

# 석탄과 슬러지의 예혼합연소에 따른 산성가스 배출특성 Characteristics of Acidic Gas Emissions from Combustion with Preblending of Coal and Sludge

심성훈 · 정상현 · 민효기\* · 이상섭\*<sup>†</sup>

Sung-Hoon Shim · Sang-Hyun Jeong · Hyo-Ki Min\* · Sang-Sup Lee\*<sup>†</sup>

한국기계연구원 환경에너지연구본부 · \*충북대학교 환경공학과

Environmental and Energy Research Division, Korea Institute of Machinery & Materials

\*Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University

(2013년 2월 6일 접수, 2014년 1월 20일 채택)

**Abstract :** Using dried sludge as a secondary fuel of a coal-fired power plant is proposed as an alternative option for sludge disposal. Because elemental contents of sludge are different from those of coal, different levels of acidic gas emissions are expected from the co-combustion of sludge with coal. In this study, sludge samples were obtained from 7 sewage treatment plants in Korea. Each sludge sample was combusted together with coal in a lab-scale combustor, and the concentrations of nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>), sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>), hydrogen chloride (HCl), chlorine (Cl<sub>2</sub>) in the flue gas were analyzed. Compared to the combustion of coal only, NO<sub>x</sub> concentration was slightly higher in the flue gas from the co-combustion of coal and sludge. SO<sub>2</sub> emission increased with the combustion of sludge due to the higher content of sulfur in sludge than in coal. For most of the tested samples, the concentrations of HCl and Cl<sub>2</sub> were varied depending on the chlorine content in the sludge sample.

**Key Words :** Coal, Sludge, Renewable Fuel, Combustion, Acidic Gas

**요약 :** 하수슬러지의 해양투기 규제에 따른 처리대안으로 석탄화력발전소 보조연료로서의 활용이 제안되고 있다. 슬러지를 석탄과 혼합하여 사용한다면 연료의 조성변화로 인하여 산성가스의 배출특성이 달라질 것으로 예상된다. 본 연구에서는 국내 하수처리장 7곳에서 발생한 하수슬러지를 수거하여 석탄과 혼합한 뒤 실험실 규모의 연소로에서 연소시킨 후 배출되는 질소산화물(NO<sub>x</sub>), 이산화황(SO<sub>2</sub>), 염화수소(HCl), 염소(Cl<sub>2</sub>) 가스를 분석하였다. NO<sub>x</sub>는 슬러지 혼합에 따른 배출농도 변화가 가장 작았고, SO<sub>2</sub>는 슬러지를 혼합하여 연소하였을 때 석탄 연소가스과 비교하여 높은 배출농도 증가를 보였다. HCl + Cl<sub>2</sub>는 슬러지의 염소함량에 따라 서로 다른 배출농도를 보였다.

**주제어 :** 석탄, 슬러지, 재생연료, 연소, 산성가스

## 1. 서론

환경부에서 통계된 하수슬러지의 발생량을 살펴보면 2001년에는 1,902,410톤의 하수슬러지가 발생하였으나 매년 꾸준히 증가하여 2010년 하수슬러지의 발생량은 3,080,043톤에 이른다.<sup>1)</sup> 또한 1997년 매립이 금지된 이후 해양투기에 주로 의존하여 하수슬러지를 처리하여 왔으나, 2012년 하수슬러지의 해양투기를 금지하는 법안인 런던협약이 발효됨에 따라 하수슬러지의 적합한 처리 대안이 요구되고 있다. 하수슬러지는 80% 가량의 높은 수분함량을 가지고 있으나, 적절한 전처리를 통해 건조시키면 3,000~4,500 kcal/kg의 발열량을 가지게 되어, 기존 석탄화력발전소의 보조연료로서 활용이 가능하다.<sup>2,3)</sup> 건조한 하수슬러지를 보조연료로 활용한다면 하수슬러지의 근본적인 처리뿐만 아니라 하수슬러지를 에너지원으로 활용하는 이점이 있다.

화력발전소에서 석탄의 연소과정을 거친 후에는 여러 유해가스가 발생한다. 유해가스의 대표적인 예로 이산화황(SO<sub>2</sub>), 질소산화물(NO<sub>x</sub>), 염화수소(HCl) 등의 산성가스를 들 수 있

는데, SO<sub>2</sub>와 HCl은 석탄에 존재하는 황(S)과 염소(Cl) 성분이 산소(O<sub>2</sub>) 및 수소(H)와 각각 반응하여 생성된다. NO<sub>x</sub>는 석탄에 존재하는 질소(N)가 산화되어 생성되기도 하지만, 고온의 연소과정에서 공기 중의 질소와 산소가 반응하여 발생하기도 한다. 따라서 연료의 성분함량이 산성가스 배출량을 결정하는 중요한 인자가 되므로, 슬러지를 보조연료로 석탄과 혼합하여 사용한다면 연료의 조성변화로 인하여 산성가스의 배출특성이 변할 수 있다. 문헌에 보고된 슬러지 성분함량의 결과들을 보면 슬러지의 질소함량은 석탄에 비하여 2~3배 높은 것으로 나타나있다.<sup>4,5)</sup> 반면에 석탄의 황함량은 석탄종, 원산지, 수분함량, 전처리 여부 등에 따라 대략 0.1~2.0%로 다양하게 분포되어 있고, 건조슬러지의 황함량은 석탄의 범위를 크게 벗어나지 않는 것으로 분석되었다.<sup>6-11)</sup> 석탄의 염소함량은 탄종에 따라서 50~500 ppm으로 서로 차이가 큰 것으로 나타나고, 하수슬러지는 건조 과정에서 염소 함량이 다량 감소하는 것으로 알려져 있으나 건조된 후에도 염소 함량범위가 매우 큰 것으로 보고되어 있다.<sup>12)</sup>

이와 관련하여 석탄과 슬러지의 혼합 연소에 따른 특정

<sup>†</sup> Corresponding author E-mail: slee@chungbuk.ac.kr Tel: 043-261-2468 Fax: 043-264-2465

유해가스 배출에 대한 연구가 일부 진행되어 왔다. Spliet-hoff<sup>9)</sup>는 짚, 목재, 슬러지 등의 다양한 재생연료를 연소하였을 때 배출되는 유해가스의 특성을 조사하였다. 다른 재생연료들은 석탄과 연소하였을 때 혼합비율이 증가함에 따라 NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>의 배출농도가 감소하는 경향을 보였지만, 슬러지는 혼합비율이 증가함에 따라 NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>의 배출농도가 증가하는 경향을 보였다. 이에 저자는 NO<sub>x</sub>의 배출증가 요인으로 연소특성의 변화를 지적하였고, SO<sub>2</sub>의 배출증가 요인으로는 슬러지의 높은 황 함량을 지적하였다. 또한 Nadziaki-wicz<sup>11)</sup>는 회분식 반응기를 이용한 실험에서 석탄에 슬러지의 혼합비율이 증가함에 따라 NO, SO<sub>2</sub>의 배출농도가 증가할 수 있음을 보여주고 있다. 그러나 기존의 외국문헌이외에 국내에서 발생한 하수슬러지에 대해서는 관련 연구가 거의 진행되지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 국내 하수처리장 7곳에서 발생하는 하수슬러지를 수거하여 석탄과 혼합연소하였을 때 배출되는 NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>의 농도분석과 함께 대표적인 산성가스 중 하나인 HCl, 염소(Cl<sub>2</sub>)가스의 농도분석을 실시하였다. 그리고 사용된 혼합연료의 성상 및 혼합비율에 따라 산성가스들의 배출특성을 평가하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1. 실험장치

본 연구에서 사용된 실험실규모 연소시스템을 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 석탄 단일시료 및 석탄/슬러지의 혼합시료는 연료공급시스템(Rovo Feeder, DAE-WON ENG, Korea, 0~500 rpm)을 통하여 연속적으로 주입된다. 연소반응기 외부의 온도는 전기로에 부착된 열전대를 이용하여 상, 중, 하단부 세 곳의 온도를 950℃로 일정하게 유지하였다. 반응기의 길이는 100 cm, 내경은 4.4 cm이며,

실험 온도에 적합한 석영(quartz)재질로 제작하였다. 반응기에서 연소를 마친 연소가스의 일부는 분진필터를 지나 연소가스 분석기(Vario Plus, MRU, Germany)로 유입되도록 하여, 가스중의 산소(O<sub>2</sub>), 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 질소산화물(NO<sub>x</sub>), 이산화황(SO<sub>2</sub>)의 농도를 2초당 1회 간격으로 측정하였다. HCl + Cl<sub>2</sub> 농도는 미국 환경보호국의 표준 분석법인 Method 26A의 흡수법을 적용하여 결정하였다. 사용한 흡수제로는 처음 세 개의 임핀저에는 0.1 N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 용액을 사용하였고, 다음 두 개의 임핀저에는 0.1 N NaOH를 넣어 사용하였다. 실험이 끝난 후 흡수액에 존재하는 Cl<sup>-</sup> 농도를 이온크로마토그래피(861 Advanced Compact IC, Metrohm, Switzerland)를 통해 분석하여 배기가스 내 HCl + Cl<sub>2</sub> 농도를 결정하였다. 동일 시료에 대하여 2회 반복 실험하였고, 연소가스 분석기를 통해 나타난 배출가스 농도결과를 통해 동일 시료의 실험간에 서로 동일한 연소가 이루어졌음을 확인하였다.

### 2.2. 실험방법

실험에 사용된 연료는 석탄 단일시료, 석탄과 7종의 슬러지를 각각 혼합한 시료이다. 석탄과 슬러지의 혼합 비율은 사전 실험을 통하여 적절한 혼합비를 결정하였고, 석탄과 슬러지를 각각 5 : 1, 3 : 1 질량비율로 미리 혼합하여 연소하였다. 연소실험은 시료 당 2회 반복하여 수행하였고, 총 연소시간은 11분으로 일정하게 하였다. 각각의 실험에서 연소에 필요한 공기는 질량유량조절기(MFC, Mass flow controller)를 통해서 주입하였고, 과잉공기비는 1.3으로 일정하게 하여 공기비에 알맞은 시료를 적절하게 주입하였다. 연소가스 분석기를 통하여 NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>를 분석하였으며, HCl + Cl<sub>2</sub> 농도는 흡수액에 흡수된 Cl<sup>-</sup> 농도를 분석하여 결정하였다. 실험에 사용된 연료의 유기원소는 유기원소분석기(EA1110, CE Instruments, United Kingdom)를 통해 분석하였고, 연료의

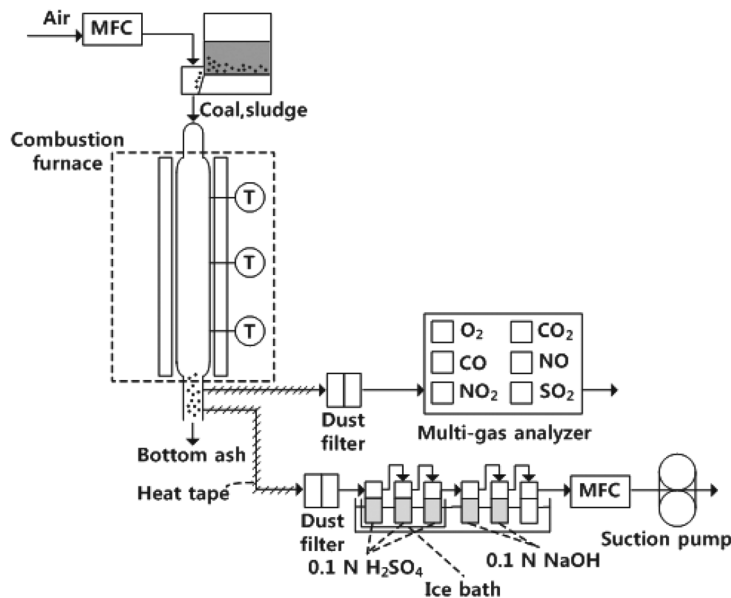


Fig. 1. Schematic diagram of combustion apparatus.

Table 1. Elemental contents of the coal and sludge samples

	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)	Hg (mg/kg)	Cl (mg/kg)	Ash (%)
Coal	68.7	4.8	8.1	1.2	0.3	0.05	160	9.2
Sludge 1	23.5	4.4	10.6	3.7	0.77	0.66	120	32.6
Sludge 2	24.1	4.7	11.4	3.8	1.09	1.22	300	38.9
Sludge 3	34.8	5.9	14.8	5.3	0.92	1.97	180	49.2
Sludge 4	29.1	5.0	13.2	4.4	0.99	2.54	170	44.3
Sludge 5	29.4	5.1	13.4	4.4	1.08	1.92	130	38.9
Sludge 6	24.2	4.8	13.5	4.1	1.07	0.79	470	43.8
Sludge 7	27.5	4.5	18.6	3.6	0.55	0.67	100	29.6

연소성분은 연료를 태운 후 배출되는 가스를 알칼리 흡수액에 포집한 후 알칼리 흡수액을 IC로 분석하였다. 분석 결과는 Table 1에 나타나 있다. 이미 출판된 논문에서 보고된 바와 같이 건조슬러지의 높은 수분함량으로 인하여 건조슬러지를 석탄과 혼합하여 연소하는 경우 수분의 배출증가가 예상되어 이에 따른 대비가 필요함을 예상할 수 있다.<sup>13)</sup> 본 연구에서 다루는 산성가스 배출농도에 영향을 줄 수 있는 질소 성분은 석탄에 비하여 슬러지에서 3~4배 정도 높게 나타났다. 황 성분 또한 슬러지 내에 더 높게 함유되어 있는 것으로 분석되었으며 연소 성분은 슬러지에 따라 석탄보다 낮거나 높은 농도를 나타내었다. 그리고 연료의 연소 특성에 영향을 미칠 수 있는 재(ash)의 함량은 슬러지에서 매우 높게 나타났다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1. 연소 실험결과

각 시료는 일정한 주입속도로 반응기에 주입되었고 배출되는 가스들의 농도는 연소가스 분석기를 통해 연속적으로 기록되었다. Fig. 2는 석탄 단일시료를 연소하였을 때 배출되는 CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO 농도를 나타낸 것이다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 시료를 주입한 후 1분 정도의 시간이 지나면 연료의 연소상태와 분석기가 정상상태에 도달하는 것을 알 수 있다. 그리고 1분 이후에는 배출농도가 거의 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있었고, 이로부터 연료의 연소상태가

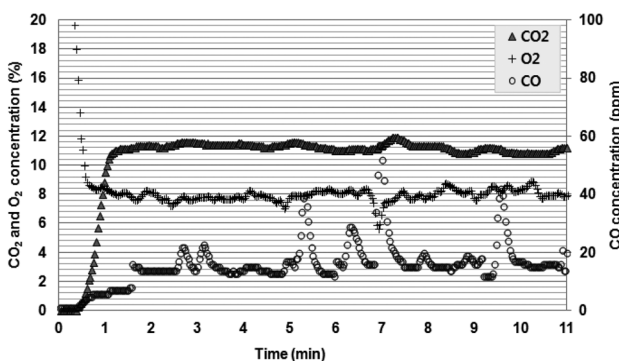


Fig. 2. CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> and CO concentrations in a combustion flue gas of the coal sample.

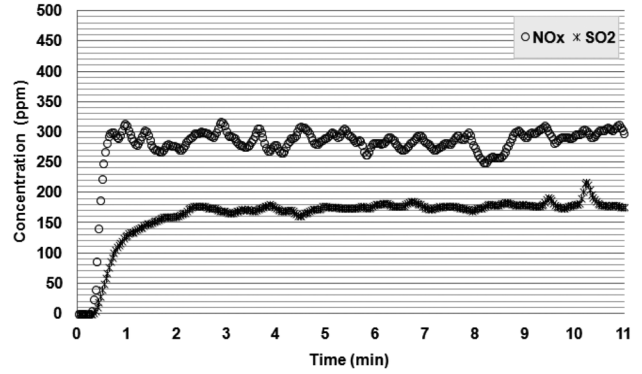


Fig. 3. NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> concentrations in a combustion flue gas of the coal sample.

시간에 따라 일정하게 유지되는 것을 유추할 수 있었다. 또한 CO<sub>2</sub>의 배출농도를 통해 연소효율을 계산해 보면 85% 이상의 연소효율을 보이고 있어 완전연소에 가까운 연소가 일어남을 확인할 수 있었다. Fig. 3은 석탄 단일시료를 연소하였을 때 배출되는 NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> 농도를 나타낸 것인데 Fig. 2에서 확인한 결과와 마찬가지로 시료 주입 후 약 1분 이후에 정상상태에 도달하여 NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>의 배출농도가 일정하게 유지됨을 확인할 수 있다. 따라서 본 실험에서는 NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>의 배출농도는 시료주입 후 1분 이후 농도가 안정화된 시점부터의 결과들을 평균하여 사용하였고, HCl + Cl<sub>2</sub>의 분석을 위해 사용된 흡수액도 시료주입 후 1분이 되는 시점에 연결하여 배출가스 흡수를 시작하였다. 연소가 정상상태에 도달한 이후에는 배출가스의 농도가 거의 일정하게 유지되므로 연소시간을 길게 할 필요가 없는 것으로 판단되어, 총 11분 동안 시료를 주입하면서 1분~11분 동안 배출되는 가스의 농도 결과를 평균하여 이용하였다.

#### 3.2. NO<sub>x</sub> 배출 특성

Fig. 4는 석탄 단일시료, 석탄과 슬러지를 각각 5 : 1, 3 : 1의 비율로 혼합한 시료들을 연소하였을 때 배출되는 NO<sub>x</sub>의 평균농도를 나타낸 것이다. 석탄 단일시료에서 배출되는 NO<sub>x</sub>의 평균농도는 292 ppm으로 나타났고, 석탄/슬러지의 혼합시료에서 배출되는 NO<sub>x</sub>의 평균농도는 273~323 ppm으로 나타났다. 이는 슬러지의 혼합연소로 인한 NO<sub>x</sub>의 배출농도가 석탄 단일연소로 인한 NO<sub>x</sub> 배출농도에 비하여 최대 11% 증가하는 수준임을 보여주는 것이다. 각 시료의 질소함량에 따른 NO<sub>x</sub> 배출농도를 나타낸 Fig. 5를 보면 석탄/슬러지 혼합시료의 질소함량이 석탄 단일시료의 질소함량에 비하여 35~80% 높은데 비하여 NO<sub>x</sub> 배출농도의 증가가 작은 수준임을 볼 수 있다. 이는 연료의 질소함량 증가로 인한 NO<sub>x</sub> 발생량 증가요인 이외에 연소 환경 변화에 따른 NO<sub>x</sub> 발생량 감소요인이 함께 존재함을 보여주는 것이다. 예상되는 NO<sub>x</sub> 배출량 감소요인으로는 재(ash) 함량 증가에 따른 연소온도 감소와 CO 배출농도 증가를 들 수 있다.<sup>8)</sup> 본 실험에서 슬러지의 재 함량은 석탄보다 3~5배 높으므로 재 함량 증가로 인해 연소온도 감소를 야기할 수 있고, 연소온

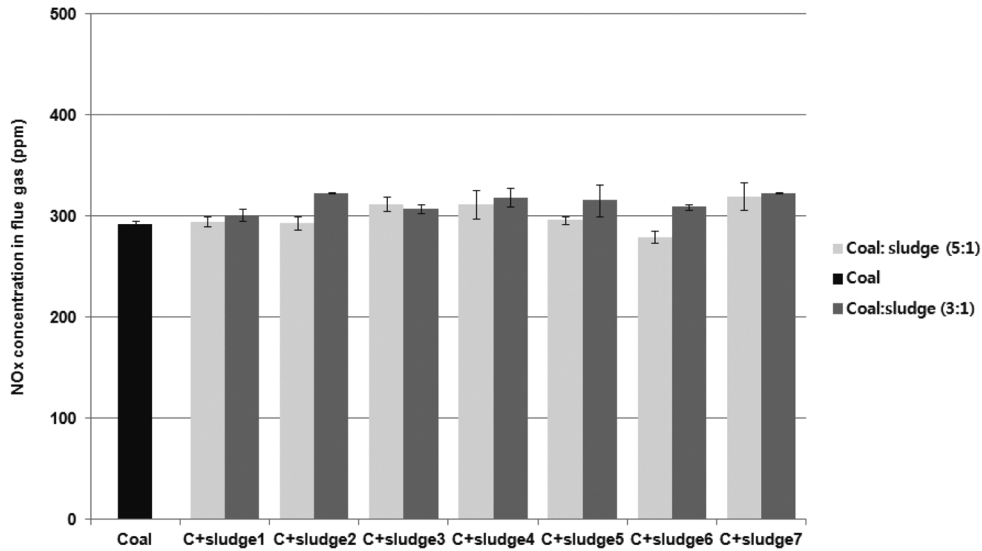


Fig. 4. Average NOx concentrations in combustion flue gases of the fuel samples.

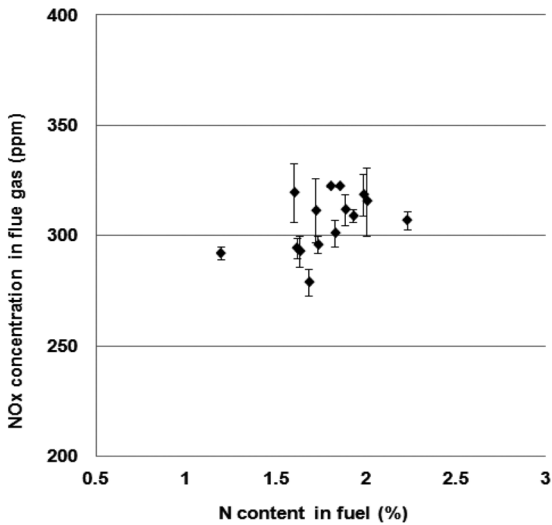


Fig. 5. Correlation between the NOx concentration and the N content in fuel.

도의 감소는 고온 NOx의 생성을 감소시키므로 혼합시료의 높은 재 함량이 NOx 발생의 감소요인으로 작용하였을 것으로 판단된다. 석탄 단일시료의 연소 시에 CO의 배출농도는 20 ppm 정도로 유지되었고, 석탄/슬러지 혼합시료의 연소 시에는 20~50 ppm으로 CO의 평균 배출농도는 서로 비슷한 수준을 보였다. 그러나 혼합연소 시에는 일시적으로 100 ppm 이상으로 농도가 갑자기 증가하는 현상을 보였는데, 이 때 NOx 농도는 급감하는 현상을 보이므로, 이러한 현상이 혼합연소 시에 NOx 발생이 감소하는 요인으로 작용했을 것으로 예상된다. 일반적으로 알려진 바와 같이 NOx 배출농도는 연소환경에 따라 쉽게 변할 수 있으므로, 연소조건이 변화하거나 다른 연소기를 사용기 때에는 본 실험의 NOx 배출 특성과 서로 다른 결과를 얻을 수도 있다.

### 3.3. SO<sub>2</sub>의 배출 특성

본 단원에서는 SO<sub>2</sub>의 배출특성을 살펴보고자 한다. Fig.

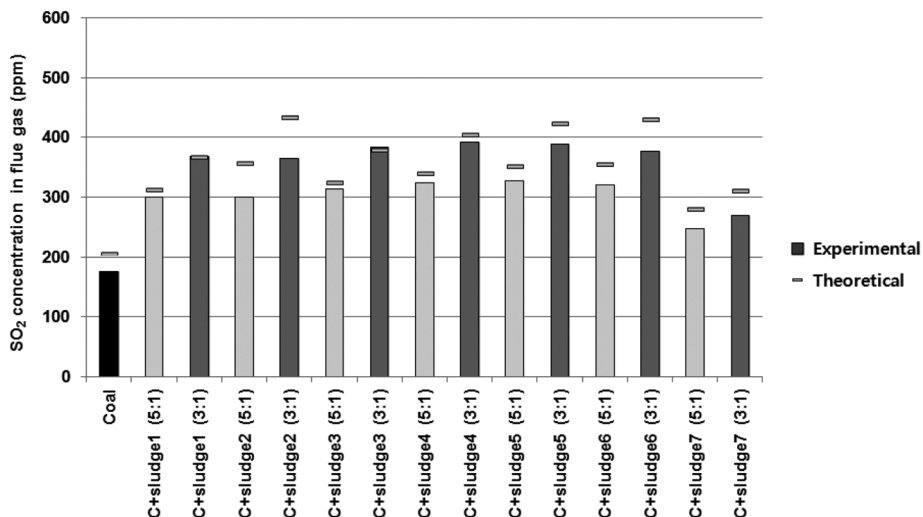


Fig. 6. Experimental and theoretical SO<sub>2</sub> concentrations in combustion flue gases of the fuel samples.

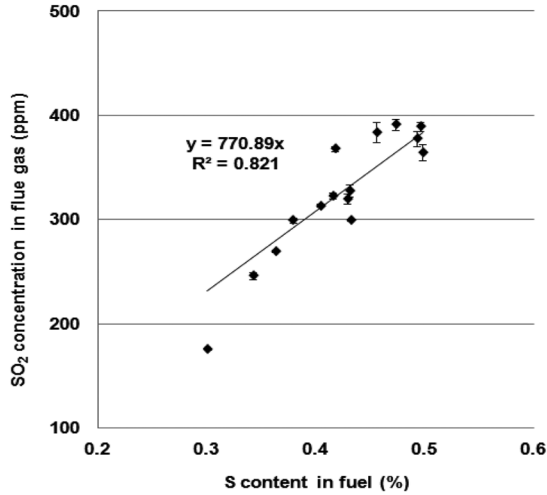


Fig. 7. Correlation between the SO<sub>2</sub> concentration and the S content in fuel.

6은 각 연료에서 배출되는 SO<sub>2</sub> 농도를 평균하여 나타낸 것이다. 각 시료에 대한 연소상태를 파악하기 위하여 시료의 황 함량으로부터 계산되는 이론적 SO<sub>2</sub> 배출농도도 Fig. 6에 함께 나타내었다. 그림에서와 같이 모든 석탄/슬러지 혼합 시료에서 석탄 단일시료보다 높은 SO<sub>2</sub> 배출농도를 보였다. 또한 모든 혼합시료에 대해서 슬러지의 혼합비율이 증가함에 따라 SO<sub>2</sub> 배출농도가 증가하는 현상을 보였다. SO<sub>2</sub>는 연료에 존재하는 황이 O<sub>2</sub>와 반응하여 생성되는 메커니즘을 가지는데 모든 슬러지 시료가 석탄 시료보다 높은 황 함량을 가지므로 이와 같은 현상이 나타난 것으로 해석된다. 실험을 통해 분석된 SO<sub>2</sub> 배출농도와 이론적 배출농도를 비교해 보면, 거의 모든 시료에 대하여 고르게 높은 연소효율을 보이고 있으므로, 본 실험에서 SO<sub>2</sub> 배출농도에 대한 연소효율의 영향은 작은 것으로 분석된다. 황 함량과 SO<sub>2</sub> 배출량의 관계는 Fig. 7에서 더욱 명확히 나타나는데 연료의 황 함량

이 증가함에 따라 SO<sub>2</sub>의 배출량이 직선적으로 비례하여 증가하는 것을 볼 수 있다. 따라서 석탄보다 상대적으로 황 함량이 높은 슬러지를 혼합하여 연소하였을 때 SO<sub>2</sub> 배출량이 증가할 것으로 예상된다. 혼합연료의 황 함량을 고려하였을 때 석탄/슬러지의 연소 시 발생하는 SO<sub>2</sub> 농도는 황 함량이 상대적으로 높은 석탄인 고험탄을 연소하였을 때의 수준이 될 것으로 예상된다.

### 3.4. HCl+Cl<sub>2</sub> 배출 특성

NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> 배출농도는 연소가스 분석기를 통하여 연속적으로 측정된 후 결과 값을 평균하여 얻은 반면에 HCl + Cl<sub>2</sub> 배출농도는 흡수액에 가스를 흡수한 후 EPA Method 26A를 적용하여 결정하였다. 이 방법은 HCl과 Cl<sub>2</sub>를 0.1 N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>와 0.1 N NaOH에 각각 분리하여 포집할 수 있지만, SO<sub>2</sub>의 농도가 높을 경우 Cl<sub>2</sub>가 0.1 N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 흡수액에도 흡수되어 분리 포집하기 어려운 것으로 보고되어 있다.<sup>14)</sup> 다만 SO<sub>2</sub>의 농도가 높더라도 HCl과 Cl<sub>2</sub>가 0.1 N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 또는 0.1 N NaOH 흡수액에 전량 포집되는 것으로 보고되어 있어,<sup>14)</sup> 본 연구에서는 위의 흡수액을 이용하여 분석된 염소성분 결과를 배출가스 중 HCl + Cl<sub>2</sub> 농도로 표시하였다.

NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>의 결과에서처럼 Fig. 8에 각 연료에서 배출된 HCl + Cl<sub>2</sub> 농도를 평균하여 나타내었다. Table 1에 나타난 각 연료의 성상을 보면 N과 S와는 달리 슬러지의 일부 시료는 석탄보다 높은 Cl 함량을 보이는 반면에, 일부 시료는 상대적으로 낮은 Cl 함량을 보인다. 석탄보다 염소함량이 높은 sludge 2와 3은 혼합하여 연소하였을 때 석탄 단일연소에 비해 HCl + Cl<sub>2</sub>가 증가하였고, 슬러지의 혼합비율이 증가함에 따라 배출농도가 증가하는 현상을 보였다. 반면에 나머지 시료들은 혼합연소에서 HCl + Cl<sub>2</sub> 배출농도가 감소하거나, 슬러지의 혼합비율이 증가함에 따라 배출농도가 감소하였다. 연료의 염소함량과 HCl + Cl<sub>2</sub>의 배출농도와의 관

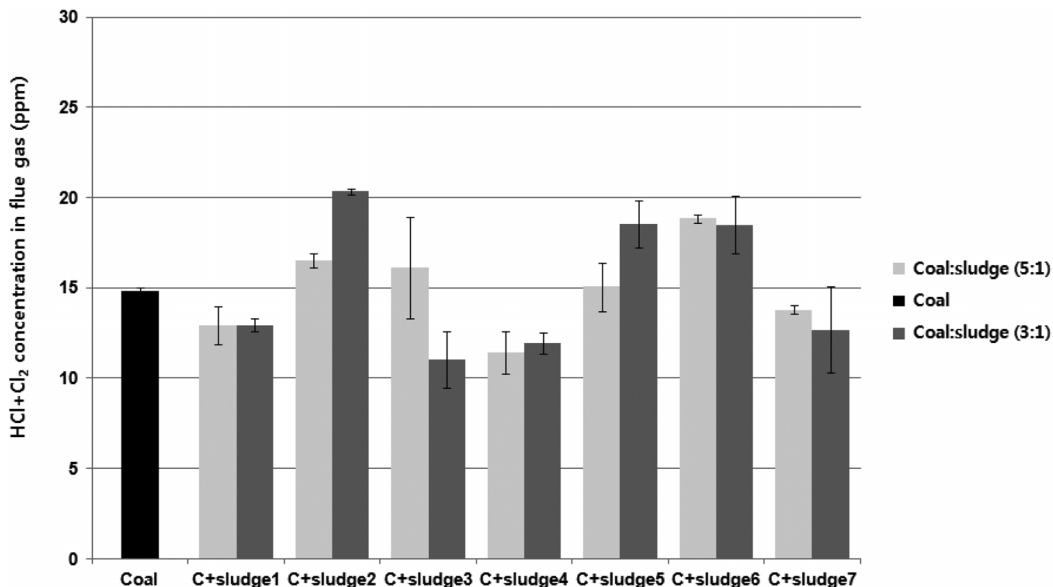


Fig. 8. Average HCl + Cl<sub>2</sub> concentrations in combustion flue gases of the fuel samples.

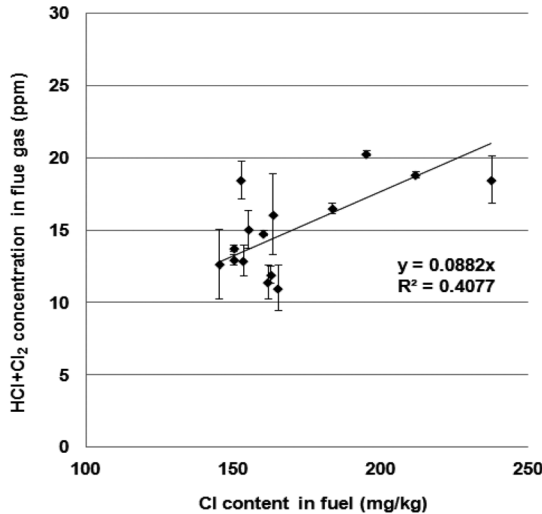


Fig. 9. Correlation between the HCl + Cl<sub>2</sub> concentration and the Cl content in fuel.

계는 Fig. 9에 나타내었는데, 실험적인 오차는 큰 편이지만 대체적으로 연료의 염소함량에 비례하여 HCl + Cl<sub>2</sub>의 배출농도가 증가함을 볼 수 있다. 이는 SO<sub>2</sub>와 마찬가지로 HCl, Cl<sub>2</sub>는 연료에 존재하는 염소성분에서 생성되는 메커니즘을 가지므로, 연료의 염소성분에 비례하여 증가하는 경향을 보이고 있는 것이다. 다만 연소 분석기로 분석되는 SO<sub>2</sub>와는 달리 흡수법을 통해 배출농도를 결정하여 상대적으로 큰 실험 오차를 얻었다. 그리고 NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>와는 달리 슬러지는 발생원에 따라 염소함량에 큰 차이를 보임으로 인해 HCl + Cl<sub>2</sub>의 배출농도에 있어서도 혼합시료 간에 큰 차이를 보였다.

#### 4. 결론

국내에서 발생하는 하수슬러지를 연료화하여 석탄과 혼합 연소하였을 때 배출되는 산성가스의 특성을 살펴보기 위하여 하수처리장 7곳에서 발생한 슬러지를 석탄과 혼합한 후 연소하였을 때 배출되는 NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, HCl + Cl<sub>2</sub> 농도를 분석하였다. 이 중에서 혼합연소 후 배출농도가 가장 증가하는 것은 SO<sub>2</sub>로서 슬러지의 높은 황 함량에 기인하는 것으로 나타났다. 반면에 본 실험에서는 혼합연소로 인한 NO<sub>x</sub> 배출농도 증가는 상대적으로 작게 나타났다. 이는 NO<sub>x</sub>의 생성이 연소 환경과 밀접한 관련이 있기 때문으로 판단되었다. 슬러지의 염소함량은 일부 시료에 대해서는 석탄보다 높았으나, 일부 시료는 석탄보다 낮게 분석되었다. 이로 인해 HCl + Cl<sub>2</sub>의 배출농도도 혼합연료 중의 염소함량에 대체적으로 비례하여 증가하거나 감소하는 경향을 보였다. 이와 같이 하수슬러지를 연료화하여 석탄과 혼합연소할 때에는 슬러지의 성상에 따라 서로 다른 산성가스의 배출특성을 나타내므로, 슬러지의 성상 분석 및 예비실험을 통해 배출가스 특성을 이해하고 이에 따른 대책을 사전에 수립하는 것이 필요할 것이다.

#### 사 사

본 연구는 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(NRF-2011-0013242), 환경부 ‘차세대 에코이노베이션 기술개발사업’ 지원을 받아 수행되었습니다. 연소실험을 도와준 충북대학교 강신욱 학생에게 감사드립니다.

KSEE

#### Reference

1. Statistics of sewage sludge in Korea 2010, Ministry of Environment(2010).
2. Lee, D. G., Lee, J. S., Kwak, H. and Bae, S. Y., "Combustion characteristics of RDF (Refuse Derived Fuel)," *J. Kor. Soc. Waste Manage.*, **22**(1), 101~112(2005).
3. Bae, S. R., Kim, Y. C., Kong, S. H., Lee, J. S., Seo, S. W. and Lee, K. C., "A study on recycling of sludge," *Bullet. Environ. Sci.*, **18**, 31~50(1997).
4. Werther, J. and Ogada T., "Sewage sludge combustion," *Prog. Energy Combust. Sci.*, **25**(1), 55~116(1999).
5. Åmand, L.-E. and Leckner B., "Metal emissions from co-combustion of sewage sludge and coal/wood in fluidized bed," *Fuel*, **83**(13), 1803~1821(2004).
6. Galbreath, K. C., Zygarlicke, C. J., Tibbetts, J. E., Schulz, R. L. and Dunham, G. E., "Effects of NO<sub>x</sub>, α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, γ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and HCl on mercury transformations in a 7-kW coal combustion system," *Fuel Proc. Technol.*, **86**(4), 429~448(2004).
7. Wang, Y., Duan, Y., Yang, L., Zhao, C., Shen, X., Zhang, M., Zhuo, Y. and Chen, C., "Experimental study on mercury transformation and removal in coal-fired boiler flue gases," *Fuel Proc. Technol.*, **90**(5), 643~651(2009).
8. Spliethoff, H. and Hein, K. R. G., "Effect of co-combustion of biomass on emissions in pulverized fuel furnaces," *Fuel Proc. Technol.*, **54**(1-3), 189~195(1998).
9. Lee, H. D. and Kim, J. K., "Combustion characteristics of two imported Indonesia coals as a pulverized fuel of thermal power plants," *J. Energy Eng.*, **19**(2), 136~142(2010).
10. Lee, W. J., "NO<sub>x</sub> generation characteristics from sludge incinerators," *J. Environ. Res. Inst. Yosu Univ.*, **3**, 73~79(2000).
11. Nadziakiewicz, J. and Koziol, M., "Co-combustion of sludge with coal," *Appl. Energy*, **75**(3-4), 239~248(2003).
12. Park, S. T., "Control technology and behavior of mercury in coal combustion process,"(2009).
13. Kang, S. W., Shim, S. H., Jeong, S. H., Jung, J. H. and Lee, S. S., "Mercury emission characteristics from co-combustion of coal and sludge," *J. Kor. Soc. Atmos. Environ.*, **28**(2), 182~189(2012).
14. Sun, J. Q., Crocker, C. R. and Lillemoen, C. M., "The Effect of Coal Combustion Flue Gas Components on Low-Level Chlorine Speciation Using EPA Method 26A," *J. Air Waste Manage. Assoc.*, **50**(6), 936~940(2000).