

농경지에서 유기물 시용에 의한 질소 공급 효과

이예진^{1*} · 윤홍배² · 송요성¹ · 이창훈¹ · 성좌경¹ · 하상건¹

¹농촌진흥청 국립농업과학원 토양비료과, ²강원도농업기술원

Effects of organic matter sources on nitrogen supply potential in arable land

Ye-Jin Lee^{1*}, Hong-Bae Yun², Yo-Sung Song¹, Chang-Hoon Lee¹, Jwa-Kyung Sung¹, Sang-Keun Ha¹

¹Division of Soil and Fertilizer, NAAS, RDA, Wanju, 565-851, Korea

²Gangwon Agricultural Research & Extension Services, Chuncheon, 200-150, Korea

Received on 12 October 2015, revised on 21 October 2015, accepted on 27 October 2015

Abstract : Recently, assessment of nitrogen balance has been required for environmental agriculture. Nutrient management using organic matters in farmlands has been strongly required as a means of extending resource-cycling agriculture and reduction of nitrogen balance. Organic matters-derived nutrients and soil-available nitrogen should be necessarily considered to manage nutrient balance in soil-plant system. In this study, we reviewed the amount of N supply according to types of organic matter such as livestock compost and green manure in arable land. In case of applied livestock compost in soil, nitrogen mineralization was influenced by nitrogen amount of livestock manure and mixed materials. And nitrogen mineralization of green manure in arable land was influenced by types of crop and return period of green manure because of change of C/N ratio. Also, nitrogen supply by organic matter in arable land can be changed by environmental factors such as temperature, moisture in soil. Therefore, nitrogen supply according to C/N ratio of organic matter and analysis method for estimation of soil nitrogen supply availability should be evaluated to set up the nutrient management model.

Key words : Organic matter, Nitrogen, C/N ratio, Livestock compost, Green manure

I. 서론

질소는 식물 영양 요구도가 큰 원소로서 작물 생산성에 영향을 미친다. 대기 중 질소는 약 78%를 차지할 정도로 다량 존재하나 미생물을 통한 질소고정을 제외하면 작물이 직접적으로 이용하기 어려운 형태이기 때문에 자연조건에서 질소의 공급은 제한적이다(Galloway et al., 2004). 그러나 대기 중 질소를 합성한 질소비료를 개발함에 따라 농경지에 투입되는 무기태 질소의 양이 증가하여 작물 수량 증가에 직접적인 영향을 미쳤다(Galloway et al., 2008). 증산 위주의 영농으로 인한 비료의 과다 시용과 토양유실 또는 용탈에 따른 질소의 수계 이동 등 환경으로 유출되는 질소의 양이 많아지면서 농경지에서 질소의 효율적 이용에 대한 관심이 요구되는 실정이다(Snyder et al., 2009; Smil, 1999).

최근 국가적으로 양분 부하량을 낮추기 위하여 무기질 비료의 공급량을 감축하는 추세로서 농경지에 투입되는 질소 비료의 양이 감소하고 있고, 축산분뇨 자원화를 통해 농경지에 무기질 비료 대신 가축분뇨 퇴·액비를 살포하는 농가가 증가하고 있다(Kim et al., 2008). 또한 친환경 농업의 일환으로 무기질 비료 대신 유기질 비료를 활용하는 농가가 증가하고 있으나 농경지의 양분 함량을 고려하지 않은 무분별한 시용은 작물 생산성에 영향을 미칠 뿐 만 아니라 질소 수지를 높이는 원인이 될 수 있다. 그러므로 작물 생산성을 유지하고 환경에 미치는 영향을 최소화하기 위해서는 질소 수지를 고려한 질소 공급량을 산정하는 것이 필요하다.

최적의 질소 시용량을 구하기 위해서는 작물의 잔재나 토양으로부터 유래한 질소의 양, 비료 대신 유기자재를 시용할 경우 질소의 공급량 등 다양한 양분 공급원의 특성을 파악해야 한다(Gutser et al., 2005). 그 외에도 작물 재배 방법, 기후조건, 토양 특성 등 환경요인과 양분 종류에 따

*Corresponding author: Tel: +82-63-238-2446

E-mail address: leeyj418@korea.kr

라 토양에서 작물로의 질소 공급량이 달라지므로(Olfs et al., 2005) 우리나라 농경지 여건을 반영한 질소 추천 모델의 개발이 요구된다.

본 연구에서는 유기물을 활용한 질소 추천 방법을 모색하기 위한 기초자료로서 가축분 퇴비와 녹비 사용에 의한 질소 공급효과 및 토양의 질소 공급능 분석에 대한 문헌들을 정리하였다.

II. 유기물 사용에 의한 질소 공급

1. 작물의 질소 이용률

토양에서 작물이 이용할 수 있는 질소는 무기질 비료나 토양 중 유기물, 작물 잔재 등 유기물질의 무기화를 통해서 공급된다(Bundy and Meisinger, 1994). 무기질 비료로부터 공급되는 질소는 작물이 직접 이용할 수 있는 형태로서 작물의 질소 이용률은 약 50% 정도에 해당된다(Baligar and Bennett, 1986). 유기물에 의한 질소 공급은 토양에서 미생물에 의해 NH_3 , NH_4^+ , NO_3^- 로 변환되는 무기화 과정과 미생물체에 합성되는 부동화 과정을 포함하는 질소 순환을 통해 이루어지기 때문에 작물의 단기적인 질소 이용률은 무기질비료에 비해 낮다. Hartz 등(2000)은 건계분을 사용했을 때 8주 동안 15 - 18%의 유기태질소가 무기화되었으나, 기타 가축분 퇴비를 사용했을 때는 4주 동안 부동화 되거나 무기화되지 않았다. Yun 등(2010, b)은 4년간 가축분 퇴비를 종류별로 사용한 토양의 무기화량을 추정한 결과 27주에 걸쳐 질소 무기화가 일어났다고 보고하였다. 그러므로 질소 무기화는 유기물의 질소 함량이나 분해 특성에 따라 달라질 수 있으나 대체로 장기간에 걸쳐 이루어지는 것을 알 수 있다.

2. C/N율과 질소 무기화

C/N율은 질소 무기화를 결정하는 인자로서 토양에서 질소 공급력을 평가하는데 중요하다. 가축분뇨 등 암모니아태 질소가 많고 C/N율이 낮은 유기물들은 단기간에 질소 유효도를 높인다(Serna and Pomares, 1993). 반면 C/N율이 15보다 큰 유기물은 토양 중에서 질소가 미생물에 의해 부동화됨에 따라 단기적인 질소 유효도는 제한되나 토양 중에 축적된 질소가 장기간에 걸쳐 무기화되어 질소 이용률은 높게

나타난다(Gutser et al., 2005). 그러므로 질소의 무기화율은 주로 토양 중 유기태 질소 함량이나 유기물의 C/N율에 의해 영향을 받는다(Mary et al., 1996; Trinsoutrot et al., 2000).

C/N율과 질소 무기화에 대한 연구결과를 보면, 토양에 C/N율이 낮은 두과 녹비작물과 C/N율이 높은 곡류 잔사를 사용했을 때 초기 탈질량은 작물의 C/N율과 반비례하는 것으로 나타났다(Aulakh et al., 1991; Mary et al., 1996). C/N율이 6.6 - 21.7 사이에 해당하는 여러 종류의 가축분 퇴비를 토양에 사용했을 때 가축분 퇴비의 C/N율이 낮을수록 순 무기화율이 높게 나타났다(Qian and Schoenau, 2002). 계분, 돈분, 우분 퇴비와 계분 톱밥, 돈분 톱밥, 우분 톱밥퇴비 각각을 4년간 연용한 밭토양에서의 질소 무기화량을 추정하였을 때 톱밥과 혼합된 퇴비보다 C/N율이 낮은 가축분 퇴비를 처리한 토양의 무기화량이 높았다(Yun et al., 2010b).

토양의 비옥도와 비료사용량에 따라 작물의 C/N율이 달라질 수 있는데, 밀짚의 경우 질소가 부족한 토양에서 재배된 밀짚보다 질소 사용량이 많은 토양에서 재배된 밀짚의 C/N율이 낮았고, C/N율이 낮은 밀짚을 토양에 환원했을 때의 질소 무기화율이 콩과 작물 잔사의 질소 무기화율과 유사하게 나타났다(Janzen and Kucey, 1988). 그러므로 작물잔사를 환원하여 유기물을 공급할 경우 작물을 재배한 토양의 비옥도를 고려한 질소 관리가 필요하다.

III. 유기물 종류에 따른 질소 공급 효과

1. 가축분 퇴비

가축분 퇴비는 토양의 유기물 및 양분 공급원으로 오랜 기간 동안 농경지에 사용되어 온 유기자재이다. 가축분뇨는 축종과 먹이 종류 등에 따라 성분 함량이 달라질 수 있으나 일반적으로 우분의 질소 함량은 0.33 - 0.5%, 돈분은 0.96%, 계분은 1.19 - 1.39%로 계분의 질소 함량이 가장 높고(NIAS, 2008), 계분의 가용성 질소는 전체 질소의 30 - 50% 정도 차지한다(Nicholson et al., 1996). 그러므로 가축분 퇴비의 종류에 따라 질소 공급량이 달라질 수 있는데, 항온조건에서 우분 퇴비, 돈분 퇴비, 계분 퇴비의 질소 무기화율을 측정하였을 때 계분 퇴비>돈분 퇴비>우분 퇴비 순으로 무기화율이 나타났으며, 무기화 속도상수 k 또한

이와 동일한 순서로 나타나 질소 함량이 가장 높은 계분의 무기화율과 무기화 속도가 가장 빠른 것을 알 수 있었다 (NIAST, 1999)(Table 1).

그러나 기존에 작물별로 가축분 퇴비를 사용했을 때 질소 이용률과 무기질 비료 대비 가축분 퇴비의 질소 공급 효율을 보면 같은 퇴비 종류라고 할지라도 유사한 결과를 보이지 않았다(Table 2). 가축분 퇴비는 우분, 돈분, 계분과 톱밥, 볏짚 등 부산물을 혼합하여 퇴비화를 거치므로

부산물의 종류나 혼합정도에 따라 분해 정도가 달라지기 때문에 질소 무기화율이 달라질 수 있다(Yun et al., 2007).

지속적으로 농경지에 가축분 퇴비를 사용했을 때 질소 공급효과를 보면, 영국 Rothamsted 장기연용 포장에서는 토양 중 총 질소함량이 지속적으로 증가하였으며(Johnston et al., 1989), 캐나다 Alberta의 농식품 연구센터에서 우분 퇴비를 0 - 90 Mg ha⁻¹ 수준으로 25년간 사용했을 때 토양 중 총 질소함량이 직선적으로 증가하였고, 무관개 조

Table 1. Nitrogen mineralization and mineralization rate constant (*k* value) of manure at 30°C incubation (NIAST, 1999)

Type of compost	T-N(%)	C/N ratio	N mineralization (%)	<i>k</i> value ¹⁾
Cattle manure with saw dust	1.11	27.6	12	0.0001
Swine with chaff	1.77	35.5	20	0.001
Poultry with saw dust	1.93	26.4	41	0.013

¹⁾Rate constant of cumulative N mineralization first-order equation (Stanford and Smith, 1972).

Table 2. N recovery of crop (NRC)¹⁾ and mineral fertilizer N equivalents (MFN)²⁾ by livestock manure application.

Types of manure	Crop (Trial period)	Amounts of applied manure	T-N ---%---	C/N ratio	NRC ---%---	MFN ---%---	Reference
Cattle	Rye-Corn (2 years)	60 Mg ha year ⁻¹ (Wet)	1.84~2.50	15.8~24.5	55.0	-	Seo and Kim (2005)
	Rice (41 years)	100 Mg ha year ⁻¹ (Wet)	1.98	21.8	20.9	41.4	Lee et al. (2009)
Swine	Chinese cabbage	356 Mg ha ⁻¹ (Dry)	1.17	13.7	44.0	68.0	Yun et al. (2010a)
	Rice (2 years)	100 Mg ha·year ⁻¹ (Wet)	0.73~1.34	18.6~21.5	31.0	-	GARES (2000)
	Garlic	200 Mg ha ⁻¹ (Wet)	1.82	13.7	-	75.4-92.3	NIAST (1999)
	Corn	246 Mg ha ⁻¹ (Wet)	0.71	23	33.1	79.5	NIAST (1998)
Poultry	Chinese cabbage (3 cropping)	162 Mg ha season ⁻¹ (Dry)	1.93~2.06	13.2~13.7	28.7	75.0	Yun et al. (2009)
	Corn (4 years)	80 Mg ha year ⁻¹ (Wet)	1.33	24.7	26.9	-	Kim and Jung (2000)

¹⁾N recovery of crop(NRC) = (N uptake amount in manure plot - N uptake amount in N non-applied plot)/(N of applied manure) *100.

²⁾Mineral fertilizer N equivalents(MFN) = (N uptake amount in manure plot - N uptake amount in N non-applied plot)/(N uptake in mineral-N fertilizer - N uptake amount in N non-applied plot)*100.

Table 3. Changes of rice grain yields from 1967 to 2007 and fertilizer use efficiency in 2007 in the Department of Functional Cereal Crop Research Farm (RDA, National Institute of Crop Science, Milyang) (Lee et al., 2008; 21. Lee et al., 2009).

Treatments	Yearly variation of grain yield -- X : Year, Y : Yield(kg ha ⁻¹) --	N fertilization ---- kg ha ⁻¹ ----	N use efficiency ---- % ----
NPK	Y=5288+30.41X (r=0.424**)	150	46.6
Compost ¹⁾	Y=3470+63.90X (r=0.681***)	139 ²⁾	20.9

¹⁾Straw compost mixed with cattle manure(C/N = 21.8).

²⁾Calculation of N input amount by compost.

건에서는 질산태 질소 함량이 증가하였다(Hao et al., 2003). 국내에서는 국립식량과학원(구 호남농업시험장)의 논토양에 벚짳과 퇴비를 장기 연용 하였을 때 유기물 무시용구에 비해 토양 유기물과 총 질소 함량이 증가하였고, 벼의 질소 흡수량이 약 40 kg ha⁻¹ 정도 높게 나타났다(Jung et al., 2001). 또한 국립식량과학원 남부작물부에서 1967년부터 2007년까지 N-P-K 비료와 우분벚짳퇴비를 각각 장기 연용 하였을 때, 질소 이용률은 퇴비 시용구가 N-P-K 구에 비해 낮았으나 매년 시용된 퇴비가 토양 중에 축적되어 서서히 분해됨에 따라 퇴비 시용구의 수량 증가에 기여한다(Table 3)(Lee et al., 2008; Lee et al., 2009).

2. 녹비

녹비작물은 가축분 퇴비나 유기질 비료처럼 외부에서 투입하여 양분함량을 높이는 것과는 달리 작물 자체를 환원하여 농경지에 양분을 공급한다. 녹비작물을 활용하면 무기질 비료 대체가 가능하므로 농경지에 비료투입량을 줄이는 효과가 있다. 두과 녹비작물은 생물학적 질소고정으로 토양 중에 질소를 공급하고, 토양에 환원된 녹비는 분해되면서 질소를 서서히 방출하므로 무기태 질소에 비해 질소 용탈은 감소하고, 질소 이용효율을 높이는데 도움을 준다(Aulakh et al., 2000; Cherr et al., 2006). 녹비작물 또

한 다른 유기자재와 마찬가지로 질소 무기화율에 따라 질소 공급량이 결정되는데, 화본과 작물에 비해 두과 작물의 C/N율이 낮아 질소 공급에 유리하다. 화본과와 두과 녹비작물 각각을 토양에 환원한 뒤 토마토의 수량을 평가했을 때 C/N율이 낮은 두과 녹비작물을 시용한 포장의 토마토가 약 23% 정도 높았고(Lee et al., 2006), 녹비작물 시용 후 토양 중 무기태 질소 함량은 C/N율이 낮은 녹비작물을 시용했을 때 높게 나타나므로(Sung et al., 2008) C/N율이 낮은 녹비작물은 비료로서의 가치가 있다고 판단된다. 녹비작물 환원에 의한 질소 공급량에 대한 연구결과를 보면, 헤어리베치를 환원했을 때 표토에서 약 3주간 무기태 질소 함량이 증가하였고(Seo and Lee, 2003), 청보리와 헤어리베치를 토양에 각각 시용했을 때 청보리에 비해 헤어리베치 처리구의 암모니아태 및 질산태 질소 발생량이 높았으며, 헤어리베치는 처리 후 3주간 암모니아태 질소 함량이 높다가 5주차에 질산태질소 함량이 증가하였다(Lim et al., 2014). 그러나 녹비의 C/N율은 생육단계에 따라 높아지기 때문에 환원시기가 중요하며(Seo et al., 1998; Yadvinder et al., 1992), 녹비작물의 질소 무기화는 작물의 C/N율뿐만 아니라 온도, 수분 등 환경적 요인에 의한 영향(Schomberg et al., 1994)을 받기 때문에 조건별로 질소 공급량을 평가하는 것이 필요하다. 국내에서 연구한 녹비작물의 질소 함량과 C/N율을 보면 같은 종류의 녹비라 할지라도 다소 차이가 있었는데, 녹비를 재배한 토양의 양

Table 4. Nitrogen content and C/N ratio of green manure

Green manure	Cropping system	Amounts of applied green manure Mg ha ⁻¹ (D.W.)	T-N %	C/N ratio	Reference
Hairy Vetch	Hairy Vetch-Corn	45.8	3.70	11.0	Seo et al. (2000)
	Hairy vetch-Pepper	11.9	3.17	11.9	Sung et al. (2008)
	Hairy vetch	4.6	2.83	13.0	Kim et al. (2012)
	Hairy vetch	48.6	3.81	12.2	Seo et al. (1998)
Soybean	Soybean-Tomato	13.2	3.20	16.7	Lee et al. (2006)
Crotalaria	Crotalaria-Chinese cabbage	4.1	3.20	-	Lim et al. (2012)
Sesbania	Sesbania-Chinese cabbage	3.1	3.70	-	
Rye	Rye-Rice	-	1.10	43.3	Kim et al. (2011)
Chinese milk vetch	Chinese milk vetch-Rice	30.0	1.41	29.9	Lee et al. (2012)
	Chinese milk vetch-Rice	93.1	2.84	15.3	Kim and Lee(2011)
Crimson clover	Crimson clover-Rice	20.7-53.6	2.02-2.18	21.1-25.5	Jeon et al. (2011)
Green barley	Green barley-Rice	130.0	0.85	50.4	Kim and Lee(2011)
	Green barley-Rice	47.3	0.90	42.5	Kim et al. (2011)

분 조건이나 환원 시기의 차이 때문으로 판단된다 (Table 4).

IV. 토양 중 질소 공급능 분석과 질소 추천

토양의 질소 공급능은 잠재적으로 작물이 이용할 수 있는 질소의 공급능력을 의미하는 것으로 토양에서 무기화 과정을 통해 공급될 수 있는 질소를 말한다. 보통 유기물을 사용했을 때 질소 공급능을 평가하기 위한 가장 일반적인 방법은 시간에 따른 질소 무기화율을 구하는 것으로서 항온조건에서 여러 연구들이 수행되어왔다(Harmsen and Van Schreven, 1955; Jarvis et al., 1996). 그러나 실제 포장에서는 실험실 조건과 달리 토양특성과 기상조건 등 환경적인 요인이 다양하기 때문에 토양 코어에 이온교환수지를 설치하여 총 무기화율을 측정하는 Field incubation 방법이 시도되었다(Distefano and Gholz, 1986).

포장에서 직접 무기화율을 구하는 방법은 시간이 많이 소요되는 단점이 있기 때문에 작물별로 필요한 목표 질소량을 정하고, 토양 중 유기태 질소 함량을 측정하여 부족한 만큼 질소를 추천하는 방법을 이용하고 있다. 독일에서는 토양 유기태 질소 함량과 토양 중 평균 질소 순 무기화량을 고려한 질소 목표치를 정하여 질소비료 사용량을 추천하고 있고(Olfs et al., 2005), 미국에서는 재배 전과 재배 중 질산태 질소를 측정하여 비료 필요량을 산정하고 있다(Roth et al., 1992). 국내에서도 시설재배지에 대해서는 질산태질소를 측정하여 질소 사용량을 추천하고 있다(Kang et al., 2011; Kwak et al., 1997; NIAST, 2006). 그러나 토양 중 질소 공급능을 측정하기 위해서는 유기태 질소 유효도를 측정하는 것이 합리적이기 때문에 화학적 추출방법으로 무기화 질소를 측정하는 연구들이 수행되었다. 여러 가지 화학적 추출방법을 이용하여 잠재적 무기화 질소를 측정할 수 있는 분석법을 비교하거나(Sharifi et al., 2007), 논토양에 대해서 단백질 분해효소인 pepsin을 이용하여 유기태 질소를 분석하는 방법(Kim et al., 2005)이 시도된 바 있다. 우리나라에서 노지 토양의 질소 비료는 토양 유기물함량을 기준으로 추천하고 있으나(NIAST, 2006), 토양 중 유기태 질소 함량은 사용되었던 유기물의 종류나 시기 등에 따라 영향을 받기 때문에 토양 유기물함량을 기준으로 질소를 추천하는 방법은 한계가 있다. 보다 정밀한 질소 사용량을 추천하기 위해서는 우리나라 토양에

적합한 유기태 질소 분석방법을 찾는 것이 필요하다고 판단된다.

V. 적 요

자원순환 및 친환경 농업을 실천하는 농가가 증가함에 따라 유기물을 활용한 농경지 양분관리에 대한 필요성이 대두되고 있다. 질소 공급원으로 유기물을 사용했을 때 질소 공급효과에 대한 연구들을 정리한 결과는 다음과 같다.

농경지에 유기물을 사용했을 때 질소의 공급은 질소 순환에서 무기화 과정을 통해 이루어지기 때문에 작물의 단기적인 질소 이용률은 무기질 비료에 비해 낮다. 유기물의 질소 공급량은 유기물의 C/N율이 낮을수록 무기화율이 높아지므로 C/N율을 고려한 유기물 사용이 중요하다. 가축 분 퇴비의 경우 축종별 분뇨 질소함량과 퇴비와 혼합된 부산물 종류에 따라 질소 무기화율이 달라질 수 있으며, 녹비는 작물 종류와 환원시기, 토양 양분조건 등에 따라 C/N율이 달라진다. 또한 적정량의 질소를 추천하기 위해서는 토양 중 유기태 질소로부터 가용화 될 수 있는 질소의 양을 측정하여야 한다.

지금까지 보고된 퇴비, 녹비에 대한 질소공급과 작물 생산성에 대한 연구결과는 재배 여건과 작물 종류 등에 따라 다르게 나타나 질소 공급을 위한 유기물 추천 모델을 구성하기 위한 기초자료로 활용하기에는 어려움이 있다. 유기물 추천 모델을 구성하기 위해서는 우선적으로 유기물질 종류별 질소 공급량에 대한 기초 데이터가 구축되어야 하며, 토양의 질소공급량을 평가할 수 있는 분석 방법의 구축이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 농업기술 공동연구사업(PJ01050901)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Aulakh MS, Khera TS, Doran JW, Singh K, Singh B. 2000. Yields and nitrogen dynamics in a rice.wheat system using green manure and inorganic fertilizer. *Soil Science Society of America Journal* 64:1867-1876.
- Aulakh MS, Doran JW, Walters DT, Mosier AR, Francis DD.

1991. Crop residue type and placement effects on denitrification and mineralization. *Soil Science Society of America Journal* 55:1020-1025.
- Baligar VC, Bennett OL. 1986. NPK-fertilizer efficiency. A situation analysis for the tropics. *Fertilizer Research Journal* 10:147-164.
- Bundy LG, Meisinger JJ. 1994. Nitrogen availability indices. In R.W. Weaver et al. (ed.) *Methods of soil analysis. Part 2. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI.* p. 951-984.
- Cherr CM, Scholberg JMS, McSorley R. 2006. Green manure approaches to crop production : A synthesis. *Agronomy Journal* 98:302-319.
- Distefano JF, Gholz HL. 1986. A proposed use of ion exchange resins to measure nitrogen mineralization and nitrification in intact soil cores. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 17(9):989-998.
- Galloway JN, Townsend AR, Erisman JW, Bekunda M, Cai Z, Freney JR, Martinelli LA, Seitzinger SP, Sutton MA. 2008. Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions. *Science* 320:889-892.
- Galloway JN, Dentener FJ, Capone DG, Boyer EW, Howarth RW, Seitzinger SP, Asner GP, Cleveland CC, Green PA, Holland EA, Karl DM, Michaels AF, Porter JH, Townsend AR, Vorosmarty CJ. 2004. Nitrogen cycle: past, present, and future. *Biogeochemistry* 70:153-226.
- Gutser R, Ebertseder Th, Weber A, Schraml M, Schmidhalter U. 2005. Short-term and residual availability of nitrogen after long-term application of organic fertilizers on arable land. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 168:439-446.
- Gyunggi-do Agricultural Research & Extension Services (GARES). 2000. Annual research report. Gyunggi-do. Korea. p.367-376. [in Korean]
- Hao X, Chang C, Travis GR, Zhang F. 2003. Soil carbon and nitrogen response to 25 annual cattle manure applications. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 166:239-245.
- Harmsen G, Van Schreven D. 1955. Mineralization of organic nitrogen in soil. *Advanced in agronomy.* Academic Press. New York. USA. Benbi D.K. and J. Richter. 2002. A critical review of some approaches to modelling nitrogen mineralization. *Biology and Fertility of Soils* 35:168-183.
- Hartz TK, Mitchell JP, Giannini C. 2000. Nitrogen and carbon mineralization dynamics of manures and composts. *Horticultural Science* 35(2):209-212.
- Janzen HH, Kucey RMN. 1988. C, N, and S mineralization of crop residues as influenced by crop species and nutrient regime. *Plant and soil* 106:35-41.
- Jarvis SC, Stockdale EA, Shepherd MA, Powlson DS. 1996. Nitrogen mineralization in temperate agricultural soils: processes and measurement. *Advances in Agronomy* 57: 187-235.
- Jeon WT, Seong KY, Kim MT, Oh IS, Choi BS, Kang UG. 2011. Effect of monoculture and mixtures of green manure crimson clover on rice growth and yield in paddy. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 44(5): 847-852. [in Korean]
- Johnston AE, McGrath SP, Poulton PR, Lane PW. 1989. Accumulation and loss of nitrogen from manure, sludge and compost : long-term experiments at Rothamsted and Woburn. Nitrogen in organic wastes applied to soils. pp.127. Academic press. USA.
- Jung JH, Sin BW, Yoo CH. 2001. Effects of the successive application of organic matters on soil properties and rice yields. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 34(2): 129-133. [in Korean]
- Kang SS, Lee JY, Sung JK, Gong HY, Jung HJ, Park CH, Yun YU, Kim MS, Kim YH. 2011. Recommendation of the amount of nitrogen top dressing based on soil nitrate nitrogen content for leaf perilla under the plastic film house. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 44(6):1112-1117. [in Korean]
- Kim ES, Lee YH. 2011. Response of soil microbial communities to applications of green manures in paddy at an early rice-growing stage. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 44(2):221-227. [in Korean]
- Kim JG, Jung KY. 2000. Amount of maximum compost application on the long-term application with different organic materials sources in upland soil. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 33(3):182-192. [in Korean]
- Kim KM, Lee BJ, Cho YS. 2012. Differences of soil carbon by green manure crops in rotated cropping system. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 45(6):1027-1031. [in Korean]
- Kim MT, Ku JH, Jeon WT, Seong KY, Park CY, Ryu JH, Cho HS, Oh IS, Lee YH, Lee JK, Park M, Kang UG. 2011. Effect of barley green manure on rice growth and yield according to tillage date in spring. *Korean Journal of Crop Science* 56(2):119-123. [in Korean]
- Kim YH, Kim SK, Zhang YS. 2005. Determination of soil nitrogen supplying capacity using pepsin digestibility. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 38(5):253-258. [in Korean]
- Kim PJ, Lee YB, Lee Y, Yun HB, Lee KD. 2008. Evaluation of livestock manure utilization rates as agricultural purpose in developed OECD countries by using nutrient balances. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 27(4): 337-342. [in Korean]
- Kwak HK, Song YS, Hong CW. 1997. Nitrogen recommendation based on soil nitrate test for Chinese cabbage growth in plastic film house. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 30(1):84-88. [in Korean]
- Lee CH, Jung KY, Kim ST. 2012. Behavior of nitrogen released from chinese milk vetch in paddy soil by using stable ¹⁵N trace. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 45(6):1094-1099. [in Korean]
- Lee CH, Kang UG, Park KD, Lee DK, Kim PJ. 2008. Long-term fertilization effects on rice productivity and nutrient efficiency in Korean paddy. *Journal of plant nutrition* 31:

- 1496-1506.
- Lee IB, Park JM, Lim JH, Hwang KS. 2006. Growth and yield response of the following tomato crop according to incorporation of green manures into soil. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 25(4):346-351. [in Korean]
- Lee SB, Lee CH, Jung KY, Park KD, Lee DK, Kim PJ. 2009. Change of soil organic carbon and its fractions in relation to soil physical properties in a long-term fertilized paddy. *Soil and tillage research* 104:227-232.
- Lim TJ, Kim KI, Park JM, Lee SE, Hong SD. 2012. The use of green manure crops as a nitrogen source for lettuce and chinese cabbage production in greenhouse. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 31(3):212-216. [in Korean]
- Lim WS, Lee HH, Hong CO. 2014. Nitrogen dynamics in the soils incorporated with single and mixture application of hairy vetch and barley. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 33(4):298-305. [in Korean]
- Mary B, Recous S, Darwis D, Robin D. 1996. Interactions between decomposition of plant residues and nitrogen cycling in soil. *Plant and soil*. 181:71-82.
- NIAS. 2008. The study of re-establish the amount and major compositions of manure from livestock. RDA. Korea.
- NIAS. 1990. Annual research report. RDA. Korea. p.314-324. [in Korean]
- NIAS. 1998. Annual research report. RDA. Korea. p.297-303. [in Korean]
- NIAS. 1999. Annual research report. RDA. Korea. p.339-350. [in Korean]
- NIAS. 2006. Fertilizer recommendation for each crop in soil testing. RDA. Korea. [in Korean]
- Nicholson FA, Chambers BJ, Smith KA. 1996. Nutrient composition of poultry manures in England and Wales. *Bioresource Technology* 58:279-284.
- Olf. HW, Blankenau K, Brentrup F, Jasper J, Link A and Lammel J. 2005. Soil-and plant-based nitrogen-fertilizer recommendations in arable farming. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 168:414-431.
- Qian P, Schoenau JJ. 2002. Availability of nitrogen in solid manure amendments with different C: N ratios. *Canadian Journal of Soil Science*. 82(2):219-225.
- Roth GW, Beegle DB, Bohn PJ. 1992. Field evaluation of a pre-sidedress soil nitrate test and quick test for corn in Pennsylvania. *Journal of Production Agriculture* 5:476-481.
- Schomberg HH, Steiner JL, Unger PW. 1994. Decomposition and nitrogen dynamics of crop residues: Residue quality and water effects. *Soil Science Society of America* 58:372-381.
- Seo JH, Lee HJ. 2003. Soil mineral nitrogen uptake and corn growth from Hairy vetch with conventional and no-tillage system. *Korean Journal of Crop Science* 48(5):381-387. [in Korean]
- Seo JH, Kim SD. 2005. Changes of soil nitrogen supply and production of upland forage crops by cattle manure during conversion from paddy to upland condition in paddy field. *Korean Journal of Crop Science* 50(6):387-393. [in Korean]
- Seo JH, Lee HJ, Hur IB, Kim SJ, Kim CK, Jo HS. 2000. Comparisons of soil nitrate and corn nitrogen uptake according to winter forage rye and green manure hairy vetch. *Journal of the Korean Society of Grassland and Forage Science* 20(3):199-206. [in Korean]
- Seo JH, Lee HJ, Kim SJ, Hur IB. 1998. Nitrogen release from Hairy vetch residue in relation to different tillages and plant growth stage. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 31(2):137-142. [in Korean]
- Serna MD, Pomares F. 1993. Evaluation of nitrogen availability in a soil treated with organic amendments. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 24:1833-1844.
- Sharifi M, Zebarth BJ, Burton DL, Grant CA, Cooper JM. 2007. Evaluation of some indices of potentially mineralizable nitrogen in soil. *Soil Science Society of America* 71:1233-1239.
- Smil V. 1999. Nitrogen in crop production: An account of global flows. *Global biogeochemical cycles*. 13(2):647-662.
- Snyder CS, Bruulsema TW, Jensen TL, Fixen PE. 2009. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agriculture, ecosystems, and environment*. 247-266.
- Stanford G, Smith SJ. 1972. Nitrogen mineralization potentials of soils. *Soil Science Society of America* 36: 465-472.
- Sung JK, Lee SM, Jung JA, Kim JM, Lee YH, Choi DH, Kim TW and Song BH. 2008. Effects of green manure crops, hairy vetch and rye, on N supply, red pepper growth and yields. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 41(4):247-253. [in Korean]
- Trinsoutrot I, Recous S, Bentz B, Lineres M, Cheneby D, Nicolardot B. 2000. Biochemical quality of crop residues and C and N mineralization under non-limiting N conditions. *Soil Science Society of America* 64:918-926.
- Yadvinder S, Bijay S, Khind CS. 1992. Nutrient transformations in soils amended with green manures. *Advances in Soil Science* 20:237-309.
- Yun HB, Han SG, Lee JS, Lee YJ, Kim MS, Lee YB^{a)}. 2010. Pig manure compost and urea application effects on Chinese cabbage in different soil fertility. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 43(6):962-967. [in Korean]
- Yun HB, Park WK, Lee SM, Kim SC, Lee YB. 2009. Nitrogen uptake by Chinese cabbage and soil chemical properties as affected by successive application of chicken manure compost. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 28(1):9-14.
- Yun HB, Lee Y, Yu CY, Yang JE, Lee SM, Shin JH, Kim SC, Lee YB^{b)}. 2010. Soil nitrogen mineralization influenced by continuous application of livestock manure composts. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 43:329-334. [in Korean]
- Yun HB, Lee Y, Yu CH, Lee SM, Hyun BK, Lee YB. 2007. Effects of crude carbohydrate content in livestock manure compost on organic matter decomposition rate in upland soil. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 40:364-368. [in Korean]