

발전용 역청탄과 저열량탄 혼소시 Tar/Soot의 배출 특성 연구

이병화 · 김진호 · 김규보* · 김승모* · 진중환**†

부산대학교 기계공학부 대학원, *부산대학교 화력발전에너지분석기술센터, **부산대학교 기계공학부
(2013년 10월 19일 접수, 2014년 5월 23일 수정, 2014년 6월 2일 채택)

Investigation of Tar/soot Yield of Bituminous and Low Rank Coal Blends

Byung Hwa Lee · Jin Ho Kim · Gyu Bo Kim* · Seng Mo Kim* · Chung Hwan Jeon**†

Graduate School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.

*Pusan Clean Coal Center, Pusan Nat'l Univ.

**School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.

(Received 19 October 2013, Revised 23 May 2014, Accepted 2 June 2014)

요약

미분탄의 연소 또는 열분해 과정으로부터 발생하는 tar-soot는 복사 열전달 및 질소산화물의 추가적인 발생 원인이라는 관점에서 의미 있게 다루어지고 있다. 최근 저열량탄이 증가함에 따라 시멘트의 원료로 재활용되던 석탄회에서 다량의 미연분과 tar-soot가 포함되어 오히려 다시 반입되는 사례가 빈번해지고 있다. 따라서 본 연구에서는 저열량탄 사용 확대에 따른 혼탄연소 조건에서 tar-soot의 배출특성을 살펴보기 위해 반응기로써 LFR(Laminar Flow Reactor)을 적용하였으며, 연료로는 현재 국내발전소에서 사용 중인 역청탄 2종(MOUNTAIN, MACARHTUR)과 아역청탄(KPU)을 이용하여 단탄별 tar-soot 배출특성과 혼소비에 따른 배출특성을 화염의 구조 변화와 함께 측정하였다. 휘발분이 많은 아역청탄의 soot cloud 길이는 역청탄에 비해 길었지만 전체적인 화염 길이는 짧아졌다. 단탄별 실험결과에서는 역청탄의 tar-soot 발생량이 아역청탄의 발생률보다 높았으며 역청탄 중 휘발분 함량이 많은 MOUNTAIN탄이 상대적으로 휘발분 함량이 적은 MACARHTUR탄의 tar-soot 발생률보다 높았다. 혼소시에는 단탄의 연소특성과는 다른 새로운 특성을 나타내었으며 저열량탄과 혼소되는 역청탄의 종에 따라 tar-soot 발생량이 지배되는 것을 확인하였으나 혼소비에 따른 평균적 특성이 아닌 완전히 차별되는 배출특성을 나타냄에 따라 석탄의 등급에 따라 최적의 혼소비를 찾아서 연소시키는 것이 tar-soot 발생량을 줄일 수 있는 방법임을 의미한다.

주요어 : 층류반응기(LFR, Laminar Flow Reactor), 단탄, 혼탄, 타르-수트 발생량

Abstract - Soot and tar which were derived from combustion or pyrolysis processes in Puverized Coal(PC) furnace or boiler have been significantly dealing in a radiative heat transfer and an additional source of NOx. Furthermore, the increasing for the use of a coal with low caloric value gives rise to a lot of tar-soot yield and LOI in a recycled ash for using cement materials. So, the ash with higher tar-soot yield and LOI can not recycle due to decreased strength of concrete. In this study, tar-soot yields and flame structures were investigated using the LFR for a blending combustion with bituminous coal and sub-bituminous coal. Also, The investigation were conducted as each single coals and blending ratio. The coals are used in a doestic power plant. In the

†To whom corresponding should be addressed.

School of Mechanical Engineering, Pusan National Univ.,
Jangjeon 2-dong, Geumjeong-gu, Busan, 609-735 Korea
Tel : 051-510-3035 E-mail : chjeon@pusan.ac.kr

experimental results, sub-bituminous coal with high volatile contents shows longer soot cloud length than bituminous coal, but overall flame length was shorter than bituminous coal. Tar-soot yields of sub-bituminous coal is lower than those of bituminous coal. Combustion characteristics are different between single coal and blended coal. Therefore, finding an optimal coal blending ratio according to coal rank effects on tar-soot yields.

Key words : LFR(Laminar Flow Reactor, single coal, blending coal, tar-soot yield)

1. 서 론

2011년 3월 후쿠시마 원전사고 이후 일본은 자국 내의 모든 원자력 발전소의 가동을 정지하였고, 독일 등 세계 여러 나라에서도 원자력 발전을 축소하고 있어 석탄 화력 발전에 대한 의존도가 높아지는 추세이며, 국내에서는 전력생산에 사용되는 에너지원 중 석탄의 비중이 43.6%(2010년 기준)를 차지하고 있다.⁽¹⁾

유연탄은 석유, 천연가스에 비해 가장 긴 160여년의 가용연한을 보유하고 있을 뿐만 아니라 정치적으로도 안정된 여러 국가에서 생산된다는 측면에서 많은 장점을 보유하고 있어, 석유를 대체할 미래 에너지로 주목받고 있다. 하지만 우리나라는 전력생산에 필요한 유연탄의 대부분을 수입에 의존하고 있는 실정으로 최근 중국, 인도 등 개발도상국들의 에너지 수요증가로 인하여 가격상승과 수급불균형이 심화되고 있으며, 이로 인하여 발전소 설계당시의 기준탄 범위를 벗어난 저열량탄의 사용이 불가피한 실정으로, 향후 저열량탄 사용은 더욱 증가될 것으로 전망되고 있다. 이러한 경향은 6080kcal/kg의 역청탄으로 설계된 발전소 보일러에서 국부적인 열불균형 및 화염편류 현상에 따른 NO_x, SO_x 등의 오염물 생성, 환경성, 집진성, 회부착성 등의 각종 문제를 발생시키며 특히 미연탄소의 증가 및 비회(fly ash)중 tar-soot 발생량 증가로 어려움을 겪고 있다.⁽²⁻⁴⁾ 현재 발전소에서는 날로 심각해지는 회처리장 확보문제 해결과 석탄회 재활용을 향상 등을 달성하기 위하여 석탄회의 미연탄소 및 tar-soot 발생량 저감이 절실한 상황이다.

따라서, 본 연구에서는 온도와 온도 상승률을 고려해 볼 때 실제 미분탄 연소로의 환경을 잘 모사할 수 있는 LFR(Laminar Flow Reactor)장치를 이용하여 저열량탄과의 혼소를 통해 혼소시 석탄의 종별 및 혼소비에 따른 tar-soot 발생량 특성을 관찰함으로써 저열량탄 사용 확대에 따른 tar-soot 발생특성을 규명하고 실제 보일러 운전을 위한 혼소기초정보를 제공하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

2-1 실험장치

LFR 시스템의 개략도⁽¹⁸⁾를 Fig. 1에 나타내었다.

장치의 주요 구성품은 크게 평판확산화염을 만들기 위한 버너 및 석탄입자를 버너의 상부로 이송하기 위한 석탄입자공급기, 석탄입자가 연소하는 것을 관찰하고 계측하기 위한 사각 석영관으로 제작된 반응부, 평판화염을 만들기 위한 연료로 일산화탄소 가스와 수소, 산화제로 산소와 질소 그리고 석탄입자 이송용 가스를 공급하기 위한 가스 공급부로 구성되어 있다. 그리고 반응영역별 특성분석을 용이하게 하기 위한 버너 및 반응기를 움직일 수 있는 2축 이송대를 설치, 구성되어 있다. 그리고 반응기 상부에는 tar-soot, char를 포집하는 샘플링 프로브가 설치되어 있다.

2-1-1 평판화염버너 및 반응부

버너는 헨켈 버너를 모형으로 제작되었다. 석탄입자들을 연속적으로 고온 층류평판화염에 공급하여 연소될 수 있도록 하는 열원을 제공한다. LFR 장치는 보일러 내부 화로 조건과 유사한 105 K의 승온율을 가지고 있다. 육각 허니컴 모양의 셀 매트릭스에 스테인레스 관을 일정한 간격으로 삽입하였으며, 전체 평판 화염면은 사각형 단면(44mmX43mm)이다. 이 모세관들은 가스연료가 공급되는 관이며 석탄입자는 중심에 삽입된 하나의 모세관(내경 0.6mm)을 통하여 공급된다. 반응부의 역할을 하는 사각단면 형상의 석영관이 버너위에 설치되어 있다.

2-1-2 미분탄 공급 장치

미분탄 연소실험에 있어서 가장 어려우면서 중요한 부분이 마이크로 크기의 입자를 정량적으로 공급하는 것이다. Fig. 1에 나타난 것과 같이 미분탄 공급(coal feeder) 장치는 석탄입자를 저장하고 있는 밀폐

된 주사기, 설정된 속도로 일정한 양의 석탄을 공급하기 위한 플런저(Plunger)와 이를 밀어 올리는 펌프, 두 개의 모세관 튜브와 진동자로 구성되어 있다. 두 개의 모세관 중 하나는 이송용 질소가스를 주입하며, 다른 하나는 석탄입자를 질소가스에 실어 버너 상부로 공급하기 위해 사용된다. 진동자는 주사기에 진동을 가하여 석탄입자가 부상하여 원활하게 공급될 수 있는 역할을 한다. 석탄의 이송유량은 일정 시간동안 공급되는 석탄입자의 무게를 측정하여 일정한 양으로 공급이 되는지 확인하였으며, Fig. 2에 결과를 나타내었다. 본 실험에 사용된 석탄샘플은 MOUNTAIN, MACARTHUR 그리고 KPU의 3종류로 입자 크기를 45~75 μ m로 분류한 샘플에 대해 시간에 따른 공급유량 검증을 수행했다.

2-1-3 가스 공급 장치

버너로 공급되는 가스는 평판 확산화염을 만들기 위한 연료(일산화탄소, 수소)와 산화제(질소, 산소), 석탄입자를 이송하기 위한 이송용 가스(질소)로 구분된다. 석탄입자를 연소하기 위한 분위기 가스의 조건에 따라 연료 및 산화제를 선택적으로 혼합할 수 있도록 제작되었다. 각각의 가스들은 개별의 유량제어기(Mass Flow Controller)를 통하여 제어하였다.

본 실험에서는, 산화제로는 산소(O₂), 연료로는 일산화탄소(CO)와 수소(H₂) 그리고 석탄입자 이송용 가스는 질소(N₂)를 사용하였다.

2-1-4 샘플링 프로브

샘플링 프로브는 석탄 입자의 반응 후 생성된 가스 성분(light gas)과 tar-soot, char 또는 solid materials을 분리, 포집할 수 있는 장치이다. 연소중인 석탄입자들은 샘플링 프로브 후단부에 연결되어 있는 진공 펌프에 의하여 프로브 속으로 포집되며, 이때 프로브의 내벽에서는 반응하고 있는 입자들의 반응을 강제로 종료시키기 위해 질소 가스가 공급되도록 설계되었다.

상부와 하부로 나누어진 2가지의 필터가 있는데 상대적으로 무게가 가벼운 배기가스와 tar-soot 입자의 일부는 하부 필터에 걸리지만 하부 필터에서 걸리지 못한 일부 tar 및 soot 입자는 관성력에 의해 상부의 필터에 걸리게 된다. Char 입자는 원심력에 의해 사이클론 내벽을 따라 char 포집기에 모이게 된다.

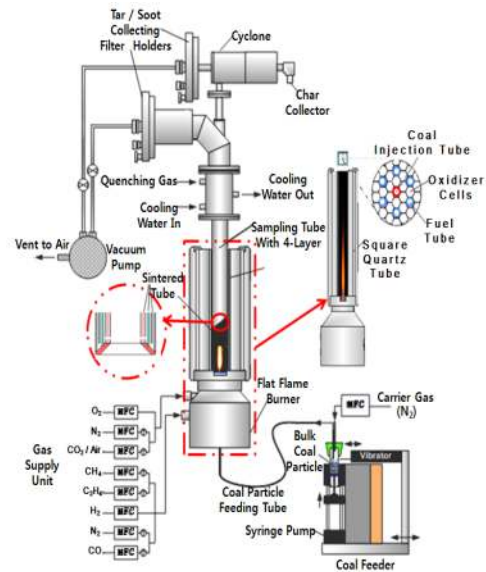


Fig. 1. Schematic of experimental apparatus to investigation tar-soot yield by coal blending combustion.

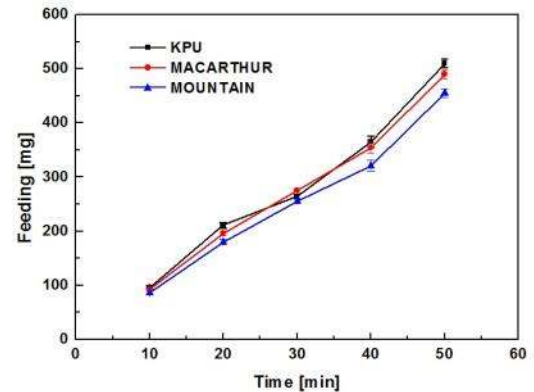


Fig. 2. The Evaluation for the feeding rate with the sample coals.

Tar-soot 무게는 상, 하부에 구성된 필터의 실험 전, 후 무게를 측정하여 그 차이의 합으로 결정하였다.

2-1-5 화염길이

화염의 디지털 이미지를 얻기 위하여 FUJIFILM FinePix S5500모델의 카메라를 사용하였고, 이미지는 모두 동일한 조건(aperture:f/7, 노출시간:1/3초)에서 각각의 조건에 대해 이미지를 획득하였다.

2-2 실험방법

2-2-1 분위기 가스 및 화염온도

본 연구에서 석탄입자를 연소시키기 위한 평판화염을 형성하기 위하여 공급한 CO, H₂, O₂, N₂ 가스의 유량은 CO:6.2slm, H₂:0.3slm, O₂:3.3slm, N₂:19slm이다. CO화염 생성시 배출되는 가스 중 반응에 참여하지 않고 남아있는 산소는 전체 배출가스에 대한 몰분율은 3.5%이다. 이러한 가스들로 생성된 화염의 온도를 Fig. 3에 나타내었으며 버너로부터 20mm높이에서부터 220mm 높이까지 20mm 간격으로 R-type 열전대를 이용하여 온도를 측정하였다.

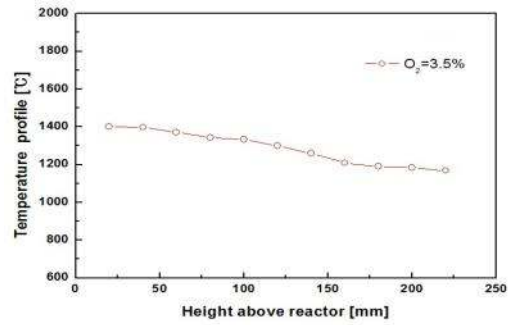


Fig. 3. Gas temperature profile in LFR center line.

2-2-2 미분탄 준비 및 물성치

본 실험에 사용된 석탄은 인도네시아산 아역청탄인 KPU탄과 호주산 역청탄 MACARTHUR탄, 캐나다산 역청탄 MOUNTAIN이다. 두 탄에 대한 공업분석과 원소분석 결과를 Table 1에 나타내었다. 일반적으로 발전소에서 사용하는 45~75µm의 입자크기를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1 화염구조와 길이

Fig. 4는 연소조건 및 탄종 변화에 따른 석탄입자들의 화염구조를 보여주고 있다. 화염사진으로부터 석탄입자가 연소반응 할 때 화염구조의 변화를 확인할 수 있으며 휘발분 연소과정에서 생성되는 soot cloud를 확인할 수 있다.

탄종과는 무관하게 공통적으로 화염의 가운데 고

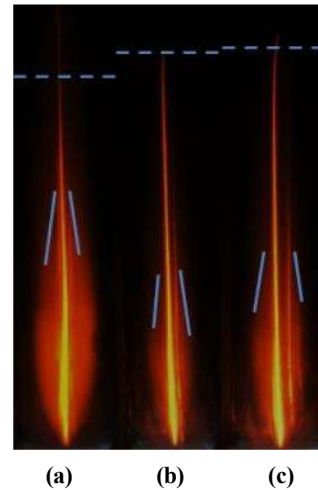


Fig. 4. The flame characteristics :

- (a) KPU O₂ 3.5mol%, (b) MACARTHUR O₂ 3.5 mol%, (c) MOUNTAIN O₂ 3.5 mol%, all height z=250mm.

23.9%, MACARHTUR 15.2% 순으로 휘발분 함량이 높은 KPU탄의 soot cloud 발생 영역이 두꺼우며

Table 1. Results of Proximate and ultimate analysis of the selected coal.

Coal (geographic origin)	Moisture (wt%) As rec'd	HHV (kcal/kg) Air dry	Proximate (wt% Air dry)				Ultimate (wt% Dry)					
			Moisture	VM	Ash	FC	C	H	O	N	S	Ash
KPU (Indonesia)	19.84	5,759	13.19	40.78	5.99	40.04	69.3	5.09	18.02	0.8	0.06	3.54
Macarthur (Australia)	9.7	6,465	1.7	15.2	20.7	62.4	70.6	3.62	4.05	1.51	0.23	19.99
Mountain (Canada)	13.1	6,877	4.00	23.9	11.5	60.6	76.4	4.2	6.47	0.98	0.31	11.65

채입자인 석탄의 연소가 일어나는 것을 관찰할 수 있으며 그 주변으로 가스연소인 soot cloud가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

휘발성분의 함량은 KPU 40.78%, MOUNTAIN

긴 것을 확인 할 수 있다. soot cloud의 연소가 종료되는 지점은 Fig. 4에서와 같이 각각 KPU 15.3cm, MACARTHUR 8.5cm, MOUNTAIN 10.2cm 이며 휘발분 함량이 적을수록 탈휘발 과정이 빠른 시간 안

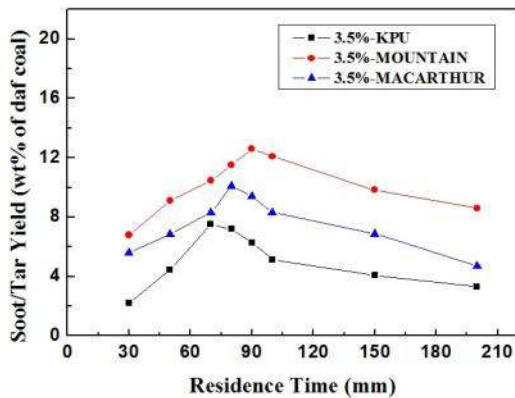


Fig. 5. Normalized soot and tar yields for single coal.

에 종료되며 좌 연소가 먼저 시작됨을 뜻한다. tar-soot 발생량 분석에서 다시 언급하겠지만 휘발성분이 많은 KPU탄의 soot cloud가 가장 두껍고 길게 형성되지만 오히려 tar-soot 발생량은 가장 적다. 이것은 탈휘발 과정에서 생성된 중간 생성물인 tar와 light gas(HCN, CH, CO, H₂)가 원소분석결과 중 석탄에 포함된 산소와 반응하여 soot의 발생을 저하시키는 것으로 사료된다.⁽⁴⁻¹⁰⁾

석탄의 연소가 종료되는 지점은 (a)21.24cm, (b)24.2cm, (c)25cm 이다. 휘발분 함량이 높은 KPU탄의 char 연소반응이 MACARTHUR, MOUNTAIN의 char 연소반응보다 늦게 시작됨에도 불구하고 전체 화염길이는 짧은 것을 확인할 수 있다. 이것으로 볼 때 전체적인 화염길이, 즉 석탄의 완전연소를 최종적으로 결정하는 중요 인자로 고정탄소의 함량이 전체적인 반응을 지배하는 중요한 인자라는 것을 알 수 있다.

3-2 단탄의 tar-soot 발생량 분석

Soot는 미분탄의 열분해시 휘발분의 약 50% 내외를 차지하는 tar 성분의 2차 열분해 과정을 통해서 주로 생성되는 것으로 알려져 있다. 석탄 입자의 온도가 증가하면 입자 내부의 화학적 결합이 분해되고 입자가 물러지는 metaplast의 상태가 되며⁽¹⁷⁾ 입자 온도가 더욱 상승하여 고분자 탄화수소계열의 tar와 light gas(CO, CO₂, CH₄, H₂O, HCN)등이 방출되고 char가 생성된다. tar 성분으로 다시 2차 열분해 과정을 통해서 soot를 형성하게 되는 것이다.⁽³⁾

Fig. 5의 tar-soot 발생량을 비교해 보면 역청탄인 MOUNTAIN과 MACARTHUR의 tar-soot 발생량이

아역청탄인 KPU보다 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 앞에서 언급했듯이 석탄연소 시 1차 탈휘발에서 tar가 생성되어 2차 탈휘발 과정을 거치면서 soot로 변화하게 되는데, 저열량탄에서 발생하는 타르는 벤젠고리모양의 부착물과 높은 산소 농도를 가지고 있는 구조이기 때문에 2차 탈휘발과정 동안에 깨지기가 쉬운 것으로 사료된다.

또한 Zeng⁽¹¹⁾, Bradley⁽¹⁵⁾, Webb⁽¹⁶⁾등이 제시한 바와 같이 MACARTHUR탄의 고유산소량은 4.05%, MOUNTAIN탄의 고유산소량은 6.47% 이지만 KPU탄은 18.02%로 3~4배 이상의 높은 산소 함량에 의해 휘발분이 분출되면서 발생하는 타르가 산소 또는 산화력 있는 OH-, O- 와 같은 라디칼과의 반응으로 인하여 C 성분으로 이루어진 soot가 아닌 기체 성분으로 전환되어진 것으로 사료된다. 즉 KPU탄의 tar-soot 발생량이 적은 이유는 산소와 tar-soot 성분의 산화반응에 의한 결과이다.⁽¹²⁻¹⁴⁾

체류시간에 따른 tar-soot 발생량은 석탄 등급이나 탄종에 관계없이 70mm~100mm 높이에서 peak값을 가지고 이후부터는 감소하는 경향을 보인다. 이 peak 부근에서 전반적인 탈휘발이 종료되고 이 구간 이후부터는 tar와 light gas의 발생량보다 산소등과 반응하여 산화되는 양이 더 많기 때문에 tar-soot의 발생량이 줄어드는 것으로 보인다.

3-3 혼탄의 tar-soot 발생량 분석

혼소의 경우는 저열량탄 사용확대에 따른 혼소영향을 살펴보기 위해 역청탄 중에서 비교적 휘발분이 높은 역청탄(MOUNTAIN)과 낮은 역청탄(MACARTHUR)을 구분하여 혼소하였으며 이때 tar-soot의 배출특성을 확인하여 보았다. 먼저 고휘발 역청탄인 MOUNTAIN와 아역청탄인 KPU 혼소시 tar-soot 발생량이 MOUNTAIN > KPU-MOUNTAIN(5:5) > KPU-MOUNTAIN(8:2) > KPU 순으로 아역청탄의 혼소비가 증가할수록 tar-soot 발생량이 감소하는 효과를 가져왔다. 반면 저휘발역청탄인 MACARTHUR와 아역청탄인 KPU 혼소시 tar-soot 발생량이 KPU-MACARTHUR(5:5) > MACARTHUR > KPU-MACARTHUR(8:2) > KPU순으로 나타났다. 혼소비를 5:5로 설정한 경우는 오히려 역청탄 단일 연소시 발생하는 tar-soot 발생량보다 오히려 증가한 결과를 가져왔지만 역청탄의 비율을 높인 8:2의 혼소비를 연소시켰을 때는 tar-soot

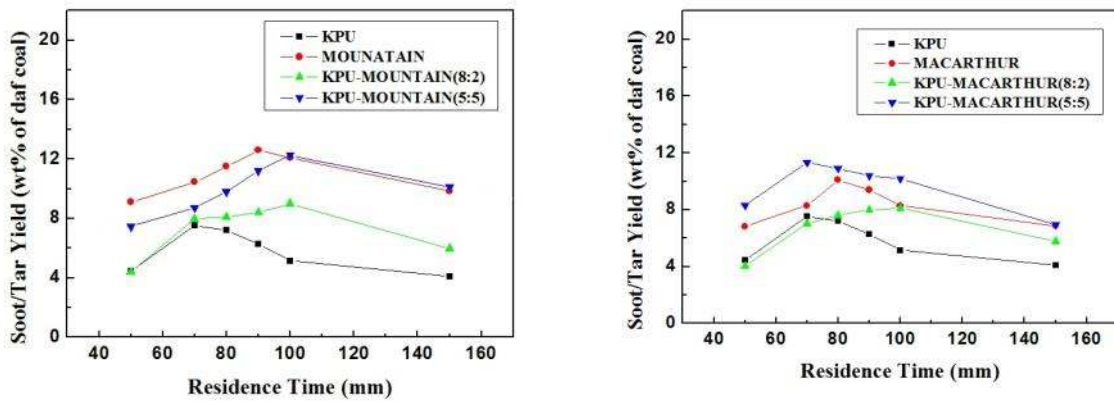


Fig. 6. Normalized soot and tar yields for blending coal.

발생량이 감소하였다. 좀 더 다양한 탄종과 혼소비율의 추가적인 실험이 필요 할 것으로 보이지만 이 결과로부터 설계탄의 범위에 적합한 역청탄(MOUNTAIN)을 혼소하는 경우와 설계탄에서 벗어난 범위의 역청탄(MACARTHUR)을 혼소하는 경우 각기 탄종에 맞는 최적의 혼소비율을 찾아서 연소시키는 것이 tar-soot 발생량 감소에 큰 영향을 미칠 것으로 보인다.

4. 결론

미분탄 연소특성을 연구하기 위하여, 실제 상용 미분탄 연소분위기를 잘 모사할 수 있는 LFR 실험장치를 이용하여 혼소비와 체류시간에 대하여 등급이 다른 세 종류 석탄의 tar-soot 발생률을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 휘발분 함량이 많은 KPU 탄이 MACARTHUR, MOUNTAIN 탄보다 soot cloud의 폭과 길이가 길었지만 전체적인 화염 길이는 짧았다. 화염길이를 결정하는 요소로 휘발분의 함량도 중요하지만 고정탄소의 함량이 더 중요한 요소이다.
- (2) 석탄 등급이 높은 역청탄인 MOUNTAIN, MACARTHUR탄의 tar-soot 발생률이 석탄 등급이 낮은 아역청탄인 KPU탄보다 큰 것을 확인할 수 있었다. 이는 석탄 연료의 조성 중 KPU탄 내의 상대적으로 높은 산소 성분으로 인해 tar가 light gas로 변환되는 것으로 나타났다.
- (3) 혼소의 경우 휘발분이 비교적 많은 역청탄과 저열량탄 혼소시 혼소 비율과 tar-soot 발생특

성이 산술평균적 특성을 나타내었다.

- (4) 저휘발역청탄, 즉 설계탄 범위를 상회하는 역청탄과 저열량탄 혼소시에는 역청탄의 혼소비가 높을 경우 단탄에서보다 더 높은 tar-soot가 배출되었다.

저열량탄 사용확대에 따라 비교적 설계탄을 상회하는 고열량탄 사용도 현재 증가하고 있으나, 이러한 혼소조건에서는 석탄 간 상호작용에 의한 산술평균적 특성을 나타내지 못함에 따라 혼소에 따른 연소특성 연구가 지속적으로 요구된다고 할 수 있다.

후기

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 제원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (NO. 201310101830)

References

1. Korea Electric Power Corporation, "Statistics of Electric Power in Korea," 80, 20-21(2010).
2. Ma, J., "Soot Formation During Coal Pyrolysis," Ph.D. dissertation, Department of chemical engineering, Brigham Young University(1996).
3. Zhang, H., "Nitrogen Evolution and Soot Formation During Secondary Coal Pyrolysis," Ph.D. dissertation, Department of chemical engineering, Brigham Young University(2001).
4. Fletcher, T. H., Ma, J., Rigby, J. R., Brown,

- A. L., Webb, B. W., "Soot in Coal Combustion Systems," *Progress in Energy and Combustion Science*, 23, 3, 283-301(1997).
5. Molina, A., "Evolution of Nitrogen During Char Oxidation," Ph.D. dissertation, Department of Chemical and Fuels engineering, University of Utah(2002).
 6. Essenhigh, R. H., Howard, J. B., "Pyrolysis of Coal Particles in Pulverized Fuel Flames" *I&EC Process Design and Development*, 6, 1, 74-84(1967).
 7. Saastamoinen, J., Gurgel Veras, C. A., Carvalho Jr, J. A., Aho, M., "Overlapping of The Devolatilization and Char Combustion Stages in The Burning of Coal Particles," *Combustion and Flame*, 116, 4, 567-579(1999).
 8. Haynes, B. S., "Soot and Hydrocarbons in Combustion, In : Bartok, W. and Sarofim, A. F. (Eds)" *Fossil fuel Combustion-A Source Book*, John Wiley, New York, 261pp(1991).
 9. McLean, W. M., Hardesty, D. R. and Pohl, J. H., *Eighteenth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1239pp(1980).
 10. Brown, A. L., "Modeling Soot in Pulverized Coal Flames," Master of Science, Department of chemical engineering, Brigham Young University(1997).
 11. Zeng, D., Hu, S., Sayre, A. N., Sarv, H., "On The Rank-dependence of Coal Tar Secondary Reactions," *Proceedings of the Combustion Institute*, 33, 1707-1714(2011).
 12. Park, C. and J. P. Appleton, "Shock-Tube Measurements of Soot Oxidation Rates," *Combustion and Flames*, 20, 369-379(1973).
 13. Frenklach, M. and H. Wang, "Detailed Modeling of Soot Particle Nucleation and Growth," *Twenty-Third Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, 1559-1566(1990).
 14. Radcliffe, S. W. and J. P. Appleton, "Soot Oxidation Rates in Gas Turbine Engines," *Combustion Science and Technology*, 4, 171-175(1971).
 15. Bradley, D., Lawes, M., Park, H. Y., Usta. N., "Modeling of Laminar Pulverized Coal Flames with Speciated Devolatilization and Comparisons with Experiments," *Combustion and Flame*, 144, 190-204(2006).
 16. Bradley, D., Lawes, M., Park, H. Y., Usta. N., "Modeling of Laminar Pulverized Coal Flames with Speciated Devolatilization and Comparisons with Experiments," *Combustion and Flame*, 144, 190-204(2006).
 17. Suuberg, E. M., Solomon, P. R., Serio, M. A., , "Coal Pyrolysis : Experiments, Kinetic Rates and Mechanisms," *Progress in Energy and Combustion Science*, 18, 133, 587-597(1992)
 18. Jeon, C. H., Kim, Y. G., Kim, J. D., Lee, B. H., Song, J. H., Chang, Y. J., "Experimental Investigation into Combustion Characteristics of Two Sub-bituminous Coals in O₂/N₂ and O₂/CO₂ Environments" *Energy&Fuels*, 24, 6034-6040(2010)