

루브라참나무림과 레시노사소나무림의 토양 질소 무기화에 있어서 개벌의 영향¹

김 춘 식²

Clearcutting Effects on Soil Nitrogen Mineralization in *Quercus rubra* and *Pinus resinosa* Stands¹

Choonsig Kim²

요 약

이 연구는 루브라참나무림과 레시노사소나무림의 질소 무기화율이 개벌후 어떤 변화를 보이는지에 관하여 조사한 결과이다. 토양상층부 15cm에서의 질소 무기화율이 비닐주머니에 토양을 배양하는 방법을 이용하여 1991년과 1992년 임목 성장 기간 동안(5월 - 10월) 조사되었다. 두 임목 성장 기간 동안 추정된 참나무림의 질소 무기화율은 개벌 처리구 67kg/ha, 무처리구 30kg/ha였고, 소나무림은 개벌 처리구 27kg/ha, 무처리구 13kg/ha였다. 총 질소 무기화율은 항상 참나무림이 소나무림보다 높았다. 배양전과 한달 배양후 토양으로부터 질산태 질소는 소나무림의 개벌 처리구에서 검출된 반면(두 임목 성장 기간동안 평균 질산화율 : 3.3kg/ha), 두 임분의 무처리구와 참나무림의 개벌 처리구에서는 거의 검출되지 않았다. 연구 결과들은 두 임분내 이용 가능한 질소량에 상당한 증가가 개벌후 발생하였으며, 낮은 질산화율은 이 임분들에 질소 보유를 위한 중요한 작용일 가능성을 시사한다.

ABSTRACT

The objective of this study was to determine the rate of nitrogen mineralization at clearcut and uncut in oak(*Quercus rubra* L.) and pine(*Pinus resinosa* Ait.) stands. The study sites were located in northern Lower Michigan, U.S.A. Nitrogen mineralization rates in the top 15cm of mineral soil were examined during the 1991 and 1992 growing seasons(May - October) using an *in situ* buried bag technique. Net nitrogen mineralization in oak stands over the course of both growing seasons was 67kg/ha in the clearcut and 30kg/ha in the uncut stands. In contrast, net nitrogen mineralization in pine stands was 27kg/ha and 13kg/ha for the same treatments. Total net nitrogen mineralization rates were always higher in oak stands than in pine stands. Extractable NO_3^- before and after one month soil incubation in both oak and pine stands was generally not detectable in the uncut stands, but in the pine clearcut treatment(nitrification over the course of both growing seasons : 3.3kg/ha). The results indicated that : 1) substantial increases in the amount of available soil nitrogen occurred following clearcuts in both stands ; and 2) the low rates of nitrification may be an important mechanism for retention of nitrogen in both oak and pine stands.

Key words : Nitrogen availability, Nitrogen mineralization, Nitrification, Canopy removal, *Quercus rubra*, *Pinus resinosa*.

¹ 接受 1995年 2月 28日 Received on February 28, 1995.

² 서울 동대문구 청량리동 임업연구원 임지환경과 130 - 012 Department of Forest Soils, Forestry Research Institute, Seoul 130 - 012, Korea.

서 론

산림토양내 질소 무기화율의 구멍은 삼림생태계내 질소순환과정의 이해나, 임지경영적인면에서 중요하다. 질소 무기화 과정중 생성되는 암모니아태 질소나 질산태 질소는 식물의 뿌리에 의해 흡수되는 질소 이온 형태로서, 임지내 질소 무기화율의 정도는 임목 성장을 제한하는 중요한 인자중의 하나로 고려된다(Kraske와 Fernandez, 1990; Zak과 Pregitzer, 1990). 또한 질소 무기화 과정중 질산화작용으로 생성되는 질산태 질소는 식물이나 미생물등에 의해 흡수되지 않으면 토양수와 함께 용탈되거나(Likens 등, 1970), 토양으로부터 대기 중에 방출되어 대기중 질소 산화물의 증가를 가져오며, 궁극적으로는 식물이 이용할 수 없게 되어 임지로부터 상당량의 질소 손실을 초래한다.

많은 연구들은 임분의 개별후 증가되는 질소 무기화율을 보고 하고 있다(Matson과 Vitousek, 1981; Binkley, 1984). 이 증가는 임분 제거후 발생된 토양수분이나 토양온도 같은 환경적인 인자의 변화와 함께 유기물의 분해가 증가하고 미생물의 활동이 증가했기 때문일 가능성이 있다(Matson과 Vitousek, 1981). 그러나 이들 환경적인 요인중 어느 인자가 더 큰 영향을 가지는지는 잘 알려져 있지 않다.

참나무류와 소나무임분은 우리 나라 산림에서 가장 우점종을 이루는 수종들이며 산림경영적인 면에서 중요하게 고려되는 수종들이다. Mun (1991)은 이들 수종들에 대한 질소 무기화율의 연구를 실내 토양배양실험을 통하여 실시하여, 상수리나무림이 리기다소나무림보다 높은 질소 무기화율을 가지는 것으로 보고하고 있다.

본 연구는 유사한 토양 및 기후조건에서 성장한 루브라참나무림과 레시노사소나무림을 대상으로 임지내 토양배양을 통하여 질소 무기화율과 질산화율을 비교하고 개별에 대한 영향을 조사하기 위해 실시되었다.

재료 및 방법

조사지 현황

이 연구는 미국 중동부 미시건 주에 위치한 90

년생 루브라참나무(northern red oak : *Quercus rubra* L.) 천연임분(북위 43° 31', 서경 84° 45', 고도 400m)과 70년생 레시노사소나무(red pine : *Pinus resinosa* Ait.) 조림지(북위 43° 31', 서경 84° 45', 고도 400m; 북위 44° 14', 서경 84° 41', 고도 300m)에서 실시되었다(Fig. 1). 조사지의 연강수량은 770mm로서 연중 고르게 분포하며 연평균 기온은 6.7°C이다(Albert 등, 1986).

조사지중 참나무림은 경사가 완만한(경사도 : 2 - 5%) 북향이었고, 소나무림은 평탄지(경사도 : 0 - 2%)의 서향 또는 동향에 위치하였다. 각 수종의 조사지는 3개의 조사구로 구성되며 각 조사구는 66×66m의 개별 처리구와 무처리구를 포함하고 있다. 개별구의 임목 벌채는 1990년 여름과 가을동안 실시되었으며, 무처리구의 임분평균 흉고단면적은 참나무림 27.0m²/ha, 소나무림 30.0m²/ha로 소나무림이 약간 높았다. 표본채취는 수고 22 - 29m 임목들에 의해 발생될 수 있는 각 처리간 임연부영향(edge effects)을 최소화하기 위해 각 처리구의 가장자리로부터 18m의 완충대를 남겨 놓은 후, 각 처리구의 중심부에 위치한 30×30m에서 실시되었다. 조사구는 사질 포드졸 토양(sandy, mixed, frigid Alfic Haplorthods)이며, 조사구내 토양의 이화학적 성질이 표 1에 나타나 있다.

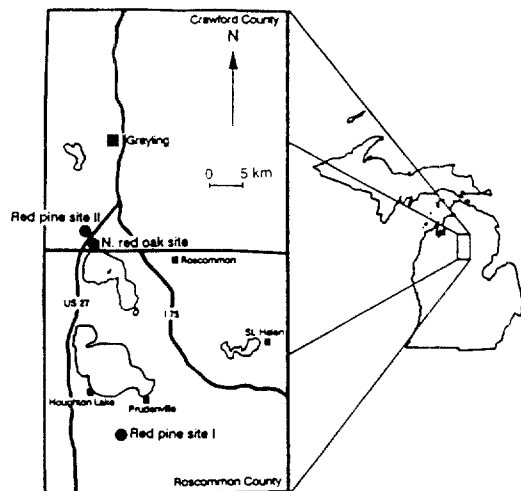


Fig. 1. Location of study sites in northern Lower Michigan, U.S.A.

Table 1. Soil physical and chemical properties of the A/E and Bw horizons by stand types

Soil property	Stand type	
	Oak	Pine
	A/E horizon	
Horizon depth(cm)	0 - 8(2)*	0 - 4(1)
Organic matter(%)	3.2 (1.06)	3.9 (0.18)
Sand(%)	96.0 (0.8)	92.0 (1.9)
Silt(%)	4.0 (0.7)	7.0 (2.1)
Clay(%)	0.0 (0.2)	1.0 (0.4)
Bulk density(g/cm ³)	1.05(0.02)	1.06(0.02)
pH	4.2 (0.2)	4.4 (0.1)
Total N(%)	0.070(0.02)	0.086(0.015)
Total P(%)	0.013(0.003)	0.012(0.003)
Organic C(%)	1.43(0.67)	2.17(0.46)
CEC(cmol/kg)	4.24(1.33)	7.93(1.40)
Ca ²⁺ (cmol/kg)	0.24(0.06)	0.31(0.14)
Mg ²⁺ (cmol/kg)	0.12(0.02)	0.08(0.03)
K ⁺ (cmol/kg)	0.09(0.03)	0.07(0.01)
	Bw horizon	
Horizon depth(cm)	8 - 50(8)	4 - 52(6)
Organic matter(%)	1.3 (0.07)	1.3 (0.19)
Sand(%)	94.0 (1.0)	95.0 (1.0)
Silt(%)	5.0 (0.6)	4.0 (1.8)
Clay(%)	1.0 (0.4)	1.0 (0.4)
Bulk density(g/cm ³)	1.34(0.02)	1.31(0.05)
pH	5.3 (0.2)	4.9 (0.2)
Total N(%)	0.019(0.003)	0.026(0.002)
Total P(%)	0.017(0.004)	0.019(0.001)
Organic C(%)	0.20(0.06)	0.37(0.03)
CEC(cmol/kg)	2.09(0.21)	2.47(0.32)
Ca ²⁺ (cmol/kg)	0.27(0.15)	0.12(0.08)
Mg ²⁺ (cmol/kg)	0.08(0.04)	0.02(0.007)
K ⁺ (cmol/kg)	0.04(0.003)	0.04(0.003)

* Means(n=3). The physical and chemical properties of soils are not significantly different between oak and pine stands at $p=0.05$. One standard error is given in parentheses.

질소 무기화율과 질산화율

토양내 질소 무기화율과 질산화율 측정을 위해 1991년과 1992년 임목생장기간(5월부터 10월)동안 임지내 각 조사구의 각 처리구에서 임상을 제거한 후 토양상층부로부터 3쌍의 직경 5cm 깊이 15cm의 토양이 토양채취기를 이용하여 무작위로 채취되었으며, 각 쌍으로부터 한 표본은 배양전 무기 질소의 함량을 결정하기 위해 실험실로 운반되었고 나머지 한 표본은 비닐주머니(두께 0.025 mm)를 이용하여 임지내에서 한달동안 배양(*in*

situ buried bag technique)하였다. 토양표본 채취는 강우 후 최소한 24시간이 경과된 후 실시하였다. 임지에서 채취된 토양은 실험실에서 2mm 이상의 돌과 뿌리를 제거한 후 4℃ 냉장고에 분석이 실시되기 전까지 보관하였다. 토양표본으로부터 무기질소는 5g의 토양을 2M KCl 용액 50ml를 이용하여 추출하였으며 추출된 용액으로부터 암모니아태 질소나 질산태 질소 함량은 Technicon 자동 분석기에 의해 정량하였다.

임지내 질소 무기화율은 한달 배양후 무기 질소(NH₄⁺+NO₃⁻) 농도로부터 배양전 무기 질소 농도를 뺀 값으로 계산되었으며 질산화율은 한달 배양후 질산태 질소(NO₃⁻) 농도에서 배양전 농도를 뺀 값으로 계산하였다. 질소 무기화율과 질산화율의 값은 토양 상층부 15cm에서의 토양 가비중값(참나무림 1.3g/cm³; 소나무림 1.3g/cm³)과 석력함량(>2mm, 참나무림 7%; 소나무림 2%)의 수정 후 전체면적당 무기질소양이 계산되었다.

pH, 토양수분함량, 토양온도

채취된 배양전 토양으로부터 토양 pH가 20g의 토양에 20ml의 증류수를 첨가한 후 측정되었으며(McLean, 1982). 토양수분함량은 약 10g의 토양을 105℃에서 24시간 건조후 조사하였고, 토양온도는 처리구내 7.5cm 깊이에 설치된 토양온도측정기(Taylor Model 5989 Thermometers)를 이용하여 매년 여름동안 3회(1991년 6월 12일, 8월 15일, 8월 21일; 1992년 7월 7일, 7월 27일, 8월 24일) 오후 3시부터 5시 사이에 측정하였다.

통계분석

수집된 자료는 분산분석을 이용하여 분석되었으며 본 연구내용을 요약하는 통계모델은 다음과 같다.

$$Y_{ijkl} = \mu + S(i) + B(j) + C(k) + T(l) + SC(jk) + ST(jl) + BC(kj) + BT(lj) + CT(kl) + SCT(ikl) + BCT(klj)$$

여기서 Y는 측정치(질소 무기화율 또는 질산화율), μ 는 전체평균, S는 임분형태($i=1, 2$), B는 조사구($j=1, 2, 3$), C는 임관처리($k=1, 2$)이며, T는 조사기간($l=1, 2$)이다. 이 모델에서 조사구를 제외한 임분형태(소나무림, 참나무림), 임관처리(개별, 무처리), 조사기간(1991, 1992)은 고정된 인자로 고려되었다. 분산분석이 실시되기 전

모든 자료는 분산의 동질성과 잔차의 정규성이 조사되었고(Neter 등, 1990), 이 가정을 만족시키지 못하는 자료는 순위에 의해 변환한 후 분산분석이 실시되었다(Conover와 Iman, 1981). 처리평균간 비교는 Tukey 분석이 이용되었으며 모든 분산분석은 SAS 통계프로그램의 일반선형모델(General Linear Models procedure)이 이용되었다(SAS Institute, Inc., 1989).

결과 및 고찰

암모니아태 및 질산태 질소의 수준

두 임분의 배양전 토양으로부터 측정된 암모니아태 질소는 개별구가 무처리구보다 높게 나타났다(Fig. 2). 2년의 조사 기간동안 평균 암모니아태 질소는 참나무림 개별구 4.8mg/kg, 무처리구 1.8mg/kg이며, 소나무림 개별구 3.4mg/kg,

무처리구 1.8mg/kg로 나타났다. 두 임분의 개별구에서 암모니아태 질소의 뚜렷한 증가는 개별 후 토양온도나 토양수분의 증가와 함께 유기물의 분해가 촉진되고 미생물의 활동이 증가했기 때문이며, 또한 임목의 제거와 함께 식생에 의한 흡수가 줄어들었을 가능성도 있다(Matson과 Vitousek, 1981). 두 임분의 무처리구에 암모니아태 질소는 1.8mg/kg로 타임분의 같은 수종에서 조사된 값보다 비교적 낮은 값을 보이고 있다. 인접지역인 Wisconsin주 28년생 루브라참나무 및 레시노사소나무조림지의 임상 및 토양 20cm에서의 암모니아태 질소는 각각 3.4mg/kg과 5.1mg/kg으로(Gower와 Son, 1992) 본 조사 결과보다 높은 값을 보여주고 있으며, 국내에서는 상수리나무림 12.6mg/kg, 리기다소나무림 5.1mg/kg로 조사되었다(Mun, 1991). 본 조사가 타 임분보다 낮게 나타난 것은 토양내 유기

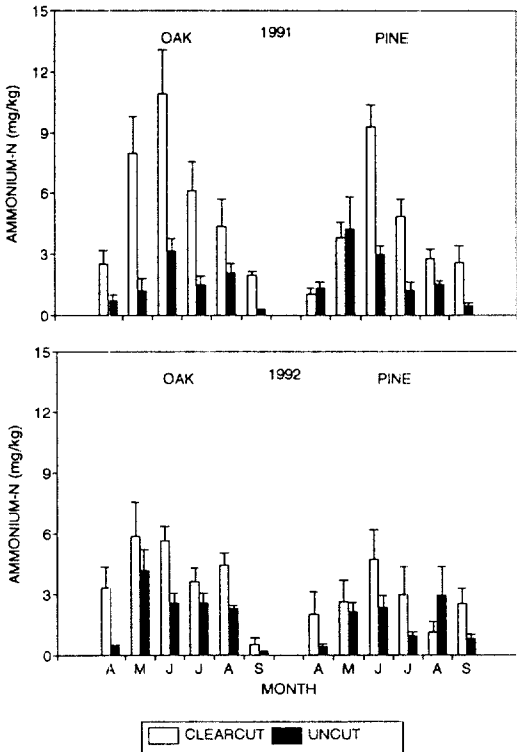


Fig. 2. Seasonal variation in extractable NH_4^+ in the top 15cm of mineral soil at clearcut and uncut in oak and pine stands during the 1991 and 1992 growing seasons. Means(n=9) and one standard error are presented.

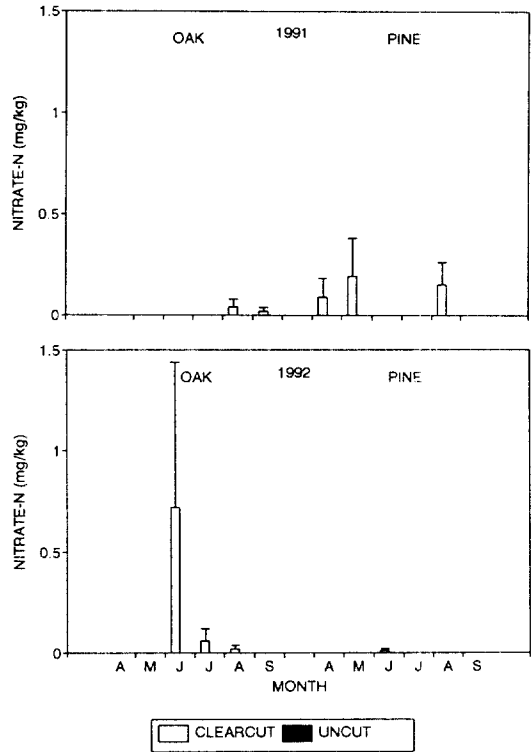


Fig. 3. Seasonal variation in extractable NO_3^- in the top 15cm of mineral soil at clearcut and uncut in oak and pine stands during the 1991 and 1992 growing seasons. Means(n=9) and one standard error are presented.

둘 함량이 적은 것과 조사지가 사질토양(Table 1)으로 수분보유력(참나무림 51mg/g, 소나무림 55mg/g)이 낮기 때문에 사료된다.

두 임분의 암모니아태 질소는 5월말이나 6월말에 가장 높은 값과 함께, 두 처리 모두 초봄(4월말)이나 가을(9월말)이 낮게 나타나는 뚜렷한 계절적인 변화를 보여주고 있으며, 이 결과는 토양 온도의 변화가 임지내 암모니아태 질소의 변화에 영향을 주기 때문으로 생각된다. 유사한 계절적인 변화가 같은 지역의 사탕단풍나무와 참나무임분에서도 관찰되었다(Zak과 Pregitzer, 1990). 특히 개벌 지역에서의 값은 벌채후 첫해인 1991년 값이 둘째해 1992년 값보다 높게 나타났으며, 식생이 다시 성장하기 전에 높은 값을 보여주고 있어서 식생에 의한 흡수와 관련이 될 가능성을 보여준다.

배양전 토양으로부터 측정된 두 임분의 무처리구로부터 질산태 질소는 거의 검출이 되지 않거나 극히 낮은 값을 보여주고 있다(Fig. 3). 비록 적은 양의 질산태 질소가 개벌 지역에서 검출되었으나 이 값은 무처리지역과 유의적인 차이는 없었다. 참나무나 소나무임분의 극히 낮은 질산태 질소 함량은 다른 연구들로부터도 보고된 바 있다(Vitousek과 Matson, 1985; Zak과 Pregitzer, 1990; Aber 등, 1993). 이 지역에서 토양내 질산태 질소가 낮은 것은 토양 pH가 낮기 때문일 가능성이 있으나(Donaldson과 Henderson, 1990), 식생이나 미생물 등에 의해 흡수되었거나(Aber 등, 1993)과 사질토양에서 질산태 질소의 급속한 용탈 손실에 의한 가능성도 있다(Poovarodom 등, 1988).

질소 무기화율과 질산화율

2년의 조사기간동안 질소 무기화율은 개벌 처리구가 무처리구보다 높았다(Fig. 4). 두 임분의 질소 무기화율은 배양전 토양의 암모니아태 질소에서 관찰된 것과 같은 뚜렷한 계절적인 변화는 나타나지 않았다. 그러나 참나무림은 개벌 처리구, 무처리구 모두 일반적으로 봄이나 초여름이 가을보다는 높게 나타나고 있다(Fig. 4). 조사기간동안 관측된 질소 부동화(nitrogen immobilization)는, 비록 예외(1992년 9월)는 있지만 배양되는 토양내 수분함량이 낮은, 건조한 시기동안 주로 발생하고 있다(Fig. 4, Fig. 8). 이 현상

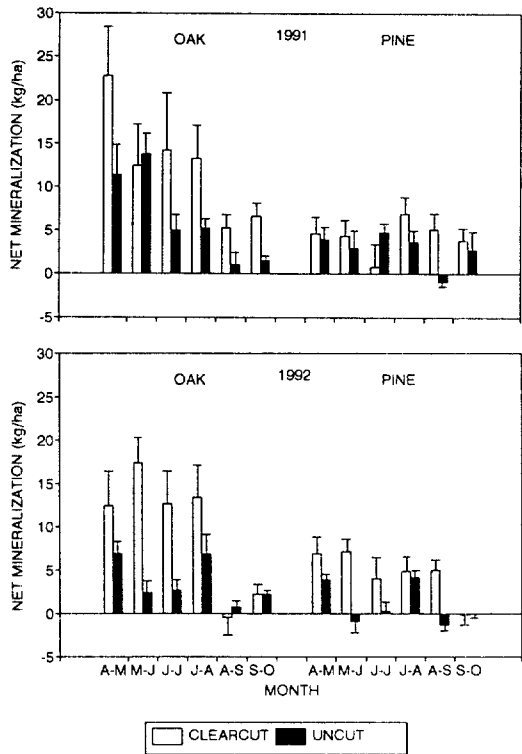


Fig. 4. Monthly net N mineralization in the top 15cm of mineral soil at clearcut and uncut in oak and pine stands during the 1991 and 1992 growing seasons. Means(n=9) and one standard error are presented.

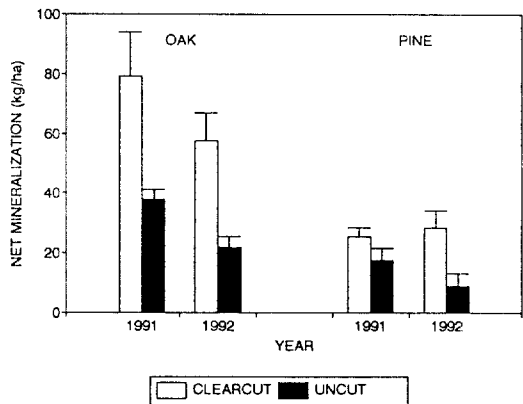


Fig. 5. Total net N mineralization in the top 15cm of mineral soil at clearcut and uncut in oak and pine stands during the 1991 and 1992 growing seasons. Means(n=9) and one standard error are presented.

Table 2. Mean water content and pH of the top 15 cm of mineral soils and soil temperature at 7.5cm depth at clearcut and uncut in oak and pine stands during the 1991 and 1992 growing seasons

Year	1991		1992	
Stand type	Oak	Pine	Oak	Pine
Soil water content(%)				
Clearcut	12.3(0.4)a*	11.7(0.5)a	8.8(0.4)a	8.9(0.5)a
Uncut	10.3(0.5)b	8.9(0.5)b	10.5(0.6)a	8.2(0.5)a
Soil temperature(℃)				
Clearcut	21.3(0.6)c	21.7(0.6)c	20.0(0.8)c	20.5(0.9)c
Uncut	16.8(0.3)d	16.7(0.3)d	16.0(0.3)d	15.8(0.4)d
Soil pH				
Clearcut	4.47(0.03)x	4.67(0.04)x	4.51(0.04)x	4.65(0.05)x
Uncut	4.28(0.03)y	4.46(0.04)y	4.30(0.03)y	4.53(0.04)x

* Treatment means with the same letter within each column are not significantly different at $p=0.05$. Soil temperature was measured three times during each summer(12 June, 15 August, and 21 August in 1991, and 7 July, 27 July, 24 August in 1992). One standard error is given in parentheses.

은 토양 미생물 등에 의한 질소 흡수가 임지내 질소 무기화율보다 큰 결과로서 발생 하였을 가능성이 있으며, Groffman 등(1993)은 건조토양이 습윤토양 보다 미생물에 의한 질소 부동화가 높은것으로 보고하고 있다.

두 임목 생장기간동안 총 질소 무기화율로부터 계산된 분산분석의 결과, 처리간(개벌, 무처리), 임분간(참나무림, 소나무림), 조사 기간(1991, 1992) 등은 모두 유의적인 차이($p<0.05$)가 있는 것으로 나타났으며, 개별 처리구의 총 질소 무기화율은 무처리 임분에 비해 2배 이상 증가를 보였다($p=0.014$)(Fig. 5). 2년의 임목생장 기간동안 총 질소 무기화율의 평균은 참나무림 개별 처리구 67kg/ha, 무처리구 30kg/ha, 소나무림 개별 처리구 27kg/ha, 무처리구 13kg/ha로 나타났다. 이 증가는 벌채후 임지내 미기상의 변화와 함께 토양온도나 토양수분의 변이 폭 증가에 의해 유기물의 분해가 촉진되고 미생물의 활동이 증가했을 가능성에 기인한다(Matson and Vitousek, 1981). 그러나 토양수분 증가는 벌채 후 첫해동안으로 한정(Table 2)되어 있으나, 개별 처리구내 토양온도는 평균 약 4~6℃ 증가(Table 2)하여 이 인자가 이 처리구내 질소 무기화율 증가에 더욱 크게 관여 하였을 것으로 생각된다. Boone(1992)은 Massachusetts 단풍나무림에 질소 무기화율이 토양수분함량의 변화보다는

토양온도의 변화와 관계가 있는것으로 보고하고 있으며, Peterjohn 등(1994)은 Massachusetts 활엽수혼효림에서 토양온도의 5℃ 증가는 2배의 질소 무기화율 증가와 관계가 있다고 보고 하고 있는데 이 결과는 본 연구결과와 유사함을 보이고 있다.

토양내 질소 무기화율은 참나무림이 소나무림 보다 높았다($p=0.030$)(Fig. 5). 두 임분사이에 토양수분함량이나 토양온도같은 환경적인 인자들의 차이는 거의 나타나지 않았기(Table 2, Fig. 8) 때문에, 두 임분 사이에 질소 무기화율의 차이는 유기물의 질의 차, 예를 들면 C/N 비(토양: 참나무림 16, 소나무림 21; 낙엽: 참나무 61, 소나무 88) 등과, 낙엽 분해율(2년동안의 낙엽 분해량: 참나무림 약 600mg/g, 소나무림 약 400 mg/g) 등에 기인할 가능성이 있다. Nadelhoffer 등(1983)은 낮은 C/N 비를 가지는 임분에서 질소 무기화작용이 급속히 발생한다고 보고하였다.

두 임분 모두 무처리구는 질산화작용이 거의 검출되지 않았지만 소나무림의 개별 처리구는 질산화작용(두 임목생장 기간동안 평균 질산화율: 3.3kg/ha)이 발생하였다(Fig. 6, Fig. 7). 비록 약간의 질산화작용이 참나무림의 개별 처리구(0.9kg/ha)에서 발생하였지만 무처리구와 유의적인 차이는 없었다. 소나무림의 개별 처리구내 질산화 작용은 임목 제거후 토양온도나 토양 pH

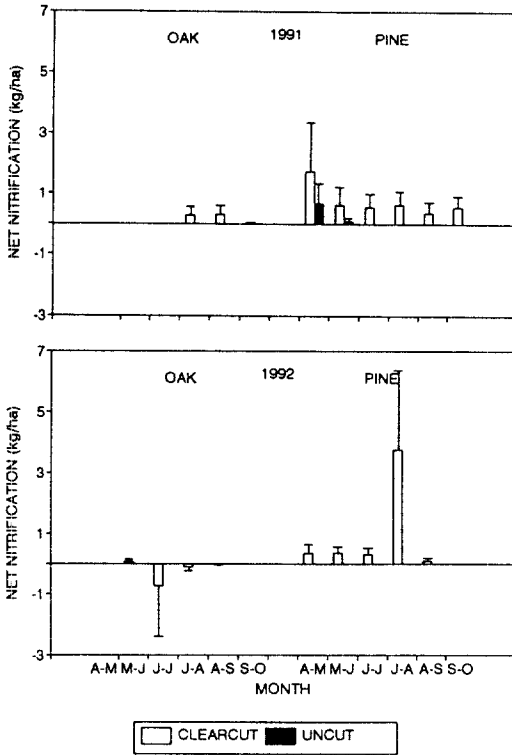


Fig. 6. Monthly net nitrification in the top 15cm of mineral soil at clearcut and uncut in oak and pine stands during the 1991 and 1992 growing seasons. Means(n=9) and one standard error are presented.

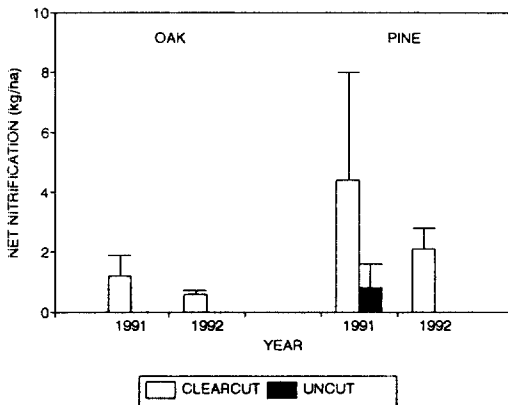


Fig. 7. Total net nitrification in the top 15cm of mineral soil at clearcut and uncut in oak and pine stands during the 1991 and 1992 growing seasons. Means(n=9) and one standard error are presented.

같은 환경조건의 변화(Table 2)와 함께 임지내 암모늄이용율의 증가(Fig. 2)가 원인이 될 가능

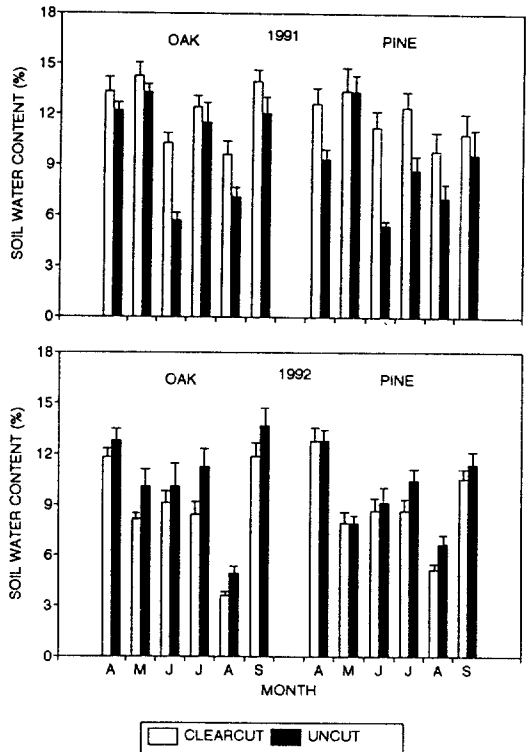


Fig. 8. Soil water content of the top 15cm of mineral soil at clearcut and uncut in oak and pine stands during the 1991 and 1992 growing seasons. Means(n=9) and one standard error are presented.

성이 있다.

전체적으로 두 임분 모두 개벌후에도 질산화율이 낮게 나타나고 있으며, 개벌구의 전체 질소 무기화율로부터 질산화율이 차지하는 비율은 참나무림 3% 소나무림 12%로 소나무림이 높게 나타났다. 이 지역 임분에서 질산화율이 낮은 것은 질산화작용균이 서식하기에는 부적합한 강산성의 토양, 생성된 질산태 질소가 토양 미생물 등에 의해 흡수되었을 가능성(Aber 등, 1993), 또는 한달 동안의 토양배양이 이 임지내 토양의 질산화작용을 일으키기에는 너무 짧을 가능성 등이 있다(Hart 등, 1994).

결론적으로 개벌은 토양온도의 상승과 함께 두 임분 모두에서 질소 무기화율을 증가하였으며 두 임분사이에 총 질소 무기화율의 차는 유기물의 질 차이에 의한 것으로 생각된다. 또한 두 임분의 개벌후에도 낮은 질산태 질소의 양은 이 임분들의 질소 보유를 위한 하나의 작용일 가능성이

있다.

인 용 문 헌

1. 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.
2. Albert, D.A., S.R. Denton and B.V. Barnes. 1986. Regional landscape ecosystems of Michigan. School of Natural Resources, University of Michigan, Ann Arbor, MI, 32pp.
3. Binkley, D. 1984. Does forest removal increase rates of decomposition and nitrogen release? *For. Ecol. Manage.* 8 : 229 - 233.
4. Boone, R.D. 1992. Influence of sampling date and substrate on nitrogen mineralization : comparison of laboratory incubation and buried bag methods for two Massachusetts forest soils. *Can. J. For. Res.* 22 : 1895 - 1900.
5. Conover, W.J. and R.L. Iman. 1981. Rank transformations as a bridge between parametric and nonparametric statistics. *Amer. Statist.* 35 : 124 - 129.
6. Donaldson, J.M. and G.S. Henderson. 1990. Nitrification potential of secondary succession upland oak forests : I. Mineralization and nitrification during laboratory incubations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54 : 892 - 897.
7. 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.
8. Groffman, P.M., D.R. Zak, S. Christensen, A. Mosier and J.M. Tiedje. 1993. Early spring nitrogen dynamics in a temperate forest landscape. *Ecology* 74 : 1579 - 1585.
9. 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.
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.
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 : 781 - 791.
13. McLean, E.O. 1982. Soil pH and lime requirement. Pages 199 - 224 in A.L. Page, R.H. Miller, and D.R. Keeney, eds. *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties.* 2nd ed. ASA and SSSA, Madison, WI.
14. Mun, H.T. 1991. Nitrogen mineralization and dynamics in the forest soil. *Korean J. Ecol.* 14 : 317 - 325
15. Nadelhoffer, K.J., J.D. Aber and J.M. Melillo. 1983. Leaf litter production and soil organic matter dynamics along a nitrogen availability gradient in southern Wisconsin(U.S.A.). *Can. J. For. Res.* 13 : 12 - 21.
16. Neter, J., W. Wasserman and M.H. Kutner. 1990. *Applied linear statistical models : regression, analysis of variance, and experimental designs.* 3rd ed. Richard D. Irwin. Homewood, Illinois, 1181 pp.
17. Peterjohn, W.T., J.M. Melillo, P.A. Steudler, K.M. Newkirk, F.P. Bowles and J.D. Aber. 1994. Responses of trace gas fluxes and N availability to experimentally elevated soil temperatures. *Ecol. Appl.* 4 : 617 - 625.
18. Poovarodom, S., R.L. Tate III and R.A. Bloom. 1988. Nitrogen mineralization rates of the acidic, xeric soils of the New Jersey Pinelands : field rates. *Soil Sci.* 145 : 257 - 263.
19. SAS Institute Inc. 1989. *SAS/STAT User's guide, Version 6, 4th ed. Volume 2*

- Cary, NC. 846pp.
20. Vitousek, P.M. and P.A. Matson. 1985. Causes of delayed nitrate production in two Indiana forests. *For. Sci.* 31 : 122 - 131
21. Zak, D.R. and K.S. Pregitzer. 1990. Spatial and temporal variability of nitrogen cycling in northern Lower Michigan. *For. Sci.* 36 : 367 - 380.