

## 집재기계에 따른 난방용 목재칩의 생산비용 및 에너지 수지분석

황진성<sup>1</sup> · 오재현<sup>2</sup> · 김준순<sup>1</sup> · 차두송<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>강원대학교 산림환경과학대학, <sup>2</sup>국립산림과학원 산림생산기술연구소

### Analysis on The Production Costs and Energy Balance of Heating Wood-Chip by Yarding Machines

Jin-Sung Hwang<sup>1</sup>, Jae-Heun Oh<sup>2</sup>, Joon-Soon Kim<sup>1</sup> and Du-Song Cha<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>College of Forest & Environmental Sciences, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

<sup>2</sup>Forest Practice Research Center, Korea Forest Research Institute, Pocheon 487-821, Korea

**요 약:** 산림바이오매스 자원의 소규모 난방에너지 이용을 위한 시스템 구축에 있어 목재칩의 연료 활용을 목적으로 목재칩 연료 생산단계에서의 비용분석과 에너지수지를 분석을 통해 산림바이오매스 자원의 에너지 이용 가능성을 검토하였다. 집재기계와 경사도별로 구분되어진 목재칩 생산 시스템에서 1 kg의 칩을 생산하기 위해 소요되는 총 생산비용은 195.45~210.54원/kg으로 산출되었으며, 에너지 투입률(%)분석에서는 26.58~27.38%의 에너지 투입률을 나타내었다. 경사도에 따른 에너지 투입률의 변화는 크지 않았으며, 생산비용의 경우와는 달리 타워야더 시스템인 시나리오 B가 트랙터 집재 시스템인 시나리오 A보다 에너지 투입률이 낮은 것으로 나타났다.

**Abstract:** To construct the production system of forest biomass as a small scale heating energy source, energy availability of wood-chip was examined by cost and energy balance analysis in the production process. The costs to produce wood-chip of 1 kg was calculated by yarding machines and their operational gradient conditions. As a result, 195.45~210.54 won/kg were required as production costs of wood-chip. Input energy rate (%) which is output to input energy in wood-chip production process were showed as 26.58~27.38%. Energy input rate by operational gradient was not significantly difference, and scenario B with tower yarder system appeared by more efficient than scenario A with tractor yarding system in opposition to production costs analysis.

**Key words :** forest biomass, woody fuel, input energy rate, production process

## 서 론

우리나라는 국토의 약 64%가 산림으로 이루어져 있으나 낮은 임업생산력과 용재위주의 임업시장으로 인해 약 70% 이상의 원목을 수입에 의존하고 있는 실정이다(심영권, 2005). 이에 산림청은 1998년부터 산림의 가치증진을 위한 숲 가꾸기 사업을 실시하고 있지만, 높은 수확집재비용으로 인해 숲가꾸기의 산물의 50% 정도가 그대로 산지에 방치되고 있다(차두송 등, 2008). 이렇게 산지에 잔존하고 있는 미이용 산림 자원을 에너지원으로서 활용한다면 에너지의 97%를 수입에 의존하고 있는 국내 에너지 부문에 대한 경제적 파급효과와 국내산림에 대한 환경적

파급효과는 대단히 클 것으로 판단된다. 그러나 미이용 산림 자원의 에너지 이용을 위해서는 우선 높은 집재비용과 운송비용을 저감할 수 있는 효율적인 수집·운송 시스템이 구축되어야 할 것이다. 이와 관련하여 송태영 등(1998)은 궤도형 집재차를 이용, 적절한 작업방법을 선정하면 생산성 향상과 집재비용을 절감할 수 있다고 제시하였다. 박상준 등(2002)도 굴삭기형 타워집재기와 원목 집게톱에 대한 집조제작업을 임목 수확 작업비용으로 분석하여 지형과 임상, 간벌작업 등에 알맞고 실용성이 높은 작업방법을 제시하였다. 최근에는 리기다 소나무를 이용한 연료 생산을 목적으로 임지의 경사도 및 기계투입, 기능 인력의 능력 등을 고려한 표준생산비를 산정하여 각 공정별 생산원가 절감 및 효율성 증대를 위한 방안모색 및 방법 등이 연구되고 있다(지식경제부, 2008). 또한, 석현덕 등(2005)은 숲가꾸기 산물수집 공정 및 단가를 활용하여 목질바이오매스 자원의 파쇄비용 및 공급비용 분석을 실시

본 연구는 산림청 산림과학특정연구(과제번호 S110909L060120)의 지원에 의해 수행된 결과의 일부임.

\*Corresponding author

E-mail: dscha@kangwon.ac.kr

하여 목질바이오매스 자원의 에너지 이용가능성을 제시하였다.

본 연구에서는 산림바이오매스 자원의 효율적 에너지 이용시스템을 구축하기 위해서, 원료 생산비용에 대한 기초자료를 바탕으로, 산림바이오매스 자원의 벌목·조재에서부터 집재, 칩핑, 운송, 건조까지의 일련의 목재칩 생산과정의 생산비용 및 에너지수지 분석을 실시하여 투입비용 및 에너지에 대한 목질계 에너지원인 목재칩의 효율성을 판단하고자 하였다.

## 자료 및 방법

### 1. 수집·가공 시나리오

본 연구에서 산림바이오매스 자원의 수집·가공 시스템은 기존 임목수확작업과정에 칩핑·건조의 단계를 추가하여 시나리오를 구성하였다. 시스템의 비용분석과 에너지수지 분석은, 가장 많은 비용과 노력이 요구되는 작업 중의 하나인(우보명 등, 1990) 집재작업을 중심으로 분석하였다. 집재기계를 기준으로 트랙터부착 타워형 집재기(일명:춘천집재기)와 가선행 타워집재기(RME-300T)로 구분하였으며, 경사도별로 적용되는 노무비용 및 작업인원의 할증률을 적용하고자 경사도(완경사지 : 15° 이하, 중경사지 : 15~30°, 급경사지 : 30° 이상)에 따라 시나리오를 구분하여 분석하였다(그림 1).

### 2. 공정별 적용기계

현재 국내에서 임목 생산 작업에 활용되고 있는 기계를 대상으로 비용 및 에너지수지 분석을 실시하였다. 각 공정별 적용기계는 다음과 같다.

#### 1) 벌목·조재

벌목 및 조재작업은 산림바이오매스 자원을 수확하는 작업에 있어서 가장 첫 번째 공정으로써 임내에서 이루어지는 작업으로, 체인톱(Husqvarna, 45cc)을 적용하였다.

#### 2) 집재

집재작업은 가장 많은 비용과 노력이 요구되는 작업 중의 하나로(우보명 등, 1990), 잔존임목과 임분 환경에 큰 훼손을 가져오기도 한다. 최근 친환경적 수확방법인 가선행 집재기에 대한 도입과 적용성에 관한 연구 및 관심이 증

가하고 있다(우보명 등, 1990; 노재후, 1993; 송태영 등, 1998), 이에 본 연구에서는 현재 국내 도입되어 활용되고 있는 트랙터부착 타워형 집재기(일명:춘천집재기)와 가선행 타워집재기(RME-300T, 오이까와사)를 대상으로 분석하였다.

#### 3) 칩핑

본 연구에서는 벌채현장에서 칩핑하는 방법을 적용하여, P사에서 개발·보급된 자주식 목재 칩퍼(PRCS-3300ED, 125HP)를 적용하여 분석하였다. 또한 굴삭기 부착형 우드그래플을 이용하여 칩퍼에 산림바이오매스를 투입하는 과정을 가공과정에 포함시켜 분석하였다.

#### 4) 운송

가공된 목재칩의 연료 수요처까지 운반은 톤백 단위로 공급된다는 가정 하에 5톤 트럭을 기반으로 한 스틱크레인 장착트럭을 적용하였다.

#### 5) 건조

목재칩이 연료로서 충분한 열량을 내기위해선 적정함수율까지 건조되어야 한다. 이에 곡물건조에 사용되는 톤백 건조기를 적용, 운송시 톤백 건조용 다공판이 포함된 채로 수요처까지 공급되며, 수요처에서는 송풍팬을 톤백 마대에 연결하여 건조하는 것을 기준으로 하였다.

### 3. 비용분석

에너지 이용에 있어 연료가격은 매우 중요한 부분이다. 본 연구에서는 산림바이오매스를 수확·가공에 소요되는 기계비용과 노무비용을 합한 총 생산비용으로서 구하였다. 건조과정을 제외한 수확·가공 시스템의 생산비용은 기존의 연구결과(대한건설협회, 2008; 산림청, 2008)를 조사·활용하였으며, 총 생산비용의 산출식은 다음 식 (1)과 같다.

$$\text{총 생산비용(원/m}^3\text{)} = \text{기계비용(운송비용 포함)} + \text{노무비용} \quad (1)$$

식에서 기계비용(원/m<sup>3</sup>)은 {(기계단가×손료계수×작업기계수, 계수)+연료비+잡품비(연료비의 x%)} / 생산량으로 산출하였다. 여기서, 손료계수는 사용기계의 1일 사용에 대한 손료비율로 산림청 지침(숲 가꾸기 시행지침, 2008)을 적용하였고, 손료(원)는 감가상각비+정비비+관리비, 노무비용(원/m<sup>3</sup>)은 {일일임금+보험료(관계법령 보험율)} / 생산량으로 산출 하였다.

### 4. 에너지수지 분석

바이오매스를 수확하는데 있어 수확·가공에 필요한 에너지가, 수확되는 바이오매스의 에너지보다 큰 경우에는

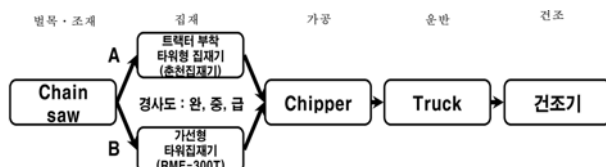


그림 1. 산림바이오매스 자원의 수확가공 시나리오.

표 1. 활동별 인력 에너지 소비량.

노동강도	남자	여자
	kcal/일	kcal/일
보통활동	2,500	2,000
심한활동 = 일반노동	3,000	2,100
격심한활동 = 벌목	3,600	2,400

에너지로 사용하는 것이 비효율적이기에 산림바이오매스 자원의 에너지 이용에 있어 에너지수지에 대한 평가가 고려되어야 한다(吉岡拓如, 2006). 이에 에너지 투입률(%)로서 에너지수지를 검토하였다. 분석에 필요한 인자들은 문헌조사를 통하여 적용하였으며 기존 자료가 없는 건조공정은 실제 실험을 통해 값을 구하였다. 산출식은 다음 식(2)와 같다.

$$p, \% = \{ \text{투입 에너지(kcal/일)} / \text{생산 에너지(kcal/일)} \} \times 100$$

투입 에너지(kcal/일) = 공정별 적용기계의 연료소비 에너지 + 인력 에너지 + 소재 에너지

$$\text{생산 에너지(kcal/일)} = \text{일일 생산 산림바이오매스 에너지량} \quad (2)$$

여기서, 각 공정별 적용기계의 연료소비 에너지는 각각의 연료소비량(L/일)에 연료의 발열량(kcal/L)을 곱하여 산출하였으며, 인력 에너지는 표 1과 같이 노동 강도 및 성별에 따라 적용하였다. 또한 소재 에너지는 적용기계를 구성하는 대부분의 재료가 강재(鋼材)로 구성되어있기에(吉岡拓如, 2006), 전체를 강재로 가정하여 식 (3)에 의해 산출하였다.

$$\{ \text{기계무게(kg)} \times \text{강재 생산 에너지(kcal/kg)} \times \text{기계수} / \{ \text{내용연수(년)} \times \text{운용시간(h/년)} / \text{일일 작업시간(h/일)} \} \quad (3)$$

## 결과 및 고찰

### 1. 비용분석

목재칩 생산 비용분석에 관련된 기계비용과 노무비용, 운송비용의 값은 기존의 연구결과(대한건설협회, 2008, 산림청, 2008)를 활용하였으며, 그 값들은 다음 표 2와 표 3과 같다.

일일 총 집재량과 작업인원은 집재기계의 일일작업량을 기준으로 산정하여 산출하였다. 집재기계의 일일 원목 작업량은 비용분석을 위하여 칩 생산량으로 환산하였다. 칩 환산량은 원목의 용적밀도 450 kg/m<sup>3</sup>,<sup>1)</sup> 칩의 산물밀도 250 kg/m<sup>3</sup>일 때(차두송 등, 2008), 트랙터 집재기 45.0 m<sup>3</sup>, 가선형 타워집재기 50.4 m<sup>3</sup>이다. 연료비<sup>2)</sup>의 경우 2008년 8월 4주부터 11월 2주까지의 전국 주유소의 평균값을 적용하였다. 노무경비 산출시 각 직종별 노임을 적용하였다.

#### 1) 기계비용

##### (1) 벌목 · 조재

벌목 · 조재작업의 적용 기계인 체인톱의 일일생산성은 원목기준 6.50 m<sup>3</sup>/대·일로 트랙터집재기에 적용시 1일 4대, 가선형 타워집재기 적용시 1일 5대의 체인톱이 소요되는 것으로 나타났다. 체인톱의 기계비용은 인자들을 식 (1)에 대입하여 산출한 결과, 시나리오 A가 2,056원/m<sup>3</sup>, 시

표 2. 기계비용 산출식 적용 인자.

작업 구분	적용 기계	기계 단가(천원)	손료 계수	작업 인원	연료 (L/일)	잡품비율 (연료비의%)	작업량 (m <sup>3</sup> /일)	칩 환산량 (m <sup>3</sup> /일)	운송비 (천원)
벌목 조재	체인톱	570	0.0084	1인	5.6 (휘발유)	95	6.5	11.7	-
집재	트랙터 집재기	60,000	0.0008	3인 1조	26.0 (경유)	40	25.0	45.0	-
	가선형 타워집재기	180,000	0.0008	4인 1조	32.5 (경유)	40	28.0	50.4	-
가공	자주식 목재 칩퍼	47,500	0.0008	3인 1조	48.0 (경유)	40	177.8	320.0	-
	우드 그레플	42,000	0.0015	1인	20.8 (경유)	30	집재기별	-	-
운송	운송용 (5t 트럭)	-	-	1인	43.6 (경유)	-	19.2	19.2	180 (100km)
건조	톤백마대, 송풍기	600	0.0084	-	4.8 kw	-	1.6	1.6	-

주) 산림청, 숲가꾸기 설계 · 감리 및 시행지침, 2008

<sup>1)</sup>IPCC 용적밀도 기준

<sup>2)</sup>www.opinet.co.kr, 전국주유소종합정보시스템

표 3. 노무비용 산출식 적용 인자.

작업구분	적용기계	적용노임	노무비 (원)	할증율	보험료	작업량 (1일, m <sup>3</sup> )	칩 환산량 (m <sup>3</sup> )
별목 조제	체인톱	별목부	87,600	완 중 급	-10% - +10%	6.5	11.7
집재	트랙터 집재기	운전사	71,349	완	-	25.0	45.0
		특별인부	81,596				
		보통인부	63,530				
	가선형 타워집재기	운전사	71,349	중 급	+5% +10%	28.0	50.4
		특별인부	81,596				
		보통인부	63,530				
가공	자주식 목재 칩퍼	보통인부	63,530	-	-	177.8	320.0
	우드그래플	운전사	71,349	-	-	-	-

주) 대한건설협회. 시중노임단가, 2008.  
산림청. 숲가꾸기 설계·감리 및 시행지침, 2008

나리오 B가 2,295원/m<sup>3</sup>으로 산출되었다.

(2) 집재

일일생산성은 트랙터 집재기가 원목기준 25.0 m<sup>3</sup>/대·일, 가선형 타워집재기가 28.0 m<sup>3</sup>/대·일로서, 인자들을 식(1)에 대입하여 산출한 결과 트랙터 집재기 2,365원/m<sup>3</sup>, 가선형 타워집재기 4,306원/m<sup>3</sup>으로 산출되었다

(3) 가공

가공작업에선 1일 1대의 칩퍼와 우드그래플이 소요되며, 가공공정에서의 기계비용은 시나리오 A가 목재 칩퍼 3,242원/m<sup>3</sup>와 우드그래플 2,364원/m<sup>3</sup>을 합한 5,606원/m<sup>3</sup>, 시나리오 B가 목재 칩퍼 2,895원/m<sup>3</sup>와 우드그래플 2,111원/m<sup>3</sup>을 합한 5,006원/m<sup>3</sup>으로 산출되었다

(4) 운송

운송량은 두 시나리오 모두 총 3대의 트럭이 소요되는 것으로 나타났으며, 운송거리는 기존 연구(심영권, 2005)에서 목질연료의 생산과 공급에 있어서의 강원도내 평균 운송거리를 참고하여 100 km를 기준으로 산정하였다. 운송비용은 정형화된 통계자료가 없어 현재 목재칩 유통에 이용되고 있는 5t트럭의 운임을 기준으로 산출하였으며, 유류비와 인건비를 포함하여 100 km에 180,000원을 적용하였다. 그 결과 운송거리 100 km일 때 시나리오 A에서의 운송비용은 12,000원/m<sup>3</sup>, 시나리오 B에서의 운송비용은 10,714원/m<sup>3</sup>이 소요되는 것으로 산출되었다.

(5) 건조

본래 곡물을 건조하는 톨백 마대를 활용하여 각 가정에

서 건조하는 방식을 적용하였으며, 건조비용에 관한 자료를 얻기 위해 건조되지 않은 목재칩(최소함수율 50%, w.b.<sup>3)</sup>) 500 kg을 담아 강제송풍기(0.6 kw/h)로 건조하였다. 실험결과 목포 함수율인 30%(w.b.)까지 건조되는데 일반 가정 전기요금(기본요금:370원, 100 kWh까지 55.10원/kWh, 200 kWh까지 113.80원/kWh)을 기준으로 총 8,050원이 소요되었다. 톨백 마대의 건조량은 1.6 m<sup>3</sup>/마대이며, 트랙터집재기의 칩 기준 일일 생산량인 45.0 m<sup>3</sup>을 건조하기 위해선 총 29대, 가선형 타워집재기의 칩 기준 일일 생산량인 50.4 m<sup>3</sup>을 건조하기 위해선 총 32대의 톨백 건조기를 적용하였으며, 계산결과 시나리오 A 8,436원/m<sup>3</sup>, 시나리오 B 8,311원/m<sup>3</sup>의 건조비용이 소요되는 것으로 나타났다.

따라서, 산림바이오매스 자원의 생산시, 총 기계비용은 운송거리 100 km일 때 시나리오 A에서 30,463원/m<sup>3</sup>, 시나리오 B에선 30,632원/m<sup>3</sup>이 소요되는 것으로 분석되었다.

2) 노무비용

(1) 별목·조제

트랙터 집재기의 원목생산량이 25.0 m<sup>3</sup>이므로 별목·조제시 체인톱은 총 4대가 소요된다. 이에 별목부 노임을 경상도별로 적용하여 산정한 별목·조제과정의 노무비용을 산출하였으며, A-1<sup>4)</sup> 7,147원/m<sup>3</sup>, A-2 7,941원/m<sup>3</sup>, A-3 8,945원/m<sup>3</sup>의 노무비용이 산출되었다. 가선형 타워집재기의 원목생산량이 28.0 m<sup>3</sup>이므로 별목·조제시 체인톱은 총 5대가 소요된다. 이에 B-1 7,945원/m<sup>3</sup>, B-2 8,828원/m<sup>3</sup>, B-3 9,711원/m<sup>3</sup>의 노무비용이 소요되는 것으로 산출

<sup>3)</sup>w.b.(습량기준 함수율, %) =  $\frac{\text{수분량}}{\text{건중량} + \text{수분량}} \times 100$

<sup>4)</sup>A-1 : 완경사(15° 미만), A-2 : 중경사(15~30°), A-3 : 급경사(30° 초과)

되었다.

(2) 집재

트랙터 집재기의 작업인원은 총 3명으로 기계운전자 1인, 특별 인부 1인, 보통 인부 1인으로 구성되어 있다. 이에 각 직종별 노임을 경사도별로 적용하여 경비를 산출하였으며, 집재과정의 노무비용은 A-1은 5,193원/m<sup>3</sup>, A-2는 5,452원/m<sup>3</sup>, 급경사지인 A-3은 5,712원/m<sup>3</sup>의 노무비용이 소요되는 것으로 산출되었다. 가선형 타워집재기의 작업인원은 총 4명으로 기계운전자 1인, 특별 인부 2인, 보통 인부 1인으로 구성되어 있다. 이에 B-1은 6,255원/m<sup>3</sup>, B-2는 6,568원/m<sup>3</sup>, B-3은 6,881원/m<sup>3</sup>의 노무비용이 소요되는 것으로 산출되었다.

(3) 가공

칩퍼의 작업인원은 총 3명으로 모두 보통 인부로 구성되어지고 우드그래플의 작업인원은 운전기사 1명이다. 이에 각 직종별 노임을 적용하여 노무비용을 산출하였다. 가공공정은 임도상에서 이루어지므로 경사도에 따른 할증률이 적용되지 않는다. 이에 가공공정의 총 노무비용은 시나리오 A가 6,059원/m<sup>3</sup>, 시나리오 B가 5,410원/m<sup>3</sup>로 산출되었다.

산림바이오매스 자원의 생산시, 칩 공급은 톤백으로 공급되므로 건조과정에 있어서의 투입 노동력은 없는 것으로 가정하였으며 운송에서의 노무비용은 기계비용의 운송비용에 모두 포함시켰기에 별도의 노무비용 산출은 실시하지 않았다. 투입된 노무비용의 총 합계는 시나리오 A의 A-1일 때 18,398원/m<sup>3</sup>, A-2일 때 19,452원/m<sup>3</sup>, A-3일 때 20,716원/m<sup>3</sup>이며, 시나리오 B의 B-1<sup>5)</sup>일 때 19,610원/m<sup>3</sup>, B-2일 때 20,806원/m<sup>3</sup>, B-3일 때 22,002원/m<sup>3</sup>으로 나타났다.

이상의 결과에서 노무비용은 완경사지에서 급경사지로 갈수록 높아지는 경향을 나타냈으며, 시나리오 B가 시나리오 A보다 노무비용이 높은 것으로 나타났다. 이는 시나리오 B에 투입되는 노동력이 시나리오 A에 투입되는 인

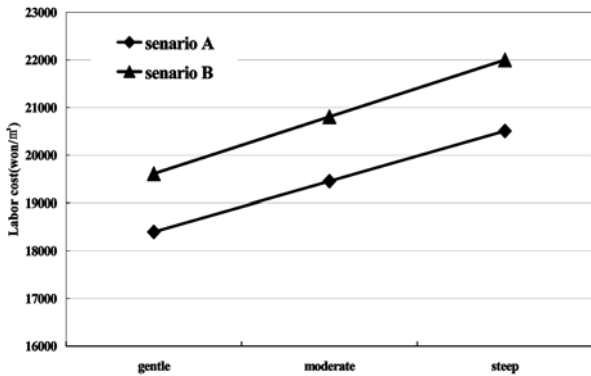


그림 2. 시나리오 A, B의 경사도별 노무비용.

표 4. 총 생산비용.

항목	경사도						
	A-1	A-2	A-3	B-1	B-2	B-3	
총 원/m <sup>3</sup>	48,862	49,915	51,179	50,242	51,438	52,634	
생산비용 원/kg	195.45	199.66	204.72	200.97	205.75	210.54	

원보다 많기 때문인 것으로 사료된다(그림 2).

1 m<sup>3</sup>의 칩을 생산하여 100 km의 연료 소비지까지 도달하기 위해 소요되는 총 생산비용은 기계비용과 경사도에 따른 노무비용 A-1 18,399원/m<sup>3</sup>, A-2 19,452원/m<sup>3</sup>, A-3 20,716원/m<sup>3</sup>, B-1 19,610원/m<sup>3</sup>, B-2 20,806원/m<sup>3</sup>, B-3 22,002원/을 합하여 산출하였다(표 4). 총 생산비용은 경사도에 따라 노무비용의 변화로 인해 약 4-5원/kg 차이가 나타났으며, 추후 실제 현장실험을 통하여 경사도에 따른 기계비용의 차이를 산출하여 노무비용과 비교가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

2. 에너지수지 분석

에너지수지분석을 위해 각 공정별 투입 기계들의 1일 연료사용량, 1일 생산량 및 연료의 순발열량 등의 기본 인자들의 값을 조사하였으며, 그 값은 표 5와 같다.

생산된 산림바이오매스 자원의 발열량은 목재칩의 목 포함수율인 30(w.b)% 기준으로 3,100 kcal/kg(차두송 등, 2008)을 일괄 적용하였다.

1) 투입 에너지

투입 에너지의 산출은 비용분석에서 적용되었던 시나리오 A와 B의 1일 칩 생산량을 기준으로 하여, 투입된 기계와 인력의 1일 소비 에너지량을 산출하였다. 에너지수지 분석에서도 경사도와 운송거리의 인자들을 고려, 각 조건별로 투입 에너지를 산출하였다.

(1) 체인톱

체인톱의 연료사용량에 따른 에너지량과, 기계의 무게, 내용연수, 운용시간을 고려하여 구한 소재에너지, 경사도별 인력에너지를 합산한 체인톱의 투입 에너지량은 A-1 179,075 kcal/일, A-2 180,515 kcal/일, A-3 181,955 kcal/일, B-1 223,844 kcal/일, B-2 225,644 kcal/일, B-3 227,444 kcal/일 인 것으로 나타났다.

(2) 트랙터 집재기

트랙터 집재기의 연료사용량에 의해 산출된 219,700 kcal/일과, 기계의 무게, 내용연수, 운용시간을 고려하여 구한 소재에너지 31,759 kcal/일, 경사도별 인력에너지를 합산한 트랙터 집재기의 투입 에너지량은 A-1 260,459 kcal/일, A-2 260,909 kcal/일, A-3 261,359 kcal/일 인 것으로

<sup>5)</sup>B-1 : 완경사(15° 미만), B-2 : 중경사(15~30°), B-3 : 급경사(30° 초과)

표 5. 산림바이오매스 자원 수집가공 시스템의 에너지 수지분석 인자.

작업 구분	적용 기계	연료 (1일, L)	인력에너지 (kcal/인)	기계무게 (kg/대)	내용 연수 <sup>1)</sup> (년)	연간 운용시간 <sup>2)</sup> (h)	순발열량 <sup>3)</sup>	총 생산량
벌목 조재	체인톱	5.6 (휘발유)	3,600	4.9	3	900		
집재	트랙터 집재기	26.0 (경유)	3,000	3,500	6	900	휘발유 = 7,400 kcal/L	칩기준 시나리오 A = 45.0 m <sup>3</sup> /일
	가선형 타워 집재기	32.5 (경유)		1,650	6	900	경유 = 8,450 kcal/L	
가공	이동식 목재 칩퍼	48.0 (경유)	3,000	5,500	5	1000	전력 = 2,150 kcal/kwh	시나리오 B = 50.4 m <sup>3</sup> /일
	우드 그래플	20.8 (경유)		3,728	7	900		
운송	운송용 (5t)	43.6 (경유)		6,000	6	1100	칩(30%, w.b) = 3,100 kcal/kg	
건조	송풍기	4.8 kw (전력)	-	19	6	900		

주) 1) 조달청 고시 제2007-13, 물품관리 내용연수

2) 吉岡拓如, 2006

3) 에너지 기본법 시행규칙, 에너지열량 환산기준(2008. 3. 3. 개정) 제15조, 제1항 관련

나타났다.

(3) 가선형 타워집재기

가선형 타워집재기의 연료사용량에 의해 산출된 274,625 kcal/일과, 기계의 무게, 내용연수, 운용시간을 고려하여 구한 소재에너지 14,972 kcal/일, 경사도별 인력에너지를 합산한 가선형 타워집재기의 투입 에너지량은 B-1 301,597 kcal/일, B-2 302,197 kcal/일, B-3 302,797 kcal/일 이다.

(4) 우드그래플

우드그래플의 연료사용량에 의해 산출된 175,076 kcal/일과, 기계의 무게, 내용연수, 운용시간을 고려하여 구한 소재에너지 42,777 kcal/일, 인력에너지를 합산한 우드그래플의 투입 에너지량은 221,537 kcal/일 인 것으로 나타났다.

(5) 이동식 목재 칩퍼

목재 칩퍼의 연료사용량에 의해 산출된 405,600 kcal/일과, 기계의 무게, 내용연수, 운용시간을 고려하여 구한 소재에너지 36,534 kcal/일, 인력에너지를 합산한 목재 칩퍼의 투입 에너지량은 451,134 kcal/일 인 것으로 나타났다.

마) 목재칩 운송트럭

운송트럭의 투입 에너지는 100 km 운행시의 사용 연료량인 43.6 L에 대한 에너지와 기계의 무게, 내용연수, 운용시간을 고려하여 구한 소재에너지 133,636 kcal/일, 인력에너지를 합산한 운송트럭의 투입 에너지량은 1,247,896 kcal/일인 것으로 나타났다.

바) 건조

시나리오 A와 B에서 톤백 건조기의 연료사용량에 의해 산출된 에너지량은 전력에너지의 순발열량을 적용한 7,182,720 kcal/일와 7,925,760 kcal/일이다. 연료사용 에너지량에 기계의 무게, 내용연수, 운용시간을 고려한 소재에

너지를 합산한 톤백 건조기의 투입 에너지량은 시나리오 A에서 7,187,720 kcal/일, 시나리오 B에서 7,931,277 kcal/일로 산출되었다.

2) 생산에너지

시나리오 A와 B에서 생산에너지의 총량은 일일 생산된 목재칩의 총 생산량을 기준으로 산출하였다. 시나리오 A의 생산에너지는 트랙터 집재기의 일일생산량 45.0 m<sup>3</sup>에, 칩의 산물밀도 250 kg/m<sup>3</sup>과 발열량 3,100 kcal/kg(차두송 등, 2008)을 적용한 결과 1일 34,875,000 kcal의 생산에너지가 산출되었다. 시나리오 B의 가선형 타워집재기의 생산에너지는 일일생산량 50.4 m<sup>3</sup>을 적용하여 일일 39,060,000 kcal의 에너지가 생산되었다.

위에서 구해진 투입 에너지와 생산에너지를 에너지 투입률(%) 산출식에 적용하여 에너지 투입률(%)을 산출하였다(표 6).

산림바이오매스 에너지 생산시스템의 에너지 투입률은 최저 26.57%에서 최고 27.38%의 에너지 투입률을 나타냈다.

시나리오 A와 B의 목재·수확가공시스템에서 시나리오 B가 시나리오 A보다 낮은 에너지 투입률을 나타냈다. 경사도에 따른 에너지 투입률의 변화는 크지 않은 것으로 나타났으며, 이는 작업인원의 증감을 경사도에 따라 조정

표 6. 경사도별 운송 에너지 투입률(%).

경사도	A-1	A-2	A-3	B-1	B-2	B-3
에너지 투입률 1(%)	27.38	27.38	27.39	26.57	26.57	26.58

하지만, 인력에너지가 투입 에너지의 약 0.5%안팎의 미미한 비율을 차지하기 때문에 전체 투입 에너지의 변화에 큰 영향을 주지 못하는 것으로 판단된다.

비용, 고효율의 시스템 구축의 기초자료로서 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 결론

본 연구에서는 산림바이오매스 자원의 소규모 난방에너지 이용을 위한 시스템 구축에 있어 목재칩 연료의 활용을 목적으로 산림바이오매스 자원의 수집·가공·운송까지, 목재칩 연료 생산단계에서의 비용분석과 에너지수지 분석을 통해 산림바이오매스 자원의 에너지 이용 가능성을 검토하여 보았다.

목재칩 생산 시스템은 기본적으로 벌목·조재·집재·가공·운송·건조의 과정으로 구성하였으며, 집재기계와 경사도에 따라 6가지의 시나리오로 나누어 분석하였다. 목재칩 생산 시스템에서 1 m<sup>3</sup>의 칩을 생산하기 위해 소요되는 총 생산비용은 기계비용과 경사도에 따른 노무비용을 합하여 총 생산비용을 산출하였으며 A-1 195.45원/kg, A-2 199.66원/kg, A-3 203.88원/kg, B-1 200.97원/kg, B-2 205.75원/kg, B-3 210.54원/kg의 생산비용이 산출되었다.

에너지 투입률(%)분석에서는 경사도에 따라 A-1 27.38%, A-2 27.38%, A-3 27.38%, B-1 26.57%, B-2 26.57%, B-3 26.58%로 나타났다. 경사도에 따른 에너지 투입률의 변화는 크지 않았으며, 시나리오 B가 시나리오 A보다 효율적인 것으로 나타났다.

본 연구는 산림바이오매스 자원의 수확과 가공 대해 비용과 에너지 효율이라는 측면에서 많은 제약조건과 가정하에 분석이 이루어졌다. 이에 산림바이오매스 자원의 에너지 이용에 대한 집재방법에 따른 두 가지의 시스템에 대한 비용 산출과 에너지 효율에 대한 분석만 이루어졌을 뿐, 구체적인 시스템을 제안하지는 못하였다. 향후, 보다 다양한 산림바이오매스 자원의 수확·가공 시스템을 적용한 비용분석과 에너지수지 분석에 관한 연구들이 이루어진다면 산림바이오매스 자원의 에너지 이용을 위한 저

## 인용문헌

1. 노재후. 1993. 집재작업시스템의 작업능률분석에 관한 연구. 서울대학교 박사학위논문. pp. 123.
2. 대한건설협회. 2008. 건설업 임금실태 조사 보고서. pp. 16.
3. 박상준, 함영철. 2002. 굴삭기형 타워집재기 및 원목집계톱의 작업능률과 작업실용 분석. 한국임학회지 91(4): 507-516
4. 산림청. 2008. 숲가꾸기 설계감리 및 사업시행 지침. pp. 89.
5. 석현덕, 민경택, 손철호, 장우환. 2005. 목질바이오매스 열에너지 개발의 경제성분석과 에너지용 산림폐재의 지속적 확보방안. 한국농촌경제연구원. pp. 101.
6. 송태영, 박문섭, 김재원, 강건우. 1998. 케도형 집재차의 집재작업 방법에 따른 작업비용 비교연구. 산림경제연구 6(2): 20-28.
7. 심영권. 2005. 친환경 연료 우드펠렛의 생산과 공급체계 구축. 국민대학교 산림자원학과 박사학위논문. pp. 131.
8. 우보명, 박종명, 이준우, 정남훈. 1990. 케이블클레인을 이용한 집재작업의 경제성에 관한 연구. 한국임학회지 79(4): 413-418.
9. 지식경제부. 2008. 리기다소나무 활용을 위한 경제성 분석-목질계 바이오에너지 연료활용을 중심으로-. pp. 194.
10. 차두송, 이재선, 우종춘, 배영수, 김준순, 이정수, 전근우, 김남훈, 이귀현. 2008. 목재칩 연료를 이용한 가정용 보일러 연구개발. 최종보고서. 화천군. pp. 264.
11. 한국영양학회. 1995. [http://farmer.rda.go.kr/main/farmwork/harmfactor/checkpoint.asp?menuCode=5&Mcode=M010003&sscode=\(2009.10.12\)](http://farmer.rda.go.kr/main/farmwork/harmfactor/checkpoint.asp?menuCode=5&Mcode=M010003&sscode=(2009.10.12))
12. 吉岡拓如. 2006. 森林バイオマス資源収穫システムの構築にする研究. 東京大 大学院 農学生命科学研究科 博士學位論文. pp. 144.

(2009년 10월 29일 접수; 2009년 11월 30일 채택)