

## 경기도 광주 지역 36년생 리기다소나무림의 바이오매스와 에너지량<sup>1\*</sup>

권기철<sup>2</sup>, 이돈구<sup>3</sup>

### Biomass and Energy Content of *Pinus rigida* Stand in Gwangju, Gyeonggi Province<sup>1\*</sup>

Ki-Cheol Kwon<sup>2</sup> and Don Koo Lee<sup>3</sup>

#### 요 약

경기 태화산 북서사면(해발 250m) 36년생 리기다소나무림의 바이오매스는 수간 목부 166.1ton/ha, 수간 수피부 22.4ton/ha, 가지 51.9ton/ha, 고사지 16.0ton/ha, 당년생 잎 3.8ton/ha, 전년생 잎 6.6ton/ha, 구과 1.3ton/ha로서 지상부 252.0ton/ha로 나타났다. 또한 연간 순생산량은 수간 목부 15.4ton/ha/yr, 수피 1.7ton/ha/yr, 가지 5.2ton/ha/yr, 당년생 잎 3.8ton/ha/yr, 구과 1.3ton/ha/yr, 지상부 27.4ton/ha/yr로 추정되었다. 리기다소나무림 지상부의 에너지량은 5,434GJ/ha, 연간 에너지 고정량은 597GJ/ha/yr로 나타났다. 리기다소나무림의 광합성부는 지상 5.2m부터 시작되고 최대 광합성부는 지상 11-13m 사이의 높이에 나타났다.

#### ABSTRACT

This study was conducted to understand the biomass and the energy content of 36-year-old *Pinus rigida* stand planted in Mt. Taehwa, Gwangju-si, Gyeonggi-do, Korea. The total biomass of aboveground was 252.0 ton/ha (65.9% from stemwood, 8.9% from stembark, 20.6% from live branches, 1.5% from current leaves, 2.6% from previous leaves, and 0.5% from cones). Annual net production (ANP) of aboveground was 27.4 ton/ha/yr, and the ratio of stemwood, stembark, live branches, current leaves, and cones to ANP of aboveground total, 56.3%, 6.1%, 19.1%, 13.9%, and 4.6%, respectively. Energy content of aboveground was 5,434 GJ/ha, and annual energy

1. 접수 2006년 3월 22일 Received on March 22, 2006.

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.

\* 본 논문은 농림부 농림기술개발사업의 지원에 의한 연구(산림 폐 바이오매스를 활용한 발효열교환장치 개발) 결과의 일부임.

accumulation was 597 GJ/ha/yr. Photosynthetic layer of *P. rigida* was shown at about 5.2 m in height, and maximum needle amount of crown at 11 to 13 m in height.

**keywords** : *Pinus rigida*, biomass, net production, energy content

## 서 론

긴 역사 속에서 인류는 오늘날의 문명을 쌓아올리고 유지하기 위해 엄청난 양의 에너지를 소모해왔다. 지금 우리가 주로 사용하고 있는 에너지원은 화석 연료인데, 그 현존량에 한계가 있어서 전세계적으로 새로운 대체 에너지 자원의 개발에 총력을 기울이고 있다(임 등, 1981; 권, 2006). 더욱이 우리나라와 같이 화석 에너지 자원이 부족한 나라에서 갈수록 높아지고 있는 에너지 비용은 개인과 기업의 경제에 있어서 매우 중요한 위치를 차지하게 되었으며, 국가적으로도 정치와 경제 문제의 중심이 되고 있다.

최근 10년간 우리나라의 에너지 소비는 매년 10%라는 세계 최고의 증가율을 기록하고 있으며, 온실가스 배출량 증가율 역시 세계 1위를 기록하고 있다(박, 2005). 특히 2005년 2월에는 교토의정서(기후변화협약에 따른 온실가스 감축 목표에 관한 의정서)가 본격적으로 발효되어 대체 에너지 개발과 산림 생산성 파악의 필요성이 더욱 절실했으며, 산림 바이오매스의 기반 구축을 위한 연구가 진행되고 있다(임과 이, 2004).

리기다소나무(*Pinus rigida* Miller)는 소나무과에 속하면서 북아메리카와 대서양 연안이 원산지인 도입수종이다(Mirov, 1967). 생장이 빠르고 출기가 곧아 1905년 도입된 이래 지난 1960년대와 1970년대에 우리나라 중부지방에서 잣나무와 낙엽송 다음으로 많이 심겨진 3대 조림수종 중 하나로서(김 등, 1985), 오늘날 대부분의 조림지가 30년생 이상의 임령을 보이고 있다(산림청, 2005). 따라서 IV영급 리기다소나무 임분의 바이오매스와 에너지량을 추정하

는 것은 교토의정서에 대응함과 동시에 대체에너지원으로서의 활용을 위해 매우 중요하다고 할 수 있다.

본 연구의 목적은 경기도 광주시 태화산 지역 36년생 리기다소나무 조림지의 바이오매스 생산성과 에너지 축적량을 알아보는 데 있다.

## 재료 및 방법

### 1. 조사지 특성

본 연구는 경기도 광주시 태화산(서울대학교 중부 학술림) 안의 36년생 리기다소나무 조림지를 대상으로 수행되었으며, 이 지역은 과거 벌채후 맹아 갱신된 임분으로서 2000년도에 가지치기와 숲아베기가 시행되었다.

조사구가 위치한 곳의 해발고는 약 250m이고, 사면은 북서쪽, 지형은 사면 중, 하부에 걸쳐 있다(Table 1). 대체적으로 온대 중부의 기후를 보이고 있으며, 토양 pH는 5.4로 산성이다. 숲가꾸기 사업으로 인해 임분밀도가 균일하지 못하고 변이가 매우 심하다. 현재의 임분밀도는 평균적으로 약 700본/ha이고, 임관 율폐도가 70% 정도 이어서 하층식생으로 잣나무(*Pinus koraiensis*), 밤나무(*Castanea crenata*), 신갈나무(*Quercus mongolica*), 졸참나무(*Q. serrata*), 갈참나무(*Q. aliena*), 떡갈나무(*Q. dentata*), 난티잎개암나무(*Corylus heterophylla* var. *heterophylla*), 병꽃나무(*Weigela subsessilis*), 산초나무(*Zanthoxylum schinifolium*), 청미래덩굴(*Smilax china*), 붉나무(*Rhus javanica*), 개웃나무(*R. tricoarpa*), 노린재나무(*Symplocos chinensis* for. *pilosa*), 산뽕나무(*Morus bombycis* var. *bombycis*), 족제비싸리(*Amorpha fruticosa*), 두릅나무(*Aralia elata*), 국

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

Altitude (m)	Aspect (°)	slope (°)	Soil texture	Soil pH	Coverage (%)
250	NE40-50	25	SL	5.4	70
Annual mean temp. (°C)	Annual precipitation (mm)	Stand age (year)	No. of trees per ha	Average DBH (cm)	Average height (m)
10.2	1,400	36	708	25.7	16.7

수나무(*Stephanandra incisa* var. *incisa*), 산딸기(*Rubus crataegifolius*), 땅석딸기(*R. parvifolius* for. *parvifolius*), 으름덩굴(*Akebia quinata*), 담쟁이덩굴(*Parthenocissus tricuspidata*), 고추나무(*Staphylea bumalda*) 등이 다수 자라고 있다.

**2. 조사 방법**

임분의 바이오매스 추정을 위해서 2005년 6월말부터 12월말까지 36년생 리기다소나무 조림지 안에서 20m×20m 크기의 조사구를 6곳 설치하여 흉고직경과 수고 등 매목조사를 실시하였으며, 숲가꾸기 사업으로 조사지 임분밀도의 변이가 매우 심하였기 때문에 과대치와 과소치가 나온 조사구를 제외한 3곳의 매목조사 자료를 평균하여 사용했다.

또한 2005년 7월초에 평균적인 임상을 보인 조사구에서 3cm 팔약으로 흉고직경급별로 표본목 1본씩 총 5본을 선정하고 벌목하여 지상부에서 2m 간격으로 줄기(수피, 목부), 가지, 고사지, 1년생 잎, 다년생 잎, 구과의 중량을 측정했다. 이때 각 표본목에서 줄기, 가지, 고사지, 잎, 구과의 일부를 채취하였으며(줄기는 2m 간격으로 단편 채취, 가지와 잎은 각 높이별로 일정량씩 계층 채취), 실험실에서 건조기로 80℃ 이상에서 항중량에 이를 때까지 건조시킨 후 건조중량 환산지수를 산출하여 전체 건조중량을 추정했다.

현존량의 추정은  $D^2H$ (흉고직경<sup>2</sup>×수고)와  $W_s$

(줄기 건조),  $W_b$ (가지 건조),  $W_l$ (잎 건조),  $W_c$ (구과 건조) 등 각 부위의 관계를 대수회귀식으로 유도한 상대생장식에 의해 계산했다. 연간 순생산량은 수간석해로 알아낸 전년도의 흉고직경 및 수고를 상대생장식에 대입하여 전년과 당년의 현존량차로 계산하였다(Kittredge, 1944; Kira 등, 1967; Saucier, 1979; 임 등, 1981).

열에너지량 측정은 채취한 5본의 리기다소나무 표본목에서 각 부위별(수피, 재부, 잎)로 USA Oxygen Bomb Calorimeter(1241 PARR)를 이용하여 3반복 측정하였다. 측정된 열 에너지량은 부위별로 평균을 낸 다음, 바이오매스 현존량 및 연간 순생산량에 대입하여 임분의 에너지 현존량과 연간 고정량을 추정하였다.

**결과 및 고찰**

**1. 생산구조 분석**

경기도 광주시 태화산 지역 북서사면의 36년생 리기다소나무 조림지에서 우세목, 중용목, 피압목의 바이오매스 수직분포도를 Figure 1에 나타내었다. 광합성부는 지상 5.2m부터 시작되고 있으며, 최대 광합성부는 지상 11-13m 사이의 높이에서 나타나고 있다. 24년생 낙엽송의 경우 최대 광합성부가 15-16m에 나타나고(권 등, 1998) 30년생 낙엽송은 17-19m에 나타나는데(이와 권, 2005) 리기다소나무의 최대

광합성부가 상대적으로 낮게 형성된 이유는 수고가 낙엽송보다 작고 5년전 간벌작업으로 인해 수간 하부에도 가지와 잎이 많이 달릴 수 있었기 때문으로 생각된다.

리기다소나무는 내음성이 약한 수종이기 때문에 자연낙지가 많이 되는데, 지상부 3.2m부터 13.2m 사이에서 수간에 붙어있는 고사지가 발견되었으며, 8-9m 사이에 가장 많았다.

## 2. 리기다소나무의 부위별 바이오매스 추정식

벌채한 36년생 리기다소나무 표본목의  $D^2H$ 와 줄기 건중( $W_s$ ), 수간목질부 건중( $W_{st}$ ), 수간수피부 건중( $W_{bk}$ ), 가지 건중( $W_b$ ), 고사지 건중( $W_{db}$ ), 당년생 잎 건중( $W_{l1}$ ), 전년생 잎 건중( $W_{l2}$ ) 및 구과 건중( $W_c$ )의 상대생장식을 Table 2에 요약했다.

본 연구에서 얻은 36년생 리기다소나무의 상대생장계수(Table 2)를 이와 권(2005)이 보고한 24년생 잣나무와 30년생 낙엽송의 계수와 비교해보면, 24년생 잣나무의 경우 0.95(줄기), 0.97(수간목부), 0.86(수피), 0.61(1년생 가지), 1.16(가지), 0.57(죽은 가지), 0.83(당년생 잎), 1.11

(전년생 잎)이었고, 30년생 낙엽송의 경우 1.00(줄기), 1.27(가지), 1.29(잎)으로서 수고와 흉고직경의 증가에 따라 리기다소나무는 잣나무보다 줄기부 바이오매스가 더 많이 증가하고 낙엽송과는 비슷한 경향을 보여주었다. 반면에 가지부 바이오매스는 잣나무나 낙엽송보다 적게 증가하고 있었으며, 고사지는 잣나무보다 더 크게 증가하였는데 이것은 잣나무가 내음성이 강한 수종인 것에 비해 리기다소나무는 극양수로서 광이 부족해지면 고사지가 크게 증가하기 때문이다(이 등, 1985; 이, 1998). 당년생 잎은 수고와 흉고직경이 증가할수록 리기다소나무가 잣나무보다 더 많아지고 있는 반면 전년생 잎은 잣나무가 리기다소나무보다 더 많아지고 있는데, 그 이유는 가지의 경우와 마찬가지로 두 수종간 내음성의 차이 때문으로 생각된다.

## 3. 리기다소나무림의 바이오매스 현존량과 연간 순생산량

본 연구에서 36년생 태화산 리기다소나무 조림지의 바이오매스와 연간 순생산량을 Table 3에 나타내었다. 리기다소나무림의 줄기부 바이

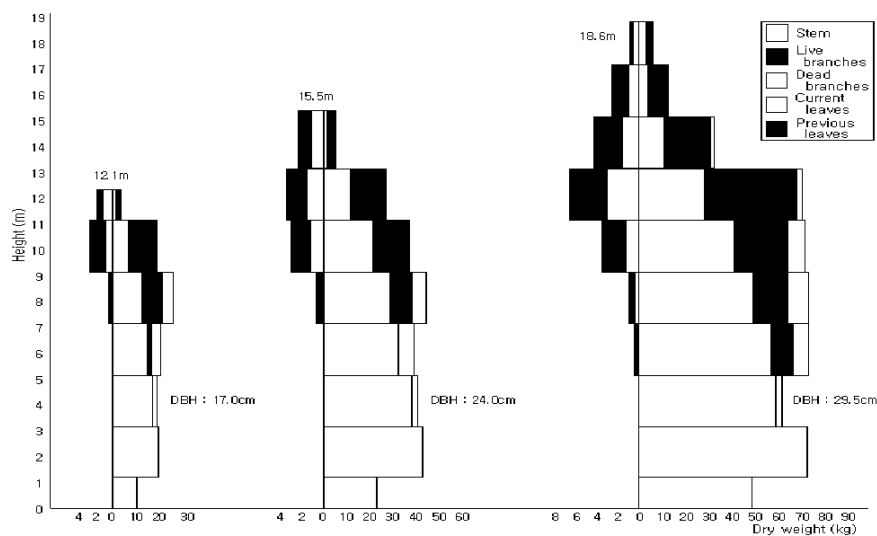


Figure 1. Vertical biomass distribution for each organ of dominant, intermediate, and suppressed trees in *Pinus rigida* stand.

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

Equation	$R^2$	t value	Pr>[t]
$\log W_s = 1.022 \log D^2 H + 1.27$	0.99	47.45	< 0.001
$\log W_{st} = 1.049 \log D^2 H + 1.105$	0.99	31.07	< 0.001
$\log W_{bk} = 0.833 \log D^2 H + 1.12$	0.97	12.30	< 0.005
$\log W_b = 1.143 \log D^2 H + 0.213$	0.96	10.20	< 0.005
$\log W_{db} = 0.877 \log D^2 H + 0.794$	0.91	6.65	< 0.01
$\log W_{l1} = 0.97 \log D^2 H - 0.216$	0.98	18.79	< 0.001
$\log W_{l2} = 0.884 \log D^2 H + 0.38$	0.95	9.30	< 0.005
$\log W_c = 0.704 \log D^2 H + 0.4$	0.73	3.46	< 0.05

Ws; Dry weight of stem (g), Wst; Dry weight of stemwood (g), Wbk; Dry weight of stembark (g), Wb; Dry weight of branches (g), Wdb; Dry weight of dead branches (g), Wl<sub>1</sub>; Dry weight of current leaves (g), Wl<sub>2</sub>; Dry weight of previous leaves (g); Wc; Dry weight of cones, D<sup>2</sup>H; multiplying square of DBH (cm) by tree height (m).

오메스는 188.6ton/ha(74.8%)로서 리기다소나무림 지상부 바이오메스의 대부분을 차지하고 있으며, 이 중 수간 목부는 166.1ton/ha(65.9%), 수간 수피부는 22.4ton/ha(8.9%)이다. 그 외의 부위로는 가지 51.9ton/ha(20.6%), 고사지 16.0 ton/ha, 당년생 잎 3.8ton/ha(1.5%), 전년생 잎 6.6ton/ ha(2.6%), 구과 1.3ton/ha(0.5%)로서 지상부 전체는 252.0ton/ha이었다. 이러한 결과는 리기다소나무 임분의 지상부 현존량 55.25 ton/ha(김, 1971), 8년생 21.60ton/ha(김, 1976),

50년생 126.75ton/ha 및 30년생 106.53ton/ha(김 등, 1985), 37년생 138.2ton/ha(김 등, 1996), *Pinus sylvestris* 조림지에서 11년생 15.36 ton/ha, 17년생 22.93ton/ha(Ovington, 1957) 등의 연구 결과와 비교하였을 때 매우 크게 나타났다.

또한 태화산 리기다소나무림의 지상부 연간 순생산량은 줄기 17.1ton/ha/yr(62.4%), 수간 목부 15.4ton/ha/yr(56.3%), 수피 1.7ton/ha/yr(6.1%), 가지 5.2ton/ha/yr(19.1%), 당년생 잎 3.8ton/ha/yr (13.9%), 구과 1.3ton/ha/yr (4.6%), 지상부 합계

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

Component	Stem	Stem-wood	Stem-bark	Live branches	Dead branches	Current leaves	Previous leaves	Cones	Total
Biomass (ton/ha)	188.6 (74.8)*	166.1 (65.9)	22.4 (8.9)	51.9 (20.6)	16.0 (-)	3.8 (1.5)	6.6 (2.6)	1.3 (0.5)	252.0 (100)
Annual net production (ton/ha/yr)	17.1 (62.4)	15.4 (56.3)	1.7 (6.1)	5.2 (19.1)	(-) (-)	3.8 (13.9)	(-) (-)	1.3 (4.6)	27.4 (100)

\*Percentage of each component to the total amount.

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

Component	Stem	Stem-wood	Stem-bark	Live branches	Dead branches	Current leaves	Previous leaves	Cones	Total
Energy content (GJ/ha)	4,038	3,554	484	1,118	345	91	159	27	5,434
Annual energy accumulation (GJ/ha/yr)	365	330	36	113	-	92	-	27	597

27.4ton/ha/yr로 추정되었다. 이것은 경기도 수원시 50년생 리기다소나무림 3.03ton/ha 및 30년생 리기다소나무-아까시나무 혼효림 21.96ton/ha(김 등, 1985), 월악산 35년생 신갈나무림 16.8 ton/ha/yr, 월악산 48년생 소나무림 17.0 ton/ha/yr, 월악산 24년생 잣나무림 6.0ton/ ha/yr 등(이와 권, 2005)에 비해 월등히 높은 생산량을 보여주는 것이다.

이렇듯 태화산 지역 리기다소나무림의 바이오매스 현존량과 연간 순생산량이 다른 연구들에 비해 매우 높게 나온 이유는 속성수로서 조림지의 환경이 양호하고 가지치기와 솎아베기 등 적절한 숲가꾸기 사업이 이루어졌기 때문으로 생각된다.

#### 4. 태화산 리기다소나무림의 에너지량

Table 4에서 태화산 지역 36년생 리기다소나무 임분의 ha당 총 에너지량(지상부)은 5,434GJ/ha이며, 연간 에너지 고정량(지상부)은 597GJ/ha/yr로 나타났다. 지상부의 총 에너지량은 35년생 월악산 신갈나무림 3,000GJ/ha(권, 2006)보다는 많으나 48년생 소나무림 6,087GJ/ha(이와 권, 2005)에 비해서는 적게 나타났다. 반면 지상부에 연간 고정되는 에너지량은 597GJ/ha/yr로서, 신갈나무림 441GJ/ha/yr, 소나무림 393GJ/ha/yr에 비해 훨씬 많은 것으로 나타났다.

한편 태화산 리기다소나무림의 총 에너지량을 같은 열량의 석유화산탄으로 바꾸면 지상부 전체는 130TOE/ha이며, 연간 지상부에 고정되는 에너지량은 14TOE/ha/yr이고, 이 중 줄기부

에만 연간 9TOE/ha/yr(64%)가 고정되고 있다.

#### 결 론

경기 태화산 북서사면(해발 250m)의 36년생 리기다소나무 조림지에서 바이오매스와 연간 순생산량을 추정하였다. 리기다소나무 임분의 광합성부는 지상 5.2m부터 시작되고 최대 광합성부는 지상 11-13m 사이의 높이에 나타났다.

리기다소나무 임분의 바이오매스는 수간 목부 166.1ton/ha(65.9%), 수간 수피부 22.4ton/ha(8.9%), 가지 51.9ton/ha(20.6%), 고사지 16.0ton/ha, 당년생 잎 3.8ton/ha(1.5%), 전년생 잎 6.6ton/ha(2.6%), 구과 1.3ton/ha(0.5%)로서 지상부 전체 252.0ton/ha로 나타났다. 또한 연간 순생산량은 수간 목부 15.4ton/ha/yr(56.3%), 수피 1.7ton/ha/yr(6.1%), 가지 5.2ton/ha/yr(19.1%), 당년생 잎 3.8ton/ha/yr(13.9%), 구과 1.3ton/ha/yr (4.6%), 지상부 합계 27.4ton/ha/yr로 추정되었다.

리기다소나무림 지상부의 에너지량은 5,434 GJ/ha, 연간 에너지 고정량은 597GJ/ha/yr로 나타났다는데, 이것은 석유화산탄으로 각각 130 TOE/ha, 14TOE/ha/yr에 해당하는 것이다.

본 조사가 이루어진 리기다소나무 임분의 바이오매스와 에너지량은 매우 높은 것으로 나타났다는데, 환경 조건이 리기다소나무 생육에 적당하고 지속적으로 숲가꾸기 작업을 통해 임분 구조를 개선시켰기 때문으로 생각된다. 따라서 리기다소나무 조림지 내에서 목질부 바이오매스의 확보를 위해서는 적지적수와 숲가꾸기 관리가 반드시 필요하다고 할 수 있다.

인 용 문 헌

1. 권기철. 2006. 신갈나무림의 바이오매스, 탄소 고정량 및 에너지 고정 효율 -위도, 해발고, 사면을 중심으로-. 서울대학교 농학박사 학위논문. 126pp.
2. 권기철, 김홍은, 이종희. 1998. 낙엽송 인공조림 임분의 생산구조와 생산성. 임산에너지 17(1) : 1-7.
3. 김갑덕, 박재욱, 박인협, 김철민, 정성학. 1985. 리기다소나무와 아까시나무의 성장과 물질생산량에 관한 연구. 임산에너지 5(1) : 1-9.
4. 김종성, 손요환, 임주훈, 김진수. 1996. 리기다소나무와 낙엽송 인공조림지의 지상부 생체량, 질소와 인의 분포 및 낙엽에 관한 연구. 한국임학회지 85(3) : 416-425.
5. 김준호. 1971. 삼림의 생산구조와 생산력에 대한 연구 I. 리기다소나무 조림지에 대하여. 식물학회지 14(4) : 19-26.
6. 김준호. 1976. 삼림의 생산구조와 생산력에 대한 연구. III. 리기다소나무와 리기테다소나무의 비교. 식물학회지 19(3) : 85-91.
7. 박광수. 2005. 환경규제에 따른 산업부문의 에너지원간 대체관계 및 온실가스 배출저감 효과 분석. 에너지경제연구원. 77pp.
8. 산림청. 2005. 임업통계연보 35호. 산림청. 462pp.
9. 이돈구, 권기철. 2005. 산림 폐 바이오매스를 활용한 발효열교환장치 개발. 농림부 농림기술관리센터. p.29-92.
10. 이경재, 김갑덕, 김재생, 박인협. 1985. 광주 지방의 리기다소나무 및 리기테다소나무조림지의 물질생산량에 관한 연구. 한국임학회지 69 : 28-35.
11. 이명중. 1998. 강원도 지방 잣나무 인공림의 임령변화에 따른 지상부 현존량과 양분축적. 한국임학회지 87(2) : 276-285.
12. 임경빈, 김갑덕, 이돈구. 1981. 대체에너지원으로서의 임업생산물 및 이의 에너지화과정의 필요성. 임산에너지 1(1) : 26-29.
13. 임재규, 이경학. 2004. 기후변화협약 제3차 국가보고서 작성을 위한 기반구축연구(제1차년도) -임업부문 온실가스 통계작성에서의 IPCC 우수실행지침 적용성 분석-. 에너지경제연구원. 147pp.
14. 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.
15. Kittredge, J. 1944. Estimation of amount of foliage of trees and stands. Jour. Forestry 42 : 905-912.
16. Mirov, N. T. 1967. The Genus *Pinus*. Ronald Press Co. 602pp.
17. Ovington, J. D. 1957. Dry-matter production by *Pinus sylvestris* L. Ann. Bot. N.S. 21 : 287-314.
18. Saucier, J. R. 1979. Estimation of biomass production and removal. Pages 172-189 in Proceedings of Impact of Intensive Harvesting on Forest Nutrient Cycling.