

## CFD 계산을 통한 순환유동층 보일러 내 분산판 노즐 특성이 클링커 생성에 미치는 영향 고찰

변영철 · 박선호 · 황정호 · 이종민\* · 김재성\*

연세대학교 공과대학 기계공학과, \*한전 전력연구원 발전연구실 연소신발전그룹

### Study of Nozzle Characteristics on Clinker Formation in a CFBC Boiler with CFD Calculation

Y.C. Byun, E.K. Kim, S.H. Park, J.H. Hwang, J.M. Lee\* and J.S. Kim\*

Department Mechanical Engineering, Yonsei University

\*APG&C Group, Power Generation Lab., KEPRI, KEPCO

#### 요 약

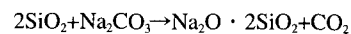
본 연구에서는 순환유동층 보일러의 운전 중 비유동화 및 완전 베드 붕괴를 유발할 수 있는, 분산판 위에서 발생하는 클링커에 대하여 그 발생원인을 순수 열 및 유동 측면에서 고찰해 보고자 하였다. 클링커는 그 화학성분 측면에서 실리콘, 철, 칼슘 등의 원소로 구성되어 있다. 비유동화 현상에 대하여 폭넓은 연구가 진행되어 왔으나, 현재까지 그 원인규명이 명확하게 이루어지고 있지는 못하는 현실이다. 본 연구에서는 FLUENT를 사용한 CFD 계산을 통하여 분산판의 노즐 형태와 노즐 배열을 달리하면서(노즐 타입 1, 노즐타입 2) 유동특성을 파악하여 클링커 발생 원인을 유추하였으며, 열 및 유동 측면에서 클링커 발생을 최소화할 수 있는 노즐 형태 및 배열을 제안(노즐타입 3)하였다.

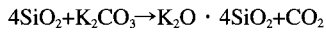
**Abstract** — During the operation of Circulating Fluidized Bed Combustion Boiler, defluidization is mainly caused by the formation of clinker. The clinker is made of components of Si, Fe, Ca, etc. However, although the defluidization is widely researched, the major factor has not been validated yet clearly. In this study, in the view of the shape and the arrangement of nozzles at a distributor (type 1, type 2), the formation of clinker is examined by CFD calculations and an improved nozzle design is proposed.

#### 1. 서 론

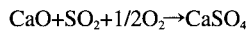
석유와 가스자원의 매장량이 한정되어 열, 스팀, 전력 등 에너지 생산분야에서 모두 석탄을 포함하는 고체연료 연소기술의 확대보급이 불가피하게 되었고 지구 환경보전 및 오염규제 강화추세에 따라 공해배출을 최소화할 수 있는 청정석탄이용기술(Clean Coal Technology)의 개발이 절실히 요구되고 있는 이 시점에 있어서 각 기술별로 기반기술 연구 및 실용화에 대한 노력이 추진 중이다. 그 중에서도 차세대 연소기술로 이미 인정받고 있는 유동층 연소는 일반적으로 기존의 스토카나 미분탄 연소시스템과 대비해 보편 석탄, 석유, 슬러지, 바이오매스 등 다양한 연료의 사용이 가능하다는 장점이 있다. 최근 세계에서는 생물체를 열분해 시키거나 발효시

켜 메탄, 에탄올, 수소와 같은 연료를 얻는 바이오매스를 가장 큰 1차 에너지원으로 사용하며, 이는 목재잔재들, 농업부산물, 곡식들을 의미하며 넓게는 산업용/도시용 폐기물도 이에 속한다<sup>[1]</sup>. 그러나 여러 형태의 연료를 사용함에 따른 가장 큰 문제점은 소결(sintering)과 응집(agglomeration)인데, 이는 연료 속에 함유되어 있는 K, Na 등의 알칼리 성분 때문에 낮은 용융온도를 가진 혼합물(eutectic)이 형성되기 때문이다<sup>[2]</sup>. 즉 연소재 중에 K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O 등의 낮은 용융온도를 가진 알칼리성 산화물이 포함되면, 재와 층물질의 주성분인 SiO<sub>2</sub>와 반응하여 역시 낮은 용융온도(764~874°C)를 가진 Si-알칼리성 산화물(예 : K<sub>2</sub>O·X·SiO<sub>2</sub>)이 생성된다. 이때의 반응식은





이 된다<sup>[3]</sup>. 즉 이와 같은 낮은 용융온도는 재와 충물질의 소결을 일으켜 층내 응집을 유도하고 게다가 노벽의 심각한 파울링과 부식문제를 야기한다. 이와 같은 응집과 소결은 유동화 손실 즉, 비유동화와 완전 베드의 봉쇄(blockage), 심지어는 플랜트의 폐쇄를 초래한다<sup>[1][4]</sup>. 또한 석유 코크스와 같이 황을 많이 함유(5~8 wt%)한 연료를 태우고 탈황제로 석회석( $\text{CaCO}_3$ )을 사용하는 경우도



의 반응으로 인해 생성된  $\text{CaSO}_4$ 와 연소 재 내에 0.1~0.2%의 바나듐(V), 그리고 낮은 용융점( $690^\circ\text{C}$ )을 가진 오산화바나듐( $\text{V}_2\text{O}_5$ ) 혼합물을 포함한 바나듐-칼슘 혼합물의 존재로 인해 충물질과 반응하여 응집, 소결 등을 유발한다<sup>[5][6]</sup>.

이와 같이 순환유동층 보일러에서는 각종 연료와 산화제(공기)의 연소로 인해 연소 부산물인 재의 발생이 불가피하며, 이러한 재의 응집, 낮은 용융점을 지닌 혼합물(Si-알칼리성 산화물)들의 생성, 충물질 응집, 그리고 부차적인 비유동화(defluidization), 사이클론 내에 침적물 생성, 재순환 영역에서의 막힘(plugging), 분산판 노즐부근의 클링커 생성 등의 문제들이 발생한다. Fig. 1은 동해화력발전소 순환유동층 보일러 분산판 노즐부근에 생성된 재 클링커를 보여준다.

이와 같은 소결과 응집으로 인한 클링커 생성을 억제하기 위해서는 여러 가지 대책이 있을 수 있는데, 그 중의 하나가 충물질로  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ( $1550^\circ\text{C}$ )와 같이 용융점이 높은 입자를 사용하는 방법이다<sup>[2][3]</sup>. 또 다른 클링커 생성 억제 방법으로 유동층 연소로의 온도제어가 있다<sup>[7]</sup>. 연료로 바이오매스를 사용하는 경우 응집물들은 온도가  $800^\circ\text{C}$ 에 접근했을 때 형성되고, 이로 인한 심각한 비유동화는 온도가  $800\sim 820^\circ\text{C}$ 를 초과하는 즉시로 발생

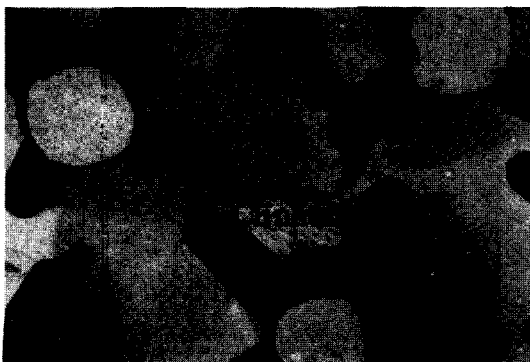


Fig. 1. Clinker around the nozzles.

한다<sup>[8]</sup>. 또 다른 방법으로 분산판 노즐의 형상 및 배열을 설계 변경하는 방법이다. 이 방법은 노내의 응집, 소결을 방지하는 근본적인 해결책이라기 보다 Fig. 1과 같이 재 클링커가 분산판 바닥에 쌓여서 공기노즐을 막아서 생기는 비유동화 방지 대책이다.

본 연구에서 관심을 둔 클링커 생성 억제 방법은 노즐에서 분사되는 공기의 유동경로, 그리고 유동입자와 연료의 적절한 혼합이다. 실제적으로 순환유동층 연소로의 효율을 향상시키기 위해서는 유동입자와 연료의 유체역학적인 혼합이 중요하며 이는 연소로 내 균일한 온도분포 형성에도 미치는 영향이 크다. 유동경로를 파악함으로써 유동입자와 연료의 혼합이 제대로 이루어지지 않을 경우 비유동화 지역이 발생하고, 국부적으로 온도가 회재(ash)의 용융점 이상으로 높아져 슬래깅(slugging) 현상이 일어나 클링커가 생성되어 조업을 중단할 수밖에 없는 사태가 발생할 것이다. 클링커의 생성은 운전조건과 연소로 전체의 열유동 특성에 중요한 변수가 될 것이며, 분산판, 노즐, 유동입자의 재유입구의 형상 등도 상당한 영향을 미치게 될 것이다.

순환유동층 연소로 내의 유동입자와 연료의 거동과 국부적인 온도분포 및 열유동 특성 등의 정보를 이해하여 클링커의 생성 원인을 분석하고, 클링커 생성 억제를 위한 순환유동층 연소로 내 분산판의 형상 최적화 및 최적의 운전조건을 결정할 수 있을 것이다. 결국, 이러한 클링커 생성억제를 위해서는 연료와 공기를 주입하는 노즐설계가 중요한데 본 연구는 여러 노즐 형상과 배열 변화를 통해 클링커 생성을 막고 연소효율을 높이기 위한 방법을 찾고자 한다. 구체적으로 전산유체해석(CFD) 코드를 사용하여 유동장 계산을 하였으며 해석결과를 통해 최적의 노즐 형상과 배열을 선정하고자 한다.

## 2. 본 론

### 2-1. 노즐 설계

본 연구에서는 기존에 동해화력발전소 순환유동층 연소기에서 사용되었던 두 가지 형태의 노즐 형상과 배열을 소개하고 이에 대한 수치계산 결과를 논의하기로 한다.

Fig. 2는 각각 설계변경 전후의 두 가지 노즐 형상 및 배열을 보여준다. 노즐 타입 2(개조 후)의 경우, 타입 1(개조 전)과 비교하여 모든 치수 및 구성은 같으나, 다음의 두 가지 면에서 차이를 나타낸다. 첫번째로는 분사노즐 각도가  $22^\circ$ 에서  $45^\circ$ 로, 그리고 분사노즐의 길이가 노즐 끝 부위로부터 50.8 mm에서 101.6 mm로 변경되었다. 두번째로는 노즐형태가 바닥면에 수평하게 단면 처리되었으며 노즐 배열측면에서는 개조 전 +자 배열에서 개조 후 X자 배열된 점이 변화된 사항이다. 즉 타

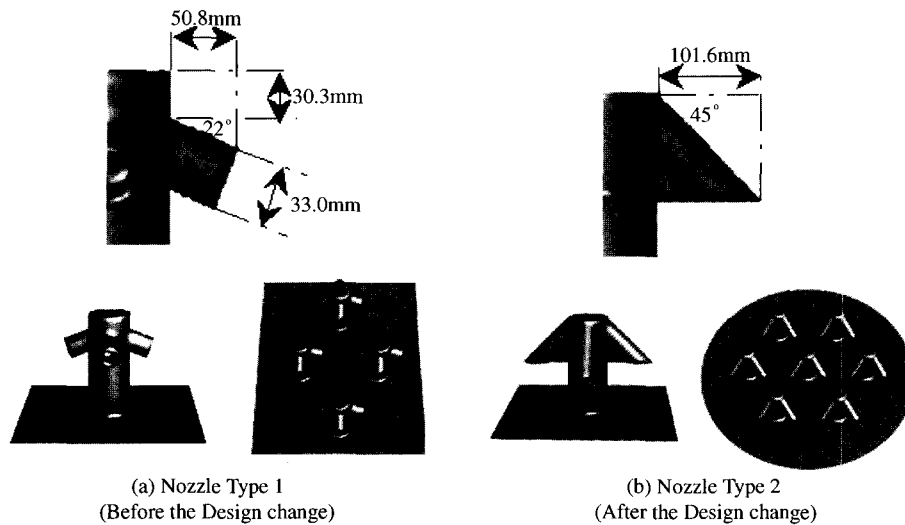


Fig. 2. Shapes and Arrangements of Nozzle Type 1, 2.

입 2와 같은 노즐 출구의 각도와 길이의 변경은 타입 1에서 발생되던 유동사가 노즐을 통하여 유입되는 단점을 방지하기 위하여 고안된 형태이며, 노즐 출구의 방향을 돌린 것은 설계 변경 전의 비유동화 영역 및 재순환 영역을 최소화하기 위함이다.

## 2-2. 노즐 타입 1, 2에 대한 계산

본 계산에서는 Fig. 1에서 회재 성분의 클링커가 형성되는 지점과 그 밖의 노즐지점에서의 설계변경 전후의 유동 특성의 차이를 비교하여 클링커가 형성되는 지점과 형성과정에 대한 원인을 살펴보고자 하였다. 타입 1과 2의 해석에 사용된 노즐의 개수가 다른 이유는 설계 변경 전에는 노즐이 +자 배열로 되어 있으므로 모든 영역에서 유동 특성이 대칭으로 나타날 것이라고 예상할 수 있으므로 최소의 개수만을 고려하였다. 그리고 설계 변경 후에는 노즐이 X자로 배열되어 있으므로 설계 변경 후보다 노즐간의 간섭이 더 커질 것이라고 예상하였으므로 더욱 많은 개수의 노즐을 고려하여 계산을 수행하였다.

계산에 사용된 CFD 코드는 Fluent 5.11이며 3차원 정상상태로서 Realizable k-ε 난류모델을 사용하였으며 열전달 현상도 고려하여 다음과 같은 연속방정식, 운동량 방정식 및 에너지방정식에 의하여 계산되었다.

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = S_m$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j H) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{k_i}{C_p} \frac{\partial H}{\partial x_i} \right) + \tau_{ik} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} + S_h$$

여기서,  $S_m$ 은 소스항,  $P$ 는 정압,  $\tau_{ij}$ 은 응력텐서이며, 에너지방정식은 Lewis 수인  $Le = \alpha/D = 1$ 이라는 조건 하에서 성립된다.

또한, 작동유체는 공기만을 고려하였으며 분산판에서의 유동사의 격렬한 혼합은 단순히 공기유동에만 좌우된다고 가정하여 유동사는 고려하지 않고 해석하였고, 어떠한 화학적 반응도 일어나지 않는 것으로 단순화하였다. 노즐에서의 공기 분사량은 실제 플랜트에서의 운전 조건과 동일하게 523 K의 온도로 질량유량 0.1444 kg/sec이 되도록 하였다.

## 2-3. 노즐 타입 1, 2에 대한 유동장 계산결과 및 검토

Figs. 3, 4의 결과들과 같이 비록 두 노즐타입의 크기 및 출구에서의 평균 속도, 주입 유량 등의 경계조건이 동일하지만, 노즐의 형태와 배열이 달라져서 주위 유동은 상당히 다른 모습을 보여준다.

먼저 Fig. 3은 두 노즐타입에서의 유동경로를 나타낸다. Fig. 3(a)에서와 같이 타입 1의 경우 제트(jet)의 흐름이 대칭적으로 각 노즐배치의 중앙부위에서 간섭이 이루어지며, 타입 2의 경우 (b)에서와 같이 제트(jet)의 간섭이 다른 노즐벽에서 발생됨을 볼 수 있다. 이러한 유동흐름의 특성으로부터 타입 2에서 클링커 생성의 원인을 유추할 수도 있다. 즉, 산소의 지속적인 공급을 바탕으로 회재성분의 용융이 제트(jet)의 간섭부위인 노즐 부근에서 발생되고 노즐벽과 분산판 위의 유동매체사이의

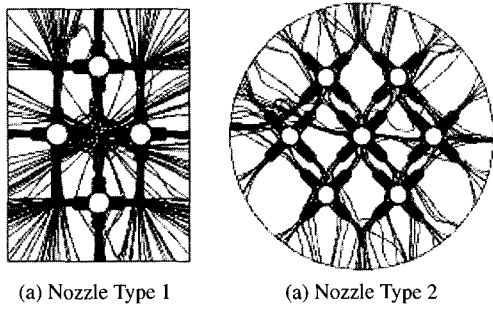


Fig. 3. Schematics of path lines.

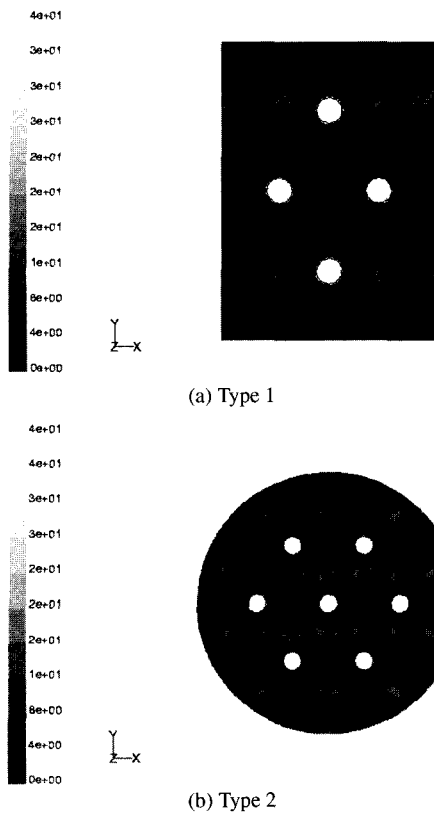


Fig. 4. Schematics of velocity magnitude.

온도구배가 발생하여 열영동(thermophoresis)에 의한 클링커 생성 입자의 성장을 들 수 있을 것이다.

Fig. 4와 Fig. 5는 각각 노즐 타입 1, 2에서의 속도크기와 연소로 축방향(z-direction) 속도크기를 나타낸다. 이들 그림들은 노즐 근처에서의 유동입자들의 혼합과 비유동화 영역을 살펴보기 위하여 제시하였다. 특히 Fig. 5는 유동입자들을 축방향으로 유동화시키는 속도를 나타내므로 분산판 근처에서의 비유동화 영역과 재순환 영

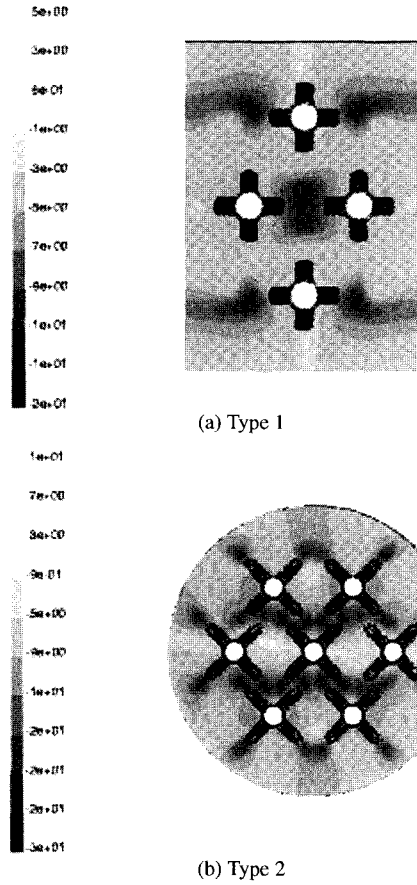


Fig. 5. Schematics of Z-velocity magnitude.

역 해석에 있어서 근거가 될 수 있다. 계산 결과를 보면 Fig. 4, Fig. 5에 나타난 바와 같이 노즐타입 2가 노즐타입 1보다 비유동화 영역이 줄어드는 현상을 볼 수 있으므로 유동입자들의 혼합측면에서 검토하면 노즐타입 2가 유리함을 알 수 있다.

2-4. 클링커 생성 방지를 위한 노즐 타입 3 제안

클링커가 위의 원인에 의해서 생성된다고 한다면, 클링커 생성 방지를 위한 해결책으로 노즐 출구의 각도는 변경하지 않고 노즐 출구의 방향만 설계 변경 전의 상태로 조정하는 것을 제안할 수 있을 것이다. 노즐 출구의 방향을 설계 변경 전처럼 + 방향의 배열로 조정한다면, 노즐 출구의 길이가 너무 길어서 + 방향으로 배열하기 어렵고, 노즐 위쪽에 비유동화 영역이 커지게 되므로 출구의 길이도 축소하여야 할 것이다. 결과적으로 클링커 생성 방지를 위해 Fig. 6과 같은 형상의 노즐과 배열을 제안할 수 있다. 노즐의 기본형상은 Fig. 2의 개

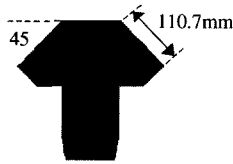


Fig. 6. Schematic of nozzle type 3.

조 전, 후의 형상을 혼합한 경우로서 유동사의 재유입을 방지하기 위하여 분사노즐 각도는 45°, 분사노즐의 길이는 노즐 끝 부위로부터 110.7 mm로 설계하였다.

2-5. 노즐 타입 3에 대한 계산결과 및 검토

Fig. 7의 유동경로와 Figs. 8, 9의 속도 크기를 보면 전체적인 유동 특성은 노즐 설계 변경 전인 타입 1의 결과와 유사한 경향을 보인다. 노즐 출구에서 배출된 유체는 노즐 사이의 공간에서 부딪힌 다음 방향을 바꾸어 노즐벽 쪽으로 움직이며, 노즐벽에 직접 부딪히는 유동 특성은 찾아볼 수 없으므로 2.3절에서 분석한 클링커 생성 원인을 제거했다고 볼 수 있을 것이다. 즉, 산소의 지

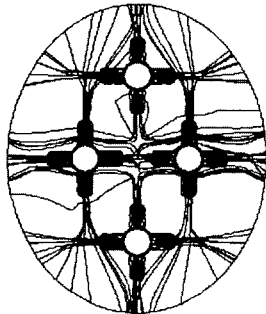


Fig. 7. Schematic of path lines of type 3.

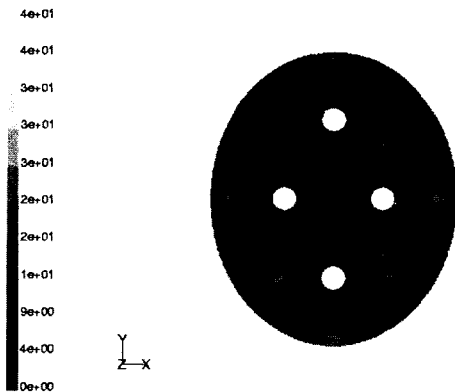


Fig. 8. Contour of velocity magnitude.

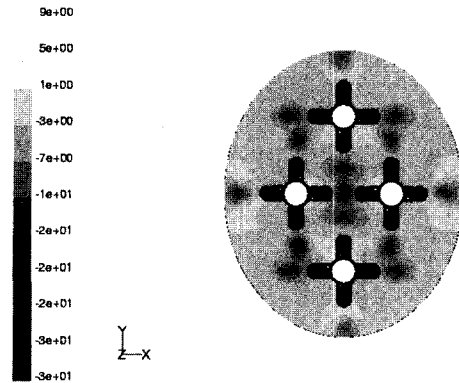


Fig. 9. Schematics of Z-velocity magnitude.

속적인 공급을 바탕으로 회재 성분의 용융이 노즐 부근에서 발생되는 현상을 방지하여, 결국 클링커 생성 입자의 성장을 막을 수 있을 것이다.

Fig. 6에서 보면, 노즐 출구에서 배출되어 가운데의 노즐 사이 공간으로 향하는 유동이 서로 부딪혀 좌우쪽으로 빠져나가게 되는데, 좌우에도 똑같은 배열의 노즐들이 위치하므로 빠져나가는 유동도 서로 부딪혀 방향을 바꾸게 될 것이다. 결과적으로 노즐 사이의 공간에 위치하는 비순환 영역 및 재순환 영역으로 보이는 공간도 상당부분 줄어들어 유동사의 원활한 혼합을 이룰 수 있을 것으로 예상된다.

유동입자의 혼합측면에서는 Fig. 8, Fig. 9에 나타난 바와 같이 노즐타입 3이 노즐타입 2보다 비유동화 영역이 줄어드는 현상은 직접적으로 볼 수는 없다. 따라서, 노즐타입 3이 유동입자의 혼합 측면에서는 현저한 효과를 가져온다고는 볼 수 없을 것이다.

3. 결 론

본 연구에서는 분산관에 설치된 노즐에 대하여 설계 변경 전후의 유동 특성 파악의 결과를 바탕으로, 클링커가 형성된 원인에 대한 가능성을 순수하게 공기의 유동측면에서 유추해 보았고, 이 결과를 바탕으로 클링커 발생을 방지할 수 있는 노즐 형태 및 배열을 제안해 보았다.

먼저 노즐 출구의 방향을 + 방향의 배열에서 × 방향의 배열로 변경한 것은 클링커가 비유동화 영역 및 재순환 영역에서 생성될 것이라고 예상하고, 설계 변경 전에 노즐 사이에 존재하리라고 생각되었던 비유동화 영역 및 재순환 영역을 최소화하기 위한 목적으로 시행한 설계 변경이었다. 그렇지만 실제 운전 결과로부터 설계 변경 전에는 생기지 않았던 클링커가 설계 변경 후에 노

즐 근처에서 생성된 것을 볼 수 있었고, 이러한 클링커 생성의 원인을 비유동화 영역 및 재순환 영역의 존재보다는 다른 원인에서 찾아야 할 것으로 보인다.

또한 Fig. 1의 사진에 나타난 위치에서만 클링커가 생성된다면, 노즐 설계 변경 후에 나타나는 노즐 벽에 강하게 부딪히는 유동에서 그 원인을 찾을 수 있을 것이다. 즉, 노즐벽 근처로의 산소의 지속적인 공급을 원인으로 하여 회재성분의 용융이 제트(jet)의 간섭부위인 노즐 부근에서 발생되고 노즐벽과 분산판 위의 유동매체 사이의 온도구배가 발생하여 열영동에 의한 클링커 생성 입자의 성장 메커니즘도 고려할 수 있을 것이다.

만약 설계 변경 전에 Fig. 1의 사진에서와 같이 노즐 벽에서 클링커가 생성되지 않았다면, 유동 특성 이외의 원인은 지배적인 영향을 미치지 못하며 노즐 배열의 변경이 클링커 생성의 원인이 되었다고 결론을 내릴 수도 있을 것이다. 그러므로 노즐 타입 3과 같이 노즐 출구로부터 유동시의 재유입을 막을 수 있도록 노즐 출구가 노즐벽과 이루는 각도를 조정하고, 설계 변경 전의 배열(+ 방향)을 유지한다면, 클링커 생성을 억제할 수 있으리라고 생각된다.

그러나, 주의할 사항은 새로운 형상의 노즐과 노즐 배열을 제안하여 클링커 생성을 억제할 수 있다고 생각할 수도 있지만, 클링커의 생성은 본 연구에서와 같은 유동 특성 이외의 열역학적 및 화학적 원인에 의해 생성될 가능성이 여전히 크다고 사료된다. 따라서, 향후 연구에서는 보다 실제상황에 근접하여 해석하기 위하여 연소반응 등으로 야기되는 국부적인 온도구배 뿐만 아니라, 회재종들의 분포에 대한 고려가 포함될 것이 필요하다.

## 후 기

본 연구는 기초전력공학공동연구소의 전력기술기초연구

구 지원과제(00-035)로 수행한 연구의 일부이며 이에 감사 드립니다.

## 참고문헌

1. Lin, W. and Dam-Johansen, K.: "Agglomeration in Fluidized Bed Combustion of Biomass Mechanism and Co-firing with Coal", Paper No. FBC 99-0120.
2. Vuthaluru, H.B. and Zhang, D.K.: "Remediation of Ash Problems in Fluidised-Bed Combustors", Fuel, 80, 583-598 (2001).
3. Grubor, B.D., Oka, S.N., Ilić, M.S., Dakić, D.V. and Arsić, B.T.: "Biomass FBC Combustion - Bed Agglomeration Problem", Fluidized Bed Combustion, 1, 515-522, ASME (1995).
4. Arena, U. and Mastellone, M.L.: "Particle Agglomeration during Energy recovery from Plastic Wastes by Means of Fluidized Bed Reactors", Paper No. FBC 99-0010 (1999).
5. Anthony, E.J., Iribarne, A.P. and Iribarne, J.V.: "A New Mechanism for FBC Agglomeration and Fouling when Firing 100% Petroleum Coke", Fluidized Bed Combustion, 1, 523-533, ASME (1995).
6. Anthony, E.J. and Jia, L.: "Agglomeration and Strength Development of Deposits in CFBC Boilers Firing High-sulfur Fuels", Fuel, 79, 1933-1942 (2000).
7. Lin, W., Krusholm, G., Dam-Johansen, K., Musahl, E. and Bank, L.: "Agglomeration Phenomena in Fluidized Bed Combustion of Straw", Fluidized Bed Combustion, 2, 831-837, ASME (1997).