



로타리킬른 소각로를 이용한 하수슬러지와 사업장폐기물의 혼합소각 특성

양동집, 고재철*, 김정근, 박희재**, 박준석***†

한국산업기술대학교 생명화학공학과, 한국산업기술대학교 청정공정&소재연구소*, 시흥환경기술개발센터**, 강원대학교 환경방재공학과***
(2009년 9월 15일 접수일, 2009년 9월 25일 수정일, 2009년 9월 28일 채택일)

Co-incineration Characteristics of Sewage Sludge and Industrial Waste Using the Rotary Kiln Incinerator

Dong-Jib Yang, Jae-Cheol Ko*, Jeong-Keun Kim, Hui-Jae Park**, Joon-Seok Park***†

Dept. of Chemical Eng. & Biotechnol., Korea Polytechnic University

Research Center for Clean Technology, Korea Polytechnic University*

Siheung Environmental Technology Development Center, Korea Polytechnic University**

Dept. of Env. Disaster Prevention Eng., Kangwon National University***

ABSTRACT

This research were performed to evaluate co-incineration characteristics of sewage sludge and industrial waste in rotary kiln incinerator, and provide the fundamental data. Plastic portion (42.55%) in this industrial waste showed over 3 times higher than that (11.92%) of paper. Korean proximate analysis of the waste mixed with sewage sludge and industrial waste (3 : 7, volumetric basis) showed 16.3% of moisture, 70.5% of volatile solids, and 13.2% of ash, respectively. Low heating value of the mixed waste was 4,513kcal/kg. So it was thought that the mixed waste of sewage sludge and industrial waste (containing 43% of plastics and 12% papers) has enough heating value for co-incineration. The incineration of mixed waste showed the lowest SO_x and NO_x concentrations at 700°C. However, the operation at 950°C was feasible in considering dioxin and the other hazardous gases. It was concluded that use of Ca(OH)₂ should be under investigation for the operation at 950°C.

Keywords : Sewage sludge, Industrial waste, Co-incineration, Rotary kiln

초록

본 연구에서는 하수슬러지와 사업장폐기물의 혼합소각을 위한 폐기물특성 및 운전특성을 살펴보고 향후 하수슬

†Corresponding author : wan5155@kangwon.ac.kr

리지와 사업장폐기물의 혼합소각에 관한 기초자료를 제시하고자 하였다. 본 사업장폐기물은 플라스틱류가 42.55%로 종이류(11.92%) 보다 3배 이상의 조성을 나타내었다. 하수슬러지와 사업장폐기물을 부피비로 3 : 7로 혼합한 폐기물의 삼성분은 수분함량이 16.3%, 가연분과 회분 함량은 각각 70.5%와 13.2%을 나타내었으며, 습윤저위발열량도 4,513kcal/kg으로 함수율 15%인 하수슬러지와 사업장폐기물(플라스틱류 약 43% 및 종이류 약 12% 함유)의 3 : 7 혼합소각이 가능할 것으로 예상된다. 혼합폐기물을 700℃로 소각할 경우 SO_x와 NO_x 농도는 최소화할 수 있었으나 다이옥신 등 유해가스 발생면에서 볼 때 950℃로 소각하는 것이 더 바람직할 것으로 사료되며, 이를 위해서는 Ca(OH)₂의 적정사용이 검토되어야 할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 하수슬러지, 사업장폐기물, 혼합소각, 로타리킬른

1. 서론

인구증가 및 생활수준의 향상, 그리고 경제발전 등으로 인하여 생활하수의 발생량은 지속적으로 증가하게 되었으며, 이를 처리하기 위한 하수처리시설도 점진적으로 확충되어 2002년 207개이던 하수처리시설은 2007년말 현재 357개로 증가하였다¹⁾. 이에 따라 하수슬러지 발생량도 점차 증가하여 2007년말 현재 하수슬러지 발생량은 약 2,744천톤/년으로 2002년의 2,073천톤/년보다 약 30%가 증가하였으며²⁾, 해마다 몇 십만 톤씩 증가하고 있는 실정이다. 2007년말 기준으로 전국의 하수슬러지 처리현황을 살펴보면 총발생량 약 2,744천톤/년 중에서 해양매출로 처리되는 양이 약 1,868천톤(68.1%)으로 가장 높게 나타나, 오는 2012년부터 '런던협약 96의정서'가 발효됨에 따라 하수슬러지 해양배출 전면금지에 따른 대책마련이 시급한 것으로 나타났다. 이 밖에 13.9%가 재활용되었으며, 나머지는 소각(12.8%), 육상매립(3.9%), 그리고 기타 방식(1.2%)으로 처리되었다. 우리나라에서는 2003년 7월부터 유기성 슬러지류의 직매립이 금지되었음에도 불구하고 여전히 4% 정도가 육상매립되고 있었다²⁾. 그러나 향후 해양배출 및 유기성 슬러지류의 직매립에 대한 규제가 점점 더 강화함에 따라 재활용과 소각의 비율은 더욱 증가할 것으로 기대된다³⁾.

하수슬러지는 사업장폐기물 배출량의 약 20%를 점유할 정도로 많은 양이 발생한다. 국내·외에서는 하수슬러지의 안정화, 감량화, 자원화를 통하여 고유가 및 기후변화에 적극대응하고, 런던협약 등에 따른 해양투

기 금지에 대처하기 위하여 효율적인 처리 시스템으로 화력발전소의 연료화, 생활폐기물과 혼합소각 등의 방법이 활발히 연구되고 있다⁴⁾. 하수슬러지의 혼합소각에 대한 연구를 살펴보면 Ninomiya(2004)와 Fernandez(2002, 2005)는 하수슬러지와 석탄연료를 혼합연소하는 동안 생성되는 입자상 물질의 배출특성과 물질 내 함유되어 있는 중금속의 특성, 그리고 석탄연료 단독연소 및 하수슬러지 혼합연소시 발생하는 미세입자의 인체위해성 여부에 대한 임상실험을 연구하였다. Nadziakiewicz와 Koziol(2003)은 함수율이 높은 슬러지를 석탄과 혼합연소할 경우 슬러지가 가지고 있는 위해성 물질을 효율적으로 저감시킬 수 있다고 하였다. Laursen과 Grace(2002)는 biomass와 석탄의 혼합연소 모의실험을 통하여 수분함량 변화는 연료의 착화에 있어 큰 문제가 없으나 높은 함수율은 불완전연소의 원인이 될 수 있다고 하였다. 현재 우리나라에서는 대부분 하수슬러지를 생활폐기물과 혼합하여 소각하는 연구를 진행하여 왔으나, 사업장폐기물과 혼합소각하는 연구는 아직까지 부진한 실정이다. 현재 국내에서 혼합소각로가 운영되고 있는 지자체는 5곳으로서 하수슬러지와 생활폐기물을 혼합소각하고 있으며, 소각로 형태는 주로 스토카식(4곳)과 유동상식(1곳)으로 운영되고 있다.

본 연구는 국내에서는 처음으로 시도된 것으로써 하수슬러지와 사업장폐기물의 혼합소각을 위한 폐기물 특성 및 운전특성을 살펴보고 향후 하수슬러지와 사업장폐기물의 혼합소각에 관한 기초자료를 제시하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1 소각시설

본 연구를 위한 소각시설은 산업생산 과정에서 발생되는 플라스틱 등의 사업장폐기물을 주로 소각처리하는 반월·시화산업단지내 G소각장의 로타리킬른(Rotary Kiln)을 대상으로 하였다. [Fig. 1]은 소각시설의 처리공정도를 나타낸 것이다. 본 소각시설은 처리용량이 100ton/day이며, 폐플라스틱류, 폐목재류, 폐지류 등 사업장폐기물을 처리하는 것으로 설계되어 있다. 주요 대기오염 방지시설로는 반건식반응탑(SDR, 52,754 Nm³/hr), 가스반응탑(GR, 6,500Nm³/hr), 여과집진기(BF, 69,818Nm³/hr) 및 촉매반응탑(SCR, 59,590Nm³/hr) 등이 설치되어 있다.

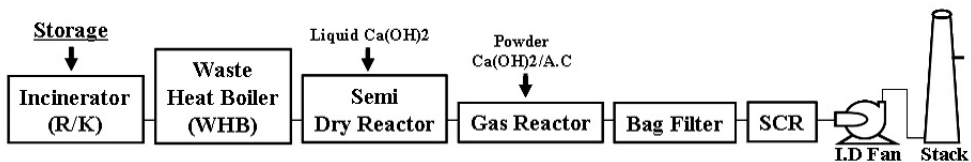
2.2 운전조건 및 분석방법

탈수슬러지의 수분함량을 30% 전후로 건조시킨 슬러지를 쓰레기와 혼합소각하는 경우 공급법은 상당히 용이하게 된다. 슬러지와 쓰레기의 혼합소각비는 주로 탈수슬러지의 수분과 쓰레기 질에 따라 달라지지만 쓰레기 양의 10% 정도인 예가 많다. 특히 스토카로에서 탈수슬러지를 쓰레기와 혼합소각하는 경우 쓰레기에 대한 건조슬러지의 혼합소각비가 10%정도이면 큰 무리가 없는 것으로 알려져 있다¹¹⁾.

본 연구대상인 G소각장에는 인근의 하수처리장에서 발생하는 하수슬러지를 건조시설에서 함수율 15%로 건조처리한 후에 유입하고 있다. 이는 배(2001)¹¹⁾의 연구에서 나타난 바와 같이 수분함량 30% 이하이므로 운반 및 정량공급 수단에 있어서 큰 무리가 없을 것

로 판단된다. G소각장에 유입되는 사업장폐기물의 일반적 특성을 분석하기 위하여 저장호퍼에서 3차례 시료를 채취한 후 원추4분법을 이용하여 분석용 시료를 제조하였다. 본 연구에서는 함수율 15%인 건조 하수슬러지에 사업장폐기물을 부피비로 3 : 7로 혼합하여 실규모로 소각시킨 후 운전특성을 살펴보았다. 혼합비를 3 : 7로 설정한 것은 유입되는 건조 하수슬러지의 수분함량이 15%로 배(2001)가 제시하는 30%보다 낮았고, 본 연구에 사용되는 폐기물 또한 생활폐기물이 아닌 이보다 발열량이 좀 더 높은 사업장폐기물이었기 때문에 일반적인 혼합비인 10%보다 높은 30%로 설정하였다.

하수슬러지, 사업장폐기물 및 혼합시료의 일정량을 채취하여 폐기물공정시험법¹⁴⁾에 따라 삼성분을 분석하였다. 시료의 화학적 특성을 분석하기 위하여 자동원소분석기(Automatic elemental analyzer, Thermofinnigan-FlashEA1112, Italy)를 이용하여 C, H, O, N, S에 대하여 원소분석을 하였다. 단열열량계(Parr 6100 Calorimeter, Parr, USA)를 이용하여 건조고위발열량을 측정하였으며, 삼성분을 이용하여 습윤저위발열량을 계산하였다. 로타리킬른에서 하수슬러지와 사업장폐기물의 혼합소각시 배출되는 배기가스 농도는 대기오염공정시험법에 따라 시료채취장치(stack sampler, M-5, KNJ Co. Ltd., Japan) 흡입관을 시료채취 위치 내부에 삽입하고 등속 흡인시켜 분광광도계(UV-Vis Spectrophotometer, UV-3600, Shimadzu, Japan) 및 자동측정기(E-Coms combustion analyzer, E-Coms Plus, USA)를 이용하여 측정하였다.



[Fig. 1] Schematic diagram of incinerator system.

3. 결과 및 고찰

3.1 사업장폐기물의 물리적 특성

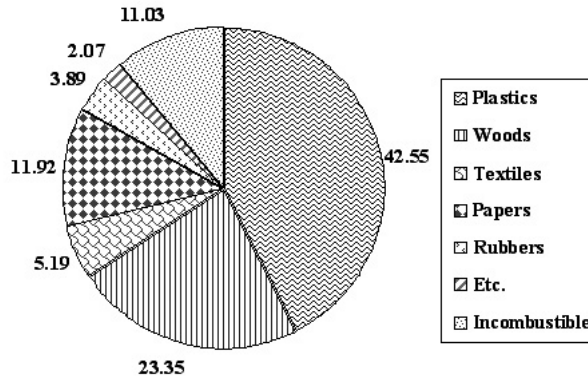
혼합소각을 위한 사업장폐기물은 반월·시화 산업단지내에서 발생하는 것으로 1개월 간격으로 3차에 걸쳐서 물리적 조성비를 조사하였으며 [Table 1], 그 평균값을 [Fig. 2]에 나타내었다. 가연성은 평균 88.97%로 플라스틱류가 42.55%, 목재류가 23.35%, 종이류가 11.92%로 반입 사업장폐기물 중 대부분을 차지하고 있었으며, 불연성은 11.03%로 도자기류 4.67%, 유리류 3.88%, 금속류 1.98% 등으로 나타났다. 사업장폐기물과 하수슬러지의 겉보기밀도는 약 0.13ton/m³과 약 1.21ton/m³으로 나타났다. 하수슬러지의 겉보기밀도가 높은 것은 하수처리장의 공정특성이 하수뿐만 아니라 산업단지내의 폐수, 분뇨탈수액 및 음식물침출수 등을 복합처리하기 때문에 처리공정에서 사용하는 응집제 등에 의하여 슬러지의 점성이 변하면서 슬러지가 덩어리 형상이 되기 때문인 것으로 판단된다.

[Table 1]은 G소각장에 반입되는 사업장폐기물을 수

도권매립지 반입 생활폐기물¹⁵⁾ 및 충청북도 J시 생활폐기물¹⁶⁾의 물리적 조성과 비교하여 나타낸 것이다. 본 연구에 사용된 사업장폐기물은 사업장에서 발생하는 일반폐기물로 지정폐기물은 함유되어 있지 않다. 본 사업장폐기물의 조성을 생활폐기물과 비교하면 음식물류폐기물의 반입이 전혀 없었다. 본 사업장폐기물의 조성은 플라스틱류가 42.55%로 종이류(11.92%) 보다 3배 이상의 조성을 나타내어, 생활폐기물에서는 종이류가 플라스틱류 보다 높은 것과는 다소 대조적이었다. 수도권매립지 반입 생활폐기물 중 종이류는 28.7%로 플라스틱류 16.5% 보다 약 1.7배의 조성을 나타내었다. 그러나 비교에 사용된 수도권매립지 성장자료는 2000년에 발표된 자료를 인용한 것으로 직매립급지가 본격적으로 실시된 2005년 이후의 특성을 제대로 반영하지 못한다. 그러므로 인구 14만명의 충청북도 J시의 자료를 추가로 참조하였다. J시에서는 직매립급지가 시행되기 이전에는 음식물류폐기물이 34.1%로 높았으나 직매립급지가 안정화에 이른 2007년에는 5.5%로 급격히 감소하였다. 따라서 상대적으로 음식

[Table 1] Physical Component of Industrial Waste Collected in G Rotary Kiln Incinerator (Unit : wt %)

Component		G Rotary Kiln Incinerator				Sudokwon Landfill Site ¹⁴⁾	J City Chungbuk ¹⁵⁾	
		1st	2nd	3rd	Average		2004	2007
Combustible (Organic)	Food Waste	-	-	-	-	32.1	34.1	5.5
	Plastic	43.28	43.22	41.15	42.55	16.5	14.8	22.6
	Wood	27.11	19.19	23.74	23.35	1.6	1.3	1.4
	Textile	6.72	6.09	2.77	5.19	4.9	1.9	4.7
	Paper	8.46	15.69	1.61	11.92	28.7	27.9	50.6
	Rubber/Leather	5.47	1.58	4.62	3.89	3.6	0.7	3.1
	Etc.	3.98	0.79	1.45	2.07	-	-	-
	subtotal	91.04	86.56	75.34	88.97	90.6	80.5	87.9
Incombustible (Inorganic)	Metal	0.50	1.69	3.75	1.98	1.9	1.6	1.5
	Glass	4.23	5.19	2.19	3.88	5.9	5.1	5.5
	Ceramic	0.00	5.42	8.60	4.67	-	-	-
	Etc.	0.25	1.13	0.12	0.50	1.6	-	-
	subtotal	4.98	13.43	14.66	11.03	9.4	6.7	7.0
Miscellaneous		-	-	-	-	-	12.8	5.1
Total		100.00	100.00	100.00	100.00	100	100	100



[Fig. 2] Average physical component of industrial waste collected in G rotary kiln incinerator (Unit : wt %).

물류폐기물 이외의 가연성물질 함량이 증가하였는데 특히 종이류는 27.9%에서 50.6%로 크게 증가하였으며, 플라스틱류도 16.5%에서 22.6%로 증가하였다. 결과적으로 본 사업장폐기물은 일반 사업장폐기물로서 직매립금지 조치 이후의 생활폐기물과 크게 다르지 않았으나 일반적인 생활폐기물 조성과 비교할 때 플라스틱류가 종이류 보다 더 높은 비율을 차지하고 있었다.

3.2 삼성분

하수슬러지, 사업장폐기물, 그리고 혼합폐기물의 삼성분 분석결과를 [Table 2]에 나타내었다. 하수슬러지는 수분, 가연분, 그리고 회분 함량이 각각 15.0%, 62.4%, 22.6%를 나타내었으며, 사업장폐기물은 16.8%, 74.0%, 그리고 9.2%를 나타내었다. 하수슬러지와 사업장폐기물을 부피비로 3 : 7로 혼합한 폐기물의 삼성분은 수분함량이 16.3%, 가연분과 회분 함량은 각각 70.5%와 13.2%이었다. 직매립금지 시행 이전의

수도권매립지 반입 생활폐기물의 삼성분은 수분, 가연분, 그리고 회분 함량이 37.1%, 46.8%, 16.1%로 수분함량이 높게 나타났다¹⁵⁾. J시의 경우 본격적인 직매립금지 이전인 2004년에는 수분이 46.4%로 높게 나타났으나 직매립금지 이후인 2007년에는 15.9%로 급격히 감소하였다¹⁶⁾. 이는 직매립금지 이후 수분함량이 높은 음식물류폐기물 조성비가 크게 감소하였기 때문으로 판단된다. 본 연구에 사용된 하수슬러지와 사업장폐기물 혼합시료의 삼성분은 직매립금지 이후인 2007년 J시 생활폐기물의 삼성분과 비교할 때 크게 차이가 없는 것으로 나타났다.

3.3 원소조성 및 발열량

원소분석은 발열량을 계산하고 소각시 공급공기량 및 연소공기량, 오염물질 농도를 예측하여 팬이나 덕트 등의 대기오염물질의 제어 등에 필요하다. 일반적으로 탄소와 수소의 함량이 높을수록 폐기물의 질이 좋다고

[Table 2] Korean Proximate Analysis for Co-incineration of Sewage Sludge, Industrial Waste, and Mixed Waste (Unit : wt %)

Korean Proximate Analysis	Sewage Sludge	Industrial Waste	Mixed Waste	Sudokwon Landfill Site ¹⁴⁾	J City, Chungbuk ¹⁵⁾	
					2004	2007
Water	15.00	16.84	16.29	37.1	46.4	15.9
Volatile Solids	62.39	73.99	70.51	46.8	45.1	65.7
Ash	22.61	9.17	13.20	16.1	8.5	18.6

할 수 있다. 본 연구의 시료에 대한 원소분석 결과를 [Table 3]에 나타내었다. 하수슬러지의 C 함량은 건조 질량 기준으로 35.10%를 나타내었으며, 55.47%인 사업장폐기물과 혼합한 폐기물에서는 54.32%를 나타내었다. 또한 하수슬러지의 H 함량은 5.56%로 사업장폐기물의 8.04%보다 다소 낮았으며, 혼합 폐기물의 H 함량은 7.28%로 나타났다. 본 연구대상의 원소분석 결과를 다른 지역의 생활폐기물 원소조성과 비교하였다. 수도권매립지 반입 생활폐기물은 직매립금지 실시 이전의 분석자료이며¹⁵⁾, 직매립금지 이후의 분석자료인 충청북도 J시의 경우 전체 생활폐기물의 원소조성이 제시되어 있지 않아서 2007년에 조사된 강원도 T시¹⁷⁾의 자료를 참조하였다. 하수슬러지의 C 함량은 35.1%로 직매립금지 실시 전후의 생활폐기물 등과 비교할 때 상대적으로 낮았다. 본 사업장폐기물의 C 함량은 55.47%로 직매립금지 실시 이전 수도권매립지 반입 생활폐기물의 47.5%와 직매립금지 이후인 T시의 51.38% 보다 높게 나타났으며, 이는 이들 생활폐기물에 비하여 발열량이 높은 플라스틱류의 조성이 높았기

때문으로 사료된다. 하수슬러지와 사업장폐기물을 혼합한 폐기물의 C 및 H 함량은 각각 54.32%와 7.28%로 T시 생활폐기물의 51.38%와 6.34%와 비교할 때 큰 차이가 없어 적정 발열량을 나타낼 수 있을 것으로 판단되었다.

본 연구에 사용된 건조하수슬러지의 건조고위발열량과 습윤저위발열량은 각각 2,978와 1,517 kcal/kg을 나타내었다[Table 4]. 습윤저위발열량이 일반적인 하수슬러지 보다 높게 나타난 것은 수분함량이 15%로 비교적 낮았기 때문으로 판단된다. 환경부에서는 하수슬러지의 연료화에 필요한 열량을 2,000 kcal/kg으로 규정하고 있다¹⁾. 일반적으로 하수처리장에서 발생하는 슬러지의 경우 건조질량기준 고위발열량이 약 2,500~4,500 kcal/kg이 되지만, 75~85%의 높은 함수율을 지니고 있기 때문에 저위발열량은 100~300kcal/kg으로 상당히 낮아지게 된다. 저위발열량이 낮은 물질을 보조연료 없이 연소시키기에 가장 적합한 것으로 알려져 있는 유동층 소각로일 경우에도 대상물질의 저위발열량은 최소한 700 kcal/kg 이상이 되어야

[Table 3] Chemical Composition of Sewage Sludge, Industrial Waste, and Mixed Waste (Unit : wt%)

Component	Sewage Sludge	Industrial Waste	Mixed Waste	Sudokwon Landfill Site ¹⁴⁾	T city, Kangwon ¹⁶⁾
C	35.10	55.47	54.32	47.5	51.38
H	5.56	8.04	7.2	87.6	6.34
O	27.92	15.51	15.99	17.7	26.72
N	5.17	0.53	1.27	1.5	1.05
S	2.24	0.48	0.64	0.2	0.21
Cl	1.40	1.67	1.65	-	0.46
Ash	22.60	18.3	18.85	-	13.84

[Table 4] Energy Content of Sewage Sludge, Industrial Waste, and Mixed Waste (Unit : kcal/kg)

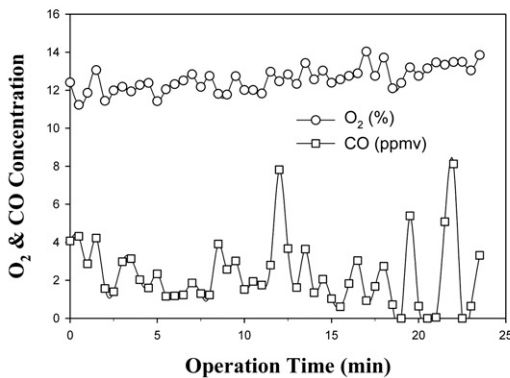
Component	Sewage Sludge	Industrial Waste	Mixed Waste	Sudokwon Landfill Site ¹⁴⁾	T city, Kangwon ¹⁶⁾
HHV ^{a)} (dry basis)	2,978	6,278	6,178	4,692	5,242
LHV ^{b)} (wet basis)	1,517	4,587	4,513	2,293	2,704

^{a)} High heating value by bomb calorimeter; ^{b)} Low heating value

한다¹¹⁾. 하수슬러지를 폐유와 혼합소각한 최 등(1994)의 연구에서 사용된 함수율 약 21%인 소화하수슬러지와 함수율 77%인 탈수슬러지의 발열량은 각각 약 1,370와 1,730 kcal/kg을 나타내었다. 플라스틱류 함유량이 높은 본 사업장폐기물의 건조고위발열량과 습윤저위발열량은 각각 6,278과 4,587 kcal/kg을 나타내었으며, 혼합폐기물에서는 각각 6,178과 4,513 kcal/kg을 나타내었다. 따라서 저위발열량 기준으로 볼 때 함수율 15%인 하수슬러지와 사업장폐기물을 부피비 3 : 7로 혼합소각하는 것이 가능할 것으로 판단된다. 유동층 소각로의 경우에는 40%까지 슬러지를 생활폐기물과 혼합소각할 수 있는 것으로 알려져 있지만, 국내의 혼합소각로는 대부분 스토카 소각로이며, 생활폐기물 스토카 소각로에서의 슬러지 혼합비율이 30% 이상 할 수 있으나, 기술적인 문제로 국내외에서는 일반적으로 5~10%의 범위에서 혼합소각을 실시하고 있는 것으로 알려져 있다.

3.4 혼합소각 운전특성

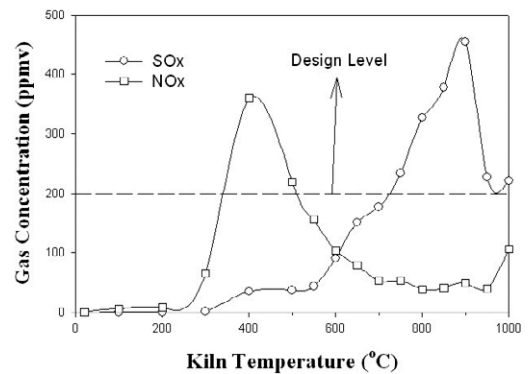
로타리킬른을 이용하여 하수슬러지와 사업장폐기물을 3 : 7로 혼합소각 운전시 표준산소농도에 따른 CO 농도변화를 24시간 모니터링한 결과를 [Fig. 3]에 나타내었다. 이 때의 운전온도는 설계치인 950℃로 하였으며, 표준산소 농도는 평균 12.6%범위를 유지하였다. 배출되는 CO의 평균농도는 약 2.23ppmv으로 배출허



[Fig. 3] Variation of O₂ and CO concentrations from rotary kiln incinerator system with operation time.

용기준 농도인 50ppmv를 지속적으로 만족시키는 것으로 나타났다.

하수슬러지와 사업장폐기물을 3 : 7로 혼합소각 운전시 운전온도에 따른 SO_x와 NO_x의 거동을 [Fig. 4]에 나타내었다. 로타리킬른의 SO_x, NO_x 농도만을 고려하여 운전설계기준이 200ppmv인 것으로만 판단할 때 적정 운전온도는 700℃ 부근일 것으로 사료되지만 SO_x, NO_x 농도만으로 적정 운전온도를 판단하는 것은 바람직하지 못하다. 온도가 낮아질 경우 다이옥신을 포함한 유해가스의 농도가 높아질 우려가 있으며, 특히 본 사업장폐기물은 플라스틱함량이 높은 것으로 나타나 추후 이에 대한 추가적인 검토가 필요할 것으로 판단된다. 본 연구에서 로타리킬른 설계온도인 950℃로 운전할 경우 SO_x의 농도가 설계기준 이상으로 높게 나와 이에 대한 대책이 필요한 것으로 나타났다. 이처럼 SO_x의 농도가 높게 나타나는 것은 연료 중의 황 함량과 상관관계가 크며, 본 연구에서 하수슬러지의 경우 황함량이 2.24%로 높아서 사업장폐기물과의 혼합폐기물에서도 0.64%로 수도권매립지 반입 생활폐기물 및 T시 생활폐기물의 약 0.2%보다 3배 정도 높았기 때문에 판단된다. 이(2005)¹⁹⁾는 하수슬러지와 생활폐기물을 혼합소각시의 경우에 슬러지 중의 황함량이 생활폐기물의 경우보다 훨씬 높기 때문에 소각로의 형태에 관계없이 슬러지의 혼합소각율이 증가할수록 SO_x의 농도가 급격히 증가하게 되므로 슬러지에 칼슘

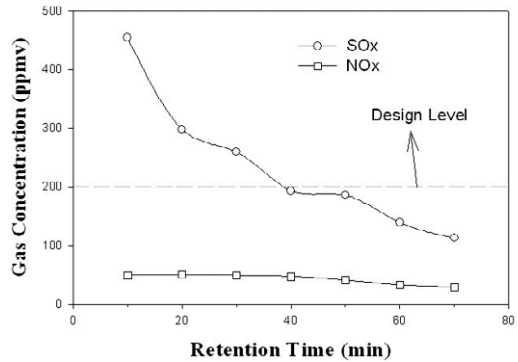


[Fig. 4] Variation of SO_x and NO_x concentrations from incinerator system with kiln temperature.

계의 흡수제를 첨가시킴에 따라 소각로 내부에서 효과적으로 SOx를 제어할 수 있었다고 하였다. 배(2006)¹²⁾는 슬러지와 흡수제를 혼합하는 것보다 슬러지 펠렛에 흡수제를 코팅하는 방법이 효과적인 것으로 나타났으며, Ca(OH)₂가 고온에서 CaO로 변환될 때 흡수제의 표면적이 커지게 되므로 처음부터 CaO를 사용하는 경우보다 SO₂의 제거율이 높게 나타나 SO₂ 배출을 80%까지 저감시킬 수 있었다고 하였다. 본 연구의 로타리킬른을 설계온도 범위인 950℃에서 운전할 경우 Ca(OH)₂의 적정사용 조건을 조절하여 SOx 농도를 설계기준 이내로 조절할 수 있을 것으로 사료되며, 향후 이에 대한 실증 연구가 더 필요한 것으로 판단된다.

로타리킬른의 체류시간에 따른 SOx와 NOx의 거동을 [Fig. 5]에 나타내었다. 로내의 폐기물 체류시간이 50분(0.12rpm) 이상으로 운전할 때에 SOx와 NOx의 농도가 안정적으로 설계기준 이내로 만족시킬 수 있는 것으로 나타났다.

[Table 5]는 로타리킬른의 평균 체류시간에 따른 가공정의 온도 및 압력변화를 나타낸 것이다. 킬른의 평균 회전속도와 체류시간은 각각 0.12rpm과 50분이었으며, 로타리킬른의 입구온도는 703.75℃, 반건식반응탑(SDR)의 출구온도는 180.79℃, 백필터의 입구 및 출구 온도는 182.52℃와 161.92℃로 나타났다. 로타리킬른의 압력 및 백필터의 차압은 평균적으로 각각 -4.32mmH₂O와 180.04mmH₂O로 나타났으며, 소각로의 24시간 연속운전 동안에 발생하는 문제점은 발견되지 않았다.



[Fig. 5] Variation of SOx and NOx concentrations from incinerator system with kiln retention time.

4. 결론

본 연구는 하수슬러지와 사업장폐기물의 혼합소각을 위한 폐기물특성 및 운전특성을 살펴보고 향후 하수슬러지와 사업장폐기물의 혼합소각에 관한 기초자료를 제시하고자 하였으며, 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 본 사업장폐기물의 조성은 플라스틱류가 42.55%로 종이류(11.92%) 보다 3배 이상의 조성을 나타내었으며, 하수슬러지와 사업장폐기물 혼합폐기물(부피비 3 : 7)의 삼성분은 수분함량이 16.3%, 가연분과 회분 함량은 각각 70.5%와 13.2%로 음식물류폐기물 직매립금지 이후 생활폐기물의 삼성분과 비교할 때 크게 차이가 없었다.
2. 하수슬러지와 사업장폐기물을 혼합한 폐기물의 C

[Table 5] Operational Factor and Combustion Temperature in Incineration System

Item	Retention Time (min)	Rotary Kiln			SDR ^{a)} T _{out} (°C)	Bag Filter		
		T _{in} (°C)	T _{out} (°C)	Pressure (mmH ₂ O)		T _{in} (°C)	T _{out} (°C)	Pressure (mmH ₂ O)
Maximum	25	756.60	993.06	-2.55	185.24	191.49	170.66	201.03
Minimum	86	618.06	887.85	-5.32	173.52	176.22	152.95	144.68
Average	50	703.75	946.37	-4.32	180.79	182.52	161.96	180.04

^{a)} SDR : Semi Dry Reactor

및 H 함량은 각각 54.32%와 7.28%로 높게 나타나 적정 발열량을 나타낼 수 있을 것으로 판단되며, 습윤저위발열량도 4,513kcal/kg으로 높게 나타나 함수율 15%인 하수슬러지와 사업장폐기물(플라스틱류 약 43% 및 종이류 약 12% 함유)의 3:7 혼합소각이 가능할 것으로 예상된다.

3. 혼합폐기물을 700℃로 소각할 경우 SO_x와 NO_x 농도는 최소화할 수 있었으나 다이옥신 등 유해가스 발생면에서 볼 때 950℃로 소각하는 것이 더 바람직할 것으로 사료되며, 이를 위해서는 Ca(OH)₂의 적정사용이 검토되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 배재근, "하수슬러지의 자원화 현황 및 전망", 유기물자원화, 8(3), pp. 7~29 (2000).
2. 환경부, "하수도통계", pp. 3~17 (2008).
3. 환경부, "하수슬러지관리 종합대책", pp. 1~13 (2008).
4. 환경부 자원순환국 폐자원에너지팀, "하수슬러지 에너지화 추진계획", pp. 1~11 (2009).
5. Ninomiya, Y., "Transformation of mineral and emission of particulate matters during co-combustion of coal with sewage sludge", Fuel, 83, pp. 751~764 (2004).
6. Fernandez, A., "Resuspension of coal and coal/municipal sewage sludge combustion generated fine particles for inhalation health effects studies", The Science of the Total Environment, 287, pp. 265~274 (2002).
7. Fernandez, A., "Health effects engineering of coal and biomass combustion particulates", Fuel, 85, pp. 1320~1327 (2005).
8. Nadziakiewicz, J. and Koziol, M., "Co-combustion of sludge with coal", Applied Energy, 75(3~4), pp. 239~248 (2003).
9. Laursen, K. and Grace, J. R., "Some implications

of co-combustion of biomass and coal in a fluidized bed boiler", Fuel Processing Technology, 76, pp. 77~89 (2002).

10. 박기혁, 최인호, 김인탁, 서영훈, 한정대, 김인규, 원창준, 어수갑, "굴뚝 CleanSYS(굴뚝원격감시체계)를 통한 생활폐기물과 하수슬러지의 혼합소각 운영현황", 한국대기환경학회 2007 추계학술대회 논문집, pp. 427~428 (2007).
11. 배성근, "도시쓰레기와 하수슬러지의 혼합소각기술", 한국폐기물학회지, 18(3), pp. 39~48 (2001).
12. 배성근, "생활폐기물과 하수슬러지의 혼합소각기술 동향", 유기물자원화, 14(1), pp. 62~71 (2006).
13. 환경부, "생활폐기물 소각시설에서의 하수슬러지 혼합소각 지침", pp. 9~16 (2007).
14. 환경부, "폐기물공정시험방법", pp. 106~107 (2004).
15. 이준홍, 문동호, 김재원, "수도권 매립지에 반입되는 쓰레기의 성상 및 물리·화학적 특성", 한국폐기물학회지, 17(3), pp. 363~369 (2000).
16. 윤석표, "음식물 폐기물 정책 변화가 도시생활폐기물의 조성변화에 미치는 영향", 유기물자원화, 16(1), pp. 39~45 (2008).
17. 벽산엔지니어링(주), "태백시 생활폐기물 소각시설 설치사업에 따른 폐기물 성상조사", pp. 61~66 (2007).
18. 최용준, 김우현, 장정국, 이제근, "유동층 소각로에서 폐유-하수슬러지의 혼합소각특성", 1994년 대한환경공학회 추계학술연구발표회논문초록집, pp. 141~144 (1994).
19. 환경부, "도시쓰레기와 유기성슬러지의 혼합·소각 공정 및 장치 상용화 개발", pp. 128~130 (2006).
20. 이호수, "하수슬러지 펠렛과 가연성폐기물의 혼합연소특성에 관한 연구", 창원대학교 박사학위논문, pp. 82~113 (2005). 