환경친화적 CFB 보일러 입자재순환 장치의 고체량 분배 특성

김유석† · 황재동* · 최용준* · 문길호* · 선도원** · 배달희**

Characteristics of Splitting Solid Amount by Friendly Environmental CFB Boiler's Particle Re-circulating Device

You-Seok Kim, Jae-Dong Hwang, Yong-Joon Choi, Kil-Ho Moon,
Do-Won Shun, and Dal-Hee Bae

Key Words : circulating fluidized-bed (순환유동층), particle re-circulating device (입자재순환 장치), minimum fluidization velocity (최소유동화속도), riser (상승관)

Abstract

Circulating Fluidized-Bed (CFB) boilers which have been operated in Korea were manufactured by the design technology of foreign leading companies. As they are not active to transfer their technology, domestic companies don't have the enough ability to design it independently yet. Doosan Heavy Industries & Construction Co. Ltd. and Korean Institute of Energy Research are trying to develop and improve the particle re-circulating device among the components of CFB boiler. Our purpose is to control the amount of particles leaving the re-circulating system by adjusting utility air and reuse the heat of circulating particles. The results of experiments with cold model system show that a fluidization state in the particle re-circulating device is very stable when the amount of utility air is supplied to its wind box with 2.29 times of minimum fluidization velocity. Also the amount of particles entering the riser don't increase linearly when the amount of utility air is supplied over 2.5 times of minimum fluidization velocity. Now we are testing its functional run with the hot-state experiment set-up.

기호설명

Ar : Archimedes No. [-]
d_p : 입자 직경 [㎛]
g : 중력가속도 [m/s^2]
G_s : 질량유량 [kg/m^2 s]
U_{mf} : 최소유동화속도 [m/s]
V_s : 고체 입자의 속도 [m/s]
μ_g : 가스 점성계수 [kg/m s]
ρ_{bulk} : 고체 입자의 겉보기 밀도 [kg/m^3]
ρ_g : 가스 밀도 [kg/m^3]
ρ_s : 고체 입자의 밀도 [kg/m^3]

† 두산중공업 기술연구원 화력시스템개발팀
E-mail : kyss@doosanheavy.com
TEL : (055)278-3707 FAX : (055)278-8569
* 두산중공업 기술연구원
** 한국에너지기술연구원

1. 서 론

1940 년대 석유정제 공업에 이용되었던 순환유동층 기술은 1970 년대 에너지 위기를 거치면서 석탄연소에 적용되기 시작하였고, 그 이후로 상당수의 상업용 순환유동층 보일러들이 운전되고 있다. 최근 지구온난화를 비롯한 환경문제의 대두 및 대체에너지 개발의 지연으로 순환유동층 보일러의 수요가 다시 증가하고 있는 추세이다. 순환유동층 보일러는 회분과 수분이 많은 저열량 연료를 비롯하여 여러 종류의 연료에 대한 설계가 용이하며, 기체와 고체의 접촉효율이 높아 90% 이상의 석탄 연소효율 및 탈황제 투입에 의

한 높은 탈황효과를 나타내고 있다. 또한, 보일러 내부의 연소온도가 850 900 ℃를 형성하므로 Thermal NOx의 생성이 억제되는 등 많은 장점이 있다.

지금까지 국내에 도입된 순환유동층 보일러는 주로 열병합 발전용으로 유연탄과 벙커 C 유를 연료원으로 하는 스팀용량 200 t/h 내외 규모의 10기가 운전 중이며, 근래 국내 무연탄 소비를 목적으로 발전용량 200 MW급 2기의 보일러가 상업운전을 시작하였다[1]. 그런데, 대부분이 외국 선진사의 설계기술을 바탕으로 국내 중공업체에 의해 제작되었지만, 선진사의 기술이전 회피로 조업조건의 변화에 따라 발생하는 운전상의 문제점 해결능력은 부족한 상태이다. 또한, 현 기준을 만족하는 황산화물과 질소산화물 배출치도 2005년 1월 1일부터 강화되는 대기환경기준에 부합하기 위해 기존 순환유동층 보일러에 대한 설비 개선 및 기술개발의 필요성이 요구되고 있다.

본 연구에서는 당 사와 한국에너지기술연구원이 공동으로 연구 개발하여 Yun et al[2]에 의해 보고된 Bench 실험장치의 특성 결과를 바탕으로 좀 더 규모가 크며 직접적인 고체순환 Loop를 통한 고체분배량 측정 및 조절 가능성 실험을 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 Cold Model 실험장치

그림 1은 순환유동층 Cold Model 실험장치의 측면도로 하부의 공기상자를 통해 유입된 공기는 분산판을 거쳐 상승관(Riser) 및 사이클론을 통해 외부로 배출되고, 상승관 내부의 층물질은 노즐형 분산판을 통과하는 고압의 공기에 의해 유동화 되고 비산되어 사이클론에서 포집된 후 입자재순환 장치로 유입되는 순환과정을 형성한다. 상승관 단면적은 900 mm x 400 mm, 높이는 7,000 mm이며 F.D. Fan의 유량은 최대 54 ㎥/min까지 사용 가능하다. 노즐형 분산판에 설치된 유동화 노즐은 외국 A사의 제품을 축소 제작한 것으로 총 36개가 설치되어 있다.

입자재순환 장치는 세 Section으로 구분되며 한 Section의 단면적 크기는 180 mm x 180 mm이다. 중앙 Section은 사이클론 하부와 연결되어 사이클론에서 포집된 입자가 집적되며 하부 공기상자를 통해 유동화 되어 유입공기 진행방향에 대해 좌측 Section과 우측 Section을 통해 상승관으로 이송된다. 이때 입자 재순환 장치의 공기상자로 공급되는 공기는 각 구역별로 최대 300 lpm의 압축공기 유입이 가능하다. 입자재순환 장치에도 현재 상용화 유동층 보일러에 적용된 것과 같은 형태의 유동화 노즐이 13개 설치되어 있다.

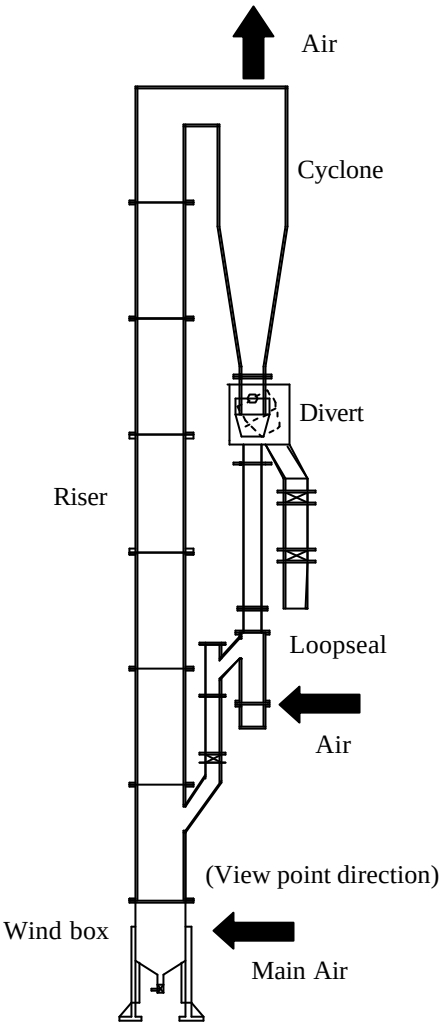


Fig. 1 Schematic diagram of the cold model experimental set-up (Left side of view point)

2.2 실험방법

평균입경 144 ㎛의 인조규사를 상승관에 300 kg, 입자재순환 장치에 75 kg씩 충진하고 상승관 단면에서의 유속조건이 1.5 m/s와 2.0 m/s인 각각의 경우에 대하여 입자재순환 장치의 실험조건을 최소유동화속도(층물질이 흔들리고 상호 움직임을 갖기 시작하는 기체의 공탑속도, U_{mf})(식 (1))를 기준으로 세 Section 중에서 두 Section의 유량변화를 일정하게 설정하고 한 Section의 유량을 최

소유동화속도의 0, 1.14, 1.17, 2.29, 2.86, 3.43 배씩 변경시켜 가며 실험하였다. 상용화 보일러의 내부온도가 평균 850 ℃로 상승할 때 위와 같이 설정한 상승관의 유속조건은 5 m/s 이상의 유속으로 변화하게 되며, 난류영역과 천이영역 사이의 유동화 패턴을 형성하게 된다.

$$u_{mf} = \left(\frac{m}{r_g d_p}\right)\left[\left(33.7^2 + 0.0408\ Ar\right)^{\frac{1}{2}} - 33.7\right] \quad (1)$$

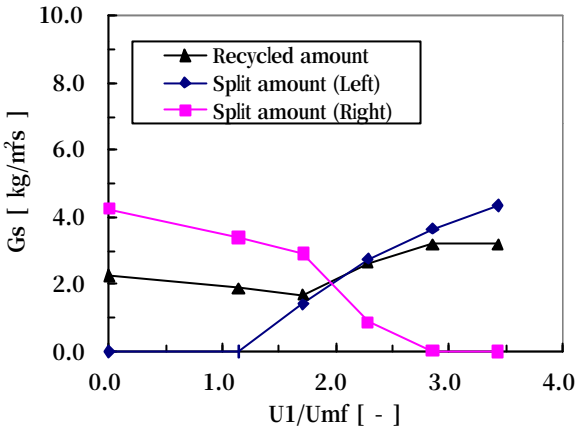
$$Ar = \frac{d_p^3 r_g \left(r_s - r_g\right) g}{m^2} \quad (2)$$

입자재순환 장치로 유입되는 고체순환량은 다이버트(Divert)를 통해 일정시간 동안 샘플링하여 그 양을 측정하였으며, 회수관(Return leg)을 통해 상승관으로 분배되는 고체량을 회수관 중간에 버터플라이 밸브를 설치하여 닫혀진 상태에서 일정 높이만큼 축적되는 시간을 측정하여 식 (3)에 의해 계산하였다[3].

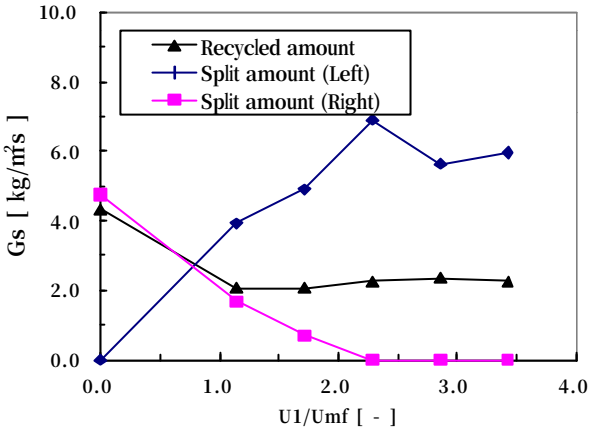
$$G_s = V_s \times r_{bulk} \quad (3)$$

3. 실험결과 및 고찰

그림 2 와 그림 3 은 입자재순환 장치의 우측 Section 으로 유입되는 공기량을 최소유동화속도의 1.17 배로 유지시킨 상태에서 좌측 Section 과 중앙 Section 의 유동화 속도 비율을 변화해 가면서 실험하였다. 고체순환량(Recycled amount)은 상승관으로부터 비산된 입자가 사이클론에서 포집되어 통해 입자재순환 장치의 입구를 통해 유입된 양으로 평균 3 kg/m²s 이다. 실험조건마다 유동화 속도 비율이 증가함에 따라 그 양이 점차 줄어드는 경향을 보이는데, 그 이유는 다이버트(Divert)를 통해 배출한 양만큼 보충해 주는 작업을 거치지 않았기 때문이다. 그림 2 의 (a)와 (b)는 상승관 유속 1.5 m/s 에 대한 입자재순환 장치의 고체분배량을 나타낸 것으로 동일한 유동화 조건하에서 중앙 Section 의 공기유입 비율이 높은 경우 좌측 Section 은 적은 유량변화 조건으로 고체분배량을 쉽게 조절할 수 있었다. 그런데, 이에 따른 문제점은 중앙 Section 의 공기유입 비율이 증가할수록 이에 대한 영향이 좌우측 Section 보다는 입자재순환 상부인 스탠드파이프



(a) U_2/U_{mf} = 1.71 & U_3/U_{mf} = 1.71

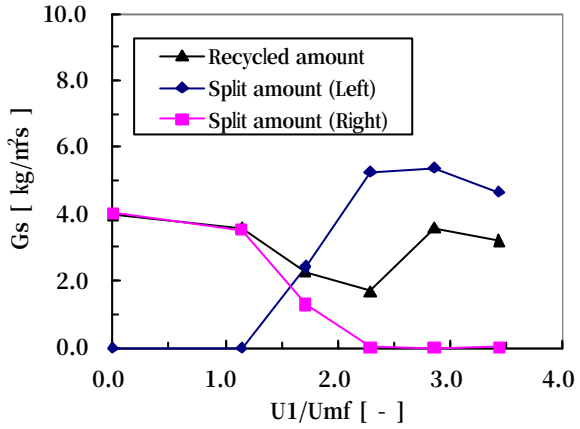


(b) U_2/U_{mf} = 2.86 & U_3/U_{mf} = 1.17

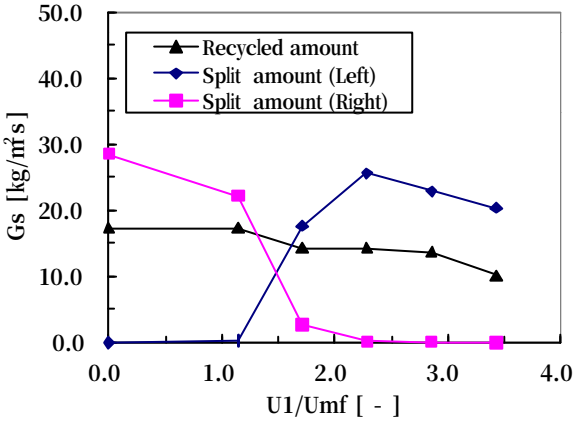
Fig. 2 Measurement of solid split amount on varying fluidization velocity

(Standpipe)와 사이클론 하단부에 직접적인 영향을 끼쳐 사이클론의 효율 이 떨어지는 문제점이 발생하였다. 따라서, 중앙 Section 으로 유입되는 공기량은 기포(Bubbling) 상태를 유지할 수 있는 최소한의 공기량만이 유입되어야 할 것으로 판단된다.

그림 3 은 입자재순환 장치에 유입되는 공기량은 동일하게 설정하고, 상승관 유속조건이 (a)의 경우는 1.5 m/s, (b)의 경우는 2.0 m/s 에 대하여 실험한 결과로 상승관의 유속증가에 따라 고체순환량(Recycled amount)의 오더가 두 배로 증가하였다. 이때 상승관 유속조건은 다르지만 좌측 Section 에 대한 공기량이 최소유동화속도의 약 1.5 배가 될 때 좌우측 Section 으로 분배되는 고체의 양이 같아짐을 관찰할 수 있다. 그런데, 실험과정을 통하여 각 Section 별 공기량 조건이



(a) Riser velocity = 1.5 m/s



(b) Riser velocity = 2.0 m/s

Fig. 3 Measurement of solid split amount on varying riser velocity (U_2/U_{mf} = 2.29 & U_3/U_{mf} = 1.17)

동일할 경우 좌측 Section 에 의한 고체분배량이 우측 Section 에 의한 고체분배량보다 약 0.8 배 많음을 관찰하였는데, 이러한 이유는 우측 Section 의 분산판과 공기상자 사이에 공기통로 형성으로 압력손실이 생겼기 때문인 것으로 판단된다.

상승관 유속조건이 2.0 m/s 인 경우 입자재순환 장치로 유입되는 공기비율이 최소유동화속도의 약 2.5 배 이하로 운전될 때 사이클론을 통해 유입되는 고체순환량이 양쪽 회수관을 통해 상승관으로 분배되는 고체량보다 많음을 중앙 Section 에 설치된 압력탭(Pressure tap)의 상승 수치를 통해 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 실험을 통하여 입자재순환 장치에서의 공기 분배량에 의해 사용자가 원하는 양만큼 원하는 방향으로 조절이 가능함을 확인하였다. Cold Model 입자재순환 장치에서는 좌우측 Section 으로 공급되는 공기량이 본 실험에 사용된 평균입경 144 ㎛의 입경에 대해 최소유동화속도의 2.29 배일 경우 가장 안정적인 기포 유동층 상태를 유지하였다. 그 이상에서는 난류(Turbulent) 상태가 형성되고 입자재순환 장치로 유입되는 공기량이 사이클론 하단부로 역류됨에 따라 사이클론 효율을 떨어뜨리고 이에 따라 유입되는 양이 줄어들어 좌우측 Section 을 통한 고체분배량 증가에 기여하지 못하고 있다. 이 조건은 입자재순환 장치의 온도가 약 850 900 ℃인 상용화 설비에 대해 유동화 공기가 팽창하여 평균적으로 최소유동화속도의 8.9 배를 이루게 되며 이 운전조건은 L-valve 및 Seal pot 형태의 기존 입자재순환 장치에 대한 연구논문 등에서 제시한 최소유동화속도의 10 배 이하의 운전조건에 해당된다. 따라서, 기존 상용화 입자재순환 장치에 적용된 Cone type 기계적 밸브를 유동화 공기만을 이용하여 같은 기능을 갖도록 시스템 구성이 가능하다고 판단된다. 따라서, 당 사에서는 Cold Model 실험결과를 바탕으로 당 사 보유 Hot Model 실험설비에 대한 고체분배량 측정 실험을 수행 중에 있다.

위와 같은 설비개선을 통해 현재 상용화 순환유동층 보일러에 적용된 Cone type 방식의 입자재순환 장치를 대체함으로써 고온의 상태로 순환되는 고체량을 운전조건에 따라 직접 보일러(상승관) 내부로 유입 시키거나, 외부열교환기(Fluidized-Bed Heat Exchanger, FBHE)를 통과시켜 열회수 과정을 거치게 한 다음 보일러 내부로 순환되게끔 유동화 공기량 조절에 의해 고체물질의 분배방향과 분배량을 제어함으로써 보일러 내부의 국부 과열을 방지하고 이로 인한 Thermal NOx 의 발생을 억제하고자 한다.

후 기

본 연구는 산업자원부에서 시행한 청정생산기술사업 (과제명 : 환경친화적 순환유동층 연소로 핵심 요소기술 개발)으로 추진되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

(1) Lee, S. H., Lee, J. M., Kim, J. S., Choi, J. H., and Kim, S. D., 2000, "Combustion characteristics of anthracite coal in the D CFB boiler", *HWAHAK KONGHAK*, Vol. 38, No. 4, pp. 516~522.

(2) Yun, J. K., Shun, D. W., Bae, D. H., Lee, H. S., Choi, Y. J., Moon, K. H., and Lee, D. K., 2004, "Study of cold mode flow characteristics of particles in a non-mechanical 2-directional loop seal", *Theories and Applications of Chem. Eng*., Vol. 10, No. 1, pp. 767~770.

(3) Wen, C. Y., and Yu, Y. H., 1966, "A generalized method for predicting the minimum fluidization velocity", *AIChE J*. 12, pp. 610-612.

(4) .Burkell, J. J., Grace, J. R., Zhao, J. and Lim, C. J., 1988, "Measurement of solids circulation rates in circulating fluidized beds", *CFB Technol. II*, pp. 501~509.

(5) Basu, P. and Fraser S. A., 1991, Circulating fluidized bed boilers : Design and operations, *Butterworth-Heinemann*, Stoneham

(6) Knowlton, T. M. and Hirsan L., 1978, "L-valves characterized for solids flow", *Hydrocarbon Processing*, pp. 149~156.

(7) Tsukada, M., Nakanishi, D. and Horio, M., 1993, "The effect of pressure on the phase transition from bubbling to turbulent fluidization", *Int. J. Multiphase Flow*, Vol.19, No. 1, pp..27~34

(8) Kim, S. W. and Kim, S. D., 2002, "Effects of particle properties on solids recycle in loop-seal of a circulating fluidized bed", *Powder Technology*, 124, pp. 76~84.