

중유회를 활용한 고형연료 제조 및 특성

민홍^a, 조성수^b, 서민혜^c, 이수영^d, 최창식^{b†}

Preparation and characterization of SRF(Solid Refuse Fuel) using heavy oil fly ash

Hong Min^a, Sung-su Cho^b, Minhye Seo^c, Soo-Young Lee^d, Changsik Choi^{b†}

(Received: Dec. 4, 2019 / Revised: Dec. 19, 2019 / Accepted: Dec. 19, 2019)

ABSTRACT: In this study, the characteristics of the SRF (Solid Refuse Fuel) prepared by blending each of the additives (citrus peel, waste wood, coal) in the heavy oil fly ash, evaluating the heavy oil fly ash recyclability. Recycling SRFs were fabricated by pellet extruding method after blending the heavy oil fly ash and additives based on 30% moisture content. As a result, the formability of the SRFs was excellent under condition of blending heavy oil fly ash with coal or citrus peel and the highest calorific value was 4,274 kcal/kg at heavy oil fly ash mixed with coal. Therefore, the formability and calorific value were improved when the heavy oil fly ash was mixed with coal(20 wt%) at 30% moisture content. From these results, the applicability of SRFs with additives was confirmed by using the heavy oil fly ash from J thermal power plant.

Keywords: Heavy oil fly ash, Recycling, SRF, Pellet

초 록: 본 연구에서는 중유회의 고형연료로써 활용 가능성을 평가하기 위해 첨가제별 성형 특성과 조성을 분석하고, 제조한 SRF(Solid Refuse Fuel)의 발열량을 비교하였다. SRF 성형을 위해 함께 첨가한 첨가제는 굴박, 폐목재, 석탄이었으며, 함수율 30%를 기준으로 각각의 첨가제를 혼합하여 압출방법을 통해 펠릿 형태로 제조하였다. 실험결과, SRF의 성형성은 중유회와 석탄 또는 굴박을 혼합한 조건에서 우수하였으며, 발열량은 석탄을 혼합한 SRF가 4,274 kcal/kg 으로 가장 높았다. 따라서 중유회를 활용한 고형연료의 합성 조건은 20 wt%의 석탄을 혼합하여 함수율 30%로 제어하였을 때, 높은 성형성과 발열량의 향상을 나타내는 것을 확인하였다. 이 결과로부터 J 화력발전소의 중유회를 활용하여 첨가제(굴박, 폐목재, 석탄)를 일정 비율로 주입하였을 때 고형연료의 제조 가능성을 확인할 수 있었다.

주제어: 중유회, 재활용, 고형연료, 펠릿

^a 고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터 연구원(Researcher, Plant Engineering Center, Institute for Advanced Engineering)

^b 고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터 수석연구원(Chief Researcher, Plant Engineering Center, Institute for Advanced Engineering)

^c 고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터 책임연구원(Principal Researcher, Plant Engineering Center, Institute for Advanced Engineering)

^d 고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터 선임연구원(Senior Researcher, Plant Engineering Center, Institute for Advanced Engineering)

† Corresponding author(e-mail: cschoi@iae.re.kr)

1. 서론

폐기물에서 에너지를 생산하는 WTE(Waste to energy)는 미국에서 1980년부터 폐기물처리와 에너지공급을 연계한 산업이 크게 성장하였으며, RDF를 이용한 발전도 미국에서 크게 발전하였다¹⁾. RDF(Refuse derived fuel)란 폐기물로부터 얻어진 연료를 뜻하며²⁾, 과거에는 고품연료의 종류를 RDF(Refuse derived fuel), TDF(Tire derived fuel), RPF(Refuse plastic&paper fuel)와 WCF(Wood chip fuel)로 구분하였으나, RDF, TDF, RPF 등을 SRF(Solid refuse fuel)로 통합하였으며, WCF는 BIO-SRF(Biomass solid refuse fuel)로 구분하였다³⁾. 고품연료는 석유 등의 화석연료 고갈에 따른 에너지 공급 문제, 자원의 효율적 활용 관점에서 에너지 공급의 일익을 담당할 것으로 기대되고 있다⁴⁾.

고형연료는 폐기물을 선별 분리-파쇄-건조-성형 등의 과정을 통해 가연물을 성형한 일종의 고체연료로서 압축성형에 의해 제조되어 열량이 균일하고 밀도가 높아 수송성에 용이하고, 함수율이 낮기 때문에 부패하지 않아 장기간 보관이 가능하다. 또한, 균일한 형상을 가지므로 사용하는데 있어서 정량 투입 자동화 등이 쉽다는 장점이 있다⁵⁻⁷⁾.

폐기물 중에서 중유회(Heavy oil fly ash)는 중유 화력발전소에서 중유를 태우고 남은 분진으로써 산업폐기물로 분류된다. 국내 중유회 발생량은 중유 화력발전소의 설립 및 가동이 증가하던 90년대 이후 지속적으로 증가하여 2015년에는 연간 12,000톤에 달하는 양이 발생하였으며, 발생량은 증가하는 추세이다. 중유회의 처리방법으로는 매립처리방법과 재활용방법으로 구분할 수 있다. 매립처리방법은 건식처리를 통하여 단순 매립하는 방식이며, 이 방식은 빗물에 의해서 중금속 용출이 발생할 수 있다는 문제점이 있다. 반면, 재활용방법은 제철소의 탈유재, 시멘트 공장의 건자재 및 연료 대체재 등으로 활용하는 방법이다. 현재까지 중유회 처리방법은 단순매립처리방법에 의존하고 있는 실정이며, 이에 대해 경제적인 재활용 방안이 필요하다⁸⁻¹¹⁾. 중유회는 탄소함량이 높아 대체연료로써 잠재적으로 높은 발열량을 가지고 있기 때문에 폐기물 관리와 에너지 회수 측면에서 효과적인 방법 중 하나일 수 있다¹²⁾. 따

라서 본 연구에서는 중유회를 활용하여 연료로 성형 및 적용하기 위한 타당성을 평가하고자 하였다. 특히, 고품연료의 성형성과 연소 특성을 향상시키기 위한 방안으로 첨가제(굴박, 폐목재, 석탄)를 일정 비율로 주입하여 최적 성형 조건을 도출하고자 하였다. 이를 통하여 중유회를 활용한 효율적 고품연료 제조방안을 모색하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험재료

본 실험에서 사용한 중유회는 J 화력 발전소에서 발생하는 중유회를 사용하였다. 중유회에 첨가할 제 중 굴박은 시중에 판매되는 껍을 사용하였으며, 폐목재는 수도권매립지공사에서 반입되는 건설폐기물로 분리 선별과정을 거친 건설폐목재를 분쇄하여 사용하였다. 그리고 석탄의 경우 인도네시아산 석탄을 사용하였다(Fig. 1).

2.2. 중유회를 활용한 고품연료 제조

중유회를 활용한 고품연료 제조는 실험실에서 소량 성형이 가능하고, 조건별로 다양한 실험이 가능한

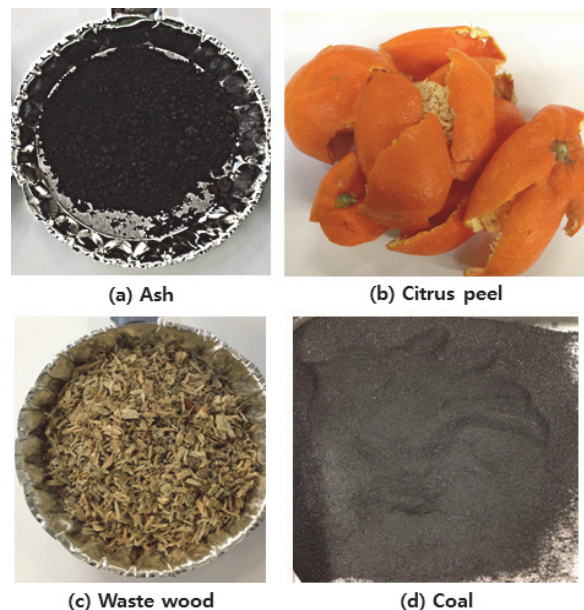


Fig. 1. Picture of the heavy oil fly ash and additive materials.

대표적인 고행연료 압출 성형방법인 pellet 성형방법으로 진행하였다. (b)중유회+귤박 고행연료는 고행연료 제조 전에 실험용 mill을 이용하여 분쇄 및 혼합을 진행하였다. 중유회 고행연료 제조는 함수율을 20, 25, 30, 35%로 제어하여 성형 가능성을 평가하였으며, 최적 성형 조건인 30% 기준으로 하여 Table 1 과 같이 중유회에 첨가제 및 물을 혼합하여 고행연료를 제조하였다.

2.3. 제조된 고행연료 특성 분석

고행연료 제조 전·후의 기초특성을 알아보기 위하여 유기물의 수분과 휘발분, 고정탄소, 회분 등을 분석하기 위해 공업분석기(LECO Proximate Analyser : TGA-601)를 사용하였으며, 원소(C, H, N, S, O)의 정량분석은 원소분석기(CE Instrument : Flash EA1112)로 분석하였다. XRF분석(XRF-1600 : Shimadzu)을 통해 정성·정량 분석을 진행하였다. 그리고 발열량 측정장비(Calorimeter : LECO AC-300)를 이용하여 발열량을 측정하였다. 제조된 고행연료의 열적특성을 알아보기 위하여 열분석법인 열중량 분석(TGA, thermogravimetric)과 미분주사열량법(DSC, differential scanning calorimetry)을 진행하였다. 열분석기(TA instruments : SDT Q600)를 사용하였으며, 상온에서 800℃까지 승온속도를 5℃/min으로 승온하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 중유회 및 첨가제 특성 분석

Table 2는 중유회 및 첨가제에 대한 공업분석 결과이다. 중유회를 건조 후 공업 분석한 결과, 휘발분 29.10%, 회분 37.11%, 고정탄소 34.04%로 휘발분, 회분, 고정탄소는 고른 함량을 나타내었다. 귤박의 경우 건조 전 함수율은 71.10%로 고행연료 제조 시 물을 혼합하지 않고 귤박의 함수율을 이용하여 성형조건의 함수율을 조절하였다. 폐목재는 5.95%의 함수율로 대기 중 수분을 흡수하여 나타나는 함수율 수준이며, 석탄의 경우에는 건조된 석탄으로 함수율이 0%로 낮은 값을 나타내었다. 바이오매스인 귤박과 폐목재는 74% 이상의 높은 휘발분 함량을 나타내었고, 2.25% 이하의 낮은 회분 함량을 나타내었다. 석탄의 경우에는 34.21%의 낮은 휘발분 함량과 57.72%의 높은 고정탄소 함량을 나타내었다. 귤박과 폐목재 대비 석탄의 회분은 8.07%로 높은 값을 나타내었다. 이와 같이 첨가제의 특징은 각각 다른 연소특성을 나타낸다. 휘발분이 높으면 발화가 쉽고 급격한 연소가 일반적이고, 고정탄소의 함량이 높으면 높은 온도에서 발화되어 보관에 유리하고 오랜 시간 안정적으로 연소되는 특성을 가진다¹²⁾.

Table 3은 원소분석 결과로 중유회를 제외한 모든 첨가제에서 탄소(C) 함량이 44%이상의 높은 값을 나

Table 1. Experimental Conditions for fabrication of SRFs

Analyzed Item	Ash SRF	Ash+Citrus peel SRF	Ash+Waste wood SRF	Ash+Coal SRF
Ash (g)	200	200	200	200
Water (g)	85.71	N/A	107.15	107.15
Additive material (g)	N/A	146.34(71% Moisture content)	50	50
Moisture content (%)	30			

Table 2. Proximate Analysis Results of Raw Materials

Analyzed Item	Ash	Citrus peel		Waste wood	Coal
	After drying	Before drying	After drying	After drying	After drying
Moisture(%)	0.00	71.10	1.94	5.95	0.00
Volatility(%)	29.10	N/A	75.26	74.45	34.21
Ash(%)	37.11	N/A	2.25	1.49	8.07
Fixed carbon(%)	34.04	N/A	20.55	18.10	57.72

타내었으며, 황(S)의 함량은 검출되지 않았다. 산소(O) 함량은 굴박에서 높게 검출되었으며, 질소(N) 함량의 경우 다른 제에 비해 폐목재에서 높은 함량을 나타내었다.

Table 4는 XRF를 이용한 무기물분석 결과로 중유회의 경우 SO_3 가 높게 분석되었고, 첨가제인 굴박, 폐목재 그리고 석탄은 CaO가 가장 높게 분석되었다. 중유회 및 첨가제의 물리적·화학적 특성 분석 결과, 첨가제는 고행연료 제조 시 고행연료의 특성 향상에 도움이 될 것으로 판단된다. Li 등(2018)은 중유회분을 하수슬러지와 함께 연소시키는 연구를 수행하였으며, 첨가제인 하수슬러지의 주입 조건에 따른 열적 거동특성을 평가하였다. 이 때 점화 및

열적 안정성 향상이 가능하였고, 특히 슬러지로부터 유래한 CaO가 SO_2 의 배출을 억제할 수 있는 것으로 나타나, 본 연구에서도 CaO가 상대적으로 높은 첨가제인 굴박과 석탄의 주입에 따른 고행연료의 특성 향상에 기여할 수 있을 것이라 판단되었다¹²⁻¹³).

Table 5는 건조된 첨가제를 이용하여 고위발열량을 측정된 발열량 결과이다. 첨가제는 중유회의 발열량인 3,563 kcal/kg 보다 높은 값을 나타내어 고행연료 제조 시 고행연료의 특성이 향상될 것으로 판단된다. 탄소함량이 67.4%인 중유회분의 경우, 약 4,491 kcal/kg의 발열량을 나타내었는데, 이는 발전소에서 사용되는 원료의 특성과 운전 조건에 따라 탄소함량이 달라지는 것을 알 수 있다¹⁴). 또한 바이

Table 3. The Element Analysis Results of Raw Materials on Dry Basis

Analyzed Item	Ash(Dried)	Citrus peel(Dried)	Waste wood	Coal
C(%)	39.79	44.09	44.57	66.60
H(%)	0.50	5.72	6.16	4.10
O(%)	16.34	44.54	35.40	13.10
N(%)	1.49	0.61	5.34	1.50
S(%)	9.17	N/A	N/A	N/A

Table 4. XRF Analysis of Raw Materials

Analyzed Item	Ash	Citrus peel	Waste wood	Coal
CaO(wt%)	1.28	50.47	30.16	41.91
K_2O (wt%)	N/A	39.93	14.67	N/A
SO_3 (wt%)	54.27	4.01	4.81	11.33
SiO_2 (wt%)	3.51	N/A	14.36	14.31
Al_2O_3 (wt%)	2.63	N/A	4.01	6.84
P_2O_5 (wt%)	N/A	3.45	2.80	N/A
Fe_2O_3 (wt%)	5.43	N/A	2.07	23.00
Cl(wt%)	N/A	2.14	27.11	N/A
MgO(wt%)	21.52	N/A	N/A	N/A
V_2O_5 (wt%)	5.18	N/A	N/A	N/A
NiO(wt%)	2.41	N/A	N/A	N/A
MnO(wt%)	1.63	N/A	N/A	N/A
Na_2O (wt%)	1.06	N/A	N/A	N/A

Table 5. Heating Value of Raw Materials

Analyzed Item	Ash(Dried)	Citrus peel(Dried)	Waste wood	Coal
Calorific value(kcal/kg)	3,563	4,309	4,337	6,634

오메스인 골박과 폐목재의 발열량은 약 4,300 kcal/kg로 유사한 발열량을 나타내었으며, 석탄은 6,634 kcal/kg으로 상대적으로 높은 발열량을 보이는 것을 확인하였다.

3.2. 중유회를 활용한 고품연료 제조

Fig. 2는 중유회를 활용하여 제조한 고품연료이며, (a)중유회 단독 고품연료와 (c)중유회+폐목재 고품연료의 경우 제조 시 압출성형장치 내부에서 저

항이 발생하여 내부에 적층되면서 성형 양이 줄어드는 현상이 발생하였다. 그리고 (c)는 중유회와 폐목재의 입자 크기 차이로 인해 완전히 혼합하지 못하여 강도 특성에서 쉽게 부서지는 특징을 나타내었다. (a), (c)와 비교하였을 때, (b)중유회+골박과 (d)중유회+석탄 고품연료는 제조 시 압출성형장치 내부 적층 현상은 발생하지 않았으며, 우수한 성형성을 나타내었다.

3.3. 고품연료 특성 분석

Table 6에서 고품연료 공업분석 결과를 살펴보면, 연료 내 수분함량은 최대 3% 이내로 분석되었으며, 휘발분은 바이오매스를 첨가한 SRF 2종이 37% 이상으로 높은 것을 확인하였다. 회분은 모두 30% 내외로 유사한 함량을 지니고 있는 것을 알 수 있다. Table 7의 원소분석 결과, (d)중유회+석탄 고품연료에서 탄소(C) 함량이 48.03%로 크게 증가한 것을 확인하였으며, 산소(O) 함량은 바이오매스를 첨가한 (b)와 (c)에서 높게 확인되었다. 수소(H)와 질소(N) 함량의 경우 큰 변화는 없었으며, 혼합성형을 통해서 황(S)의 함량이 소량 감소되는 것을 확인하였다. 이는 Table 8의 XRF 분석 결과에서도 볼 수 있는데, 첨가제를 이용하여 제조한 (b), (c) 그리고 (d)는 단



Fig. 2. Various extruded SRFs.

Table 6. Proximate Analysis of Prepared SRFs

Sample	a	b	c	d
Analyzed Item	Ash SRF	Ash+Citrus peel SRF	Ash+Waste wood SRF	Ash+Coal SRF
Moisture(%)	2.98	0.60	0.00	0.00
Volatility(%)	29.57	37.65	38.94	29.61
Ash(%)	30.10	30.64	30.83	31.11
Fixed carbon(%)	37.35	31.21	30.30	39.59

Table 7. Element Analysis of Prepared SRFs

Sample	a	b	c	d
Analyzed Item	Ash SRF	Ash+Citrus peel SRF	Ash+Waste wood SRF	Ash+Coal SRF
C(%)	41.62	41.03	39.76	48.03
H(%)	1.04	1.63	1.37	1.42
O(%)	17.62	21.20	23.76	17.16
N(%)	1.84	1.38	1.45	1.15
S(%)	8.53	7.29	8.40	7.00

Table 8. Chemical Composition of Prepared SRFs

Sample	a	b	c	d
Analyzed Item	Ash SRF	Ash+Citrus peel SRF	Ash+Waste wood SRF	Ash+Coal SRF
CaO(wt%)	1.44	1.68	1.40	1.21
MgO(wt%)	22.16	22.37	23.33	21.84
K ₂ O(wt%)	0.18	0.65	0.22	N/A
SO ₃ (wt%)	52.08	48.18	48.57	46.51
SiO ₂ (wt%)	2.90	3.87	3.78	1.41
Al ₂ O ₃ (wt%)	1.93	2.52	2.44	0.69
P ₂ O ₅ (wt%)	1.01	0.79	0.63	N/A
Fe ₂ O ₃ (wt%)	6.70	7.35	7.38	12.01
Cl(wt%)	N/A	N/A	N/A	N/A
V ₂ O ₅ (wt%)	5.64	5.45	5.26	4.54
NiO(wt%)	3.26	3.81	3.54	8.61
MnO(wt%)	1.65	2.01	1.91	2.32
Na ₂ O(wt%)	0.79	0.97	1.23	N/A

Table 9. Heating Value of Prepared SRFs

Sample	a	b	c	d
Analyzed Item	Ash SRF	Ash+Citrus peel SRF	Ash+Waste wood SRF	Ash+Coal SRF
Calorific value(kcal/kg)	3,608	3,419	3,547	4,274

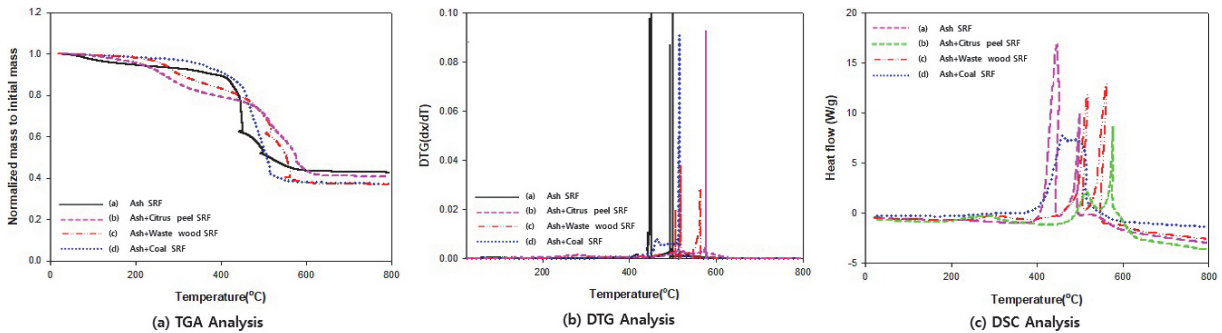


Fig. 3. TGA/DTG/DSC analysis of prepared SRFs.

독 고형연료인 (a)보다 SO₃의 함량이 감소하는 결과를 보였다.

제조된 고형연료 4종의 발열량 비교결과를 Table 9에 나타내었다. 중유희분을 단독으로 성형한 SRF는 3,608 kcal/kg의 발열량을 나타내었으며, 상대적으로 낮은 발열량을 지닌 바이오매스를 첨가제로 혼합한 경우, 발열량은 다소 감소하였지만, 그 영향은 미미하였다. 그러나 석탄을 첨가제로 넣은 시료는 탄소

함량의 증가로 발열량이 4,200 kcal/kg 이상으로 증가되는 것을 확인하였다. 따라서 중유희분에 석탄을 20 wt% 혼합하여 제조한 SRF는 성형성과 발열량을 향상시킬 수 있는 것으로 판단되었다.

제조된 고형 연료의 열적 특성을 분석하기 위하여 TGA, DTG, DSC 분석을 진행하였다. Fig. 3을 살펴보면 (a)TGA 결과에서 각 고형연료의 열적 특성이 다르기 때문에 무게 감량이 시작되는 온도와 감

량의 정도는 각각 다르게 나타났으며, 800 °C까지 연소하면서 최종적으로 전체 무게의 약 40% 정도 잔류하는 것을 확인하였다. (b)DTG 결과에서는 모든 고행연료는 1차적으로 200 °C ~ 400 °C구간에서 무게감량이 발생하고, 400 °C ~ 600 °C구간에서 대부분의 무게감량이 발생하는 것을 확인하였다. (c) DSC분석 결과, 첨가제를 혼합한 모든 고행연료는 연소분위기 온도구간에서 발열반응이 나타났으며, 중유회에 첨가제를 혼합한 고행연료는 고행연료 가능성이 있다고 판단된다.

4. 결론

본 연구는 J 화력 발전소에서 배출되는 중유회를 활용하여 첨가제를 혼합하여 제조된 고행연료 제조 실험결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. J 화력 발전소의 중유회분은 34.0%의 고정탄소와 29.1%의 휘발분을 함유하고 있는 것으로 나타났다. 중유회분 단독의 발열량은 약 3,600 kcal/kg 수준이며, 첨가제의 혼합 및 압출성형을 통해 고행연료를 제조함으로써 SRF로의 활용이 가능할 것이라 판단되었다.
2. 고행연료를 제조하기 위한 첨가제는 총 3종이었으며, 바이오매스 2종 (굴박, 폐목재)과 석탄 (인도네시아 석탄)을 활용하였다. 함수율 30%의 동일 조건에서 폐목재를 첨가한 중유회 고행연료는 강도가 낮은 단점이 있었으며, 굴박 및 석탄을 첨가한 경우에는 성형성이 우수함을 확인하였다.
3. 제조된 고행 연료의 열적 특성 분석 결과, 석탄을 혼합한 SRF가 4,274 kcal/kg로 가장 높은 발열량이 관찰되었다. 또한 제조된 SRF는 800 °C까지 연소하면서 최종적으로 전체 무게의 약 40%정도 잔류하였으며, 연소분위기 온도구간에서 발열반응이 확인되었다. 중유회에 첨가제를 혼합한 SRF는 고행연료로써 활용 가능성이 있다고 사료된다.

사 사

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 에너지기술개발사업(20172010202050)의 지원을 받아 연구되었습니다.

References

1. P. O' Connor John, RDF Plant; Centerpiece in an integrated waste system, Solid Waste & Power. (1992).
2. Shin, B. C., Lee, J. Y. and Choi, H. W., "Application and prospect of waste refuse derived fuel(RDF)", Polymer Science and Technology, 13(3), pp. 307~314. (2002).
3. Jeon, T. W., Kang, J. G., Son, J. H., Yoon, Y. W., Jang, M. J., Jo, S. Y. and Shin, S. K., "A study on improvement of solid refuse fuel quality test method", Environment Resources Research Dep. (2017).
4. Lee, J. H., "Policy direction for development and expansion of alternative energy", Korea · Japan RDF Seminar, Samsung Eng., pp. 1~20. (2001).
5. Choi, Y. S., Kwon, Y. B., Kim, B. K., Choi, S. J. and Kim, B. W., "The development of a RDF plant for municipal solid wastes", J. Korean Solid Wastes Engineering Society, 16(6), pp. 682~691. (1999).
6. Lee, S. W. and Choi, Y. S., "Pyrolysis characteristics of RDF prepared from MSWs", J. Korean Soc. Environ. Eng., pp. 197~199. (2002).
7. Choi, Y. S. and Roh, S. A., "Recent status of RDF in domestic and foreign countries", New & Renewable Energy, pp. 531~534. (2006).
8. SSANGYONG CEMENT IND., <http://www.ssangyongcement.co.kr/default.html>, (Accessed Dec. 3, 2019).
9. Korea Cement Association, <http://www.cement.or.kr/tech/resource.asp>, (Accessed Dec. 3, 2019).
10. Hwang, S. Y., Kim, S. R. and Kim, N. S., "Recycling

- of power plant fly ash for construction materials by removal of heavy Metals”, *J. Korea Soc. Waste Manag.*, 26(3), pp. 206~212. (2009).
11. Heo, S., Kim, S. R., Kim, Y. H., Shin, D. G., Lee, Y. J. and Kwon, W. T., “Characterization of heavy oil fly ash and its reutilization as a cement kiln auxiliary fuel”, *J. of Environmental & Thermal Eng.*, 12(2), pp. 58~64. (2015).
 12. Li, X., Miao, W., Lv, Y., Wang, Y., Gao, C. and Jiang, D., “TGA-FTIR investigation on the co-combustion characteristics of heavy oil fly ash and municipal sewage sludge”, *Thermochimica Acta*, 666, pp. 1~9. (2018).
 13. Zhang, Q., Liu, H., Zhang, X. J., Xing, H. X., Hu, H. Y. and Yao, H., “Novel utilization of conditioner CaO for gas pollutants control during co-combustion of sludge and coal”, *Fuel*, 206, pp. 541~545. (2017).
 14. Vitolo, S., Seggiani, M. and Falaschi, F., “Recovery of vanadium from a previously burned heavy oil fly ash”, *Hydrometallurgy*, 62, pp. 145~150. (2001).