

주요 활엽수종의 함수율별 발열량 예측

황진성¹ · 오재현² · 차두송^{1*}

¹강원대학교 산림환경과학대학, ²국립산림과학원 산림생산기술 연구소

Estimation of the Heating Value of Major Broad-Leaved Trees due to Moisture Content

Jin Sung Hwang¹, Jae Heun Oh², and 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

ABSTRACT : Heating value is the one of most important factor in energy use of the woods. This study was investigated for determining the heating value according to the moisture content level(%) of major broad-leaved tree in Korea. Heating value was decreased rapidly regardless the kinds of species (*Liriodendron tulipifera*, *Alnus japonica*, and *Quercus mongolica*) and parts of woods (wood part, and bark) as the moisture content (MC) was increased. In addition, bark had higher heating value than wood part. *Liriodendron tulipifera* showed the highest heating value among the other two species.

Keywords : Wood-biomass, Heating value, Moisture content, Broad-leaved tree

서 론

지구온난화의 주범으로 알려지고 있는 과도한 화석연료의 사용을 줄이기 위해서는 에너지 사용체계를 순환적으로 사용할 수 있는 사회 시스템을 구축하는 것이 필요하다. 이에 신·재생에너지는 자원고갈 및 공해나 대기오염문제 등에 자유로운 이유로 화석연료를 대체할 수 있는 지속가능한 에너지로서 여러 국가에서 연구되어지고 있다. 그 중에서도 바이오매스 에너지원은 유럽과 미국, 일본 등에서 관심이 높아지고 있는 가운데, 에너지 이용에 있어 주요한 위치를 차지해 나가고 있다(Lee et al., 2006). 국내에서도 이러한 바이오매스 에너지원이 매우 유망한 에너지원으로서 주목 받고 있으며, 대부분의 국토가 산림으로 이루어진 우리나라와 같은 조건에서는 목질계 바이오매스의 에너지원 이용이 활성화 될 것으로 기대되어진다. 특히, 산림청에서 1998년부터 숲 가꾸기 사업을 실시하고 있지만, 높은 수확 및 집재 비용으로 인하여 숲가꾸기의 산물의 50% 정도가 그대로

산지에 방치되고 있는 실정이며, 이러한 미이용 목질바이오매스 자원을 에너지원으로서 활용한다면 에너지의 97%를 수입에 의존하고 있는 국내 에너지부문에 대한 경제적 파급 효과와, 국내산림에 대한 환경적 파급효과는 대단히 클 것으로 판단된다.

목질 바이오매스를 에너지원으로 이용하는데 있어 목재의 발열량은 가장 중요한 요인 중의 하나로서 특히, 연료의 매매와 연소로의 설계, 연소장치의 선택에 있어서 필수적인 자료가 된다(Kim and Yeon, 1999). 일반적으로 목재발열량은 알콜-벤젠과 α -셀룰로오스와 정의상관관계를 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(Boo et al., 2007 : Park et al., 2008 : Shin et al., 2008), 함수율에 따른 발열량 특성에 대한 연구는 미흡한 상태이

* Corresponding author: (E-mail) dscha@kangwon.ac.kr

※ 본 연구는 산림청 산림과학기술개발사업(과제번호 S120910L090100)의 지원에 의해 수행된 결과의 일부임.

다. 이에 본 연구에서는 추후 목질 바이오매스를 에너지원으로서 활용하기 위한 자료를 제공하고자, 대표적인 활엽수 3개 수종을 대상으로 함수율 및 부위에 따른 발열량을 측정하였다.

재료 및 방법

1. 공시재료

공시재료는 강원도 홍천군에 위치한 강원대학교 산림환경과학대학 부속학술림에서 바이오순환림 조림 속성수로 대두되고 있는 백합나무(*Liriodendron tulipifera*), 대표 사방수종인 오리나무(*Alnus japonica*), 국내 자생 참나무류 중 가장 많은 비율을 차지하고 있는 신갈나무(*Quercus mongolica*) 등 활엽수 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.

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

여기서, $M(\%)$ = 함수율(d.b : dry basis)

W_m (g) = 물질 내에 포함되어있는 수분의 무게

W_d (g) = 완전히 건조된 물질의 무게

3. 분석방법

실험결과는 SAS 프로그램의 ANOVA와 던컨의 다중비교를 실시하여 발열량에 대한 함수율에 따른 수종간·부위간 유의성 검정을 실시하였다.

결과 및 고찰

1. 수종별 함수율변화에 따른 발열량

공시재료로 선정된 활엽수 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(Jo et al., 2009). 하지만 함수율이 120% 혹은 140% 이상인 경우에는 측정장치의 점화실패로 발열량 측정이 불가능하였다.

(1) 백합나무(*Liriodendron tulipifera*)

백합나무의 함수율별 발열량 측정은 함수율 140%까지 측정 가능하였으며, 결과는 Fig. 2와 같다. 함수율 0%일 때 수피의 평균 발열량은 4927.3 kcal/kg(표준편차 ±48.2)로 가장 높게 나타났으며, 목질부는 평균 발열량이 4635.7 kcal/kg(표준편차 ±40.2)인 것으로 나타났다. 함수율이 20~140%로 변화할 때 발열량은 수피는 4230.0~1948.0 kcal/kg, 목질부는 3483.0~1713.3 kcal/kg로 변화하는 것으로 나타났으며, 일반적으로 수피가 목질부보다 약 284.6 kcal/kg정도 높게 산출되었다. 또한 함수율별 발열량을 예측한 결과는 Fig. 3과 같다. 예측결과, 목질바이오매스의 펠릿 이용 적정함수율인 20%일 때의 발열량은 수피 4228.1 kcal/kg,

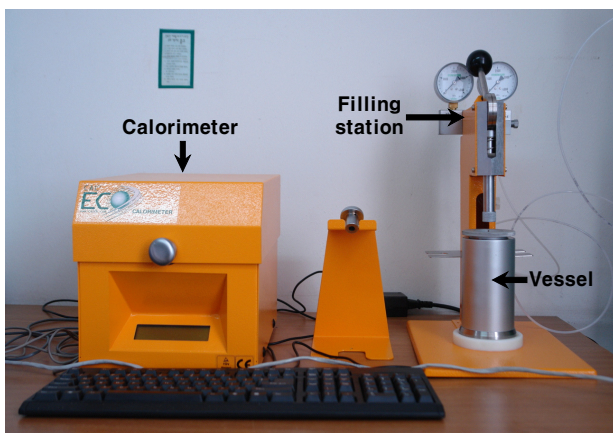


Fig. 1. Calorimeter(ECO isothermal bomb calorimeter, CAL2K).

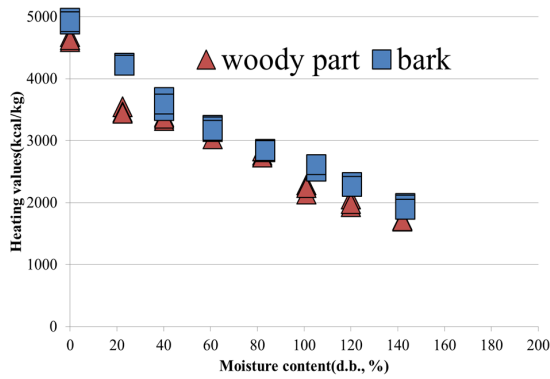


Fig. 2. Actual heating value by MC.

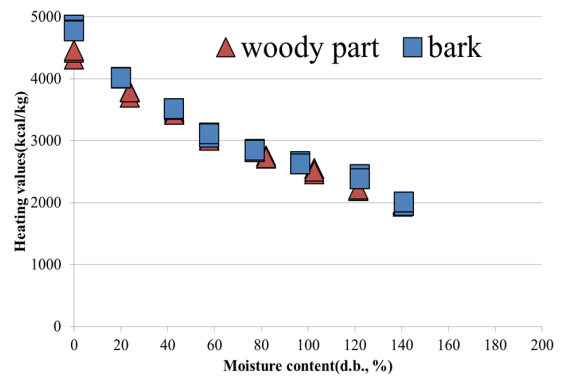


Fig. 4. Actual heating value by MC.

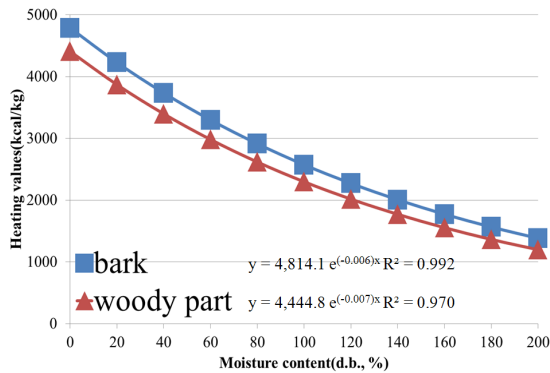


Fig. 3. Estimate heating value by MC.

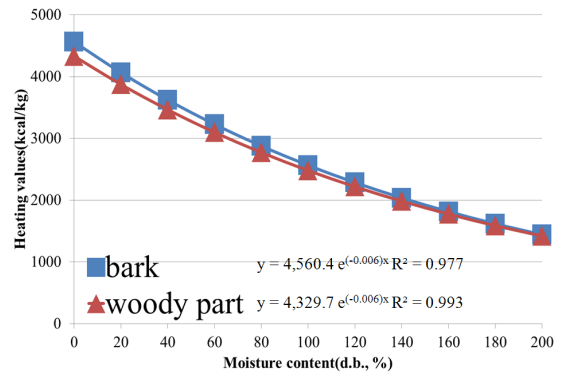


Fig. 5. Estimate heating value by MC.

목질부 3868.9 kcal/kg인 것으로 나타났으며, 목재칩 이용 적정함수율인 40%일 때의 발열량은 수피 3734.0 kcal/kg, 목질부 3396.1 kcal/kg인 것으로 나타났다.

(2) 오리나무(*Alnus japonica*)

오리나무의 함수율별 발열량 측정은 함수율 140%까지 측정 가능하였으며, 결과는 Fig. 4와 같다. 함수율 0%일 때 수피의 평균 발열량은 4807.3 kcal /kg(표준편차 ±48.6)로 가장 높게 나타났으며, 목질부는 평균 발열량이 4401.3 kcal/kg(표준편차 ±71.8)인 것으로 나타났다. 함수율이 20~140%로 변화할 때 발열량은 수피는 4017.0~1977.7 kcal/kg, 목질부는 3761.3~1966.7 kcal/kg로 변화하는 것으로 나타났으며, 일반적으로 수피가 목질부보다 약 159.3 kcal/kg정도 높게 산출되었다. 또한 함수율별 발열량을 예측한 결과는 Fig. 5와 같다. 예측결과, 목질바이오매스의 펠릿이용 적정함수율인 20%일 때의 발열량은 수피 4064.1 kcal/kg, 목질부 3872.8 kcal/kg인 것으로 나타났으며, 목재칩이용 적정함수율인 40%일 때의 발열량은 수피 3621.8

kcal/kg, 목질부 3464.0 kcal/kg인 것으로 나타났다.

(3) 신갈나무(*Quercus mongolica*)

신갈나무의 함수율별 발열량 측정은 함수율 120%까지 측정 가능하였으며, 결과는 Fig. 6과 같다. 함수율 0%일 때 수피의 평균 발열량은 4908.0 kcal/kg(표준편차 ±3.6)로 가장 높게 나타났으며, 목질부는 평균 발열량이 4496.3 kcal/kg(표준편차 ±34.4)인 것으로 나타났다. 함수율이 20~120%로 변화할 때 발열량은 수피는 4159.7~2498.0 kcal/kg, 목질부는 3814.0~2017.3 kcal/kg로 변화하는 것으로 나타났으며, 일반적으로 수피가 목질부보다 약 408.5 kcal/kg정도 높게 산출되었다. 또한 함수율별 발열량을 예측한 결과는 Fig. 7과 같다. 예측결과, 목질바이오매스의 펠릿이용 적정함수율인 20%일 때의 발열량은 수피 4199.7 kcal/kg, 목질부 3814.4 kcal/kg인 것으로 나타났으며, 목재칩이용 적정함수율인 40%일 때의 발열량은 수피 3761.8 kcal/kg, 목질부 3333.8 kcal/kg인 것으로 나타났다.

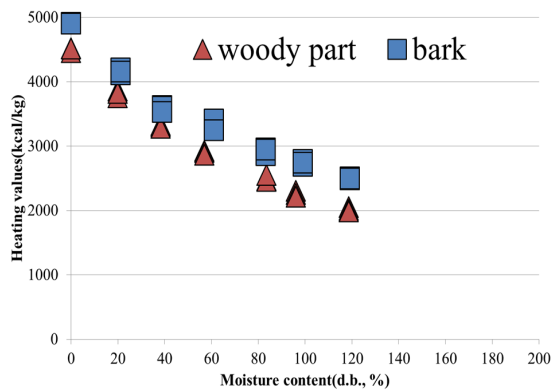


Fig. 6. Actual heating value by MC.

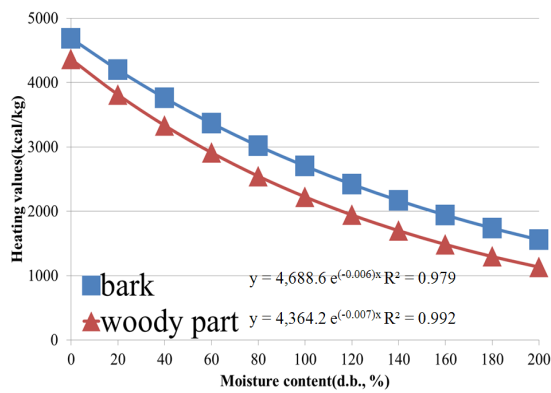


Fig. 7. Estimate heating value by MC.

2. 함수율에 따른 수종별 · 부위별 발열량 분산분석

활엽수 3개 수종의 함수율별 수종 · 부위에 따른 발열량의 차이를 살펴보기 위하여 분산분석한 결과는 Table 1과 같다. 함수율 40%의 수종간 분석결과를 제외하곤 유의수준 5%에서 수종간, 부위간에는 모든 함수율에서 유의적 차가 있는 것으로 나타나, 수종 및 부위에 따른 발열량의 차이가 있는 것으로 판단된다. 하지만 함수율 0%의 수종 · 부위간 및 함수율 40%의 수종간의 유의성 차이가 없는 것으로 나타나, 앞으로 많은 실험결과를 통하여 재검토 하여야 할 것으로 사료된다.

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, 백합나무의 경우 함수율 60%와 80%의 경우를 제외하곤 목질부와 수피의 발열량 차이가 있는 것으로 나타났다. 오리나무의 경우에는 함수율 140% 일 때만 발열량의 차이가 없는 것으로 나타났으며, 신갈나무는 전체 함수율에서 목질부와 수피의 발열량 차이가 있는 것으로 나타났다.

부위별 수종간 검정결과에서 목질부의 결과는 Table 5와

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

Source	MC(d.b., %)	Pr > F							
		0	20	40	60	80	100	120	140
Species		<.0001	0.0006	0.4809	0.0146	0.0019	0.0001	<.0001	<.0001
part		<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
Species*part		0.0741	<.0001	0.0063	0.0002	<.0001	0.0003	<.0001	0.0002

Table 2. Differences of the heating value by parts in same moisture content in *Liriodendron tulipifera*.

part	M.C(d.b., %)	Heating values(kcal/kg)							
		0	20	40	60	80	100	120	140
woody part		4635.7	A	3483.0	A	3360.0	A	3127.3	A
	bark	4927.3	B	4230.0	B	3592.3	B	3213.0	A
part		80	100	120	140				
	woody part	2778.7	A	2225.7	A	1995.0	A	1713.3	A
bark	2841.7	A	2545.3	B	2297.7	B	1948.0	B	

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

같다. 함수율 0%와 20%의 경우 오리나무와 신갈나무간의 평균발열량 차이는 없는 것으로 나타났으며, 함수율 40%, 100%, 120%에서는 백합나무와 신갈나무간의 평균발열량 차이가 없는 것으로 나타났다. 함수율 60%인 경우 3 수종 모두 다른 발열량 값을 나타냈으며, 함수율 80%에서는 오리나무와 백합나무간 평균발열량의 차이가 없는 것으로 나타났다.

부위별 수종간 검정결과에서 수피의 결과는 Table 6과

같다. 함수율 0%의 경우 백합나무와 신갈나무간의 평균발열량 차이는 없는 것으로 나타났으며, 함수율 20%, 100%, 120%에서는 3 수종 모두 다른 평균발열량을 나타냈다. 함수율 40%와 140%인 경우 3 수종 모두 평균발열량의 차이가 없는 것으로 나타났으며, 함수율 60%에서는 백합나무가 나머지 수종과 평균발열량의 차이가 없는 것으로 나타났다. 함수율 80%의 경우 오리나무와 백합나무간 평균발열량의 차이가 없는 것으로 나타났다.

Table 3. Differences of the heating value by parts in same moisture content in *Alnus japonica*.

part	Heating values(kcal/kg)								
	M.C(d.b., %)	0		20		40		60	
woody part		4401.3	A	3761.3	A	3451.0	A	3013.0	A
bark		4807.3	B	4017.0	B	3510.7	B	3098.0	B
part	M.C(d.b., %)	80		100		120		140	
woody part		2731.7	A	2510.7	A	2205.3	A	1966.7	A
bark		2841.7	B	2646.0	B	2417.3	B	1977.7	A

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

Table 4. Differences of the heating value by parts in same moisture content in *Quercus mongolica*.

part	Heating values(kcal/kg)								
	M.C(d.b., %)	0		20		40		60	
woody part		4496.3	A	3814.0	A	3305.3	A	2900.0	A
bark		4908.0	B	4159.7	B	3588.7	B	3328.7	B
part	M.C(d.b., %)	80		100		120		140	
woody part		2493.7	A	2258.7	A	2017.3	A		
bark		2921.0	B	2740.7	B	2498.0	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 in woody part.

species	Heating values(kcal/kg)								
	M.C(d.b., %)	0		20		40		60	
<i>Alnus japonica</i>		4401.3	B	3761.3	A	3451.0	A	3013.0	B
<i>Liriodendron tulipifera</i>		4635.7	A	3483.0	B	3360.0	B	3127.3	A
<i>Quercus mongolica</i>		4496.3	B	3814.0	A	3305.3	B	2900.0	C
species	M.C(d.b., %)	80		100		120		140	
<i>Alnus japonica</i>		2731.7	B	2510.7	B	2205.3	B	1966.7	A
<i>Liriodendron tulipifera</i>		2778.7	B	2225.7	A	1995.0	A	1713.0	B
<i>Quercus mongolica</i>		2493.7	A	2258.7	A	2017.3	A		

* 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 in bark.

species	Heating values(kcal/kg)								
	M.C(d.b., %)	0		20		40		60	
<i>Alnus japonica</i>		4807.3	B	4017.0	C	3510.7	A	3098.0	B
<i>Liriodendron tulipifera</i>		4972.3	A	4230.0	A	3592.3	A	3213.0	AB
<i>Quercus mongolica</i>		4908.0	A	4159.7	B	3588.7	A	3328.7	A
species	M.C(d.b., %)	80		100		120		140	
<i>Alnus japonica</i>		2841.7	B	2646.0	B	2417.3	B	1977.7	A
<i>Liriodendron tulipifera</i>		2841.7	B	2545.3	C	2297.7	C	1948.0	A
<i>Quercus mongolica</i>		2921.0	A	2740.7	A	2498.0	A		

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

결 론

본 연구에서는 목재의 에너지 이용에 있어서 가장 중요한 요인 중의 하나인 발열량을 국내 주요 활엽수종을 대상으로 함수율수준에 따라 수종별, 부위별로 측정·분석하였다. 그 결과 활엽수 3개 수종의 발열량은 함수율 0%일 때에 수피가 4927.3 kcal/kg~4807.3 kcal/kg, 목질부가 4635.7 kcal/kg~4401.3 kcal/kg로 측정되었으며, 수피와 목질부 모두 백합나무가 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 백합나무의 경우 수피 4228.1 kcal/kg, 목질부 3868.9 kcal/kg인 것으로 나타났으며, 오리나무의 경우 수피 4064.1 kcal/kg, 목질부 3872.8 kcal/kg, 신갈나무는 수피 4199.7 kcal/kg, 목질부 3814.4 kcal/kg인 것으로 산출되었다. 또한 목재칩이용 적정함수율인 40%일 때의 발열량은 백합나무의 경우 수피 3734.0 kcal/kg, 목질부 3396.1 kcal/kg, 오리나무의 경우 수피 3621.8 kcal/kg, 목질부 3464.0 kcal/kg, 신갈나무의 경우 수피 3761.8 kcal/kg, 목질부 3333.8 kcal/kg인 것으로 나타났다.

함수율별 부위·수종간의 분산분석을 실시한 결과는 함수율 40%의 수종간 분석결과를 제외하곤 유의수준 5%에서 수종간, 부위간에 유의적 차가 있는 것으로 분석되었다.

기존의 연구결과에서 함수율 0%인 경우, Abe(1986)는 활엽수의 발열량 4,710 kcal/kg, Hwang *et al.*(2009)의 바이오에너지 순환림의 버드나무 수종의 발열량 4410.5 kcal/kg,

Jo *et al.*(2009)의 백합나무 목질부 4453.6 kcal/kg, 오리나무 목질부 4558.7 kcal/kg은 본 연구의 발열량 측정결과와는 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. 그러나 기존의 연구 결과는 목질부와 수피를 구분하지 않고 혼합하여 측정하였거나 시료의 채취 시기 및 장소 등의 차이에 의한 결과로, 다소의 발열량의 차이가 있는 것으로 사료되지만, 함수율과 발열량사이에 음의 상관관계를 가지는 비슷한 경향을 나타내었다.

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

인용문헌

Abe Fusako. 1986. Calorific value of Japanese coniferous wood. Bull. For. & For. Prod. Res. Inst. 338:91-100.

Boo, K. J., J. H. Bae, J. O. Kim, S. M. Kim, I. G. Lee, J. S. Lee, S. C. Park, J. H. Kim, J. P. Lee, J. W. Kim, S. K. Kim, T. Y. Song, K. S. Lee, and Y. J. Kang. 2007. A study on the energy utilization of ligneous biomass -Focusing on energy production facility fueled by wood chips-. Ministry of commerce, Industry and energy. pp. 292-302.

Hwang, J. S., J. H. Oh, J. S. Lee, N. H. Kim, and D. S. Cha. 2009. Heating value of short rotation coppice species according to moisture content. Jour. Korea. Soc. For. Eng Tech 7(2):129-141.

Jo, S. T., O. K. Lee, S. M. Lee, S. H. Choi, and B. J. Ahn. 2009. Application of forestry bio energy. KFRI. pp. 47-54.

Kim, K. Y., Y. J. Yeon. 1999. Combustion engineering. DongHwa Technology Publishing, Paju, Korea.

Lee, J. S., D. S. Cha, J. H. Oh, K. S. Han, and J. J. Kim. 2006. The Report of development on department of unused biomass energy cinversion. (1)Development of energy conversion and application technology for woody-biomass resource. Ministry of

commerce, Industry and energy. pp. 1-72.

Park, Y. J., S. Y. LEE, and H. P. Lee. 2008. The thermal characteristics of tree branches, barks, living lwaves and dead leaves in *Pinus densiflora* and *Quercus dentata*. J. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng. 22(1):84-92.

Shin, S. J., G. S. Han, S. J. Myeong, J. S. Cho, and I. J. Yeon. 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.

(Received May 3, 2011; Accepted August 25, 2011)