

## 리기다소나무造林地의 伐採水準 및 試料 採取時期에 따른 土壤水內 이온濃度 變化<sup>1\*</sup>

吳光仁<sup>2</sup> · 曹熙科<sup>2</sup> · 安起完<sup>2</sup> · 金椿埴<sup>3</sup>

## Changes of Ion Concentrations in Soil Solution According to Different Cutting Intensities and Sampling Times in *Pinus rigida* Plantations<sup>1</sup>

Kwang-In Oh<sup>2</sup>, Hi-Doo Cho<sup>2</sup>, Ki-Wan An<sup>2</sup> and Choonsig Kim<sup>3</sup>

### 요 약

벌채수준 및 시료 채취시기에 따른 토양수내 이온농도 변화를 알아보기 위해 전라남도 곡성군에 위치한 성숙한 리기다소나무조림지를 대상으로 4개의 벌채처리구(무벌채구, 6m×50m, 10m×50m, 20m×50m 대상개벌채처리구)를 설치하고 zero tension lysimeter를 이용하여 98년 6월 20일부터 8월 4일까지 6주동안 3차례(7월 6일, 7월 30일, 8월 4일) 토양수를 채취하여 분석한 결과, 토양수내 이온농도는 채취 시기별로 뚜렷한 차이를 보였으나 벌채수준이나 채취 깊이별(10cm, 30cm)로는 차이가 나타나지 않았다. 조사기간동안 토양수내 이온농도의 크기는  $\text{NO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{NH}_4^+$  순이었으며  $\text{NO}_3^-$ 의 평균 농도는 3.60mg/L,  $\text{Ca}^{2+}$  1.7mg/L,  $\text{Mg}^{2+}$  0.5mg/L,  $\text{NH}_4^+$  0.04mg/L 였다. 토양수내 이온농도는  $\text{NH}_4^+$ 를 제외하고는 토양수량과 이온농도 사이에 부의 상관관계( $r = -0.31 \sim -0.41$ )가 있었으며 리기다소나무조림지내 토양수 이온농도의 변화는 벌채처리보다는 강수유입 형태가 보다 더 큰 영향을 미치고 있는 것으로 나타났다.

### ABSTRACT

The concentrations of some ions ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ) in soil solution collected by zero tension lysimeter in mature *Pinus rigida* plantations in Goksung, Jeonranam-do were measured at two soil depths (10cm and 30cm) following various levels of cutting intensity treatment (uncut, 6m×50m, 10m×50m, 20m×50m strip clearcutting) three times (July 6, July 30, and August 4) between June 20 and August 4 1998. The ion concentrations in the soil solution were significantly different among sampling times, while the concentrations were not different among cutting levels or sampling depths. The ion concentrations in the soil solution decreased in the order of  $\text{NO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{NH}_4^+$  and the mean concentration was 3.60mg/L for  $\text{NO}_3^-$ , 1.7mg/L for  $\text{Ca}^{2+}$ , 0.5mg/L for  $\text{Mg}^{2+}$ , and 0.04mg/L for  $\text{NH}_4^+$  respectively. These ion concentrations except for  $\text{NH}_4^+$  ion were negatively correlated with the volume of collected soil solutions ( $r = -0.31 \sim -0.41$ ). The results suggest that the change of nutrient concentrations in the soil solution collected from the *P. rigida* plantations was related to the temporal input patterns of precipitation rather than the cutting intensity.

Key words : lysimeter, nutrient cycling, *Pinus rigida*, soil water, tree cutting

<sup>1</sup> 接受 1999年 3月 24日 Received on March 24, 1999.

<sup>2</sup> 全南大學校 農科大學 林學科 Dept. of Forestry, Chonnam National Univ. Kwangju 500-757, Korea.

<sup>3</sup> 임업연구원 Forestry Research Institute, Seoul 130-012, Korea.

\* 본 연구는 농림부지원 농특 첨단기술개발 과제로 수행된 연구결과의 일부임

서론

산림생태계내 토양수 유입과 토양수내 양분분포의 이해는 산림생태계의 양분순환이나 대기부터 여러 가지 산성강하물의 산림생태계 유입에 의한 토양내 양분동태의 구명(Rustard 등, 1993), 간벌, 임목벌채, 시비 등과 같은 산림작업으로부터 발생될 수 있는 임지의 양분 손실(Ingerslev 1997, Baumler와 Zech, 1998), 토양수내 양분동태와 계류수의 양분동태와의 관련성 등(박재현과 우보명 1997; 정용호 등, 1997)의 이해에 중요한 의미를 가진다. 특히 개벌과 같은 산림벌채는 계류수내 질산태질소의 농도 증가와 함께 산림생태계로부터 상당한 질소 손실을 초래하는 것으로 알려져 있으나(Likens 등, 1970) 국내에서는 산림작업과 관련된 토양수내 양분동태에 관한 자료는 극히 빈약한 실정이다.

리기다소나무는 미국이 원산으로 1900년도 초에 일본으로부터 도입된 이래 사방지나 척박임지의 녹화를 위한 조림수종으로 1960년부터 1994년까지 약 70만ha가 조림되었고(산림청, 1994) 식재 35년부터 벌채가 가능한 것으로 알려져 있기 때문에 앞으로 많은 지역에서 대규모의 벌채가 실시될 것으로 예측되며 산림생산력의 지속성과 토양양분 손실의 최소화화를 위한 산림벌채수준의 결정이나 산림양분관리를 위해서는 여러 가지 벌채수준에 따른 토양수내 양분농도의 동태에 관한 구명이 필요하다. 본 연구는 성숙한 리기다소나무 무입분을 대상으로 임목생장에 필수적인 양분들 중 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 등의 이온을 대상으로 여러가지 벌채수준에서 토양수량과 토양수내 이온분포가 채취시기별, 깊이별로 어떠한 영향을 보이는지를 조사하기 위해 수행하였다.

재료 및 방법

본 연구는 전라남도 곡성군 곡성읍 서계리와 농소리(127° 15' E, 35° 15' N)에 위치한 성숙한 리기다소나무 조림지를 대상으로 실시하였다. 조사지는 화강암 풍화도재로부터 발달된 갈색약건산림토양형(B<sub>2</sub>)이 주를 이루며 표고 100~200m의 산록 및 산복부위에 위치하고 있다. 조림지의 평균 임분연령은 25~30년생으로서 임분의 평균 흉고직경은 18~27cm, 평균수고는 12~15m이며 임분 지위는 중정도로 판정되었다(산림청, 1995).

조사지의 하층식생은 졸참나무(*Quercus serrata*), 진달래(*Rhododendron mucronatum*), 조록싸리(*Lespedeza maximczii*), 노간주나무(*Juniperus rigida*), 청미래덩굴(*Similax china*) 등이 전지역에서 우점종으로 분포하고 있다.

조사지는 유사한 임분 밀도와 입지환경을 가지는 리기다소나무조림지를 대상으로 50m×150m 크기를 가지는 6개의 조사구가 선정되었으며 각 조사구내에 무벌채구, 6m×50m, 10m×50m, 20m×50m 크기의 벌채구를 임의로 배치하였다. 각 벌채구는 벌채 후 상수리나무와 졸참나무가 1998년 4월에 식재 되었으며 각 벌채구 사이는 벌채처리 수준간의 영향을 최소화하기 위하여 무벌채구인 완충지대를 10m×50m씩 설정하였고 각 처리구의 벌채는 1997년 10월부터 98년 1월까지 실시하였다. 벌채 처리는 산록으로부터 산복을 향하여 등고선 방향으로 벌채처리수준별 대상개벌을 실시하였다. 벌채된 임목은 임의로 반출되었고 벌채시 생산된 가지나 엽 등의 벌채잔존물은 98년 2월과 3월 사이에 각 처리구사이에 위치한 10m×50m폭의 완충지대에 고르게 배치되도록 하였으며 벌채구내에 발생된 하층식생은 교란이 최소화 되도록 하였다.

각 벌채수준별 유입되는 토양수량과 토양수내 이온농도를 조사하기 위하여 Jemison과 Fox(1992)에 의해 설계된 수집면적 600cm<sup>2</sup>의 크기를 가지는 zero tension pan lysimeter를 제작하여 각 벌채수준 처리구(20m×50m, 10m×50m, 6m×50m, 무벌채구)별로 10cm, 30cm 깊이에 총 48개(6 조사구×4 벌채처리구×2 깊이)의 토양수채취기를 설치하였다. 토양수 채취기는 각 벌채처리구의 중심부(예를들면 6m×50m의 벌채구에는 폭 3m와 길이 25m가 만나는 지점에) 약 60cm 깊이의 토양단면을 제작한 후 깊이 10cm와 30cm 위치에 토양수채취기를 1개씩 설치하고 직경 2cm의 플라스틱 호스를 연결한 후 20L 플라스틱 물통 1개씩을 부착하였다. 토양수채취기는 1998년 6월 20일 설치하였으며 6월 20일부터 7월 4일, 7월 5일부터 7월 30일, 7월 31일부터 8월 4일까지 총 3회에 걸쳐 토양수를 수집하였다. 조사기간동안 동일한 처리구내에서도 토양수량은 장소적 변이가 매우 심하였으며 강우가 많이 발생할 때는 넘치는 경우도 있었다. 수집된 토양수는 현지에서 양을 측정후 약 500ml 정도를 플라스틱 병에 넣고 실험실로 운반한 후 분석이 실시될 때까지

냉동고에 보관하였다. 토양수의 pH는 pH메타를 이용하였고 토양수내 함유된 이온농도는 전남대학교 농과대학 농화학과의 이온크로마토그래프(Dionax Dx-120 IC)를 이용하여 측정하였다. 수집된 자료는 3개의 조사인자(채취시기, 벌채수준, 채취깊이)로 구성되어 있지만 본 연구에서는 가중평균치를 이용하여 농도가 계산되어 3인자 대한 분산분석(3 Way ANOVA)을 실시할 경우 잔차에 대한 자승평균(Mean Squared Error)이 존재하지 않기 때문에 각각의 인자에 대하여 One Way ANOVA를 이용하여 분산분석을 실시하였으며 각처리간의 차이는 Duncan 다중비교분석을 통하여 처리평균간 차이가 있는지를 조사하였다(SAS, 1989).

## 결과 및 고찰

### 1. 토양성질

각 처리구의 각 조사구내 토양수가 매설되는 지점에서 유기물층을 제거한 후 광물질 토양 상층부 10cm 깊이의 토양시료에 대하여 토양성질을 분석한 결과(Table 1) 토양 pH는 4.5~4.7의 강산성으로 나타났으며 유기물, 전질소, 유효인산 등의 함량은 일반 산림토양에 비해 낮은 값을 보이고 있다. 특히 유효인산은 전조사구가 2ppm 이하로 일반 산지토양의 평균유효인산함량 15ppm 보다 매우 낮은 값을 보이고 있어서 이들 지역에서 인산이 임목생장에 제한적인 요인으로 판단된다. 벌채처리별 토양성질 중 10m, 20m 벌채구내 토양 pH, 전질소, 유기물함량 등은 무처리구에 비해 낮은 값을 보이고 있으며 토양 pH, 유기물함량, 전질소함량, 양이온치환용량 등을 고려할 때 처리구중 무벌채구의 토양양분상태가 가장 양호한 것으로 나타났다.

### 2. 채취시기별 토양수량 및 이온농도 변화

토양수량은 채취시기별로 뚜렷한 차이를 보이고 있으며 7월 31일~8월 3일까지 사이에 유입된 토양수가 10,841ml로 가장 많은 양이 수집되었다(Fig. 1). 토양수량의 변이에 영향을 미치는 요인은 채취시기별 강수량의 변화로서 조사지역과 인접인 광주측후소에서 조사한 자료에 따르면 이 기간 동안 강수량은 212.8mm의 집중호우가 내렸으며 일 평균 강수량도 53.2mm 정도였다. 6월 20일~7월 6일 사이는 강수량이 278.8mm로서 7월 31일~8월 4일까지 기간동안에 비해 높았으나 일 평균 강수량은 31.1mm로서 8월초에 비해 강우가 분산된 것으로 나타났다. 7월 7일~29일까지의 강수량은 135.9mm로서 조사기간동안 가장 낮은 값을 보였으며 일 평균 강수량도 15.1mm로 가장 낮아 일 평균 강수량과 토양수량과는 밀접한 관계가 있는 것으로 나타났다. 다른 연구도 토양수량과 강수량과는 밀접한 상관( $r=0.77\sim0.88$ )이 있는 것으로 보고하고 있다(Jemison과 Fox, 1992).

조사지역의 토양수내 평균 pH는 5.05로서 우리나라 산림지역의 토양수 평균 pH 6.9(정용호 등, 1997), 서울 관악산 리기다소나무임분의 토양수 pH 5.68~5.7보다는(박재현과 우보명, 1997) 상당히 낮은 경향을 보이고 있다. 이 지역의 토양수 pH가 낮게 나타난 것은 이 지역 산림토양이 토양 pH 4.50~4.74로서 강산성화 되어있고 또한 토양내 Ca, Mg 같은 염기성 양분함량이 낮아 염기성 이온의 유입이 낮게 나타나기 때문으로 판단된다. 비록 통계적인 유의차이는 없었으나( $P>0.05$ ) 토양수 pH는 비교적 토양수량이 적었던 7월7~29일 사이에 수집된 토양수에서 높은 경향을 보이고 있으며 강수량과 토양수량이 많았던 기간동안은 낮은 경향을 보이고 있다(Fig. 1).

**Table 1.** Soil chemical properties in various levels of cutting in *P. rigida* plantations (n=6).

Treatment	pH (1 : 5)	OM (%)	TN (%)	Avail. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (ppm)	CEC (me/100g)	Exchangeable			
						Ca <sup>2+</sup> (ppm)	Mg <sup>2+</sup> (ppm)	Na <sup>+</sup> (ppm)	K <sup>+</sup> (ppm)
Uncut	4.74	2.02	0.14	1.53	10.14	673	31	34	70
6m strip cutting	4.70	2.06	0.13	1.77	9.02	286	27	26	69
10m strip cutting	4.50	1.48	0.11	1.81	9.41	669	29	27	65
20m strip cutting	4.65	1.28	0.10	1.41	9.60	322	33	27	69

강수량이 적었던 기간동안 토양수 pH가 높게 나타난 것은 토양수내 함유된 염기성이온농도가 높기 때문으로 판단된다(Fig. 1).

토양수내 이온농도는  $\text{NH}_4^+$ 를 제외하고는 채취 시기별로 차이를 보이고 있으며( $P < 0.05$ ) 평균 강

수량이 적고 유입된 토양수량도 적었던 7월 6일 ~7월 30일 사이에 가장 높은 농도를 보이고, 비교적 강수량이 많고 토양수 유입량이 많았던 기간 동안은 낮은 농도를 보이고 있다. 그 결과 토양 수량과 이온농도 사이도 부의 상관관계( $r = -0.31$

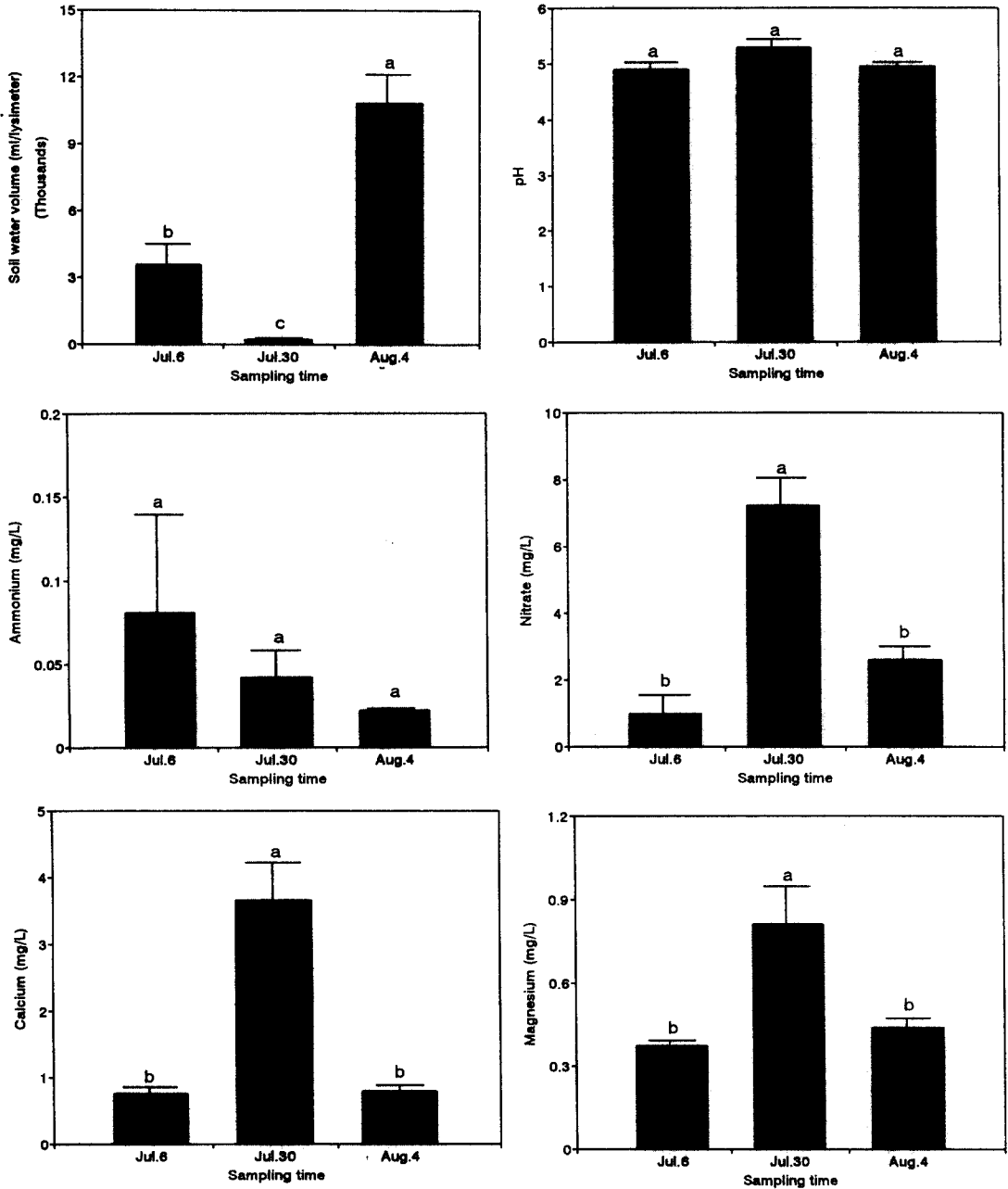


Fig. 1. Volume weighted pH and ion concentrations (means +1SE) in soil solution in sampling time in *P. rigida* plantations. Different letters above bars indicate significant difference at  $P < 0.05$ .

**Table 2.** Correlation coefficients among pH and ion concentrations in soil solutions in *P. rigida* plantations.

	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	pH	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Mg <sup>2+</sup>	0.466**				
pH	0.583**	0.127			
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	-0.084	-0.049	0.004		
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.606**	0.576**	0.208	-0.048	
Soil water content	-0.415**	-0.313**	-0.411**	0.048	-0.358**

\*\* :  $P < 0.001$ 

~-0.41)과 함께(Table 2) 토양수내 이온 농도의 채취시기별 변화에 강수유입형태가 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며 이는 주로 토양수량의 증가에 따른 이온의 희석효과가 주원인으로 생각된다.

### 3. 벌채수준별 토양수량 및 이온농도 변화

조사기간동안 수집된 벌채수준별 평균 토양수량의 경우 가장 넓은 면적이 벌채된 20m처리구가 7,561ml로서 가장 많은 양이 유입되었으며 6m 벌채처리구나 무처리구에 비해 유의적으로 높은 유입량을 보이고 있다(Fig. 2). 20m 벌채처리구에 토양수량이 증가한 원인은 임목의 벌채와 함께 임관에 의한 강우차단량이 발생하지 않았기 때문에 판단되며 우리나라 침엽수임분의 경우 임관에 의한 강우 차단량은 11~19% 정도인 것으로 알려져있다(민진홍과 우보명, 1995; 이돈구와 김갑태, 1997).

여러 가지 벌채수준에서 토양수 pH는 벌채수준별 차이가 없는 것으로 나타나고 있다(Fig. 2). 벌채수준별 토양수 pH에 차이가 나타나지 않는 것은 채취된 토양수내에 벌채처리간에도 뚜렷한 양분농도 차이가 없는 것과 일치하고 있으며(Fig. 2) 다른 연구들도 간벌과 같은 산림작업 실시 후 토양의 급속한 완충능력에 기인하여 토양수 pH에 뚜렷한 차이가 나타나지 않는 것으로 보고하고 있다(Baumler와 Zech, 1998).

토양수내 이온농도는 벌채수준간에 차이가 나타나지 않고 있으며 벌채수준의 증가는 토양수내 이온농도에 뚜렷한 증가를 초래하지 않는 것으로 나타났다(Fig. 2). 그러나 통계적인 유의성은 없었지만( $P > 0.05$ ) 비교적 용탈이 쉬운 이온인 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 경우 벌채구가 무벌채구에 비해 일반적으로 높은 경향을 보이고 있으며, 이는 주임목의 제거와 함께 식생에 의한 흡수가 줄었기 때문으로 사

료된다. 간벌을 실시한 토양수내 이온농도는 증가하는 경향을 보이는 것으로 알려져 있으며 벌채 1년 후에는 토양의 완충작용의 결과로서 원래의 상태로 회복하게 되는 것으로 알려져 있다(Baumler와 Zech, 1998).

### 4. 깊이별 토양수량 및 농도 변화

깊이별 평균 토양수 유입량은 10cm, 30cm 깊이 사이에 차이가 없는 것으로 나타났다(Fig. 3). 그러나 다른 연구는 토양수량이 깊이가 증가할수록 측면에서 유입되는 토양수에 의해 토양수량이 증가하는 것으로 보고하고 있다(David와 Gertner, 1987). 깊이별 토양수 pH도 차이가 없었으며, 이는 치환성 양이온함량이 낮은 이 지역의 토양의 완충능력이 낮기 때문으로서 토양수 pH는 깊이가 증가할수록 토양완충능력에 의해 토양수 pH 증가한다는 결과와는 대조적으로 나타났다(Baumler와 Zech, 1998). 토양수내 양분농도 또한 두 깊이간에 차이가 나타나지 않았다.

### 5. 토양수내 양분농도

토양수내 양분농도의 크기는 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> > Ca<sup>2+</sup> > Mg<sup>2+</sup> > NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 순으로 나타났다(Fig. 3). 이 지역 산림의 평균 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 농도는 3.60mg/L으로 우리나라 산림지역의 평균 토양수내 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 농도 1.78mg/L보다 높았으며(정용호 등, 1997), 토양수내 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 농도가 높게 나타난 것은 lysimeter를 설치하는 동안 발생된 토양교란에 의해 질산화작용이 활발하게 발생하였거나(Shepard 등, 1990), 임목이 벌채된 지역에서 식생에 의한 질소의 흡수가 낮아 토양수내 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 농도가 상승되었을 가능성, 질산화작용이 일반적으로 가장 활발한 여름동안 주로 토양수가 채취되어 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 농도가 높게 나왔을 가능성이 있다. 그러나 Ca<sup>2+</sup>과 Mg<sup>2+</sup>의 경우 이 지역 산림의 평균 농도는 1.7mg/L, 0.5mg/L으로서

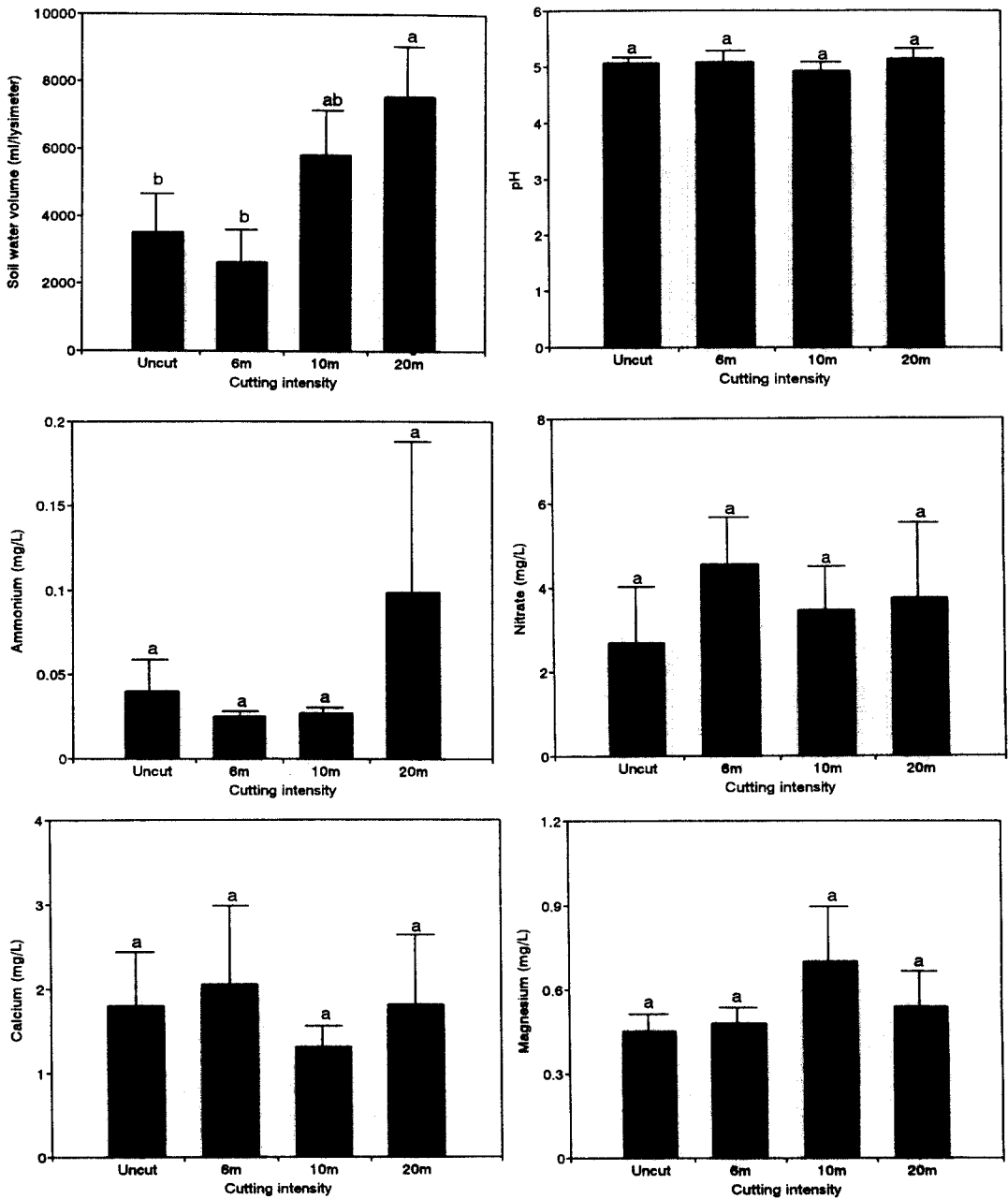


Fig. 2. Volume weighted pH and ion concentrations (means +1SE) in soil solution in various levels of cutting intensity in *P. rigida* plantations. Different letters above bars indicate significant difference at  $P < 0.05$ .

우리나라 산림의 토양수내 평균  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  농도 6.3mg/L, 1.4mg/L에 비해(정용호 등, 1997) 낮은 값을 보이고 있다. 또한  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ 과  $NO_3^-$  농도 사이에는 유의적인 정의 상관관계가

( $r=0.58\sim0.61$ ) 나타나(Table 2) 토양수내  $NO_3^-$ 의 용탈과 함께  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ 도 함께 이동하고 있음을 시사한다.  $NH_4^+$ 는 평균 농도가 0.04mg/L로서 다른 양분농도에 의해 현저히 낮게 나타났

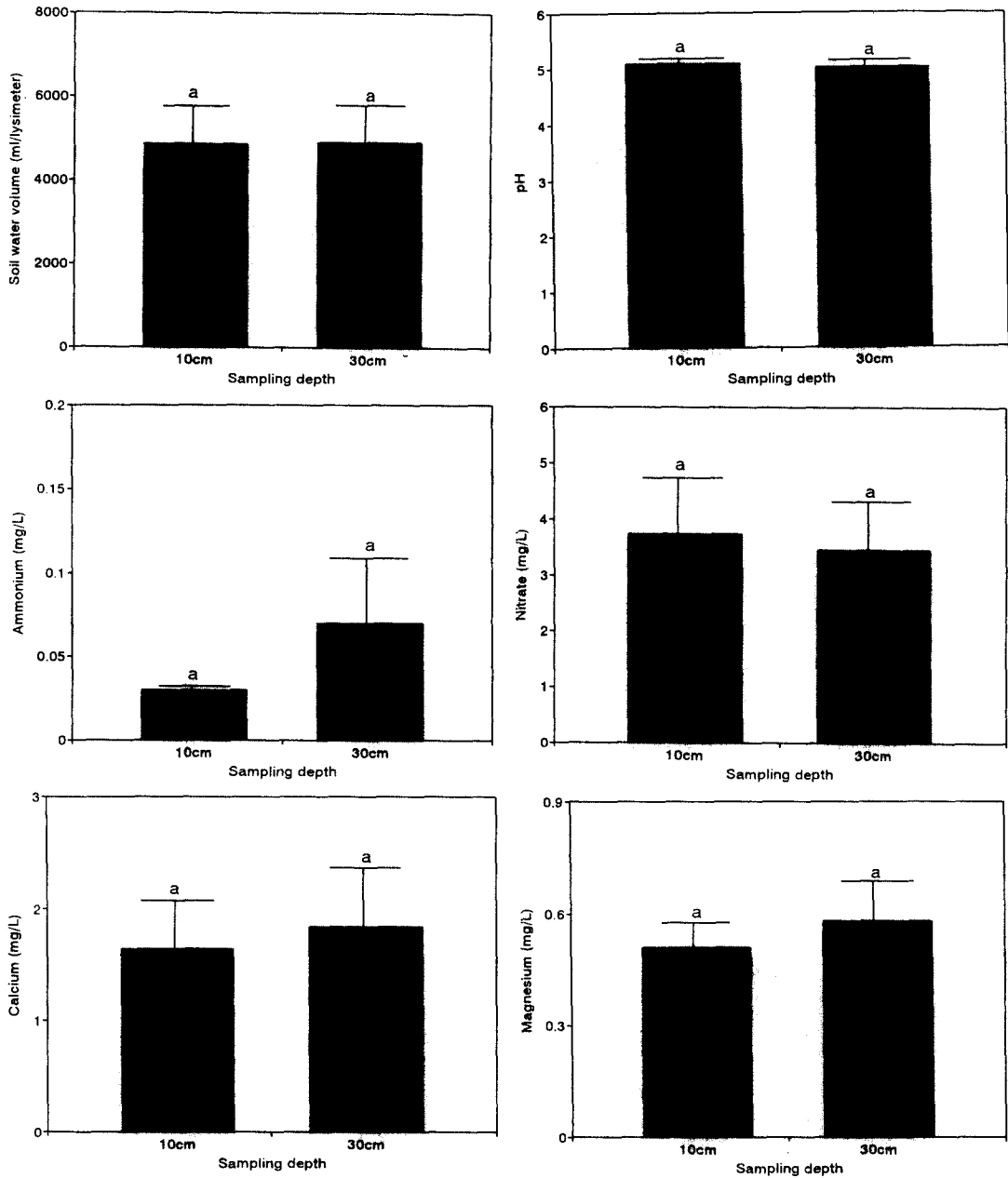


Fig. 3. Volume weighted pH and ion concentrations (means + 1SE) in soil solution in sampling depth in *P. rigida* plantations. Different letters above bars indicate significant difference at  $P < 0.05$ .

으며 이는 식생에 의한 흡수가 발생하였거나 엽 내 양분농도가 낮아 C/N 율이 높은 유기물층의 발달을 가지는 리기다소나무임분에서 미생물에 의한 질소의 부동화(nitrogen immobilization)가 크게 나타났을 가능성, 질산화작용이 급속히 발생

하여  $\text{NO}_3^-$ 으로 산화되었을 가능성, 점토같은 토양입자나 유기물 등에 흡착되었을 가능성 등을 고려할 수 있다.

**결 론**

리기다소나무조림지를 대상으로 벌채수준 및 시료 채취시기가 토양수내 이온농도에 미치는 영향을 조사한 결과 채취시기에 따른 이온농도 변화는 강수유입형태에 의해 차이가 있는 것으로 나타났으나 벌채수준별 이온농도는 뚜렷한 변화를 보이지 않았다. 이는 현재 조사된 벌채구의 크기나 완충지역을 가지는 벌채수준이 토양수내 이온농도의 변화에 영향 줄 정도가 아니거나, 본 조사가 벌채 약 5개월 후 시작되어 아직까지 벌채로부터 발생될 수 있는 환경요인의 변화 크지 않기 때문 일 수 있다. 비록 토양수내 양분농도는 벌채수준간에 큰 차이는 없었지만 벌채가 가장 크게 실시된 지역의 경우(20m×50m 대상개별처리구) 토양수 증가가 관찰되어 토양수를 통하여 용탈될 수 있는 양분총량이 다른 벌채처리구에 비해 높게 나타날 가능성도 있다.

**인 용 문 헌**

1. 민진홍·우보명. 1995. 테다소나무림과 소나무림에서의 수관통과우량, 수간유하우량 및 차단손실우량. 한국임학회지 84 : 502-516.
2. 박재현·우보명. 1997. 산림유역내 강수로부터 계류수질에 미치는 영향인자 분석. -pH, 용존산소, 전기전도도-. 한국임학회지 86 : 489-501.
3. 산림청. 1994. 임업통계연보. 536pp.
4. 산림청. 1995. 산림입지조사요령. 86pp.
5. 이돈구·김갑태. 1997. 경기도 광주지방 잣나무림, 낙엽송림 및 참나무림에서 수관통과우, 수간류 및 차단손실. 한국임학회지 86 : 200-207.
6. 정용호·원형규·김경하·박재현·유정환. 1997. 전기전도도가 산림유역내 계류수와 토양수질에 미치는 영향. 산림과학논문집 55 : 125-137.
7. Baeumler, R. and W. Zech. 1998. Soil solution chemistry and impact of forest thinning in mountain forests in the Bavarian Alps. For. Ecol. and Manage. 108 : 231-238.
8. David, M.B. and G.Z. Gertner. 1987. Sources of variation in soil solution collected by tension plate lysimeters. Can. J. For. Res. 17 : 190-193.
9. Ingerslev, M. 1997. Effects of liming and fertilization on growth, soil chemistry and soil water chemistry in a Norway spruce plantation on a nutrient-poor soil in Denmark. For. Ecol. and Manage. 92 : 55-66.
10. Jemison Jr, J.M. and R.H. Fox. 1992. Estimation of zero-tension pan lysimeter collection efficiency. Soil Sci. 154 : 85-94.
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. Mono. 40 : 23-47.
12. Rustard, L.E., I.J. Fernandez, R.D. Fuller, M.B. David, S.C. Nodvin and W.A. Halteman. 1993. Soil solution response to acidic deposition in a northern hardwood forest. Agriculture, Ecosystem and Environment 47 : 117-134.
13. SAS Institute Inc. 1989. SAS/STAT user's guide. 4th ed. Vol. 2. SAS Institute Inc., Cary N.C. 846pp.
14. Shepard, J.P., M.J. Mitchell, T.J. Scott and C.T. Driscoll. 1990. Soil solution chemistry of an Adirondack Spodosol : lysimetry and N dynamics. Can. J. For. Res. 20 : 818-824.