

순환유동층 보일러 전열관의 열전달 특성

김부현* · 조형희**

Heat Transfer of Smooth and Finned Tubes in A CFBC

Bu-Hyeon Kim and Hyung Hee Cho

Key Words: Fluidized Bed(유동층), Circulating Fluidized Bed Combustion(순환유동층 연소), Finned-Tube(휨관), Heat Transfer(열전달)

Abstract

The objective of present work is to investigate experimentally the characteristics of heat transfer. A fluidized bed combustion has advantages of pollution control, fuel flexibility and excellent heat transfer. The present study investigates fundamental phenomena of bed-to-surface heat transfer in high temperature fluidized beds to improve design of immersed tube surface. The tested operating variables are bed temperature, superficial velocity, mean size of bed material, and the rake angle of fin. Generally, heat transfer rates between the fluidized bed and immersed finned-tube are much higher than those of a smooth tube. A life time of finned-tube is generally longer than that of smooth tube.

1. 서 론

유동층 연소는 연소시 발생하는 유해 성분의 제거가 용이하고, 다양한 연료의 사용 가능하며, 뛰어난 열전달 특성 등으로 인하여 주목되고 있다. 유동층 연소로에서는 유동매체로 석회석이나 백운석 등을 사용하면 연소과정에서 연료 중의 유황이 산화 반응하여 생성된 SO₂를 흡수하여 제거할 수 있고, 연소 온도를 낮게 유지할 수 있어 NO_x의 생성을 제어할 수 있으므로 배기 가스를 후처리 하지 않아도 환경오염 기준에 쉽게 도달할 수 있다. 유동층 연소로에서는 여러 가

지 종류의 연료를 연소시킬 수 있도록 설계가 가능하므로 기존의 미분탄 연소로보다 사용 연료의 종류에 대해서 융통성이 훨씬 크다. 또한 전열관을 유동층 내에 설치한 경우에는 유동매체와 전열관 표면 사이의 충돌접촉으로 인하여 기존 보일러의 대류열교환 방식에 비해 열전달계수가 매우 크다. 유동층 연소로 설계에서 유동층 내에 설치된 전열관은 주로 열전달 표면이 매끈한 전열관을 사용해 왔으며, 전열표면이 매끈한 전열관은 운전시간이 경과됨에 따라 전열표면과 유동매체 사이에 충돌 접촉과 연소화염에의 직접 노출로 인한 침식 때문에 전열관의 수명이 기존 보일러에서 보다 매우 짧다. 일반적으로 유동층 내에 설치된 전열관으로의 열전달량은 휨이 부착된 전열관의 경우가 휨이 없는 전열관의 경우보다 큰 것으로 알려져 있고 있으며, 전열관에 휨을

* 한국전력공사

** 연세대학교 기계공학과

부착한 결과, 침식은 대부분 환에서 일어나 전열관의 수명도 길어진 것으로 보고되고 있다. 고온 유동층 연소로 내에 3각형 형상의 환이 방사상으로 부착된 원통형 전열관을 수평으로 설치하였을 때 유동층 온도, 층내 가스속도, 유동매체의 평균 입자크기, 환의 경사각 등의 인자가 유동층에서 전열관으로의 열전달에 미치는 영향을 실험적으로 고찰하고, 열전달 표면이 매끈한 전열관인 경우와 비교하고자 한다.

2. 순환유동층 열전달 이론

2.1 순환유동층과 열전달 표면의 열전달

고정층으로부터 유동층으로의 변천에 대한 열전달계수의 변화가 Fig. 1에 도식적으로 나타나 있다.

유동층에서 열전달율은 유체속도, 유체의 열전달율, 고체입자의 크기, 밀도 및 열역학적 성질, 유동층 장치의 형태 등 많은 인자들에 의해 영향을 받는다.

그림에서 h_{max} 와 U_{opt} 에 관한 값들은 일반적으로 $Numax=f(Ar)$, $Re_{opt}=f(Ar)$ 와 같은 형태로 주어진다. Ar 은 아르키메데스수 (Archimedes Number)로 다음과 같이 정의 된다.

$$Ar = \frac{gd_e^3}{V_f^2} \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \quad (1)$$

여기서 g 는 중력가속도, d_e 는 고체입자의 상당 지름, V_f 는 유체의 동점성계수, ρ_s , ρ_f 는 고체 입자 및 유체의 밀도이다.

이들 중 $Re_{opt} = f(Ar)$ 로 주어진 식이 훨씬 더 수렴성을 지니고 있는데 그 원인은 $h-U$ 곡선상에 h_{max} 의 값이 평평하기 때문에 U_{opt} 의 값은 다소 폭 넓은 값이라고 할 수 있다. 더우기 Re_{opt} 의 다른 평균값으로 유동층 내의 다른 곳에서 매우 비슷한 h_{max} 값을 얻을 수 있다. 적당한 공식에 의해 유동층이 층 전체에 걸쳐 완전히 이루어지고 있을 때 h_{max} 와 U_{opt} 을 근사적으로 추정하는 것이 가능하다.

2.2 순환유동층 연소로의 열전달 인자

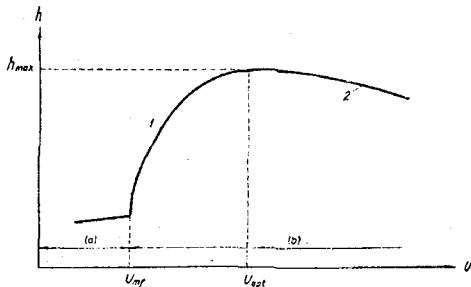
2.2.1 유체속도, 고체입자 크기 및 형태의 영향

일반적으로 최소유동화속도(U_{mf}) 이상에서는 유체속도가 계속 증가할수록 열전달계수도 급격히 증가하여 최고점에 도달한 후, 유체의 속도를 증가시키면 따라 열전달계수는 점차 감소하게 된다. 이것은 유동층 내의 입자 밀도가 감소하기 때문이다. 열전달계수 h 와 유동화속도 U 와의 관계는 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다.

고체 입자의 크기가 열전달계수에 미치는 영향은 고체의 입경이 커질수록 열전달계수가 감소하는데 처음에는 급격히, 그 이후에는 천천히 감소한다. 입자밀도는 유체속도에 의해 변하기 때문에, 열전달계수에 대한 독립적인 변수는 아니다. Mickey와 Trilling은 $h \propto \rho_m^{-0.48}$ 임을 보였고, Mickley와 Fairbanks는 $h \propto \rho_m^{0.8}$ 으로 Wender와 Cooper는 $h \propto \rho_m^1$ 임을 보였다.

2.2.2 고체입자와 유체의 물리학적 물성의 영향

유체의 열전도율(k_f)은 유동층에서의 열전달에 가장 큰 영향을 미치며, 열전달계수는 열전도율(k_f)의 $\frac{1}{2} \sim \frac{2}{3}$ 승에 비례한다. 유동층에서 층의 온도가 증가함에 따라 열전달계수(h_w)가 증가하는 것은 복사열에 의한 것이라기 보다는 층온도가 증가함에 따라 열전도율이 증가하기 때문이라



(a) Fixed layer (b) Fluidized layer

Fig. 1 Effect of fluid velocity and heat transfer coefficient in fluidized bed

고 생각된다. 고체입자의 열전도율(k_s)은 실제로 열전달계수에 거의 영향을 주지 않는다. 그러나 유동될 입자들을 포함한 고정층의 열전도율(k_s)이 증가함에 따라 열전달계수가 증가하는데 이것은 Packet 이론과 일치하는 것이다.

고체입자의 비열 또한 열전달에 영향을 미치는 데 열전달계수는 비열의 0.25 ~ 0.8승에 비례한다. 그러나 유체의 비열은 유동층에서의 열전달에 거의 영향을 주지 못한다. 왜냐하면 고체입자의 체적 열용량(volumetric heat capacity)은 상압에서 유체의 비열에 비해 3배 이상이 되므로 가스-고체 시스템에서는 중요한 역할을 하지 못한다.

2.2.3 전열관의 형상과 배열의 영향

수직관에 대한 열전달계수는 일반적으로 수평관에 대한 것보다 5~15% 정도 더 크다. 왜냐하면 수평관은 수직관보다 유동층 내의 유동매체와의 접촉조건이 더 나쁘기 때문이다. Korotjanskaja와 Gelperin 등의 실험에 의하면 Quartz sand ($d_p = 0.16 \text{ mm}$)의 유동층에서 지름 80 mm와 20 mm의 전열관으로 영각(angle of attack) β' 의 변화에 따른 h 의 변화에 대한 실험에서 전열관을 수평에서 수직의 위치로 점차 변화시키면 h 는 서서히 증가하는 경향이 있으며 수직의 경우에 h_{max} 는 5~6% 증가하였다.

Genetti와 Kundson은 열전달계수가 전열관의 설치높이에 별 영향을 받지 않음을 주장했다. 열전달계수에 대한 튜브 높이의 영향은 유체의 유동화 속도의 함수로서 낮은 유동화 속도에서는 층의 분리가 일어나 유동층 아래 부분에 큰 입자가 많이 존재하므로 층의 아래로 갈수록 열전달계수가 감소하나 높은 유동화속도에서는 유동화상태가 좋기 때문에 튜브 높이에 따른 영향은 없다고 생각된다

2.3 순환유동층 연소로에서의 열교환

유동층 연소로에서의 열교환 목적은 연료의 연소열을 회수하기 위한 것이지만 또 한가지 중요한 목적은 층내의 온도분포를 균일하고 일정하게 온도 제어하는 데에도 있다. 온도제어는 열교환매체의 유량을 조절하여 이루어진다. 열회수를 너무 많이 하면 층내의 온도는 연료의 발화점 이

하로 급격히 저하되므로 연소가 불안정하게 되거나 소화하게 되며, 또 그 반대의 경우에는 층내의 온도가 급격히 상승되어 층내물질(bed material)이나 회재의 점결 및 고온에 의한 장치부식 문제가 심각해진다. 점결현상은 층내의 유동화 상태를 점점 나쁘게 하여 극단적인 경우에는 층 전체를 점결시켜 계속 운전이 불가능하게 된다. 열교환장치로는 열교환관을 사용하거나 유동층 벽 자체가 열교환기인 수냉벽(water-wall)을 사용할 수도 있으며, 이 둘을 혼합하여 사용하는 방식도 있다. 마모는 전열관의 배치 방향, 층내물질의 마모성 및 유동화 공기속도에 좌우된다. 일반적으로 전열관이 수직으로 배치된 경우보다 수평으로 배치된 경우, 입자들이 거친 경우, 유동화 공기속도가 빠른 경우에 마모는 더 잘 일어나게 된다. 부식은 마모에 비해서는 덜 심각하나 갈탄(Lignite)과 같이 알카리 금속성분이 많은 경우에는 문제가 심각하다. 휘발된 알카리 금속들은 전열관을 부식시키고, 회재에 침식되어 Clinker를 형성, 결과적으로 유동화를 어렵게 만든다. 이러한 문제는 순환시스템을 사용할 경우에 더욱 심각하다.

2.4 순환유동층 내에서의 열전달계수 계산

기체와 고체 입자의 혼합상으로 되어 있는 순환 유동층 연소로에서의 열전달은 대류 열전달과 복사 열전달에 의해 이루어지나, 고체 입자와 전열관 사이의 충돌에 의한 접촉 열전달이 대부분을 차지한다. 유동하는 열매체와 전열관 표면 사이의 열전달계수, h_0 를 유동층에서의 열전달계수라 정의한다.

열교환기에서의 고온 유체로부터 저온 유체로의 열흐름 경로에서 열저항은 흐름과 연관된 표면 저항(skin resistance), 벽에 퇴적물의 형성으로 인한 스케일 저항(scale resistance) 및 전열관 재료 자체의 열저항을 포함한다. 따라서 열전달이 관내부와 외부로 흐르는 유체 사이에서 일어나는 열교환기에서 관을 통한 열흐름에 대한 총 열저항 R 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \frac{1}{A_i h_i} + \frac{F_i}{A_i} + \frac{t}{K_0 A_m} + \frac{F_0}{A_0} + \frac{1}{A_0 h_0} \quad (2)$$

여기서 $A_s, A_o, F_i, F_o, h_i, h_o$ 는 전열관의 내외부 표면적, 불결계수 및 열전달 계수, K_0 는 전열관 재료의 열전도율, t 는 전열관의 두께, A_m 는 관의 대수 평균 표면적이다.

열전달계수 h_0 와 전열관의 외부 표면적 (A_0)을 기준으로한 열관류계수 U_0 와의 관계는 깨끗한 전열관을 사용하였으므로 불결계수 F_i 와 F_o 는 모두 '0'으로 내부 및 외부 표면에서의 불결 저항은 '0'이므로 외부 표면적을 기준으로 한 열관류계수 U_0 는 다음과 같이 간단하게 된다.

$$\frac{1}{U_0} = \frac{A_0}{h_o A_i} + \frac{A_0 F_i}{A_i} + \frac{A_0 \ln(r_o/r_i)}{2\pi K_0 L} + F_o + \frac{1}{h_o}$$

$$= \frac{r_o}{r_i h_i} + \frac{r_o \ln(r_o/r_i)}{K_0} + \frac{1}{h_o} \quad (3)$$

여기서 r_i, r_o 는 전열관의 내부 및 외부 반지름이고 L 는 전열관의 길이이다.

전열관을 통해 유동층내에서 전열관 내의 물로 전달된 열량 q_1 은 보존되므로 두 열량값이 같아 다음 식을 얻을 수 있다

$$\frac{T_A - T_B}{\frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi K_0 L} + \frac{1}{h_o A_o}} = C_{pw} \rho_w Q_w (T_2 - T_1) \quad (4)$$

T_A 는 평균 유동층 온도, T_B 는 전열관 내의 물의 평균온도, C_{pw}, m, Q_w, ρ_w 는 물의 정압비열, 질량흐름률, 유량, 밀도이고 T_1, T_2 는 전열관속을 흐르는 물의 입구 및 출구 온도이다.

여기서 전열관 내의 물의 평균온도 T_B 는 다음과 같다.

$$T_B = \frac{T_2 - T_1}{\ln(T_2/T_1)} \quad (5)$$

식 (5)을 식 (4)에 대입하고 h_o 에 대하여 정리하면

$$h_o = \frac{1}{A_0} \frac{1}{\frac{T_A - T_1}{C_{pw} \rho_w Q_w (T_2 - T_1)} - \frac{1}{h_i A_i} - \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi K_0 L}} \quad (6)$$

h_i 와 측정값 T_A, T_1, T_2, Q_w 와 전열관의 크기에 의한 값 r_i, r_o, L 등을 식 (6)에 대입하여 h_o 를 구할 수 있다.

3. 실험장치 및 결과

3.1 실험장치

Fig. 2는 순환유동층 전열 실험장치의 계통도이며 순환유동층 연소로 본체, 유동화 공기 공급장치, 냉각수 공급장치, 집진장치, 예열장치 및 계측기 등으로 구성되어 있다. 층내물질은 실제 국내 무연탄을 연소하는 발전소의 회재와 유사한 성질의 모래를 사용하고 실제 석탄을 연료로 하는 순환유동층 연소로와 같은 연소실 분위기를 얻기 위하여 유동층 내에 실제 화염이 존재하도록 하였다.

3.2 전열관의 종류

전열 실험에 사용한 전열관은 매끈한관(smooth tube)와 환관(finnd tube)의 2종류로 바깥지름 48.6 mm, 안지름 30.6, 길이 700 mm인 Boiler용 고압강관을 사용하였다. 환이 부착된 전열관의 환 높이는 5 mm로 일정하며, 환이 가공된 길이는

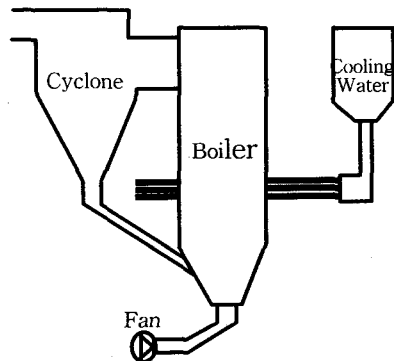


Fig. 2 Experimental apparatus

모두 250 mm 이고, 흰 경사각(rake angle)에 따라 25°, 30°, 35°, 40°, 45°, 50°의 6종류 흰이 부착된 전열관에 대하여 전열 실험을 하였다.

3.3 유동매체의 종류

유동매체의 크기는 평균 입자의 크기에 따라 시료 A, B의 2종류를 선택하였으며, 실험하기 전의 입자 크기로 시료 A는 0.5 mm 이상 2.35 mm 이하의 크기로 평균 입자 크기는 1.22 mm이었고, 시료 B는 1.0 mm 이상 3.25 mm 이하의 크기로 평균 입자의 크기는 1.54 mm이었다.

3.4 열전달 실험결과

열전달계수는 동일한 전열관 및 공탐속도에서 층내 온도가 증가할수록 또한 유동매체의 크기가 작을수록 증가한다. Fig. 3과 4는 시료 A와 B에 대하여 흰 경사각 변화에 대하여 열전달계수 변화를 나타내고 있다. 동일한 전열관, 층내 온도 및 유동매체의 크기에 대하여 공탐속도가 증가함에 따라 열전달계수가 약간 증가하다가 감소하는 경향이 있으나 실험이 이루어진 공탐속도의 범위 내에서의 평균 열전달계수에 대하여 편차가 ± 6% 이내로 그 변화량은 아주 작았다.

열전달 계수가 최대인 전열관은 유동매체가 A인 경우에는 흰 경사각이 25°인 흰 전열관이며, B인 경우에는 흰 경사각이 $\theta=30^\circ$ 인 흰 전열관으로 매끄러운 전열관에 비해 열전달계수가 각각 약 2배와 1.8배 증가하였다.

4. 결론

흰 전열관에서의 열전달계수가 매끄러운 전열관에서의 열전달계수보다 크고 유동매체의 크기에 따라 최대 열전달계수를 갖는 흰 전열관의 흰 경사각이 다르다. 또한 동일한 유동매체의 공탐속도에서 층내 온도가 증가할수록 흰 경사각의 변화에 대한 열전달계수의 변화폭이 커져서 흰 경사각의 영향이 명확하게 나타난다.

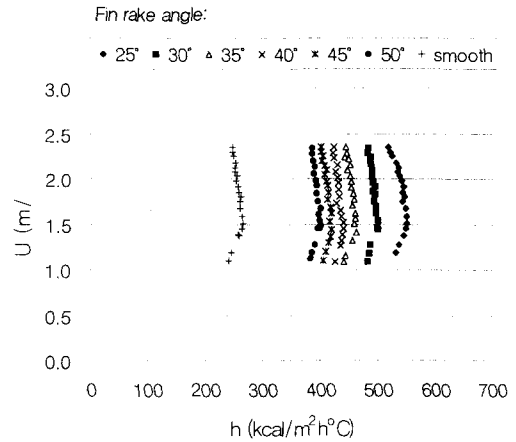


Fig. 3 Effect of fin rake angle on heat transfer coefficients for specimen A at 720°C

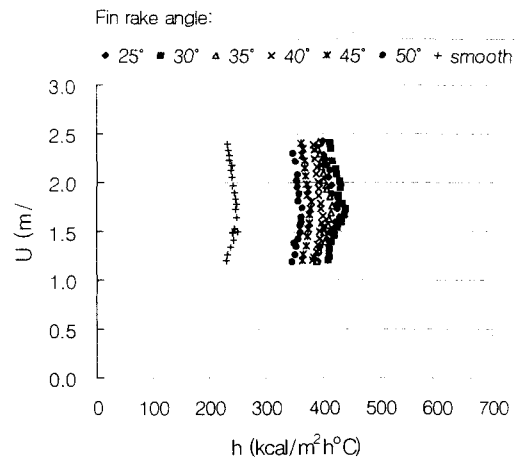


Fig. 4 Effect of fin rake angle on heat transfer coefficients for specimen B at 720°C