

# 15kW급 미분탄 연소로내에서 바이오매스 혼소율 변화에 따른 연소 특성 비교

이상민\* · 성연모\* · 최민성\* · 문철언\* · 최경민\*\* · 김덕줄\*

## Combustion Characteristics of Biomass Blends on a 15KW Pulverized Coal furnaces

Sangmin Lee\*, Yonmo Sung\*, Minsung Choi\*, Cheoreon Moon\*, Gyungmin Choi\*\*, Duckjool Kim\*

### ABSTRACT

This study focused on the effect of the biomass blended ratio on air-staged pulverized coal furnace. The hybrid NO<sub>x</sub> reduction technology between fuel blending and air staging has been applied in an air-staged pulverized coal fired furnace. The results indicated that co-firing biomass with coal could reduce NO<sub>x</sub> emissions in an air-staged combustion. In addition, carbon burnout and flame temperature increased under the air-staged condition. A dominant synergistic effect on NO<sub>x</sub> reduction and carbon burnout was observed when biomass co-firing with coal was applied in air staged combustion.

**Key Words** : Pulverised coal, Air-staged, Particle size, Biomass blended, NO<sub>x</sub> reduction

석탄화력발전은 현재까지 전 세계적으로 널리 사용되고 있으며 최근 급격한 경제성장으로 인해 증가된 에너지 수요로 석탄의 소비가 증가하고 있다. 화석연료 사용의 증가로 환경오염이 심각해지고 매장량의 감소로 인해 많은 국가에서 화석연료발전의 규제를 강화하고 있다. 이에 따라 석탄연소에 대한 국내외에서 다양한 연구가 진행되고 있다.

석탄연소에서는 석탄의 물성치, 석탄 입자의 크기 및 바이오매스 혼소율, 다단연소 등이 화염형상, 연소효율, 배기특성 등의 연소 특성에 영향을 미친다[1-2]. Lockwood 등은 석탄의 입자 크기별 다단연소시 NO 배기특성에 관해 수치해석적 방법을 통해 관찰하였으며[1] Spliethoff는 0.5M W<sub>th</sub> 연소로에서 바이오매스 혼소율에 따른 연소 효율 및 배기특성에 관한 연구를 수행하였다[3]. Moon 등은 슬릿버너에서 저압탄에서 바이오매스 10% 혼소시 연소효율이 향상됨을 관찰하였다[4]. 또한 Smart 등은 여러 종류의 화석연료를 사용해서 0.58MW<sub>th</sub> 연소로 내부의 연소특성을 관찰하였다[5].

이러한 연구들에서 바이오매스 혼소율에 대한 연구가 충분히 수행되었지만 연소로 내부 계측을

통한 국소 영역의 화염특성 및 연소효율에 대한 분석이 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 15kW급 실험실 규모의 미분탄 연소로에서의 바이오매스 혼합비율 변화에 따른 연소로 내부의 계측으로 연소특성 구체적으로 비교하고자 하였다.

실험에 사용된 장비는 15kW급 스웰 유동 버너(S<sub>n</sub>:1.33)와 석탄 공급장치, 공기 및 연료 공급기, 가스분석기(Horiba VA-3000) 등이며 Fig. 1.과 같이 미분탄 연소 시스템을 구성하였다.

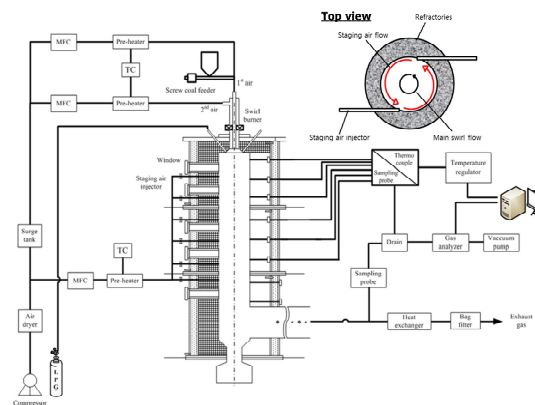


Fig. 1 Schematic diagram of a pulverized coal fired furnace system.

\* 부산대학교 기계공학부

† 연락처자, [choigm@pusan.ac.kr](mailto:choigm@pusan.ac.kr)

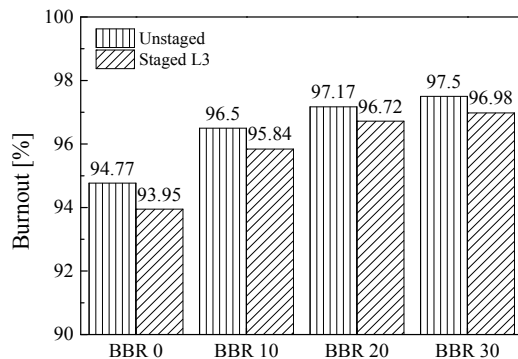
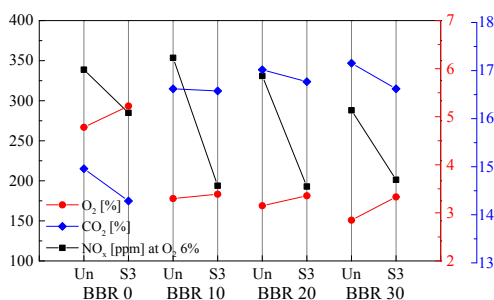
TEL : (051)510-2476 FAX : (051)-512-5236

**Table 1** Solid Fuel analysis

| Fuel type | Proximate analysis (wt. %, air-dry) |       |       |      | Caloric value (kcal/kg) |      |
|-----------|-------------------------------------|-------|-------|------|-------------------------|------|
|           | M                                   | VM    | FC    | Ash  |                         |      |
| GC        | 9                                   | 33.83 | 48.83 | 8.34 | 6304                    |      |
| BM        | 6.77                                | 74.85 | 16.01 | 2.37 | 4363                    |      |
| Fuel type | Ultimate analysis (wt. %, dry)      |       |       |      |                         |      |
|           | C                                   | H     | O     | N    | S                       | Ash  |
| GC        | 72.2                                | 4.61  | 10.94 | 2.65 | 0.44                    | 9.16 |
| BM        | 41.2                                | 6.02  | 49.7  | 0.45 | 0.1                     | 2.53 |

**Table 2** Operating conditions [slpm]

| Fuel Type | BBR 0                                | BBR 10                               | BBR 20                               | BBR 30                               |
|-----------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Primary   | 10                                   |                                      |                                      |                                      |
| Secondary | 286 <sup>a</sup><br>251 <sup>b</sup> | 282 <sup>a</sup><br>250 <sup>b</sup> | 277 <sup>a</sup><br>246 <sup>b</sup> | 271 <sup>a</sup><br>241 <sup>b</sup> |
| Staging   | 0 <sup>a</sup><br>35 <sup>b</sup>    | 0 <sup>a</sup><br>32 <sup>b</sup>    | 0 <sup>a</sup><br>31 <sup>b</sup>    | 0 <sup>a</sup><br>30 <sup>b</sup>    |

<sup>a</sup> Unstaged condition<sup>b</sup> Staged condition at port 3**Fig. 2** Effect of Biomass blending ratio on carbon burnout in unstaged and staged combustion conditions.**Fig. 3** Effect of Biomass blending ratio on NO<sub>x</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> emissions in unstaged and staged combustion conditions

시료는 역청탄인 Glencore(GC)와 목질계 펠릿 형태의 바이오매스(BM)를 사용하였으며 각각의 연료에 대한 분석결과를 Table 1에 표기하였다. 그리고 혼소율에 따른 연소특성 비교를 위해 바이오매스를 발열량 기준으로 혼소율 0%, 10%, 20%, 30%를 BBR(Biomass Blended Ratio) 0, 10, 20, 30으로 선정하였다. 연소로 운전 조건은 총 공급열량이 15kW, 공기비가 1.15, LPG 공급량이 5slpm이며 1, 2차 공기공급량을 Table 2에 표기하였다. 이는 Munir 등의 연구에 따르면 연소효율과 NO<sub>x</sub> 저감에 1차 반응영역에서 공기비가 0.9 일 때 효과적임을 감안하여 1차 반응 영역에서 공기비를 0.9로 선정하였다[6].

Fig. 2는 선정한 4가지 조건에서 바이오매스 혼소율 변화 및 2단연소에 대한 연소효율로, 바이오매스 혼소율이 높아질수록 전반적으로 연소효율이 증가되는 경향을 보인다. 이는 바이오매스 내 다량 포함된 휘발성분이 연소 초기에 방출되면서 석탄의 연소성을 향상시키는 현상으로 연소효율이 증가하는 것이다. 또한 2단연소시 연소효율이 감소되는 경향이 나타나는데 이는 Munir의 연구와 같이 석탄입자가 산소부족 조건인 1차 반응영역에서의 체류시간이 증가하면서 나타나는 현상이다[6]. 연소배출물 측정값인 Fig. 3에서 혼소율 변화와 다단연소에 따른 연소 특성을 확인할 수 있다. 배출된 NO<sub>x</sub> 농도가 BBR 0 보다 BBR 10 이 높은 것은 바이오매스 10% 혼소시 석탄 연소성의 향상으로 단일연소시의 미연분이 반응하면서 NO<sub>x</sub>가 증가하는 현상이다. 하지만 BBR 20, BBR 30에서는 연료내 포함되어 있는 질소 성분이 줄어들고, 바이오매스의 휘발분 성분 중 NO<sub>x</sub> 저감효과를 일으키는 NH<sub>3</sub>성분이 다량 방출되면서 연소 후 NO<sub>x</sub> 농도가 줄어들을 수 있다[7]. 또한 바이오매스 혼소율 10%에서 석탄 연소보다 배출된 O<sub>2</sub>가 급격히 낮아지며, 혼소율의 증가에 따라 O<sub>2</sub> 농도가 감소하는 경향과 2단연소시 O<sub>2</sub> 농도가 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 이는 바이오매스 혼소율이 높을수록 연소효율의 향상으로 O<sub>2</sub> 농도가 감소하고 2단연소시 석탄 입자의 1차 연소 구간에서의 체류시간이 증가하면서 O<sub>2</sub> 농도가 증가하는 현상이다. CO<sub>2</sub> 농도에서도 바이오매스 혼소로 인한 석탄의 반응성 향상으로 혼소율이 증가할수록 CO<sub>2</sub> 농도가 증가하고, 다단연소시 체류시간의 증가로 연소효율이 감소하면서 CO<sub>2</sub> 배출 농도가 감소함을 확인할 수 있다. 특히 2단연소시 바이오매스 혼소율 변화에 큰 차이가 없는 연소특성을 보이는데, 이는 Moon[8]의 연구결과와 같이 석탄의 반응성 향상을 위해 10% 바이오매스 혼소가 충분하다는 것을 의미한다..

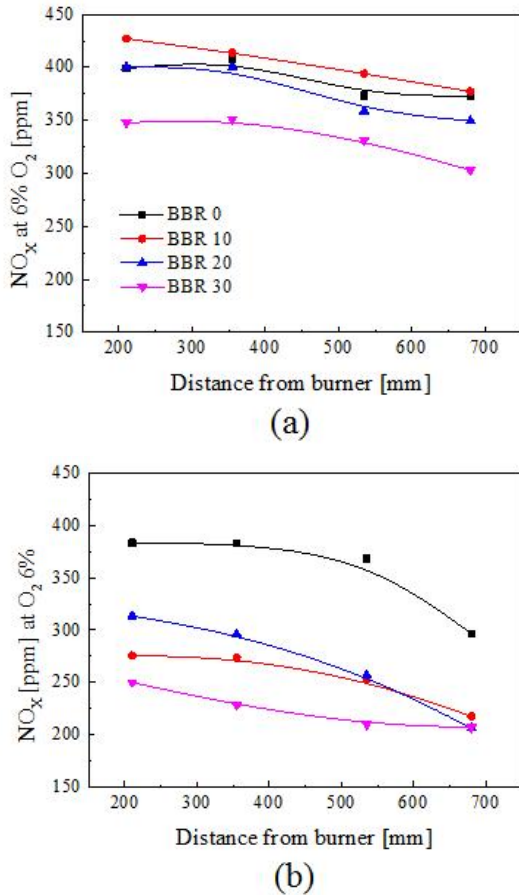


Fig. 4 Effect of biomass blended ratio and (a) un-staged, (b) air-staged combustion on NOx at center line.

이러한 연소 반응 차이를 연소로 내부의 NO<sub>x</sub> 및 O<sub>2</sub>의 측정값으로 살펴보면 Fig. 4(a)의 단일 연소시 NO<sub>x</sub> 농도가 BBR 0보다 BBR 10에서 높은 경향을 확인 할 수 있다. 바이오매스 혼소를 통해 향상된 석탄의 반응성으로 나타나는 현상이다. 하지만 혼소율이 20%, 30%에서는 NH<sub>3</sub>로 인한 NO<sub>x</sub> 저감 효과로 연소로 내부에서 NO<sub>x</sub> 농도가 저감된다. Fig. 4(b) 2단연소시 1차 연소 영역의 산소 희박조건 형성과 바이오매스 혼소시 배출되는 다량의 NH<sub>3</sub>로 인해 급격한 NO<sub>x</sub> 저감 효과가 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 연소로 내부의 온도와 NO<sub>x</sub> 분포에서 바이오매스 10% 혼소시 반응성의 향상으로 내부 온도와 NO<sub>x</sub> 형성이 증가하고 20, 30%에서 온도 및 NO<sub>x</sub> 농도가 감소하는 경향을 나타낸다. 또한 다단연소시 온도와 NO<sub>x</sub> 농도가 감소하는 경향을 나타냈으며 특히 10% 바이오매스 혼소에서 NO<sub>x</sub> 저감이 확연함을 보인다.

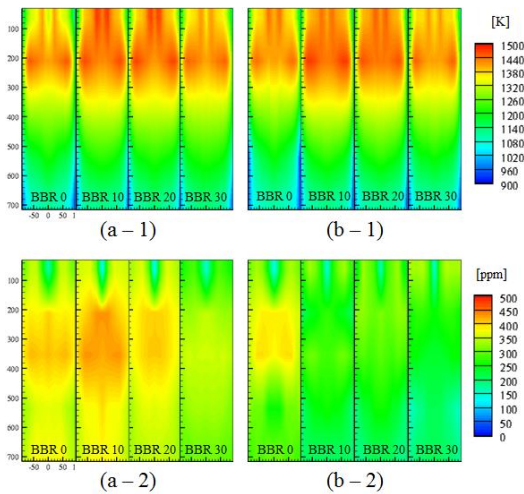


Fig. 5 Effect of biomass blended ratio in (a) un-staged and (b) air-staged combustion on (1) temperature and (2) NO<sub>x</sub> at inner furnace.

본 연구에서 사용한 역청탄과 목질계 펠릿형태의 바이오매스 10% 혼소시, 약 45%의 NO<sub>x</sub> 저감 효과를 볼 수 있었다.

### 후 기

본 연구는 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No, 20144010200780)입니다.

### 참고 문헌

- [1] T. ABBAS, P. COSTEN, F. C. LOCKWOOD, C. A. ROMO-MILLARES, "The effect of particle size on NO formation in a large-scale pulverized coal-fired laboratory furnace: measurements and modeling", combustion and flame., Vol. 93, 1993, pp. 316-326.
- [2] H. Spliethoff, K.R.G. Hein, "Effect of co-combustion of biomass on emissions in pulverized fuel furnace", Fuel Processing Technology., Vol. 54, 1998, pp. 189-205.
- [3] H. Maier, H. Spliethoff, A. Kickerer, A. Fingerla, K. R. G. Hein., "Effect of Coal Blending and particle size on NOx Emission and Burnout", Fuel., Vol. 73, 1994, pp. 1447-1452.
- [4] Cheoreon Moon, Yonmo Sung, Seongyool Ahn, Taekyung Kim, Gyungmin Choi, Duckjoon Kim, "Effect of Blending Ratio on Combustion Performance in Blends of Biomass and Coals

of Different Ranks", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 47, 2013, pp. 232-240.

[5] Roman Weber, John P. Smart, Willem vd Kamp, "On the (MILD) combustion of gaseous, liquid, and solid fuels in high temperature preheated air", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 30, 2005, pp. 2623-2629.

[6] S. Munir, W. Nimmo, B.N. Gibbs, "The effect of air staged, co-combustion of pulverised coal and biomass blends on NOx emissions and combustion efficiency", *Fuel*, Vol. 90, 2011, pp. 126-135.

[7] P. Glarborg, A.D. Jensen, J.E. Johnsson, "Fuel nitrogen conversion in solid fuel fired systems", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 29, 2003, pp. 89-113.

[8] C.E. Moon, "A Study on combustion and emission characteristics of coals of different rank in pulverized coal combustion", Ph.D. Thesis, Pusan National University, Busan, South Korea, 2013.