

지하수 관개 시비의 지하수 내 질산성질소 저감 효과 평가

염여훈¹ · 김 영¹ · 김문수² · 박선화² · 한경진^{3*}

¹고려대학교 환경시스템공학과

²국립환경과학원 토양지하수연구과

³한국교통대학교 환경공학과

Evaluation of the Effect of Pump and Fertilize on Nitrate Reduction in Groundwater

Yuhoon Yeum¹ · Young Kim¹ · Moon-su Kim² · Sunhwa Park² · Kyungjin Han^{3*}

¹Department of Environmental Engineering, Korea University

²Soil and Groundwater Research Division, National Institute of Environmental Research

³Department of Environmental Engineering, Korea National University of Transportation

ABSTRACT

In this study, the pump and fertilize (PAF) was applied to reduce nitrogen infiltration into groundwater at three corn cultivation sites over a three-year period, and its effectiveness was evaluated. PAF involves pumping nitrate-contaminated groundwater and using it for irrigation, thereby replacing the need for chemical fertilizers. This method not only substitutes chemical fertilization, but also reduces nitrogen infiltration into groundwater through root zone consumption. To confirm PAF's effectiveness, an equal amount of nitrogen was applied in each cultivation plot, either through chemical fertilizer or irrigation with nitrate-contaminated groundwater. Regular monitoring of infiltrating pore water and groundwater was conducted in each cultivation plot. The linear regression slope for nitrate concentration in the pore water after repeated application of PAF ranged from -3.527 to -8.3485 mg-N/L/yr, confirming that PAF can reduce nitrate concentration in the pore water. With an increasing proportion of PAF, the infiltrating nitrate mass in pore water was reduced by 42% compared to plots fertilized with chemical fertilizer. Additionally, the linear regression slope of nitrate concentration in groundwater was calculated as -2.2999 and -9.2456 mg-N/L/yr. Therefore, continuous application of PAF in rural areas is expected to significantly contribute to reducing nitrate concentration in groundwater.

Key words: Groundwater, Nitrate, Non-point source, Pump and fertilize

1. 서 론

질산성질소는 대표적인 지하수 내 오염물질로 농촌지역 경작지에서는 화학비료 또는 가축분퇴비 등의 형태로 투입된 질소의 50% 이상이 지하수로 침투되고 있다(Viers et al., 2012). 특히 국내에서는 21세기 이후 농경지 내

주저자: 염여훈, 고려대학교 환경시스템공학과, 연구교수
공저자: 김 영, 고려대학교 환경시스템공학과, 교수; 김문수, 국립환경과학원 토양지하수연구과, 연구관; 박선화, 국립환경과학원 토양지하수연구과, 연구관

*교신저자: 한경진, 한국교통대학교 환경공학과, 조교수
Email: rudwls1009@ut.ac.kr

Received : 2024. 01. 09 Reviewed : 2024. 01. 13

Accepted : 2024. 01. 21 Discussion until : 2024. 04. 30

질소 투입량은 감소하였음에도 불구하고 단위면적 당 질소 투입량은 13% 증가하였고, 이에 따라 농촌지역 지하수 관정 내 질산성질소의 먹는물 수질기준 초과율은 약 24%로 보고된 바 있다(OECD, 2008). KMOE(2014) 연구에 따르면 농축산지역에서의 지하수 내 질소 부하량이 국내 질소 총 부하량의 84%로 산출되었으며, 이들 대부분은 유기비료로부터 기인함을 확인하였다. 또한 Kim et al.(2019)은 국내 농축산업에 의해 투입되는 질소량과 지하수 내 질산성질소 농도가 높은 양의 상관관계를 가짐을 확인한 바 있다. 따라서 광범위한 경작지에서 투입된 질소는 비점오염원 형태로 침투하며 지하수 내 질산성질소 오염 부하에 큰 영향을 미치고 있다.

이에 저자들은 King et al.(2012)의 조사 결과를 참고

하여 질소비료의 시비 대신 질산성질소 오염 지하수를 양수 및 관개함으로써, 경작지 내 질소 투입 및 관개를 지하수로 대체할 뿐만 아니라 질산성질소가 작물에 의해 섭취된 뒤 재침투된 관개수는 지하수로 침투하여 지하수 수질개선 효과가 있는 관개 시비(pump and fertilize, PAF)를 농촌지역 경작지에서의 질소 침투 부하량을 줄이기 위한 방안으로 고려하였다. Martin et al.(1982)의 옥수수에 의한 질소 흡수에 대한 현장 모델링 연구에 따르면, 관개용수 내 질산성질소가 합성 비료보다 질소 흡수 효율이 더 높다는 결과를 나타내어 관개 시비는 질소 비료를 대체하는 것이 가능할 수 있음을 확인한 바 있다. 이에 미국 캘리포니아 내 툴레 및 살리나스 지역의 일부 농가는 관개 시비를 채택하여 적용 중이다(King et al., 2012). 국내 유사한 연구로 배수로 물을 관개 시 벼농사의 비점오염원 경감 효과(Kim et al., 2007), 산악을 대상으로 토양 및 관개용수의 질 등 재배 환경에 대한 현장 및 설문조사 기반 연구(Cho, 2011) 등이 있었으나, 대다수의 관개 시비 관련 기존 연구는 지하수에 끼치는 영향에 대한 고려가 부족하거나 재배 환경 조사 등에 집중되어 있었다. 그 외 Baram et al.(2016)은 국내 식생 및 식생환경과 상이한 아몬드와 피스타치오를 대상으로 관개 시비를 적용 및 평가하였고, Cahn(2016)은 양배추와 브로컬리를 대상으로 관개 시비를 적용 시 작물의 생장과 비료의 대체 가능성을 평가하였다.

상기 국내외 연구 사례들은 질산성질소로 오염된 지하수의 관개 시비가 범용적으로 다양한 작물에 적용 가능하다는 것을 시사하였다. 하지만 해당 연구들은 주로 작물의 생장과 비료의 대체 가능성에만 초점을 두었고, 물질수지 관점에서 PAF 적용에 따른 불포화층에서 포화층으로 침투되는 질소 영향을 고려하지 않아 PAF 적용에 따른 경작지에서 투입되는 질소 저감 효과가 제시되지 않았다. 이에 본 연구에서는 3개 지역의 옥수수 경작지를 대상으로 약 3년간 PAF를 통해 질산성질소 오염 지하수를 관개 시비하였고, 각 경작지에서의 불포화층 및 포화층 모니터링을 통해 PAF 적용에 따른 지하수 내 질산성질소 저감 효과를 평가하였다.

2. 연구방법

2.1. 부지별 시험구 구성 및 모니터링 장비 설치

연구 부지는 대한민국 충청남도 BR, YS1, YS2 지역에 위치하고 있으며, 각 지역의 옥수수 경작지 내 시험구를 조성하여 관개 시비를 적용 및 평가하였다. 모든 옥수

수 경작지는 수년간 장기간 경작한 이력이 있다. BR, YS1 지역에는 각각 2개의 시험구를 설치하였으며, YS2 지역에서는 4개의 시험구를 설치하였다. 시험구는 직사각형 형태이며, 너비는 3 m, 길이는 10 m, 면적은 30 m²이다. 각 시험구 내 파종 또는 이식된 옥수수는 약 50~70 개였다.

각 시험구에는 불포화층 토양 공극수를 채취하기 위한 Drain Gauge G3 Lysimeter(METER Group, Inc., WA, USA)를 설치하였다. 또한 lysimeter 내부에 수위 센서를 설치하였고, 이를 Em50 데이터 수집모듈에 연결하여 포집된 토양 공극수의 부피를 기록하였다. 관측 결과는 토양 공극수 내 용질의 침투 질량 산출에 활용하였다. Lysimeter의 토양 공극수 포집구는 지하수위를 고려하여 BR, YS1 지역에 30 cm 심도에 설치하였으며, YS2 지역에는 10 cm 심도에 설치하였다.

YS1, YS2 지역의 각 시험구에는 포화층 지하수를 채취하기 위해 air percussion 장비를 이용하여 직경 2 inch, 심도 약 10 m의 지하수 관정을 설치하였다. 상기 모니터링 장비가 설치된 시험구의 모식도는 Fig. 1과 같다.

2.2. 시비 단계 구성 및 시험구별 경작 방법

본 연구에서는 관개 시비 적용에 따른 지하수로 침투하는 질산성질소의 부하 저감 평가를 위해 Uncultivated(UC), Good Agricultural Practice(GAP), Chemical Fertilizer(CF)-60%, Pump and Fertilize(PAF)-0~60% 시비를 준비하였다(Table 1). UC는 옥수수를 파종 또는 이식하지 않고, 화학비료 시비 또는 지하수 관개를 일절 하지 않는다. GAP는 옥수수 표준시비량(15,800 mg-N/m²)을 화학비료로 시비(RDA, 2010a), CF-60%는 GAP 시비량의 60%를 화학비료로 시비한다. PAF-15%는 GAP 기준의 45%를 화학비료로 시비(7,110 mg-N/m²), GAP 기준의 15%를 관개 시비(2,370 mg-N/m²), PAF-30%는 GAP 기준의 30%를 화학비료로 시비(4,740 mg-N/m²), GAP 기준의 30%를 관개 시비(4,740 mg-N/m²), PAF-60%는 화학비료 없이 GAP 기준의 60%를 관개 시비(9,480 mg-N/m²)한다.

Huang et al.(1996)과 Ju et al.(2004; 2006)의 토양 내 잔류 질소가 지하수 내 질산성질소 오염에 끼치는 영향에 대한 연구와 저자들의 사전 연구에 따르면 장기간 경작 활동에 의해 토양 내 축적된 질소가 지속적으로 토양 공극수로 용출되어 지하수로 침투하는 것으로 나타났고, 경작지 내 질소의 투입이 일절 없는 UC 모니터링을 통해 이에 대한 영향을 평가하였다. 또한 장기간 경작 활동에 의해 질소가 축적된 토양에서 표준 시비량으로 경작

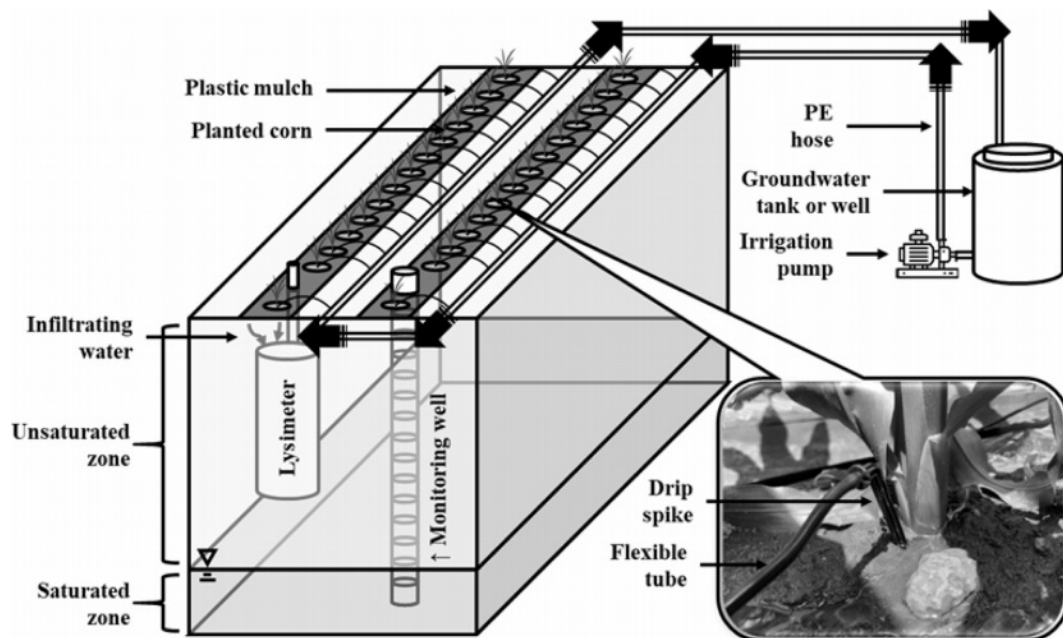


Fig. 1. Schematic diagram of cultivation plot and PAF system.

Table 1. Fertilization configuration of this study

	UC ¹⁾	GAP ²⁾	CF ³⁾ -60%	PAF ⁴⁾ -15%	PAF-30%	PAF-60%
Chemical fertilizer	Not applied	15,800 mg-N/m ² (100% of GAP)	9,480 mg-N/m ² (60% of GAP)	7,110 mg-N/m ² (45% of GAP)	4,740 mg-N/m ² (30% of GAP)	Not applied
PAF	Not applied	Not applied	Not applied	2,370 mg-N/m ² (15% of GAP)	4,740 mg-N/m ² (30% of GAP)	9,480 mg-N/m ² (60% of GAP)
Net N fertilization	None	15,800 mg-N/m ² (100% of GAP)	9,480 mg-N/m ² (60% of GAP)	9,480 mg-N/m ² (60% of GAP)	9,480 mg-N/m ² (60% of GAP)	9,480 mg-N/m ² (60% of GAP)
Remarks			Fertilization reduced	Fertilization reduced, PAF applied		

¹⁾UC: Uncultivated

²⁾GAP: Good agricultural practice

³⁾CF: Chemical fertilizer

⁴⁾PAF: Pump and fertilize

시 작물 생장에 필요한 질소 외 과량의 잉여 질소가 지하수로 침투하는 것으로 판단되어, 공통적으로 화학비료만을 시비하는 GAP와 GAP 기준 60%를 시비하는 CF-60%와의 비교를 통해 시비량 저감 영향을 평가하였다. 또한 CF-60%와 동일한 양의 질소를 시비하되, 일부 또는 전체를 질산성질소로 오염된 지하수로 관개하는 PAF-15~60%와 CF-60%를 비교하여 시비량 저감과 관개 시비의 효과를 평가하였다.

BR, YS1 지역에서는 CF-60% 및 PAF-15~60%를 각각 5~6회 반복 적용하였다(Table 2). YS2 지역의 시험구 #1~4에서는 UC, GAP, CF-60%, PAF-15~60%를 각각 5회씩 반복 적용하였다. 또한 YS1 지역 시험구 #1, 2, YS2 지역 시험구 #2~4에서는 토양 내 축적된 잉여 질소

의 영향을 배제하기 위해, 기존 토양을 30 cm 걷어 낸 후, 마사토를 30 cm 객토하고 60 cm 심도까지 혼합하는 토양개량을 실시하였다.

2.3. 지하수 관개 시비 장비 설치

관개 시비 시험구 외곽에는 농업용 PE 호스를 설치하였고, 관개수 주입에 따른 PE 호스의 움직임을 방지하기 위하여 고정판을 설치하였다. 농업용 PE 호스에는 6 mm 연질호스를 연결할 수 있는 점적호스용 단추를 설치하였다. 또한 점적호스용 단추에 연결된 연질호스는 드립 스파이크와 연결하였다. 점적호스용 단추, 연질호스와 연결된 드립 스파이크는 시험구 내 파종 또는 이식된 옥수수 수만큼 PE 호스에 설치하였다.

Table 2. Applied fertilization by plots and details of pump and fertilize

	Cultivation period (Elapsed time on graph)	Plot #1	Plot #2			
			PAF proportion	Irrigated volume (L/plot)	Nitrate conc. (mg-N/L)	
BR Site	Fall, 2019 (0.1 to 0.2 year)	CF-60%	PAF-15%	1,780	35±2.9	
	Spring, 2020 (0.8 to 1.0 year)	CF-60%	PAF-30%	3,555	47±2.5	
	Fall, 2020 (1.0 to 1.2 year)	CF-60%	PAF-60%	7,110	46±1.6	
	Spring, 2021 (1.8 to 2.0 year)	CF-60%	PAF-60%	7,110	41±1.8	
	Fall, 2021 (2.0 to 2.2 year)	CF-60%	PAF-60%	7,110	50±2.5	
	Cultivation period (Elapsed time on graph)	Plot #1	Plot #2			
			PAF proportion	Irrigated volume (L/plot)	Nitrate conc. (mg-N/L)	
YS1 Site	Fall, 2019 (0.6 to 0.8 year)	CF-60%	PAF-15%	3,000	25±1.0	
	Spring, 2019 (1.4 to 1.5 year)		Soil regenerated by 1:1 ratio			
	Fall, 2019 (1.6 to 1.8 year)	CF-60%	PAF-15%	1,780	34±0.4	
	Spring, 2020 (2.3 to 2.5 year)	CF-60%	PAF-30%	3,555	49±4.3	
	Fall, 2020 (2.6 to 2.8 year)	CF-60%	PAF-60%	9,480L	34±0.6	
	Spring, 2021 (3.3 to 3.5 year)	CF-60%	PAF-60%	9,480L	30±1.4	
	Fall, 2021 (3.6 to 3.7 year)	CF-60%	PAF-60%	9,480L	31±6.5	
	Cultivation period (Elapsed time on graph)	Plot #1	Plot #2	Plot #3	Plot #4	
					PAF proportion	Nitrate conc. (mg-N/L)
YS2 Site	Spring, 2019 (0.4 to 0.5 year)	UC	Soil regenerated by 1:1 ratio			
	Fall, 2019 (0.6 to 0.8 year)	UC	GAP	CF-60%	PAF-15%	1,780
	Spring, 2020 (1.3 to 1.5 year)	UC	GAP	CF-60%	PAF-30%	3,555
	Fall, 2020 (1.6 to 1.7 year)	UC	GAP	CF-60%	PAF-60%	14,220
	Spring, 2021 (2.3 to 2.5 year)	UC	GAP	CF-60%	PAF-60%	14,220
	Fall, 2021 (2.6 to 2.7 year)	UC	GAP	CF-60%	PAF-60%	14,220

각 부지에는 2,000 ℓ 부피의 관개용수 보관용 물탱크를 2~5개씩 설치하였고, 관개 시비 이전 질산성질소로 오염된 지하수를 미리 양수하여 준비하였다. 관개 시에는 농업용 양수기의 흡입구를 관개용수 보관용 물탱크에 설치하였고, 토출부를 경작지 내 설치된 PE 호스에 연결하여

질산성질소 함유 지하수를 작물에 관개할 수 있도록 하였다. 단, YS2 지역에 PAF-60%를 적용 시 양수기의 흡입구를 시험구의 지하수 상류에 위치한 관정에 연결하였다. 상기 지하수 관개 시비 장치가 설치된 시험구의 모식도는 Fig. 1과 같다.

2.4. 시료 채취 및 분석 방법

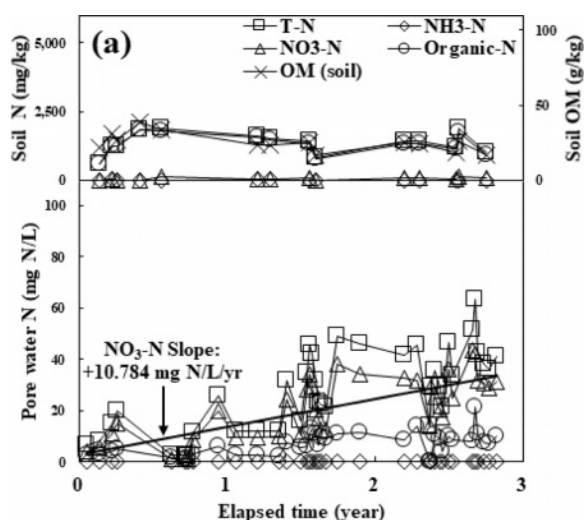
라이시미터 내 포집된 토양 공극수는 Brass Transfer Pump(OTC, MI, USA)를 이용하여 채취, 지하수는 일회용 배일러를 이용하여 1ℓ를 채수하였으며, 채취한 시료는 무균 채수병에 기체상 없이 보관하였다. 토양은 토양 시료채취기(Eijkkelkamp, Giesbeek, Netherlands)를 이용하여 시험구 당 5지점의 표토를 채취하여 혼합하였으며, 채취한 시료는 밀봉한 유리병에 보관하였다. 모든 채취된 시료는 파손을 방지하기 위해 비닐 포장재로 감싼 후 보냉하여 전문 분석기관에 분석을 의뢰하였다.

채취한 토양 공극수와 지하수는 총질소, 암모니아성질소, 질산성질소, 유기질소를 분석하였고, 토양은 총질소, 암모니아성질소, 질산성질소, 유기질소, 유기물 함량을 분석하였다. 토양 공극수와 지하수 시료는 신성생명환경연구원(충청남도) 또는 위트랩생활환경연구원(경기도)에 분석을 의뢰하였으며, 토양은 재단법인 환경기술원(전라북도)에 분석을 의뢰하였다. 토양 공극수와 지하수 시료는 수질오염공정시험기준(국립환경과학원)에 의거하여 분석하였으며, 토양 시료는 RDA(2010b)에 의거하여 분석하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1. 미경작 시 질소류 물질의 불포화대 내 침투 특성 평가

장기간 경작을 실시하여 토양 내 질소가 축적된 조건에서, 질소를 농경지 내 투입하는 경작 또는 관개 시비가 없는 조건하 질소류 물질의 침투 특성을 평가하기 위해,



YS2 지역 시험구 #1에서 약 3년간 경작을 실시하지 않으며(UC) 불포화층을 모니터링하였다(Fig. 2a). 토양 시료 분석결과 총질소는 평균 1,360 mg-N/kg으로 검출되었으며, 유기질소가 총질소의 90% 이상으로 나타나 대부분의 질소는 유기질소 형태로 존재함을 확인할 수 있었다. 유기물은 평균 25 g/kg으로 검출되었다.

반면 토양 공극수 내 질산성질소 농도는 매년 지속적으로 증가하였으며, 최대값은 43 mg-N/L이다. 질산성질소 농도와 라이시미터에 포집된 토양 공극수의 양을 이용하여 경작지 내 침투된 질소의 질량으로 환산 시, GAP 기준 시비량(658 g N)의 약 4배에 상응하는 2,745 kg N의 질소가 침투한 것으로 나타났다. 선형 회귀분석으로 질산성질소의 농도 추세를 평가한 결과, 기울기가 +10.784 mg-N/L/yr로 나타나 질산성질소 농도가 지속적으로 증가하는 추세를 확인할 수 있었다. 본 시험구에서는 모니터링 기간 화학비료나 지하수 등 질소를 투입하지 않았음에도 불구하고 토양 공극수 내 질산성질소 농도가 지속적으로 증가한 것으로 보아 Huang et al.(1996), Ju et al. (2004; 2006)이 보고한 바와 동일하게 토양에 축적된 잉여질소가 지속적으로 토양 공극수로 용출 및 포화층으로 침투하고 있음을 확인하였다.

3.2. 표준비 경작 시 질소류 물질의 불포화대 내 침투 특성 평가

토양에 축적된 질소의 영향을 배제 후 표준비 경작 시 질소류 물질의 침투 특성을 평가하기 위해, YS2 지역 시

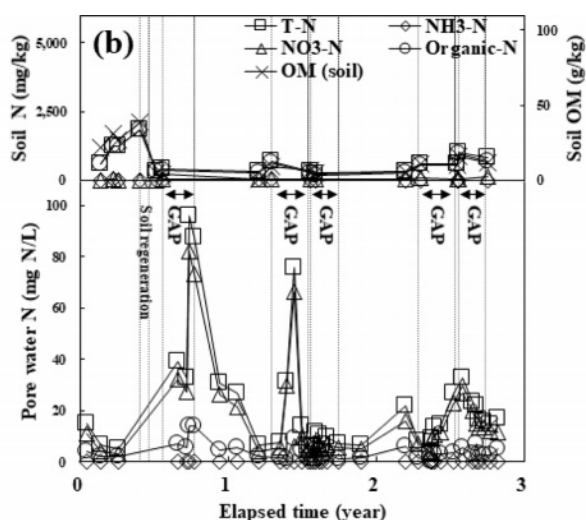


Fig. 2. Soil and pore water monitoring data of uncultivated plot #1 at YS2 site (a), and GAP applied plot #2 at YS2 site (b). Square symbol (\square), diamond symbol (\diamond), triangle symbol (\triangle), circle symbol (\circ) with solid line represent T-N, $\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, organic-N concentration in soil or pore water respectively; x symbol(X) with solid line represents organic matter(OM) concentration in soil; vertical dotted line represents cultivation period; bold solid line represents linear regression of $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration in pore water.

험구 #2에서 토양개량 후 표준비 경작(GAP)을 5회 적용하며 불포화층을 모니터링하였다(Fig. 2b). 토양개량 전 토양 내 총질소는 평균 1,235 mg-N/kg, 유기물은 평균 30 g/kg으로 검출되었으며, 토양개량 후 토양 내 총질소는 평균 500 mg-N/kg, 유기물은 평균 8 g/kg으로 검출되어, 토양개량 후 총질소, 유기물의 농도가 감소한 것을 확인할 수 있었다.

토양 공극수에서는 토양개량 후 GAP 경작을 반복 적용 시, 간헐적으로 최대 82 mg-N/L의 고농도 질산성질소가 검출되었다. GAP 경작 기간 사이의 휴작기에는 토양 공극수에서 저농도 질산성질소가 검출되는 점으로부터, GAP 경작 시 시비하는 화학비료로부터 용출된 고농도 질산성질소가 경작 기간에 지하수로 침투하는 것으로 판단된다. 지하수 내 질산성질소는 화학비료의 영향이 크고, 도시 또는 논 지역보다 경작지의 지하수에서 질산성질소의 농도가 높음을 확인된 바 있어(Babiker et al., 2004), 이는 GAP 경작지 내 토양 공극수에서의 질산성질소 침투 양상과 상통함을 확인할 수 있다. 즉 근권에서 작물에 섭취되지 않은 채 포화층으로 침투하는 질소의 양 저감을 위해서는 시비량 저감 또는 관개 시비의 적용이 필요함을 확인할 수 있다.

3.3. PAF 적용 시 질소류 물질의 불포화대 내 침투 특성 평가

3.3.1. 원토양 조건의 BR 지역 시험구 #1, 2

장기간 경작을 실시하여 토양 내 질소가 축적된 원토양

조건에서, 시비량 저감 및 관개 시비 적용에 따른 질소류 물질의 침투 특성을 평가하기 위해, 약 2.5년간 BR 지역 시험구 #1에서 CF-60%를 5회, 시험구 #2에서 PAF-15~60%를 5회 적용하며 불포화층을 모니터링하였다(Fig. 3). 두 시험구의 토양 내 총질소는 약 2,000~3,000 mg-N/kg, 유기물은 약 30~50 g/kg으로 검출되었다.

반면 토양 공극수에서 질산성질소 농도를 선형 회귀분석하여 추세를 분석한 결과, 화학비료만을 시비한 시험구 #1에서는 기울기가 +1.1574 mg-N/L/yr로 산출되었으며, 관개 시비를 적용한 시험구 #2에서는 기울기가 -8.3485 mg-N/L/yr로 산출되었다. 동일한 원토양 조건의 YS2 지역 시험구 #1에서는 미경작 시에도 토양 공극수의 질산성질소 농도 추세가 +10.784 mg-N/L/yr로 산출된 반면 BR 지역 시험구 #1에서 약 90% 감소된 기울기가 산출된 점은 장기간 경작을 실시하여 토양 내 질소가 축적된 원토양 조건에서 40%의 시비량 저감으로도 충분히 지하수로 침투하는 토양 공극수 내 질산성질소 농도를 완화시킬 수 있음을 확인할 수 있었다. 또한 시비량 저감 및 관개 시비를 동시에 적용할 경우에는 음의 기울기가 산출된 점으로부터, 시비량 저감 및 관개 시비는 효과적으로 지하수로 침투하는 질산성질소의 부하를 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

3.3.2. 토양개량 조건의 YS2 지역 시험구 #3, 4

토양에 축적된 질소의 영향을 배제 후 시비량 저감 및 관개 시비 적용에 따른 질소류 물질의 침투 특성을 평가

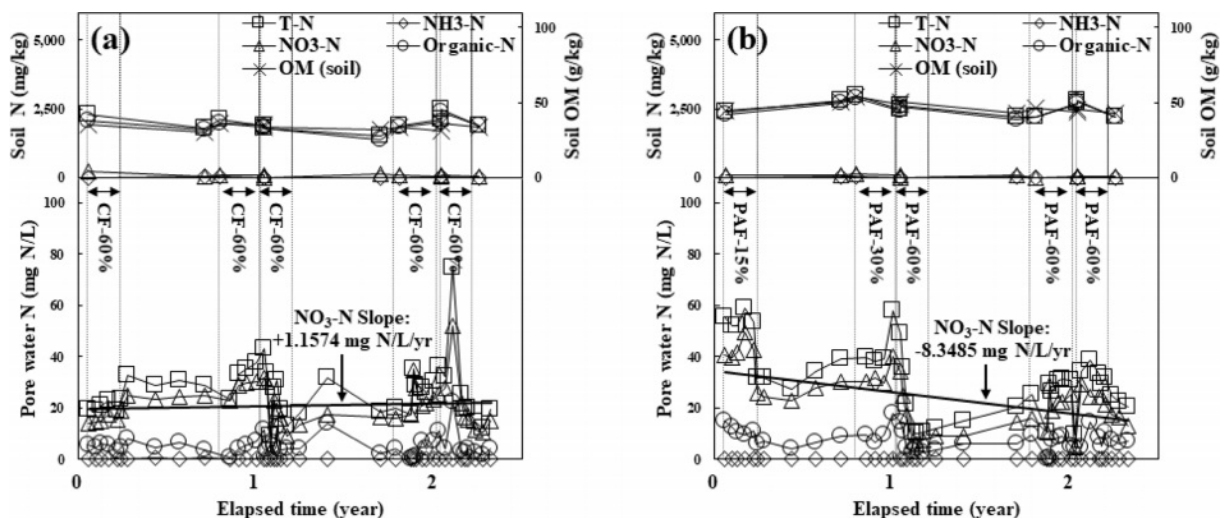


Fig. 3. Soil and pore water monitoring data of CF-60% applied plot #1 at BR site (a), and PAF-15, 30, and 60% applied plot #2 at BR site (b). Square symbol (\square), diamond symbol (\diamond), triangle symbol (\triangle), circle symbol (\circ) with solid line represent T-N, NH_3 -N, NO_3 -N, organic-N concentration in soil or pore water respectively; x symbol (X) with solid line represents organic matter (OM) concentration in soil; vertical dotted line represents cultivation period; bold solid line represents linear regression of NO_3 -N concentration in pore water.

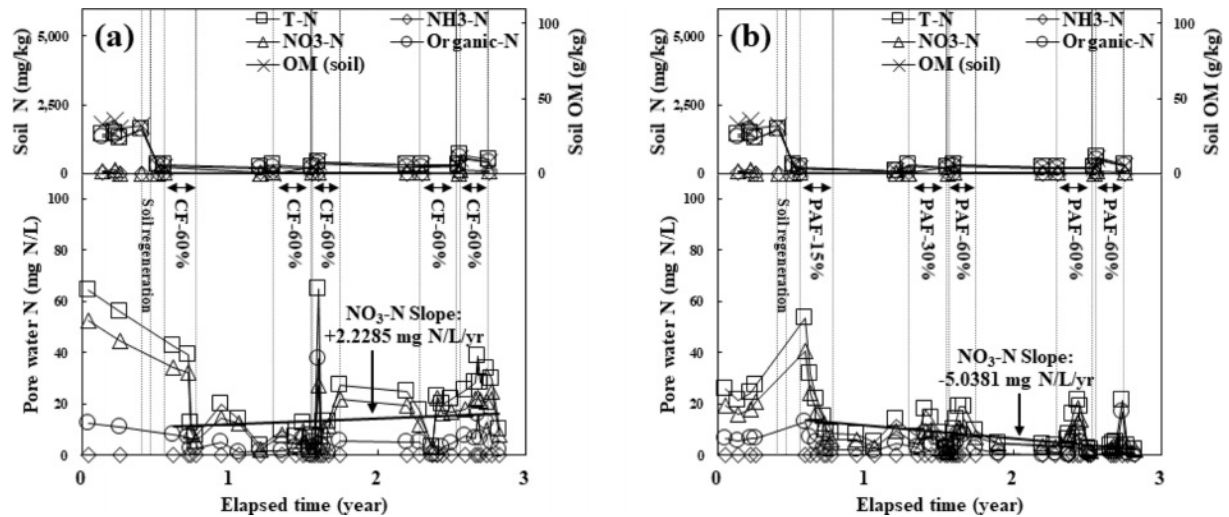


Fig. 4. Soil and pore water monitoring data of CF-60% applied plot #3 at YS2 site (a), and PAF-15, 30, and 60% applied plot #4 at YS2 site (b). Square symbol (\square), diamond symbol (\diamond), triangle symbol (\triangle), circle symbol (\circ) with solid line represent T-N, NH₃-N, NO₃-N, organic-N concentration in soil or pore water respectively; x symbol (X) with solid line represents organic matter (OM) concentration in soil; vertical dotted line represents cultivation period; bold solid line represents linear regression of NO₃-N concentration in pore water.

하기 위해, 토양개량 후 약 3년간 YS2 지역 시험구 #3에서 CF-60%를 5회, 시험구 #4에서 PAF-15~60%를 5회 적용하며 불포화층을 모니터링하였다(Fig. 4). 토양개량 전 두 시험구의 토양 내 총질소는 약 1,400 mg-N/kg, 유기물은 약 30 g/kg으로 검출되었으며, 토양개량 후 토양 내 총질소는 약 300 mg-N/kg, 유기물은 약 5 g/kg으로 검출되어 토양개량에 따른 질소류 물질 및 유기물의 농도가 감소함을 확인하였다.

토양개량 전, 후 토양 공극수 내 질산성질소 농도를 비교한 결과, CF-60%를 적용한 시험구 #3에서는 토양개량 전인 0.3년 경과 후 시점까지 40 mg-N/L 이상의 농도로 검출되었으나, 토양개량 후인 0.7년 경과 후 시점에는 10 mg-N/L 미만의 농도로 검출되었다. PAF-15~60%를 적용한 시험구 #4에서는 토양개량 전인 0.6년 경과 후 시점까지 약 20 mg-N/L의 농도로 검출되었으나, 토양개량 후인 0.7년 경과 후 시점에는 10 mg-N/L 미만의 농도로 검출되었다. 두 시험구에서 공통적으로 토양개량 후 토양 공극수 내 질산성질소 농도가 감소하는 점으로부터, 질소가 축적된 경작지의 토양개량은 효과적으로 토양 공극수 내 질산성질소 농도를 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있었다. 토양개량 후 CF-60% 또는 PAF-15~60%를 5회 적용하여 토양 공극수에서 질산성질소 농도에 대한 추세를 분석한 결과, 화학비료만을 시비한 시험구 #3에서는 기율기가 +2.2285 mg-N/L/yr로 나타났으며, 관개 시비를 적용한 시험구 #4에서는 기율기가 -5.0381 mg-N/L/yr로 나타났다. 토양개량을 실시하였더라도 시비량이 저감된 화학비료를

시비하는 CF-60% 적용 시 토양 공극수 내 질산성질소 농도가 지속적으로 증가하나, 동일한 양의 질소를 지하수로 관개하는 PAF-15~60% 적용 시 토양 공극수 내 질산성질소 농도가 지속적으로 감소하는 것으로 보아 토양개량, 시비량 저감 및 관개 시비는 효과적으로 지하수로 침투하는 질산성질소의 부하를 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

3.3.3. 토양개량 조건의 YS1 지역 시험구 #1, 2

YS1 지역 또한 토양에 축적된 질소의 영향을 배제 후 시비량 저감 및 관개 시비 적용에 따른 질소류 물질의 침투 특성을 평가하기 위해, 토양개량 및 시험구 #1에서 CF-60%를 6회, 시험구 #2에서 PAF-15~60%를 6회 적용하였다. 토양개량 전 두 시험구 토양 내 총질소는 약 2,000 mg-N/kg으로 검출, 유기물은 약 30 g/kg으로 검출되었으며, 토양개량 후 토양 내 총질소는 약 300 mg-N/kg, 유기물은 약 5 g/kg으로 검출되어 토양개량에 따른 질소류 물질 및 유기물의 농도가 감소하였음을 확인하였다.

또한 관개 시비를 적용한 시험구 #2에서 토양 공극수 내 질산성질소 농도를 선형 회귀분석으로 추세를 분석한 결과, 기율기가 -3.527 mg-N/L/yr로 나타나, YS2 지역과 유사하게 토양개량, 시비량 저감 및 관개 시비는 효과적으로 지하수로 침투하는 질산성질소의 부하를 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

3.4. PAF 적용 시 불포화대 내 질소 침투량 평가

토양개량 여부에 따른 관개 시비 적용 시 불포화층 내

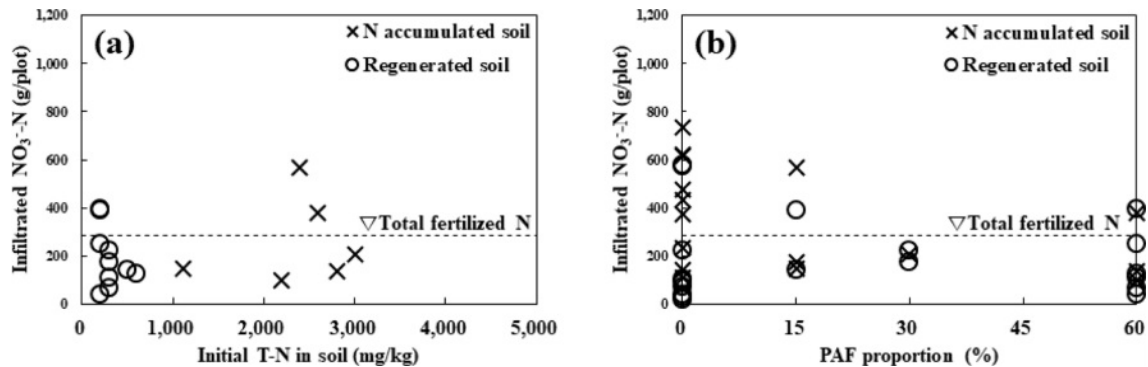


Fig. 5. Infiltrated nitrate mass during the cultivation period by initial T-N in soil (a), and infiltrated nitrate mass during the cultivation period by PAF proportion (b). X symbol (X) represents infiltrated $\text{NO}_3\text{-N}$ mass in plot during single cultivation period under N accumulated soil condition; circle symbol (O) represents infiltrated $\text{NO}_3\text{-N}$ mass in plot during single cultivation period under regenerated soil condition; horizontal dotted line represents total fertilized and/or irrigated N in plot during single cultivation period.

질산성질소 침투량 평가를 위해, 경작 초기 토양 내 총질소 농도별 경작 기간 시험구 내 질산성질소 침투량을 도식하였고, 이를 시험구 내 질소 시비 총량과 비교하여 분석하였다(Fig. 5a). 원토양 조건에서는 경작 초기 총질소 농도가 평균 2,352 mg/kg로 측정되었으며, 경작 시 질산성질소 침투량은 질소 시비 총량인 284 g/plot의 90%인 평균 256 g/plot으로 산출되었다. 반면 토양개량을 실시한 시험구에서는 경작 초기 총질소 농도가 원토양 조건의 경작 초기 총질소 농도보다 낮은 평균 310 mg/kg으로 측정되었으며, 경작 시 질산성질소 침투량은 질소 시비 총량인 284 g/plot의 68%인 평균 192 g/plot으로 산출되었다. 즉 관개 시비를 적용 시 경작지 내 투입한 질소보다 적은 양의 질산성질소가 침투하는 점으로부터 관개 시비는 지하수로 침투하는 질산성질소의 부하 저감에 효과적임을 확인할 수 있었으며, 토양개량 후 관개 시비를 적용한 조건의 질산성질소 침투량 평균이 원토양 조건의 질산성질소 침투량 평균의 71%로 산출된 점으로부터, 관개 시비에 토양개량을 추가적으로 실시한다면 보다 효과적으로 지하수로 침투하는 질산성질소의 부하를 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서 적용한 시비의 종류로는 화학비료만을 시비한 CF-60%, 화학비료와 지하수를 동시에 적용한 PAF-15, 30% 뿐만 아니라 지하수만을 관개한 PAF-60%가 있으며, 이들의 총 질소 시비량은 동일하다. 총 시비량 중 지하수를 통해 질소를 시비하는 비중에 따른 불포화층 내 질산성질소 침투량 평가를 위해, 지하수 비중별 경작 기간 시험구 내 질산성질소 침투량을 도식하였고, 이를 시험구 내 질소 시비 총량과 비교하여 분석하였다(Fig. 5b). 화학비료만을 시비하여 지하수의 비중이 0%인 CF-60%

를 적용 시, 평균 306 g N/plot의 질산성질소가 침투한 것으로 나타났다. 그중 원토양 조건에서는 평균 415 g N/plot의 질산성질소가 침투하였고, 토양개량 조건에서는 평균 208 g N/plot의 질산성질소가 침투한 것으로 나타났다. PAF-15, 30, 60%를 적용 시, 각각 평균 285, 201, 178 g N/plot의 질산성질소가 침투한 것으로 나타났다. PAF-60% 적용 시 CF-60% 대비 평균 42%의 질산성질소 침투량이 저감된 점은 Martin et al.(1982)의 옥수수에 의한 질소 흡수에 대한 현장 모델링 연구에서 관개용수 내 질산성질소가 합성 비료보다 질소 흡수 효율이 더 높다는 결과와 일치함을 확인할 수 있었다. 즉 지하수를 이용한 관개 시비는 지하수의 비중이 높을수록 지하수로 침투하는 질산성질소의 부하를 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

3.5. PAF 적용 시 포화대 지하수 내 질소류 물질 농도 평가

토양개량과 관개 시비의 지하수 내 질산성질소 수질개선 효과 확인을 위해, 포화층 지하수 내 질산성질소 농도를 장기간 모니터링하여 선형 회귀분석을 통해 추세를 분석한 결과, YS1 지역 시험구 #2, YS2 지역 시험구 #4에서 질산성질소 농도 기울기는 각각 -9.2456, -2.2999 mg-N/L/yr로 나타났다(Fig. 6). Chen et al.(2010)이 밀과 옥수수를 교대로 경작하는 경작지에서 하수, 지하수 또는 하수 교대로 관개를 실시하며 경작지에서 관개수의 침투에 따른 포화층 지하수 내 질산성질소 농도를 모니터링 시 지하수 내 질산성질소 농도가 증가한 반면, 지하수만을 이용한 관개 시 지하수 내 질산성질소 농도가 감소함을 확인하였으며, 이는 질산성질소 농도 추세와 일치함을 확인

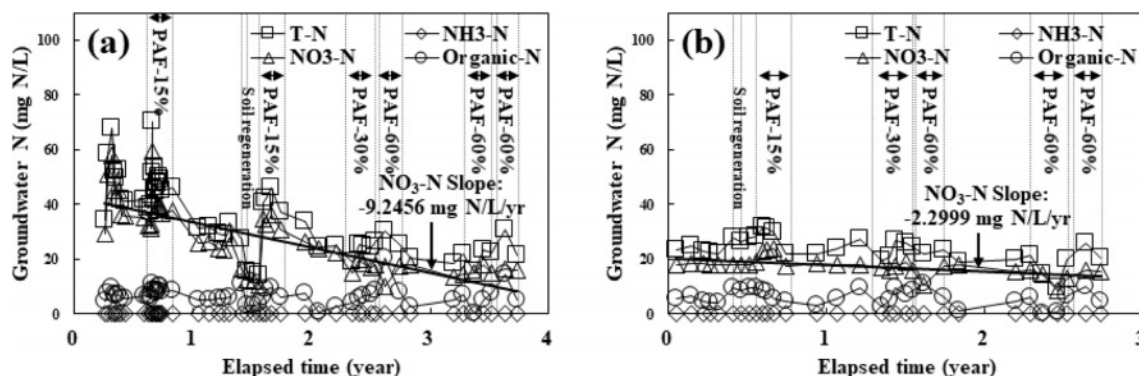


Fig. 6. Groundwater monitoring data of PAF-15, 30, and 60% applied plot #2 at YS1 site (a), and PAF-15, 30, and 60% applied plot #4 at YS2 site (b). Square symbol (\square), diamond symbol (\diamond), triangle symbol (\triangle), circle symbol (\circ) with solid line represent T-N, NH_3 -N, NO_3 -N, organic-N concentration in groundwater respectively; vertical dotted line represents cultivation period; bold solid line represents linear regression of NO_3 -N concentration in groundwater.

할 수 있었다. 그러나 지하수 내 질산성질소 농도 변화와 관개 시비의 인과관계가 확인되지 않아 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 경작지 내 토양개량 및 관개 시비 적용에 따른 지하수로 침투하는 질산성질소의 부하 저감 평가를 위해, BR, YS1, YS2 지역에서 화학비료만을 시비하는 GAP와 CF-60%, 지하수를 관개 시비하는 PAF-15~60%를 약 3년간 경작지에 적용하며 불포화층의 토양, 토양 공극수, 포화층의 지하수를 모니터링하였다. 원토양 조건의 BR 지역 시험구 #2, 토양개량 조건의 YS1 지역 시험구 #2, YS2 지역 시험구 #4에서 지하수를 관개 시비하는 PAF-15~60%를 5~6회 반복 실험을 실시한 결과, 토양 공극수 내 질산성질소 농도 추세가 각각 -8.3485, -3.527, -5.0381 mg-N/L/yr로 나타나, 관개 시비는 토양 공극수 내 질산성질소 농도를 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 토양개량 여부에 따른 불포화층 내 질산성질소 침투량을 평가한 결과, 토양개량 후 관개 시비를 적용한 조건의 질산성질소 침투량 평균이 원토양 조건의 질산성질소 침투량 평균의 71%로 산출되어, 관개 시비 적용에 토양개량을 추가적으로 실시한다면 효과적으로 지하수로 침투하는 질산성질소의 부하를 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 또한 지하수 비중별 불포화층 내 질산성질소 침투량을 평가한 결과, PAF-60% 적용 시 CF-60% 대비 평균 42%의 질산성질소 침투량이 저감된 점으로 보아, 지하수를 이용한 관개 시비는 지하수의 비중이 높을수록 지하수로 침투하는 질산성질소의 부하를 감소시킬 수 있음을 확인하였

다. 관개 시비를 적용한 YS1 지역 시험구 #2, YS2 지역 시험구 #4에서 지하수를 모니터링한 결과, 지하수 내 질산성질소의 농도 추세는 각각 -9.2456, -2.2999 mg-N/L/yr로 나타나 질산성질소 농도가 지속적으로 감소하는 양상으로 확인하였으나, 이러한 농도 변화와 관개 시비의 인과관계가 명확히 규명되지 않아 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서는 관개 시비 적용 시 지하수로의 오염물질 침투량 저감만을 고려하였으므로, 경작물의 성장성을 고려한 최적의 관개 시비 방법에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

사 사

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2017-03-02-021; NIER-2018-03-02-005; NIER-2019-04-02-013; NIER-2020-04-02-052; NIER-2021-04-02-113).

References

- Babiker, I.S., Mohamed, M.A., Terao, H., Kato, K., and Ohta, K., 2004, Assessment of groundwater contamination by nitrate leaching from intensive vegetable cultivation using geographical information system, *Environ. Int.*, **29**(8), 1009-1017.
- Baram, S., Couvreur, V., Harter, T., Read, M., Brown, P.H., Hopmans, J.W., and Smart, D.R., 2016, Assessment of orchard N losses to groundwater with a vadose zone monitoring network, *Agric. Water Manag.*, **172**, 83-95.
- Cahn, M., Pump And Fertilize: How To Factor Irrigation Water Into Nitrogen Budgets, <https://www.growingproduce.com/vege->

tables/pump-and-fertilize-how-to-factor-irrigation-water-into-nitrogen-budgets [accessed 24.01.04]

Chen, S., Wu, W., Hu, K., and Li, W., 2010, The effects of land use change and irrigation water resource on nitrate contamination in shallow groundwater at county scale, *Ecol. Complex.*, **7**(2), 131-138.

Cho, J.Y., 2011, Cultivation environment in relation to good agricultural practices in the major cultivation area of disocorea batatas, *J. Appl. Biol. Chem.*, **54**(4), 290-295.

Huang, W.Y., Shank, D., and Hewitt, T.I., 1996, On-farm costs of reducing residual nitrogen on cropland vulnerable to nitrate leaching. *Rev. Agric. Econ.*, **18**(3), 325-339.

Ju, X., Liu, X., Zhang, F., and Roelcke, M., 2004, Nitrogen fertilization, soil nitrate accumulation, and policy recommendations in several agricultural regions of China, *AMBIO: A J. of the Human Environment*, **33**(6), 300-305.

Ju, X.T., Kou, C.L., Zhang, F.S., and Christie, P., 2006, Nitrogen balance and groundwater nitrate contamination: comparison among three intensive cropping systems on the North China Plain, *Environ. pollut.*, **143**(1), 117-125.

Kim, C.S., Ko, J.Y., Lee, J.S., Jung, K.Y., Park, S.T., Ku, Y.C., and Kang, H.W., 2007, Use of drainage water as irrigation resource in the paddy field to mitigate non-point source pollutants, *Korean J. Environ. Agric.*, **26**(2), 107-115.

Kim, H.R., Yu, S., Oh, J., Kim, K.H., Lee, J.H., Moniruzzaman, M., Kim, H.K., and Yun, S.T., 2019, Nitrate contamination and subsequent hydrogeochemical processes of shallow groundwater in agro-livestock farming districts in South Korea, *Agric.*

Ecosyst. Environ., **273**, 50-61.

King, A.M., Boyle, D., Jensen, V.B., Fogg, G.E., and Harter, T., 2012, Groundwater Remediation. Technical Report 5, Center for Watershed Sciences, University of California, Davis.

Korea Ministry of Environment (KMOE), 2014, Survey Report on the Background and Pollution of Groundwater in Livestock Area ('14), National Institute of Environmental Research.

Martin, D.L., Watts, D.G., Mielke, L.N., Frank, K.D., and Eisenhauer, D.E., 1982, Evaluation of nitrogen and irrigation management for corn production using water high in nitrate, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **46**(5), 1056-1062.

Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), 2008, Environmental Performance of Agriculture in OECD Countries since 1990, OECD Publishing, France.

Rural Development Administration (RDA), 2010a, Fertilizer Recommendations Guidelines for Crops, National Academy of Agricultural Science, RDA.

Rural Development Administration (RDA), 2010b, Methods of Soil Chemical Analysis, National Academy of Agricultural Science, RDA.

Viers, J.H., Liptzin, D., Rosenstock, T.S., Jensen, V.B., Hollander, A.D., McNally, A., King, A.M., Kourakos, G., Lopez, E.M., De La Mora, N., Fryjoff-Hung, A., Dzurella, K.N., Canada, H.E., Laybourne, S., McKenney, C., Darby, J., Quinn, J.F., and Harter, T., 2012, Nitrogen Sources and Loading to Groundwater. Technical Report 2, Center for Watershed Sciences, University of California, Davis.