

충북 월악산 지역 48년생 소나무림의 바이오매스와 에너지량¹

이돈구²·김영수³·권기철³

Biomass and Energy Content of *Pinus densiflora* Stand in Mt. Wolak, Chungbuk Province¹

Don Koo Lee², Young-Soo Kim³ and Ki-Cheol Kwon³

요 약

충북 월악산 동사면(해발 300m)에서 48년생 소나무 천연림의 바이오매스와 연간 순생산량을 추정 한 결과, 소나무림의 바이오매스는 줄기부 87.3 ton/ha, 가지부 41.43 ton/ha, 잎 9.41 ton/ha로서 지상부 전체가 138.14 ton/ha로 추정되었으며, 연간 순생산량은 줄기부 5.3 ton/ha/yr, 가지부 2.93 ton/ha/yr, 잎 2.62 ton/ha/yr로서 지상부 전체 10.85 ton/ha/yr로 추정되었다. 또한 소나무림 지상부의 에너지량은 2,981 GJ/ha, 연간 에너지 고정량은 239 GJ/ha/yr로 나타났다. 한편, 월악산 지역 소나무림의 엽면적지수는 6.58로 나타났다.

ABSTRACT

This study was conducted to understand the biomass and the energy content of 48-year-old *Pinus densiflora* stand planted in Mt. Wolak, Jecheon-si, Chungcheongbuk-do, Korea. The total biomass of aboveground was 138.14 ton/ha (87.3 ton/ha from stemwood, 41.43 ton/ha from live branches, and 9.41 ton/ha from leaves). Annual net production (ANP) of aboveground was 10.85 ton/ha/yr, and the ANP of stemwood, live branches, and leaves were 5.3 ton/ha/yr, 2.93 ton/ha/yr, and 2.62 ton/ha/yr, respectively. Energy content of aboveground was 2,981 GJ/ha, and annual energy accumulation was 239 GJ/ha/yr. The leaf area index (LAI) of *P. densiflora* stand was 6.58.

keywords : *Pinus densiflora*, biomass, net production, energy content, LAI

-
1. 접수 2006년 3월 22일, Received on March 22, 2006.
 2. 서울대학교 농업생명과학대학 산림과학부 Department of Forest Sciences, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea.
 3. 국립산림과학원 Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea.

서 론

오늘날 산림생태계에서 바이오매스에 관한 연구들은 목재 수요의 증가와 대체에너지원으로서의 기능으로 많은 관심이 되고 있으나, 연구에 투입되는 시간과 노동의 강도로 인해 집중적인 연구는 좀처럼 이루어지지 않고 몇몇 연구자들에 의해서만 산발적으로 이루어지고 있다(Black 등, 1998; Caldwell과 Virginia, 1991; 권 등, 1998). 그러나 산림생태계는 지구상에서 단위면적당 순광합성량이 가장 높은 것으로 알려져 있으며(Kimmins, 1997), 최근 산림의 이용율을 극대화시키기 위한 “whole tree harvest” 기술에 의해 줄기 뿐만 아니라 가지, 뿌리, 잎, 수피 등 나무의 모든 부위들이 이용되고 있는 추세이다(이, 1985; 이와 권, 2005). 또한 2000년 이후 또다시 시작된 에너지 고갈 위기로 많은 나라에서 에너지를 확보하기 위한 갈등이 심화되고 있으므로, renewable energy resources이자 대체에너지원으로서 산림의 바이오매스에 대한 연구는 어느 때보다 절실하다(이와 권, 2005).

소나무(*Pinus densiflora* S. et Z.)는 우리나라에서 가장 많이 분포하며, 북위 43° 20'의 함북 증산에서부터 33°20'의 제주 한라산에 이르고 해발 1300m 아래에 분포한다(정과 이, 1965). 소나무는 생태적 적응 범위가 대단히 넓고 우리나라의 기후와 환경에 잘 적응해서 전국의 산야에 분포해 있으며 건축재와 펄프재 및 송이 생산 등에 이용되는 중요한 수종이다.

소나무는 천구수종의 특징을 가지고 있으며, 생태적 특성과 경제적 중요성 때문에 그동안 우리나라에 천연갱신과 숲가꾸기에 의한 관리가 많이 시도되어 왔다. 그러나 대부분의 소나무림은 산불이나 인위적 간섭에 의한 피해지에서 자연적으로 이루어졌거나 다른 침엽수 조림지에 소나무가 침입하여 점차 우점하게 된 경우가 많고, 숲가꾸기 계획에 의해 소나무 임분의 관리가 이루어진 경우는 상대적으로 드물다. 소나무

는 다른 수종에 비해 많은 지역에서 장령림으로 분포하고 있어서 순생산성이 높을 것으로 기대되고 있다(이, 1985).

그동안 소나무림의 바이오매스에 대한 연구를 살펴보면 조사 및 측정의 어려움으로 인해 12년생(이 등, 1999), 36년생(이, 1985), 31~42년생(박과 김, 1989), 40년생(이, 2004) 소나무림 등에 대한 연구가 일부 이루어졌을 뿐이며, 이중 소나무림의 엽면적지수나 에너지량에 대한 연구는 거의 없다. 따라서 본 연구에서는 우리나라의 천연림에서 우점하고 있는 수종인 48년생 소나무 임분의 바이오매스 생산기구를 파악하여 그 생산량과 에너지량 및 엽면적지수를 알아내는데 목적이 있다.

재료 및 방법

1. 조사지 선정

본 연구는 충북 제천시 월악산(충북대학교 농과대학 연습림) 지역의 소나무 천연림을 대상으로 수행되었다. 행정구역상 충북 제천, 충주, 단양과 경북 문경에 걸쳐 있고, 동경 128° 02'~128° 20', 북위 36° 47'~36° 59'에 위치해 있다. 월악산 지역은 과거 화전민에 의해 산림이 훼손된 이후 조성된 이차림이며, 남사면과 능선, 산정부에서는 소나무가 우점하고 있고, 계곡 주변의 평탄지에도 일부 소나무림이 분포하고 있다. 월악산 지역 소나무림은 대부분 평균 임령이 40년 이상인 장령림으로서 어린 나무가 거의 없다.

월악산 지역은 우리나라 기후 구분에서 제천을 중심으로 한 소백산맥 산간지역구로 1월과 7월의 일교차가 크고 1월의 상대습도가 낮은 특성을 갖고 있다. 최근 5년간 연습림 기상 자료와 제천시의 기상 자료를 보면 연평균 온도 11.0℃, 연평균 최고온도 21.0℃, 연평균 최저온도 -4.6℃, 연평균 강수량 1,576mm로서 온대 중부의 기후 특성을 보이고 있다(권, 2006).

2. 임분 및 바이오매스 조사

2003년 7월에 48년생 소나무림을 대상으로 20m×20m 크기의 조사구를 평균적인 임상을 보이는 곳에 3개 설치하여 매목조사를 실시했다. 그리고 3개의 조사구 중 흉고직경과 수고가 평균값을 보인 조사구에서 흉고직경이 6cm 이상인 임목을 흉고직경급별로 1본씩 총 5본 선정하여 벌목하고 지상부에서 2m 간격으로 줄기(수피, 목부), 가지, 잎의 생중량을 측정했다. 이때 각 표본목에서 줄기, 가지, 잎의 일부를 채취하였으며, 실험실에서 건조기로 80℃ 이상에서 항중량에 이를 때까지 건조시킨 후 건조중량지수를 산출하고 생중량에 적용시켜 전체 건조중량을 계산했다.

3. 현존량 및 순생산량 추정

현존량의 추정은 D^2H 와 W_s (줄기 건조), W_b (가지 건조), W_l (잎 건조)과의 관계를 대수회귀식으로 한 상대생장식에 의해서 계산했다. 조사지내의 지상부 현존량(W_t)의 추정은 이 상대생장식을 전임목에 적용시켜, $W_t = W_s + W_b + W_l$ 로 구했다.

연간 순생산량의 추정은 수간석해를 하여 1년간의 수고 및 흉고직경의 성장량을 조사하고 여기서 얻은 연간 흉고직경 성장량(D)과 연간 수고성장량(H)에서 D^2H 를 계산하고 이를 상대생장식에 대입하여 전년과 당년의 현존량차로 계산했다.

4. 엽면적 측정

소나무의 엽면적은 Johnson(1984)의 침엽 표면적 계산식을 이용하여 측정했으며, 여기서 부피는 마이크로 피펫을 이용하여 50개씩의 침엽 전체 부피를 측정했고, 각 침엽의 길이와 폭을 마이크로미터로 측정했다.

$$A = 2l \left(1 + \frac{\pi}{n}\right) \sqrt{\frac{vnl}{\pi l}}$$

l =침엽의 길이, n =침엽의 개수, v =침엽의 부피

5. 임분 환경 분석

바이오매스를 조사한 각 임분의 물리적 환경 특성을 파악하기 위해, 지형, 해발고, 사면방위, 경사도, 기상 환경, 토양 특성 등을 조사했다. 토양 특성을 조사하기 위해 각 조사구마다 3군데에서 낙엽층을 제거한 후 A층 토양을 균등 채취했다. 이렇게 채취된 토양은 토양채취비닐에 밀봉한 후 실험실로 운반하여 물리·화학적 분석을 했다.

각 조사구에서 채집한 토양의 물리적 성질 및 화학적 성질에 대한 분석을 위해 실험실로 운반한 후 15일간 음건시켰다. 음건시킨 토양은 2mm 표준망체를 이용해 입자의 직경이 2mm 이하인 토양에 대해 토성, 토양 수분, 토양 pH, 전질소함량, 유기물함량 등을 측정했다. 여기서 토성의 결정은 비중계법으로 점토, 미사, 모래의 비율을 구하여 미국농무성(USDA; U. S. Department of Agriculture)법에 따랐다. 토양내 전질소함량은 Kjeldahl 분석방법을 이용했고, 수분함량은 신선토양을 건조기에서 100℃로 24시간 건조시켜 그 무게를 측정해서 계산했다. 유기물함량은 전건 토양을 전기화로서 450℃로 12시간 태워 측정했으며, 토양 pH는 신선토양 10g에 H_2O 를 1:5의 비율로 혼합하여 24시간 진탕한 후 측정했다(농업과학기술원, 2000).

결과 및 고찰

본 연구에서 조사된 충북 제천시 월악산내 소나무림의 개황을 Table 1에 정리했다. 평균 임령은 48년생이고 평균 흉고직경이 23cm로서 장령림에 속하며, 흉고직경 2cm 이상의 유령목을 포함한 ha당 본수가 975본으로서 속아

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

Altitude (m)	Aspect (°)	slope (°)	No. of trees per ha	Average DBH (cm)	Average height (m)
300	NE80	10	975	22.7	12.3
Coverage (%)	Soil texture	Soil pH	Soil moisture (%)	Total N (%)	Organic matter (%)
60	S, SL	4.5	18.7	0.12	4.06

Table 2. The regression equations, the adjusted coefficient of determination, and F value for estimating the biomass of *P. densiflora*.

Equation	adj. R ²	F value
$\log W_s = 0.8275 \log D^2 H + 1.6836$	0.94	63.94**
$\log W_b = 1.1075 \log D^2 H + 0.1960$	0.90	35.47**
$\log W_l = 0.8699 \log D^2 H + 0.4561$	0.91	43.57**

**Indicates significance at 0.01.

베기 작업이 없었음에도 임분밀도가 낮은 편이다. Table 1에서 소나무림의 토양 환경을 보면, 토성은 대부분 사토이고 토양수분이 적으며 토양pH가 매우 낮은 등, 전반적으로 식물 생육에 불리한 조건이다. 척박한 토양 특성 덕분에 참나무류와 다른 활엽수종들의 침입이 적어 이 지역에서 소나무림이 계속 유지되고 있는 것으로 판단된다.

별채한 표본목의 D²H와 줄기 건중(Ws), 가지 건중(Wb), 잎 건중(Wl)에서 유도된 상대생장식을 Table 2와 Figure 1에 나타내었다. Table 3은 Table 2에 유도된 상대생장식을 이용해 월악산 동사면 지역(해발 300m)에서 48년생 소나무림의 총생산량과 순생산량을 계산한 것이다. 여기에 따르면 월악산 소나무림의 바이오매스는 줄기부 87.3 ton/ha, 가지부 41.43 ton/ha, 잎 9.41 ton/ha로서 지상부 전체의 바이오매스는 138.14 ton/ha로 추정됐으며, 연간 순생산량은 줄기부 5.3 ton/ha/yr, 가지부 2.93 ton/ha/yr, 잎(1년생) 2.62 ton/ha/yr로서 지상부 전체의 연간 순생산

량은 10.85 ton/ha/yr로 추정됐다. 권(2006)이 조사한 월악산 지역 35년생 신갈나무와 비교했을 때, 지상부 전체의 바이오매스와 연간 순생산량 모두 소나무림이 더 작은 것으로 나타났는데, 본 연구대상지의 임분이 낮은 밀도를 보이고 있기 때문이다.

본 연구결과를 타 연구와 비교하면, 김과 윤(1972)이 발표한 춘천지방의 소나무 자연림 현존량 26.87ton/ha보다는 훨씬 크고, 이(1985)가 발표한 평균임령 36년생인 강원도 소나무 천연림 현존량 198.82ton/ha보다는 다소 작다. 또한 연간 순생산량을 비교하면 이(1985)가 연구한 강원도 소나무림은 연간 순생산량이 15.87 ton/ha/yr에 비해 10.85 ton/ha/yr로서 더 작다. 따라서 월악산 지역의 소나무림은 임령에 비해 높은 축적을 보여주지 못하는 것으로 나타났다. 다른 활엽수종의 침입이 거의 없는데다, 그동안 이 지역에서 간벌이 시행된 적이 없었는데도 임분밀도가 ha당 1,000본이 채 안되는 것을 고려하면 입지 조건이 상당히 불리한 것이 낮은 연

Table 3. The tree biomass and annual net production of *P. densiflora* stand.

Component	Stem	Branches	Leaves	Aboveground total
Biomass (ton/ha)	87.30 (63.20)	41.43 (29.99)	9.41 (6.81)	138.14 (100.00)
Annual net production (ton/ha/yr)	5.30 (48.85)	2.93 (27.00)	2.62 (24.15)	10.85 (100.00)

*Percentage of each component to the total amount

Table 4. Energy content and annual energy content of *P. densiflora* stand.

Component	Stem	Branches	Leaves	Aboveground total
Energy content (GJ/ha)	1,868	886	227	2,981
Annual energy accumulation (GJ/ha/yr)	113	63	63	239

간 순생산량을 보인 이유로 생각된다.

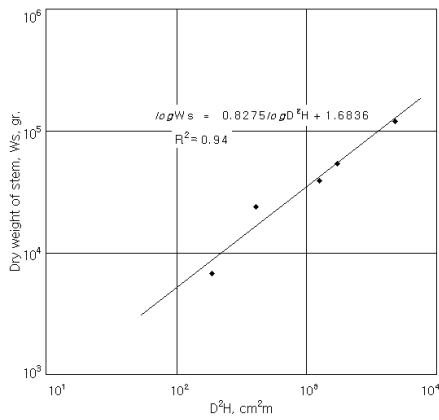
월악산 지역 소나무림은 수간 하부에 굵은 가지가 필요 이상으로 많이 뺏어나와있기 때문에 가지치기 작업이 필요하다. 만일 이 지역에서 수간 하부의 굵은 가지 위주로 가지 전체 무게의 10%를 제거하는 가지치기를 한다면 ha당 약 4 ton의 바이오매스를 이용할 수 있는데, 이것은 2년간의 성장량에 해당하는 것이다. 또한 10%(중량비)의 약도 간벌을 실시하면 지상부 약 9 ton/ha의 바이오매스가 나오는데, 이것은 2년간의 성장량에 해당하여 같은 지역 35년생 신갈나무림에 비해 성장속도가 느리다. 따라서 이 지역의 소나무림에서는 간벌의 주기와 강도를 신갈나무림보다 더 낮춰 잡아야 할 필요가 있는 것으로 보인다.

본 연구에서 소나무의 부위별 발열량을 측정하여 평균한 결과, 신갈나무의 목질부가 4,750 kcal/kg이고 잎이 4,900 kcal/kg인 것에 비해 소나무는 목질부가 5,110 kcal/kg, 잎이 5,770 kcal/kg으로 측정되어 같은 단위 중량당 소나무의 열에너지량이 신갈나무보다 더 높은 것으로 나타났다.

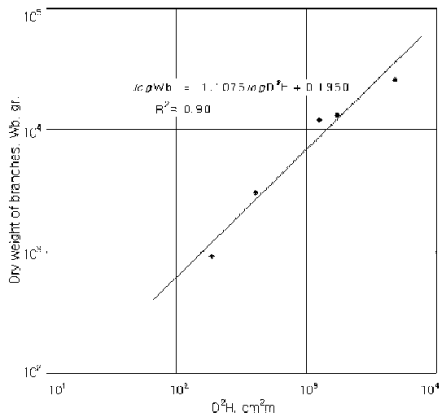
이러한 실험 결과에 따라 월악산 소나무림의

총 에너지량(지상부)과 연간 에너지 고정량(지상부)을 계산한 결과를 Table 4에 나타냈다. Table 4를 보면 월악산 소나무림의 총 에너지량은 2,981 GJ/ha이고 연간 에너지 고정량은 239 GJ/ha으로 나타났다. 이 값을 신갈나무림의 에너지량(권, 2006)과 비교하면, 임분 전체의 총 에너지량에서는 35년생 신갈나무림(지상부 3,000 GJ/ha)와 비슷하고 중왕산 60~70년생 신갈나무림(북사면 지상부 4,205 GJ/ha, 남사면 지상부 3,508 GJ/ha)보다 낮다. 반면 연간 고정되는 에너지량은 월악산 신갈나무림(지상부 441 GJ/ha/yr)보다 적고, 중왕산 신갈나무림(북사면 지상부 292 GJ/ha/yr, 남사면 지상부 지상부 238 GJ/ha/yr)과 비슷한 것으로 나타났다.

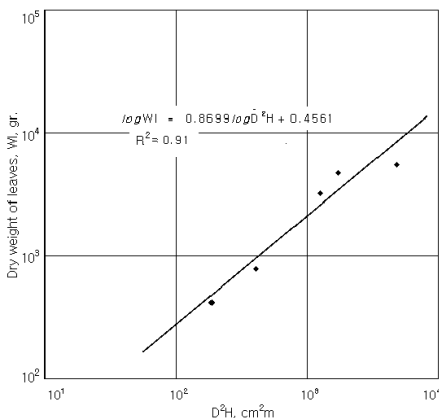
월악산 지역 소나무림의 에너지량을 다시 석유환산톤으로 환산하면, 줄기 44.6 TOE/ha (63%), 가지 21.2 TOE/ha (30%), 잎 5.4 TOE/ha (7%), 지상부 전체는 71.2 TOE/ha에 해당하며, 연간 고정되는 에너지량을 환산하면, 줄기 2.7 TOE/ha/yr (47%), 가지 1.5 TOE/ha/yr (26%), 잎 1.5 TOE/ha/yr (27%), 지상부 전체 5.7 TOE/ha/yr이다. 즉, 월악산 지역 48년생 소나무림 1ha는 1년에 5.7 ton 분량의 석유를 지상부에 생산하



(a) Stem (Ws)



(b) Branches (Wb)



(c) Leaves (Wl)

Figure 1. Allometric relations between dry weights of stem (Ws), branches (Wb) and leaves (Wl) and D²H.

Table 5. Leaf biomass and leaf area of *P. densiflora* sample trees.

Sample	Fresh weight (g)	Dry weight (g)	Volume (ml)	Leaf area (cm²)
A	1.20	0.64	1.00	43.99
B	1.40	0.78	1.34	55.18
C	1.01	0.51	0.78	35.87
Total	3.61	1.93		135.04

여 비축하는 셈이다.

Table 5는 소나무의 엽중량과 엽면적을 측정 한 결과치이며, 이 수치로 건중량에 대한 엽면 적 비를 계산하면 약 69.97 cm²/g이 된다. 따라서 Table 4에서 엽중량 9.41 ton/ha에 대입하면 월악산 48년생 소나무림의 엽면적지수는 6.58 로 계산된다. 이 값은 월악산 신갈나무림의 13.04 보다 낮지만 해발고가 1,000m로 높은 중 왕산 신갈나무림의 6.10(북사면), 4.40(남사면) 에 비해 약간 높은 값이며, 월악산 24년생 잣나 무림의 20.2보다 크게 낮다(이와 권, 2005).

결 론

우리나라에서 소나무림은 대부분 40년생 이 상의 장령림으로 분포하고 있기 때문에 충북 월 악산 동사면 지역(해발 300m)에서 48년생 소나 무 천년림을 대상으로 바이오매스와 연간 순생 산량을 조사하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었 다. 월악산 48년생 소나무림의 평균 흉고직경은 22.7cm, 평균 수고 12.3m로 개체목의 크기가 큰 편이지만, 임분밀도가 ha당 975본으로 매우 낮 았다. 또한 토양 pH가 4.45로 강산성을 띄고 있 어서 식물의 생육에 불리하며, 임분 내에 다른 활엽수종이 거의 침입하지 않고 있다.

월악산 48년생 소나무림의 현존량은 줄기부 87.3 ton/ha, 가지부 41.43 ton/ha, 잎 9.41 ton/ha로 서 지상부 전체의 바이오매스는 138.14 ton/ha로

추정되었으며, 연간 순생산량은 줄기부 5.3 ton/ha/yr, 가지부 2.93 ton/ha/yr, 잎 2.62 ton/ha/yr로서 지상부 전체의 연간 순생산량은 10.85 ton/ha/yr로 추정되었다. 이것을 석유환산톤으로 보면 48년생 소나무림의 지상부는 71.2 TOE/ha이고, 연간 생산되어 지상부에 고정되는 양은 5.7 TOE/ha이다.

월악산 지역 소나무림에서 10%(중량비) 강도의 가지치기를 한다면 ha당 약 4 ton의 바이오매스를 이용할 수 있는데, 이것은 2년간의 성장량에 해당하는 것이다. 또한 10%(중량비)의 약도 간벌을 실시한다고 가정하면 지상부 약 9 ton/ha의 바이오매스가 나오는데, 이것은 2년간의 성장량에 해당하므로 간벌의 주기와 강도를 낮춰 잡아야 한다.

인 용 문 헌

- 권기철. 2006. 신갈나무림의 바이오매스, 탄소 고정량 및 에너지 고정 효율 -위도, 해발고, 사면을 중심으로. 서울대학교 농학박사 학위논문. 126pp.
- 권기철, 김홍은, 이종희. 1998. 낙엽송 인공조림 임분의 생산구조와 생산성. 임산에너지 17(1) : 1-7.
- 김준호, 윤성모. 1972. 삼림의 생산구조와 생산력에 대한 연구 II. 춘천지방의 소나무림과 신갈나무림의 비교. 식물학회지 15(3) : 1-8.
- 농업과학기술원. 2000. 토양 및 식물체 분석법. 농촌진흥청. 202pp.
- 박인협, 김준선. 1989. 한국산 4개 지역형 소나무천연림의 물질 현존량 추정식에 관한 연구. 한국임학회지 78(3) : 323-330.
- 이도형. 2004. 흉고직경과 수고에 의한 소나무(*Pinus densiflora* S. et Z.)의 지상부와 지하부 생체량 추정. 한국임학회지 93(3) : 242-250.
- 이돈구, 권기철. 2005. 산림 폐 바이오매스를 활용한 발효열교환장치 개발. 농림부 농림기술관리센터. p.29-92.
- 이돈구, 권기철, 김영환. 1999. 식재밀도에 따른 강송의 Biomass 생산 및 배분 특성. 임산에너지 18(1) : 6-10.
- 이수옥. 1985. 강원도산 소나무천연림생태계의 Biomass 및 Net Primary Production에 관한 연구. 한국임학회지 71 : 74-81.
- 정태현, 이우철. 1965. 한국삼림식물대 및 적지적수론. 성균관대학교 논문집 10 : 329-435.
- Black, K. E., C. G. Harbron., M. Franklin., D. Atkinson., and J. E. Hodger. 1998. Differences in root longevity of some tree species. Tree Physiol 18 : 259-264.
- Caldwell, M. M., and R. A. Virginia. 1991. Root systems. Pages 367-398 in R. W. Pearcy, J. Ehleringer, H. A. Mooney, and P. W. Rundel (eds.) Plant Physiological Ecology : Field Methods and Instrumentation. Chapman & Hall, London.
- Kimmis, J. P. 1997. Forest Ecology (2nd ed.). Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey, U.S.A. 596pp.