

녹비작물과 바이오숯의 고추 재배지 아산화질소 배출량 저감 효과

서영호* · 김세원 · 최승출 · 김인종 · 김경희 · 김건엽¹

강원도농업기술원, ¹국립농업과학원

Effect of Green Manure Crop and Biochar on Nitrous Oxide Emission from Red Pepper Field

Youngho Seo*, Sewon Kim, Seungchul Choi, Injong Kim, Kyunghi Kim, and Gunyeob Kim¹

Gangwon Agricultural Research & Extension Services, Chuncheon 200-150, Korea

¹National Academy of Agricultural Science, RDA, Suwon 441-707, Korea

Atmospheric nitrous oxide (N₂O) level has been increasing at a rate of 0.2~0.3% per year. The rise in N₂O concentration in atmosphere was mainly due to an increased application of nitrogen fertilizers. The objective of the study was to assess the effect of green manure crop and biochar on N₂O emissions 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⁻¹, standard N fertilization rate for red pepper. Emissions of N₂O 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 N₂O emission of 1.14 kg N₂O-N ha⁻¹. 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.

Key words: Biochar, Greenhouse gas, Green manure crop, Nitrous oxide, Red pepper

서 언

대표적인 온실가스의 하나인 아산화질소의 지구 온난화 잠재력은 이산화탄소와 비교하여 약 300배 높는데, 대기의 아산화질소 농도는 매년 0.2~0.3%씩 높아지고 있다 (Saggar et al., 2009). Park et al. (2012)이 1940년부터 2005년까지 대기 중의 아산화질소의 방사성 동위원소 조성을 살펴본 결과, 아산화질소 농도 증가의 주된 요인은 농경지에 사용된 질소질 비료인 것으로 나타났다. 즉, 토양 미생물이 농경지에 사용된 질소질 비료나 가축 분뇨 퇴비를 질산화 과정과 탈질 과정을 거쳐 변환시키는데, 이 과정에서 부산물이나 중간 산물로 아산화질소가 만들어 진다 (Freney, 1997; Singh and Tyagi, 2009). Gu et al. (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 et al. (2008)은 고추 재배지에서의 아산화질소 배출에 영향

을 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 et al. (2003)은 콩 작기중 아산화질소 배출량은 3.0~4.7 kg N₂O ha⁻¹라고 하였는데, Kim et al. (2010)에 따르면 콩 재배지에서의 아산화질소 배출에 영향을 미치는 요인은 무기태 질소 (66%), 토양 수분 (19%), 토양 온도 (15%) 순이었다.

국가적으로 온실가스를 줄이려는 정책을 펴고 있는 가운데, 농업 부문에서는 농경지로부터의 온실가스 배출량을 줄이려는 노력이 필요하다. 녹비작물을 재배하면 질소질 비료의 사용량을 줄일 수 있으며, 바이오숯을 사용하면 아산화질소의 배출량을 줄일 수 있음을 보여주는 연구 결과들이 보고되고 있다 (Yanai et al., 2007). 따라서 본 논문에서는 녹비작물인 헤어리베치와 바이오숯이 밭작물의 하나인 고추 재배지에서의 아산화질소 배출량을 얼마나 줄일 수 있는지 살펴보고, 그 결과를 보고하고자 하였다.

접수 : 2012. 7. 16 수리 : 2012. 8. 14

*연락처 : Phone: +82332486096

E-mail: seoys@korea.kr

재료 및 방법

강원도농업기술원의 노지 포장에서 고추 (*Capsicum annuum* L.)를 재배하면서 온실가스 시료를 채취하여 분석하였다. 포장의 토양은 규암토 (coarse silty, mixed, nonacid, mesic Aquic Fluventic Eutrochrepts)으로, 시험을 시작하기 전의 토양 화학성을 Table 1에 나타내었다. 고추에 대한 질소 표준시비량인 10a당 19 kg을 요소로 사용한 구를 대조구로 하였으며, 녹비작물인 헤어리베치를 처리한 구, 헤어리베치와 질소질 비료 반량 (9.5 kg 10a⁻¹)을 사용한 구, 바이오숯과 질소질 비료를 10a당 19 kg 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 774 kg이었다. 헤어리베치를 처리구당 13 kg씩 동일하게 처리하였는데, 이 때의 수분 함량은 84.2%로 건물중 기준으로는 처리구당 2.1 kg이었다. 바이오숯은 홍천에 소재한 참숯 가마에서 구입한 백탄을 10a당 1,000 kg 수준으로 처리하였다. 본 시험에 쓰인 헤어리베치와 바이오숯의 화학 조성을 Table 2에 나타내었다.

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

을 이용하였으며, 5% 수준에서 통계적 유의성을 검토하였다.

아산화질소의 분석을 위한 시료 채취는 온실가스 연구에서 일반적으로 쓰이고 있는 챔버법을 이용하였으며 (Kim et al., 2006; Kim et al., 2008; Saggar et al., 2009; Kim et al., 2010; Seo et al., 2012), 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. 아산화질소의 분석은 전자포획검출기 (ECD)를 장착한 가스크로마토그래프 (Varian GC 450, USA)를 이용하였다 (Seo et al., 2012). 아산화질소의 배출량은 다음 식을 이용하여 계산하였다 (Shin et al., 2003; Kim et al., 2008; Kim et al., 2010; Seo et al., 2012).

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

여기에서 F는 아산화질소 배출량 (mg m⁻² h⁻¹)이며, ρ는 아산화질소의 밀도인 1.96 mg m⁻³이고, V와 A는 각각 챔버의 체적 (m³)과 면적 (m²)이며, Δc·Δt⁻¹는 챔버 내에서의 시간당 아산화질소 농도의 평균 증가량이고, T는 챔버내 평균 온도 (°C)에 273을 더한 값이다. Parkin et al. (2012)에 따르면, 챔버법을 이용한 온실가스 측정에서 직선 회귀 방법이 검출 한계가 낮고 분석 정도와 시료 채취 시간에 대한 민감도가 낮았다.

Table 1. Selected soil chemical characteristics of the field before the study.

pH	EC	OM	Avail. P ₂ O ₅	Exch. Cation		
				K	Ca	Mg
(1:5)	dS m ⁻¹	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	cmol ⁺ kg ⁻¹		
6.4	0.18	16	547	0.46	5.2	1.4

Table 2. Chemical composition of the hairy vetch and biochar used in the study.

	T-N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
	g kg ⁻¹				
Hairy vetch	44.1	11.8	43.0	18.0	6.7
Biochar	3.6	1.1	6.7	11.5	0.8

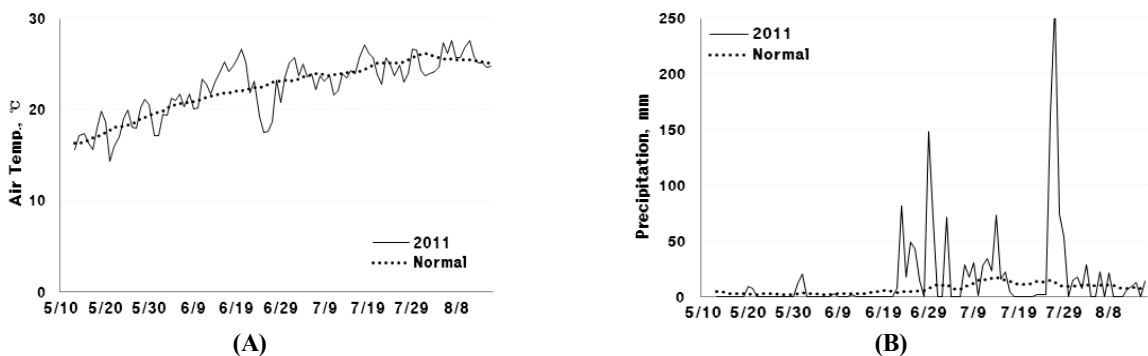


Fig. 1. Mean air temperature (A) and precipitation (B) during the study period compared with normal data (1981~2010).

시험 기간 동안의 평균 기온과 강수량을 평년 (1981~2010년) 과 비교하여 Fig. 1에 나타내었다. 시험 기간의 평균 기온은 22.5°C로 평년과 같았으나, 강수량은 1,565 mm로 평년 기록인 725 mm의 두 배 이상이었다.

결과 및 고찰

시험 기간 동안의 아산화질소 배출 양상 결과는 Fig. 2와 같았다. 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 et al. (2008)과 Kim et al. (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 et al. (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.

질소질 비료를 표준 시비량인 10a당 19 kg 처리한 구에서 약 3개월 동안에 누적된 아산화질소 배출량은 1.14 kg N₂O-N ha⁻¹이었으며, 질소원을 처리하지 않은 무시용구에서의 아산화질소의 배출량은 0.16 kg N₂O-N ha⁻¹였다 (Fig. 3). 질소질 비료 처리구의 아산화질소 배출계수는 0.0057로서 IPCC (2006)에서 정한 배출계수인 0.01보다 낮은 편이었다. 시험 기간 동안의 강수량은 평년의 2배 이상 (Fig. 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 et al., 1998). 따라서 과도한 강수량에 의한 너무 높은 토양 수분 함량으로 아산화

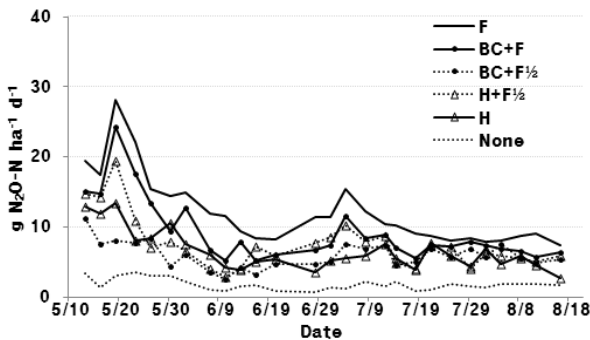


Fig. 2. N₂O emission flux from red pepper field. F, BC, and H denote nitrogen fertilizer, biochar and hairy vetch, respectively. F and F_{1/2} denote standard nitrogen fertilization and half fertilization, respectively.

질소 배출량이 낮아졌을 가능성을 배제할 수 없었다. 한편, 본 연구의 배출계수 0.0057은 콩의 0.0202 (Yang et al., 2012a)보다 낮으나, 당근의 0.0025 (Yang et al., 2012b)보다 높은 값이었다.

헤어리베치와 바이오숯+질소질 비료 처리구의 아산화질소 배출량은 각각 0.61 kg N₂O-N ha⁻¹과 0.86 kg N₂O-N ha⁻¹로서, 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 et al., 2008; Kim et al., 2010; Yang et al., 2012a; Yang et al., 2012b). 한편, 표준 시비량의 반량에 해당하는 질소질 비료를 각각 헤어리베치와 바이오숯과 함께 처리한 구에서의 아산화질소 배출량은 각각 0.70 kg N₂O-N ha⁻¹과 0.56 kg N₂O-N ha⁻¹이었다. 헤어리베치는 질소 함량이 높은 콩과 작물로서 질소원으로 작용하여 토양 중의 무기태 질소 함량을 높여 아산화질소 배출량이 높았던 것으로 사료된다.

Yanai et al. (2007)은 바이오숯을 무게 비로 10%를 처리하였을 때 아산화질소 배출량이 105 μg N₂O-N m⁻²에서 11 μg N₂O-N m⁻²로 줄어들었다고 보고하였다. Zwieten et al. (2009)은 바이오숯 처리가 아산화질소로부터 질소 가스로 환원시키는 효소 활성을 높이거나, 토양 통기성을 높여 탈질균의 활성에 영향을 미치거나, 토양 pH를 높여 아산화질소 환원효소의 활성을 높이고 N₂O/N₂ 비를 낮추거나, 탈질균의 활성에 필요한 유효태 탄소를 흡착하여 줄이거나, 전자수용체의 공급에 변화를 주거나, 바이오숯이 아산화질소를 흡착한 다음 질소 가스로 환원하거나, 아산화질소가 바이오숯에 흡착된 방향족 탄소 화합물을 산화시키면서 자

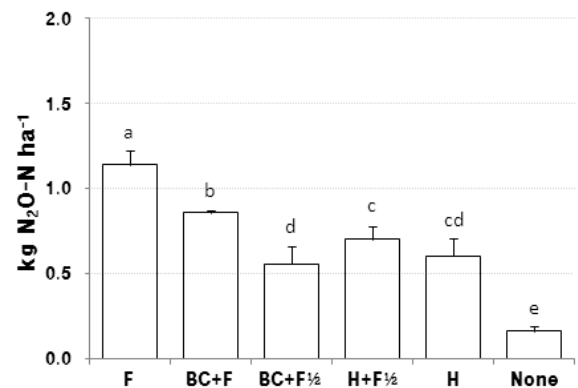


Fig. 3. N₂O emission from red pepper field. F, BC, and H denote nitrogen fertilizer, biochar and hairy vetch, respectively. F and F_{1/2} denote standard nitrogen fertilization and half fertilization, respectively. Error bars indicate standard deviation. Treatments with same letter are not significantly different at the 0.05 probability level.

신은 질소 가스로 환원하여 아산화질소의 배출량을 줄이는 것으로 추정하였다.

요 약

농업 부문에서 온실가스 배출량을 줄이기 위하여 녹비작물인 헤어리베치와 바이오숯을 이용하였을 때 밭작물 재배지에서 아산화질소 배출량 저감 효과를 평가하였다. 질소 사용량은 고추의 표준 시비량인 190 kg ha⁻¹이었으며, 주 2회 시료를 채취하여 GC/ECD로 아산화질소를 분석하였다. 대조구인 질소질 비료(요소) 처리구의 아산화질소 배출량은 1.14 kg N₂O-N ha⁻¹이었으며, 헤어리베치와 바이오숯+질소질 비료 처리구의 아산화질소 배출량은 각각 0.61 kg N₂O-N ha⁻¹과 0.86 kg N₂O-N ha⁻¹로 온실가스 배출을 각각 46.5%와 24.6% 줄였다.

사 사

본 논문은 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ006783052012)의 지원에 의해 이루어졌습니다.

인 용 문 헌

- Freney, J.R. 1997. Emission of nitrous oxide from soils used for agriculture. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 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). 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.
- 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 N₂O 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.
- 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.
- Stehfest, E. 2008. Modelling of Global Crop Production and Resulting N₂O Emissions. VDM Verlag Dr. Müller, Saarbrücken, Germany.
- Yanai, Y., K. Toyota, and M. Lkazaki. 2007. Effect of charcoal addition on N₂O 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 N₂O 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 N₂O in the Jeju black volcanic ash soil with carrot cultivation. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45:459-465.
- Zwieten, L.V., B. Singh, S. Joseph, S. Kimber, A. Cowie, and K.Y. Chan. 2009. Biochar and emissions of non-CO₂ greenhouse gases from soil. In Lehmann, J. and Joseph, S. (eds.): Biochar for Environmental Management. Earthscan, London, UK. p. 227-249.