

# 환경위성 자료를 이용한 북한경제 분석 가능성 연구: 위성 관측 이산화질소 농도와 북한 GDP 간 상관관계 분석

이원진 | 환경부 국립환경과학원 기후대기연구부 환경위성센터 환경연구관 | wjleeleo@korea.kr

## 1. 머리말

위성 영상은 북한과 같이 접근이 어려운 지역에 대해 직접적인 지표 변화 분석이 가능하기 때문에 북한 산림환경 분석(정형섭 외, 2015), 북한 핵실험에 의한 지표 변화(이원진 외, 2018) 등 다양한 북한 분석 연구에 많이 사용되고 있다. 이에 반해 직접적 변화 관측보다는 다양한 요소의 종합적 분석이 필요한 경제 분석에서는 야간 조명 위성 영상을 사용하거나(김정아·천상현, 2020), 시멘트 공장 굴뚝의 연기 여부(백철승 외, 2019) 등을 살펴보는 연구가 진행되었다. 야간 위성 영상에서 관측되는 빛은 도로의 가로등, 대형 어선 등에서 많이 방출되기 때문에 간접적으로 경제상황을 대변하는 지표로 많이 활용되고 있으며, 굴뚝의 연기 또한 산업상황에 대한 간접적 지표로 사용할 수 있다.

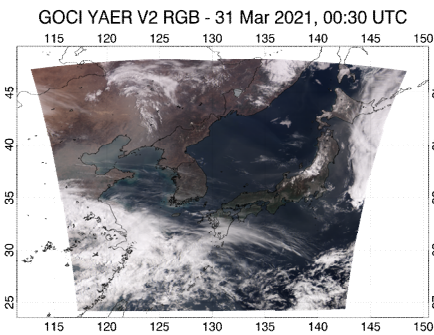
한편, 대기오염물질 중 이산화질소의 경우 주로 차량, 공장, 발전소 등에서 많이 배출되기 때문에 경제 지표를 추정할 수 있는 간접적 지표로 활용될 수 있다. 특히 북한의 경우 대부분의 이산화질소가 차량보다는 공장 및 발전소에서 배출되기 때문에 이동 배출원(차량)을 고려하지 않고 고정 배출원(공장 및 발전소)에 대한 고려만 가정하고 연구를 진행할 수 있을 것이다. 따라서 본고에서는 환경위성을 이용하여 북한 지역의 이산화질소 농도 변화 관측을 통해 북한경제 분석 가능성을 제시해 보고자 한다. 본고에서는 환경위성에 대한 소개, 연평균 이산화질소 농도와 북한 GDP 간의 비교, 마지막으로 국립환경과학원 환경위성센터에서 운영 중인 정지궤도 환경위성을 이용하여 파악한 북한의 지역별 이산화질소 농도 순위를 제시하였다.

## II. 환경위성 자료 소개

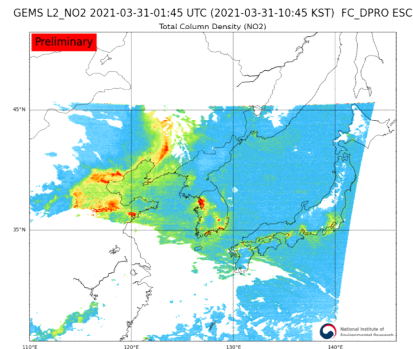
### 1. 환경위성을 이용한 대기오염물질 관측

환경은 자연, 물, 대기, 자원 순환, 생태 등 광범위한 분야에 대한 포괄적 의미를 갖고 있지만 본고에서 제시하는 환경위성은 대기환경 관측을 목적으로 개발된 것을 의미한다. 국내 지구관측 위성은 주로 가시광선(아리랑 위성 등) 영역과 적외선 영역(기상 위성 등)을 많이 활용하고 있지만, 환경위성은 대기오염물질이 자외선 영역 중 특정 파장에 흡수 및 산란되는 양을 관측하여 농도로 변환한다(그림 1). 대기환경 관측 위성은 크게 입자상 물질(에어로졸, 미세먼지 등)과 가스상 물질(이산화질소, 오존 등)을 관측하며, 지상 관측자료는 설치된 지점(1차원)에 대한 정보만 제공하는 것과 달리 위성 관측은 2차원적으로 대기오염물질의 분포를 알 수 있어 극지방 오존홀 연구, 황사 이동 등 다양한 연구에 활용되고 있다.

[그림 1] 가시광선 영역에서 관측된 광학 영상(좌)과 자외선 영역으로 관측된 환경위성 영상(우)



(2021. 3. 31) 해양위성 관측 영상



(2021. 3. 31) 환경위성 관측 영상

위성 선진국에서는 이러한 특성을 이용하여 대기환경을 관측해 왔다. 대표적인 환경위성 자료로는 미항공우주국에서 2004년에 발사한 Aura 위성에 탑재된 OMI(Ozone Monitoring Instrument) 영상과 유럽우주국에서 2017년에 발사한 Sentinel-5P 위성에 탑재된 TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument) 영상이 있다. 이 두 센서는 지구 전체를 관측할 수 있는 저궤도 위성으로, 약 13시에 한반도를 지나며 하루에 1회 정도 관측을 수행한다.

## 2. 정지궤도 환경위성에 대한 소개

기존 OMI, TROPOMI와 같은 위성 자료는 1일 1회 정도 관측하는 저궤도 위성으로, 대기오염물질의 공간 분포 연구에는 적합하지만 대기오염물질의 시간적인 변화에 따른 생성·이동·소멸 등에 대한 연구에는 한계를 보인다. 이에 환경부에서는 대기환경 감시를 위한 정지궤도 환경위성(Geostationary Environment Monitoring Spectrometer: GEMS)을 약 10년간 준비하여 2020년 2월 19일(수) 오전 7시 18분, 대한민국 지구 반대편에 위치한 남아메리카 프랑스령 기아나쿠루(French Guiana Kourou)의 기아나 우주센터에서 정지궤도 복합위성 2B호(Geo Kompsat-2B, 이하 천리안 2B) 위성에 탑재하여 성공적으로 발사하였다.

정지궤도 복합위성은 고도 약 36,000km 적도 상공에서 지구와 같은 속도로 궤도를 돌면서 지구를 관측하는 정지궤도 위성으로, 이에 탑재된 GEMS는 1일 주간 평균 8회 정도 아시아 지역의 대기오염물질을 관측한다. 환경위성 중 정지궤도에서 운용 중인 세계 최초의 위성이며, 2023년 4월에 발사된 미국의 TEMPO(Tropospheric Emissions Monitoring of POLLution) 위성과 2024년 발사 예정인 유럽의 Sentinel-4 위성의 정지궤도 군집(Constellation)을 통해 아시아-북미-유럽의 북반구 전역에 대한 대기오염물질의 이동에 관한 연구가 가능해질 것으로 기대된다.

GEMS는 2021년 3월부터 에어로졸, 오존, 이산화질소 등 기본 산출물(L2) 서비스를 시작하여 2022년 11월에 총 21종의 모든 기본 산출물을 공개 완료하였다(표 1). 또한 2023년 6월부터 이산화질소 산출물에 대해 위도에 따른 공간 해상도 차이를 보정하고 구름에 의한 오차 영향을 최소화할 수 있도록 일평균 및 월평균 자료를 산출하며, 한반도는 약 5km, GEMS 전체 영역에 대해서는 약 10km 해상도로 산출하여 서비스하고 있다.

이와 같이 극궤도 환경위성과 정지궤도 환경위성의 발전과 장시간 동안 축적된 자료는 북한과 같은 비접근 지역에 대한 대기오염물질의 시공간 변화 감시뿐만 아니라 이를 이용한 경제 연구의 가능성을 높여줄 수 있는 계기가 되었다. 특히 COVID-19 기간 동안 국가 간 교역이 중단되고 이에 따른 정보가 차단되는 상황에서 환경위성 자료는 전통적인 북한경제 연구에서 새로운 가능성을 열어 줄 수 있다. 본고에서는 지금까지 제시된 경제지표 통계 값과 환경위성에서 관측된 이산화질소 농도 자료 간의 비교를 통해 간접적인 북한경제 연구 가능성에 집중하고자 하였다.

〈표 1〉 GEMS 위성 자료의 기본 산출물과 평균 산출물

구분	대분류	산출물
기본산출물 (Level-2) 및 평균산출물 (Level-3)	- 지표면 정보	- 지표면반사도
	- 구름	- 구름양
		- 구름 기압
		- 구름 복사 비율
	- 에어로졸	- 자외선 에어로졸 지수
		- 가시광 에어로졸 지수
		- 에어로졸 광학두께
		- 에어로졸 단일산란알베도
		- 에어로졸 유효 고도
	- 오존	- 대류권 오존 농도
		- 성층권 오존 농도
		- 오존 전량
	- VOCs	- 포름알데히드 전층 농도
		- 글리옥살 전층 농도
	- 이산화질소 ※ 평균장(L3) 배포 일평균, 월평균 자료	- 대류권 이산화질소 농도
		- 성층권 이산화질소 농도
	- 이산화황	- 이산화황 전층 농도
- 자외선 정보	- 자외선 지수	
	- 식물 반응 가중 선량률	
	- DNA 손상 가중 선량률	
	- 비타민 D 합성 가중 선량률	

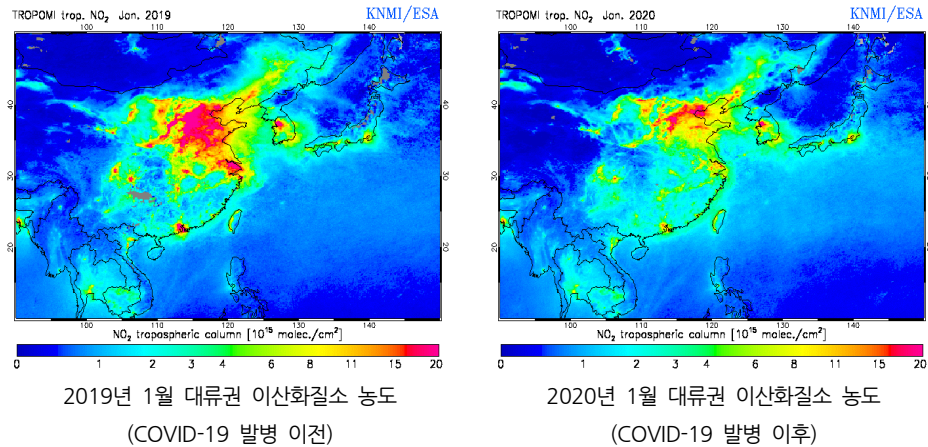
### III. 환경위성을 이용한 북한경제 연구 가능성

#### 1. 이산화질소 농도를 이용한 경제 지표 상관성 연구

[그림 2]는 TROPOMI에서 관측된 2019년 1월과 2020년 1월의 대류권 이산화질소 농도를 나타내고 있다(van Geffen et al., 2022). COVID-19로 인한 강력한 경제 봉쇄 정책으로 중국지역의 이산화질소 농도가 낮아졌음을 확인할 수 있는바, 이산화질소는 경제 활동과 상관관계가 있음을 알 수 있다. 이산화질소는 화석 연료를 쓰는 공장, 발전소, 자동차 배기가스에서 주로 배출되는 물질로, 이산화질소 농도는 화석연료를 사용하는 경제활동에 대한 간접적

지시자로 활용될 수 있을 것이다. 이산화질소 이외에 화석연료 사용에 의해 발생하는 대표적 대기오염물질에는 이산화황 등이 있다. 이러한 가스상 오염물질들은 이산화질소에 비해 대기 중 체류시간이 길어 스모그와 같이 대기오염을 지속적으로 악화시킬수 있기 때문에 탈황 장치 부착 등을 통해 정책적으로 관리를 하고 있다. 이에 비해 이산화질소는 대기 체류시간이 상대적으로 짧고 대부분 그 나라에서 생성하고 소멸하는 특징을 지닌다. 다시 말해 이산화질소는 다른 오염물질에 비해 그 지역의 인위적 활동과 제일 상관관계가 높은 물질이라고 할 수 있다.

[그림 2] 위성 관측 이산화질소 월 평균 농도(COVID-19 이전(좌) 이후(우))



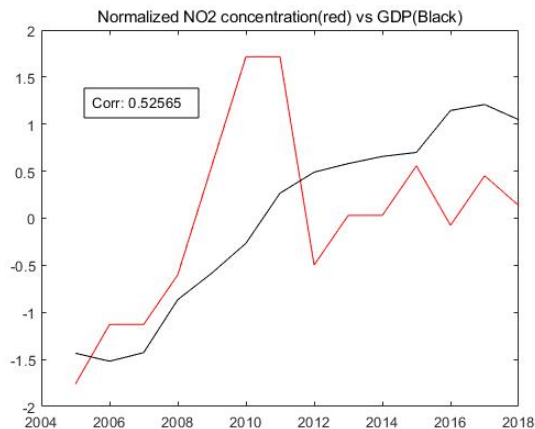
COVID-19 이후 이산화질소 변화와 경제 활동간의 상관관계가 매우 높다는 사실이 밝혀진 이후로 이산화질소 농도를 이용한 경제 상관성 연구가 지속적으로 진행되어 왔다. Keola and Hayakawa(2021)는 TROPOMI 위성으로 관측된 이산화질소 농도와 각 나라의 GDP를 비교하여 이산화질소 배출량이 1% 증가할 때 GDP가 0.51% 증가하는 것으로 분석하였다. 하지만 이러한 결과는 국가별로 차이가 있으며, 어떠한 경우에는 반대의 경향이 관측되었다. 각 국가별 대기환경 정책에 따라 이러한 경향은 달라질 수 있기 때문에 이를 절대적으로 분석하는 것에는 한계가 있다. 하지만 북한과 같이 접근이 어렵고 정보가 제한적인 상황에서는 충분히 이를 활용할 가치를 지닌다.

## 2. 이산화질소 농도와 북한 GDP 간의 상관관계 연구

본고에서는 접근이 어려운 북한지역의 경제 연구를 위해 위성 관측 이산화질소 농도 자료와 대표적 경제 지표인 북한 GDP 간 상관성을 시계열로 확인하였다. 사용된 자료는 2005년부터 2018년까지 OMI와 TROPOMI 자료의 연평균 자료이다(Chong et al., 2023). GDP 자료는 통계청에서 매년 발간하는 북한의 「주요통계지표」에서 연도별 명목 GDP를 이용하였으며, 이를 정규화 점수(Z-score)로 변환시켰다. 연평균 이산화질소 농도 자료도 같은 방법으로 정규화하였으며, 정규화 점수를 상호 비교하였다.

[그림 3]은 위성 관측된 연평균 이산화질소 농도와 GDP 간의 상관관계 비교이다. 붉은색은 연평균 이산화질소 농도를 의미하며 검은색은 GDP를 의미한다. 전체적인 추세가 비슷한 것을 확인할 수 있다. 연평균 자료이기 때문에 데이터 개수가 적지만 이를 고려하더라도 0.5 이상의 상관관계가 계산되었다. 시기를 나눠서 보면 2007년 이후로 2011년까지 GDP도 급속한 성장이 있었지만 이에 비해 이산화질소 농도는 더욱 빠르게 증가하였음을 확인할 수 있다. 이 시기 북한의 경제적 상황에 대한 평가가 복합적으로 이루어져야 이에 대한 상세한 분석이 가능할 것으로 생각된다. 그리고 2012년 이후로 GDP는 완만한 증가곡선을 그리고 있으며, 이산화질소 농도도 증가와 감소가 반복되고 있지만 전체적으로 상승하는 추세를 보인다. 이러한 추세는 이산화질소 농도와 GDP 간의 상관관계가 있음을 의미하며 향후 북한경제를 분석하는 참고자료로 더욱 의미를 가질 수 있을 것으로 판단된다.

[그림 3] 연평균 이산화질소 농도와 GDP 간의 정규화 점수 비교

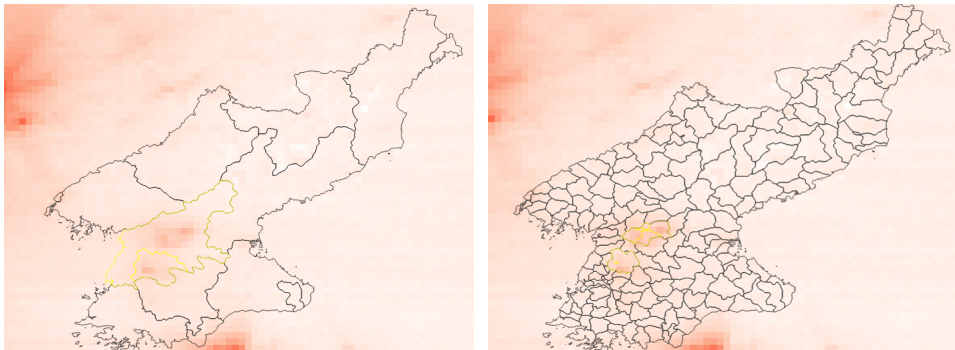


### 3. 이산화질소 농도의 공간적 분포 비교

위성 관측의 최대 장점 중 하나는 '2차원 공간 분포 파악'이라고 할 수 있다. 특히 월 평균 이산화질소 농도 자료를 토대로 GIS를 이용하여 북한의 시군별로 이산화질소 농도가 높게 산출되는 지역을 살펴보고, 고해상도 구글어스 영상을 이용하여 주된 원인에 대해 찾아보았다. 이산화질소의 배출원은 다양하지만, 북한의 경우 각 지역별로 대표적인 이산화질소 배출원 공장 혹은 화력발전소 등이 존재하기 때문에 이를 확인해 보고 향후 북한 산업 전문가와 같이 이산화질소 배출원에 대한 상세 분석이 필요할 것으로 판단된다.

[그림 4]는 2021년 3월의 월평균 이산화질소 분포이다. GIS를 이용하여 도 단위 행정구역과 시·군 단위 행정구역으로 구분하였다. 도 단위로 보면 평양직할시, 평안남도 순으로 이산화질소 농도가 높게 계산되었으며 시·군 단위로 보면 순천시, 북창군, 은산군, 평양직할시 순으로 이산화질소 농도가 높게 산출되었다. 이산화질소 농도에 따른 순위를 분석할 때 계절별 차이도 고려해야 하며 월평균보다는 연평균 이산화질소 농도를 고려하여 판단할 필요도 있지만, 각 지역별로 월 단위 분석 자료를 쌓아간다면 지역적 경제상황과 지역별 경제규모 차이도 파악이 가능할 수 있을 것이란 의미에서 분석 자료를 서술하였다.

[그림 4] 2021년 3월의 월 평균 이산화질소 농도(도 단위 행정구역(좌), 시·군 단위 행정구역(우))



월평균 이산화질소 농도가 높은 대표적인 지역인 평양과 북창의 경우 화력발전소가 존재하는 것을 확인하였다. 그리고 은산의 경우 대규모 석탄 기지가 있는 것으로 판단되나, 북한 산업 구조에 대한 이해가 필요하다. 또한 봉산 지역도 이산화질소 농도가 높은 지역 중 하나로 주로 시멘트 공장이 있는 것으로 생각되나, 이 또한 북한 산업 연구자와의 상호 검증이 필요할 것이다.

## IV. 한계점 및 결론

과거 북한 연구는 탈북자 면담, 북한에서 내는 정책 및 기사 자료, 수출·수입량 등 다양한 정보를 복합적으로 분석하여 진행하였다. COVID-19 이후 이러한 정보가 제한되는 상황에서 위성 기술이 발전하고 자료 취득률이 높아지면서 위성 영상은 북한 연구 수요에 적합한 자료 중 하나가 될 수 있을 것으로 보인다. 하지만 위성 영상의 경우 지표의 지형·지물 등과 같은 직접적인 변화를 관측하기 때문에 북한경제와 같은 종합적 분석이 필요한 경우에는 위성 영상 사용이 제한적이다. 최근 들어 대기오염물질을 관측할 수 있는 환경위성의 공간 해상도가 높아지며 COVID-19 이후 다양한 봉쇄에 따른 직접적인 대기오염물질 농도 변화를 관측하기 시작하였고, 환경위성을 이용한 경제 연구에도 관심이 증대되고 있다. 특히 우리나라는 세계 최초의 정지궤도 환경위성을 보유하고 있기 때문에 기존 저궤도 환경위성에 비해 자료 취득률이 훨씬 높으며, 다양한 시공간 변화를 관측할 수 있기 때문에 이를 북한경제 연구에 적용하기에 매우 적합한 상황이다.

본고에서는 우선 환경위성에 대해 소개하고 다양한 대기오염물질 중 이산화질소의 농도를 이용하여 북한의 GDP와 상관관계 연구를 수행하였다. 그 결과 0.5 이상의 상관관계를 계산할 수 있었으며, GIS를 이용하여 지역별 이산화질소 농도를 분석하였다. 이러한 연구는 환경위성 자료가 북한경제 연구의 자료로써 활용될 가능성을 보여준 것으로, 앞으로 자료가 더욱 축적되면 정확한 분석이 가능할 것으로 판단된다.

북한경제 연구에서 환경위성 자료를 바탕으로 지역별 경제활동에 따른 대기오염물질 추세 및 각 도십지 간의 이산화질소 농도 차이 등을 파악할 수 있다. 따라서 환경위성 자료는 북한 산업 구조와 경제규모의 상대적 추정 등에서 다양하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

하지만 환경위성 자료를 이용한 북한경제 연구는 이산화질소 농도를 이용하여 산업 경제에 대해 간접적으로 추정하는 것이기 때문에 주변국과의 교류 상황, 대북제재 등과 같은 다양한 시대적 상황을 고려하여 판단하여야 하며 북한 상황을 잘 아는 전문가와의 협력을 통해서만 더욱 정확한 정보로 가공할 수 있을 것이다. 또한 환경쿠즈네츠 곡선에 따르면 경제규모와 대기오염물질 배출량은 국가 소득에 따라 다양한 모양으로 나타나며 소득과 대기오염물질 사이의 관계가 정비례하지 않기 때문에 북한 환경 정책에 대한 이해를 바탕으로 북한 환경과 경제에 대한 모델 수립이 필요하다. 본고의 내용이 다양한 연구분야의 융합과 관련해 환경위성의 다양한 활용에 도움이 되기를 기대한다.

## 참고문헌

- 김정아 · 천상현, 「야간 조명 인공위성 데이터를 활용한 북한의 개발현황과 변화 고찰」, 『대한국토 · 도시계획학회지』, 55권, 6호, 2020.
- 백철승 · 서준형 · 조진상 · 안지환 · 조계홍, 「위성사진으로 본 북한의 시멘트 산업」, 『세라미스트』, 22권, 2호, 2019.
- 정형섭 · 박수진 · 최재원 · 박승환 · 채성호 · 백원경 · 이선민 · 김대성 · 신휴석 · 김추홍 · 안유순 · 이승진, 「인공위성자료를 활용한 북한 산림현황 분석」, 한국임업진흥원 보고서, 2015.
- 이원진 · 선종선 · 정형섭 · 박순천 · 이덕기 · 오관영, 「고해상도 위성영상을 활용한 북한 6차 핵실험 이후 지표변화 관측」, 『대한원격탐사학회지』, 34권, 6호, 2018.
- Chong, H., S. Lee, Y. Cho, J. Kim, J.-H. Koo, Y. P. Kim, Y. Kim, J.-H. Woo, and D. H. Ahn, “Assessment of air quality in North Korea from satellite observations,” *Environment International*, 171, 2023.
- Keola. S. and K. Hayakawa, “Do lockdown policies reduce economic and social activities? evidence from NO2 emissions,” *The developing economies*, 59(2), 2021.
- van Geffen, J. H. G. M., Eskes, H. J., Boersma, K. F., Maasackers, J. D. and Veeffkind, J. P., TROPOMI ATBD of the total and tropospheric NO2 data products, Report S5P-KNMI-L2-0005,RP, KNMI, De Bilt, The Netherlands. 2022.