

< 논 문 >

파울링 예측을 위한 가스-입자 이상 유동 해석 (1)

— 고온 풍동 설계 및 성능실험 —

하만영* · 이대래* · 안승표* · 김경천* · 이재근* · 김귀순** · 박호동***

(1996년 6월 25일 접수)

Particulate Two-Phase Flow Analysis for Fouling Prediction (I)

— Design of Hot Wind Tunnel and Its Performance Experiment —

M.Y. Ha, D.R. Lee, S.P. Ahn, K.C. Kim, K.S Kim, J.K. Lee and H.D. Park

Key Words : Fouling(파울링), Gas-Particle Two Phase Flow(기체-고체 이상 유동), Hot Wind Tunnel(고온 풍동), Experimental Study(실험적 연구)

Abstract

We designed the hot wind tunnel to reproduce the conditions of utility boiler and carried out its performance test, in order to investigate the particulate two-phase flow behaviour, the fouling and heat transfer characteristics to the heat exchanger. The hot wind tunnel introduces the control system to control the temperature in the test section. The particle is injected into the hot gas stream. The fouling probe (cylindrical tube) is positioned normal to the particulate gas-particle two-phase flow and cooled by the air. The temperature of gas and cooling air, and temperature in the fouling probe are measured as a function of time, giving the local and averaged heat transfer and fouling factor. The shape of particulate deposition adhered to the fouling probe is also observed.

기 호 설 명

A_0	: 프루브관의 바깥 표면적	$(R_f)_{avg}$: 평균 파울링 저항 계수
C_p	: 정압 비열	$(R_f)_{local}$: 국소 파울링 저항 계수
d_i	: 프루브관의 내경	T_{ai}	: 냉각 공기 입구 온도
d_0	: 프루브관의 외경	T_{ao}	: 냉각 공기 출구 온도
h_{rc}	: 대류 및 복사에 의한 열전달 계수	T_g	: 연소가스의 온도
k	: 프루브관의 열전도도	T_{wi}	: 프루브관의 내면 온도
L	: 프루브관의 길이	T_{wo}	: 프루브관의 외면 온도
\dot{m}	: 공기의 질량 유량	U	: 총괄 열전달 계수
\dot{Q}_{avg}	: 평균 열전달량	a	: 공기
\dot{Q}_{local}	: 국소 열전달량	ao	: 공기 출구
		ai	: 공기 입구
		c	: 표면이 깨끗한 상태
		f	: 파울링
		p	: 압력
		rc	: 대류 및 복사

*부산대학교 공과대학 기계공학부

**회원, 부산대학교 공과대학 항공우주공학과

***회원, 한국중공업주식회사 기술연구원 열유체연구팀

1. 서 론

화력발전소에서 가지고 있는 문제점 중의 하나는 석탄 속에 포함되어 있는 연소되지 않는 물질 즉, 재(ash)에 의해서 발생하는 문제이다. 석탄이 분쇄기에서 미분화되어, 연소용 공기와 함께 버너로 보내어지고, 버너에서 보일러 내부로 분사되어 미분탄의 연소가 이루어진다. 이때 미분탄 속에 포함되어 있는 재성분은 불연성 성분이므로 연소되지 않고 연소가스와 함께 연도를 따라서 움직이게 된다. 복사열 및 매우 높은 연소가스온도로 인하여 연소실의 온도가 재의 용점보다 높은 영역에서는 재의 입자가 용융된 상태로 연소가스의 흐름을 따라 지나가다가 보일러의 수관벽에 부딪칠 때 급랭하면서 응집되어 수관벽에 부착 및 퇴적하여 수관벽으로의 열전달을 막게 되는데, 이러한 현상을 슬래깅(slagging)이라고 한다. 재가 연소가스와 함께 대류전열면을 통과하면서 과열기, 재열기 등에 응축, 부착하여 굳어지는 현상을 파울링(fouling)이라 하며, 이러한 것에 영향을 주는 인자로는 열전달 표면의 형상, 열전달 표면의 물질, 열교환기 벽면의 온도, 퇴적물의 온도, 열전달 표면을 지나는 유체의 속도 등이 있다. 열교환기에 쌓인 재는 열교환기 표면의 물질과 화학적 반응하여 부식(corrosion)을 일으키게 되며 이는 석탄 연소시 유헤분과 알칼리 성분이 많이 함유된 탄일수록 발생하기 쉬우며 고온부의 과열기, 재열기의 가스측에는 고온 부식이, 저온부인 절탄기, 공기예열기에서는 저온 부식이 주로 발생한다. 또한, 연소가스와 함께 움직이는 재성분이 경도가 클 경우에는 열교환기관에 충돌하여 국부적으로 충격 하중을 가함으로써 또한 침식(erosion)을 일으키게 된다. 따라서 열교환기관에 재가 부착되면 관으로의 열전달이 현저히 저하되어 발전소의 효율을 낮추게 될뿐만 아니라 심할 경우 보일러 관의 과열로 인한 과열사고로 전발전소를 멈춘 상태에서 상당한 기간에 걸친 개조공사를 실시하여야 한다. 이로 인한 에너지 손실 및 보수, 개조공사에 소요되는 경비가 막대하다.

파울링 형성 과정은 시작 과정, 표면으로의 전달 과정, 부착 과정, 변형 및 aging 과정, 제거 및 재부착 과정으로 되어 있다.^(1,2) 깨끗한 열교환기에

서 부착이 일어나서 열교환기의 열저항을 증가시키는 데에는 시간지연이 존재한다. 이 시간지연 또는 시작 과정 동안에 파울링을 조장시키는 조건이 열교환기의 표면에 형성되어진다. 열전달에서 열저항의 초기 증가는 실질적으로 거친 초기 부착물이 점성 경계층을 부수는 인자으로써 작용하기 때문에 발생되어진다. 파울링에서의 입자 전달 현상은 여러 가지 메커니즘이 파울링 매체를 표면으로의 이동을 증가시킨다는 것이 여러 연구자들에 의하여 입증되어 왔다. 이러한 전달 메커니즘에는 브라운확산(Brownian diffusion), 열영동력(thermophoresis), 관성충돌(inertial impaction), 난류확산, 중력의 영향, 전기장의 영향 등이 있다.^(3~5)

일단 열교환기에서 부착 과정이 일어나면 표면에서는 물리적, 화학적 변화가 일어난다. 파울링층의 제거는 초기층이 부착되면서 시작된다. 제거는 파울링층의 부서짐, 침식, 열 해리에 의해서 일어난다.⁽³⁾ 유체의 속도는 파울링의 행동에 영향을 미치는 중요한 인자 중의 하나이다. 대부분의 보고서에 의하면 파울링 성장률은 속도가 증가함에 따라 감소한다고 보고하고 있다. 속도가 증가하면 관군 표면에 부착되는 입자의 양 및 부착된 입자의 제거되는 양이 증가한다. 그러나 제거되는 양이 부착되는 양보다 크므로, 관군에 부착되는 입자의 양은 속도가 증가함에 따라 감소하게 된다.⁽⁶⁾ 유체의 온도가 증가할수록 화학적 반응률 및 결정화율이 증가한다. 유체의 온도가 낮으면 화학적 반응률 및 결정화율이 아주 낮으므로 입자의 표면에 부착되는 입자의 양은 아주 적으나, 어느 임계온도 이상의 온도에서는 이러한 반응이 급격히 일어나 파울링 저항은 급격히 증가를 하게 된다. 표면온도는 결정화의 정도에 영향을 미치며, 또한 부착물의 강도에도 영향을 준다. 따라서 간접적으로 제거과정에서 관군의 표면온도가 영향을 미치고 있다.⁽⁷⁾ 또한 열교환기 표면에서 부착물이 유동의 역방향으로 형성되면서 세 가지의 분리된 층으로 구성되어진다. 내피층과 외피층, 중간층을 형성하는데 형성 입자에 따라서 파울링의 정도가 달라질 것으로 기대된다. 따라서 각 층의 결정 구조를 분석하여 파울링에 미치는 영향을 규명하여야 한다. 석탄을 연료로 사용하는 발전용 보일러에서 연소가스와 분진(플라이애쉬)의 운동특성은 발전소의 성능에 지대한 영향을 미치고 있으나 실험상의 어려움 및 매우 복잡한 메커니즘 때문에 많은 연구가 이루어지지 않고 있

다, 이에 따라 본 연구에서는 가스·입자 이상유동에서의 플라이 애쉬 입자의 거동, 파울링 특성 및 열전달 특성 규명을 목적으로 실제 보일러에서와 동일한 조건을 재생할 수 있는 실험 장치(고온용 풍동)를 설계, 제작하여 다양한 실험을 수행한다. 고온용 풍동의 실험구간에서 온도를 제어할 수 있는 제어시스템을 도입하고, 아울러 재분사장치를 설계, 제작하여 고온풍동내의 연소 가스 중에 입자를 분사시킴으로써 실험구간에서의 파울링 특성을 관찰하도록 하였다. 또한 고온에서 파울링 입자를 연소가스 중에 분사시켜 실험 구간에 설치되어 있는 열교환기관에서의 파울링을 일으키는 입자의 부착특성을 조사함으로써 시스템의 성능을 평가한다.

2. 실험 장치(고온풍동) 및 방법

Fig. 1은 현재의 실험에 사용된 고온용 풍동의 설계도를 보여주고 있다. 풍동의 전체 길이가 10.78m이고, 높이가 2m이며 또한 각각의 부분은 플랜지로 연결되어 있어 조립이 용이하도록 하였다. 본 실험장치를 구성하는 주요 부분은 연소실, 온도제어부, 입자 발생 장치, 입자 주입부 및 수축부, 실험구간, 후 처리부이다. 고온의 분위기 온도 내에서 입자의 용융을 돕기 위해 연소 내부의 열을 차단할 목적으로 내화물로 단열시켜서 연돌 까지 고온의 연소가스가 나가도록 하였다.

연소실은 고온의 연소가스를 발생시키는 부분으로써 여기에는 버너와 주연소용 송풍기 및 2차 공기용 송풍기로 구성되어 있다. 가스 및 오일을 검용으로 사용할 수 있는 버너의 출력은 110t/h이며, 화염의 길이는 2m 이고, 화염의 폭은 0.7m이다. 주연소용 송풍기는 연소시에 사용하며 2차 공기용 송풍기는 시험구간에서 요구하는 속도가 나오지 않을 경우를 대비하여 설치하였다. 연소실의 크기는 길이가 2m이고 높이가 2m로 내부는 내화벽돌과 캐스터블에 의해서 주위와 단열되어 있으며 화염의 크기에 의해서 연소실의 크기를 2m로 하였다. 연소실은 직경이 1m인 원형의 형상을 하고 있으며 출구 부분에서 원형의 형상이 사각의 형상으로 변하게 되어 있다.

Fig. 2는 공기 및 연료의 배관도를 나타내고 있다. 연료는 연료공기 조절장치에 의해서 공기의 양에 비례하여 연료가 들어가도록하고 있으며 송풍기의 유량은 콘트롤모터에 의해서 자동 및 수동으로

버터플라이 밸브를 작동시킴으로써 조절하도록되어 있다. 또한 화염의 감지를 위해서 버너의 입구 부위에 화염 감지기를 설치하여 작동중에 화염이 꺼질 경우 화염 감지기에서의 신호가 오일 솔레노이드 밸브로 들어가 오일 솔레노이드 밸브의 작동을 멈추도록 함으로써 연료의 공급을 중단하게 한다. 공기는 주연소용 송풍기로부터 들어와서 분사용 공기와 연소용 공기로 나누어져서 들어오게 된다. 연소용 공기는 콘트롤모터에 의해서 연소용 공기제어 밸브를 제어하여 연소용 공기의 양을 자동적으로 조절하게 되며, 이 곳을 지나온 공기는 수동 버터플라이 밸브에 의해서 다시 조절이 되어 버너로 보내어지고, 분사용 공기는 분사용 수동 버터플라이 밸브를 거쳐 버너로 보내어진다.

온도는 온도 지시 조절기에서 목표 값이 설정되어지면 온도 지시 조절기에서 자동적으로 콘트롤모터를 제어하여 버터플라이 밸브를 열면서 공기의 양을 조절하게 되고 또한 연료 공기 조절기를 제어하여 연료의 양을 조절하게 된다. 이렇게 조절되어

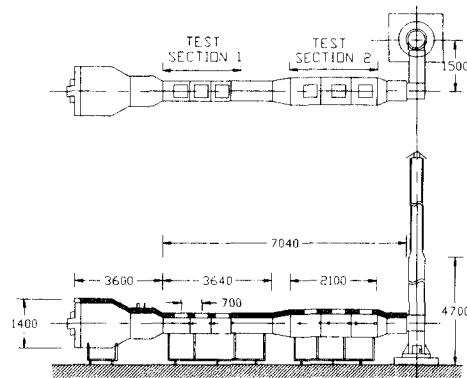
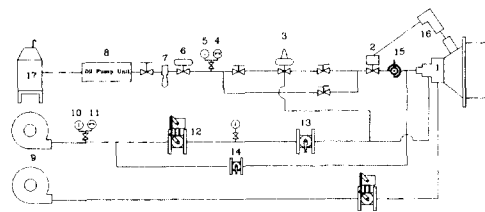


Fig. 1 A drawing of hot wind tunnel



- 1 Nozzle-Mix Oil Burner
- 2 Main Oil Solenoid Valve
- 3 Air/Oil Ratio Control
- 4 Oil Pressure Switch (Low)
- 5 Oil Pressure Gauge
- 6 Main Oil Pressure Regulator
- 7 Oil Filter
- 8 Oil Pump Unit
- 9 Turbo Blower(1)
- 10 Air Pressure Gauge
- 11 Air Pressure Switch(Low)
- 12 Air Control Valve
- 13 Manual Butterfly valve
- 14 Manual Butterfly valve
- 15 Micro coke
- 16 Ultraviolet flame detector
- 17 Oil tank

Fig. 2 A piping system of fuel and air supply

진 연료와 공기는 버너에서 연소를 하게 되고, 이렇게 연소한 연소가스의 온도는 수축부에 설치되어진 열전대에 의해서 감지되어 감지된 신호는 다시 온도 지시 조절기에 보내어져 다시 연료 공기 조절기 및 자동 버터플라이 밸브를 조절하면서 연료 및 공기의 양을 조절하면서 설정한 목표 온도를 맞추게 된다. 수축 부분은 실험 구간에서 균일 유동을 얻기 위하여 단면이 수축하는 부분에 만곡형 수축부를 두었다. 수축부는 수축비가 4:1을 가지는 3차원 수축비로 설계되었으며, 설계법은 Tulapurkara와 Bhalla⁽⁸⁾의 연구 결과에서 가장 타당하다고 입증된 Morel의 방법을 사용하였다. 본 실험 장치에서 단면이 축소되는 부분의 수축비는 4이며, 수축 길이는 60cm, 수축부 입구에서 변곡점까지의 거리는 26.4cm, 수축전의 높이는 80cm, 수축후의 높이는 30cm이다. 수축부의 상부에 분진 주입부를 설치하였으며 이 주입부를 통하여 실제 발전소에서 채취한 재 및 소석회 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)를 고온풍동 내부로 주입한다.

Fig. 3은 파울링 프루브를 시험구간에 고온의 연소가스의 흐름에 수직하게 설치하고, 분진을 고온의 연소가스중에 분사하여 파울링 프루브에 부착되는 파울링 현상을 규명하기 위한 실험장치의 계통도이다. 분진 저장탱크는 분진을 담아 두는 용기이며, 이 용기 속의 교반기는 회전하면서 분진들이 멎치지 않도록 한다. 분진은 스크류 피더 (screw feeder)를 통하여 깔때기 모양을 하고 있는 호퍼 아래로 분산되면서 아래로 자유낙하하게 된다. 압축기에서 나온 압축공기는 진공 형성 펌프로 들어

간 후 진공형성펌프의 아래 부분을 진공의 상태로 만들므로써 호퍼 아래 부분의 분진을 빨아들이게 된다. 빨려 올라온 분진은 고온의 연소가스중으로 압축공기와 함께 분사된다. 분진의 주입량은 모터에 의하여 구동되는 스크류 피더의 회전수에 의하여 결정되어 진다.

시험부는 수축부 하류에 연결되어져 있고 Fig. 1에서 보여준 것처럼 2구간으로 나누었다. 주위 연소가스의 속도가 파울링에 미치는 영향을 조사하기 위하여 시험부 2의 단면적은 시험부 1의 단면적에 비하여 두 배가 되도록 즉 시험부 2에서의 평균속도는 시험부 1에서의 평균속도에 비하여 0.5배가 되도록 설계하였다. 시험부 1의 단면은 $0.3\text{m} \times 0.3\text{m}$ 이고 길이가 각각 0.9m, 0.7m, 1.14m인 세 부분으로 나누어지고 이러한 덕트들은 플랜지를 사용하여 결합되어진다. 시험부 2는 단면이 $0.425\text{m} \times 0.425\text{m}$ 이고 각각의 길이가 0.7m인 덕트 세 개가 결합되어져 있다. 시험부에 고온의 연소가스가 흘러가므로 시험부의 외부는 18cm 두께의 내화물 및 단열재를 사용하여 단열시켰다. 시험부 1 및 2의 상부에는 파울링 프루브관과 일체형으로 만들어진 6개의 뚜껑을 설치하였다. 파울링 프루브(fouling probe)관의 배열형태는 실험조건에 따라 단일관, 정열 배열 혹은 엇갈림 배열의 관군 형태를 취한다. 파울링 실험 완료후 관군 표면에 부착된 입자의 형상을 관찰하고 이를 정량화할 수 있도록하기 위하여 시험부에 체인블록을 설치하였다. 상부에 위치한 뚜껑은 풍동 내부를 청소하는 창으로서도 이용되어진다. 시험구간의 측면은 측정용 프루브를

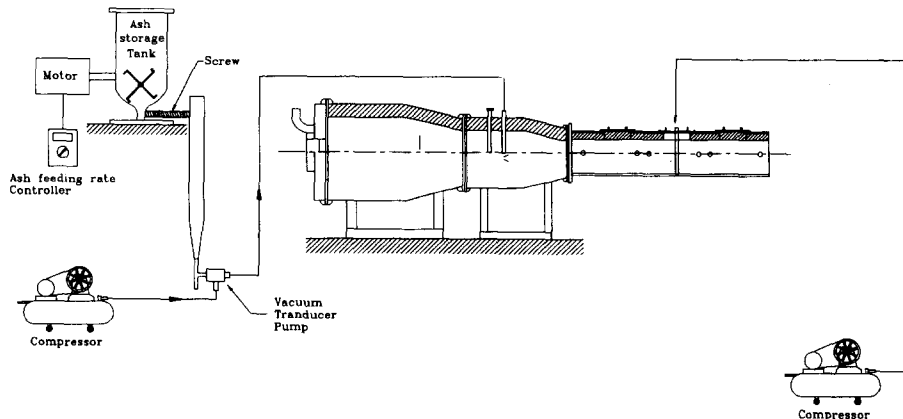


Fig. 3 A schematic diagram of particle feeding system and fouling probe

넣을 수 있도록 33mm의 직경으로 구멍 가공을 하였으며 측정을 하지 않을 경우에 부싱으로 막을 수 있도록 하였다.

Fig. 4는 본 실험에서 사용되는 파울링 프루브관으로써 실제 발전소에서 사용되고 있는 Cr-Mo강이다. 파울링 측정용 프루브에 심은 열전대는 1mm 소선 K-type이며, 관의 외벽온도를 알기 위하여 관의 중심 부분에 $\phi 4\text{mm}$ 의 구멍을 가공하여 K-type의 열전대를 바깥 표면 근접해서 점용접을 하여 MgO를 채워 빈 홈을 막았다. 또한 내벽의 온도를 측정하기 위하여 외벽에 심은 열전대와 같은 위치의 내벽에 점용접으로 K-type의 열전대를 용접하여 설치하였다. 관은 고온의 연소가스에 노출되어 있으므로 냉각을 시켜주어야 한다. 이를 위하여 관내부로 냉각공기를 흘려 보낸다. 냉각공기는 압축기를 통해 공급되며 밸브에서 유량을 조절할 수 있다. 관내부를 통과하는 냉각공기의 질량 유량의 양에 따라 관의 내부 및 연소 가스와 접하는 관의 외부온도를 조절할 수 있다. 냉각공기의 입구 및 출구의 온도를 알기 위하여 입구와 출구의

중심 부분에도 0.6mm 소선 K-type의 열전대를 설치하였다.

Fig. 5는 파울링 측정용 프루브에 분진이 부착되어 가는 동안에 열전달 양과 파울링 저항 계수를 구하기 위하여, 파울링 프루브 전후의 연소가스 온도, 파울링 프루브관 내부 및 외부온도, 그리고 냉각공기 입구 및 출구온도를 측정하기 위한 데이터 획득 장치를 보여주고 있다. 각 부분의 온도는 시간의 함수로써 컴퓨터에 기록되어진다. 시험구간의 속도를 측정하기 위하여 정압 피토크관과 전압 피토크관을 만들어 시험구간의 한 부분에 정압 피토크관을 고정설치하였으며, 전압 피토크관으로 고온의 유동장을 조사하고자 한다. 피토크관이 고온의 가스에 노출되므로 현재의 실험에서는 냉각수가 순환하도록 제작된 피토크관을 사용하였다. 제작 피토크관에 대한 검증은 상용 피토크관을 비 연소시에 실험 구간의 한 지점을 정하여 세 가지 속도에 대하여 측정된 후 제작된 피토크관을 같은 지점에 설치하여 마이크로마노미터를 이용하여 속도를 측정하였다. 그 결과는 다음의 표와 같다.

Manufactured pitot tube	2.680 m/s	3.801 m/s	7.070 m/s
Commercial pitot tube	2.537 m/s	3.708 m/s	7.251 m/s

제작한 피토크관을 사용하여 시험구간의 한 단면에서 측정된 속도분포는 상용피토크관을 사용하여 측정된 결과와 잘 일치하고 있다. 고온에서의 제작 피

토크관에 의해서 얻은 속도의 보정은 연소가스가 고온의 공기라고 가정을 하여 베르누이 방정식에서 구한 속도의 식에서 밀도를 보정하여 계산하였다. Fig. 6(a)는 상온에서 실험 구간의 한 단면을 상용 피토크관으로 측정된 것이고 (b)는 고온상태에서 제작 피토크관으로 측정된 것이다. 고온에서의 실험 구간은 대체적으로 균일한 분포를 나타내주고 있으나 벽면의 근처에서 중심축의 속도보다 다소 속도가 감속되고 있는 것을 보여주고 있다.

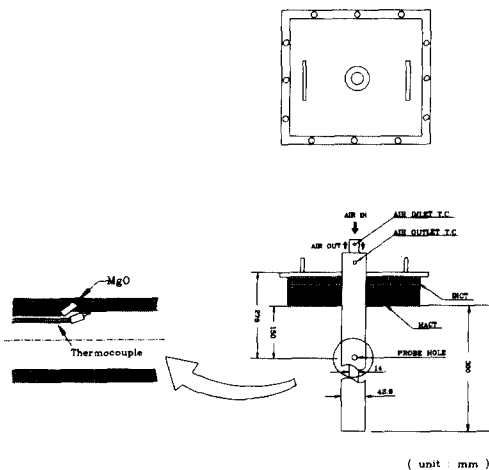


Fig. 4 Assembly of fouling probe

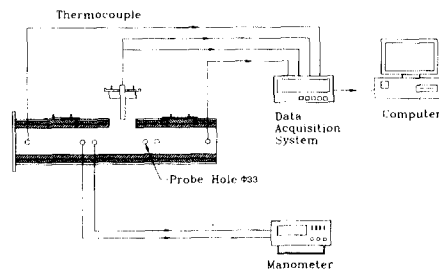
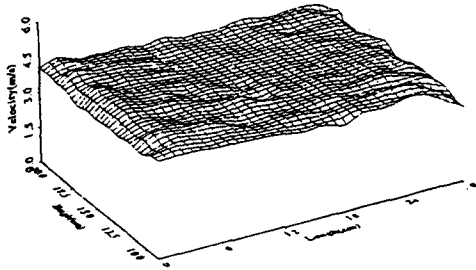
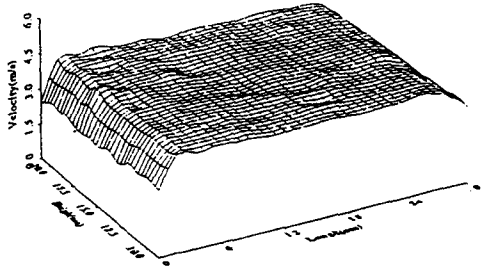


Fig. 5 A block diagram of data measuring system



(a) Pitot tube for cold gas velocity measurement



(b) Pitot tube for hot gas velocity measurement

Fig. 6 Gas velocity at the cross section of test region

3. 온도 측정 및 파울링 저항 계수 R_f 계산

Fig. 5의 데이터 획득장치를 사용하여 측정된 온도를 사용하여 열전달 양과 파울링 저항 계수 R_f 를 계산한다. 먼저 정체점에서 고온의 연소가스로부터 냉각 공기로 전달되는 국소 열전달 양과 파울링 저항 계수를 구한다.

$$\dot{Q}_{local} = UA_0 \Delta T = UA_0 (T_g - T_{wi}) \quad (1)$$

여기서 A_0 는 연소 가스와 접하는 바깥면의 표면적이며, T_g 및 T_{wi} 는 각각 연소가스의 온도 및 관의 내면온도이다. 그리고 U 는 총괄 열전달 계수로서 이 값의 역수는 입자를 연소가스 중에 분사하기 전, 즉 프루브관의 표면이 깨끗한 경우에는 다음과 같다.

$$\left(\frac{1}{U}\right)_c = \frac{1}{h_{rc}} + \frac{A_0 \ln(d_o/d_i)}{2\pi kL} \quad (2)$$

여기서 h_{rc} 는 관공 표면에서의 주위 연소가스와 의 대류 및 복사에 의한 열전달 계수를, d_o 및 d_i

는 관의 내경 및 외경을, k 는 관의 열전도도를, 그리고 L 은 관의 길이를 나타낸다. 그러나 분진이 연소가스 중에 분사되면 프루브관의 표면에 입자가 부착되고 열 저항이 증가하므로 총괄 열전달 계수의 역수는 다음과 같이 표시된다.

$$\left(\frac{1}{U}\right)_f = \frac{1}{h_{rc}} + \frac{A_0 \ln(d_o/d_i)}{2\pi kL} \quad (2)$$

그러므로 정체점에서의 국소 파울링 저항 계수 $(R_f)_{local}$ 는 다음과 같이 표현되어진다.

$$\begin{aligned} (R_f)_{local} &= \left(\frac{1}{U}\right)_f - \left(\frac{1}{U}\right)_c \\ &= \left(\frac{A_0 (T_g - T_{wi})}{\dot{Q}_{local}}\right)_f - \left(\frac{A_0 (T_g - T_{wi})}{\dot{Q}_{local}}\right)_c \end{aligned} \quad (4)$$

T_g 및 T_{wi} 는 Fig. 4에서 보여준 데이터 획득 장치로부터 측정된 온도값을 사용한다. 파울링이 존재 및 존재하지 않을 경우의 전달되는 열량 Q_f 및 Q_c 는 관의 내부와 외부에서 측정된 온도를 사용하여 다음의 식으로부터 구한다.

$$\dot{Q}_{local} = \frac{T_{wo} - T_{wi}}{\ln(d_o/d_i)} \quad (5)$$

여기서 T_{wo} 는 관의 외면온도를 나타낸다. 그리고 관 내부를 흘러가는 냉각공기의 측정된 입구 및 출구온도로부터 연소가스로부터 전달되는 평균 열전달 및 파울링 저항 계수를 구한다. 연소가스로부터 냉각공기로 전달되는 평균 열전달량은 다음과 같다.

$$\dot{Q}_{avg} = \dot{m} C_{p,a} (T_{ao} - T_{ai}) \quad (6)$$

평균 열전달량과 측정된 가스 및 공기온도에서 평균 파울링 저항 계수 $(R_f)_{avg}$ 를 구한다.

$$\begin{aligned} (R_f)_{avg} &= \left(\frac{1}{U}\right)_f - \left(\frac{1}{U}\right)_c = \left(\frac{A LMTD}{\dot{Q}_{avg}}\right)_f \\ &\quad - \left(\frac{A LMTD}{\dot{Q}_{avg}}\right)_c \end{aligned} \quad (7)$$

$$LMTD = \frac{(T_g - T_{ao}) - (T_g - T_{ai})}{\ln\left(\frac{T_g - T_{ao}}{T_g - T_{ai}}\right)} \quad (8)$$

여기서 T_{ao} 와 T_{ai} 은 각각 냉각 공기 출구와 입구 온도를 나타낸다.

4. 실험 결과 및 고찰

실험의 수행 순서는 먼저 버너를 점화를 시킨 후 콘트롤 판넬에 시험구간에서 목표로 하는 온도를

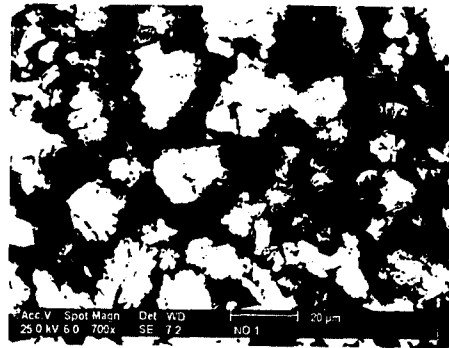
설정된 후 수축부에 위치한 열전대로부터 연소가스의 온도를 측정하여 연소가스의 온도가 목표치에 도달할 때까지 기다린다. 시스템이 원하는 정상 상태에 도달하였다고 판단되는 순간부터 입자발생장치를 통하여 입자를 저장용기로부터 시험구간의 실린더에 수직하게 분사하고 데이터 획득 장치로부터는 각 부분에서의 온도를 측정하기 시작한다. 제작된 고온풍동의 성능실험을 위하여 사용한 변수는 Table 1과 같다.

실험에 사용되어지는 파울링용 입자인 소석회의 성질들을 알기 위해 기초실험을 수행하였다. 재의 화학성분은 전자현미경 (Scanning Electron Microscope)으로 분석하였다. Fig. 7은 주사 전자 현미경의 배율을 700배로 하여 상온에서의 소석회 성분과 1000°C 고온에서 파울링 실험후 관 표면에 부착된 입자를 채취한 소석회 성분을 관찰한 조직 사진이다. 사진에서 보는 바와 같이 상온 상태보다 고온 상태에서의 소석회가 더욱더 응집이 되어 있는 작은 분말 형태를 유지한다. 이것은 고온에서 소석회가 소결되어 응집되었기 때문으로 생각된다. Table 2는 상온과 고온에서의 각 성분을 비교하였다. 여러 성분들 중에 고온 상태에서 SiO₂ 성분이 거의 3배 정도 증가된다. 이 성분은 프루브 표면을 침식시키는 주 요인으로 작용한다.

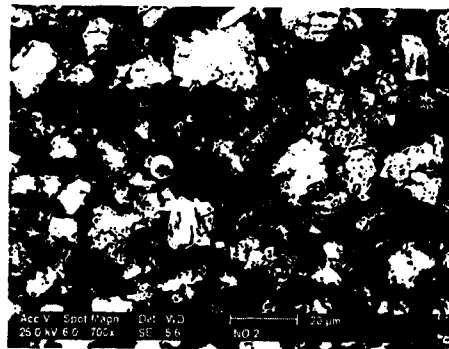
Table 1 Parameters used in the present experiment

Parameter	Range
Gas temperature	1000°C
Average gas velocity	8m/s
Test duration	2~3hours
Particulate feed rate	44.39g/min
Cooling air feed rate	0.0282m ³ /s

Fig. 8은 컨트롤 패널에서 연소실의 온도를 1000°C로 지정하였을 경우에 관군의 전방 및 후반부에 설치한 열전대에서 측정된 온도의 시간에 따른 변화를 보여주고 있다. 관군의 중심에서 전방부 및 후반부 열전대 중심까지의 거리는 0.275m이다. 연소가스의 온도는 ±10°C 범위 내에서 변동하고 있는데 이는 평균 온도의 약 1%에 해당한다. 이러한 온도변동은 PID 제어를 하면서 연료와 공기의 양으로 온도를 제어하게 됨에 따라 제어부와 온도



(a) 25°C



(b) 1000°C

Fig. 7 SEM pictures of Ca(OH)₂

Table 2 Chemical compositions of slaked lime in the low and high temperature

Components Conditions	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Ca(OH) ₂	MgO	H ₂ O
Low temperature (25°C)	0.48	0.13	0.04	87.35	0.58	0.42
High temperature (1000°C)	1.78	0.19	0.06	83.59	0.69	0.35

감지부와의 시간 지연으로 발생한다. Fig. 6에서 보여준 것처럼 관군 상류 및 하류에서 측정된 온도의 시간에 따른 변화는 유사한 상관관계를 보여주고 있다. 두 점에서 측정된 온도 차이는 약 45°C이다. 실험 완료시까지 거의 일정하게 유지된다.

Fig. 9는 컨트롤 패널에서 연소실의 온도를 1000°C로 지정하였을 경우에 흐름의 상부에 설치한 파울링 프루브관의 정체점에서 바깥 표면과 안쪽 표면에서 측정된 시간의 변화에 따른 온도변화를 보여주고 있다. 이때의 연소가스의 속도는 약 8m/s이다. 파울링 입자로서는 소석회를 사용하였고 입자 발생장치를 사용하여 시험부에 주입된 파울링 입자의 분사량은 44.39 g/min이다. 초기 2분 (120초) 동안은 입자를 주입하지 않은 상태에서의 온도변화를 나타내고 있고, 그후부터는 입자를 주입했

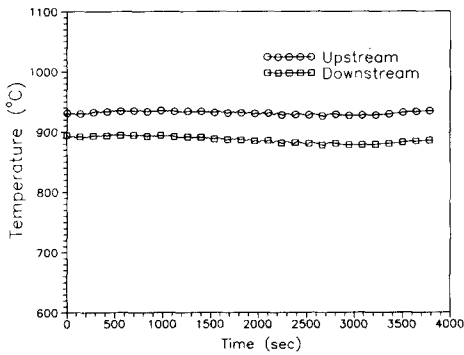


Fig. 8 Gas temperature at the upstream and downstream of tube as a function of time for $T_g = 1000^\circ\text{C}$, $V_g = 8\text{m/s}$, $\dot{Q} = 0.0282\text{m}^3/\text{s}$, $\dot{m} = 44.39\text{g}/\text{min}$

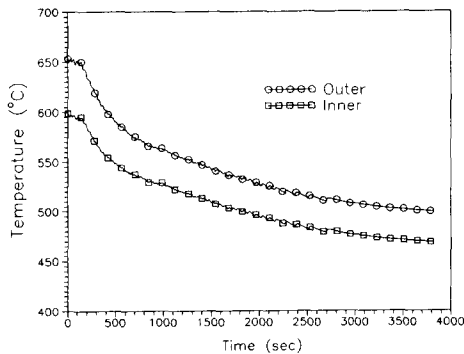


Fig. 9 Temperature at the inner and outer surface of tube as a function of time for $T_g = 1000^\circ\text{C}$, $V_g = 8\text{m/s}$, $\dot{Q} = 0.0282\text{m}^3/\text{s}$, $\dot{m} = 44.39\text{g}/\text{min}$

을 경우에 시간에 따른 온도의 변화를 보여주고 있다. 플라이 애쉬가 분사되면서 정체점 외부 및 내부의 온도변화는 애쉬가 관에 부착함에 따라서 온도는 점점 감소하고 있다. 입자 주입 초기 관의 표면이 깨끗한 경우에는 안과 밖의 표면 온도 차가 약 54°C를 유지하며, 입자가 프루브 표면에 부착되면서 열전달을 감소시키고 이로 인한 단열 효과 때문에 안과 밖의 온도차는 점점 감소하여 입자 공급이 완료되는 실험의 마지막 단계에서 약 31°C를 유지한다.

Fig. 10은 정체점에서의 국소 열전달량의 시간에 따른 변화를 나타내고 있다. 분진입자가 관 표면에 쌓임에 따라서 단열 효과가 증가하고 이에 따라 관의 내부 및 외부의 온도차이는 감소하고 전달되는 열량은 점점 감소하게 된다. 일단 파울링 입자가 부착되기 시작하면 열전달 양은 급격히 감소하고, 시간이 경과함에 따라서 감소하는 기울기는 점점 줄어들어 파울링 입자의 부착 및 제거가 평형 상태에 도달하는 일정값으로 접근하게 된다.

Fig. 11은 국소 파울링 저항계수의 시간에 따른 변화를 나타내고 있다. 파울링 입자를 주입하기 전에는 파울링 효과가 없으므로 파울링 저항 계수는 0의 값을 가지게 된다. 파울링 입자를 주입하면 초기에는 국소 파울링 저항 계수 값이 급격히 증가하다가 차츰 시간이 경과함에 따라 거의 일정한 값에 도달한다. 일반적으로 파울링 저항계수의 증가는 시간의 변화에 따라서 지수 함수적으로 증가하면서 일정값으로 수렴하는 것으로 알려져 있다. 파울링 저항 계수가 일정 값에 도달하는 것은 파울링 입자의 부착 및 제거가 평형 상태에 도달하였다는 것을

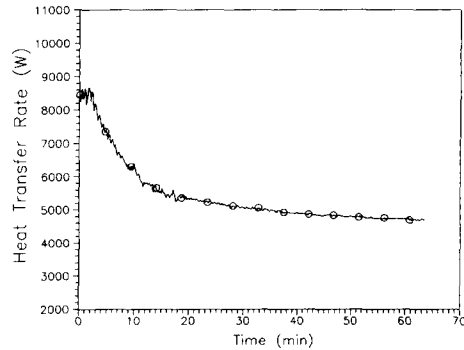


Fig. 10 Local heat transfer rate at the stagnation point as a function of time for $T_g = 1000^\circ\text{C}$, $V_g = 8\text{m/s}$, $\dot{Q} = 0.0282\text{m}^3/\text{s}$, $\dot{m} = 44.39\text{g}/\text{min}$

의미한다.

Fig. 12는 고온 풍동 내부에 설치된 파울링 프루브 관 너부를 순환하는 냉각 공기의 입구 및 출구 온도의 시간에 따른 변화를 보여주고 있다. 이때 순환하는 냉각 공기의 유량은 Table 1에 보여준 것처럼 0.0282m³/s(속도로는 47m/s)이다. 입구에서의 냉각 공기의 온도는 약 51°C로써 전 실험 시간 동안 거의 일정한 값을 유지하고 있다. 출구에서의 공기의 온도는 입자를 주입하기 시작하는 순간에 약 223°C이며 관 표면에서 파울링이 진행됨에 따라 점점 감소하다가 본 실험을 마치는 순간에 약 187°C를 유지하게 된다.

Fig. 13은 파울링 프루브 관내를 흐르는 냉각 공기의 입구와 출구에서 측정된 온도를 기준으로 하여 계산된 파울링 프루브를 통한 평균 열전달량의 시간에 따른 변화량을 나타내고 있다. 평균 열전달

량의 시간에 따른 변화량은 정체점에서의 국소 열전달량의 변화와 유사하게 파울링 입자가 관 표면에 부착됨에 따라 감소하며, 그 크기는 국소 열전달량에 비하여 적다.

Fig. 14는 평균 파울링 저항계수의 시간에 따른 변화를 나타내고 있다. 파울링 입자를 주입하기 전에는 파울링 효과가 없으므로 파울링 저항 계수는 0의 값을 가진다. 분진이 공급되면서부터 파울링 저항 계수가 상승하면서 시간이 경과함에 따라 일정 값에 도달하는 평형상태에 도달한다. 평균 파울링 저항 계수는 국소 파울링 저항 계수의 시간에 따른 변화와 아주 유사한 형태를 보이며 증가하고 있다. Fig. 11에서 알 수 있는 것처럼 국소 파울링 저항 계수가 평균 파울링 저항 계수보다 약간 높게 나타나고 있다.

Fig. 15는 파울링 실험을 마친 후 바로 체인 블

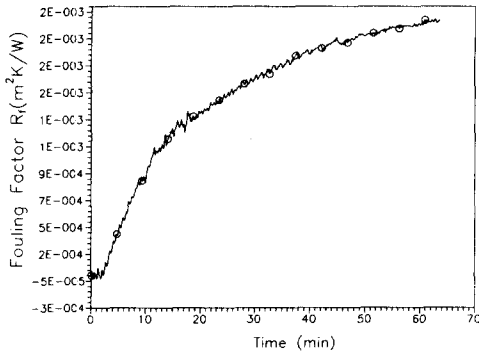


Fig. 11 Local fouling resistance at the stagnation point as a function of time for $T_g=1000^\circ\text{C}$, $V_g=8\text{m/s}$, $\dot{Q}=0.0282\text{m}^3/\text{s}$, $\dot{m}=44.39\text{g}/\text{min}$

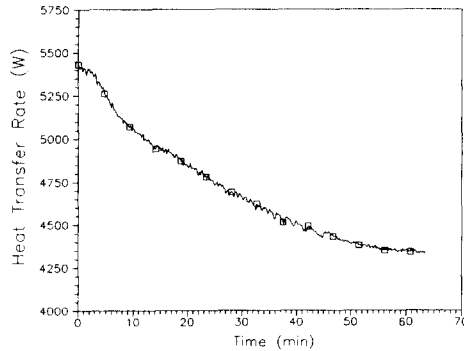


Fig. 13 Average heat transfer rate as a function of time for $T_g=1000^\circ\text{C}$, $V_g=8\text{m/s}$, $\dot{Q}=0.0282\text{m}^3/\text{s}$, $\dot{m}=44.39\text{g}/\text{min}$

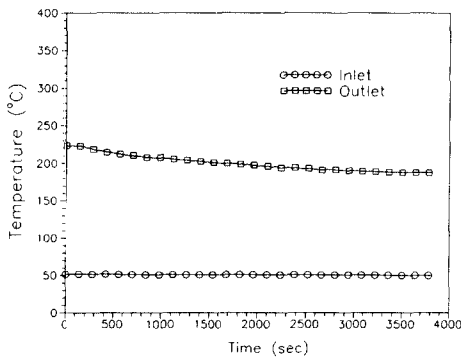


Fig. 12 Cooling air temperature at the inlet and outlet of tube as a function of time for $T_g=1000^\circ\text{C}$, $V_g=8\text{m/s}$, $\dot{Q}=0.0282\text{m}^3/\text{s}$, $\dot{m}=44.39\text{g}/\text{min}$

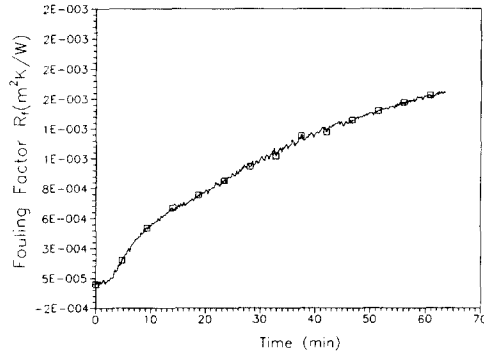


Fig. 14 Average fouling resistance as a function of time for $T_g=1000^\circ\text{C}$, $V_g=8\text{m/s}$, $\dot{Q}=0.0282\text{m}^3/\text{s}$, $\dot{m}=44.39\text{g}/\text{min}$

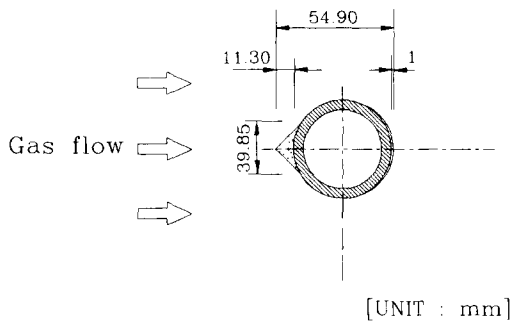


Fig. 15 A shape of particles deposited on the tube for $T_g=1000^\circ\text{C}$, $V_g=8\text{m/s}$, $\dot{Q}=0.0282\text{m}^3/\text{s}$, $\dot{m}=44.39\text{g}/\text{min}$

록을 사용하여 일체형으로 된 파울링 프루브를 고온 풍동에서 바깥으로 들어올려 관에 부착된 파울링 입자의 두께를 직접 측정하여 나타낸 그림이다. 파울링 프루브의 정체점 위치에서 관의 파울링 입자의 부착 패턴을 살펴보면, 정체점으로부터 약 $\pm 35^\circ$ 사이에 주로 많이 쌓여 있고 정체점에 부착된 입자의 두께는 약 11.30mm로 가장 두껍다. $45^\circ \sim 90^\circ$ 사이에 부착된 입자의 양은 아주 적었다. 90° 에서부터 다시 서서히 쌓이기 시작하면서 90° 를 지나면서 다시 부착되는 양이 조금 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 이 그림에서 보여주는 것처럼 정체점에 부착되는 분진의 양은 최대가 되며 정체점으로부터 하류로 가면서 부착되는 양은 감소한다. 유동 방향에 대해 $\theta=90^\circ$ 근처에 부착되는 분진은 거의 존재하지 않고 이후의 후류 영역에서는 약간의 분진이 산만하게 부착되어 있는 형상을 보여 주고 있다. 관표면에 부착된 부착물의 물리적 특성을 관찰해 보면 정체점에서 부착된 소석회는 높은 응집력을 갖고 그 표면은 매끈한 상태였다. 90° 위치에서는 입자가 거의 부착되지 않으므로 프루브 표면이 약간 드러나 있고 비교적 깨끗한 표면을 보인다. 후류 영역으로 갈수록 와류가 형성되어 분진 부착이 프루브 뒷면에 폭넓게 이루어진다. 부착 형상을 살펴보면 180° 주변으로 둥근 형상을 이루며 표면은 돌기 모양을 하고 분진 응집력은 아주 약했다. Fig. 15에 보여준 파울링 입자가 관에 부착되는 이러한 형상은 관 주위의 유동 패턴과 아주 밀접한 관계가 있다. 입자는 관의 정체점에서 직접 부딪치면서 상당히 많은 양이 쌓이나 정체점으로부터 하류로 가면서 유체의 흐름은 가속이 되고 이

로 인하여 부착되었던 애쉬는 유동에 의한 침식으로 주위의 유체로 재박리가 된다. 그러므로 정체점 하류로 감에 따라서 부착된 입자의 양은 점점 감소하게 된다. 그러나 관주위의 유체의 흐름은 후류 영역에서 유동의 박리가 일어나고 이 이후에는 재순환 영역이 존재하므로 입자는 다시 관 주위로 재유입되어 관주위로 부착되는 입자의 양이 조금씩 증가하게 된다.

5. 결 론

(1) 고온용 풍동을 설계, 제작하였으며 1000°C 의 온도에서 기초성능실험을 수행하였다.

(2) 단일 관표면에 분진입자가 부착하면서 초기에 열전달 양은 급격히 감소하고 파울링 저항 계수는 급격히 증가한다. 그러나 시간이 지나가면서 부착되는 분진의 양과 재박리되는 분진이 평형을 이루어 열전달 양과 파울링 저항 계수는 일정 값에 접근하게 된다.

(3) 단일관의 경우 정체점 근처에서 입자가 많이 부착되고 하류로 가면서 침식에 의하여 관 표면에 부착되는 입자의 양이 감소하다가 유동박리후 후류에서는 재순환 영역의 존재로 인하여 부착되는 입자의 양이 증가한다.

후 기

이 논문은 한국과학재단 1994년 특정연구과제 및 한국중공업 연구비의 지원하에 수행되었으며, 이에 관계자 여러분에게 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Epstein and Norman, 1983, "Thinking about heat transfer fouling : A5×5 Matrix," *Heat Transfer Engineering*, 4(1) : 43~56
- (2) Epstein and Norman, 1981, *Fouling of Heat Transfer Equipment., Fouling in Heat Exchangers*, Hemisphere Publishing Company. eds. E.F. C., Somerscales and J.G. Knudsen, pp.701~734. Washington, D.C
- (3) Beal, S.K. 1970, "Deposition of particles in turbulence Flow on Channel or Pipe Walls," *Nuclear Science and Engineering*. 40 pp. 1~11

- (4) Wenglarz, R.A. 1981, "An Assessment of Deposition in PFBC Power Plant Turbines," *ASME Journal of Engineering for Power*. 103 pp. 552~560
- (5) Lister, D.H. 1981, "Corrosion Products in Power generating Systems," *Fouling in Heat Transfer Equipment Hemisphere Publishing Company*, eds. E.F.C. Somerscales and J.G. Knudsen, pp. 135~200. Washington, D.C
- (6) Walker, G., *Industrial Heat Exchangers : A Basic Guide*. Hemisphere Publishing Corp., Washington, D.C
- (7) Gdmundson, J.S. 1981, "Particulate Fouling : Fouling of Heat Transfer Equipment," Hemisphere Publishing Company, eds. E.F.C Somerscales and J.G. Knudsen, pp. 357~387. Washington, D.C
- (8) Tulapurkara E.G. and V.V.K. Bhalla, 1988, "Experimental Investigation of Morel's Method for Wind Tunnel Contractions," *Journal of Fluids Engineering, March*, Vol. 110, pp. 45~47