

Assessment of N₂O Emission Factor of Autumn Chinese Cabbage Fields at Three Different Geographical Location in South Korea

Gun-Yeob Kim*, Woo-Kyun Park, Hyun-Cheol Jeong, Sun-il Lee, Pil-Joo Kim¹,
Young-Ho Seo², and Un-sung Na

National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration, Wanju, 565-851, Korea

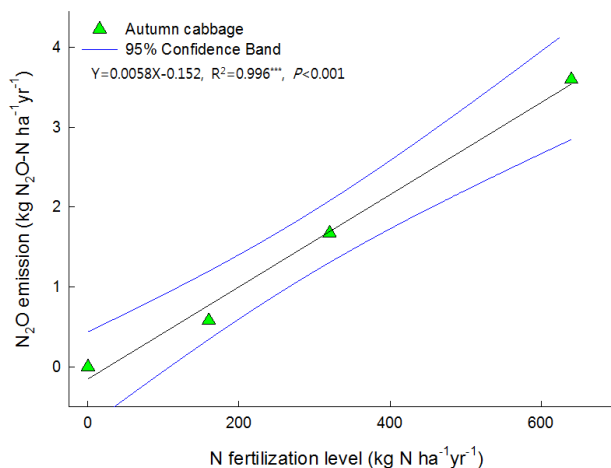
¹*Gyeongsang National University, Jinju, 660-701, Korea*

²*Gangwondo Agricultural Research and Extension Services, Chuncheon, 200-939, Korea*

(Received: June 9 2015, Revised: June 19 2015, Accepted: June 19 2015)

The level of nitrous oxide (N₂O), a long-lived greenhouse gas, in atmosphere has increased mainly due to anthropogenic sources, especially application of nitrogen fertilizers. Quantifying N₂O emission in the agricultural field is essential to develop national inventories of greenhouse gases (GHGs) emission. The objective of this study was to develop an emission factor to estimate the direct N₂O emission from an agricultural field cultivated with the Chinese cabbage during autumn season in 2010-2012. Emission factor of N₂O calculated over three years experiment using accumulated N₂O emission, nitrogen fertilization rate, and background N₂O emission was 0.0058±0.00254 kg N₂O-N kg⁻¹ N. More extensive studies need to be conducted to develop N₂O emission factors for other upland crops in the various regions of Korea because N₂O emission is influenced by many factors including climate characteristics, soil properties, and agricultural practices as well as crop species.

Key words: N₂O emission factor, nitrous oxide emission, Chinese cabbage (autumn season)



Relationships between the averaged N₂O emissions and nitrogen fertilizer application rates during chinese cabbage (autumn season) cultivation in upland soil from 2010 to 2012.

*Corresponding author : Phone: +82632382493, Fax: +82632383823, E-mail: gykim1024@korea.kr

§Acknowledgement: This study was carried out with the support of "Cooperative Research Program for Agricultural Science & Technology Development (Project No. PJ010036)", Rural Development Administration, Republic of Korea.

Introduction

농경지에서 아산화질소 (N₂O)는 토양에 질소질 비료와 가축분뇨를 투입했을 때, 토양 미생물에 의해 탈질 과정을 일으키는 동안 발생된다 (Freney, 1997; Singh and Tyagi, 2009). Iserman (1994)은 농경지 시용의 질소비료 절반은 무기태질소의 형태로 유실된다고 하였으며, 농경지로부터 대기로 배출되는 N₂O 중에서 81% 정도가 질소비료사용에 의해 배출된다고 하였다. 질소비료 사용은 농경지로부터 대기로 배출되는 N₂O의 가장 큰 요인으로 작용하고 있다 (Minami, 1997). Hellebrand 등 (2008)은 토양의 무기태 질소 가운데 NO₃⁻-N의 상승이 N₂O 배출을 증가시킨다고 하였다. 그러나 Firestone과 Davidson (1989)은 토양에서 N₂O의 배출은 유기물이나 비료 사용을 줄이는 것보다 토양 중에서 발생하는 질산화 및 탈질 작용 등 생화학적 과정을 적절히 조절하는 것이 더 큰 효과를 볼 수 있다고 하였다. 그리고 그 다음 효과로는 Frolking 등 (1998)과 Parton 등 (1996)이 토양수분을 조절하여 N₂O 배출을 줄일 수 있으며, 대기온도에 따른 토양온도 변화에도 N₂O 배출에 영향을 받는다고 하였다.

2006년 IPCC (Intergovernmental Panel for Climate Change) 가이드라인에는 농경지에서 온실가스 배출량을 산정하는 방법을 크게 Tier 1, 2, 3로 구분하고 있다 (IPCC, 2006). Tiers는 방법의 복잡성 정도를 나타내는 것으로서, 방법론의 선택은 배출계수 (emission factor) 및 활동자료 (activity data) 확보수준에 따라 달라질 수 있다. 국가고유의 배출계수가 아직 준비되어 있지 않을 경우에는 Tier 1 방법으로 N₂O 배출량을 산정할 수 있다. 이때는 IPCC 가이드라인에서 제시하고 있는 N₂O 배출계수와 활동자료 등을 활용하여 연간 N₂O 배출량을 산정할 수 있다 (IPCC, 2006). 한편, Tier 2 수준에서는 각국의 기상, 토양환경이 다르기 때문에 그 나라 환경에 맞게 개발한 고유 N₂O 배출계수와 활동자료를 활용하여 정확한 N₂O 배출량을 산정한다. Tier 3은 Tier 2보다 더 높은 정확도를 갖는 배출계수이며, 상당 부분 시험·분석을 통하여 개발한 매개변수 값을 활용한다. 온실가스 배출 통계작성의 복잡성 및 정확성은 Tier 3로 갈수록 높다. Tier 2 이상의 작성방법은 국가고유의 작성방법으로 간주된다.

우리나라는 2014년에 N₂O의 국가 고유 배출계수가 농경지 토양분야에 가을배추 재배토양에서 배출계수로 설정되어 국가공인을 받았다. 이전에는 IPCC에서 제시한 임의 값은 0.0125 kg N₂O-N/N kg (IPCC, 1996)과 0.01 kg N₂O-N/N kg (IPCC, 2006)을 이용하여 N₂O의 발생량을 추정하였다. 즉, 농경지에 사용한 무기질 비료나 가축분 퇴액비의 질소 가운데 휘산되지 않고 남은 부분의 1.25% 또는 1%가 N₂O로 직접 대기에 배출된다는 것이다. 국가 고유 배출계수

는 그 나라의 토양, 기후, 농사 기술과 재배환경 등을 반영하므로, IPCC의 임의 계수보다 그 나라 배출량의 불확도 (Uncertainty)를 줄이면서 정확하게 추정할 수 있다.

지금까지 배추재배 토양에서 국가 고유 배출계수를 개발하지 못하여 IPCC에서 부여하는 N₂O 임의계수 값을 적용하기 때문에 국가 온실가스 배출량이 과대평가가 될 우려가 있었다. 따라서 본 연구에서는 더욱 정밀한 온실가스 인벤토리 작성을 위하여 질소 비료 사용량에 따라 N₂O 배출 특성을 3년 (2010~2012년)간 조사하여 2014년에 우리나라 국가 고유 N₂O 배출계수로 등록된 가을배추 재배지 토양의 배출 특성을 파악하고자 하였다.

Materials and Methods

먼저 N₂O 배출계수 개발의 이론적 배경을 살펴보면, 2006 IPCC 가이드라인 (IPCC, 2006)에 따라 밭에서 N₂O 총 배출량은 아래의 식 1과 같이 N₂O 직접배출량에서 EF₁ (배출계수)을 개발해야한다.

$$N_2O - N_{input} = [(F_{SN} + F_{ON} + F_{CR} + F_{SOM}) \times EF_1] + [(F_{SN} + F_{ON} + F_{CR} + F_{SOM})_{FR}^* \times EF_{1FR}] \quad (식 1)$$

여기서, F_{SN} : 화학비료로 공급되는 질소량 (kg N/yr)

F_{ON} : 축산분뇨로 배설되는 양을 유기질비료로서 농경지에 투입된 질소량 (kg N/yr)

F_{SOM} : 무기질 토양의 무기화에 의해 공급되는 질소량 (kg N/yr)

F_{CR} : 토양으로 환원되는 작물 잔사에 의해 공급되는 질소량 (kg N/yr)

EF₁ : 밭 토양에서 N₂O 직접 배출계수 (kg N₂O-N/kg 투입)

EF_{1FR} : 벼논에서 질소사용으로 배출되는 N₂O 배출계수 (kg N₂O-N/kg N)

(F_{SN}+F_{ON}+F_{CR}+F_{SOM})_{FR}^{*} : 벼논에 해당

가을배추밭 토양에서 N₂O 배출량을 정확하게 산정하기 위해서는 1차적으로 우리나라 밭 재배환경 하에서 N₂O 고유 배출계수 (N₂O-N_{input})의 설정이 선행되어야 한다.

본 시험은 우리나라 가을배추밭 토양의 고유 N₂O 배출계수를 설정하기 위해, 아래 Table 1에서와 같이 강원도 춘천, 경기도 수원 및 충청남도 예산 등 3지역을 가을배추재배 조사포장으로 선정하였다. 3지역 모두 2009년 포장을 설치하였으며 2010년부터 2013년까지 가을배추재배 시험포장에서 N₂O를 포집·분석하였다.

시험토양은 수원시에 위치한 국립농업과학원 기후변화생

Table 1. Chemical properties of soil before experiment at 3 different sites.

Parameter	Investigation site		
	Suwon	Chuncheon	Yesan
Soil series	Gopyeong	Yonggye	Yesan
Soil texture	SICL	SCL	L
pH (1:5 with H ₂ O)	6.2	6.0	6.5
EC (dS m ⁻¹)	0.38	0.33	0.75
OM (g kg ⁻¹)	15.4	22.0	28.0
Av.P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	372.6	470.2	275.2
NH ₄ -N (mg kg ⁻¹)	7.3	4.5	8.4
NO ₃ -N (mg kg ⁻¹)	7.8	3.8	6.8
Exch. Cation (cmolc kg ⁻¹)			
K	0.6	0.6	0.7
Ca	5.9	3.5	7.2
Mg	5.4	0.9	1.4
Sampling site (GPS reading)	N 37°15'27.68", E 126°59'16.05"	N 37°57'15.9", E 127°46'26.6"	N 36°44'15", E 126°49'07"

태과 가을배추밭에서 수행하였다. 토양통은 고평통 미사질 식양토 (37°15'27.68"N, 126°59'16.05"E)로서 유기물 함량이 15.4 g kg⁻¹ 그리고 인산이 372.6 mg kg⁻¹, 암모니아태 질소 7.3 mg kg⁻¹와 질산태질소 7.8 mg kg⁻¹이었다. 춘천시에 위치한 강원도농업기술원의 가을배추밭 시험포장 (37°57'15.9"N, 127°46'26.6"E)은 용계통 사질식양토로서 유기물 함량이 22.0 g kg⁻¹ 그리고 인산이 470.2 mg kg⁻¹, 암모니아태 질소 4.5 mg kg⁻¹와 질산태질소 3.8 mg kg⁻¹이었다. 그리고 예산읍에 위치한 충남농업기술원 가을배추밭 시험포장 (36° 44'15"N, 126° 49'07"E)은 예산통 양토로서 유기물 함량이 28.0 g kg⁻¹ 그리고 인산이 275.2 mg kg⁻¹, 암모니아태 질소 8.4 mg kg⁻¹와 질산태질소 6.8 mg kg⁻¹이었다. 공시품종은 수원에서는 시알, 춘천과 예산지역은 노랑과 불암3호이었으며 재식거리는 3지역 모두 75 (이랑거리)×30cm (포기거리)로 정식하였다.

비료 사용량은 각 작물의 표준 시비량을 기준으로 하였으며, 3지역 모두 NPK 처리의 N-P₂O₅-K₂O를 320-78-198 kg ha⁻¹이며 토양 수분관리는 자연 강우량으로 하였다. 질소비료 처리의 양은 3지역의 시험포장 면적 규모의 여건에 따라 차이가 있었으며, 수원에서는 0배, 1배, 2배, 춘천은 0배와 1배 그리고 예산지역은 0배, 0.5배, 1배, 2배로 사용하였다. 농촌진흥청 작물별 시비처방기준 (RDA, 2006)의 표준시비방법에 준하였으며, 질소는 요소를 2회 분시, 인산은 용성인비로 전량 기비, 칼리는 염화칼리를 1회 분시 하였다.

N₂O 배출 플럭스를 조사하기 위해 국제적으로 공인된 밀폐형태 챔버인 steady-state (Hutchinson과 Livingston, 1993)를 사용하였다 (Fig. 1). 설치된 챔버는 외부로의 공기 유출이 없도록 하였으며, 지름이 0.25 m, 높이가 0.5 m인

PVC 소재로 각 시험구의 대표 지점에 안정적으로 설치하였다. 가스시료 채취는 Yagi (1991)의 방법에 의하여 10:00~13:00시 사이에 60 ml 주사기로 1주일에 2회 채취하여 분석하였다.

채취한 공기 시료의 N₂O 기체농도는 10 port와 4 port valve를 장착한 GC-ECD (Varian 3800)를 사용하였고 column은 Porapak Q (80/100 mesh)를 충전한 1/8"×2 m의 stainless steel tubing column, 그리고 Detector의 온도는 320 °C로 하였다. N₂O 분석 조건은 Table 2와 같다.

플럭스는 다음 식에 따라서 계산 (F: mg m⁻² hr⁻¹) 하였다.

$$F = \rho \cdot V \cdot A^{-1} \cdot \Delta c \cdot \Delta t^{-1} \cdot 273 \cdot T^{-1} \quad (\text{식 2})$$

ρ 는 가스밀도 (mg m⁻³),

A는 챔버 바닥면적 (m²),

V는 챔버내 공기체적 (m³),

$\Delta c \cdot \Delta t^{-1}$ 는 챔버내 가스농도의 평균 증가속도 (10⁻⁶ m³ m⁻³ hr⁻¹),

T는 챔버내 평균기온 (K)

N₂O ρ 값 (T=273 K)은 다음과 같다.

$$\rho_{N_2O} = 1.96, \rho_{N_2O-N} = 1.25$$

IPCC에서는 불확도 평가를 통해 생산 자료의 신뢰성 확보를 요구하고 있다 (IPCC, 2006). 우리나라 가을배추 토양에서 N₂O 배출계수를 구하기 위하여 3년간 전국 3개 지역에서 조사된 N₂O 배출계수의 정규분포 95% 신뢰구간을 산정하였고, 본 신뢰구간의 절대 값을 평균 배출계수로 나누어 자료의 불확도 (%)를 평가하였다 (SRI, 2011).



Fig. 1. Steady-state chamber for collecting N₂O in soil.

Table 2. Gas Chromatographic analysis conditions for N₂O measurement.

Detector		ECD
Column	Packing material	Porapack Q (80/100)
	Materials	Stainless steel
	O.D. x length	1/8" x 2 m
Carrier gas		N ₂
Flow rate		30 ml/min (Carrier+make up)
Temperature	Column	70°C
	Injector	80°C
	Detector	320°C
Retention time		3.2 min
Concentration of calibration gas		0.5 and 1.0 ppmv N ₂ O in N ₂
Loop		2 ml

Results and Discussion

N₂O 배출량 변화는 조사지역별 조사 연차와 관계없이 대부분 정식 후 한 달까지는 높은 N₂O 배출 양상을 보였다 (Fig. 2). 가을배추 생육초기에 질소비료 사용효과로 N₂O 배출량이 빠르게 증가하였다. 3개 지역 N₂O 배출량은 정식하고 한 달 이후부터 시간이 지남에 따라 크게 감소하여 수확기와 이듬해 정식 전 기간까지 낮은 배출을 유지하였다. 특히 3지역 중 충남 예산지역의 N₂O 배출이 타 지역 보다 많았는데, 이는 토양온도와 토양수분에 영향이 미치는 강수량이 다른 지역에 비해 예산에서 높았으며 (Table 3) 이는 N₂O 배출 양상에도 영향이 미친 것으로 보인다.

3지역 모두 가을이 깊어지는 9월 중순~10월 초순 이후부터 N₂O 배출이 거의 일어나지 않았다. 이는 봄배추의 경

우 봄~여름철 기간에 재배하기 때문에 여름철에 빈번한 강우로 인한 토양수분과 토양온도의 상승으로 N₂O 배출이 증가하나, 가을배추는 가을~초겨울 기간 동안 재배하므로 10월부터는 강수량이 적고 기온이 떨어져 토양수분과 토양온도가 낮아져 N₂O 배출이 감소하는 것으로 나타났다.

조사지역에 따라 강수량과 기온 등의 재배환경 차이로 인해 가을배추 수량에 다소 간 차이가 있었다 (Table 3). 토양온도와 토양수분에 영향이 미치는 강수량은 다른 지역에 비해 예산에서 높았으며 이는 N₂O 배출에도 영향을 미친 것으로 보인다. N₂O 배출의 양상은 토양온도와 토양수분 변화와는 밀접한 경향이 있으며, 토양온도와 토양수분이 증가할수록 N₂O 플럭스가 증가된다고 하였다 (Clayton 등, 1997; Mahmood 등, 1998; Dobbie 등, 1999; G dde과 Conrad, 1999; Conen 등, 2000; Sozanska 등, 2002; Kim 등, 2008; Kim 등, 2010). Arone과 Bohlen (1998)은 N₂O 배출량과 토양 수분함량과는 정의 상관관계가 있다고 하였으며, Dobbie 등(1999)은 남부 스코틀랜드의 N₂O 배출량이 조사지역과 기후 차이에 관계없이 토양수분과 밀접한 관계가 있다고 하였다. Sozanska 등 (2002)은 토양수분에서 액상과 기상부분을 고려한 WFPS (Water Filled Pore Space)가 80~85%에서 N₂O 배출이 최대가 되고, Kim 등 (2014)은 고추재배에서 식양토와 사양토 등 토성과 관계없이 토양수분 함량의 변화 추이에 따라 N₂O 배출량 변화도 같은 양상을 보인다고 하였으며, 토양수분과 토양온도가 N₂O 배출에 대한 기여율은 식양토에서 토양수분 47.7%와 토양온도 6.2% 그리고 사양토에서 토양수분 66.0%와 토양온도 21.7%로 토양온도보다 토양수분이 N₂O 배출에 크게 영향을 미친다고 하였다.

3개 지역에서 N₂O 배출과 질소비료 사용량을 회귀분석한 결과 (Fig. 3)에 나타난바와 같이 사용량이 많을수록 배출량이 증가하였으며, 질소비료 사용량에서 99.6%로 N₂O 배출의 경시적 변이를 설명할 수 있었다. N₂O 배출량과 질소비료 사용량의 상관은 0.998^{***}로서 높은 상관관계를 보였다. 3개 지역 평균 N₂O 배출계수는 0.0058 kg N₂O-N/N kg으로 평가되어 IPCC default 값인 2006 가이드라인의 0.01 kg N₂O-N/N kg과 1996 가이드라인의 0.0125 kg N₂O-N/N kg보다 42.0~53.6%가 낮았다 (Table 4). 이때 조사 자료의 평균 오차범위 (error range)는 0.00408~0.00752 kg N₂O-N/N kg안에 분포하였으며, 95% 신뢰구간에서 평가한 불확도는 29.7% 이었다. IPCC default 값은 Bouwman (1996)과 Mosier (1998)의 보고에 의하면 대부분 유럽과 미국의 목초지와 밭 토양의 NH₄⁺와 NO₃⁻ 함량 자료를 참고하였고 아시아에서는 유일하게 일본 밭 토양 자료를 활용하여 0.0125와 0.01 kg N₂O-N/N kg을 결정하였다. 그리고 대부분 밭 토양보다 질소비료 사용량이 많은 목초지가 많아서 배출계수 값이 높은 것으로 판단된다.

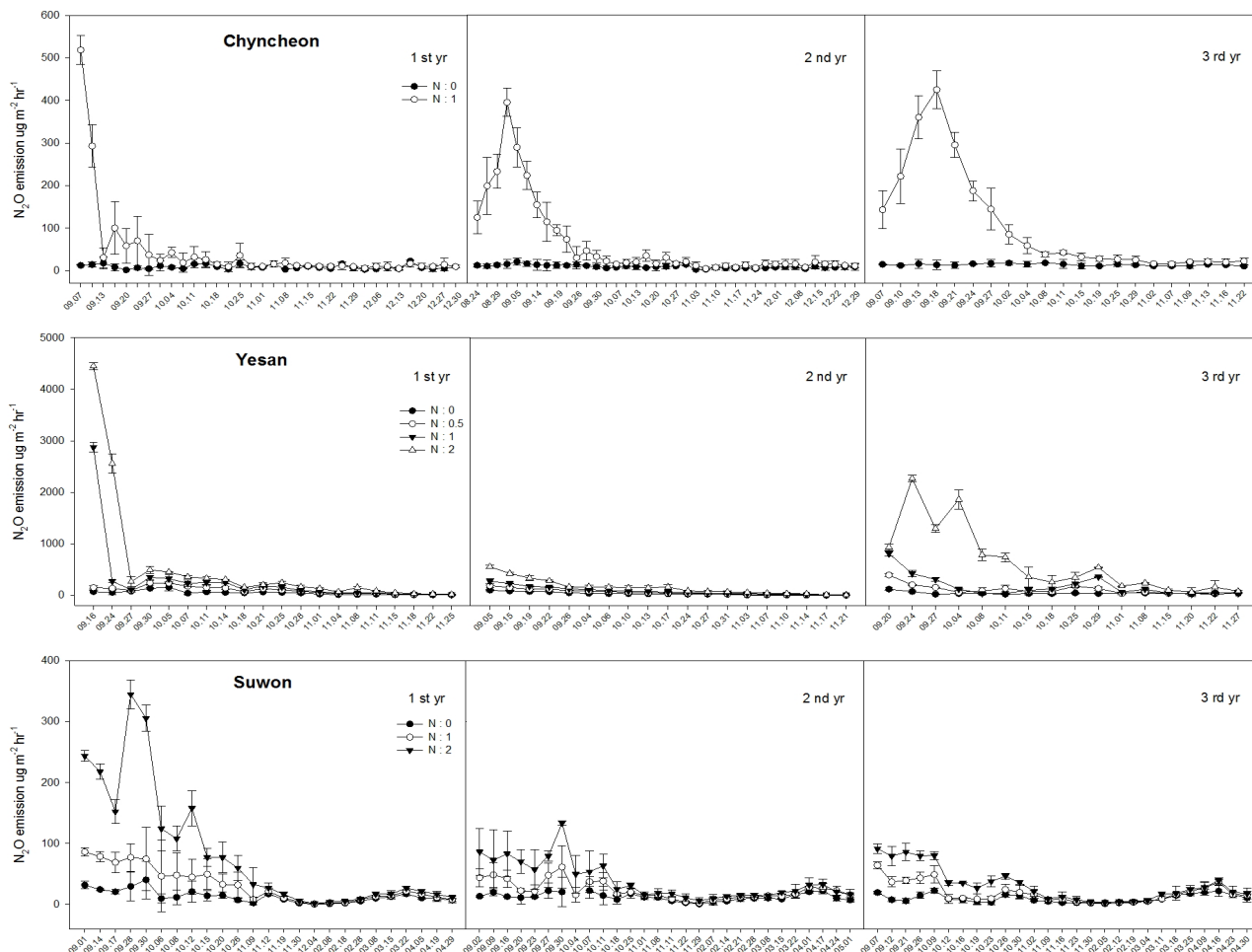


Fig. 2. N₂O emission patterns in Chinese cabbage (autumn season) soils located at 3 different sites treated by N fertilizer levels.

Table 3. Comparison of climate condition and yield properties in upland soils located at 3 different sites during Chinese cabbage (autumn season) cultivation.

Parameter	Investigation site		
	Chuncheon	Yesan	Suwon
1st year			
Mean air temperature (°C)	11.2	23.0	15.0
Mean soil temperature (°C)	22.1	23.6	22.0
Mean soil water contents (vol. %)	31.2	33.2	30.4
Precipitation (mm)	128.0	219.0	148.0
Sun shine hour (hour)	171.7	164.7	186.8
yield (ton/ha)	48.3	71.5	63.5
2nd year			
Mean air temperature (°C)	10.9	22.4	13.6
Mean soil temperature (°C)	23.2	24.7	24.5
Mean soil water contents (vol. %)	30.7	35.1	31.3
Precipitation (mm)	173.4	308.9	174.6
Sun shine hour (hour)	155.3	153.6	167.1
yield (ton/ha)	92.1	56.4	83.3
3rd year			
Mean air temperature (°C)	18.2	23.0	15.3
Mean soil temperature (°C)	23.6	25.2	21.8
Mean soil water contents (vol. %)	29.5	32.4	30.7
Precipitation (mm)	154.2	203.6	165.6
Sun shine hour (hour)	170.6	184.3	197.9
yield (ton/ha)	64.8	86.4	91.0

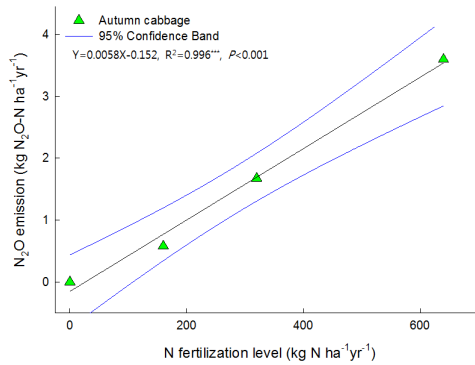


Fig. 3. Relationships between the averaged N₂O emissions and nitrogen fertilizer application rates during Chinese cabbage (autumn season) cultivation in upland soil from 2010 to 2012.

Table 4. Comparison of N₂O emission (N kg ha⁻¹ yr⁻¹) and average N₂O emission factor in upland soils located at 3 different sites during Chinese cabbage (autumn season) cultivation treated by N fertilizer levels.

N fertilizer	N ₂ O emission	Average N ₂ O emission factor	Average error range*
kg ha ⁻¹	N ₂ O kg ha ⁻¹ yr ⁻¹	kg N ₂ O-N/N kg	kg N ₂ O-N/N kg
160	0.692		
320	1.537	0.0058	0.00408~0.00752
640	3.226		

Note) *Error range within 95% confidence intervals.

Conclusion

전국 3개 지역에서 가을배추 생육 및 수확 후 월동기간을 포함한 3년 동안 N₂O 배출량을 조사하여 우리나라 가을배추 재배지 토양에서 N₂O 배출계수 0.0058 kg N₂O-N/N kg 을 산정하였다. 본 연구를 통해 산정된 배출계수는 2014년에 우리나라 고유배출계수로 국가에 등록하였고 앞으로 우리나라와 지자체의 가을배추 재배지역에서 발생하는 N₂O 배출량을 산정할 때 사용된다. 가을배추재배지의 국가 고유 배출계수 개발 이전에는 IPCC에서 부여하는 임의 계수를 적용하였기 때문에 국가 온실가스 배출량이 과대평가되어 왔었다.

국가 고유온실가스 배출계수 개발은 선진국 수준의 정밀도를 가지는 배출량 인벤토리 산정의 의미를 담고 있으며, UN 기후변화사무국 및 온실가스 담당 정부부처 (환경부 온실가스종합정보센터)에 제출하는 국가 온실가스 보고서 작성에 기본 자료로 활용될 뿐만 아니라 국가 온실가스 배출 통계의 품질개선 및 신뢰도도 향상될 것으로 기대하고 있다. 이외에도 국가 고유의 아산화질소 배출계수 적용으로 국가 및 지자체 온실가스 배출량 감축도 기대하고 있다.

References

- Arone, J.A., and P.J. Bohlen. 1998. Stimulated N₂O flux from intact grassland monoliths after two growing seasons under elevated atmospheric CO₂. *Oecologia*. 116:331-335.
- Bouwman, A.F. 1996. Direct emission of nitrous oxide from agricultural soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 46, 53-70.
- Clayton, H., I.P. Mctagart, J. Parker, L. Swan, and K.A. Smith. 1997. Nitrous oxide emissions from fertilised grassland: A 2-year study of the effects of N fertiliser form and environmental conditions. *Biol. Fertil. Soils* 25:252-260.
- Conen, F., K.E. Dobbie, and K.A. Smith. 2000. Predicting N₂O emissions from agricultural land through related soil parameters. *Global Change Biology*. 6:417-426.
- Dobbie, K.E., I.P. Mctagart, and K.A. Smith. 1999. Nitrous oxide emissions from intensive agricultural systems: variations between crop and seasons; key driving variables; and mean emission factors. *J. Geophys. Res.* 104:26891-26899.
- Firestone, M.K. and E.A. Davidson. 1989. Microbiological basis of NO and N₂O production and consumption in soil. In: Andreae, M.O., Schimel, D.S. (Eds.), *Exchange of Trace Gases between Terrestrial Ecosystems and the Atmosphere*. Wiley, New York.
- Freney, J.R.. 1997. Emission of nitrous oxide from soils used for agriculture. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 49(1-3), 1-6.
- Frolking, S.E., A.R. Mosier, and D.S. Ojima. 1998. Comparison of N₂O emissions from soils at three temperate agricultural sites: simulations of year-round measurements by four models. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 52:77-105.
- Gödde, M. and R. Conrad. 1999. Immediate and adaptational temperature effects on nitric oxide production and nitrous oxide release from nitrification and denitrification in two soils. *Biol. Fertil. Soils* 30:33-40.
- Hellebrand, H.J., V. Scholz, and J. Kern. 2008. Fertilizer induced nitrous oxide emissions during energy crop cultivation on loamy sand soils. *Atmospheric Environment* 42:8403-8411.
- Hutchinson, G.L., and G.P. Livingston. 1993. Use of chamber systems to measure trace gas fluxes. *Agricultural ecosystem effects on trace gases and global climate change*. ASA Spec. Publ. 55. P. 63-78.
- IPCC. 1996. Revised IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Reference Manual, revised in 1996, IPCC.
- IPCC, 2006. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
- Iserman, 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, G.Y., B.H. Song, K.A. Roh, S.Y. Hong, B.G. Ko, K.M. Shim, and K.H. So. 2008. Evaluation of Green House Gases Emissions According to Changes of Soil Water Content, Soil Temperature and Mineral N with Different Soil Texture in Pepper Cultivation. *J. Soil Sci. Fert.* 399-407.
- Kim, G.Y., K.H. So, H.C. Jeong, K.M. Shim, S.B. Lee, and D.B. Lee. 2010. Evaluation of N₂O Emissions with Changes of Soil Temperature, Soil Water Content and Mineral N in Red Pepper and Soybean Field. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 880-885.
- Kim, G.Y., H.C. Jeong, Y.K. Son, S.Y. Kim, J.S. Lee, P.J. Kim. 2014. Effect of Soil Water Potential on Methane and Nitrous Oxide Emissions in Upland Soil during Red Pepper Cultivation. *J. Korean Soc. Appl. Biol. Chem.* 57. 15-22.
- Mahmood, T., R. Ali., K.A. Malik, and S.R.A. Shamsi. 1998. Nitrous oxide emissions from an irrigated sandy-clay loam cropped to maize and wheat. *Biol. Fertil. Soils.* 27:189-196.
- Minami, K. 1997. Mitigation of nitrous oxide emissions from fertilized soils. In: *Proceedings of IGAC Symposium*, Nagoya, Japan.
- Mosier A., C. Kroeze, C. Nevison, O. Oenema, S. Seitzinger, and O. van Cleemput. 1998. Closing the global atmospheric N₂O budget: Nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle, *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 52, 225-248.
- RDA(Rural Development Administration). 2006. Fertilizer recommendation standards for various crops, Sanglok-sa, 58-59.
- Singh, S.N. and L. Tyagi. 2009. Nitrous oxide: Sources, sinks and mitigation strategies. In Sheldon A. I., Barnhart E. P. (eds.): *Nitrous oxide emissions research progress*. Nova Science Publishers, Inc., New York, p. 127-150.
- Sozanska, M., U. Skiba, and S. Metcalfe. 2002. Developing an inventory of N₂O emissions from British Soils. *Atmos. Environ.* 36:987-998.
- SRI(Statistical Research Institute). 2011. A study on uncertainty calculator of activity data-National GHGs emission statistics, 110-172 (in Korea).
- Yagi, K. 1991. Emission of biogenic gas compounds from soil ecosystem and effect of global environment. 2. Methane emission from paddy fields. *Soil and Fert. Japan.* 62(5): 556-562.