

# 무연탄 혼소 500 MW 석탄화력발전소에서 보일러 운전조건이 미연탄소 발생에 미치는 영향

남정철\*, 유호선\*\*†

\*한국중부발전(주), \*\*† 숭실대학교 기계공학과

## Effect of Boiler Operating Conditions on the Generation of Unburned Carbon in Anthracite Co-fired 500 MW Thermal Power Plant

Jeong-Chul Nam\*, Ho-Seon Yoo\*\*†

\* Korea Midland Power co., Ltd., Boryeong 33439, Korea

\*\*† Department of Mechanical Engineering, Soongsil University, Seoul 06978, Korea

**Key words** : North Korea(북한), Anthracite(무연탄), Combustion test(연소시험), Coal fired power plant(석탄화력 발전소)

**ABSTRACT** : Considering the recent government policy toward North Korea and situation of power facilities in North Korea, it will be necessary to prepare for the consumption of the anthracite coal from Korea in coal-fired power plants. In this study, the anthracite co-fired tests in 500 MW thermal power plants were conducted with varying the main operation conditions, such as anthracite injection position in the boiler, coal fineness and combustion air flow, to investigate the effects on the generation of unburned carbon. It was confirmed that the generation of unburned carbon was remarkably reduced when the anthracite coal was injected into the boiler low burner with a relatively long residence time in the main combustion region, and that the increase of the coal fineness proportional to the combustion reaction surface area also reduces the generation of unburned carbon. An increase in the combustion air flow, which increase the combustion reactivity, also contributes to the reduction of unburned carbon. It is possible to maintain the unburned carbon generation below 5 % of the ash recycling quality by controlling the above operating conditions for the given mixing rate of anthracite, and the priority of changing the operating conditions within the test range is the highest for anthracite coal injection position.

**초 록** : 최근 북한에 대한 정부정책 기조와 북한의 전력설비 상황을 고려할 때 북한 무연탄을 우리나라 석탄화력발전소에서 소비할 수 있도록 그에 대한 대비가 필요할 것이다. 본 연구에서는 500 MW 석탄화력발전소에서 보일러 내 무연탄 주입위치, 미분도 및 연소용 공기유량 등 주요 운전조건을 변화시키면서 미연탄소 발생에 미치는 영향을 파악하기 위한 무연탄 혼소시험을 실시하였다. 주연소영역 체류시간이 상대적으로 긴 보일러 하부로 무연탄을 주입할 때 미연탄소 발생이 현저히 감소하고, 연소반응 표면적과 비례하는 미분도를 증가시켜도 미연탄소 발생이 감소하는 것을 확인하였다. 연소반응성을 증가시키는 공기유량의 증가도 미연탄소 저감에 기여한다. 주어진 혼소율에 대하여 상기의 운전조건 조절을 통하여 미연탄소 발생을 석탄회 재활용 품질기준인 5 % 이하로 유지하는 것이 가능하며, 시험범위 내에서 운전조건 변경의 우선 순위는 무연탄 주입위치가 가장 높다.

- 기호설명 -

† Corresponding Author, hsy@ssu.ac.kr

HGI : 석탄분쇄지수 (-)  
CI : 연소성지수 (kcal/kg)

HHV : 고위발열량 (kcal/kg)  
IDT : 회융점 (°C)

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

최근 2018년 4월 남북정상회담의 '판문점 선언'을 통해 북한과 북한 주변국과의 경제협력을 강화하는 신북방정책에도 속도가 붙을 것으로 예상되며, 남북간 긴밀한 경제계 발협력을 기대할 수 있을 것이다. 북한의 광물자원은 세계적인 규모로 알려져 있는데, 통계청<sup>(1)</sup> 및 한국광물자원공사<sup>(2)</sup> 자료에 따르면 석탄의 매장량은 갈탄이 160억톤, 무연탄이 45억톤 정도이며 대부분 탄광의 원탄 품위(grade of raw coal)는 6,000 kcal/kg이 넘어 북한산 무연탄의 품질은 높은 수준임을 추정할 수 있다.

한편 우리나라 석탄화력발전소의 석탄은 무연탄으로 전량 수입에 의존하고 있으며, 국내탄발전소의 경우는 전원 구성 비율이 상대적으로 아주 작을 뿐만 아니라 준공된 지 20년 혹은 40년이 가까이 되어 설비노후화 및 폐지에정의 실정이다.<sup>(3)</sup>

따라서 북한에 대한 정부정책 기조와 북한의 전력설비 상황을 고려할 때 상기의 북한 무연탄을 우리나라 석탄화력발전소에서 소비할 수 있도록 그에 대한 대비가 필요하며, 최근 이슈인 미세먼지에 대한 국민적 요구를 고려할 때 배출물에 대한 환경적인 문제에 그 초점을 맞춰야 할 것이다.

석탄화력발전소의 배출물 중 석탄회는 석탄을 연소 후 부산물로 발생되는 회로서 시멘트 및 농업용 비료 원료 등으로 재활용되고 있다. 다만 석탄회의 재활용 품질기준은 KS규격(KS L 54055405:2018 플라이애시 2종 가열 감량)에 따라 정해지며, 발전소의 석탄회는 대체로 미연탄소 5% 이하의 기준을 충족해야 한다. 특히 무연탄 소비 시는 연료특성상 회발생량의 증가에 따라 미연탄소의 총량도 증가할 것으로 예상된다.

본 연구는 석탄화력발전소 중 구성비율이 가장 큰 500 MW 표준석탄화력발전소에서 무연탄 혼소 시 미연탄소 저감의 관점에서 보일러 운전조건의 변경을 통해 최적의 설비운전조건을 마련하는데 목적이 있다.

1.2 연구 내용

본 연구에서의 시험대상 설비는 표준석탄화력발전소인 보령화력 3~6호기이며, 정상출력운전 중인 유연탄발전소에서 무연탄 혼소 시 보일러 운전조건이 미연탄소 발생에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 무연탄의 연료 특성을 고려하여 3가지의 보일러 운전조건에 대해 시험하였는데, 첫 번째 경우는 무연탄 주입버너 위치를 변경하여 노내 체류시간 증가에 따른 연소가능시간 증가가 미연탄소 발생에 미치는 효과를 시험하였고, 두 번째 경우는 미분도 조정장치를 조정하여 미분도를 증가시켜 미분탄 연소반응 표면적 증가효과를 시험하였다. 마지막으로 세 번째 경우는 연소용 총 공기량을 증가시켜 연소반응성 증가에 따른 미연탄소 영향에 대해 시험하였다.

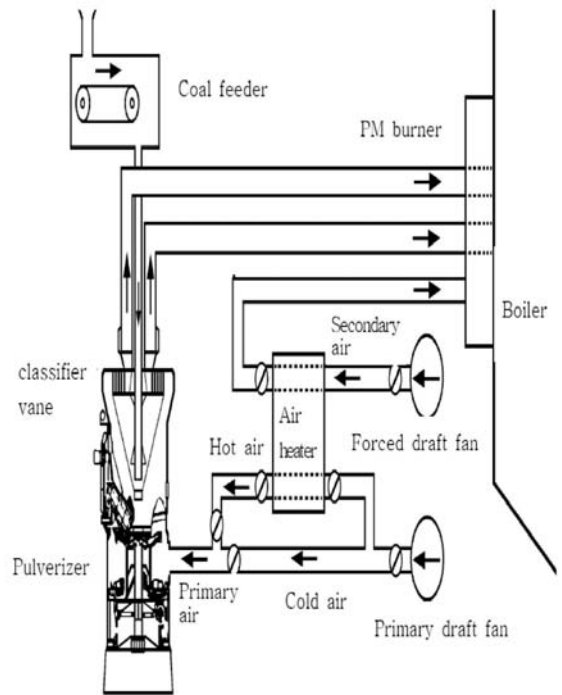


Fig. 2-1 Draft system and pulverizer system

## 2. 무연탄 혼소시험

### 2.1 연구대상 보일러

본 연구의 시험대상인 보령화력 3~6호기 발전소는 국내 최초의 중간부하운전용 유연탄화력발전소로서 빈번하고 신속한 기동정지 및 높은 부하변동률, 안정된 저부하운전 및 기동손실의 최소화, 높은 열효율, 수명유지를 위한 열응력 감소 및 고도의 제어기술 적용 등의 보일러 특성이 요구된다. 또한 평형통풍, 변압운전, 미분탄 및 중유의 혼소 또는 전소가 가능하도록 설계되었다.<sup>(4)</sup>

Fig. 2-1은 보일러 통풍계통 및 미분기계통을 나타내고 있다. 보일러 운전을 위하여 필요한 공기는 2대의 압입통풍기, 2대의 1차공기 통풍기, 2대의 유인통풍기로 처리되는 평형통풍 방식을 채택하고 있다. 연소용 공기는 압입통풍기로 공급되며, 미분탄의 운반과 건조에 사용되는 공기는 1차공기 통풍기로 공급되어진다.

보일러에서 연소되는 석탄을 분쇄, 건조하는 미분기는 호기당 6대가 설치되어 있으며 정상운전시는 5대가 운전되고 1대는 예비기로 사용된다. 급탄기로부터 석탄이 바울(Bowl)의 중앙으로 공급되며 바울 링(Ring)과 그라인딩 롤(Roll)의 사이를 지나면서 분쇄된다. 분쇄된 미분탄은 미분도 조정장치인 분류기(Classifier)를 통과하여 미분도가 최종 결정되며 미분탄 이송관을 통해 보일러 노내로 공급된다. 노내로 공급되는 미분탄과 연소용 공기는 아래와 같이 탄소(C), 수소(H), 황(S) 등의 가연성분과 연소반응을 거쳐 증기를 생산한다.



### 2.2 무연탄의 특성 및 성상

무연탄은 석탄 중 탄화가 가장 많이 진행된 것으로 역청

탄보다 훨씬 오래전에 형성되었으며 보통 고정탄소 86 % 이상, 휘발분 14 % 이하이며 점결성은 없다. 통상적인 무연탄은 회분이 적고 고정탄소분이 많으며 발열량이 4,000~7,000 kcal/kg 정도로써 이용가치가 높지만, 국내 무연탄의 경우 발열량은 4,731~5,373 kcal/kg 정도로 낮으며 회분 함량이 높다.<sup>(5)</sup>

석탄의 분쇄지수(HGI, Hardgrove Grindability Index)란 석탄의 분쇄특성을 나타내는 지수로서 각종 원소의 함량이 비슷해도 분쇄특성은 다르며, 미분기의 용량결정에 영향을 준다. 일반적으로 탄화도가 클수록 분쇄도가 높으며 무연탄의 석탄분쇄지수는 80 이상으로 분쇄가 용이하여 미분도를 증가시킬 경우 연소반응 표면적 증대가 기대된다. 또한 무연탄은 휘발분 함량이 낮아 착화가 어려운데, 특히 국내 무연탄은 회분이 많아 전체적으로 미연탄소분을 많이 발생하므로 연소과정에서 보일러 노내 체류시간을 충분히 유지시켜야 한다.<sup>(6)</sup>

석탄의 연소성<sup>(7)</sup>은 건식 고위발열량[Dry Higher Heating Value], 연료비[Fuel ratio] 및 회분함량에 따라 결정되는데 연소성을 판단하는 기준으로서 아래와 같은 연소성지수(CI, Combustibility Index)를 사용한다.

$$CI = \frac{Dry\ HHV}{Fuel\ Ratio} \times (115 - Ash\ \%) \times \frac{1}{105} \quad (2-6)$$

여기서 연료비는 휘발분에 대한 고정탄소의 비율을 나타내며, 회분함량과 연료비가 감소하면 연소성지수가 증가한다. 탄종별 연소성지수는 대략 2,000~5,000 kcal/kg이며, 상기 식에 따르면 무연탄의 연소성지수는 역청탄이나 아역청탄에 비해 상대적으로 낮은 것을 알 수 있다.

미연탄소분은 미분탄 연소 시 불완전 연소에 의해 완전히 연소되지 않고 석탄회 중에 존재하는 미연탄소를 말하는 것으로 연소전환율, 즉 반응시간, 산소농도, 반응온도 등에 좌우된다. 연료 중 가연성분이 완전히 산화되지 못할 경우 미방출 열에너지가 미연탄소 손실이 되며 이 손실은 연료의 성상, 회분함량, 연소설비, 과잉공기량, 석탄의 미분도 등의 운전조건에 따라 광범위하게 변화한다.

### 2.3 혼소시험 조건

시험은 동급 발전소 4기를 대상으로 총 19회를 실시하였다. 시험 시 운전조건은 출력 505 MW 주파수추종운전모

드이며 시험개시 최소 3시간 전에 출력 및 혼소율을 시험치로 조정하고 부하안정시간을 유지하였다. 시험개시 전까지 제매(Soot blowing) 처리를 완료하였고 혼소율은 자체 혼소설비의 벨트에서 측정된 석탄의 양을 적용하였다. 시험 중 보일러 버너 경사는 재열증기 온도에 따라 자동조정 되었다. 각 시험항목 별 데이터는 4시간 이상 평균치를 적용하였으며 산소농도는 공기에열기 전단에서 취득하였다. 미분도는 200 mesh 체로 쳐서 통과된 비율을 적용하였는데, 200 mesh는 사방 1인치 넓이에 40,000개의 구멍을 가진 체로서 구멍의 크기는 74  $\mu\text{m}$   $\times$  74  $\mu\text{m}$  이다.

미연탄소는 절탄기, 공기예열기 및 전기집진기에서 포집된 비회(Fly ash)에서 채집 분석되었다. 시험에 필요한 기타조건은 ASME 보일러 성능시험 Code를 준용하였다.

시험탄은 호주산 수입 무연탄인 GLENCORE-AN이며, 국내 무연탄과 비교 시 발열량이 다소 높은 5,286 kcal/kg 이다. 석탄분쇄지수는 72로 역청탄 대비 높아 분쇄가 용이하다. 회용점 온도인 회의 최초 변형점 온도(IDT, Initial Deformation Temperature)는 1,405  $^{\circ}\text{C}$ 로 역청탄 대비 높아 상대적으로 노내 슬래깅(Slagging) 영향에 강할 것으로 예상된다. 시험탄의 공업분석 결과치는 각각 수분 2.09%, 휘발분 9.04%, 회분 25.85%, 고정탄소 63.02%로 국내 무연탄의 성상과 유사하다.

무연탄의 낮은 연소성지수로 미연탄소가 증가할 것을 고려하여 전반적으로 무연탄 혼소율 4~5% 정도에서 시험하였으며, 무연탄인 GLENCORE-AN과 아역청탄인

TRAFIGURA-Indonesia를 제외하면 모든 혼소 탄종이 주연료인 역청탄의 성상을 가지고 있다.

## 2.4 혼소시험 방법

시험은 보일러 운전조건이 미연탄소 발생에 미치는 영향을 파악하기 위해 3가지의 보일러 운전조건에서 실시하였다. Fig. 2-2는 보일러 버너위치 및 무연탄 주입버너를 나타낸다. 보일러는 직각코너화염노[Tangential corner firing furnace] 형식이며 연료 및 공기가 노(Furnace)의 코너에 설치된 윈드박스(Windbox)를 통해 노즐로 유입된다.

첫 번째 시험은 무연탄 주입버너 위치변경을 통한 노내 체류시간 증가의 영향을 시험하였다. Fig. 2-2에서 보는 바와 같이 6개의 버너 중 최하부층 버너인 버너 A에서 무연탄을 연소하였을 경우와 중간층 버너인 버너 C에서 연소하였을 경우의 미연탄소 발생량을 비교하였다. 이때의 노내 연소체류시간은 약 0.7초로 확인되는데, 전체 버너높이 14 m, 보일러 수냉벽 지역 유속 8 m/초를 산술 계산하였다.

두 번째 시험은 하부 미분기의 미분도 조정을 통한 연소반응 표면적 증가에 대한 영향을 시험하였다. 미분기의 미분도 조정장치인 분류기 베인(이하 Classifier vane)의 위치를 각각 25%와 50%로 조정하여 미분도(200 mesh 체를 통과한 비율) 각각 약 61%와 약 71%에서 미연탄소의 발생량을 비교하였다. 이때 Classifier vane의 위치가 클수록 많이 닫히므로 미분도는 상승한다.

세 번째 시험은 연소용 공기량 증가에 따른 연소반응성 증가의 영향을 시험하였다. 연소용 공기를 공급하는 압입 통풍기를 이용하여 연소용 공기량을 증가시켜 공기에열기 전단 산소농도의 변화와 미연탄소 발생량을 비교하였다. 이때 압입통풍기의 풍량조절은 유압식으로 작동하는 동익의 각도를 제어하여 이루어진다.

## 3. 시험결과 및 고찰

### 3.1 무연탄 주입위치의 영향

Fig. 3-1은 화재활용 기준인 미연탄소 5% 기준, 보일러 내 무연탄 주입위치에 따른 미연탄소 발생량을 도식화하

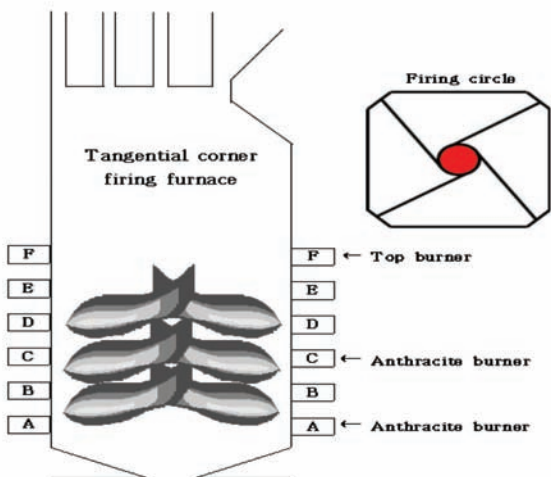


Fig. 2-2 Boiler burner position to anthracite

## 무연탄 혼소 500 MW 석탄화력발전소에서 보일러 운전조건이 미연탄소 발생에 미치는 영향

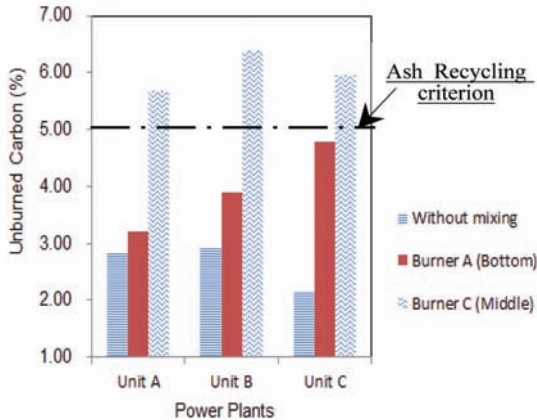


Fig. 3-1 Effect of burner position with anthracite

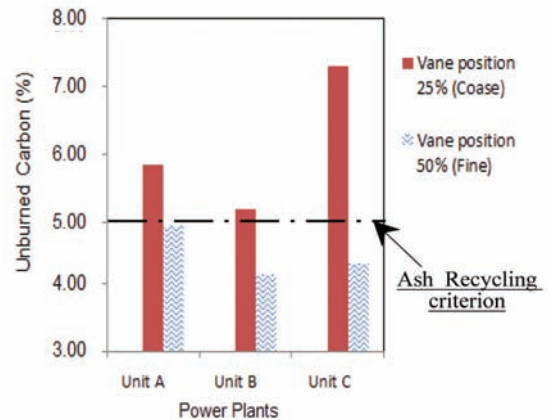


Fig. 3-2 Effect of coal fineness

였다. 이번 시험은 무연탄의 특성인 휘발분 함량이 적고 연소성지수가 낮은 것을 고려하여 보일러 내 무연탄 주입 위치 조정에 따른 주연소영역의 체류시간 영향을 확인하였다. 시험은 중간층 버너 및 하부층 버너에서 무연탄을 각각 연소하여 미연탄소 발생량을 측정하였고 시험 중 미분기 Classifier vane 위치 및 산소농도의 응동폭을 최소화하였다.

무연탄 혼소율 약 4.3 % 일 때, 하부버너[버너 A]에서 무연탄 혼소 시 중간버너[버너 C] 대비 미연탄소 발생은 2.36 %p 감소하여 버너 A에서 버너 C까지의 노내 연소체류시간인 0.7초 동안 충분한 연소반응이 일어났음을 확인하였다. 또한, 하부버너 연소 시는 모든 발전소에서 미연탄소가 5 % 이하로 석탄회 재활용 기준을 충족하였지만, 중간버너 연소 시는 미연탄소가 석탄회 재활용 기준을 초과하였다.

미분기 교체운전을 통한 무연탄 주입버너 위치 변경은 보일러 운전 중에도 용이하고, 본 연구내용의 다른 보일러 운전조건 변경에 따른 미연탄소 감소량과 비교하면 상대적으로 미연탄소 저감에 큰 영향을 미치므로 미연탄소 저감을 위한 보일러 운전조건 변경의 우선순위가 가장 높은 것으로 볼 수 있다.

### 3.2 미분도의 영향

Fig. 3-2는 회재활용 기준인 미연탄소 5 % 대비 무연탄 미분도 변화에 따른 미연탄소 발생량을 도식화하였다. 이

번 시험은 무연탄의 분쇄가 용이한 것을 고려하여 미분기의 미분도 조정장치인 Classifier vane 위치를 조정하고 200 mesh 통과기준 미분도가 약 61 %와 약 71 % 일 때 미연탄소 발생에 미치는 영향을 확인하였다.

시험 중 미분도 조정장치인 Classifier vane 위치변경과 미분도는 하부미분기(미분기 A)에 대해서만 적용하였으며 다른 미분기의 Classifier vane 위치는 일정하게 유지하였다. 미분도는 200 mesh 기준이며 산소농도의 응동폭을 최소화하였다.

무연탄 혼소율은 약 4.5 % 유지하였으며, 무연탄을 혼소한 하부미분기의 미분도가 61 % [CV position 25 %]와 71 % [CV position 50 %] 일 때 미연탄소 발생량의 평균은 각각 6.13 %, 4.47 %로 미분도 10 %p 증가 시 미연탄소 발생량은 약 1.66 %p 감소하여, 미분도 증가에 따른 연소반응 표면적 증가가 미연탄소 발생을 감소시키는 것을 확인하였다. 또한, 미분도 약 71 % 일 때는 모든 발전소에서 미연탄소가 5 % 이하로 석탄회 재활용 기준을 충족하였지만, 미분도 약 61 % 일 때는 석탄회 재활용 기준을 초과하였다.

### 3.3 연소용 공기유량의 영향

Fig. 3-3은 회재활용 기준인 미연탄소 5 % 대비 산소(O<sub>2</sub>) 농도 증가 시 미연탄소 발생량을 도식화하였다. 이번 시험은 미분기의 Classifier vane 위치 50 %에서, 연소용 공기유량을 증가시키므로써 산소농도를 증가시킬 때 연소



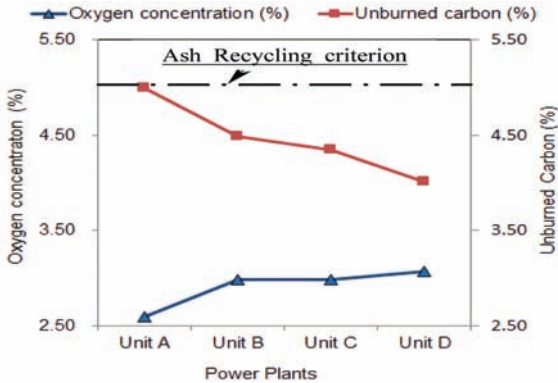


Fig. 3-3 Effect of combustion air flow

반응성 증가가 미연탄소 발생에 미치는 영향에 대해 실시하였다.

무연탄 혼소율 약 4.9 % 일 때, 연소용 공기량 증가에 따라 산소농도는 0.47 %p 증가하였고 미연탄소 발생량은 약 0.98 %p 감소하여, 공기량 증가에 따른 연소반응성 증가가 미연탄소 발생을 감소시키는 것을 확인하였다.

단, 산소농도가 2.6 % 이하시는 미연탄소가 5 %를 초과하여 석탄회 재활용 기준을 초과할 가능성이 있으며, 연소용 공기량을 과도하게 증가 시에는 건배기 가스 손실 및 질소산화물, 황산화물 배출이 증가하므로 저과잉공기 운전을 고려해야 할 것이다.

### 3.4 무연탄 혼소율의 영향

Fig. 3-1은 무연탄 혼소 전과 혼소율 약 4.3 % 일 때의 미연탄소 발생량을 보여주는데, 미연탄소 발생은 혼소 전 평균 2.63 %, 혼소 후 평균 4.99 %로 혼소 전 대비 혼소 후 약 2.36 %p 증가하였으며, 무연탄 투입버너 위치인 하부버너 또는 중간버너 사용에 따라 미연탄소는 3~6 % 범위를 유지하였다. 무연탄 혼소시험 중 미연탄소 발생에 영향을 줄 수 있는 운전요인을 최소화하여 시험을 실시하였으나 각 발전소별 제어특성과 다양한 설비운전상황은 미연탄소 발생 결과에 대한 오차로 고려되어야 할 것이다.

Fig. 3-2에서 Unit C의 경우 시험 중 가장 높은 혼소율인 5.0 %이며 낮은 미분도 61 %에서 매우 높은 미연탄소 발생량인 7.33 %를 볼 수 있는데, 무연탄의 혼소율 5 % 이상의 경우 석탄회 재활용 품질기준인 미연탄소 발생량이 5

%를 초과할 가능성이 크며 무연탄 혼소율은 미연탄소 발생과 직접적으로 비례한다고 볼 수 있다. 따라서 혼소율이 일정수준 초과 시 보일러 운전조건 변경만으로 미연탄소 발생을 석탄회 재활용 품질기준인 5 % 이하로 제어하기 어렵다.

## 4. 결론

본 연구는 500 MW 석탄화력발전소에서 무연탄 혼소 시 보일러 운전조건이 미연탄소 발생에 미치는 영향을 파악하기 위하여 수행되었다. 주연료인 유연탄 대비 휘발분이 적고 분쇄가 용이하며 연소성 지수가 낮은 무연탄의 특성을 고려하여, 혼소율 변동을 최소화하는 조건에서 보일러 내 무연탄 주입위치, 미분도 및 연소용 공기유량 등 3개의 주요 운전조건을 변화시키면서 무연탄의 혼소시험을 실시하였다. 동급 발전소 4기를 대상으로 총 19회의 시험을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 혼소율이 일정한 조건에서 무연탄은 주연소영역 체류시간이 상대적으로 긴 보일러 하부 버너로 주입할 때 미연탄소 발생이 현저히 감소하였다.
2. 연소반응 표면적과 비례하는 미분도를 증가시키면 미연탄소 발생이 감소한다. 또한 연소반응성을 증가시키는 공기유량의 증가도 미연탄소 저감에 기여한다.
3. 주어진 혼소율에 대하여 무연탄 주입위치, 미분도, 연소용 공기유량 등 운전조건을 조절을 통하여 미연탄소 발생을 석탄회 재활용 품질기준인 5% 이하로 유지하는 것이 가능함을 확인하였다. 시험범위 내에서 운전조건 변경의 우선순위는 무연탄 주입위치가 가장 높다. 다만 혼소율이 일정 수준을 초과하면 운전조건만으로 미연탄소 발생을 품질기준에 맞추어 제어할 수는 없다.

## 참고문헌

- (1) National Statistical Office, 2017, Statistics Index of North Korea, pp. 106
- (2) KDI, 2017 Feb., KDI North Korea Economy Re-view, Trend and Analysis, A Study on

무연탄 혼소 500 MW 석탄화력발전소에서 보일러 운전조건이 미연탄소 발생에 미치는 영향

- the anthracite trade of North Korea-China
- (3) Korea Power Exchange, 2018 March, Power Ca-pacity
  - (4) KOPEC, 1993, Boryeong Thermal Power Plant Unit 3&4 Operation Manual, pp. 118-125
  - (5) Korea Power Learning Institute, 2015, Practice of Boiler Operation, Revision 3, pp. 170-199
  - (6) Korea Power Learning Institute, 2015, Practice of Thermal Power Plant, Revision 2, pp. 150-154
  - (7) Korea Power Learning Institute, 2009, Practice of Combustion Management, Revision 10-4, pp. 225 