

우리나라, 미국 및 유럽의 대기환경기준 강도에 관한 비교 연구

A Comparative Study on the Ambient Air Quality Standard Strength among Korea, the U.S.A. and the EU

박민빈 · 이태정 · 이은선 · 김동술*

경희대학교 대학원 환경응용과학과 대기오염연구실

(2016년 10월 10일 접수, 2016년 10월 20일 수정, 2016년 10월 21일 채택)

Min-Bin Park, Tae-Jung Lee, Eun-Sun Lee and Dong-Sool Kim*

Department of Applied Environmental Science, Graduate School, Kyung Hee University

(Received 10 October 2016, revised 20 October 2016, accepted 21 October 2016)

Abstract

Based on air quality monitoring data ('10~'14) of Suwon City provided by the Korean Department of Environment, a fundamental statistic for 5 criteria pollutants such as SO₂, CO, NO₂, O₃, and PM₁₀ was initially investigated. The purpose of this paper was to review the ambient air quality standards (AAQS) of Korea, the U.S.A. and the EU and further to assess the degree of standard strength by the achievability of the AAQS comparing each national standard. Since the level and the way of standards for each air pollutant are various among countries, it is difficult to determine the degree of relative attainment using the same set of data above. Further when all the areas having bad air quality for a specific pollutant are classified as non-attainment case, it is more difficult to assess the degree of standard strength. Thus we introduced a new concept called the average concentration distance (ACD) to quantitatively estimate the strength. As results, the Korean 1-hr NO₂ AAQS is slightly stronger than the US standard and weaker than the EU standard. The Korean O₃ standard is strongest; however, the Korean PM₁₀ standard is weakest. Furthermore the equivalent levels of 8-hr O₃ standards in the U.S.A. and the EU were respectively estimated as 97.5 and 95.7 percentiles of the Korean standard with maintaining the existing standard of 60 ppb.

Key words : AAQS, Air quality monitoring network, Attainment, Non-attainment, Average concentration distance

1. 서 론

대기 중 가스상 및 입자상 오염물질은 호흡기 질환, 폐암, 수명단축 등 인체에 미치는 심각한 영향의 원인이

되고 있을 뿐만 아니라, 시정악화, 생태계 파괴 및 지구 기후변화 등 다양한 환경문제를 초래하고 있다(WHO, 2016; Yu and Hong, 2012; Anderson, 2009; Miller *et al.*, 2007; Gao *et al.*, 2002). 따라서 대부분 국가에서는 대기오염물질의 규제 및 관리를 위해 인체 위해성과 환경 및 복지에 미치는 영향을 고려하여 대기환경기준을 설정하여 관리하고 있다.

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)31-201-2430, E-mail : atmos@khu.ac.kr

미국 EPA는 1970년 개정된 청정공기법(Clean Air Act: CAA)에서 6개 대기오염물질(SO₂, NO₂, O₃, CO, Pb, 부유분진)에 대해 연방대기질기준(National Ambient Air Quality Standards: NAAQS)을 설정하고 이행 계획을 마련하였다. CAA 규정에 따라서 미국 EPA는 5년마다 현행 대기환경기준의 적합성 여부를 재검토하고 있으며, 1990년 개정법에서는 오존의 전구물질(precursor)에 대한 규제를 강화하고, 1997년 오존 및 PM₁₀ 환경기준 개정과 PM_{2.5} 환경기준을 추가한 바 있다(Kim, 2002).

대기환경 규제기준(criteria)에는 기준치(standard), 추천치(recommendation), 목표치(goal), 지침치(guide-line) 등이 있는데, 우리나라는 환경정책기본법에 대기환경 규제기준의 목표를 설정하고 이 목표치를 달성하기 위한 각종 정책을 추진하고 있다. 1978년 2월 SO₂에 대한 대기환경기준을 최초로 도입하였고, 1983년 CO, NO₂, 총먼지, O₃ 및 HC에 대한 기준을, 1991년 2월 Pb에 대한 기준을, 1995년 PM₁₀에 대한 기준을 설정하였다. 2010년에는 벤젠(C₆H₆)에 대한 기준을 도입하였으며, 2011년 3월 PM_{2.5} 기준을 추가로 설정하고 2015년 1월부터 시행하고 있다. 이 중, 일부 항목은 환경기준 목표 달성도와 건강위해를 감안하여 SO₂는 1995년과 2011년, CO는 1995년, PM₁₀은 2001년과 2007년, NO₂는 2007년에 환경기준을 단계적으로 강화하였다(MOE, 2014). 한편, 대기규제물질(criteria air pollutants)의 측정과 감시를 위해 대기오염 자동측정망을 운영하고 있으며, 1973년 서울 4개 측정소, 1974년 부산 3개 측정소 등을 시작으로 매년 대기오염측정소를 확대설치 운영하고 있다. 2015년 12월 기준으로 전국에 259개 도시대기측정소가 운영되고 있다(NIER, 2016). 대기오염 측정소에서는 SO₂, CO, NO₂, O₃, PM₁₀ 등 5개 규제물질을 5분 간격으로 연속 측정하고 있다. 전국 측정망에서 측정되는 대기오염도 자료는 국가대기오염정보관리시스템(NAMIS)에 수집되어 관리되고 있으며, 국가와 지방자치단체 등 행정기관에서 대기환경정책 자료로 활용할 수 있도록 한국환경공단이 대기질 정보를 제공하고 있다(MOE, 2010). 자동측정망 자료의 분석결과는 대기오염 정보체계의 운영, 오염방지대책 수립과 평가를 위한 기초자료의 제공, 환경기준 달성(attainment)과 미달성(non-attainment) 여부의 판단 및 감시 등에 활용되고 있다.

합리적인 환경기준을 설정하기 위해서는 우선, 공중보건을 보호할 정도로 충분히 엄격해야 하고, 단순하고 이해하기 쉬워야 하며, 실제 대기질의 변화에 대한 민감도를 가지고 있어야 하고, 기상변동에 안정해야 하며, 가능한 많은 측정자료를 사용해서 설정하여야 한다. 마지막으로 기준의 엄격성은 실제로 강제할 수 있는 수준이 되어야 한다(Fairley and Blanchard, 1991). 일반적으로 대기환경규제 수준이 엄격하게 설정되면 달성도 차원에서 의미가 퇴색되며, 반대로 너무 완화되어 있다면 행정적 측면 및 건강보호 측면에서 달성 목표치로서의 의미도 퇴색되기 때문에 합리적 수준에서 대기환경 규제기준을 설정하는 것이 중요하다(Jang and Jung, 2012).

본 연구에서는 수원시에서 운영되고 있는 6개 측정소의 대기오염자료를 바탕으로 연구를 수행하였다. 우선 주요 대기오염물질의 농도현황을 분석하였으며, 이를 통해 각 오염물질에 대해 우리나라, 미국 및 EU의 대기환경기준과 계산방법을 각각 적용하였다. 이 결과를 이용하여 장·단기 대기환경기준의 달성도(attainment)를 비교 분석하였으며, 농도거리개념을 이용하여 기준의 강도(strength)를 정량적으로 평가하였다.

2. 연구 방법

본 연구를 수행하기 위해 수원시 자동측정망의 5년간 자료(2010~2014년)를 시범대상으로 활용하였으며, 그림 1과 같이 수원시 신평동, 인계동, 우만동, 영통동, 천천동, 고색동 등 6개 측정소의 자료를 이용하였다. 자동측정망 자료는 1시간 평균자료를 이용하여 8시간 평균, 일평균, 연평균을 계산하였으며, 유효측정값의 처리비율을 75% 이상으로 적용하였다. 특히 8시간 평균 자료는 이동평균법(running average)을 적용하여 추출하였으며, 일별 8시간 구분대의 측정시간값의 누적합을 측정시간수로 나누어 계산한 17개의 평균값 중 최고값을 당일의 8시간 평균값으로 간주하였다.

본 연구에서는 2010년부터 2014년까지 수원시의 주요 대기오염물질 중 SO₂, CO, NO₂, O₃, PM₁₀의 오염현황을 분석하였다. 또한 이 측정망 자료는 우리나라(MOE, 2016), 미국(EPA, 2016), EU(European Commission, 2016)의 대기환경기준과 산정방법을 각각 적

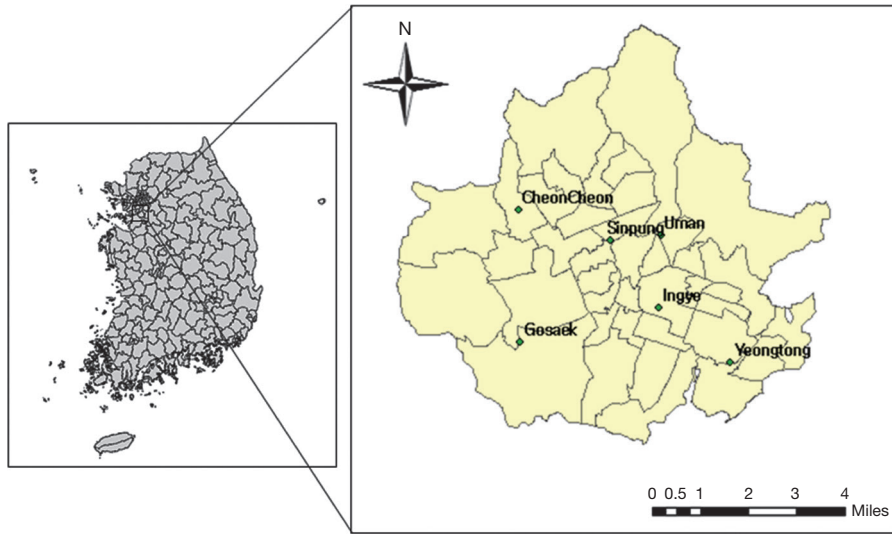


Fig. 1. Air quality monitoring sites of Suwon-city used in this study.

용하여 수원시 6개 지역의 대기오염 기준초과여부에 따른 달성/미달성 여부를 비교·검토하였다. 각국의 대기환경기준과 달성/미달성 여부의 판단 기준은 표 1과 같다.

우리나라의 경우, SO₂의 대기환경 1년 기준은 20 ppb로 설정하고 있으며, 1시간 기준으로 999천분위수 값이 150 ppb를 초과하거나, 24시간 기준으로 99백분위수의 값이 50 ppb를 초과하면 미달성이라고 정의한다. 반면 미국은 1시간 기준이 75 ppb로 한국 150 ppb와 EU 131 ppb에 비해 엄격하게 설정되어 있으며, 기준초과 여부를 판단하는 세부기준 역시 일 최고 1시간 평균농도의 99백분위수 값의 3년 평균값을 기준농도로 하고 있어 한국과 EU보다 엄격하게 적용하고 있다. EU는 1시간 평균농도가 1년에 24회 이상 131 ppb를 초과하거나, 24시간 평균농도가 1년에 3회 이상 47 ppb를 초과할 경우 미달성이라고 정의하고 있다.

CO의 대기환경기준은 우리나라의 경우 1시간 기준으로 999천분위수 값이 25 ppm을 초과하거나 8시간 기준으로 99백분위수의 값이 9 ppm을 초과하면 미달성이라고 정의한다. 미국은 1시간 평균농도가 1년에 1회 이상 35 ppm을 초과하거나 8시간 평균농도가 1년에 1회 이상 9 ppm을 초과하면 미달성이라고 정의하며, EU는 8시간 평균 농도가 1년에 1회 이상 8.6 ppm

을 초과하는 경우를 미달성이라 정의하고 있다.

NO₂의 경우, 우리나라의 1년 기준은 30 ppb로 설정하고 있으며, 1시간 기준으로 999천분위수 값이 100 ppb를 초과하거나 24시간 기준으로 99백분위수의 값이 60 ppb를 초과하면 미달성이라고 판단한다. 미국은 1년 기준이 53 ppb이며 1시간 기준은 최근 3년간 일 최고 1시간 평균농도의 98백분위수 값이 100 ppb를 초과할 경우 미달성이라 정의하고 있다. EU의 1년 기준은 21 ppb로 설정하고 있으며, 1시간 평균농도가 1년에 18회 이상 105 ppb를 초과하면 미달성으로 정의한다.

O₃에 대한 우리나라 대기환경기준은 1시간 기준의 경우 999천분위수 값이 100 ppb를 초과하거나 8시간 기준의 경우 99백분위수의 값이 60 ppb를 초과하면 미달성으로 정의하고 있다. 한편 미국은 8시간 환경기준을 70 ppb로 정하고 있어 표면적으로는 국내 기준인 60 ppb에 비해 완화된 수준처럼 보인다. 하지만 미국은 실질적으로 세부기준에서 연중 4번째로 높은 날의 8시간 평균농도에 대한 연속 3년간 평균값을 기준으로 하므로 단순하게 1년을 기준으로 99백분위수 값으로 정하고 있는 국내기준과 기준치만으로 비교하기 어렵다. EU는 8시간 평균농도가 3년에 25회 이상 60 ppb를 초과하면 미달성으로 정의하고 있다.

우리나라의 PM₁₀에 대한 1년 기준은 50 µg/m³로 설

Table 1. The ambient air quality standards in Korea, USA, and EU (as of 2015) (MOE, 2016; EPA, 2016; European Commission, 2016).

Pollutant	Averaging time	Korea ¹⁾	US	EU*
SO ₂ (ppb)	1 hr	150	75 ²⁾	131 ¹⁰⁾
	24 hr	50	–	47 ¹¹⁾
	1 yr	20	–	–
CO (ppm)	1 hr	25	35 ³⁾	–
	8 hr	9	9 ³⁾	8.6 ³⁾
NO ₂ (ppb)	1 hr	100	100 ⁴⁾	105 ¹²⁾
	24 hr	60	–	–
	1 yr	30	53 ⁵⁾	21 ⁵⁾
O ₃ (ppb)	1 hr	100	–	–
	8 hr	60	70 ⁶⁾	60 ¹³⁾
PM ₁₀ (µg/m ³)	24 hr	100	150 ⁷⁾	50 ¹⁴⁾
	1 yr	50	–	40 ⁵⁾
PM _{2.5} (µg/m ³)	24 hr	50	35 ⁸⁾	–
	1 yr	25	12 ⁹⁾	25 ⁵⁾
Pb (µg/m ³)	Rolling 3 month average	–	0.15 ³⁾	–
	1 yr	0.5	–	0.5 ⁵⁾
Benzene (µg/m ³)	1 yr	5	–	5 ⁵⁾

¹⁾ 99th permillage of 1 hr concentrations shouldn't exceed the standard and 99th percentile of 8 hr and 24 hr concentrations shouldn't exceed the standard. 1 yr concentrations shouldn't exceeded the standard

²⁾ 99th percentile of 1 hr daily maximum concentrations, averaged over 3 years.

³⁾ Not to be exceeded more than once per year

⁴⁾ 98th percentile of 1 hr daily maximum concentrations, averaged over 3 years

⁵⁾ Not to be exceeded

⁶⁾ Annual fourth-highest daily maximum 8 hr concentration, averaged over 3 years

⁷⁾ Not to be exceeded more than once per year on average over 3 years

⁸⁾ 98th percentile, averaged over 3 years

⁹⁾ Annual mean, averaged over 3 years

¹⁰⁾ Not to be exceeded more than 24 times per year

¹¹⁾ Not to be exceeded more than 3 times per year

¹²⁾ Not to be exceeded more than 18 times per year

¹³⁾ Not to be exceeded more than 25 times per 3 years

¹⁴⁾ Not to be exceeded more than 35 times per year

*Conversion factor of EU standard: 20°C, 101.3 kPa

정하고 있으며, 24시간 기준의 경우 99백분위수 값이 100 µg/m³를 초과하면 미달성으로 정의하고 있다. 미국은 24시간 기준이 150 µg/m³로 설정되어 있어 우리나라보다 크게 완화된 것처럼 보인다. 하지만 최근 3년간 24시간 평균농도가 150 µg/m³를 1회 이상 초과하면 미달성이라 하고 있어 우리나라보다 매우 엄격하게 적용되고 있다. EU는 1년 기준치를 40 µg/m³로 설정하고 있다. 하지만 24시간 기준은 우리나라 연평균 기준과 동일한 50 µg/m³를 설정하여 매우 엄격하나, 종합적인 기준 달성여부는 초과횟수를 1년에 35회를 적용하여 판단하고 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수원시 대기오염 현황

수원시 주요 오염물질인 SO₂, CO, NO₂, O₃, PM₁₀의 오염현황을 분석하기 위하여 각 오염물질의 시간별 자료로부터 8시간 평균, 일평균, 연평균 농도를 계산하여 비교하였다. 표 2에는 각 오염물질의 연도별 평균 농도 및 표준편차와 오염물질별 적용 단기기준을 고려하여 최대 및 최소 농도범위(range)를 SO₂, NO₂, PM₁₀은 24시간 평균값으로, CO, O₃는 8시간 평균값으로 제시하였다.

Table 2. Statistical summary of daily concentration (SO₂, NO₂, and PM₁₀) and 8 hr concentration (CO and O₃) monitored from 2010 to 2014 on the 6 sites in Suwon City, Korea.

		Sinpung	Ingye	Uman	Yeongtong	Cheoncheon	Gosaek
SO ₂ (ppb)	2010	5.95 ± 2.52 ¹⁾ 1.27~14.17 ²⁾	4.75 ± 2.13 1.13~12.17	5.23 ± 2.39 2.00~14.46	4.82 ± 1.83 2.00~11.04	5.81 ± 2.21 2.17~15.25	5.35 ± 1.83 2.42~11.21
	2011	5.86 ± 2.73 1.13~17.42	4.60 ± 2.05 1.00~11.58	5.65 ± 2.41 1.29~16.96	4.61 ± 2.19 1.04~13.83	5.42 ± 2.84 1.92~18.42	5.82 ± 2.20 1.79~14.21
	2012	5.77 ± 2.74 1.17~20.54	5.12 ± 2.23 1.29~18.25	5.77 ± 2.74 2.00~23.23	4.77 ± 2.16 1.13~17.38	5.48 ± 2.44 1.21~19.92	5.65 ± 2.35 1.18~16.25
	2013	5.90 ± 2.54 1.25~15.21	5.56 ± 2.14 1.59~12.67	6.55 ± 2.61 2.00~14.88	5.31 ± 2.10 1.54~12.71	5.63 ± 2.16 1.42~13.09	5.98 ± 2.17 1.87~12.83
	2014	6.14 ± 2.63 1.88~15.79	5.67 ± 2.46 1.00~16.21	5.40 ± 2.06 2.33~14.75	5.10 ± 2.16 2.00~15.42	6.14 ± 2.11 2.00~14.43	5.94 ± 1.99 2.92~15.42
CO (ppm)	2010	0.72 ± 0.24 0.39~2.36 ³⁾	0.76 ± 0.26 0.33~2.53	0.82 ± 0.25 0.24~2.18	0.46 ± 0.23 0.20~2.63	0.51 ± 0.24 0.20~2.63	0.73 ± 0.28 0.33~2.83
	2011	0.68 ± 0.26 0.31~2.33	0.73 ± 0.29 0.38~2.49	0.77 ± 0.31 0.21~2.55	0.48 ± 0.19 0.30~2.01	0.58 ± 0.26 0.30~2.53	0.67 ± 0.25 0.29~2.24
	2012	0.66 ± 0.23 0.31~2.15	0.66 ± 0.21 0.24~2.11	0.86 ± 0.28 0.40~2.41	0.52 ± 0.17 0.30~1.74	0.55 ± 0.21 0.35~2.34	0.65 ± 0.23 0.38~2.25
	2013	0.70 ± 0.25 0.35~2.58	0.67 ± 0.23 0.31~2.46	0.54 ± 0.17 0.33~1.81	0.59 ± 0.27 0.28~2.04	0.57 ± 0.26 0.30~2.58	0.72 ± 0.26 0.27~2.66
	2014	0.70 ± 0.23 0.28~2.44	0.63 ± 0.21 0.32~2.38	0.61 ± 0.18 0.36~2.24	0.70 ± 0.24 0.34~2.14	0.64 ± 0.19 0.40~2.54	0.69 ± 0.23 0.38~2.29
NO ₂ (ppb)	2010	33.8 ± 14.6 7.5~81.9 ²⁾	36.9 ± 14.9 10.2~86.0	39.5 ± 14.9 10.9~89.9	35.5 ± 13.8 7.7~80.8	34.8 ± 14.7 9.3~84.9	32.2 ± 13.9 8.9~81.5
	2011	36.7 ± 15.9 8.7~80.5	33.9 ± 14.4 7.7~79.1	46.1 ± 16.6 12.0~93.7	35.5 ± 13.9 8.9~73.2	35.0 ± 15.2 5.9~76.5	31.7 ± 13.2 7.8~77.1
	2012	32.9 ± 14.5 8.1~85.6	34.0 ± 13.5 6.4~86.5	42.6 ± 15.5 7.3~89.1	32.3 ± 13.4 7.7~79.8	34.0 ± 13.5 9.7~81.5	31.4 ± 13.2 7.7~85.9
	2013	35.1 ± 15.4 7.2~92.9	35.5 ± 14.6 9.7~95.3	42.7 ± 13.6 17.9~90.8	35.1 ± 12.9 11.5~88.8	33.6 ± 14.9 6.4~91.6	32.4 ± 13.6 9.9~99.9
	2014	34.8 ± 15.3 9.5~87.5	36.8 ± 15.2 11.9~86.9	37.8 ± 13.9 8.5~86.7	34.1 ± 14.1 8.3~78.4	32.5 ± 12.8 8.4~69.5	31.9 ± 13.3 8.9~75.2
O ₃ (ppb)	2010	22.2 ± 12.2 2.0~105.4 ³⁾	20.5 ± 12.8 1.0~114.3	17.7 ± 9.8 2.1~87.4	16.9 ± 9.8 2.0~98.1	18.5 ± 10.4 2.1~88.8	20.6 ± 10.4 3.0~88.6
	2011	21.9 ± 12.5 3.6~101.2	20.6 ± 12.3 2.8~109.9	20.2 ± 11.2 2.3~99.5	18.9 ± 10.5 1.3~86.3	18.8 ± 10.2 2.6~89.3	21.1 ± 10.3 4.2~90.8
	2012	22.7 ± 12.0 3.0~99.5	23.5 ± 13.4 2.5~108.3	22.0 ± 12.6 2.6~99.1	19.8 ± 11.0 3.5~86.8	19.6 ± 10.4 3.0~86.3	22.4 ± 12.0 4.1~98.4
	2013	23.1 ± 13.1 3.8~100.6	22.3 ± 12.8 3.5~101.9	18.2 ± 12.2 3.3~97.8	21.5 ± 13.8 2.8~106.0	21.4 ± 12.0 3.4~96.0	22.2 ± 11.8 4.6~86.9
	2014	24.1 ± 13.6 4.6~95.0	22.4 ± 13.7 2.8~85.9	20.9 ± 13.0 4.0~93.0	23.7 ± 15.4 1.5~102.8	22.8 ± 13.3 3.0~97.3	24.2 ± 13.9 3.3~102.0
PM ₁₀ (µg/m ³)	2010	36.1 ± 13.7 12.7~133.5 ^{b)}	38.4 ± 19.9 8.5~225.7	32.5 ± 19.2 6.9~269.2	35.8 ± 19.3 7.7~225.7	51.9 ± 30.9 11.1~219.0	57.9 ± 34.7 9.0~246.7

Table 2. Continued.

	Sinpung	Ingye	Uman	Yeongtong	Cheoncheon	Gosaek	
PM ₁₀ (μg/m ³)	2011	54.8 ± 25.3 17.6~196.2	51.8 ± 35.0 5.9~295.8	45.3 ± 28.8 5.1~276.2	51.9 ± 33.3 5.1~293.3	54.5 ± 35.6 8.9~304.5	56.6 ± 35.5 5.6~302.8
	2012	45.4 ± 22.7 7.0~154.1	45.6 ± 23.3 7.1~157.8	44.0 ± 20.0 5.9~132.5	45.5 ± 21.8 7.0~144.0	47.8 ± 23.6 10.0~170.7	47.3 ± 22.4 7.8~145.8
	2013	52.7 ± 25.9 14.8~171.5	49.9 ± 27.8 10.4~193.0	53.0 ± 29.3 9.7~176.8	50.3 ± 25.9 10.5~176.0	50.4 ± 24.8 14.5~179.1	51.9 ± 26.3 14.3~191.2
	2014	51.2 ± 30.3 10.5~196.0	50.5 ± 29.5 11.1~178.1	46.4 ± 26.9 8.7~167.6	50.9 ± 29.6 9.9~180.8	49.1 ± 26.7 11.4~165.7	52.3 ± 27.3 9.4~167.0

¹⁾ annual mean ± SD

²⁾ 24 hr concentration range (Min~Max), Min = Minimum, Max = Maximum

³⁾ 8 hr concentration range (Min~Max), Min = Minimum, Max = Maximum

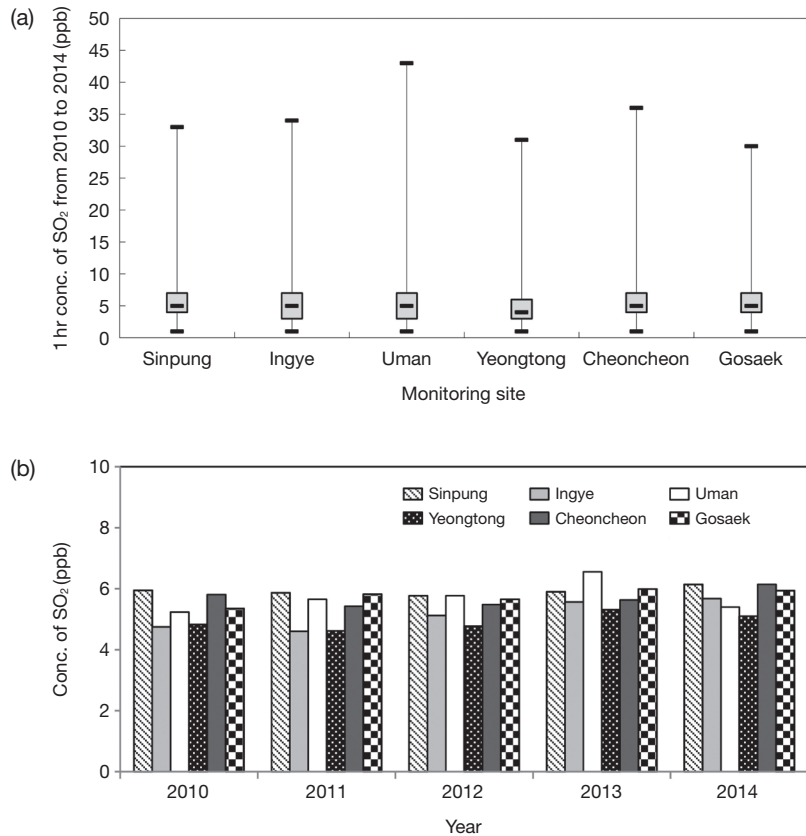


Fig. 2. Box plots of SO₂ average concentrations on 6 sites in Suwon city; (a) 1-hr mean and its range and (b) annual mean for each site.

2010~2014년까지 수원시 SO₂의 1시간 평균농도는 1~43 ppb의 범위로 모든 자료가 시간 기준치인 150 ppb를 훨씬 밑도는 수치를 보였다[그림 2(a)]. 또한 24

시간 평균농도 범위는 1~23 ppb로 일평균 기준치인 50 ppb보다 매우 낮은 수치를 보였다. SO₂ 연평균농도는 지점별 연도별로 4~6 ppb 범위로 큰 기복 없이 일

정한 농도 수준을 보였으며[그림 2(b)], 2014년 연평균 농도는 신평동 6.1 ppb, 인계동 5.7 ppb, 우만동 5.4 ppb, 영통동 5.1 ppb, 천천동 6.1 ppb, 고색동 5.4 ppb로 연평균 기준치인 20 ppb보다 매우 낮은 농도를 보였다. SO₂는 주로 제조업연소, 생산 공정, 에너지산업연소 등 고정오염원의 연료사용에 의해 발생하는데, 수원시의 경우 제조업이 점차적으로 감소할 뿐만 아니라 전국적으로 저황유 사용 확대, 고체연료 사용금지, 청정연료의 사용 의무화 등 연료규제의 효과로 환경기준보다 매우 낮은 농도를 확인할 수 있었다.

2010~2014년까지 수원시의 CO 1시간 평균농도는 0.1~4.4 ppm 범위로 모든 자료가 1시간 기준치인 25 ppm을 훨씬 밑도는 수치를 보였다[그림 3(a)]. 또한 8시간 평균농도 범위도 0.2~2.8 ppm으로 8시간 기준치인 9 ppm보다 매우 낮았다. 2014년 연평균 오염도는

인계동, 우만동, 천천동이 0.6 ppm, 신평동, 영통동, 고색동이 0.7 ppm으로 전국 평균인 0.5 ppm보다 다소 높은 농도값을 보였다[그림 3(b)]. CO는 탄소성분이 불완전 연소할 때 발생하는데, 주요 배출원은 수송부문이며, 산업공정과 비수송부문의 연료연소에서 발생한다. 수원시의 자동차 등록대수는 2013년 12월 기준으로 411,685대(Suwon city, 2014)로 거의 세대 당 1대 꼴을 보이는데, 이와 같은 수송부문 연료연소와 불법 연소에 의한 배출로 판단된다.

이와 같이 우리나라에서 SO₂, CO, Pb 등과 같은 소위 후진국형 오염물질의 농도가 전국적으로 현저하게 감소한 기본적인 이유는 국가의 경제발전 여력과 국민의 환경의식 증대에 힘을 얻은 정부가 오염물질 저감에 대한 확실한 신념과 의지를 가지고, 각종 연료정책을 장기적으로 과감히 추진하였기 때문이다(Kim, 2013).

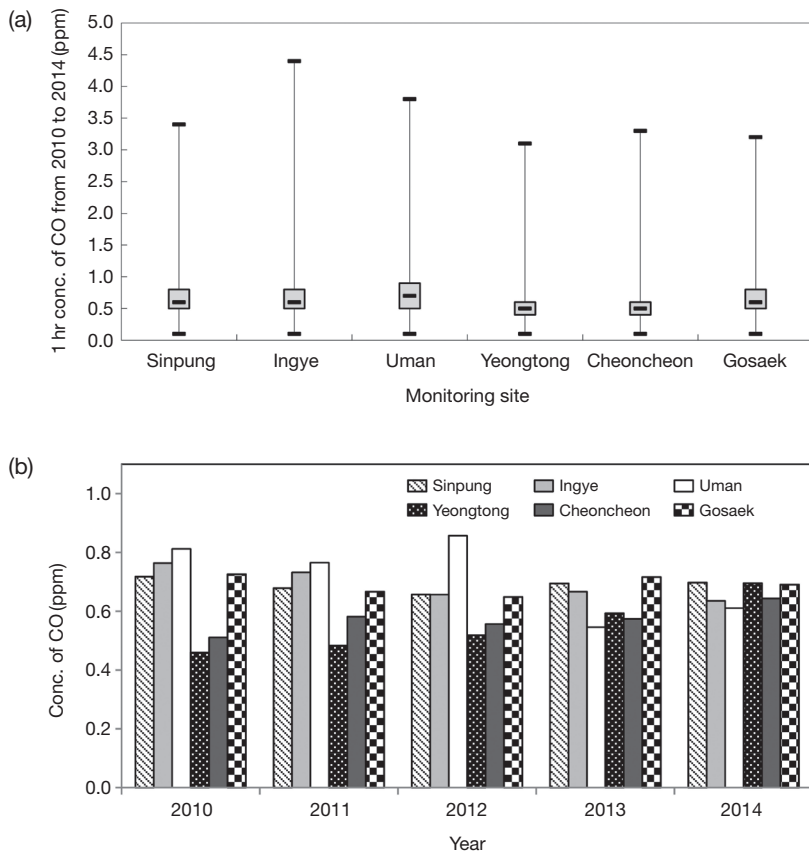


Fig. 3. Box plots of CO average concentrations on 6 sites in Suwon city; (a) 1-hr mean and its range and (b) annual mean for each site.

2010~2014년까지 수원시의 NO₂ 1시간 농도는 1~150 ppb 범위를 보였다[그림 4(a)]. 특히 2014년 시간평균 농도의 999천분위수가 신평동 105 ppb, 인계동 117 ppb, 우만동 102 ppb, 영통동 102 ppb, 천천동 96 ppb, 고색동 88 ppb로 나타났다. NO₂의 시간평균 대기환경기준은 측정자료의 999천분위수가 100 ppb를 초과하지 않아야 하므로, 천천동과 고색동을 제외한 신평동, 인계동, 우만동, 영통동 등 4개 지점이 시간기준을 만족하지 않았다. 또한 NO₂의 일평균 기준은 측정자료의 99백분위수가 60 ppb를 초과하지 않아야 하는데, 수원시 NO₂의 24시간 농도범위는 6~100 ppb 범위를 보였으며, 2014년도 24시간 평균농도의 99백분위수는 신평동 74 ppb, 인계동 77 ppb, 우만동 74 ppb, 영통동 69 ppb, 천천동 65 ppb, 고색동 67 ppb로 전 지역이

24시간 기준을 만족하지 못하였다. 그림 4(b)는 2010년부터 2014년까지 NO₂의 연평균 농도범위를 보여주고 있는데, 그 범위가 31.4~46.1 ppb로서 기준치인 30 ppb를 초과하고 있다. 구체적으로 2014년 연평균 오염도는 신평동 35 ppb, 인계동 37 ppb, 우만동 38 ppb, 영통동 35 ppb, 천천동 33 ppb, 고색동 32 ppb로 모든 지점이 기준을 초과할 뿐만 아니라, 전국 평균인 24 ppb보다 10 ppb 이상 높은 농도값을 보였다. NO₂의 주요 배출원은 이동오염원과 화석연료 발전소 등의 고온 연소원인데, 수원시의 경우 인구밀집에 따른 이동오염원 및 생활오염원에서의 다량 배출, 도처에 산재한 산업체의 보일러, 복합화력발전소, 인근 지자체로부터의 유입 등의 영향 때문으로 전국 평균을 웃도는 것으로 판단된다. NO₂의 대기질을 개선하기 위해서는 이동오염

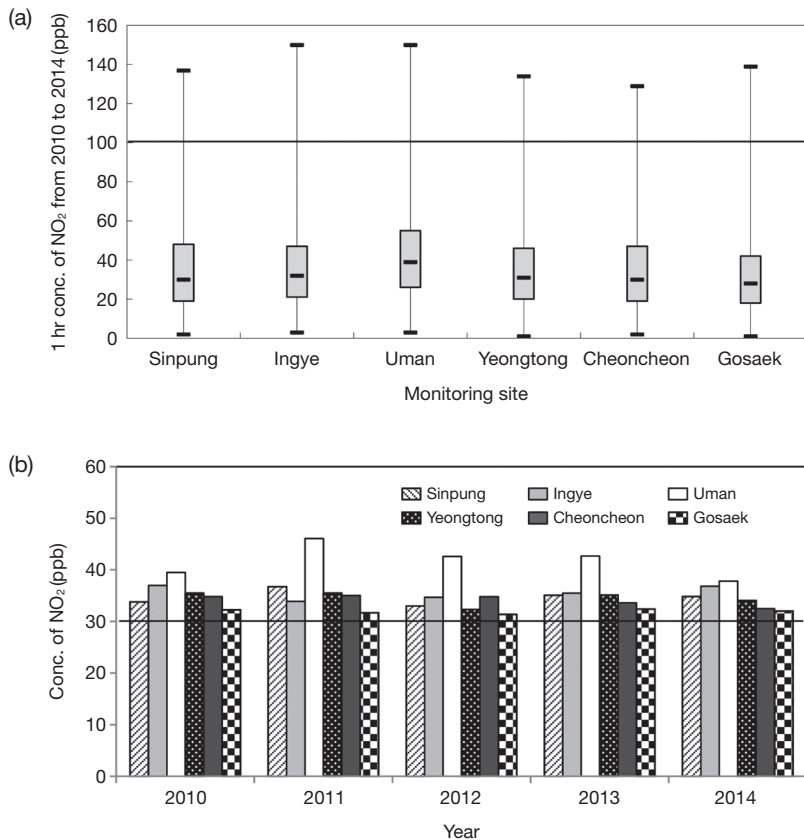


Fig. 4. Box plots of NO₂ average concentrations on 6 sites in Suwon city; (a) 1-hr mean and its range and (b) annual mean for each site. Each solid line in box (a) and box (b) indicates the hourly and the annual NO₂ AAQS in Korea, respectively.

원의 관리가 중요하며 그 밖에 사업장, 주택 등의 점·선 오염원에 대한 관리를 합리적인 대기정책이 수립되어야 한다. 또한 NO₂가 O₃ 생성에 직접적인 영향을 미친다는 점을 고려하여 대기환경 과학 및 기술이 접목된 저감정책을 개발하여야 한다.

2010~2014년까지 수원시 O₃의 8시간 이동평균 농도는 1~114 ppb 범위를 보였다[그림 5(a)]. O₃의 8시간 대기환경기준은 통계치의 99백분위수가 기준 60 ppb를 초과하지 않아야 한다. 2014년 8시간 이동평균 농도의 99백분위수는 신평동 85 ppb, 인계동 80 ppb, 우만동 84 ppb, 영통동 91 ppb, 천천동 84 ppb, 고색동 89 ppb로 모든 지점이 8시간 기준치 60 ppb를 크게 초과하여 환경기준을 달성하지 못하였다.

O₃는 따라서 시민의 건강과 복지를 고려한 현실적인 기준치의 재설정이 필요한 것으로 사료된다. 오존은

만성 호흡질환, 천식 악화, 폐활량 감소, 폐렴, 생체 면역능력의 감소 등을 유발하며, 기관지를 통해 인체 내부로 유입되어 기관지 세포 및 조직에 악영향을 미쳐 기관지 질환과 폐기능의 악화를 초래하므로(Heo *et al.*, 2004; Tiltion, 1989), 대기 중 오존 농도를 저감하기 위한 정책 마련이 필요한 실정이다. O₃는 질소산화물과 휘발성유기화합물 등이 자외선과 광화학 반응을 일으켜 생성된 광화학 2차 오염물질로, 생성정도가 오존의 전구물질(precursor)의 농도와 일사량, 온도, 풍향, 풍속 등 기상조건 및 지역 환경인자와 밀접한 관계가 있다(Heo and Kim, 2004; Vukovich, 1995). 수원시에서 높은 O₃ 농도를 보이는 이유는 수원 전 지역에서 배출되는 고농도 NO₂와 분지형인 수원 주변의 산지(광교산, 청명산, 팔달산 등)에서 배출되는 자연적 VOC 및 각종 인위적 VOC에 의한 광화학반응으로 오존이 생성된

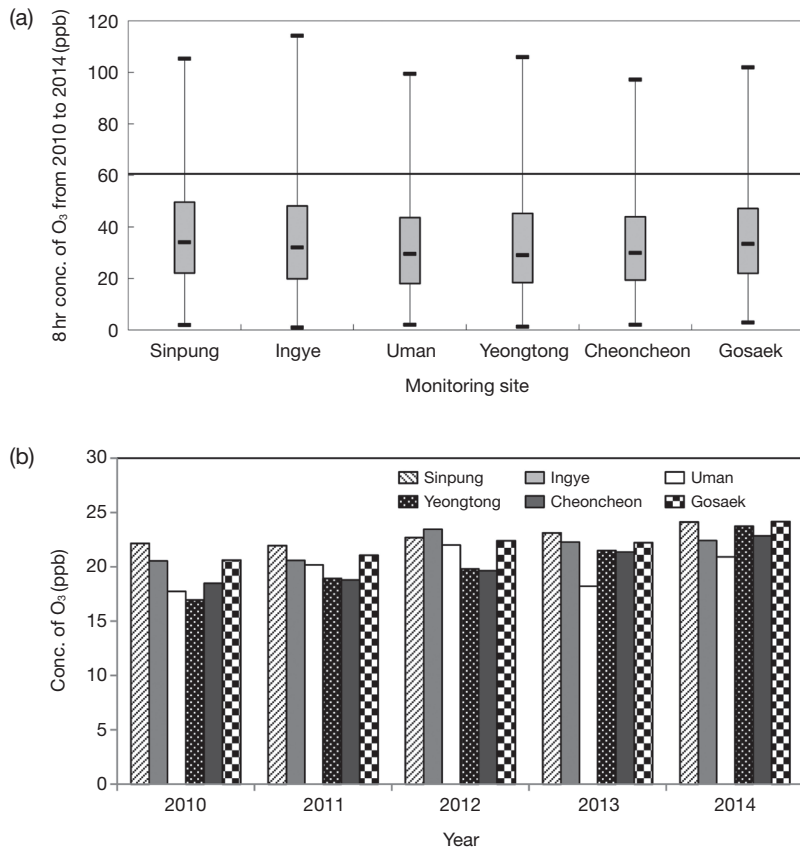


Fig. 5. Box plots of O₃ average concentrations on 6 sites in Suwon city; (a) 8-hr mean and its range and (b) annual mean for each site. A solid line in box (a) and box (b) indicates the 8-hr O₃ AAQS in Korea.

것으로 판단된다. 하지만 오존의 대기 중 농도가 질소 산화물과 VOC의 농도비율과 관련이 있으며, 이 비율은 지역별로 상이하므로 고농도 오존관리를 위해서는 수원시의 질소산화물과 VOC의 면밀한 배출량 조사가 필요하다.

2010~2014년까지 수원시 PM₁₀의 24시간 평균농도는 5~303 µg/m³ 범위를 보였다[그림 6(a)]. PM₁₀의 24시간 대기환경기준은 통계치의 99백분위수가 100 µg/m³를 초과하지 않아야 한다. 2014년 수원시 각 지점의 24시간 평균농도의 99백분위수는 신평동 159 µg/m³, 인계동 162 µg/m³, 우만동 151 µg/m³, 영통동 154 µg/m³, 천천동 145 µg/m³, 고색동 133 µg/m³로 모든 지점이 24시간 기준치 100 µg/m³를 크게 초과하여 환경기준을 달성하지 못하였다. 한편, 그림 6(b)의 2010년부터 2014년

까지 수원시의 연평균 PM₁₀ 농도는 32~58 µg/m³ 범위를 보였다. 2014년 연평균 오염도는 신평동 51 µg/m³, 인계동 50 µg/m³, 우만동 46 µg/m³, 영통동 51 µg/m³, 천천동 49 µg/m³, 고색동 52 µg/m³로 연간 기준 50 µg/m³를 신평, 인계, 영통, 고색동이 초과하였으며 전국 평균인 49 µg/m³보다 다소 높았다. 이들 신평, 인계, 우만, 영통동은 2010년 PM₁₀ 연평균 농도가 40 µg/m³ 이하의 낮은 농도를 보였으나 이후 농도가 크게 증가하였다.

3.2 우리나라, 미국, EU에서 설정한 농도산정법의 비교 검토

2010년부터 2014년까지 수원시 6개 측정지점에서의 SO₂, CO, NO₂, O₃, PM₁₀의 환경기준 달성여부를 우리나라, 미국, EU의 환경기준 산정법을 적용하여 각각

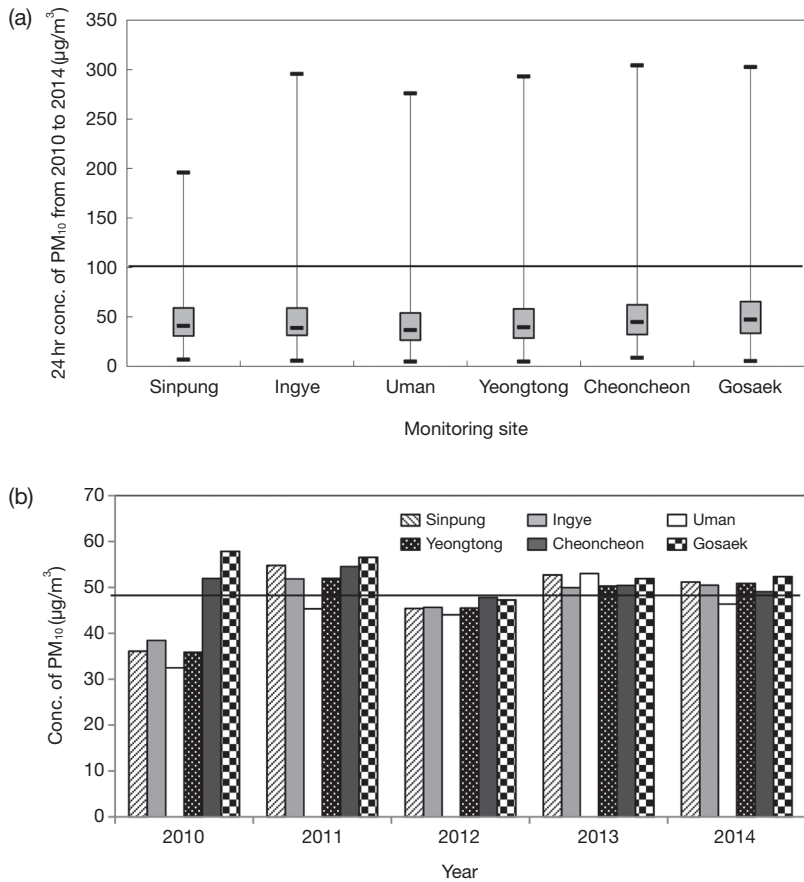


Fig. 6. Box plots of PM₁₀ average concentrations on 6 sites in Suwon city; (a) 24-hr mean and its range and (b) annual mean for each site. Each solid line in box (a) and box (b) indicates the 24-hr and the 1-yr PM₁₀ AAQS in Korea, respectively.

비교 검토하였다. 표 3은 SO₂(1시간), NO₂(1시간), CO(8시간), O₃(8시간), PM₁₀(24시간) 기준에 대한 결과를 각각 비교한 것이다.

SO₂의 1시간 기준은 우리나라, 유럽, 미국 모두 설정하여 운용하고 있으며, 표 3에서와 같이 수원시 6개 지점 모두 각국의 1시간 기준을 100% 달성하고 있다. 24시간 기준은 우리나라와 EU만이 적용하고 있으며 연평균 기준은 우리나라만 적용하고 있는데, 수원시 모든 지점에서 24시간 및 연평균 SO₂ 기준을 달성하였다. 한편, CO의 1시간 기준은 우리나라와 미국이 적용하고 있으며, 우리나라와 미국의 산정법을 각기 적용한 결과 모든 측정지점에서 100% 달성률을 보였다. 또한 8시간 기준은 우리나라, 미국, EU 모두 설정하고 있으며, 표 3에서와 같이 모든 산정결과가 100% 달성률을 보였다.

NO₂의 1시간 기준은 우리나라, 미국, EU가 각각 100 ppb, 100 ppb, 105 ppb로 설정하고 있어 비슷한 수준이었으나, 기준 초과여부를 판단하는 산정법은 크게 다르다. 우리나라에서는 999천분위수가 기준치를 초과하지 않아야 하는데, 이 산정법을 적용한 결과 2010년 6개 지점, 2011년 5개 지점, 2012년 5개 지점, 2013년 6개 지점, 2014년 4개 지점이 미달성이었다. 한편, 미국 EPA 1시간 기준은 최근 3년간 하루 최고 1시간 평균농도의 98백분위수가 100 ppb를 초과하는 경우를 미달성이라 정의하고 있다. 미국 기준을 수원시 자료에 적용한 결과, 우리나라 기준을 적용했을 때보다 미달성 사례가 적었다. 또한 105 ppb를 연간 18회를 초과하지 않아야 하는 EU의 기준을 적용할 경우 미달성 지역은 2010년 1개 지점, 2011년 2개 지점, 2012년 1개 지점, 2013년 5개 지점, 2014년 1개 지점이었다. 단순히 기준 달성여부뿐만 판단할 때 NO₂의 단기기준인 1시간 기준은 우리나라 기준이 미국보다 다소 엄격하였으며, EU에 비해서는 상당히 엄격한 수준임을 알 수 있었다.

한편, NO₂의 24시간 기준은 우리나라에서만 기준을 설정하고 운용하고 있는데, 99백분위수가 60 ppb를 초과할 때 미달성으로 정의하고 있다. 이 기준을 적용한 결과, 2010~2014년까지 수원시 6개 지점에서 모두 미달성이었다. 하지만 장기기준인 연평균 기준은 우리나라, 미국, EU 모두 운용하고 있는데, 우리나라와 EU의 산정법을 적용하면 2010~2014년까지 6개 지점 모두 미달성이었다. 하지만 미국의 산정법을 적용하면 모

두 달성하여 우리 기준이 미국보다 엄격하였으나, EU와 비교하면 다소 느슨하였다.

O₃의 1시간 기준은 우리나라만 기준을 설정하고 있으며, 국내 기준을 적용한 결과 2010년 3개 지점, 2011년 3개 지점, 2012년 4개 지점, 2013년 5개 지점, 2014년 3개 지점에서 미달성이었다. 한편, 8시간 기준은 우리나라, 미국, EU가 각각 60 ppb, 70 ppb, 60 ppb로 설정하고 있다. 각국의 농도 산정법을 적용하여 O₃ 농도를 평가한 결과, 2010~2014년까지 6개 지점 모두 미달성이었다. 수원시뿐만 아니라 2014년 전국 256개 유효 측정소 중 8시간 환경기준 달성률은 0%였다(NIER, 2015). 참고로 우리나라는 1993년에 처음으로 8시간 기준치를 60 ppb로 설정하였는데, 시간농도자료를 통계 처리하여 평균농도를 구할 때 구간평균법(block average)으로 계산하여 당시 이에 대한 문제점이 제기된 바 있었다(Heo *et al.*, 1999). 이후 2001년 제 4차 대기환경기준을 재설정할 때 구간평균법을 이동평균법으로 산출방법을 변경하였으나, 산출법 변경에 따른 기준치의 재설정 작업이 시민단체의 반발을 의식하여 수행되지 않았으며, 현재까지 매우 엄격한 기준을 유지하고 있다. 실제로 2001년 이전에 30%대를 유지하던 환경기준 달성률은 평균산정법 개정 후인 2001년 12.8%로 급감한 바 있다(NIER, 2002). 따라서 국민의 건강과 복지를 우선으로 하면서 통계처리법의 변경에 따른 기준치의 합리적 재설정이 필요하다고 판단된다. 다음 절에 O₃의 기준치 재설정에 관한 분석을 수행하였다.

PM₁₀의 24시간 기준은 우리나라 100 µg/m³, 미국 150 µg/m³, EU 50 µg/m³로 설정하고 있다. 기준치만을 표면적으로 보면 미국이 우리나라보다 완화되어 있고 EU가 강화된 기준처럼 보인다. 하지만 PM₁₀ 기준의 달성여부 판정법은 판이하게 다르다. 미국의 경우 최근 3년간 24시간 평균농도가 150 µg/m³를 1회 이상 초과하면 안 되기 때문에 매우 엄격한 기준이라 할 수 있다. 수원시의 PM₁₀ 측정자료를 우리나라, 미국, EU의 24시간 기준 산정법에 각각 적용한 결과, 우선 우리나라 기준법을 적용할 경우 2010년 신평동을 제외한 모든 지점에서 미달성이었으며, 미국 및 EU 기준법을 적용할 경우 모든 지점이 미달성이었다. 또한 장기기준인 1년 기준은 우리나라와 EU에서만 운용하고 있는데, 우리나라 기준법에 의하면 2010년 4개, 2011년 1개, 2012년 6개, 2013년 1개, 2014년 2개 지점이 환경기준을 달

Table 3. Air quality evaluations according to the ambient air quality standards of Korea, US, and EU.

		Korean method					US EPA method					EU method				
		2010	2011	2012	2013	2014	2010	2011	2012	2013	2014	2010	2011	2012	2013	2014
SO ₂ (1 hr)		999th permillage of 1 hr concentrations (standard: 150 ppb)					99th percentile of 1 hr daily maximum concentrations, averaged over 3 years (standard: 75 ppb)					The number of cases with concentration exceeding the 1 hr standard 130 ppb (permitted case: 24 times per year)				
	Sinpung	20	23	27	22	20	23	23	23	24	23	0	0	0	0	0
	Ingye	20	16	24	19	21	23	20	19	19	21	0	0	0	0	0
	Uman	24	26	32	25	19	27	27	26	26	23	0	0	0	0	0
	Yeongtong	18	21	24	20	21	22	21	20	21	21	0	0	0	0	0
	Cheoncheon	20	26	26	20	21	22	23	23	23	22	0	0	0	0	0
	Gosaek	18	22	26	21	21	22	22	22	22	22	0	0	0	0	0
CO (8 hr)		99th percentile of 8 hr daily maximum concentrations (standard: 9 ppm)					The number of cases with concentration exceeding the standard 9 ppm (permitted case: 1 times per year)					The number of cases with concentration exceeding the 8 hr standard 8.6 ppm (permitted case: 1 times per year)				
	Sinpung	2.0	1.9	1.9	1.9	1.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Ingye	2.3	2.1	1.7	1.8	1.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Uman	2.0	2.0	2.2	1.2	1.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Yeongtong	2.0	1.7	1.6	1.8	1.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Cheoncheon	2.0	2.1	2.1	2.2	2.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Gosaek	2.3	1.9	1.9	2.1	1.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NO ₂ (1 hr)		999th permillage of 1 hr concentrations (standard: 100 ppb)					98th percentile of 1 hr daily maximum concentrations, averaged over 3 years (standard: 100 ppb)					The number of cases with concentration exceeding the 1 hr standard 105 ppb (permitted case: 18 times per year)				
	Sinpung	104	110	102	122	105	102	104	102	101	98	7	21	6	24	9
	Ingye	112	103	104	123	117	106	104	103	103	107	20	7	8	26	34
	Uman	105	125	122	122	102	111	113	113	114	107	9	73	55	20	5
	Yeongtong	108	102	99	109	102	97	101	100	96	96	11	5	1	14	4
	Cheoncheon	105	106	102	117	96	102	102	101	99	94	8	9	2	16	5
	Gosaek	107	95	106	120	88	94	94	95	93	91	9	2	9	21	0
O ₃ (8 hr)		99th percentile of 8 hr daily maximum concentrations (standard: 60 ppb)					Annual fourth-highest daily maximum 8 hr concentration, averaged over 3 years (standard: 70 ppb)					The number of cases with concentration exceeding the 8 hr standard 60 ppb (permitted case: 25 times per 3 years)				
	Sinpung	95	92	85	89	85	91	92	94	91	87	140	149	146	159	170
	Ingye	102	95	89	86	80	102	101	97	91	86	171	141	141	153	159
	Uman	84	90	86	75	84	83	85	89	86	84	69	78	113	114	117
	Yeongtong	82	79	79	83	91	80	82	82	82	86	82	80	80	117	163
	Cheoncheon	85	78	70	83	84	87	83	79	79	81	115	94	76	95	117
	Gosaek	82	81	84	84	89	85	85	85	85	88	119	110	104	125	161
PM ₁₀ (24 hr)		99th percentile of 24 hr PM ₁₀ concentrations (standard: 100 µg/m ³)					The number of cases with concentration exceeding the standard 150 µg/m ³ , averaged over 3 years (permitted case: 1 time per 3 years)					The number of cases with concentration exceeding the 24 hr standard 50 µg/m ³ (permitted case: 35 times per year)				
	Sinpung	87	153	121	147	159	5	8	6	10	11	38	188	125	160	148
	Ingye	111	180	120	149	162	19	19	10	13	11	51	156	130	145	147
	Uman	107	157	101	162	151	9	10	6	9	9	36	109	111	108	132
	Yeongtong	110	173	114	143	154	17	17	9	11	7	42	159	125	149	149
	Cheoncheon	179	197	126	138	145	23	22	16	11	6	147	164	129	145	141
	Gosaek	193	187	115	143	133	26	29	18	14	5	184	186	135	158	161

성하였으며, EU 기준법을 적용할 경우 2010년 4개 지점이 달성하였으며, 다른 연도에는 6개 지점 모두가 미달성이었다.

3.3 평균농도거리에 의한 각국의 기준 강도 비교

대기환경기준의 달성여부를 판정할 때, 우리나라는 측정농도의 백분위수 및 천분위수 개념을 사용한다. EU는 측정농도의 특정 농도치에 대한 초과횟수 개념을 사용하고, 미국은 측정농도의 백분위수, 초과횟수 및 측정 최고농도의 출현순위 개념을 혼용하고 있다. 따라서 본 연구 사례처럼 연구대상 사례수가 작아 기준 강도(standard strength)를 추정하기 어렵거나, O₃와 PM₁₀의 경우처럼 거의 모든 사례가 미달성이라면 기준 강도의 상대적 비교는 매우 어렵다.

앞 절에서 2010년부터 2014년까지의 수원시 모니터링 자료를 이용하여 한국, 미국, EU의 대기환경기준과 농도산정법을 비교한 바 있는데, 각 기준의 달성여부만으로는 기준 강도를 판정하기에 무리가 있었다. 예를 들어, 표 4에서와 같이, O₃의 8시간 기준에 대해, 한국, 미국, EU의 기준을 각각 적용하였을 때 모든 사례(5개 연도×6개 지역=30개 사례)가 미달성이었으며, PM₁₀의 24시간 기준 역시 한국, 미국, EU의 기준을 적용했을 때 미달성 사례가 각각 29회, 30회, 30회로 한국의 기준이 다소 강하였지만 그 강도를 직접 비교하는 것은 무리였다. 하지만 미달성 횟수가 엇비슷함에도 불구하고 각국이 정한 농도기준을 초과한 정도는 크게 달랐다.

따라서 본 연구에서는 한국, 미국, EU의 기준 강도를 정량적으로 비교하기 위해, 군집분석(cluster analysis)에서 사용하는 맨해탄거리법(Manhattan distance 또는 city-block distance) 개념을 활용하였다(Kowalski, 1977). 즉, 각국의 기준농도 값을 초과하여 분포된

측정농도의 거리(즉, 측정농도-기준농도)를 30개 사례 각각에 대해 계산하고 평균농도거리(ACD: average concentration distance)를 구하였다. 구체적으로 ACD란 우선 30개 사례 중 미달성 사례에 한정하여, 특정된 기준치를 초과하여 벗어난 절대 농도치를 모두 합산하고 그 값을 미달성 사례수로 나눈 거리를 의미한다. 이에 따라 각국의 상이한 달성도 판정법에도 불구하고 농도값으로 표현된 평균거리를 얻을 수 있었다.

본 연구에서는 30개의 사례 중 우리나라 기준의 경우에는 백분위수 또는 천분위수 기준치를 초과할 때 각 사례별로 거리를 구한 후 최종 ACD를 계산하였으며, EU 경우처럼 달성 여부를 초과횟수로 판단하는 경우에는 일단 사례별로 기준치를 넘는 모든 측정자료의 농도에 대해 기준치에서의 초과농도 거리를 구하고, 이 방법을 모든 미달성 사례에 적용한 후 합산된 거리를 총 미달성 사례수로 나누어 최종 ACD를 계산하였다. 표 4는 2010년부터 2014년까지 5년간 6개 지점(30개 사례)에서 O₃와 PM₁₀ 각각에 대해 8시간 및 24시간 기준에 대한 미달성 횟수와 기준점에서 벗어난 ACD를 보여주고 있다. 참고로 기준치가 감소할수록 측정치와 기준치의 차이가 증가하므로 ACD가 증가하며 기준 강도는 강해진다. 즉, 국가 간 기준 강화도를 비교할 때 동일한 미달성 횟수를 보이지만 ACD가 상대적으로 크다는 의미는 그 국가의 기준이 엄격하다는 의미이다.

3.3.1 O₃ 8시간 기준의 강도 평가

현행 운용되는 한국, 미국, EU의 산정법을 적용할 때 표 4에서와 같이 수원시의 모든 사례가 미달성이었으며, 한국, 미국, EU의 기준에서 초과한 ACD는 각각 25 ppb, 17 ppb, 12 ppb를 보였다. 즉, 기준 강화도는 한국, 미국, EU 순을 보여 우리나라의 기준이 상대적으로 가장 엄격하였다.

Table 4. The number of non-attainment cases and the average concentration distances (ACD) exceeded from each specific standard for 30 cases in Suwon City, Korea.

	Korea		US EPA		EU	
	No. of non-attainment	ACD ¹⁾	No. of non-attainment	ACD	No. of non-attainment	ACD
O ₃ (8 hr)	30	25 ppb	30	17 ppb	30	12 ppb
PM ₁₀ (24 hr)	29	46 µg/m ³	30	39 µg/m ³	30	25 µg/m ³

¹⁾ACD: average concentration distance

이와 같이 우리나라에서 O₃의 8시간 기준은 가장 엄격하지만, 반면 PM₁₀의 24시간 기준은 가장 완화되어 있었다. 본 연구에서는 이와 같이 엄격하거나 완화된 우리나라의 백분위수 기준 또는 농도기준을 조금씩 변화시켜가면서 미국과 EU가 각각 설정한 기준에 근접하도록 모사하고 우리나라의 기준 강도를 검토하였다.

그림 7은 우리나라 8시간 기준 산정법을 적용한 결과로서 기준치를 60 ppb로 동일하게 유지한 상태에서, 현행 기준인 99백분위수에서 시작하여 미달성 횟수가 변할 때까지 단계별로 완화시키면서 미달성 횟수와 ACD를 각각 계산한 결과이다. 참고로 본 연구에서는 기준 완화 시 시민단체의 농도에 대한 거부감을 고려하여 기준농도 대신 환경기준 달성 여부를 판단하는 백분위수의 변화율만을 조사하였다. 그림 7에서와 같이 95백분위수에 도달할 때까지 미달성 횟수는 30회였으며 ACD는 이에 상응하여 점진적으로 감소하였다. 이 그림에서 미달성 사례(그림 box에서 어두운 부분)에 대해서 표 4에서 계산된 미국의 ACD(17 ppb) 및 EU의 ACD(12 ppb)를 대응시킨 결과, 미국 및 유럽 기준에 가까운 우리나라 기준은 각각 97.5백분위수 및 95.7백분위수였다. 현재 대부분의 지역에서 오존의 환경기준이 초과하고 있으며, 다른 국가에 비해 상대적으로 엄격한 기준이 적용되고 있어 행정적인 목표기준치로 현행 오존의 대기환경 기준은 합리적인 재설정

필요하다고 판단된다.

3.3.2 PM₁₀ 24시간 기준의 강도 평가

표 4에 의하면 PM₁₀ 24시간 기준의 한국, 미국, EU의 미달성 횟수는 각각 29회, 30회, 30회로 우리나라의 기준이 가장 약하였다. 또한 모든 사례가 미달성을 보인 미국과 EU 기준의 경우, 기준을 초과한 ACD가 각각 39 µg/m³, 25 µg/m³로 계산되어 미국의 기준이 EU보다 엄격하였다. 이를 통해 PM₁₀ 24시간 기준은 미국, EU, 한국 순으로 엄격하였다. 우리나라는 상대적으로 완화된 기준을 가지고 있음에도 불구하고 2010년~2014년까지 수원시의 6개 측정망에서 PM₁₀의 24시간 기준 달성률은 겨우 3.3%를 보여 PM₁₀ 오염이 극심함을 알 수 있었다.

한편 PM₁₀의 경우, 오존의 기준완화 경우와는 달리, 현기준보다 강화를 목적으로 우리나라의 24시간 기준을 99백분위수로 동일하게 유지한 상태에서, 기준치만을 100 µg/m³에서 1 µg/m³씩 줄여가면서(즉, 기준을 강화하면서) 미달성 횟수가 30회 될 때까지 모사하였다. 표 5에서와 같이, 결과 기준치가 86 µg/m³일 때 비로소 수원시의 전체 사례가 미달성이 되었다. 이 한계기준치에서의 ACD는 58 µg/m³로 조사되었는데, 이 ACD는 미국의 39 µg/m³ 및 EU의 25 µg/m³보다는 큰 값을 보여 이 기준치는 매우 엄격한 수준이라고 판단된다.

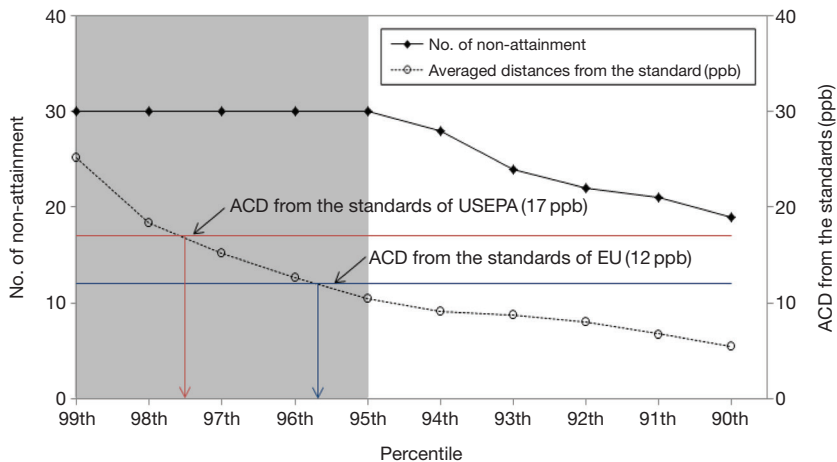


Fig. 7. The frequency of non-attainment (left axis) and the ACD (right axis) for the Korean 8-hr standard of ozone (60 ppb) which were calculated by changing the degree of percentile based on air quality monitoring database in Suwon City. The shaded area in the box occupies all the non-attainment cases and the figure also provides ACD levels of corresponding USEPA and EU standards.

Table 5. The number of non-attainment cases and the average concentration distances (ACD) exceeded from each specific PM₁₀ 8-hr standard for 30 cases in Suwon City, Korea.

	Korean method				USEPA method		EU method	
	Current standard: 100 µg/m ³		Est. Standard ¹⁾ : 86 µg/m ³		No. of non-attainment	ACD	No. of non-attainment	ACD
	No. of non-attainment	ACD ²⁾	No. of non-attainment	ACD				
PM ₁₀ (24 hr)	29	46 µg/m ³	30	58 µg/m ³	30	39 µg/m ³	30	25 µg/m ³

¹⁾ Estimated standard : the numerical value of 86 was calculated when all the cases in Suwon City were classified as non-attainment area

²⁾ ACD: average concentration distance

만약 미국과 유럽의 기준에 근접하는 우리나라의 기준을 재설정한다면, 전국적인 충분한 측정자료를 기반으로 한 심층적인 연구가 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 2010년부터 2014년까지 수원시 6개 대기오염측정소의 자료를 이용하여 우리나라의 대기질 수준을 분석하였으며, 대기환경기준과 산정법이 서로 다른 한국, 미국, EU의 경우를 비교 분석하고 우리나라 기준의 상대적 강도를 평가하였다.

우선 수원시 SO₂와 CO의 대기질 농도는 매우 낮았으며 각국에서 설정한 환경기준을 100% 만족하였다. 특히 SO₂의 경우 미국과 EU와 달리 우리나라는 장기기준인 연평균 기준을 운용하고 있는데, 극히 낮은 농도수준에서 전국적으로 또한 장기적으로 기준을 충족하고 있으므로 SO₂의 장기기준은 폐지할 필요가 있다고 사료되었다.

한편 수원시 NO₂의 1시간 평균 농도를 한국, 미국, EU의 기준과 비교할 때, 우리나라의 기준은 미국보다는 다소 엄격하였으며 EU보다는 다소 완화되어 있었다. 연평균 농도는 미국기준을 100% 만족하였으나 한국과 EU의 기준은 100% 만족하지는 못하여 우리나라의 기준이 미국보다는 엄격함을 알 수 있었다. 현재 우리나라 NO₂의 장·단기 기준은 비교적 엄격하게 설정되어 있어 대부분 수원시 사례는 미달성을 보였다.

수원시 O₃의 8시간 평균 농도를 한국, 미국, EU의 기준에 적용한 결과, 모든 사례가 미달성이었다. 수원시 사례를 평균농도거리(ACD) 개념을 도입하여 분석

한 결과 우리나라 기준이 미국과 EU보다 매우 엄격하였다. 이는 2001년도에 O₃의 8시간 기준산정법이 기존의 구간평균에서 이동평균으로 변경되면서 이에 상응하는 기준이 재설정되지 않았기 때문이다. 또한, O₃의 경우 1시간 단기기준은 우리나라만 적용하고 있는데, 일부 지역은 8시간 기준을 적용할 때 모든 사례가 미달성이었지만 1시간 기준을 적용할 때 달성으로 평가되기도 하였다. 따라서 O₃ 기준의 경우 단기기준인 1시간과 8시간 기준을 모두 설정하기보다는 1시간 기준보다 보수적인 8시간 기준만을 단기기준으로 통일하고 단일화할 필요가 있다. 우리나라 8시간 기준치를 60 ppb로 동일하게 유지한 상태에서, 미국 및 유럽 기준에 근접한 우리나라의 기준은 각각 97.5백분위수 및 95.7백분위수였다.

PM₁₀의 24시간 기준은 미국, EU, 한국 순으로 우리나라가 가장 완화되어 있었으며 연평균 기준도 EU보다 매우 완화되어 있었다. 그럼에도 달성률은 매우 낮아 수원시 PM₁₀ 오염은 매우 심각하였다. 기준의 달성도 측면에서 미국과 EU 기준에 가까운 PM₁₀의 24시간 한계기준치는 86 µg/m³였다.

결론적으로 수원시의 규제 대기오염물질 중 SO₂, CO 등은 환경기준을 충분히 달성하고 있었으며, NO₂의 1시간 기준은 우리나라 기준이 미국보다 다소 엄격하였고, O₃의 8시간 기준은 우리나라가 미국과 EU보다 매우 엄격하였으며, PM₁₀의 장단기 기준은 우리나라가 가장 완화되어 있었다. 합리적인 대기환경기준을 설정하기 위해서는 공중보건을 보호할 정도로 엄격해야 하며, 이 기준의 엄격성은 미달성 시 실질적으로 강제할 수 있는 수준이 되어야 한다. 무엇보다 행정 목표 형태의 기준설정보다 대기오염물질의 농도 수준을 낮

추는 정책과 관리방안의 개발이 시급하다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부의 재원으로 미래철도기술연구사업(16RTRP-B0822486-03)의 연구비를 지원받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Anderson, H.R. (2009) Air pollution and mortality: A history, *Atmospheric Environment*, 43, 142-152.
- European Commission (2016) <http://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm> (accessed on Aug. 18, 2016).
- EPA (2016) <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqstable> (accessed on Aug. 18, 2016).
- Fairley, D. and C.L. Blanchard (1991) Rethinking the ozone standard, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 41(7), 928-936.
- Gao, Y., E.D. Nelson, M.P. Field, Q. Ding, H. Li, R.M. Sherrell, C.L. Gigliotti, D.A. Van Ry, T.R. Glenm, and S.J. Eisenreich (2002) Characterization of atmospheric trace elements on PM_{2.5} particulate matter over the New York-New Jersey harbor estuary, *Atmospheric Environment*, 36, 1077-1086.
- Heo, J.S., T.O. Kim, and D.S. Kim (1999) A comparative study on ambient air quality standard for ozone, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 15(2), 159-173.
- Heo, J.S. and D.S. Kim (2004) A new method of ozone forecasting using fuzzy expert and neural network systems, *Science of the Total Environment*, 325(1), 221-237.
- Heo, J.S., K.H. Kim, and D.S. Kim (2004) Pattern recognition of high O₃ episodes in forecasting daily maximum ozone levels, *Terrestrial, Atmospheric, and Oceanic Sciences*, 15(2), 199-220.
- Jang, J.S and J.P. Jung (2012) Estimation of the probability of exceeding PM_{2.5} standards in Busan, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 28(6), 697-705. (in Korean with English abstract)
- Kim, D.S. (2013) Air pollution history, regulatory changes, and remedial measures of the current regulatory regimes in Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29(4), 353-368. (in Korean with English abstract)
- Kim, H.K. (2002) Analysis of environmental policy in US and KOREA, *Reformation of Environmental Legislation*, 22, 401-402.
- Kowalski, B.R. (1977) *Chemometrics: Theory and Application*, ACS Symposium Series, ACS, Washington, D.C.
- Miller, K.A., D.S. Siscovick, L. Sheppard, K. Shepherd, J.H. Sullivan, G.L. Anderson, and J.D. Kaufman (2007) Long-term exposure to air pollution and incidence of cardiovascular events in women, *The New England Journal of Medicine*, 356, 447-458.
- MOE (2010) Ministry of Environment, Operating Plan of Air Quality Measurement Network (2011-2015).
- MOE (2014) Ministry of Environment, 2014 White Paper of Environment.
- MOE (2016) Ministry of Environment, <http://eng.me.go.kr/eng/web/index.do?menuId=253&findDepth=1> (accessed on Aug. 18, 2016)
- NIER (2002) National Institute of Environmental Research, Annual Report of Air Quality in Korea 2001.
- NIER (2015) National Institute of Environmental Research, Annual Report of Air Quality in Korea 2014.
- NIER (2016) National Institute of Environmental Research, Annual Report of Air Quality in Korea 2015.
- Suwon City (2014) The 53th Suwon Statistical Year Book.
- Tiltion, B.E. (1989) Health effects of tropospheric ozone, *Environmental Science & Technology*, 23(3), 257-263.
- Vukovich, F.F. (1995) Regional-scale boundary layer ozone variations in the Eastern United States and their association with meteorological variations, *Atmospheric Environment*, 29(17), 2259-2273.
- WHO (2016) Ambient (outdoor) air quality and health, Fact sheet No 313, Updated March 2014, <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/en/> (accessed on Aug. 18, 2016).
- Yu, S.D. and W.P. Hong (2012) A study on the effects of fine particles to satellite signal, *The Korea Institute of Electronic Communication Science*, 7(1), 125-134. (in Korean with English abstract)