

질소와 인 시비가 리기다소나무와 낙엽송 침엽 및 소지에서의 부위별 양분의 계절적 변화 및 재분배에 미치는 영향

이 임균* · 손요환¹

국립산림과학원 산림환경부, ¹고려대학교 환경생태공학부

적 요: 본 연구는 경기도 양평지역 내 서로 인접하여 있고 동일한 입지환경 위에 생육하고 있는 41년생 리기다소나무와 낙엽송 조림지를 대상으로 질소와 인 시비처리가 리기다소나무와 낙엽송 침엽 및 소지에서의 부위별 양분의 계절적 변화 및 양분 재분배에 미치는 영향을 구명하기 위하여 수행되었다. 엽내 질소와 인 농도는 낙엽송이 리기다소나무 당년생과 1년생 엽보다 모두 높은 것으로 나타났다. 또한 두 수종 모두 질소와 인 농도는 소지보다 침엽에서 더 높았던 것으로 나타났으나 엽령 증가에 따른 침엽과 소지에서의 질소와 인 농도의 차이는 나타나지 않았다. 엽과 소지에서의 질소와 인 농도의 계절적인 차이는 두 수종 모두 통계적으로 유의성이 인정되었다. 두 수종의 침엽내 양분의 농도는 임목 생장기에 농도가 가장 높았고 가을철엔 가장 낮아진 반면, 소지내 양분농도는 7월 이후 점차적으로 증가되는 경향을 나타내었다. 이러한 계절적 경향은 두 수종 모두 가을철 낙엽기에 침엽으로부터 소지로 양분이 이동되어 축적되는 현상을 나타내는 양분의 재분배 현상에 기인하는 것으로 판단된다. 그러나 수종별로 양분 이용효율을 나타낼 수 있는 양분 재분배율은 본 연구 결과만으로 보면 상록성 침엽수인 리기다소나무와 낙엽성 침엽수인 낙엽송 간에 차이가 없어 잎의 형태와 양분이용효율간의 관계를 단정하기는 어려웠다. 또한 시비처리 후 침엽과 소지의 양분 재분배율 변화도 일정한 경향을 나타내지 않아 임지의 비옥도와 양분 재분배율의 관계가 명확하지 않았다.

검색어: 소지, 시비, 양분 재분배, 침엽, *Larix kaempferi*, *Pinus rigida*

서 론

시비처리가 토양의 특성이나 양분순환 체계에 미치는 영향 등이 수종별로 다르기 때문에(Binkley 1986) 시비에 관한 연구는 수종간의 비교, 특히 같은 침엽수종 중에서도 상록성과 낙엽성 수종으로 구분하여 이를 비교하는 연구가 수종별 양분 이용 효율에 대한 연구와 기타의 침엽수 조림지를 관리하는데 있어서 필요할 것으로 생각된다. 그러나 국내의 조림수종 중, 대표적인 상록성 침엽수인 리기다소나무와 낙엽성 침엽수인 낙엽송을 대상으로 실시된 양분순환 관련 연구는 그리 많지 않은 실정이며(김 1995, 김 등 1996, Son and Lee 1997), 특히 시비 후의 양분순환과 관련한 연구는 거의 이루어지지 않았다.

식물체로 흡수된 양분은 새로운 기관을 형성하는데 이용되며, 그 기관이 노쇠하게 되면 다른 부위로 이동하였다가 다시 이용된다(Binkley 1986). 이와 같은 양분의 내부 순환은 대부분 잎에서 일어나지만 뿌리나 기타 목질부에서도 일부 일어나는 것으로 알려지고 있다(Cowling and Merrill 1966, Cole and Rapp 1981, Meier *et al.* 1985, Fahey and Birk 1991).

식물체내에서 일어나는 이러한 내부순환은 토양내 유효태 양분급원의 변화나 유기물 분해로부터 생기는 양분의 유실 등에

의해 크게 영향을 받지 않기 때문에 양분의 이용측면에서 이로운 과정이라 할 수 있다(Helmisaari 1992b). 양분요구량 중 양분 재분배가 차지하는 비율은 잎의 형태에 따라 크게 좌우되며(Gower and Richards 1990, Son and Gower 1991), 일반적으로 낙엽성 수종이 상록성 수종에 비해 양분재분배의 비중이 높은 것으로 알려지고 있다. 또한 이러한 양분재분배율은 환경조건이나 임목의 성장과정 등에 의해서도 달라질 수 있다(Chapin and Kedrowski 1983, Meier *et al.* 1985, Fahey and Birk 1991, Nambiar and Fife 1991, Son *et al.* 1997)고 보고되고 있다.

이전의 많은 연구에서 상록성 수종이 낙엽성 수종에 비하여 토양의 비옥도가 낮거나 생육환경이 열악한 곳에서도 생장을 지속할 수 있다는 점을 밝힌 바 있으며(Waring and Franklin 1979), 이러한 차이가 상록성 수종은 식물체내 양분의 농도는 낮지만 양분 이용효율이 높다는데 기인한다는 점에서는 의견이 일치되고 있다(Chabot and Hicks 1982). 그러나 상록성 수종이 높은 양분 이용효율을 나타내는 원인에 대해서는 여전히 논란이 많으며 이에 대한 연구가 필요한 상태이다.

본 연구의 목적은 임목 생육여건이 유사한 입지에서 동일한 시기에 식재되어 성장하고 있는 리기다소나무와 낙엽송 임분을 대상으로 시비처리에 의한 두 임분간 엽내 양분농도의 계절적 변화와 함께 낙엽기를 전후로 한 엽령별 질소와 인의 재분배율

* Corresponding author; Phone: 82-2-961-2550, Fax: 82-2-961-2543, e-mail: iklee@foa.go.kr

과 엽면적의 차이를 조사하여 시비에 의해 나타나는 임목의 반응을 연구함으로써 수종별 양분 재분배의 차이에 대한 원인을 구명하는 것이다. 또한 이들 두 수종의 당년생 엽으로부터 1년생 이상의 엽 및 줄기 또는 기타 부위로의 질소와 인의 이동과 리기다소나무 엽과 줄기에서 연령에 따른 질소와 인의 재분배를 변화를 구명하는 것이다.

재료 및 방법

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 조림지에서 수행되었다(Fig. 1). 토양, 방위, 경사, 고도 등의 입지여건과 수령 및 과거 시엽과정이 동일하고 서로 인접하여 있는 41년생 리기다소나무와 낙엽송 임분을 선정하여 수종별로 6개의 15 m×15 m 정방형 시험구(총 12개)를 설정하였다.

조사지의 식생은 리기다소나무와 낙엽송이 상층 임관을 구성하고 있으며, 하층 식생으로는 졸참나무, 갈참나무, 개울나무, 산초나무 등이 관목의 형태로 나타났고 초본류로는 밀나물, 땅초, 말나리, 산개고사리 등이 출현하였다.

조사지의 지형은 대체적으로 완경사 지역이 폭넓게 위치하고 있으며, 토양은 변성암을 모암으로 하는 갈색 약건 산림토양(B1)으로 분류되었고 토성은 두 입지 모두 미사질 양토(silt loam)로 분류되었다(이임균 2000).

지난 20년간 조사지역의 연평균 강우량은 1,287 mm, 연평균 기온은 10.6°C였으며(기상청 1992), 1996년과 1997년의 연평균 강우량과 연평균 기온은 각각 1,089 mm와 10.5°C, 그리고 1,437 mm와 11.5°C로 1997년의 기상상태는 1996년에 비해 강우량이 많았고 기온 또한 높게 나타났다.

시비처리

임목생장이 시작되기 전인 1996년 3월 각 수종별로 3처리 2

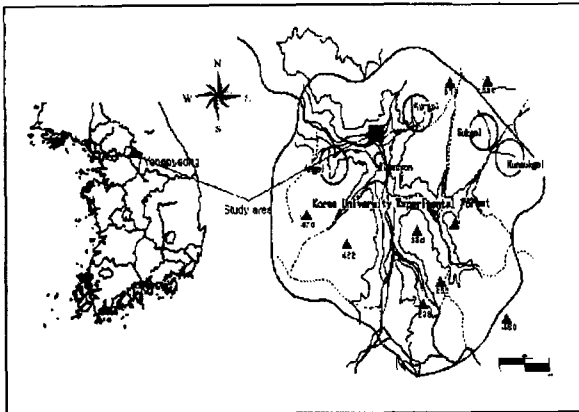


Fig. 1. Location of the study sites(■) in Yangpyeong, Gyeonggi Province, Korea.

반복의 split plot design으로 시비처리를 하였으며, 처리구간의 상호작용을 최소화하기 위하여 시비처리 구간의 간격을 10 m 이상으로 하였다. 시비처리 직전에 하층 식생에 의한 비료성분의 손실을 막기 위하여 15 m×15 m의 조사구내 리기다소나무와 낙엽송을 제외한 모든 교목 및 관목류 등을 제거하였다(Park 1997). 시비는 수종별로 3 처리 즉 대조구(control), 저농도 시비구(LNP, 200 N kg/ha + 25 P kg/ha), 그리고 고농도 시비구(HNP, 400 N kg/ha + 50 P kg/ha)로 나누어 처리하였으며, 각 처리구별로 2개씩의 반복을 두었다.

본 연구에 사용된 질소비료는 ammonium sulfate((NH₄)₂SO₄) 그리고 인 비료는 superphosphate(Ca(H₂PO₄)₂ · H₂O)가 각각 사용되었고 손으로 직접 임지에 골고루 살포하였다.

엽과 소지에서의 질소와 인의 재분배

두 수종 모두 당년생 엽이 신장을 완료한 6월경부터 조사구 당 5본의 우세목 혹은 준우세목들을 선정 한 후, 등목기와 고지 전정가위 등을 이용하여 조사목 수관의 중간부위에서 리기다소나무의 경우는 당년생 엽과 1년생 엽을 모두 포함하고 있는 가지를 크기에 따라 한 개 혹은 두 개를 채취하였다. 채취한 시료들은 즉시 비닐봉투에 넣고 실험실로 옮긴 후, 저온저장고에서 4°C로 분석 전까지 저장하였다.

채취된 가지들을 대상으로 리기다소나무는 엽과 가지를 각각 당년생과 1년생으로 구분하였고 낙엽송은 당년생 엽과 당년생 가지로 각각 구분하였다. SLA(specific leaf area, cm²/g)의 계절적인 변화를 조사하기 위하여 리기다소나무의 경우 각각의 조사목으로부터 채취된 100개의 당년생 엽과 1년생 엽으로, 그리고 낙엽송은 100개의 당년생 엽을 이용하여 엽면적을 측정 한 후 (Regent Instruments Inc., WinFolia V2.0), 엽 시료를 건조기에서 70°C로 향량이 될 때까지 건조시켜 건중량을 측정하였다. 이를 근거로 하여 엽 건중량당 엽면적의 비, 즉 SLA를 구하였다. 건중량 측정이 완료된 엽과 소지 시료는 분쇄한 후, H₂SO₄에 K₂SO₄, CuSO₄ 촉매제를 첨가하고 Lachat block digester BD-46으로 분해하여 Bran-Luebbe Traccs 800 자동 이온분석기로 총 질소와 인 농도를 측정하였다(농업기술연구소 1988).

질소와 인의 재분배율은 다음과 같은 공식에 의해 추정하였다(Gower *et al.* 1989). 즉 침엽의 재분배율(%) = ((C_{max} - C_{min}) / C_{max}) × ΔSLA × 100 그리고 소지의 재분배율(%) = ((C_{max} - C_{min}) / C_{max}) × 100. 여기에서 C_{max}는 성장기간 중 침엽 또는 소지에서의 가장 높은 양분 농도이며, C_{min}은 성장기간 중 가장 낮은 양분농도를 적용하였다. 그런데 소지에서의 양분 농도의 계절적 변화는 침엽에서와는 달리 성장 초기에는 낮은 상태이나 성장후기, 특히 낙엽 전후에 증가하는 것이 일반적이다(Son and Lee 1997). 따라서 소지에서의 양분 재분배율은 성장 초기나 중기에 비해 성장후기나 낙엽 전후에 증가한 양분의 농도 비율로 표시할 수 있다(Côté *et al.* 1989). 또한 ΔSLA는 조사기간 중의 C_{max}와 C_{min}간에 통계적으로 유의적인 차이가 있을 경우에만 계산식에 포함시켰다.

일반적으로 잎으로부터의 양분 용탈은 산림생태계내의 양분 이동과정 중 하나가 될 수 있다. 그러나 질소와 인의 경우 잎으로부터의 용탈은 비교적 적으며(Nelson *et al.* 1995), 더욱이 본 조사지역의 가을철 기후가 전형적으로 건조한 기후이기 때문에 본 논문에서 보고된 질소와 인의 재분배율 값은 용탈에 의한 손실량을 포함시키지 않았다.

통계분석

질소와 인의 농도 및 SLA의 자료에 대한 수종간, 시비처리간, 침엽과 소지의 부위별, 부위의 연령별, 월별 및 연도별 차이를 GLM(General Linear Model)을 사용하여 각각 검정하였다. 질소와 인의 재분배의 경우에는 먼저 수종, 처리, 월별, 그리고 연도간의 차이와 이들간의 상호작용 여부를 분석하였으며, 다음으로 한 수종내에서 부위별, 부위의 연령 및 이들간의 상호작용을 검정하였다. 통계적으로 차이가 유의한 경우 Duncan's test를 이용하여 평균값을 비교하였고 모든 통계처리는 Statistical Analysis System(SAS 1988)을 사용하였으며, 유의성 여부의 판단기준은 $p=0.05$ 였다.

결과 및 고찰

부위별 양분농도의 계절적 변화

침엽과 소지에서 질소와 인의 농도는 계절별($p<0.01$) 그리고 시비 당년과 시비 이듬해간에 연도별로 통계적으로 유의한 차이를 보였다($p<0.05$). 당년생 침엽의 경우 질소 농도는 수종간에 유의적인 차이가 나타났으나($p<0.001$), 리기다소나무는 엽령간에 차이가 나타나지 않았으며, 당년생 소지에서는 수종간에만 유의적인 차이가 있는 것으로 나타났다($p<0.001$). 또한 인 농도는 엽과 소지 모두 수종간 통계적으로 유의하였으며($p<0.01$), 리기다소나무는 엽령간에 유의적인 차이가 나타났다($p<0.05$). 두 수종 모두 질소와 인 농도는 침엽이 소지에 비해 높게 나타났으며, 리기다소나무는 당년생 엽과 소지가 1년생에 비해 질소와 인 농도 모두 높게 나타났다.

리기다소나무와 낙엽송에 대한 침엽내 질소 농도의 계절적 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 조사기간 동안의 처리별 평균 질소 농도는 리기다소나무의 당년생 엽과 1년생 엽 그리고 낙엽송의 당년생 엽 모두 시비처리구가 대조구에 비해 높은 엽내 질소 농도를 나타내었다. 또한 수종별로는 엽의 수명이 약 8개월 정도 되는 낙엽송 엽이 약 29개월의 엽 수명을 가지고 있는 리기다소나무(김 1995) 당년생 엽과 1년생 엽에 비해 높은 엽내 양분농도를 나타내었는데, 이와 같은 결과는 천연림 하에서의 엽내 질소 농도는 수종별 엽 수명과 반비례 관계에 있다고 한 Gower와 Richards(1990)의 결과와 일치하는 것이다.

침엽내 질소 농도의 계절적 변화를 살펴본 결과, 두 수종 모두 생육기인 7, 8월에 엽내 질소 농도가 연중 최고치에 도달되었는데 이는 Liu(1995)의 결과와 일치되는 것이며, Son과 Gower(1991) 등의 연구결과와도 유사하였다. 리기다소나무와 낙엽송

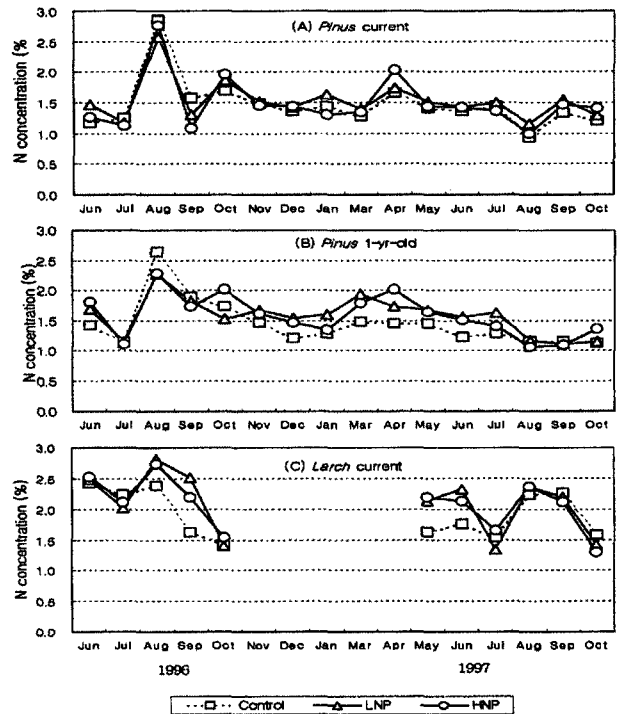


Fig. 2. Seasonal nitrogen concentrations(%) of current-year(A) and 1-year-old(B) foliages of *P. rigida* and current-year foliage(C) of *L. kaempferi* plantations.

모두 침엽내 질소 농도는 시비 당년인 1996년의 결과가 시비 이듬해인 1997년에 비해 높은 것으로 나타났는데, 이는 1996년 3월에 시행한 시비의 효과가 당년에 나타났기 때문인 것으로 생각된다.

한편 두 수종 모두 시비당년인 1996년에는 8월에 연중 최고치에 도달되었으나 리기다소나무는 시비 다음해인 1997년 8월에는 오히려 연중 최저치를 보여 연도간에 다른 양상을 보인 반면, 낙엽송은 1997년에도 연중 최고치를 나타내어 시비 이듬해에는 두 수종간에 다른 계절적 양상을 나타내었다.

또한 리기다소나무의 당년생 엽과 1년생 엽 그리고 낙엽송의 당년생 엽 모두 생육기 이후 점차 감소되다가 낙엽 절정기 직전인 10월에 엽내 질소 농도가 최저치를 보였는데, 이는 엽내에 함유되어 있던 질소양분이 다른 부위, 특히 소지부위로 이동되었기 때문으로 판단되며, 같은 시기의 소지 내 질소 농도가 상승한 것이 이와 같은 사실을 뒷받침해 주고 있다(Fig. 3 참조). 이와 같은 경향은 Liu(1995)의 결과에서도 나타나고 있다. 리기다소나무와 낙엽송 소지 내 질소 농도의 계절적 변화를 Fig. 3에 나타내었다.

리기다소나무의 당년생 소지와 1년생 소지 그리고 낙엽송의 당년생 소지 모두 시비처리구가 대조구에 비해 높은 소지 내 질소 농도를 나타내었다. 따라서 침엽과 소지 내 질소 농도 모두 낙엽송이 리기다소나무에 비해 높은 결과를 나타내었으며, 두 수종 모두 침엽이 소지에 비해 질소 농도가 높았고 리기다소나

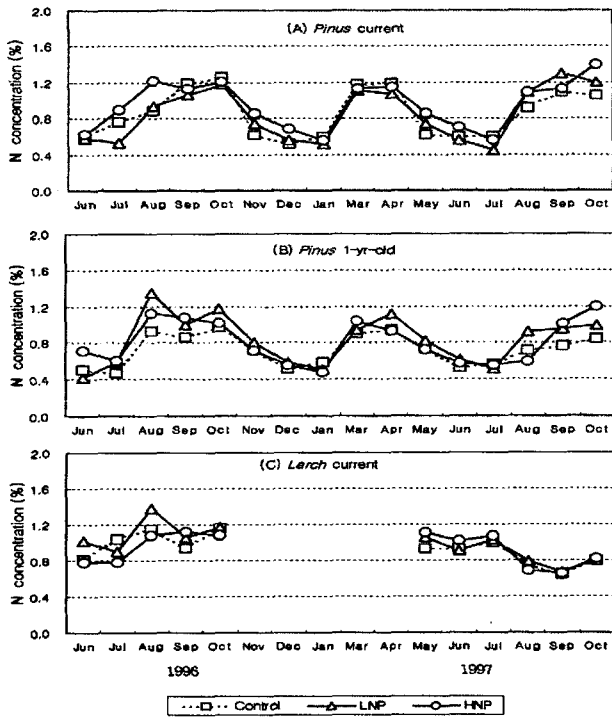


Fig. 3. Seasonal nitrogen concentrations(%) of current-year(A) and 1-year-old(B) twigs of the *P. rigida* and current-year twig(C) of *L. kaempferi* plantations.

무의 경우 침엽과 소지 모두 당년생이 1년생에 비해서 높은 질소 농도를 나타내었다.

리기다소나무 당년생 소지의 경우, 시비 당년인 1996에는 성장기간 중 계속적으로 증가하여 10월에 연중 최고치인 1.21%에 도달되었다가 1997년 1월에는 0.55%까지 감소되었다. 이후 임목의 생육이 시작되는 3, 4월에 소지 내 질소 농도가 급격히 증가하여 1.14%를 유지하였는데, 이는 새로운 조직의 형성과정 중에 있기 때문인 것으로 보이며, 이후 기관의 형성이 완료되면서 점차 감소하다가 9월과 10월에 1.17~1.22%의 높은 농도를 유지하였다. 또한 리기다소나무 1년생 소지 내 질소 농도는 당년생 소지의 결과에 비해서는 낮은 편이었으나 계절적 양상은 거의 일치되고 있다. 낙엽송의 처리기간 평균 소지 내 질소 농도는 1996년에는 6월에 연중 최저치인 0.87%에서 점차 증가하여 8월에 연중 최고치인 1.21%에 도달된 후 10월까지 1.04~1.14%를 유지하였다. 그러나 1997년에는 5월에서 7월까지 0.95~1.04%를 보이며 안정적으로 유지되다가 이후 계속 감소하여 9월에 0.66%로 연중 최저치에 도달되었으나 다시 증가하기 시작하여 10월 말에 0.81%를 나타내었다.

Meier 등(1985)은 *Abies ambilis*의 경우, 어린 임분(약 25년생)에서는 지상부의 연간 질소흡수량의 약 80%가 당년생 엽과 가지에 할당되며, 성숙임분(약 180년 이상)에서는 90% 이상 할당된다고 보고하였다. 따라서 본 연구에서 나타난 소지 내 질소 농도는 비교할만한 다른 연구결과들이 없어 직접적인 비교는 어

려우나 질소 농도가 대략 0.5~1.2%의 범위로 매우 높게 나타나 소지가 임목부위 중 1.5~2.0%의 질소 농도 범위를 보였던 엽 다음으로 양분의 농도가 높았고, 이는 동일 임지에서 조사된 지상부 부위별 양분농도의 결과(이임균 2000)에서도 확인되고 있다.

리기다소나무와 낙엽송에 대한 엽내 인 농도의 계절적 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 조사기간 동안의 침엽 내 처리별 평균 인 농도는 리기다소나무의 당년생 엽과 1년생 엽 그리고 낙엽송의 당년생 엽 모두 시비처리구가 대조구에 비해 높은 엽내 인 농도를 나타내었다.

시비 당년인 1996년에는 리기다소나무 당년생 엽의 경우 9월에, 그리고 리기다소나무 1년생과 낙엽송 당년생 엽은 8월에 각각 연중 최고치에 도달되어 비슷한 양상을 보였으나 1997년에는 리기다소나무 당년생과 1년생 엽 모두 3월에 그리고 낙엽송 엽은 6월에 각각 연중 최고치를 보여 연도간에 다른 양상을 보였다. 일반적으로 본 연구에서 나타난 리기다소나무나 낙엽송 침엽에서의 질소나 인의 양분농도가 생장초기인 3~4월 말까지 높다가 이후 점차 낮아져 임목생장 최성기인 6~8월 말경에 안정적으로 되는 것은 침엽의 생장에 의한 양분의 회석효과 때문인 것으로 판단되며, 이는 Adams 등(1987)이 보고한 연구결과에도 잘 나타나 있다.

또한 리기다소나무는 1996년 6월 이전의 자료가 없어 정확한 경향은 알 수 없으나 만약 1996년 6월에 보인 인 농도의 처리간

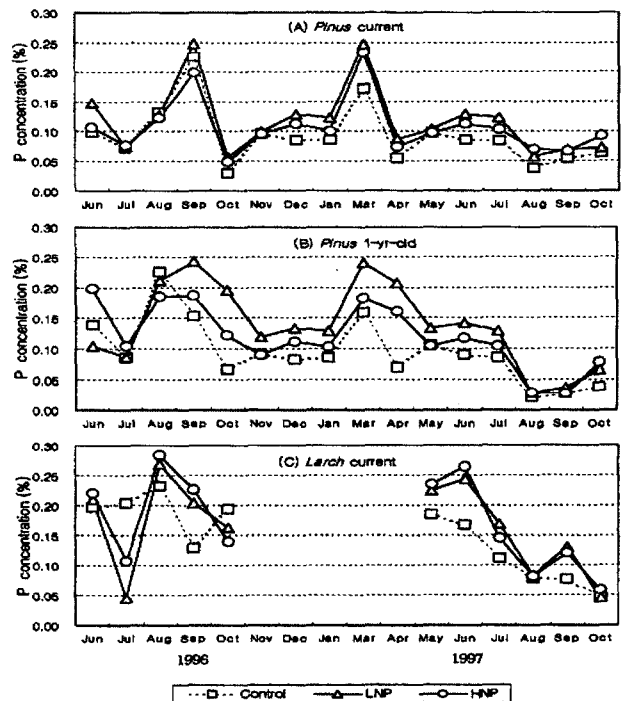


Fig. 4. Seasonal phosphorus concentrations(%) of current-year(A) and 1-year-old(B) foliages of *P. rigida* and current-year foliage(C) of *L. kaempferi* plantations.

차이가 시비에 의한 것이라면 질소에 비해 인의 체내 흡수가 더 빠르다는 것을 보이는 것으로 생각된다. 그러나 본 연구의 기간이 이와 같은 결론을 얻기에는 짧았던 관계로 정확한 경향 파악은 추후 과제로 남길 수밖에 없다. 또한 낙엽송의 경우에도 거의 모든 계절에서 시비처리구가 대조구에 비해 높은 인 농도를 보였으나 7월에 시비처리구가 대조구에 비해 인 농도가 상당히 낮았던 것은 분석에 의한 오류일 수도 있으나 시비처리에 의한 일시적인 농도 저하 현상일 수도 있으므로 이에 대한 보강 연구가 요망된다.

리기다소나무와 낙엽송에 대한 소지내 인 농도의 계절적 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 리기다소나무의 당년생 소지와 1년생 소지에서 인 농도는 시비 처리구가 대조구에 비해 높았으나 낙엽송 소지에서는 처리간에 차이가 없었다. 결과적으로 침엽과 소지 내 인 농도 모두 낙엽송이 리기다소나무에 비해 높은 결과를 나타내었으며, 두 수종 모두 침엽이 소지에 비해 인 농도가 높았고 리기다소나무의 경우 침엽과 소지 모두 1년생이 당년생에 비해서 높은 인 농도를 나타내었다. 이와 같은 리기다소나무 소지의 질소와 인 농도는 Woodwell 등(1975)의 결과와 유사하였다.

또한 소지 내 인 농도의 계절적 변화는 두 수종 모두 엽에 비해 증감의 폭이 작아 비교적 안정적이었으며, 인 농도 또한 질소 농도와 그 양상이 유사하였다. 1996년의 경우는 두 수종 모두 8월에 연중 최고치에 도달된 후 계속 감소하다가 낙엽기에 다시 증가되는 경향을 보였으며, 1997년에는 두 수종 모두 생장이 시작되는 봄철에 높은 농도를 보이다 점차 낮아져 리기다소나무는 7월에 그리고 낙엽송은 8월경에 연중 최저치에 도달된 후 낙엽기에 다시 증가되는 경향을 보였다. 이와 같이 낙엽기에 즈음하여 소지 내 양분 농도가 증가하는 것은 침엽내 양분의 경우 낙엽 전에 침엽이 강수에 의한 용탈에 민감해져서 일부 손실이 되기도 하지만 상당량이 소지나 다른 부위로 이동한다는 사실을 입증하는 것으로 임목 부위간 양분농도 변화를 구체적으로 제시한 매우 중요한 결과라 할 수 있다. 이와 같은 결과는 일반적으로 당년생 가지는 질소와 인에 대한 주요 저장고이고, 추후에 있을 가지 생장을 위하여 양분이 재이동된다고 보고한 Proe와 Millard(1995)의 결과와 일치되는 것이며, 결과적으로 수목내 당년생 가지에서 질소와 인의 분배가 이루어지고 있음을 뜻하는 것이다(Cowling and Merrill 1966, Cole and Rapp 1981, Fahey and Birk 1991). 그러나 소지 내 양분 농도가 증가했다는 것은 가을철에 토양내 양분의 유효도가 더 커졌기 때문인 것도 고려하지 않을 수 없는데(Son et al. 1997, 이입균 2000), 그 이유는 가을철에 재분배되거나 흡수된 양분들은 소지나 혹은 구멍들 내에 저장되어야만 하는데 생장을 개시하거나 생장이 현재 진행중인 신엽들에는 양분 저장장소가 없기 때문에 결국 엽 생장을 위해 소지나 구멍 등 다른 부위에 양분을 축적할 수밖에 없기 때문이다(Helmisaari 1992b, Son et al. 1997).

또한 엽과 소지 모두 질소와 인 농도는 1월에서 생장이 시작되는 시기인 3월 사이에 급격하게 증가한 이후 생육기에는 점차 안정적인 경향을 나타내었는데, 이는 엽내 질소급원의 크기는

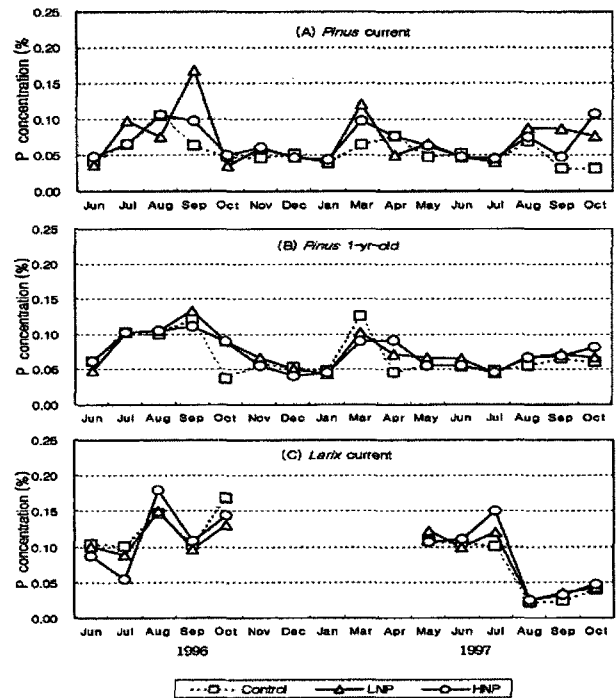


Fig. 5. Seasonal phosphorus concentrations(%) of current-year(A) and 1-year-old(B) twigs of *P. rigida* and current-year twig(C) of *L. kaempferi* plantations.

엽면적이 확대되고 엽중량이 증가되는 시기에 빠르게 증가되며, 그 후 엽중량이 안정적인 상태에 이르게 되면 엽내 질소 급원의 크기 또한 적절한 수준으로 유지된다고 한 Singh와 Negi(1992)의 결과와 일치되는 것이다.

일반적으로 소지에서의 양분 농도는 다른 계절에 비해 겨울 동안에 더욱 낮아지는 경향을 보였는데, 이는 침엽으로부터 이동해 온 양분이 소지에서 또 다른 부위 즉, 수피나 큰 가지 등으로 이동되기 때문인 것으로 생각된다. 침엽과 소지 등 본 연구에서 측정된 거의 모든 부위에서 질소와 인의 농도가 연중 최고치와 연중 최저치를 보이는 시점이 1996년과 1997년에 약간의 차이가 있는 것은 1996년의 경우 초여름까지 예년에 비해 강우가 적어 비교적 생장이 늦게 시작된 때문인 것으로 추정되었다. 또한 침엽과 소지에서의 양분 재분배율을 구하기 위하여 양분 농도의 계절적 변화 상태를 파악하고 생장기간 중 농도의 최고치를 보이는 시점을 결정할 때 이른 봄 침엽이나 소지의 형성과 생장이 완료되기 이전에 높은 농도를 보이는 시점은 비록 연중 최고치를 보였다 하더라도 제외하도록 하였다. 이는 이른 봄 새로운 조직의 형성에 필요한 양분의 축적 현상 때문으로 이 시점을 기준으로 양분 재분배율을 추정하면 과대 측정될 가능성이 있는데 따른 것이다.

SLA의 계절적 변화

침엽의 단위중량당 엽면적인 SLA(cm²/g)는 계절간(p<0.001) 그리고 2개 연도간(p<0.001)에 통계적으로 유의한 차이를 나타

내었으며, 리기다소나무 당년생 엽에서는 수종간 유의한 차이가 나타났다($p < 0.01$, Fig. 6).

조사기간 동안의 처리별 평균 SLA는 리기다소나무와 낙엽송의 당년생 엽의 경우 시비 처리구가 대조구에 비해 SLA가 높았으나 리기다소나무의 1년생 엽에서는 대조구가 시비 처리구보다 SLA가 높은 것으로 나타나 같은 수종내에서도 연령간에 각기 다른 경향을 보였다. 그리고 낙엽송은 처리구간 평균 98.28 cm^2/g 으로 리기다소나무의 당년생 엽(33.07 cm^2/g)과 1년생 엽(27.94 cm^2/g)에 비해 높은 SLA 값을 나타내었는데, 이와 같은 결과는 다른 *Pinus* spp.과 *Larix* spp.을 대상으로 조사된 결과(Gower et al. 1989)와 매우 유사한 수준이며, 일반적으로 *Larix*에서의 SLA가 타 수종에 비하여 상당히 높은 것은 리그닌과 같은 식물구조에 사용되는 화합물의 비중이 다른 침엽수에 비하여 상대적으로 낮기 때문인 것으로 알려지고 있다(Gower et al. 1989).

한편 SLA의 계절적 변화는 리기다소나무 당년생과 낙엽송에서 모두 생장의 초기에 높은 값을 보이다가 생장의 후기에 감소하는 경향을 보이고 있다. 이와 같은 결과는 생장의 초기에 엽의 형태를 완성하고 점차 대사작용이 증가하여 축적되는 물질의 양이 증가하기 때문인 것으로 보인다. 그러나 리기다소나무의 1년생 침엽에서는 1996년의 경우 계절별 SLA의 변화가 없었으나 1997년의 경우 대조구에서는 계절별 변화가 없었는데 비해 시비처리구에서는 생장 후기에 점차 낮아지는 경향을 보였다. 이러한 두 수종에서의 SLA의 계절적 변화 경향은 다른 침엽수나 *Larix* 속의 수종에서도 유사하게 나타나고 있다(Gower et al.

1989).

SLA를 연도별로 비교한 결과, 리기다소나무 당년생 엽은 1996년과 1997년에 각각 25.92 cm^2/g 과 38.63 cm^2/g , 1년생 엽은 각각 20.37 cm^2/g , 33.84 cm^2/g , 그리고 낙엽송은 1996년과 1997년에 각각 82.36 cm^2/g 과 111.54 cm^2/g 으로 낙엽송이 리기다에 비해 높게 나타나고 있다. 본 연구 결과에서 나타난 수치는 같은 임지를 대상으로 김 등(1996)에 의해 조사된 리기다소나무 82.36 cm^2/g 그리고 낙엽송 24.36 cm^2/g , 그리고 기타 다른 *Pinus* 및 *Larix*와 관련된 연구에서 보고된 결과 등과 매우 유사한 수준이었으나, 낙엽성 침엽수인 은행나무를 대상으로 조사된 결과인 148~170 cm^2/g (손 등 1998)에 비해서는 낮았다. 그리고 리기다소나무와 낙엽송 두 수종 모두에서 1996년도와 1997년 연평균 SLA에 차이가 있는 것은 시료 채취기간이 각각 다른데서 기인하는 것으로 1997년에는 1월부터 연중 침엽을 채취하여 생장기간 초기의 높은 SLA가 연 평균치에 반영되었기 때문인 것으로 보인다. 또한 리기다소나무 침엽에서 당년생 엽이 1년생 엽에 비해 SLA가 높게 나타났는데, 이러한 양상은 1997년에서도 동일하게 나타나고 있다. 이는 1년 중 생장기간의 변화에 따라 SLA가 변하는 것과 비슷하게 조직 내 저장물질의 증가에 기인하는 것이며, 다른 연구에서도 이와 유사한 경향을 보이고 있다(Gower et al. 1989).

침엽과 소지의 양분농도 및 SLA의 연도별 변화

지금까지 언급한 바 있는 침엽과 소지의 양분농도 및 SLA의 결과를 연도별로 비교하기 위해 1996년 6월~10월, 그리고 1997년의 6월~10월까지의 수종별 침엽과 소지에서 질소 및 인의 농도(%)와 SLA(cm^2/g)의 연도별 변화를 나타낸 결과는 Table 1과 같다.

시비가 침엽의 양분 농도에 미치는 영향은 1996년의 경우 리기다소나무에서 질소와 인의 농도가 당년생과 1년생 엽과 소지에서 연령간에 통계적으로 유의한 차이가 없었으나, 질소 농도는 리기다소나무의 당년생($p < 0.01$)과 1년생 소지($p < 0.05$), 그리고 낙엽송 엽($p < 0.05$)에서 각각 처리구간에 유의적인 차이를 나타내었다.

또한 인 농도는 리기다소나무의 1년생 엽과 당년생 소지 그리고 낙엽송의 엽에서 각각 처리구간에 유의적인 차이가 나타났다($p < 0.05$). 1997년의 경우, 리기다소나무의 침엽과 소지 모두 연령간에 차이가 나타나지 않았으나, 질소 농도는 리기다소나무의 1년생 엽과 당년생 소지에서 처리구간에 유의적인 차이가 나타났으며($p < 0.01$) 인 농도에서는 리기다소나무 당년생과 1년생 엽($p < 0.01$), 당년생 소지($p < 0.01$) 그리고 낙엽송의 엽($p < 0.001$)에서 처리구간에 유의적인 차이를 나타내었다. 엽면적에서는 두 수종 모두 처리구간에 차이는 나타나지 않았으나 연도별로는 고도의 유의적인 차이가 있는 것으로 나타났다($p < 0.001$).

시비처리가 침엽 및 소지내 양분 농도에 영향을 주는 정도는 리기다소나무에서 큰 것으로 나타나고 있다. 이는 본 조사지를

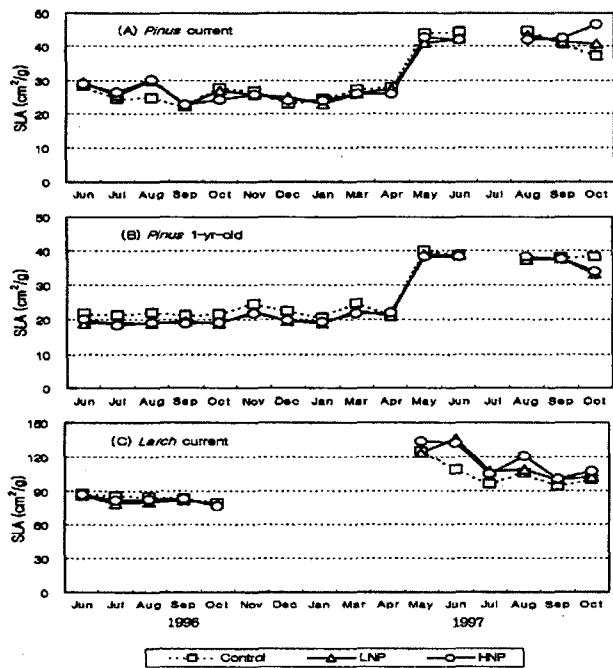


Fig. 6. Seasonal specific leaf area(cm^2/g) of current-year(A) and 1-year-old(B) foliages of *P. rigida* and current-year foliage(C) of *L. kaempferi* plantations.

Table 1. Mean nitrogen and phosphorus concentrations(%) and SLA(cm²/g) for *P. rigida* and *L. kaempferi* during the growing season of 1996 and 1997. One standard error of the mean is in the parentheses

Species	Part	Old	Treatment	N(%)		P(%)		SLA(cm ² /g)	
				1996	1997	1996	1997	1996	1997
<i>Pinus rigida</i>	Needle	Current-year	Control	1.709 (0.672)	1.278 (0.198)	0.112 (0.074)	0.071 (0.020)	25.52 (2.527)	42.18 (3.462)
			LNP	1.674 (0.561)	1.405 (0.161)	0.131 (0.076)	0.092 (0.033)	26.87 (3.005)	41.70 (1.188)
			HNP	1.642 (0.719)	1.353 (0.192)	0.110 (0.056)	0.091 (0.021)	26.51 (3.094)	43.05 (2.211)
		1-year	Control	1.764 (0.573)	1.228 (0.063)	0.134 (0.063)	0.062 (0.033)	21.54 (0.259)	38.59 (0.556)
			LNP	1.688 (0.411)	1.377 (0.245)	0.169 (0.069)	0.089 (0.053)	18.98 (0.352)	37.10 (2.347)
			HNP	1.788 (0.442)	1.343 (0.198)	0.159 (0.043)	0.077 (0.042)	19.02 (0.581)	37.27 (2.182)
<i>Larix kaempferi</i>	Current-year	Control	2.017 (0.456)	1.834 (0.351)	0.192 (0.038)	0.111 (0.046)	83.91 (3.117)	104.97 (6.188)	
		LNP	2.248 (0.547)	1.961 (0.499)	0.179 (0.084)	0.150 (0.077)	81.05 (3.005)	113.11 (14.425)	
		HNP	2.219 (0.461)	1.961 (0.428)	0.196 (0.071)	0.151 (0.080)	82.12 (3.807)	116.54 (10.813)	
<i>Pinus rigida</i>	Twig	Current-year	Control	0.936 (0.284)	0.810 (0.240)	0.065 (0.025)	0.045 (0.016)	.	.
			LNP	0.851 (0.290)	0.889 (0.389)	0.082 (0.055)	0.068 (0.023)	.	.
			HNP	1.013 (0.253)	0.954 (0.338)	0.073 (0.027)	0.064 (0.027)	.	.
		1-year	Control	0.747 (0.241)	0.693 (0.131)	0.084 (0.034)	0.057 (0.006)	.	.
			LNP	0.908 (0.395)	0.805 (0.216)	0.096 (0.031)	0.064 (0.011)	.	.
			HNP	0.909 (0.232)	0.777 (0.294)	0.094 (0.019)	0.062 (0.013)	.	.
<i>Larix kaempferi</i>	Current-year	Control	1.021 (0.147)	0.844 (0.140)	0.125 (0.031)	0.067 (0.041)	.	.	
		LNP	1.105 (0.181)	0.877 (0.136)	0.114 (0.026)	0.074 (0.043)	.	.	
		HNP	0.970 (0.172)	0.896 (0.187)	0.115 (0.049)	0.079 (0.055)	.	.	

LNP: Low Nitrogen + Phosphorus, HNP: High Nitrogen + Phosphorus.

대상으로 토양 질소의 유효태량과 연간 질소 무기화를 비교한 결과, 낙엽송 임지에서의 토양내 질소무기화량은 리기다소나무 임분과 유사하였으며, 토양내 유효태 질소 농도는 리기다소나무

임분에 비해 높은 것으로 나타났다(이임균 2000). 이와 같은 결과를 종합하여 볼 때, 본 조사지의 낙엽송 임분은 리기다소나무 임분에 비해 토양 내 질소의 양이 충분하여 질소와 인의 시비에

다른 침엽과 소지의 양분 증가가 나타나지 않은 것으로 보인다.

또한 본 연구에서 측정된 리기다소나무 침엽 내 질소와 인의 농도는 다른 연구결과(김 등 1996)와 유사하나, 낙엽송 침엽 내 질소나 인의 농도는 다른 *Larix* 속에서 보고된 연구결과에 비해서는 높은 편이며(Kimmins *et al.* 1985), 시비 후 침엽에서의 양분 농도와 SLA의 변화를 종합하여 판단하여 볼 때, 본 연구 대상지의 낙엽송 임분은 질소가 생장의 제한요소로 작용하고 있지 않음을 추정할 수 있다(Binkley *et al.* 1995).

본 연구에서 리기다소나무와 낙엽송 모두 조사기간 동안(1996~1997) 전 처리구에서 질소와 인의 농도는 침엽내 양분 농도가 소지에서보다 높았으며, 이러한 차이는 통계적으로 유의하였다(t -test, $p < 0.001$). 이와 같은 결과는 일반적으로 임목의 경우 구성 부위별로 양분의 농도 차이가 있으며, 엽에서의 양분 농도가 다른 부위보다 높았다는 Son과 Gower(1992)의 결과와 일치되는 것이다. 리기다소나무의 경우 조사기간 동안 소지에서의 질소와 인의 농도 범위는 각각 0.7~1.0%와 0.05~0.10%였으며, 낙엽송에서는 이보다 약간 더 높은 질소 0.9~1.1%, 인 0.07~0.13%를 나타내었다. 이와 같은 결과는 리기다소나무와 낙엽송을 대상으로 소지만을 분리하여 양분농도를 측정할 이전의 결과가 없기 때문에 직접적으로 비교하기는 어렵지만 *Pinus* 속 종들의 소지내 양분 농도와는 대체로 유사하였다(Woodwell *et al.* 1975). 그러나 가지로부터 소지를 분리하지 않은 상태에서 가지의 농도를 측정할 다른 연구결과(김 등 1996)에 비해서는 매우 높은 결과를 나타내었는데, 이러한 결과는 임목에서 소지가 침엽에 이어 양분의 농도가 높은 부위임을 보이고 있는 것이다(Liu 1995).

리기다소나무의 경우, 침엽과 소지를 그 연령에 따라 당년생과 1년생으로 구분하여 각각의 양분 농도를 측정할 결과, 부위의 연령에 따라 그 농도 차이가 통계적으로 유의한 경우가 있었다. 일반적으로 침엽에서의 연령에 따른 질소나 인의 농도 차이는 없었으나 소지에서는 당년생 질소의 농도가 1년생 질소의 농도에 비하여 높은 경향을 보였다. 즉 1996년도 대조구에서 소지의 당년생 질소의 농도는 0.936%로 1년생의 0.747%에 비하여 높았으며, 1997년 대조구나 HNP 처리구 역시 소지의 당년생 질소의 농도가 1년생에 비하여 높았고 이러한 차이는 통계적으로 유의하였다($p < 0.05$). 그러나 인의 경우에는 오히려 1년생 침엽이나 소지에서 당년생에 비해 높은 농도를 보였다. 즉 1996년 대조구의 소지, LNP 처리구의 침엽, 그리고 HNP 처리구의 침엽과 소지에서, 1997년의 경우는 대조구의 소지에서 인의 농도가 당년생에 비해 1년생에서 더 높았다. 침엽수에서 침엽의 연령에 따른 양분의 농도 변화를 연구한 결과에서 수종에 따라 또는 임지에 따라 연령과 상관관계가 있는 경우도 있지만(Bockheim *et al.* 1986), 그렇지 않은 경우도 있어(Son and Gower 1992) 일정한 경향은 없는 것으로 알려져 있다. 그러나 소지에서의 연령별 양분 농도의 변화에 대한 기존의 자료가 없으므로 앞으로 다양한 상록성 침엽수 소지에서의 연령별 양분 변화에 대한 연구가 필요한 것으로 보인다.

시비처리가 SLA에 미치는 영향은 1996년의 경우 리기다소나무 당년생 침엽에서는 대조구의 25.5 cm²/g이 시비처리 후 LNP 처리구의 26.9 cm²/g, HNP 처리구의 26.5 cm²/g으로 증가한데 비하여, 1년생 침엽에서는 오히려 대조구의 21.5 cm²/g에서 시비 후 LNP 처리구의 19.0 cm²/g과 HNP 처리구의 19.0 cm²/g으로 감소하여($p < 0.05$) 엽령간에 차이가 있음이 확인되었다. 그러나 1997년에는 리기다소나무 당년생 침엽에서는 대조구 42.2 cm²/g, LNP 처리구 41.7 cm²/g, HNP 처리구 43.1 cm²/g, 그리고 1년생 침엽에서는 대조구 38.6 cm²/g, LNP 처리구 37.1 cm²/g, 그리고 HNP 처리구 37.3 cm²/g으로 각 엽령별로 처리간에 차이가 나타나지 않았다. 한편 낙엽송의 경우 1996년 대조구의 SLA는 83.9 cm²/g에서 시비 후 LNP 처리구에서 81.1 cm²/g 그리고 HNP 처리구에서 82.1 cm²/g으로 감소하였으며, 1997년에는 대조구의 SLA가 105.0 cm²/g에서 시비 후 각각 113.1 cm²/g과 116.5 cm²/g로 증가되어($p < 0.05$) 연도간에 다른 양상을 나타내었다($p < 0.001$).

이와 같이 1996년에는 시비 처리구의 SLA가 대조구에 비해 감소되었다가 시비 이듬해인 1997년에는 시비 처리구의 SLA가 대조구에 비해 높은 이유는 1996년의 엽 생장은 전년도에 흡수되었던 양분을 이용하여 이루어져 시비처리에 따른 효과가 나타나지 않았으나 1997년의 경우에는 전년도에 시비된 질소 비료 성분이 체내로 흡수된 후 시비 이듬해에 효과가 나타나 엽면적을 증가시킨 데 기인하는 것으로 판단된다.

침엽과 소지에서의 양분 재분배

침엽과 소지 내 양분 농도의 계절적 변화 양상을 조사한 결과(Fig. 2, 3, 4, 5), 연중 성장 후기 또는 낙엽기간 중의 침엽 내 양분 농도가 가장 낮은 때를 보이는 시점이 대체로 소지내 양분의 농도가 가장 높은 때와 거의 일치하였다. 즉 침엽에서의 양분이 감소하는 반면 소지에서는 증가하였는데, 이는 양분이 침엽으로부터 소지로 이동하고 있음을 보여주는 것이다. 물론 가을철 낙엽시기를 전후하여 침엽에서만 양분농도가 감소하였다면 강우에 의한 침엽에서의 용탈 결과로 볼 수 있으나, 소지에서의 양분 농도 증가가 동시에 일어나고 있으므로 이는 명확한 양분의 재분배를 위한 양분의 이동현상으로 보아야 할 것이다. 이러한 결과는 이미 다른 연구에서도 암시하는 바와 같이 소지는 침엽으로부터 이동된 양분의 수용부임을 나타내는 것이다(Côté *et al.* 1988, Helmisaari 1992a, Proe and Millard 1995).

한편, 가을철에는 뿌리로부터 흡수된 양분은 생장기 동안 양분의 요구도가 높았던 침엽과 같은 수용부가 존재하지 않기 때문에 소지나 소지와 인접한 기관에 축적될 수 있다(Helmisaari 1992b). 또한 가을철에는 낙엽의 유입으로 인한 토양에서의 질소 무기화가 상대적으로 높아 양분의 유효도 또한 높아지므로(Son and Lee 1997), 오히려 소지에의 양분축적이 가능하다고 볼 수 있다. 리기다소나무와 낙엽송의 침엽내 질소와 인의 양분재분배율을 나타낸 결과는 Table 2와 같다.

시비처리 후 침엽에서의 양분 재분배율 변화는 수종, 연도 및 양분의 종류에 따라 각기 다르게 나타나 일정한 경향이 없는 것

Table 2. Nitrogen and phosphorus retranslocation rates(%) of foliage and twig for *P. rigida* and *L. kaempferi* plantations

Species	Tissue	Age	Treatment	N(%)		P(%)		
				1996	1997	1996	1997	
<i>P. rigida</i>	Needle	Current-year	Control	44.8	33.8	87.3	56.6	
			LNP	49.2	23.3	77.4	55.3	
			HNP	60.6	30.5	75.0	39.0	
			1-year	Control	28.6	61.9	57.0	76.7
				LNP	19.5	74.0	19.8	80.7
				HNP	24.3	58.7	35.0	75.3
<i>L. kaempferi</i>	Current-year	Control	40.0	39.4	16.7	57.9		
		LNP	50.2	43.8	39.6	50.8		
		HNP	44.1	56.9	50.9	59.7		
<i>P. rigida</i>	Twig	Current-year	Control	53.3	43.6	34.4	19.4	
			LNP	50.9	62.8	78.8	47.7	
			HNP	48.1	60.1	50.9	58.0	
			1-year	Control	47.8	32.4	50.1	19.1
				LNP	64.4	47.6	63.7	33.6
				HNP	29.1	53.0	44.0	43.5
<i>L. kaempferi</i>	Current-year	Control	29.5	34.7	40.2	76.7		
		LNP	13.0	34.8	35.5	79.0		
		HNP	27.9	38.8	61.6	83.2		

LNP: Low Nitrogen + Phosphorus, HNP: High Nitrogen + Phosphorus.

으로 보인다. 리기다소나무 당년생 침엽에서 질소는 1996년의 경우 대조구는 45%이었고 시비처리 후 49%와 61%로 재분배율이 증가하였으나, 오히려 1997년에는 대조구의 34%에서 시비처리 후 23%와 31%로 감소하였다. 리기다소나무 1년생 침엽의 경우에는 처리구간에 유사한 질소 재분배율을 보였으나 1996년에는 처리구 평균 재분배율이 24.1%였다가 1997년에는 64.9%를 보여 연도간에 차이가 있는 것으로 나타났다. 또한 낙엽송 침엽의 경우에는 1996년과 1997년의 재분배율이 처리구 평균 44.8%와 46.7%를 나타내어 연도간에 유사한 경향을 나타내었으며, 1996년에는 처리구간에 일정한 경향이 없었으나 1997년에는 시비수준이 증가될수록 질소 재분배율이 증가하는 경향을 보여 연도간에 다른 양상을 나타내었다.

리기다소나무 당년생과 1년생 침엽에서의 인 재분배율은 대조구의 경우 1996년과 1997년 모두 시비처리 후 감소하는 현상을 보였으나 낙엽송 침엽에서는 인의 재분배율이 1996년에는 대조구의 17%에서 LNP와 HNP의 각각 40%와 51%로 시비처리 후 증가되는 경향을 보인데 비해, 1997년에는 대조구에서 58%의 인 재분배율을 보이던 것이 LNP와 HNP 처리구에서는 각각 51%와 60%로 일정한 경향이 없었던 것으로 나타났다.

또한 리기다소나무 침엽에서 연령에 따른 질소와 인의 재분배율 변화는 일정한 경향을 보이지 않고 있다. 즉 1996년의 경우 당년생 침엽의 질소와 인의 재분배율은 1년생에 비하여 높았으나 1997년에는 이와는 반대로 오히려 1년생 침엽에서 높은 수치를 보였다. 이전의 Helmisaari(1992a)나 Son과 Gower(1991) 등의 결과에서도 침엽의 연령 변화에 따른 양분 재분배율의 특별한 경향을 발견하지는 못하였는데, 본 연구에서 나타난 연도별 차이가 1996년과 1997년의 연간 총 강우량과 강우량의 월별 분포 차이에서 기인하였을 가능성도 배제할 수 없다. 그러나 이러한 차이가 명확하게 강우와 같은 기상 조건의 차이에 의한 것인지는 보다 장기간의 재순환 연구를 통하여 밝혀질 수 있을 것으로 사료되며, 본 연구결과만으로는 그 원인이나 경향을 단정하기 어려운 것으로 생각된다.

한편, 리기다소나무 1년생 침엽의 경우, 1996년에는 질소와 인의 재분배율이 낮았으나 1997년에는 모든 처리구에서 질소와 인의 재분배율이 리기다소나무와 낙엽송의 당년생 엽에 비해 높은 것으로 나타났는데, 이는 구엽으로부터의 양분 재이용율이 큰 수종은 영구 조직내에 저장되는 양분의 양이 더 많음을 의미하는 것이다(Singh *et al.* 1990). 또한 신엽을 형성할 때 이렇게 저장되었던 양분들을 재이용함으로써 엽이 성장하는 기간동안에 요구되는 양분량을 보충해 줌으로써 점차적으로 수목에 대한 토양으로부터의 양분 흡수 의존도를 감소시켜 줄 수 있을 것으로 생각된다.

시비처리 후 소지에서의 질소와 인 재분배율 변화나 리기다소나무에서 침엽과 소지의 연령에 따른 질소와 인의 재분배율 변화도 일정한 경향을 보이지는 않았다. 또한 낙엽송의 경우, 1996년에는 처리구 평균 24%를 보였으나 1997년에는 오히려 가을철 소지에서의 질소 농도가 감소한 결과를 보여 소지에서의 재분배율은 36%로 수종간 비교에서는 리기다소나무에서 더 높은 것으로 나타났다.

리기다소나무 당년생 소지에서의 인 재분배율은 1996년과 1997년 모두 시비수준이 증가될수록 재분배율 또한 증가되는 경향을 보였으나 1년생 소지의 경우, 1996년에는 일정한 경향이 없었던 반면, 1997년에는 시비수준이 증가될수록 증가되는 경향을 보였다. 낙엽송의 경우에는 1996년과 1997년 모두 대조구에 비해 시비처리구에서 인의 재분배율이 높았으며, 시비수준이 증가될수록 증가되는 경향을 나타내었다. 또한 리기다소나무의 경우 당년생과 1년생 소지 모두 시비당년이 시비 다음해에 비해 인의 재분배율이 높은 것으로 나타났으나 낙엽송은 이와 반대의 양상을 보여 수종간에 다른 경향을 나타내었다.

낙엽송에서는 리기다소나무와는 달리 가을철 소지에서의 양분 농도가 계속 감소하는 경우가 관찰되었는데(Fig. 3, Fig. 5), 이와 같은 결과는 수종간의 가을철 낙엽되는 부위의 차이 및 양분의 재순환 후 축적되는 부위에 차이가 있을 수 있는 가능성을 보이는 것이다. 즉 조사기간 동안의 결과에 의하면 리기다소나무에서는 소지가 가을철 침엽의 낙엽과 함께 떨어지는 경우가 매우 적었으나 낙엽송에서는 침엽과 함께 소지도 상당량 떨어

저 침엽에서부터 이동되는 양분이 소지보다는 오히려 다른 부위에 축적될 수 있다는 가능성이 관찰되었다. 만약 가을철에 침엽으로부터 이동한 양분이 가지 또는 가지가 아닌 수피, 목부 혹은 뿌리 등에 축적된다면(Côté *et al.* 1989, Vogel and Dawson 1993), 소지에서 양분농도가 감소할 수도 있으나 아직까지 침엽, 소지, 그리고 가지나 다른 양분의 저장 가능성이 있는 부위에서의 연중 양분 동태를 파악한 다른 연구결과들이 없기 때문에 이러한 가정을 확인하기는 어려우므로 이를 위해 보다 상세한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

본 연구의 리기다소나무에서 나타난 질소와 인의 재분배율은 상록성 침엽수나 *Pinus* 속 수종들에서 보고되고 있는 양분 재분배율과 매우 유사하다(Chapin and Kedrowski 1983, Gower *et al.* 1989, Son and Gower 1991, Helmisaari 1992a).

또한 낙엽송 침엽에서의 질소 재분배율은 1996년과 1997년에 약 40% 정도로서 일반적으로 다른 *Larix* 속의 수종들에서 관찰된 질소 재분배율 범위인 48~90%와 비교하면 낮은 상태이다(Chapin and Kedrowski 1983, Gower *et al.* 1989, Son and Gower 1991). 그러나 인의 재분배율은 1996년에는 17%이었으나 1997년에는 58%로써 인의 재분배율은 질소 재분배율보다 일반적으로 낮고 또한 수종과 연도에 따라 변이가 매우 심하다는 이전의 연구결과에(Gower *et al.* 1989) 비추어 큰 차이는 없는 것으로 보인다.

임목에서 상록성이나 낙엽성과 같은 잎의 행태가 양분 재분배율과 직접적인 관련이 있다는 이전의 주장이 있었으나(Gower *et al.* 1989, Son and Gower 1991), 본 연구 결과 상록성 침엽수인 리기다소나무와 낙엽성 침엽수인 낙엽송간에는 침엽과 소지의 양분 재분배율에 명확한 차이가 발견되지 않아 이러한 견해와 일치하지는 않았다. 그러나 잎의 행태는 임목에서 양분 이용효율을 결정하는 변수가 되므로 잎의 행태가 동일한 몇 종의 수종을 대상으로 하는 보다 광범위한 연구는 계속 필요한 것으로 생각된다. 비록 리기다소나무와 낙엽송간에 질소와 인의 재분배율에는 차이가 없다고 하더라도 낙엽송 침엽에서 양분의 농도가 더 높기 때문에 양분의 재분배량 그 자체는 낙엽송에서 많을 것으로 판단된다.

일반적으로 침엽에서 나타나는 양분 재순환 정도의 차이는 각기 다른 수종인 경우에는 종에 따라 달라지며, 동일 수종인 경우 임지의 비옥도에 따라 달라지기도 하는 것으로 알려지고 있다(Côté *et al.* 1989). 일부 연구자들은 척박한 지역에서 생육하고 있는 수종들은 양분 재분배율을 높임으로써 양분을 효율적으로 이용하여 이러한 곳에서도 생장이 가능하다고 하나(Gower *et al.* 1989), 실제 임지의 비옥도와 양분의 재분배율간의 관계는 아직까지 불분명한 상태로 남아 있다(Son and Gower 1991). 이러한 사실은 임지에 시비하여 비옥도를 인위적으로 변화시키고 양분의 재분배율을 측정하여 이들간의 관계를 조사한 연구결과들에서 확인할 수 있다. 즉 Helmisaari(1992a)와 손 등(1998)은 시비처리 후 양분재분배율이 증가한 것을 보고한데 비해, Chapin과 Moilanen(1991)은 이와는 반대로 시비처리 후 양분 재분배율이

감소됨을 보고하였으나, 일부의 경우에는 시비처리와 양분재분배율과의 관계가 없는 결과도 보고되고 있다(Chapin and Kedrowski 1983, Helmisaari 1992b).

본 연구에서 속효성 비료를 사용한 후 임지의 비옥도는 시비당년에 매우 높아지고(손 등 1998), 만약 임지의 비옥도가 임목의 양분 재분배율에 영향을 미친다면 그 효과는 1996년에 나타날 것으로 예측하였으나 실제로는 1996년에 시비가 미치는 일정한 효과가 나타나지 않았고 시비 다음 해인 1997년에도 뚜렷한 영향은 없는 것으로 관찰되었다. 따라서 본 연구결과나 이와 관련된 자료들을 토대로 시비처리가 엽과 소지에서 양분 재분배에 미치는 영향을 추정할 결과, 본 연구대상 임분은 양분 특히 질소가 생육을 제한할 만큼의 부족한 수준에 있지 않은 것으로 볼 수 있으며, 이러한 경우 임지 비옥도와 양분 재분배율의 관계는 다른 기작을 나타낼 가능성을 생각할 수 있다. 그러나 단지 2년간의 일부 연구 결과만을 토대로 이를 확인하기는 어려우며, 더욱이 조사 연도에 따른 기후조건 차이가 임목의 생리·생장에 다른 반응을 일으켰을 수 있는 가능성을 배제할 수 없다.

따라서 이들의 관계를 분명히 밝혀려면 시비 후 보다 장기간에 걸친 토양 양분 동태와 수체 내 양분 재순환 연구는 물론 연구대상 임분에서의 양분 요구량과 공급량을 추정하여 양분의 수지균형을 연구할 필요가 있는 것으로 사료된다. 즉 각기 다른 수종에서 임지의 비옥도별 임목의 생육에 소요되는 양분의 양과 토양으로부터의 흡수되는 양 그리고 수체 내 재순환에 의해 충당되는 양을 추정하여 그들의 비율을 구함으로써 수종별 양분 이용효율 및 재순환의 역할과 비옥도의 관계를 구명할 필요가 있다.

인용문헌

- 기상청. 1992. 한국의 기후표. 800p.
- 김종성. 1995. 양평지역 리기다소나무, 낙엽송, 졸참나무림의 물 질생산과 질소와 인의 분포에 관한 연구. 고려대학교 박사학위논문. 80p.
- 김종성, 손요환, 임주훈, 김진수. 1996. 리기다소나무와 낙엽송 인공조림지의 지상부 생체량, 질소와 인의 분포 및 낙엽에 관한 연구. 한국임학회지 85(3): 416-425.
- 농업기술연구소. 1988. 토양화학분석법: 토양, 식물체, 토양미생물. 농촌진흥청 농업기술연구소. 450p.
- 손요환, 김진수, 황재홍, 박정수. 1998. 은행나무 묘목에 대한 시비가 생장 및 엽내 양분과 유용 추출물 농도에 미치는 영향. 한국임학회지 87(1): 98-105.
- 이임균. 2000. 질소 및 인 시비가 리기다소나무와 낙엽송 인공조림지의 양분순환에 미치는 영향 - 경기도 양평지역을 중심으로 -. 고려대학교 박사학위논문. 151p.
- Adams, M.B., R.G. Campbell, H.L. Allen, and C.B. Davey. 1987. Root and foliar nutrient concentrations on loblolly pine: effects of season, site, and fertilization. For. Sci. 33: 984-996.

- Binkley, D. 1986. Forest Nutrition Management. John Wiley & Sons. New York. 290p.
- Binkley, D., F.W. Smith, and Y. Son. 1995. Nutrient supply and decline in leaf area and production in lodgepole pine. Can. J. For. Res. 25: 621-628.
- Bockheim, J.G., J.E. Leide, and D.S. Tavella. 1986. Distribution and cycling of macronutrients in a *Pinus resinosa* plantation ecosystem, Wisconsin. Can. J. For. Res. 13: 609-619.
- Chabot, B.F. and D.J. Hicks. 1982. The ecology of leaf life spans. Ann. Rev. Ecol. Syst. 13: 229-250.
- Chapin, F.S. III. and L. Moilanen, 1991. Nutritional controls over nitrogen and phosphorus resorption from a Alaskan birch leaves. Ecology 72: 709-715.
- 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.
- 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.
- Côté, B., J.O. Dawson, and M.B. David. 1988. Autumnal changes of sulfur fractions and the ratio of organic sulfur to total nitrogen on leaves and adjacent bark of eastern cottonwood, white basswood and actinorhizal black alder. Tree Physiol. 4: 119-128.
- Côté, B., C.S. Vogel, and J.O. Dawson. 1989. Autumnal changes in tissue nitrogen of autumn olive, black alder and eastern cottonwood. Plant Soil 118: 21-32.
- Cowling, E.B. and W. Merrill. 1966. Nitrogen in wood and its role in wood deterioration. Can. J. Bot. 44: 1539-1554.
- Fahey, T.J. and E. Birk. 1991. Measuring internal distribution and resorption. In : Lassoie, J.P. and T.M. Hinckley(ed.). Techniques and Approaches in Forest Tree Ecophysiology. Boca Raton, Fl. pp.225-245.
- Gower, S.T., C.C. Grier, and K.A. Vogt. 1989. Aboveground production and N and P use by *Larix occidentalis* and *Pinus contorta* in the Washington Cascades, USA. Tree Physiol. 5: 1-11.
- Gower, S.T. and J.H. Richards. 1990. Larches: deciduous conifers in an evergreen world. BioScience 40: 818-826.
- Helmisaari, H.S. 1992a. Nutrient retranslocation within the foliage of *Pinus sylvestris*. Tree Physiol. 10: 45-58.
- Helmisaari, H.S. 1992b. Nutrient retranslocation in three *Pinus sylvestris* stands. For. Ecol. Manage. 51: 347-367.
- 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.
- Liu, S.R. 1995. Nitrogen cycling and dynamic analysis of man made larch forest ecosystem. Plant Soil 168/169: 391-397.
- Meier, C.E., C.C. Grier and D.W. Cole. 1985. Below- and aboveground N and P use by *Abies amabilis* stands. Ecology 66: 1928-1942.
- Nambiar, E.K.S. and D.N. Fife. 1991. Nutrient retranslocation in temperate conifers. Tree Physiol. 9: 185-208.
- Nelson, L.E., M.G. Shelton, and G.L. Switzer. 1995. The influence of nitrogen applications on the resorption of foliar nutrients in sweetgum. Can. J. For. Res. 25: 298-306
- 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.
- Proe, M.F. and P. Millard, 1995. Effect of P supply upon the seasonal growth and internal cycling of P in Sitka spruce(*Picea sitchensis*(Bong.) Carr.). Plant Soil 168/169: 313-317.
- SAS. 1988. SAS/STAT User's Guide, 6.03 edition, SAS Institute, Cary, NC, USA.
- Singh, S.P., P.K. Ralhan, V.P. Upadhyay, and G.C.S. Negi. 1990. Seasonal changes in stem diameter and leaf development in a tropical montane forest. J. Veg. Sci. 1: 165-172.
- Singh, S.P. and G.C.S. Negi. 1992. Leaf nitrogen dynamics with particular reference to retranslocation in evergreen and deciduous tree species to Kumaun Himalaya. Can. J. For. Res. 23: 349-357.
- Son, Y. and S.T. Gower. 1991. Aboveground nitrogen and phosphorus use by five plantation-grown trees with different leaf longevities. Biogeochemistry 14: 167-191.
- Son, Y. and S.T. Gower. 1992. Nitrogen and phosphorus distribution for five plantation species in southwestern Wisconsin. For. Ecol. Manage. 53: 175-193.
- Son, Y. and I.K. Lee. 1997. Soil nitrogen mineralization in adjacent stands of larch, pine and oak in central Korea. Ann. Sci. For. 54: 1-8.
- Son, Y., I.K. Lee, and J.H. Hwang. 1997. Nitrogen and phosphorus retranslocation in foliage and twig of *Pinus rigida* and *Larix leptolepis*. Kor. J. Ecol. 20(4): 259-264.
- Waring, R.H. and J.F. Franklin. 1979. Evergreen coniferous forests of the Pacific Northwest. Science 204: 1380-1385.
- Woodwell, G.M., R.H. Whittaker, and R.A. Houghton. 1975. Nutrient concentrations in plants in the Brookhaven oak-pine forest. Ecology 56: 318-332.

(2004년 6월 23일 접수; 2004년 7월 21일 채택)

Effects of Nitrogen and Phosphorus Fertilization on Seasonal Changes and Retranslocation of Nutrition in Foliage and Twig of *Pinus rigida* and *Larix kaempferi*

Lee, Im Kyun and Yowhan Son¹

Dept. of Forest Environment, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

¹*Div. of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea*

ABSTRACT : Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on seasonal changes of nutrient content in tree components, and retranslocation N and P in foliage and twig were determined in adjacent 41-year-old plantations of *Pinus rigida* Miller and *Larix kaempferi* Gordon on a similar soil in Yangpyeong, Gyeonggi Province. In general, foliage N and P concentrations of *L. kaempferi* were significantly higher than current and 1-year-old foliages of *P. rigida*. N and P concentrations were higher in foliage than in twigs for both tree species. However, there were no significant differences in foliage and twig N and P concentrations with ages. Significant seasonal differences in foliage and twig N and P concentrations were observed for both tree species because of nutrient retranslocation. Foliage nutrient concentrations were highest in the mid-growing season and lowest in autumn, whereas twig nutrient concentrations have gradually increased since July. These seasonal trends indicated nutrient retranslocation from foliage into twigs before foliage senescence. However, there were no significant changes in foliage and twig nutrient retranslocation, and no consistent patterns in foliage and twig nutrient retranslocation following N and P fertilizer additions. No significant changes in nutrient retranslocation between different foliage and twig ages were observed following fertilization.

Key words : Fertilization, *Larix kaempferi*, Nutrient retranslocation, *Pinus rigida*, Twig
