

## 80 kW<sub>th</sub>급 미분탄 연소 시스템에서 하수슬러지 혼소시 연소 특성 연구

채태영, 이재욱, 이영재, 양원\*

한국생산기술연구원 고온에너지시스템그룹  
31056 충남 천안시 서북구 입장면 양대기로길 89

(2018년 7월 10일 접수; 2018년 10월 28일 수정본 접수; 2018년 11월 27일 채택)

### Study on the Co-firing of Sewage Sludge to a 80 kW<sub>th</sub>-scale Pulverized Coal Combustion System

Taeyoung Chae, Jaewook Lee, Youngjae Lee, and Won Yang\*

Thermochemical Energy System Group, Korea Institute of Industrial Technology  
89, Yangdaegiro-gil, Ipiang-myeon, Seobuk-gu, Cheonan-si Chungnam 31056 Republic of Korea

(Received for review July 10, 2018; Revision received October 28, 2018; Accepted November 27, 2018)

#### 요 약

하수슬러지의 열화학적 처리는 수분을 제거하여 연료로 사용되는 하수슬러지의 수분 함량을 낮추어 주는 기술이다. 열화학적 처리된 하수슬러지는 열량이 높아지기 때문에 에너지 집약적 과정이라고 할 수 있다. 이러한 공정 중에 소비되는 에너지를 절약하기 위해 하수슬러지의 수열 탄화 공정을 사용하였다. 수열탄화 공정은 하수슬러지를 사전 건조 없이 깨끗한 고체 연료로 전환할 수 있다. 본 연구는 수열탄화 하수슬러지와 미분탄 연소 시스템의 혼소 특성을 조사하는 것을 목적으로 한다. 혼소 시 생성되는 유해물질 및 연소 효율의 변화를 측정하는 것을 목적으로 한다. 본 연구에 사용된 연소 시스템은 80 kW<sub>th</sub>급 연소로서 1기의 선회류 버너가 장착되어 있다. 두 가지의 석탄을 주 연료로 사용하였고, 하수슬러지의 혼소율은 열량 기준 0% ~ 10%까지 진행하였다. 실험 결과 NO<sub>x</sub>는 400 ~ 600 ppm, SO<sub>x</sub>는 600 ~ 700 ppm 사이를 유지하였고, CO는 100 ppm 전후로 일정하게 유지되어 안정적인 연소를 확인할 수 있었다. 하수슬러지를 혼소할 경우, 혼소율이 증가할수록 NO<sub>x</sub>와 SO<sub>x</sub>의 배출량도 증가하였으나 그 편차가 크지 않았다. 연소 배가스에 포함된 오염 물질 배출은 혼소 비율 보다 주 연료인 석탄의 조성에 의해 크게 영향을 받는 것으로 밝혀졌다.

**주제어** : 수열탄화 슬러지, 미분탄, 혼소, 황산화물, 질소산화물

**Abstract** : Thermochemical treatment of sewage sludge is an energy-intensive process due to its high moisture content. To save the energy consumed during the process, the hydrothermal carbonization process for sewage sludge can be used to convert sewage sludge into clean solid fuel without pre-drying. This study is aimed to investigate co-firing characteristics of the hydrothermally carbonated sewage sludge (HCS) to a pulverized coal combustion system. The purpose of the measurement is to measure the pollutants produced during co-firing and combustion efficiency. The combustion system used in this study is a furnace with a down-firing swirl burner of a 80 kW<sub>th</sub> thermal input. Two sub-bituminous coals were used as a main fuel, and co-firing ratio of the sewage sludge was varied from 0% to 10% in a thermal basis. Experimental results show that NO<sub>x</sub> is 400 ~ 600 ppm, SO<sub>x</sub> is 600 ~ 700 ppm, and CO is less than 100 ppm. Experimental results show that stable combustion was achieved for high co-firing ratio of the HCS. Emission of NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub> was decreased for higher co-firing ratio in spite of the higher nitrogen contents in the HCS. In addition, it was found that the pollutant emission is affected significantly by composition of the main fuel, regardless of the co-firing ratios.

**Keywords** : Hydrothermally carbonized sewage sludge, Pulverized coal, Co-firing, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>

\* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: yangwon@kitech.re.kr; Tel: +82-10-3415-3375; Fax: +82-41-589-8323

doi: 10.7464/ksct.2019.25.1.074 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

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.

## 1. 서론

최근 화석연료, 특히 발전용 석탄의 사용으로 인한 미세먼지 배출 등 환경오염 문제가 대두되면서, 태양광, 풍력, 바이오에너지 등과 같은 신재생에너지에 관한 관심과 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히, 국내에서는 바이오매스를 이용한 바이오에너지 생산에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 다양한 바이오매스 중 유기성 폐기물에 해당되는 하수슬러지는 런던 협약에 의해 해양 투기가 금지되면서 친환경적인 처리가 시급한 상황이다. 이를 청정 연료로 변환하여 에너지 생산까지 가능하도록 할 수 있는 다양한 연구의 필요성이 늘어나고 있다. 그러나 하수슬러지는 다량의 수분을 함유하고 있기 때문에 사전 작열 없이는 에너지 생산이 불가능하여 사전 건조 과정 후 연료로 사용이 가능하다. 그러므로 에너지 생산시 운전비용이 상승하게 되어 경제성 저하의 문제점을 지니고 있다. 앞서 언급한 문제점을 해결하고 궁극적으로 유기성 폐기물 생산효율을 높이기 위해, 수열탄화기술 등을 통한 하수슬러지의 고형 연료화 및 이를 기존 연소 시스템에 활용하는 기술에 대한 관심이 높아지고 있고, 이와 관련된 많은 연구가 활발하게 진행되고 있다[1-4]. Amand and Leckner [5]는 유동층 반응기에서 하수슬러지와 석탄 및 목질계 바이오매스와의 혼소를 통해 NO와 N<sub>2</sub>O의 저감에 대한 연구를 수행하였다. 또한 Salatino et al. [6] 역시 유동층 반응기를 이용해 다양한 종류의 펠릿화된 바이오매스와 무독성 폐기물을 이용하여 유동층 연소와 관련된 연료 특성 인자를 도출하였다. 뿐만 아니라 연료 전환율과 착연소에 대해 규명하고, 층물질의 응집 현상에 대해 조명하기 위해 회분 입자의 크기 및 거동에 대한 연구도 수행하였다. Wang et al. [7]은 밀집 연소에서 문제가 되는 파울링 및 고온 부식을 저감할 수 있는 방안에 대해 연구하였으며, 밀집 연소시 하수슬러지를 약 5%

가량 투입하여 칼륨의 생성 억제 현상을 파악하였다. Hong and Naruse [8]는 건조된 하수슬러지에 카울린 첨가제를 사용하여 온도에 따른 연소 특성 및 흡착제로서의 특성을 알아보았다. Amand et al. [9]의 경우, 하수슬러지 혼소시 발생하는 슬래깅 파울링 문제에 관한 연구를 진행하여 회분 점착의 주요 원인 중 하나인 염화칼륨을 제거하는 메커니즘을 제시하였다. 이외에도 많은 연구자들이 유기성 폐기물 및 바이오에너지에 관한 연구를 진행하였다[10-14]. 수열탄화(Hydrothermal carbonization)는 수분함량이 높은 유기성 폐기물을 온도(180 ~ 200 °C)까지 승온시켜 탈수(Dehydration) 반응을 유도하는 것을 말한다. 이는 기존 건조 방식에 비해 60% 이상의 에너지를 절감시켜 경제적인 고형연료화를 가능하게 한다[15-18]. 그러나 대부분의 연구는 하수슬러지 기반 연료를 유동층 연소 시스템에서 혼소한 연구에 집중되어 있는 반면, 국내의 경우 대부분의 석탄화력발전은 미분탄 연소 방식을 사용하고 있기 때문에 미분탄 연소 시스템에서의 혼소가 어느 정도까지 가능한지에 대한 연구가 수행되어야 한다. 본 연구는 하수슬러지를 건조, 고형연료화한 후 미분탄 화력 발전 혼소 연료로서 활용 가능성을 확인하는 것에 목적이 있으며, 이를 위해 우선적으로 80 kW<sub>th</sub>급 미분탄 연소 시스템을 이용하여 수열탄화된 하수슬러지와 일반 건조 하수슬러지를 석탄과 혼합하여 연소하였을 경우 생성되는 연소가스 조성 변화를 분석하고 연소 효율을 측정하여 일반 건조 하수슬러지와 수열탄화 하수슬러지의 연소 특성을 비교 분석하였다.

## 2. 실험 장치 및 조건

### 2.1. 실험 장치

본 실험에서 사용된 장치는 80 kW<sub>th</sub> 미분탄 보일러 연소 시스템으로 Figure 1에 개략도를 나타내었다. 지름 600 mm, 높

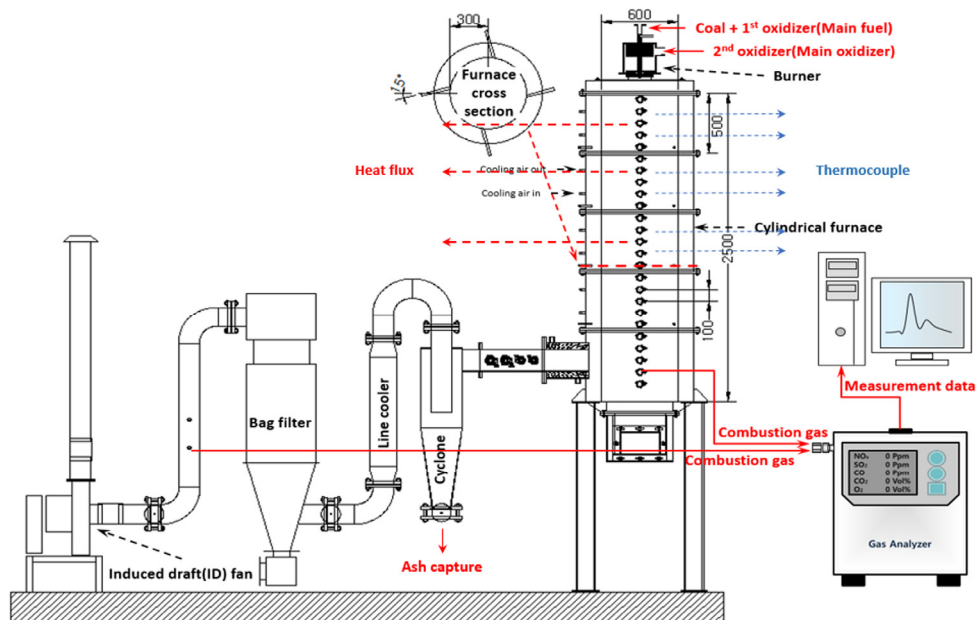


Figure 1. Schematic diagram of the 80 kW<sub>th</sub> down firing furnace system set-up.

이 500 mm인 원통 형태의 연소로가 5단으로 이루어져 총 2500 mm의 연소로가 있으며, 연소로 벽면에는 프로브와 열전대 삽입을 위한 포트가 위치하고 있다. 각 단 연소로에는 열유속 프로브 삽입을 위한 포트가 5개씩 설치되어 있으며, 연소로 벽면 온도 측정을 위한 R타입의 열전대가 2개씩 설치되어 있다. 연소로를 지나면 사이클론(Cyclone)과 회분 집진기(Bag filter)가 설치되어 연소 후 생성되는 회분을 포집할 수 있다. 사이클론의 경우, 실시간으로 회분을 포집할 수 있도록 설계되어 있다. 그림에는 생략되어 있으나, 연소로 상단에는 혼소를 위해 로드셀(Load cell)이 장착된 피더(Feeder)가 2대 설치되어 있으며, 피더에서 발열량 기준으로 각 연료의 투입량을 설정하게 된다. 투입량이 설정된 각 연료는 혼소용 버너를 통해 공기와 함께 투입되어 연소된다. 버너의 중앙부에서 연료와 함께 1차 공기가 투입되고 옆면에서 2차 공기가 투입되어 연소에 필요한 산화제를 공급하여 선회류(Swirl)를 생성하게 된다.

## 2.2. 실험 조건

설명에 앞서 앞으로 수열탄화 하수슬러지는 HCS (Hydrothermal carbonization sewage sludge), 일반건조 하수슬러지는 DSS (Dried sewage sludge)로 명명하도록 하겠다. Table 1은 연료의 성분을 분석한 결과를 나타내었다. 연료 분석 결과는 Table에 나타내었으며, 실험에 사용된 HCS와 DSS는 본 연구의 공동수행기관인 고등기술연구원에서 제조한 것을 제공받았다. 분석 결과를 살펴보면 일반적으로 석탄과 달리 하수슬러지는 휘발분이 많고 고정탄소가 적게 포함된 것을 볼 수 있다. 이것은 혼소 시 석탄보다 연소가 빠르게 진행될 수 있다는 것을 의미한다. 석탄은 N, S를 약 1% 내외로 소량 포함하고 있지만 하수슬러지의 경우 연소 후 NO<sub>x</sub>로 전환되는 N을 DSS는 7.2%, HCS는 6.2%로 다량 포함하고 있는 특징이 있다. 또한, 석탄의 경우 건조한 것이 아니기 때문에 수분을 5 ~ 6% 정도 포함하고 있지만, 하수슬러지는 건조과정을 거쳐 0.1 ~ 0.2%의 수분을 포함하고 있다. 실험에 사용된 HCS 운전조건은 Table 2에 나타내었으며, DSS는 간접가열 건조방식으로 제조되었다. 본 연구를 위해서 하수슬러지를 미분탄 버너에 투입하기 위해 분쇄 과정을 거쳐 300 μm 이하의 입도로 미분하여 사용하였다. Table 3에는 실험 조건을 나타내었다. DSS의 경우 석탄 2종에 혼소하여 실험을 진행하였고 HCS의 경우 Indominco 석탄과 혼소 실험을 진행하였다. 혼소율은 하수슬러지의 혼소율을 0 ~ 10%까지 변경하여 실험을 수행하였다.

**Table 3.** Experimental conditions for co-firing

Case	AD0	AD2	AD5	AD10	ID0	ID2	ID5	ID10	IH0	IH2	IH5	IH10
Coal (kg/hr)	10.03	9.83	9.53	9.03	10.7	10.49	10.17	9.63	10.7	10.49	10.17	9.63
Sludge (kg/hr)	0	0.31	0.77	1.54	0	0.31	0.77	1.54	0	0.3	0.76	1.51

\* AD: A49+DSS, ID: IN+DSS, IH: IN+HCS; 0: 0%, 2: 2%, 5: 5%, 10: 10%

**Table 1.** Composition of fuels

Ultimate analysis (wt%, dried basis)				
Element	Adaro49	Indominco	DSS	HCS
C	74.5	68.8	42.6	45.1
H	4.8	4.9	6.7	5.9
N	1.0	1.5	7.2	6.2
S	0.1	1.4	0.9	0.7
O	16.7	16.0	27.6	23.2
Proximate analysis (wt%, dried basis)				
Element	Adaro49	Indominco	DSS	HCS
M	6.7	4.7	0.1	0.2
VM	44.1	41.9	73.4	65.8
FC	46.5	47.1	11.3	13.2
Ash	2.7	6.5	15.2	20.8
HHV (MJ/kg)	23.3	28.3	19.2	19.7

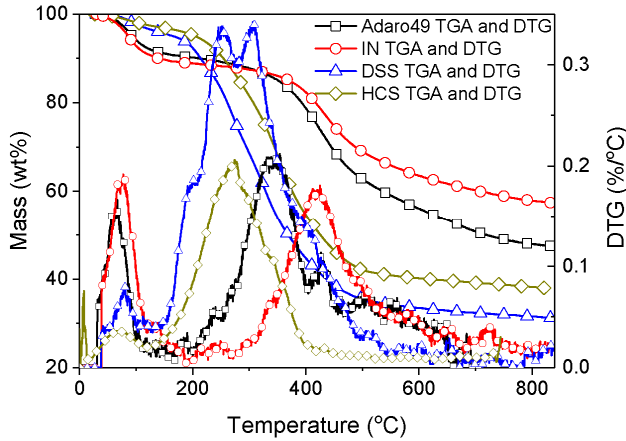
**Table 2.** Experimental condition for hydrothermal carbonization sewage sludge

Doivision	Item	Unit	Condition
Operating conditions	Sludge squeezing	kgf/cm <sup>2</sup>	15
Inflow sludge	Input	L	5.67
Dehydrated filtrate	Recovery rate	%	98.8
Dehydrated cake	Weight	kg	0.5
Filtration rate		kg.DS/m <sup>2</sup> hr	1.9

## 3. 실험 결과

### 3.1. 열중량 분석 결과

Figure 2는 하수슬러지 고형연료 및 석탄의 TGA (thermo-gravimetric analysis)와 DTG (derivative thermo-gravimetric) 결과를 나타낸 것이다. TGA 분석은 N<sub>2</sub> 조건에서 수행되었으며, TGA 결과에서 시료의 무게 변화 속도를 통해 건조와 탈휘발 시점을 알 수 있다. A49, IN의 경우 두 단계의 경사가 형성되었으며, 건조와 탈휘발의 반응으로 판단된다. A49의 경우 약 352 °C에서 탈휘발이 시작되며, IN은 약 365 °C에서 시작되었다. 이는 DTG 결과를 보면 더욱 정확하게 알 수 있다. 발열량이 상대적으로 낮고 수분과 휘발분이 많은 A49석탄의 건조와 탈휘발이 먼저 진행되었고 IN석탄의 건조와 탈휘발이 약간 늦게 진행되는 것을 확인할 수 있다. 약간의 차이가 있지

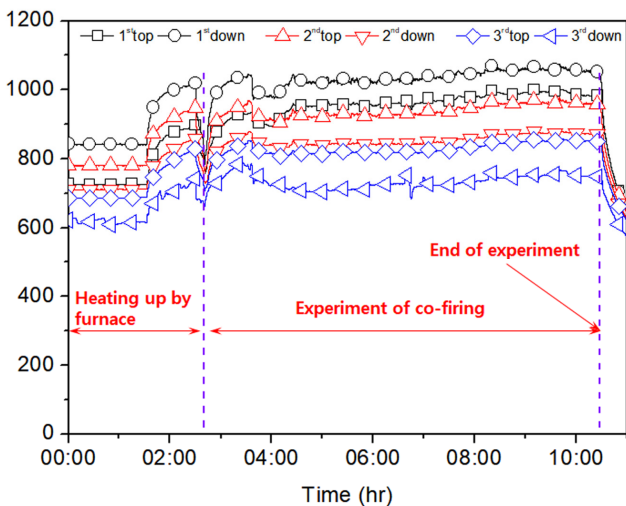


**Figure 2.** Thermogravimetric analysis (TGA) and derivative thermogravimetric (DTG) of coals and sewage sludges.

만 두 석탄의 탈휘발은 비슷한 시점에서 시작되는 것을 확인하였다. HCS와 DSS의 경우 수분량이 적어 건조의 구간이 느리게 진행되었고 탈휘발의 한 단계만 확인하게 나타났다. HCS의 경우 약 253 °C에서 탈휘발이 시작되고, DSS의 경우 약 255 °C에서 시작되는 것을 확인하였다. 전반적으로 HCS와 DSS의 탈휘발 시점이 A49, IN의 탈휘발 시점보다 약 100 °C 정도 빨리 급격하게 진행되었으며 휘발분의 함량이 전체 비율에서 60% 이상을 차지하여 탈휘발 구간이 긴 것을 알 수 있었다. 그러나 HCS의 경우, DSS에 비하여 탈휘발 진행속도나 느린 것을 볼 수 있었다. HCS가 일반 DSS에 비해 휘발분이 적고 고정탄소가 많기 때문에 나타나는 결과이다.

### 3.2. 연소로 벽면 온도

본 연구에는 총 3종류의 혼소 연료를 각각 4가지 혼소율로 분류하여 실험을 진행하였다. 연소로 별 실험 데이터는 Figure 3에 나타난 바와 같이 연료가 변경되어도 연소로 벽면 온도



**Figure 3.** Temperature of IN/HCS co-firing case.

는 큰 차이를 나타내지 않고 있다. 기본적으로 연소 온도는 열량, 산화제의 양, 운전 방법 등 여러 요인에 의해 다양한 형태를 보인다. 그러나 본 실험은 조건 별 열량을 동일하게 투입하였고 이에 따른 산화제의 양 또한 1차, 2차 동일한 비율로 투입하였다. 이에 따라 연료 투입량과 산화제의 투입량이 변하였으나 연소로 벽면은 유사한 온도 경향으로 나타났다. 물론, 세밀하게 분석하면 주 연소 온도나 최고 온도의 위치는 다를 수 있으나 본 연구에서는 연소 안정성 및 온도 분포 경향에 중점을 두고 실험을 진행하였기 때문에 구체적인 부분은 제외하고 실험을 진행하였다. 따라서 실험 조건 변경에 무관하게 연소로 벽면은 유사한 온도 분포를 나타내었고 대표적인 IN/HCS 혼소 실험 결과만 그림으로 나타내었다. 앞에 설명한 바와 같이 연소로 1단부터 3단까지 각 단 별로 2개의 TC가 삽입되었기 때문에 각 단별로 위쪽을 Top, 아래쪽을 down으로 표시하였다. 즉 1단은 상단부 부터 아래로 166 mm에 1<sup>st</sup>top TC가 장착되었고 333 mm에 1<sup>st</sup>down TC가 장착되었다. 순서에 따라 2<sup>nd</sup>top은 666 mm, 2<sup>nd</sup>down은 833 mm, 3<sup>rd</sup>top은 1166 mm, 3<sup>rd</sup>down은 1333 mm에 장착되었다. 실험 시간이 지남에 따라 약간의 온도 증가 경향이 나타나는데, 이것은 연소로 축열에 의한 것으로 실험에 큰 영향을 미치지 않아 무시하고 실험을 진행하였다. 연소는 연소로 상부에서 대부분 진행되기 때문에 연소로 1단의 온도가 가장 높은 것을 볼 수 있다. 또한 벽면 데이터가 최대 1050 °C까지 증가한 것을 알 수 있었다. 석탄과 하수슬러지 혼소를 여러 종류 진행하였으나 온도는 크게 변하지 않고 일정하게 유지되었다. 이것은 연료에 관계없이 유사한 연소 특성을 나타내는 것이고 크게 불안정한 연소가 나타나지 않았음을 나타내는 것이다.

### 3.3. 연소 효율

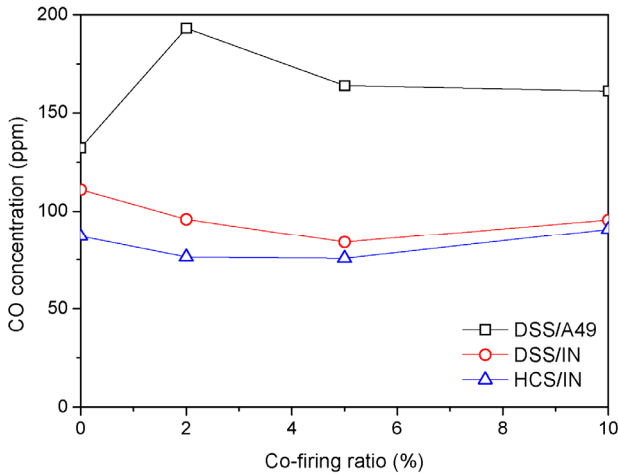
Table 4는 연소 효율을 나타낸 표이다. 표에 나타난바와 같이 혼소율 별로 연소 효율을 측정하였고 회분은 연소로 후단 사이클론에서 채집하였다. 모든 조건에서 연소효율은 99% 이상으로 안정적인 연소가 이루어진 것을 알 수 있었다. DSS/A49 5, 10% 혼소 조건 연소의 경우, 미세하게 연소 효율이

**Table 4.** Combustion efficiency by co-firing rate

Co-firing ratio	Unburned carbon (%)	Combustion efficiency (%)
Coal 100%	≥ 0.1	≤ 99.9
DSS/A49 2%	0.1	99.9
DSS/A49 5%	0.3	99.7
DSS/A49 10%	0.3	99.7
DSS/IN 2%	≥ 0.1	≤ 99.9
DSS/IN 5%	≥ 0.1	≤ 99.9
DSS/IN 10%	≥ 0.1	≤ 99.9
HCS/IN 2%	≥ 0.1	99.9
HCS/IN 5%	0.1	99.9
HCS/IN 10%	0.2	99.8

**Table 5.** Concentration of O<sub>2</sub> and CO

Co-firing ratio	DSS/A49		DSS/IN		HCS/IN	
	O <sub>2</sub> (%)	CO (ppm)	O <sub>2</sub> (%)	CO (ppm)	O <sub>2</sub> (%)	CO (ppm)
0%	4.7	132.3	3.6	111	4	86.9
2%	2.3	193.2	4.3	95.8	3.6	76.2
5%	4.2	164	3.9	83.9	3	75.6
10%	4	161.2	3.8	95.4	3.8	90.6



**Figure 4.** CO concentration (ppm).

낮은 것을 볼 수 있는데, 연소에 영향을 줄 수 있는 수치는 아니기 때문에 큰 의미가 있는 결과는 아니라고 할 수 있다.

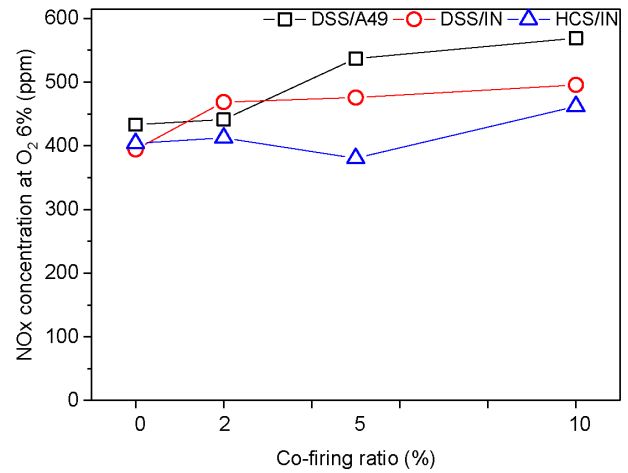
Table 5는 연소가스 조성 중 O<sub>2</sub>, CO 농도를 나타낸 표이다. Figure 4는 구분을 명확하게 하기 위해 CO 농도를 그린 그래프이다. CO와 O<sub>2</sub>는 연소 효율을 보기 위해 정리한 데이터로 각 조건 별 평균 농도를 나타내었다. CO 농도는 IN 석탄을 사용하였을 때 낮게 배출되는 경향을 나타내었다. 또한, 혼소율의 증감 여부에는 밀접한 관계가 없는 것으로 나타났는데, 이것은 하수슬러지 혼소 보다 주 연료인 석탄에 따른 영향이 큰 결과라 할 수 있다. IN의 경우, A49에 비하여 발열량이 높고 연료 내 C의 함량이 많기 때문에 상대적으로 안정적인 연소 분위기를 쉽게 조성할 수 있다. 하수슬러지를 비교해도 발열량이 높은 HCS를 혼소 연료로 사용하였을 때 CO농도가 낮아지는 것을 확인할 수 있었다.

DSS/A49 2% 혼소의 경우, CO 농도가 다른 연소 조건에 비해 많은 것을 볼 수 있다. O<sub>2</sub> 농도가 낮아지면 산화에 필요한 O<sub>2</sub>가 적어지게 되어 상대적으로 완전 산화 되어 CO<sub>2</sub>로 되지 못하고 부분 산화되어 CO가 생성되는 비율이 증가하게 된다. 그러므로 O<sub>2</sub>농도의 영향으로 O<sub>2</sub> 평균 농도가 낮아 발생한 결과라고 할 수 있다. 그러나 배가스 조성 중 CO 농도는 HCS/IN을 혼소했을 때 평균적으로 가장 적게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이것은 기본 연료 조성에 따른 영향으로 연소가 다른 연료 혼소에 비해 안정적이기 때문에 나타나는 결과이

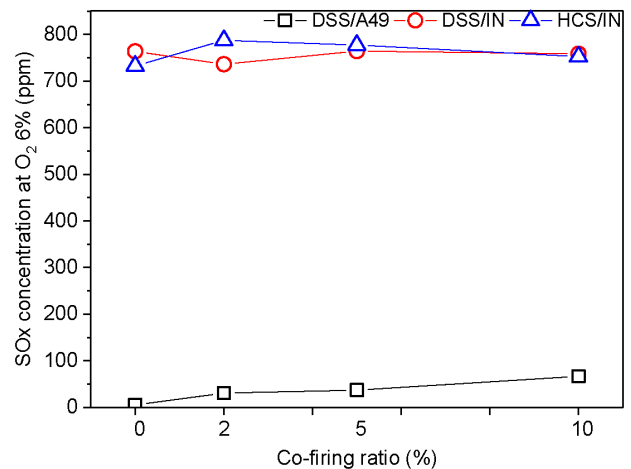
다. 실험에 사용된 연료만 비교하면 IN이 A49에 비해 열량이 높고 HCS는 DSS에 비해 열량이 높다. 열량이 높은 연료는 반응성이 좋기 때문에 연소 후 CO 생성량도 상대적으로 낮아지게 되어 나타나는 결과이다.

### 3.4. 연소가스 조성

Figure 5와 Figure 6은 연소가스 조성 중 NO<sub>x</sub>와 SO<sub>x</sub>를 산소 6% 기준으로 보정하여 나타낸 결과이다. 하수슬러지의 경우, 기본적으로 N을 석탄에 비해 많이 포함하고 있다. 앞서 보여준 분석결과와 같이 연료의 조성 중 N의 함량이 석탄에 비해 상대적으로 많은 하수슬러지를 혼소하였을 때 혼소율이 증가함에 따라 NO<sub>x</sub> 생성량도 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나 증가폭이 크지 않은 것을 볼 수 있다. 석탄에 포함된 N의 경우, A49 1.0%, IN 1.5% 포함되어 있고 하수슬러지의 경우, DSS 7.2%, HCS 6.2%를 포함하고 있다. 혼소율이 증가함에도 불구하고 석탄 전소에서 생성되는 NO<sub>x</sub> 양과 큰 차이를 보이지 않는다. 우선 가장 큰 이유는 혼소율이 최대 10%로 크지 않



**Figure 5.** NO<sub>x</sub> concentration at O<sub>2</sub> 6%.



**Figure 6.** SO<sub>x</sub> concentration at O<sub>2</sub> 6%.

기 때문이다. 그리고 휘발분을 과량 포함하고 있는 하수슬러지가 연소로에 투입되면 석탄 보다 많은 휘발분이 우선 연소되어 공기중 O<sub>2</sub>와 반응하게 된다. 이 경우, 초기 반응하는 휘발분이 과량의 O<sub>2</sub>와 반응하여 연소되면 상대적으로 소량 남아 있는 O<sub>2</sub>와 N이 반응하여 NO<sub>x</sub>를 생성 시킬 확률이 낮아지게 되기 때문에 하수슬러지 혼소율이 증가하여도 생성되는 NO<sub>x</sub>의 생성률이 억제되어 크게 증가하지 않는 것이다[19,20]. SO<sub>x</sub>의 경우, 주연료의 영향이 더 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. S의 경우 A49는 0.1% IN은 1.4% 포함하고 있다. 그래프에 나타난 바와 같이 혼소율 증가에 따른 증가폭 보다 주연료에 변화에 따른 증가량이 훨씬 큰 것을 볼 수 있다. 또한, 하수슬러지는 IN탄에 비해 S의 함량이 적기 때문에 IN탄에 하수슬러지를 혼소할 경우 혼소율이 증가할수록 S가 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 연소 가스에서 생성되는 SO<sub>x</sub>는 연료에 포함된 S에 영향을 받는다는 것을 볼 수 있는 결과이다. 2종의 하수슬러지를 혼소할 경우, HCS의 발열량이 DSS에 비해 높기 때문에 보다 효율적인 혼소 연료로 사용이 가능하다. DSS/A49 혼소의 경우, 석탄에 포함된 S가 0.1%로 매우 적기 때문에 연소 후 SO<sub>x</sub>가 상대적으로 적게 생성되는 것을 볼 수 있다. 혼소율이 증가함에 따라 SO<sub>x</sub>의 생성량도 증가하지만 기본적으로 석탄에 포함된 양이 적기 때문에 다른 실험 조건에 비해 적게 생성되는 것이다. 연소가스에서 생성되는 유해물질은 연료에 포함된 기본 조성에 민감하다는 것을 확인하였다. 그러므로 SO<sub>x</sub> 및 NO<sub>x</sub> 생성은 연료의 대부분을 차지하고 있는 주연료인 석탄의 성분에 의해 결정된다. 그러므로 하수슬러지 혼소율을 크게 증가시키지 않는다면 포함된 S와 N은 연소 후 생성되는 연소 가스에 크게 영향을 미치지 않을 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

본 연구는 80 kW<sub>th</sub>급 미분탄 연소시스템을 사용하여 HCS와 일반 건조 하수슬러지를 석탄과 혼소하였을 경우 연소 특성을 분석하고 연소 후 배출되는 가스를 분석한 결과이다. 실험 결과 석탄 전소와 하수슬러지 혼소의 경우 벽면 온도는 유사한 것을 확인하였다. 또한, 연소 후 배가스 분석 결과 중 CO농도가 100 ppm 전 후로 일정하게 유지되어 안정적인 연소를 확인할 수 있었다. 이는 실제 발전 연소로에 하수슬러지를 혼소할 경우, 연소 측면에서는 문제가 없음을 확인한 결과라고 할 수 있다. 혼소율이 증가할수록 NO<sub>x</sub>가 증가하는 경향을 나타내었는데, 하수슬러지에 상대적으로 많이 포함된 N의 영향으로 혼소에 따른 감소 경향이 있기 때문에 차이는 크지 않다. 그러나 혼소율을 점차 시킬 경우는 N의 영향으로 NO<sub>x</sub>가 증가가 예상되므로 혼소율을 높이게 되면 연소 후 배가스에 포함된 NO<sub>x</sub>의 처리를 고려해야 할 것이다. 연소가스 내 NO<sub>x</sub>와 SO<sub>x</sub>의 조성은 연료에 포함된 S와 N에 더 민감하게 반응한다. 그러나 NO<sub>x</sub>의 경우, 하수슬러지의 특성상 석탄에 비하여 연료에 포함된 N의 영향이 적다고 볼 수 있다. 그러므로 최대 10% 하수슬러지 혼소는 일반 100% 석탄 연소와 크

게 다르지 않기 때문에 석탄 발전 연소에서 충분히 사용 가능할 것으로 사료된다.

#### 감사

본 연구는 산업통상자원부-한국에너지기술평가원 청정화력핵심기술개발사업(20161110100090)의 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

#### 약어

HCS:	수열탄화 하수슬러지
DSS:	일반건조 하수슬러지
IN:	Indominco 석탄
A49:	Adaro49 석탄
AD:	A49+DSS
ID:	IN+DSS
IH:	IN+HCS
TGA:	Thermogravimetric analysis
DTG:	Derivative thermo-gravimetric

#### References

1. Heinzl, H., Siegle, V., Spliethoff, H., and Hein, K., "Investigation of Slagging in Pulverized Fuel co-Combustion of Biomass and Coal at a Pilot-Scale Test Facility," *Fuel Proc. Technol.*, **54**, 109-125 (1998).
2. Cenni, R., Frandsen, F., Gerhardt, T., Splietho, H., and Heina, K., "Study on Trace Metal Partitioning in Pulverized Combustion of Bituminous Coal and Dry Sewage Sludge," *Waste Manage.*, **18**, 433-444 (1998).
3. Werther, J., and Ogada, T., "Sewage Sludge Combustion," *Prog. Energy and Combust. Sci.*, **25**, 55-116 (1999).
4. Yoshihiko, N., Lian, Z., Takeo, S., Chikao, K., and Megumi, M., "Transformation of Mineral and Emission of Particulate Matters During Co-Combustion of Coal with Sewage Sludge," *Fuel*, **83**, 751-764 (2004).
5. Amand, L., and Leckner, B., "Co-combustion of Sewage Sludge with Wood/Coal in a Circulating Fluidized Bed Boiler-A Study of Gaseous Emissions," Chalmers University of Technology, Sweden, (2001).
6. Salatino, P., "Fluidized Bed Combustion of Pelletized Biomass and Waste-Derived Fuels," *Combust. and Flame*, **155**, 21-36 (2008).
7. Liang, W., Terese, L., and Ehsan, H., "Effect of Sewage Sludge Addition on Potassium Release and Ash Transformation during Wheat Straw Combustion," *Chem. Eng. Trans*, 2283-9216 (2014).
8. Hong, Y., and Ichiro, N., "Combustion Characteristics of Dried Sewage Sludge and Control of Trace-Metal Emission," *Energy & Fuels*, **19**, 2298-2303 (2005).
9. Lars-Erik, A., Leckner, B., David, E., and Claes, T., "Deposits

- on Heat Transfer Tubes during Co-Combustion of Biofuels and Sewage Sludge,” *Fuel*, **85**, 1313-1322 (2006).
10. McIlveen-Wright, D., Huang, Y., Rezvani, S., and Wang, Y., “A Technical and Environmental Analysis of Co-Combustion of Coal and Biomass in Fluidised Bed Technologies,” *Fuel*, **86**, 2032-2042(2007).
  11. Davidsson, K., Amand, L., Elled, A., and Leckner, B., “Effect of Cofiring Coal and Biofuel with Sewage Sludge on Alkali Problems in a Circulating Fluidized Bed Boiler,” *Energy & Fuels*, **21**, 3180-3188 (2007).
  12. Tomasz, K., Marco, M., Michael, I., and Roman, W., “Investigation of Ash Deposit Formation during Co-Firing of Coal with Sewage Sludge, Saw-Dust and Refuse Derived Fuel,” *Fuel*, **87**, 2824-2837 (2008).
  13. Fouad, A., and Jaroslaw, Z., “An Evaluation of Biomass Co-Firing in Europe,” *Biomass and Bioenergy*, **34**, 620-629 (2010).
  14. Aho, M., Yrjas, P., Taipale, R., Hupa, M., and Silvennoinen, J., “Reduction of Superheater Corrosion by Co-Firing Risky Biomass with Sewage Sludge,” *Fuel*, **89**, 2376-2386 (2010).
  15. Chao, H., Apostolos, G., and Jing, Y., “Conversion of Sewage Sludge to Clean Solid Fuel Using Hydrothermal Carbonization: Hydrochar Fuel Characteristics and Combustion Behavior,” *Appl. Energy*, **111**, 257-266 (2013).
  16. Ganesh, K., Zhengang, L., Akshay, J., Srinivasan, M., and Rajasekhar, B., “Hydrothermal Carbonization of Sewage Sludge for Energy Production with Coal,” *Fuel*, **111**, 201-210 (2013).
  17. Eyser, C., Palmuc, K., Schmidt, T., and Tuerka, J., “Pharmaceutical Load in Sewage Sludge and Biochar Produced by Hydrothermal Carbonization,” *Sci. Total Environ.*, **537**, 180-186 (2015).
  18. Chuan, P., Yunbo, Z., Yun, Z., Bibo, X., Tengfei, W., Caiting, L., and Guangming, Z., “Production of Char from Sewage Sludge Employing Hydrothermal Carbonization: Char Properties,” *Combust. Behavior and Thermal Characteristics, Fuel*, **176**, 110-118 (2016).
  19. Liu, G., Yan, L., Pozzobon, E., Higgins, B., Milewicz, M., and Repcznski, A., “High Portion Biomass Co-Firing and NO<sub>x</sub> Reduction in a Coal-Fired Boiler,” *Clean Coal & Fuel Systems 2012*, 192-205 (2012).
  20. Sung, Y., Lee, S., Kim, C., Jun, D., Moon, C., Choi, G., and Kim, D., “Synergistic Effect of Co-Firing Woody Biomass with Coal on NO<sub>x</sub> Reduction and Burnout during Air-Staged Combustion Experimental Thermal and Fluid Science,” *ETF Scienceev.*, **71**, 114-125 (2016).