

# 질소와 인 시비가 경기도 양평지역 리기다소나무와 낙엽송 조림지의 지상부 생체량과 양분농도에 미치는 영향<sup>1</sup>

이임균<sup>2</sup> · 손요환<sup>3</sup> · 오정수<sup>2</sup>

## Effects of Nitrogen and Phosphorus Fertilization on Aboveground Biomass and Distribution of Nutrient Content of *Pinus rigida* and *Larix kaempferi* Plantations in Yangpyeong area, Gyeonggi Province<sup>1</sup>

Im Kyun Lee<sup>2</sup>, Yowhan Son<sup>3</sup>, and Jeong Soo Oh<sup>2</sup>

### 요 약

본 연구는 질소 및 인 시비가 지상부 생체량과 양분의 분포에 미치는 영향을 조사하기 위하여 경기도 양평지역의 유사한 토양 위에 조성되어 있는 41년생 리기다소나무와 낙엽송 조림지를 대상으로 실시되었다. 시비는 대조구(control), 저농도 시비구 [200N kg/ha+25P kg/ha(LNP)], 고농도 시비구 [400N kg/ha+50P kg/ha(HNP)] 등 세 수준으로 처리하였으며, 본 연구로부터 얻어진 결과는 다음과 같다.

리기다소나무와 낙엽송 임분의 총 지상부 생체량은 대조구가 149, 145ton/ha, LNP 처리구가 166, 149ton/ha, HNP 처리구가 152, 170ton/ha이었으며, 수종간에는 유의적인 차이가 나타나지 않았다. 리기다소나무와 낙엽송 임분 모두 지상부 각 부위별 생체량은 수간목부>가지>수피>엽의 순으로 분포되어 있었다. 하층식생의 생체량은 리기다소나무림이 1,111kg/ha, 그리고 낙엽송림이 907kg/ha이었으며, 이는 전체 지상부 생체량의 0.6~0.7%에 해당되는 것이었다. 일반적으로 수체내 모든 양분들의(N, P, K, Ca, Mg) 농도는 리기다소나무에 비해 낙엽송이 높았는데, 그 이유는 낙엽성 침엽수가 상록성 침엽수에 비해 높은 양분 흡수력을 가지고 있기 때문으로 판단된다. 리기다소나무와 낙엽송 임분의 각 부위별 양분농도는 처리간에는 유의적인 차이가 나타나지 않은 반면, 수종간 각 부위간에는 고도의 유의적인 차이가 있는 것으로 나타났다. 또한 두 수종 모두 각 부위별 양분농도는 엽>가지>수피>수간목부의 순으로 감소되었다. 두 수종 모두 양분함량은 시비 처리구가 대조구에 비해 많았으며, 리기다소나무는 LNP 처리구에서 그리고 낙엽송은 HNP 처리구에서 가장 많았던 것으로 나타났다. 지상부 식생에 대한 총 양분함량은(N+P+K+Ca+Mg) 리기다소

1. 접수 2004년 5월 3일 Received on May 3, 2004.

2. 국립산림과학원 산림환경부 Department of Forest Environment, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea.

3. 고려대학교 환경생태공학부 Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea.

## 2 질소와 인 시비가 경기도 양평지역 리기다소나무와 낙엽송 조림지의 지상부 생체량과 양분농도에 미치는 영향

나무가 703kg/ha 그리고 낙엽송이 869kg/ha였다.

### ABSTRACT

Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on aboveground biomass and distribution of nutrient content in tree components were determined in adjacent 41-year-old plantations of *Pinus rigida* Miller and *Larix kaempferi* Gordon on a similar soil in Yangpyeong, Gyeonggi Province. Fertilizer was experimentally applied at the three levels [control(C), 200 N kg/ha+25 P kg/ha(LNP), and 400 N kg/ha+50 P kg/ha(HNP)] in June, 1996. The results obtained from this study were summarized as follows :

Total aboveground biomass of *P. rigida* and *L. kaempferi* stands was 149, 145ton/ha for control, 166, 149ton/ha for LNP, and 152, 170ton/ha for HNP, respectively, and did not differ between the tree species. Aboveground biomass of *P. rigida* and *L. kaempferi* plantations were distributed as follows : stemwood>branch>stembark>foliage. Biomass of understory vegetation was 1,111kg/ha for *P. rigida* and 907kg/ha for *L. kaempferi*, and comprised 0.6~0.7% of the total aboveground biomass of the plantations. The concentrations of all nutrients(N, P, K, Ca, Mg) were generally higher in *L. kaempferi* than in *P. rigida* because of high nutrient uptake characteristics of *Larix* spp. Nutrient concentrations in tree components of *P. rigida* and *L. kaempferi* plantations were not significantly different among treatments, whereas they were significantly different between species and among tree components. The nutrient concentration in tree components of both tree species decreased in order of foliage>branch>stembark>stemwood. The contents of all nutrients were higher in the fertilized plots than in the control plots, generally the highest in LNP for *P. rigida* and in HNP for *L. kaempferi*. Total nutrient(N+P+K+Ca+Mg) contents of aboveground biomass were 703kg/ha for *P. rigida* and 869kg/ha for *L. kaempferi*, respectively.

**keywords** : fertilization, aboveground biomass, *Pinus rigida*, *Larix kaempferi*, nutrient distribution.

### 서론

산림자원 관리의 주요한 목표 중의 하나는 생산성을 높이고 우량 목재를 생산하는데 있으며<sup>(8)</sup>, 이러한 산림생태계의 생산성을 보다 정확하게 추정하기 위한 수단으로 임목 생체량을 측정하고 있다. 임목의 생체량을 부위별로 혹은 층위별로 구분하여 측정하는 것은 해당 산림생태계의 물질 축적 유형과 특징을 파악하고 임분내 목재생산관리에 대한 중요한 정보를 제공한다는 면에서 중요하다. 또한 임목에 축적

된 양분량은 산림벌채 시 발생될 수 있는 임지 내 양분 손실량의 추정, 지위나 연령별 양분흡수 동태, 그리고 임목의 각 부위별 양분분포 상황을 비교적 정확하게 파악할 수 있게 하므로 매우 중요하다고 할 수 있다. 이와 같은 중요성 때문에 최근까지도 산림생태계의 구조와 수목의 물질생산량에 관한 연구는 산림 식생연구에 있어서 주요 연구 주제가 되고 있다<sup>(4,20,22)</sup>.

온대지역 침엽수림을 대상으로 한 최근의 시비실험은 주로 우점종들의 성장반응<sup>(17)</sup>과 체내 양분농도의 변화<sup>(14)</sup>, 비료의 지속기간과 같

은 비생물적인 생태계 구성요소들을 관찰하는 데<sup>(30)</sup> 집중되어 있다. 그러나 시비처리 후에 리기다소나무나 낙엽송 등의 상층목 뿐 아니라 해당 임지의 초본류나 관목류의 생장에 미치는 영향 등에 관련한 연구는 거의 없는 실정이며, 일반적으로 수관면적이 리기다소나무에 비해 작은 낙엽송 임지는 임관을 통과하는 광선의 양이 많아 하층식생의 종류가 다양하고 그 생체량도 많은 것으로 알려지고 있으나<sup>(7)</sup> 실제 이를 연구한 결과는 그리 많지 않다.

임분내 상층 및 하층식생들의 체내 무기양분 농도는 몇 개의 상호적인 요인들에 의해 영향을 받기 쉽다<sup>(16)</sup>. 그 중 가장 영향을 크게 받는 것은 토양내 무기양분의 유효도이며<sup>(15)</sup>, 이 밖에도 토양내 양분들간, 흡수하는 과정에서 양분들간의 복잡한 상호관계, 그리고 특정 수종들이 특정 양분들을 선택해서 흡수하는 것 등<sup>(44)</sup> 여러 요인들이 있다. 또한 토양의 화학적 특성들과는 별개로 식물에 의한 무기물의 흡수에 영향을 미치는 광도나 토양수분 등을 포함하는 몇몇 환경인자들도 상층 및 하층식생들의 무기양분 농도에 영향을 미치는 요인 중 하나이다<sup>(35)</sup>.

시비 효과는 상층식생과 하층식생 모두에게서 나타나는 것으로 알려져 있으나 식생층간에 양분 경쟁을 다룬 연구는 그리 많지 않은 실정이다. 질소비료의 시비가 하층식생 조직내의 질소 농도를 증가시켰다는 몇몇 결과들이 보고된 바 있는데, 그 중 Stanek 등<sup>(38)</sup>은 요소비료를 시비한 후 하층식생인 bracken fern과 salal 모두의 질소함량이 유의적으로 증가하였음을 보고한 바 있으며, 하층식생의 질소비료에 대한 회수율은 토양내 질소함량이 매우 낮은 지역에서는 13% 정도를 보이기도 하지만<sup>(13)</sup>, Mead와 Pritchett<sup>(29)</sup>는 대부분의 지역에서는 적용된 시비량의 5% 이하의 회수율을 보인다고 하였다.

본 연구의 목적은 유사한 입지에 식재된 리기다소나무와 낙엽송 임분을 대상으로 시비처리를 통해 인위적으로 임지내 유효태 양분상

태를 조절한 후, 각 임분에서 성장하고 있는 상층과 하층식생을 대상으로 각각의 생체량을 추정하여 각 층위별 체내 양분흡수량을 산출하고, 또한 이를 근거로 토양내 양분흡수 경쟁의 정도를 파악하는 것이다.

## 재료 및 방법

### 1. 조사지 개황

본 연구는 경기도 양평군 양동면 고송리에 소재한 고려대학교 생명환경과학대학 부속 연습림(북위 37°30', 동경 127°42', 평균 해발고 176 m)의 41년생 리기다소나무와 낙엽송 임분에서 수행되었다(Figure 1). 이들 임분은 1956년 참나무류 천연림을 개별한 후 두 수종 모두 ha당 3,000본이 식재되었으며, 지금까지 3회에 걸쳐 간벌이 실시되어 현재는 리기다소나무가 ha당 약 667본 그리고 낙엽송이 ha당 약 578본 정도가 생육하고 있다.

각 수종별 평균 흉고단면적은 리기다소나무가 64.8m<sup>2</sup>/ha, 낙엽송이 55.5m<sup>2</sup>/ha이었으며<sup>(3)</sup>, 임관의 울폐도는 낙엽송에 비해 리기다소나무 임분에서 더 높은 것으로 나타났다. 본 연구를 위하여 토양, 방위, 경사, 고도 등의 입지여건과 수령 및 과거 시업과정이 동일하고 서로 인접하여 있는 41년생 리기다소나무와 낙엽송 임분을 선정하여 수종별로 6개의 15m×15m 정방형 시험구를(총 12개) 설정하였다. 조사지의 식생은 리기다소나무와 낙엽송이 상층임관을 구성하고 있으며, 하층식생으로는 졸참나무(*Quercus serrata*), 갈참나무(*Q. aliena*), 개웃나무(*Rhus trichocarpa*), 산초나무(*Zanthoxylum schinifolium*), 산벚나무(*Prunus sargentii*), 싸리(*Lespedeza bicolor*), 신갈나무(*Q. mongolica*), 붉나무(*R. chinensis*), 산딸기(*Rubus crataegifolius*) 등이 관목의 형태로 나타났다. 또한 초본류로는 밀나물(*Smilax riparia* var. *ussuriensis*), 망초(*Erigeron canadensis*), 말나리(*Lilium distichum*), 산개고사리(*Athyrium*

4 질소와 인 시비가 경기도 양평지역 리기다소나무와 낙엽송 조림지의 지상부 생체량과 양분농도에 미치는 영향

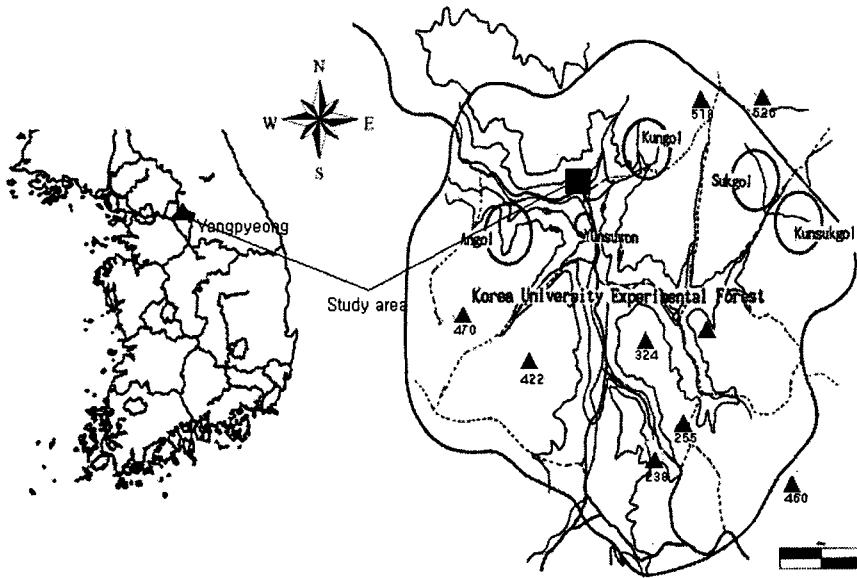


Figure 1. Location of the study sites(■) in Yangpyeong, Gyeonggi Province, Korea.

*vidalii*), 파리풀(*Phryma leptostachya* var. *asiatica*), 양지꽃(*Potentilla fragarioides* var. *major*), 주름조개풀(*Oplismenus undulatifolius*), 풀솜대(*Smilacina japonica*), 새(*Arundinella hirta*) 등이 출현하였다.

조사지 임분특성 및 토양의 물리·화학적 성질을 Table 1에 나타내었다.

시비처리 직전에 측정한 임분 내 평균 수고 및 흉고직경은 각각 리기다소나무가  $9.8 \pm 1.45\text{m}$ 와  $24.2 \pm 0.90\text{cm}$ 이었으며, 낙엽송이  $11.3 \pm 2.31\text{m}$ 와  $24.9 \pm 0.93\text{cm}$ 이었다. 또한 본 조사지의 지형은 대체적으로 완경사 지역이 폭넓게 위치하고 있으며, 토양은 변성암을 모암으로 하는 갈색약전 산림토양형(B<sub>2</sub>)으로 분류되었다. 토성은 리기다소나무 임분이 모래 23.9%, 미사 59.5%, 점토 16.6%, 그리고 낙엽송 임분이 모래 20.9%, 미사 62.4%, 점토 16.7%로 미국 농무성법에 의한 분류 결과, 두 임지 모두 미사질 양토(silt loam)로 분류되었다.

지난 20년간 조사지역의 연평균 강우량은 1,287mm, 연평균 기온은 10.6°C였으며<sup>(1)</sup>, 1996년과 1997년의 연평균 강우량과 연평균 기온은

각각 1,089mm와 10.5°C, 그리고 1,437mm와 11.5°C로 1997년의 기상상태는 1996년에 비해 강우량이 많았고 기온 또한 높게 나타났다.

## 2. 시비처리

임목생장이 시작되기 전인 1996년 3월 23일에 각 수종별로 3처리 2반복의 split plot design으로 시비처리를 하였으며, 처리구간의 상호작용을 최소화하기 위하여 시비처리구간의 간격을 10m 이상으로 하였다. 시비처리 직전에 하층식생에 의한 비료성분의 손실을 막기 위하여 15m×15m의 조사구내 리기다소나무와 낙엽송을 제외한 모든 교목 및 관목류 등을 제거하였다<sup>(31)</sup>. 시비는 수종별로 3처리 즉 대조구(control), 저농도 시비구(LNP, 200 Nkg/ha+25 Pkg/ha), 고농도 시비구(HNP, 400 Nkg/ha+50 Pkg/ha) 등으로 나누어 처리하였으며, 각 처리구별로 2개씩의 반복을 두었다. 본 연구에 사용된 질소비료는 ammonium sulfate((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), 인 비료는 superphosphate(Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> · H<sub>2</sub>O)가 각각 사용되었고 손으로 직접 임지에 골고루 살포하였다.

**Table 1.** Characteristics of stands and mineral soils(0~20cm depth, n=5) for *Pinus rigida* and *Larix kaempferi* plantations in Yangpyeong, Gyeonggi Province. Values are averages of plots, with standard errors of the mean in parentheses.

	<i>Pinus rigida</i>	<i>Larix kaempferi</i>
General stand characteristics		
Latitude (N)	37° 30'1396	37° 30'1741
Longitude (E)	127° 42'1546	127° 42'1555
Above sea level (m)	166~178	171~186
Tree age (years)	41	41
Tree height (m)	9.8 (1.45)	11.3 (2.31)
DBH (cm)	24.22 (0.90)	24.88 (0.93)
Forest floor		
dry mass (kg/ha)	24,333 (290)	10,600 (390)
N (kg/ha)	121.67 (4.48)	97.84 (3.82)
P (kg/ha)	8.27 (1.41)	6.68 (0.98)
Soil characteristics		
Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )*	1.08 (0.06)	0.95 (0.04)
Texture	Silt loam	Silt loam
Depth of A horizon (cm)	25.8	21.4
pH (1 : 5 H <sub>2</sub> O)	4.97 (0.07)	4.92 (0.03)
Total N (%)	0.23 (0.02)	0.35 (0.05)
Available-P (ppm)	13.67 (0.41)	15.30 (0.81)
Organic matter (%)	8.96 (0.20)	10.10 (0.32)
Exchangeable Cations (me/100g)		
K	0.17 (0.02)	0.17 (0.02)
Ca	1.44 (0.07)	1.24 (0.06)
Mg	0.43 (0.03)	0.40 (0.03)
Na	0.09 (0.01)	0.11 (0.01)
Total base (me/100g)	2.13 (0.05)	1.96 (0.09)
Base saturation (%)	14.30 (1.03)	12.42 (0.12)

\* : Adopted from Kim *et al.* (1996)

### 3. 임분의 현존량 및 양분량

시비처리 직전인 1996년 3월 리기다소나무와 낙엽송 임분의 처리구내에 있는 조사목들의 흉고직경을 측정하였다. 시비처리 후 3년이 경과된 1999년 8월 각 처리구별로 모든 임목의 흉고직경을 재조사하여 Kim 등<sup>(25)</sup>에 의해 이미 조제된 흉고직경을 독립변수로 하는 임목 부위별 현존량 추정 회귀식을 이용하여 상층식생에 대한 현존 생체량을 각 부위별로

추정하였다. 그리고 체내 각 부위별 양분농도를 측정하기 위하여 처리구별로 우세목과 준우세목 그리고 열세목을 각각 2본씩 총 6본을 선정하여 엽, 가지, 목질부, 그리고 수피 등을 채취하였다. 수체 내 양분함량 측정시료는 70℃로 건조하여 분쇄기로 분쇄한 후 40 mesh 체를 통과한 것에 대하여 질소, 인, 칼륨, 칼슘, 그리고 마그네슘 등의 농도를 분석하였으며<sup>(5)</sup>, 각 임분에서 얻어진 임목부위별 현존량에 각 부위별 양분농도를 곱하여 임분내 부위

6 질소와 인 시비가 경기도 양평지역 리기다소나무와 낙엽송 조림지의 지상부 생체량과 양분농도에 미치는 영향

별 양분함량을 구하였다.

또한 하층식생의 현존 생체량을 추정하기 위하여 관목류와 초본류의 생체량이 최성기인 1999년 8월 초순<sup>(22)</sup>에 15m×15m 방형구내 2m×2m의 소형 방형구를 설치하고 소형 방형구내에서 주 임목인 리기다소나무와 낙엽송을 제외한 모든 관목류와 초본류를 지표면과 가장 가까운 부위에서 절단하였다. 모든 시료를 비닐봉투에 넣어 밀봉하여 실험실로 운반하고 실험실에서 목본과 초본을 수종별로 분류하고 건중량을 측정하였으며, 분쇄기로 분쇄하여 양분분석을 실시하였다. 또한 하층식생의 질소와 인 양분축적량을 구하기 위해 관목류(주로 갈참나무, 졸참나무, 산벚나무, 개웃나무 등)의 잎과 당년생 가지내의 양분 총량과 지상부 초본류의 체내 양분의 총량을 구하였다.

시료를 채취하였다. 방형구간의 차이를 검정한 결과 통계적으로 유의한 차이가 없어 방형구를 별도의 독립변수로 취급하지는 않았고 2개의 방형구 내에 있는 총 12본의 시료채취목을 반복으로 취급하여 자료를 분석하였다. 모든 자료에 대한 통계분석 전에 자료가 정규분포를 보이는지를 SAS<sup>(36)</sup>의 univariate로 검정하였다.

지상부 생체량 및 양분농도 그리고 양분축적량에 대하여 수중간, 계절간, 그리고 시비처리간의 차이를 ANOVA를 이용하여 검정하였으며, 통계적으로 차이가 유의한 경우 Duncan's test를 이용하여 평균값을 비교하였고 모든 통계처리는 Statistical Analysis System<sup>(36)</sup>을 사용하였으며, 유의성 여부의 판단기준은 p=0.05였다.

결과 및 고찰

4. 통계분석

1. 지상부 구성부위별 생체량

실험설계에서 매 처리구마다 2개씩의 방형구를 설치하였고 매 방형구에서 지상부 생체량 조사시에는 6본의 시료채취목을 선정하여 각각

연구대상 임분에서 상층임관을 구성하고 있는 주임목인 리기다소나무와 낙엽송의 구성부위별 생체량과 분배비율을 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Aboveground biomass(ton/ha) of the tree components for *P. rigida* and *L. kaempferi* plantations. Values in the parentheses are proportion of components.

Species	Treatment	Stemwood	Stembark	Branch	Foliage	Total
<i>P. rigida</i>	Control	104.40b (70.06)	12.30b (8.26)	24.52a (16.46)	7.77b (5.22)	148.99b (100)
	LNP	115.79a (69.94)	13.65a (8.25)	27.45a (16.58)	8.65a (5.23)	165.54a (100)
	HNP	106.74b (70.04)	12.58b (8.26)	25.11a (16.48)	7.95b (5.22)	152.38b (100)
<i>L. kaempferi</i>	Control	107.61b (74.39)	9.87b (6.83)	23.99b (16.58)	3.18b (2.20)	144.65b (100)
	LNP	111.00b (74.40)	10.09b (6.76)	24.82b (16.64)	3.28b (2.20)	149.19b (100)
	HNP	126.76a (74.42)	11.11a (6.52)	28.70a (16.85)	3.77a (2.21)	170.34a (100)

Values followed by the same letter among treatments are not significantly different at p=0.05.

본 연구에서 추정된 지상부위 생체량은 수간목부( $p < 0.05$ )와 수피( $p < 0.05$ ), 그리고 엽( $p < 0.01$ )에서 수종간에 유의적인 차이가 있는 것으로 나타났다. 또한 리기다소나무의 경우 가지부위를 제외한 수간목부와 수피 그리고 엽 등에서 모두 처리간에 유의적인 차이를 나타내었으며( $p < 0.01$ ), 낙엽송은 모든 부위(수간목부, 수피, 가지,  $p < 0.01$ ; 엽,  $p < 0.05$ )에서 처리간에 유의적인 차이를 나타내었다. 수종별 지상부 총 생체량은 리기다소나무의 경우 대조구가 149ton/ha, LNP 처리구가 166ton/ha, HNP 처리구가 152ton/ha, 그리고 낙엽송의 경우에는 대조구가 145ton/ha, LNP 처리구가 149ton/ha, HNP 처리구가 170ton/ha로 리기다소나무는 LNP 처리구가( $p < 0.01$ ) 그리고 낙엽송은 HNP 처리구( $p < 0.01$ )의 지상부위 생체량이 타 처리구에 비해 각각 많았던 것으로 나타났다.

수종별 처리구 평균 생체량은 리기다소나무가 156ton/ha 그리고 낙엽송이 155ton/ha로 두 수종간에 생체량 차이는 없는 것으로 나타났다( $p > 0.05$ ). 일반적으로 동일 임지에 소나무류와 낙엽송이 식재되었을 경우 낙엽송이 소나무류에 비해 임목 생체량이 상대적으로 많았다는 이돈구와 김갑태<sup>(8)</sup>의 결과와 동령의 *Larix decidua*가 *Pinus strobus*, *Pinus resinosa*, *Picea abies* 등보다 지상부 임목 생체량이 월등히 많음을 보고한 바 있는 Gower와 Son<sup>(20)</sup>의 결과와는 일치하지 않았다.

이와 같이 본 조사지에 있어서 두 수종간에 생체량 차이가 나지 않았던 이유는 리기다소나무 임분이 낙엽송 임분에 비해 수피와 엽 생체량의 증가율은 상대적으로 높았으나 상층식생 총 생체량의 85~90%를 차지하는 수간목부와 가지의 경우 낙엽송 임분 중 특히 HNP 처리구에서 1996년에 비해 생체량이 약 10% 가량 증가되었으며, 또한 대조구와 LNP 처리구에서는 리기다소나무 임분에 비해 생체량이 적었으나 HNP 처리구에서는 리기다소나무 HNP 처리구에 비해 약 18ton/ha 가량 많았기 때문인 것으로

판단된다.

본 연구에서 추정된 지상부위 리기다소나무의 생체량 155.64ton/ha는 경기도 광릉지역 31년생 리기다소나무림을 대상으로 조사된 170.2ton/ha<sup>(23)</sup>과 강원도 홍천의 36년생 소나무림을 대상으로 조사된 198.8ton/ha<sup>(9)</sup>, 그리고 미국 위스컨신주의 28년생 스트로브스소나무와 레지노사소나무림을 대상으로 조사한 결과인 174.5ton/ha와 163.8ton/ha<sup>(20)</sup>에 비해서는 낮은 결과이다. 그러나 같은 조사지 내에서 37년생 리기다소나무림을 대상으로 조사된 138.2ton/ha<sup>(4)</sup>에 비해서는 높은 결과를 나타내었다.

낙엽송의 지상부위 생체량 154.73ton/ha는 영국과 미국에서 측정된 28년생과 46년생 *L. decidua*의 165.6ton/ha와 189.4ton/ha<sup>(21)</sup>, Gower와 Son<sup>(20)</sup>에 의해 조사된 28년생 *L. decidua*의 191.0ton/ha, 김갑덕과 이경재<sup>(2)</sup>의 63년생 낙엽송의 173.1ton/ha, 경기도 광주에서 조사된 이돈구와 김갑태<sup>(8)</sup>의 29년생 낙엽송의 171.1ton/ha에 비해서는 낮은 결과를 나타내었다. 그러나 일본의 28년생 낙엽송의 99.8ton/ha<sup>(26)</sup>, 임경빈 등<sup>(11)</sup>의 15년생 63.7ton/ha, Kim<sup>(23)</sup>의 31년생 87.2ton/ha, 같은 임지를 대상으로 조사된 김 등<sup>(4)</sup>의 37년생 127.3ton/ha와 인접지역을 대상으로 조사된 손요환 등<sup>(7)</sup>의 35년생 140.0ton/ha 등에 비해서는 높은 결과이나 각 수종별로 임령이나 지위 그리고 ha당 임목본수를 감안하면 큰 차이는 없는 것으로 판단된다.

또한 시비처리 후 3년이 경과한 다음 조사된 본 연구결과를 시비처리 이전에 조사되었던 각 처리구별 생체량<sup>(10)</sup>과 비교하여 생체량 증가율을 구한 결과, 리기다소나무는 대조구가 8.5%, LNP 처리구가 10.7%, HNP 처리구가 11.1% 증가한 것으로 나타났으며, 낙엽송은 대조구가 7.2%, LNP 처리구가 9.1% 그리고 HNP 처리구가 9.4%가 증가하여 두 수종 모두 시비처리구, 그 중 HNP 처리구의 생체량 증가율이 가장 높은 것으로 나타났다.

이와 같은 수종별 생체량 증가율의 순위를

8 질소와 인 시비가 경기도 양평지역 리기다소나무와 낙엽송 조림지의 지상부 생체량과 양분농도에 미치는 영향

위에서 언급한 처리구별 지상부위 생체량과 비교하면 낙엽송은 그 순위가 일치하였으나, 리기다소나무의 경우 생체량은 LNP 처리구가 많았는데 비해 생체량 증가율은 HNP 처리구가 높은 것으로 나타나 약간 다른 경향을 보였다. 따라서 본 연구과 같이 흉고직경을 독립변수로 하여 조사구별 생체량을 구하는 경우에는 조사시점의 절대치를 수종별로 혹은 처리구별로 비교하기에 앞서, 이전에 정확히 조사된 흉고직경 자료를 토대로 현 시점의 수종별 혹은 처리구별 생체량의 증가율을 구하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 또한 지상부위 생체량을 부위별로 구분한 결과, 두 수종 모두 수간목부 ( $p<0.05$ )와 수피( $p<0.05$ ), 그리고 ( $p<0.01$ )에서 수종간에 유의적인 차이가 있는 것으로 나타났으나 처리간에는 통계적인 차이가 나타나지 않았다. 수종별로는 리기다소나무가 수간목부 70.0%, 수피 8.3%, 가지 16.5%, 그리고 엽 5.2%였으며, 낙엽송은 수간목부 74.4%, 수피 6.7%, 가지 16.7%, 그리고 엽 2.2%였다. 이와 같은 결과는 광릉의 31년생 리기다소나무와 낙엽송 인공조림지를 대상으로 조사된 리기다소나무 수간목부 69%, 수피 11%, 가지 16%, 엽 4%, 낙엽송 수간목부 77%, 수피 4%, 가지 15%, 그리고 엽 4%<sup>(23)</sup>와 조사지 인근 광주지역의 29년생 낙엽송 인공조림지를 대상으로 조사된 수간목부 77.6%, 가지 15.7%, 엽 6.7%의 결과<sup>(8)</sup>, 그리고 백운산지역 천연임분을 대상

으로 조사된 수간목부 66.5%, 수피 8.5%, 가지 22.5%, 엽 2.5% 등의 결과<sup>(6)</sup>에 비해 큰 차이가 없었다.

결과적으로 두 수종간에 부위별 생체량 뿐만 아니라 총 생체량에 대한 부위별 비율 또한 차이가 있는 것으로 나타났는데, 이는 생체량은 수종이나 지위 그리고 입지적인 조건에 따라 다르며, 임목 각 부위별 상대적 분포 또한 다르다고 한 Prescott 등<sup>(34)</sup>의 결과와 일치하는 것이다. 생체량의 구성성분별 순위는 두 수종 모두 수간목부가 70% 이상을 차지하여 가장 높고 가지>수피>잎 등의 순서로 감소하였으며, 이와 같은 경향은 리기다소나무<sup>(4,23)</sup>와 낙엽송<sup>(4,7,8)</sup>은 물론 다른 여러 수종에서도 일반적으로 관찰되고 있다<sup>(26)</sup>.

한편, 각 임분에서 주 임목인 리기다소나무와 낙엽송 이외의 하층식생을 대상으로 생체량을 조사한 결과는 Table 3과 같다.

리기다소나무 임분의 하층식생 생체량은 목본과 초본을 합하여 대조구 1,111.6kg/ha, LNP 처리구 1,119.2kg/ha 그리고 HNP 처리구 1,103.5kg/ha이었다. 그리고 낙엽송 임분은 대조구 879.6kg/ha, LNP 처리구 919.6kg/ha 그리고 HNP 처리구 921.4kg/ha 등으로 리기다소나무는 LNP 처리구가, 그리고 낙엽송은 HNP 처리구가 하층식생의 생체량이 가장 많은 것으로 나타났으나 두 수종 모두 처리간에는 차이가 없었다( $p>0.05$ ). 또한 수종별 임분내 하층식생

**Table 3.** Comparisons of understory biomass (kg/ha) after fertilization treatments in *P. rigida* and *L. kaempferi* plantations. Values in the parentheses are proportion of components.

Species	Treatment	Shrub	Herb	Total
<i>P. rigida</i>	Control	1,004.1 (90.3)	107.5 (9.7)	1,111.6 (100)
	LNP	1,001.0 (89.4)	118.2 (10.6)	1,119.2 (100)
	HNP	981.7 (89.0)	121.8 (11.0)	1,103.5 (100)
<i>L. kaempferi</i>	Control	695.2 (79.0)	184.3 (21.0)	879.5 (100)
	LNP	746.8 (81.2)	172.8 (18.8)	919.6 (100)
	HNP	742.1 (80.5)	179.3 (19.5)	921.4 (100)



의 생체량은 리기다소나무가 처리구간 평균 1,111.4kg/ha, 그리고 낙엽송이 906.9kg/ha를 나타내어 리기다소나무 임분에서의 하층식생 생체량이 낙엽송에 비해 더 많았다( $p < 0.05$ ). 이는 리기다소나무 임분을 통과하는 광선량이 낙엽송 임분에 비해 상대적으로 많아 하층식생의 종류가 다양하고 성장 또한 활발하기 때문인 것으로 판단된다.

수종별 하층식생의 생체량에 대한 본 연구 결과는 180년생 *Abies amabilis* 임분을 대상으로 조사된 1,870kg/ha<sup>(42)</sup>에 비해서는 낮은 것이며, 30년생 라디아타소나무 임분을 대상으로 조사된 455kg/ha<sup>(40)</sup>과 폰데로사소나무림을 대상으로 초안(NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>)을 50kg/ha로 시비한 후 조사된 결과인 850kg/ha<sup>(35)</sup>에 비해서는 두 수종 모두 높은 결과이다.

한편, 하층식생의 생체량이 지상부위 총 생체량에 차지하는 비율은 리기다소나무의 대조구가 0.8%, LNP 처리구가 0.7%, HNP 처리구가 0.7%를 차지하였으며, 낙엽송은 대조구가 0.6%, LNP 처리구가 0.6%, HNP 처리구가 0.5%를 차지하여 두 수종 모두 처리간에 유사한 결과를 나타내었다. 이와 같은 결과는 하층식생이 지상부위 총 생체량에 차지하는 비율은 <2% 정도라고 보고한 Kimmins 등<sup>(26)</sup>의 결과와, *L. decidua* 하에서의 <1%<sup>(37)</sup>, 인접지역에서 측정된 낙엽송 임분 하에서의 1%<sup>(4)</sup>와 인공조림지에서의 0.6%<sup>(7)</sup> 등과 유사한 결과이다.

또한 하층식생을 구성하고 있는 초본식물이 각 임분내 하층식생의 총 생체량에서 차지하는 비율은 리기다소나무의 경우 대조구가 9.7%, LNP 처리구가 10.6%, HNP 처리구가 11.1%였다. 또한 낙엽송은 대조구가 21.0%, LNP 처리구가 18.8%, HNP 처리구가 19.5%로 두 수종 모두 처리구간에 차이는 없었으나, 낙엽송 임분은 처리구간 평균 19.7%로 리기다소나무 임분의 평균 10.4%에 비해 하층식생에서 초본류의 구성비율이 약 2배 가량 높은 결과를 나타내었다( $p < 0.001$ ). 본 연구의 리기다소나무에 관

한 결과를 다른 연구와 직접적으로 비교하기는 어려우나 낙엽송의 경우 인접지역을 대상으로 조사된 18.2%<sup>(7)</sup>와 유사한 결과이다. 또한 리기다소나무는 시비처리구가 대조구에 비해 초본식물이 차지하는 비율이 높았으나 낙엽송 임분에서는 이와는 반대의 경향을 나타내어 이러한 처리구간의 차이가 시비로 인한 결과인지는 보다 장기적인 연구를 통해 밝힐 수 있을 것으로 생각된다.

## 2. 지상부 체내 부위별 양분량

상층임관을 구성하고 있는 리기다소나무와 낙엽송의 체내 부위별 양분농도를 조사한 결과 (Table 4), 두 수종 모두 처리간에는 유의적인 차이가 나타나지 않았으나 수종간 임목 구성 부위간에는 고도의 유의성이 있는 것으로 나타났다( $p < 0.01$ ).

임목 부위별 질소 농도는 두 수종 모두 엽>가지>수피>수간목부의 순이었고, 시비처리구가 대조구에 비해 높은 질소 농도를 나타내었으나 처리간에 유의한 차이는 없었다. 또한 수간목부와 가지에서는 수종간에 유의차가 없었으나 수피와 엽에서는 유의적인 차이가 나타났다( $p < 0.05$ ). 본 연구에서 나타난 리기다소나무의 부위별 질소 농도는 Walker와 Gessel<sup>(43)</sup>이 *Pseudotsuga menziesii* 임분을 대상으로 보고한 결과인 엽 1.40%, 가지 0.36%, 수피 0.29%, 수간목부 0.08%와 유사하였으며, 낙엽송의 경우에는 경기도 광릉의 31년생 낙엽송 인공조림지를 대상으로 조사된 엽 1.70%, 가지 0.58%, 수피 0.36%, 수간목부 0.145%<sup>(23)</sup>와 유사하였다.

임목 각 부위별 인 농도는 두 수종 모두 엽>가지>수피>수간목부의 순이고, 가지부위에서는 대조구가 시비처리구에 비해 높았는데 비해 다른 부위에서는 시비처리구가 대조구에 비해 높았으나 처리간 그리고 수종간에 유의한 차이는 없었다. 본 연구에서 나타난 임목 부위별

10 질소와 인 시비가 경기도 양평지역 리기다소나무와 낙엽송 조림지의 지상부 생체량과 양분농도에 미치는 영향

**Table 4.** Nutrient concentrations(% of dry weight) of tree components for *P. rigida*(Pr) and *L. kaempferi* (Ll) plantations. One standard error of the mean is in parenthesis.

Component	Treat ment	N		P		K		Ca		Mg	
		Pr	Ll	Pr	Ll	Pr	Ll	Pr	Ll	Pr	Ll
Stemwood	Control	0.077 (0.004)	0.106 (0.016)	0.013 (0.004)	0.013 (0.002)	0.020 (0.003)	0.040 (0.004)	0.047 (0.011)	0.078 (0.013)	0.027 (0.008)	0.039 (0.004)
	LNP	0.085 (0.001)	0.120 (0.006)	0.019 (0.005)	0.016 (0.002)	0.023 (0.001)	0.044 (0.002)	0.049 (0.012)	0.076 (0.003)	0.026 (0.002)	0.034 (0.002)
	HNP	0.079 (0.004)	0.115 (0.012)	0.014 (0.002)	0.020 (0.003)	0.021 (0.005)	0.043 (0.008)	0.047 (0.004)	0.081 (0.003)	0.031 (0.004)	0.041 (0.003)
Stembark	Control	0.181 (0.014)	0.406 (0.013)	0.028 (0.006)	0.038 (0.006)	0.025 (0.004)	0.063 (0.007)	0.151 (0.006)	0.238 (0.029)	0.054 (0.004)	0.066 (0.003)
	LNP	0.193 (0.017)	0.424 (0.018)	0.032 (0.005)	0.041 (0.006)	0.030 (0.002)	0.067 (0.009)	0.162 (0.008)	0.243 (0.007)	0.049 (0.001)	0.062 (0.005)
	HNP	0.204 (0.019)	0.425 (0.001)	0.031 (0.005)	0.042 (0.001)	0.030 (0.003)	0.063 (0.003)	0.154 (0.001)	0.250 (0.010)	0.058 (0.004)	0.055 (0.005)
Branch	Control	0.416 (0.026)	0.586 (0.044)	0.046 (0.006)	0.051 (0.008)	0.166 (0.024)	0.246 (0.024)	0.200 (0.006)	0.318 (0.003)	0.052 (0.001)	0.087 (0.005)
	LNP	0.427 (0.034)	0.606 (0.038)	0.043 (0.003)	0.054 (0.005)	0.183 (0.012)	0.294 (0.020)	0.205 (0.012)	0.320 (0.003)	0.051 (0.005)	0.098 (0.013)
	HNP	0.411 (0.028)	0.599 (0.027)	0.045 (0.012)	0.057 (0.009)	0.191 (0.018)	0.283 (0.023)	0.210 (0.009)	0.324 (0.026)	0.054 (0.009)	0.098 (0.001)
Foliage	Control	1.431 (0.112)	1.908 (0.103)	0.082 (0.005)	0.096 (0.003)	0.431 (0.032)	0.494 (0.046)	0.234 (0.014)	0.499 (0.024)	0.157 (0.009)	0.191 (0.007)
	LNP	1.509 (0.024)	1.915 (0.059)	0.105 (0.015)	0.110 (0.004)	0.497 (0.089)	0.517 (0.010)	0.247 (0.015)	0.498 (0.002)	0.161 (0.006)	0.215 (0.004)
	HNP	1.593 (0.090)	1.924 (0.080)	0.095 (0.012)	0.116 (0.015)	0.514 (0.070)	0.509 (0.016)	0.232 (0.015)	0.501 (0.008)	0.155 (0.007)	0.203 (0.011)

인 농도는 Walker와 Gessel<sup>(43)</sup>의 결과에 비해 대체로 낮은 경향을 나타내었으나 Kim<sup>(23)</sup>의 결과에 비해서는 유사한 결과를 나타내었다.

각 임목 부위별 칼륨농도는 두 수종 모두 엽>가지>수피>수간목부의 순이고, 모든 부위에서 시비처리구가 대조구에 비해 높은 농도를 나타내었으나 처리간에 유의적인 차이는 없었다. 또한 수간목부와 엽에서는 수종간에 차이가 나타나지 않았으나 수피와 가지에서는 수종간에 유의적인 차이가 있는 것으로 나타났다(p<0.05).

또한 임목 부위별 칼슘농도는 모든 부위에서 시비처리구가 대조구에 비해 높은 칼슘 농도를 나타내었으나 처리간에 유의적인 차이는 없었다. 그러나 칼슘농도는 모든 부위에서 수종간에 유의적인 차이가 있는 것으로 나타났다(수간목부, 수피, 가지 : p<0.05, 엽 : p<0.01). 그리고 임목 부위별 평균 마그네슘 농도는 리기다소나무의 경우 엽>가지=수피>수간목부의 순으로, 그리고 낙엽송의 경우는 엽>가지>수피>수간목부의 순으로 낮아졌으며, 리기다소나무는 모든 부위에서 시비처리구가 대조구에

비해 높았다. 낙엽송은 수피에서는 대조구가 시비처리구에 비해 마그네슘 농도가 높았던 반면, 다른 부위에서는 시비처리구가 대조구보다 높은 결과를 나타내었으나 다른 양분들

과 마찬가지로 처리간에 유의적인 차이는 없는 것으로 나타났다.

이와 같이 본 연구에서 나타난 리기다소나무와 낙엽송의 엽내 양분 농도는 *P. menziesii* 임

**Table 5.** Nutrient contents(kg/ha) of the tree components for *P. rigida*(Pr) and *L. kaempferi*(Ll) plantations. Values in the parentheses are proportion of tree components. Values followed by the same letter among treatments are not significantly different at p=0.05.

Component	Treatment	N		P		K		Ca		Mg	
		Pr	Ll	Pr	Ll	Pr	Ll	Pr	Ll	Pr	Ll
Stem wood	Control	80.4b (25.5)	114.1c (32.1)	13.6b (39.2)	14.0c (42.4)	20.9b (21.3)	43.0c (34.7)	49.1b (36.4)	83.9b (42.1)	28.2b (47.2)	42.0b (55.6)
	LNP	98.4a (26.4)	133.2b (34.2)	22.0a (46.6)	17.8b (45.6)	26.6a (21.5)	48.8b (33.6)	56.7a (36.3)	84.4b (41.2)	30.1b (46.5)	37.7c (50.1)
	HNP	84.3b (24.8)	145.8a (33.3)	14.9b (39.5)	25.4a (50.0)	22.4b (19.5)	54.5a (33.7)	50.2b (35.7)	102.7a (42.4)	33.1a (49.9)	52.0a (55.4)
Stem bark	Control	22.3b (7.0)	40.1b (11.3)	3.4b (9.9)	3.8b (11.4)	3.1b (3.1)	6.2b (5.0)	18.6b (13.8)	23.5b (11.8)	6.6b (11.1)	6.5a (8.6)
	LNP	26.4a (7.1)	42.8b (11.0)	4.4a (9.2)	4.1b (10.6)	4.1a (3.3)	6.8a (4.6)	22.1a (14.1)	24.5b (12.0)	6.7b (10.3)	6.3a (8.3)
	HNP	25.7a (7.6)	47.2a (10.8)	4.0a (10.6)	4.7a (9.2)	3.8a (3.3)	7.0a (4.3)	19.4b (13.8)	27.8a (11.5)	7.3a (11.0)	6.1a (6.5)
Branch	Control	102.0b (32.3)	140.6c (39.6)	11.3a (32.5)	12.2c (37.0)	40.7b (41.5)	59.0c (47.6)	49.0c (36.4)	76.3b (38.2)	12.8b (21.3)	20.9c (27.7)
	LNP	117.2a (31.5)	150.4b (38.6)	11.8a (25.0)	13.4b (34.4)	50.2a (40.5)	73.0b (50.1)	56.3a (36.0)	79.4b (38.8)	14.0a (21.6)	24.3b (32.3)
	HNP	103.2b (30.4)	171.9a (39.3)	11.3a (29.9)	16.4a (32.2)	48.0a (41.7)	81.2a (50.2)	52.7b (37.5)	92.9a (38.3)	13.6a (20.5)	28.1a (30.0)
Foliage	Control	111.2c (35.2)	60.7b (17.1)	6.4c (18.4)	3.1b (9.2)	33.5c (34.1)	15.7c (12.7)	18.2b (13.5)	15.9b (8.0)	12.2b (20.4)	6.1c (8.1)
	LNP	130.5a (35.0)	62.8b (16.1)	9.1a (19.2)	3.6b (9.3)	43.0a (34.7)	17.0b (11.7)	21.4a (13.7)	16.3b (8.0)	13.9a (21.5)	7.1b (9.4)
	HNP	126.6b (37.3)	72.5a (16.6)	7.6b (20.1)	4.4a (8.6)	40.9b (35.5)	19.2a (11.9)	18.4b (13.1)	18.9a (7.8)	12.3b (18.6)	7.7a (8.2)
Total	Control	315.9c (100%)	355.4c (100%)	34.7b (100%)	33.0b (100%)	98.2c (100%)	124.0c (100%)	134.9b (100%)	199.6b (100%)	59.8b (100%)	75.4b (100%)
	LNP	372.5a (100%)	389.2b (100%)	47.3a (100%)	38.9b (100%)	124.0a (100%)	145.5b (100%)	156.5a (100%)	204.6b (100%)	64.7a (100%)	75.4b (100%)
	HNP	339.8b (100%)	437.4a (100%)	37.8b (100%)	50.8a (100%)	115.0b (100%)	161.9a (100%)	140.7b (100%)	242.2a (100%)	66.3a (100%)	93.9a (100%)

## 12 질소와 인 시비가 경기도 양평지역 리기다소나무와 낙엽송 조림지의 지상부 생체량과 양분농도에 미치는 영향

분을 대상으로 엽내 적정 양분 농도를 보고한 Ballard와 Carter<sup>(12)</sup>의 결과와 일반 식물체의 적정 엽내 양분 농도를 보고한 Epstein<sup>(19)</sup>의 결과, 그리고 임분상태가 양호한 경기도 광릉의 31년생 리기다소나무와 낙엽송 인공조림지를 대상으로 조사된 Kim<sup>(23)</sup>의 결과들에 비해 질소를 제외한 나머지 양분들은 대체로 낮은 수준이었으나, van den Burg<sup>(41)</sup> 그리고 Lea와 Ballard<sup>(27)</sup> 등의 결과와는 양분별 농도범위가 거의 일치하였다. 따라서 본 조사지의 경우 토양내 양분상태는 엽내 양분농도가 안정되어 있는 타 지역과 매우 유사하였다.

두 수종 모두 부위별 양분농도는 엽>가지>수피>수간목부의 순이었으며, 이는 21년생 *Larix gmelinii*를 대상으로 조사된 Liu<sup>(28)</sup>의 결과와 일치되었다. 또한 양분별로는 엽과 가지의 경우, 두 수종 모두 N>K>Ca>Mg>P의 순이었으나, 수간목부와 수피에서는 리기다소나무가 N>Ca>Mg>K>P 그리고 낙엽송에서는 N>Ca>K>Mg>P의 순을 나타내었는데, 이는 경기도 광릉에서 31년생 리기다소나무와 낙엽송 임분을 대상으로 조사된 Kim<sup>(23)</sup>의 결과와 일치되는 것이다.

한편, 리기다소나무와 낙엽송의 각 부위별 생체량과 체내 양분농도를 이용하여 임목내 질소, 인, 칼륨, 칼슘, 마그네슘 등의 양분 총량을 구한 결과는 Table 5와 같다. 각 부위별 양분함량은 모든 양분에서 리기다소나무와 낙엽송 임분 모두 처리간에 유의적인 차이를 나타내었으며( $p<0.01$ ), 인을 제외한 질소, 칼륨, 칼슘, 그리고 마그네슘함량에서는 수종간에 유의적인 차이를 나타내었다( $p<0.01$ ). 모든 양분에서 리기다소나무 임분에서는 LNP 처리구가, 그리고 낙엽송 임분에서는 HNP 처리구가 양분함량이 가장 많았던 것으로 나타났다. 또한 리기다소나무 임분에서의 처리구 평균 양분함량은 질소 342.7kg/ha, 인 39.9kg/ha, 칼륨 112.4kg/ha, 칼슘 144.0kg/ha, 그리고 마그네슘 63.6kg/ha이었으며, 낙엽송 임분에서의 처리구 평균 양분함

량은 질소 394.0kg/ha, 인 40.9kg/ha, 칼륨 143.8kg/ha, 칼슘 215.5kg/ha, 그리고 마그네슘 81.6kg/ha이었다.

위의 양분들을 합한 수종별 총 양분함량은 리기다소나무 임분이 702.6kg/ha 그리고 낙엽송 임분이 875.8kg/ha으로 낙엽송 임분이 리기다소나무 임분에 비해 1.3배 가량 양분함량이 더 많은 것으로 나타났다( $p<0.01$ ). 이와 같은 본 연구의 임목내 양분량은 관악산에서 41년생 리기다소나무와 26년생 낙엽송을 대상으로 조사된 Kim과 Lee<sup>(24)</sup>의 결과에 비해 리기다소나무는 유사한 결과를 나타내었으나 낙엽송은 대체로 낮은 경향을 나타내었다. 또한 두 수종 모두 온대지역의 침엽수들을 대상으로 조사된 Cole과 Rapp<sup>(18)</sup>의 결과, 즉 질소 479kg/ha, 인 68kg/ha, 칼륨 340kg/ha, 칼슘 480kg/ha, 마그네슘 65kg/ha에 비해서는 유사한 결과를 나타내었다. 또한 본 연구에서 두 수종 모두 시비처리구에서 대조구에 비해 양분함량이 높게 나타난 것은  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 를 시비한 결과, 체내 양분량이 대조구에 비해 상당히 높았다는 Tagliavini 등<sup>(39)</sup>의 결과와 일치되는 것이다.

리기다소나무와 낙엽송 모두 양분 총량은 N>Ca>K>Mg>P의 순이었는데, 이는 같은 수종을 대상으로 조사된 Kim<sup>(23)</sup>의 결과와 일치하는 것이다. 또한 부위별 양분축적량은 질소의 경우 리기다소나무가 엽>가지>수간목부>수피 그리고 낙엽송은 가지>수간목부>엽>수피의 순이었으며, 칼륨과 칼슘은 두 수종 모두 가지>수간목부>엽>수피, 그리고 인과 마그네슘은 수간목부>가지>엽>수피의 순이었다. 이와 같은 결과는 Kim<sup>(23)</sup>이 31년생 리기다소나무와 낙엽송을 대상으로 조사된 결과, 즉 질소나 칼륨의 경우 가지>수간목부>엽>수피의 순이었으며, 인과 마그네슘은 수간목부>가지>엽>수피의 순이었다는 결과와 대체로 일치하는 것이다. 그러나 같은 임지를 대상으로 1995년에 조사된 김종성 등<sup>(4)</sup>의 결과, 즉 리기다소나무의 경우 질소의 농도는 엽>가지>수피>수간

목부의 순이었으며, 인의 농도는 엽>수피>가지>수간목부의 순이었으며, 낙엽송의 경우 질소와 인의 농도는 엽>수피>가지>수간목부의 순이었다는 결과와는 일치되지 않았다.

한편, 엽이 지상부 총 생체량에서 차지하는 비율은 리기다소나무와 낙엽송에서 각각 5.2%와 2.2%로 매우 낮았으나(Table 2), 엽내 질소와 인의 양분축적량은 리기다소나무에서 각각 35.8%와 19.3%, 그리고 낙엽송에서 각각 16.6%와 9.0%로 비록 생체량의 비율은 낮았으나 엽내 양분의 농도가 높아 엽이 지상부 양분의 주 저장부위를 보이고 있다<sup>(4)</sup>. 이와는 대조적으로 수간목부는 지상부 임목 생체량에서 차지하는 비율이 리기다소나무와 낙엽송에서 각각 70.0%와 74.4%로 매우 높았으나, 임목내 질소와 인의 양분축적량은 리기다소나무에서 25.9%와 42.2%, 그리고 낙엽송에서 각각 33.3%와 46.5%로 엽이나 가지 등의 부위에 비해 양분축적량이 비교적 낮은 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 같은 임지를 대상으로 조사된 김종성 등<sup>(4)</sup>과 광릉의 31년생 리기다소나무와 낙엽송

조림지를 대상으로 조사된 Kim<sup>(23)</sup>의 결과와 유사함을 보이고 있다.

조사구내 하층식생들을 대상으로 관목과 초본으로 구분하여 양분분석을 실시한 결과(Table 6), 질소와 인, 마그네슘에서는 관목과 초본 모두 수종간, 처리간에 유의차가 없었으며, 칼륨에서는 리기다소나무의 관목과 초본에서 처리간에 유의적인 차이가 나타났(p<0.01). 또한 칼슘에서는 낙엽송의 관목에서 처리간에 유의적인 차이가 나타났으나(p<0.05), 리기다소나무의 관목과 초본 그리고 낙엽송의 초본에서는 처리간에 유의차가 없었다.

처리간 평균 질소 농도는 리기다소나무의 관목과 초본이 각각 1.96%와 1.98%를, 그리고 낙엽송의 관목과 초본이 각각 2.26%와 2.06%를 나타내어 수종별로는 낙엽송 임분이 리기다소나무 임분에 비해 질소 농도가 높았으며, 식생별로는 리기다소나무 임분의 경우 관목과 초본이 비슷한 경향을 보인 반면 낙엽송 임분에서는 관목이 초본에 비해 높은 질소 농도를 나타내었다. 이와 같은 낙엽송 임분에서의 하

**Table 6.** Nutrient concentrations(% of dry weight) of understory vegetations in *P. rigida* and *L. kaempferi* plantations. Values in the parentheses are standard errors of the means(n=5). Values followed by the same letter among treatments are not significantly different at p=0.05.

Species	Treatment	N		P		K		Ca		Mg	
		Shrub	Herb	Shrub	Herb	Shrub	Herb	Shrub	Herb	Shrub	Herb
<i>Pinus rigida</i>	Control	1.978a (0.042)	1.845a (0.031)	0.224a (0.005)	0.174a (0.004)	2.315b (0.213)	1.977b (0.134)	1.125b (0.085)	0.469a (0.005)	0.414a (0.025)	0.184a (0.006)
	LNP	1.878a (0.051)	2.115a (0.046)	0.231a (0.013)	0.197a (0.011)	3.115a (0.174)	2.412a (0.177)	1.314a (0.108)	0.502a (0.012)	0.433a (0.018)	0.195a (0.008)
	HNP	2.012a (0.102)	1.978a (0.097)	0.247a (0.024)	0.189a (0.041)	3.474a (0.155)	2.431a (0.085)	1.339a (0.226)	0.478a (0.021)	0.428a (0.009)	0.199a (0.014)
<i>Larix kaempferi</i>	Control	2.219a (0.114)	1.978a (0.085)	0.214a (0.011)	0.187a (0.019)	2.565b (0.246)	2.525a (0.109)	1.221a (0.174)	0.502a (0.021)	0.406a (0.052)	0.194a (0.006)
	LNP	2.245a (0.038)	2.102a (0.024)	0.231a (0.009)	0.197a (0.005)	3.145a (0.587)	2.974a (0.059)	1.331a (0.097)	0.498a (0.017)	0.442a (0.015)	0.179a (0.012)
	HNP	2.312a (0.088)	2.097a (0.071)	0.241a (0.003)	0.189a (0.012)	2.978ab (0.499)	2.785a (0.152)	1.402a (0.044)	0.514a (0.034)	0.439a (0.031)	0.201a (0.052)

14 질소와 인 시비가 경기도 양평지역 리기다소나무와 낙엽송 조림지의 지상부 생체량과 양분농도에 미치는 영향

층식생에 대한 층위별 질소 농도 결과는 21년 생 *L. gmelinii*림에서 조사된 결과<sup>(28)</sup>인 관목류 2.1% 그리고 초본류 2.2%와 유사한 경향을 나타내었으며, 본 연구에서 상층식생인 리기다소나무의 엽내 질소 농도는 1.51%, 그리고 낙엽송은 1.92%를 나타내어 임지내 관목류와 초본류에 비해 낮은 결과를 나타내었는데, 이와 같은 결과 또한 Liu<sup>(28)</sup>의 결과와 일치되는 것이다.

처리간 평균 인 농도는 리기다소나무와 낙엽송의 관목과 초본이 모두 각각 0.23%와 0.19%를 나타내어 수종별로는 관목과 초본 모두 차이가 없었으며, 식생별로는 두 수종 모두 관목이 초본에 비해 높은 인 농도를 나타내었다. 그리고 처리간 평균 칼륨 농도는 리기다소나무의 관목과 초본이 각각 2.97%와 2.27%를, 그리고 낙엽송의 관목과 초본이 각각 2.90%와 2.76%를 나타내어 수종별로는 관목의 경우 리기다소나무가 초본의 경우 낙엽송 임분에서 칼륨 농도가 높았으며, 식생별로는 두 수종 모두 관목이 초본에 비해 높은 칼륨 농도를 나타내었다.

한편, 처리간 평균 칼슘 농도는 리기다소나무의 관목과 초본이 각각 1.26%와 0.48%를, 그리고 낙엽송의 관목과 초본이 각각 1.32%와 0.50%를 나타내어 수종별로는 낙엽송이 리기다소나무에 비해 칼슘 농도가 높았으며, 식생

별로는 두 수종 모두 관목이 초본에 비해 높은 칼슘 농도를 나타내었다. 또한 처리간 평균 마그네슘 농도는 리기다소나무의 관목과 초본이 각각 0.43%와 0.19%를, 그리고 낙엽송의 관목과 초본이 각각 0.43%와 0.19%를 나타내어 수종별로는 관목과 초본 모두 차이가 없었으며, 식생별로는 두 수종 모두 관목이 초본에 비해 높은 마그네슘 농도를 나타내었다.

또한 각 처리구별로 하층식생내 양분 총량을 구한 결과(Table 7), 수종간 평균 질소량은 리기다소나무가 21.5kg/ha 그리고 낙엽송이 22.6kg/ha, 인은 리기다소나무가 2.5kg/ha 그리고 낙엽송이 2.3kg/ha, 칼륨은 리기다소나무가 31.6kg/ha 그리고 낙엽송이 29.2kg/ha, 칼슘은 리기다소나무가 13.0kg/ha 그리고 낙엽송이 12.0kg/ha, 마그네슘은 리기다소나무가 4.4kg/ha 그리고 낙엽송이 4.0kg/ha이었다. 인과 칼륨, 칼슘 그리고 마그네슘량은 리기다소나무 임분에서 더 많은 것으로 나타났으며, 질소량은 낙엽송 임분에서 더 많은 것으로 나타났다. 이와 같은 리기다소나무와 낙엽송 임분의 하층식생내 질소와 인의 양분함량은 북미의 소나무림을 대상으로 조사된 Powers와 van Cleve<sup>(33)</sup>의 결과와 대체로 유사하였다.

리기다소나무 하층식생의 처리구별 양분 총량은 대조구에서 65.3kg/ha, LNP 처리구에서 75.3kg/ha 그리고 HNP 처리구에서 78.0kg/ha이

Table 7. Nutrient contents(kg/ha) of understory vegetations in *P. rigida* and *L. kaempferi* plantations.

Species	Treatment	N			P			K			Ca			Mg		
		Shrub	Herb	Total	Shrub	Herb	Total	Shrub	Herb	Total	Shrub	Herb	Total	Shrub	Herb	Total
<i>Pinus rigida</i>	Control	19.69	1.98	21.67	2.23	0.19	2.42	23.04	2.13	25.17	11.20	0.50	11.7	4.12	0.20	4.32
	LNP	18.57	2.50	21.67	2.28	0.23	2.42	30.80	2.85	25.17	12.99	0.59	11.7	4.28	0.23	4.32
	HNP	19.19	2.41	21.67	2.36	0.23	2.42	33.14	2.96	25.17	12.77	0.58	11.7	4.08	0.24	4.32
<i>Larix kaempferi</i>	Control	17.99	3.65	21.64	1.74	0.35	2.09	20.80	4.66	25.46	9.90	0.93	10.83	3.29	0.36	3.65
	LNP	18.82	3.63	21.64	1.94	0.34	2.09	26.37	5.14	25.46	11.16	0.86	10.83	3.71	0.31	3.65
	HNP	20.24	3.48	21.64	2.11	0.31	2.09	26.08	4.62	25.46	12.28	0.85	10.83	3.84	0.33	3.65

었으며, 낙엽송의 경우에는 대조구에서 63.7 kg/ha, LNP 처리구에서 72.3kg/ha 그리고 HNP 처리구에서 74.2kg/ha 등이었다. 두 수종 모두 시비농도가 증가될수록 하층식생의 양분 총량 또한 증가되는 경향을 보였으나( $p < 0.01$ ), 수종 간에는 차이가 없었다. 하층식생의 양분 총량은 두 수종 모두  $K > N > Ca > Mg > P$ 의 순이었으며, 이와 같은 결과는 상층식생의 양분 총량 순서인  $N > Ca > K > Mg > P$ 와는 약간 다른 양상을 보였다.

Liu<sup>(28)</sup>는 초본류에 의해 흡수되는 총 질소량의 95% 정도가 낙엽에 의해 토양으로 환원되어 초본류가 임분내 질소 순환 속도를 빠르게 하여 천연림보다는 인공림에서의 질소 순환에 중요한 역할을 하고 있다고 한 바 있다. 따라서 본 조사지의 경우 하층식생의 총 생체량은 리기다소나무림에서 더 많았으나, 이 중 초본류의 생체량은 낙엽송 임분에서 두 배 가량 많아 낙엽송 임분에서는 앞으로 초본류에 의한 양분 순환 속도 증가의 효과가 있을 것으로 기대된다.

하층식생의 양분 총량 중 초본이 차지하는 비율은 양분별로 다른 경향을 보였는데 질소는 리기다소나무 10.7%, 낙엽송 15.9%, 인은 리기다소나무 8.6%, 낙엽송 14.8%, 칼륨은 리기다소나무 8.4%, 낙엽송은 16.6%, 칼슘은 리기다소나무 4.3%, 낙엽송 7.4%, 그리고 마그네슘은 리기다소나무 5.1%. 낙엽송이 8.5%로 리기다소나무임분에 비해 낙엽송임분 내 하층식생에서 초본이 차지하는 양분량이 더 많은 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 초본류의 양분농도가 수종간에 차이가 없었던 반면에, 하층식생의 생체량 중 초본류가 차지하는 비율이 리기다소나무의 경우 9.4%인데 비해 낙엽송 임분에서는 19.7%로 리기다소나무 임분에 비해 초본류의 비율이 매우 높는데 그 원인이 있는 것으로 판단된다.

한편, 리기다소나무와 낙엽송 임분 내 하층

식생의 양분 총량이 지상부 양분 총량에서 차지하는 비율을 조사한 결과, 질소는 6.3, 5.7%, 인은 6.3, 5.6%, 칼륨은 28.2, 20.3%, 칼슘은 9.0, 5.6%, 그리고 마그네슘은 7.0, 4.8%로 두 수종 모두 하층식생이 지상부의 양분 총량에 차지하는 비율이 칼륨에서 가장 큰 것으로 나타났다. 또한 본 조사지의 연간 총 낙엽량 중 하층식생이 차지하는 비율이 리기다소나무 임분에서 0.8% 그리고 낙엽송 임분에서 1.0%로 매우 낮았으나<sup>(10)</sup>, 양분 총량에서 차지하는 비율은 4.8~28.2%로 그 기여율이 낙엽량에 비해 상당히 큰 것으로 나타났다. 이러한 양상을 보이는 이유는 수목의 낙엽에 함유되어 있는 양분들의 함량보다 초본류나 관목류에 포함되어 있는 양분들의 함량이 크기 때문으로 판단되며, 이와 같은 본 연구결과는 초본류나 관목류가 임분내 전체 양분함량에 기여하는 정도는 낙엽생산량에 기여하는 정도보다 상당히 크다고 한 Perala와 Alban<sup>(32)</sup>의 결과와 일치되는 것이다.

## 결론

이상과 같은 결과들을 종합하여 얻은 결론은 다음과 같다. 두 수종 모두 총 지상부 생체량은 시비처리구가 대조구에 비해 높았으며, 시비처리 수준이 증가될수록 생체량 또한 증가되는 경향을 나타내었다. 또한 지상부 각 부위별 양분농도는 처리구간에 유의적인 차이가 나타나지 않았으나 양분 총량에 있어서는 시비처리구가 대조구에 비해 많이 증가된 양분에 의한 임목 성장효과가 클 것으로 기대된다. 또한, 두 수종 모두 지상부 생체량의 30% 정도를 차지하고 있는 엽, 가지, 수피 등은 생체량의 70% 이상을 차지하는 수간목부에 비해 저장 양분이 많아 산림 수확시 양분손실을 최소화하기 위해 임지 내에 남겨 두는 작업법을 택하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

## 인용문헌

1. 기상청. 1992. 한국의 기후표. 800p.
2. 김갑덕, 이경재. 1983. 63년생 낙엽송 임분의 물질 생산량에 관한 연구. 서울대 연습림보고 19 : 30-36.
3. 김종성. 1995. 양평지역 리기다소나무, 낙엽송, 졸참나무림의 물질생산과 질소와 인의 분포에 관한 연구. 고려대학교 박사학위논문.
4. 김종성, 손요환, 임주훈, 김진수. 1996. 리기다소나무와 낙엽송 인공조림지의 지상부 생체량, 질소와 인의 분포 및 낙엽에 관한 연구. 한국임학회지 85(3) : 416-425.
5. 농업기술연구소. 1988. 토양화학분석법 : 토양, 식물체, 토양미생물. 농촌진흥청 농업기술연구소. 450p.
6. 박인협. 1985. 백운산지역 천연림생태계의 삼림구조 및 물질생산에 관한 연구. 서울대학교 박사학위논문.
7. 손요환, 황재홍, 이임균, 김현우, 김진수, 임주훈. 1995. 양평연습림 기초생태연구 II. 낙엽송 인공조림지의 생체량 추정 및 하층식생 구조분석. 고려대학교 자연자원논집 35(1) : 15-20.
8. 이돈구, 김갑태. 1997. 경기도 광주지방에서 자라는 참나무류, 낙엽송 및 잣나무의 수형 특성과 물질분배. 한국임학회지 86(2) : 208-213.
9. 이수욱, 박관화. 1986. 한국의 소나무 및 참나무 천연림생태계의 Biomass 및 유기energy 생산에 관한 연구. 임산에너지 6(1) : 46-58.
10. 이임균. 2000. 질소 및 인 시비가 리기다소나무와 낙엽송 인공조림지의 양분순환에 미치는 영향-경기도 양평지역을 중심으로-. 고려대학교 박사학위논문.
11. 임경빈, 김갑덕, 이경재, 김용식, 박인협, 김갑태, 이승호, 권태호, 박효섭. 1981. 15년생 낙엽송 임분의 성장 및 생산구조. 한국임산에너지학회지 1 : 4-12.
12. Ballard, T. M. and R. E. Carter. 1986. Evaluating forest stand nutrient status. B.C. Min. For., Victoria, Land Manage. Rep.20. 60p.
13. Björkman, E., G. Lunderburg, and H. Nömmik. 1967. Distribution and balance of <sup>15</sup>N labelled fertilizer nitrogen applied to young trees (*Pinus sylvestris* L.). Studia Forestalia Suecica 48.
14. Brinkman, J. A. and R. E. J. Boerner. 1994. Nitrogen fertilization effects on foliar nutrient dynamics and autumnal resorption in maidenhair tree(*Ginkgo biloba* L.). J. Plant Nutrition 17 : 433-443.
15. Brunet, J. 1994. Interacting effects of pH, aluminum and base cations on growth and mineral composition of the woodland grasses *Bromus benekenii* and *Hordelymus europaeus*. Plant Soil 161 : 157-166.
16. Chapin, F. S. III. 1980. The mineral nutrition of wild plants. Ann. Rev. Ecol. Syst. 11 : 233-260.
17. Chapin, F. S. III. and R.A. Kedrowski. 1983. Seasonal changes in nitrogen and phosphorus fractions and autumnal retranslocation in evergreen and deciduous taiga trees. Ecology 64 : 376-391.
18. Cole, D. W. and M. Rapp. 1981. Elemental cycling in forest ecosystems. In : Reichle, D.E.(ed.). Dynamic Properties of Forest Ecosystems. International Biological Programme 23. Cambridge University Press, London. pp.341-409.
19. Epstein, E. 1972. Mineral Nutrition of Plants : Principles and Perspectives. Willey and Sons, New York. 412p.
20. 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 : 1959-1966.
21. Gower, S. T., P. B. Reich, and Y. Son. 1993. Canopy dynamics and aboveground production of five tree species with different leaf longevities. Tree Physiology 12 : 327-345.
  22. Grier, C. C., K. A. Vogt, M. R. Keyes, and R. L. Edmonds. 1981. Biomass distribution and above- and below-ground production in young and mature *Abies amabilis* zone ecosystems of the western cascades. Can. J. For. Res. 11 : 155-167.
  23. Kim, C. S. 1999. Aboveground nutrient distribution in pitch pine(*Pinus rigida*) and Japanese larch(*Larix leptolepis*) plantations. J. Kor. For. Soc. 88(2) : 266-272.
  24. Kim, D. Y. and D. K. Lee. 1998. Distribution of ecosystem nutrients in pitch pine, korean pine, larch and oak forests in Kyunggi-do, Korea. Proceedings of IUFRO Inter-Divisional Seoul Conference. Oct. 12-17. Seoul, Korea. p.330-339.
  25. Kim, J. S., Y. Son, and Z. S. Kim. 1995. Allometry and canopy of *Pinus rigida*, *Larix leptolepis*, and *Quercus serrata* stands in Yangpyeong area. J. Kor. For. Soc. 84(2) : 186-197.
  26. Kimmins, J. P., D. Binkley, L. Chatarpaul, and J. DeCatanaro. 1985. Biogeochemistry of temperate forest ecosystems : literature on inventories and dynamics of biomass and nutrients. Information Report PI-X-47 E/F, Canadian Forestry Service, Petawawa National Forestry Institute, Chalk River, Ontario. 227p.
  27. Lea, A. and R. Ballard. 1982. Relative effectiveness of nutrient concentrations in living foliage and needle fall at predicting response of loblolly pine to N and fertilization. Can. J. For. Res. 12 : 713-717.
  28. Liu, S. R. 1995. Nitrogen cycling and dynamic analysis of man made larch forest ecosystem. Plant Soil 168/169 : 391-397.
  29. Mead, D. J. and W. L. Pritchett. 1975. Fertilizer movement in slash pine ecosystem. I. Uptake of nitrogen and phosphorus and nitrogen movement in the soil. Plant Soil 43 : 451-465.
  30. Morrison, I. K. and N. W. Foster. 1977. Fate of urea fertilizer added to a boreal forest *Pinus banksiana* Lamb. stand. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 41 : 441-448.
  31. Park, G. S. 1997. Effects of fertilization and clone on aboveground and soil carbon storages in a willow(*Salix* spp.) bioenergy plantation. J. Kor. For. Soc. 86(2) : 177-185.
  32. Perala, D. A. and D. H. Alban. 1982. Biomass, nutrient distribution and litterfall in *Populus*, *Pinus*, and *Picea* stands on two different soils in Minnesota. Plant Soil 64 : 177-191.
  33. Powers, R. F. and K. Van Cleve. 1991. Long-term ecological research in temperate and boreal forest ecosystems. Agron. J. 83 : 11-24.
  34. Prescott, C. E., J. P. Corbin, and D. Parkinson. 1988. Biomass, productivity, and nutrient use efficiency of aboveground vegetation in four Rocky mountain coniferous forest. Can. J. For. Res. 19 : 309-317.
  35. Riegel, G. M., R. F. Miller, and W. C. Krueger. 1991. Understory vegetation response to increasing water and nitrogen levels in a *Pinus ponderosa* forest in Northeastern Oregon. Northwest Sci. 65(1) : 10-15.
  36. SAS. 1988. SAS/STAT User's Guide, 6.03 edition, SAS Institute, Cary, NC, USA
  37. Son, Y. and S. T. Gower. 1992. Nitrogen and phosphorus distribution for five plantation

18 질소와 인 시비가 경기도 양평지역 리기다소나무와 낙엽송 조림지의 지상부 생체량과 양분농도에 미치는 영향

- species in southwestern Wisconsin. For. Ecol. Manage. 53 : 175-193.
38. Stanek, W., D. Beddows, and D. State. 1979. Fertilization and thinning effects on a Douglas-fir ecosystem at Shawnigan Lake on Vancouver Island : some observations on salal and bracken fern undergrowth. Environment Canada, Pac. For. Res. Centre, Victoria, Info. Rep. BC-R-1.
39. Tagliavini, M., A. Masia, and M. Quatrieri. 1995. Bulk soil pH and rhizosphere pH of peach trees in calcareous and alkaline soils as affected by the form of nitrogen fertilizers. Plant Soil 176 : 263-271.
40. Turner, J. and M. J. Lambert. 1986. Nutrition and nutritional relationships of *Pinus radiata*. Ann. Rev. Ecol. Syst. 17 : 325-350.
41. van den Burg, J. 1985. Foliar analysis for determination of tree nutrient status : a complication of literature data. Rapport 414, Rijksinstituut voor Onderzoek in de bos - en Landschapsbouw "de Dorschkamp", Wageningen, Netherlands.
42. Vogt, K. A., C. C. Grier, C. E. Meier, and R. L. Edmonds. 1982. Mycorrhizal role in net primary production and nutrient cycling in *Abies amabilis* ecosystems in western Washington. Ecology 63 : 370-380.
43. Walker, R. B. and S. P. Gessel. 1991. Mineral deficiencies of coastal Northwest conifers. Institute of Forest Resources, Univ. of Washington, Seattle. 63p.
44. Wenworth, T. R. and E. A. Davidson. 1987. Foliar mineral elements in native plants on contrasting rock types : multivariate patterns and nutrient balance regulation. Soil Sci. 144 : 190-202.