

벤치규모 순환유동층연소로에서의 석탄연소 특성연구

선도원, 배달희, 한근희, 조성호, 이승용
한국에너지 기술연구원
대전시 유성구 장동 71-2

COMBUSTION OF COAL IN A BENCH SCALE CIRCULATING FLUIDIZED BED UNIT

Dowon Shun, Dal-Hee Bac, Keun-Hee Han, Seong-Ho Cho, Seung-Young Lee
KOREA INSTITUTE OF ENERGY RESEARCH
71-2 JANGDONG YUSUNGKU, TAEJON 305-343, KOREA

1. 서론

순환유동층 석탄 연소기술은 10mm 미만의 석탄을 고속 유동 상태에서 연소하는 기술로 연료의 발열량 변화에 비교적 유연하다. 특히 높은 연소효율과 더불어 석회석 주입에 의한 노내 탈황, 공기 다단주입에 의한 저 NOx 연소등 독특한 장점을 가진 기술이다. 순환유동층을 이용한 보일러 기술은 1985년을 기점으로 이전까지 보급되던 기포유동층 보일러를 앞질러 산업계 열병합 발전용 보일러로 보급되기 시작하였고, 같은 시기에 우리나라에도 첫기가 도입되었다. Table 1은 국내에 가동중인 순환유동층 보일러의 현황을 나타내었다. 우리나라에는 1985년 이래 현재까지 약 10여기의 순환유동층 보일러가 보급되었으며 강원도 동해시의 200MWe급 발전용 보일러를 제외하고는 대부분 증기용량 100-200ton/h (10-50MWe)의 산업용 열병합 발전 보일러 규모이다.

순환유동층 보일러 기술의 국산화 연구는 1980년 중반부터 국내의 학계와 연구소를 중심으로 시작되었다. 그 동안 학계의 수력학적 기초연구, 연구소의 연소특성연구 등을 토대로 1990년대 초반부터는 설계기술과 배연 연구등 다양한 적용분야의 연구 개발을 수행해 오고 있다. 이와 대비하여 중공업체 등에서는 외국기술의 license 도입에 의한 국내 보급을 시작으로 외국업체의 해외건설에도 참여하는 등 성과를 나타내고 있다.

본 연구는 순환유동층 연소기술 개발을 위한 기초연구의 일부로 벤치규모 순환유동층 연소로에서 국내 무연탄 및 수입 유연탄 연소에 따른 특성 비교를 소개한 것이다.

Table 1. Commercial CFB boilers in Korea

| Company (Location) | Category | Capacity (MWe) | Steam (T/H) | Fuel | Start | Supplier |
|----------------------------|-------------|----------------|-------------|----------------------------|-------|-------------------------|
| Oriental Chem. | Chemicals | 12.5 | 120 | Bitu. coal* Pet. coke** | 1985 | Hyundai/Ahlstrom |
| Sunkyoung(Suwon) | Textile | - | 130 | Bitu. coal | 1988 | " |
| Sunkyoung(Ulsan) | Textile | 27 | 130 | Bitu. coal Pet. coke | 1989 | " |
| Hyundai Oil(Susan) | Refinery | - | 120 | Pet. coke | 1989 | " |
| LG (Yuchon) | Chemicals | 25 | 210 | Pet. coke | 1990 | " |
| Petrochem. Service (Ulsan) | Chemicals | - | 250 × 2 | Bitu. coal Pet. coke | 1990 | " |
| Samyang Genex | Food | 9.2 | 60 | Bitu. coal Heavy oil | 1991 | " |
| Taegu Dye Complex | Dyeing | 54.1 | 130 × 3 | Bitu coal | 1986 | Samsung/ Babcock |
| Pusan Dye Complex | Dyeing | 19 | 80 × 2 | | | Daewoo/Studsvik |
| Jeil Sugar | Sugar | 5.4 | 40 | Bitu coal | 1988 | Samsung/ Babcock |
| Hansol Paper | Paper | 23 | 130 | Bitu. coal | 1990 | " |
| Korea Zinc | Metal | 43.5 | 175 | Bitu. coal | 1991 | Korea Heavy Ind. /Lurgi |
| Tonghae | Power plant | 200 | 693 | Anthracite | 1998 | KoreaHeavy Ind./ABB |

* Bituminous coal, ** Petroleum coke

2. 연소실험장치

Fig. 1은 실험장치의 구성도를 나타낸 것이다. 연소로는 내경 0.2m × 높이 1m의 농후 층과 내경 0.25m × 높이 10m의 freeboard로 구성되어 있다. 석탄은 hopper로부터 screw feeder를 통하여 연소로 하부 분산판 위 1m 지점으로 공급된다. 연소로 안에서 석탄은 빠른 유속의 유동화 공기와 접촉하면서 연소하게 된다. 고온 입자의 연소회재와 연소가스는 연소로 상부의 출구를 통하여 사이클론으로 인입되어 분진이 제거되고, 연소가스는 백필터

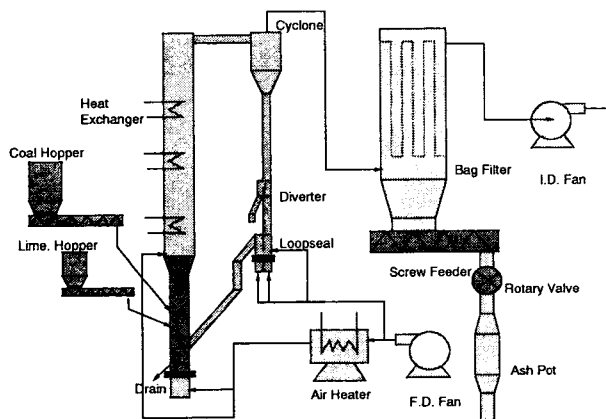


Figure 1. Flow diagram of CFBC test facility

로 들어가 다시 한번 미분회재가 제거된 후 대기로 배출된다. 사이클론에서 분리된 회재는 재순환 설비를 통하여 연소로로 다시 투입된다.

Table 2에 석탄과 석회석의 성분분석을 나타내었다. 유연탄은 호주 Blair Athol산이며, 무연탄은 국내 강원도 삼척지역 탄광에서 입수하였다. 석탄은 원탄을 -6mm로 분쇄하여 연료로 사용하였다. 석회석은 충청북도 단양지역에서 입수하였다.

Table 2. Analysis of coal and limestone

| Analysis | Bituminous coal (Australia) | Anthracite (Samchuk) | Limestone (Tanyang) |
|--------------------------------|-----------------------------|----------------------|---------------------|
| Proximate, wt % as received | | | |
| Moisture | 12.9-15.9 | 3.53 | |
| Volatile | 24.7-27.0 | 4.73 | |
| Ash | 6.6-6.8 | 38.00 | |
| Fixed Carbon | 52.8-53.3 | 53.74 | |
| Ultimate, wt % dry basis | | | |
| C | 69.9 | 54.03 | |
| H | 3.8 | 0.19 | |
| N | 1.6 | 0.48 | |
| S | 0.5 | 0.68 | |
| Ash, wt % ash | | | |
| CaO | 5.3 | 1.01 | 49.26 |
| MgO | 3.6 | 1.66 | 1.23 |
| Al ₂ O ₃ | | 33.56 | 0.16 |
| SiO ₂ | | | 8.88 |
| Fe ₂ O ₃ | | 4.24 | 0.46 |
| Mean diameter, mm | 0.1151-0.8030 | 0.3937 | 0.1726 |
| Calorific value, Kcal/kg | 6,065-6,455 | 4,529 | |

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 석탄 주입량으로 표현되는 공급열량의 증감에 따른 연소로 온도변화를 나타낸 것이다. 연소로는 상용 보일러에 비해 연소로 부피와 표면적의 비가 매우 크며 이에 따라 열손실이 크게 발생한다. 따라서 연소로 하부와 배가스 출구간의 연소온도차가 발생한다. 공급열량의 증가에 따라 연소로의 온도차는 점차 감소하여 일정값에 수렴하였으며 유연탄과 무연탄의 차이에 따른 온도분포의 특성차이는 나타나지 않았다.

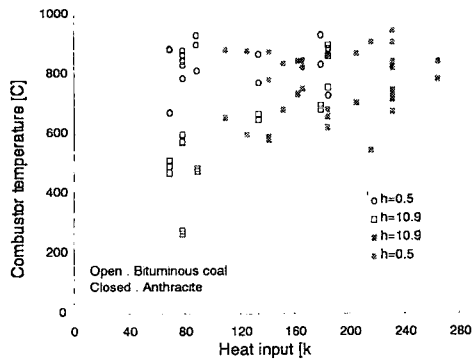


Figure 2 The effect of heat input on combustor temperature

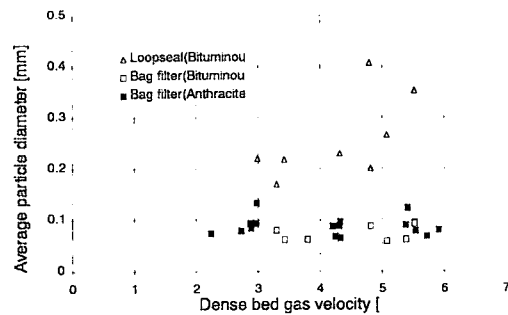


Figure 3. The effect of dense bed gas velocity on average particle size distribution

Fig. 3은 유동화 공기 유속이 회재의 평균 입경에 미치는 영향을 나타내었다. 공기유속이 증가할수록 사이클론에서 포집되는 입자의 평균입경은 증가하게 된다. 그러나 사이클론의 효율이 공기의 유속범위에서 크게 변하지 않으므로 백필터에 포집되는 입자의 평균입경은 변하지 않게 된다. 백필터 회재의 평균 입경은 탄종에 관계없이 연소로의 유속에 의해 결정되는 것으로 나타났다.

다. 또한 무연탄과 유연탄을 비교한 경우에도 탄소농도의 차이는 크게 나타나지 않았다.

따라서 연소로 Figure 4 는 연소로 유속의 변화에 따른 백필터 회회 미연 탄소농도를 나타낸 것이다. 유속의 증가에도 불구하고 백필터에서 수집된 회회 미연탄소농도의 변화는 나타나지 않았을 빠져나가는 석탄 입자의 탄소농도는 연소로의 유속과 사이클론 효율에 의존한다는 것을 보여준다.

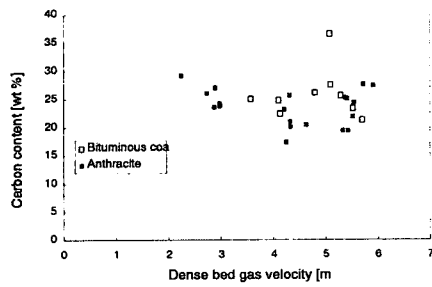


Figure 4. The effect of dense bed gas velocity on carbon content of bag filter ash

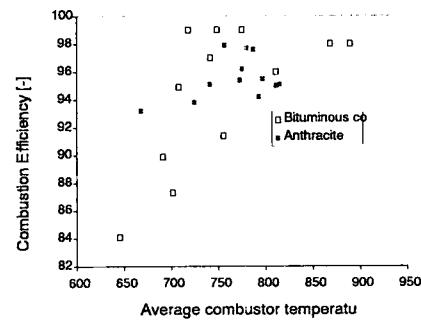


Figure 5. The effect of average combustor temperature on combustion efficiency

Fig. 5는 유연탄과 유연탄 연소시 포집된 백필터 회회 입경별 발열량 분포를 나타내었다. 석탄의 발열량은 입경에 무관하게 거의 일정한 발열량을 나타내었다. 그러나 백필터회회 발열량은 입경에 따라 큰 차이를 나타내었다. 그림에서 입경 0.1mm 이상의 백필터 회회는 발열량이 급격하게 감소하며 입경 0.1mm 이하의 백필터회회는 발열량이 거의 일정하게 유지되는 것을 보여준다. 따라서 입경 0.1mm 이하의 입자는 연소로를 순환되는 횟수가 짧아 체류시간이 char 연소시간보다 매우 짧게 되며 연소가 완전히 이루어지지 않았음을 알 수 있다. 반면에 입경 0.1mm 이상의 입자는 사이클론에서 포집되어 loopseal을 통해 연소로로 재순환되어 완전연소에 가깝게 연소됨을 알 수 있다.

Fig. 6은 연소로 온도변화에 따른 연소효율을 나타내었다. 연소효율은 연소로 온도 증가에 따라 증가하다가 연소로 평균온도 750°C 이상에서 일정한 값을 나타내었다. 연소효율은 연소로 온도 증가에 따른 연소반응 속도의 증가와 입자 유속에 의한 연소로내 체류시간과의 관계로 나타난다.

Fig. 7 은 연료중 질소성분의 NOx의 전환율을 나타내었다. 순환유동층 연소로의 연소온도가 850°C로 낮게 조절되는 이유로 인하여 생성되는 NOx는 모두 연료중 질소성분의 산화로 간주할 수 있다. NOx의 발생은 무연탄과 유연탄 모두 온도의 증가를 따라 증가하였다.

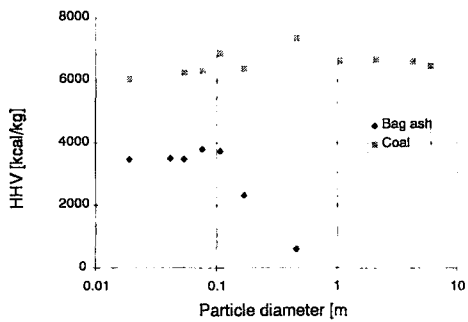


Figure 6. The variation of heating value of particle by size

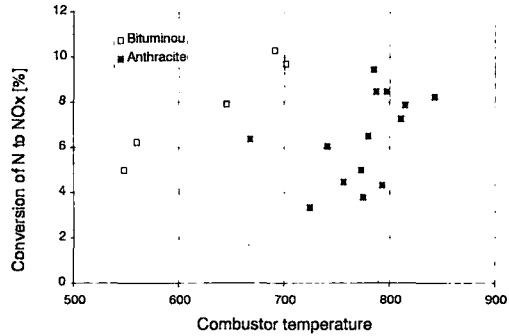


Figure 7. The effect of temperature on fuel-N conversion

온도 증가에 따른 NO_x의 전환율은 무연탄의 경우가 유연탄의 경우보다 낮게 증가하였다. 이는 석탄에 결합된 질소는 각각 휘발분과 char에 결합되어 있으며 무연탄의 질소는 유연탄보다 char와 결합된 비율이 높다. 연소과정에서 char의 연소가 휘발분의 연소보다 느린 것과 마찬가지로 char와 결합된 질소성분의 산화도 낮게 나타나는 것으로 이해된다.

Fig. 8은 연소로 온도변화에 따른 일산화탄소 배출특성을 나타낸다. 유연탄의 경우 뚜렷한 경향을 볼수 없으나 무연탄의 경우는 온도증가에 따라 CO가 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 온도증가에 따라 연소효율이 증가함으로써 CO가 감소하는 것으로 해석 될 수 있다.

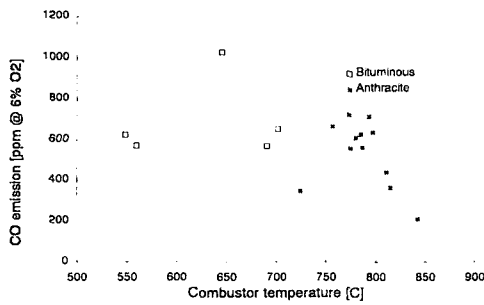


Figure 8. The effect of average combustor temperature on CO emission

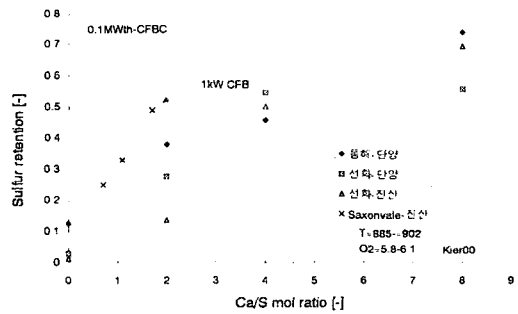


Figure 9. The effect of Ca/S mol ratio on sulfur retention

Fig. 9는 석탄 연소시 산지가 다른 석회석의 Ca/S 몰비에 따른 SO₂ 포집율을 나타낸 그림이다. 석회석 투입량 증가에 따라 탈황효율이 급격히 증가하다가 4몰 이상에서는 탈황효율이 둔화되며, 석회석의 종류에 따라 차이를 보인다. 다른 연구결과에 비해 탈황효율이 낮은 것은 석회석의 입도에 비해 유동화공기 유속이 너무 높아 석회석의 체류시간이 짧고 사이클론의 포집효율이 낮아 석회석의 재활용율이 감소함으로써 탈황효율이 감소한 결과로 추정된다.

4. 결론

- 벤치규모의 순환유동층연소로에서 국내무연탄과 호주산 수입유연탄의 연소특성을 실험 비교하였다.
- 가스유속이 증가함에 따라 loopseal 회재의 평균입경이 증가했으나, 백필터 회재의 입경은 변하지 않았다.
- 또한 가스유속의 변화에도 백필터 회재의 탄소함량의 변화는 크지 않았다.
- 투입석탄의 경우 입도분포별 발열량이 거의 일정하나 백필터 회재의 경우는 0.1mm이상에서는 급격히 감소한다.
- 연소로의 평균온도가 증가함에 따라 연소효율은 증가하며, 평균 750℃ 이상이 되면 거의 일정하다.
- 연소로 온도가 증가 함에 따라 연료중 질소의 NOx로의 전환율이 증가하며, 온도가 같은 경우 무연탄의 전환율이 유연탄에 비해 낮다.
- 연소로 온도 증가에 따라 CO 의 배출농도는 감소한다.
- Ca/S ratio 비가 증가함에 따라 탈황효율이 급격히 증가하다가 4몰 이상에서는 증가율이 둔화 되었다.

참고문헌

- Basu, P., and Fraser, S. A., Circulating Fluidized Bed Boilers, Butterworth-Heinemann, Boston, 349pp.(1991).
- Choi, J.-H. et al., Development of Circulating-Fluidized-Bed Coal Boiler Technology (I), Korea Institute of Energy Research KE-91009G, Ministry of Energy and Resources, 140pp. (1991).
- Furusawa T. and Shimizu, T., "Analysis of Circulating Fluidized Bed Combustion Technology and Scope for Future Development, " Circulating Fluidized Bed Technology II, 51-62 (1988).
- Mann, M. D., Hajicek, D. R., Henderson, A. K., and Moe, T. A., "EERC Pilot-Scale CFBC Evaluation Facility," Energy & Environmental Research Center, University of North Dakota, September, (1992).
- Shun, D. et al., Development of Circulating-Fluidized-Bed Coal Boiler Technology (II), Korea Institute of Energy Research KE-92050G, Ministry of Energy and Resources, 111pp. (1992).
- Shun, D. et al. Circulating Fluidized Bed Combustion of Korean Anthracite, Korea Institute of Energy Research 93Y-TO3, Korea Electric Power Co., 118pp. (1994).
- Shun, D. et al., Development of Circulating-Fluidized-Bed Coal Combustion Technology for Co-generation, Korea Institute of Energy Research Kier-973403, Ministry of Trade Industry and Energy, 97pp. (1993).