

석탄의 Slagging 연소와 2단 연소기술에 의한 분진 및 NO_x 저감 연구

최상일, 박주식, 손용권, 김호영*, 김재호**
한국에너지기술연구소, 고려대학교*, 대한석탄공사**

Study on the 2-staged slagging coal combustion for reduction of fly-ash and NO_x

S.I. Choi, C.S. Park, E.K. Shon, H.Y. Kim*, J.H. Kim**
KIER, Korea University*, Daihan Coal Corporation**

1. 서론

최근 국내의 에너지 수요는 특히 전기에너지 분야에서 급격한 증가추세를 보여왔으며 그 결과 전력생산을 위한 화석연료 중 특히 석탄의 사용량은 해가 갈수록 증가하였으며 이에 따라 다량의 대기오염물질과 온실가스 등이 발생하고 있어서 미래의 석탄 연소시스템들은 높은 열효율과 최소의 대기오염물질 배출을 필요로 하고 있다. 현재 국내 산업체와 화력발전소의 석탄 연소설비는 대부분이 미분탄 연소시스템을 사용하고 있으며 발생하는 공해물질 중 가장 문제시되고있는 것은 배기가스에 포함된 분진과 질소산화물(NO_x) 그리고 아황산가스라고 하겠다. 그중 국내의 미분탄 연소설비에서 분진과 질소산화물에 대한 대기오염 방지 대책과 관련된 문제점 들을 살펴보면 다음과 같다.

첫째, 분진은 연소후 집진설비를 사용하여 비교적 완벽하게 제거되고 있다고 할 수 있으나 회분에 의한 보일러의 slagging과 fouling 현상에 대한 근본적인 대책이 미흡하여 열 전달을 저해하거나 가스의 흐름을 차단하기도 하며 보일러의 마모와 부식을 초래하는 등 석탄 보일러의 성능에 크게 영향을 미치게되고 포집된 막대한 양의 석탄회 처리 또한 문제가 되고 있다.

둘째, 질소산화물(NO_x)은 저 NO_x 버너와 연소용 공기의 단계적 공급, 연소시스템의 진단과 최적화 기술 등을 이용하여 저감하고 있으나 아직까지 미흡한 상태여서 다량의 NO_x 배출에 의해 대기오염을 가중시키고 있으며 앞으로 NO_x 배출 규제가 엄격해질 전망이어서 탈질설비의 설치가 검토되고 있으나 막대한 예산과 운전비가 소요될 것이므로 보다 근본적인 대책이 필요한 실정이다.

2. 저공해 미분탄 연소기술

미분탄 연소에 따른 공해물질의 발생은 석탄의 직접연소시 공통적으로 발생하는 문제로서 미분탄 연소에만 국한되는 것은 아니다. 이러한 공해물질의 저감과 연소 및 운전상의 문제점들을 해결하기 위하여 새로운 저공해 연소기술의 개발이 필요하다. 저공해 연소기술은 연소방식 개선과 연소기와 버너의 구조 변경 등에 의해 가능하므로 비교적 적은 시설투자비로써 보다 경제성있는 공정이 가능할 뿐만 아니라 보일러 내부의 공해물질 유입을 현저히 감소시킬 수 있으므로 보일러와 관련 설비의 성능 개선은 물론 수명 연장도 가능하다. 또한 배기가스 후처리 공정과 복합적으로 사용됨으로써 초청정설비로 활용될 수 있다. 실제로 선진국에서 연구 및 개발되고 있는 저공해 보일러 시스템들은 저공해 연소기술과 배기가스의 후처리기술을 병행하여 사용함으로써 대기오염물질들을 획기적으로 감소시키고 있다.

2.1 선진국의 관련 연구개발 동향

2.1.1 Entrained Coal Combustor[1]

미국의 TRW에서는 저공해 석탄연소를 위한 Entrained Coal Combustor를 개발하였고 1987년도에는 2,800lb/hr의 steam 생산이 가능한 기존의 stoker 보일러를 개조하여 4,000 시간의 내구성 시험과정을 성공적으로 끝마쳤으며 현재는 50MWE급의 발전용 보일러에 적용하여 설치 중이다. 주요 기술을 살펴보면 석탄을 단계적으로 연소시켜 공기비와 연소온도 조절에 의해 NO_x 발생을 200ppm 까지 저감하였으며 고온의 slagging 연소기술을 적용하여 90% 정도의 회분을 제거하고 가스 성분만을 보일러에서 재 연소시켜 NO_x 저감과 동시에 보일러 내부의 분진 유입을 억제 시켰다.

2.1.2 Low Emission Boiler System[2]

미국의 Riley Stoker Corporation에서는 CCV(Combustion Controled Venturi) 저 NO_x burner와 U-fired 연소기를 사용하여 2000년 까지 상업용의 저공해 보일러를 개발하기 위해 다음과 같은 연구 개발을 추진하고 있다. CCV burner와 재 연소기술을 사용하고 최종적으로 배기가스 후처리설비를 사용함으로써 NO_x 발생을 0.1 lb/MBtu 까지 저감하고자 하였으며 U-fired slag tap 연소기를 사용하여 용융 상태에서 회분을 1차로 제거하고 다시 집진설비를 이용하여 2차로 분진을 제거함으로써 0.01 lb/MBtu 이하로 분진 발생을 감소하고자 하였다. 한편 전체적인 발전 효율은 기존 시스템 이상을 유지하도록 하였다.

2.1.3 High Performance Power System[3]

미국의 DOE 산하 PETC의 주관 하에 LEBS(Low Emission Boiler System)

와 함께 Combustion 2,000 program으로 추진되는 HIPPS project는 석탄을 이용한 복합발전시스템 개발을 위한 사업으로서 전체 효율을 47-48%로 계획하고 있으며 2,004년도의 실용화를 목표로 추진되고 있다. 그 핵심기술은 HITAF(High Temperature Air Furnace)와 석탄가스화기를 선택적으로 사용하는 것이며 NOx는 0.06lb/MBtu 이하로 분진은 0.003 lb/MBtu 이하로 저감하고자 한다.

2.2 연구목표

본 연구의 최종 목표는 연소과정 중 NOx, 분진 저감을 위한 저공해 미분탄 연소기의 개발이며 세부 연구목표와 방향은 다음과 같다.

첫째, Slagging 연소기술을 적용하여 90% 정도의 회분을 용융상태로 제거하기 위하여 2단계 고온 연소방식을 사용하였으며 clean gas 재 연소를 통하여 미분탄 연소공정의 청정화와 성능 개선을 추구하고자 하였다.

둘째, 새로운 구조의 연소기를 사용하여 고온의 연소영역에서는 공기비를 낮추고 저온의 연소영역인 보일러에서 최종 공기비를 유지하며 석탄을 단계별로 연소시켜 NOx 발생을 200ppm 이하로 저감하고자 하였다.

3. 연소시험

3.1 연소시험 방법

저공해 미분탄 연소과정은 연소기에서의 1차 연소와 보일러에서의 2차 연소로 구분될 수 있으며 1차 연소는 본 연구 결과로써 개발된 2단 동축형 cyclone 연소기를 이용한다. 1차 연소는 고온에서 저 공기비를 이용하여 환원성 분위기를 유지함으로써 질소산화물의 발생을 억제하는 동시에 slagging 연소를 이용하여 회분을 용융시켜 제거하기 위한 연소과정이다.

2차 연소는 1차 연소에서 발생하는 미연소가스와 미연탄소분의 완전연소를 위해 필요하며 최종적인 질소산화물의 저감을 위해 저온 연소가 필요하다.

3.2 연소시험 기준

시료탄으로써 회분의 용융온도 등을 감안하여 Alaska탄을 선정하였고 연소시험 기준은 다음과 같으며 시료탄의 개략적인 분석치는 <표 2-1>과 같다.

- (1) 1차 연소에서의 공기비 : 0.75 - 1.13
- (2) 2차 연소에서의 최종 공기비 : 1.1 - 1.15

Table 1. Analysis of Alaska coal(%)

Volatile	Ash	Moisture	C	H	O	N	S	Heating Value
44.85	14.42	5.09	54.4	4.55	26.16	0.64	0.17	5240(Kcal/Kg)

3.3 연소시험 장치

분진과 NOx 저감을 위한 시험용 연소시스템은 Fig. 1과 같으며 1차 연소에서 생성된 연소가스가 2차 연소를 위해 재 연소 보일러에 유입된다.

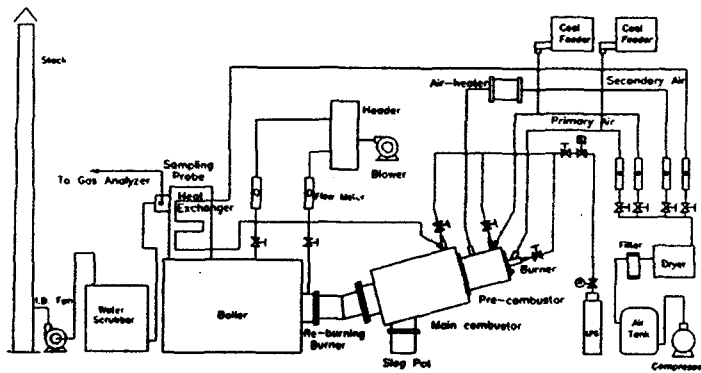


Fig. 1 Schematic diagram of the 2-staged slagging coal combustion system.

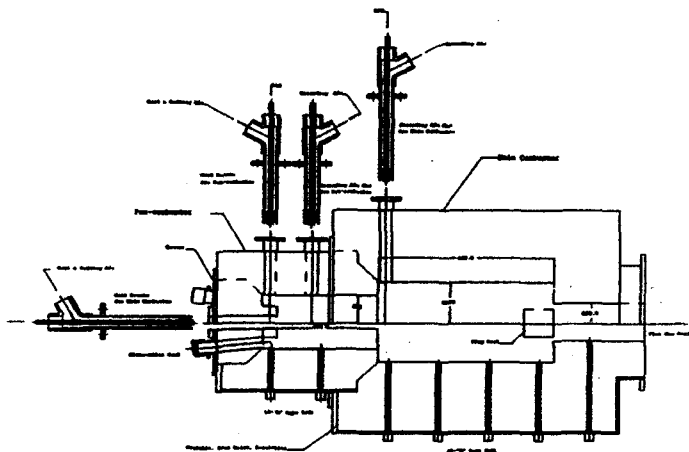


Fig. 2 2-staged concentric cyclone combustor.

연소기는 Fig. 2와 같이 동축형의 2단 cyclone 연소기의 형태이며 Pre-

combustor를 적용한 이유는 많은 양의 연소용 공기를 가열하여 main combustor에 공급함으로써 고온의 slaging 연소를 하기 위함이다.

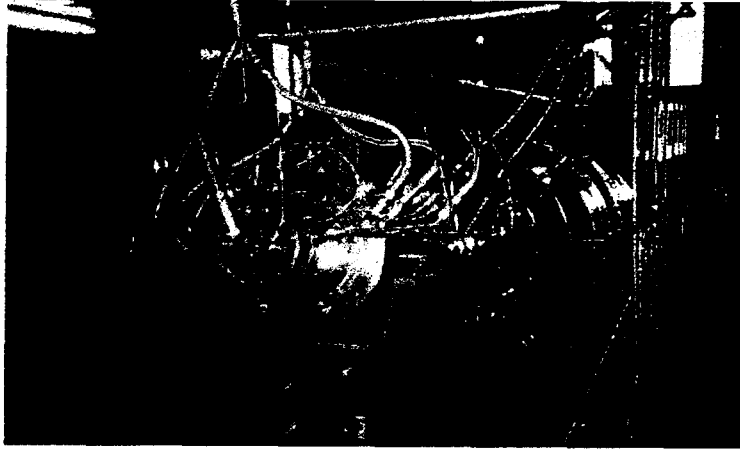


Fig. 3 Photograph of the 2-staged slagging coal combustion system.

Fig. 3은 연소시스템의 설치상태를 보여주는 사진으로서 그 열용량은 약 250KW 규모이며 연소기는 수평면에 대해 15도의 경사를 이루고 설치하여 연소기에서 용융된 회분의 원활한 배출을 유도하였다.

3.4 연소시험 결과

Alaska탄을 대상으로 수행된 연소시험 결과 연소기와 보일러 내부의 각 부위별 온도분포와 배기가스의 성분 변화 등을 측정할 수 있었다.

3.4.1 온도 분포

Fig. 4는 main combustor의 공기비 변화에 따른 연소기와 보일러 내부의 온도분포를 나타낸다. Pre-combustor에서의 온도분포는 700-1,000℃ 정도로 낮으나 main combustor에서의 온도는 1,000-1,400℃ 정도로서 전반적으로 높으며 연소기의 출구에서도 1,300℃ 이상의 높은 온도분포를 보인다. 그러나 재 연소 보일러에서는 1,100℃ 전후로서 2차 연소온도가 상대적으로 낮은 것을 볼 수 있다.

3.4.2 Slagging 현상

Alaska탄 회분의 FT는 1,243℃로 매우 낮아서 고온의 slaging 연소에 의해 대부분의 회분이 연소기에서 용융상태로 제거됨으로써 보일러에서 포집되는 분진의 양은 극히 적었다.

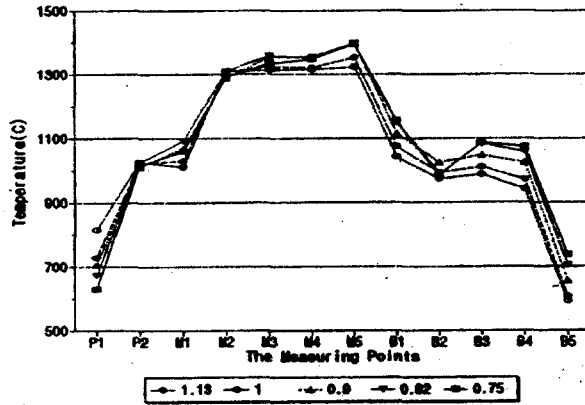


Fig. 4 Temperature profiles of combustor and boiler.

3.4.3 질소산화물(NOx)

Fig. 5는 공기비에 따라 재 연소 이후에 발생된 NOx 발생 현상을 나타낸 것으로서 공기비 1.0 이상에서는 약 450ppm 으로 높으나 공기비 0.75에서는 재 연소 공기량이 증가함에 따라 250ppm 까지 감소한 것을 볼 수 있다.

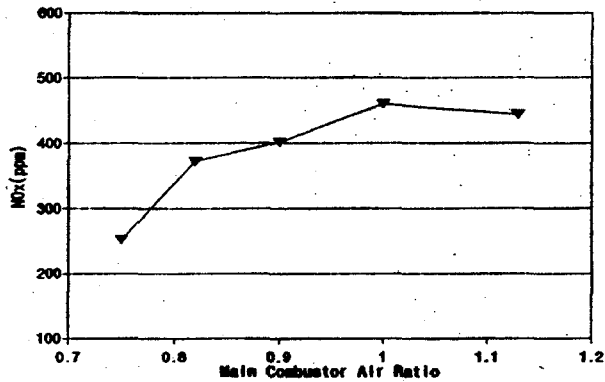


Fig. 5 NOx variation for air ratio in combustor.

3.4.4 일산화탄소(CO)

Fig. 6은 재 연소 후 배기가스 중의 일산화탄소를 측정된 결과이다. Main combustor에서 낮은 공기비에 의해 불완전 연소되어 발생하는 다량의 일산화탄소가 보일러 내에서 재 연소되어 약 150ppm 정도로 감소하는 것을 알 수 있다.

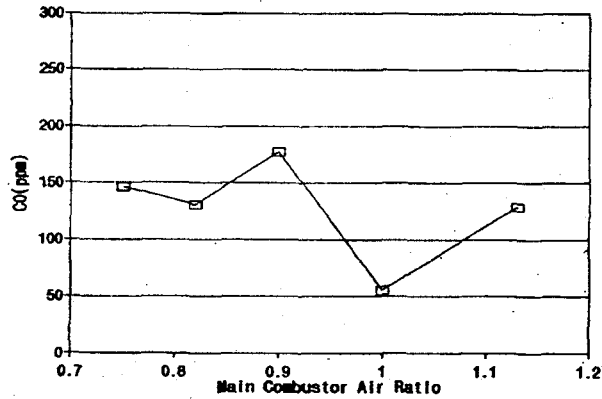


Fig. 6 CO variation for air ratio in combustor.

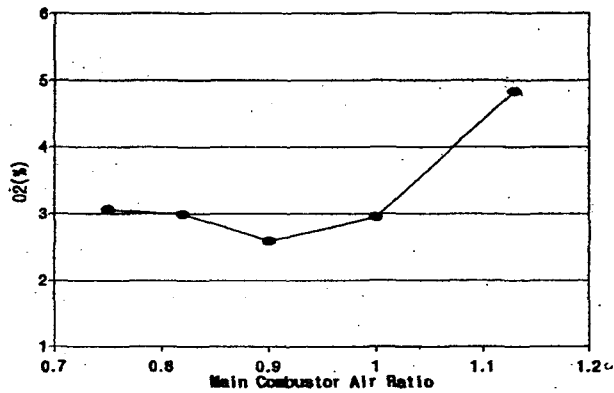


Fig. 7 O₂ variation for air ratio in combustor.

3.4.5 산소(O₂)

2차 연소 이후 산소 농도는 Fig 7과 같이 전체적으로 3% 정도로 비슷한 값을

보이고 있으나 공기비 1.15에서는 냉각을 위한 과잉공기에 의해 약 4.8%로서 높게 나타났다.

4. 결론

(1) 미분탄 보일러에서 일반적으로 회분의 용융온도가 낮은 석탄은 slagging 현상이 증가하므로 탄종 선택과 사용에 제한이 따른다. 그러나 Slagging 연소방식을 적용할 경우 회분을 용융 상태로 분리할 수 있으므로 저 회용점 석탄을 보다 쉽게 연소할 수 있으며 분진을 효과적으로 저감할 수 있다.

(2) 1차 연소에서 2단 동축형 cyclone 연소기를 이용하여 연소기의 공기비를 0.75까지 낮추며 고온 slagging 연소를 한 후, 2차 연소시 연소온도를 1,200℃ 미만으로 유지함으로써 배기가스 중 3% 산소의 저 과잉공기 상태에서 NO_x 발생을 250ppm 까지 저감할 수 있었으며 일산화탄소 발생도 150ppm 이하로 감소할 수 있었다.

감사

본 연구는 산업자원부 에너지자원기술개발지원센터에서 지원하는 청정 에너지과제로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. J. C. Stansel and D. J. Frey : "NO_x and SO_x Reduction in TRW's Entrained Coal Combustor", U. S. TRW(1987)
2. Roderick Beittel : "Engineering Development of an Advanced Coal Fired LEBS", 10th Annual Coal Preparation & Utilization Conference.(1994)
3. L. A. Ruth and S. S. Kim : "Advanced Coal-Fired Power Generation : The Combustion 2000 Program", U. S. PETC, 10th Korea-USA Joint Workshop on Coal Utilization Technology.(1994)
4. 최상일, "2단 연소기술에 의한 저공해 미분탄 연소기 개발(1)(2)(3)", 청정에너지기술개발사업 연구보고서, 한국에너지기술연구소, (1995, 1996, 1997)