



기술자료

북한의 에너지 사용과 대기오염물질 배출 특성

Characteristics of Energy Usage and Emissions of Air Pollutants in North Korea

김인선, 김용표¹⁾,*

이화여자대학교 환경공학과, ¹⁾이화여자대학교 화학신소재공학과

In Sun Kim, Yong Pyo Kim¹⁾,*

Department of Environmental Science & Engineering, Ewha Womans University

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

접수일 2018년 11월 26일
 수정일 2018년 12월 31일
 채택일 2019년 1월 21일

Received 26 November 2018
 Revised 31 December 2018
 Accepted 21 January 2019

*Corresponding author
 Tel : +82-(0)2-3277-2832
 E-mail : yong@ewha.ac.kr

Abstract Data on the energy usage and emissions of air pollutants in North Korea are assembled and analyzed. North Korea suffers from energy shortage and is highly dependent on domestic sources such as coal and biomass. Also, a large amount of air pollutants are emitted from North Korea due to inefficient combustion technologies and low level application of emission control technologies. In particular, it is found that though reliability of the data on the biomass burning is not high, it might be important energy sources and emit a large amount of air pollutants some of which are quite toxic. Also, it is found that the air pollutants emitted from North Korea can affect the air quality in South Korea, especially on the Seoul Metropolitan Area. Furthermore, the energy consumption in North Korea is expected to increase and, without installation of proper control equipment the air quality in both North and South Korea will be worsened. Cooperative strategy in energy sector between South and North Korea should be considered to manage air pollution and health effects in Korean Peninsular.

Key words: North Korea, Energy usage, Biomass, Emissions of air pollutants

1. 서 론

최근 한반도의 정치적 변화로 인해 남북협력을 새로운 관점에서 검토할 기회가 생겼다. 남북협력을 연구할 때 어려운 문제의 하나는 신뢰도 높은 북한의 자료 확보이다. 효과적인 남북협력 방안을 기획하고 실행하기 위해서는 북한의 현황을 정확하게 파악하여야 한다. 현재 북한에서 생산된 자료는 구하기 어렵기 때문에 북한에 대한 대부분의 자료는 거울자료(북한과의 교류가 있는 국가나 국제기구의 자료로부터 북한의 자료를 산출)이므로(Yeo *et al.*, 2018), 그 신뢰도를 명확하게 알 수 없다. 또한 이러한 자료들도 서로 차이가 많이 나기 때문에 어느 자료를 신뢰

하여야 하는가에 대한 문제도 발생한다. 예를 들어 북한 석탄 화력발전소의 효율 평가(단위 발전량당 이산화탄소 배출량)에서도 여러 산출 결과가 다르며(Yeo *et al.*, 2018), 대기오염물질인 이산화질소(NO₂)의 북한에서의 배출량도 연구자들에 따라 크게는 100배 정도 차이가 났다(Kim *et al.*, 2014). 따라서 북한에 대한 자료를 잘 취합하고, 이를 검토하여 신뢰 수준을 파악하는 것이 중요하다.

대기환경 분야의 현황을 파악하기 위해서는 대기오염물질의 주요 배출원인 에너지 사용과, 그로 인한 대기오염물질 배출량을 파악하는 것이 우선이다. Kim *et al.* (2011)은 북한의 대기환경기준, 일부 지역의 대기오염도와 함께 북한의 에너지 사용과 대기로

염물질 배출량 자료를 정리, 검토하였다. 그러나 이 자료는 2000년대 자료여서(배출량 자료의 경우 2003년), 최근의 북한의 에너지 사용과 대기오염물질 배출 특성을 파악할 수 없다.

이 연구에서는 (1) 확보할 수 있는 최근의 북한의 에너지 사용과 대기오염물질 배출 자료를 수집하고, (2) 이들을 비교, 분석하여 특성을 파악하고, (3) 남북의 대기환경 상호 영향을 검토하였다. 북한의 에너지 사용량은 우리나라 국가통계포탈 자료(Korean Statistical Information Service, KOSIS), 국제에너지기구(International Energy Agency, IEA), 미국 에너지관리청(U.S. Energy Information Administration, EIA)을 이용하여 1980년도부터 2016년도까지 정리하였다. 대기오염물질 배출량은 여러 배출량 자료를 활용하여 1970년도부터 2014년까지 정리하였다. 특히, 북한의 에너지 사용과 대기오염물질 배출에 관한 세부분석에는 Regional emission inventory in Asia (REAS)와 Emission database for global atmospheric research (EDGAR) v 4. 3. 2 결과를 주로 사용하였다.

2. 북한의 에너지 사용

북한의 에너지 공급난은 매우 심각한 수준이다. 그림 1은 남한, 북한 그리고 세계평균 1인당 1차 에너지 소비량을 보여준다(KOSIS, 2018). 우리나라(남한)와 북한의 1인당 1차 에너지 소비량은 1980년대에는 큰 차이를 보이지 않는다. 그러나 1990년대 이후 1인당 1차 에너지 소비량이 급격히 증가하는 남한과 달리 북한의 1인당 1차 에너지 소비량은 점차 감소하고 있다. 2010년대 이후, 그 양은 더욱 감소하였다. 2003년 세계평균 1인당 1차 에너지 소비량 대비 43.1%이던 북한의 1인당 1차 에너지 소비량은 2016년 0.40 toe (tonne of oil equivalent)로 세계평균 대비 22.2%에 머물고 있다. 또한, 전체 1차 에너지 소비량도 매우 적다. 미국 에너지관리청(US EIA) 자료를 기준으로 2015년 북한의 총 1차 에너지 소비량은 0.46 Quadril-

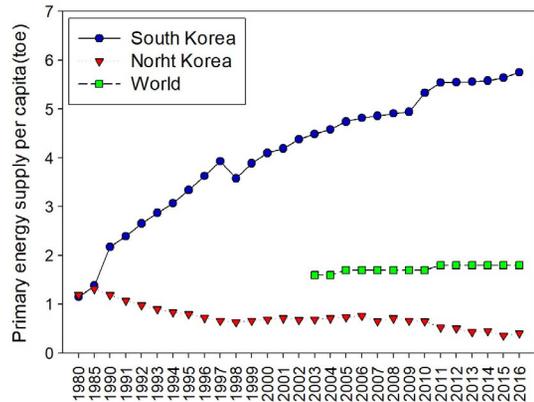


Fig. 1. Primary energy supply per capita in South Korea, North Korea and the world average (KOSIS, 2018).

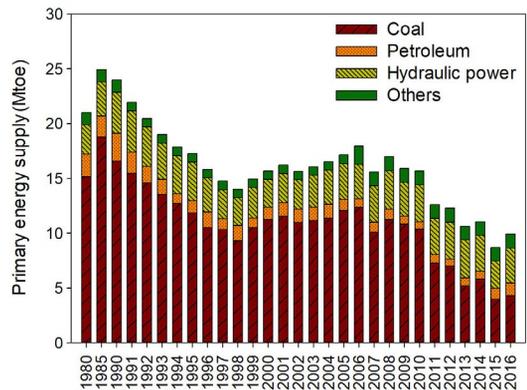


Fig. 2. Primary energy supply in North Korea (KOSIS, 2018).

lion Btu (10^{15} Btu)로 전 세계 75위이다. 이는 주변국인 중국(119.61 Quadrillion Btu, 1위), 일본(18.74 Quadrillion Btu, 5위), 남한(11.10 Quadrillion Btu, 9위)과 비교하여 매우 적은 양이다(EIA, 2018).

이러한 북한의 에너지 공급난은 석탄의 공급량 감소와 대체에너지원 부재에서 기인한다. 그림 2는 북한의 1차 에너지원별 공급량 추이를 보여준다(KOSIS, 2018). 북한은 여러 내외 요인으로 인하여, 석탄의 의존도가 매우 높다. 1990년부터 2016년까지 북한의 1차 에너지원 중 석탄이 차지하는 비율은 최소 43.2%에서 최대 71.4%이다(KOSIS, 2018). 이는 2015년 전 세계에서 석탄을 가장 많이 소비한 중국의

Table 1. Coal and heavy oil consumption between 1995 and 2007 based on North Korea data (UNEP, 2012).

	(unit: 10,000 t)			
Year	1995	2000	2005	2007
Total coal	3,020	2,273	2,505	2,743
Heavy oil	175.3	113.9	128.5	130.1

66.7%, 3번째로 많은 양의 석탄을 소비한 인도의 43.2%와 비교하여도 매우 높은 비율이다(IEA, 2018). 그림 2에서 수력발전에 의한 에너지 공급량은 거의 변화가 없다. 또한, 석유와 기타 에너지원에 다소 변화가 있으나 이 변화가 전체 1차 에너지 공급량에 미치는 영향은 크지 않다. 결국 석탄의 공급량 감소가 북한의 에너지 공급난의 주요 원인이다. 이와 같은 석탄의 공급 문제는 북한의 자체 자료에서도 나타나고 있다. 북한 자료에 의하면(UNEP, 2012) 1995년에 비해 2000년대 석탄과 중유의 사용량이 감소하였다. 특히 2000년에 최저를 기록하고 2005, 2007년에 증가하기는 하였으나 1995년 사용량에는 미치지 못하고 있다. 또 하나 주목한 것은 북한 자료(표 1)와 우리나라 자료(그림 2)가 상당한 차이를 보이고 있는 것이다.

북한의 석탄 공급량은 1990년대와 2010년대 후반부터 지금까지 두 기간에 걸쳐서 크게 감소하였다. 그림 3은 북한 내 석탄의 공급과 사용의 구조를 간단히 보여준다(IEA, 2018). 1990년대 북한의 석탄 생산량과 수입량이 감소하였다. 특히, 몇 차례 큰 홍수피해와 석탄 채굴의 기술적 한계 등으로 그 생산량이 감소하였고, 이로 인하여 석탄의 공급량이 감소하였다(KEEI, 2007). 2000년대 이후, 석탄의 생산량에 다소 변화가 있지만 크지 않다. 반면, 2010년도 이후 석탄 수출량은 크게 증가한다. 석탄의 생산량이 제한적인 상황에서 수출량 증가는 북한 내 석탄 공급량을 급격히 감소시켰다. 또한, 석유, 천연가스와 같은 대체 에너지원 공급이 어려운 상황에서 이러한 석탄 공급량 감소는 북한의 에너지 공급난을 심화시켰다.

석탄을 비롯한 기존의 에너지원 공급량 감소는 생물성 연료의 사용량과 의존도를 증가시켰다. 여기서

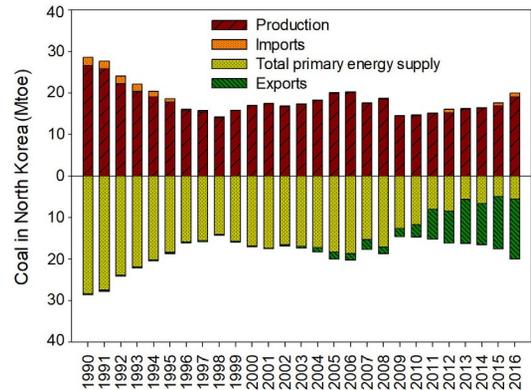


Fig. 3. Balance of supply and usage for coal in North Korea (IEA, 2018).

생물성 연료란 연료로 사용되는 바이오매스(biomass as fuel)로 장작, 농업 부산물, 동물 폐기물, 목탄 및 기타 파생연료이다(Kim *et al.*, 2011). 생물성 연료는 조사자, 조사방법에 따라 그 정의와 표현방법에 차이가 있다. 이 연구에서는 바이오매스와 관련된 자료를 통일하여 모두 생물성 연료로 표기하되 자료별 차이를 유지하기 위해 원문에서 사용된 용어를 괄호 안에 표기하고자 한다. 북한에서 제출한 자료에 의하면(UNEP, 2012), 2008년 현재 가정에서의 취사를 위해 도시에서는 63%가 석탄을 28%가 생물성 연료(wood)를 사용하고 있고(가스 4%, 석유 3%, 전기 2%, 기타 0%), 시골에서는 77%가 생물성 연료를 19%가 석탄을 사용하고 있다(기타 2%, 전기 석유 각 1%, 가스 0%). 또한 가정에서의 난방을 위해 도시(총 3,579,626 가구 가운데)에서는 64.3%가 석탄을 25.7%가 생물성 연료를 사용하며(이외에 중앙 난방시스템, 전기, 기타가 있음), 시골(총 2,307,845 가구 가운데)에서는 75.3%가 생물성 연료를 20.5%가 석탄을 사용하고 있었다. 즉 시골 지역에서는 생물성 연료가 난방과 취사에 압도적으로 사용되고 있다.

그러나 생물성 연료의 종류와 사용량 자료는 자료원에 따라 그 차이가 매우 크다. 그림 4는 국제에너지기구(IEA)가 산출한 북한의 생물성 연료(primary solid biofuels) 소비량과 전체 에너지 소비량에서 생

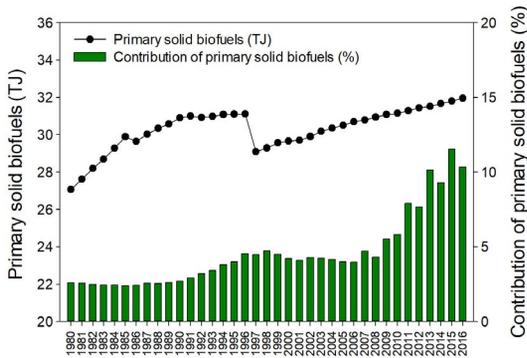


Fig. 4. Consumption of primary solid biofuels and contribution of primary solid biofuels in total final consumption in North Korea (IEA, 2018).

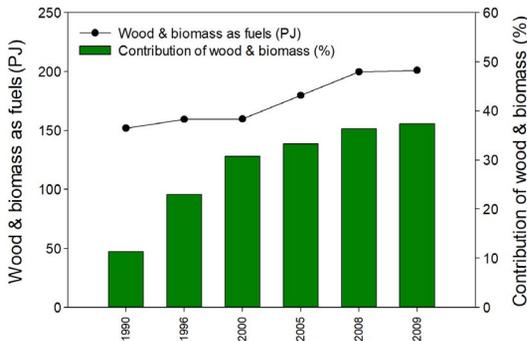


Fig. 5. Consumption of wood & biomass as fuels and contribution of wood & biomass as fuels in final consumption in North Korea (Nautilus Institute, 2012).

물성 연료의 비율을 보여준다(IEA, 2018). 1997년 29.1 TJ이던 생물성 연료의 사용량은 지속적으로 증가하여 2016년 31.9 TJ이고, 전체 에너지원 소비량에서 생물성 연료가 차지하는 비율은 4.5%에서 10.3%로 두 배 이상 증가하였다. 그림 5는 안보 관련 정보 기관인 Nautilus Institute 산출한 북한의 생물성 연료(biomass/wood)와 전체 에너지 소비량에서 이들이 차지하는 비율을 보여준다(Nautilus Institute, 2012). 2009년 북한의 생물성 연료의 사용량은 201 PJ이고 전체 에너지 소비량 중에 37.4%를 차지한다. KOSIS의 경우, 생물성 연료(신탄, 폐기물 가열 등)를 기타 항목에 포함하여 발표하고 있으며, 2016년 북한의 1

차 에너지 공급 열량 중 기타항목이 차지하는 비율은 12.7%이다. 이와 같이 북한의 생물성 연료에 관한 자료는 생물성 연료에 대한 정의와 조사 방법 따라 사용량과 비율에서 10배 정도 차이가 날 수 있다.

탈북이주민을 대상으로 하는 설문조사를 통해 북한 가정부문의 에너지 소비구조를 파악한 연구에 따르면 2011년 북한 가정부문에서의 생물성 연료(나무류) 소비량은 404.2 ktoe로 전체 1,710.8 ktoe 중 23.6%를 차지한다. 또한, 평양을 제외한 관서, 관동지방에서의 가정부문 생물성 연료 소비 비율은 30~31%로 더 높다(KEEI, 2013). 북한의 생물성 연료 사용에 관한 자료는 연구에 따라 그 값이 차이를 보이나, 종합적으로 북한 내 생물성 연료의 소비량이 증가하고 그 비율 또한 다른 에너지원과 비교하여 높을 것으로 추정된다.

이러한 생물성 연료는 심각한 환경문제와 건강문제를 발생시킨다. 생물성 연료는 같은 열량을 내는 석탄, 석유를 사용할 때와 비교하여 더 많은 양의 대기오염물질을 발생시킨다. 산업부문보다 가정부문에서 사용되는 생물성 연료가 일으키는 환경 및 보건 문제는 더욱 심각하다. 같은 열량을 내는 석탄, 석유와 비교하여 수에서 수십 배에 이르는 입자성 물질(particulate matter), 탄화수소(hydrocarbons), 일산화탄소(CO)를 배출하고 이는 실내공기질 및 대기환경에 영향을 미친다(Levine *et al.*, 1991; De Koning *et al.*, 1985). 생물성 연료에서 배출되는 이러한 대기오염물질들은 호흡기계열의 급성 및 만성질환을 일으킬 수 있다(De Koning *et al.*, 1985). 북한의 높은 석탄 사용 비율과 다량의 생물성 연료사용은 대기오염물질 배출에도 영향을 주고 있다. 이는 3장에 설명하고자 한다.

한편 앞으로의 북한 에너지 사용에 대한 전망은 에너지시나리오에 따라 그 추정치에 차이가 있지만, 북한의 에너지 소비량은 장기적으로 증가할 것으로 나타난다. Nautilus Institute (2012)는 북한의 2030년 에너지 소비량이 2009년 소비량에 약 2배에 달할 것으로, Yeo and Kim (2016)은 2035년 북한의 에너지 소

비증가량이 2011년도 한반도 통합에너지 소비량의 절반 정도로 추정하고 있다. 북한의 에너지 소비량 증가는 에너지원과 소비 형태에 따라 달라질 수 있지만, 결과적으로 대기오염물질 배출량 증가를 의미한다.

3. 북한의 대기오염물질 배출

표 2는 전 지구 배출량 자료인 EDGAR, Community emissions database system (CEDS)와 아시아지역을 대상으로하는 배출량 자료인 REAS, Transport and chemical evolution over the Pacific (TRACE - P), Inter-continental chemical transport experiment - Phase B (INTEX - B)의 결과를 정리한 연도별 북한의 대기오염물질 배출량이다. 이때, 전 지구 배출량 자료인 EDGAR, CEDS의 북한의 연도별 배출량은 Emissions of atmospheric compounds and compilation of ancillary data (ECCAD)를 이용하여 얻었다. 배출량 자료는 계산방법과 계산범위 등의 차이로 자료별 결과의 차이가 크다. 2000년대 평균 북한의 대기오염물질 배출량은 배출량 자료별로 질소산화물(NO_x)은 0.213~0.287 Tg, 이산화황(SO_2)은 0.219~0.662 Tg, CO_2 는 71.8~83.0 Tg, CO는 1.64~5.08 Tg, organic carbon (OC)은 0.0180~0.0653 Tg, black carbon (BC)은 0.0092~0.0320 Tg로 나타난다. 2010년대 초반 평균 북한 대기오염물질 배출량의 경우, NO_x 은 0.164 Tg, SO_2 은 0.178~0.518 Tg, CO_2 는 56.3~71.3 Tg, CO는 1.38~3.75 Tg, OC은 0.0294~0.0630 Tg, BC은 0.0079~0.0288 Tg로 전반적으로 줄어들었다. 특히, 표 2에서 북한의 CO, OC, BC 배출량은 다른 대기오염물질의 배출량과 비교하여 더욱 큰 차이를 보인다. 이러한 차이는 생물성 연료를 비롯한 북한의 에너지 사용과 관련된 자료의 부족으로 인한 결과로 판단된다. 본 연구에서는 아시아 지역을 대상으로 하는 배출량 자료 중 REAS를 중심으로 북한의 대기오염물질 배출 특성을 설명하고자 한다.

그림 6은 북한의 총 1차 에너지 공급량과 REAS 1.11과 REAS 2.1에서 제공하는 북한의 질소산화물 배출량 자료이다 (Kurokawa *et al.*, 2013; Ohara *et al.*, 2007). 배출량 산정 방식의 변화로 인하여 2000년대 초반 북한의 질소산화물 배출량이 각각 다르게 산정되었으나, 북한 전체 1차 에너지 공급량의 변화가 배출량 증감과 큰 상관성을 보임을 확인할 수 있다. 따라서 2010년도 이후, 1차 에너지 공급량의 급격한 감소와 함께 질소산화물의 배출량 또한 감소하였을 것으로 추정된다. 분야별로는 2000년부터 2008년 사이 북한의 연료연소에 의한 질소산화물 배출에서 산업 부문이 평균 41.7%로 가장 큰 배출원이고, 수송부문이 38.4%, 전력생산부문이 12.7%의 비율을 차지한다.

그림 7은 남한과 북한의 단위 1차 에너지 공급량 대비 NO_x 배출비율을 비교하였다 (KOSIS, 2018; Kurokawa *et al.*, 2013). 2008년 남한의 NO_x 배출량은 1,059 Gg으로 북한의 288 Gg 보다 더 많다. 반면, 1차 에너지 공급량 1 toe 당 NO_x 배출량은 남한 4.40 kg, 북한 16.98 kg으로 남한과 비교하여 북한은 단위 1차 에너지 공급량당 3.9배 많은 NO_x 를 배출하는 에너지 수급 구조를 갖는다. 북한 내 질소산화물 배출저감 시설에 관한 정확한 보고는 없으나, 에너지 사용량과 질소산화물 배출량 자료를 바탕으로 매우 열악할 것으로 판단된다. 산업부문과 전력생산과 같은 대형 단일오염원의 경우, 선택적 촉매 환원 (Selective Catalytic Reduction, SCR)과 같은 배연탈질설비로 상대적으로 쉽게 제거 가능하다. 따라서 미래의 북한의 에너지 사용이 지금과 같은 구조를 유지하면서 증가한다면, 이로 인한 질소산화물 배출 증가는 상대적으로 제거가 쉽다. 그러나 향후 북한의 이동수단 증가와 그로 인한 질소산화물 배출량 증가는 추후 구체적인 의가 필요하다.

그림 8은 북한의 총 1차 에너지 공급량과 REAS 1.11과 REAS 2.1에서 제공하는 이산화황 배출량 자료이다 (Kurokawa *et al.*, 2013; Ohara *et al.*, 2007). 질소산화물 배출량과 동일하게 그 산정 방식의 변화로 인하여 2000년대 초반 북한의 이산화황 배출량이 각

Table 2. Anthropogenic emissions of air pollutants in North Korea.

	CO ₂ (10Tg)			CO (Tg)			NO _x (0.1 Tg)			SO ₂ (0.1 Tg)			OC (0.01 Tg)			BC (0.01 Tg)			PM _{2.5} (0.1 g)		PM ₁₀ (0.1 Tg)									
	1)	2)	3)	1)	2)	3)	1)	2)	3)	1)	2)	3)	1)	2)	3)	1)	2)	3)	1-1)	3)	1)	3)								
1970	8.63	5.38		1.85	6.65		1.78	1.78		6.46	3.02		3.10	4.27		0.930	2.25		1.45		1.94									
1980	12.2	11.1		2.94	6.06		3.73	3.73		9.84	3.33		4.27	5.58		1.42	3.69		2.16		2.88									
1990	13.6	12.4		3.07	12.1		3.73	3.73		10.4	3.76		4.31	6.75		1.44	4.16		2.37		3.10									
2000	8.00	6.90	7.61	12.0 ⁴⁾	1.64	5.09	5.09	3.56 ⁴⁾	2.08	2.08	2.85	2.73 ⁴⁾	6.59	2.68	2.14	2.27 ⁴⁾	3.20	6.27	1.77	10.6 ⁴⁾	0.929	3.07	1.50	2.20 ⁴⁾	1.55	1.28	2.14	2.90		
2001	8.30	7.19	7.89		1.70	5.19	5.19		2.14	2.14	2.92		6.79	2.78	2.22		3.23	6.36	1.79		0.943	3.11	1.54		1.61	1.32	2.19	3.00		
2002	8.02	6.91	7.58		1.63	5.04	5.03		2.08	2.08	2.84		6.48	2.70	2.15		3.12	6.34	1.79		0.908	3.11	1.49		1.55	1.29	2.12	2.89		
2003	8.22	7.10	7.74		1.65	5.13	5.11		2.12	2.12	2.88		6.58	2.77	2.18		3.17	6.46	1.80		0.920	3.19	1.52		1.59	1.31	2.16	2.95		
2004	8.41	7.29	7.90		1.67	5.19	5.17		2.17	2.17	2.92		6.71	2.86	2.24		3.21	6.55	1.81		0.933	3.23	1.54		1.61	1.33	2.19	3.00		
2005	8.78	7.66	8.23		1.70	5.41	5.39		2.25	2.25	3.01		7.02	3.00	2.33		3.31	6.70	1.83		0.962	3.32	1.60		1.67	1.37	2.29	3.12		
2006	8.98	7.80	7.04		1.70	5.46	4.81	3.58 ⁵⁾	2.28	2.28	3.01	2.70 ⁵⁾	7.15	3.02	2.09	2.33 ⁵⁾	3.37	6.79	1.79	9.5 ⁵⁾	0.974	3.34	1.62	2.1 ⁵⁾	1.71	1.39	2.45 ⁵⁾	2.33	3.19	3.01 ⁵⁾
2007	7.69	6.54	7.04		1.48	4.83	4.81		2.01	2.01	2.71		5.94	2.70	2.12		2.91	6.44	1.78		0.837	3.06	1.41		1.46	1.21	1.99	2.69		
2008	8.40	7.22	7.77		1.61	5.16	5.14		2.15	2.15	2.88		6.52	2.86	2.26		3.12	6.68	1.80		0.908	3.26	1.52		1.58	1.28	2.16	2.91		
2009	8.24	7.19			1.62	4.67			2.00	2.00			6.39	2.28			3.07	6.70			0.899	3.26					2.12			
2010	7.89	6.83			1.55	4.37			1.90	1.90			6.03	2.05			2.98	6.63			0.863	3.19					2.03			
2011	6.73	5.15			1.29	3.48			1.56	1.56			4.74	1.65			2.92	6.14			0.747	2.77					1.81			
2012	6.77	5.25			1.30	3.55			1.57	1.57			4.77	1.70			2.93	6.19			0.750	2.78					1.82			
2013		5.38				3.62			1.58	1.58				1.74				6.24				2.81								
2014		5.52				3.74			1.61	1.61				1.76				6.29				2.84								

1) Emissions Database for Global Atmospheric Research (EDGAR) v4.3.2 (Crippa *et al.*, 2018)
 1-1) Emissions Database for Global Atmospheric Research (EDGAR) v4.3.1
 2) Community Emissions Database System (CEDS) (Smith *et al.*, 2015)
 3) Regional emission inventory in Asia (REAS) v2.1 (Kurokawa *et al.*, 2013)
 4) Transport and Chemical Evolution over the Pacific (TRACE-P) (Streets *et al.*, 2003)
 5) Intercontinental Chemical Transport Experiment - Phase B (INTEX-B) (Zhang *et al.*, 2009)

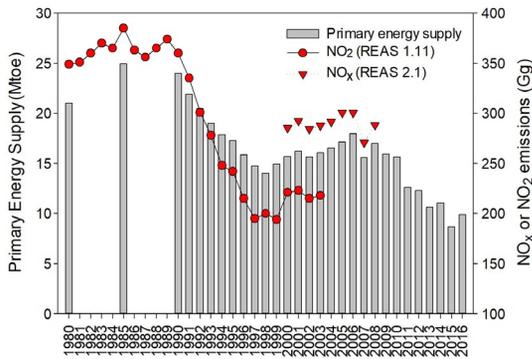


Fig. 6. Primary energy supply and NO_x and NO₂ emissions in North Korea (KOSIS, 2018; Kurokawa *et al.*, 2013; Ohara *et al.*, 2007).

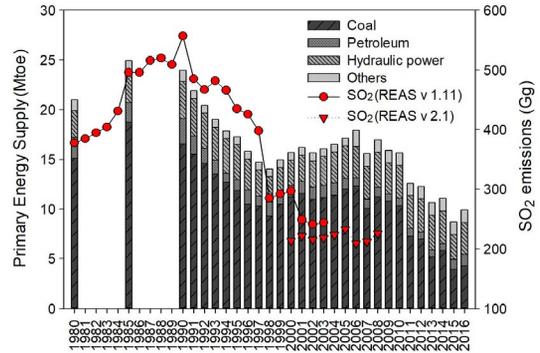


Fig. 8. Primary energy supply and SO₂ emissions in North Korea (KOSIS, 2018; Kurokawa *et al.*, 2013; Ohara *et al.*, 2007).

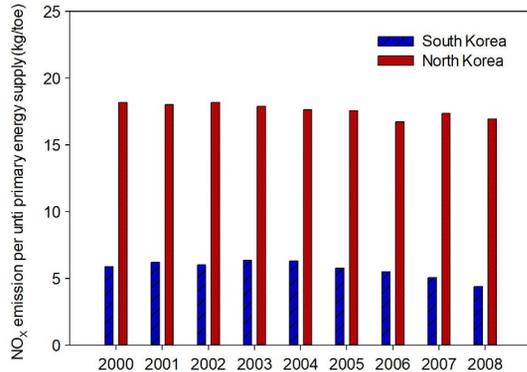


Fig. 7. NO_x emission per unit primary energy supply in South and North Korea (KOSIS, 2018; Kurokawa *et al.*, 2013).

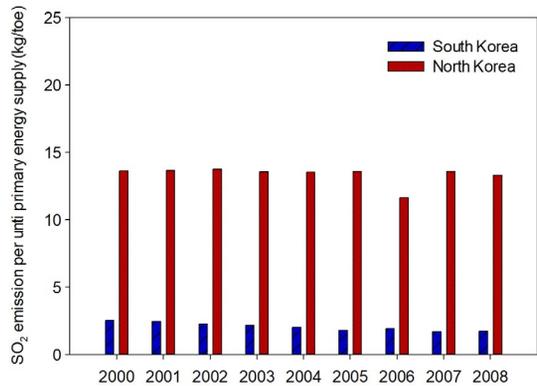


Fig. 9. SO₂ emission per unit primary energy supply in South and North Korea (KOSIS, 2018; Kurokawa *et al.*, 2013).

각 다르게 산정되었으나, 북한 전체 1차 에너지 공급량의 변화가 배출량 증감과 큰 상관성을 보임을 확인할 수 있다. 따라서 2010년도 이후, 1차 에너지 중 석탄 공급량이 급감함에 따라 이산화황의 배출량 또한 크게 감소하였을 것으로 추정된다. 세부적으로 2000년부터 2008년 사이 북한의 연료연소에 의한 이산화황 배출에서 산업부문이 평균 58.9%로 가장 큰 배출원이고 전력생산이 23.2%로 그 다음이다.

그림 9는 남한과 북한의 단위 1차 에너지 공급량 대비 이산화황 배출비율을 비교하였다(KOSIS, 2018; Kurokawa *et al.*, 2013). 2008년 남한은 1차 에너지 공급량 1 toe당 1.73 kg의 SO₂를 배출하였다. 반면, 북한

은 2008년 1 toe당 13.32 kg의 SO₂를 배출하였다. 2000년부터 2008년 사이 남한의 단위 에너지당 SO₂ 배출량은 감소하지만 북한의 경우 2006년을 제외하고 거의 변화가 없다. 그 결과, 북한의 단위 1차 에너지 공급량당 SO₂ 배출량은 2000년 남한의 5.4배에서 2008년에는 7.7배로 증가하였다. 단위 에너지 공급량당 높은 이산화황 배출량은 북한 내 석탄 사용비율이 높기 때문이다. 2008년 북한에서 발생한 이산화황의 57.6% (연료연소부만만 고려시 88.5%)가 석탄연소에서 발생하였다. 질소산화물과 동일하게, 산업·전력부문과 같은 대형 단일오염원의 경우, 배연탈황설비(Flue Gas Desulfurization, FGD) 설치로 효과적인 저

Table 3. CO and CO₂ emission in South and North Korea (Kurokawa *et al.*, 2013).

		2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
CO (Gg)	South Korea	897	842	819	802	814	786	827	796	690
	North Korea	5091	5188	5034	5106	5168	5387	4811	4807	5137
CO ₂ (Tg)	South Korea	447	466	470	476	498	498	510	523	532
	North Korea	76	79	76	77	79	82	70	70	78

Table 4. Carbon emission in South and North Korea (Estimation based on the results on CO and CO₂ emissions by Kurokawa *et al.*, 2013). (unit: Gmole C)

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
South Korea	9,348	9,764	9,830	9,919	10,465	10,537	10,777	11,072	11,282
North Korea	1,855	1,917	1,838	1,874	1,912	1,995	1,698	1,698	1,874

감이 가능하다. 또한, 이산화황 배출은 천연가스와 같은 무황연료(저황연료)로의 전환으로 저감이 가능하다.

표 3은 REAS 2.1에서 제공하는 남한과 북한의 일산화탄소(CO)와 이산화탄소(CO₂)의 연도별 총 배출량이다(Kurokawa *et al.*, 2013). 북한은 남한보다 많은 양의 일산화탄소를 배출하고, 이산화탄소는 적게 배출한다. 2000년부터 2008년까지 북한의 일산화탄소 배출량은 평균 5,081 Gg으로 같은 기간 남한의 평균 일산화탄소 배출량 808 Gg의 약 6.3배이다. 반면, 2000년부터 2008년까지 북한의 이산화탄소 배출량은 평균 76 Tg으로 남한 평균 491 Tg의 15.6%이다. 북한의 연소부문에서 발생하는 일산화탄소와 이산화탄소 배출량비(CO/CO₂)는 6.84%로 남한의 0.18%보다 크게 높다. 높은 일산화탄소 발생비율은 연료의 불완전연소비율이 높음을 의미하고 이러한 불완전연소는 일산화탄소 이외에도 많은 대기오염물질을 배출한다. 특히, OC, BC와 같은 대기오염물질을 다량으로 배출할 것으로 예상된다.

표 4는 표 3 자료를 활용하여 계산한 남한과 북한의 연소부문 탄소배출량이다. 일산화탄소와 이산화탄소 배출량을 각각의 분자량으로 나누어 몰단위 배출량으로 전환하고 두 물질의 배출량을 합하여 전체 탄소배출량(Gmole C, giga mole carbon)으로 변환하였다. 2000년부터 2008년까지 북한의 평균 탄소배출량은 1,851 Gmole로 남한의 탄소배출량의 18%이다.

반면, KOSIS자료를 기준으로 같은 기간 북한의 에너지 사용량은 남한의 7~8%이다. 에너지의 종류와 그 에너지의 사용 및 후처리에 따라 탄소배출량에 차이가 있을 수 있으나, 연소부문의 탄소는 에너지 사용량에 준하여 발생한다. 남한과 비교한 북한의 탄소배출량은 에너지 사용량과 비교하여 약 두 배 많다. 이러한 차이는 기존 에너지 통계에서 확인되지 않은 북한 내 탄소배출원이 존재함을 의미한다. KOSIS, IEA와 달리 그림 5에 제시된 북한의 생물성 연료 사용비율은 약 40%로 매우 높다. 이러한 생물성 연료의 높은 사용이 북한의 탄소배출량에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다. 이는 단순히 탄소배출뿐만 아니라 북한의 대기오염물질 배출 전반에 영향을 준다. 결과적으로 불완전연소비율이 높은 에너지 소비방식과 높은 생물성 연료 소비비율이 북한의 대기오염물질 배출에 영향을 미쳤다.

한편 Bae *et al.* (2018)이 3차원 모델을 사용하여 북한의 대기오염물질이 수도권 초미세먼지 농도에 미치는 영향을 조사한 연구에서 활용한 일산화탄소 배출량 자료는 북한은 CREATE 2015년 기준 1,412,242 톤이고, 남한은 CAPSS 2013년 기준 951,999톤이었다. 이는 북한의 일산화탄소 배출량이 남한보다 1.5배 정도 많은 것이기는 하나, REAS처럼 2008년 기준 7배 이상 차이 나는 것은 아니다. 이 역시, 북한의 대기오염물질 배출량 자료의 편차가 큼을 보여주고 있다. REAS가 제공하는 배출량 자료는 생물성 연료

(fuel wood, crop residue, animal waste)를 배출원으로 포함하고 있다. 에너지 소비량과 소비방식에 따른 배출계수를 사용하는 기존의 배출량 산정방식에서 생물성 연료와 관련된 결과는 화석연료에 비해 불확실성이 높다. 따라서 북한의 생물성 연소에 의한 대기오염물질 배출량 결과에는 상당한 오차가 존재할 수 있다.

생물성 연료에서 발생하는 대기오염물질은 유기성분 배출비율도 높을 뿐만 아니라 그로 인한 인체위해성도 높다(Mauderly and Chow, 2008). 따라서 북한의 유기성분 대기오염물질 배출은 인체위해성 측면에서 더욱 문제가 될 수 있고, 이는 우리나라 대기환경 및 국민건강에 영향을 미칠 가능성이 높다. Lee and Kim (2007), Kim *et al.* (2013), Kim *et al.* (2016) 등은 북한에서 발생한 대기 에어로졸 내 유기성분이 우리나라 수도권 대기질에 미치는 영향의 정량화를 수용모형을 활용하여 시도하였다. 따라서 북한에서의 유기 에어로졸의 배출과 조성특성 파악은 매우 중요하다. 그리고 더 나아가 북한에서 발생된 대기오염물질의 인체위해성에 관한 논의가 필요하다.

Bae *et al.* (2018)에 의하면 북한의 대기오염물질 배출량이 남한보다 많은 물질은 일산화탄소와 함께 미세먼지(PM_{10}), 초미세먼지($PM_{2.5}$)이다. 표 5는 REAS 2.1에서 제공하는 남한과 북한의 미세먼지, 초미세먼지, BC, OC 배출량이다(Kurokawa *et al.*, 2013). 북한은 미세먼지, 초미세먼지와 함께 BC와 OC의 배출량도 남한보다 더 많다. 남한과 북한의 대기 에어로졸 중 유기성분 배출량의 이러한 차이는 EDGAR에서도 확인된다(Crippa *et al.*, 2018). EDGAR v4.3.2는 1970년도부터 2012년까지의 온실가스 및 대기오염물질의 전 지구 배출량을 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 단위로 제공한다. 그림 10과 그림 11은 EDGAR v4.3.2 2012년 OC와 BC 배출량 자료의 일부이다. 북한은 평양과 동서해안을 따라 위치한 대도시에서 집중적으로 OC를 배출한다. 전반적으로 관동보다는 관서지방의 OC 배출량이 많다. 또한, OC를 다량으로 배출하는 대도시들 일부가 BC도 다량으로 배출하고 있다. 하지만 BC의 배출

Table 5. PM_{10} , $PM_{2.5}$, BC and OC emission in 2008 for South and North Korea (Kurokawa *et al.*, 2013). (unit: Gg)

	PM_{10}	$PM_{2.5}$	BC	OC
South Korea	110	56	13	9
North Korea	291	128	15	18

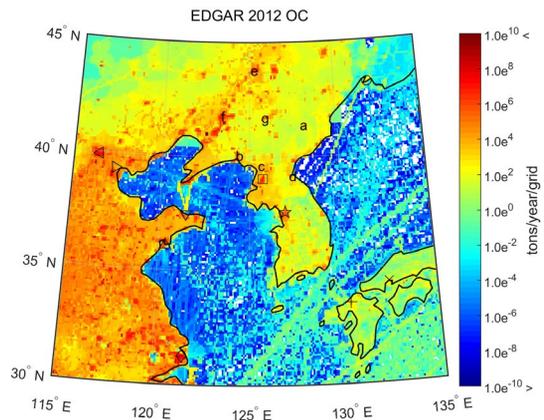


Fig. 10. OC emission in 2012 (unit: tons/years/grid, ☆: Seoul, South Korea, □: Pyongyang, North Korea, a: Hyesan, North Korea, b: Sinuiju, North Korea, c: Anju, North Korea, d: Wonsan, North Korea) (EDGAR v 4.3.2).

강도(단위면적당 배출량)가 OC에 비해 낮다. 이는 평양과 같은 대도시를 제외하고 BC에 비해 OC를 더 많이 배출하는 것을 의미한다. 반면, 남한은 OC 배출량과 BC 배출량이 많은 지역이 거의 동일하며 해당 지역의 OC, BC 배출강도가 크게 다르지 않다.

그림 12는 REAS 2.1에서 제공하는 남한과 북한의 OC와 BC의 연도별 총 배출량이다(Kurokawa *et al.*, 2013). 남한과 비교하여 북한은 많은 양의 OC를 연소부문에서 배출하고 있으며, 자체 BC 배출량과 비교하여도 더 높은 비율로 OC를 배출하고 있다. 남한과 북한의 총 에너지를 고려한다면, 북한의 OC 배출비율은 매우 상당히 높은 수준이다. OC와 BC 배출비율은 에너지 종류마다 달라진다. 에너지 소비방식에 따라 차이가 있으나, 바이오매스, 석탄, 석유 순으로 BC (또는 element carbon (EC)) 배출비율 대비 OC 배출비율이 높아진다(Shen *et al.*, 2013; Chow *et al.*, 2011). 북한의 이러한 OC, BC 배출특성

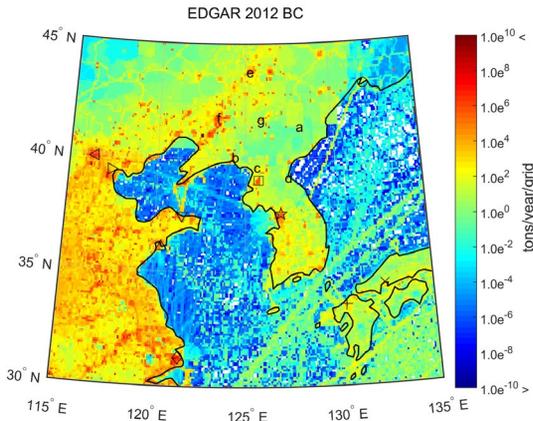


Fig. 11. BC emission in 2012 (unit: tons/years/grid, ☆: Seoul, South Korea, □: Pyongyang, North Korea, a: Hyesan, North Korea, b: Sinuiju, North Korea, c: Anju, North Korea, d: Wonsan, North Korea) (EDGAR v 4.3.2).

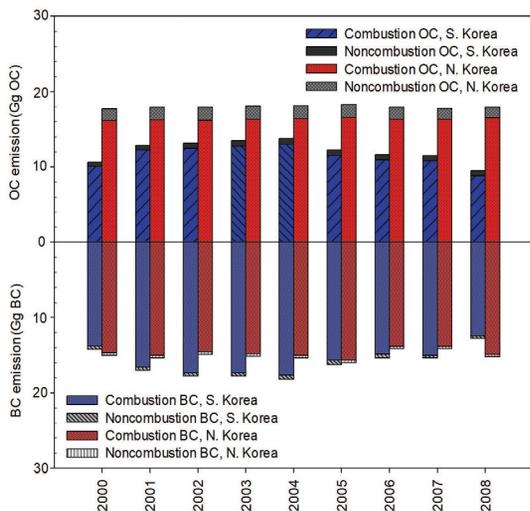


Fig. 12. OC and BC emission in South and North Korea (Kurokawa *et al.*, 2013).

은 높은 불완전연소비율과 다량의 생물성 연료와 석탄소비가 대기 에어로졸 중 유기성분(특히, OC) 배출량에 영향을 주고 있음을 의미하며, 이러한 영향은 평양과 주요 대도시를 제외한 다른 지역에서 더 심각한 문제로 작용하고 있음을 알 수 있다.

4. 남북한 상호 영향

서울에서 북한은 40 km 정도이기 때문에 북한 대기오염물질의 이동은 장거리 이동보다는 근거리 이동으로 평가하여야 한다. 남북한의 대기오염물질에 의한 영향 연구는 주로 북한의 대기오염물질이 수도권에 미치는 영향을 평가하는 것이었다.

Lee and Kim (2007)은 서울에서 2002~2003년 측정된 다환방향족탄화수소(PAHs) 성분 농도 자료에 Chemical Mass Balance (CMB) 모델을 적용하였다. 그들은 PAHs의 대부분이 석탄 사용(특히 가정에서의 사용과 코크스 제조과정에서의 배출)과 생체소각(biomass burning)에 의한 것으로 평가하였으며, 중국과 우리나라의 대기오염 배출 특성을 고려하여, 그 가운데 상당부분이 중국과 함께 북한에서 이동하였을 가능성을 제시하였다(Lee and Kim, 2007). Kim *et al.* (2013)은 같은 자료에 대해 CMB 모델과 함께 역궤적분석을 수행하고, 중국과 우리나라의 PAHs 배출량 자료를 사용하여, 서울에서 관측한 PAHs의 20% 정도는 북한의 영향일 것으로 추정하였다. Kim *et al.* (2016)은 3차원 PSCF (3D-PSCF)를 개발하고, 2006~2007년에 서울에서 관측한 입자상 PAHs 측정 결과에 CMB 모델과 함께 적용하여, 낮은 고도에서 이동하는 생체소각 기원의 PAHs는 주로 북한 지역에서 겨울철에 이동한 것임을 주장하였다. 산불이 주로 봄철에 발생하고 높은 고도로 이동하며, 농업잔재물 소각(open burning)이 봄이나 가을철에 발생하는 것을 고려하면, 이는 주로 북한의 가정에서 취사나 난방으로 사용하는 생체소각에 의한 것으로 보인다는 것이다.

북한이 수도권에 미치는 영향에 대한 3차원 광화학 모델 연구 결과는 그 영향이 상당할 수 있음을 보여준다. Seoul City (2016)에 의하면 2015년 8, 10월, 2016년 1, 4월에 대해 CAMx 모델로 모사한 결과 서울시의 초미세먼지에 대한 중국의 영향은 평균 38.29%, 북한의 영향은 6.92%, 그 외 황사 및 자연배출량의 영향은 9.79%였다. 한편 질소산화물의 경우

에는 중국의 영향은 0.41%, 북한의 영향은 0.48%, 그 외 황사, 자연배출량 및 기타는 2.50%로 상대적으로 매우 작은 것으로 나타났다. Bae *et al.* (2018)은 CMAQ 모델로 2016년 전체 기간을 모사하였다. 모사 결과에 의하면 북한의 대기오염물질이 수도권의 초미세먼지 농도에 미치는 영향은 연평균 14.7%에 이르며, 1월에는 20% 정도 영향을 미치는 것으로 나타났다. 초미세먼지 가운데 OC는 연평균 27.4% 정도로 다른 성분에 비해 상대적으로 그 영향이 크고, 특히 12월과 1월에는 40% 이상인 것으로 나타났다. 북한의 유기에어로졸 성분이 수도권에 미치는 영향이 상대적으로 큰 것은, 북한의 생체소각에 의한 탄소 입자 생성이 중요하다는 앞의 여러 연구 결과와 연관된 것이다. 한편 Bae *et al.* (2018)에 의하면 남한의 대기오염물질이 북한에 미치는 영향은 개성의 연평균 초미세먼지 농도의 13.7% 정도였고, 평양의 경우에는 그보다 낮았다. 주로 영향을 미치는 성분은 질산염과 암모늄염으로, 수도권의 질소산화물 배출이 많은 것 때문으로 보인다.

앞으로 북한이 경제개발을 본격적으로 시행한다면, 앞에 나온 전망치보다 더 많은 에너지를 사용할 가능성이 크고, 당분간은 수입에 의존하지 않는 석탄과 생물성 연료를 적극적으로 사용할 것으로 보인다. 이는 적절한 제어기술의 도입 없이는 대기오염물질의 배출량을 크게 늘릴 것으로 보이며, 따라서 북한이 우리 수도권에 미치는 영향이 매우 커질 가능성이 있다. 이에 대한 적극적인 대책 수립과 남북협력이 필요하다.

5. 요약

북한은 전체 에너지 소비량이 2015년 기준 전 세계 75위 (0.46×10^{15} Btu) 매우 적다. 또한, 석탄의 경우, 약 40~70%, 생물성 연료는 최대 37.4%로 전체 에너지원에서 석탄과 생물성 연소가 차지하는 비율이 높은 특징을 갖는다. 북한은 적은 양의 에너지 소비로

인하여 2008년 기준 남한 대기오염물질 배출량과 비교하여 질소산화물은 27%, 이산화황은 54%, 이산화탄소는 15%에 해당하는 적은 양의 대기오염물질을 배출한다. 그러나 단위 에너지 사용량당 질소산화물은 3.9배, 이산화황은 7.7배, 이산화탄소는 2.1배 북한이 남한보다 더 많은 대기오염물질을 배출한다. 또한, 일산화탄소와 대기 에어로졸 중 유기성분(BC, OC)의 경우, 북한이 남한보다 각각 7.4배, 1.2배, 1.9배 더 많은 양을 배출한다.

이는 북한의 에너지 수급구조 및 소비가 대기오염물질을 매우 많이 배출하는 형태를 가지고 있음을 의미하며, 북한의 대기질을 간접적으로 확인할 수 있게 한다. 특히, 교외지역 가정부문의 주요한 에너지원인 생물성 연료 사용이 북한 대기오염물질 배출에 큰 영향을 미치고 있고, 이는 우리나라 수도권 대기질 뿐만 아니라 남북한의 국민건강에서 영향을 미치고 있을 것으로 추정된다.

북한의 에너지 사용은 장기적으로 증가 될 것으로 판단되고, 지금과 같은 에너지 수급구조와 소비형태를 유지한다면 이는 한반도 및 동북아시아 대기질에 큰 위협요소가 될 가능성이 있다. 따라서 남북협력사업 중 에너지부문은 경제적으로 뿐만 아니라 한반도 국민건강 관점에서 면밀한 검토가 필요하다.

감사의 글

이 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 중견연구자 지원사업(NRF-2017R1A2B4006760)의 지원과 2016학년도 이화여자대학교 대학원 장학금 지원(I.S. Kim)을 받아 작성되었습니다. The authors gratefully acknowledge European Commission, Joint Research Centre (JRC)/Netherlands Environmental Assessment Agency (PBL), Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR), release version 4.3.2 (<http://edgar.jrc.ec.europa.eu/overview.php?v=432>), 2018. The authors also gratefully

acknowledge Emissions of atmospheric Compounds and Compilation of Ancillary Data (ECCAD, [http://eccad.aeris-data.fr/#DatasetPlace:null\\$DOI](http://eccad.aeris-data.fr/#DatasetPlace:null$DOI)).

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.
- Chow, J.C., Watson, J.G., Lowenthal, D.H., Chen, L.W.A., Motallebi, N. (2011) PM_{2.5} source profiles for black and organic carbon emission inventories, *Atmospheric Environment*, 45, 5407-5414.
- Crippa, M., Guizzardi, D., Muntean, M., Schaaf, E., Dentener, F., Aardenne, J., Monni, S., Doering, U., Olivier, J., Pagliari, V., Maenhout, G. (2018) Gridded emissions of air pollutants for the period 1970-2012 within EDGAR v4.3.2, *Earth System Science Data*, 10, 1987-2013.
- De Koning, H.W., Smith, K.R., Last, J.M. (1985) Biomass fuel combustion and health, *Bulletin of the World Health Organization*, 63(1), 11-26.
- International Energy Agency (IEA) (2018) online data services, world energy balances and statistics <http://data.iea.org/> (accessed on November, 2018).
- 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)
- 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.
- Kim, I.S., Wee, D., Kim, Y.P., Lee, J.Y. (2016) Development and Application of Three Dimensional Potential Source Contribution Function (3D-PSCF), *Environmental Science and Pollution Research*, 23(17), 16946-16954.
- Kim, N.K., Kim, Y.P., Morino, Y., Kurokawa, J.I., Ohara, T. (2014) Verification of NO_x emission inventory over North Korea, *Environmental Pollution*, 195: 236-244.
- Korea Energy Economics Institute (KEEI) (2007) Analysis of North-east Asia energy market: Coal industry, Uiwang, December 2007. (in Korean with English summary)
- Korea Energy Economics Institute (KEEI) (2013) Analysis of consumption behavior of energy in North Korea-Residential/commercial/public sector, Uiwang. (in Korean with English abstract)
- Korean Statistical Information Service (KOSIS) (2018) Total consumption of primary energy and energy consumption per capita in North Korea, <http://kosis.kr/> (accessed on November, 2018). (in Korean)
- Kurokawa, J., Ohara, T., Morikawa, T., Hanayama, S., Greet, J.M., 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, 1019-11058.
- Lee, J.Y., Kim, Y.P. (2007) Source apportionment of the particulate PAHs in Seoul, Korea: impact of long range transport to a megacity, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7, 3587-3596.
- Levine, J.S. (1991) Global Biomass Burning e Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implication. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, USA.
- Mauderly, J.L., Chow, J.C. (2008) Health Effects of Organic Aerosols, *Inhalation Toxicology*, 20, 257-288.
- Nautilus Institute (2012) Foundations of energy security for the DPRK: 1990-2009 Energy balances, engagement options, and future paths for energy and economic redevelopment, Berkeley, US.
- Ohara, T., Akimoto, H., Kurokawa, J., Horii, N., Yamaji, K., Yan, X., Hayasaka, T. (2007) An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980-2020, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7, 4419-4444.
- Seoul City (2016) Final report, Emission inventory and intensive monitoring of fine particles (PM-2.5), 51-6110 000-001538-01, Seoul.
- Shen, G., Tao, S., Wei, S., Chen, Y., Zhang, Y., Shen, H., Huang, Y., Zhu, D., Yuan, C., Wang, H., Wang, Y., Pei, L., Liao, Y., Daun, Y., Wang, B., Wang, R., Lv, Y., Li, W., Wang, X., Zheng, X. (2013) Field Measurement of Emission factors of PM, EC, OC, Parent, Nitro- and Oxy-Polycyclic Aromatic Hydrocarbons for Residential Briquette, Coal Cake, and Wood in Rural Shanxi, China, *Environmental Science and Technology*, 47(6), 2998-3005.
- Smith, S.J., Zhou, Y., Kyle, P., Wang, H., Yu, H. (2015) A Community Emissions Data System (CEDS): Emissions For CMIP6 and Beyond, 2015 International Emission Inventory Conference, April 2015, San Diego, US.

- Streets, D.G., Bond, T.C., Carmichael, G.R., Fernandes, S.D., Fu, Q., He, D., Klimont, Z., Nelson, S.M., Tsai, N.Y., Wang, M.Q., Woo, J.H., Yarber, K.F. (2003) An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D21).
- United Nations Environment Programme (UNEP) (2012) Democratic People's Republic of Korea Environment and Climate Change Outlook - Project Proposals. Pyongyang.
- U.S. Energy Information Administration (EIA) (2018) International energy statistics <https://www.eia.gov/beta/international/>.
- 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)
- 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.
- Zhang, Q., Streets, D.G., Carmichael, G.R., He, K.B., Huo, H., Kanari, A., Klimont, Z., Park, I.S., Reddy, S., Fu, J.S., Chen, D., Duan, L., Lei, Y., Wang, L.T., Yao, Z.L. (2009) Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(14), 5131-5153.

Authors Information

김인선 (이화여자대학교 환경공학과 박사과정)
김용표 (이화여자대학교 화학신소재공학과 교수)