

열중량 반응기를 이용한 제지슬러지의 연소 특성

육찬남 · 김정수* · 한광수*
원광보건대학 식품영양과
군산대학교 환경공학과*

Combustion Characteristic of Paper Sludge Using TGA Reactor

Chan-Nam Yook · Jung-Soo Kim* · Kwang-Soo Han*
Department of Food & Nutrition, Wonkwang Health Science College
*Department of Environmental Engineering, Gunsan National University**

Abstract

To obtain the preliminary design data for combustion of paper sludges, decomposition characteristics and combustion kinetics of paper sludges reactor have been determined in a TGA reactor. Also, the combustion characteristics of paper sludges have been determined in a fluidized bed reactor.

The data obtained from the TGA reactor indicate that dewatering of paper sludge is terminated at temperature below 130°C. With heating rate of 20°C/min, combustion is terminated at temperature below 340°C.

The combustion rate is found to be first order with respect to temperature and oxygen concentration.

Activation energies for paper wastes are found to be 570, 700, 2600, 4600 Kcal/mole, respectively.

The calcination conversions were investigated with the operating temperature and residence time. In this investigation, it was found that calcination conversion was affected by the operating temperature and residence time. The optimum conditions of operating temperature and mean residence time were 850°C and 6 minutes of respectively.

I. 서 론

급속한 경제성장 및 생활수준의 향상에 따라 배출되는 폐기물의 종류와 그 양은 매년 증가추세를 보이고 있어 이의 처분문제가 사회적인 관심사로 심각하게 대두되고 있다.

이들 폐기물 중에서 특히 제지 sludge의 경우 년

간 830,000 ton 정도의 발생량을 보이는데 이중 150,000 ton은 재활용되어지며 280,000 ton은 매립되어지고 나머지 약 400,000ton은 소각되어지는 실정이다. 발생량의 약 33%에 달하는 제지 sludge매립의 경우

1) sludge의 과다한 수분 함유로 인한 매립지 안정화에 상당한 악영향을 주며

2) 또한 과다한 수분은 침출수의 다량 발생으로 2차 오염을 야기하며

3) 열량을 얻을 수 있는 자원을 폐기하는 결과를 낳게 된다.^{1,2,3,4,5)}

그리고 재활용의 경우 제철소 용광로 진정제와 콘크리트 크랙완화 첨가제, 철강 이송시 보온제, 인공토양 등으로 사용되어지고 있으나 전체 발생량의 18%에 불과하여 그 처리 양이 미약한 실정이다.

이에 반해, 발생량의 48%를 처리하는 소각의 경우 다단 소각로, 유동층 소각로, 스토카식 소각로 등의 소각 장치에 의해 소각 되어지고 있으나 sludge의 과다한 수분 함량과 건조 전후의 성상의 차이(밀도, sphericity 등) 등은 소각로의 조업을 불안정하게 할 뿐 아니라 소각로 내의 소각특성과 최종 열적 감량에서도 현저한 차이를 보이는 단점을 가지고 있다.

그러나 현재까지의 sludge처리에 관한 국내외적인 연구추세로 볼 때 sludge의 감량화, 안정화가 가능하고 sludge의 소각에 따른 에너지를 회수할 수 있을 뿐만 아니라 나아가 최종 소각 잔유물의 위생매립 및 매립지 축소가 가능한 소각기술이 폐기물의 처리에 가장 큰 잠재력을 지닌 것으로 볼 수 있다.⁸⁾

따라서 소각로에서의 원활한 조업을 위하여 먼저 시료의 성상과 건조 전후의 시료의 연소특성 파악이 선행되어야 할 것이며 이를 위해 본 연구에서는 시료의 성상과 연소특성을 파악할 수 있는 열중량 반응기를 제작하여 다양한 종류의 제지 sludge(백상지 sludge, 신문지 sludge, art지 sludge, 골판지 sludge)를 대상으로 조업온도, 산소 주입속도, 공기 전달속도 등에 따른 시료의 성상 및 연소특성을 규명 하고자 하였다.

II. 실험 장치 및 방법

1. 열중량 반응기

1.1 실험장치

열중량 반응기는 Fig. 1과 같으며 전자저울 system, 각종 gas 및 유량계로 구성되어 있다. 반

응기는 내경 55mm, 높이 1m의 SUS 304 pipe로 제작되었으며 내부가열을 위해 외벽에 4kw kanthal 열선을 설치하였고 외부로의 열손실을 줄이기 위하여 50mm 두께의 kaowool로 단열 하였다. 반응기 내부온도는 시료 basket 아래 5mm 위치에 설치한 열전대(K-type)를 이용하여 온도를 측정하고 PID controller로 조절하였다. 반응기 하부에는 가스의 혼합을 위해 raschig ring을 충전하였다. 전자저울 system은 연소반응의 진행에 따른 시료 무게변화를 연속적으로 측정하는 것으로 precisa 250A 전자식 저울과 시료 basket의 상하운동을 위해 반응기 상부에 설치된 winch assembly로 구성되었다. 전자저울의 무게감량 data는 personal computer로 매 3초마다 입력되었다.

제지sludge 시료는 100mesh 316 stainless망으로 제작된 시료 basket에 넣어서 직경 3mm 니크롬선으로 저울 하부에 부착된 고리와 연결된 시료 holder에 장착되어 반응기 내에 투입되거나 반응완료 후 탈착 된다. 시료 basket의 장착, 탈착은 반응기 중앙부에 위치한 hatch를 통하여 실시하였다. 연소반응시 주입되는 공기는 cylinder에 보관되고 사용 시는 압력조절 valve unit와 유량계에 의해 유량이 측정된 후 가스 예열기를 통과한 후 반응기 하부로 주입되었다. sludge의 가스화 가능성을 조사하기 위해 공기를 다른 valve unit를 통해 N₂

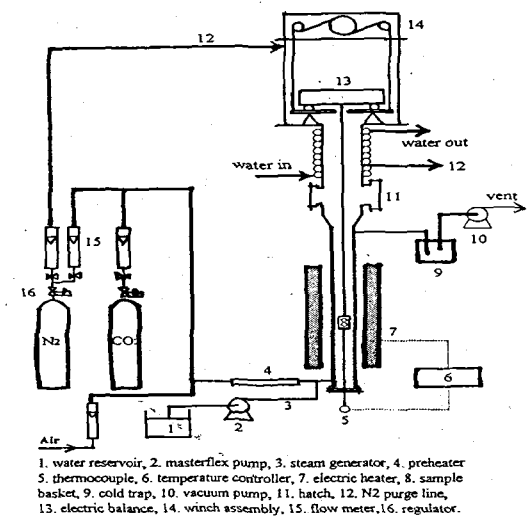


Fig. 1. Schematic diagram of thermobalance

가스와 혼합하여 적절한 산소농도로 조절하여 반응기 하부로 주입되었다. N_2 가스의 양은 주입되는 공기의 산소 분율에 따라 조정되었다. 한편 sludge 연소시 연소가스가 반응기 상부의 저울 system으로 유입되는 것을 막기 위해 vacuum pump를 이용해서 반응기 상부의 압력을 50mmAq 정도로 맞추었다.

1.2 실험방법

열중량 반응기 내로 N_2 가스를 연소반응시 요구되는 유량으로 주입하면서 반응온도까지 반응기를 가열한 뒤 온도가 정상상태에 도달하면 hatch를 통해서 시료 basket를 넣고, winch assembly로 반응기의 반응영역 내에 위치시켜 반응온도에서 basket의 영점조정을 한다. Basket의 영점조정이 끝나면 hatch를 통해서 미리 계량되어 준비된 시료인 제지 sludge를 sample basket에 넣고 winch assembly로 basket를 반응영역에 놓고 N_2 가스 분위기 하에서 무게감량이 없어질 때까지 기다린다. 보통 basket주입 후 15분 정도 지나면 시료에 남아 있던 잔여수분과 휘발분이 탈착되어서 시료무게가 거의 일정해진다. 시료량이 1.0g 이하에서는 시료량에 따른 반응속도의 차이가 거의 없었으므로 0.5g에서 거의 대부분 실험하였으며 정밀도는 0.0001g까지 측정하였다.

시료무게가 일정하게 정상상태에 도달하면 공기와 N_2 가스를 산소농도에 따른 미리 정한 비율에 맞추어 반응기 내에 선 속도가 5cm/s가 되도록 각각의 가스를 rotameter로 계량해서 반응기 하부에 주입하였다. 반응가스가 주입되기 시작하면 시료와 반응가스가 반응하기 시작해서 시료의 무게감량이 시작되고 반응온도, 반응가스 중의 산소농도에 따라 무게감량 비율이 다르게 나타난다. 반응 중의 무게변화는 전자저울의 신호를 매 3초마다 개인용 컴퓨터로 받아 data파일로 저장하였다. 대략 1시간 정도 반응시간이 경과되면 공기와 N_2 의 혼합가스 주입을 끝내고 공기를 주입해서 시료에 남아있는 미반응탄소를 완전히 연소시켜 잔류무게로부터 제지 sludge의 회분을 알아내었다. 연소반응 kinetics를 알아보기 위해 반응온도는 500℃ 와 850℃ 사이에서 다양하게 변화시키면서 실험하였고 시료

sludge 중의 탄소분의 시간에 따른 전환율로부터 반응속도를 구하였다.

2. 유동층 반응기

2.1 실험장치

본 실험에서 사용한 실험 장치는 Fig. 2와 같다. 실험 장치는 크게 유동층부, 시료주입부, 시료 배출부, 시료 유출부 및 공기 주입부로 나눌 수 있다. 유동층부는 내경 0.067m, 높이 1.25m이며 부식을 방지하기 위해 실린더형의 stainless steel관으로 제작하였으며 가스분산판은 충전층으로 직경 0.005m의 ceramic bead를 사용한 porous medium 형태이다. 유동층내의 온도를 시료의 착화점 이상으로 가열하기 위하여 소각로 외부에 220V, 3kw의 kanthal선을 감고, 외부에 구리관을 감아 냉각수를 공급하여 소각로내의 온도를 조절할 수 있게 하였다. 그리고 가스 분산판으로부터 0.05m, 0.1m, 0.35m, 0.75m에 K-type의 열전대를 유동층 중심부에 설치하여 유동층내의 온도를 측정하였으며 분산판으로부터 0.05m 상부에 설치된 열전대를 PI-Controller(Han Young Electronic Co. HY-8000S Series)에 연결하여 유동층내의 온도를 제어하였다. 또한 정상적인 유동화상태 및 유동층내의 물질의 양을 측정할 수 있도록 windbox에 manometer를 설치하여 유동층 내부의 유동화 상태와 층내 물질의 양을 관찰하였다.

시료 주입부는 가스 분산판으로부터 1.05m 지점인 소각로 상부에 설치된 screw feeder를 사용하여 시료를 공급하였다. 시료 배출부는 소각 및 소성시 생성된 소성물을 배출시키기 위해 소각로 하부에 설치된 배출관을 통하여 진동배출기를 사용하여 배출하였다. 유동화 공기의 양을 조절하기 위해 needle valve와 유량계(Glimont Co. No.15)를 설치하였다.

2.2 실험방법

공기 압축기로부터 공급되어진 공기는 oil-정화기와 공기정화기를 통과시켜 공급하였다. 그리고 needle valve로 유동화 공기의 양을 조절하였다. 완전히 소성된 소성물(CaO) 715 μ m 입자를 유동층

후 미 소성된 석회석 성분을 900℃에서 3시간 동안 완전히 소성시킨 후 소성 전환율을 산출하였다.

3. 시 료

3.1 제지sludge

본 연구에 사용한 시료는 중앙제지, 화성제지, 세풍제지, 삼일제지에서 발생하는 제지sludge이다. 각 시료에 대한 화학분석표는 Table 1.에 나타내었는데 표에서 보듯이 수분이 63-69%, 고형분이 31-37%이다. 이러한 고형분은 건조기준으로 각 조성별로 상당한 차이가 발생하는 데 중앙 및 세풍제지 sludge가 가연성분인 섬유소 성분 함유량에 있어 화성 및 삼일제지 sludge보다 약 2배 높은 40-46%의 함유량을 보이고 있다. 그리고 특이한 것은 삼일제지 sludge의 경우 전체 고형성분 중 석회석 함량이 약 60% 차지할 정도로 높음을 알 수 있으며 이러한 석회석이 그대로 폐기될 경우 가용한 자원을 폐기하는 결과를 초래하므로 이의 재활용이 필요하며 또한 소성반응은 흡열반응이므로 소성반응에 필요한 열은 제지sludge 내 섬유소 성분의 연소로 인해 충당할 수 있다. 그리고 본 실험의 실험조건은 Table 2에 나타내었다.

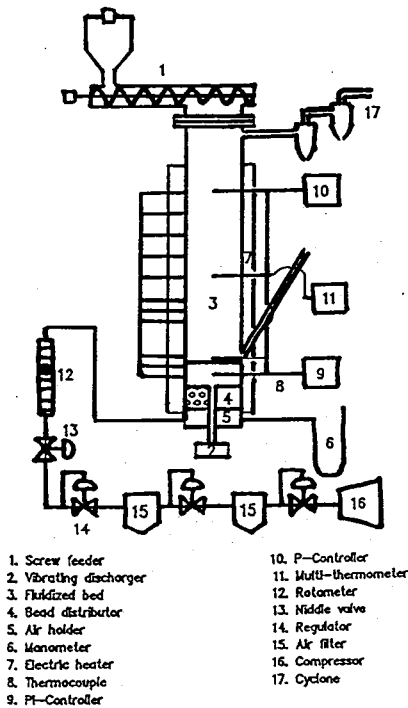


Fig. 2. Schematic diagram of experimental facilities.

초기물질로 aspect ratio가 1.0이 되도록 넣어준 후 유동층 연소로 900℃로 가열하였다. 같은 크기로 이루어진 시료를 주입 속도가 13.3, 21.64, 33.02, 40.78, 48.44, 57.62, 그리고 70.77g/min로 screw feeder를 통해 연속적으로 주입하였다. 각 주입속도에 따라 이론적인 체류시간의 3배 정도의 시간에서 배출부를 통해 소성물을 채취하였다.

위와 같은 실험을 유동층의 온도가 850, 800, 750, 그리고 700℃의 온도에서 반복하였다. 채취한 각각의 소성물은 미 소각된 pulp 성분을 연소시키기 위해 전기로에서 600℃로 2시간 동안 방치한

Table 2. Experimental condition

Operating variables	Condition
Static bed height(L/D)	1.0
Gas velocity(U_0/U_{mf})	1.6
Temperature(℃)	700, 750, 800, 850
Particle size(μm)	715
Solid feeding rate(g/min)	13 ~ 70

Table 1. Chemical analysis of paper sludge sample

Paper sludge producer	component of sludge					Moisture	Remark
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaCO ₃	pulp	TiO ₂		
Jungang	31.2	16.4	4.1	46.2	2.1	69.1	
Hwasung	44.1	23.8	8.1	24	---	65.2	
Sepoong	37.0	18.3	2.4	39.0	3.3	67.2	
Samil	8.0	4.0	61.4	21.2	5.4	62.7	

III. 실험결과 및 고찰

1. TG 분석에 의한 제지sludge 연소특성 해석

각 제지sludge 종류별 연소특성을 알아보기 위하여 공기분위기 하에서 열중량 분석을 하였다. Fig. 3~Fig. 6은 각 제지회사 별로 시료를 약 15mg을 취해 이를 TGA에서 분당 20°C씩 승온시켜 승온속도에 대한 중량감속 곡선을 나타낸 그림이다.

본 실험에 사용된 제지sludge는 수분이 60~70%이고 고형성분이 30~40%이며 이 고형분 중에서 섬유소성분은 30~40%, tar는 limestone 성분은 60~70%를 차지하고 있다. 그림에서 전체적으로 약 140°C까지 급격한 탈수분 현상이 일어나고 250~260°C부터 중이성분인 섬유소성분의 연소반응이 일어나 350°C까지 이어짐을 알 수 있다. 이때 무게감량은 시료에 따라 조금씩 차이는 있지만 6~16% 정도이다.

시료 A, B, C(A : 중앙제지, B : 화성제지, C : 삼일제지)의 경우 300°C 근처에서 연소에 의한 최고 감량속도를 보이다가 그 이후는 잔여 섬유소 및 무기산화물이 분해되면서 3~8%의 무게감량을 보인 후 600°C 이상의 온도에서는 연소 및 분해가 거의 완료되어 회분만 남게 된다.

이와는 달리 Fig. 6의 경우 300~380°C까지는 가연성분인 섬유소성분의 연소로 인해 약 6.5% 무게감량을 보인 후 일정하게 유지되다가 약 640°C 이

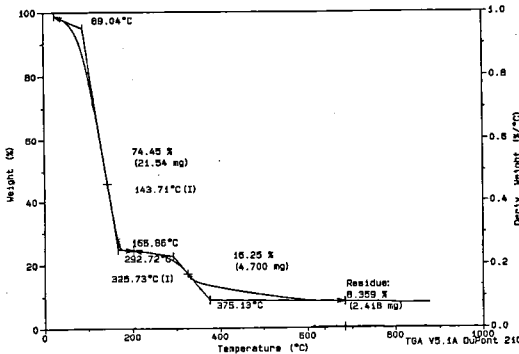


Fig. 3. TG analysis for paper sludge A (A : Jungang)

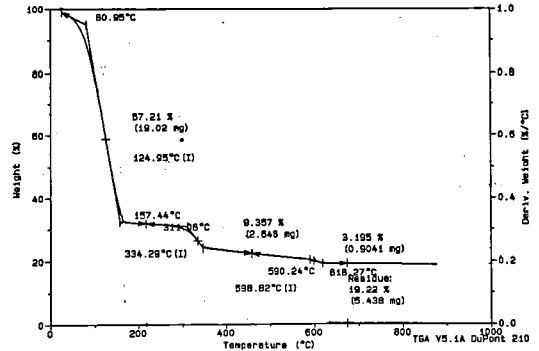


Fig. 4. TG analysis for paper sludge B (B : Whasung)

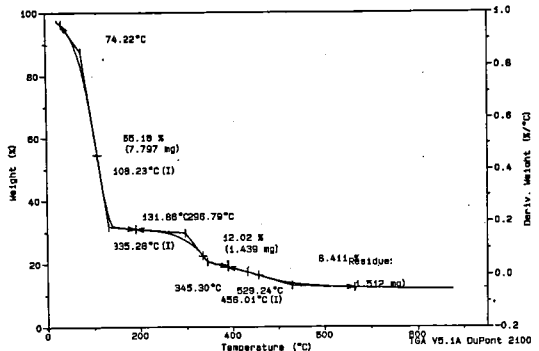


Fig. 5. TG analysis for paper sludge C (C : Sepoong)

상에서 약 14%의 무게감량이 다시 일어남을 알 수 있다.

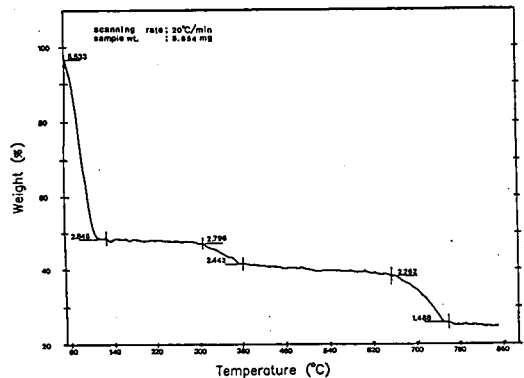


Fig. 6. TG analysis for paper sludge D (D : Samil)

이러한 무게감량은 Table. 1에서 나타난 바와 같이 art지를 만드는 공정에 필수적으로 주입되는 limestone 성분의 소성반응 때문에 일어나는 데 limestone의 경우 일반적으로 650℃에서부터 소성반응이 일어나기 시작하며 이러한 소성반응은 온도가 증가할수록 더욱 증가하기 때문이다.

이러한 사실은 시료 D를 대상으로 DTA 실험을 한 Fig. 9의 결과로부터 확인할 수 있다. 그림에서 제지sludge로부터 탈수분 과정이 완료되는 140℃에서 그리고 limestone의 소성반응이 거의 완료되는 약 800℃에서 흡열반응 peak가 존재함을 알 수 있다.

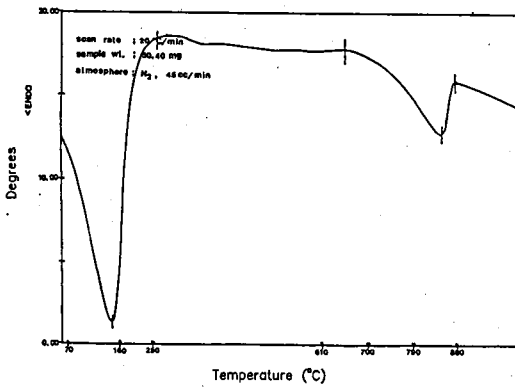


Fig. 7. DG analysis for paper sludge D (D : Samil)

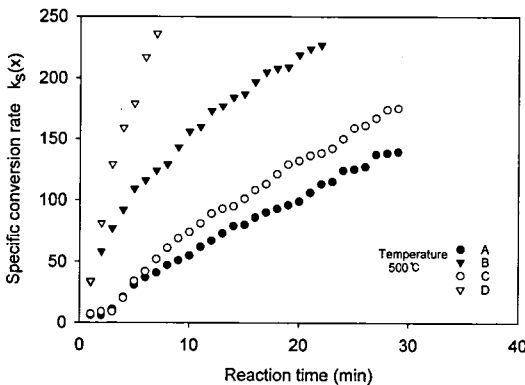


Fig. 8. Specific conversion rate profile of various sludges with reaction time.

(A : Jungang, B : Hwasung, C : Sepoong, D : Samil)

2. 열중량 반응기를 이용한 제지 sludge 연소특성 해석

specific conversion rate는 $K_s(x) = \left[\frac{1}{1-x} \right] \frac{dx}{dt}$ 로 표시되는데 이는 임의시간에서 남아 있는 탄소분에 대한 연소속도를 나타낸다. Fig. 8. 은 조업온도를 500℃로 했을 시 각 시료의 specific conversion rate를 조업시간에 따라 나타낸 그림이다.

그림에서 시료 A와 C가 비슷한 형태로 연소됨을 알 수 있으며 조업시간에 따른 연소속도가 전체적으로 1차적인 직선관계이나 그 기울기에 있어서는 조업시간 1분을 경계로 달라짐을 알 수 있다.

이러한 형태는 주어진 기체의 선속도와 고체반응물 즉 제지sludge의 내부구조 및 입자크기에서 반응온도에 따라 경막확산, 세공확산 그리고 화학반응 율속영역으로 구분되는 데 이에 대한 특성을 살펴보면 다음과 같다.

1) 경막확산 율속영역(film diffusion control regime)

이 영역에서는 반응온도가 비교적 높아 고체입자와 산소의 반응속도가 고체입자 표면을 둘러싼 경계면을 통한 반응가스의 물질전달속도보다 매우 빠르기 때문에 반응가스는 경계면을 통과하여 시료의 표면에 도달하는 순간 입자표면과 반응하여 없어진다. 따라서 입자내부의 산소는 거의 없게 되며 결국 주어진 입자에 대하여 총괄반응속도는 산소가 입자표면으로의 물질전달속도에 의하여 결정되므로 반응온도의 영향은 거의 없어 활성화 에너지는 거의 0 에 가까운 값을 취하게 된다.

2) 세공확산 율속영역(pore diffusion control regime)

고체입자와 산소의 고유 반응속도가 비교적 느려지면 시료내의 세공을 통하여 산소의 확산이 이루어지기 때문에 시료내의 산소가 존재하여 입자내의 농도 구배가 형성된다. 따라서 전체 반응속도는 시료와 반응가스의 고유반응속도 뿐만 아니라 세공을 통한 반응가스의 확산속도에 영향을 받게 되며 반응이 진행됨에 따라 세공이 확장됨과 함께

반응가스의 유효 확산계수가 증가하게 되어 산소의 농도분포도 변하게 된다. 이러한 반응조건하에서 실험할 경우 이에 대한 해석을 위해서는 유효 확산계수를 알아야 하는데 이것은 시간에 따른 세공구조가 바뀌므로 이를 정확히 알기가 힘들다. 이러한 영역에서는 반응속도와 물질전달에 대한 저항이 모두 고려되는 영역으로서 이 영역에서 활성화 에너지는 고유반응속도에서 얻은 값의 절반 가량으로 보고되고 있으며 반응차수는 실제 반응차수와 다음과 같은 관계가 있음을 밝혔다.

$$n = (m + 1) / 2$$

여기서 n은 겉보기 반응차수(apparent reaction order) 이고 m은 실제반응차수(true reaction order) 이다.

3) 화학반응 율속영역(Chemical reaction control regime)

이 영역은 반응온도가 비교적 낮기 때문에 반응속도가 느리다. 따라서 고체입자 주위의 경계면을 통한 산소의 물질전달속도가 반응에 의하여 소멸되는 속도보다 매우 빨라 입자내부의 산소농도분포는 거의 균일하게 되며 총괄반응속도는 고체입자와 산소의 고유 반응속도에 의하여 지배된다.

초기에는 제지sludge 중 탈 수 있는 섬유소성분들이 고온에서 쉽게 공기와 접촉할 수 있으므로 공기전달속도가 상대적으로 높아 제지sludge 연소속도도 비교적 높게 나타났다. 그러나 제지sludge의 가연성분인 섬유소성분이 연소되고 제지sludge를 구성하는 다른 성분인 tare 등의 분율이 상대적으로 높아지므로 인하여 초기보다 두꺼운 회분층을 형성하게 된다. 그리고 가연성분이 활발히 연소함으로 인하여 초기보다 훨씬 많은 CO₂를 방출하며, 이로 인해 제지sludge 주위에 기체경막과 회분층이 존재함으로 인하여 공기전달속도가 둔화되어 연소속도 또한 감소하게 된다(19,20).

Fig. 9~11은 조업온도를 600, 700, 800℃로 변화시키면서 조업시간에 따른 각 제지sludge의 specific conversion rate를 나타낸 그림이다.

시료 A와 C의 경우 시료의 특성상, 즉 가연성분

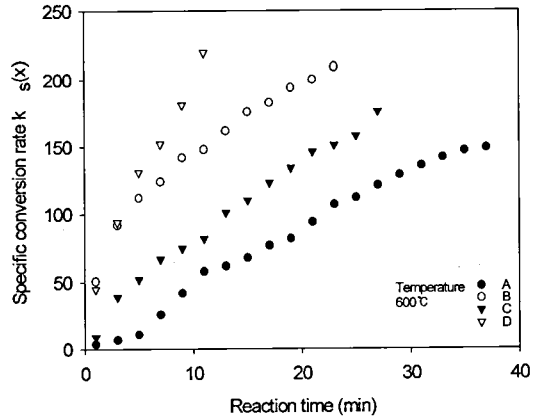


Fig. 9. Specific Conversion rate profile of various sludges with reaction time.

(A : Jungang, B : Hwasung, C : Sepoong, D : Samil)

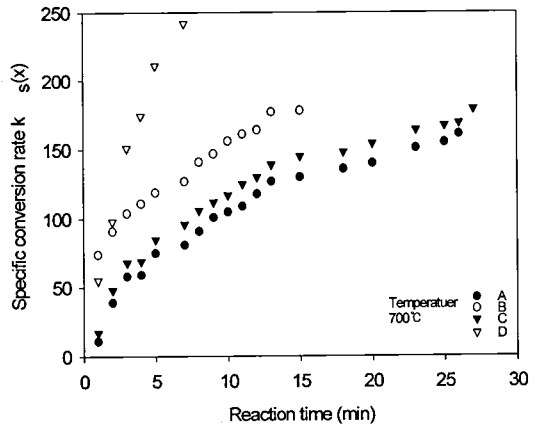


Fig. 10. Specific Conversion rate profile of various sludges with reaction time.

(A : Jungang, B : Hwasung, C : Sepoong, D : Samil)

조성분율에 따라 연소되는 속도가 600℃까지는 차이가 발생하나 700℃이상부터는 그 차이가 감소하여 800℃에서는 거의 일치하였으며, 연소시간 또한 약 40% 정도 단축되었다.

이러한 현상은 온도가 증가할수록 비슷한 성분의 제지sludge를 함유하고 있는 경우(주로 회분성분) 가연성분의 연소성이 급격히 증가하여 연소속도가 거의 최대값에 이르기 때문이다.

이와는 달리 시료 B의 경우 제지sludge 특성상

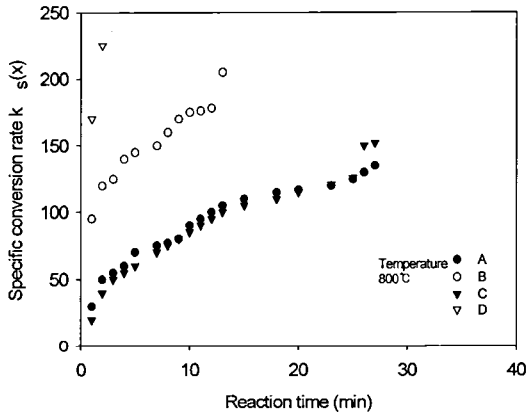


Fig. 11. Specific Conversion rate profile of various sludges with reaction time.

(A : Jungang, B : Hwasung, C : Sepoong, D : Samil)

상당히 낮은 섬유소성분과 시료 A, C와 일부 상이한 회분조성을 가지므로 인하여 A, C와는 다른 연소특성곡선을 보여준다.

그리고 시료 D의 경우 A, B, C와는 전혀 다른 연소특성곡선을 보여주는 데 온도가 증가할수록 연소속도가 증가함을 알 수 있다.

초기단계에서 같은 반응시간 대의 연소속도 값을 비교해 보면 500℃보다 800℃가 약 4.5배정도 높음을 알 수 있다. 이는 시료 D의 특성으로서 아트지를 고급지를 생산하는 제지공정의 거의 마지막 공정에서 제지에 얇게 TiO₂와 가는 입자의 limestone을 코팅함으로써 제조되는 데, 이러한 아트지를 제조하는 제지공장에서 나온 sludge가 D시료이다. 따라서 이러한 제지공장에서 나오는 제지 sludge는 다른 제지 sludge와 달리 TiO₂와 limestone의 함유량이 대단히 높다.

일반적으로 limestone은 600℃이상에서 소성반응이 일어나며 이러한 소성반응은 반응 중의 CO₂분압과 온도에 크게 의존한다. 따라서 시료 D의 경우 다른 시료와는 달리 온도가 증가할수록 specific conversion rate가 급격히 증가하게 된다.

제지 sludge와 공기와의 연소반응의 반응 활성화 에너지를 온도구간 500-850℃에서 구한 반응속도 상수 k와 반응온도의 절대온도 역수(1/T)와의 관계를 Arrhenius plot하면 Fig. 12와 같이 된다.

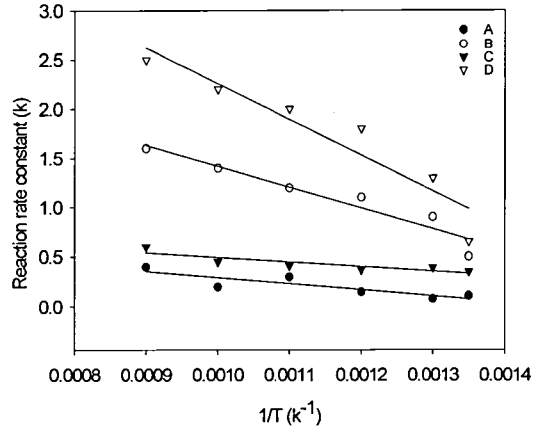


Fig. 12. The Arrhenius plot for sludge combustion system using rate constants

(A : Jungang, B : Hwasung, C : Sepoong, D : Samil)

실험결과 제지 sludge A와 C의 경우 활성화 에너지는 550과 700Kcal/mole의 값을 가지나 B의 경우 이보다 훨씬 높은 2600Kcal/mole 값을 가짐을 알 수 있다. 그리고 제지 sludge D의 경우 활성화 에너지가 가장 높은 4600Kcal/mole 값을 나타냈다.

일반적으로 연소반응에서 활성화 에너지가 높으면 초기 착화성이 낮다는 것을 의미하는데 제지 sludge B와 D의 경우 초기 착화성이 낮아 A와 C에 비해 초기에 훨씬 착화되기 어려움을 알 수 있다. 따라서 이러한 결과로부터 제지 sludge B와 D를 소각시 초기 소각로 예열온도를 다른 A와 C 소각시보다 훨씬 높게 하여야 함을 유추할 수 있다. 제지 sludge D의 경우 반응 활성화 에너지가 월등히 높은 이유는 연소반응이 일어날 때 제지 sludge 내에 함유된 석회석 입자가 흡열반응인 소성반응을 거치기 때문이다(22).

Fig. 13은 제지 sludge A를 공기중의 산소농도를 5%에서 21%까지 다양하게 변화시키면서 조업시간에 따른 specific conversion rate를 조사한 그림이다.

그림에서 산소농도가 감소할수록 연소속도는 감소하나 연소시간은 길어짐을 알 수 있다. 연소가 적합한 온도조건하에서 산소전달속도를 인위적으로 조작함으로써 제지 sludge의 연소속도 또한 조

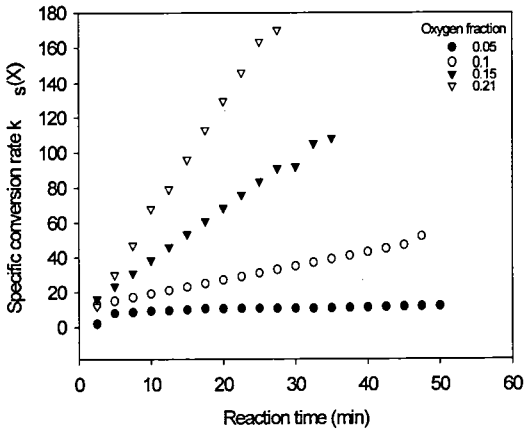


Fig. 13. Specific conversion rate profile of sludge A for oxygen fraction with operating temperature (A: Jungang)

절할 수 있는 데 이러한 기법을 제지sludge를 소각시키지 않고 제지sludge 내의 가연 고정탄소 혹은 휘발분을 보다 청정한 연료인 연료가스의 생산에 응용할 수 있을 것으로 사료된다. Lee 등¹⁷⁾에 의하면 제지sludge 보다 훨씬 유해한 유해폐수 sludge의 경우 소각시 다양한 종류의 중금속이나 오염물질 등이 배출되므로 이러한 단점을 보완할 필요성이 있다고 하였는데 상기의 산소 전달속의 조절에 의하여 인위적으로 최소한의 탄소성분만

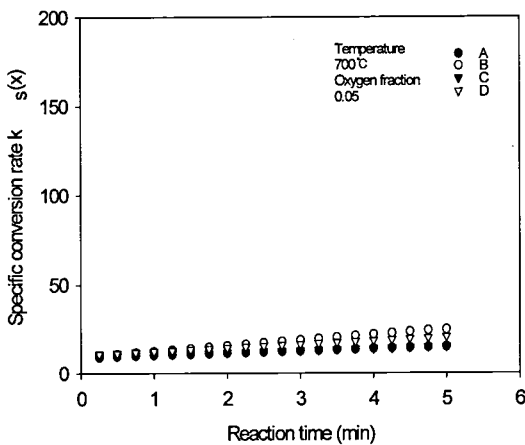


Fig. 14. Specific conversion rate profile of various sludges with reaction time.

(A: Jungang, B: Hwasung, C: Sepoong, D: Samil)

연소시키고 나머지 성분은 보다 연소하기 쉬운 청정gas로 전환시 오염물질 배출 없이 유해폐수 sludge를 처리할 수 있으리라 사료된다.

Fig. 14는 제지sludge A, B, C, D를 산소농도 5%로 하였을때 조업시간에 따른 specific conversion rate를 조사한 그림이다.

산소농도 5%시 제지sludge의 종류 즉 가연성분 조성이나 회분의 조성에 크게 영향을 받지 않고 거의 유사한 형태로 연소됨을 알 수 있다.

3.3 소성온도에 따른 소성전환율

유동층 소각로를 이용하여 715 μ m의 균일 입자를 유속 0.142m/sec, 조업 온도 700 $^{\circ}$ C에서 900 $^{\circ}$ C 범위로 유동층내 체류 시간에 따른 소성전환율을 Fig. 15에 나타내었다.

Fig. 15에서도 볼 수 있듯이 조업온도가 증가할수록 소성전환율은 증가하며 각각의 온도에서 어느 체류시간 이후부터 소성전환율은 일정하여지며 또한 온도가 증가할수록 짧은 체류시간에서는 소성 반응속도가 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이와 같은 이유는 소성반응이란 근본적으로 열분해하는 흡열반응이므로 열을 필요로 한다. 따라서 높은 조업온도에서는 소성전환율이 높게 나타나고 있다. 그리고 800 $^{\circ}$ C 이상의 온도에서는 완전전화가 가능하지만 800 $^{\circ}$ C 미만의 온도에서는 폐 sludge 입자들이 완전소성될 수 있을 만큼의 열량이 부족

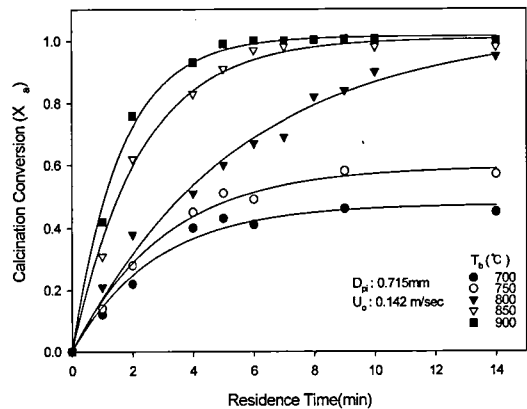


Fig. 15. Residence time of paper sludge D with unconverted fraction of paticales in a fluidized incinerator.

하므로 완전전화가 되지 않는다. 그리고 소성 반응 속도는 Stencil 등²³⁾이 언급한 바와 같이 폐 sludge 입자내의 석회석성분이 흡수한 열량에 의존하므로 조업온도가 높을수록 증가하게 된다.

IV. 결 론

1. TG 분석을 통한 제지sludge의 연소특성을 예측할 수 있었는데 약140℃와 300℃에서 탈수분 및 연소과정이 일어나며 이러한 연소특성은 제지 sludge를 구성하고 있는 회분의 구성성분에 크게 의존함을 알 수 있었다.
2. 제지sludge의 연소반응은 1차 반응이나 연소과정 중에 발생하는 연소가스와 회분층에 의해 반응 개시 1분을 기준으로 반응속도는 달라졌는데 이러한 사실로부터 제지sludge 연소반응의 경우 산소전달과정이 전체 연소반응을 율속함을 알 수 있었다.
3. 제지sludge 조각시 인위적으로 산소전달속도를 조절함으로써 연소속도를 조절할 수 있었으며 이러한 결과를 바탕으로 제지 혹은 유해 sludge의 가스화 가능성을 제시해 주었다.
4. 다량의 limestone을 함유한 제지sludge의 소성 반응시 소성 kinetics로부터 활성화 에너지를 구할 수 있었으며 유동층 반응기에서 소성반응이 일어날 경우 흡열 및 발열반응과 입자의 분급현상에 의해 완전혼합흐름 반응기의 거동에서 벗어남을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2003학년도 원광보건대학 학술연구비에 의하여 수행되었음을 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. U.S. EPA, Municipal Wastewater Sludge Combustion Technology, EPA/625/4-85/015,

- pp1~28, 1985.
2. Kawaguchi, M., J. Environ. Pollut. Contr.(Japan), 21, pp853~859, 1985.
3. Baeyens, J. and Geldart, D., Proc. 2nd Eng. Found. Conf., Cambridge, England, pp264~269, 1978.
4. Kudo, H. and Wade, G. L., Proc. 1st Korea-Japan Symp. on Fluidization, Seoul, Korea, pp54~65, 1987.
5. Purlong, D. A. and Wade, G. L., AIChE Symp. Series, No. 122, pp152~161, 1972.
6. Jones, J. L., Lewis, F. M. and Jacknow, J., Environ. Sci. Technol., 11, pp968~972, 1977.
7. Environment Administration, Korea Environmental Yearbook, Korea, pp80, 1988.
8. Bailie, R. C. and Burton III, R. S., AIChE Symp. Series, No. 122, pp1~151, 1972.
9. Gilbert, W. G., Evan III, F. L., Wall, H., Reardon, F. X. and Gowen, E. M., J. WPCF, 59, pp939~943, 1987.
10. Ho, T. C., Ku, P. and Hopper, J. R., Proc. of International Conference on Fluidization, Elsinor, Denmark, pp393~400, 1986.
11. Agarwal, P. K., Genetti, W. E. and Lee, Y. Y., Chem. Eng. Sci., Vol. 41, pp2373, 1986.
12. Lief Astrom and Steve Vayda, Proc. of Institute of Energy's 5th International Fluidized Combustion Conference, London, U.K., pp83~93, 1991.
13. Martin, W.J., U.S.Patent 3, 951,081, 1976.
14. Campbell, K. R., 2nd International Conference on Municipal Waste Combustion, Tamp, Florida, 1991.
15. 이제근, 이기호, 장정국, 임준혁, 임종성, 전해수, 화학공학, Vol. 30, pp499~508, 1992.
16. 이제근, 이기호, 이규현, 전해수, 화학공학, Vol. 28, pp470~479, 1990.
17. Lee, J., Lee, K. and Chun, H, J. of Chem. Eng. of Japan, Vol.25, pp179~182, 1993.
18. Dennis, J. S. and Hayhurst, A. N., "The Effect of CO₂ on the Kinetics and Extent of

- Limestone and Dolomite Particles in Fluidized Bed”, Chem. Eng. Sci., 42, pp2361, 1987.
19. Dutta, S. and Wen, C. Y., Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., 16, 31, 1977.
 20. Park, K. Y., Bak, T. C., Son, J. E. and Park, W. H., HWAHAK KONGHAK, 25, 345, 1987.
 21. Jacob, M. and Perlmutter, D. D., “An Equilibrium - Interface Model for Studies of Decomposition”, Chem. Eng. Sci., 35, 1645, 1980.
 22. Ingraham, T. R. and Marrier, P., “Kinetic Studies on the Thermal Deomposition of Calcium Carbonate”, Can. J. Chem. Eng. 41, 170, 1963.
 23. Kim, H. T., Stencel, J. M. and Byrd, J. R., “Limestone Calcination and Sulfation Microstructure, Porosity and Kinetics under AFBC Environments”.