

상용 순환 유동층 연소로 수관벽 전열관 두께 지도

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 1월 18일 접수, 2005년 4월 15일 채택)

A Tube Thickness Map 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-Done 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, Gyeonggi-do 445-743, Korea

***SK Chemical Co., 600, Hwangshung-dong, 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 January 2005; accepted 15 April 2005)

요 약

상용 순환 유동층 연소로(200 ton steam/hr, 4.97×9.90×28.98 m)의 수관벽에서 전열관의 두께분포를 측정하였으며, 전열관 마모를 고찰하였다. 전열관의 두께는 초음파 측정방법을 이용하여 측정되었다. Splash 영역에서 원형을 포함한 모든 수관벽 전열관의 마모가 심하게 발생하였다. 전면과 후면의 수관벽 하부 옆면벽에 가까운 양면에서 마모가 더 큰 것으로 나타났다. 기체출구 부근벽의 일부 전열관에서 상당한 전열관 마모가 발생되었다. 원형에서는 연소로 단면의 내부로 들어올수록 전열관의 마모가 증가되는 것으로 나타났다.

Abstract – The tube thickness map of water wall has been measured in a commercial circulating fluidized bed combustor (200 ton steam/hr, 4.97×9.90×28.98 m height) with ultrasonic method and tube erosion has been discussed. Severe tube erosion took place in the splash region on all waterwalls including wingwalls. Erosion on the lower part of front and rear walls, close to both side walls, was more serious than other places. Erosion of some tubes around the gas exit was found to be noticeable. Tube erosion increased on the wingwall as the position of the tube become closer to the center of the combustor crosssection.

Key words: Tube Thickness, Tube Erosion, Circulating Fluidized Bed, Combustor, Erosion Map

1. 서 론

유동층 연소로는 다양한 연료를 높은 연소효율과 열 전달률을 유지하면서 연소할 수 있고, 석회석이나 백운석 등을 유동매체인 충물질로 사용하여 연소기체 중 SO₂를 직접 흡수하여 제거할 수 있

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

유동층 연소로에서는 충물질 고체 입자가 격렬히 혼합되고 거동하므로 전열면의 경계층을 깨어서 전열효과를 극대화 한다. 반면에 전열관과 유동매체의 충돌접촉으로 인하여 전열관 표면에 마모가 발생한다. 이로 인하여 충 내에 설치한 전열관의 계속적인 보수 및 유지 관리가 필요하다. 유동층 연소로에서 마모 문제는 충 내 전열

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

관, 로 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(Fig. 1). 이중 가장 중요하게 대두되는 부분은 로 내 수관벽이다.

마모는 여러 가지 원인에 의해 발생되며, 유속, 연소로 및 전열관의 온도 등과 같은 운전 변수의 영향과 석탄, 석탄회, 탈황제, 충물질 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 수관 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 수가 증가함에 따라 증가하다가 일정한 유동화 수에서 최대값을 보인 후 감소하는 것으로 보고하였다.

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 밀도가 증가하는 경우에도 입경이 증가하는 경우와 유사한 효과를 기대할 수 있다. 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 Cl 함량은 채탄 깊이가 증가함에 따라 증가하는 것으로 보고되었으며, 대부분의 Cl은 석탄 중의 유기물에 포함되어 있어서 가열하면 HCl의 형태로 증발되는 것으로 보고되었다[7]. Hou 등[7]은 전열관 마모에 대한 Cl의 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 Cl 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. Holtzer 와 Redmarkers[11]은 전열관의 표면온도가 일정값 이상에서는 온도가 증가함에 따라서 전열관의 마모속도는 감소하는 것으로 보고하였다.

마모에 대한 대책은 정기적인 점검과 발견 후의 수리 및 교체, 마모를 줄이기 위한 장치 구조 및 조업조건의 개선에 대한 노력이 산발적으로 이루어지고 있으나 연소로 관리측면에서 체계적인 대응책에 대한 보고는 아직 미흡한 것으로 판단된다. 마모에 대한 대책은 수관벽의 경우에 덧씌워서 보호하기(용접, 용사육성), 벽의 구석부분은 모퉁이를 둥글게 보수하기(내화물 시공), 기타 다른 부위들은 주로 국부적 코팅이나 내화물 설치 및 설제상의 문제점 보완, 조업조건의 개선에 의한 완화 등으로 이루어졌다.

한편, 수관벽에서 발생하는 마모의 특성을 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 순환유동층보일러의 연소로에서 수관벽의 마모특성을 고찰하였다. 측정된 수관벽 전열관의 두께자료를 분석하여 마모지도를 구하고 연소로 내에서 발생하는 마모특성에 대한 정성적인 분석을 수행하였다.

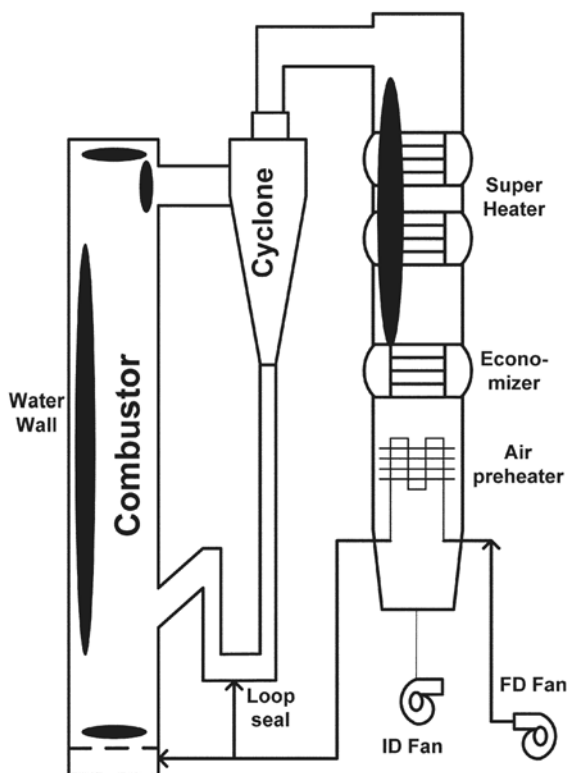


Fig. 1. Process scheme of a Ahlstrom boiler. ●: erosion spots.

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

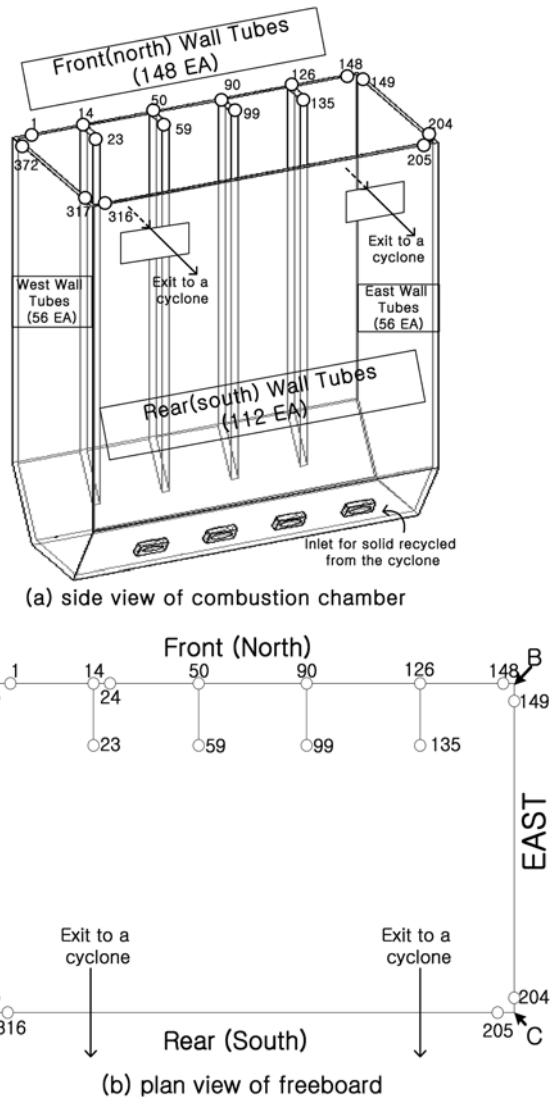


Fig. 2. Layout of water wall tubes in the combustor.

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)

Ahlstrom사 형태이다(Fig. 1). 보일러 공정은 연소로, 2개의 고온 사이클론, 루프실(loopseal) 그리고 대류전열부로 구성되며, 외부열교환기를 사용하지 않고 연소로의 벽면을 통하여 주된 전열을 하는 것이 특징이다. Fig. 2는 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 윙월(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. 2에 나타난 바와 같이 연소로의 전열관은 전면(북측벽)의 좌편 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 정면(내측벽면을 기준으로 90° 위치)으로 하였고, 연소로의 각 면에 있는 모든 전열관을 대상으로 하여 측방향으로 여러 위치에서 측정하여 높이에 따른 전열관 두께 분포를 관찰하였다. 본 보일러는 1989년부터 가동되었으며 1년 단위로 정기보수를 통하여 전열관이 점검되고 보수된다. 본 자료는 대표적인 자료로서 1999-2000년 사이 1년간 가동 후 점검된 자료이다.

3. 결과 및 고찰

전열관 두께 자료는 Fig. 2와 같은 순서로 매겨진 전열관 번호와 측정위치를 각각 x축과 y축으로 하고, 전열관 두께를 z축으로 하여

Table 2. Equations for horizontal distance of center of a tube in Fig. 2(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+1232
		60-90	(tube no. -60)×88+3696
		100-126	(tube no. -100)×88+6424
		136-148	(tube no. -136)×88+8800
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
		149-204	(tube no. -149)×88+44
East	B→C	205-316	(tube no. -205)×88+44
South	C→D	317-372	(tube no. -317)×88+44
West	D→A		

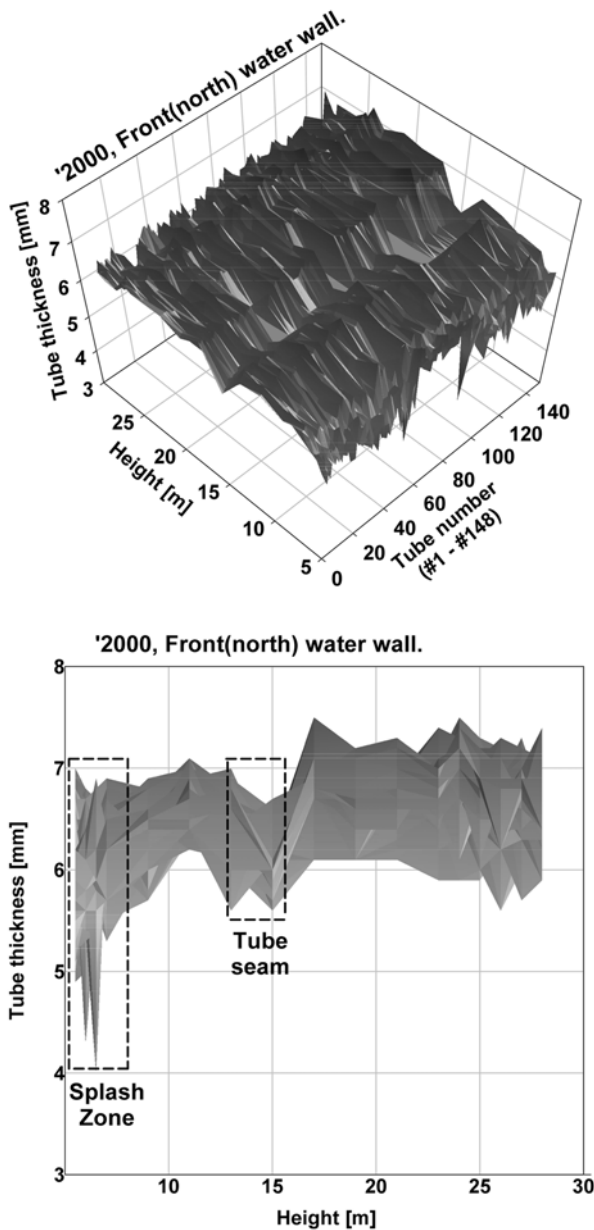


Fig. 3. Tube thickness map of front(north) water wall(including wing walls).

측정 높이와 전열관 번호에 따른 두께 분포로 나타내었다. x축 방향으로 거리는 Table 2의 요령으로 환산하여 구할 수 있다.

Fig. 3은 측정된 북쪽벽(연소로 앞면)의 전열관 두께 분포를 나타낸다. 앞면에는 4세트의 wing wall(전열관 번호: 15-23; 51-59; 91-99; 127-135)이 있다. 그림에서 나타내는 것과 같이 두께분포는 다소의 굴곡을 나타낸다. 이 굴곡 속에는 전열관 제작시의 두께 편차의 영향이 포함되어 있을 것으로 추측되지만 벽의 하부와 높이 약 15 m에서 수평방향으로 두께가 두드러지게 얇은 부분이 나타났다. 기체 분배기로부터 높이 3.5 m까지는 내화물벽으로 전열관이 보호되어 있으며, 이상의 높이에서는 전열관벽이 노출되어 있다. 측정범위에서 하부는 유동층의 splash 영역에 해당되며, 이 영역에서는 고체가 격렬하게 튀어 오르고 전열관에 충돌하여 전열관의 마모를 가속시킨다. Splash 영역은 연소로 바닥으로부터 약 7 m 높이까지 이르렀

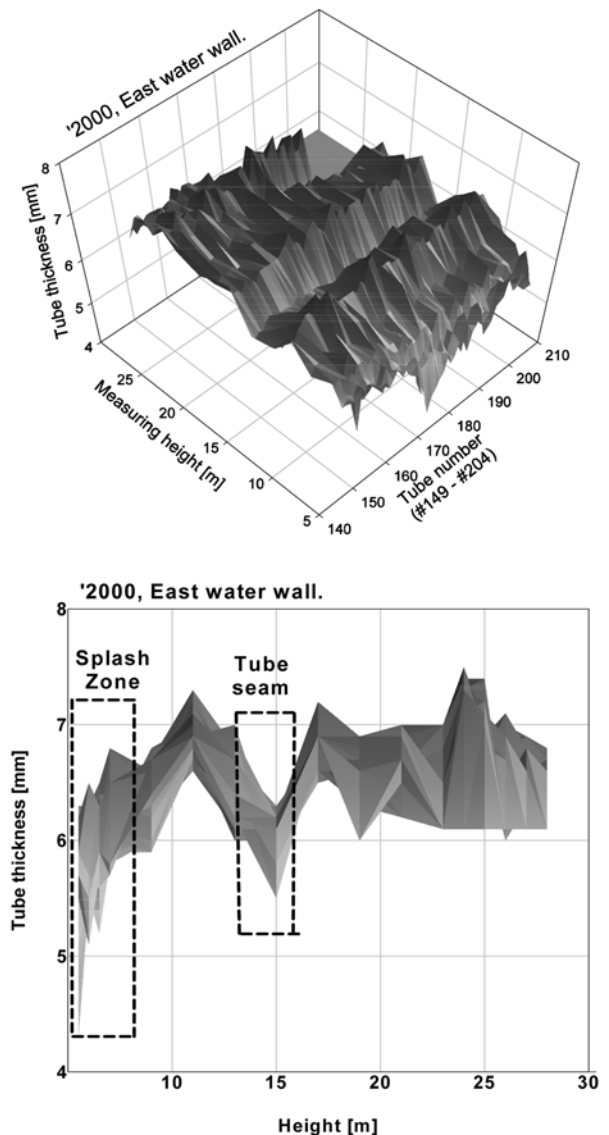


Fig. 4. Tube thickness map of east water wall.

다. 결과적으로 이 이유로 전열벽의 하부에서 전열관의 두께가 더 얇게 나타나는 것으로 설명될 수 있다. 한편, 전열벽의 양쪽 하부에서 대칭으로 전열관 두께가 더 얇게 나타나고 있다. 이는 사이클론의 출구가 남측벽의 양끝으로 위치하여 재순환되는 입자의 흐름이 중심보다는 동서로 치우치기 때문인 것으로 사료되었다. 높이 약 15 m에서 횡방향으로 나타나는 전열관 두께가 얇은 띠는 마모에 의한 것이 아니라 전열관의 이음매에서 두께가 얇기 때문인 것으로 확인되었다.

Fig. 4는 연소로 동측벽을 나타내고 있는데 북측벽과 유사하게 측정높이 약 15 m 근처에서 상대적으로 얇은 부분이 형성되고 있으며, 하부의 두께가 더 얇은 것으로 나타났다. 측정범위의 하부는 유동층의 splash 영역으로 고체입자의 격렬한 거동으로 전열관의 마모가 심하게 발생하는 것으로 사료되었다. Splash 영역은 연소로 바닥으로부터 약 7 m까지 이르는 것으로 나타났다. 높이 약 15 m에서 횡방향으로 나타나는 전열관 두께가 얇은 띠는 전열관의 이음매인 것으로 확인되었다. 그림에서 오른쪽 상부의 자료가 빈 곳

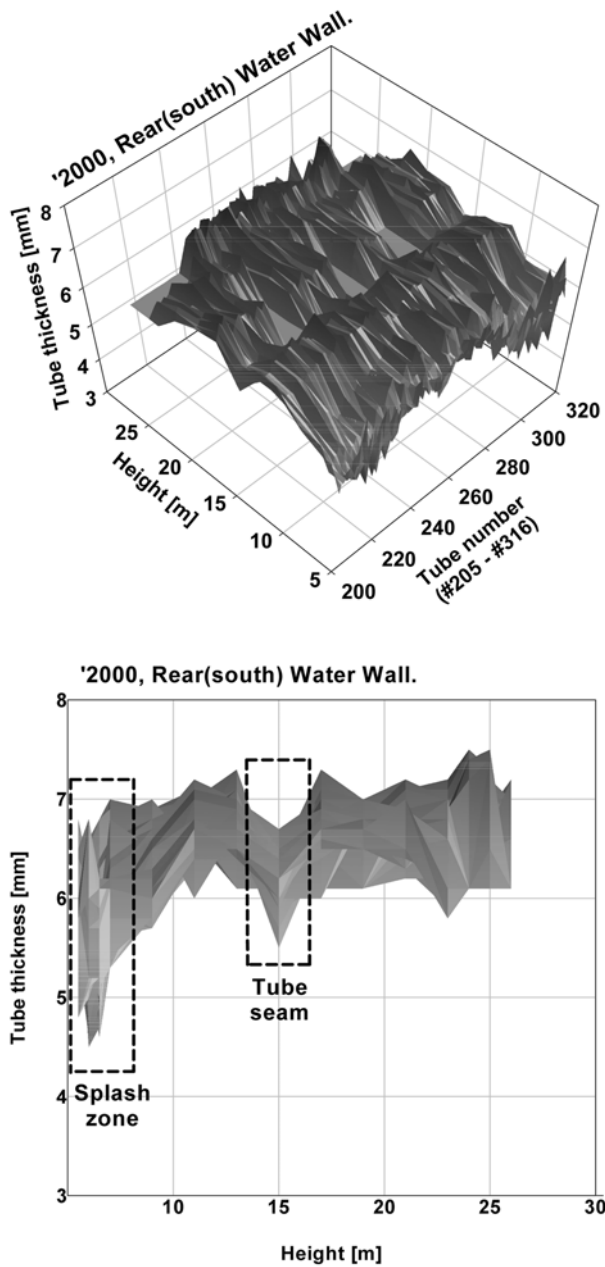


Fig. 5. Tube thickness map of rear(south) water wall.

은 사이클론으로 향하는 기체출구의 측벽으로 내화물로 보호된 부분이다.

Fig. 5는 연소로 남측벽의 전열관을 나타내고 있다. 북측벽과 유사하게 하부의 두께가 상대적으로 얇게 나타났고, 양쪽 하부 모서리가 더 얇은 경향을 보였으며, 측정높이 15 m 근처에서 상대적으로 얇은 부분이 형성되고 있다. 유동층의 splash 영역에서 입자의 격렬한 거동으로 전열관의 마모가 심하게 발생하는 것으로 나타났으며, splash 영역의 높이는 약 7 m에 이르렀다. 하부 양편에서 마모가 더 큰 것은 사이클론의 출구가 남측벽의 양끝으로 위치하여 재순환되는 입자의 흐름이 중심보다는 동서로 치우치기 때문인 것으로 사료되었다. 높이 약 15 m에서 횡방향으로 나타나는 전열관 두께가 얇은 띠는 전열관의 이음매인 것으로 확인되었다. 두 개의

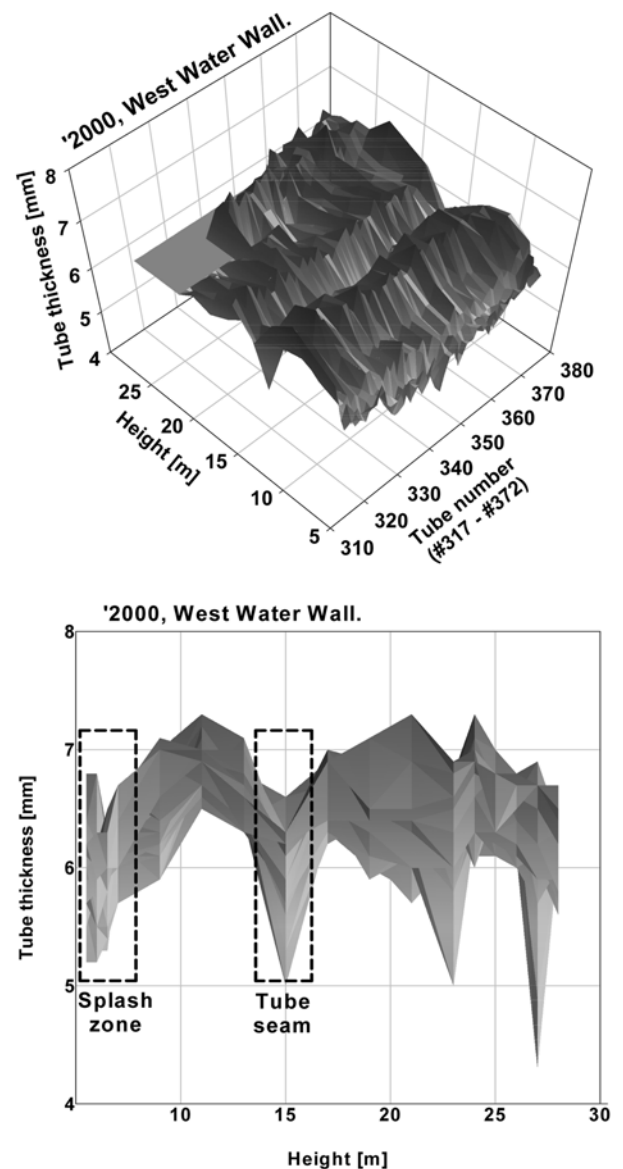


Fig. 6. Tube thickness map of west water wall.

사이클론으로 향하는 기체출구는 상부 양쪽 모서리에 위치한다.

Fig. 6는 연소로 서측벽 전열관을 나타내고 있는데 측정 높이 약 15 m 근처에서 상대적으로 얇은 부분이 형성되어 있으며, 북측벽, 동측벽, 남측벽과 유사하게 하부의 두께가 상대적으로 얇게 형성되어 있음을 알 수 있었다. 다른 벽들과 유사하게 splash 영역에서 고체의 격렬한 거동으로 전열관의 마모가 심하게 발생하며, splash 영역은 높이 약 7 m에까지 이르렀다. 높이 약 15 m에서 횡방향으로 나타나는 전열관 두께가 얇은 띠는 전열관의 이음매인 것으로 확인되었다. 벽의 좌측 상부의 자료가 없는 부분은 사이클론으로 향하는 기체출구의 측벽으로 내화재로 보호된 부분이다. 한편, 다른 벽에서는 약하게 나타나지만 서측벽에서는 상부 약 23 m 높이와 27 m 높이에서 두께가 매우 얇게 나타나는 전열관이 있었다. 이는 기체출구부근에서 고체의 농도가 커지고, 순환흐름이 형성되기 때문에 발생하는 것으로 예측된다. 양쪽 사이클론으로 나가는 유체의 흐름이 완벽하게 대칭을 이루지 못

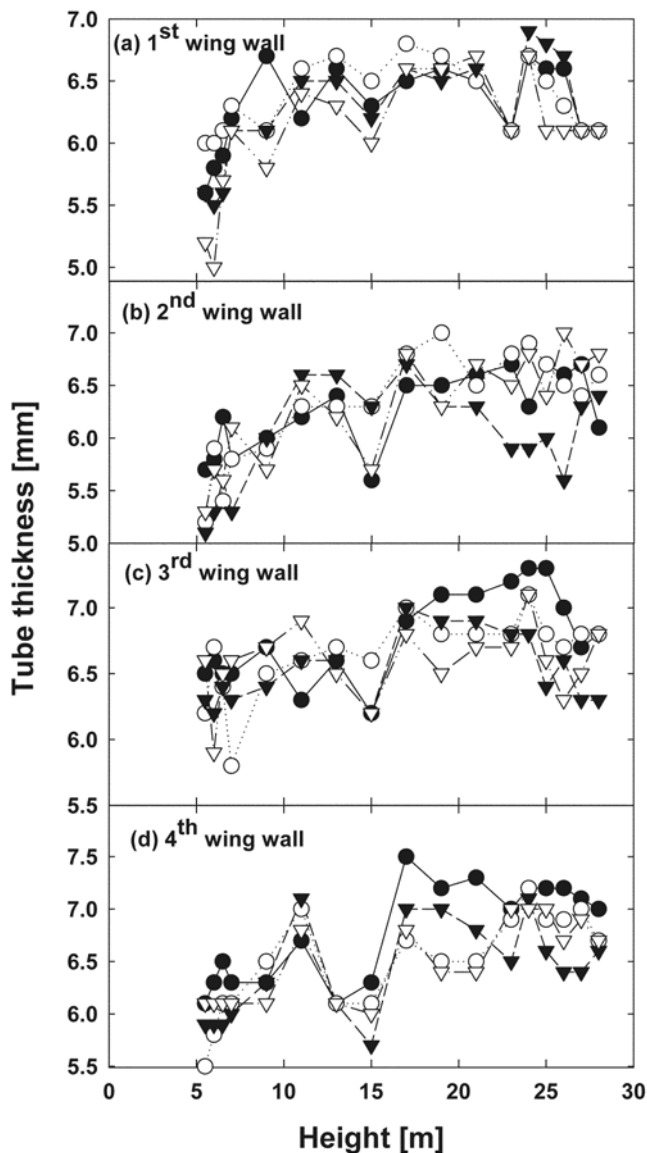


Fig. 7. Tube thickness profile of wing walls.

((a) -●-: tube no. 14, -○-: tube no. 17, -▼-: tube no. 20, -▽-: tube no. 23; (b) -●-: tube no. 50, -○-: tube no. 53, -▼-: tube no. 56, -▽-: tube no. 59; (c) -●-: tube no. 90, -○-: tube no. 93, -▼-: tube no. 96, -▽-: tube no. 99; (d) -●-: tube no. 126, -○-: tube no. 129, -▼-: tube no. 132, -▽-: tube no. 135).

하기 때문에 고체의 농도도 불균형을 이루며, 이 경우에는 서쪽 벽에 인접한 기체출구로 고체흐름이 동쪽편보다 더 컸던 것으로 사료된다.

Fig. 7은 북측벽에 위치한 윙월(wing wall)의 전열관 두께 자료를 나타내고 있다. 다른 벽의 전열관과 유사하게 하부의 두께가 상대적으로 얇게 나타났고, 측정높이 15 m 근처에서 상대적으로 얇은 부분이 형성되고 있다. 유동층의 splash 영역에서 입자의 격렬한 거동으로 전열관의 마모가 심하게 발생하는 것으로 나타났으며, splash 영역의 높이는 약 7 m에 이르렀다. 높이 약 15 m에서 횡방향으로 나타나는 전열관 두께가 얇은 띠는 전열관의 이음매인 것으로 확인되었다. 대략적인 경향으로 전열관 하부에서 두께는 연소로 내부로 들어올수록 더 얇아지는 것으로 나타났다. 이는 연소

로 단면의 중심에 가까울수록 유체의 속도가 증가되고 동시에 비산되는 입자의 속도가 증가되기 때문으로 사료된다.

5. 결 론

상용 순환 유동층 연소로의 수관벽에서 전열관의 두께분포를 측정 및 분석하였다. Splash 영역에서 고체의 격렬한 거동으로 전열관의 마모가 심하게 발생하며, splash 영역은 높이 약 7 m에까지 이르는 것으로 판단되었다. 사이클론 출구가 위치한 벽과 마주보는 벽의 하부 양편에서 마모가 더 큰 것으로 나타났다. 이는 사이클론의 출구가 벽의 양끝으로 위치하여 재순환되는 입자의 흐름이 중심보다는 양끝으로 치우치기 때문인 것으로 사료되었다. 프리보드 기체출구 부근벽의 일부 전열관에서 심한 전열관 마모가 발생되었다. 이는 프리보드 기체출구부근에서 고체의 농도가 커지고, 순환흐름이 형성되기 때문인 것으로 판단되었다. 윙월(wing wall)에서도 splash 영역에서 마모가 심하게 나타났으며, 연소로 내부로 들어올수록 더 얇아지는 것으로 나타났다.

감 사

본 연구는 산업자원부 에너지관리공단의 청정에너지기술개발사업의 지원으로 수행된 과제입니다.

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).