

## 순환유동층 반응기에서 벽면의 마모 특성 고찰

김시문 · 이종민<sup>†</sup> · 김재성 · 김의현 · 김종진

한전 전력연구원 발전연구실  
(2001년 9월 17일 접수, 2001년 12월 12일 채택)

### Observation of Wall Erosion in a Circulating Fluidized Bed Reactor

Si-Moon Kim, Jong-Min Lee<sup>†</sup>, Jae-Sung Kim, Euy-Hyun Kim and Jong-Jin Kim

Power Generation Laboratory, KEPRI, KEPCO, Daejeon 305-380, Korea  
(Received 17 September 2001; accepted 12 December 2001)

#### 요 약

순환유동층(0.25 m-L×0.62 m-W×10 m-H) 반응기에서 조업조건에 따른 상승관 벽면에서의 마모특성을 고찰하였다. 상승관에서의 기체유속(1.9-3.8 m/s), 전체 고체량(100-200 kg) 그리고 일-이차 공기비(0.8-1.0) 변화에 따른 상승관 높이 및 위치별 마모율을 고찰한 결과, 고체 체류량 및 고체 순환량, 그리고 입자의 유속 혹은 유동화 속도의 변화가 마모율에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 순환유동층 회막상에서는 유동화 속도 증가 및 일-이차 공기비의 증가에 따른 고체 체류량의 증가로 인해 벽면에서의 마모율이 증가되었으며, 반면 농후상에서는 고체 체류량보다는 유동화 속도의 증가 혹은 이차 공기 주입에 따른 유동변화에 의해 마모율이 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 전이영역에 대한 마모율은 대부분의 조업조건에 대해 농후상과 회막상 영역의 중간 정도의 마모율을 갖는 것으로 나타났다. 한편, 순환유동층내의 유속 증가에 따른 고체 순환량 증가에 따라 상승관 천장부위에서의 마모율은 크게 증가하는 것으로 고찰되었다. 특히 가운데 부위가 가장 큰 마모율을 보였다. 또한 상승관 상부 벽면의 마모 경향은 입자의 하향흐름이 가장 많이 생성되는 사이클론 주입부 벽면에서 가장 큰 마모율을 보이는 것으로 나타났다.

**Abstract** – The wall erosion characteristics of a circulating fluidized bed reactor(0.25 m-L×0.62 m-W×10 m-H) was observed with various operating conditions, such as fluidizing velocity, total solid inventory and primary to secondary air ratio. The erosion rate was affected by solid hold-up and solid circulation rate as well as fluidizing velocity which were varied due to operating conditions. The wall erosion in dilute phase of the CFB riser increased with increasing solid hold up resulted from increasing of the fluidizing velocity and the primary to secondary air ratio. The erosion of the wall in dense phase increased with increasing fluidizing velocity although the solid hold up decreased with fluidizing velocity. The extent of erosion in the transition phase was somewhere in between the dense and the dilute phases. The erosion of the roof of the CFB riser increased with increasing solid circulation rate resulted from increasing the fluidizing velocity, total solid inventory and primary to secondary air ratio. The middle part of the roof where the solid circulation rate was higher than that of the side part of the roof, showed the highest erosion rate. The erosion seemed to be serious at the area around the cyclone inlet duct due to the enlarged down flow of the solid particles at this area.

Key words: Circulating Fluidized Bed, Wall Erosion, Solid Hold-up, Solid Circulation Rate

#### 1. 서 론

순환유동층(CFB) 연소로는 비교적 높은 유속에서 기-고체간의 긴밀한 접촉을 통하여 연소반응을 일으키고, 가열 및 연소되는 입자의 유동 및 순환에 의한 벽면 튜브로의 열 전달을 통해 수증기를 만들어 발전 등에 이용하는 연소장치이다. 이러한 순환유동층 연소로에서의 기-고체 유동은 기포유동층에 비해 매우 격렬하나 상대적으로 기포유동층 보일

리와는 달리 전열관이 층내에 배열되어 있지 않고 대부분이 연소로의 벽면 전열관으로 구성되어 있어 전열관의 마모에 관심이 상대적으로 적었다. 그러나, 최근에 순환유동층 연소로에서도 벽면 전열관 마모라든지, 내화재 마모 그리고 사이클론 및 재순환부 등에서의 마모 등이 보고되고 있어 이에 대한 관심이 높아지고 있다[1, 2].

순환유동층 연소로에서의 전열관 마모는 크게 전열관 재질, 층물질 특성, 조업 조건, 그리고 시스템 구조 등에 많은 영향을 받는다. 전열관과 고체입자와의 재질 특성에 따른 경도 차이에 의해 마모시편과 입자간의 동일 경도를 경계로 입자 경도가 증가함에 따라 마모율은 급격하게 증가하는 것으로 알려져 있으며, 조업 온도 및 전열관 온도에 따라서는

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: jmlee@kepri.re.kr

산화마이 형성되는 온도영역(400 °C)까지는 마모율이 감소하다가 더 높은 온도에서는 고온 부식으로 인한 마모율의 증가가 보고되고 있다[3, 4]. 또한, 입자의 크기에 의한 마모율의 변화에 있어서는 입자가 비교적 큰 경우, 단위 입자 크기 당 마모율은 거의 일정하게 나타나는 반면, 입자가 작은 경우에는 마모율이 급격하게 감소하여 2 μm이하 입자의 경우에는 마모가 거의 일어나지 않는 것으로 알려져 있다. 입자 형태에 있어서도 비교적 각진 입자의 경우가 둥근 입자에 비해 연소로 전열관의 마모에 더 큰 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다[3-5]. 한편, 순환유동층 연소로의 하단부 내화재로부터 상부의 전열관으로 드러나는 경계 부분의 마모는 그 특성이 구조에 따라 매우 다양한 형태를 보이는 것으로 알려져 있으며, 이에 대한 대책으로 경계면의 구조 변경이라든지, 방해판 설치 그리고 전열관과 내화재 사이의 금속판 설치 및 전열관 코팅 등이 있는 것으로 알려져 있다[6-8].

한편, 이러한 순환유동층 내에서의 고체 입자 및 벽면 전열관 마모는 순환유동층의 수력학적 운전조건에 따라 고체의 체류량 및 입도 분포 그리고 순환량의 변화에 의해 영향을 받을 수 있으며, 이러한 변화는 실제적으로 운전조건에 따른 유동변화로부터 그 영향 인자를 고찰 할 수 있다. 특히, 대규모의 순환유동층 보일러의 관리 및 유지보수에 있어 전열관 마모진행의 검사는 매우 광범위하여 상대적 마모도의 중요성에 따라 관리 및 보수가 진행되어야만 한다. 그러나, 수력학적 특성에 따른 벽면 전열관 마모에 대한 연구는 매우 미비하게 진행되어 있으며, 이에 본 연구에서는 순환유동층의 마모현상에 있어 기고체의 수력학적 특성이 벽면 마모에 미치는 영향을 고찰하였으며, 운전 조건에 따른 상대적 마모도의 비교 및 특성 분석을 수행하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2-1. 실험장치

본 연구에 사용된 3개의 순환 loop를 갖는 냉간 순환유동층 실험장치를 Fig. 1에 나타내었다. 본 냉간 순환유동층 장치는 국내탄용으로 설계, 제작되어 현재 상용 운전되고 있는 동해화력 순환유동층 보일러를 모사한 것으로 그 수력학적 특성의 유사성을 나타내기 위해 여러 설계변수에 대한 설정을 동해화력 순환유동층 보일러와 동일하게 하였다[9, 10]. 장치의 구성은 크게 순환유동층 부분(riser, cyclone, downcomer, loopseal, FBHE)과 공기 공급 계통부분, 그리고 공기유량 제어부분 및 압력 측정 부분으로 구성되어 있으며, 비산되어 유출되는 입자의 포집을 위해 집진 장치를 설치하였다. 순환유동층 부분은 연소로 부분에 해당하는 상승관[Riser, 0.25 m(L)×0.62 m(W)×10.0 m(H)], 3개의 사이클론[Cyclone, 0.365 m(I.D.)×1.46 m(H)] 및 재순환부[Loopseal, 0.1 m(I.D.)] 그리고 가운데 순환 loop에 추가적으로 설치되어 있는 외부 열교환기[FBHE, fluidized bed heat exchanger, 0.3 m(L)×0.3 m(W)×0.5 m(H)]로 구성되어 있다. 상승관, 재순환부 그리고 외부열교환기의 분산판은 bubble cap 타입의 노즐이 설치된 분산판을 사용하였다. 공기공급은 자동조절 밸브로 정량 조절하여 주입하도록 되어있으며, 일차공기는 상승관의 주분산판을 통해 주입하고, 이차공기는 분산판 위로 0.5 m 간격의 주입구를 통해 양쪽 측면에 각각 4개씩 설치하여 주입하도록 구성되어 있다. Loopseal 공기는 분산판을 통해 주입되는 주유동화 공기와 dipleg에서 흐름의 원활함을 위해 주입되는 aeration(grease air) 공기로 나누어 각각 정량 조절하여 주입하도록 구성되어 있다.

한편, 순환유동층의 벽면 마모 정도를 조입 변수에 따라 고찰하기 위해 Fig. 1에서 보는 바와 같이 전면 7개소, 측면 5개소 및 후면 1개소 그리고 천장부 3개소를 위치 및 높이에 따라 마모시편을 부착하였다(Table 1참조). 시편의 재료로는 사전 기초실험을 통해 비교적 짧은 시간에 마모의 상태를 잘 고찰할 수 있는 석고를 선택하였으며, 석고를 스테인레스 틀에 부어 일정시간 동안 양생시켜 만든 마모 시편을 상승관의 벽면

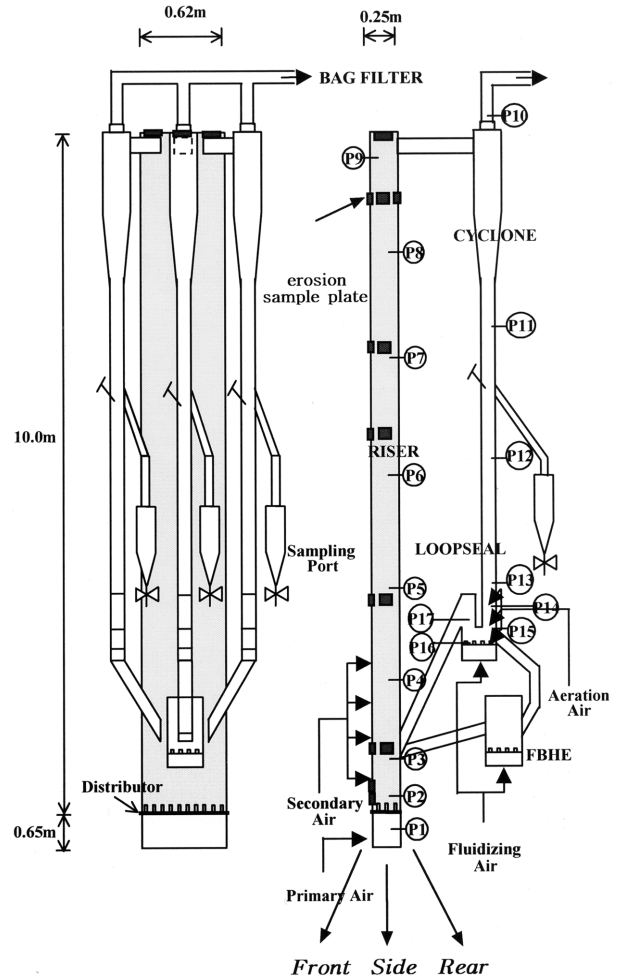


Fig. 1. Cold model circulating fluidized bed reactor.

Table 1. Position and size of the erosion sample plate

Sample plate	Position(m)	Size(W×L×t)(m)	
Front	0.1-0.15	0.05×0.05×0.015	
	0.35-0.40	0.05×0.05×0.015	
	0.95-1.00	0.05×0.05×0.015	
	3.05-3.10	0.05×0.05×0.015	
	5.45-5.50	0.05×0.05×0.015	
	6.00-6.05	0.05×0.05×0.015	
	8.95-9.00	0.05×0.05×0.015	
	Rear	8.95-9.00	0.05×0.05×0.010
		Side	0.95-1.00
3.05-3.10			0.05×0.05×0.010
5.45-5.50	0.05×0.05×0.010		
Roof	6.00-6.05	0.05×0.05×0.010	
	8.95-9.00	0.05×0.05×0.010	
	10.00	0.10×0.10×0.01	
	10.00	0.10×0.10×0.01	
	10.00	0.10×0.10×0.01	

에 창을 내어 끼우는 방식으로 시편 고정을 하였다. 마모 시편은 순환유동층의 벽면흐름에 영향을 주지 않도록 벽면과 평행하게 부착하였으며 이를 Fig. 2에 나타내었다.

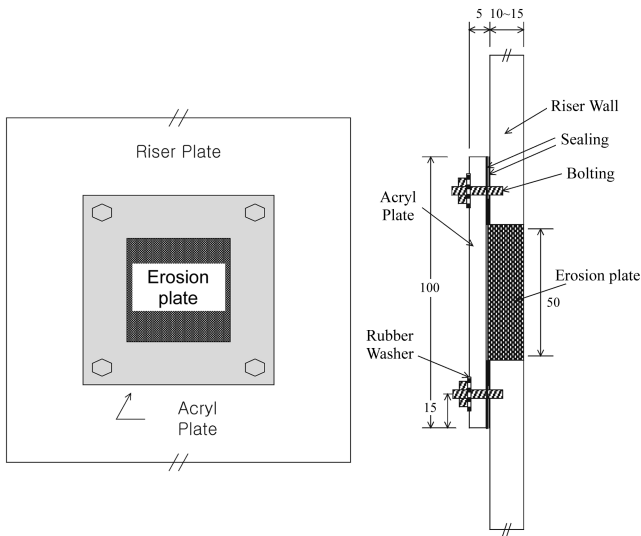


Fig. 2. Details of erosion sample plate.

2-2. 실험방법

본 연구에서는 순환유동층의 운전조건 변화에 따른 유동 변화로 야기 되는 벽면 마모의 영향을 고찰하고자 유동 변화에 비교적 큰 영향을 미치는 상승관의 유속, 일.이차 공기비 그리고 전체 고체량(solid inventory) 변화에 따른 마모 시편의 마모정도를 측정하였다.

상승관의 유속은 사용한 층물질 입자(silica carbonate;  $d_p=281 \mu\text{m}$ ,  $\rho_g=2,800 \text{ kg/m}^3$ )가 동해화력 순환유동층 보일러와 유사한 유동현상을 보이는 범위인 1.9-3.8 m/s를 설정하였다[8]. 일.이차 공기비[PA/(PA+SA)]는 0.8-1.0의 범위에서, 그리고 전체 고체량은 100-200 kg 범위에서 변화를 주어 그 영향을 고찰하였다. 마모율은 석고 마모 시편의 초기무게를 측정 한 후, 원하는 실험 조건에서 10시간 조업후의 무게 감량으로 마모율을 측정하

였으며, 초기 마모시편의 상태를 최대한 동일하게 유지하기 위해 석고의 건조온도(100 °C) 및 양생시간(72시간) 등을 동일하게 설정하였다.

한편, 운전조건 변화에 따른 상승관내에서의 유동현상을 특성화하기 위해 고체 체류량 및 고체 순환량을 측정하였다. 유동층내 각 지역의 고체 체류량의 계산을 위한 압력차이는 상승관(9개) 및 downcomer(9개) 그리고 loopseal(15개)에서 각각 측정하여 PC로 자동 저장되도록 하였다. 자동 저장된 압력값은 각각의 위치에 따른 압력차이를 계산하여 식 (1)을 사용하여 고체 체류량( $\epsilon$ )을 계산하였다.

$$\frac{\Delta P}{L} = (1 - \epsilon)(\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c} \quad (1)$$

또한, 압력값의 보정 및 검증을 위해 각각의 압력탭에 manometer를 설치하여 동시에 직접 측정하는 방법을 취하였다. 한편, 고체 순환량의 측정을 위해 각각의 downcomer로 흐르는 고체량을 slide valve를 이용하여 일정시간동안 sampling하여 그 양을 측정하여 순환량을 결정하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 본 실험에 사용된 층물질에 대한 유속 및 전체 고체량(inventory)에 따른 고체 체류량을 도시한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 유속이 증가함에 따라 농후상(dense phase)에서의 고체 체류량은 점차 감소하는 반면에 희박상(lean phase)에서의 고체 체류량은 점차 증가하는 경향을 보여주고 있다. 이를 고체 체류량에 대해 log-plot한 결과로 그 영향을 상세히 나타낸 것을 보면(Fig. 3내부 그래프 참조) 상승관의 높이에 따라 농후상과 희박상, 그리고 이 두영역간의 전이(transition) 영역으로 나누어 고체 체류량의 특성이 다르게 고찰되고 있음을 알 수 있다. 일정유속에서 농후상에서는 거의 일정한 고체 체류량을 유지하나 유속증가에 따라 점차 감소하는 경향을 보여주고 있으며, 전이영역 및 희박상 영역에서는 일정유속에서 높이에 따라 감소하는 경향을 보여주고 있으나, 유속에 대해 점차 고체 체류량이 증가하는 경향을 나타낸다. 또한, 전이영역 및 희박상 영역에서의 고체 체류량의 변화에 대한 기술기의

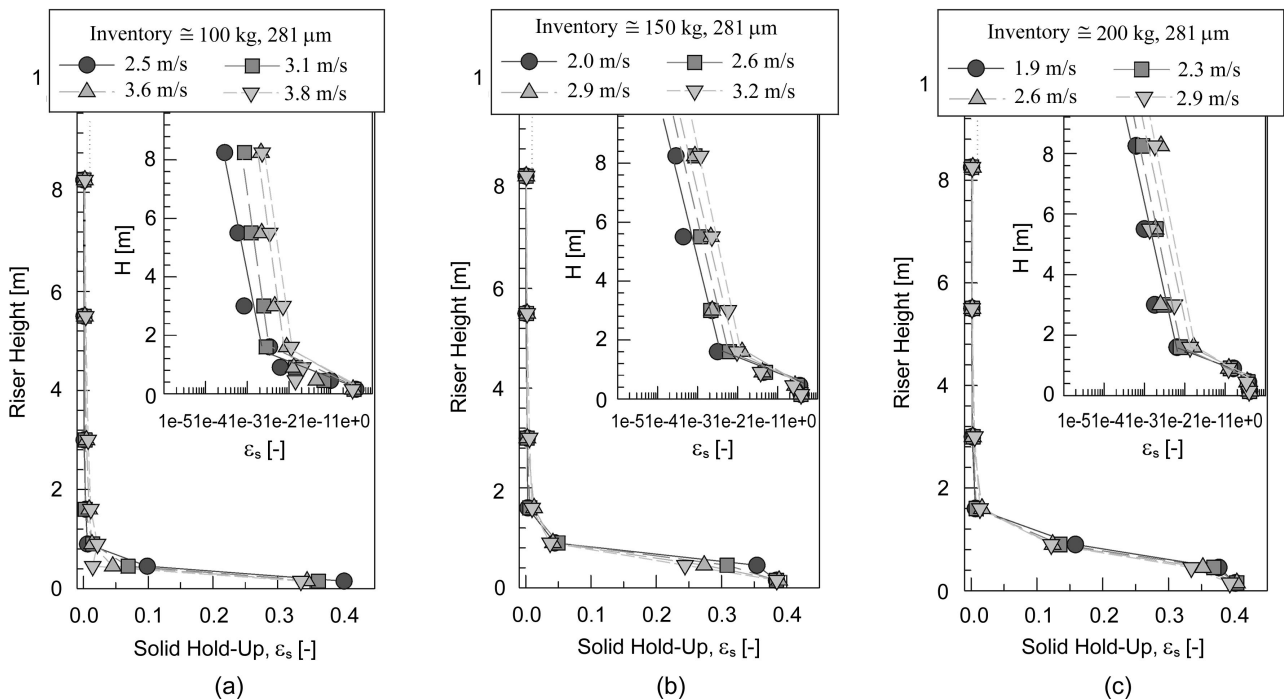


Fig. 3. Effects of fluidizing velocity and solid inventory on axial solid hold-up in the CFB riser; (a) 100 kg, (b) 150 kg, (c) 200 kg.

절대값은 유속의 증가에 따라 점차 증가함을 고찰할 수 있었으며, 이를 전체 상승관에서의 고체 체류량 식으로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다[9, 11].

$$\epsilon_s = \epsilon_{sd}, \text{ for } h < H_d \quad (2)$$

$$\epsilon_s = (\epsilon_{sd} - \epsilon_{HX})e^{-a(h-H_d)} + \epsilon_{exit}e^{K(H_{exit}-h)}, \text{ for } H_d < h < H_{exit} \quad (3)$$

where,  $\epsilon_{HX} = \epsilon_{exit}e^{K(H_{exit}-H_d)}$

상기 식 (2)에서의 고체 체류량은 일정한 고체 체류량을 갖는 농후상 영역에서의 값을 의미하며, 식 (3)은 농후상 이후의 영역을 두 개의 영역으로 나타내어 각각의 영역에 대한 지수적 관계를 상수 a 및 K를 사용하여 나타낸 상관식이다[11, 12]. 농후상의 고체 체류량 및 높이, 그리고 고출구의 고체 체류량 값을 알 경우에 상기 식 (2)와 (3)으로부터 상승관 전체의 고체 체류량을 표현할 수 있다.

여기서 a 및 K는 각각 전이영역 및 희박상 영역에서의 기울기의 변화로써, 본 연구에 적용된 입자에 대해서는 그 입자 크기에 상관없이 다음과 같은 상관 관계가 있음을 보고한 바 있다[10, 13].

$$a \cdot U_o/U_f = 3.6 \quad (4)$$

$$K \cdot U_o/U_f = 0.37 \quad (5)$$

한편, 시스템내의 전체 고체량의 증가에 따라서는 농후상 영역의 높이가 증가할 뿐만 아니라, 일정한 유속에서 희박상 영역의 고체 체류량 증가도 고찰되었다. 이는 같은 유속에서 농후상 영역의 층높이 증가로 인한 일차공기와 고체 입자간의 접촉 빈도의 증가로 인해 나타나는 현상으로 이해할 수 있다. 이러한 이유로 인해 고체 순환량도 증가하는 경향을 나타내는 것으로 알려져 있다[10, 14].

유속 증가에 따른 고체 순환량은 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 유속증가에 따라 지수적으로 증가하며, log-plot으로 도시하였을 경우 직선적으로 비례함을 알 수 있다. 또한, 사이클론 및 순환 loop가 3개인 본 시스템의 경우, 가운데 loop로 순환하는 고체량이 양측에 비해 1.5배 큼을 보이고 있으며, 이는 양측면의 구조적 차이점과 더불어 상승관에서의 고체 flux가 상대적으로 가운데에서 가장 크기 때문이다.

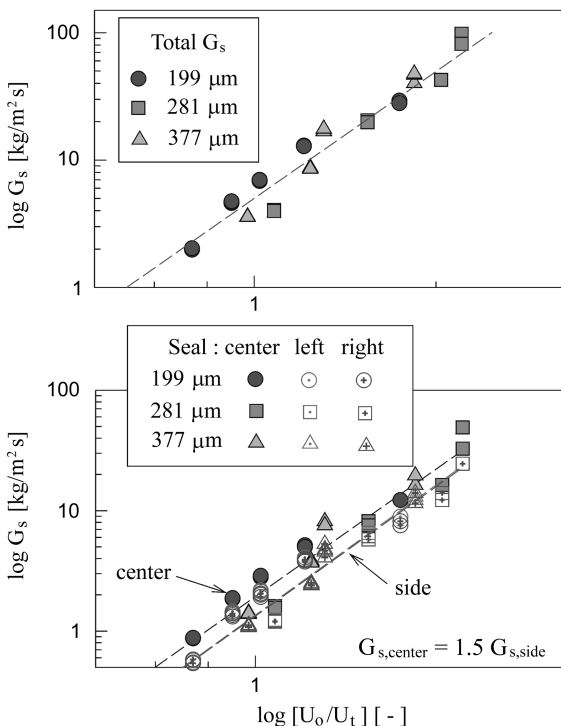


Fig. 4. Effect of fluidizing velocity on solid circulation rate with different particle size.

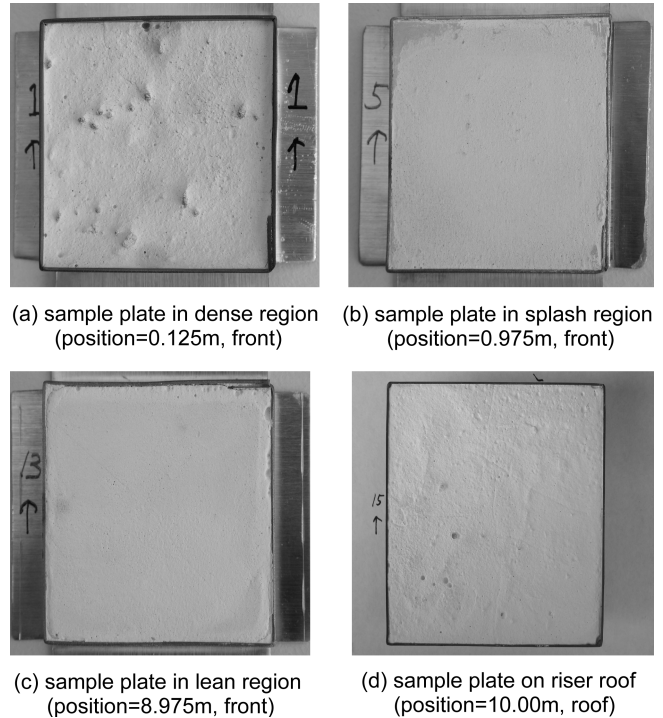


Fig. 5. Erosion at different height of the riser ( $U_o=3.2$  m/s, solid inventory =150 kg).

한편, Fig. 3에 나타난 유동 변화에 따른 벽면에서의 마모는 크게 마모 시편의 위치에 따라 Fig. 5( $U_o=3.2$  m/s, inventory=150 kg)에서 보인 바와 같이 네 부분의 마모형태가 고찰되었다. 첫 번째로는, 고체 밀도가 매우 높고, 유동화 현상이 매우 격렬하게 일어나는 농후상 영역에서의 마모 형태로, 마모 시편과 충돌물과의 충돌이 다양한 각도로 그리고 매우 격렬하게 일어나 마모 시편의 표면 형상이 매우 불규칙한 형태의 마모가 고찰되었다[Fig. 5(a)].

두 번째로는 전이영역에서의 마모 형태로 상단의 희박상 영역과 하단의 농후상 영역의 경계지역의 특징이 잘 내포된 마모 형태로 마모의 정도는 농후상 영역 다음으로 많이 일어나며, 그 형태는 고체 입자의 상승흐름과 하강흐름이 교차하는 영역으로서 마모시편의 표면 형상이 위 아래로 쓸린 모습을 보여주고 있다[Fig. 5(b)]. 세 번째로는 상승관의 9 m 지점에 부착된 시편에 대한 희박상 영역에서의 마모형태로 고체 입자의 농도가 상대적으로 낮아 매우 미세한 표면 감소현상을 보여주고 있다[Fig. 5(c)]. Fig. 5(d)에서는 상승관 천장부분에 부착된 마모 시편의 표면 감소를 보여주고 있으며, 이는 상승관 측면에서의 마모와는 달리 입자의 수직 충격에 의한 마모가 주로 일어나 시편 표면이 파이는 형상을 보여주고 있으며, 특히, 사이클론으로 배출되는 방향으로 가까운 면(시편 좌측면)이 더 많은 마모를 보이는 것으로 나타났다.

전체 고체량(inventory=150 kg)이 일정할 경우, 운전 유속 변화로 인한 상승관 벽면에서의 마모율의 관계를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이, 상승관 벽면에서의 마모율의 변화는 Fig. 3의 고체 체류량 분포 경향과 매우 유사함을 알 수 있다. 즉, 농후상 영역에서는 비교적 큰 마모율을, 그리고 상부의 희박상 영역으로 갈수록 비교적 작은 마모율을 보이며, 중간 전이 영역에서는 이 두 마모율의 중간정도의 값을 갖는 것으로 고찰되었다. 또한, 유속이 증가함에 따라 전이영역

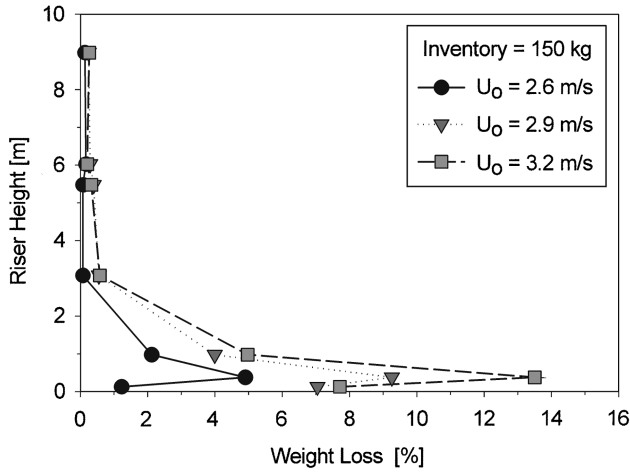


Fig. 6. Effect of fluidizing velocity on erosion at different height of the riser.

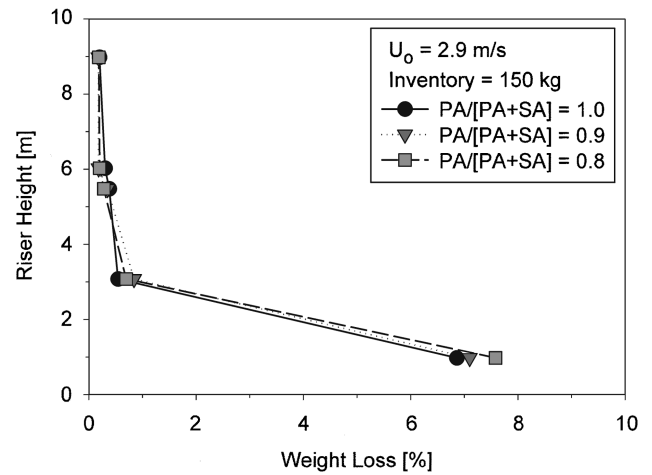


Fig. 8. Effect of secondary air on erosion at different height of the riser.

과 회박상 영역에서의 높이에 따른 마모율은 점차 증가하는 경향을 보여주고 있어, 이들 영역에 있어 고체 체류량이 벽면 마모에 있어 직접적인 비례관계를 갖고 있음을 알 수 있다. 그러나, 그림에 나타난 바와 같이 농후상 영역에서의 마모 형태는 고체 체류량과 직접적 상관관계가 존재하지는 않음을 고찰할 수 있다. 즉, 농후상의 고체 체류량 분포는 상승관내에서의 유속이 증가함에 따라 점차 감소하는 반면, 마모율은 유속이 증가함에 따라 점차 증가하는 경향을 보여주고 있다. 이는 일정 고체 체류량 이상이 될 경우에는 고체 체류량의 증감보다는 고체 유동특성의 발달 정도가 마모에 큰 영향을 미치는 것으로 이해할 수 있다. 또한, 유속이 일정할 경우, 고체 체류량이 농후상에서 비교적 일정한 값을 보이고 있는 것과는 달리, 상승관 벽면에서의 마모율은 분산관 바로 위에서 상대적으로 적은 값을 보이고 있다. 이는 분산관 바로 위에서 고속의 기체 유속에 의한 상승 효과로 인해 이 영향권에 있는 벽면에서는 고체 입자들의 상대적 빈도 감소로 고체 유동 특성이 비교적 적기 때문으로 이해 할 수 있다. 결과적으로 농후상에서의 마모율은 고체 체류량의 변화보다는 기포 특성과 이에 따른 고체 유동 발달이 마모에 큰 영향을 미치는 것으로 이해할 수 있다.

Fig. 7은 상승관내의 유속( $U_0=2.9$  m/s)이 일정할 경우, 순환유동층내의 전체 고체량에 따른 마모율의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 전체 고체량이 증가함에 따라 높이에 따른 각 위치별 마모율도

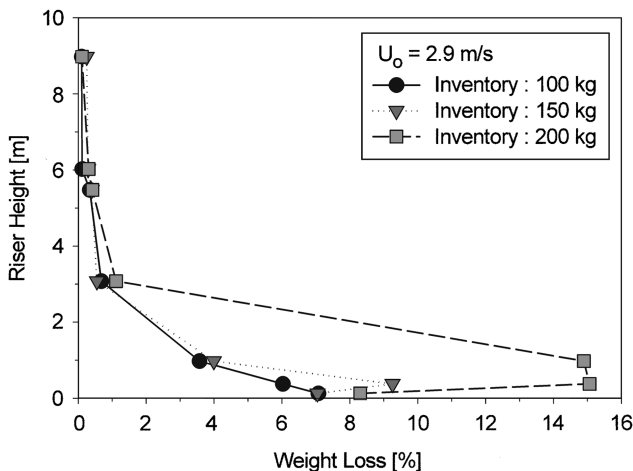


Fig. 7. Effect of solid inventory on erosion at different height of the riser.

증가하는 경향을 보이고 있으며, 이는 Fig. 3에 나타난 전체 고체량에 따른 고체 체류량의 경향과도 같음을 알 수 있다. 즉, 앞서 고찰한 바와 같이 전체 고체량 증가에 따른 고체 체류량의 증가는 마모율의 증가를 가져왔으며, 특히 전이영역이 점차 농후상 층 높이의 증가로 인해 농후상 영역으로 바뀌어 마모율이 급격하게 증가함을 고찰할 수 있다. 또한, 일정 유속에서의 조업으로 인해 기포 특성이 크게 바뀌지 않아, 각 영역에서의 고체 체류량 증가는 직접적으로 마모율에 비례함을 고찰할 수 있었다. 그러나, 전체 고체량이 가장 적은 100 kg일 경우, 분산관 바로 위의 상승관 벽면에서의 마모율은 그 경향이 상이하게 나타나 기포의 영향뿐만 아니라, 재순환부에서의 순환량과 농후상의 층높이 변화로 인해 그 영향을 받는 것으로 생각된다[1, 15].

전체 상승관으로 주입되는 공기량이 일정할 때( $U_0=2.9$  m/s, Inventory =150 kg) 일-이차 공기비[PA/(PA+SA)]에 따른 상승관에서의 고체 체류량은 일-이차 공기비가 증가함에 따라 회박상 영역의 고체 체류량은 점차 증가하는 경향을 나타냈으며, 반면에 전이영역 및 농후상에서의 고체 체류량은 점차 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 일차 공기로의 주입량 비가 클 경우에는 농후상 영역에서 충분한 유속이 형성되고, 일차 공기와 고체입자의 접촉빈도도 크기 때문에 이차공기의 주입이 있는 경우에 비해 상승관내의 비산율을 높여주어 회박상 영역의 고체 체류량이 증가하는 것으로 이해할 수 있다[10, 16]. 한편, 측면으로 공급되는 이차 공기량에 따른 맞은편 상승관의 벽면에서의 마모율은 Fig. 8에 나타내었다. 상승관 벽면에서의 마모율은 이차 공기량이 증가할수록 농후상 측면의 마모율이 점차 증가함을 볼 수 있으며, 전이영역 및 회박상 영역을 거치면서 마모율의 감소를 고찰할 수 있다. 이는 이차 공기의 주입 증가에 따라 농후상에서의 고체 유동 방향이 맞은편 상승관 벽면으로 작용하기 때문에 마모율이 증가하는 경향을 나타내었으며, 전이 영역 및 회박상 영역에서는 점차 고체 체류량의 감소 영향을 받아 마모율이 감소하는 것으로 고찰되었다. 그러므로, 이차 공기비의 증가는 농후상에서의 국부적 마모율의 증가를 가져오는 반면, 회박상에서의 마모는 점차 감소시키는 결과를 가져오는 것으로 나타났다.

상승관 천장 부위에서의 마모는 벽면에서의 마모 현상과는 달리 입사 각도가 비교적 수직에 가까운 충격에 의한 마모 현상을 나타낸다. 이러한 충격 마모에 대해 일정 고체량(inventory=150 kg)에서 상승관내에서의 조업 유속과 위치에 따른 마모율을 Fig. 9에 나타내었다. 유속이 점차 증가함에 따라 각 위치에서의 마모율은 대체로 증가하는 경향을 보였으며, 특히 유속의 증가율에 비해 마모율이 훨씬 크게 증가함을 고찰할 수 있었다. 이는 순환유동층의 고체층 내에 전열관이 담긴 마모의 고

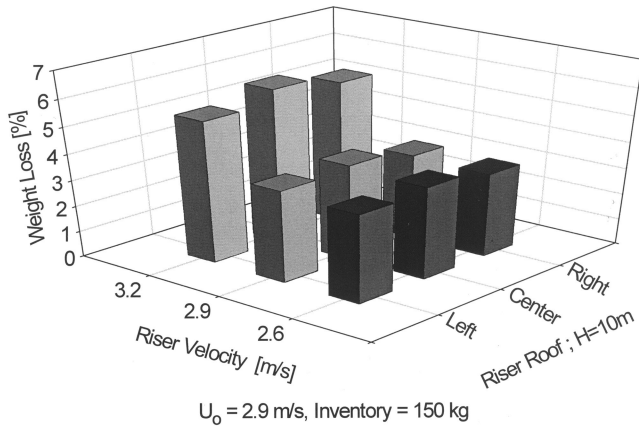


Fig. 9. Effect of fluidizing velocity on erosion at the roof of the riser.

찰에서도 보고되는 것으로 대체적으로 입자 유속의 제곱에 비례하여 마모가 진행되는 것으로 나타나고 있어[16] 본 실험결과에서는 이러한 유속의 영향과 더불어 고체 순환량의 증가 영향으로 제곱이상의 마모율 증가가 예상된다. 한편, 가운데 천장 부분의 마모가 양측 천장 부분에 비해 마모율이 상대적으로 큼을 고찰 할 수 있었으며, 이는 고체 순환량의 차이에 의해 나타나는 것으로, 양측 순환 loops에 비해 1.5배 정도의 고체 순환량이 많은 가운데 부분의 마모율이 비교적 큼을 알 수 있었다. 그러나, 순환유동층 고체층 내의 전열관 마모에 있어 고체 순환량 증가에 대해 직선적으로 비례한다는 보고와는 달리[17], 고체 순환량이 1.5배 증가된 것에 비해 마모율이 정비례하지는 않았으며, 어느 정도의 마모율 증가만이 고찰되었다. 이는 고체 순환량이 증가함에 따라 입자 간의 간섭 증가에 의한 충격량의 감소 영향으로 생각될 수 있다.

상승관에서의 비교적 굵은 고체 입자의 상향 흐름경향은 하단부 농후상 영역에서부터 출발하여 상승관 front(사이클론 설치면의 반대 위치 면)를 거쳐 천장부위 및 재순환부를 통해 다시 상승관으로 주입되는 경로를 갖는 것으로 알려져 있다[1, 15]. 그러나, Fig. 10에 나타낸 바와 같이 순환유동층 상승관 상부(H=8.975 m)에서의 마모 경향은 front면이나 측면보다는 rear면(사이클론 설치면)의 마모가 좀더 크며 그 다음 front 및 측면의 순서로 마모율이 크게 나타나는 것으로 고찰되었다. 이는 비교적 큰 입자의 상향 흐름경향과는 달리 상승관 상부 벽면에서의 마모는 천장부위나 사이클론 주입구 부분에서 발생하는 하향흐름의 고체 입자에 의한 영향이 크게 나타나며 이러한 고체 입자의 하향흐름은 사이클론 주입구 부분에서 가장 많이 나타나는 것으로 이해될 수 있다.

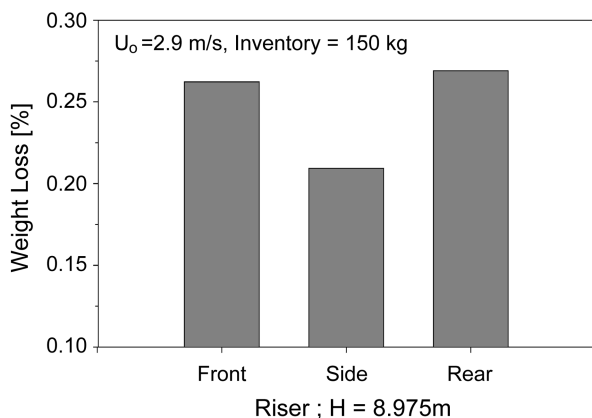


Fig. 10. Erosion of the upper part of the riser wall.

### 4. 결 론

순환유동층 상승관 벽면에서의 마모율은 위치 및 높이에 따른 고체 체류량 및 고체 순환량, 그리고 입자의 유속 혹은 유동화 속도에 영향을 받는 것으로 고찰되었다. 순환유동층 희박상에서는 유동화 속도 증가 및 입-이차 공기비의 증가에 따른 고체 체류량의 증가로 인해 벽면에서의 마모율의 증가가 고찰되었으며, 반면 농후상에서는 고체 체류량 보다는 유동화 속도의 증가 혹은 이차 공기 주입에 따른 유동변화에 대해 마모율이 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 전이영역에 대한 마모율은 희박상과 농후상의 중간 정도의 마모율을 보이며, 대부분의 조업 조건에 대한 영향도 농후상과 희박상 영역의 중간 정도의 변화를 갖는 것으로 나타났다. 또한, 전체 고체량의 증가에 따라 고체 체류량의 증가로 인해 마모율이 증가하였으며, 농후상 층높이의 증가로 인한 마모 영역의 확대도 고찰되었다.

한편, 순환유동층내의 유속 증가에 따른 고체 순환량 증가에 따라 상승관 천장부위에서의 마모율은 가운데 부위가 가장 크게 나타났으며, 유속에 따라서는 그 마모정도가 지수적으로 증가하는 것으로 고찰되었다. 또한 상승관 상부 벽면의 마모 경향은 입자의 하향흐름이 가장 많이 생성되는 사이클론 주입부 벽면에서 가장 큰 마모율을 보이는 것으로 나타났다. 이러한 마모 경향을 통해 내화재 및 전열관 마모 점검 및 유지보수에 대한 기준 설정 및 검사 용이성을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

### 감 사

본 연구는 에너지관리공단의 청정에너지개발 지원사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

### 사용기호

- a : decay constant in transition region [ $\text{m}^{-1}$ ]
- $d_p$  : particle size [m]
- h : height [m]
- $H_d$  : dense bed height [m]
- $H_{exit}$  : exit height [m]
- K : decay constant in dilute phase [ $\text{m}^{-1}$ ]
- $U_{mf}$  : minimum fluidizing velocity [m/s]
- $U_o$  : superficial velocity in the riser [m/s]
- $U_t$  : terminal velocity [m/s]

### 그리스 문자

- $\epsilon$  : void fraction [-]
- $\epsilon_{exit}$  : volume fraction of solid at exit [-]
- $\epsilon_s$  : volume fraction of solid [-]
- $\epsilon_s^*$  : the lowest volume fraction of solid in the riser [-]
- $\epsilon_{sd}$  : volume fraction of solid in the dense bed [-]
- $\rho_s$  : density of solid [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
- $\rho_g$  : density of gas [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

### 참고문헌

1. Stringer, J. and Stallings, J.: Proceedings of the 11th Int. Conf. on FBC, Montreal, Canada, 589(1991).
2. Wang, B. Q. and Lee, S. W.: Proceedings of the 13th Int. Conf. on FBC, Orlando, FL, USA, 1427(1995).

3. Stringer, J.: Proceedings of the 9th Int. Conf. on FBC, New York, USA, 685(1987).
4. Macoy, D. E., Garver, D. L. and Hileman, G.: U. S. Patent No. 4,724,049 (1987).
5. Stringer, J. and Ehrlich, S.: ASME Paper No. 76-WA/CD-4, 11(1976).
6. Bixer, A. D.: EPRI Report GS-6747, Paper No. 35, California USA (1990).
7. Slusser, J. W., Bartlertt, S. B. and Bixer, A. D.: EPRI Report GS-6747, Paper No. 16, California USA(1990).
8. Kim, S. M., Kim, E. H., Lee, J. M. and Kim, J. S.: KEPRI Report, TM.00GJ06, P2000.448, Taejon, Korea(2000).
9. Lee, J. M., Kim, S. M., Kim, J. S., Kim, J. J. and Song, K. K.: *Energy Engg. J.*, **9**, 348(2000).
10. Lee, J. M., Kim, J. S. and Kim, J. J.: *Korean J. Chem. Eng.*, in press (2001).
11. Zhang, W. and Johnsson, F.: Report A91-193, Dept. of Energy Conversion, Chalmers Univ., Sweden(1991).
12. Johnsson, F. and Leckner, B.: Proceedings of 13th Int. Conf. on FBC, Florida, USA, 671(1995).
13. Lee, J. M., Kim, J. S. and Kim, J. J.: International Sym. on Chem. Eng., Cheju, Korea, 263(2001).
14. Kim, J. H.: *Korean J. Chem. Eng.*, **16**, 840(1999).
15. Kaneda, H. and Oki, K.: EPRI Report GS-6747, Paper No. 14, California USA(1990).
16. Choi, J. H., Park, J. H., Choung, W. M., Kang, Y. and Kim, S. D.: *Korean J. Chem. Eng.*, **12**, 141(1995).
17. Bis, Z., Gajewski, W., Krzywanski, J. and Leszczynski, J. S.: Proceedings of 5th International Conf. on CFB, Paper No. MSD8, Beijing, China(1996).