

논토양에서 중질소(N-15)를 이용한 표면시용 요소로부터 유래하는 질소의 행동에 관한 연구

이상모 · 류순호*

서울대학교 농화학과

초록 : 중질소(N-15)를 추적자로 사용하는 동위원소 희석법(isotope dilution technique)을 이용하여 수도를 pot 재배하면서 중질소로 표지된 요소를 15 kg N/10a(관행구)와 30 kg N/10a(배비구) 수준으로 시용한 후 토양과 수도체의 중질소함량을 안정동위원소비 질량분석기로 분석하여 시용한 요소로부터 유래하는 질소의 수지(balance)를 계산하였다. 수도체 중 시용한 요소로부터 유래하는 질소가 차지하는 비율(NDFP)은 관행구에서 평균 64%, 배비구에서 평균 89%로서 배비구가 높았으나, 수도체에 의한 시용된 요소의 회수율은 관행구와 배비구가 각각 65.5와 54.2%로서 시용된 요소의 효율은 관행구가 높았다. 시용된 요소 중 토양에 무기태 질소의 형태로 남아있는 잔류율은 관행구와 배비구에서 수도를 재배하지 않은 경우 각각 13.5% ($\text{NH}_4\text{-N}$ 5.53%, $\text{NO}_3\text{-N}$ 7.99%)와 16.5% ($\text{NH}_4\text{-N}$ 7.49%, $\text{NO}_3\text{-N}$ 8.98%)이고, 수도를 재배한 경우 각각 2.0% ($\text{NH}_4\text{-N}$ 0.63%, $\text{NO}_3\text{-N}$ 1.32%)와 2.3% ($\text{NH}_4\text{-N}$ 0.87%, $\text{NO}_3\text{-N}$ 1.40%)로서 수도를 수확한 직후의 토양에서 관행구와 배비구 모두 시용된 요소는 $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 형태보다는 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 형태로서의 잔류율이 높았다. 시용된 요소 중 토양에 유기태 질소의 형태로 남아있는 잔류율은 수도를 재배한 경우에는 관행구와 배비구가 각각 23.65와 26.93%로서 비슷하였으나, 수도를 재배하지 않은 경우에는 각각 64.98과 41.83%로서 큰 차이가 있었다. 수도체와 토양에 의한 시용된 요소의 전체 회수율은 수도를 재배하지 않은 경우 관행구 78.5%, 배비구 58.3%이고, 수도를 재배한 경우 관행구 91.1%, 배비구 83.4%로서 시용된 요소의 전체 회수율은 관행구가 높았다(1994년 7월 14일 접수, 1994년 8월 22일 수리).

서 론

요소는 1773년 Ronell에 의하여 urine에서 발견되었으며 1828년 Wöhler에 의하여 인공적으로 합성되어 현재는 전세계적으로 가장 많이 사용되는 질소질비료가 되었다.¹⁾ 우리나라에서 요소비료가 생산되기 시작한 것은 1961년이며 그 후 생산량은 꾸준히 증가되어 1992년도 우리나라의 화학비료의 총생산량은 3,383천톤 이며 그 중 질소질비료인 요소의 생산량은 562천톤 이나 된다.²⁾ 토양에서 요소의 행동 또는 작물에 의한 흡수이용율을 높이기 위한 연구들이 이루어져 왔지만 논토양에서 요소와 시용된 요소로부터 유래하는 질소의 행동에 관한 정량적인 자료는 매우 부족하다. 질소화합물들이 토양의 조건에 따라 토양에서 어떻게 행동하며 또 이들이 어떤 형태로 토양으로부터 주위의 환경으로 이동하는가를 정량적으로 밝히는 것은 중요한 연구과제이다.

작물에 의하여 흡수되는 시용질소의 양은 작물의 종류와 비료의 시용량, 시용시기 및 시용방법에 의하여 결정된다.^{3,4)} 토양에서 공간변이성의 정도는 Total-N 값이 N-15 값보다 크므로 Total-N 보다는 N-15 값을 측정하는 것이 시용된 질소에 대하여 더욱 정확한 정량적인 자료들을 얻을 수 있는데⁵⁾ N-15 를 추적자(tracer)로 사용하는 방법은 non-tracer 방법에 비하여 labeled N은 더욱 정확하게 측정되고, 기준구(check plot)가 필요없이 수행될 수 있다는 장점이 있다. 더우기 비료로부터 유래한 질소를 토양으로부터 유래한 질소와 구분할 수 있다.

본 연구는 중질소(N-15)를 추적자로 사용하는 동위원소 희석법을 이용하여 논토양 조건에서 표면시용된 요소의 행동을 규명하기 위한 정량적인 자료를 얻고자 수행되었다.

Key words : Paddy soil, Urea, Surface-applied, Nitrogen-15, Isotope dilution technique

*Corresponding author : S.-H. Yoo

재료 및 방법

공시토양

Pot 재배용 토양은 서울대학교 농업생명과학대학 부속농장의 논(규암토: coarse silty, mixed, nonacid, mesic family of Aquic Fluventic Eutrochrepts)에서 채취한 것으로 풍건시킨 후 2 mm체를 통과시킨 것을 사용하였다.

공시토양의 주요특성은 Table 1과 같다. 토양의 pH는 초차전극법, 유기탄소함량은 Walkely-Black법, 전질소함량은 Kjeldahl법, 양이온 치환용량 및 치환성 양이온은 1N-ammonium acetate(pH 7.0) 포화법으로 정량하였다. Urea-N은 비색법(Modified Diacety Monoxime법), 치환성 $\text{NH}_4\text{-N}$ 과 $\text{NO}_3\text{-N}$ 은 2M KCl로 침출하여 증질의 MgO와 Devardas alloy(Cu 50%, Al 45%, Zn 5%)를 사용하여 중류법으로 정량하였으며, 입경분석은 pipette 법으로 분석하여 토성은 미국 농무성의 분류법에 의하여 결정하였다.⁶⁾ 토양 총 urease 활성(TUA)은 toluene을 처리하지 않고 측정하는 non-buffer법(NB-T법), 토양에 축적된 urease 활성(AUA)은 미생물활성 억제제인 toluene을 처리한 non-buffer법(NB%T법)을 사용하였으며, 미생물이 분비하는 urease 활성(MUA)은 NB-T법과

NB+T법의 차이로서 계산하였다(MUA=TUA-AUA).

Pot 재배시험

Pot(25×30 cm, 1/2000a)에 밑에서부터 자갈 4.0 kg과 모래 1.5kg을 깔고 그 위에 인산과 가리비료를 미리 혼합한 공시토양 9 kg을 충전하고 24시간 담수시킨 후 1992년 6월 9일에 수도유묘(일품, 20일묘)를 pot당 3주(1주 3분)씩 이앙하였으며 각 처리 모두 3반복으로 하였다.

수도를 pot에서 재배하므로 포장에서의 수도에 대한 권장비료시비량($\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}$: 15-9-11 kg/10a)의 2배에 해당하는 용성인비 6.24 g과 염화加里 2.54 g(10a 토양의 무게를 130 ton으로 계산)를 1992년 6월 9일에 전량 기비로 사용하였으며, 질소의 시비는 관행구(15 kg N/10a)와 배비구(30 kg N/10a)로 구분하여 N-15가 표지된 요소를 용액으로 만들어 기비로 시비량의 50%를 1992년 6월 9일, 추비로 시비량의 30%는 6월 29일, 20%는 7월 29일에 시비하였다. N-15로 표지된 요소는 N-15 함량이 98%인 요소를 일반요소(N-15 함량 0.366%)를 사용하여 N-15 함량이 약 4%가 되도록 희석하여 표면사용하였다.

1992년 8월10일에 생육조사를 하였으며, 9월22일에 낙수하여 10월 12일에 수량조사를 한 후 토양과 수도를 채취하였다. 수도를 수확한 뒤의 토양은 0-5, 5-10, 10-15 및 15-20 cm로 구분하여 채취하였으며, 지상부 수도체도 볏짚(straw)과 이삭(grain)을 분리 채취하여 건조 탈곡한 뒤 분쇄기로 분쇄하여 60 mesh체를 통과시킨 것을 분석용 시료로 하였다.

토양과 수도체의 N-15분석

토양과 수도체(볏짚 과 곡립)의 N-15 농도를 분석하기 위하여 먼저 Total-N, $\text{NH}_4\text{-N}$ 와 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도를 중류법으로 정량하였다. 토양과 수도체의 N-15 농도는 중류과정에서 포집하여 산으로 적정한 용액을 사용하여 안정 동위원소비 질량분석기(Stable Isotope Ratio Mass Spectrometer: SIRMS, model: VG ISOGAS MM 622)로 분석하였다. 안정동위원소비 질량분석기를 이용한 N-15의 분석과정은 Fig. 1와 같다. 중류과정에서 포집하여 산으로 적정한 용액에 농축과정에서의 질소의 손실을 방지하기 위하여 0.08N H_2SO_4 2 ml를 첨가하고 열판을 이용하여 약 200°C 에서 건조될 정도로 농축시킨 후 5 ml의 증류수로 포집하였다. 본 실험실에서 제작한 N_2 가스 발생 및 포집장치를 이용하여 농축 시료용액 2 ml와 alkaline sodium hypobromite(NaOBr) 용액 4 ml를 섞이지 않게 넣은 뒤 진공펌프로 약 5분간 공기를 1차 제거한 후 잔존공기를 Argon gas로 3회 치환한 뒤 농

Table 1. Characteristics of soil used

pH (1:5)	6.1
Organic Carbon	11.65 gkg ⁻¹
Total N	1.02 gkg ⁻¹
Urea-N	ND
Ext. $\text{NH}_4\text{-N}$	10.2 mgkg ⁻¹
Ext. $\text{NO}_3\text{-N}$	2.1 mgkg ⁻¹
CEC	10.8 cmolkg ⁻¹
Exch. Ca	3.9 cmolkg ⁻¹
Exch. Mg	0.5 cmolkg ⁻¹
Exch. K	0.3 cmolkg ⁻¹
Texture*	Sandy loam
Sand	60.7%
Silt	21.7%
Clay	17.6%
Saturation moisture content	54.5%
Total Urease Activity	8.9 µg urea-N hydrolyzed/g soil/hr
Accumulated Urease Activity	5.2 µg urea-N hydrolyzed/g soil/hr
Microbial Urease Activity	3.7 µg urea-N hydrolyzed/g soil/hr

* USDA.

축액과 NaOBr 용액을 반응시켜 N₂ 가스를 발생시켰다. 발생된 N₂ 가스는 공기 중의 수분을 제거하기 위하여 진한 황산 5 ml를 함유하고 있는 포집장치로 포집하였다. N₂ 가스와 함께 생성되는 H₂(water vapor), CO₂ 및 Br₂ 같은 불순물은 액체 질소(liquid N₂)를 이용한 cold trap 으로 제거한 후 안정동위원소비 질량분석기로 N-15를 분석하였다.

결과 및 고찰

수도체의 Total-N과 N-15 농도

질량분석기를 사용하여 시료의 N-15 농도를 측정하고 다음의 식을 이용하여 수도체와 토양 중에 시용한 요소로부터 유래하는 질소가 차지하는 비율(Nitrogen Derived From Fertilizer, NDFF)과 시용된 요소의 회수율(Recovery)을 계산하였다.

N_{tot}: the total amount of N in plant or soil

$$= \text{Dry wt.} \times \text{Total-N in plant or soil}$$

NDFF: nitrogen derived from fertilizer

$$= \frac{(\text{plant or soil N-15 atom \%} - 0.366)}{(\text{fertilizer N-15 atom \%} - 0.366)} \times 100$$

A: the amount of N-15 labeled fertilizer in plant or soil

$$= N_{\text{tot}} \times \text{NDFF}$$

R: the recovery of fertilizer nitrogen by plant or soil

$$= \frac{A}{(\text{the amount of fertilizer nitrogen applied})} \times 100$$

Table 2는 N-15가 표지된 요소를 15 kg N/10a(관행구)와 30 kg N/10a(배비구) 수준으로 시용한 pot에서 재배한 수도체의 N-15 분석결과이다.

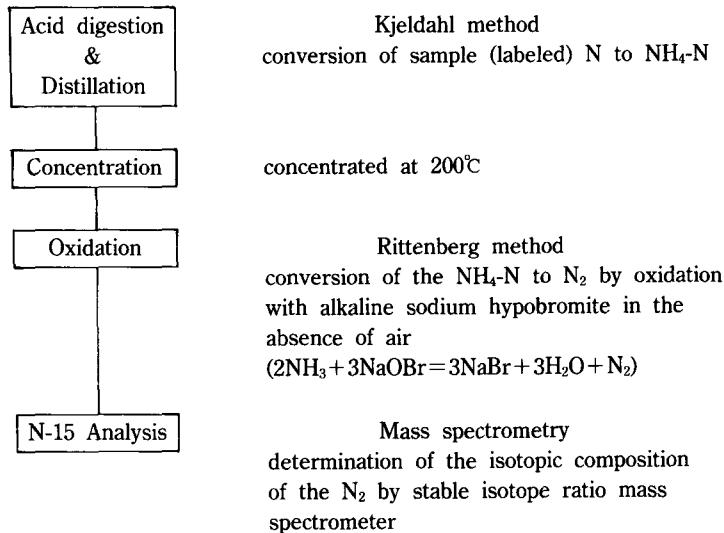


Fig. 1. N-15 analysis procedures by stable isotope ratio mass spectrometer.

Table 2. Total-N and N-15 concentration in rice (straw and grain)

Treatment	Plant	Dry wt.	Total-N	T-N _{tot}	N-15	NDFF	A	R
		(g)	(%)	(mg)	(atom %)	(%)	(mg)	(%)
15 kg N/10a (1.039 g N)	Straw	61.0	0.592	361.2	2.753	66.1	238.8	23.0
	Grain	60.6	1.163	705.6	2.627	62.6	441.3	42.5
	Total	121.6		1066.2			680.1	65.5
30 kg N/10a (2.078 g N)	Straw	64.8	0.622	402.8	3.633	90.4	364.1	17.5
	Grain	70.9	1.214	860.6	3.570	88.7	763.4	36.7
	Total	135.7		1263.4			1127.5	54.2

Table 3. Total-N and N-15 concentration in soil planted to rice

Treatment	Depth	Dry wt.	Total-N	T-N _{tot}	N-15	NDFP	A	R
	(cm)	(g)	(%)	(mg)	(atom %)	(%)	(mg)	(%)
15 kg N/10a (1.039 g N)	0~5	2250	0.102	2286.9	0.621	7.1	161.2	15.5
	5~10	2250	0.104	2343.6	0.450	2.3	54.6	5.3
	10~15	2250	0.089	2003.4	0.417	1.4	27.9	2.7
	15~20	2250	0.104	2334.2	0.400	0.9	21.5	2.1
	Total	9000		8968.1			265.2	25.6
30 kg N/10a (2.078 g N)	0~5	2250	0.103	2305.8	0.956	16.3	376.5	17.7
	5~10	2250	0.107	2400.3	0.610	6.8	162.3	7.8
	10~15	2250	0.094	2107.4	0.450	2.3	49.1	2.4
	15~20	2250	0.101	2277.5	0.408	1.2	26.4	1.3
	Total	9000		9091.0			614.3	29.2

Total-N 농도는 관행구에서 벗짚 0.59, 곡립 1.16%이었으며, 배비구에서 벗짚 0.62, 곡립 1.21%로서 벗짚과 곡립 모두 배비구에서 많았고, 관행구와 배비구 모두 곡립이 벗짚에 비하여 2배 정도 높았다.

전체 질소 중 사용된 요소로부터 유래한 질소가 차지하는 비율(NDFP)은 관행구에서 벗짚 66.1, 곡립 62.6%이었고, 배비구에서 벗짚 90.4%, 곡립 88.7%로서 배비구가 높았다.

수도체에 의한 사용된 요소의 회수율은 관행구에서 벗짚 23.0, 곡립 42.5%이었고, 배비구에서 벗짚 17.5, 곡립 36.7%로서 수도체에 의한 전체 회수율은 관행구 65.5 및 배비구 54.2%였다. 관행구가 배비구에 비하여 수도체에 의한 전체 회수율이 약 11% 정도 높았는데 이는 관행구의 경우가 사용된 요소의 효율이 높았다는 것을 의미한다. 앞의 NDFP 자료에 의하면 벗짚과 곡립의 평균 NDFP 값은 배비구가 약 90%, 관행구가 약 64%로서 수도에 의한 사용된 요소의 흡수율은 배비구에서 높았지만, 흡수된 질소에 의한 수량의 증가효과는 관행구에서 높았다.

수도의 질소이용률은 곡립 1/3, 벗짚 1/4~1/3, 토양과 뿌리 1/4 및 손실 1/5~1/4이고,^{7,8)} 포장조건에서 수도에 의한 표면사용된 요소의 흡수이용률은 30~40% 정도라고 알려져 있는데,^{9,10)} 수도체에 의한 회수율이 포장의 경우보다 높게 나타난 것은 본 실험은 밀이 있는 pot를 사용하여 용탈을 차단한 closed system의 형태로 실험을 수행하였기 때문에 용탈에 의한 사용된 요소의 손실은 매우 적었으며, 또 요소를 용액으로 만들어 토양의 표면에 사용하였기 때문에 사용된 요소가 빠른 속도로 토양내부로 확산되어 심층시비의 효과에 의한 것이라고

생각된다. 비료 사용방법에서 요소를 심층시비하면 표층시비에 비하여 수량이 증가되고 비료의 회수율도 높다. 이는 요소의 가수분해로 생긴 NH₄가 환원층에서 점토 광물이나 유기물에 흡착되어 토양표면으로의 확산이 방지되므로 NH₃ 휘산이나 질산화-탈질작용에 의한 질소 손실이 줄어들기 때문이라고 알려져 있다.¹¹⁾ Phangpan 등¹²⁾은 보통 포장조건에서 수도에 의한 사용질소의 회수율은 약 30% 이하이나 pot 조건에서는 표면사용의 경우 약 40% 이고, 심층시비의 경우 약 60~70% 정도라고 보고하였다.

사용 질소비료의 효율은 사용된 질소의 단위량에 대한 작물 생산량의 증가량을 조사하는 방법과 시비구와 무비구간의 질소 흡수량 차이를 이용하는 방법 등이 있다.¹³⁾ 그러나 전자의 경우 시비효율은 작물이 이용한 질소의 양이나 사용비료의 오염가능성을 고려하지 않고 단지 작물수량으로만 표시하고, 후자의 경우 비료의 효율은 사용된 비료 질소는 토양 질소의 이용도나 흡수를 바꾸지 않는다는 가정에 기초를 두기 때문에 실제 토양에서 일어나는 현상과 차이가 있다.

사용된 질소가 무기화-부동화 변환(mineralization-immobilizationturnover, MIT)을 통하여 토양질소와 교환 반응을 한다는 사실 때문에 N-15 자료의 해석은 매우 복잡하다. MIT는 정량적이지 못하고 무기화되는 토양 질소의 양은 부동화되는 사용질소의 양보다 많을 수 있으며, 사용된 질소는 MIT에 의하여 효율이 떨어진다고 알려져 있다.¹⁴⁾ N-15를 사용하는 연구에서 사용질소의 효율은 보통 N-15의 작물에 의한 회수율로부터 계산되나 MIT가 작물에 의하여 흡수되는 질소의 동위원소 조성(isotopic composition)에 영향을 주기 때문에 주의가 가

Table 4. Total-N and N-15 concentration in unplanted soil

Treatment	Depth	Dry wt.	Total-N	T-N _{tot}	N-15	NDFP	A	R
	(cm)	(g)	(%)	(mg)	(atom %)	(%)	(mg)	(%)
15 kg N/10a (1.039 g N)	0~5	2250	0.101	2277.5	1.144	21.5	489.7	47.1
	5~10	2250	0.099	2220.8	0.654	7.8	173.2	16.7
	10~15	2250	0.102	2286.9	0.526	4.4	101.1	9.7
	15~20	2250	0.099	2230.2	0.450	2.3	52.0	5.0
	Total	9000		9015.4			816.0	78.5
30 kg N/10a (2.078 g N)	0~5	2250	0.100	2258.6	1.377	28.0	632.2	30.4
	5~10	2250	0.108	2428.7	0.771	11.2	271.8	13.1
	10~15	2250	0.116	2598.8	0.627	7.2	187.9	9.0
	15~20	2250	0.115	2579.9	0.535	4.7	120.2	5.8
	Total	9000		9854.7			1212.1	58.3

지고 평가되어야 한다.

토양의 Total-N과 N-15 농도

Table 3은 수도를 재배한 경우의 관행구와 배비구 토양의 Total-N과 N-15를 분석한 결과이다. Total-N 농도는 관행구와 배비구간에 차이가 거의 없었으며, 토양 깊이별로도 10~15 cm 깊이를 제외하고는 비슷한 경향으로 공시토양의 0.102%와 큰 차이가 없었다. 토양깊이 10~15 cm에서 관행구와 배비구는 각각 0.089와 0.094 %로서 최소값을 나타내었는데 이는 수도의 뿌리분포 밀도가 10~15 cm에서 가장 높아 토양 중의 질소를 가장 많이 흡수하였기 때문이라고 생각된다.

관행구와 배비구의 토양깊이별 Total-N 농도는 비슷하였지만 NDFP는 크게 차이가 났다. NDFP는 모든 깊이에서 배비구가 높았으며, 특히 0~5 및 5~10 cm 깊이에서 관행구는 7.1과 2.3%, 배비구는 16.3과 6.8%로서 배비구가 관행구에 비하여 약 2~3배 정도 높았다. 시용된 질소의 토양 중 잔류율은 관행구 25.6%, 배비구 29.2%로서 시용 요소량이 달라도 시용요소의 토양 중 잔류율은 비슷하였다.

Table 4는 수도를 재배하지 않은 경우의 관행구와 배비구 토양의 Total-N 과 N-15 분석결과이다. Total-N 농도는 배비구가 관행구에 비하여 약간 큰 경향이었으며, 관행구의 경우 토양깊이별로 차이가 거의 없었으며 공시토양의 0.102%와 비슷하였다. 그러나 배비구의 경우에는 0~5 및 5~10 cm 깊이에서 0.100과 0.108%로서 공시토양과 차이가 없었으나 토심 10~15 및 15~20 cm 깊이에서는 0.116과 0.115%로 증가하였다. 시용된 요소로부터 유래하는 질소의 양이 적음에도 불구하고 토양의

Table 5. Total recovery of fertilizer-N by rice and soil(%)

	15 kg N/10a (1.039 g N)		30 kg N/10a (2.078 g N)	
	NO RICE	RICE	NO RICE	RICE
Straw	—	23.0	—	17.5
Grain	—	42.5	—	36.7
Soil	78.5	25.6	58.3	29.2
Total	78.5	91.1	58.3	83.4

Total-N 농도가 증가했다는 것은 토양의 무기화 반응(mineralization)에 의한 것이라고 생각된다.

토양깊이별 NDFP는 관행구와 배비구가 각각 2.3~21.5와 4.7~28.0%의 범위로서 수도를 재배한 경우와 마찬가지로 토양깊이가 커질수록 감소하는 경향이었으나 수도를 재배한 경우에 비하여 변화폭이 매우 컸으며, 모든 깊이에서 배비구가 관행구에 비하여 높았다.

토양깊이에 따른 배비구와 관행구 간의 NDFP 차이는 앞의 결과에서 나타났듯이 수도를 재배한 경우에는 0~5 및 5~10 cm 깊이에서 큰 차이가 있었으나, 수도를 재배하지 않은 경우에는 10~15 및 15~20 cm 깊이에서 관행구는 4.4와 2.3%, 배비구는 7.2와 4.7%로서 배비구가 관행구에 비하여 약 2배 정도 높았다.

시용된 요소의 토양 중 잔류율은 관행구 78.5%, 배비구 58.3%로서 큰 차이가 있었는데 이 차이의 대부분은 토양깊이 0~5 cm에서 잔류율의 차이에 기인하였다. 토양깊이 0~5 cm에서 잔류율은 관행구와 배비구가 각각 47.1과 30.4%로서 관행구가 높았다는 사실은 질소의 시용

량이 많은 배비구에서 토양의 상단부인 0~5 cm에서 사용된 요소의 손실이 많았다는 사실을 나타내는 것이다.

토양 중 사용된 요소의 전체 잔류율은 수도를 재배한 경우에는 관행구와 배비구가 비슷하였지만 수도를 재배하지 않은 경우에는 관행구와 배비구 간에 큰 차이가 있었다는 결과는 수도 재배의 영향을 나타내는 것이다.

관행구와 배비구에서 사용된 요소의 수도와 토양에 의한 전체 회수율은 Table 5와 같다. 수도를 재배하지 않은 경우 관행구 78.5%, 배비구 58.3% 이었으며, 수도를 재배한 경우 관행구 91.1%, 배비구 83.4%로서 수도재배에 의하여 전체 회수율은 증가하였다. 전체회수율은 수도를 재배한 경우에 관행구가 약 7.7% 높았으며, 수도를 재배하지 않은 경우에도 관행구가 약 20.2% 높았다. 이는 작물을 재배하는 경우에는 토양에 처리하는 질소

량이 증가하면 작물에 의한 흡수량도 증가하므로 사용 질소의 손실량은 처리량과 비례하지 않지만, 작물이 없는 경우에는 사용질소량이 증가함에 따라 손실되는 질소량도 증가한 것이라고 생각된다.

질소 사용량이 증가할수록 식물에 의한 회수율은 감소하고,¹⁵⁾ 사용된 질소의 회수율은 ammonium 형태가 nitrate 형태의 비료보다 좋으며, 작물에 의한 회수율은 50% 이하이고 가스에 의한 손실은 약 15% 정도라고 알려져 있다.¹⁶⁾

수도와 작물에 의하여 회수되지 않은 부분은 용탈수에 의하여 용탈되었거나, 휘산이나 탈질반응에 의하여 가스상태로 손실되었다고 생각할 수 있다. 그러나 본 실험은 용탈수의 이동을 차단한 pot 조건에서 수행하였으므로 대부분 가스상태로 손실되었다고 생각된다.

pot 실험에서 사용된 요소의 29~40%는 곡립, 12~20

Table 6. $\text{NH}_4\text{-N}$ and N-15 concentration in unplanted soil

Treatment	Depth	Dry wt. (g)	$\text{NH}_4\text{-N}$ ($\mu\text{g/g}$)	$\text{NH}_4\text{-N}_{\text{tot}}$ (mg)	N-15 (atom %)	NDFP (%)	A (mg)	R (%)
	(cm)							
15 kg N/10a (1.039 g N)	0~5	2250	7.0	15.75	2.213	51.1	8.05	0.77
	5~10	2250	13.3	29.93	1.473	30.6	9.16	0.88
	10~15	2250	28.3	63.68	1.340	27.0	17.19	1.65
	15~20	2250	61.6	138.60	0.970	16.7	23.15	2.23
	Total	9000		247.96			57.55	5.53
30 kg N/10a (2.078 g N)	0~5	2250	9.6	21.60	2.918	70.6	15.25	0.73
	5~10	2250	15.8	35.55	2.649	63.2	22.47	1.08
	10~15	2250	45.0	101.25	2.314	53.9	54.57	2.63
	15~20	2250	80.6	181.35	1.626	34.9	63.29	3.05
	Total	9000		339.75			155.58	7.49

Table 7. $\text{NH}_4\text{-N}$ and N-15 concentration in soil planted to rice

Treatment	Depth	Dry wt. (g)	$\text{NH}_4\text{-N}$ ($\mu\text{g/g}$)	$\text{NH}_4\text{-N}_{\text{tot}}$ (mg)	N-15 (atom %)	NDFP (%)	A (mg)	R (%)
	(cm)							
15 kg N/10a (1.039 g N)	0~5	2250	7.7	17.33	1.307	26.1	4.52	0.44
	5~10	2250	6.6	14.85	0.667	8.3	1.23	0.12
	10~15	2250	6.4	14.40	0.517	4.2	0.60	0.06
	15~20	2250	6.6	14.85	0.400	0.9	0.13	0.01
	Total	9000		61.43			6.48	0.63
30 kg N/10a (2.078 g N)	0~5	2250	10.4	23.40	2.112	48.3	11.30	0.54
	5~10	2250	8.4	18.90	1.071	19.5	3.69	0.18
	10~15	2250	8.0	18.00	0.802	12.1	2.18	0.10
	15~20	2250	8.4	18.90	0.567	5.6	1.06	0.05
	Total	9000		79.20			18.23	0.87

%는 벚짚, 27~33%는 토양과 뿌리로 회수되거나 뿌리로 회수되는 양은 1% 이하이고, 사용된 요소의 회수율은 표면사용일 경우 74%, 심층시비의 경우 94% 및 표면과 심층시비 혼합의 경우 94%라고 알려져 있다.¹⁷⁾

토양의 NH₄-N과 N-15 농도

Table 6은 수도를 재배하지 않은 경우 토양의 NH₄-N에 대한 분석결과이다. 토양깊이에 따른 NH₄-N의 농도는 관행구와 배비구가 각각 7.0~61.6과 9.6~80.6 µg/g 범위로서 배비구가 높았으며 토양깊이가 커질수록 증가하는 경향이였다.

토양깊이별 NDFF는 관행구와 배비구가 각각 16.7~51.1과 34.9~70.6%로서 토양깊이가 커질수록 NDFF는 감소하는 경향이였다. 특히 배비구와 관행구 간에는 큰

차이가 있었는데 0~5 cm 이하의 깊이에서는 배비구가 관행구에 비하여 약 2배 정도 큰 값을 나타냈다. 토양 깊이가 커질수록 NDFF가 작다는 것은 사용된 요소로부터 유래하는 질소의 양이 적다는 것을 나타내는 것이다. 비료로 사용되는 질소의 양이 증가하는 경우에도 수도의 주요 질소 공급원은 토양 유기물의 무기화에 의하여 생성되는 것이다. 토양유기물의 무기화 과정은 온도, 수분함량, 유기물함량, 점토함량 등에 의하여 영향을 받는다고 알려져 있다.¹⁸⁾

토양깊이에 따라 NH₄-N의 형태로 남아있는 사용된 요소의 잔류율은 토양깊이가 커질수록 NDFF는 감소하였어도 NH₄-N의 농도는 증가하였기 때문에 회수율은 증가하였으며, 전체 잔류율은 관행구 5.53%, 배비구 7.49%로서 배비구가 높았다.

Table 8. NO₃-N and N-15 concentration in unplanted soil

Treatment	Depth	Dry wt.	NO ₃ -N	NO ₃ -N _{tot}	N-15	NDFF	A	R
	(cm)	(g)	(µg/g)	(mg)	(atom %)	(%)	(mg)	(%)
15 kg N/10a	0~5	2250	13.4	30.15	2.592	61.6	18.57	1.79
	5~10	2250	18.6	41.85	2.096	47.9	20.05	1.93
	10~15	2250	45.2	101.70	1.900	42.5	43.22	4.16
	15~20	2250	5.0	11.25	0.718	9.8	1.10	0.11
	Total	9000		184.95			82.94	7.99
30 kg N/10a (2.078 g N)	0~5	2250	26.3	59.18	3.479	86.2	51.01	2.45
	5~10	2250	42.4	95.40	2.732	65.5	62.49	3.01
	10~15	2250	58.1	130.73	2.327	54.3	70.99	3.42
	15/20	2250	5.0	11.25	1.042	18.7	2.10	0.10
	Total	9000		296.56			186.59	8.98

Table 9. NO₃-N and N-15 concentration in soil planted to rice

Treatment	Depth	Dry wt.	NO ₃ -N	NO ₃ -N _{tot}	N-15	NDFF	A	R
	(cm)	(g)	(µg/g)	(mg)	(atom %)	(%)	(mg)	(%)
15 kg N/10a (1.039 g N)	0~5	2250	8.2	18.45	2.448	57.6	10.63	1.02
	5~10	2250	5.6	12.60	0.750	10.6	1.34	0.13
	10~15	2250	5.7	12.83	0.686	8.9	1.14	0.11
	15~20	2250	5.6	12.60	0.558	5.3	0.67	0.06
	Total	9000		56.48			13.78	1.32
30 kg N/10a (2.078 g N)	0~5	2250	10.4	23.40	3.273	80.5	18.84	0.91
	5~10	2250	8.4	18.90	1.279	25.3	4.78	0.23
	10~15	2250	8.8	19.80	0.975	16.9	3.35	0.16
	15~20	2250	8.8	19.80	0.738	10.3	2.04	0.10
	Total	9000		81.90			29.01	1.40

Table 7은 수도를 재배한 경우 토양의 NH₄-N에 대한 분석결과이다. 토양깊이에 따른 NH₄-N 농도는 관행구와 배비구 모두 0~5cm 깊이에서 최대 7.7과 10.4 μg/g 이었으며, 나머지 깊이에서는 거의 차이가 없었다. 토양 깊이에 따른 NDFP는 관행구에서 0.9~26.1%, 배비구에서 5.6~48.3% 범위로서 토양깊이가 커질수록 급격히 감소하였으며, 모든 토양깊이에서 배비구가 관행구에 비하여 약 2~5배 정도 큰 경향이였다. 토양 중 NH₄-N의 형태로 남아있는 사용된 요소의 잔류율은 관행구 0.63%, 배비구 0.87% 이었으며, 잔류하는 요소의 대부분은 0~5 cm 깊이에 존재하였다.

토양의 NO₃-N과 N-15 농도

수도를 재배하지 않은 경우 토양의 NO₃-N에 대한 분석 결과는 Table 8과 같다. 토양깊이에 따른 NO₃-N 농도는 관행구와 배비구가 각각 5.0~45.2와 5.0~58.1 μg/g의 범위로서 모든 토양깊이에서 실험전 공시토양의 2.1 μg

/g에 비하여 많이 증가하였으며, 관행구와 배비구 모두 10~15 cm 깊이에서 최고값을 나타냈다. 토양깊이에 따른 NDFP는 0~5 cm 깊이에서 관행구와 배비구가 각각 61.6과 86.3%로서 가장 높았고 토양깊이가 커질수록 감

Table 10. Remaining percentage in different forms of nitrogen derived from the applied fertilizer in soil

N-fraction	15 kg N/10a (1.039 g N)		30 kg N/10a (2.078 g N)	
	NO RICE	RICE	NO RICE	RICE
Total-N	78.50	25.60	58.30	29.20
NH ₄ -N	5.53	0.63	7.49	0.87
NO ₃ -N	7.99	1.32	8.98	1.40
*Organic-N	64.98	23.65	41.83	26.93

*Organic-N=Total-N-KCl extractable N.

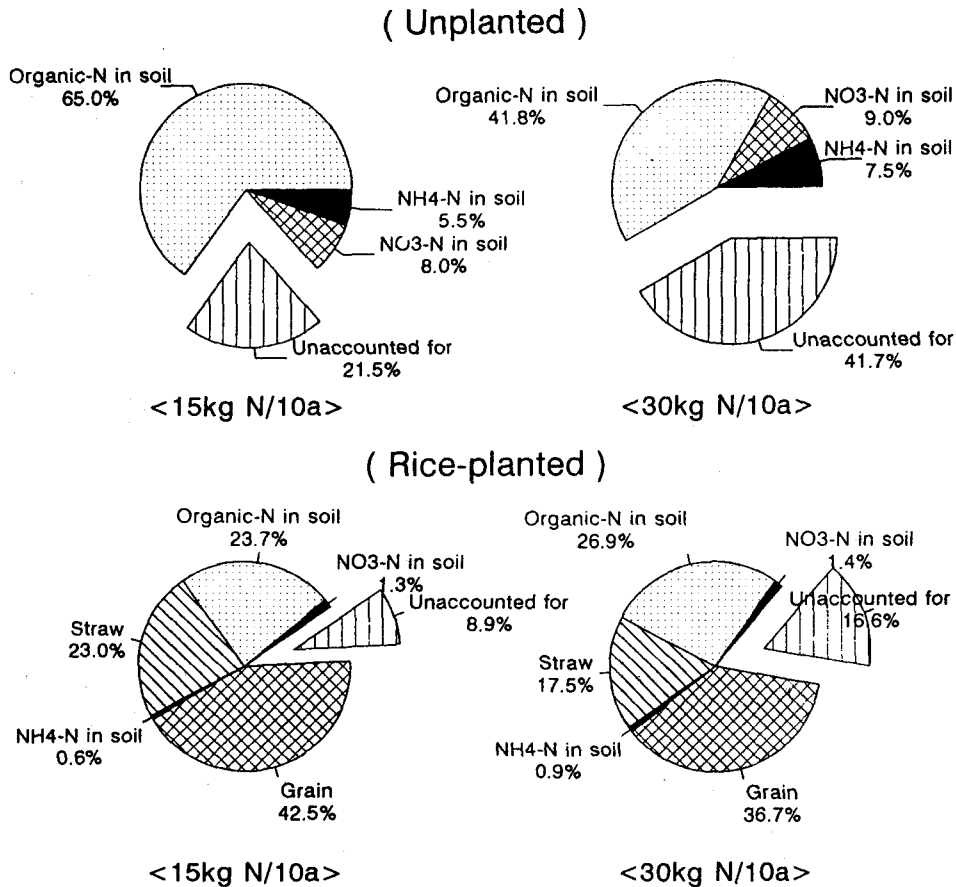


Fig. 2. Total recovery of fertilizer-N

소하였다. 시용된 요소 중 NO₃-N 형태로의 잔류율은 관행구 7.99%, 배비구 8.98%로서 큰 차이가 없었다.

Table 9는 수도를 재배한 경우 토양의 NO₃-N에 대한 분석결과이다. 토양깊이에 따른 NO₃-N 농도는 NH₄-N 농도와 비슷한 경향으로서 관행구와 배비구 모두 0~5 cm 깊이에서 최고농도를 나타내고 다른 깊이에서는 비슷한 값을 나타내는 경향이였다. NDFFF는 관행구와 배비구 모두 토양깊이가 커질수록 감소하는 경향으로, 관행구에서 5.3~57.6%, 배비구에서 10.3~80.5% 범위였다. 토양깊이에 따른 NDFFF는 0~5 cm 깊이에서 수도를 재배하지 않은 경우 관행구와 배비구가 각각 61.6과 86.2% 이었고, 수도를 재배한 경우 관행구와 배비구가 각각 57.6과 80.5%로서 큰 차이가 없었으나 그 이하의 깊이에서는 수도를 재배하지 않은 경우가 약 2~5배 정도 큰 값을 나타냈다. 시용된 요소 중 NO₃-N 형태로의 잔류율은 관행구에서 1.32%, 배비구 1.40%로서 수도를 재배하지 않은 경우와 같이 관행구와 배비구간에 큰 차이가 없었다.

Table 10과 Fig. 2는 토양 중 Total-N과 NH₄-N 및 NO₃-N의 형태로 남아있는 시용된 요소의 잔류율을 나타낸 것이다. 수도재배와 요소시비량에 상관없이 시용된 요소는 NH₄-N의 형태보다는 NO₃-N의 형태에 의한 잔류율이 높았는데 이는 수도의 등숙을 위한 낙수기간 동안에 NH₄-N이 NO₃-N로 변환되었기 때문이라고 생각된다. 일반적으로 토양에 존재하는 무기태 질소는 NH₄-N 형태가 NO₃-N 형태에 비하여 많이 존재하는데 수확 직후의 토양에서는 NO₃-N 형태가 더 많이 존재하였다. 비료의 시용으로 증가된 NO₃-N의 형태로 존재하는 질소는 그 다음해에 작물에 의하여 흡수되기 전에 용탈될 가능성이 있으며 또한 시용질소의 효율을 감소시키고 지하수를 오염시킬 가능성이 높아지게 된다.

시용된 요소의 토양 중 잔류율에서 NH₄-N과 NO₃-N와 같은 무기태의 형태로 남아있는 잔류율을 뺀 값을 유기태의 형태로 잔류하는 질소라고 생각할 수 있다. 시용된 요소 중 유기태의 형태로 남아있는 잔류율은 수도를 재배한 경우에는 관행구와 배비구가 각각 23.65와 26.93%로서 비슷하였으나, 수도를 재배하지 않은 경우에는 각각 64.98과 41.83%로서 큰 차이가 있었다.

이양기에 시비한 비료의 약 25~40%가 수도를 수확한 후의 토양에 잔류하고 이러한 잔류성 질소는 유기태 형태로 부동화된 질소나 화학적으로 고정된 형태이다. 작물이 이용할 수 있는 주요 질소공급원으로 간주되는 토양의 유기태 질소의 양은 미생물의 생체 질소(microbial biomass-N)와 관계가 깊으며,¹⁹⁾ 시용된 질소의 약

20% 정도가 토양의 미생물에 의하여 부동화 되고, 시용된 질소 중 토양에 잔류하는 질소는 다음 작물에 의하여 흡수되기 보다는 작물이 생육하지 않는 기간 동안에 손실된다고 알려져 있다.^{20,21)}

감사의 글

이 연구는 1992년도 교육부지원 한국학술진흥재단의 자유공모과제 학술연구 조성비에 의하여 수행되었으며 이 논문은 그 연구결과의 일부이다. 재정적 지원을 해준 한국학술진흥재단에 깊이 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Gould, W. D., C. Hagedorn, and R. G. L. McCready (1987) Urea transformations and fertilizer efficiency in soil. *Adv. Agron.* 40:209-238.
- 한국비료공업협회 (1993) 비료연감. p. 9-11.
- Chairoj, P., Y. Uehara, M. Kimura, H. Wada. and Y. Takai (1984) Nitrogen dynamics in the uppermost part of submerged paddy soils in temperate and tropical regions. I. Effect of long-term fertilization treatment. *Soil Sci. Plant Nutr.* 30(3), 383-396.
- De Datta, S. K., R. J. Buresh, M. I. Samson, and K. R. Wang (1988) Nitrogen use efficiency and nitrogen-15 balances in broadcast-seeded flooded and transplanted rice. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52, 849-855.
- Selles, F., R. E. Karamanos, and R. G. Kachanoski (1986) The spatial variability of nitrogen-15 and its relation to the variability of other soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50, 105-110.
- Page, A. L. (1982) *Methods of soil analysis*. 2nd end. ASA and SSSA. Madison, U.S.A.
- De Datta, S. K., I.R.P. Fillery, W. N. Obcemea, and R. C. Evangelista. (1987) Floodwater properties, nitrogen utilization, and nitrogen-15 balance in a calcareous lowland rice soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51, 1355-1362.
- Reddy, K. R., and W. H. Patrick, Jr. (1986) Fate of fertilizer nitrogen in the rice root zone. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 50, 649-651.
- 김호식, 조백현, 이춘영, 이은웅, 심삼철, 류순호, 권용웅, 조재성 (1968) 수도에 대한 인산 및 질소질비료의 효과에 관한 연구-동위원소를 이용한 6개년간의 국제적 공동시험결과 -. *한토비지.* 1, 13-26.
- Broadbent, F. E., and M. E. Tusneem (1971) Losses of nitrogen from some flooded soils in tracer experiments. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 35. 922-926.

11. Smith, S. J., J. S. Schepers, and L. K. Porter (1990) Assessing and managing agricultural nitrogen losses to the environment. *Advances in Soil Science* 14, 1-43.
12. Phongpan, S., S. Vacharotayan, and K. Kumazawa (1988b) Dynamics of ammonia volatilization losses in wetland soil following the broadcast of urea amended with phenyl phosphorodiamidate. *Soil Sci. Plant Nutr.* 34(1), 127-137.
13. Torbert, H. A., R. L. Mulvaney, R. M. Vanden Heuvel, and R. G. Hoefl (1992) Soil type and moisture regime effects on fertilizer efficiency calculation methods in a nitrogen-15 tracer study. *Agron. J.* 84, 66-70.
14. Meyer, M. L., P. R. Bloom, and J. Grava (1989) Transformation and losses of applied nitrogen-15 labeled ammonium in a flooded organic soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53, 79-85.
15. Reeder, J. D. (1985) Fate of nitrogen-15 labeled fertilizer nitrogen in revegetated cretaceous coal spoils. *J. Environ. Qual.* 14, 126-131.
16. Carter, J. N., O. L. Bennett, and R. W. Pearson (1967) Recovery of fertilizer nitrogen under field conditions using nitrogen-15. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 31, 50-56.
17. Phongpan, S., S. Vacharotayan, and K. Kumazawa (1988a) Fate and efficiency of urea fertilizer in wetland rice soil. *Soil Sci. Plant Nutr.* 34(1), 117-126.
18. Gotoh, S., H. Koga, and S. Ono (1984) Effect of long-term application of organic residues on the distribution of organic matter and nitrogen in some rice soil profiles. *Soil Sci. Plant Nutr.* 30(3), 273-285.
19. Inubushi, K., H. Wada, and Y. Takai (1984) Determination of microbial biomass-nitrogen in submerged soil. *Soil Sci. Plant Nutr.* 30(3), 455-459.
20. Kissel, D. E., S. J. Smith, and D. W. Dillow (1976) Disposition of fertilizer nitrate applied to swelling clay soil in the field. *J. Environ. Qual.* 5, 66-71.
21. Liang, B. C., M. Remillard, and A. F. Mackenzie (1991) Influence of fertilizer irrigation and non-growing season precipitation on soil nitrate-N under corn. *J. Environ. Qual.* 20, 123-128.

A Study on the Behavior of Surface-Applied Urea with ^{15}N Isotope Dilution Technique in Paddy Soil

Sang-Mo Lee and Sun-Ho Yoo* (Department of Agricultural Chemistry, Seoul National University Suwon 441-744, Korea)

Abstract: The pot experiment using ^{15}N isotope dilution technique was carried out to calculate the balance of nitrogen of surface applied urea in the rice-soil system. The ^{15}N concentration was determined by stable isotope ratio mass spectrometer (model: VG ISO-GAS MM622). In the pots with ^{15}N labeled urea application at the rates of 15 and 30 kg N/10a, the percentage of nitrogen derived from fertilizer (NDFP) in rice was higher at the rate of 30 kg N/10a (average 89%) than at the rate of 15 kg N/10a (average 64%). However, the recovery as percentage of fertilizer N by rice was higher at the rate of 15 kg N/10a (65.5%) than at the rate of 30 kg N/10a (54.2%). The percentages of the fertilizer N remained in extractable inorganic N form at the rates of 15 and 30 kg N/10a were 13.5% ($\text{NH}_4\text{-N}$ 5.53%, $\text{NO}_3\text{-N}$ 7.99%) and 16.5% ($\text{NH}_4\text{-N}$ 7.49%, $\text{NO}_3\text{-N}$ 8.98%) in unplanted soil, and 2.0% ($\text{NH}_4\text{-N}$ 0.63%, $\text{NO}_3\text{-N}$ 1.32%) and 2.3% ($\text{NH}_4\text{-N}$ 0.87%, $\text{NO}_3\text{-N}$ 1.40%) in soil planted to rice, respectively. The dominant form of inorganic-N in soil after harvest was $\text{NO}_3\text{-N}$ form rather than $\text{NH}_4\text{-N}$ form regardless of urea application rate or rice cultivation. The percentages of the fertilizer N remained in organic N form at the rates of 15 and 30 kg N/10a were 65.0 and 41.8% in unplanted soil, and 23.7 and 26.9% in soil planted to rice, respectively. In conclusion, the efficiency of surface-applied urea was greater at the rate of 15 kg N/10a than at the rate of 30 kg N/10a.