

상온의 두 방향 loop seal에서 입자의
흐름특성 연구

윤진경, 선도원*, 배달희*, 이홍석*, 이동규
충북대학교 공업화학과

*한국에너지기술연구원 청정신공정연구센터

Study of flow characteristics of particles
from 2-directional loop seal at Cold mode.

Jin-Kyeong Yun, Dowon Shun*, Dal-Hee Bae*, Hong-Suk Lee* and Dong-Kyu Lee

Department of Industrial Chemistry Engineering,
Chung-buk National University

*Advanced Clean Energy Process Research Center,
Korea Institute of Energy Research

1. 서론

순환 유동층 연소보일러는 고온에서 석탄과 공기의 높은 접촉률을 이용한 연소기술로 연소 효율은 높고 공해물질의 배출은 낮아 그 우수함이 입증되어 발전 및 열 병합 발전, 소각, 또는 복합발전에도 적용되는 차세대 연소기술이다. 특히 원료물질인 석탄의 저렴한 가격으로 인해 운전경제성이 뛰어나 산업용 보일러로 환영받고 있다[1,2]. 순환유동층 기술의 핵심요소 기술인 입자 재순환 장치 기술은 산업전반에 사용되는 범용기술일 뿐 아니라 외국 기술의 도입으로 인한 외화손실을 막기 위해 개발이 불가피하다.

고체 재순환부(loop seal)는 고체 입자를 압력이 낮은 곳에서 높은 곳으로 전달하고, 반응기내 기체의 역류를 방지하는 sealing 역할을 하며 고체 순환속도를 조절한다. 본 연구에서는 연소로와 외부 열 교환장치(EHE)[3]로 고체 입자를 정량공급 할 수 있는 두 방향 loop seal을 고안하여 실험하였다[4]. 상온 loop seal 실험장치를 통해 유속, 고체 순환량, 수평관 gap의 높이가 분리 및 공급현상에 미치는 영향을 연구하였다.

2. 이론(실험 및 방법)

본 연구를 위한 실험장치는 Fig. 1의 Batch 장치와 Fig. 2의 순환 유동층[5] 장치로 구성하였다. Batch 실험장치의 크기는 150×150×680(mm)이며 두 개의 고체 출구를 가지고 있고 내부의 유동특성을 관찰할 수 있도록 아크릴로 제작하였다. 장치의 상부에 인위적으로 고체량을 조절할 수 있는 로터리 피더를 설치하였으며 장치 내부의 압력변화를 측정하기 위해 물 마노미터를 사용하였다. Q₁, Q₂, Q₃에서 주입된 공기에 의한 유속은 각각 U₁, U₂, U₃로 표기하였다. Q₁, U₁은 EHE에 가까운 loop seal의 유량과 유속을, Q₃, U₃은 Riser에 가까운 유량과 유속을 의미한다.

순환 유동층 장치는 bench scale 규모의 장치에서 기존 loop seal을 제거하고 batch 실험을 통하여 새로 고안된 아크릴 재질의 loop seal로 설치하였다. 연소로 하부는 내경 5 in. tubular 형이며 연소로 높이는 7m이다[6]. 사용된 입자는 인조규사로 평균 입도가 74 μ m, 150 μ m인 것을 순환유동층 실험과 batch 실험에 각각 사용하였다. 순환 유동층 실험 장치를 나타낸 Fig. 2에서 EHE와 Riser로 흐르는 고체순환량을 측정하기 위해 고체측정관에 Butterfly 밸브를 설치하였고, 실험 중 발생하는 역류에 의한 입자의 쓸림 현상을 막기 위해 loop seal 상단에 압력균형 유도관을 설치하여 실험하였다. 압력 측정은 연소로와 loop seal에 물 마노미터를 설치하여 측정하였다.

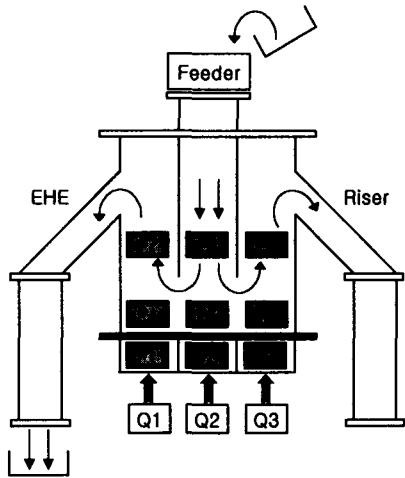


Fig. 1. Apparatus of batch experiment

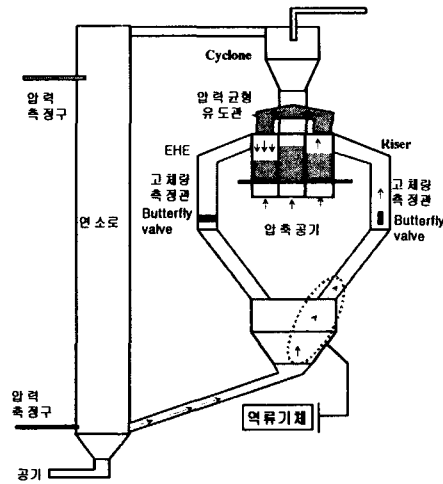
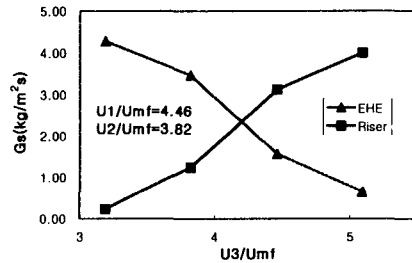
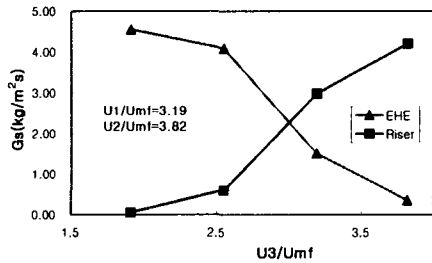


Fig. 2. Apparatus of CFB experiment

3. 실험(결과 및 고찰)

Fig. 3은 유속 증가에 따른 Riser와 EHE로 흐르는 입자의 양을 나타낸 것이다. loop seal의 가운데 부분에 주입하는 공기의 유속 U_2 는 U_{mf} 의 3.82배로 고정시킨 상태에서 EHE 방향의 U_1 과 Riser 방향의 U_3 를 증가시켰다. U_1 의 유속을 고정시킨 상태에서 U_3 의 유속을 증가시키면 EHE의 고체순환량은 점차 감소하는 반면 Riser의 고체 순환량은 증가하게 되어 교차점을 형성하게 된다. Q_1 과 Q_3 로부터 주입되는 공기의 양으로 입자의 흐르는 방향뿐 아니라 고체 순환량도 조절할 수 있다는 사실을 실험을 통해 알 수 있다. 한편, U_2/U_{mf} 가 고정인 상태에서 U_1/U_{mf} 가 증가할수록 EHE와 Riser의 고체순환량 곡선의 기울기는 점차 감소하는 것을 관찰하였다. 유속이 상대적으로 낮은 $U_2/U_{mf}=3.15, 4.46$ 의 그래프에서는 교차점 부근에서의 기울기 절대치가 크게 나타났다. 즉, 적은 유속의 변화에도 고체순환량의 변화가 크다는 의미이므로 고체순환량의 정량이 어렵다는 것을 의미한다. 그러나, $U_2/U_{mf}=8.28, 9.55$ 의 그래프는 기울기의 절대치가 확연히 작아져 거의 직선을 나타내므로 고체순환량의 정량 조절이 상대적으로 용이하였다. 유속이 상대적으로 낮은 실험에서의 그래프를 살펴보면 EHE와 Riser로 같은 양의 공기를 주입할지라도 Riser로 더 많은 양의 고체입자가 흐름을 알 수 있다. 이것은 Loop seal 내에 충분한 유동화가 일어나지 않았을 때 생기는 현상인데 유속을 점차 증가시켜 반응기내를 충분히 유동화 시키면 한쪽 방향으로의 고체 쓸림 현상은 확연히 사라지는 사실을 발견하였다.



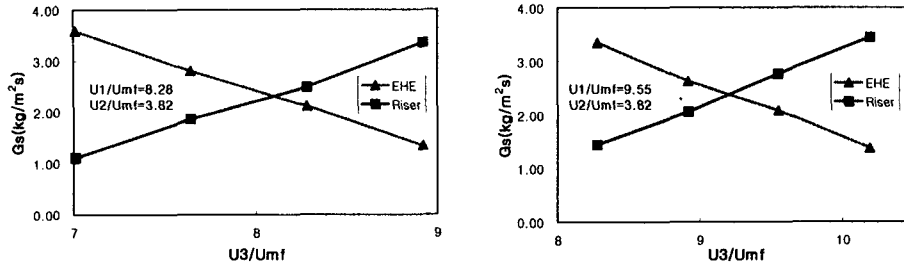


Fig. 3. Relations between solid circulation rate(Gs) and the gas velocity

Fig. 4는 Fig. 3에서 설명한 교점 부근에서 고체순환량 곡선의 기울기와 U_1 , U_2 와의 관계를 나타낸 그래프이다. 앞에서 설명한 바와 같이 U_1 의 유속이 증가할수록 기울기는 점점 감소하였다. 마찬가지로 U_2 의 유속 증가에 따라 기울기는 대체로 감소하였다. 따라서 loop seal 내의 유속이 높아지면 입자의 정량공급 조절이 용이해지지만 운전비는 상승하는 단점이 있다. 그러나, 앞에서 설명한 입자의 쏠림 현상을 방지하기 위해서는 최소유동화 속도의 3배 정도로 유지하는 것이 바람직하다.

Fig. 5는 로터리 피더의 RPM 증가에 따른 전체 고체순환량의 변화를 나타낸 그래프이다. EHE 방향으로만 입자가 흐르도록 U_1 의 유속을 일정하게 유지하고 U_2 는 입자이동을 위해 적당량으로 유지시켰으며 U_3 는 0으로 고정하였다. 로터리 피더로부터 공급되는 총 고체순환량이 증가할수록 EHE로 흐르는 고체의 양도 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

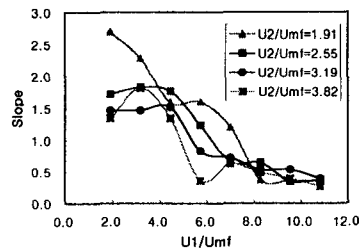


Fig. 4. Relations between gas velocity and Gs slope near the intersection point

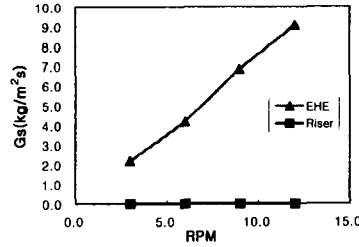


Fig. 5. Relations between RPM of rotary feeder and solid circulating rate.

Fig. 6은 순환 유동층에서 유속과 EHE, Riser로 흐르는 고체량의 관계를 나타낸 그래프이다. Batch 실험과 달리 동시에 EHE, Riser로 흐르는 고체량을 측정할 수 없기 때문에 한쪽씩 순서대로 측정하였다. Batch 실험에서는 입자가 EHE, Riser를 통해 대기로 배출되는 반면에 순환유동층 실험에서는 입자가 재순환하기 때문에 양쪽의 밸브를 모두 닫았을 경우 공기의 흐름이 차단되어 loop seal 내에 유동화가 일어나지 않게 된다. Fig. 3과 유사한 방법으로 실험한 결과 Batch 실험과 마찬가지로 순환유동층 실험에서도 EHE, Riser로의 입자 분리 현상이 나타났다. $U_2/Umf=13.71$ 로 고정하고 U_1 과 U_2 를 각각 최소유동화 속도의 13.71부터 27.41배로 증가시키면서 실험하였다. 실험에 사용한 인조규사의 입도는 $74\mu\text{m}$ 로 Batch 실험에서 사용한 $150\mu\text{m}$ 크기의 인조규사보다 미세한 입자를 사용하였다. 수평판 gap의 높이를 9cm, 25cm로 변화시켜 입자의 정량공급 특성에 미치는 영향을 알아본 결과 차이점이 나타나지 않았고 이는 Batch 실험에서도 발견하였다. Fig. 1의 loop seal에 설치한 물 마노미

터를 통해 압력이 고체 순환특성에 미치는 영향을 알아보았으나 실험 측정 오차가 클 뿐 아니라 일정한 경향을 나타내지 못하여 해석 할 수 없었다.

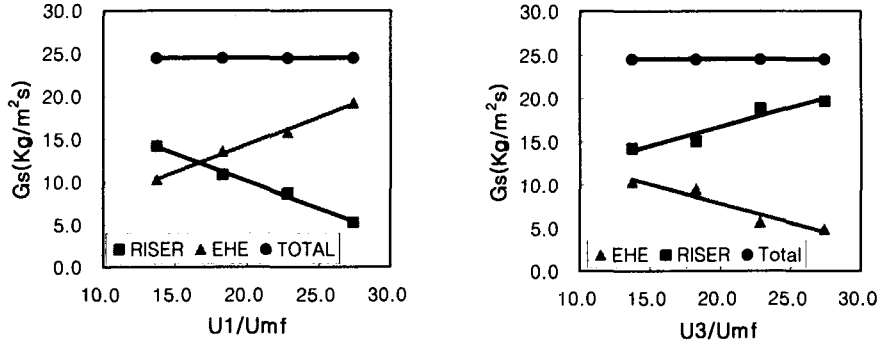


Fig. 6. Relations between gas velocity and solid circulation rate at apparatus of circulating fluidized bed.

4. 결론

두 방향 loop seal에서 유속의 조절을 통한 입자의 정량 공급 특성이 나타남을 확인하였다. 총 고체 순환량의 증가에 따라 EHE, Riser로 흐르는 고체 순환량은 선형적으로 증가하였다. 유속에 따른 고체 입자의 분리 공급특성은 다음의 몇 가지 특성으로 나타났다. Q_1 과 Q_3 에 같은 양의 공기를 주입하였음에도 불구하고 EHE와 Riser로 배출되는 고체 순환량이 큰 차이를 나타내었다. 그러나, 유속을 증가시켜 loop seal 내의 유동화를 활발하게 한 후 고체 입자의 쓸림 현상은 거의 나타나지 않았다. EHE의 고체순환량 곡선과 Riser의 고체순환량 곡선이 만나는 교점 부근의 기울기는 유속이 증가하면서 감소하였다. 즉, 활발한 유동화가 일어난 loop seal에서는 유속 조절을 통한 입자의 정량 공급이 용이하지만 유속이 낮은 조건에서는 미세한 유속 조절에도 고체 순환량이 급변하여 정량 공급이 상대적으로 어려웠다. Loop seal 수평관 gap의 높이를 9, 25cm로 변화하여 실험한 결과 입자의 정량공급 특성에 영향을 미치지 않았고 압력을 통한 입자의 정량공급 특성은 실험시 측정 오차가 클 뿐 아니라 일정한 경향을 나타내지 않아 규명하지 못하였다.

5. 참고문헌

1. 선도원, 박영성, 손재익 : 화학공업과 기술, 13(1), 6(1995).
2. 손재익 : 청정석탄활용기술개발, 한국에너지기술연구소 보고서, 제 3장(1994).
3. Qinhui Wang, Zhongyang Luo : "Development of a new external heat exchanger for a circulating fluidized bed boiler", Chemical Engineering and Processing, 00 (2002).
4. Basu, P. and Fraser, S.A.: "Circulating Fluidized Bed Boilers", Ch.8, Butterworth-Heinemann, Stoneham(1991).
5. Kunii and Levenspiel: "Fluidization Engineering", Ch.8, Butterworth-Heinemann(1991).
6. 선도원, 배달희, 한국회: "국내산 무연탄의 순환유동층 연소특성 연구", HWAHAK KONG HAK, Vol. 34, No. 3 (1996)