

Flux-gradient similarity theory 적용에 따른 태화산 산림지표 토양NO플럭스 분석

Practical Use of Flux Gradient Similarity Theory for Forest Soil NO Flux at Mt. Taewha

김 득 수*

군산대학교 환경공학과 대기환경연구실

(2014년 11월 4일 접수, 2014년 12월 11일 수정, 2014년 12월 11일 채택)

Deug-Soo Kim*

Atmospheric Environmental Research,

Department of Environmental Engineering, Kunsan National University

(Received 4 November 2014, revised 11 December 2014, accepted 11 December 2014)

Abstract

Terrestrial vegetation has been known as a main source of biogenic volatile organic compounds (BVOCs). Isoprene and monoterpene among the BVOCs are most abundant species emitted by forests, and have a significant impact on atmospheric chemistry. Abundance of these species could lead to an increase or decrease in the production of natural tropospheric ozone in forests, depending on the nitric oxide (NO) concentration. Soil is the most significant source of natural NO. Understanding of NO emission from forest soil could be critical in evaluation of air quality in the forest area. Flux-gradient similarity theory (FGST) was applied for practical use to estimate forest soil NO emission at Mt. Taewha where is available micro-meteorological data near surface monitoring from flux tower. NO fluxes calculated by FGST were compared to flux results by flow-through dynamic chamber (FDC) measurement. Surface NO emission trends were shown between two different techniques, however their magnitudes were found to be different. NO emissions measured from FDC technique were relatively higher than those from theoretical results. Daily mean NO emissions resulted from FGST during Aug. 13, 14 and 15 were 0.28 ± 8.45 , 2.17 ± 15.55 , and $-3.18 \pm 13.65 \mu\text{g m}^{-2} \text{hr}^{-1}$, respectively, while results from FDC were 2.26 ± 1.44 , 5.11 ± 3.85 , and $2.23 \pm 6.45 \mu\text{g m}^{-2} \text{hr}^{-1}$. Trends of daily means were shown in similar pattern, which NO emissions were increasing during late afternoon ($r^2=0.04$). These emission trends could be because soil temperature and moisture influence importantly soil microbiology.

Key words : Flux gradient, Similarity theory, Soil NO emission, Dynamic chamber, Forest soil, Photochemical ozone

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)63-469-4764, E-mail : dskim@kunsan.ac.kr

1. 서 론

습지, 산림 등을 포함한 주요생태환경에서 일정 공간·시간규모에서 대기화학적으로 중요한 기체 배출량을 산정하는 것은 어렵다 (Megonigal and Guenther, 2008). 그러나 이들은 지표농도 분포에 영향을 주어 대기질 변화를 초래할 수 있어 그들의 배출경향을 이해하기 위한 지속적 감시 (monitoring)가 요구된다. 이를 통한 배출량감시는 기후변화와 대기질을 동시관리하여 효율성을 높일 수 있는 대기질-기후변화 통합관리 (Melamed *et al.*, 2011)에도 활용될 수 있다 (Kim and Kim, 2013). 특히 인위적 배출에 상당하는 전지구배출량의 약 40% 수준으로 토양 내 생지화학과정으로 배출되는 NO와 N₂O (IPCC, 2006; Warneck, 2000; Yienger and Levy, 1995)는 지역 오존생성과 기후변화에 민감할 것으로 판단되지만 토양배출조사연구는 상대적으로 매우 부족한 실정이다 (Kim and Kim, 2002; Papen and Butterbach-Bahl, 2000).

산림지표에서 배출되는 NO는 주변의 인위적 오염원의 영향이 배제된다 해도 산림환경으로부터 배출되는 BVOC와 함께 광화학생성에 기인하는 지역 오존과 이차오염물질들의 생성을 촉진시킬 수 있다. 결과적으로 산림에서 토양NO의 배출은 산림대기질 변화에 중요한 요인으로 작용하게 되며, 광화학과정을 통하여 오존 등 산림생태계와 지역 대기상태를 악화시키는 유해물질을 생성하는 데 기여할 수 있다 (Laffineur *et al.*, 2011).

이번 연구에서는 산림토양에서의 NO지표배출 규모를 산정하는 방법으로 자주 활용되고 있는 미기상학 방법 중에서 플럭스경도 유사법 (flux gradient similarity method)을 적용하고, 조사지역에서 측정된 지표층 높이에서 측정된 미기상자료를 사용하여 지표NO 배출량을 산출하였다. 이렇게 이론적 유사방법에 따라 산출된 NO배출량의 배출규모와 경향을 동일한 지역과 일정 동안 flow-through dynamic chamber (FDC)에 의해 측정된 배출량과 상호 비교하여 분석하였다. 이는 지표층에서 연속적인 미기상측정을 통해 보다 수월하게 연속적인 지표NO배출량을 산정하여 지역오존 생성으로 인한 대기질 관리의 실용성을 높이기 위한 목적이다.

2. 연구내용 및 방법

태화산 산림지표NO배출량을 지표층 내의 플럭스-경도 유사이론 (flux-gradient similarity theory; FGST)을 적용하여 산정하였으며, 측정된 지표NO배출량과의 비교분석은 유동성챔버 (flow-through dynamic chamber; FDC)를 사용하여 태화산 대기측정타워에 인접한 지점에서 2013년 8월 중 15일간 연속으로 측정된 지표NO배출량 결과와 함께 수행되었다. 측정기간 동안의 매시간 평균배출량을 산출하여 사용하였으며, FDC에 의한 배출량측정 기간과 동일한 기간 동안의 미기상 자료를 활용해 FGST방식으로 계산된 NO배출량과의 비교를 통해 분석하여 제시하였다.

2.1 유동성챔버 (FDC)에 의한 NO지표배출량

지표배출량 측정에 적용한 유동성챔버 시스템은 그림 1에서 제시한 기초설계를 적용하여 제작하였다. 챔버 내벽과의 접촉으로 인한 기체손실을 최소화하기 위해 챔버몸체를 스테인레스 스틸(SS)로 하였으며, 원통형의 금속체 챔버 형태로 지면 위에 설치되는 몸체와 지표에 삽입될 하체로 구분되었다. 내부 용적은 13리터로 하체는 측정 하루 전 현장에 토양속 5~7cm 깊이로 설치하여 측정 시 챔버 설치에 따른 지표면 교란을 최소화하도록 하였다. 몸통 면에 위치한 외기 유입구와 유출구를 통하여 일정 유량(Q)의 외기를 연속적으로 흐르게 하여 챔버 내부를 정상상태 (steady state)를 유지토록 한다. NO농도 측정은 화학발광법 (chemiluminescence method)에 의한 NO_x 연속측정기 (TECO 42S, Thermo Environmental Instruments Inc.)의 시료채취부와 연결하여 연속적으로 NO농도를 모니터링 할 수 있도록 하였다. NO배출량은 다음과 같이 챔버 내 질량평형 (mass balance)식에 의해 결정되었다 (Kim, 2005).

$$J = \frac{Q}{A} ([C]_f - [C]_0) \quad (1)$$

이때 A는 챔버의 밑면적; m², Q는 외기 유량; m³ s⁻¹, J는 NO 배출량 ppb m s⁻¹, [C]_f는 유출구에서의 NO농도 (ppb), 그리고 [C]₀는 유입구에서의 NO농도 (ppb)이다.

Flow-through dynamic chamber for Nitric oxide (NO)

NO(normally open): continuously measure soil NO emission
 NC(normally close): measure NO concentration near surface

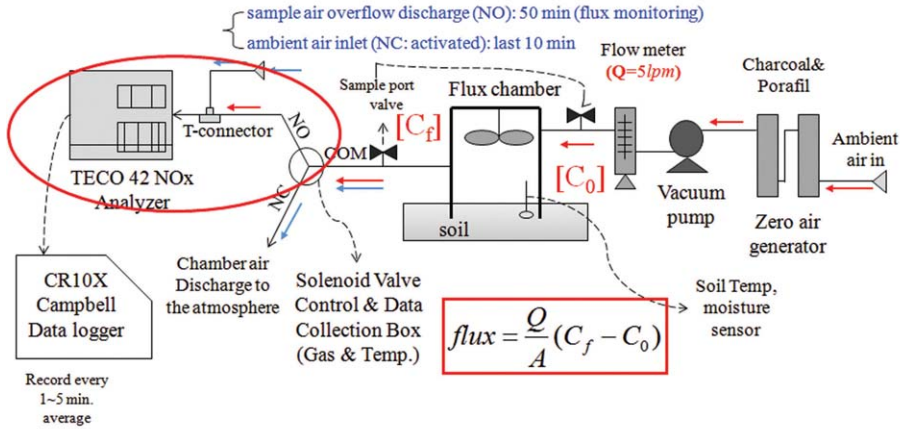


Fig. 1. A schematic flow-through dynamic chamber system for surface NO emission in x-y plot during August 13~ 15, 2013.

2. 2 플럭스-경도 상사론 (FGST)을 이용한 NO지표배출량

미기상 플럭스 측정방법인 플럭스경도법 (flux-gradient similarity method)을 적용하여 산림 지표층에서의 NO플럭스를 산출하였다. 플럭스타워 하층에서 측정된 미기상 자료를 이용하여 간편하게 산림지표NO 배출량을 확인할 수 있다면 지표층 내에서의 오존 생성에 따른 대기질 변화를 평가하는 데 기여할 수 있을 것이다. 이를 위하여 태화산 인근 대기환경에서의 광화학오존 생성에 대한 BVOC의 영향 정도를 판단할 목적으로 가동 중인 태화산 플럭스 타워에서 측정되고 있는 자료 중 일부(대기오염물질 측정자료, 풍속 등 기상, 토양관련자료)를 이용하였다. 또한 이론적 방법론과 측정된 결과와의 비교연구를 통해 미기상 관측 자료를 활용하여 이론적으로 배출량을 산정할 수 있는 방법을 도출할 수 있다면, 향후 지속적인 측정 결과와의 비교 연구를 통해 현업에 적용할 수 있는 객관적이고 사용이 편리한 배출량 산정기술을 정립해 나갈 수 있을 것이다.

지표층 내 대기안정도를 중립으로 가정한 flux gradient 상사법 (similarity theory)을 이용하면 두 층 간 (z_1 과 z_2)의 NO농도와 풍속 차이에 의해 NO배출량을 다음 식에 의해 구할 수 있다 (Lenschow, 1995).

$$F_{NO_{surface}} = - \frac{(U_2 - U_1)k^2 (C_2 - C_1)}{[\ln(z_2/z_1)]^2} \quad (2)$$

여기서 k 는 von Karman 상수 (0.4)이며, z_1 (아래층)과 z_2 (위층)는 두 층의 지표로부터의 높이, U_1 과 U_2 는 z_1 과 z_2 에서의 평균풍속, C_1 과 C_2 는 z_1 과 z_2 에서의 NO농도이다. 이때 필요한 변수들은 태화산 플럭스 측정타워의 최하층 (4.1 m)에서의 미기상 풍속자료이다. FDC에 의해 지표NO배출량 측정 시에 지표 위 ~30 cm에서 대기 중 NO의 농도를 측정하였으며, 그 측정값을 C_1 에 적용하였다. 결과적으로 하층인 $z_1=0.3$ m이며, z_1 에서의 풍속 (U_1)은 거의 지표 수준인 0으로 가정할 수 있었으며, U_2 와 C_2 는 $z_2=4.1$ m에서의 풍속과 NO농도이다. 결과적으로 토양지표NO플럭스 ($F_{NO_{surface}}$)는 다음과 같이 단순화 될 수 있다.

$$F_{NO_{surface}} = - \frac{U_2 k^2 (C_2 - C_1)}{[\ln(z_2/z_1)]^2} \quad (2)$$

이렇게 이론적으로 산출된 결과와 실제 flow-trough dynamic chamber 측정 배출량과의 비교분석은 이론적 방법론의 실용성 평가와 함께 태화산 산림으로부터의 지표NO배출특성과 지역에서의 광화학오존생성에 대한 산림NO배출의 영향을 이해하는 데 도움이

될 수 있다. NO 이외에도 N_2O 와 CH_4 의 지표배출량이 동일한 기간 동안 닫힌 챔버법(closed chamber)을 적용하여 배출량 변동성을 조사하였으며, 이때 배출량에 영향을 줄 수 있는 주요 환경인자인 토양온도와 토양수분량도 조사되었다.

3. 연구결과 및 논의

3.1 산림지표층 내의 NO농도의 변화와 NO지표배출량

그림 2는 국립환경과학원에서 운영 중인 태화산 대기오염측정소(Kim and Kim, 2013)에 설치된 플렉스타워의 두층인 4.1 m와 9.5 m에서 측정된 대기환경 NO농도와 함께 실제 FGD를 이용하여 실측된 토양 NO배출량을 함께 도시하여 그 변화와 대기농도와 지표배출량 사이의 연관성을 살펴보았다. 그림에서 0.3 m에서의 NO농도는 배출량측정 시에 챔버 상부에서 측정된 대기환경 농도 값을 적용한 것이다.

그림 2에서 보면 챔버법에 의한 지표NO배출량의 경우 8월 초경에 보다는 중순으로 가면서 지표배출이 상대적으로 높아지는 경향을 보였으며, 측정기간 후반으로 갈수록 더운 날씨가 계속되어 지표기온의 상승으로 인해 배출증가가 서서히 증가한 것으로 사료되며, 이와 관련된 토양온도와의 상관성 연구결과는 투고준비 중인 배출량과 토양조건인자와의 분석

을 통해 제시될 것이다. 4.1 m와 9.5 m 층 사이의 NO농도 차이는 비교적 적게 나타났으나, 0.3 m에서의 NO농도와는 비교적 크게 나타났다. 지표인근에서의 대기NO농도가 8월 5일을 제외하고는 대부분 오염타워에서 측정된 상층에 비해 높게 나타났으며, 측정기간 후반부(8월 14일~15일)에서는 특히 지표층(0.3 m)에서의 대기농도가 높은 시간대에서 상층부 지표농도와 토양배출량이 함께 증가하고 있는 경향을 보였다. 이러한 결과는 해 뜬 직후의 오전과 복사로 지표온도가 상승하는 늦은 오후에 관측된 높은 지표배출로 NO가 상층으로 확산되어 생긴 현상일 것으로 설명될 수 있다. 이번 측정에서 특이한 것은 이러한 상대적인 NO의 지표 고농도 현상이 오전(7~8시경)뿐 아니라 이른 새벽에도 나타나고 있는 것이다.

3.2 플렉스-경도상사론(FGST)에 의한 지표NO배출량 분석

태화산 대기오염측정타워 최하단 측정 높이인 4.1 m에서 측정된 NO농도와 FDC에 의한 지표플렉스 측정 시에 측정된 0.3 m에서의 NO농도 자료를 사용하여 2.2절에서 이미 제시한 FGST방법으로 식(2)를 적용하여 지표NO배출량을 산출하였다. FDC방법으로 실측된 지표NO배출량과의 비교 분석을 위하여 2013년 8월 3일부터 15일까지의 FDC측정기간 중에 태화산 대기오염타워에서 두층에서의 NO농도 측정치와 풍속자료를 이용하여 플렉스-경도상사이론에 따른

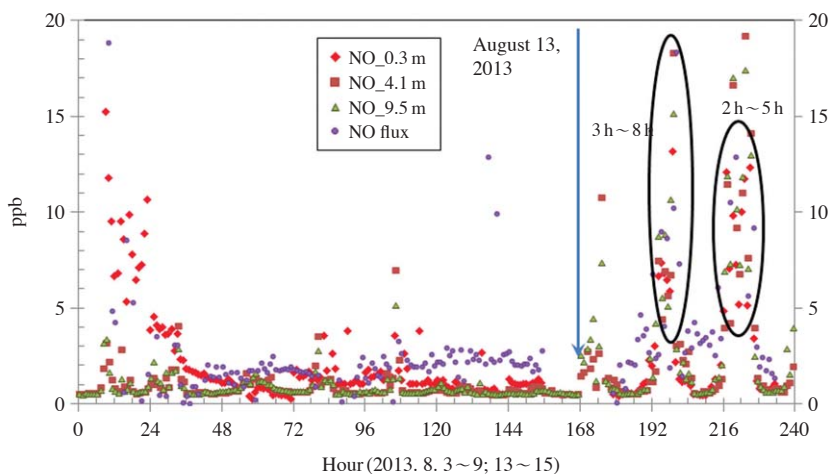


Fig. 2. Ambient NO concentrations for three different heights, and surface NO soil emission ($\mu\text{g m}^{-2} \text{hr}^{-1}$) measured by FDC method.

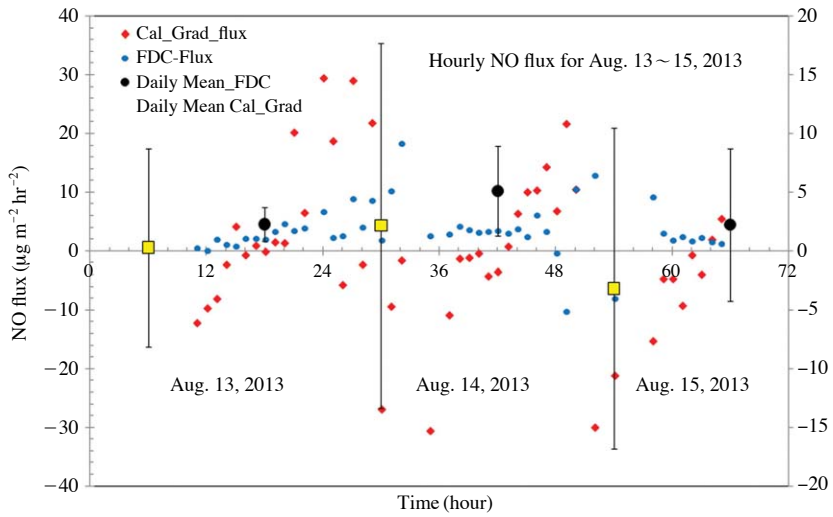


Fig. 3. Surface hourly soil NO emissions by FDC (small dot) and FGST (diamond). Daily means of FDC (large dot) and FGST (square) with one standard deviation indicating scale in right side.

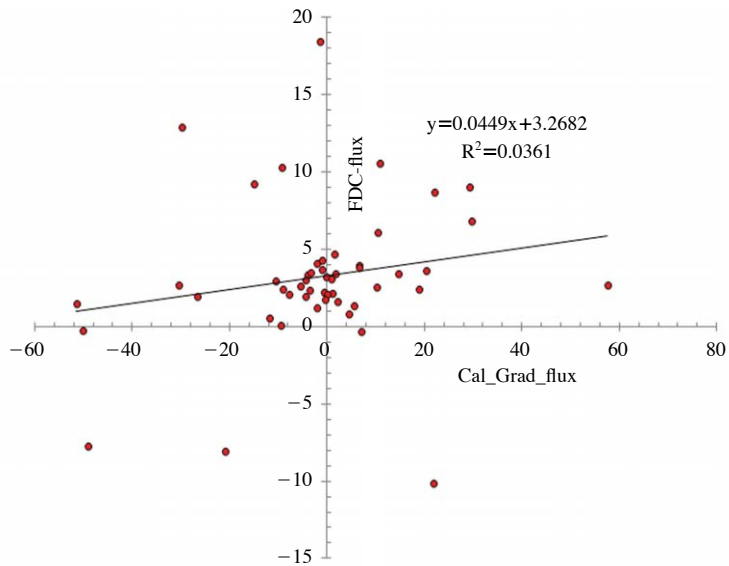


Fig. 4. Correlation between soil NO emissions ($\mu\text{g m}^{-2} \text{hr}^{-1}$) calculated by FGST and measured by FDC in x-y plot during August 13~15, 2013.

NO플럭스 산출식 (2)을 적용하여 NO지표배출량을 계산하였다. 산출결과에 따른 배출량비교는 대기오염 측정타워의 4.1 m에서 풍속과 농도자료 확보가 가능하였던 2013년 8월 13일부터 15일 동안이었으며, 각 방법에 따라 산출된 NO지표배출량을 그림 3에 제시

하였다. 비교 결과 플럭스챔버로 측정된 FDC에 따른 지표NO배출량은 대부분의 경우에서 양의 값으로 지표배출을 보인 반면에 FGST에 따른 플럭스 산출 값은 양(+)과 음(-)의 값들이 산출되었으며, 8월 15일 평균배출은 음(-)으로 산림지표가 대기 중 NO를 흡

수하는 것으로 나타나 실제 플럭스챔버에 의해 실측한 경우와 차이가 있음을 보였다. 이는 FGST의 적용 범위가 풍속 값의 지표층 내 변동에 따른 영향으로 제한될 수 있으며, 실제 이론적 근거가 지표층 대기 상태가 중립(neutral)일 경우를 가정하고 있어 그에 따른 차이일 것으로 추정된다. 8월 13일, 14일과 15일의 경도상사법에 따라 산출된 일평균 배출량은 순서대로 $0.28 \pm 8.45 \mu\text{g m}^{-2} \text{hr}^{-1}$, $2.17 \pm 15.55 \mu\text{g m}^{-2} \text{hr}^{-1}$ 과 $-3.18 \pm 13.65 \mu\text{g m}^{-2} \text{hr}^{-1}$ 이었으며, FDC로 측정된 배출량은 각각 $2.26 \pm 1.44 \mu\text{g m}^{-2} \text{hr}^{-1}$, $5.11 \pm 3.85 \mu\text{g m}^{-2} \text{hr}^{-1}$ 과 $2.23 \pm 6.45 \mu\text{g m}^{-2} \text{hr}^{-1}$ 이었다. 계산결과들이 상대적으로 변동 폭이 넓게 +/-영역으로 나타났으나, FDC에 의한 측정값은 변화 폭이 좁고 모두 양의 배출을 보였다. 일중 변화 경향은 유사하여 늦은 오후로 가면서 증가하는 경향을 보였으며, 이들 두 가지 방식에 따른 NO배출량의 선형(linearity) 상관성은 $r^2 = 0.04$ 으로 비교적 낮았으나, 배출 경향은 유사하였다(그림 4). 제한된 측정기간 이었음에도 불구하고 일 중 변화경향이 유사한 결과를 보인 것은 토양온도와 수분 등 미생물환경 변화에 영향을 주는 인자들이 중요하게 작용하였기 때문이었을 것이다.

4. 요약 및 결론

수도권 인근 산림지역 대기질관리와 대기화학적 특이성 조사를 위해 국립환경과학원에서는 경기도 태화산 내에 대기오염측정소를 설치 운영하고 있다. 주요 사업으로는 지역 오존생성 정도의 이해를 위해 BVOC 플럭스 조사사업을 수행 중이다. 이번 연구에서는 유동성챔버(flow-through dynamic chamber)방법을 이용하여 NO의 산림토양 배출량을 측정하고, 측정결과를 대기오염관측타워에서의 측정된 NO농도와 미기상자료를 활용할 수 있는 플럭스경도상사이론(flux-gradient similarity theory)을 응용하여 동일한 기간 동안의 NO지표배출량을 산출하여 비교 분석하였다. 비교결과가 유의하다면 측정타워에서 생산하고 있는 주요 대기오염물질과 기상자료만으로도 산림환경의 대기질 관리에 활용할 수 있기를 기대할 수 있기 때문이다.

측정기간은 기온이 상대적으로 높은 여름(8월)에 집중적인 측정기간을 설정하여(2013년 8월 1일~15

일 중 10일간) 수행되었다. 플럭스상사법(flux-gradient similarity theory)을 적용하여 태화산 대기오염측정타워에서 측정된 지표층에서의 NO와 미기상 풍속자료를 플럭스 산정모델에 적용하여 지표NO배출량을 산출하고 유동성챔버(FDC)로 실제 측정된 지표NO배출량과 비교분석하였다. 측정기간이 일치했던 2013년 8월 13일부터 15일 동안의 비교결과는 평균적으로 플럭스챔버에 의해 측정된 지표NO배출량이 상사법으로 계산된 NO배출량에 비해 상대적으로 높았다. 8월 13일, 14일과 15일의 경도상사법에 따라 산출된 일평균 배출량은 순서대로 $0.28 \pm 8.45 \mu\text{g m}^{-2} \text{hr}^{-1}$, $2.17 \pm 15.55 \mu\text{g m}^{-2} \text{hr}^{-1}$ 과 $-3.18 \pm 13.65 \mu\text{g m}^{-2} \text{hr}^{-1}$ 이었으며, FDC로 측정된 배출량은 각각 $2.26 \pm 1.44 \mu\text{g m}^{-2} \text{hr}^{-1}$, $5.11 \pm 3.85 \mu\text{g m}^{-2} \text{hr}^{-1}$ 과 $2.23 \pm 6.45 \mu\text{g m}^{-2} \text{hr}^{-1}$ 이었다. 이론적으로 계산된 결과들이 상대적으로 배출범위가 넓으면서 +/-영역으로 나타났었던 반면에, FDC에 의한 측정된 배출량은 상대적으로 변화 폭이 좁았고 모두 양의 배출을 보였다. 일중 변화는 상사법 계산결과나 FDC측정 결과 변화경향이 유사하여 늦은 오후로 가면서 증가하는 경향이었으며, 야간의 경우에 비교적 높은 배출을 보였다. 이들 계산된 NO배출량과 FDC로 측정된 값들을 x-y plot으로 제시하였으며, 이들 사이에서 양의 상관성을 확인하였으나, 상관계수(r^2)는 0.04정도로 비교적 낮게 나타났다.

인위적 오염 영향이 비교적 적은 산림지 환경에서의 광화학 오존생성량은 맑은 날 수목에서 배출되는 BVOCs와 함께 산림토양에서 배출된 NO의 대기화학과정에서 생성되는 자유 free radical의 영향이 중요하게 작용한다. 결과적으로 인위적영향이 적은 산림지역 광화학 오존생성의 영향을 이해하기 위해서는 BVOCs 역할과 함께 BSNO_x (biogenic soil NO_x)의 배출특성을 이해하고 산림환경에서의 오존생성과정을 이해하는 것이 매우 중요하다.

감사의 글

이 연구는 2013년 국립환경과학원 연구사업 “산림지역 토양의 질소산화물 및 메탄의 지표 배출량 조사 연구(II)”과 일부 2009년 한국연구재단의 지원(2009-0072936)으로 수행되었기에 감사드립니다.

References

- IPCC (2006) IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Vol. 1. General Guidance and Reporting. Published: IGES, Japan.
- Kim, D.-S. (2005) Sensitivity study of the flow-through dynamic flux chamber technique for the soil NO emissions, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* 21(E3), 75-85.
- Kim, D.-S. and J.-C. Kim (2002) Soil nitric and nitrous oxide emissions from agricultural and tidal flat fields in southwestern Korea, *Canadian Journal of Environmental Engineering and Science*, 1(5), 359-369.
- Kim, D.-S. and S. Kim (2013) N₂O and CH₄ Emission from Upland Forest Soils using Chamber Methods, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29(6), 789-800. (in Korean with English abstract)
- Laffineur, Q., M. Aubinet, N. Schoon, C. Amelynck, J.-F. Müller, J. Dewulf, H. Van Langenhove, K. Steppe, M. Simpraga, and B. Heinesch (2011) Isoprene and monoterpene emissions from a mixed temperate forest, *Atmospheric Environment*, 45, 3157-3168.
- Lenschow, D.H. (1995) Micrometeorological techniques for measuring biosphere-atmosphere trace gas exchange. In: Matson, P.A. and R.C. Harris (eds) *Biogenic Trace gases: Measuring Emissions from Soil and Water*, pp. 126-163. Blackwell Science, Cambridge, MA 02142.
- Megonigal, J.P. and A.B. Guenther (2008) Methane emissions from upland forest soils and vegetation, *Tree Physiology*, 28, 491-498.
- Melamed, L.M., K. Law, and P. Monks (2011) Workshop on Tackling the air pollution and climate change challenge. In *IGAC News Issue No. 45*, October 2011, 15-16, IGAC.
- Papen, H. and K. Butterbach-Bahl (2000) A 3-year continuous record of nitrogen trace gas fluxes from untreated and limited soil of N-saturated spruce and beech forest ecosystem in Germany: 1. N₂O emissions, *J. Geophys. Res.*, 104(D15), 18487-18503.
- Warneck, P. (2000) *Chemistry of the Natural Atmosphere*. 2nd Ed., Academic Press, New York.
- Yienger, J.J. and H. Levy (1995) Empirical model of global soilbiogenic NO_x emissions, *J. Geophys. Res.*, 100, 11447-11464.