

제주토양에서 ^{15}N 표지 요소비료의 질소 변환 특성 및 용탈

송성준¹, 유장걸², 손상목³

¹제주대학교 방사선용융과학연구소,

²제주대학교 생명자원과학대학 원예생명과학부

³단국대학교 유기농업연구소

Transformations of ^{15}N Labeled Urea and Nitrate Leaching in Jeju Soils

Sung-Jun Song¹, Zang-Kual U²,
Sang-Mok Sohn³

¹Applied Radioisotope Research Institute,
Cheju National University, Jeju, Korea 690-756

²Faculty of Horticultural Life Science,
Cheju National University, Jeju, Korea 690-756

³Research Institute of Organic Agriculture,
Dan Kook University, Cheonan, Korea 330-714

Abstract

Laboratory incubation experiment was conducted to study the transformations of ^{15}N -labeled urea into ammonium and nitrate and nitrate leaching in the very dark brown volcanic ash(VDBV) and dark brown non-volcanic ash(DBNV) soils the hydrolysis of urea was faster at 20°C and 30°C than 10°C and greater in the DBNV soil than in the VDBV soil while nitrification was greater in the VDBV soil containing higher total N and organic matter than in the DBNV soil. In addition, nitrate leaching increased with increased application of urea and was higher in the DBNV soil(31-63%)

than in the VDBV soil(19 -35%).

서론

요소비료는 농작물 재배에서 가장 많이 사용되는 질소원으로 제주도내 감귤원에서도 많이 사용되고 있으나 제주도내 토양조건에서 요소의 분해 및 질산태 질소의 변환특성은 잘 알려져 있지 않다. 토양에 사용된 요소는 urease에 의하여 $\text{NH}_4\text{-N}$ 으로 가수분해된 후 식물에 의해서 직접 흡수될 수 있으나 산화조건인 밭토양에서는 질산화작용을 통하여 $\text{NO}_3\text{-N}$ 으로 대부분 전환된 뒤 흡수된다. 특히, 질산태 질소는 수용성 음이온으로 토양중에 물과 함께 용탈되기 쉽기 때문에 필요 이상의 질소질 비료를 과다 시비할 때에는 강우와 함께 토양 하층으로 용탈되어 지하수의 질산성 오염원의 하나로 작용할 수 있다. 실제로, 질소질 비료의 과다시비로 인한 지하수 오염이 제주지역에서 심각하게 발생하고 있으나, 제주도 토양에서 질소의 행동에 관한 연구는 매우 미진한 편이므로 비료의 효율적인 시비관리와 환경오염방지를 위해 매우 필요한 실정이다.

재료 및 방법

가. 공시토양

중질소 표지 요소비료를 사용하여 온도와 시간별 토양중 암모늄 태와 질산태 질소 변환 특성을 조사하고자 농암갈색 화산회 토양과 암갈색 비화산회 토양(홍적색토)을 선정하였으며, 특히 암갈색 토양은 토양분류학상 육지부 전라도 무등봉의 밭토양과 이화학적 성질이 매우 유사하다. 공시 토양의 이화학적 성질은 표 1과 같다. 총질소, 질산태 질소, 암모늄태 질소, 유기물 및 유효인산 함량이 농암갈색 화산회 토양보다 암갈색 비화산회 토양이 높은 것이 특징이다.

Table 1. Chemical properties of soils used for the study

Soil	pH (1:5)	EC (ms/m)	OM (%)	Total N (%)	NH ₄ -N (mg/kg)	NO ₃ -N (mg/kg)	Available P (mgP/kg)	Exchangeable bases		
								K (cmol/kg)	Ca (cmol/kg)	Mg (cmol/kg)
Dark brown non-volcanic ash soil	5.35	10.7	1.53	0.06	6.65	20.4	130	0.58	2.40	1.15
Very dark brown volcanic ash soil	5.62	16.8	8.50	0.41	3.85	7.93	87.3	0.47	2.75	0.85

나. 중질소 표지 요소비료의 토양중 질산태 질소 변환 특성

두 종류의 토양 20 g을 삼각 플라스크에 취하고 5 atom % 중질소 표지 요소를 각 토양의 포장용 수량의 40%에 해당하는 증류수에 녹인 뒤 이를 토양에 가하였다. 공급된 중질소는 30 kg N/10a에 해당하는 양으로 토양의 가비중(농암갈색 화산회 토양: 0.7 g/cm³, 비화산회 토양: 1.3 g/cm³)과 작토 깊이(25cm)를 고려하여 토양의 무게를 구하고 그 면적으로부터 토양 무게로 환산하여 계산한 비료의 양(농암갈색 화산회토: 3.43 mg N/20 g 토양, 암갈색 비화산회토: 1.85 mg N/20 g 토양)이다. 또한, 플라스크 입구는 알루미늄 호일로 막음으로써 기내 환경이 호기적인 조건을 유지하였다.

그 후 온도가 10, 20, 30 °C로 달리 조절된 incubator에 3반복으로 나누어 처리하고 일정기간 (1, 3, 7, 15, 30, 60일)별로 꺼내어 2M KCl 200 ml 가하여 30분간 진탕하였다(Bremner, 1965, Knowles 와 Lefebvre, 1971). 그 후 추출액을 25 ml Kjeldahl 플라스크에 취하여 MgO 0.2 g을 넣어 암모늄태 질소를 먼저 증류하여 0.05N H₂SO₄ 용액에 포집 적정하였고 그 후 남아 있는 질산태 질소분획은 Devarda's alloy 분말 0.2 g을 가하여 암모늄태로 전환 증류하여 그 함량을 구하였다.

한편, 앞서 분획별로 포집한 적정 액은 다시 각각 Kjeldahl 증류하여 이를 0.05N H₂SO₄ 용액에 포집하고 이를 75°C 내외 온도에서 최종부피가 약

150ul 되도록 농축하였다(Bremner, 1965). 이를 액체용 tin capsule에 취하고 원소분석기 (elemental analyzer, Fisons Instrument EA1108-CHNSO, Italy)의 시료주입부에 넣어 질소가스로 변환·분리시킨후 이를 자동으로 질량분석기(mass spectrometer, VG Isotec Sira II, England)로 도입하여 ¹⁵N 존재비를 측정하였다.

다. 토양중 질산태 질소의 용탈양 조사

토양 200g을 컬럼(7 x 13, D x H cm)에 충전하고 5 % atom 중질소 표지 요소 비료를 0, 15, 30, 60 N kg/10a에 해당하는 양을 포장 용수량의 40%에 해당하는 증류수(농암갈색 화산회 토양: 360 ml, 암갈색 비화산회 토양: 150 ml)에 각각 녹인 뒤 이를 토양에 가하였다. 공급된 중질소는 농암갈색 화산회토인 경우에 토양 200g 당 0, 17.1, 34.2, 68.4 mg N 그리고 암갈색 비화산회토 경우에 토양 200 g 당 0, 9.23, 18.5, 36.9 mg N을 가하였다. 컬럼 입구는 알루미늄 호일로 막음으로써 기내 환경이 호기적인 조건을 유지하였고 20 °C로 조절된 incubator에 3반복으로 나누어 30일간 처리하였다. 그 후 500 mm의 강우량에 해당하는 1 liter 증류수를 분당 0.5 ml로 적하하여 질산태 질소를 용탈시킨 뒤 ion chromatograph (Dionex, DX-500)으로 질산태 질소를 측정하였다. 중질소를 측정하기 위해 질소량이 1mg 정도 되도록 용

탈액을 취하고 MgO를 가하여 1차 증류하여 암모늄태 질소를 제거하고 Devarda's alloy 분말을 가하여 증류함으로써 암모늄태로 전환된 질산태 질소 분획을 0.05N H₂SO₄ 용액에 포집하였다 (Bremner, 1965).

그 후 포집액을 농축하고 질량분석기(mass spectrometer, VG Isotec Sira II, England)로 도입하여 ¹⁵N 존재비를 측정하였다.

결과 및 고찰

1. 중질소 표지 요소비료의 토양중 질산태 질소 변환 특성

요소비료를 처리한 후 온도와 시간 경과일수별 토양중의 암모늄태 질소와 질산태 질소함량의 변화 추이를 그림 1,2에 그리고 비료에서부터 온 암모늄태 질소의 함유율과 질산태 질소로의 전환율은 표 2,3에 나타냈다. 일반적으로 토양중의 urease 활성은 온도가 낮을 때 보다 높을 때 높다고 알려져 있는 데(조백현, 1972, 1984), 암모늄태 질소함량이 10 ℃ 보다는 20 - 30℃에서 더 높은 것으로 보아 본 조사 토양중에서의 요소분해도 온도가 높을 때 활발하다는 것을 시사하였다. 또한, 암갈색 비화산회 토양이 농암갈색 화산회 토양보다 비료로부터 온 암모늄태질소의 함유율이 많은 것으로 보아 즉 요소의 분해율은 암갈색 비화산회 토양이 농암갈색 화산회 토양보다 더 클 것으로 사료된다.

한편, 질산화작용도 urease 활성과 마찬가지로 온도에 따라 상이한 데, 두가지 토양 모두 10 ℃ 보다는 20 - 30℃에서 더 컸다. 특히, 농암갈색 토양인 경우에 30 ℃에서는 시간이 경과할수록 암모늄태 질소의 함유율이 상대적으로 낮은 것은 질산태 질소로의 전환율 즉, 질산화작용이 암갈색 비화산회 토양에 비해 더 크다는 사실을 의미하며, 이는 농암갈색 화산회 토양이 암갈색 비화산회 토양에 비해 pH, 유기물 및 질소 함량이 높아 질산화작용 관련 미생물의 생육에 유리하게 작용했던 것으로 사료되며(Mengel and Kirkby, 1987), Chao와 Chao(1997)도 질산태 질소의 축적량은 질산화

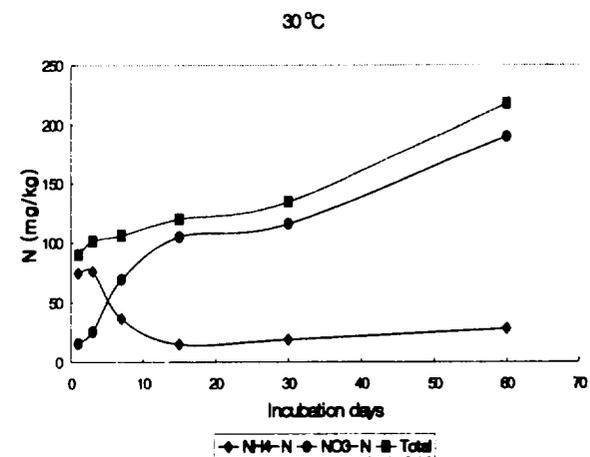
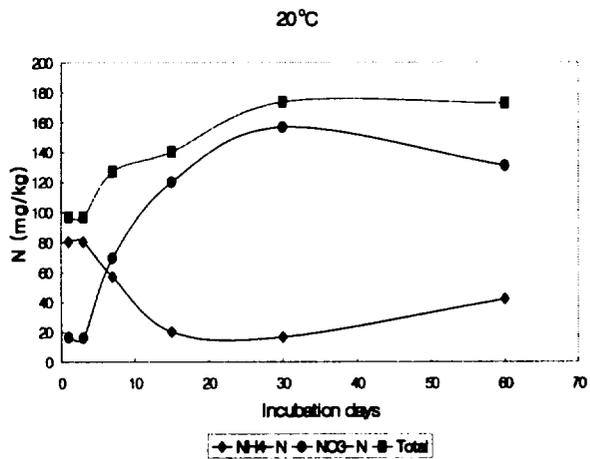
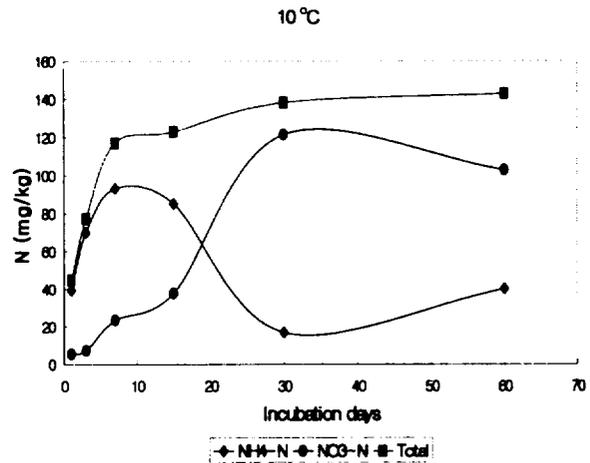


Fig. 1. Changes of inorganic NH₄-N and NO₃-N in the dark brown non-volcanic ash soil during 60 day's incubation at three different regimes of temperature after urea was added.

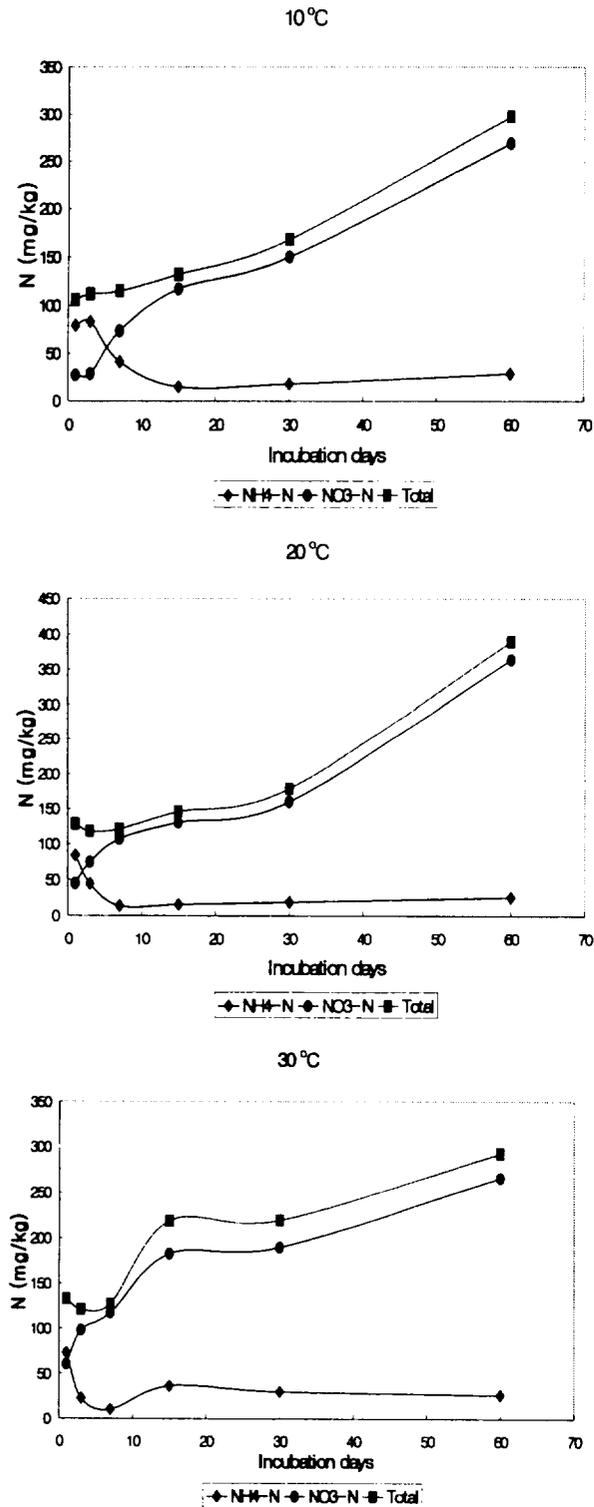


Fig. 2. Changes of inorganic $\text{NH}_4\text{-N}$ and $\text{NO}_3\text{-N}$ in the very dark brown volcanic ash soil during 60 day's incubation at three different regimes of temperature after urea was added.

작용 관련 미생물의 밀도가 높을 때 크다고 하였다. 또한, 7일 경과 후 암갈색 토양에서 20 °C 보다 30 °C에서 비료 유래 총질소 함량이 낮은 것은 온도가 높아짐에 따라 탈질작용도 활발히 일어났음을 의미한다.

2. 토양중 질산태 질소의 용탈양 조사

시비량과 토양특성에 따른 질산태 질소의 용탈양을 조사하여 표 4, 5에 나타냈다. 시비량이 높아짐에 따라 용탈양은 증가했는데, 암갈색 비화산회 토양의 비료유래 질산태 질소의 용탈양은 31 - 63 %범위 였으나 농암갈색 화산회 토양은 19 - 35 %정도로 암갈색 토양이 농암갈색 토양에 비해 시비된 비료의 용탈양이 더 컸다. 표 2, 3과 그림 1, 2 결과에서 처럼 농암갈색 토양이 암갈색 토양에 비해 질산화작용이 높아 시비된 비료의 질산태 질소로의 전환도 많이 일어나 용탈양도 클 것으로 예상할 수 있다. 왜냐하면, 밭토양에서는 토양표면의 양전하와 특이적인 흡착을 하는 인산이온에 비하여 비특이적인 흡착을 하는 질산이온의 흡착력이 약하기 때문에 용탈이 빨리 일어나기 때문이다(조백현, 1984). 그러나, 농암갈색 화산회 토양은 암갈색 비화산회 토양에 비해 등전점이 낮아 비특이적인 음이온 흡착력이 컸기 때문에(현과 오, 1994) 질산태 질소의 용탈양이 적었던 것으로 생각된다.

또한, 표 4, 5에서 보는 바와 같이 용탈된 질산태 질소의 양이 처리된 질소비료양보다 많거나 또는 비료 유래의 질산태 질소의 양이 적은 것은 처리된 비료이외에 토양 자체에 존재하는 유기물로 부터의 질산태 질소의 기여가 크다는 사실을 암시한다.

결론적으로 토양중 요소의 분해, 질산화작용 및 용탈은 질소 시비량과 토양의 종류에 따라 상이 했다. 따라서 포장조건에서 질산태 질소의 용탈을 최소화 시키기 위해서는 토양특성 및 시비량, 토양수분조건등 질산태 질소의 변환과 용탈에 관여할 수 있는 요인들에 대한 다각적인 검토가 요망된다.

Table 2. Percentage transformation of N-fertilizer(urea) into NH₄-N and NO₃-N in dark brown non-volcanic soil as incubated for 7 days at three different regimes of temperature.

Temp. (°C)	Incubation days								
	1			3			7		
	NH ₄ -N (%)	NO ₃ -N (%)	Total (%)	NH ₄ -N (%)	NO ₃ -N (%)	Total (%)	NH ₄ -N (%)	NO ₃ -N (%)	Total (%)
10	29.0	0.96	29.9	61.5	2.29	63.8	70.1	16.1	86.2
20	66.0	7.99	74.0	57.5	10.0	67.5	44.6	51.0	95.6
30	62.2	6.47	68.7	61.6	16.9	78.5	24.7	48.1	72.8

Table 3. Percentage transformation of N-fertilizer(urea) into NH₄-N and NO₃-N in very dark brown volcanic soil as incubated for 7 days at three regimes of temperature.

Temp. (°C)	Incubation days								
	1			3			7		
	NH ₄ -N (%)	NO ₃ -N (%)	Total (%)	NH ₄ -N (%)	NO ₃ -N (%)	Total (%)	NH ₄ -N (%)	NO ₃ -N (%)	Total (%)
10	38.2	1.67	39.3	37.7	7.72	44.9	17.6	27.2	44.8
20	34.8	8.97	43.8	18.4	27.2	45.6	1.41	37.3	38.7
30	34.2	18.4	52.6	6.6	35.9	42.5	1.51	38.9	40.4

Table 4. NO₃-N leached from dark brown non-volcanic ash soil by 500 mm of water, as incubated at 20°C for 30 days after four different levels of urea were added.

Application level (mg N/200 g soil)	NO ₃ -N leaching (mg N/200g soil)	NO ₃ -N derived from urea[%] (mg N/200g soil)
0 (0 kg N/10a)	2.37	
9.20 (15 kg N/10a)	9.08	2.83[30.8]
18.4 (30 kg N/10a)	16.7	5.85[31.8]
36.8 (60 kg N/10a)	67.1	23.0[62.5]

Table 5. $\text{NO}_3\text{-N}$ leached from very dark brown non-volcanic ash soil by 500 mm of water, as incubated at 20°C for 30 days after four different levels of urea were added.

Application level (mg N/200 g soil)	$\text{NO}_3\text{-N}$ leaching (mg N/200g soil)	$\text{NO}_3\text{-N}$ derived from urea[%] (mg N/200g soil)
0 (0 kg N/10a)	0.14	
17.3 (15 kg N/10a)	12.4	3.20[18.5]
34.6 (30 kg N/10a)	21.8	7.54[21.8]
69.2 (60 kg N/10a)	50.8	23.9[34.5]

참 고 문 헌

- Badzhov, K. and E. Ikonomova(1971) ^{15}N for studying nitrogen transformations in soil, nitrogen nutrition of plants and in assessing available nitrogen in soil In "nitrogen-15 in soil-plant studeis". IAEA pp. 21-32
- Bremner, J. M.(1965) Inorganic forms of nitrogen. In "Method of soil analysis part 2. Chemical and microbiological properties(C. A. Black ed). pp. 1179-1237. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.
- Chao, W. L. and C.C. Chao(1997) Nitrogen transformation in tropical soils: influence of fertilization and crop species. Agriculture, Ecosystem and Environment 64: 11-17
- IAEA(1976) Tracer manual on crops and soils. Technical Report Series No. 171. pp. 119-122
- Knowles, R. and J. Lefebvre(1971) Field, greenhouse and laboratory studies on the tranformation and translocation of ^{15}N -labelled urea in a boreal forest black spruce system, Proceeding of a symposium on isotopes and radiation in soil-plant relationships including forestry. 13-17 December 1971. IAEA
- Mengel, K. and E. A. Kirkby(1982) Principles of Plant Nutrition. International Potash Institute, Switzerland. pp. 340-343
- 조백현(1972) 신제 비료학. 향문사. pp. 55-72
- 조백현(1984) 신고 토양학. 향문사. pp. 50-54, 126-128, 194-196
- 현해남, 오상실(1994) 제주도 토양의 오염물질흡착능과 지하수 오염. 제주도 지하수자원의 환경학적 보전과 개발이용 심포지움. 대한지하수환경학회. pp. 26-53
- 임선옥(1982) 식물영양·비료학. 일신사. pp. 179-187
- 윤순강, 유순호(1994) 요소유래 $\text{NO}_3\text{-N}$ 및 동반양이온의 토양중 행동 I. $\text{NO}_3\text{-N}$ 및 동반양이온의 용탈. 한국토양비료 학회지 27(1):15-20
- 윤순강, 유순호(1994) 요소유래 $\text{NO}_3\text{-N}$ 및 동반양이온의 토양중 행동 II. 토양과 용탈수의 pH 변화 및 시용질소의 행방. 한국토양비료 학회지 27(1):21-26