

京畿道 光陵 상수리나무 成熟林의 窒素 無機化에 關한 研究^{1*}

金 權 壇²

Nitrogen Mineralization and Nitrification in a Mature *Quercus acutissima* Stand in Kwangnung, Kyonggi Province^{1*}

Choonsig Kim²

要 約

경기도 광릉 중부임업시험장 내에 위치한 상수리나무임분의 무기 질소 동태를 구명하기 위하여 3개의 20×10m의 조사구를 선정하고 각 조사구로부터 직경 5cm, 깊이 15cm 토양을 비닐주머니매설 배양법을 이용하여 1995년 11월부터 96년 11월까지 1년 동안 조사하였다. 조사 기간 동안 질소 무기화량은 95.2mg/kg/yr, 질산화량은 65.4mg/kg/yr 이었으며, 질산화가 질소 무기화에 차지하는 비율은 69%였다. 질소 무기화나 질산화에 영향을 미치는 환경 인자 중 토양 온도나 토양 수분 조건은 이 임분의 질소 무기화나 질산화에 큰 영향을 미치지 않았다.

ABSTRACT

The objective of this study was to determine the rate of nitrogen mineralization and nitrification in a mature sawtooth oak (*Quercus acutissima* CARRUTH) stand in the Chungbu Forest Experiment Station, Kyonggi Province. Nitrogen mineralization and nitrification in the top 15cm of mineral soil were examined from November 1995 to November 1996 using an *in situ* buried bag method. Net nitrogen mineralization was 95.2mg/kg/yr and nitrification was 65.4mg/kg/yr. Nitrification consisted of 69% of annual nitrogen mineralization. Neither nitrogen mineralization nor nitrification was significantly correlated with the monthly soil temperature and soil moisture content.

Key words: nitrogen mineralization, nitrification, *Quercus acutissima*, soil moisture, soil temperature

緒 論

산림 생태계의 질소 무기화 과정의 구명은 산림 생태계내 질소 순환 과정의 이해나 산림 경영적인 면 또는 산림 환경적인 면에서 중요한 의미를 갖는다. 토양내 유기태질소의 무기화 과정 중 생성되는 암모니아태질소나 질산태질소는 식물에 의해 흡수되는 주요한 질소 형태로서 임지내 질소 무기화율의 정도는 임목생장을 제한하는 인자 중의 하나로 고려된다(Kraske와 Fernandez,

1990; Zak과 Pregitzer, 1990). 또한 질소 무기화 과정 중 질산화작용에 의해 생성되는 질산태 질소는 식물이나 미생물에 의해 흡수되거나 부동화(immobilization) 되지 않으면 토양수와 함께 용탈되어 계류수에 질산태질소 농도의 상당한 증가를 가져오거나(Likens 등, 1970), 탈질작용을 통하여 토양으로부터 대기중으로 방출되어 궁극적으로 식물이 이용할 수 없게 되며 임지로부터 상당량의 질소 손실을 초래하여, 환경적인 면이나 임지생산력적인 면에서 상당한 문제를 발생시킨다. 이와 같은 중요성 때문에 1980년대 이후

¹ 接受 1997年 11月 27日 Received on November 27, 1997.

² 임업연구원 임지환경과 Div. of Forest Soils, Forestry Research Institute, Seoul 130-012, Korea

* 본 연구는 1996년도 한국과학재단 Post-doc 연수 지원 과제 중의 일부임

미국이나 유럽 등에서는 이 분야의 연구에 상당한 관심과 함께 질소 무기화 작용을 통한 현존 임분의 수종별 질소 동태 해석(Gower와 Son, 1992)이나, 여러 가지 임지 방해 후 무기 질소의 동태(Matson과 Vitousek, 1981; Kim 등, 1995), 대기오염 등과 질소 무기화와의 관계(Bowen 등, 1991)에 대한 많은 연구가 시행된바 있다.

국내에서의 이 분야 연구는 Mun(1991)이 상수리나무와 리기다소나무의 질소 무기화율을 실내 토양 배양 실험을 통하여 실시한 바 있으며, 손요환 등(1995)은 경기도 광릉시험림의 구주낙엽송, 스트로브잣나무, 서양측백임분의 토양내 질소 무기화의 정도를 보고한 바 있다. 또한 김춘식(1995)은 미국에서 조사한 루브라참나무와 레시노사소나무임분의 개별이 질소 무기화에 미치는 영향을 국내에 소개한 바 있으나, 아직까지 국내 자료는 극히 제한되어 있다. 본 연구는 우리나라 산림의 참나무류중 우점종을 차지하고 있는 상수리나무천연임분을 대상으로 임지내 비닐주머니매설 배양법을 이용하여 1)질소 무기화와 질산화량을 구명하고; 2)질소 무기화와 질산화의 변이에 기여하는 환경적인 인자를 구명하는데 목적이 있다.

材料 및 方法

본 연구는 경기도 광릉에 위치한 중부임업시험장내의 유사한 임지 환경을 가지며 여러 가지 자연적, 인위적인 방해를 받지 않은 70년생의 성숙한 상수리나무 천연림을 대상으로 3개의 20×10m 조사구를 선정하였다. 이 지역의 연평균 강수량은 1,365mm 정도로서 우리나라 연평균 강수량 1,274mm 보다는 약간 높다. 조사구는 표고 250m에 위치하며 경사는 15~25°, 토양은 화강편마암을 모암으로하는 갈색약전(B₂)이나 적운산림토양형(B₃)이 분포하고 있었다. 조사구는 평균 흉고직경 27cm, 평균수고 28m, 흉고단면적합 33m²/ha, 지위지수 18(산림청, 1995)로서 상수리

나무가 우수한 생장을 보이는 임지이며, 조사구 토양의 이화학적 성질을 Table 1에 나타내었다.

조사구내 식생은 중층의 경우 서어나무(*Carpinus laxiflora*), 가막살나무(*Viburnum dilatatum*), 팔배나무(*Sorbus alnifolia*), 소나무(*Pinus densiflora*), 잣나무(*P. koraiensis*), 생강나무(*Lindera obtusiloba*), 상수리나무(*Q. acutissima*), 물푸레나무(*Fraxinus rhynchophylla*) 등이 출현하였으며, 하층 식생은 때죽나무(*Styrax japonica*), 국수나무(*Stephanandra incisa*), 개암나무(*Corylus heterophylla* var. *thunbergii*), 청미래덩굴(*Smilax china*), 애기나리(*Disporum smilacinum*), 둥굴레(*Polygonatum odoratum* var. *pluriflorum*), 우산나물(*Syneilesis palmata*) 등이 주로 나타났다.

조사구의 토양내 질소 무기화는 각 조사구의 광물질 토양 상층부로부터 3쌍의 직경 5cm, 깊이 15cm 부위의 토양 시료를 무작위로 채취하고, 각 쌍으로부터 한 표본은 실험실로 운반하였으며, 한 표본은 비닐주머니(두께 0.025mm) 매설법(Nadelhoffer 등, 1984)을 이용하여 임지내 한달 동안 토양을 배양하였다. 실험실로 운반된 배양 전 토양과 한달 동안 현지에서 배양된 토양은 2mm체를 통과시킨 후 5g의 토양을 50ml의 2M KCl 용액과 함께 1시간 30분 동안 진탕하고 그 혼합물을 여과지(Whatman No. 42)에 의해 여과한 후 용액내 암모니아태질소는 Indophenol Blue Method, 질산태질소는 Copperized Cadmium Reduction Method 의해 농도를 정량하였다(Keeney와 Nelson, 1982). 토양 시료 채취 및 토양 배양은 '95년 11월 25일부터 1996년 11월 12일까지 1년 동안 실시하였으며 겨울 동안('95년 11월 25일~'96년 4월 3일)은 한번 배양이 되었고, 그 이후는 매월 1차례씩 실시하였다. 임지내 질소 무기화량은 배양 후 무기태질소 농도(NH₄⁺ + NO₃⁻)로부터 배양 전 무기태질소 농도를 뺀 값으로 계산되었으며 질산화량은 배양 후 질산태질소 농도(NO₃⁻)에서 배양 전 농도를 뺀 값으로 하

Table 1. Soil physical and chemical properties in the top 15cm of mineral soil in the study site.

Soil texture	pH (H ₂ O)	Organic matter (%)	T.N. (%)	Avail. P ₂ O ₅ (ppm)	CEC	Exchangeable				Total base	BS (%)
						K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺		
Loam	4.8	4.9	0.23	15.5	11.8	0.36	0.10	1.91	0.57	2.94	24.9

였다.

토양 온도나 토양 수분 함량 같은 여러 가지 환경적인 요인이나 유기물 동태 등이 질소 무기화에 미치는 영향을 알아보기 위해 배양 전 토양이 채취된 토양 주위의 7.5cm 깊이에서 토양 온도를 오전 10시~12시 사이에 디지털온도계(HANNA HI 94530)에 의해 측정하였으며, 토양 수분 함량은 2mm체를 통과한 배양 전 토양 시료 10g을 105°C에서 24시간 건조 후 계산하였다. 토양 pH는 5g의 풍진 토양에 25ml의 증류수를 혼합한 후 유리전극 pH 미터를 이용하여 측정하였으며, 유기물 함량은 550°C의 전기로에서 3시간 태운 후의 값으로부터 계산하였다.

직경 2mm 이하의 세균은 배양전 토양 시료로부터 조사되었으며 2mm체를 통과한 토양내 세균은 유기물 함량 측정 값에 포함되어 있었기 때문에, 2mm체를 통과하지 않은 부분만을 수돗물로 세척하고 선별하여 세균을 분류하였다. 세균 분류는 육안과 형태적인 특징에 의해 탄력성이 있으며 조직 내부가 갈색이나 흰색인 경우는 살아 있는 뿌리로, 조직 내부가 비어 있거나 잘 부서지며 검은 색을 띠는 뿌리는 죽은 뿌리로 분류하였다. 분류된 뿌리는 65°C 항온기에서 48시간 이상 건조 후 무게를 측정하였다.

結果 및 考察

조사 기간동안 월별 조사구내 암모니아태질소는 토양 온도가 23°C로 가장 높았던 8월에 채취

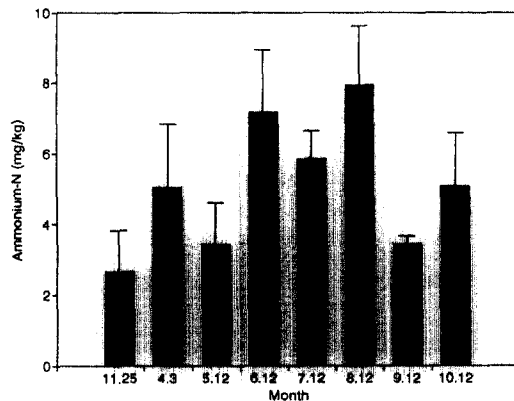


Fig. 1. Monthly variation in extractable NH_4^+ in the top 15cm of mineral soil in a saw-tooth oak stand. Means(n=9) and one standard error are presented.

한 시료에서 높은 값을 보이고 있으며(Fig. 1) 비교적 토양 온도가 높은(Fig. 5) 여름이 가을이나 봄 보다는 높게 나타나고 있다. 특히 살아 있는 세균량이 많아(Fig. 5) 식생에 의한 흡수가 높았을 것으로 생각되는 4, 5월의 암모니아태 질소는 비교적 낮은 값을 보이고 있으며 살아 있는 세균량이 적은 6, 7, 8월은 비교적 높게 나타나 암모니아태질소의 계절적인 변화 형태에 토양 온도의 변화나 식생에 의한 질소 흡수가 관련이 있는 것으로 나타나고 있다.

조사기간 동안 평균 암모니아태질소는 5.1mg/kg으로서(Fig. 1) 광릉 지역에서 조사된 구주낙엽송 4.0mg/kg, 스트로브잣나무 4.2mg/kg 등 보다는 높게 나타났으나, 서양측백임분의 5.1mg/kg 과는 유사하였다(손요환 등, 1995). 그러나 Mun (1991)이 조사한 충청남도 공주 지역의 상수리나무임분 0~10cm의 토양내 암모니아태질소 12.6mg/kg 보다는 낮은 값이다. 이는 공주 지역의 유기물과 전질소의 함량이 12.4%와 0.31%로서 본 조사구의 조사기간동안 평균 유기물 함량 6.2%(Fig. 5)나 전질소 함량 0.23%(Table 1) 보다는 높게 나타나 두 지역 상수리나무임분 사이에 암모니아태 질소 농도의 차이는 유기물이나 전질소 함량의 차이에 의한 것으로 사료된다.

질산태질소의 경우 6월의 0.7mg/kg에서 9월의 4.9mg/kg 까지 분포하고 있으며(Fig. 2) 임목이 주로 성장하고 강수량이 비교적 많은 5~8월 동안 낮게 나타나고 있다. 질산태질소는 강우에 의해 비교적 쉽게 용탈이 되는 것으로 알려져 있

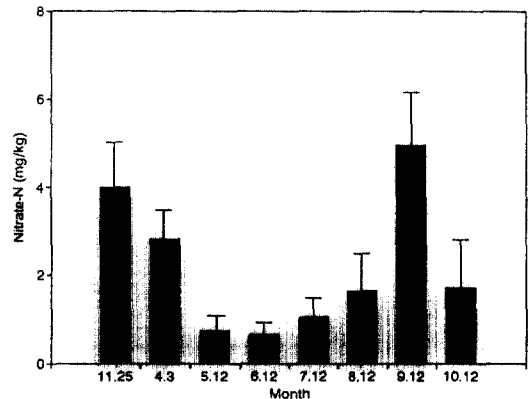


Fig. 2. Monthly variation in extractable NO_3^- in the top 15cm of mineral soil in a saw-tooth oak stand. Means(n=9) and one standard error are presented.

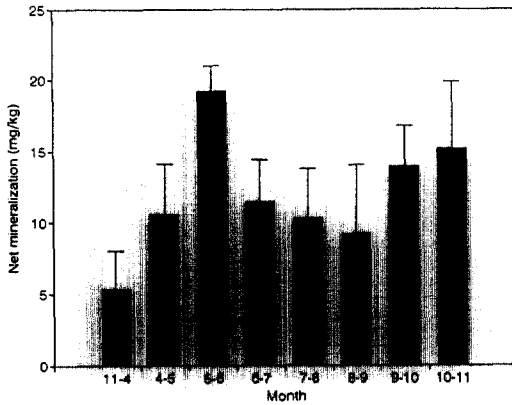


Fig. 3. Monthly variation in net N mineralization in the top 15cm of mineral soil in a sawtooth oak stand. Means(n=9) and one standard error are presented.

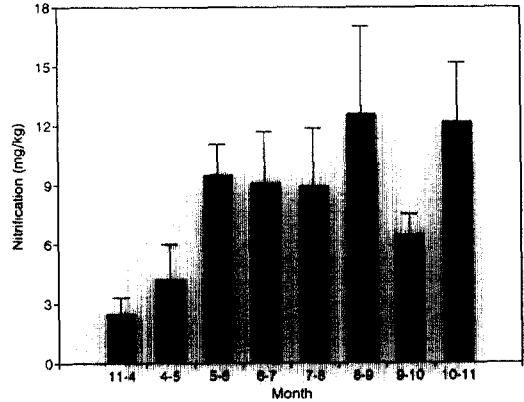


Fig. 4. Monthly variation in nitrification in the top 15cm of mineral soil in a sawtooth oak stand. Means(n=9) and one standard error are presented.

며, 이 기간 동안(6~8월) 용탈에 의한 손실이 크게 발생하였거나, 임목생장 기간으로서 식생에 의한 흡수가 활발하였기 때문일 수 있다. Mun (1991) 등도 공주 지역의 상수리나무임분으로부터 질산태질소의 유사한 계절적인 변화 형태를 관찰하였다. 조사기간 동안 평균 질산태질소는 2.2mg/kg로서 암모니아태질소보다 낮게 나타나고 있으며, 광릉에서 조사된 구주낙엽송 5.3mg/kg, 스트로브잣나무 3.9mg/kg, 서양측백 4.8mg/kg이나(손요환 등, 1995), 충남 공주에서 조사된 상수리나무 6.5mg/kg 보다 낮은 값을 보이고 있다 (Mun, 1991).

조사기간 동안 월별 질소 무기화량은 상수리나무임분의 경우 5월에 배양한 토양 시료에서 최대의 질소 무기화량을 보이고 있으며 뚜렷한 계절적인 변화는 보이지 않았으나, 6~8월에 배양된 시료에 비해 가을인 9월과 10월에 배양한 시료에서 질소 무기화량이 많았다(Fig. 3). 미국 위스컨신주에서 조사된 참나무류임분에서도 5월과 9, 10월에 계절적인 최대 값을 보고하고 있다(Nadelhoffer 등, 1984). 일반적으로 질소 무기화의 측정에 있어서 비닐주머니매설 배양법의 이용은 배양주머니내에서 용탈이나 식생에 의한 흡수가 발생하지 않기 때문에 질소 무기화로부터 발생된 무기태질소들이 배양주머니안에 머물러 있어 유기물이나, 죽은 뿌리, 미생물 등에 의한 부동화가 일어날 수 있다. 본 연구에서도 죽은 뿌리 양이 비교적 많은 달인 4, 7, 8월의 질소 무기화가 다른 달에 비해 낮게 나타나 이 기간동안 질소의

부동화가 발생하였을 가능성과 함께 계절적인 변화에 영향을 미치고 있는 것으로 나타났다. 본 연구 결과는 다른 계절에 비해 토양 온도의 증가와 함께 임목 생장기간 동안의 질소 무기화가 일반적으로 높다는 결과(손요환 등, 1995)와는 상반되며, 질소 무기화의 계절적인 동태에 미치는 토양 온도의 영향이 식생에 따라 다를 수 있음을 시사한다.

토양 온도나 토양 수분의 변화는 임지의 질소 무기화와 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있으나(Poovarodom과 Tate, 1988) 본 연구 결과는 토양 pH, 토양 수분, 토양 온도의 월별 변화와 월별 질소 무기화량과는 상관이 없는 것으로 나타났다($P>0.05$). 이 결과는 조사 기간동안 배양된 시료내 수분 함량이 20% 이상이며 겨울과 초봄에 배양된 시료를 제외하고는 토양 온도는 10℃ 이상으로서(Fig. 5) 이들 지역에서 이들 인자가 질소 무기화의 제한 요인으로 작용하지 않았을 가능성이 있다. 그러나 유기물 함량과 질소 무기화량은 상관 관계($r=-0.280, P=0.045$)를 보이고 있으며 유기물 함량의 증가와 함께 배양백내에서 무기태질소의 부동화 증가와 관련이 있는 것으로 사료된다.

조사 기간동안 총질소 무기화량은 95.2mg/kg로서 광릉 지역에서 조사된 여러 침엽수의 임목생장기간 동안 조사된 질소 무기화량 21.5mg/kg ~47.7mg/kg(손요환 등, 1995) 보다 높은 질소 무기화 값을 보이고 있다(Table 2). 일반적으로 유기물의 양과 성질, 분해 속도 등의 차이 때문

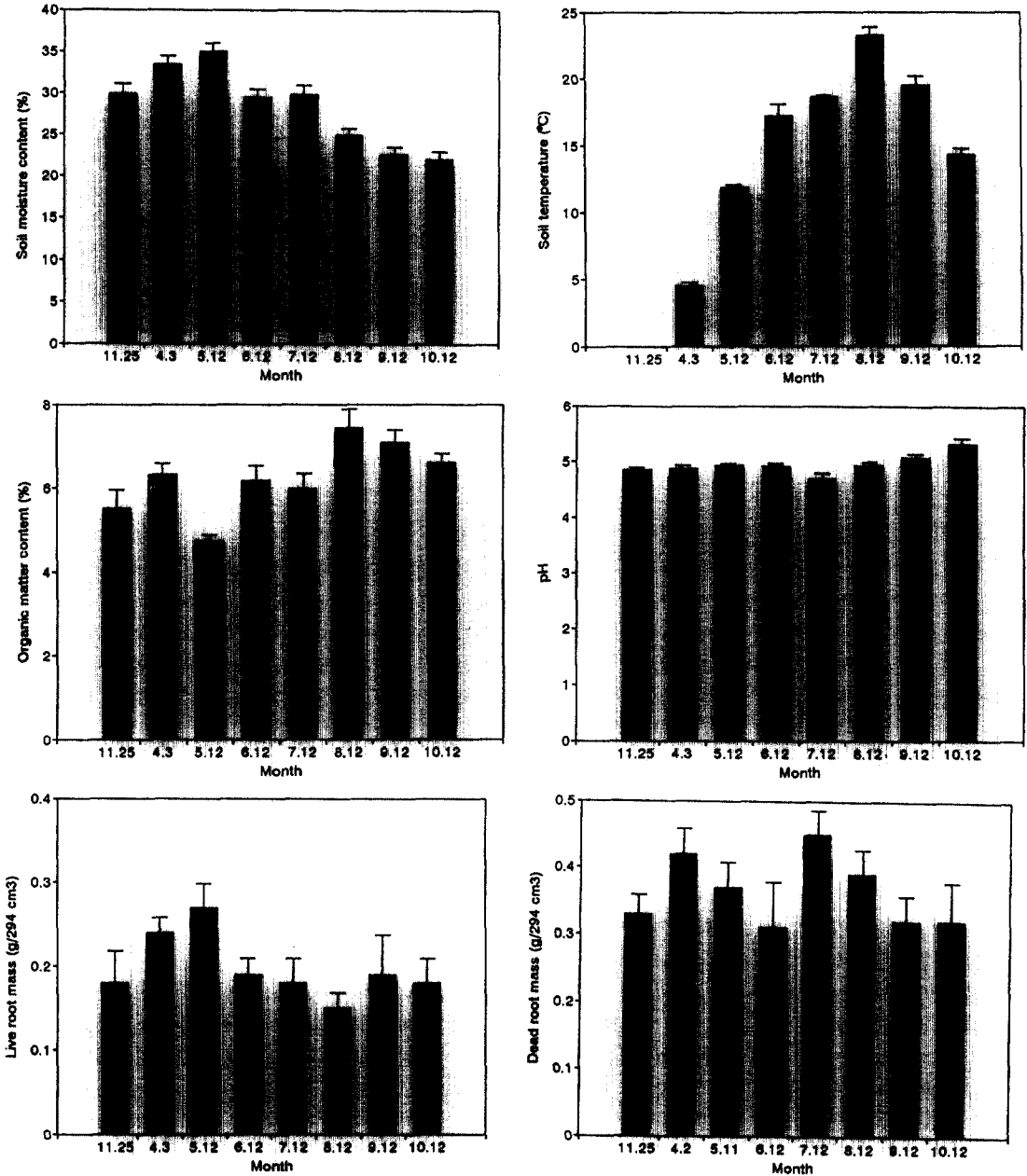


Fig. 5. Monthly variation in soil moisture content, organic matter content, pH, live root mass, and dead root mass in the top 15cm of mineral soil, and soil temperature at 7.5cm depth in a saw-tooth oak stand. Means(n=9) and one standard error are presented. Soil temperature was not measured in November, 1995.

에 참나무류와 같은 활엽수임분이 침엽수류에 비해 높은 질소 무기화를 보이고 있는 것으로 알려져 있다(김춘식 등, 1995). 국외에서 조사된 참나무류임분의 질소 무기화는 74~114kg/ha/yr 정

도인 것으로 알려져 있다(Nadehoffer 등, 1984). 질산화량은 토양온도가 낮은(Fig. 5), 겨울과 봄에 배양한 시료에서 낮은 값을 보이고 있으며, 임목생장기간 동안 9월에 배양된 시료에서(Fig.

Table 2. Net N mineralization and nitrification in several forest stands in the Kwangnung area

Stand	Duration	Net N mineralization (mg/kg)	Nitrification (mg/kg)	Nit./Net min. (%)	Reference
<i>Q. acutissima</i>	1 year	95.2	65.4	69	This study
<i>Larix decidua</i>	growing season	47.7	>48	100	Son <i>et al.</i> (1995)
<i>Pinus strobus</i>	"	38.1	35.4	93	"
<i>Thuja occidentalis</i>	"	21.5	>22	100	"

4) 질산화작용이 낮게 나타난 것은 이 기간동안 암모니아태질소의 공급이 적었기 때문으로 생각된다(Fig. 1). 상수리나무임분의 질산화량은 65.4mg/kg/yr으로서 광릉지역에서 조사된 다른 침엽수임분에 비해 높은 값을 보이고 있으며 (Table 2), 질산화량에 대한 질소무기화량이 차지하는 비율은 69%로서(Table 2), 이 지역에서 조사된 구주낙엽송, 스트로브잣나무, 서양측백의 질산화에대한 질소 무기화의 비율 93% 이상보다는 낮은 값을 보이고 있다. 이는 상수리나무임분이 다른 침엽수임분에 비해 질산화작용에 의해 생성된 질산태 질소를 죽은 뿌리나 미생물에 의해 급격히 부동화하였거나(Aber 등, 1993), 배양기간의 차이 때문으로 생각되며(Hart 등, 1994), 본 조사에서는 채취된 토양 시료를 한달 동안 배양하였고, 다른 침엽수류의 연구 결과는 45일 배양으로 배양기간의 증가는 토양내 질산태질소 농도 증가와 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다(Mun, 1991).

5. Bower, R.D., J.M. Melillo, P.A. Steudler and J.D. Aber. 1991. Effects of nitrogen additions on annual nitrous oxide fluxes from temperate forest soils in the northeastern United States. *J. of Geophys. Res.* 96 : 9321-9328.
6. Gower, S.T. and Y. Son. 1992. Differences in soil and leaf litterfall nitrogen dynamics for five forest plantations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56 : 1956-1966.
7. Hart, S.C., G.E. Nason, D.D. Myrold and D.A. Perry. 1994. Dynamics of gross nitrogen transformations in an old-growth forest : the carbon connection. *Ecology* 75 : 880-891.
8. Keeney, D.R. and D.W. Nelson. 1982. Nitrogen-Inorganic forms. Pages 643-698. in A.L. Page, R.H. Miller and D.R Keeney eds. *Methods of Soil Analysis*. ASA and SSSA.
9. Kim, C., T.L. Sharik and M.F. Jurgensen. 1995. Canopy cover effects on soil nitrogen mineralization in northern red oak (*Quercus rubra*) stands in northern Lower Michigan. *For. Ecol. and Manage.* 76 : 21-28.
10. Kraske, C.R. and I.J. Fernandez. 1990. Conifer seedling growth response to soil type and selected nitrogen availability indices. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54 : 246-251.
11. Likens, G.E., F.H. Bormann, N.M. Johnson, D.W. Fisher and R.S. Pierce. 1970. Effects of forest cutting and herbicide treatment on nutrient budgets in the Hubbard Brook watershed-ecosystem. *Ecol. Monogr.* 40 : 23-47.

引用 文 獻

1. 김춘식. 1995. 루브라참나무림과 레시노사스 나무림의 토양 질소 무기화에 있어서 개별의 영향. *한국임학회지* 84 : 198-206
2. 산림청. 1995. 산림 입지 조사 요령. 86pp.
3. 손요환·김정태·이상은·이명균. 1995. 경기도 광릉시험림의 구주낙엽송, 스트로브잣나무, 서양측백조림지 토양내 질소 무기화 비교. *한국생태학회지* 18 : 385-396
4. Aber, J.D., A. Magill, R. Boone, J.M. Melillo, P. Steudler and R. Bowden. 1993. Plant and soil responses to chronic nitrogen additions at the Harvard Forest, Massachusetts. *Ecol. Appl.* 3 : 156-166.

12. Matson, P.A. and P.M. Vitousek. 1981. Nitrogen mineralization and nitrification potential following clearcutting in the Hoosier national forest, Indiana. *For. Sci.* 27 : 23-47.
13. Mun, H.T. 1991. Nitrogen mineralization and dynamics in the forest soil. *Korean J. Ecol.* 14 : 317-325.
14. Nadelhoffer, K.J., J.D. Aber and J.M. Melillo. 1984. Seasonal patterns of ammonium and nitrate uptake in nine temperate forest ecosystems. *Plant and Soil* 8 : 321-335
15. Poovarodom, S. and R.L. Tate III. 1988. Nitrogen mineralization rates of the acidic, xeric soils of the New Jersey Pinelands : laboratory studies. *Soil Sci.* 145 : 337-343.
16. Zak, D.R. and K.S. Pregitzer. 1990. Spatial and temporal variability of nitrogen cycling in northern Lower Michigan. *For. Sci.* 36 : 367-380.