

우리나라 산림지역에서의 이산화황 농도의 시·공간적 분포

이승우* · 이충화 · 지동훈 · 윤희정

국립산림과학원 산림복원연구과

Temporal and Spatial Distribution of Ambient Sulfur Dioxide Concentration in Forest Areas, Korea

Seung-Woo Lee, Choong-Hwa Lee, Dong-Hun Ji, and Hee-Jung Youn

Division of Forest Restoration, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

For 65 national forest areas in 1993 to 2008, the ambient sulfur dioxide (SO₂) concentrations were measured monthly using passive samplers and compared to the those of urban areas in order to investigate the characteristics of temporal and spatial distribution. In the forest areas, annual average concentration of sulfur dioxide gradually decreased from the beginning year of monitoring to 1997 and then had no significant change, such as the annual trend in urban areas monitored by Ministry of Environment. For the monitoring term, average concentration of sulfur dioxide in the forest areas was 5.6ppb, which was lower than the 10.1ppb in the urban areas and the EC ecological standard level (7.6 ppb). Seasonally, both in forest areas and urban areas the monthly average concentrations were much higher in winter and spring due to much more heating fuel consumption, and lowest in summer. Regional comparison to other regions of Gyeongbuk and Gyeonggi province showed that the concentration of sulfur dioxide was the highest during year. A significant positive correlation between sulfur oxides' emissions and sulfur dioxide concentration by province was observed, reflecting that the size and proximity of sources of atmospheric sulfur oxides could be important factors in determination.

Key words: Air pollution, Forests, National monitoring, Sulfur dioxide (SO₂)

서 언

산업화와 도시화 등으로 인해 악화된 대기질 환경은 인간뿐만 아니라 산림에도 여러 가지 악영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 최근에는 산림의 환경적 기능과 관련하여 산림건강성에 미치는 대기오염의 영향이 새로운 각도에서 해석되고 있으며 (Percy and Ferretti, 2004), 기후변화와 관련해서는 대기오염이 기후변화와 함께 산림의 지속성을 위협하는 주요 요인으로까지 인식되고 있다 (Smidt and Herman, 2004; Bytnerowicz et al., 2007). 이와 관련된 대기오염물질은 주로 화석연료의 연소 과정에서 발생하는데 대표적인 물질로는 황산화물 (SO_x)을 들 수 있다 (Carmichael et al., 2002; Reddy and Venkataraman, 2002).

공기 중에 기체상태로 존재하는 이산화황 (SO₂)은 임목의 광합성 작용에 의해 흡수되기도 하지만 (Escobedo

and Nowak, 2009), 반대로 임목의 성장저하, 토양산성화 증가, 산불 취약성 증가 등과 같은 여러 부작용을 초래할 수 있는 유해물질이기도 하다 (이 등, 2004; 한 등, 2004; William et al., 1985; Nancy et al., 2008; 山田 et al., 1996). 특히 이산화황은 기류에 의해 보통 수백~수천 km까지 이동이 가능하여 중국 북경을 중심으로 황해연안에 집중된 산업시설에서 배출된 이산화황이 편서풍의 영향 하에 있는 우리나라로 장거리 유입될 가능성이 높은 상황이다 (한 등, 2006).

현재 국내에서는 이러한 대기오염물질의 농도를 실시간으로 측정하기 위한 국가규모의 자동측정망이 갖추어져 있으며, 도시대기측정 236개소, 도로변대기측정 40개소, 교외대기측정 16개소, 국가배출농도측정 5개소가 있다. 그러나 측정지점이 대부분 도시지역을 대상으로 이루어지고 있기 때문에 산림지역에 대한 체계적인 관측이 필요한 실정이다. 물론 산림지역이 대기오염 배출원과 멀리 떨어져 있고 고가의 자동측정장비 운용이 어려운 점 등 (김과 봉, 1998; 임 등, 2007)은 있으나 국토 면적의 64%를 차지하는 산림이 생물다양성 보전, 온

접수 : 2010. 10. 26 수리 : 2010. 12. 13

*연락처 : Phone: +8229612638

E-mail: soilloverlee@forest.go.kr

실가스 흡수원 등의 역할을 담당하고 있음을 감안할 때 조사의 필요성이 한층 커지고 있다.

북미, 유럽, 일본 등지에서는 산림지역 대기질 측정에 있어 대기오염 자동측정장치를 대신하여 부가적인 설비와 전원이 필요치 않고 비용이 적게 드는 수동식 공기포집기 (passive sampler)를 주로 이용하고 있다 (Ferm et al., 1994; Roger, 2003; Nishikawa and Kannari, 2010). 우리나라의 경우 1990년대 초반부터 국립산림과학원과 각도 산림환경연구소 (원)가 공동으로 전국 산림의 고정조사지를 대상으로 수동식 공기포집기를 이용한 월 단위 대기오염도 측정을 실시해 오고 있다.

이에 본 연구는 전국 산림지역 65개소를 대상으로 실시한 1993~2008년간의 장기모니터링의 결과를 토대로 대기 중 이산화황 농도의 시간 및 공간적 분포 특성을 도시지역과 비교하여 파악하고자 수행되었다.

재료 및 방법

연구 대상지 산림지역의 이산화황 (SO₂) 농도를 조사하기 위하여 전국을 40 km×40 km 크기의 65개 격자로 나누고 각각의 격자 중심점에서 가장 인접한 산림지역을 조사 대상으로 하였다. 전체 모니터링 조사지를 도별로 구분해 보면 강원 9개소, 경기 7개소, 경북 11개소, 경남 9개소, 전북 6개소, 전남 11개소, 충북 4개소, 충남 6개소, 제주 2개소에 해당한다. 이들 65개 고정조사지의 분포 상황은 그림 1과 같다.

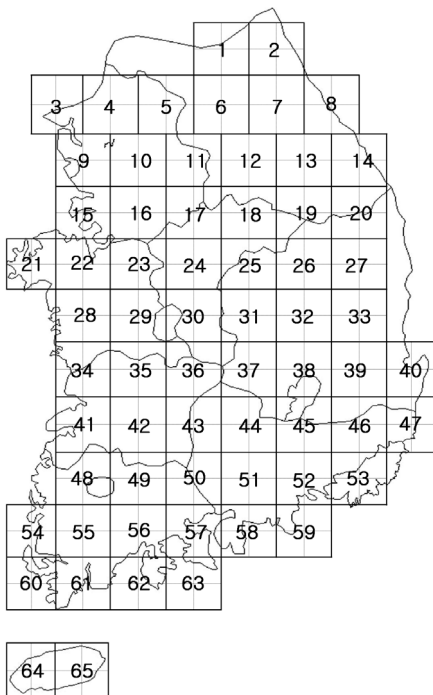


Fig. 1. Monitoring system of air pollution in forest areas.

이산화황 농도 측정 산림지역 대기오염 모니터링 기간 (1993~2008년) 동안 연구 조사지의 대기 중 이산화황 (SO₂)을 포집하기 위하여 장기확산형 패시브 샘플러 (Passive sampler; OGAWA社, ENVORS社)를 이용하였다. 패시브샘플러는 월단위로 교체하였으며 오염원에 직접 노출되지 않도록 지상으로부터 약 2m 높이에 설치하였다 (Sanz et al., 2007).

전처리 및 분석 매월 수거한 패시브 샘플러는 지퍼백 또는 바이알에 담아 냉장 보관한 후 분석에 이용하였다 (Maria Delgado, et al., 2006). 대기 중 이산화황 (SO₂) 포집용으로 이용한 패시브샘플러의 흡수제는 Sodium bicarbonate이었으며, 추출에는 0.15% 과산화수소 (H₂O₂)를 이용하였다. 이때 0.5 mL 유리바이알에 패시브샘플러 흡수여지와 추출용액 5 mL를 담아 초음파세척기에 50~60℃의 온도를 유지하여 20분간 추출한 후 0.45 μm의 membrane filter (Millipore Inc.)를 사용하여 여과한 시료를 Ion Chromatography (Sykam S-5200)로 분석하였다 (정 등, 2002; 임업연구원, 2003).

농도 환산 SO₄²⁻ 표준용액 (1, 5, 10 ppm)으로 calibration한 후 추출된 시료의 용액상 ppm 농도를 환산계수 (344), 희석배수, 방치일수 등을 적용하여 기체상태의 ppb 농도로 환산하였으며 이 때 이용한 산출식은 다음과 같다 (정 등, 2002).

$$\text{시료농도 (ppb)} = \frac{\text{용액상 ppm농도} \times 5 (\text{추출액량}) \times \text{환산계수}}{\text{방치일수} \times 24 (\text{hr})}$$

통계 분석 2002년에서 2008년까지의 전국 9개 도별 이산화황 농도와 황산화물 (SO_x) 배출량간의 상관관계를 알아보고자 SPSS 프로그램 (11.0)을 이용하여 T-test (Pearson correlation) 양측검정을 실시하였고 P<0.01인 것을 통계적 유의성이 있는 것으로 판단하였다.

결과 및 고찰

연도별 농도 변화 전국 65개 산림지역 고정조사지에 대한 이산화황 (SO₂) 농도의 연도별 변화 (1993~2008)를 보면 전체적으로 관측 시작년도부터 점차 낮아지다가 1997년 이후에는 뚜렷한 변화를 보이지 않았다 (Fig. 2). 이러한 결과는 환경부에서 조사한 전국 42개 도시지역의 연도별 농도 변화와도 같은 경향이였다 (환경부, 1993~2008). 이를 연대별로 구분해 보면 1993부터 1999년까지는 산림지역과 도시지역의 연평균 이산화황 농도가 각각 6.8 ppb와 15.4 ppb에서 2000부터 2008

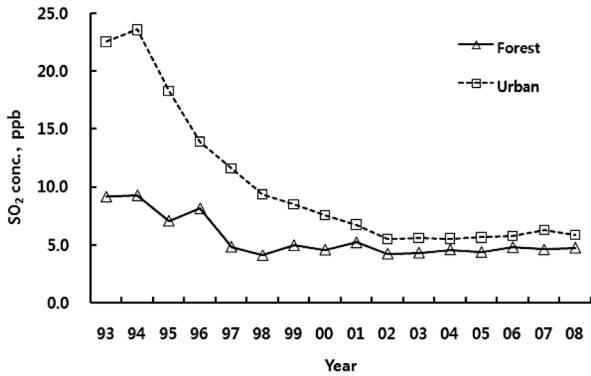


Fig. 2. Change in annual average concentration of ambient sulfur dioxide in forest areas and urban areas. *Data of urban areas is from ministry of environment.

년까지는 각각 4.6 ppb와 6.1 ppb로 크게 낮아졌다.

이러한 산림과 도시지역에서의 이산화황 감소추세는 청정연료사용 의무화제도 등 지속적인 이산화황 저감 정책에 기인한 결과로 판단된다. 특히 도시지역에 비해 산림지역의 이산화황 감소 추세의 구배가 적은 것은 난방 및 산업시설 등 황산화물 (SOx) 배출원이 상대적으로 적은 지역적 특성과 관련이 깊을 것으로 판단된다.

이와 관련하여 Furukawa (1984)는 1967년부터 1980년까지 일본 전역에서 측정된 대기 중 이산화황 농도의 연도별 감소추세가 탈황류의 사용량 증가와 관계가 있었음을 보고한 바 있다.

전체 조사기간 동안의 전체 산림지역 조사지의 이산화황 평균 농도는 5.6 ppb로 환경부에서 조사한 도시지역의 연평균 농도 10.1 ppb에 비해 낮은 수준이었으며, 국내 대기환경기준치 (20 ppb)와 비교해서도 현저히 낮은 수준이었다. 또한 유럽연합에서 제시하고 있는 식생과 생태계 보호를 위한 연평균 이산화황 농도의 기준치 (7.6 ppb, 20 $\mu\text{g m}^{-3}$)와 비교해서도 낮은 수준이었다 (EC Directive, 1999). 그러나 이산화황이 산림의 건강성을 위협하는 주요 대기오염물질임을 감안할 때 산림 건강성 평가를 위한 종합적인 판단지표로서 지속적인 관측이 요구된다.

계절별 농도 변화 산림지역의 대기 중 이산화황 농도의 계절적 변화 특성을 파악하기 위해 1993~2008년 월별 자료를 평균한 결과, 연간 U자형 농도 변화를 보였다 (Fig. 3). 계절별로는 겨울 (12~2월) 6.2 ppb, 봄 (3~5월) 5.7 ppb, 가을 (9~11월) 4.2 ppb, 여름 (6~8월) 3.8 ppb 순으로 높게 나타났다. 이러한 결과는 환경부 도시지역의 계절별 농도 변화와도 일치하고 있어 두 지역간의 농도 차이는 있지만 대기 중에서의 이산화황의 생성, 확산, 소멸 특성은 계절적으로 크게 다르지 않음을 알 수 있다.

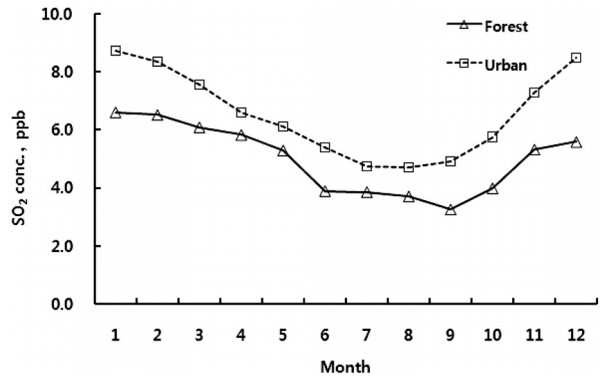


Fig. 3. Change in monthly average concentrations of ambient sulfur dioxide for forested areas and urban areas. *Data source of urban areas is from ministry of environment.

전체적으로 겨울철과 봄철에 이산화황 농도가 상대적으로 높은 결과는 동절기 동안에 난방연료 소비량 증가에 따른 황산화물 배출량 증가에 기인한 것으로 판단된다. 반면 하절기에는 난방연료 소비가 줄고 기온 상승에 따른 대기 혼합고 (mixing height)의 상승으로 대기의 활발한 대류현상이 발생되어 대기오염물질의 확산이 원활함은 물론 잦은 강우에 의해 오염도가 낮아지는 것과 관련이 깊을 것으로 판단된다 (임 등, 2007). 이와 관련하여 Carmichael (1995)은 대기 중 이산화황 농도는 계절풍과 계절별 강수에 의해 뚜렷한 계절적 사이클을 나타내며 특히 겨울에 뚜렷하게 나타난다고 하였으며, Nishikawa and Kannari (2010)는 대기 중 이산화황 농도의 계절적 변화가 황산화물 (SOx) 배출량의 계절적 변화와 밀접하게 관련한다는 연구결과를 보고하였다.

지역별 분포 특성 전체 조사지의 이산화황 농도의 지역별 분포 경향을 파악하기 위하여 전국 65개 산림지역의 이산화황 평균 농도를 도별로 산출하였다 (Fig. 4). 그 결과 경북 (6.0 ppb)과 경기지역 (5.8 ppb)의 연평균 이산화황 농도가 다른 지역에 비해 높게 나타났고, 그 다음으로 경남, 충북, 충남 등의 순이었다. 또한 이러한 결과는 그림 4에서 나타난 환경부의 도시지역에 대한 도별 평균치와도 유사한 경향을 보였다. 전체적으로 인구밀도가 높고 대규모 공단을 포함하는 지역에서 이산화황 농도가 높게 나타나 산림지역의 이산화황 농도가 지역별 오염발생원의 규모 및 근접도 등과 관계가 있을 것으로 판단된다.

이를 도별 이산화황 농도와 황산화물 배출량의 관계를 통해 확인하고자 2002~2008년간의 도별 황산화물 (SOx)의 연간 배출량과 도별 산림지역 및 도시지역의 연평균 이산화황 농도간의 관계를 그림 5에 나타내었다. 산림지역과 도시지역 모두 황산화물 배출량이 클수록

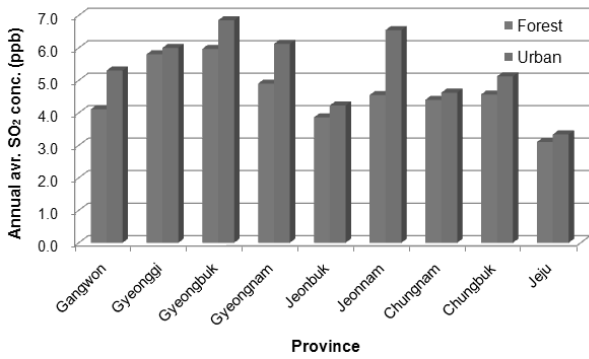


Fig. 4. Average average sulfur dioxide concentration of forest area and urban area by province in 1993 to 2008.

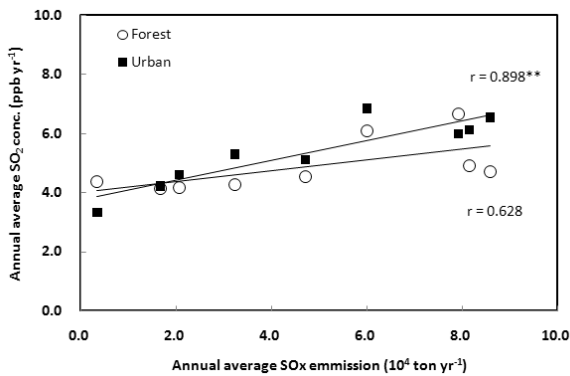


Fig. 5. Relation between ambient SO₂ concentration and SOx emission by province in 2002 to 2008.
 *Data source of SOx emission is from ministry of environment.
 *Significant correlation at the 0.05 level, **Significant correlation at the 0.01 level.

대기 중 이산화황 농도가 높은 결과를 보였다. 변수간 상관성의 유의확률은 이산화황의 배출원이 상대적으로 적은 산림지역에 비해 도시지역 ($p < 0.01$)에서 더 높게 나타났다. 이러한 결과는 황산화물 배출원의 규모와 근접성이 해당지역의 대기 중 이산화황 농도에 중요하게 작용하고 있음을 반영하였다.

요 약

전국 65개 산림지역 조사지를 대상으로 장기확산형 패시브샘플러를 이용하여 1993년에서 2008년까지 월별 이산화황 (SO₂) 농도를 측정하고 도시지역과 비교하여 산림지역에서의 이산화황 농도의 시간적 및 공간적 분포 특성을 구명하였다. 산림 내 이산화황 (SO₂)의 연평균 농도는 관측 시작년도부터 점차 낮아지다가 1997년 이후에는 뚜렷한 변화가 없었으며, 이는 환경부의 도시지역의 연도별 농도 변화와도 같은 경향이었다. 조사기간 동안 전체 산림지역 조사지의 연평균 이산화황 농도

는 5.6 ppb로 환경부의 도시지역 평균치 (10.1 ppb)와 EC (1999)의 생태적 위해 기준치 (7.6 ppb)에 비해 낮은 수준이었다. 계절별로는 산림지역과 도시지역 모두에서 난방 연료 사용량이 많은 겨울과 봄에 농도가 높았으며 강우와 고온의 영향이 큰 여름에 낮게 나타났다. 지역별로는 다른 지역에 비해 경북과 경기지역에서 이산화황 연평균 농도가 높게 나타났다. 황산화물 배출량과 이산화황 농도 간에 유의적인 정의 상관성이 나타남에 따라 황산화물 배출원의 규모와 근접성이 대기 중 이산화황의 농도를 결정짓는 중요한 인자임을 반영하였다.

사 사

샘플링과 분석에 힘써 주신 각 도 산림환경연구소 (원) 담당자 분들께 감사를 드립니다. 이 논문은 국립산림과학원의 지원을 받아 수행되었습니다.

인 용 문 헌

Bytnerowicz A, K. Omasa, and E. Paoletti. 2007. Integrated effects of air pollution and climate change on forests: A northern hemisphere perspective. *Environ. Pollut.* 147:438-445.

Carmichael, G.R., D.G. Streets, G. Calori, M. Amann, M.Z. Jacobson, J. Hansen, and H. Ueda. 2002. Changing trends in sulfur emissions in Asia: implications for acid deposition, air pollution and climate. *Environ. Sci. Technol.* 36:4707-4713.

EC Directive. 1999. Council directive 99/30/EC, relating the limitvalues for sulphur dioxide, nitrogen dioxide and oxides of nitrogen, particulate matter and lead in ambient air. *Official Journal of the European Communities L* 163, pp.41-60.

Escobedo F. and D.J. Nowak. 2009. Spatial heterogeneity and air pollution removal by an urban forest. *Landscape Urban Plan.* 90:102-110.

Ferm, M., A. Lindskog, P.A. Svanberg, and C.Å. Boström. 1994. New measurement technique for air pollutants (in Swedish), *Kemisk Tidskrift* 1:30-32.

Furukawa, A. 1984. Defining pollution problems in the Far East - a case study of Japanese air pollution. pp.59-74. In eds. M.J. Koziol and F.R. Whatley. *Gaseous Air Pollutants and Plant Metabolism.* published by Butterworths. p.466.

Maria Delgado-Saborit J. V. Esteve-Cano. 2006. Field Study of Diffusion Collection Rate Coefficients of a No2 Passive Sampler in a Mediterranean Coastal Area. *Environ. Monit. Assess.* 120:327-345.

Nancy, E.G., A.M. Richard, D.P. Timothy, J.S. Steve, J.C.

- Deborah, E.F. Mark, J.R. Phillip, and D. Alexander. 2008. Air pollution increases forest susceptibility to wildfires : A case study in the San Bernardino mountains in Southern California. *Development in Environmental Sciences* 8:365-403.
- Nishikawa Y. and A. Kannari. 2010. Atmospheric concentration of ammonia, nitrogen dioxide, nitric acid, and sulfur dioxide by passive method within Osaka prefecture and their emission inventory. *Water, Air, and Soil Pollution* DOI:10.1007/s11270-010-0472-3.
- Percy K.E. and M. Ferretti. 2004. Air pollution and forest health: toward new monitoring concepts. *Environ. Pollut.* 130:113-126.
- Reddy, M.S. and C. Venkataraman. 2002. Inventory of aerosol and sulphur dioxide emissions from India: I-Fossil fuel combustion. *Atmos. Environ.* 36:677-697.
- Roger, M.C. 2003. The use of passive sampling to monitor forest exposure to O₃, NO₂ and SO₂: a review and some case studies. *Environ. Pollut.* 126:301-311.
- Sanz, M.J., V. Calatayud, and G. Sanchez-Pena. 2007. Measures of ozone concentrations using passive sampling in forests of South Western Europe. *Environ. Pollut.* 145:620-628.
- Smidt S, and F. Herman. 2004. Evaluation of air pollution-related risks for Austrian mountain forests. *Environ. Pollut.* 130:99-112.
- William E.W., A.M. Harold, and A.G. Robert. 1985. *Sulfur dioxide and vegetation*. Stanford University Press, Stanford, California p.593.
- 山田悦, 吉田大作, 胡連春, 山田武. 1996. パッシブサンプラーを用いる山間部における大気中二酸化窒素及び二酸化硫黄の簡易測定法. *分析化学* 45:1083-1088.
- 김신도, 봉춘근. 1998. Passive sampler를 이용한 서울지역의 NO₂ 분포에 관한 연구. *서울시립대학교 도시과학연구원 도시과학논총* 24:159-164.
- 이충규, 황진형, 김종갑. 2004. 산성강우에 의한 수목의 쇠퇴현상(I)-음이온을 중심으로. *한국생태학회지* 27:347-353.
- 임봉빈, 김선태, 정재호, 이범진. 2007. 장기 NO₂ 및 SO₂ Passive Diffusive Sampler (PDS)를 이용한 대전시 대기질 모니터링. *한국환경과학회지* 16:187-195.
- 임업연구원. 2003. 대기오염 및 산림생태계 변화 모니터링. 연구자료 204호 p.259.
- 정의석, 김선태, 김선규, 홍성민, 정호성. 2002. 남극지역의 대기오염 측정체계 구축을 위한 기초조사. *대전대학교 환경문제연구소논문집* 6:61-72.
- 한진석, 김영미, 안준영, 공부주, 최진수, 이상욱, 이석조. 2006. 장거리 이동 대기오염물질 이동량의 공간적 분포와 변화 추이 (1997~2004년). *한국대기환경학회지* 22:99-106.
- 한진석, 안준영, 홍유덕, 공부주, 이석조, 선우영. 2004. 한반도 서해상으로 장거리 이동하는 SO₂의 농도 및 연직 분포 특징. *한국대기환경학회* 20:671-683.
- 환경부. 1993-2008. *대기환경연보*.