

플럭스챔버에 의한 N₂O와 CH₄의 산림에서의 토양배출량 측정연구

N₂O and CH₄ Emission from Upland Forest Soils using Chamber Methods

김 득 수* · 김 소 영¹⁾

군산대학교 환경공학과 대기환경연구실, ¹⁾국립환경과학원 대기환경연구과
(2013년 8월 1일 접수, 2013년 10월 1일 수정, 2013년 10월 7일 채택)

Deug-Soo Kim* and Soyoung Kim¹⁾

*Atmospheric Environmental Research, Department of Environmental Engineering,
Kunsan National University*

¹⁾*Climate and Air Quality Research Department, National Institute of
Environmental Research, Incheon*

(Received 1 August 2013, revised 1 October 2013, accepted 7 October 2013)

Abstract

N₂O and CH₄ are important greenhouse gases (GHG) along with CO₂ influencing greatly on climate change. Their soil emission rates are highly affected by bio-geo-chemical processes in C and N through the land-atmosphere interface. The forest ecosystems are generally considered to be net emission for N₂O; however, net sinks for CH₄ by soil uptake. Soil N₂O and CH₄ emissions were measured at Mt. Taewha in Gwangju, Kyeonggi, Korea. Closed chamber technique was used for surface gas emissions from forest soil during period from May to October 2012. Gas emission measurement was conducted mostly on daytime (from 09:00 to 18:00 LST) during field experiment period (total 25 days). The gas samples collected from chamber for N₂O and CH₄ were analyzed by gas chromatography. Soil parameters were also measured at the sampling plot. GHG averages emissions during the experimental period were $3.11 \pm 16.26 \mu\text{g m}^{-2} \text{hr}^{-1}$ for N₂O, $-1.36 \pm 11.3 \mu\text{g m}^{-2} \text{hr}^{-1}$ for CH₄, respectively. The results indicated that forest soil acted as a source of N₂O, while it acted like a sink of CH₄ on average. On monthly base, means of N₂O and CH₄ flux during May (spring) were $8.38 \pm 48.7 \mu\text{g m}^{-2} \text{hr}^{-1}$, and $-3.21 \pm 31.39 \mu\text{g m}^{-2} \text{hr}^{-1}$, respectively. During August (summer) both GHG emissions were found to be positive (averages of $2.45 \pm 20.11 \mu\text{g m}^{-2} \text{hr}^{-1}$ for N₂O and $1.36 \pm 9.09 \mu\text{g m}^{-2} \text{hr}^{-1}$ for CH₄); which they were generally released from soil. During September (fall) N₂O and CH₄ soil uptakes were observed and their means were $-1.35 \pm 12.78 \mu\text{g m}^{-2} \text{hr}^{-1}$ and $-2.56 \pm 11.73 \mu\text{g m}^{-2} \text{hr}^{-1}$, respectively. N₂O emission was relatively higher in spring rather than other seasons. This could be due to dry soil condition during spring experimental period. It seems that soil moisture and

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)63-469-4764, Email : dskim@kunsan.ac.kr

temperature mostly influence gas production and consumption, and then emission rate in subsoil environment. Other soil parameters like soil pH and chemical composition were also discussed with respect to GHG emissions.

Key words : N₂O and CH₄, Greenhouse gas emission, Forest soil, Closed chamber technique, Soil uptake

1. 서 론

주요 온실기체들 중 온난화에 대한 기여 수준은 지구복사강제력 (global radiative forcing)을 기준으로 보면 CO₂의 경우 63.2%, CH₄ 18.1%, N₂O 6%, SF₆를 포함한 CFCs 등이 12.5% 정도인 것으로 보고되었다 (WMO, 2010). 이들 온실기체들은 여러 경로를 통해서 대기로 배출되고 있으며, CO₂, CH₄, N₂O 등은 인위적 배출원 이외에도 농경지, 산림지 등 지표토양과 습지 등 다양한 생태 (ecosystem)환경으로부터의 발생원들이 있어 자연배출량에 상당한 기여를 하고 있다. 특히 산림과 대기사이의 CO₂ 교환의 경우는 지구탄소 순환과정의 중요한 부분으로 집중적인 관심을 받아오고 있으나, CH₄와 N₂O의 경우 산림 등 주요 생태 지표와 대기간의 탄소와 질소 순환을 통한 교환량이 CO₂에 비해 상대적으로 적어 자연생태로부터의 배출량과 교환과정에 대한 이해가 부족하다 (Megonigal and Guenther, 2008). 현실적으로도 측정의 어려움으로 다양한 생태환경에서의 자료가 매우 부족하고, 주어진 생태환경의 시간·공간적 불균질성은 자료의 정확성과 대표성 확보를 어렵게 한다 (Bartlett and Harriss, 1993; Sheare and Khalil, 1993). 결과적으로 습지, 산림 등을 포함한 주요생태환경에서 일정 공간 규모와 시간규모에서의 배출규모를 산정하는 데 많은 제약을 받는다 (Megonigal and Guenther, 2008). 그러나 배출된 성분량은 지표층 대기 농도분포에 영향을 미치고 대기화학 특성에 따른 대기질 변화를 초래할 수 있어 배출경향에 따른 지역 대기질 변화를 이해하기 위한 감시 (monitoring)가 필요하다. 배출량감시는 기후변화와 대기질을 동시관리 하여 효율성을 높이는 대기질-기후변화 통합관리 (Melamed *et al.*, 2011)에 기초자료로서 활용될 수 있을 것이다. 한편 지구 규모에서 질소 자연배출이 인위적 배출에 상당하는 정도임에도 불구하고 (IPCC, 2006; Warneck, 2000), 지역 오존생성과 기후변화에 기여하는 토양배출 NO

와 N₂O에 대한 조사연구 또한 상대적으로 매우 부족한 실정이다 (Kim and Kim, 2002; Papen and Butterbach-Bahl, 2000).

산림은 일반적으로는 CH₄의 순흡원 (net sink)이지만 (Megonigal and Guenther, 2008; Lemer and Roger, 2001; Smith *et al.*, 2000) 산림생육이 지속되는 오랜 동안 낙엽 등 biomass 축적과 질소침적 (N deposition)을 겪는다. 생지화학적 순환과정에서 CH₄, N₂O, NO의 지표교환 결과에 따라 이들의 source 또는 sink로서의 산림토양의 역할을 이해할 수 있어 관심 기체들의 지표배출량 측정과 분석이 필요하다. 이를 위해 산림지역 대기질 영향 연구를 수행 중인 태화산 (서울대 학술림 경기도 광주)에서 closed chamber를 이용하여 주요 온실기체 (N₂O와 CH₄)의 산림지표 배출량을 측정하였으며, 주요 토양인자들과의 상호 연관성 분석을 통하여 배출 변화 경향과 대기화학적 특성을 분석하였다.

2. 연구 내용 및 방법

2.1 조사지점

측정지역인 태화산 (해발 600 m, 37° 17.488'N, 127° 17.305'E)은 경기도 광주시 도척면에 위치하고 있으며 주로 화강암 지역으로 토양은 대부분 사양토로 되어 있고, 수종은 참나무류, 물푸레나무, 서어나무, 층층나무의 천연림 (496 ha)과 잣나무, 낙엽송 밤나무의 인공림 (300 ha)으로 구성되어 있다. 서울대학교 학술림이며 산림생태 보전과 관련된 조사가 이루어지고 있다. 국립환경과학원은 42 m 높이의 대기관측타워를 세워 수목에서 배출되는 BVOCs와 오존을 포함한 주요대기오염물질의 고도별 농도를 측정하여 광화학 오존생성 관여 물질들을 실시간 측정할 수 있는 시스템을 운영하고 있다 (그림 1).

산림토양배출량 측정지점으로는 대기오염타워에서 ~5미터 반경 내 위치한 산림 내의 지점을 선택하였



Fig. 1. Taewha Mt. site for GHG flux measurement.

다. 이 지점은 타워를 이용한 고도별 대기오염측정기와 토양물리인자 감지센서가 설치된 곳으로 토양온도와 수분 정보를 공유할 수 있어 배출량 분석에 유리하다. 플럭스챔버 설치와 배출량 측정시스템을 운용하기 위한 전력공급, 측정에 필요한 장비 등의 보관 또한 용이하며, 외부인 출입에 따른 지표환경 변화를 방지하기 위해 측정지역 둘레로는 출입을 제한할 수 있도록 하였다.

2.2 플럭스 챔버에 의한 시료채취 방법

태화산 측정 현장에서 사용된 정적 폐쇄형챔버 (static closed chamber)는 지표로부터 직접적인 배출 측정이 가능하며, 동시에 설치 지점 인근 토양시료를 채취·분석하여 토양환경 변화와의 관련성도 분석할 수 있다. 폐쇄형챔버를 이용한 지표 배출량 측정 사례는 국내에서도 과거 여러 선행연구를 통해 상세히 기술되고 있다 (Kim and Na, 2013; Kim, 2007; Kim and Oh, 2004, 2003; Kim *et al.*, 2002). 챔버의 내부 용적은 약 21 L 정도이고, 실린더 형태의 챔버몸체와 몸체를 엮도록 제작된 받침으로 구성되었다. 설치 시 몸체받침부분을 먼저 토양 표면에서 약 5~7 cm 정도의 깊이로 설치한 후 최소 1시간 이상 그 상태로

둔다. 또한 받침 부분 설치 시에는 작은 풀 등은 식생은 자연 상태로 훼손함이 없이 유지하지만 지표면에 떨어진 낙엽들은 지표배출에 영향을 끼칠 수 있다고 사료되어 제거하였다. 이는 플럭스 측정 챔버 내에 있는 지표층 낙엽으로 있을 수 있는 토양배출 영향을 줄이고, 챔버 설치과정으로 훼손 (disturbing) 된 지표 상태를 가능한 설치 전 상태와 유사한 환경으로 복원될 시간을 주어서 챔버 설치로 인한 영향을 최소화하기 위함이다. 이 후에 지표에 설치된 받침 위에 챔버 몸체를 결합한 후 시간에 따른 챔버 내부 농도변화를 측정한다. 이를 위해 챔버 결합 직후부터 일정 시간 간격으로 챔버 내부로부터 일정량의 공기를 채취하여 성분농도를 분석하였다. 한번 설치된 챔버받침은 측정기간 동안 항상 설치된 상태로 두었다. 결과적으로 봄철 1차 측정 시 설치한 받침부분을 제거하지 않았고, 그 이후 여름과 가을철 측정 시에도 몸체만 결합하여 인위적 요인에 따른 지표 변화로 인한 영향을 최소화할 수 있도록 노력하였다. 측정은 우선 계절별 변화를 살펴보기 위해 2012년 5월 (봄)과 8월 (여름), 9~10월 (가을) 중에서 강수일을 피하여 최소한 7일 이상 수행하였다. 하루 중 측정 시간대는 일상적으로 오전 8시 이후부터 오

Table 1. Gas chromatography analysis condition for N₂O, CH₄ and CO₂.

Varian CP-3800		
Gas species	N ₂ O	CH ₄ , CO ₂
Detector	ECD	FID
Flow rate	30 cm ³ /min	30 cm ³ /min
Carrier gas	N ₂ (99.9999%)	Air, H ₂ (99.999%)
Column	Porapak Q (80/100 mesh) 3 m	Porapak Q (80/100 mesh) 6 m
Column Temp.	70°C	70°C
Injection Temp.	150°C	150°C
Oven Temp.	350°C	300°C

후 6시 직전까지(10시간 정도)로 매 시간 배출량(플럭스) 변화를 조사하기 위해 시간배출량을 산정하였다. 실제 측정일은 2012년 5월, 8월, 9월과 10월 동안 총 6회에 걸쳐 25일간 1일 평균 9시간 정도였다. 측정지점에서의 배출량 산정은 동일한 재질과 규격으로 제작된 2개의 플럭스 챔버를 가로 세로 1m의 공간 내에 이웃하여 설치한 후 동시에 주사기를 사용하여 시료를 채취하고 시간배출량을 산정한 후 평균을 취한 것을 대표치로 사용하여 분석하였다. 이 때 챔버로부터 기체시료의 상세한 채취과정과 플럭스 챔버의 열개는 Kim and Na (2013, 2011)에 상세히 기술하였다. 측정기간 중 배출량 산출을 위해 채취된 총 1,445개의 기체시료(50 mL/개)를 분석하였고, 매 측정일 챔버 인근에서 채취된 토양시료 25개의 이화학적 특성(pH, 온도, 수분량, 질소량, 유기물함량)을 분석하였다. 채취한 시료의 분석은 gas chromatography (GC)를 이용하였으며, 표 1에 온실기체 분석에 사용된 GC의 분석조건을 요약하였다. 분석에 사용된 GC는 ECD와 FID를 갖춘 Varian CP-3800 Model로 CH₄, CO₂, N₂O를 동시에 분석할 수 있도록 methanizer가 장착되었다.

플럭스 챔버에서 일정시간 간격으로 채취된 시료들의 GC 분석 결과 얻은 온실기체 농도를 이용하여 챔버 내 온실기체 농도의 시간 변화율($\Delta C/\Delta t$)을 구한 결과를 식(1)의 배출량 산정 식에 대입하여 각 온실기체의 배출량을 산출하였다(Kim and Na, 2011; Kim and Oh, 2003).

$$F = \rho \cdot V/A \cdot \Delta C/\Delta t \cdot 273/(T+273) \quad (1)$$

F: flux (mg m⁻² hr⁻¹)

ρ : density of gas (mg m⁻³)

V: volume of the chamber (m³)

A: the bottom area of the chamber (m²)

$\Delta C/\Delta t$: the average changing rate of concentration with time (ppmV hr⁻¹)

T: average temperature in the chamber (°C)

2.3 토양 시료 채취 및 분석방법

측정기간 동안 태화산 학술림의 기체시료 채취와 함께 토양 조절인자 분석을 위해 토양채취기(auger)를 이용하여 배출량 측정시에 측정 지점 반경 1m 정도 내외에서 일정량을 채취하였다. 토양시료 채취시 지표면 위의 낙엽층(<1cm)을 제거하고 약 10~15 cm 정도의 깊이로 1일/1회 시료 채취를 수행하였다. 채취한 토양은 수분 손실을 방지하기 위하여 토양 시료 봉투에 담아 밀봉하여 시료 분석시까지 4°C 이하 냉장 보관을 실시하였다. 시료 중 일부는 토양수분량 및 pH 측정을 위해 분취하여 군산대 대기환경 연구실에서 측정을 수행하였다. 주요 토양화학성분은 전북 농업기술연구원에 의뢰하여 분석하였으며, 토양시료 분석방법은 농촌진흥청 토양화학분석법(NIAST, 2000)에 준하여 pH 및 EC는 각각 초자전극법과 전기 전도도법으로 분석하였고, 유기물은 Tyurin법, 치환성 양이온은 유도결합플라즈마분과광도계(CBC, Interga XL)로 분석하였다.

3. 결과 및 논의

3.1 토양인자와 N₂O, CH₄ 배출량 변화

태화산 측정 현장에서 25일 동안(2012. 5. 17~19, 23~27, 8일간; 8. 7~11, 22~25, 9일간; 9. 22~26, 10. 27~29, 8일간) 8시간/일 이상 매 시간 측정된 결과로 시간배출량을 산출한 후, 해당 일에 산출된 시간배출량을 평균하여 N₂O와 CH₄의 일평균 배출량을 산정하였다. 토양기원(soil origin) 기체배출량의 경우 토양인자에 종속된 미생물학적 요인의 변화가 배출량에도 영향 미칠 수 있으며(Werneck, 2000), 일별 N₂O, CH₄의 배출 변화와 토양인자들의 상관성을 살펴보기 위해 일별 토양시료 성분 분석결과와 일평균 배출량을 그림 2에 제시하였다. 토양 NO₃⁻의 농도는 비교적 맑고 건조했던 봄철(5월) 평균이 31.8±11.6 mg kg⁻¹로 측정 기간 동안 강수와 태풍 등으로 인한 영

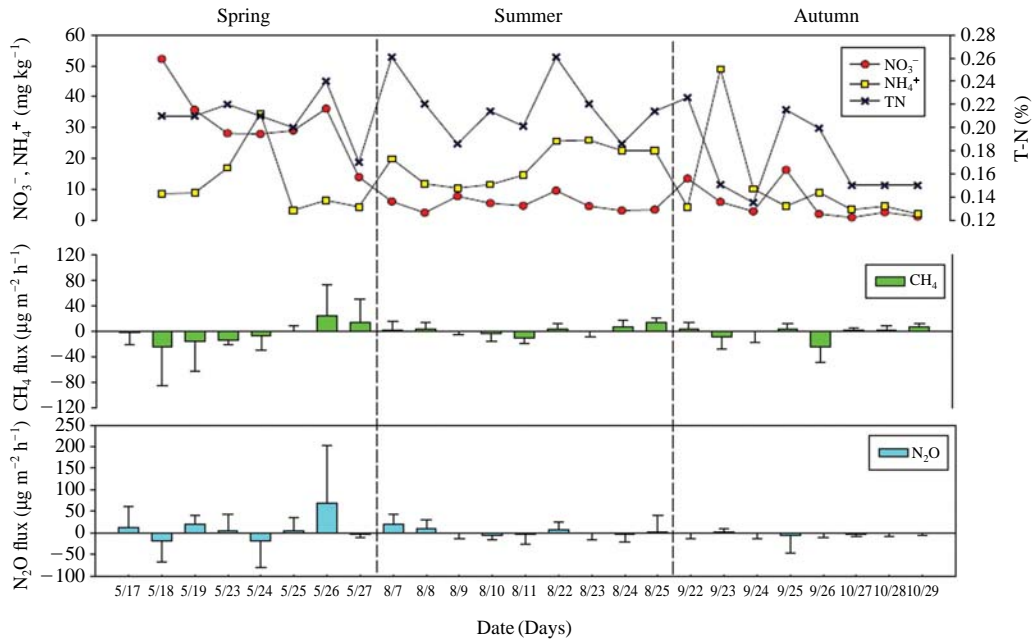


Fig. 2. Daily N₂O and CH₄ soil emissions and soil parameters during experimental periods.

Table 2. Summaries of soil fluxes in monthly averages and sampling site soil chemistry for the experimental period.

Date (Month)	Flux (µg m ⁻² hr ⁻¹)			Soil elements						
	N ₂ O Flux (µg m ⁻² hr ⁻¹)	CH ₄ Flux (µg m ⁻² hr ⁻¹)	pH	Soil Temp. (°C)	Chamber Temp. (°C)	WFPS (%)	NO ₃ -N (mg kg ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N (mg kg ⁻¹)	T-N (%)	
May (Spring)	Mean	8.30	-3.21	4.4	14.9	23.9	21.05	31.8	11.8	0.21
	SD	48.70	31.39	0.1	1.45	3.77	2.27	11.6	11.0	0.02
	Min	-137.69	-117.31	4.2	13.5	16.6	18.40	13.9	3.2	0.17
	Max	335.37	121.95	4.5	17.8	29.1	24.07	52.2	34.6	0.24
Aug. (Summer)	Mean	2.45	1.36	4.5	22.6	26.1	41.51	5.2	18.3	0.22
	SD	20.11	9.09	0.1	1.4	3.8	16.02	2.3	6.29	0.03
	Min	-42.21	-18.23	4.3	21.3	21.6	29.34	2.4	10.4	0.19
	Max	46.05	22.11	4.6	25.0	32.3	68.71	9.5	25.9	0.26
Sep., Oct. (Autumn)	Mean	-1.35	-2.56	4.4	16.4	17.6	46.84	5.6	10.8	0.17
	SD	12.78	11.73	0.1	3.2	3.9	7.23	5.9	15.7	0.04
	Min	-96.79	-47.92	4.3	12.1	11.9	31.90	0.8	1.9	0.14
	Max	30.90	29.99	4.6	19.5	21.1	55.93	16.2	49.0	0.23

량이 잦았던 여름(8월)과 가을철(9, 10월)의 5.2±2.3 mg kg⁻¹, 5.6±6.0 mg kg⁻¹에 비해 매우 높게 나타났다. 계절별 차이를 보이는 토양 NO₃⁻와는 달리 NH₄⁺와 T-N의 경우에는 계절별 평균 수준이 각각 10.8~18.3 mg kg⁻¹과 0.17~0.22%로 유사하게 나타났다. 결과적으로 5월 중 토양 [NO₃⁻]/[NH₄⁺]의 평균인 2.7

은 8월과 9~10월 평균인 0.3과 0.5보다 매우 높게 나타났다. 또한 봄철 토양에 유용한 N이 보다 풍부하여 토양생산성 (productivity 또는 fertility)이 타 계절에 비해 현저히 높았음을 의미하여 (Conen and Nefitel, 2010) 봄철에 토양에서의 질산화 (nitrification) 과정이 훨씬 우세하였음을 짐작케 한다. 그 결과로 봄

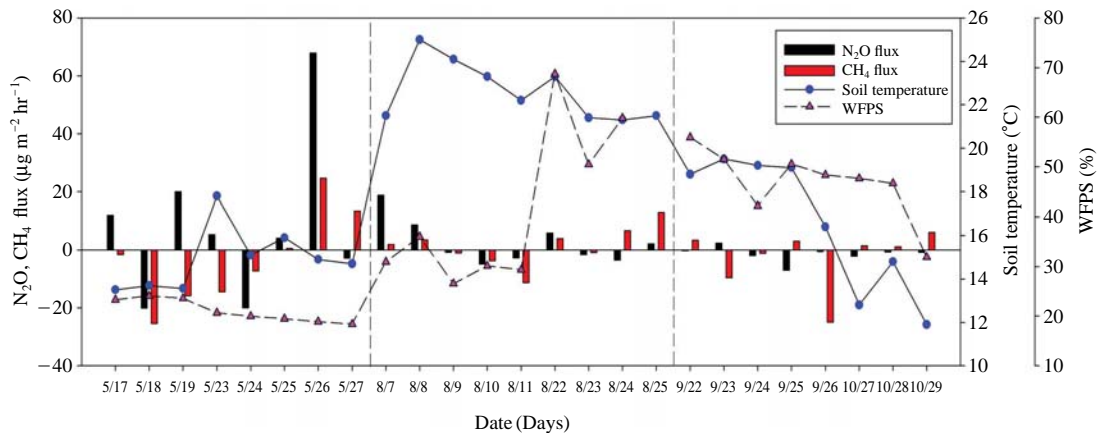


Fig. 3. Daily variations of N_2O and CH_4 soil emission, and soil parameters (soil temperature and soil water filled pore space).

철 측정기간 동안 토양 내 축적된 질소순환에 관여하는 미생물활동으로 인한 질산화과정에서 생성된 NO 와 N_2O 배출이 타 계절에 비해 높게 나타났을 것으로 판단된다.

표 2는 N_2O 와 CH_4 의 일평균배출량과 측정일 토양 분석 결과의 계절 평균을 제시한 것이다. 봄철(5월)은 8일간(시료수: 405개) 토양배출량 측정을 수행하였다. 봄철 평균 N_2O 배출량은 $8.30 \pm 48.70 \mu g m^{-2} hr^{-1}$ 이었으며, CH_4 은 주로 토양에 흡수(uptake)되는 것으로 나타나 $-3.21 \pm 31.39 \mu g m^{-2} hr^{-1}$ 로 조사되었다. 대기 중 CH_4 의 주요 흡원(sink)으로는 대기 중에 존재하는 수산화기(OH radical)와의 반응에 의한 것과 지표산화과정에 따른 토양흡수(soil uptake)에 의한 것으로 보고되었다(Bartlett and Harris, 1993). 봄철 측정결과 CH_4 flux가 음의 값으로 나타났으며, 토양수분을 보면 5월중 토양수분(평균 21.1 %WFPS)이 다른 계절(여름과 가을은 각각 41.5 %WFPS, 46.8 %WFPS)에 비해 현저히 낮은 것으로 확인되었다(그림 3). 결과적으로 계절특성에 따른 건조한 기상조건이 봄철 표토 층의 경우 다른 계절에 비해 상대적으로 호기조건이 오래 지속되었고 혐기상태에서의 발생(production)보다는 표층 산화(aeration oxidation)에 의한 소비(consumption)가 상대적으로 높게 나타난 때문으로 사료된다.

여름철 측정은 8월 중 9일 간(시료수: 495개) 수행하였다. 평균 N_2O 배출량은 $2.45 \pm 20.11 \mu g m^{-2} hr^{-1}$,

그리고 CH_4 은 $1.36 \pm 9.09 \mu g m^{-2} hr^{-1}$ 이었다. N_2O 는 평균적으로 지속적인 토양배출이 나타났지만 배출량은 봄철에 비해 현저히 낮았고 변화 폭도 좁게 나타났다. CH_4 의 평균배출량 측정 결과 봄철에는 토양 흡수가 나타나는 반면 여름철은 양의 값으로 토양배출이 확인되었다. 그러나 일별 CH_4 배출량조사 결과에 따르면 측정기간 9일 중 4일 동안 일평균 -0.88 에서 $-11.25 \mu g m^{-2} hr^{-1}$ 수준의 흡수가 나타나고 있어 지속적인 배출은 아니었으며, 역시 토양수분 등 CH_4 생성과 관련된 토양환경인자 변화가 배출결과에 주요한 역할을 하는 것으로 사료된다.

가을철(9월) 평균 기체배출량은 N_2O 의 경우 $-1.35 \pm 12.78 \mu g m^{-2} hr^{-1}$, 그리고 CH_4 은 $-2.56 \pm 11.73 \mu g m^{-2} hr^{-1}$ 으로 모두 토양흡수로 확인되었다. 가을철 평균 토양수분(46.8 %WFPS)이 봄철(21.1 %WFPS)과 달리 빈번한 강우로 2배 이상 높아 CH_4 생성에 유리한 토양조건이었음에도 불구하고 토양 흡수가 관측되었다. CH_4 배출에 있어 토양의 역할은 CH_4 생성(production)과 소비(consumption) 사이의 균형에 따라 결정되며, 토양수분 증가는 생성조건을 높일 수 있지만 과도한 수분으로 토양 내 CH_4 확산능이 낮아지고 지표배출이 방해받게 된다. 결과적으로 지표의 호기성토양 접촉에 의한 산화와 더불어 토양흡수에 기여하는 요소로 작용될 수 있을 것이다. 수분 이외에도 미생물활동에 관여하는 토양온도, pH에 의한 영향도 있어 향후 복합적인 영향이 고려되어야 할

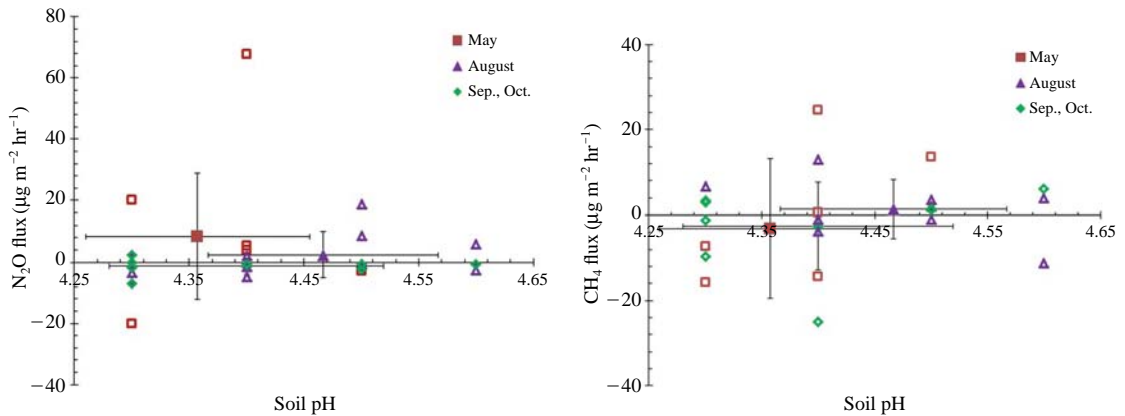


Fig. 4. Daily averages of soil N₂O and CH₄ emissions according to soil pH. Blank marks represent daily averages, and filled marks represent monthly means on measurement days during the month. The bars represent standard errors of the monthly mean.

것이다.

측정기간 전체에서의 평균배출량은 N₂O는 $3.11 \pm 16.26 \mu\text{g m}^{-2} \text{hr}^{-1}$ ($0.27 \text{ kg-N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$), 그리고 CH₄은 $-1.36 \pm 11.3 \mu\text{g m}^{-2} \text{hr}^{-1}$ ($-0.12 \text{ kg-CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)으로 조사되었다. 이번 측정으로 태화산 산림토양은 평균적으로 N₂O배출과 동시에 CH₄은 흡수하는 것으로 해외선행연구 결과와 일치하였다. 그러나 이 결과는 측정기간 전체 평균에 해당한 것이며, 1일 측정의 경우는 모든 기체배출량의 측정범위(표 2)에서 보였듯이 +/-를 포함하고 그 변화 폭도 크게 나타났다. 이처럼 기상과 토양인자 등 외부자연환경에 따른 변화가 심한 토양배출특성을 이해하기 위해서는 지표대기 간의 생지물리화학과과정(land-atmosphere biogeo-physicochemical process)에 대한 이해가 절대적으로 필요하다.

3. 2 토양pH와 N₂O, CH₄ flux

토양 내 생지화학순환과정은 토양pH, 토양수분, 토양온도 등 토양의 물리·화학인자의 영향을 받는다(Brady and Weil, 1999). 토양에서 배출되는 질소성분 물질(NO, N₂O, N₂)의 생성율은 산성토양일 때보다 중립이거나 약간의 알칼리성을 띠고 있을 때 높으며, 탈질화(denitrification) 과정에 관여하는 미생물 군의 크기 또한 토양pH와 관련이 있다(Smith *et al.*, 1998). Wrage *et al.* (2001)와 Mikha *et al.* (2000)은 탈질화 과정에서는 토양의 낮은 pH로 인해 nitrous oxide reduc-

tase가 N₂O의 N₂로의 환원을 방해하기 때문에 N₂O가 배출된다고 하였다.

그림 4는 N₂O, CH₄배출에 대한 토양pH의 영향을 살펴보기 위해 일별 자료와 함께 계절별 평균값들을 나타낸 것이다. 측정기간 동안 채취된 토양시료들은 모두 산성을 띠었으며, 그 범위는 pH 4.2~4.6(평균 pH 4.41 ± 0.11) 사이의 값으로 나타났다(그림 4). 8월에서 상대적으로 건조했던 1차 측정(8월 7일~11일)에서의 평균 pH는 4.5, 강우가 있었던 2차 측정(8월 22일~25일)에서의 평균 pH는 4.4로 낮게 나타났다. N₂O 배출량과 pH 변화는 서로 양의 상관성(봄철, $r^2=0.1181$; 여름철, $r^2=0.1288$; 가을철, $r^2=0.0106$)을 나타내기는 하였으나, 상관관계는 비교적 낮은 것으로 조사되었다. 그러나 태화산 산림토양에서의 토양 pH와 CH₄ 배출은 측정기간 평균 음의 상관성을 보였으며, 가을철 $r^2=0.0504$ 을 제외하면 봄철에 $r^2=0.5565$ 와 여름철 $r^2=0.2095$ 로 NO와 N₂O에 비해 상관성이 높았다. 음의 상관은 토양의 pH가 낮아질수록 CH₄ 흡수가 증가하게 됨을 의미하며, 이미 산림토양이 CH₄의 흡원임을 보고한 선행연구(Lemer and Roger, 2001; Smith *et al.*, 2000) 결과와 일치하여 산림토양 산성화가 CH₄ 배출에 직접적인 변화를 가져올 수 있음을 의미한다. 이 경우 강한 산성인 대부분의 국내 산림지가 농경지 등으로 토지이용 형태가 변화하게 될 경우 비료사용으로 인한 토양pH 변화(약산성 또는 중성화)로 토양 흡수량을 감소시킬 수 있어 토양

흡수량 감소로 인한 대기 중 CH_4 농도 증가 가능성이 있다.

3.3 토양온도와 N_2O , CH_4 flux

메탄산화 세균의 활동에 가장 적절한 온도는 25°C 정도로 알려져 있으나, 자연 상태에서 $0\sim 10^\circ\text{C}$ 정도의 낮은 온도나 30°C 이상의 높은 온도에서도 메탄 산화가 발생한다(Dunfield *et al.*, 1993). 한편 선행연구들의 논의에서는 N_2O 배출에 관여하는 미생물들은 각기 적응된 최적 온도, 또는 연평균 온도와 유사한 범위에서 잘 적응하는 경향을 보였으며, 일반적으로 기체배출은 토양온도가 증가할수록 증가하는 것으로 나타났다(Kim and Oh, 2003). 그림 5는 측정기간 산출된 일별 N_2O , CH_4 배출량과 월평균 배출량을 토양온도 변화에 따라 나타낸 것이다.

측정 기간 동안의 토양온도는 봄(5월) $13.5\sim 17.8^\circ\text{C}$ (평균 $14.9\pm 1.5^\circ\text{C}$), 여름(8월) $21.3\sim 25^\circ\text{C}$ (평균 $22.6\pm 1.4^\circ\text{C}$), 가을(9, 10월) $12.1\sim 19.5^\circ\text{C}$ (평균 $16.4\pm 3.2^\circ\text{C}$)의 온도변화를 보였다. 일반적으로 NO 와 N_2O 배출이 높은 초지 또는 농경지 토양의 경우 토양온도와 배출량과는 높은 상관성을 보이며 일정 수준의 온도까지는 대체로 양의 상관성에 따른 증가세를 보이다가 $30\sim 35^\circ\text{C}$ 정도 이후부터는 다시 감소하는 경향을 보였다(Kim and Oh, 2004). 질소의 토양배출에 관여하는 미생물의 대사활동이 일정 수준까지의 온도에서 활성화되기 때문이며, 지나치면 고온에 따른 스트레스 증가로 활동이 약해지기 때문인 것으로 알려

져 있다. 그러나 이번 태화산의 측정결과는 초지와 농경지에서와는 달리 토양온도와 배출량 사이에서 유의한 상관성을 확인할 수 없었으며, 상대적으로 토양온도가 낮고 건조했던 봄철의 N_2O 배출($8.3\pm 48.7\mu\text{g m}^{-2}\text{ hr}^{-1}$)이 토양온도와 수분이 높았던 여름철($2.45\pm 20.11\mu\text{g m}^{-2}\text{ hr}^{-1}$)과 가을철($-1.35\pm 12.78\mu\text{g m}^{-2}\text{ hr}^{-1}$) N_2O 보다 더욱 높게 나타나 주로 토양온도 영향을 받았던 농경지에서의 배출 경향과는 차이가 있었다. 이러한 경향은 태화산 측정기간 동안 산림토양 N_2O 배출이 토양온도와 수분의 복합적 영향 결과로 나타났기 때문일 수 있다. 건조했던 봄철 토양의 경우 일정 온도의 영향으로 생성된 기체는 토양공극을 통해 수월하게 지표면으로 확산되어 대기로 배출될 수 있다. 그에 비해 강수일 증가에 따른 여름과 가을철의 토양수분(%WFPS) 증가는 토양공극을 매우 감소시키고, 결과적으로 지표면까지의 기체 확산을 방해하게 된다. 반면에 CH_4 배출량의 경우 계절변화에서는 평균토양온도가 $22.6\pm 1.36^\circ\text{C}$ 로 가장 높았던 여름철에 가장 높은 배출($1.36\pm 9.09\mu\text{g m}^{-2}\text{ hr}^{-1}$)이 나타났고, 토양수분은 유사한 수준으로 높았으나 온도가 $16.4\pm 3.2^\circ\text{C}$ 로 낮았던 가을철은 흡수($-2.56\pm 11.73\mu\text{g m}^{-2}\text{ hr}^{-1}$)로 나타났다. 토양온도와 수분이 모두 낮았던 봄철 역시 흡수($-3.21\pm 31.39\mu\text{g m}^{-2}\text{ hr}^{-1}$)로 나타나서 CH_4 배출의 경우 온도조건이 CH_4 주요 생성인자 역할을 하며, 이후 수분량에 따른 확산조건이 영향을 주는 것으로 판단된다.

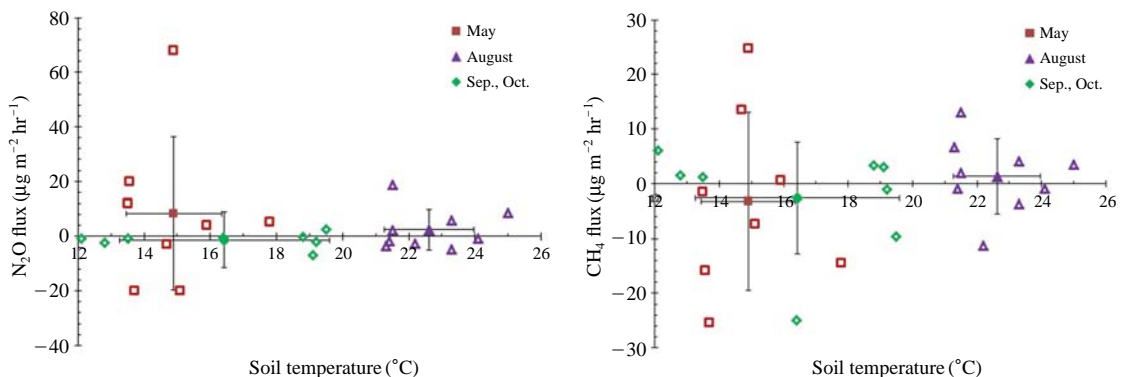


Fig. 5. Daily averages of soil N_2O and CH_4 emissions according to soil temperature. Blank marks represent daily averages, and filled marks represent monthly means on measurement days during the month. The bars represent standard errors of the monthly mean.

3. 4 토양수분량과 N₂O, CH₄ flux

태화산 측정지역의 토양 내 수분함유량을 보다 정확히 측정하기 위해서 gravimetric soil moisture보다는 water-filled pore space (WFPS)를 사용하여 토양수분 변화에 따른 토양N₂O와 CH₄ 배출량의 변동성을 일별, 계절별로 비교분석 하였다. %WFPS는 일정량의 토양이 갖고 있는 전체토양공극부피에 대한 수분으로 채워진 부피의 비율로 다음 식(2)에 의해 산출된다.

$$\text{WFPS (water-filled pore space, \%)} = \frac{[100 \times (\theta g \times \text{BD})]}{1 - (\text{BD}/\text{PD})} \quad (2)$$

$$\theta g \text{ (gravimetric soil water content)} = \frac{\text{wet soil mass} - \text{dry soil mass}}{\text{dry soil mass}} = \frac{\text{H}_2\text{O (g)}}{\text{soil (g)}}$$

$$\text{BD (soil bulk density)} = \frac{\text{dry soil mass (g)}}{\text{soil volume (cm}^3\text{)}}$$

한편 PD는 입자밀도 (particle density)를 나타내며, 이번 연구에서는 임업연구원 경기도 산림토양 조사 자료를 인용하여 2.48 g cm⁻³ (Jeong *et al.*, 2002)을 적용하였다.

측정기간 동안의 WFPS는 봄 18.4~24.07% (평균 21.05±2.27% WFPS), 여름 26.56~68.71% (평균 41.51±16.02% WFPS), 가을 31.9~55.93% (평균 46.84±7.23% WFPS)의 수분변화를 보였다. 특히 8월의 경우

1차 측정기간(8월 7일~11일)의 건기, 2차 측정기간(8월 22일~25일)에는 강우가 지속되어 1차에 비해 2차 측정기간 동안의 토양수분량이 거의 2배 정도로 높았다. 9월과 10월의 가을철 측정 기간 동안에도 잦은 태풍의 영향으로 강수일이 많아 토양수분량이 여름철 수준보다 높게 나타났다. 결과적으로 이러한 기상변화 요인(여름철인 8월에서보다 상대적으로 강수가 잦았던 가을철의 9월의 강수 영향)이 측정기간 동안 산림토양 기체배출에 미친 영향력이 높아져, 토양온도에 따른 일반적 배출경향과는 달리, 토양온도와의 직접적인 상관성을 확인할 수 없었다고 사료된다.

그림 6은 측정기간 산출된 N₂O와 CH₄ 배출변화와 %WFPS와의 관계를 계절별로 도시한 것이다. 봄과 여름 측정기간 토양N₂O의 지표배출이 나타났으며, 상대적으로 토양온도는 낮았지만 건조한 기상상태로 %WFPS가 21%로 낮았던 봄철의 N₂O 배출이 현저히 높게(여름철 8월의 ~3배) 나타났다. 반면에 %WFPS가 평균 46% 이상으로 높았던 가을(9, 10월)에는 흡수가 나타나 봄철 배출 양상과는 대조를 보였다. 이번 측정결과에서 토양온도가 높을수록 N₂O 배출의 증가 경향은 보이지 않았으며, 봄철 높은 N₂O 배출 원인으로서는 비교적 건조했던 호기성 토양환경에서 미생물에 의한 chemoautotrophs에 따른 nitrification과정의 부산물로서 주로 N₂O 배출 증대에 관여했을 것으로 추정된다 (Warneck, 2000). 토양 CH₄의 경우는 %WFPS가 가장 낮았던 봄철(평균 21%)과 가장 높

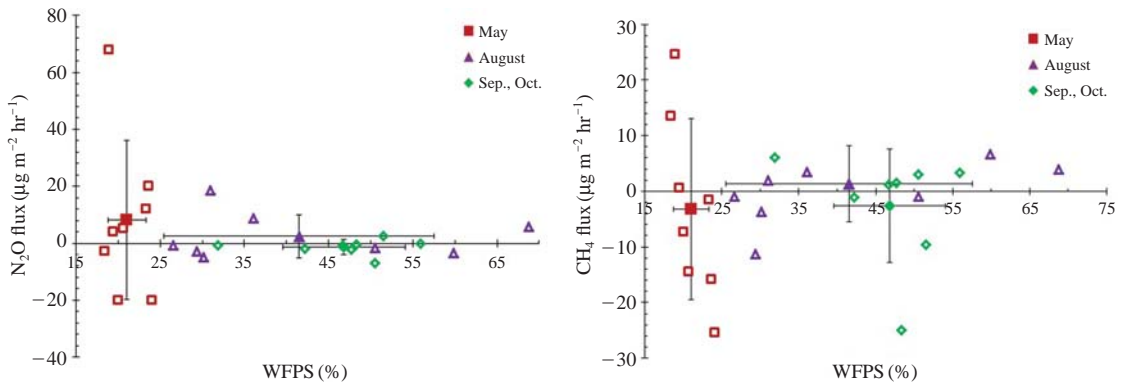


Fig. 6. Daily averages of soil N₂O and CH₄ emissions according to soil moisture (%WFPS). Blank marks represent daily averages, and filled marks represent monthly means on measurement days during the month. The bars represent standard errors of the monthly mean.

Table 3. Yearly average N₂O and CH₄ emission at Mt. Taewha.

Season (Month)	Average emission rate ($\mu\text{g m}^{-2}\text{hr}^{-1}$)	
	N ₂ O	CH ₄
Spring (May)	8.3	-3.21
Summer (August)	2.45	1.36
Fall (Sep.)	-1.35	-2.56
Winter	8.3	-3.21
Yearly average (kg yr ⁻¹)	304.4 (=0.38 kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	-131.02

있던 가을철(평균 47%)에 평균적으로 토양 흡수가 나타났고, WFPS가 약 40% 수준이며 토양온도가 타 계절에 비해 평균 6~7°C 가량 높았던 여름철에는 미약하지만 배출로 전환되었다. 이러한 여름철에 토양 CH₄ 배출로의 전환은 8월 측정기간 강수로 인해 적절한 수준의 수분과 함께 평균 23°C(봄과 가을의 평균 토양온도인 15°C와 16°C보다 7~8°C 가량 높았음)의 토양환경이 유지될 수 있어서 CH₄ 배출을 촉진시켰을 것으로 판단된다.

3.5 태화산 온실기체 배출량

태화산 주요온실가스 배출량 조사결과를 요약하여 표 3에 제시하였다. 이때 연간 배출량 산정에 사용된 평균배출량은 해당계절을 대표하는 월 중 측정된 배출평균값을 가정하였다. 결과적으로 단기간 제한된 측정자료 수로 계절을 대표하는 데 무리가 따르겠으나 선행연구결과와의 비교를 위해 계절을 대표한다는 가정 하에 태화산 면적 7,960,540 m²에 각 계절평균 배출계수를 적용하여 연간 배출량을 산출하였다. 겨울철의 경우는 이번 측정 조사 자료가 없으므로 겨울철 N₂O 및 CH₄의 평균 플럭스는 토양온도가 가장 낮았던 봄철 자료를 적용하여 산정하였다. 산정결과 N₂O는 304.4 kg yr⁻¹이 배출되고, CH₄은 -131.02 kg yr⁻¹으로 토양흡수(soil uptake)가 일어나는 것으로 조사되었다. 한편 1993년 미국 동부 지역에서 측정된 연평균 N₂O 배출량은 0.16 kg ha⁻¹ yr⁻¹으로 비교를 위해 태화산 N₂O의 연간 평균배출량을 동일한 단위로 환산하면 0.38 kg ha⁻¹ yr⁻¹로 다소 높게 나타났으나 유사한 범위였으며, 영국 남서부와 중부 스코틀랜드 산림에서 측정 보고된 배출량인 0.06~0.22 kg ha⁻¹ yr⁻¹과 0.23~0.25 kg ha⁻¹ yr⁻¹(Skiba *et al.*, 1998)와도 배출 범위가 유사하게 나타났다.

4. 결 론

경기도 태화산에서 챔버법을 이용하여 N₂O, CH₄의 산림토양 배출량을 측정하고, 변인으로 작용하는 주요 토양인자들과의 상관성 분석을 통하여 산림토양에서의 온실기체 배출량 변화특성을 분석하였다. 봄(5월), 여름(8월), 가을(9월, 10월) 중 25일 동안 N₂O, CH₄의 토양배출량을 측정하였다. 배출량 측정시스템은 폐쇄형플럭스챔버(closed flux chamber)를 적용하였고, 기체 시료 분석은 gas chromatograph(GC)를 이용하였다. GC분석기는 methanizer를 장착한 FID/ECD를 동시에 갖추고 있어 CH₄와 N₂O를 동시에 분석할 수 있다.

측정기간 동안에 총 1,445개의 기체시료와 25개의 토양시료가 분석되었다. N₂O, CH₄의 계절별 평균 soil flux는 계절에 따라 각 봄(5월) 8.3, -3.21 $\mu\text{g m}^{-2}\text{hr}^{-1}$, 여름(8월) 2.45, 1.36 $\mu\text{g m}^{-2}\text{hr}^{-1}$, 가을(9, 10월) -1.35, -2.56 $\mu\text{g m}^{-2}\text{hr}^{-1}$ 으로 조사되었다. N₂O 배출량은 비교적 강수의 영향이 적었고 토양온도 또한 일정 수준에 머물렀던 봄철 동안의 배출량이 지표온도가 상대적으로 높았지만 비교적 높은 토양수분량을 보였던 여름철보다 높게 나타났다. 여름철 측정기간인 8월에 계절적 특성으로 상대적으로 잦았던 강우로 토양수분이 높았으며, 높은 함수율이 미생물 활동을 제한하고 또한 토양의 질소순환과정에 따라 생성된 N₂O가 토양층에서 대기로 배출하는 데 역시 방해요인으로 작용한 것이 주요 원인이었을 것으로 사료된다. CH₄은 토양에 의한 배출(emission)보다는 평균적으로 토양흡수(sink)가 나타났으며, 특히 가을과 봄철에 흡수량이 높게 나타난 것으로 조사되었다. 측정기간 중 평균적으로 토양 흡수 경향이 확인되었고 주로 soil oxidation에 의한 것으로 산림토양이 CH₄의 순흡원임을 보였다. 조사지역인 태화산 산림 토양의 평균산성도는 5월 pH 4.36±0.1, 8월 pH 4.47±0.1, 9월 pH 4.40±0.12으로 국내 산림토양 평균 pH 5.5보다 낮아 타 지역 산림토양에 비해 강한 산성도를 보였다. 수분에 따른 기체배출량의 계절적 변화에서는 %WFPS가 높아질수록 토양배출이 감소되거나 음의 값을 나타내었다.

이상의 연구에서 태화산 일부 지역인 대기오염측정 타워 인근 산림에서 토양 N₂O와 CH₄ 플럭스를 각 계절에 해당하는 월중 측정하고 결과를 분석·제

시하였으며, 산림지역에서의 연간 배출량을 산출하였다. 산출 결과, N₂O는 304.4 kg yr⁻¹으로 산림토양에서 배출되고, CH₄은 -131.02 kg yr⁻¹으로 토양으로의 흡수(soil uptake)가 일어나는 것으로 조사되었다. 이는 지리적 조건이 유사한 산림에서의 해외 선행연구와의 비교결과 해당 기체들의 지표배출 범위에서는 변동치로 인해 일부 차이가 있었으나 평균배출량은 유사한 범위 내에서 나타났다.

산림토양의 주요 온실기체 토양지표 배출은 토양 온도와 수분, 이화학 특성들이 기체배출의 조절인자(controlling factors)로 작용하며 토양미생물 활동 또한 중요하여 산림생태와 산림토양에서의 기체배출 특성을 이해하기 위해서는 산림 식생분포와 지리적 특성에 따른 계획적이고 지속적인 환경모니터링과 주어진 환경에서의 토양배출량 측정이 요구되며, 이는 지표-대기 간의 생지물리화학과정(land-atmosphere biogeo-physicochemical process)의 이해를 위해서도 필요하다.

감사의 글

이 연구는 2012년 국립환경과학원 연구사업 “Closed chamber를 이용한 산림지역 토양의 질소산화물 및 메탄의 지표 배출량 조사연구”의 지원과 2009년 한국연구재단의 지원(2009-0072936)을 받아 수행되었기에 감사드립니다. 측정 결과 해석에 있어 이론적 토론과 논의에 도움을 준 극지연구소 극지기후변화연구부 나운성연구원에게도 감사드립니다.

References

- Bartlett, K.B. and R.C. Harris (1993) Review and assessment of methane emissions from wetlands, *Chemosphere*, 26, 261-320.
- Brady, N.C. and R.R. Weil (1999) *The nature and properties of soils*, 12th ed, Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey, 881 p.
- Conen, F. and A. Neftel (2010) Nitrous Oxide Emissions from Land-Use and Land-Management Change-in Nitrous Oxide Climate Change, Ed. K. Smith, Earthscan, London 2010. p.143-161.
- Dunfield, P., R. Knowles, R. Dumont, and T.R. Moore (1993) Methane production and consumption in temperate and subarctic peat soils: Response to temperature and pH, *Soil Biology & Biochemistry*, 25, 321-326.
- IPCC (2006) *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Vol. 1. General Guidance and Reporting*. Published: IGES, Japan.
- Jeong, J.H., K.S. Koo, C.H. Lee, and C.S. Kim (2002) Physico-chemical Properties of Korean Forest Soils by Regions, *Jour. Korean For. Soc.*, 91(6), 694-700. (in Korean with English abstract)
- Kim, D.-S. (2007) Greenhouse Gas (CH₄, CO₂, N₂O) Emissions from Estuarine Tidal and Wetland and Their Characteristics, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 23(2), 225-241. (in Korean with English abstract)
- 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 J.M. Oh (2003) N₂O Emissions from Agricultural Soils and Their Characteristics, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 19(5), 529-540. (in Korean with English abstract)
- Kim, D.-S. and J.M. Oh (2004) The relevance of soil N₂O emissions measured by a closed chamber technique on the physico-chemical soil parameters, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 20(6), 749-758. (in Korean with English abstract)
- Kim, D.-S. and U.S. Na (2011) Soil Emission Measurements of N₂O, CH₄ and CO₂ from Intensively Managed Upland Cabbage Field, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 27(3), 313-325. (in Korean with English abstract)
- Kim, D.-S. and U.S. Na (2013) Characteristics of Greenhouse Gas Emissions from Freshwater Wetland and Tidal Flat in Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29(2), 171-185. (in Korean with English abstract).
- Kim, D.-S., Y. Harazono, M.A. Baten, H. Nagai, and H. Tsuruta (2002) Surface flux measurements of CO₂ and N₂O from a dried rice paddy in Japan during a fallow winter season, *J. of the Air & Waste Manage. Assoc.* 52, 416-422.
- Lemer, J. and P. Roger (2001) Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: a review, *Eur. J. Soil Biol.* 37, 25-50.
- Megonigal, J.P. and A.B. Guenther (2008) Methane emissions from upland forest soils and vegetation, *Tree Physio-*

- logy, 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.
- Mikha, S.A., S.K. Tejinder, and W.D. Jhon (2000) Mineralization and denitrification in upland, nearly saturated and flooded subtropical soil. 11. Effect of organic matures varying in N content and C:N ratio, *Biological and Fertility of Soil*, 31, 168-174.
- 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. Geophy. Res.*, 104(D15), 18487-18503.
- Sheare, M.J. and M.A.K. Khalil (1993) Rice agriculture, emissions. In *Atmospheric Methane, Source, Sinks and Role in Global Change*, ed. M. A. K. Khalil, Springer, Berlin, pp. 230-253.
- Skiba, U.M., L.J. Sheppard, J. MacDonald, and D. Fowler (1998) Some key environmental variables controlling nitrous oxide emissions from agricultural and seminatural soils in Scotland, *Atmospheric Environment*, 32(19), 3311-3320.
- Smith, K.A., P.E. Thomson, H. Clayton, I.P. McTaggart, and F. Conen (1998) Effects of temperature, water content and nitrogen fertilisation on emissions of nitrous oxide by soils, *Atmospheric Environment*, 32(19), 3301-3309.
- Smith, K.A., K.E. Dobbie, B.C. Ball, L.R. Bakken, B.K. Sitaula, S. Hansen, R. Brumme, W. Borken, S. Christensen, A. Prieme, D. Fowler, J.A. Macdonald, U. Skiba, L. Klemedtsson, A. Kasimir-Klemedtsson, A. Degorska, and P. Orlanski (2000) Oxidation of atmospheric methane in Northern European soils, comparison with other ecosystems, and uncertainties of global terrestrial sink, *Global Change Biol.*, 8, 885-894.
- Warneck, P. (2000) *Chemistry of the Natural Atmosphere*. 2nd edition, Academic Press, New York.
- WMO (2010) *WMO Greenhouse Gas Bulletin The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere based on Global Observations through 2009*, No. 6; 24 November 2010, World Meteorological Organization.
- Wrage, N., G.L. Velthof, M.L. van Beusichem, and O. Onema (2001) Role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide, *Soil Biol. Biochem.*, 33, 1723-1732.