

〈Original article〉

콩과 고추재배지에서 양분 공급원별 N₂O 배출량 평가

김건엽* · 이선일 · 이종식 · 정현철 · 최은정

농촌진흥청 국립농업과학원 기후변화생태과

Evaluation of N₂O Emissions by Nutrient Source in Soybean and Pepper Fields

Gun-Yeob Kim*, Sun-Il Lee, Jong-Sik Lee, Hyun-Cheol Jeong and Eun-Jung Choi

National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju 55365, Republic of Korea

Abstract - Nitrogen fertilizers, hairy vetch, and slow-release complex fertilizers were applied to the soil during the cultivation of crops. The impact of these factors on N₂O emission was quantitatively assessed and the GHGs reduction effect comprehensively evaluated. Among the three factors, the significant factors affecting N₂O emission were mineral nitrogen > soil moisture > temperature. Yield and fertilizer utilization efficiency were highest in the slow-release complex fertilizer treatment. There was no significant difference in N₂O emissions between the slow-release complex fertilizer treatments and the NPK + hairy vetch treatments. Comprehensive results showed that slow-release complex fertilizers treatment has high yield and fertilizer utilization efficiency but low N₂O emission.

Keywords : N₂O emission, low-release complex fertilizer, soybean and red pepper fields

서 론

농경지에서 배출되는 온실가스 배출가스인 N₂O는 지구 온난화잠재력(GWP; Global Warming Potential)이 CO₂ 대비 310배로 가장 크다(IPCC 1996). 대기 중 N₂O 농도는 산업혁명 이전 270 ppb에서 2006년에 320 ppb로 약 1.2배 증가하였다(IPCC 2007). 농업활동에서 N₂O의 주 배출원은 질소비료 및 가축분뇨이며, N₂O의 지구온난화 기여율은 5% 이상인 것으로 알려져 있다(IPCC 2007). 농업활동에 의한 온실가스 배출감축을 위해서는 먼저 농업부문의 온실가스 발생원과 토양에 양분공급원별로 온실가스 배출에 미치는 영향을 구체적으로 평가할 필요가 있다.

비료 종류 중 효과지연성 피복비료는 수용성의 속효성 입상비료를 안정한 피막으로 피복하여 비료성분의 용출속도를 조절한 것으로서 일명 Coating비료로 불려 지기도 한다. 피복비료에서 양분의 용출은 피복의 미세한 공극을 통해서 확산·용출하며, 수지로 피복한 비료는 피막두께의 변화나 용출조절제의 사용에 따라 용출속도를 임의로 조절 할 수 있다. LCU (Latex Coating Urea)효과지연성 복합비료를 토양에 사용하면 질소성분이 천천히 용출될 뿐 아니라 오랫동안 지속되기 때문에 질소성분의 유실과 휘산을 경감할 수 있는 장점이 있다(Azeem *et al.* 2014; LeMonte *et al.* 2016). 따라서 작물이 필요로 하는 시기에 양분이 공급되어 비료효과를 증가시키기 때문에 수량을 증가시키고 분시횟수의 단축 등 시비노력이 절감되는 이점이 있어 최근에 LCU효과지연성 복합비료를 기비로만 사용하고 추비를 생략하는 농가가 늘어나고 있는 추세이다. 이와 같이 LCU효과지연성 복합비료 사용

* Corresponding author: Gun-Yeob Kim, Tel. 063-238-2493,
Fax. 063-238-3823, E-mail. gykim1024@korea.kr

Table 1. Chemical properties of soil in soybean and red pepper fields before the experiment

| Crop | pH (1:5) | EC (dS m ⁻¹) | OM (g kg ⁻¹) | Av. P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹) | T-N (g kg ⁻¹) | Exch. Cation (cmol _c kg ⁻¹) | | |
|------------|----------|--------------------------|--------------------------|--|---------------------------|--|------|------|
| | | | | | | K | Ca | Mg |
| Soybean | 6.6 | 0.45 | 19.7 | 392.0 | 1.2 | 0.52 | 5.93 | 2.91 |
| Red pepper | 7.0 | 0.66 | 25.7 | 324.3 | 1.8 | 0.51 | 7.78 | 3.15 |

으로 수량 증대와 더불어 토양에 무기태질소 공급의 조절을 통하여 N₂O 배출을 줄일 수 있을 것으로 기대하고 있다. 그리고 헤어리베치는 공중질소를 고정하는 두과 작물로서 다른 녹비작물 보다 C/N율이 비교적 낮고(탈질율 10) 분해속도가 빠른 유기물이다(Cho *et al.* 2012). 경작지에서 유기물 투입은 논토양에서는 CH₄ 생성 박테리아에 의해 혐기조건 상태로 유기물이 분해되어 CH₄이 발생하지만 유기물이 밭토양에서 질소 비료에 의해서만 발생하는 N₂O와는 크게 영향을 받지 않으므로 N₂O 배출 감축에 기여하고 있다. 따라서 LCU효과지연성 복합비료 시용으로 인한 N₂O 배출과 녹비작물 시용으로 인한 N₂O 배출 감축효과 등 질소공급원인 비료한 종류와 N₂O 배출 연구(Kim *et al.* 2002, 2010; Seo *et al.* 2012; Azeem *et al.* 2014; Sakatar *et al.* 2015; LeMonte *et al.* 2016)는 있으나, 질소공급원별로 N₂O 배출 감축효과를 종합적으로 파악한 연구는 미미하였다.

본 연구에서는 작물 재배시 질소비료와 유기물인 헤어리베치 그리고 LCU효과지연성 복합비료 등 질소공급원별로 토양에 사용하여 작물의 수량, N₂O 배출 특성 및 N₂O 배출량 감축 효과 등 종합적으로 파악하고 질소공급원별로 N₂O 배출에 얼마나 영향을 주는지를 정량적으로 밝혀서 온실가스 배출관리에 필요한 기초자료를 제공하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 처리 및 시료 분석방법

본시험은 전라북도 완주군 이서면에 위치한 국립농업과학원의 시험포장(위도: 35°82'41.5"N, 경도: 127°04'36.0"E)에서 2016~2017년(2년) 동안 수행하였다. 시험 토양은 pH는 6.2~7.1, 유기물함량은 7.8~13.8 g kg⁻¹로서 특성은 Table 1과 같고 농촌진흥청 토양화학분석법(NIAS 2010)에 준하였다. 대상작물은 우리나라에서 주요 밭작물인 콩(대풍) 그리고 고추(시알)를 공시작물로 하였다. 콩의 파종일은 6월 12일경, 고추의 정식일은 5월 10일경으로 검정 피복 비닐로 멀칭하여 재배하였다. 비료 시용량은 농촌진흥청 작물별 시비처방기준(RDA 2006)의 표준시비량을 기준으로 하였으며, 콩 재배에서 NPK 처리는 N-P₂O₅-K₂O를 32-33-37 kg ha⁻¹으

로 질소, 인산, 칼리 등을 전량 기비하였고 고추는 질소는 요소로 3회 분시, 인산은 용성인비로 전량 기비, 칼리는 염화칼리를 2회 분시하였다. 비료 및 유기물처리에는 NPK, NPK(질소 성분량 50%)+ 헤어리베치 생초(질소 성분량 50%), LCU(Latex Coating Urea)효과지연성 복합비료(질소 성분량 100%) 등 3처리 3반복으로 각 처리 당 질소성분량 100%에 맞추었다. 헤어리베치의 질소함량은 헤어리베치가 32 g kg⁻¹으로 헤어리베치 투입량(수분함량 75.7%)은 8,800 kg ha⁻¹이었다.

토양화학성은 토양시료를 채취하여 풍건 후 2 mm체를 통과시켜 농촌진흥청 토양화학분석법(NIAS 2010)에 준하여 분석하였다. pH는 토양을 증류수와 1:5 (W/V)로 혼합한 후 30분간 교반하여 pH meter (Orion 4 star, Thermo, Singapore)로 측정하였고, EC는 pH 측정 후 토양용액을 #42 여과지로 여과 후 EC meter (Orion 4 star, Thermo, Singapore)를 이용하여 측정하였다. 유효인산은 Lancaster법(NIAS 2010)으로 720 nm 파장에서 비색계(AU/CARY 300, Varian, Australia)로 분석하였으며, 치환성 양이온은 1 M NH₄OAC (pH 7.0) 용액으로 침출하여 유도결합플라즈마 방출분광기(Optima 7300DV, Perkin Elmer, USA)로 분석하였다. 총질소는 CN analyzer (Vario Max CN, Elementar, Germany)로 분석하였다.

2. 시료채취 및 온실가스 분석방법

시험포장에서 N₂O는 비정체형 밀폐형태(Closed Chamber Method)인 순환형 상자법(Denmead *et al.* 1979)을 이용하여 외부로의 공기 유출이 없도록 포집하였다. 설치된 chamber는 지름이 0.25 m, 높이가 0.5 m인 PVC 소재로 제작하였으며, 가스포집 챔버는 콩과 고추 재배기간 동안 밭 토양 위 작물과 작물 사이에 고정하여 설치하였고 포집하지 않을 때는 챔버 덮개는 열어두었다. 챔버 재원과 가스포집 형태는 기존에 검증받았던 방법(Matthias *et al.* 1978; Denmead *et al.* 1979)에 의해 제작하였으며, N₂O 발생원인 토양 위에 챔버를 설치한 후 챔버 내부와 외부를 단절시켜 챔버 내부에서 단위 시간당 온실가스의 농도 증가율을 측정하였다. N₂O 가스 포집 방법(Sebacher *et al.* 1980; Yagi *et al.* 1990; Shin *et al.* 1995)은 가스 채취 시작시점에 가스 포집 즉시 챔버 위쪽

덮개를 덮고, 그리고 30분 후 가스를 포집하여 30분 전 포집한 농도와 30분 후 포집한 농도차를 이용하여 배출량을 측정하였다. 가스시료 채취는 Yagi *et al.* (1991)의 방법에 의하여 24시간 배출되는 온실가스 농도를 평균한 값의 시간 범위가 하루에 두 번인 10:00~13:00시와 오후 16:00~19:00시로 나타나 오전과 오후 시간 중에 하나의 시간범위를 선택하여 가스를 채취하므로 본 시험에서는 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 (7890A, Agilent, USA)를 사용하였고 column은 Porapack Q (80/100 mesh)를 충전한 1/8"×2 m의 stainless steel tubing column, 그리고 Detector의 온도는 320

Table 2. Gas chromatographic analysis conditions for N₂O measurement

| Detector | | ECD |
|----------------------------------|------------------|---|
| Column | Packing material | Porapack Q (80/100) |
| | Materials | Stainless steel |
| | O.D.×length | 1/8"×2 m |
| Carrier gas | | N ₂ |
| Flow rate | | 30 mL min ⁻¹ (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 |

°C로 하였다. N₂O 분석 조건은 Table 2와 같다.

N₂O 플럭스(Minami 1987)는 다음 식(1)에 따라서 계산하였다.

$$F(\text{mg m}^{-2} \text{ hr}^{-1}) = q \cdot V A^{-1} \cdot \Delta c \Delta t^{-1} \cdot 273 T^{-1} \quad (1)$$

q는 가스밀도(mg m⁻³)이며, A는 챔버 바닥면적(m²), V는 챔버내 공기체적(m³), ΔcΔt⁻¹는 챔버내 가스농도의 평균 증가속도(10⁻⁶ m³ m⁻³ hr⁻¹) 그리고 T는 챔버내의 평균기온이다. N₂O의 q값(T=273 K)은 다음과 같다; q_{N₂O}=1.96, q_{N₂O-N}=1.25.

콩과 고추밭에서 N₂O 배출에 관여하는 요인들 중 N₂O 배출에 어느 정도 영향이 미치는가를 정량적으로 파악하기 위해 N₂O 배출에 대한 기여도를 평가하였다. N₂O 배출에 대한 기여도를 평가하기 위한 통계분석은 SPSS를 이용하여 다중회귀분석(multiple regression analysis)을 하였다. N₂O 배출에 대한 요인별 기여율은 관여하는 N₂O 배출 요인인 독립변수(무기태질소, 토양수분함량, 토양온도)들의 상관계수 값에 이들 각 각의 표준편회귀계수로 곱하여 백분율로 환산하였고, 결정계수는 기여율을 합하여 중상관계수의 제곱을 하였다.

결과 및 고찰

콩과 고추 재배기간 동안 토양수분과 토양온도와 N₂O 배출량의 경시적 변화는 Fig. 1과 같다. 콩과 고추 토양의 N₂O 배출량 변화는 전 생육기간 동안 토양수분과 토양온도의 변화와 유사한 양상을 보였다. N₂O 배출량은 토양수

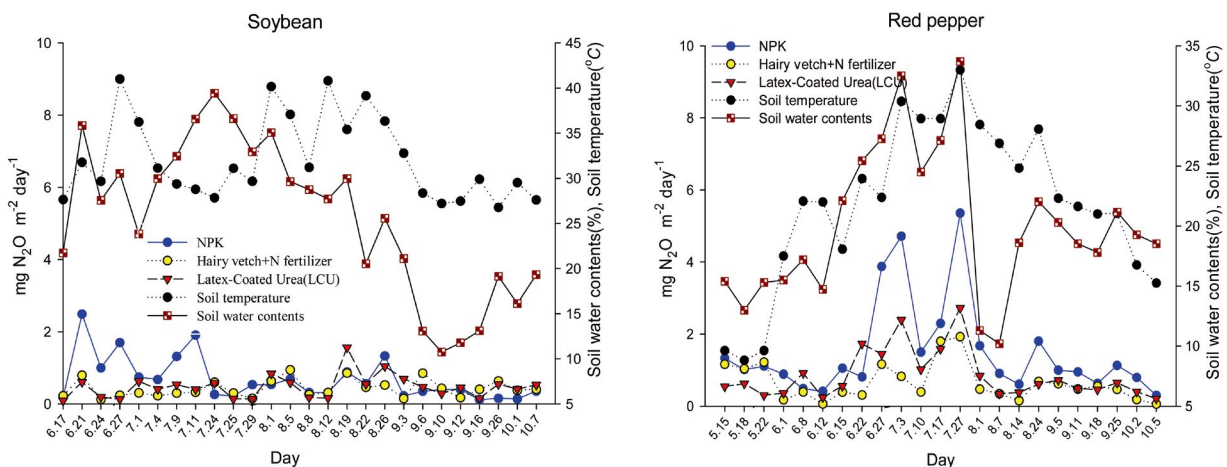


Fig. 1. Daily changes of soil water contents, soil temperature and soil N₂O in soybean and red pepper fields (all flux measurements included). Values are the mean of three replicates measured between 10:00 a.m. and 12:00 at sampling dates.

분 (Stevens *et al.* 1997; Arnone and Bohlen 1998; Hou *et al.* 2000; Kim *et al.* 2008)과 토양온도 (Gödde and Conrad 1999; Kim *et al.* 2008)와 정의 상관관계가 있어, 토양수분 함량이 많을수록 그리고 토양온도가 높을수록 N₂O 배출량이 많다고 하였다.

콩 재배 토양의 N₂O 배출량 변화는 생육 초기인 6월 중순 (6월 21일)부터 7월 중순 (7월 11일)까지 약한달 간은 NPK 처리에서 헤어리베치 + N 비료와 LCU효과지연성 복합비료 처리보다 배출량이 높게 나타났으며, 그 이후 생육중기부터 수확기까지 배출량은 다른 처리와 비슷한 배출량을 보였다. NPK 비료 사용 후 초기 생육기간에 질소 비료는 분해속도가 빨라서 N₂O 배출량이 높은 것으로 나타났다. 헤어리베치 + N 비료와 LCU효과지연성 복합비료 처리는 생육초기부터 수확기까지 전 생육기간 동안 NPK 비료처리에 비해 낮은 배출을 유지하였다. 고추 재배 토양의 N₂O 배출량 변화는 여름철인 6월 중순 (6월 27일)부터 8월 초순 (8월 1일)까지 높은 배출량을 보였고 NPK 화학비료 처리가 전 생육기간 동안 배출이 높게 나타났다.

콩과 고추 재배 토양에서 질소공급원 처리별로 N₂O 총 배출량은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 NPK 비료처리에서 가장 많은 배출량 (콩 0.98 kg ha⁻¹, 고추 2.35 kg ha⁻¹)을 보였고 LCU효과지연성 복합비료 처리 (콩 0.61 kg ha⁻¹, 고추 1.17 kg ha⁻¹) 다음으로 헤어리베치 + N 비료 처리 (콩 0.54 kg ha⁻¹, 고추 1.03 kg ha⁻¹)로 배출량이 적었다. LCU효과지연성 복합비료가 같은 화학비료인 NPK 처리보다 N₂O 배출량이 낮은 원인은 일시적 고농도 질소의 분해를 피하고 일정하게 질소성분이 용출되는 LCU효과지연성 질소비료의 특성 (LeMonte *et al.* 2016) 때문으로 생각된다. 또한 유기물 종류들 중에서 비교적 C/N율이 낮은 헤어리베치는 토양에서 유기물의 분해속도가 빨라 양분의 유효도와 비료이용효율이 높아서 온실가스 배출을 높이지만 (Cho *et al.* 2012; Alam *et al.* 2015) 유기물보다 NPK 화학비료가 분해속도가 더 빨라서 N₂O 배출량이 높게 나타난 것 (Alam *et al.* 2015)으로 판단된다.

N₂O 배출에 대한 기여도를 Table 3에 나타냈다. 결정계수는 콩 0.729, 고추 0.760의 결과를 얻었다. 따라서 N₂O 배출

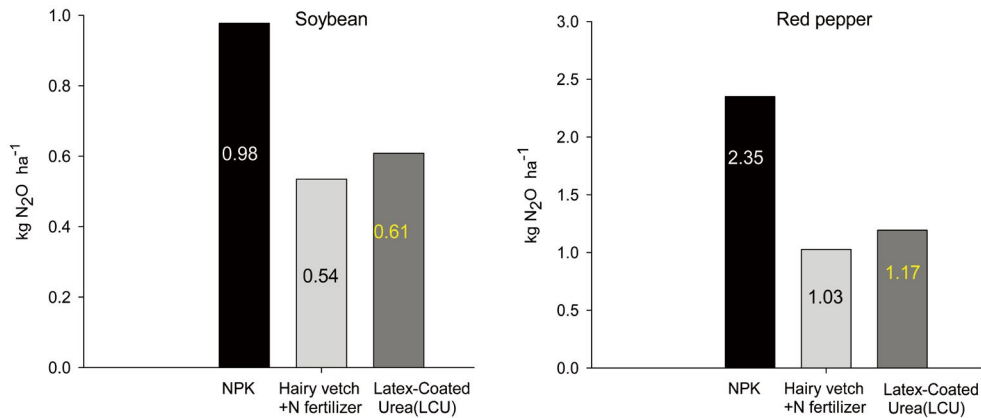


Fig. 2. Accumulated N₂O emission from soybean and red pepper fields by different fertilizers.

Table 3. Multiple regression analysis for contribution factors to N₂O in soybean and red pepper fields (**p* < .05, ***p* < .01; statistically significant at 0.5% and 1%)

| Crop | Factors | Standardized coefficients (β) | Pearson correlation coefficient (r) | Contribution rate (%) |
|------------|--------------------------------------|---|-------------------------------------|-----------------------|
| Soybean | Soil temperature (a) | 0.104* | 0.658** | 15.2 |
| | Soil water contents (b) | 0.144* | 0.710** | 19.2 |
| | N _{mineral} (c) | 0.689** | 0.865** | 65.5 |
| | Multiple correlation coefficient (R) | 0.837 | | |
| | R-square | 0.718 | | |
| | Multiple regression equation | y = 0.028a + 0.024b + 0.025c - 1.934 | | |
| Red pepper | Soil temperature (a) | 0.218* | 0.764** | 22.0 |
| | Soil water contents (b) | 0.288** | 0.859** | 28.8 |
| | N _{mineral} (c) | 0.492** | 0.891** | 51.2 |
| | Multiple correlation coefficient (R) | 0.869 | | |
| | R-square | 0.756 | | |
| | Multiple regression equation | y = 14.107a + 49.242b + 6.178c - 84.089 | | |

Table 4. Yield, fertilizer utilization efficiency and N₂O emission of soybean and red pepper fields from treatments

| Crop | Treatments | N source (kg ha ⁻¹) | Yield (ton ha ⁻¹) | *Fertilizer use efficiency (FUE) | N ₂ O emission (kg N ₂ O ha ⁻¹) |
|------------|------------------|---------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|---|
| Soybean | PK | 0 | 1.12 | | 0.35 |
| | NPK | 32 | 2.32 | 37.5 | 0.98 ^a |
| | NPK + hairy vech | 32 | 2.25 | 35.3 | 0.54 ^b |
| | LCU | 32 | 2.95 | 52.5 | 0.61 ^b |
| Red pepper | PK | 0 | 9.81 | | 0.35 |
| | NPK | 190 | 16.38 | 34.6 | 2.35 ^a |
| | NPK + hairy vech | 190 | 16.20 | 33.6 | 1.03 ^b |
| | LCU | 190 | 18.31 | 44.7 | 1.17 ^b |

*Fertilizer use efficiency (kg unhulled rice yield/kg of applied N): (Yield in respective treatment - Yield in PK)/(N fertilization rate)

에 대한 3개의 독립변수(무기태질소, 토양수분함량과 토양 온도)에 의해 콩에서 71.8%, 고추 75.6%를 설명할 수 있었다. N₂O 배출량과 토양온도, 토양수분함량 그리고 무기태질소의 상관 분석한 결과, 콩에서 각 0.658**, 0.710** 그리고 0.865**, 고추는 0.764**, 0.859** 그리고 0.891**으로 고도로 유의하여 N₂O 배출량에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. N₂O 배출에 영향을 미치는 요인은 콩에서 무기태질소(65.5%), 토양수분함량(19.2%), 토양온도(15.2%), 그리고 고추에서는 무기태질소(51.2%), 토양수분함량(28.8%), 토양온도(22.0%) 순으로 나타났으며, 두 작물 모두 무기태질소의 기여도가 가장 큰 것으로 나타나 N₂O 배출에 가장 큰 영향이 미치는 것으로 나타났다. Arone and Bohlen (1998)은 N₂O 배출량과 토양 수분함량과는 정의 상관관계가 있다고 하였으며, Dobbie *et al.* (1999)은 남부 스코틀랜드의 N₂O 배출량이 조사지역과 기후 차이에 관계없이 토양수분과 밀접한 관계가 있다고 하였다. 무기태질소, 토양수분, 토양온도는 밭 토양에서 N₂O 배출에 가장 영향을 미치는 요인들이다(Davidson *et al.* 1993; Parton *et al.* 1996; Wagner-Riddle *et al.* 1997; Lemke *et al.* 1998; Frolking *et al.* 1998; Jones 2007). Hellebrand *et al.* (2008)은 유채와 호밀 등 일년생작물에서 N₂O 배출량과 토양 중 무기태질소인 NO₃⁻-N은 정의 상관관계가 있으며, NO₃⁻-N이 높으면 N₂O 배출량도 많다고 하였다. 이와 같이 인위적으로 조절이 불가능한 토양온도를 제외하고 밭 토양에서 온실가스를 감축하기 위해서는 N₂O 배출에 큰 영향을 주는 토양수분과 무기태질소와 관계가 있는 질소시비량을 조절함으로써 가능하다고 생각된다. 세 가지 요인 중 N₂O 배출에 가장 크게 영향을 미치는 요인은 무기태질소(콩 65.5%, 51.2%), 토양수분함량(콩 19.2%, 고추 28.8%), 토양온도(콩 15.2%, 고추 22.0%) 순으로 나타났다. 즉, 무기태질소가 N₂O 배출에 가장 영향을 미치는 요인으로 분석되었으며, N₂O 배출에 기여하는 세 가지 요소 중 토양온도가 N₂O 배출에 대한 미치는 영향은 낮았다. 이는 고추와 콩

재배에서 N₂O 배출에 큰 영향을 주는 요인은 무기태질소이며 다음으로 토양수분이었다는 선행 연구결과와 일치하였다(Kim *et al.* 2010). Iserman (1994)은 농경지 토양에서 대기 로 배출되는 아산화질소의 양 가운데 81%가 질소비료에 의해 배출된다고 하였다. 농경지 토양에서 아산화질소 배출은 질산화작용이나 탈질작용 등 생물학적인 과정이 가장 중요하며, 토양에 요소를 사용할 때 요소의 가수분해로 방출되는 NH₄는 화학적 자급영양생물인 질화균에 의해 N₂O⁻와 NO₃⁻로 산화되고 이러한 질산화작용의 여러 과정을 통한 생화학 적 경로를 통해 N₂O와 NO를 배출한다(Firestone *et al.* 1989). 탈질균은 호흡내에 전자 수용체가 질산화 과정을 통해 질소산화물을 이용하고 N₂O와 N₂를 배출한다(Davidson *et al.* 1993). 그러므로 토양 내 무기태질소 공급을 조절하기 위해 LCU효과지연성 복합비료를 사용하여 아산화질소 배출량을 줄일 수 있는 효과를 기대할 수 있다.

Table 4는 콩과 고추 재배에서 비료공급원별 질소비료 이용효율을 나타낸 것이다. 수량은 질소 무처리구에서 콩이 1.12 ton ha⁻¹ 그리고 고추 9.81 ton ha⁻¹, NPK 처리에서 콩 2.32 ton ha⁻¹ 그리고 고추 16.38 ton ha⁻¹, NPK + 헤어리베치 처리에서 콩이 2.25 ton ha⁻¹ 그리고 고추 16.20 ton ha⁻¹, LCU 효과지연성 복합비료 처리에서 콩 2.95 ton ha⁻¹ 그리고 고추 18.31 ton ha⁻¹으로 가장 높았다. 질소비료 이용효율에서도 LCU효과지연성 복합비료 처리에서 콩 52.5와 고추 44.7로 가장 높았다. N₂O 배출량에서도 LCU효과지연성 복합비료와 NPK + 헤어리베치 처리에서 차이를 보이지 않았으며 수량과 질소비료이용효율 그리고 N₂O 배출량 등을 종합적으로 살펴보면, LCU효과지연성 복합비료 처리가 생산성 및 환경적인 면에서 가장 우수한 것으로 나타났다. 그러므로 토양내 무기태질소 공급을 조절하기 위해 LCU효과지연성 복합비료를 사용하여 아산화질소 배출을 줄일 수 있는 효과를 기대할 수 있다.

적 요

작물 재배시에 질소비료와 유기물인 헤어리베치 그리고 LCU효과지연성 복합비료 등 질소공급원별로 토양에 시용하여 N₂O 배출에 영향을 주는 요인들의 특성을 조사하였다. 그리고 그 요인들이 N₂O 배출에 얼마나 영향을 주는지를 정량적으로 밝히고 온실가스 배출의 영향 인자들에 대해 온실가스 감축 효과를 종합적으로 평가하였다.

N₂O 배출에 영향을 미치는 요인은 토양온도, 토양수분과 무기태질소 등이다. 이 세 가지 요인 중 N₂O 배출에 가장 크게 영향을 미치는 요인은 무기태질소(콩 65.5%, 51.2%) > 토양수분함량(콩 19.2%, 고추 28.8%) > 토양온도(콩 15.2%, 고추 22.0%) 순으로 나타났다. 수량과 비료이용효율은 LCU효과지연성 복합비료 처리에서 가장 높았다. N₂O 배출량은 LCU효과지연성 복합비료와 NPK + 헤어리베치 처리에서 차이를 보이지 않아 종합적인 결과는 수량과 비료이용효율 그리고 낮은 N₂O 배출량을 보인 LCU효과지연성 복합비료 처리가 가장 양호한 것으로 나타났다. 따라서 앞으로 N₂O 배출을 저감할 수 있는 토양 양분관리 기술 개발 연구가 확대 되면 온실가스 배출저감 대책에 도움이 될 것으로 기대할 수 있다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업(과제번호: PJ012614)의 지원에 의해 이루어진 것임

REFERENCES

- Alam F, TY Kim, SY Kim, SS Alam, P Pramanik, PJ Kim and YB Lee. 2015. Effect of molybdenum on nodulation, plant yield and nitrogen uptake in hairy vetch (*Vicia villosa* Roth). *Soil Sci. Plant Nutr.* 61:664-675.
- Arone JA and PJ Bohlen. 1998. Stimulated N₂O flux from intact grassland monoliths after two growing seasons under elevated atmospheric CO₂. *Oecologia* 116:331-335.
- Azeem B, KZ KuShaari, ZB Man, A Basit and TH Thanh. 2014. Review on materials & methods to produce controlled release coated urea fertilizer. *J. Control. Release* 181:11-21.
- Cho JL, HS Choi, Y Lee, SM Lee and SK Jung. 2012. Effect of organic materials on growth and nitrogen use efficiency of rice in paddy. *Korean J. Org. Agric.* 20:211-220.
- Davidson EA, PA Matson, PM Vitousek, R Riley, K Dunklin, G García-Méndez and JM Maass. 1993. Processes of regulating soil emissions of NO and N₂O in a seasonally dry tropical forest. *Ecology* 74:130-139.
- Denmead OT. 1979. Chamber systems for measuring nitrous oxide emission from soils in the field. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43:89-95.
- Dobbie KE, IP Mctagart and KA Smith. 1999. Nitrous oxide emissions from intensive agricultural systems: variations between crop and seasons, key driving variables, and mean emission factors. *J. Geophys. Res.-Atmos.* 104:26891-26899.
- Firestone MK and EA Davidson. 1989. Microbiological basis of NO and N₂O production and consumption in soil. In *Exchange of Trace Gases between Terrestrial Ecosystems and the Atmosphere* (Andreae and Schimel, eds.). Wiley, New York.
- Frolking SE, AR Mosier and DS Ojima. 1998. Comparison of N₂O emissions from soils at three temperate agricultural sites: simulations of year-round measurements by four models. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 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 HJ, V Scholz and J Kern. 2008. Fertilizer induced nitrous oxide emissions during energy crop cultivation on loamy sand soils. *Atmos. Environ.* 42:8403-8411.
- 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. *Chemosphere-Glob. Change Sci.* 2:321-327.
- IPCC. 1996. Revised IPCC guideline for national greenhouse gas inventories: Reference manual, revised in 1996. Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland.
- IPCC. 2007. Climate change 2007: The physical science basis: Summary for policymakers. Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland.
- 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.
- Jones SK, RM Rees, UM Skiba and BC Ball. 2007. Influence of organic and mineral N fertiliser on N₂O fluxes from a temperate grassland. *Agric. Ecosyst. Environ.* 121:74-83.
- Kim GY, SI Park and BH Song. 2002. Effects of water and nutrient management on methane and nitrous oxide emission from a rice paddy field. *Korean J. Environ. Agric.* 21:136-

- 143.
- Kim GY, BH Song, KA Roh, SY Hong, BG Ko, KM Shim and KH 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. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 41:399–407.
- Kim GY, KH So, HC Jeong, KM Shim, SB Lee and DB 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.* 43:880–885.
- Lemke RL, RC Izaurralde, SS Malhi, MA 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.
- LeMonte JJ, VD Jolley, JS Summerhays, RE Terry and BG Hopkins. 2016. Polymer coated urea in turfgrass maintains vigor and mitigates nitrogen's environmental impacts. *PLoS One* 11:e0146761.
- Matthias AD, DN Yarger and RS Weinbeck. 1978. A numerical evaluation of chamber methods for determining gas fluxes. *Geophys. Res. Lett.* 5:765–768.
- Minami K. 1987. Emission of nitrous oxide (N₂O) from agro-ecosystems. *Jpn. Agric. Res. Q.* 21:22–27.
- NIAS. 2010. *Methods of Soil Chemical Analysis*. National Institute of Agricultural Sciences, Sam-Mi press. pp. 13–290.
- Parton WJ, AR Mosier, DS Ojima, DW Valentine, DS Schimel, K Weier and AE Kulmala. 1996. Generalized model for N₂ and N₂O production from nitrification and denitrification. *Glob. Biogeochem. Cycle* 10:401–412.
- RDA. 2006. *Fertilizer Recommendation Standards for Various Crops*. Rural Development Administration, Sanglok-sa. pp. 16–17.
- Sakatar R, S Shimada, H Arai, N Yoshioka, R Yoshioka, H Aoki, N Kimoto, A Sakamoto, L Melling and K Inubushi. 2015. Effect of soil types and nitrogen fertilizer on nitrous oxide and carbon dioxide emissions in oil palm plantations. *Soil Sci. Plant Nutr.* 61:48–60.
- Sebacher DI and RC Harris. 1980. A continuous sampling and analysis system for monitoring methane fluxes from soil and water surfaces to the atmosphere. pp. 22–27. In *Proceedings of 73rd Annual Meeting of Air Pollution Control Assn in Montreal*. Montreal, Quebec.
- Seo YH, SW Kim, SC Choi, IJ Kim, KH Kim and GY Kim. 2012. Effect of green manure crop and biochar on nitrous oxide emission from red pepper field. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45:540–543.
- Shin YK, YS Lee, SH Yun and ME Park. 1995. A simplified closed static chamber method for measuring methane flux in paddy soils. *Korean Soc. Soil Sci. Fert.* 28:183–190.
- Stevens RJ, RJ Laughlin, LC Burns, JRM Arah and RC Hood. 1997. Measuring the contributions of nitrification and denitrification to the flux of nitrous oxide from soil. *Soil Biol. Biochem.* 29:139–151.
- Wagner-Riddle C, GW Thurtell, GE Kidd, EG Beauchamp and R Sweetman. 1997. Estimates of nitrous oxide emissions from agricultural fields over 28 months. *Can. J. Soil Sci.* 77:135–144.
- Yagi K, K Minami and Y Ogawa. 1990. Effects of water percolation on methane emission from paddy fields. *NIAES Res. Rep. Div. Environ. Planning* 6:105–122.
- Yagi K. 1991. Emission of biogenic gas compounds from soil ecosystem and effect of global environment: 2. Methane emission from paddy fields. *Soil Fert. Japan* 62:556–562.

Received: 20 November 2018

Revised: 18 December 2018

Revision accepted: 18 December 2018