

## 음식물 쓰레기와 제지슬러지를 이용한 고체연료 제조

김용렬<sup>†</sup> · 손민일<sup>\*</sup>

<sup>†</sup>대진대학교 공과대학 화학공학과,  
<sup>\*</sup>명지대학교 공과대학 화학공학과  
(2010년 9월 28일 접수 ; 2010년 12월 15일 채택)

### Manufacturing Process of Solid Fuel Using Food Wastes and Paper Sludges

Yong-Ryul Kim<sup>†</sup> · Min-II Son<sup>\*</sup>

*Department of Chemical Engineering, Daejin University, Pocheon, 487-711, Korea*  
*\*Department of Chemical Engineering, Myongji University, Yongin, 449-728, Korea*  
(Received September 28, 2010 ; Accepted December 15, 2010)

**Abstract** : Dry Process(natural drying, hot-air drying, oil fry drying), optimized mixture ratio and the condition of carbonization was carried out in order to improve the product durability develop eco-friendly solid fuel mixing food waste and paper sludge. As a result of the experiment, oil fry drying process was the fastest method for drying food waste and paper sludge mixture that contains 80% water inside, and the optimized mixture ratio to minimize the generating concentration of chlorine gas against caloric value of mixture ratio was 7:3. Additionally proper temperature of product carbonization was about 200°C and shown increasing product durability through the carbonization. Therefore, the pelletized solid fuel be shaped diameter around 0.5cm, length 2cm under which was pulverized and molded using 7:3 mixture of food waste, and paper sludge was the eco-friendly solid fuel possible to be industrialized which is consist of chlorine concentration of below 2.0wt% and the lowest caloric value of over 5,000kcal/kg. In conclusion, this developing manufacturing process of the solid fuel can be interpreted to contribute alternative energy development in accordance with low carbon and green growth era.

*Keywords* : solid fuel, food waste, paper sludge, oil dry, carbonization

#### 1. 서론

최근 국내의 폐기물 발생량은 매년 약 7% 정도 증가하는 추세에 있으며 이에 따라 매립

에 의한 처리량도 해마다 증가하고 있는데, 2005년도 기준으로 생활 폐기물은 하루 48,398톤, 산업 폐기물은 하루 112,419톤, 그리고 건설 폐기물은 하루 129,000톤에 이르고 있으며, 이 중에서 폐기물의 11.5%는 주로 매립하고 5.5%는 소각하며 79%는 재활용되고 있다. 특히, 산

<sup>†</sup>주저자 (Ee-mail : yrkim@daejin.ac.kr)

업 폐기물의 경우에는 현재 약 20%정도는 매립에 의존하고 있는 실정이며, 이에 따라 매립지 확보가 새로운 사회문제로 부각되어 새로운 폐기물 처리기술이 절실히 요구되는 시점에 이르렀다[1,2]. 현재 펄프 및 제지공장에서 배출되는 슬러지는 연간 약 130 만톤에 이르러 있으나 처리기술의 부족으로 주로 매립에 의존하고 있고 일부 공장에서는 소각하고 있으며, 처리비용도 전국적으로 수백억에 달하고 있다. 세계적으로 매립과 소각에 의한 방법 이외의 제지공장 폐기물의 처리방법으로는 일본의 경우에 제지 슬러지로부터 제지원료로의 섬유소 회수, 비료화, 토양 개량제, 혐기발효를 통한 메탄 가스화, 건축용 텍스나 스테이트화, 그리고 지렁이 양식 등에 이용하는 것으로 밝혀졌으며 [3,4], 미국의 경우에는 1968년부터 펄프 및 제지 슬러지의 활용방안을 소각에 의한 폐열이용과 소각재의 이용, 유연탄 보일러의 보조연료로의 이용, 토양에 직접사용 및 토양 안정제 등의 다양한 각도에서 연구하기 시작하였다 [토6]. 국내의 경우에는 연료화, 퇴비화, 그리고 건축용 자재 등으로의 활용성에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔는데, 퇴비화는 숙성기간이 길고 퇴비화를 위한 공간이 마련되어야 하므로 연속적인 공정으로 퇴비화를 할 수 없다는 단점이 있다[2]. 또한 국내 생활쓰레기의 약 23%를 차지하고 있는 음식물쓰레기의 양은 2005년 기준으로 하루 평균 11,863톤이 배출되고 있다[1]. 음식물쓰레기를 주로 배출하는 곳은 일반가정이 70%, 음식점과 농수산물 유통시장 등이 30%를 차지하고 있다. 배출되는 음식물쓰레기의 53.1%는 수분의 함량이 높은 채소류이고, 그 다음은 육류와 어패류 순이다[7]. 현재 음식물쓰레기는 매립, 소각 등의 방법으로 처리하였으나, 쓰레기에 함유되어 있는 유기물 및 영양성분을 이용하여 사료와 퇴비 등으로 활용이 증가되고 있다. 그러나 고체연료화 하는 경우에는 음식물 쓰레기에 포함된 염분 등에 의하여 연소 시 염소가스의 발생으로 다이옥신 등의 환경오염물질을 배출하는 문제점이 있다[8]. 따라서 에너지원의 대부분을 수입하고 있는 국내 실정으로 볼 때 폐기물 내에 포함된 오염물질을 제거하고, 폐자원을 재활용하는 기술개발은 매우 중요할 뿐만 아니라 시급한 실정이다.

본 연구에서는 음식물 쓰레기의 연료로 활용할 경우 발생하는 염소 가스를 억제하기 위하

여 제지슬러지를 혼합하여 환경 친화적인 고체 연료를 제조하고, 산업화가 가능한 제조공정을 개발하여 발전소 등의 연료로 활용 가능성을 조사하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 제지 슬러지 및 음식쓰레기의 건조 실험

본 연구에서는 K사의 제지 슬러지(PS)와 수도권권지역에서 수거한 음식물 쓰레기(FW)를 원료로 하여 성분실험과 건조 실험을 수행하였다. 성분 실험은 화학시험 연구원에 의뢰하여 실시하였으며, 건조실험은 자연건조, 열풍건조 그리고 오일(식용유)을 이용한 중탕건조를 실시하여 비교하였다. 건조 실험 중 자연건조는 바람이 잘 통하고 햇볕이 없는 응달에서 실온 25℃, 습도 20~30%의 조건에서 7일 동안 제지 슬러지와 음식물 쓰레기 각각에 대하여 실시하였다.

또한 열풍건조와 오일을 이용한 건조 특성을 비교하기 위하여 제지 슬러지와 음식물 쓰레기를 같은 질량비율로 혼합한 시료를 사용하여 실험하였다. 이 때 열풍건조는 110℃에서 4시간 동안 2kW 열풍건조기를 이용하여 실시하였으며, 오일을 이용한 중탕건조의 경우 Fig. 1과 같은 장치를 이용하여 원료 대비 2.5배의 오일을 반응기에 넣고 110℃에서 4시간동안 시간에 따른 증발량을 측정하였다.

### 2.2. 발열량 측정 및 연소가스 분석

음식물 쓰레기(FW)와 제지 슬러지(PS)와의 최적 혼합비와 오일(폐식용유)의 혼합에 따른 영향 그리고 음식물 쓰레기에 대한 제지슬러지의 첨가에 따른 염소가스 배출 억제 영향을 알아보기 위하여 다음과 같이 시료를 준비하였다.

먼저 오일 혼합에 따른 영향을 알아 보기 위하여 오일 20%를 기준으로 음식물 쓰레기와 제지 슬러지의 조성을 달리하며 시료를 준비하였으며, 음식물 쓰레기에 대한 제지슬러지의 첨가에 따른 염소가스 배출 억제 영향을 알아보기 위하여 음식물 50g을 기준으로 제지슬러지의 혼합량을 증가시키며 음식물 쓰레기 기준으로 100%, 97%, 70%, 50%, 30%, 17%, 0%의 시료를 준비하여 발열량 및 방출 가스 중 염소에 대한 발생량(%)을 화학시험연구원에 의뢰하였다. 이 때 발열량에 대한 측정방법은 KSE

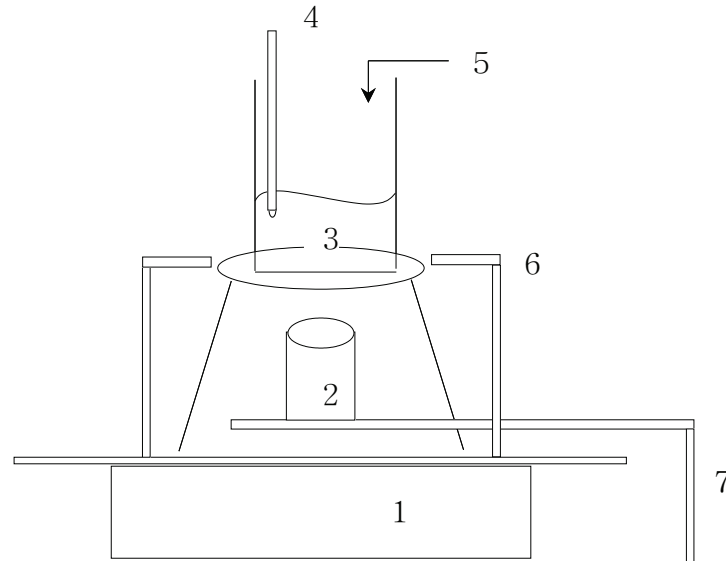


Fig. 1. Schematic diagram for the sludge drying reactor.

1. Balance    2. Burner    3. Oil Reactor    4. Thermometer    5. sludge  
6. Wind Barrier    7. Burner Support

3707 방법으로 그리고 염소에 대한 측정법은 ASTM D 2361 방법을 이용하여 측정하였다. 그리고 최적의 혼합비율을 선택하여 염소 이외의 연소가스에 대한 분석을 방재시험연구원에 의뢰하여 측정하였다.

### 2.3. 탄화 및 내구성 실험

음식물 쓰레기(FW)와 제지 슬러지(PS)와의 혼합물에 대하여 온도에 따른 탄화의 영향을 알아보기 위하여 수분 조성이 10 wt%이하가 되도록 열풍 건조를 이용하여 건조된 음식물 쓰레기와 제지슬러지를 가정용 믹서기로 분쇄하여 음식물대 슬러지의 혼합비를 2:8, 5:5, 8:2로 혼합 후 (주)셀텍사의 펠레기(5.5kW, 0.3ton/h)를 이용하여 직경 약 0.5 cm, 길이 2 cm 이하인 펠렛(pellet)형태로 제조하여, 170℃, 200℃ 그리고 250℃의 온도에서 전기로(2kW, 1000℃)를 이용하여 30분간 탄화실험을 수행하였다. 또한 탄화전과 탄화 후의 내구성에 대한 실험을 수행하기 위하여 직경 3.15mm의 체로 걸러진 펠렛 100g을 볼밀을 이용하여 분당 50회전을 주어 500회전 후 시험을 수행한 후에 다시 직경 3.15mm의 체로 거른 후, 체에 잔류하고

있는 펠렛의 무게를 측정하여 다음 계산식을 이용하여 계산하였다.

$$\text{내구성(\%)} = \frac{\text{내구성 시험후 무게}}{\text{내구성 시험전 무게}} \times 100$$

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 제지 슬러지 및 음식쓰레기의 건조 특성

음식쓰레기와 제지슬러지에 대한 건조 특성을 알고자 자연건조, 열풍건조 그리고 오일(폐식용유)을 이용한 건조에 따른 특성을 알아보았다.

#### 3.1.1. 자연건조 비교

음식물 쓰레기를 자연건조하는 경우 Fig. 2와 같이 5일간은 선형적으로 수분함유량이 감소하지만 5일 후에는 감소량이 줄어드는 경향을 보이고 있다. 이것은 슬러지 표면의 자유수 등은 쉽게 증발하지만 슬러지 내부의 화학적 결합수는 쉽게 증발하지 못하기 때문에 일어나는 현상이라고 생각된다.

Table 1. Moisture concentration change for food waste with natural condition

Dry(day)	Initial	1	2	3	4	5	6	7
Water content(%)	79.8	58.3	47.9	37.7	27.4	17.1	15.1	14.4

Table 2. Water concentration change for waste paper sludge with natural condition

Dry(day)	Initial	1	2	3	4	5	6	7
Water content(%)	80.1	60.6	50.1	42.5	35.8	27.3	22.6	21.3

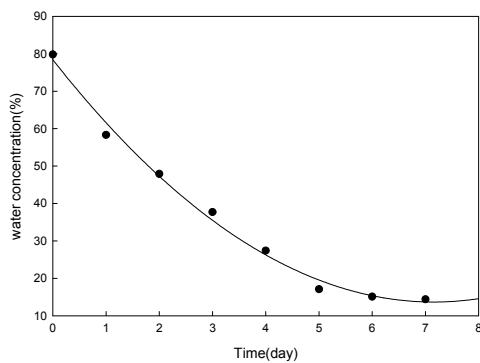


Fig. 2. The changes of water concentration for food waste in natural condition.

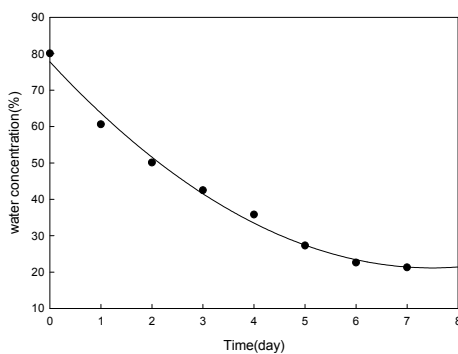


Fig. 3. The changes of water concentration for waste paper sludge with natural condition.

제지슬러지의 경우 Fig. 3과 같이 비교적 선형적으로 수분함유량이 감소하지만 4~5일 후에는 감소량이 줄어드는 경향을 보이고 있지만

음식물 쓰레기보다 건조속도가 느린편이라 할 수 있다. 이것은 제지슬러지의 경우 압축프레스를 거쳐서 배출되기 때문에 자유수 등과 심부의 결합수가 증발하기 어렵기 때문으로 생각된다.

이와 같은 현상은 슬러지의 경우 내부의 복잡한 수분결합 상태로인해 결정체가 뚜렷한 일반적인 고형물과 달리 건조에 어려움이 있으며, 일반적인 고형물 건조에 비해 항를 건조기간이 짧고, 감율건조기간이 길며, 임계점이 1차와 2차로 나누어져 건조가 진행된다는 보고와 일치한다[9,10].

### 3.1.2. 열풍과 오일을 이용한 건조 비교

음식물 쓰레기와 제지슬러지의 혼합물(1:1) 100 g을 이용하여 열풍건조와 오일을 이용한 중탕반응기에서 건조실험을 수행한 결과 한계함수율에 도달하는데 걸리는 시간이 오일을 이용한 중탕반응기의 경우가 약 20분경이며, 열풍건조기의 경우는 약 2시간 이었다. 이것은 오일을 이용한 중탕반응의 경우 열전달 면적과 열전달 속도가 크기 때문이며, 상대적으로 열풍건조의 경우는 심부의 결합수가 증발되는데 걸리는 시간이 오래 걸리기 때문에 한계함수율에 도달하는데 많은 시간이 걸린다고 판단된다 [9,10].

따라서 음식물 쓰레기와 제지슬러지의 혼합물의 경우에는 오일을 이용한 중탕반응기의 경우가 건조 속도가 빠르기 때문에 대량으로 건조시에 유리하며, 기존의 건조기에 비하여 설비의 크기를 크게 줄일 수 있기 때문에 초기 설비 투자비가 훨씬 적게 소모될 것으로 생각된다.

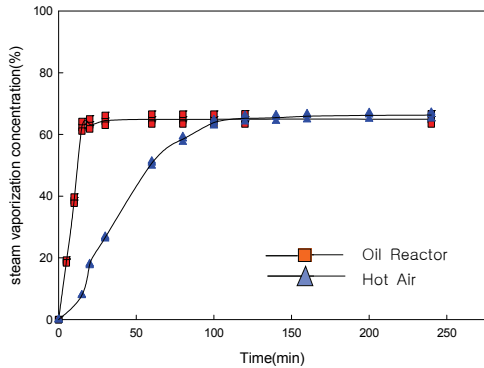


Fig. 4. The changes of water concentration for waste paper sludge with hot air machine and oil reactor(Amount of Mixture for food waste and waste paper sludge: 50g + 50g=100g, Amount of oil : 250g, Initial temperature : 110°C).

**3.2. 고체 혼합물의 발열량 측정 및 연소가스 분석에 따른 최적 혼합비**

음식물 쓰레기와 제지 슬러지와와의 최적 혼합비, 오일 첨가에 대한 영향 그리고 제지슬러지 첨가에 따른 염소 억제효과를 알아 보기 위하여, 음식물 쓰레기와 제지 슬러지 그리고 오일을 여러 조성에 따른 발열량(kcal/kg) 및 방출가스 중 염소에 대한 발생량(%)을 분석하였으며, 그 결과는 Table 3과 Table 4와 같다.

먼저 오일 첨가에 대한 영향은 Table 3에서와 같이 오일을 첨가 할수록 발열량이 증가하므로 오일을 이용한 중탕반응기를 이용하여 건조하는 경우 최종 건조물에 대한 오일의 농도를 조절하여 일정수준의 발열량을 갖는 연료를 제조하는데 유리하다고 판단된다.

또한 발열량의 경우 제지슬러지보다 음식물 쓰레기의 경우가 더 높았으며, 이것은 음식물 쓰레기가 제지슬러지보다 유기물이 더 많이 함유하기 때문으로 생각되며, 염소 발생량의 경우 음식물 쓰레기에는 염분이 다량 함유되어 있기 때문에 제지슬러지 보다 염소의 발생량이 많은 것으로 생각된다[7,11].

제지슬러지 첨가에 따른 염소 억제효과는 Table 3과 Table 4에서와 같이 음식물 쓰레기 50 g에 대하여 제지슬러지의 조성이 증가 할수록 염소의 발생량이 감소함을 확인 할 수 있었으며, 이것은 제지슬러지내의 무기물 중 탄산칼슘(CaCO3) 또는 산화칼슘(CaO)에 의한 영향으로 판단된다[12].

작용 성분: CaO, CaCO<sub>3</sub>

기본 반응: CaO + 2HCl → CaCl<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O

그리고 CaCO<sub>3</sub> + 2HCl → CaCl<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O + CO<sub>2</sub>

따라서 음식물 쓰레기와 제지 슬러지와의 최적 혼합비는 발열량 대비 염소의 발생량을 고려하였을 때 음식물 쓰레기대비 제지 슬러지와

Table 3. Combustion gas analysis of solid mixture(Oil addition)

No.	solid fuel	calorific power(kcal/kg)	chlorine(%)
1	food waste(100%)	5,220	2.06
2	paper sludge(100%)	3,169	0.01
3	food waste(80%)+oil(20%)	5,698	1.61
4	paper sludge(80%)+oil(20%)	4,245	0.08
5	food waste(70%)+oil(30%)	6,448	-
6	food(64%)+paper(16%)+oil(20%)	5,382	2.30
7	food(48%)+paper(32%)+oil(20%)	5,014	0.99
8	food(32%)+paper(48%)+oil(20%)	4,751	0.41
9	food(16%)+paper(64%)+oil(20%)	4,417	0.25

Table 4. Combustion gas analysis of solid mixture(No oil addition)

No.	Solid fuel	calorific power(kcal/kg)	chlorine(%)
1	food waste(100%)	5,220	2.06
2	paper sludge(100%)	3,169	0.01
3	food(97%)+paper(3%)	5,158	1.99
4	food(70%)+paper(30%)	4,601	1.45
5	food(50%)+paper(50%)	4,195	1.04
6	food(30%)+paper(70%)	3,784	0.63
7	food(17%)+paper(83%)	3,518	0.36

Table 5. Combustion gas analysis of solid mixture

Air Pollutant	Permissible Emission Standard		Result
	Emission Facilities	Emission Standard	
CO	Facility of using solid fuel of over 2 tons per hour	15(12)ppm	1,124.2ppm (without oxygen input)
	Facility of using solid fuel of 200 kg to 2 tons per hour	200(12)ppm	
HCl	Facility of using solid fuel of over 2 tons per hour	20(12)ppm	7.62ppm
SOx	Facility of using solid fuel of over 2 tons per hour	30(12)ppm	1.65ppm
	Facility of using solid fuel of 200 kg to 2 tons per hour	50(12)ppm	
NOx	Facility of using solid fuel of over 2 tons per hour	70(12)ppm	23.54ppm
	Facility of using solid fuel of 200 kg to 2 tons per hour	100(12)ppm	
HS	Facility of using solid fuel of over 2 tons per hour	2(12)ppm	-
	Facility of using solid fuel of 200 kg to 2 tons per hour	10(12)ppm	
F <sub>2</sub>	Facility of using solid fuel of over 2 tons per hour	2(12)ppm	0ppm
	Facility of using solid fuel of 200 kg to 2 tons per hour	3(12)ppm	
HCN	All Combustion Facilities	10ppm	2.39ppm
Br <sub>2</sub>	Combustion Facility of Solid Fuel	5ppm	0.1ppm
As	Combustion Facility of Solid Fuel	0.5ppm	-

의 혼합비가 7:3인 경우가 5,000 kcal/kg이상의 발열량 대비 염소의 발생량을 2%(환경부 고시 고체연료 기준) 이내로 할 수 있는 최적의 혼합비라고 할 수 있다.

음식물 쓰레기대비 제지 슬러지와 혼합비가 7:3인 고체 혼합물에 대한 800 °C 로에서의 배출가스에 대한 분석은 Table 5와 같다. 일산화탄소(CO)의 경우 허용기준을 크게 넘었지만

Table 6. Carbonization temperature and durability of solid fuel

solid fuel (food : paper)		3:7	5:5	7:3
mass before carbonization(g)		100	100	100
durability(%)		94.2	93.8	95.1
170℃	mass after carbonization(g)	94.1	93.4	93.4
	durability(%)	95.3	95.8	96.1
200℃	mass after carbonization(g)	92.6	92.5	92.1
	durability(%)	95.2	96.6	97.3
250℃	mass after carbonization(g)	91.7	91.2	90.9
	durability(%)	96.4	97.5	97.7

이것은 로 내에 별도의 산소 주입이 없는 상태에서 실험이 진행 되었기 때문으로 판단되며, 그 외의 배출가스의 경우에는 배출허용 기준이하 이므로 음식물 쓰레기와 제지 슬러지를 이용하여 고체연료를 제조시에 큰 문제는 없는 것으로 확인 되었다.

### 3.3. 온도 변화에 따른 탄화상태

음식물 쓰레기와 제지 슬러지와와의 혼합물에 대하여 온도에 따른 탄화의 영향을 알아보기 위하여 건조된 음식물 쓰레기와 제지슬러지를 분쇄하여 음식물 : 슬러지의 혼합비를 3:7, 5:5, 7:3로 혼합 후 펠렛기를 이용하여 펠렛화 후 170 ℃, 200 ℃ 그리고 250 ℃의 온도에서 30분간 탄화실험을 수행한 결과는 Table 6과 같다.

온도가 증가 할수록 탄화에 따른 질량 감소는 증가 하였으며, 동시에 내구성 또한 증가하는 경향을 보였다. 그리고 적절한 탄화온도는 약 200 ℃가 적당하다고 판단되었다.

## 4. 결론

본 연구에서는 음식물 쓰레기와 제지슬러지를 혼합하여 저위 발열량이 3,500 kcal/kg 이상이고 연소가스 중 염소가스가 2.0 wt% 이하인 환경 친화적인 고체연료를 제조하였으며, 산업화가 가능한 고체 연료 제조 공정을 개발하여 발전소 등에서 연료로의 활용가능성에 대하여 연구하였다. 이를 위해 음식물 쓰레기와 제지

슬러지의 건조방법(자연건조 열풍건조, 오일건조), 최적혼합비 그리고 고체연료로 제조시에 내구성 향상을 위하여 탄화 실험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다

1. 초기 약 80% 내외의 수분을 함유한 음식물 쓰레기와 제지슬러지의 건조 방법은 오일을 이용한 건조가 가장 빨랐으며, 건조 속도가 빠르기 때문에 건조반응기를 소규모로 제작 하더라도 상관없으므로 초기 건설비가 기존의 공정 보다 저렴할 것으로 판단된다.
2. 음식물 쓰레기와 제지슬러지의 혼합물이 발열량이 높으면서 염소가스 발생 농도를 최소화 할 수 있는 최적 혼합비(음식물 쓰레기: 제지슬러지)는 7:3 이었다.
3. 탄화의 적정 온도는 약 200 ℃가 최적의 조건임을 알았으며, 탄화에 의해 내구성이 증가됨을 알 수 있었다.
4. 음식물 쓰레기와 제지슬러지 7:3으로 혼합하여 오일 건조한 다음 분쇄 및 혼합하여 제조한 직경 약 0.5 cm, 길이 2 cm 이하인 pellet형 고체연료는 염소 가스 농도가 2.0 wt% 이하이고, 저위발열량이 약 5,000 kcal/kg 이상인 환경친화적이고 산업화가 가능한 고체연료 이었다.

따라서 개발한 고체연료 제조공정은 저탄소, 녹색성장 시대에 요구되는 대체에너지 개발에 크게 기여할 것으로 판단되었다.

### 감사의글

이 논문은 2010학년도 대전대학교 학술연구비 지원에 의한 것으로 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. Ministry of Environment, "White Paper of Environment", Administrative Publication 11-14802000-000851-10 (2005).
2. Jae-Ek Son, "Study on the Development Strategies of the Fundamental Energy Technologies to Address the Convention on Climate Change ", Korea Institute of Energy Research Report, KE-93012B, 161 (1993).
3. Kiyokazu Furuno, "A Case of Waste Consumption by Earthworms", Sanyo Kokusaku Pul., 1045 (1981).
4. J. S. Oh, Cellulose Separation from Sludge of Paper Manufacture", *J. Kor. Sol. Wastes Eng. Soc.*, **12(1)**, 139 (1995).
5. J. N. McGovern, J. G. Berbee, and J. G. Bockhein, Characteristics of Combined Effluent Treatment Sludge from Several Types of Pulp and Paper Mill, *Toppi Journal*, **115** (1983).
6. M. I. Groves, K. M. Staiger, R. M. R. Branion, and S. J. B. Duff, Use of a Laboratory-Scale Vertical Sludge Press to Optimize Polymer-Enhanced Dewatering of Pulp Mill Waste-Activated Sludge, *J. of Pulp and Paper Sci.*, **22(12)**, 464 (1996).
7. D. K. Min and K. M. Cho, A Study on the Generation and Physico-chemical Characteristics of the Food Waste, *J. Kor. Sol. Wastes Eng. Soc.*, **9(7)**, 307 (2003).
8. J. H. Hong, Cost-Benefit Analysis of Alternative Food Waste Recycling Methods, *The Hanyang J. of Eco. Stu.*, **22(1)**, 211 (2001).
9. J. H. Perry, "Chemical Engineerings Handbook", 3rd ed. McGraw-Hill Book Company, New York, 3 (1963).
10. C. J. Geankoplis, Transport Process and Unit Operations, Allyn and Bacon, Inc. (1978).
11. C. N. Yook, J. S. Kim, and K. S. Han, Combustion Characteristic of Paper Sludge Using TGA Reactor, *Kor. J. Sani.*, **18(3)**, 48 (2003).
12. B. D. Kim, S. C. C. H. P. Lee, H. T. Kim, and K. O. Yoo, Dry Removal of HCl in Flue Gas by Calcined Calcium, *J. KSEE*, **21(11)**, 215KSEE, 9).