미래기술 산업생태계 연구

김기완·이경애·고혜원·노우진



KDI 한국개발연구원
Korea Development Institute

미래기술 산업생태계 연구

저	자
연구총괄	**김기완**	한국개발연구원 선임연구위원
	이경애	한국개발연구원 전문위원
	고혜원	한국개발연구원 전문연구원
	노우진	한국개발연구원 연구원

목 차

요 약 ····· 1

제1장 서 론 ····· 7

제1절 연구의 배경과 목적 ····· 7

제2절 연구의 구성 ····· 12

제2장 국내 우주산업의 성장과 정책개선 방향 ····· 14

제1절 서 론 ····· 14

제2절 우주 산업의 주요 이슈 ····· 18

1. 기술개발의 특이성 ····· 18
2. 뉴스페이스로의 전환과 민간 참여의 증가 ····· 21
3. 국제 협력과 글로벌 경쟁의 심화 ····· 27

제3절 국내 우주산업의 발전 현황 ····· 32

1. 우주산업의 정의 ····· 32
2. 국내 우주산업의 성장 추이 ····· 34
3. 국제 협력과 글로벌 경쟁의 심화 ····· 50

제4절 우주경제 활성화를 위한 정책 방향 ····· 56

1. 주요 우주개발 정책 추진 경과 ····· 56
2. 우주 정책 개선과 관련한 이슈 논의 ····· 61

제5절 소 결 ····· 72

참고문헌 ····· 73

부 록 ····· 77

제3장 수소산업 생태계 ····· 82
제1절 서 론 ····· 82
제2절 수소경제 ····· 83
1. 수소경제 개념 ····· 84
2. 왜 수소인가? ····· 87
3. 수소산업 생태계 현황(산업 밸류체인) ····· 90
제3절 수소산업 현황 ····· 104
1. 수소시장 동향 ····· 104
2. 국내 수소산업 투자동향 ····· 113
3. 국내 수소사업 추진 현황 ····· 116
4. 연구개발 동향 ····· 119
5. 수소산업 동향 ····· 122
6. 국내 수소 산업 생태계 ····· 127
제4절 수소산업 발전을 위한 정책개선 방향 ····· 135
1. 해외 정책 ····· 136
2. 국내 수소경제 관련 정책적·법적 기반 ····· 150
3. 해외 수소정책과 국내 수소정책 비교 ····· 156
4. 규제 개선 현황 ····· 158
5. 수소 정책에 대한 향후 개선방향 제언 ····· 160
참고문헌 ····· 170
부 록 ····· 176

제4장 양자기술의 적용과 산업생태계 ····· 177
제1절 서 론 ····· 177
제2절 양자기술의 개념과 주요 기술 영역 ····· 181
1. 양자기술의 개념 ····· 181
2. 양자기술의 주요 활용 영역 ····· 182

제3절 양자기술 관련 일반 현황 ····· 194
1. 시장 동향 및 전망 ····· 194
2. 투자 동향 ····· 198
3. 연구 동향 ····· 205
제4절 우리나라 양자기술 산업생태계 분석 ····· 211
1. 정 부 ····· 212
2. 연구기관 ····· 216
3. 기 업 ····· 219
4. 양자핵심인력 ····· 224
제5절 양자기술 산업생태계 활성화를 위한 정책 과제 ····· 228
참고문헌 ····· 233
부 록 ····· 237

◈ 표 목 차

<표 2- 1> 글로벌 유망 우주 스타트업과 주요 사업 ····· 15
<표 2- 2> NASA의 스핀오프 사례 ····· 16
<표 2- 3> 한국형 발사체 누리호(KSLV-Ⅱ)의 재원 ····· 19
<표 2- 4> 발사장 입지 선정 조건 ····· 20
<표 2- 5> 올드스페이스와 뉴스페이스의 비교 ····· 22
<표 2- 6> 각국의 군집위성 계획 현황 ····· 24
<표 2- 7> 미국과 중국의 우주국제협력 사례 ····· 29
<표 2- 8> 우주개발 지역중심 협력 체계 사례 ····· 33
<표 2- 9> 우주경제 관련 정의 비교 ····· 34
<표 2-10> 우주 경제 구성 분야 ····· 35
<표 2-11> 「우주산업실태조사」의 우주 분야 분류 체계 ····· 36
<표 2-12> 분야별 우주산업 활동금액 ····· 37
<표 2-13> 국내 우주산업 투자 현황 ····· 43
<표 2-14> 주요 우주기술 개발 성과 ····· 45
<표 2-15> 국내 주요 우주 기업의 벨류 체인 현황 ····· 48
<표 2-16> 국내 주요 우주 스타트업의 주요사업, 투자 및 고용 현황 ····· 49
<표 2-17> 주요국의 우주・항공・해양분야 기술 수준 및 격차 비교 ····· 53
<표 2-18> 우주항공해양 분야 기술 수준 및 기술격차 ····· 54
<표 2-19> 기업체의 수입과 수출, 내수 규모 ····· 55
<표 2-20> 한국의 주요 우주개발 관련 정책 ····· 57
<표 2-21> 제4차 우주개발기본계획 주요 내용 ····· 58
<표 2-22> 「우주항공청 특별법 제정안」의 주요 특징 ····· 59
<표 2-23> 주요국의 우주 전담 기구 현황 ····· 60

<표 2-24> 주요 기업의 통신용 소형위성군 배치 계획 ····· 63
<표 2-25> 해외 우주 기술·제품 주요 인증 기구 ····· 65
<표 2-26> STEM 전략의 목표와 추진 전략 ····· 71
<부표 2-1> 기업의 분야별 매출액 ····· 77
<부표 2-2> 연구기관의 분야별 예산액 ····· 77
<부표 2-3> 대학의 분야별 연구비 ····· 78
<부표 2-4> 기업체와 연구기관 고용의 학력, 전공별 비중 ····· 78
<부표 2-5> 기관별 투자 현황 ····· 79
<부표 2-6> 기관별 지재권 현황(특허 등록) ····· 80
<부표 2-7> 기관별 지재권 현황(특허 출원) ····· 80
<부표 2-8> 기업체 매출액, 수출입, 분야별 내수 현황 ····· 81

<표 3- 1> 탄소경제와 수소경제 비교 ····· 86
<표 3- 2> 수소의 필요성 ····· 88
<표 3- 3> 수소 유형별 특징 ····· 91
<표 3- 4> 수소 생산 분류 방법 ····· 94
<표 3- 5> 수소의 생산 방식 ····· 95
<표 3- 6> 수소의 물리적 상태와 화학적 물질 변환에 따른 저장 방식 ····· 96
<표 3- 7> 수소 연료전지 종류 ····· 103
<표 3- 8> 수소 모빌리티 보급 현황 비교 ····· 112
<표 3- 9> 국내 수소차 수출 현황 ····· 112
<표 3-10> 전 부처 수소 관련 R&D 예산 ····· 115
<표 3-11> 수소생산기지 구축 사업 진행 세부 현황 ····· 116
<표 3-12> 국내 수소 생산기지 및 출하센터 구축 현황 ····· 117
<표 3-13> 청정수소 밸류체인 프로젝트(H2STAR) ····· 118
<표 3-14> 수소의 물리적 특징에 따른 가치사슬별 특징 ····· 124

<표 3-15> 가치사슬 별 국내 수소산업 현황(2021년 기준) ····· 128
<표 3-16> 국내 수소산업 현황(2021년 기준) ····· 131
<표 3-17> 주요 그룹별 수소사업 관련 투자 계획(2030년까지) ····· 135
<표 3-18> 탄소집약도 구간별 청정수소 PTC/ ICT 금액 ····· 139
<표 3-19> 일본의 '2050년 탄소중립을 향한 향후 수소 도입 확대 방안' ····· 149
<표 3-20> 국내 수소경제 정책 타임라인 ····· 154
<표 3-21> 국가별 수소 정책 비교 ····· 157
<표 3-22> 국내 수소분야 규제개선 추진결과 ····· 160
<부표 3-1> 수소 기술개발 로드맵(핵심기술 개발계획) ····· 176

<표 4- 1> 전 세계 양자기술 시장 전망 ····· 179
<표 4- 2> 2020년 기술수준평가(ICT・SW 분야) ····· 180
<표 4- 3> 양자컴퓨터의 분류와 주요 내용 ····· 185
<표 4- 4> IBM의 양자컴퓨터 개발 로드맵 ····· 186
<표 4- 5> 양자컴퓨터의 활용 분야 ····· 187
<표 4- 6> 양자센서의 분류와 주요 내용 ····· 189
<표 4- 7> 양자센서의 활용 분야 ····· 190
<표 4- 8> 양자암호통신의 기술분류와 개념 ····· 193
<표 4- 9> 양자암호통신의 활용 분야 ····· 194
<표 4-10> 전 세계 양자기술 시장 전망 ····· 196
<표 4-11> 분야별 양자기술 기반 글로벌 매출 구성비 ····· 196
<표 4-12> 국내 양자기술 시장 전망 ····· 197
<표 4-13> 2018년 EU Quantum Flagship의 주요 과제와 투자 규모 ····· 200
<표 4-14> 국가중대과학연구프로그램(양자제어) 투자 예산 ····· 201
<표 4-15> 국내 양자기술 관련 사업 현황 ····· 203
<표 4-16> 양자기술 스타트업 기업의 투자 유치 금액(상위 10개 투자건수) ····· 204

<표 4-17> 2014~20년 양자기술 관련 특허 출원 수 ····· 206
<표 4-18> 주요국의 양자기술 특허 및 평균 패밀리 특허 수(2014~20년) ····· 207
<표 4-19> 양자기술 출원인별 출원 특허 수 ····· 209
<표 4-20> 주요국의 양자기술 분야 논문 수, 피인용 지수(2016~20년) ····· 210
<표 4-21> 우리나라 양자기술 관련 정책 동향(2021~23년) ····· 215
<표 4-22> 주요 기술 분야별 연구기관 현황(양자컴퓨터) ····· 216
<표 4-23> 주요 기술 분야별 연구기관 현황(양자센서) ····· 218
<표 4-24> 주요 기술 분야별 연구기관 현황(양자통신) ····· 219
<표 4-25> 양자암호통신 분야의 주요 기업 현황 ····· 222
<표 4-26> 2022년 국내 양자기술 인력 현황 ····· 227
<부표 4-1> ICT R&D 기술로드맵 2025 ····· 237

◈ 그 림 목 차

[그림 1- 1] 미래기술에 대한 혁신도, 관심도, 투자규모 및 채택 수준(2021) ····· 9

[그림 2- 1] 발사 및 페이로드 현황 ····· 23
[그림 2- 2] 위성 종류별 운영 비중 ····· 25
[그림 2- 3] 우주분야 스타트업 투자 유형 ····· 26
[그림 2- 4] 우주 스타트업의 벤처 투자 비중: 투자단계별(左), 기업별(右) ····· 26
[그림 2- 5] 우주 참여기관 수(상)와 활동 금액(하) ····· 37
[그림 2- 6] 기업체 분야별 매출액: 우주기기제작(上), 우주활용(下) ····· 39
[그림 2- 7] 참여 기관 유형별 고용 현황 ····· 41
[그림 2- 8] 전공별 인력 비중:기업체(上), 연구기관(下) ····· 41
[그림 2- 9] 기관별 연구개발투자 비중 ····· 43
[그림 2-10] 연구개발비와 시설투자비 비중: 기업체(左), 연구기관(中), 대학(右) ····· 43
[그림 2-11] 신규 특허 출원 및 등록 현황 ····· 46
[그림 2-12] 기관 유형별 특허 출원 및 등록 현황: 국내 특허(上), 국외 특허(下) ····· 47
[그림 2-13] 국가별 우주예산 비교 ····· 51
[그림 2-14] GDP 대비 우주예산 비중 ····· 52
[그림 2-15] 분야별 우주예산 비교: 전 세계(左), 한국(右) ····· 52
[그림 2-16] 기업체 수입, 수출, 내수 비중 ····· 55
[그림 2-17] 기업체 내수 비중: 기기제작(左), 활용(右) ····· 56
[그림 2-18] 한국의 우주개발 추진체계(2021년 기준) ····· 60
[그림 2-19] 누리호 발사 당시 해상 및 육상 통제 구역 ····· 67
[그림 2-20] 발사 허가 절차 ····· 68

[그림 3- 1] 수소 생산기술 분류 ····· 91
[그림 3- 2] 수소산업 밸류체인 ····· 92
[그림 3- 3] 수소 저장 방식별 운송 수단 ····· 99
[그림 3- 4] 운송 거리・규모・주기에 따른 수소 운송 방식 ····· 99
[그림 3- 5] 수소 충전소 유형 ····· 100
[그림 3- 6] 국내 수소 생산량 추이 ····· 105
[그림 3- 7] 글로벌 수소 생산량 추이 ····· 106
[그림 3- 8] 2050년 글로벌 수소 수요 전망 ····· 106
[그림 3- 9] 2050년 국내 수소 수요 ····· 107
[그림 3-10] 2050년 주요 국가별 수소 수요 ····· 108
[그림 3-11] 수소 충전소 현황 ····· 110
[그림 3-12] 부처별 수소 관련 사업 예산 ····· 114
[그림 3-13] 부처별 수소 R&D 영역 구분 ····· 115
[그림 3-14] 수전해 설비의 종류 ····· 119
[그림 3-15] 전 세계 수전해 설비 설치 규모 전망 ····· 123
[그림 3-16] 수소산업 사업체 수(2020년과 2021년 비교) ····· 129
[그림 3-17] 기업규모에 따른 사업체 비중(2020년과 2021년 비교) ····· 129
[그림 3-18] 영국 수소 투자 로드맵 ····· 144
[그림 3-19] 우리나라 주요 수소경제 정책 흐름 ····· 152

[그림 4- 1] 양자기술 개발 및 활용 분야 ····· 178
[그림 4- 2] 양자기술의 기본 개념 ····· 183
[그림 4- 3] 세계 주요국의 양자산업 투자 규모 ····· 199
[그림 4- 4] 미국의 양자기술 세부 분야별 투자 규모 ····· 199
[그림 4- 5] 양자기술 스타트업 기업의 투자 유치 금액(상위 10개 투자건수) ····· 205
[그림 4- 6] 주요국의 양자기술 정책 현황 ····· 212

[그림 4- 7] 양자기술 관련 직업 유형별 양자/비양자 기술 비중 ····· 225
[그림 4- 8] 양자기술 세부 분야별 필요 학위 분포 ····· 225
[부도 4- 1] 양자컴퓨터 가치사슬 ····· 242
[부도 4- 2] 양자센서 가치사슬 ····· 243
[부도 4- 3] 양자통신 가치사슬 ····· 244

요 약

1. 국내 우주산업의 성장과 정책개선방향

우주기술개발은 새로운 전성기를 맞이하고 있다. 지금까지 우주 분야는 정부의 거대자본 투입을 기반으로 군대와 연구기관을 중심으로 하는 기초과학 연구가 주를 이루었으나, 최근 민간기업이 활발히 시장에 참여하는 '뉴스페이스(new space)'로 패러다임이 전환되고 있다. 앞으로 우주개발은 기초과학연구의 영역을 넘어 시장개척이라는 상업적 목표를 가진 다양한 규모의 기업들의 활발한 참여가 예상된다.

한국은 그동안 정부 중심의 연구개발 투자를 통해 발사체와 위성제조 분야에서 괄목할 만한 기술개발 성과를 보여주었다. 최초의 국적 위성인 <우리별 1호>가 발사('92. 8)된 이래 독자적인 발사체 기술을 확보한 <누리호>의 3차 발사가 성공('23. 5)하였으며 <다누리호> 개발을 통해('22. 8) 우주탐사까지 영역을 확장하고 있다. 또한 최근 정부 및 대기업뿐 아니라 소형 발사체와 위성 제작을 중심으로 일부 스타트업이 기업공개와 M&A에 성공하기도 하였다.

그러나 이러한 지속적 성장에도 불구하고, 국내 우주산업은 국제적인 수준과 비교할 때 시장 규모가 영세하고 기술수준도 후발국에 머무르고 있다. 혁신적인 스타트업들이 활동을 시작하였지만, 아직까지 국내기업들은 상업용 우주 시장의 초입에서 활동하고 있는 것으로 판단된다. 따라

서 정부의 제도적 뒷받침을 통해 기술검증과 시험을 통과하고 수출실적을 달성하도록 하는 적극적인 지원이 필요하다. 중장기적인 시야에서 한국 우주산업의 원활한 기술개발과 산업생태계 활성화를 위해서는 제한된 예산을 효율적으로 집행함과 동시에 민간기업의 활발한 혁신을 유도할 수 있는 우주 정책이 추진되어야 한다.

궁극적으로 동 분야의 산업생태계 조성을 위해서는 이 시장에서 규모의 경제를 구현할 수 있는 대기업의 안정적인 성장과 중소기업 및 스타트업의 역량 강화 등 기업 규모와 기술 발전 단계에 따른 정책 설계가 필요하다. 또한 우주개발은 '미지'의 영역으로 선진국에서도 수많은 시행착오를 경험하고 있음을 고려할 때 시행착오를 두려워하지 않고 적극적인 도전을 장려하는 혁신 정책이 마련되어야 할 것이다. 이를 위해서는 국가 우주 정책의 지향점에 대한 심도 있는 고찰과 신기술의 적용과 시험을 반복할 수 있는 효율적인 규제 개선, 활발한 혁신을 유도하는 인프라 및 제도의 정비, 그리고 이 모든 과정에서 융합 인재를 활용할 수 있는 교육정책이 뒷받침되어야 한다.

2. 수소산업 생태계

부존자원이 풍족하지 못하여 예로부터 국민경제의 필수적인 에너지의 대부분을 수입에 의존하고 있는 우리나라는 에너지산업이 발달하기 어려운 환경을 가지고 있다. 최근 갈수록 온실가스로 인한 기후변화와 환경오염 대응 정책이 강해지는 전 세계적 추세에 맞추어 우리나라도 신재생에너지 보급 확대가 국내 산업의 생존과 경제성장으로 이어져야 한다는 문제의식을 갖기 시작했다. 수소는 탄소중립 사회를 준비하고 에너지 패러다임 전환하는 과정에서 간헐성이나 지역적 편차 등 재생에너지의 한계를 보완해 주고 수송 부문에서부터 에너지 부문 전반에 걸쳐 다양한 미래 산업 창출이 가능하다는 점에서 주목받고 있다. 에너지 수입국인 우리나라가 수소 이용 확대로 에너지원을 다각화하고 석유나 천연가스 등이 집중되어 있는 특정 국가로부터 에너지 의존도를 낮출 수 있게 된

다면 특정 국가들의 국지적 분쟁으로 인한 시장이 받는 충격을 줄여 지정학적 리스크를 낮출 수 있게 될 것으로 기대된다.

제조업 기반을 둔 국내 산업을 고려했을 때, 수소 관련 산업은 생산, 저장・운송, 충전, 활용 등 가치사슬 전반에 걸쳐 다양한 산업과 연계되어 있어 전・후방산업 효과가 클 것으로 기대된다. 수소차 및 연료전지의 협력업체 대다수는 중소・중견기업일 것이며 수소 활용 산업의 확대에 따라 협력업체들의 성장과 고용 창출로 이어질 것이다. 수소 생산과 운송・저장 설비 및 충전소 등 인프라 구축은 금속과 기계 설비 등 관련 산업의 확대를 기대할 수 있다.

아직 전 세계적으로 수소 산업은 초반기이며 국내 수소산업이 경쟁력을 가지기 위해서 그를 뒷받침해 줄 산업정책이 필요하다. 수소산업은 초창기인 만큼 여전히 불확실성이 크고 인프라가 충분하지 않아서 민간 주도로 생태계를 촉진하기에는 아직 시장의 자생력이 부족하고 충분히 성숙되지 못한 상태이다. 그러므로 기존 에너지원의 시장 정착과 같이 정부의 주도적인 정책 지원을 시작으로 장기적으로는 시장 주도형 수소경제가 조성될 수 있도록 초기 산업 육성 정책이 중요하다.

세계 각국 수소 선도국은 자신들의 권역별 시장 특징에 맞는 전 주기적 지원 정책을 도입하여 시행하고 있다. EU의 경우 EU집행위를 중심으로 각국 지원체계에 맞게 경매 기반의 제도를 설계하고 있고 미국은 시장을 전반적으로 지원하고 있다. 국내의 경우 시장별 맞춤형으로 지원되고 있는 것으로 보인다. 규제와 관련하여 일부 선진국에서처럼 최소 규제 형태의 네거티브 방식으로 전환된 것과 같이 산업 육성을 기반으로 한 규제 패러다임의 전환이 필요할 수 있다. 다만, 수소경제의 성공적 이행을 위해 규제개혁은 안전성 검증 및 실증을 통해 경제성과 안전성이 균형 있게 양립할 수 있는 방향으로 추진되어야 할 것이다. 특히 청정수소의 국내 생산과 관련하여 현실 가능한 단・장기적인 목표를 설정하고 구체적인 방안이 마련되어 있는 로드맵이 필요하다. 아직 초기 단계인 인프라의 구축, 수소 관련 핵심 소재 국산화, 기술개발을 통한 원천 기술 획득을 시작으로 실증・대형화・상용화의 연계, 수소 활용 분야의 영역

확대, 정부의 지원에 힘입어 민간 기업과 협업이 가능한 인센티브 정책의 마련 등 수소산업이 전 주기적으로 연결되어 있는 만큼 그 파급효과를 고려한 일관적인 추진체계 및 제도 설계가 중요할 것이다.

3. 양자기술의 적용과 산업생태계

양자기술은 우주, 군사 등 전략산업은 물론 제조업, 금융, 의료 등 다양한 산업에 지대한 영향을 미칠 수 있는 미래의 게임 체인저로 평가되고 있다. 양자기술의 파괴력은 미세공정을 통한 반도체의 획기적인 성능 향상, 고차원의 DNA 구조 분석을 이용한 난치병 치료, 해킹 불가능한 국가안보 시스템 구축 등 다양한 산업이 직면한 기술적인 한계를 해결할 가능성을 내포하고 있다는 점에 있다. 미국은 양자컴퓨팅 관련 대중(對中) 투자를 제한하면서 중국을 견제하고 있고, 중국은 세계 최대 규모의 양자기술연구소 건립을 추진하는 등 기술 선점을 위한 노력을 아끼지 않고 있다. 이처럼 미국과 중국을 위시한 강대국들의 기술 패권 경쟁의 과열은 양자기술의 중요성을 더욱 부각하고 있다.

세계 양자기술 시장은 아직 초기 단계이므로 시장 선점을 위한 전략 수립과 공격적인 투자가 필요한 시점인 것은 분명한 사실이다. 우리나라 역시 양자기술을 미래 12대 전략기술로 지정하는 등 양자산업 활성화를 위한 장단기 전략을 수립하고 있다. 하지만 현재 우리나라의 양자기술 수준은 세부 분야별 차이는 있으나 선도국가 대비 5년에서 많게는 10년까지 기술격차가 벌어져 있다. 특히 양자대학원, 양자팹 등 인프라의 부족과 대기업, 벤처기업 등 민간 부문의 저조한 참여, 우수인력의 국내외 유출 등 양자기술 발전을 위해 해결해야 할 선결문제가 다수 남아 있는 상황이다.

본 장의 주요 목적은 양자기술 산업생태계 활성화를 위한 정책적 과제를 제시하는 데 있다. 구체적으로 정부, 연구기관, 기업, 양자핵심인력으로 대표되는 양자기술 산업생태계 요인의 활성화를 위한 정책에 대한 개선점을 제시한다. 더욱 면밀한 개선안을 도출하기 위해 연구기관과 스타

트업 등의 양자기술 전문가와의 면담을 진행하였고, 다양한 시각에서 정책 수요 의견 및 발전을 저해하는 요인에 대한 의견을 취합하였다. 본 장에서 살펴본 현황과 면담 등으로부터 도출된 시사점은 다음과 같다.

먼저 양자기술 개발을 위한 예산을 재분배할 필요가 있다. 양자기술의 중요성을 인식하여 예산은 큰 폭으로 증액되고 있으나, 양자기술 연구를 위한 시설 구축에만 수백억 이상이 소요되는 상황에서 예산이 효과적으로 사용될지는 미지수이다. 또한 양자기술 R&D 항목의 예산은 증가하였으나 양자기술 연구개발을 선도하고 있는 연구기관들의 예산이 큰 폭으로 감소하였다. 연구기관의 사업비 감축이 국내 양자기술 발전에 타격을 주지 않을 것이라고 단언할 수 없다. 하지만 예산을 무한정 늘릴 수 없는 것이 현실이며, 이미 우리나라의 GDP 대비 연구개발 예산 비중은 주요 선진국에 비해 높은 상황이다. 따라서 주어진 예산에서 비용효율적으로 예산을 분배, 활용하는 것이 현실적인 대안이 될 것이다.

인력양성 측면에서는 양자핵심인력 육성을 위한 다방면의 전략을 설정해야 한다. 먼저 양자기술의 근간이 되는 기초과학에 관한 연구가 꾸준히 지속될 수 있게 지원해야 한다. 미국, 영국 등 주요 선진국은 기초과학 분야의 예산 분배 결정에 있어 개입을 최소화하고 이를 과학계 전문가 집단의 자율성에 맡긴다. 하지만 과거 우리나라는 선진국 추격을 위해 '선택과 집중'의 효율성을 중시하며 국가 주도로 기초과학을 계획하였다. 그 결과 지난 30년간 효율성 측면에서 가장 소외된 분야였던 양자역학이 현재는 미래를 주도할 가장 촉망받는 영역이 되었다. 이렇듯 미래의 기술패권 경쟁에서 우위를 점할 수 있는 기술 분야는 불확실성을 내포하고 있으므로 기초과학연구의 다양성을 존중하고, 일관된 지원을 꾸준히 지속해야 한다.

마지막으로 양자기술에 대한 지나친 환상을 경계하고, 현실적인 노력을 투입해야 한다. 양자기술의 혁신적인 파괴력은 모두가 인식하고 있으나, 막대한 규모의 예산을 투입하여 시장을 점유할 수 있는 것은 소수의 강대국이 될 여지가 있다. 바꿔 말하자면 국가의 미래를 위한 전략기술로써 양자기술의 잠재력은 방대하지만, 모든 문제를 해결할 수 있는 유

일한 기술이라는 과도한 기대는 지양해야 할 것이다. 따라서 주어진 조건에서 양자기술 산업생태계를 활성화하기 위한 현실적인 노력을 투입해야 한다.

제1장

서 론

김 기 완 (한국개발연구원)

제1절 연구의 배경과 목적

2022년 말 세상에 공개된 생성형 인공지능(generative AI)에 기초한 ChatGPT 서비스는 그간 AI의 영향을 먼 미래의 일로만 생각하던 많은 사람들의 인식을 일거에 바꾸어 놓았다. ChatGPT는 일상 대화 방식으로 AI가 인간 활동의 많은 부분에 조언이나 실용적인 도움을 줄 수 있다는 사실을 보여주었고, 디지털 기술의 발전에 의한 사회 변화가 일부 첨단 기술에 국한되는 먼 미래의 일이 아니라는 점을 여실히 보여주었다.

소위 '4차 산업혁명'이나 '디지털 전환' 등의 용어로 대변되는 디지털 기술의 급속한 발전과 인접 기술·산업과의 융·복합화, 그리고 이의 현실 세계 적용을 통한 경제사회 전반의 급속한 변화는 이미 21세기 세계를 규정하는 핵심 이슈의 하나로 자리 잡고 있다. 특히 AI와 인접 기술분야와의 결합, 합성생물학(synthetic biology)의 획기적인 발전은 인류에게 주어진 물리학적, 생물학적 한계를 넘어설 수 있는 기회를 제공함과 동시에 미래 기술 발전이 가져올 파급효과에 대한 우려도 제기하고 있다. 이에 세계 주요국들은 코로나 팬데믹 이후 강화된 세계경제 분절화(fragmentation) 및 자국중심주의 경향과 맞물려 미래 기술을 선점하고 이를 산업적으로 응용하기 위해 보다 직접적인 산업정책을 실천하고 있으며 이 글로벌 경쟁에 우리나라 역시 예외가 아니다.

이러한 배경에서 본 연구는 미래 경제사회를 규정하게 될 핵심 분야를 선정하여, 이들의 산업생태계를 분석 또는 전망하고 이들이 발전 과정에서 어떠한 도전과제에 직면하고 있으며 정책적으로 어떻게 뒷받침할 수 있는지를 연구하고자 한다. 본 연구는 개별 기술/산업 사례에 대한 심층 분석을 통해 연구대상에 접근한다는 점에서 사례연구 특성을 지닌다. 다른 한편, 본 연구는 그간 KDI의 통상적인 보고서와 달리, 내부 전문위원 또는 (전문)연구원이 주도적으로 사례를 연구하고 보고서 챕터도 주도적으로 작성하는 방식으로 진행함으로써 참여 연구진의 연구역량 제고에도 기여하고자 하였다.

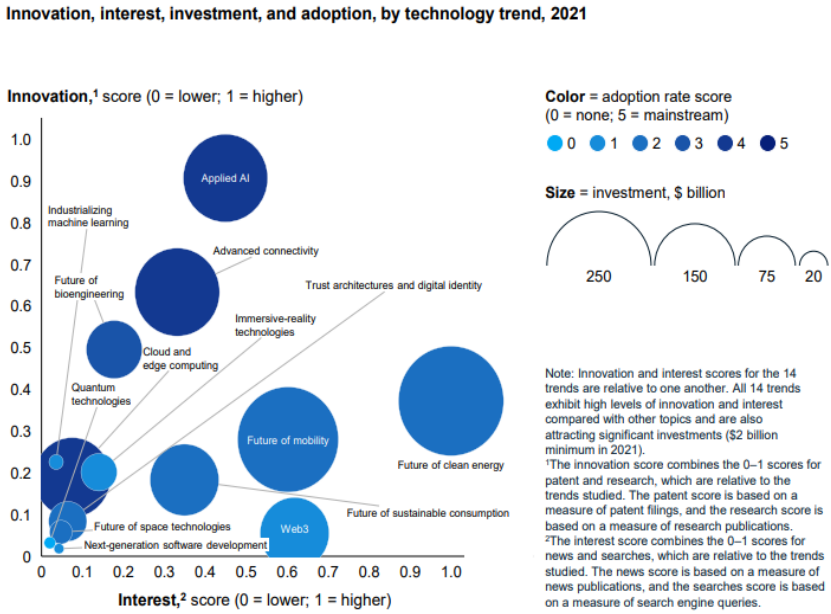
본 연구에서 연구 대상으로 선정한 분야는 양자기술·산업, 수소경제(hydrogen economy),[1] 미래 우주산업의 세 가지이다. 본 보고서에서는 첫째, 현재에 비해 미래 우리 산업 지형에서 차지하게 될 잠재력과 둘째, 이들 분야에 대한 국내의 정책적 관심을 고려하여 이들 분야를 선정하였다.

McKinsey 보고서(2022)에서는 여러 지표를 통해 미래 기술의 상대적 중요성과 현재 위상, 앞으로의 전망 등을 제시한 바 있다. 이를 요약한 그래프(그림 1-1 참조)를 보면, 양자기술 및 미래 우주산업은 현재 기술혁신이나 사회적 관심, 투자규모 면에서는 작은 비중을 차지하지만 현재의 기술적, 산업적 쟁점을 해결할 경우 미래에 빠른 성장을 보여줄 것으로 기대하고 있다. 반면, 수소경제를 별도로 분류하고 있지 않다는 점에서 정확한 비교에는 한계가 있지만, 수소기술이 포함된 '미래 청정에너지(future of clean technology)' 분야의 경우 이미 매우 높은 사회적 관심과 투자가 이루어지고 있다는 점을 확인할 수 있다.

---

1 '수소경제'는 다른 방식으로는 탈탄소화가 어렵거나 비용/에너지 효율적인 해결책을 찾기 어려운 분야에서 수소를 활용하는 다양한 방식을 통칭하는 용어이다. 이러한 맥락에서 수소경제 개념은 수소의 생산으로부터 최종소비자 사용까지, 화석연료 소비를 억제하고 온실가스 감축에 기여하는 전 과정을 포괄하는 것으로 볼 수 있다(https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_economy 참조). 보고서 3장에서는 이에 대한 보다 상세한 개념과 범위를 제시하겠지만, 여기서는 편의상 수소경제라는 용어를 사용한다.

[그림 1-1] 미래기술에 대한 혁신도, 관심도, 투자규모 및 채택 수준(2021)



자료: McKinsey, “McKinsey Technology Trends Outlook 2002,” 2022, p.3.

양자기술은 원자 단위의 극미소 세계에서 나타나는 양자역학적 현상의 특성들을 컴퓨팅이나 통신, 센싱 등의 분야에 활용하는 기술을 의미한다. 양자기술의 경우 앞서 인용한 맥킨지 보고서에서는 2021년 현재 양자기술이 가지는 시장 잠재력을 대략 300조~500조원 규모로 보고 있으며, 이 기술이 아직 초기 발전 단계라는 점을 조심스럽게 거론하고 있지만 세 가지 측면에서 주목할 필요가 있다고 보고 있다. 첫째, 양자기술에 대한 투자가 빠르게 증가하고 있는데, 예를 들어 2022년 양자기술 스타트업에 대한 투자가 17억달러가량으로 2021년에 비해 두 배 이상 급증하였다. 둘째, 미래 핵심활용분야로 지목되는 분야의 기술성숙과 시장화가 앞으로 10년 이내에 달성될 것으로 예상되고 있다. 셋째, 양자기술 시장이 빠르게 증가할 것이라는 점을 들고 있는데, 예를 들어 양자컴퓨팅 서비스의 경우 2027년까지 시장 규모가 매년 50%씩 급증할 것으로 예상되고 있다. 이러한 배경에서 우리 정부 역시 2023년 6월 양자과학기술 수준

최선도국 대비 85% 달성, 양자핵심인력 2,500명 양성, 양자시장 점유율 10%로 확대, 양자과학기술 공급·활용기업 1,200개 육성 등을 목표로 하는 「대한민국 양자과학기술 전략」을 발표한 바 있다.[2]

수소를 이용한 전력생산과 활용 기술은 다른 신재생에너지원과 더불어 미래 청정기술의 하나로 소개되고 있다. 앞서 언급한 McKinsey(2022) 보고서에서는 수소의 미래 잠재력으로 다음 세 측면을 거론하고 있다: 첫째 생산비용의 급격한 감소와 더불어 인프라의 발전이 일어날 경우 많은 응용분야에 걸친 수소 생산의 스케일업이 가능하며, 둘째 수전해(electrolysis) 비용의 감소와 효율화가 이루어진다면 생산되는 수소의 질을 제고할 수 있고, 셋째 급전에 활용 가능한 전해조(electrolyzer) 개발은 신재생에너지의 원활한 활용과 성장을 가능하게 할 것으로 예상된다는 점이다. 다만, 이를 위해서는 수소 생산의 스케일업이 가능하도록 그린수소 생산 비용의 상당한 감소가 필요하고, 전해조의 생산 효율성 제고가 필요하며, 일부 섹터에 한정되어 있는 수소 활용을 확대함과 동시에, 인프라 확충도 가속화할 필요가 있다는 점을 지적하고 있다. 우리 정부는 수소경제를 미래 전략산업으로 육성할 계획을 지속적으로 발표하고 있다. 이미 2003년 8월 당시 정부는 대통령 주재 '차세대 성장동력 보고회'에서 수소연료전지를 10대 차세대 성장동력산업의 하나로 선정하고 2004년 수소연료전지를 태양광 및 풍력과 더불어 미래 신재생에너지의 핵심으로 발표한 바 있다.[3] 최근인 2019년 1월에는 세계 최고 수준의 수소경제 선도국가 도약을 목표로 하는 「수소경제 활성화 로드맵」을 발표[4]하였고, 2020년 2월에는 세계 최초로 「수소법」(수소경제 육성 및 수소 안전관

---

2 과학기술정보통신부, 「2035년 대한민국, 글로벌 양자 경제 중심국가로!」, 2023. 6. 27.

3 『중앙SUNDAY』, 「세계 최고 수소경제 육성' 로드맵, 용두사미 전철 우려」, 2023. 3. 17. (https://www.joongang.co.kr/article/25135204#home).

4 구체적으로는 수소차 누적 생산량을 2018년 2,000대에서 2040년 620만대(내수 290만대, 수출 330만대)로 확대하여 수소차·연료전지 세계 시장 점유율 1위 달성을 목표로 제시하였으며, 수소차 충전소도 2018년 14개에서 2022년 310개, 2040년 1,200개소로 확대 설치할 계획을 발표하였다. 연간 수소공급량은 2018년 그레이수소 13만톤에서 2022년에는 그린수소 47만톤, 2040년에는 해외 생산 포함 그린수소 526만톤 공급을 목표로 제시하였다(앞서 언급한 『중앙SUNDAY』 기사에서 인용).

리에 관한 법률)을 제정하였으며, 2020년 7월에는 수소경제위원회를 출범하여 현재까지 5회에 걸쳐 '수소경제 이행 기본계획'을 점검하는 등의 정책적 노력을 기울이고 있다.

新우주산업의 경우 막대한 투자가 필요한 거대과학으로써 공공부문에 의해 주도되었던 기존의 우주산업과 달리, 최근 20년간 지구 저궤도로의 발사체 발사 비용과 통신위성 사용 비용이 급속히 감소하면서 그 중요성이 최근 들어 부각되고 있다. 특히 민간 부문을 중심으로 지난 5~10년간 비용 감소 추세가 가속화되고 있는데, 이는 주로 발사체 및 위성의 크기, 무게, 파워, 비용의 감소에 기인한 바 크며 그 결과 위성 서비스 비용도 크게 감소하고 있다. 앞서 언급한 McKinsey(2022) 보고서는 다음과 같은 측면에서 미래 우주산업에 주목할 필요가 있다고 보고 있다. ① 현재 4,500억달러 규모로 추산되는 우주시장 규모가 2030년까지 매년 10% 이상 성장하여 향후 1조달러를 넘어설 것으로 전망되며 ② 신규 기업, 특히 스타트업의 우주산업 진입이 가속화될 것으로 예상(스타트업은 현재 600개가량에서 2030년까지 1,000개 이상이 될 것으로 전망)되고, ③ 비용 감소 추세의 가속화는 우주 광물채굴(space mining)이나 우주비행 상용화 등 응용분야 확장에 기여하고, ④ 수요증가 대응을 위한 수직적 결합(vertical integration), 서비스 분야 응용 등 새로운 비즈니스 모델이 출현하고 있으며, ⑤ 보다 높은 수준의 디지털 기술을 활용하기 위해 SW에 대해 보다 강조하게 될 것이라는 점이다. 우리 정부에서도 우주산업을 미래 전략산업의 하나로 설정하고 상당한 정책 우선순위를 부여하고 있다. 최근의 예로는 2021년 11월 국가우주위원회를 국무총리 주관으로 격상하고 10년 뒤 우주 비즈니스 시대를 여는 것을 목표로 하는 「우주산업 육성 추진전략」을 발표[5]한 바 있으며, 현 정부 들어서는 국정과제에 포함된 '선도형 우주항공 거버넌스 추진', '민간주도 우주산업 생태계 조성', '독자 우주기술 및 우주안보 역량 확보' 실천 과제하에 우주경제 비전 선포, 우주항공청 설립 추진, 우주산업 클러스터 조성계획 수립, 독자개발 발사체 발사 및 달 궤도선 발사 등을 시행해 오고 있다.

---

5 『ZDNet Korea』, 「10년 뒤 우주 비즈니스 시대… 산업 육성 전략 세웠다」, 2021. 11. 15. (https://zdnet.co.kr/view/?no=20211115161435)

이처럼 본 연구에서 다루고자 하는 세 분야는 미래 한국경제·산업에 대해 높은 잠재력을 지니며 정책적 관심도 매우 높다는 점에서 각 분야의 미래 산업생태계를 분석 또는 전망해 보는 연구는 향후 이들 분야의 발전을 견인하는 데 있어 중요한 시사점을 제공해 줄 것으로 기대된다.

제2절 연구의 구성

본 연구는 양자기술, 수소경제, 新우주산업 각각에 대해 챕터별로 독자적인 분석 프레임워크하에서 연구를 수행하였다. 이는 기술적 성숙도나 산업생태계 정착 수준에서 각 분야가 상이하기 때문에 일률적인 분석 프레임워크를 적용하기 어려웠기 때문이다.[6] 따라서 각 분야의 특성을 고려하여 우선적으로 기술적 정의나 산업의 범위에 대한 검토를 진행한 후, 국내외 관련 기술 및 산업 동향을 리뷰하고, 관련 국내외 정책 동향을 분석하며, 가능한 범위 내에서 각 분야별로 현재와 미래의 산업생태계를 조망해 보고 이를 통해 향후 이들 분야의 발전을 견인하기 위한 정책적 시사점을 도출하는 방식으로 연구를 진행하였다.

연구 과정에서는 주로 관련 통계 및 2차 문헌 분석을 많이 활용하였으나, 동시에 관련 기술 및 산업 종사자들을 대상으로 한 인터뷰와 자문 등을 적극적으로 활용함으로써 각 분야의 현황과 미래 전망, 정책 수요에 대한 현장의 목소리를 최대한 반영하고자 노력하였다.[7] 이 과정에서 본 연구를 통해 축적된 정보, 지식 및 네트워크는 향후 본 보고서의 분석 대상 분야뿐만 아니라 인접 기술·산업 분야를 분석하는 데도 중요한 길라잡이가 될 것으로 기대된다.

---

6 예를 들어 아직 원천기술 개발 단계인 양자기술의 '산업생태계'를 우주산업과 동일선상에서 비교하기는 어려우며, 수소산업의 경우에도 우리나라의 선도적 정책 노력에도 불구하고 아직 기술적, 상업적 불확실성이 존재하는 것이 현실이다.

7 이 과정에서 확보된 내용들은 보고서 본문에 포함시켰으며, 그렇지 못한 경우에는 부록으로 별도 수록하였다.

마지막으로 본 연구는 KDI 연구부서 내의 개별 산업에 대한 전문역량 제고라는 목적도 함께 가지고 있다는 점에서, 본 연구 과정에서 축적된 세부 지식을 추후 적절한 방식으로 심화시킬 수 있는 기회가 주어짐으로써 원내 산업연구 결과물이 축적·활용·확산되는 '제도적 학습(institutional learning)' 과정이 정착될 수 있게 되기를 희망한다.

제2장

국내 우주산업의 성장과 정책개선 방향

이 경 애 (한국개발연구원)

제1절 서 론

경제성장의 동력으로 첨단기술개발에 관한 관심이 급증하면서 글로벌 기술패권 확보를 위한 각국의 경쟁이 치열해지는 가운데, 최근 우주기술의 개발과 우주산업 활성화에 대한 관심이 매우 높아지고 있다. 과학탐사를 위해 발사체를 개발하고 위성을 발사하는 것에서 나아가 우주 데이터를 활용한 다양한 서비스와 심지어 우주관광상품[1]까지 최근 10년간 우주 분야는 큰 관심과 투자의 대상이 되었다.

글로벌 시장에서 우주산업에 투자된 자금은 약 200억달러('22. 12), 한화로 약 26조 1,070억원으로 추정된다.[2] 특히 코로나19 팬데믹과 우크라이나-러시아 전쟁 등 세계 경제의 불황에도 불구하고 벤처캐피털을 통해 우주분야에 투자된 자금은 82억달러(한화 10조 9,289억원)에 달한다. 미국의 스페이스 X와 시에라 스페이스, 영국의 원웹 등 유망한 우주 스타트업에 대한 관심도 크게 증가하였다. 또한 디지털 전환은 제조 영역을

1 『조선일보』(2021)에 따르면, 영국 버진그룹회장 리처드 브랜슨, 아마존 창업자 제프 베이조스, <스페이스 X>의 최고경영자 일론 머스크 등은 직접 우주선에 탑승하여 지구궤도를 선회하는 시도에 성공했으며, 특히 일론 머스크는 화성관광 상품의 가격을 편도 5억 6천만원으로 제시하기도 한다.

2 *Bryce Tech*(2023)의 수치를 사용했으며 달러-원 환율 1,332원을 적용하였다.

<표 2-1> 글로벌 유망 우주 스타트업과 주요 사업

기업명	주요 사업
美 스페이스 X	발사체, 우주선, 소형 인공위성 개발
美 시에라 스페이스	재사용 소형 우주왕복선 <드림체이서> 개발 상업용 우주정거장 <오비탈 리프> 건설
美 랠러티비티 스페이스	3D 프린터를 활용한 로켓 개발
英 원 웹	저궤도 인공위성을 활용한 우주 인터넷망 조성

자료: 『동아사이언스』, 「우주산업리포트: 글로벌 우주산업 투자동향」, 2022. 4. 15.

넘어 데이터 기반 서비스까지 우주산업의 영역을 확장시키고 있다.

한국도 누리호 3차 발사에 성공하면서('23. 5) 우주 선진국으로서의 발돋움할 수 있다는 기대감이 높아졌다. 2010년에 한국형 발사체 사업을 시작한 이후 국내 300여 개 기업과 연구기관, 대학 등의 협업을 통해 자체 발사체와 위성기술에 대한 성과를 보였다는 점에서 긍정적 평가를 받고 있다.[3] 그러나 이러한 기술적 성과에 비해 아직까지 산업으로서 민간 소비자가 체감할 만한 성과는 찾아보기 어렵다. 반도체와 디스플레이, 이차전지 등 경제성장을 견인하고 있는 선도 기술과 달리 우주분야에 우선순위를 두고 관심을 가져야 하는 이유는 무엇인가? 우주기술 개발과 우주산업을 활성화해야 하는 이유로는 ❶국가안보 전략, ❷신기술 확보, ❸새로운 미래 개척의 3가지 측면을 거론할 수 있다.

첫째, 우주기술은 국가 안보전략을 수립하는 데 반드시 필요하다. 미국 항공우주국(National Aeronautics and Space Administration, 이하 NASA)이 우주기술을 개발하고 관련 산업을 지원하는 표면적 이유는 인류의 지적 호기심과 우주의 기원을 탐구한다는 과학적 명분이지만, 1950년대 이후 미국의 우주 관련 정책은 실제로 국가안보전략의 일환으로 운영되어 왔다. 군대의 지상체계와 우주체계를 연결하는 시스템이 안보전략에서 글로벌한 추세가 되면서 국가안보를 위해서 우주기술개발은 반드시 필요한 과업이 되었다. 이에 따라 미국, 러시아, 프랑스, 일본 등 다수의 선진국

3 『한겨레』(2023)에 따르면 자체 제작한 위성을 자체 제작한 발사체에 탑재하여 우주궤도에 올린 나라는 미국, 프랑스, 일본, 러시아, 중국, 인도밖에 없다.

에서 이미 우주군대를 운영하고 있고, 분단 상황의 한국도 과학기술정보통신부의 12개 국가전략기술 중 하나로 우주기술을 포함한 바 있다.[4]

둘째, 경제성장을 추동하는 기술혁신 과정에서 우주 인프라의 중요성이 크게 증가하였다. 흔히 우주산업하면 떠올리게 되는 발사체 제작과 발사는 우주경제의 일부분에 불과하며, 이와 연관된 우주인터넷, 우주통신, 우주 데이터 등 다양한 신기술은 타 산업에서 혁신적인 상품과 서비스를 개발하는데 핵심 역할을 할 수 있다. 일례로 미국의 대표적인 민간 우주기업인 스페이스X 社의 '스타링크'는 기존 통신망의 단점을 개선할 뿐 아니라, 통신 산업의 패러다임을 바꿀 수 있다는 평가를 받기도 했다.

아울러 발사체에 탑재된 위성의 수리와 급유, 위성을 활용한 영상 촬영 등에 필요한 다양한 우주 플랫폼 기술이 개발됨에 따라, 기존 산업에서도 이미 우주원천기술이 활용되고 있으며 새로운 산업의 기회도 열릴 것으로 예상되고 있다(표 2-2 참조).

<표 2-2> NASA의 스핀오프 사례

우주 원천 기술	파급 기술	파급 산업
우주복 개발	각종 단기 단열재/기능성 의류	단열재/섬유 산업
심우주 전자광학	전구 디자인 및 가공 기술	전기 산업
우주선 정수 나노 필터	항균 바이오 필터	정수 필터 산업
초음파영상과 슈퍼컴퓨터를 이용한 우주인 혈류량 검사	초음파 검진을 통한 심장병 환자의 질병 예방	의료산업
우주공간의 미세 중력하의 실험가공	공기투과 콘택트 렌즈 개발	의료산업
원격 탐사 이미지	의료용 영상진단 소프트웨어	의료산업
허블망원경의 광학기술	의료 내시경	의료산업
우주발사체 및 셔틀의 공급선(연료, 동력, 가압 등) 기술	연료공급시스템	기계 산업
항공기 엔진제작 설계기술	엔진설계 테스트 소프트웨어	자동화/기계 산업
우주발사체 구조	유리섬유 제작	소재 산업

자료: 한국연구재단(2018), <표 1>.

4 과학기술정보통신부(2022. 10. 28).

셋째, 우주는 새로운 자원탐사를 가능하게 한다. 현재 한국은 미국의 달 유인 탐사 계획인 아르테미스 협정(Artemis Accords)에 참여 중이다. 달 탐사를 통해 달 표면에는 1만여 년 정도 사용할 수 있는 핵융합에너지원인 헬륨-3가 존재한다는 것이 최근 밝혀지기도 했다.[5] 이에 미국 NASA는 2032년부터 대규모로 달 토양을 채취하는 <레골리스(Regolith)> 프로젝트에 착수하였고, 중국도 2100년까지 태양계 자원을 지구로 운송하는 「우주 채굴 로드맵」을 발표하였다('23. 9).[6] 우주 자원탐사는 지구의 한정된 에너지와 자원고갈, 환경오염 등의 문제를 해결하는 기술 발전에 도움이 될 뿐 아니라 더 나아가 화성과 같은 새로운 행성으로의 관광이나 이주와 같이 이제까지 경험해 보지 못한 새로운 기회를 제시하기도 한다.[7]

본 장의 연구는 이러한 우주기술의 중요성과 파급효과에 대한 인식을 바탕으로 향후 동 산업을 국가전략산업으로서 육성하기 위한 정책과제를 탐색하는 것을 목표로 한다. 세부적으로는 우주산업의 성장잠재력 제고를 지향하는 가운데, 국내 자체 기술 확보, 활력있는 생태계 구축 등을 위한 중장기 산업정책의 개선 방안을 논의하고자 하였다. 이를 위해 문헌조사와 통계 분석등의 정량적 방법 뿐 아니라 국내외 사례 조사와 전문가 면담, 기업방문 등 정성적 연구 방법을 병행하였다.

본 장의 구성은 다음과 같다. 제2절에서는 최근 우주산업의 주요 이슈와 혁신의 동인에 대해 알아본다. 제3절에서는 국내 우주산업의 발전 현황을 분석하고 국제경쟁력 수준을 점검한다. 마지막으로 제4절에서는 최근 국내외 우주산업 육성과 관련한 주요 정책을 요약하고 우주전담기구의 설립에 따른 국가 우주 정책의 개선 방안을 논의하여 정책 시사점을 제공하고자 한다.

---

5 김경자(2021)에 따르면, 달 탐사 결과 일메나이트 광물을 가져왔는데, 헬륨-3, 물, 산소 등이 다수 포함되어 있었고, 특히 헬륨-3는 톤당 $3 billion(10억)의 가치를 보유한다.

6 『조선비즈』(2023. 11. 30).

7 스페이스X 社의 화성관광상품은 기술이 아직 개발 중임에도 불구하고, 약 8일을 우주비행사들과 같이 생활하는데 한화 651억원의 티켓을 판매한 바 있다.

제2절 우주 산업의 주요 이슈

1. 기술개발의 특이성

가. 거대 자본 소요

우주분야 기술개발은 본질적으로 자본집약적일 뿐 아니라 대규모 자본과 인력을 필요로 한다. 투자 시설이 거대하고 복잡할 뿐 아니라 다학제 인력의 투입이 필요하다. 개발뿐 아니라 시험과 인증과정에서도 거대자본이 소요된다. 예를 들어 러시아 1단 엔진을 수입하여 2단만 한국 기술로 개발한 '나로호'의 1회 사업비가 5,025억원이었고, 2022년 발사에 성공한 누리호(KSLV-II)의 개발에는 12년간 1조 9,572억원이 소요되었다.[8]

이러한 특성은 기술개발 과정에서 불확실성을 높일 뿐 아니라 정부 R&D 전략과 국제협력의 중요성을 증대시킨다. 이민형 외(2010)에서는 이러한 유형의 과학연구를 '혼합형 거대과학'으로 정의하고 중진국 입장에서는 원천기술 확보를 위해 국가비전 수준의 장기적 추진계획 수립이 필요함을 주장하였다.

나. 엄격한 국제 규제

우주기술은 자본과 인력이 충분하고 개발 의지가 있다고 해서 자유롭게 개발하는 것이 불가능하다. 동 분야 기술들이 여러 방면, 특히 무기로도 활용(Dual Use)되기 때문에 수출통제가 엄격하며, 특히 미국은 국가안보의 이유로 전 세계 우주패권을 장악하고 있어 기술개발 과정에서 선도국과의 외교 협력이 매우 중요하다. 특히, 발사체 기술은 미사일기술통제

8 뉴스핌(2018)에 따르면, 나로우주센터를 제외한 나로호(KSLV-Ⅰ) 사업비는 모두 5,025억원으로 이 중 러시아에 지불한 기술수입료가 2,500억원, 로켓 개발비, 설계, 시험, 각종 설비 제작비 등의 연구개발비와 운영비, 인건비, 경비 등이 2,502억원이 소요되었다.

<표 2-3> 한국형 발사체 누리호(KSLV-Ⅱ)의 재원

구 분	주요 재원
길이 및 중량	- 길이: 47.2m - 중량: 200톤(추진체 180톤) - 탑재중량: 1,500㎏
우주 투입 궤도	- 600~800㎞
구 성	- (1단) 75톤급 액체엔진 4기 묶음(클러스터링) - (2단) 75톤급 액체엔진 1기 - (3단) 7톤급 액체엔진 1기

자료: 『머니투데이』, 「2조원 누리호, 우주산업 씨앗 뿌렸다… 예산 1.5조 기업에 집행」, 2022. 6. 12.

체제(Missile Technology Control Regime: MTCR)의 통제를 받기 때문에 기술선진국인 미국에서 해외 반출을 금지하고 있어 소재, 부품, 장비의 국산화를 위한 노력이 반드시 필요하다.[9] 미국은 일부 우방국가의 경우에만 기술의 해외 반출을 허용하는데 현재 영국, 프랑스, 일본 등 일부 국가에 한정되고 한국은 제외되어 있는 상황으로 MTCR의 후발 가입국들은 인도를 제외하고는 대부분 규제 대상에 해당한다.

더불어 미국 국무부가 주관하는 ITAR의 경우 위성핵심부품이 대부분 해당되기 때문에, 누리호와 같은 한국형 첨단 발사체를 개발한다 해도 탑재되는 위성의 주요 기술은 미국이 선점하고 있는 문제가 있다.[10] ITAR의 완전 대체는 기술적으로 단기간에는 해결하기 매우 어려운 문제로 대규모 자본과 시간이 소요된다. 실제로, 소규모 위성은 국산기술로 가능할 수 있지만 실제 산업에 활용되는 실용급 위성들은 미국 부품이 필수이기 때문이다. 따라서 원활한 우주기술의 개발을 위해서는 외교적 노력으로 ITAR 규제에 해당되지 않는(ITAR-free) 소재와 장비, 부품을 사용하는 것만이 현재로서는 유일한 방법이다. 또한 최근 미-중 무역갈등

9 7개국(미국, 캐나다, 독일, 영국, 프랑스, 이탈리아, 일본)이 합의하여 제안한 사정거리 300㎞ 이상 탄두 중량 500㎏ 이상 미사일 완제품과 부품 기술의 수출을 통제하는 국제협약으로 최초 가입국인 7개국은 제재가 없으나 후발 가입국들에 미국산 부품을 사용한 발사체와 위성의 발사에 미국 국무부의 허가를 받도록 한 규제이다.

10 ITAR(International Traffic in Arms Regulations)는 미국 정부 규정으로 국방 관련 미 군수품 목록에 대한 수출입을 제어하는 것으로 미 수출 제한 법안 22장에 근거한 전략기술 관련 규제이다. 우주 관련 핵심 부품도 다수 선정되어 있다.

으로 인해 첨단 기술에 대한 무역제재가 강화되고 있는데 각국의 첨단기술보호 정책에 빠짐없이 등장하는 주제도 '국방기술'이다. 발사체와 위성과 관련된 첨단기술과 일반 기술이라 하더라도 연관된 기술이라면 글로벌 무역 규제의 대상이 될 가능성이 높아졌다.

다. '발사'로 완성되는 우주기술개발

또한 우주분야의 기술개발과 시험 과정에서 특별한 환경 조건을 만족하는 발사장을 선정하여 활용하는 것이 중요하다. 위성과 발사체 모두 결국엔 고도 100㎞ 이상의 우주 영역에 진입해야 의미가 있다. 한국의 지리적 입지를 고려할 때 국내 발사장이 모든 제품의 사양을 만족시킬 수 없기 때문에 이 과정에서 국제협력을 통한 원활한 조율이 필요하다. 예를 들어 정지궤도 위성은 항상 같은 지역(적도 상공 36,000㎞)에 위치하기 때문에 지구 자전과 공전 속도를 고려할 때 적도 지방에서 동쪽으로 위성을 발사하는 것이 가장 효율적이다. 반면, 저궤도 위성은 중력을 강하게 받기 때문에 큰 원심력을 얻을 수 있도록 적도가 아닌 남반구나 북반구에 위치한 발사장이 적합하다.

최근 소형 위성 및 발사체에 대한 민간개발이 증가하면서 2020년 기준 2024년부터 2030년까지 발사 계약 여부가 확정되지 않은 소형위성만

<표 2-4> 발사장 입지 선정 조건

조 건	세부 내용
효율성	발사체 성격(정지궤도, 저궤도 등)에 따라 지구 자전 속도의 힘을 고려해 발사궤도 및 연료효율을 효율화 하는 위치로 선정
안전성	비행 중 폭발해도 안전하도록 사람, 재산, 폭발 위험물질이 발사장과 비행경로에 존재하지 않는 바다 주변을 선호
군사·정치적 문제	고도 100㎞ 이상을 우주로 정의하고, 그 아래에서 비행하는 발사체에 대해 국제법상 발사 이후 100㎞ 이내 외국 영공의 직접 통과를 금지
기상 조건	발사체의 기능에 영향을 주지 않는 온도와 기후 조건을 만족

자료: 한화 스페이스 허브 네이버 포스트 내용을 저자 정리(접속일: 2023. 12. 20).

2,000여 대에 이르게 되었고 이는 발사장 부족으로 이어지기도 하였다.[11] 한국은 소형 발사체의 경우 러시아, 인도 등의 국가들과 협업하여 왔으나, 우크라이나와 러시아의 전쟁으로 인해 최근 발사장 확보에 더욱 어려움을 겪고 있다.

2. 뉴스페이스로의 전환과 민간 참여의 증가

가. 올드스페이스 vs 뉴스페이스

민간 기업이 활발히 시장에 참여하는 '뉴스페이스(new space)'로의 패러다임 전환은 최근 우주분야에서 가장 중요한 이슈이다. '뉴스페이스'란, 전통적인 우주개발과 달리 행위주체와 활동영역이 공공분야에서 민간으로 크게 확장된 현상을 의미한다.[12] 과거 전통 방식의 우주개발, 즉 '올드스페이스(old space)'에서는 국가가 우주기술개발을 주도하고 대기업이 수주하는 방식으로 이루어졌다. 주로 안보, 국가위상제고, 과학지식 확보 등 국가적 목표를 위해 장기간 정부자본을 투입하여 첨단기술을 확보하는 대규모 프로젝트 위주였다. 이 시기의 기술개발은 성공 위험이 매우 높고 장시간에 걸쳐 대규모 자본이 소요되었기 때문에 민간투자가 어려웠다. 미국의 아폴로 프로젝트나 대형 우주왕복선 제작 등이 대표적인 사례이다(표 2-5 참조).[13]

이와는 대조적으로 '뉴스페이스'에서의 우주기술 개발은 시장개척이라는 상업적 목표를 가진 다양한 규모의 기업들이 단기에 비교적 낮은 비용을 투입하여 수행된다. 스페이스X가 로켓 재활용과 소형위성 및 발사체를

---

11 『산경투데이』(2023. 6. 30).

12 안형준 외(2018)에서는 뉴스페이스를 "정부가 우주개발의 주된 자금 공급원이 되어 민간 대형 업체가 개발한 하드웨어를 구매하는 방식이 주를 이루던 기존의 산업생태계가 새로운 민간투자 파트너와 기업가적 활동(entrepreneurial activity) 모델을 기반으로 한 소규모 기업들의 활발한 참여 속에 민간 주도로 변화되는 양상"으로 정의하였으며 OECD(2023)에서는 유사한 개념으로 '스타트업 스페이스', '스페이스 4.0' 등을 사용한다.

13 1961년부터 1972년까지 NASA의 주도로 이루어진 미국의 유인 달 탐사 계획이다.

<표 2-5> 올드스페이스와 뉴스페이스의 비교

구 분	올드 스페이스(Old Space)	뉴 스페이스(New Space)
목표	국가적 목표 - 군사, 안보, 경제, 과학지식 확보, 국가위상제고 등	상업적 목표 - 시장 개척
개발기간	장기	단기
개발주체	국가연구기관, 대기업	중소기업, 스타트업, 벤처
개발비용	고비용	저비용
주요 자금 출처	정부(공공자본)	민간(상업자본)
관리 방식	정부주도	자율 경쟁
특징	보수적, 위험회피, 신뢰성	혁신성, 리스크 테이킹, 고위험
대표 사례	아폴로 프로젝트, 우주 왕복선	SpaceX, Rocket Lab, One Web

자료: 안형준 외(2019).

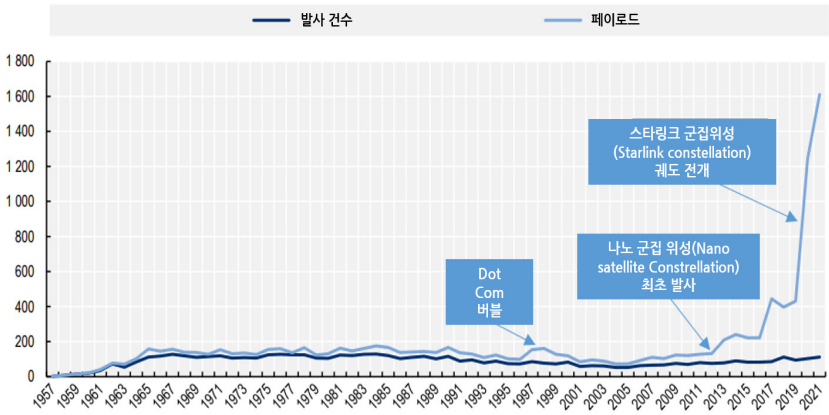
저가의 비용으로 개발한 것이 대표적인 혁신 사례이다. 페터 슈나이더(2018)에 따르면 NASA의 기존 로켓은 1회 발사에 3억 8,000만달러가 소요되고 추가로 연간 10억달러의 고정비와 유지비가 지출되었던 반면, 스페이스X의 소형우주선은 그 가격을 1억달러로 크게 낮추어 시장 진입장벽을 낮추는 데 기여하였다.

나. 낮아진 진입 장벽과 위성 수요의 증가

OECD(2023)은 '뉴스페이스'로의 전환에 ❶소형 위성과 같은 새로운 우주 기술의 출현, ❷린(lean) 생산방식, ❸기술 기업의 대규모 투자, ❹컴퓨팅 성능의 발전 및 디지털 전환 등 여러 요인이 영향을 미친다고 언급하였다.[14] 특히 산업적 측면에서 볼 때, 뉴스페이스로의 전환은 공급 기업의 행태 변화뿐 아니라 자금 조달 방법과 혁신의 양상 등에서 차이를보이고 있다. 정부 R&D 자금뿐 아니라 주식이나 스타트업 투자 등의 민간자본에 대한 의존도가 증가하고 있으며 우주뿐 아니라 타 산업 영역

14 인력, 생산설비 등 생산능력을 필요한 만큼만 유지하면서 생산효율을 극대화하는 생산 시스템을 의미한다(네이버 시사용어사전, 접속일: 2023. 12. 23).

[그림 2-1] 발사 및 페이로드[1] 현황



주: 1) 페이로드는 발사 기능을 제외하고 우주에서 특정 기능을 수행하도록 설계된 우주 물체 (예: 위성, 우주 탐사선)를 의미.
2) 2021년 9월 23일까지 현황.

자료: OECD, “Harnessing ‘New Space’ for Sustainable Growth of the Space Economy“, 2023, p.8, [Figure 2].

과의 융합을 통한 서비스 개발에 대한 관심이 증대하였다. 또한 기존의 발사체를 재사용하거나 제품의 표준화를 통한 생산 효율화를 추구함과 더불어 규모의 경제를 선점하기 위한 활동이 활발하다.

위성 발사 수가 폭발적으로 증가한 것은 규모의 경제를 선점하기 위한 민간기업의 경쟁을 보여주는 대표적인 사례이다. [그림 2-1]은 지구 관측을 위한 최초의 나노군집위성의 발사와 함께 2011년 이후 발사 활동이 어떻게 증가했는지를 보여준다. 로켓 발사 건수는 2021년까지 비교적 안정적으로 유지되지만, 페이로드는 발사당 위성 수가 증가하면서 크게 증가하고 있다. 특히 소형군집위성의 출현과 ‘스타링크’가 궤도에 전개된 것은 페이로드 증가에 큰 영향을 미쳤다.

OECD(2023)에 따르면 2022년 말 기준으로 미국의 스페이스X와 영국의 원웹(Eutelsat OneWeb)이 각각 3,000개와 500개의 위성을 보유하고 있으며 이는 궤도에 있는 모든 운영 위성의 절반 이상을 차지하는 것으로 나타났다. 상업용 위성은 저궤도 군집위성을 중심으로 앞으로도 크게 증가할 것으로 예상된다. 예를 들어 아마존社의 카이퍼(Kuiper) 군집위성의

경우 최대 3,236기 이상의 위성으로 구성되며 대량생산을 시작하였고('23. 12), EU, 캐나다, 중국, 한국 등 다수의 국가에서 저궤도 군집위성의 개발에 대한 계획을 발표하였다(표 2-6 참조).[15] 한국도 한화시스템과 KAI 등 민간기업을 중심으로 초소형 군집위성 개발을 추진 중이다.[16]

이러한 민간기업의 참여 증가 추세는 위성의 종류별 운영 비중에서도 확인할 수 있다(그림 2-2 참조). 이미 저궤도 위성과 정지궤도 위성의 경우 민간기업의 상업용 위성이 과반을 차지하고 있으며, 지구관측을 위한 중궤도 위성과 과학탐사를 위한 고타원궤도 위성에서는 여전히 군사용과 정부 및 공공위성의 비중이 높다.

발사 수요 및 위성 수의 급격한 증가는 관련 정책 수요도 증가시키고 있다. 일부 선진국이 아니라 전 세계 국가들이 우주기술개발에 참여하게 됨에 따라 우주 활용을 위한 인프라 관리와 제도적 보완에 대한 수요도 증가하였다. 또한 위성수의 급증으로 인해 우주 쓰레기(Space Debri)의 처리 등 우주개발의 지속가능성도 이슈로 부각되고 있다.

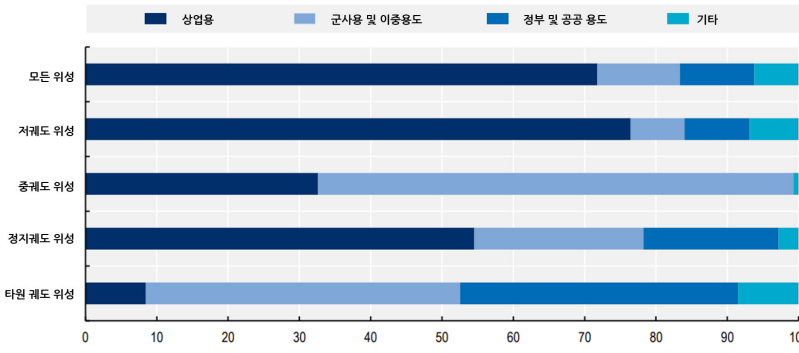
<표 2-6> 각국의 군집위성 계획 현황

국가	기업명	구축계획(기)
미국	Space X	42,000
	Amazon	3,236
	DARPA	20
영국	OneWeb	6,372
중국	Guowang	12,992
	Hongyun	864
	Hongyan	320
러시아	Sfera	640
캐나다	Telesat	298

자료: 『서울경제』, 「선진국 군집위성 6만 7,000개 지구 저궤도 선점할 판… 공군 "韓, 위성 충돌 위험 대비해야,"」 2022. 7. 10.

15 『Spaceradar』(2023. 11. 25).
16 『연합뉴스』(2023. 5. 18).

[그림 2-2] 위성 종류별 운영 비중



주: 군사 및 이중 용도에는 국방 관련 임무뿐만 아니라 군-민간, 정부, 군-상업 또는 이들의 조합이 포함되며, 정부 및 공공용도는 군사용을 제외한 수치.

자료: OECD, “Harnessing ‘New Space’ for Sustainable Growth of the Space Economy,” 2023, p.9, [Ffigure 3].

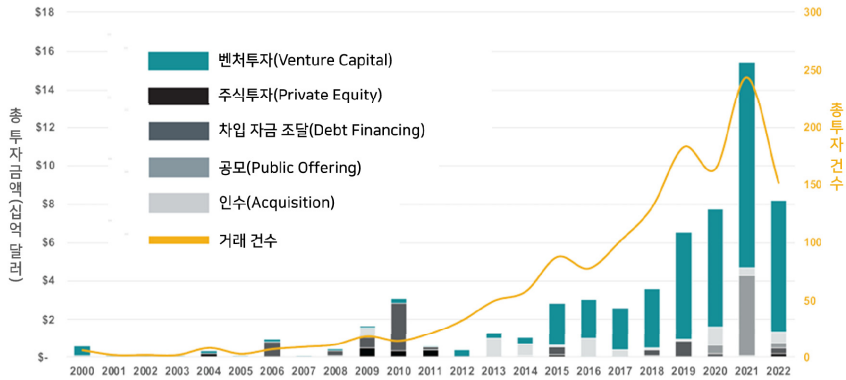
다. 민간투자의 확대

벤처기업의 금융 접근성이 확장되어 자금 구성이 다양해진 것은 뉴스페이스 전환 이후 발견되는 큰 변화이다. 전통적으로 우주기업의 벤처투자는 정부 지원이나 대출을 통한 자금 조달이 지배적이었으나 2015년 이후 벤처투자와 기업공개, M&A 등 금융 접근성이 크게 개선되고 있다. Brice Tech(2023)에 따르면 우주 스타트업 투자는 2021년 150억달러(한화 18조 4,000억원), 2022년에는 82억달러(한화 10조 9,600억원)를 기록하였다.[17] 2022년에는 글로벌 경기침체의 영향으로 전체 투자가 크게 감소하였고 고금리가 지속되면서 기업인수목적회사(SPAC)를 통한 우회상장 금액이 40억달러(’21)에서 2억 7,100만달러(’22)로 크게 감소하였다. 그러나 이러한 전반적 투자 둔화에도 불구하고 2015년 이후 벤처투자 및 주식투자, 공모, 인수 등 투자 방법이 더욱 다양해진 것은 우주분야에서의 민간투자 활성화로 인한 변화임이 분명하다.

특히 벤처 투자는 2022년 전체 우주 스타트업 투자의 3/4을 차지하고

17 2023년에는 OneWeb・Eutelsat 합병, Viasat의 Inmarsat 인수, L3Harris의 Aerojet Rocketdyne 인수 완료, BAE Systems의 Ball Aerospace 인수와 같은 M&A 거래가 성사되었다.

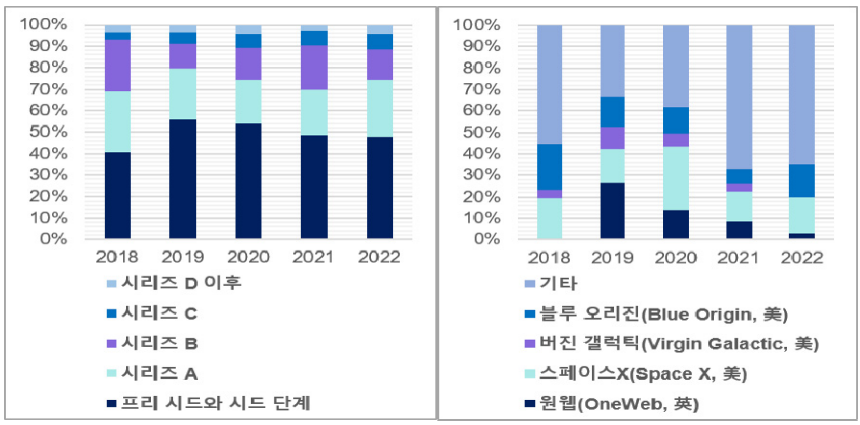
[그림 2-3] 우주분야 스타트업 투자 유형



자료: *BryceTech*, "Start-up Space: update on investment in commercial space ventures," 2023.

있다. 투자 단계별로 보면, 창업 초기인 시리즈 A 단계 이전의 투자 비중이 70%를 상회하고 있으나, 최근 시리즈 C 및 D 단계의 투자도 꾸준히 증가하고 있다. 그러나 아직까지는 북미 소재의 일부 뛰어난 기업에 벤처 투자가 집중되고 있는데, 전체 벤처투자의 73%인 66억달러가 미국에 집중되고 있으며 10억달러 이상의 대규모 거래도 북미 기업이 주도하고 있는 것으로 나타났다(그림 2-4 참조).

[그림 2-4] 우주 스타트업의 벤처 투자 비중: 투자단계별(左), 기업별(右)



주: 10억달러 이상의 투자를 유치한 경우 기업명을 표시함.
자료: *BryceTech*(2023)의 Figure20(A), Figure15(B)를 인용함.

3. 국제 협력과 글로벌 경쟁의 심화

본 절의 1항에서 살펴본 바와 같이 우주기술은 거대자본이 소요되는 바, 국제협력을 통한 다학제 연구와 공동의 자본 투자가 반드시 필요하다. 그간 우주 분야 국제협력은 1991년 소련의 붕괴 이후 미국의 주도로 이루어져 왔다. 그러나 기술 발전으로 인해 발사 가격이 하락하고 위성 수요가 급증하면서 우주 분야는 더 이상 '과학'의 영역이 아닌 규모의 경제를 구현해야 하는 '산업'의 영역으로 전환되고 있다. 이에 기존의 미국 주도의 국제협력구조가 동맹국 중심과 지역 중심으로 변화하고 있다.

가. 미국과 중국의 우주 경쟁 심화

가장 큰 변화는 첨단기술개발을 위한 국제무역갈등이 고조됨과 더불어 우주분야에서도 미국과 중국 간의 경쟁이 심화되고 있다는 것이다. 미국은 우주분야에서 중국의 성장을 견제하기 위해 미국이 주도하는 우주개발협력 프로그램에 중국의 참여를 견제하고 있는데, 예를 들어 2011년 의회를 통과한 '울프수정안(Wolf Amendment)'은 미국의 정부자금으로 운영되는 단체의 경우 중국 정부 및 유관단체와 직접적 협력을 금지하여 기술 유출에 대비하고자 하였다. 이와 더불어 우크라이나 침공 이후 국제사회에서 러시아에 대한 경제적 제재가 강화되자 중국과 러시아가 미국에 공동 대응하는 사례도 증가하고 있다.

미국의 대표적인 국제협력 프로젝트는 2045년 유인 달 탐사 성공을 목표로 하는 '아르테미스' 협정이다. 미국은 2025년에 달 남극에 유인우주선을 착륙시키고 이후 우주인 4명이 상주할 수 있는 우주정거장으로 '루나 게이트웨이(Lunar Orbital Platform-Gateway)'의 건설을 추진하면서 한국을 포함하여 32개 국가들과 협정을 체결하였다. 또한 다양한 국적의 우주인이 참여하는 유인 탐사 프로젝트를 기획 중이며 탐사과정에서의 행동규정과 우주이용규칙 등도 제안하고 있다.

중국은 2007년 달 탐사를 시작한 이래, 미국의 '아르테미스' 협정에 맞서 러시아와의 협력을 강화하였다.[18] 2021년 3월 중국의 국가우주국(CNSA)과 러시아의 연방우주공사(Roscosmos)가 국제달연구기지(ILRS) 건설을 위한 MOU를 체결한 것이 대표적인 예이다.[19] 또한 동 프로젝트에 파키스탄, 아랍에미리트, 아시아태평양우주협력기구(APSCO)의 참여를 발표하기도 하였다.[20]

중국·러시아의 동맹과 미국의 갈등은 국제우주정거장(International Space Station, 이하 ISS) 프로젝트에도 영향을 미치고 있다. ISS는 1998년 건설이 시작된 후 현재까지 운영되고 있는 유일한 우주정거장으로 현재까지 가장 뛰어난 우주 협력의 성과로 평가받았다.[21] 모듈 제작에서부터 건설, 활용에 이르기까지 미국, 러시아, 유럽우주국(ESA) 등 전 세계 20여 개국이 참여하였다.[22] 그러나 장비 노후화로 인해 ISS의 운영이 2030년으로 종료될 것으로 예상된 이후, 러시아와 중국은 각각 독자 우주정거장인 '로스(ROS)'와 '톈궁(天宮)' 건설계획을 발표하였다.[23]

이와 더불어 미국과 중국을 중심으로 하는 새로운 국제협력체계가 등장하고 있다. 미국과 EU, 한국 등 12개국이 참여하는 '우주위협감소를 위한 UN 워킹그룹'에서는 위성요격미사일 시험 금지결의안을 채택하였고('22. 4) 영국과 함께 '우주에서의 책임 있는 활동'을 논의하는 워킹그룹을 추진 중이다. 이에 러시아와 중국은 동맹국인 벨라루스, 쿠바, 북한 등과 함께 '우주무기배치방지협정(PPWT)'에 서명하는 것으로 대응하였다('23. 12). 또한 미국이 4개국 안보회담인 '쿼드(Quad)'를 통해 동맹국 보유 위성 간 정보 공유를 선언('22. 5. 25)하자마자 중국은 '브릭스(BRICS) 우주연합회'의 공동관측망 전략을 발표하였다('22. 5. 26). 미국과

---

18 2007년 중국의 '창어(嫦娥) 1호'를 시작으로 '창어(嫦娥) 3호'가 달 착륙에 성공했다.

19 International Lunar Research Station의 약자를 의미한다.

20 『Spaceradar』, 「중국, 달기지 프로젝트 국제협력 강화… 10여 개국과 참여 논의」, 2023. 6. 21.

21 BBC News Korea(2023. 5. 7) 기사에 따르면 전 NASA 책임자로 근무한 토마스 주르부첸이 "우주정거장은 진정한 대규모 국제 성취 중 하나"로 언급하였다.

22 1,000㎥ 규모의 모듈형 우주정거장으로 러시아가 6개, 미국이 8개 일본이 1개, EU가 1개의 모듈을 제작하는 협업을 통해 완성한다(『한겨레』, 2023. 10. 17).

23 우크라이나 전쟁 이후 러시아는 그동안 미국 및 서방 국가들과 함께 운영해 오던 국제우주정거장(ISS)의 철수를 발표한다(『동아사이언스』, 2022. 7).

<표 2-7> 미국과 중국의 우주국제협력 사례

주도 국가	프로그램명	주요 내용 및 특징
미국	아르테미스 협정 (Artemis Accords)	- 미국항공우주국의 유인 달 탐사 프로젝트 - 2017년부터 호주, 캐나다, 일본, 이탈리아, 영국, 한국 등 32개국이 참여 중('23. 12).
	국제우주정거장(ISS) 프로젝트	- 러시아와 미국, ESA 등 전세계 20여개국이 참여한 국제우주정거장 프로젝트 - 노후화로 운영 종료 계획 중('31).
	우주위협 감소를 위한 UN 워킹그룹 (UN OEWG on reducing space threats)	- 12개국, EU와 한국 등이 참여. - 위성요격 미사일 시험 금지 결의안 채택('22. 4).
	4개국 안보회담 (Quadrilateral Security Dialogue)	- 미국, 일본, 인도, 호주의 4개국이 참여하는 반중(中) 연합 협력체('07) - 보유 위성 정보 공유 등 최근 우주 분야에서 협력 중('22. 5. 25).
중국	달 연구기지(ILRS) 건설 프로젝트	- 중국 국가우주국(CNSA)과 러시아 연방우주공사(Roscosmos)의 국제달연구기지 건설협력('21. 3).
	톈궁 우주정거장 프로젝트 (Tiangong Space Station)	- 고도 390㎞ 상공에서 지구를 돌고 있는 중국의 우주정거장 건설 프로젝트 - 러시아 및 이탈리아와 협력.
	우주 무기 배치 방지 협정 (PPWT)	- 러시아와 중국이 UN군축 회의에 발표('08). - 러시아, 벨라루스, 중국, 쿠바, 북한, 이집트가 공동으로 작성한 우주공간에 무기배치금지 결의안'으로 발전('23. 12).
	브릭스 우주연합회 (BRICS Joint Committee on Space Cooperation)	- 브릭스(브라질, 러시아, 인도, 중국, 남아프리카공화국) 내에 우주 협력 기구를 구성. - 소형 위성으로 이뤄진 관측망 전략을 통한 공동 관측과 데이터 공유 발표('22. 5. 26).

자료: 저자 정리.

중국, 러시아와의 갈등은 우주군 창설을 통해서도 발견된다. 미국이 우주군을 창설하면서('19. 8) 우주기술 이용과 관련한 제도를 정비하자, 러시아와 중국도 독립적인 우주 부서를 설립하여 대응하였다.[24] 상기 내용들

24 미국은 중국의 우주굴기를 견제하고자 우주군을 창설('19. 8)하였고 중국과 러시아도 기존의 군체제에서 우주 관련 부서를 독립시켰는데, 중국은 우주부서 독립의 목표로 '미국의 우주개발 독점체제의 견제'를 명시적으로 밝힌 바 있다(『동아일보』, 2023. 3. 2).

을 종합해 보면 최근 우주분야 국제협력이 명시적으로는 '우주 평화'를 추구하고 있음에도 불구하고 실질적으로는 상대 진영과의 갈등이 더욱 심화되고 있음을 알 수 있다. 형식적으로는 미국과 중국・러시아가 동맹국 간의 우주 평화를 강조하고 있으나, 실제로는 동맹국과의 공조와 동맹 내에서만의 평화를 강화하여 우주 패러다임을 선점하고자 하는 것이다.

미국과 중국의 기술개발 경쟁은 국제협력체계 뿐 아니라 기술 플랫폼으로까지 확장되고 있다. 현재 UN 산하 국제민간항공기구(International Civil Aviation Organization)에서 국제 표준으로 인정하고 있는 국제항법위성시스템은 미국의 <GPS>, 러시아의 <글로나스>, EU의 <갈릴레오>, 중국의 <베이더우>의 4개뿐이다. 중국의 <베이더우>는 국제표준으로 인정받은 후('23. 11) 글로벌시장 점유율을 15% 정도 기록하고 있는데, 중국은 기술 플랫폼 선점을 위해 이를 동남아와 중동, 아프리카에 무료로 제공하는 공격적인 전략을 추구하고 있다.[26,27]

우주기술 경쟁의 또 한 사례는 바로 소형군집위성 분야이다. 동 분야에서는 미국의 민간기업인 스페이스X의 <스타링크>가 45개국 200만명의 가입자를 확보하면서 플랫폼 선점을 가속화하고 있는데[28] 중국은 <GW 프로젝트>를 통해 스페이스X 다음으로 많은 위성을 쏘아 올리는 전략을 추구하고 있다.[29] 이를 통해 중국과 러시아의 보유 위성을 2015년 대비 2배로 증가하고자 하였으며 특히 2030년까지 300기의 저궤도 군집위성을 발사할 계획이다.[30]

---

26 『Spaceradar』(2023. 11. 21).

27 『동아사이언스』(2021. 12. 17).

28 『중앙일보』(2023. 10. 24).

29 『동아일보』(2023. 3)에 따르면 중국은 2027년까지 스페이스X에 맞서고자 13,000여 개의 위성을 발사하는 계획을 수립하였고, 이에 스페이스X는 2027년까지 12,000개, 2030년까지 모두 4만개 이상의 위성 발사 계획을 수립하였다.

30 『디지털투데이』(2023. 11. 17).

나. 지역 중심 협력체계의 증가

국제무역에서 지역경제 중심의 협력이 활발한 것과 마찬가지로 우주기술 개발에 있어서도 지리적으로 인접한 국가 간 협력이 증가하고 있다. 인접한 국가들은 지리적 특성상 필요한 우주 인프라가 유사할 가능성이 높고 데이터 공유 시 경제적 이점이 크기 때문이다.

대표적인 지역중심협력체계로는 유럽 22개국이 가입되어 있는 유럽우주국(European Space Agency, 이하 ESA)을 들 수 있다. ESA는 유럽발사체기구(ELDO)와 유럽우주연구기구(ESRO)를 통합하면서 유럽 내 정부국제기구로 출발하였다(정영진, 2015). 우주연구와 기술개발, 우주활용 등을 위해 회원국간의 평화적 협력을 추진하며 회원국간 일관성 있는 우주산업정책과 관련한 활동을 지원한다. 회원국의 참여도에 따라 예산을 배분하고 '의무적 활동'과 '선택적 활동'으로 구분하여 프로그램을 운용하고 있다.[31]

전통적인 우주개발이 미국과 유럽, 러시아 등 강대국을 중심으로 했다면 최근에는 개발도상국을 중심으로 우주기술개발을 위한 지역협력체가 구성되었다. '아랍우주협력그룹(Arab Space Cooperation Group: ASCG)'과 '남미 및 카리브해 우주국(Latin American and Caribbean Space Aency: ALCE)', '아프리카 우주국(African Space Agency: AfSA)' 등이 대표적인 예이다. 아랍우주협력그룹은 사우디아라비아 UAE 등 아랍 14개국이 참여하며 남미우주국은 아르헨티나, 멕시코, 파라과이 등 남미 19개국이 참여 중이다. 특히 이집트 카이로의 '스페이스시티'는 아프리카우주국뿐 아니라 이집트우주국이 위치해 있을 뿐 아니라 인공위성 생산공장, 지상국, 우주 박물관 및 각종 교육시설 등을 유치할 계획이다. 이집트는 최근 아랍우주협력그룹의 회장국으로 당선되었기 때문에 아프리카뿐 아니라 아랍국가와의 국제협력도 강화할 것으로 예상된다.[32]

---

31 정영진(2015)에 따르면 ESA의 분담금은 회원국의 GDP에 따라 이사회가 결정하며, 한 국가가 총분담금의 25%를 초과할 수 없도록 규정한다.

32 『Spaceradar』(2023. 2. 5).

아시아 지역의 지역협력체로는 중국을 중심으로 하는 아시아태평양우주협력기구(APSCO)와 일본을 중심으로 하는 아시아태평양우주포럼(Asia-Pacific Regional Space Agency Forum, 이하 APRSAF)을 들 수 있다. APSCO는 현재 터키, 몽고, 태국, 파키스탄 등 8개국이 정식 회원국으로 참여하고 베이징에 본부를 두었다. ESA와 마찬가지로 회원국의 경제수준을 고려하여 분담금을 마련하고 정관을 두는 등 체계적인 운용을 추구하나, 참여국들이 MTCR 비회원국이고, 미·중 갈등으로 인해 다수의 국가가 참여하지 않는 한계가 있다. 반면, APRSAF의 경우 4개의 상임위를 두고 다양한 우주관련 의제를 논의하지만, 비회원제 포럼을 중심으로 하기 때문에 국제협의체로서의 위상은 부족하다. 한국은 APRSAF에는 참여하고 있지만 APSCO의 정식 회원국은 아니다.

지역 중심으로 국제협력이 증가하는 추이에 맞추어 기존의 지역협력체계에서 우주의 중요성이 증가하기도 한다. 1949년에 설립되어 30개국이 참여하고 있는 북대서양조약기구(NATO)가 대표적인 사례로, NATO의 기존 집단안보 영역은 지상과 바다, 하늘에 국한되었는데 최근 우주를 집단안보 영역에 새로 포함시켰다(『동아사이언스』, 2022. 6. 17). <표 2-8>에 제시된 쿼드(Quad)와 브릭스(BRICS)에서의 위성 데이터 공유 협력도 이와 같은 맥락으로 이해할 수 있다.

제3절 국내 우주산업의 발전 현황

최근 우주산업은 기술개발의 특이성에도 불구하고 빠르고 치열한 글로벌 경쟁이 심화되고 있다. 본 절에서는 국내 우주산업 생태계의 현황을 살펴보고, 글로벌시장에서의 기술 경쟁력을 논하고자 한다.

1. 우주산업의 정의

OECD(2016)는 우주경제(space economy)를 우주에 대한 탐험, 이해,

<표 2-8> 우주개발 지역중심 협력 체계 사례

지역중심 협력체	회원국 수	설립	연간 예산 (백만달러)	본부
유럽우주국(ESA)	22개국('22. 5)	'75	7,720	프랑스
아시아태평양 우주협력기구(APSCO)	8개국('23. 12)	'08	-	중국
아프리카 우주국(AfSA)	55개국('23. 7)	'22	-	이집트
남미 및 카리브해 우주국(ALCE)	19개국('22. 3)	'22	100	멕시코
아랍 우주협력그룹(ASCG)	14개국('21. 9)	'19	-	이집트

자료: 『동아사이언스』(2022. 6. 17)의 일부 내용을 저자 정리.

관리 및 활용의 과정에서 인류에게 가치와 이익을 창출하고 제공하는 모든 활동과 자원의 사용을 의미한다고 정의하였다. 미국 상무부 경제분석국에서는 공공부문과 민간부문의 우주 관련 재화 및 서비스가 직접적으로 투입되거나 사용된 분야를 우주경제로 정의하고 있다. 특히 미국은 국민계정 상의 산업분류에서 우주산업분류가 존재하지 않는 것을 보완하고자우주산업과 관련한 특별 분류로 우주경제위성계정(SESA)를 개발했다. 우리나라는 「우주개발진흥법」에서 우주개발과 우주개발사업, 우주개발사업자를 정의하고 있다. <표 2-9>의 정의에 따르면 한국의 우주경제는 '인공우주물체'를 중심으로 구성되어 있으며, 인공우주물체를 설계, 제작, 발사하기 위한 연구 활동, 기술개발과 이를 위한 기기, 장치, 소프트웨어 등이 포함된다.

최근 OECD(2022)에서는 가치사슬단계에 따라 우주경제를 ① 업스트림 ② 다운스트림 ③ 우주기술 활용 산업의 3단계로 분류하였다. 업스트림은 기술개발과 연구를 중심으로 하는 전형적인 우주활동을 의미하며 우주 및 지상시스템의 장비와 관련 SW의 설계, 공급 등이 포함된다. 다운스트림은 우주에서 획득한 데이터와 신호, 통신 등을 직접적으로 활용한 제품과 서비스, 데이터 활용을 위한 서비스를 포함한다. 즉, 우주기술 활용은 의료, 자동차 등 우주에서 얻은 기술을 다른 산업에서 응용한 제품과 서비스를 의미한다.

본 연구에서는 과학기술정통부의 「우주산업실태조사」 분류를 사용한다.

<표 2-9> 우주경제 관련 정의 비교

구 분	정 의
美 상무부 (BEA)	■ 공공부문과 민간부문의 우주 관련 재화 및 서비스로 구성되며 다음 조건에 부합해야 함 - 우주에서 사용되거나 이를 직접 지원하는 것 - 제품 및 서비스가 기능하기 위해 우주 재화 및 서비스에서 직접 투입되는 요소가 필요하거나 이를 직접 지원하는 것 - 우주 연구와 관련된 것
韓 「우주 개발 진흥법」	■「우주개발」의 정의 - 인공우주물체의 설계・제작・발사・운용 등에 관한 연구활동 및 기술개발 활동 - 우주공간의 이용・탐사 및 이를 촉진하기 위한 활동 ■「우주개발사업」: 우주개발의 진흥을 위한 사업과 이와 관련되는 교육・기술・정보화・산업 등의 발전을 추진하기 위한 사업 ■「우주사업자」란 다음 각 목에 해당하는 사항의 연구・개발・제작・생산・제공・유통 등과 관련된 경제활동을 하는 자를 의미 - 인공우주물체와 관련된 기기, 장치, 소프트웨어, 기반시설, 건축물, 공작물, 활용 서비스 등

자료: 신상우(2022) 및「우주개발진흥법」내용을 저자 정리.

「우주산업실태조사」는 우주산업을 한국표준산업분류와 연계하여 위성체 제작, 발사체 제작, 지상장비, 위성활용 서비스 및 장비, 과학연구, 우주탐사 등으로 분류하고 있다. 위성체 및 발사체 제작, 지상장비 등은「우주개발진흥법」상의 우주경제에 해당하는 인공발사체의 개발과 공급에 관련된다. 우주활용은 OECD(2022)의 분석에서 다운스트림에 해당하는 분류인 원격탐사, 방송통신, 항법 등 위성정보를 활용한 영역과 OECD (2022)의 업스트림에 해당하는 연구활동 '우주탐사' 등으로 구성된다.

2. 국내 우주산업의 성장 추이

가. 시장 규모

우주산업에 참여하고 있는 국내 기관은 지속적으로 증가하고 있다. 참여기관 유형을 ❶대학, ❷연구기관, ❸기업체의 3가지로 구분할 때 민간부문인 기업체 수는 코로나19 팬데믹에도 불구하고 147개('13)에서

<표 2-10> 우주 경제 구성 분야

구 분	범 위	활 동
업스트림	- 일반적 우주경제의 기본 조사 대상으로 전형적인 우주활동이 해당 - 우주 및 지상시스템 제작 발사	- 비영리기관의 기초/응용연구 - 연구개발서비스, 과학엔지니어링 - 부품, 지상시스템용 재료 공급 - 우주 및 지상시스템용 장비와 연관SW 설계 및 제조 - 위성/궤도 시스템, 발사체 등의 시스템 통합 및 공급, 제어시스템 등
다운스트림	- 위성 데이터를 활용한 위성통신, 위헝항법/지구관련 제품 및 서비스	- 우주 및 지상시스템 운영 - 데이터 배포 서비스 - 위성장비 및 SW 개발 - 위성방송, 위치/항법/시각(PNT)* 서비스제공, 지도 제작/매핑 - 우주신호 및 데이터 부가가치 서비스
우주기술 활용 산업	- 부분적으로 우주기술 이용하여 다른 산업에서 새로운 제품과 서비스를 만들어 내는 분야	- 우주개발에서 개발된 기술을 응용한 제품과 서비스 - 미중력상태 우주비행사 의자를 활용한 자동차 카시트 설계 - 달 착륙 기술을 활용한 자율주행자동차 - 우주 원격의료 프로그램 응용서비스

주: PNT는 position, navigation, timing의 약자로 GPS 정보의 기본이 되는 주요 정보를 의미.
자료: 신상우(2022), pp.10~12. 내용을 저자 요약.

428개('21)로 약 3배 증가한 반면, 공공부문인 대학과 연구소 수는 2013년과 유사한 수준이다.

「우주산업실태조사」는 국내 우주산업의 규모를 추정하는 데 있어, 대학의 연구비, 연구기관의 예산, 기업의 매출을 '활동 금액'으로 정의하여 사용하고 있다. 기업체의 매출은 국내 우주산업의 활동 금액에서 2013년 이후 가장 높은 비중을 차지하고 있으며 2017년 3조 3,930억원을 기록한 이후 글로벌 경제위기와 코로나19 팬데믹의 영향으로 매출이 점차 감소하여 2021년 2조 5,700억원을 기록하고 있다. 참여기관 수로는 대학이 연구기관의 2배에 달하는 것으로 나타났지만 활동 금액을 기준으로 볼 때 연구기관이 대학의 10배 이상의 규모를 차지하고 있다. 이러한 격차는 최근 더욱 확대되고 있는데 대학의 연구비가 260억원('13), 340억원('21)으로 증가하는 동안 연구기관의 예산은 317억원('13)에서 586억원('21)

<표 2-11>「우주산업실태조사」의 우주 분야 분류 체계

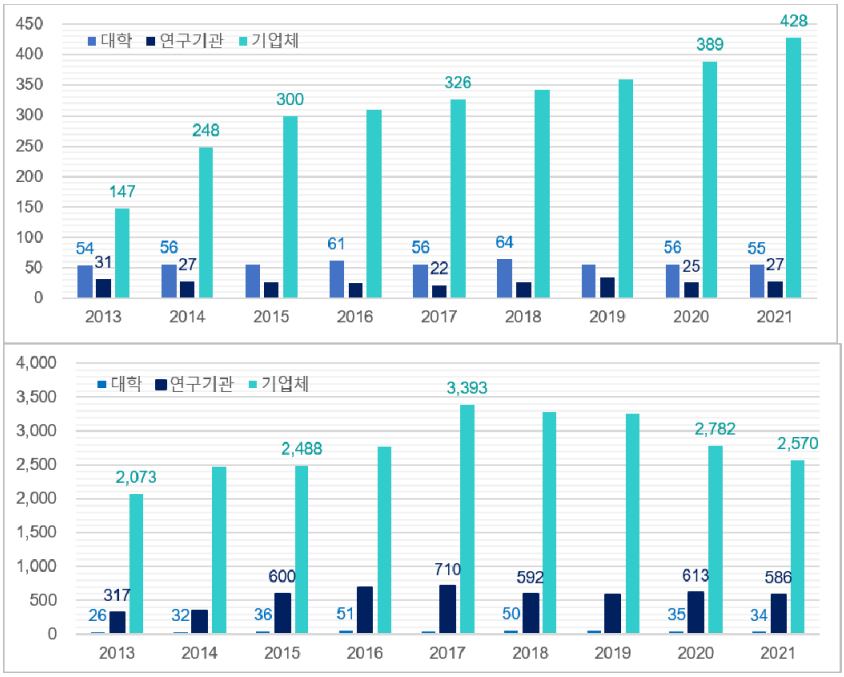
구분	대분류	중분류	정의 예시
우주 기기 제작	위성체 제작		시스템, 위성본체, 탑재체
	발사체 제작		시스템, 서비스시스템, 엔진
	지상 장비	지상국 및 시험시설	위성시험, 위성관제 및 운영
		발사대 및 시험시설	발사대 시스템, 시험설비
	우주 보험		
우주 활용	위성활용 서비스 및 장비	원격탐사	위성지도, GIS
		위성방송통신	위성디지털방송, 셋탑박스, 위성핸드폰
		위성항법	위치정보 활용, DGPS수신기, 네비게이션
	과학연구	지구과학	대기, 해양 등 국내외 위성자료 활용
		우주 및 행성과학	지구주변 및 태양계, 지구형 행성, 목성형 행성, 소행성, 혜성
		천문학	천문관측, 전파천문
	우주탐사	무인우주탐사	
		유인우주탐사	

자료: 과학기술정보통신부, 『2020 우주산업실태조사』, 2020, p.6의 [그림 1-1].

으로 증가하였다. 활동 금액을 우주기기제작과 우주 활용으로 구분해보면, 모든 기관에서 기기제작 보다는 우주활용분야의 활동 금액이 큰 것으로 나타나, 국내 우주산업은 업스트림보다는 다운스트림이 활발한 것을 알 수 있다. 특히 기업체 매출은 우주 활용 분야에서 1조 9,408억원('13)에서 3조 13억원('17)으로 지속적인 매출 증가를 기록하였다(표 2-12 참조).

반면, 기기제작 분야는 연구기관의 연구비와 기업의 매출이 유사한 수준임을 알 수 있는데 연구기관의 연구비가 3,074억원('13), 기업의 매출이 1,330억원('13)으로 발사체와 위성체 등 기기 제작에 있어 공공분야가 주도하는 연구비가 민간기업보다 2배 이상 규모의 우위가 있었다. 이러한 경향은 2017년까지 지속되었으나 2019년 이후 기업체의 기기제작 분야 매출이 연구기관의 연구비를 상회하였다. 앞으로 누리호의 체계종합기술

[그림 2-5] 우주 참여기관 수(상)와 활동 금액(하)



주: 활동 금액은 10억원 기준으로 연구비(대학), 예산(연구기관), 매출(기업)을 종합하였으며 기관 간 중복 수치는 제외함.
자료: 과학기술정보통신부, 「우주산업실태조사」, 각년도, 저자 정리.

<표 2-12> 분야별 우주산업 활동금액

(단위: 십억원)

	대학		연구기관		기업체	
	기기제작	활용	기기제작	활용	기기제작	활용
2013	11.1	14.8	307.4	67.4	133.0	1,940.5
2014	9.6	22.1	269.2	72.3	229.7	2,248.2
2015	16.2	19.4	519.6	80.3	288.5	2,199.1
2016	23.9	27.3	578.5	111.5	350.9	2,428.3
2017	11.6	30.6	566.2	143.7	379.9	3,013.2
2018	13.7	35.8	473.1	119.0	453.0	2,899.8
2019	22.9	24.3	453.0	131.9	641.0	2,620.0
2020	7.7	27.0	520.0	93.0	774.8	2,007.0
2021	7.2	26.4	439.4	146.7	657.7	1,912.0

자료: 과학기술정보통신부, 「우주산업실태조사」, 각년도, 저자 정리.

에 대한 민간 이전이 예정되어 있기 때문에 기기제작 분야에서도 기업체 매출이 증가할 것으로 예상된다.[33]

대학의 경우 기기제작과 활용 분야의 연구비가 2013년에 111억원과 148억원으로 유사한 수준이었으나 2021년 현재 72억원, 264억원으로 큰 격차가 발생하고 있다. 이는 위성 활용 및 서비스 분야의 연구비가 증대된 것과 관련 있다(부표 참조).

기업체 매출을 세부적으로 살펴보면, 분야별로 격차가 큰 것을 관찰할 수 있다. 특히 우주활용분야에서는 위성 활용 및 장비 서비스를 제외하고는 기업체 매출이 미미하다. 우주탐사는 2017년 44억원의 매출을 기록한 이래 아직까지 10억원을 넘는 성과는 보이지 못하고 있고, 과학연구의 경우 대학과 연구소를 중심으로 주로 수행되기 때문에 매출액이 50억원 미만으로 나타났다. 반면에 위성활용서비스 및 장비 매출은 1조 9,367억원('13)에서 2조 6,185억원('19)으로 꾸준히 증가하였는데, 전 분야를 아울러 가장 높은 수준이다. 이는 국내 기업들이 위성활용분야에 경쟁력이 있다는 의미이면서 위성 활용을 제외하고는 기업의 성과가 미흡하다는 의미로도 해석할 수 있다.

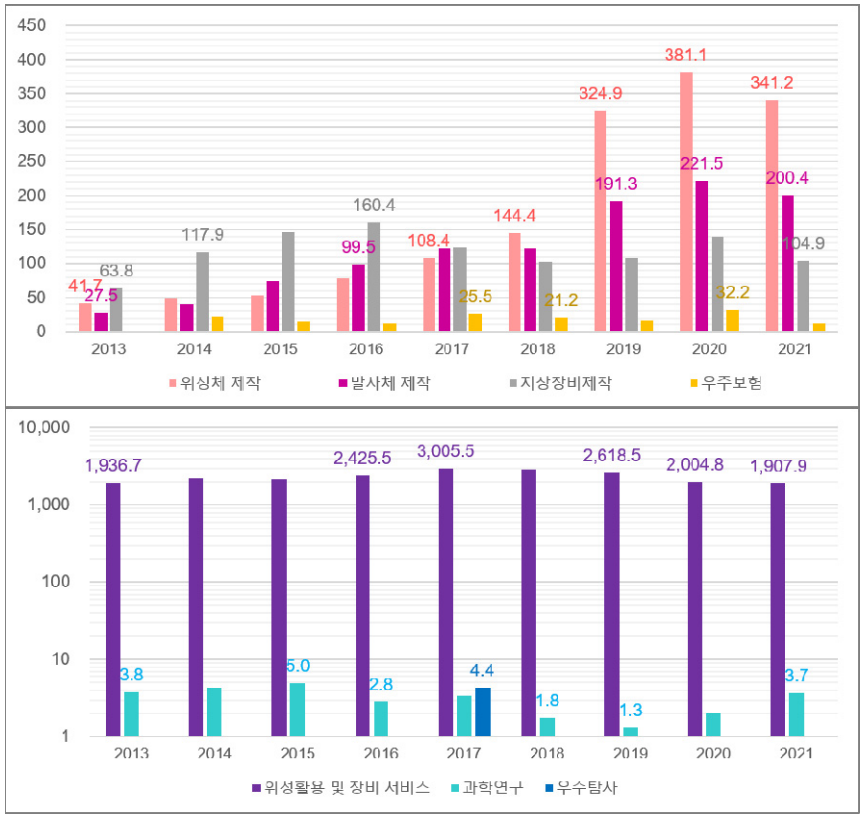
우주기기제작 분야에서는 2013~16년 기간 중 지상장비제작에서 가장 높은 매출이 발생했다. 그러나 이후 1,604억원('16) 수준에서 1,049억원('21)으로 매출이 감소하였는데 이는 한국이 본격적으로 발사체 및 위성체 개발에 역량을 집중한 시기와 맞물린다. 위성체 개발 매출은 1,444억원('18)에서 3,811억원('20)으로 크게 증가하였고, 발사체 제작 매출은 꾸준히 증가하여 2,004억원('21)을 기록했다.

이처럼 위성 활용과 위성 제작 등 위성과 관련된 분야들이 두각을 보이고 있는 것은 최근 글로벌 시장에서 소형 위성제작과 활용이 이슈가 되어 관련 분야의 기업활동이 활발해지고 있기 때문이다. 국내에서도 쎄트렉아이(주)가 창업한 이후('99. 12) 컨텍, 나노스페이스테크놀로지, SIIS 등 위성제작과 활용을 위한 스타트업이 빠르게 성장하고 있다. 또한

33 『동아사이언스』(2022. 10. 12).

[그림 2-6] 기업체 분야별 매출액: 우주기기제작(上), 우주활용(下)

(단위: 십억원)



주: 우주활용분야 매출액은 로그 스케일로 표현.
자료: 과학기술정보통신부, 「우주산업실태조사」, 각년도, 저자 정리.

한화에어로스페이스와 같은 업스트림의 발사체 제조 대기업이 위성 활용 영역까지 사업을 확장하고 있어 앞으로도 동 분야의 성장이 예측된다.

나. 고용 및 투자

국내 우주산업이 규모 측면에서 눈에 띄는 성장을 보여준 것과 마찬가지로 고용에서도 꾸준한 증가 추이를 확인할 수 있다. 또한 참여기관수와 활동 금액과 마찬가지로 공공분야보다는 민간분야에서 더 많은 고용

창출이 나타나고 있어, 최근 국내 우주산업의 성장은 민간기업의 영향이 큰 것을 알 수 있다. 구체적으로, 기업체 고용은 3,450명('13)에서 2021년에7,317명('21)으로 2.1배 증가하였는데, 동 기간 연구기관은 904명('13)에서 1,305명('21)으로 1.4배, 대학은 969명('13)에서 1,175명('21)으로 1.2배 증가하였다(그림 2-7 참조). 특히 2021년에는 코로나19 팬데믹에도 불구하고 민간 기업을 중심으로 고용이 크게 증가하였다.

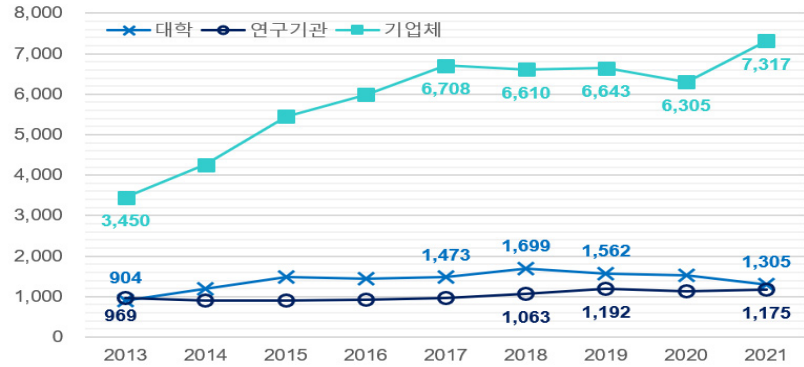
[그림 2-8]은 기업체와 연구기관의 전공별 인력 비중과 고학력자 인력 비중을 나타낸 것이다. 고학력자 비중은 석박사 인력 비중으로 계산하였다. 연구기관은 모든 기간 응답자의 88% 이상이 석사 혹은 박사 인력이고 그 추이가 꾸준한 것으로 나타났다(부표 2-4 참조). 기업체의 경우 석박사 인력 비중이 2016년 이후 20~25%인 것으로 나타났으며 이를 통해 우주 분야가 첨단기술 영역으로 고학력 전문인력의 수요가 매우 높은 것을 알 수 있다. 이와 비교했을 때 12대 주요 산업의 고학력 인력 비중은 평균 8%에 불과하였다.[34]

전공별 고용 비중은 기업체와 연구기관에서 매우 다르게 나타났으나, 공통적으로 전자전기 및 IT 공학 전공인력의 비중이 높게 나타났다. 특히 기업체에서는 2017년을 제외하면 40% 이상의 인력이 전자전기 및 IT 공학 전공자였으며 조사 기간 내에 그 추이가 안정적이었다. 인상적인 것은 공학 외 전공자 비중이 19.1%('13), 17.5%('21)로 두 번째로 높다는 것이다. 반면, 우주공학 전공자는 2.0%('13)에서 5.2%('21) 증가하는 데 그쳤다. 연구기관에서는 전자전기뿐 아니라 자연과학, 우주공학, 기계 및 재료공학 등 공학 분야 전공자들이 고르게 분포하고 있다. 우주공학 전공자의 경우 19.2%('13), 22.2%('16), 18.6%('21) 등 20% 내외에서 안정적인 고용 비중을 보여주고 있고, 전자전기 및 IT공학 비중도 26.7%('13), 29.7%('15), 28.6('21) 등 20% 후반대에서 안정적이다. 기업체와 달리 공학 외 전공 비중은 6.4%('13), 1.9%('16), 4.9%('21)로 가장 낮은 수준인

---

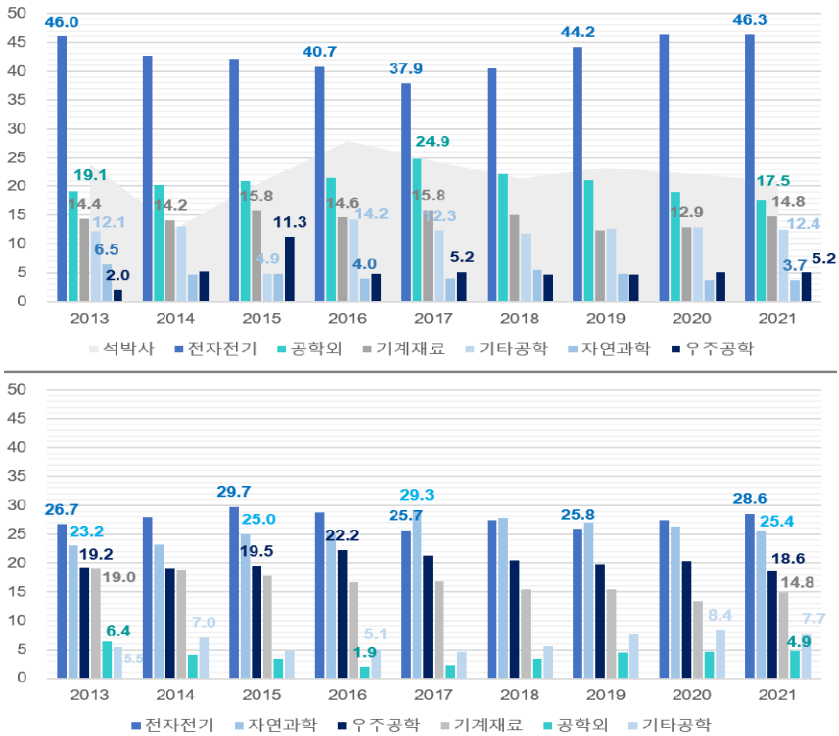
34 산업통상자원부・한국산업기술진흥원(2021)의 조사 결과에 따르면 기계, 디스플레이, 바이오 등 12대 주력산업의 학력별 고용 비중은 2020년 기준으로 고졸(43.9%), 전문대졸(17.6%), 대졸(30.6%), 대학원졸(8.0%) 인 것으로 나타난다.

[그림 2-7] 참여 기관 유형별 고용 현황



자료: 과학기술정보통신부, 「우주산업실태조사」, 각년도, 저자 정리.

[그림 2-8] 전공별 인력 비중:기업체(上), 연구기관(下)



주: 기업체 석박사 인력 비중은 회색 음영으로 표시함. 연구기관은 석박사 인력 비중이 모든 기간에서 88%를 상회함에 따라 표시하지 않음. 세부 지표는 <부표> 참조.
자료: 과학기술정보통신부, 「우주산업실태조사」, 각년도, 저자 정리.

것으로 나타났다.

인적자본 투자가 증가한 것과 마찬가지로 국내 우주산업의 총투자액도 1,509억원('13)에서 2,648억원('21)으로 분석 기간 중에 약 1.7배 증가하였다. 우주분야에서의 투자는 주로 연구개발과 시설투자를 중심으로 이루어지고 있으며 교육 훈련 및 기타 투자는 30억원 이하로 저조하다. 연구개발비는 2,177억원('17)을 기록한 이후 1,717억원('18)으로 감소하였다가 현재 1,805억원('21)으로 나타났다.

각 기관의 활동비용 중 연구개발투자비의 비중을 비교해 보면, 기업체의 경우 3.6%('13)에서 5.9%('21)로 점진적으로 증가한 반면에 연구기관과 대학은 2014년에 각각 12.4%, 23.1%로 높은 수준을 일시적으로 기록하였다가 감소하여 2021년 4.6%, 3.3%로 나타났다. 이는 R&D 상위 1,000개 기업 중 제조업에 속한 기업들과 유사한 수준이며, 우주산업이 속한 산업분류인 '기타운송장비제조업'의 2.31%('22)보다 높은 수준이다.[35]

우주 산업의 경우 발사체의 발사를 위해 연구개발 투자와 더불어 과감한 시설투자도 필요하다. <표 2-13>에 기재된 투자 현황에 따르면 2015년에는 연구개발투자의 2.5배에 달하는 3,048억원이 투자되기도 하였다. 백기태(2022)에서는 기업의 연구개발투자액은 정부예산이 R&D협약 형태로 기업체에 지출되는 형식이기 때문에 실질적인 자본 투자 규모는 시설투자비로 판단해야 한다고 주장하였으며, 시설투자비를 기준으로 볼 때 국내 기업체의 자본 투자를 매우 낮은 수준으로 평가한 바 있다.[36]

[그림 2-10]은 참여기관별로 연구개발투자와 설비투자의 비중을 비교한 결과이다. 기업체는 경기 상황에 따라 등락은 있으나 2015년을 제외

---

35 한국산업기술진흥원(2022), 한국산업기술진흥원(2023)의 분석 결과에 따르면 R&D 투자액 상위 1,000대 기업에 대한 매출액 대비 투자 비중이 제조업은 평균 5.04%('21), 4.69%('22)인 것으로 나타났으며 전자부품과 의료물질의 경우 각각 8.75%('22), 8.84%('22)의 매우 높은 수준으로 나타난다.

36 백기태(2022)는 우주산업실태조사 결과를 면밀히 분석하여 2020년 총 378개의 기업체의 우주분야 시설투자 규모의 합계가 연구기관의 시설투자규모 합계와 약 260억원밖에 차이가 나지 않음을 지적하였다. 또한 25개 연구기관의 시설투자도 실제로는 한국항공우주연구원에서 집행된 것이 대부분이라고 설명하였다.

<표 2-13> 국내 우주산업 투자 현황

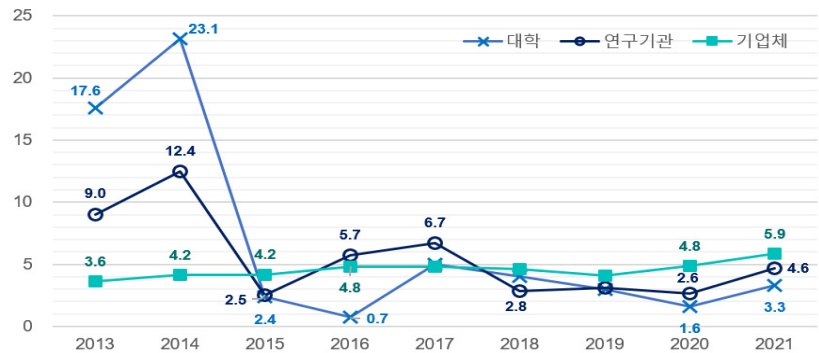
(단위: 십억원)

구 분	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
연구개발	117.1	181.4	122.1	180.2	217.7	171.7	154.7	152.1	180.5
시설투자	32.6	179.5	304.8	125.0	128.4	62.6	158.9	134.5	83.5
교육·기타	1.2	2.4	1.5	1.5	2.4	2.8	1.8	2.6	0.8
합 계	150.9	363.3	428.3	306.7	348.5	237.1	315.4	289.2	264.8

자료: 과학기술정보통신부, 「우주산업실태조사」, 각년도, 저자 정리.

[그림 2-9] 기관별 연구개발투자 비중

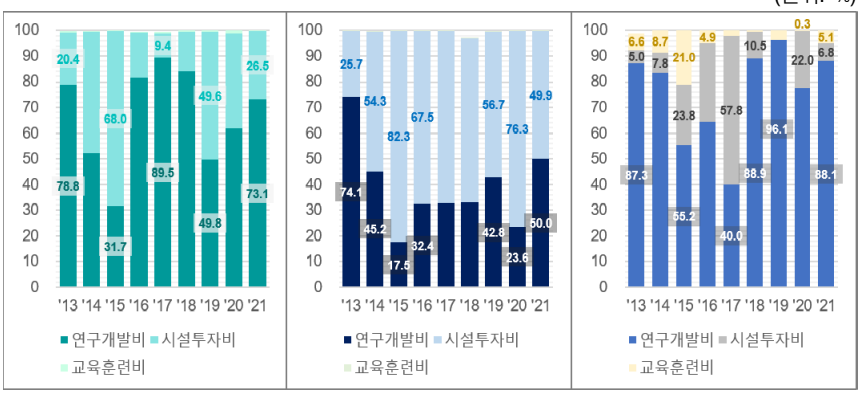
(단위: %)



주: 기업은 매출액 대비 투자비, 연구기관은 연구비 대비, 대학은 예산 대비로 각각 계산.
자료: 과학기술정보통신부, 「우주산업실태조사」 각년도, 저자 계산.

[그림 2-10] 연구개발비와 시설투자비 비중: 기업체(左), 연구기관(中), 대학(右)

(단위: %)



자료: 과학기술정보통신부, 「우주산업실태조사」, 각년도, 저자 계산.

하면 89.5%('17), 73.1%('21) 등 전체 투자 중 연구개발투자 비중이 가장 높고 시설투자는 49.6%('19), 26.5%('21) 등 연구개발투자 비중을 크게 하회하고 있다. 반면에 연구기관은 74.1%('13), 56.7%('19), 50.0%('21) 등 연구개발 투자만큼 시설투자의 비중도 높은 것으로 나타나고 있다. 특히 2015년에는 시설투자 비중이 82.3%를 기록하기도 하였다. 대학의 경우 88.9%('18), 96.1%('19), 88.1%('21) 등 최근 시설투자보다는 연구개발 투자의 비중이 투자비의 대부분을 차지하고 있으며 다른 기관과는 달리 교육훈련비의 비중이 6.6%('13), 21.1%('15) 5.1%('21) 등 시설투자와 유사한 수준인 것으로 나타났다.

다. 혁신 성과

국내 우주산업의 성장은 기술개발과 지식재산권 증가 등의 혁신성과로 나타나고 있다. 기술개발 성과는 위성과 발사체 개발 등 우주기기제작기술의 자립이 주를 이룬다. 위성 분야는 최초의 국적 위성인 <우리별 1호>가 발사('92. 8)된 이래 최근 <차세대 중형위성> 발사('21. 3)에 성공하였다.[37] 발사체 분야는 러시아와의 기술협력으로 최초 우주발사체인 <나로호>를 3차 발사('13. 1)까지 성공시켰고, 최근 독자기술로 개발한 3단형 발사체 <누리호>의 3차 발사('23. 5)에 성공한 바 있다.[38] 또한 <다누리호> 개발에 성공하여('22. 8) 우주탐사까지 영역을 확장하였다.[39]

그러나 상기 성과는 주로 한국항공우주연구원, 인공위성연구소 등 정부재원을 투입한 공공분야를 중심으로 이루어졌다. 민간기업으로는 한화에어로스페이스와 KAI 등 일부 대기업이 참여하였다. 아직까지 한국의 우주기술개발은 정부 출연 연구기관이 선진국과의 기술협력을 통해 독자

---

37 차세대 중형위성은 총 172개의 핵심기술 및 품목 중 91.3%에 해당하는 157개를 국산화한 성과(한국지식재산연구원, 2022) 누리호는 독자적인 발사체 기술을 확보한 사례이다.

38 누리호는 1.5톤급 실용위성을 지구 상공 600~800㎞ 태양동기궤도에 직접 투입할 수 있어 독자적인 우주운송능력을 확보한 것으로 평가된다.

39 러시아, 미국, 일본, 유럽, 중국, 인도에 이어 7번째로 달 탐사선을 성공시킨 나라로 기록되었다.

<표 2-14> 주요 우주기술 개발 성과

분 야	주요 성과	특 징
위성	- 우리별 1호 발사('92. 8). - 우리별 3호 발사('99. 5). - 과학기술위성 1호 발사('03. 9). - 나로과학위성 발사(13. 1). - 차세대 소형위성 1호 발사('18. 12). - 차세대 중형위성 1호 발사('21. 3).	최초의 국적 위성 독자 위성 모델 국내 최초 우주관측 위성 주요 위성 기술 국산화
발사체	- 과학로켓 KSR-Ⅰ('93. 6). - 과학로켓 KSR-Ⅱ('98. 6). - 과학로켓 KSR-Ⅲ('02. 11). - 나로호 3차 KSLV-Ⅰ('13. 1). - 누리호 시험 발사('18). - 누리호 KSLV-Ⅱ 3차 발사('23. 5).	1단 고체엔진 국산 발사체 2단 고체엔진 국산 발사체 액체추진 발사체 최초 우주발사체(러시아와 협력) 자체개발 우주발사체(1단형) 자체개발 우주발사체(3단형)
탐사	- 다누리호 KPLO 발사('22. 8).	국내 최초 달 궤도선

자료: 한국항공우주연구원 홈페이지(https://www.kari.re.kr/kor/sub01_12.do/ 접속일: 2023. 12. 5).

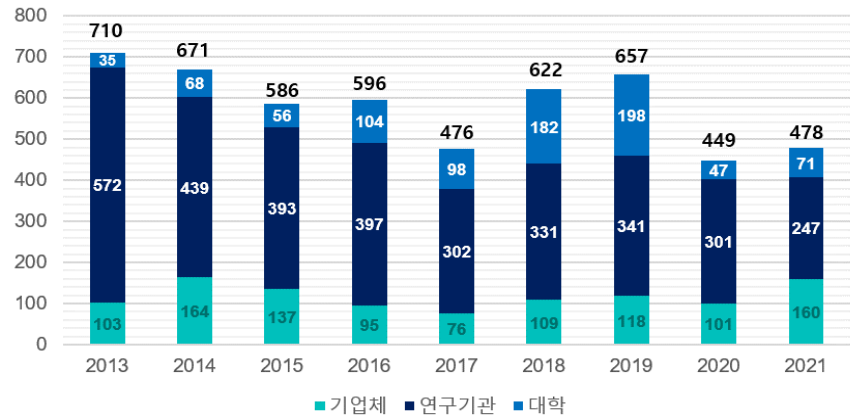
기술을 개발한 후 이를 민간기업에 기술이전하는 방식으로 진행되고 있는데, 기술자립 이후 기술의 성숙과 확산을 위해서는 민간 주도의 기술 개발이 더욱 활발해져야 할 것이다.

반면, 특허의 출원과 등록을 중심으로 본 지식재산권 성과는 기업수나 매출액의 증가와는 달리 아직까지 뚜렷한 증가세가 확인되지 않는다. [그림 2-11]에 제시된 바와 같이 신규 특허 등록 및 출원수는 710건('13)에서 476건('17)으로 감소한 이후 657건('19)으로 회복되었으나 코로나 팬데믹 이후 478건('21) 수준을 기록하고 있다. 기관별로 보면 연구기관의 특허는 572건('13)에서 247건('21)로 꾸준히 감소한 반면, 기업 특허는 코로나19 팬데믹에도 불구하고 160건('21)으로 증가했다. 대학의 특허는 331건('18), 198건('19)을 제외하면 평균 70건 정도의 낮은 수준인데, 이는 특허제도 활용의 유인이 다른 기관보다 적기 때문인 것으로 판단된다.[40]

40 대학의 경우 개발기술의 상업화보다는 연구논문이나 학회 발표 등의 연구실적을 중시하는 경향이 강할 뿐만 아니라 연구 성과를 관리하고 산업화할 수 있는 전문화된 조직 및 인력이 매우 부족한 상태이다(조현래, 2005).

[그림 2-11] 신규 특허 출원 및 등록 현황

(단위: 건)



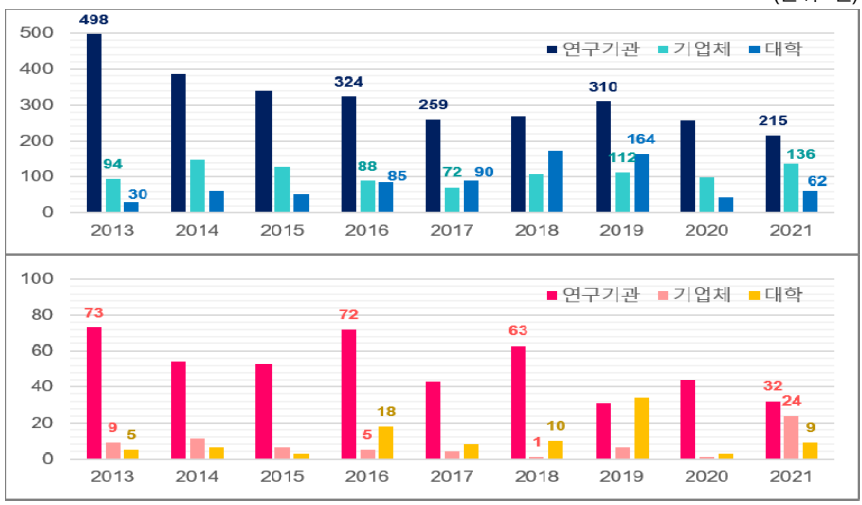
자료: 과학기술정보통신부, 「우주산업실태조사」, 각년도, 저자 정리.

국내·외 특허 현황을 파악해 보면 국외 특허보다는 국내 특허의 출원과 등록이 현저히 높은 것으로 나타났다. 모든 기간 국내특허와 국외특허 모두 연구기관이 가장 높은 수준의 출원과 등록 건수를 나타내고 있어 앞서 살펴본 바와 마찬가지로 공공분야에서 기술개발을 주도하고 있음을 알 수 있다. 그러나 이러한 격차는 점차 감소하는 추세로 국내 특허를 예로 살펴보면 연구기관의 특허는 498건('13)에서 215건('21)으로 감소한 반면, 기업체의 특허는 94건('13)에서 136건('21)으로 증가하였다.

특허제도는 속지주의에 따라 각 국가의 특허권은 해당 국가에 특허를 신청해야만 보호받을 수 있다. 해외 특허의 출원과 등록은 글로벌시장에서의 제품 판매와 마케팅을 위해 필요한 조치로, 한국 기업의 해외 특허 등록과 출원은 9건('13), 5건('16), 1건('18) 등 매우 저조하였고 최근 24건('21)으로 증가하였으나 아직까지 매우 낮은 수준이다.

[그림 2-12] 기관 유형별 특허 출원 및 등록 현황: 국내 특허(上), 국외 특허(下)

(단위: 건)



자료: 과학기술정보통신부, 「우주산업실태조사」 각년도, 저자 정리.

라. 스타트업의 성장

최근 전 세계적인 뉴스페이스 전환과 맞물려 한국에서도 민간 우주기업의 성장이 두드러지게 나타나고 있다. 한화에어로스페이스와 KAI, LIG넥스원 등 그동안 국방안보기술 분야에서 활약한 대기업뿐 아니라 다양한 스타트업들의 활약이 활발해졌고, 최근 기술 상장 및 M&A에 성공한 사례도 나타나고 있다.[41]

<표 2-15>는 주요 기업의 사업영역을 가치사슬에 따라 분류한 것이다. 한화에어로스페이스, 한국항공우주, LIG넥스원 등의 대기업은 주로 업스트림의 대형 발사체와 지상장비 등에 주력하고 있다. 반면, 중소기업과 스타트업들은 소형 우주기기 제조를 중심으로 위성활용과 탐사 등 다운스트림에서도 활동하는 것으로 나타났다. 업스트림에서 우주기기를 제작

41 ㈜쎄트렉아이는 자회사인 ㈜SIIS와 함께 벤처투자를 받던 스타트업에서 IPO에 성공하였고 2021년 대기업인 한화에어로스페이스에 인수되었다. ㈜컨텍은 기술특례상장으로 2023년에 IPO에 성공한 사례이다.

<표 2-15> 국내 주요 우주 기업의 벨류 체인 현황

기업명	구분	업스트림			다운스트림	
		위성	발사체	지상장비	위성활용	과학연구
한화에어로스페이스	대기업	●	●	●	○	
한화시스템	대기업	●			●	
한국항공우주(KAI)	대기업	●	●			
LIG넥스원	대기업		●	●		
KT Sat	대기업				●	
㈜컨 텍	중소기업			●	○	
㈜쎄트렉아이	중소기업	●		○	○	
㈜에스아이아이에스	중소기업	○			●	○
나라스페이스	스타트업	●			○	○
지티엘	스타트업			●	○	
우나스텔라	스타트업		●			○
페리지에어로스페이스	스타트업		●	○		
㈜이노스페이스	스타트업		●	○		○

주: ●는 주력 사업, ○는 직간접적으로 연관된 사업을 의미함.
자료: 신상우(2021)의 <표 1>과 각 기업 홈페이지를 참고하여 저자 정리.

하더라도 스타트업은 초소형 위성이나, 군집 위성, 영상 분석 등에 주력한다. 페리지에어로스페이스는 초소형 인공위성 발사를 위한 발사체 로켓을 개발하고 있고, 우나스텔라의 유인 발사체는 총 승객 인원 6명을 목표로 한다. 이노스페이스의 경우도 소형 위성발사체와 소형 위성 발사를 위한 연관 서비스를 개발 중이다(표 2-16 참조). 국내 우주개발 역사에 비추어 볼 때 최근 스타트업의 활발한 투자유치와 발사 성공, 시험 시도 등은 매우 긍정적으로 평가할 수 있다.

적극적인 투자유치와 더불어 국내 스타트업들이 최근 뚜렷한 기술개발 성과를 보이고 있다. 이노스페이스가 <한빛-TLV>의 시험발사에 성공했고('23. 3), 나라스페이스테크놀로지의 초소형 위성은 <옵저버>는 팰컨9에 탑재되어 발사에 성공했다('23. 10). 페리지에어로스페이스의 <블루웨일 3.0>은 정지비행 후 기체 수직 이착륙시험에 성공하였다('23. 11). 루미르와 져스텍, 카이로스페이스 등에서 개발한 소형 위성은 3차 누리호 발사에 탑재되기도 하였다('23. 5).

<표 2-16> 국내 주요 우주 스타트업의 주요사업, 투자 및 고용 현황

기업명	주요 사업 및 특징
㈜컨 텍	- (주요 사업) 위성 지상국, 위성관제시스템, 영상 분석 - (대표자 및 설립) 이성희, '14. 12. - (투자) 총투자 1,204억원(IPO 완료. '23. 11) - (자본금) 71억원('23. 11) - (고용 및 소재지) 93명 / 대전
나라스페이스테크놀로지	- (주요 사업) 소형위성제조, 위성데이터 분석 - (대표자 및 설립) 박재필, '15. 3. - (투자) 총투자 135억원(Series A) - (자본금) 1억원('22. 4) - (고용 및 소재지) 45명 / 부산
㈜에스아이아이에스	- (주요 사업) 위성영상 분석/판매 - (대표자 및 설립) 박성동, '14. 4. - (투자) 총투자 20억원(Series A) - (자본금) 3억원('19. 11) - (고용 및 소재지) 58명 / 대전
지티엘	- (주요 사업) 위성추적 안테나시스템 및 운영 - (대표자 및 설립) 황건호, '21. 4. - (투자) 총투자 35억원(Series A) - (자본금) 0.5억원('23. 8) - (고용 및 소재지) 12명 / 경남 창원
㈜쎄트렉아이	- (주요 사업) 중형 위성 제조 - (대표자 및 설립) 유상근, '99. 12. - (투자) 총투자 1,190억원(M&A: 한화에어로스페이스) - (자본금) 54억원('23. 12) - (고용 및 소재지) 381명 / 대전
우나스텔라	- (주요 사업) 유인 발사체 제조 - (대표자 및 설립) 박재홍, '22. 2. - (투자) 총투자 55억원(Pre A) - (자본금) 1억원('23. 9) - (고용 및 소재지) 14명 / 서울
페리지에어로스페이스	- (주요 사업) 소형 발사체 제조 - (대표자 및 설립) 신동윤, '18. 6. - (투자) 총투자 567억원(Series C) - (자본금) 1억원('23. 10) - (고용 및 소재지) 70명 / 대전
㈜이노스페이스	- (주요 사업) 소형 발사체 제조 - (대표자 및 설립) 김수종, '17. 9. - (투자) 총투자 345억원(Series C) - (자본금) 80억원('23. 7) - (고용 및 소재지) 118명 / 세종

자료: The VC 홈페이지 저자 정리(https://thevc.kr/, 접속일 2023. 12. 7).

글로벌 시장에서 우주 스타트업 생태계는 2가지 트렌드로 요약할 수 있는데 ① 자금의 원활한 조달을 위해 기업인수목적법인(SPAC)을 적극적으로 활용하고 있는 점 ② 본격적인 사업화 단계에서는 수직계열화를 통해 사업을 확장한다는 점이다.[42] 미국의 대표적인 우주 스타트업인 스페이스X는 <펠컨 9>과 같은 발사체 제조 외에도 국제우주정거장 건설과 우주수송기 개발까지 확장한 데 이어 최근에는 <스타링크> 구축을 통해 통신위성 개발과 함께 위성 데이터 서비스까지 우주산업의 전 영역에서 활발한 활동을 추구하고 있다. 이러한 트렌드와 비교할 때 국내 스타트업은 기술상장에 성공한 일부 사례를 제외하고는 수익화에 성공한 사례는 많지 않고 기술개발을 통해 상업발사시장에 도전을 시작한 초기 단계로 볼 수 있다.[43]

3. 국내 우주산업의 국제 경쟁력 비교

가. 정부 투자 규모

앞서 살펴본 한국의 우주산업 현황을 보면 매출과 고용, 투자 등에서 최근 10년 내에 상당한 성장이 있었음을 살펴볼 수 있다. 그러나 국제적인 수준에서 볼 때 한국 우주산업은 아직 영세한 수준이다. [그림 2-13]은 2004년 이후 주요 국가별 우주 예산의 총액을 비교한 것이다. 미국은 전 세계 국가 중 가장 높은 수준의 예산을 투입하고 있고 그 수준은 3,460억달러('04)에서 5,980억달러('21)로 꾸준히 증가하였다. 프랑스, 이탈리아, 러시아 등의 국가들도 10억~100억달러 규모의 우주예산을 운용중이며 코로나 팬데믹 전까지 지속적으로 예산이 증가했다. 인상적인 점은 중국의 우주예산 증가가 매우 빠르게 진행되었다는 점이다. 중국의 경우 10억달러('04)에 불과했던 예산이 161억달러('21)까지 16배 이상의

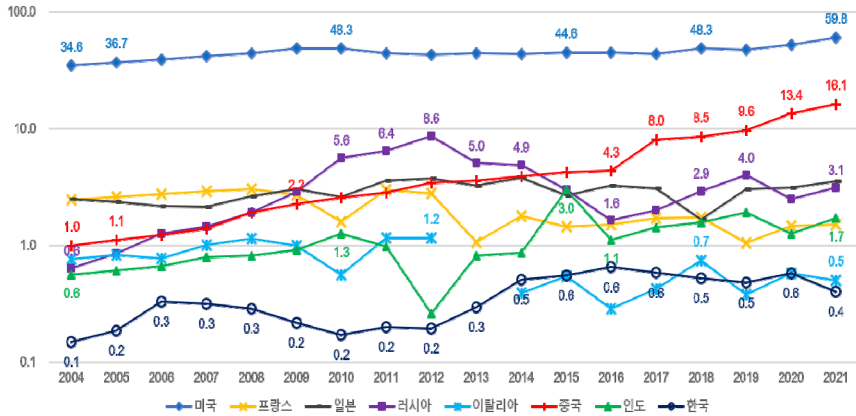
---

42 SPAC은 발행 주식을 공모한 후 다른 기업과 합병을 사업목적으로 삼는 명목상 회사로, 복잡한 IPO과정을 거치지 않고도 자금을 조달할 수 있는 유연한 투자 방법으로 평가된다.

43 (https://brunch.co.kr/@jejucenter/371/, 접속일: 2023. 12. 8).

[그림 2-13] 국가별 우주예산 비교

(단위: 십억 달러)



자료: 우주산업실태조사, 각년도 자료 저자 정리.

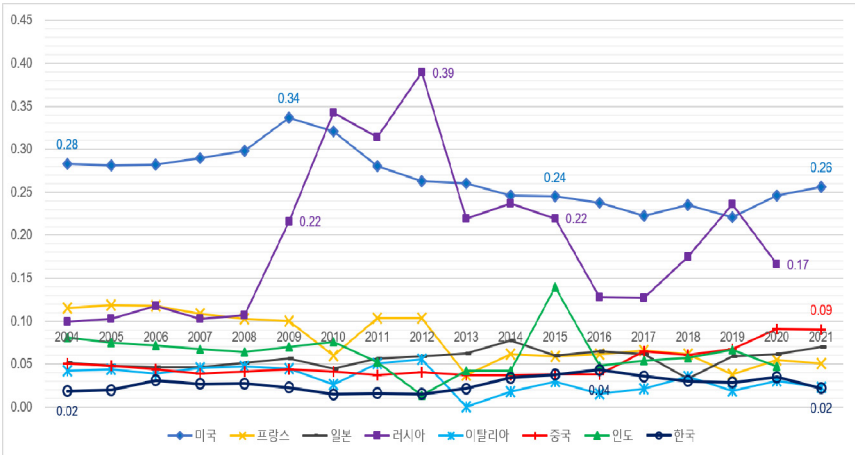
우주 예산이 증가하였으며 2008년 글로벌 금융위기나 2019~20년 기간 중의 코로나19 펜데믹에도 불구하고 그 상승세가 꾸준히 유지되었다.

한국의 경우 2004년에 1억달러에서 2020년 6억달러로 예산이 증가되기는 하였으나 단 한 번도 10억달러 이상의 투자를 시행한 적이 없어 이탈리아를 제외하면 선도 국가들과는 큰 투자 격차를 보이고 있다.

국가별 경제규모를 고려하여 GDP 대비 우주예산 비율을 비교한 결과는 [그림 2-14]와 같다. 비교 대상 국가들 중 유일하게 한국과 유사한 수준의 우주예산을 집행하던 이탈리아를 제외하면 한국의 GDP 대비 우주예산 비율은 가장 낮은 수준이다. 미국은 절대적인 예산 수준뿐 아니라 GDP 대비 0.2% 이상의 예산을 지속적으로 우주분야에 할당하는 것으로 나타났다. 글로벌 금융위기 이후 러시아가 재정난에도 불구하고 우주예산을 감액하지 않으면서 GDP 대비 우주예산 비중이 0.39까지 증가하기도 하였으나, 이 시기를 제외하면 러시아도 0.1% 이상의 우주 예산을 꾸준히 지출하였다. 중국은 예산총액은 뚜렷한 증가세를 보인 데 반해 GDP 대비 비율은 0.05%('04)에서 0.09%('21)로 완만하게 증가했다. 그러나 이러한 분석 결과를 모두 감안하더라도 한국의 GDP 대비 우주예산 비율은 0.02%('21)로 2004년 수준에서 크게 달라지지 않았다. 분야별로

[그림 2-14] GDP 대비 우주예산 비중

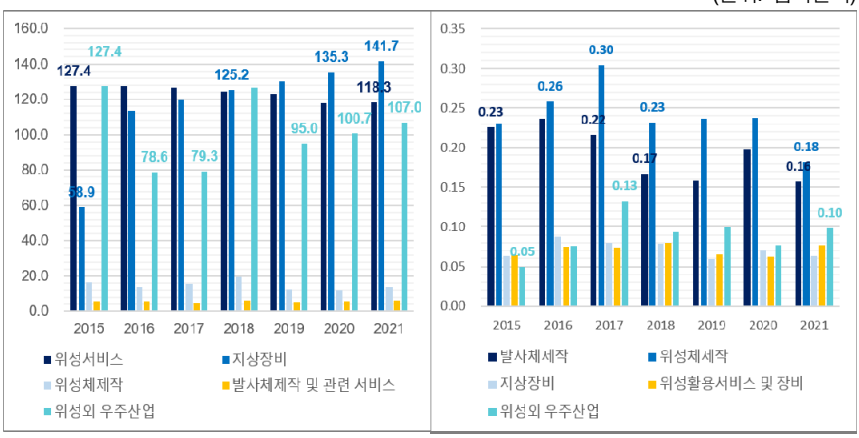
(단위: %)



자료: 우주산업실태조사 각년도 자료 저자 정리.

[그림 2-15] 분야별 우주예산 비교: 전 세계(左), 한국(右)

(단위: 십억달러)



자료: 우주산업실태조사 각년도 자료 저자 정리.

우주예산 수준을 비교하여 보면, 글로벌 시장의 정부 투자 패턴과 한국의 우주예산 분포가 상이함을 확인할 수 있다. 글로벌 시장에서의 우주예산은 위성서비스 분야가 1,274억달러('15)로 가장 높았다가 1,183억달러('21)로 조금 감소하였고, 대신 지상장비 분야의 투자가 389억달러('15)

에서 1,417억달러('21)로 크게 증가하였다. 더불어 위성 외 우주산업분야의 투자도 1,274억달러('15)에서 1,070억달러('21)로 조금 감소하기는 했지만 높은 수준을 유지하고 있다. 반면, 발사체 제작 관련 투자는 비교대상 분야 중 가장 낮은 수준을 나타낸다.

한국의 경우 위성체 제작 분야에서 정부예산이 2억 6천만달러('16)에서 1억 8천만달러('21)로 가장 높은 수준이고, 발사체 제작 분야도 1억 6천만달러('21)로 아직까지는 높은 비중을 차지하고 있다. 반면, 위성 외 우주산업 투자는 위성활용서비스, 지상 장비 등과 유사하게 낮은 수준의 투자 현황을 보인다. 글로벌 시장의 정부투자가 위성 외 우주산업 비중이 발사체 투자 예산보다 높은 것을 감안할 때, 향후 정부 투자는 다운스트림의 시장 성장 가능성도 고려해야 할 것이다.

나. 기술 경쟁력

시장의 성장과 최근의 혁신 성과에도 불구하고 글로벌 기술 경쟁력은 아직 후발 국가 수준에 머무르고 있다. 한국과학기술기획평가원(2022)의 평가에 따르면 2020년 기준 한국의 우주·항공·해양분야 기술 수준은 미국을 100으로 할 때 68.1이며 기술격차가 8.6년으로 측정되었다. 이는 2018년의 65.1과 8.4년보다도 소폭 하락한 수준으로 중국과 일본이 기술 수준을 높이고 격차를 줄인 것과는 대비되는 결과이다.

<표 2-17> 주요국의 우주·항공·해양분야 기술 수준 및 격차 비교

국 가	기술 수준		기술 격차(년)	
	2018	2020	2018	2020
한국	65.1	68.4	8.4	8.6
중국	80.6	81.6	5.3	5.1
일본	83.1	83.5	4.1	3.9
EU	93.2	93.3	1.6	1.8
미국	100.0	100.0	0.0	0.0

자료: 한국과학기술기획평가원, 「2020년 국가 전략기술 기술수준 평가보고서」, 2022.

<표 2-18> 우주항공해양 분야 기술 수준 및 기술격차

	기술 수준		기술 격차(년)	
	2018	2020	2018	2020
우주항공해양 분야 전체	65.1	68.4	8.4	8.6
- 우주발사체 개발 및 운용 기술	60.0	60.0	17.0	18.0
- 우주환경 관측·감시·분석 기술	54.5	55.5	10.0	10.0
- 우주 탐사 및 활용 기술	55.0	56.0	12.0	15.0

자료: 한국과학기술기획평가원, 「2020년 국가 전략기술 기술수준 평가보고서」, 2022.

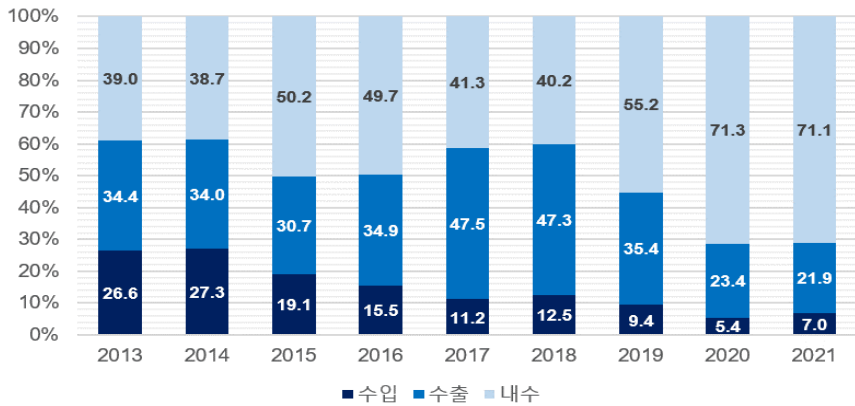
항공을 제외하고 우주 세부 항목만을 살펴보면 기술격차는 더욱 확대된다. 발사체 개발 및 응용 기술은 60.0의 기술 수준이나 18년이라는 큰 기술격차를 보이고 있고, 우주 환경 관측이나 탐사 관련 기술도 미국 대비 55~56 수준으로 10~15년의 기술격차를 가진 것으로 평가되었다.

다. 수출 경쟁력

매출이 발생하는 기업체를 중심으로 수출, 수입, 내수 규모를 구분해 보면 국내 우주 산업이 내수시장을 중심으로 성장하였으며 코로나19 팬데믹 이후 수출실적이 크게 감소하였음을 확인할 수 있다. [그림 2-16]과 <표 2-19>의 결과를 보면 수출은 1조 8,184억원('17)을 달성한 이후 지속적으로 감소하여 6,075억원('21)을 기록한 반면, 내수시장은 꾸준한 증가추이를 유지하여 1조 1,020억원('13)에서 1조 9,665억원('21)로 성장하였다. 특히 2018년까지는 내수시장과 수출시장의 매출 규모가 유사하다.내수시장 비중은 39.0%('13), 50.2%('15), 40.2%('18)를 기록하였고 수출의 매출 비중은 34.4%('13), 47.3%('18)로 증가하였다. 그러나 2019년과 본격적인 코로나19 팬데믹의 영향을 받은 2020년 이후 급격한 수출 감소로 내수 시장의 비중이 71.1%('21)로 크게 증가하였다.

내수 시장에서의 매출 실적을 판매 대상에 따라 구분하여 살펴보면 분야별로 차이가 있음이 나타난다. 기업체 매출을 공공부문과 민간부문으로 구분하여 살펴보면 우주기기제작 분야의 매출은 70% 이상이 공공

[그림 2-16] 기업체 수입, 수출, 내수 비중



주: 우주분야 기업체 매출액과 수입액을 더한 값을 분모로 하여 수입과 수출, 내수를 분자로 한 값을 각각의 비중으로 계산함.
자료: 과학기술정보통신부, 「우주산업실태조사」, 각년도, 저자 계산.

<표 2-19> 기업체의 수입과 수출, 내수 규모

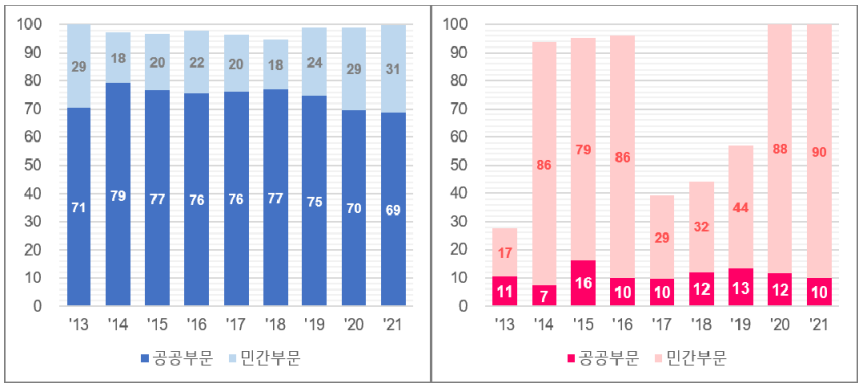
구분	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
수출	971.8	1,159.5	943.5	1,146.6	1,818.4	1,778.0	1,274.4	688.0	607.5
수입	967.8	1,063.3	775.8	632.5	646.0	589.2	383.1	264.3	229.6
내수	1,102.0	1,318.3	1,544.4	1,632.9	1,576.8	1,512.8	1,986.8	2,095.3	1,964.4

자료: 과학기술정보통신부, 「우주산업실태조사」, 각년도, 저자 정리.

부문에서 발생하였다(그림 2-17 참조).[44] 반면, 우주활용 분야는 민간부문 매출 비중의 등락이 있으나 공공부문 매출은 모든 기간에 20%를 하회한다. 특히 코로나19 팬데믹 이후에는 우주활용 분야는 88%('20), 90%('21)로 거의 모든 매출이 민간부문에서 발생했다. 동 시기 우주기기분야도 29%('20), 31%('21)로 민간부문에서의 매출이 증가하였다. 즉, 한국의 우주산업은 내수 시장을 중심으로 성장하였으며, 기기제작 분야는 아직까지 공공분야에 크게 의존하고 있는 것을 알 수 있다.

44 「우주산업실태조사」에서는 기업체 매출을 판매 대상에 따라 정부부처, 공공기관, 민간, 대학, 기타의 5가지로 구분한다. 본 연구에서는 정부부처와 공공기관을 합산하여 공공부문으로 계산한다.

[그림 2-17] 기업체 내수 비중: 기기제작(左), 활용(右)



자료: 과학기술정보통신부, 「우주산업실태조사」 각년도, 저자 계산.

제4절 우주경제 활성화를 위한 정책 방향

1. 주요 우주개발 정책 추진 경과

한국의 본격적인 우주기술개발은 1990년대 과학로켓[45]과 자체위성제작을 위한 정부투자에서 시작한다.[46] 최초의 우주관련 국가 전략은 1996년 4월에 수립된 「우주개발중장기기본계획」으로, 이 시기의 우주개발은 대통령을 위원장으로 하는 「국가과학기술위원회」나 과학기술부총리를 위원장으로 하는 「과학기술관계장관회의」의 여러 안건 중 하나였다.

2005년에 「우주개발진흥법」이 제정되면서 우주기술개발과 관련한 정부 투자를 독립적으로 심의하고 중장기 계획을 결정하는 「국가우주위원회」가 설치되었다.[47] 「국가우주위원회」는 정부의 우주개발 전략의 수립, 심의 및 우주기술 개발과 관련한 활동의 심사와 허가를 담당한다. 이와 더불어 2007년 「제1차 우주개발중장기기본계획」이 수립된 이후 현재까지

45 1990년에 한국항공우주연구원 설립과 함께 한국형 과학관측 로켓(KSR) 제작이 추진되었다(『전자신문』, 2022).

46 1992년 우리별 1호발사, 1999년 다목적 실용위성 1호 발사 등.

47 김종범(2018)에서는 우주개발진흥법의 제정을 한국 우주개발체계의 정점으로 평가한다.

<표 2-20> 한국의 주요 우주개발 관련 정책

정 책	주요 내용
우주개발진흥법 제정	- 우주개발의 체계적 진흥을 위한 법안으로 제정('05) - 국가우주위원회 위원장을 대통령으로 격상('24. 1. 예정)
국가우주위원회 설치	- 우주개발진흥기본계획과 위성정보활용종합계획 등 정부의 우주개발 계획을 심의하고, 우주발사 허가에 관한 사항을 심의 ('06~, '23. 12 현재 22회 개최)
「우주개발진흥기본계획」	- 우주개발의 비전과 성과목표, 주요 전략 및 정책과제 제시 - 제1차('07) 이후 5년마다 수립 → 최근 제4차 계획 수립('22)
「위성정보활용종합계획」	- 위성정보서비스 제공을 위한 기술개발과 제도 및 인프라 선진화 - 제1차 계획('14) 이후 5년마다 수립 → 2차 계획 수립 완료('19)
「한국형발사체* 개발계획」	- 한국의 자력으로 실용 우주발사체를 개발하기 위한 계획('00) - KSLV-I(나로호), KSLV-II(누리호) 등이 개발 완료 → 차세대 발사체인 KSLV-III의 개발 진행 중
「미래우주경제로드맵」	- 우주항공청설립과 6대 우주전략을 제시('22) - 5년 내 달 탐사용 발사체 엔진 개발, 달('32)·화성('45) 착륙 목표

주: KSLV(Korea Space Launch Vehicle, 한국형발사체).
자료: 저자 정리.

5년 주기의 기본계획이 발표되고 있으며 「위성정보활용종합계획」, 「한국형 발사체 개발계획」 등의 세부전략을 추진 중이다(표 2-20 참조).

가. 「우주개발진흥기본계획」의 수립

「우주개발진흥기본계획」은 한국 우주정책의 가장 기본이 되는 계획으로 「국가우주위원회」의 심의를 거쳐 5년마다 수립하며, 이를 바탕으로 정부의 투자방향이 결정된다. 「제4차 우주개발기본계획」('22. 12)에서는 앞으로의 정책 패러다임을 '우주개발 2.0'으로 전환하겠다고 발표하였는데, 정부투자의 범위를 위성 및 발사체 기술 개발 중심에서 탐사와 과학 영역까지 확장하고 민간의 우주참여를 확대하는 것을 골자로 한다.

정부는 이를 위해 2045년에 우주분야에서 글로벌 강국을 실현하겠다는 비전과 더불어 3가지 성과 목표와 5가지 추진 전략을 제시하였다. 구체적으로 탐사부문에서는 2032년에 달 착륙, 2045년에 화성 착륙을 달성한다는 목표를 설정하였으며 2021년 7,300억원 수준의 정부 우주개발 투자를

<표 2-21> 제4차 우주개발기본계획 주요 내용

구 분	주요 내용
비 전	2045 우주경제 글로벌 강국 실현
성과목표	① 우주탐사영역 확장: 달 착륙('32) → 화성 착륙('45) ② 우주개발투자 확대:정부 투자 0.73조원('21) → 1.5조원('27) ③ 민간우주산업 창출: 세계시장점유율 1%('20) → 10%('45)
추진전략	5대 장기 우주개발 미션 설정 ① 우주탐사 확대: 독자적 우주 탐사계획 추진 ② 우주수송 완성: 우주수송서비스 능력・인프라 완성 ③ 우주산업 창출: 우주신산업을 주력산업화 ④ 우주안보 확립: 우주・지상안보 지원체계 확립 ⑤ 우주과학 확장: 국내역량 주도의 선도형 연구 추진

자료: 과학기술정보통신부, 「새 정부 첫 국가우주위원회 개최: 경제영토를 우주까지 확장하기 위해 국가적 역량 결집」, 보도자료, 2022. 12. 20.

2027년 1.5조원으로 2배 이상 확대할 계획이다. 또한 민간의 우주경제를 활성화하여 세계시장 매출 점유율을 2020년 1%에서 2045년 10%까지 확장하여 탐사, 수송, 산업, 안보 및 과학의 5대 전략을 추진할 계획이다.

나. '우주항공청' 설립의 추진

최근 한국 우주정책의 또 하나의 주요한 이슈는 '우주항공청'의 설립이다. 우주항공청은 윤석열 정부의 대표적인 공약의 하나로 「우주항공청 설치 및 운영에 관한 특별법안」(이하 '우주항공청 특별법') 등 관련한 3건의 법안이 국회 본회의 통과를 앞두고 있다.[48] 동 법은 공포 후 4개월 내에 시행될 예정으로 새로 설립될 우주 전담 기관의 거버넌스와 운영을 위한 후속 조치에 관한 내용을 담고 있다(표 2-22 참조). 동 법은 '특별법'으로서 각종 특례가 적용되는데, 대표적으로 우주청장이 본부 소속의 조직에 관해 융통성을 발휘하여 유연한 인사를 할 수 있도록 하였고 인력 300명과 7,200억원의 예산이 투입될 계획이다.[49]

48 관련 법안은 「우주항공청 설치 및 운영에 관한 특별법안」, 「우주개발 진흥법 일부개정법률안」, 「정부조직법 일부개정법률안」의 3가지로 구성되며 상정 이후 2024년 상반기 법안소위 및 국회 본회의 통과를 앞두고 있다.

<표 2-22> 「우주항공청 특별법 제정안」의 주요 특징

구 분	주요 특징
법안 성격	- 특별법의 성격으로 공포 후 4개월 내에 시행 - 정부조직 운용에 관한 각종 특례 적용 예) 청장이 본부 소속의 조직에 대한 구성·변경·해체 가능
우주항공청의 거버넌스	- 과기정통부 외청인 중앙행정기관으로 설치 - 항공우주연구원과 천문연구원을 우주항공청 소관으로 이관 - 「우주개발 진흥법 일부개정법률안」을 통해 국가우주위원회의 위상과 기능을 강화하기 위해 위원장을 국무총리에서 대통령으로 격상
후속 조치	- 법안 통과 이후 시행령안과 조직운영을 위한 인사·조직·사업관리 등 관련 규정 30여 건을 마련할 계획 - (시행령) 시행령안 마련(법 공포 후 1주일 내) → 입법예고(2월) → 법제처심사(3월) → 국무회의(4월) → 시행(5월) - 법안 통과 이후 조직 및 예산을 이관하고 전문인력 확보와 청사정주여건을 개선할 계획

자료: 과학기술정보통신부 보도자료의 주요 내용을 저자 정리.

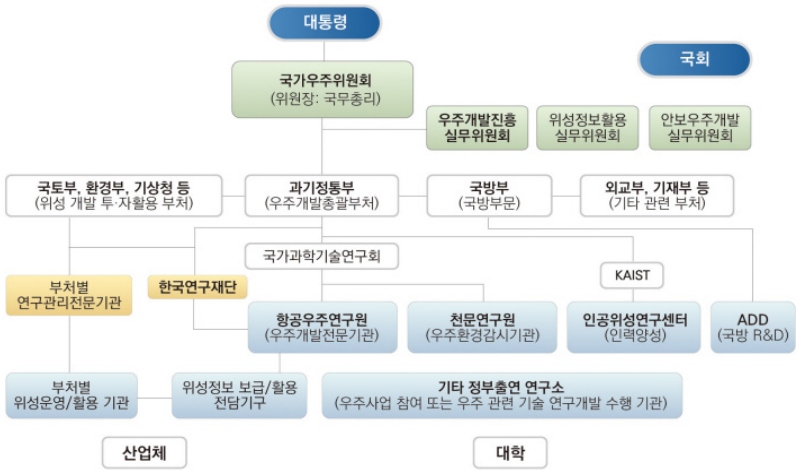
그간 한국의 우주개발추진체계는 국가우주위원회를 중심으로 과기정통부, 국방부, 외교부 등 다양한 부처가 관여하고 한국항공우주연구원, 천문연구원 등의 전문연구기관이 참여하는 방식이었다(그림 2-18 참조). 윤광석 외(2023)에서는 이와 같은 한국의 우주개발 추진체계가 크게 7개의 조직으로 산재된 형태라고 평가하였다.[50] 해외 주요국의 우주전담기관의 형태를 보면 각국의 역사·사회적 배경에 따라 우주청, 우주국, 우주부처, 우주연구기관 등 매우 다양한 형태가 운영되고 있으며, 미국과 러시아, 유럽 등의 선진국들에서는 전담 부처 형태의 조직이 다수이다(표 2-23 참조).[51] 이에 관하여 과학기술정보통신부는 향후 우주 경제의 성장

49 『서울경제』, 「우주항공청 300명 이내 구성, 예산 7,200억」, 2023. 7. 27.

50 윤광석 외(2023)는 한국의 우주개발 추진체계를 ① 대통령 직속 국가우주위원회 ② 과학기술정보통신부, 국방부, 외교부, 기재부, 국토교통부, 환경부, 기상청 등 7개 정부 부처 ③ 과학기술정보통신부 산하 국가과학기술연구회 및 본 연구회 소속 항공우주연구원, 천문연구원 등 2개 연구기관 ④ 국방부 산하 ADD ⑤ 과학기술정보통신부 산하 KAIST 및 인공위성 연구센터 ⑥ 기타 정부출연 연구소 ⑦ 부처별 연구관리전문기관 및 위성운영/활용기관의 7개 조직으로 구분한다.

51 과학기술정보통신부 보도자료(2023. 7. 27)에 따르면 74개국의 우주전담기관 설립 현황을 보면 우주청 14국(33%), 우주국 10국(24%), 우주부 6국(14%), 연구기관 6국(14%), 우주위원회 5국(12%), 우주기업 1국(2%)으로 구성된다.

[그림 2-18] 한국의 우주개발 추진체계(2021년 기준)



자료: 안형준 외, 「우주항공 기술 강국을 향한 전략과제」. 『STEPI Insight』, 226, 2018, pp.2~27.

<표 2-23> 주요국의 우주 전담 기구 현황

국가별 전담 기구		형태	인력(명)	연간 예산(백만달러)
NASA	미국 항공우주국(NASA)	전담 부처	17,000 ('24)	27,200 ('24)
	중국 국가항천국(CNSA)	전담 부처	2,400 ('18)	2,000 ('19)
DLR	독일 항공우주국(DLR)	전담 부처	8,400 ('18)	1,529 ('19)
cnes	프랑스 국립우주센터(CNES)	전담 부처	2,357 ('21)	2.544 ('21)
POCKOCMOC	러시아 연방우주국(POCKOCMOC)	전담 부처	181,100 ('20)	2,348 ('22)
JAXA	일본 우주항공연구개발기구(JAXA)	연구 기관	1,600 ('23)	787 ('24)
	영국 우주국(UKSA)	전담 부처	332 ('23)	200 ('19)
KARI	한국 항공우주연구원(KARI)	연구 기관	1,048 ('23)	523 ('23)

자료: 1) 미국: 『산경투데이』, 「심층분석 NASA 예산안을 통해 보는 우주개발의 미래」, 2023. 4. 5; 2) 중국, 독일: 전경련, 「주요국 우주산업 국제비교 및 시사점」, 2021; 3) 프랑스: https://brunch.co.kr/@jejucenter/378; 4) 러시아: https://www.statista.com/statistics/1325054/roscosmos-employees-russia/; 5) 영국: https://rocketreach.co/uk-space-agency-profile_b5dcb06df42e4b00; 6) 한국: 항우연 홈페이지 경영공시 자료(https://www.kari.re.kr/kor/sub06_03.do).

가능성을 고려할 때 연구기관 중심의 기술개발뿐 아니라 국제협력과 정책집행 등에서 정부 대표성을 부여할 수 있는 기관으로서 우주전담부처의 필요성을 설명하고 있다.[52]

2. 우주 정책 개선과 관련한 이슈 논의

국내 우주산업은 시장 규모와 고용, 투자 등에서 지속적인 성장을 이루고 있지만, 국제적인 수준에서는 아직까지 규모가 영세하고, 기술수준도 후발국에 머무르고 있다. 글로벌시장의 우주개발 패러다임이 정부에서 민간으로 전환되고 있으나, 아직 국내 우주산업은 '뉴스페이스'로 전환되었다고 판단하기는 어렵다. 상업용 우주 시장의 초입에서 활동하고 있는 국내기업들이 정부의 제도적 뒷받침 없이 기술 검증과 시험을 통과하고 수출실적을 달성하는 것이 아직까지는 불가능하기 때문이다. 따라서 중장기적인 시야에서 한국 우주 산업의 원활한 기술개발과 산업생태계 활성화를 위해서는 제한된 예산을 효율적으로 집행함과 동시에 민간기업의 활발한 혁신을 유도할 수 있는 우주 정책이 필요하다.

가. 우주 전략의 방향

본 절의 1항에서 살펴본 바와 같이 지금까지 한국은 발사체와 위성 등 우주기기제작 기술을 개발하기 위한 산발적인 단기 전략을 발표하고 추진하여 왔다. 그러나 향후 우주경제가 확대될수록 국제협력과 우주외교, 민간 생태계 강화, 우주국방력 확보 등 다양한 정책 이슈에 대한 중장기 대응이 필요하다. 또한 앞으로의 우주 정책은 기술개발뿐 아니라 글로벌 시장을 공략할 수 있는 산업적 시각이 동반되어야 한다.

우주전략의 근간에는 본 연구의 제2절에서 논의한 우주기술개발의 특이성에 대한 충분한 이해가 반드시 선행되어야 한다. 정부는 우주전담기

---

52 과학기술정보통신부, 「우주항공청 설립 운영 기본방향 공개」, 보도자료, 2023. 7. 27.

구로서 우주분야와 항공분야를 동시에 관장하는 '우주항공청'의 설립을 준비하고 있다. 그러나 우주산업과 항공산업은 기술개발 단계에서 이미 다른 경로에 있음을 유의해야 한다. 항공산업은 기술이 충분히 성숙하여 R&D 지원보다는 새로운 비즈니스와 서비스 개발이 필요한 산업이다. 반면, 우주산업은 한국이 기술후발국임을 차지하더라도 세계 시장에서 아직까지 업스트림단계의 기술개발투자가 여전히 활발하다. 따라서 같은 조직 안에 있더라도 기술 발전단계와, 산업환경의 특수성이 고려된 정책이 입안되어야 한다.

또한 상기 전략은 반드시 중장기적인 시야를 가지고 추진되어야 한다. 앞으로 우주개발의 미래는 우주에 가보는 것(Going to Space)에서 우주 안에서 활동하는 것(In the Space)으로 변경될 것인데, 우주에서 무엇을 할 것인가에 관한 국제적 논의와 기술 발전 정도를 고려해야 한다. 예를 들어 앞으로 우주산업에서는 우주에서 제품을 제작하거나 OSAM(Made in Space), 우주위성을 활용한 Outernet이 인터넷을 대체할 가능성이 있는데, 이는 기존의 법률과 제도로는 대응하기 어려운 이슈이다. 미래기술의 산업화에 선도적으로 대응할 수 있도록 중장기적인 시야에서 정책을 설계하고 국제협력을 추진해야 할 것이다.

산업적 관점에서의 우주산업전략은 현재 기술수준을 고려하여 민간기업의 빠른 성장을 도모하는 방향으로 설계되어야 한다. 기존의 우주기술 개발은 정부 R&D자금에 기반하여 누리호와 같은 대규모 발사체와 고궤도 위성을 중심으로 해 왔다. 출연연을 중심으로 하는 정부주도의 기술개발은 민간에서 할 수 없는 선도적 기술을 중점적으로 하는 것이 바람직하다. 그러나 중소기업과 스타트업의 경우 기술 수준이 낮더라도 우주기기 제조 노하우를 빠르게 습득할 수 있도록 소형 및 초소형 발사체와 저사양 위성의 제작도 염두에 두어야 하며, 해당 우주기기의 사양과 가격대별로 체계적인 분류와 맞춤형 전략을 마련해야 할 것이다. 기술 후발국 입장에서 제한된 예산을 활용해 낮은 기술 단계부터 다양한 시행착오를 경험해야 부품의 내재화 속도를 높이고 민간기업의 빠른 성장을 도모할 수 있다. 이와 관련 해외 주요기업은 이미 소형위성군 배치 계획을

<표 2-24> 주요 기업의 통신용 소형위성군 배치 계획

(단위: 개, ㎏, 백만달러)

운영기업	발사 계획 ('17~'26)	목표 운영 수	1기당 무게(㎏)	1기당 비용	총구축 비용
스페이스X(美)	1,822	4,425	390	5.2	9,500
원웹(美)	969	900	150	2.7	3,090
Telesat(Ka, 캐나다)	118	118	200	5.7	685
Telesat(V, 캐나다)	64	117	200	5.7	365
Hongyun(中)	44	156	300	8.5	375

자료: 황진영, 「새로운 물결_뉴스페이스」, 『한국항공우주연구원 e-정책정보』, 2018.

수립하여 진행 중이다(표 2-24 참조).

나. 정책집행 과정의 개선

정책집행의 실효성을 제고하고 민간 시장에서 정부 전략이 신뢰성을 확보하기 위해서는 먼저 실제 집행가능한 정책 목표를 수립해야 한다. 본 절의 제1항 <표 2-22>에 제시된 「제4차 우주개발기본계획」에서는 2045년에 한국의 우주 시장 매출이 글로벌 시장의 10%를 점유하겠다는 매우 야심찬 목표를 설정하였다. 이는 우주 경제의 세계시장 규모가 2045년에도 전혀 성장하지 않고 현재 수준으로 유지된다고 가정할 때 한국의 매출액이 290억달러(한화 약 38조원)로 성장하는 수준을 의미한다.[53] 더욱이 우주 산업의 지속적인 성장 규모를 고려할 때 상기 목표를 달성하는 것은 더욱 요원해질 가능성이 높다. 모건스탠리는 세계 우주산업을 2040년에 1조 1,000억달러(약 1,370조원)로 성장할 것으로 예측한 바 있는데, 상기 시장에서 점유율 10%를 달성하기 위해서는 정부투자와 민간기업의 매출을 합산한 금액이 100억달러를 기록해야 한다.[54] 따라서 정책목표의 수립시에는 세계시장 점유율 10%라는 목표가 과연 실현 가

53 2020년 전 세계 우주산업 시장 규모는 매출 기준 2,710억달러(348조원), 이 중 한국은 29억달러로 1.1%를 기록했다(과학기술정보통신부 보도자료, 2022. 12. 20. 기준).

54 『조선일보』(2023. 1. 12).

능한 목표인지를 점검하고, 이를 실현하기 위해 필요한 '폭발적인' 민간 기업의 성장은 어떻게 이루어야 하는지에 대해 진지한 검토가 이루어져야 한다.

새롭게 설립되는 우주항공청이 우주기술개발을 전담하는 정부부처인 만큼 부처간 예산중복으로 인한 비효율성을 개선하고 충분한 타당성 검토가 완료된 사업에 대해서는 신속하고 효율적으로 사업을 추진하도록 해야 한다. 지금까지는 「국가우주위원회」의 승인을 얻은 사업이라고 하더라도, 예산의 심의 및 조정은 국가과학기술자문회의를 통해 다시 한번 실무 절차를 진행해야 했기 때문에 예산 집행과정에서 비효율과 불일치가 발생하는 문제점이 있었다(윤광석 외, 2023).

다. 인프라 및 제도 정비

1) 품질인증 및 데이터 인프라 개선

우주기술의 개발은 100㎞ 이상 상공에 '발사'하는 과정이 반드시 필요하고 이를 위해 수많은 인증과 허가 절차가 필요하다. 국내법 및 국제법의 규정하에 까다로운 품질 인증 절차가 완비되어 있는 항공분야와 달리 우주분야는 그간 엄밀한 의미에서는 국제법상 글로벌시장에서 일반화된 규제가 존재하지 않고 일부 기술 선진국의 국가별 품질인증 절차의 사례가 있을 뿐이다.[55] 예를 들어 미국과 러시아 등 우주기술 선도 국가에서는 발사체와 인공위성 등 각 영역별로 제품의 품질과 상용화를 인증할 수 있는 제도적 기반을 마련하였다. 미국의 경우 미항공우주국(NASA)를 중심으로 발사체 및 인공위성, 우주부품 보증 시스템을 운용하고 있으며, 러시아는 연방우주국(FSA)의 심사와 유럽과의 전자부품(EEE) 상호인증을 수행 중이다. 유럽은 유럽우주청(ESA)이 인증 업무를 총괄하고 있다(표 2-25 참조).

한국은 국내법상으로 우주관련 제품과 서비스의 인증 기반이 취약할

---

55 임창호 외(2016).

<표 2-25> 해외 우주 기술·제품 주요 인증 기구

구분	미국	유럽	러시아	일본
발사체	미연방항공청 (FAA, 상용), NASA	유럽우주기구 (ESA)	연방우주기구 (FSA, 인증센터)	일본우주개발청 (JAXA)
인공위성	DCSS NASA 또는 위성 제작사	ESA 및 위성제작사	FSA 및 위성제작사	미국과 유사
EEE부품 (관리기준)	NASA(QML, NPSL)	ECSS(QPL)	FSA(QPL)	미국과 유사

주: DCSS: Defecnse Supply Center Columbus.
자료:『전자신문』,「우주기술 제품 인증체계 시급하다」, 2006. 7. 11.

뿐 아니라, 분단 상황으로 인해 발사를 위한 인증과 허가 절차가 매우 복잡하게 구성되어 있어 빠른 시험과 기술 검증에 불리하다. 명확한 제도가 마련되지 않았기 때문에 지금까지는 우주기술의 인증과 발사를 위한 허가에 있어 주무부처의 재량적인 해석에 의존할 수밖에 없었다.

만약 기존에 인증과 허가를 시행한 사례가 있다면 발사허가 과정이 용이할 수 있지만, 정부 R&D 자금을 통해 개발한 발사체와 현재 스타트업의 제품군은 크게 다르기 때문에 동일한 기준을 적용하는 것은 합리적이지 않다. 예를 들어 최근 발사에 성공한 누리호(KSLV-Ⅱ)는 총중량 200톤, 길이 47.2m, 최대 직경이 3.5미터에 달하며 3차 발사 시 위성 8기를 탑재한 고사양 발사체이다. 그러나 국내 스타트업의 '초소형' 발사체의 제품 사양 은 이에 크게 미치지 못한다. 저사양 제품부터 끊임없는 시행착오를 통해 빠르게 성장하는 것이 우주산업 발전을 위한 전략이라면, 제품의 스펙과 사양에 맞는 인증과 허가 절차도 별도로 마련되어야 한다.

발사체와 마찬가지로 위성제작 분야에서는 주파수 할당 정책에 저사양 위성의 활용도 고려해야 할 것이다. 정부자금으로 개발한 기존 고사양 위성들의 수명은 7~15년으로 장기이기 때문에 안전기준이 높고 장기간 주파수 할당을 염두에 두어야 했다. 그러나 향후 저사양 위성에 대한 수요가 크게 증가할 것을 감안할 때 기술 등급별 체계 전략과 품질 기준, 그리고 활용을 위한 단기 주파수 정책도 필요하다.[56]

우주 데이터의 적극적 활용을 위한 데이터 플랫폼의 마련도 필요하다. 해외 사례를 보면, 일본은 위성 영상을 활용할 수 있는 인터페이스 시스템 <Tellus>를 개설하였는데, <Tellus>는 오픈 무료 데이터 플랫폼으로 위성에서 얻을 수 있는 정보 및 전 세계 정보를 통합해 제공한다.[57]

2) 민간 발사장 확충 및 인허가 프로세스 개선

우주기술개발을 위해서는 민간 기업의 반복적 발사 시도가 용이하게 이루어질 수 있도록 해야 하며, 이를 위해 가장 중요한 것은 안전한 발사장의 확보이다. 발사체와 위성을 경량화하여 수익성을 강화하더라도, 본질적으로는 안전한 우주기기의 사용이 보장되어야 하기 때문에 시스템 엔지니어링 검증과 신뢰성 확보를 위한 반복 실험은 반드시 필요하다.

국제법상 고도 100㎞ 이상을 운행하는 모든 비행체는 외국 영공을 직접 통과하지 않아야 한다. 한국은 지리적 특성상 북한, 일본, 중국과 근접해 있어 지상에 발사장을 설치할 수 있는 곳은 남해 인근이 유일하다. 그러나 안전거리를 충분히 확보하고자 하면 남해 이남의 오키나와와 대만, 필리핀을 고려해야 하기 때문에 지상 발사장에서 확보할 수 있는 발사각은 남쪽 방향 15도에 불과하다. 또한 발사장은 지리적 위치뿐 아니라 기존의 항공기, 어선 등의 운항 여부와 지역주민의 안전도 고려해야 한다. 제주도 가파도와 마라도는 지상발사장 적정지역으로 선정되기도 하였으나 지역주민의 반발로 무산된 바 있고, 누리호 발사 시 안전을 위해 육상 반경 3㎞, 공역은 길이 95㎞, 폭 44㎞를 통제하였다(그림 2-19 참조).[58]

지상 발사장의 대안으로는 바지선을 이용한 ❶해상 발사, 비행기를 이용한 ❷공중발사와 ❸외국 발사장 이용 등이 있다. 해상 발사는 주변국 영공침해의 우려가 없는 공해(公海)에 바지선을 활용하여 발사하는 방식이나, 국내 사례가 없어 구체적인 발사 허가 지침이 미비하다.[59] 공중

---

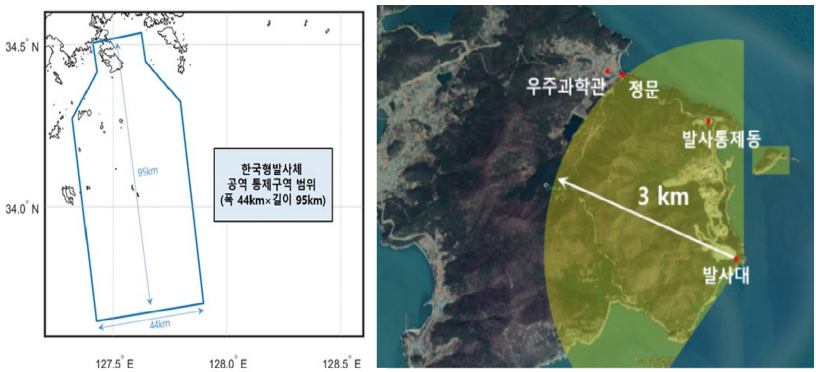
56 달 남극 탐사를 성공한 인도의 <찬드라얀 3호>의 수명이 고작 15일이었지만 주어진 과업을 훌륭하게 해낸 사례이다.

57 안재현(2021. 5. 12).

58 『제주의 소리』(2022. 6. 22).

59 국방부에서 고체연료를 사용한 우주발사체의 해상발사에 성공('23. 12)한 바 있지만 민

[그림 2-19] 누리호 발사 당시 해상 및 육상 통제 구역



자료: 『동아사이언스』(2021. 10. 21).

발사는 발사각에 구애받지 않고 원하는 위도에서 발사할 수 있는 장점이 있지만 아직까지 기술적 안정성을 획득하지 못해 성공률이 저조하다. 이에 대표적인 공중발사 서비스기업인 버진 오빗이 파산하기도 하였다('23. 4). 외국 발사장을 이용할 경우 이미 안정성과 효율성이 검증된 곳을 활용하는 장점이 있으나 비용이 높아 소규모 스타트업의 이용에는 한계가 있고, 활용 주체는 기업이더라도 정부의 적극적인 국제협력이 전제되어야 한다. 이와 관련하여 중국은 아프리카 국가의 발사장 건설·활용을 적극적 국제협력을 추진 중이고, 미국은 동맹국을 대상으로 자국 발사장의 활용을 독려하고 있다.[60]

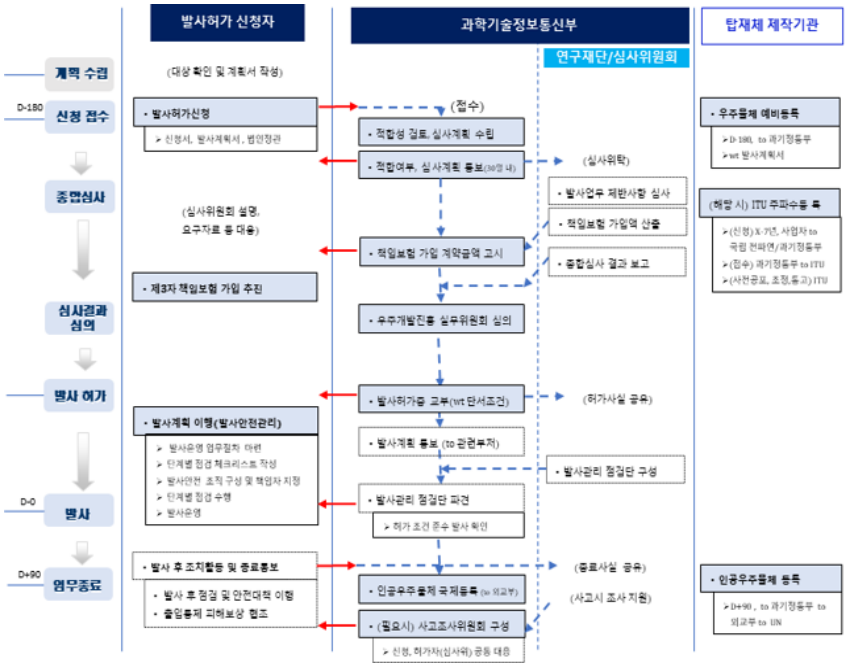
현재 국내에서 운용 중인 지상 발사장은 액체연료 기반의 발사체를 위한 전남 고흥의 나로우주센터와 고체연료 발사체나 군용 기술개발을 위한 충남 태안의 안흥종합시험장이 유일하다.[61] 그러나 이들 시설은 설립 목적과 보안 등을 이유로 민간기업이 자유롭게 사용하기 어렵다. 이에 정부는 우주발사체기업의 경쟁력 강화 방안의 일환으로 소형 발사체를 위한 발사장 건설을 추진 중이다.

간기업의 활용사례는 아직까지 없다.

60 『산경투데이』, 「우주개발 열풍이 촉발한 로켓 발사장 건설 붐」, 2023. 6. 30.

61 『중앙일보』, 「어디 좋은 땅 없나, 발사장 찾아 헤매야 하는 한국 우주 기업들」, 2021. 8. 30.

[그림 2-20] 발사 허가 절차



자료: 과기정통부, 「제46회 우주개발진흥실무위원회 개최」, 보도자료, 2023. 3. 30.

발사장의 확보뿐 아니라 발사를 위한 허가와 인증절차의 개선도 필요하다. 과학기술정보통신부에서는 제4차 우주개발실무진흥위원회('23. 3)를 통해 민간의 발사 역량 증진을 위해 발사 허가의 표준화 계획을 밝혔다. 허가를 위한 일련의 과정을 과학기술정보통신부가 관리하며 전문적인 심사를 위해 한국연구재단의 심의 과정을 추가하였다. 심사는 주로 우주발사체의 사용 목적, 발사 안전관리, 손해배상 책임보험 가입 등의 재정부담 능력의 3가지를 기준으로 한다. 그러나 아직까지 한국의 발사 경험이 많지 않고, 규제 시 참고할 수 있는 최근의 사례가 고사양 발사체인 '누리호'이기 때문에 저사양 발사체에 대한 충분한 고려와 빠른 대처에 대한 신중한 고려가 반드시 필요하다.[62] 최근 초소형 발사체와 같이

62 『한국경제』(2022)에 따르면 누리호는 위성 8기 탑재가 가능한 고사양 스펙으로, 미국의 민간 발사체와 비교할 때 발사 비용이 미국의 20배인 것으로 나타난다.

저사양 발사체를 개발 중인 소규모 스타트업의 경우, 정부 역량이 결집된 누리호와 같은 기준을 동일하게 적용하여 심사하는 것은 오히려 이들 기업의 기술개발 속도를 저하시킬 우려가 있다. 국가 안보와 국민의 안전을 해하지 않는다면, '완성된' 기술 수준의 품질 검증보다는 끊임없는 시행착오를 반복할 수 있는 시험장이 되도록 민간 발사장을 운용해야 한다.

더불어 신기술 개발을 위한 혁신 활동을 활성화하기 위한 능동적인 규제 해석과 '규제샌드박스'의 적극적인 활용이 필요하다. 예를 들어 해상 발사의 경우 바지선이 우주발사기지로서의 역할을 하기 때문에 선상에 발사를 위한 구조물을 설치해야만 하는데, 이는 현행 선박안전법에서 구체적으로 명기하고 있지 않은 사항이며, 기존의 해양기술개발에서는 유사한 사례를 찾기 어렵다.[63] 따라서 우주기술 개발이 아닌 선박의 안전한 운항만을 목표로 한다면 발사를 위한 구조물을 출항 시마다 설치하고 해체는 비효율적인 일을 반복해야만 하며, 이는 곧 발사 비용의 증가와 연계된다. 해상 발사와 같은 신유형의 기술개발에 효과적으로 대응할 수 있도록 규제샌드박스를 활용하여 우주기술개발을 위한 새로운 유형의 실험의 영향을 평가하고 현행 규정을 융통성 있게 적용할 수 있는 접근에 대한 검토가 필요하다.

라. 정부 투자방법의 다양화와 민간투자 확대를 위한 여건 개선

지금까지 정부는 출연연구소를 중심으로 연구개발 자금을 지원함으로써 우주기술을 개발하였다. 이러한 유형의 정부 지원은 장기간 기간이 소요되고 민간에서 도전하기 어려운 선도기술 영역에 적합하다. 최근 발사체와 위성 제작에 있어 민간기술 수준도 많이 발전되었기 때문에 이제는 단순한 기술개발 비용의 지원이 아닌 '투자'로서의 정책 전환도 고민해야 한다. 단순히 연구개발지원 위주로 정책을 운용한다면 시장규모를 확대하고 민간투자를 유도하는 것에 한계가 있기 때문이다. 연구개발자

---

63 현행법은 바지선의 선상 구조물이 없는 상태에서 출항을 허가하는 것이 일반적이다.

금지원은 수혜받은 기업에 '매출'로 기록되지 않을 뿐 아니라 기술개발이 지연될 경우의 비용 증대에 따른 위험도 정부와 공유하기 어렵다.

따라서 기존의 연구개발자금 지원 이외에 정부투자의 방법을 다양화하여 민간기업의 참여와 시장 수요의 창출을 도모할 필요가 있다. 조달계약 방식은 대표적인 사례로, 이미 각국에는 혁신을 촉진하기 위한 공공조달계약 제도가 존재한다. 미국의 OTA는 NASA의 공공조달제도에 유연성을 부여하여 우주기술개발에 적용한 대표적인 사례이다.[64] 미국은 스페이스 X의 <펠컨9>과 <드래곤2>의 개발시 OTA를 활용한 공공조달계약을 체결하였다. 이를 통해 NASA와 스페이스X가 협력하여 기술을 개발하고 발사 비용을 분담하였으며 개발 이후 현재까지 26회의 우주수송 실적을 기록하고 있다.[65] 조달계약은 수혜기업에 매출로 기록되기 때문에 향후 글로벌 진출을 위한 기업의 레퍼런스로 활용될 수 있으며 수익뿐 아니라 스타트업의 경쟁력 강화에도 유리하다.

벤쳐캐피탈 등 민간 자금을 중심으로 스타트업 투자를 활성화하기 위해서는 우주분야가 수익 회수에 장기간이 소요된다는 사실을 감안한 정책 설계가 필요하다. 본 장 제2절에서 살펴본 바와 같이 최근 글로벌 시장에서는 우주 스타트업에 대한 벤처투자가 크게 증가하고 있다. 따라서 향후 민간투자를 더욱 확대하기 위해서는 회수시장 대안을 반드시 고려해야 한다. 또한 민간투자자들이 장기간 신뢰를 가지고 시장에 투자할 수 있는 긍정적인 신호를 제공하는 것이 중요하다. 최근 우주항공청의 설립과 같은 정부의 적극적인 정책추진은 민간투자자에게 긍정적인 신호가 될 수 있지만, 정권이 교체되더라도 정책의 일관성이 담보되어야 민간투자를 안정적으로 유도할 수 있을 것이다.

---

64 OTA는 Other Transaction Authority의 약자로, 미국의 공공조달제도인 연방조달규칙(Federal Acquisition Regulation)의 제35조에 해당함. 연구개발, 시제품 개발생산 관련한 일부 영역에서 연방 조달규칙 및 관련법에 준거하지 않고 연구개발 프로젝트마다 개별 조건을 결정하는 것을 주요 내용으로 한다.

65 권준민, 「주요국의 혁신 촉진형 공공조달제도 현황」, 『KIAT 애자일』, 2023년 제18호, 2023. 8. 11.

마. 융합 인재 양성

본 연구의 제3절 [그림 2-8]을 통해 살펴본 바와 같이 현재 우주산업 종사자들은 단순히 '우주항공' 전공자만으로 구성되지 않는다. 따라서 우주분야의 전문인력을 양성하고자 할 때 '우주' 전공 인력뿐 아니라 디지털 전환과 연관된 전기・전자・IT 분야와 실제 하드웨어 기술을 실현시키는 기계 및 엔지니어링 분야의 인력 등 다양한 전공자들과의 융합과 연계가 매우 중요하다. 발사체와 위성뿐 아니라 엔지니어링, IT 등 다양한 분야의 인재를 육성하고 우주 분야 기술 문제를 해결할 수 있도록 하는 훈련이 필요하다.

미국 STEM 교육 전략은 첨단기술의 확보를 위해 젊은 인재를 지속적으로 육성하기 위한 정책으로 모든 국민에 대한 양질의 STEM 교육, STEM 리터러시, 혁신과 고용에서 글로벌 리더십을 유지한다는 비전하에 추진되고 있다.[66] 특히 동 전략은 실전 문제 해결을 위한 다학제 간 학습을 권장하고 기업가 정신 함양 및 비STEM 인력과의 융합을 촉진하고 있다.

<표 2-26> STEM 전략의 목표와 추진 전략

구분	주요 내용
3대 목표	① STEM 리터러시의 향상을 위한 기반 구축 ② STEM에서 다양성, 평등성, 포용성의 확대 ③ 미래 STEM 인력의 양성
4대 추진 전략	① 전략적 파트너십의 개발 및 강화 ② 융합적 STEM 학습에 학생 참여 독려 ③ 컴퓨터적 리터러시 구축하기 ④ 실행・운영에 있어 투명성 및 책임감 확보

자료: 한국과학기술기획평가원(2019)의 주요 내용을 저자 정리.

66 Science, Technology, Engineering, and Mathematics의 약자. 미국은 국가혁신역량이 STEM 교육 생태계 구축에 기반한다는 인식하에 'STEM 교육 5개년 전략'을 수립한 바 있다(한국과학기술기획평가원, 2019).

제5절 소 결

세계 시장에서 우주산업은 기술개발 과정의 특이성으로 인해 정부 주도로 거대자본이 투입되던 시기를 벗어나 민간기업이 활발히 참여하는 방향으로 전환되고 있다. 이러한 변화는 우주산업이 과학탐사뿐 아니라 상업시장에서 큰 파급력을 갖는다는 측면에서 우리 경제의 새로운 성장 동력으로서의 가능성을 제시한다.

최근 '누리호'를 통해 독립된 발사체 기술개발에 성공하였고 달에 탐사위성을 발사한 세계 7번째 국가로 기록되는 등 뚜렷한 기술개발 성과와 함께 혁신적인 스타트업의 등장이 증가하면서 국내 우주산업의 성장 가능성이 확인되기도 하였다. 그러나 그간의 성장에도 불구하고 아직까지 국내 우주산업의 규모는 국제 수준에 크게 미치지 못하고 있으며 GDP 대비 정부투자도 선진국과 비교할 때 높지 않다. 발사체 분야에서 독자적인 체계종합을 이루어 낸 것을 제외하면 주요 소재·부품의 상당 부분을 여전히 해외에 의존하고 있을 뿐 아니라 미·중 갈등과 분단으로 인한 정치적 위협 등 '우주기술개발'이 '우주산업'으로 자리잡기 위해서는 앞으로도 다양한 도전과제가 남아있다.

궁극적으로 우주분야의 산업 생태계 조성을 위해서는 이 시장에서 규모의 경제를 구현할 수 있는 대기업의 안정적인 성장과 중소기업 및 스타트업의 역량 강화 등 기업 규모와 기술 발전 단계에 따른 정책 설계가 필요하다. 또한 우주개발은 '미지'의 영역으로 선진국에서도 수많은 시행착오를 경험하고 있음을 고려할 때 시행착오를 두려워하지 않고 적극적인 도전을 장려하는 혁신 정책이 마련되어야 할 것이다. 이를 위해서는 국가우주 정책의 지향점에 대한 심도 있는 고찰과 신기술의 적용과 시험을 반복할 수 있는 효율적인 규제 개선, 활발한 혁신을 유도하는 인프라 및 제도의 정비, 그리고 이 모든 과정에서 융합 인재를 활용할 수 있는 교육정책이 뒷받침되어야 한다.

참고문헌

과학기술정보통신부, 「새 정부 첫 국가우주위원회 개최: 경제영토를 우주까지 확장하기 위해 국가적 역량 결집」, 보도자료, 2022. 12. 20.

_____, 「우주항공청 설립 운영 기본방향 공개」, 2023. 7. 27.

과학기술정보통신부, 「우주산업실태조사」, 각년도.

권준민, 「주요국의 혁신 촉진형 공공조달제도 현황」, KIAT 애자일 2023년 제18호, 2023. 8. 11.

김경자, 「우주탐사와 우주자원」, 『기술과 혁신』, Special Issue 04, 2021. 9.

김종범, 「한국의 우주정책과 행정의 변천사」, 『한국우주산업기술동향』, 16권 1호, 2018, pp.14~21.

백기태, 「국내 우주개발 산업화의 의미와 산업정책 시사점」, 『우주정책연구』 2022 Vol. 6, pp.26~49.

산업통상자원부 한국산업기술진흥원, 「2021년도 산업기술인력 수급 실태조사 결과」, 2021. 12.

신상우, 「뉴스페이스 시대의 핵심 우주스타트업의 현황과 과제」, 『기술과 혁신』, Vol. 449, special issue 5, 2021. 9, pp.22~25.

_____, 「OECD 우주경제 보고서의 주요 내용과 시사점」, 『SPEC Insight』, 07호, STEPI 국가우주정책센터, 2022.

안재현, 「일본우주산업의 현황 및 발전방향」, KOTRA 해외시장 뉴스, 2021. 5. 12.

안형준 외, 「우주항공 기술 강국을 향한 전략과제」, 『STEPI Insight』, 226호, 2018, pp.2~27.

_____, 『뉴스페이스 시대, 국내우주산업 현황 진단과 정책 대응』, 과학기술정책연구원 정책연구 2019-20, 2019.

윤광석 외, 「우주항공청 설립의 이슈와 조직 설계 방향」, 『KIPA 정부디자인 ISSUE』, 통권 20호, 한국행정연구원, 2023.

이민형 외, 『거대과학 종합관리체계 구축 및 추진전략』, STEPI 정책연구 2010-11, 2010.

임창호 외, 「우주분야 품질인증 제도에 대한 고찰」, 『항공우주산업기술동향』

14권 2호, 2016, pp.28~39.

임창호,「아시아 지역의 우주기관 협의체 변화와 우리의 미래」,『한국항공우주연구원 정책동향』, 2012. 9. 28.

전국경제인연합회,「주요국 우주산업 국제비교 및 시사점」, 2021.

정영진,「유럽우주기구」, 한국항공우주연구원 e-정책정보센터, 2015. 2. 13.

조현래,「대학기술이전전담조직의 활성화를 위한 법적과제」,『산업재산권』, 18호, 2005, pp.133~171.

페터 슈나이더 저, 한윤진 역,『우주를 향한 골드러시』, 쌤 앤 파커스, 2021. 1. 27.

한국과학기술기획평가원,「미국 STEM 교육 5개년 전략」, 과학기술인재정책 동향리포트, 2019년 제1호, 2019.

한국산업기술진흥원,『2022 Industrial R&D Investment Scoreboard』, 2022.

_____,『2023 Industrial R&D Investment Scoreboard』, 2023.

한국연구재단,「우주 경제 시대를 대비한 전략적 우주 개발의 필요성」, NRF Issue Report 2018-3호, 한국연구재단, 2018.

한국지식재산연구원,『우주 산업의 기술환경 변화와 지식재산』, 특허청 용역보고서, 2022. 12.

Bryce Tech, "Start-Up Space 2022: Update on investment in commercial space ventures," 2022.

_____, "Start-up Space: update on investment in commercial space ventures", 2023.

Nikkei Asia, "Japan approves $787bn 2024 budjet; size shirnks as COVID wanes", 2023. 12. 22.

OECD, *Space and Innovation,* OECD Publishing, Paris, 2016.

_____, *OECD Handbook on Measuring the Space Economy*, OECD Publishing, Paris, 2022.

_____, Harnessing "New Space" for Sustainable Growth of the Space Economy, 2023.

<언론기사>

『뉴스 H』,「우주정복시대, 누리호 발사가 갖는 의미」, 2023. 8. 31.

『뉴스핌』,「예산 단돈 29억원에서 2조원 대로 한국형 로켓 자력 개발 30년사」, 2018. 11. 28.

『동아사이언스』,「누리호 발사대 반경 3㎞ 육상통제 시작, 안전 위해 1,300여 명 투입」, 2021. 10. 21.

_____, 「우주산업리포트: 중국판 GPS 베이더우가 전세계 사용자 확대에 나서는 이유」, 2021. 12. 17.

_____, 「우주산업 리포트: 글로벌 우주산업 투자 동향」, 2022. 4. 15.

_____, 「우주산업 리포트: 요즘 국제 우주협력의 다섯 가지 트렌드」, 2022. 6. 17.

_____, 「러시아 2024년 이후 우주정거장 떠난다」, 2022. 7. 27.

_____, 「누리호 기술 한화에어로스페이스 이전, 새 비즈니스 위한 것」, 2022. 10. 12.

_____, 「국내 우주항공 종사자 및 학생 98.3% "우주항공청 설립 서둘러야"」, 2023. 12. 26.

『동아일보』, 「미·중 10년 내 위성 전쟁할 수도, 신우주경쟁격화」, 2023. 3. 2.

『디지털투데이』, 「중국, 스페이스X 따라 잡는다… 초저궤도 위성 집중」, 2023. 11. 17.

『머니투데이』, 「2조원 누리호, 우주산업 씨앗 뿌렸다… 예산 1.5조 기업에 집행」, 2022. 6. 12.

『전자신문』, 「누리호 1990년 KSR-I 개발의 시작, 누리호 성공의 자양분」, 2022. 6. 21.

『제주의 소리』, 「제주 우주센터 유치 실패가 시민단체 때문, 10년만 재소환된 낭설」, 2022. 6. 22

『조선일보』, 「우주관광은 '미끼'… 억만장자들의 진짜 목표는 우주산업」, 2021. 7. 21.

_____, 「세계 우주산업 규모 2030년 735조원, 한국 시장 점유율은 1%」, 2023. 1. 12.

『중앙일보』, 「어디 좋은 땅 없나, 발사장 찾아 헤매야 하는 한국 우주기업들」, 2021. 8. 30.

_____, 「우주 인터넷 시대 멀지 않았다」, 2023. 10. 24.

『한겨레』, 「우리 위성 우리 기술로 쏘아 올렸다… 누리호 실전 발사 성공」, 2023. 5. 25.

_____, 「살류트, 스카이랩, ISS, 미르, 톈궁… 우주정거장 건설 50년」, 2023. 10. 17.

『한국경제』, 「누리호 발사 비용 미의 20배… 이젠 기업이 로켓 재사용 주도해야」, 2022. 6. 22.

『BBC News Korea』, 「불타는 결말? 수명을 다한 국제 우주정거장의 최후」, 2023. 5. 7.

『Spaceradar』, 「아프리카 우주국 이집트 카이로에 영구히 자리잡는다」, 2023. 2. 5.

_____, 「중국 베이더우 '글로벌 표준'으로 인정받았다」, 2023. 11. 21.

_____, 「중국, 달 기지 프로젝트 국제협력 강화… 10여 개국과 참여 논의」, 2023. 6. 21.

<웹사이트>

네이버시사용어사전(https://terms.naver.com/entry.naver?docId=3385786&cid=43667&categoryId=43667, 접속일: 2023. 12. 27).

한화 스페이스 허브 네이버 포스트(https://m.post.naver.com/viewer/postView.naver?volumeNo= 33660335&memberNo=1972196, 접속일: 2023. 12. 20).

https://www.lignex1.com/web/kor/main.do(접속일 2023. 12. 7).

https://www.ktsat.com/kr/mainPage.do(접속일 2023. 12. 7).

https://www.hanwhaaerospace.co.kr/kor/index.do(접속일 2023. 12. 7).

https://www.hanwhasystems.com/kr/index.do(접속일 2023. 12. 7).

https://www.koreaaero.com/KO/Default.aspx(접속일 2023. 12. 7).

https://www.satreci.com/(접속일 2023. 12. 7).

https://penge-gtl.imweb.me/(접속일 2023. 12. 7).

https://www.si-imaging.com/kr/(접속일 2023. 12. 7).

http://www.innospc.com/(접속일 2023. 12. 7).

https://www.unastella.co/(접속일 2023. 12. 7).

https://perigee.space/(접속일 2023. 12. 7).

https://www.naraspace.com/ko(접속일 2023. 12. 7).

https://kr.contec.kr/(접속일 2023. 12. 7).

부 록

<부표 2-1> 기업의 분야별 매출액

(단위: 십억원)

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
합계	2,073	2,448	2,488	2,779	3,393	3,291	3,261	2,782	2,570
기기제작	133	230	289	351	380	391	641	775	658
위성체	42	49	54	79	108	144	325	381	341
발사체	28	41	75	99	123	122	191	222	200
지상장비	64	118	146	160	123	103	108	140	105
우주보험	-	22	14	12	25	21	17	32	11
활용	1,941	2,248	2,199	2,428	3,013	2,900	2,620	2,007	1,912
위성활용 서비스 및 장비	1,937	2,244	2,194	2,425	3,005	2,898	2,618	2,005	1,908
과학연구	4	4	5	3	3	2	1	2	4

자료: 과학기술정보통신부, 「우주산업실태조사」, 각년도, 저자 정리.

<부표 2-2> 연구기관의 분야별 예산액

(단위: 십억원)

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
합계	415	570	689	804	784	645	634	637	621
기기제작	332	467	588	675	626	515	496	533	460
위성체	127	177	257	298	317	247	255	249	208
발사체	139	242	260	274	225	181	174	210	179
지상장비	66	48	71	103	84	86	66	74	74
우주보험	-	-	-	-	-	-	-	-	-
활용	83	103	100	129	157	130	138	104	161
위성활용 서비스 및 장비	33	37	47	56	36	42	38	35	58
과학연구	45	59	48	51	54	51	58	56	68

자료: 과학기술정보통신부, 「우주산업실태조사」, 각년도, 저자 정리.

<부표 2-3> 대학의 분야별 연구비

(단위: 십억원)

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
합계	26.0	31.8	35.6	51.2	42.2	49.6	47.2	34.7	33.5
기기제작	11.1	9.6	16.2	23.9	11.6	13.7	22.9	7.7	7.2
위성체	4.6	4.1	11.8	12.4	6.8	9.5	15.7	4.7	3.1
발사체	5.1	4.3	3.3	10.8	4.5	3.9	6.2	2.9	4.1
지상장비	0.0	0.0	1.1	0.8	0.3	0.4	1.0	0.1	-
우주보험	-	-	-	-	-	-	-	-	-
활용	14.8	22.1	19.4	27.3	30.6	35.8	24.3	27.0	26.4
위성활용 서비스 및 장비	4.9	6.8	5.6	10.7	14.0	17.9	11.1	12.6	13.6
과학연구	9.0	11.7	10.6	12.3	14.8	14.5	10.9	13.5	11.3

자료: 과학기술정보통신부, 「우주산업실태조사」, 각년도, 저자 정리.

<부표 2-4> 기업체와 연구기관 고용의 학력, 전공별 비중

(단위: %)

구 분		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
기업체	우주공학	2.0	5.2	11.3	5.0	5.2	4.8	4.8	5.2	5.2
	전자전기	46.0	42.6	42.1	40.7	37.9	40.6	44.2	46.3	46.3
	기계재료	14.4	14.2	15.8	14.6	15.8	15.1	12.3	12.9	14.8
	자연과학	6.5	4.7	5.0	4.0	4.0	5.6	4.9	3.7	3.7
	기타공학	12.1	13.1	4.9	14.2	12.3	11.7	12.6	12.9	12.4
	공학 외	19.1	20.2	21.0	21.5	24.9	22.2	21.1	19.1	17.5
	석/박사	23.9	12.8	20.8	27.9	24.4	21.4	23.3	22.2	21.0
연구기관	우주공학	19.2	19.1	19.5	22.2	21.3	20.3	19.7	20.2	18.6
	전자전기	26.7	27.8	29.7	28.9	25.7	27.4	25.8	27.3	28.6
	기계재료	19.0	18.8	17.7	16.7	16.8	15.5	15.4	13.4	14.8
	자연과학	23.2	23.2	25.0	25.2	29.3	27.8	26.9	26.3	25.4
	기타공학	5.5	7.0	4.8	5.1	4.6	5.6	7.7	8.4	7.7
	공학 외	6.4	4.0	3.3	1.9	2.3	3.4	4.4	4.5	4.9
	석/박사	88.8	91.6	93.8	93.0	93.1	91.9	89.7	89.8	88.0

주: 설문조사에 전공과 학력을 응답한 경우를 합산하여 비중을 계산함.
자료: 과학기술정보통신부, 「우주산업실태조사」, 각년도, 저자 계산.

<부표 2-5> 기관별 투자 현황

(단위: 십억원)

구 분		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
전체	연구개발	117.1	181.4	122.1	180.2	217.7	171.7	154.7	152.1	180.5
	시설투자	32.6	179.5	304.8	125.0	128.4	62.6	158.9	134.5	83.5
	교육·기타	1.2	2.4	1.5	1.5	2.4	2.8	1.8	2.6	0.8
	소 계	150.9	363.3	428.3	306.7	348.5	237.1	315.4	289.2	264.8
기업체	연구개발	75.0	103.1	103.8	133.9	163.1	151.6	133.8	134.8	150.5
	시설투자	19.4	93.6	222.3	29.4	17.1	27.4	133.0	80.2	54.6
	교육·기타	0.8	0.9	1.0	1.3	2.1	1.1	1.6	2.5	0.7
	소 계	95.2	197.6	327.1	164.6	182.2	180.1	268.4	217.5	205.8
연구기관	연구개발	37.4	70.9	17.5	45.9	52.5	18.2	19.5	16.7	28.8
	시설투자	13.0	85.2	82.1	95.5	108.3	34.9	25.9	54.2	28.8
	교육·기타	0.1	0.8	0.1	0.1	0.2	1.7	0.2	0.1	0.1
	소 계	50.5	156.9	99.8	141.5	161.0	54.8	45.6	71.0	57.7
대학	연구개발	4.6	7.4	0.8	0.4	2.1	2.0	1.4	0.6	1.1
	시설투자	0.3	0.7	0.4	0.2	3.1	0.2	0.0	0.2	0.1
	교육·기타	0.4	0.8	0.3	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1
	소 계	5.2	8.8	1.5	0.6	5.3	2.2	1.4	0.7	1.3

자료: 과학기술정보통신부, 「우주산업실태조사」 각년도, 저자 정리.

<부표 2-6> 기관별 지재권 현황(특허 등록)

(단위: 건)

구 분		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
전체	국내특허	237	284	214	228	210	251	304	216	237
	국회특허	20	13	15	29	19	16	36	37	25
	실용신안	0	5	4	1	0	0	0	1	0
기업체	국내특허	40	89	68	42	52	53	66	50	88
	국회특허	3	2	1	3	3	1	2	1	8
	실용신안	-	5	4	1	-	-	-	1	-
연구기관	국내특허	186	167	133	146	114	123	144	145	117
	국회특허	16	10	12	16	12	10	16	35	13
	실용신안		-	-	-	-	-	-	-	-
대학	국내특허	11	28	13	40	44	75	94	21	32
	국회특허	1	1	2	10	4	5	18	1	4
	실용신안	-	-	-	-	-	-	-	-	-

<부표 2-7> 기관별 지재권 현황(특허 출원)

(단위: 건)

구 분		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
전체	국내특허	385	310	306	269	211	296	282	184	176
	국회특허	67	58	47	66	36	58	35	11	40
	실용신안	1	1	0	3	0	1	0	0	0
기업체	국내특허	54	58	59	46	20	54	46	49	48
	국회특허	6	9	5	2	1	-	4	0	16
	실용신안	-	1	-	1	-	1	-	0	-
연구기관	국내특허	312	218	207	178	145	145	166	112	98
	국회특허	57	44	41	56	31	53	15	9	19
	실용신안	1	-	-	1	-	-	-	-	-
대학	국내특허	19	34	40	45	46	97	70	23	30
	국회특허	4	5	1	8	4	5	16	2	5
	실용신안	-	-	-	1	-	-	-	-	-

<부표 2-8> 기업체 매출액, 수출입, 분야별 내수 현황

(단위: 십억원)

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
A. 기업체 전체 매출, 시장규모 및 수출입 현황									
매출액	2,073	2,478	2,488	2,779	3,393	3,291	3,261	2,782	2,570
시장규모	2,823	3,406	3,074	3,289	3,822	3,762	3,601	2,940	2,763
내수	1,102	1,318	1,544	1,633	1,577	1,513	1,987	2,095	1,964
수출	971	1,160	943	1,146	1,816	1,778	1,274	687	605
수입	750	928	586	510	429	471	340	158	193
무역수지	222	231	357	637	1,387	1,307	934	529	412
B. 내수 현황① (기업체 전체 분야)									
정부부처	50	47	95	52	55	66	99	122	136
공공기관	135	199	320	327	340	352	531	543	427
민간기관	200	997	1,062	1,196	431	433	754	1,421	1,399
대학	0	1	0	1	1	1	1	1	2
기타	716	75	68	57	750	661	602	7	1
C. 내수 현황② (기업체 우주기기제작분야)									
매출액	133	230	289	351	380	391	641	775	658
내수	114	209	269	328	361	360	596	721	619
정부부처	1	1	14	19	20	1	8	26	47
공공기관	79	164	192	229	256	276	438	476	379
민간기관	34	38	54	73	73	63	143	211	192
대학	0	1	0	0	1	0	0	1	1
기타	-	4	9	7	12	19	6	7	-
D. 내수 현황③ (기업체 우주활용분야)									
매출액	1,941	2,248	2,199	2,428	3,013	2,900	2,620	2,007	1,912
내수	988	1,109	1,276	1,305	1,215	1,153	1,391	1,374	1,345
정부부처	49	45	81	33	35	65	91	97	88
공공기관	56	35	128	97	85	76	94	67	48
민간기관	167	958	1,008	1,124	358	370	611	1,210	1,208
대학	0	0	0	0	0	0	1	1	1
기타	716	70	59	51	738	641	595	0	1

주: 1) 시장규모=내수+수출+수입.
2) 매출액=내수+수출.

자료: 과학기술정보통신부, 「우주산업실태조사」, 각년도, 저자 정리.

제3장

수소산업 생태계

고 혜 원 (한국개발연구원)

제1절 서 론

전 세계 국가들은 기후변화에 대한 문제와 지속 가능한 경제성장을 목표로 '그린뉴딜'(Green New Deal) 정책 및 법안을 시행하고 있다. 탄소배출을 감소시키고 더 나아가서 이산화탄소(CO_2)를 포함한 온실가스(Green House Gas: GHG)를 배출하지 않는 에너지원을 찾아내는 것이 전 세계적 중요한 과제로 국제에너지기구 IEA(2015)는 지구 기온상승을 2℃ 이하로 유지하기 위해서는 이산화탄소 배출량을 2012년 대비 60% 감축해야 한다고 경고한 바 있다. 탄소배출이 증가함에 따라 지구 온난화가 가속화되고 이상기후와 이상기온의 발현도 잦다. 재생에너지 개발과 보급이 장려되고 효율이 높은 에너지시스템의 구축과 이에 기반을 둔 에너지 수요관리 중심으로 국가 에너지 정책 패러다임이 전환됨에 따라 현재 전 세계 에너지 사용량의 대부분을 차지하는 화석연료의 대체가 시급하다. 오염원을 배출하지 않는 친환경 에너지를 발굴하여 새로운 에너지 패러다임을 일으키고 새로운 성장동력으로써 수소(H_2)가 가장 많은 주목을 받고 있다.

수소는 화석연료를 대체할 수 있는 청정에너지원으로 전 세계적으로 많은 국가들이 수소의 생산과 저장・운송, 활용을 위한 연구 및 기술개

발에 매진하고 있다. 수소는 새롭게 발견되거나 개발된 에너지가 아니라 이미 한 세기 전부터 지속적으로 사용되고 있는 산업용 원료(주로 그레이수소)로 연간 약 8,000만톤의 수소가 생산되고 있다.[1] 특히, 우리나라가 세계적 경쟁우위를 보유하고 있는 반도체와 디스플레이 제조, 암모니아 제조, 광섬유 제조, 석유정제, 화학원료 등 다양한 분야에서도 수소가 사용되어 왔다.

그렇지만 전 세계적 국가들이 앞다투어 탄소중립이란 트렌드를 향해 나아가고 있다고 하여 우리나라도 저탄소·무탄소란 대세에 무조건적인 기계적 달성을 목표로 정책이나 산업이 매몰되는 것은 크게 바람직한 방향으로 보이지 않으며, 수소에너지의 이점과 우리나라 산업 특성을 고려해 보아야 할 것이다. 탄소중립을 달성하고 온실가스를 줄이는 것도 중요하나, 그것을 일차적인 목표로 맞추기보다는 탄소중립을 하나의 전 세계적 메가트렌드로 보고 그 트렌드 안에서 어떻게 국내 산업을 육성할 것이고 메가트렌드에 따라 바뀐 국제질서 안에서 우리나라의 수출산업을 어떻게 재편할 것인가를 고민해 보면 수소가 중요할 수밖에 없을 것이다.

본 장에서는 수소산업 생태계 현황을 살펴볼 예정으로 제2절에서는 수소경제의 개념과 중요성을 논하고 전 주기에 걸친 수소산업에 대해 개관한 후, 제3절에서는 수소산업에 대한 시장 동향 등 산업생태계 현황을 알아본 후 마지막으로 제4절에서는 수소법 제정 및 수소산업을 발전시키기 위한 국내 정책 및 전략, 규제 그리고 해외 수소 정책을 살펴보고 비교해 본 후 개선 사항을 검토할 것이다.

제2절 수소경제

본 절에서는 수소경제의 개념에 대한 파악을 목표로 ① 수소경제 개념 및 ② 왜 수소인가에서는 친환경 에너지 중에서 수소를 손꼽는 이유에

1 이승훈(2023)의 수소경제 현황 및 글로벌시장 동향 파트를 참조하였다.

대해 논의할 것이며 이를 바탕으로 ③ 수소산업의 주요 가치사슬에 대해 살펴보고자 한다.

1. 수소경제 개념

수소는 어디에나 존재한다. 화학 주기율표에서 원자번호 1번인 수소는 지구를 넘어 우주에서 75%를 차지할 정도로 풍부하며 지역적인 편중이 없는 보편적인 에너지원으로 장기간 대용량 저장도 가능하며 에너지 효율도 높다.[2] 이러한 특성으로 인해 수소는 미래 에너지 패러다임을 바꿀 이상적인 에너지원으로 지목되어 왔다. 그러나 수소는 흔하지만 쉽게 구하기 어려운 물질로 순수한 수소 그 자체로 존재하지 않고 다른 원자와 함께 화합물의 상태로 존재하므로 수소를 사용하기 위해서는 관련 기술을 통해 수소를 생산해야만 한다. 그러므로 수소를 에너지원으로 활용하기 위해서는 고도의 기술력이 필요하며 낮은 경제성과 기술력의 한계로 인해 지금까지는 일부 특정 산업 영역에서만 사용되어 왔으며 폭넓은 상용화가 지연되어 왔다.

최근 들어 연료전지 발전시스템의 고도화 및 수소전기차의 상용화로 수소산업에 대한 기대가 높아졌다. EU 그린뉴딜 및 코로나19 팬데믹의 여파와 함께 환경과 ESG(Environmental, Social and Governance) 시각에서 에너지 패러다임의 전환으로써 '수소경제' 개념이 부상하였다. 세계 주요국은 그린뉴딜과 수소산업을 신성장 동력 에너지원으로 로드맵으로 지정하면서 국내에서도 정부와 기업 모두 수소경제로의 이행을 주장하고 있다.

그렇다면 수소경제란 무엇일까? 수소경제라는 말은 1970년 미국에서 처음 쓰였다. 미국 자동차 기업 GM(General Motors)의 기술센터 강연에서 Texas A&M 대학교 존 보크리스(John O'Mara Bockris) 교수가 '수소는 석유를 대체하여 에너지 수요를 충족시키는 에너지시스템 및 경제'라는 의미로 처음 언급했다.

---

2 수소의 에너지 밀도는 휘발유의 4배, 천연가스의 3배, 리튬이온 배터리에 비해서 100배 정도 큰 수준으로 운송 수단의 연료로도 상당한 강점을 지닌다(이민황, 2022).

그 후, 1973년 미국 가스기술협회의 그레고리(D.P. Gregory)박사가 'The Hydrogen Economy'라는 제목의 칼럼을 'Scientific American'誌에 게재하면서 수소경제라는 용어가 본격적으로 사용되고 제레피 리프킨(Jeremy Rifkin)이 'The Hydrogen Economy'란 저서를 발간하면서 대중화되었다. 2004년 미국 공학한림원(National Academy of Engineering: NAE)은 수소경제를 '석탄, 천연가스, 원자력, 신재생에너지를 이용하여 수소를 생산하고, 생산된 수소를 저장·운반하는 인프라를 구축하며, 수소를 직접 연소하거나 연료전지를 이용하여 전력을 생산하여 최종적으로 소비하는 에너지 수급 시스템을 기반을 둔 경제'로 정의하며 체계적이고 구체적으로 설명하였다(김나래 외, 2021).[3]

종합해 보면 수소경제는 수소가 국가경제 및 사회 전반에 있어서 근본적인 변화를 초래하여 경제성장과 친환경 에너지 공급의 원천이 되어 기존 화석 연료 등 탄소에 기반을 둔 경제구조에서 수소 중심으로 전환된 미래 경제사회를 통칭한다고 할 수 있다.[4] 수소경제로의 이행에서 핵심은 탄소를 배출하는 화석원료 위주의 에너지시스템 경제에서 수소를 에너지원으로 전환하는 것으로 환경, 에너지, 사회 분야 그리고 경제 분야 등에서 발생되는 여러 문제를 해결할 수 있다고 기대되고 있다.

국내에서는 2020년 '수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률'을 세계 최초로 제정하면서 수소경제를 '수소의 생산 및 활용이 국가, 사회 및 국민생활 전반에 근본적 변화를 선도하여 새로운 경제성장을 견인하고 수소를 주요한 에너지원으로 사용하는 경제 산업 구조를 말한다'고 정의하였다.[5] 즉, 수소경제란 현재의 석탄이나 석유 등 화석연료 중심의 에너지원이 아닌 수소를 주요 에너지원으로 사용하는 경제 산업 구조를 의미한다. 화석연료가 아닌 수소를 활용하여 전기 발전 열 생산 또는

---

3 삼정KPMG 경제연구원, 「수소생산에서 활용까지, 수소경제에서 찾는 기회」, 『인사이트』, Vol.79, 2021.

4 관계부처 합동, 『수소경제 활성화 로드맵』, 2019. 12.

5 '수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률' 제2조(정의)' 참조했다.

<표 3-1> 탄소경제와 수소경제 비교

	탄소경제(Carbon Economy)	수소경제(Hydrogen Economy)
에너지 패러다임	탄소자원(석유, 석탄, 가스) 중심 대부분 수입에 의존(국내 99%)	수소 중심 국내 생산으로 에너지 자립에 기여
에너지공급	대규모 투자가 필요한 중앙 집중형 수급 입지적 제약이 큼	소규모투자가 가능한 분산형 수급 입지제약 적음
경쟁 양상	자원 개발 및 에너지 확보 경쟁	기술 경쟁력 및 규모의 경제 확보 경쟁
환경	온실가스, 대기오염물질 다량 배출(Co_2, NOx, SOx 등)	온실가스 배출이 적어 친환경적 (H_2O)

자료: 관계부처 합동,『수소경제 활성화 로드맵』, 2019. 12.

자동차나 기계, 선박, 열차 등을 움직이게 하는 등 안정적으로 수소를 생산하고 운송하고 저장하는 데 필요한 모든 일련의 산업 분야와 시장을 만들어내는 경제시스템이다(김종기 외, 2019).

수소산업은 일반적으로 수소의 생산과 저장 및 활용 부문과 관련된 산업으로 정의된다(김종기 외, 2019). 수소 산업은 또한 크게 수소를 '생산' 하는 공급 측면과 수소를 '활용'하는 수요 측면으로 구분된다. 공급 부문은 수소 에너지를 생산하고, 생산된 수소를 소비처에 의해 활용되기 전까지의 과정으로 저장과 운송의 활용도 포함된다. 생산된 수소에너지를 수요처인 최종소비자(End-user)에게 운반(운송)하기 위해 필요한 저장용기(저장) 등 다양한 장치 및 인프라도 포함한다. 수요 부문은 수소를 연료 및 원료로 활용하는 부문으로 수소자동차, 수소선박, 수소드론 등 모빌리티와 연료전지(건물용, 발전용, 산업용, 생활용품용 등)와 관련된 산업이 중심이다. 각 수소산업의 생태계 가치사슬 분야별 주요 현황과 특징은 3절에서 서술될 예정이다.

2. 왜 수소인가?

그렇다면 다른 탄소를 배출하지 않는 친환경 에너지원으로 태양광·태양열, 풍력, 수력 등 여러 신재생에너지가 존재하는데 그와 별도로 왜 수소가 주목받는 것일까? 그 이유는 다음과 같다.

첫째, 수소는 저탄소 에너지원이면서 탄소중립을 위해서도 중요한 에너지원이다. 친환경 에너지원으로써 탄소중립 실현에 기여할 수 있는 수소는 산소와 반응하여 전기와 열을 생성하고 부산물로 물(H_2O)을 남기는 친환경 에너지이다. 태양광이나 풍력 등 재생에너지는 활용에 있어서 국내에서는 일부 한계점을 가진다. 기상 여건에 따라 발전량의 편차가 발생되어 에너지 공급에 있어서 가변성이 있고 그로 인한 전력 계통의 부하 문제, 특히 중화학공업 및 중장비 운송은 고온·고출력이 요구되기 때문에 이를 위한 재생에너지로부터 전기화의 어려움 등이 한계로 지적되고 있다. 수소는 이런 재생에너지의 단점을 보완하는 역할을 하는 새로운 에너지로써 더욱 주목받고 있다. 글로벌 탄소 감축 목표를 달성하고 에너지정책의 기본방향인 에너지 전환이라는 목표를 달성하는 데 있어서 수소가 미래에너지로 재생에너지 확산을 촉진하는 역할을 할 것으로 기대를 모으고 있다.

둘째, 수소는 전후방 산업효과가 큰 미래 신성장 동력원으로 각광받으며 이에 따라 수소와 관련하여 다양한 산업생태계 창출이 가능하다. 에너지 전환 과정에서 수소 생산 및 운송 등 인프라 구축을 위한 투자가 촉진되고 산업이 육성되는 과정에서 새로운 일자리 창출이 기대된다. 생산·유통 뿐 아니라 활용 분야까지 전주기 밸류체인이 구축된다면 관련 후방산업과 연계한 내수경제 활성화 및 해외진출도 가능해진다. 특히 모빌리티(승용차, 상용차, 열차, 선박, 드론, 건설기계 등) 전 분야에 수소를 활용하면 새로운 산업시장을 창출할 것이고, 발전 분야에서는 친환경적이면서 고효율적인 전기와 열을 생산하는 연료전지 기술까지 다양한 산업으로 확장될 것으로 보인다. 이처럼 수많은 전후방 협력업체와 연계되어 경제성장에 따른 파급효과가 클 것으로 보인다.

셋째, 수소는 중동 및 산유국에 몰려있는 석유와 같이 특정 국가나 지역에 집중적으로 매장되어 있는 화석원료와 달리 지역적 편중이 없는 보편적인 에너지원이다. 수소는 지구 표면에서는 산소(O_2)와 규소(Si) 다음 세 번째로 많은 원소로, 우주 물질 중 질량 기준으로 약 75%이고 원자 개수로는 약 90%를 차지하는 가장 풍부한 원소이다.[6] 그러므로 현재 화석연료의 97% 이상을 수입하는 국내 상황에서 기술적 난도는 높지만 기술개발을 통해 국내에서 생산된 수소를 활용하여 에너지원을 다각화하게 된다면 해외 에너지 의존도를 낮춰 에너지 안보를 강화할 수 있을 것으로 기대된다.

마지막으로 수소는 에너지의 저장 및 운반이 타 재생에너지에 비교해서 용이하여 활용도가 크다. 재생에너지는 현 기술수준 상태에서 저장기술이 부족하여 실시간으로 사용되어야 하는 상황인 반면, 수소의 경우 운송 및 보관성이 좋기 때문에 활용도가 더욱 높다. 현재 기체상태로 수소를 압축하고 저장하는 기술이 상용화되어 있으나, 부피를 800배 더 줄일 수 있는 액화수소 저장 기술도 빠르게 발전되고 있다. 이런 장점을 고려하여 대안 기술로 수소에너지가 주목받고 있는 것으로 보인다.

여러 가지 수소에너지의 장점에 대해서 논의해 보았으나 수소에너지는

<표 3-2> 수소의 필요성

- 수소의 특징	
친환경 에너지원	- 수소는 열과 전기를 만든 후 부산물로 물을 생성 - 이상기후를 발생시키는 탄소를 포함한 온실가스 감축 실현
미래 신성장 산업	- 신규 미래산업 창출이 가능 - 밸류체인 전반에서 다양한 산업과 연계
에너지 안보	- 해외 수입에 의존하는 화석연료를 국내 생산 기술 개발과 함께 수소로 대체 가능 - 에너지원 다각화 및 에너지 공급 리스크 완화
운반・저장 용이성	- 전력 등 타 에너지원과 비교시 상대적으로 저장이 용이함 - 저장 용이성으로 유통 경제성 및 충전소 인프라 구축에 이점을 가짐

6 네이버 지식백과 – 화학 백과 중 '수소' (https://terms.naver.com/entry.naver?cid=62802&docId=5663136&categoryId=62802, 접속일: 2023. 12. 8).

단점도 존재한다. 마지막으로 언급한 수소의 운반 용이성은 수소의 저장과 운반에 있어서 고도의 기술력을 요하므로 이에 대한 기술개발이 더 선행되어야만 장점으로 승화될 수 있으며 상용화하기에 상당한 시일이 필요할 것이다. 다만, 이는 국내만의 한계가 아니며 전 세계적 국가에서 액화수소 저장 및 운반에 대한 기술개발이 이루어지고 있다. 또한 친환경 수소(그린수소) 생산 단가나 핵심기술 가격에 따른 경제성이 부족하고, 국내 재생에너지 보급률이 낮다는 점, 수소 안전성에 대한 국민 인식이 부족하다는 점 등도 단점으로 언급되고 있다.

그런데 사실 수소는 에너지원으로 뿐만 아니라 이미 생각보다 다양하게 사용되어 왔다. 재생에너지 등 타 원료를 통해 만들어지는 2차 에너지원인 동시에 수소 자체가 1차 에너지원으로 이미 여러 산업에서 원료로 다양하게 활용되고 있다. 석유화학 산업에서 일부 제품 제조에 수소를 투입하거나 부산물로 나오는 수소를 활용하기도 했으며, 정유 과정에서 탈황 공정에서 수소를 사용하기도 하는 등 정유 업계에서 LNG를 개질(改質, reforming)해서 수소를 직접 생산하기도 했다.[7] 그 외 반도체나 LCD 등 제조 과정이나 비료 등 화학제품 제조 과정, 석영유리, 광섬유 등 제조 과정에서도 수소가 투입되어 왔다.[8]

반도체나 디스플레이와 같은 전기기기와 자동차 등 국제경쟁력을 가지는 국내 연관 산업 발달 정도를 살펴보면 수소가 미래 에너지원으로써 전략적으로 선택된 것으로도 보인다. 또한 중공업 및 온실가스 다배출 업종인 제조업 위주로 산업이 구성되어 있는 우리나라는 전체 에너지의 약 1/4 정도의 에너지를 수입하고 있으며 수출주도형 경제구조를 가지고 있다는 점에서 수소는 타 재생에너지보다 활용도 측면에서 장점을 가지고 있다고 판단된다.

---

7 개질이란 형태를 재구성한다는 의미로 재료의 성분에서 화학구조의 형태를 전환하고 그 과정에서 원하는 재료를 합성하여 추출하는 방법이며, 개질 수소는 촉매를 사용하여 천연가스나 석탄가스 등 탄화수소를 수소와 일산화탄소로 분해하여 생산되는 수소이다.

8 『JTBC』(2023. 9. 4).

3. 수소산업 생태계 현황(산업 밸류체인)

「수소산업 육성을 위한 특별법안」(2018. 8. 6)에 따르면 수소산업을 수소의 제조, 포집, 정제, 저장, 운반, 충전, 연료전지 등 수소 이용과 관련된 산업으로 정의되고 있다. 수소산업은 일반적으로 수소의 생산과 저장, 그리고 활용과 관련된 산업으로 보고 있고, 크게는 수소에너지를 공급하는 부문과 수소를 활용하는 수요 부문으로 구성된다.

공급 부문은 수소에너지의 생산 및 저장, 운송 등의 범주로 정의되며 수소의 이동 및 운송을 위한 저장용기, 부품 등 다양한 장치와 인프라를 포함한다. 수요 부문은 수소 모빌리티(수소 자동차, 수소 선박, 수소 드론 등)와 연료전지(건물용, 발전용, 산업용, 생활용품) 및 가스터빈 등과 관련된 산업이 중심이다. 수소산업 밸류체인은 보통 생산, 저장, 운송, 충전 활용 단계로 주로 구성된다. 최종소비자가 수소를 에너지원으로 이용하면 수소 충전소를 거쳐 활용하거나 충전소를 거치지 않고 바로 활용처로 운송하기도 하므로 충전 단계는 선별적으로 포함되기도 한다.

가. 수소의 공급 부문: 생산

1) 수소 유형

수소는 어떤 원료로 어떻게 생산했는지에 따라 이산화탄소 배출 여부 및 배출량 그리고 명칭이 달라진다. 원재료 및 생산 방법에 따라 대표적으로 그린・블루・그레이수소가 있으며, 그 외 청록・핑크・브라운・블랙・옐로우 등 다양하게 구분된다. 그레이수소와 브라운 수소는 화석연료인 석탄이나 천연가스에서 추출하는 수소이고 블루수소는 이 과정에서 배출된 탄소를 포집(Carbon Capture and Storage: CCS)한 수소이다. 그레이수소는 석유화학이나 철강 산업에서 발생하는 부생 수소와 천연가스에서 얻은 추출 수소(개질 수소)로 나뉜다. 청록수소는 메탄을 열분해하여 생산한 수소이며, 핑크 수소는 원자력 발전을 통해 생산된 전기를 활용해 물을 전기 분해한 수소를 지칭한다. 그린수소는 청정에너지인 재생에너지로 얻은 전력을 통해 물을 전기 분해하여 생산한 수소를 뜻한다.

탄소중립을 이루기 위한 수단으로는 그린수소 생산이 필수겠으나,

<표 3-3> 수소 유형별 특징

구분	원료	특징
핑크	원자력 전기 + 열	- 원자력 발전에서 생산한 전기와 열을 통해 생산한 수소 - 경제성은 높으나 안전성
그린	재생에너지 전기, 물	- 재생에너지를 에너지원으로 만든 전기를 활용 - 물을 전기분해하여 생산한 수소로 CO_2 미발생 - 높은 생산단가 및 재생에너지 활용으로 인한 지역 제한이 존재
청록	메탄 천연가스	- 천연가스(메탄:CH_4)를 고온반응기에 주입하여 얻은 수소 - 고체탄소(카본블랙)로 분해되어 CO_2 미발생 - 그린수소 대비 적은 전력량으로 생산 가능(장점)
블루	메탄, 석탄 천연가스	- 그레이수소 생산 시 배출되는 CO_2를 포집한 수소 - CO_2가 소량 발생하나 포집하여 배출량 저감 가능 - 포집된 CO_2를 활용하기 위한 방안이 필요
그레이	메탄, 석탄 천연가스	- 화석연료에서 SMR 등의 방식을 통해 생산한 수소 - 고순도 수소를 획득하기 위해 정제가 필요 - 부생 수소의 경우 생산량 확대의 한계가 존재
브라운	석탄, 갈탄	- 석탄, 갈탄 등을 고온·고압으로 가스화시켜 수소 생산 - 수소생산 방식 중 CO_2가 오히려 많이 발생

자료: 김나래 외(2023).

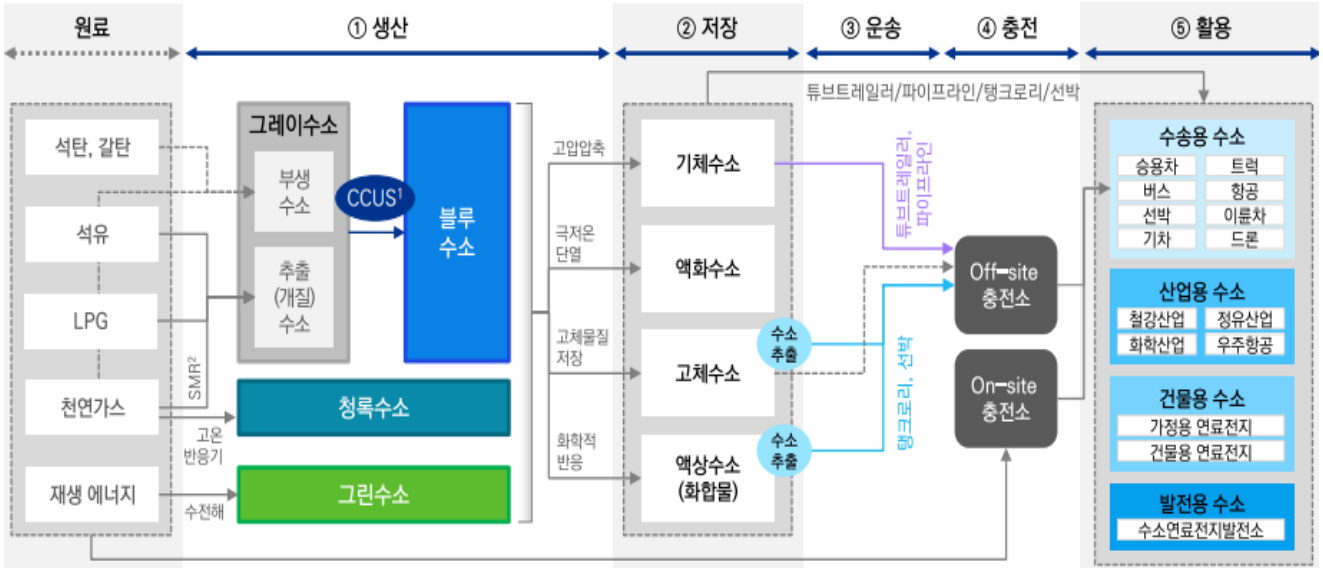
[그림 3-1] 수소 생산기술 분류

(단위: kg/kgH_2)

구분	그레이	블루	그린	브라운	핑크
	가스저장/파이프라인 → SMR → 그레이 수소	가스저장/파이프라인 → 증기메탄개질 (CO_2 포집) → 블루 수소	태양/바람 → 전기분해 (H_2O, O_2) → 그린 수소	석탄 → 가스화 → 브라운 수소	원자력 → 전기분해 (H_2O, O_2) → 핑크 수소
공정	수증기 개질	수증기 개질 + CCUS	전기분해	가스화	전기분해
탄소 배출량	9.2~11.1	1.2~3.9	0.3~1.0	10 이상	소량

자료: 『가스신문』(2023. 2. 15).

[그림 3-2] 수소산업 밸류체인



주: 1) CCUS(Carbon Capture Utilization & Storage)는 이산화탄소 포집, 활용과 저장.
2) SMR(Stream Methan Reforming)은 수증기 메탄 개질.
자료: 김나래 외(2021).

단기간 내 그린수소 생산은 기술적으로 어려우며 아직 상용화하기에는 높은 생산 단가와 같은 현실적인 문제 등을 고려하여 개질 수소로 충당되고 있으며, 대응 방안으로 블루수소와 청록수소가 그린수소의 생산이 상용화되기 전까지 주요 수소 에너지원으로 주목받을 것이다.

2) 수소 생산 방식에 따른 분류

1세대 수소 생산 방식으로는 화석연료를 이용한 방법으로 수증기, 이산화탄소, 부분산화, 자열개질 및 직접 분해의 방법이 주된 방법이었다. 비화석연료를 활용한 방식으로 잉여전력 활용 등의 전기분해와 열화학분해, 생물학적 분해 및 광화학적 분해 방법이 2세대 수소 생산 방식으로 전기분해를 통한 수소 생산이 가능해졌다(김종기 외, 2019). 국내에서 생산되고 있는 수소의 공정 방법 비율로는 나프타 분해(54.1%), 천연가스 개질(17.2%) 소금물 전기 분해(22.6%)의 순으로, 아직은 국내 시장에서 유통되고 있는 수소량은 많지 않으나[9] 향후 기술이 개발되어 생산능력이 강화된다면 수소경제 전략 로드맵의 수소에너지 생산 목표에 이를 수 있을 것으로 기대되고 있다.

수소는 현재 대부분 화학연료 기반으로 생성되며, 화학 공정 부산물로 발생하는 수소를 제외하고 천연가스의 수증기 개질에 의한 생산방식이 가장 경제적인 대량 생산방식이다. 현재 상용화하고 있는 공업용 수소 생산은 주로 탄화수소의 스팀 개질법이나 물의 전기 분해법 등이며, 주로 천연가스나 석유가 원료 및 동력원으로 사용되므로 탄소배출이 발생한다.[10]

수소 생산기술로는 수증기 매탄 개질법, 부분산화 방법, 자열 개질 방법, CCS(탄소포집), 열화학적 방식, 생물학적 방식, 수전해 방식 등이 있다. 수증기 메탄 개질법은 수소 생산 중 가장 저렴한 방법으로 세계 총수소 생산의 절반 정도가 이 방법을 사용하고 있으며, 천연가스의 주성분인

---

9 산업통상자원부(2014), p.171 <표 3-46> 참조.

10 SMR(Steam Methane Reforming, 스팀 천연가스 개질), POX(Partial Oxidation, 부분산화), ATR(Autothermal Reforming, 자기열 개질), 수전해(Electrolysis) 등 수소 생산 방법이 있다.

<표 3-4> 수소 생산 분류 방법

1차 분류	2차 분류	
원료	화학반응	에너지원
화석연료 이용	개질 반응	가스연료(LNG, LPG)
		부생 가스
		합성연료(메탄올, DME)
	가스화	석탄/ 펫코크
	생물학적 전환	생물학적 CO 전환
바이오매스 폐자원 이용	가연성 폐자원 가스화	가연성 폐자원
	바이오매스 가스화	바이오매스
	생물학적 발효	생물학적 제재
물 분해	수전해 (전기분해)	알칼라인(AEC)
		고분자전해질막(PEMEC)
		음이온교환막(AEM)
		고체산화물(SOEC)
	광분해	광전기화학(PEC)
		광촉매
		광생물학
	열분해	열화학 사이클
		레독스 사이클
	원자력	초고온 가스

자료: 조재현(2023), p.28.

메탄(CH_4), 프로판(C_3H_8) 등을 촉매를 통해 고온(700~1,000℃), 고압(3~25 Bar)의 수증기와 반응해 수소를 제조하는 기술이다. 부분산화 방식은 탄화수소를 이산화탄소와 물로 완전히 산화하는 방식으로 필요한 산소의 양을 제한하고 반응시켜 수소를 생산하는 방식이다. 자열 개질 방식은 수증기 메탄 개질과 부분산화 방식을 혼합하여 반응하는 방법으로, 가스화는 고체상 연료가 산소・스팀과 반응하면서 수소가 포함된 합성가스로 전환되는 방법으로 수소를 막(membrane)을 통해 분리하거나 흡착기를 통해 포집한다. CCS는 이산화탄소(CO_2)를 포집 및 처리하는 기술을 의미한다. 바이오매스 활용 열화학적 방식은 가스화 반응에서 연료를 바이오매스로 사용한 것이며, 바이오매스 활용 생물학적 방식은 광분해법과 발효법으로

<표 3-5> 수소의 생산 방식

	방식	원료	사용에너지	기술 수준
비화석 연료기반	전기분해	소금물, 물	전기	상용화
	열화학적 분해	물	원자력, 태양열	개발중
	생물학적 분해	물 및 바이오매스	열, 미생물	개발중
	광화학적 분해	물	태양광	개발중
화석연료 기반	수증기 개질	천연가스, LPG, 나프타	열	상용화
	이산화탄소 개질	천연가스	열	-
	부분산화	중질유, 석탄	열	상용화
	자연개질	천연가스, LPG, 나프타	열	상용화
	직접분해	천연가스, 나프타	열(플라즈마)	상용화
	석탄 가스화	석탄	열	개발중
	부생 가스	석유제품의 원료합성	열	상용화
	제철소 고로	석탄	열	미활용

자료: 김기환 · 안지영(2022).

나뉜다. 광분해법은 박테리아와 미세 조류 등 미생물이 반응에 참여하여 수소화 효소 시스템을 통해 직접 물 분해하여 수소를 생산하는 방식이며, 발효법은 탄화수소로 구성된 바이오매스가 미생물에 의해 발효되면서 유기산으로 전환됨과 동시에 수소를 생산하는 방식이다. 마지막으로 수전해 수소 생산법의 기본 원리는 물을 전기 분해하여 산화환원 반응을 유도하여 수소를 생산하는 방식으로 알카라인법, PEM (Polymer Electrolyte Membrane: 고분자 전해질막)법, SOEC(Solid Oxide Electrolysis: 고체산화물)법이 있다(이안나, 2021).[11]

나. 수소의 공급 부문: 저장

수소는 압력과 온도의 변화에 따라 그 물리적 형태가 바뀐다. 수소 저장은 온도나 압력에 따른 수소의 상태, 즉 물리적 형태에 따라 기체 저장, 액체 저장, 고체 저장, 그리고 다른 물질을 첨가한 물질 변환 저장 등으로 구분된다.

11 수전해 기술에 대해서는 제3절에서 좀 더 상세히 설명될 예정이다.

기체 저장은 기체 상태의 수소에 고압을 가해 저장하는 방식으로 LPG를 운반하는 형식과 비슷하며, 과거 우리나라는 LPG를 운반하는 기술을 경험한 바 있어 이와 유사한 기술이 정립되어 있다. 그러나 대용량으로 저장하는데 한계를 가지며 압력용기 등 설비도 비싸다는 단점을 가진다. 기체 상태에서 -253℃가 되면 수소는 액체로 변환되는데, 이때 액체수소(액화수소)는 기체수소 대비 부피가 1/800로 줄어든다. 즉, 액체수소는 고압기체수소(200bar)의 4배 수준의 저장밀도를 가지며 기체수소 대비 대용량 저장이 가능하고 폭발 위험까지 낮다. 하지만 수소를 액화하기 위해서는 액화수소플랜트 등 추가적인 인프라 구축에 막대한 자금 투입이 필요하다.

고체 저장 방식은 저장 합금 등에 수소를 저장하는 방식이 있으며, 낮은

<표 3-6> 수소의 물리적 상태와 화학적 물질 변환에 따른 저장 방식

	물리적 방식		화학적 방식	
	고압축 수소	액체수소	LOHC	암모니아
특징	- 상온·상압에서 기체 - 기체 수소 저장 시, 압출을 가해 부피를 줄여야 하며 고압 유지 필요	- 극저온 상태(-253℃) 유지 시 액화 - 기체 대비 에너지 밀도 높음. - 대기압 수준에서 저장 가능	- 수소에 다른 물질을 가해서 변환 - 액화수소 대비 액체 상태 유지 용이	- 수소에 질소 가해 암모니아로 변환 - 액화수소 대비 약체 상태 유지 용이 - 단위 부피당 수소 저장 밀도 높음
부피·에너지 밀도	일반 수소의 463배	일반 수소의 865배	일반 수소의 574배	일반 수소의 1,467배
장점	- 저렴한 구축비용 - 가장 보편화된 기술 - 소형 모빌리티 적용 가능	- 상압 저장 가능 - 에너지 저장밀도 高 - 저장 용기 안정성	- 기존 인프라 사용 가능(석유화학 시설) - 장기간 보관 가능	- 기 인프라(프로판) 사용 가능 - 높은 에너지 밀도 폭발 위험성 低
단점	- 일정량 이상 저장 불가 - 낮은 에너지 저장 밀도 비싼 저장 용기	- 액화 시 많은 에너지 소모 - 대규모 시설비용 필요 - 기화 손실로 장기간 보관 불가	- 유기화학물 회수 재생 공정 필요 - 상업화 연구 필요	- 냄새, 독성으로 인한 취급 주의

자료: 장현숙 외(2023)을 참조하여 저자 작성.

압력으로 수소를 저장하기 때문에 가장 안전한 저장 방식이라 할 수 있으나, 저장용량에 한계가 있고 합금 비용이 비싸다는 단점을 가진다.

물질 변환한 수소는 액상유기수소운반체(Liquid Organic Hydrogen Carrier: LOHC),[12] 암모니아 등 화학적으로 변환하여 저장하는 기술이다. 액상유기수소 저장은 액화수소 대비 액체 상태 유지가 용이하고 상온·상압의 조건에서 대규모로 이송이 가능하지만 탈수소화 공정이 필요하다. 암모니아 저장은 수소에 질소를 가해 암모니아로 변환한 형태로 단위당 저장밀도가 높으나, 바로 암모니아를 연료로 사용해야 한다는 단점이 있다. 화학적 물질 변환인 LOHC와 암모니아 저장의 경우 화학적 재변환을 위한 기술과 비용도 추가적으로 고려되어야 한다.

다. 수소의 공급 부문: 운송 방식

수소 운송은 수소 상태와 운송 거리, 1회 운송 시 운송 규모, 운송 주기에 따라서 운송 방식이 나뉜다. 운송 방식으로는 파이프라인(배관), 튜브트레일러, 액화 탱크로리·선박, 액상 탱크로리·선박 등이 주로 사용되며, 국내 또는 해외에서 생산된 수소의 효율적인 운송 방안 및 기술에 대해 현재까지 연구되고 있는 중이다. 기체수소 운송의 경우 파이프라인(배관)과 튜브트레일러 방식이 주로 사용되며 액체수소는 탱크로리 및 선박으로 운송하는 방식이 주로 쓰인다.

파이프라인은 공급지와 수요지를 배관으로 연결하여 수소를 운반하는 방식으로 건설비용만 100미터당 1억원이 소요되는 등 구축 비용이 비싼 반면, 운송비가 저렴하다는 특징을 가지므로 대량으로 운송할 때는 경제적인 편이다.[13] 튜브트레일러 방식의 경우 수소를 대용량 압축 및 저장을 통해 강재(鋼材)로 만들어진 실린더 또는 카트리지에 담아서 운반하는 방식으로 시설비가 다른 운송 방식보다 저렴하지만, 안전에 대한 수용성이

---

12 LOHC는 유기화합물을 수소 저장, 운송 및 방출을 위한 매개 물질을 사용하여 대용량 수소를 이송하는 기술을 뜻한다.

13 김종기 외(2019), p.72.

낮다는 단점을 가지기 때문에 소규모 단위의 수소 운송(공급)에 유용한 것으로 평가되고 있다. 수소 튜브트레일러는 장거리 운송에 적합하고 파이프라인은 단거리 또는 특정 지역 내 운송에 적합하다.

액체수소는 전술하였듯 탱크로리 방식으로 운반되는데 액화수소, 암모니아 및 액체유기화합물 등 액상수소가 이 방식으로 운송된다. 액화수소의 경우 액화수소플랜트를 통해 -253℃까지 수소를 냉각시켜 액체 상태로 변환 후 탱크로리로 운송하는 방식으로, 대규모로 저장되기 때문에 상대적으로 안전하여 대도시에서도 사용 가능하다. 그러나 액화 시설에 대한 비용이 비싸서 대규모 재정적 지원이 필요하며, 시설 운영 단계에서 전력 소비로 인해 온실가스도 배출된다. 액상 탱크로리는 액상 화합물을 운송하는 방식으로, 톨루엔 등 액상수소운반체에 수소를 첨가하여 탱크로리로 운반하는 기술은 아직 상용화 단계가 아니다. 암모니아 형태의 수소 운반 기술은 요구되는 에너지가 낮고(-33℃에서 액화) 기존 암모니아 저장 및 운송 인프라를 사용할 수 있다는 장점을 가진다. 그러나 저장 부문에서 언급한 것처럼 암모니아를 다시 수소로 변환하는 기술이 아직 초기 개발 단계로 다양한 국가의 연구소에서 기술개발 중에 있다.

라. 수소 충전

운송된 수소는 최종 수요처(활용처)로 바로 수송되기도 하지만 수소충전소로 가기도 하며, 이를 통해 수소연료전지차 등의 충전에 활용된다. 수소충전소는 On-site 충전소와 Off-site 충전소 두 가지 형태로 구분된다.

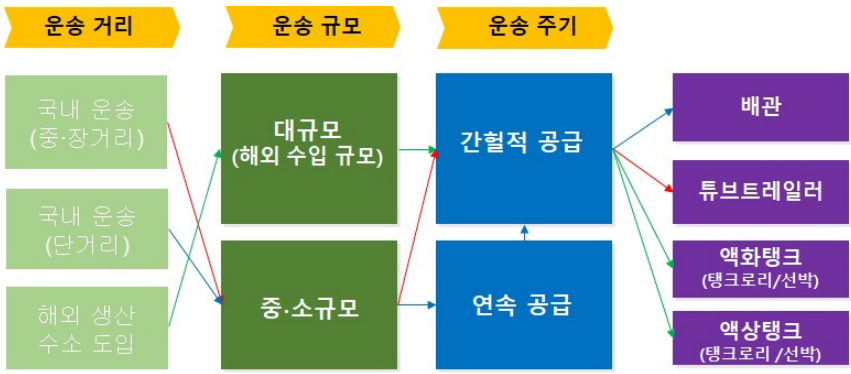
On-site형 충전소 현지 공급 방식으로 충전소 자체적으로 수소를 생산한다. 천연가스, LPG 등을 개질하거나 수전해를 통해 물을 전기 분해하여충전소 현지에서 수소를 생산한다. 천연가스 개질 방식은 기존 천연가스 공급 파이프라인을 활용하여 수소를 생산할 수 있다는 장점을 가지지만, 수소 생산 설비 구축에 비용이 발생한다는 점과 탄소를 발생한다는 단점을 가진다. 수전해 방식은 수소 생산 설비 구축에 비용이 발생하지만 심야 전기에너지(잉여전력)를 활용해 수소를 생산할 수 있으며 친환경

[그림 3-3] 수소 저장 방식별 운송 수단



자료: 김나래 외(2023).

[그림 3-4] 운송 거리・규모・주기에 따른 수소 운송 방식

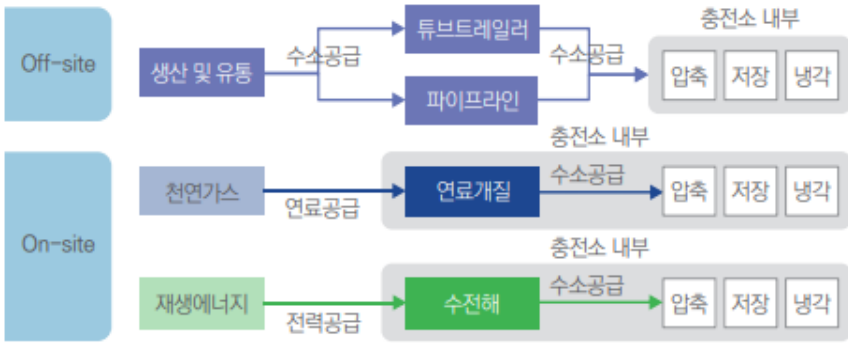


주: 육상에서는 액화탱크 또는 액상 탱크기반의 탱크로리가, 해상에서는 선박을 활용하여 운송.
자료: 김나래 외(2023).

재생에너지를 활용한다면 온실가스 발생 없이 수소를 생산할 수 있다는 장점을 가진다.

Off-site형 충전소는 중앙 공급 방식으로 충전소 외부에서 생산된 수소를 공급받는 방식이다. 수소를 파이프라인을 통해 수소 생산지에서 충전소까지 공급받는 방식과 튜브트레일러를 통해 공급받는 방식이 있다. 앞서 운송 부문에서 서술한 바와 같이 기체수소 상태인 경우 파이프라인과 튜브트레일러를 통해 운송 및 충전이 가능하다. 파이프라인 공급 방식

[그림 3-5] 수소 충전소 유형



자료: 김나래 외(2021).

수소충전소는 생산자와 충전소를 연결하는 운송용 파이프를 설치해야 하는 등 초기 투자비용이 많이 발생하지만, 안정적으로 다량의 수소를 운송할 수 있다는 장점을 가진다. 튜브트레일러 공급 방식 수소충전소의 경우, 운송 인프라 구축을 위한 설비 투자비용이 발생하지 않는다는 장점이 있는 반면, 단점은 운송비용이 발생된다는 점이다. 이렇듯 중앙 공급 방식(off-site)은 대량으로 수소를 생산하여 공급함으로써 운송에 따른 추가적인 비용이 발생한다는 단점이 있다.

마. 수소의 수요 부문: 활용

수소산업의 하류 생태계인 수소 연료전지차(수소자동차)와 연료전지는 우리나라 수소 활용시장에서 대표적으로 경쟁력이 있는 분야로, 이를 중심으로 수소경제 선도국가로 도약하기 위한 기반이 조성되어 있다.

수소는 운송·수송, 산업, 건물, 발전 등 다양한 분야에서 활용될 수 있다. 수송용 수소는 수소를 사용하여 발생시킨 전기에너지를 동력원으로 하는 이동 교통수단에 쓰이며, 수소 연료전지자동차(FCEV)부터 수소 버스, 수소 트럭과 같은 상용차, 기차 선박, 비행기, 드론 등 다양한 분야에서 활용된다. 한국뿐 아니라 세계 주요 각국에서 탄소 저감을 위해 수소 연료전지를 활용한 선박, 트램, 철도, 드론, 중장비(지게차, 건설기계) 등이 개발되고 있다.

1) 산업

철강, 정유, 화학, 우주산업 등에서 산업용 원료나 연료로 사용되는 수소를 산업용 수소라고 한다. 철강 산업에서는 탄소 배출 저감을 위해 철강 제련 과정에서 필요한 환원제를 탄소배출 원료에서 수소로 대체하는 수소환원제철을 개발하고 있다. 철강 1톤 생산을 위해 석탄 0.75톤이 사용되고 이때 약 2톤의 이산화탄소가 배출되는데 이를 수소로 대체하게 된다면 이산화탄소의 배출 없이 생산 활동을 할 수 있다.

한편, 정유 산업은 에너지 효율이 높은 석유 제품을 생산하는 데 수소를 사용한다. 그리고 석유화학 산업에서 수소는 원유를 정제할 때 나오는 부생 수소를 제조 및 공정 내 원료로 사용하거나 정유 산업과 같이 타 산업에 유통과 판매하기도 한다. 마지막으로 우주산업에서 인공위성이나 행성 탐사선과 같이 대형 우주발사체에서 액체수소를 추진연료로 활용하고 있다.

2) 수소 모빌리티

수소를 활용한 수소 연료전지차(Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicle: FCEV)는 크게 승용차와 상용차로 구분된다. 상용차는 화물이나 여객의 수송을 위한 이동 수단으로 버스, 택시, 트럭이 포함된다. 수소차에 수소를 충전하기 위해서는 밸류체인상 사전에 수소가 생산되어 저장한 상태에서 충전소로 운송하여 충전소 수소탱크에 저장하였다가 수소차에 제공하여 마지막 단에 소비되는 과정을 거쳐야 한다. 수소를 사용하여 발생시킨 전기에너지를 동력원으로 연료전지(fuel cell)를 대신 사용하거나 배터리 또는 슈퍼 커패시터[14]와 함께 사용하여 고동모터에 전력을 공급하는 원리이다(이정훈, 2022).

---

14 커패시터(super capacitor)는 수소전지용 에너지 저장 장치를 뜻한다.

3) 발전: 수소 연료전지 및 수소 가스터빈

건물용 수소는 가정과 공공 기관 또는 상업용 건물의 냉난방 등 전기에너지를 수소 연료전지를 활용한 방식으로 '신에너지 및 재생에너지 개발・이용・보급 촉진법'을 바탕으로 태양열, 풍력 등 신재생에너지 공급의무화 제도가 적용되어 상업용 건물에 대한 수소 공급 수요가 증가되고 있다. 한편, 가정용 연료전지는 주택에 설치되는 연료전지로 건물용 연료전지와 같은 정책적 규제가 없으며 전기요금이 현재 가스요금보다 저렴하기 때문에 경제성이 떨어져 활발히 사용되거나 공급되고 있지 않다.

발전사업자 또는 발전 사업을 통해 열・전기를 대용량으로 생산하기 위한 원료로써 사용되는 수소를 발전용 수소라고 한다. 발전 효율을 개선하고자 하는 정부의 의지 및 친환경 에너지원을 사용해야 한다는 정부 정책적 측면의 규제로 인하여 발전용 수소에 대한 필요성(needs)은 지속적으로 증가하고 있다. 국내 에너지 전환 정책과 RPS제도[15]로 인해 발전용 연료전지 설비가 증가하고 있다. 수소경제 활성화 로드맵에 설정된 발전용 연료전지 목표치를 초과 달성한 것을 보면 설비 증가세는 지속될 것이 확실해 보인다.[16]

산업용 수소가 원료로 직접 사용되는 경우를 제외하면 대부분의 활용 영역에서 수소는 연료전지를 통해서 활용되고 있다. 연료전지는 작동 온도에 따라서 고온형과 저온형으로 나뉘는데 일반적으로 연료전지 작동온도가 높을수록 효용성이 좋아지지만 내구성에 대한 문제가 발생하므로 각 연료전지는 특성에 맞게 활용해야 한다.

수소 가스터빈은 수소를 에너지원으로 회전 에너지를 얻는 가스터빈을 의미하며 기존 화석연료를 섞어서 활용하는 혼소(혼한 연소)와 수소만을 연료로 사용하는 전소 방식으로 구분된다. 수소경제 로드맵(2019년)에 의하면 수소 가스터빈은 2030년까지 기술개발을 완료 후 2035년경 상용

---

15 RPS(Renewable Portfolio Standard) 제도는 신재생에너지 의무 비율 제도의 약자이다.

16 2019년 1월 발표된 수소경제 활성화 로드맵에 따르면 발전용 연료전지 공급량 목표는 2022년 기준 1.5GW(내수1GW), 2040년 기준 15GW(내수 8GW)이나 2021년 말 기준 발전 허가를 받은 사업자들의 연료전지 발전 허가 설비 용량이 2022년 연료전지 발전 설비 목표인 1.5GW를 넘어선다.

<표 3-7> 수소 연료전지 종류

구분	고온형 연료전지		저온형 연료전지		
	응용탄산염형 (MCFC)	고체산화물형 (SOFC)	인산형 (PAFC)	고분자전해질형 (PEMFC)	알칼리형 (AFC)
세대	2세대	3세대	2세대	3세대	1세대
전해질	용융탄산염	세라믹	인산염	이온교환막	수산화칼륨
운전 온도	550~700	550~1,000	150~250	50~100	0~230
전기 화학적 반응 효율	45~55%	40~60%	45~55%	40~60%	60~70%
주 용도	중대형 건물 복합 발전, 열병합발전 (100kW~MW)	소·중·대용량 복합 발전, 열병합발전 (1kW~MW)	중형건물 분산전원 (200kW)	수소전기차, 가정용·건물용, 소규모 분산발전용 (1~10kW)	우주발사체 전원
특징	내부 개질 가능, 열병합 대응 가능	내부 개질 가능, 열병합 대응 가능	수소의 불순물인 일산화탄소 내구성 높음, 열병합 대응 가능	저온작동, 고출력밀도	이산화탄소에 민감, 순수한 수소와 산소 사용 필요

자료: 이선명(2021).

발전을 목표로 하고 있다.

시장 성장의 동력은 수소차(FCEV) 확대에 따라 고분자전해질형(PEMFC)가 확대될 것이고, 발전용 연료전지 시장의 진화(SOFC) 등에 기반하며, 수소차 대형화에 따른 용량 확대와 장기적으로는 선박이나 열차와 같은 대형 모빌리티 시장에 대한 기대가 크다.

제3절 수소산업 현황

1. 수소시장 동향

가. 수소 생산·수요

탄소중립 실현의 핵심으로 주목받고 있는 수소에너지는 미약하게 증가하다가 2021년부터 뚜렷한 증가세를 보이고 있다. 국내에서는 특히 2020년까지 탄소를 배출하지 않는 재생에너지 혹은 원전을 기반으로 생산한 그린수소 및 핑크수소의 생산은 거의 없는 것으로 나타났다. 즉, 화석연료 기반의 그레이수소(부생 수소 혹은 추출 수소)가 100%를 차지했음을 의미한다. 2021년 기준 국내에서 생산된 수소 생산량은 203만 1,669톤으로 이 중 약 55%인 113만 1,248톤이 부생 수소이고, 나머지는 개질 수소이다.[17] 2021년 또한 그레이수소 생산이 100%로, 아직 국내에서 그린수소 생산은 기술개발을 통한 미래 기술에 달려있다 할 수 있다.

2021년 기준 국제 수소 총생산량은 9,400만톤으로 생산과정에서 발생된 이산화탄소는 9억tCO2e이다. 그레이수소(천연가스 개질 방식으로 수소 생산)의 비중이 62%로 가장 높은 비중을 차지하고 있고, 석탄으로부터 수소 생산은 19%이며 이는 중국의 주력 수소 방식이다. 나프타 개질의 부산물로 생산된 부생 수소 생산은 약 18%이다(이슬기 외, 2022).[18] 블루수소와 그린수소 등 저탄소 수소의 생산은 100만톤 미만으로 전체 수소 생산의 0.7% 미만이다. 그중 대부분은 CCUS를 활용하여 화석연료로부터 탄소를 포집하여 생산한 수소이며, 수전해 방식으로는 3만 5,000톤이 생산된다. 희망적인 것은 2020년과 비교했을 때 20%가량 증가한 것으로 생산기술 속도가 빠르다는 점이다.

---

17 수소경제 종합정보포탈. 다만, 한국가스공사 발표된 개질 수소 생산 현황: '22: 42톤, '23: 464톤(자료: 『국토일보』, 2023. 10. 24).

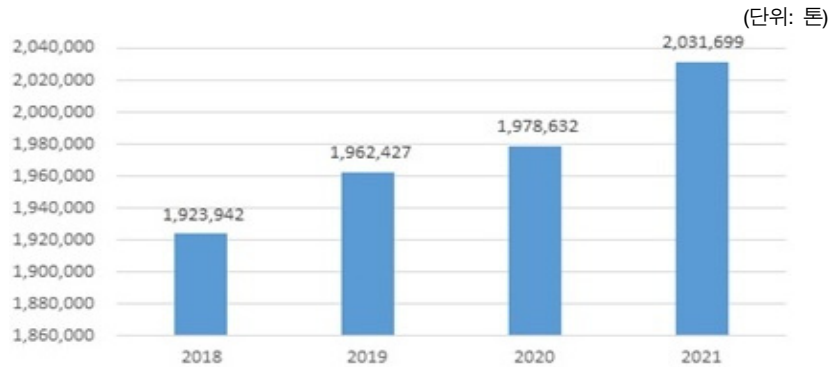
18 이슬기 외(2022).

국내 수소시장 규모는 240만톤(2015년 기준)으로 대부분 산업용 원료로 사용되고 있다. 정부는 2017년 12월 '재생에너지 3020 계획'을 수립했고 재생 전력 보급 확대 정책에 따라 수소 기반의 에너지 저장 산업의 발전될 것이고 수소전기차 보급 증가에 따라 수소 공급 및 저장 등 관련 인프라 시장은 크게 증가될 것이다.

맥킨지(McKinsey&Company)에 의하면 수소 수요는 2030년부터 급증해 탄소중립 원년인 2050년에는 세계 수소 수요는 6억톤 이상으로, 그중 한국의 수소시장 규모가 약 1,690만톤에 달할 것으로 전망되었고, 연간 최종 에너지 수요의 약 21%에 해당한다. 산업용 원료로 주로 쓰였던 수소는 발전, 운송, 건물 그리고 산업 등 다양한 분야에 적용되어 약 70조원의 경제효과가 발생되어 약 60만개의 일자리 창출이 이루어질 것으로 전망되었다.[19] 수소 에너지는 연간 1.5억톤 수준의 이산화탄소를 줄이는 등 탄소 배출 저감을 실현시킬 수 있을 것으로 기대된다.

글로벌 수소 생산시장은 2020년부터 2025년까지 연평균 9.7%로 성장하여 약 1,500억달러 규모의 시장이 될 것으로 전망되고 있으며, 미국과 중국을 선두로 인도와 일본 그리고 독일 등이 키 플레이어가 될 것으로 예상된다.

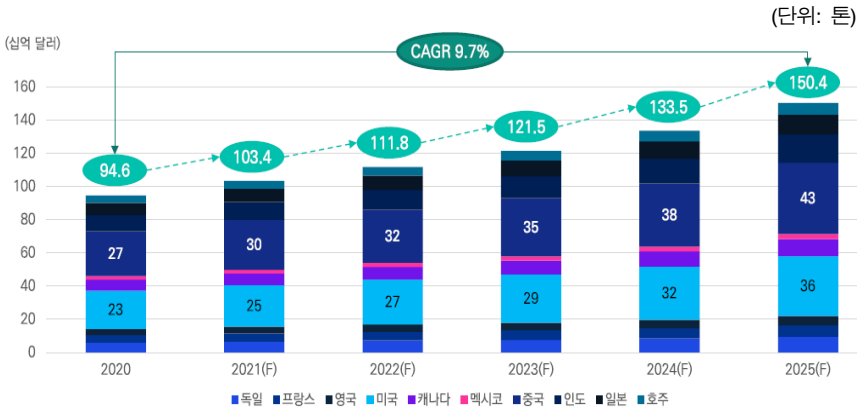
[그림 3-6] 국내 수소 생산량 추이



자료: 『서울경제』(2021. 5. 2), 일부 인용.

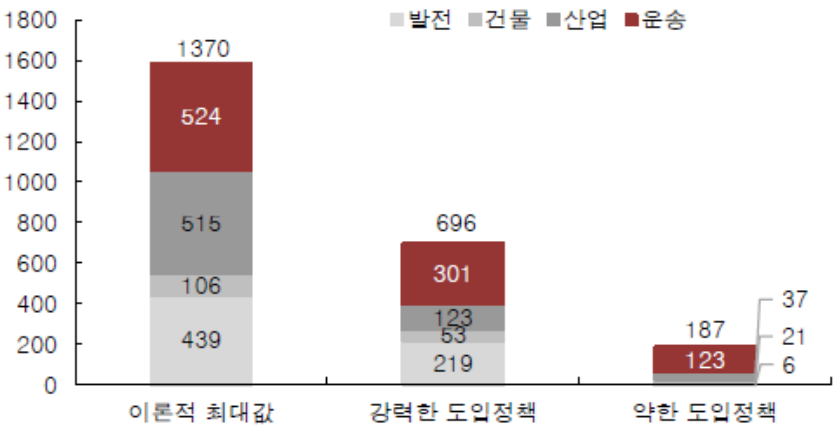
19 『신소재경제』(2023. 5. 4).

[그림 3-7] 글로벌 수소 생산량 추이



주: 수소 생산시장 조사 국가는 미국, 중국, 독일, 프랑스, 영국, 캐나다, 맥시코, 인도, 일본, 호주.
자료: 김나래 외(2023), p.6.

[그림 3-8] 2050년 글로벌 수소 수요 전망



주: 1million tons=1,000㎏임을 감안 시 696million tons=6,960억㎏으로 환산됨.
자료: *Bloomberg*, 딜로이트. 이영원 외(2023), p.17.

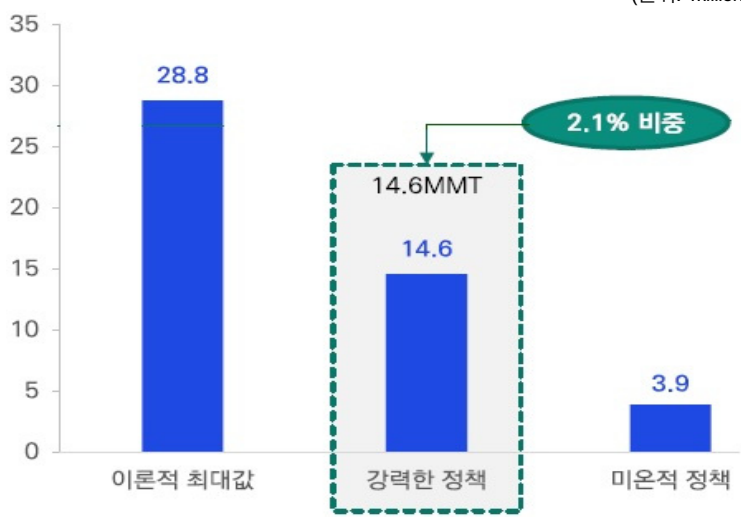
Bloomberg에 의하면 각 국가가 강력한 수소 정책을 실행할 경우 2050년 글로벌 수소 수요는 696MMT까지 증가할 것이라고 전망했으며, 글로벌 에너지 수요 중 한국 점유 비중을 고려하면 국내의 경우 글로벌 수요의 2.1% 비중인 14.6MMT 수준의 수요량이 발생될 것이라 전망되었다(그림 3-9 참고).

IEA(2022)에 따르면 전 세계 각국의 탄소중립에 대한 정책에 힘입어 수소 수요는 2021년 9,400만톤에 도달하여 전년 대비 5% 증가했고 이전 연간 최고치인 2019년 9,100톤을 초과했다(IEA, 2022).[20] 수소에 대한 수요는 1975년 이후 현재에 이르러 3배 이상 증가하였고 수소 생산기술에 투자를 지원하는 국가는 지속적으로 증가하는 등 수소산업 또한 지속적으로 성장할 것으로 보인다.

IEA(2022)의 2050년 수요 추정량은 5억 2,800만톤이며, 수소위원회(Hydrogen Council)의 경우 6억 6,000만톤인 것으로 나타난다. 수소위원회의 추정에 따르면 최대 수요국은 중국으로 1억 9,500만톤 수준일 것이며 한국과 일본이 함께 3,500만톤을 차지할 것으로 예상했다. 한국의 2050 탄소중립 시나리오의 수소 수요량 2,700만톤은 국제기구의 전망 수준을 넘어서고 있다(그림 3-10 참고).

[그림 3-9] 2050년 국내 수소 수요

(단위: million tones)

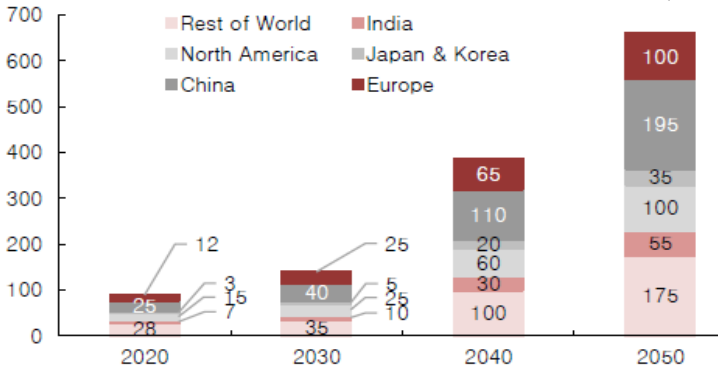


주: 1million tons=1,000㎏임을 감안 시 14.6million tons=146억㎏으로 환산됨.
자료: *bloomberg,* 김나래 외(2023), p.7.

20 IEA, “Global Hydrogen Review 2022,” 2022.

[그림 3-10] 2050년 주요 국가별 수소 수요

(단위: 백만톤)



자료: *Bloomberg*, 딜로이트. 이영원 외(2023), p.17.

나. 수소 저장·운송 동향

2023년 현재 대부분의 수소는 여전히 사용처 근처에서 생산되고 있으며 저장·운송은 기체 방식이 주로 사용되고 있다. 증가하는 수요를 충족하기 위해서 생산지에서 수요처로 수소를 이동시킬 필요가 높아지고 있고 특히 장거리 수소 유통체제 구축을 위해 수소를 액화시키는 액체·액상으로 변환에 관한 기술개발이 진행되고 있다. 주로 석유화학단지 등 생산지와 가까운 곳을 중심으로 파이프라인을 통해 인근 지역 수요처에 수소를 공급하거나, 중장거리의 경우 고압의 기체를 튜브트레일러에 압축하여 운송하는 기체 상태로의 저장 및 운송 방식이 이용되고 있다.

향후 장거리 운송을 위해 경제성이 높은 액체 및 액상 방식으로 수소를 저장하고 운송하는 기술이 필요하며 장기적 관점에서 대륙 간 이동 또는 수소 선박 등 수소를 고밀도 형태(액화 또는 암모니아 등)로 전환하여 활용하는 방안이 개발되고 있다. 다만, 국내의 경우 지난 10년간 수소 밸류체인 전체에서 저장(전환) 및 운송 기술의 특허 출원이 5%를 차지하고 0.6의 집중도(RTA)로 분석되어 생산과 활용 분야보다 상대적으로 낮은 수치를 기록하였다.[21] 수소는 전주기 밸류체인이 함께 개발되어야 하

는 만큼 향후 타 분야와 조화로운 성장을 위해서 저장 및 운송 인프라 기술개발이 가속화될 필요가 있다.

국내 수소 운송설비 중 수소 배관 길이가 가장 긴 권역은 2021년 기준 경상권으로 114.8㎞이며 그 다음은 전라권으로 103.8㎞, 수도권은 12.9㎞이다.[22] 국내 수소 튜브트레일러의 경우 2021년 기준 400bar는 한 대도 없고, 200bar 기준 역시 경상권이 397대로 가장 많았고 그 다음은 중부권으로 279대였으며 수도권은 174대인 것으로 집계된다.

세계 수소 저장시장 규모는 2021년 147억달러에서 4.4%씩 연평균 성장해서 2030년에는 약 217억달러에 이르는 등 저장시장이 운송시장의 성장을 견인할 것으로 예상된다(한국무역협회, 2023). 현재 기체수소 저장체 기반이므로 유통 범위는 자국 내로 한정되어 있으나 향후 저장기술이 발전되면 해외 운송이 가능해져 시장 규모가 성장할 것이다. 액화수소 저장 기술이 상용화되면 연계된 인프라(액화수소 운송 선박, 파이프라인, 튜브트레일러)도 함께 활성화되어 2050년 수소 운송시장은 5,660억달러 규모에 이를 것으로 전망된다(배순한, 2022).[23] 국내에서도 수소 액화 플랜트가 대기업에 의해 건설되고 있으며 2023년 말에서 2024년 초에 가동될 예정이다.

다. 수소충전(충전소)

국내의 수소차(현대차 넥쏘)가 처음으로 탄생한 2019년에 수소충전소[24]는 전국에 31개소로 충전하기 쉽지 않아 충전소가 있는 곳으로 찾아가야 했으며 이마저 수소 공급이 원활하지 않은 경우 되돌아가야 하는 경우도

---

21 장현숙 외(2023).

22 수소경제 종합포털에 따르면 국내 수소 배관 길이는 총 248.4㎞이다. (https://h2hub.or.kr/main/stat/stat_distribute_area_pipe.do)

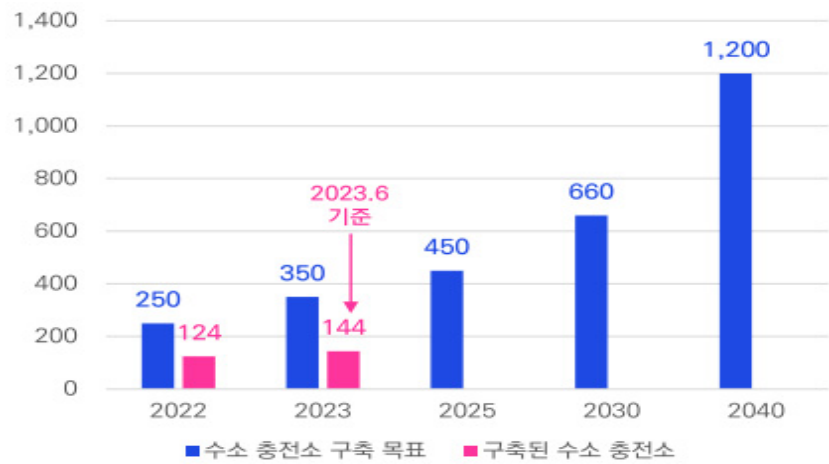
23 배순한(2022).

24 수소충전소는 수소저장용기, 압축기, 디스펜서로 구성되어 있다. 확보한 수소를 압축해 저장하고 이를 디스펜서로 차량에 공급하는 방식으로 차량 충전구에 충전기를 꽂고 5분 정도 대기하면 충전이 완료된다(『가스신문』, 2023. 7. 11).

있었다. 하지만 수소차 외 수소버스와 수소트럭 등 승용차와 상용차 보급이 증가되면서 수소충전소 구축 속도가 빨라졌다. 제2절에서 전술했듯 수소는 공급방식에 따라 오프사이트와 온사이트 충전소로 나뉘며 국내 충전소 대부분은 오프사이트 충전소로 저장식 공급방식이다.

현재 국내 수소차 및 충전소 보급을 담당하는 환경부에 따른 전국 수소충전소는 171개(2023년 6월 기준)[25]로 증가하였다. 다만, 이는 2022년 목표치인 250개보다도 적다.[26] 러시아-우크라이나 전쟁으로 인한 에너지 가격 상승 및 국제금융시장 불안으로 인한 환율 상승으로 인해 수소 제조 및 구매 원가의 급등으로 석유화학 공장 가동률이 낮아지면서 부생수소 양의 감소 등 수소 충전소를 이용하는 소비자들은 수소 수급 부족 문제를 경험한 바 있다. 정부는 수소 수급 현황을 모니터링하면서 생산량을 늘리거나 수송용으로 활용할 수 있는 수소 물량 확보를 위한 정책을 시행 중이다(김나래 외, 2023).[27]

[그림 3-11] 수소 충전소 현황



자료: 환경부, 무공해차 통합누리집.

25 『가스신문』(2023. 7. 11)은 179개, 월간수소경제(2023. 9. 5)에 따르면 171개로 집계되고 있어 여기서는 최소치를 인용한다..

26 환경부 보도설명자료(2022. 10. 24)를 참조했으며, 2023년 수소충전소 목표치는 350개이다.

27 김나래 외(2023. 6).

라. 수소 활용(수소자동차, 수소 발전 및 연료전지)

우리나라는 생산과 저장·유통 등 타 밸류체인 대비 모빌리티 부문에서 적극적인 지원과 함께 목표를 설정하여 2022년까지 수소차 6.7만대(수소승용차 6.5만대, 수소 버스는 2천대)를 국내 보급할 계획을 제시한 바 있다(산업부, 2018).

2019년 수소경제 로드맵 수립 후 후속 대책 수립과 핵심기술 개발 등 약 3천 7백억원을 집중적 지원하여 글로벌 수소 시장을 빠르게 선점하였다. 특히 활용 분야인 수소차의 경우 2019년 연간 수소차 보급 대수와 신설 충전소 수에서 모두 세계 1위를 차지한 바 있다. 2020년 기준 연간 전 세계 수소차 판매량이 6,500여 대로 2019년 대비 약 35.3%의 성장률을 보이면서 전 세계수소차 시장점유율의 70%에 육박하였다. 수소트럭은 현대자동차가 세계 최초로 양산체계를 갖추고 2025년까지 1,600대의 수소 트럭(10톤급)을 스위스에 수출하는 계약을 체결하기도 했다. 한편, 국내 발전용 수소 연료 전지에서도 2019년 기준 발전량이 408MW로 국내에서 글로벌 보급량의 40%를 점유하여 세계 최대 수소전지 발전시장으로 올라선 바 있다.

수소차와 연료전지 기술은 이미 상용화 이후 기술고도화 단계이며 정부 보조금 등 정부의 정책적 지원을 바탕으로 시장 규모가 빠르게 성장하고 있다. 다만, 기존의 수소차 중심에서 해외의 수소경쟁국들과 같이 상용차, 철도차량 건설기계, 지게차, 선박, 드론 등 기술을 확대해 나가야 할 것이며, 수소발전 중 연료전지시스템 제작 및 운영 기술은 세계 최고 수준으로 앞서고 있으나 핵심소재·부품의 해외 의존도가 높아 경제성 확보 및 소재 부품의 국산화 및 고도화가 추진되어야 할 것이다. <표 3-9>는 국내 수소차의 수출현황으로 2022년 넥쏘의 내수판매는 1만대가 넘었으나 수출은 361대로 그 수가 감소한 것을 확인할 수 있다. 수소차 분야에서 국내 시장은 앞선 기술력을 바탕으로 세계 선두를 유지하고 있지만 전체 시장 규모가 작고 차량용 반도체 수급난, 원자재 가격 상승, 우크라이나 사태 등 여러 악재로 자동차 시장이 위축되고,[28] 최근 역성장

<표 3-8> 수소 모빌리티 보급 현황 비교

국가	수소차 (상용)	지게차	기차	연료전지 (가정・건물, MW)	연료전지 (발전용, MW)
한국	30,786 (321)	-	-	18	882
북미	15,700 (80)	60,000	1	500	235
일본	8,150 (132)	397	-	480	10
유럽	3,116 (313)	335	14	490	10
중국	298 (12,984)		2	-	-
총계	58,050 (13,839)	60,732	17	1,470표	1,137

주: 1) 글로벌 통계: IPHE 2023년 3월 기준, 중국 23년 4월 기준.
2) 한국: 2023년 4월 말 기준(연료전지: 2023년 3월 기준 KHFCIA).
자료: 이승훈(2023).

까지 나타나고 있는 실정이다. 다만, 상대적으로 충전 인프라 구축이 쉬운 상용차 시장에서 수소기술이 충분한 경쟁력을 가져갈 수 있고 장기적으로는 일정 수준 이상의 수소승용차 수요가 발생할 것이며 성과를 낼 것으로 전망된다.[29]

이렇듯 수소 산업은 공급 측면(생산・저장・운송)과 수소를 이용한 수요측면(고정형 연료전지 발전, 수소연료전지 모빌리티 등)의 다양한 밸류체인으로 구성되어 있다. 최근 수소 인프라 업체는 그린수소 생산을 위해 노력하고 있으며 수소연료전지는 수소열차, 수소선박 등 대형 모빌리티

<표 3-9> 국내 수소차 수출 현황

	연도					
	2018	2019	2020	2021	2022	2023.01~07
차량 수	227	788	1041	1121	361	240

자료: 수소경제 종합정보포탈.

28 『월간수소경제』(2023. 3. 27).
29 『대한경제』(2023. 6. 14).

로의 활용이 확대되고 있다. 또한 자국 및 해외 합작사 출범 등 연료전지 시스템 업체와 모빌리티 업체들의 협력을 통해 수소연료전지 모빌리티 개발도 활발하다. 한편, 최근 들어 암모니아가 수소 캐리어로서 저장 운송의 역할 뿐만 아닌 발전 원료로도 사용 가능하다는 점을 바탕으로 활발한 기술개발 및 암모니아 공급에 대한 국제협력이 이어지고 있다.

2. 국내 수소산업 투자동향

국내의 경우 2019년 수소경제 활성화 로드맵을 시작으로 2020년 수소기술개발 로드맵, 2021년 제1차 수소경제이행 기본계획 및 2022년 제5차 수소경제위원회 등 정부가 주도하여 수소경제 이행 마스터플랜을 수립하여 각 부처의 수소 관련 사업 예산을 지속적으로 증가했다. 특히 수소연료전지차 및 수소충전소 보급 확대전략이 수립됨에 따라 관련 부처의 R&D 및 비R&D 지원사업 규모가 확대되었다(김기환 외, 2022).

2018년부터 2023년까지 지난 7년간 정부 예산 내역을 확인한 결과 6개 부처에서[30] 정부 예산으로 지원한 수소 관련 사업은 총 84개(R&D 사업 54개, 비R&D 사업 30개)였다. 수소경제 정책이 정부에 의해 본격적으로 시작되기 전인 2017년과 2018년 수소 예산은 약 750억원 규모였으며 2019년 정부예산이 2,783억원으로 급격히 증가하였다. 2022년에는 1.1조원의 정부 예산이 수소 분야에만 편성되었고 2023년에는 1.2조원이었다.

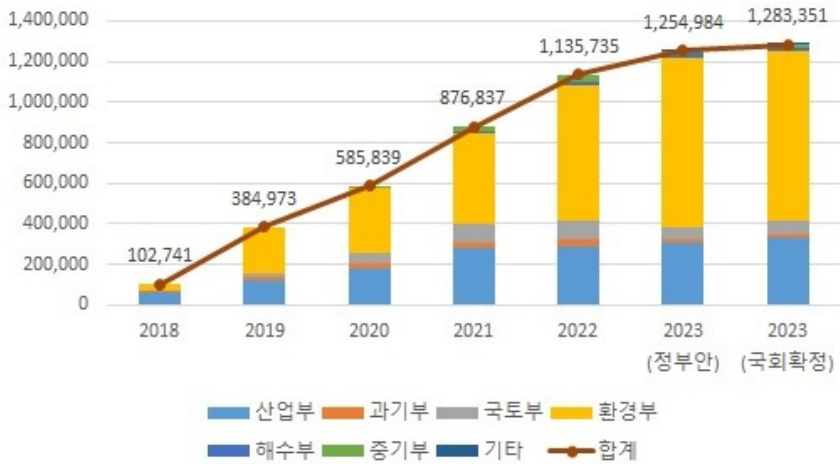
환경부 지원 예산의 비중이 가장 높았는데 이는 환경부의 「수소연료전지차 보급사업」[31](비R&D 사업)에 전부 투입된 예산이다. 수소차(수소 승용차, 수소 버스, 수소 트럭) 1대당 지원액이 책정되어 있으며 수소 충전소 사업비도 지원하고 있어 총 지원 예산 규모가 타 사업에 비해 높고, 2022년 기준 정부의 수소 관련 사업 예산의 약 58%를 차지하고 있다. 동 예산은 2023년 사업명이 변경되어 3개 사업[32]으로 구분되었고 그중

---

30 산업부, 과기부, 국토부, 환경부, 해수부, 소방청이 해당된다.

31 환경부 주관으로 수소차 구매 및 수소충전소 건설에 따른 보조금을 지급하는 지원 사업이다.

[그림 3-12] 부처별 수소 관련 사업 예산



주: R&D 및 비 R&D 지원 사업 총합.
자료: 제4회 수소경제와 한국의 수소기술 심포지엄('23.8.23) 발표자료, H2Korea 제공자료 가공.

'무공해차 보급사업—수소차 보급' 하나만 살펴보았을 때 전년 예산에 비해 약 461억원 감소된 것으로 보이지만(2022년 6,795억원, 2023년 6,334억원) 2022년에는 수소충전소 설치사업도 포함된 예산이므로 분산된 3개의 사업 총액으로 보았을 때는 8,363억원으로 증가된 것이다. 수소차 보급 예산 편성 시 수소승용차는 1만 6,000대, 수소승합차 700대, 수소화물차 100대, 수소청소차 120대에 대한 구매 지원을 목표로 설정하였다. 이는 전년도 수소차 보급계획 물량에 비해 보급된 수소차 대수가 적었다는 점을 감안한 조정을 통해 소폭 감소되었다.[33]

충전 인프라 구축 사업의 경우, 2022년 4,202억원이었고 2023년은 986억원(23.5%) 증가한 4,189억원으로 편성되었다. 이 중 수소충전소 구축사업에 1,896억원을 집행했고, 전기·수소충전기 운영비로 258억 6천만원

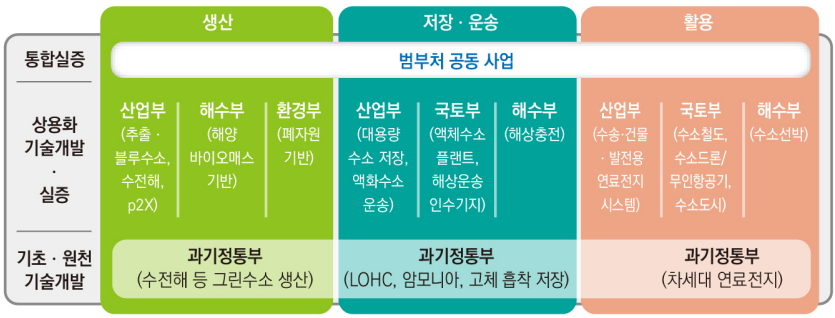
32 환경부의 사업 '수소차 보급 및 수소충전소 설치사업'은 2023년부터 '무공해차 보급사업-수소차 보급'과 '무공해차 충전인프라 구축-수소충전소 설치,' '무공해차 충전인프라 구축-운영비 보조'로 사업명이 변경되어 3개로 구분되었고, 이 세 예산은 2023년 총예산 중 65%를 차지한다.

33 『에너지신문』(2023. 1. 1).

이 편성되었다. 또한 수소 충전소 구축 사업[34]으로 2022년 152억 8,700만원 대비 18억 3,000만원이 감액된 134억 2,700만원이 투입되었다.

부처별 수소 R&D 영역 구분은 [그림 3-13]과 같다. 「제1차 수소경제 이행 기본계획」에 따르면 수소 밸류체인에 따른 R&D 영역이 구분되어 있다. 미래 신기술에 대한 기초와 원천 기술개발은 과학기술정보통신부(과기정통부)에서 생산, 저장운송, 활용 등 밸류체인 전 단계에서 전담하고 있다. 상용화 기술개발 및 실증은 산업통상자원부(산업부), 해양수산수(해수부), 국토교통부(국토부), 환경부에서 전담 분야에 따라 나누어 지원한다. 전 주기에 걸쳐 부처 간 협력이 필요한 통합실증 사업의 경우 범부처 공동 사업으로 진행하고 있다(김기환 외, 2022). <표 3-10>은 수소

[그림 3-13] 부처별 수소 R&D 영역 구분



자료: 김기환 외(2022), p.45.

<표 3-10> 전 부처 수소 관련 R&D 예산

(단위: 백만원)

	2018	2019	2020	2021	2022	2023
R&D	65,996	92,130	182,169	268,642	333,157	313,656
비R&D	36,745	292,843	403,670	608,195	826,578	969,695
총예산	102,741	384,973	585,839	876,837	1,159,735	1,283,351

자료: 제4회 수소경제와 한국의 수소기술 심포지엄(2023. 8. 23) 발표 자료 슬라이드.

34 수소충전 구축사업은 상업 운영으로, 적자가 발생되면 수소청정소에 연료비를 보조하는 사업이다(민간경상보조).

관련 R&D에 대한 전 부처의 R&D 및 비R&D 예산을 비교한 것이다.

3. 국내 수소사업 추진 현황

가. 국내 수소 생산기지 현황

한국의 수소 산업은 정부의 적극적 지원 및 육성정책을 바탕으로 빠르게 성장하여 왔다. 수소경제 로드맵(2019)과 제1차 수소경제 이행 기본계획(2021)에 따라 수소생산기지 구축 사업이 2019년부터 추진되었다. 2023년까지 초기 수소생산 기반을 조성하기 위해서 부생 수소 및 개질 수소 생산기지를 구축한 후 청정 생산 기술을 점진적으로 도입할 예정으로 2022년부터는 청정 수소 생산 기반을 구축하고자 수전해 기반 생산기지(2022)와 탄소포집형 수소 생산기지(2023)를 구축할 예정이다. 2022년 예산집행이 완료됨에 따라 개질 수소 생산기지 구축 사업은 종료되었고 2023년부터는 그린수소 생산기지 구축 사업을 시작하여 진행 중에 있다(장현숙 외, 2023).

2022년에 생산된 수소의 양은 약 242만톤으로 추정되며,[35] 그중 42.97%

<표 3-11> 수소생산기지 구축 사업 진행 세부 현황

(단위: 억원)

구축 사업명	지역	사업기간	예산
소규모 수소생산기지	창원, 삼척, 평택, 대전, 부산, 춘천, 인천, 완주	2019~20년 (단년도 사업)	400
중대규모 수소생산기지	광주, 창원 평택	2020~22년	196
출하센터	울산, 서산, 여수	2019~22년	128
수전해 공급 인프라	부안, 평창	2022년~	117
탄소포집형 수소생산기지	추진 예정	2023년~	21

자료: 장현숙 외(2023), 수소산업 경쟁력 강화를 위한 정책연구: 친환경 수소생산을 위한 주요국 정책 비교, Trade Focus 2023년 12호.

35 EG-TIPS 에너지온실가스 종합정보 플랫폼(https://tips.energy.or.kr/carbon/Ggas_tatistics04.do, 접속일: 2024. 1. 3)

<표 3-12> 국내 수소 생산기지 및 출하센터 구축 현황

유형	지역	설치시기	생산량(톤/年) 및 출하량(톤/일)	운영기관
소규모 생산기지	경남 창원	2021. 4.	330, 460Nm3/h(1톤/일)	제에엔케이히터
	강원 삼척	2022. 9.	429, 600Nm3/h,(1.2 톤/일)	디에이치투에너지
	경기 평택	2022. 7.	2,350, 3,300Nm3/h(7.1톤/일)	한국가스기술공사
	대전 동구	2023. 3.	430, 600Nm3/h(1.2 톤/일)	대전도시공사
	부산 기장	2023. 3.	430, 600Nm3/h(1.2 톤/일)	인천그린공사
	인천 중구	2023. 3.	430, 600Nm3/h(1.2 톤/일)	
	전북 완주	구축 예정	-	
중대규모 생산기지	광주 광산	구축 예정	-	
	경남 창원	구축 예정	-	
	경기 평택	구축 예정	-	
수소 출하센터	전남 여수	2022. 8.	7.8톤/연	덕양에너젠
	울산 남구	구축 예정	-	
	충남 서산	구축 예정	-	
수전해 기반 수소 생산기지	전북 부안	구축 예정	-	
	강원 평창	구축 예정	-	
	강원 동해	구축 예정	-	
	충남 보령	구축 예정	-	
탄소포집형 생산기지	충북 청주	구축 예정	-	

자료: 수소경제종합포털(https://h2hub.or.kr/main/stat/stat_product_base.do, 접속일: 2023. 12. 14).

가 제조방식으로 생산된 개질(추출)수소이고, 나머지 56.84%는 산업공정 과정에서 배출된 합성가스를 정제하여 생산한 부생 수소이다.[36] 2018년 기준, 86%의 부생 수소는 산업용 공급원료로 사용 및 자체 소비가 되고 그 외 나머지 14%는 외부로 유통・판매되어 석유화학, 반도체, 금속공업 등에 사용되고 있다.

36 정유, 화학업종과 달리 기타(정유, 화학업종 외 식품, 섬유, 금속, 요업 등)의 경우 수소 에너지 생산 현황이 부생 수소와 개질 수소로 구분되어 있지 않아 합산이 100%가 되지 않는다.

나. 국내 수소실증 프로젝트 현황

국내는 청정수소 수요가 더 많기 때문에 상당 부분의 청정수소 공급량을 해외에서 도입해야 한다. 이에 정부는 2021년 10월 수소 자급률 향상 및 에너지 안보를 강화하고자 한국이 주도하여 글로벌 수소공급망을 구축했다. 해외 청정수소 개발부터 운송・저장, 활용에 이르기까지 밸류체인별 관련 민간기업들과 연합하여 청정수소를 생산・도입하는 「H2STAR 프로젝트」를 추진하고 있다. H2STAR 프로젝트는 2030년 청정 암모니아를 약 941만톤 국내로 도입하여 이를 수소로 환산하면 약 171만톤의 청정수소가 국내로 도입될 것으로 예상된다.

<표 3-13> 청정수소 밸류체인 프로젝트(H2STAR)

(단위: 만톤, 암모니아)

국내 거점	진출지역	국내 기업	2030년 도입규모
당진/태안	호주	글로비스 등 10개사[1)]	300
영흥/인천	칠레, 사우디, 호주	롯데정밀화학 등 6개사[2)]	87
삼척	호주, 사우디, 오만, 말레이시아	포스코 등 17개사[3)]	440
동해	UAE	GS에너지 등 7개사[4)]	114
보령	보령 블르수소 생산 프랜트 건설	SK E&S 등 2개사[5)]	-

주: 1) (생산)한국가스공사, 현대글로비스, (운송・저장)현대글로비스, 한국조선해양, (활용)중부, 동서, 서부발전, 현대자동차, 현대제철.
2) (생산)롯데정밀화학, 두산중공업 등, (운송・저장)롯데글로벌로지스, (활용) 남동, 서부발전.
3) (생산)롯데정밀화학, 롯데케미칼, 포스코 등, (운송・저장)한국조선해양, 포스코인터네셔널, (활용)남부발전, 삼천리 등.
4) (생산)GS에너지, 포스코, (운송・저장)현대글로비스, 삼성엔지니어링 (활용)GS에너지, GS칼텍스, 효성.
5) (생산)SK E&S, 중부발전 (활용)중부발전.
자료: 김기환 외(2022), 이승훈(2023) 발제문을 참고로 저자 작성.

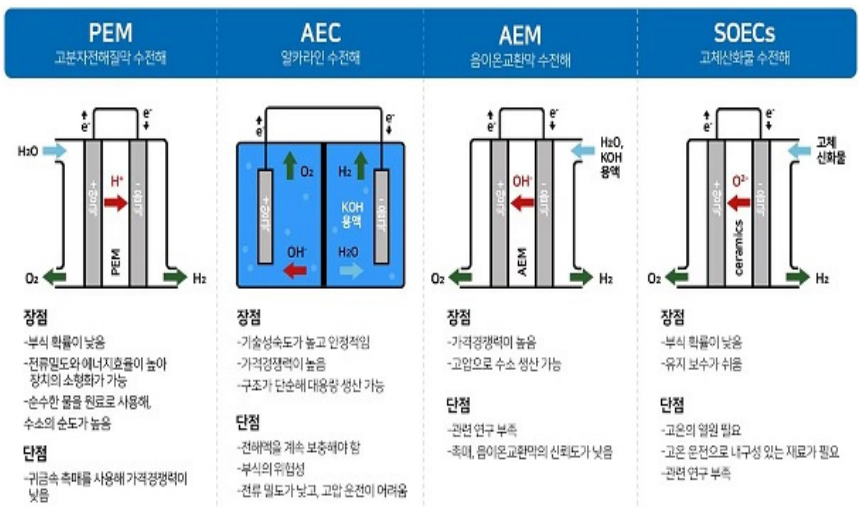
4. 연구개발 동향

가. 수전해

수소 생산 분야에서 향후 수소 수요가 증가될 것으로 예상되고 있으나, 앞서 언급한 바와 같이 (해외와 마찬가지로) 국내 수소 공급원은 지금까지 부생 수소 및 개질 수소이며, 수요량을 충족시키기엔 부생 수소로는 생산량 확대에 한계가 있어 다양한 수소 생산 기술 확보가 필요하다. 다행스럽게도 관련된 다양한 기술 기반이 확보되어 있어서 국내 기술력은 우수한 편이다. 2025년까지 천연가스 개질기술 개발을 통해 저가 수소 대량 생산기술을 확보하고, 2030년까지 수소 생산량 증대를 위한 고효율・대용량 수전해 시스템 기술을 개발하는 것을 목표로 하고 있다.

수전해를 통해 생산된 친환경 그린수소가 그레이수소(개질수소) 대비 경제성을 가지려면 하루 평균 4.8시간의 신재생 여유 전력이 필요하다(전혜영 외, 2021). 그러나 국내 재생에너지 발전량은 적어 2030년 수전해

[그림 3-14] 수전해 설비의 종류



자료: 『조선일보』(2023. 7. 12).

수소 생산량이 21만톤에 불과할 것으로 추정되며, 따라서 상당 부분의 그린수소는 수입에 의존할 수밖에 없는 실정이다. 그리하여 태양광 및 풍력 등 다양한 재생에너지원과 연계한 실증을 통해 친환경 수소로 점진적 전환을 계획하고 있다.

그린수소를 생산하기 위하여 국내뿐 아니라 미국, 영국, 프랑스, 독일, 일본 등 여러 국가에서 수전해 기술을 활용하여 그린수소 생산 기술개발이 진행되고 있다. 2022년 기준 저탄소 수소 생산기술로 알칼라인(Alkaline: ALK)과 고분자전해질막(Polymer Electrolyte Membrane: PEM) 생산이 시장성장기(market uptake)에 들어선 것으로 보이며 고체산화물(Solid Oxide Electrolysis Cell: SOEC) 수전해, 음이온 교환막(Anion Exchange Membrane: AEM) 수전해 기술은 초기 단계로 빠르게 발전하고 있다. 고체산화물 수전해(SOEC)는 그중 가장 고도화된 기술로 아직 기초연구단계에 머물러 있으나 향후 기술개발이 완료되어 상용화된다면 그린수소 생산 및 발전 기술을 모두 보유하게 되어 시너지 효과가 클 것이다(전혜영 외, 2021). 수소 생산 분야에서 특히 주목되는 주요 기술로는 중소형 개질 수소생산 시스템과 알칼라인・고분자전해질 저온 수전해 시스템, 재생에너지 연계 P2H기술이 있다(이정훈, 2022).

해외에서는 수전해방식의 재생에너지 확대 보급에 따른 계통 안정화 및 그린수소 생산을 상용화하기 위해 다수의 P2G 프로젝트[37]가 진행되어 기술개발이 진행되고 있다. P2G 프로젝트의 기술은 미활용 재생에너지 전력을 이용하여 물을 전기 분해하여 수소를 생산 후 저장하거나 다른 물질로 전환하는 기술로 주로 재생에너지 자원이 풍부한 유럽에서 활발히 진행되고 있고 2021년 기준 약 100개 이상의 과제가 운영되고 있다.[38] 일본도 태양광과 알칼라인 수전해를 연계하여 수소를 생산 저장(압축 수소), 운송(튜브트레일러) 활용(연료전지, 전가치)을 실증하여 전주기 비즈니스 모델 개발을 목표로 2030년까지 연구 개발을 진행하고 있다.

---

37 P2G(Power to Gas) 기술은 재생에너지 전력을 사용하여 물을 전기분해 한 후 생성된 수소를 저장하거나 다른 물질로 전환하는 기술이며, 1988년 이후 160개 이상의 프로젝트가 22개 국가에서 진행되고 있다.

38 한국 전력연구원 공식 블로그(2023. 5. 17).

국내에서도 정부 주도 R&D 사업을 기반으로 재생에너지 확대 보급에 따른 그린수소 생산을 위한 다수의 Power to Gas(P2G) 프로젝트가 진행되고 있고, '재생에너지 장주기 저장 및 전환을 위한 Power to Gas(P2G) 기술개발 사업'에 총 19개 산・학・연[39]이 참여하여 '재생에너지 이용 극대화를 위한 2MW급 하이브리드 수전해(알칼라인 및 고분자전해질막 수전해) 수소 생산 및 저장 기술개발'에 대한 핵심기술 확보 및 MW급 하이브리드 수전해 테스트베드(Test-bed) 구축되고 운영되는 등 총 3개의 세부 과제가 진행되었다. 최근에는 총 12.5MW급 재생에너지 연계 대규모 그린수소 실증장 구축 및 운영을 목표로 한 연구과제가 한국남부발전 주관으로 알칼라인 수전해 2MW, 고분자 전해질막 수전해 7MW, 음이온 전해질막 수전해 2MW, 고체산화물수전해 1.5MW로 총 네 가지의 수전해 시스템이 2026년까지 제주도에 구축될 예정으로 그린수소 생산에 대해 기대를 모으고 있다(조재현, 2023).

나. 액화수소

수소를 활용하거나 대량으로 생산된 후 수요처를 찾지 못할 경우 혹은 운송비용 절감을 위해 대용량의 수소를 저장 및 장거리 운송을 해야 할 필요성도 높아지고 있다. 이에 따라 기체 저장 및 운송 기술을 고도화하여 수소 운송량을 증대하고, 수소를 대량으로 안정성 있게 저장 및 운송이 가능한 액체수소(수소액화)・액상수소화물 저장・운송기술에 대한 기술개발도 추진되고 있다.

수소 저장・운송 분야에서 주목되는 주요 기술로는 고압기체저장 탱크, 중・장거리 수소 배관망, 튜브트레일러용 대용량 복합재용기, 액상수소화물 수소저장・추출시스템, 수소액화 플랜트, 액체수소 저장탱크, 액체수소 탱크로리 액체수소운송선 화물창 등이 있다(이정훈, 2022). 최근에는 액화수소시장(수소액화 및 액체수소 저장기술) 및 암모니아 변환

39 한국동서발전, 한국중부발전, 두산, 엘켐텍, 지필로스, 한국에너지기술연구원, 고등기술연구원, 한양대학교 등 총 19개.

및 크래킹 기술도 주목받고 있다. 총 18개 기관이 '상용급 액체수소플랜트 핵심기술개발사업'을 통해 핵심장비를 국산화하고 대용량 액화수소 저장탱크를 개발 중에 있다. 2022년 강원 액화수소산업 규제자유특구에서 국내 기술로 액체수소 생산시설과 충전소를 처음으로 실증하는 '액체수소 생산 및 고정식 충전소 제작 실증'이 착수되고 있다.[40]

대규모 액화수소를 공급하기 위한 액화·액상 탱크에 대한 기술개발도 필요하다. 액화·액상 탱크에 탱크로리와 선박이 있는데 일부 국내 기업이 규제 샌드박스「액화수소 운송을 위한 전용 탱크로리 운영 실증」승인을 산업통상자원부로부터 받았고 실증사업을 시작했으나[41] 이는 아직 세상에 없는 기술을 개발하는 것으로 많은 리스크가 따른다.

5. 수소산업 동향

수소산업은 수소의 생산과 수소의 저장·운송, 수소의 활용(충전 포함)을 전(全) 주기로 본다. 이 모든 가치사슬 중 무엇 하나 할 것 없이 생산부터 활용까지 모든 분야가 유기적으로 연결되어 있으며, 수소(에너지)의 움직임은 순환되어야 하며 어느 부문에서든 취약한 부분이 발생되면 그 부문의 앞·뒷단에 문제를 가져올 수 있다. 즉, 수소의 생산에서부터 최종 활용까지를 모든 부문을 고려한 균등한 발전 및 포트폴리오를 요한다.

그동안 수소산업 육성하기 위하여 정부는 최근까지 일부 활용 분야에 제도적·재정적인 지원에 적극적이었고, 수소자동차와 발전용 연료전지 등 세계 최고 수준의 보급 실적을 가져오며 우위를 차지했다. 본래부터 자동차 제조업 강국인 우리나라는 수소자동차 제조에서도 빛을 발했고 연료전지 발전 분야에서도 기술적으로 발전되어 왔다. 충전 분야도 국내에서 수소전기차 등 모빌리티 분야가 많이 발전되고 보급됨에 따라서 충전소의 수도 그만큼 증가했다. 반면, 수소 밸류체인 구조의 앞단인 생산과 저장·운송 부문의 발전은 상대적으로 취약한 편이다.

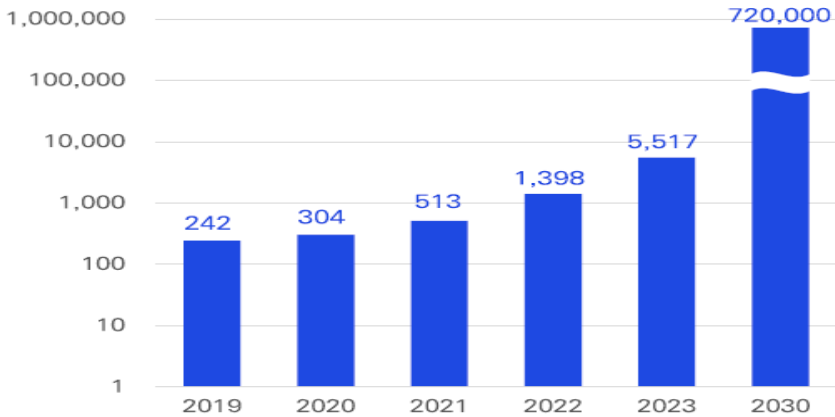
---

40 『월간수소경제』(2023. 3. 31).

41 *NBNews*(2022. 12. 21).

TMR(Transparency Market Research)[42]에 의하면 전 세계 그린수소 시장이 '21~'31년까지 연평균 51.6% 성장할 것으로 전망됨[43]에 따라 수전해 설비 수요도 증가되고 있다.[44] 정부는 대규모 수전해 실증 및 상용화를 통해 그린수소를 2030년에는 25만톤 2050년에는 300만톤까지 국내에서 생산할 예정이라고 발표했으나,[45] 정책적 목표와 달리 그린수소 생산의 핵심인 국내 수전해 기술 수준은 선도국보다 낮으며 설비 비용이 높아 대규모 상업화에 도달하지 못하고 있다. 높은 재생에너지 비용과 낮은 기술성숙도에 의해 야기되는 높은 수소의 생산단가가 걸림돌이 되고 있다. 전기요금을 낮추는 것도 필요하지만 수전해의 설치비용의 하락을 유도할 수 있는 기술개발이 수반되어야 한다. 해외의 기술들은 상용화

[그림 3-15] 전 세계 수전해 설비 설치 규모 전망



자료: 김나래 외(2023.06), 원자료: IEA.

42 TMR(Transparency Market Research)은 미국과 인도 기반 시장조사 기업.

43 Green Hydrogen Market(https://www.transparencymarketresearch.com/green-hydrogen-market.html, 접속일: 2023. 8. 28).

44 김나래 외(2023. 6).

45 국내 청정수소 생산 목표량: 2030년 100만톤(그린수소 25만톤, 블루수소 75만톤)이며 2050년 500만톤(그린수소 300만톤, 블루수소 200만톤)(https://www.h2news.kr/news/article_print.html?no=11158).

수준인 반면, 우리나라는 실증하는 단계로 상용화까지 아직 미흡한 상태이다.

수소 시장 확대로 수소의 운송 및 저장에 대한 필요성이 커지는 상황에서 국내 기업들의 수소 저장 및 운송 기술 발전도 필요하다. 수소 저장 및 운송의 경우 일부 핵심기술에 있어서 국내 기술이 부족한 부분은 있으나 전반적으로 봤을 때 매우 난도가 높은 기술을 요하는 것은 아니기 때문에 경쟁의 여지가 있다는 의견도 있다.

다만, 밸류체인 전 단계를 고려한 균형 있는 개발이 필요하다. 예컨대 충전소 인프라가 없는 상황에서 플랜트를 설립하게 된다면 추후 플랜트의 가동으로 수소 물량이 급증할 것이고 이를 바로 활용하거나 또는 충전할 수 없다면 에너지 낭비가 될 것이다. 실제로 수요처가 부족한 상황이 없도록 액화수소 관련 충전소 등 수요 인프라 확보가 시급하다. 당장 SK, 효성, 두산 등 국내 대기업이 액화수소 플랜트 설립 후 운용으로 국내 액화수소 생산량이 4만 4천톤(2023년)에서 최소 10만여 톤(2026년)으로 증가될 것으로 관측되어 수요 창출 방안 마련이 필요하다.

국내에서 운영되고 있는 액화수소 충전소는 아직까지 없는 상태이며 인프라 구축도 필요하다. 하지만 2023년은 액화수소 생산의 원년으로 충전소를 비롯한 인프라 구축에 대한 정부의 지원이 기대되고 있는 만큼

<표 3-14> 수소의 물리적 특징에 따른 가치사슬별 특징

	기체형태의 수소	액체형태의 수소
저장	- 상온에서 저장 - 고압 압출 필요(200~700bar) - 고압 용기 필요	- 대기압에서 저장 - 액화 상태 유지하기 위해 -253℃의 극저온 단열 필수
운송	- 고압 수소 운송→폭발 위험성 高 - 튜프트레일러 또는 파이프라인 적합	- 대기압에서 운송→폭발 위험성 低 - 탱크로리로 운송
충전	- 액화 수소 충전소 대비 충전소 부지 면적 大	- 기체 수소 충전소 대비 충전소 부지 면적 小
활용	- 산업용, 발전용 등 다양하나 주로 파이프라인을 통해 공급받는 산업용은 기체 수소 필요	- 대부분 운송용 연료 - 국가적 전략 사업(로켓 추진 연료 등) 에도 활용

정부도 수소경제 활성화를 위해서 2030년까지 액화수소 충전소 70곳에 대한 설치비를 70%까지 지원할 예정이며,[46] 수소버스에 대한 정부 보조금 신설 등 액화수소 수요 창출 지원 정책 등 시장 활성화 방안을 제시할 것으로 보인다.

국내기업들이 액화수소에 집중하는 것에는 액체 형태의 수소가 기체 수소 대비 저장・운송・충전・활용 전 주기에서 장점을 가지고 있어 현재 활용되고 있는 국가전략사업을 비롯하여 운송용 연료로서 액화수소가 추후 액화수소 충전소를 통하여 활용도가 높을 것으로 예상되기 때문이다. 전 세계 상용급 액화수소 플랜트는 액체형태의 수소를 필요로 하는 분야가 증가함에 따라 증가하고 있는 추세로 북미, 유럽, 아시아 내 40개 사이트에서 매일 401톤의 액화수소가 생산되고 있다(2022년 기준).[47]

한국은 재생에너지 공급의 한계로 수소 분야에 있어서도 순수입 국가로 분류되며 해외 생산 수소의 도입이 필수적일 것으로 예상된다. 한국과 매우 유사한 상황인 일본의 경우 액화수소 운반선 개발에 일찍이 뛰어들어 2022년 1월 세계 최초로 액화수소 운반선 개발 및 호주에서 생산한 액화수소를 일본 자국까지 운송하는 시범 운항에 성공한 바 있다. 국내의 경우에도 액화수소 운반선 개발에 속도를 내고 있고 포스코와 현대중공업이 협업을 통해 액화수소탱크 개발을 추진 중으로 2025년 상용화를 목표하고 있다.

저장 및 운송 방안으로 전술했던 수소의 액화 보관・운송하는 방식과 수소 화합물의 일종인 암모니아 형태로의 방식이 대기업에 의해 각기 선택하고 있다. 그린수소를 생산하여 질소와 합성시키면 그린수소 저장 매체로 사용 가능하다는 점에서 암모니아가 주목받고 있다. 암모니아는 까다로운 액화와 에너지 밀도가 낮은 수소의 단점을 극복하기 위한 방안으로 고려되고 있다. 수소는 -253℃가 끓는점이므로 액화하기 어렵고 장기 보관이 현재 기술 상황에서 다소 어려운 반면, 암모니아의 경우, 끓는점

---

46 시사저널e(2023. 7. 24.)
47 김나래 외(2023. 6).

이 −33.34℃로 상대적으로 높고 액화수소보다 에너지 밀도가 높고 보관이 쉬우며 운송이 액화수소에 비해서 경제적[48]이다. 또한 암모니아의 제조 공정 난이도가 높지 않으며 수소 캐리어 이외에도 그 자체로도 비료 등으로 활용할 수 있다는 점이 장점으로 꼽힌다.

수소는 암모니아와 달리 수소 자체를 다른 물질로 변화하지 않는다는 장점을 가진다. 또 저장된 에너지를 사용할 때 수소는 암모니아보다 효율상 장점을 가지는데 액화수소는 끓는점이 매우 낮고 별도의 화학적 반응이 필요하지 않아 적은 노력으로 수소를 뽑을 수 있으며, 암모니아와 달리 독성과 악취가 없다. 이러한 각각의 장단점을 가진 액화수소와 암모니아에 국내 대기업들 기술개발 및 설비투자를 하고 있으며 한국이 글로벌 수소 강국으로 거듭나기 위해서는 다양한 수소 수요 창출 및 수소 활용처 확보와 정책적인 측면에서 강력한 지원이 필요할 것으로 보인다.

업체들은 각 사가 보유하고 있는 생산기술의 수준 및 수입 노선 등에 따라 회사의 경쟁력이 결정되기 때문에 각 기업별로 강점을 둔 방향으로 수소 산업에 뛰어들고 있는 것으로 보인다. 국내기업 중 SK E&S, 효성중공업, GS칼텍스 등은 차세대 수소 저장・운송 기술로 액화수소 선택했으며, 포스코, 롯데케미칼, SK이노베이션 등은 암모니아를 수소로 전환하는 기술을 개발하며 투자하고 있다.

예컨대, SK E&S의 경우, 도시가스, LNG, 전력 사업을 기반으로 수소 등 그린 포트폴리오를 구축하였다. 천연가스(LNG) 개질 과정에서 발생하는 탄소를 포집하여(CCUS) 블루수소 중심의 청정수소 인프라를 구축하고 추후 그린수소 밸류체인으로 전환하여 생산부터 저장운송 및 활용까지의 전 밸류체인을 일괄 구축하는 포트폴리오를 추진하고 있다. 롯데케미칼의 경우 기업의 시초가 비료 사업이었던 만큼 비료의 원재료인 암모니아 제조 기술을 바탕으로 그린수소 등을 암모니아 형태로 전환하여 국내로 들여오는 사업을 추진하고 있다. 암모니아 유통에 있어서 아시아 최대 규모(90만톤/년으로 동북아의 21%)를 가지며 국내 최대 공급 인프

48 암모니아는 같은 양의 수소와 비교하여 운송비의 3배, 저장비는 30배 저렴하다.

라(국내의 약 70%) 암모니아에서 수소를 추출하는 기술개발을 추진하고 있다.

6. 국내 수소 산업 생태계

산업의 경제 규모를 파악하고 살펴보기 위해서 국내에서 사용되는 데이터 및 설문조사 자료를 활용하는 것이 효과적이다. 새로운 산업에 대한 정책을 추진하기 위해서 그 산업의 경제 규모를 파악이 선행되어야 할 것이다. 정부의 예산이 국한되어 있고 자원을 잘 활용되어야 할 만큼 산업이 어떤 가치사슬로 구성되어 있는지, 기업 규모가 어떻게 구성되어 있는지, 매출액은 얼마나 발생되는지, 가치사슬 단계별 고용은 몇 명이나 발생되고 있는지, 얼마나 산업 관련 기술개발을 위해 투자가 되고 있는지 등에 대한 이해가 뒷받침되어야 한다.

그러나 신산업은 데이터 부재 및 관련 산업에 대한 전업도의 문제로 정확한 경제적 규모를 추정하는데 있어 어려움이 있으며 수소 산업도 역시 그러하다. 산업통계를 활용하기 위해서 통계 데이터에서 분석 대상 산업에 해당하며 산업분류체계에 맞추어 분류된 업체를 분석해야 할 것이나 아직까지 수소 산업은 산업으로써 충분히 발달하지 않아서 산업분류체계가 수소 산업에 맞추어 재편되어 있지 않다.[49] 이는 수소산업뿐만 아니라 우주, 양자 등 대다수의 신산업 및 미래 성장산업 전반에 해당되는 문제이다.

H2KOREA에서는 2021년부터 수소기업을 대상으로 수소산업에 대한 실태조사[50]를 실시하고 있으며, 수소산업에 특화된 통계로 부문별(생산・유통・활용・관련 서비스) 일반 현황, 관련 분야 매출액, 투자액(연구개발 및 시설투자), 종사자수, 경쟁력, 활성화 방향 등 구체적 통계 항목을 제공하고 있다. 본 절의 6.에서는 수소경제 종합정보포털에서 제공하는

---

49 통계청의 광업제조업조사는 한국표준산업분류체계(이하 KSIC)에 따라서, 한국무역협회의 무역통계는 HS코드에 맞추어 산업 대상 산업을 산업분류체계로 분류하고 있다.

50 H2KOREA에서 2021년부터 실태조사 및 통계조사를 실시하고 있다(`20년과 `21년 자료).

수소산업 생태계 현황 통계[51]와 수소사업체수 및 기업 규모별 사업체 수를 참고하기로 한다.

가. 국내 수소산업 전반

탄소중립으로 수소에너지의 중요성이 부각되고 있고 정부의 수소산업 육성 지원 정책에 따라 수소 사업에 차여하는 기업은 증가하고 있으며, 국내 회사 규모와 관계없이 많은 기업이 수소 사업을 추진하고 있다. 2021년 기준 국내 수소산업의 수소분야 매출 총액은 약 11조원으로 추산된다(표 3-15 참고).

수소융합얼라이언스의 설문조사에 따르면 수소산업 사업체 수는 2020년 기준 2,642개이며, 2021년 기준으로는 2,548개인 것으로 보인다. 수소전문기업으로 등록된 기업은 2022년 기준 56개인데 이 중 수소생산・저장・운송은 11개사, 수소충전은 16개사, 모빌리티는 10개사이며, 연료전지는 19개사이다(H2KOREA Hydrogen 브리핑, 2022)

2020년 기준으로 수소생산 업체 비중이 유통업체보다 간발의 차이로

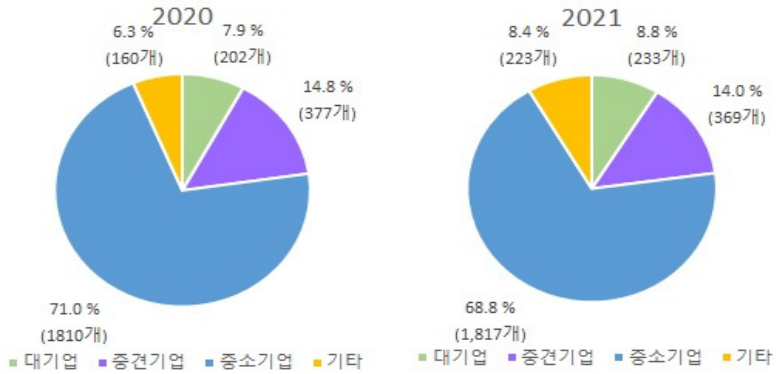
<표 3-15> 가치사슬 별 국내 수소산업 현황(2021년 기준)

부문	비중 (%)	기업 규모별 비중(%)				수소분야 매출액 (백만원)	수소분야 투자액 (백만원)
		대기업	중견	중소	기타		
생산	13.32	13.5	14.2	70.9	1.4	2,171,378	3,770,640
유통	24.91	2.3	8.7	85.2	3.8	997,719	256,505
활용	45.84	12.2	19.3	63.8	4.8	7,220,816	1,598,565
서비스	15.93	5.4	6.8	55.8	32	676,464	734,663
합계	100	-	-	-	-	11,066,377	6,360,373

자료: 수소경제종합포털(https://h2hub.or.kr/main/stat/stat_abroad_ecosystem.do, 접속일: 2023. 8. 24).

51 수소경제 종합정보포털 통계자료에서 국내 수소산업 생태계 현황의 출처는 수소융합얼라이언스(H2KOREA)이다.

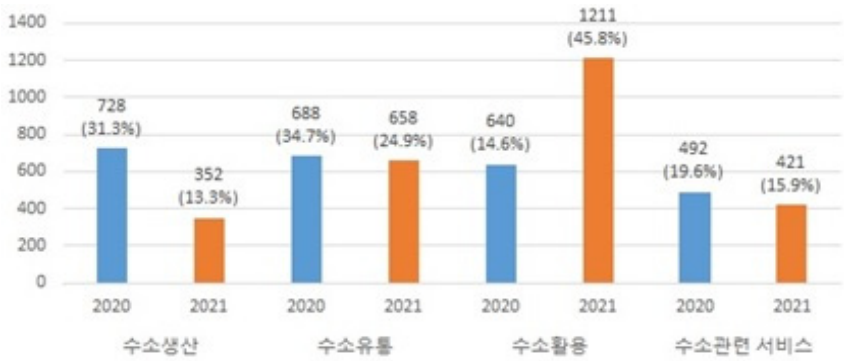
[그림 3-16] 수소산업 사업체 수(2020년과 2021년 비교)



자료: H2KOREA(2020; 2021), 수소산업실태조사 결과보고서.

제일 많이 차지하고 있음을 알 수 있으며, 수소 관련 서비스가[52] 제일 적은 비중을 차지하고 있었다. 2021년은 수소 활용 관련 업체가 눈에 띄게 증가하여 전체 수소산업 사업체 중 45.8%를 차지했다는 것을 확인할 수 있었다. 이는 수소 모빌리티와 연료전지의 발전과도 관련이 있을 것이다.

[그림 3-17] 기업규모에 따른 사업체 비중(2020년과 2021년 비교)



자료: H2KOREA(2020; 2021) 수소산업실태조사 결과보고서.

52 수소 관련 서비스에는 수소 관련 안전제품, 수소 관련 엔지니어링 서비스업, 수소 관련 연구개발 및 과학기술 서비스업, 수소 관련 유지·보수 서비스업, 수소안전 관련 관리·유지·컨설팅 서비스업, 수소 관련 교육 서비스업, 수소 관련 협회 및 단체가 포함된다(수소융합얼라이언스, 『2021년 수소산업실태조사 결과보고서』, 2020).

나. 수소전문기업

정부는 수소 산업을 육성하고 수소경로의 이행을 위하여 일정 요건을 충족한 수소기업을 발굴하여 '수소전문기업'으로 선정하여 수소전문기업으로 육성하기 위한 지원 제도를 마련하고 있다. '수소전문기업'이란 수소의 생산・저장・운송・충전・판매 및 연료전지, 그리고 이에 사용되는 소부제(소재・부품・제품) 및 장비의 제도 등 수소의 전 밸류체인에 걸쳐 사업을 영위하는 기업 중 수소사업으로 분류되는 매출액 또는 수소분야에 관련된 연구・인력개발비의 비중이 일정 기준에 해당되는 기업으로 정의된다.[53]

수소전문기업으로 선정되려면 수소사업 매출액이 최소 10억원 이상[54] 되어야 할 뿐 아니라 총매출액 규모에 따라 상이한 연구개발 투자 조건을 만족해야 수소전문기업으로 선정될 수 있다.[55] 총매출액이 작을수록 더 높은 수소사업 매출액 비중과 수소관련 연구개발 투자비중을 충족되어야 수소전문기업으로 선정될 수 있다. 수소전문기업이 되면 전용 지원사업에 참여(비R&D)하여 기업당 총 4.5억원까지을 지원받을 수 있으며, 중기부 구매조건부 시제품 개발사업에 가점 2점, 수출바우처 사업/산업부 소재・부품・장비 선도기업 육성사업(그린선도기업) 지원시 최대 2점 가점 등 혜택을 가진다.

수소경제법 시행에 따라 2021년 6월 동 제도를 도입하였고 2023년 8월 현재 64개 사가 수소전문기업으로 지정되어 있다. <표 3-16>은 2022년 10월 기준 국내 수소전문기업 현황을 나타낸다. 수소전문기업으로 등록된 51개 기업 중 가장 많은 비중을 차지하는 밸류체인은 활용 분야로 22개 기업이 연료전지 개발 및 생산 사업에 특화되어 있다. 수소 충전 관련

---

53 수소경제 종합정보포탈, 수소전문기업 소개 (https://corporation.h2hub.or.kr/hes/intro/introduction-of-hydrogen-companies.do_, 접속일: 2023. 8. 24)

54 총매출액에서 수소사업 매출액 비중이 100분의 50 이상이며 최소 총매출액은 20억원이다.

55 수소경제 종합정보포탈, 수소전문기업 소개 (https://corporation.h2hub.or.kr/hes/intro/introduction-of-hydrogen-companies.do_, 접속일: 2023. 8. 24)

<표 3-16> 국내 수소산업 현황(2021년 기준)

	기업수	평균 총매출액 (백만원)	평균 수소 관련 매출액(백만원)	평균 수소 관련 매출액 비중(%)	평균 종업원 수(명)
대기업	1	461,839	461,839	100%	421
중견	4	128,509	28,951	42.50%	198.67
중소	46	18,634	9,905	74.17%	45.34
합계	51	35,942	20,260	72.2%	63.91

자료: 김기환 외(2022), p.43.

설비와 충전소 건설 및 운영 사업에 특화된 기업도 총 14개로 대부분 중소기업이다. 수소 생산과 유통 저장 부문도 수소전문기업이 있으나 비중이 적은 편이다. 이는 처음 수소경제 활성화 로드맵에서 중점을 둔 수소 밸류체인이 활용 부문으로 연료전지 및 수소차·수소충전소의 보급정책의 결과라고 할 수 있으며, 앞으로 생산·유통·저장 등 타 부문의 밸류체인 부문도 함께 발전될 수 있도록 집중되어야 함을 시사한다.

다. 주요 기업

정부의 탄소중립 정책 및 수소경제 활성화 로드맵 발표 등에 따라 국내 주요 그룹들도 수소경제로의 전환을 위한 계획을 수립하고 있다. 그룹마다 수소사업과 관련하여 현재 기술개발 수준 및 상용화 정도, 시장 지위는 모두 상이하며 기존 사업 부문과 신규 수소산업과의 연계성도 다르므로 탄소배출 저감을 위한 사업 전환이 불가피하지만 각자의 추진 전략은 상이할 수밖에 없다. 아래에서는 국내 주요 그룹별 수소사업 관련 추진 현황과 계획을 그룹 및 기업마다 차이가 있으며 기업 및 그룹별 수소사업에서 지향하고자 하는 방향성이 무엇인지 파악하고자 한다. 다음은 각 주요 그룹사별 특징에 따른 수소사업 전략 및 방향을 소개한다.

SK그룹은 기존의 도시가스, LNG, 전력사업을 기반으로 수소를 포함한 그린 포트폴리오를 구축했다. 특히 생산 공급−유통−활용 전 주기 밸류체인에 걸쳐 전방위적으로 수소사업에 적극성을 보이고 있다. 해외 기업

들과의 협력을 통해 수소의 생산과 도입, 액화수소 및 유통, 충전소 등 인프라 구축을 추진 중에 있으며, 연료전미와 혼소발전도 추진 중이다. 울산(그레이수소), 보령(블루수소), 제주(그린수소) 등 프로젝트에 참여 중이며, 호주, UAE(아랍에미레이트) 등과 해외 컨소시엄을 추진하고 있다.[56] SK에코플랜트는 글로벌 점유율 1위인 Bloom Energy와 협력하여 연료전지 발전 사업을 진행하고 있으며, SK(주)와 SK E&S는 PEM 수전해 설비와 액화, 저장과 충전, 수소연료전지 등 수소분야 선두기업 Plug Power의 지분을 인수해 모빌리티용 수소 연료전지기술을 공동 투자한다. 2023년까지 인천 석유화학단지에 연 3만톤 규모 수소액화플랜트 완공 예정이고 2025년부터 CCUS 기술을 활용하여 연간 25만톤의 블루수소와 액화수소 연 3만톤을 공급할 계획이다. 기체수소 배관과 전국에 건설 중인 액화수소충전소에 수소를 공급하여 수소연료전지 및 혼소 발전과 수소버스・지게차 등 모빌리티용으로 사용할 예정이다.[57]

롯데는 수소사업에 그룹의 비전을 걸고 2030년까지 총 6조원(총투자액 중 60%)를 수소 및 전기소재 사업에 투자할 계획이다.[58] 특히 롯데케미칼은 수소사업의 확장 과정에서 자회사 롯데정밀화학이 지닌 암모니아 관련 역량을 중심으로 수소의 저장과 운송의 효율성이 높은 암모니아를 핵심 요소로 꼽았다. 롯데정밀화학은 암모니아 유통 관련 동북아시아 1위 기업으로서 그룹의 수소사업 전략에 영향을 주었을 것이다. 또한 수소 공급망 확대를 위해 에어리퀴드 코리아와 조인트벤처를 설립하고 암모니아 분해, 액화수소 산업, 수소 출하 사업 등 협력을 강화하고 있다. 울산공장에 부생 수소 연료전지 발전소 건설을 추진 중이며, 2024년 하반기 가동 목표로 대산공장 내 부생 수소를 활용한 대규모 고압 수소출하센터를 짓고 있다. 2030년부터 생산한 수소 120만톤 중 60만톤은 발전용으로, 45만톤은 연료전지 및 수소가스 터빈용으로, 15만톤은 수송용으로 공급하는 등 다양한 활용 방안을 구상하고 있다.[59]

---

56 『투데이에너지』(2023. 7. 13).
57 『이투데이』, 「SK 2023 ESG Special Report」.(2023. 5. 15)
58 롯데케미칼 지속가능경영보고서(2022).

포스코는 장기적으로 제철 공정에서 석탄 대신 수소환원제철 기술 HyRex를 개발 중이며 2030년까지 기술 실증을 완료하여 2050년에 탄소 중립을 계획하고 있다. 오만, 호주, UAE 등 해외 국가들과 협력하여 그린수소를 생산하는 재생에너지 단지를 조성하거나 암모니아 크래킹 기술, 고온수전해 기술, 중조(탄산수소나트륨)을 활용한 블루수소 생산 계획을 통해 2050년까지 700만톤의 수소 생산체계를 구축해 그룹 내 철강과 발전 분야에 필요한 500만톤의 수소를 공급한다는 계획이다. 포스코인터네셔널은 미국과 호주 등지에서 CCS(탄소포집저장) 공동연구와 사업화를 추진하고 있으며, 2035년까지 인천과 광양, 포항을 중심으로 친환경 수소복합터미널을 구축하고 인천에서 운영 중인 LNG 발전소를 수소 혼소 발전기로 대체해 상업용 수소 혼소 발전소를 운영하는 것을 목표로 하고 있다.[60]

현대자동차 그룹은 수소차 제조는 물론 수소를 생산하여 자동차 제조 공정에 활용하고, 수소차 연료전지 시스템을 활용해 전기를 생산(발전)·보관·유통까지 수소 생태계의 구축을 목표로 투자와 협력 범위를 확대하고 있다. 세계적으로 경쟁력이 있는 수소전기차용 연료전지 기술을 확장하여 상용차, 수소연료전지 시스템 판매 확대에서 철도·트램·선박·드론·도심항공교통(UAM) 등까지 확장을 계획하고 있다. 세계 최초로 고속형 대형버스 급에 수소연료전지를 탑재한 전기버스를 출시하고 대형 수소전기트럭을 미국시장에 공개하는 등 현대차는 승용차에서부터 트럭·버스 등 대형 상용차까지 수소전기차 라인업을 구축했다.[61]

한화는 2030년까지 그린수소 연구개발 실증 및 생산, 수소 저장설비 등 1.3조원을 투자하고 그룹 내 수소 전주기에 걸친 7개사의 수직계열화를 추진했다. 한화솔루션이 생산과 저장, 큐셀이 태양광 발전으로 생산한 재생에너지와 한화케미칼이 수전해 기술을 연계해 대량의 그린수소 생산을 계획하고 있다. 한화파워시스템은 충전사업을 한화에너지 및 한화종

---

59 『비즈니스포스트』(2023. 4. 17), 『연합인포맥스』(2023. 6. 12), 『CEOSCORE』(2023. 7. 24).
60 『I가스저널』(2023. 10. 23).
61 『서울경제』(2023. 11. 23).

합화학은 수소연료전지 사업을 담당한다. 특히 LNG 대신 수소를 가스터빈 연료로 쓰는 수소터빈 주력 기술로 수소 혼소 발전에 힘쓰고 있다.[62]

두산은 인산 연료전지(PAFC), 발전용 선박용 고체산화물 연료전지(SOFC)와 양이온 과환막 연료전지(PEMEC)와 같은 자사 기술개발을 통한 제품을 구축했다. 특히 두산퓨얼셀은 국내 기업 최초로 ㎿급 양이온 교환막(PEM) 기술의 수전해 시스템을 개발했다. 상용화를 앞둔 1㎿ 급 PEM 수전해 시스템에서 생산된 수소는 상용차·트럭 등 모빌리티 산업과 발전 등 다양하게 활용될 예정이며, 수소연료전지를 활용한 드론사업도 전개하고 있다.[63]

1) 기업 투자 동향

국내 기업들은 탄소중립의 중요성이 대두되면서 RE100 가입하거나 가입을 위해 대기업은 물론 중소·중견기업들까지 수소의 생산, 유통·저장, 활용 등 수소경제 전 분야에서 기술개발 및 국내외 프로젝트에 참여하거나 R&D MOU를 체결하는 등 수소 산업 분야로 사업영역 확장을 위해 각각의 기업들은 투자를 추진하고 있다. SK그룹, 현대자동차그룹, HD현대, 효성, 삼성, 두산 등 국내 주요 대기업 그룹과 중소·중견기업은 2030년까지 수소분야에 약 48.7조원 규모의 투자를 추진할 계획이며(표 3-11) 정부도 민간투자가 잘 추진되도록 적극 지원할 예정이다(산업통상자원부, 보도자료, 2021. 3. 2).

이러한 정부 지원 정책에 힘입어 민간 기업들은 본격적으로 수소산업 활성화를 위해 2021년 9월 SK, 현대자동차, 포스코 등 국내 17개 대기업으로 구성된 민간협의체 '코리아 H2 서밋(Korea H2 Business Summit; H2 서밋)'이 출범하였고, 그중 SK, 현대자동차, 포스코, 한화, 효성 등 5개 기업이 2030년까지 수소의 생산, 저장·유통, 활용 등 전 분야에 걸쳐 약 43조 4천억원 규모의 투자 계획을 발표하였다.[64] H2 서밋은 국내 기업

---

62 『아시아경제』(2023. 6. 5).
63 『파이낸셜투데이』(2023. 9. 13).
64 『한겨레』(2021. 3. 2).

<표 3-17> 주요 그룹별 수소사업 관련 투자 계획(2030년까지)

(단위: 조원)

기업	사업내역 및 투자분야	규모
SK	대규모 액화플랜트 구축, 2026년까지 연간 28만톤 규모 수소 생산·공급, 연료전지발전 확대, 美 플러그 파워와 합작투자 등 M&A를 통한 수소 기술력 확보	18.5
현대자동차	2028년까지 3세대 수소연료전지 개발, 수소모빌리티 설비투자 및 기술개발(R&D), 인프라 투자	11.1
포스코	부생 수소 생산, 해외 그린수소 도입, 수소환원제철 개발 등	10.0
롯데	(블루수소 생산) 탄소포집, 활용 기술 개발, (그린수소 생산) 암모니아 유통 인프라 활용, 2030년까지 120만톤 규모 청정수소 생산 등 전 밸류체인 구축, 수소탱크 양산 등	6.0
두산	2024년까지 그린수소 생산 시스템 개발, 2028년까지 수소전기터빈 개발 등	5.0
한화	수전해 기술 R&D·실증·상용화, 수소탱크 등 수소저장설비	1.3
효성	액화수소 플랜트 구축, 액화수소 충전소 보급 등	1.2
HD현대	블루수소 밸류체인 구축, 친환경 선박 개발, 수소 충전소 구축 등	1.0
중소·중견	연료전지, 그린수소 R&D, 수소추출기, 수소저장용기 등	1.2

자료: 수소경제위원회 3차, IBK, 『서울경제』(https://www.sedaily.com/NewsView/29QRZ44J0N).

및 외부 투자자의 출자를 통해 수소펀드를 조성하고 국내외 수소 인프라 구축을 위한 프로젝트에 직접 혹은 공동 투자하는 형태로 운영될 예정으로 핵심기술을 보유한 수소전문기업을 육성하기 위해 적극적으로 투자할 예정이다.

제4절 수소산업 발전을 위한 정책개선 방향

부존자원이 풍족하지 못한 우리나라는 예로부터 국민경제의 필수적인 에너지의 대부분을 수입에 의존하고 있어 에너지산업이 발달하기 어려웠다. 최근 갈수록 온실가스로 인한 기후변화와 환경오염 대응 정책이 강해지는 전 세계적 추세에 맞추어 우리나라도 신재생에너지 보급 확대가 국내 산업의 생존과 경제성장으로 이어져야 한다는 문제 의식을 가지기 시작했다. 수소는 탄소중립 사회를 준비하고 에너지 패러다임 전환하는

과정에서 재생에너지의 한계(간헐성, 경직성 및 지역간 편차)를 보완해주고 수송 부문에서부터 에너지 부문 전반에 걸쳐 다양한 미래 산업 창출이 가능하다는 점에서 주목받고 있다.

제조업 기반을 둔 국내 산업을 고려했을 때, 수소 관련 산업은 협력 부품업체가 많고 생산, 저장・운송, 충전, 활용 등 가치사슬 전반에 걸쳐 다양한 산업과 연계되어 전・후방산업 효과가 클 것으로 기대된다. 수소차 및 연료전지의 협력업체(부품 등) 대다수는 중소・중견기업일 것이며 수소 활용 산업의 확대에 따라 협력업체들의 성장과 고용 창출로 이어질 것이다. 수소 생산과 운송・저장 설비 및 충전소 등 인프라 구축은 금속과 기계 설비 등 관련 산업의 확대를 기대할 수 있다.

에너지 수입국인 우리나라가 수소 이용 확대로 에너지원을 다각화하고 석유나 천연가스 등이 집중되어 있는 특정 국가로부터 에너지 의존도를 낮출 수 있게 된다면 특정 국가들의 국지적 분쟁으로 인한 시장이 받는 충격을 줄여 지정학적 리스크를 낮출 수 있게 될 것이다. 아직 전 세계적으로 수소 산업이 초반기이며 국내 수소산업이 경쟁력을 가지기 위해서 그를 뒷받침해줄 산업정책이 필요하다. 아직 수소산업은 초창기인 만큼 불확실성이 크고 인프라가 충분하지 않으며 민간주도로 생태계를 촉진하기에는 시장이 자생력이 부족하고 충분히 성숙하지 못하다. 그러므로 정부가 정책적으로 산업이 육성하여 자생력을 갖출 수 있도록 지원해 주는 것이 중요하다.

본 절에서는 그동안 정부에서 추진해 온 수소경제 정책 흐름을 살펴본 후 해외 각국의 수소경제 정책을 살펴보고, 지금까지 수소경제로의 전환 과정에서 추진된 정책들을 점검하고 수소산업이 더 발전되고 굴기를 맞이하기 위하여 필요한 정책들이 무엇인지 논의해 보고자 한다.

1. 해외 정책

아직 초창기라고 할 수 있는 수소산업의 발전을 위해서는 기술개발 및 인프라에 막대한 재정이 소요되기 때문에 수소기술 산업은 독자적 또는

자생적으로 성장하는 데 한계를 지닌 산업으로 보인다. 수소는 단순한 산업 발전뿐이 아닌 국가온실가스감축이라는 목표치 달성을 두고 핵심 수단의 하나로 인식되고 그 중요성이 커지고 있다.

수소에너지 및 관련 산업들의 육성을 위해 세계 각국의 정부는 금전적 제도적 지원을 통하여 기술개발이 필수인 분야로 당장의 결과물이 아닌 미래의 성장동력으로서 투자하고 있다. 산업이 자생력을 가진 시장화 단계까지는 물론 상당한 시간이 걸릴 것이다. 그러므로 기업은 초기 손익분기점 달성까지 정부 및 유관기관의 지원에 상당 부분 의존하게 되며, 일정 성장 수준까지 체계적으로 지원하고 이끌어 주는 역할을 해줄 필요가 있고 그 지원 정도에 따라서 이 산업의 성장 속도가 결정될 것이다. 예컨대, 미국의 인플레이션 감축법(IRA), EU의 핏 포 55(Fit-for 55) 패키지, 유럽 공동 이익에 관한 주요 프로젝트(Important Projects of Common European Interest: IPCEI) 기금 지원 프로그램, 일본의 수요측 R&D 지원 프로그램 호주의 청정에너지금융공사(Clean Energy Finance Corp.: CEFC)의 자금 지원 등이 지원되고 있다. 우선 해외 각국의 수소산업 정책 동향에 대해서 논의하고 해외와 국내 정책을 비교하고자 한다.

가. 미국

미국은 대규모 보조금 정책을 활용하여 시장을 활성화시키고 세계 각국 정부가 그러하듯 수소를 생산하는 데에 있어서의 생산비용 절감 정책을 추진하고 있다. 미 에너지부(DOE)를 중심으로 청정 수소에너지 기술 상용화와 관련 기술을 산업 전반에 융합하는 것을 목표로 하는 수소 경제로드맵(Road map to a US Hydrogen Economy)을 2020년에 발표했고 이어 '청정수소 전략 로드맵'을 2023년 발표했다.

또한 미국 정부는 재생에너지를 사용하여 그린수소 생산 단가를 낮추고 비용 차이를 보전하기 위하여 인센티브 정책을 마련했다. 특히 2022년 8월 7일 인플레이션 감축법(Inflation Reduction Act, IRA)를 발표했고 정부 세입 증가를 통해 인플레이션을 감소시키려는 취지로 도입했다. IRA는 바이든

정부에서 2021년 추진한 더 나은 재건 법안(Build Back Better; BBB)을 축소·수정하고 일부 신설한 제도로, 2030년까지 탄소배출량을 40% 줄이는 것을 목표로 에너지 및 기후변화 프로그램 등에 약 $7,400억 규모의 자금을 투자하기 위해 마련되었다. 에너지 및 기후변화 부문에서는 기존 재생에너지와 저장설비, CCUS부문에 적용된 생산 및 투자 세액 공제를 선택할 수 있고 기간도 연장되었으며, 고용조건 또는 사업의 기여도 등을 충족하면 추가적인 혜택을 받을 수 있도록 설계되었으며 저탄소부문 확대와 일자리 창출 측면이 더 보완되었다. 그리고 전기차 구매와 생산에 대한 지원, 청정수소 및 청정전기 생산에 대한 인센티브 등이 포함되어 있다.[65]

미국 국세청은 청정에너지 사업자에게 두 가지 세액공제방식, 생산세액공제(Production Tax Credit: PTC)와 투자세액공제(Invest Tax Credit: ITC)를 제공하는데, PTC는 재생에너지 생산량에 비례하여 세액공제를 받는 방식이고 ITC는 투자금액의 일정비율을 세액공제 받는 방식이다.

청정수소의 생산세액공제(PTC)와 범위, 적정 임금[66] 및 견습 조건[67]을 포함시켜 인센티브와 연결시킴으로써 수소 사업에 질 좋은 고용의 양적인 확대를 지속하고자 했다. 청정수소 생산되는 에너지원에 제한 없이 수소 생산시 배출되는 CO_2 양이 적을수록 세액공제 금액이 커진다. 청정수소로서 지원받을 수 있는 최소한의 양인 기준점은 4.0kgCO_2/kgH_2[68]이며, 이 기준점보다 적게 배출하는 4개의 구간으로 나뉘어 차등 지원된다. 지원금이 가장 큰 구간의 단위 공제액은 청정수소 1kg 당 $0.60, 임금 조건과 견습 조건을 충족할 경우 단위당 공제액은 그 5배로 1kg 당 $3.0까지 증가된다. 그 외 3구간 또한 마찬가지로 요건 충족 시 지원금의 5배를

---

65 김기환 외(2022).

66 Prevailing wage requirement는 해당 설비 주변 지역에서 건설, 개조, 수리되던 설비에서 지급하는 임금수준을 지급해야하는 요건을 의미한다(김기환 외, 2022, p.68, 각주 65).

67 Apprenticeship requirement는 견습생에 의해 일정 부분 노동 시간이 채워져야 하거나 인원수 중 일부가 채워야 하는 요건을 의미한다(김기환 외, 2022, p.68, 각주 66).

68 1kg의 수소(H_2)를 생산하는 데 발생하는 이산화탄소(CO_2)양을 뜻한다. (https://www.congress.gov/bill/117th-congress/house-bill/5376/text)

<표 3-18> 탄소집약도 구간별 청정수소 PTC/ ICT 금액

탄소배출집약도	생산세액공제(PTC) 세율	지원금	지원금(PTC)[1]
0~0.45 $kgCO_2$	100%	\$0.60/kgH_2	\$3.00/kgH_2
0.45~1.5 $kgCO_2$	33.4%	\$0.20/kgH_2	\$1.00/kgH_2
1.5~2.5 $kgCO_2$	25%	\$0.15/kgH_2	\$0.75/kgH_2
2.5.~4.0 $kgCO_2$	20%	\$0.12/kgH_2	\$0.60/kgH_2
탄소배출집약도	비중	투자세액공제(ITC) 세율	투자공제비율(ITT)[2]
0~0.45 $kgCO_2$	100%	6%	30%
0.45~1.5 $kgCO_2$	33.4%	2%	10%
1.5~2.5 $kgCO_2$	25%	1.5%	7.5%
2.5.~4.0 $kgCO_2$	20%	1.2%	6%

주: 1), 2): 적정 임금 조건과 견습 요건이 만족될 경우, 기본 투자공제비율의 500%가 적용.
자료: 김기환 외(2022) p.68~69를 참조하여 저자 작성.

지급받을 수 있다.[69] 또 지급받을 공제액을 직접 세금을 갚는 데 사용할 수 있으며(direct pay option), 타인이나 다른 법인에게 이전할 수 있게 함으로써(transfer option) 개인의 사정에 맞게 유연하고 유용하게 공제액을 사용할 수 있다.

2025년 이전에 건설을 시작한 설비에 에너지저장설비(수소저장설비 포함) 등은 수소 생산 지원과 별개로 30%의 투자세액공제(ITC)를 받을 수 있다.[70] 현재 \$5/kgH_2 수준인 청정수소 생산비용을 2035년까지 \$1/kgH_2로 절감하는 것을 목표로 미 에너지부(DOJ)는 R&D 확대 및 관련 공급망 정비 등을 추진하고 있다. 또, 미국은 청정 전기 생산에 대해서 자국산 부품 요건 등의 조건을 만족할 경우, 추가 공제를 통해 제조업 경쟁력과 일자리 전환 및 확대를 유도하고 있다.

인프라 부문에 있어서 초당적 인프라 법안[71](Bipartisan Infrastructure

69 1kg당 최소 12센트에서 최대 3달러까지 세액공제를 제공한다.

70 김기환 외(2022).

71 초당적 인프라(기반 시설)법(Bipartisan Infrastructure Law, BIL)은 2021년 11월 15일 제정되었고 정식명칭은 기반시설 투자 및 일자리 법안(Infrastructure Investment and Jobs Act,

Law: BIL) 및 (초당적) 인프라 투자 및 일자리 법안(Infrastructure Investment and Jobs Act: IIJA)이 있다. 미국은 IIJA을 통해 청정수소 개발과 관련하여 $95억의 투자 내용을 담았다. 그중 $80억은 6~10개의 지역 청정수소 허브(Regional Clean Hydrogen Hubs)의 구축에 할당되고 청정수소 수소전해질 프로그램(Clean Hydrogen Electrolysis Program)에 $10억이 할당 및 투입되었다. 청정수소 제조 및 재활용 이니셔티브에 $5억 등 5년간(2022~26년) 지원된다. 또한 이산화탄소 포집 및 저장(CCS) 인프라 구축 및 기술개발, 수송, 처리, 대출 지원 등이 포함되어 있다.[72]

지역 청정수소 허브 구축 사업은 청정수소의 생산에서 시작하여 처리, 운송, 저장, 활용 등 순조로이 연결 가능하도록 허브를 구축하기 위한 지원 프로그램이다. 청정수소 수전해 프로그램은 수전해를 통한 청정수소 생산 비용을 $2/kg$H_2$ 정도까지 낮추기 위한 연구개발・실증・사용화 그리고 보급(Research, Development, Demonstration, Commercialization & Deployment: RDDC&D)을 지원하는 프로그램이다. 미국은 향후 10년 동안 그린수소뿐 아니라 청정 수소에 최대 $3/kg$H_2$까지 제공한다. 청정수소 개발 및 허브 구축과 별도로 CCS 인프라 구축 및 기술개발에 $115억이 할당되었다. 이 예산은 탄소포집 실증프로젝트 프로그램, 탄소저장 확인 및 검증, 이산화탄소 운송 엔지니어링과 디자인, 이산화탄소 수송 인프라 금융혁신 프로그램(Carbon Dioxide Transportation Infrastructure Finance and Innovation; CIFIA) 등이 포함되어 있다(DOJ, 2023).

나. 유럽국가 – EU, 영국, 독일

수소경제에 세계적으로 가장 활발하게 투자하는 지역은 유럽이라 할 수 있다. EU 집행위는 지난 2020년 7월 수소 생산과 인프라 구축의 제시하는 유럽 수소 전략(A Hydrogen strategy for a climate neutral Europe)을

IIJA)으로 도로, 교통, 전력망, 통신 등의 공공 투자에 1조 달러 이상의 자금을 지원하기 위해 마련되었다.

72 *DOE*, “U.S National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap”(2023).

발표했고, 이 전략은 유럽 수소 생태계 조성, 국제 표준 및 시장 개발의 구체적인 계획이 담고 있다. 수소에너지 비중 강화와 탄소 비중이 높아 탈탄소화가 어려운 분야에도 수소 활용도를 확대하고자 하는 것을 골자로 한다. 수소 전략은 2030년까지 최소 40GW의 수전해 장치를 설치하고 최대 1,000만톤의 그린수소를 생산하는 등 2030년까지 140억유로 규모의 수소경제로 성장시킬 계획을 가진다. 그리고 EU 국가들과 유럽투자은행(EIB), 시민사회, 에너지・수송・운송 등 200여개 기업이 소속되어 있는 '유럽 청정수소연합(Clean Hydrogen Alliance)'이 발족되기도 했다. 친환경 에너지 전환 및 에너지의 안정적 공급 목표인 EU의 REPowerEU (2022년 5월) 계획에서 수소에너지는 중요한 핵심 중 하나이다. EU는 본 전략에서 2025년까지 17.5GW의 수전해 시설과 수소 프로젝트 지원 등에 2억유로를 투입할 예정이며, 2030년까지 1,000만톤의 그린수소를 역내 생산하고 추가로 1,000만톤의 그린수소를 녹색수소파트너십(지중해, 북해, 우크라이나 등)을 통한 수입으로 총 2,000만톤의 수소 생산을 목표로 하고 있다(Kotra, 2023).[73]

1) 유럽연합(EU)

유럽연합은 코로나19 및 러시아의 우크라이나 침공으로 에너지 수급 불균형에 따른 비용 상승에 따라 유럽경제의 위협하는 요인이 작용하는 등 유럽연합 차원의 에너지 정책을 강화하고 특히 그린수소의 산업계 적용 및 친환경 모빌리티 확대를 위해 청정수소경제의 활성화 관련 정책을 적극적으로 추진하고 있다.

2020년 7월에 발표한 '기후 중립적인 유럽을 위한 수소전략(A Hydrogen strategy for a climate neutral Europe)'을 통해 수소에너지 비중을 강화하고 수소 활용도 확대할 계획을 세웠다. EU 수소 전략은 녹색수소 증대를 위한 로드맵으로 투자와 수요, 공급, 연구개발 등 4개 부문으로 분류되었고 수소 전략 발표와 함께 20개의 행동 조치가 실시되었으며, 2022년 1분기 말 20개의 조치가 모두 완료되었다.[74]

---

73 Kotra(2023. 6. 15) (https://dream.kotra.or.kr/kotranews/cms/news/actionKotraBoardDetail.do?SITE_NO=3&MENU_ID=100&CONTENTS_NO=1&bbsGbn=322&bbsSn=322&pNttSn=203380).

EU의 수소 전략에서 가장 중요한 부분은 그린수소로 현재는 2% 수준인 그린수소의 에너지 비중을 2050년까지 23% 이상으로 전환할 계획을 가진다. 이를 위해 수전해 설비 용량을 6GW까지, 2030년까지 80GW(역내/역외 각 40GW)를 확보하고 이를 통해 현재 2.5~5.5유로/kg 그린수소 생산 단가를 그레이수소 수준인 1.5유로/kg까지 낮출 계획이다. 또한 교통수단(버스, 택시, 트럭, 철도, 배 등)에서 산업(정유, 화학, 철당 등)까지 수소의 활용을 확장할 목표다. 이를 위해 2030년까지 수전해 설비 분야에 240억~420억유로를, 수소 운송 및 충전 등 인프라 확충에 650억유로를, 그린수소 제조를 위한 재생에너지 설비 건설(80~120GW)에 2,200억~3,400억유로를 투자한다. R&D와 관련하여 '청정수소 연구 및 혁신을 위한 자금'의 2배인 약 13억유로가 투자될 것으로 향후 10년간 공동자금 조달과 관련하여 100억유로가 추가로 투자될 것이다.

활용 부문에서 EU와 독일은 탄소차액거래계약(Carbon CfD)을 도입해서 석유화학 분야나 철강에서의 청정수소 활용을 높이고자 했으며 이는 온실가스배출권 수익으로 조성한 혁신기금(Innovation Fund)을 통해 지원될 예정이다. EU는 녹색공공조달 자금을 이용하여 계약 당국에서 현재 상용화 되지 않아 시장에 나와 있지 않은 상품이나 서비스를 구매하고자 할 경우 기술개발 파트너와 파트너십을 맺고 연구개발과 파일럿 프로젝트, 후속 구매를 통해 신제품 및 서비스를 제공할 수 있다(김기환 외, 2022).

EU의 재정 지원으로 공동 이익을 위한 중요 프로젝트(Important project of common european interest: IPCEI)[75]를 통해 2021년 수소생태계 분야별 주요 사업 62개를 선정하여 80억유로 지원할 것을 발표했다. EU예산 54

---

74 Kotra(2023. 1. 16).

75 IPCEI는 수소 기술개발 및 혁신 부문에 대한 연구 지원 및 인프라 투자 분야 등 기술개발 및 인프라 구축 부문을 지원한다. 지원 프로젝트 이름에서처럼, 이 프로젝트는 유럽 국가들의 공동 이익과 경제적 성장, 경쟁력 향상과 일자리 창출 등을 위해 개발이 필요한 전략적 분야에 각 국가들이 공동 투자하고, 이 프로젝트를 통해 구축된 인프라 및 개발된 기술로부터 긍정적 외부효과를 EU국가들이 함께 공유하기 위한 것이다(김기환 외, 2022).

억유로와 매칭된 88억유로의 민간투자를 확정했고, 2023년 말까지 3회의 추가 집행이 있을 예정이다. EU IPCEI에 참여한 기업은 수소생산, 연료전지, 저장운송유통 등 3가지로 분류로 나뉘며 수소생산에 참여한 기업이 가장 많다고 한다.[76]

유럽연합의 수소 부문에 대해 EU 혁신기금 및 EU-ETS를 통해 2030년까지 380억유로 이상의 재원을 확보할 것이다. 약 6개의 수소 프로젝트에 2.5억유로의 보조금을 지급했고 전체 지원금의 19.85%를 차지하는 등 수소에 적극적인 투자 및 지원이 진행되고 있다. 유럽 청정수소 인프라 펀드와 하이드로젠 원 캐피탈 등 민간투자 펀드도 활발하게 수소 부문에 투자가 이어지도록 지원하고 있다.

2) 영국

영국은 2021년 8월 국가 수소 전략(UK Hydrogen Strategy)을 발표하면서 2030년 그린수소 생산 설비 보급 목표를 5GW를 확보하는 것을 목표로 하였다. 영국 정부는 2022년 4월 에너지 안보 전략(Energy security strategy)을 발표하고 수소 생산 목표치를 최대 10GW(그린수소 5GW, 블루수소 5GW)로 목표를 두 배 상향하고 이를 달성하고자 2025년까지 2GW의 저탄소 수소 설비를 도입하여 에너지보안을 대비하고자 했다(김기환 외, 2022). 이는 지난 2021년 2월 러시아의 우크라이나 침공으로 천연가스 가격이 급등하여 에너지 안보와 에너지 자립에 대한 중요성이 전 세계적으로 높아진 결과라 할 수 있으며, 영국 정부는 2050년까지 에너지 소비 중 수소의 비중을 20~35%를 목표로 탄소중립을 달성하고자 계획하고 있다.[77]

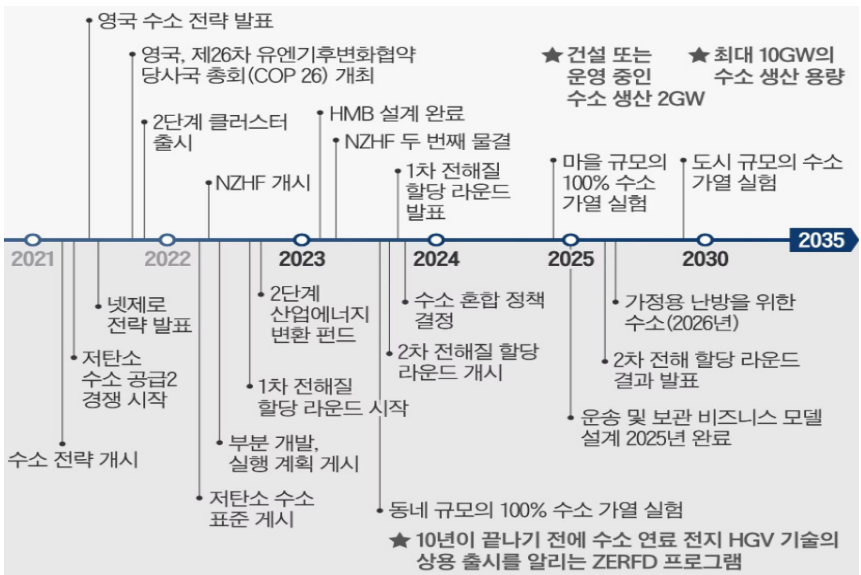
효율적인 설비 도입 지원을 위해 청정수소 생산 부문에서 저탄소 부문 차액 계약거래(Contract for Difference: CfD)를 바탕으로 한 지원제도를 도입하였고 이 제도를 지원하기 위해 약 2억4천만 파운드의 넷제로 수소

---

76 『가스신문』(2023. 10. 11).
77 『조선일보』(2023. 10. 11).

펀드 기금(Net Zero Hydrogen Fund; NZHF)를 조성했으며,[78] 이 기금으로 250MW 급 수전해 설비를 지원된다. 수소 생산 지원을 위한 넷제로 수소 펀드와 함께 수소 생산기술 혁신을 위한 넷제로 혁신 포트폴리오가 영국 보조금 정책의 큰 줄기이다. 영국의 수소 설비 설치 목표 및 사업모델에 의한 재정 지원, CCUS, 열 부분 실증 계획까지 구체적으로 일정을 정하고 관련 기업과 소통을 통해 불확실성을 줄여 나가면서 민간투자를 활성화시키고 있다(김기환 외, 2022). 또한 수소경제를 통해 영국은 2030년까지 1만 2,000개 이상의 일자리를 창출하고 최대 110억파운드(약 18조 1,312억원)의 민간투자가 일어날 것으로 기대하고 있으며, 2050년까지 최대 10만개의 일자리를 새롭게 만들고 약 130억파운드(약 21조 4,277억원) 상당의 부가가치가 창출할 것으로 전망한다.[79]

[그림 3-18] 영국 수소 투자 로드맵



자료: 『조선일보』(2023. 10. 11).

78 『매일경제』(2023. 10. 11).
79 『조선일보』(2023. 10. 11).

3) 독일

독일은 EU 국가 중에서 수소를 포함한 에너지 전환 정책에 가장 주도적인 역할과 투자를 하고 있다. 지난 2020년 6월 국가수소전략(Die Nationale Wasserstoffstrategie)을 발표하고 전 밸류체인에서의 수소 활용도 증대와 관련 일자리 창출 및 기술력 강화에 중점을 두었다. 사실 국가수소전략 발표 이전부터 독일 내 싱크탱크를 활용하여 수소 로드맵을 준비했었고, 2007년부터 '수소·연료전지 국가혁신 프로그램(National Innovation Programme Hydrogen and Fuel Cell Technology: NIP)'을 시행했다.[80] 특히 산업, 운송, 에너지시스템 등 수소 에너지를 활용할 수 있는 기술과 인프라 구축에 주력하고 있다. 친환경 수소경제로의 전환을 위해 90억유로를 투자해서 5GW의 수소 생산을 목표하고 있으며 투자금 중 70억유로는 독일 내 생산시설 구축에 나머지 20억유로는 해외 수소 생산기지 확보에 사용된다. 2030년까지 14TWh 그린수소 생산 목표 수립과 분야별 38개의 세부 이행계획을 담았다. 수소전략 전반을 관리하는 수소내각위원화와 정책 자문기구인 '국가수소위원회'를 두고 연도별 이행보고서를 발간해 전략 방향성을 검토하고 전략 이행 과정을 모니터링하여 3년마다 개정 및 전략 확장을 하여 정책의 일관성을 유지하고 있다.

독일 연방 정부는 그린수소 및 수소 기반 제품의 생산·운송·활용과 유통 및 수출입 인프라와 관련하여 9억유로를 지원하여 2021년 12월 저탄소 수소 해외 도입을 위한 거래 제도로 수소 생산 시장(생산자)와 수요시장(수요자)을 연결하는 이중 경매 프로그램인 H2 Global을 개발하였다. 이 제도는 EU 역외 수소 생산자와 EU 내 수요자를 중개하는 것으로 최저가로 매입해 최고가를 지불한 구매자에게 매매계약이 체결되며 차액계약(CFD)과 유사한 방식으로 운영되며 공급 가격과 수요 가격의 가격 편차를 독일 정부의 공공 및 자선기관의 보조금을 사용해서 보상하는 방식으로 운영된다. 첫 입찰에서 수전해 수소를 통해 생산된 그린 암모니아,

---

80 수소산업 시장 경쟁력 제고를 위한 수소·연료전지 지원 정책 프로그램으로 교통분야, 인프라 및 시설투자 보조금 등에 약 20억유로가 지원된다(1차(2007~'16): 수소 인프라 기반 마련, 2차('16~'25): 기술개발과 인프라 구축), (장현숙 외, 2023).

그린 메탄올 등 10년(2024~33년)간 계약이 체결된다. 이렇듯 H2Global은 수소 공급자와 장기 계약을 체결하여 수요 불확실성을 완화시켜 안정적인 사업 운영 및 투자가 가능하도록 하고 수요자와 단기 계약을 체결하여 경쟁력 있는 수요 측 가격을 제공하여 수소에 대한 조기 수요 창출을 목표로 한다(김기환 외, 2022).

독일도 또한 러시아의 우크라이나 침공으로 에너지 안보의 중요성을 인식하고 수소경제 전환을 가속화했다. 독일 신호등(사회민주당빨강+자유민주당+노랑+녹색당+초록) 연립정부는 2023년 7월 수소 생산 목표치를 5GW에서 10GW로 2배 증가시키기 위한 국가수소전략을 의결하기도 했다. 2030년까지 수소를 산업현장 및 교통편(버스나 트럭, 해상교통)에도 점차 더 투입할 계획을 가지고 있으며 이를 위해 수소 수요량이 2030년 95~130TWh에 달할 것으로 전망하고 있다. 30~50% 자체 수소생산이 가능한 독일은 나머지 50~70%는 별도의 국가 수소 수입 계획을 통해 수입할 예정이다. 2027~28년까지 약 1,800㎞ 상당의 수소파이프라인을 건설할 예정으로(유럽 전체로는 약 4,500㎞) 이를 통해 2030년까지 주요 수소의 생산과 수입, 저장이 수요 측과 연결되게 될 전망이다.[81]

다. 일본

일본은 세계 최초로 2017년 12월 국가 「수소기본전략」을 채택한 국가로 재생에너지를 활용하여 이산화탄소를 발생시키지 않는 수소 공급시스템을 개발하고자 하였다. 수소기본전략에 이어 2019년에는 「수소・연료전지 산업 로드맵(水素・燃料電池技術開発戦略)」을 기반으로 수소산업 육성 정책을 추진하였다.

수소기본전략은 2030년까지 수소차 80만대, 수소버스 1,200대, 충전소 900개소, 가정용 연료전지 530만대, 수소발전단가를 17엔(0.15달러)/kWh, 연료전지발전 그리드 패리티(Grid Parity)를 실현하고 수소상용화를 목표

81 『조선일보』(2023. 7. 27).

로 하는 등[82] 2050년까지 수소사회 실현을 달성하기 위하여 2030년까지의 추진계획을 제시하였다. 수소가격을 LNG(가솔린) 등의 수준으로 인하하고자 구체적으로 목표 가격을 설정하였고 그러기 위하여 저렴한 원료를 활용한 수소 생산, 대량으로 생산과 수송이 가능하도록 공급망을 구축, 산업이나 발전 그리고 연료전지차 등 수소의 대량이용을 제시했다.

「수소・연료전지 전략 로드맵」은 수소기본전략의 구체적인 추진정책을 담아서 2019년에 수립되어 발표되었다. 수소 공급망 전체(생산, 저장, 수송, 활용)를 포괄한 로드맵은 2015년 6월에 처음 수립했고, 2016년에 가정용 연료전지의 가격 목표를 명확화하고 FCV(연료전지차) 보급 목표 설정했으며 수소 발전과 관련하여 구체적인 기술 추진하는 등 전략을 개정하였다. 2019년 일본은 전략을 개정하여 「수소기본전략」과 2018년 7월에 수립된 「제5차 에너지기본계획」에서 제시한 목표를 달성하기 위해 구체적 추진전략을 마련하고 평가워킹 그룹 설치를 통해 전문가를 참여시켜 후속조치를 마련하는 방안을 추가했다.[83]

2019년 9월 「수소・연료전지 전략 로드맵」에서 제시한 목표 달성을 위해 구체적인 기술개발 사항을 정한 '수소・연료전지 기술개발 전략'을 수립하여 3개 분야 10개 항목을 선정하여 중점 기술개발을 위해 프로젝트 평가와 해외 연계 강화 등을 강조하였다. 2020년 12월에 「그린성장전략」을 수립하여 2050년까지 탄소중립 실현을 스가 요시히데 총리가 선언하였다. 성장이 기대되는 14개 중점산업 분야를 선정하여 분야별 현안 과제와 목표를 제시하였고 그중 에너지 부문에서 「수소연료 암모니아 산업」을 중점산업 분야로 지정했다.

우리나라와 비슷한 환경을 가진 일본은 한국과 마찬가지로 수소 수입국이 될 것으로 보이며, 해외에서 수소 공급처를 확보하고자 추진하고 있으며 수소 수요 대응을 위한 활용처를 확대하고자 했다. 저비용 수소 조달과 공급을 위해서 해외 자원을 활용하고 일본 자국 내 그린수소 생

82 수소경제 종합정보포털(https://h2hub.or.kr/main/econ/policy-abroad.do, 접속일: 2023. 10. 16).
83 유선아, 하세가와 요시유키(2023. 3. 3).

산 역량을 강화하고자 한다. 일본의 수소 해외 공급망으로는 호주에서의 HySTRA[84](갈탄 개질)와 브루나이에서의 AHEAD[85](NG 개질 수소) 등이 있으며[86] 사우디아라비아의 태양광을 이용하는 등 잉여 재생에너지를 활용해 수소를 생산해서 조달하는 실증 프로젝트를 진행하고 있다.[87] 해상풍력을 통한 재생에너지를 활용하여 수소 생산 기술 개발을 진행 중인 AquaVentus 프로젝트[88]을 통해 2040년에는 CO_2 배출이 전혀 없는 CO_2 Free 수소 생산시스템을 확립할 계획을 세우고 있다. 운송 부문(해상)에서 수소 공급 비용을 2030년까지 30엔/Nm3, 2050년까지 20엔/Nm3을 목표로 액체수소 비용 절감을 통한 글로벌 수소 밸류체인을 구축하고자 한다.

일본 정부는 2023년 4월 개정을 통해 2040년 수소 도입 목표량을 설정(2030년 300만톤, 2040년은 1,200만톤)하고 국내외 일본기업과 관련하여 수전해 장치 도입 목표를 2030년까지 세계 수전해장치의 약 10%에 해당하는 15GW 정도로 설정하여 수소생산기반을 확립하고자 했다. 또한 수소・암모니아 공급망의 조기 구축을 추진하고 민관합동으로 15조엔을 15년간 공급망에 투자하는 계획을 세우는 등 2030년경에는 수소 상용화를 위한 지원 제도를 정비하고자 했다.[89]

라. 중국

중국은 세계 최대 수소 생산국(2022년 기준 4,004만톤)이며 수소산업을

---

84 일본 가와사키중공업과 J파워, 이와타니산업, 쉘 제팬 등 7사로 구성된 '수소에너지공급망기술연구협회(CO_2 Free Hydrogen Energy Supply-chain Technology Research Association)'의 약자.

85 AHEAD(Advanced Hydrogen Energy Chain Association for Technology Development, 기술개발을 위한 고급 수소에너지 체인 협회)라 명명한 해당 프로젝트는 브루나이 정부 발주에 일본의 5개 기업으로 구성된 컨소시엄이 참여한 사업으로, 브루나이가 차세대 에너지 사업 분야로 수소를 지목하면서 시작된 사업.

86 수소경제 종합정보포털(https://h2hub.or.kr/main/econ/policy-abroad.do, 접속일: 2023. 10. 11).

87 Kotra(2022. 2. 7)

88 해상풍력 발전량은 '30년 1,000만 KW에서 '40년 3,000만~4,500만KW로 확대될 것으로 예상된다.

89 외교부 에너지과학외교과(2023. 4. 12).

<표 3-19> 일본의 '2050년 탄소중립을 향한 향후 수소 도입 확대 방안'

시점	수소 도입 확대 전망
현재	- 연료전지 자동차/정치용(定置用) 등 관련 제품 사용화 완료 - 석유정제 등 탈황 공정 등에서 이미 사용 - 활용되는 수소는 모두 그레이수소(이산화탄소 배출)
~2030년	- 상용차 등 타 수송 부문으로의 활용 확대 - 대규모 수소발전기술 등의 확립(수소발전 20년대 중반에 실증 개시) - 재생에너지와 수전해장치 등 활용한 일본 내 재생에너지 유래 수소 제조 기반 확립 - 해외로부터의 대규모 공급 체제 확립('25년도 이후에 대규모 실증개시)
2030~50년	- 발전 분야에서의 활용 본격화를 통한 공급비용 인하 - 수소환원제철 등 산업용도에서의 활용기술 확립 - 재생에너지 보급 확대, 재생에너지 잉여분 활용한 일본 내 수소 제조기반 확립 및 확대
2050년	- 산업(철강 포함)과 열이용 등 모든 분야에서 수소 활용(탄소중립 기여) - 수소 공급원의 다양화 도모(안전보장 공헌)

자료: 경제산업성 자원에너지청(수소암모니아를 둘러싼 현황과 향후 검토 방향, 2022. 3).
유선아 외(2023.03), 「KOTRA 경제통상 리포트」, p.3.

전략적 신산업의 하나로 설정하여 중앙정부차원의 탄중화(碳中和, 탄소배출제로) 정책를 중심으로 지방정부는 전방위적 계획과 지원책을 마련하고 있다. 중국은 2016년 10월 '중국 제조 2025'의 일환으로 '신에너지·에너지절약형 자동차 기술 로드맵' 발표를 통해 수소 연료전지차 육성 목표를 제시했으며, 2020년 자국 '에너지법'에서 수소를 주요 에너지원으로 포함시키는 등 본격적인 논의가 시작되었다. 중국은 중국 제조 2025를 통해 수소에너지 및 연료전지 기술개발과 수소전기차 산업 육성 등 정책 및 목표가 제시되었다. 2022년 10월 최초로 중앙정부 차원의 「수소에너지산업을 위한 중장기전략」을 발표했다. 이 전략에서 중국은 처음으로 수소 전주기 전략을 제시하였으며 수소산업 누적 생산액 증대와 수소충전소 및 수소 연료전지차 확대를 중점 추진 과제로 수소경제의 성장을 국가주도로 추진하고 있으며 이를 위해 지난해 각 부처와 위원회에서 50여 개 이상, 지역별로는 300여 개가 넘는 수소 정책을 발표한 바 있다.

2025년까지 그린수소를 20만톤까지 생산을 확대하고 산업 전반에 그린수소를 활용하는 것을 목표로 2035년까지 그린수소 생산 시스템 조성

및 소비 비중 확대하고자 했으며 그린수소 핵심기술 연구개발과 시범사업의 추진을 강조하고 있다. 중국의 수소에너지 산학연 협력체인 '중국수소에너지연맹'은 2022년 6월에 발표된 「2030년 그린수소 100 발전 로드맵」을 통해서 수전해 생산 설비를 100GW(2030년까지)로 확대하는 목표를 제안한 바 있다.[90]

수소 생산에 있어서 생산과 수요를 탄소중립을 목표로 2050년까지 수요량을 5,000만톤까지 증가시킬 계획을 세웠고, 재생에너지를 활용한 수전해를 통한 그린수소 생산 비율을 70%까지 확대하기로 계획했다. 저장 및 운송은 인프라 구축과 기술개발 추진을 통한 경쟁력을 확보하고자 했고 수소 장거리 파이프라인 건설을 위한 타당성조사 사업을 추진하고 있으며, 중국의 국무원은 극저온/고압가스, 저온액체나 고체와 같이 다양한 형태의 저장·운송 기술개발 계획을 발표했다. 보조금 지급과 기술개발 지원 등 수소 연료전지차 중심의 생태계를 구축하고자 했으며 '차이나 수소 이니셔티브'를 선언하고 중앙정부의 보조금 지급을 통해 2030년까지 수소 연료전지차 100만대 보급과 수소충전소 1,000개 설립을 추진했다.[91] 특히 상용차(수소버스와 트럭 등)를 중심으로 수소자동차 보급을 확대하고자 했으며, 수소 연료전지 자동차 시범 도시군을 정하여 핵심기술부품개발과 산업망 구축을 추진했으며, 상하이, 베이징 등 지방정부 차원의 수소산업 육성 계획을 또한 발표하기도 했다.

2. 국내 수소경제 관련 정책적·법적 기반

우리나라는 2018년 8월 '혁신성장 전략투자 분야'로 '수소경제'가 선정된 후 2019년 재생에너지 정책 계획을 아우르며 수소경제 선도국가로의 도약을 목표로 한 범정부(국가) 차원의 로드맵인 「수소경제 활성화 로드맵」('19.01) 및 「수소 기술개발 로드맵」('19.10) 등을 수립하였다. 2020년

---

90 장현숙 외(2023).
91 KOTRA(2022. 2. 7).

수소법이 국회를 통과하면서 2020년 2월 세계 최초로 「수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률(이하 수소법)」을 제정하고 2021년 2월 시행한 국가로 지속적으로 수소경제로의 전환에 노력을 기울여 왔다. 2030 국가온실가스감축목표(NDC) 달성 및 2050년 탄소중립 달성이라는 전 세계적인 새로운 글로벌 이니셔티브의 흐름에 맞추어 우리나라도 '청정수소'를 목표로 수소경제 이행 정책을 시행하고 있다.

2019년 「수소경제 활성화 로드맵」을 통해 수소경제 전반에 대한 법적·정책적 기반을 마련했고, 그 일환으로 세계 최초로 수소 전주기 안전관리에 대한 법률인 「수소법」은 수소경제 이행 추진체계와 지원 정책, 수소전문기업의 육성, 수소 연료공급시설 설치, 그리고 수소 사용시설의 안전관리 등 규정을 포괄한다. 수소법 제정으로 공식적 수소경제 이행 추진체계를 갖추고 수소 정책 컨트롤 타워인 수소경제위원회는[92] 「수소경제 기본 계획」을 수립하는 등 주요 정책을 수립하고 추진하는 역할을 수행한다. 수소유통 전담기관으로 한국가스공사가 지정되었고, 수소안전 전담기관으로 한국가스안전공사가 지정되어 국내 수소 유통 및 수급관리, 안전관리 업무를 전담하고 있다.

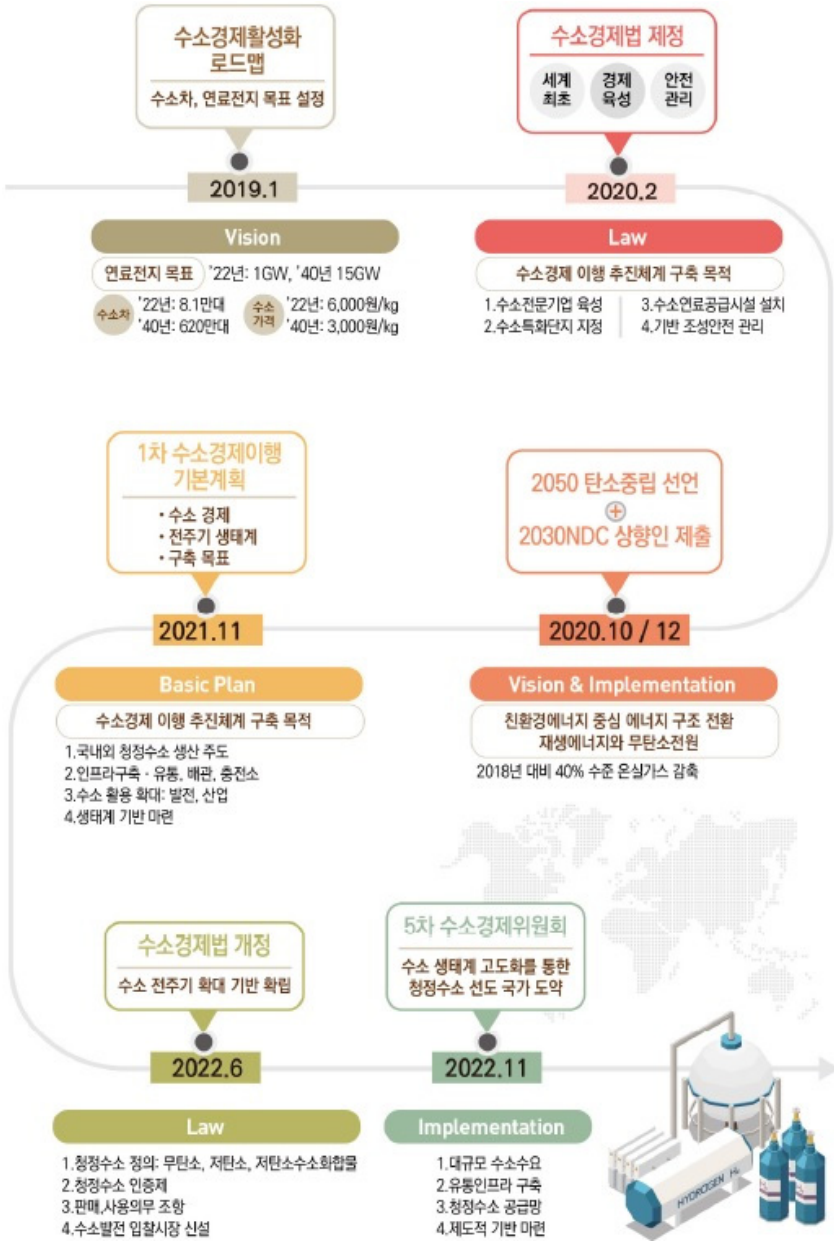
2019년 「수소경제 기술개발 로드맵」을 통해 정부의 수소경제 정책 목표를 달성하기 위한 수소산업 전 주기 핵심기술을 도출하고 중장기(~2040년) 기술개발 전략을 제시하기 위한 범부처 수소 기술개발 로드맵이 수립되었다. 「수소경제 활성화 로드맵」의 기본방향을 바탕으로 「수소경제 기술개발 로드맵」에서는 수소 기술을 대분류(5개), 중분류(18개), 소분류(49개)로 구분하여 기술분류체계를 정립하였다. 특히 5개의 대분류에서는 수소의 생산, 저장·운송, 활용(수송), 활용(산업·발전), 안전·인프라로 나누어 기술별 구체적인 목표를 세웠다. 이를 통해 수소 전 주기 기술개발 전략에 따라 부처별 R&D 사업을 추진했고, 부처 간 협의가 필요한 경우 범부처 수소 R&D 협의체를 구성하여 협업체계 구축이 가능하였다.

달라진 시장 환경 변화 및 정책 여건을 고려한 수소 기술 분류체계의

---

92 수소경제위원회는 국무총리를 위원장으로 8개 관계부처 장관 및 민간위원 등 총 20명 이내 위원으로 구성.

[그림 3-19] 우리나라 주요 수소경제 정책 흐름



자료: 김기환 외(2022), p.10.

재조정과 산업공정 과정에서 수소 및 암모니아 활용 등 새롭게 제시된 수소 기술 분야에 대한 기술개발 전략 수립이 필요해짐에 따라 「수소 기술개발 로드맵 2.0(안)」이 수립되었고 「수소경제 기술개발 로드맵」을 보완한 새로운 수소 기술개발 로드맵 및 추진 전략을 발표했다.[93]

2050 탄소중립 달성을 위해 국제적 정책 방향이 온실가스 배출이 없는(또는 적은) 그린수소 및 블루수소 중심으로 더 높아진 요구를 따라 해외에서 생산된 저가의 청정수소를 국내에 도입하기 위한 공급망 구축의 필요성이 커지고 국제협력, 기술개발, 세부지원제도 등 추가적인 정책의 수요가 필요해졌다. 이에 「제1차 수소경제 이행 기본 계획」을 수립하여 청정수소 전 주기의 생태계 구축계획 및 세부 전략을 발표했다. 이는 수소 부문의 최초 법정 기본계획으로 청정수소의 전 밸류체인의 정책 방향과 추진 전략을 종합적으로 제시하고 있다. 기본 계획은 2030년 및 2050년까지의 국내 청정수소 공급과 수요 목표를 설정하고 있으며, 이 목표를 달성하기 위한 4대 전략과 15대 과제를 제시하였다.

2022년 11월 제5차 수소경제위원회는 새 정부의 수소경제 정책을 반영하여 「청정수소 생태계 조성 방안」, 「세계 1등 수소산업 육성 전략」, 「수소기술 미래 전략」 등 총 3개의 후속 정책을 발표하였다. 위 정책들은 청정수소경제의 조성과 수소산업 육성, 수소기술개발에 대한 구체적인 정책 방향과 로드맵을 담고 있다. 청정수소경제로의 전환을 위하여 규모・범위의 성장(Scale-Up), 인프라・제도의 성장(Build-Up), 산업・기술의 성장(Level-Up)을 제시했다. 특히 「청정수소 생태계 조성 방안」과 「세계 1등 수소산업 육성 전략」은 수소경제와 산업에 대한 구체적 추진 전략이 담겨있으며, 이전에 발표된 「제1차 수소경제 이행 기본 계획」과 비교했을 때 각각 청정수소경제 이행 부문과 산업 육성 부문으로 나누어 시점과 규모를 명시하는 등 기존보다 더 구체화 되었고 청정수소 생산 방식 다양화의 일환으로 원자력 수소에 대한 추진 전략이 포함되었다.

---

93 과학기술정보통신부 보도자료(2022. 1. 27).

<표 3-20> 국내 수소경제 정책 타임라인

정책명	내용
2018년	
혁신성장 전략투자 방향 발표('18. 8)	플랫폼 경제 구현을 위한 전략투자 분야로 '수소경제' 선정, 수소경제에 1,100억원 재정투자
2019년	
수소경제 활성화 로드맵 ('19. 1. 17)	43조 부가가치 창출 목표· '40년 수소차 620만대 생산, 수소택시 8만대, 수소트럭 3만대 보급목표·수소충전소 1,200개소 개축· 연료전지 발전용 15GW, 가정용·건축용 2.1GW 보급
수소경제 표준화 전략 로드맵('19. 4. 3)	2030년까지 '국제표준 8건(수소 모빌리티 부문)/4건(수소에너지) 3건(수소공급 및 가격) 이상 제안·전체 국제표준 제안의 20% 점유' 목표
제3차 에너지 기본 계획 발표('19. 6)	재생에너지·수소·효율연계 등 미래에너지산업을 육성, 수소차 290만대·연료전지 10.1GW 보급('40), 그린수소 생산 등
미래자동차 산업 발전 전략('19. 10. 15)	수소차 부문 친환경 기술력과 국내 보급을 가속화해 세계 시장 적극 선점
수소 인프라 및 충전소 구축 방안('19. 10)	수소 생산 방식 다양화, 저장·운송 인프라 확충, 2022년까지 총 310기의 수소충전소 구축 계획(2030년 660기)
수소 시범도시 추진전략 ('19. 10. 10)	수소를 주 에너지로 주거·교통 중심으로 기술을 실증하는 수소 시범도시 3곳 선정 계획
수소 기술개발 로드맵 ('19. 10)	수소경제 정책 목표 구현을 위한 생산, 저장·운송, 활용, 안전 등 전 분야 핵심기술 도출·중장기 기술개발(R&D) 전략 제시
수소 안전관리 종합대책 ('19. 12)	글로벌 수준으로 체계적인 안전관리를 위한 수소 안전대책의 방안 논의, 핵심(충전소·생산기지·연료전지)시설 중점 관리
2020년	
수소경제법 국회 통과 및 제정('20. 1)	수소경제 정책 및 국내 수소·연료전지 산업의 지속적 육성을 위한 법적 기반 마련, 세계 최초「수소법」제정 국가로 등극
수소차·수소 충전소 추진성과 및 향후 계획 ('20. 7)	2030년까지 보조금 등 재정지원 연장·강화를 통해 수소차 85만대 보급 및 수소충전소 660기 확충
사업용 수소차 연료 보조금 도입 방안('20. 7)	사업용 버스 연료보조금 도입('21년 9월 시행, ㎏당 3,500원의 연료 보조금 지급), 택시 및 화물차 연료 보조금 도입(택시는 2023년 시행 예정, 화물차 '22년 9월부터)
수소경제위원출범 ('20. 7)	수소경제 정책 제시 및 수소경제 전담기관 지정

<표 3-20>의 계속

정책명	내용
2021년	
한극가스공사 수소사업본부 신설('21. 1)	수소사업본부와 수소유통센터 신설을 통해 경제적인 수소 생산・공급을 위한 투자 추진
수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률 시행('21. 2)	수소경제 이행 추진체계, 수소경제 지원 정책, 수소용품 및 사용 시설의 안전규정 신설 등 규정을 통해 수소경제 체계적 육성 방향 제시 및 안전 관리 강화
제3차 수소경제위원회 개최('21. 3)	기업들의 수소경제 민간투자계획(~'30, 43조원) 및 정부 지원 방안 발표(청정수소 인증제, 수소발전 의무화제도(HPS) 도입, 수소터빈・수소환원제철 기술개발 지원 등) 수소 클러스터 5개 지역 예타 신청, 수소차 생산기지・연료전지 등 수소경제 예산 8,244억원 지원
수소경제 성과 및 수소선도국가 비전 발표('21. 10)	수소 사용량 2030년 390만톤, 2050년 2,700만톤까지 확대, 국내 청정수소 생산 본격화 및 청정수소 생산・해외 도입 (청정 수소 도입하는 5개 사업 H2 STAR 가동)
제1차 수소경제 이행 기본 계획('21. 11. 26)	수소경제 전 주기 생태계 구축으로 청정수소경제 선도 비전 제시. 수소법 시행 후 첫 법정 기본계획으로 국내・외 청정 수소 생산 주도, 인프라 구축, 그린・블루수소 생산・도입, 수소발전・모빌리티・수소산업공정 확산, 수소 클러스터・도시・규제 특구 육성, 수소 안전・기술개발・국제협력의 추진 전략 및 과제 제시
2022년	
한국 주도의 글로벌 수소산업연합회(GHIAA) 발족('22. 5. 25)	미국・영국・독일 등의 18개국 협회 참여, 한국 창립총회에서 초대 의장국으로 한국을 추대, 수소융합얼라이언스(H2KOREA)에 사무국 설치하고 연합회 이끌 예정.
산업통상자원부, 수소펀드 출범 선포 ('22. 7. 6)	수소 분야에 대한 민간투자 활성화 및 협력 기회를 발굴하기 위해 국내 기업과 외부 투자자의 출자 등 5,000억원 규모의 '수소펀드' 조성. 금융지원・상생협력・규제혁신 등 지원
수소기술 미래전략 ('22. 7)	수소 활용(수송・발전) 기술 1위 공고화 등 추진 전략 및 체계 제시. 청정수소 대량생산 국산화 기술개발, 해외 수소 공급을 위한 저장・운송 기술 확보를 위한 R&D 본격 추진
세계 1등 수소 산업 육성 전략('22. 11. 9)	2030년까지 핵심기술 개발, 산업생태계 조성, 수출산업화 촉진 등 지원을 통해 수소산업 글로벌 선도국가로 도약. '30년까지 7대 전략 분야 선진국 대비 기술 수준 100% 달성, 세계 시장 점유율 1위 품목 10개, 수소전문기업 600개를 목표
청정수소 생태계 조성 방안('22. 11. 9)	수송・발전・산업 부문에서 대규모 수소 수요 창출과 그에 맞는 인프라, 국내외 청정수소 생산기지와 공급망 구축 및 제도 구축 통해 청정수소 생태계 확장
윤정부 수소경제 정책방향 제시('22. 11. 9)	2030년 수소차 3만대, 액화수소충전소 70개소, '36년 청정수소 발전 비중 7.1% 달성, 수소전문기업 600개 목표

<표 3-20>의 계속

정책명	내용
2023년	
수소경제 활성화를 위한 정책 토론회('23. 2)	국회수소경제포럼 주최, 수소융합얼라이언스 주관, 산업통상자원부, 에너지경제연구원, 포스코홀딩스, 한국가스공사 등이 후원
수소 안전관리 로드맵 2.0('23. 5. 9)	청정수소 생태계를 위한 선제적 안전기준 개발, 수소산업 육성을 위한 규제혁신, 안전과 산업의 균형을 위한 안전관리 등 3대 전략, 10대 추진 과제, 64개 세부과제를 발굴(세부과제 중 58%에 해당하는 37개 '24년까지 추진 완료 방침)

자료: 이상현 외(2023) 및 각 보도자료를 참조하여 저자 정리.

3. 해외 수소정책과 국내 수소정책 비교

세계 각국 수소 선도국은 자신들의 권역별 시장 특징에 맞는 전주기 지원 정책을 도입하여 시행하고 있다. EU의 경우 EU집행위로 하여금 각국 지원체계에 맞게 경매 기반의 제도를 설계하고 있고 미국은 전반적인 시장을 지원하고 있고 국내의 경우 시장별 맞춤형으로 지원되고 있다.

EU는 REPower를 통해 EU 역내의 수전해 설비를 투자하여 1천만톤을 생산하고 해외 도입 터미널 및 수소배관망 구축을 적극 지원하여 나머지 1천만톤을 수입 등 총 2천만톤('30)을 목표로 하고 있다. 2024년 이후 배출권 가격 연계 경쟁 경매시장 도입(Carbon CfD) 예정이며 그린수소의 역외 수입을 위해 터미널과 수소배관 인프라에 대한 적극적인 투자가 활발하다. 미국의 경우 인프라 구축(IIJA)과 세액공제(IRA)를 통해 청정수소 1천만톤('30), 2천만톤('40), 5천만톤('50) 등 점진적인 생산 증가를 목표로 시장 전반적인 폭넓은 지원을 하고 있다.

국내의 경우 2023년 청정 수소발전 입찰제도(CHPS) 및 2024년 청정수소 인증제를 시행할 예정이고 이를 통해 청정수소 시장을 확대하여 연관 산업을 확대할 계획을 가진다. 생산 부문을 지원할 예정이며, 암모니아 인수기지('26) 및 액화수소 인수기지 완공 계획('29)과 수소배관망 구축 계획('30)을 가진다. 다만, 주로 발전 부문 중심의 정책으로, 그 외 좀 더 적극적인 인프라 투자 재정에 대한 투입이 고려되어야 한다. 또한 국내

<표 3-21> 국가별 수소 정책 비교

	미국	EU	독일	일본	한국
주요 정책	수소경제 로드맵 ('20. 3) 청정수소 전략 로드맵('23)	기후 중립적 유럽을 위한 수소 전략('20)	국가수소 전략 ('20)	국가수소전략 ('17. 9. 제정, '23. 7. 개정) 수소·연료전지 산업로드맵('19. 3)	수소경제 로드맵('19. 1) 수소경제 이행기본계획 ('21. 11)
청정 수소 생산 목표	청정수소 (그린, 블루) 각 1천만톤(~'30) ('40 2천만톤 /'50 5천만톤)	청정수소 역내 생산 1천만톤, 수입 1천만톤('30)	50만톤 그린수소 (~'30)	청정수소 42만톤 도입 (~'30)	그린 25만톤 블루 75만톤(~'30) 그린 300만톤 블루 200만톤(~'50)
생산 정책	수소생산 세액공제	Auction CFD	그린수소 생산 세금감면	법인세 감면, 발전단가 차 보조금 지원	수전해 R&D·생산가지구축 지원, 인증제도
활용 정책	콜로라도주 難감축 부문 그린수소 활용시 $1/kg 지원 전 부문	RFNBO주1 산업부문 초점 의무화 42%('30) 60%('35)	H2 Global 통해 산업 부문 지원	산업부문 수소활용 R&D를 위한 자금 지원	청정수소발전 입찰제도 발전 부문 초점
예산	인프라법 $95억 IRA $225억	IPCEI 1차 54억€ 2차 52억€	213.6억 유로 (~'30)	수소·암모니아 7조엔('30)	2.6조원('20)

주: RFNBO는 비생물계 재생 에너지 연료.
자료: 장현숙 외(2023), 김기환(2023. 9. 14), 각 정부 발표 자료 참조하여 저자가 종합함.

수소 정책은 해외 대비 기술개발 폭이 한정적이며, 청정수소 로드맵이 부재하며 산업 부문 청정수소 활용에 대한 단기 계획이 미비한 편인 것으로 보인다. RDDD(Research, Development, Demonstration and Deployment[94]: 연구개발·실증·확산)의 경우 EU는 EU Innovation Fund와 IPCEI, Hy2Tech[95]를 통해 지원되며, 미국은 IIJA, Hydrogen Shot에 관련 지원 정책이 있다. 인프라 구축에 대해서도 EU는 IPCEI, Hy2Use[96]을 통해 지원되고 미국은

94 연구개발(R&D) 과정 이후 실제 운영 환경에서 기술을 실증·검증하고 기술이전 및 확산을 촉진시키는 과정.

95 수소 밸류체인에 있는 생산, 저장 및 유통, 연료전지, 모빌리티 기술개발 지원하는 프로그램으로 총 35개 기업의 41개 프로젝트가 선정되었으며 공공지원 4억유로 민간지원 88억유로가 집행된다(김기환 외, 2022).

96 수소 인프라 건설 관련 프로젝트, 산업 부문(철강, 화학, 시멘트)에서의 수소 활용 증진 관련 프로젝트를 지원하는 프로그램으로 총 13개 국가, 29개 기업의 35개 프로젝트가

IIJA와 IRA에 의한 지원 정책이 있다. RDDD와 인프라에 대한 국내 정책은 미비하다고 할 수 있다. 수전해에 대한 지원 또한 EU는 UK CFD 혹은 EU 지원되고 미국은 IIJA를 통해 청정수소 수소전해질 프로그램에 $10억이 투입된다. 하지만 국내의 경우 수전해와 관련하여 기본 계획('21.11) 발표 후 뚜렷한 정책과 전략의 변화가 눈에 띄지 않는다. 5차 수소경제위원회('22.11)[97]에서 수전해 기반 수소생산기지 시범 구축에 관한 개소당 56억원 지원 계획이 있으나 올해 9월 '수전해 기반 그린수소 생산시설' 준공식을 막 가진 상황이며,[98] 수전해 공급 인프라는 종전의 부생 수소 생산기지 건설보다 고도의 기술력과 예산이 요구되는 가운데 수소생산기지 구축 사업 예산은 2021년 이후 지속 축소되고 있는 등 향후 그린수소 생산 수요에 효과적으로 대응하지 못할 우려가 있다.[99] 수전해 기반 원천기술에 대한 선도국과의 기술격차 및 국가별 수전해 설비 용량 분석을 보면 한국의 순위는 매우 낮은 상황이며, 현재 구축 및 운영 중인 수소생산기지는 생산 물량은 적고 예상보다 수요가 한참 적거나 수요처가 없는 곳도 있어 손해를 보는 등 운영이 어렵다. 사실상 재생에너지 자원이 부족하여 건설에 힘든 환경 조건 등 사실상 현 정책과 전략으로 수소 자립이 어려움이 있어 이에 정부는 해외 생산기지 확보하여 해외 생산과 해외 도입을 제시하고 있다. 다만, 장기적으로 볼 때 해외 경쟁력을 확보하기 위해서 수전해 부문에 대한 체계적인 투자가 필요할 것이다.

4. 규제 개선 현황

수소처럼 신산업을 발전시키고 기술 발전 저해를 방지하기 위해서 부재한 신산업과 신기술에 대한 기준 및 근거 규정을 마련하고 신산업의 허용을 위한 법령 개선과 경직된 규제를 완화 등 시장조성을 위한 지원이 필요하다.

선정되었고, 13개국에서 52억유로의 재정이 집행되었으며 추가로 70억유로의 민간투자가 이루어질 예정이다(김기환 외, 2022).

97 관계부처 합동(2022. 11. 9).

98 환경부(2023. 9. 13).

99 장현숙 외(2023).

수소산업 생태계 활성화를 위한 흐름에 맞추어 우리나라는 2018년부터 총 81건의 규제개선을 추진하는 등 수소산업에 대한 지원을 강화하고 있는 것으로 보인다. 국내 81건의 각 분야별 수소분야 규제개선 결과 중 이송·저장 및 충전소 등 수소 유통과 관련된 규제개선은 46건, 연료전지, 수소차, 수소선박 수소기차 등 수소 활용 관련 규제개선은 21건, 수소 생산은 12건, 기타 2건 순이다. 그리고 대다수 수소의 충전소 관련 규제가 개선되었고(41건), 그다음은 연료전지와 관련된 것으로 수소 안전성을 강화하는 방향으로 나아가고 있다.

수소 관련 규제 중 일부 국민의 안전성에 대한 공감대 및 확신 부족으로 쉽게 풀기 어려운 부분도 있기 때문에 수소생산기지 구축 등 국내 수소산업 성장을 위해서 안전규제 마련(예컨대, 수전해설비 안전기준 마련[100]) 등 각종 규제의 적극적 도입과 개선이 필요하다. 또 사업자의 경제성 확보 등 수소산업의 원활한 시장정착과 성장을 위해 정부 및 관련 기관이 불합리한 절차에 대한 개선과 함께 불필요하게 과다한 경제적 부담을 덜 수 있도록 리스크 해결에 앞장서야 할 것으로 보인다. 특히 신기술에 대해 검증하고 실증할 수 있도록 정부 주도의 규제샌드박스 및 규제자유특구를 통해 적극적으로 자유롭게 활용 가능하도록 수소 관련 규제가 개선되어 수소산업의 경쟁력을 강화할 수 있도록 지원되어야 할 것이다. 또한 수소생산기지 사업의 경우 인허가 규제나 제도 변경으로 인하여 잦은 사업의 지연 및 중단이 발생되기도 했다. 그래서 기(旣) 진행된 수소생산기지 구축사업의 절반 이상이 예산 집행률 70%를 하회한 바 있으며 소규모생산기지 구축 2020년 사업 목표 달성도는 80%, 중·대규모 수소생산기지 및 출하센터 구축 달성도는 0%('23. 1. 기준) 이었다.[101]

한편, 지난 2023년 5월 발표된 '수소 안전관리 로드맵 2.0'에서 산업부는 수전해 설비 내구성 검증 방법 마련과 차세대 수전해(SOEC 등) 안전

---

100 현재 규제샌드박스를 통해 실증 특례로 수전해 스택 전용 안전기준 마련 중이다.
101 장현숙 외(2023).

<표 3-22> 국내 수소분야 규제개선 추진결과

수소 생산	수소유통		수소활용				기타	합계
	이송저장	충전소	연료전지	수소차	수소선박	수소기차		
12	5	41	13	4	3	1	2	81

자료: 수소경제 종합정보포털(https://h2hub.or.kr/main/info/regulation.do, 접속일: 2023. 12. 4).

기준 개발 등 21개의 규제개선 과제가 제시되었고,[102] 2023년 3월 기준 수전해, 액화수소 전주기 및 셀프충전 등 수소 신기술 실증을 위하여 청정수소(6건), 액화수소(16건), 수소모빌리티(8건), 수소차충전소(11건) 수소용기 등 기타(13건) 등 총 54건의 규제샌드박스와 규제자유특구 과제가 진행되고 있다.[103]

그러나 아직 현장에서는 각종 규제와 제도가 그 자체로 혹은 부재한 관계로 산업 발전을 저해하고 있으며, 민관이 함께 정기적인 규제를 점검하고 기술 발전 지원을 통해 산업현장의 어려움을 해소해야 한다는 지적이 있다. 일부 선진국과 같이 최소규제 형태의 네거티브 방식으로의 전환처럼 산업육성을 기반으로 한 규제 패러다임의 전환이 필요할 수도 있을 것이다. 다만, 수소경제의 성공적 이행을 위해 규제개혁은 안전성 검증 및 실증을 통해 경제성과 안전성을 균형 있게 양립할 수 있는 방향으로 추진되어야 할 것이다.[104]

5. 수소 정책에 대한 향후 개선방향 제언

지금까지 수소 산업이라고 일컫는 수소의 전 주기적 분야인 생산과 이송・저장, 활용 등은 그 영역이 매우 광범위하여 수소 산업에 대해 정확하고 면밀하게 파악하여 산업분류를 하는 작업은 쉽지 않은 상황이다. 수소의 생산, 이송・저장 그리고 수소충전의 경우에는 비교적 명확하여 별도로 다룰 수 있겠으나, 수소의 활용의 경우 특히 광범위한 영역이며,

102 산업통상자원부(2023. 5. 30).
103 산업통상자원부(2023. 5. 9).
104 『환경일보』(2022. 7. 22).

수소전기차를 포함한 수소 모빌리티, 발전용 연료전지, 화력발전용, 산업용 원료, 연료 활용 등 세분화하는 것이 적절할 수 있다.[105] 또한 수소를 전업으로 하는 기업이 있는 반면, 고객사의 요구 혹은 수출입의 무역 조건으로 탄소를 저감하거나 배출하지 않을 것에 대한 요구를 충족하기 위해 필연적으로 수소 산업에 진입한 기업도 있다. 앞 절에서 언급한 바와 같이 수소 산업에 대해서 명확히 파악해야 정밀하게 세부적인 산업정책을 설계할 수 있을 것이며 그렇기 위해서 수소 산업에 대한 정의 및 분류 작업이 필요할 것이다.

다음은 수소 생산을 중심으로 저장·이송 및 활용 등 수소 밸류체인별로 수소 산업의 성장을 위한 개선 방안에 대해 논의해 보고자 한다.

가. 생산[106]

현재 수소 생산의 대부분은 부생 수소 및 그레이수소(개질 수소)에 의존하고 있으며 장기적으로 보았을 때 앞으로는 청정수소로의 전환이 요구된다. IEA에 따르면 수소생산 시장 규모는 1,296억달러(`20년)에서 연평균 9.2%씩 성장하여 2,014억달러('25년)에 이를 것이라는 전망이 있었다고 '수소 공급량' 파트에서 언급한 바 있다. 전 세계 수소 생산량 약 9,400만톤('21년 기준) 중 81% 정도는 그레이수소이지만 세계적으로 수전해 기술개발을 통해 2030년까지 수전해 설비 규모가 연평균 약 86% 증가하여 재생에너지 기반인 그린수소를 중심으로 글로벌 수소의 생산량이 확대될 것으로 예측되고 있다.[107]

궁극적으로 그린수소의 생산이 필요하겠지만 재생에너지 생산과 연결되어 대량으로 생산하기 위한 기술개발 상황을 고려했을 때 청정수소의 생산이 단기 및 중기적 방안으로 고려되고 있다. EU 일부 국가와 미국에

---

105 이는 KETEP 박진남 PD로부터 자문받은 내용이다.

106 아래 청정수소 부문은 KETEP 박진남 PD 및 KISTEP 김선교 박사에게 자문 받은 내용을 포함하고 있다.

107 IEA(2022).

서는 청정수소 범주에 블루수소, 청록수소, 그린수소뿐 아니라 최근에는 핑크수소[108]까지 포함하기도 한다. 청정수소 각각의 특징과 국내 여건 및 경쟁력 강화를 위한 방향을 살펴보면 다음과 같다.

블루수소는 기술적 성숙도가 높으며 기업 차원에서의 투자를 통한 구축이 가능하나 생산 공정을 가동하고 포집된 이산화탄소의 저장 및 활용에 대한 방안이 필요하며, 이 부분에서 정부의 협력이 필요하다.

청록수소의 생산은 탄소배출이 없고 경제성이 낮지만 기업의 투자만으로 대량생산이 가능한 기술이다. 다만, 현재 세계적으로 파일럿생산 수준으로 국내에는 활용할 수 있는 상업용 공정이 없다. 적절한 공정의 확보 및 공정에서 필요한 에너지를 청정에너지로 공급할 수 있다면 단기적으로 대량으로 생산하기에 가장 적합한 기술이다.

그린수소는 가장 양질의 청정수소이지만 대량의 신재생에너지 전력을 저가로 안정적으로 공급할 수 있어야 한다. 재생에너지가 부족한 국내의 경우 결과적으로 그린수소의 생산 단가가 높아질 수밖에 없고 해외 국가들과 비교하면 그린수소 생산 단가는 매우 높은 측에 속한다. 국내 생산량 확대를 위해서는 생산 단가 저감을 위한 보조금 지원 등의 노력을 기울여야 할 것이다.

해외뿐 아니라 국내에도 원자력 발전과 연계하여 수전해를 통해 생산되는 핑크수소의 청정수소 포함 여부를 두고 의견이 엇갈리고 있다. 이에 대하여 2022년 국회를 통과하지 못하고 수소법 개정안이 계류된 상태이다. 핑크수소는 그린수소 생산단가의 절반 수준으로 생산가능하나 인프라 구축 과정에서의 인허가 및 주민 수용성 측면의 문제가 있다.

이렇듯 청정수소 생산을 위해 각각의 장단점을 고려하고 국내 상황에 맞게 방안을 설계하여 청정수소 생산에 박차를 가해야 할 것이다. 아직까지 국내에는 수소 생산에 대한 로드맵이 부재하다. NDC 목표에 도달하기 위한 블루수소 등 포함한 청정수소 및 수전해 수소 생산에 대한 구

---

108 독일을 제외한 프랑스, 영국, 스웨덴 등 EU 주요국은 원전을 기반으로 한 핑크수소를 저탄소수소로 인정하고 있으며 미국도 정부의 지원과 함께 원전 활용한 수소 실증프로젝트에 참여하고 있으며, 일본의 로드맵에도 원자력수소가 포함되어 있다.

체적 방법에 대한 로드맵이 없다. 현실적인 여건과 기술개발 가능성을 고려한 목표를 설정하고 구체적인 방안을 마련하는 '청정수소 국내 생산 로드맵(가칭)'이 준비되어야 할 것이다.

청정수소 중 그린수소 생산을 위한 국내 인프라는 여전히 초기 단계에 있으며 대학・연구소 등의 주도로 전극, 분리막, 분리판 등 수전해 시스템의 핵심 소재를 일부 국산화했지만 여전히 해외 의존도가 높다.[109] 성능 개발을 위한 R&D 뿐 아니라 부품 국산화를 위해 해결해야 할 문제가 많은 상황으로 보인다. 지난 제6차 수소경제위원회(2023.12.18)에서 수전해・액체수소 운반선・수소터빈 등 수소산업 10대 전략 분야의 소재・부품・장비에 대한 국산화율 80%를 2030년까지 달성하도록 지원하겠다고 발표를 했고,[110] 민간기업뿐 아니라 대학 및 연구소와 협력하여 실행될 수 있도록 추진 방안 및 그 과정에 대한 검토가 시행되어야 할 것이다.

「탄소중립 전략 로드맵」과 「제5차 수소경제위원회 및 수소 안전관리 로드맵 2.0」 등을 통해 단계별 수소 생산 기술 확보 전략을 제안하고 실증과 상용화를 강조하고 있다. 수소 생산에 있어서 실제 현장에서 활용 가능하도록 수전해 시스템(MW 급) 개발과 경제성 확보를 위한 스케일업 즉, 대형화(100MW 급)될 수 있도록 단계적으로 기술을 확보하고 실증하는 시스템이 필요하다. 즉, 수소원천기술을 R&D를 통해서 발전시킨 후 거기서 끝나는 것이 아닌 기술개발을 통하여 '원천기술 획득 → 대형화 → 실증 → 상용화'의 단계까지 연계되고 기술이 전환할 수 있는 프로그램이 필요할 것이다. 또한 실증 기반으로 청정수소생산 인프라 구축을 지원할 수 있는 인센티브 정책도 필요한 것으로 보인다.

수소 관련 사업을 하는 민간 기업들에 있어서 가장 크게 고려되는 부분은 수소 단가일 것이다. 기업이 영속되기 위해서 수익을 제일 중요하게 생각할 것인데, 현재 수소 비용에 대한 명확한 가이드 라인이 없는 상태에서 사업을 진행하고 투자를 권고하는 상황이라 할 수 있다. 이미 제

---

109 김선교 박사의 자문이다(2023).
110 『정책브리핑』(2023. 12. 18).

도와 유통이 확립되어 있는 타 에너지산업과 달리 수소는 아직 초기 단계다. 아직 제도와 시장이 완벽하게 형성되지 않았기 때문에 적절한 정부의 가격정책과 지원이 필요할 것으로 보인다.

EU, 미국, 영국 일본 등 주요국들은 청정수소 생산 촉진을 위한 보조금 정책을 발표하고 있다. 독일은 그린수소 생산 목표를 위해 kWh(킬로와트아워)당 3.723센트씩 전력에 대한 부과금을 면제하고, 수소 공급이 가능한 국가 33곳을 대상으로 그린수소 수입 전략을 수립하였다. 미국은 자국 내 수소산업 활성화를 위해 229억달러(IRA법)과 95억달러(IIJA법) 규모의 보조금을 지원하여 수소 기술개발과 생산단가 절감에 힘쓰고 있고, 2032년 말까지 수소 생산하는 기업(생산자)에게 kg당 0.60~3.00달러의 세액 공제를 제공한다. 일본의 경우 그린전환(GX)의 그린이노베이션(GI)기금을 통해 10년간('21~'30년) 총 20조엔 중 수소가 포함된 비화석에너지 부문[111]에 6~8조엔(정부 지원)의 기금을 조성하여 장기적 기술개발 및 실증을 위한 예산 지원을 발표했다. 향후 10년간 민관 전체(총 150조엔)에서 수소・암모니아에 대한 지원은 최소 7조엔인 것으로 발표되었다. 미국, 유럽, 영국, 독일, 일본 등은 청정수소의 생산을 촉진하기 위해 보조금 정책을 발표하고 있다.

국내에는 수소 생산에 대해서 수소생산기지구축(산업부), 바이오가스 활용 청정수소 생산시설 설치사업(환경부), 해양바이오수소 생산 상용화 기술개발(해수부), 해양재생에너지 연계 그린수소 생산기술(해수부) 등 인프라 구축과 기술개발에 대한 예산이 있다.[112] 초기 수소 시장 확립을 위해 수소 기술개발 및 수소 생산 단가 절감을 전력 부과금 면제 혹은 세액 공제 등 여러 가지 청정수소 생산에 대한 보급사업(보조금)과 지원금 정책이 마련된다면 한국도 수소 활용 분야와 같이 선도하는 위치를 유지하고 세계 수소 산업에서 앞서 나갈 수 있을 것이다.

---

111 비화석에너지에는 재생에너지, 원자력, 수소, 암모니아가 포함되어 있다. 참고로 CCS가 포함된 자원순환(자원순환산업, 바이오, CCS)에는 약 2~4조엔이 지원될 예정이다.

112 H2 KOREA에서 제공한 내부자료에 따르면 2023년 기준 수소생산기지구축에 약 43억원, 바이오가스 활용 청정수소 생산시설 설치사업에 10억원, 해양바이오수소 생산 상용화 기술개발에 19억원, 해양재생에너지 연계 그린수소 생산기술에 65억원의 예산이 확정된 바 있다.

또한 동 절 4.에서 살펴본 바와 같이 제도 변경 및 인허가 규제로 인하여 수소생산기지 구축 사업이 지연 및 중단되는 문제가 발생한 바 있다. 수소 사업에 대한 인허가의 신속처리가 가능하도록 하는 등 제도 개선을 통해 수소경제 경쟁력을 강화할 수 있을 것이다.

나. 저장・이송

국내의 그린수소 생산 여력이 미래 수소 수요 대비 한정되어 있으므로 해외 도입 수소 비중이 높을 것을 고려했을 때 수소의 저장・운송에 대한 전략적 중요성이 높은 가운데 기반 생태계 여건이 미흡한 상태이다. 장거리・대용량 운송, (저압) 안전성이 우수한 액화수소의 기술개발은 초기 단계로 조속한 기술격차 해소가 필요하다. 액체수소 운송을 위해 대용량 고효율 운송선이 필요하며 이 기술은 일본이 주도하고 있는 가운데 국내 기술 확보도 필수적이다. 또한 국내외 수소 공급망 체계의 확보를 위한 대용량 수소 저장 기술도 확보되어야 할 것이다.

현재 고압 기체 및 액체수소가 대표적인 이송・저장의 방안으로 고압기체를 활용하는 기술은 안정적으로 진행되고 있다. 액화수소의 경우 2023년 말부터 2024년에 국내에 다수의 수소 액화 플랜트의 가동을 개시할 예정이며, 이와 연계된 액화 수소 충전소도 구축되고 있다. 액화 수소 산업이 안정적으로 성장하기 위해서는 액화수소 생산과 사용량, 즉 공급량과 수요량의 균형이 맞추어져야 하며, 적정 가격으로 액화수소를 공급할 수 있어야 할 것이다.

단기적으로 현재 상용화되고 있는 튜브트레일러를 이용한 고압기체 운송 혹은 탱크로리를 이용한 액체수소의 운송이 확대될 것으로 보이는 가운데 수소의 유통량이 증가하는 시점에서는 수소배관망을 통한 수소이송도 고려되어야 할 것으로 이에 따른 기술개발과 함께 안정성 기준 확보 등 제도적으로도 준비되어야 할 것이다.

다. 충전

국내 수소충전소 구축은 수량으로는 중국[113]에 이어 세계 2위이지만 전부 700기압 충전소로, 기술 수준이나 가동률을 고려하면 국내 수소충전소는 세계 1위 수준이다.[114] 향후 수소충전소 설비 및 부품의 국산화율이 확대되어야 할 것이며 수소충전소의 에너지 사용량 저감이 중요한 이슈가 될 것이다. 다만, 정부가 예측한 수소전기차 보급 목표치에 도달하지 못하여 수소충전소 운영업자는 대부분 적자 운영을 하고 있다. 이를 극복하기 위해서는 운영비용 절감 및 가동률 제고와 함께 공적 지원이 필요할 것이며[115] 수소의 판매가격(수소 소매가격) 인상도 고려할 필요가 있을 것이다.

일본은 2019년 전년도 운영비를 기준으로 최대 2억 2천만원(66%)의 운영보조금을 지원한 바 있으며 일부 충전소 운영사업자들은 일본과 같이 정부가 운영보조금을 일정 기간 지원해 주길 기대한 바 있다. 이 부분에 대해서 수소경제 로드맵에도 반영되었던 계획이었으나, 한 분야(수소충전소)에 구축 지원과 운영 지원금 등 이중 지원 문제 및 타 사업자(LPG충전소 등)와의 형평성 문제가 제기되고, 부처 간 이견[116]으로 실현되지 못했는데[117] 이에 대한 재검토가 필요할 것이다.

라. 활용

국내 수소 활용은 수소전기차가 가장 대표적이며, 2023년 상반기 기준 국가별 수소차 판매 현황을 보면 우리나라가 세계 1위를 계속 유지하고

---

113 「중국 수소충전소 건설 및 운영 발전 백서(2023년)」에 따르면 올해(2023년 상반기 기준) 전 세계 수소충전소 수량은 1,089기이며, 이중 중국이 가장 많은 351기이며 한국은 2023년 6월 말 기준 수소충전소 수량이 총 179기이다(https://me2.do/xY9GKWq0).

114 『전자신문』(2023. 5. 31)

115 김재경(2018).

116 『월간수소경제』(2020. 7. 30).

117 『월간수소경제』(2023. 10. 31).

있다. 수소전기차는 우리나라가 가장 경쟁력을 가질 수 있는 수소산업 분야이지만, 앞으로는 승용차뿐 아니라 버스, 트럭 등 대형 수소 차량으로의 전환이 필요하며 수소 선박, 수소 트램, 수소 드론 등 영역 확대도 필요하다.

수소자동차 이외 대표적으로 수소 활용 범주에 속하는 연료전지는 수십 MW 급의 발전단지 구축에 있어서 가장 효율적인 발전 수단이며, 분산 발전용으로 적합하다. 연료전지는 천연가스 혹은 수소를 그 연료로 이용하고 있으며 수소 혼소 기술이 개발되고 있다. 천연가스를 연료로 사용하는 경우 탄소배출이 발생하므로 수소를 전소하는 방향으로의 전환을 위한 기술개발 지원이 필요하다.

화력발전용 수소 활용은 암모니아 혼소의 석탄화력발전과 수소 혼소 LNG(액화천연가스) 가스터빈 발전이 대표적이다. 석탄화력발전에 암모니아를 혼합하여 연소시키는 것이 실행에 용이한 방안이나 안정적으로 청정 암모니아를 공급하기 위한 청정 암모니아 공급망 확보 및 인수기지 인프라 구축과 함께 청정 암모니아 수입 및 사용(암모니아 크래킹)에 따른 비용 부담이 있어 이에 대한 해소방안도 필요할 것이다. LNG 가스터빈 발전에 수소를 혼합하여 연료를 공급하는 수소 혼소 가스터빈의 경우 아직 실증 단계로 활성화되기 위해선 비용 부담 해소 방안과 청정수소의 대량 공급 확보 방안이 필수적이며, 아직 이 방안은 구체적으로 제시되지 못하고 있다.

그 외 철강이나 석유화학 등 산업에서의 연료 및 원료로서 수소 활용이 있다. 철강산업은 철강 생산하는 과정에서 고로에서의 탄소배출을 저감 뿐 아닌 궁극적으로 탄소중립을 목표로 수소환원제철로 기술개발하고 있다. 수소환원제철에 대한 정부의 지원은 선진국 대비 정부지원금 10%에 미치지 못하고 있는 상황이며,[118] 수소환원제철을 실행하기 위해서는 청정수소 10만톤의 공급이 필요한데[119] 이를 위한 적절한 청정수소 공급

---

118 『매일신문』(2023. 10. 10).

119 포스코의 경우 2030년 철강(용선 쇳물) 생산을 기준으로 100만톤 생산하는 데 청정수소 10만톤이 소요된다고 한다(출처:『딜사이트』(2023. 7. 10).

방안 확보 및 지원이 필요하다. 석유화학의 경우 산업용으로 수소를 연료 및 원료로 사용하는 것은 기술적으로 문제가 없으나 요구되고 있는 수소의 가격의 수준이 매우 낮다.[120] 현재 수소충전소에서 수소의 가격이 10,000원/kg 이상으로 판매되는 현실을 고려할 때, 현 시점에서는 아직 석유화학 산업에서의 활용에 대한 실행안을 제시하기 어려운 상황이다. 정부는 2040년까지 수소 공급가격을 kg당 3,000원 수준에 맞출 계획을 세웠다. 현 상황에서 당장 가격을 낮추기는 어려울 것이지만 재생에너지가 상대적으로 저렴한 해외에서 저렴한 수소를 수입하는 등 수소생산비용을 낮출 수 있도록 하는 방안이 필요하다.

산업 및 전환 부문에서 기존 화석에너지 기반으로 공급된 연료를 청정수소로 전환하고자 하는 노력이 필요하다. 수소 기술 전반의 기술 경쟁력은 선도국과 비교할 때 높지 않으며, 국내 재생에너지 발전원의 급격한 확대가 어려워 그린수소 생산 여력 및 수요 기반 또한 높지 않다. 글로벌 수소 공급망 관점에서 국내 수요에 기반을 둔 원천기술과 산업생태계 형성 정책이 필요하며, 기술과 산업시장 전반에 대한 지속적인 모니터링에 따른 전략적 집중과 유연한 정책 추진이 필수적일 것이다. 기술경쟁력을 높이기 위하여 산학연의 연계를 통한 기술개발 기반의 강화가 지속적으로 필요하다.

수소도 초기에는 기존 에너지원의 시장 정착과 같이 정부의 주도적 지원을 시작으로 장기적으로는 민간투자를 통한 시장 주도형 수소 경제를 조성시킬 필요가 있다. 그때까지 지속적인 중장기적 정책이 필연적이다. 민간투자 정착 및 시장 참여 활성화를 위해서는 정부가 계획하고 있는 제도 및 정책에 대한 명확하고 구체적인 시그널을 보여주어야 한다. 예컨대 청정수소 인증제 범위에 포함되는 수소 생산기술 및 배출량의 기준 등 구체적인 방향을 알아야 기업이 사업 계획을 수립하는데 불확실성을 낮추고 주도적인 참여가 가능할 것이다. 정부의 지원과 함께 금융기관의 지분투자나 관련 기업 및 공공기관의 공동 출자, 펀드 조성 등 공공과 민간의 자금을 적극 활용하는 방안도 있을 것이다.

---

120 박진남 PD의 자문(2023)에 의하면 1,000원/kg 이하의 수준이라고 한다.

미국의 예시(IRA법)처럼 청정수소 생산, 투자에 대한 인센티브 지원 및 세액공제, 수소기술에 대한 혜택 확대 등을 통한 수소 생태계 전반의 민간 참여를 촉진해야 한다. 수소는 생산-저장・이송, 충전-활용은 전 주기적으로 모두 연결되어 있어 장기적 관점에서 수소의 전주기에 걸친 파급효과를 고려한 일관적인 정책 추진체계 및 제도 설계가 중요할 것으로 여겨진다. 예컨대, 기존 에너지원으로 정의되어 않았던 수소와 암모니아 등이 새로운 에너지원으로 활용하게 됨에 따른 현행 에너지 관련법 및 제도의 면밀한 검토를 통해 관련 법령의 신설 혹은 개정을 고민하는 등 에너지전환과 청정수소 기반의 에너지산업이 정착할 수 있도록 법과 제도 설비를 마련되어야 할 것이다.

참고문헌

경제산업성 자원에너지청, 「수소암모니아를 둘러싼 현황과 향후 검토 방향」, 2022. 3

과학기술정보통신부, 「국가필수전략기술 중 수소 기술 육성·보호를 위한 범부처 수소 기술개발 사업 본격 추진」, 보도자료, 2022. 1. 27.

관계부처 합동, 「수소경제 활성화 로드맵」, 2019. 12.

_____, 「세계 1등 수소산업 육성 전략」, 2022. 11. 9.

_____, 「청정수소 생태계 조성방안」, 2022. 11. 9.

국무조정실·국무총리비서실, 「정세균 국무총리, 제3차 수소경제위원회 주재」, 보도자료, 2021. 3. 2.

김기환·안지영, 『시장주도형 수소경제 조기 정착을 위한 전략 연구(3/3)』, 에너지경제연구원, 기본연구 22-22, 2022. 12. 31.

김기환, 「수소 시장 확대의 대응 전략」, 제7회 H2MEET 산업발전포럼, 2023. 9. 14.

김나래·엄이슬·임두빈, 「수소생산에서 활용까지, 수소경제에서 찾는 기회」, 『삼정 Insight』, vol.79(통권 제79호), 삼정 KPMG 경제연구원, 2021.

김나래·엄이슬·정미주, 「수소시대의 도래, 기업의 13가지 기회」, Business Focus, 삼정 KPMG 경제연구원, 2023. 6.

김재경·김수현·박진남, 『시장주도형 수소경제 조기 정착을 위한 전략 연구(1/3)』, 에너지경제연구원 기본연구보고서 20-26, 2020. 12. 31.

김재경, 『수소연료전지 자동차(FCEV) 충전 수소 시장 조성을 위한 정책연구』, 에너지경제연구원 수시연구보고서 17-7, 2018. 3.

김종기·허선경·이슬기·김민지·김경유·이지연·서동혁, 『한국 수소산업 생태계 분석과 발전과제』, 산업연구원 연구보고서 2019-926, 2019. 12. 9.

김호섭·민유성, 「수소경제, 주요 그룹사별 추진 현황 및 Credit 과점 함의」, 한국신용평가 KIS Special Report, 2021. 9.

배순한, 「수소 에너지의 화려한 귀환」, 『Deloitte Insights』, 2022 No, 24, 2022.10.26.

산업통상자원부, 『2014 신·재생에너지백서』, 2014. 12.

_____, 「자동차 부품산업 활력제고 방안」, 보도자료, 2018. 12. 18.

_____, 「정세균 국무총리, 제3차 수소경제위원회 주재」, 보도자료, 2021. 3. 2.

_____, 수소경제정책과, 「수소경제 성과 및 수소선도국가 비전」, 보도참고자료, 2021. 10. 7.

_____, 『수소 안전관리 로드맵 2.0』, 2023. 5. 9.

_____, 「수소산업! 규제혁신으로 키운다. 수소산업 규제혁신 민관협의체 출범」, 2023. 5. 30.

외교부 에너지과학외교과, 「특집 국제에너지・자원 분석」, 2023. 4. 12.

유선아・하세가와 요시유키, 「KOTRA 경제통상 리포트」. 2023. 3. 3.

이민황, 『수소경제-2050 탄소배출제로 수소가 답이다』, 맥스미디어, 2022.

이상현・김태현, 「글로벌에너지위기로 수소 모멘텀 강화」, IBK투자증권, 2023.

이선명, 「연료전지」, KISTEP 기술동향브리프 2021-06호

이슬기・허선경・김종기・서동혁, 「탄소중립 이행을 위한 수소산업 육성 전략 연구」, 산업연구원 연구보고서 2022-07, 2022. 10. 31.

이승훈, 「수소경제 현황 및 글로벌 시장 동향」, 충남수소국가혁신클러스터 투자유치 사업설명회, 2023. 11. 29.

이안나, 「수소생산 및 저장」, 화학/신소재 뼛속시리즈, e베스트투자증권, 2021. 9. 7.

이영원・정상휘, 「에너지 빈국 대한민국의 탄소중립 전략」, 흥국증권 리서치센터, 2023. 3.

이정훈, 「주요국 수소 기술 혁신 및 개발 현황」, 『Deloitte Insights』, 기후기술과 수소경제의 미래, 2022 No.24, 2022. 10. 26.

장현숙・임지훈・황준석, 「수소산업 경쟁력 강화를 위한 정책 연구: 친환경 수소 생산을 위한 주요국 정책 비교」, 한국무역협회 『Trade Focus』, 2023년 12호, 2023. 7.

전혜영・신지윤, 「수소산업」, In-Depth, KTB 투자증권, 2021. 1. 18.

정성욱, 제4회 수소경제와 한국의 수소기술 심포지엄, 2023. 8. 23., 「한국에너지기술평가원 수소에너지 연구개발 현황」, 발표자료 slide.

조재현, 「K그린수소 생산을 위한 다양한 수전해 기술개발」, 『KEPRI NEWS』, 2023.

환경부, 『국내 최초 수력을 이용한 그린수소 생산시설 준공』, 2023. 9. 13.

H2KOREA, 「수소산업실태조사 결과보고서」, 2021. 12.

_____, 「수소산업실태조사 결과보고서」, 2022. 12.

KOTRA, 「주요국 수소경제 동향 및 우리기업 진출전략」, 2022. 2. 7.

_____, 「EU 수소 산업 정책 및 프로젝트 동향」, 2023. 1. 16.

_____, 「독일 수소경제 투자 현황과 한-독 협력 가능성」, 2023. 6. 15,

(https://dream.kotra.or.kr/kotranews/cms/news/actionKotraBoardDetail.do?SITE_NO=3&MENU_ID=100&CONTENTS_NO=1&bbsGbn=322&bbsSn=322&pNttSn=203380)

International Energy Agency(IEA), 2015.

_____, “Global Hydrogen Review 2021,” 2021.

_____, “Global Hydrogen Review 2022,” 2022.

<언론기사>

『가스신문』, 「2030년 세계수소생산량 1100만톤… 그린수소가 70% 차지」, 2023. 2. 15, (http://www.gasnews.com/news/articleView.html?idxno=108984, 접속일: 2023. 8. 10)

_____, 「우리나라 수소산업 어디까지 왔나-기획취재②: 수소 대중화의 전진기지-수소 충전소의 운용 실태, 보급 속도 전 세계 최고…충전설비 국산화율 높이는 게 관건」, 2023. 7. 11, (http://www.gasnews.com/news/articleView.html?idxno=111089, 접속일: 2023. 10. 13)

_____, 「EU, 2050년까지 그린수소로 에너지 비중의 23% 목표」, 2023. 10. 11., (http://www.gasnews.com/news/articleView.html?idxno=112261, 접속일: 2023. 12. 15)

『국토일보』, 「수소생산 능력 없는 수소경제…기술력 최하위」, 2023. 10. 24. (http://www.ikld.kr/news/articleView.html?idxno=282994, 접속일: 2023. 12. 12)

『대한경제』, 「수소차 1위’ 현대차…충전소 태부족 걸림돌」, 2023. 6. 14, (https://www.dnews.co.kr/uhtml/view.jsp?idxno=2023061414501929707 40, 접속일: 2023. 8. 24)

『매일경제』, 「포스코 등 탄소중립 돕는 '수소환원제철' 정부 지원, 선진국의 10% 그쳐」, 2023. 10. 10, (https://news.imaeil.com/page/view/2023101015351056882, 접속일: 2023. 10. 12)

_____, 「전해조 기술·풍부한 풍력자원… ‘그린수소의 꿈’ 준비하는 英」, 2023. 10. 11, (https://www.mk.co.kr/news/world/10846781 접속일: 2023. 10. 12)

_____, 「포스코 등 탄소중립 돕는 '수소환원제철' 정부 지원, 선진국의 10% 그쳐」, 2023. 11. 7, (https://news.imaeil.com/page/view/2023101015351056882, 접속일: 2023. 11. 7)

『비즈니스포스트』, 「롯데케미칼 수소 사업 박차, 암모니아 경쟁력 무기」, 2023. 4. 17, (https://www.businesspost.co.kr/BP?command=article_view&num=312448, 접속일: 2023. 12. 3)

『서울경제』, 「원전 빠진 '수소경제'… 수소 생산량 3년째 제자리」, 2021. 5. 2,

(https://www.sedaily.com/NewsView/22M7DLF2S7, 접속일: 2023. 9. 22)

_____, 「글로벌 수소시장 2050년 12조달러…국내 기업도 50조 베팅」, 2023. 6. 18, (https://www.sedaily.com/NewsView/29QRZ44J0N, 접속일: 2023. 11. 16)

_____, 「다음 스텝은 생태계… 현대차 '수소 악셀' 더 밟는다」, 2023. 11. 23, (https://www.sedaily.com/NewsView/29XCIQYHPP, 접속일: 2023. 12. 18)

『신소재경제』, 「제9장 수소생산 소재기술(3)-김태근(충남대)-신소재경제신문・재료연 공동기획 소재기술백서 2020(32)」, 2023. 5. 4, (http://amenews.kr/news/view.php?idx=53324, 접속일:2023. 8. 28)

『시사저널e』, 「SK E&S・효성重, 액화수소 본격 생산 돌입…사용처 확보는 숙제」, 2023. 7. 24, (http://www.sisajournal-e.com/news/articleView.html?idxno=301859, 접속일: 2023. 8. 28)

『아시아경제』, 「한화, 수전해부터 혼소 발전까지… 7社 수직 계열화」, 2023. 6. 5, (https://view.asiae.co.kr/article/2023060507584401064, 접속일: 2023. 11. 27)

『월간수소경제』, 「수소경제 진단과 전망 ② <수소산업 과제> 설문조사」, 2020. 7. 30, (https://www.h2news.kr/news/article.html?no=8387, 접속일: 2023. 12. 5)

_____, 「韓, 이제 액화수소 볼모지 아니다」, 2023. 3. 31, (https://www.h2news.kr/news/article.html?no=11161, 접속일: 2023. 9. 5)

_____, 「수소생산 활성화, 인센티브 등 제도 개선에 달렸다」, 2023. 7. 31, (https://www.h2news.kr/news/article.html?no=11161, 접속일: 2023. 8. 24)

_____, 「수소산업 주요 통계(2023년 6월 30일 기준)」, 2023. 7. 31, (https://www.h2news.kr/news/article.html?no=11161, 접속일: 2023. 9. 24)

_____, 「수소차 글로벌 판매 1등의 명암①: 넥쏘 글로벌 판매 3만대 돌파 '빛과 그림자'」, 2023. 3. 27, (https://www.h2news.kr/news/article.html?no=10771, 접속일: 2023. 8. 24)

『월간수소경제』, 「수소충전소 적자 운영 심각하다」, 2023. 10. 31, (https://www.h2news.kr/news/article.html?no=11430, 접속일: 2023. 12. 5)

『에너지신문』, 「예산으로 본 2023년 수소사업…'수소 모빌리티' 가속화」, 2023. 1. 1, (https://www.energy-news.co.kr/news/articleView.html?idxno=85769, 접속일: 2023. 8. 21)

『연합인포맥스』, 「수소에 진심인 롯데케미칼, 신성장동력 확보 박차」, 2023. 6. 12, (https://news.einfomax.co.kr/news/articleView.html?idxno=4269487, 접속일: 2023. 8. 24)

『이투데이』, 「SK E&S, '블루수소 파트너십' 강화… 글로벌 MOU 체결」, 2023. 12. 3, (https://www.etoday.co.kr/news/view/2308114, 접속일: 2023. 12. 11)

『전자신문』, 「韓, 전기차 충전 환경 세계 최고… 올해 세계 전기차 비율은 20% 근접」,

2023. 5. 31, (https://www.etnews.com/20230530000255, 접속일: 2023. 12. 5)

『정책브리핑』, 「수소 소부장산업 육성‥2030년 핵심기술 국산화율 80% 달성」, 2023. 12. 18, (https://www.korea.kr/news/policyNewsView.do?newsId=148923877, 접속일: 2023. 12. 20)

『조선일보』, 「친환경 '그린수소' 핵심기술은 수전해」, 2023. 7. 12, (https://biz.chosun.com/science-chosun/technology/2023/07/12/BSO5YVH6F5GV7IPC4UWJHWZSJA/, 접속일: 2023. 9. 2)

_____, 「수소경제 전환 사활 건 유럽 최대 경제대국 독일」, 2023. 7. 27, (https://biz.chosun.com/international/international_economy/2023/07/27/K2AVS245OVEEXCWL4766RXJSZM/, 접속일: 2023. 10. 13)

_____, 「천연가스 대신할 英 수소에너지의 3대 강점」, 2023. 10. 11, (https://biz.chosun.com/international/international_general/2023/10/11/7LBYCUDVMNGFJKRI6SWKNWFZWA/, 접속일: 2023. 10. 12)

『투데이에너지』, 「SK E&S, 액화수소사업 민간분야 선두주자」, 2023. 5. 15, (http://www.todayenergy.kr/news/articleView.html?idxno=260413, 접속일: 2023. 9. 12)

_____, 「고려아연·SK가스 등 수소 컨소시엄 본계약 체결」, 2023. 7. 13, (http://www.todayenergy.kr/news/articleView.html?idxno=262551, 접속일: 2023. 11. 28)

『파이낸셜투데이』, 「두산그룹의 '수소 선봉장' 듀산퓨얼셀」, 2023. 9. 13, (https://www.ftoday.co.kr/news/articleView.html?idxno=308981, 접속일: 2023. 9. 20)

『한겨레』, 「5개 그룹 2030년까지 43조 4천억원 수소경제 투자」, 2021. 3. 2, (https://www.hani.co.kr/arti/economy/marketing/985132.html, 접속일: 2023. 9. 3)

『환경일보』, 「수소산업 발전 위해 규제 패러다임 전환해야」, 2022. 7. 22, (http://www.hkbs.co.kr/news/articleView.html?idxno=686063, 접속일: 2023. 10. 12)

『i가스저널』, 「글로벌 수소 동향을 한눈에」, 2023. 10. 23, (http://www.igasnet.com/news/articleView.html?idxno=20649, 접속일: 2023. 11. 1)

『CEOSCORE』, 「롯데케미칼, 수소·전지 미래 먹거리 낙점… 2030년 전체매출 60%로 확대 '속도'」, 2023. 7. 24, (https://ceoscoredaily.com/page/view/2023071716495218190, 접속일: 2023. 11. 1)

『JTBC』, 「수소는 미래 에너지? 유서 깊은 에너지!」, 2023. 9. 4, (https://news.jtbc.co.kr/article/article.aspx?news_id=NB12142537, 접속일: 2023. 10. 11)

『NBNnews』, 「CJ대한통운, 국내 최초 '액화수소 운송' 나서… 40대 투입」, 2022. 12. 21, (https://www.nbntv.kr/news/articleView.html?idxno=65667, 접속일: 2023. 11. 21)

<웹사이트>

수소경제 종합정보포털 (https://h2hub.or.kr/main/econ/policy-abroad.do, 접속일: 2023. 10. 11).

한국 전력연구원 공식 블로그,「R&D ISSUE 그린수소 생산을 위한 다양한 수전해 기술개발」, 2023. 5. 17, (https://blog.naver.com/kepri5086/223097054585, 접속일: 2023. 12. 4).

환경부, 무공해차 통합누리집(https://ev.or.kr/nportal/main.do#).

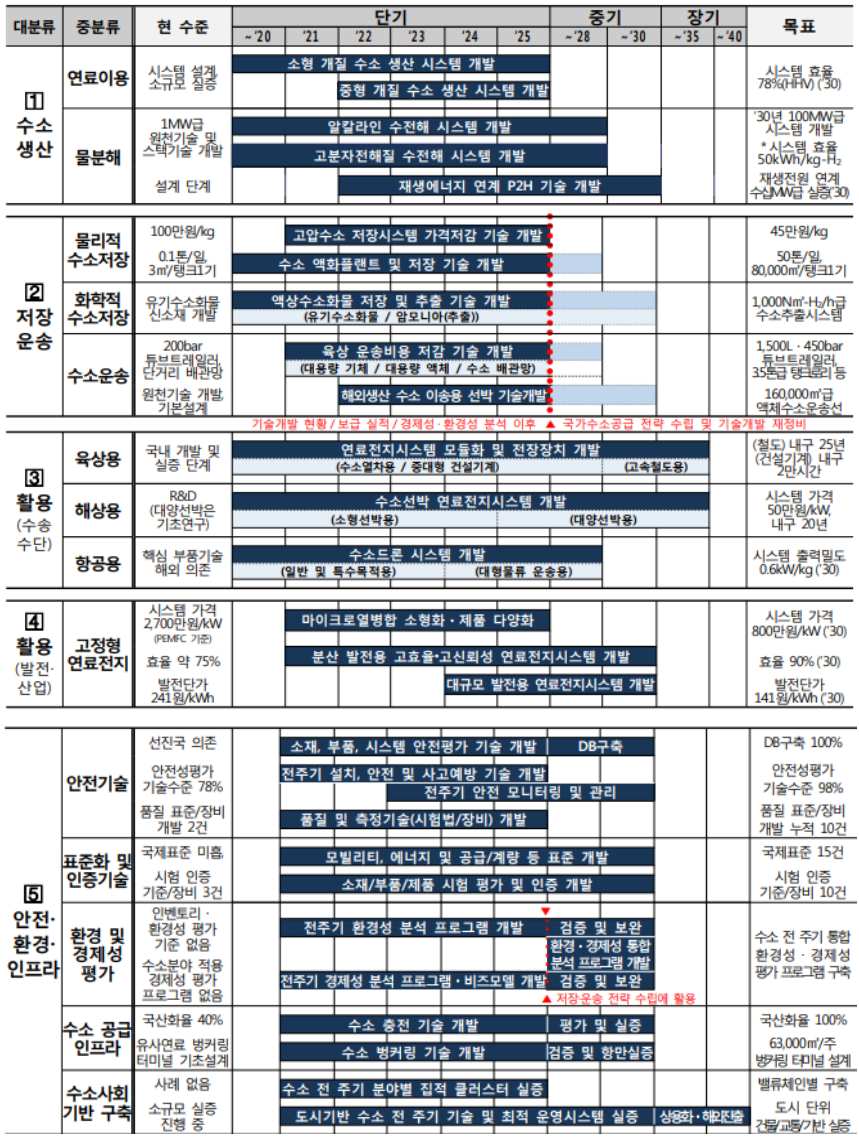
DOJ, U.S National Clean Hydrogen Strategy and Roadmep, 2023. 8. 24 (https://www.hydrogen.energy.gov/home/u.s.-national-clean-hydrogen-strategy-and-roadmap)

Green Hydrogen Market(https://www.transparencymarketresearch.com/green-hydrogen-market.html, 접속일: 2023. 8. 28).

KDI 경제정책시계열서비스(https://epts.kdi.re.kr/search, 접속일: 2023. 11. 1).

부 록

<부표 3-1> 수소 기술개발 로드맵(핵심기술 개발계획)



제4장

양자기술의 적용과 산업생태계

노 우 진 (한국개발연구원)

제1절 서 론

양자과학기술(Quantum Science and Technology, 이하 양자기술)은 미시세계(micro world)에서 발현하는 양자물리학적 특성을 활용하는 기술을 의미한다. 1900년 독일의 물리학자인 막스 플랑크(Max Planck)에 의해 양자(Quantum)의 개념이 발견되면서 양자물리학이 태동하였다. 이후 물리학자들은 양자의 이중성과 같은 거시세계(macro world)의 법칙으로는 설명할 수 없는 미시세계의 특성을 연구하였고, 이를 활용한 기술이 개발되기 시작하였다. 양자물리학 이론 정립을 바탕으로 인류의 획기적인 발전을 불러일으킨 시기를 1차 양자혁명(20~21세기 초)의 시대로 지칭하며, 현재까지 광범위하게 사용되는 반도체, 레이저, 태양전지 등이 이에 해당한다(과학기술정보통신부, 2023).

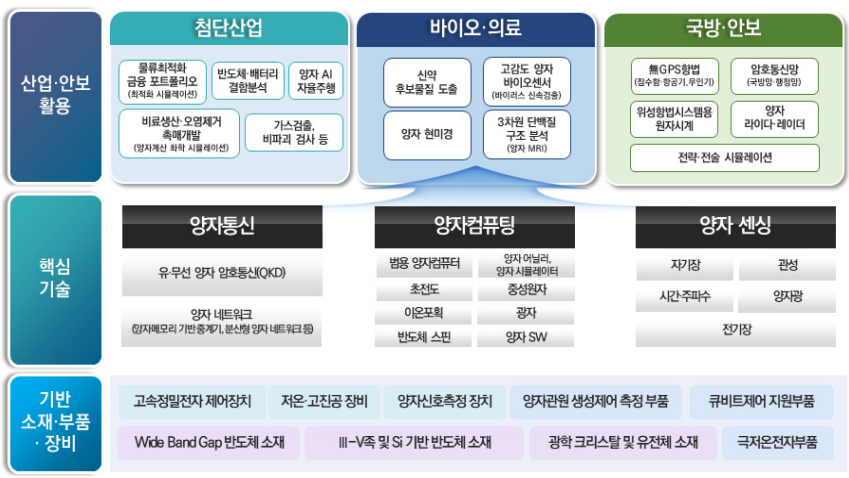
반면, 2차 양자혁명은 양자 얽힘, 양자 중첩 등 1차 양자혁명 시대에 비해 고차원적인 양자물리학적 현상을 활용하는 시대로 정의할 수 있다. 2차 양자혁명의 시대에는 현존하는 기술의 근본적인 한계를 뛰어넘는 획기적인 변화가 예상된다. 예를 들어 0과 1중 하나의 값을 나타낼 수 있는 비트(bit)를 사용하는 슈퍼컴퓨터에 비해 0과 1을 동시에 나타낼 수 있는 큐비트(qubit)를 사용하는 양자컴퓨터가 압도적인 연산 능력을 보유하고

있다. 구글의 53큐비트 양자컴퓨터(Sycamore)는 슈퍼컴퓨터가 약 10,000년이 소요될 문제를 200초 만에 풀어냈고, IBM의 127큐비트 양자컴퓨터인 Eagle은 최고 수준의 슈퍼컴퓨터가 계산할 수 없을 정도의 복잡한 문제를 불과 0.001초 만에 해결하였다(Arute *et al.*, 2019; Kim *et al.*, 2023).

[그림 4-1]은 양자기술의 개발과 활용 분야를 나타내는데, 양자기술은 다양한 산업이 직면한 난제를 해결할 핵심기술로 평가되고 있다. 반도체 분야에서는 미세구조 설계를 통한 획기적인 성능향상을 가져올 수 있고, 의료 및 신약 분야에서는 DNA 구조 분석, 암 진단 등에 활용하여 이전까지는 기술적 한계로 인해 불가능한 의료 서비스를 제공할 수 있게 된다. 또한 양자암호를 이용한 국가안보 시스템 구축 등 국가전략 수단으로 활용될 여지도 있다. 이렇듯 양자기술은 미래의 게임체인저로서 우주, 군사 등 전략산업은 물론 제조업, 금융, 의료 등 다양한 산업에 지대한 영향을 미칠 것으로 평가된다(McKinsey, 2021).

글로벌 시장조사 기관인 McKinsey와 Mind Commerce에 의하면 2022년 전 세계 양자기술의 시장은 약 8.7조원으로 현재까지는 그 규모가 크지 않으나, 연평균 36.0%의 높은 성장률을 지속해 2030년에는 약 101조

[그림 4-1] 양자기술 개발 및 활용 분야



자료: 과학기술정보통신부, 「제1회 양자기술 최고위 전략대화」, 2022. 12. 28.

<표 4-1> 전 세계 양자기술 시장 전망

(단위: 조원)

연도	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	연평균 성장률
규모	8.7	11.5	16.0	20.8	28.7	41.3	53.1	74.2	101.2	36%

자료: 과학기술정보통신부, 『양자정보기술백서』, 2022, p24. 표 I-1-1

2,000억원으로 시장이 확대될 것으로 전망된다. 장치의 정밀성 문제와 같은 기술적 한계에 직면한 시장 초기 단계임을 고려한다면 상용화가 본격적으로 실시된 이후 시장의 규모는 더욱 빠르게 증가할 것으로 기대된다. 현재 양자기술의 대표적인 분야는 양자컴퓨터, 양자센서, 양자통신으로 분류할 수 있으며, 양자통신은 이미 초기 상용화 단계에 진입하여 4~6년 이내에 상용화가 완료될 것으로 기대된다. 양자센서와 양자컴퓨터는 각각 7~9년, 10~14년 후에 상용화 단계에 진입할 것으로 예상되기 때문에 주요 선진국들은 앞다퉈 범국가적 발전 전략을 수립하고 있다(과학기술정보통신부, 2023).

미국, 중국 및 유럽 등 주요국들은 양자기술의 범용성과 혁신적인 파괴력이 미래 국가의 경쟁력을 좌우할 수 있다는 인식하에 대규모 정부투자를 진행하고 있다(한국과학기술정보연구원, 2022). 우리나라 역시 양자기술의 중요성을 인식하고 양자기술을 12대 국가전략기술로 지정하고 신성장 4.0 전략 프로젝트의 핵심 분야로 선정하였다. 또한 정부는 2023년 6월 「대한민국 양자과학기술 전략」을 발표하고 2035년까지 세계 시장 점유율 10%를 달성하기 위해 약 3조원 이상의 민·관 투자, 2,500명의 양자기술 핵심 인력양성, 1,200개의 양자기술 활용기업 육성, 약 2,100억원의 국제협력 투자와 같은 구체적인 중장기 로드맵을 제시하였다(과학기술정보통신부, 2023).

양자기술은 ICT 관련 제품의 수출 비중이 높은 우리나라에서 중요성이 가중된다. 우리나라의 2022년 수출 품목 중 ICT 기반 제품에 해당하는 반도체, 평판디스플레이, 무선통신기기가 총수출에서 차지하는 비중은 약 42%에 달한다.[1] 양자기술이 ICT 기술 분야에 적용된다면 우리나라의 산업

<표 4-2> 2020년 기술수준평가(ICT · SW 분야)

중점과학기술	기술수준		기술격차(년)	
	2018	2020	2018	2020
초고집적 반도체 공정 및 장비 · 소재기술	94.0	90.0	1.0	1.5
초고속 · 초절전형 반도체 소자 및 SoC 설계 · 제작 기술	85.0	85.0	1.5	1.5
대면적 · 초고속 · 초정밀 디스플레이 소재 · 공정 및 장비 기술	97.5	95.0	0.8	0.5
양자정보통신 기술	55.0	62.5	6.5	4.5

주: 기술수준은 선도국(100%) 대비 비율을 의미함.
자료: 한국과학기술기획평가원, 2020년 기술수준평가.

구조와 시너지가 매우 높을 것으로 기대된다. 하지만 우리나라의 양자기술 수준은 2020년 기준으로 미국, 유럽 등 선도국가의 약 62.5% 수준으로 최대 10년까지 뒤처져 있다(한국과학기술정보연구원, 2022). 다행스럽게 양자기술 시장이 본격적으로 형성되기까지 적지 않은 시간이 남았으므로 공격적인 투자 확대를 통해 선진국과의 격차를 좁혀 선도국가로 도약할 여지가 있다고 판단된다(과학기술정보통신부, 2023).

본 장에서는 미래의 핵심기술로 평가받는 양자기술의 현황과 산업생태계를 살펴보고자 한다. 구체적으로 문헌과 통계 자료 수집을 통해 양자컴퓨터, 양자센서, 양자통신 3개의 분야에 대한 투자, 세부 기술 영역, 연구개발 현황 등 일반 현황에 대해 살펴보고자 한다. 아울러 앞서 살펴본 양자기술의 현황과 국내 양자기술 전문가와의 면담을 통해 국내 양자기술 발전의 저해 요인과 성장을 위한 정책적 수단에 대한 심도 있는 논의를 진행하고자 한다. 이를 통해 정부의 국가전략기술 발전에 이바지하고 국제경쟁력 확보를 위한 정책적 제언을 도출하는 것을 목표로 한다.

1 e-나라지표(https://www.index.go.kr/unity/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=2455 접속일: 2023. 8. 23)

제2절 양자기술의 개념과 주요 기술 영역

양자기술의 개념을 이해하기 위해서는 양자물리학에 대한 이해가 선행되어야 하므로 이에 대해 우선 설명한 이후, 주요 기술 영역인 양자컴퓨터, 양자센서 및 양자암호통신에 대한 정의, 적용 분야, 기술 동향에 대해 살펴보고자 한다.

1. 양자기술의 개념

양자물리학(양자역학)은 눈에 보이지 않는 아주 작은 단위인 원자, 광자(photon), 분자(molecule) 등이 존재하는 미시세계에서 나타나는 움직임과 현상을 연구하는 학문이다. 19세기 말까지 물리학계는 세상의 모든 현상을 뉴턴의 고전역학으로 풀어낼 수 있다고 단언하였다. 하지만 1900년 초 플랑크(Max Plank)의 흑채복사실험과 아인슈타인(Albert Einstein)의 광전효과 실험을 시작으로 고전역학의 가정을 위배하는 연구 결과들이 등장하면서 양자역학이 태동하기 시작하였다.

저명한 물리학자들은 미시세계에서 나타나는 특징에 관한 연구를 지속하며 양자역학을 정립하였다. 1970년대에 이르러 최초로 양자 얽힘 현상을 실험으로 증명해 냈고, 1990년에 이르러서야 양자를 조작하고 제어할 수 있는 수준까지 도달하게 되었다. 양자 얽힘 현상을 증명하는 데 이바지한 클라우저(John Clauser), 에스페(Alain Aspect), 차일링거(Anton Zeilinger) 3명의 물리학자는 새로운 물리학 분야를 개척해 낸 선구적 공로를 인정받아 2022년 노벨물리학상을 받게 된다. 양자기술의 특성이 점차 발견되고 있으나, 아직 설명되지 않는 현상들이 다수 존재하며 앞으로 밝혀내야 할 과제가 많은 상황이다.

양자기술에서 주로 활용되는 양자역학적 특성은 양자 얽힘(quantum entanglement), 양자 중첩(quantum superposition)이 있다. 양자 얽힘은 상호작용(양자 얽힘)을 했던 두 입자가 서로 연결된 것처럼 같은 움직임을 보이는 현상을 의미한다. 예를 들어 입자 A, B는 반드시 파랑, 빨강 둘

중 하나의 상태만 허용된다는 가정하에 입자 A와 입자 B가 상호작용을 통해 서로 얽혀 있다면, 관측을 통해 입자 A가 파랑으로 정해지는 순간 어떤 외부의 간섭없이 입자 B는 즉시 빨강으로 정해진다는 것이다. 이러한 얽힘 현상은 조건만 갖춰진다면 두 입자가 서로 수백 km가 떨어진 곳에서도 작동한다.

양자 중첩은 여러 가능성을 동시에 갖는 양자의 성질로 정의할 수 있다. 관측하지 않는 이상 전자는 중첩되어 있고, 관측하는 순간 중첩상태가 붕괴(양자 붕괴)하면서 하나의 상태로 고정되는 성질을 의미한다. 예를 들어, 일반컴퓨터의 비트(bit)는 전류의 방출로 0, 1을 선택할 수 있으며 둘 중 하나의 값을 나타내지만, 양자컴퓨터의 큐비트(qubit)는 0과 1 어떠한 상태도 될 수 있는 중첩상태를 유지한다. 이러한 특성으로 큐비트는 여러 계산을 동시에 처리할 수 있고, 일반컴퓨터에 비해 빠른 연산능력으로 문제를 해결할 수 있다.

2. 양자기술의 주요 활용 영역

양자 중첩, 양자 얽힘과 같이 비교적 최근에 발견된 특성을 이용한 기술은 아직 상용화 초기 단계에 있으나, 이미 양자역학적 특성을 실생활에 적용하고 있는 기술 사례가 존재한다. 대표적인 사례 중 하나인 레이저(LASER)는 복사 방출에 의한 빛 증폭(Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation)의 머리글자를 따서 만든 단어로 전자가 궤도를 이동하면서 방출하는 빛을 증폭시켜 만든 장치이다. 레이저는 철이나 금속과 같은 재료를 절단하거나, 표면에 글자를 새기는 등 산업적 활용도가 높다. 이외에 거리 측정, 바코드 리더기, 미사일 유도, 안과 수술 등 실생활에서 다방면으로 활용되고 있다. 2020년의 세계 레이저 가공 시장은 약 40억달러 수준으로 시장이 이미 활성화되었으며, 2025년까지 약 58억달러에 규모로 확대될 전망이다(연구개발특구진흥재단, 2021).

최근에는 입자 크기에 따라 다른 색을 방출하는 양자점(Quantum Dot, QD[2,3]을 활용한 디스플레이가 개발 및 상용화되었다. QD 디스플레이는

간소하고 효율적인 발광 구조를 갖추고 있어 최고 수준의 화질, 빠른 응답속도와 무한에 가까운 명암비를 구현한다는 장점이 있다. 삼성디스플레이는 QD 디스플레이의 선두 주자로 약 3조원을 투입해 QD-OLED를 양산하였고, 2023년 중반까지 2차 투자 계획을 발표할 예정이다.[4]

다가오는 2차 양자혁명의 시대에는 고차원적인 양자역학적 특성을 자유롭게 활용하고, 이를 기존 기술에 접목하는 단계에 도달할 것으로 예상된다. 본 연구에서는 가장 주목받고 있는 분야인 ICT 기술과 양자역학의 접목으로 파생되는 양자컴퓨팅, 양자통신, 양자센서에 대해 살펴보고자 한다. 또한 각 분야의 세부 주요 기술 영역, 국내외 기술수준 등 현황을 살펴보고 해당 기술의 활용 분야에 대해 파악하고자 한다.

[그림 4-2] 양자기술의 기본 개념



자료: 과학기술정보통신부, 『양자시대를 여는 우리의 도전과 전략』, 2023. 6. 27, p.5.

---

2 QD(Quantum Dot)는 원자가 뭉쳐져 이루어진 나노미터(nm) 수준의 초미세 반도체 입자를 의미한다. 전자가 이동하면서 빛이 방출되는데 크기에 따라 방출되는 빛의 세기와 파장이 변화한다. 일반적으로 2~10nm의 크기이며 빛을 비추거나 전류를 공급했을 때 입자의 크기에 따라 다른 색을 나타낸다. 2nm(파랑), 3nm(초록), 4nm(노랑), 5nm(주황), 7nm(빨강) 등 크기에 따라 여러 가지 색을 표현할 수 있다. QD는 1982년 반도체의 주요 소재인 카드뮴(Cd) 화합물에서 현상이 처음 발견되었고, 이를 양자구속효과라고 한다.

3 양자점을 발견하고 이를 광전자 소자, 디스플레이 기술 등을 상용화하는 데 이바지한 바웬디(Moungi Bawendi), 에키모프(Alexei Ekimov), 브러스(Louis Brus)는 2023년 노벨화학상을 수상하였다.

4 http://stock.mk.co.kr/news/view/55431 (접속일: 2023. 7. 28)

가. 양자컴퓨팅(quantum computing)

양자컴퓨터의 등장은 반도체를 기반으로 한 고전 컴퓨터의 발전과도 무관하지 않다. 반도체 기술의 발전에 따라 컴퓨터의 성능은 급진적으로 향상되었다. 무어(Gordon Moore)는 반도체 칩이 상용화되기 시작한 1960년대부터 매년 칩의 용량이 2배씩 증가할 것으로 예측하였고, 실제로 반도체 칩의 용량은 예측에 따라 증가하였다.[5] 반도체 칩의 회로 선폭이 좁을수록 고집적, 전력량 감소 등 성능의 향상이 동반되기 때문에 반도체 칩은 점점 작아졌고, 현재 머리카락의 10만분의 3 수준인 3나노 공정까지 양산화되고 있다.[6]

하지만 미세공정 기술의 발전으로 트랜지스터가 원자 수준까지 소형화되면서 또 다른 문제가 발생하는데, 대표적으로 터널링 효과(tunneling effect)를 들 수 있다. 터널링 효과는 양자역학의 특징 중 하나인 원자의 입자-파동의 이중성에서 기인한다. 매우 작은 트랜지스터에 전류를 흘려보낼 때 전류의 누설이 발생하고 회로 내 전자의 제어가 힘들어져 성능이 급감하게 된다. 따라서 반도체의 소형화가 진행될수록 기술적 한계로 인해 미세공정의 비용이 상승하고 경제성이 저하된다. 또한 고전 컴퓨터의 대규모 전력 소모가 컴퓨터 운용의 효율을 저해한다. 한국과학기술정보원이 운영하는 슈퍼컴퓨터의 2019년 전력 소모량은 약 2,628MWh에 달하며, 이는 아파트 3천세대의 전력 소모량과 같고 월평균 전기료 3억 5,000천만원에 해당한다(이준・문희진, 2019).

양자컴퓨팅은 고전 컴퓨터가 직면한 연산장치 고도화의 한계와 고전력 소모 문제를 극복할 수 있는 대안으로 검토되고 있다. 양자컴퓨팅은 1980년 초 미국의 물리학자인 리처드 파인만(Richard Feynman)에 의해 제안되었고, 이후 1994년 피터 쇼어(Peter Shor)가 양자 암호해독에 관한 알고리즘을 발표하면서 연산 능력, 보안 등 고전 컴퓨터에 비해 월등한

---

5 지난 수년간 기술적 한계에 도달하면서 반도체 용량의 증가 속도가 둔화하였고, 무어의 법칙(Moore's Law)의 속도 주기는 12개월에서 18개월로 수정되었다.

6 https://economist.co.kr/article/view/ecn202305110048 (접속일: 2023. 7. 28)

성능을 보일 것이라는 기대하에 전 세계의 주목을 받게 되었다. 1997년 IBM의 2큐비트 양자컴퓨터가 등장한 이후, 2011년 캐나다의 양자컴퓨터 스타트업 회사인 D-wave Systems가 128큐비트 상용 양자컴퓨터를 최초로 출시하면서 양자컴퓨터의 개발이 본격화되었다.

양자컴퓨터는 큐비트의 근원에 따라 다양하게 구현되며 양자 중첩상태를 유지하는 결맞음 시간(Coherence Time) 내에 연산 횟수를 증가시키는 방향으로 발전하고 있다. 현재 개발 중인 양자컴퓨터는 초전도, 양자점, 이온 트랩, 광학 기반 양자컴퓨터 등 큐비트의 구현 플랫폼에 따라 구분되며, 각자의 플랫폼 방식의 장단점이 명확하다. <표 4-3>은 큐비트 생성

<표 4-3> 양자컴퓨터의 분류와 주요 내용

구분	특성	장단점	주요 기관
초전도	절대온도 0℃ 부근에서 저항이 사라지는 초전도 현상을 기반으로 하며, 초전도체 사이에 절연체를 끼운 전자소자에 전류를 흘려 이를 큐비트로 활용	[장점] 빠른 속도, 반도체 기술 활용 가능 [단점] 상태 붕괴가 빠름, 초저온 유지	Google IBM Rigetti
이온 트랩	전자기장을 이용하여 전하를 띤 입자를 포획하고, 이를 큐비트로 활용	[장점] 소자의 안정성, 높은 게이트 신뢰도 [단점] 속도가 느리고 다수의 레이저 장치 필요함	IonQ
광학 기반 (광자)	빛 입자(광자)의 파동과 진동 방향을 이용하여 큐비트 생성	[장점] 양자통신, 양자센서 등 다양한 영역으로 확장 가능 상온에서 작동 [단점] 광속으로 움직이는 광자의 운동성, 휘발성으로 집적이 어려움	MIT PsiQuantum USTC
반도체 양자점 (스핀트로닉스)	반도체 기판 안의 전자가 가지는 자성의 방향을 활용하여 큐비트를 생성	[장점] 소자의 안정성, 반도체 기술 활용 [단점] 얽힘 상태 구현의 어려움, 초저온 유지	Intel

자료: 이준・문희진, 2019, <표 2-3>, p.21, 과학기술정보통신부, 『2022 양자정보기술 백서』.

<표 4-4> IBM의 양자컴퓨터 개발 로드맵

연도	시스템 모듈	큐비트 수	특징
2019	Falcon	27	자체 클라우드를 활용하여 양자회로 가동
2020	Hummingbird	65	프로토타입의 양자 알고리즘 가동
2021	Eagle	127	큐비트 배열 디자인을 개선하여 오류율 감소
2022	Osprey	433	슈퍼컴퓨터의 연산 능력을 뛰어넘는 양자우월성 달성
2023	Condor	1,121	양자게이트 오류율, 결맞음 유지 시간을 개선하기 위한 알고리즘 개발 및 적용
2024	Flamingo	1,386+	
2025	Kookaburra	4,158+	
2026+	미정	10K~100K	단일 칩의 병렬적 연결을 기반으로 한 프로세스 구축 계획

자료: IBM Quantum computing Development Roadmap(https://www.ibm.com/quantum/roadmap 접속일: 2023. 8. 10)

방식에 따른 양자컴퓨터의 종류와 특성, 장단점을 나타낸다. 각 방식은 결맞음 시간, 시설・설비의 용이성, 게이트의 신뢰도 등 상이한 특징을 보인다. 이외에 다이아몬드 NV(Nitrogen Vacancy), 리드버그(Rydberg) 등 다양한 방식의 양자컴퓨터 연구가 진행되고 있으나, 어떤 방식이 상용 양자컴퓨터까지 도달할지는 예단하기 어려운 상황이다.

양자컴퓨터 분야의 선두 주자인 IBM은 27큐비트 Falcon을 시작으로 양자컴퓨터 개발을 위한 양자 로드맵을 발표했다. 2022년에는 슈퍼컴퓨터의 성능을 뛰어넘는 433큐비트 Osprey를 공개하였고 2023년 12월에는 1,121큐비트의 Condor와 오류율을 대폭 축소한 133큐비트의 Heron을 공개하면서 양자컴퓨터 경쟁에서 앞서 나가기 시작했다.[7] 물론 큐비트의 구현 방식, 게이트 오류율, 결맞음 시간 등 다양한 측면을 고려한다면 큐비트 수가 양자컴퓨터의 절대적인 성능을 대변할 수 없다. 하지만 자체 양자컴퓨터 프로세서 개발, 클라우드 서비스를 통해 연구자들에게 양자컴퓨팅 시스템을 제공한다는 점에서 IBM은 가장 포괄적인 기술 역량을 갖

7 Heron은 큐비트의 수는 적으나 기존 양자컴퓨터의 오류율을 약 1/5 수준까지 낮췄다는 점에서 의미가 있으며, 큐비트의 수가 유사한 127큐비트의 Eagle 보다 약 5배 이상 향상된 성능을 보인다.

춘 기업임은 분명하다(정지형, 2023). IBM의 관계자는 큐비트 수가 증가할수록 한 차원 높은 수준의 실험과 애플리케이션 실행이 가능해지며, 다양한 산업 분야에서 활용할 수 있다고 설명하였다.[8]

양자컴퓨터는 아직 초기 개발 단계에 있음에도 불구하고 인공지능, 신약 물질 개발 등 복잡한 계산을 요구하는 분야에서 고전 컴퓨터를 대체할 것으로 기대된다. 가장 주목받고 있는 분야는 재료·화학 분야로 시간과 비용의 제약으로 고전 컴퓨터에서 구현하지 못한 시뮬레이션을 시도할 수 있다는 점에서 기대가 크다. 2020년 양자컴퓨터를 활용한 다양한 소재 개발이 진행되었는데, 미국의 시카고대학교는 IBM의 양자 칩을 활용하여 반도체 소재 안에 생성되는 입자인 엑시톤(Exciton) 응축물에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 연구진은 엑시톤 응축물이 거의 손실 없이

<표 4-5> 양자컴퓨터의 활용 분야

구분	산업화 모델
국방·안보	1) 암호체계 개발 2) 암호해독 및 정보수집 등
제조·반도체	1) 양자컴퓨터 기반 생산계획 설계 2) 반도체 미세구조 설계
의료·제약·소재	1) 자기공명영상(MRI) 해상도 향상 2) 이미징 플랫폼 개선 3) 암 치료접근 방법 적용 4) 신약 물질 탐색을 위한 양자 시뮬레이터 개발 5) 단백질 구조 분석 6) 신소재 개발 최적화 등
금융	1) 블록체인 보호 2) 위험관리 분석
교통·물류·항공	1) 교통망 경로 최적화 2) 항공기 디자인 최적화 3) 물류자원 최적화
기타 산업	1) 인공지능 2) 기후변화 모델링 3) 에너지

자료: 과학기술정보통신부, 『2022 양자정보기술 백서』, <표 III-4-1>, p.522.

8 https://m.ddaily.co.kr/page/view/20211115152431773 73 (접속일: 2023. 8. 10)

에너지를 전달하기 때문에 효율적인 에너지 소재로서의 잠재력을 가지고 있다고 설명했다. 독일의 Daimler AG와 IBM은 양자컴퓨터를 활용하여 리튬 함유 분자에 대한 시뮬레이션을 수행하였고, 통용되고 있는 전기자동차용 리튬전지에 비해 용량, 가격, 지속시간 등에서 월등히 뛰어난 배터리를 개발하고 있다(과학기술정보통신부, 2022).

나. 양자센싱(quantum sensing)

양자센싱은 양자역학적 특징을 활용해 중력, 온도, 자기장의 흐름 등의 물리량을 측정하는 기술을 통칭한다. 객체의 미세한 변화를 양자 얽힘, 양자 중첩 등 극도로 예민한 양자역학적 특성을 활용해 높은 민감도, 분해능으로 측정할 수 있다는 점에서 고전 센서와 차이를 보인다(Degen *et al.*, 2017). 앞서 설명한 바와 같이 양자컴퓨터가 슈퍼컴퓨터를 능가하는 연산 능력을 보유하게 되는 것을 양자우월성으로 정의한다면 양자센싱 분야에서 고전 센서의 한계인 표준양자한계(standard quantum limit) 이하의 초정밀 측정이 이에 해당한다(정보통신기획평가원, 2020).

양자센서는 측정하는 물리량(길이, 시간, 힘, 에너지 등)에 따라 양자관성센서, 양자시간센서, 양자전기장・자기장센서, 양자광학센서 등으로 분류할 수 있다. 양자관성센서는 원자, 물질파의 양자역학적 특성을 활용해 중력, 가속도, 회전 가속도 등을 측정하는 센서를 의미한다. 최근 중력 및 항법 기술에 대한 수요가 증가하면서 양자관성센서의 일종인 양자중력센서와 양자항법센서의 소형화 연구가 활발하게 진행 중이다. 만약 소형화가 실현되면 기술의 한계로 탐사할 수 없었던 해양, 지질 자원 탐사와 GPS로 위치를 측정할 수 없는 지역에서도 정밀한 위치 측정이 가능해질 것으로 기대된다.

양자시간센서는 전기신호를 활용하는 시계를 벗어나 주파수에 공진하는 원자의 상태를 측정하고, 이때 발생하는 양자 중첩, 양자 간섭을 기반으로 시간을 측정한다. 양자시간센서 역시 초소형화가 진행 중이며, 높은 정확도를 최우선으로 개발되고 있다. 국내에서는 한국표준과학연구원에서

<표 4-6> 양자센서의 분류와 주요 내용

구분	주요 내용
양자관성센서	양자중력센서 - 지하자원, 싱크홀과 같은 지하 위험 요소를 비파괴 방식으로 감지 - 차량, 비행기, 인공위성 등 탑재하도록 소형화
	양자 가속도 센서, 항법장치 - 양자 현상에 기반해 가속도, 회전 가속도의 절댓값을 측정하여 위치의 오차율을 감소시켜 관성 항법을 시행 - GPS를 사용할 수 없는 환경(수중, 지하 등)에서 정밀 위치 측정
	양자 변위 센서 - 양자 반작용 회피 기법을 통해 양자 상태 측정의 근본적인 정밀도 향상 방안을 제시
양자시간센서	광주파수 대역의 양자 상태 간 주파수를 정밀하게 측정하여 기존 마이크로파 대역의 주파수 표준을 능가하는 시스템 - 시간 및 주파수 측정 기반의 다른 센서(온도, 자기장, 가속도 등)에 도입되어 정확도 및 신뢰성 보장
양자자기장·전기장센서	고밀도 원자, 고체 불순물 등의 양자 간섭현상을 바탕으로 기존 자기장 센서의 정확도를 능가하는 고감도 자기장 센서 - 미세한 생체신호를 측정할 수 있는 소형/다채널 양자 자기장 센서 - 뇌질환 치료의 범위를 확장 - 상온에서 작동하는 생체자기 측정 자기장 센서
	고체 불순물, 원자의 양자 현상을 이용해 고해상도 자기공명영상장치(MRI)를 만들 수 있는 센서 - 저자기장 MRI 의료 영상 장비 개발에 활용
양자광학센서	현대 현미경이 구분하기 힘든 수준의 미세구조를 시각화 - 빛의 회절에 의한 한계를 양자 얽힘 상태의 광자를 이용해 극복하는 계측기술
	기존의 광원과 검출기가 감지하기 어려운 파장 영역에서 물질의 특성을 분광 측정하는 양자분광센서 - 가스 검출, 소재 평가 등 고감도 적외선 측정

자료: 정보통신기획평가원, 「ICT R&D 기술로드맵」, 2020.

약 30년 이상 원자시계 개발 연구를 수행하고 있으며, 20억년에 단 1초의 오차가 발생하는 이터븀(ytterbium) 광시계(KRISS-Yb1)를 2014년 최초로 개발하면서 프랑스, 일본, 미국, 이탈리아에 이어 세계 협정시(Universal Time Coordinated: UTC) 생성에 이바지한 다섯 번째 나라가 되었다.[9]

9 한국표준과학연구원, 「K-표준, 세계 표준이 되다」, 보도자료, 2021. 11. 10.

<표 4-7> 양자센서의 활용 분야

구분	산업화 모델
국방・안보	1) 양자라이다, 양자레이더 등
제조・반도체	1) 양자센서 기반 배터리 불량 검출 2) 가스센싱 기술
의료	1) 뇌자도 검사 2) 심자도 검사 3) 양자현미경, 양자내시경 의료분야 접목 4) 양자 MRI 의료진단 서비스
교통・물류・항공	1) 항공기 시각주기유도 시스템 2) 자율자동차용 양자 라이다(LiDAR) 3) 주행 정확도 및 안정성 향상
유틸리티 및 건설	1) 양자중력센서기반 지하통신시설물 위치 파악 2) 통신선로 단락 검출
기타 산업	1) 지구 물리학 조사 및 매장물 탐사 2) 석유 및 가스 탐사 3) 가스 파이프라인 감시

자료: 과학기술정보통신부, 『2022 양자정보기술 백서』, <표 III-3-1>, p.500.

양자전기장센서는 최근 들어 주목받고 있는 양자센서로 광대역 주파수를 측정할 수 있으며 국방, 통신, 의료 등 활용 분야가 다양하다는 장점이 있다. 특히 자율 주행, 인공지능, IoT 등의 초연결 시대가 도래하면서 고주파 측정 기술의 수요는 더욱 높아질 것으로 기대되며, 양자센서의 발달은 관련 시장 개화 시 급격하게 증가하는 무선 통신 시장을 선점할 기회가 될 것으로 예상된다(과학기술정보통신부, 2022). 양자자기장센서는 RNA(Ribonucleic Acid)를 측정해 질병을 조기 진단하거나 기존 자기공명장치(MRI)로는 측정할 수 없는 세포의 직접적인 시각화를 가능하게 한다는 점에서 그 활용도가 탁월하며, 이미 표준양자한계를 넘어선 센서가 다수 개발되고 있다(Mitchell and Alvarez, 2020).

양자광학센서는 양자현미경, 양자가스센서, 양자라이다(LiDAR) 등 많은 분야에서 활발한 연구가 진행되고 있다. 양자현미경은 기존의 현미경이 구분하기 힘든 수준의 미세구조를 시각화할 수 있으며, 이는 의료, 제약 분야는 물론 반도체 결함 검사에서 활용될 여지가 있다. 양자가스센싱 기술은 고감도 가스 누출 탐지가 가능하므로 산업 안전 분야에서 적

극 활용될 수 있다. 또한 양자라이다, 양자레이더는 원격 물체 탐지 기능을 획기적으로 늘려주기 때문에 자율주행 자동차, 국방 분야 등 다양한 분야에 유용하게 쓰일 것으로 기대된다.

이처럼 양자센서는 고전적인 측정한계를 극복하고, 정밀한 측정치를 제공함으로써 국방・안보, 제조・반도체, 의료 등 다양한 분야의 비약적인 발전에 이바지할 것으로 예상된다. 아직은 기술개발에 필요한 부품, 장비 위주로 연구가 진행되었지만, 향후 초정밀 센서의 상용화로 시장이 확대될 것으로 기대된다. 세계 1위 방위산업체 Lockheed Martin에서는 다이아몬드 NV를 활용한 항법 시스템을 개발하고 있다.[10] 반면, 국내 양자센서 연구는 아직 초기 단계에 머물러 있고 대학이나 정부출연연구기관 중심의 기본 연구에 집중 되어있다(정보통신기획평가원, 2022). 초기 시장 선점을 위해서는 양자센서의 정밀도, 분해능 향상과 같은 측정한계의 초월이 기본조건이며 집적화, 소형화, 잡음제어 등과 같은 기술경쟁력을 갖춰야 한다(한국과학기술정보원, 2020).

다. 양자암호통신(quantum cryptography communication)

충분한 수의 큐비트, 낮은 오류율을 지닌 상용화 양자컴퓨터의 등장은 미래의 혁신을 주도하고 경제, 사회 등 여러 방면에서 새로운 패러다임을 만들어 낼 것이다. 하지만 양자컴퓨터의 뛰어난 성능은 고전 컴퓨터의 암호체계를 무력화시켜 보안성을 현저히 하락시킬 수 있다. 고전적인 암호 기술은 큰 수의 소인수분해를 바탕으로 하는 RSA 암호체계를 사용하는데 고전 컴퓨터로는 자릿수에 따라 소인수분해 소요 시간이 기하급수적으로 증가하기 때문에 암호해독이 쉽지 않다.[11] 하지만 1994년 피터

---

10 https://www.hankyung.com/it/article/2023070719081 (접속일: 2023. 8. 14)

11 현존하는 RSA 암호체계 중 가장 안전하다고 평가되는 2,048비트의 RSA 공개키를 슈퍼컴퓨터로 암호 해독할 경우, 약 300조 년 이상의 시간이 소요되기 때문에 물리적으로 암호해독이 불가능하다. 하지만 범용 양자컴퓨터가 상용화되고 2,000만 큐비트 이상의 양자컴퓨터를 활용할 수 있게 된다면 암호해독 시간은 8시간으로 대폭 축소될 것으로 예상된다(Gidney and Ekerå, 2021).

쇼어가 제안한 알고리즘과 양자컴퓨터를 활용한다면 기존 암호체계의 무력화는 시간문제이므로 주요 선진국들은 양자컴퓨터 이상으로 양자암호 개발에 투자하고 있다. 우리나라의 대학교, 연구기관 역시 높은 보안성의 양자암호기술 개발을 추진하고 있다(한국과학기술한림원, 2019).

양자암호통신은 양자역학적 특성을 활용한 보안 통신, 양자장비간 연결을 위한 네트워크 기술을 통칭하며 양자암호, 양자네트워크 등으로 분류된다. 양자암호통신은 단일 광자의 양자역학적 특성인 불확정성과 비복제성을 이용해 양자키분배(Quantum Key Distribution: QKD)를 수행할 수 있다는 점에 있다. 기존의 광통신은 수십 개의 광자를 이용하므로 광분할 및 증폭 과정에서 공격자가 정보를 읽거나 복제할 수 있다. 하지만 QKD는 단일 광자가 미세한 변화에도 반응해 상태가 변하는 특성을 활용하므로 수신자와 발신자 이외에 제3자가 감청을 시도할 때 그 즉시 상태가 변하기 때문에 해킹이나 도청이 원칙적으로 불가능하다.

양자암호통신은 실용화에 가장 근접한 기술로 현재 암호기기의 정보 암호화・복호화에 필수적인 키 교환 기술 개발에 집중되고 있지만, 향후 양자기기 사이의 정보 전송으로 확장될 것으로 보인다. 초기 양자암호통신은 단거리에서 정보교환을 요하는 연구, 의료, 금융 등에서 활용되고 궁극적으로는 양자중계기를 기반의 초장거리 글로벌 양자통신 네트워크로 발전할 것으로 예상된다(과학기술정보통신부, 2022). 현재 양자키분배 통신의 거리 확장을 위한 연구가 진행되고 있고, 기존 유선 광통신망을 활용하기 위한 양자중계기와 메모리 연구가 활발히 진행되고 있다(한국과학기술기획평가원, 2022).

양자암호통신의 상용화는 통신서비스는 물론 국방・안보, 제조, 금융 등 다양한 분야에서 파급효과가 기대된다. 특히 해독 불가능한 암호체계는 정보의 보안성이 중요시되는 국방 분야에서 뚜렷한 성과를 보여줄 것으로 예상된다. 일례로 국내 스타트업 회사 이와이엘이 개발한 양자 난수 초소형 암호칩은 우수성을 인증받아 미국 공군의 군사용 드론에 공급되고 있다. 이 기술을 활용하여 드론이 촬영한 영상은 양자난수 생성 기술에 의해 암호화된 정보를 전송하기 때문에 해킹할 수 없고 격추 시에도

<표 4-8> 양자암호통신의 기술분류와 개념

구분	주요 내용
유선 QKD 시스템 기술	통신 파장대역 초고속 양자광원 개발, 고효율/초고속 단일광자검출소자 및 부품 개발, 양자간섭계 칩 개발
	시스템 제어 기술, QKD 네트워크 기술
	기존 고전 광통신 채널과 양자채널을 하나의 광케이블에 연동
무선 QKD 시스템 기술	이동형 무인기, 드론, 소형 위성 등에 사용될 수 있도록 무게가 가볍고 부피가 작은 무선 QKD 송수신부 모듈을 구성하는 기술
	수십 km 이상의 거리를 무선으로 구축하기 위한 송신부 시스템
	초장거리 글로벌 양자통신을 위해 저·중궤도 또는 정지 궤도에 있는 위성을 이용하여 QKD를 수행하는 기술
QKD 공통 기술	난수 생성 기술 및 하드웨어 개발 기술, 난수 성능 검증 기술 등
	초기 오류를 보정하고, 비밀성 증폭을 위한 후처리 알고리즘 기술
	인증, 무결성 기능을 양자적인 안정성을 기반으로 수행하는 기술
	광원, 측정부, 변조부 등의 외부 광주입을 통해 QKD 전송 암호키 정보를 조작하는 등 QKD에 대한 양자적 보안 위협을 찾는 기술
	보안 요구사항의 구현 적절성, 신뢰성 등의 안전성 척도의 연구 및 이의 측정 척도의 정량화, 이를 시험하는 방법론을 개발하는 기술
양자중계기	고품질/고속 양자 얽힘 광원 생성 기술
	고체 큐비트와 광자 큐비트 사이의 스핀-광자 얽힘 생성 기술
	양자 얽힘 교환 기술, 양자 메모리 기술
	서로 다른 이종 큐비트 간의 인터페이스를 위한 파장 변환 기술
양자정보 네트워크	다중 사용자가 존재하는 네트워크 환경에서 양자 정보를 효율적으로 부호화하는 기술
	기존 네트워크의 방식을 기반으로 양자 정보의 효율적 교환을 위한 스위칭/라우팅

자료: 정보통신기획평가원, 「ICT R&D 기술로드맵」, 2020.

정보의 안전성을 보장한다. 또한 민감한 개인정보인 금융 데이터의 전송에 있어 양자기술의 적용은 월등한 성능을 보일 것으로 예상된다. 2020년 SK텔레콤은 양자암호통신 시범사업에 참여하여 양자암호통신망 기술 개발을 진행하였다. 이 기술이 실현되면 먼 거리로 떨어져 있는 은행과 수요자 간 비대면 안면인식을 통해 측정된 민감 정보를 안전하게 전송할 수 있을 것으로 기대된다.

<표 4-9> 양자암호통신의 활용 분야

구분	산업화 모델
국방・안보	1) 인공위성 양자 키 분배 네트워크 구현 서비스 2) 양자통신과 현대암호 Post Processing 알고리즘 3) 드론용 양자암호모듈 등
통신 응용	1) 유선 양자암호통신 서비스 2) 공연・엔터테인먼트 분야 응용 서비스 3) 양자 키 분배 시스템의 소형화 4) 양자인터넷 서비스 5) 무선 양자인터넷 구현 서비스
제조	1) 스마트팩토리 양자암호통신적용
의료	1) 양자암호통신기반 의료 클라우드 서비스 2) 의료 데이터 전송 서비스
금융	1) 블록체인 기반 금융서비스 보안 2) 결제시스템 연동 및 기밀 정보 암호통신 서비스 3) 금융데이터 분석 및 보안 서비스 등
교통・물류	1) 자율주행배송서비스(배송로봇・드론)에 양자암호 적용

자료: 과학기술정보통신부, 『2022 양자정보기술 백서』, <표 III-3-1>, p.500.

제3절 양자기술 관련 일반 현황

본 절에서는 양자기술의 세부 분야인 양자컴퓨터, 양자센서, 양자암호통신의 일반 현황을 살펴보고자 한다. 양자기술 관련 시장은 아직 초기 단계지만 현재 기술 수준에서의 양자기술 시장 규모와 상용화가 시작된 5~10년 이후의 전망치를 살펴보고자 한다. 또한 미국, 중국, 유럽 등 양자기술의 주요 선도국가와 우리나라의 투자 현황에 대해 살펴보고, 우리나라 양자기술의 현주소를 파악하고자 한다. 아울러 세부 분야별 선도기업, 기술 수준, 연구 동향 등 여러 측면의 현황을 분석하여 우리나라 양자기술 발전을 위한 정책적 제언을 도출하고자 한다.

1. 시장 동향 및 전망

양자기술 시장은 초기 단계이므로 기술 선점을 위한 보안, 시장 미발

달 등의 요인으로 인해 국가 단위의 통계자료 수집은 어려운 상황이다. 또한 스타트업 회사의 진입, 퇴출이 활발하게 발생한다는 점과 자료 수집 시점과 측정 기준에 따라 추정치의 변화가 크다는 점으로 인해 시장 규모의 추정은 쉽지 않다. 따라서 본 소절에서는 구득 할 수 있는 자료 중 다수의 글로벌시장 전망 보고서를 다루고 있는 과학기술정보통신부의 『양자정보기술백서』와 「ICT R&D 기술로드맵」을 활용하여 전 세계 양자기술 시장의 전망치와 산업별 구성비, 제품별 구성비 등을 살펴보고자 한다. 『양자정보기술백서』는 글로벌시장 조사기관인 McKinsey, Mind Commerce, IQ4I 등의 전망치를 재구성하고 있으며, 양자기술 관련 조사기관인 Inside Quantum Technology의 보고서를 포함하고 있으므로 세계 양자기술 시장을 살펴보기에 적합한 자료로 판단된다. 또한 ICT R&D 기술로드맵에서는 양자기술 각 분야의 세부 기술 영역에 대한 전망치를 포함하고 있으므로 국내 양자기술 시장의 세부 동향을 파악하기에 용이할 것으로 판단된다.[12]

전 세계 양자기술 시장의 규모는 2022년 약 8조 6,656억원으로 추산되며 시장 초기 단계인 관계로 그 규모는 크지 않다. 하지만 상용화 예상 시점인 2030년에 이르러 양자기술 시장은 약 101조 2,414억원으로 규모가 확대되고 연평균 36.0%의 높은 성장률을 보일 것으로 전망된다. 기술별로 살펴보면 양자컴퓨터 시장은 2022년 약 5조 658억원으로 가장 큰 비중을 차지하고 있으며, 연평균 38.9%의 성장률로 2030년에는 약 70조 1,171억원으로 시장의 규모가 커질 전망이다. 양자통신 시장은 2022년 1조 6,886억원으로 그 규모가 가장 작지만 2030년까지 연평균 39.8%의 성장률을 보이며 시장 규모가 24조 5,793억원까지 확대될 것으로 예상된다. 반면, 양자센서 시장은 양자컴퓨터, 양자통신에 비해 성장세가 더디며 2030년 6조 5,450억원 수준의 시장이 형성될 것으로 전망된다.

양자기술은 다양한 산업에서 활용될 것으로 기대된다. 특히 최첨단 기술 수준을 요구하는 항공・우주 분야에서 양자기술을 활용한 매출이 크게

12 ICT R&D 기술로드맵에서는 2035년까지의 양자기술의 세부 영역별 로드맵을 제시하였다. 구체적인 내용은 <부표 4-1>에 수록하였다.

<표 4-10> 전 세계 양자기술 시장 전망

(단위: 억원)

연도	양자컴퓨터	양자센서	양자통신	합계
2022	50,658	19,111	16,886	86,656
2023	69,377	21,596	24,086	115,058
2024	99,484	24,511	35,998	159,993
2025	132,471	27,845	47,255	207,571
2026	186,533	31,660	69,115	287,307
2027	276,723	36,029	100,400	413,152
2028	363,640	41,073	126,319	531,031
2029	519,725	47,028	175,130	741,883
2030	701,171	65,450	245,793	1,012,414
연평균 증가율	38.9%	16.6%	39.8%	36.0%

자료: 과학기술정보통신부, 『양자정보기술백서』, 2022, p.24. <표 I-1-1>.

발생할 것으로 예상된다. 항공·우주 분야의 매출 비중은 2022~30년 분석 기간에 모두 30%를 웃도는 모습을 보인다. 또한 항공·우주 분야와 마찬가지로 극도의 보안성을 요구하는 국방 분야에서도 24% 수준의 큰 비중을 차지할 것으로 전망된다. 이외에 에너지, 금융·보험 등 다양한 분야에 양자기술이 접목될 것으로 예상되고 있다.

국내 양자기술 시장 규모를 세부 분야, 세부 기술 영역별로 살펴보면,

<표 4-11> 분야별 양자기술 기반 글로벌 매출 구성비

(단위: %)

구분	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
항공·우주	30.0	30.2	30.5	30.8	31.0	31.3	31.5	31.8	32.0
국방	24.5	24.4	24.3	24.3	24.2	24.1	24.1	24.0	23.9
에너지	22.2	22.0	21.9	21.8	21.6	21.5	21.3	21.2	21.0
금융·보험	10.3	10.3	10.4	10.4	10.4	10.5	10.5	10.6	10.6
물류·유통	5.0	4.9	4.7	4.6	4.4	4.3	4.2	4.0	3.9
보건·의료	2.0	2.2	2.3	2.5	2.6	2.8	3.0	3.2	3.4
화학·재료	1.3	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	1.0	1.0
기타	4.8	4.7	4.7	4.6	4.5	4.4	4.4	4.3	4.2

자료: 과학기술정보통신부, 『양자정보기술백서』, 2022, p.25. <표 I-1-2>.

먼저 양자컴퓨터 시장은 2019년 약 10억원 수준이지만 2027년 약 276억원까지 확대될 전망이다. 양자컴퓨터 시장의 발달은 큐비트 수 확장을 필두로 하드웨어 분야의 성장세가 가파를 것으로 예상되고 소프트웨어, 클라우드 순의 비중을 차지할 전망이다. 상용화 시점에 근접할수록 하드웨어를 활용할 수 있는 양자 소프트웨어와 정보 전송 및 보관을 위한 클라우드 서비스의 시장 규모가 확대될 것으로 보인다. 양자센서 시장은 2019년 약 656억원 규모로 컴퓨터, 양자통신 분야에 비해 큰 비중을 차지한다는 점에서 세계 시장과 차이를 보인다. 원자시계, 양자자기장센서, 단일광자검출기 순으로 비중이 크게 나타나며 시장의 규모는 2027년 약 1,699억원까지 확대될 것으로 전망된다.

양자통신 시장의 경우 QKD 장비시장과 양자네트워크・암호 시장으로 분류할 수 있는데 2019년 양자통신 시장은 약 42억원 규모이지만 2027년 1,540억원 수준까지 성장할 것으로 기대된다. 현재 우리나라 양자통신 시장은 QKD 장비 개발에 편중되어 있고, 그 추세는 상용화 시점까지

<표 4-12> 국내 양자기술 시장 전망

(단위: 십억원)

구분	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
양자컴퓨터	1.0	1.7	3.5	4.7	6.7	10.0	14.0	19.9	27.6
하드웨어	0.9	1.4	2.7	3.4	4.4	6.2	8.1	13.0	13.2
소프트웨어	0.2	0.3	0.6	1.1	1.8	2.8	4.3	6.3	9.2
클라우드	0.0	0.0	0.1	0.3	0.5	1.0	1.7	2.9	5.3
양자센서	65.6	72.8	81.1	91.5	102.5	115.4	130.5	148.5	169.9
원자시계	32.3	34.2	36.3	38.4	40.8	43.3	46.0	48.9	52.0
양자중력센서	0.5	0.5	0.6	0.7	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
양자자기센서	29.1	32.8	37.0	41.8	47.2	53.4	60.5	68.5	77.7
양자레이더, 라이다	0.5	0.8	1.1	1.7	2.5	3.7	5.4	8.0	11.9
단일광자검출기	1.7	2.1	2.6	3.1	3.8	4.7	5.8	7.1	8.6
기타양자센서	1.4	2.4	3.5	5.8	7.5	9.5	12.0	15.0	18.6
양자통신	4.2	6.5	9.3	10.5	21.9	33.2	40.8	88.8	154.0
QKD 장비	4.1	6.4	9.2	10.2	20.4	30.4	37.3	80.2	139.1
양자네트워크, 암호	0.0	0.1	0.1	0.3	1.5	2.8	3.6	8.6	14.9

자료: 정보통신기획평가원, 『ICT R&D 기술로드맵 2025』, 2020, pp.139~141.

지속될 것으로 전망된다. 이처럼 양자기술 시장은 가까운 미래에 규모가 크게 확장되지만 세계 시장에서 우리나라가 차지하는 시장 비중은 크지 않을 것으로 예상된다. 세계 시장 점유를 위해서는 기술의 고도화가 선결 조건이므로 양자기술 분야 전반에 대한 공격적인 투자가 필요한 시점으로 판단된다.

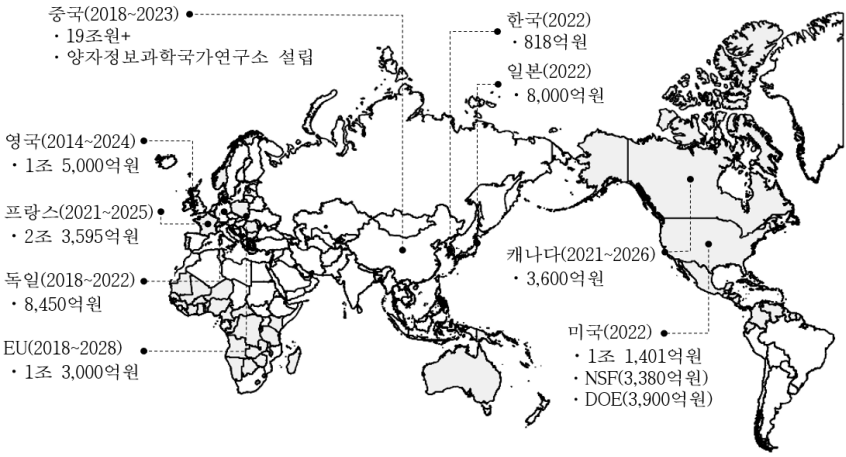
2. 투자 동향

주요 선진국은 양자기술 시장의 초기 선점을 위해 적극적인 투자를 진행하고 있으며 국가 차원의 투자는 물론 기업 차원의 투자 규모도 확대되고 있다. [그림 4-3]은 최근 주요국의 양자기술 관련 투자 규모를 보여주고 있는데, 투자 기간의 차이는 있으나 대부분 국가에서 대규모 자본을 투입하고 있음을 알 수 있다.

양자기술 선도국가인 미국은 양자정보과학(Quantum Information Science: QIS)의 예산을 양자컴퓨팅(Quantum Computing: QCOMP), 양자센서 및 계측(Quantum Sensing and Metrology: QSENS), 양자네트워킹(Quantum Networking: QNET), 기초양자정보과학(QIS for Advancing Fundamental Science: QADV), 양자기술(Quantum Technology: QT) 등 국가 양자 이니셔티브(National Quantum Initiative: NQI)의 분류에 따라 투입하고 있다. 2019년 4억 4,900만달러, 2020년 6억 7,200만달러, 2021년 8억 5,500만달러, 2022년 9억 1,800만달러를 투입하면서 초기 R&D 예산의 약 2배 수준의 예산을 투입하고 있다. 2023년에는 8억 4,400만달러의 투자가 계획되어 있으며 예산은 지속적으로 증가할 것으로 전망된다(NSTC, 2023).

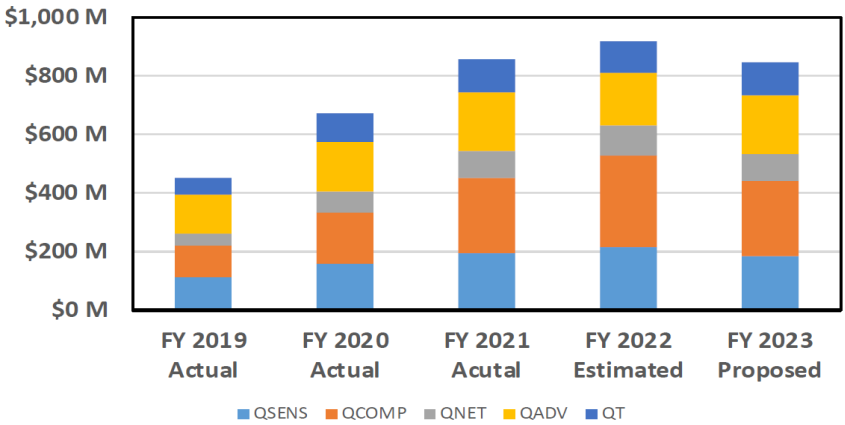
세부 분야별 투자 금액의 구체적인 수치는 발표되지 않았으나 NSTC의 보고서를 토대로 살펴보자면 2019년부터 양자컴퓨터에 대한 투자가 지속해서 증가하고 있다. 양자센서와 양자통신에 대한 투자 역시 일정 비율을 유지하고 있으며, 평균적으로 양자컴퓨터, 양자센서, 양자통신 순으로 투자 규모가 크다. 양자산업의 토대가 되는 기초과학기술에 대한

[그림 4-3] 세계 주요국의 양자산업 투자 규모



자료: 과학기술정보통신부, 『양자정보기술백서』, 2022, p.82를 참고하여 작성.

[그림 4-4] 미국의 양자기술 세부 분야별 투자 규모



자료: National Science and Technology Council (NSTC), “National Quantum Initiative Supplement to the president’s FY 2023 Budget”, 2023, p.8, [Figure 2.2].

투자가 일정한 비중을 차지하고 있다는 점이 투자 양상의 특징이다.

미국은 국립과학재단(National Science Foundation: NSF), 에너지부(Department of Energy: DoE), 표준기술연구소(National Institute of Standards and Technology: NIST)를 법안기관으로 지정하여 투자 예산을 집행하고

있다. NSF는 주요 R&D 프로그램인 양자도약과제연구소(Quantum Leap Challenge Institutes: QLCI)를 통해 양자컴퓨터, 양자센서 등 양자기술 전반에 걸쳐 연구를 수행하고 있으며 해당 프로그램에는 대학, 기업, 국립연구소 등이 참여하고 있다. NSF는 2020년 약 1억 9,400만달러의 예산을 집행하였으며 2022년의 투자 예산은 약 2억 6,000만달러까지 증가하였다. DoE는 가장 많은 예산을 운용하는 기관으로, 바이오센서, 차세대 검출기 등의 양자센서와 양자컴퓨터 연구를 위한 시뮬레이터 개발, 양자네트워크 애플리케이션 및 테스트베드 구축 등의 연구를 주도하고 있다. DoE는 2022년 고급과학컴퓨팅(약 1억달러), 기초에너지과학(약 1억달러), 고에너지물리학(5,000만달러) 등 총 3억달러 이상의 예산을 양자정보과학 R&D에 투입하고 있다(과학기술정보통신부, 2022).

EU는 2016년 슈퍼컴퓨터의 성능을 능가하는 양자컴퓨터를 개발하기 위한 Quantum Flagship 프로그램을 발표하였다. Quantum Flagship은 10년간 10억유로의 예산을 양자기술 개발에 투자하는 데 주요 목적이 있으며 2018년을 시작으로 3년간 총 1억 3,200만 유로(약 1,700억원)의 예산이 투입되었다. <표 4-13>은 Quantum Flagship의 첫 번째 단계로 양자통신 분야 4개, 양자시뮬레이션 분야 2개, 양자계측・센서 분야 4개 등 총

<표 4-13> 2018년 EU Quantum Flagship의 주요 과제와 투자 규모

영역	과제명	연구비
양자통신	양자키분배(CiViQ), 양자인터넷 구현(QIA), 양자난수발생기(QRANGE), 소형 양자통신기기(UNIQORN)	430억원
양자시뮬레이션	양자시뮬레이션 플랫폼(Qombs, PASQuanS)	239억원
양자계측・센서	광학시계(iqClock), 자기공명장치(MetaboiQs), 고감도 센서(macQsimal, ASTERIQS)	470억원
양자컴퓨팅	초전도체 방식(OpenSuperQ), 이온트랩 방식(AQTION)	255억원
양자 기초과학	양자정보처리(2D, SIPC), 양자회로(S2QUP), 양자정보전송(QMiCS), 양자기기플랫폼(SQUARE), 양자정보소스(PhoG), 양자시뮬레이션 플랫폼(PhoQus), 다중 큐비트(MicroQC)	355억원
과제지원	프로젝트 주요 협력 및 지원(QFLAG)	45억원

자료: 한국전자통신연구원, 『양자정보기술 동향 및 시사점』, 2019, p.15. <표 5>.

20개의 과제와 해당 투자 규모를 나타낸다. 특정 분야에 대한 집중 투자가 아닌 모든 분야에서 균형 있는 예산을 투입한다는 점과 기초과학연구에 큰 비중을 둔다는 점에서 미국의 투자 방식과 유사하다.

영국은 양자기술 개발을 위해 2014년 국가양자기술프로그램(UK National Quantum Technologies Programme: UKNQTP)을 발표하였다. UKNQTP는 2014년을 시작으로 10년간 1조 5,000억원의 예산을 양자기술 개발에 투입할 계획을 세웠고, UKNQTP의 첫 단계인 2014년부터 2019년까지는 본래 편성된 예산인 약 4,000억원을 뛰어넘는 6,000억원의 투자가 이뤄졌다. 또한 2018년에는 박사급 인력을 교육하기 위해 교육기관 75곳에 총 6,600억원을 투자하는 등 기술개발은 물론 인력양성을 위한 노력을 아끼지 않았다. 2022년 영국 정부는 지속 가능한 양자 산업 육성, 글로벌 선도 지위 강화, 광범위한 사회경제적 기회 확대 등의 목표 실현을 위한 양자 전략 계획을 재정립하였다(과학기술정보통신부, 2022).

중국은 양자기술을 미·중 패권 경쟁에서 우위를 선점할 수 있는 중요한 기술 영역으로 인식해 공격적인 투자 기조를 유지하고 있다. 중국 국무원은 2006년 국가전략 분야 중 하나로 양자기술 연구를 선정하면서 연간 약 3,200억원을 투자하였다. <표 4-14>는 중국 과기부가 국가중대과학연구프로그램을 통해 2008년부터 2017년까지 양자기술 분야에 투자한 금액으로 약 3,100억원에 달한다. 최근 발표한 제14차 5개년 계획에 의하면 전략육성 7대 분야에 양자기술(양자통신, 양자컴퓨터) 관련 분야를 2개 추가하고 연구개발비를 매년 7% 이상 증액해 집중적으로 양성할 계획임을 밝혔다(과학기술정보통신부, 2022). 현재 중국의 양자기술 수준은 이미 선도국가 반열에 올랐으며 미국과의 경쟁 구도가 지속되고 있다.

<표 4-14> 국가중대과학연구프로그램(양자제어) 투자 예산

(단위: 만위안)

연도	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
예산	8,622	12,499	15,878	21,694	18,697	19,085	18,944	26,954	15,897	6,327

자료: 과학기술정보통신부, 『양자정보기술백서』, 2022, p.94. <표 I-3-6>.

캐나다는 미국 등 주요 국가가 대규모 투자를 시작하기 이전부터 대학교를 중심으로 양자기술 연구개발 및 육성에 집중하였다. 2002년부터 워털루 대학에 약 760억원, 브리티시컬럼비아 대학에 약 665억원, 셔브룩 대학에 약 335억원 등을 투자하면서 D-wave systems, Xanadu와 같은 양자컴퓨터 선도기업의 육성을 지원하였다. 또한 캐나다 자연과학·공학 연구위원회(Natural Science and Engineering Research Council of Canada; NSERC)에 약 2,700억원을 투자하면서 연구 혁신, 산학협력 네트워크 구축 등 다방면의 지원을 아끼지 않았다. 아울러 2021년 4월 국가양자전략(National Quantum Strategy, NQS)을 수립하면서 2021년부터 2026년까지 약 3,600억원의 자금을 투입하여 양자기술 선점을 위해 노력하고 있다.

우리나라는 과거 소규모 과제 위주로 양자기술 연구가 추진되었기 때문에 선도국가에 비해 연구 분야의 다양성이나 과제 수, 투자 금액 면에서 규모가 작은 수준이다. 2019년 이후 양자기술 전용 사업이 신설되면서 2019년 106억원, 2020년 235억원, 2021년 326억원 수준으로 예산이 대폭 증액되었다. 또한 2021년 4월 양자기술 연구개발 전략을 수립과 함께 기술 분류별 투자 계획이 마련되었고 양자통신 분야에 478억원, 양자센서 분야에 100억원, 양자컴퓨터 분야에 490억원 이상의 예산을 배정하였다.

최근 들어 12대 국가전략기술 지정, 신성장 4.0 프로젝트 핵심 분야 선정 등 양자기술에 대한 중요성을 증대되면서 적극적인 R&D 정책이 수립되고 있다. 정부는 2035년까지 세계 시장 점유율 10%를 달성하기 위해 약 3조원 이상의 민·관 투자와 2,100억원 규모의 국제협력 투자 등을 계획하고 있다(과학기술정보통신부, 2023).

<표 4-15>는 최근 양자기술 관련 사업의 투자 현황을 나타내며, 2022년 양자기술 관련 사업 예산은 2021년 대비 약 320억원이 증액된 790억원으로 집계되고 있다. 양자센서 분야의 경우 양자센서 핵심 원천기술을 개발하는 데 주력하고 있으며, 국내 산업 수요가 분명한 센서에 대해 우선적인 수요연계형 R&D 추진을 계획하고 있다. 양자통신 분야의 경우 이미 선도국가 수준의 경쟁력을 갖췄다는 판단하에 유선/무선 양자암호

<표 4-15> 국내 양자기술 관련 사업 현황

(단위: 억원)

분야	사업명	2021년	2022년
양자센서	양자센서 핵심 원천기술 개발	58	85
양자통신	양자인터넷 핵심 원천기술 개발	-	72
	양자암호통신 집적화 및 전송 기술 고도화	73	76
양자컴퓨터	양자컴퓨팅 기술개발	96	114
	양자컴퓨팅 연구인프라 구축	-	100
인프라	양자 연구개발생태계 조성	60	112
	양자암호통신 인프라 구축	140	100
국제협력	국가 간 협력 기반 조성	-	60
인력양성	과학·기술 혁신 인재 양성	39	71
합계		466	790

주: ITRC 사업(2022 기준 24억원), 기초연구사업(2020 기준 약 20억원), 출연연 고유 사업(2022 기준 약 200억원) 등 과제 단위 지원사업은 제외된 값.
자료: 과학기술정보통신부, 『2022 양자기술백서』, 2022, p.97, <표 I-3-8>.

통신의 성능고도화, 양자인터넷 구현과 그에 따른 시장 선점을 목표로 하고 있다.

양자컴퓨터 분야의 경우 2027년까지 50큐비트 급 초전도 양자컴퓨터 시스템을 개발하고 경제적 활용 가능성을 탐색하며, 2031년까지 세계적 수준의 신뢰도를 보유한 1,000큐비트 급 양자컴퓨터 개발을 목표로 하고 있다. 이외에 국제 공동 연구를 위한 국제협력과 양자 전문인력 양성을 위한 투자 역시 유의미한 비중을 차지하고 있다.

앞서 언급한 바와 같이 2000년대에 이르러 국가 주도의 투자뿐만 아니라 민간투자 역시 활발하게 진행되고 있다. <표 4-16>은 양자기술 스타트업 기업의 투자 유치 중 금액이 가장 큰 상위 10개의 투자 건수를 나타낸다. 규모가 큰 투자는 양자컴퓨터 관련 회사를 대상으로 이루어지는 것이 주요 특징이며, 이는 양자컴퓨터의 상용화로 인해 촉발되는 산업잠재력에 대한 투자 증가로 판단된다(McKinsey, 2023). 양자컴퓨터 관련 신생기업은 2001년을 기점으로 2018년까지 꾸준히 증가하였고 2022년 약 350개의 기업이 활동 중이다.[13]

<표 4-16> 양자기술 스타트업 기업의 투자 유치 금액(상위 10개 투자건수)

(단위: 백만달러)

기업명	소속 국가	기술영역	투자금액	연도
SandboxAQ	미국	양자기술 전반	500	2022
PsiQuantum	미국	양자컴퓨터	450	2021
IonQ	미국	양자컴퓨터	350	2021
Rigetti Computing	미국	양자컴퓨터	345	2022
Arqit	영국	양자통신	345	2021
IonQ	미국	양자컴퓨터	300	2021
Quantinuum	영국	양자컴퓨터	300	2021
D-Wave Systems	캐나다	양자컴퓨터	300	2022
PsiQuantum	미국	양자컴퓨터	230	2020
Origin Quantum	중국	양자컴퓨터	149	2022

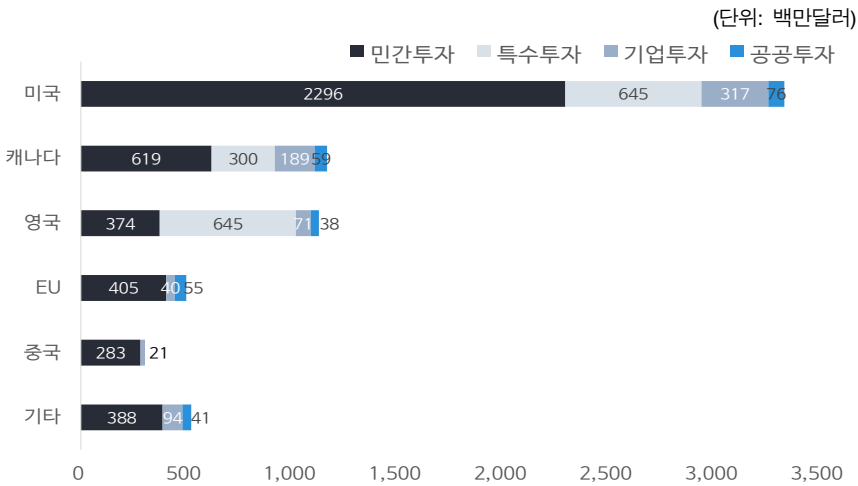
자료: McKinsey & Company,『Quantum Technology Monitor』, 2023, p.11.

IonQ는 2021년 약 650만달러의 투자를 유치하였고, 같은 해 10월 양자컴퓨터 관련 기업 최초로 뉴욕증권거래소에 상장하였다. PsiQuantum은 2015년 창업한 기업으로 광자를 이용한 양자컴퓨터를 개발하고 있는 미국의 선두기업으로 알려져 있다. PsiQuantum은 2020년 230만달러(시리즈 C), 2021년 450만달러(시리즈 D)의 투자유치에 성공하면서 스타트업 최대 규모 투자를 기록하였다. 하지만 2022년 SandboxAQ가 500만달러의 투자를 유치하면서 최대 투자 규모를 갱신하였다. 상위 투자 건수의 목록이 2022년에 들어서면서 크게 변동하였고, 100만달러 이상의 대규모 투자가 7건(D-Wave Systems, Origin Quantum, Rigetti Computing 등) 발생한 점으로 보아 양자기술 관련 투자가 활성화되고 있는 것으로 판단된다.

양자기술 스타트업 기업의 투자 비중 현황을 국가별로 살펴보면 미국의 투자 규모는 약 34억달러로 다른 국가에 비해 규모가 크고, 민간투자는 전체 투자의 약 70%(23억달러)를 차지하고 있다. 중국은 스타트업 기업에 대한 투자 자료가 공개되지 않은 경우가 많으므로 투자 규모의

13 2019년부터 양자기술 관련 창업기업의 수가 감소하였는데, McKinsey는 이에 대한 원인으로 창업기업의 역량 부족, 상업화 실패, 스케일업 위주의 투자 행태 등으로 파악하고 있다(McKinsey, 2023).

[그림 4-5] 양자기술 스타트업 기업의 투자 유치 금액(상위 10개 투자건수)



자료: McKinsey & Company,『Quantum Technology Monitor』, 2023, p.11.

하향편의가 존재할 가능성이 높다. 다만, 주로 연구기관 주도로 양자기술 개발이 이루어지고 있으므로 스타트업에 대한 투자 규모가 크지 않을 것으로 예상되며, 일부 기관에서는 중국의 민간투자 규모를 약 6억 1,500만 달러로 추정하고 있다. 이외에 캐나다, 영국, EU 등 다른 국가도 미국과 유사한 투자유형을 보이고 있으며, 민간투자가 기술 발전을 견인하고 있는 것으로 판단된다. 앞서 살펴본 바와 같이 2000년대 초부터 최근까지 이어져 온 투자 행태는 창업 초기 단계의 소규모 투자가 대다수였다면, 양자기술을 적용한 제품이 상용화되는 단계에 가까워질수록 대규모 투자가 나타나고 있다.

3. 연구 동향

양자기술의 발전은 특허, 논문 등의 연구 동향과 직결되므로 주요국의 양자기술 관련 특허와 논문 수를 살펴보고 우리나라의 현재 위치는 어떠한지 살펴보고자 한다. 아울러 특허 출원 수와 패밀리 특허 수를 살펴보고 연구의 양적 측면과 질적 측면까지 같이 살펴보고자 한다. 패밀리

<표 4-17> 2014~20년 양자기술 관련 특허 출원 수

	한국	미국	중국
2014	11	33	97
2015	19	52	117
2016	18	55	177
2017	52	80	382
2018	64	173	574
2019	23	203	560
2020	6	95	345
합계	193	691	2,252

자료: 한국과학기술정보연구원, 『양자기술 과학·기술·산업 분석』, 2022.

특허는 자국에서 출원한 특허를 기초로 해외 여러 국가에서 출원한 특허의 수를 의미하며, 범용성 및 활용잠재력 등 특허의 질적 측면을 대리한다.

<표 4-18>은 2014년부터 2020년까지의 한국, 미국, 중국의 특허 출원 수를 나타낸다. 중국의 특허 출원 수가 2,252건으로 가장 많으며 한국, 미국, 중국 모두 유사한 추세를 보인다. 하지만 우리나라는 미국과 중국에 비해 적은 특허 수를 보유하고 있다. 주요국의 특허 수를 양자기술 세부 영역별로 살펴보면, 전반적으로 양자통신과 양자센서 분야에서는 중국이 강세를 보이고 있고, 양자컴퓨터 분야에서는 미국이 앞서고 있다. 구체적으로 양자통신의 경우 중국의 특허 수가 압도적으로 많으며 그중 양자암호 분야의 특허가 1,692건으로 전체 특허 수 중 상당 부분을 차지한다. 많은 특허를 보유하고 있음에도 불구하고 패밀리 특허 수는 2.9건으로 특허의 질적 수준이 높다. 일본은 조사 국가 중 가장 적은 양자통신 분야의 특허를 가지고 있으나 패밀리 특허 수는 3.3개로 가장 높다. 미국은 중국에 이어 2번째로 특허 수가 많은 국가이며, 패밀리 특허 수도 2.5건으로 준수한 수준을 보인다. 우리나라는 양자암호 분야에서 특허 수가 149개로 전체 특허 중 약 78%를 차지하고 있으나, 패밀리 특허 수는 2.1개로 상대적으로 낮은 수준이다.

양자센서 분야에서는 중국의 특허 수가 가장 많지만, 평균 패밀리 특허 수는 타 국가에 비해 낮은 수준이다. 반면, 미국은 특허 수는 적지만

<표 4-18> 주요국의 양자기술 특허 및 평균 패밀리 특허 수(2014~20년)

분야	한국		일본		미국		중국	
	특허	패밀리 특허	특허	패밀리 특허	특허	패밀리 특허	특허	패밀리 특허
양자통신								
양자암호	149	2.1	57	3.1	140	2.6	1,692	2.9
양자전송	4	2.5	8	4.0	8	1.6	120	1.6
양자네트워크	4	1.2	2	5.5	26	2.7	156	1.5
	157	2.1	67	3.3	174	2.5	1,970	2.7
양자센서								
양자관성센서	6	1.5	16	4.7	11	4.3	99	1.5
양자시간센서	4	1.2	0	0	9	2.7	4	2.2
양자전기장・자기장센서	8	3.8	4	3.2	38	13.6	65	1.6
양자광학센서	1	1.0	0	0	2	2.0	29	1.3
	19	3.1	20	4.5	60	9.9	197	1.5
양자컴퓨터								
양자시뮬레이터	1	1.0	1	7	18	2.1	27	1.3
물리 양자비트	12	2.4	18	3.8	348	3.0	39	1.1
논리 양자비트	4	2.3	2	1.5	61	3.1	4	1.3
양자 알고리즘 및 SW	0	0	3	2.3	30	3.1	17	1.3
	17	2.3	24	3.6	457	3.0	87	1.2
합계	193	-	111	-	691	-	2,252	-

주: 표의 음영은 각 분야의 특허 수 1위 국가를 의미함.
자료: 한국과학기술정보연구원, 『양자기술 과학・기술・산업 분석』, 2022.

양자전기장・자기장센서의 패밀리 특허 수가 13.6건에 달하는 등 우수한 수준의 특허를 보유하고 있다. 우리나라는 양자전기장・자기장센서 8건, 양자관성센서 6건 등 총 19건의 특허를 보유하고 있고, 패밀리 특허는 3.1건으로 나타났다. 양자센서는 주로 연구기관에서 특허를 출원하였으며 한국표준과학연구소(KRISS)가 9건으로 가장 많은 특허를 보유하고 있다. 양자컴퓨터 분야에서는 미국의 양자컴퓨터에 집중된 발전 정책의 효과가 두드러지게 나타나는데, 양자시뮬레이터를 제외한 모든 분야에서 가장 많은 특허 수를 보유하고 있고, 특히 물리 양자비트는 중국의 약 9배 큰 특허를 가지고 있다. 캐나다는 물리 양자비트 관련 특허 수가 52건

으로 미국에 이어 두 번째로 많은 국가인데, 이는 일찍부터 양자컴퓨터 연구에 투자하면서 최초로 양자컴퓨터 상용화에 성공한 경험이 반영된 결과로 판단된다.

<표 4-19>는 주요국의 출원인별 특허 수로 상위 10개 출원인은 미국, 중국 기관이 대다수를 차지하고 있다. 미국은 ICT 관련 대기업인 IBM, Google, Intel이 상위권을 기록하고 있으며, 주로 양자컴퓨터 관련 특허를 보유하고 있다. 중국은 양자암호, 양자센서와 관련된 기관이 상위권에 속해있으며, 민간 중심이 아닌 대학을 중심으로 연구, 개발이 이루어진다는 점에서 특징을 보인다. 우리나라의 출원인을 살펴보자면 개인 출원인으로 파악되는 채령이 30건으로 가장 많은 특허를 보유하고 있으며, 한국과학기술연구원(KIST) 19건, 한국전자통신연구원(ETRI) 17건, SK텔레콤 14건, 한국과학기술원(KAIST) 13건 등의 순서를 보인다.

양자기술 관련 특허가 양자기술의 산업화, 기술의 접목에 영향을 미친다면 논문의 파급력은 원천기술의 발견과 활용에 영향을 미칠 수 있다. <표 4-20>은 주요국의 양자기술 분야 논문 수와 피인용 지수를 나타낸다. 특허의 추이와 마찬가지로 양자통신 분야에서는 중국의 논문 건수가 압도적으로 많고 미국 632건, 영국 394건, 독일 333건, 캐나다 374건, 한국 125건 순서로 나타났다(한국과학기술정보연구원, 2022). 하지만 피인용 건수는 논문 건수와는 양상이 다르게 나타나는데, 막스 플랑크 연구소를 기점으로 기초과학연구 분야에 강점이 있는 독일은 피인용 건수가 무려 16.1건으로 미국, 중국에 비해 논문 건수는 적으나 파급력은 상당히 높다. 한국은 다른 국가에 비해 논문 건수, 피인용 건수가 높은 수준은 아니지만, 양자통신 논문(125건) 중 2020년 한해에 게재된 논문이 약 35%인 점에서 본다면 관련 연구가 활발하게 진행되고 있는 것으로 판단된다. 특히 양자암호는 논문 건수는 적지만 피인용 건수가 높고 세계 주요국 수준의 특허 수를 보유하고 있다는 점에서 일정 부분 상용화 단계로 진입한 것으로 보인다.

양자센서 분야도 마찬가지로 특허와 유사한 양상을 보이는데 양자관성센서, 양자광학센서 등 특정 분야에서는 중국의 논문 건수가 가장 많다.

<표 4-19> 양자기술 출원인별 출원 특허 수

순위	출원인	주요 분야	국가	건수
1	IBM	양자컴퓨터	미국	115
2	Ruban Quantum Tech	양자암호	중국	96
3	University Beijing Posts and Telecommunications	양자암호, 양자네트워크	중국	90
4	QuantumCTek	양자암호	중국	70
5	Google	양자컴퓨터	미국	49
6	State Grid China	양자암호, 양자네트워크 양자자기장・전기장센서	중국	45
7	University Central South	양자암호	중국	44
8	D-wave Systems	양자컴퓨터	캐나다	42
9	Intel	양자컴퓨터	미국	40
10	University Beihang	양자관성센서 양자전송	중국	37
17	채령	양자암호	한국	30
-	한국과학기술연구원(KIST)	양자암호 양자광학센서 양자물리비트	한국	19
-	한국전자통신연구원(ETRI)	양자컴퓨터	한국	17
-	SK텔레콤	양자암호 양자네트워크	한국	14
-	한국과학기술원(KAIST)	양자암호 양자 알고리즘 및 SW	한국	13

자료: 한국과학기술정보연구원, 『양자기술 과학・기술・산업 분석』, 2022, p.109, <표 4-44>.

하지만 피인용 건수는 주요국 중 가장 낮은 수준을 보이며, 선도국가인 미국과는 무려 4배 이상의 차이를 보인다. 독일은 양자시간센서, 양자전기장・자기장센서 등 다양한 분야에서 우수한 논문을 배출하고 있으며, 평균 피인용 건수는 26.9건으로 기초과학 분야에서 강점을 보인다. 우리나라는 양자전기장・자기장센서 관련 논문이 11건, 피인용 건수가 10.7건에 달하지만, 주요국에 비해 저조한 성적이다.

양자컴퓨터 분야는 미국이 1,644건으로 가장 많은 논문을 보유하고 있으며, 피인용 건수도 상당히 높은 수준이다. 특허와 마찬가지로 물리 양자비트와 관련된 논문의 수가 가장 많지만, 양자시뮬레이터, 논리 양자비트

<표 4-20> 주요국의 양자기술 분야 논문 수, 피인용 지수(2016~20년)

분야	한국		독일		미국		중국	
	건수	피인용 건수	건수	피인용 건수	건수	피인용 건수	건수	피인용 건수
양자통신								
양자암호	30	8.1	138	18.6	228	17.9	502	10.1
양자전송	36	5.8	112	14.7	180	13.1	505	10.4
양자네트워크	59	5.3	83	14.0	224	13.3	1,022	7.7
	125	6.2	333	16.1	632	14.9	2,029	9.0
양자센서								
양자관성센서	3	13.3	17	14.2	33	16.9	39	5.9
양자시간센서	1	1.0	16	85.3	38	35.3	34	4.1
양자전기장·자기장센서	11	10.7	80	20.1	82	23.2	72	6.5
양자광학센서	3	3.6	9	8.1	39	11.7	43	4.4
	18	9.4	122	26.9	192	22.2	188	5.5
양자컴퓨터								
양자시뮬레이터	16	23.0	102	24.0	210	23.4	134	9.5
물리 양자비트	32	5.3	157	19.2	595	17.9	460	9.4
논리 양자비트	17	3.2	113	19.4	417	24.0	204	10.5
양자 알고리즘 및 SW	38	4.0	91	26.5	422	19.1	391	8.6
	103	7.2	463	21.7	1,644	20.4	1,189	9.3
합계	246	-	918	-	2,468	-	3,406	-

주: 표의 음영은 각 분야의 논문 수 1위 국가를 의미함.
자료: 한국과학기술정보연구원, 『양자기술 과학·기술·산업 분석』, 2022.

등의 논문 게재 건수도 꾸준히 증가하고 있다. 중국 역시 양자컴퓨터개발에 막대한 예산을 투입한 결과로 논문 게재 수, 특허 수에서 가시적인 성과를 이루고 있으나, 피인용 건수 측면에서 미국, 독일과 2~3배 이상의 격차가 벌어져 있는 상황이다. 우리나라는 타 국가에 비해 양자 알고리즘 및 SW 분야에 비중이 높다는 점이 특징이며, 양자시뮬레이터의 경우 우수한 논문을 다수 게재하였다. 2020년에는 논리 양자비트 10건, 양자 알고리즘 및 SW 18건 등 전년 대비 2배 이상 증가한 46건에 달하는 논문을 게재하면서 양자컴퓨터 분야의 연구가 활발하게 일어나고 있음을 방증한다.

제4절 우리나라 양자기술 산업생태계 분석

산업생태계의 활성화는 양자기술의 발전과 적용, 나아가 상용화를 위해 다양한 주체들이 상호작용하는 일련의 과정을 의미한다. 원천기술을 개발하는 연구기관, 양자기술을 제품에 적용하여 사업화하는 기업, 개발을 지원하는 정부 등이 주요 구성 요인(player)에 해당한다. 앞서 살펴본 바와 같이 주요 선진국은 양자기술 개발을 위한 투자를 지속하고 있으나 국가별 양상은 다르게 나타난다. 예를 들어, 미국은 막대한 규모의 민간 투자와 글로벌 IT 기업들이 양자기술 개발을 주도하고 정부는 이를 지원하는 형태로 진행되고 있지만, 중국은 정부 주도의 정책하에서 연구기관과 대학을 중심으로 개발을 진행하고 있다. 양국은 양자기술 분야에서 1위를 다투는 선도국가로 자리매김하고 있으나 기술 개발의 추진 방식과 지원 방식이 다르며, 이는 각 국가가 활용할 수 있는 요인을 적절히 분배한 결과라고 볼 수 있다.

본 절에서는 양자기술 산업생태계를 구성하는 주요 구성 요인의 역할에 관해 기술하고, 현재 요인들의 현황이 어떠한지 살펴보고자 한다. 먼저 주요 국가에서 시행하고 있는 정부 주도의 양자기술 정책과 우리나라의 정책을 시간대별로 비교하고 우리나라 양자기술 산업생태계에서 정부의 역할은 어떠한지 구체적으로 살펴본다. 이어서 우리나라 양자기술 발전을 이끌어가고 있는 정부출연연구원, 대학교 등 연구기관에 대한 최근 동향을 기술한다. 양자기술의 주요 기술 분야인 양자컴퓨터, 양자센서, 양자통신으로 구분하고 각 분야의 주요 연구기관을 소개한다. 아울러 선도국가에 비해 절대적으로 뒤처져 있는 양자기술 관련 스타트업, 대기업과 양자핵심인력에 대해 파악함으로써 우리나라 양자기술 산업생태계의 주요 요인의 전반적인 동향을 살펴본다.

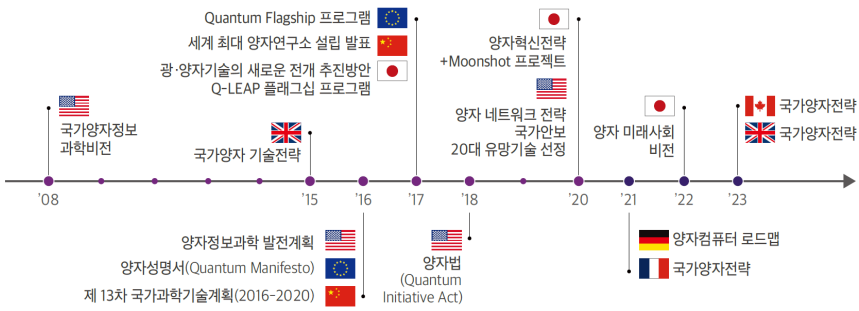
1. 정 부

정부는 자금 지원, 교육, 인력양성, 기술 인프라 구축 및 규제 개선 등 다양한 형태의 정책을 바탕으로 산업생태계 조성을 지원한다. 특히 양자기술은 시장 형성의 초기 단계이므로 산업생태계의 요인 중 정부의 역할은 중요성이 가중된다. 앞서 언급했던 바와 같이 주요 선진국은 양자기술의 범용성과 혁신적인 파괴력이 국가 경쟁력을 좌우할 수 있다는 인식하에 범국가적인 국가전략을 수립하고 있다.

[그림 4-6]은 주요 국가의 시기별 양자기술 정책을 나타내는데, 먼저 미국은 2009년 1월 세계 최초로 '국가양자정보과학비전'을 발표하면서 양자기술 개발의 우선순위를 앞당기는 등 국가기관 중심의 양자기술 고도화를 추진하였다. 미국은 중국과의 기술 패권 경쟁에서 우위를 점하기 위해 2018년 양자법(Quantum Initiative Act)을 제정하였고, 국가양자조정실(The National Quantum Coordination Office)을 설립하는 등 조직적인 지원체계를 확립하였다. 이후 2020년 20대 핵심유망기술 중 하나로 양자기술을 선정하였고, 산업생태계 조성을 위한 노력을 아끼지 않고 있다(과학기술정보통신부, 2022).

미국과 마찬가지로 중국은 양자기술을 패권 경쟁에서 우위를 선점하기 위한 정부 주도의 정책을 활발하게 시행하고 있다. 중국은 2006년 국가

[그림 4-6] 주요국의 양자기술 정책 현황



자료: 과학기술정보통신부, 『양자시대를 여는 우리의 도전과 전략』, 2023. 6. 27, p.9.

중장기 발전계획에서 국가전략 미래기술 4대 분야 중 하나로 양자기술을 포함시켰다(이선제 외, 2023). 13차(2016~20년) 5개년 계획에서는 양자통신과 양자컴퓨터를 중대과학기술프로젝트에 포함시키면서 양자기술 개발을 가속하였다(서행아, 2016). 아울러 양자기술 강국 도약을 위해 2018년부터 5년간 약 1천억 위안(약 13조원)을 투입해 37만㎡에 달하는 세계 최대 규모의 국립양자과학연구소의 설립을 추진하고 있다(한중과학기술협력센터, 2020). 최근 발표한 제14차 5개년 계획(2021~25)에 의하면 전략육성 7대 분야에 양자통신과 양자컴퓨터를 추가하고 연구개발비를 매년 7% 이상 증액할 계획임을 밝혔다(과학기술정보통신부, 2022).

EU는 2016년 산·학·연이 모두 참여한 양자 성명서(Quantum Manifesto)와 함께 양자기술 개발을 위한 단기·중기·장기 로드맵을 발표하였다(유형정, 2022). 이어서 2018년 미래신흥기술(Future and Emerging Technology) 프로그램의 하나로 양자컴퓨터, 양자 시뮬레이션, 양자센싱, 양자통신, 양자 기초과학 분야로 이루어진 Quantum Flagship 프로젝트를 시행하였다. Quantum Flagship 프로그램은 5개의 분야에 대해 2027년까지 10억유로를 투자함으로써 혁신적인 양자기술 연구를 지원하고, 이를 통한 산업 발전 촉진과 국제적인 위상 확보를 목표로 설정하고 있다. 이외에 영국과 독일 등 주요 회원국들은 EU의 프로그램과 별개로 양자기술 전략을 수립하고 있다.[14]

우리나라는 주요 국가에 비해 상대적으로 양자기술 개발 전략의 수립이 늦은 편에 속한다. 과학기술정보통신부는 2014년 양자기술 선도국가 도약의 필요성을 강조하면서 '양자정보통신 중장기 추진전략'을 마련하였다. 동 추진전략에서는 2020년 양자정보통신 글로벌 선도국가 진입을 비전으로 설정하였고 핵심기술 개발, 연구기반 조성, 지속성장 기반 마련 등의 전략을 수립하였다. 추진전략이 발표된 이후 양자통신 중장기 기술

14 영국은 양자기술 허브 구축, 인력양성을 위해 2014년부터 2019년까지 약 4억파운드를 지원하였으며, 독일은 EU와 별개로 양자기술 계획을 수립하고 2020년부터 2025년까지 양자컴퓨팅 분야에 11억유로, 응용 분야에 8.8억유로 등의 투자를 실행, 계획하고 있다(과학기술정보통신부, 2022).

개발사업에 대한 예비타당성조사(2016년)를 실시하는 등 양자기술 개발을 위해 노력하였으나 좌초되면서 예산 확대 기회가 무산되었다.

하지만 2017년 「4차 산업혁명 대비 초연결 지능형 네트워크 추진 전략」이 발표되면서 투자 확대의 계기가 마련되었고, 2019년 양자컴퓨터 부문에 대한 예산 60억원을 배정받으면서 양자기술 개발 전략에 대한 논의가 활발해졌다(과학기술정보통신부, 2022). 이후 2021년 과학기술정보통신부는 「양자기술 연구개발 투자전략」을 발표하였고, 동 추진 전략은 2030년대 양자기술 4대 강국으로의 진입을 목표로 하고 도전적 원천 연구 강화, 전문인력 확보 및 국내외 협력 기반 구축, 특화 연구를 위한 인프라(양자팹) 확충 및 연계・고도화, 양자기술의 활용 및 산업혁신 촉진을 중점전략으로 내세웠다(과학기술정보통신부, 2021).

<표 4-21>은 양자기술 관련 정책의 최근 동향으로 양자기술 정책이 활성화되기 시작한 「양자기술 연구개발 투자전략」 발표 이후의 정책 동향을 다루고 있다. 2021년 이후 우리나라는 양자기술 발전과 관련된 정책을 적극적으로 도입하고 있다. 정부는 연구기관과 학술기관에 집중된 양자기술 연구를 산업적 성과와 연계시킬 수 있도록 산・학・연 협력의 장으로 '미래양자융합포럼'을 창립하였다.[15,16] 또한 12대 국가전략기술 중 하나로 양자기술을 선정하고, 과기부 장관 직속의 양자기술개발지원과를 신설하면서 지원 정책을 구체화하고 있다.

2023년 들어서는 더욱 적극적인 정책 기조를 유지하고 있는데, 2023년 4월 양자기술 선점과 기술 추격을 목적으로 한 도전혁신형 사업에 대한 예비타당성조사에 착수하였으며 사업비는 총 9,960억원에 달한다.[17]

---

15 미국은 양자기술 관련 산업생태계 조성과 국제 표준화 선점을 위해 표준기술연구소(NIST) 주도로 약 140개의 기업이 참가한 양자경제개발연합체(QED-C)를 구성하였고, EU는 13개의 회원국과 38개의 산・학・연으로 구성된 OPEN-QKD를 구성하였다. 이처럼 주요 국가들은 양자산업생태계 조성과 가속화를 위해 산・학・연・관으로 구성된 협의체를 구성하고 있다(과학기술정보통신부, 2021).

16 양자융합포럼은 한국전자통신연구원, 한국과학기술연구원, 한국연구재단 등 12개의 연구기관, 고등과학원, 성균관대, 한국과학기술원 등 64개의 학술기관과 현대자동차, SK하이닉스, 삼성, KT 등 25개의 기업이 참가한 협의체로서 기술 자문, 산업 활용 모델 발굴, 공동연구 등을 실시・지원한다.

<표 4-21> 우리나라 양자기술 관련 정책 동향(2021~23년)

보도자료	보도 일시	주요 내용
미래양자융합 토론회 창립	2021.06	- 연구계・학계의 연구 성과를 산업적 성과로 연계할 수 있도록 산・학・연 협력의 장 마련 - 산업계를 본격적으로 참여함으로써 기술경쟁력 도약을 유도하고, 산업모형을 발굴하여 생태계를 형성할 수 있도록 지원
양자・반도체 등 원천연구개발에 904억원 투자	2022.01	- '26년까지 양자컴퓨팅 연구 인프라를 구축하기 위해 약 490억원을 투입하는 등 '21년에 비해 약 2배 예산 확대
양자전문인력 확보 전략 마련	2022.10	- 국가 경제・안보를 위해 독자적 기술 확보가 시급한 전략 기술별 인력 확보를 위한 정책 마련 추진 - 매년 박사 인력 30명 이상 배출을 위한 양자대학원 구축
12대 국가전략기술 육성방안 발표	2022.10	- 기술패권 경쟁에서 우위 확보를 위한 국가 차원의 전략을 구체화 - 체제 전환에 따른 기술・산업의 공통 핵심・필수기반 기술군으로 양자기술을 선정
양자기술 개발지원과 신설	2022.11	- 컴퓨터, 센서, 통신 등 분야별로 분산되어 있던 양자기술 진흥 업무를 양자기술개발지원과 신설을 통해 통합 - 양자기술 전략로드맵 수립과 연구개발 지원, 공정 인프라 정비 등 추진 계획
국가연구개발사업 예타 착수	2023.04	- 양자기술 추격을 목적으로 하는 도전혁신형 사업 - 사업 기간 '24~'31년, 총사업비 9,960억원
대한민국 양자과학기술 전략	2023.06	- 중장기 미래정책 비전과 전략을 발표하고, 민・관 협력을 통한 양자 분야 육성 의지 표명 - 2035년까지 기술 수준 85%, 세계 시장 점유율 10%, 양자 핵심 인력 2,500명 육성 계획
양자육성법 통과	2023.10	- 법은 양자기술 집중육성을 위한 종합계획 수립, 기술 개발 및 상용화 촉진, 인력양성, 연구 거점・클러스터 구축 등 종합적인 육성 근거를 포함
양자 전문인력을 위한 2번째 양자대학원 개원	2023.11	- 한국과학기술원 주관 양자대학원은 앞으로 9년간 석박사 대상 양자 특화 전문 교육과정을 운영 - 경북대, 부산대 등 지역거점 국립대학과 LG사이언스파크, 큐노바, KRISS, ETRI, KISTI 등 산학연 협력

자료: 과학기술정보통신부 보도자료를 바탕으로 저자 작성.

아울러 6월 개최된 퀀텀코리아 2023에서 「대한민국 양자과학기술 전략」을 발표하면서 2035년까지의 단계별 발전 전략을 제시하였고, 마침내 10

17 2023년 12월 12일 과기부는 양자기술과 같은 도전적이며, 혁신적인 국가전략기술의 발전이 지체되는 일이 없도록 평가 제도를 개편하여 '24년 초 발표할 예정이다.

월에 이르러 「양자과학기술 및 양자산업 육성에 관한 법률」이 국회 본회의를 통과하였다. 2018년 양자법을 제정한 미국에 비해 다소 뒤처져 있지만 양자기술의 산업 도약의 제도적 기반이 마련되었다는 점에서 의의가 있다.

2. 연구기관

우리나라는 출연연과 대학교 등의 연구기관이 협업하며 양자기술 개발에 앞장서고 있다. 양자기술 산업생태계에서 연구기관의 중요성은 새로운 기술 개발과 기술의 파급력에 있다. <표 4-22>는 양자컴퓨터 연구개발에 참여하고 있는 연구기관의 동향을 나타낸다. 먼저 양자컴퓨터 분야는 한국표준과학연구원(KRISS), 한국과학기술연구원(KIST) 등의 연구원과 한국과학기술원(KAIST), 서울대학교 등의 고등교육기관이 주요 플레이어로 참여하고 있으며, 하드웨어/소프트웨어, 큐비트 구현 방식(초전도, 이온트랩, 리드버그) 등 다방면으로 연구를 진행 중이다.

<표 4-22> 주요 기술 분야별 연구기관 현황(양자컴퓨터)

기관명	주요 내용
한국표준과학연구원 (KRISS)	- 대규모 양자소재 시뮬레이션을 위한 중성원자 기반 양자 시뮬레이터 원천기술 개발 중
한국과학기술원(KIST)	- 상온, 대기압 구동 NV센터 2큐비트 양자컴퓨터 개발
기초과학연구원(BIS)	- 세계 최초로 전자스핀 큐비트 개발
한국과학기술정보연구원 (KISTI)	- 2023년 9월 세계적인 양자컴퓨팅 기업인 Xanadu와 양자컴퓨팅 핵심기술 공동개발을 위한 MOU 체결[18]
한국과학기술원(KAIST)	- 20큐비트급 리드버그 양자컴퓨터 개발(2022년) - 9년간 박사급 인력 180명을 양성할 계획(양자대학원)
서울대학교	- 높은 오류율에 내성을 가지는 양자컴퓨팅 방법 고안
성균관대학교	- 양자정보연구지원센터를 통해 국내 양자컴퓨팅 연구개발 지원 및 양자팹, 양자클라우드 서비스 제공

자료: 한국정보통신기술협회, 「ICT 표준화 전략맵」, 2023; 과학기술정보통신부, 『양자기술백서』(2022), 한중기술협력센터, 「한·중 양자정보기술 동향 비교」, 2022.

18 https://www.kisti.re.kr/promote/post/news/6209?cPage=3&t=1702617752792(접속일: 2023. 11. 6)

한국표준과학연구원은 '초전도 양자컴퓨팅 시스템연구단'을 운영하고 있으며 초전도 큐비트 시스템 구축 연구와 고충실도 양자게이트를 구현하기 위한 연구를 진행하고 있다. 표준연은 올해 6월 정부가 착수한 '50 큐비트 급 초전도 방식 양자컴퓨터 구축 프로젝트'의 주관 기관으로 2026년까지 미국·중국에 이은 3번째 50큐비트 양자컴퓨터 개발을 목표로 하고 있다.[19] 한국과학기술연구원은 2012년 출연연 최초로 양자 전문 연구조직인 양자정보연구단을 출범하였고, 중국에 이어 세계 두 번째로 상온, 대기압에서 구동이 가능한 2큐비트 양자컴퓨터를 개발하였다.

기초과학연구원(BIS)은 2023년 10월 세계 최초로 전자스핀 큐비트를 개발하였는데, 전자스핀 큐비트의 구현 방식은 오류나 결함 없이 수백 개의 큐비트를 제어할 수 있는 가능성을 제시하였다는 점에서 학계의 인정을 받아 권위 있는 국제 학술지에 게재되었다. 국내 리드버그 양자컴퓨팅 연구는 주로 KAIST 물리학과에서 수행하고 있으며, 2022년에는 20 큐비트 급 리드버그 양자컴퓨터를 개발하면서 계산과학의 난제를 풀어내는 성과를 보였다.[20] 성균관대학교는 초전도, 이온트랩 등의 양자컴퓨터 연구는 물론 '양자정보연구지원센터'를 통해 국내 양자컴퓨팅 연구개발을 지원하고 있다. 양자정보연구지원센터는 양자소자에 특화된 양자팹을 구축하여 전문성이 높은 양자소자공정을 지원하고, 연구와 교육 목적의 양자컴퓨터 클라우드 서비스를 지원한다.[21,22]

<표 4-23>은 양자센서 분야의 연구기관별 연구개발 현황을 나타낸다. 양자센서 분야에서도 표준연의 연구개발은 활발하다. 표준연은 「양자센서 핵심 원천기술 개발사업」을 통해 이동성을 갖춘 소형 양자중력센서 개발을 위한 연구를 수행하였다. 또한 30년 이상 원자시계 개발 연구를 수행하고 있으며, 20억 년에 단 1초의 오차가 발생하는 이터븀(ytterbium)

---

19 https://zdnet.co.kr/view/?no=20230903023029(접속일: 2023. 10. 27).

20 https://www.aitimes.com/news/articleView.html?idxno=145321(접속일: 2023. 10. 27).

21 https://qcenter.kr/sub/sub01_02.php(접속일: 2023. 10. 27).

22 양자컴퓨터 클라우드 서비스는 전문가, 대학원생, 산업체 등 다양한 주체들에게 개방되어 있으며, 양자컴퓨터의 선두주자인 IonQ(이온트랩), IBM(초전도), D-wave systems(어닐러)의 클라우드 서비스를 이용할 수 있다.

<표 4-23> 주요 기술 분야별 연구기관 현황(양자센서)

기관명	주요 내용
한국표준과학연구원 (KRISS)	- 소형 양자중력센서 개발을 위한 공동 연구 수행 - 이터븀 원자광시계(KRISS-Yb1) 개발 - 뇌, 심장질환 검사시스템(SQUID) 기업(AMCG)에 기술이전
한국과학기술연구원 (KIST)	- 2021년 고전 센서의 한계를 뛰어넘는 양자센서 구현
국방과학연구소(ADD)	- 회전 운동을 측정하는 원자 스핀 자이로스코프 독자 개발 - 양자레이더 개발, 원격 물체 탐지를 위한 양자조명 연구, 광자 파장 변환 연구 등 진행
한국전자통신연구원 (ETRI)	- 자기장 통신용 자기장 센서 개발
한국과학기술원(KAIST)	- KRISS와 공동으로 원자시계, 초소형 광주파수 합성기 개발
부산대학교	- ADD와 공동으로 양자관성센서 기술 개발 - 원자 기반 고주파 전기장 측정 기술 개발
고려대학교	- 민감도를 극대화한 양자자기장센서를 개발, LG전자와의 협업을 통해 산업·의료 분야에 활용할 수 있는 연구를 진행

자료: 한국정보통신기술협회, 「ICT 표준화 전략맵」 (2023), 과학기술정보통신부, 『양자기술백서』 (2022), 한중기술협력센터, 「한·중 양자정보기술 동향 비교」 (2022).

광시계를 최초로 개발하면서 세계 협정시 생성에 이바지하였다. 또한 표준연은 뇌, 심장질환 진단을 위한 양자자기장센서를 기술이전 계약으로 민간기업에 이전하는 등 높은 수준의 기술을 보유하고 있다.[23]

국방과학연구소는 양자센서가 항공기, 선박 운용 등 국방 분야에서의 활용 가능성이 높다는 점을 인식해 연구개발에 힘쓰고 있다. 국방과학연구소는 회전 운동을 측정하는 원자 스핀 자이로스코프를 독자적으로 개발하는 데 성공하였는데, 원자 스핀 자이로스코프는 기술의 성숙도가 높아질수록 항법장치의 크기, 소모 전력 등의 비용을 획기적으로 줄일 수 있다는 장점이 있다. 이외에 한국전자통신연구원, 고려대학교 등의 기관에서 기초연구부터 상용화까지 다양한 수준으로 연구되고 있다.

우리나라의 양자통신은 연구기관을 중심으로 개발되는 타 분야와 특징을 달리한다. 한국전자통신연구원, 한국과학기술연구원 등 연구기관과 SKT, KT, LG유플러스 등 주요 통신사가 적극적으로 참여하고 있다.

23 https://www.newspim.com/news/view/20210331001290(접속일: 2023. 10. 27)

<표 4-24> 주요 기술 분야별 연구기관 현황(양자통신)

기관명	주요 내용
한국전자통신연구원 (ETRI)	- 국내 최초 무선 QKD 시연 - 유무선 QKD 요소기술 개발
한국과학기술연구원 (KIST)	- 유선 QKD 네트워크 시스템 기술을 중심으로 프로토콜 및 핵심 부품 기술 확보
한국과학기술정보연구원 (KISTI)	- SKT, KT와 공동으로 양자암호 네트워크 통합제어 소프트웨어(Q-SDN*) 개발 *Quantum-Software Defined Network
고려대학교	- 양자인터넷 요소 기술 개발과 인력양성을 위한 초신뢰양자인터넷센터 운영

자료: 한국정보통신기술협회, 「ICT 표준화 전략맵」, 2023; 과학기술정보통신부, 『양자기술백서』, 2022; 한중기술협력센터, 「한·중 양자정보기술 동향 비교」, 2022.

한국전자통신연구원은 2005년 25㎞ 유선 QKD 시스템을 시연하고 한국과학기술연구원과 공동으로 요소 기술을 개발하고 있다. 또한 2018년에는 국내 최초로 자체 부품을 활용하여 약 300m 무선 QKD를 시험을 선보이면서 국내 기술로 무선 QKD의 가능성을 증명하였다. 국내 1호 양자대학원을 보유하고 있는 고려대학교는 '초신뢰양자인터넷센터'를 운영하고 있다. 센터는 초신뢰 양자인터넷 요소 기술 개발과 인력양성을 목표로 설정하고 KIST, ETRI 등의 연구기관뿐만 아니라 큐노바, 이와이엘 등 양자기술 관련 기업과 협력하고 있다.

앞서 살펴본 연구기관의 현황을 살펴보면 분야별로 차이는 있으나, 선도 국가에 뒤처져 있는 경우가 많다. 양자컴퓨터는 아직 기초 연구 수준에 머물러 있으며 미국의 IBM, Google과는 약 10년 이상의 기술격차가 벌어져 있는 상황이다. 반면에 QKD 프로토콜, QKD 네트워크 등 양자통신 분야는 제품화가 가능한 시점이고, 나아가 사업화까지도 근접해 있는 상황이다(한국정보통신기술협회, 2023).

3. 기 업

기업의 상품 및 서비스 생산 활동은 산업생태계를 활성화하고 나아가

경제의 역동적인 성장을 견인한다는 점에서 핵심 역할을 차지한다. 하지만 현재 우리나라 양자기술 산업생태계에서 기업이 차지하는 비중은 크지 않다. 미국은 양자기술 관련 벤처기업의 수가 약 350개에 달하지만, 우리나라는 2021년에 들어서야 양자컴퓨팅 1호 스타트업이 설립되었다. 본문에서는 양자기술 관련 기업에 대해 살펴보고, 기업들의 최근 발전 방향은 어떠한지 기술하고자 한다. 구체적으로 주요 대기업의 투자 동향과 연구 협력 현황, 국내 설립 스타트업의 연구개발 현황 및 사업화 수준 등을 파악하고자 한다.

삼성전자는 2019년 9월 미국의 양자컴퓨팅 소프트웨어 개발 스타트업인 알리로 테크놀로지스에 270만달러를 투자하고, 같은 해 10월 아랍에미리트 무바달라캐피탈과 함께 IonQ에 5,500만달러 규모의 공동투자를 단행했다.[24] 이후 이스라엘의 스타트업인 퀀텀머신스(5,000만달러 공동투자, 2021년)와 클래시큐(330만달러, 2022년)에 투자하는 등 신기술 확보와 초기시장 진입을 시도하고 있다. 또한 삼성종합기술원(SAIT)을 통해 IBM과의 양자컴퓨터 관련 협력 연구를 진행하고, 「삼성미래기술육성사업」을 통해 기초과학 및 반도체 관련 연구를 지원하여 우수한 양자기술 인력과 협력할 수 있는 발판을 마련하고 있다.

현대자동차는 IonQ와의 협력을 통해 전기차 배터리의 효율 개선, 양자컴퓨팅 기반 자율 주행 자동차 개발 등의 연구를 진행하고 있으며, IBM 퀀텀 네트워크에 가입하는 등의 신기술 개발을 위해 노력하고 있다.[25] 또한 현대자동차는 2023년부터 양자 알고리즘 개발과 검증을 위한 해외 인재를 상시 채용하고 있는 것으로 보아 미래 모빌리티 분야의 선두 주자로 도약하기 위한 수단으로 양자컴퓨터를 적극 활용하려는 것으로 보인다.[26]

앞서 살펴본 바와 같이 대기업은 유용할 수 있는 자금을 바탕으로 유

---

24 https://www.etoday.co.kr/news/view/2060231(접속일: 2023. 10. 27)

25 IBM 퀀텀 네트워크는 IBM이 양자컴퓨팅 발전을 위해 결성한 협의체로 전 세계 기업, 연구소, 학술기관 등 200개 이상의 참여하고 있다. 우리나라의 경우 LG전자, 현대자동차, 한림제약, 성균관대 등이 참여하고 있다.

26 https://sedaily.com/NewsView/29N7BG0M4U(접속일: 2023. 11. 5)

망한 기업에 투자하거나 연구 협력을 위주로 양자컴퓨터를 개발하고 있다. 반면, 스타트업은 기술력을 바탕으로 투자를 유치하여 연구개발을 지속하는데, 대표적인 양자컴퓨터 스타트업으로 큐노바와 SDT를 예로 들 수 있다.[27] 큐노바는 KAIST 교원창업프로그램으로 설립된 국내 1호 양자컴퓨팅 소프트웨어 회사이며, 일반 소프트웨어 개발자와 과학자들이 쉽게 접근할 수 있도록 클라우드 기반의 양자 소프트웨어 기술을 개발하고 있다. 양자 소프트웨어가 상용화된다면 고전컴퓨터로 해결하기 어려운 신약 개발, AI 학습 등의 문제를 쉽게 해결할 수 있을 것으로 기대된다. 큐노바는 자체 소프트웨어 개발은 물론 타 기업과의 협업도 지속하고 있다. 최근 LG유플러스와 큐노바는 양자컴퓨터를 활용해 6G 저궤도 위성 네트워크 최적화 연구에 성공하는 등의 성과를 보여주고 있다.[28]

양자센서 기업은 양자컴퓨터와 양자통신에 비해 많지 않고 대표적으로 SKT, ㈜씨디바이스, ㈜퀀텀센싱, AMCG 등이 있다. 먼저 SKT는 양자통신뿐만 아니라 양자센서까지 사업을 확장하는 추세다. SKT는 2022년 9월 국내에서 최초로 양자센싱 시스템을 실증하였는데, 대형 가스 시설물을 실시간으로 감시할 수 있는 양자 기반의 가스센싱 시스템을 ㈜퀀텀센싱, 보령 LNG 터미널과 함께 협력하여 실증한다. 또한 SKT는 2023년 부산항만공사와 협업하여 양자 라이다(LiDAR)를 활용한 항만 보안관제 실증을 완료하였다. SKT가 개발한 양자 라이다는 빛을 광자 수준에서 인식하기 때문에 어두운 밤에도 정확하게 사물을 인식할 수 있다는 장점이 있다. 가시거리가 좋지 않은 상황에서 양자 라이다를 이용해 측정한 결과 기존 제품 대비 약 7배 이상 탐지거리가 늘어나는 등 우수한 성능을 보였다.[29]

㈜씨디바이스는 양자기술을 활용해 이미지 센서를 제작하는 벤처기업으로 빛의 투과와 반사로 발생하는 광자의 미세한 변화를 측정해 채혈 없이 혈당을 측정할 수 있는 측정기를 개발하였다.[30] ㈜퀀텀센싱은 양자

---

27 큐노바는 2023년 6월 약 50억원 규모의 프리A 투자를 유치하였다.

28 https://www.koreaittimes.com/news/articleView.html?idxno=125309(접속일: 2023. 12. 6).

29 https://www.etnews.com/20231031000029(접속일: 2023. 12. 15).

<표 4-25> 양자암호통신 분야의 주요 기업 현황

기업명	현 황
SKT	- 양자기술연구소 개소(2011년) - 세계 최초로 유선 QKD를 상용화 LTE망에 적용(2016년) - 스위스 ID Quantique 인수(2018년) - 삼성전자와 협업으로 갤럭시 퀀텀시리즈 개발(2021년) - 양자암호칩개발(비트리, 케이씨에스 등, 2023년)
KT[31]	- QKD 장비 개발(우리넷, 코위버에 QKD 기술이전, 2018년)) - 1km 무선 양자통신 시험 성공(2022년) - 기업간거래(B2B) 양자암호 전용회선 서비스 출시 - 2024년까지 무선 양자통신 거리 10km 이상 확장 계획
LG유플러스	- U+양자내성암호 전용회선 서비스 출시(2022년) - 양자암호 산업용 유심칩 상용화 (아이씨티케이홀딩스, 2023년)
이와이엘	- 양자난수를 활용한 도청방지 솔루션 최초 상용화(2021년) - 국정원 암호모듈 검증(KCMVP) 획득(2023년)
노르마	- SKT와 양자내성암호 공동연구 협약(2022년) - 양자암호 업체 최초로 상장을 위한 예비심사 청구(2023년)
SDT	- 양자암호통신장치 기술 이전 및 사업화 협력(KIST, 2022년) - 큐비트 측정 장치의 국산화를 위한 연구개발

자료: 한국정보통신기술협회, 「ICT 표준화 전략맵」, 2023; 과학기술정보통신부, 『양자기술백서』, 2022.

기술 기반 가스센서 기업으로, 광자 에너지를 활용하여 가스의 농도를 측정할 수 있는 기술을 개발하였다. 최근에는 부산외대와 상호 업무협약을 맺으면서 양자기술 분야 인재 양성을 위한 협력, 공동 연구, R&D 등 양자기술 발전을 위한 다양한 활동에 참여하게 됐다.[32] AMCG는 표준연으로부터 이전받은 양자자기장센서 기술을 활용하여 뇌, 심장질환을 조기에 발견할 수 있는 심자도시스템을 개발하고 있다. AMCG는 2021년 시리즈A로 100억원의 투자를 유치하였고, 2023년 6월 정확도 평가 임상시험에 돌입하였다. 만약 심자도시스템을 활용하게 된다면 방사선, 조영제를 사용하지 않고 생체자기장의 변화를 측정하기 때문에 확인할 수 없었던 질병에 대한 예측이 가능해질 것으로 평가되고 있다.[33]

---

30 https://www.hankyung.com/article/2023113055901(접속일: 2023. 12. 15).

31 https://news.nate.com/view/20231012n22125?mid=n0600(접속일: 2023. 12. 7).

32 https://m.ekn.kr/view.php?key=20231128010008234(접속일: 2023. 12. 15).

33 http://m.biospectator.com/view/news_view.php?varAtcId=15129 (접속일: 2023. 12. 15)

양자암호통신 분야에서는 통신 3사와 협력업체의 연구개발이 활발하다. SKT는 2011년 약 500억원을 투입해 국내 최초 양자기술연구소인 '퀀텀테크랩'을 설립하면서 양자기술 연구를 지속해 왔다. 2018년에는 세계 최고 수준의 양자통신 기업인 ID Quantique를 인수하는 등 원천기술을 확보하면서 다양한 실증사례를 만들었다. 또한 SKT는 비트리, 케이씨에스 등 국내 암호 분야의 강소기업들과 협업하여 양자암호칩을 개발하면서 글로벌 양자보안 시장을 공략하고 있다.[34] 최근 SKT는 양자키분배, 양자난수생성기를 바탕으로 고도화된 양자암호통신 기술을 바탕으로 구독형 양자암호통신 서비스(QKD as a Service: QaaS)를 개시하였다. 공공, 의료, 금융 등 높은 보안성이 요구되는 기업을 중심으로 QaaS를 제공하고, 향후 양자내성암호 기술을 도입한 전용회선을 출시할 예정이다.[35] KT는 2017년 양자기술 연구를 시작하고 불과 1년 만에 자체 프로토콜 개발에 성공하였다. 또한 국내 중소기업(우리넷, 코위버 등)에 기술을 이전하여 관련 장비를 제작하는 등 SKT와 함께 국내 유선 QKD 상용화를 이끌고 있다(한국정보통신기술협회, 2023).

대기업 이외에 주요 스타트업으로는 SDT가 있는데, SDT는 2017년 설립된 기업으로 양자기술 연구에 활용되는 원자 단위의 계측·제어 장비를 개발하는 양자표준기술 기업이다. SDT는 국내 최초로 한국과학기술연구원과 양자암호통신장치 기술이전 및 사업화 협약을 진행하였고, 높은 기술력을 인정받아 약 270억원의 투자를 유치하였다. SDT는 1나노초 이하에서 얽혀있는 광자의 동시 상관관계를 측정할 수 있는 장비(CCU)를 상용화하였고, 2023년에는 양자컴퓨터 개발을 보조할 수 있는 큐비트 컨트롤러를 개발하는 등 핵심기술 장비들의 국산화를 위해 노력하고 있다. SDT는 양자기술 응용력과 그간의 성과를 앞세워 2025년 상장을 목표로 기술특례 상장을 준비하고 있다.[36]

앞서 살펴본 국내 대기업과 스타트업들은 양자기술 개발을 위한 투자

---

34 https://news.sktelecom.com/178465(접속일: 2023. 12. 7).

35 https://www.aitimes.com/news/articleView.html?idxno=154670(접속일: 2023. 12. 7).

36 https://www.aitimes.com/news/articleView.html?idxno=154588(접속일: 2023. 11. 9).

를 지속하고 있다. 국내 독자 기술개발을 위한 노력뿐만 아니라 글로벌 선도기업과의 협력을 통해 기술을 발전시키고 있다. 하지만 기업들이 본격적인 연구개발을 시작한 시점이 글로벌 IT 기업에 비해 뒤처져 있다는 점, 양자법과 같은 양자산업 발전의 발판이 마련된 지 얼마 되지 않았다는 점 등 위험 요소가 다수 존재한다.

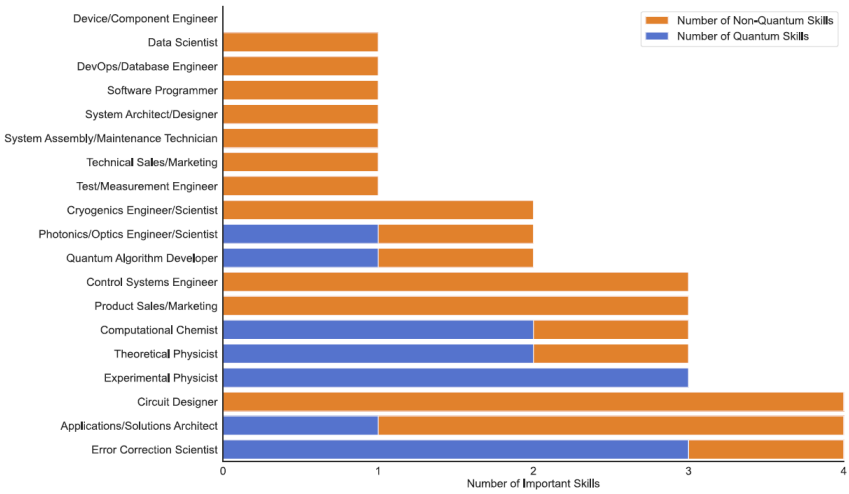
4. 양자핵심인력

양자핵심인력은 양자기술 분야의 신기술을 연구하고 장치를 상용화하는 등 양자기술 활성화에 필요한 인력을 의미한다. 바꿔 말하자면 양자핵심인력은 양자역학에 대한 기초과학적 지식을 갖춘 인력 혹은 양자컴퓨터와 같은 하드웨어 개발을 위한 공학적 지식을 갖춘 인력 등 광범위한 범위의 지식 분야를 포괄한다. Fox *et al.*(2020)의 연구에서 시행한 설문조사에 의하면 양자 기업의 전체 근로자 중 공학자로 종사하는 근로자는 95%를 차지하고, 그중 전기공학자는 무려 71%를 차지했다.[37] 연구 결과는 양자기술 관련 기업과 산업이 발전하기 위해서는 기초과학뿐만 아니라 전기공학, 컴퓨터공학, 기계공학 등 숙련된 인력의 가용성이 중요한 요인임을 강조하고 있다(과학기술정보통신부, 2022).

한편, Hughes *et al.*(2022)의 연구에서는 AT&T, IBM, Google 등이 속해있는 미국의 양자기술 협의체(QED-C)의 회원 기업 51개를 대상으로 설문조사를 실시하여 양자기술 기업의 인력 현황을 살펴보았다. [그림 4-7]은 양자기술 관련 직업 유형별로 필요로 하는 양자기술/비양자기술의 비중을 나타내는데, 일부 분야를 제외하고는 모든 인력이 반드시 양자 관련 기술을 보유하고 있는 전문가로 구성되지 않는다는 것을 알 수 있다. 또한 [그림 4-8]의 양자기술 세부 분야별 필요 학위 비중을 보면 이론에 치중된 오류율 정정 분야를 제외하고는 학사, 석사의 비중도 상당

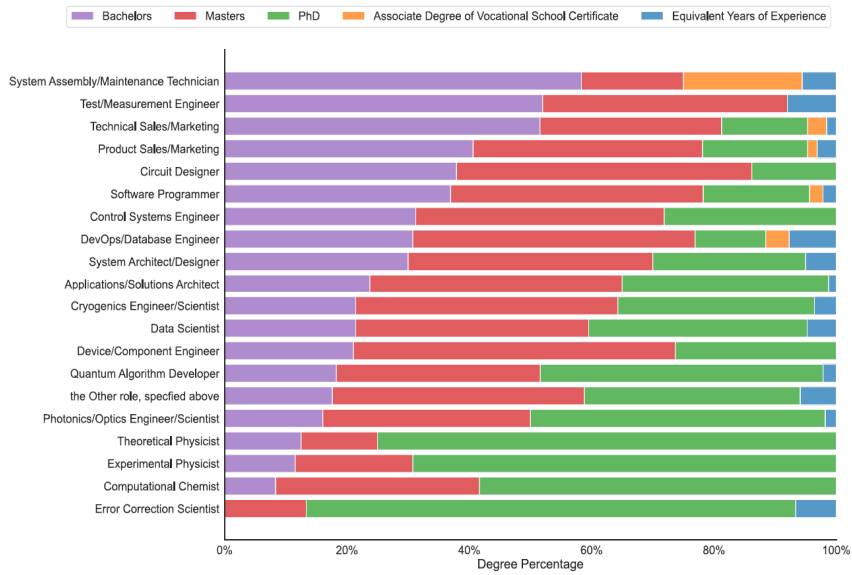
37 Fox *et al.*(2020)의 연구에서는 각 기업에 종사하고 있는 근로자의 직책을 기준으로 직업 유형을 분류하였고 공학자(95%), 실험과학자(86%), 이론과학자(57%) 등의 비중을 보였다.

[그림 4-7] 양자기술 관련 직업 유형별 양자/비양자 기술 비중



주: 설문조사는 QED-C에 속해있는 기업 중 51개 기업을 대상으로 시행함.
자료: Hughes *et al.*, "Assessing the Needs of the Quantum Industry," 2022.

[그림 4-8] 양자기술 세부 분야별 필요 학위 분포



주: 설문조사는 QED-C에 속해있는 기업 중 51개 기업을 대상으로 시행함.
자료: Hughes *et al.*, "Assessing the Needs of the Quantum Industry," 2022.

하다는 것을 알 수 있다. 따라서 양자기술 전문인력은 양자역학 관련 기초과학 연구에 능통한 박사급 인력도 중요하지만, 다양한 분야의 전공자와 학위자가 양자산업 활성화를 위해 모두 필요한 상황이다.

주요 국가들은 양자기술 확장을 위해 필요한 다양한 분야의 노동력을 창출하기 위한 인력양성 전략을 발표하고 있다. 미국은 양자기술 발전 전략을 발표한 이후 대규모의 투자를 진행하여 인력양성에 힘쓰고 있으나, 수요에 비해 인력 공급이 부족한 상황이며 이러한 양자인력 공급 부족 현상은 일정 기간 지속될 것으로 전망되고 있다(과학기술정보통신부, 2022). 우리나라 역시 양자핵심인력을 육성하기 위해 해외연수 지원 프로그램, 양자정보과학 융합전문인력 양성센터 지정, 양자전문대학원(고려대학교, KAIST) 설립 등 다양한 정책을 시행하고 있다.

<표 4-26>은 국내 산・학・연 양자기술 전문인력 현황조사 결과를 나타낸다. 2022년 국내 양자기술 인력은 산업계 256명, 연구계 284명, 학계 511명으로 총 1,051명으로 집계된다. 양자핵심인력인 박사급 인력은 총 384명으로 연구계(189명), 학계(123명), 산업계(72명) 순으로 분포하고 있다.[38] 산업계에서 학사, 석사 학위를 보유하고 있는 인력의 약 65%는 양자통신 분야에 종사하고 있으며, 양자컴퓨터 분야는 약 7% 수준으로 타 분야에 비해 전문성이 요구되는 분야로 판단된다. 연구계 종사자들은 학위별 분포가 고르게 나타나고 양자센서 분야의 인력이 가장 많다. 박사 학위자들은 앞서 살펴본 바와 같이 아직 연구기관에 종사하는 인력이 많다. 다만, 박사 학위자들은 특정 분야에 편중되지 않고 분야별로 고루 분포해 있다. 이는 산업계와 연구계에서 공통으로 나타나는 특징이다.

국내 양자기술 관련 산업계와 연구계 기관을 대상으로 향후 인력 수요를 조사한 결과, 2033년까지 약 2,600명의 인력이 필요할 것으로 전망하였다. 또한 핵심 인력인 박사학위자는 약 1,000명 이상이 필요한데, 이는 현재 박사인력 규모의 약 3배 수준이다. 추후 양자기술의 발달과 함께

38 2023년 최신화된 국내 양자기술 전문인력 현황을 보면, 산업계는 266명(+10명), 연구계는 273명(-11명)으로 눈에 띄는 증가세를 보이진 않는다(양자산업생태계지원센터, 접속일: 2023. 12. 11).

<표 4-26> 2022년 국내 양자기술 인력 현황

구분	산업계	연구계	학계[1)]	합계
전체	256	284	511	1,051
학사	95	34	0	129
양자컴퓨터	0	10	-	-
양자센서	25	17	-	-
양자통신	70	7	-	-
석사	89	61	388	538
양자컴퓨터	13	16	-	-
양자센서	27	30	-	-
양자통신	49	15	-	-
박사[2)]	72	189	123	384
양자컴퓨터	22	55	-	-
양자센서	21	75	-	-
양자통신	29	62	-	-

주: 1) 학계 관련 인력 현황은 2022년 한국연구재단 현황조사 결과를 인용.
2) 박사급 인력은 박사후연구원, 교수를 포함.
자료: 과학기술정보통신부, 『양자기술백서』, 2022.

관련 기업이 증가한다고 가정한다면, 인력 수요는 더욱 증가할 것으로 예상된다. 정부는 이러한 산업, 연구계의 수요에 맞춰 2035년까지 양자대학원을 확충하고 양자 과학기술 이론—실습—프로젝트 제공, 양자 엔지니어 성장 경로 제시 등 다방면으로 양자기술 관련 인력양성을 지원할 계획이다. 정부는 2035년까지 양자기술 관련 제조, 활용 산업 종사자 10,000명, 양자핵심인력 2,500명 집중 양성을 목표로 하고 있다. 하지만 고급 인력의 해외 유출, 타 산업군으로의 이직 등 해결해야 할 문제가 산재해 있는 상황이다.[39]

39 https://biz.chosun.com/science-chosun/science/2022/12/08/DZQPRYJFNFAU5EFQIDDRWTIEQE/ (접속일: 2023. 12. 11)

제5절 양자기술 산업생태계 활성화를 위한 정책 과제

양자기술은 미래의 게임 체인저로 제조업, 금융, 의료 등 다양한 산업에 지대한 영향을 미칠 것으로 전망되고 있다. 최근 미국은 양자컴퓨팅 관련 대중(對中) 투자를 제한하는 등 중국에 대한 견제를 지속하고 있고, 중국은 2018년부터 약 1,000억위안을 투자한 세계 최대 규모의 양자기술 연구소 완공이 얼마 남지 않은 상황이다. 이처럼 미국과 중국을 위시한 강대국들의 기술패권 경쟁의 과열은 양자기술의 중요성을 더욱 부각하고 있다. 세계 양자기술 산업은 아직 초기 단계이므로 시장 점유를 위한 전략 수립과 공격적인 투자가 필요한 시점인 것은 분명한 사실이다.

우리나라 역시 양자기술을 미래 12대 전략기술로 지정하는 등 양자산업 활성화를 위한 장단기 전략을 수립하고 있다. 하지만 현재 우리나라의 양자기술 수준은 세부 분야별 차이는 있으나 선도국가 대비 5년에서 많게는 10년까지 기술격차가 벌어져 있다. 특히 양자대학원, 양자팹 등 인프라의 부족과 대기업, 벤처기업 등 민간 부문의 저조한 참여, 우수인력의 국내외 유출 등 양자기술 발전을 위해 해결해야 할 선결문제가 다수 남아 있는 상황이다.

본 절의 주요 목적은 양자기술 산업생태계 활성화를 위한 정책적 과제를 제시하는 데 있다. 구체적으로 앞서 살펴본 정부, 연구기관, 기업, 양자핵심인력으로 대표되는 양자기술 산업생태계 요인의 활성화를 위한 정책에 대한 개선점을 제시하고자 한다. 또한 연구기관과 스타트업 등의 양자기술 전문가와의 면담을 통해 다양한 시각에서 정책 수요 의견을 취합하고 현재 양자기술 발전을 저해하는 요인과 이에 대한 개선점은 무엇인지 살펴보고자 한다. 앞서 살펴본 현황과 면담, 포럼 등으로부터 도출되는 시사점을 정리하면 다음과 같다.

첫째, 양자기술 발전을 위해 가용 자원을 효과적으로 분배할 필요가 있다. 2024년 예산안을 살펴보면 인공지능, 첨단바이오, 양자 등 차세대 핵심전략기술에 대한 R&D 투자를 강화하기 위해 전년 대비 2,947억원 증액한 4조 9,774억원을 편성하였다. 양자기술 분야는 1,252억원이 배정

되었으며, 이는 전년 대비 172억원 증가한 규모이다. 또한 양자암호와 밀접한 관련이 있는 사이버보안 분야의 예산도 2023년에 비해 증액된 1,892억원이 배정되었다. 양자기술 관련 예산의 전년 대비 증가율은 약 31.4%로 가장 높은 수준이지만, 인공지능(7,685억원), 첨단바이오(9,750억원)에 배정된 예산에 비하면 규모가 가장 작았다(국회예산정책처, 2023). 물론 양자기술의 중요성을 인식하여 예산은 큰 폭으로 증액되고 있으나, 양자기술 연구를 위한 시설 구축에만 수백억 이상이 소요되는 상황에서 예산이 효과적으로 사용될지는 미지수이다.

한편, 양자기술 R&D 항목의 예산은 증가하였으나 양자기술 연구개발을 선도하고 있는 연구기관들의 예산이 큰 폭으로 감소하였다. 주요 양자기술 관련 출연연인 KIST, ETRI, KISTI, KRISS의 예산안을 살펴보면 2023년 주요사업비는 약 3,130억원 수준이었으나, 2024년에는 25.1% 감소한 2,350억이 편성되었다. 연구기관의 사업비 감축이 국내 양자기술 발전에 타격을 주지 않을 것이라고 단언할 수 없다. 하지만 예산을 무한정 늘릴 수 없는 것이 현실이며, 이미 우리나라의 GDP 대비 연구개발 예산 비중은 주요 선진국에 비해 높은 상황이다.[40] 따라서 주어진 예산에서 비용효율적으로 예산을 분배, 활용하는 것이 현실적인 대안이 될 것이다.

양자기술 연구를 위한 주요 인프라 중 하나로 클린룸(양자팹)을 예로 들 수 있다. 하지만 클린룸의 신축은 수백억에서 수천억의 예산이 소요되기 때문에 광범위한 보급이 제한된다. 더군다나 대학과 출연연 등에서 연구를 위해 클린룸을 활용하고 있으나 폐쇄적인 운영으로 활용도가 낮다. 민간기업의 입장에서도 양자기술의 상용화 시점을 예상하기 힘든 상황이므로 공격적인 투자로 인프라를 조성하기에는 위험부담이 따른다. 따라서 클린룸 시설을 확충하기 위해 정부는 민간기업에 투자유인을 제공할 수 있는 방향으로 예산을 지원하는 방안을 고려할 수 있다. 민간기업이 기존에 보유하고 있는 반도체 시설을 클린룸으로 개조 · 증축할 수

---

40 2021년 우리나라의 GDP 대비 R&D 예산 비중은 약 4.9%로 미국(3.5), 중국(2.4), 일본(3.3)에 비해 상당히 높은 편에 속한다(OECD, 「Main Science and Technology Indicator」, 접속일: 2023. 12. 12).

있도록 지원한다면 신축에 비해 저렴한 비용으로 클린룸을 만들 수 있다. 또한 자금 지원의 조건으로 양자기술 연구자들에게 클린룸 일부를 개방 및 공유한다면 연구환경 개선 효과와 효율적인 비용 절감 효과를 동시에 누릴 수 있을 것으로 예상된다.[41]

가용한 자원의 활용에는 우리나라의 산업 구조에 대한 고려도 포함된다. 우리나라는 주요 국가에 비견해도 우수한 첨단 산업 기술을 보유하고 있으며, 특히 반도체 분야의 기술은 세계 최고 수준이다. 양자기술의 핵심은 미세한 원자를 제어하고 활용하는데 있으므로 반도체 개발로부터 얻은 기술력은 양자기술 개발에 도움이 될 것이다. 반도체 제조 공정이 이미 다 갖춰져 있고 초전도, 이온트랩 방식의 양자컴퓨터는 반도체와 제작 방식이 유사하므로 우리나라는 양자컴퓨터 분야에 진입은 늦었으나, 초기시장임을 고려하면 추격의 여지가 있다.

둘째, 양자핵심인력 육성을 위한 다방면의 전략을 설정해야 한다. 먼저 양자기술의 근간이 되는 기초과학에 관한 연구가 꾸준히 지속될 수 있게 지원해야 한다. 미국, 영국 등 주요 선진국은 기초과학 분야의 예산 분배 결정에 있어 개입을 최소화하고 이를 과학계 전문가 집단의 자율성에 맡긴다. 하지만 과거 우리나라는 선진국 추격을 위해 '선택과 집중'의 효율성을 중시하며 국가 주도로 기초과학을 계획하였다. 그 결과 지난 30년간 효율성 측면에서 가장 소외된 분야였던 양자역학이 현재는 미래를 주도할 가장 촉망받는 영역이 되었다.[42] 이렇듯 미래의 기술패권 경쟁에서 우위를 점할 수 있는 기술 분야는 불확실성을 내포하고 있으므로 기초과학연구의 다양성을 존중하고, 일관된 지원을 꾸준히 지속해야 한다.

앞서 살펴본 바와 같이 양자핵심인력은 양자역학, 전기공학, 기계공학 등 다양한 분야에 걸쳐 분포하고 있다. 따라서 양자핵심인력의 육성은 양자역학과 같이 기초과학에 능통한 인력은 물론이고 장치 개발을 위한 엔지니어의 역할 역시 중요하다. 따라서 양자산업의 활성화를 위한 특화

---

41 https://www.sedaily.com/NewsView/29LREYJ0LE(접속일: 2023. 11. 15).

42 https://www.snunews.com/news/articleView.html?idxno=32348(접속일: 2023. 11. 15).

인력양성 프로그램을 운영해야 할 필요가 있다. 현재 고려대학교와 KAIST에 양자 특화 대학원을 설립하여 운영하고 있으나 세계 양자시장을 점유하기 위해서는 더 많은 인력이 요구되는 상황이다.

또한 양자핵심인력 양성만큼 중요한 것은 핵심 인재의 유출 방지에 있다. 핵심 인재의 유출은 해외로의 유출, 타 산업으로의 유출 모두 발생할 수 있는데, 이는 절대적으로 부족한 양자 관련 기업, 연구기관의 수에 주요 원인이 있다. 어렵게 양성한 양자인력이 해외로 취업을 한다거나 반도체 기업으로 취업해 양자기술과 관련 없는 일을 하는 등 국가적 손실이 발생하고 있다.[43] 따라서 양자핵심인력의 전략적인 육성과 함께 이들이 국내에서 활발한 활동을 할 수 있도록 전문 양자기술 연구기관을 유치하고 민간기업의 참여를 독려하는 등 노력해야 한다.

셋째, 양자기술의 개발, 상용화까지의 시간을 단축할 수 있는 최선의 전략을 구축해야 한다. IBM은 2023년 오류율이 현격히 낮은 127큐비트 Heron과 1,121큐비트의 Condor를 선보이면서 상용 양자컴퓨터의 실현을 앞당기고 있다. 현재와 같은 추세라면 10년 이내에 양자컴퓨터 상용화가 이루어지고, 신약 개발 등 과학적 분석 도구의 기능을 수행할 것으로 예측된다.[44] 하지만 우리나라의 양자컴퓨터 수준은 IBM이 초기 개발한 양자컴퓨터 수준에 머물러 있다. 기술격차의 주요 원인은 양자기술 개발의 착수 시점이 선도국가에 비해 5~10년 이상 늦다는 점도 있지만, 미국과 중국 등 주요국의 거대자본과 양자기술 핵심 인력의 차이에서 기인한 점도 있다. 따라서 규모의 차이에서 발생하는 기술격차는 차치하고 신기술 개발, 제품 제작, 상용화까지 단계에서의 비효율을 제거하는 방향의 전략을 구축해야 한다.

먼저 신기술 개발이 상용화까지 지체없이 이루어지기 위해서는 기술규제, 관련 법의 부재 등 행정적인 문제가 해결되어야 한다. 신기술이 상용화되면서 촉발할 수 있는 사회적 문제에 대한 파급력을 상세히 살펴보고

---

43 https://biz.chosun.com/science-chosun/science/2022/12/08/DZQPRYJFNFAU5EFQIDDRWTIEQE/(접속일: 2023. 12. 11).

44 https://m.dongascience.com/news.php?idx=62766(접속일: 2023. 12. 15).

관련 지침을 제정해야 할 것이다. 또한 부처별 유관 업무에 공백이 생기지 않게 업무 분담을 철저히 할 필요가 있다. 2017년 SKT는 자체 개발한 양자암호통신 장비를 국가 통신망에 납품한 뒤 우수성을 인정받고 해외 수주까지 추진해 시장을 선점할 계획을 세웠다. 하지만 시장 진출의 첫 단추인 인증 절차조차 마련되지 않았기에 제품의 납품 자체가 불가능했고, 납품이 3년 넘게 표류한 사례가 있다.[45] 시장 초기 선점이 중요한 산업인 만큼 상용화 과정에서 행정적인 비효율로 지체가 발생하지 않게 검토해야 할 것이다.

상용화를 활성화하기 위해서는 개발 초기 단계의 벤처기업을 육성해야 한다. 현재는 소수의 양자 벤처기업이 기술 개발에 힘쓰고 있으나, 양자 벤처기업의 활성화는 양자기술 산업생태계 활성화에 긍정적인 파급효과를 가지고 올 것이다. 기술력은 우수하지만, 자금이 부족한 벤처기업을 위해 기술 협약, 세제 혜택 등 다양한 지원을 제공해야 한다. 또한 자금력을 보유하고 있는 민간기업의 유치를 위해 노력해야 하며, 성과 위주의 단발성이 아닌 시장 진출까지의 지속적인 지원이 양자 벤처기업 활성화의 선결조건이 되리라 판단된다.

마지막으로 양자기술에 대한 지나친 환상을 경계하고, 현실적인 노력을 투입해야 한다. 양자기술의 혁신적인 파괴력은 모두가 인식하고 있으나, 막대한 규모의 예산을 투입하여 시장을 점유할 수 있는 것은 소수의 강대국이 될 여지가 있다. 바꿔 말하자면 국가의 미래를 위한 전략기술로서 양자기술의 잠재력은 방대하지만, 모든 문제를 해결할 수 있는 유일한 기술이라는 과도한 기대는 지양해야 할 것이다.[46]

---

45 https://it.chosun.com/news/articleView.html?idxno=2019031902435(접속일: 2023. 12. 15).
46 https://zdnet.co.kr/view/?no=20230503120627(접속일: 2023. 12. 15).

참고문헌

과학기술정보통신부, 「대한민국 양자과학기술 비전: 양자시대를 여는 우리의 도전과 전략」, 2023.

과학기술정보통신부, 한국지능정보사회진흥원, 『양자정보기술 백서』, 2022.

국회예산정책처, 「2024년도 예산안 총괄 분석 II」, 예산안분석시리즈 I, 2023.

서행아, 「중국 13차 5개년 국가 과학기술혁신 계획 특징 및 시사점」, 한국과학기술기획평가원, 『Issue Paper』, 2016.

연구개발특구진흥재단, 「레이저 가공시장」, 글로벌 시장동향보고서, 2021.

유형정, 「양자정보기술」, 『기술동향브리프』, 2022.

이준·문희진, 2019, 「양자컴퓨터 R&D 정책 현황과 전망」, 『KISTI 정책총서』, Vol. 5, 한국과학기술정보연구원.

정보통신기획평가원, 「ICT R&D 기술로드맵 2025」, 2020.

_____, 「주요국의 양자기술 개발과 투자전략: 전략기술 분야와 중점 R&D를 중심으로」, 2022.

정지형, 「양자컴퓨터 정책 및 기술 동향과 시사점」, 한국전자통신연구원, 2023.

한국과학기술기획평가원, 「양자정보기술」, 『기술동향브리프』, 21, 2022.

한국과학기술정보연구원, 「미래 산업의 게임 체인저, 양자정보과학기술(QIST): 양자 2.0의 시대」, 2022.

_____, 「양자기술 과학·기술·산업 분석」, 『KISTI R&I Report』, 2022.

한국과학기술한림원, 「과학은 끝없이 증명할 뿐이다. 양자기술」, 『차세대리포트』 Vol. 3, 2019.

한국과학기술협력센터, 「중국의 양자정보 연구개발 동향」, 『이슈리포트』, Vol. 11, 2020.

한국전자통신연구원, 「양자정보기술 동향 및 시사점」, 2019.

한국정보통신기술협회, 「ICT 표준화 전략맵」, 2023.

한중기술협력센터, 「한·중 양자정보기술 동향 비교」, 2022.

Arute, Frank *et al.*, "Quantum supremacy using a programmable superconducting processor," *Nature* 574.7779, 2019, pp.505~510.

Degen, Christian L., Friedemann Reinhard, and Paola Cappellaro, “Quantum sensing,” *Reviews of modern physics*, 89(3), 2017.

Fox, Michael FJ, Benjamin M. Zwickl, and H. J. Lewandowski, “Preparing for the quantum revolution: What is the role of higher education?,” *Physical Review Physics Education Research*, 16(2), 2020.

Gidney, Craig and Martin Ekerå, “How to factor 2048 bit RSA integers in 8 hours using 20 million noisy qubits,” *Quantum,* 5, 2021.

Hughes, Ciaran *et al*., “Assessing the needs of the quantum industry,” *IEEE Transactions on Education*, 65(4), 2022, pp.592~601.

Kim, Youngseok *et al*., “Evidence for the utility of quantum computing before fault tolerance,” *Nature* 618.7965, 2023, pp.500~505.

Mckinsey, *The Quantum Technology Monitor*, 2021.

Mitchell, Morgan W. and Silvana Palacios Alvarez, “Colloquium: Quantum limits to the energy resolution of magnetic field sensors,” *Reviews of Modern Physics*, 92(2), 2020.

NSTC, *National Quantum Initiative Supplement To The President’s FY 2023 Budget*, 2023.

<보도자료>

과학기술정보통신부, 「정보통신기술(ICT) 정보보안 및 신시장 창출을 위한 양자정보통신 중장기 추진전략 마련: 2020년, 양자정보통신 글로벌 선도국가 진입 위해 9개 실천과제 추진」, 보도자료, 2014. 12. 5.

_____, 「양자기술 분야 연구생태계 조성 본격화: IBM 양자컴퓨팅 인터넷 자원공유 서비스(클라우드 서비스) 참여기관 및 석·박사 등 해외연수 참여자 모집」, 보도자료, 2021. 4. 19.

_____, 「미래 전략기술 확보를 위한 양자기술 연구개발 투자전략 수립」, 보도자료, 2021. 4. 29.

_____, 「대한민국 양자기술 산학연 교류 협력의 장, 미래양자융합토론회 창립」, 보도자료, 2021. 6. 30.

_____, 「양자·반도체 등 정보통신기술 원천연구개발에 904억원 투자」, 보도자료, 2022. 1. 13.

과학기술정보통신부, 「양자 기술 인재 확보 시급, ’30년까지 전문인력 1,000명 확보 전략 마련 착수」, 보도자료, 2022. 10. 13.

_____, 「12대 국가전략기술, 대한민국 기술주권 책임진다」, 보도자료, 2022. 10. 28.

_____, 「양자기술개발과 디지털플랫폼정부 구현 밀착 지원, 보도자료」, 2022. 11. 30.
_____, 「양자과학기술 · 도심항공교통 · 뿌리기술 개발사업 국가연구개발사업 예비타당성조사 착수」, 보도자료, 2023. 4. 12.
_____, 「2035년 대한민국, 글로벌 양자경제 중심국가로!」, 보도자료, 2023. 6. 27.
_____, 「미래 게임체인저 양자 강국으로 가는 법적 기반 마련」, 보도자료, 2023. 10. 6.
_____, 「양자 전문인력의 산실, 두 번째 양자대학원 개원」, 보도자료, 2023. 11. 7.
한국과학기술정보연구원, KISTI 캐나다 양자컴퓨팅 기업 Xanadu와 양자컴퓨팅 핵심기술 공동개발을 위한 업무협약 체결」, 2023. 10. 24.
한국표준과학연구원, 「K-표준 세계 표준이 되다」, 보도자료, 2021. 11. 10.

<언론기사>

『뉴스핌』, 「AMCG, 표준과학연구원과 'MCG기술이전계약'… 심장병 진단 패러다임 바꿔」, 2021. 3. 31.
『대학신문』, 「주변국에서 중심국으로, 기초과학 강국으로 비상하기 위해서는」, 2023. 9. 17.
『동아사이언스』, 「IBM, 1000큐비트 양자칩 첫 공개… 10년 내 양자컴 시대 열 것」, 2023. 12. 5.
『디지털데일리』, 「IBM, 구글보다 앞선 양자 컴퓨터 기술… 양자컴퓨터 '이글' 공개」, 2011. 11. 15.
『매일경제』, 「이재용이 점찍은 'QD 디스플레이' 성장세… 내년 15% 커질 것」, 2023. 3. 6.
『바이오스펙테이터』, 「AMCG, 시리즈A 100억… 비침습 생체자기심장진단 개발」, 2021. 12. 27.
『서울경제』, 「상시 채용중, 현대차가 양자컴퓨터 인재 뽑는 이유는」, 2023. 3. 28.
『서울경제』, 「퀀텀혁명이 온다: 선도국 따라가려면 인프라·소부장 뒷받침 돼야」, 2023. 2. 15.
『에너지경제』, 「부산외대—퀀텀센싱, '양자기술 분야 및 글로벌 협력' 업무협약」, 2023. 11. 28.
『이코노미스트』, 「경계현 삼성전자 사장 "파운드리 3나노 기술력, TSMC에 1년 뒤처져"」, 2023. 5. 14.
『이투데이』, 「전 세계 뛰어든 양자컴퓨터 경쟁… 삼성도 투자 나섰다」, 2021. 9. 7.
『전자신문』, 「SKT, 양자 라이다로 보안관제… 6.5조 양자 센싱 시장 공략」, 2023. 10. 31.

『조선비즈』, 「양자기술 석·박사 어렵게 키워도 3명 중 2명 반도체行… "인재 품을 기관이라도 만들라"」, 2022. 12. 8.

『지디넷코리아』, 「양자컴퓨터 핵심은 측정과 제어… 50큐비트 급 이정표 세운다」, 2023. 9. 4.

『지디넷코리아』, 「양자 컴퓨팅의 환상에서 벗어나자」, 2023. 5. 3.

『파이낸셜뉴스』, 「양자 키 위성까지 송수신 KT, 양자암호통신 거리 10㎞까지 늘린다」, 2023. 10. 12.

『한국경제』, 「상상이 현실이 된다… 록히드마틴·NASA '양자 기술' 개발 속도」, 2023. 7. 7.

『한국경제』, 「김훈 대표 "양자센서 활용한 무채혈 혈당 측정기 개발"」, 2023. 11. 30.

『AI 타임스』, 「난제도 척척 풀어… 카이스트, 20큐비트 급 리드버그 양자컴퓨터 개발」, 2022. 6. 22.

『AI 타임스』, 「SDT, 국내 첫 양자기술 상장기업 목표로 기술특례상장 준비」, 2023. 10. 24.

『AI 타임스』, 「SKT-IDQ, 구독형 양자암호통신 'QaaS' 출시」, 2023. 10. 26.

『IT TIMES』, 「LG유플러스, 양자컴퓨터로 6G 위성 네트워크 최적화」, 2023. 9. 25.

『IT조선』, 「양자통신 개발하면 뭐해!… 인증 미비로 정부 납품 3년째 표류」, 2019. 3. 20.

『SK Telecom』, 「SKT-암호 강소기업, '양자생태계' 가속페달」, 2022. 5. 25.

<웹사이트>

양자산업생태계지원센터(https://www.kqic.kr/main/index.html, 접속일: 2023. 12. 11).

양자정보연구지원센터(https://qcenter.kr, 접속일: 2023. 10. 27).

e-나라지표(https://www.index.go.kr/unity/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=2455, 접속일: 2023. 8. 23).

IBM Quantum computing Development Roadmap(https://www.ibm.com/quantum/roadmap, 접속일: 2023. 8. 10).

OECD, Main Science and Technology Indicator(https://www.oecd.org/sti/msti.htm, 접속일: 2023. 12. 12).

부 록

<부표 4-1> ICT R&D 기술로드맵 2025

<table>
<tr><th colspan="2">구분</th><th>2020</th><th>2021</th><th>2022</th><th>2023</th><th>2024</th><th>2025</th><th>2030</th><th>2035+</th></tr>
<tr><td rowspan="4">유선 QKD 시스템</td><td rowspan="2">기초원천</td><td colspan="3">유선 송신부 집적화칩</td><td colspan="3">유선 수신부 집적화칩</td><td colspan="2">양자중계기 기반 장거리 QKD</td></tr>
<tr><td colspan="4">단일 광섬유 이종 채널 구현 기반 유선 QKD 망적용 기술</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="2">응용개발</td><td>신뢰 연계점</td><td>멀티 신뢰 연계점</td><td colspan="3">QKD 네트워크</td><td colspan="2">소형/저가 시스템</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="5">시스템 제어 기술</td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="3">무선 QKD 시스템</td><td rowspan="2">기초원천</td><td colspan="3">소형 무선 송신부 집적화칩 기술</td><td colspan="3">소형 무선 수신부 집적화칩 기술</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td colspan="3">무인기 이동형 QKD 기술</td><td colspan="2">위성 QKD 기술</td></tr>
<tr><td>응용개발</td><td></td><td></td><td></td><td colspan="3">장거리 무선 QKD 기술</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="3">QKD 공통 기반 기술</td><td rowspan="2">기초원천</td><td>공개 후처리 알고리즘</td><td></td><td>고속 오류보정 (후처리)</td><td></td><td>정밀 비밀증폭 (후처리)</td><td>신규 QKD 프로토콜</td><td>양자 개체 인증</td><td>양자 서명</td></tr>
<tr><td>응용개발</td><td></td><td colspan="3">QKD 구현안전성 보장방법론</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="3">양자 중계기</td><td rowspan="3">기초원천</td><td colspan="5">얽힘광원/얽힘교환기술</td><td>파장변환기술</td><td rowspan="2">양자 중계기</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="6">양자 메모리</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="6">양자 인터페이스</td><td></td></tr>
</table>

<부표 4-1>의 계속

<table>
<tr><th colspan="2">구분</th><th>2020</th><th colspan="2">2021</th><th>2022</th><th>2023</th><th>2024</th><th>2025</th><th>2030</th><th>2035+</th></tr>
<tr><td rowspan="3">양자 정보 네트워크</td><td rowspan="2">기초원천</td><td></td><td colspan="3">양자 정보 인코딩</td><td></td><td></td><td>양자 스위치</td><td>양자 라우터</td><td></td></tr>
<tr><td></td><td colspan="5">양자 링크 프로토콜</td><td colspan="2">양자네트워크 프로토콜</td></tr>
<tr><td>응용개발</td><td></td><td colspan="4">독립 광섬유 기반 양자통신 링크</td><td colspan="3">공유 광섬유 기반 양자통신 링크</td></tr>
<tr><td rowspan="4">양자 관성 센서</td><td rowspan="2">기초원천</td><td>원자 확률분포 압착상태 해석</td><td colspan="4">원자 확률분포의 압착상태 생성 및 측정기술</td><td colspan="2">압착상태가 적용된 원자간섭계 구현</td><td>원자 간섭계의 양자잡음 감소</td></tr>
<tr><td>나노 역학계 양자간섭 측정</td><td colspan="4">광역학계 소자 제작 및 광결합 기술</td><td colspan="2">역학계와 비고전광의 결합 및 비고전적 운동 상태 생성 기술</td><td>광역학계 양자잡음 감소</td></tr>
<tr><td rowspan="2">응용개발</td><td>실험실형 원자 중력계</td><td colspan="2">원자중력계 정확도 평가기술</td><td colspan="3">이동형 원자중력계 (정확도 10nm/s2)</td><td>소형화 기술</td><td>개인 휴대형 원자 중력계</td></tr>
<tr><td>실험실형 원자 각속도계</td><td colspan="4">이동형 원자스핀 각속도계</td><td colspan="2">원자간섭 기반 가속도계 소형화 기술</td><td>이동형 원자관성 항법센서 플랫폼</td></tr>
<tr><td rowspan="3">양자 시간 측정 센서</td><td rowspan="3">기초원천</td><td>개별 공진기 기반의 광주파수 빗</td><td colspan="4">광 집적회로를 이용한 집적 광주파수빗 생성</td><td colspan="2">광, 전자 이종집적을 통한 저전력 광/전자 주파수빗 생성</td><td>초정밀, 대규모 주파수빗 생성, 제어</td></tr>
<tr><td>세슘 원자분수 기반 원자시계</td><td colspan="5">광격자 기반 이동형 원자시계</td><td colspan="2">다원자 얽힘을 이용한 고해상도 원자시계 및 고체기반 핵전이 시계</td></tr>
<tr><td>공진기 기반 QED 기초 이론</td><td colspan="2">양자비파괴측정을 이용한 고반복률 원자시계</td><td colspan="5">초발광 레이저를 이용한 공진기 잡음 저감 기술 도입</td><td>초발광 능동형 광시계</td></tr>
</table>

<부표 4-1>의 계속

<table>
<tr><th colspan="2">구분</th><th>2020</th><th>2021</th><th>2022</th><th>2023</th><th>2024</th><th>2025</th><th>2030</th><th>2035+</th></tr>
<tr><td rowspan="2">양자 시간 측정 센서</td><td rowspan="2">응용 개발</td><td>분광용 원자 증기셀 제작</td><td colspan="5">저전력, 초저온, 초소형 원자 증기셀 기술</td><td colspan="2">다원자 얽힘 제어를 위한 정밀 집적 원자 증기셀 기술</td></tr>
<tr><td>실험실형 광주파수 합성기</td><td colspan="5">칩스케일 증기셀과 광공진기 기반의 소형 광주파수 합성기 (정확도 5x10^{-11})</td><td>집적형 광주파수 합성기</td><td>초소형 온디멘드 광주파수 합성</td></tr>
<tr><td rowspan="4">양자 자기장 전기장 센서</td><td rowspan="2">기초 원천</td><td>점결함 기반 양자센싱 원리증명</td><td colspan="3">고감도 공간 고분해 자기장 양자센싱</td><td colspan="3">대면적 고분해능 자기장 이미징 기술</td></tr>
<tr><td>비차폐 환경 원자자계 기초실험</td><td colspan="2">광섬유 기반 원자 고주파수 전기장 센서</td><td colspan="2">다채널 원자자계 센서</td><td colspan="2">고전한계 극복 초고감도 원자자계 개발</td><td>공간 고분해 원자 전기장 측정</td></tr>
<tr><td rowspan="2">응용 개발</td><td colspan="3">초소형 자기 센서 (관성 센서 및 금속 탐지)</td><td colspan="2">고분해능 나노 NMR (바이오 샘플)</td><td>극미량 시료의 화학 특성 분석</td><td colspan="2">극미소스케일 자기장 이미징</td></tr>
<tr><td>원자자계 이용한 지자장 측정</td><td colspan="4">고감도 자기장통신 양자센서</td><td colspan="2">양자센서를 이용한 바이오 자기 센서</td><td>저자장 초소형 MRI 개발</td></tr>
<tr><td rowspan="4">양자 광학 센서</td><td rowspan="4">기초 원천</td><td>광자수 양자얽힘 광원</td><td colspan="2">초고분해능 이미징 기술</td><td colspan="3">다광자 양자얽힘 광원 개발</td><td colspan="2">양자얽힘 또는 광-원자 상호작용 기반 초정밀 이미징 및 패터닝</td></tr>
<tr><td>시공간 양자얽힘 광원 제작</td><td colspan="4">시공간 양자얽힘 측정기술</td><td colspan="2">마이크로파-광파 변환기술</td><td>표준 양자한계 미만 광신호 측정</td></tr>
<tr><td>가시광 근적외선 광자쌍 생성</td><td colspan="4">유도결맞음 양자간섭계와 근적외선 분광측정</td><td colspan="2">가시광-중적외선 얼힘 광자쌍 광원</td><td>중적외선 대역 분광측정</td></tr>
<tr><td>양자상태 단층분석 사연</td><td colspan="2">양자상태 측정 신뢰도 추정</td><td colspan="3">양자얽힘 정량평가 불확도 분석 및 신뢰구간 추정</td><td colspan="2">양자계측 성능한계 및 실용적 정밀도 분석</td></tr>
</table>

<부표 4-1>의 계속

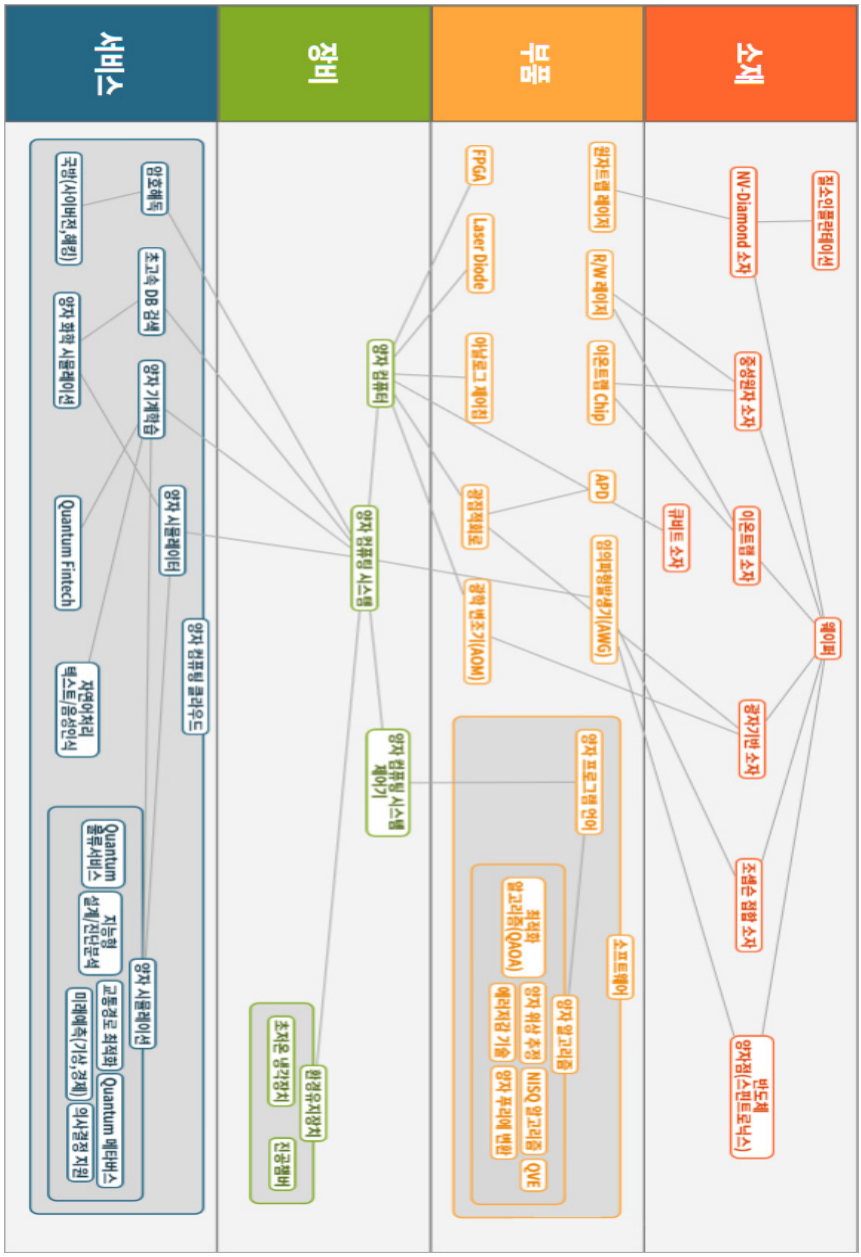
<table>
<tr><th colspan="2">구분</th><th>2020</th><th>2021</th><th>2022</th><th>2023</th><th>2024</th><th>2025</th><th>2030</th><th>2035+</th></tr>
<tr><td rowspan="2">양자 광학 센서</td><td rowspan="2">응용 개발</td><td colspan="5">양자조명</td><td colspan="2">초고분해능 양자현미경</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="3"></td><td colspan="2">적외선 양자 분광센서</td><td colspan="2">양자 LiDAR</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="2">양자 컴퓨팅 HW 플랫폼</td><td>기초 원천</td><td>2큐비트 연산 에러율 초전도-0.2</td><td>2큐비트 연산 에러율 초전도-0.1 이온덫-0.1 반도체-0.2</td><td></td><td></td><td>2큐비트 연산 에러율 초전도-0.01 이온덫-0.01 반도체-0.1</td><td></td><td>2큐비트 연산 에러율 초전도-0.001 이온덫-0.001 반도체-0.01</td><td>오류 정정 논리 큐비트</td></tr>
<tr><td>응용 개발</td><td>QV=10 초전도 양자 컴퓨터</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>5큐비트 양자 컴퓨터 시스템</td><td>20 큐비트 양자 컴퓨터 시스템</td><td>오류 정정 적용 양자 컴퓨터 시스템</td></tr>
<tr><td rowspan="4">양자 시뮬레이터</td><td rowspan="3">기초 원천</td><td>20 큐비트</td><td>20 큐비트 단일 제어</td><td></td><td>100 큐비트 단일 제어</td><td></td><td rowspan="3">중규모 양자 무작위 걸음 시뮬레이션</td><td rowspan="3">무작위 걸음 최적화</td><td rowspan="3">대규모 무작위 걸음 시뮬레이션</td></tr>
<tr><td>104 광격자 원자</td><td></td><td>10x10 단일 원자 측정</td><td></td><td>3종 헤밀토니안 시뮬레이션</td></tr>
<tr><td>16차원 다광자 생성 기술</td><td>16차원 다광자 제어 기술</td><td>40차원 집적 양자 연산 회로 구현</td><td>10광자 양자 광원 개발</td><td>100 차원 집적 양자 연산 회로 구현</td></tr>
<tr><td>응용 개발</td><td colspan="5"></td><td>기초 양자 물질 특성 분석</td><td>소규모 양자 물질 특성 분석</td><td>신물질 양자 특성 분석</td></tr>
</table>

<부표 4-1>의 계속

<table>
<tr><th colspan="2">구분</th><th>2020</th><th>2021</th><th>2022</th><th>2023</th><th>2024</th><th>2025</th><th>2030</th><th>2035+</th></tr>
<tr><td rowspan="4">양자 인공 지능 기술</td><td rowspan="2">기초 원천</td><td colspan="5">인공지능 기초 알고리즘</td><td rowspan="2">Baye-sian Deep Learning</td><td rowspan="2">Boltz-mann machine Rein-forced learning</td><td rowspan="2">2큐비트 QRAM</td></tr>
<tr><td>Linear Regres-sion</td><td>Gaussian Regres-sion</td><td>Support Vector Machine</td><td>Principal Compo-nent Analysis</td><td>Gaus-sian Mixture</td></tr>
<tr><td rowspan="2">응용 개발</td><td colspan="5"></td><td>소규모 분자 구별 양자 인공 지능</td><td></td><td>새로운 분자 설계 수준 인공 지능</td></tr>
<tr><td rowspan="4">양자 컴퓨터 알고 리즘 및 응용 기술</td><td rowspan="2">기초 원천</td><td rowspan="2">양자 우월성 알고 리즘 분석</td><td rowspan="2">10 큐비트 Iterative Frag-mented VQE</td><td rowspan="2">20 큐비트 QAOA</td><td rowspan="2">20 큐비트 Resilient Vector Process</td><td rowspan="2"></td><td rowspan="2">50 큐비트 Full VQE</td><td rowspan="2">Full NISQ 큐비트 알고 리즘 세트</td><td rowspan="2">NISQ 응용 SW</td></tr>
<tr></tr>
<tr><td rowspan="2">응용 개발</td><td rowspan="2"></td><td rowspan="2"></td><td rowspan="2"></td><td rowspan="2">5000 큐비트 어닐러 용 최적화</td><td rowspan="2">툴셋 컴파 일러 프로 그래밍 언어</td><td rowspan="2">NISQ 알고 리즘 라이브 러리세 트</td><td rowspan="2">소규모 실제 문제 해결 NISQ 알고리 즘</td><td rowspan="2">1000 큐비트 실제 응용 (암호)</td></tr>
<tr></tr>
</table>

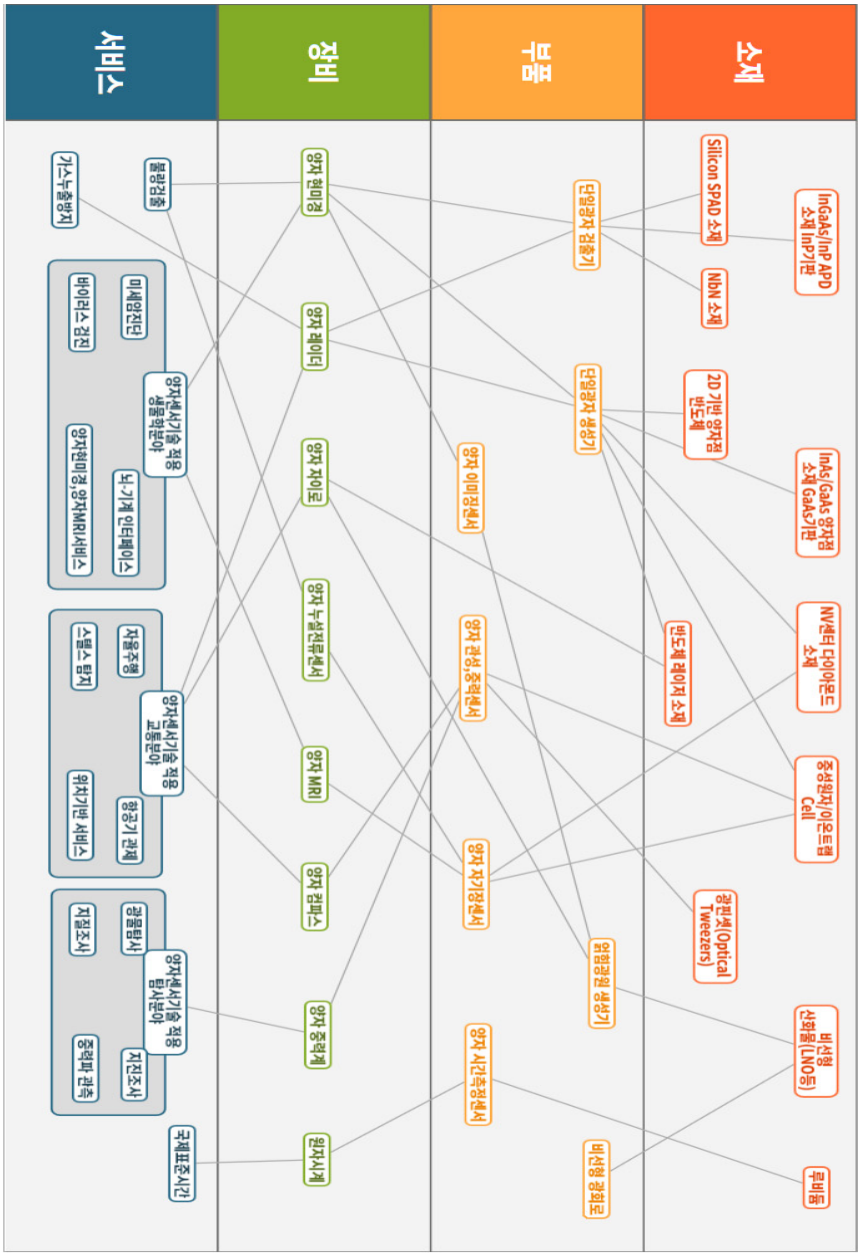
자료: 정보통신기획평가원(2020)에서 인용.

[부도 4-1] 양자컴퓨터 가치사슬



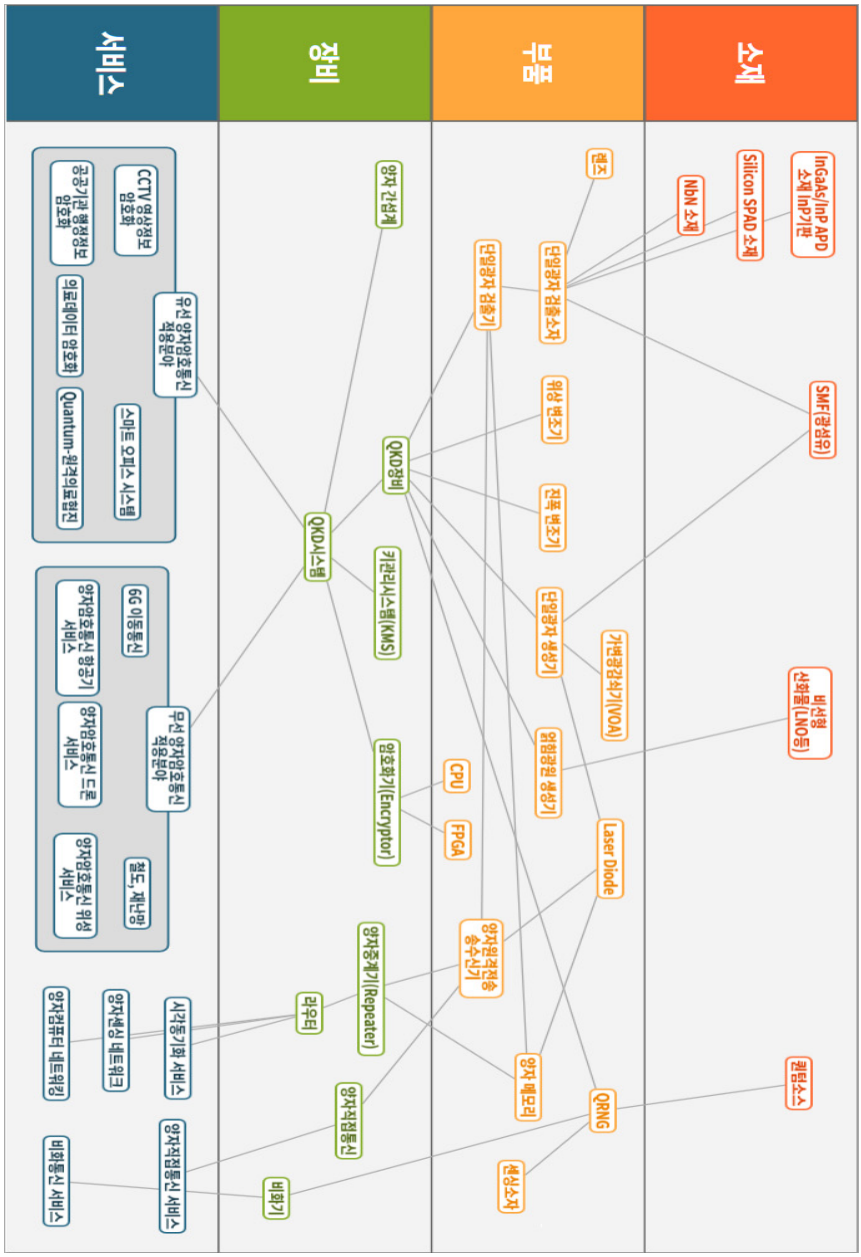
자료: 양자산업생태계지원센터
(https://www.kqic.kr/main/ecosys.html?sub1=2&sub2=6&menu=1 접속일: 2023. 12. 5)

[부도 4-2] 양자센서 가치사슬



자료: 양자산업생태계지원센터
(https://www.kqic.kr/main/ecosys.html?sub1=2&sub2=5&menu=1 접속일: 2023. 12. 5)

[부도 4-3] 양자통신 가치사슬



자료: 양자산업생태계지원센터
(https://www.kqic.kr/main/ecosys.html?sub1=2&sub2=4&menu=1 접속일: 2023. 12. 5)

미래기술 산업생태계 연구

인 쇄 2023년 12월 27일
발 행 2023년 12월 30일

저 자 김기완 · 이경애 · 고혜원 · 노우진
발행인 조동철
발행처 한국개발연구원
등 록 1975년 5월 23일 제6-0004호
주 소 세종특별자치시 남세종로 263
전 화 (044) 550-4114
팩 스 (044) 550-4310

ⓒ 한국개발연구원 2023