

3개의 사이클론 갖는 순환유동층에서의 수력학적 특성 연구

이종민, 김재성, 김종진

한전 전력연구원 발전연구실 연소신발전그룹

Hydrodynamic Study in the Cold CFB Reactor with 3-Cyclones

Lee Jong-Min, Kim Jae-Sung and Kim Jong-Jin

APG & C Group, Power Generation Lab, KEPRI, KEPCO

1. 서론

순환유동층 보일러는 연소로 (상승관: riser)내에 공기를 고속으로 주입하여 비말동반되는 고체입자를 사이클론에서 포집하여 재주입하는 유동층을 이르는 것으로, 난류유동층(turbulent fluidized bed), 고속유동층(fast fluidized bed) 그리고 희박상 유동(dilute phase flow) 영역에서 조업이 이루어진다. 순환유동층은 비교적 높은 기체 유속에서 조업이 이루어지기 때문에 고체입자의 혼합 및 비산 그리고 재순환이 격렬하게 이루어지고, 기-고체간 접촉효율 및 전열계수가 높아 전체적인 처리량 및 효율이 좋은 장점을 가지고 있다. 이에 국내외적으로 순환유동층 보일러의 보급은 급격히 늘어나고 있으며, 국내에서도 10여기 이상의 순환유동층 보일러가 가동되고 있고 앞으로 추가 건설 될 예정이다.

한전에서도 동해화력에 최대규모(200MWe×2)의 저급 무연탄용 순환유동층 2기를 건설하여 운영 중에 있으며, 국내외적으로 규모 및 적용 탄종면에서 처음 시도되는 것이기에 그 관심도가 매우 크다 하겠다. 이러한 순환유동층의 성능 및 운전 특성은 연소로에서의 수력학적 특성에 크게 영향을 받으며, 특히 일차공기량 및 이차공기량, sealpot 공기량, 고체입도 및 밀도 등에 따라 연소로에서의 고체체류량 및 순환량 등이 영향을 받아 이것이 보일러 성능에 큰 영향을 미칠 수 있는 것으로 보고되고 있다. 특히, 동해화력 순환유동층 보일러의 경우, 연소로의 형태가 사이클론이 3개 설치된 비대칭형의 직사각형 구조로 되어 있으며, 외부열교환기가 설치되어 있어 기존에 알려진 상용 CFB 연소로와는 상당히 다르다고 할 수 있다. 이에 본 연구에서도 동해화력 순환유동층 보일러 특성에 맞추어 3개의 사이클론을 갖는 직사각형 구조의 냉간 순환유동층 반응기를 제작, 설치하여 동해화력 운전상황에 따른 운전조건을 모사하여 수력학적 특성 (고체체류량, 고체순환량 등)을 고찰하였다.

2. 실험 장치 및 방법

본 연구에 사용된 3개의 순환 loop를 갖는 냉간 순환유동층 실험장치를 Fig. 1에 나타내었다. 그림에 나타낸 바와 같이 장치의 구성은 크게 반응기부분, 공기 공급 계통부분, 그리고 공기유량 제어부분 및 압력 측정부분으로 구성되어 있으며, 비산입자의 포집을 위해 집진장치를 설치하였다. 반응기 부분은 연소로 부분에 해당하는 상승관(Riser, 0.25m(L)×0.62m(W)×10.0m(H)), 3개의 사이클론(Cyclone, 0.365m (I.D.)×1.46m(H)) 및 재순환부(Loopseal, 0.1m(I.D.)) 그리고 가운데 순환 loop에 추가적으로 설치되어 있는 외부열교환기(FBHE, 0.3m(L)×0.3m(W)×0.5m(H))로 구성되어 있으며, 상승관, 재순환부 그리고 외부열교환기의 분산판은 노즐 타입의 분산판이 설치되었다. 공기공급은 자동조절 밸브로 정량 조절하여 주입하도록 되어있으며, 일차공기는 상승관의 주분산판을 통해 주입, 이차공기는 분산판 위로 0.5m 간격의 주입구를 통해 양쪽 측면에 각각 4개씩 설치하여 주입하도록 구성

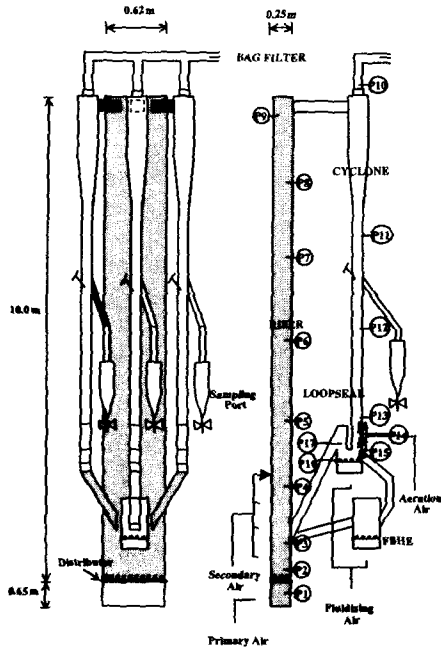


Fig. 1 Experimental apparatus

되어 있다. Loopseal 공기는 분산판을 통해 주입되는 주유동화 공기와 dipleg에서 흐르는 원활함을 위해 주입되는 aeration (grease air) 공기로 나누어 각각 정량 조절하여 주입하도록 구성되어 있다.

압력측정은 상승관(9개) 및 downcomer (3개) 그리고 Loopseal(5개)에 전체 33개의 압력탭이 설치되어 일정간격을 기준으로 정압을 측정하여 PC로 자동 저장되도록 되어 있다. 고체순환량의 측정은 일정시간동안 downcomer로 흐르는 고체량을 slide valve를 이용하여 sampling하여 그 양을 측정하여 결정하였다.

실험에 사용된 입자는 silca sand로 평균 입경은 $127\mu\text{m}$ 이며 밀도는 $2800\text{kg}/\text{m}^3$ 의 입자를 사용하였다. 상승관에서의 공기유속 및 Loopseal, FBHE에서의 공기유속은 동해화력의 설계 입자 및 유속조건과 유사한 범위 (난류유동층-고속유동층)에서 설정하였으며, 상승관에서의 공기유속, 이차 공기주입 위치의 영향, 일차 공기비, Loopseal 공기유속 그리고 전체 inventory 등에

따른 고체체류량 및 고체순환량을 측정하여 그 영향을 고찰하였다.

3. 결과 및 고찰

동해화력은 연소로 온도 $850\text{--}900^\circ\text{C}$ 기준으로 약 $4\text{--}6\text{m}/\text{s}$ 의 운전유속을 갖고 있으며, 주입되는 석탄의 평균 입도는 $780\mu\text{m}$ 로 그 운전범위가 난류유동층 조업을 띄고 있다. 이에 본 실험에서도 평균입경 및 밀도 그리고 운전유속을 난류 유동층 조업에 초점을 맞추어 그 영향을 고찰하였다.

Fig. 2는 본 순환유동층에서의 압력 loop을 나타낸 그림이다. 그림에서 볼 수 있듯이 riser 및 downcomer 그리고 loopseal간 압력은 상호 balance를 이루고 있었으며, 특히 난류유동층 조업에 있어 loopseal에서의 고체층 높이(14-13)는 연소로의 고체순환부위(4~5)이상의 높이에 걸리는 압력과 비슷한 값을 보이고 있어 적절한 balance를 구성함을 볼 수 있다. 이는 loopseal 유속이 충분한 유동층을 형성할 수 있는 유속이어야 하며, 대략 $10\text{--}20u_{mf}$ 이상의 유속조건에서 이루어지는 것으로 나타났다.

순환유동층내의 전체 고체량이 100kg, Loopseal의 운전유속은 $0.2\text{--}0.3\text{m}/\text{s}$ 일 때 상승관(Riser)의 운전유속, U_0 ,에 따른 고체체류량을 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 고체체류량은 하부 dense phase 및 상부 lean phase 모두 운전유속이 증가함에 따라 점차

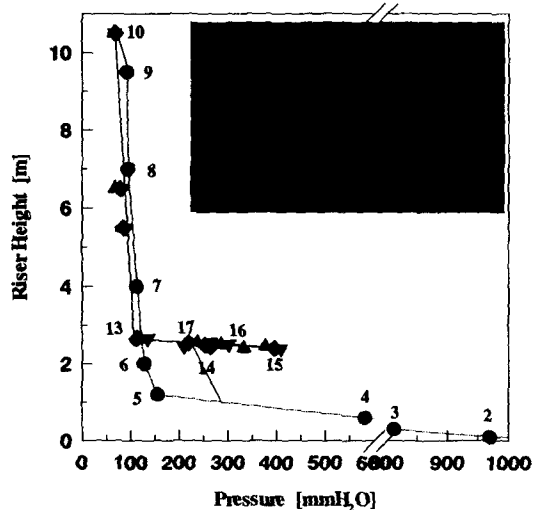


Fig. 2 Pressure loop in the CFB

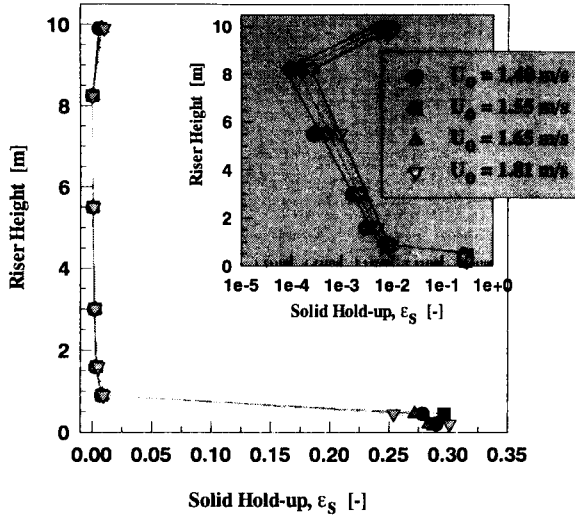


Fig. 3 Axial solid hold-up with U_0 .

다. 특히 가운데 사이클론을 구성하는 loopseal 2는 양쪽의 사이클론을 구성하는 loopseal 1, 3보다 순환량이 더 크울 알 수 있으며, 이는 기존에 보고된 고체 flux의 분포와도 일치하는 것으로 나타났다. 대략 본 시스템의 경우 가운데 loop의 경우 유속에 따른 평균 고체순환량이 양쪽 loop에 비해 약 30% 이상 더 큰 것으로 나타났다³.

전체 공기량은 일정하고 일·이차 공기비 ($PA/[PA+SA]$)가 0.66~1.0 일 때 riser에서의 고체체류량은 Fig. 2에 나타낸 바와 같은 경향을 보인다. 다만, 이차공기량이 증가할수록 고체체류량은 감소하는 경향을 보이며, 이는 상승관내의 고체체류량의 증가를 위해선 일·이차 공기량비의 증가를 통해 이를 수 있음을 나타낸다. 또한 일·이차 공기량비의 증가에 따라 고체순환량은 직선적으로 증가하는 것으로 나타났다. 이차공기량의 주입위치에 따른 고체순환량의 영향을 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 이차공기의 주입 위치가 하단부에 위치할수록 고체순환량은 점차 증가하는 경향을 보였으며, 특히 모든 이차공기 주입구를 이용해 주입하였을 경우가 좌측 혹은 우측의 주입구만으로서의 공기주입보다 고체순환량이 좀더 큰 것을 알 수 있었다. 이는 하단부로 주입되는 공기의 양이 같을 경우, 비교적 넓은 범위에 걸쳐 주입되는 것이 고체순환량 증가에 더 큰 영향을 미치는 것을 의미한다. 또한 좌측과 우측의 이차공기주입으로 인한 고체순환량의 측정결과, 좌우측의 주입위치조절로는 loopseal 1과 2로의 순환량 조절이 어려움을 알 수 있다.

전체 고체 inventory에 따른 고체체류량 분포를 Fig. 6에 나타내었다. 고체 inventory에 따라 축방향 고체체류량은 그림에서 볼 수 있듯이 점차 증가하는 경향을 나타내었으며, 특히 dense 층의 높이가 점차 증가하는 경향을 보여주고 있다. 이는 상승관내의 전체 고체량

증가하는 경향을 보이고 있으며, 높이에 따라서는 대체적으로 높이가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 난류유동층 조업의 대표적인 고체체류량을 나타내는 것으로 하부 dense 층의 고체체류량이 25~28% 정도이고 상부의 고체체류량이 1~0.02% 정도로 나타나고 있다. 상승관에서 사이클론으로 배출되는 출구에서는 비교적 고체체류량이 높게 나타났으며 이는 출구효과에 기인한 것으로 생각된다^{1,2}.

상승관 기체유속에 따른 고체순환량을 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 riser의 공기유속이 증가함에 따라 전체 고체순환량 및 loopseal 1, loopseal 2 그리고 loopseal 3의 고체체류량 모두가 증가하는 경향을 나타내고 있

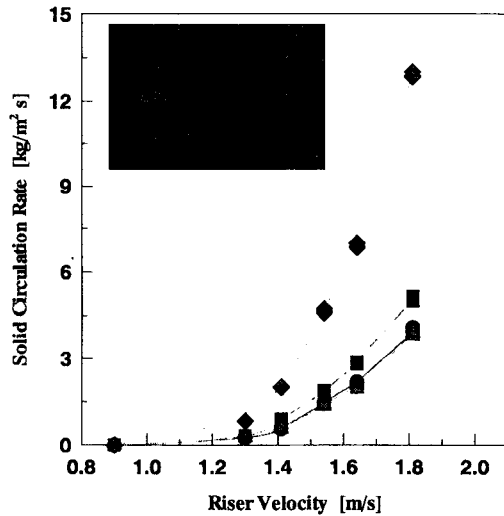


Fig. 4 Solid circulation Rate with U_0 .

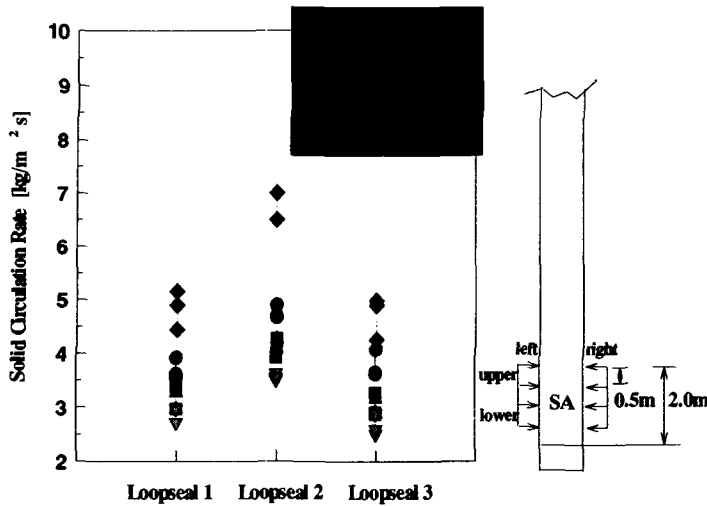


Fig. 5 Solid circulation rate with SA inlet position

dipleg의 고체축적 및 비유동으로 인한 이동층형성으로 고체순환량 및 체류량이 적은 반면, 충분한 유동화속도 이상 ($>5u_{mf}$)의 유속에서는 일정 고체체류량 및 순환량을 보여 Loopseal의 순환량 및 체류량 조절 능력이 없어짐을 알 수 있었다. 이는 실제 상용 CFB 연소로의 Loopseal 조건이 매우 격렬한 유동층 ($>10u_{mf}$)임을 고려한다면 실제 Loopseal의 고체순환량 및 체류량 조절능력은 무시될 만 하다는 것을 의미하고 있다.

(inventory)의 증가(상승관내의 압력차 증가)로 인한 고체 momentum의 증가로 인해 나타나는 현상으로 이해할 수 있다. 고체순환량도 전체 고체량이 증가할 수록 점차 증가하는 경향을 나타내는 것으로 측정되었다.

Loopseal의 공기유속 ($1u_{mf} \sim 15u_{mf}$)에 따른 고체체류량의 변화 및 순환량의 측정결과로 다음의 현상을 발견할 수 있었다. Loopseal의 공기유속이 최소 유동화 속도 이전 및 부근에서는 ($\leq 1u_{mf}$)

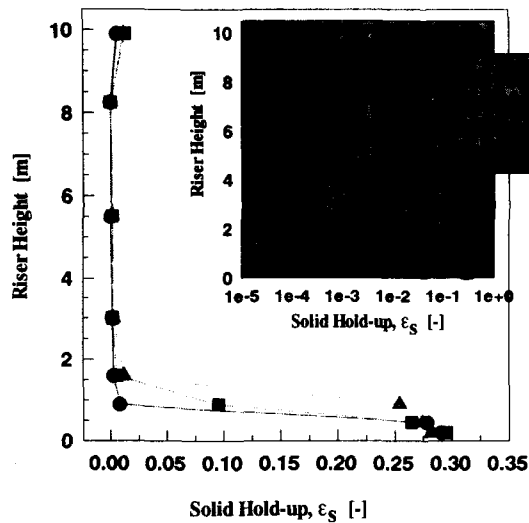


Fig. 6 Axial solid hold-up with total solid inventory

4. 결론

3개의 사이클론을 갖는 순환 유동층에서 수력학적 특성을 고찰한 결과는 다음과 같다. 첫째 고체체류량 및 고체순환량은 상승관 유속, 일차/(일차+이차) 공기비, 전체고체량 (total inventory)의 증가에 따라 점차 증가하는 경향을 보였으며, 이차공기주입위치의 하단주입 또한 고체체류량과 순환량의 증가에 기여하는 것으로 나타났다. 특히 3개의 loop중 가운데로의 고체순환량이 양측에 비해 월등이 높은 것으로 나타났다. Loopseal의 공기유속에 따라서는 충분한 유동화시 고체체류량 및 순환량에 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. Namkung, W., Cho, Y. J. and Kim, S. D.; HWAHAK KONGHAK, 32, 241(1994)
2. Johnsson, F. and Leckner, B.; 17th internation conference on FBC, 1, 671(1995)
3. Leckner, B., Golriz, M. R., Zhang, W. Andersson, B. A.; 15th internation conference on FBC, 2, 771(1991)