

폐기물고형연료 발열량에 영향을 미치는 요인에 관한 연구

강민수^{1,2}, 김양도², 류영복¹, 이강우³, 손병현⁴, 이만식^{1*}
¹한국생산기술연구원, ²부산대학교 재료공학부, ³(주)유성, ⁴한서대학교 환경공학과

A study on determinants having influence on heating value of waste-derived solid fuels

Min-Su Kang^{1,2}, Yang Do Kim², Young Bok Ryu¹, Gang-Woo Lee³,
Byung-Hyun Shon⁴ and Man Sig Lee^{1*}

¹Green Technology Service Center, Korea Institute of industrial Technology

²School of Materials Science and Engineering, Pusan National University

³Yoo Sung Company Limited

⁴Department of Environmental Engineering, Hanseo University

요 약 폐기물을 이용한 고형연료의 제조는 온실가스 저감과 대체연료로서의 이윤 창출 목적으로 많은 연구가 진행되었고, 이로 인해 상용화가 이루어 질 정도로 기술적인 발전을 거듭 하였다. 하지만, 단일폐기물에 대한 고형연료의 제조는 성분 변화가 별로 없지만 여러 가지 폐기물을 혼합하여 고형연료를 만들 경우에는 주의가 필요하다. 본 연구에서는 다양한 폐기물을 이용하여 제조한 고형연료의 특성 분석을 하였다. 특성분석 결과 성형 전 폐기물과 성형 후 고형연료는 발열량 차이가 크게 나타났으며, 그 원인으로는 폐기물의 성상, 수분, 혼합정도에 기인되었다. 균일 혼합 후 폐기물 고형연료는 발열량이 6,000kcal/kg을 넘었다.

Abstract The manufacturing of the solid fuel using wastes has been studied on the purpose of the reduction of green house gases and the profit-making as alternative fuel, and thus, it has become as technically improved as to be used as business. However, the production of solid fuel with multi-wastes combination needs a caution while the solid fuel with one-waste has not a significant component change. This study analyzes the solid fuel components through the practical plant experiment to the various wastes. The resulted data shows a different pattern than the theoretical one in the component analysis, and it can be concluded that the adequate uniform mixing has a great influence on the manufacturing of the solid soil.

Key Words : The Solid Fuel Using Wastes, Alternative Fuel, Green House Gases, Multi-Wastes Combination, Uniform Mixing

1. 서론

우리나라는 1960년대 이후 급속한 산업화와 경제 발전을 이룩함과 동시에 에너지 소비량이 세계에서 가장 빠른 속도로 증가하고 있다. 최근 우리나라 국민 1인당 연간 에너지 소비량이 20년 사이에 3배가 늘어날 정도로 다소비 에너지 국가가 되었지만 소비량에 비해 에너지

생산량은 극히 부족한 실정이다. 또한, 에너지 소비에 사용되는 대부분의 연료를 화석연료에 의존하고 있기 때문에 이에 대한 대책 마련이 시급한 실정이다.

이에 대응하기 위해 정부는 11개 항목의 신재생에너지를 선택하여 에너지 수입국에서 에너지 생산국으로의 변화를 꾀하고 있다. 그림 1에서 보듯이 2007년도의 신재생에너지는 총 에너지 소비량의 2.4%를 차지하고 있으

본 논문은 국토해양부 지역기술혁신 연구개발사업의 연구비지원(과제번호 08지역기술혁신 B-03)에 의해 수행되었습니다.

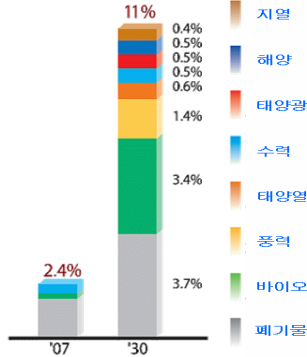
*교신저자 : 이만식(lms5440@kitech.re.kr)

접수일 09년 09월 10일

수정일 (1차 09년 11월 24일, 2차 09년 12월 10일)

게재확정일 10년 01월 20일

며, 2030년도에는 그 비중을 11% 까지 늘려갈 계획 중에 있다[1]. 특히 이중에서도 폐기물을 이용한 에너지는 집근의 용이성과 온실가스 감축의 목적으로 많은 연구가 거듭되었으며 그 결과 기술적 진보가 상당 부분 이루어진 상태이다.



[그림 1] 신재생에너지의 종류와 보급 목표

폐기물을 이용한 재생에너지에는 크게 고형연료의 제조, 가스화, 열분해 유화 그리고 소각열 재이용이 있는데 [2], 본 연구에서는 고체상 가연성 폐기물을 이물질 선별 제거, 파쇄, 성형하여 압축고형물 형태 또는 미성형 형태의 고형연료로 제조하는 기술에 관한 것이다.

이를 위해 본 연구에서는 실제 산업단지에서 발생한 폐기물을 이용하여 고형연료를 제조하였으며, 제조된 고형연료의 성분 및 특성을 파악하여 고형연료 제조 공정의 문제점 및 개선 방안을 고찰하였다.

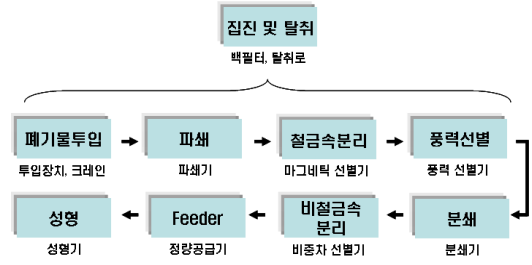
2. 연구내용 및 범위

본 연구를 위해 사용한 대상 폐기물은 영남권 사업장에서 많이 발생하는 폐합성수지, 폐지, 폐타이어, 폐목재이다[3].

2.1 실험장치

본 연구의 원활한 수행을 위하여 그림 2와 같은 폐기물 고형연료 제조 공정에서 실험을 수행하였다. 폐기물은 크레인을 통해 파쇄기로 유입되며, 파쇄물의 크기는 50cm 정도이다. 파쇄 된 폐기물은 자력 선별, 풍력 선별을 통하여 금속 성분, 토사류 등을 제거하였다. 폐기물의 원활한 성형을 위하여 분쇄기에서 미세 파쇄를 행하였으며 파쇄물의 크기는 5cm 정도이다. 미세하게 파쇄 된 폐기물은 정량공급기로 유입되며 여기서 약간의 혼합이 이

루어진다. 정량공급기를 통해 성형기로 투입되며, 성형기에서 압축 성형을 통해 고형연료의 제조가 이루어진다.



[그림 2] 폐기물 고형연료 제조 공정도

표 1은 고형연료 제조에 사용되는 각 공정별 장비 제원을 나타내었다.

[표 1] 고형연료 제조 장비 사양

구분	1차 파쇄기	2차 파쇄기	정량공급기	성형기
형식	hook breaker	hook breaker	원통 호퍼	Ring-dies type
투입원료	플라스틱 등 폐기물	플라스틱 등 폐기물	분쇄 폐기물	분쇄 폐기물
처리용량	5ton/hr	4ton/hr	4ton/hr	2ton/hr
수량	1기	1기	1기	2기
전력용량	200KW	250KW	7.5KW	320KW

2.2 재료 및 방법

현재 전국적으로 사업장 폐기물을 이용하여 고형연료를 제조하는 곳은 대부분이 발열량이 높고 성형이 잘되는 필름류 플라스틱을 사용하는 것으로 조사되었으며, PE를 이용한 콤팩트드에 대한 연구도 수행되었다[4]. 이와는 다르게 본 연구에서는 폐합성수지, 폐지, 폐타이어, 폐목재 등 다양한 폐기물을 사용하여 고형연료 제조 가능성을 검토하였다. 고형연료 제조를 위해 사용한 폐기물의 혼합비율은 표 2와 같다.

[표 2] 폐기물 혼합비율

구분	혼합비율(%)			
	폐합성수지	폐지	폐타이어	폐목재
샘플 1	100			
샘플 2		100		
샘플 3			100	
샘플 4	70	10	10	10

2.3 성분 분석

제조한 폐기물 고형연료의 특성을 알아 보기위해 삼성분(수분, 회분, 가연분), 원소분석(C, H, O, N, S), 발열량, 중금속, 염소 등을 분석하였다. 모든 분석은 고형연료제품 품질시험·분석방법에 의거하여 실시하였다[5].

2.3.1 발열량, 기초성분

본 연구에서 시료의 발열량 측정을 위해 Parr사의 6200 calorimeter를 사용하였으며, 원소분석(C, H, O, N, S)을 위해 Elementar사의 Vario Macro 원소분석기를 사용하였다. 열량계로 측정된 값은 고위발열량이므로 원소분석기에서 측정된 수소 값을 이용하여 저위발열량을 측정하였다.

2.3.2 삼성분, 중금속, 염소

수분은 시료를 105~110℃에서 1시간 가열 건조했을 때 시료에 대한 건조 전·후의 질량차이의 질량 백분율로 구했다. 회분은 시료를 공기 중에서 815±10℃로 가열 회화하고 잔류하는 재의 질량을 시료에 대한 질량 백분율로 계산하였다. 가연분은 시료 질량의 백분율에서 수분과 회분을 뺀 값에 대한 질량 백분율로 계산하였다.

염소의 분석은 미리 물을 넣은 산소 bombe 속에 시료접시를 넣은 후 산소를 압입해서 연소시키는 산소bombe법에 따르고, 생성된 가스를 물에 흡입시켜서 이온크로마토그래프법에 따라서 염소를 구하였다. 주입한 시료의 양은 약 1g 으로 하였으며, 압력을 30~35kg/cm²로 유지한 상태에서 점화를 시켜 시료를 연소하였다. 가스포집은 그림 3과 같이 시료를 시료접시 내에 약간의 물을 가하여 잠기게 함으로써 연소 과정에서 발생된 가스가 물에 흡입되도록 하였다. 전반적인 시험방법은 그림 4와 같으며 시료용액은 500mL, 시료를 넣지 않은 용액을 바탕시험액으로 하였다. 용량 분석용 표준물질인 염화나트륨을 이용하여 염화물 이온 표준용액을 만들어 사용하였고, 염소 농도계산은 아래의 식을 이용하였다.

$$C = \frac{(b-a) \times 500}{m \times 1000} \times 100$$

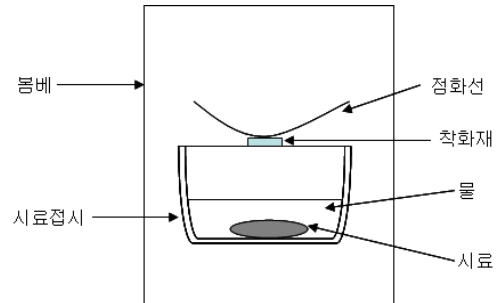
여기서, C: 염소(질량 %)

a: 검량선으로부터 구한 바탕시험액 중 염화물 이온농도(mg/mL)

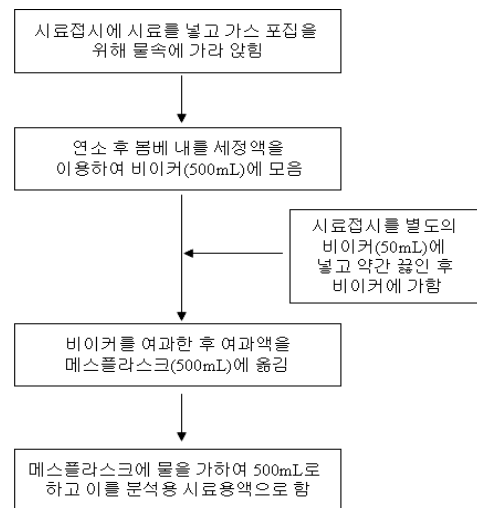
b: 검량선으로부터 구한 분석용 시료용액 중의 염화물 이온농도(mg/mL)

m: 시료의 질량(g)

중금속 분석은 Perkin elmer사의 AAnalyst 800원자흡광분광기를 이용하였다.



[그림 3] bombe 개략도



[그림 4] 염소 시험방법

3. 결과 및 고찰

3.1 폐기물 선정 및 특성 분석

고형연료를 제조하기 위해 사용한 폐기물을 그림 5에 나타내었다. 사용한 폐기물은 폐합성수지, 폐지, 폐타이어, 폐목재이며 이들 폐기물을 선택한 이유는 슬러지를 제외하고 사업장에서 가장 많이 배출되고 있기 때문이다.



[그림 5] 실험에 사용된 폐기물

[표 3] 폐기물 특성 분석

구분		폐합성수지	폐타이어	폐지	폐목재
삼성분	수분(%)	0.7	0.4	6.4	6.7
	회분(%)	18.2	4.1	10.3	3.9
	가연분(%)	81.1	95.5	83.3	89.4
원소 분석	C(%)	63.4	63.8	39	46
	H(%)	10.4	4.6	5.6	5.9
	O(%)	5.5	22.5	26.2	30.9
	N(%)	ND	ND	ND	ND
	S(%)	ND	ND	ND	ND
염소(%)		0.04	ND	ND	ND
저위발열량(kcal/kg)		7,369	7,647	3,164	3,502

위의 폐기물에 대한 특성 분석 값을 표 3에 나타내었다. 폐합성수지와 폐타이어는 수분함유량이 낮고, 탄소성분이 높아 저위발열량이 높게 나타났다. 이는 저위발열량이 고위발열량에서 연소가스 중에 함유된 수증기의 증발열을 뺀 것을 말하기 때문에 수분이 낮을수록 탄소성분이 많을수록 저위발열량이 높아짐을 의미한다. 보통 고체와 액체 연료의 경우 열량계산을 저위발열량을 기준으로 하는데 이는 고체나, 액체 연료의 경우 연료를 기화시켜 연소시키기 위하여 연료 중에 함유된 수분을 증발시켜야 하기 때문이다. 결국 총발열량에서 수분의 증발열을 뺀 연료의 발열량을 저위발열량이라 하며, 본 연구에서도 고체 연료를 대상으로 실험을 하였기 때문에 저위발열량을 기준으로 실험을 수행하였다[6]. 원소분석기에 의한 성분 분석 결과 질소와 황은 검출되지 않았으며, 수소함유량이

높은 폐기물은 상대적으로 산소함유량이 낮음을 확인할 수 있었다. 또한, 이온크로마토그래프법에 의한 염소 분석결과 염소 함유량이 매우 낮게 검출되었다. 특성 분석 결과로부터 높은 저위발열량을 지니는 폐합성수지와 폐타이어는 고형연료 제조를 위한 좋은 재료가 될 수 있다고 판단된다.

3.2 폐기물 고형연료 제조 및 특성 분석

폐기물을 이용하여 제조한 고형연료를 표 4에 나타내었다. 샘플 1은 폐합성수지 100%를 이용하여 만든 고형연료이며, 샘플 2는 폐타이어 100%를 이용, 샘플 3은 폐지 100% 이용, 샘플 4는 폐합성수지 70%, 폐지 10%, 폐타이어 10%, 폐목재 10%의 비율로 혼합하여 제조한 것이다. 폐목재는 100%를 이용하였을 경우 성형이 되지 않았는데 이는 목재 특성 상 100℃ 정도의 성형기 내부에서는 점성이 없어서 뭉쳐지지 않았기 때문이다. 각 샘플의 크기는 길이가 2~5cm정도이고 직경이 1.2cm정도로 제조하였다.

[표 4] 제조된 폐기물 고형연료

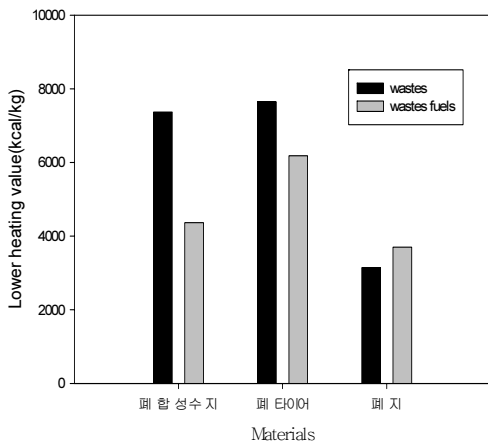


표 5는 제조된 고형연료에 대한 특성 분석 결과이다. 이는 자원의 절약과 재활용촉진에 관한 법률 시행규칙에서 고시한 고형연료제품의 품질·등급 발열량 기준에 의거하여 샘플 1은 4등급, 샘플 2는 2등급, 샘플 3은 4등급, 샘플 4는 3등급으로 분류할 수 있다.

[표 5] 폐기물 고형연료 특성 분석

구분		샘플 1	샘플 2	샘플 3	샘플 4
삼성분	수분(%)	12.8	0.3	7.1	13
	회분(%)	11.3	18.4	12.7	13.2
	가연분(%)	75.9	81.3	80.2	73.8
원소 분석	C(%)	39.1	76.2	32.2	32.2
	H(%)	5.7	7.1	4.6	4.6
	O(%)	24.6	14.9	29.5	29.5
	N(%)	ND	0.1	ND	ND
	S(%)	ND	1.6	ND	ND
염소(%)		2.53	1.09	0.1	2.05
저위발열량(kcal/kg)		4,364	6,183	3,700	4,617

원폐기물과 폐기물을 이용하여 제조한 고형연료에는 차이가 있었으며 특히 저위발열량 부분에서 많은 차이가 났다. 그림 6은 폐기물과 고형연료의 저위발열량을 비교한 것이다.



[그림 6] 성형 전후의 저위발열량 비교

그림 6에서 보듯이 폐합성수지와 폐타이어를 이용해 만든 고형연료는 성형 전 폐기물 보다 저위발열량이 상당히 떨어짐을 알 수 있다. 이런 결과가 나타난 이유는 크게 3가지를 생각할 수 있다. 첫 번째가 폐기물의 분류가 원활하게 이루어지지 못한 것이다. 사업장에서 발생한 폐기물이 폐합성수지, 폐타이어, 폐목재, 폐지로 명확하게 분류되지 않아서 균일한 폐기물 투입이 이루어지지 못한 것이다. 이런 결과로 인하여 저위발열량 값 자체가 일정하지 못하여 성형 전후의 발열량 차이가 크다고 할 수 있다. 폐RPF 제조시 투입공정 개선 및 효율화 방안 연

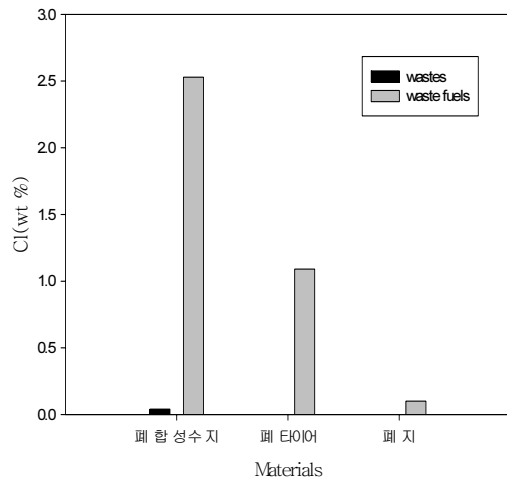
구에서도 혼합폐플라스틱의 성상, 종류, 시료채취시기 등에 따라 발열량은 달라진다고 보고하였다[7]. 두 번째로는 제조 공정 중 성형 후 생산된 고형연료가 대기 중에서 많은 수분을 흡수하여 결과적으로 저위발열량이 낮아진 것으로 판단된다. 이 등[8]의 연구에서도 수분의 양은 RDF의 발열량을 저하시키는 주요 인자로 작용하였다고 보고하였다. 또한, 다음의 Dulong 식에 의해서도 수분 함량은 저위발열량을 낮춘다는 것을 확인할 수 있다.

$$HI = Hh - 600(9 \times H + W)$$

여기서, HI: 저위발열량, Hh: 고위발열량

H: 수소함유량, W: 수분함유량

하지만 페타이어를 이용한 고형연료는 수분함량이 비슷함에도 불구하고 저위발열량에서 많은 차이가 나타남을 알 수 있다. 또한 그림 7에서 염소 농도를 비교했을 경우에도 성형 전 폐기물과 고형연료에는 많은 차이가 나타남을 알 수 있다.

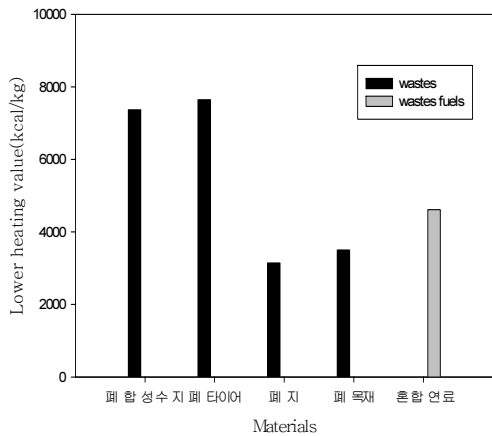


[그림 7] 염소함량 비교

이는 폐합성수지, 폐타이어, 폐지에도 여러 종류가 섞여있기 때문에 이들 폐기물이 고형연료 제조 동안에 충분히 혼합되지 않아서 큰 오차를 나타내었고 이것이 발열량 차이를 나타내는 세 번째 원인이라고 분석하였다. 광 등의 연구에서는 본 연구에서처럼 수분함유량이 높을 경우 연소가스의 HCl 농도가 높아질 수 있다고 보고하였다[9].

그림 8은 각각의 폐기물을 폐합성수지가 70%, 페타이어 10%, 폐지 10%, 폐목재 10%를 혼합하여 제조한 고형

연료와 각각의 폐기물과의 저위발열량 차이를 비교한 것이다. 이론적으로는 6500kcal/kg 정도를 예상했지만 실제 분석 값은 4600kcal/kg 정도로 성형 전 폐기물보다 저위 발열량이 낮음을 알 수 있다. 이러한 결과는 앞서 설명한 바와 같이 폐기물의 불균일한 성상 및 부족한 혼합 그리고 수분 함유에 기인된 것으로 판단된다. 이 등[10]의 연구에서도 조성물질의 함량이 연소 배가스의 조성에 직접적인 영향을 미친다고 보고 하였다.

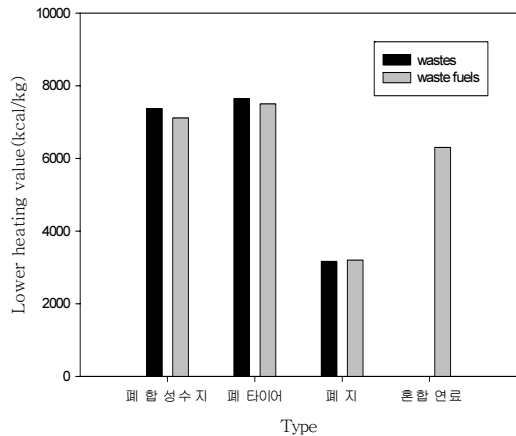


[그림 8] 혼합고형연료와 폐기물의 저위발열량 비교

3.3 균일한 혼합에 따른 발열량 특성 분석

앞선 실험에서 폐기물을 이용한 고형연료는 성형 전 폐기물과의 특성 차이를 보였다. 이를 위해 폐기물을 완전 단일 종으로의 선별이 불가능하다고 판단하여 혼합공정에 대한 연구를 수행하였다.

일반적으로 액체의 균일 혼합을 위해 많이 사용되는 것은 패들(paddle)에 의한 혼합이지만 본 연구에서처럼 고체 폐기물의 혼합에는 적당하지 못하다. 따라서 실험 수행을 위해 균일 혼합은 셰이커(shaker)에서 실험실 규모 수준으로 진행하였다. 파쇄 된 폐기물을 셰이커(shaker) 위에 올려놓고 5분 간 혼합 후 성형기로 투입하였다. 그림 9는 셰이커(shaker)에 의해 혼합 후 제조된 폐기물 고형연료의 발열량을 나타낸 것이다. 앞서 설명한 로터리식 혼합 방식으로 제조된 고형연료의 저위발열량은 4,600kcal/kg으로 나타났지만, 셰이커(shaker)에 의해 혼합한 후 제조된 고형연료는 6,300kcal/kg으로 나타났다. 이 결과로 인해 폐기물 성형 전과 후의 발열량 차이는 폐기물의 균일한 혼합이 큰 영향을 미친다고 판단할 수 있다. 또한, 균일하게 혼합되어 제조된 고형연료는 자원의 절약과 재활용 촉진에 관한 법률 시행규칙에서 규정한 고형연료제품의 발열량을 만족하였다[11].



[그림 9] 혼합 후 혼합고형연료와 폐기물의 저위발열량 비교

최의 연구[12]에서는 수분 함량이 높은 슬러지를 이용하여 본 연구에서보다 발열량이 높은 고형연료를 제조하였는데 이는 고형연료 제조를 위해 같이 혼합한 필름류의 발열량이 무척 높았기 때문이라고 판단된다.

이상의 결과에서 가연성 폐기물을 이용한 고품질의 고형연료 제조를 위해서는 폐기물의 균일한 혼합이 중요하고 이에 따른 혼합 공정 개발이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

사업장에서 배출되는 가연성 폐기물을 이용한 고형연료 제조에서 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 1) 폐합성수지와 폐타이어는 높은 발열량을 가지는 폐기물로 고형연료 제조를 위한 좋은 원료가 될 수 있다.
- 2) 성형 전 폐기물과 성형 후 고형연료는 발열량 차이가 크게 나타났으며, 그 원인으로는 폐기물의 성상, 수분, 혼합 정도에 기인되었다.
- 3) 균일 혼합 후 폐기물 고형연료는 대체연료로서 기준이 되는 발열량 6,000kcal/kg을 만족하였다.

참고문헌

- [1] 지식경제부, “2030 국가에너지 기본계획”, 2008.
- [2] 한국에너지기술연구원, “폐기물분야 기술개발”, 2006.
- [3] 환경부, “2006 전국 폐기물 발생 및 처리현황”, 2007.
- [4] 이현광, “페폴리에틸렌 필름의 재활용에 관한 연구”,

한국산학기술학회, 제 9권, 제 1호, pp. 182-188, 2008.

- [5] 환경부, “고형연료제품 품질 시험분석방법”, 환경부 고시 제 2007-201호, 2008.
- [6] 조광명, “대기오염”, 2003.
- [7] 산업기술시험원, “폐RPF 제조시 투입공정개선 및 효율화 방안 연구”, 2005.
- [8] 이동규, 이종석, 곽현, 배성렬, “폐기물 고형연료(RDF)의 연소 특성, 한국폐기물학회, 제 22권, 제 1호, pp. 101-112, 2004.
- [9] Kwak, Y.H., Kim, W.H, and Bae, S.K., “Absorption behavior of chlorine and sulfur by Ca(OH)₂ in a fluidized bed reactor”, 25th International Conference on Incineration and Thermal Treatment Technologies, 2006.
- [10] 이종석, 곽현, 배성렬, “폐기물 고형연료(RDF)의 연소특성에 관한 연구, 화학공학의 이론과 응용, 제 8권, 제2호, pp. 4441-4444, 2002.
- [11] 환경부, “자원의 절약과 재활용 촉진에 관한 법률 시행규칙, 별표 7”, 2008.
- [12] 최연석, “염색폐수슬러지의 고형연료화 및 이용기술 연구”, 한국폐기물학회, 추계학술대회, pp. 347-350, 2007.

강 민 수(Min-Su Kang)

[정회원]



- 2002년 2월 : 부경대학교 환경공학과 (공학사)
- 2004년 2월 : 부경대학교 환경공학과 (공학석사)
- 2008년 8월 ~ 현재 : 한국생산기술연구원 연구원
- 2008년 8월 ~ 현재 : 부산대학교 재료공학과 박사과정

<관심분야>

폐기물 재활용, 해수담수화, 정수시설 운영관리

김 양 도(Yang Do Kim)

[정회원]



- 1991년 2월 : 한양대학교 신소재공학부 (공학사)
- 1994년 6월 : Colorado School of Mines Dept. of Metallurgical & Materials Engineering(공학석사)
- 1997년 12월 : Colorado School of Mines Dept. of Metallurgical & Materials Engineering(공학박사)
- 2003년 3월 ~ 현재 : 부산대학교 재료공학과 교수

<관심분야>

에너지재료, 표면처리 및 박막증착, 반도체 재료

류 영 복(Young Bok Ryu)

[정회원]



- 2004년 2월 : 부경대학교 화학공학과 (공학사)
- 2006년 2월 : 부경대학교 화학공학과 (공학석사)
- 2006년 3월 ~ 현재 : 한국생산기술연구원 연구원

<관심분야>

폐기물 재활용, 나노물질합성기술, Hydrate 응용기술

이 강 우(Gang-Woo Lee)

[정회원]



- 1988년 2월 : 부산대학교 환경공학과 (공학사)
- 1995년 8월 : 부산대학교 환경공학과 (공학석사)
- 2002년 8월 : 부산대학교 환경공학과 (공학박사)
- 2004년 7월 ~ 현재 : (주)유성중앙연구소 소장

<관심분야>

산업폐기물처리, 소각로 해석 및 설계

손 병 현(Byung-Hyun Shon)

[정회원]



- 1990년 2월 : 부산대학교 환경공학
학과 (공학사)
- 1994년 2월 : 부산대학교 환경공
학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 부산대학교 환경공
학과 (공학박사)
- 1997년 3월 ~ 현재 : 한서대학
교 환경공학과 교수

<관심분야>

유해가스처리, 대기오염제어

이 만 식(Man Sig Lee)

[정회원]



- 1994년 8월 : 동아대학교 화학공
학과 (공학석사)
- 2003년 8월 : 부경대학교 화학공
학과 (공학박사)
- 2004년 9월 : The University of
British Columbia Post-doc.
- 2005년 9월 ~ 현재 : 한국생산
기술연구원 선임연구원

<관심분야>

폐기물 재활용, 수질/가스 처리, Hydrate 응용기술