우리나라 산림과 도시지역의 이산화질소 농도의 시·공간적 패턴

이승우* · 이충화

국립산림과학원 산림수토보전과

(2011년 9월 8일 접수; 2011년 12월 6일 수정; 2011년 12월 6일 수락)

Temporal and Spatial Pattern of Ambient Nitrogen Dioxide Concentration in Forest and Urban Areas, Korea

Seung-Woo Lee* and Choong-Hwa Lee

Division of Forest Water and Soil Conservation, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

(Received September 8, 2011; Revised December 6, 2011; Accepted December 6, 2011)

ABSTRACT

The ambient concentrations of nitrogen dioxide (NO_2) at 65 forest areas were measured every month using passive diffusive samplers from 2002 to 2009 and were compared to those at urban areas in order to investigate the characteristics of temporal and spatial distributions of NO_2 from the forest and urban areas. The annually averaged concentrations of NO_2 gradually decreased for both areas. The average concentration of NO_2 in the forest areas was 8.0 ppb, which was lower than that in the urban areas (i.e., 19.4 ppb) and the ecological standard level of the European Union (i.e., 14.6 ppb). The monthly average of NO_2 concentration depicted seasonal variations particularly in the urban areas, showing higher concentration in winter and lower concentration in summer. Strong locality of NO_2 concentration distribution illustrates that the locations near the metropolitan areas (e.g., Gyeonggi and Chungnam provinces) had the highest concentration during the measurement period. A significant positive correlation between NO_x emissions and NO_2 concentration was observed, suggesting that the magnitude and proximity to sources of atmospheric nitrogen oxides would be important controlling factors.

Key words : Nitrogen dioxide(NO_2), Air pollution, Forest area, National monitoring

I. 서 론

대기 중의 이산화질소(Nitrogen dioxide, NO_2)는 주로 차량의 배기가스 및 난방연료의 탄화 등의 과정에서 발생하는 대기오염물질로서 대기 중에서 일정농도 이상일 때 인체는 물론 생태계와 자연환경에 해로운 영향을 미친다(Kim and Bong, 1998; Carmichael *et al.*, 2002; Reddy and Venkataraman, 2002). 또한 광화학 반응을 통해 2차 대기오염물질인 오존의 생성에

기여하는 전구물질이기도 하지만(Atkins *et al.*, 1995; Kim *et al.*, 2001; Sakugawa, 2004), 그 자체로 수목의 생장저하, 잎의 조직 파괴, 토양 산성화 등 산림에 생태적 악영향을 초래하기도 한다(Percy and Ferretti, 2004; Smith, 1990; Yamada *et al.*, 1996).

산림생태계에 미치는 대기 중 질소의 영향은 유입 과정에서의 성장(건성, 습성)과 유입량에 따라 일차적으로 달라지며 그 반응체의 종류(수목, 식생, 토양, 미생물 등)에 따라서도 다르게 나타난다. 이와 관련하여

* Corresponding Author : Seungwoo Lee
(soilloverlee@forest.go.kr)

대기 중 질소산화물의 침적이 산림생태계에 미치는 영향을 규명하고자 하는 다양한 연구가 있어왔다. 이 중 질소포화(N saturation)에 대한 산림의 반응을 분석한 연구에서는 수종별 민감도에 따라 임목의 생장과 고사율이 다르게 나타나며, 임목의 고사 원인 중의 하나는 토양의 산성화로 인한 토양 중 Ca:Al 비율의 감소라는 결과가 있다(Wallace *et al.*, 2007). 또한 Gundersen (1999)은 산림생태계에 대한 질소 유입량 증가의 위험성을 주장하면서, 질소 유입이 초기에는 임목생장에 도움이 되는 시비효과로 작용하지만 이후에는 지피식생의 변화, 양분 불균형, 토양 산성화 등의 부정적 영향을 초래한다고 보고하였다.

한편 Lu *et al.*(2008)은 중국을 포함한 몇몇 국가들에서 보고된 연구자료를 종합하여 산림의 종다양성 감소를 초래하는 3대 원인 중 하나가 질소강하물의 증가라고 주장하면서 이 때문에 식물종, 토양미생물종 및 동물종의 다양성이 위협받을 수 있음을 강조하였다. 또한 질소강하물의 영향은 임목의 성장에도 관련되는데, Tolunay(2003)는 체코에서 이산화질소를 포함한 대기오염도가 높은 지역과 낮은 지역의 임목 연륜폭을 비교하여 분석한 결과, 1985년부터 1998년까지 대기오염의 영향을 받은 지역에서의 연륜폭이 유의적으로 낮았다고 하였다. 또한 Shan(2000)은 1970년대 초반부터 시작된 일본에서의 대면적의 소나무림 고사 및 쇠퇴의 원인을 늦은 겨울과 이른 봄철의 최저기온의 급감 이외에도 질소강하물에 의한 내한성 감소 및 생물계절성의 가속화로 보고한 바 있다. 이러한 질소강하물의 생태적 영향에 대한 관심은 아시아 지역에서 더욱 부각되고 있는데, 이는 1961년에 연간 14.4TgN/a이었던 것이 2000년에는 67.7TgN/a, 2030년에는 105,314.4TgN/a으로 증가할 것으로 예측하고 있기 때문이다(Zheng *et al.*, 2002).

이러한 대기 중 질소산화물에 대한 국내 관측체계를 살펴보면 환경부에서 전국 71개 도시지역을 대상으로 원격감시체계(Tele-Monitoring System)를 통해 실시간으로 측정하는 것과 국립산림과학원에서 전국 65개 산림지역을 대상으로 확산형 패시브 샘플러(passive diffusive sampler)를 이용하여 월 단위로 관측하는 것을 들 수 있다. 이중 산림지역은 대도시나 공단지역에 비해 상대적으로 질소산화물 배출원이 적지만 바람에 의해 장거리 이동되는 요인과 온실가스의 산림내 저장에 질소순환이 중요하게 작용하기 때문에 지속적인 관

측이 요구되는 부분이다(Roger, 2003; de Vries *et al.*, 2009). 그러나 산림지역에서의 이산화질소 농도와 관련된 선행 연구의 대부분이 유역 규모 또는 지역 규모에 국한되어 국가 규모에서의 관측정보가 부족한 실정이다. 따라서 본 연구는 2002-2009년간 전국 65개 산림지역의 고정조사지에 대한 대기오염도 모니터링 결과를 토대로 산림지역에 있어서의 대기 중 이산화질소의 시간 및 공간적 분포특성을 도시지역과 비교, 분석하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 연구 대상지

산림지역의 대기 중 이산화질소 농도를 조사하기 위하여 전국을 40×40km 크기의 65개 격자로 나누고 각각의 격자 중심점에서 가장 인접한 산림지역을 조사 대상으로 하였다. 전체 조사지는 소나무, 리기다소나무, 잣나무로 구성된 침엽수 임상 만을 대상으로 하였으며 수령은 3~5영급에 해당하였다.

Fig. 1. The distribution map of the monitoring locations of air pollution in the forest areas.

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 Fig. 1과 같다.

2.2. 이산화질소 농도 측정

산림조사지 내 이산화질소의 매월 가중평균농도를 측정하기 위하여 2002년 3월부터 2009년 12월까지 확산형 패시브 샘플러(NO_B-P01, Envors)를 이용하였다. 패시브 샘플러는 대기오염물질의 공간분포 분석을 위해 매우 유용한 방법으로 널리 이용되고 있다(Song, 2005; Varshney and Singh, 2003; Yamada *et al.*, 2006). 이를 위해 굴뚝 등의 인위적인 배출원과 근접하지 않도록 주의하여 지상으로부터 2 m 높이에 패시브 샘플러를 설치하였다(Sanz *et al.*, 2007). 도시지역과의 농도 비교를 위하여 환경부의 71개 도시지역에 대한 동일기간의 월평균 이산화질소 농도자료를 이용하였다(Ministry of Environment, 2002-2009).

2.3. 전처리 및 분석

매월 수거한 패시브 샘플러는 지퍼백 또는 바이알에 담아 냉장 보관한 후 분석에 이용하였다(Delgado-Saborit *et al.*, 2006). 대기 중 이산화질소 포집을 위해 이용한 패시브 샘플러의 흡수제는 탄산수소나트륨(sodium bicarbonate)이었으며, 추출에는 초순수를 이용하였다. 이때 0.5ml 유리바이알에 패시브 샘플러 흡수여지와 초순수 5ml를 담아 50~60°C 수온의 초음파세척기에서 20분간 추출한 후 0.45μm의 멤브레인 필터(membrane filter, DISMIC-25cs, ADVANTEC)를 사용하여 여과한 시료를 국립산림과학원에 설치된 이온 크로마토그래피(ion Chromatography, S-5200, Sykam)로 분석하였다(Korea forest research institute, 2003).

본 연구에서 사용한 패시브 샘플러를 30일간 보관한 공시험 농도는 0.27 ± 0.03 ppb(RSD=8.8%)로서 Yim *et al.*(2007)이 보고한 정량한계 농도와 유사한 수준이었다.

2.4. 농도 환산

질산이온(NO₃⁻) 표준용액(1, 5, 10ppm)으로 보정한 후 추출한 시료의 용액상 농도(ppm)에 환산계수(458), 회석배수, 방치일수 등을 적용하여 기체상태의 농도

(ppb)로 환산하였으며 이 때 이용한 산출식은 다음과 같다(Jung *et al.*, 2002).

$$\text{시료농도(ppb)} = \frac{\text{용액상ppm 농도} \times 5(\text{추출액량}) \times \text{환산계수}}{\text{방치일수} \times 24(\text{hr})} \quad (1)$$

2.5. 통계 분석

2002년에서 2009년까지의 전국 9개 도의 이산화질소 농도와 질소산화물(NO_x) 배출량간의 상관관계를 알아보기로 SPSS 프로그램(11.0)을 이용하여 T-테스트(pearson correlation) 양측검정을 실시하였고 P<0.01인 것을 통계적 유의성이 있는 것으로 판단하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 연도별 농도 변화

전국 65개 산림 조사지에서의 대기 중 이산화질소 농도의 연차별(2002~2009) 변화를 보면 2003년을 시작으로 점차 감소하는 추세를 보이고 있다(Fig. 2). 또한 도시지역의 이산화질소 농도 또한 2002년 이후 큰 차이는 아니지만 낮아지는 경향을 보이고 있다. 이들 산림과 도시지역에서 보여지는 이산화질소 농도의 감소 추세는 2000년대에 들어서 정부의 청정연료사용 의무화 및 탈질산화 정책으로 인하여 배출량이 감소한 것에 기인한 것으로 판단된다.

연구기간 동안의 전체 65개 산림지역에서 관측된 이산화질소의 연평균 농도는 8.0ppb이었으며, 유럽연합에서 제시하고 있는 식생과 생태계보호를 위한 기준치(14.6ppb, 30μg/m³)와 비교하면 낮은 수준이었다

Fig. 2. Changes in the annually averaged concentration of ambient nitrogen dioxide (NO₂) for the forest areas and urban areas from 2002 to 2009.

(EC Directive, 1999). 이러한 비교는 우리나라를 포함하여 이산화질소의 생태적 위험수준에 대한 국가기준을 제시하고 있는 지역이 없는 관계로 유럽의 기준에 준하였다.

또한 동일 기간에 환경부에서 측정한 도시지역의 연평균 농도인 19.4ppb의 약 2/5로 낮은 수준이었다. 이처럼 산림지역에서의 연평균 이산화질소 농도는 적정기준 농도 이하로 나타났으나 산림의 질소포화도 인한 물질 불균형을 초래할 수 있음을 감안할 때 산림 건강성에 영향을 미치는 지표로서 지속적인 관측이 요구된다.

전술한 산림과 도시지역 간의 농도 차이는 이산화질소의 주요 배출원이 주로 차량의 배기가스인 점을 고려할 때, 도시지역에 비해 교통량이 상대적으로 적은 산림지역의 오염원 특성에 기인한 것으로 판단된다(Sakugawa *et al.*, 2004).

3.2. 계절별 농도 변화

산림지역의 대기 중 이산화질소 농도의 계절적 변화 특성을 파악하기 위해 2002~2009년간 월별 자료를 평균한 결과, 월별로는 큰 차이를 나타내지 않았다(Fig. 3). 계절별 농도는 겨울(12~2월) 3.8ppb, 가을(9~11월) 3.7ppb, 봄(3~5월) 3.2ppb, 여름(6~8월) 2.8ppb 순으로 나타났다. 이처럼 하절기에 이산화질소 농도가 낮은 결과는 Lee *et al.*(2010)이 보고한 산림지역에서의 대기 중 이산화황(SO_2)의 계절별 변화와 같은 경향을 보인다. 이러한 계절적 패턴의 유사성은 연료 사용량이 상대적으로 많은 동절기와 강우 희석효과가 큰 하절기의 계절적 특성이 이산화질소와 이산화황의 대기 중 분포에 동일하게 작용하기 때문으로 판단된다.

이산화질소 농도의 계절별 경향은 산림지역에서 보

Fig. 3. Changes in the monthly averaged concentration of ambient nitrogen dioxide (NO_2) for the forest areas and urban areas from 2002 to 2009.

다 도시지역에서 뚜렷하게 나타났다. 이러한 결과는 대기중의 이산화질소가 산림지역에 비해 현저히 높은 도시지역에서 하절기 강우에 의한 희석 현상이 보다 뚜렷하게 나타나기 때문으로 사료된다.

하절기에 이산화질소 농도가 낮은 결과와 관련해서 Kurita *et al.*(2003)은 여름에 녹음이 우거져 이산화질소의 흡수 및 흡착 등의 차단작용이 크게 나타나기 때문이라고 보고한 바 있다. 또한 Yim *et al.*(2007)은 기온이 높은 낮 시간대에 고농도로 존재하는 OH 라디칼(radical)이 대기 중에서 이산화질소와 반응하여 질산(HNO_3)을 형성하는 과정에서 이산화질소의 농도를 감소시킬 수 있기 때문으로 해석하였다. 이 외에도 하절기에 잦은 강우에 의해 대기 중의 이산화질소와 같은 가스상 오염물질이 대기 중에 오래 잔류하거나 또는 멀리 확산되지 못하는 기상요인도 관련이 있을 것으로 판단된다(Zhang *et al.*, 2006).

한편 초겨울에 이산화질소 농도가 높은 결과와 관련하여, Kaneyasu(1994)는 초겨울에 이산화질소의 농도가 높아지는 것은 광화학반응이 주요하게 작용하기 때문으로 보고하였다. 물론 겨울철에 낮은 혼합도에 의해 배출된 오염물질의 확산이 원활하게 일어나지 않기 때문에 이산화질소 농도가 높아지는 현상과도 관련이 있겠다(Yim *et al.*, 2007). 한편 Nishikawa와 Kannari(2010)는 대기 중 이산화질소 농도의 계절 변화가 질소산화물 배출량의 계절 변화와 밀접하다는 연구결과를 보고하였다. 이 외에도 이상에서 언급한 이산화질소의 계절별 농도 변화는 이들 물질의 광화학적 반응, 오염물질 배출량, 장거리 이동성, 강수량 등 다양한 요인에 의해 영향을 받기 때문에 보다 세부적인 해석이 요구된다.

2.3. 지역별 분포 특성

전체 조사지에 대한 이산화질소 농도의 지역별 분포 경향을 파악하기 위하여 전국 65개 산림지역의 이산화질소의 연평균 농도를 도별로 산출한 결과(Fig. 4), 경기, 충남, 경남, 충북, 강원, 전남, 전북, 제주 순으로 높게 나타났다. 지역 평균값이 15.1ppb로 가장 높았던 경기 지역은 서울과 인천 등 수도권을 포함하고 있어 높은 차량밀도에 따른 이산화질소 배출량이 상대적으로 큰 것이 주원인으로 판단된다. 그러나 나머지 모든 지역이 유럽연합에서 제시하는 생태적 제한기준값(14.6ppb)보다 낮게 나타나 산림생태계에 미치는 이산화질소의

Fig. 4. Annually averaged concentration of ambient nitrogen dioxide (NO₂) for the forest and urban areas categorized by province from 2002 to 2009.

Fig. 5. Relationship between ambient nitrogen dioxide concentration and NOx emission categorized by province from 2002 to 2009. Data source of NOx emission were from the Ministry of Environment (<http://stat.me.go.kr/nesis/index.jsp>). *indicates significant correlation at the 0.05 level, whereas **indicates significant correlation at the 0.01 level.

영향은 이산화질소 발생원이 밀집한 대도시 일부 지역에 국한되어 발생할 것으로 보여진다. 이러한 산림지역에서의 지역간 이산화질소의 농도 차이는 도시지역에서도 유사한 경향을 보였는데, 제주, 강원, 전남 등의 지역에서 대체로 낮게 나타났다.

전술한 지역별 대기 중 이산화질소 농도 결과가 질소 배출량과 어떠한 연관이 있는가를 밝히기 위해 통계자료가 확보된 2002~2009년간의 도별 질소산화물의 연간 배출량과 도별 산림지역 및 도시지역의 연평균 이산화질소 농도간의 관계를 Fig. 5에 나타내었다. 산림지역과 도시지역 모두에서 대기 중 연평균 이산화질소 농도와 질소산화물 배출량간의 관계가 통계적으로 유의성을 가진 양의 상관관계를 나타냈다. 변수 간 유의확률 또한 질소산화물 배출원이 상대적으로 많은 도시지역($p < 0.01$)에서 더 높게 나타나 도시지역에서의

대기 중 이산화질소 농도가 질소산화물 배출량에 더 많은 영향을 받음을 알 수 있다. 이러한 결과는 정도의 차이는 있으나 산림과 도시지역의 대기오염도 수준이 해당 지역 내 대기오염물질의 배출량과 배출원의 인접도에 따라 영향을 받음을 의미한다.

적 요

전국 65개 산림지역을 대상으로 확산형 패시브 샘플러를 이용하여 2002년부터 2009년까지 월 단위로 대기 중 이산화질소(NO₂) 농도를 측정하고 도시지역에서의 결과와 비교함으로써 산림지역에서의 이산화질소 농도의 시간적 및 공간적 분포 특성을 규명하였다. 연구기간 동안 산림 내 NO₂의 농도는 서서히 감소하는 경향을 보였으며, 전국 산림의 연평균 농도는 8ppb로 도시지역의 평균값(19.4ppb)과 생태적 기준값(14.6ppb)보다 낮았다. 계절별로는 NO₂의 농도가 산림지역과 도시지역 모두에서 동절기(3.8ppb)에 높고 하절기(2.8ppb)에 낮은 경향을 보였는데, 도시지역이 더 뚜렷한 계절변화를 보였다. 지역별로는 다른 지역에 비해 수도권 지역과 인접한 경기와 충남에서 이산화질소의 연평균 농도가 높게 나타났다. 이러한 지역간 이산화질소 농도 차이의 원인을 규명하기 위해 질소산화물 배출량과 이산화질소 농도 간의 상관관계를 분석한 결과, 유의적인 정의 상관성이 나타남에 따라 질소산화물 배출원의 규모와 근접성이 대기 중 이산화질소의 농도를 결정짓는 중요한 인자임을 시사하였다.

REFERENCES

- Atkins, D. H. F., and D. S. Lee, 1995: Spatial and temporal variation of rural nitrogen dioxide concentrations across the United Kingdom. *Atmospheric Environment* **29**(2), 223-239.
- Carmichael, G. R., D. G. Streets, G. Calor, 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. *Environmental Science & Technology* **36**(22), 4707-4713.
- Delgado-Saborit, J. M., and V. Esteve-Cano, 2006: Field Study of Diffusion Collection Rate Coefficients of a NO₂ Passive Sampler in a Mediterranean Coastal Area. *Environmental Monitoring and Assessment* **120**(1), 327-345.
- de Vries, W., S. Solberg, M. Dobberty, H. Sterba, D.

- Laubhann, M. van Oijen, C. Evans, P. Gundersen, J., Kros, G. W. W. Wamelink, G. J. Reinds, and M. A. Sutton, 2009: The impact of nitrogen deposition on carbon sequestration by European forests and heathlands. *Forest Ecology and Management* **258**, 1814-1823.
- EC Directive, 1999: Council directive 99/30/EC, relating the limit values for sulphur dioxide, nitrogen dioxide and oxides of nitrogen, particulate matter and lead in ambient air. Official Journal of the European Communities L163, 41-60.
- Gundersen, P., 1999: Nitrogen status and impacts of nitrogen input in forests – indicators and their possible use in critical load assessment. *Presented at Conference on Critical Loads*, Copenhagen, November 1999.
- Jung, E. S., S. T. Kim, S. K. Kim, S. M. Hong, and H. S. Chung, 2002: Preliminary survey for the design of the air pollution monitoring system in antarctic area. *The Institute of Environmental Studies* **6**, 61-72.
- Kim, S. D., and C. K. Bong, 1998: A study on distribution of NO₂ concentration using the passive sampler in Seoul. *The Journal of Urban Sciences* **24**(1), 159-164.
- Kim, S. T., S. G. Kim, H. M. Kim, and E. S. Jung, 2001: Air Quality Assessment of Industrial Complex Using Passive Sampler. *The Institute of Environmental Studies* **5**, 67-81.
- Korea forest research institute, 2003: *Air pollution and forest ecosystem changes by monitoring*. Research Materials 204. 259pp.
- Kurita, N., N. Iwamoto, T. Yamada, S. Takezaki, N. Maeda, M. Kotajima, 2006: Measurement of nitrogen dioxide in and around experimental station at Tanashi, The University Forests, The university of Tokyo -Effect of urban forest to nitrogen dioxide concentration-. *Miscellaneous Information-Tokyo University Forests* **45**, 1-27.
- Lee, S. W., C. H. Lee, D. H. Ji, and H. J. Youn, 2010: Temporal and spatial distribution of ambient sulfur dioxide concentration in forest areas, Korea. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* **43**(6), 1035-1039.
- Lu, X., J. Mo, and S. Dong, 2008: Effects of nitrogen deposition on forest biodiversity. *Acta Ecological Sinica* **28**(11), 5532-5548.
- National Institute of Environmental Research, 2002-2009: *Annual Report of Ambient Air Quality in Korea*. Ministry of Environment.
- 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, & Soil Pollution* **215**(1), 229-237.
- Percy, K. E., and M. Ferretti, 2004: Air pollution and forest health: toward new monitoring concepts. *Environmental Pollution* **130**, 113-126.
- Reddy, M. S., and C. Venkataraman, 2002: Inventory of aerosol and sulphur dioxide emissions from India: I- Fossil fuel combustion. *Atmospheric Environment* **36**(4), 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. *Environmental Pollution* **126**(3), 301-311.
- Sakugawa, H., T. Yuhara, and T. Hirakawa, 2004: Behavior and sources of atmospheric ozone, Nitrogen oxides and sulfur dioxide in Yakushima, Japan. *Science Reports* **30**, 73-85.
- Sanz, M. J., V. Calatayud, and G. Sanchez-Pena, 2007: Measures of ozone concentrations using passive sampling in forests of South Western Europe. *Environmental Pollution* **145**(3), 620-628.
- Shan, Y., 2000: Phenological disorder induced by atmospheric nitrogen deposition: Original causes of Pine forest decline over Japan. Part II. *Water, Air, & Soil Pollution* **117**, 205-215.
- Smith, W. H., 1990: Air pollution and forests. Springer-Verlag New York Inc. 117-290.
- Song, Y. B., 2005: A study on correlations between distribution of sulfur dioxide concentration and soil environments by using passive samplers. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* **27**(10), 1025-1029.
- Tolunay, D., 2003: Air pollution effects on annual ring widths of forest trees in mountainous land of Izmir (Turkey). *Water, Air, and Soil Pollution: Focus* **3**, 227-242.
- Varshney, C., and A. Singh, 2003: Passive samplers for NOx monitoring: A critical review, *Environmentalist* **23**(2), 127-136. DOI: 10.1023/A:1024883620408.
- Wallace, Z. P., G. M. Lovett, J. E. Hart, and B. Machona, 2007: Effects of nitrogen saturation on tree growth and death in a mixed-oak forest. *Forest ecology and management* **243**, 210-218.
- Yamada, E., D. Yoshida, L. C. Hu, and T. Yamada, 1996: A simple measurement method of atmospheric nitrogen dioxide and sulfur dioxide in mountains using passive samplers. *Bunseki Kagaku* **45**(12), 1083-1088.
- Yim, B. B., S. T. Kim, J. H. Jung, and B. J. Lee, 2007: Air Quality Monitoring in Daejeon City with Long-Term NO₂ and SO₂ Passive Diffusive Samplers. *Journal of the Environmental Sciences* **16**(2), 187-195. (in Korean with English abstract)
- Zhang, L., R. Vet, and D.V. Michelangeli, 2006: Numerical investigation of gas scavenging by weak precipitation. *Journal of Atmospheric Chemistry* **54**, 203-231.
- Zheng, X. H., C. Fu, X. Xu, X. Yan, Y. Huang, S. Han, and G. Chen, 2002: The Asian nitrogen cycle case study. *AMBIO: A Journal of the Human Environment* **31**(2), 79-87.