

상용 순환 유동층 연소로 수관벽 전열관 마모속도

김태우 · 최정후[†] · 선도원* · 손재익* · 정봉진** · 김수섭*** · 김상돈****

건국대학교 화학공학과, 차세대환경기술센터

143-701 서울시 광진구 화양동 1

*한국에너지기술연구원

305-343 대전시 유성구 장동 71-2

**수원대학교 환경공학과

445-743 경기도 화성시 봉담읍 와우리 산2-2

***SKC(주)

680-160 울산시 남구 황성동 600

****한국과학기술원 생명화학공학과

305-701 대전시 유성구 구성동 373-1

(2005년 2월 18일 접수, 2005년 4월 23일 채택)

Tube Erosion Rate of Water Wall in a Commercial Circulating Fluidized Bed Combustor

Tae-Woo Kim, Jeong-Hoo Choi[†], Do-Won Shun*, Jae-Ek Son*, Bongjin Jung**, Soo-Sup Kim*** and Sang-Don Kim****

Department of Chemical Engineering, Innovative Environmental Technology Center, Konkuk University,
1, Hwayang-dong, Gwangjin-gu, Seoul 143-701, Korea

*Korea Institute of Energy Research, 71-2, Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

**Department of Environmental Engineering, Suwon University, San 2-2, Wau-ri, Bongdam-eup, Hwaseong-si, Gyeonggi-do, 445-743, Korea

***SK Chemical Co., 600, Hwangsun-gong, Nam-gu, Ulsan, 680-160, Korea

****Department of Molecular Biology and Chemical Engineering, KAIST, 373-1, Guseong-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-701, Korea

(Received 18 February 2005; accepted 23 April 2005)

요 약

상용 순환 유동층 연소로(200 ton steam/hr, 4.97×9.90×28.98 m)의 수관벽에서 전열관의 마모속도를 측정 및 고찰하였다. 전열관의 두께는 초음파 측정방법을 이용하여 측정되었다. Splash 영역에서 윙월을 포함한 모든 수관벽 전열관의 마모속도가 두드러졌다. 전열관의 마모속도는 분배기로부터 높이가 증가함에 따라서 감소한 후 다시 증가하였다. 프리보드 기체출구 부근의 윙월에서는 기체 및 고체흐름의 편향성으로 인한 마모속도의 차이도 나타났다. 윙월의 마모속도는 연소로 단면의 중앙에 위치할수록 크게 나타났다.

Abstract – The erosion rate of water wall tube has been measured and discussed in a commercial circulating fluidized bed combustor (200 ton steam/hr, 4.97 × 9.90 × 28.98 m height). Tube thickness was measured with ultrasonic method. Severe tube erosion rate was observed in the splash region on all waterwalls including wingwalls. The tube erosion rate increased after an initial decrease as height from the distributor increased. The difference of erosion rate among wing walls was found due to unbalanced distribution of gas and solid flow rates. The erosion rate of the wing wall increased as location of the wing wall became closer to the center of combustor crosssection.

Key words: Tube Erosion Rate, Tube Erosion, Circulating Fluidized Bed, Combustor, Erosion

1. 서 론

순환유동층 연소로는 다양한 연료를 대상으로 높은 연소효율과 열전달속도를 유지하면서 설계될 수 있고, 석회석이나 백운석 등의 탈황제를 유동매체인 층 물질로 사용하여 연소기체 중 SO₂를 직접

흡수하여 제거할 수 있으며, 연소온도가 낮아서 NO_x의 생성을 억제할 수 있는 장점이 있어서 중대형의 보일러에 널리 사용되고 있다.

유동층 연소로에서는 고체 입자가 격렬히 혼합되고 거동하므로 전열면의 경계층을 깨어서 전열효과를 극대화 한다. 반면에 전열관과 유동매체의 충돌접촉으로 인하여 전열관 표면에 마모가 발생한다. 이로 인하여 층 내에 설치한 전열관의 계속적인 보수 및 유지관리가 필요하다. 순환유동층 연소로에서 마모는 층 내 전열관, 로

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: choijhoo@konkuk.ac.kr

내 수관벽, 로 내 과열기, 대류 전열부에 설치된 전열관과 연소로 하부(석탄 주입구, 벽면 양 모서리, 벽면 하부), 기체 출구, 사이클론에 설치된 내화물 그리고 분산관 등에서 주로 발생된다. 이중 가장 중요하게 대두되는 부분은 로내 수관벽이다.

마모는 여러 가지 원인에 의해 발생되며, 유속, 연소로 및 전열관의 온도 등과 같은 운전 변수의 영향과 석탄, 석탄회, 탈황제, 증물 질 등의 입자 특성의 영향과 전열관의 재질 등의 영향으로 분류되어 생각될 수 있다. 전열관 마모에 영향을 미치는 인자로서 Seitzinger[2]는 30 MWe(123 ton steam/hr)규모의 lurgi 형태의 순환 유동층 연소로에서 운전조건의 변화(증기생산량 증가)와 기체 흐름 분배에 기인한 기체 유속의 증가가 전열관 마모의 주원인이라고 보고하였다. Zhao 등[3]은 가압 유동층 실험 장치에서 유동층 내부에 설치된 관의 마모에 미치는 압력과 유동화 수(fluidization number)의 영향에 대해 보고하였다. 그들은 마모의 심각한 정도는 층 내의 유동화 형태가 주원인이라고 하였다. 그들은 마모율(관 표면의 단위 면적당, 단위 시간당 무게 감량)은 유동화 수(유동화속도의 최소유동화속도에 대한 비)가 증가함에 따라 증가하다가 일정한 유동화 수에서 최대값을 보인 후 감소하는 것으로 보고하였다. Han[12]은 유동화 속도의 증가에 따라 기포가 합체되어 크기가 커져 기포가 안고 있는 증물질이 증가하고, 기포의 빈도가 커지며, 기포의 상승속도가 빨라져 그에 따른 운동량이 증가하기 때문에 마모율이 증가한다고 보고하였다.

고체입자의 입경이 증가하면 마모 속도가 증가하는데 이는 입경이 증가하면 입자의 관성력(inertia force)이 증가하여 입자의 운동량이 유지된 채로 전열관에 충돌하게 되고 또 충돌 효과가 증가하기 때문으로 보고되었다[4]. 입자의 구형도가 작아지면 전열관의 마모 속도가 증가되는 것으로 보고되었다[5]. Ninham 등[6]의 보고에 따르면 새 층 물질을 사용하는 것이 기존에 사용되던 층 물질을 사용하는 것보다 더 큰 마모성을 나타내었다. 따라서 층 물질의 교환 주기가 긴 것이 마모를 줄이는데 효과적임을 의미하였다.

Lindsley 등[5]은 전열관 마모에 영향을 주는 고체 성분으로 (Si+Al)와 (Ca+S)의 영향을 보고하였다. 입자 조성에 (Si+Al)이 많으면 마모성이 증가되며, 반면에 (Ca+S)가 많으면 마모성이 감소되었다. 입자 내부에 (Si+Al)이 분포하고, 표면에 (Ca+S)가 분포하면 마모성이 감소되는데, 이는 (Ca+S) 성분이 많고 입자표면에 분포하게 되면 전열관 표면에 (Ca+S)의 침적물이 형성되고, 이의 완충역할로 인해 전열관의 마모 속도가 감소되는 것으로 보고하였다.

석탄 중의 염소(Cl) 함량은 채탄 깊이가 증가함에 따라 증가하는 것으로 보고되었으며, 대부분의 염소는 석탄 중의 유기물에 포함되어 있어서 가열하면 염산(HCl)의 형태로 증발되는 것으로 보고되었다[7]. Hou 등[7]은 전열관 마모에 대한 염소의 영향에 관한 실험에서 HCl의 농도가 증가하면 마모율이 지수적으로 증가하는 것으로 보고하였다. 반면에 Sethi 등[8]은 그들의 보고에서 염소 함량이 큰 석탄을 사용하는 경우에 전열관의 마모가 50%까지 증가될 수 있음을 확인하였고, 이는 미분탄 연소에서 얻어진 결과와 유사하였으나, 마모 속도의 증가가 반드시 석탄 내 염소 함량의 증가 때문만으로 볼 수 없다고 보고하였다.

Nimhan 등[6]은 마모 모사 실험장치에서 전열관 재질의 내마모성 및 내산성에 대한 실험을 수행하였다. Fe-5Cr-a ferritic alloy (laboratory purity)는 내마모성과 내산성이 모두 나빴다. 상용등급 Fe-9Cr-1Mo-a martensitic alloy와 Fe-15Cr-a chromia-forming ferritic

alloy(laboratory purity)의 내마모성과 내산성은 중간급이었다. Yamamoto 등[9]은 가압 유동층 실험장치에서 여러 가지 재질의 전열관을 이용하여 재질에 따른 마모도를 보고하였다. High Cr ferric steel(ASME SA213-T91)과 일반적인 18Cr-8Ni austenitic steel(MITI-SUS304J1HTB)는 내마모성이 좋았으나, 25Cr austenitic steel(MITI-SUS301J1TB)는 온도 600 °C 가까이에서는 좋으나, 550-600 °C에서는 나빴다. Ninham 등[6]과 Yamamoto 등[9]의 보고에 의하면 조업 온도와 전열관의 재질에 따라 내마모성과 내산성이 다르게 나타났다.

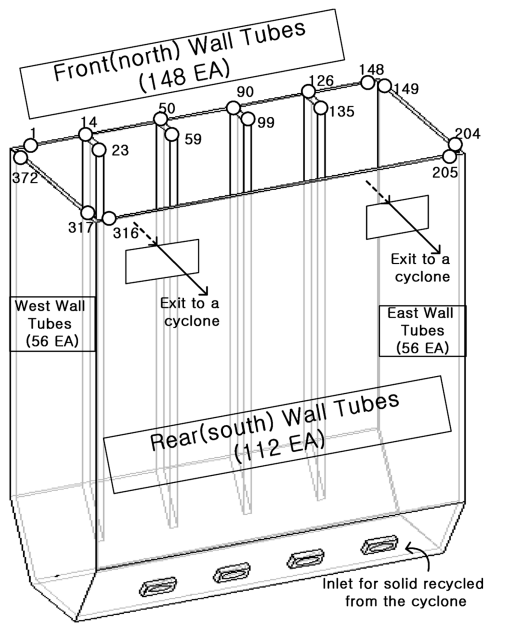
Vincent 등[10]은 TVA의 상압 유동층 연소로 내의 금속 마모에 대해 고찰하였다. 그들은 탄소강의 마모지수를 1.0으로 기준하여 다른 재질의 전열관의 상대적인 마모지수를 나타내었다. Chromized 210과 WC18943 coating이 0.1로 가장 낮았으며, 304 Co-extrusion은 1.3이었다. Holtzer와 Redmarkers[11]은 전열관의 표면온도가 일정 값 이상에서는 온도가 증가함에 따라서 전열관의 마모속도는 감소하는 것으로 보고하였다.

한편 수관벽에서 발생하는 마모속도의 분포를 전체적으로 보여주는 자료는 마모형태에 대한 이해를 돕고 보일러의 운전 및 유지에 큰 도움을 줄 수 있으나 아직 제시된 바 없다. 본 연구에서는 국내에서 조업중인 S사의 열병합발전용 순환유동층 보일러의 연소로에서 수관벽의 마모속도분포를 고찰하였다. 측정된 수관벽 전열관의 두께자료를 분석하여 마모속도분포를 구하고 연소로 내에서 발생하는 마모속도에 대한 정량적인 분석을 수행하였다.

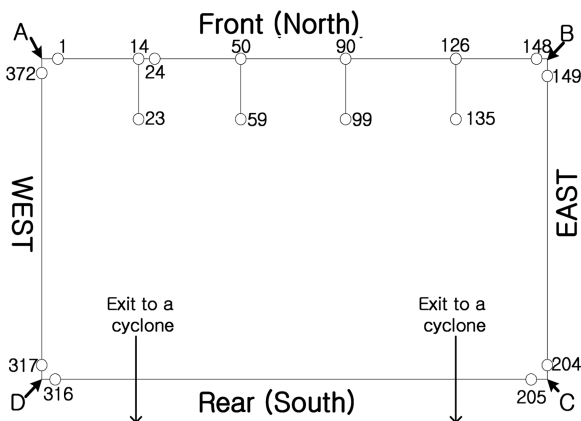
2. S사 순환 유동층 연소로

본 연구에서 고찰한 S사 순환 유동층 연소로(200 ton steam/hr, 4.97×9.90×28.98 m height)는 loopseal 방식으로 회재를 재순환하는 Ahlstrom사 형태이다. 보일러 공정은 연소로, 2개의 고온 사이클론, 루프실(loopseal) 그리고 대류전열부로 구성되며, 외부열교환기를 사용하지 않고 연소로의 벽면을 통하여 주된 전열을 하는 것이 특징이다. Fig. 1은 수관벽으로 이루어진 연소실의 모양을 나타낸다. 순환 유동층 연소실의 전체 높이는 28.98 m이며, 로 바닥으로부터 3.5 m 지점까지 80 mm의 두께로 내화물이 설치되어 있고, 전면(북측벽)과 후면(남측벽)은 로 상부로부터 25.75 m 지점부터 안쪽으로 21° 기울어져 있는 구조이다. 연소로 내벽은 총 372개의 전열관이 횡방향으로 연결되어 구성된다. 전면에는 9개의 전열관으로 구성된 윙 월(wing wall) 4세트가 설치되어 있다. 연소로 내벽을 구성하는 전열관의 사양은 Table 1에 나타나 있다. 후면(남측벽)의 상부에는 사이클론으로 나가는 기체 출구가 2개 있고, 하부에는 사이클론에서 포집된 입자의 재순환 주입구가 4개 있으며, 주입되는 석탄은 재순환 주입구로 함께 공급된다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 연소로의 전열관은 전면(북측벽)의 좌면 끝 전열관부터 시작하여 동측→남측→서측 방향으로 번호가 부여되어 있다. 전열관의 위치에 따른 횡방향 거리는 Table 2에 의해서 환산될 수 있다.

전열관 두께 측정에는 초음파 측정 방법이 사용되었다. 전열관 단면에서 측정위치는 내측 정면으로 하였고, 연소로의 각 면에 있는 모든 전열관을 대상으로 하여 측방향으로 여러 위치에서 측정하여 높이에 따른 전열관 두께 분포를 관찰하였다. 1998년 정기보수시에 측정된 전열관 두께에서 2002년 정기보수시에 측정된 전열관 두께를 뺀 차이를 가지고 전열관의 마모속도를 결정하였다. 연소로의 평균 운전조건은 Table 3과 같이 요약된다. 전열관의 마모속도는 연례



(a) side view of combustion chamber



(b) plan view of freeboard

Fig. 1. Layout of water wall tubes in the combustor.

Table 1. Tube specifications

Type	Outside diameter of tube	Tube thickness	Material	Tube pitch	Total number of tubes	Wing wall
Membrane wall	63.5 mm	6.1 mm	A210A1	88 mm	372 EA	4 set (each set has 9 tubes)

Table 2. Equations for horizontal distance of center of a tube in Fig. 1(b)

Wall	Direction	Range of tube no.	Equation for horizontal distance in mm.
North	A→B	1-14	(tube no. -1)×88+44
		24-50	(tube no. -24)×88+1,232
		60-90	(tube no. -60)×88+3,696
		100-126	(tube no. -100)×88+6,424
		136-148	(tube no. -136)×88+8,800
Wing	From north wall to inside	14-23	(tube no. -14)×88
		50-59	(tube no. -50)×88
		90-99	(tube no. -90)×88
		126-135	(tube no. -126)×88
East	B→C	149-204	(tube no. -149)×88+44
South	C→D	205-316	(tube no. -205)×88+44
West	D→A	317-372	(tube no. -317)×88+44

Table 3. Average operation condition

Operation days [day]	Steam generation [ton/h]	Mean bed temperature [°C]	Total air flow [Nm ³ /s]	Gas velocity [m/s]
1228	159	820	53.56	4.35

보수가 이루어지지 않는 연소로 바닥으로부터 높이 7 m 이상의 전열관에 대해서 고찰하였다.

3. 결과 및 고찰

전열관 마모속도 자료는 Fig. 1과 같은 순서로 매겨진 전열관 번호와 측정위치를 각각 x축과 y축으로 하고, 전열관 두께를 z축으로 하여 측정 높이와 전열관 번호에 따른 마모속도분포로 나타내었다. x축 방향으로 거리는 Table 2의 요령으로 환산하여 구할 수 있다.

한편, 유동층 연소로에서 마모에 의해 문제가 발생되어 운전 정지 및 보수, 수리를 하게 되는 경우는 가장 극심하게 마모된 부위에 문제가 발생한 경우이다. 따라서 전열관의 마모 속도는 연소로의 유지 관리 측면에서 볼 때 가장 빠른 마모 속도를 기준으로 예측하는 것이 타당한 것으로 사료되었다. 따라서 본 연구에서는 각각의 측정 높이에서 여러 개의 전열관 중 최대마모속도를 고찰하였다.

Fig. 2부터 Fig. 5은 본 연구에서 결정된 최대 마모 속도를 각 벽면별로 나타낸 그림이다. 기준 높이(연소로 바닥)로부터 7 m까지는 심한 마모로 전열관이 주기적으로 코팅제로 보수되어 정확한 마모속도를 결정할 수 없었으므로, 기준 높이로부터 7 m 이하의 높이에서 측정된 자료는 전열관 마모 속도 고려 대상에서 제외하였다.

Fig. 2은 전면(북측벽)에서 각 측정 높이에서 결정된 최대마모속도를 나타내고 있다. 벽의 하부(높이 7 m)에서 1.85×10^{-3} mm/day를 보이고 높이가 증가함에 따라서 마모속도는 지수적으로 감소한 후 높이 약 17 m에서 0.32×10^{-3} mm/day를 보이고 다시 증가하여 프리보드 정상의 기체출구 근처에서 1.05×10^{-3} mm/day를 나타내었다.

기체분배기로부터 높이 3.5 m까지는 내화물벽으로 전열관이 보호되어 있으며, 이상의 높이에서는 전열관벽이 노출되어 있다. 측정

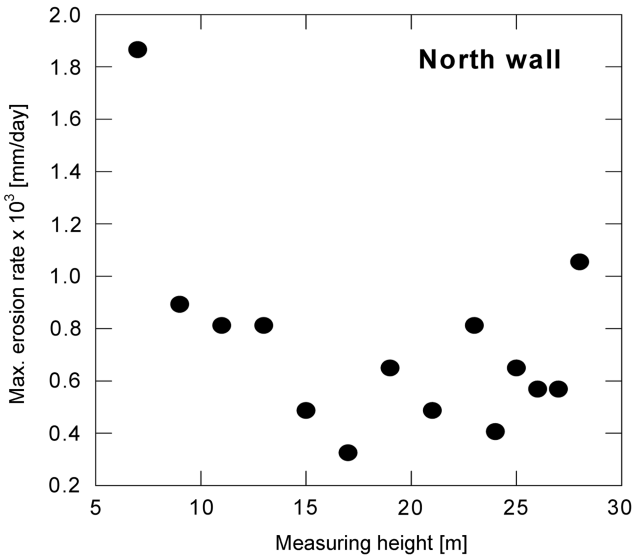


Fig. 2. Maximum tube erosion rate profile of front(north) water wall.

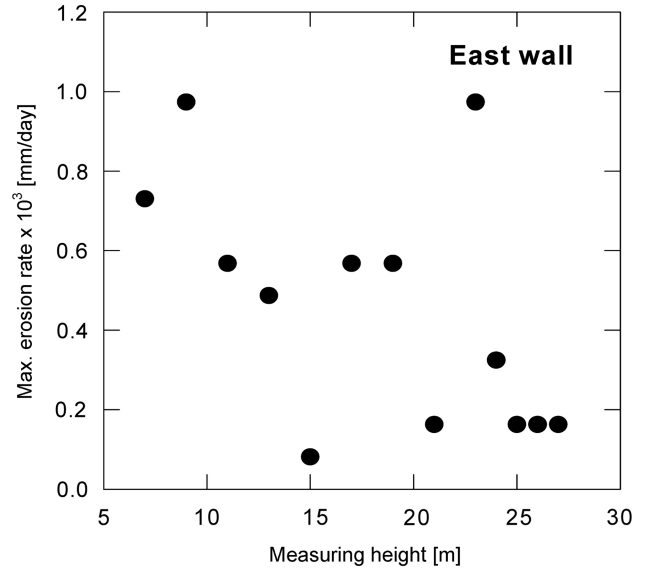


Fig. 3. Maximum tube erosion rate profile of east water wall.

범위에서 하부는 유동층의 splash 영역에 해당되며, 이 영역에서는 고체가 격렬하게 튀어 오르고 전열관에 충돌하여 전열관의 마모를 가속시킨다. 결과적으로 이 이유로 전열벽의 하부에서 전열관의 마모속도가 크며, 높이가 증가함에 따라서 splash 영역의 고체농도가 감소하기 때문에 마모속도는 감소한다. 한편, 프리보드 기체출구 부근에서는 기체 흐름 방향의 변화로 고체의 재순환현상이 나타나고 이로 인하여 고체농도가 증가되며, 고체농도는 높이가 낮아짐에 따라서 감소된다. 결과적으로 이로 인하여 기체출구 부근의 전열관의 마모속도가 커지는 것으로 사료되며, 이 영향은 높이가 낮아짐에 따라서 감소하는 것으로 사료된다.

Fig. 3은 연소로의 동측벽에서 각 측정 높이에서 결정된 최대마모속도를 나타내고 있다. 북측벽과 유사하게 연소로하부(0.97×10⁻³ mm/day)와 프리보드 기체출구부근(0.97×10⁻³ mm/day)에서 큰 마모속도를 나타내며, 중간 높이에서는 대략적으로 최소값을 나타내는 경향이다. 연소로 하부는 유동층의 splash 영역으로 고체입자의 격렬한 거동으로 전열관의 마모가 심하게 발생하는 것으로 사료되었다. 높이가 증가함에 따라서 splash 영역의 고체농도가 감소하기 때문에 마모속도는 감소한다. 한편, 프리보드 기체출구 부근에서는 기체흐름방향의 변화로 고체의 재순환현상이 나타나고 이로 인하여 고체농도가 증가되며, 고체농도는 높이가 낮아짐에 따라서 감소된다. 결과적으로 이로 인하여 기체출구 부근의 전열관의 마모속도가 커지는 것으로 사료되며, 이 영향은 높이가 낮아짐에 따라서 감소하는 것으로 사료된다. 사이클론으로 향하는 기체출구는 벽상부 오른쪽에 접한다.

Fig. 4는 연소로의 후면(남측벽)에서 각 측정 높이에서 결정된 최대마모속도를 나타내고 있다. 북측벽과 유사하게 하부(1.45×10⁻³ mm/day)와 프리보드 기체출구(0.97×10⁻³ mm/day)에서 마모속도가 상대적으로 크게 나타났고, 중간높이에서는 최소값을 갖는 경향을 나타내었다. 이는 유동층의 splash 영역에서 입자의 격렬한 거동으로 전열관의 마모가 심하게 발생하기 때문이며, 높이가 증가할수록 입자의 농도가 감소하기 때문에 마모속도는 감소한다. 프리보드 기체출구 부근에서는 기체흐름방향의 변화로 고체의 재순환현상이 나

타나고 이로 인하여 고체농도가 증가되며, 고체농도는 높이가 낮아짐에 따라서 감소된다. 결과적으로 이로 인하여 기체출구 부근의 전열관의 마모속도가 커지는 것으로 사료되며, 이 영향은 높이가 낮아짐에 따라서 감소하는 것으로 사료된다. 사이클론으로 향하는 두 개의 기체출구는 전열벽 상부 양쪽 모서리에 위치한다. 벽상부의 큰 마모속도는 모두 각 기체출구에 인접한 전열관에서 발생하였다.

Fig. 5는 연소로의 서측벽에서 각 측정 높이에서 결정된 최대마모속도를 나타내고 있다. 북측벽, 동측벽, 남측벽과 유사하게 전열벽하부(1.3×10⁻³ mm/day)와 프리보드 기체출구 부근의 전열관(1.05×10⁻³ mm/day)의 마모속도가 크며 중간 높이에서는 최소값을 나타내고 있다. 다른 벽들과 유사하게 splash 영역에서 고체의 격렬한 거동으로 전열관의 마모가 심하게 발생하며, 프리보드 기체출구

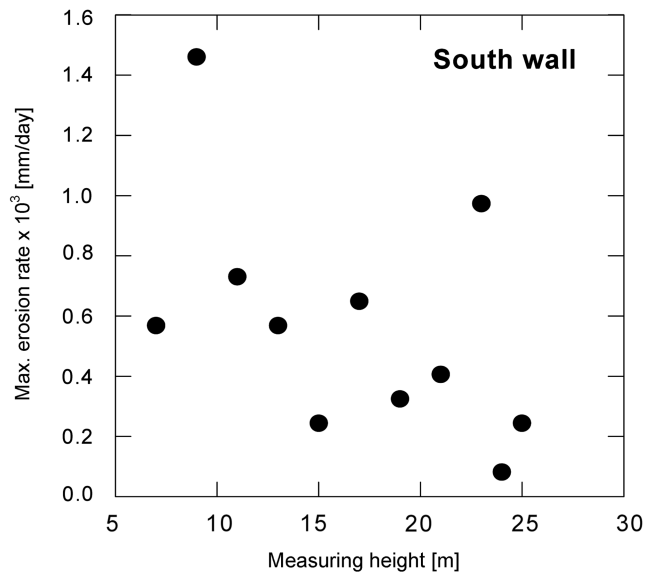


Fig. 4. Maximum tube erosion rate profile of rear(south) water wall.

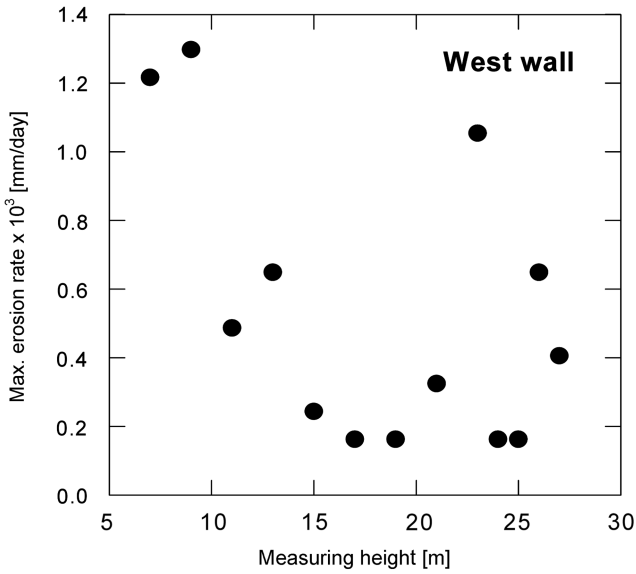


Fig. 5. Maximum tube erosion rate profile of west water wall.

부근에서는 기체흐름방향의 변화에 따른 고체농도의 증가로 마모가 심하게 발생하는 것으로 사료된다. 하부에서는 높이가 증가함에 따라서 고체농도가 감소하기 때문에 마모속도가 감소하며, 프리보드 기체출구 부근에서는 높이가 감소함에 따라서 고체농도가 감소하기 때문에 마모속도는 감소한다. 벽의 상부 좌측에 사이클론으로 향하는 기체출구가 인접해 있다.

Fig. 6은 연소로의 전면(북측벽)에 설치된 wing wall에서 최대마모속도를 나타낸다. 첫 번째 윙월에서는 하부에서 마모속도가 큰 값을 보이며, 높이가 증가할수록 감소하는 경향을 보였다. 그러나 2, 3, 4번째 윙월에서는 하부에서 마모속도가 큰 값을 보이며, 높이가 증가할수록 감소한 후 다시 증가하여 프리보드 기체출구에서 큰 값을 보이는 경향을 나타내었다. 결과적으로 유동층의 splash 영역에서는 입자의 격렬한 거동으로 전열관의 마모가 심하게 발생하는 것으로 나타났다. 한편, 프리보드 기체출구 부근에서는 기체흐름방향의 변화에 따른 고체농도의 증가로 마모가 심하게 발생하는 데 이의 영향은 윙월에 따라 차이가 있는 것으로 나타났다. 즉 두 개의 기체출구로 향하는 기체 및 고체의 편향흐름으로 인하여 횡방향으로 고체농도의 차이가 발생하며, 이의 영향으로(동측벽에 인접한 출구로 향하는 유량이 더 크기 때문에) 첫 번째 윙월보다는 2, 3, 4번째 윙월에서 마모속도가 더 큰 것으로 예측되었다. 한편, 중앙에 위치하고 있는 두 번째와 세 번째 wing wall의 최대마모속도값이 전체 높이에서 다소 크게 나타나고 있는 점이 주목할 만하다. 이것은 기체속도가 양측벽에 가까운 단면에서 보다는 중앙단면에서 더 빨라서 마모속도가 더 크기 때문인 것으로 설명될 수 있었다.

5. 결 론

상용 순환 유동층 연소로의 수관벽에서 전열관의 마모속도를 측정 및 분석하였다. Splash 영역에서 전열관의 마모가 심하게 발생하며, 이 영역에서 마모속도는 높이가 증가함에 따라서 감소한다. 그러나 마모속도는 다시 증가하여 프리보드 기체출구에서 큰 값을 나타낸다. 윙월(wing wall)에서도 splash 영역에서 마모속도가 크게 나

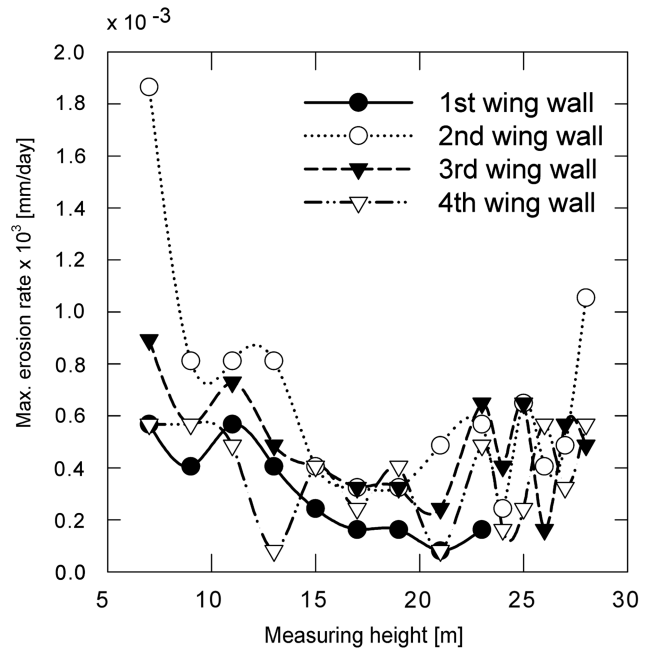


Fig. 6. Maximum tube erosion rate profile of wing walls(a)-●-: 1st wing wall, -○- : 2nd wing wall, -▼- : 3rd wing wall, -▽- : 4th wing wall).

타났고, 높이가 증가함에 따라서 감소하였으며, 프리보드 기체출구에서는 기체 및 고체 흐름의 편향성으로 인하여 마모속도의 차이가 나타나는 것으로 사료되었다. 연소로 단면의 중앙에 위치한 수관벽에서 마모속도가 더 크게 나타났다.

감 사

본 연구는 산업자원부 에너지관리공단의 청정에너지기술개발사업의 지원으로 수행된 과제임을 밝힙니다.

참고문헌

1. Stringer, J. and Stallings, J., "Material Issues in Circulating Fluidized-Bed Combustors," Proc. of the 11th Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion, 589-608(1991).
2. Seitzinger, D. L., "Atmospheric Fluidized Bed Combustion Gas Erosion Solution," Proc. of the 13th Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion, 585-595(1995).
3. Zhao, C., Chang, Z., Jin, H. and Zhang, L., "Effects of Fluidization Mode Transition on Erosion of Immersed Tubes in Pressurized Fluidized Bed," Proc. of the 16th Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion, FBC01-0181(2001).
4. Rogers, W. A. and Boyle, E. J., "Water Prediction in a Fluidized Bed Combustor," Proc. of the 1993 Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion, 811-817(1993).
5. Lindsley, B. A., Marder, A. R. and Lewnard, J. J., "The Effect of FBC particle Characteristics on Erosion of a Low Alloy Steel," Proc. of the 1993 Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion, 803-809(1993).
6. Ninham, A. J., Entwisle, M. J., Hutchings, I. M. and Little, J. A.,

- “A Laboratory-Scale Fluidized Bed Rig for High Temperature Tube Wastage Studies;” Proc. of Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion, 583-589(1989).
7. Hou, P. Y., Sum, J. T., Niu, Y. and Stringer, J., “HCl Effect on In-Bed Tube Wastage in Bubbling Fluidized Bed, a Laboratory Study under Simulated Dense Particle Impact Conditions;” Proc. of the 15th Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion, FBC 99-0137(1999).
 8. Sethi, V. K., Barber, S. A., Sherman, S. K., Gonzalez, R. A., Puentes, E. and Stencel, J. M., “Wear-Corrosion Synergism in Chlorine-Containing Coal Combustion Environments;” Proc. of the 10th Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion, 563-574(1989).
 9. Yamamoto, K., Kajigaya, I., Sonoya, K. and Tsuji, Y., “Material Selection for the Super-Heater and Re-Heater Tubes on PFBC, Based on the Results of Laboratory Test and Ex-Serviced Materials Survey;” Proc. of the 16th Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion, FBC01-0191(2001).
 10. Vincent, R. Q., Canonico, D. A. and Wheeldon, J. M., “An Evaluation Program for Metal Wastage in Fluidized Bed Combustors;” Proc. of the 1989 Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion, 927-935(1989).
 11. Holtzer, G. J. and Rademakers, P. L. F., “Studies on 90 MWth AKZO and 4 MWth TNO FBS Show Excellent Erosion-Corrosion Results;” Proc. of the 1991 Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion, 743-753(1991).
 12. Han, K. H., “Erosion Characteristics of In-Bed Tubes in Bubbling Fluidized Bed Cold Mode Reactor;” Master Dissertation, Chungnam National University, Korea(1995).