

주요 침엽수종의 함수율 변화에 따른 발열량 예측

황진성¹ · 오재현² · 지병윤² · 김판석¹ · 이준우³ · 차두송^{1*}

¹강원대학교 산림환경과학대학, ²국립산림과학원 산림생산기술 연구소, ³충남대학교 환경임산자원학부

Estimating the heating value of major coniferous trees by moisture content

Jin Sung Hwang¹, Jae Heun Oh², Byoung-Yun Ji², Pan Seog Kim¹, Joon Woo Lee³, Du Song Cha^{1*}

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

²Forest Practice Research Center, Korea Forest Research Institute, Pocheon 487-821, Korea

³Department of Environment & Forest Resources, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

Received on 25 October 2011, revised on 9 November 2011, accepted on 18 December 2011

Abstract : The calorific value is the most significant factor in woody biomass utilization. We measured the calorific value by the wood parts (debarked parts and bark) and moisture content for 3 major tree species (*Larix kaempferi*, *Pinus koraiensis*, and *Pinus rigida*). Results showed that the calorific value decreased exponentially as the moisture content increased regardless of tree species and the wood parts. The bark had higher calorific values than woody parts (de-barked parts). In addition, *Pinus koraiensis* had the highest calorific values among 3 study species.

Key words : Woody-biomass, Heating value, Moisture content, Coniferous trees

I. 서론

전세계 에너지원별 가채량을 살펴보면, 석유는 40년, 천연가스는 약 60년 정도로 자원의 고갈이 현실화되고 있다. 물론 탐사기술 진보로 인해 새로운 매장량을 발견하고, 개발능력의 향상으로 개발가능자원 확보량을 늘여 가채년수가 다소 연장될 가능성은 있겠지만 현재와 같은 에너지 수급정책으로는 지속적인 사용에 있어서 한계를 가질 수밖에 없다. 이런 현실 속에서 신·재생에너지는 고갈 및 공해나 대기오염, 방사능 폐기물 문제 등에 자유롭고, 개도국에 전력공급이 가능하여 경제성장동력, 친환경성, 사회형평성 향상이라는 측면에서 지속가능성을 제고할 수 있다. 그 중에서도 바이오매스 에너지원은 유럽과 미국, 일본 등에서 관심이 높아지고 있는 가운데, 에너지 이용에 있어 주요한 위치를 차지해 나가고 있다(MCIE, 2006). 국내에서도 이러한 바이오매스 에너지원이 매우 유망한 에너지원으로서 주목받고 있으며, 대부분의 국토가 산림으로 이루어진 우리나라와 같은 조건에서는 목질계 바이오매스의 에너지원 이용이 활성화 될 것으로 기대된다.

목질 바이오매스를 에너지원으로 이용하는데 있어 목재의 발열량은 가장 중요한 요인 중의 하나로서 특히, 연료의 매매와 연소로의 설계, 연소장치의 선택에 있어서 필수적인 자료가 된다(Kim과 Yeon, 1999). 일반적으로 목재발열량은 알콜-벤젠과 α -셀룰로오스와 정의상관계를 가지고 목재의 자체함수율과 음의 상관관계를 가지는 것으로 알려져 있어 에너지 효율이 높은 상태로 이용하기 위해서는 함수율별 발열량 특성을 파악할 필요가 있다(Abe, 1986). 또한 수종별, 부위별, 예를 들면 수피, 목질부, 잎, 가지, 근원부 등에 따라서 발열량의 차이가 있는 것으로 알려져 있으나(MCIE, 2007; Park 등, 2008; Shin 등, 2008), 함수율에 따른 발열량 특성에 대한 연구는 미흡한 상태이다. 이에 본 연구에서는 추후 목질 바이오매스를 에너지원으로서 활용하기 위한 자료를 제공하고자, 대표적인 침엽수 3개 수종을 대상으로 함수율 및 부위에 따른 발열량을 측정하였다.

II. 재료 및 방법

1. 공시재료

공시재료는 강원도 홍천군에 위치한 강원대학교 산림환경

*Corresponding author: Tel: +82-33-250-8336

E-mail address: dscha@kangwon.ac.kr

경과학대학 부속학술림에서 국내 주요 조림·간벌사업 대상인 낙엽송(*Larix kaempferi*), 잣나무(*Pinus koraiensis*), 리기다소나무(*Pinus rigida*) 등 침엽수 3개 수종을 선정하였다. 채취된 시료의 함수율별 발열량 특성파악을 위해 부위별로는 수피와 목질부로 분리하여 완전건조 후, 함수율별 적정 수분을 첨가하여 48시간동안 밀폐용기에 담아 수분평형을 이룰 때까지 보관하였다. 함수율은 0~200%(d.b.)까지 20% 간격으로 조절하였으며 조절된 함수율은 드라이 오븐 건조법으로 건조하여 함수율을 측정하였다.

2. 발열량 측정

발열량의 측정은 열량계(ECO Isothermal Bomb Calorimeter, CAL2K)를 이용하였으며(Fig. 1), 동일 시료에 대하여 3회 반복 실험하였다. 함수율은 다음 식 (1)에 의해 산출하였다.

$$M(\%) = \frac{W_m}{W_d} \times 100 \quad (1)$$

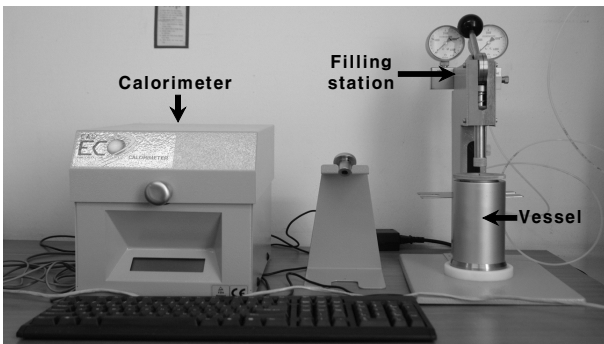


Fig. 1. Calorimeter (ECO Isothermal Bomb Calorimeter, CAL2K).

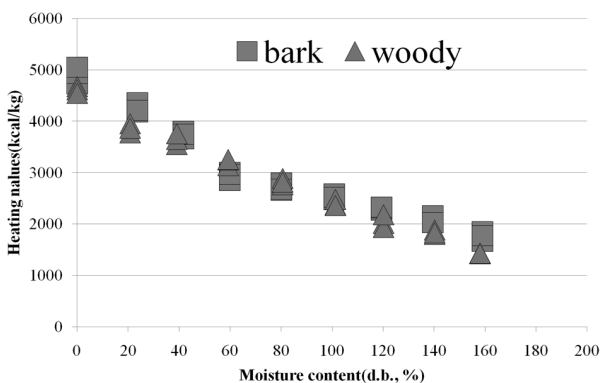


Fig. 2. Actual heating value by M.C.

여기서, $M(\%)$ = 함수율(d.b : dry basis)

W_m (g) = 물질 내에 포함되어 있는 수분의 무게

W_d (g) = 완전히 건조된 물질의 무게

3. 분석방법

실험결과는 SAS 프로그램의 ANOVA와 Duncan의 다중 비교를 실시하여 발열량에 대한 함수율에 따른 수종간부위 간 유의성 검정을 실시하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 수종별 함수율변화에 따른 발열량

공시재료로 선정된 침엽수 3개 수종에 대하여 함수율변화에 따른 발열량을 측정하였다. 일반적으로 저위발열량은 전건시료로 고위발열량을 측정, 저위발열량 산출 공식에 함수율을 대입하여 산출한다. 하지만 본 실험에서는 계산된 저위발열량이 아닌 함수율에 따른 실제 저위발열량을 측정하기 위하여 함수율이 조절된 시료를 기건시료로서 측정하였다. 기건시료로 발열량을 측정하는 경우에는 목재내부의 수분을 증발시키는데 열량이 소모되어 저위발열량이 산출된다(KFRI, 2009). 하지만 함수율이 140% 혹은 160% 이상인 경우에는 측정장치의 점화실패로 발열량 측정이 불가능하였다.

(1) 낙엽송(*Larix kaempferi*)

낙엽송의 함수율별 발열량 측정은 함수율 160%까지 측정 가능하였으며, 결과는 Fig. 2와 같다. 함수율 0%일 때 수피의 평균 발열량은 4900.0±166.8 kcal/kg로 가장 높게

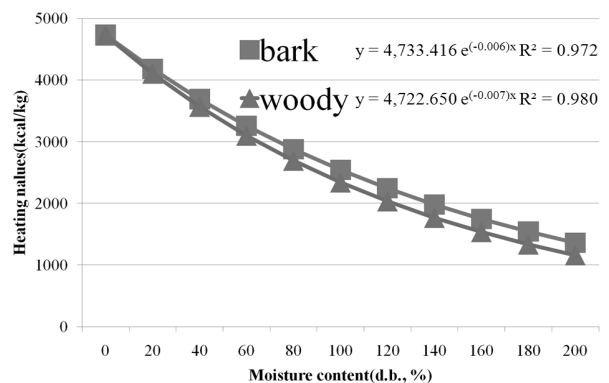


Fig. 3. Estimate heating value by M.C.

나타났으며, 목질부는 평균 발열량이 4609.0±65.6 kcal/kg 인 것으로 나타났다. 함수율이 20~160%로 변화할 때 발열량은 수피는 4248.7~1759.7kcal/kg, 목질부는 3862.0~1422.0 kcal/kg로 변화하는 것으로 나타났으며, 일반적으로 수피가 목질부보다 약 150.2kcal/kg 정도 높게 산출되었다. 또한 함수율별 발열량을 예측한 결과는 Fig. 3과 같다. 예측 결과, 목질바이오매스의 펠릿이용 적정함수율인 20%일 때의 발열량은 수피 4179.3 kcal/kg, 목질부 4103.9 kcal/kg인 것으로 나타났으며, 목재칩 이용 적정함수율인 40%일 때의 발열량은 수피 3689.9 kcal/kg, 목질부 3566.4 kcal/kg인 것으로 나타났다.

(2) 리기다소나무(*Pinus rigida*)

리기다소나무의 함수율별 발열량 측정은 함수율 140%까지 측정 가능하였으며, 결과는 Fig. 4와 같다. 함수율 0%일 때 수피의 평균발열량은 4664.3±377.8 kcal/kg로 가장 높게 나타났으며, 목질부는 평균발열량이 4608.7±23.4 kcal/kg인 것으로 나타났다. 함수율이 20~140%로 변화

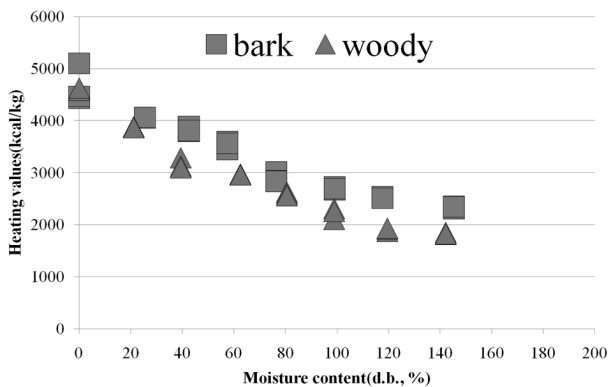


Fig. 4. Actual heating value by M.C.

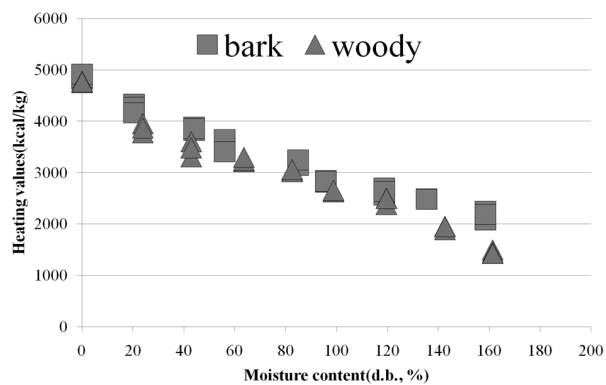


Fig. 6. Actual heating value by M.C.

할 때 발열량은 수피는 4059.0~2333.7 kcal/kg, 목질부는 3873.0~1828.7 kcal/kg로 변화하는 것으로 나타났으며, 일반적으로 수피가 목질부보다 약 423.1 kcal/kg 정도 높게 산출되었다. 또한 함수율별 발열량을 예측한 결과는 Fig. 5와 같다. 목질바이오매스의 펠릿이용 적정함수율인 20%일 때의 발열량은 수피 4164.1 kcal/kg, 목질부 3859.6 kcal/kg인 것으로 나타났으며, 목재칩이용 적정함수율인 40%일 때의 발열량은 수피 3764.2 kcal/kg, 목질부 3379.2 kcal/kg인 것으로 나타났다.

(3) 잣나무(*Pinus koraiensis*)

잣나무의 함수율별 발열량 측정은 함수율 160%까지 측정 가능하였으며, 결과는 Fig. 6과 같다. 함수율 0%일 때 수피의 평균발열량은 4863.0±44.2 kcal/kg로 가장 높게 나타났으며, 목질부는 평균발열량이 4763.0±13.5 kcal/kg인 것으로 나타났다. 함수율이 20~160%로 변화할 때 발열량은 수피는 4253.3~2167.0 kcal/kg, 목질부는 3862.0~1450.3 kcal/kg로 변화하는 것으로 나타났으며, 일반

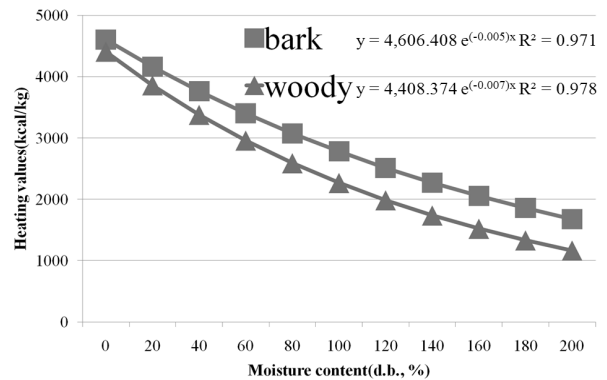


Fig. 5. Estimate heating value by M.C.

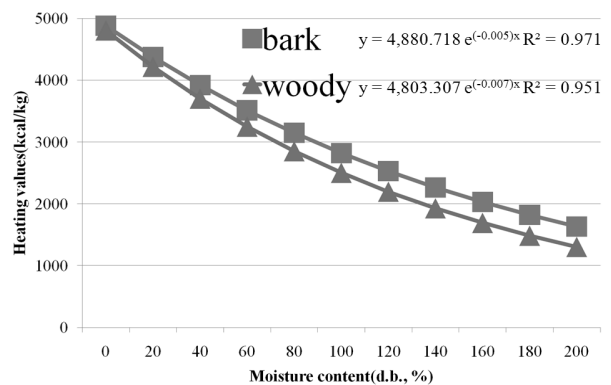


Fig. 7. Estimate heating value by M.C.

Table 1. Analysis of variance for heating value ($\alpha=0.05$).

Source	M.C (d.b., %)	Pr > F								
		0	20	40	60	80	100	120	140	160
Species		0.2348	0.0838	0.0096	0.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	0.0004
part		0.0912	<.0001	<.0001	0.0004	0.0023	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
Species*part		0.4749	0.0507	0.0007	<.0001	0.0004	0.0005	0.0002	<.0001	0.001

Table 2. Differences of the heating value by parts in same moisture content (*Larix kaempferi*).

part	M.C (d.b., %)	Heating values (kcal/kg)									
		0	20	40	60	80					
woody		4609.0	A	3862.0	A	3649.0	A	3212.3	A	2820.3	A
bark		4900.0	B	4248.7	B	3733.3	A	2937.7	B	2709.7	A
species	M.C (d.b., %)	100	120	140	160						
woody		2400.3	A	2038.3	A	1833.3	A	1422.0	A		
bark		2522.3	A	2302.3	B	2085.0	B	1759.7	B		

*Same letter are not significantly different by Duncan's multiple range test ($\alpha=0.05$).

Table 3. Differences of the heating value by parts in same moisture content (*Pinus rigida*).

part	M.C (d.b., %)	Heating values (kcal/kg)							
		0	20	40	60				
woody		4608.7	A	3873.0	A	3168.3	A	2963.3	A
bark		4664.3	A	4059.0	B	3830.7	B	3535.7	B
species	M.C (d.b., %)	80	100	120	140				
woody		2590.7	A	2222.7	A	1906.0	A	1828.7	A
bark		2896.3	B	2697.3	B	2529.3	B	2333.7	B

*Same letter are not significantly different by Duncan's multiple range test ($\alpha=0.05$).

적으로 수피가 목질부보다 약 324.3 kcal/kg 정도 높게 산출되었다. 또한 함수율별 발열량을 예측한 결과는 Fig. 7과 같다. 예측 결과, 목질바이오매스의 펠릿이용 적정함수율인 20%일 때의 발열량은 수피 4374.0 kcal/kg, 목질부 4216.1 kcal/kg인 것으로 나타났으며, 목재칩이용 적정함수율인 40%일 때의 발열량은 수피 3919.9 kcal/kg, 목질부 3700.6 kcal/kg인 것으로 나타났다.

2. 함수율에 따른 수종별·부위별 발열량 분산분석

침엽수 3개 수종의 함수율별 수종부위에 따른 발열량의 차이를 살펴보기 위하여 분산분석한 결과는 Table 1과 같다. 함수율 0%, 20%의 수종간 분석결과와 0%의 부위간 분석결과를 제외하고는 유의수준 5%에서 수종간, 부위간에는 모든 함수율에서 유의적 차가 있는 것으로 나타나, 수종 및 부위에 따른 발열량의 차이가 있는 것으로 판단된다.

또한 함수율 0%와 20%를 제외하고는 수종·부위간 상호작용 효과가 있는 것으로 분석되었다.

Table 1의 결과로서 함수율별 수종간, 부위간의 유의성이 인정되어 Duncan의 다중비교를 이용, 함수율에 따른 부위별 수종간, 수종별 부위간에 대한 평균발열량의 차이를 검토하였다.

수종별 부위간 검정결과는 다음 Table 2~Table 4와 같으며, 낙엽송의 경우 함수율 40, 80, 100%의 경우를 제외하고는 목질부와 수피의 발열량 차이가 있는 것으로 나타났다. 리기다 소나무의 경우에는 함수율 0% 일 때만 발열량의 차이가 없는 것으로 나타났으며, 잣나무는 전체 함수율에서 목질부와 수피의 발열량 차이가 있는 것으로 나타났다.

부위별 수종간 검정결과에서 목질부의 결과는 Table 5와 같다. 함수율 0, 120, 140, 160%의 경우 낙엽송과 리기다 소나무간의 평균발열량 차이는 없는 것으로 나타났으며, 함수율 40, 60%에서는 낙엽송과 잣나무간의 평균발열량

Table 4. Differences of the heating value by parts in same moisture content (*Pinus koraiensis*).

part	M.C (d.b., %)	Heating values(kcal/kg)									
		0		20		40		60		80	
woody		4763.0	A	3862.0	A	3459.0	A	3246.7	A	3033.3	A
bark		4863.0	B	4253.3	B	3854.3	B	3487.3	B	3189.0	B
species	M.C (d.b., %)	100		120		140		160			
woody		2633.7	A	2455.7	A	1926.3	A	1450.3	A		
bark		2824.7	B	2629.0	B	2481.3	B	2167.0	B		

*Same letter are not significantly different by Duncan's multiple range test ($\alpha=0.05$).

Table 5. Differences of the heating value by species in same moisture content (woody).

species	M.C (d.b., %)	Heating values (kcal/kg)									
		0		20		40		60		80	
Larix kaempferi		4609.0	A	3862.0	A	3649.0	A	3212.3	A	2820.3	A
Pinus rigida		4608.7	A	3862.0	A	3168.3	B	2963.3	B	2590.7	B
Pinus koraiensis		4763.0	B	3873.0	A	3459.0	A	3246.7	A	3033.3	C
species	M.C (d.b., %)	100		120		140		160			
Larix kaempferi		2400.3	A	2038.3	A	1833.3	A	1422.0	A		
Pinus rigida		2222.7	B	1906.0	A	1828.7	A	1450.3	A		
Pinus koraiensis		2633.7	C	2455.7	B	1926.3	B				

*Same letter are not significantly different by Duncan's multiple range test ($P=0.05$)

Table 6. Differences of the heating value by species in same moisture content(bark).

species	M.C (d.b., %)	Heating values (kcal/kg)									
		0		20		40		60		80	
Larix kaempferi		4900.0	A	4248.7	A	3733.3	A	2937.7	A	2709.7	A
Pinus rigida		4664.3	A	4059.0	B	3830.7	AB	3535.7	B	2896.3	B
Pinus koraiensis		4863.0	A	4253.3	A	3854.3	B	3487.3	B	3189.0	C
species	M.C (d.b., %)	100		120		140		160			
Larix kaempferi		2522.3	A	2302.3	A	2085.0	A	1759.7	A		
Pinus rigida		2697.3	B	2529.3	B	2333.7	B	2068.7	B		
Pinus koraiensis		2824.7	C	2629.0	C	2481.3	C	2167.0	B		

*Same letter are not significantly different by Duncan's multiple range test ($P=0.05$).

차이가 없는 것으로 나타났다. 함수율 80, 100%인 경우 3 수종 모두 다른 발열량 값을 나타냈으며, 함수율 20%에서는 수종간 평균발열량의 차이가 없는 것으로 나타났다. 대체적으로 잣나무의 발열량이 다른 수종들 보다 높은 것으로 판단된다.

부위별 수종간 검정결과에서 수피의 결과는 Table 6과 같다. 함수율 60, 160%의 경우 리기다소나무와 잣나무간의 평균발열량 차이는 없는 것으로 나타났으며, 함수율 80~140%에서는 3 수종 모두 다른 평균발열량을 나타내었다. 함수율 0%인 경우 3 수종 모두 평균발열량의 차이가

없는 것으로 나타났으며, 함수율 60%에서는 리기다소나무가 나머지 수종과 평균발열량의 차이가 없는 것으로 나타났다. 함수율 20%의 경우 낙엽송과 잣나무간 평균발열량의 차이가 없는 것으로 분석되었다. 수피에서도 대부분의 함수율에서 잣나무의 발열량이 다른 수종들 보다 높은 것으로 나타났다.

IV. 결론

본 연구에서는 목재의 에너지 이용에 있어서 가장 중요

한 요인 중의 하나인 발열량을 국내 주요 침엽수종을 대상으로 함수율수준에 따라 수종별, 부위별로 측정·분석하였다. 그 결과 침엽수 3개 수종의 발열량은 함수율 0%일 때에 수피가 4900.0 kcal/kg~4664.3 kcal/kg, 목질부가 4763.0 kcal/kg~4608.7 kcal/kg로 측정되었으며, 수피와 목질부 모두 잣나무가 가장 높은 것으로 나타났다. 또한 수피가 목질부 보다는 발열량이 높은 것으로 측정되었으며, 3개 수종 모두 함수율이 높아질수록 발열량이 지수 함수적으로 감소하는 것으로 나타났다.

에너지 활용 시 발열량 예측을 위해 회귀분석을 실시한 결과, 목질바이오매스의 펠릿이용 적정함수율인 20%일 때의 발열량은 낙엽송의 수피 4179.3 kcal/kg, 목질부 4103.9 kcal/kg인 것으로 나타났으며, 리기다소나무의 수피 4164.1 kcal/kg, 목질부 3859.6 kcal/kg, 잣나무는 수피 4374.0 kcal/kg, 목질부 4216.1 kcal/kg인 것으로 산출되었다. 또한 목재칩이용 적정함수율인 40%일 때의 발열량은 낙엽송의 수피 3689.9 kcal/kg, 목질부 3566.4 kcal/kg, 리기다소나무의 수피 3764.2 kcal/kg, 목질부 3379.2 kcal/kg, 잣나무의 수피 3919.9 kcal/kg, 목질부 3700.6 kcal/kg인 것으로 나타났다.

함수율별 부위수종간의 분산분석을 실시한 결과는 함수율 0%, 20%의 수종간 분석결과와 0%의 부위간 분석결과를 제외하고는 유의수준 5%에서 수종간, 부위간에는 모든 함수율에서 유의적 차가 있는 것으로 분석되었다.

기존의 연구결과에서 함수율 0%인 경우, Abe(1986)는 침엽수의 발열량 4970.0kcal/kg, Hwang 등(2009)의 바이오에너지 순환립의 버드나무 수종의 발열량 4410.5 kca/kg, KFRI(2009)의 낙엽송 4869.1 kcal/kg, 리기다소나무 4721.1 kcal/kg, 잣나무 5131.8 kcal/kg은 본 연구의 발열량 측정결과와는 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. 그러나 기존의 연구결과는 목질부와 수피를 구분하지 않고 혼합하여 측정하였거나 재료의 수종만 구분되어 측정된 결과로, 다소의 발열량의 차이가 있는 것으로 사료되지만, 함수율과 발열량사이에 음의 상관관계를 가지는 비슷

한 경향을 나타내었다.

추후 목질바이오매스의 보다 효율적 이용을 위하여 더욱 다양한 수종과 가지, 잎, 뿌리 등의 세밀한 부위별 발열량 측정을 검토할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 산림청 산림과학기술개발사업(과제번호 S1209 11L090110)의 지원에 의해 수행된 결과의 일부임.

참고 문헌

- Abe F. 1986. Calorific value of Japanese coniferous wood. Bull. For. & For. Prod. Res. Inst. 338: 91-100.
- Hwang JS, Oh JH, Lee JS, Kim NH, Cha DS. 2009. Heating value of short rotation coppice species according to moisture content. Jour. Korea. Soc. For. Eng. Tech. 7(2): 129-141. [In Korean]
- Kim KY, Yeon YJ. 1999. *Combustion Engineering*. 324 pp. DongHwa Technology Publishing, Paju, Korea. [In Korean]
- KFRI (Korea Forest Research Institute). 2009. Application of forestry bio energy. pp. 47-54. [In Korean]
- MCIE (Ministry of Commerce, Industry and Energy). 2006. The Report of development on department of unused biomass energy conversion. (1)Development of energy conversion and application technology for woody-biomass resource. pp. 1-72. [In Korean]
- MCIE (Ministry of Commerce, Industry and Energy). 2007. A study on the energy utilization of ligneous biomass-Focusing on energy production facility fueled by wood chips-. pp. 292-302. [In Korean]
- Park YJ, Lee SY, Lee HP. 2008. The thermal characteristics of tree branches, barks, living leaves and dead leaves in *Pinus densiflora* and *Quercus dentata*. J. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng. 22(1): 84-92. [In Korean]
- Shin SJ, Han GS, Myeong SJ, Cho JS, Yeon IJ. 2008. Wood pelletizing using pine root wast biomass -different pelletizing properties between trunk and root biomass of *Pinus densiflora*. Proc. cf conf. Kor. Soc. For New and Renewable Energy. pp. 71-73. [In Korean]