

반탄화 목분과 폐활성탄 혼합물의 복합연료활용을 위한 연료적 특성에 관한 연구¹

이 창 구² · 강 석 구^{2,†}

A Study on Fuel Characteristics of Mixtures Using Torrefied Wood Powder and Waste Activated Carbon¹

Chang Goo Lee² · Seog Goo Kang^{2,†}

요 약

본 연구는 반탄화 목분과 정수기 필터용 폐활성탄 분쇄물을 혼합한 혼합물을 연료로 사용하였을 경우의 그 연료적 특성을 평가하고자 하였다. 반탄화 목분은 국산 범용수종인 졸참나무와 소나무를 이용하여 급속으로 목재칩 열가공처리가 가능한 wood roaster를 이용하여 처리하였으며 처리조건은 200℃에서 각 300 s, 450 s, 600 s를 적용하였다. 이때 폐활성탄과 반탄화 목분의 혼합비율은 중량대비(wt%) 5 : 95, 10 : 90, 15 : 85, 20 : 80, 40 : 60, 60 : 40, 80 : 20으로 하였으며, 이에 대한 연료적 특성에 평가를 위해 발열량, 원소분석, 회분함량 등을 측정하였다.

그 결과는 다음과 같다.

1. 동일시간, 온도 등의 wood roasting 처리조건에서 소나무가 졸참나무에 비해 탄소함량이 더 높았으며, 이는 낮은 온도와 짧은 시간에 최적 탄화도를 나타냄으로 소나무가 효율적인 반탄화 작업이 가능함을 알 수 있다.
2. 반탄화 목분 및 무처리 목분의 폐활성탄 첨가율이 증가할수록 총발열량 값은 급격히 증가하였고 회분함량 또한 증가하였다.
3. 반탄화 목분과 무처리 목분에 폐활성탄을 혼합한 경우에는 두 조건 모두 첨가율에 따라 총발열량은 증가하지만 무처리 보다는 반탄화 목분 그리고 졸참나무보다는 소나무가 더 높은 총발열량을 나타냈다.
4. 폐활성탄을 목분과 함께 혼합물의 원료로 사용하기 위해서는 800℃, 4시간 연소조건 이상의 고온 연소조건이 필요하다고 판단된다. 이는 800℃, 4시간 연소조건에서도 완전연소가 되지 않고 회분상태로 잔류하는 함량이 매우 높기 때문이다.
5. 또한 무처리 목분과 반탄화 목분에 폐활성탄을 혼합한 조건 중 무처리 목분에 폐활성탄을 혼합하는 조건이 총발열량의 증가율이 더 높게 나타났으며, 이러한 현상은 소나무보다는 졸참나무가 더 명확하게 나타났다. 최적 회분함량의 폐활성탄 첨가비율은 소나무 무처리 목분에 총 중량대비 5% 이상, 10% 미만의 조건이며 이는 1급 펠릿에 해당되는 0.7% 미만의 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

¹ Date Received November 14, 2014, Date Accepted January 7, 2015

² 충남대학교 환경소재공학과, Department of Bio-based Materials, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

[†] 교신저자(Corresponding author) : 강석구(e-mail: lachesis@cnu.ac.kr)

ABSTRACT

This study evaluated fuel properties of composite materials which were prepared by mixing a waste activated carbon from the used purifier filter with torrefied wood powder. Wood species of the raw material of torrefied wood powder are oak wood (*Quercus serrata* Thunb. ex Murray) and pine wood (*Pinus densiflora* Siebold & Zucc). And the treatment conditions used for this study were 300 s, 450 s, and 600 s at 200℃ for the wood roaster. Also, the mixing ratios are 5 : 95, 10 : 90, 15 : 85, 20 : 80, 40 : 60, 60 : 40 and 80 : 20 (waste activated carbon : torrefied wood powder). The fuel properties such as highly heating value (HHV), elementary analysis and ash content were evaluated. The results obtained are followings;

1. Despite the same treatment condition of wood roasting, pine wood has higher carbon contents than oak wood. Therefore, pine wood indicated the optimum carbonization at low temperature and short treatment times.
2. The gross calorific value and ash content increased as the mixing ratio of waste activated carbon increased.
3. Mixtures of the waste activated carbon and torrefied wood powder showed greater gross calorific value than those of the mixtures of waste activated carbon and the untreated wood powder. Also, the pine wood resulted in higher heating value than those of the oak wood.
4. When composite fuels that were composed waste activate carbon and wood powder are used, higher temperature conditions are required because the combustion is incomplete at 800℃ and 4 hours.
5. The increasing rate of the gross calorific value of mixtures of waste activated carbon and untreated wood powder is higher than does the mixtures of waste activated carbon and torrefied wood powder. Also, this phenomenon is more obvious for pine woods. Therefore, an optimal mixing ratio of waste activated carbon was determined to be between 5% and 10% (wt%). Also, this condition satisfied the requirement of the No.1 grade of wood pellet.

Keywords : torrefaction, torrefied wood powder, wood roasting, highly heating value, elementary analysis, ash content

1. 서 론

최근 인류가 직면한 환경문제로서 무분별한 화석 연료의 사용으로 인한 지구온난화 및 기후변화에 대해 관심이 높아져가고 있다. 이에 화석연료가 가지는 환경문제를 해결하는 방안으로 바이오매스 등을 비롯한 신재생에너지의 사용을 국제적으로 권장하는 추세이며 이에 대한 기술개발 및 연구가 활발히 이루어지고 있다(황병호 외 1998).

목질계 바이오매스 중 목질원료를 파쇄 및 건조한 후 압축·성형공정을 통해 얻을 수 있는 목재펠릿이나 목재브리켓 등과 같은 고체바이오연료가 신재생 에너지 공급원으로써 주목받고 있고 있으며 이들을 고효율성 연료로 부상시키기 위해 다방면에서 기술 개발 및 연구가 꾸준히 진행되는 추세이다(Simes, H.C., C. C. Hassler, and T. H. Bean. 1988). 그러한 연구의 일환으로 목재펠릿의 경우 단위체적당 발열

량을 극대화시킬 수 있는 방법으로 목질원료 반탄화 방법을 도입하는 추세이다(Repellin, V. et al. 2010), (Chen, W.H and P. C Kuo. 2011). 이때 주로 이용되는 목재 반탄화 방법으로는 일정량의 목재를 Kiln 내 적재한 후 장시간 동안 건조 및 고온처리를 하여 회수하는 건식방법과 과열증기를 이용한 digester를 이용한 방법 등이 있으며 이를 통해 목질원료 내 탄소함량을 증가시켜 고에너지밀도의 특성을 부여하고 있다.

그러나, 연료로 사용되기 위한 목질원료의 기존의 건·습식 반탄화 방법은 연료의 가치와 대비하여 투자비용 및 건조 및 가공비용이 크게 소요되기 때문에, 용도에 적합한 목재 고온건조처리 기술이 필요한 실정이다. 이에 대해 펄프용 목재칩의 형상의 목질원료를 빠른 시간 내 열가공처리하여 반탄화시킬 수 있는 기술개발이 필요한 상황이다.

한편, 국내 산림자원의 총 산림면적은 88,874 ha로

국토의 64%를 차지하고 있으며 이 중 임목축적량은 8억 m³로 보고되고 있다(산림청 임업통계연보 2013). 이 중 지구온난화 및 기후변화에 따른 산림병해충의 유입과 확산으로 인해 병충해피해목의 면적이 2014년 4월 기준 127,000 ha 이상으로 이는 국내 울산광역시 면적에 달하는 거대한 규모로 알려져 있으며 특히 소나무재선충피해목과 참나무시들음병 감염목의 개체 수가 전국의 병충해피해목 대비 각 18% 이상의 수준으로 분포되어 있는 것으로 나타났다(산림청 임업통계연보 2013). 또한 병충해피해목의 경우 훈증 및 소각처리 등 다양한 방제작업 및 계획이 추진되어 있지만 확실한 치료법이 없는 실정으로 많은 문제가 야기되고 있다. 이에 대해, 병충해피해목과 같은 저부가가치 산림자원을 이용하여 고부가가치화 제품으로써 접목시킬 수 있는 고도의 기술을 접목하여 병충해피해목 및 숲가꾸기 부산물 등과 같은 미 이용되는 국내 산림자원의 고도이용을 극대화할 방안이 매우 시급하다.

또한, 산림자원을 제외하고도 일상생활에서 발생하는 폐기물 또한 주목할 필요가 있다. 다양한 분야에서 버려지는 폐기물을 제품의 원재료로 적용하여 고효율제품으로써 재탄생시킬 수 있는 제품을 복합 또는 혼합의 방법을 통해 기존 제품이 가지는 단점을 개선하고 장점을 부각할 수 있는 기술개발이 필요하다.

이 중, 시중에서 판매되는 정수기 내 흡착제로써 필터역할을 하는 활성탄의 경우 용도폐기 후 동일한 용도로 재활용될 수 없기 때문에 이를 다른 용도로 재활용하거나 효과적으로 처리할 수 있는 방안이 필요하다.

일반적인 활성탄의 경우 매우 높은 탄소성분을 함유하고 있는 특징이 있어 이점을 활용하여 정수기에서 수거된 폐활성탄을 분쇄한 후 복합연료의 원료로 새로운 시도를 하고자 한다.

그리하여, 본 연구에서는 범례적인 병충해피해목의 이용 및 축진을 고려하여 주요병충해피해수종인 소나무와 졸참나무를 선정한 후 이들을 급속의 wood roasting방법을 통해 제작한 반탄화 목재칩과

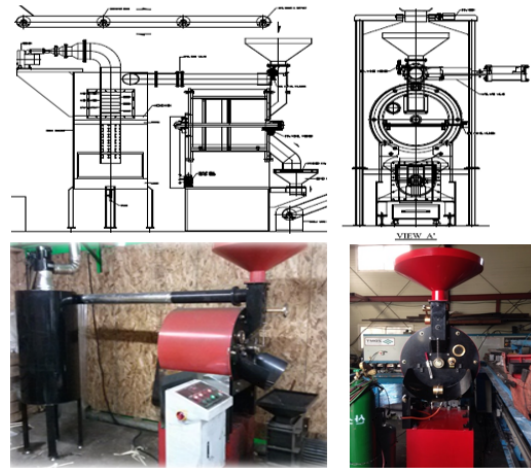


Fig. 1. Wood Roaster.

정수기필터에서 용도폐기된 폐활성탄을 이용하여 각각의 연료적 특성을 분석하고 더 나아가 이들을 다양한 혼합비율로 혼합하여 새로운 개념의 복합연료로써 이용가능성을 연료적 특성 평가방식으로 검증하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시재료

2.1.1. Wood roasting 처리 및 원재료

본 연구의 wood roasting공정에 이용된 재료는 대전 소재의 P사로부터 졸참나무(*Quercus serrata* Thunb. ex Murray), 소나무(*Pinus densiflora* Siebold & Zucc.) 펄프용 목재칩을 분양받아 이용하였다. Wood roasting공정은 Wood roaster (Fig. 1)를 이용하여 200℃의 온도에서 각각 300초, 450초, 600초간 처리하였으며, 처리 후 처리된 칩의 분쇄를 위해 Wood roaster의 부대시설인 분쇄기를 통해 20 mesh 이하의 목분형태로 제조하였다.

2.1.2. 폐활성탄

대전소재의 정수기형 활성탄 필터 제조사인 H사로부터 용도폐기된 정수기 필터용 활성탄 분쇄물을

분양받았으며 20 mesh 이하로 선별작업을 실시한 후 2차적으로 이들을 증류수에 침지시킨 후 표면의 이물질들을 제거한 후 강제송풍식 건조기를 이용해 $105 \pm 3^\circ\text{C}$ 에서 24시간 이상 건조하여 함수율 3% 미만으로 조정 후 공시재료로 이용하였다.

2.1.3. 시료제조

본 연구에 이용된 발열량 측정시료의 제조조건은 20 mesh로 분급된 정수기용 폐활성탄과 Wood roasting 처리된 3가지 조건의 반탄화 목분 및 무처리 건조목분을 이용하여 중량대비기준(wt%)으로 하여 5 : 95, 10 : 90, 15 : 85, 20 : 80, 40 : 60, 60 : 40, 80 : 20 등 총 7가지의 비율로 단순 혼합하여 시료를 제조하였다. 이때, 시료는 전건처리 후 사용하였다.

2.2. 실험방법

2.2.1. 발열량 측정실험

각 수종 및 처리조건별로 발열량을 측정하기 위해 열량계(Parr 6400 Automatic Isoperibol Calorimeter, Parr instrument Inc.)를 사용하여 측정하였으며 이때, 모든 시료는 전건 후 사용하였다.

2.2.2. 원소분석 실험

각각의 조건별 시료는 유기화합물(C,H,O,N)을 정량·정성분석을 위하여 원소분석기(Element Analyzer, 1112series, THERMO)를 이용하여 3반복 시험을 하였다.

2.2.3. 회분함량 측정실험

각 시료의 회분함량의 측정을 위해 머플가마(Furnace, Muffle Furnace, CEBER CERAMIC FIB)를 이용하여 800°C 에서 4시간 동안 3반복 조건으로 실험하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 발열량 측정결과

Table 1은 200°C 의 온도에서 각 300초, 450초, 600초동안 열처리한 졸참나무 및 소나무 반탄화 목분과 이에 각 비율별로 정수기용 폐활성탄을 혼합물의 발열량에 대한 결과를 나타낸 것이다.

Table 1의 결과에서 나타난 바와 같이 반탄화 처리를 하지 않은 무처리 소나무의 발열량이 졸참나무에 비해 약 3.64% 높은 것으로 나타났는데 이는 권등(2010)에 의하면 소나무와 같은 침엽수재에 함유되어 있는 정유 및 수지성분에 기인하는 것으로 보고한 바 있다. 두 수종 모두 한국목재펠릿품질규격의 발열량 등급 중 1급펠릿에 해당되는 18.0 MJ/kg 이상의 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 또한 반탄화 처리된 시료는 탄화시간이 길어질수록 발열량이 점진적으로 상승하는 것으로 나타났는데 이는 Bourgeois, J. (1989)가 열처리과정 중 바이오매스계 원료 내 존재하는 수산기가 제거됨과 동시에 탄소의 함량이 높아짐에 따라 발열량이 상승한다고 보고한 바와 같이 본 실험 또한 이와 동일한 결과로 나타난 것으로 사료된다.

졸참나무의 경우, 무처리군에 비교해서 각 3가지 탄화조건에 대해 각 0.21%, 3.44%, 4.56%가 상승한 반면 소나무의 경우 4.12%, 3.23%, 6.52% 상승한 것으로 보아 동일처리조건에서 소나무의 탄화조건이 졸참나무의 조건보다 더 적합하다고 판단된다.

폐활성탄을 탄화처리 목분의 중량대비 각 비율(5%, 10%, 15%, 20%, 40%, 60%, 80%)에 따라 혼합한 혼합재료의 발열량을 측정한 결과, 폐활성탄의 비율이 높아질수록 급진적으로 상승하였으며 두 수종 모두 본 실험의 반탄화 처리조건 중 가장 높은 조건인 200°C , 600초 처리한 결과보다 무처리목분과 중량대비 5%의 폐활성탄을 혼합한 조건이 졸참나무의 경우 0.04%, 소나무의 경우 0.28% 가량 더 높은 것으로 나타났다. 따라서 결과적으로 반탄화 처리조건과 폐활성탄 혼합조건의 발열량 상승에 대한 관계는 폐활성탄 혼합처리 조건에 더 효과적으로 기인하는

Table 1. Highly heating value of 2 species according to the various wood roasting condition and the mix ratio of waste activated carbon

(unit : MJ/kg)

Mix ratio	<i>Quercus serrata</i> Thunb. ex Murray				<i>Pinus densiflora</i> Siebold & Zucc.			
	Con.	5 min	7.5 min	10 min	Con.	5 min	7.5 min	10 min
0 : 100	19.06 (± 0.10)	19.10 (± 0.71)	19.74 (± 0.26)	19.97 (± 0.46)	19.78 (± 0.28)	20.63 (± 0.42)	20.44 (± 0.54)	21.16 (± 0.36)
5 : 95	20.25 (± 0.24)	20.26 (± 0.11)	20.31 (± 0.05)	21.61 (± 0.05)	21.20 (± 0.21)	21.57 (± 0.17)	21.87 (± 0.14)	22.06 (± 0.02)
10 : 90	21.22 (± 0.06)	21.56 (± 0.09)	21.62 (± 0.06)	22.11 (± 0.08)	21.55 (± 0.16)	21.73 (± 0.53)	22.68 (± 0.06)	23.36 (± 0.03)
20 : 80	21.99 (± 0.18)	21.86 (± 0.39)	22.15 (± 0.01)	22.61 (± 0.25)	22.13 (± 0.05)	22.79 (± 0.83)	23.15 (± 0.38)	23.15 (± 0.28)
40 : 60	24.03 (± 0.05)	24.53 (± 0.01)	24.36 (± 0.22)	24.67 (± 0.31)	24.38 (± 0.02)	24.35 (± 0.13)	25.02 (± 0.27)	24.95 (± 0.05)
60 : 40	26.36 (± 0.11)	26.48 (± 0.16)	26.82 (± 0.10)	26.70 (± 0.19)	26.49 (± 0.62)	27.19 (± 0.29)	26.65 (± 0.45)	27.66 (± 0.02)
80 : 20	28.62 (± 0.11)	28.83 (± 0.07)	28.94 (± 0.05)	28.99 (± 0.17)	28.74 (± 0.17)	28.92 (± 0.13)	28.86 (± 0.11)	29.31 (0.13)
W.A.C					31.38 (± 0.06)			

* W.A.C : Waste activated carbon

Table 2. Highly heating value between the bomb calorimeter method and the calculated by element contents

(unit : MJ/kg)

Content	<i>Quercus serrata</i> Thunb. ex Murray				<i>Pinus densiflora</i> Siebold & Zucc.				W.A.C
	Con.	5 min	7.5 min	10 min	Con.	5 min	7.5 min	10 min	
Bomb calorimeter	19.06 (± 0.10)	19.10 (± 0.71)	19.74 (± 0.26)	19.97 (± 0.46)	19.78 (± 0.28)	20.63 (± 0.42)	20.44 (± 0.54)	21.16 (± 0.36)	31.38 (± 0.06)
Elemental analyzer	19.25	19.41	19.71	20.05	19.64	20.51	20.67	21.25	26.82

것을 알 수 있다. 일반적인 국산 침엽수 펠릿의 평균적인 발열량이 18.84~19.68 MJ/kg (4,500~4,700 kcal/g)인 점을 고려하였을 시 20.93 MJ/kg (5,000 kcal/g)의 수준 이상의 발열량 값을 확보하기 위해서는 졸참나무의 경우 200℃, 600초의 wood roasting 조건으로 처리된 목분에 중량대비 5% 이상의 폐활성탄을 혼합하였을 시 가능한 것으로 나타났으며, 소나무의 경우 폐활성탄을 혼합하지 않고 200℃, 600초의 반탄화 처리만으로 도달할 수 있는 것으로 나타났다.

3.2. 원소분석법을 이용한 발열량 검증결과

Table 3은 200℃의 온도에서 각 300초, 450초, 600초 간 처리한 졸참나무 및 소나무 반탄화 목분과 폐활성탄의 원소분석 결과를 나타낸 것이다.

공통적으로 두 수종 모두 탄화 처리시간 조건이 상승할수록 탄소의 함량이 높아지고 수소와 산소의 함량이 낮아지는 것으로 나타났는데 이 중 졸참나무의 탄소함량의 경우 무처리군에 비교 시 각 3가지 탄화조건에 대해 각 1.8%, 4.23%, 6.06% 가량 상승

Table 3. Value of elementary analysis about 2 species and highly heating value according to the calculated each element value

(unit of element : %, unit of HHV : MJ/kg)

Content	Constant	<i>Quercus serrata</i> Thunb. ex Murray				<i>Pinus densiflora</i> Siebold & Zucc.				W.A.C
		Con.	5 min	7.5 min	10 min	Con.	5 min	7.5 min	10 min	
C	0.3491	47.94 (± 0.32)	48.82 (± 0.1)	50.06 (± 0.59)	51.03 (± 0.03)	48.46 (± 0.44)	51.53 (± 0.40)	52.13 (± 0.06)	53.25 (± 0.11)	83.50 (± 4.28)
H	1.1783	6.15 (± 0.17)	5.98 (± 0.08)	5.78 (± 0.02)	5.70 (± 0.02)	6.28 (± 0.06)	5.88 (± 0.08)	5.79 (± 0.09)	5.85 (± 0.07)	0.47 (± 0.06)
O	0.1034	45.62 (± 0.48)	45.07 (± 0.08)	44.03 (± 0.59)	43.13 (± 0.05)	45.21 (± 0.06)	42.53 (± 0.08)	42.04 (± 0.09)	40.85 (± 0.07)	15.74 (± 4.41)
N	0.0151	0.29 (± 0.00)	0.14 (± 0.01)	0.14 (± 0.00)	0.14 (± 0.02)	0.05 (± 0.02)	0.06 (± 0.01)	0.04 (± 0.01)	0.05 (± 0.02)	0.28 (± 0.05)
A	0.0211	0.51 (± 0.06)	0.57 (± 0.06)	0.67 (± 0.02)	0.73 (± 0.01)	0.22 (± 0.04)	0.38 (± 0.06)	0.39 (± 0.00)	0.44 (± 0.06)	58.9 (± 8.69)
HHV		19.25	19.41	19.71	20.05	19.64	20.51	20.67	21.25	26.82

* W.A.C : Waste activated carbon

한 것으로 나타났으며 소나무의 경우 각 5.96%, 7.04%, 9.0% 상승한 것으로 나타났다. 졸참나무의 수소함량은 무처리군에 비교 시 각 탄화조건에 대해 2.84%, 6.4%, 7.89% 감소한 것으로 나타났으며 소나무의 경우 6.8%, 8.46%, 7.35% 감소한 것으로 나타났다. 산소함량의 경우 졸참나무는 무처리군에 비교 시 각 1.22%, 3.61%, 5.77% 감소하였으며 소나무는 각 6.3%, 7.54%, 10.67% 감소한 것으로 나타났다. 이는 종합적으로 탄소함량의 증가율과 수소 및 산소함량의 증감율을 견주어 볼 때 소나무가 졸참나무에 비해 탄화조건이 더 적합하다는 결과를 뒷받침할 수 있으며 이와 같은 결과는 van Krevelen, D.W. and Schuyer, J. (1957)가 석탄류를 포함한 모든 바이오매스 원료는 탄화가 많이 진행될수록 탄소함량이 높아짐과 동시에 산소와 수소함량이 낮아지며, 이를 통해 발열량이 상승되는 것으로 보고한바 있으며 이는 본 실험을 통한 두 수종 간의 원소분석결과와 일치하는 것으로 나타났다.

또한, Table 2는 Bomb Calorimeter를 이용하여 얻은 발열량과 Elemental Analyzer를 통해 측정된 각 원소의 함유량을 이용하여 Dulong's Formula Higher Heating Value를 (1) 이용하여 비교한 결과이다.

$$(0.3491 \times C) + (1.1783 \times H) - (0.1034 \times O) - (0.0151 \times N) + (0.1005 \times S) - (0.0211 \times A) \quad (식1)$$

이에 대한 결과로써 두 가지 방법을 통한 결과 값은 서로 유사성을 가지는 것으로 나타났으나 폐활성탄 단독으로 측정 및 산출한 값은 다소 차이가 나는 것으로 나타났는데 이는 원소분석결과를 이용한 Dulong's Formula Higher Heating Value 산출식에 회분의 함량이 포함되는데 이에 회분함량이 다소 높은 것으로 나타났으며 이는 회분 실험 시 폐활성탄의 연소온도조건에 적합하지 못함으로 인해 발생한 것으로 판단된다. 그러나 본 실험을 통한 Bomb Calorimeter를 통해 얻은 고위발열량과 Elemental Analyzer를 통해 얻은 원소분석에 대한 결과간에는 높은正的 상관을 나타내었다. (R = 0.99)

또한, Table 4는 원소분석 결과를 통해 산출한 Oxygen/Carbon 및 Hydrogen/Carbon 비율을 나타낸 것이다. 결과에서 보는 바와 같이 졸참나무의 경우 O/C 비율은 무처리군에 비해 각 3가지의 탄화조건에 대해 각각 3.10%, 8.14%, 12.62%의 감소를 나타냈으며 H/C 비율 또한 5.08%, 11.48%, 14.46% 감소한 것으로 나타났다. 마찬가지로 소나무의 경우에도

Table. 4. Ratio of O/C and H/C about 2 species

Content	Quercus serrata Thunb. ex Murray		Pinus densiflora Siebold & Zucc.	
	O/C	H/C	O/C	H/C
Untreated	95.16%	12.82%	93.29%	12.95%
200℃, 5 min	92.30%	12.20%	82.50%	11.40%
200℃, 7.5 min	88.00%	11.50%	80.60%	11.10%
200℃, 10 min	84.50%	11.20%	76.70%	11.00%

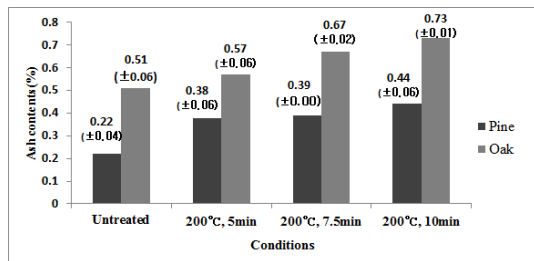


Fig. 2. Ash content between *Quercus serrata* Thunb. ex Murray and *Pinus densiflora* Siebold & Zucc. according to the each treatment condition.

O/C 비율은 각 13.08%, 15.74%, 21.63% 감소하였으며 H/C 비율 또한 13.60%, 16.67%, 17.73% 감소한 것으로 나타났다.

Van Krevelen, D.W. (1950)는 탄화가 진행된 물질일수록 O/C 및 H/C의 비율이 낮아진다고 보고한 바 있으며 이는 본 실험을 통한 결과와 일치되는 것으로 나타났다. 또한 두 수종간의 O/C 및 H/C 비율의 증감률을 비교해 볼 때 소나무가 졸참나무보다 현저히 감소하는 것으로 나타났으므로 이는 동일한 반탄화 처리조건에서도 활엽수종인 졸참나무 보다 침엽수종인 소나무가 본 연구의 탄화조건에 더 적합한 것으로 판단된다. 따라서, 졸참나무는 소나무와 유사성을 갖는 탄화도를 기대하기 위해 좀 더 높은 탄화 온도 및 시간 등의 처리조건을 적용해야 탄화도를 높일 수 있다고 사료된다.

3.3. 회분량 측정

Fig. 2는 두 수종 간 무처리구를 포함한 탄화시간 조건별의 회분함량을 나타낸 그래프이다. 두 수종의

모든 처리조건 중 200℃, 600초 처리한 졸참나무의 회분함량을 제외하고 모두 한국목재펠릿품질규격의 회분함량 등급 중 1급펠릿에 해당되는 0.7% 미만 기준을 만족하는 것으로 나타났으며 이는 소나무의 회분함량이 졸참나무의 결과보다 현저히 낮아 더 우수한 것으로 나타났다.

또한, Fig. 3은 폐활성탄을 혼합한 혼합물에서 발생하는 회분함량을 나타내었다. 무처리군과 고 탄화도를 기대할 수 있는 조건인 200℃, 600초의 처리조건에서 제조된 시료와 폐활성탄 혼합 시 그 혼합비를 따른 회분함량의 경향을 비교하였다. 실험결과 무처리군의 경우 두 수종 모두 중량대비 20%의 폐활성탄을 혼합할 시 3.0% 미만 기준에 해당되는 3등급 제품의 기준을 만족하는 것으로 나타났으며, 이외의 모든 기준은 4등급을 만족하거나 그 이하의 등급으로 나타났다. 그리고 200℃, 600초 반탄화 처리 목분에 중량대비 20%의 폐활성탄을 혼합할 경우, 두 수종 모두 6.0% 이하의 기준에 해당되는 4등급의 기준을 만족하였고, 폐활성탄의 혼합비율이 상승할수록 중량대비 40%의 졸참나무 조건을 제외한 모든 시료에서 모두 4등급의 기준에도 미치지 못했다.

회분의 함량이 펠릿품질규격 1등급 기준에 부합하지 않는 결과를 나타내어 추가적으로 Fig. 4와 같이 최소 회분함량의 경향을 보였던 무처리군의 소나무와 최대 회분함량 결과를 나타내었던 200℃, 600초 처리조건을 거친 졸참나무에 대해서 중량대비 각 5%, 10%, 15%씩 폐활성탄을 혼합한 혼합물의 회분함량을 측정된 결과, 5%와 10%의 무처리군 소나무 조건이 1등급 펠릿에 해당되는 0.7% 미만의 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 또한 15%를 혼합하였을 경우에는 2등급 펠릿에 해당되는 1.5% 이하의 기준

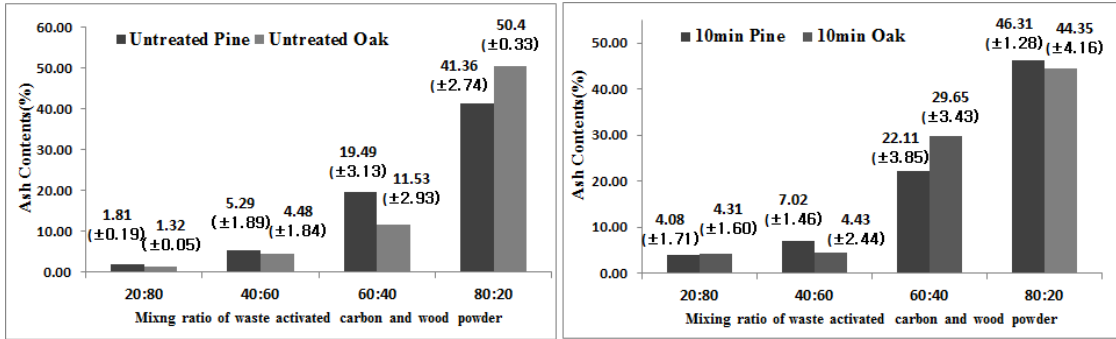


Fig. 3. Ash content between untreated specimens and treated at 200°C, 10 min specimens according to the each mix ratio of waste activated carbon.

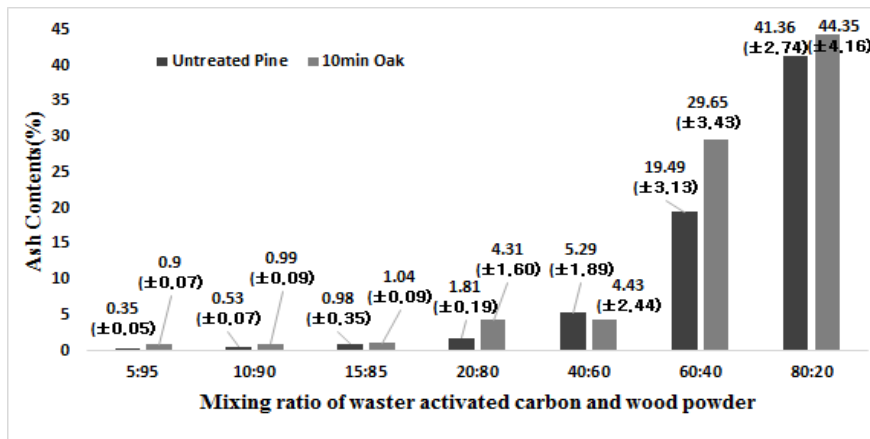


Fig. 4. Ash content between untreated *Pinus densiflora* Siebold & Zucc. and treated 10 min *Quercus serrata* Thunb. ex Murray according to the each mix ratio of waste activated carbon.

을 만족한 것으로 나타났다. 그리고 200°C, 600초 처리조건의 졸참나무의 경우 모두 2급 펠릿에 해당되는 1.5% 이하의 기준을 만족한 것으로 나타났다.

4. 결 론

국내 산림에 분포도가 가장 높은 범용 활엽수종인 졸참나무와 범용 침엽수종인 소나무 wood chip을 급속온열처리의 특징을 가지는 wood roasting 방법을 통해 얻어진 반탄화 분말과 정수기용 폐활성탄을 다양한 비율로 혼합한 혼합원료의 발열량측정, 원소

분석, 회분시험 등을 통해 복합연료로서의 사용 가능성을 구명하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 동일시간, 온도 등의 wood roasting 처리조건에서 소나무가 졸참나무에 비해 탄소함량이 더 높았으며, 이는 낮은 온도와 짧은 시간에 최적 탄화도를 나타냄으로 소나무가 효율적인 반탄화 작업이 가능함을 알 수 있다.
2. 무처리 및 반탄화 목분에 폐활성탄 첨가율이 증가할수록 총발열량 값은 급격히 증가하지만 회

분함량 또한 동시에 증가하는 문제점이 있다.

3. 또한 반탄화 목분과 무처리 목분에 폐활성탄을 혼합한 경우에는 두 조건 모두 첨가율에 따라 총발열량은 증가하지만 무처리 보다는 반탄화 목분 그리고 졸참나무보다는 소나무가 더 높은 총발열량을 나타냈다.
4. 폐활성탄을 목분과 함께 혼합물의 원료로 사용하기 위해서는 800℃, 4시간 연소조건 이상의 고온연소조건이 필요할 것으로 판단된다. 이는 800℃, 4시간 연소조건에서도 완전연소가 되지 않고 회분상태로 잔류하는 함량이 매우 높기 때문이다.
5. 또한 무처리 목분과 반탄화 목분에 폐활성탄을 혼합한 조건 중 무처리 목분에 폐활성탄을 혼합하는 조건이 총발열량의 증가율이 더 높게 나타났으며, 이러한 현상은 소나무보다는 졸참나무가 더 명확하게 나타났다. 최적 회분함량의 폐활성탄 첨가비율은 소나무 무처리목분에 총 중량대비 5% 이상, 10% 미만의 조건이며 이는 1급 펠릿에 해당되는 0.7% 미만의 기준을 만족하는 것으로 나타났다.
6. 최종적으로 총발열량과 회분량을 고려해볼 때, 최적의 혼합물 구성비는 총 중량대비 폐활성탄 5~10%의 혼합조건이 한국목재펠릿품질규격 중 회분함량 기준인 1~2등급에 부합할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 2014년도 목재기반의 산림 신 소득 창출 고도화(S211414L010300)의 연구지원비에 의하여 수행되었음.

REFERENCES

- Bourgeois, J., Bartholin, M.C., Guyonnet, R. 1989. Thermal treatment of wood; analysis of the obtained product. *Wood Science and Technology* 23(4); 303-310.
- Chen, W.H., Kuo, P.C. 2011. Torrefaction and co-torrefaction characterization of hemicellulose, cellulose and lignin as well as torrefaction of some basic constituents in biomass. *Energy* 36: 803-811.
- Hwang, B.H., Koo, J.E., Kim, Y.S., Kim, Y.S., Moon, S.P., Moon, C.G., Baek, G.H., Ahn, W.Y., Lee, B.G., Lee, J.Y., Lee, H.J., Cho, N.S. 1998. *Wooden Biomass*, Goyang, Korea.
- Kim, Y.H., Na, B.I., Lee, S.M., Lee, H.W., Lee, J.W. 2013. Optimal Condition for Torrefaction of Eucalyptus by Response Surface Methodology. *Journal of The Korean Wood Science and Technology* 41(6); 497-506.
- Kwon, G.J. 2013. Kangwon Univ. Forest Environmental Science College. In: Kwon, S.M., Jang, J.H., Cha, D.S., Kim, N.H., (eds), *Analysis to Calorific Value of Softwood and Hardwood*. *Journal of The Korean Wood Science and Technology*. p. 49.
- Repellin, V., Govin, A., Rolland, M., Guyonnet, R. 2010. Modelling anhydrous weight loss of wood chips during torrefaction in a pilot kiln. *Biomass Bioenergy* 34: 602-609.
- Simes, H.C., Hassler, C.C., Bean, T.H. 1988. *Wooden densification*, West Virginia Uni. Extension Service. Publication No. 838.