

|                            |                       |        |         |                  |            |
|----------------------------|-----------------------|--------|---------|------------------|------------|
| 어젠다코드                      | 1 - 1 - 2             |        | 구 분     | 과제완결             |            |
| 기술분야코드                     | V1                    | 기술유형코드 | E01     | 작목구분코드           | CR-01-CR11 |
| 과제종류                       | 공동연구                  |        | 세세부사업   | 농업분야 기후변화대응기술 개발 |            |
| 연구과제 및 세부과제                |                       |        | 수행기간    | 과제책임자 및 세부책임자    |            |
| 농경지 아산화질소 배출계수 개발 및 배출량 평가 |                       |        | '09~'12 | 국립농업과학원          | 김건엽        |
| 1) 발작물별 아산화질소 배출계수 개발      |                       |        | '09~'12 | 옥수수연구소           | 서영호        |
| 색인용어                       | 농경지, 아산화질소, 배출계수, 발작물 |        |         |                  |            |

## ABSTRACT

The level of nitrous oxide(N<sub>2</sub>O), a long-lived greenhouse gas, in atmosphere has increased mainly due to anthropogenic source, especially application of nitrogen fertilizers. Quantifying N<sub>2</sub>O emission from agricultural field is essential to develop national inventories of greenhouse gases(GHGs) emission. The objective of the study was to develop emission factor to estimate direct N<sub>2</sub>O emission from agricultural field in Gangwon-do, Korea by measuring N<sub>2</sub>O emissions from potato(*Solanum tuberosum*), red pepper(*Capsicum annuum* L.), and Chinese cabbage(*Brassica campestris* L.) cultivation land from 2009 to 2012. Mean N<sub>2</sub>O emissions(±standard deviation) from field cultivated red pepper, potato, and Chinese cabbage grown in spring and fall were 1.48±0.25, 1.27±0.27, 1.49±0.06, and 1.14±0.22 kg N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup>, respectively, as compared with 0.45±0.15 kg N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup> for background emission from non-fertilized soil. The estimated fertilizer-induced emission factor of N<sub>2</sub>O was 0.0051±0.0016 kg N<sub>2</sub>O-N kg<sup>-1</sup> N. It should be noted that country-specific emission factor needs to be determined based on various regions and crop types in the country because many factors including soil properties, environmental factors, and agricultural practices influence N<sub>2</sub>O emissions. In addition, many researches have been conducted to develop agricultural practices to reduce greenhouse gas emission from agricultural field. We assessed the effect of green manure crop and biochar on N<sub>2</sub>O emissions reduction from upland crop field. The green manure crop used in the study was Hairy vetch and the cultivated crop was Red pepper (*Capsicum annuum* L.). Nitrogen was applied at a rate of 190 kg ha<sup>-1</sup>, standard N fertilization rate for Red pepper. Emissions of N<sub>2</sub>O from the field were reduced from the plots applied with hairy vetch and biochar by 46.5% and 24.6%, respectively, compared with nitrogen fertilizer treated plots with N<sub>2</sub>O emission of 1.14 kg N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup>. The results from the study imply that green manure crop and biochar can be utilized to reduce greenhouse gas emission from the upland crop field.

## 1. 연구목표

대표적인 온실가스의 하나인 아산화질소의 지구 온난화 잠재력은 이산화탄소와 비교하여 약 300배 높는데(IPCC, 2007), 대기의 아산화질소 농도는 매년 0.2~0.3%씩 높아지고 있다(Saggar 등, 2009). 1700년대 이전에는 아산화질소의 농도가 285 ppbv였는데(Stauffer와 Neftel, 1988), 1998년에는 314 ppbv(IPCC, 2001)로 증가하였다. Park 등 (2012)이 1940년부터 2005년까지 대기 중의 아산화질소의 방사성 동위원소 조성을 살펴본 결과, 아산화질소 농도 증가의 주된 요인은 농경지에 시용한 질소질 비료인 것으로 나타났다. 즉, 토양 미생물이 농경지에 시용된 질소질 비료나 가축 분뇨 퇴비를 질산화 과정과 탈질 과정을 거쳐 변환시키는데, 이 과정에서 부산물이나 중간 산물로 아산화질소가 만들어진다(Freney, 1997; Singh와 Tyagi, 2009). Gu 등(2009)은 자연 상태의 아산화질소 26~30%는 농경지로부터 배출되는 것으로 추정하였다.

농경지로부터 아산화질소 배출에 영향을 미치는 요인으로는 질소 시비량, 토양 유기물 함량, 토양 산도, 토성, 작물 종류, 양분원의 종류 등이 있다(Stehfest, 2008). Kim 등(2008)은 고추 재배지에서의 아산화질소 배출에 영향을 미치는 요인으로는 식양토에서는 무기태 질소(51%), 토양 온도(26%), 토양 수분함량(23%)이었으며, 사양토에서는 토양 수분함량(39%), 토양 온도(36%), 무기태 질소(24%) 순이었다고 하였다. 또한 사양토에서의 아산화질소 배출량은 식양토에 비해 74~82% 적었고, 토양 수분장력이 -50 kPa일 때가 -30 kPa인 경우보다 13~40% 적었다고 하였다. 한편 Shin 등(2003)은 콩 작기중 아산화질소 배출량은 3.0~4.7 kg N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>라고 하였는데, Kim 등(2010)에 따르면 콩 재배지에서의 아산화질소 배출에 영향을 미치는 요인은 무기태 질소(66%), 토양 수분(19%), 토양 온도(15%) 순이었다.

우리나라는 온실가스에 대한 국가 고유 배출계수가 아직 개발되어 있지 않으므로, 기후변화에 관한 정부간 회의(Intergovernmental Panel for Climate Change; IPCC)에서 기본값으로 제시한 배출계수를 이용하여 농경지에서 직접 배출되는 온실가스의 양을 추정하고 있다. 아산화질소 배출계수의 기본값은 1996년 가이드라인에서는 0.0125였는데, 2006년 가이드라인에서는 0.01로 조정되었다(IPCC, 2006). 즉 농경지에 넣어준 질소질 비료나 축분 퇴비 가운데 휘산되지 않고 남은 질소의 1%는 아산화질소의 형태로 직접 대기로 배출된다는 의미이다. 국가마다 토양, 기후, 농사 기술 등이 다르므로, 국가 고유 배출계수를 이용하면 더 정확한 온실가스 배출량을 산정할 수 있다.

선진국은 국가고유 아산화질소 배출계수를 이용하여 밭에서의 아산화질소 배출량을 계산하고 있다. 일본의 국가고유 배출계수는 0.0062 kg N<sub>2</sub>O-N kg<sup>-1</sup> N(Akiyama 등, 2006), 스웨덴은 0.01~0.015 kg N<sub>2</sub>O-N kg<sup>-1</sup> N(Swedish Environmental Protection Agency, 2006)이고, 네덜란드는 화학비료는 0.01 kg N<sub>2</sub>O-N kg<sup>-1</sup> N, 축분에서는 0.02 kg N<sub>2</sub>O-N kg<sup>-1</sup> N(Netherlands Environmental Assessment Agency, 2006)를, 호주는 건조 지방에서 관개하지 않은 밭은 0.003 kg N<sub>2</sub>O-N kg<sup>-1</sup> N으로부터 원예 작물의 0.021 kg N<sub>2</sub>O-N kg<sup>-1</sup> N까지 다양하게 정하여(Australian Greenhouse Office, 2006) 사용하고 있다.

전 세계적으로 농경지로부터 배출되는 온실가스를 줄이는 기술을 개발하고 있다(Augustenborg 등, 2012). 녹비작물을 재배하면 질소질 비료의 시용량을 줄일 수 있으며, 바

이오솟을 사용하면 아산화질소의 배출량을 줄일 수 있음을 보여주는 연구 결과들이 보고되고 있다(Yanai 등, 2007; Alho 등, 2012; Felber 등, 2012; Kammann 등, 2012).

본 연구에서는 아산화질소에 대한 국가 고유 배출계수를 개발하기 위하여 강원도 춘천에서 감자, 고추, 배추 등 3작목을 4년간 재배하면서 아산화질소 시료를 채취하여 분석하였다. 또한 국가적으로 온실가스를 줄이려는 정책을 펴고 있으므로, 농업 부문에서도 농경지로부터의 온실가스 배출량을 줄이려는 노력이 필요하다. 따라서 녹비작물인 헤어리베치와 바이오솟이 밭작물의 하나인 고추 재배지에서의 아산화질소 배출량을 얼마나 줄일 수 있는지 살펴해보았다.

## 2. 재료 및 방법

강원도농업기술원의 포장(춘천, N 37° 57' 15.9" E 127° 46' 26.6")에서 감자(*Solanum tuberosum*), 배추(*Brassica campestris* L.), 고추(*Capsicum annuum* L.)를 4년간 재배하면서 온실가스 시료를 채취하여 분석하였다. 작물은 2009년 4월 29일, 2010년 5월 5일, 2011년 5월 3일, 2012년 5월 11일에 파종/정식하였다. 배추는 1년에 2번(봄, 가을) 재배하였고, 고추와 감자는 한 번 재배하였다. 봄배추는 고추와 감자와 같은 날 정식하였고, 가을배추는 2009년 8월 26일, 2010년 9월 5일, 2011년 8월 23일, 2012년 9월 5일에 정식하였다. 포장의 토양은 용계통(fine loamy, mixed, mesic Typic Dystrudepts)이며, 시험을 시작하기 전의 토양 화학성을 표 1에 나타내었다. 비료 사용량은 각 작물의 표준 시비량을 기준으로 하였는데, 배추는 10a당 N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O = 32-7.8-19.8 kg, 고추는 19-11.2-14.9 kg, 감자는 13.7-3.3-11.4 kg이다. 표준시비법에 따라 감자는 모두 밀거름으로 하였으며, 배추와 고추는 밀거름과 웃거름으로 나누어 주었다. 배추의 경우 질소의 52%를 밀거름으로 하고, 나머지 48%는 2회에 나누어 웃거름으로 주었다. 고추는 54%를 밀거름으로, 46%는 웃거름으로 3회 주었다. 감자의 수확일은 2009년 7월 10일, 2010년 7월 27일, 2011년 7월 18일, 2012년 7월 24일이었으며, 배추는 2009년 6월 30일과 11월 16일, 2010년 7월 1일과 11월 25일, 2011년 6월 28일과 11월 23일, 2012년 7월 10일과 11월 20일에 수확하였다. 각 시험구는 18 m<sup>2</sup>이며, 난괴법 3반복으로 배치하였다. 모든 통계 처리는 SAS(ver. 9.2, SAS, Cary, NC) 프로그램을 이용하였으며, 통계적 유의성 검정은 0.05 수준에서 Duncan 다중검정법을 이용하였다.

표 1. 시험포장 토양의 물리화학성

| pH<br>(H <sub>2</sub> O,1:5) | 전기전도도<br>dS m <sup>-1</sup> | 유기물<br>g kg <sup>-1</sup> | 유효인산<br>mg kg <sup>-1</sup> | 치환성 양이온                                  |      |      | 입경분석          |    |    |
|------------------------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------|--|------|------|---------------|----|----|
|                              |                             |                           |                             | Ca                                       | K    | Mg   | 모래            | 미사 | 점토 |
|                              |                             |                           |                             | -- cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> -- |      |      | ----- % ----- |    |    |
| 6.0                          | 0.33                        | 22                        | 470                         | 3.5                                      | 0.63 | 0.87 | 54            | 18 | 28 |

아산화질소의 분석을 위한 시료 채취는 온실가스 연구에서 일반적으로 쓰이고 있는 챔버법을 이용하였으며(Kim 등, 2006; Kim 등, 2008; Saggarr 등, 2009; Kim 등, 2010; Seo 등,

2012; Yang 등, 2012a; Yang 등, 2012b), 시료 채취 간격은 주 2회였다. Parkin(2008)의 연구 결과에 따르면, 1-4일 간격으로 시료를 채취하는 경우 아산화질소 누적 배출량의 정확도는 10% 이내였으며, 3-7일 간격인 경우에는 14% 이내였다. 분석 시료는 2009년은 4월 29일부터 다음 해 5월 3일까지 370일간, 2010년은 5월 5일부터 다음 해 5월 2일까지 363일간, 2011년은 5월 3일부터 다음 해 3월 15일까지 317일간, 2012년은 5월 11일부터 11월 22일까지 196일간 채취하여 분석하였다. 아산화질소의 분석은 전자포획검출기(ECD)를 장착한 가스크로마토그래프(Varian GC 450, USA)를 이용하였다(Seo 등, 2012). 아산화질소의 배출량은 다음 식을 이용하여 계산하였다(Shin 등, 2003; Kim 등, 2008; Kim 등, 2010; Seo 등, 2012).

$$F = \rho \cdot V \cdot A^{-1} \cdot \Delta c \cdot \Delta t^{-1} \cdot 273 \cdot T^{-1}$$

여기에서 F는 아산화질소 배출 ( $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )이며,  $\rho$ 는 아산화질소의 밀도인  $1.96 \text{ mg m}^{-3}$ 이고, V와 A는 각각 챔버의 체( $\text{m}^3$ )와 면( $\text{m}^2$ )이며,  $\Delta c \cdot \Delta t^{-1}$ 는 챔버 내에서의 시간당 아산화질소 농도의 평균 증가량이고, T는 챔버내 평균 온도( $^{\circ}\text{C}$ )에 273을 더한 값이다. Parkin 등 (2012)에 따르면, 챔버법을 이용한 온실가스 측정에서 직선 회귀 방법이 검출 한계가 낮고 분석 정도와 시료 채취 시간에 대한 민감도가 낮았다.

연구기간 중의 평균 기온과 강수량을 그림 1에 나타내었다. 평균 기온은 2009년에는  $10.3^{\circ}\text{C}$ , 2010년  $10.3^{\circ}\text{C}$ , 2011년  $10.8^{\circ}\text{C}$  이었는데, 이는 평년(1981~2010) 자료인  $11.2^{\circ}\text{C}$ 와 비교하여  $0.4\sim 0.9^{\circ}\text{C}$  낮은 값이다. 강수량은 2009년에 1,789mm, 2010년 1,634mm, 2011년 1,851mm, 로서, 평년 자료인 1,325 mm보다 300~500mm 높았다.

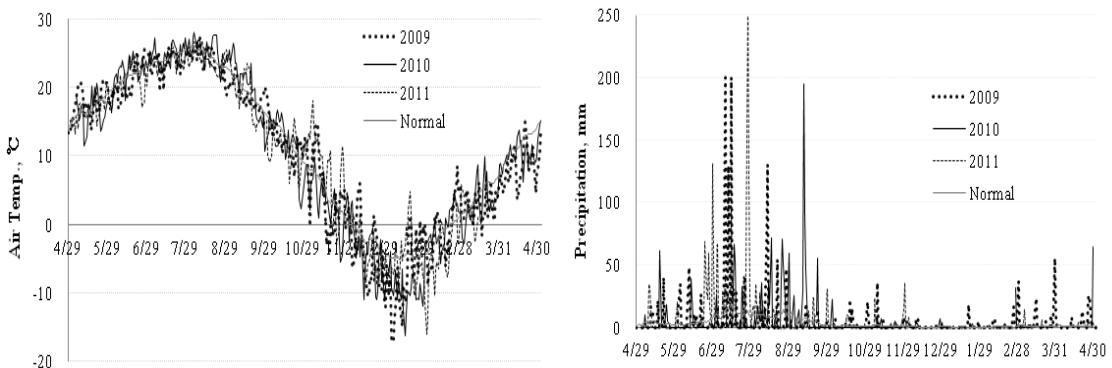


그림 1. 연구기간 중의 평균기온(왼쪽)과 강수량(오른쪽)

발작물 재배지로부터 배출되는 온실가스를 줄이는 기술을 개발하기 위하여, 강원도농업기술원의 노지 포장에서 고추(*Capsicum annuum* L.)를 재배하면서 온실가스 시료를 채취하여 분석하였다. 포장의 토양은 규암통(coarse silty, mixed, nonacid, mesic Aquic Fluventic Eutrochrepts)으로, 시험을 시작하기 전의 토양 화학성을 표 2에 나타내었다. 고추에 대한 질소 표준시비량인 10a당 19kg을 요소로 사용한 구를 대조구로 하였으며, 녹비작물인 헤어

리베치를 처리한 구, 헤어리베치와 질소질 비료 반량(9.5kg 10a<sup>-1</sup>)을 사용한 구, 바이오숯과 질소질 비료를 10a당 19kg 사용한 구, 바이오숯과 질소질 비료 반량을 사용한 구, 아무 것도 처리하지 않은 무시용구를 두었다. 헤어리베치는 시험하기 전년도 9월 하순에 파종(줄뿌림)하여 월동하였으며, 4월 하순에 수확하였고 수량은 생체중으로 10a당 774kg이었다. 헤어리베치를 처리구당 13kg씩 동일하게 처리하였는데, 이 때의 수분 함량은 84.2%로 건물중 기준으로는 처리구당 2.1kg이었다. 바이오숯은 홍천에 소재한 참숯 가마에서 구입한 백탄을 10a당 1,000kg 수준으로 처리하였다. 본 시험에 쓰인 헤어리베치와 바이오숯의 화학 조성을 표 3에 나타내었다.

표 2. 시험포장 토양의 화학성

| pH    | 전기전도도              | 유기물                | 유효인산                | 치환성 양이온                            |     |     |
|-------|--------------------|--------------------|---------------------|------------------------------------|-----|-----|
|       |                    |                    |                     | 칼리                                 | 석회  | 고토  |
| (1:5) | dS m <sup>-1</sup> | g kg <sup>-1</sup> | mg kg <sup>-1</sup> | cmol <sup>+</sup> kg <sup>-1</sup> |     |     |
| 6.4   | 0.18               | 16                 | 547                 | 0.46                               | 5.2 | 1.4 |

표 3. 시험에 사용된 헤어리베치와 바이오숯의 화학 조성

|       | 전질소                | 인산   | 칼리   | 석회   | 고토  |
|-------|--------------------|------|------|------|-----|
|       | g kg <sup>-1</sup> |      |      |      |     |
| 헤어리베치 | 44.1               | 11.8 | 43.0 | 18.0 | 6.7 |
| 바이오숯  | 3.6                | 1.1  | 6.7  | 11.5 | 0.8 |

고추의 정식은 2011년 5월 13일에 하였으며, 웃거름(질소질 비료)은 6월 2일과 7월 2일에 사용하였다. 각 처리구의 크기는 2.1×8.0m이며, 난괴법 3반복으로 배치하였다. 모든 통계 분석은 SAS 프로그램(ver. 9.2, SAS, Cary, NC)을 이용하였으며, 5% 수준에서 통계적 유의성을 검토하였다.

온실가스 시료의 채취와 분석은 앞에서 기술한 바와 같다. 시험기간 동안의 평균기온과 강수량을 평년(1981~2010년)과 비교하여 그림 2에 나타내었다. 시험기간의 평균기온은 22.5℃로 평년과 같았으나, 강수량은 1,565mm로 평년 기록인 725mm의 두 배 이상이었다.

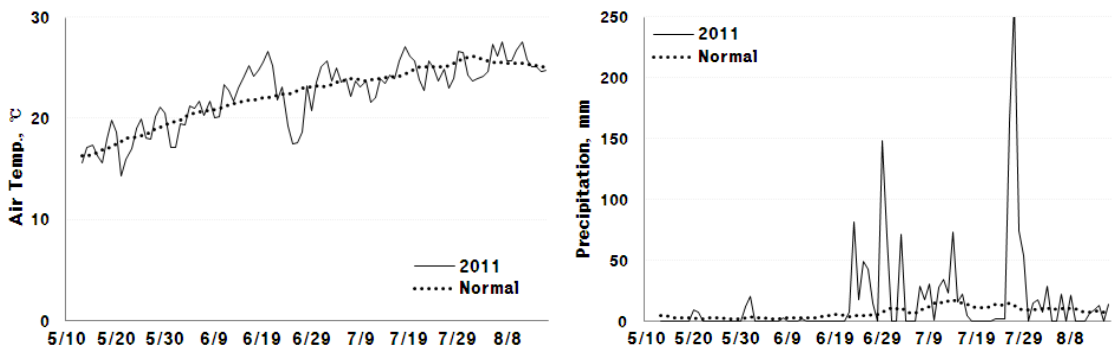


그림 2. 평년(1981~2010)대비 연구기간 중의 기온(왼쪽)과 강수량(오른쪽)

### 3. 결과 및 고찰

고추 재배지에서의 아산화질소 배출율은 2009년에  $35.5 \text{ g N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$  이하, 2010년  $19.8 \text{ g N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$  이하, 2011년  $26.9 \text{ g N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$  이하, 2012년  $26.3 \text{ g N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$  이하였다(그림 3). 감자는 2009년에  $29.5 \text{ g N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$  이하, 2010년  $16.3 \text{ g N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$  이하, 2011년  $28.5 \text{ g N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$  이하, 2012년  $30.7 \text{ g N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$  이하이었다. 고추와 감자 밭에서의 아산화질소 발생은 질소비료를 시용 한 다음 3개월 이내에 배출율이 높았다. 배추는 가을에 재배되는 경우에는 봄에 재배되는 경우와 다른 양상을 나타내었다. 즉, 가을에 배추를 정식한 직후에 아산화질소의 배출율이 2009년에는  $98.3 \text{ g N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ , 2010년  $79.2 \text{ g N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ , 2011년  $60.3 \text{ g N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ , 2012년  $64.8 \text{ g N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 까지 급증하여, 봄 재배의  $53.3 \text{ g N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$  (2009),  $37.4 \text{ g N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$  (2010),  $37.5 \text{ g N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$  (2011),  $40.8 \text{ g N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$  (2012)에 비해 높았다. 이는 정식 시기의 기온과 강수량이 가을재배의 경우 봄재배에 비해 높아 토양 온도와 수분이 미생물 활성화에 적합했기 때문으로 사료된다. 아산화질소 배출율은 늦가을에 매우 낮아졌다가 겨울에는 거의 0에 가까이 떨어지는데, 이는 온도와 토양 무기태 질소의 함량이 낮아지기 때문으로 보인다.

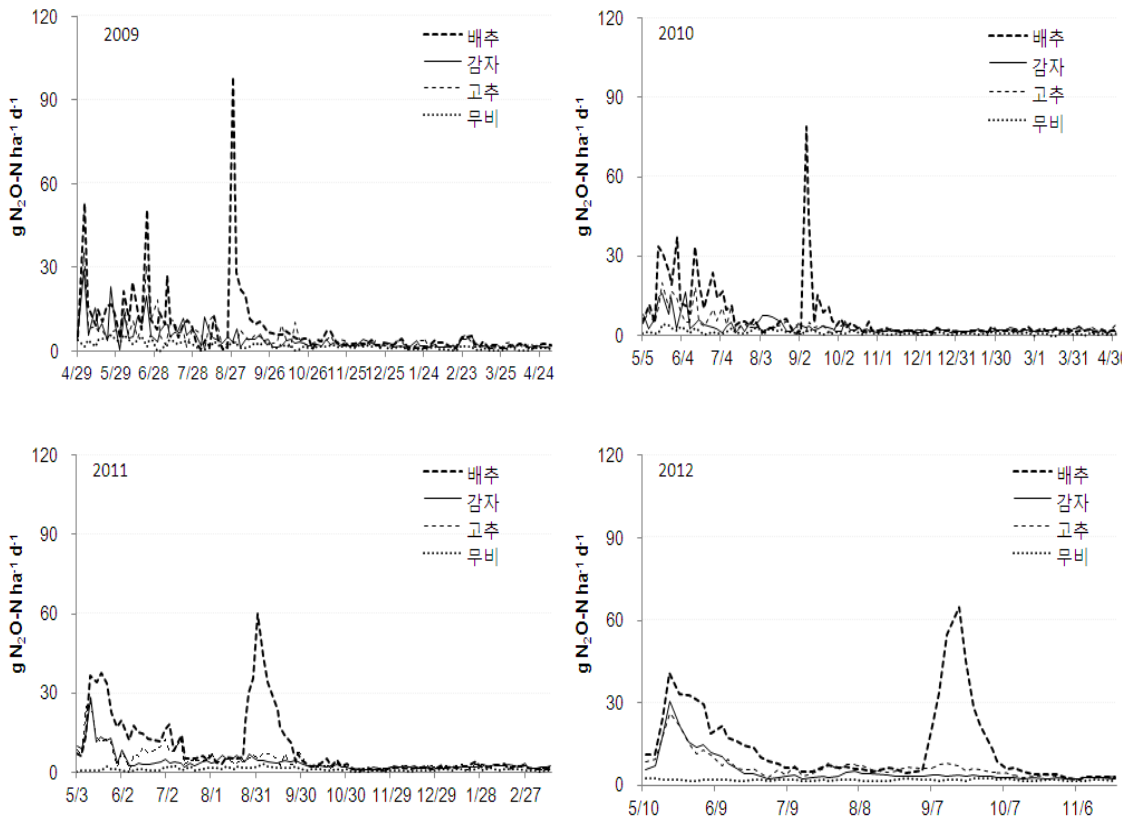
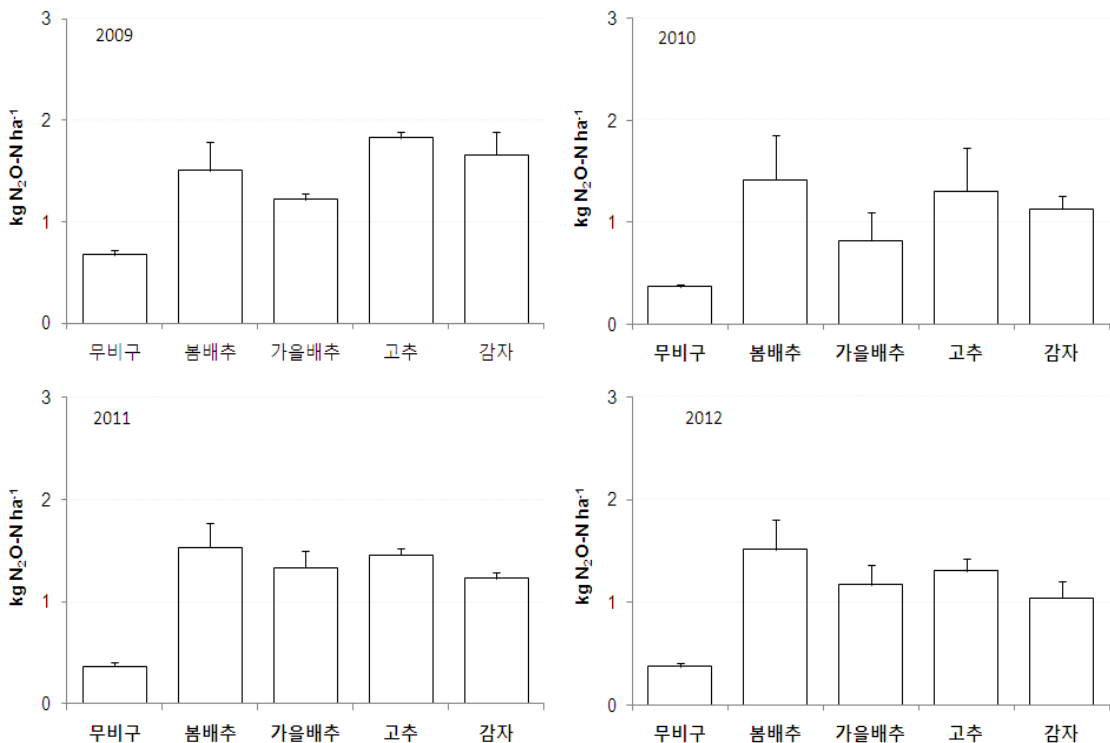


그림 3. 연도별 고추, 배추, 감자 재배지로부터 아산화질소 배출 양상

고추 밭에서의 아산화질소 배출량은 2009년 1.83 kg N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup>, 2010년 1.31 kg N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup>, 2011년 1.46 kg N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup>, 2012년 1.31 kg N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup>이었다(그림 4). 감자는 1.66 kg N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup>(2009), 1.13 kg N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup> (2010), 1.23 kg N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup> (2011), 1.04 kg N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup>(2012)였으며, 봄배추는 1.51 kg N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup>(2009), 1.41 kg N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup>(2010), 1.53 kg N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup>(2011), 1.52 kg N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup>(2012)였고, 가을배추는 1.22 kg N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup> (2009), 0.82 kg N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup>(2010), 1.34 kg N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup>(2011), 1.17 kg N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup>(2012)이었다. 2012년은 196일간 채취 분석하여 다른 해의 317~370일에 비해 짧았으나, 겨울에는 기온이 매우 낮고 토양에 남아있는 질소가 적어서 아산화질소 배출량이 매우 낮을 것으로 사료된다. 고추를 예로 들면, 2012년에 분석을 끝냈던 11월 22일 이후 겨울 동안의 아산화질소 배출량을 보면, 2009년엔 0.22 kg N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup>, 2010년 0.19 kg N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup>, 2011년 0.21 kg N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup>로 낮았다. Bouwman 등(2002)은 120일 이내에 조사한 아산화질소 배출량은 180~300일 동안 측정된 자료에 비해 유의하게 낮았다고 하였으나, Akiyama 등(2006)은 비료 시용에 의한 아산화질소 배출은 90일 이내에 대부분 이루어진다고 가정하고, 90일 이상 측정된 자료들을 바탕으로 일본의 아산화질소 배출계수를 산정하였다. 한편, 질소 비료를 처리하지 않은 무비구에서의 아산화질소 배출량은 0.37~0.67 kg N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup>을 나타내어, 일본의 0.65 kg N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup>(Akiyama 등, 2006), 중국의 1.06 kg N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup>(Gu 등, 2009), 그리고 Bouwman(1996)이 제시한 1.0 kg N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup>보다는 다소 낮은 수준이었다.

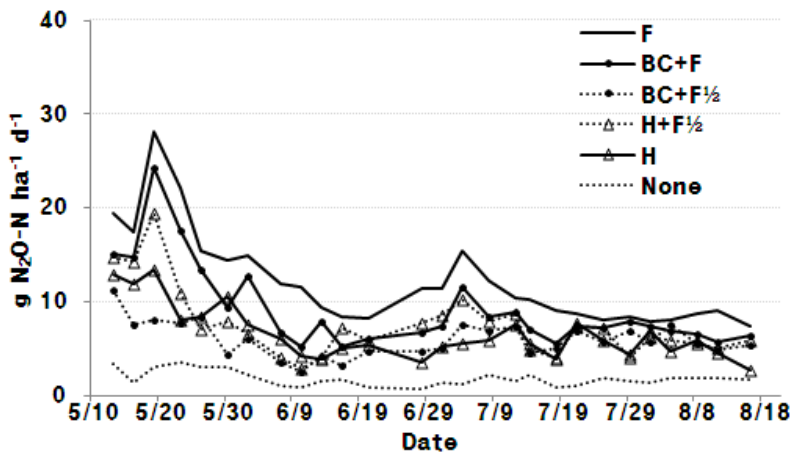


※ 에러 막대는 표준편차를 나타냄

그림 4. 연도별 고추, 감자, 봄배추, 가을배추 재배지와 무비구로부터 아산화질소 배출량

각 작물별 질소 시비량과 아산화질소 배출량, 무비구의 아산화질소 배출량으로 계산한 배출계수는 고추는 0.00545~0.00676 kg N<sub>2</sub>O-N kg<sup>-1</sup> N, 감자는 0.00541~0.00800 kg N<sub>2</sub>O-N kg<sup>-1</sup> N, 봄배추 0.00405~0.00483 kg N<sub>2</sub>O-N kg<sup>-1</sup> N, 가을배추는 0.00226~0.00387 kg N<sub>2</sub>O-N kg<sup>-1</sup> N이었다. 제주도 화산회토 토양에서의 밭작물 재배지의 아산화질소 배출계수는 콩은 0.0202 kg N<sub>2</sub>O-N kg<sup>-1</sup> N(Yang 등, 2012a), 당근 kg N<sub>2</sub>O-N kg<sup>-1</sup> N(Yang 등, 2012b), 감자 0.0040 kg N<sub>2</sub>O-N kg<sup>-1</sup> N(Yang 등, 2012c)이라고 보고된 바 있다. 일본에서는 배수가 잘 되는 밭에서는 0.0032 kg N<sub>2</sub>O-N kg<sup>-1</sup> N, 배수가 불량한 밭은 0.0140 kg N<sub>2</sub>O-N kg<sup>-1</sup> N로 하여 국가고유 아산화질소 배출계수는 0.0062±0.0045 kg N<sub>2</sub>O-N kg<sup>-1</sup> N를 사용하고 있다(Akiyama 등, 2006). 다만 차나무는 0.0282±0.0180 kg N<sub>2</sub>O-N kg<sup>-1</sup> N로 따로 정하였다(Akiyama 등, 2006). 우리나라에서도 작물별로 배출계수를 따로 하는 것보다는 밭작물을 일괄적으로 정하되, 매우 특이한 배출 양상을 보이는 작목만을 따로 정하는 것이 좋으리라 사료된다. 본 연구에서의 결과를 바탕으로 추정한 밭작물의 아산화질소 배출계수는 0.0051±0.0016 kg N<sub>2</sub>O-N kg<sup>-1</sup> N이나, 아산화질소 배출량은 토양의 성질, 기상 등 환경 요인, 재배 관리 등 여러 요인에 의해 영향을 받으므로 여러 지역과 여러 작물의 결과를 종합하여 정하여야 한다.

밭작물 재배지에서의 온실가스 배출량을 줄이는 기술을 개발하기 위한 시험에서는, 고추 재배지로부터 시험기간 동안의 아산화질소 배출 양상을 그림 5에 나타내었다. 질소질 비료를 처리한 구에서는 고추를 정식한 다음 약 1주일 후에 배출량이 매우 높아졌다가 이후 낮아지는 경향을 보였으며, 웃거름을 준 다음에 다소 높아지는 양상을 나타내었다. Kim 등(2008)과 Kim 등(2010)이 보고한 바와 같이 아산화질소 배출량은 무기태 질소의 함량, 토양 온도, 토양 수분 함량 등이 복합적으로 작용하므로, 어느 한 요인에 의해 뚜렷한 변화 양상을 보이지는 않았다. Yang 등(2012a, 2012b)은 화산회 토양에서 콩과 당근을 재배하였을 때 아산화질소의 배출량과 토양 수분과는 2년 동안 고도로 상관관계가 있었으나, 토양 온도와는 한 해에는 유의성이 인정되었으나 다른 해에는 유의성이 인정되지 않았다고 하였다.



※ F : 질소비료, BC : 바이오숯, H : 헤어리베치, F<sub>1/2</sub> : 질소비료<sub>1/2</sub>

그림 5. 고추 재배지의 아산화질소 배출 양상.

질소질 비료를 표준 시비량인 10a당 19kg 처리한 구에서 약 3개월 동안에 누적된 아산화질소 배출량은 1.14 kg N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup>이었으며, 질소원을 처리하지 않은 무시용구에서의 아산화질소의 배출량은 0.16 kg N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup>였다(그림 6). 질소질 비료 처리구의 아산화질소 배출계수는 0.0057 kg N<sub>2</sub>O-N kg<sup>-1</sup> N로서 IPCC(2006)에서 정한 배출계수인 0.01 kg N<sub>2</sub>O-N kg<sup>-1</sup> N보다 낮은 편이었다. 시험기간 동안의 강수량은 평년의 2배 이상(그림 1)이었으므로, 토양 수분 함량이 상당히 높았을 것으로 추정된다. 토양 수분 함량이 높을수록 탈질이 잘 일어나지만, 토양 공극에 대한 용적수분 함량 비율이 90% 이상에서는 아산화질소 배출량이 급격히 낮아진다(Lemke 등, 1998). 따라서 과도한 강수량에 의한 너무 높은 토양 수분 함량으로 아산화질소 배출량이 낮아졌을 가능성을 배제할 수 없었다. 한편, 본 연구의 배출계수 0.0057 kg N<sub>2</sub>O-N kg<sup>-1</sup> N은 콩의 0.0202 kg N<sub>2</sub>O-N kg<sup>-1</sup> N(Yang 등, 2012a)보다 낮으나, 당근의 0.0025 kg N<sub>2</sub>O-N kg<sup>-1</sup> N (Yang 등, 2012b)와 감자 0.0040 kg N<sub>2</sub>O-N kg<sup>-1</sup> N(Yang 등, 2012c)보다 높은 값이었다.

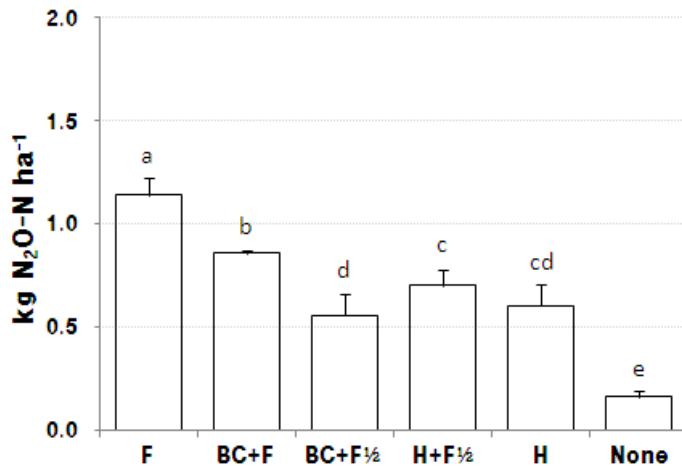


그림 6. 고추 재배지의 아산화질소 배출량

헤어리베치와 바이오숯+질소질 비료 처리구의 아산화질소 배출량은 각각 0.61kg N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup>과 0.86kg N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup>로서, 녹비작물인 헤어리베치와 바이오숯을 활용하면 온실가스인 아산화질소의 배출량을 각각 46.5%와 24.6% 줄일 수 있을 것으로 사료된다. 다만, 농경지로부터 아산화질소 배출은 토양 특성뿐만 아니라 기상 조건의 영향을 크게 받으므로, 감소 정도의 변화 폭이 크다고 볼 수 있다(Kim 등, 2008; Kim 등, 2010; Yang 등, 2012a; Yang 등, 2012b). 한편, 표준 시비량의 반량에 해당하는 질소질 비료를 각각 헤어리베치와 바이오숯 함께 처리한 구에서의 아산화질소 배출량은 각각 0.70 kg N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup>과 0.56 kg N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup>이었다. 헤어리베치는 질소 함량이 높은 콩과 작물로서 질소원으로 작용하여 토양 중의 무기태 질소 함량을 높여 아산화질소 배출량이 높았던 것으로 사료된다.

Yanai 등(2007)은 바이오숯을 무게 비로 10%를 처리하였을 때 아산화질소 배출량이 105 µg N<sub>2</sub>O-N m<sup>-2</sup>에서 11 µg N<sub>2</sub>O-N m<sup>-2</sup>로 줄어들었다고 보고하였다. Zwieten 등(2009)은 바이

오숫 처리가 아산화질소로부터 질소 가스로 환원시키는 효소 활성을 높이거나, 토양 통기성을 높여 탈질균의 활성에 영향을 미치거나, 토양 pH를 높여 아산화질소 환원효소의 활성을 높이고  $N_2O/N_2$  비를 낮추거나, 탈질균의 활성에 필요한 유효태 탄소를 흡착하여 줄이거나, 전자수용체의 공급에 변화를 주거나, 바이오숫이 아산화질소를 흡착한 다음 질소 가스로 환원하거나, 아산화질소가 바이오숫에 흡착된 방향족 탄소 화합물을 산화시키면서 자신은 질소 가스로 환원하여 아산화질소의 배출량을 줄이는 것으로 추정하였다.

#### 4. 적 요

밭작물 재배지에서 배출되는 아산화질소의 배출량과 배출계수를 정하기 위하여 4년 동안 (2009~2012) 고추, 배추, 감자를 재배하면서 시료를 채취하여 분석하였다. 아산화질소 배출량 (평균±표준편차)은 고추가  $1.48\pm 0.25$  kg  $N_2O-N$  ha<sup>-1</sup>, 감자  $1.27\pm 0.27$  kg  $N_2O-N$  ha<sup>-1</sup>, 봄배추  $1.49\pm 0.06$  kg  $N_2O-N$  ha<sup>-1</sup>, 가을배추  $1.14\pm 0.22$  kg  $N_2O-N$  ha<sup>-1</sup>이었다. 질소질 비료를 처리하지 않은 무비구의 아산화질소 배출량은  $0.45\pm 0.15$  kg  $N_2O-N$  ha<sup>-1</sup>이었다. 질소 시비량과 아산화질소 배출량, 무비구의 아산화질소 배출량으로 산정한 배출계수는  $0.0051\pm 0.0016$  kg  $N_2O-N$  kg<sup>-1</sup> N이었다. 아산화질소 배출량은 토양의 성질, 기상 등 환경 요인, 재배 관리 등 여러 요인에 의해 결정되므로 여러 지역과 여러 작물의 결과를 종합하여 정하여야 한다. 농업 부문에서 온실가스 배출량을 줄이기 위하여 녹비작물인 헤어리베치와 바이오숫을 이용하였을 때 밭작물 재배지에서 아산화질소 배출량 저감 효과를 평가하였다. 질소 시용량은 고추의 표준 시비량인 190 kg ha<sup>-1</sup>이었으며, 주 2회 시료를 채취하여 GC/ECD로 아산화질소를 분석하였다. 대조구인 질소질 비료(요소) 처리구의 아산화질소 배출량은 1.14 kg  $N_2O-N$  ha<sup>-1</sup>이었으며, 헤어리베치와 바이오숫+질소질 비료 처리구의 아산화질소 배출량은 각각 0.61 kg  $N_2O-N$  ha<sup>-1</sup>과 0.86 kg  $N_2O-N$  ha<sup>-1</sup>로 온실가스 배출을 각각 46.5%와 24.6% 줄였다.

#### 5. 인용문헌

- Akiyama, H., Yagi, K, and X. Yan. 2006. Estimations of emission factors for fertilizer-induced direct  $N_2O$  emissions from agricultural soils in Japan : Summary of available data. *Soil Sci. Plant Nutr.* 52:774-787.
- Alho, C.F.B.V., A.S. Cardoso, B.J.R. Alves, and E.H. Novotny. 2012. Biochar and soil nitrous oxide emissions. *Pesq. Agropec. Bras. Brasilia.* 47:722-725.
- Augustenborg, C.A., S. Hepp, C. Kammann, D. Hagan, O. Schmidt, and C. Muller. 2012. Biochar and earthworm effects on soil nitrous oxide and carbon dioxide emissions. *J. Environ. Qual.* 41:1203-1209.
- Australian Greenhouse Office. 2006. National Inventory Report 2004. Vol. 1. Australian Greenhouse Office. Canberra.
- Barton, L. and L.A. Schipper, 2001. Regulation of nitrous oxide emissions from soils irrigated with dairy farm effluent. *J. Environ. Qual.* 30:1881-1887.

- Bouwman, A.F. 1996. Direct emissions of nitrous oxide from agricultural soils. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 46:53-70.
- Bouwman, A.F., L.J.M. Boumans, and N.H. Batjes. 2002. Emissions of N<sub>2</sub>O and NO from fertilized fields: Summary of available measurement data. *Global Biogeochem. Cycles.* 16:1058-1070.
- Felber, R., R. Huppi, J. Leifeld, and A. Neftel. 2012. Nitrous oxide emission reduction in temperate biochar-amended soils. *Biogeosci. Discuss.* 9:151-189.
- Freney, J.R. 1997. Emission of nitrous oxide from soils used for agriculture. *Nutrient Cycling Agroecosystem.* 49:1-6.
- Gu, J., X. Zheng, and W. Zhang. 2009. Background nitrous oxide emissions from croplands in China in the year 2000. *Plant Soil.* 320:307-320.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2001. Third Assessment Report. Working Group I. Cambridge University Press. Cambridge.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2006. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Vol. 4. Agriculture, forestry and other land use. Eggleston H. S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., Tanabe K. (eds.) Hayama, Japan, 682p.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. Climate Change 2007. Mitigation of climate change : Contribution of working group III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Metz B., Davidson O., Bosch P., Dave R., Meyer L. (eds) Cambridge University Press, New York.
- Kammann, C., S. Ratering, C. Eckhard, and C. Muller. 2012. Biochar and hydrochar effects on greenhouse gas (carbon dioxide, nitrous oxide, and methane) fluxes from soils. *J. Environ. Qual.* 41:1052-1066.
- Kim, G.Y., B.H. Song, B.K. Hyun, K.M. Shim, J.T. Lee, J.S. Lee, W.I. Kim, and J.D. Shin. 2006. Predicting N<sub>2</sub>O emission from upland cultivated with pepper through related soil parameters. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 39:253-258.
- 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 greenhouse gases emissions according to changes of soil water content, soil temperature and mineral N with different soil texture in pepper cultivation. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 41:399-407.
- Kim, G.Y., K.H. So, H.C. Jeong, K.M. Shim, S.B. Lee, and D.B. Lee. 2010. Assessment of greenhouse gases emissions using global warming potential in upland soil during pepper cultivation. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43:886-891.
- 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.
- Netherlands Environmental Assessment Agency. 2006. Greenhouse Gas Emissions in the Netherlands 1990-2004: National Inventory Report 2006. Netherlands Environmental Assessment Agency. Bilthoven.
- Park, S., P. Croteau, K.A. Boering, D.M. Etheridge, D. Ferretti, P.J. Fraser, K.R. Kim, P.B. Krummel, R.L. Langenfelds, T.D. van Ommen, L.P. Steele, and C.M. Trudinger. 2012. Trends and seasonal cycles in the isotopic composition of nitrous oxide since 1940. *Nature Geosci.* 5:261-265.
- Parkin, T.B. 2008. Effect of sampling frequency on estimates of cumulative nitrous oxide emissions. *J. Environ. Qual.* 37:1390-1395.
- Parkin, T.B., R.T. Venterea, and S.K. Hargreaves. 2012. Calculating the detection limits of chamber-based soil greenhouse gas flux measurements. *J. Environ. Qual.* 41:705-715.
- Saggar, S., J. Luo, D.L. Giltrap, and M. Maddena. 2009. Nitrous oxide emissions from temperate grasslands: Processes, measurements, modelling and mitigation. In Sheldon A. I., Barnhart E. P. (eds.): Nitrous oxide emissions research progress. Nova Science Publishers, Inc., New York, p. 1-66.
- Seo, Y.H., S.W. Kim, S.C. Choi, B.C. Jeong, and Y.S. Jung. 2012. Nitrous oxide emission from livestock compost applied arable land in Gangwon-do. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45:25-29.
- Shin, Y.K., J.W. Ahn, M.H. Koh, and J.C. Shim. 2003. Emissions of greenhouse gases from upland rice and soybean. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 36:256-262.
- 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.
- Stauffer, B.R. and A. Neftel. 1988. What we have learnt from the ice cores about the atmospheric changes in the concentrations of nitrous oxide, hydrogen peroxide and other trace species. In *The Changing Atmosphere*. Edited by R. FS and I. ISA. John Wiley & Sons Ltd. Chichester.
- Stehfest, E. 2008. Modelling of Global Crop Production and Resulting N<sub>2</sub>O Emissions. VDM Verlag Dr. Müller, Saarbrücken, Germany.
- Swedish Environmental Protection Agency. 2006. Sweden's National Inventory Report 2006. Swedish Environmental Protection Agency. Bromma.
- Yanai, Y., K. Toyota, and M. Lkazaki. 2007. Effect of charcoal addition on N<sub>2</sub>O emissions from soil resulting from resetting air-dried soil in short-term laboratory experiments. *Soil Sci. Plant Nutri.* 53:181-188.
- Yang, S.H., H.J. Kang, S.C. Lee, H.J. Oh, and G.Y. Kim. 2012a. Influence of N

fertilization level, rainfall, and temperature on the emission of N<sub>2</sub>O in the Jeju black volcanic ash soil with soybean cultivation. Korean J. Soil Sci. Fert. 45:451-458.

Yang, S.H., H.J. Kang, S.C. Lee, H.J. Oh, and G.Y. Kim. 2012b. Influence of N fertilization level, rainfall, and temperature on the emission of N<sub>2</sub>O in the Jeju black volcanic ash soil with carrot cultivation. Korean J. Soil Sci. Fert. 45:459-465.

Yang, S.H., H.J. Kang, S.C. Lee, H.J. Oh, and G.Y. Kim. 2012c. Influence of N fertilization level, rainfall, and temperature on the emission of N<sub>2</sub>O in the Jeju black volcanic ash soil with potato cultivation. Korean J. Soil Sci. Fert. 45:544-550.

Zwieten, L.V., B. Singh, S. Joseph, S. Kimber, A. Cowie, and K.Y. Chan. 2009. Biochar and emissions of non-CO<sub>2</sub> greenhouse gases from soil. In Lehmann, J. and Joseph, S. (eds.): Biochar for Environmental Management. Earthscan, London, UK. p. 227-249.

## 6. 연구결과 활용

| 연도(연차)   | 활용구분 | 제목                                     |
|----------|------|--|
| 2010(2년) | 논 문  | 강원지역 벼 재배의 기후변화 대응 연구(비SCI)            |
| 2011(3년) | 논 문  | 강원지역의 2010년 복숭아 동해(비SCI)               |
| 2012(4년) | 논 문  | 축분퇴비가 사용된 농경지에서의 아산화질소 배출량(비SCI)       |
|          | 논 문  | 녹비작물과 바이오숯의 고추재배지 아산화질소 배출량 저감효과(비SCI) |
|          | 영농활용 | 고추 밭에서의 온실가스 배출량 저감 기술(중앙)             |

## 7. 연구원 편성

| 구분    | 소속      | 직급    | 성명  | 수행업무    | 참여년도 |     |     |
|-------|---------|-------|-----|---------|------|-----|-----|
|       |         |       |     |         | '10  | '11 | '12 |
| 과제책임자 | 옥수수연구소  | 농업연구사 | 서영호 | 과제 총괄   | ○    | ○   | ○   |
| 공동연구자 | 환경농업연구과 | 농업연구관 | 강안석 | 연구방향 설정 | ○    | ○   | -   |
| "     | 옥수수연구소  | "     | 김경희 | "       | -    | -   | ○   |
| "     | 원예연구과   | 농업연구사 | 조병욱 | 연구 협조   | ○    | -   | -   |
| "     | 인삼약초연구소 | 농업연구관 | 안문섭 | "       | -    | ○   | -   |
| "     | 특화작물연구소 | "     | 김인중 | "       | -    | -   | ○   |
| "     | "       | 농업연구사 | 김세원 | "       | ○    | ○   | ○   |
| "     | 환경농업연구과 | "     | 최승출 | "       | ○    | ○   | ○   |
| "     | "       | "     | 윤병성 | "       | -    | -   | ○   |
| "     | "       | 공무직   | 김장수 | 포장관리 등  | ○    | ○   | ○   |