목재공학 34(4): 66~75, 2006
Mokchae Konghak 34(4): 66~75, 2006

월악산 24년생 잣나무 인공림의 바이오매스와 에너지량*1

권 기 철*2† · 이 돈 구*3

Biomass and Energy Content of *Pinus koraiensis* Stand Planted in Mt. Wolak*1

Ki-Cheol Kwon*2† · Don Koo Lee*3

요 약

충북 월악산 북동 사면 지역(해발 380 m)에서 24년생 잣나무 인공림의 바이오매스와 에너지량을 조사한 결과, 잣나무림의 바이오매스는 줄기부 26.6 ton/ha, 수피부 4.3 ton/ha, 1년생 가지 0.2 ton/ha, 가지부 8.6 ton/ha, 고사지 1.5 ton/ha, 당년생 잎 1.3 ton/ha, 전년생 잎 6.1 ton/ha로서 고사지를 제외한 지상부 전체는 47.0 ton/ha으로 나타났다. 또한 연간 순생산량은 줄기부 3.0 ton/ha/yr, 수피부 0.4 ton/ha/yr, 1년생 가지 0.2 ton/ha/yr, 가지부 1.1 ton/ha/yr, 당년생 잎 1.3 ton/ha/yr이며, 지상부 합계는 6.0 ton/ha/yr로 추정되었다. 이것을 열 에너지량으로 환산하면 지상부 전체의 에너지량은 1,028 GJ/ha, 연간 에너지 고정량(지상부)은 133 GJ/ha/yr로 나타났다. 한편, 잣나무림의 엽면적 지수는 20.2로 나타났다.

ABSTRACT

This study was conducted to understand the biomass and the energy content of 24-year-old *Pinus koraiensis* stand planted in Mt. Wolak, Chungcheongbuk-do, Korea. Nine sample trees were selected and harvested for the study. Stem, bark, branches and leaves were weighed respectively with the stratified clipping method, and analyzed for productive structure. The allometric regression equations between dry weight of each component and D^2H were obtained to estimate the total biomass of aboveground (47.0 ton/ha) and other parts (56.5% from stemwood, 9.1% from stembark, 0.5% from current twigs, 18.4% from live branches, 2.6% from current leaves, and 12.9% from previous leaves). Annual net production of aboveground was 6.0 ton/ha/yr, and the ratios of stemwood, stembark, current twigs, live

* 1 접수 2006년 3월 3일, 채택 2006년 3월 23일
* 2 국립산림과학원 Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea
* 3 서울대학교 농업생명과학대학 산림과학부 Department of Forest Sciences, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea
† 주저자(corresponding author) : 권기철(e-mail: kkch30@yahoo.co.kr)

branches, and current leaves to that of aboveground were 49.8%, 7.3%, 3.5%, 18.6%, and 20.8%, respectively. Energy content of aboveground was 1,028 GJ/ha, and annual energy content was 133 GJ/ha/yr. Leaf area index (LAI) of *P. koraiensis* plantation was 20.2 in Mt. Wolak.

Keywords: *Pinus koraiensis*, biomass, net production, energy content, LAI

1. 서 론

전통적으로 임목은 건축이나 가구와 같은 곳에 일반용재로서 많이 사용되어 그 용도의 이용성을 나타내는 재적의 생장이 중요하게 평가되어왔다. 그러나 1950년대 이후부터 펄프와 보드류와 같이 중량 단위로 거래되는 목재 생산물이 활발하게 이루어지게 되었으며, 온실가스 흡수원으로서의 산림 기능과 같은 사회적 요구에 의해 임학자들 사이에서도 산림의 바이오매스와 생산성에 대한 관심이 증대되었다(이 등, 1998).

산림의 기능은 일반 용재 및 산림 부산물의 생산 기능과 환경보전과 같은 공익적 기능으로 크게 나뉘지만, 그 외에도 최근에 들어서는 유한한 에너지원인 석유나 석탄을 대체할 수 있는 재생 가능한 대체 에너지원으로서의 기능도 중요하게 부각되고 있다. 따라서 에너지원이라는 측면에서 넓은 범위에 걸쳐 산재하고 있는 산림 자원의 바이오매스와 생산성을 파악하는 것이 필요하다.

우리나라에서는 1970년대 오일 파동 이후 산림의 바이오매스와 생산성에 대한 관심이 크게 증대되면서 1980년대 중반까지 많은 연구(임 등, 1981; 오 등, 1984; 김과 정, 1985; 김 등, 1985; 김과 김, 1988)가 있었으나, 바이오매스 측정에 들어가는 많은 인력과 시간, 그리고 원유 공급의 확대 등 여러 여건 때문에 소강 상태에 접어들게 되었다. 그러나 1990년대 말에 들면서 다시 에너지 문제가 전세계적 문제로 떠오르면서 대체 에너지원으로서 그리고 지구온난화의 해결 방안으로서 산림 바이오매스의 중요성이 부각되었다. 즉, 오늘날 당면한 에너지 공급 문제를 가장 잘 해결할 수 있는 방법 중 하나로 우리나라도 전 국토의 65%에 이르는 산림 자원을 이용하는 것이 긍정적으로 검토되고 있는 것이다.

잣나무는 낙엽송과 함께 지난 1960년대 이래 우리나라에서 가장 많이 식재된 2대 조림수종으로서, 우리나라 온대 북부 위쪽의 지역에서는 천연적으로 군락을 이루며 동북아 일대에 자생하는 수종이다(Mirov, 1967; 李, 1997). 잣나무는 생리적 특성상 상대적으로 적은 광량에서도 자랄 수 있는 내음성 수종으로서 자연상태에서 극상림을 이루는 주요 수종이다. 그러나 지금까지 우리나라에서 이루어진 잣나무 관련 연구는 주로 바이오매스와 물질 분배에 대한 연구가 대부분이며, 아직 잣나무 임분내에 축적된 에너지량과 연간 고정되는 에너지량에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다. 따라서 본 연구의 목적은 우리나라의 주요 조림수종인 잣나무 조림지(24년생)의 엽면적지수와 바이오매스를 측정하여 임분의 생산기구와 생산성을 파악하고, 에너지 현존량과 연간 에너지 고정량을 추정하는 것이다.

2. 재료 및 방법

2.1. 조사지 선정

본 연구는 충북 제천시 월악산에 위치한 충북대학교 연습림내 24년생 잣나무 조림지에서 수행하였다. 조사 대상지는 온난 습윤한 전형적인 온대중부의 기후를 보이고 있으며, 조림 당시 1.8 m × 1.8 m의 정방형 식재방식으로서 3,086 본/ha의 식재밀도가 적용되었으며, 조림 후 가지치기와 간벌 등의 산림 작업 일체가 시행된 적이 없어서 고사목이 다량 발생하고 있다.

Table 1은 조사지의 개황이며, 조사지 방위는 NE70-45°, 해발고는 약 300 m, 평균경사도는 30°, 토성은 사양토이다. 하층식생으로는 갈참나무, 신갈나무, 굴참나무, 진달래, 철쭉, 생강나무, 국수나무, 산

Table 1. General description of the *Pinus koraiensis* stand

Altitude (m)	300	Annual mean temperature (℃)	11.0
Aspect (°)	NE70~45	Annual precipitation (mm)	1,570
Average slope (°)	30	Stand age (year)	24
Soil texture	Sandy loam	No. of trees per ha	2,250
Soil pH	4.7	Average DBH (cm)	8.5

딸기, 팥배나무, 물푸레나무, 개암나무, 난티잎개암나무, 산초나무, 병조희풀 등이 자라고 있으나, 하층의 피복율은 30% 이하로서 낮은 편이다. 토성은 사양토로서 전형적인 산림토양의 특성을 보이고 있는데, 토양 pH는 4.7의 강산성이어서 식물의 생육에 매우 불리하다.

2.2. 바이오매스 및 연간 순생산량 추정

잣나무 임분의 바이오매스 측정을 위해서 2004년 7월 10일부터 8월 10일까지 24년생 잣나무 조림지를 대상으로 20 m × 20 m 크기의 방형구를 3곳 설치하여 매목조사를 실시하였다. 그리고 흉고직경이 4 cm 이상인 살아있는 임목을 각 흉고직경급별로 표본목 1본씩 총 9 본을 선정하여 벌목하고 지상부에서 2 m 간격으로 줄기(수피, 목부), 가지(1년생 소지, 가지), 잎(당년생 잎, 전년생 잎), 고사지의 생중량을 각각 분리하여 측정하였다. 이때 각 표본목에서 줄기, 가지, 잎의 일부를 채취하였으며(줄기는 2 m 간격으로 단판 채취, 가지와 잎은 각 높이별로 일정량씩 계층 채취), 실험실에서 건조기로 80℃ 이상에서 항중량에 이를 때까지 건조시켜 건중량지수를 산출하여 전체 건중량을 계산하였다.

바이오매스 현존량의 추정은 D^2H와 Ws (줄기 건중), Wbk (수피 건중), Wb (가지 건중), Wl (잎 건중)과의 관계를 대수회귀식으로 유도한 상대생장식 (Kittredge, 1944; Kira 등, 1967; Saucier,1979; 임 등, 1981)에 의해 계산했다. 연간 순생산량의 추정은 수간석해를 하여 1년간의 수고 및 흉고직경의 생장량을 조사하여 전년도 D^2H를 계산한 다음 상대생장식에 대입하여 전년과 당년의 현존량차로 계산하였다. 이 때 각 단판의 연륜폭은 등각법으로 2방향 반복 측정하였으며, 형상이 부정형으로 일그러진 단판은 원주등분법으로 2방향 측정하였다.

2.3. 잣나무 임분의 엽면적지수 측정

잣나무의 엽면적지수를 알아내기 위해 24년생 잣나무 조림지에서 벌채한 표본목 중 5 본에서 당년생 잎과 다년생 잎을 각각 무작위로 50개씩 수거하여 각 잎의 건중량, 길이, 폭, 부피 등을 마이크로미터와 마이크로 피펫을 이용하여 측정하였다. 잣나무 침엽의 표면적은 Johnson(1984)의 침엽 표면적 계산식을 이용하여 측정하였다.

$$A = 2l(1 + \frac{\pi}{n}) \cdot \sqrt{\frac{vn}{\pi l}}$$

l = length of needle, n = number of needle, v = volume of needle

2.4. 열 에너지량 측정

연구 조사지에서 채취한 9 본의 잣나무 표본목에서 각 부위별(수피, 재부, 잎)로 열 에너지량을 3반복 측정하였으며, USA Oxygen Bomb Calorimeter (1241 PARR)를 이용하였다. 측정된 열 에너지량은 부위별로 전체 평균을 낸 다음, 잣나무 임분의 부위별 바이오매스 현존량 및 연간 순생산량에 대입하여 임분의 에너지 현존량 및 연간 고정량을 추정하였다.

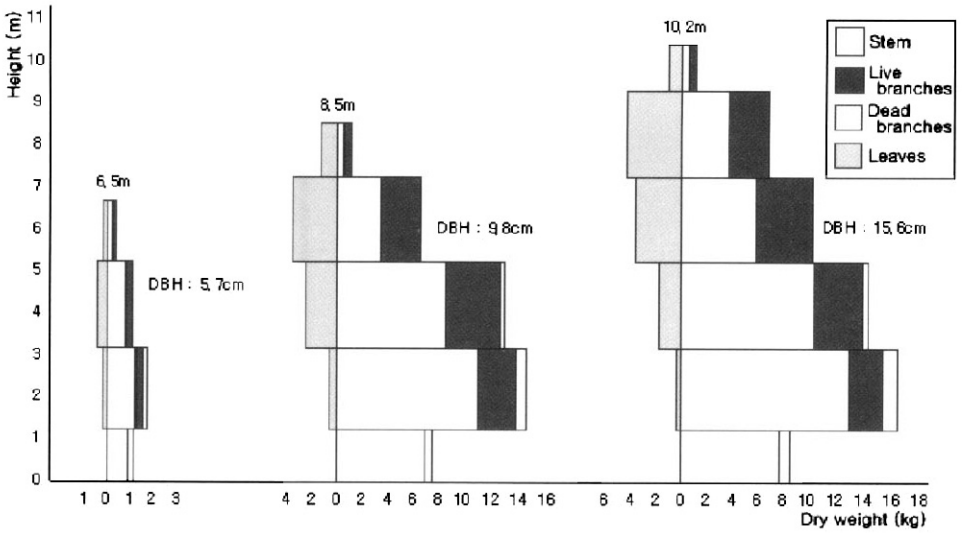

Fig. 1. Vertical biomass distribution for each organ of dominant, intermediate, and suppressed trees in *Pinus koraiensis* stand.

3. 결과 및 고찰

3.1. 생산구조 분석

Fig. 1과 같이 24년생 잣나무 임분의 광합성 부위는 지상 3 m부터 시작되고 있으며, 최대 광합성 부위는 지상 7~9 m 높이에서 나타나고 있다. 잣나무는 내음성이 강한 수종이기 때문에 자연낙지가 거의 없어 24년생 낙엽송 임분의 최대 광합성 부위 15~16 m (권 등, 1998)에 비해 수고가 낮고 광합성 층도 낮게 형성되어 있는 것이 특징이다. 경기도 광주지방 22년생 잣나무 임분의 최대 광합성 부위는 7.2 m 부위에서 나타나며 광합성 부위가 수관 상부에 몰려있는 역삼각형의 형태를 나타내고 있는 반면(이와 박, 1987), 경기도 포천지방 35년생 잣나무 임분의 최대 광합성 부위는 우세목 11.2~13.2 m, 피압목 8.2~10.2 m에 나타나 전체 수고의 3/4 부위에 위치하고 있다(이 등, 1998). 본 연구 대상 임분에서는 심한 임내 경쟁으로 인해 우세목과 피압목 모두 광합성 부위가 수관 상부에 몰려있으며, 수관 하부에는 고사지가 다수 발생하고 있고, 수관의 수직분포도가 22년생과 35년생 잣나무 임분의 중간 형태를 보이고 있다.

Fig. 1에서 고사지가 발생한 높이까지 가지치기를 시행한다면 우세목의 경우 전체의 40% 정도가 대상이 되며, 중간목은 60% 이상이 가지치기 된다. 또한 고사지가 다량 발생하고 있는 높이까지 가지치기를 한다면, 우세목은 전체의 20% 정도, 중간목은 30% 정도이다. 따라서 가지치기의 강도는 약 30% 내외로 하는 것이 좋을 것으로 판단된다. 또한 조사지 안에 고사목이 전체의 25% 가량 발생할 정도로 임내 경쟁이 극심하므로 솎아베기도 필수인데, Fig. 2에서 생육이 극히 불량한 흉고직경 6 cm 이하의 잣나무를 벌채하면 ha당 675 본이 해당되어 약 30%의 간벌 강도가 적용된다.

3.2. 바이오매스 현존량 및 연간 순생산량

3.2.1. 상대생장식

벌채한 9 본의 잣나무 표본목에서 수고곡선식을 유도하였으며($H=0.425D+3.612$, $R^2=0.93$), 표본목의 D^2H와 줄기 건중(Ws), 수간목질부 건중(Wst), 수간수피부 건중(Wbk), 당년생 가지 건중(Wb_1), 가지 건중(Wb), 고사지 건중(Wdb), 당년생 잎 건중(Wl_1), 전

Table 2. Dry weight (g) of tree component (stem, branches and leaves) of sample trees in *P. koraiensis* stand

DBH (cm)	Height (m)	Stem	Stem-wood	Stem-bark	Dead branches	Current twigs	Live branches	Current leaves	Previous leaves
4.5	5.5	1,998	1,627	371	111	41	421	100	236
5.5	5.1	3,789	3,200	589	515	32	650	165	458
5.7	6.5	3,696	3,095	600	511	49	593	252	668
7.5	6.8	6,696	5,633	1,063	613	73	1,052	385	1,014
9.8	8.5	13,955	11,916	2,039	681	111	3,186	485	2,384
10.4	8.1	15,940	13,642	2,299	783	121	3,335	626	2,949
13.2	9.3	27,943	24,078	3,865	877	172	8,103	1,121	5,782
14.2	9.2	32,901	28,468	4,433	1,398	187	11,010	1,333	6,499
15.6	10.2	43,533	37,868	5,665	1,515	221	13,801	1,659	8,413

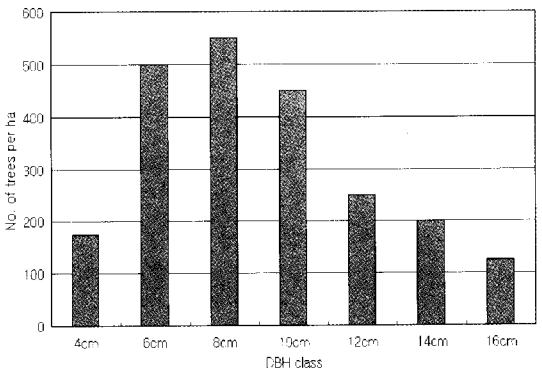

Fig. 2. No. of *P. koraiensis* in the study sites by DBH class.

년생 잎 건중(Wl_2)은 Table 2와 같이 나타났다. 여기서 유도된 상대생장식을 Table 3, 4에 정리하였다.

본 연구에서 얻은 상대생장계수를 유사한 연령의 낙엽송과 비교해보면, 월악산 지역 24년생 낙엽송(권 등, 1998)의 상대생장계수 0.95(줄기), 1.18(가지), 1.14(잎)와 수간, 가지, 잎의 기울기 값이 유사하게 나타났다. 한편 22년생 잣나무 임분(이와 박, 1987)의 상대생장계수 0.93(줄기), 1.43(가지), 1.34(잎)과 비교하면 줄기와 잎의 계수는 크고 가지의 계수가 더 작은 것으로 나타났는데, 우세목이 더 많은 엽량을 확보함으로서 상대적으로 열세목에게서 광 확보 기회를 크게 빼앗는 것으로 해석된다. 한편, 권(1982)은 18년생 잣나무 인공림에서 D^2H와 줄기, 가지, 잎 사이의 상대생장계수는 각각 0.93, 1.13, 1.01이라고 하였고, 이(1994)는 55년생 잣나무 임분의 값이 각각 0.97, 1.13, 1.05로 보고하였는데, 본 연구의 24년생 잣나무 임분과 비교하면 가지의 값이 크고 줄기와 잎은 두 연구의 중간값으로 나타났다.

3.2.2. 현존량

상대생장식에 표준지에서 측정한 모든 임목의 D^2H를 대입하여 계산한 결과로 24년생 월악산 잣나무 조림지의 바이오매스 현존량과 연간 순생산량을 Table 5에 나타내었다. 잣나무림의 줄기부 바이오매스는 26.57 ton/ha (56.5%), 수피 4.27 ton/ha (9.1%), 1년생 가지 0.21 ton/ha (0.4%), 가지 8.64 ton/ha (18.4%), 고사지 1.45 ton/ha, 당년생 잎 1.25 ton/ha (2.6%), 전년생 잎 6.07 ton/ha (12.9%), 지상부 전체 47.01 ton/ha이었다.

이러한 결과는 18년생 잣나무 임분(권, 1982)에서 줄기 82.6 ton/ha (67.3%), 가지 27.7 ton/ha (22.5%), 잎 12.5 ton/ha (10.2%), 지상부 현존량 124.8 ton/ha, 22년생 잣나무 임분(이와 박, 1987)에서 줄기 82.6 ton/ha (67.3%), 가지 27.7 ton/ha (22.5%), 잎 12.5 ton/ha (10.2%), 지상부 현존량 124.8 ton/ha, 28년생 잣나무 임분(이와 김, 1997)에서 줄기 46.6 ton/ha (55.3%), 가지 19.2 ton/ha (30.2%), 잎 9.5 ton/ha (14.5%), 지상부 현존량

Table 3. The regression equations, the coefficient of determination (R^2), and t-value for estimating the biomass of *P. koraiensis*

Equation	R^2	t-value	Pr>[t]
logWs = 0.9543logD^{2}H + 1.3875	0.99	28.88	< 0.001
logWst = 0.9708logD^{2}H + 1.2712	0.99	27.58	< 0.001
logWbk = 0.8641logD^{2}H + 0.8125	0.99	37.54	< 0.001
logWb$_1$ = 0.6087logD^{2}H + 0.2797	0.97	16.23	< 0.001
logWb = 1.1598logD^{2}H + 0.1672	0.97	17.60	< 0.001
logWdb = 0.5744logD^{2}H + 1.2181	0.70	4.45	< 0.01
logWl$_1$ = 0.8321logD^{2}H + 0.3763	0.97	16.92	< 0.001
logWl$_2$ = 1.1107logD^{2}H + 0.1765	0.99	31.34	< 0.001

Ws; Dry weight of stem (g), Wst; Dry weight of stemwood (g), Wbk; Dry weight of stembark (g), Wb$_1$; Dry weight of current twigs (g), Wb; Dry weight of branches (g), Wdb; Dry weight of dead bramches (g), Wl$_1$; Dry weight of current leaves (g), Wl$_2$; Dry weight of previous leaves (g), D^{2}H; multiplying square of DBH (cm) by tree height (m)

Table 4. The regression equations, the coefficient of determination (R^2), and t-value for estimating the leaf biomass of *P. koraiensis*

Equation	R^2	t-value	Pr>[t]
logWl$_1$ = 0.8663logWs − 0.8110	0.97	15.53	< 0.001
logWl$_1$ = 0.9394logWbk − 0.3307	0.96	13.16	< 0.001
logWl$_1$ = 1.3206logWb$_1$ + 0.0853	0.93	10.03	< 0.001
logWl$_1$ = 0.6973logWb + 0.3242	0.93	10.76	< 0.001
logWl$_1$ = 0.7495logWl2 + 0.2430	0.98	20.72	< 0.001
logWl$_2$ = 1.1583logWs − 1.4163	0.99	29.27	< 0.001
logWl$_2$ = 1.2605logWbk − 0.7883	0.99	23.97	< 0.001
logWl$_2$ = 0.9361logWb + 0.0891	0.97	15.08	< 0.001
logWl$_2$ = 1.3128logWl$_1$ − 0.2669	0.98	20.72	< 0.001

75.3 ton/ha, 그리고 35년생 잣나무 임분(이 등, 1998)에서 줄기 70.9 ton/ha (64.8%), 가지 25.4 ton/ha (23.2%), 잎 13.1 ton/ha (12.0%), 지상부 현존량 109.4 ton/ha 등과 비교하였을 때, 엽량의 비율은 높지만 줄기와 가지의 바이오매스는 크게 떨어지는 것이다. 이러한 결과가 나온 이유는 선행 연구들의 대상 조림지가 지속적인 숲가꾸기 관리가 이루어진 반면, 본 연구대상지의 임분은 토양환경이 잣나무의 생육에 매우 열악한데다가 이미 간벌시기를 놓침으로서 극심한 경쟁으로 인해 생장에 장해를 겪고 있기 때문이라고 생각된다.

한편 타 수종과의 바이오매스 현존량 및 분포 비율을 비교해보면, 13년생의 낙엽송 임분에서 줄기 51.7 ton/ha (74.5%), 가지 12.4 ton/ha (17.9%), 잎 5.3 ton/ha (7.6%), 지상부 현존량은 69.4 ton/ha (Hatiya 등, 1966), 15년생 낙엽송 임분에서 줄기 47.70 ton/ha (74.9%), 가지 11.85 ton/ha (18.6%), 잎 4.11 ton/ha (6.5%)로 지상부 현존량 63.66 ton/ha (임 등, 1981), 리기다소나무 임분의 지상부 현존량 23.88~54.09 ton/ha (임 등, 1982), 8년생 리기다소나무와 리기테다소나무 임분의 현존량이 각각 21.60 ton/ha와 22.80 ton/ha (김, 1976), *Pinus sylvestris* 조림지에서 11년생 15.36 ton/ha, 17년생 22.93 ton/ha (Ovington, 1957)로 나타났다. 이상의

Table 5. The tree biomass and annual net production of *P. koraiensis* stand

Component	Stem	Stem-wood	Stem-bark	Current twigs	Live branches	Dead branches	Current leaves	Previous leaves	Aboveground total
Biomass (ton/ha)	30.84	26.57	4.27	0.21	8.64	(1.45)	1.25	6.07	47.01
Distribution of biomass (%)	65.60	(56.53)	(9.07)	0.45	18.38	–	2.65	12.92	100.00
Biomass in last year (ton/ha)	27.40	23.57	3.83	0.20	7.52	–	1.12	5.31	41.55
Annual net production (ton/ha)	3.44	3.00	0.44	0.21	1.12	–	1.25	–	6.02
Distribution of net production (%)	57.14	(49.83)	(7.31)	3.49	18.61	–	20.76		100.00

연구결과와 임령의 차이를 고려해 비교하였을 때, 본 연구가 수행된 잣나무림에서 잎의 비중은 높고 현존량이 비슷하거나 약간 작은 것으로 나타났다.

Satoo (1968)는 임분이 성숙하면 현존량이 일정해진다고 하였으며, 이와 박(1987)은 잣나무 임분의 경우 20~30년생이면 현존량의 증가가 거의 없게 된다고 하였다. 그러나 본 연구 결과를 보았을 때 지위와 임분의 관리에 따라 현존량이 일정해지는 시기가 크게 달라지는 것으로 판단된다.

3.2.3. 연간 순생산량

Table 5에서 월악산 24년생 잣나무림의 연간 순생산량은 줄기 3.0 ton/ha/yr (49.8%), 수피 0.4 ton/ha/yr (7.3%), 1년생 가지 0.2 ton/ha/yr (3.5%), 가지 1.1 ton/ha/yr (18.6%), 당년생 잎 1.3 ton/ha/yr (20.8%), 지상부 합계 6.0 ton/ha/yr로 추정되었다. 이러한 결과는 18년생 잣나무 임분(권, 1982)에서 줄기 8.75 ton/ha/yr (43.7%), 가지 4.02 ton/ha/yr (20.1%), 잎 7.26 ton/ha/yr (36.2%), 지상부 20.03 ton/ha/yr과 22년생 잣나무 임분(이와 박, 1987)에서 줄기 7.79 ton/ha/yr (39.9%), 가지 4.17 ton/ha/yr (21.4%), 잎 7.56 ton/ha/yr (38.7%), 지상부 19.52 ton/ha/yr 등과 비교하였을 때, 잎을 비롯하여 모든 부위의 연간 순생산량이 크게 떨어진 것이다. 선행된 연구와 잎의 현존량을 비교하였을 때, 전체 잎의 양에서는 큰 차이가 나지 않은 반면 최근 1년간 잎의 순생산량에서 큰 차이가 나타났다. 그 이유는 본 연구가 수행된 월악산 지역 잣나무 임분이 숲가꾸기가 전혀 되어 있지 않아 생산성이 크게 악화되었으며, 또한 높은 임분밀도로 인해 많은 양의 전년생 잎 사이에서 당년생 잎이 충분한 광을 확보할 수 없었기 때문으로 생각된다.

3.2.4. 엽면적 지수와 잎의 생산 효율

엽면적 지수 또는 엽량은 순생산량과 비례 관계에 있는 것으로 알려져 있으며(Covington과 Aber, 1980; Doucet 등, 1976), 잣나무 잎의 건중량비 엽면적을 계산하기 위해 잎 표본의 건중량, 부피, 길이, 폭 등을 측정한 결과를 Table 6에 나타내었다. 잣나무 잎의 건중당 엽면적은 당년생 잎 3.12 m^2/ton, 전년생 잎 2.69 m^2/ton로서 ha당 엽중량(건중)인 당년생 잎 1.25 ton, 전년생 잎 6.07 ton에 대입하면 월악산 24년생 잣나무림의 엽면적지수는 20.2 (당년생 잎 3.9, 전년생 잎 16.3)로 추정된다. 이것을 10년생 현사시나무 조림지의 엽면적지수 9.2~16.1(오, 1990), 35년생 신갈나무림의 엽면적지수 11.2과 60~70년생 신갈나무림의 엽면적지수 4.3~6.1(이와 권, 2005) 등과 비교해보면 잣나무의 엽면적지수가 활엽수종보

Table 6. Leaf area and dry weight of *P. koraiensis* sample trees

	Sample no.	Mean length (mm)	Mean volume (㎖)	Leaf area (mm^2)	Dry weight (g)
Current leaves	1	6.81	0.0092	1.17	0.5
	2	7.55	0.0127	1.45	0.6
	3	10.26	0.0150	1.83	0.6
	4	8.71	0.0148	1.68	0.4
	5	6.80	0.0190	1.68	0.4
Previous leaves	1	8.70	0.0184	1.87	0.6
	2	7.91	0.0256	2.10	0.6
	3	14.84	0.0372	3.47	1.7
	4	10.24	0.0284	2.52	0.7
	5	9.37	0.0422	2.94	1.2

Table 7. The production efficiency of leaf of *P. koraiensis* stand

Components	*P. koraiensis*
Leaf biomass (ton/ha)	7.32
Aboveground production (ton/ha/yr)	6.02
Stem production (ton/ha/yr)	3.44
Leaf area index (LAI)	20.22
Efficiency of leaf to produce stem (ton/ton/yr)	0.47
Biomass/LAI (ton/ha)	0.30

다 더 높은 것으로 나타났다.

Table 7은 잎의 생산 효율을 계산한 것인데, 줄기부 생산 효율이 0.47로서 관리가 지속된 22년생 잣나무 조림지의 줄기부 생산 효율 0.62(이와 박, 1987)에 비해 현저하게 낮다. 오(1990)는 임분밀도가 1,000~4,000 본/ha인 10년생 현사시나무 조림지의 엽면적지수를 조사한 결과 임분밀도가 낮을수록 엽면적지수와 바이오매스가 높아진다고 하였는데, 본 연구지역의 임분밀도가 2,250 본/ha인 점을 고려하면 적절한 숲가꾸기 작업으로 엽면적지수와 생산 효율을 크게 높힐 수 있을 것으로 기대된다.

3.3. 잣나무 임분의 에너지량

월악산 24년생 잣나무 임분의 에너지량을 Table 8에 정리했다. 여기에 따르면 24년생 잣나무 임분의 ha당 지상부의 총 에너지량은 1,028 GJ/ha이고 연간 에너지 고정량(지상부)은 133 GJ/ha/yr로 나타났으며, 이것은 같은 열량의 석유로 환산하였을 때 지상부 전체가 24.5 TOE/ha, 연간 지상부에 고정되는 양은 3.2 TOE/ha/yr에 해당한다. 줄기부에 전체 에너지량의 64.2%가 집중되어 있으며, 연간 에너지 고정량에서도 54.9%로 많은 비중을 차지하고 있다. 잎은 연간 에너지 고정량에서 22.6%를 차지하고 있는데, 가지

Table 8. Energy content and annual energy content of *P. koraiensis* stand

Component	Stem	Stem-wood	Stem-bark	Current twigs	Live branches	Dead branches	Current leaves	Previous leaves	Aboveground total
Energy content (GJ/ha)	660	568	92	5	186	(31)	30	147	1,028
Annual energy content (GJ/ha/yr)	73	64	9	5	24	—	30	—	133

치기와 솎아베기와 같은 숲가꾸기 작업이 이루어진다면 이 비율은 더 높아질 것으로 생각된다.

한편, 본 연구에서 월악산 24년생 잣나무림의 지상부 총 에너지량 1,028 GJ/ha을 다른 수종과 비교해보면 35년생 신갈나무림 3,000 GJ/ha, 60~70년생 신갈나무림 3,508~4,205 GJ/ha, 30년생 낙엽송림 8,357 GJ/ha, 48년생 소나무림 6,087 GJ/ha 등에 비해서 작게 나타났다. 잣나무림 내에 연간 고정되는 에너지량(133 GJ/ha/yr) 역시 35년생 신갈나무림 441 GJ/ha/yr, 60~70년생 신갈나무림 238~292 GJ/ha/yr, 30년생 낙엽송림 1,256 GJ/ha/yr, 48년생 소나무림 393 GJ/ha/yr에 비해 적은 것으로 나타났다(이와 권, 2005). 그 이유는 이 지역의 토양 환경이 잣나무가 생육하기에 적당하지 못한데다가 조림후 숲가꾸기 작업이 전혀 이루어지지 않아 심한 경쟁으로 고사목이 다량 발생하는 등 임분의 바이오매스 생산성이 크게 떨어진데 있다고 생각된다.

4. 결 론

충북 월악산 북동 사면 지역(해발 380 m)에서 24년생 잣나무 인공림의 바이오매스와 에너지량을 추정한 결과, 월악산 잣나무림의 바이오매스는 줄기부 26.6 ton/ha, 수피부 4.3 ton/ha, 1년생 가지 0.2 ton/ha, 가지부 8.6 ton/ha, 고사지 1.5 ton/ha, 당년생 잎 1.3 ton/ha, 전년생 잎 6.1 ton/ha로서 고사지를 제외한 지상부 전체는 47.0 ton/ha으로 나타났다. 또한 연간 순생산량은 줄기부 3.0 ton/ha/yr, 수피부 0.4 ton/ha/yr, 1년생 가지 0.2 ton/ha/yr, 가지부 1.1 ton/ha/yr, 당년생 잎 1.3 ton/ha/yr, 지상부 합계 6.0 ton/ha/yr로 추정되었다. 이것을 열 에너지량으로 환산하면 잣나무림의 지상부 전체 에너지량은 1,028 GJ/ha, 연간 에너지 고정량(지상부)은 133 GJ/ha/yr로 추정되었다. 또한 조사 임분의 엽면적지수는 20.2로 나타났다.

월악산 지역의 잣나무림은 심한 경쟁과 줄기 아랫부분까지 달려있는 살아있는 가지들로 인해 고사지가 다수 발생하고 있으며 높은 임분밀도로 생장에 장해를 받고 있으므로 가지치기와 간벌이 시급한 곳이다. 따라서 고사지가 많이 발생하는 높이까지 30%의 강도로 가지치기할 필요가 있으며, 간벌 역시 30% 이상의 중도 간벌이 필요하다. 30% 강도의 가지치기시 2.6 ton/ha의 폐 바이오매스가 나오며, 30% 강도의 간벌을 시행하면 14.1 ton/ha의 폐 바이오매스가 나온다. 이것은 현재의 연간 순생산량으로 복구되는 시간을 추정하였을 때 가지치기는 8년, 간벌은 2년에 해당되지만, 지금 유령림을 벗어나는 단계이기 때문에 숲가꾸기 작업으로 생장이 더욱 왕성해져서 이 기간은 크게 단축될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. 권기철, 김홍은, 이종희. 1988. 낙엽송 인공 조림 임분의 생산구조와 생산성. 임산에너지 17(1): 1~7.
2. 권태호. 1982. 경기도 광주지방 잣나무 인공림의 물질생산에 관한 연구. 서울대학교 석사학위 논문. p. 58.
3. 김갑덕, 김철민. 1988. 국내 삼림 biomass의 생산에 관한 연구와 동향. 임산에너지 8(2): 94~107.
4. 김갑덕, 박재욱, 박인협, 김철민, 정석학. 1985. 리기다소나무와 아까시나무의 성장과 물질생산량에 관한 연구. 임산에너지 5(1): 1~9.
5. 김시경, 정좌용. 1985. 굴참나무천연림의 생산구조 및 물질생산력에 관한 연구. 한국임학회지 70: 91~102.
6. 김준호. 1976. 삼림의 생산구조와 생산력에 관한 연구. III. 리기다소나무와 리기테다소나무의 비교. 식물학회지 19(3): 85~91.
7. 오정수. 1990. 밀도와 수령에 따른 현사시 엽면적지수와 물질생산. 임연연보 41: 1~8.
8. 이경재. 1984. 잣나무 인공림에서 밀도조절에 따른 생장 및 물질생산의 비교연구. 서울대학교대학원 박사학위논문. p. 42.
9. 이경재, 박인협. 1987. 경기도 광주지방 22년생 잣나무 및 신갈나무림의 물질생산량과 무기영양물 분포. 임산에너지 7(1): 11~21.
10. 이경학, 정영교, 손영모. 1998. 경기도 포천지방 35년생 잣나무인공림의 바이오매스에 관한 연구. 한국산림측정학회지 1(1): 61~68.
11. 이돈구, 권기철. 2005. 산림 폐 바이오매스를 활용한 발효열교환장치 개발. 농림부 농림기술관리센터. pp. 29-92.
12. 이돈구, 김갑태. 1997. 경기도 광주지방에서 자라는 참나무류, 낙엽송 및 잣나무의 수형특성과 물질분배. 한국임학회지 86(2): 208~213.

13. 임경빈, 김갑덕, 이경재, 김용식, 박인협, 김갑태, 이승호, 박효섭. 1981. 15년생 낙엽송임분의 성장 및 생산구조. 임산에너지 1(1): 4~12.
14. 임경빈, 김갑덕, 이경재, 권태호. 1981. 낙엽송조림지의 생산구조에 관한 연구. 서울대학교연습림연구보고 17: 31~37.
15. 임경빈, 이경재, 권태호, 박인협. 1982. 리기다소나무 인공조림지의 물질생산에 관한 연구. 임산에너지 2(2): 1~12.
16. 李景文. 1997. 紅松混交林 生態与經營(Hongsong Hunjiaolin Shengtai Yu Jingying). 東北林業大學出版社. Harbin. p. 260.
17. Covington, W. W. and J. D. Aber. 1980. Leaf production during secondary succession in northern hardwoods. Ecology 61: 200~204.
18. Doucet, R., J. B. Berglund, and C. E. Farnsworth. 1976. Dry matter production in 40-year-old *Pinus banksiana* stands in Quebec. Can. J. Fo Res. 6: 357~367.
19. Hatiya, K., K. Tochiaki, and T. Fujimori. 1966. Analysis on the growth of a young larch (*Larix leptolepis*) plantation with excessively high stand density. J. Jap. For. Soc. 48: 445~448.
20. Johnson, J. D. 1984. A rapid technique for estimating total surface area of pine needles. For.Sc. 30: 913~921.
21. Kira, T., H. Ogawa, and K. Ogino. 1967. Comparative ecological studies on three main type of forest vegetation in Thailand - IV. Dry matter production, with special reference to the Khao Chong rain forest. Nature and life southeast Asia 5: 149~174.
22. Kittredge, J. 1944. Estimation of amount of foliage of trees and stands. Jour. Forestry 42: 90 5~912.
23. Mirov, N. T. 1967. The Genus *Pinus*. The Ronald Press Company, N.Y. p. 602.
24. Oh, J. S., J. W. Kim, Y. H. Jeong, M. Y. Oh, S. K. Park, and S. K. Kim. 1984. Stand structure, volume, and biomass production of 9-year-old *Alnus hirsuta* var. *sibirica* grown in Minirota tion. 1984. Jour. Korean For. Soc. 65: 54~59.
25. Ovington, J. D. 1957. Dry-matter production by *Pinus sylvestris* L. Ann. Bot. N.S. 21: 287~314.
26. Satoo, T. 1968. Primary production relations in woodlands of *Pinus densiflora*. Symposium Primary Productivity and Mineral Cycling in Natural Ecosystem. N.Y. pp. 52-79.
27. Saucier, J. R. 1979. Estimation of biomass production and removal. Proceedings of Impact of Intensive Harvesting on Forest Nutrient Cycling. pp. 172-189.