Journal of Korean Society for Atmospheric Environment
Vol. 32, No. 4, August 2016, pp. 360-371
DOI: http://dx.doi.org/10.5572/KOSAE.2016.32.4.360
p-ISSN 1598-7132, e-ISSN 2383-5346

한·중·일 PM_{10} 국가 배경농도 최근 경향 분석

Analysis of the Recent Trend of National Background PM_{10} Concentrations over Korea, China, and Japan

양금희 · 이종재[1] · 유영숙[2] · 장임석[2] · 임재현[3] · 이동원[2] · 김상균[2] · 김철희*
부산대학교 대기환경과학과, [1]부산대학교 환경연구원
[2]국립환경과학원 기후대기연구부, [3]환경부 기후대기정책관실

(2016년 4월 12일 접수, 2016년 7월 19일 수정, 2016년 8월 20일 채택)

Geum-Hee Yang, Jong-Jae Lee[1], Young-Sook Lyu[2], Lim-Seok Chang[2], Jae Hyun Lim[3], Dong-Won Lee[2], Sang-Kyun Kim[2] and Cheol-Hee Kim*
Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University
[1]*Institute of Environment Studies, Pusan National University*
[2]*Climate and Air Quality Research Department, National Institute of Environmental Research*
[3]*Climate and Air Quality Bureau, Ministry of Environment*

(Received 12 April 2016, revised 19 July 2016, accepted 20 August 2016)

Abstract

The goal of this research is to examine the recent decade-long (2000~2014) trends of national background concentrations over China, Japan, and Korea. Based on the Long-range Transboundary Air Pollutants in Northeast Asia (LTP) project, which is three-party collaboration project among three countries, we investigated the long-term trends of national background PM_{10} concentrations in three countries over the recent 15 years, including the 2008 Beijing Olympic Game period. In accordance with the agreement among three countries, a total of 8 national background sites: three national background monitoring sites in China (2 sites in Dalian, and 1 in Xiamen), three sites in Korea (Ganghwa, Gosan, and Taean), and two sites in Japan (Oki and Rishiri), were chosen for the trend analysis.

The results showed that Chinese background concentration recorded the highest level overall. However, the rapid declining recent trends of annual median (50^{th}-percentile) values were surprisingly detected since 2006 or 2007 in every site in China, with the most rapidly decreasing rate (-18.6 ± 10.3%/year) over 2006~2007, and the second most rapidly decreasing rate (-18.0 ± 1.5%/year) over 2007~2008. Based on the previous statistical literature, we concluded that this declining trends were due to the emission reduction of PM_{10} concentrations in China for 2008 Beijing Olympic Game. In Korea, Ganghwa was also showing the decreasing trends over the recent years since 2006, which is also well accorded with the decreasing period of Chinese background concentrations. Taean also implied some impact of Beijing Olympic Game, showing small but detectable decreasing trends, while Gosan showed the increasing tendencies probably due to the near-urban influences. However, since 2012, most sites in both China and Korea showed strong increasing trends, undoubtedly implying the increasement of both emission in

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)51-510-3687, E-mail : chkim2@pusan.ac.kr

China and its long-range transport process toward Korea. Two sites in Japan, Oki and Rishiri recorded the lowest level of PM_{10} level during whole period with the smallest deviations of measurements. Other discussions including the decade-long trends of 5^{th}, 10^{th}, 25^{th}, 50^{th}, 75^{th}, 90^{th}, 95^{th}-percentiles of PM_{10} background concentrations in three countries were also comparatively addressed here.

Key words : Background Concentration, PM_{10} concentrations, Long-range Transboundary Air Pollutants in Northeast Asia (LTP) project

1. 서 론

대기오염물질 배경농도란 대상 지역에서의 자체 인위적 오염 발생원의 영향을 배제하여 자연적 배출량만을 고려한 농도 수준으로서, 대상 지역의 자체 인위적 배출량을 최소화하였을 때 기대할 수 있는 대기오염물질의 농도를 말한다(Nopmongcol *et al*., 2016; EPA, 2014). 이때 대상 지역을 특정 지역(혹은 국가)으로 특정할 경우에 해당하는 지역(국가) 배경농도는 인위적 오염물질이 아닌 자연적으로 배출되는 배출량뿐만 아니라 장거리 수송되어 오는 농도까지 고려하는 농도이므로, 풍상측 지역에서의 자연적 및 인위적 배출량의 영향을 모두 고려하는 개념으로 정의한다(EPA, 2014; McKendry, 2006). 따라서 어느 지역(국가)에서의 오염물질 농도 감축을 위한 계획을 수립하는 것은 해당 지역의 인위적인 활동으로 인해 발생하는 대기오염물질의 기여도를 줄이는 것이 목표이므로, 예컨대 우리나라의 PM_{10} 농도의 감축을 위한 계획을 수립하고 결과를 평가할 경우, PM_{10} 배경농도를 파악하는 것은 국내의 현실적인 PM_{10} 규제 목표를 설정하고 평가할 때 중요한 기준이 될 수 있다.

전 세계적으로 배경농도 분석에 대한 연구는 다양한 물질에 대하여 활발히 수행되어졌다. 한반도에서도 Rd, CFC, SO_2, NO, O_3, 미세먼지 등 여러 물질에 대한 배경농도 측정 및 분석 또한 현재 수행되고 있으나(Ko *et al*., 2014; Kang *et al*., 2012; Kim *et al*., 2001; Park *et al*., 1994; Kim *et al*., 1992), 특정 지점에서 단기 측정값을 분석한 경우가 많은 편이라 한 지점에서 10년 이상의 장기간의 추세에 대한 연구는 부족한 실정이다.

우리나라는 지정학적으로 중국 산둥 반도와 약 400 km 정도밖에 되지 않아, 동북아시아 지역의 가장 큰 오염물질 배출지역인 중국의 풍하측에 자리 잡고 있으므로 편서풍을 타고 대륙으로부터 불어오는 황사와 같은 자연배출량뿐만 아니라 중국에서 배출되는 인위적인 배출량의 영향을 크게 받고 있어 이에 대한 영향 연구는 자주 보고되었다(Choi *et al*., 2014; Lee *et al*., 2014; Park *et al*., 2012). 따라서 국내의 배출 규제와 목표 수준을 논의하기 위해서는 국내 자체 배출량 규제뿐만 아니라 국가 간 장거리 이동에 의한 월경성 대기오염물질의 영향을 필수적으로 논의하여야 하므로 주변 국가를 포함한 동북아시아 국가 배경농도에 대한 이해가 매우 필요하였다. 이에 따라 1990년대 이후 현재까지 한 · 중 · 일 3국 정부 간 협의 하에 대기오염물질 공동연구체계인 Long-range Transboundary Air Pollutants in Northeast Asia 사업(이하 'LTP 사업'으로 명명)이 발주되어 대기오염물질의 장거리 이동에 관한 국가 간 공동연구가 매우 오랫동안 진행되어 왔다. 특히 대기오염물질의 장거리 이동에 관한 한 · 중 · 일 협력 연구 중 대기오염물질들의 배출원-수용지 관계(Source-Receptor Relationship)에 대한 모델링 연구는 3국 간 LTP 사업의 주요 이슈로 평가되고 있으며(NIER, 2012a), 이와 연관된 측정 분석적 연구 또한 각 국가 배경농도 측정 지점들이 협의되어 국가별 배경농도의 측정 분석적 연구가 병행되어 왔다. 본 연구에서는 동북아시아 LTP 사업을 통해 수집된 한 · 중 · 일 국가별 배경농도 측정소에서 2000년~2014년 측정된 미세먼지 배경농도를 분석하여 그 경향성 및 계절적 특성 등을 다양하게 분석하였다.

2. 연구 방법

2.1 분석지점

LTP 사업에서 국가 배경농도를 연구하기 위하여 한 · 중 · 일 3국이 협의된 측정 지점은 중국 3지점(Dalian 2지점, Xiamen 1 지점), 한국 3지점(Gosan, Ganhwa,

Taean 각 1지점), 일본 2지점(Rishiri, Oki 각 1지점)이다. 이상 총 8개의 측정소의 위치를 그림 1에 나타내었고, 측정 기간 및 측정 지점의 자세한 위치 정보를 표 1에 나타내었다. 이 중에서 중국의 일부 측정소는 국가 배경농도 측정소로서 적합하지 않은 특성이 일부 보고되고 있으나, 본 연구에서는 중국 측정소의 경우 중국의 국가 배경농도 측정소라기보다는 한국 및 일본으로 장거리 이동되는 중국 대기오염물질의 출구 지역으로 그 농도를 해석할 수 있으므로, 본 연구에서는 위의 총 8 측정소 자료를 모두 3국가의 지역 배경농도로 가정하고 그 장기 측정 자료를 특별한 여과 없이 수용하여 그 경향을 분석하였다.

국가별, 측정소별 특성을 살펴보면, 중국 북동부 랴오둥반도 랴오닝 성의 남단부 해안지역에 위치한 Dalian 시의 경우 동쪽은 서해, 서쪽은 발해만에 접해 있으며, 서편에는 북경, 천진과 같은 대도시가 위치하고 있다. Dalian 측정소는 Ganjingzi 측정소(이하 Dalian_G로 명명)와 Fujiazhuang 측정소(이하 Dalian_F로 명명)로 구성되어 있으며, Dalian_G 측정소는 상대적으로 Dalian 시 내 도심지역에, 그리고 Dalian_F 측정소는 Dalian 시 동부 외곽 해안지역에 있다. Hongwen 측정소가 있는 Xiamen 시는 중국 동남부 푸젠 성의 해안지역에 있으며 본 연구에서는 Xiamen 측정소로 명명하였다. Xiamen 측정소는 본 연구의 총 8개 측정소 중에서 유일하게 편서풍이 아닌 무역풍대에 위치하고 있으며 동쪽으로 대만과 인접하고 있다.

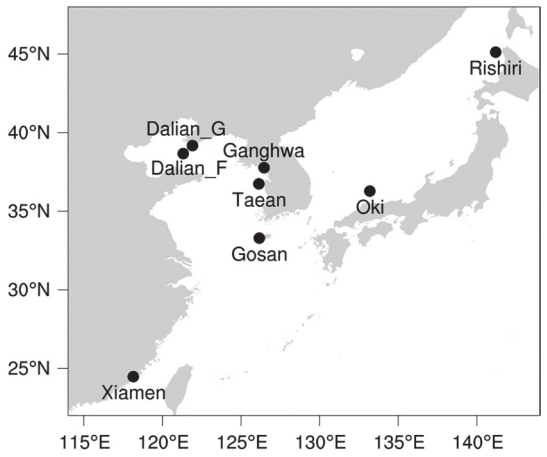

Fig. 1. Locations of the PM_{10} background concentration monitoring stations of LTP project over China, Japan, and Korea.

한국의 경우, Gosan 측정소는 제주도의 서쪽 끝 지점인 제주특별자치도 제주시 산악에 위치해 있으며, Ganghwa 측정소는 인천시로부터 서쪽으로 인접한 섬으로 서울 · 경기지역의 배경농도에 대한 정보를 제공한다. Taean 측정소는 한반도의 중서부 지역에 위치하므로 한국의 3 측정소는 서로 다른 위치적 특성을 보여 장거리 대기오염물질의 특성을 다양하게 연구할 수 있을 것으로 판단된다.

일본의 경우 북부지역에 있는 Rishiri 측정소는 홋카이도의 서쪽에 있는 섬에 위치해 있으며, 이 섬 중앙에는 산악 지형이 존재한다. 일본 남부 지역에 있는 Oki 측정소는 위치상 동북쪽으로 멀리 떨어져 있어서 대략 일본과 한반도 사이에 존재하는 Oki 섬에 위치해 있다.

각 측정소별 PM_{10} 측정 방법으로 Dalian_F, Dalian_G, Ganghwa, Taean, Gosan 측정소에서 β-gauge method를, Xiamen 및 Rishiri 측정소에서는 TEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance) method를, 그리고 Oki 측정소에서는 β-ray absorption method를 사용하였다(NIER, 2012b).

Table 1. Site information on 8 monitiring sites in China, Japan, and Korea.

Country	Site name		Latitude (N)	Longitude (E)	Period
China	Dalian	Fujiazhuang	38°51′50.8″	121°37′31.6″	2002/01/01~2013/12/31
		Ganjingzi	38°58′26.1″	121°36′43.1″	
	Xiamen	Hongwen	24°28′36.1″	118°09′05.0″	
Korea	Ganghwa		37°45′52.1″	126°27′47.2″	2000/01/01~2014/12/31
	Gosan		33°17′33.0″	126°09′43.8″	
	Taean		36°44′11.1″	126°07′55.8″	
Japan	Oki		36°16′44.1″	133°11′51.8″	2000/09/01~2013/12/31
	Rishiri		45°07′14.4″	141°11′53.4″	

Table 2. List of the number of valid and missing days in each site.

	China			Korea			Japan	
	Dalian_F (Fujiazhuang)	Dalian_G (Ganjingzi)	Xiamen (Hongwen)	Ganghwa	Gosan	Taean	Oki	Rishiri
Total (days)		4383			5479		4870	
Valid (days)	4254	4253	4077	5298	4988	5206	4470	3955
Missing (days)	129	130	306	181	491	273	399	847
Missing ratio (%)	2.94	2.97	6.98	3.30	8.96	4.98	8.19	17.39

2.2 자료

선정된 8개 측정소에서 일 24회 기록되는 시간 평균 농도 자료 중 18회 이상(75%) 측정된 날을 유효측정일로 선정하여 일평균 값을 계산하였다(환경부, 2008). 각 측정소의 데이터 유효일 수 및 결측일 수(표 2)를 살펴보면, Rishiri 측정소에서 결측률이 18.79%로 가장 높았으며 그다음으로 Oki 측정소에서 8.21%로 나타나 일본 측정소의 결측률이 3국 중에서 상대적으로 높게 나타났다. 연도별로 보면 Rishiri 측정소에서 2007년 결측률이 59.7% (218일), 2013년 54.0% (197일), 2010년 Dalian_F 측정소와 Dalian_G 측정소에서 33.4% (122일), Xiamen 측정소에서 2009년 33.4% (122일), 34.3% (125일), 2001년 Gosan 측정소와 2003년 Oki 측정소에서 33.7% (123일)의 순으로 높게 나타나 자료 해석 시 유의할 필요가 있다. 보다 정확한 자료 해석을 위하여 10일 이상 연속적으로 결측이 발생한 기간에 대한 정보를 표 3에 나타내었다. 이러한 연속적인 결측이 발생한 측정소의 계절적 특성은 자료 해석에서 제외하거나, 장기간 경향성 및 각종 통계적인 정보를 파악하는 데 있어서 각별히 유의해야 할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 결측이 연속적으로 발생한 일본 측정소의 경우 월 및 계절 변동 해석 시에만 일부 추가적인 유의사항을 첨가하였고, 장기 시계열 해석에는 특별한 의미를 부여하지 않았다.

Table 3. Number of days with more than consecutive 10 missing days, and their periods over the study period.

Station	Period	Number of days
Ganghwa	2000/05/25~2000/06/13	20
	2005/01/25~2005/02/03	10
Gosan	2000/06/20~2000/07/04	15
	2000/08/22~2000/09/21	31
	2001/01/26~2001/05/16	111
	2014/06/11~2014/07/25	45
Taean	2011/11/01~2012/01/31	92
Rishiri	2000/12/27~2001/01/17	22
	2005/04/24~2005/07/01	69
	2007/06/07~2007/12/30	207
	2009/07/07~2009/07/28	22
	2009/09/10~2009/09/30	21
	2010/09/25~2010/10/15	21
	2013/07/01~2013/12/10	163
Dalian_F	2010/09/01~2010/12/31	122
Dalian_G	2010/09/01~2010/12/31	122
Xiamen	2009/09/01~2009/12/31	122
	2010/09/01~2010/12/31	122
Oki	2002/10/01~2002/10/16	16
	2003/04/24~2003/07/11	79
	2003/07/24~2003/08/28	36
	2004/10/12~2004/10/21	10
	2005/02/07~2005/02/16	10
	2007/01/25~2007/02/28	35
	2008/02/06~2008/03/26	50
	2008/04/02~2008/04/22	21
	2009/04/26~2009/05/13	18
	2010/07/20~2010/08/26	38

3. 결과 및 분석

3.1 국가별 및 지점별 분석

한 · 중 · 일 배경농도 지역에서의 대기 중 PM_{10} 농도에 대한 전반적인 농도 분포 특성을 살펴보기 위하여, 전체 측정 기간에 대한 측정소별 PM_{10}의 평균 농도를 그림 2에 나타내었다. 그 결과 전체 분석 기간 PM_{10} 농도의 평균값은 중국에서 가장 높게 나타났고 한국, 일본 순으로 나타났다.

중국의 경우 Xiamen 측정소 농도가 가장 낮았으며, 중국 내 지점별 차이 또한 상대적으로 크게 나타났다. Dalian_F 측정소와 Dalian_G 측정소는 같은 Dalian 시

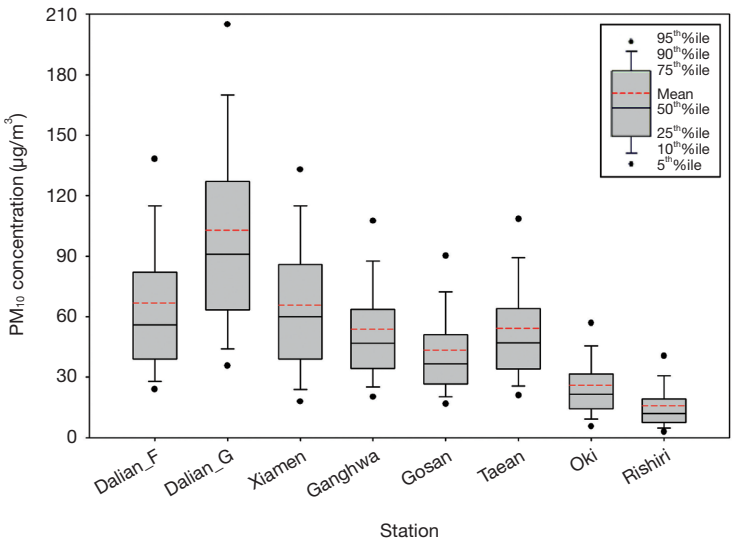

Fig. 2. PM_{10} background concentrations observed at 8 sites in each of the 3 countries over the study periods: 2002 ~ 2013 (China), 2000 ~ 2014 (Korea), and 2000 ~ 2013 (Japan).

내에 위치함에도 불구하고 두 측정소 간 농도 차이가 크게 나타났는데, 이는 Dalian_G 측정소가 Dalian_F 측정소보다 상대적으로 도심 내 건물 사이에 있으며 북쪽으로 신흥 도심지인 선양시의 영향을 많이 받고 있는 것으로 유추할 수 있었다. 그러나 중국의 경우 넓은 고배출 국가임을 고려할 때 단지 세 측정소만으로 중국 대륙 전체를 대표하기에는 한계가 있을 수 있다. 따라서 본 연구와 별개로 중국의 국가 전체의 배경농도를 연구하기 위해서는 위성자료 등 보다 많은 자료와 다양한 측정 분석적 연구가 병행되어야 할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 중국의 자료가 국가 배경농도를 의미한다기보다는 한국 및 일본으로 장거리 이동되는 중국 대기오염물질의 출구 지역 농도로 그 의미를 부여하였으며, 중국의 지역별 국가 배경농도는 본 연구와 별개로 연구되어야 할 것으로 판단된다.

한국에서는 Gosan 측정소의 평균 농도가 가장 낮았으나 Ganghwa와 Taean 측정소의 평균 농도 차는 크지 않았다. 이는 중국의 주요 공업단지가 중국 북동부 해안 지역에 집중하고 있고, 이 지역으로부터 상대적으로 거리가 가장 먼 Gosan 측정소가 중국의 장거리 대기오염물질의 영향을 가장 덜 받은 지점으로 판단된다. 또한, 다른 두 측정 지점에 비해 위도가 낮은 곳에 위치하므로 여름철 등의 남서풍 계열의 해양 대기의 영향을 더 자주 받은 결과로 판단된다.

일본은 전체적인 평균 농도가 3국 중에서 가장 낮게 나타났으며, 특히 Rishiri 측정소에서 Oki 측정소보다 더 낮게 나타났다. 편서풍대에 있는 두 측정소의 서쪽에는 바다가 있어 유사한 지리적 환경을 가지고 있으나, Rishiri 측정소는 대륙의 주요 고배출 지역으로부터 장거리 수송되는 거리가 가장 멀고, 장거리 이동 시 동북아시아의 계절적 기후 특성 및 기류의 차이로 인한 일본의 지역 순환이 상대적으로 더 활발한 것에 기인한 것(Kim *et al*., 2012)으로 파악되었다.

전체 측정 기간에 대하여 지점별 PM_{10} 농도에 대한 평균, 표준편차, 최소값, 최대값, 분위수 통계량을 표 4에 나타내었다. 표 4에서 볼 수 있듯이 중국의 측정소들은 전 기간에 대한 측정치의 편차가 가장 크게 나타났으며, 일본 측정소에서는 상대적으로 편차가 적게 나타나는 양상을 보였다. 일반적인 평균 농도에 비하여 고농도를 나타내는 날의 농도 상승폭 또한 중국에서 가장 크게 나타났다. 특히 중국 전 지점의 일평균 PM_{10} 농도에 대하여 가장 높은 평균 농도를 보인 Dalian_G 측정소의 경우 가장 낮은 평균 농도를 보인 Rishiri 측정소보다 무려 86 $\mu g/m^3$ 가량 더 높게 나타났으며, 이는 Rishiri 측정소의 평균값 대비 약 6배 정도 높은 농도 수준이다. 전체 측정 기간 중 일평균 최고 농도를 측정

Table 4. Statistical summary of the background concentrations observed at each of the 8 sites in China, Japan, and Korea, during the whole observed period.

		China			Korea			Japan	
		Dalian_F (Fujiazhuang)	Dalian_G (Ganjingzi)	Xiamen (Hongwen)	Ganghwa	Gosan	Taean	Oki	Rishiri
Mean		66.93	102.94	65.74	53.86	43.42	54.39	27.74	17.12
σ		51.78	69.37	38.10	37.43	32.14	36.93	25.52	15.72
Minimum		6	8	3	3.42	2.67	5.71	3.67	2.94
Maximum		1257	1981	830	979.25	745.46	664.63	760.42	432.88
%ile	5	24	36	18	20.33	16.83	21.08	10.32	5.56
	10	28	44	24	25.13	20.32	25.54	12.24	6.54
	25	39	64	39	34.25	26.78	34.17	16.17	8.78
	50	56	91	60	46.79	36.63	47.00	22.63	13.16
	75	82	127	86	63.67	51.04	64.10	32.33	2.83
	90	115	170	115	87.67	72.25	89.21	46.35	32.15
	95	138	205	133	107.54	90.21	108.42	57.7	41.47

소별로 살펴보면 측정소별 최대값은 Dalian_G 측정소에서 1,981 μg/m^{3}로, Rishiri 측정소에서 가장 낮은 최대값인 432.88 μg/m^{3}를 보였다. 이는 2000년대 초반 빈번했던 황사 등의 자연적 배출에 의한 고농도와 연관된 것으로 확인되었다.

3.2 지점별 PM_{10} 배경농도의 장기간 경향성 분석

3.2.1 분위수 분포 분석

전체 측정 기간에 측정된 측정소별 PM_{10} 농도의 분위수(%ile) 분포를 그림 3에 나타내었다. 그림에 나타난 것과 같이 각 측정소의 배경농도의 분위수 분포는 최대값에 접근하는 지수함수 형태로 나타났고, 이 때 측정소별 측정된 최대 농도값의 e^{-1}의 감소 인자에 해당하는 e^{-1} (e-folding) 농도값은 중국(Dialin_F, Dailin_G, Xiamen 측정소 순서대로) 72th%ile, 62th%ile, 50th%ile, 한국(Ganghwa, Gosan, Taean 측정소 순서대로) 75th%ile, 75th%ile, 76th%ile, 일본(순서대로 Oki, Rishiri 측정소 순서대로) 79th%ile, 80th%ile로 나타났다. 즉, 중국의 측정소는 상대적으로 농도 변화가 커서 배경농도를 확정하기 힘든 반면, 일본 측정소는 다수의 자료가 하위 농도 즉 0~80th%ile에 약 63% 이상 집중되고 있어서 일정 수준 이내에서 배경농도로 주로 측정되므로 배경농도 수준을 잘 특정할 수 있는 결과로 판단된다.

국가별 평균적 농도 수준을 살펴보기 위하여 상 · 하위 ±10th%ile을 제외한 분위수 분포를 살펴본 결과,

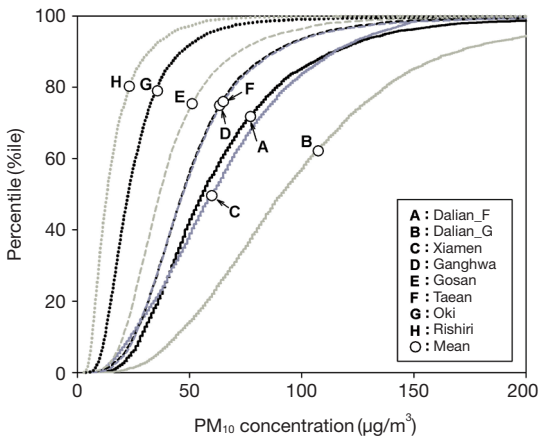

Fig. 3. Distribution curves of the cumulative PM_{10} background concentrations in 8 sites during the study period.

Dalian_G 측정소의 분포 곡선이 전반적 분포에서 가장 완만한 기울기를 보였으며, Dalian_F 측정소와 Xiamen 측정소의 분포 곡선은 서로 유사하게 나타났다. 그러나 산술 평균분포(그림에서 ○로 표시)에서는 Dalian_F 측정소에 비하여 Xiamen 측정소가 상대적으로 더 낮은 분위수에서 평균값이 존재하는 것으로 나타나, Dalian_F 측정소에서 고농도가 상대적으로 더 자주 측정된 것으로 해석된다. 한국의 경우 Ganghwa와 Taean 두 측정소에서 전반적으로 매우 유사한 분위수 분포 및 평균값을 보였고, 반면 Gosan 측정소에서 제일 낮게 나타

났다. 일본의 경우 Oki 측정소가 Rishiri 측정소보다 더 가파른 증가 경향을 보였다. 3국 전체로 볼 때 Dalian_G 측정소에서의 분포 곡선이 가장 완만한 것은 PM_{10} 농도의 측정 빈도가 고농도에 집중되어 있는 결과로 해석되며, 이와 반대로 Oki 및 Rishiri 측정소의 경우 분포 곡선이 중위수 이하에서 가장 가파른 변화를 보여 PM_{10} 농도 발생 빈도가 저농도에 집중되어 있음을 확인할 수 있었고, 따라서 배경농도 수준을 특정하기에 제일 양호한 것으로 판단된다.

3.2.2 연평균 농도 분석

측정 지점별 PM_{10} 농도의 장기 변화 경향을 파악하기 위하여 PM_{10} 일평균 값의 평균(mean), 중위수(median), 5^{th}, 10^{th}, 25^{th}, 75^{th}, 90^{th}, 95^{th}%ile의 연도별 분포를 그림 4에 나타내었다. 최고값의 경우 연도별로 그 차이가 매우 크게 나타났고 연도별 변화 경향을 파악하기가 쉽지 않아 본 연구에서 제외하였다. 또한, 일본의 경우, 2000년 9월부터 측정이 시작되어 연간 자료로서 불충분하다고 판단되는 기간을 제외한 2001~2013년을 본 연구의 분석 기간으로 한정하였다.

Dalian 시에 위치한 Dalian_F와 Dalian_G 측정소 모두 농도가 2006년까지 증가하여 최고치를 기록한 이후 2010년까지 중위수, 5^{th}, 10^{th}, 25^{th}, 75^{th}, 90^{th}%ile 모두 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 추세는 2008년 북경 올림픽 개최를 위한 북경 중심의 대규모 배출량 저감 정책과 연관된 것으로 사료된다. 올림픽 개최 직전 기간(2006~2008년)에 대하여 측정소별 중위수(50^{th}%ile) 경향을 정량적으로 살펴보면, 2006~2007년 변화 경향은 Dalian_F, Dalian_G, Xiamen 측정소에서 각각 −12.7, −12.6, −30.5%/year (평균 −18.6±10.3%/year)로서 분석 기간 중 가장 큰 감소 경향을 보였고, 2007~2008년 각각 −17.7, −19.6, −16.7%/year (평균 −18.0±1.5%/year)로서 두 번째로 큰 감소 경향을 보였다. Wang and Hao (2012)는 중국 전역의 PM_{10} 및 SO_2 농도가 2005년 이후 꾸준히 감소하는 경향을 보고하며 이를 올림픽 개최 효과로 분석하였고, 특히 PM_{10} 농도 감축을 위하여 2003년부터 시행된 중국 발전소의 PM_{10} 배출량 제어 정책이 중국의 제철, 시멘트, 알루미늄 산업 분야에서 성과를 낸 결과로 보고되었다 (Wang and Hao, 2012). 이는 또한 중국의 5개년 감축 계획 10회차(2001~2005년)에 의한 배출량 저감 기간 (MEP, 2011)과도 일치함을 확인하였다. Witte *et al*. (2009)는 위성자료를 이용하여 NO_2, SO_2, CO 농도를 올림픽이 있었던 2008년과 올림픽 이전의 기간 사이의 농도 차이에 대한 비교 분석을 시도하였고, 특히 올림픽이 개최되던 기간의 엄격한 배출량 규제로 인해 올림픽 기간의 NO_2 농도가 2005~2007년 농도 대비 43% 감축된 것을 확인하였다.

반면 2010년 이후 다시 증가하여 최근(2013년)에는 2006년의 최고치 농도와 유사한 수준으로 회복하였다. 특히 최근(2012~2013년)에는 모든 분위수에서 급격한 증가율을 보였는데, 2013년의 경우 2012년 대비 Dalian_F와 Dalian_G 측정소 모두 평균 1.62배 증가하였다. 이처럼 Dalian_F와 Dalin_G 측정소에서 2013년 PM_{10} 농도가 급증한 것은 Dalian 시와 가까운 북경에서 2013년 1월 총 28일의 스모그가 발생한 것과 연관이 있는 것으로 사료된다(Hu and Jiang, 2013; Luo, 2013).

Xiamen 측정소는 Dalian 시의 두 측정소와 마찬가지로 2006년까지 꾸준히 증가한 후 2006~2008년 사이 급격한 감소를 보였으나, Dalian_F와 Dalian_G 측정소와는 달리 2008년 이후 일정한 농도 수준을 크게 벗어나지 않는 것으로 나타났다.

한국의 경우, 장기적인 관점에서 Ganghwa와 Taean 측정소에서는 연평균 농도가 전체적으로 소폭 감소하는 추세를, Gosan 측정소에서는 소폭 증가하는 경향을 보이고 있는 등 서로 다른 경향성을 보였다. 그럼에도 불구하고 세 측정소 모두 공통적으로 2012년 이후 증가하는 경향을 보였으며, 이러한 경향은 높은 분위수에서 더욱 뚜렷하게 나타났다. 이러한 현상은 우리나라의 풍상측에 위치한 Dalian_F와 Dalian_G 측정소에서의 2012~2013년 급격한 농도 증가와 연관이 있을 것으로 사료되어 모델링 연구 등 자세한 관련 연구가 요구된다.

Taean 측정소의 농도는 측정 기간 초기에는 모든 분위수에서 급격한 감소를 보였으나, 95^{th}%ile을 제외한 모든 분위수에서 2011년까지 일정한 농도 수준을 유지하였다. 95^{th}%ile의 경우 2006년까지 꾸준히 소폭 감소하는 경향을 보이다가 2006~2011년 증가하는 추세를 보여 2000년의 농도 수준까지 회복되는 모습을 보였다. 이후 2011~2012년에는 모든 분위수에서 뚜렷하게 감소하는 경향을 보이고 있으나, 이후 다시 농도가 증

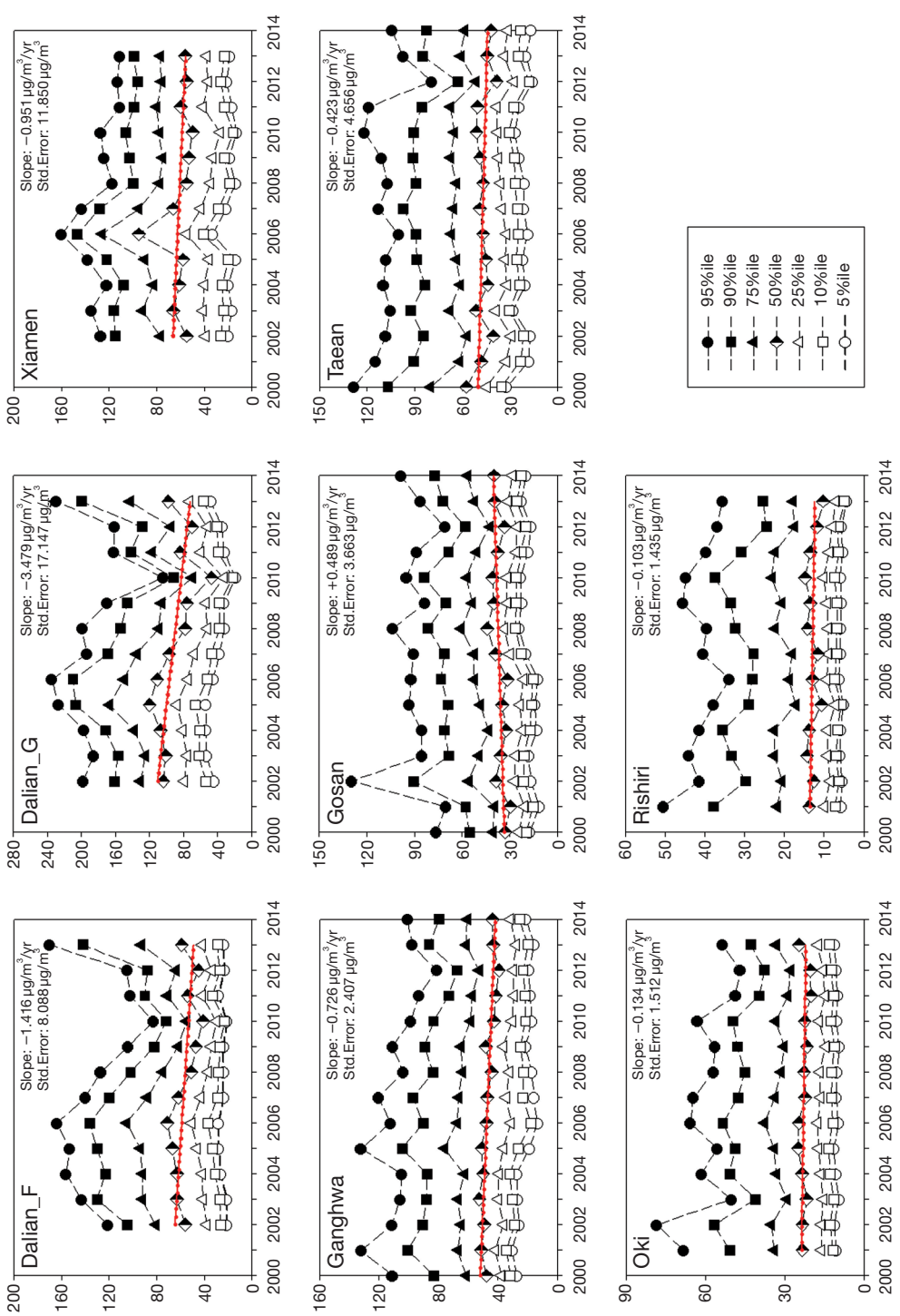

Fig. 4. Annual variations of 5th, 10th, 25th, 50th, 75th, 90th, and 95th percentiles of PM_{10} concentrations observed at 8 sites in 3 countries over the study periods: 2002 ~ 2013 (China), 2000 ~ 2014 (Korea), and 2001 ~ 2013 (Japan). Red line indicates the linear regression curve of 50th percentile.

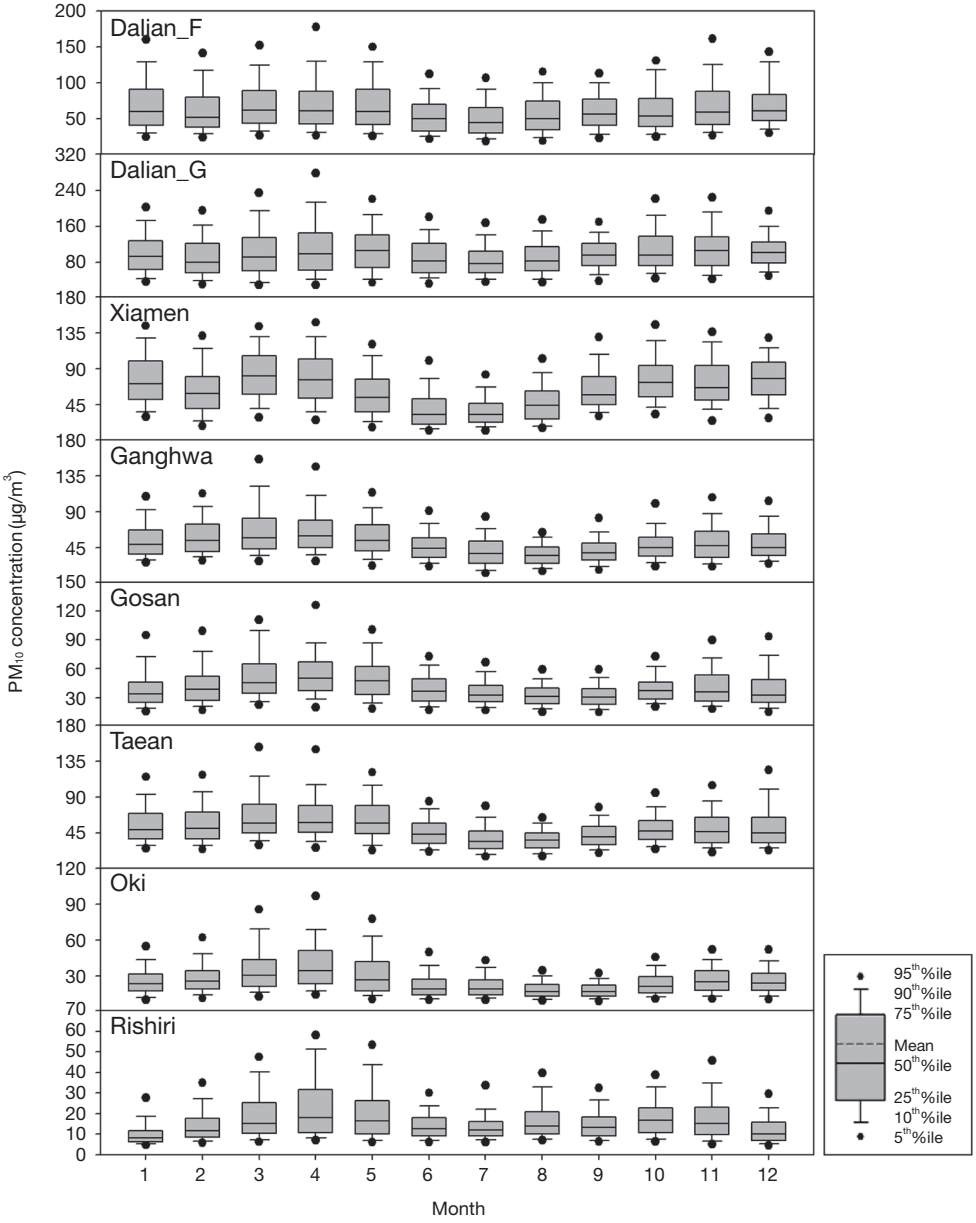

Fig. 5. Monthly variations of 5th, 10th, 25th, 50th, 75th, 90th, 95th percentiles of PM_{10} concentrations observed at 8 sites in each of the 3 countries over the study periods: 2002～2013 (China), 2000～2014 (Korea), and 2000～2013 (Japan).

가하는 등 그 추세를 단정하기는 힘들어 보인다.

Gosan 측정소는 전체적인 농도 수준이 다른 두 측정소에 비해 상대적으로 상당히 낮은 모습을 보였다. 2002년의 일시적인 고농도를 제외하고는 2000년～2008년 사이 증가하는 모습을 보였고, 이후 Ganghwa 및 Taean 측정소와 마찬가지로 2012년까지 모든 분위수에서의 급격한 감소 경향을 나타낸 이후 다시 뚜렷하게 증가하는 양상을 보이고 있다. 다만 연평균 값의

추세만을 한정하여 볼 때 Ganghwa와 Taean 측정소와는 지리적으로 남쪽에 위치한 Gosan 측정소에서 증가하는 경향을 보인 이유가 최근의 제주도 내의 주변 도심지 영향이 커진 것으로 판단되나, 보다 자세한 분석적 연구가 필요할 것으로 판단된다.

일본의 두 측정소에서는 모두 전체적으로 감소하는 경향을 보이는 것 외에 큰 특징을 보이지 않는다. 두 지점 모두 고분위수의 변화 양상이 불규칙하여 일정한 경향성을 규정하기 힘들며, 50^{th}%ile을 포함한 저분위수에서는 전체 측정 기간 동안 농도의 변화 정도가 매우 작게 나타났다. Oki와 Rishiri 두 측정소 모두 2001년 대비 2013년 95^{th}%ile의 값이 30% 가량 감소한 것으로 나타났다.

3.2.3 월별 변동성 분석

측정 지점별 월별 특성을 살펴보기 위하여 전체 기간에 대한 PM_{10} 일평균값을 월별로 그림 5에 나타내었다. 모든 측정소에서 봄철, 특히 4월에 가장 높은 농도를, 그다음으로 겨울, 가을, 여름 순으로 나타났다. 이러한 봄철의 고농도는 대륙에서 불어오는 다량의 황사 영향 및 북경과 같은 고배출 지역의 서풍 수송에 의한 풍계의 일치 정도와 연관된 결과로 판단되며, 여름철에는 강수로 인한 씻김 현상으로 농도가 낮게 나타나는 것으로 판단된다. 농도 편차 또한 농도가 가장 높은 4월에 제일 크게 나타났으며, 그다음으로 3월 순으로 나타났다. 이는 황사 발생일과 비발생일의 농도 편차에 기인한 것으로 해석하였고, 그 결과 계절적 농도 편차는 봄철에 가장 크게 나타났고, 겨울, 가을, 여름 순으로 나타났다.

측정 지점별 월평균 농도는 중국의 경우 Dalian_G 측정소에서 가장 크게 나타났다. 또한, Dalian_F에서는 Xiamen 측정소에 비하여 월평균 값이 같거나 소폭 높게 나타났으나, 10월에는 Xiamen 측정소에서 오히려 뚜렷하게 높게 나타났다. Xiamen 측정소의 경우 Dalian 시에 있는 두 측정소에 비해 위도가 낮을 뿐만 아니라 위에서 설명한 지리적 및 기후적 요소가 상이하여 상대적으로 다른 경향을 보이는 것으로 판단된다. 한국의 경우 Ganghwa와 Taean 측정소에서는 월 평균 농도가 매우 유사하였으나, Gosan 측정소의 경우 다른 두 지점에 비하여 연중 항상 낮은 값을 나타내었다. 일본의 경우 계절별로 보면 여름철의 경우 두 측정소의 월 평균 농도의 차이가 크지 않으나, 봄철의 경우 Oki 측정소가 Rishiri 측정소보다 그 상승폭이 높게 나타났는데, 이는 상대적으로 대륙의 발원지로부터 가까운 Oki 측정소가 장거리 수송되어 오는 영향을 더 자주 받은 결과로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 한 · 중 · 일 배경농도 측정소 8지점에서 측정된 대기 중 PM_{10} 농도 자료를 분석하여 국가 간 배경농도의 장기 변화 경향을 살펴보았다. 그 결과 중국의 국가 배경농도 측정소에서 제일 높은 값을, 일본 측정소에서 가장 낮은 값을 보였다. 또한, 모든 측정소에서 4월에 가장 높은 농도와 가장 큰 편차를 보였다.

중국의 경우 세 국가 중 농도 값이 가장 높았을 뿐만 아니라, 전체 기간에 대한 측정값들 사이의 편차 또한 제일 크게 나타났다. 특히 Dalian_G 측정소가 다른 두 측정소인 Dalian_F와 Xiamen 측정소보다 더 높았는데, 이는 측정소 위치가 도심에 더 가까운 것에 기인한 것으로 해석하였다. 중국 측정소의 장기 변화 경향은 모든 측정소에서 최근 PM_{10} 배경농도가 감소하는 경향을 보였으며, 그 감소폭 또한 세 국가 중 가장 크게 나타났는데, 이는 2008년 북경 올림픽 개최를 앞두고 시행된 중국 내의 대규모 배출량 규제에 기인한 것으로 판단하였다. 그러나 2013년 이후에는 올림픽 개최에 따른 규제가 완화됨에 따라 다시 증가하여, 예전의 농도 수준으로 회복하는 것으로 분석하였다.

한국의 경우 전체 측정 기간에 대하여 Ganghwa 및 Taean 측정소에서의 농도 수준 및 경향은 매우 유사하였으나, Gosan 측정소의 경우 다른 두 지점보다 전체 농도는 낮으나 오히려 시간적으로는 증가하는 경향을 보였다. 또한, 측정소별 평균 농도의 상세한 변화 양상이 서로 다르게 나타났으나, 공통적으로 세 측정소 모두 2012년 이후 농도가 급격히 증가하는 경향을 보이고 있으며, 이러한 현상은 Dalian_G와 Dalian_F 측정소의 2012년 이후의 급격한 증가 추세와 연관될 수 있는 것으로 해석하였다.

일본의 경우 본 연구에서 선정한 8개 측정소 중에서 가장 낮은 농도를 보였다. 이는 대륙의 배출원으로부터 가장 멀리 떨어져 있어 장거리 이동 영향이 가장 적을

것으로 판단되며, 또한 도심지로부터 떨어진 지리적 및 기후적 특성 또한 상이한 것에 기인한 것으로 해석하였다.

배경농도는 국내 인위적 배출량을 모두 제거한 경우 기대할 수 있는 대기 중 농도값으로서 중요한 의미를 가진다. 따라서 한반도 서해상의 배경농도를 분석하는 것은 중국의 대기오염물질이 장거리 이동하여 발생할 수 있는 대기 중 농도를 파악하고 나아가 국내의 인위적인 PM_{10} 배출량 규제 목표를 설정하는 데 있어서 귀중한 참고자료로 이용될 수 있을 것이다. 따라서 본 연구에서 수행된 중 · 장기 분석 결과는 이러한 측면에서 중요한 기초 자료가 될 수 있을 것으로 판단된다.

그러나 본 연구에서 사용된 측정소 지점 수와 자료 기간은 제한적이다. 특히 중국 측정소의 경우, 한 · 중 · 일 3국의 합의된 국가 배경농도 측정소로서 혹은 중국 고배출 지역의 출구 지역으로서 중요하지만 전체 중국 대륙을 대표하기에는 한계가 있을 수 있으므로 향후 위성자료를 포함한 중국의 다수의 배경농도 측정소 혹은 풍하측 중국 출구 지역 자료를 수집하여 보다 심도 있는 분석이 추가적으로 수행되어야 할 것으로 판단된다. 향후 배경농도의 전반적인 원인과 향후 예측 결과 등을 연구를 병행하기 위하여 위성 측정 자료 등 보다 광범위하고 다양한 자료들을 활용할 계획이며, 나아가 WRF-CMAQ과 같은 대기질 모델을 이용하는 한반도 주변 국가 배경농도 모델링 연구를 병행할 예정이다.

감사의 글

본 연구에서 사용된 일부 자료는 한중일 협력사업인 LTP (Long-range Transboundary Air Pollutants in Northeast Asia) project에서 수집된 자료로서, 귀중한 자료를 제공해 주신 국립환경과학원 기후대기연구부 LTP 사업단에 깊이 감사드립니다. 본 논문은 부산대학교 기본연구지원사업 (2년) 지원에 의하여 연구되었습니다.

References

Choi, K.-C., J.-J. Lee, C.-H. Kim, L.-S. Chang, and J.-H. Woo (2014) Assessment of transboundary ozone contribution toward south Korea using multiple source-receptor modeling technique, Atmospheric Environment, 92, 118-129.

Environmental Protection Agency (EPA) (2014). Policy Assessment for the Review of the Ozone National Ambient Air Quality Standards. Final Report. EPA-452/R-14e006. EPA Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, NC.

Hu, D. and J. Jiang (2013) A Study of Smog Issues and $PM_{2.5}$ Pollutant Control Strategies in China, Journal of Environmental Protection, 4, 746-752.

Kang, C.-H., W.-H. Kim, C.-G. Hu, and D.-H. Kang (2012) Real-time monitoring of radon background level at Gosan site, Jeju Island, Analytical Science & Technology, 25(1), 7-13. (in Korean with English Abstract)

Kim, C.-H., L.-S. Chang, F. Meng, M. Kajino, H. Ueda, Y. Zhang, H.-Y. Son, J.-J. Lee, Y. He, J. Xu, K. Sato, T. Sakurai, Z. Han, L. Duan, J.-S. Kim, S.-J. Lee, C.-K. Song, S.-J. Ban, S.-G. Shim, Y. Sunwoo, and T.-Y. Lee (2012) Sulfur deposition simulations over China, Japan and Korea: A model intercomparison study for abating sulfur emission, Environmental Science and Pollution Research 19(9), 4073-4089.

Kim, J., M.-K. Park, S.-N. Oh, H.-M. Cho, and K.-R. Kim (2001) The Background Monitoring of Atmospheric CFC-11 and CFC-12 at Kosan, Korea, Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 37(1), 65-74. (in Korean with English Abstract)

Kim, Y.P., J.H. Lee, K.-C. Moon, H.-K. Kim, and C.B. Lee (1992) Measurement of Carbonaceous Species in Fine Particles at the Background Sites in Korea During 1996 and 1997, Journal of Korea Air Pollution Research Association, 16, 184-193. (in Korean with English Abstract)

Ko, H.-J., Y.-S. Lee, W.-H. Kim, J.-M. Song, and C.-H. Kang (2014) Chemical Composition Characteristics of Fine Particulate Matter at Atmospheric Boundary Layer of Background Area in Fall, 2012, Journal of the Korean Chemical Society, 58(3), 267-276. (in Korean with English Abstract)

Lee, H.-J., S.-W. Kim, J. Brioude, O.R. Cooper, G.J. Frost, C.-H. Kim, and M. Trainer (2014) Transport of NO_2 in East Asia identified by satellite and in-situ measurements and Lagrangian particle dispersion model simulations, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 119, 2574-2596.

Luo, Q. (2013) 25 Smoggy Days Occured in January 2013, Beijing Daily.

McKendry, I.G. (2006) Background concentrations of PM2.5 and ozone in British Columbia, Canada Geography/ Atmospheric Science, 3, Report for The University of British Columbia.

MEP (Ministry of Environment Protection of China) (2011) Report on environmental quality in China, 2010. http://www.mep.gov.cn.

NIER (National Institute of Environmental Research) (2012a) The 12th year Joint Research for Long-range Transboundary Air Pollutants in Northeast Asia, Annual Report of LTP Project 2011, NIER, Korea.

NIER (National Institute of Environmental Research) (2012b) Assessment of Long-range Transboundary Air Pollutants in Northeast Asia (LTP) Project, NIER, Korea.

Nopmongcol, U., J. Jung, N. Kumar, and G. Yarwood (2016) Changes in US background ozone due to global anthropogenic emissions from 1970 to 2020, Atmospheric Environment, 140, 446-455.

Park, K.Y., H.G. Lee, M.S. Suh, K.M. Jang, C.-H. Kang, C.-G. Hu, and Y.J. Kim (1994) Analysis of Air Pollution Concentrations at Cheju Baseline Measurement Station, Korean Society for Atmospheric Environment, 10(4), 252-259. (in Korean with English Abstract)

Park, S.-Y., Y.-J. Kim, and C.-H. Kim (2012) Characteristics of Long-Range Transport of Air Pollutants due to Different Transport Patterns over Northeast Asia, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 28(2), 142-158. (in Korean with English Abstract)

Wang, S. and J. Hao (2012) Air quality management in China: Issues, challenges, and options, Journal of Environmental Sciences, 24(1), 2-13.

Witte, J.C., M.R. Schoeberl, A.R. Douglass, J.F. Gleason, N.A. Krotkov, J.C. Gille, K.E. Pickering, and N. Livesey (2009), Satellite observations of changes in air quality during the 2008 Beijing Olympics and Paralympics, Geophys. Res. Lett., 36, L17803, doi: 10.1029/2009GL039236.