

서울시 용산구 지역에 이산화황 농도의 시계열 변동과 영향인자 분석

김보원 · 김기현*

한양대학교 건설환경공학과, 133-791, 서울특별시 성동구 왕십리로 222

The Analysis of Time Series of SO₂ Concentration and the Control Factor in An Urban Area of Yongsan-gu, Seoul

Bo-Won Kim and Ki-Hyun Kim*

Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

Abstract: The environmental behavior of SO₂ was investigated in terms of the factors affecting the temporal variabilities by analyzing the data sets obtained from the Yongsan district in Seoul from 2004 till 2013. To this end, the relationship between SO₂ and relevant parameters including particulate matters (such as PM_{2.5}, PM₁₀, and TSP (total suspended particulates)) and gaseous components (CH₄, CO, THC (total hydrocarbon), NMHC (non-methane hydrocarbon), NO, NO₂, NO_x, and O₃) was investigated in several aspects. Over a decade, the annual mean concentrations of SO₂ varied in the range of 4.36-5.86 nmole mole⁻¹ (min-max) which was about five times lower than the regulation guideline set for the air quality management in Korea. In fact, this pattern greatly contrasts with some other air pollutants of which concentrations exceeded their guideline values significantly. According to our analysis, SO₂ was strongly correlated to the temperature and other relevant parameters. The overall results of this study confirm that the administrative regulation of SO₂ levels has been made effectively relative to other airborne pollutants.

Keywords: sulfur dioxide, Yongsan-gu, pollution, meteorological condition

요약: 서울특별시 용산구의 측정망에서 2004년부터 2013년간 관측한 대기질 자료를 중심으로 SO₂의 환경거동을 시간적 기준으로 다양한 관점에서 분석하였다. 이와 동시에 관측한 기타 대기오염물질들(PM_{2.5}, PM₁₀, TSP, CH₄, CO, NO, NO₂, NO_x, O₃, THC, NMHC)의 농도자료와 기상자료들과의 관계를 해석하는 방식으로 SO₂의 거동을 조사하였다. 10년간 측정된 용산구 지역에서 측정된 SO₂의 연간 평균농도는 대기환경기준치인 20 nmole mole⁻¹보다 5배 정도 낮은 4.36-5.86(최저-최고) nmole mole⁻¹ 수준으로 나타났다. 이는 연간 평균농도가 관리기준치를 초과하는 성분들과 뚜렷하게 대조적인 양상을 보였다. 여러 가지 통계적 기법을 적용하여 SO₂의 배출량에 영향을 미치는 요인들을 파악하였다. 그리고 용산구에서 측정된 SO₂와 기타대기오염물질, 기상자료들의 경향성을 비교해보았다. SO₂은 온도 및 기타물질들에 대한 상관성이 있는 것으로 나타났다. 또한 본 연구의 결과에 의하면, SO₂은 다른 대기오염물질들에 비해 상대적으로 관리가 잘 이루어지고 있다는 것을 확인할 수 있다.

주요어: 이산화황, 용산구, 오염물질, 기상요소

*Corresponding author: kkim61@hanyang.ac.kr
Tel: +82-70-7560-9151
Fax: +82-2-2220-1945

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

현대 사회의 발전과 대기, 토양, 수질을 위시한 환경 시스템에는 많은 변화가 함께 나타나고 있다. 시간이 지남에 따라 파괴된 환경도 자연스럽게 회복하기 마련이지만, 자연이 회복하는 속도보다 사람들에 의한 환경의 파괴속도가 더 빠르기 때문에 오염 상태의 회복은 점

점 한계점에 다다르고 있다. 이를 조절하기 위해, 대기 중 오염의 정도와 그에 대한 원인을 파악하는 것이 시급하다. 이런 과정의 일환으로 대기오염물질의 계측과 함께 대기의 물리화학적 현상을 해석하기 위해, 다양한 방식으로 접근하기 위한 노력이 이어져 왔다(Koo and Kim, 2004; Kim and Chung, 2007).

지금 인류에게 가스, 석탄, 석유등과 같은 화석연료는 가장 중요한 에너지자원이다. 이런 화석연료의 사용으로 인해, 황산화물(SOx), 질소산화물(NOx) 등과 같은 대기오염물질들이 발생한다. 이러한 현상은 다시 스모그 현상, 산성비와 같은 심각한 환경문제를 유발하는 것으로 알려져 있다(Choi et al., 2006). 따라서 대부분의 국가는 이들 오염물질에 대한 배출량을 법적으로 강력하게 규제하고 있다(Korean ministry of environment, 2014). 이들의 배출과 오염에 대한 심각성은 1952년도의 런던스모그 참사와 같은 대규모 대기오염사건 등을 통해 잘 알려지게 되었다. 당시 화석연료의 사용량이 일시적으로 급격히 증가함으로써, 주요 대기오염물질들의 농도가 심각한 수준(이산화황(SO₂): 1.3 μmole mole⁻¹, 일산화탄소(CO): 0.2-0.5%, 분진: 4.5 mg m⁻³)으로 증가하였다. 이로 인해, 많은 인명피해가 발생하였다(Cho, 1991). 또한, 산성비로 식물의 엽육세포 파괴와 그에 따른 비정상적 성장(Evans and Curry, 1979), 활성산소 생성과 이로 인한 산화스트레스 등의 피해와 같은 문제점도 잘 알려져 있다(Koricheva et al., 1997). 특히 SO₂는 대기 중에서 여러 단계의 화학작용을 거치며 황산(H₂SO₄) 또는 H₂SO₄은 황산염(SO₄²⁻) 에어로졸로 존재하며, 생태계에 다양한 형태로 영향을 미친다(Bae and Kim, 2003). 이와 같이 SO₂는 사람과 자연에 직접적인 영향을 미치기 때문에, 사람들이 밀집한 대도시환경에서 SO₂의 발생원인 그리고 다른 대기오염물질이나 주변 기상자료들과의 연관성을 파악하는 것이 중요하다. 이미 선행연구의 일환으로 국내 도심지역을 중심으로 주요 대기오염물질들의 장기적 추이를 비교 분석하였다(Kim, 1996).

본 연구에서는 서울시 용산구의 대기오염측정망을 통해 2004년부터 2013년까지 관측한 주요관리대상 대기오염물질들의 시간대별 농도자료를 토대로, SO₂의 배출특성을 다양한 관점에서 해석하고자 하였다. 특히, SO₂와 동시에 측정된 대기오염물질 및 주변 기상자료를 동시에 비교 분석하는 방식으로 다양한 통계분석을 하였다.

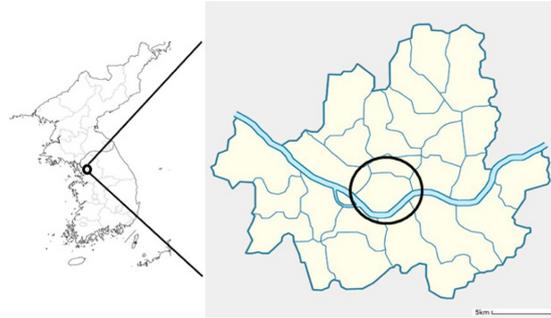


Fig 1. Geographical location of the Yongsan-gu (YS) district in Seoul, Korea.

연구방법

측정지점의 정보

본 연구에서는 SO₂의 시간적 분포특성을 파악하기 위해, SO₂와 동시에 관측한 주요 대기오염물질들(미세먼지(PM_{2.5}, PM₁₀), 총 부유먼지(Total suspended particulates, TSP), CH₄, CO, 일산화질소(NO), NO₂, NOx, 오존(O₃), 총 탄화수소(Total hydrocarbon, THC), 비메탄 탄화수소(Non-methane hydrocarbon, NMHC)의 농도와 기상요소를 측정하였다. 이를 위해, 서울특별시 용산구(GS: 37°32'18"N, 126°57'56"E) (Fig. 1)의 측정소에서 2004년 1월부터 2013년 12월까지 10년 동안 자료를 수집하였다. 자료를 분석하기에 앞서 시간단위로 측정된 자료 (24개 1 day⁻¹)를 기반으로 평균값을 산출하여 일자료를 중심으로 기본적인 분석을 실시하였다. 측정기기의 오류 등으로 일정 부분의 자료를 확보하지 못한 경우, 일 기준 2/3 이상의 시간자료를 확보한 경우(n≥16)에만 일자료로 전환하여 사용하였다.

지리적으로 서울특별시의 중앙에 위치한 용산구는 서울시 전체 인구의 2.44%에 해당하는 255,294명이 거주하고 있다(Seoul metropolitan government, 2012). 그리고 용산구의 세대수는 110,706, 그리고 인구밀도는 11,674명 km⁻²를 기록하고 있다(참고로 서울시의 평균인구밀도 17,255명 km⁻²). 용산구는 21.87 km²의 면적을 유지하며, 주거지역 11.43 km² (52.3%), 녹지지역 8.95 km² (41.0%), 상업지역 1.47 km²(6.7%)으로 나눌 수 있다. 또한 대기환경오염물질(가스, 먼지, 매연 및 악취)의 배출원은 4종(연간 오염물질배출량: 2톤≤a<10톤, 1일 평균 폐수배출량: 50 m²≤a<200 m²)에 해당하는 시설 2개소, 5종(기타 배출시설 또는 소

Table 1. Information of the analytical system used for the measurements of SO₂ and relevant parameters in this study

Order	Compound	Model Number	Manufacturer	Country	Method
1	SO ₂	SA-633	KIMOTO	Japan	UV fluorescence method
2	PM _{2.5} , PM ₁₀ , TSP	FH62 C-14	TEC	USA	β -Ray absorption method
3	CO	ZRF	FUJI	Japan	Non-dispersive infrared absorption method
4	NO, NO ₂ , NO _x	NA-623	KIMOTO	Japan	Chemiluminescence method
5	O ₃	OA-683	KIMOTO	Japan	UV absorption method
6	CH ₄ , THC, NMHC	HA675	KIMOTO	Japan	Hydrogen flame ionizing detection method (FID)
7	Temp	HMP45A	VAISALA	Finland	100 Platinun resistor sensor
8	RH	HMP45A	VAISALA	Finland	Semi conductor type
9	UV	-	-	-	UVradiometion of sun
10	Solar	LI200SZ	LI-COR	USA	-
11	WS	WM05103	R.M.YOUNG	USA	Propeller pulse Meethod

음진동 배출시설 사업장, 폐수배출량은 용수사용량을 기준)에 해당하는 시설 6개소로 총 8개소가 있다. 본 연구에서 위에 언급한 기본적인 정보를 바탕으로, 주 조사대상인 용산구 측정망에 대한 SO₂의 오염상태를 조사하였다.

성분별 기기분석 방법

SO₂ 및 기타 조사대상의 성분들은 각기 적절한 측정방법을 적용하여, 매 시간별 자료를 확보하였다. 본 연구에서 주 조사대상으로 선정한 SO₂은 자외선 형광법에 기반을 둔 SA-633 Sulfur Dioxides Analyzer (SA-633, KIMOTO, Japan)를 사용하여 실시간 측정하였다. 본 장비는 SO₂를 0-1 $\mu\text{mole mole}^{-1}$ 범위 내에서 측정가능하고, 최소검출한계는 1 nmole mole⁻¹에 해당한다. 시료는 0.3 L min⁻¹의 유속으로 주입하여, 0-40°C 범위내의 시료를 분석가능하다. 미세먼지 (PM_{2.5}, PM₁₀, TSP)를 측정하기 위해 베타선흡수방식을 이용하는 Thermo Scientific FH 62 C14 Continuous Particulate Monitor (FH62 C-14, TEC, USA)로 실시간 측정을 하였다. 측정 가능한 범위는 0-10,000 μm^{-3} (1시간 평균기준)이며, 최소검출한계는 4 μm^{-3} (1시간 평균기준)이다. 샘플링 유속은 0.6 L min⁻¹이고, -30-60°C 범위 내에서 시료의 분석 가능하다.

NO_x성분은 화학발광법에 기반을 둔 NA-623 (KIMOTO, Japan)를 이용하여 분석하였다. 측정범위는 0-1 $\mu\text{mole mole}^{-1}$ 이고, 최소검출한계는 1 nmole mole⁻¹부터 검출이 가능하다. 샘플링 유속은 0.8 L min⁻¹이고, 0-40°C 범위내의 시료를 분석가능하다. 이외, CO성분은 비분산적외선흡수법을 이용한 NDIR gas analyzer (ZRF, FUJI, Japan)를 사용하였다. O₃는 자외선광도법을 이용한 OA-683 Ozone Analyzer

(OA-683, KIMOTO, Japan)로 측정하였다. Hydrocarbon (HC) 성분은 수소이온화검출기법을 이용한 Hydrocarbon Analyzer (HA675, KIMOTO, Japan)을 이용하였다. 그리고 주변 외부기상요소도 각각의 측정장비를 통해 동시측정을 실시하였다(온도(Temperature, Temp), 습도(Relative humidity, RH: HMP45A, VAISALA, Finland), Ultraviolet (UV), 태양광 (LI200SZ, LI-COR, USA), 풍속(Wind speed, WS: WM05103, RM.YOUNG, USA)) (Table 1).

결과 및 토의

용산지역 대기오염의 현황

본 연구의 조사대상인 용산구 지역에서는 2004년부터 2013년까지 10년간 매시간 단위로 SO₂ 농도를 관측하였다. 본 연구에서는 이들 기본자료를 일기준으로 전환하고, 이렇게 전환한 자료를 토대로 다양한 시간적 관점(월, 계절, 연간주기 등) SO₂의 환경거동을 조사하고자 하였다. 이를 위해, 동시에 관측한 주요 기준성 대기오염물질 및 기상요소들에 대해서도 동일한 기준을 적용하여 분석을 실시하였다. 성분마다 총 기간의 평균치를 Table 2에 제시하였다. SO₂의 월간 기준평균농도는 Table 3에 정리하였다. Fig. 2에는 월 평균값을 토대로 지난 10년간 SO₂의 농도변화를 비교할 수 있게 제시하였다. 그리고 SO₂의 시간적 분포특성을 설명하기 위한 하나의 방편으로 기상변수들의 월별 통계량도 Table 4에 제시하였다. 주요성분들의 연간평균자료와 현시점(2013년 기준)의 대기오염물질에 대한 환경기준치를 제시하였다: (1) SO₂: 20 nmole mole⁻¹ (연평균), (2) NO₂: 30 nmole mole⁻¹ (연평균), (3) O₃: 60 nmole mole⁻¹ (8시간), (4)

Table 2. Concentration of SO₂ and relevant parameters measured at of Yongsan in Seoul, Korea during 2004-2013

Order		Mean±SD (median)
A. Pollutant species		
1	SO ₂ (nmole mole ⁻¹)	5.24±2.50 (4.92)
2	PM _{2.5} (μg m ⁻³)	26.5±16.2 (23.0)
3	PM ₁₀ (μg m ⁻³)	53.8±39.6 (46.3)
4	TSP (μg m ⁻³)	74.8±51.2 (65.5)
5	CH ₄ (μmole mole ⁻¹)	2.10±0.21 (2.08)
6	CO (μmole mole ⁻¹)	0.51±0.26 (0.44)
7	NO (nmole mole ⁻¹)	25.2±27.5 (15.5)
8	NO ₂ (nmole mole ⁻¹)	36.9±15.0 (35.1)
9	NOx (nmole mole ⁻¹)	62.0±39.2 (51.5)
10	O ₃ (nmole mole ⁻¹)	17.5±10.6 (16.0)
11	THC (μmole mole ⁻¹)	2.46±0.30 (2.42)
12	NMHC (μmole mole ⁻¹)	0.37±0.20 (0.33)
B. Meteorological parameters ^b		
13	Temp (°C)	1.28±10.4 (14.4)
14	RH (%)	60.4±15.5 (60.5)
15	UV (mW cm ⁻²)	0.28±0.22 (0.21)
16	Solar (W m ⁻²)	136±72.5 (126)
17	WS (m sec)	1.75±0.87 (1.80)

^aNumber of daily measurement data.^bTemp=temperature, RH=relative humidity, UV=Ultraviolet, WS=wind speed

CO: 9 μmole mole⁻¹ (8시간), (5) PM₁₀: 50 μg m⁻³ (연평균), (6) Pb: 0.5 μg m⁻³ (연평균), (7) Benzene: 5 μg m⁻³ (연평균). 이러한 기준에 의하면, SO₂성분은 기준치보다 5배 정도 낮은 4.36-5.86 nmole mole⁻¹의 연간 평균농도를 유지하였다(Table 3). 반면, NO₂성

분은 평균농도가 36.9 nmole mole⁻¹ 수준으로, PM₁₀은 평균농도가 53.8 μg m⁻³ 수준으로 관리기준치를 일정 수준 초과하였다. 그러나 CO와 O₃는 각각 0.51 μmole mole⁻¹과 17.5 nmole mole⁻¹ 수준으로 SO₂와 유사하게 환경기준치 기준을 잘 유지하였다. 그 외 성분들은 26.5 μg m⁻³ (PM₁₀), 74.8 μg m⁻³ (TSP), 2.10 μmole mole⁻¹ (CH₄), 25.2 nmole mole⁻¹ (NO), 62.0 nmole mole⁻¹ (NOx), 2.46 μmole mole⁻¹ (THC), 0.37 μmole mole⁻¹ (NMHC)의 평균농도로 나타났다(Table 2).

SO₂의 연평균농도에 기반한 장기적 추이변화

본 연구에서 월 평균기준으로 SO₂자료를 비교한 결과(Table 4)를 살펴보면, 주거지역에 해당하는 용산 구 지역도 화석연료 사용 및 기상조건과 같은 변수에 민감하게 영향을 받는 것을 알 수 있다. 겨울철(12-2월: 평균 -0.26-0.60°C)에 고농도(6.10-7.16 nmole mole⁻¹)를 기록하고, 여름 중순-초가을(7-9월) 사이에 저농도(3.54-3.89 nmole mole⁻¹)를 보였다. 이러한 경향은 일반적 기상변수(RH, UV, Solar and WS)의 하 고동저 경향과는 반대의 성격이 강하다(Fig. 3). Fig. 2에 제시한 전체 연구기간 동안 SO₂의 변화경향을 보면, 2005년 2월달에는 2.11 nmole mole⁻¹ 그리고 같은 해 4월달에는 9.97 nmole mole⁻¹의 농도로 10년간 최저와 최고치의 평균농도가 동일한 해에 이루어진 것을 알 수 있다.

Table 3. The average monthly concentration of SO₂ for each year between 2004 and 2013(concentration in nmole mole⁻¹ unit)

Month Year	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	Mean±SD (median)	Range (N)
1	7.57	2.43	9.32	8.28	7.16	6.41	9.54	6.11	7.09	7.48	7.14±2.00 (7.32)	2.43-9.54 (10)
2	5.24	2.11	8.07	6.42	8.34	6.90	6.89	6.66	5.54	5.83	6.20±1.75 (6.54)	2.11-8.34(10)
3	5.65	5.71	-	6.52	4.81	4.52	5.88	5.45	3.86	6.66	5.45±0.92 (5.65)	3.86-6.66 (9)
4	5.33	9.97	3.69	4.38	5.10	5.96	5.91	5.13	3.71	6.06	5.52±1.79 (5.23)	3.69-9.97 (10)
5	4.24	8.48	5.16	7.45	3.94	4.92	6.18	4.30	5.38	6.45	5.65±1.48 (5.27)	3.94-8.48 (10)
6	4.37	9.30	4.25	4.87	2.93	4.53	5.59	4.18	4.48	5.70	5.02±1.69 (4.51)	2.93-9.30 (10)
7	4.20	4.43	3.43	3.22	3.32	3.35	5.25	3.02	3.13	5.23	3.86±0.86 (3.39)	3.02-5.25 (10)
8	4.00	3.10	3.90	3.25	3.19	3.12	5.04	3.02	2.62	5.30	3.65±0.90 (3.22)	2.62-5.30 (10)
9	3.38	4.00	3.68	3.22	3.57	3.46	2.77	3.53	3.04	4.79	3.54±0.56 (3.49)	2.77-4.79 (10)
10	3.35	5.03	3.93	3.20	4.42	5.67	3.73	4.38	3.25	4.66	4.16±0.82 (4.15)	3.20-5.67 (10)
11	4.03	8.07	6.68	6.38	5.87	7.53	4.66	4.60	4.82	5.20	5.79±1.35 (5.53)	4.03-8.07 (10)
12	3.59	7.73	7.45	8.32	6.32	9.72	5.30	6.71	5.47	6.57	6.72±1.72 (6.64)	3.59-9.72 (10)
Mean±SD (median)	4.58±1.20 (4.22)	5.86±2.76 (5.37)	5.41±2.10 (4.25)	5.46±2.01 (5.62)	4.91±1.71 (4.61)	5.51±1.94 (5.30)	5.56±1.67 (5.45)	4.76±1.29 (4.49)	4.36±1.33 (4.17)	5.83±0.85 (5.76)		
Range (N)	3.35-7.57 (12)	2.11-9.97 (12)	3.43-9.32 (11)	3.20-8.32 (12)	2.93-8.34 (12)	3.12-9.72 (12)	2.77-9.54 (12)	3.02-6.71 (12)	2.62-7.09 (12)	4.66-7.48 (12)		

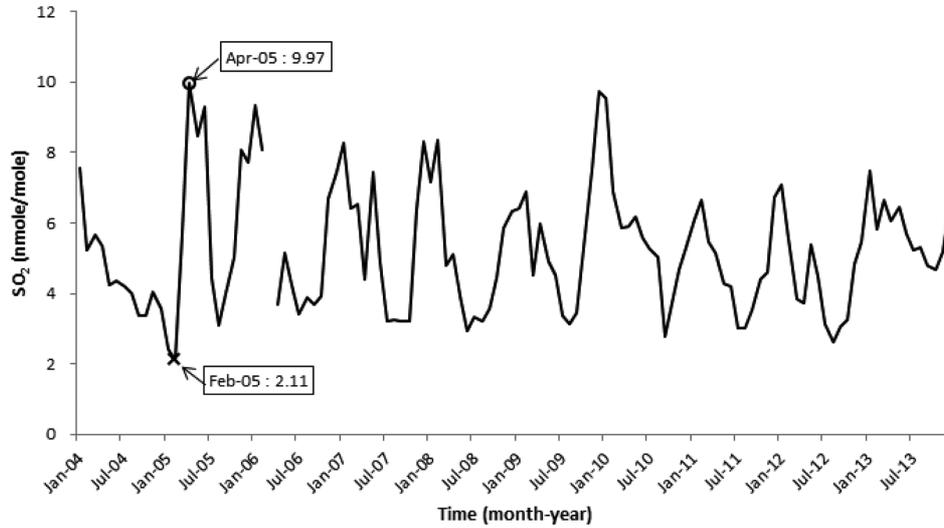


Fig 2. Plot of monthly mean concentrations of SO₂ measured from Yongsan, Seoul (2004-2013).

SO₂의 시간적 변화추이를 파악하기 위해, 장기적 증·감 추이를 통계적으로 평가하고자 하였다. 이를 위해 MK-test (Mann-Kendall trend test)를 기반으로 월 단위로 확보한 오염물질 및 기상항목들에 대한 시간적 추이를 비교분석하였다(Table 5). SO₂와 외부 기상요소 중 UV (Q (Sen's slope, 변화추세)=0.0033), WS (Q=0.0168)를 제외한 다른 외부기상요소들(Temp, RH, Solar)은 전체 측정 기간 동안에 뚜렷한 증가 및 감소하는 경향성을 나타내지 않았다. UV와 WS의 p 값은 <0.0001로 통계적 신뢰성을 보였다(Table 5A). 다른 각도에서 SO₂의 시간적 변화를 보기 위해, SO₂

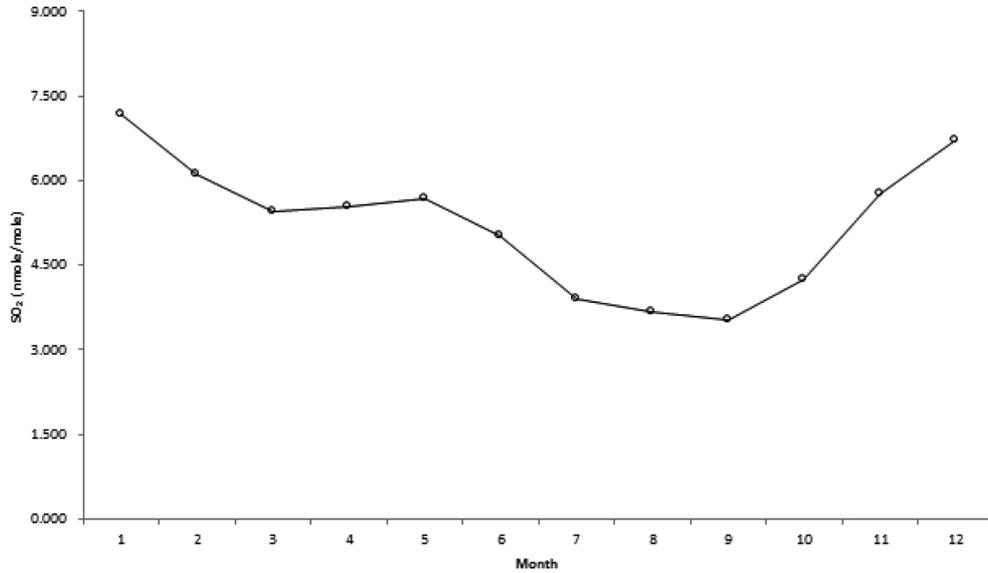
자료를 매년도 별로 분리하여 분석에 적용하였다. 2005년도에는 Q값이 0.0064로 증가하였으며, 2004년과 2010-2013년까지의 Q값은 -0.010- -0.0034로 감소하였다. 이처럼 전반적으로 농도분포가 감소하는 경향성이 나타났다. 2006-2009년도는 신뢰성이 낮거나 Q값이 0으로 나타났다(Table 5B). SO₂는 총 측정 기간의 동안 시간적 요인에 비해, 다른 요인들에 상대적으로 영향을 더 받는 것으로 추정된다.

우리의 예와 마찬가지로 여러 국가들이 SO₂의 배출량의 변화에 큰 관심을 갖고 주기적으로 관측을 진행하고 있다. 콜롬비아 및 푸에르토리코의 AIRS

Table 4. The monthly average values of SO₂ meteorological parameters measured during 2004-2013

Month	SO ₂ (nmole mole ⁻¹)	WS (m sec)	Temp (°C)	RH (%)	UV (mW cm ⁻²)	Solar (W m ⁻²)
1	7.16	1.68	-2.31	52.6	0.14	83.5
2	6.10	1.88	0.60	50.4	0.19	113
3	5.44	2.15	5.44	52.1	0.25	147
4	5.53	2.07	11.8	53.7	0.31	172
5	5.68	1.79	18.2	59.2	0.40	193
6	5.04	1.66	22.7	65.1	0.42	188
7	3.89	1.72	24.9	78.0	0.33	131
8	3.67	1.68	26.1	73.0	0.36	153
9	3.54	1.45	21.5	66.7	0.33	144
10	4.25	1.49	15.5	60.6	0.27	134
11	5.76	1.72	7.64	58.4	0.17	90.5
12	6.71	1.86	-0.26	54.4	0.14	75.6
Mean±SD (median)	5.23±1.18 (5.49)	1.76±0.21 (1.72)	12.6±10.3 (13.7)	60.3±8.76 (58.8)	0.27±0.10 (0.29)	135±39.1 (139)
Range (N)	3.54-7.16 (12)	1.45-2.15 (12)	-2.31-26.1 (12)	50.4-78.0 (12)	0.14-0.42 (12)	75.6-193 (12)

A. SO₂



B. Relevant meteorological parameters

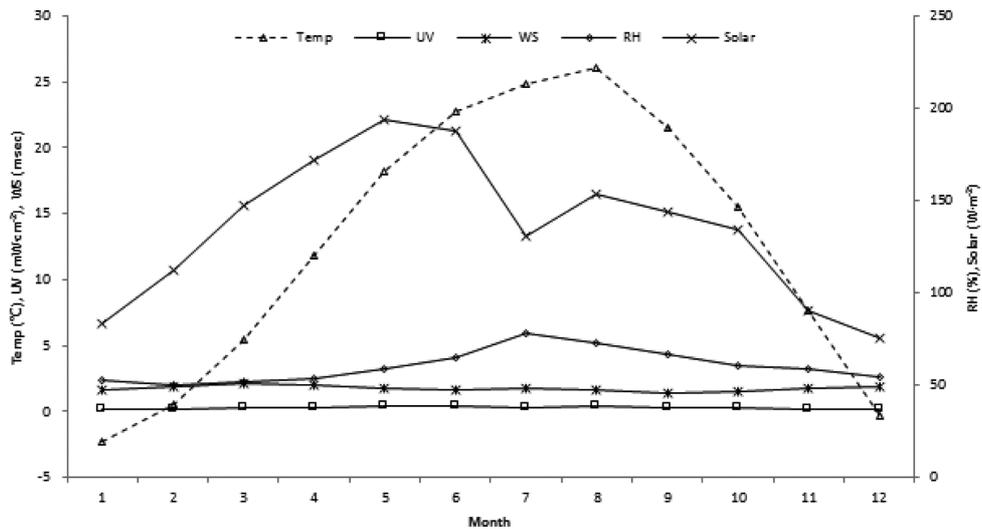


Fig 3. The temporal (monthly) patterns of SO₂ and relevant meteorological parameters measured from 2004 to 2013.

(Aerometric information retrieval system)에 의하면 1980년부터 1998년 까지 SO₂의 평균농도를 측정한 결과 9.7 nmole mole⁻¹에서 6.7 nmole mole⁻¹로 감소한 것으로 나타났다(Arden et al., 2002). 이는 서울에서 유사 기간대에 측정된 SO₂의 농도와 비교해보았을 때, 장기적 감소 경향성(1989년에 56 nmole mole⁻¹에서 1998년에 8 nmole mole⁻¹)이 같다는 것으로 확인할 수 있다(National institute of environmental

research, 2013). 브라질 동남쪽에 위치한 중소 도시를 중심으로 2004-2005년간 SO₂를 측정된 결과, 총 평균 4.60±3.20 nmole mole⁻¹로 최저 1.00 nmole mole⁻¹에서 최고 31.0 nmole mole⁻¹의 농도를 기록하였다(Amancio and Nascimento, 2012). 또한, 2007년 중국의 경우, 일부 도시에서 공기질 모니터링을 통해 24시간 평균값으로 SO₂농도의 일일주기의 경향을 분석하였다. 일자료를 토대로 도시 월평균자료를 분석

Table 5. Results of long-term trend analysis of SO₂ and relevant parameters based on the MK-test (between 2004-2013)

(A) MK test using average monthly data (2004-2013)					
Order	Pollutants	MK coefficient (Kendall's tau)	Sen's slope (Q)	Probability (p)	Trend at 95% confident interval ^a
1	SO ₂	-0.004	-0.0003	0.952	×
2	Temp	0.026	0.0100	0.674	×
3	RH	-0.108	-0.0412	0.082	×
4	UV	0.420	0.0033	<0.0001	+
5	Solar	0.107	0.1893	0.085	×
6	WS	0.553	0.0168	<0.0001	+

(B) MK test between SO ₂ and other relevant parameters measured using average monthly for each year					
Order	year	MK coefficient (Kendall's tau)	Sen's slope (Q)	Probability (p)	Trend at 95% confident interval ^a
1	2004	-0.329	-0.0065	<0.0001	-
2	2005	0.158	0.0061	<0.0001	+
3	2006	-0.089	0	0.0360	×
4	2007	-0.118	0	0.0039	o
5	2008	-0.073	0	0.0534	×
6	2009	0.057	0.0025	0.1103	×
7	2010	-0.472	-0.0107	<0.0001	-
8	2011	-0.144	-0.0043	<0.0001	-
9	2012	-0.132	-0.0034	0.0002	-
10	2013	-0.288	-0.0044	<0.0001	-

^aMeaning of different symbols: +=Increasing, -=Decreasing, o=No changing, ×=No trend

하였을 때, 최저 31.0 nmole mole⁻¹에서 최고 101 nmole mole⁻¹까지 나타났다(Zhou et al., 2014). 브라질과 중국의 자료들도 같은 해 용산구의 SO₂ 농도와 비교해 보았다. 2004년과 2005년 용산구 SO₂의 연평균농도는 4.58, 5.86 nmole mole⁻¹로 브라질과 비슷한 수치로 나타났다. 2007년도는 최저 3.20 nmole mole⁻¹에서 최고 8.32 nmole mole⁻¹로 중국보다 최고치 기준으로 12.1배나 높은 수치로 나타났다.

용산지역에서 SO₂ 발생 요인

용산구에서 측정된 대기오염물질과 주요 환경변수 간의 통계적 유의성을 조사하기 위해, 상관분석을 실시하였다(Table 6). MK-test와 마찬가지로 변수들 간의 비교분석을 쉽게 월 단위 평균자료를 이용하여 분석하였다. 먼저 2004-2013년까지의 분석결과를 토대로 상관분석을 실시, 상대적으로 상관성이 강한 경우로 전체 136개의 비교 가능한 짝 중 88개로 64.7%를 차지하고 있다((1) p≤0.01=80개 그리고 (2) p≤0.05=8개)). 이 중 12개 변수들(양의 상관: PM_{2.5}, PM₁₀, TSP, CO, NO₂, NOx, 음의 상관: O₃, Temp, RH, UV, Solar)의 경우, p값이 0.01 이하로 SO₂와 높은 상관성을 유지하는 것으로 나타났다(Table 6A). 또한,

이들 측정변수를 모두 개별 연도별로 자료를 나누는 방식으로, SO₂와 다른 변수들과의 상관성을 비교해보았다(Table 6B). 이때, 절반 이상의 변수들이 SO₂와 5년 이상 주기적으로 상관성이 나타났다. NO₂, NOx, Temp은 8년 이상 강한 상관성을 유지한 것으로 나타났으며, 이 성분들과 온도요소는 화석연료의 사용과 밀접한 관련이 있는 것으로 판단한다. 또한, 2007-2009, 2011년도에서 16개 변수의 짝 중 56.3% 이상(9개 이상)의 상대적 상관성이 높은 것으로 나타났다(Table 6C). 본 연구에서는 위의 결과로 SO₂와 변수들의 상호간에 상관성이 높은 결과를 얻을 수 있었다. 또한, SO₂와 다른 변수들의 상관성을 비교한 자료에서 (1) PM₁₀, Temp, RH (P≤0.01), (2) O₃ (P≤0.05)와 같이 상관성이 높은 경향은 본 연구에서 관측한 결과와 유사하다(Amancio and Nascimento, 2012).

주요 대기오염물질 중 SO₂의 근본적인 발생원인은 가정이나 산업시설 등에서 보일러와 같은 연소도구를 통해 화석연료를 사용하는 것과 밀접한 관계를 유지한다. 그리고 실제 도심환경에서는 도로 위를 달리는 자동차 또한 대표적인 SO₂의 배출원으로 알려져 있다(Lee, 1996). 환경부의 2012년 전국 대기오염도에

Table 6. Results of correlation analysis between SO₂ and each relevant parameter measured concurrently
(A) Correlation analysis using average monthly data of SO₂ and other parameters (2004-2013)

Order	SO ₂	PM _{2.5}	PM ₁₀	TSP	CH ₄	CO	NO	NO ₂	NOx	O ₃	THC	NMHC	Temp	RH	UV	Solar	WS
1	SO ₂	r	1	0.425 (**)	0.489 (**)	0.520 (**)	0.167 (**)	0.450 (**)	0.485 (**)	0.584 (**)	0.566 (**)	0.204 (**)	-0.570 (**)	-0.410 (**)	-0.245 (**)	-0.274 (**)	0.075
2	PM _{2.5}	r	0.771 (**)	0.669 (**)	-0.022 (**)	0.372 (**)	0.408 (**)	0.609 (**)	0.519 (**)	-0.135 (**)	-0.061 (**)	-0.049 (**)	-0.396 (**)	-0.258 (**)	-0.355 (**)	-0.119 (**)	-0.099
3	PM ₁₀	r	1	0.960 (**)	0.068 (**)	0.380 (**)	0.427 (**)	0.585 (**)	0.524 (**)	-0.107 (**)	0.03 (**)	-0.039 (**)	-0.512 (**)	-0.415 (**)	-0.435 (**)	-0.144 (**)	-0.159
4	TSP	r	1	1	0.02 (**)	0.302 (**)	0.379 (**)	0.537 (**)	0.473 (**)	-0.035 (**)	-0.059 (**)	-0.094 (**)	-0.483 (**)	-0.433 (**)	-0.387 (**)	-0.094 (**)	-0.156
5	CH ₄	r	0.284 (*)	1	0.284 (*)	0.439 (**)	0.209 (**)	0.399 (**)	0.399 (**)	-0.224 (**)	0.632 (**)	-0.343 (**)	-0.425 (**)	-0.442 (**)	-0.01 (**)	-0.347 (**)	0.134
6	CO	r	0.395 (**)	1	0.395 (**)	0.432 (**)	0.445 (**)	0.445 (**)	0.445 (**)	-0.308 (**)	0.053 (**)	-0.251 (**)	-0.656 (**)	-0.554 (**)	-0.199 (*)	-0.432 (**)	0.199 (*)
7	NO	r	0.633 (**)	1	0.633 (**)	0.960 (**)	0.960 (**)	0.960 (**)	0.960 (**)	-0.720 (**)	0.286 (*)	-0.14 (**)	-0.670 (**)	-0.341 (**)	-0.533 (**)	-0.677 (**)	-0.189 (*)
8	NO ₂	r	0.825 (**)	1	0.825 (**)	-0.256 (**)	0.825 (**)	0.825 (**)	0.825 (**)	-0.256 (**)	0.135 (**)	-0.068 (**)	-0.538 (**)	-0.504 (**)	-0.178 (**)	-0.176 (**)	0.113
9	NOx	r	1	1	1	-0.619 (**)	1	1	1	-0.619 (**)	0.26 (**)	-0.127 (**)	-0.685 (**)	-0.432 (**)	-0.441 (**)	-0.558 (**)	-0.096
10	O ₃	r	-0.337 (*)	1	1	1	1	1	1	1	-0.337 (*)	-0.16 (**)	0.539 (**)	0.067 (**)	0.638 (**)	0.858 (**)	0.277 (**)
11	THC	r	0.511 (**)	1	1	1	1	1	1	1	1	0.511 (**)	-0.192 (**)	-0.126 (*)	-0.321 (*)	-0.232 (**)	-0.206
12	NMHC	r	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.238 (*)	0.338 (*)	-0.391 (**)	0.105 (**)	-0.399 (**)
13	TEMP	r	0.732 (**)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.732 (**)	0.494 (**)	0.598 (**)	-0.122
14	RH	r	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.052 (**)	0.089 (**)	-0.300 (**)
15	UV	r	0.603 (**)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.603 (**)	0.590 (**)
16	Solar	r	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.255 (**)
17	WS	r	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

*Correlation is significant at 0.05 level
**Correlation is significant at 0.01 level

Table 6. Continued
 (B) Correlation between SO₂ and other relevant parameters (monthly data)

Order	year	PM _{2.5}	PM ₁₀	TSP	CH ₄	CO	NO	NO ₂	NOx	O ₃	THC	NMHC	Temp	RH	UV	Solar	WS	
1	2004	r 0.806 (**)	0.569 (*)	0.579 (*)	0.313	0.531	0.422	0.564	0.498	-0.351	-0.143	-0.523	-0.577 (*)	-0.513	0.500	-0.169	0.470	
2	2005	r 0.120	0.510	0.646 (*)	0.046	0.096	0.221	0.672 (*)	0.411	0.352	0.174	0.119	0.136	-0.100	0.426	0.473	0.053	
3	2006	r 0.057	0.143	0.097	0.528	0.476	0.894 (**)	0.862 (**)	0.895 (**)	-0.815 (**)	0.513	0.309	-0.896 (**)	-0.625 (*)	-0.211 (*)	-0.751 (**)	-0.491	
4	2007	r 0.681 (*)	0.713 (**)	0.653 (*)	0.397	0.612 (*)	0.636 (*)	0.684 (*)	0.719 (**)	-0.332 (*)	0.658 (*)	0.391	-0.801 (**)	-0.622 (*)	-0.596 (*)	-0.068	0.494	
5	2008	r 0.464 (*)	0.639 (*)	0.712 (**)	-	0.760 (**)	0.764 (**)	0.647 (*)	0.786 (**)	-0.433 (*)	-	-	-0.945 (**)	-0.840 (**)	0.775 (**)	-0.575	0.147	
6	2009	r 0.621 (*)	0.687 (*)	0.690 (*)	-	0.613 (*)	0.803 (**)	0.555 (**)	0.790 (**)	-0.746 (**)	-	-	-0.830 (**)	-0.439 (**)	-0.824 (**)	-0.786 (**)	0.319	
7	2010	r 0.580 (*)	0.474	0.456	-	0.551	0.519	0.801 (**)	0.678 (*)	0.096	-	-	-0.570	-0.258	-0.299	-0.207	0.427	
8	2011	r 0.748 (**)	0.595 (*)	0.522	0.341	0.836 (**)	0.611 (*)	0.755 (**)	0.706 (*)	-0.391	0.425	0.411	-0.943 (**)	-0.808 (**)	-0.800 (**)	-0.386 (*)	0.633 (*)	
9	2012	r 0.945 (**)	0.800 (**)	0.716 (**)	-	0.502	0.679 (*)	0.740 (**)	0.781 (**)	-0.349 (**)	-	-	-0.722 (**)	-0.747 (**)	-0.463 (**)	-0.304	0.158	
10	2013	r 0.929 (**)	0.956 (**)	0.541	-	0.802 (**)	0.473	0.721 (**)	0.579 (*)	-0.095	-	-	-0.631 (*)	-0.489 (**)	-0.283	-0.178	0.294	
		p<0.01	4	3	2	3	3	5	5	2	1	1	6	3	3	2	2	
		p<0.05	3	3	4	2	3	3	3	3	1	1	2	2	1	1	1	1
Total		7	6	6	5	5	6	8	8	2	1	1	8	5	4	2	2	

Table 6. Continued

(C) Frequency of strongly correlated pairs from the annually divided data groups

Order	year	SO ₂			All parameters measured		
		p<0.01	p<0.05	Total	p<0.01	p<0.05	Total
1	2004	1	2	3	35	22	57
2	2005	0	2	2	10	7	17
3	2006	6	1	7	27	17	44
4	2007	3	8	11	27	25	52
5	2008	7	2	9	38	13	51
6	2009	6	4	10	43	17	60
7	2010	1	2	3	29	22	51
8	2011	6	4	10	39	24	63
9	2012	7	1	8	31	17	48
10	2013	4	2	6	28	11	39
11	All year	12	0	12	80	8	88

대한 조사결과를 보면, SO₂의 경우 화학연료를 많이 사용하는 광양, 울산 등의 공단지역이 다른 지역에 비해 높은 농도 수준을 기록하는 것으로 나타났다 (National institute of environmental research, 2013). 그러나 전국 244개 유효측정소에서 측정된 연평균과 24시간의 측정값은 환경기준치를 초과하지 않는 것으로 나타났다. 이와 같이, 공업단지가 아닌 용산지역에서 주요 화석연료 사용은 보일러 및 자동차에 기인할 수 있다. 또한, 1989년도 서울지역의 SO₂ 연평균 농도는 56 nmole mole⁻¹를 기록하였지만 해마다 감소하여 2012년도에는 10배 이하 수준인 5 nmole mole⁻¹로 나타났다. 이는 1981년 황 함유 기준제도, 1985년 고체연료사용 금지제도, 1988년 청정연료사용 의무화제도 등의 정부정책으로 인해 SO₂ 배출량이 현저히 줄어들었는데 기여하였다고 판단한다. 2004년부터 2012년까지 용산구와 서울지역의 SO₂의 비교해보았을 때, 용산구는 4.36-5.86 nmole mole⁻¹ (Table 3), 서울지역은 5.00-6.00 nmole mole⁻¹로 유사한 경향성을 확인할 수 있다. 위의 선행연구들의 결과를 살펴 보았을 때, 온도요소는 SO₂의 배출량에 상당한 연관성이 있음을 재차 확인해 준다.

이외 서울시내의 지하환경에서도 SO₂를 측정된 선행연구에 대한 자료와 비교를 시도해 보았다. 1997년 7월부터 11월까지 한 달에 2회(초순과 하순) 간격으로 특정 지하철역(시청역, 강남역, 서울역, 혜화역, 을지로역)에서 파리로자닐린법을 통해 SO₂의 농도를 측정하였다(Son and Jang, 1999). 이때, 평균 57.0±15.0 nmole mole⁻¹로 나타났으며, 시청역에서 67.0±11.0 nmole mole⁻¹로 가장 높고, 혜화역에서 38.0±10.0

nmole mole⁻¹로 가장 낮게 나타났다. 이미 상대적으로 지금 시점에 비해 농도가 높은 시점이었지만, 지하환경에서 더 높은 배출이 이루어진 것을 알 수 있다.

결론

본 연구에서는 서울특별시 용산구의 측정소를 중심으로 2004년부터 2013년까지 대기질에 큰 영향을 끼치는 대기오염물질 SO₂의 시간적 분포추이를 동시에 관측한 대기질자료와 기상변수들을 토대로 경향성을 파악하고 이들의 농도분포에 영향을 미치는 요인들을 확인하고자 하였다. 서울지역의 SO₂은 1989년부터 점차 줄어들었고, 최근 10년간 5-6 nmole mole⁻¹ 수준을 유지하고 있다. 정부에서는 SO₂의 배출원 저감을 위해 오랜 기간 체계적인 관리를 지속하고 있다. 용산지역 또한 2004년부터 2013년까지 연평균이 4-5 nmole mole⁻¹ 수준으로 대기환경기준치인 20 nmole mole⁻¹ 보다 5배정도 낮은 수준으로 유지하는 추세이다.

화석연료의 연소가 주 배출원으로 작용하는 SO₂는 주로 온도가 낮은 겨울철에 보일러 사용 등과 같이 화석연료의 사용이 늘어날 때, 함께 증가하는 경향성이 나타난다. 이는 대부분이 주택가로 형성된 용산구 지역에서 가정용 보일러와 자동차 등의 사용이 중요한 배출원으로 작용하는 것으로 판단할 수 있다. 현 시점에서 SO₂은 다른 대기오염물질에 비해 상대적으로 관리가 잘 이루어진 것으로 나타났다. 그에 반해, 같은 지역 내에서도 NO₂와 PM₁₀ 같은 항목들은 각

각의 대기환경기준치를 초과하는 경향성이 뚜렷하다. 이들 대기오염물질에 대한 배출량을 줄이기 위한 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것으로 판단한다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것입니다(과제번호 2009-0093848).

References

- Amancio, C.T. and Nascimento, L.F.C., 2012, Asthma and air pollutants: A time series study. *Revista da Associacao Medica Brasileira*, 58, 302-307.
- Arden, C., Burnett, R.T., Thun, M.J., Calle, E.E., Krewski, D., Ito, K., and Thurston, G.D., 2002, Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *The journal of the American Medical Association*, 287, 1132-1141.
- Bae, S.Y. and Kim, Y.P., 2003, The relative contribution of SO₂-to-sulfate conversion processes over the metropolitan Seoul area. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 19, 451-465. (in Korean)
- Cho, Y.S., 1991, Smog and health effects -A review of London smog of December, 1952-. *Journal of Environmental and Sanitary Engineering*, 6, 109-120. (in Korean)
- Choi, H.J., Noh, D.W., and Cho, Y.S., 2006, Estimation of the marginal abatement costs for SO_x of the electric utility industry using a distance function approach. *Journal of Environmental Policy and Administration*, 14, 195-215. (in Korean)
- Evans, L.S. and Curry, T.M., 1979, Differential responses of plant foliage to simulated acid rain. *American Journal of Botany*, 66, 953-962.
- Kim, H.S. and Chung, Y.S., 2007, Large-scale transport of air pollutants in the East Asian region: Satellite and ground observations. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 28, 123-135. (in Korean)
- Kim, K.H., 1996, The concentration of major atmospheric pollutants in Won Ju city, Korea during 1992-1994. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 17, 437-447. (in Korean)
- Koo, H.S. and Kim, H.D., 2004, Numerical simulation on the wind ventilation lane and air pollutants transport due to local circulation winds in Daegu districts. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 25, 418-427. (in Korean)
- Korean ministry of environment, 2014, Air environmental conservation act. Korean ministry of environment, Seoul, Korea, Attached 8, 1 p. (in Korean)
- Koricheva, J., Roy, S., Vranjic, J.A., Haukioja, E., Hughes, P.R., and Hanninen, O., 1997, Antioxidant responses to simulated acid rain and heavy metal deposition in birch seedlings. *Environmental Pollution*, 95, 249-258.
- Lee, Y.J., 1996, Umweltpolitische instrumente zur luftreinhaltung - Zur reduzierung der SO₂-emissionen -. *Journal of Environmental Policy and Administration*, 4, 71-87. (in Korean)
- National institute of environmental research, 2013, Annual report of air quality in Korea (2012). Supplement 1, Seoul, Korea, 1 p. (in Korean)
- Seoul metropolitan government, 2012, Seoul statistical yearbook. Seoul metropolitan government, Seoul, Korea, 5 p. (in Korean)
- Son, B.S. and Jang, B.K., 1999, Concentration of sulfur dioxide (SO₂) of subway station in Seoul. *The Korean journal of sanitation*, 14, 17-23. (in Korean)
- Zhou, N., Cui, Z., Yang, S., Han, X., Chen, G., Zhou, Z., Zhai, C., Ma, M., Li, L., Cai, M., Li, Y., Ao, L., Shu, W., Liu, J., and Cao, J., 2014, Air pollution and decreased semen quality: A comparative study of Chongqing urban and rural areas. *Environmental Pollution*, 187, 145-152.

Manuscript received: September 11, 2014

Revised manuscript received: October 12, 2014

Manuscript accepted: November 16, 2014