The Fate of ^{15}N -labeled Organic Materials Applied to Chinese Cabbages Cropping System

Cho-Rong Lee, Yura Oh, Bi-Na Song, Jung A Jung, Jeong-Lai Cho, Sang-Min Lee, and Nan-Hee An*

National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea

*Corresponding author: nanhee79@korea.kr

ABSTRACT

Received: February 5, 2020

Revised: February 21, 2020

Accepted: March 2, 2020

ORCID

Cho-Rong Lee

<https://orcid.org/0000-0002-4912-8035>

Nitrogen added to farmland is used to plants or remains in soil, or is lost to environment. We incorporated ^{15}N -labeled materials (Chemical fertilizer (CF), green manure (GM), livestock compost (LC), GM+LC, and oil cake (OC) to soil and cultivated Chinese cabbages (*Brassica rapa subsp. pekinensis*) and analyzed the ^{15}N recovery of crop and soil to investigate the fate of nitrogen. The results follow. The $^{15}\text{N}_{\text{crop}}$ recovery of chemical fertilizer (CF) was the highest, and that of organic materials differed by type. The $^{15}\text{N}_{\text{soil}}$ recovery of CF was the lowest, and that of organic materials was 3 - 6 times higher than CF. The $^{15}\text{N}_{\text{loss}}$ was not significantly difference between CF and organic materials (except GM+LC). As results, despite of the same amount of nitrogen input, there was the difference in plant uptake and soil residue between organic materials and CF. Nitrogen of CF is used to Chinese cabbages more than organic materials, however most of the remaining nitrogen is estimated to be lost to the environment. Therefore, CF might be hard to occur residual effect in the next cropping season. In organic materials, nitrogen is less used to Chinese cabbages than CF, but remains in soil more than CF. Therefore, organic materials might be useful for improving soil fertility and have a residual effect in the next cropping season. We suggest that these properties of organic materials should be taken into account in calculating the amount of applied fertilizer in organic farming where mainly organic materials are used. Moreover, it is necessary to investigate the cumulative and residual effects of continuous input of the same organic materials.

Keywords: Organic materials, ^{15}N , Stable isotope, ^{15}N recovery, Nitrogen fate

Distribution of ^{15}N derived from materials to Chinese cabbages-soil-environment system.

Treatment	^{15}N distribution (%)		
	Crop [†]	Soil [‡]	Unaccounted [§]
Green manure (GM)	27	28	45
Livestock compost (LC)	8	47	45
GM+LC	25	50	25
Oil cake (OC)	25	23	51
Chemical fertilizer (CF)	50	6	44

[†] is $^{15}\text{N}_{\text{crop}}$ recovery of Chinese cabbages.

[‡] is $^{15}\text{N}_{\text{soil}}$ recovery in soil.

[§] is $^{15}\text{N}_{\text{loss}}$ into environment (100- $^{15}\text{N}_{\text{total}}$ recovery).

Introduction

질소는 작물 재배에 필수적인 다량 요구원소이며 작물 생산을 위해서는 적절한 질소 관리가 중요하다 (Hirel, 2001; Samborski, 2009; Giambalvo, 2010; Muchecheti, 2016). 질소 공급을 위해서 사용되는 비료에는 유안, 요소 등의 화학비료 (무기질비료)와 녹비작물, 가축분퇴비, 유박 등 유기질비료가 있다. 무기질비료와 유기질비료는 질소 공급 특성이 상이하다고 알려져 있다. 토양 수용액에 용해되어 바로 작물에 이용되는 속효성 비료인 화학비료와 달리 유기질비료는 아미노산 등의 유기태질소로 존재하기 때문에 작물에 이용되기 위해서는 미생물의 무기화과정이 필수적이다 (Smith, 2018). 이러한 화학비료와 유기질비료의 질소 공급 특성의 차이는 작물의 생산성 뿐만 아니라 토양 및 주변 환경에도 영향을 미칠 것이다. 작물 생산성 극대화에만 중점을 두던 과거의 농업과 달리 현재 농업은 친환경농업을 지향하고 있기 때문에 투입된 비료의 작물 생산성 증진과 환경에 미치는 영향 간의 균형이 필요하다 (Poffenbarger, 2018).

양분 공급을 목적으로 토양에 투입된 질소는 작물에 이용되며 남은 질소는 미생물체내로 유기화과정을 거쳐 토양에 남아 있거나 휘산·탈질·용탈 등 대기나 수계로 유실되는 등 다양하게 순환한다 (Dittert, 1998; Cassman, 2002; Poffenbarger, 2018). 미생물체내로 유기화 된 질소는 토양에 잔존하고 있다가 다음 작기에 분해되어 작물에 이용될 가능성이 있으며, 토양 내 질소가 휘산과 탈질 작용을 거쳐 대기로 유실되면 토양 비옥도 감소뿐 아니라 온실가스 (Janzen, 1991; Galloway, 2002; Gardner, 2009)와 미세먼지 (Lee, 2017; Kim, 2017)의 발생을 유발할 수 있다. 또한 수계로 유실된 질소는 청색증이나 부영양화와 같은 수질오염을 유발할 수 있다 (Carpenter, 1998; McIsaac, 2001; Gardner, 2009; Erisman, 2013; Valkama, 2015). 따라서 농경지에 투입한 질소가 작물에 이용되는지, 이용되지 않은 질소가 토양에 잔존하여 다음 작기에 질소를 공급하는지 대기나 수계로 유실되는지 등의 질소 동태를 추적하는 것은 매우 중요하다고 할 수 있다.

토양에 투입된 질소의 동태를 정량화하려면 기존에 토양에 있던 질소와 구분하는 것이 필수적이다. 이러한 구분과 농경지내 질소 동태 추적을 위해 대표적으로 동위원소를 활용하고 있다 (Holbeck, 2013). 동위원소란 같은 양성자 수를 가지는 원소 중 중성자의 수가 다른 원소로 화학적 성질이 동일하여 식물이나 미생물이 동위원소를 비특이적으로 이용하기 때문에 특정 물질의 기원을 추적할 때 많이 사용하고 있다. 이미 국내에서도 녹비작물에 질소 동위원소인 중 질소 (^{15}N)을 표지하여 녹비작물 내 질소가 콩에 얼마나 이용되는지를 추정 (Seo, 2008)하였으며, 일반 돈분퇴비와 중 질소가 농축된 요소 (^{15}N -enriched urea)를 배추에 시비하여 배추 체내의 질소가 퇴비와 요소 중 어디서 유래되었는지 구명하였다 (Ro, 2003). 또한 당밀발효농축액내 포함된 질소의 토양 중 행동을 연구하기 위하여 중질소를 활용하여 질산화, 유기화, 탈질 등으로의 행동을 연구하였다 (Lee, 2002). 현재까지 안정동위원소를 이용한 질소 동태 연구는 작물 이용성에 중점을 두고 수행되어 자재에서 유래한 질소가 토양 및 환경에 미치는 영향을 종합적으로 고찰한 연구는 거의 없는 실정이다.

본 연구는 토양양분관리를 위해 사용하는 다양한 유기자원 (녹비작물, 가축분퇴비, 유박 등)에서 유래된 질소의 작물, 토양으로의 동태를 조사하기 위하여 안정동위원소를 활용하여 연구를 수행하였다.

Materials and Methods

중질소 표지 유기자원 확보 및 토양 처리 실험에 사용한 유기자원은 녹비작물 2종 (헤어리베치, 호밀), 가축

분퇴비, 유박(대두박)으로 유기자원에서 유래한 질소와 기존에 토양에 있던 질소를 구분하기 위하여 유기자원에 중 질소를 인위적으로 표지 (labeling)하였다. 표지 방법은 선행연구 (Seo, 2008; Lee, 2013)를 참고하여 수행하였다. 녹 비작물은 고무포트에 토양을 충전하고 질소비료로 10 atom% 유안 (Sigma-aldrich)을 물에 녹여 투입하여 헤어리베 치와 호밀을 각각 재배하였다. 가축분퇴비의 중질소 표지는 앞서 중질소를 1차적으로 표지한 호밀 (5.4 atom%)을 표 지원으로 사용하였으며, 우분 (34%), 계분 (30%), 미강 (15%)을 주성분으로 하는 미숙퇴비 원료를 호밀과 함께 퇴비 화를 진행해 약 1달 동안 중질소가 표지되도록 하였다. 유박은 녹비작물과 동일한 방법으로 콩 (참을)을 재배하여 수 확한 후 수분 제거 (170°C), 가압 착유 (600 kPa)를 거쳐 기름이 제거된 콩 찌꺼기 (유박)를 회수하여 건조 후 사용하였다.

본 시험의 처리구는 녹비작물 (GM), 가축분퇴비 (LC), 녹비작물 + 가축분퇴비 혼용 (GM+LC), 유박 (OC), 화학비 료 (CF), 무처리 (CON) 총 6처리 3반복으로 구성하였다. 처리구 디자인은 난괴법으로 수행하였다. 녹비작물은 헤어 리베치와 호밀을 6:4 (w:w)로 혼합하여 사용하였고, 녹비작물 + 가축분퇴비는 3:7 (w:w)로 혼합하여 처리하였다. 유 박은 중질소를 표지한 유박이 부족하여 일반 콩으로 만든 유박을 1:1.3 (w:w)로 혼합하여 처리하였다. 화학비료는 10 atom% 유안 (Sigma-aldrich)을 질소비료로 사용하였다. 처리구 별 투입된 자재의 atom % ^{15}N 함량은 Table 1과 같다.

배추 재배 공시 작물은 배추 (CR추월)로 2018년 9월부터 12월까지 토양 11 kg를 채운 1/2000a와그너포트에 토 양검정 질소시비량의 130%인 45.6 kg N/10a에 해당하는 자재를 처리 후 전북 완주군 소재의 유리온실에서 재배하였 으며, 물관리는 처리별로 배추 생육차이가 발생하여 생육상태를 고려하여 포트별로 상이하게 투입하였다. 시험 전 토 양의 토성은 사양토이며 이화학적 분석결과는 Table 2와 같다.

토양 및 식물체 분석 작물이 이용하는 형태의 질소인 무기태질소 함량을 분석하기 위하여, 배추 정식 후 1, 3, 5, 7, 9, 11주 간격으로 토양을 채취하여 습토상태로 2 mm체 친 후 2M KCl로 침출하여 흐름주입분석기 (Lachat, QC8500, USA)를 이용하여 암모늄태 질소와 질산태 질소 함량을 각각 660 nm, 520 nm에서 분석하였다. 배추 수확 후 토양의 미생물체 내 질소함량 (Microbial biomass nitrogen, MBN)을 알아보기 위하여 토양을 습토 상태로 10 g씩

Table 1. Chemical components of treatments in the experiment.

Treatment	atom % ^{15}N	T-N (%)	C/N ratio
Green manure (GM)	5.00	3.5	11.2
Livestock compost (LC)	2.10	2.8	13.5
GM+LC	1.05	2.6	14.3
Oil cake (OC)	1.63	6.6	7.4
Chemical fertilizer (CF)	10	21	-

[†] GM is mixed of hairy vetch and rye at the ratio of 6:4 and GM+LC is mixed of green manure mixture and livestock compost at the ratio of 3:7.

Table 2. Physico-chemical properties of the soil used in the experiment.

Soil texture	pH	T-N (g kg ⁻¹)	OM [†] (g kg ⁻¹)	C/N	Available P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	Exchangeable cation (cmol ⁺ kg ⁻¹)		
						K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
Sandy Loam	5.7	0.4	15	23	450	0.47	3.61	1.81

[†] OM is organic matter

데시케이터에 넣고 클로로포름으로 혼증하여 미생물을 사멸시킨 후 0.5M K₂SO₄로 추출하여 유기탄소측정기 (Shimadzu, TOC-LCPH, Japan)으로 MBN 함량을 분석하였다.

¹⁵N 회수율 분석 시험에 사용된 유기자원과 배추는 70°C에서 건조하고, 토양은 7일 이상 풍건하여 시료를 볼밀러 (Retsch, Mixer Mill MM301, Germany)를 이용하여 곱게 갈아 원소분석기 (Elementar, vario Max CN element analyzer, Germany)를 이용하여 총 질소 함량을, 질량분석기 (Elementar, Isoprime IRMS, Germany)를 이용하여 시료내 질소 동위원소비 (¹⁴N/¹⁵N)인 δ¹⁵N을 측정하였다. δ¹⁵N는 대기 중 질소의 동위원소비를 기준으로 시료의 변이 정도를 나타내는 값이며 대기의 atom% ¹⁵N (0.3663%)을 이용하여 유기자원, 배추, 토양의 중질소 함량 (atom% ¹⁵N)을 (Eq. 1)와 같이 계산하였다.

$$\text{시료의 atom\% } ^{15}\text{N} = (\delta^{15}\text{N}/1000 + 1) \times \text{대기의 atom\% } ^{15}\text{N} \quad (\text{Eq. 1})$$

¹⁵N 회수율 (¹⁵N recovery, %)은 ¹⁵N 표지원으로 투입된 ¹⁵N이 시료로 회수된 비율로 수확 후 배추 (¹⁵N_{crop recovery})와 토양 (¹⁵N_{soil recovery})에 대해 (Eq. 2)와 같이 계산하였다 (Smith, 2018).

$$^{15}\text{N recovery (\%)} = N_{\text{sample}} (a - b) / N_{\text{fertilizer}} (c - d) \quad (\text{Eq. 2})$$

N_{sample}은 시료 (배추 또는 토양)의 총 질소함량이며 a는 ¹⁵N표지원이 투입된 시료의 atom % ¹⁵N, b는 무처리 시료의 atom% ¹⁵N를 나타내며, N_{fertilizer}는 ¹⁵N표지원의 질소함량이며, c는 ¹⁵N 표지원의 atom % ¹⁵N, d는 대기의 atom % ¹⁵N (0.3663%)이다.

배추와 토양의 총¹⁵N회수율 (¹⁵N_{total recovery}, %)은 배추 회수율 (¹⁵N_{crop recovery})과 토양 회수율 (¹⁵N_{soil recovery}) 합하여 계산하였고, 유기자원으로 투입된 ¹⁵N 중 배추와 토양에서 회수되지 않은 양 (100-¹⁵N_{total recovery})은 환경으로 유실된 것 (¹⁵N_{loss}, %)으로 추정하였다.

통계 분석 자료의 통계분석은 SPSS를 이용한 분산분석으로 수행하였고, 95% 수준에서 Duncan's New Multiple Range Test로 유의성 정도를 분석하였다.

Results and Discussion

유기자원의 중질소 표지량 분석 ¹⁵N를 인위적으로 표지한 호밀, 헤어리베치, 대두박, 가축분퇴비의 ¹⁵N 함량은 Table 3와 같다. 동일한 조건에서 중질소를 표지하지 않은 호밀 (0.41%)과 헤어리베치 (0.43%)의 ¹⁵N 함량은 대기 (0.37%)와 유사한 경향을 보였으나, ¹⁵N를 표지한 경우 10배 이상의 ¹⁵N가 식물체내로 표지되었다. 콩과작물인 헤어리베치와 대두박은 벼과작물인 호밀보다 ¹⁵N 표지량이 적었는데, 이는 질소고정을 하는 콩과작물은 대기 중의 질소를 고정하기 때문에 호밀보다 비료로 투입한 ¹⁵N을 조금 이용하였기 때문으로 판단된다. 또한 5.37 atom% ¹⁵N인 호밀을 이용하여 표지한 가축분퇴비는 1.05 atom% ¹⁵N으로 중질소 함량이 비교적 낮았지만 표지가 된 것을 확인하였다.

배추 수량 및 시험 후 토양 분석 수확기 배추의 수량은 Table 4과 같다. 무처리 대비 5개 유기자원과 화학비료 처리에서 배추 수량이 유의하게 증가하였으며, 유기자원과 화학비료 처리는 통계적으로 유의한 차이가 없었다. 배추의 Total N 및 ¹⁵N 흡수량은 유기자원 및 화학비료 처리에 유의한 영향을 받았으며, CF, GM, GM+LC, OC, LC, CON 순으로 높았다.

시험 후 토양 pH는 유기자원 및 화학비료 처리에 유의한 영향을 받았다 ($p < 0.05$). CON 대비 CF, GM, OC에서 유의하게 감소하였으며, LC와 GM+LC는 무처리와 차이가 없었다. Total N (g kg^{-1}) 및 Total C (g kg^{-1})는 CON 대비 CF 및 OC는 통계적으로 유의한 차이가 없었으나 GM, LC, GM+LC는 유의하게 높았다 (Table 5).

질소 동태 조사 ¹⁵N을 표지한 유기자원을 이용하여 유기자원에서 유래한 질소의 동태를 조사한 결과는 Table 6과 같다. 유기물 형태로 토양에 투입된 질소는 무기화과정을 거친 후 1)작물에 이용되며, 작물에 이용되지 못한 질소는 토양 미생물체로 유기화되거나 유기물형태로 2)토양에 잔존할 수 있다. 또한 탈질, 휘산, 유거, 용탈 등의 과정을 통해 3)환경으로 유실될 수 있다. 본 연구에서는 배추와 토양에 회수되지 않은 질소 (Unaccounted)는 유실된 것으로 계산하였으며, 끝이 막혀있는 포트에서 수행하여 유거나 용탈이 아닌 휘산이나 탈질을 통해 대기 중으로 유실된 것으로 판단하였다. 이에 실제 노지에서의 질소 유실량과는 차이가 있을 것으로 보인다.

Table 3. atom % ¹⁵N of organic materials used in the experiment.

Organic materials	Rye	Hairy vetch	Oil cake (soybean)	livestock compost
atom % ¹⁵ N	5.37	4.62	3.42	1.05

Table 4. Yields, N and ¹⁵N uptakes of Chinese cabbages in treatments (Mg ha^{-1}).

Treatment	Yields (Mg ha^{-1})	N contents (kg ha^{-1})	¹⁵ N contents (kg ha^{-1})
Control (CON)	86.3b	103d	0.4d
Green manure (GM)	202.2a	270b	8.0b
Livestock compost (LC)	163.1a	204c	1.2cd
GM+LC	187.2a	268b	3.5c
Oil cake (OC)	192.4a	233bc	2.7cd
Chemical fertilizer (CF)	195.8a	569a	28.5a

CON is control (non-application); GM is mixture of hairy vetch and rye; LC is livestock compost; GM+LC is mixture of GM and LC; OC is oil cake of soybean; CF is chemical fertilizer (ammonium sulfate) at the rate of $45.6 \text{ kg N ha}^{-1}$.

Table 5. Chemical properties of the soils after Chinese cabbages cultivation.

Treatment	pH	T-N (g kg^{-1})	T-C (g kg^{-1})
Control (CON)	7.0a	0.36c	8.28c
Green manure (GM)	6.7b	0.52ab	9.64b
Livestock compost (LC)	7.0a	0.64a	11.56a
GM+LC	6.9a	0.61a	10.79a
Oil cake (OC)	6.7b	0.45bc	8.43c
Chemical fertilizer (CF)	6.5b	0.38c	8.22c

[†] GM is mixed of hairy vetch and rye at the ratio of 6:4 and GM+LC is mixed of green manure mixture and livestock compost at the ratio of 3:7.

Table 6. Distribution of ^{15}N derived from materials to Chinese cabbages-soil-environment system.

Treatment	^{15}N distribution (%)		
	Crop [†]	Soil [‡]	Unaccounted [§]
Green manure (GM)	27	28	45
Livestock compost (LC)	8	47	45
GM+LC	25	50	25
Oil cake (OC)	25	23	51
Chemical fertilizer (CF)	50	6	44

[†] is $^{15}\text{N}_{\text{crop}}$ recovery of Chinese cabbages.

[‡] is $^{15}\text{N}_{\text{soil}}$ recovery in soil.

[§] is $^{15}\text{N}_{\text{loss}}$ into environment ($100 - ^{15}\text{N}_{\text{total}}$ recovery).

① 작물 ^{15}N 회수율 ($^{15}\text{N}_{\text{crop}}$ recovery) 자재에서 공급된 ^{15}N 이 작물에 이용된 비율인 $^{15}\text{N}_{\text{crop}}$ recovery을 조사한 결과는 다음과 같다. CF는 50%로 가장 회수율이 높았고, 4개의 유기자원 처리는 CF보다 낮고 종류별로 상이한 경향을 보여 동일량의 질소를 투입하더라도 자재에 따라 작물에 이용되는 비율이 달랐다. Smith (2018)이 ^{15}N 을 표지한 비료를 사용한 100여개 문헌을 검토하여 화학비료의 $^{15}\text{N}_{\text{crop}}$ recovery은 43%로 높고, 축분과 유기물잔사는 17 - 18%로 낮다고 보고한 결과와 같은 경향을 보였다.

유기자원 중 콩과작물이 포함된 GM, OC, GM+LC 처리는 각각 27%, 25%, 25%로 높은 회수율을 보였는데, Vargas et al. (2017)이 콩과작물인 crotalaria를 환원한 후 브로콜리의 $^{15}\text{N}_{\text{crop}}$ recovery가 29%이었다고 보고한 결과와 유사한 경향을 보였다. 작물이 흡수하는 질소는 무기태질소로 (Lim, 2014), 유기자원이 토양에 투입되고 난 후 무기화되어야 작물이 흡수할 수 있다. 자재 처리 후 토양의 무기태질소 함량을 정기적으로 조사한 결과 (Fig. 1), 초기 3주 동안 질소 무기화가 가장 활발하였으며 화학비료의 무기화량이 가장 많았고 유기자원은 GM, OC, GM+LC 순으로 높았다. 또한 토양의 무기태질소 함량이 높을수록 배추의 ^{15}N 흡수량이 높은 정의 상관관계 ($R^2 = 0.8776$)가 있었다 (Fig. 2).

Fig. 1. Changes of net mineral nitrogen in Chinese cabbages-cultivated soil over time.

LC는 $^{15}\text{N}_{\text{crop}}$ recovery이 8%로 가장 낮았는데 다수의 문헌에서 축분퇴비의 $^{15}\text{N}_{\text{crop}}$ recovery은 3 - 26%수준으로 낮다고 보고하였으며 (Kirchamn, 1990; Jensen, 1999; Holbeck, 2013), $^{15}\text{N}_{\text{crop}}$ recovery이 적은 것은 질소 유기화와 관련 있다고 하였다. Dittert et al. (1998)은 가축분퇴비의 암모니아가 호기적 조건에서 토양 미생물에 빠르게 이용된다고 하였는데, 본 연구에서 LC의 토양 질소 순무기화가 거의 발생하지 않은 것 (Fig. 1)으로 보아 LC유래 질소가 토양 미생물체내로 많이 이용되어 $^{15}\text{N}_{\text{crop}}$ recovery이 낮은 것으로 판단된다.

② 토양 ^{15}N 회수율 ($^{15}\text{N}_{\text{soil}}$ recovery) 자재로 투입된 ^{15}N 이 배추 수확 후 토양에 얼마나 남아있는지 알아보기 위하여 토양 ^{15}N 회수율을 분석한 결과는 다음과 같다. CF는 투입한 ^{15}N 의 6%가 토양에 잔존하는 것으로 나타났는데, Bosshard (2009)와 Smith (2018)가 화학비료의 토양 ^{15}N 회수율이 22%, 20 - 30% 라고 보고하였으며, Holbeck (2013)가 화학비료의 토양 ^{15}N 회수율이 20%미만이라고 보고한 것에 비해 낮은 경향을 보였다. 따라서 화학비료는 투입 후

Fig. 2. Correlation between mineral nitrogen in soil and ^{15}N uptakes by Chinese Cabbages ($R^2 = 0.8776$).

Fig. 3. Microbial biomass nitrogen (MBN) in soil after harvest of Chinese cabbages.

단기간에 작물에 이용되는 양은 많지만, 이용되지 않은 질소의 대부분은 토양에서 제거되어 다음 작기에 잔존 효과를 나타내기는 어려울 것으로 판단된다.

유기자원의 토양¹⁵N회수율은 23 - 50%로, 1작기 내에 작물에 이용되지 않고 토양에 잔존하는 ¹⁵N의 비율이 화학비료에 비해 3 - 6배 높았으며, 유기자원 중 GM+LC와 LC는 50%, 47%로 상대적으로 높고 GM와 OC는 28%, 23%로 낮은 경향을 보였다. 배추 수확 후 토양의 MBN함량을 조사한 결과 (Fig. 3), 토양¹⁵N회수율이 높은 유기자원 처리에서 화학비료보다 높게 나타났다. MBN은 토양 미생물체내에 동화된 N량으로 유기자원에서 공급된 N가 작물에 이용되기보다 토양 미생물체내로 이용되어 토양¹⁵N회수율이 증가하였음을 나타낸다. 따라서 유기자원은 화학비료보다 한 작기 내에 작물에 이용되는 양은 적지만, 토양에 많이 잔류하여 토양 지력 증진에 효과적일 것으로 보인다. Smith (2018) 역시 유기자재는 화학비료에 비해 토양¹⁵N회수율이 높아 토양 유기물 pool에 더 기여한다고 하였으며, 유기자재의 토양¹⁵N회수율은 1년 이내 급격하게 감소한다고 하였다. 이러한 결과로 미루어 볼 때 토양에 잔류한 유기자재 유래 질소는 최소 1년까지는 작물에 잔존 효과를 보일 것으로 판단된다.

유기자원 중 GM과 OC의 토양¹⁵N회수율이 상대적으로 낮았던 것은 질소 무기화량이 상대적으로 많았기 때문으로 보인다. Amato et al. (1987)은 밀짚과 콩과작물의 지상부 및 지하부를 토양에 투입한 결과, 무기화량이 가장 많았던 콩과작물의 지상부가 토양¹⁵N회수율이 가장 낮았다고 하였다. LC와 GM+LC는 투입한 ¹⁵N의 약 절반이 토양에 잔류하는 것으로 나타났으며, LC는 초기 7일째 이후 거의 질소 순무기화가 발생하지 않았고, LC처리 토양의 MBN이 무처리에 비해 2배 이상 증가한 것으로 보아 LC유래 질소의 상당부분이 미생물체내로 이용되어 토양에 잔류하고 있음을 알 수 있었다 (Fig. 3). 토양에 투입된 유기물의 C/N (Rowell, 2001; Qju, 2008) 과 lignin/N (Kumar, 2003)은 질소 무기화에 영향을 준다. 가축분퇴비 중 우분은 이분해성인 헤미셀룰로스 함량이 돈분과 계분에 비해 낮고 난분해성인 리그닌 함량이 높아 (Yun, 2007). C/N이 낮아도 질소무기화가 거의 발생하지 않는다. 우리가 실험에 사용한 퇴비는 우분을 주 원료로 제조하여 낮은 C/N에도 불구하고 질소무기화가 거의 발생하지 않은 것으로 판단된다.

③ ¹⁵N유실율 (¹⁵N_{loss}) 투입된 ¹⁵N 중 작물과 토양에 회수되지 않고 대기로 유실된 양 (¹⁵N_{loss})을 추정된 결과, GM+LC를 제외한 유기자원 3종과 화학비료는 유사한 경향을 보였다. OC는 51%로 가장 많은 양이 유실되었으며, GM, LC, CF는 44 - 45%, GM+LC는 25%가 유실된 것으로 나타났다.

유기자원 중 GM과 OC의 유실율이 CF와 유사하게 높았던 것은 배추의 질소 요구시기와 자재의 질소 무기화특성이 맞지 않았기 때문으로 판단된다. GM과 OC의 질소 무기화량이 활발했던 초기 2 - 3주 동안은 배추의 질소 요구량은 크지 않은 시기로, 무기화 된 질소의 많은 양이 토양 미생물에 이용되거나 탈질, 휘산 등으로 유실된 것으로 보인다. LC는 토양 중에서 질소 순무기화가 거의 발생하지 않았음에도 불구하고 45%가 환경으로 유실된 것을 보아, 퇴비의 암모늄태 질소가 휘산이나 탈질을 통해 바로 대기 중으로 제거된 것으로 보인다. GM+LC의 유실율은 25%로 가장 낮았으며 총¹⁵N회수율 (작물 + 토양)은 75%로 GM을 단독처리 했을 때 보다 토양회수율이 증가하고, LC를 단독으로 처리했을 때보다 작물회수율이 증가하여 유실율이 감소하였다.

Conclusions

유기물 형태로 토양에 투입된 질소는 무기화과정을 거친 후 작물에 이용되거나 토양 미생물체로 유기화 또는 유기물형태로 토양에 잔존하거나 탈질, 휘산 등 환경으로 유실될 수 있다. 토양양분관리를 위해 사용하는 녹비작물, 가축

분퇴비, 유박 등의 유기자원에 포함된 질소가 작물, 토양, 환경으로 이동하는 특성을 알아보기 위하여 ^{15}N 를 표지한 유기자원을 토양에 투입한 후 배추 및 토양에 대한 ^{15}N 회수율을 조사한 결과는 다음과 같다. 작물 ^{15}N 회수율은 화학비료가 50%로 가장 높았고, 유기자원은 8 - 27%로 화학비료보다 낮았으며 자재 종류별로 상이하였다. 토양 ^{15}N 회수율은 화학비료가 6%로 가장 낮았고 유기자원은 23 - 50%로 화학비료보다 3 - 6배 높았으며, 유기자원 중에서도 GM+LC와 LC는 47%, 50%로 높은 경향을, GM과 OC는 28%, 23%로 낮은 경향을 보였다. 전체 ^{15}N 투입량에서 총 ^{15}N 회수율(작물 + 토양)을 뺀 유실율은 GM+LC를 제외하고는 유기자원과 화학비료간의 뚜렷한 차이가 없었다. 위와 같은 결과로 동일량의 질소를 기준으로 자재를 투입하더라도 종류에 따라 작물에 이용되고, 토양에 잔존하고, 환경으로 유실되는 질소의 비율이 다른 것을 확인하였다. 화학비료는 투입 후 단기간에 작물에 이용되는 양은 많지만 이용되지 않은 질소의 대부분이 환경으로 유실되어 다음 작기에 잔존 효과를 나타내기는 어려울 것으로 보인다. 반면, 유기자원은 화학비료와 유사한 양이 유실되지만 한 작기 내에 작물에 이용되는 질소가 적고 토양에 잔류하는 양이 많아 토양 지력 증진에 효과적이며 다음 작기에 잔존 효과를 나타낼 것으로 판단된다. 이에 지속적으로 유기자원을 이용하여 토양양분을 관리하는 유기농경지의 경우 유기자원의 이러한 특성을 고려하여 시비량을 산정해야할 것으로 보이며, 동일 자재의 연용에 의한 누적·잔존 효과에 대한 조사가 필요할 것으로 보인다.

Acknowledgement

This study was conducted by the support of “Research Program for Agricultural Science and Technology Development (Project No. PJ0134982018)”, National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

- Amato, M., J. Ladd, A. Ellington, G. Ford, J. Mahoney, A. Taylor, and D. Walscott, 1987. Decomposition of plant material in Australian soils. IV. Decomposition in situ of ^{14}C labeled and ^{15}N labeled legume and wheat materials in a range of southern Australian soils. *Soil Research*. 25(1):95-105.
- Bosshard, C., P. Sorensen, E. Frossard, D. Dubois, P. Mader, S. Nanzer, and A. Oberson, 2009. Nitrogen use efficiency of ^{15}N -labelled sheep manure and mineral fertilizer applied to microplots in long-term organic and conventional cropping system. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 83:271-287.
- Carpenter, S.R., N.F. Caraco, D.L. Correll, R.W. Howarth, A.N. Sharpley, and V.H. Smith, 1998. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological applications*. 8(3):559-568.
- Cassman, K.G., A. Dobermann, and D.T. Walters, 2002. Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*. 31(2):132-141.
- Dittert, K., T. Goerges, and B. Sattelmacher, 1998. Nitrogen turnover in soil after application of animal manure and slurry as studied by the stable isotope ^{15}N : A review. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*. 161(4): 453-463.
- Erisman, J.W., J.N. Galloway, S. Seitzinger, A. Bleeker, N.B. Dise, A.M.R. Petrescu, A.M. Leach, and W. de Vries, 2013. Consequences of human modification of the global nitrogen cycle. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 368(1621):20130116.
- Galloway, J.N., E.B. Cowling, S.P. Seitzinger, and R.H. Socolow, 2002. Reactive Nitrogen: Too Much of a Good

- Thing? AMBIO: A Journal of the Human Environment. 31(2):60-63, 64.
- Gardner, J.B., and L.E. Drinkwater, 2009. The fate of nitrogen in grain cropping systems: a meta-analysis of ^{15}N field experiments. *Ecological applications*. 19(8):2167-2184.
- Giambalvo, D., P. Ruisi, G.D. Miceli, A.S. Frenda, and G. Amato, 2010. Nitrogen Use Efficiency and Nitrogen Fertilizer Recovery of Durum Wheat Genotypes as Affected by Interspecific Competition. *Agronomy Journal*. 102(2):707-715.
- Hirel, B., P. Bertin, I. Quillere, W. Bourdoncle, C. Attagnant, C. Dellay, A. Gouy, S. Cadiou, C. Retalliau, M. Falque, and A. Gallais, 2001. Towards a better understanding of the genetic and physiological basis for nitrogen use efficiency in maize. *Plant Physiol*. 125:1258-1270.
- Holbeck, B., W. Amelung, A. Wolf, K.-H. Südekum, M. Schlöter, and G. Welp, 2013. Recoveries of ^{15}N -labelled fertilizers (chicken manure, mushroom compost and potassium nitrate) in arable topsoil after autumn application to winter cover crops. *Soil and Tillage Research*. 130:120-127.
- Janzen, H., and S. McGinn, 1991. Volatile loss of nitrogen during decomposition of legume green manure. *Soil Biology and Biochemistry*. 23(3):291-297.
- Jensen, B., P. Sørensen, I.K. Thomsen, B.T. Christensen, and E.S. Jensen, 1999. Availability of Nitrogen in ^{15}N -Labeled Ruminant Manure Components to Successively Grown Crops. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:416-423.
- Kim, S.T., C.H. Bae, B.U. Kim, and H.C. Kim, 2017. PM_{2.5} Simulations for the Seoul Metropolitan Area:(I) Contributions of Precursor Emissions in the 2013 CAPSS Emissions Inventory. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*. 33(2):139-158.
- Kirchmann, H. 1990. Nitrogen interactions and crop uptake from fresh and composted ^{15}N -labelled poultry manure. *Journal of Soil Science*. 41:379-385.
- Kumar, K., and K.M. Goh, 2003. Nitrogen release from crop residues and organic amendments as affected by biochemical composition. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 34:2441-2460.
- Lee, J.H., Y.M. Kim, and Y.K. Kim, 2017. Spatial panel analysis for PM_{2.5} concentrations in Korea. *Journal of the Korean Data & Information Science Society*. 28(3):473-481.
- Lee, S.M. 2013. The study of nitrogen cycle in organic farming using stable isotope. Research program report. NAS.
- Lee, S.M., W.J. Choi, S.I. Yun, Y.D. Choi, H.M. Ro, and J.W. Park, 2002. Evaluation of Fate of NH_4^+ of Condensed Molasses Solubles (CMS) in Soil Using by ^{15}N -Tracer Method. *Korean journal of Soil Sci. Fert.* 35(2):69-76.
- Lim, W.S., H.H. Lee, and C.O. Hong, 2014. Nitrogen Dynamics in the Soils Incorporated with Single and Mixture Application of hairy vetch and barley. *Korean J Environ Agric.* 33(4):298-305.
- McIsaac, G.F., M.B. David, G.Z. Gertner, and D.A. Goolsby, 2001. Eutrophication: nitrate flux in the Mississippi River. *Nature*. 414(6860):166.
- Muchechei, F., and I.C. Madakadze, 2016. Yield and nitrogen recovery of rape (*Brassica napus* L.) in response to application of leguminous leaf litter and supplemental inorganic nitrogen. *Experimental Agriculture*. 52(4): 518-536.
- Poffenbarger, H.J., J.E. Sawyer, D.W. Barker, D.C. Olk, J. Six, and M.J. Castellano, 2018. Legacy effects of long-term nitrogen fertilizer application on the fate of nitrogen fertilizer inputs in continuous maize. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 265:544-555.
- Qiu, S., A.J. McComb, R.W. Bell, 2008. Ratios of C, N and P in soil water direct microbial immobilisation-mineralization and N availability in nutrient amended sandy soils in southwestern Australia. *Agric. Ecosyst. Environ.* 127:93-99
- Ro, H.M., W.J. Choi, and S.I. Yun, 2003. Uptake and recovery of urea- ^{15}N blended with different rates of composted manure. *Korean journal of Soil Sci. Fert.* 36(6):376-383.
- Rowell, D.M., C.E. Prescott, and C.M. Preston, 2001. Decomposition and nitrogen mineralization from biosolids and other organic materials: relationship with initial chemistry. *J. Environ. Qual.* 30:1401-1410.

- Samborski, S.M., N. Tremblay, and E. Fallon, 2009. Strategies to make use of plant sensors- based diagnostic information for nitrogen recommendations. *Agronomy Journal*. 101(4):800-816.
- Seo, J.H., S.H. Lee, Y.S. Cho, J.E. Lee, C.K. Lee, and Y.U. Kwon, 2008. Estimation of soybean N fraction derived from N sources by ^{15}N in soybean cultivation with rye as green manure. *Korean journal of crop science*. 53(1):50-57.
- Smith, C.J., and P.M. Chalk, 2018. The residual value of fertiliser N in crop sequences: An appraisal of 60 years of research using ^{15}N tracer. *Field Crops Research*. 217:66-74.
- Valkama, E., R. Lemola, H. Kähkönen, and E. Turtola, 2015. Meta-analysis of the effects of undersown catch crops on nitrogen leaching loss and grain yields in the Nordic countries. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 203:93-101.
- Vargas, T.d.O., E.R. Diniz, A.L.V. Pacheco, R.H.S. Santos, and S. Urquiaga, 2017. Green manure- ^{15}N absorbed by broccoli and zucchini in sequential cropping. *Scientia Horticulturae*. 214:209-213.
- Yun, H.B., Y. Lee, C.Y. Yu, S.M. Lee, B.K. Hyun, and Y.B. Lee, 2007. Effect of Crude Carbohydrate Content in Livestock Manure Compost on Organic Matter Decomposition Rate in Upland Soil. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 40(5):364-368.