

Article

<https://doi.org/10.7745/KJSSF.2018.51.4.420>

pISSN : 0367-6315 eISSN : 2288-2162

Effects of Nitrogen Source on Corn (*Zea mays* L.) and Leached Water Using Stable Nitrogen Isotope

Ki In Kim*, Tae Jun Lim¹, and Kyeong Bo Lee²

Department of Horticultural Science, Mokpo National University, Muan 58554, Korea

¹Department of Korea Program on International Agriculture, Technology Cooperation Bureau, Rural Development Administration, Jeonju 54875, Korea²Bioenergy Crop Research Institute, National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, Muan 58545, Korea*Corresponding author: rollingkim@mokpo.ac.kr

ABSTRACT

Received: August 22, 2018**Revised:** November 7, 2018**Accepted:** November 12, 2018

The objective of this study was to evaluate nitrogen (N) source tracing using N stable isotope on corn (*Zea mays* L.) and leached water. Five nitrogen treatments were control (No nitrogen), 2 chemical N fertilizer (urea and slow released nitrogen (SRN), 1 cattle nitrogen manure (CM), and 1 oil cake from rapeseed (*Brassica napus* L.) after oil extraction. N rate was 200 kg N ha⁻¹. The experiment was designed by a completely randomized block design with four replications. Lysimeter was filled with 4 kg of soil and corn was planted. Plant samples were collected at a growth stage of V6 and analyzed for total N and $\delta^{15}\text{N}$. Water samples were collected every week and analyzed for nitrate-N and $\delta^{15}\text{N}$. In this study, total N content at a growth stage of V6 corn plant ranged from 0.56% to 4.07%. N content was 0.56% for the control, 0.57% for the CM, 3.16% for the SRN, 3.19% for the oil cake, and 4.07% for the urea treatment. $\delta^{15}\text{N}$ value at a growth stage of V6 corn plant ranged from 0.098‰ to -3.453‰. $\delta^{15}\text{N}$ value in corn plant was -3.453‰ for the SRN treatment, -0.213‰ for the urea, 0.098‰ for the control, 2.935‰ for the oil cake, and 5.563‰ for the CM. Nitrate-N concentration in leached water was the lowest under control, followed by CM, SRM, oil cake, and nitrate-N concentration in leached was the highest under urea treatment. These results suggest different N mineralization from diverse N sources. Averaged $\delta^{15}\text{N}$ isotope value in leached water changed from negative to positive. Averaged $\delta^{15}\text{N}$ isotope under chemical N fertilizers such as urea and SRN was -16‰ and -15.0‰, respectively at the 5th week. Averaged $\delta^{15}\text{N}$ isotope values for all N treatments changed during the experiment. These results indicate that $\delta^{15}\text{N}$ isotope technique can be used for leached water samples to differentiate N sources. However, further research is needed to clarify the exact timing of sampling based on different N sources.

Keywords: Leaching, nitrogen stable isotope, soil waterLeached soil water analysis for $\delta^{15}\text{N}$ at the 5th week and the 7th week after N treatment in 2016.

N treatment	After N treatment	
	5 th week	7 th week
	$\delta^{15}\text{N}$	
	‰	
Control	NA [†]	NA
Urea	-16.6 ± 0.38 [‡]	0.1 ± 0.37
SRN	-15.0 ± 0.91	-7.2 ± 1.13
Oil cake	-13.2 ± 0.75	15.5 ± 1.9
CM	-0.1	27.2

[†]NA is not available.[‡]Standard Error (n=4), Number of observations of $\delta^{15}\text{N}$ value of CM at the 5th week and the 7th week is one each.

Introduction

농업에서 작물 재배 시 사용하는 질소 원소는 다량원소로서 작물 생산에 매우 긍정적인 효과가 있다. 이러한 질소는 토양내에서 무기화작용, 용탈 등 다양한 생물 화학적 변화와 물리적인 이동 형태를 가지고 있다 (Pierzynski et al., 1994; Van Cleemput, 1996). 질소는 무기화작용을 통하여 작물이 흡수할 수 있는 무기태 질소이온으로 변환되어 토양 내에 존재하고 이런 질소의 다양한 변화는 농업적인 측면 뿐만 아니라 환경적인 측면에서도 매우 중요한 역할을 하고 있다. 작물의 뿌리에서 흡수되지 못한 무기태 질소이온은 토양수에 녹아 용탈되어 지하수 등으로 이동되어 지하수를 오염시킬 수 있는 잠재적인 오염원으로 평가하고 있다. 환경오염 측면에서 녹조, 지하수 오염 등의 발생원인은 물속에 존재하는 질소농도와 매우 밀접한 관련이 있다. 이러한 이유로 농업인뿐만 아니라 일반 시민들까지도 음용수 및 지하수에 함유된 질산태 질소의 농도 수준과 음용시 안전성 여부와 비점오염원으로서 기여도 등에 대하여 많은 관심을 가지고 있다. 농업에서 사용하는 세가지 질소원은 화학질소비료, 가축분뇨, 그리고 유기물 등으로 크게 구분되어 진다. 대표적인 세가지 질소원 중 화학질소비료는 대기중에 존재하는 N_2 가스를 Harber-Bosch 공정을 거쳐 제조하고 있으며, 축산활동으로 생긴 가축분뇨는 축분, 돈분, 계분 등이 있으며 유기물은 작물 수확 후에 토양으로 환원된 작물체, 유기질 퇴비 및 유박 등이 있다. 가축분뇨 중 돼지분뇨의 총질소 함량은 0.17% (Kang et al., 2011)로 보고되었고 돈분액 비인 경우 화학비료의 일부 또는 전체를 대체 사용 가능하다고도 하였다 (Jensen et al., 2000; Park et al., 2011). 이러한 세가지 질소원은 물리적으로는 판별이 매우 용이하나 세가지 질소원을 토양에 시비하여 토양미생물에 의해 질소 무기화작용이 일어나 작물이 사용할 수 있는 암모니아태질소와 질산태질소로 변화하게 되면 세가지 질소원을 화학적으로 구별하기는 매우 어렵다. 무기태 질소는 토양수에 용해되어 작물에 흡수되거나 토양수의 이동 및 용탈등 다양한 경로를 거쳐 지하수 등의 수계로 흘러 들어갈 경우 세가지 질소원을 구별하기는 더욱 어려운 실정이다. 질산태질소의 존재 여부는 음용수의 품질에 큰 영향을 미치고 있고 현재 우리나라의 경우 미국 환경보호국 (EPA)의 음용수 안전 기준을 따르고 있는데 이 중 음용수의 질산태 질소 함유 농도를 10 mg L^{-1} 이하로 제한하고 있다 (U.S. Environmental Protection Agency, 2010). 영아의 경우 질산태질소의 농도가 10 mg L^{-1} 이상이 되는 음용수에 장기간 노출될 경우 청색증 등 건강에 이상을 일으킨다고 보고되고 있다. 토양에 사용된 질소비료가 토양미생물에 의해 무기화과정을 거쳐 식물뿌리에서 모두 흡수된다면 작물 질소이용효율 측면에서 굉장히 유용하겠지만 질소이용효율 (Kim et al., 2008a)은 40%이하로 보고되고 있어 작물에 흡수되지 못한 나머지 질산태 질소는 용탈 (Han et al., 2008)되어 지하수 또는 지표수로 유입되어 수질오염을 일으키게 될 가능성이 매우 높다. 앞에서 언급한 것 같이 세가지 질소원은 물리적으로는 구별이 매우 용이 하지만 화학적으로 구조가 매우 비슷하여 일반적인 화학분석 방법으로는 질소원을 구별하기가 거의 불가능 하여 농업적인 측면에서의 수계의 오염 기여도를 제시하기는 매우 어렵다. 미국 USGS의 지하수오염 등에 대한 연구에서도 축산단지내의 지하수 오염의 원인이 가축분뇨의 이동에 의한 것이라고 추정하는 실정이다.

실제로 농업을 연구하는 많은 연구자들이 질소순환, 질소효율, 질산태 질소의 용탈 (Randall and Vetsch, 2008), 질소 이동 경로 추적 등에 대해 오랫동안 연구를 했음에도 불구하고 아직도 정확히 구명되지 않은 부분 중의 하나가 질소원 추적에 대한 연구이다. 이러한 상황에서 환경오염, 특히 수질오염의 원인중의 하나가 농업에서 사용하는 화학질소비료와 가축분뇨로 지목되고 있는 실정이다. 수질 오염원으로서 화학질소비료, 가축분뇨, 폐수, 대기중의 질소 등 다양한 질소원이 오염원이 될 수가 있다 (EPA, 2010). 우리나라뿐만 아니라 국외에서도 수질 오염 문제가 점점 더 심각해지는 추세이다. 미국에서는 수질오염과 관련하여 수질 오염원에 대한 추적 연구와 수질 오염원으로 판명될 경우 오염원 사용 감축 등을 통해 수질오염을 규제하려는 움직임을 보이고 있고 호수나 하천에 유입되는 질소와 인의 농도

변화를 수년간 모니터링 한 후 기준치 이상일 경우 오염원 추적을 통하여 오염원의 원인을 제거하려고 하고 있다. EPA에서 하루 동안 최대치로 배출할 수 있는 질산태질소나 인산의 농도를 측정하여 규제 농도 이상일 경우 집중관리 대상으로 지정하여 오염원의 배출 원인과 감축을 하기 위해 정책적인 시행을 준비하고 있다.

우리나라인 경우 2015년 이후 가축분뇨 해양투기가 금지됨에 따라 가축분 퇴비의 재활용에 대해 다시 한 번 고려해 봐야 할 과제 중 하나이다. 왜냐하면 최근까지 매년 3%의 가축분을 해양 폐기물투기 하였지만 더 이상은 해양투기를 할 수가 없게 되었고 가축분을 야적할 공간도 부족하여 적절한 관리를 하지 않을 경우 수질 오염으로 이어질 가능성도 매우 크다. 이외에도 한국의 경우 노지재배뿐만 아니라 시설하우스를 활용한 재배도 활발히 이루어지고 있다. 시설하우스 내 토양의 염류집적과 잦은 관수로 인한 양분의 용탈, 양분 용탈로 인한 수질 오염에 기여할 것으로 판단된다. 따라서 질소원 추적에 따른 질소오염원 추적 등은 환경오염 측면에서도 반드시 정립되어야 한다. 질소원 오염 추적에 대한 정량적인 방법을 제시하기 위해 사용할 수 있는 방법 중 하나의 방법은 질소 안정동위원소를 사용하는 것이다. 지구 대기 중에 있는 존재하는 질소는 지구 대기의 78.08%를 차지하고 있고 두 개의 질소 안정동위원소인 ^{14}N 과 ^{15}N 으로 구성되어 있다. 지구 대기의 78.08% 중 안정동위원소 비율은 ^{14}N 이 99.634%, ^{15}N 이 0.37%를 차지하고 있다. 질소 안정동위원소는 유기농산물 판별 등에 대한 실용적인 연구 및 이론적인 연구 등에도 활용하고 있다. 질소 동위원소비는 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 로서 $\delta^{15}\text{N}$ 로 표시하며 Kim et al. (2008) 보고에 의하면 요소비료의 $\delta^{15}\text{N}$ 는 -1.45‰, 화학질소비료가 사용되지 않은 토양의 $\delta^{15}\text{N}$ 는 4.67‰이다. Young et al. (2013)은 낙농업을 하는 두 농가의 지하수를 채취 후 분석한 결과 $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3$ 농도 범위는 +2.9‰에서부터 +49.4‰로 보고 하였으며 질소원은 축분에 의한 것이라 보고하였다. 일반적인 화학질소비료에 의한 $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3$ 농도 범위는 -4‰에서 +4‰ (Kendall et al., 2007) 그리고 -6‰부터 +6‰ (Xue et al., 2009)으로 보고하였다.

따라서 본 연구의 목적은 옥수수 재배 시 질소원 추적을 위해 다양한 질소원을 라이시미터 처리구에 사용 한 후 식물체, 토양, 토양수의 질소흡수량과 용탈양등의 안전질소동위원소 분석을 통하여 질소원 이동 추적이 가능한지 여부를 평가하고자 한다.

Materials and Methods

시험 재료 2016년도 옥수수 재배시험에 적용된 공시토양의 토성은 식양토이었고 pH는 6.4, 유효인산 함량은 60 mg kg^{-1} , 질산태질소 함량은 14 mg kg^{-1} , 유기물함량은 15.0 g kg^{-1} 이었다 (Table 1). 본 재배시험 이용된 질소 비료는 요소비료, 완효성비료, 가축퇴비분과 유박을 사용하였다.

처리 및 방법 본 실험은 2016년 6월 전라남도 무안군에 위치하는 국립식량과학원 바이오에너지작물연구소 시설하우스 내에 원통형 라이시미터 (지름 $15 \text{ cm} \times$ 높이 60 cm)에 4 kg 의 토양을 50 cm 깊이로 충전하였다. 토양 충전

Table 1. Physicochemical properties of the soil used for the experiment.

Soil texture	pH	Organic matter	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	Avail. P_2O_5	Exch. cation		
					K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}
	(1:5)	g kg^{-1}	----- mg kg^{-1} -----		----- $\text{cmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}$ -----		
Silty clay loam	6.4	15.0	14.0	60	0.45	4.5	1.2

후 옥수수를 파종하였으며 옥수수 파종 후 5개의 질소원 (무비구, 화학질소비료 (요소 및 요소비료가 코팅된 완효성 비료), 유기물 (가축퇴비 및 유박)를 4반복으로 200 kg N ha⁻¹ 수준으로 질소시비처리 하였다. 원통형 라이시미터 하단에는 다공형 도자기판을 부착하여 토양수가 용탈될 수 있도록 설계 제작 되었다. 토양수 채집은 옥수수 생육 중 1주 일 간격으로 실시하였고 관개수는 400 ml의 증류수로 관수하였으며 관개 1일후 토양에서 용탈된 용탈수를 채취하였으며 채취날짜는 2016년 6월 28일, 7월 7일, 7월 12일, 7월 15일, 7월 21일, 7월 27일, 8월 3일, 8월 5일 동안 총 8회 채 취하였으며 라이시미터 크기 제한으로 인해 옥수수는 파종후 60일까지 V6까지만 재배하였다.

토양 및 식물체 분석 토양 및 식물체 분석은 토양화학분석법 (NIAST, 2000)의 토양 및 식물체 분석법에 준하였다. 토양 pH는 토양과 증류수의 비율을 1:5로 하여 초자전극법으로 측정하였다. 토양 유기물은 Tyurin 법, 유효인 산은 Lancaster 법, 치환성 칼륨, 칼슘, 마그네슘은 1N-CH₃COONH₄ (pH 7.0) 완충용액으로 침출하여 ICP-OES (MX2, GBC, Australia)를 사용하여 측정하였다. 질산태 질소는 2M-KCl로 침출후 암모니아를 제거한 후 켈달 분해 장치 (B-316, Buchi, Switzerland)로 증류한 후 0.01 N 황산 표준용액으로 적정하여 계산하였다. 식물체의 총질소와 δ¹⁵N의 안정성 동위원소 분석 질량분석기 (Stable Isotope Ratio Mass Spectrometer System with Elemental Analyzer) 로 분석하였다. 토양수 시료는 질산태 질소 성분을 분석하였으며 질산태 질소를 함유한 경우 토양수의 δ¹⁵N 동위원 소 분석을 실시하였다 (Young et al., 2013). 옥수수 시료는 60°C 건조기에 건조 후 분쇄하여 식물체 총질소 및 δ¹⁵N 을 실시하였다. 통계분석은 SAS 통계프로그램 (v. 9.2)를 이용하여 ANOVA 분석을 실시하였다.

Results and Discussion

옥수수의 총질소 및 질소 안정동위원소 함량 옥수수의 V6 생육시기에 조사한 각 처리구간의 옥수수 총질소 함량은 무비구인 경우 0.56%, 요소 4.07%, 완효성비료 3.16%, 유박 3.19%, 그리고 축분인 경우 0.57%로 나타나 (Table 2). 옥수수에 질소 공급이 원활하게 이루어지는 것은 요소 처리구, 완효성비료 처리구, 그리고 유박 처리구이었다. 옥수수에 함유된 δ¹⁵N의 값은 무비구 0.098‰, 화학질소비료인 요소와 완효성비료는 각각 -0.213‰과 -3.453‰이 었고 유기질비료인 유박과 축분은 각각 +2.935 ‰과 +5.563‰이었다. 이러한 결과로 미루어 보아 질소원으로 시비한 각각의 질소비료원은 옥수수에 의해 이용되고 있음을 알 수 있었고 옥수수에 흡수된 질소 비료원 중 화학질소비료원인

Table 2. Plant analysis for total N and δ¹⁵N at V6 growth stage of corn.

N treatment [†]	Total N	δ ¹⁵ N
	----- % -----	----- ‰ -----
Control	0.56 ^{a‡}	0.098 ± 0.13 [§]
Urea	4.07 ^c	-0.213 ± 0.36
SRN	3.16 ^b	-3.453 ± 0.13
Oil cake	3.19 ^b	2.935 ± 0.36
CM	0.57 ^a	5.563 ± 0.13

[†]SRN is slow released nitrogen. CM is manure from cattle.

[‡]Mean separation within columns by Duncan's multiple range test at p=0.05.

[§]Standard Error (n=4).

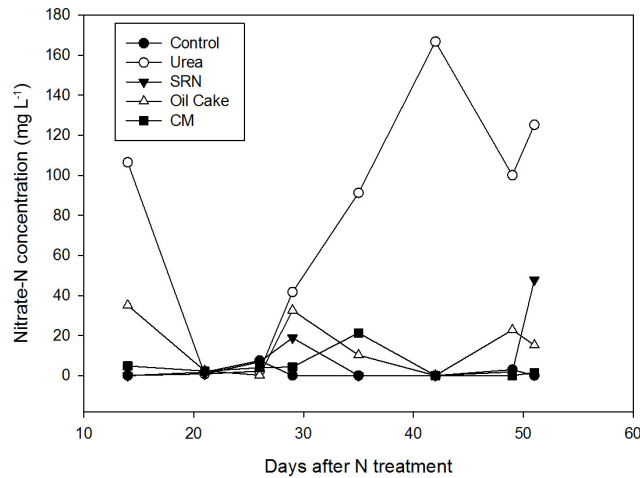


Fig. 1. Nitrate-N concentration (mg L^{-1}) in soil water under control (No nitrogen), urea, slow released nitrogen (SRN), oil cake, and cattle manure (CM) treatments.

요소와 완효성비료는 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 음이었으며 유기질비료원인 유박과 축분은 양의 값을 나타내었다. Lim et al. (2010) 은 화학비료, 가축분뇨 및 퇴비의 질소 동위원소비를 조사하여 평균 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 화학비료가 $-1.5 \pm 0.5\%$ (범위: $-3.9 \sim +0.5\%$), 가축분뇨가 $+6.3 \pm 0.4\%$ ($+5.3 \sim +7.2\%$), 가축분퇴비가 $+16.0 \pm 0.4\%$ ($+9.3 \sim +20.9\%$)로 보고하였다.

질산태질소 용탈 각 라이시미터에 질소원별로 5개의 질소비료를 처리 후 용탈수에 함유된 질산태질소 분석 결과는 Fig. 1과 같다. 5개의 질소비료원은 용탈시기에 따라서 질산태질소 농도가 다양한 것을 알 수 있다. Han et al. (2008) 은 요소비료 용탈실험을 통해서 용탈수에 의한 질산태질소의 수직적 이동을 보고하였고 본 실험결과와 동일한 결과를 나타냈다. 질소비료를 시비하지 않는 무비구인 경우 용탈수에 포함된 질산태질소의 농도가 매우 낮았으며 가장 높은 질산태질소의 농도는 요소비료였고 다음으로 유박, 완효성비료, 축분퇴비 순이었다. 용탈 시기별로 질소원에 따라 농도차가 나는 경향을 보였다. 이러한 결과로 미루어 보면 화학질소비료는 토양과 즉시 반응하여 질산태질소로 바로 무기화 되는 경향을 가지는 것을 알 수 있었고 완효성비료나 유박, 축분퇴비 등은 요소비료보다 무기화 속도가 훨씬 느리다는 것을 알 수 있다. 전체적으로 무비구를 제외한 모든 질소 처리구에서 지하수 음용기준인 10 mg L^{-1} 이상인 경향을 보여 이 실험결과로 미루어 보면 농업에서 사용하는 질소비료원이 용탈될 경우 수질오염원이 될 수 있는 가능성이 있다.

용탈수의 질소동위원소 함량 5개의 질소원별로 처리한 용탈수에 질산태질소가 함유되어 있는 경우 추가적으로 진행된 토양수의 질소 안정동위원소 분석 결과는 Table 3과 같다. 질소 비료 처리 후 5주째에 채취한 용탈수의 질소 안정동위원소는 전체적으로 음의 값을 7주째에 채취한 용탈수의 질소 동위원소는 양의 값을 보였다. 화학질소비료, 즉 요소와 완효성 질소 비료인 경우 5주째 질소 동위원소 값은 -16.6% 과 -15.0% 을 각각 나타내었다. 5개의 질소 원별로 처리한 용탈수의 질소 동위원소 함량은 시간이 지남에 따라 값이 증가하는 경향을 보였다. 요소비료 처리구인 경우 5주째에 채취한 용탈수의 질소 동위원소 함량은 -16.6% 이었고 7주째에 채취한 용탈수의 질소 동위원소 함량은 $+0.1\%$ 를 나타내어 주된 질소원이 바뀌는 것을 알 수 있다. 완효성비료의 경우 5주째에 채취한 용탈수의 질소 동위원소 함량은 -15.6% 로 요소비료와 비슷한 경향을 보였지만 7주째에 채취한 용탈수의 질소 동위원소 함량은 -7.2% 를 나타내어 완효성비료인 경우 요소비료보다 토양에서 훨씬 더 오래 잔류할 수 있다는 것을 보여주고 있다. 유박인 경우

Table 3. Leached soil water analysis for $\delta^{15}\text{N}$ at the 5th week and the 7th week after N treatment in 2016.

N treatment	After N treatment	
	5 th week	7 th week
	$\delta^{15}\text{N}$	
----- % -----		
Control	NA [†]	NA
Urea	-16.6 ± 0.38 [‡]	0.1 ± 0.37
SRN	-15.0 ± 0.91	-7.2 ± 1.13
Oil cake	-13.2 ± 0.75	15.5 ± 1.9
CM	-0.1	27.2

[†]NA is not available.

[‡]Standard Error (n=4), Number of observations of ^{15}N value of CM at the 5th week and the 7th week is one each.

5주째에 채취한 용탈수의 질소 동위원소 함량은 -13.2% 이지만 7주째에 채취한 용탈수의 질소 동위원소 함량은 +15.5%를 나타내었다. 축분퇴비와 무비구인 경우 용탈이 발생되었으나 질산태질소의 농도도 낮아 질소 안정동위원소 분석 결과 도출하기가 어려울 것으로 판단된다.

Conclusions

본 연구는 질소원 추적을 위해 라이시미터 처리구에 다양한 질소원을 시험 처리 후 옥수수와 토양수로 이동된 질소원의 질소원 이동 추적이 가능한지 여부를 알아보기 위해 수행되었으며 질소원으로 시비한 각각의 질소비료원은 옥수수에 의해 이용되고 있음을 알 수 있었고 옥수수에 흡수된 질소 비료원 중 화학질소비료원인 요소와 완효성비료는 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 음이었으며 유기질비료원인 유박과 축분은 양의 값을 나타내었다. 모든 처리구에서 질산태질소의 용탈이 일어났으며 무비구를 제외한 모든 질소 처리구에서 지하수 음용기준인 10 mg L^{-1} 보다 높은 경향을 보여 농업에서 사용하는 질소비료원이 수질오염원이 될 가능성이 있는 것으로 보여진다. 요소와 완효성 질소 비료인 경우 5주째 질소 동위원소 값은 -16.6% 과 -15.0%을 각각 나타내었다. 5개의 질소원별로 처리한 용탈수의 질소 동위원소 함량은 시간이 지남에 따라 값이 증가하는 경향을 보였다. 요소비료 처리구인 경우 5주째에 채취한 용탈수의 질소동위원소 함량은 -16.6% 이었고 7주째에 채취한 용탈수의 질소 동위원소 함량은 +0.1%를 나타내어 요소비료의 용탈이 빠르게 진행하고 이로 인해 주된 질소원이 토양 유기물로 바뀌는 것으로 판단된다. 본 실험 조건에서 완효성비료의 경우 5주째에 채취한 용탈수의 질소 동위원소 함량은 -15.6%로 요소비료와 비슷한 경향을 보였지만 7주째에 채취한 용탈수의 질소 동위원소 함량은 -7.2%를 나타내어 완효성비료인 경우 요소비료보다 토양에서 훨씬 더 오래 잔류할 수 있다는 것을 보여주고 있다. 유박인 경우 5주째에 채취한 용탈수의 질소 동위원소 함량은 -13.2% 이지만 7주째에 채취한 용탈수의 질소 동위원소 함량은 + 15.5%를 나타내었다.

Acknowledgement

This Research was supported(in part) by Research Funds of Mokpo National University in 2015.

References

- Fogg, G.E., D.E. Rolston, D.L. Decker, D.T. Louie, and M.E. Grismer. 1998. Spatial variation in nitrogen isotope values beneath nitrate contamination sources. *Ground Water* 36(3):418-426.
- Han, K., H. Ro, H. Cho, L. Kim, S. Hwang, H. Cho, and K. Song. 2008. Mobility of nitrate and phosphate through small lysimeter with three physico-chemically different soils. *Korean Soc. Soil Sci. Fert.* 41:260-266.
- Jensen, L.S., I.S. Pedersen, T.B. Hansen, and N.E. Nielsen. 2000. Turnover and fate of ^{15}N -labelled cattle slurry ammonium-N applied in the autumn to winter wheat. *Eur. J. Agro.* 12:23-35.
- Kang, H., S. Yang, and S. Lee. 2011. Effects of liquid pig manure on growth of potato, soil chemical properties and infiltration water quality. *Korean Soc. Soil Sci. Fert.* 44:1130-1136.
- Kendall, C., E.M. Elliott, and S.D. Wankel. 2007. Tracing anthropogenic inputs of nitrogen to ecosystems. Stable isotopes in ecology and environmental science. R. H. Michener and K. Lajtha, Blackwell Publishing. 375-449.
- Kim, K., D.E. Clay, C.G. Carlson, S.A. Clay, and T. Trooien. 2008. Do synergistic relationships between nitrogen and water influence the ability of corn to use nitrogen derived from fertilizer and soil? *Agron. J.* 100:551-556.
- Lim, S.S., S.M. Lee, S.H. Lee, and W.J. Choi. 2010. Nitrogen isotope compositions of synthetic fertilizer, raw livestock manure slurry, and composted livestock manure. *Korean Soc. Soil Sci. Fert.* 43:453-457.
- Park, J.M., T.J. Lim, S.E. Lee, and I.B. Lee. 2011. Effect of pig slurry fertigation on soil chemical properties and growth and development of cucumber (*cucumis sativus* L.). *Korean Soc. Soil Sci. Fert.* 44:194-199.
- Pierzynski, G.M., J.T. Sims, and G.F. Vance. 1994. Soils and environmental quality. Lewis publishers. New York., USA.
- US Environmental Protection Agency. 2009. Ag 101. Nutrient Management.
- US Environmental Protection Agency. 2010. National Primary Drinking Water Regulations. Code of Federal Regulations, Title 40, Chapter I, Part 141.
- US Environmental Protection Agency. 2010. Total Maximum Daily Loads. Chapter 4- EPA and State Responsibilities.
- Van Cleemput, G. Hofman, and A. Vermoesen. 1996. Progress in nitrogen cycling studies. Kluwer Academic Publishers.
- Wassenaar, L. I., 1995. Evaluation of the origin and fate of nitrate in the Abbotsford aquifer using the isotopes of ^{15}N and ^{18}O in NO_3^- . *Appl. Geochem.* 10:391-405.
- Xue, D., J. Botte, B.D. Baets, F. Accoe, A. Nestler, P. Taylor, O. Van Cleemput, M. Berglund, and P. Boeckx. 2009. Present limitations and future prospects of stable isotope methods for nitrate source identification in surface and groundwater. *Water Res.* 43:1159-1170.
- Young, M., C. Kendall, K. Lockhart, B. Esser, and T. Harter. 2013. Using nitrate and water isotopes to evaluated groundwater quality beneath dairy farms in California. Task Report 2. SWRCB Agreement Number 04-184-555. Department of Land, Air, and Water Resources. University of California, Davis. 38 pages. <http://groundwater.ucdavis.edu>.