한국대기환경학회지 제 28 권 제 2 호
J. KOSAE Vol. 28, No. 2 (2012) pp. 182 ~ 189
Journal of Korean Society for Atmospheric Environment
DOI: http://dx.doi.org/10.5572/KOSAE.2012.28.2.182

석탄과 슬러지의 혼합연소에 따른 수은 배출 특성

Mercury Emission Characteristics from Co-Combustion of Coal and Sludge

강신욱 · 심성훈[1] · 정상현[1] · 정종현[2] · 이상섭*
충북대학교 환경공학과, [1]한국기계연구원 환경에너지연구본부
[2]대구한의대학교 보건학부

(2012년 1월 19일 접수, 2012년 2월 22일 수정, 2012년 3월 10일 채택)

Sin-Wook Kang, Sung-Hoon Shim[1], Sang-Hyun Jeong[1], Jong-Hyeon Jung[2] and Sang-Sup Lee*
Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University
[1]*Environmental and Energy Research Division, Korea Institute of Machinery & Materials*
[2]*Faculty of Health Science, Daegu Haany University*

(Received 19 January 2012, revised 22 February 2012, accepted 10 March 2012)

Abstract

Co-combustion of sludge with coal is proposed as an alternative option for sludge disposal instead of ocean dumping. Because the combustion of sludge can cause emissions of various air pollutants, it is important to understand the characteristics of sludge combustion flue gases. Especially, very few studies are found to investigate mercury emissions from the co-combustion of sludge with coal. In this study, coal and sludge samples were prepared with different mixing ratios. These samples were combusted in a bench-scale combustor, and their flue gases were analyzed. Due to higher mercury content in the sludge sample, higher mercury emissions were found with an increase in a ratio of sludge to coal. Compared to the combustion flue gas of the coal sample, higher levels of mercury oxidation were found in the combustion flue gas of the samples including sludge.

Key words : Coal, Sludge, Co-combustion, Mercury, Combustor

1. 서 론

쾌적한 도시기반의 조성을 위해 건설된 하폐수처리장의 증가로 하수슬러지의 발생량도 꾸준히 증가하고 있어 또 다른 사회문제로 대두되고 있다(이완구, 2007). 정부에서는 1997년 유기성 슬러지의 직매립 금지를 통하여 육상에서의 처리처분, 자원화를 유도하였지만 재활용 및 소각처리의 비율은 크게 변동이 없었고, 비교적 처리 비용이 낮은 해양배출의 처리가 증가하였다(환경부, 2008). 그러나 현재는 하수슬러지 해양투기를 금지하는 런던협약의 발효로 인하여 하수슬러지의 재활용 및 에너지화를 통한 육상

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)43-261-2468, E-mail : slee@chungbuk.ac.kr

처리 대책 마련이 여느 때보다도 더욱 시급한 상황이다(환경부, 2008; Sim, 2002).

하폐수처리장에서 탈수를 거친 슬러지는 80% 정도의 수분을 함유하고 있지만 건조시켰을 경우 3,000~4,500 kcal/kg의 발열량을 가지고 있다. 이 값은 국내 무연탄의 발열량과 비슷한 수준으로 단독연료로 사용하기에는 어려움이 있으나, 적절한 처리를 거치면 공정의 에너지원은 물론 발전 및 난방용 연료로도 전환이 가능하다. 하지만, 기존 하수슬러지 소각으로는 소각계획량의 한계로 인하여 제약이 따르며, 실제 이론 발열량을 재현하기에 어려움이 따를 수 있다(곽연호, 2008; Kim *et al.*, 1999). 따라서 석탄 등의 연료와 건조슬러지를 혼합하여 사용하면 하수슬러지를 보조연료로 에너지화하는 것이 가능해진다(Ha, 2009; 곽연호, 2008; Lee *et al.*, 2005). 특히 건조슬러지를 기존의 석탄화력발전소에 보조연료로 사용하면 연소로에서 석탄과 함께 연소되므로 효율적인 에너지 전환을 기대할 수 있고, 하수슬러지의 발생량이 줄더라도 발전소 운전에 거의 영향을 받지 않는 장점이 있다.

하수슬러지는 다량의 중금속 및 유해성분을 함유하고 있어, 연소할 경우 중금속 및 가스상 오염물질의 배출에 따른 문제점을 야기할 수 있다. 관련연구로써 Park *et al.* (2009)은 하수슬러지 소각시설에서 배출되는 중금속의 농도를 분석하였고, Duan *et al.* (2010)은 유동층 연소장치에서 석탄과 슬러지를 혼합연소하였을 때 배출되는 수은의 배출특성을 알칼리성 흡수제의 주입량과 관련지어 조사하였다. 이렇듯 국내외적으로 하수슬러지 연소에 따른 오염물질 배출과 관련된 연구가 진행되고 있으나, 하수슬러지의 에너지화를 통한 육상처리대책 마련이 시급한 현 시점을 고려할 때 여전히 미흡한 수준으로 판단된다. 또한 배출 중금속 중에서 인체에 매우 유해한 물질로 알려져 있는 수은에 대한 연구는 특히 국내에서 여전히 미흡한 실정이다(Jung and Shim, 2009). 슬러지의 수은 함량은 0.061~4.13 ppm으로 문헌에 따라 서로 다른 함유량이 보고되고 있어(Park *et al.*, 2009; Åmand and Leckner, 2004; Werther and Ogada, 1999) 슬러지 내 평균 수은 농도를 단정지어 언급하기 어렵지만, 대부분 석탄에 비하여 매우 높은 수준의 수은 함량이 보고되고 있다.

수은은 미국 환경보호국(US EPA)에서 유해 오염물질 189종의 하나로 선정되어 있고, 미량으로 존재하여도 인체 및 동식물의 신경계통에 상당히 치명적인 중금속으로 잘 알려져 있다(이주형, 2006). 수은은 원소상태의 수은인 원소수은(Hg^0), 산화된 형태인 산화수은(Hg^{2+}), 입자와 결합되어 있는 형태인 입자수은(Hg_p)의 세 가지 형태로 구분하며, 원소수은과 산화수은은 배기가스 내에서 가스상으로 존재하게 된다. 미국 환경보호국 보고서에 따르면(Kilgroe *et al.*, 2001), 입자수은은 기존에 설치된 입자제어설비에 의해 쉽게 제어되지만, 가스상 수은은 주변조건에 민감하게 반응하여 입자수은보다는 제어에 어려움을 가지고 있다. 그리고 산화수은은 물에 잘 용해되고 활성탄 흡착제 및 알칼리성 흡수제 등과 쉽게 반응하여 포집되는 특성이 있으나, 원소수은은 반응성이 매우 낮아 기존의 대기오염 제어설비에서 거의 포집되지 않고 배출되는 특성이 있다. 따라서 효율적인 수은제어 전략을 수립하기 위해서는 해당 공정에서 배출되는 수은의 조성 및 특성에 대한 조사가 선행되어야 한다.

본 연구에서는 슬러지를 보조연료로 사용함에 따른 수은의 배출특성에 대해 조사하고자 한다. 이를 위하여 미분탄과 건조슬러지를 연소시켰을 때 배출되는 가스의 특성을 살펴볼 수 있도록 실험실 규모의 연소시스템과 배출가스 분석시스템을 구축하였다. 그리고 구축된 시스템에 미분탄과 건조슬러지 분말의 혼합비율을 달리하여 연소시켰을 때 배출되는 수은을 분석하여 각각의 특성을 조사하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

석탄과 슬러지의 혼합 연소 후 배출되는 가스를 분석하기 위하여 그림 1에서와 같이 실험실 규모의 연소 및 가스 분석시스템을 구성하였다. 실험하고자 하는 각각의 연료는 연료 공급 시스템(Rovo Feeder, DAEWON ENG, Korea, 0~500 rpm)을 통하여 일정한 속도로 주입되도록 하였고, 연소 시 필요한 공기는 질량 유량 조절기(MFC)를 이용하여 일정하게 조절하였다. 연소로는 온도조절기기(CT-100, KS ENG, Korea) 및 열전대를 이용하여 상단부와 하단부의 온도를 950°C로 일정하게 유지할 수 있도록 하였다. 그

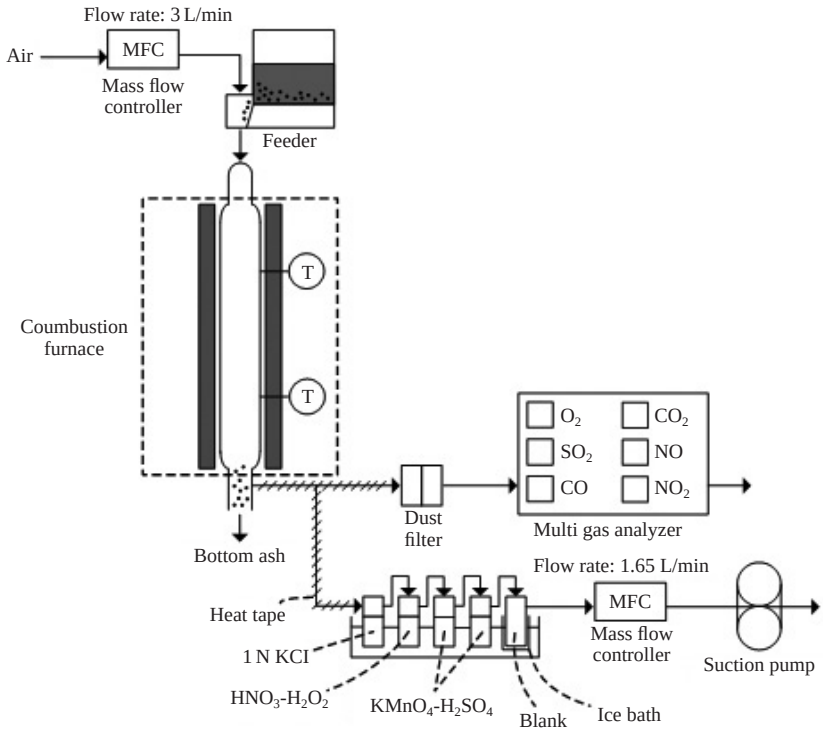

Fig. 1. Schematic diagram of combustion apparatus.

리고 반응기의 크기는 길이 80 cm 내경 3.6 cm이며, 실험 온도에 잘 견딜 수 있도록 석영(Quartz)재질로 제작하였다. 반응기에서 연소를 마친 배출 가스의 일부는 분진필터를 지나 연소 가스 분석기(Vario Plus, MRU, Germany)로 유입되도록 하여, 가스중의 산소(O_2), 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO_2), 질소산화물(NO_x), 이산화황(SO_2)의 농도를 매초 간격으로 측정될 수 있도록 하였다. 그리고 배출 가스 중 다른 일부는 채취하여 수은 분석에 사용되었다. 수은의 채취 및 분석에는 일반적으로 통용되는 수은 분석법인 Ontario Hydro Method를 적용하였다. 그림 1에서와 같이 반응기 하단부터 임핀져 입구까지 열 테이프(heat tape)를 이용하여 일정 온도로 유지시킨 다음, 첫 번째 임핀져에서 1 N KCl 수용액에 산화수은이 포집되도록 하였다. 두 번째 임핀져에는 5% HNO_3-10% H_2O_2 수용액을 넣고, 세 번째와 네 번째 임핀져에는 4% $KMnO_4$-10% H_2SO_4 수용액을 넣어 원소수은이 포집되도록 하였다. 마지막 다섯 번째 임핀져에는 빈 임핀져를 얼음조 안에 두어 고온의 배출 가스가 질량 유량 조절기로 바로 유입되는 것을 방지하였다. 임핀져 배열 후단에는 질량 유량 조절기와 진공 흡입 펌프(G-50DA, ULVAC, Japan)를 설치하여 채취 유량이 1.65 L/min로 일정하도록 하였다. 실험이 마친 후 각각의 임핀져에 포집된 수은의 양은 액상 수은분석기(RA-3060, NIC, Japan, 0.005～500 ng Hg)를 이용하여 결정하였다.

2. 2 실험방법

본 실험에서는 석탄 시료와 하수처리장에서 수거한 후 건조시킨 슬러지 시료를 이용하였고, 각각의 성상 분석 결과는 표 1에 정리하였다. 표에 나타난 바와 같이 석탄의 수은 함량이 문헌(Kilgroe *et al.*, 2001)에 보고된 평균 농도 범위인 0.03～0.22 ppm에 속하는 0.08 ppm으로 분석되었고, 슬러지의 수은 함량은 석탄 시료보다 10배 정도 높은 0.87 ppm으로 분석되었다. 또한 슬러지는 상대적으로 높은 염소함량을 보여주는데, 이는 하수처리장에서 염소 소독제 사용에 따른 영향인 것으로 사료된다. 연료의 염소함량은 배

Table 1. Elemental contents of the samples.

	Coal	Sludge
C (%)	65	28
H (%)	4.2	4.5
N (%)	1	3.7
S (%)	0.3	0.5
O (%)	11	22
Cl (ppm)	30	6000
Hg (ppm)	0.08	0.87
Fe (ppm)	4489	20641
Cu (ppm)	6.32	302
Ca (ppm)	11276	9989

기가스 중 수은의 산화와 깊은 연관성이 있는 것으로 보고되어 있다. 또한 수은의 산화에 영향을 줄 수 있는 철(Fe), 구리(Cu)의 함량을 분석한 결과, 슬러지에서 상대적으로 높은 함량을 나타내었다. 반면에 칼슘(Ca)의 함량은 서로 비슷한 수준으로 나타났다. 유기원소 분석이 서로 다른 분석장치를 통해 이루어짐으로 인한 오차는 존재할 수 있으나, 표 1에 포함되지 않는 함량의 대부분은 재(ash)의 함량으로 고려할 수 있다. 따라서 분석결과를 바탕으로 슬러지는 석탄보다 2배 이상 많은 재 함량을 가짐을 유추할 수 있는데, 이는 문헌의 결과와도 일치한다(Werther and Ogada, 1999).

본 연구에서는 석탄 단일연소, 슬러지 단일연소, 석탄과 슬러지의 혼합비를 1 : 1부터 점진적으로 늘려가면서 실험에 사용하기에 적합한 혼합비를 결정하였다. 그 결과 슬러지 단일연소, 석탄과 슬러지 1 : 1, 2 : 1 혼합비의 시료는 고농도 CO 가스를 배출하는 불완전연소를 보였으므로 본 실험의 시료로 사용하기에 어렵다고 판단하였다. 따라서 본 실험에서는 석탄과 슬러지를 5 : 1, 4 : 1, 3 : 1로 혼합하여 실험시료로 사용하였고, 혼합시료의 성상은 원 시료의 성상과 혼합비로부터 계산된 값과 동일한 것으로 가정하였다. 연료의 연소 시 사용하는 공기의 유량은 3 L/min, 과잉공기비는 1.3으로 일정하게 하였다. 각각의 실험은 총 5분간 실시하였는데, 연소가스의 농도는 분석기에서 매초 간격으로 측정이 되었고, 수은의 농도는 실험이 끝난 후 각 임핀져에 포집된 수은의 양을 통하여 결정하였다. 앞서 언급한 바와 같이 1 N KCl 수용액에는 산화수은이 포집되고, 5% HNO_3-10% H_2O_2 수용액과 4% $KMnO_4$-10% H_2SO_4 수용액에는 원소수은이 포집되므로, 각 임핀져에 포집된 수은의 양을 분석한 후 가스 채취 유량을 이용하여 배출가스 중 수은의 농도를 계산하였다. 그리고 원소수은과 산화수은은 서로 매우 다른 특성을 가지고 있어, 배기가스 중 원소수은과 산화수은의 비율이 수은 제어 전략을 수립하는데 중요한 지표로 사용된다. 따라서 아래의 식을 이용하여서 배출가스 중 수은의 산화도를 계산하였다.

Table 2. Summary of experimental conditions.

Item	Conditions
Fuel	Coal : Sludge (1 : 0, 5 : 1, 4 : 1, 3 : 1)
Fuel injection rate	0.321 ~ 0.360 g/min
Air/fuel ratio	1.3
Inside diameter of the reactor	3.6 cm
Height of the furnace	80 cm
Temperature inside the furnace	950˚C
Air flow rate	3 L/min (at 20˚C)
Test time	5 minutes

$$\text{수은의 산화도(\%)} = \frac{\text{배출가스 중 산화수은농도}}{\text{배출가스 중 원소수은농도} + \text{배출가스 중 산화수은농도}} \times 100 \quad (1)$$

또한 본 실험의 조건들은 표 2에 정리하여 나타내었다.

3. 실험결과

3.1 연료 공급 실험결과

본 연구에서는 공기의 유량과 과잉공기비를 3 L/min와 1.3으로 일정하게 하여 연소실험을 수행하였다. 과잉공기비는 실제 주입되는 공기의 양을 이론적으로 필요한 공기의 양으로 나누어 구할 수 있으므로, 표 1에 나타난 연료의 성상을 기준으로 실험조건에 적합한 연료 주입량을 계산하였다. 표에 나타난 바와 같이 각 연료는 서로 다른 성상을 가지고 있으므로, 1.3의 과잉공기비를 충족시키기 위해 필요한 연료의 주입량은 0.321 ~ 0.360 g/min 범위에서 차이가 있는 것으로 나타났다. 또한 석탄과 슬러지 시료의 혼합에 따른 물리적 변화의 가능성으로 인하여 연료의 정량 공급을 실험을 통하여 먼저 확인하였다.

본 실험에서는 연료 공급시스템으로 제작된 Rovo feeder는 원판 표면 위에 일정한 양의 시료가 위치되

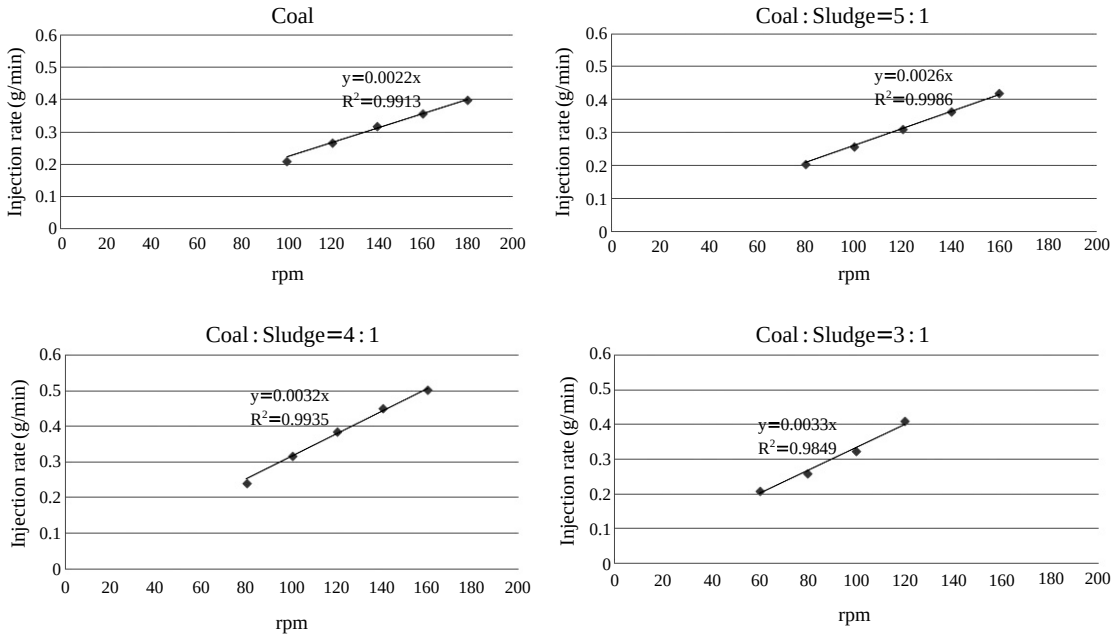

Fig. 2. Calibration between the rpm and fuel injection rate.

도록 한 후, 표면 위의 시료를 주입하는 원리로 운전되었고, 시료의 공급속도는 원판의 회전속도로 조절하였다. 따라서 각 시료에 대해 원판의 회전속도(rpm)에 따른 연료의 주입량을 산정하였고, 그 결과는 그림 2에 나타난 바와 같다. 그림에서와 같이 원판의 회전속도 증가에 따른 연료의 주입량의 결과가 시료의 혼합비율에 따라 서로 다름을 알 수 있다. 이는 혼합에 따른 시료 밀도 등의 물리적 변화에 기인하는 것으로 판단된다. 그러나 모든 시료에 대해 원판의 회전속도가 증가함에 따라 시료 주입량이 일관성 있게 직선적으로 증가하고 있으므로, 본 결과를 기초로 각 시료에 대해 필요한 연료량을 주입하였다.

3. 2 연소정도 평가

각 연료를 연소한 후 배출되는 O_2, CO, CO_2, NO_x, SO_2의 농도는 연소가스 분석기에 의해 매초마다 측정되었다. 그림 3의 (a)와 (b)는 석탄 단일 시료와 석탄과 슬러지의 혼합비 1 : 1의 시료를 각각 연소시켰을 때 배출되는 연소가스 농도들을 보여주고 있다. 그림에서는 각 연소가스의 농도변화를 쉽게 확인할 수 있도록 % 농도인 CO_2, O_2와 ppm 농도인 NO_x, CO, SO_2를 각각 분리하여 나타내었다. 본 실험은 연료를 일정한 속도로 연속적으로 주입하고 일정한 공기비에서 수행하는 것이므로, 이론적으로는 각 연료에서 배출되는 연소가스의 농도가 시간에 따라 일정해야 하지만, 실험적인 변수 등으로 인하여 정상상태에 도달하는데 어려움이 있을 수 있다. 그러나 그림에서 보는 바와 같이 석탄 단일 시료를 연소하였을 때에 실험 시작 30～50초 이내에 시료의 연소와 분석기의 상태가 정상상태에 도달하는 것으로 나타났다. 반면에 석탄과 슬러지의 혼합비 1 : 1의 시료를 연소하였을 때에는 고농도 CO 가스를 배출하는 불완전연소가 발견되었고, 연소가스의 농도변화가 심한 편이어서, 연소정도가 일정하게 유지되지 않는 것으로 판단되었다.

본 연구는 같은 연소조건에서 석탄과 슬러지의 혼합연소에 따른 수은 배출특성을 조사하고자 한 것이므로, 연소정도가 일정하게 유지되는 범위인 석탄과 슬러지의 혼합비 5 : 1, 4 : 1, 3 : 1과 석탄 단일 시료에 대해 실험을 수행하였다. 그리고 탄소성분의 CO_2 전환율 및 양론적인 연소계산을 통하여 연소정도를 평가하였을 때, 석탄과 슬러지 혼합시료는 60～70%, 석탄 단일시료는 약 80%의 연소효율을 보였다.

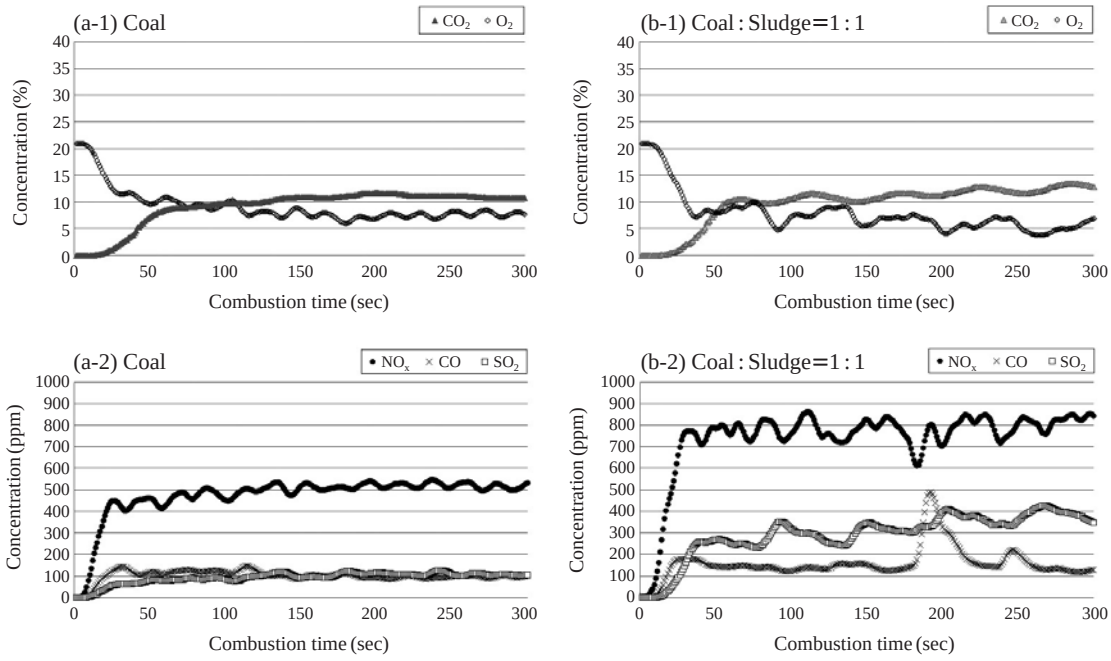

Fig. 3. Concentrations of CO_2, O_2, NO_x, CO and SO_2 in the combustion flue gas of (a) coal and (b) coal : sludge=1 : 1.

3. 3 수은 분석 결과

본 실험에서는 연소가스 분석기를 이용한 측정과 함께 Ontario Hydro Method를 이용하여 배출가스 중 수은을 분석하였다. 앞에서 설명한 바와 같이 배출가스 중 산화수은과 원소수은을 구분하여 분석하였으며, 그 결과를 바탕으로 수은의 평균 배출농도와 수은의 산화도를 계산하였다. 그리고 실험실 규모 연소실험의 제약으로 인해 시료에 따라 연소효율이 서로 다르므로 배출가스의 과잉산소 농도를 고려하여 각 수은 농도를 계산하였다. 그림 4는 각 연료에 대하여 4% 산소 보정농도를 기준으로 계산된 가스상 수은의 평균 배출농도를 나타내고 있는데, 석탄 단일연소의 경우 3.4 μg/Nm^3, 석탄과 슬러지 혼합비 5 : 1의 시료에서는 4.4 μg/Nm^3, 4 : 1의 시료에서는 6.1 μg/Nm^3, 3 : 1의 시료에서는 7.5 μg/Nm^{3}의 평균 배출농도를 나타내었다. 이는 수은 함량이 높은 슬러지의 혼합으로 인하여 수은의 배출이 증가함을 보여주는 것이다.

본 실험에서 각 시료에 함유되어 있는 수은이 완전연소하여 100% 가스상으로 배출된다고 가정하였을 때, 4% 산소 보정 농도를 기준으로 수은의 배출농도는 10～32 μg/Nm^3 범위가 되어야 한다. 이에 비

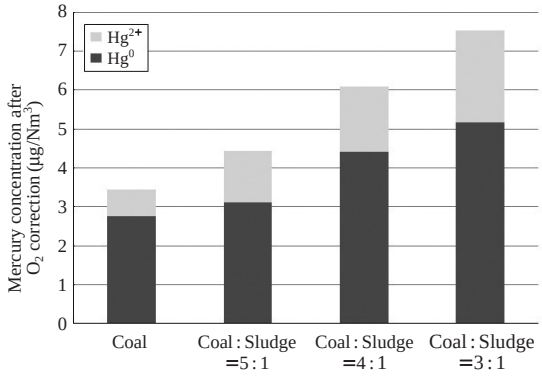

Fig. 4. Elemental and oxidized mercury concentrations after O_2 correction in the flue gas for each tested fuel sample.

하여 실험에서 얻은 가스상 수은은 상대적으로 낮은 농도인데, 이는 상당량의 수은이 재에 포집된 형태로 존재함을 의미하고, 실험 후 재를 분석한 결과를 통해서도 알 수 있었다. 그러나 본 실험과 같이 Drop tube furnace형태 연소기의 특성상 바닥재와 비산재를 구분하기 어렵고, 실공정에서 입자상 수은은 대부

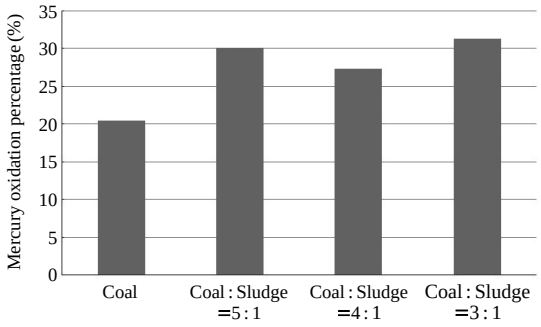

Fig. 5. Mercury oxidation percentage in the flue gas for each tested fuel sample.

분 입자제어설비에서 포집되므로, 여기서는 가스상 수은에 대해서만 다루도록 한다.

그림 5는 각 연료에 대하여 식(1)을 따라 계산하여 얻은 수은의 산화도를 나타내고 있다. 슬러지와 혼합한 시료의 연소가스에서는 혼합비와 상관없이 서로 비슷한 수준의 수은 산화도가 나타난 반면에 석탄 단일 연소가스에서는 상대적으로 낮은 수준의 수은 산화도가 나타났다. 이는 슬러지의 혼합으로 인해 연소가스 중 수은의 산화도가 증가함을 나타내는 것으로 슬러지의 높은 염소함량과 철, 구리 함량에 기인하는 것으로 판단된다. 그러나 슬러지의 혼합비가 증가함에 따라서는 수은 산화도가 변화하지 않는 것은 이러한 함량들이 일정수준 이상에서는 수은의 산화도에 관여하는 정도가 감소하기 때문으로 판단된다. 이는 연료의 염소, 철, 구리 등의 함량이 수은의 산화도에 영향을 미치는 중요한 인자들 중 하나이지만, 각 함량이 증가함에 따라 수은의 산화도가 직선적으로 증가하는 관계는 아님을 보여주는 문헌들에서의 결과와도 일치한다(Wang *et al.*, 2009; Kilgroe *et al.*, 2001). 그리고 본 실험에서 나타난 수은의 산화도는 국내의 다른 문헌(Park *et al.*, 2008)에서 석탄의 단일 연소에 대해 보고한 수은의 산화도와 유사한 결과를 나타내었다.

4. 결 론

본 연구에서는 하수슬러지를 석탄의 보조연료로 사용하여 에너지화하였을 때 발생하는 수은의 변화를 살펴보았다. 실험실규모의 연소장치인 Drop tube furnace의 특성상 체류시간이 부족하여 60~80%의 연소효율을 나타내었으나, 연소정도가 시간에 따라 일정하게 유지됨을 확인할 수 있었다. 따라서 실험은 연소정도가 일정하게 유지되는 범위인 석탄과 슬러지의 혼합비 5 : 1, 4 : 1, 3 : 1과 석탄 단일 시료를 이용하여 수행하였다. 수은의 평균 배출농도는 석탄 단일 연소 시 3.4 μg/Nm^3, 석탄과 건조슬러지 5 : 1 비율의 혼합시료를 연소하였을 경우 4.4 μg/Nm^3, 4 : 1 혼합시료에 대해서는 6.1 μg/Nm^3, 3 : 1 혼합시료에 대해서는 7.5 μg/Nm^{3}로 나타나 슬러지 혼합비가 증가할수록 수은 배출농도가 증가함을 보여주었다. 반면에 수은의 산화도는 석탄 단일 연소의 경우 약 20%를 나타냈고, 슬러지가 함유된 혼합시료의 연소에서는 27~31%의 범위에서 서로 비슷한 산화도를 보였다. 이상의 결과들은 하수슬러지를 보조연료로 에너지화하는 경우 수은의 배출증가가 예상되어 이에 따른 대책이 필요함을 알 수 있다. 그러나 수은의 배출농도는 증가하지만, 상대적으로 제어가 용이한 산화수은의 비율도 함께 증가할 것으로 예상되므로 수은제어 전략을 수립하기에는 용이할 것으로 판단되었다.

감사의 글

이 논문은 2010학년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었고, 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2011-0013242).

참 고 문 헌

곽연호(2008) 유동층 소각로에서 하수슬러지와 RDF의 혼합연소 및 가스 배출 특성, 창원대학교 박사학위논문.

이완구(2007) 하수슬러지 탄화물의 바이오매스 연료로서의 유효이용에 관한 기초연구, 한양대학교 석사학위논문.

이주형(2006) 인위적 배출원 및 실험용 Furnace에서의 수은 화합물 배출거동연구, 연세대학교 석사학위논문.

환경부(2008) 하수슬러지 통계.

Åmand, L.-E. and B. Leckner (2004) Metal emissions from co-combustion of sewage sludge and coal/wood in fluidized bed, Fuel, 83(13), 1803-1821.

Duan, Y., C. Zhao, Y. Wang, and C. Wu (2010) Mercury Emission from Co-combustion of Coal and Sludge in a Circulating Fluidized-Bed Incinerator, Energy Fuels 2010, 24(1), 220-224.

Ha, S.A. (2009) A Study on the Characteristics of Combustion and Manufacturing Process on Refuse-derived Fuel by Mixing Different Ratios with Organic and Combustible Wastes, J. of KOWREC, 17(1), 27-38.(in Korean with English abstract)

Jung, J.S. and S.G. Shim (2009) Mercury Research and Management in Korea, J. KOSAE, 25(2), 99-107. (in Korean with English abstract)

Kilgroe, J.D., C.B. Sedman, R.K. Srivastava, J.V. Ryan, C.W. Lee, and S.A. Thorneloe (2001) Control of mercury emissions from coal-fired electric utility boilers: interim report, U.S. Environmental Protection Agency, National Risk Management Research Laboratory.

Kim, K.S., Y.N. Park, and J.C. Chung (1999) Recycling of Sewage Sludge and Study of a Policy Plan, J. of KOWREC, 7(1), 79-91. (in Korean with English abstract)

Lee, D.G., H.Y. Shin, H. Kwak, and S.Y. Bae (2005) Co-combustion Characteristics of Sewage Sludge and RDF (Refuse Derived Fuel), J of KSWM, 22(6), 533-540. (in Korean with English abstract)

Park, J.M., S.B. Lee, M.J. Kim, J.P. Kim, J.C. Kim, S.J. Lee, and S.H. Lee (2009) Study on the Emission Characteristics of Heavy metals in sewage sludge Incinerator, J. of ESE, 24(3), 19-27. (in Korean with English abstract)

Park, K.S., J.H. Lee, J.H. Kim, S.H. Lee, and Y.C. Seo (2008) A Study on Emission Characteristics of Mercury from Coal Combustion at a Lab-scale Furnace, J. KOSAE, 24(2), 238-248. (in Korean with English abstract)

Sim, D.H. (2002) Results of recent field program in atmospheric diffusion, J. of KOWREC, 10(3), 17-20.

Wang, Y., Y. Duan, L. Yang, C. Zhao, X. Shen, M. Zhang, Y. Zhuo, and C. Chen (2009) Experimental study on mercury transformation and removal in coal-fired boiler flue gases, Fuel Processing Technology, 90(5), 643-651.

Werther, J. and T. Ogada (1999) Sewage sludge combustion, Progress in Energy and Combustion Science, 25(1), 55-116.