



논문

북한 대기질 현황 및 개선방안

The State of the Air Quality and Measures for Improving it in North Korea

여민주, 김용표^{1),*}

이화여자대학교 환경공학과, ¹⁾이화여자대학교 화학신소재공학과

Min Ju Yeo, Yong Pyo Kim^{1),*}

Department of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University

¹⁾Department of Chemical Engineering & Materials Science, Ewha Womans University

접수일 2019년 1월 15일

수정일 2019년 3월 4일

채택일 2019년 4월 23일

Received 15 January 2019

Revised 4 March 2019

Accepted 23 April 2019

*Corresponding author

Tel : +82-(0)2-3277-2832

E-mail : yong@ewha.ac.kr

Abstract Recently, concerns on the air quality in North Korea (NK) have been growing in South Korea (SK). However, the data on the state of the air quality are scarce with low reliability. In this study, the trends of the annual mean PM_{2.5} concentration weighted by population in NK by region were figured out. And major factors influencing the PM_{2.5} concentration, the status of the air quality management, ways to improve the air quality in NK were discussed. The effects of the coal-fired power plants, and the western and the southern parts of outside of NK to the PM_{2.5} concentration in NK were estimated about 13%, 25% and 27%, respectively. Based on the data produced by NK, the carbon intensity in 2000 was 4,872 kt/Mtoe, about 2.2 times of SK. Despite of low level of energy consumption in NK, at about 8% of that in SK in 2000, the emission amounts of carbon monoxide and sulfur oxides in 2000 were reported to be about 2.7 times higher than SK. The emission intensities of carbon monoxide and sulfur oxides in 2000 were calculated about 33 times higher than those in SK.

Key words: Air quality in North Korea, PM_{2.5} concentration in North Korea, Effect from China to North Korea, Cooperation of atmospheric environment between South Korea and North Korea

1. 서론

최근 국내에서 북한 대기환경에 대한 관심이 증가하고 있다. 우리나라 미세먼지 문제가 심각해지면서 우리나라 외부에서의 영향에 대한 정량화가 중요해진 상황인데, 북한에서 배출된 대기오염물질도 우리나라 대기질에 영향을 줄 수 있기 때문이다. 북한의 2016년 총에너지 공급량(Total Primary Energy Supply)은 8.8 Mtoe (IEA, 2018b)로 같은 해 우리나라 282.4 Mtoe (IEA, 2018b)의 약 3%에 불과하다. 하지만 북한은 대기오염에 의한 사망률이 인구 10만 명당 약 238명으로 172개국 가운데 가장 높아(WHO, 2017) 대기질 관리가 잘 되지 않고 있을 것이라는 점을 예

상할 수 있다. 또한 북한은 우리나라와 인접해있어 북한의 대기오염이 우리나라 대기질에 미칠 수 있는 영향은 다른 국가들에 비해 상대적으로 클 것으로 예상된다(Kim *et al.*, 2013). 향후 우리나라와 북한의 통합 또는 통일시 효율적인 한반도 대기환경관리를 위해 사전에 북한 대기환경에 대한 이해를 높여야 하는 것 또한 북한 대기환경에 대한 관심을 가져야 하는 이유의 하나이다(Yeo and Kim, 2016).

북한의 대기환경 관련 자료의 부족과 높은 불확실성 등으로 북한 대기환경 연구에 한계가 있지만 북한 대기환경에 대한 연구가 증가하고 있다(Kim and Kim, 2019; Yeo and Kim, 2019, 2018; Bae *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2014; Kim *et al.*, 2013, 2011). 현재 북한도

미세먼지 문제가 심각하여 미세먼지 경보를 발령하고 주민들에게 마스크 사용을 권고(JOINS, 2018)하며, 중국 대기오염물질에 의한 영향을 우려하는 상황으로 알려져 있다. 하지만 북한의 대기질 측정 자료가 제한되어 있어 지표면에서의 북한 대기질 현황은 파악하기 어렵다.

최근 북한에 대한 위성자료가 생산되고 있고, 질소산화물 배출량의 경우 위성자료를 여러 연구자들의 추정치와 비교하기도 하였다(Kim *et al.*, 2014). 하지만 이 결과는 북한 공식 자료와의 비교 결과를 제시하지 않았다는 한계가 있고, 아직까지 위성자료에서 산출한 북한의 시공간적인 농도 자료가 많이 공유되지 않은 상황이다. 북한의 대기오염물질 배출량도 북한 외부에서 추정한 자료(IIASA, 2017; Kurokawa *et al.*, 2013)를 주로 활용하는 실정이다. 따라서 북한 대기환경을 연구하기 위해서는 신뢰할 수 있는 북한의 대기오염물질 배출량과 농도 등 대기질 파악에 필수적인 자료 생성과 공유가 필요하다.

최근 경제협력개발기구(Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD)에서 PM_{2.5}가 다른 오염물질들에 비해 사람들의 건강에 더 많은 영향을 준다고 판단하여 대기 중 PM_{2.5}에 대한 노출 정도를 녹색성장지표(Green Growth Indicators)의 하나로 제시하였다(OECD, 2017). 그리고 OECD 회원국 뿐만 아니라 북한을 포함한 비회원국의 PM_{2.5} 노출 농도(Mean population exposure to PM_{2.5})를 통계자료(OECD, 2018)로 제공하였다. OECD(2018)에는 북한의 시군구 단위까지의 지역별 자료가 제시되어 북한의 공간적 농도 분포를 파악하는데 유용하다.

북한이 국제기구에 제출한 국가 보고서(UNFCCC, 2016; NCCE, 2012; UNEP, 2012a, 2003; MLEP, 2000), 청정개발체제(Clean Development Mechanism, CDM) 사업계획서(UNFCCC, 2017) 등에 제시된 에너지 소비량과 온실가스 배출량 등 북한이 직접 생산한 북한 대기환경 관련 자료를 활용하는 것 또한 북한 대기환경을 파악하는데 도움이 되는 것으로 판단된다(Yeo and Kim, 2018).

본 연구에서는 이들 자료를 활용하여 기존에 많이 알려지지 않은 (1) 북한의 지난 20여 년간 PM_{2.5} 농도 추이와 PM_{2.5} 농도에 영향을 주는 요인을 파악하고, (2) 북한에서 생산한 에너지와 이산화탄소, 대기오염물질 배출량 자료를 이용하여 북한 대기환경 관리 실태를 파악하여 북한 대기질에 대한 이해를 높이고자 하였다. 또한 (3) 북한 대기질을 개선할 수 있는 방안을 제시하였다.

2. 연구자료와 방법

2.1 북한의 미세먼지(PM_{2.5}) 농도 자료

본 연구에서 사용한 북한 PM_{2.5} 농도(OECD, 2018)는 세계질병부담(Global Burden of Disease, GBD) 2017 프로젝트(IHME, 2018)에서 추정(Shaddick *et al.*, 2018)한 것이다. OECD(2018)에는 북한의 11개 시도의 183개 시군구에 대한 1998~2013, 2015년 PM_{2.5} 농도가 제시되었다.

OECD(2018)에서 제시하는 PM_{2.5}의 농도는 격자 기반 인구수 자료를 활용하여 인구 가중치를 고려하여 추정되었다. 격자 기반 인구수는 미국항공우주국(National Aeronautics and Space Administration, NASA) 사회경제 자료 및 활용 센터(Socioeconomic Data and Applications Center, SEDAC)의 격자 기반 세계 인구(Gridded Population of the World, GPW v4.0) 자료를 활용하였다(OECD, 2018).

GBD 2017 프로젝트에서 PM_{2.5} 농도는 위성과 모델링, 가능한 경우 지상 관측소에서 측정한 결과 생성된 정보를 지리적 가중회귀분석(Geographically Weighted Regression, GWR)하여 0.1°×0.1° 해상도로 도출하였다(van Donkelaar *et al.*, 2016). 여러 위성(MISR, MODIS Dark Target, MODIS and SeaWiFS Deep Blue, and MODIS MAIAC) 결과물로부터 산출한 1998년부터 2014년까지의 에어로졸광학두께(Aerosol Optical Depth, AOD)를 AERONET의 지상 관측 결과를 이용하여 산정한 상대적인 불확도를 고

려하여 화학수송모델(GEOS-Chem) 결과와 결합한 것이다(van Donkelaar *et al.*, 2016).

2.2 북한의 미세먼지(PM_{2.5}) 농도 영향 요인 분석 방법

특정 지역의 미세먼지 농도는 해당 지역 내에서의 배출, 외부 유입, 반응을 통한 생성 및 제거, 침적 등을 통해 결정된다(Seinfeld and Pandis, 2016). 현재 북한 대기질도 중국에서 배출된 대기오염물질의 이동에 의한 영향을 받고 있어 북한 대기환경 개선을 위해서는 국지적인 배출과 외부 영향을 분리하여 파악할 필요가 있다.

하지만 북한에는 국지적인 배출에 의한 영향을 파악할 수 있는 대기오염물질 배출량 인벤토리와 이들 요인을 항목별로 분석할 만큼의 자료가 구축되어 있지 않는 것으로 판단된다. 예를 들어, 수송모델을 사용하여 배출원의 기여도를 파악하기 위해서는 배출원 특성이 사전에 파악되어야 하는데, 북한 내 배출원에 대해서는 정보가 부족하다. 이런 이유로 북한 미세먼지 농도에 영향을 주는 요인(그림 1)인 국지적

배출에 의한 기여도, 외부 영향 기여도 등을 정량적인 결과로 제시하기는 어렵다. 본 연구에서는 불확실성이 높음에도 불구하고 북한 대기질에 대한 이해를 높이기 위해 이들 요인 영향에 대한 정량적인 결과를 일부 제시하고자 하였다.

대기오염물질 배출량은 주로 에너지 소비량 등의 활동도에 제거효율과 배출계수를 고려하여 산정한다. 제거효율과 배출계수는 대기환경관리 실태를 보여주는 지표로 볼 수 있다(2.3절 참조). 하지만 북한의 경제 및 기술 수준을 고려하였을 때 북한 내 지역별로 배출계수 및 제거효율에 큰 차이가 없을 것으로 예상되므로, 본 연구에서는 주로 지역별 활동도의 차이가 지역별 배출 가능성에 영향을 주었다고 가정하였다. 북한은 석탄 연소가 대기질에 주요하게 영향을 준다고 스스로 발표하였으므로(UNEP, 2012a), 본 연구에서는 석탄화력 발전소 유무를 북한의 국지적인 지역별 미세먼지 배출가능성을 보여주는 지표로 활용하였다.

또한 북한의 지역별 지리적인 위치를 북한 외부 영향 가능성을 보여주는 지표로 활용하였다. 북한 서쪽

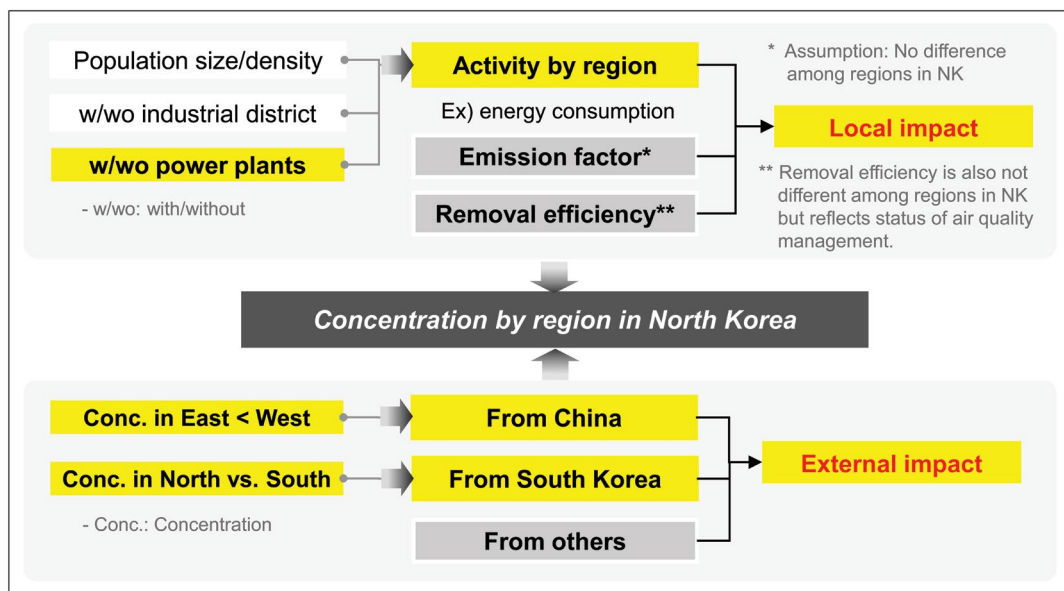


Fig. 1. Factors determining the concentrations of air pollutants in North Korea by region.

Table 1. Annual mean PM_{2.5} concentration weighted by population in case (A) with/without the coal-fired power plants, (B) East and West regions, and (C) South and North regions in North Korea.

Year	A (Coal-fired power plants)			B (East vs. West)			C (South vs. North)		
	(a) With	(b) Without	(a)/(b)	(a) East	(b) West	(b)/(a)	(a) South	(b) North	(a)/(b)
1998	26.5	23.3	1.13	19.7	28.1	1.43	28.4	21.0	1.35
1999	20.1	18.5	1.08	15.7	21.5	1.37	21.6	16.7	1.30
2000	25.2	22.4	1.12	18.5	27.0	1.46	26.1	21.2	1.23
2001	27.6	24.7	1.11	18.6	30.7	1.65	30.6	21.1	1.45
2002	24.6	21.4	1.15	18.4	25.8	1.40	25.0	20.9	1.19
2003	28.3	25.2	1.12	21.9	29.7	1.36	29.2	24.1	1.22
2004	23.4	20.5	1.14	17.3	24.8	1.43	24.3	19.5	1.24
2005	24.3	21.9	1.11	18.4	26.0	1.41	25.7	20.2	1.27
2006	26.3	23.7	1.11	20.1	27.9	1.39	27.3	22.4	1.22
2007	23.9	21.7	1.10	17.7	25.9	1.46	25.5	19.9	1.28
2008	25.6	23.4	1.09	18.8	27.9	1.48	27.3	21.3	1.29
2009	27.2	25.4	1.07	21.5	29.2	1.36	28.8	23.5	1.23
2010	23.0	21.0	1.10	17.4	24.8	1.42	23.9	20.0	1.20
2011	21.5	18.6	1.16	15.3	23.0	1.50	22.3	17.6	1.27
2012	19.8	17.9	1.10	14.3	21.5	1.51	21.4	15.9	1.35
2013	25.9	24.2	1.07	19.4	28.5	1.47	28.6	21.1	1.36
2015	32.7	29.3	1.12	23.9	35.3	1.48	32.8	29.2	1.12
Avg.	25.0	22.5	1.11	18.6	26.9	1.45	26.4	20.9	1.27

그룹 지역은 동쪽 그룹 지역에 비해 북한 서쪽에 위치한 중국의 영향, 남쪽 그룹 지역은 북쪽 그룹 지역에 비해 북한 남쪽에 위치한 우리나라의 영향을 더 많이 받는다고 판단하였다.

본 연구에서는 북한 미세먼지 농도에 미치는 1) 석탄화력 발전소의 영향, 2) 중국의 영향, 3) 우리나라의 영향을 분리하여 살펴보고자 하였다. 1)~3) 요인이 두 개 이상 해당하는 지역의 경우, 요인별로 분리하여 영향을 파악하는 것이 어렵기 때문에, 1)~3)의 세 가지 요인 중 한 가지 요인에만 해당하는 지역과 세 가지 요인 중 한 가지에도 해당하지 않는 지역(본 연구에서는 비영향 지역이라 가정함)의 농도 차이를 해당 요인에 의한 영향이라 간주하고 정량적인 결과를 제시하였다. 예를 들어, 북한 동쪽과 북쪽에 해당하여 2)와 3)의 영향요인은 존재하지 않으면서 석탄화력 발전소가 있어 1) 석탄화력 발전소의 영향을 볼 수 있는 지역과 비영향 지역의 농도 차이가 석탄화력 발전소에 의한 영향이라 간주하였다.

1)~3) 요인의 영향을 파악할 수 있는 지역을 선정하기 위하여 북한의 11개 시도 지역을 표 2에 정리한 것처럼 (A) 석탄화력 발전소가 있는 그룹 지역과 없

는 그룹 지역, (B) 동쪽과 서쪽 그룹 지역, (C) 남쪽과 북쪽 그룹 지역으로 구분하였다. 석탄화력 발전소가 있는 지역에는 함경남·북도, 평안남·북도, 평양시, 황해남도의 6개 시도가 해당하며, 나머지 5개 지역을 석탄화력 발전소가 없는 지역으로 분류하였다. 동쪽 그룹 지역에는 함경남·북도와 양강도, 강원도의 4개 시도를 포함하였고, 나머지는 서쪽 그룹 지역으로 분류하였다. 남쪽 그룹 지역에는 황해남·북도, 강원도, 평안남도, 평양시와 개성시의 6개 시도를 포함하였고, 나머지는 북쪽 그룹 지역으로 분류하였다(표 2).

2.3 북한의 대기환경관리 실태 분석 방법

대기오염물질 배출량을 산정할 때 주로 고려하는 제거효율과 배출계수는 대기환경 관리 실태를 보여주는 지표로 볼 수 있다. 예를 들어, 제거효율이 높은 저감 시설이 설치 및 운영되고 있으면 그렇지 못한 경우보다 동일한 양의 연료를 사용하더라도 배출량이 줄어들게 된다.

북한의 배출시설별 제거효율과 배출계수에 대해서는 잘 알려져 있지 않으므로 본 연구에서는 북한의 대기환경 관리 실태를 파악하기 위해 에너지 공급량

Table 2. Classification of regions, and the selected regions reflect effects of 1) the coal-fired power plants, 2) the western part of outside of North Korea (NK) (China), and 3) the southern part of outside of NK (South Korea).

Region	A (Coal-fired power plants)		B (East vs. West)		C (South vs. North)	
	With	Without	East	West	South	North
Changang-do		O		O		O
Hamgyong-bukto	O		O			O
Hamgyong-namdo	O		O			O
Hwanghae-bukto	O			O	O	
Hwanghae-namdo	O			O	O	
Kaesong-si		O		O	O	
Kangwon-do		O	O		O	
P'yongan-bukto	O			O		O
P'yongan-namdo	O			O	O	
P'yongyang-si	O			O	O	
Yanggang-do		O	O			O

2) Effects from western part of NK (China)
 1) Effects of the coal-fired power plants
 3) Effects from southern part of NK (South Korea)
 Background area

당 이산화탄소 배출량, 에너지 공급량당 대기오염물질 배출량, 이산화탄소 배출량당 대기오염물질 배출량을 우리나라와 비교하여 분석하였다.

북한이 국제기구에 제출한 보고서와 사업계획서 (UNFCCC, 2017; MLEP, 2012; NCCE, 2012)에 제시된 에너지 소비량, 이산화탄소 및 대기오염물질 배출량 자료 등을 활용하였다. 이들 자료는 북한에서 직접 생산하였다는 점에서 북한 외부에서 추정된 자료들에 비해 북한 실태를 잘 반영하였을 것으로 기대된다.

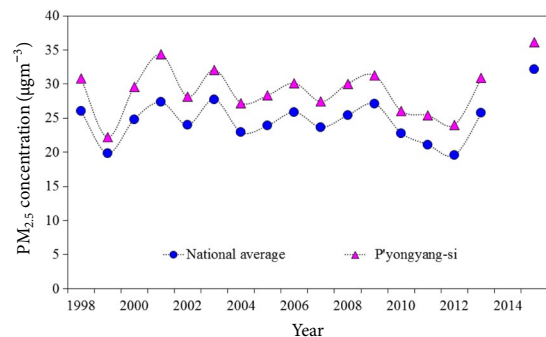


Fig. 2. Trends of the annual mean PM_{2.5} concentration weighted by population in North Korea and Pyongyang between 1998 and 2015. Values in 2015 (raw data: OECD, 2018). Values in 2015 are estimated (OECD, 2018).

3. 결과 및 고찰

3.1 북한의 인구 가중 미세먼지(PM_{2.5}) 농도 추이와 영향요인 고찰

3.1.1 북한의 인구 가중 미세먼지(PM_{2.5}) 농도 추이

지난 20여 년간 북한의 PM_{2.5} 연평균 농도는 25 µg/m³에 가까웠다(그림 2). 지난 20여 년간 북한의 PM_{2.5} 연평균 농도는 큰 변화가 없어 3년 이상 증가 또는 감소 추이를 지속한 기간은 거의 없었는데, 2009년 이후 3년간 감소 추이를 보였다. 이후 2012년

부터 증가 추이를 보이고 있다.

평양시의 PM_{2.5} 연평균 농도는 북한 전체의 연평균 농도보다 약 12~23% 높은 결과를 나타내었고, 북한 연평균 농도와 비슷한 추이를 보였다. 북한 다른 지역보다 공업시설이 밀집하여 있고 자동차 사용량이 많을 것으로 예상되는 평양의 연평균 PM_{2.5} 농도가 북한 평균보다 높다는 점을 통해 북한 내에서 국지적인 배출에 의한 영향이 있다는 점을 예상할 수 있다. 또한 평양시는 북한의 남서쪽에 위치하여 북한의 동쪽 및 북쪽에 위치하는 지역들에 비해 중국이나 우리나라에 의한 영향도 더 많이 받을 수 있다.

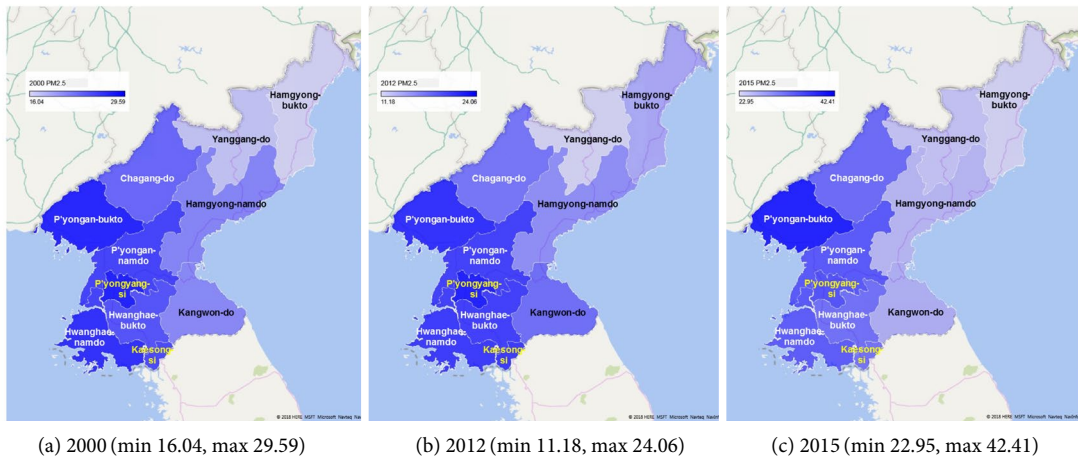


Fig. 3. $PM_{2.5}$ concentrations by region in 2000, 2012, and 2015 in North Korea (unit: $\mu g/m^3$) (raw data: OECD, 2018).

2012년 이후 북한의 $PM_{2.5}$ 농도가 증가한 것은 서울의 PM_{10} 측정 결과와 유사하다. 2012년 이후 서울의 PM_{10} 의 연평균 농도는 증가하였다(Kim and Lee, 2018). Seo *et al.* (2018)은 서울 대기질에 배출량과 기상 요인이 모두 영향을 주며 영향도가 비슷할 것으로 추정하였다. 따라서 한반도 대기질을 파악하기 위해서는 기상 요인에 대한 고려도 중요할 것으로 판단되며, 앞으로 기후변화가 심화되면 기상 요인이 대기질에 영향을 주는 경향은 더욱 커질 것으로 예상된다.

북한의 시·도별 $PM_{2.5}$ 농도 분포는 그림 3과 같은데, 북한 서쪽 그룹 지역의 농도가 동쪽 그룹 지역에 비해 주로 높다. 표 1을 보면, (B) 북한 서쪽 그룹 지역의 농도가 동쪽 그룹 지역에 비해 1998년부터 2015년까지 평균적으로 약 45%, (C) 남쪽 그룹 지역의 농도가 북쪽 지역에 비해 약 27% 높다. (A) 석탄화력 발전소가 있는 그룹 지역은 없는 그룹 지역에 비해 약 11% 높은 값을 나타내었다.

이를 통해, 북한 동서 그룹 지역 간에 $PM_{2.5}$ 농도에 영향을 줄 수 있는 요인들의 차이가 남북 그룹 지역 간, 그리고 석탄화력 발전소 유무에 따른 차이보다 크다는 것을 알 수 있었다. 하지만 이 결과만으로 북한 동서 그룹 지역 간의 차이가 가장 큰 이유를 도출

하기는 어렵다.

3.1.2 북한의 미세먼지($PM_{2.5}$) 농도 영향 요인 및 고찰

본 소절에서는 미세먼지 농도에 영향을 주는 요인별 영향 정도에 대해 정량적인 결과를 제시하고자 하였다. 1) 석탄화력 발전소의 영향, 2) 중국의 영향, 3) 우리나라의 영향을 분리하여 볼 수 있을 것으로 기대되는 지역으로는 각각 자강도, 함경남·북도, 강원도가 선정되었다(표 2). 북한의 11개 지역 가운데 세 가지 요인 중 한 가지에도 해당하지 않는 비영향 지역에는 양강도가 해당한다.

자강도, 함경남·북도, 강원도와 양강도의 해당 기간 동안 평균 농도 차이는 각각 1) $2.3 \mu g/m^3$ (평균의 12.5%), 2) $5.9 \mu g/m^3$ (평균의 26.8%), 3) $5.3 \mu g/m^3$ (평균의 24.6%)이다(표 3). 1)~3) 모든 결과에서 해당 지역의 농도가 양강도보다 높다는 점에서 북한의 $PM_{2.5}$ 농도에 석탄화력 발전소, 중국, 우리나라의 영향에 대한 가능성을 예상할 수 있었다. 특히, 2) 북한 서쪽(중국)에서의 영향이 가장 큰 것으로 나타났고, 3) 북한 남쪽(우리나라)에서의 영향도 중국에서의 영향과 거의 비슷한 수준으로 나타났다.

이 결과는 다른 요인을 통제하고 한 요인에 대한

Table 3. Differences between Yanggang-do and the selected regions reflect effects of 1) the coal-fired power plants, 2) the western part of outside of North Korea (NK) (China), and 3) the southern part of outside of NK (South Korea).

Year	Base region	1) Effects of the coal-fired power plants				Effects from western part of NK (China)		3) Effects from southern part of NK (South Korea)	
	(a) Yanggang-do	(b1) Hamgyong-bukto	(b2) Hamgyong-namdo	(b) Average	(a)-(b) Difference	(c) Chagang-do	(a)-(c) Difference	(d) Kangwon-do	(a)-(d) Difference
1998	15.6	18.0	21.6	19.8	4.3	20.7	5.2	23.4	7.8
1999	12.6	14.6	16.9	15.8	3.2	16.7	4.1	18.7	6.1
2000	16.1	16.0	21.1	18.5	2.4	23.7	7.5	20.8	4.6
2001	15.2	15.8	19.4	17.6	2.4	22.6	7.5	24.1	8.9
2002	15.5	18.3	19.6	19.0	3.4	22.0	6.5	20.2	4.6
2003	18.6	21.5	22.6	22.1	3.4	24.4	5.7	24.8	6.2
2004	15.6	16.6	18.4	17.5	1.9	19.8	4.2	18.8	3.2
2005	17.0	17.7	19.3	18.5	1.5	19.9	2.9	19.8	2.8
2006	18.2	18.6	21.4	20.0	1.8	22.7	4.6	22.4	4.3
2007	16.4	15.8	18.7	17.2	0.8	20.8	4.4	20.0	3.6
2008	15.5	16.2	20.2	18.2	2.7	23.9	8.4	23.5	8.1
2009	19.7	19.7	22.2	21.0	1.3	25.2	5.5	24.2	4.6
2010	14.8	16.1	18.8	17.5	2.7	22.2	7.5	20.0	5.3
2011	14.0	14.0	15.9	15.0	1.0	18.4	4.4	17.2	3.3
2012	11.2	13.1	15.2	14.1	3.0	17.2	6.0	17.7	6.6
2013	16.0	17.9	20.1	19.0	3.0	22.1	6.1	23.6	7.6
2015	23.1	22.9	24.3	23.6	0.5	33.3	10.1	25.2	2.0
Max.	23.1	22.9	24.3	23.6	4.3	33.3	10.1	25.2	8.9
Min.	11.2	13.1	15.2	14.1	0.5	16.7	2.9	17.2	2.0
Avg.	16.2	17.2	19.7	18.5	2.3	22.1	5.9	21.4	5.3
Difference/Average		12.5%				26.8%		24.6%	

영향만을 파악한 것임에도 불구하고 여러 가정을 통해 산정하였기 때문에 불확도가 높아 함경남·북도 및 강원도의 농도가 양강도보다 높은 이유가 각각 중국과 우리나라의 영향에 의한 것이라고 결론내리기는 어렵다. 그럼에도 각 요인별 영향 가능성을 제시하였고, 상대적으로 영향도가 큰 요인을 제시하였다는 점에서 의미가 있을 것이다.

북한의 대기 중 대기오염물질 농도에서 국지적인 영향과 외부영향에 대한 기여도를 정량적으로 파악하여 북한의 대기질 개선을 위한 구체적인 방안을 도출하기 위해서는 신뢰할 수 있는 북한의 지상관측 농도 자료와 자체 배출량 등의 자료부터 확보되어야 할 것이다.

북한에서도 우리나라의 대기정책지원시스템 (Clean Air Policy Support System, CAPSS)과 같이 물질별, 세부지역별, 배출원별 대기오염물질 배출량이 체계

적으로 생산된다면, 북한 내 국지적인 영향에 대해 신뢰할 수 있는 결과를 도출할 수 있을 것이다. 외부 영향에 대해 신뢰할 수 있는 결과를 도출하고 국지적인 영향과 외부 영향을 분리하여 파악하기 위해서는 남북 협력 및 동북아 역내 다른 국가들과의 협력이 매우 중요할 것으로 판단되며, 상세한 내용에 대해 3.3절에서 논의하였다.

3.2 북한의 대기환경관리 실태와 고찰

3.2.1 북한의 탄소강도

IEA (2018a)에서 추정한 2016년 북한의 ‘탄소강도’ 값은 68.8 tCO₂/TJ로 2016년 결과가 제시된 175개국 가운데 16번째로 높았다. 탄소강도는 총에너지 소비량당 이산화탄소 배출량을 의미한다. 같은 해 세계평균과 우리나라의 탄소강도는 각각 56.1, 49.8 tCO₂/TJ

Table 4. (a) Energy supply, (b) emissions and (c) the ratio of emissions and energy supply of air pollutants (carbon monoxide, nitrogen oxides, and sulfur oxides) and carbon dioxide, and (d) the ratio of air pollutants emissions and carbon dioxide emission in 2000 in South Korea (SK) and North Korea (NK), and the ratio of SK and NK.

Year: 2000		South Korea (SK)	North Korea (NK)	NK/SK
(a) Energy Supply (Mtoe)		188	15	0.08
(b) Emissions (kt)	CO	901	2,448	2.72
	NO _x	1,123	169	0.15
	SO _x	491	1,297	2.64
	CO ₂	410,800	73,417	0.18
(c) Emissions/Energy Supply (kt/Mtoe)	CO	4.8	162.4	33.94
	NO _x	6.0	11.2	1.88
	SO _x	2.6	86.1	33.00
	CO ₂	2,183	4,872	2.23
(d) Air pollutants emissions/CO ₂ emission (%)	CO	0.2	3.3	15.21
	NO _x	0.3	0.2	0.84
	SO _x	0.1	1.8	14.79

이었다. 북한에서 자체적으로 생산한 자료(NCCE, 2012)를 활용하여 산정한 2000년 북한의 탄소강도(표 4)는 4,872 kt/Mtoe로 같은 해 우리나라 탄소강도인 2,183 kt/Mtoe보다 두 배 이상 큰 값을 나타내었다.

탄소강도는 에너지 효율이 낮으면 값이 커지고, 연료 구성비에도 영향을 받는다. 비배출에너지(신재생에너지, 원자력 에너지 등) 비중이 높아지면 값이 작아지고, 화석에너지 비중이 높거나 화석에너지 중에서 석탄 사용 비중이 높으면 값이 커진다.

북한은 총에너지 소비량의 70% 이상이 석탄으로 알려져 있어(IEA, 2018b) 높은 석탄 사용 비중이 탄소강도에 영향을 주었을 것으로 판단된다. Yeo and Kim (2018)에 의하면, 북한에서 자체적으로 생산한 자료를 활용하여 산정한 북한 석탄화력 발전소의 2007년부터 2009년까지의 평균 발전효율은 약 23%로 같은 기간 약 39%인 우리나라와 세계평균에 비해 매우 낮으며, 이 역시 탄소강도에 영향을 주었을 것이다.

북한에서 자체적으로 생산한 자료를 활용하여 산정한 북한의 석탄화력 발전소에서의 이산화탄소 배출 강도(emission performance)도 약 1,500 gCO₂/kWh로, 같은 기간 세계평균이나 우리나라 값(IEA, 2011)인 약 900 gCO₂/kWh에 비해 1.7배 가량 크다

(Yeo and Kim, 2018). 석탄화력 발전소에서의 이산화탄소 배출 강도는 석탄화력 발전소에서 단위 전력을 생산할 때의 이산화탄소 배출량으로 값이 작을수록 환경 영향이 작고, 배출시설의 에너지효율과 연료 품질 등의 영향을 받는다. KEEI (2015)에 의하면, 북한은 경제난으로 고품질의 무연탄은 수출하고, 국내에서는 저품질의 무연탄을 사용한다. 따라서 낮은 발전효율과 연료 품질이 북한의 석탄화력 발전소에서의 이산화탄소 배출 강도를 높였을 것으로 예상된다.

3.2.2 북한의 대기오염물질 배출 강도

북한은 에너지 공급량 대비 대기오염물질 배출량이 많아 대기환경을 효율적으로 관리하지 못하는 상황인 것으로 추정된다. 북한에서 자체적으로 생산한 자료에서 제시하는 2000년 북한의 총에너지 공급추정량(수력, 석탄, 석유 사용량 합계)은 약 15.1 Mtoe(NCCE, 2012 제공값 활용)로, 같은 해 우리나라 TPES 값인 188.2 Mtoe의 약 8%에 해당한다. 하지만 북한에서 자체적으로 생산한 자료에서 제시하는 2000년 북한의 일산화탄소와 황산화물 배출량은 그림 4에서와 같이 우리나라보다 2.7배 가량 더 많다.

대기오염물질 배출량은 활동도에 배출계수와 제거 효율을 고려하여 산정한다. 대기오염물질 배출량도 이산화탄소와 마찬가지로 발전효율, 연료품질 등의

영향을 받지만 제거효율의 영향도 크게 받는다. 제거효율은 대기오염물질 배출시설 관리 실태를 반영한다. 예를 들어, 우리나라 석탄화력발전소에서는 황산화물 제거를 위해 배연탈황설비(Flue Gas Desulfurization, FGD)를 주로 사용하는데 제거효율이 90% 이상, 먼지 제거를 위해 사용하는 전기집진기의 제거효율은 99% 이상이다. 제거효율이 99% 이상이면 실제 발생하는 대기오염물질 양의 1% 미만이 대기 중에 배출된다.

우리나라는 고체연료 사용을 금지하고, 청정연료를 공급하고, 연료 내 황 함유율을 낮추는 등 연료기준과 대기오염물질 배출시설에서의 대기오염물질 배출허용기준을 지속적으로 강화하였다(Kim and Lee, 2018). 이렇게 대기오염물질 배출을 엄격하게 관리하여 에너지 사용량이 증가하였음에도 황산화물의 배출량은 감소하였고, 일산화탄소, 질소산화물, 황산화물의 '대기오염물질 배출 강도'도 감소하였다(그림 5). 본 연구에서 대기오염물질 배출 강도는 단위 에너지를 사용할 경우 대기오염물질 배출량을 의미한다.

우리나라의 2000년 일산화탄소, 질소산화물, 황산화물 배출 강도는 각각 4.8, 6.0, 2.6 kt/Mtoe이고, 북한에서 자체적으로 생산한 자료를 활용하여 산정한 2000년 북한의 결과는 각각 162.4, 11.2, 86.1 kt/Mtoe으로 세 물질 모두 우리나라보다 큰 값을 나타내었다(표 4).

대기오염물질 배출저감시설이 설치되지 않았거나 설치되었지만 운영되지 않을 경우, 발생하는 대기오염물질이 그대로 대기 중에 배출된다. 따라서 북한의 대기오염물질 배출시설 관리가 잘 되지 않았을 경우 에너지 사용량과 대기오염물질 발생량이 우리나라보다 더 적더라도 대기오염물질 배출량은 더 많을 수 있고, 그 결과 대기오염물질 배출 강도 값이 커지게 된다. 북한 대기환경관리 실태에 대해서는 3.2.3절에서 더 논의하였다. Chu (2018)에 의하면, 북한의 전력난 및 경제난으로 대기오염물질 배출저감시설은 미설치 또는 미가동 상태이다.

그림 4에서는 2000년과 2002년 우리나라와 북한의

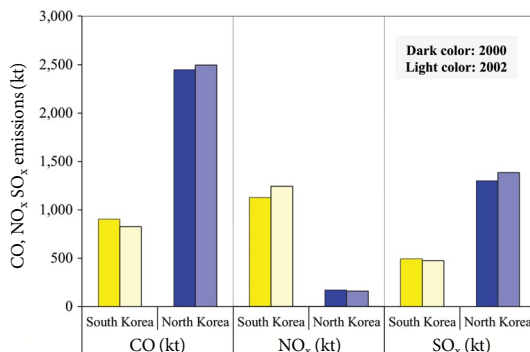


Fig. 4. Emissions of carbon monoxide (CO), nitrogen oxides (NO_x), and sulfur oxides (SO_x) in South Korea (CAPSS data (NIER (2018)) and North Korea (data produced by NK (NCCE, 2012)) in 2000 and 2002.

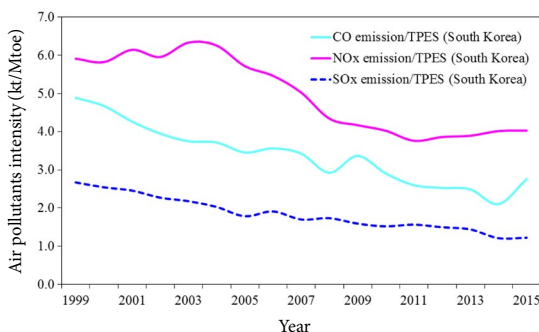


Fig. 5. Trends of emission intensities of carbon monoxide (CO), nitrogen oxides (NO_x), and sulfur oxides (SO_x) in South Korea between 1999 and 2015 (raw data: NIER, 2018; KOSTAT, 2017).

일산화탄소, 질소산화물, 황산화물 배출량을 비교하였는데, 이들 연도 값을 비교한 이유는 북한에서 직접 생산한 대기오염물질 배출량(NCCE, 2012) 자료와 우리나라 대기정책지원시스템(Clean Air Policy Support System, CAPSS) 값(NIER, 2018)을 활용하기 위해서다. NCCE (2012)에는 1990, 1994, 2000, 2002년 북한의 대기오염물질 부문별 배출량이 제시되어 있고, CAPSS 자료는 1999년부터 제공된다.

지금까지 북한 에너지 및 대기환경 연구에서 북한의 에너지 사용량과 대기오염물질배출량 자료는 북한 외부에서 추정된 값을 주로 사용하였는데, 이 값

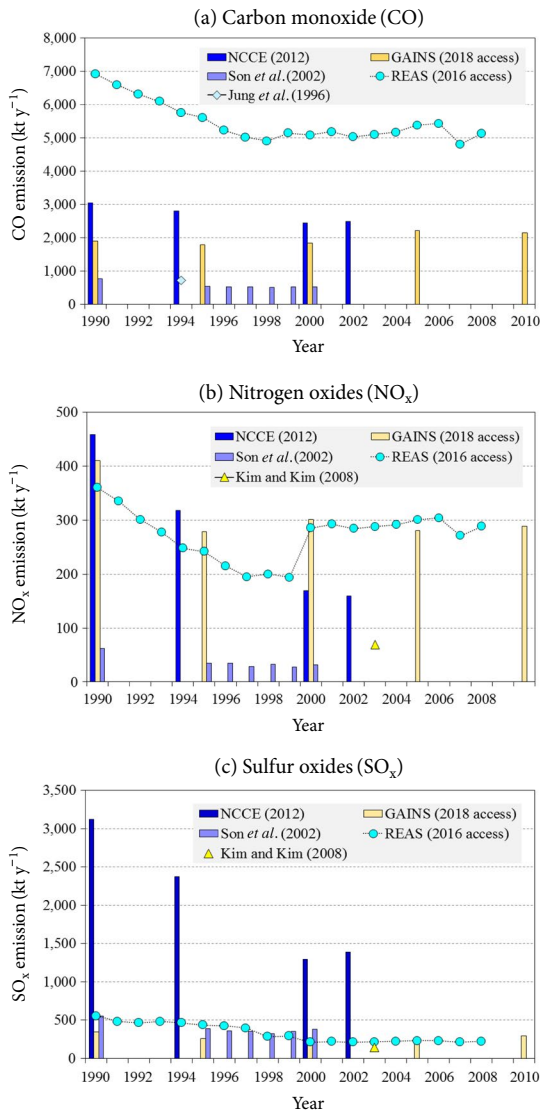


Fig. 6. Emission trends of air pollutants in North Korea (NK) (data produced by NK (NCCE, 2012) and from various outside sources, Greenhouse Gas - Air Pollution Interactions and Synergies (GAINS) (IIASA, 2017), Regional Emission inventory in Asia (REAS) (Kurokawa *et al.* 2013), Kim and Kim (2008), Son *et al.* (2002), and Jung *et al.* (1996)).

들은 그림 6을 보면 연구기관 및 연구자에 따라 차이가 있고 불확도가 높으므로, 본 연구에서는 북한에서 생산한 값을 활용하였다. CAPSS (NIER, 2018)는 우리나라 정부에서 제공하는 공식 대기오염물질 배출

량 자료이다.

그림 6을 보면 일산화탄소, 질소산화물, 황산화물 배출량은 추정 기관에 따라서 차이가 있고, 북한에서 자체적으로 생산한 자료와도 차이가 있다. 대체적으로 북한 외부에서는 북한의 대기오염물질 배출량을 북한에서 자체적으로 생산한 자료(NCCE, 2012)보다 적게 추정하였다. 예를 들어, 황산화물은 북한 외부에서 전체적으로 NCCE (2012) 결과의 20% 가량으로 낮게 추정하였다.

이는 북한의 에너지 공급량과 대기오염물질 배출 시설 관리 실패가 제대로 반영되지 않았기 때문인 것으로 예상할 수 있다. 에너지 공급량은 북한 외부에서 추정한 결과와 북한에서 자체적으로 생산한 결과의 차이가 대기오염물질 배출량에 비해 작다는 것을 그림 7에서 확인할 수 있다. 따라서 북한 외부에서 북한 대기오염물질 배출량을 추정하는 과정에서 북한의 대기관리 실패를 과대평가하여 실제보다 더 낮은 배출계수나 더 높은 제거효율을 적용했을 것으로 예상된다.

총에너지 공급량 통계(그림 7)에 포함되지 않은 생체연료 사용에 의한 배출도 기여하였을 것이라 예상할 수 있는데, 일산화탄소 배출량이 이에 해당하는 것으로 보인다. 우리나라는 2000년 일산화탄소 배출량의 80% 가량이 도로이동오염원에서 배출되었지만 (NIER, 2018), 북한은 1990, 1994, 2000, 2002년 일산화탄소 배출량의 30% 이상이 농업 부산물과 같은 생체연료 사용에 의한 것임을 그림 8에서 확인할 수 있다. 생체연료 사용량은 불확도가 매우 높으므로(Kim *et al.*, 2011), 일산화탄소 배출량은 결과별 차이가 큰 것으로 예상된다.

일본에서 개발한 Regional Emission inventory in ASia (REAS)에서는 북한의 일산화탄소 배출량을 북한에서 자체적으로 생산한 자료(NCCE, 2012)보다 두 배 가량 높게 추정하였는데(그림 6), 이는 생체연료 사용량을 높게 추정하였기 때문인 것으로 보인다. 다른 외부 기관에서는 생체연료 사용량을 고려하지 않았거나 매우 낮게 추정하였을 것으로 예상된다.

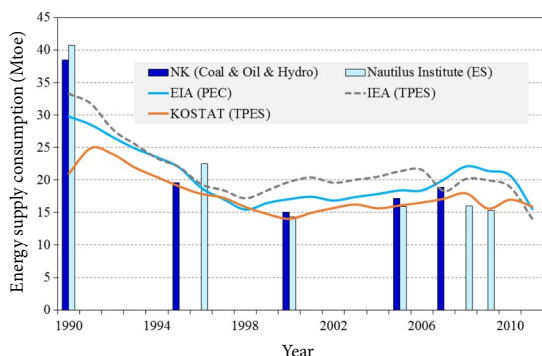


Fig. 7. Energy supply trends in North Korea (NK) (data produced by NK (NCCE, 2012) and from various outside sources, EIA (2017), IEA (2017), KOSTAT (2017), and Nautilus Institute (2012)).

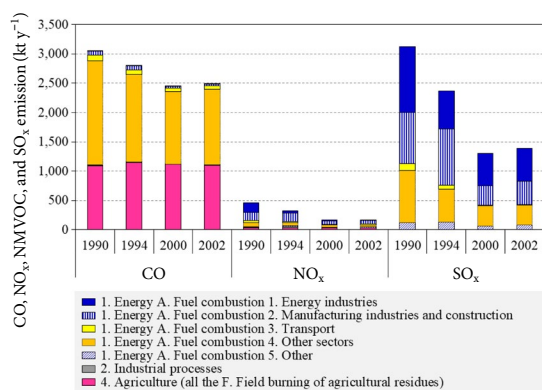


Fig. 8. Emissions of carbon monoxide (CO), nitrogen oxides (NO_x), and sulfur oxides (SO_x) by sector in 1990, 1994, 2000, and 2002 in North Korea (raw data: NCCE, 2012).

3.2.3 북한의 대기환경 관리실태와 고찰

표 4에 우리나라와 북한의 2000년 에너지 공급량, 대기오염물질(일산화탄소, 질소산화물, 황산화물)과 이산화탄소 배출량, 대기오염물질 배출 강도와 탄소 강도를 각각 의미하는 에너지 공급량당 대기오염물질과 이산화탄소 배출량, 이산화탄소 배출량당 대기오염물질 배출량 결과를 제시하였다.

우리나라 값에 대한 북한 값의 비도 함께 제시하였는데, 에너지 공급량의 비가 0.08로 가장 작았고, 일산화탄소와 황산화물의 에너지 공급량당 대기오염물질 배출량의 비가 약 33~34로 가장 컸다. 이는 Kim

et al. (2011)에서 제시한 4보다 훨씬 큰 수치이다. Kim *et al.* (2011)은 북한 외부에서 추정한 값을 사용하였는데, 이를 통해 북한과 북한 외부에서는 북한의 대기환경 관리실태에 대한 이해의 차이가 크다는 것을 확인할 수 있다.

우리나라와 북한의 에너지 공급량당 이산화탄소 배출량 차이를 통해서는 3.2.1절에서 언급한 탄소강도와 마찬가지로 에너지효율과 연료 품질에 의한 차이를 예상할 수 있고, 에너지 공급량당 대기오염물질 배출량 차이를 통해서는 에너지효율과 연료 품질에 의한 차이뿐만 아니라 배출시설에서의 제거효율에 의한 차이까지 예상할 수 있다. 따라서 이산화탄소 배출량당 대기오염물질 배출량의 차이를 통해서 대기오염물질 배출시설에서의 제거효율에 의한 차이를 예상할 수 있다. 동일한 양의 이산화탄소가 배출될 때 북한의 일산화탄소와 황산화물 배출량의 비는 우리나라의 15배 가량으로 북한의 이들 물질 배출시설에 대한 관리 방안 개선이 시급하다는 점을 파악할 수 있었다.

그림 6에서 질소산화물은 일산화탄소나 황산화물에 비해 북한과 북한 외부에서 추정한 결과 차이가 적었고, 이산화탄소 배출량당 대기오염물질 배출량의 비도 0.84로 1보다 작은 값을 나타내었다. 우리나라가 북한보다 동일한 이산화탄소 배출량당 질소산화물을 19% 가량 더 배출한 것이다. 이를 통해 2000년 우리나라의 질소산화물 배출원 관리 또한 개선이 필요한 상황이었음을 파악할 수 있었다. 하지만 2015년 우리나라 이산화탄소 배출량(에너지 부문 602.4 MtCO₂e)당 질소산화물 배출량(1,158 kt)은 0.19%로 2000년의 약 0.3%보다 크게 개선되었다.

3.3 북한 대기질 개선 방안

3.3.1 북한의 대기질 개선을 위한 방안

앞의 결과들을 통해 북한은 현재 대기질이 잘 관리되지 않고 있는 상황임을 확인할 수 있었다. 이런 상황에서 북한은 자발적 감축기여(Intended Nationally Determined Contribution, INDC)에서 자국의 2030

Table 5. Measures proposed in the Intended Nationally Determined Contributions (INDC) of North Korea (UNFCCC, 2016).

Mitigation measures prioritized for conditional contribution
1. To reduce power transmission and distribution losses to 6%
2. To build 2000 MW nuclear power station
3. To install a total of 1000 MW grid connected solar PV systems
4. To build a total of 500 MW West Sea off – shore wind farms at the Korean West Sea
5. To build a total of 500 MW on-shore wind farms
6. To use energy-efficient air conditioners and heat pumps instead of coal-fired space heating at households and offices
7. To use biogas from livestock manure and domestic sewage instead of coal or firewood for cooking
8. To replace coal use for hot water with solar hot water system at households
9. To replace conventional wood stoves for cooking with efficient wood stoves at rural households
10. To build the rice husk cogeneration plants
11. To building centralized compositing facilities to collect and treat municipal solid waste
12. To replace the old subcritical coal power stations with ultra-supercritical coal power stations
13. To increase additives (blast furnace slag or fly ash) from 15% to 50% in blended cement
14. To build biogas plants treating municipal solid waste
15. To replace conventional coal stoves for cooking with efficient electric cookers at the households
16. To reduce 25% of energy consumption in industry through technical modernization by 2030
17. To replace tunnel brick kilns with vertical shaft brick kilns
18. To introduce the Bus Rapid Transit systems in large cities
19. To scale up agroforestry and sustainable forest management

년 이산화탄소 기준배출량을 187.73 MtCO₂로 예측하였는데 (UNFCCC, 2016), 이는 2010년 98.27 MtCO₂ (NCCE, 2012)의 약 2배에 해당하여 에너지 소비량도 비슷한 수준으로 증가할 것으로 예상된다. 북한의 에너지 소비량이 증가할 경우 북한 내 이산화탄소 및 대기오염물질 배출량이 증가하여 북한뿐만 아니라 동북아시아 및 우리나라에 미칠 영향이 증가할 것으로 예상된다.

북한의 대기질을 개선하기 위해서는 3.2절에서도 논의하였듯이 무엇보다 북한 내 대기오염물질 배출원에서의 배출에 의한 영향과 북한 외부에서의 영향을 구분하여 파악하고, 북한 내 대기오염물질 배출을 줄이고 외부 영향에 대응하는 방안을 마련해야 할 것이다.

이를 위해서는 북한의 현재 대기오염물질 배출량과 대기질에 대해 신뢰할 수 있는 자료가 필요하다. 하지만 현재 북한에는 대기오염물질 배출 인벤토리와 지상관측 시스템이 구축되어 있지 않는 것으로 판단된다. UNEP (2012a)에 따르면, 북한 역시 제한된 기술 및 재원으로 인해 모니터링 시스템이 잘 구축되지 않았다고 판단하고 있으며, 모니터링 네트워크 현

대화를 북한 대기질 관리를 위한 우선순위가 높은 사업으로 고려하고 있다.

2007년에도 ‘남북보건의료 환경보호 협력분과위원회 제1차 회의 합의서’에서 남북한 정부차원의 교류 협력으로 황사를 비롯한 대기오염 측정시설 설치 및 자료교환을 합의한 적이 있지만, 별다른 진전은 없었던 것으로 평가되고 있다(Chu, 2018).

따라서 지상관측을 할 수 있는 모니터링 시스템 구축이 선행되어야 할 것으로 보인다. 북한의 효과적인 대기질 관리를 위해서는 우리나라 도시대기 측정망과 같이 국지적인 대기질을 파악하기 위한 모니터링 시스템과 우리나라 국가 배경농도 측정망과 같이 외부 영향을 파악하기 위한 모니터링 시스템(MOE and NIER, 2018)부터 우선적으로 구축해야 할 것으로 판단된다.

또한, 북한의 대기오염물질 배출량을 줄이기 위해서는 연료 품질과 에너지 효율을 개선하여 배출계수를 개선하고, 대기오염물질 배출시설에 저감시설을 설치 및 운영하여 제거효율을 높일 수 있는 사업을 추진해야 한다. 이들 사업에 대한 예시는 표 5, 6에 제시하였다.

Table 6. Priority projects for financing of North Korea (NCCE, 2012).

	Projects
Cross-cutting Project	1. Establishment of National Climate Change Centre and its Capacity Building
GHG Inventory Projects	2. Development of GHG Inventory Strategy and Capacity Building 3. Preparation of Biennial GHG Inventory in DPR Korea
Mitigation Projects	4. Promotion of CDM Project Activities in DPR Korea 5. Capacity Building of the Centre for Rational Use of Energy 6. Clean Production and Energy Efficiency 7. Energy Efficiency Standards and Labeling in DPR Korea 8. Climate Change Technology Needs Assessment in DPR Korea 9. Chongchon River Cascade Hydropower Generation Project (CDM Project) 10. Replacement of Incandescent Lamps by CFLs/LEDs (CDM Project) 11. Capacity Building for Sustainable Forest Management 12. Production of Energy, Fuel and Fertilizer from Municipal Solid Waste 13. Capacity Building for Integrated Management of Solid Waste
Adaptation Projects	14. Improvement of Climate Information Service in DPR Korea 15. Improvement of Observation Network in DPR Korea 16. Capacity Building for Integrated Water Resources Management in the Teadong River Basin 17. Recovery of Degraded Forest and Firewood Forest Management in Community Areas 18. Capacity Building for Integrated Management of Coastal Zones 19. Promotion of Development and Dissemination of Advanced Agricultural Technologies for coping with Climate Change 20. Control of Forest Pests Outbreaks by Climate Change and Integrated Forest Pest Management 21. Improvement of Ecosystem Conservation System in Coastal Zone of the Korean West Se 22. Capacity Building for Improving the Community-based Disaster Management System

북한의 대기질 개선 사업을 진행하기 위해서는 기술과 자금, 교육훈련이 필요한데, 현재 북한의 기술 수준 및 경제 상황을 고려하면 북한에서 자체적으로 진행하기에는 어려움이 있을 것으로 보인다. 그러나 현재는 북한이 우리나라의 지원 제안을 그대로 받아들이지 않을 것으로 보인다. 따라서 국제협력을 통한 기술 및 자금 지원을 통해 북한의 대기질을 개선시키는 것이 가장 현실적인 대안으로 판단된다.

북한 외부에서 기술과 자금을 북한 대기질 개선을 위한 사업에 지원하고, 북한에서는 지원받은 사업에서 생산된 자료를 지원국에 공유하는 협력 방식을 고려할 수 있다. 북한에 신뢰할 수 있는 대기오염물질 배출 인벤토리가 구축되고, 신뢰할 수 있는 대기오염물질 농도 및 분석 자료가 공유된다면, 북한 내 대기오염 현상 및 원인뿐만 아니라 동북아시아 대기오염 현상 및 원인에 대한 이해도 높일 수 있을 것이다. 북한과의 협력 방식에 대해서는 3.3.2절에서 논의하였다.

북한 대기질을 파악하기 위해서는 인공위성 자료도 도움이 될 것인데, 현재 천리안 2B에 탑재될 정지궤도 환경위성(Geostationary Environment Monitoring Spectrometer, GEMS)이 한반도를 포함한 동아시아 지역 대기오염물질과 기후변화 유발물질 배출·이동 상시 감시를 위해 개발되고 있으며, 2019년에 발사될 예정이다. 향후 GEMS를 통해 생성될 대기오염물질 농도 자료도 북한 대기질에 대한 이해도를 높이는데 크게 기여할 것으로 기대된다.

3.3.2 북한이 제시하는 우선순위 사업

북한과의 협력을 성공적으로 성사시키고 유지하기 위해서는 Jang (2018)도 언급하였듯이 북한의 의사를 고려하는 것이 중요하다. 북한이 선호하는 협력방식을 취하고, 북한에 우선순위가 있는 사업을 우선적으로 진행하는 것이 교류협력의 성공가능성을 높일 것이다.

NCCE (2012)와 UNFCCC (2016) 등을 보면, 북한

은 기존에도 추진한 바 있는 청정개발체제 (Clean Development Mechanism, CDM)와 같은 국제협력 프로그램 활용을 선호하는 것으로 판단된다. CDM과 같은 국제협력 프로그램은 일정 요건(예를 들어, 국가승인기구 설치)을 만족시키면 정치적인 요인의 영향을 상대적으로 덜 받을 수 있을 것으로 예상된다.

북한에서 2013년에 제정한 재생에너지법 제6조(국제적인 교류와 협조)에서 ‘국가는 재생에너지 분야에서 다른 나라, 국제기구들과의 교류와 협조를 발전시킨다.’라고 명시(Law publisher, 2016)하였는데, 이를 통해 북한은 신재생 에너지 분야에서의 국제협력력을 바라고 있다는 점을 알 수 있다. 이는 UNFCCC(2016)에서도 파악할 수 있다(표 5).

신재생에너지는 전력을 생산하는 과정에서 이산화탄소나 대기오염물질을 배출하지 않으므로 북한에서 신재생에너지 공급량 늘리는 것은 향후 에너지 수요가 증가했을 때 대기오염을 최소화하면서 에너지를 공급할 수 있는 방안의 하나이다.

신재생에너지는 민생에너지 수급 문제를 해결하기 위해서도 유용한 방안인 것으로 판단된다. 현재 북한은 민생에너지 수급과 관련하여 공급량의 부족과 정제되지 않은 에너지원의 사용에 따른 건강 영향의 두 가지 문제에 직면해 있다. KEEI(2013)에 의하면, 2011년 북한 가정부문의 에너지 소비량은 1985년의 32.8% 정도밖에 되지 않아 북한 가정부문의 에너지 빈곤 문제가 심각하다는 점을 예상할 수 있다. 북한은 적절한 실내 공기오염 저감 장치가 없는 환경에서 환경과 건강영향이 큰 것으로 알려진 연탄, 나무와 농업 부산물 등의 생체연료를 주로 이용하여 난방과 요리를 하는 것으로 알려져 있는데(KEEI, 2013), 이 때문에 실내 공기오염에 의한 초과사망률이 매우 높은 상황(WHO, 2017)이다.

태양광이나 풍력 등을 이용하는 신재생에너지는 화석에너지를 사용하는 대형 발전소에 비해 단기간에 설치가 가능하고, 소규모로 전기에너지를 공급할 수 있다. 북한의 신재생에너지 잠재량은 태양광 발전이 8,902 TWh로 가장 크며, 풍력 발전과 소수력 발전

도 각각 8 TWh, 5 TWh이다(HRI, 2015).

신재생에너지 외에도 북한은 국제적인 지원을 통해 기후변화를 완화할 수 있는 우선순위 사업 목록을 사업방식과 규모에 대해 표 5와 같이 제시하였다. 표 5를 보면, 북한이 우선순위를 두고 국제적인 지원을 바라는 사업은 에너지 공급량을 증가시키고, 온실가스 배출을 줄이고, 대기질을 개선할 수 있는 방향을 지향하고 있다. 고체연료 사용과 관련하여 석탄화력 발전소 효율 개선뿐만 아니라 가정에서의 석탄 난방과 우드 스토브 효율 개선 사업을 제시하였는데, 이는 북한 주민의 건강을 고려했을 때 매우 중요한 사업이라 판단된다.

UNFCCC(2016) 이전에도 북한은 우선순위 사업 목록을 꾸준히 외부에 제시해 왔다. UNEP(2003)에서는 산림부문, 수자원관리, 대기환경개선, 환경보호, 자원보존, 다양성 보존을 위한 16개 프로젝트 목록을 제시하였다.

2012년에 UNFCCC에 제출한 제2차 국가기후변화 보고서(NCCE, 2012)에는 표 6과 같은 목록이 제시되어 있다. NCCE(2012)에는 프로젝트에 대해 상세하게 배경, 목적, 활동, 결과(output), 담당기관(agency), 예산, 기간정보가 제시되어 있다. 표 5와 6에 제시된 사업들이 북한에서 추진될 경우 북한 대기질 개선에 도움이 될 것으로 기대된다.

표 7은 UNEP(2012b)에 제시된 북한이 국제지원을 바라는 프로젝트 목록으로 이에 대한 책자가 별도로 제시되었으며, 프로젝트 추진 기간, 예산, 배경, 목적, 활동 등이 세분화된 상세 목록과 표 등으로 제시되어 있다.

최근 남북 화해 분위기가 형성되어 남북 산림 협력, 철도 협력 등 남북 협력이 급속도로 진전되고 있다. 대기환경 분야에서의 남북 협력 역시 한반도의 대기질을 개선하고 에너지 자원을 효율적으로 사용 및 관리하기 위해 우선순위를 두어 추진해야 할 것으로 판단된다. 환경문제를 해결하기 위한 사례는 남북 협력의 성공적인 사례가 될 것으로 기대된다(The DMZ Forum, 2015).

Table 7. Project proposals of North Korea (UNEP, 2012b).

Project proposals
1. Capacity building for environmental monitoring and early warning
2. Capacity building for the implementation of Clean Development Mechanism projects
3. Capacity building on legal and regulatory framework for environmental management
4. Establishment of the National Cleaner Production Center (NCPC)
5. Capacity building for integrated management of solid waste
6. Production of energy, fuel and fertilizer from municipal solid waste
7. Development of environmental management decision support system
8. Improvement of the national system for nature reserves their management
9. Preparation of an action plan for the rehabilitation of wetland ecosystems

하지만 Chu (2018)에 의하면, 남북한간 교류협력에서 양국의 접근방식과 협력체계가 다르고, 주요 관심사와 수요에 차이가 있으며, 제도적 기반이 미비한 한계가 있다. 외교와 안보 등 외부요인의 절대적 영향도 제약 조건이다. 이런 한계로 남북한의 대기환경 분야 교류협력은 사실상 전무한 것으로 평가된다 (Chu, 2018).

따라서 한반도 대기질을 개선하기 위해 북한과 협력하기 위해서는 CDM과 같은 국제협력 프로그램을 활용하고 동북아 대기질 개선을 위한 협력, 기후변화 협력 등의 다자간 협력 틀을 활용하는 것이 도움이 될 것으로 기대된다.

4. 결 론

본 연구에서는 북한의 지난 20여 년간 지역별 $PM_{2.5}$ 농도 추이와 지역별 $PM_{2.5}$ 농도에 영향을 주는 요인을 파악하고자 하였다. 또한, 북한 대기환경 관리 실태를 파악하여 북한 대기질에 대한 이해를 높이고자 하였고, 북한 대기질을 개선할 수 있는 방안을 제시하였다.

본 연구에서 사용한 북한의 $PM_{2.5}$ 농도 (OECD,

2018)는 위성 자료와 모델링 결과로 추정한 것으로 불확도가 있는 자료이지만, 북한에는 지상관측 결과가 없는 것으로 판단되므로 현재 북한 대기질을 파악하기 위해 사용할 수 있는 최선의 자료라고 판단된다. 에너지 소비량, 이산화탄소 및 대기오염물질 배출량 자료는 북한이 직접 생산한 자료를 활용하였는데, 이 역시 불확도가 있지만 북한에서 직접 생산하였다는 점에서 북한 외부에서 추정한 자료들에 비해 북한 실태를 잘 반영하였을 것으로 기대된다.

지난 20여 년간 북한의 $PM_{2.5}$ 연평균 농도는 $25 \mu g/m^3$ 에 가까웠다. 북한의 11개 시도 지역을 $PM_{2.5}$ 농도 영향요인으로 분류하여 연평균 농도를 비교한 결과, (A) 석탄화력 발전소가 있는 그룹 지역은 없는 그룹 지역에 비해 약 11%, (B) 서쪽 그룹 지역이 동쪽 그룹 지역에 비해 약 45%, (C) 남쪽 그룹 지역이 북쪽 그룹 지역에 비해 약 27% 높은 값을 나타내었다. 이 결과를 통해 북한에서 석탄화력 발전소가 있는 지역, 서쪽 그룹 지역, 남쪽 그룹 지역의 농도가 각각 반대의 경우보다 $PM_{2.5}$ 농도가 높다는 것을 확인할 수 있었다.

1) 석탄화력 발전소, 2) 북한 서쪽(중국), 3) 북한 남쪽(우리나라)의 영향을 보여줄 것으로 기대되는 지역과 양강도의 농도차이 결과에서는 석탄화력 발전소의 영향이 12.5%, 우리나라와 중국의 영향이 각각 약 24.6%, 26.8% 가량인 것으로 나타났다. 물론 이 결과는 매우 불확실한 결과이므로, 앞으로 관측과 모델링을 통해 개선하여야만 한다. 그럼에도 불구하고 이를 통해 북한의 대기오염물질 관리를 위해서는 신뢰할 수 있는 북한 모니터링 자료를 확보하여 북한 외부에서의 영향을 파악하고, 동북아 역내 다른 국가들과의 협력이 중요하다는 점을 확인할 수 있었다.

북한의 대기질을 개선하기 위해서는 우선 북한 내 대기오염물질 배출원에서의 배출에 의한 영향과 북한 외부에서의 영향을 구분하여 파악하는 것이 중요하므로 지상관측을 할 수 있는 모니터링 시스템 구축이 선행되어야 할 것으로 보인다.

또한 북한 내 대기오염물질 배출을 줄이고 외부 영

향에 대응하는 방안을 마련해야 할 것인데, 본 연구에서 북한의 대기환경 관리 실태를 살펴본 결과, 많은 개선이 필요할 것으로 판단된다. 2000년 북한의 에너지 소비량은 우리나라의 8%에 불과했지만, 일산화탄소와 황산화물의 에너지 공급량당 대기오염물질 배출량은 우리나라의 33~34배 가량으로 북한의 이들 물질 배출시설에 대한 관리 방안 개선이 시급하다는 점을 파악할 수 있었다.

북한 주민의 건강영향을 생각한다면, 북한의 실외 대기질뿐만 아니라 실내 공기질 개선도 매우 시급하다. 북한에서는 가정에서의 난방 및 요리를 위하여 생물성 연료 및 저품질의 석탄을 사용하는데, 적절한 저감시설을 설치하지 않아 유해대기오염물질에 대한 노출이 클 것으로 예상된다.

북한의 대기질 개선 사업을 진행하기 위해서는 기술과 자금, 교육훈련이 필요하며 국제협력을 통한 기술 및 자금 지원을 통해 북한의 대기질 개선 사업을 추진하는 것이 가장 현실적인 대안일 것이다. 대기환경 분야에서의 남북 협력은 한반도의 대기질을 개선하고 에너지 자원을 효율적으로 사용 및 관리하기 위해 우선순위를 두어 추진해야 할 것으로 판단된다.

북한이 바라는 형태의 국제 협력과 우선순위 사업을 추진하는 것이 협력을 성공적으로 추진하는데 있어 중요할 것이다. CDM과 같은 국제협력 프로그램을 활용하고 동북아 대기질 개선을 위한 협력, 기후변화협력 등의 다자간 협력 틀을 활용하고, 북한이 국제사회에 제시한 우선순위 사업 목록을 활용하는 것이 유용할 것으로 기대된다.

본 연구에서 북한의 미세먼지 농도에 영향을 미치는 요인에 대해 분석한 결과에는 지형적인 요인 등 고려하지 못한 요인들이 있고, 여러 가정을 하였다는 점에서 불확도가 높지만, 북한의 지역별 배출 가능성과 외부 영향 가능성을 제시하여 전반적으로 북한의 대기환경에 대한 이해를 높이는 데 기여할 것으로 기대된다. 앞으로는 위성자료 등을 활용하여 정량적인 분석을 통해 북한의 대기질 현황을 파악할 수 있을 것으로 기대된다. 향후 북한에 신뢰할 수 있는 대기

오염물질 배출 인벤토리가 구축되고, 신뢰할 수 있는 대기오염물질 농도 및 분석 자료가 공유된다면, 북한 내 대기오염 현상 및 원인뿐만 아니라 동북아시아 대기오염 현상 및 원인에 대한 이해도 높일 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2018년도 정부(미래창조과학부; 교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다 (NRF-2017R1A2B4006760; NRF-2017R1A6A3A11029726).

References

- Bae, M., Kim, H.C., Kim, B.-U., Kim, S. (2018) PM_{2.5} Simulations for the Seoul Metropolitan Area: (V) Estimation of North Korean Emission Contribution, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34 (2), 294-305, (in Korean with English abstract), DOI: 10.5572/KOSAE.2018.34.2.294.
- Chu, J.M. (2018) Cooperation for Air Pollution between South Korea and North Korea. Workshop on Special Committee on Air Pollution in the Korean Peninsula. Held August 21, 2018. Seoul. (in Korean)
- Hyundai Research Institute (HRI) (2015) Potential of the cooperation of South Korea and North Korea in the renewable CDM project - HRI VIP Report No: 636. Seoul. (in Korean)
- Institute for Health Metrics and Evaluation (IHME) (2018) Global Burden of Disease Study 2017 (GBD 2017) Data Resources. <http://ghdx.healthdata.org/gbd-2017>. Accessed November 11, 2018.
- International Energy Agency (IEA) (2011) CO₂ emissions from fuel combustion highlights, 2009 edition. Paris.
- International Energy Agency (IEA) (2018a) CO₂ emissions from fuel combustion 2018 Highlights. Paris.
- International Energy Agency (IEA) (2018b) <http://energyatlas.iea.org/>. Accessed December 27, 2018.
- International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) (2017) GAINS Online - East Asia. <http://gains.iiasa.ac.at/gains/activities.EAN/index.menu>. Accessed

- August 21, 2017.
- Jang, J.Y. (2018) Status of the ecological environment and environment cooperation between South Korea and North Korea. Seminar on Sustainable energy and environment cooperation between South Korea and North Korea. Held July 10, 2018. Seoul. (in Korean)
- JOINS (2018) Emissions from China as well as local sources, Painful fine particles for North Korean people. <https://news.joins.com/article/22859164>. Accessed November, 09, 2018. (in Korean)
- Kim, I.S., Kim, Y.P. (2019) Characteristics of energy usage and emissions air pollutants in North Korea, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 35(1), 125-137, (in Korean with English abstract), DOI: 10.5572/KOSAE.2019.35.1.125.
- Kim, I.S., Lee, J.Y., Kim, Y.P. (2011) Energy usage and emissions of air pollutants in North Korea, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 27(3), 303-312, (in Korean with English abstract), DOI: 10.5572/KOSAE.2011.27.3.303.
- Kim, I.S., Lee, J.Y., Kim, Y.P. (2013) Impact of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) emissions from North Korea to the air quality in the Seoul Metropolitan Area, South Korea, Atmospheric Environment, 70, 159-165, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2012.12.040.
- Kim, N.K., Kim, Y.P., Morino, Y., Kurokawa, J., Ohara, T. (2014) Verification of NO_x emission inventory over North Korea. Environmental Pollution, 195, 236-244, DOI: 10.1016/j.envpol.2014.06.034.
- Kim, Y.M., Kim, J.W. (2008) A study on the estimation of air pollutants emission for North Korea, Journal of Korea Environmental Policy, 16(2), 151-177.
- Kim, Y.P., Lee, G. (2018) Trend of Air Quality in Seoul: Policy and Science, Aerosol and Air Quality Research, 18, 2141-2156, DOI: 10.4209/aaqr.2018.03.0081.
- Korea Energy Economics Institute (KEEI) (2015) Energy statistics of North Korea. Ulsan. (in Korean)
- Korea Research Institute for Human Settlements (KRIHS) (2014) A study on urban development models and implementation strategies for selective North Korean cities. Gyeonggi. (in Korean)
- Kurokawa, J., Ohara, T., Morikawa, T., Hanayama, S., Janssens-Maenhout, G., Fukui, T., Kawashima, K., Akimoto, H. (2013) Emissions of air pollutants and greenhouse gases over Asian regions during 2000-2008: Regional Emission inventory in ASia (REAS) version 2. Atmospheric Chemistry and Physics, 13, 11019-11058, DOI: 10.5194/acp-13-11019-2013.
- Law publisher (2016) *Laws of the Democratic People's Republic of Korea (additional edition)*. pp. 128-134. Law publisher, Pyongyang.
- Ministry of Environment (MOE), National Institute of Environmental Research (NIER) (2018) Guidelines for installation and operation of air pollution monitoring system. Sejong. (in Korean)
- Ministry of Land and Environment Protection (MLEP) (2000) DPRK's First National Communication under the Framework Convention on Climate Change. Pyongyang.
- Ministry of Unification (MOU) (2018) North Korea Information Portal - Map. <http://nkinfo.unikorea.go.kr/NKMap/main/viewMain.do>. Accessed November 09, 2018. (in Korean)
- National Coordinating Committee for Environment (NCCE) (2012) DPR Korea's Second National Communication on Climate Change. Pyongyang.
- Nautilus Institute (2012) Foundations of energy security for the DPRK: 1990-2009 energy balances, engagement options, and future paths for energy and economic redevelopment. CA, USA.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2018) Air pollutants emissions. <http://airemiss.nier.go.kr/mbs/home/mbs/airemiss/index.do>. Accessed December 27, 2018. (in Korean)
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) (2017) Green growth indicators 2017. Paris.
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) (2018) Exposure to PM_{2.5} in countries and regions. <https://stats.oecd.org/index.aspx?queryid=72722>. Accessed November 09, 2018.
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (2016) *Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change, third edition*, John Wiley & Sons Inc, Hoboken, New Jersey, USA.
- Seo, J., Park, D.-S., Kim, J.Y., Youn, D., Lim, Y.B., Kim, Y. (2018) Effects of meteorology and emissions on urban air quality: a quantitative statistical approach to long-term records (1999-2016) in Seoul, South Korea. Atmospheric Chemistry and Physics, 18, 16121-16137, DOI: 10.5194/acp-18-16121-2018.
- Shaddick, G., Thomas, M., Amini, H., Broday, D.M., Cohen, A., Frostad, J., Green, A., Gumy, S., Liu, Y., Martin, R.V., Prüss-Üstün, A., Simpson, D., van Donkelaar, A., Brauer, M. (2018) Data integration for the assessment of population exposure to ambient air pollution for global burden of disease assessment, Environmental Science & Technology, 52(16), 9069-9078, DOI: 10.1021/acs.est.8b02864.

- Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC) (2018) Gridded Population of the World (GPW), v4. <http://sedac.ciesin.columbia.edu/data/collection/gpw-v4/maps/services>. Accessed November 25, 2018.
- Son, K.W., Kang, G.K., Kim, K.S. (2002) Strategy for activation of cooperation of environment and energy between South Korea and North Korea. Seoul. (in Korean)
- The DMZ Forum (2015) International environmental cooperation of the democratic people's republic of Korea: report prepared for the DMZ forum. USA.
- United Nations Environment Programme (UNEP) (2003) DPR Korea: State of the Environment 2003. Thailand.
- United Nations Environment Programme (UNEP) (2012a) Democratic People's Republic of Korea Environment and Climate Change Outlook. Pyongyang.
- United Nations Environment Programme (UNEP) (2012b) Democratic People's Republic of Korea Environment and Climate Change Outlook - Project Proposals. Pyongyang.
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (2016) Intended Nationally Determined Contribution of Democratic People's Republic of Korea. Bonn, Germany.
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (2017) Clean Development Mechanism (CDM). <http://cdm.unfccc.int/>. Accessed June 29, 2017.
- U.S. Energy Information Administration (EIA) (2017) Korea, North - Overview. <https://www.eia.gov/beta/international/analysis.cfm?iso=PRK>. Accessed August 01, 2017.
- Van Donkelaar, A., Martin, R.V., Brauer, M., Hsu, N.C., Kahn, R.A., Levy, R.C., Lyapustin, A., Sayer, A.M., Winker, D.M. (2016) Global estimates of fine particulate matter using a combined geophysical-statistical method with information from satellites, models, and monitors. *Environmental Science & Technology*, 50(7), 3762-3772, DOI: 10.1021/acs.est.5b05833.
- World Health Organization (WHO) (2017) World health statistics 2017: monitoring health for the SDGs, Sustainable Development Goals. Geneva, Switzerland.
- Yeo, M.J., Kim, Y.P. (2016) Trend and prediction of environmental resources consumption in the Korean Peninsula, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 25(4), 261-279, (in Korean with English abstract), DOI: 10.14249/eia.2016.25.4.261.
- Yeo, M.J., Kim, Y.P. (2018) Electricity supply trend and operating statuses of coal-fired power plants in North Korea using the facility-specific data produced by North Korea: characterization and recommendations, *Air Quality, Atmosphere & Health*, 11, 979-992, DOI: 10.1007/s11869-018-0601-5.
- Yeo, M.J., Kim, Y.P. (2019) Estimation of the carbon dioxide emission change due to the change of the meat consumption behavior in North Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(1), 1-15, (in Korean with English abstract), DOI: 10.5572/KOSAE.2019.35.1.001.

Authors Information

여민주 (이화여자대학교 환경공학과 연구교수)
 김용표 (이화여자대학교 화학신소재공학과 교수)