

Short Communication



CrossMark

Open Access

질소비료의 심층시비에 의한 논과 밭 토양의 암모니아 배출 억제 효과

홍성창*, 김민욱, 김진호

농촌진흥청 국립농업과학원 기후변화평가과

Reducing the Effect of Ammonia Emissions from Paddy and Upland Soil with Deep Placement of Nitrogen Fertilizers

Sung-Chang Hong*, Min-Wook Kim, Jin-Ho Kim (Climate Change & Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea)

Received: 21 September 2022/ Revised: 28 October 2022/ Accepted: 3 November 2022

Copyright © 2022 The Korean Society of Environmental Agriculture

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ORCID

Sung-Chang Hong

<https://orcid.org/0000-0002-9042-1284>

Min-Wook Kim

<https://orcid.org/0000-0001-8262-5909>

Jin-Ho Kim

<https://orcid.org/0000-0002-5266-1586>

Abstract

BACKGROUND: Ammonia gas emitted from nitrogen fertilizers applied in agricultural land is an environmental pollutant that catalyzes the formation of fine particulate matter (PM_{2.5}). A significant portion (12-18%) of nitrogen fertilizer input for crop cultivation is emitted to the atmosphere as ammonia gas, a loss form of nitrogen fertilizer in agricultural land. The widely practiced method for fertilizer use in agricultural fields involves spraying the fertilizers on the surface of farmlands and mixing those with the soils through such means as rotary work. To test the potential reduction of ammonia emission by nitrogen fertilizers from the soil surface, we have added N, P, and K at 2 g each to the glass greenhouse soil, and the ammonia emission was analyzed.

METHODS AND RESULTS: The treatment consisted of non-fertilization, surface spray (conventional fertilization), and soil depth spray at 10, 15, 20, 25, and 30 cm. Ammonia was collected using a self-manufactured vertical wind tunnel chamber, and it was quantified by the indophenol-blue method. As a result of analyzing ammonia emission after fertilizer treatments by soil depth, ammo-

nia was emitted by the surface spray treatment immediately after spraying the fertilizer in the paddy soil, with no ammonia emission occurring at a soil depth of 10 cm to 30 cm. In the upland soil, ammonia was emitted by the surface spray treatment after 2 days of treatment, and there was no ammonia emission at a soil depth of 15 cm to 30 cm. Lettuce and Chinese cabbage treated with fertilizer at depths of 20 cm and 30 cm showed increases of fresh weight and nutrient and potassium contents.

CONCLUSION(S): In conclusion, rather than the current fertilization method of spraying and mixing the fertilizers on the soil surface, deep placement of the nitrogen fertilizer in the soil at 10 cm or more in paddy fields and 15 cm or more in upland fields was considered as a better fertilization method to reduce ammonia emission.

Key words: Ammonia(NH₃), Fertilizer deep placement, Nitrogen, Reduction, Soil depth

서론

대기오염물질 배출량 통계인 환경부의 2019년 대기환경정책지원시스템(CAPSS) 자료에 따르면 우리나라 암모니아의 배출량은 연간 316,299톤이었고 이 중 79.8%인 244,335톤이 농업부문에서 배출되었다. 비료를 사용하는 농경지의 배출량은 5.9%인 연간 18,799톤이다. 암모니아 기체는 공기 중에서

* Corresponding author: Sung-Chang Hong
Phone: +82-63-238-2501; Fax: +82-63-238-3824;
E-mail: schongcb@korea.kr

초미세먼지(PM2.5)를 형성하는데 촉매로 작용하는 국가가 관리하는 9대 대기오염 물질 중 하나로 배출량을 줄일 필요가 있다. 영농현장에서 작물재배 전 농작물에 질소비료를 공급하는 방법은 토양표면에 살포 후 로터리 작업 등으로 토양입자와 혼합하여 주는 토양표면 살포 방법이다. 이 토양표면 살포 방법은 토양의 pH, 수분함량, 온도 등의 영향을 받아 질소성분의 12-18%가 암모니아 기체로 휘산되어 배출되는 문제점이 있다[1]. 질소는 농경지에서 작물재배를 위해 반복적으로 사용되는 필수적인 양분이다. 최근 글로벌 공급망 차질로 질소를 함유한 요소비료의 가격이 폭등한 바 있다. 2017년 농림축산식품부에 의하면 우리나라 질소비료의 사용량은 연간 21.6만 톤이며 2019년 OECD 농업환경지표에 따르면 질소수지는 228 kg·ha⁻¹이다. 농경지 단위면적 당 화학비료 사용량은 313.2 kg·ha⁻¹로 OECD 회원국 중 2위에 해당한다.

논에서 질소비료를 산화층에서 환원층까지 투입하기 위하여 전층시비(全層施肥)를 시행하고 있으나, 실제적으로는 로터리 날의 길이인 10-15 cm 깊이 정도 얇은 층에서만 비료와 토양이 혼합되고 있다고 볼 수 있다. 이에 따라 논에 사용한 질소비료는 암모니아로 휘산되고 산화층에서 질산화(nitrification), 환원층에서 탈질작용(denitrification)에 의해 일산화질소, 아산화질소, 질소와 같은 질소성 기체로 배출되어 흡수율이 낮은 문제점이 있다. 벼 재배를 위해 논에 투입된 질소비료가 암모니아 휘산, 강우 유출수에 의한 유실 등으로 손실되는 잠재비율은 총 유입량의 36.7%로 추산된다[2]. 또한 산화상태인 밭 토양에 살포된 질소비료는 질산으로 쉽게 변하여 강우에 의한 유출수 등으로 유실될 수 있다. 따라서, 본 연구는 암모니아 배출을 억제하는 비료 살포 방법을 개발하기 위한 기초자료를 얻기 위하여 수행하였다.

재료 및 방법

본 연구는 2021년 10월부터 2022년 6월까지 전북 완주군 이서면에 소재한 국립농업과학원의 유리온실과 시험포장에서 수행하였다.

토양 깊이별 질소비료 처리

질소비료를 토양 깊이별 처리하기 위하여 직경 17 cm, 높이 50 cm, 표면적 200 cm²의 아크릴 토양칼럼을 제작하여 사용하였다. 처리내용은 무비, 표면살포, 토양깊이 10, 15, 20, 25 및 30 cm였다. 토양칼럼 상부로부터 토양 깊이 10, 15, 20, 25 및 30 cm에 요소, 용성인비, 염화칼리를 이용하여 N:P:K를 각각 2 g:2 g:2 g을 처리한 후 토양을 덮어 토양의 무게가 논 토양은 14 kg, 밭 토양은 13 kg이 되도록 하였다.

여기서 질소 성분 2 g·200 cm²은 1,000 kg·ha⁻¹에 해당하는 양으로 벼의 기비 표준시비량의 20배, 상추 기비 표준시비량의 10배, 배추 기비 표준시비량의 9배에 해당하는 양이다. 본 연구에서는 질소비료의 심층시비에 의한 암모니아 배출량을 억제하는 기술을 개발하기 위한 기초연구로서 작물별 질소비료 표준시비량보다 과다할 정도로 많은 양을 투입하여 배출량을 산정하였다. 관행시비 방법인 표면살포는 토양표면에 비료를 살포 후 토양입자와 잘 섞이도록 혼합하였다. 본 실험에서 사용된 밭 토양은 국립농업과학원 내 저기산에서 채취한 산적으로 밭토양으로 조성된 후 작물재배 기간이 짧은 토양으로 유기물 함량과 양분함량이 낮은 특성이 있다. 본 실험에 사용된 논 토양과 밭 토양의 실험 전 이화학성은 Table 1과 같다.

암모니아 포집 및 배출량 산정

토양 표면으로부터 배출되는 암모니아는 2022년 5월 14일부터 2022년 6월 13일까지 30일간 자체 제작한 수직형 윈드터널 챔버(Wind tunnel chamber)를 이용하여 포집하였다. 수직형 윈드터널챔버는 직경 17 cm, 높이 100 cm로 제작하여 상기한 아크릴 토양칼럼 위에 부착하였고 풍속은 0.7 m·sec, 분취 유량은 2 L·min로 하였다. 분취한 공기는 0.5% boric acid에 접촉시켜 암모니아를 24시간 포집하였고, 환경부 대기오염 공정시험법인 Indophenol-blue 측정법으로 정량 분석하였다. 포집한 시료는 실험실에서 증류수를 추가하여 250 ml로 맞춘 후 시료용액으로 사용하였으며, 분석용 시료 용액 10 ml에 페놀-니트로프루시드나트륨 용액과 차아염소산나트륨 용액을 각각 5 ml씩 넣고 상온에서 1시간 반응 후 분광광도계(biochrom, libra S-70)로 640 nm 파장에서 흡광도를 측정하여 정량하였다. 암모니아 배출량은 Hong [3] 등의 산정법에 준하여 산정하였다.

상추와 배추 재배

심층시비에 의한 작물의 생장반응을 조사하기 위하여 상추와 배추 재배실험을 수행하였다. 심층시비 처리는 1.44 m² 면적의 맨홀 형태의 콘크리트 포트에 인력으로 토양 깊이 20 cm와 30 cm를 파내어 폭이 약 3~4 cm의 골을 만든 후 해당량을 시비한 후 복토하였다. 심층시비 효과만을 조사하기 위하여 상추의 시비량은 기비 표준시비량인 N:P:K 10:5.9:6.4 kg·10a 해당량으로 처리하고 토양표면에 처리하는 웃거름은 사용하지 않았다. 상추는 2021년 8월 19일에 정식한 후 10월 12일까지 53일간 재배한 후 생육조사하였다. 배추의 시비량도 심층시비 효과를 조사하기 위하여 기비 표준시비량인 N:P:K 11:7.8:11 kg·10a 해당량으로 처리하고 토양표면에 처리하는 웃거름은 사용하지 않았다. 배추는 2022년 8월 25일 정식하여 11월 10

Table 1. Chemical property of soil used in lab experiment

Soil type	pH (1:5)	EC (dS·m ⁻¹)	OM (g kg ⁻¹)	Available P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	T-N (%)	mg kg ⁻¹		Ex. Cations (cmol kg ⁻¹)			
						NO ₃ -N	NH ₄ -N	Ca	K	Na	Mg
Paddy	6.7	0.35	21.9	43.7	0.96	4.5	6.4	6.57	0.33	0.14	2.42
Upland	5.6	0.29	4.6	70.3	0.61	17.9	3.8	4.00	0.24	0.12	1.54

Table 2. Chemical property of soil used in field experiment

pH (1:5)	EC (dS/m ⁻¹)	OM (g kg ⁻¹)	Available P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	T-N (%)	mg kg ⁻¹		Ex. Cations (cmol kg ⁻¹)			
					NO ₃ -N	NH ₄ -N	Ca	K	Na	Mg
4.7	0.33	1.3	23.2	0.01	10.4	68.3	0.61	0.29	0.05	0.72

일까지 75일간 재배하였다. 배추의 엽록소 함량은 SPAD 502 (Minolta, Japan)로 동일한 엽위의 앞에서 측정하였다. 상추 생육조사시 엽수는 5 cm 이상 크기의 잎을 조사하였다. 본 실험에 사용된 토양은 국립농업과학원 내 저기산에서 채취한 산적토로 작물의 재배가 없던 토양으로 유기물 함량과 양분 함량이 낮은 특성이 있다. 실험 전 밭 토양의 이화학적은 Table 2와 같다.

데이터 통계처리

상추와 배추 생육조사 자료는 통계패키지 R을 이용하여 최소유의차 검정(Least Significant Differences Test)을 수행하였다.

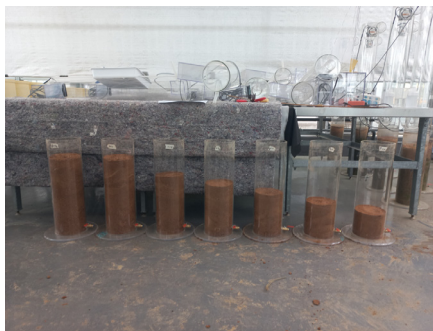
결과 및 고찰

토양 깊이별로 질소비료를 투입하고 암모니아 배출량을

산정하기 위한 실험전경은 Fig. 1과 같고 2022년 5월 14일부터 6월 13일까지 측정한 토양깊이별 논 토양과 밭 토양의 암모니아 배출량은 Fig. 2와 같다.

논 토양의 표면살포 처리구에서 30일간 포집한 암모니아 배출량은 70.1 kg·ha⁻¹로 산정되었으며 토양깊이 10 cm 이상 깊이의 심층시비 처리구에서 암모니아 배출이 없었다. 밭 토양의 표면살포 처리구에서 30일간 포집한 암모니아 배출량은 77.0 kg·ha⁻¹로 산정되었으며 토양깊이 15 cm 이상 깊이의 처리구에서 암모니아 배출이 없었다.

Yao [4]는 벼 논에서 10 cm 깊이에 심층시비하면 표면살포보다 암모니아의 배출량이 93% 감소한다고 하였다. Wu [5]는 밭 토양에서 토양 깊이 10-35cm에 질소비료를 처리하면 표면 5 cm 깊이 처리보다 암모니아의 배출이 28-55% 감소한다고 하였고 암모니아 배출량은 토양깊이 5 cm에서 투입 질소량의 11.4-13.1%, 토양 깊이 35 cm에서 0.03-0.04%라 했다. 여기서 대조 처리구는 표면살포가 아닌 토양 깊이 5 cm에 줄

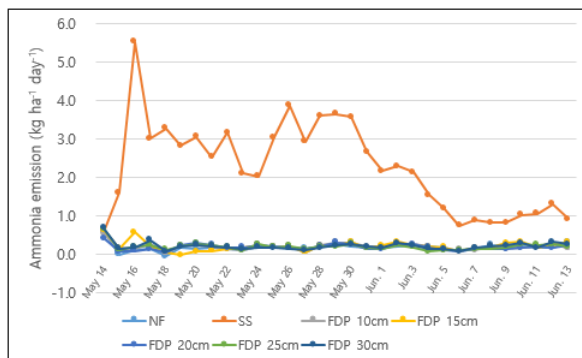


(fertilizer treatment by soil depth)

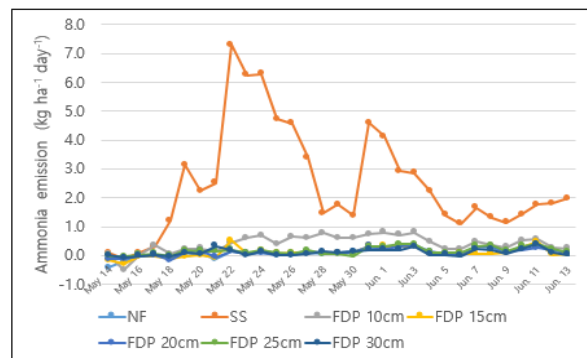


(ammonia trapping by using vertical wind tunnel chamber)

Fig. 1. Scene of lab experiment.



(paddy soil)



(upland soil)

Fig. 2. Reducing effects of fertilizer deep placement on ammonia emission in paddy soil and upland soil.

NF : No fertilization, SS : Surface spray, FDP : Fertilizer deep placement

뿌림 처리한 것으로 본 실험의 대조 처리구의 표면살포 방법과는 차이가 있다.

암모니아 포집 후 요소처리 토양 깊이별로 토양을 채취하여 논 토양과 밭 토양의 NO_3^- -N과 NH_4^+ -N 농도를 분석한 결과는 Fig. 3과 같다. 논 토양의 NO_3^- -N 농도는 표면처리구보다 토양 깊이 10 cm 처리부터 토양 깊이 30 cm 처리구까지 감소하였고 NH_4^+ -N 농도는 표면처리구보다 토양 깊이 10 cm 처리부터 토양 깊이 30 cm 처리구까지 증가하였다. 밭 토양의 NO_3^- -N 농도는 표면처리구보다 토양 깊이 10 cm 처리구에서 증가하고 토양 깊이 20 cm부터 토양 깊이 30 cm 처리구까지 감소하였다. NH_4^+ -N 농도는 토양 깊이 10 cm 처

리에서 증가하거나 토양 깊이 30cm 처리구 까지 감소하였다. 여기서 심층시비 처리에 의해 논 토양과 밭 토양의 NO_3^- -N 농도가 감소한 것은 처리한 요소비료가 함유한 암모늄태 질소의 산화가 억제되었기 때문으로 추정된다.

논 토양 10 cm와 밭 토양 15cm 이하의 깊이에서 심층시비하면 암모니아 배출이 없는 것은 토양 속의 산소와의 접촉이 줄어들기 때문으로 추정된다. 추가 실험에서 증류수에 질소 비료를 동일한 양 투입하고 폭기하여 공기의 공급량이 증가했을 때 암모니아 휘산량이 미량 증가한 것, 혐기상태인 논 토양에서 10 cm 이상의 깊이에서, 산화상태인 밭 토양에서는 15 cm 이상의 깊이에서 암모니아의 배출량이 억제된 것 등으로

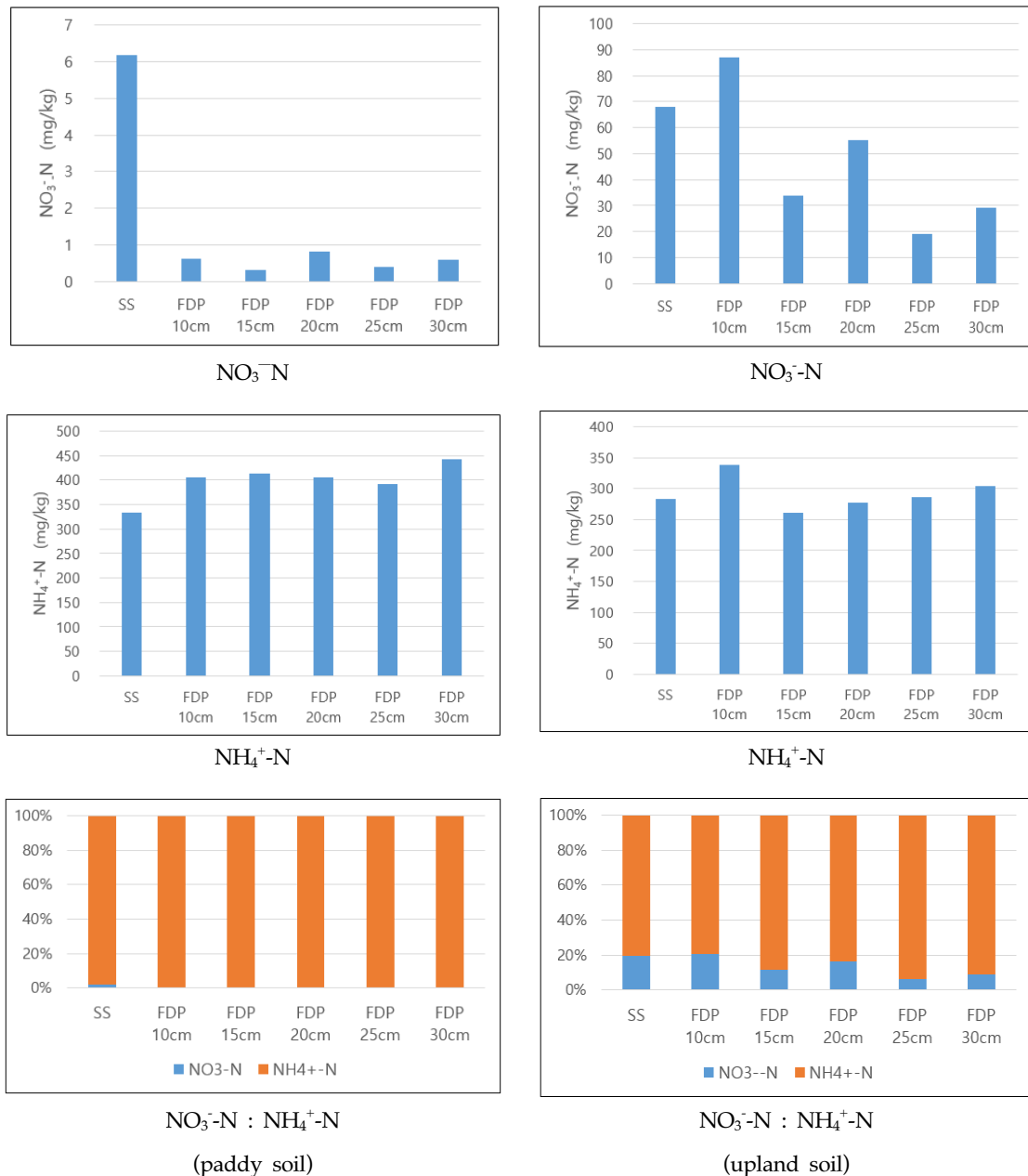


Fig. 3. Concentration change of NH_4^+ -N and NO_3^- -N in the soil after 30 days of urea fertilizer treatment by soil depth. One repeat mineral analysis, SS : Surface spray, FDP : Fertilizer deep placement

볼 때 질소비료가 위치해 있는 곳의 산소와의 접촉 여부와 관련되고 또, 토양수분에 의한 암모니아 기체의 NH₄⁺-N로의 재생성 등이 관련된 것으로 추정되며 기작에 관한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

심층시비 처리하고 재배 후 상추와 배추의 생육을 조사한 결과는 Fig. 4와 Table 3과 같다.

상추는 토양깊이 20 cm, 30 cm 에 심층시비 처리로 생장이 촉진되어 표면살포 처리구보다 상추의 잎수 25-57%, 생체중이 유의하게 증가하였다. 배추는 토양깊이 20 cm, 30 cm에 심층시비 처리로 표면살포 처리구보다 배추의 생체중이 56-230%, 엽록소 함량의 간지 지표인 SPAD는 39-52%로 유의하게 증가하였다.

Zhu [6]는 토양 깊이 5 cm에 이양과 동시에 측조시비하

면 표면살포보다 비의 수량이 3.6-4.3% 증가한다고 하였고, Zhu [7]는 비 이양과 동시에 토양 깊이 5 cm에 심층시비하면 표면살포보다 질소흡수율이 62-91% 증가하고 비의 수량이 6-11% 증가한다고 하였다. Li [8]는 비 이양시 측조시비로 토심 10 cm에 심층시비하면 표면살포 보다 질소이용율이 24% 향상되고 비의 수량은 55% 증가한다 하였다.

상추와 배추 재배 후 식물체의 양분함량을 분석한 것은 Fig. 5와 같다. 상추는 표면살포 처리구보다 심층시비 30 cm 처리가 질소와 칼리 성분의 함량이 높았고, 배추는 표면살포 처리구보다 심층시비 20 cm, 30 cm 처리가 질소와 칼리, 인산의 함량이 높은 경향을 나타냈다. 따라서 심층시비 처리로 질소, 칼리, 인산 성분의 흡수가 향상되어 상추와 배추의 생장이 촉진되고 생체량이 증가한 것으로 보인다.

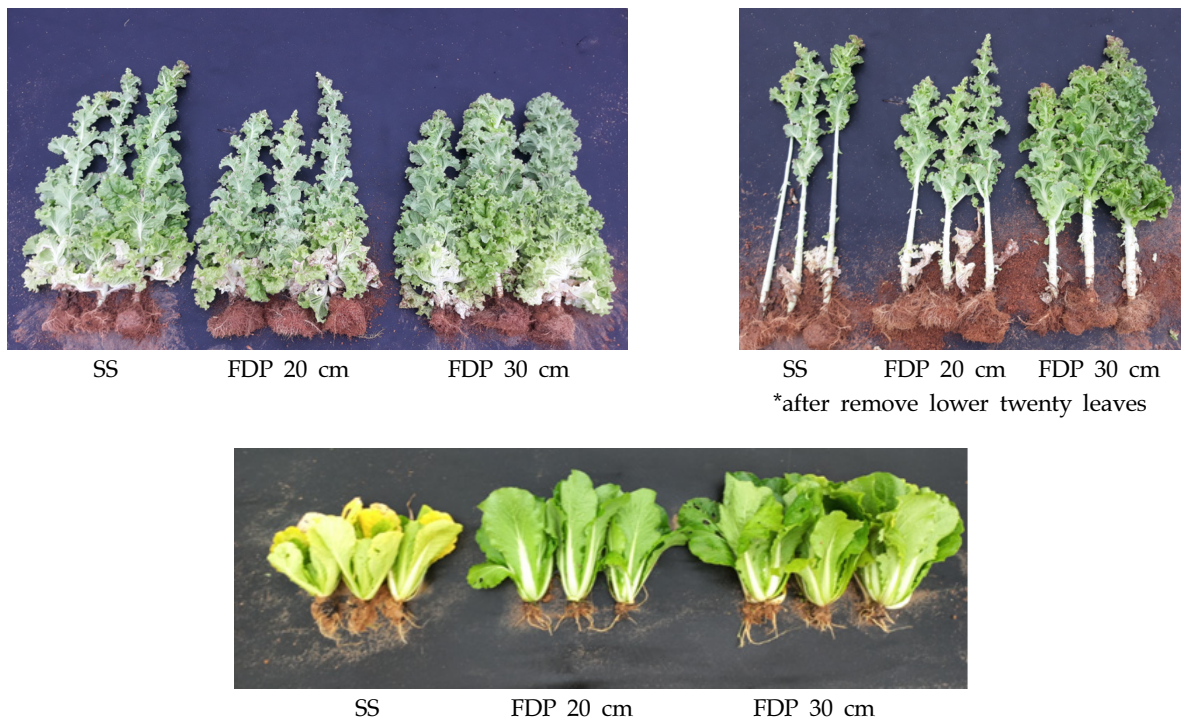


Fig. 4. Effects of fertilizer deep placement on growing responses of lettuce and Chinese cabbage.

SS: Surface spray, FDP: Fertilizer deep placement

Table 3. Effects of fertilizer deep placement on growing responses of lettuce and Chinese cabbage

Treatment	lettuce		Chinese cabbage	
	leaf number (no. plant)	fresh weight (g/plant)	SPAD	fresh weight (g/plant)
No fertilization	10.0 d	4.9 c	21.3 b	35.2 c
Surface spray	21.0 c	119.3 b	23.1 b	109.2 bc
FDP 20 cm	26.3 b	130.6 b	32.1 a	170.1 b
FDP 30 cm	33.0 a	250.7 a	35.7 a	360.3 a
LSR*	3.3	77.0	5.7	79.9
LSD** 5%	*	*	*	*

FDP: Fertilizer deep placement, * Least significant reange, ** Least Significant Test, Letters on the column represent significantly difference at LSD 5% probability

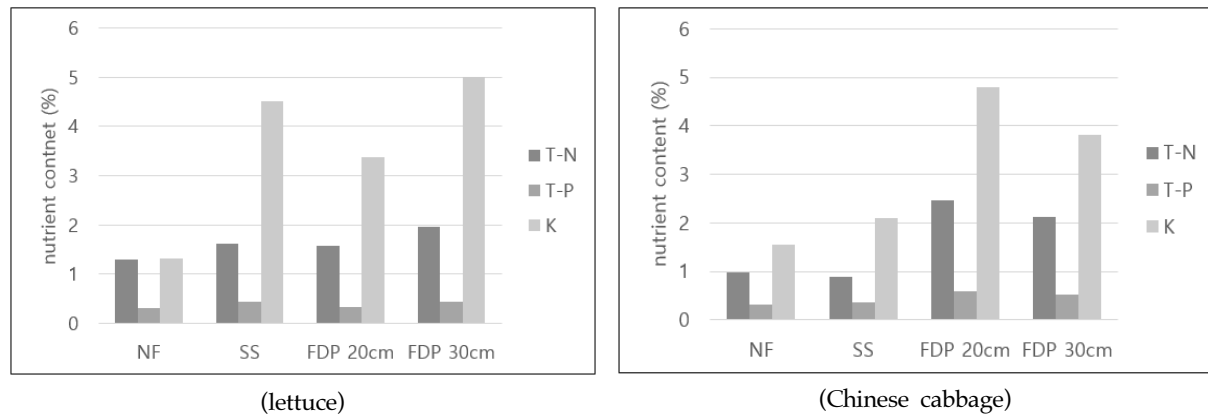


Fig. 5. Effects of fertilizer deep placement on nutrient content of lettuce and Chinese cabbage plant.

SS: Surface spray, FDP: Fertilizer deep placement
One repeat mineral analysis

결론적으로, 질소비료를 심층시비하면 암모니아 기체의 배출을 억제하고 작물의 양분 흡수율이 높아져 생산량을 증가시킬 수 있을 것으로 기대되며 실용화를 위한 추가적인 연구가 필요하다고 판단되었다.

Note

The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgement

This study was carried out with the support of “Research Program for Agricultural Science & Technology Development (Project No. PJ016763)”, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

1. Wang H, Zhang D, Zhang Y, Zhai L, Yin B, Zhou F, Geng Y, Pan J, Luod J et al. (2018) Ammonia emissions from paddy fields are underestimated in China. *Environmental Pollution*, 235, 482-488. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.12.103>.
2. Jung GB, Hong SC, Kim MK, Kim MH, Choi SK, So KH (2016) Input and output budgets for nitrogen of paddy field in South Korea. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*. 49(1), 60-65. <http://dx.doi.org/10.7745/KJSSF.2016.49.1.060>.
3. Hong SC, Kim JH, Kim MW (2021) Estimation of ammonia emission with compost application in plastic

- house for leafy perilla cultivation. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 40(3), 149-160. <https://doi.org/10.5338/KJEA.2021.40.3.18>.
4. Yao Y, Zhang M, Tian Y, Zhao M, Zhang B, Zhao M, Zeng K, Yin B (2018) Urea deep placement for minimizing NH₃ loss in an intensive rice cropping system. *Field Crops Research*, 218, 254-266. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.03.013>.
5. Wu P, Liu F, Li H, Cai T, Zhang P, Jia Z (2021) Suitable fertilizer application depth can increase nitrogen use efficiency and maize yield by reducing gaseous nitrogen losses. *Science of the Total Environment*, 781, 146787. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146787>.
6. Zhu C, Ouyang Y, Diao Y, Yu J, Luo X, Zheng J, Li X (2021) Effects of mechanized deep placement of nitrogen fertilizer rate and type on rice yield and nitrogen use efficiency in Chuanxi Plain, China. *Journal of Integrative Agriculture*, 20(2), 581-592. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146787>.
7. Zhu C, Xiang J, Zhang Y, Zhang Y, Defeng Zhu D, Chen H (2019) Mechanized transplanting with side deep fertilization increases yield and nitrogen use efficiency of rice in Eastern China. *Scientific Reports* 9(1), 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42039-7>.
8. Li L, Zhang Z, Tian H, Mo Z, Ashraf U, Duan M, Wang Z, Wang S, Tang X, Pan, S (2020) Roles of nitrogen deep placement on grain yield, nitrogen use efficiency, and antioxidant enzyme activities in mechanical pot-seedling transplanting rice. *Agronomy*, 10(9), 1252. <https://doi.org/10.3390/agronomy.10091252>.