

土地 利用 形態의 變化와 土壤 內 炭素와 窒素의 關係^{1*}

孫堯丸^{2*} · 李叔姬²

Relationship between Land-Use Change and Soil Carbon and Nitrogen^{1*}

Yowhan Son^{2*} and Sook Hee Lee²

요 약

토지 이용 변화는 토양 내 유기물과 양분 상태에 영향을 줄 것으로 기대된다. 본 연구에서는 경기도 광주군 검단산 일대에서 과거 논으로 이용되다가 현재는 버드나무-신나무 우점의 산림으로 변환 지역, 밭에서 잣나무 인공조림지로 변환 지역, 그리고 과거부터 지속적으로 참나무류가 우점하고 있는 산림 지역 등 세 가지 토지 이용 형태를 선정하고 여기에서 토양 내 탄소와 질소의 농도, 토양 호흡, 그리고 질소 유효도 등을 측정, 비교하였다. 경작지의 휴경 후 20년이 경과한 다음, 토양 내 탄소와 질소의 농도는 토양 깊이 0-10cm, 10-20cm에서 과거 논이었던 지역이 다른 지역에 비하여 높은 것으로 나타났다. 또한 일반적으로 탄소와 질소의 농도는 표층에서 높고 토양 깊이가 증가할수록 점차 낮아지는 경향을 보였다. 이것은 유기물의 유입과 분해의 차이로 인한 축적량이 과거 논이었던 지역에서 가장 많기 때문이며, 탄소와 질소의 증가는 주로 표층에 국한한데에 기인하는 것으로 보인다. 토양 발생 이산화탄소량은 논에서 산림으로 변환 지역에서 가장 높게 나타났으며, 이는 토양 내 높은 탄소 농도와 습윤한 수분 조건 때문인 것으로 보인다. 이온교환수지봉지법으로 측정한 토양 내 질소 유효도는 토지 이용 형태에 따라 유의한 차이를 나타내었는데, 무기태 질소 ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$)의 유효도와 암모니움태 질소의 농도는 산림지역에서 가장 높고, 밭에서 산림으로 변환 지역, 논에서 산림으로 변환 지역의 순으로 점차 감소하였다.

ABSTRACT

Changes in land-use can affect soil organic matter content and fertility. We compared total soil carbon and nitrogen concentrations, soil respiration, and nitrogen availability under three land-use types in central Korea; conversion of old rice field to natural willow-maple (*Salix-Acer*) forest, conversion of old field to artificial Korean pine (*Pinus koraiensis*) forest, and indigenous oak (*Quercus* spp.) forest. After 20 years of fallow the area of rice field conversion to forest had higher soil carbon and nitrogen concentrations in the soil depth of 0-10cm and 10-20cm than the areas of field conversion to Korean pine forest and indigenous forest. In general, soil carbon and nitrogen concentrations decreased with soil depth. Organic matter accumulation as a balance of input and decomposition seemed to be higher in the soil of previous rice field, and carbon and nitrogen accumulation was largely confined to the topsoil. Soil respiration rates were greatest at the area of rice field conversion to forest, and appeared to be related to soil carbon and soil moisture. Soil nitrogen availability measured by the ion exchange resin bag method differed significantly among land-use types; soil inorganic nitrogen ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$) and ammonium availability were highest in the soil under indigenous oak forest followed by conversion of old field to artificial Korean pine forest and conversion of old field to natural willow-maple forest.

Key words : carbon, land-use change, nitrogen, nitrogen availability, soil respiration

¹ 接受 2000年 11月 15日 Received on November 15, 2000.

審査完了 2000年 12月 4日 Accepted on December 4, 2000.

² 고려대학교 산림자원환경학과 Department of Forest Resources and Environmental Sciences, Korea University, Seoul 136-701, Korea.

* 본 논문은 2000년 고려대학교 특별연구비 지원에 의해 수행된 과제의 결과임.

* 연락처자 E-mail : yson@korea.ac.kr

서 론

인류가 지구생태계를 교란시키는 여러 행위 가운데 하나가 토지 이용의 변화이다. 즉 임지의 임목을 벌채하고 농경지나 혹은 그 이외의 다른 용도로 전환하는 행위는 생태계의 구조와 기능을 크게 변화시킨다. 이와 같은 인위적인 토지 이용 변화는 앞으로 수십년 간 지구 환경을 변화시키는 가장 중요한 근원이 될 것으로 예상되며 (Mooney and Chapin, 1994; Vitousek, 1994), 이에 따라 토지 이용 변화와 생태계 변화간의 관계가 최근에 생태학 관련 분야에서 중요한 연구과제가 되고 있다. 한편 토지 이용 변화의 한 형태로서 벌채 적지나 방치된 농경지에 산림식생을 조성하는 사업이 활발하게 진행되고 있는데, 특히 이전의 농경지가 휴경 후 산림으로 복구되는 과정과 그 역할에 대해 많은 관심이 집중되고 있다 (Kaiser, 2000; Post and Kwon, 2000; Schimel 등, 2000). 일반적으로 휴경지가 산림으로 전환되면 토양 내 유기 탄소 유입 증가, 온도 및 수분 조건 변화, 침식의 감소와 토양수 내 양분 저장 능력 향상, 토지 생산성 증대, 그리고 수질 개선의 효과까지 있는 것으로 알려져 있다 (Henderson, 1995). 현재까지 산림의 파괴와 타용도로의 전환이 가져오는 생태계의 제반 변화는 비교적 상세히 연구된 바 있으나 (Adger and Brown, 1994; Kronert 등, 1999), 휴경된 농경지가 산림으로 변하는 과정에서 일어나는 탄소와 질소의 변화나 동태에 관한 연구는 매우 미진한 실정이다.

우리나라에서 최근 농산촌 인구의 급격한 감소로 경작지의 휴경이 증가하면서 점차 산림으로 전환되는 면적이 늘어나고 있다. 따라서 본 연구는 이러한 토지 이용 변화가 생태계에 어떠한 영향을 미치고 있는지를 밝히기 위한 목적으로 수행되었다. 특히 이전에 논과 밭으로 이용되던 토지가 산림으로 변한 경우를 원래부터 산림인 지역과 비교하여 토양 내 탄소와 질소의 농도, 이산화탄소 발생량, 그리고 토양 내 질소 유효도 변화 등을 비교 분석하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 연구대상지

본 연구는 경기도 광주군 중부면 일대의 검단산 지역에서 수행되었다 (37° 27' 34" - 37° 28' 35" N,

127° 14' 41" - 127° 16' 27" E). 이 지역은 과거 농경지로 이용되다가 휴경된 후 산림으로 전환된 면적이 점차 증가되어 현재는 대부분 산림으로 구성되어 있다. 연구대상 지역 중 경작지가 차지하는 비율은 1974년에 21%이었으나, 1992년에는 17%로 감소하였으며, 산림과 야생 초지의 면적은 1974년에 79%와 0.08%에서 1992년에는 81%와 0.53%로 각각 증가하였다 (이숙희, 2000; 정기현 등, 1998). 1980년과 1992년에 각각 촬영된 항공사진, 그리고 현지 실사를 통하여 이 지역에서 과거 논이 휴경 후 산림으로 변한 지역, 밭이 휴경 후 식재에 의하여 산림으로 변한 지역, 그리고 과거부터 현재까지 지속적으로 산림인 지역 등 세 가지의 토지 이용 형태별로 연구대상지를 선정하였다.

연구대상지 중 과거 논과 밭이었던 지역은 휴경 후 약 20년 정도가 경과한 것으로 추정되고 있다. 논에서 산림으로 변한 지역은 상층에 왕버들 (*Salix glandulosa* Seem.)과 버드나무 (*S. koreensis* Anderss.)가, 하층에 신나무 (*Acer ginnala* Max.)가 우점하고 있으며, 과거 밭으로 이용되던 지역은 잣나무 (*Pinus korainesis* Sieb. et Zucc.)로 인공 조림되어 현재는 임관이 옹골쳐진 상태를 유지하고 있다. 한편 산림지역은 상층에 신갈나무 (*Quercus mongolica* Fisch.)와 굴참나무 (*Q. variabilis* Bl.)가, 하층에 신갈나무, 굴참나무, 산벚나무 (*Prunus sargentii* Rehder), 물푸레나무 (*Fraxinus rhynchophylla* Hance) 등이 우점종을 이루고 있다 (정기현 등, 1998).

2. 시료채취 및 분석

연구대상지에서 각 토지 이용 형태별로 다시 세 개소를 선정하고 각 개소의 임의의 세 개 지점을 토양 시료 채취 지점으로 정하였다. 여기에서 2000년 3월 말 직경 7cm, 깊이 65cm의 토양채취기로 0-10cm, 10-20cm, 20cm 이상 등 세 개 깊이별로 토양 시료를 채취하였다. 채취한 시료는 70°C 건조기에서 건조시킨 후 분쇄하고 기초과학지원연구소 서울분소에서 원소분석기 (Vario EL)로 토양 내 탄소와 질소의 농도를 측정하였다.

토양으로부터 발생하는 이산화탄소의 농도는 IRGA (infrared gas analyzer, EGM-2, PP System)를 이용하여 측정하였다. 2000년 5월 초순부터 대략 1개월 간격으로 9월까지 연구대상 지역 세 개소 내 임의의 세 개 지점에서 이산화탄소 농도 측정하고, soil probe로 토양온도도 측정하

였다. 또한 방위에 따른 이산화탄소 발생량 차이를 비교하기 위하여 5월 6일 논에서 산림으로 변한 지역 중 북쪽과 남쪽의 세 개소에서 이산화탄소 발생량을 측정하였다.

토양 내 질소 유효도를 측정하기 위하여 이온교환수지봉지법 (ion exchange resin bag)을 사용하였다 (손요환과 김현섭, 2000). 14ml의 음이온교환수지 (Sybron INOAC ASB-1P OH⁻, Sybron International, Milwaukee, Wisconsin, USA)와 양이온교환수지 (Sybron IONAC C-251 H⁺)로 7cm×7cm의 봉지를 제작하고, 이 봉지를 연구대상 지역 세 개소 임의의 다섯 개 지점에서 지표로부터 10cm 깊이에 2000년 4월 말 매설하였다. 2개월 후 봉지를 회수하여 기진시키고 봉지에서 이온교환수지를 분리하여 2M KCl로 추출한 다음 (Binkley 등, 1994) 질산태 질소의 농도는 자동이온분석기 (Perstorp Analytic., EnviroFlow 3500)로, 암모늄태 질소의 농도는 Indophenol-blue법으로 각각 측정하였다.

토양 내 탄소와 질소의 농도 자료는 토지 이용 형태, 토양 깊이, 그리고 이들 간의 상호작용에 대한 유의성 검정을 SAS (1988)의 general linear model을 사용하여 검정하였다. 또한 토양 질소의 유효도, 토양 호흡, 토양 온도 등의 자료를 토지 이용 형태와 측정시기별로 차이를 검정하였으며, 토양 호흡과 온도간의 상관관계는 회귀식을 이용하여 분석하였다.

결과 및 고찰

1. 토양 내 탄소와 질소의 농도

토지 이용 형태 및 토양 깊이별 탄소와 질소의 농도는 통계적으로 유의한 차이를 나타내었다 (Table 1). 일반적으로 논에서 산림으로 변한 지역의 토양 내 탄소와 질소 농도가 다른 지역에 비

하여 높게 나타났으나, 토지 이용 형태별 토양 내 탄소와 질소의 농도는 토양의 깊이에 따라 차이를 보였다. 즉 과거 논에서 현재는 산림으로 변한 지역의 탄소 농도는 토양 깊이 0-10cm (74.5 g/kg)와 10-20cm (30.3 g/kg)에서 모두 다른 지역에 비하여 통계적으로 높은 것으로 나타났으나 (p<0.05), 20cm 이상의 깊이에서는 산림지역과 차이가 없었다. 또한 질소의 농도도 0-10cm (6.6 g/kg)와 10-20cm (4.0 g/kg) 깊이에서는 과거 논이었던 지역이 다른 지역에 비하여 높았지만 (p<0.05), 20cm 이상의 깊이에서는 밭에서 산림으로 변한 지역과 차이를 보이지 않았다 (Figure 1).

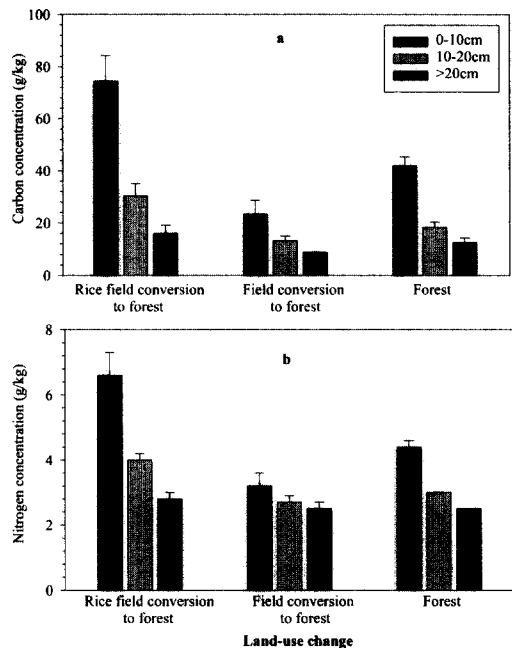


Figure 1. Carbon (a) and nitrogen (b) concentrations in the mineral soil under different land-use types. Bars denote standard errors.

Table 1. Analysis of variance of soil carbon and nitrogen concentrations (g/kg) between land-use type and soil depth.

Source	DF	Carbon			Nitrogen		
		Mean-square	F-ratio	p	Mean-square	F-ratio	p
Land-use type	2	4378.5	24.21	0.0001	20.729	24.33	0.0001
Soil depth	2	8673.1	47.96	0.0001	32.105	37.67	0.0001
Land-use type*soil depth	4	1228.5	6.79	0.0001	5.719	6.70	0.0001
Error	72	180.8			0.852		

동일한 기후 조건에서 토지 이용의 변화에 따라 각기 다른 식생이 성립될 경우 식생의 종류별로 토양에 공급되는 유기물의 종류와 양이 달라지고 분해속도에도 차이가 나므로 토양의 물리적, 화학적, 생물적 성질에 차이를 가져오게 된다 (Van Cleve and Powers, 1995; Zak 등, 1990). 본 연구에서 논이 산림으로 변한 지역에서는 습윤한 수분 조건으로 인하여 식생이 급격히 침입하여 토양으로의 유기물 유입량이 늘어나 축적된 유기물에 의하여 탄소의 농도가 높게 나타난 것으로 추정된다 (Richter 등, 1999; Trettin 등, 1995; Zak 등, 1990). 습윤한 지역에서는 건조한 지역에 비하여 식물생장이 빠르고 따라서 토양 내 탄소의 축적량도 많다는 점은 이전의 다른 연구에서도 확인되고 있다 (Bruce 등, 1999; Lugo 등, 1986). 또한 Post and Kwon (2000)도 기후대별로 농경지가 산림으로 전환된 지역에서의 탄소 축적 연구를 종합한 결과 습윤한 조건에서 탄소의 증가량이 건조 또는 과습한 조건에 비하여 높았음을 보고한 바 있다.

한편, 토지 이용 형태별로 출현하는 식생의 종류가 다르고 이에 따라 유기물 내 탄소의 농도도 다르며, 탄소의 농도가 다른 양분의 순환에 영향을 주지만, 식생의 차이로 인한 탄소 농도 차이가 반드시 토양 내 질소를 비롯한 다른 양분의 농도 차이와 일치하지는 않는다. 즉 본 연구에서 토지 이용 형태별 및 토양 깊이별로 탄소와 질소 농도의 순위가 다른 것은 토양 내에서 일어나는 수분을 통한 양분의 유입, 용탈, 흡수, 질소 고정 등의 제반 작용 때문인 것으로 추정된다 (Johnson, 1995; Zak 등, 1990).

탄소와 질소의 농도는 토양 깊이가 증가할수록 점차 감소하는 경향을 보였으나, 원소의 종류, 토지 이용 형태, 그리고 깊이에 따라 통계적인 유의성에는 차이가 있었다. 탄소의 농도는 세 가지 토지 이용 형태 모두 0-10cm 깊이에서 10-20cm 또는 20cm 이상의 깊이에서보다 높게 나타났지만, 10-20cm와 20cm 이상의 깊이 간에는 차이가 없었다. 질소의 농도는 논에서 산림으로 변한 지역은 0-10cm에서 가장 높고 10-20cm와 20cm 이상의 깊이에서는 차이가 없었으나, 밭에서 산림으로 변한 지역에서는 세 가지 토양 깊이 모두에서 차이가 나타나지 않았다. 원래부터 산림인 지역의 경우 질소 농도는 0-10cm (4.4 g/kg) > 10-20cm (3.0 g/kg) > 20cm 이상 (2.5 g/kg) 등의 순으로 나타났다 (Figure 1).

휴경된 농경지에 산림식생이 침입하여 토양 내 탄소 농도가 증가하는 현상은 주로 표층 (0-10cm)에 집중되며, 이와 같은 현상은 산림 식생 침입 후 열대지방에서는 10년, 온대지방에서는 30여년이 경과한 시점에까지도 동일하게 나타나는 것으로 보고되고 있다 (Aweto, 1981; Richter 등, 1999). 토양 내 탄소의 증가는 식생이나 낙엽층 부위에 비하여 매우 느린 속도로 진행되는데, 본 연구에서도 탄소와 질소 농도의 토지 이용 형태간 차이가 표층에서 주로 나타났다. 동일한 토지 이용 형태에서 토양 깊이별 탄소와 질소 농도의 변화도 아래층으로 갈수록 차이가 없는 것은 아직까지 식생 발달의 영향이 표층에 집중되었기 때문이며, 하층까지 그 영향을 미치지 위해서는 보다 많은 시간이 경과되어야 할 것으로 보인다 (Switzer 등, 1979). 표층토양에서는 지상부의 낙엽과 낙지, 지하부의 세균으로부터 공급되는 유기물에 의하여 탄소 농도가 높게 나타나며, 하층토양으로 내려 갈수록 이들 유기물의 영향을 적게 받아 탄소의 농도가 감소하고 20cm 이상 깊이에서는 유기물의 영향이 거의 없는 것으로 나타났다 (Switzer 등, 1979). 산림토양에서 깊이에 따른 양분 농도의 감소는 매우 일반적이며, 우리나라 전역의 산림토양을 대상으로 한 연구에서도 대체로 토양 내 탄소의 농도는 깊이에 따라 감소하는 경향이 나타나고 있다 (정진현 등, 1998).

한편 논에서 산림으로 변한 지역의 토양 내 탄소와 질소의 농도는 0-10cm와 10-20cm 깊이에서 현재의 논에 비하여 높았으나 20cm 이상의 깊이에서는 차이를 보이지 않았다 (손요환, 미발표 자료). 그리고 밭에서 산림으로 변한 지역의 경우는 현재의 밭과 비교하여 모든 토양 깊이에서 탄소와 질소 농도가 차이를 보이지 않아 산림식생의 도입으로 인한 유기물 공급의 영향이 크지 않은 것으로 볼 수 있다. 특히 여기에 식재된 잣나무는 낙엽과 낙지 내 질소 농도가 다른 낙엽활엽수에 비하여 낮고 낙엽의 분해속도도 느려 유기물은 주로 낙엽층에 축적되고 토양 내로 공급되는 양이 적다 (이경재와 박인협, 1987; 이명중, 1998). 따라서 이곳에서는 논에서 산림으로 변한 지역이나 원래부터 산림인 지역과 비교하여 토양 내 탄소와 질소의 농도가 낮은 것으로 사료된다.

2. 토양 발생 이산화탄소

토양 온도와 발생하는 이산화탄소는 토지 이용

형태 및 측정 시기별로 통계적으로 유의한 차이를 보였다 ($p < 0.001$). 토지 이용 형태에 따라 약간의 차이가 있기는 하지만 대체로 토양온도와 이산화탄소 발생량은 5월부터 증가하여 8월경에 최고치에 도달하고 이후 점차 감소하는 경향을 보였다 (Figure 2). 이와 같은 계절적 경향은 우리나라 중부지방의 활엽수나 침엽수 임지에서 유사하게 나타나고 있다 (손요환과 김현우, 1996; Son 등, 1994). 토양 온도는 5월과 9월을 제외하고 나머지 측정 시점에서는 토지 이용 형태간에 차이가 통계적으로 유의하였으며 ($p < 0.001$), 6월, 7월, 8월에는 논에서 산림으로 변환된 지역이 다른 지역보다 낮게 나타났다 (Figure 2a). 세 종류의 토지 이용 형태 모두 현재는 임관이 울폐된 상태이나, 과거 논이

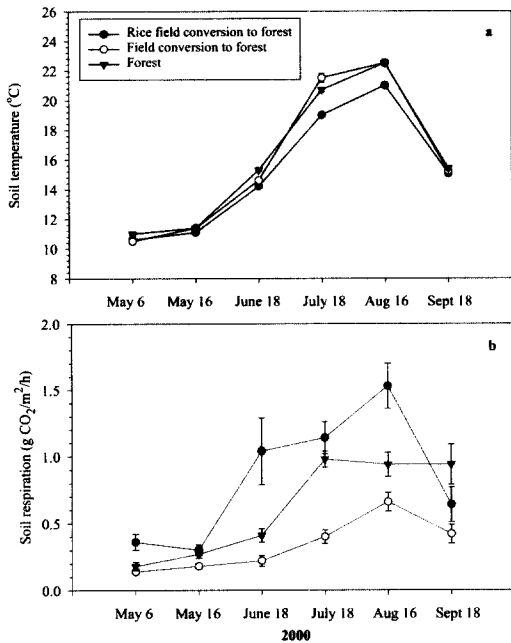


Figure 2. Soil temperature (a) and respiration (b) in different land-use types. Bars denote standard errors.

었던 지역은 다른 지역과 비교하여 습윤하기 때문에 토양 온도는 낮은 것으로 보인다.

이산화탄소 발생량은 7월과 9월을 제외하고 나머지 측정 시점에서는 논에서 산림으로 변환된 지역이 가장 높았으며, 과거 밭에서 산림으로 된 지역에서 항상 가장 낮게 나타났다 ($p < 0.05$) (Figure 2b). 이는 토지 이용 형태에 따라 식생으로부터 토양으로 공급되는 유기물의 종류와 뿌리 및 미생물의 활

동에 영향을 미치는 환경인자의 차이에서 기인하는 것으로 사료된다. 즉 밭에서 산림으로 변환된 지역에서는 침엽수 유기물이 분해되기 어려우며 (Fisher and Binkley, 2000), 특히 논에서 산림으로 변환된 지역은 습윤하여 뿌리와 미생물의 대사작용이 활발하기 때문인 것으로 보인다 (Thuille 등, 2000). 다른 연구에서도 토양 내 탄소의 농도와 이산화탄소 발생량간에는 정의 상관관계가 있음이 보고되고 있다 (Conant 등, 2000). 한편 남쪽과 북쪽의 방위에 따라 토양 온도에는 차이가 없었으나, 이산화탄소의 발생량은 북쪽사면 ($0.34 \text{ gCO}_2/\text{m}^2/\text{h}$)이 남쪽사면 ($0.22 \text{ gCO}_2/\text{m}^2/\text{h}$)에 비하여 높게 나타났다. 이는 북쪽사면이 남쪽사면에 비해 보다 습윤하여 식생의 발달과 생장이 양호하여 토양 내 유기물의 함량이 높고 이들이 분해되어 발생하는 이산화탄소의 양도 많기 때문인 것으로 추정된다.

토지 이용 형태와 상관없이 모든 이산화탄소 발생량과 토양 온도를 회귀분석한 결과 이산화탄소 발생량과 토양 온도간에는 통계적으로 유의한 정의 상관관계가 있었다 ($r^2 = 0.237$, $p < 0.001$). 그러나 토양 온도는 전체 측정 시점에서 이산화탄소 발생량의 변이 가운데 24% 정도를 설명하고 있어 이전의 다른 연구에서 보고된 것에 비교하면 비교적 낮은 설명력을 보였다 (손요환과 김현우, 1996; Son 등, 1994; Thuille 등, 2000).

3. 토양 질소 유효도

이온교환수지지방방법으로 2개월 동안 측정된 토양 질소 유효도는 질산태 질소 농도의 경우 세 가지 토지 이용 형태별로 통계적으로 유의한 차이가 없었지만, 암모니움태 질소와 질산태와 암모니움을 합한 무기태 질소 농도에서는 유의한 차이를 나타내었다 ($p < 0.001$). 그러나 질산태와 암모니움태 질소, 그리고 이들의 합 모두에서 개소별 차이나 토지 이용 형태와 개소간의 상호작용이 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났다 ($p > 0.05$). 암모니움태 질소 농도와 질산태와 암모니움을 합한 무기태 질소 농도는 산림지역에서 가장 높고, 밭에서 산으로 변환된 지역, 그리고 논에서 산으로 변환된 지역의 순으로 점차 감소하는 경향을 보였다 (Table 2). 한편 연구 대상지의 토양 질소 공급 능력은 우리나라 다른 임분에서 측정된 수치에 비하여 매우 높아 (손요환과 김현섭, 2000), 연구대상지는 비교적 토양 비옥도가 높은 지역인 것으로 보인다.

Table 2. Soil nitrogen availability measured by ion exchange resin bags (mg-N/bag) for different land-use types. Mean followed by the same letter in a given column do not differ at $p=0.05$. Values are mean \pm S.E.

Land-use types	Nitrate	Ammonium	Total
Rice field conversion to forest	2.79 \pm 0.53a	1.20 \pm 0.19c	3.99 \pm 0.58c
Field conversion to forest	3.02 \pm 0.42a	4.65 \pm 0.96b	7.67 \pm 0.96b
Forest	3.17 \pm 0.38a	7.71 \pm 1.45a	10.88 \pm 1.65a

유기물 분해 후 토양 조건에 따라 주로 암모니아態 질소로 존재하는 지역과 질산화작용에 의하여 질산태 질소로 존재하는 지역 등 토지 이용 형태에 따라 차이가 있는 것으로 보인다 (Table 2). 그리고 논에서 산으로 변한 지역은 토양 내 탄소와 질소의 농도가 높고 이산화탄소의 발생량도 많으나 질소 유효도가 낮는데 그 원인은 아직까지 명확히 알 수 없었다. 한편 밭에서 산으로 변한 지역이 원래부터 산림인 지역과 질소 유효도에서 차이를 보이는 것은 잣나무와 참나무류의 식생 차이에서 비롯된 것으로 볼 수 있다. 그러나, 본 연구에서 나타난 토지 이용 형태별 질소 유효도 차이는 특정 시점에서의 결과이므로 토지 이용 형태가 토양에서의 무기태 질소 동태에 미치는 영향을 보다 명확히 파악하기 위해서는, 질소 유효도 및 토양수 내 질소 농도의 변화를 연중 계속적으로 측정하여야 할 것으로 생각한다. 즉 질소 유효도는 계절적으로 차이를 보이기 때문에 (손요환과 김현섭, 2000) 다른 측정시기에는 현재와 상이한 결과가 나타날 수도 있으며, 질산화작용에 의하여 증가한 질산태 질소 중 식생의 흡수 능력을 초과한 양이 용탈될 수 있기 때문이다. 또한 연구에 사용된 이온교환수지에 질산태 질소의 일부가 흡착되지 않고 토양수를 통하여 용탈될 가능성도 있기 때문에 (Binkley 등, 1994) 앞으로의 연구에서 토양수를 통한 질산태 이온의 동태를 조사할 필요가 있다.

인 용 문 헌

1. 손요환 · 김현섭. 2000. 이온교환수지봉지를 이용한 일본잎갈나무 간벌지의 질소 유효도 측정. 한국환경농학회지 19 : 188-190.
2. 손요환 · 김현우. 1996. 리기다소나무와 낙엽송 인공조림지내 토양발생 이산화탄소에 관한 연구. 한국임학회지 85 : 496-505.
3. 이경재 · 박인협. 1987. 경기도 광주지방 22년 생 잣나무 및 신갈나무림의 물질생산과 무기영양물 분포. 임산에너지학회지 7 : 11-21.
4. 이명중. 1998. 강원도 지방 잣나무 인공림의 임령변화에 따른 지상부 현존량과 양분축적. 한국임학회지 87 : 276-282.
5. 이숙희. 2000. 토지이용 변화가 토양 내 탄소와 질소의 농도에 미치는 영향. 고려대학교 자연자원대학원 석사학위논문.
6. 정기현 · 이우균 · 심우범. 1998. 항공사진과 GIS를 이용한 토지이용형태 및 산림식생변화 모니터링. 한국산림측정학회지 1 : 43-51.
7. 정진현 · 김춘식 · 이원규. 1998. 지역별, 임분별 산림토양내 탄소량 추정. 산림과학논문집 57 : 178-183.
8. Adger, W.N. and K. Brown. 1994. Land Use and the Causes of Global Warming. John Wiley and Sons. pp. 271.
9. Aweto, A.O. 1981. Secondary succession and soil fertility restoration in south-western Nigeria. Journal of Ecology 69 : 609-614.
10. Binkley, D., R. Stottlemeyer, F. Suarez and J. Cortina. 1994. Soil nitrogen availability in some arctic ecosystems in northwest Alaska : responses to temperature and moisture. Ecoscience 1 : 64-70.
11. Bruce, J.P., M. Frome, E. Haites, H. Janzen, R. Lal and K. Paustian. 1999. Carbon sequestration in soils. Journal of Soil and Water Conservation 54 : 382-389.
12. Conant, R.T., J.M. Klopatek and C.C. Klopatek. 2000. Environmental factors controlling soil respiration in three semiarid ecosystems. Soil Science Society of America Journal 64 : 383-390.
13. Fisher, R.F. and D. Binkley. 2000. Ecology

- and Management of Forest Soils. 3rd edition. Wiley. pp. 489.
14. Henderson, G.S. 1995. Soil organic matter : a link between forest management and productivity. In : W.W. McFee and J.M. Kelly (eds.), Carbon Forms and Functions in Forest Soils. Soil Science Society of America. pp. 419-435.
 15. Johnson, D.W. 1995. Role of carbon in the cycling of other nutrients in forested ecosystems. In : W.W. McFee and J.M. Kelly (eds.), Carbon Forms and Functions in Forest Soils. Soil Science Society of America. pp. 299-328.
 16. Kaiser, J. 2000. Panel estimates possible carbon sinks. *Science* 288 : 942-943.
 17. Kronert, R., J. Baudry, I.R. Bowler and A. Reenberg. 1999. Land-use Changes and Their Environmental Impact in Rural Areas in Europe. Parthenon Publishing. pp. 261.
 18. Lugo, A.E., M.J. Sanchez and S. Brown. 1986. Land use and organic carbon content of some subtropical soils. *Plant Soil* 96 : 185-196.
 19. Mooney, H.A. and F.S. Chapin. 1994. Future directions of global change research in terrestrial ecosystems. *TREE* 9 : 371-372.
 20. Post, W.M. and K.C. Kwon. 2000. Soil carbon sequestration and land-use change : processes and potential. *Global Change and Biology* 6 : 317-328.
 21. Richter, D.D., D. Markewitz, S. Trumbone and C.G. Wells. 1999. Rapid accumulation and turnover of soil carbon in a re-establishing forest. *Nature* 400 : 56-58.
 22. SAS. 1988. SAS/STAT User's Guide, 6.03 edition. SAS Institute, Cary, NC, USA.
 23. Schimel, D., J. Melillo, H. Tian, A.D. McGuire, D. Kicklighter, T. Kittel, N. Rosenbloom, S. Running, P. Thornton, D. Ojima, W. Parton, R. Kelly, M. Sykes, R. Neilson and B. Rizzo. 2000. Contribution of increasing CO₂ and climate to carbon storage by ecosystems in the United States. *Science* 287 : 2004-2006.
 24. Son, Y., G. Lee and J.Y. Hong. 1994. Soil carbon dioxide evolution in three deciduous tree plantations. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 27 : 290-295.
 25. Switzer, G.L., M.G. Shelton and L.E. Nelson. 1979. Successional development of the forest floor and soil surface on upland sites of the East Gulf Coastal Plain. *Ecology* 60 : 1162-1171
 26. Thuille, A., N. Buchmann and E.-D. Schulze. 2000. Carbon stocks and soil respiration rates during deforestation, grassland use and subsequent Norway spruce afforestation in the Southern Alps, Italy. *Tree Physiology* 20 : 849-857.
 27. Trettin, C.C., M.F. Jurgensen, M.R. Gale and J.W. McLaughlin. 1995. Soil carbon in Northern forested wetlands : impacts of silvicultural practices. In : W.W. McFee and J.M. Kelly (eds.), Carbon Forms and Functions in Forest Soils. Soil Science Society of America. pp. 437-459.
 28. Van Cleve, K. and R.F. Powers. 1995. Soil carbon, soil formation, and ecosystem development. In : W.W. McFee and J.M. Kelly (eds.), Carbon Forms and Functions in Forest Soils. Soil Science Society of America. pp. 155-200.
 29. Vitousek, P.M. 1994. Beyond global warming : ecology and global change. *Ecology* 75 : 1861-1876.
 30. Zak, D., D.F. Grigal, S. Gleeson and D. Tilman. 1990. Carbon and nitrogen cycling during old-field succession : constraints on plant and microbial biomass. *Biogeochemistry* 11 : 111-129.