

Short Communication



CrossMark

Open Access

## 신개발 심층시비장치를 이용한 심층시비의 발작물 재배 효과

홍성창<sup>1\*</sup>, 김민욱<sup>1</sup>, 김진호<sup>1</sup>, 박성직<sup>2</sup>

<sup>1</sup>농촌진흥청 국립농업과학원 기후변화평가과, <sup>2</sup>국립한경대학교 지역자원시스템공학부

### Understanding the Effects of Deep Fertilization on Upland Crop Cultivation and Ammonia Emissions using a Newly Developed Deep Fertilization Device

Sung-Chang Hong<sup>1\*</sup>, Min-Wook Kim<sup>1</sup>, Jin-Ho Kim<sup>1</sup> and Seong-Jik Park<sup>2</sup> (<sup>1</sup>Climate Change & Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea, <sup>2</sup>Department of Bioresources and Rural System Engineering, Hankyong National University, Ansong 17579, Korea)

Received: 17 March 2023/ Revised: 22 March 2023/ Accepted: 24 March 2023

Copyright © 2023 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>

Seong-Jik Park  
<https://orcid.org/0000-0003-2122-5498>

#### Abstract

Nitrogen fertilizers applied to agricultural lands for crop cultivation can be volatilized as ammonia. The released ammonia can catalyze the formation of ultrafine dust (particulate matter, PM<sub>2.5</sub>), classified as a short-lived climate change pollutant, in the atmosphere. Currently, one of the prominent methods for fertilizer application in agricultural lands is soil surface application, which comprises spraying the fertilizers onto the soil surface, followed by mixing the fertilizers with the soil. Owing to the low nitrogen absorption rate of crops, when nitrogen fertilizers are applied in this manner, they can be lost from land surfaces through volatilization. Therefore, investigating a new fertilization method to reduce ammonia emissions and increase the fertilizer utilization efficiency of crops is necessary. In this study, to develop a method for reducing ammonia emissions from nitrogen fertilizers applied to soil surfaces, deep fertilization was conducted using a newly

developed deep fertilization device, and ammonia emissions from barley, garlic, and onion fields were examined. Conventional fertilization (surface application) and deep fertilization (soil depth of 25 cm) were conducted for analysis. The fertilization rate was 100% of the standard fertilization rate used for barley, and deep fertilization of N, P, and K fertilizers was implemented. Ammonia emissions were collected using a wind tunnel chamber, and quantified subsequently using the indole-phenol blue method. Ammonia emissions released from the basal fertilizer application persisted for approximately 58 d, beginning from approximately 3 d after fertilization in conventional treatments; however, ammonia was not released from deep fertilization. Moreover, barley, garlic, and onion yields were higher in the deep fertilization treatment than in the conventional fertilization treatment. In conclusion, a new fertilization method was identified as an alternative to the current approach of spraying fertilizers on the soil surface. This new method, which involves injecting nitrogen fertilizers at a soil depth of 25 cm, has the potential to reduce ammonia emissions and increase the yields of barley, garlic, and onion.

\* Corresponding author: Sung-Chang Hong  
Phone: +82-63-238-2501; Fax: +82-63-238-3825;  
E-mail: schongcb@korea.kr

**Key words:** Ammonia (NH<sub>3</sub>), Fertilizer deep placement, Nitrogen, Upland crop, Yield

## 서론

암모니아(NH<sub>3</sub>)는 대기 중에서 초미세먼지의 형성을 촉매하는 오염물질로 초미세먼지의 발생을 억제하기 위해서는 대기 중의 암모니아 농도를 낮출 필요가 있다. 농경지에서 작물 재배를 위해 투입되는 요소비료의 암모니아 배출계수는 141.5 kg·NH<sub>3</sub>/ton-N이다(환경부 대기오염물질배출량 통계, 2019). 벼 재배를 위해 투입되는 질소비료의 10-39%가 대기 중으로 휘산된다[1]. 밭 토양에서 토양 깊이 10-35 cm에 질소비료를 처리하면 표면 5 cm 깊이 처리보다 암모니아의 배출이 28-55% 감소할 수 있고[2], 토양깊이 10 cm 기준 질소비료 심층 시비를 통해 엽록소 함량과 생체량, 이삭수를 증가시켜 벼의 수량을 증가시킨다[3].

작물재배를 위해 투입되는 질소비료로부터 배출되는 암모니아의 배출량을 줄일 수 있는 질소비료 살포 방법의 개발이 필요하며 이는 질소비료의 손실을 막아 농가 경영비를 절감할 수 있는 방안도 될 수 있을 것이다. 질소비료 중 요소비료의 토심 5-10 cm에 심층시비 처리 후 암모니아와 온실가스의 배출량에 미치는 영향에 대한 기초적인 연구는 최근 중국을 중심으로 활발하게 수행되었다. 벼 재배시 무논 상태에서 이앙과 동시에 토양 깊이 5 cm 내외의 깊이에 비료를 위치하게 할 수 있는 측조시비 기술은 이앙과 시비작업을 동시에 하여 노동력을 절감하고 시비 효과가 높아 우리나라, 중국, 일본 등에서 널리 사용 중이다. 한편, 인도, 스리랑카, 방글라데시 등에서 요소비료를 성형한 요소 고형비료(urea briquette)를 벼 이앙 후 무논에 인력 혹은 수동식 기계를 이용하여 주입하나[4], 우리나라 농업현장에 적합한 심층시비에 관한 연구는 매우 부족한 실정이다. 따라서 논과 밭 상태에서 다양한 깊이에 질소비료를 심층시비 처리하고 효과를 평가하기 위해서는 실용적인 면적에서 사용할 수 있는 기계장치의 개발이 필요한 실정이다.

우리나라 보리의 재배면적은 2021년 13,719 ha이며, 2022

년 기준 마늘 및 양파 재배면적은 각각 22,362 ha, 17,655 ha로 중요한 소득작물이다. 보리의 표준시비량은 88-75-36 (N-P-K) kg·ha<sup>-1</sup>이며 기비(basal fertilization)로 질소성분의 60%, 추비(additional fertilization)로 40%를 월동 후 생육재생기에 시비한다. 마늘의 표준시비량은 250-77-128 (N-P-K) kg·ha<sup>-1</sup>이며 양파의 표준시비량은 240-77-154 (N-P-K) kg·ha<sup>-1</sup>이다. 마늘은 기비로 질소성분의 36%, 월동 후 생육재생기에 추비로 2회에 나누어 64%를 시비하고, 양파는 기비로 질소성분의 33%, 월동 후 생육재생기에 추비로 2회에 나누어 67%를 시비한다. 이와같이 마늘은 주요 밭작물 중에서 질소비료의 투입량이 가장 많은 작물로 비료살포 방법을 개선하여 암모니아의 배출량을 줄일 수 있는 여지가 큰 작물이다.

따라서, 본 연구는 밭작물 재배를 위해 기비로 투입하는 질소비료에서 유래하는 암모니아의 배출을 억제할 수 있는 새로운 시비장치를 이용한 비료처리 방법을 개발하기 위하여 수행하였다.

## 재료 및 방법

본 연구는 2021년 10월 29일부터 2022년 6월 9일까지 전북 완주군 이서면에 소재한 국립농업과학원의 기후변화평가과 시험포장에서 수행하였다.

### 심층시비 처리

심층시비 처리는 자체 개발한 심층시비장치(특허출원번호: 10-2022-0034794, PCT 국제특허 출원번호: KR2022/009661)를 이용하였다(Fig. 1). 심층시비장치는 트랙터 부착부, 비료량 조절 및 공급부, 지중 비료투입구로 구성되어있다(가로 110 cm × 세로 90 cm × 높이 110 cm). 시비깊이는 지표면에서 토양 속 깊이 40 cm까지 조절할 수 있고 62마력 농업용 트랙터에 부착하여 견인하면서 지중 비료주입관을 통해 토양 속에 2,000 m<sup>2</sup>/hr의 속도로 비료를 주입할 수 있도록 제작하였다.

처리 관행의 표면살포와 심층시비 처리구로 구성하였다. 시험포장은 처리구별로 100 m<sup>2</sup>(가로 5 m × 세로 20 m)의 밭 포장을 설치하여 수행하였고 시험구배치는 완전임의배치법 3반복으로 배치하였다. 2021년 10월 29일에 관행의 표면살포



(Deep fertilizer applicator)



(Fertilizer injection)

Fig. 1. Fertilizer deep placement using a newly developed deep fertilization device.

처리구는 비료를 레이크 등 농기구를 이용하여 인력으로 토양과 균일하게 혼합하여 처리하였고 심층시비 처리구는 심층시비장치를 이용하여 토양 깊이 25 cm에 2열로 기비를 주입하였다(Fig. 1). 시비량은 보리의 표준시비량 88-75-36(N-P-K)  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  중 기비 표준시비량인 35-75-36(N-P-K)  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ 의 해당량을 처리하였다. 마늘과 양파의 시비량은 보리의 표준시비량과 동일하게 처리하였다.

### 암모니아 포집 및 정량

토양 표면으로부터 배출되는 암모니아는 2021년 10월 29일부터 12월 27일까지 58일간 투명 아크릴 윈드터널 챔버( $60\text{ cm} \times 40\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ )를 이용하여 관행의 표면살포 처리구와 심층시비 처리구에 각각 3반복으로 포집하였다. 윈드터널 챔버의 풍속은 2 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 시료용액 10 mL에 페놀-니트로프루시드나트륨 용액과 차아염소산 나트륨 용액을 각각 5 mL씩 넣고 상온에서 1시간 반응 후 분광광도계(biochrom, libra S-70)로 640 nm 파장에서 흡광도를 측정하여 정량하였다. 암모니아 배출량은 Kim 등[5]의 산정법을 보완하여 산정하였다.

### 밭작물 재배

보리는 시비처리 직후인 10월 30일에 토양표면에 산과 파

중한 후 토양과 혼합하여 복토되도록 하였다. 마늘과 양파는 흑색 유공 비닐멀칭(주간거리 10 cm  $\times$  열간거리 10 cm)을 피복 후 시판용 양파 묘를 구입하여 11월 3일에 정식하였고, 마늘은 시판용 종구를 구입하여 11월 3일에 토양 깊이 6-7 cm 깊이에 파종하였다. 양파와 마늘 생육재생기인 2022년 2월 14일과 3월 15일에 요소비료를 각각 추비를 2회 사용하였다. 보리는 2022년 5월 3일에 수확하여 수량을 조사하였고 마늘과 양파는 2022년 6월 9일에 수확하여 수량을 조사하였다. 실험 전 밭 토양의 이화학적은 Table 1과 같다. 본 실험에 사용된 토양은 국립농업과학원 기후변화평가과 내부 시험포장으로 저기산에서 채취한 산적토로 복토한 후 3년간 작물을 재배한 토양으로 유기물 함량과 양분함량이 낮은 특성이 있다. 또한 우리나라 밭 토양의 농도배양 목표치는 치환성 K 함량이 0.7-0.8 이나 본 토양의 K 함량은 다소 높았고, 치환성 Mg 함량이 1.5-2.0의 범위이나 본 토양은 다소 낮은 수치를 나타내었다.

### 데이터 통계처리

보리, 마늘, 양파의 수량조사 자료는 통계패키지 R을 이용하여 최소유의차 검정(Least Significant Differences Test)을 수행하였다.

## 결과 및 고찰

### 암모니아 배출량

보리재배를 위한 기비 처리 후 10월 27일부터 12월 29일까지 58일간 측정된 암모니아 배출량을 산정한 것은 Fig. 2와

Table 1. Chemical property of soil used in field experiment

pH (1:5)	EC (dS/m)	OM (g/kg)	T-N (%)	Ex Cation (cmol <sub>c</sub> /kg)				NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N (mg/kg)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N (mg/kg)	Available P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )
				K	Ca	Mg	Na			
5.5	0.26	6.4	0.07	2.03	3.23	0.23	0.31	2.4	10.1	89.3

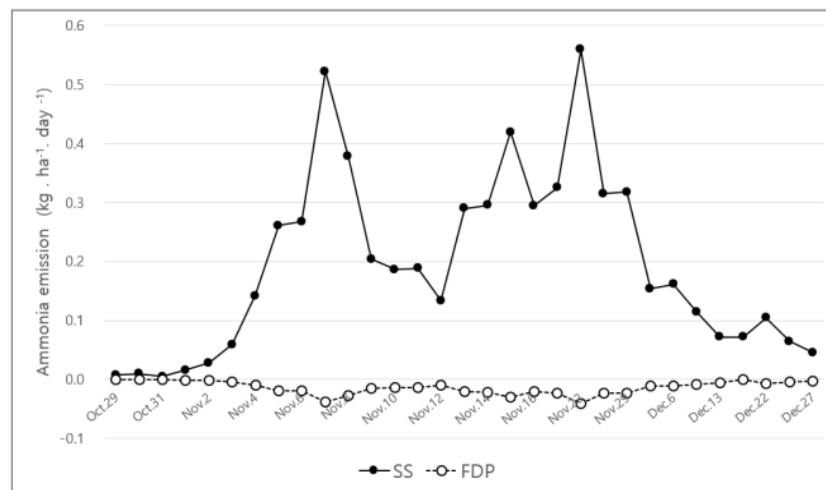


Fig. 2. Reduction effects of fertilizer deep placement on ammonia emission in barley cultivation using a newly developed deep fertilization device (SS: surface spray, FDP: fertilizer deep placement).

같다. 관행의 토양 표면살포 처리구의 암모니아 배출량은 5.9 kg·ha<sup>-1</sup>이었고 이 양은 투입한 질소량에 대하여 16.9%에 해당하는 양이었다. 심층시비처리구는 암모니아 배출이 발생되지 않았다.

Chatterjee 등[4]은 토양 속 5 cm에 주입한 요소 고품비료 (urea briquette)는 암모니아와 아산화질소의 배출을 줄이고 벼 수량을 증가시킨다고 보고하였다. Liu 등[6]은 질소비료 심층시비는 표면살포 보다 무거운 논물의 pH를 2-4% 낮추고 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N의 농도를 29-98% 낮추며, 질소이용효율은 26-93% 증가시키고 벼 수량은 5-11% 증가시킨다고 하였다. 또 인력에 의한 심층시비를 개선하여 기계화가 필요하다 하였다.

심층시비 처리구의 암모니아 배출량이 없었으며 수차례 음(-)의 값을 나타내기도 하였는데 이것은 기상조건에 따른 챔버 내부와 발아하여 토양 위로 출현한 보리 식물체에 맺힌 결로 등에 의해 암모니아 기체 성분이 용해되고 챔버 내에 포집되지 않았던 결과로 판단된다.

**작물 생육 및 수량**

보리, 마늘, 양파의 재배 시험을 수행한 시험포장을 Fig. 3 과 같다. 보리 파종 후 토양 표면의 보리의 출현(입모)은 심층시비 처리구가 표면살포 처리구 보다 빠른 경향을 나타냈는데 이것은 심층시비장치의 지중 비료주입관이 토양 깊이 25 cm 까지 들어가 토양입자를 파쇄한 효과에 의한 것으로 추정된다. 보리 입모 후 초기 생육은 심층시비 처리구가 표면살포 처리구보다 약 3주간 지연되는 경향을 나타냈다. 이것은 심층시비

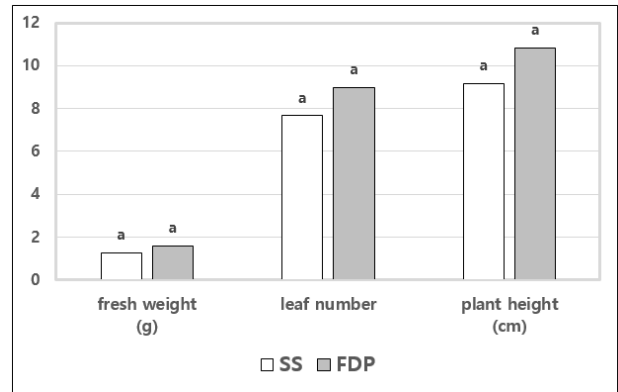


Fig. 4. Effects of fertilizer deep placement on growing response of barley. Letters on the bars represent significantly difference at LSD test 5% probability (average, n=10).

처리구는 토양 깊이 25 cm에 비료가 위치하고 있어 보리의 뿌리가 도달하는 기간동안 생육이 지연됐기 때문에 판단된다. 파종 후 80일인 2022년 1월 18일 조사한 생육초기 보리의 생체중, 엽수, 초장은 유의한 차이는 나타내지 않았으나 표면 살포 처리구보다 심층시비 처리구에서 증가하는 경향을 나타냈다(Fig. 4).

보리의 수량은 표면살포 처리구보다 심층시비 처리구에서 27% 유의하게 증가하였다. 보리의 수량구성요소 중 이삭수, 이삭당 낱알수, 보릿짚 무게는 유의한 차이를 나타내지 않았으나 증가하는 경향을 보였다(Table 2).

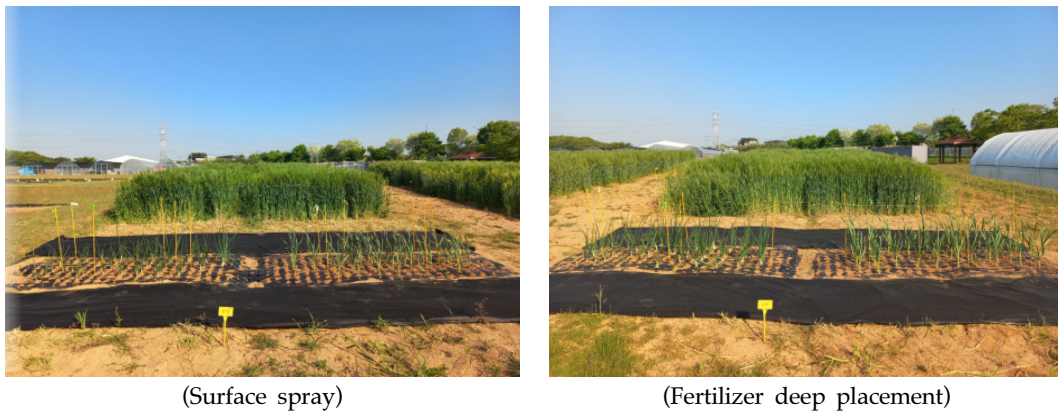


Fig. 3. Barley, garlic, and onion experiment field at maturing time after fertilizer deep placement treatment.

Table 2. Effects of fertilizer deep placement on yield and yield components of barley

Treatment	Panicle number (3.3m <sup>2</sup> )	Grain number per panicle	1,000 grain weight (g)	Grain yield (g/3.3m <sup>2</sup> )	Straw weight (g/3.3m <sup>2</sup> )
SS	1,608	30.6	37.4	1,798	2,087
FDP	1,762	34.6	37.9	2,275	2,266
LSR	546	14	7.9	406	468
LSD (P<0.05)	NS	NS	NS	*	NS

SS: surface spray, FDP: fertilizer deep placement at 25 cm depth, LSR: least significant range, LSD: least significant difference test

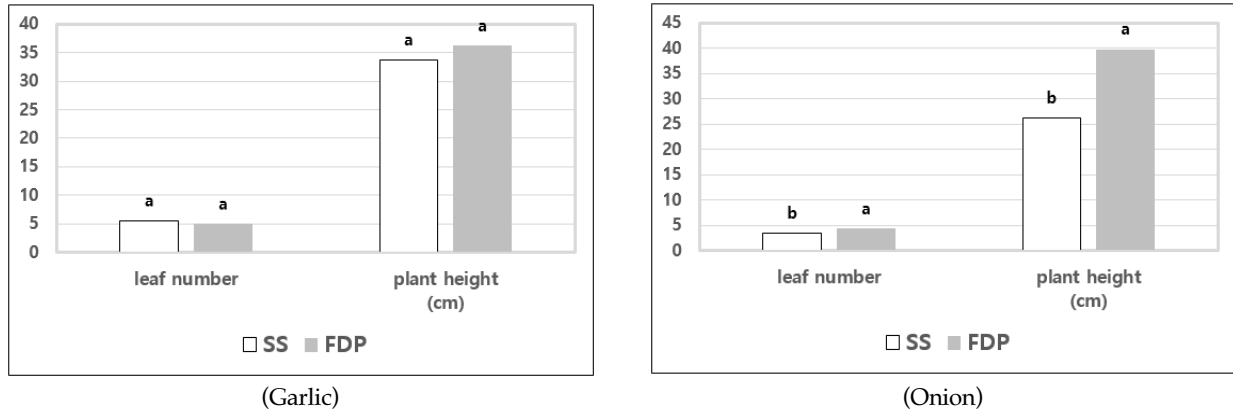


Fig. 5. Effects of fertilizer deep placement on growing response of garlic and onion. Letters on the bars represent significantly difference at LSD test 5% probability (average, n=10).



Fig. 6. Effects of fertilizer deep placement on yield responses of garlic and onion (SS: surface spray, FDP: fertilizer deep placement at 25 cm depth).

마늘과 양파의 초기생육도 보리와 유사한 경향을 나타내어 파종 및 정식 후 약 3주 동안은 심층시비 처리구가 표면살포 처리구보다 생장이 늦은 경향을 나타내었다. 생육재생기인 2022년 4월 15일에 조사한 마늘과 양파의 생장은 심층시비 처리구가 표면살포 처리구보다 촉진되었고(Fig. 5) 이러한 경향은 수확기까지 계속되었다.

마늘과 양파를 수확후 조사한 결과는 Fig. 6과 Table 3과 같다. 마늘은 심층시비 처리구에서 표면살포 처리구보다 구의 무게가 유의하게 증가하였고 구와 잎, 줄기를 포함하는 전체 무게도 유의하게 증가하였다.

양파는 심층시비 처리구에서 표면살포 처리구보다 구의 무게가 유의하게 증가하였고 구와 잎, 줄기를 포함하는 전체 무

게도 유의하게 증가하였다(Table 3).

이와 같이 심층시비 처리구의 보리, 마늘, 양파의 생산량이 증가한 것은 토양깊이 10 cm 질소비료 심층시비로 엽록소 함량과 생체량, 이삭수를 증가시켜 벼의 수량을 증가시킨다고 한 Du 등[3]의 연구결과와 유사한 결과로 판단된다.

Wu 등[7]은 심층시비 25 cm 처리로 아산화질소 배출이 30.8% 감소되었고 질소흡수율과 질소이용효율은 높아지며 옥수수 수량은 13.8% 증가한다고 하였다. Liu 등[6]은 질소비료의 과다 사용은 농업 온실가스 배출을 늘려 탄소발자국을 증가시키는 반면에 심층시비는 작물의 흡수율을 높이고 질소 손실을 줄인다고 보고하였다. 또 요소비료 심층시비는 표면살포보다 메탄의 배출을 36.3%, 아산화질소의 배출을 29.3% 줄이

Table 3. Effects of fertilizer deep placement on yield responses of garlic and onion

Treatment	Garlic			Onion		
	Bulb weight (g) (A)	Leaf, stem weight (g) (B)	Total weight (g) (C=A+B)	Bulb weight (g) (A)	Leaf, stem weight (g) (B)	Total weight (g) (C=A+B)
SS	34.0	24.6	58.6	156.0	57.6	203.3
FDP	52.6	47.0	99.6	304.6	47.3	374.6
LSR	10	8	18	98	26	126
LSD (P<0.05)	*	*	*	*	NS	*

SS: surface spray, FDP: fertilizer deep placement at 25 cm depth, LSR: least significant range, LSD: least significant difference test

며 순생태계 경제이익을 48% 증가시킨다고 보고하였다. Liu 등[8]은 완효성비료를 토심 15 cm에 심층시비하면 표면살포보다 옥수수 수량 6.3-13.4%, N 흡수율 27.9-39.5 질소이용효율을 82.9-140.1% 높이고 후기 토양의  $\text{NO}_3^-$ -N와  $\text{NH}_4^+$ -N의 유효도를 높인다고 하였다. Linqvista 등[9]은 질산화억제제는 메탄의 배출을 18%, 아산화질소의 배출을 29% 감소시킨다고 했으며, 질소비료 심층시비는 메탄의 배출을 감소시키나 아산화질소의 배출을 증가시킨다고 했고, 황산암모늄의 심층시비에 따른 메탄과 아산화질소 배출량은 검토할 필요가 있다고 하였다.

토양 깊이 25 cm에 심층시비한 보리, 마늘, 양파의 생육이 초기 약 3주간 지연된 이후의 생육이 촉진되고 수량의 증가로 이어진 것은 암모니아 배출이 없어 질소성분의 손실이 감소하였기 때문이라 판단된다.

한편, Fan 등[10]은 뿌리의 95%가 분포하는 (d95) 토양 깊이는 밀이 103 cm, 옥수수 88 cm, 귀리 77 cm, 보리 99 cm이며, 최대분포 깊이는 밀 150 cm, 옥수수 118 cm, 귀리 97 cm, 보리 146 cm라고 보고하였다. 또한 발작물의 평균 최대분포 깊이는 141 cm, 50% 분포깊이가 14 cm, 95% 분포 깊이는 102 cm라고 언급하였다. 따라서, 토양 속 깊이 25 cm에 심층시비 처리하면 발작물 뿌리의 비료 양분 흡수를 촉진할 수 있을 것으로 판단된다.

논토양은 담수 후 상층부의 산화층과 하층의 환원층이 생성되며 이를 논토양의 토층분화라 한다. 논토양의 시비방법 중 전층시비(whole layer fertilization)는 요소 등 암모늄태질소 비료가 산화층에서 산화되어 환원층에서 탈질작용에 의해 손실되는 것을 방지하기 위하여 환원층에 시비하기 위한 것이다. 그러나 환원층에만 시비할 수 있는 전용의 기계장치가 없으므로 로터리 작업으로 썩레질을 통해 하층의 환원층까지 비료가 위치하도록 해왔는데, 이 썩레질 과정 중 산화층에서 환원층에 까지 전층(whole layer)에 시비하게 되므로 전층시비라 칭한다.

밭 토양은 담수하지 않으므로 논토양과 같이 환원층이 형성되지 않고 산화상태를 유지하므로 농업현장에서는 비료살포기나 인력 등으로 비료를 토양표면에 살포한 후 로터리 작업으로 토양입자와 고르게 혼합한다.

결론적으로, 트랙터 부착 심층시비장치의 개발로 농경지에 실용적으로 질소비료를 심층시비할 수 있었으며 질소비료를 심층시비하면 암모니아 기체의 배출을 억제하고 작물의 양분 흡수율이 높아져 생산량을 증가시킬 수 있을 것으로 기대된다. 따라서 농업현장의 실용화를 위한 심층시비기술에 대한 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. PJ016998)", National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Republic of Korea.

### References

1. Liu TQ, Fan DJ, Zhang XX, Chen J, Li CF, Cao CG (2015) Deep placement of nitrogen fertilizers reduces ammonia volatilization and increases nitrogen utilization efficiency in no-tillage paddy fields in central China. *Field Crops Research*, 184, 80-90. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.09.011>.
2. 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>.
3. Du B, Luo HW, He LX, Zheng AX, Chen YL, Zhang TT, Wang ZM, Hu L, Tang XR (2018) Deep fertilizer placement improves rice growth and yield in zero tillage. *Applied Ecology and Environmental Research*, 16(6), 8045-8054. [http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1606\\_80458054](http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1606_80458054).
4. Chatterjee D, Mohanty S, Guru PK, Swain CK, Tripathi R, Shahid M, Kumar U, Kumar A, Bhattacharyya P et al. (2018) Comparative assessment of urea briquette applicators on greenhouse gas emission, nitrogen loss and soil enzymatic activities in tropical lowland rice. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 252, 178-190. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.10.013>.
5. Kim TY, Kim SY, Hong H C, Hong BY, Lee YB (2013) Evaluation of ammonia emission from liquid pig manure composting system with forced aeration. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 32(4), 366-368. <https://doi.org/10.5338/KJEA.2013.32.4.366>.
6. Liu TQ, Li SH, Guo LG, Cao CG, Li CF, Zhai ZB, Zhou JY, Mei YM, Ke HJ (2020) Advantages of nitrogen fertilizer deep placement in greenhouse gas emissions and net ecosystem economic benefits from no-tillage paddy fields. *Journal of Cleaner Production*, 263, 121322. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121322>.
7. Wu P, Chen G, Liu F, Cai T, Zhang P, Jia Z (2021) How does deep-band fertilizer placement reduce  $\text{N}_2\text{O}$  emissions and increase maize yields?. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 322, 107672. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107672>.
8. Liu W, Xiong Y, Xu X, Xu F, Hussain S, Xiong H, Yuan

- J (2019) Deep placement of controlled release urea effectively enhanced nitrogen use efficiency and fresh ear yield of sweet corn in fluvoaquic soil. *Scientific Reports*, 9(1), 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56912-y>.
9. Linquist BA, Adviento-Borbe MA, Pittelkow CM, van Kessel C, van Groenigen KJ (2012) Fertilizer management practices and greenhouse gas emissions from rice systems: A quantitative review and analysis. *Field Crops Research*, 135, 10-21. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.06.007>.
10. Fan J, McConkey B, Wang H, Janzen H (2016) Root distribution by depth for temperate agricultural crops. *Field Crops Research*, 189, 68-74. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.02.013>.