



서울대학교 통일평화연구원

Institute for Peace and Unification Studies Seoul National University

2020년도 통일기반구축사업

# 북한의 대기오염 모니터링 시스템 구축

서울대학교 통일평화연구원  
서울대학교 환경대학원  
기후융합과학연구실





## ■ 연구진

연구책임자	정수종 (서울대학교 환경대학원 부교수)
참여연구원	박훈영 (서울대학교 환경계획연구소 박사 후 연구원)
	김종호 (서울대학교 환경대학원 박사과정)
	박채린 (서울대학교 환경대학원 박사과정)
	박하영 (서울대학교 환경대학원 박사과정)
	심소정 (서울대학교 환경대학원 박사과정)
	방정연 (서울대학교 환경대학원 석사과정)

2020년도 서울대학교 통일평화연구원의 재원으로 통일기반구축사업의 지원을 받아 수행된 결과물임.

<목차>	
1. 서론	1
2. 사용자료 및 분석 방법	4
가. 분석 자료	4
(1) 분석지역 및 기간	5
(2) OCO-2 (Orbiting Carbon Observatory-2) 위성자료	6
(3) S-5P TROPOMI XCO, XNO <sub>2</sub> 관측	7
(4) MODIS MAIAC AOD 관측	8
나. 분석 방법	10
(1) 증가효과(enhancement)계산	10
3. 한반도의 대기오염물질 배출 특성 및 대기질 현황	12
가. 북한과 남한의 국가적 규모 분석	12
(1) 북한과 남한의 XCO <sub>2</sub> 와 ΔXCO <sub>2</sub> 확률 분포	13
(2) 북한과 남한의 XCO와 ΔXCO 확률 분포	15
(3) 북한과 남한의 XNO <sub>2</sub> 와 ΔXNO <sub>2</sub> 확률 분포	17
(4) 2018~2020년 겨울철 XCO, XNO <sub>2</sub> 월별 공간 분포	19
(5) 2019년 2월과 2020년 2월 XCO, XNO <sub>2</sub> 확률 분포	22
(6) 2018~2020년 겨울철 XS <sub>2</sub> , AOD월별 공간 분포	24
나. 평양과 서울의 도시적 규모분석	26
(1) 겨울철 평양과 서울의 공간 분포 및 확률 분포	27
(2) 평양과 서울의 XCO, XNO <sub>2</sub> 일별 추세	30
(3) 평양과 서울의 XS <sub>2</sub> , AOD 일별 추세	32
(4) 용하시와 서울의 XCO, XNO <sub>2</sub> 일별 추세	34

(5) 용하시와 서울의 XS02, ADO 일별 추세	37
4. 연구요약 및 결론	40

## <그림 목차>

<그림 1> 연구 대상지(북한과 남한, 평양과 서울)	5
<그림 2> (a) TROPOMI 위성 활용한 한반도 CO 공간분포, (b) 한반도 NO <sub>2</sub> 공간분포	9
<그림 3> 2018년부터 2020년까지 OCO-2 위성이 관측한 북한과 남한의 XCO <sub>2</sub> 평균 농도, ΔXCO <sub>2</sub> 평균 농도 확률 분포	14
<그림 4> 2018년부터 2020년까지 TROPOMI 위성이 관측한 북한과 남한의 XCO 평균 농도, ΔXCO 평균 농도 확률 분포	16
<그림 5> 2018년부터 2020년까지 OCO-2 위성이 관측한 북한과 남한의 XCO <sub>2</sub> 평균 농도, ΔXCO <sub>2</sub> 평균 농도 확률 분포	18
<그림 6> 코로나 전 시기와 코로나 후 시기의 한반도의 겨울철 XCO 월별 공간분포	20
<그림 7> 코로나 전 시기와 코로나 후 시기의 한반도의 겨울철 XNO <sub>2</sub> 월별 공간분포	21
<그림 8> 2019년 2월과 2020년 2월 북한과 남한의 XCO, XNO <sub>2</sub> 농도 확률 분포 .....	23
<그림 9> 코로나 전 시기와 코로나 후 시기의 한반도의 겨울철 XSO <sub>2</sub> 월별 공간 분포	25
<그림 10> 2018년부터 2020년까지 평양과 서울의 XCO, XNO <sub>2</sub> 의 공간분포	28
<그림 11> 2018년부터 2020년까지의 평양과 서울의 XCO와 XNO <sub>2</sub> 농도 확률 분포	29
<그림 12> 평양과 서울의 XCO와 XNO <sub>2</sub> 일평균 시계열 추세와 상자 그림	31
<그림 13> 평양과 서울의 XSO <sub>2</sub> 와 AOD 일평균 시계열 추세와 상자 그림	33
<그림 14> 용하시와 XCO, XNO <sub>2</sub> 공간분포	35
<그림 14> 용하시와 서울의 XCO, XNO <sub>2</sub> 일평균 시계열 추세와 상자 그림	36
<그림 14> 용하시와 서울의 XSO <sub>2</sub> , AOD 일평균 시계열 추세와 상자 그림	38

<표 목차>

<표 1> 활용한 인공위성 정보

9





# 1. 서론

산업화와 도시화로 인한 에너지 사용은 기후변화의 원인 물질로 알려진 온실가스과 대기오염 물질을 배출하며 보건과 경제 분야 등 인간의 안보 전반에 큰 영향을 미치고 있다. 세계보건기구(WHO)가 2019년 발표한 자료에 따르면, 북한 도시 지역의 연평균 초미세먼지 농도는  $31 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, 세계보건기구 기준치인  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 3배가 넘는 것으로 조사되었다. 북한의 대기오염 관련 사망률이 우리나라의 10배에 이르는 것으로 추정되며, 이는 172개국 중 가장 높은 것으로 나타나고 있다. 하지만 북한에서 발생한 대기오염은 북한에 한정되지 않고 인접한 한국과 서로 직·간접적으로 영향을 받을 수 있기 때문에, 대기오염 개선을 위해 남북 기후협력체계 구축의 필요성이 대두되고 있다.

유의미한 남북 기후협력체계를 위해 정량적이고 신뢰도 높은 온실가스과 대기오염물질에 대한 현황파악이 선행되어야 한다. 하지만 현재 북한의 대기질 관측은 일부 지역에서만 한정적으로 이뤄지고 있으며, 관측된 자료도 한국에서는 UN 기관에서 보고된 일부 자료들을 통하여 간접적으로만 자료에 접근하고 있다. 따라서 위성자료와 같은 새로운 자료와 접근방법을 활용하여 접근이 제한된 북한의 대기오염 배출 특성과 북한의 대기 환경을 이해하고자 한다.

본 연구에서 인공위성에서 관측된 자료를 활용하여 이산화탄소 및 대기오염물질을 분석하고, 북한과 남한, 평양과 서울의 배출 특성과 각 도시의 대기질을 파악을 목표로 했다. 이는 통일기반구축사업의 일환으로 북한 지역의 대기환경관리 현황과 고찰을 통하여 대기오염 개선 및 기후변화 대응을 위한 남북협력사업의 개선방안을 도출할 수 있을 것으로 기대된다.



## 2. 자료 및 분석 방법

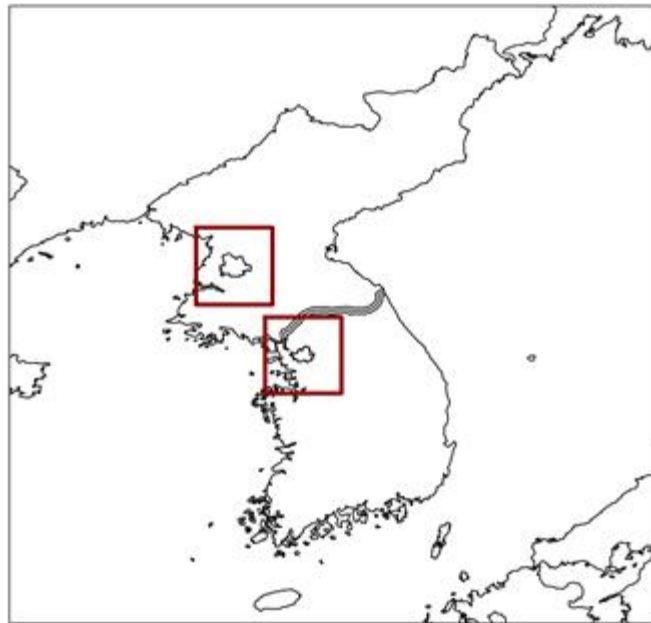
### 가. 분석 자료

남한은 기상청에서 운영중인 높은 해상도의 대기질 자료를 확보하고 있지만 북한의 대기오염관측망은 남한보다 관측 수가 적으며, 그 관측 자료의 신뢰도를 명확하게 알 수가 없다. 이를 극복하기 위하여 NASA(미국항공우주국)에서 제공하는 OCO-2의 이산화탄소 자료, ESA(유럽항공우주국에서) 제공하는 TROPOMI의 대기오염물질 자료(일산화탄소, 이산화질소, 이산화황)를 활용한다. 또한, 대기오염 물질과 밀접한 관련성이 있는 에어로솔 광학두께를 확인하기 위해 NASA의 MODIS Terra 및 Aqua 위성을 사용한다.

본 연구는 2018년부터 2020년까지 위와 같은 위성으로 관측된 이산화탄소, 일산화탄소, 이산화질소, 이산화황, 에어로솔 광학두께의 정량적으로 산출한다. 또한, 서울과 평양의 이산화탄소, 일산화탄소, 이산화질소, 이산화황과 에어로솔 광학두께의 양과 변화를 분석했다. 이를 통해 북한과 남한의 이산화탄소와 대기오염물질의 시·공간적 분포를 정량적으로 분석하고자 했다.

### (1) 분석 지역 및 기간

본 연구의 공간적 범위는 남한과 북한이 위치한 한반도 지역 (33°N-38°N, 124°E-130°E)과 각 연구대상지의 대도시인 서울(37.57°N, 126.98°E)과 평양(39.03°N, 127.75°E)이다(그림 1). 본 연구의 시간적 범위는 ESA에서 제공하는 TROPOMI 자료의 기간이 2017년 10월 이후부터 현재까지라는 점을 고려하여, 2018년부터 2020년까지이다. 또한, 식생 활동이 적어 인간 배출 효과를 가장 잘 볼 수 있는 겨울기간을 대상으로 2018년 12월부터 2020년 12월까지 대상지의 다중 인공위성을 통해 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 일산화탄소(CO), 이산화질소(NO<sub>2</sub>), 이산화황(SO<sub>2</sub>), 에어로솔 광학두께(AOD) 등의 관측 농도를 활용하였다.



<그림 1> 연구 대상지(북한과 남한, 평양과 서울)

## (2) OCO-2(Orbiting Carbon Observatory-2) XCO<sub>2</sub> 관측

OCO-2(Orbiting Carbon Observatory-2)는 2014년 7월 NASA에서 대기 중 이산화탄소를 관측하기 위해 발사한 원격위성이다(표 1). 이 위성은 태양동기궤도 위성으로 약 705km 고도에서 16일 주기로 지구를 공전하며 주요 거점 도시를 관측하기 때문에 도시화와 산업화로 인해 발생하는 이산화탄소를 파악하기에 매우 적합하다.

OCO-2 위성은 이산화탄소를 관측하기 위해 1.61 $\mu$ m CO<sub>2</sub> 흡수선과 0.76 $\mu$ m O<sub>2</sub> A밴드 흡수선의 세기를 이용하여 지표에서 연직으로 분포하는 이산화탄소의 연직농도를 산출하며, 이 값을 연직컬럼농도(XCO<sub>2</sub>)라고 부른다. OCO-2위성에서 관측한 이산화탄소의 연직컬럼농도는 CO<sub>2</sub>의 건조공기몰분율(dry-air mole fraction, XCO<sub>2</sub>)을 평균 오차 범위 1ppm 이내로 관측할 수 있다. 또 공간적 해상도는 1.29km x 2.25km로 타 온실가스 관측 위성들보다 높은 해상도를 가지기 때문에 지역적 규모(regional scale)에서부터 도시 규모까지 이산화탄소의 배출현황을 보기에 적합하며, 시계열 분석에도 사용될 수 있다.

본 연구는 OCO-2 위성에서 산출한 CO<sub>2</sub>의 연직컬럼농도(Vertical Column Density)를 활용하여 2018년부터 2020년까지의 한반도 XCO<sub>2</sub> 공간분포를 분석했다.

### (3) S-5P TROPOMI XCO, XNO<sub>2</sub> 관측

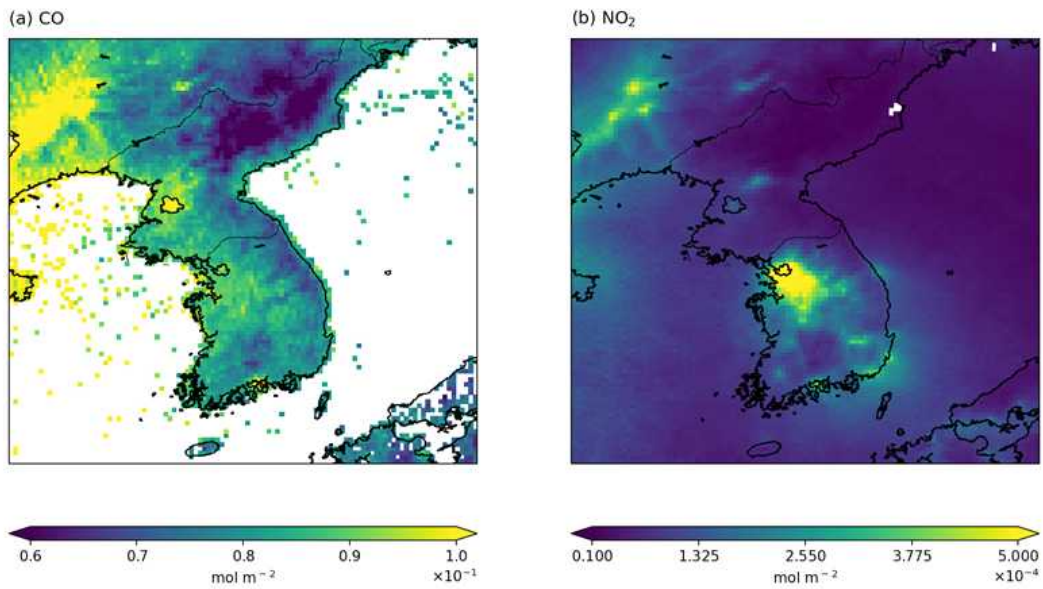
2017년 10월 ESA(European Space Agency, 유럽우주국)에서 발사한 Copernicus Sentinel-5 Precursor (S-5P) 위성에 탑재된 TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument)는 대기질을 관측하는 목적으로 개발되었다. TROPOMI는 2600km 넓이의 관측 폭으로 하루에 전세계를 관측할 수 있으며, 7km×7 km, 7km×3.5 km의 공간 해상도를 갖는다. TROPOMI는 대기오염물질인 일산화탄소, 이산화질소, 이산화황 등의 대기 산출물과 대기질 정보를 일별로 제공하고 있다(표1).

S-5P TROPOMI 측정의 공간 분해능은 일산화탄소(CO)는 7km × 7km, 최저점에서 이산화질소(NO<sub>2</sub>)와 이산화황(SO<sub>2</sub>)는 7km × 3.5km이다. 2019년 8월 6일부터 분해능이 향상되었으며, 각각 5.5km×7km 및 5.5km × 3.5km이다. 높은 분해능 외에도 기기의 우수한 신호대 잡음비를 통해 도시 및 산업 지역의 CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> 오염 감지를 포함하여 대기 성분을 하루 단위로 관찰할 수 있다. 우리나라의 경우 주로 대도시와 공장이 많은 곳(수도권, 부산, 울산, 광양 등) 주위에서 대기오염물질의 농도가 높게 나타난다.

본 연구에서는 TROPOMI 위성의 CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>의 연직칼럼농도(Vertical Column Density)를 활용하여 2018년부터 2020년까지의 한반도 XCO, XNO<sub>2</sub>, XSO<sub>2</sub>의 공간 분포를 분석하였다(그림 2).

#### (4) MODIS MAIAC AOD 관측

본 연구에서는 NASA의 Terra/Aqua 위성에 탑재된 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)센서에서 측정된 에어로졸 광학두께(Aerosol Optical Depth; AOD)자료를 활용했다 (표 1). AOD는 미세먼지(PM2.5, PM10) 또는 황사 등에 의해 빛의 대기투과율변화를 정량적으로 나타낸 값으로 대도시 및 발전소를 포함한 공업지역에서 높게 나타난다. 본 연구에서는 MODIS의 AOD 자료에 MAIAC 알고리즘을 적용하여 재구성한 1km 해상도의 Level 2자료인 MCD19A2를 활용했다. 이 자료는 구름, 눈, 또는 얼음 등의 효과는 배제된 자료만 사용되었다. AOD의 값은 한반도 상공을 각각 오전 10시 30분과 오후 1시 30분에 지나가는 Terra와 Aqua영상의 AOD 평균값을 이용하여 계산했다.



<그림 2> TROPOMI 위성 활용한 한반도 (a) CO 공간분포, (b) NO<sub>2</sub> 공간분포 예시

<표 1> 활용한 인공위성 정보

위성	운영기관	측정 데이터	해상도
Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2)	NASA	XCO2	1.3 x 2.25km <sup>2</sup>
Sentinel-5 Precursor TROPOspheric Monitoring Instrument (S-5P TROPOMI)	ESA	XCO	7 x 7km <sup>2</sup> 5.5 x 7km <sup>2</sup> (2019.8.6. ~)
		XNO2, XSO2	7 x 3.5km <sup>2</sup> 5.5 x 3.5km <sup>2</sup> (2019.8.6. ~)
Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS MAIAC)	NASA	AOD	1 X 1 km <sup>2</sup>



## 나. 분석 방법

### (1) 증가효과(enhancement) 계산

본 연구는 대기 중에 있는 배경농도를 제거하고 인위적인 배출 영향을 받은 농도를 분석하기 위해 증가 효과(enhancement,  $\Delta$ 오염물질)를 정의하여 계산하였다. 인공위성 관측자료를 활용하여 한반도의 북한과 남한을 비교하는 국가 규모와 두 지역의 대도시인 평양과 서울을 비교하는 도시 규모로 나눠서 분석을 수행하였다.

국가 증가효과(National enhancement)는 전체 연구대상지를 지나가는 위성이 측정한 농도가 가장 낮은 첫 번째 백분위수 (1<sup>st</sup> percentile)를 제거한 값으로 정의하였다.

도시 증가효과는(Urban enhancement)는 대상지의 도시를 지나가는 위성이 측정한 농도가 가장 낮은 첫 번째 백분위수 (1<sup>st</sup> percentile)를 제거한 값으로 정의하였다.

국가 및 도시 증가효과를 산출하기 위하여 NASA에서 운영하는 OCO-2 위성의 XCO<sub>2</sub> 자료, MODIS의 AOD 자료, ESA에서 운영하는 TROPOMI의 XCO, XNO<sub>2</sub>, XSO<sub>2</sub> 자료를 활용하였다. 규모에 따른  $\Delta$ XCO<sub>2</sub>,  $\Delta$ AOD,  $\Delta$ XCO,  $\Delta$ XNO<sub>2</sub>,  $\Delta$ XSO<sub>2</sub>의 국가 증가량과 도시 증가량을 분석하여 각 지역의 배출 양상을 관찰하였다.



### 3. 한반도의 대기오염물질 배출 특성 및 대기질 현황

#### 가. 남한과 북한의 국지적 규모 분석

한반도의 대기질 현황 분석에 앞서 현재의 한반도 대기오염물질 배출과 대기질에 어떤 특징을 보이는가를 이해하는 것은 매우 중요하다. 이산화탄소와 대기오염물질(일산화탄소, 이산화질소, 이산화황)은 자동차, 건물의 난방 등의 화석연료 연소에 의해 함께 발생되기 때문에, 그 지역의 대기질을 파악할 수 있다.

한반도의 이산화탄소와 대기오염물질의 농도를 분석하여 대기질 특성을 파악하고자 하였다. 이산화탄소와 대기오염물질 농도를 산출하기 위해 위성자료인 OCO-2, TROPOMI, MODIS MAIAC 자료를 이용하였다. 2018년 6월부터 2020년 10월까지의 기간동안 남한과 북한의 이산화탄소, 일산화탄소, 이산화질소, 이산화황, 에어로솔 광학두께의 농도 변화를 파악하였다. 한반도의 북한과 남한의 국지적 규모로 구분하여 비교 분석하였다.

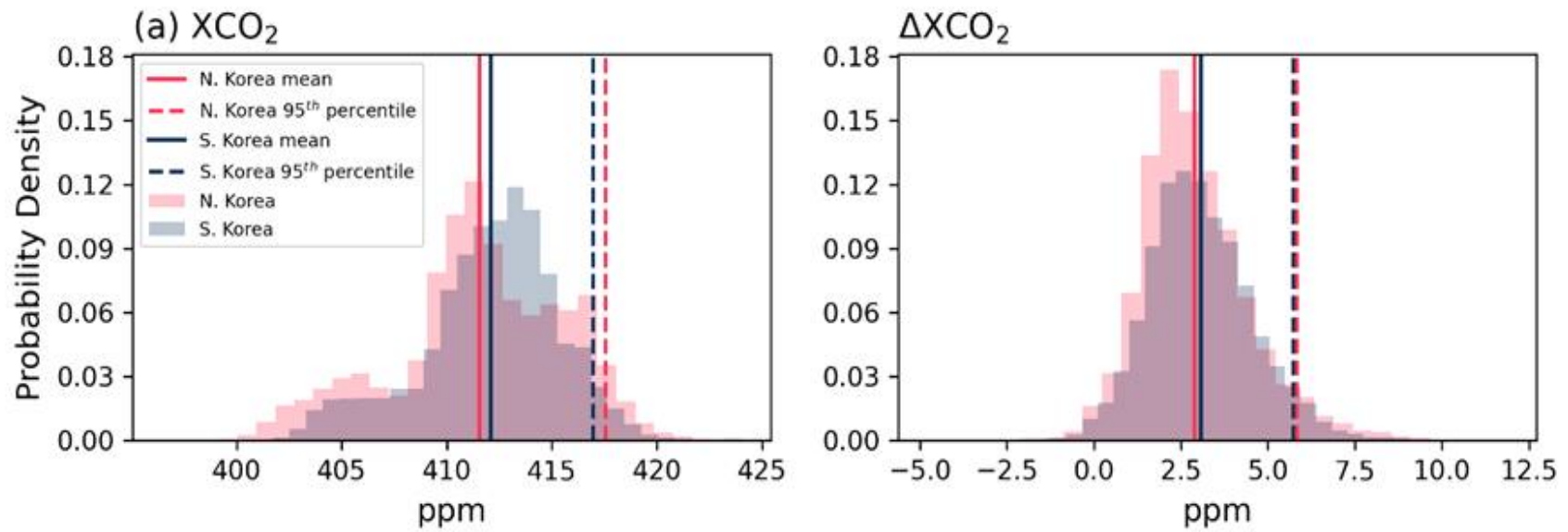
### (1) 북한과 남한의 XCO<sub>2</sub>와 ΔXCO<sub>2</sub> 확률 분포

이산화탄소는 기후변화의 주요원인 물질로 화석 연료의 사용으로 인해 배출될 수 있다. 도시화와 인간활동의 지표로서 사용될 수 있는 이산화탄소의 배출을 확인하기 위해 북한과 남한의 XCO<sub>2</sub> 평균 농도와 증가 효과 값인 ΔXCO<sub>2</sub> 농도 확률 분포를 분석했다(그림 3). 그림3에서 실선은 대상지의 관측기간 동안 평균 농도 값으로, 점선은 관측 농도의 95번째 백분위수(95th percentile)로 고농도 사례를 의미한다.

관측기간 동안 북한과 남한에서의 XCO<sub>2</sub> 평균 농도는 각각 411.55ppm, 412.09ppm로 비슷하지만 남한이 조금 더 높게 나타났다. 반면 XCO<sub>2</sub> 고농도 값은 북한과 남한에서 417.54ppm, 416.95ppm로 나타나 북한이 남한보다 0.59ppm 더 높은 결과를 보여주고 있다.

북한과 남한의 XCO<sub>2</sub> 증가 효과 값(ΔXCO<sub>2</sub>)을 비교하였을 때, 북한의 ΔXCO<sub>2</sub> 평균 농도는 2.89ppm이었고, 남한의 ΔXCO<sub>2</sub> 평균 농도는 3.069 ppm였다. 북한의 이산화탄소 농도와 마찬가지로 북한과 남한의 ΔXCO<sub>2</sub>의 고농도 값은 각각 5.84ppm, 5.72ppm로 나타나 북한에서 고농도 사례에 더 높은 값을 가지는 결과가 나타났다.

OCO-2 위성에서 산출한 이산화탄소 배출과 배경대기를 제거한 증가 효과를 남한과 북한으로 비교한 결과 일반 농도는 남한에서 더 높지만, 고농도 사례에서는 북한에서 더 높은 것으로 나타났다. 남한이 북한보다 약 2배정도 인구가 많은 점을 고려했을 때, 북한의 이산화탄소 고농도 사례가 높다는 점은 에너지사용과 배출 특성의 차이, 그리고 중국의 영향 등을 고려해볼 수 있다. 이 점에 대해 좀 더 분명히 하기 위해 다른 배출원들과의 비교가 필요할 것으로 보인다.



<그림 3> 2018년부터 2020년까지 OCO-2 위성이 관측한 북한과 남한의  $XCO_2$  평균 농도,  $\Delta XCO_2$  평균 농도 확률 분포

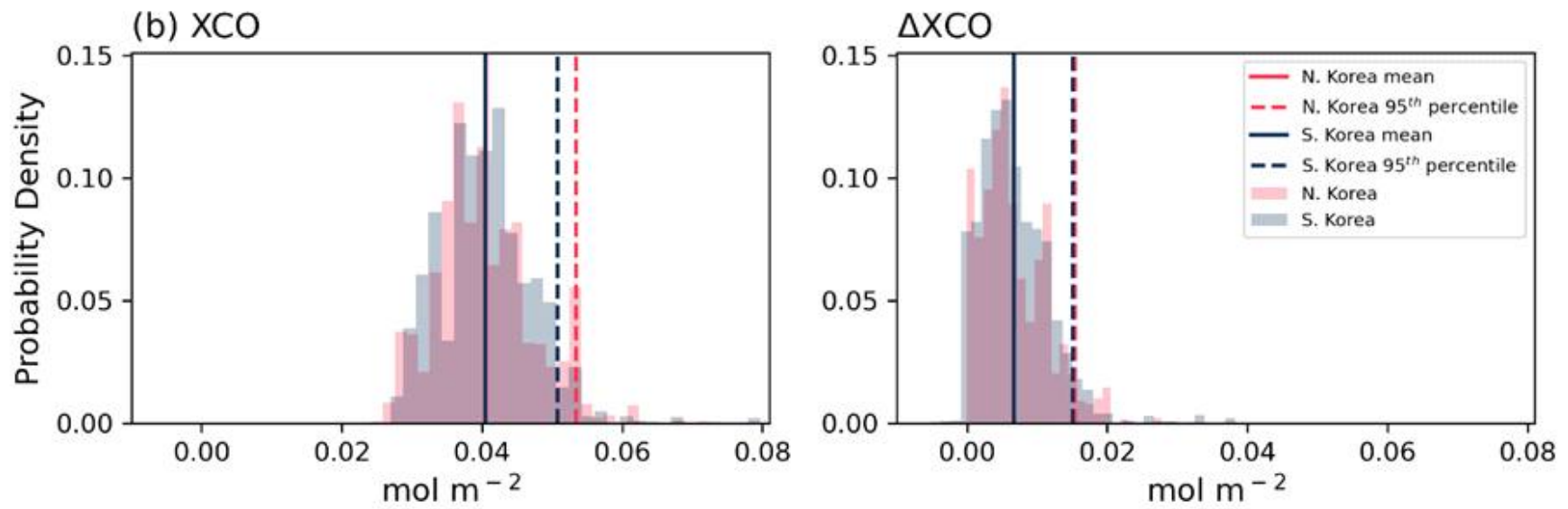
## (2) 북한과 남한의 XCO와 $\Delta$ XCO 확률 분포

일산화탄소(CO)는 연료의 탄소성분이 불완전 연소할 때 배출되는 가스이다. 차량과 산업공정에서 나타날 수 있지만, 산불과 바이오매스 연소에서도 나타날 수 있기 때문에 북한의 에너지 사용 패턴에 대해 짐작해볼 수 있다. 그림 4는 2018년부터 2020년까지의 2년 동안 TROPOMI 위성이 관측한 북한과 남한의 XCO 농도와 증가 효과 값인  $\Delta$ XCO 농도 확률 분포를 비교하여 각각 나타낸 것이다.

그림 4를 통해 북한과 남한에서의 XCO 평균 농도는 각각  $0.0405 \text{ mol m}^{-2}$ ,  $0.0404 \text{ mol m}^{-2}$ 를 확인하였다. 북한과 남한의 XCO 국가 증가 값인  $\Delta$ XCO 평균 농도값은 각각  $0.046701 \text{ mol m}^{-2}$ ,  $0.046703 \text{ mol m}^{-2}$ 이다.

북한과 남한의 XCO 농도를 비교할 때, XCO 농도 분포가 비슷한 양상을 보였다. 하지만 남한의 에너지 배출 및 인위적인 활동이 더 많다는 것을 고려하여, 북한의 XCO 평균 농도가 남한의 평균 농도와 비슷하다는 것은 북한 내에서 고농도 CO 배출원이 많을 것으로 보인다. 그림 4를 통해서도 북한의 XCO 고농도 값이 남한보다 더 높다는 것을 확인할 수 있다. CO(일산화탄소)는 자동차를 포함하는 이동 오염원의 배기뿐 아니라 제철소의 공업 등에서 배출된 점을 고려하여, 북한의 고농도 CO는 노후화된 발전소 및 에너지를 사용으로 인한 것으로 볼 수 있다.

북한의 XCO 농도 값이 전반적으로 남한보다 높은 것으로 나타났다. 그러나, 북한 자체의 배출 효과를 보여주는  $\Delta$ XCO 농도를 비교할 때,  $\Delta$ XCO 고농도 값은 북한과 남한이 비슷한 수준이다. 북한의 XCO 농도가  $\Delta$ XCO 농도 보다 더 높은 것은 북한 외부에서 유입된 것으로 추정된다. 추후 연구를 중국을 포함한 지역을 대상으로 모델링 등으로 통해 이를 정확하게 검증하는 과정이 필요하다.



<그림 4> 2018년부터 2020년까지 TROPOMI 위성이 관측한 북한과 남한의 XCO 평균 농도,  $\Delta XCO$  평균 농도 확률 분포

### (3) 북한과 남한의 $XNO_2$ 와 $\Delta XNO_2$ 확률 분포

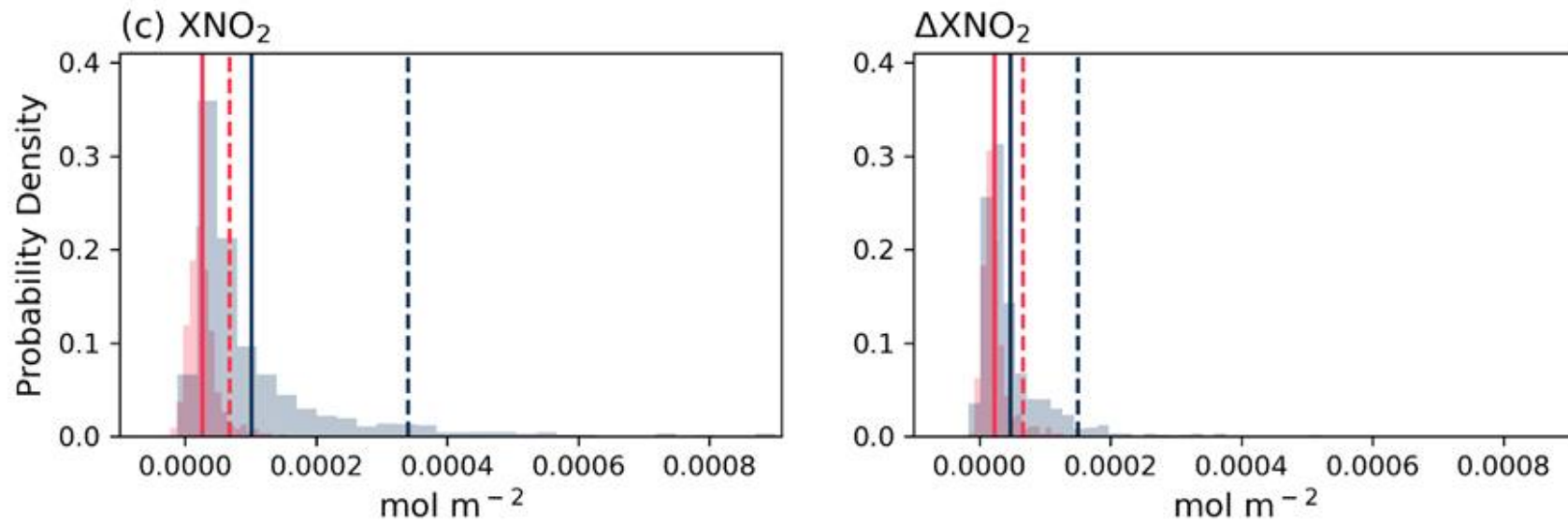
그림 5는 2018년부터 2020년까지의 2년 동안 TROPOMI 위성이 관측한 북한과 남한의  $XNO_2$  농도와 증가 효과 값인  $\Delta XNO_2$  농도 확률 분포를 비교하여 각각 나타낸 것이다.

북한과 남한에서의  $XNO_2$  평균 농도는 각각  $0.000068 \text{ mol m}^{-2}$ ,  $0.0001 \text{ mol m}^{-2}$ 를 확인할 수 있다(그림 5). 북한과 남한 지역 자체의 배출 효과를 보여주는  $\Delta XNO_2$  평균 농도값은 각각  $0.000023 \text{ mol m}^{-2}$ ,  $0.000048 \text{ mol m}^{-2}$  이었다.

$XNO_2$  와  $\Delta XNO_2$  농도를 비교한 결과, 앞의 이산화탄소 그리고 일산화탄소와는 다른 양상을 보여주었다.  $XNO_2$  평균 농도가 남한이 북한보다 대략 2배 이상 높다는 것을 확인 할 수 있다. 또한,  $XNO_2$  평균 농도 뿐만 아니라  $XNO_2$  고농도 값 역시 남한이 더 높다.

질소산화물( $NO_2$ )도 화석연료 사용에 따라 배출되는 물질로, 특히 자동차 등의 이동 오염원의 내연기관에서 많이 배출되는 것으로 알려져 있다. 통계청에서 조사된 바에 따르면 2018년 기준 남한에 등록된 차량이 23,203,000대인 반면, 북한은 284,000대로 불과해 약 80배 이상 남한에서 많은 차량이 운행되고 있기 때문에 질소산화물이 많이 배출되고 있는 것으로 보인다.





<그림 5> 2018년부터 2020년까지 TROPOMI 위성이 관측한 북한과 남한의 XNO<sub>2</sub> 평균 농도, ΔXNO<sub>2</sub> 평균 농도 확률 분포

#### (4) 2018~2020년 겨울철 XCO, XNO<sub>2</sub> 월별 공간 분포 및 농도 확률 분포

본 연구에서는 식생활동이 적어 인간 배출효과를 가장 잘 볼 수 있는 겨울철에 해당하는 월평균(12월,1월,2월) 공간분포를 나타내고자 하였다. 그림6과 그림 7은 각각 코로나 전 시기(2018년부터 2019년까지)와 코로나 후 시기(2019년부터 2020년까지)의 북한과 남한의 겨울철 XCO, XNO<sub>2</sub> 농도 월별 공간분포를 나타냈다. CO<sub>2</sub> 농도 같은 경우는 위성자료가 부족하여 공간분포로 확인 할 수 없었다.

그림 6 CO의 공간분포는 북한과 남한이 전반적으로 비슷한 농도 수준임을 나타냈다. 북한 내에서 평양이 다른 지역보다 농도가 더 높으며, 남한의 서울보다 더 높다. 이는 북한 내에서 CO 농도가 많이 발생하는 배출원이 더 많을 뿐만 아니라 외부에서 수송된 CO로부터 영향을 많은 영향을 받았을 것으로 판단된다.

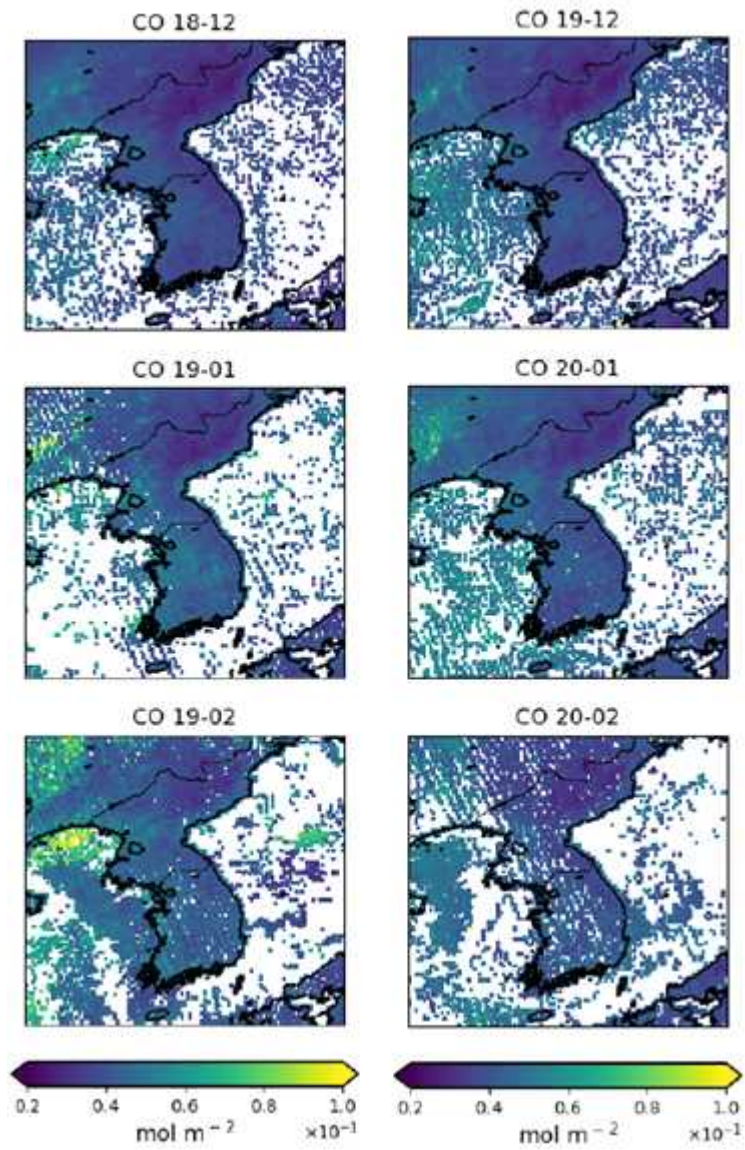
그림 6 NO<sub>2</sub>의 공간분포에서는 북한과 남한의 농도 분포가 차이를 확인할 수 있다. 북한의 NO<sub>2</sub> 농도는 북한 내에서 평양 이외 다른 지역의 농도가 높은 지역을 확인할 수 있었지만, 남한보다 낮았다. 이를 통해, 북한은 NO<sub>2</sub> 배출원인 운송 수단 사용이 남한보다 더 작을 것으로 판단된다. 남한의 NO<sub>2</sub> 농도는 북한보다 높으며, 남한 내에서 서울을 포함한 수도권 지역과 산업활동이 활발한 곳인 남쪽 해안가 지역의 농도는 높다. 이는 남한이 북한보다 차량 보유수가 더 많아 차량으로 인한 NO<sub>2</sub> 배출이 더 많으며, 산업지대에 운송 수단 사용이 많아 NO<sub>2</sub> 농도가 더 높은 것으로 추정된다.

그림 8은 2019년 2월과 2020년 2월 북한과 남한의 XCO, XNO<sub>2</sub> 농도 확률 분포를 비교하여 보여줬다.

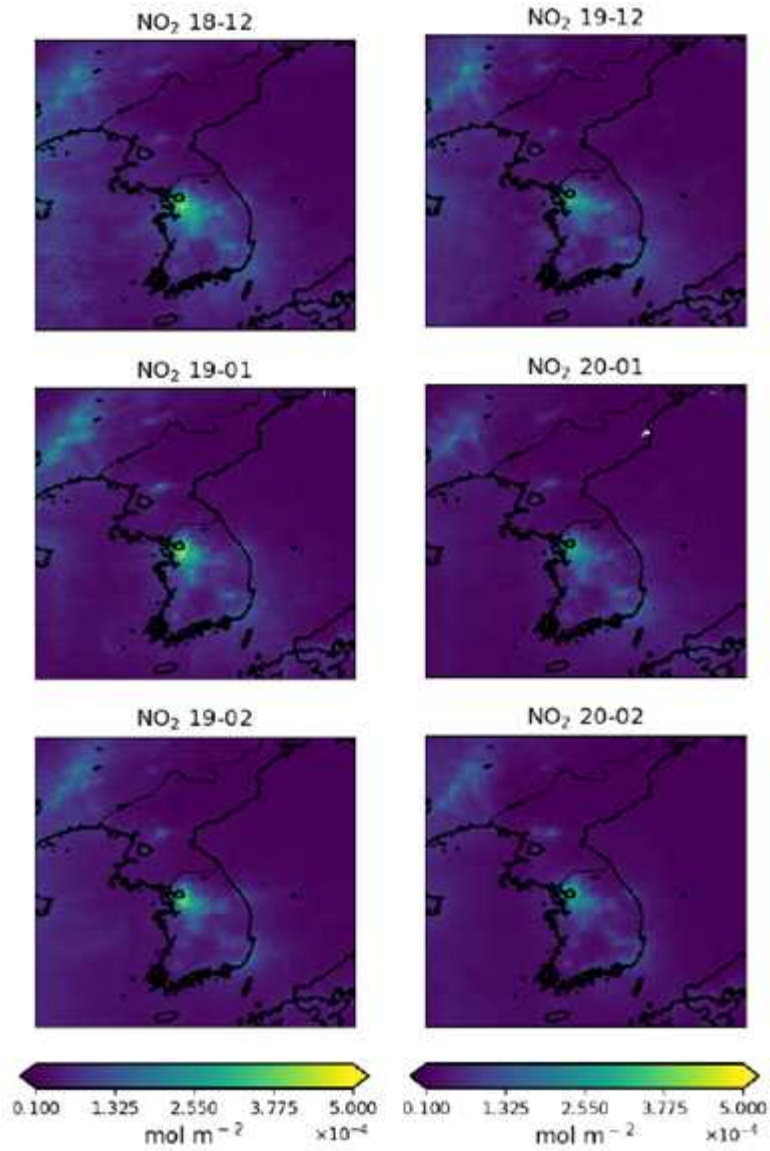
그림 8에서 북한의 경우, 2019년 2월 XCO 평균 농도와 고농도 값은 각각 0.0434 mol m<sup>-2</sup>, 0.0551 mol m<sup>-2</sup>이다. 반면, 2020년 2월의 XCO 평균 농도와 고농도 값은 각각 0.0389 mol m<sup>-2</sup>, 0.0487 mol m<sup>-2</sup>으로 전년 대비 감소하였다.

그림 8에서 남한의 경우, 2019년 2월 남한의 XCO 평균 농도와 고농도 값은 각각  $0.0453\text{mol m}^{-2}$ ,  $0.0551\text{mol m}^{-2}$ 이다. 반면, 2020년 2월의 XCO 평균 농도와 고농도 값은 각각  $0.0426\text{mol m}^{-2}$ ,  $0.0496\text{mol m}^{-2}$ 으로 전년 대비 감소하였다.

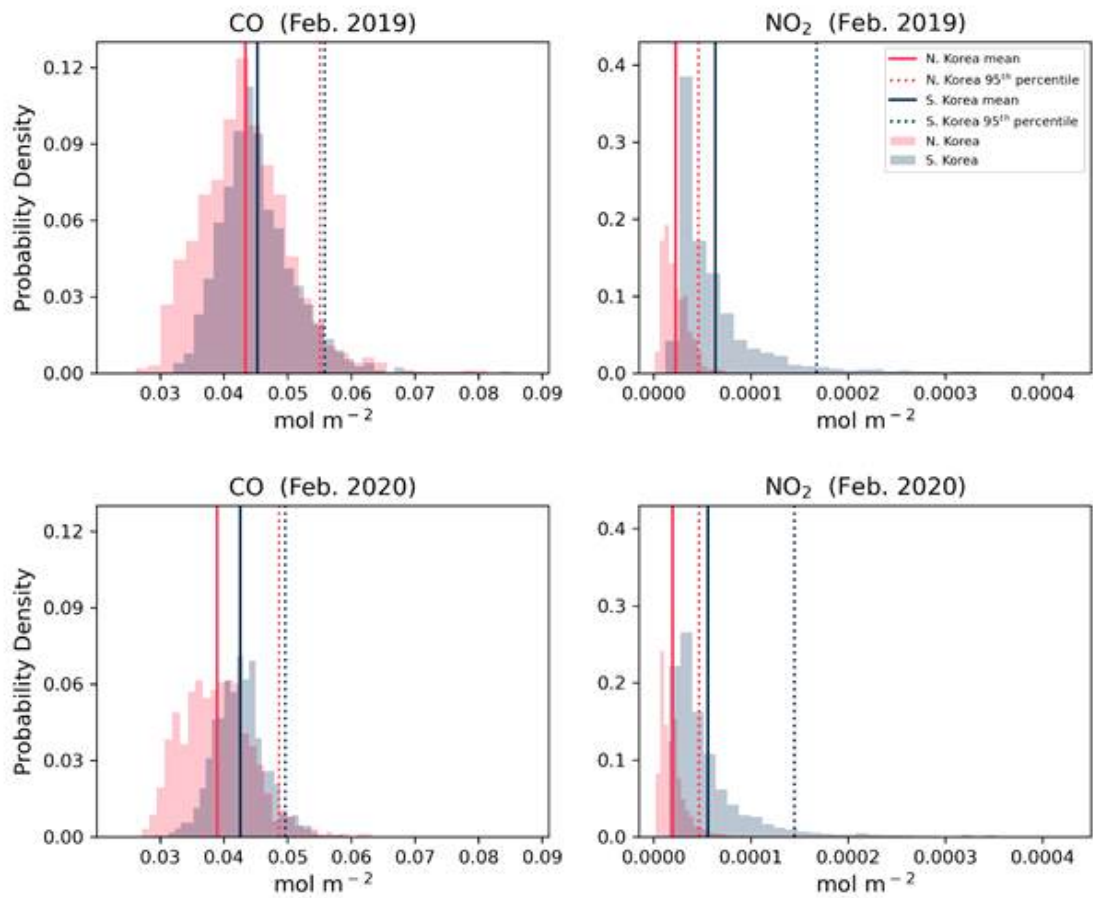
코로나 19로 인해 2019년 2월 대비 2020년 2월에 XCO, XNO<sub>2</sub> 농도는 북한과 남한에서 모두 감소하였다. 북한은 코로나 19로 인해 북한 내 배출도 줄었지만, 외부에서 수송된 CO, NO<sub>2</sub> 배출이 감소하여 전년 대비 외부의 영향을 더 적게 받았다. 또한, 배출량 감소로 인한 대기 중 농도 감소가 위성 자료에서도 정확하게 감지했음을 확인하였다.



<그림 6> 코로나 전 시기와 코로나 후 시기의 한반도의 겨울철 XCO<sub>2</sub>, 월별 공간분포



<그림 7> 코로나 전 시기와 코로나 후 시기의 한반도의 겨울철 XNO<sub>2</sub> 월별 공간분포



<그림 8> 2019년 2월과 2020년 2월 북한과 남한의 XCO, XNO<sub>2</sub> 농도 확률 분포

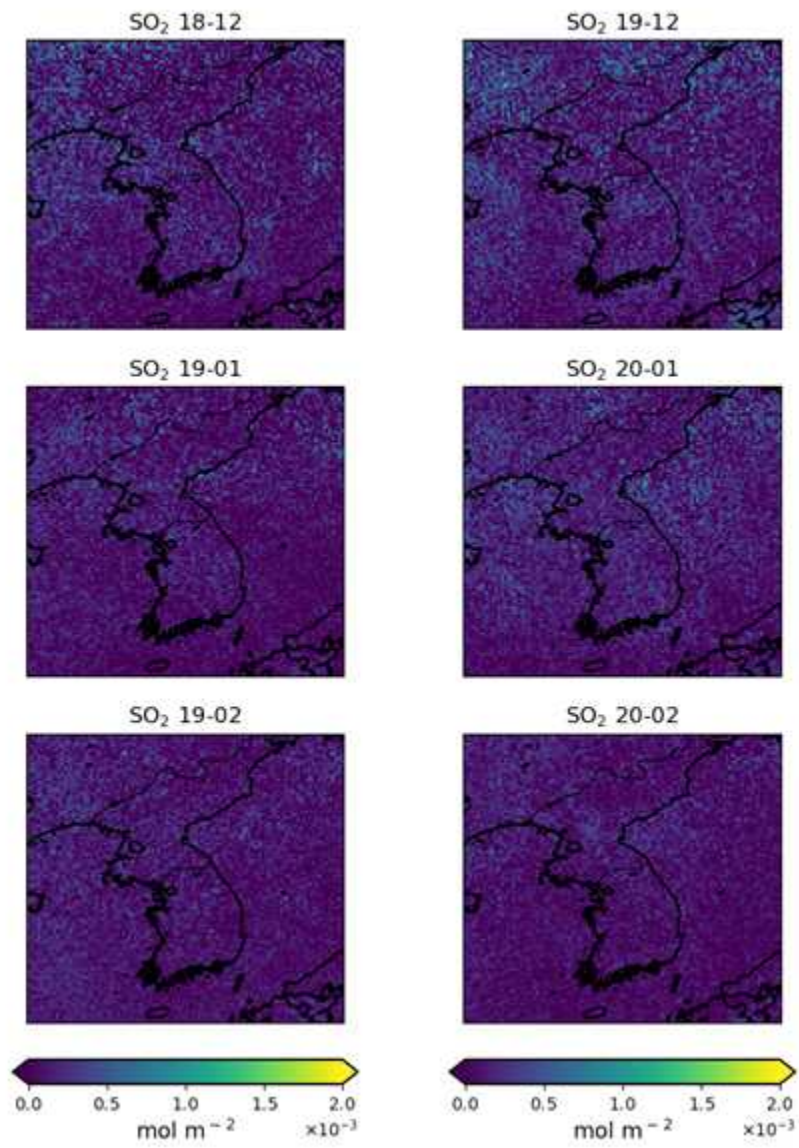
#### (5) 2018~2020년 겨울철 XSO<sub>2</sub>, AOD월별 공간 분포

그림 9는 코로나 전 시기(2018년부터 2019년까지)와 코로나 후 시기(2019년부터 2020년까지) 북한과 남한의 겨울철 XSO<sub>2</sub> 월별 공간분포를 나타냈다. SO<sub>2</sub>는 계절별 농도를 분석하였을 때, 겨울철 농도가 가장 높은 시기이다.

2018년~2019년 겨울철과 2019년~2020년 겨울철 모두 12월에서 SO<sub>2</sub> 농도가 가장 높았으며, 1월과 2월로 갈수록 SO<sub>2</sub> 농도가 낮았다. 하지만, 두 시기의 겨울철 농도를 비교 분석할 때, 코로나 19 영향으로 인한 배출 감소 효과는 뚜렷하게 나타나지 않았다.

SO<sub>2</sub>가 선박, 화산분출 등에서 많이 배출되는 기체이며, 대기 중에 머무는 시간이 짧은 미량 기체이다. 한반도 규모의 지역별 비교에서는 농도 차이가 크지 않기 때문에 북한과 남한을 비교하기 어렵다. SO<sub>2</sub> 관련 연구에서는 주로 한 지역의 공단지역과 비공단지역으로 나뉘어 분석하였다. 향후 SO<sub>2</sub> 관한 연구는 북한의 공단지역과 남한의 공단지역끼리의 비교분석이 필요하다.

AOD 같은 경우는 상대적으로 자료가 적으며, 대기 물질 특성상 국가 규모 비교가 어렵기에, 한반도의 AOD 월별 공간분포로 확인할 수 없었다.



<그림 9> 코로나 전 시기와 코로나 후 시기의 한반도의 겨울철 XSO2 월별 공간 분포



## 나. 평양과 서울의 도시적 규모 분석

북한과 남한의 국가적 규모뿐만 아니라 도시적 규모의 이산화탄소와 대기오염물질의 농도를 분석하여 대기질 특성을 파악하고자 하였다. 이산화탄소와 대기오염물질 농도를 산출하기 위해 위성자료인 OCO-2, TROPOMI 자료를 활용하여 2018년 6월부터 2020년 10월까지의 기간 동안 북한의 평양과 남한의 서울에서 이산화탄소, 일산화탄소, 질소산화물의 농도 변화를 파악하였다. 북한과 남한의 수도인 평양과 서울을 도시적 규모로 구분하여 비교 분석하였다.

### (1) 2018~2020년 겨울철 평양과 서울의 XCO 와 XNO<sub>2</sub> 공간 분포 및 농도 확률 분포

그림 10과 그림 11은 각각 2018년부터 2020년까지의 겨울철 평양과 서울을 확대하여 XCO 와 XNO<sub>2</sub>의 공간분포와 농도 확률 분포를 나타낸 것이다.

그림 10 XCO 공간분포에 경우, 평양의 XCO 농도는 주변 도시 보다 높을 뿐만 아니라 서울과 수도권 지역보다 더 높았다. 이는 평양이 서울과 수도권 지역보다 CO 배출원이 더 많을 것으로 추정된다. 남한 내에서 서울의 XCO 농도는 주변 도시보다 더 높았지만, 평양의 농도보다는 낮았다. 이를 통해 서울은 다른 주변 도시보다 CO 배출원이 많지만, 평양보다는 적을 것으로 판단된다.

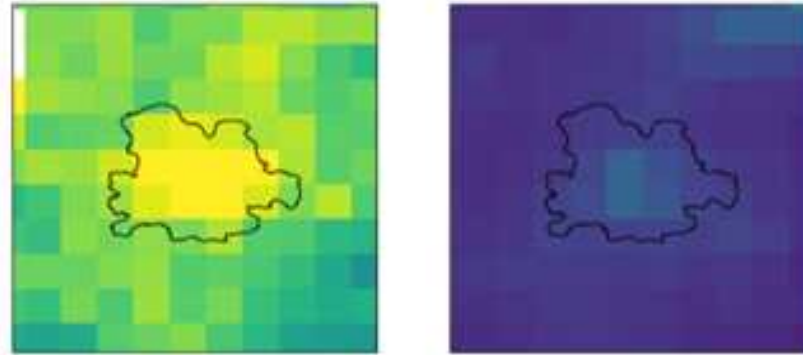
그림 10 XNO<sub>2</sub> 공간분포에 따르면, XCO 농도 결과와 반대로 평양의 XNO<sub>2</sub> 농도는 서울보다 낮았지만, 북한 내에서 평양의 XNO<sub>2</sub> 농도는 주변 도시보다 더 높았다. 이는 NO<sub>2</sub> 농도는 차량과 양의 상관관계가 있기에, 북한 내에서 평양이 주변 도시보다 교통량이 더 많을 것으로 추정된다. 서울의 XNO<sub>2</sub> 농도는 평양보다 높을 뿐만 아니라 수도권 북쪽지역 보다 더 높았다. 이를 통해, 서울은 주변 도시보다 차량과 같은 운송 수단이 더 많을 뿐만 아니라 평양 보다 더 많을 것으로 판단된다.

그림 11 XCO 농도 확률 분포에 따르면, 평양과 서울의 평균 농도는 각각  $0.0521\text{mol m}^{-2}$ ,  $0.0468\text{mol m}^{-2}$ 를 확인할 수 있다. 평양과 서울의 95번째 백분위수 농도 값은 각각  $0.0745\text{mol m}^{-2}$ ,  $0.0599\text{mol m}^{-2}$ 이다. 평양과 서울은 XCO 평균 농도보다 고농도 값에서 큰 차이를 보이며, 평양의 XCO 고농도 값은 서울보다 11.3% 더 높다. 이는 평양이 서울보다 더 많은 고농도 XCO를 유발하는 배출원이 존재하므로, 북한의 대기질 개선을 위해서는 CO의 고농도 유발 배출원을 파악할 필요가 있다.

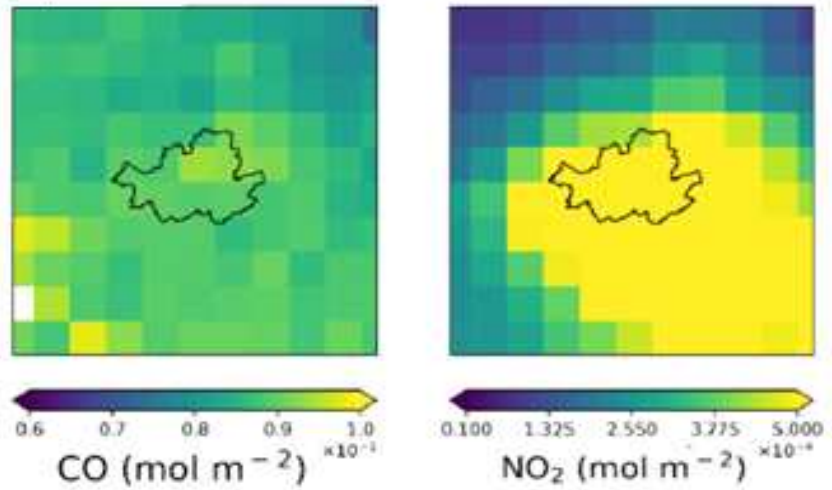
그림 11의 XNO<sub>2</sub> 농도 확률 분포에 따르면, 평양과 서울의 평균 농도는 각각  $0.000064\text{mol m}^{-2}$ ,  $0.000343\text{mol m}^{-2}$ 를 확인할 수 있다. 평양

과 서울의 고농도 농도 값은 각각  $0.000156 \text{ mol m}^{-2}$ ,  $0.000782 \text{ mol m}^{-2}$ 이다. 서울의  $\text{XNO}_2$  고농도 값은 평양의 고농도 값보다 4배 이상 더 높다. 이는 서울이 평양보다 교통량이 더 많아  $\text{NO}_2$ 가 많이 배출한 것으로 보인다.

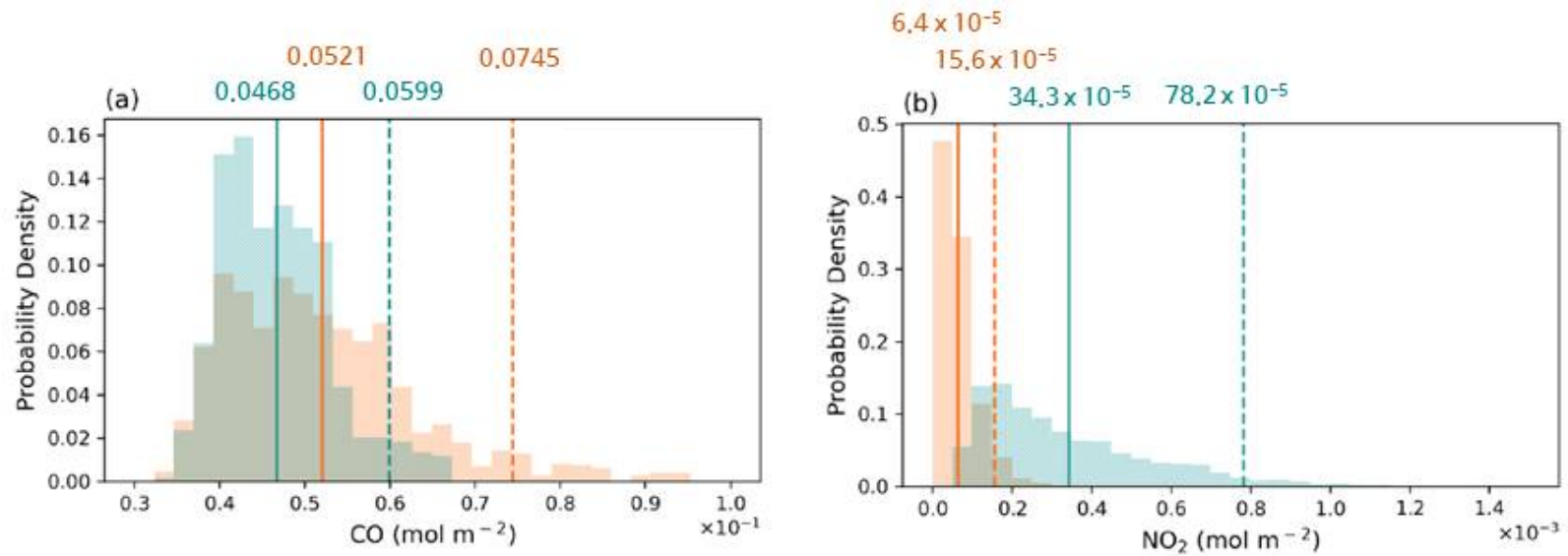
(a) Pyongyang



(b) Seoul



<그림 10> 2018년부터 2020년까지의 평양과 서울의 XCO와 XNO2의 공간분포



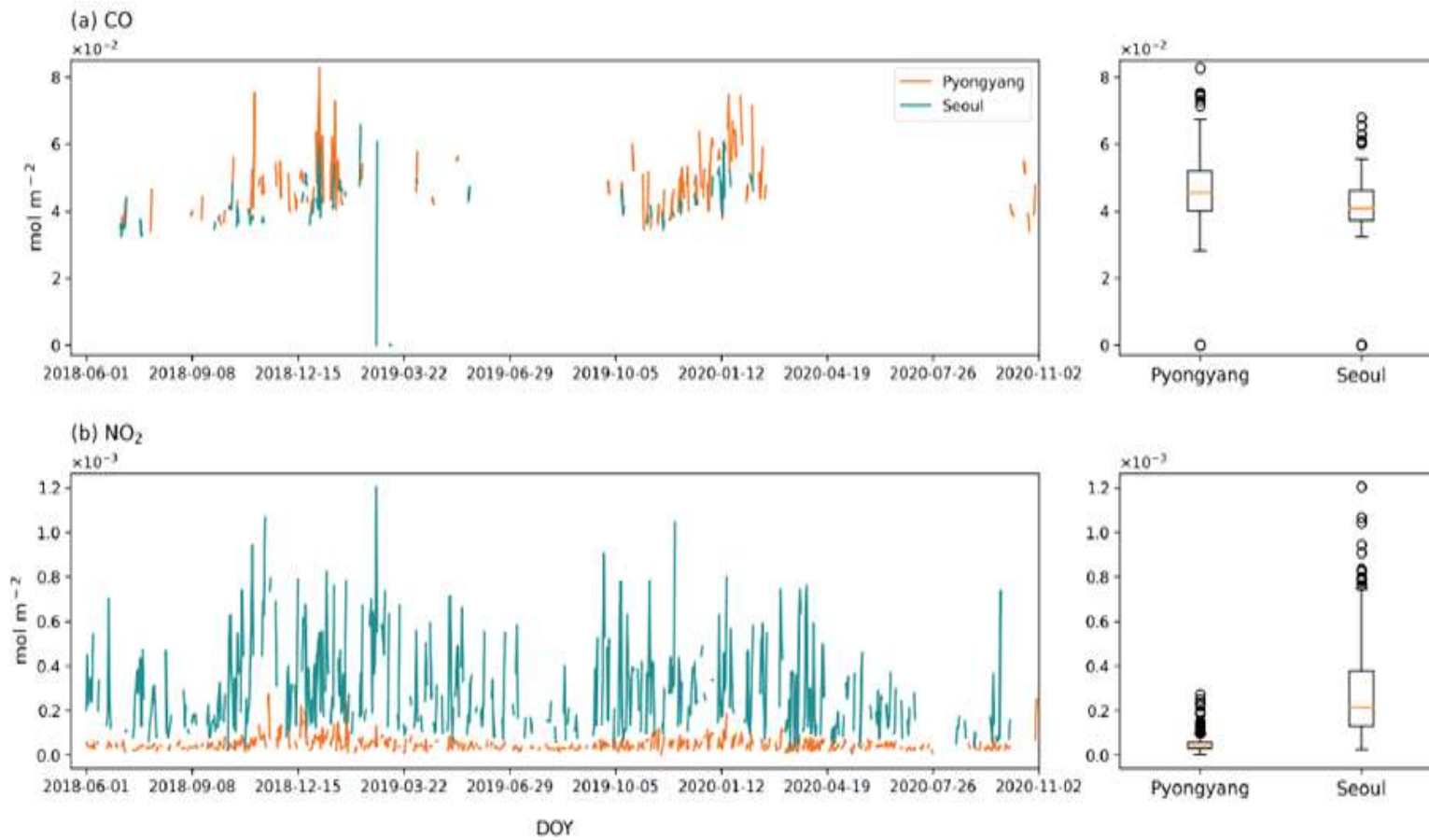
<그림 11> 2018년부터 2020년까지의 평양과 서울의 XCO와 XNO<sub>2</sub>의 농도 확률 분포. 연녹색 선은 평양의 평균 농도를 보여주며 주황색 선은 서울의 평균 농도를 보여준다.

## (2) 2018~2020년 평양과 서울의 XCO, XNO<sub>2</sub> 일별 추세

2018년 6월부터 2020년 8월 동안 평양과 서울의 XCO와 XNO<sub>2</sub> 자료를 비교 분석하였다. 그림 12는 평양과 서울의 XCO와 XNO<sub>2</sub> 일평균 시계열 추세와 각 도시의 모든 농도 자료를 나타낸 상자 그림이다.

그림12 XCO 시계열 추세를 분석한 결과, 전 기간에 대해 평양과 서울의 XCO 평균 농도는 각각 0.0461 mol m<sup>-2</sup>, 0.0393 mol m<sup>-2</sup>이다. 평양의 평균농도는 서울의 평균농도보다 더 높다. 가을과 겨울철 평양에서의 XCO 농도는 비교적 다른 계절보다 높은 양상이 보인다. 이는 가을철과 겨울철에 석탄과 바이오 연료등 노후화된 에너지를 사용하는 난방이 늘어 XCO 농도가 급격히 증가한 것으로 추정된다.

그림12 XNO<sub>2</sub> 시계열 추세를 분석한 결과, 전 기간에 대해 평양과 서울의 XNO<sub>2</sub> 평균 농도는 각각 0.000047 mol m<sup>-2</sup>, 0.00028 mol m<sup>-2</sup>이다. 서울의 평균 XNO<sub>2</sub> 농도는 평양의 농도보다 10배 정도 더 높다. 이는 서울에서 주요 XNO<sub>2</sub> 배출원은 자동차이며, 특히 경유 차량과 같은 노후차량이 서울의 XNO<sub>2</sub> 농도에 많은 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.



<그림 12> 평양과 서울의 XCO와 XNO<sub>2</sub> 일평균 시계열 추세와 상자 그림

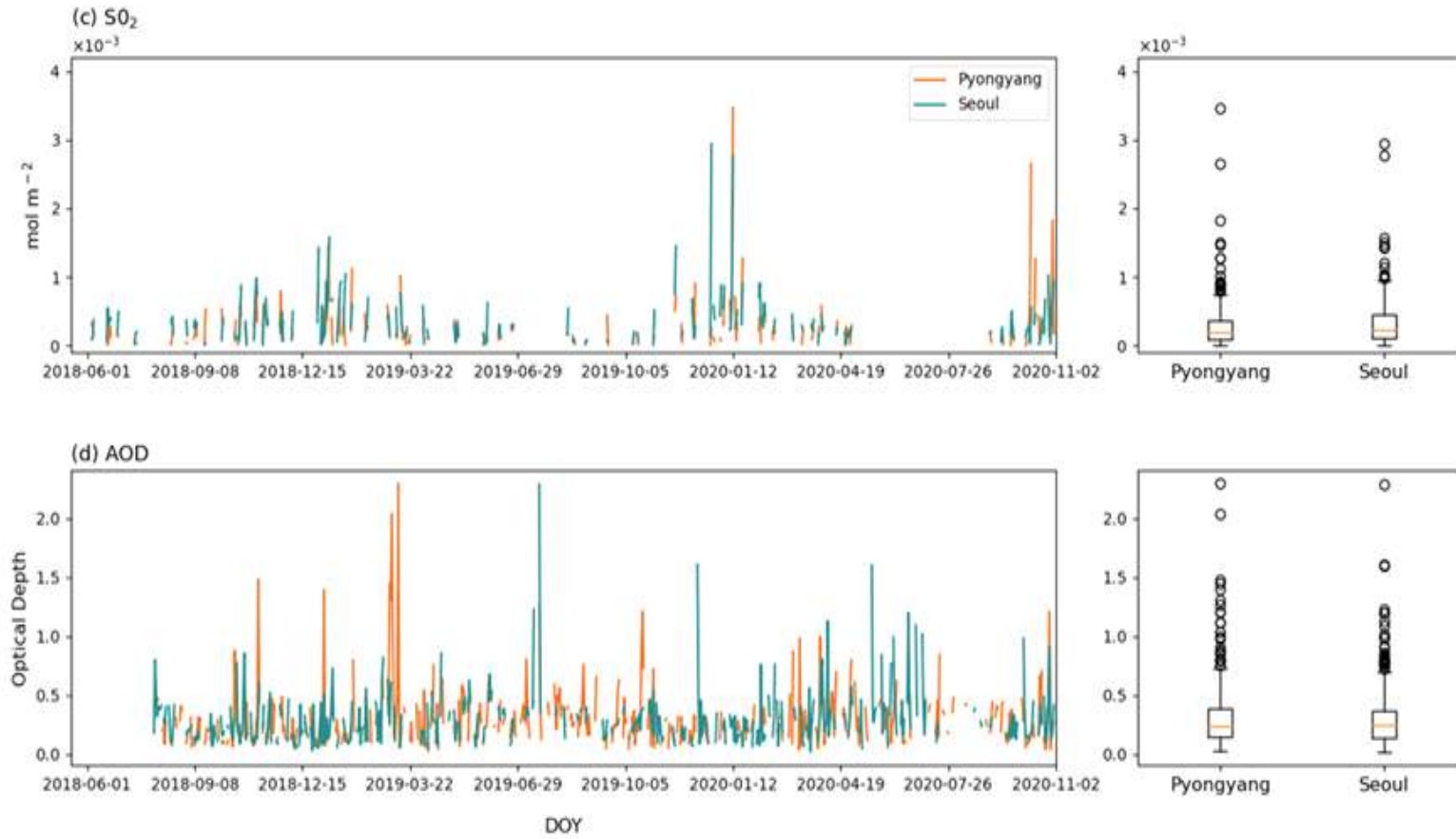
### (3) 2018~2020년 평양과 서울의 XSO<sub>2</sub>, AOD 일별 추세

본 연구는 상대적으로 자료가 적고 대기 물질 특성상 국가 규모 비교가 어려웠던 XSO<sub>2</sub>, AOD를 도시 규모의 평양과 서울을 대상으로 분석하였다.

그림 13은 2018년 6월부터 2020년 8월 동안 평양과 서울의 XSO<sub>2</sub>와 AOD 일평균 시계열 추세와 각 도시의 모든 농도 자료를 나타낸 상자 그림이다. 평양과 서울의 XSO<sub>2</sub> 평균 농도는 각각 0.000293mol m<sup>-2</sup>, 0.000334mol m<sup>-2</sup> 이다. 평양의 XSO<sub>2</sub> 평균 농도는 서울보다 낮으며, 2019년 하반기부터 평양과 서울 두 도시에서 모두 농도 증가율이 커졌다. 특히, 평양은 겨울에 서울보다 XSO<sub>2</sub> 평균 농도가 높게 나타나 고농도 배출원이 존재할 것으로 생각된다. 국립환경과학원에 따르면 황산화물은 난방, 발전, 산업 등 연소시설에서 발생으로 이용할 때 배출될 수 있는 것으로 알려져 있다. 북한의 석탄 및 바이오매스 연료를 이용한 난방에 대한 높은 의존도가 겨울철에 SO<sub>2</sub> 고농도 사례를 만들고 있는 것으로 생각된다.

AOD의 경우, 평양은 0.294이며, 서울은 0.290으로 두 도시의 AOD의 평균은 비슷하지만, 평양의 AOD 고농도 사례가 서울보다 많다. 또한, AOD의 고농도가 나타나는 시기가 서로 다르게 나타났다. 대체로 평양은 봄에 AOD 농도가 높았으며, 서울은 여름에 AOD 농도가 높았다. 향후 평양이 서울보다 고농도 사례가 많은 원인과 평양과 서울의 고농도 AOD 시기가 다른 원인에 대한 연구가 필요하다.





<그림 13> 평양과 서울의 XSO<sub>2</sub>와 AOD 일평균 시계열 추세와 상자 그림

#### (4) 2018~2020년 용하와 서울의 XCO, XNO<sub>2</sub> 일별 추세

우리는 본 연구에서 목표로 한 평양과 서울의 겨울철 XCO와 XNO<sub>2</sub> 공간분포 분석을 수행하며, 평양 외에 북한의 용하에서 고농도 오염 물질 배출현황이 발견되어 연구결과보고에 추가했다(그림 14). 용하는 양강도 김정숙군 용하노동자구를 의미하며 산간지대로 임업 활동이 활발한 곳이다. 또한, 용하는 광업기지로 부상하면서 주거지 형성으로 확장된 도시다. 활발한 공업과 인간 활동으로 인해 대기오염물질 배출량이 많을 것으로 추정된다.

그림 15는 2018~2020년 용하와 서울의 XCO와 XNO<sub>2</sub> 일평균 시계열 추세와 각 도시의 모든 농도 자료를 나타낸 상자 그림이다. 용하와 서울의 XCO 시계열 추세와 상자그림(boxplot)을 분석한 결과, 전반적으로 용하의 XCO 농도는 서울보다 높으며, 용하시의 XCO 평균 농도 역시 서울보다 더 높았다. 이는 용하시가 서울보다 CO 배출원이 더 많을 것으로 추정된다. 그러나, 관측된 XCO의 위성자료가 부족하여 용하시와 서울의 농도의 계절별 특성을 보기 어려웠다. 향후 XCO의 위성자료가 더 많이 확보된다면, 용하시와 서울의 XCO농도 분석이 필요하다.

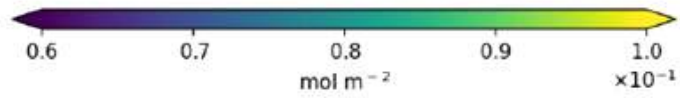
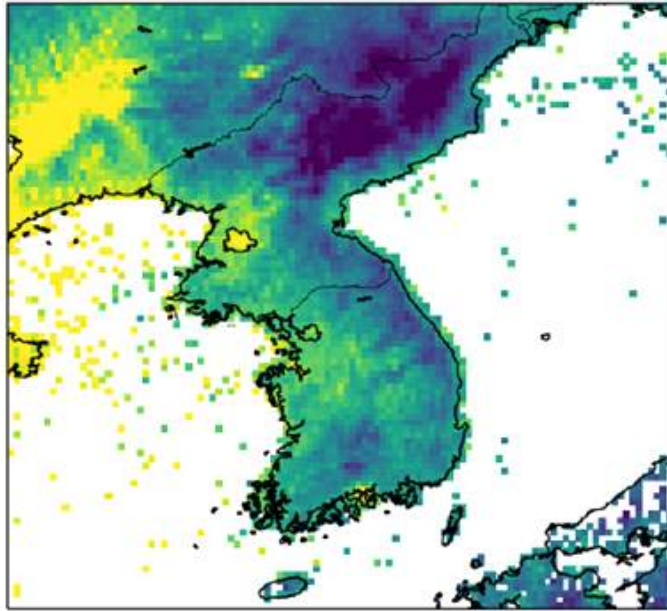
그림 15(b)에서 용하시의 XNO<sub>2</sub> 농도는 0.0000772 mol m<sup>-2</sup>, 서울의 농도는 0.000278 mol m<sup>-2</sup>로 보여준다. 북한 내에서는 겨울철 용하시의 XNO<sub>2</sub> 농도가 높지만, 서울과 비교했을 때 비교적 NO<sub>2</sub> 배출이 낮음을 확인할 수 있다. 이는 서울이 용하시 보다 NO<sub>2</sub> 배출원인 차량이 더 많을 것으로 판단된다.

그림 16은 2018~2020년 용하시와 서울의 XSO<sub>2</sub>와 AOD 일평균 시계열 추세와 각 도시의 모든 농도 자료를 나타낸 상자 그림이다. 용하시의 XSO<sub>2</sub> 평균 농도는 0.000444 mol m<sup>-2</sup>, 서울의 XSO<sub>2</sub> 평균 농도는 0.000333 mol m<sup>-2</sup>이며, 용하시의 XSO<sub>2</sub> 평균 농도는 서울보다 더 높다. 용하시는 광업기지로 광업 및 수송을 위한 연료 사용이 XSO<sub>2</sub> 농도에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

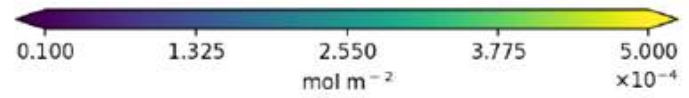
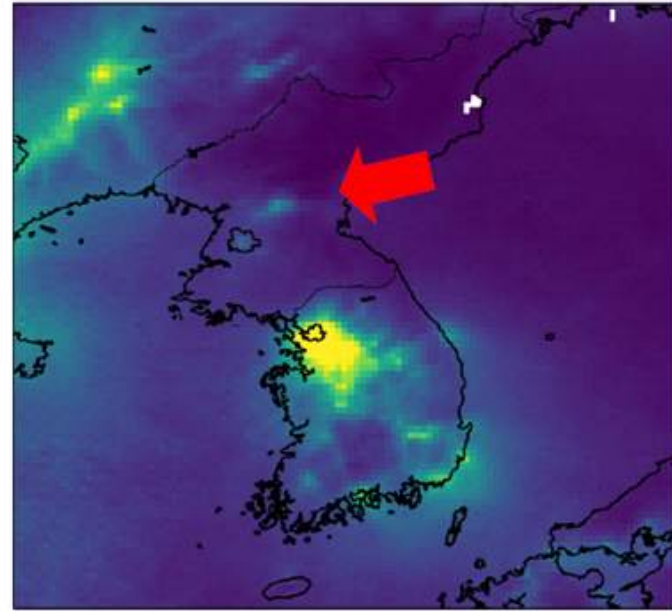
용하시를 지나가는 AOD 인공위성 자료가 없었기에 용하시와 서울의

AOD 농도를 비교 분석을 할 수가 없었다. 향후 AOD 자료가 확보된다면, 추가 분석을 수행하고자 한다.

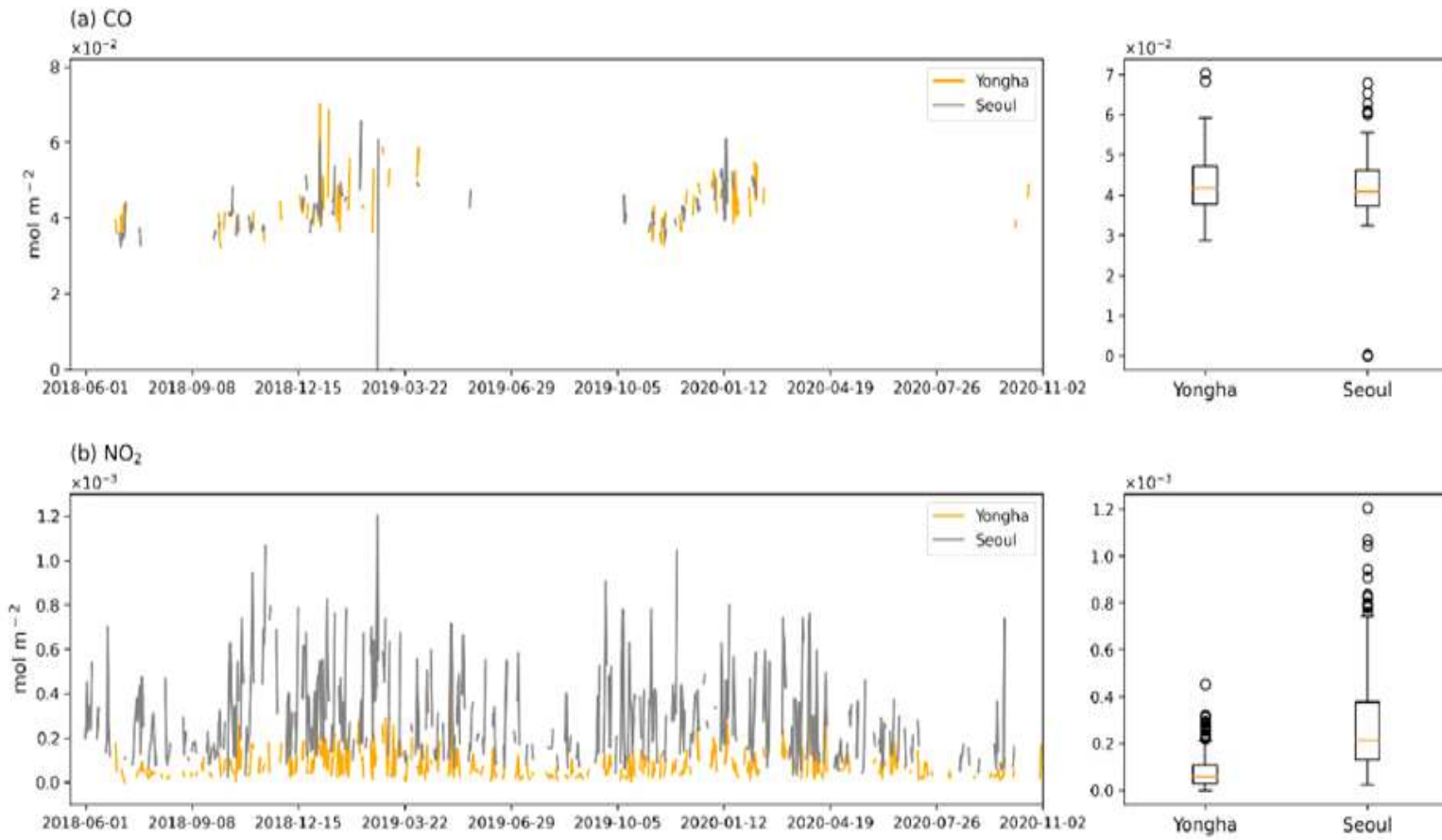
(a) CO



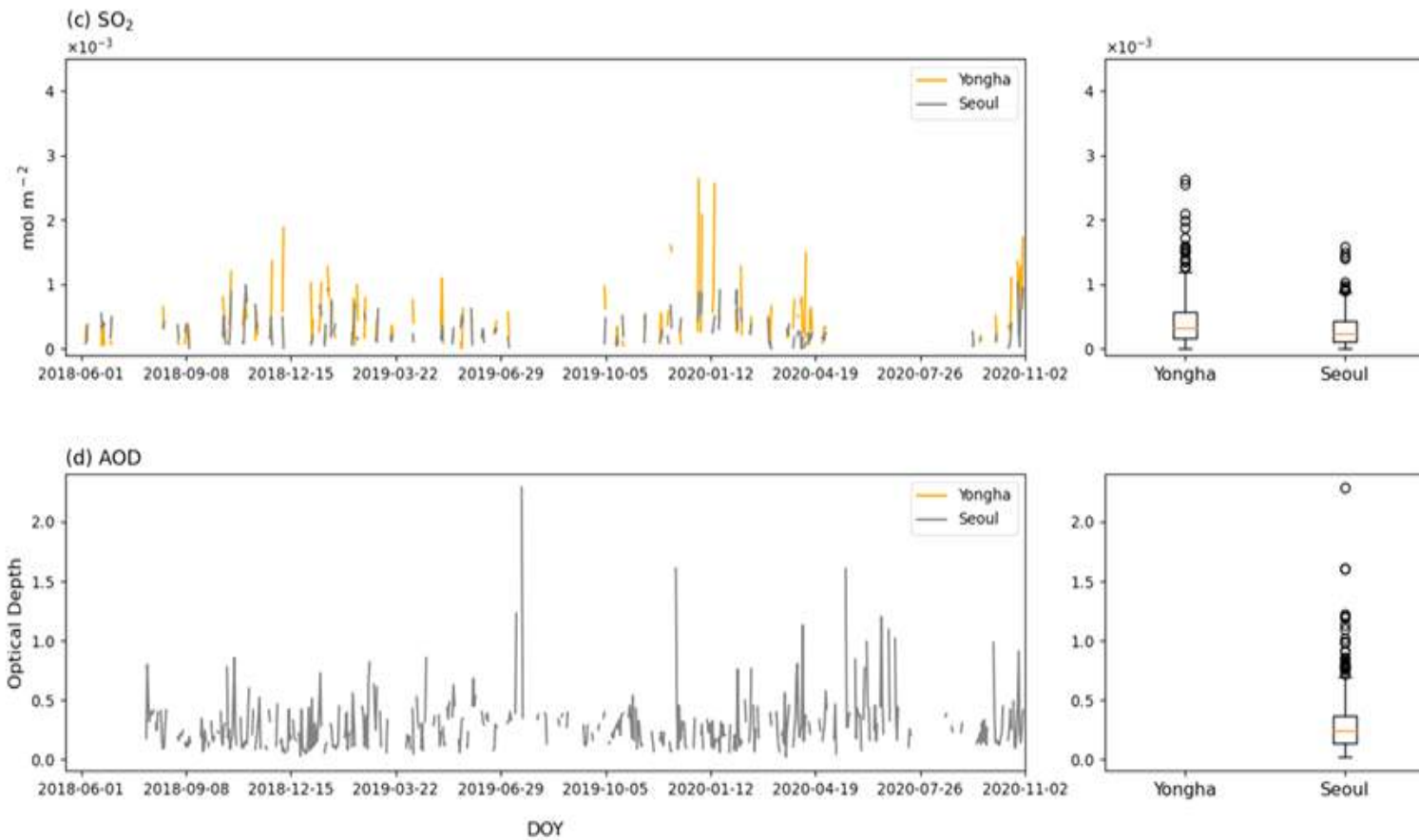
(b) NO<sub>2</sub>



<그림 14> 용하시와 서울의 XCO, XNO2 공간분포



<그림 15> 용하시와 서울의 XCO와 XNO2 일평균 시계열 추세와 상자 그림



<그림 16> 용하시와 서울의 XS02, AOD 일평균 시계열 추세와 상자 그림



## 4. 연구요약 및 결론

본 연구는 다중 인공위성을 활용하여 북한의 대기질 현황을 분석하기 위해 북한의 대기오염실태를 정량적으로 파악하였다. 분석하기 앞서 북한 지역의 대기질을 나타내는 이산화탄소와 대기오염물질(일산화탄소, 이산화질소, 이산화황, 에어로졸 광학두께)배출의 특성을 파악하였다. 연구 방법으로는 북한과 남한을 비교하는 국가 규모와 평양과 서울을 비교하는 도시 규모로 나뉘, 이산화탄소와 대기오염물질의 농도 및 증가 효과농도( $\Delta$ 오염물질)를 비교 분석하였다.

2018년부터 2020년까지의 2년 동안 국가 규모로 북한과 남한의 대기 현황을 분석한 결과는 다음과 같다. 한반도의 이산화탄소( $\text{CO}_2$ ) 현황은 북한이 남한보다  $\text{XCO}_2$  평균 농도는 낮았지만, 북한의  $\text{XCO}_2$  고농도 값은 남한보다 0.12ppm 정도 더 높았다. 이는 북한에서 고농도  $\text{CO}_2$ 를 배출하는 배출원이 남한보다 많다는 것으로 추정된다. 향후 북한의  $\text{XCO}_2$  고농도 배출원에 대한 연구가 필요하다.

한반도의 일산화탄소( $\text{CO}$ ) 현황은 북한과 남한의 농도 분포 양상이 비슷하였다. 남한의 에너지 배출 및 인위적인 활동이 더 많다는 것을 고려한다면, 북한 내에 고농도  $\text{XCO}$ 를 배출하는 배출원이 많이 존재한다는 것으로 추정된다. 또한, 북한의  $\text{XCO}$  고농도 값은 서울보다 높았지만, 북한 자체의 배출 효과를 보여주는  $\Delta\text{XCO}$ 의 고농도 값은 북한과 남한이 비슷한 수준이다. 이는 중국 및 외부에서 배출되는 고농도  $\text{CO}$ 가 수송된 것으로 판단된다.  $\text{CO}$ 가 어디로부터 기인했는지 정확히 파악하기 위해 대기모델링을 수행한다면 북한의 고농도 사례와 증가효과에 대해 보다 정확히 파악할 수 있을 것으로 기대된다.

한반도의 이산화질소( $\text{XNO}_2$ ) 현황으로는 남한의 평균농도와 고농도가 북한의 농도보다 약 2배 이상 높았다. 이는 북한이 남한보다 운송 수단으로 인한 배출량이 적어 이러한 차이가 난 것으로 판단된다.



본 연구에서는 식생 활동이 적어 인간 배출 효과를 가장 잘 볼 수 있는 겨울기간의 2018년부터 2019년까지와 2019년부터 2020년까지 북한과 남한의 대기오염물질(XCO, XNO<sub>2</sub>) 월별 공간분포를 분석하였다. CO 겨울철 공간분포에서는 북한 내에서 CO농도가 높음을 확인할 수 있다. 이는 북한 내에서 CO 농도가 많이 발생하는 배출원이 더 많을 뿐만 아니라 외부에서 수송된 CO로부터 많은 영향을 받은 것으로 추정된다. NO<sub>2</sub> 겨울철 공간분포에서는 북한의 NO<sub>2</sub> 농도가 남한 보다 낮음을 보여줬다. 이는 남한의 서울과 수도권을 중심으로 차량으로 인한 많은 양의 NO<sub>2</sub>가 배출되어 NO<sub>2</sub> 농도가 높은 것으로 판단된다. SO<sub>2</sub> 겨울철 공간분포에서는 2018~2019년 겨울철과 2019~2020년 겨울철 모두 12월에서 XSO<sub>2</sub> 농도가 가장 높았으며, 1월과 2월로 갈수록 XSO<sub>2</sub> 농도가 낮았다. 이를 통해 2018~2019년 대비 2019~2020년 겨울철 CO와 NO<sub>2</sub> 농도가 감소한 것은 코로나 19로 인한 효과로 판단되며, SO<sub>2</sub> 경우에는 이와 같은 효과가 두드러지지 않았다.

본 연구는 2018년부터 2020년까지의 2년 동안 도시 규모로 평양과 서울의 대기 현황을 정량적으로 도출하여 비교 분석하였다. 일산화탄소(CO) 현황으로는 평양이 북한 주변도시 보다 XCO 평균 농도가 높을 뿐 아니라 서울보다 더 높았다. 또한, 평양의 XCO 고농도 값은 서울보다 11.3% 정도 더 높았다. 이는 평양 내에 고농도 CO를 배출하는 배출원이 많이 존재한다는 것으로 추정된다. 북한의 대기질 개선을 위해서는 CO의 고농도 유발 배출원을 파악할 필요가 있다. 이산화질소(XNO<sub>2</sub>) 현황으로는 평양의 평균 농도가 서울보다 낮았으며, NO<sub>2</sub> 고농도 값 역시 서울보다 4배 정도 낮았다. 이는 서울이 평양보다 교통량이 더 많아 NO<sub>2</sub>가 많이 배출한 것으로 보인다. XCO 일별 추세를 분석한 결과로는 전 기간에 대해 평양의 평균 농도가 서울보다 더 높았다. 이는 가을과 겨울철 평양에서 석탄 연료와 바이오매스 연료 등 노후화된 에너지 사용하는 난방이 늘어 XCO 평균 농도에 영향을 준 것으로 판

단된다. XNO<sub>2</sub> 일별 추세를 분석한 결과, 서울의 XNO<sub>2</sub> 평균 농도는 평양보다 10배 더 높았다. 이는 서울에서 경유 차량과 같은 노후차량이 서울의 XNO<sub>2</sub>농도에 영향을 미친 것으로 판단된다. 상대적으로 자료가 적고 변수 특성상 북한과 남한의 비교가 어려웠던 XSO<sub>2</sub>(이산화황), AOD(에어로졸 광학 두께)의 시계열 추세 분석을 하였지만, XSO<sub>2</sub>는 도시 규모에서도 다른 변수에 비해 차이가 크게 두드러지지 않았다. AOD 농도 경우에는 평양과 서울에서 전체적으로 큰 차이가 보이지 않았지만, 고농도가 나타나는 시기가 다르게 나타났다. 평양은 봄에 AOD 농도가 높았으며, 서울은 여름에 AOD 농도가 높았다. 고농도 AOD 고농도 시기 분석과 고농도 AOD를 유발하는 기작이 지역별로 다른 것으로 추정되기에 향후 추가 연구가 필요할 것으로 보인다.

본 연구에서는 접근하기 어려운 북한의 대기질 현황을 분석하고자 하였다. 직접적인 북한의 대기오염 관측이 부재하므로 인공위성 관측자료를 활용하여 에너지 사용으로 발생할 수 있는 미세먼지 유발물질인 CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>와 기후변화를 유발하는 CO<sub>2</sub>의 농도를 파악하여 대기오염실태를 정량적으로 파악하였다.

본 연구는 북한의 대기오염 개선을 위한 현황을 파악할 수 있는 기초 자료를 구축하였다. 이를 통해, 유의미한 남북협력사업의 개선방안을 도출할 수 있을 것으로 기대된다. 또 북한의 온실가스 및 대기오염물질 측정과 이를 반영한 도시 배출 특성 분석은 북한의 이산화탄소 배출 저감 및 도시 대기질 개선방안 개발에 큰 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

향후, 우리나라의 최근에 발사된 환경위성(GK-2B)를 통해, 북한의 시·공간 고해상도의 미세먼지 및 대기오염물질 농도 자료를 받을 수 있다. 이를 활용하여 북한의 대기오염물질의 농도 변화, 물질 간 상관성 및 비율 변화를 정량적으로 분석하여, 북한 대기에 가장 큰 영향을 끼치는 대기오염물질과 배출원을 파악이 필요할 것으로 보인다. 또한, 북

한과 인접해 있는 중국과의 협력을 통해 한국에서 얻기 어려운 북한의 관측자료를 중국 과학원을 통해 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 북경대에서 연구 중인 북한의 국가 통계자료 기반 인벤토리 결과와 모델링 결과를 비교 분석하여 신뢰도 있는 자료를 산출하는 것이 필요하다.

2020년도 서울대학교 통일평화연구원의 재원으로 통일기반구축사업의 지원을 받아 수행된 결과물임.