

배추 밭에서의 N₂O, CH₄, CO₂ 토양배출량 측정 및 특성 연구: 주요온실가스 배출량 측정 및 지표생태변화에 따른 특성 연구

Soil Emission Measurements of N₂O, CH₄ and CO₂ from Intensively Managed Upland Cabbage Field

김 득 수* · 나 운 성

군산대학교 공과대학 환경공학과 대기환경연구소

(2010년 12월 29일 접수, 2011년 2월 9일 수정, 2011년 3월 14일 채택)

Deug-Soo Kim* and Un-Sung Na

*Atmospheric Environmental Research, Department of Environmental Engineering,
Kunsan National University, Kunsan, Jeonbuk 573-701, Korea*

(Received 29 December 2010, revised 9 February 2011, accepted 14 March 2011)

Abstract

From October 2009 to June 2010, major greenhouse gases (GHG: N₂O, CH₄, CO₂) soil emission were measured from upland cabbage field at Kunsan (35° 56'23"N, 126° 43'14"E), Korea by using closed static chamber method. The measurements were conducted mostly from 10:00 to 18:00LST during field experiment days (total 28 days). After analyzing GHG concentrations inside of flux chamber by using a GC equipped with a methanizer (Varian CP3800), the GHG fluxes were calculated from a linear regression of the changes in the concentrations with time. Soil parameters (e.g. soil moisture, temperature, pH, organic C, soil N) were also measured at the sampling site. The average soil pH and soil moisture were ~pH 5.42±0.03 and 70.0±1.8 %WFPS (water filled pore space), respectively. The ranges of GHG flux during the experimental period were 0.08~8.40 mg/m² · hr for N₂O, -92.96~139.38 mg/m² · hr for CO₂, and -0.09~0.05 mg/m² · hr for CH₄, respectively. It revealed that monthly means of CO₂ and CH₄ flux during October (fall) were positive and significantly higher than those (negative value) during January (winter) when subsoil have low temperature and relatively high moisture due to snow during the winter measurement period. Soil mean temperature and moisture during these months were 17.5±1.2°C, 45.7±8.2 %WFPS for October; and 1.4±1.3°C, 89.9±8.8 %WFPS for January. It may indicate that soil temperature and moisture have significant role in determining whether the CO₂ and CH₄ emission or uptake take place. Low temperature and high moisture above a certain optimum level during winter could weaken microbial activity and the gas diffusion in soil matrix, and then make soil GHG emission to the atmosphere decrease. Other soil parameters were also discussed with respect to GHG emissions. Both positive and negative gas fluxes in CH₄ and CO₂ were

*Corresponding author.

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

observed during these measurements, but not for N_2O . It is likely that CH_4 and CO_2 gases emanated from soil surface or up taken by the soil depending on other factors such as background concentrations and physicochemical soil conditions.

Key words : Greenhouse gas emission, Closed chamber, Soil GHG emission, Cabbage field, Soil parameters, N_2O , CO_2 , CH_4

1. 서 론

인류 활동에 의한 온실기체 배출은 산업화 이후로 계속해서 증가해오고 있으며, 1970년과 2004년 사이에 ~70%나 증가한 것으로 보고되고 있다(IPCC, 2007). CO_2 농도는 산업화 이전 280 ppm에서 2005년에는 379 ppm으로 증가하였고 화석연료의 연소에 의한 배출이 2/3, 토지사용 변화에 의한 배출이 1/3을 차지하는 것으로 추정되고 있다. CH_4 의 경우 산업화 이전보다 두 배 이상 높은 1,774 ppb로 화석연료 연소, 반추동물·수생식물과 같은 육생 시스템과 습지와 담수 논농사 그리고 매립지로부터 생성된다. N_2O 의 경우에도 산업화 이전보다 약 18% 높은 319 ppb로 인간 활동으로 인한 농업활동 중 특히 질소를 함유한 비료사용에 의한 영향으로 증가되고 있다(IPCC, 2007). 온실기체 배출에 대한 연구는 자연부문 배출원에 대한 연구보다 산업부문 배출원 연구가 활발히 진행되고 있다. 국내의 경우 자연부문(토양과 자연생태환경 등) 배출원에 대한 연구로 서해안 갯벌에서의 배출에 대한 연구가 단기간 동안 수행된 적이 있으나(Kim, 2007), 배출환경의 특수성에 의한 실측환경의 어려운 여건 등으로 인하여 배출특성 분석을 위해 충분한 자료 확보가 미흡한 실정이다.

일반적으로 토양과 대기 사이에서 생지화학(biogeochemical)적 탄소와 질소순환 과정을 통해 주요 온실기체인 CO_2 , CH_4 , N_2O 의 지표층(surface layer) 배출 또는 토양 흡수가 나타날 수 있다. 토양유기탄소는 산화상태에서 미생물에 의하여 CO_2 로 전환되어 대기 중에 방출이 되지만 토양 중에 녹아 탄산염이나 중탄산염 등으로 되어 토양에 남게 되기도 하며, 환원상태에서 혐기성 미생물들에 의하여 CH_4 로 전환되어 배출되기도 한다. 질소화합물(NO , N_2O , NH_3)의 경우도 토양내 미생물대사활동과 연관된 질산

화·탈질화 과정을 통해서 배출되고 있다(Warneck, 2000). 토양내 NH_3 에서 NO_3^- 으로 변환되는 질산화 과정에서 중간생성물로 NO_2^- 를 거치며, NO_3^- 에서 N_2 로 전환이 되는 탈질화 과정에서는 NO 와 N_2O 가 함께 발생된다. 토양내 질산화·탈질화 과정에 의한 기체 배출변화와 함께 토양의 이화학(physico-chemical)성상 즉 토양의 수분과 온도 그리고 유기물 등의 배출조절 인자들의 변화에 대한 이해도 매우 중요하다(Suh *et al.*, 2006).

이번 연구에서는 주요온실가스 배출량측정 및 지표생태변화에 따른 특성 연구의 일환으로 국내 주요 밭작물인 배추를 대상으로 하여 통상적인 영농방식에 따른 배추밭으로부터의 주요온실기체 배출량을 측정하였다. 동시에 그러한 배출량과 배추경작지 토양인자(토양의 이화학특성)들의 변화에 따른 상관성을 조사하여 배추밭에서의 토양특성이 지표 온실기체 배출량의 변화에 미치는 영향을 분석하였다. 이번 연구결과가 과거 선행 연구 자료와 함께 인위적 근원의 배출정보에 비해 상대적으로 부족한 국내 자연부문 배출량 산정의 기초 자료로 활용될 수 있기를 기대한다.

2. 연구 및 내용

2.1 조사지점

경작지로부터의 주요온실가스 배출량 조사 지점은 전북 군산시 옥산면(35°56'23"N, 126°43'14"E)에 위치한 한 배추밭 경작지를 대상으로 하였으며, 2009년 10월부터 2010년 6월까지 측정을 수행하였다. 해당 경작지는 약 300여평(약 992 m²)으로 경작물을 파종하기 전 봄(4월 초순)과 여름(8월 중순)에 밭갈이를 2회 실시하였으며, 이후 복합비료와 과석 퇴비(질소 21%, 인산 17%)를 파종 전에 시비하였다. 해당

밭은 20년 이상 경작 중에 있으며 토양 pH는 5.4 정도로 토양의 산성화가 이루어져 있는 지역으로 추정된다. 연구 기간 중에는 배추를 경작하고 있었으며, 밭 경작지의 경작물에 피해가 가지 않도록 작물과 작물 사이의 골에 배출량 측정을 위한 플럭스챔버(flux chamber)를 설치하여 지표배출량을 측정하였다.

2.2 플럭스챔버 구성 및 시료채취 방법

지표배출량 측정에 사용된 챔버는 폐쇄형 챔버(closed chamber)이며 원통형 아크릴로 제작하였다(Kim, 2007). 폐쇄형 챔버는 토양에서 배출되는 가스가 챔버 내부에서 평형상태에 도달하기까지의 시간에 따른 농도 증가율을 이용하여 플럭스를 산정하는 방법으로 지표로부터의 플럭스 변화를 직접 관찰하는데 범용되고 있는 방법이다(Kim and Oh, 2003). 폐쇄형 챔버는 측정 지표면 위에 챔버를 설치 후 챔버 내부와 외부를 단절시켜 시간에 따른 농도 증가율을 측정하는 방법으로 농도가 낮은 미량 기체의 지표 플럭스를 현장에서 직접 측정할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 내부의 온도 변화와 챔버 설치 시 지표 상태를 변화시켜 실제 배출량에 영향을 미칠 수 있는 단점을 가지고 있어 내부온도에 따른 배출량 보정과 함께 설치로 인한 영향을 최소화하기 위해 보통 측정일 하루 전에 챔버를 미리 설치하여 사용한다(Kim, 2007; Kim and Oh, 2004).

측정시 사용된 폐쇄형 챔버는 그림 1과 같은 형태(부피: 약 21.2L)로 직경 30 cm, 높이 30 cm인 원통형으로 투명한 아크릴로 제작하였다. 챔버는 상부 몸체와 하부의 받침 형태로 구분되어 있으며, 하부를 측정일 전에 먼저 설치하고 실제 배출량 측정 시에 상부와 결합시킨다. 이때 결합되는 부분은 가스의 누출을 방지하기 위하여 받침 결합부에 홈을 따라 O-ring을 설치하였다. 또한, 챔버 상부에는 저속 소형 fan을 장착하여 챔버 내부 공기의 균질성을 유지할 수 있게 하였다.

이번 측정실험에서는 선정된 밭 경작지에서 챔버의 설치에 따른 지표 상태의 변화 영향을 최소화하기 위하여 측정개시 3일 전에 챔버 2기의 하부를 약 10 cm~15 cm 깊이로 설치하였다. 토양내 이화학 특성이 균질할 수 없기 때문에 측정점 위치에 따라 기체의 배출량에 차이가 있을 수 있으며, 가능한 여러 지점에서 동시에 측정함으로써 대표성을 높일 수 있

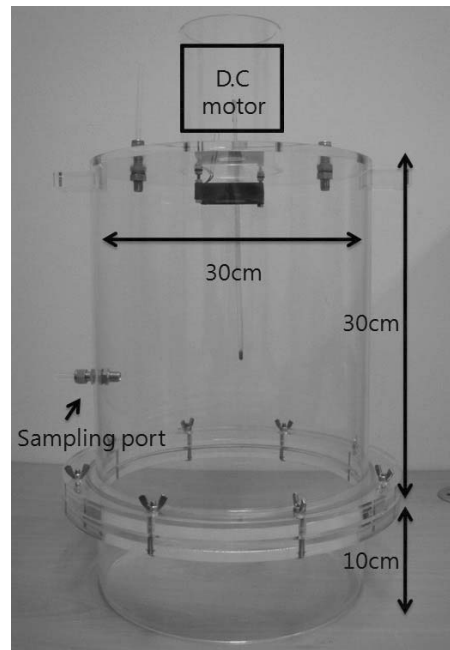


Fig. 1. Schematic of flux chamber system.

을 것이나 연구와 측정 여건에 따라 결정될 수밖에 없는 한계가 있다. 이번 연구에서는 2기의 챔버를 서로 이웃하여 설치하고 2지점에서 측정된 배출량의 평균값을 사용하였다. 배출량 시료 측정 기간은 2009년 10월부터~2010년 6월까지 기간 중에서 계절적 특성을 고려하여 대략 매월중 약 1주간을 대상으로 연속으로 집중 측정을 실시하였다. 배출량 산출을 위한 챔버내 시료 채취는 이미 측정지에 설치해 놓은 2기의 챔버 하부에 첫 번째 챔버 상부를 합체(1번 챔버)한 직후 시료채취구를 통해 3-way syringe를 사용하여 50 mL의 시료를 채취한다. 15분 후 다음 시료를 채취하기 전 사이에 두 번째 챔버 하부에 준비된 두 번째 상부를 합체(2번 챔버)한 직후 1번 챔버에서와 같은 방법으로 시료 50 mL을 채취한다. 이후는 번갈아 가면서 각 챔버의 첫 번째 시료채취로부터 15분 간격으로 각 2회 씩 추가로 채취(각 챔버 당 총 3회 시료)하여 각 챔버 시료의 농도 변화율로부터 배출량을 산출하였다. 이와 같은 방법으로 시료들을 채취한 후 즉시 지표 상태가 변형이 되지 않게 조심스럽게 하부로부터 상부를 분리하여 30분 정도 방치를 한 후 동일한 방법으로 반복하

여 이후 6시간 동안 시료를 채취하였다. 표 2는 배출량 측정일과 N₂O, CH₄, CO₂의 일평균 배출량 결과를 측정지점 토양시료의 이화학적 특성 값과 함께 나타낸 것이다. 이때 측정일 동안의 평균 배출량은 대부분 오전 10시~오후 4시까지 매시간 산출된 배출량을 평균한 것이다.

2.3 분석 방법 및 flux 산정

주요온실기체 분석은 가스크로마토그래피(GC)를 사용하였으며, 실제 시료 분석에 사용된 G.C는 methanizer가 장착된 Varian CP-3800모델로 Pye-Unicam 63Ni를 장착한 전자포획검출기(Electronic Capture Detector, ECD)와 수소불꽃이온화검출기(Flame Ionization Detector, FID)가 이용되었다. Column은 Porapak Q (80/100 mesh)를 사용하였고 Carrier gas는 순도 99.999%의 수소, 질소, 산소를 사용하였으며, 분석 조건과 함께 표 1에 요약하여 제시하였다.

분석에 사용한 온실가스 표준기체 (standard gas)는 한국표준과학연구원 (KRISS)에서 제조하여 인증받은

것(N₂ balance 10 L 알루미늄 용기, 10.0 MPa)으로 구매하였다. 사용된 N₂O 표준기체의 농도는 0.3 ppm, 1 ppm, 5 ppm이었고, CH₄ 표준기체의 농도는 1 ppm, 5 ppm, 10 ppm이었으며, CO₂ 표준기체의 농도는 100 ppm, 500 ppm, 1,000 ppm으로 모두 농도 오차 3% 이내이었다. 시료분석 전에 정밀성과 재현성 조사를 위하여 GC의 상태를 충분히 안정화시킨 후, 각 표준기체들을 3회씩 분석하였으며, peak면적과 재현시간을 조사하였다. 표 2에 peak면적의 분석결과를 정리하였으며, 반복정밀성(RSD=표준편차/평균값×100%)은 0.3~3.5% 정도이었고, 직선성(linearity)을 나타내는 다중 검량선 확인 결과 모든 기체에서 r²=0.9993 이상으로 나타났다.

G.C분석에 따른 챔버 내 기체 농도의 시간 변화를 구하고 식(1)을 이용하여 배출량을 산출하였다(Kim, 2007; Kim and Oh, 2003).

$$\text{Flux} = \rho \cdot \left[\frac{V}{A} \right] \cdot \left[\frac{\Delta C}{\Delta t} \right] \cdot \left[\frac{273}{(T+273)} \right] \quad (1)$$

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)

ΔC/Δt: the average changing rate of concentration with time (ppmV hr⁻¹)

T: average temperature in the chamber (°C)

배출량 측정 시 플럭스 챔버를 설치한 인근에서 토양시료를 채취하였으며, 토양의 이화학적 특성을 파악하기 위하여 토양화학 분석법에 의거하여 분석하

Table 1. G.C analysis condition of 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) 6m
Column temp.	70°C	70°C
Injection temp.	150°C	150°C
Oven temp.	350°C	300°C

Table 2. GHG's reproducibility test result (Peak area) for gas chromatography QA/QC.

Gas	Standard concentration	Peak area					RSD (=SD/AVG × 100)
		1st	2nd	3rd	Average (AVG)	Standard deviation (SD)	
N ₂ O	0.3 ppm	58644	59565	57960	58723	805.41	1.4
	1 ppm	186723	788457	188148	187776	924.92	0.5
	5 ppm	888423	901900	892336	894219	6933.15	0.8
CH ₄	1 ppm	7815	7693	7543	7683.7	136.24	1.8
	5 ppm	25545	25217	25371	25377.7	164.10	0.7
	10 ppm	46038	45466	45254	45586	405.54	0.9
CO ₂	100 ppm	36552	39019	36983	37518	1317.64	3.5
	500 ppm	209141	210238	210120	209833	602.19	0.3
	1000 ppm	419524	417950	415224	417566	2175.57	0.5

였다. 분석 항목은 pH, 토양수분량(WFPS; water filled pore space), 전기전도도(EC; electrical conductivity), 유기물질함량(OM; organic matter), T-N, NH₄⁺-N, NO₃⁻-N이다. 채취한 시료의 일부는 곧바로 토양수분량과 pH를 분석하는 데 사용하였으며, 다른 항목들을 분석하기까지 시료를 건조시켜 보관하였다. 이번 연구에서 토양수분량은 WFPS로 나타내었으며, WFPS는 토양의 총 공극에 대한 수분이 차지하고 있는 공극의 부피비(volumetric water content ratio)로 설명이 되며, 식(2)에 따라 산출된다.

$$WFPS (\%) = \frac{[100 \times (\theta_g \times BD)]}{\left[1 - \left(\frac{BD}{PD}\right)\right]} \quad (2)$$

θ_g : gravimetric soil water content

$$= \left(\frac{\text{wet soil mass} - \text{dry soil mass}}{\text{dry soil mass}} = \frac{H_2O (g)}{\text{soil} (g)} \right)$$

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

PD: soil particle density (g cm⁻³)

토양의 BD는 1.23 g cm⁻³이었으며, PD는 지역 평균값인 2.65 g cm⁻³을 적용하였다. 분석항목 중 WFPS와 pH는 직접 분석을 하였으며, 다른 항목들은 전북 농업기술원의 협조로 분석을 수행하였다.

3. 결과 및 논의

토양으로부터 기인하는 N₂O의 자연부문 배출은 주로 토양내의 질산화·탈질화 과정에 의한 것으로 널리 보고되고 있다. 특히 경작지에서 작물의 성장을 위해 사용된 질소비료에 의한 영향이 농경지 토양으로 인한 N₂O 배출의 81% 정도를 기여하고 있는 것으로 보고되었다(Isermann, 1994). 또한, 질소 비료 사용과 더불어 토양 온도와 토양 수분함유량(WFPS)이 토양 표면으로부터 기체의 발생에 밀접한 관련이 있다고 보고되어 왔으며, Kim *et al.* (1992)과 Fang and Moncrieff (2001)의 연구에서는 토양에 교환되는 이산화탄소의 주요 조절인자는 토양 온도와 수분 그리고 유기물 함량이라고 하였다. 이번 연구에서도 배출에 밀접한 관련이 있는 토양 온도와 토양 수분 함유량과 비료 사용으로 인하여 온실기체 변화에 영향을

미치는 NO₃⁻, NH₄⁺, T-N 등 토양화학인자들을 측정하였고, 기체 시료와 함께 분석 결과를 표 3과 4에 요약하였다. 그림 2는 측정기간 동안 산출된 주요 온실기체 일평균 배출량 변화와 주요 토양 조절인자의 변화를 동시에 도시한 것이다. N₂O의 경우 측정기간 동안 전반적으로 지표 배출이 일어나는 경향을 보였으며, 5월에 가장 높은 배출량을 보인 것으로 나타났다. CH₄, CO₂의 경우에는 연구기간 동안 음과 양의 값을 보여 토양에 의한 배출(source)과 흡수(sink)가 있었으며, 10월과 11월에 비교적 높은 배출을 보였다. 이는 주로 주위 환경영향에 따른 토양내의 기질 변화로 호기성·혐기성 상태에 따른 산화와 환원 과정이 반복적으로 나타나 기체배출 기작에 영향을 준 것으로 호기 상태에서는 CO₂, 혐기 상태에서는 CH₄ 배출로의 전환이 우세하게 나타났기 때문으로 사료된다.

N₂O의 배출량은 0.08~8.40 mg/m²·hr를 나타냈으며, 평균 1.12±0.14 mg/m²·hr의 값을 보였다. 가장 높은 배출량을 보인 5월의 배출량은 4.47±2.59 mg/m²·hr를 보였으며, 상대적으로 높은 토양 온도와 T-N 그리고 낮은 NH₄⁺가 기록되었다(표 3). 5월에 상대적으로 높은 T-N양이 나타난 것은 봄철 기온 상승으로 질산화 과정에서의 미생물의 활발한 활동과 상대적으로 4월 중순경 비료 사용으로 인한 영향이 복합적으로 나타났기 때문으로 판단된다. CO₂의 범위는 -73.11~139.38 mg/m²·hr로 평균 5.32±4.12 mg/m²·hr로 나타났다. 10월에 CO₂의 배출량은 60.26±86.06 mg/m²·hr로 가장 높은 배출량을 보였으며, 토양인자 중 EC와 NO₃⁻, NH₄⁺은 비교적 높게 나타났고, 수분량은 상대적으로 낮았다. CH₄의 배출량 범위는 -0.09~0.07 mg/m²·hr로 다른 온실기체보다 비교적 좁은 변화폭을 보였으며, 평균값도 거의 0에 가까워 지표배출이 거의 없는 것으로 나타났다. CH₄ 또한 CO₂와 같이 10월의 측정기간 중 0.02±0.02 mg/m²·hr로 측정기간 중 가장 높게 나타났으며, 토양인자들의 변화 또한 CO₂의 경우와 같이 토양내 NO₃⁻, NH₄⁺의 양들이 10월 중에 높게 나타났다.

이상의 측정 자료에 의한 온실기체배출량의 평균 값을 이용하여 측정기간 동안의 해당 경작지에서의 온실기체 연간 배출량(측정대상 배추경작지 면적 992 m², 경작기간 연중 6개월로 가정)은 N₂O의 경우

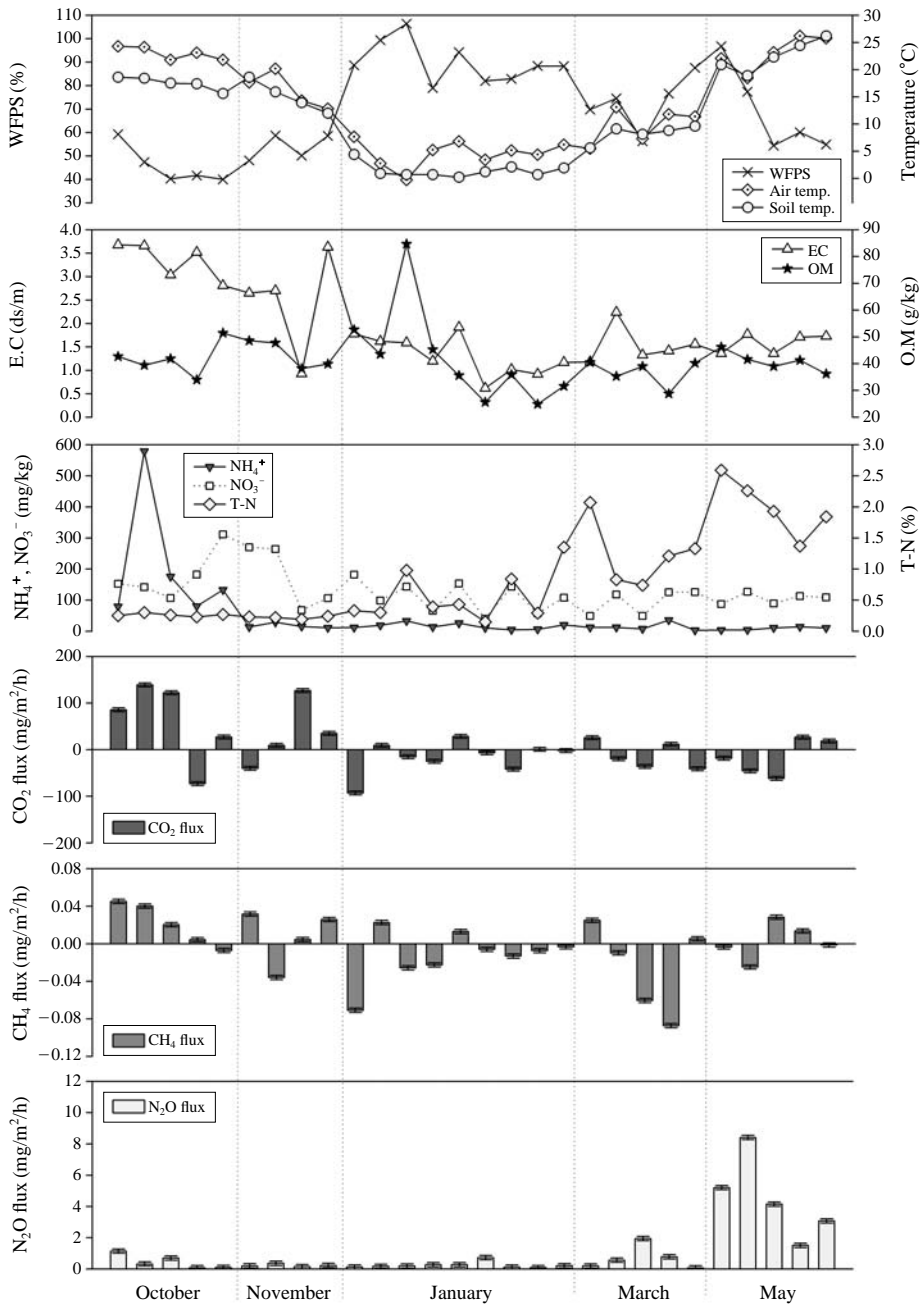


Fig. 2. Monthly trend of major GHG's fluxes and soil parameter.

4.97 kgN₂O/yr (1,540.7 kgCO₂-eq/yr)이고 CO₂의 경우 23.12 kgCO₂/yr로 추정된다. N₂O의 지구온난화지수 (GWP; global warming potential index)에 따른 CO₂기

준으로 환산하면 측정 경작지에서의 CO₂ 환산배출량은 1,563.82 kgCO₂-eq/yr로 추정될 수 있다. 한편 전북지역 배추밭 경작지 면적인 1,585 ha (통계청, 2009)

Table 3. Daily average of GHG's fluxes and soil parameter for the experimental period.

Date (Days)	Flux (mg/m ² · hr)				Soil elements							
	N ₂ O flux	CO ₂ flux	CH ₄ flux	N	pH	Soil temp. (°C)	WFPS (%)	E.C (dS/m)	O.M (g/kg)	NH ₄ ⁺ -N (mg/kg)	NO ₃ ⁻ -N (mg/kg)	T-N (%)
10/06	1.14	85.44	0.05	12	5.36	18.6	59.3	3.68	42.7	79.2	152.6	0.25
07	0.32	139.38	0.04	12	5.47	18.4	47.4	3.66	39.4	579.0	141.4	0.30
08	0.70	122.34	0.02	12	6.42	17.5	40.3	3.04	41.9	175.3	106.7	0.26
09	0.08	-73.11	0.00	12	5.36	17.4	41.7	3.52	34.0	80.6	182.3	0.23
15	0.10	27.26	-0.01	12	4.44	15.6	40.0	2.81	51.4	133.0	311.6	0.27
11/04	0.20	-40.30	0.03	12	4.91	18.6	48.1	2.65	48.6	13.4	270.2	0.23
09	0.37	9.55	-0.04	12	5.37	15.9	58.7	2.70	47.8	28.6	264.3	0.22
11	0.15	126.76	0.00	12	5.26	13.9	50.2	0.93	38.2	15.4	67.8	0.19
12	0.23	35.10	0.03	12	5.07	12.0	58.6	3.63	39.9	10.9	106.4	0.24
12/24	0.13	-92.96	-0.07	12	5.50	4.4	88.7	1.78	52.7	11.6	181.6	0.33
01/11	0.17	9.53	0.02	12	5.26	0.9	99.4	1.62	43.6	18.6	98.1	0.30
14	0.19	-15.28	-0.03	12	5.70	0.7	106.4	1.59	84.7	33.2	142.9	0.98
15	0.27	-24.98	-0.02	12	5.84	0.7	79.0	1.20	45.3	13.3	65.4	0.39
18	0.27	28.62	0.01	12	5.20	0.2	94.2	1.92	35.6	25.6	153.6	0.43
22	0.73	-6.80	-0.01	12	5.72	1.2	82.0	0.62	25.6	10.5	39.9	0.15
25	0.12	-41.66	-0.01	12	5.18	2.1	82.9	1.02	35.9	4.6	143.2	0.84
27	0.09	0.77	-0.01	12	5.00	0.7	88.4	0.92	24.9	6.0	57.5	0.29
29	0.21	-1.88	0.00	12	5.36	1.9	88.3	1.17	31.6	20.3	107.7	1.35
03/19	0.19	26.00	0.02	12	5.90	5.6	69.8	1.18	40.5	12.0	49.1	2.07
24	0.56	-19.69	-0.01	12	5.50	9.1	74.6	2.24	35.3	12.0	118	0.83
26	1.94	-36.13	-0.06	12	6.00	8.1	56.3	1.33	39.0	7.6	48.8	0.74
29	0.78	11.84	-0.09	12	5.60	8.8	76.6	1.42	28.8	35.8	125.3	1.21
04/02	0.08	-40.85	0.01	12	5.60	9.6	87.6	1.56	40.2	2.8	125.8	1.33
05/27	5.20	-18.48	0.00	12	5.77	20.9	96.8	1.36	46.2	3.6	86.9	2.59
28	8.40	-45.55	-0.02	12	5.28	18.9	77.4	1.77	41.6	4.2	126.7	2.26
31	4.15	-61.56	0.03	12	5.42	22.3	54.5	1.36	39.0	10.6	88.9	1.93
06/04	1.51	27.05	0.01	12	5.06	24.4	60.1	1.71	41.3	14.0	112.9	1.37
07	3.07	18.51	0.00	12	5.35	26.2	54.9	1.73	36.2	10.1	108.5	1.84
Mean	1.12	5.32	0.00		5.42	11.24	70.08	1.93	41.14	48.99	128.00	0.84
Standard error	0.14	4.12	0.00		0.03	0.6	1.4	0.07	0.78	7.96	4.75	0.05

Table 4. Monthly average of GHG's fluxes and soil parameter for the experimental period.

Date (Month)	Flux (mg/m ² · hr)			Soil elements								
	N ₂ O flux	CO ₂ flux	CH ₄ flux	pH	Soil temp. (°C)	WFPS (%)	E.C (dS/m)	O.M (g/kg)	NO ₃ ⁻ -N (mg/kg)	NH ₄ ⁺ -N (mg/kg)	T-N (%)	No. of day
Oct.	0.14±0.45	60.26±86.06	0.02±0.02	5.4	17.5	45.7	3.3	41.9	178.92	209.44	0.3	5
Nov.	0.23±0.09	32.78±70.04	0.01±0.03	5.2	15.1	60.9	2.3	45.4	178.06	15.98	0.2	4
Jan.	0.24±0.19	-16.07±16.07	-0.01±0.01	5.5	1.4	89.7	1.3	40.9	101.04	16.51	0.3	8
Mar.	0.71±0.75	-11.76±35.13	-0.03±0.03	5.7	8.2	72.9	1.6	36.8	93.39	14.06	1.2	5
May	4.47±2.59	-16.01±38.73	0.00±0.02	5.4	22.5	68.7	1.6	40.9	104.76	8.51	2.0	5

에 따른 전라북도 배추밭에서의 배출량을 동일한 가정으로 추정된 결과 N₂O와 CO₂ 배출량은 각각 77.8 tonN₂O/yr (24,118 tonCO₂-eq/yr)와 369 tonCO₂/yr이었

다. 이들을 CO₂기준으로 환산하면 총 24,487 tonCO₂-eq/yr이었으며, 2006년 농업분야 온실가스 배출량 중 우리나라 전체 밭에서 배출되는 2,321천 tonCO₂-eq/yr

(국립농업과학원, 2009)의 약 1.1% 수준을 차지하는 것으로 추정되었다.

3.1 토양수분량(WFPS)과 온실기체 배출량

토양수분량은 토양에서 서식하는 미생물의 성장 활동에 매우 중요한 요소로 작용되며 수분량 정도에 따라 호기·혐기성 상태가 조성이 되며 질산화와 탈질화 과정에 영향을 줄 수 있다. 지속적인 토양 수분의 공급은 담수상태의 논 경작지와 같은 현상이 일어나 토양 속 공극의 감소로 인하여 토양내 혐기성 상태를 유지시켜 탈질화 과정이 일어나게 될 것이며, 이로 인해 N_2O 기체가 배출되고, 혐기성 상태에서의 미생물의 영향으로 CH_4 의 발생이 일어난다. 반대로 토양수분량의 감소가 지속된다면 호기성 상태에서의 CH_4 의 산화 과정에 따른 CO_2 의 발생이 나타나고 질산화 과정으로 인하여 역시 배출에 영향을 줄 수 있을 것이다.

Lemke *et al.* (1998), Wagner-Riddle *et al.* (1997)은 WFPS가 70~90%일 때 N_2O 발생에 최적조건인 것으로 보고하였고, 90% 이상일 때 배출량이 급격히 감소한다고 하였다. 한편, Davidson *et al.* (1991)은 WFPS가 60% 정도에서 질산화 과정과 탈질화 과정이 토양내 서로 공존하여 최대 N_2O 의 배출량을 보인다고 보고하였다. 이번 연구 결과에서는 측정기간 동안에 시료 채취 2~3일 전·후로 강우나 눈이 내린 경우가 있었으며, 이로 인해 토양의 수분함유량이 높았던 것으로 판단된다. 전체적으로 WFPS함량은 40% 이상으로 나타났으며, 5월의 WFPS가 68.7%일 때 상대적으로 높은 N_2O 배출량을 보였으며, 이러한 결과는 다른 측정 월에 비해 적당한 수준의 수분량과 22.5°C 정도의 적정 수준의 토양온도에 따른 환경이 동시에 조성되었기 때문에 사료된다. 그림 3은 토양수분량과 각 온실기체 간의 상관관계를 나타낸 것이다. WFPS와 N_2O 배출량과의 관계에는 55~80%일 때 높은 배출량을 보였으며 과거 연구 결과와 유사한 경향을 보였으나, 상관관계에서 $R^2=0.0012$ 로 극히 낮은 상관성을 보였다. 이들 사이에 낮은 상관성을 보인 것은 %WFPS가 적정 수준을 넘는 범위에 있는 측정결과까지도 포함한 것이 주요인이었을 것으로 판단되며, 또한 상대적으로 적정수준보다 낮은 토양온도에 의한 기체발생 제한요인도 복합적으로 배출에 영향을 주었기 때문인 것으로 사료된다. 다른

두 기체의 경우도 비교적 낮은 상관성(CO_2 , $R^2=0.1401$; CH_4 , $R^2=0.0876$)을 보였으나, WFPS가 높을수록 낮은 배출 경향을 보였다. 토양수분량이 높게 유지될 때 혐기성 상태의 조성으로 CH_4 의 발생이 예상되었으나, 상대적으로 높은 배출을 확인할 수 없었으며 N_2O 배출 경향에서와 같이 수분량 외에 다른 조절 인자와의 복합적인 영향에 의한 결과로 사료된다. 또한 일정 수준 이상의 토양수분량 증가는 토양내 공극률의 감소를 초래하여 확산능(diffusivity) 감소로 인한 지표면으로의 기체 배출을 억제시킬 수 있는 것도 한 원인으로 작용할 수 있을 것이다.

3.2 토양온도와 온실기체 배출량

토양수분량과 더불어 토양온도 또한 토양 기체배출량의 중요한 인자로 보고되고 있으며, 이들 인자들은 토양에 존재하고 있는 미생물의 성장과 활동에 영향을 미친다(Williams *et al.*, 1992). 이번 측정기간 동안의 토양온도는 0.2~26.2°C의 범위를 보였고 표 4에서와 같이 N_2O 의 경우는 5월에 22.5°C로 가장 높은 온도를 보였으며 N_2O 배출도 동시에 높게 나타났다. Godde and Conard (1999)는 토양내 서식하는 미생물의 성장 및 활동들은 계절적 변화와 토양의 성상에 따라 각기 다른 인자들과의 상호작용으로 인하여 배출량에 대한 불확실성을 설명하였다. Kim and Oh (2003)에서는 최적의 토양온도가 13~15°C에서 최대 N_2O 의 배출량을 보인다고 보고하였으며, Davidson *et al.* (1991)에 따르면 약 25~30°C 이상이 되면 지속적인 온도증가로 인한 수분의 감소와 미생물의 활동에 영향을 미쳐 온도 증가에 따른 배출량 증가는 나타나지 않는다고 보고하였다. 이번 연구결과에서도 그림 4와 같이 N_2O 의 경우 토양 온도가 가장 높았던 5월 중(22~27°C) 높은 배출량을 보였으며, 그 중 25°C 이상에서 가장 높은 배출량을 보였다. 토양 온도와 N_2O 와의 상관관계도 $R^2=0.2443$ 으로 비교적 상관성이 있는 것으로 나타났다. 선행된 연구 결과와 비교하였을 시 적정 범위를 벗어난 온도에서 N_2O 배출량의 감소를 예상하였으나 배출량의 증가를 보였는데 이는 토양온도의 증가와 함께 토양수분량의 영향이 있었을 것으로 사료되며, 향후 실험실내에서 토양인자들과 배출량과의 조절실험에 따른 분석을 통해 직접적인 상관성연구를 필요로 한다. CO_2 와 CH_4 의 경우에는 상대적으로 낮은 상관성

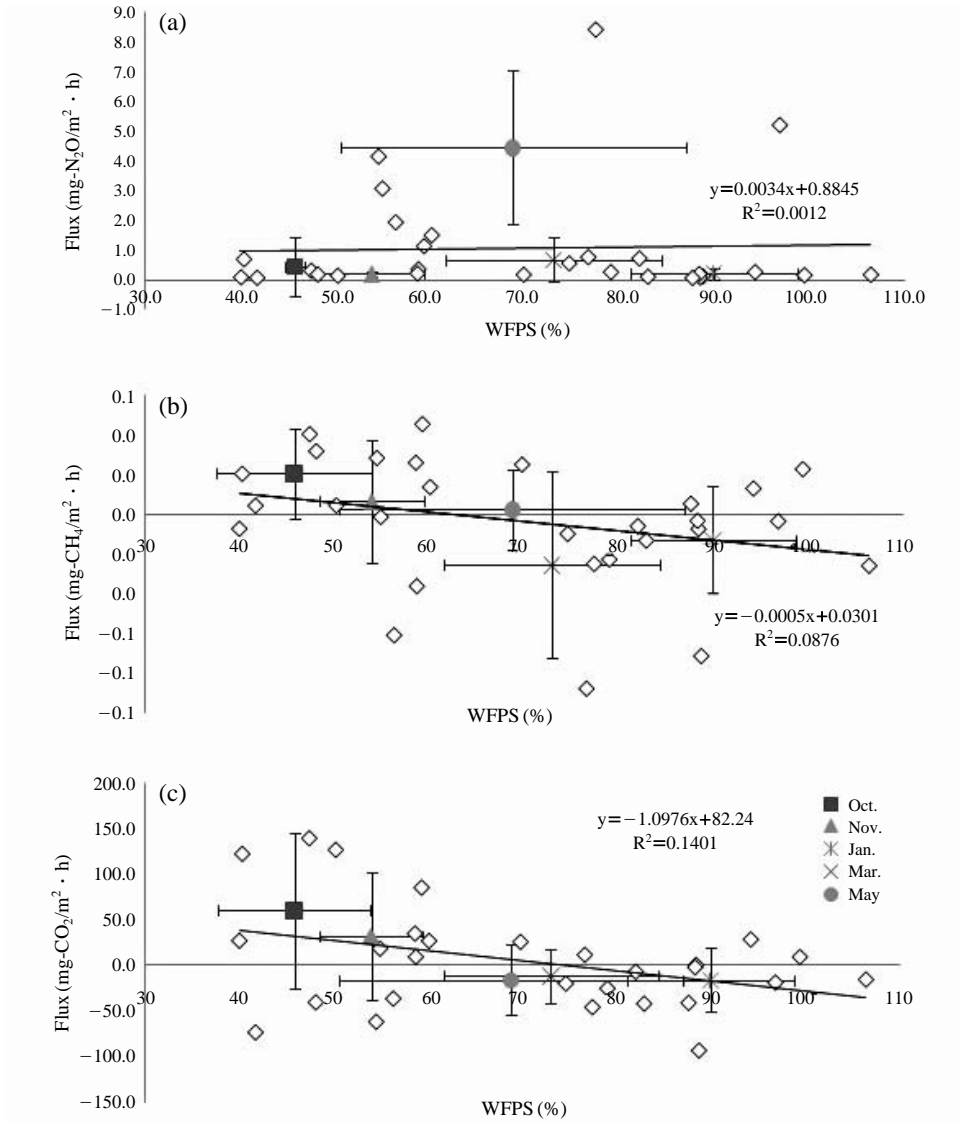


Fig. 3. Relationships between WFPS and major GHG's fluxes.

($R^2=0.0446$, $R^2=0.0984$)을 보였으나, N₂O의 경우와 유사한 배출경향을 보였으며, 10월경에 상대적으로 높은 지표 배출이 나타나서 배출에 적정했던 온도변위는 N₂O 경우보다 다소 낮은 16~20°C로 나타났다.

3.3 질소 함유량과 온실기체 배출

밭 경작지 토양에서 질소를 함유한 비료 사용은 토양 N₂O 배출량을 증가시키는 것으로 보고되고 있

다. Hou *et al.* (2000)의 연구에 따르면 N₂O 배출량이 높은 이유는 토양의 유기물 질소 사용에 원인이 있다고 하였으며, 특히 NO₃⁻가 원인이라고 하였다. 이에 토양 시료를 채취하여 토양의 질소의 함량을 분석하고 또한, 토양의 미생물에 의한 질산화·탈질화 과정의 영향에 의한 N₂O의 배출을 고려하여 NH₄⁺와 NO₃⁻에 대하여 분석을 실시하였다. 분석결과는 표 3과 4에서 보듯이 T-N의 범위는 0.19~2.59%를

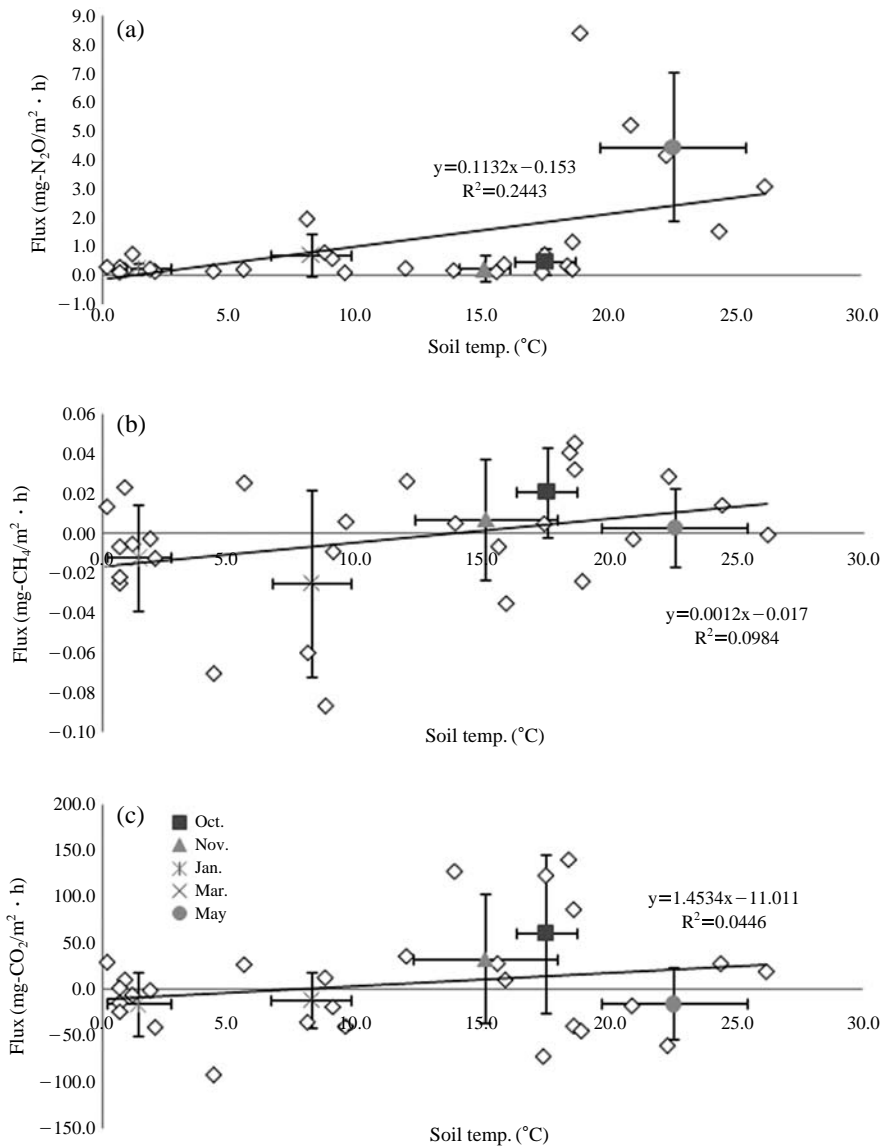


Fig. 4. Relationships between soil temp. and major GHG's fluxes.

보였으며, 3월에 1.2%, 5월에 T-N이 2.0%로 봄철에 높은 배출량을 보였다. 3월과 5월간 T-N이 높았던 이유는 겨울철 이후 토양온도의 상승과 함께 4월 중순경 질소비료의 시비가 있었기 때문으로 사료되며, N₂O 배출량 또한 빠르게 상승한 것으로 판단된다. 이에 관련되어 NH₄⁺와 NO₃⁻, 그리고 유기물함량(organic matter; OM)의 범위는 각각 2.8~579.0 mg/kg,

11.8~311.6 mg/kg, 25.6~84.7 g/kg의 범위를 보였다. 국립농업과학원의 전라북도 밭 토양의 화학성 분석(농촌진흥청, 2009)에서는 OM의 양이 평균적으로 21 g/kg 보고하였으며, 이번 측정토양시료 분석결과와 비교 시에 측정토양 OM의 양이 상대적으로 높은 것으로 나타났다. 측정기간 동안 토양의 OM은 3월에 상대적으로 낮게 나타났으나 평균값과 큰 차이를 보

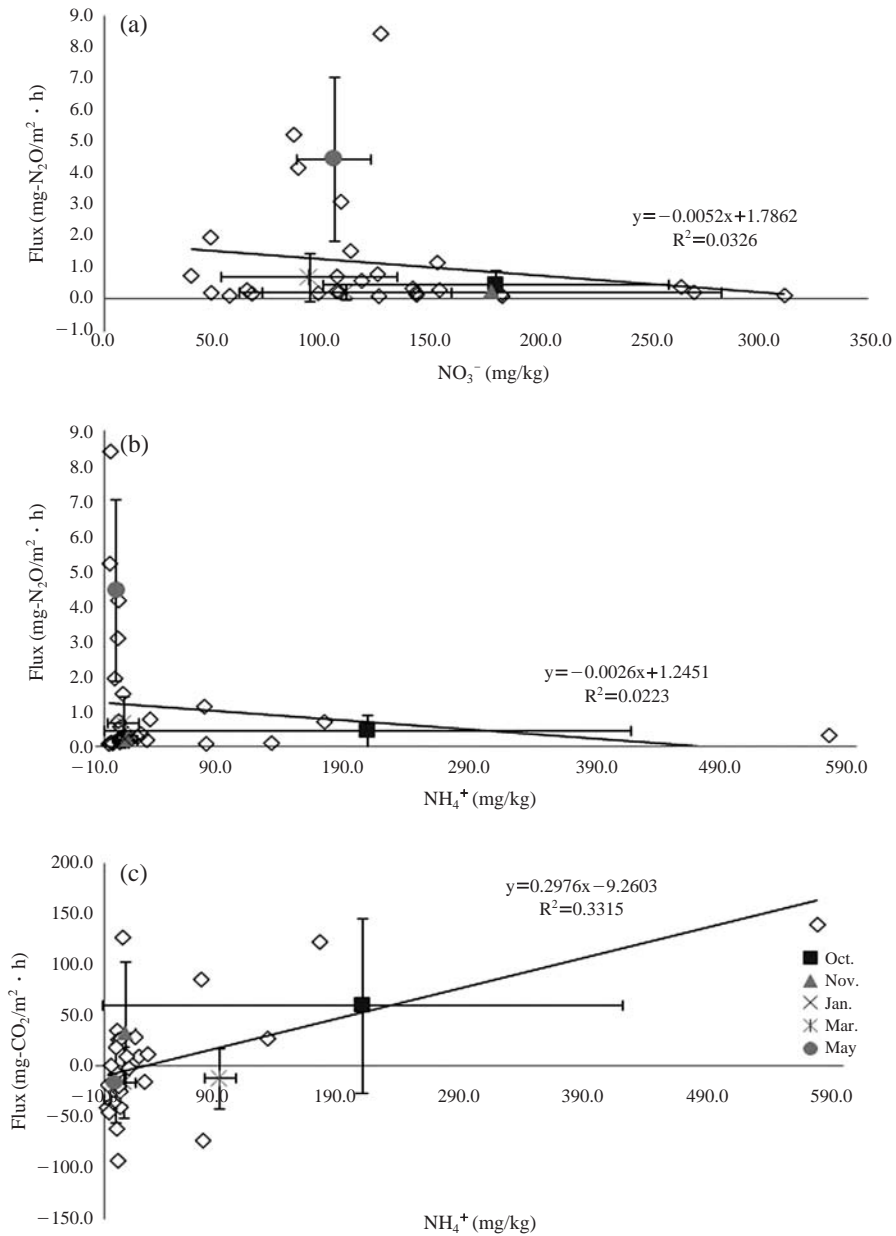


Fig. 5. Relationships between NO₃⁻, NH₄⁺ and major GHG's fluxes.

이지는 않았다. 토양내 NO₃⁻와 NH₄⁺의 경우 대부분의 기간에서 NO₃⁻-N이 상대적으로 NH₄⁺-N보다 높게 나타났으며, 그림 5에서 질산화의 최종산물인 토양 NO₃⁻에 따른 N₂O 배출량의 변화에서 그 상관성은 매우 낮았지만 토양 NO₃⁻와 NH₄⁺가 증가할수록

N₂O 배출이 낮아지는 경향으로 나타났다. 그러나 N₂O와 토양 NO₃⁻, NH₄⁺의 경우와는 달리 CO₂ 배출의 경우에는 일정수준(R²=0.3315; p=0.001)에서 NH₄⁺와의 상관성이 있는 것으로 나타났다.

측정기간 동안 조사된 모든 1시간 단위의 주요 은

Table 5. Correlation analysis for major GHG'd fluxes with soil parameters (n=28).

		WFPS	Soil temp.	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	T-N	E.C	O.M
CH ₄	R	-.280	.327	.302	-.034	-.030	.397	-.083
	P-value	.148	.090	.118	.863	.881	.037	.675
CO ₂	R	-.374	.211	.576	-.098	-.279	.333	-.089
	P-value	.050	.281	.001	.619	.150	.083	.651
N ₂ O	R	.035	.494	-.150	-.180	.712	-.142	-.019
	P-value	.860	.008	.447	.359	.000	.472	.922

실가스 배출량과 토양인자들 사이의 상관성을 통계 프로그램 (SPSS)을 이용하여 조사한 결과를 표 5에 나타내었다. 토양온도와 수분량 및 질소 함량에 따른 온실기체 배출에 대한 상관관계는 전체적으로 낮은 상관성을 보였으며, 특히 CO₂와 CH₄의 경우 토양인자들과 극히 낮은 상관성이 나타났다. N₂O의 경우에는 토양온도와 T-N의 경우 각각의 P-value가 0.05 이하로 일정수준 범위에서 서로 상관성이 있는 것으로 나타났다. 대부분의 경우에서 지표 온실가스 배출량과 토양 인자들 사이의 1:1 상관성은 95% 신뢰구간에서 비교적 낮게 나타났으나, CO₂의 경우 NH₄⁺와의 상관관계는 비교적 높았으며, P<0.05이므로 신뢰성이 있는 것으로 판단되었고, N₂O의 경우에는 토양온도와 T-N에서 P<0.05이므로 신뢰성이 있는 것으로 판단되었다.

4. 요약 및 결론

연구기간 동안 CO₂와 CH₄는 10월에 비교적 높은 배출량(60.26±86.06, 0.02±0.02)을 보였으며, N₂O의 경우 5월에 높은 배출량(4.47±2.59)을 보였다. 배출량이 높은 5월의 토양인자들을 살펴볼 때 WFPS는 평균 68.7%와 토양온도는 평균 22.5°C로 토양 온도는 측정 기간 중 높은 온도를 보였다. 또한 측정 기간 동안에 질소를 함유한 복합비료(질소 21%, 인산 17%)는 4월 중순경 한번의 시비가 이루어졌으며, 시비된 비료의 영향으로 N₂O의 경우 5월에 현저하게 높은 배출량을 보였다. 조절인자와의 상관성에서는 T-N의 상관성은 R²=0.5071로 비교적 높은 상관성을 보였으나, WFPS는 R²=0.0012이며, 토양온도 R²=0.2443로 낮은 수치를 보였다. 이는 N₂O의 배출에 T-N의 영향이 크게 기여한 것으로 나타내었으나, 표

3에서 보듯이 전체적인 경향을 볼 때 적정 토양온도와 WFPS가 복합적으로 N₂O 배출에 영향을 미치는 요인으로 작용되는 것으로 판단되어진다. CO₂와 CH₄에서 WFPS와의 상관성은 각각 R²=0.0446, R²=0.0984를 보였으며, 토양 온도와의 상관성에서는 각각 R²=0.0446, R²=0.0984로 N₂O의 기체보다 더 낮은 상관성을 보였으나 월별 배출량(표 4)에서 높은 배출량을 보인 10월의 결과를 살펴볼 때 적정 WFPS와 적정 온도로 인하여 배출량이 나타난 것으로 보이며, 이 역시 배출량에 영향을 미치는 인자로 작용되는 것으로 사료된다.

전반적인 온실기체 배출량과 토양 인자들과의 상관성은 극히 낮은 편이지만 신뢰성 분석을 위하여 SPSS로 분석한 결과, CH₄에서는 모든 인자들에서 신뢰성 있는 상관분석이 이루어지지 않았으나, CO₂의 경우 NH₄⁺와의 상관성에서 p-value<0.05로, N₂O 경우 토양 온도와 T-N에서 p-value<0.05로 95% 신뢰구간에서 의미 있는 상관관계를 보였다. 그러나 측정기간 동안의 토양 인자 변화에 따른 온실기체 배출량의 상관성 분석에서는 뚜렷한 상관성을 확인할 수 없었으며, 이는 조절인자들 배출량 사이의 상호효과에 따른 상호 복합성으로 인하여 일정수준에서의 상관성이 확인되었다 할지라도 불확실성을 내포하고 있다. 향후 주요토양인자와 토양배출량 사이의 상관성 분석연구는 Mills *et al.* (2007)과 Kim and Oh (2004)에 의해서 시도되었던 실험실 실내 환경에서의 조절 실험방식을 참조하여 연구목적에 적절한 시스템을 구성하여 수행할 계획이다. 이러한 실험연구를 이용하여 주요 토양인자들을 인위적으로 조절할 수 있는 환경에서 기체배출량과의 상관성 연구가 체계적으로 수행된다면 지표토양에서의 기체배출기작(gas emission mechanism)의 이해에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2009-0072936; 2010-0016242). 연구지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

국립농업과학원(2009) 온실가스 저감을 위한 벼 재배 기술, 농촌진흥청 국립농업과학원.
 농촌진흥청(2009) 농업환경변동조사 사업 보고서, 농촌진흥청 국립농업과학원.
 통계청(2009) 2009년 김장무·배추 재배면적조사 결과 (<http://kostat.go.kr/portal/korea>).
 Davidson, E.A. (1991) Fluxes of nitrous oxide and nitric oxide from terrestrial ecosystem, in *Microbial Production and Consumption of Greenhouse Gases: Methane, Nitrous Oxide and Halomethanes*. Edited by J.E. Rogers and W.B. Whitman, American Soc. for Microbiol., Washington, D.C., 219-235.
 Fang, C. and J.B. Moncrieff (2001) The dependence of soil CO₂ efflux on temperature, *Soil Biology and Biochemistry*, 33, 155-165.
 Godde, M. and R. Conard (1999) Immediate and adaptation temperature effects on nitric oxide production and nitrous oxide release from nitrification and denitrification in two soils, *Biol. Fertil. Soils*, 30, 33-40.
 Hou, A., H. Akiyama, Y. Nakajima, S. Sudo, and H. Tsuruta (2000) Effects of Urea form and soil moisture on N₂O and No emissions from Japanese Andosols, *Global Change Science*, 2, 321-327.
 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007) Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland, pp. 104.
 Isermann, K. (1994) Agriculture's share in the emissions of trace gases affecting the climate and some cause

oriented proposals for reducing this share, *Environ. Pollut.*, 83, 95-111.
 Kim, D.S. (2007) Greenhouse gas (CH₄, CO₂, N₂O) emissions from estuarine tidal and wetland and their characteristics, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 23(2), 225-241. (in Korean with English abstract)
 Kim, D.S. and J.M. Oh (2003) N₂O emissions from agricultural soils and their characteristics, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 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, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 20(6), 749-758. (in Korean with English abstract)
 Kim, J., S.B. Verma, and R.J. Clement (1992) Carbon dioxide budget in a temperate grassland ecosystem, *J. Geophys. Res.*, 97, D5, 6057-6063.
 Lemke, R.L., R.C. Izaurralde, S.S. Malhi, M.A. Arshad, and M. Nyborg (1998). Nitrous oxide emissions from agricultural soils of the boreal and Parkland regions of Alberta, *Soil Sci. Soc., Am. J.*, 62, 1096-1102.
 Mills, A.R., S.R. Wilson, and D.F. Jolley (2007) Monitoring Emissions of Carbon Dioxide, Nitrous Oxide and Methane from an Estuarine Sediment, *IGACTivities Newsletter*, Issue No. 36, p. 2-5, July 2007.
 Suh, S.U., Y.M. Chun, N.Y. Chae, J. Kim, J.H. Lim, M. Yokozawa, M.S. Lee, and J.S. Lee (2006) A chamber system with automatic opening and closing for continuously measuring soil respiration based on an open-flow dynamic method, *Ecol. Res.*, 21, 405-414.
 Wagner-Riddle, C., G.W. Thurtell, G.k. Kidd, E.G. Beauchamp, and R. Sweetman (1997) Estimates of nitrous oxide emissions from agricultural fields over 28 months, *Can. J. Soil Sci.*, 77, 135-144.
 Warneck, P. (2000) *Chemistry of the Natural Atmosphere*. 2nd edition, Academic Press, New York.
 Williams, E.J., G.L. Hutchinson, and F.C. Fehsenfeld (1992) NO_x and N₂O emission from soil, *Global Biogeochemical Cycle*, 6, 351-388.