

유동층 저회냉각기에서의 입자 혼합특성과 비유동 진단

김동원* · 이종민* · 김재성* · 김종진*

Characteristics of particle mixing and detection of poor fluidization in a fluidized bed ash cooler

D. W. Kim^{*}, J. M. Lee^{*}, J. S. Kim^{*}, J. J. Kim^{*}

ABSTRACT

Interruption of good fluidization in a fluidized bed ash cooler(FBAC) for discharging bed materials such as sand or coal ash particles from the CFB combustor is frequently happened because of agglomeration of the particles in the bed. This unstable operation may, in the worst case, result in an unscheduled boiler shut down. In this study, we examined the operation problems of the FBAC of Tonghae CFB boiler and studied and introduced the simple detection and solution techniques with analyzing the mixing property and the occurrence of defluidization in a simulated fluidized bed ash cooler system (0.5m-H x 0.5m-W x 1.0m-L). The bridge of the large particles at the bed surface could be observed, and this caused to form the defluidization area at the entrance of the FBAC. The defluidization was affected not only by airflow rates but also by the particles discharging rates as well as particle size distribution in the FBAC. The local defluidization could be detected by analysis of the accumulated standard deviation error at a given period of time. Also, the regulation of the overall or local airflow rate made clearing up the local defluidization possible.

Key Words : FBAC, Defluidization, Mixing, Pressure Fluctuation, Tonghae CFB Boiler

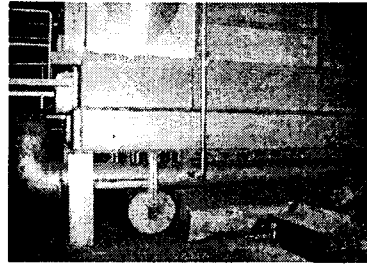
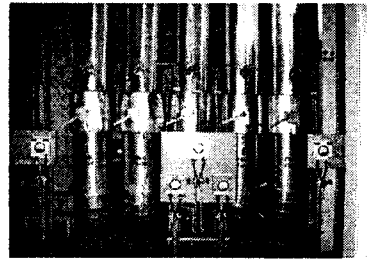
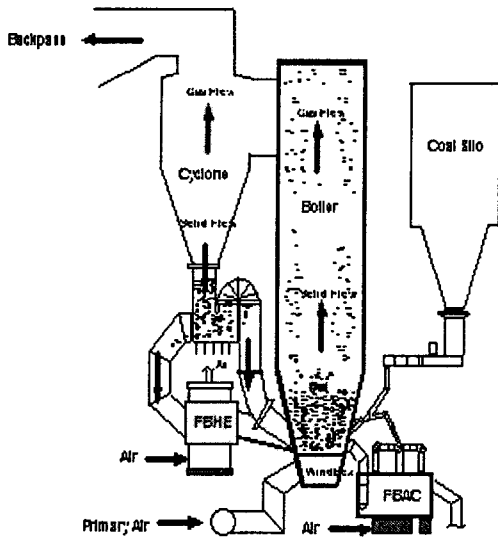
1. 서론

순환유동층 보일러에서는 모래나 석탄 재입자와 같은 저회를 배출하는 용도로 기포유동층 타입의 저회냉각기를 가지고 있다. 순환유동층 보일러에서 비교적 많은 회재를 포함하고 있는 국내 무연탄과 같은 연료를 사용할 경우, 별도의 층물질의 주입없이 회재를 층물질로 사용하게 되며, 지속적인 층물질의 배출을 통해 연소로 내의 층물질 양을 조절하게 된다. 이 때 층물질의 배출은 연소로 하단부에 설치되어 있는 유동층 저

회 냉각기(FBAC)를 통해 이루어지며, 고온(약 900℃)의 회재, 즉 고온 층물질은 열교환을 통해 저온(200℃ 내외)의 층물질로 온도가 낮춰져 배출되게 된다. Alstrom(예전 ABB-CE)에서 설계하고 1998년 11월 이래로 상업운전을 하고 있는 동해화력 순환유동층 보일러(200MWe × 2기)는 저회냉각기가 설치되어 있다. 그러나 저회냉각기 내에 층물질의 응집으로 저회냉각기의 비유동 현상이 자주 발생한다. 결과적으로 이런 불안정한 운전은 최악의 경우 예상치 못한 보일러의 정지를 가져올 수 있다. 저회냉각기내의 국부 응집의 시작은 정확히 알지 못하지만, 저회냉각기로의 석탄재 입자들의 유입비와 혹은 온도변화에 따라 순환유동층 연소로로부터 배출되는 석탄재의 입도와 조성의 변화와 직접적인 관련이 있다. 국부 응집과 비유동화는 저회냉각기 전체의 비유동화

* 한전 전력연구원 수화력발전연구소

† 연락처, kdw@kepri.re.kr



(a)

(b)

그림 1. (a) 동해 순환유동층 보일러 (b)저회냉각기의 공기분산시스템 사진

를 일으켜 결국 순환유동층 보일러의 운전정지를 발생시키게 된다. 연소로에 주입되는 석탄입자의 크기와 저회냉각기의 유동화 공기유량의 적절한 조절 없이는 필연적인 결과로 이해될 수 있다. 그러나 석탄입자의 크기를 석탄처리공정을 통해 일정하게 만드는 것은 어렵고, 국부 비유동 진단 없이는 국부유동불량이 발생했을 때 정상유동을 위한 적절한 공기유량 조절 또한 어렵다. 유동층 내 거동의 작은 변화를 진단할 수 있는 방법은 원하지 않는 변화의 초기감시를 위해 유용할 뿐 아니라 강제적인 조절을 위해 유용하고 하겠다. 최근 논문에서 비유동 혹은 유동층에서의 수력학적 변화를 진단하기 위한 보다 진보된 측정 및 분석 기술이 나와있다[Fan et al., 1981; Kai and Furusaki, 1987; Chong et al., 1987; Van den Bleek and Schouten, 1993; Svensson et al., 1996; Louge, 1997; Werther, 1999; Schouten et al., 1999, Ommen 2001]. 그러나 유동변화의 진단 방법은 비유동 문제의 해소의 방법과 같이 적용될 수 있어야 한다. 이런 기술은 현 시스템과 실용적인 운전조건 분석에 의해 얻어져야 한다. 이번 연구에서 우리는 동해화력 순환유동층 보일러의 저회냉각기의 운전 문제를 조사하고 연구했으며, 손쉬운 진단기법과 혼합특성과 저회냉각기 모사장치에서 비유동의 발생의 분석을 통해 기술적 해결방안을 모색하였다.

2. 동해순환유동층보일러 저회냉각기

그림 1은 국내 무연탄을 사용하는 동해화력 순환유동층 보일러이다. 연소로로부터 석탄재 배

출과 회재입자로부터 열회수를 목적으로 하는 FBAC(저회냉각기)가 설치되어 있다. 저회냉각기는 절탄기와 냉각수 열전달면을 가지고 있다. 이 저회냉각기의 유동화 공기는 전면을 따라 4개의 위치의 순환유동층 연소로로 돌아간다. 저회냉각기는 층분리기에 의해 고온부와 저온부로 크게 두 부분 나누어져 있다. 이때 유동화 공기는 여러 개의 공기헤더로 연결된 분산노즐로부터 공급된다. 각각의 헤더의 공기유량은 그림 1(b)에서와 같이 국부적으로 조절이 가능하다. 저회냉각기의 입구쪽 공기 주입관은 연소로로부터 배출되는 재입자들 때문에 저회냉각기 출구쪽보다 더 많은 유동화 공기가 흐른다. 하지만 저회냉각기에 유동화를 위해 주입되는 공기유량을 조절한다고 하더라도 비유동과 층물질의 응집이 종종 발생한다. 이는 회재속의 다른 입자보다 굵은 입자들이 유동 불량을 일으키기 때문이다. 동해화력 순환유동층 보일러는 이 유동불량과 응집을 강제 배출을 통해 해결하고 있다. 그러나 이런 불안정한 운전은 최악의 경우 예상치 못한 발전소 정지를 초래할 수 있다. 그러므로 이러한 문제를 해결하고 안전한 운전을 유지하기 위해서는 비유동 사전진단과 응집의 예측이 필요하다고 하겠다.

3. 실험

저회냉각기를 모사한 실험장치는 그림 2와 같다. 이 장치는 아크릴판으로 구성된 부분(0.5m높이×0.5m세로×1.0m가로)과 공기분산 시스템, 회재 주입을 위한 저장고를 포함한 입자 주입부, 회재 배출부, 유동 공기 배출부의 입자 집진을

위한 필터와 압력계 및 유량계로 구성되어 있다. 이 공기 분산 시스템은 5개의 공기노즐로 구성된 10개의 공기 주입부와 이의 공기유량을 조절할 수 있도록 되어 있다. 공기 분산 노즐은 개구비가 2.1%이고 균일한 유량공급을 위해 노즐은 4개의 구멍을 가지고 있다. 또한 공기주입관 중 회재가 직접 낙하하는 쪽의 1번째 2번째 라인과 중간 라인(6번째) 그리고 회재 배출부(9번째)라인에 고주파 압력계를 설치하여 각 주입관에서의 압력 변동을 측정할 수 있도록 하였다.

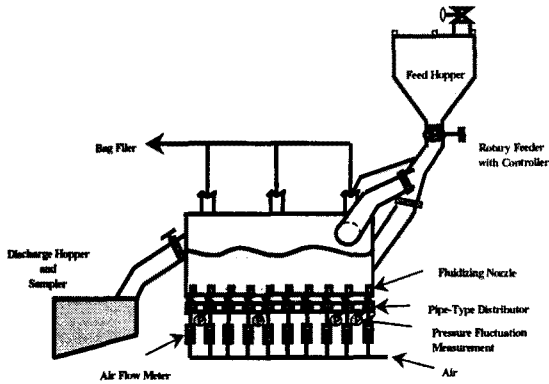


그림 2. 모사된 저회냉각기의 개략도

이 연구에서는 충물질(320 μ m)보다 더 굵은 입자(860, 1460 μ m)들을 저회냉각기에 투입하였을 때 입자들의 혼합특성과 압력변화를 관찰하였다. 더 굵은 입자들은 운전조건의 변화를 위해 유동화가 잘 되고 있는 저회냉각기내로 로터리 공급장치를 통해 주입된다. 이 과정을 통해 충물질의 추출 및 압력변동을 측정함으로써 유동화와 비유동화를 판단할 수 있게 된다.

4. 결과 및 고찰

입자들의 투입시 발생하는 비유동화 현상을 그림 3에서 보여주고 있다. 그림3a와 b는 저회냉각기의 유동화가 일어나기 전과 원활한 유동화 모습을 보여주고 있다. 반면에 그림 3c와 d는 비유동화의 시작과 그 성장을 보여주고 있다. 유동층 상부에 굵은 입자가 충물질의 위에 브리지를 형성하고 있는 것을 확인할 수 있으며 이로 인해 저회냉각기 회재주입구 쪽에 비유동화 영역이 형성됨을 볼 수 있다. 이는 기존에 유동화의 혼합특성에서 많이 알려져 있던 굵은 입자는 항상 하단부로 가라앉고, 가는 입자는 상부에서 유동화 현상을 나타냈던 것(Jetsam and flotsam)과 다른 모습을 보인다. 저회냉각기에 주입된 굵은 입자들은 충표면에 머무르며 반면에 가는 입자들은 굵은 입자의 브리지 아래서 유동된다. 이는 저회냉각기 내로 투입되는 굵은 입자들이 충물질과 혼합되는데 필요한 시간보다 투입되는 입자량이 크기 때문이다. 게다가 주입된 입자들에 의해 저회냉각기의 입구 쪽 근처의 국부층 높이가 증가했기 때문이다. 이는 압력강하의 영역이 증가됨을 의미한다. 따라서 이 영역으로 공기유량이 낮은 압력강하를 가진 다른 영역으로 우회해서 흐르고 이 결과로 저회냉각기의 회재 주입구 근처의 비유동화가 가속된다.

그림 4는 굵은 입자(860 μ m)를 5kg/min의 속도로 투입하였을 경우, 유동화 공기를 변화시키면서 배출부 충물질을 채집하여 입도를 분석한 것이다. 이 그림에서 저회냉각기 내에 충물질과 투입된 굵은 입자의 혼합된 정도는 굵은 입자의 비가 증가함으로 통해 알 수 있다. 그림 4a, b는 배출라인에서 굵은 입도가 발견되지 않은 것으로 보아 충물질과 굵은 입자가 잘 혼합되지 않음을 볼 수 있다. 그림 4c는 일정시간까지는 혼합되고 4d에서는 충물질과 굵은 입자가 완벽하게 혼합됨을 볼 수 있다. 이것은 입자들의 혼합이 공기유량의 충분한 증가를 통해 이루어 질 수 있음을

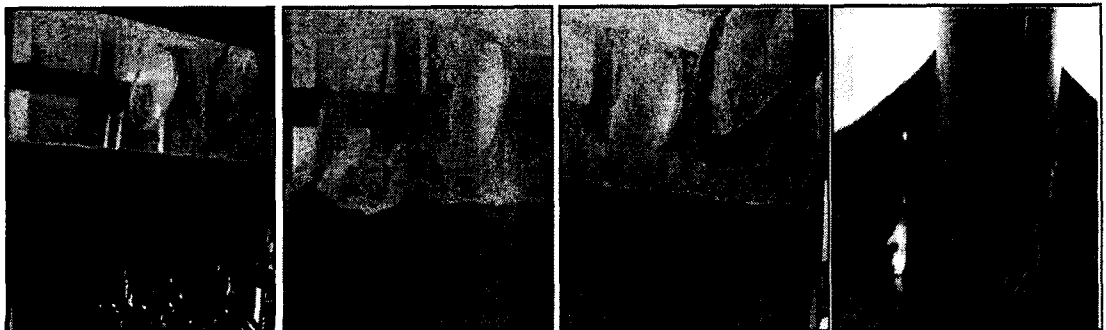
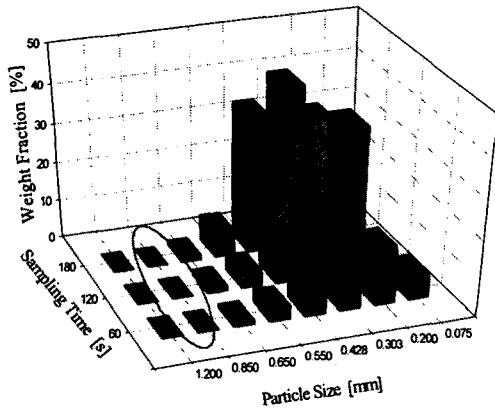
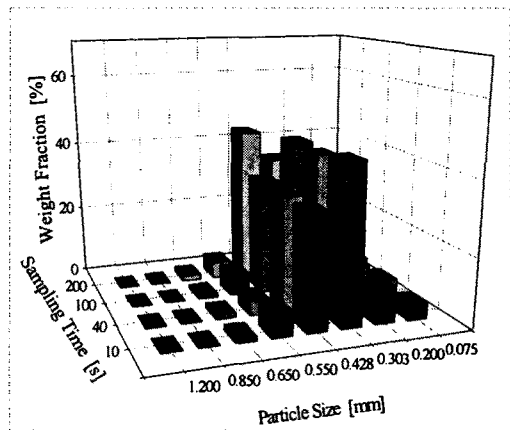


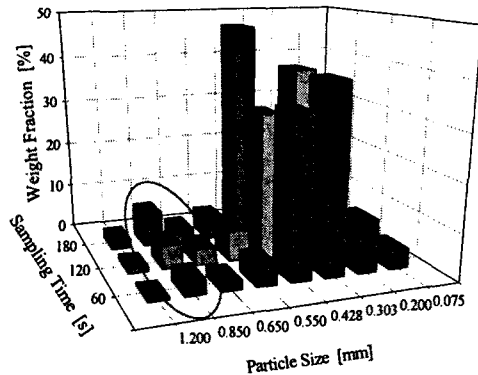
그림 3. (a) 유동화 전 (b) 유동화 (c) 입자주입후 입구에서 비유동화 시작 (d)충표면의 굵은 입자의 결합 사진



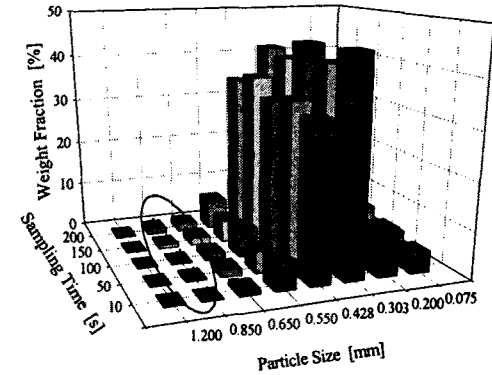
(a)



(b)



(c)

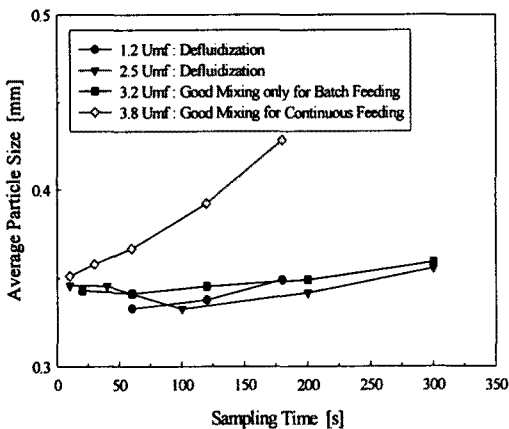


(d)

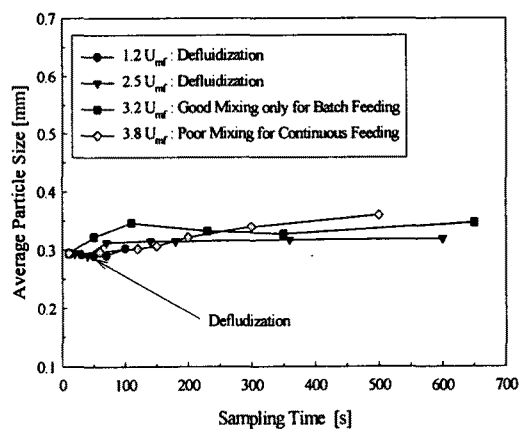
그림 4. (a) 1.2 U_{mf} , (b) 2.5 U_{mf} , (c) 3.2 U_{mf} , and d) 3.8 U_{mf} 층으로 굵은입자($860\mu m$, 5kg/min) 주입 후 입도의 분포

보여주고 있다. 그림5a는 5kg/min의 속도로 굵은 입자가 층으로 투입되었을 때 채집된 입자들의 평균 입도를 나타낸 것이다. 굵은 입자는 2.5 U_{mf} 아래에서는 층물질과 잘 혼합되지 않으며, 3.2 U_{mf} 에서는 굵은 입자가 단지 한번 주입시에는

혼합되고 층으로 굵은입자가 지속적으로 공급시에는 비유동화가 일어났다. 굵은입자의 지속적인 공급시 3.8 U_{mf} 에서는 좋은 혼합을 관찰할 수 있었다. 우리는 이것을 채집된 입자의 평균입도의 증가로 알 수 있었다. 그러나 층물질에 굵은 입도



(a)



(b)

그림 5. 공기유속과 배출량 변화에 따른 혼합 특성 (a) 5kg/min, (b) 10kg/min

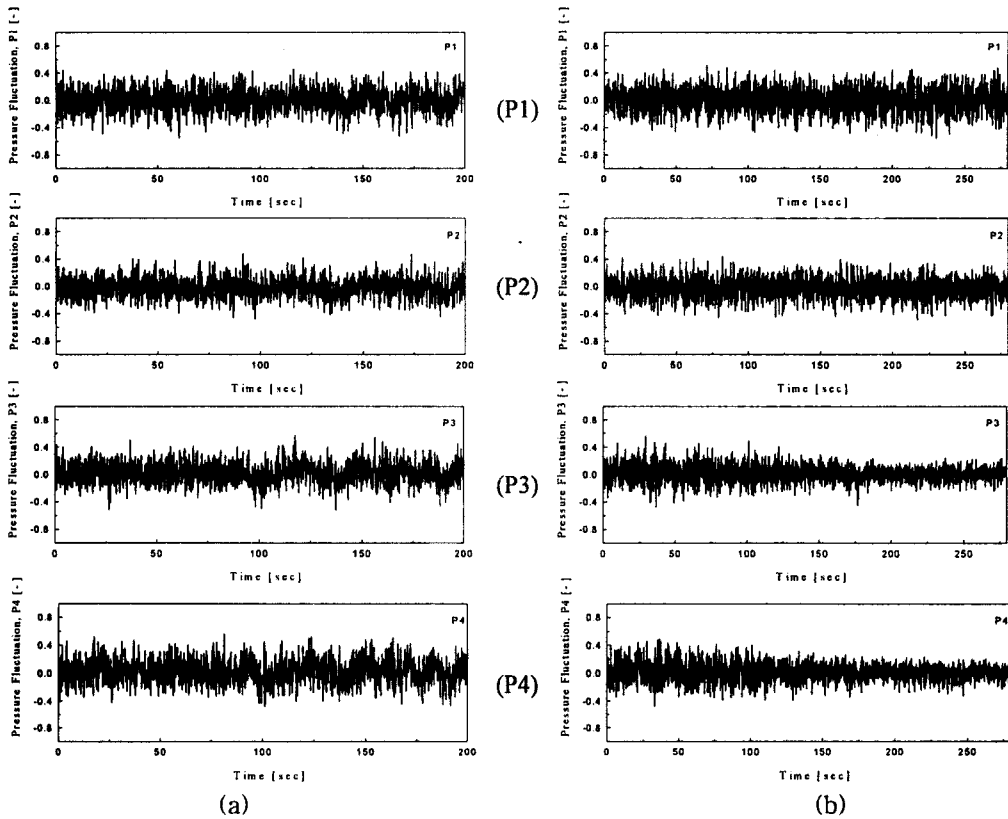


그림 6. a) 유동화, b) 국부적인 (P3, P4) 유동불량에 따른 압력변동

가 혼합되기에 충분한 공기유량을 주어도 10kg/min의 속도의 지속적인 투입시에서는 비유동이 발생하였다. 이것은 비유동화는 공기유량의 흐름뿐만 아니라 저회냉각기로 주입되는 입자량에도 영향을 받는다는 것을 의미한다.

그림 6은 저회냉각기가 원활한 유동화가 될 때

(그림6a)와 국부적인 유동불량일 때(그림6b)의 압력변화를 보여준다. 압력변화는 공기의 주입관에서 측정되었다. P1은 저회냉각기 입구 근처의 2번째 공기 주입관, P2는 저회냉각기의 중간에 5번째 공기 주입관, P3과 P4는 저회냉각기 출구 근처에 9번째 10번째 공기주입관에 설치되어 있다.

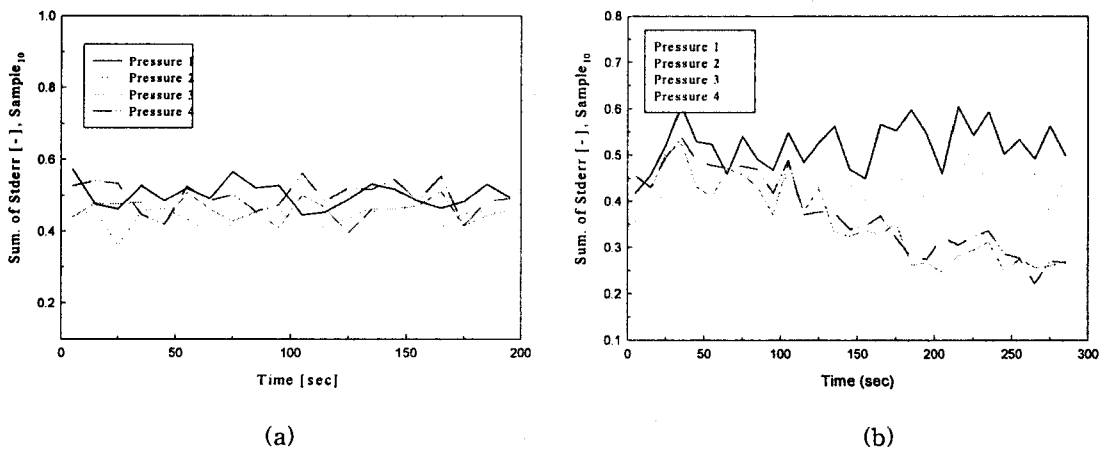


그림 7. (a)유동화, (b)국부 비유동화 에 따른 신호 표시

그림 6a에서 보듯이 압력변동은 층의 유동이 원활한 경우 압력을 측정하는 위치에 상관없이 같은 경향을 보인다. 그림 6b에서는 국부적으로 저회냉각기 회재주입구 부분에 비유동화가 발생할 때의 압력변화를 보여준다. P3와 P4의 압력변동의 크기는 비유동화가 시작할 때부터 점차적으로 감소하였다. 이는 층표면의 굽은 입자 브리지 때문에 이 지역의 기포의 터짐이 약해졌기 때문이다. 층 밑부분에서부터 생성된 기포들은 상승하며 비유동영역인 브리지까지 성장한다. 이때 이 기포는 브리지에 의해 깨어지고 이로 인해 기포의 터지는 힘이 약하게 된다. 그러나 그림 6에서 보이는 것과 같이 압력변동의 측정시간이 상대적으로 길거나 압력변동의 변화가 감소하는 영역의 시작을 감지하지 못한다면 이 압력변동의 변화는 비유동 진단의 정확한 척도로 이용할 수 없다. 이 연구에서는 일정 시간동안의 표준편차 에러의 합을 통해 국부적인 비유동화를 진단하는 기술을 도입하였다. 표준편차에러의 합은 아래와 같이 정의된다

$$ss_i = \sum_{j=1}^t \frac{s_j}{\sqrt{n}}$$

$$s_j = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=n \times (j-1) + 1}^{n \times (j-1) + n} (x_i - \bar{x}_j)^2 \right]^{1/2}$$

$$\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=n \times (j-1) + 1}^{n \times (j-1) + n} x_i$$

그림7은 유동화가 원활한 상황(a)와 국부적인 비유동 상황(b)에서 측정시간에서 압력변동의 정해진 영역의 표준편차에러의 합을 보여준다. 그림 7a, b에서 보듯이 층이 유동화가 원활히 되면 표준편차에러의 합은 특정 범위 내에 있다. 하지만 국부 비유동화가 발생하면 그 값이 점차 감소함을 볼 수 있다. 따라서 우리는 쉽게 이 간단한 식을 통해 국부 비유동화를 진단할 수 있다.

그림 8은 국부 비유동화의 실시간 진단과

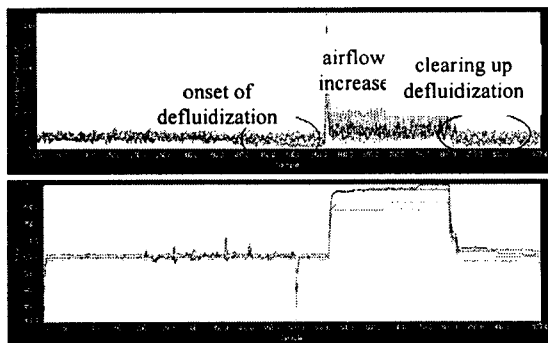


그림 8. 공기유량 조절을 통한 국부 비유동화 해소모습

공기 유량의 증가를 통한 비유동화 해소를 보여 주고 있다. 일정 시간동안의 표준편차에러의 합의 해석을 통해 국부적인 비유동화를 진단할 수 있었다. 더욱이 전체적인, 국부적인 공기유량의 조절을 통해 국부 비유동화를 해소할 수 있었다. 그림8에서와 같이 비유동화로 인해 일정한 범위를 벗어난 표준편차에러의 합이 공기유량 조절 후 일정한 범위안의 값으로 들어움을 보여주고 있다.

4. 결론

모사된 저회냉각기 시스템(0.5m-H x 0.5m-W x 1.0m-L)에서의 혼합특성과 비유동 발생을 해석하는 간단한 진단 및 해결하는 방안이 연구되었다. 층물질에 생긴 굽은 입자들의 브리지를 확인할 수 있었으며, 이는 저회냉각기 회재 주입 입구부분에 비유동형성을 야기시켰다. 이 비유동화는 공기유량비 뿐만 아니라 저회냉각기의 입자 분배 및 입자 배출비의 영향을 받았다. 국부적인 비유동화는 주어진 시간동안 표준편차에러의 합의 해석을 통해 진단할 수 있었다. 더욱이 전체 혹은 국부적인 공기유량의 조절을 통해 국부적인 비유동화를 해소할 수 있었다.

참고문헌

[1] Chong, Y. O., O'Dea, D. P., White, E. T., Lee, P. L. and Leung, L. S., "Control of Quality of Fluidization in a Tall Bed Using the Variance of Pressure Fluctuations", Powder Technolo. 53, 237-246 (1987)
 [2] Fan, L. T., Ho, T.-C., Hiraoko, S. and Walawender, W. P., "Pressure Fluctuations in a Fluidized Bed", AIChE J. 27, 388-396 (1981)
 [3] Kai, T., and Furusaki, S., "Methanation of Carbon Dioxide and Fluidization Quality in a Fluidized Bed Reactor - the Influence of a Decrease in Gas Volume", Chem. Eng. Sci. 42, 335-339 (1987)
 [4] Lee, J. M., Kim, J. S., and Kim, J. J., "Evaluation of the 200MWe Tonghae CFB boiler Performance with Cyclone Modification, Energy, 28, 111-118 (2003)
 [5] Lee, J. M., Kim, J. S., Kim, J. J., and Ji, P. S., "Status of the 200MWe Tonghae CFB boiler after Cyclone Modification", 13th Korea-US Jonit Workshop on Energy & Environment, Sep., Nevada, USA, 41-50 (1999)
 [6] Louge, M., "Experimental Techniques" in:

- Grace, J. R., Avidan, A. A., Knowlton, T. M., (Eds.), "Circulating Fluidized Beds", Chapman & Hall, London, UK 312-368 (1997)
- [7] Ommen, J. R., "Monitoring Fluidized Bed Hydrodynamics" Ph. D. Thesis, Delft University Press, the Netherlands, (2001)
- [8] Schouten, J. C., Zijerveld, R. C. and Van den Bleek, C. M., "Scale up of Bottom Bed Dynamics and Axial Solids Distribution in Circulating Fluidized Beds of Geldart B particles", Chem. Eng. Sci. 54, 2103-2112 (1999)
- [9] Svensson A., Johnsson, F. and Leckner, B., "Fluidization Regimes in Non-Slugging Fluidized Beds; the Influence of Pressure Drop Across the Air Distributor", Powder Technol. 86, 299-312 (1996)
- [10] Van den Bleek, C. M. and Schouten, J. C., "Deterministic Chaos- A New Tool in Fluidized Bed Design and Operation", Chem. Eng. J. 53, 75-87 (1993)
- [11] Wether, J., "Measurement Techniques in Fluidized Bed", Powder Technol. 102, 15-36 (1999)