

ORIGINAL ARTICLE

화학폐수슬러지와 무연탄을 이용한 복합건조공정의 조사시간에 따른 고품연료의 특성 평가

이승철 · 정진희 · 이준희*

동아대학교 환경공학과

Characteristic Evaluation of RDF for the Combined Drying Produced by Weight Mixing Ratio Use Chemical Wastewater Sludge and Anthracite Coal

Seung-Chul Lee, Jin-Hee Jung, Jun-Hee Lee*

Department of Environmental Engineering, Dong-A University, Busan 604-714, Korea

Abstract

The objective of this study was to evaluate the microwave drying characteristics of mixtures of chemical wastewater sludge (70~90%) and anthracite coal (10~30%) with respect to physical and economic factors such as mass, volume reduction, moisture content, drying rate and heating value when the wastes were dried at different weight mixing ratio and for different microwave irradiation time. The drying process were carried out in a microwave oven, the combined drying process with a 2,450 MHz frequency and 1 kW of power. Maximum dry rates per unit area on the microwave drying of mixtures with chemical wastewater sludge and anthracite coal were 35.5 kg H₂O/m²·hr for Cs90-Ac10; 40.1 kg H₂O/m²·hr for Cs80-Ac20 and 35.0 kg H₂O/m²·hr for Cs70-Ac30. The result clearly indicated that moisture can be effectively and inexpensively removed from the wastes through use of the microwave drying process.

Key words : Drying rate, Chemical wastewater sludge, Microwave drying, Moisture content, Anthracite coal

1. 서 론

세계는 현재 자원의 고갈로 대변되는 고유가와 환경 파괴의 대표적인 상징인 지구온난화로 경제적으로 뿐만 아니라 환경적으로도 큰 위기를 맞고 있다. 이와 같은 세계적인 위기 속에 유럽과 미국, 일본 등의 선진국은 지속 가능한 국가발전의 원동력을 에너지로 규정하고 지속가능하면서 경쟁력 있는 에너지 확보를 목표로 기후변화협약과 연계한 신재생에너지 정책을 강력하게 추진하고 있

다(Kwan et al., 2003). 과거 슬러지의 상당부분이 해양 투기 처리방식에 의존하고 있으나, 런던협약이 발효됨에 따라 폐수처리슬러지를 포함한 유기성 폐기물의 해양배출이 전면 금지되었다. 이에 따라 슬러지 육상처리기술 및 신재생에너지 분야로 활로 가치가 증대되었다(Park et al., 2005).

유기성 슬러지는 신재생 에너지 중 재생에너지부분의 바이오매스 에너지로 분류되고 있으며, 슬러지연료, 바이오가스, 연료전지의 부분에 이용될 수 있으며, 국외에

Received 4 December, 2015; Revised 4 December, 2015;

Accepted 12 February, 2016

*Corresponding author : Jun-Hee Lee, Department of Environmental Engineering, Dong-A University, Busan 604-714, Korea
Phone: +82-51-200-5575
E-mail: loan24@nate.com

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서는 일찍부터 유기성 슬러지를 연료화 함으로써 국가의 환경 친화적 이미지 상승과 더불어 이익 창출을 하고 있다(Kang et al., 2007). 이에 발맞춰 우리나라 역시 에너지부족과 환경파괴의 위기상황을 극복하고 세계적으로 추진되고 있는 기후 변화협약 및 런던협약 등에 대처하기 위한 주요 방안으로서 폐기물을 이용한 재생에너지의 개발 및 실용화에 박차를 가하고 있다(Park, 2006).

신재생에너지 중 폐기물의 열적 에너지를 이용하는 방법이 에너지원의 잠재적 가치를 비교하였을 때 가장 유망한 에너지원으로 인정되고 있으며, 폐기물을 에너지원으로 이용하는 방법에는 직접 소각에 의한 열회수 기술, 폐기물 고형연료(refuse derived fuel, RDF)로 가공 후 이용하는 기술 및 열분해(Pyrolysis)에 의한 액체연료 또는 가스 연료화 기술 등이 있다(Park, 2004).

이 세 가지 방법 중에서 경제성과 효율성을 고려할 때 가연성의 폐기물을 고체 연료로 가공하는 폐기물 고형연료화 기술이 현실적이고 가장 경제적인 방법으로 인정받고 있으며, 우리나라 정부에서는 현재 해양처분 되고 있는 유기성 폐기물을 2020년까지 100% 바이오 가스화 또는 고형연료화 하는 것을 목표로 하고 있다(Kang et al., 2007; Ministry of Environment, 2007; Lee et al., 2009).

하수슬러지의 경우 법정부적 차원에서 해양처분의 대안으로 다양한 처리/처분 대책을 적극적으로 강구하고 실행하였지만 유기성 폐수처리 슬러지의 경우 각 사업장의 사정으로 해양처분의 대안을 마련하지 못한 것이 주요 원인이라고 할 수 있다(Jun et al., 2009; Caballero, 1997; Storm, 1999; Lee, 2005; Choi, 2008). 지금까지 이루어진 유기성 슬러지의 건조, 탄화 후 연료화에 대한 연구와 슬러지 탄화물의 활용방안에 대한 연구 역시 하수슬러지에 집중되어 있으며, 유기성 폐수슬러지의 연료

화에 대한 연구는 거의 전무한 실정이다(Park, 2005; Park, 2004; Yang, 2008; Kim et al., 2009).

따라서 본 연구에서는 복합건조공정을 통한 화학폐수 슬러지에 무연탄을 첨가하여 발열량, 함수율 및 건조속도 등의 분석을 통해 고형연료로서 가능성 및 연료로서의 효용가치를 평가하는데 그 목적이 있다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 실험재료

본 연구에 사용된 화학폐수슬러지는 U시 석유화학산업단지 내 위치한 S화학 폐수처리공정에서 최종 발생하는 탈수케일을 채취하여 사용하였다. 산업부산물인 무연탄의 경우 시중에 판매되는 저급 연탄을 ball mill로 분쇄한 후, 원활한 고형연료 제작을 위하여 2 mm 이하의 mesh로 거른 후 사용하였다. 화학폐수슬러지의 삼성분 분석결과 함수율은 86.1%, 가연분은 6.15% 및 회분은 7.75%로 각각 나타났으며, 고위발열량은 3,302.1 kcal/kg을 나타내었다. 또한 산업부산물로 무연탄의 삼성분 분석결과 함수율은 3.3%, 가연분 95.1% 및 회분 1.6%로 각각 나타났으며, 고위발열량은 3,982.9 kcal/kg으로 나타나, 이들 재료를 이용한 혼합물에 대하여 마이크로파-열풍 복합건조를 통해 수분을 충분히 제거한다면 고위발열량을 지닌 고품질 고형연료의 생산이 가능할 것으로 판단된다.

2.2. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용한 마이크로파-열풍 복합건조장치의 마이크로파 조사강도는 1 kW이며, 마이크로파 투과거리는 진공에서는 무한하고 물과 같은 흡수물질은 물에 녹아있는 물질의 성질에 따라 다르고 금속과 같은 반사물질은 투과하지 않기 때문에 마이크로파가 물질에 잘

Table 1. Characteristics of experimental materials

Items		Units	Chemical wastewater sludge (Cs)	Anthracite coal (Ac)
Three components	Moisture	%, wet basis	86.1	3.3
	Combustible	%, dry basis	6.2	95.1
	Ash	%, dry basis	7.7	1.6
Higher heating value		kcal/kg, dry basis	3,302.1	3,982.9



(a) Chemical wastewater sludge



(b) Anthracite coal

Fig. 1. Photographs of experimental materials.



Fig. 2. Photographs of microwave-hot air hybrid drying system.

흡수되도록 컨베이어 간격을 4 cm로 조절하였다. 또한, 마이크로파는 직진성이 좋고, 특히 강한 마이크로파는 물질 내의 수분에 흡수되어 이를 발열시키는 성질을 가지고 있다.

본 연구에서는 화학폐수슬러지 70~90% 및 무연탄

10~30%의 자체 수분 및 점성에 의해 성형이 가능한 혼합비율과 열풍온도 250℃에 따른 마이크로파-열풍 복합 건조방식에 따른 운전시간별 건조특성을 평가하였으며, 또한 건조물질의 삼성분(수분, 가연분 및 회분), 발열량(고위발열량 및 저위발열량) 등 고형연료로의 가능성을

Table 2. Physical dimensions and characteristics of microwave-hot air hybrid drying process

Parameters	Units	Dimensions and characteristics
Dimensions	mm	W 1,360 × L 1,060 × H 900
Width of conveyor	mm	W 550 × L 990
Number of heater	ea	5
Microwave power	kW	1
Microwave frequency	MHz	2,450
Temperature	℃	Max. 300

Table 3. Operating conditions

Parameters	Units	Conditions	
Heating temperature of hot air	℃	250	
Microwave power	kW	1	
Operating periods	min	0 ~ 35	
Size of mixtures	mm	W 30 × L 30 × H 25	
Weight mixing ratio	chemical wastewater sludge (Cs)	%	70 ~ 90
	Anthracite coal(Ac)	%	10 ~ 30

평가하였다. Table 3의 운전조건에 나타난 바와 같이, 혼합시료를 이용하여 크기 W 30 mm × L 30 mm × H 25 mm로 압축·성형한 후 마이크로파 건조기의 cavity에 넣고 무게감량이 거의 없을(항량) 때까지 가열하여 조사 시간에 따른 함수율, 중량, 부피 감소율 및 건조속도 변화를 측정하였으며, 또한 건조시료는 수분이 흡습되지 않도록 데시케이터에 보관하면서 분석하였다.

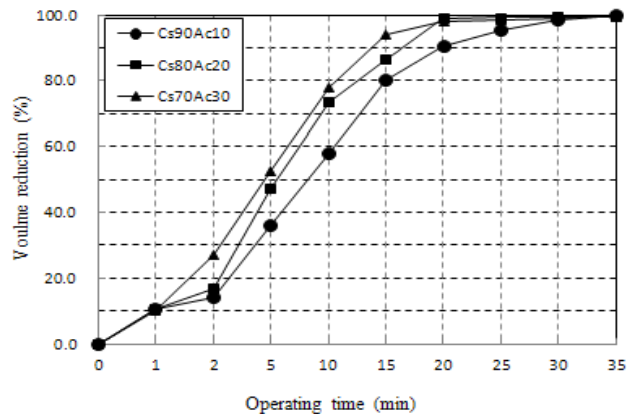
3. 결과 및 고찰

3.1. 부피 감소율 변화

화학폐수슬러지 및 무연탄 중량 혼합 비율별 마이크로파-열풍 복합건조를 실시 후 조사시간에 따른 부피 감소율 변화를 Table 4 및 Fig. 3에 나타내었다. 마이크로파-열풍 복합 건조를 실시한 시료의 부피 감소율은 조사 시간 5분 이후 혼합비율 Cs90-Ac10, Cs80-Ac20 및

Table 4. Variations of volume reduction according to mixing ratio of chemical wastewater sludge and anthracite coal in various drying processes

Parameters	Operating time (min)									
	0	1	2	5	10	15	20	25	30	35
Cs90-Ac10	0.0	10.5	14.0	35.8	57.7	80.4	90.6	95.3	98.5	99.6
Cs80-Ac20	0.0	10.7	16.9	47.2	73.3	86.2	98.8	99.1	99.3	99.6
Cs70-Ac30	0.0	10.0	27.0	52.4	78.2	94.1	98.0	98.4	99.0	99.8

**Fig. 3.** Comparison of volume reduction of mixtures according to weight mixing ratio and microwave drying time.

Cs70-Ac30 혼합건조시료에서 각각 35.8%, 47.2% 및 52.4%로 나타났다. Cs90-Ac10 혼합건조시료를 제외한 모든 시료에서 전체적으로 50% 정도의 부피 감량율을 보였으며, Cs90-Ac10 혼합건조시료의 경우 조사시간 10분 이후 부피 감소를 57.7%로 나타나, 50% 이상의 부피 감소를 나타내었다. 이는 화학폐수슬러지의 초기 함수율이 높음으로 인해 수분증발에 기인하는 것으로 판단된다.

3.2. 함수율 변화

화학폐수슬러지 및 무연탄의 중량 혼합 비율별 마이크로파-열풍 복합건조를 실시 후 조사시간에 따른 함수율 변화를 Table 5 및 Fig. 4에 나타내었다.

본연구에 사용된 실험재료 혼합시 별도의 결합제의 첨가 없이 화학폐수슬러지의 자체에 함유된 수분에 의해 성형이 가능한 혼합비율을 선정하여 실험을 실시하였기 때문에 초기 수분 함량이 모두 다르게 나타났다. 혼합비

율 Cs90-Ac10, Cs80-Ac20 및 Cs70-Ac30 혼합건조시료의 초기 함수율은 각각 77.9%, 69.8% 및 61.6%를 나타냈지만, 마이크로파-열풍 복합건조 조사시간 10분 이후 함수율은 각각 33.0%, 18.6% 및 13.5%로 나타났다. 또한 혼합비율별 완전건조(함수율 10% 이하)되기 까지 필요한 조사시간은 Cs90-Ac10의 혼합비율의 혼합건조시료에서 20분, Cs80-Ac20 및 Cs70-Ac30의 혼합비율의 혼합건조시료에서는 조사시간이 15분으로 나타나 이는 화학폐수슬러지와 무연탄의 혼합비율에 따라 초기 함수량의 차이에 의한 것으로 판단되며, 화학폐수슬러지 및 무연탄을 혼합하였을 때, Cs70-Ac30의 혼합비율에서 가장 빠른 조사시간에 완전건조가 이루어 졌다.

3.3. 건조속도 변화

화학폐수슬러지 및 무연탄의 중량 혼합비율별 마이크로파-열풍 복합 건조 시 조사시간에 따른 건조속도 변화를 Table 6 및 Fig. 5에 나타내었다. 화학폐수슬러지 및

Table 5. Variations of moisture content according to mixing ratio of chemical wastewater sludge and anthracite coal in hot air drying process

Parameters	Operating time (min)									
	0	1	2	5	10	15	20	25	30	35
Cs90-Ac10	77.9	69.8	67.0	50.0	33.0	15.3	7.3	3.7	1.2	0.3
Cs80-Ac20	69.8	62.3	58.0	36.9	18.6	9.6	0.8	0.6	0.5	0.3
Cs70-Ac30	61.6	55.5	45.0	29.3	13.5	3.6	1.2	1.0	0.6	0.1

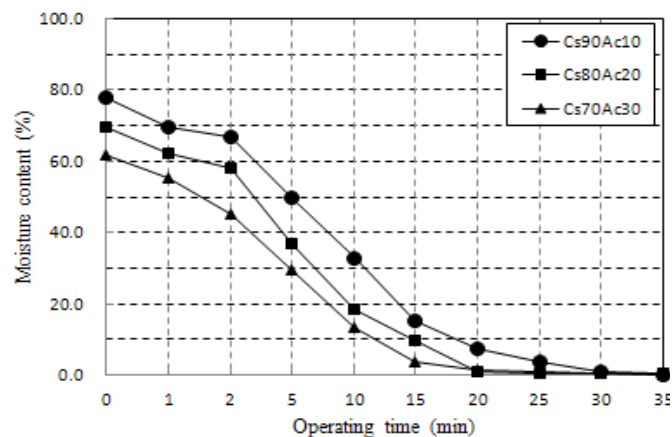


Fig. 4. Comparison of moisture content of mixtures according to weight mixing ratio and microwave drying time.

무연탄의 혼합비율 Cs90-Ac10, Cs80-Ac20 및 Cs70-Ac30의 경우 조사시간 1분에 대한 건조속도는 각각 35.4 kg H₂O/m²·hr, 40.1 kg H₂O/m²·hr 및 35.0 kg H₂O/m²·hr 순으로 나타나 대부분 모든 함수율에서 빠른 건조속도를 나타내었다. 빠른 건조속도를 나타내게된 원인으로 고체 입자 내부의 압력이 초기에 급격하게 높아지기 때문으로 고체 입자가 건조됨에 따라 입자 내부의 압력 상승속도는 수증기 생성속도와 표면으로의 흐름속도 사이의 차이에 의해 결정되며, 또한 입자 크기를 포함한 여러 가지 운전조건의 상호작용으로 이러한 결과가 나타나는 것으로 이 현상은 실험에 의해서만 확인 할 수 있는 것으로 알려져 있다.

3.4. 발열량 분석

화학폐수슬러지 및 무연탄의 증량혼합비율별 마이크로파 열풍 복합건조 시 완전건조(함수율 10% 이하) 시점을 기준으로 발열량을 분석하여 Table 7 및 Fig. 6에 각각 나타냈다. 화학폐수슬러지 및 무연탄 혼합비율

Cs90-Ac10의 혼합건조시료에 대한 발열량은 3,850.7 kcal/kg, 이론적발열량은 3,370.2 kcal/kg, 고위발열량은 3,511.8 kcal/kg 및 저위발열량은 3,198.7 kcal/kg로 각각 나타났다. Cs80-Ac20의 혼합건조시료에 대한 발열량은 4,023.7 kcal/kg, 이론적발열량은 3,438.3 kcal/kg, 고위발열량은 3,762.2 kcal/kg 및 저위발열량은 3,481.2 kcal/kg로 각각 나타났다. 또한 Cs70-Ac30의 혼합건조시료에 대한 발열량은 3,958.8 kcal/kg, 이론적발열량은 3,506.3 kcal/kg, 고위발열량은 3,814.8 kcal/kg 및 저위발열량은 3,569.4 kcal/kg로 각각 나타났다.

전체적으로 화학폐수슬러지와 무연탄에 대한 혼합비율 및 건조방법 별 완전건조 시점에서 저위발열량은 3,198.7~3,569.4 kcal/kg의 범위로 나타났으며, 고품질 연료 품질기준 중 저위발열량 3,500 kcal/kg 이상을 대체로 만족하지 못하는 것으로 나타났다.

Table 6. Variations of drying rate according to mixing ratio of chemical wastewater sludge and anthracite coal in various drying processes

Parameters	Operating time (min)									
	0	1	2	5	10	15	20	25	30	35
Cs90-Ac10	0.0	35.4	23.7	24.2	19.5	15.7	12.9	8.0	4.6	1.9
Cs80-Ac20	0.0	40.1	31.7	35.4	27.5	18.9	15.4	7.8	3.2	1.4
Cs70-Ac30	0.0	35.0	47.2	36.7	27.4	19.6	12.4	6.4	2.4	0.6

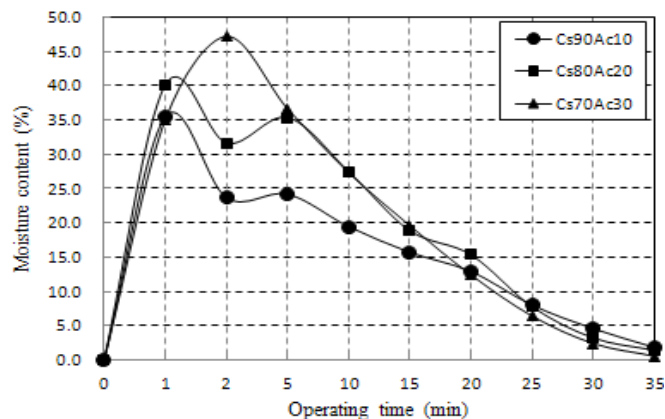


Fig. 5. Comparison of drying rate of mixtures according to weight mixing ratio and microwave drying time.

Table 7. Comparison of heating values for RDFs produced with chemical wastewater sludge

Parameters	Bomb calorimeter	Theoretical HHV	Practical HHV	LHV
Cs90-Ac10	3,850.7	3,370.2	3,511.8	3,198.7
Cs80-Ac20	4,023.7	3,438.3	3,762.2	3,481.2
Cs70-Ac30	3,958.8	3,506.3	3,814.8	3,569.4

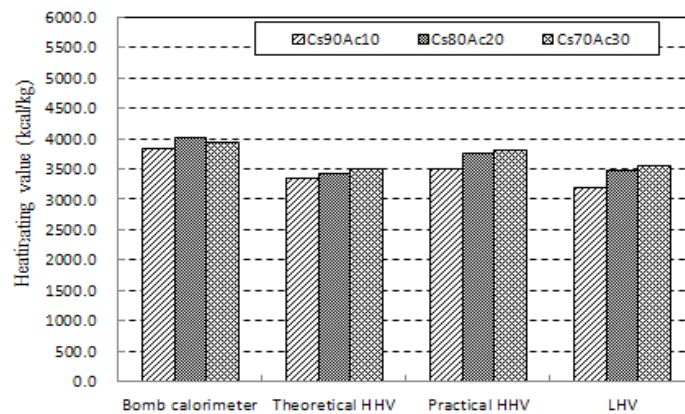


Fig. 6. Comparison of heating values for RDFs produced with chemical wastewater sludge - anthracite coal mixture in various drying processes.

4. 결론

화학폐수슬러지 및 무연탄의 혼합물에 대한 마이크로파-열풍 복합건조 시 원료의 증량혼합비율 및 마이크로파-열풍 조사시간에 따른 부피 감소율, 함수율, 건조속도 및 발열량 등 건조특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

화학폐수슬러지 및 무연탄 혼합물의 마이크로파-열풍 복합건조시 조사시간 5분 이후 혼합비율 Cs80-Ac20 및 Cs70-Ac30의 혼합건조시료에서 각각 47.2% 및 52.4%로 나타나 전체적으로 50% 정도의 부피 감량율을 나타내었으며, Cs90-Ac10의 혼합건조시료의 경우 조사시간 10분 이후 57.7%의 부피 감량율이 나타났다.

화학폐수슬러지 및 무연탄 혼합물의 마이크로파-열풍 복합건조 시 혼합비율 Cs90-Ac10, Cs80-Ac20 및 Cs70-Ac30의 혼합건조시료에서 초기 함수율은 각각 77.9%, 69.8% 및 61.6%로 나타난 반면에 마이크로파-열풍 복합건조 시 조사시간 10분 이후 함수율은 각각 33.0%, 18.6% 및 13.5%로 나타났다. 위 결과를 바탕으로

로 화학폐수슬러지 대비 무연탄 함량이 증가할수록 건조 효율이 높은 것으로 판단된다.

화학폐수슬러지 및 무연탄 혼합물의 마이크로파-열풍 복합건조 시 최대 건조속도는 Cs90-Ac10, Cs80-Ac20 및 Cs70-Ac30의 각각 35.4 kg H₂O/m²·h, 40.1 kg H₂O/m²·h·hr 및 35.0 kg H₂O/m²·h를 나타내었다.

화학폐수슬러지 및 무연탄 혼합물의 마이크로파-열풍 복합건조 시 발열량을 분석한 결과, 혼합비율 Cs90-Ac10, Cs80-Ac20 및 Cs70-Ac30의 혼합건조시료의 발열량은 각각 3,850.7 kcal/kg, 4,023.7 kcal/kg 및 3,958.8 kcal/kg으로 나타났으며, 이론발열량은 3,370.2 kcal/kg, 3,438.3 kcal/kg 및 3,506.3 kcal/kg, 고위발열량의 경우 3,511.8 kcal/kg, 3,762.2 kcal/kg 및 3,814.8 kcal/kg으로 나타났다. 저위발열량은 혼합비율에 따라 각각 3,198.7 kcal/kg, 3,481.2 kcal/kg 및 3,569.4 kcal/kg으로 나타내어, 고형연료 품질기준인 저위발열량 3,500 kcal/kg 이상을 전반적으로 만족하지 못하는 것으로 나타났다.

위 결과를 토대로 마이크로파-열풍 복합건조공정을 이용한 화학폐수슬러지 및 무연탄 혼합물의 고형연료로의 재활용 가능성을 평가한 결과 건조효율 및 발열량 향상을 위하여 보조연료를 첨가하여야 할 것으로 판단되어지며, 보조연료의 경우 건조 시 다이옥신 발생 등의 유해성이 없고 발열량이 높은 폐기물을 선택적으로 사용할 경우 양질의 고형연료를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

REFERENCES

- Caballero, J. A., 1997, Characterization of sewage sludges by primary and secondary pyrolysis, *Journal of Anal. Appl. Pyrol.*, 40(1), 433-450.
- Choi, B. S., 2008, A study on the gas production behavior by sewage sludge gasification, *Journal of the Korea Soc. Waste Manage.*, 25(5), 461-469.
- Hu Kwan, Lu, J. Y., Wang, S. H., 2003, The study of preparation of block using wastewater sludge of petrochemical factory, *Korea Organic Resources Recycling Association*, 11(2), 66-73.
- Jun, K. S., Hwang, E. J., Kim, H. J., 2009, A study on drying and carbonization of organic sludge from sewage plant and petrochemical industries for energy and resources recovery, *Clean Technology*, 15(3), 154-164.
- Kang, S. K., Lee, S. J., Ryu, I. S., Lee, K. C., 2007, Refined fuel production using municipal sewage sludge-preparation of refined solid fuels from organic sludge, *Journal of Korean Society of Combustion*, 16(1), 20-22.
- Kim, D. Y., Jung, B. -G., Sung, N. C., 2009, Evaluation of absorbent with sewage sludge carbide and incinerator ash, *Journal of the Korea Soc. Waste Manage.*, 26(3), 285-290.
- Lee, H. J., 2005, Waste organic material carbonization, 2005 Symposium on Waste Management and Treatment, Sudokwon Landfill Site Management Corp., 386-397.
- Lee, J. Y., Kang, S. J., 2009, Strategies for energy recovery from waste resources and biomass, *Journal of the Korea Org., Resour. Recy. Assoc.*, 17(2), 26-35.
- Ministry of Environment, 2007, Road map for energy recovery and on-land treatment of food waste, Seoul.
- Park, S. W., 2005, Carbonization technology for recycling wastes as fuel, *J. Korea Soc.*, 22(3), 226-235.
- Park, S. W., 2005, Carbonization technology for recycling wastes as fuel, *Journal of the Korea Soc. Waste Manage.*, 22(3), 226-235.
- Park, S. W., 2006, Carbonization technology for recycling wastes as fuel, *Journal of the Korea Soc.*, 22(3), 226-235.
- Park, S. W., Jang, C. H., Kim, N. J., 2004, Recycling technology of sewage sludge by carbonization, *Journal of the Environ. Sci.*, 13(2), 161-165.
- Storm C Rüdiger., H Spliethoff H, Hein K R G., 1999, Co-pyrolysis of coal/biomass and coal/sewage sludge mixtures, *Journal Eng. Gas Turb. Power*, 121, 55-63.
- Yang, M. W., Kim, Y. J., Lee, D. H., 2008, Assessment on leaching reduction of heavy metals by carbonization residue of sewage sludge as covering soil in landfill, *Journal of the Korea Soc. Waste Manage.*, 25(6), 560-568.