

國產 低質無煙炭 燃燒用 流動層 燃燒爐 開發 및 熱效率 增大에 관한 研究

A Study on the Augmentation of Thermal Efficiency and the Development for the Fluidized Bed Combustor Utilizing Korean Low Grade Anthracite Coals

李 寬 錫*
K. S. Rhee

ABSTRACT

Characteristics of heat transfer in a smooth and finned tube located vertically in atmospheric fluidized bed combustor which uses low grade anthracite coals was studied.

Experiments to investigate the characteristics of heat transfer between smooth and finned tube are carried out and the results depend on particle size, fluidizing air velocity and bed temperature are summarized.

It is found that heat transfer coefficient of the smooth and finned tube increases with decrease in particle diameter and increase in bed temperature.

Furthermore, it is noted that heat transfer coefficient increase at the first with increase in the velocity of fluidizing air and tends to decrease at a certain fluidizing air velocity.

The increase of heat transfer coefficient for the finned tube is appeared to be increased in 30% compared to that for the smooth tube.

記 號 說 明

C_{pf} : 냉각수의 비열 [J/Kg °C]
 D_i : 전열관의 내경 [mm]
 \bar{d}_p : 평균입자 직경 [mm]
 h_i : 전열관의 열전달계수 [W/m² °C]
 K_f : 냉각수의 열전도도 [W/m °C]
 M_{so} : 냉각수의 유량 [Kg/sec]
 U_{mf} : 最小 流動化 速度 [m/sec]
 x : 粒子的 質量分率
 Δp : 압력손실 [mm H₂O]

Pr : Prandtl 수
 Re_f : Reynolds 수

1. 序 論

流動層 燃燒技術은 固定層을 형성하고 있는 입자들이 유동화기체에 의해서 서서히 움직이기 시작하여 유동층 무게만큼의 압력이 공기 분산판을 통하여 공급될때 완전유동화 상태를 유지하며 고체입자와 Gas 2相이 유동하면서 연소하는 것으로서, 熱量 2,000 Kcal/kg의 低

品位 연료를 안정하게 연소할 수 있고, 특히 固一氣系의 경우는 유속의 증가에 따라 空 隙 率이 증가하게 되고 더 큰 유속에서는 기포가 발생하게 되어 이러한 上 昇 氣 泡의 作 用으로 입자들의 표면적을 크게하여 큰 熱 傳 達 效 果를 얻을 수 있으며 혼합식의 경우는 연소효율을 99%까지 높일 수 있다. ^{1,2,3,4,5,6)}

本 研究는 국산 저질무연탄을 연료로 사용하는 常 壓 氣 泡 狀 流 動 層 燃 燒 爐의 層 內에 2 種의 傳 熱 管 즉, 平 滑 管 및 環 狀 形 Fin 管을 설치하여 熱 傳 達 特 性을 究 明하고자 한다.

2. 實 驗 裝 置 및 實 驗 條 件

2.1 實 驗 裝 置

Fig. 1은 본 실험에서 사용한 실험장치의 概 略 圖를 나타낸 것이다.

Coal hopper에서 나온 석탄은 Conveyer belt에 낙하·이송되어 Screw feeder를 거쳐 연소로에 공급되며, 석탄공급량은 속도조절기를 부착한 1/2마력의 전동기를 사용하여 3~10kg/hr로 조절하였다.

유동화 공기는 압력 1.0kg/cm², 최대유량 4.71m³/min인 Rotary type 송풍기로 송풍하였으며, 공기유량 측정은 최대용량 2.000N l/min의 공기유량계를 사용하였다. 송풍기에서 나온 공기는 공기에열기에서 80℃ 정도로 예열한 후 연소로에 공급하도록 하였다.

연소실내의 온도분포를 측정하기 위해 연소실 각 위치에 5개의 傳 熱 管 入 口 口 徑을 만들고 직경 0.5 mm의 K-type 열전대를 넣어서 연소실의 온도분포를 측정하였다.

또한 전열관에서의 열전달 계수를 구하기 위해 전열관 입·출구 온도를 측정하였으며, 층류의 경우 식(1)과 같은 Leveque 식에 의거, 난류의 경우는 식(2)과 같은 Dittus-Boelter 식에 의거 열전달계수를 구했다.⁷⁾

$$\frac{h_i D_i}{K_f} = 1.62 \left(\frac{4 M_w C_{pf}}{\pi K_f L} \right)^{1/3} \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{h_i D_i}{K_f} = 0.023 Pr^{0.4} Re_f^{0.8} \dots \dots \dots (2)$$

Fig. 2는 본실험에서 사용한 Fin 관의 개략도를 나타낸 것이며

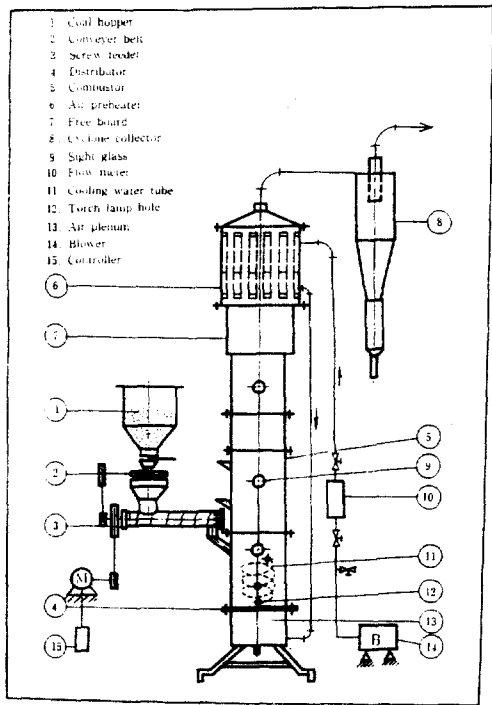


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus

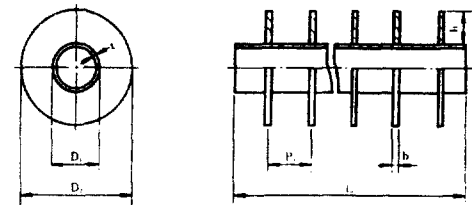


Fig. 2. Schematic diagram of finned tube

- b : Fin 管의 Fin 幅
- D1 : Fin 管의 內 徑
- D2 : Fin 管의 Tip 直 徑
- h : Fin 管의 高 이
- L : 傳 熱 管 長 이
- Pf : Fin 管의 厚 지
- t : 傳 熱 管 厚 度

본실험에서 流 動 媒 體로 사용한 층물질 (Bed ash)과 석탄의 입자크기는 다음과 같은 Leva의 방정식⁸⁾에 의하여 구했다.

$$\bar{d}_p = \left(\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{d_i} \right)^{-1} \dots \dots \dots (3)$$

2.2 實 驗 條 件

○ 석탄공급량 : 3.0 ~ 10.0 [Kg/hr]

- 爐內徑 : 380 [mm]
- 석탄입자 평균직경 : 0.414 [mm]
- 충물질 입자직경 : 0.312, 0.485, 0.625 [mm]
- 공기속도 : 0.35 ~ 2.00 [m/sec]
- 충온도 : 800 ~ 1,000 [°C]
- 충압력 : 1[atm]
- 전열관 직경 : 12.5 [mm]
- 전열관 길이 : 250.0 [mm]
- 전열관 두께 : 1.0 [mm]
- Fin 관의 Tip 직경 : 30.0 [mm]
- Fin관의 pitch : 11.0 [mm]
- Fin높이 : 8.75 [mm]

3. 實驗結果 및 考察

3.1 最小 流動化 速度

Fig. 3 은 상온에서 각각의 충물질에 대한 공기속도와 압력손실과의 관계를 나타낸 것이며, 각각의 경우에 따른 최소 유동화 속도 (U_{mf})를 알 수 있다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 최소 유동화 속도 이후에서는 공기유속을 증가하여도 압력손실은 거의 일정하게 평형을 유지하고 있다.

Fig. 4 는 충온도 1,000 °C의 경우에 대해서 유동화 공기속도와 압력손실과의 관계를 나타낸 것이다.

이상의 그림에서 알 수 있는 바와 같이 입자직경이 증가함에 따라 최소 유동화 속도는

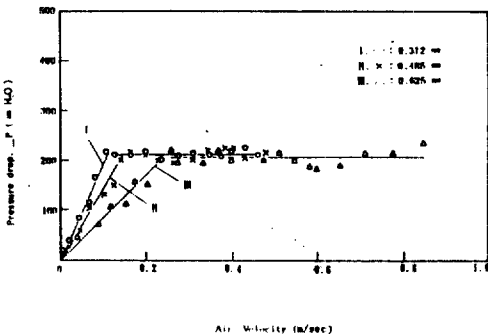


Fig. 3. Pressure drop versus air velocity at room temperature for each particles

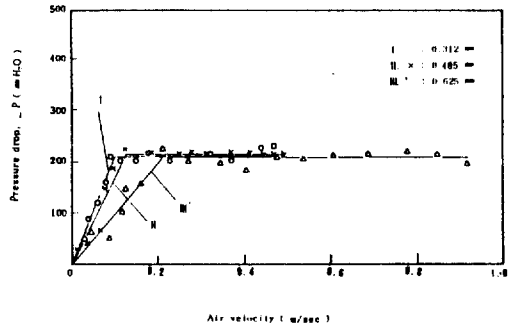


Fig. 4. Pressure drop versus air velocity at bed temperature of 1,000 °C for each particles

증가하며, 모든 경우 최소 유동화 속도 이상의 공기유속에서는 압력손실이 일정하게 나타나고 있다.

또한 동일 입자직경의 경우 상온에서의 최소 유동화 속도가 고온의 경우보다 다소 높게 나타나고 있다.

이와같은 이유는 충물질의 평균입자직경이 2 mm이하인 본실험의 경우 공기의 점도는 온도가 올라갈수록 증가하므로 최소유동화 속도는 감소하게 된다.

3.2 燃燒爐內的 溫度分布

Fig. 5 는 충온도 800 °C에서 충높이에 따른 노내온도 분포를 나타낸 것으로 본 실험에서는 전열관의 유무 및 종류에 따른 충내 온도 변화는 거의 없는 것으로 나타났으며, 각각의 경우 충높이 300 ~ 800 mm의 영역에서 거의

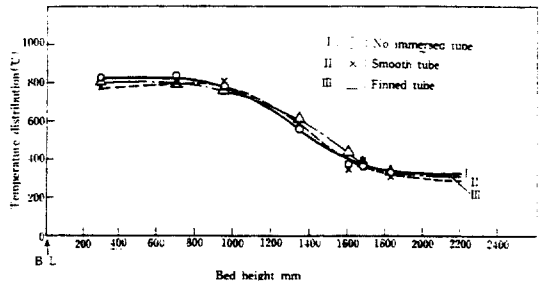


Fig. 5. Temperature distribution of axial direction in bed at the air velocity of 1.0m/sec and approximately 45cm of static bed height

균일한 온도분포를 나타내고 있기 때문에 이 영역내에 전열관을 설치하였다.

한편 기준온도 850, 900, 950, 1,000 °C의 경우도 800 °C의 경우와 거의 동일한 경향이 나타났다.

3.3 平滑管의 熱傳達係數

3.3.1 流動化 空氣速度의 影響

Fig. 6, 7은 평활관을 사용할 경우, 층온도 800 °C와 1,000 °C일때 각 유동물질의 평균입자직경에 대한 유동화 공기속도와 열전달계수와의 관계를 나타낸 것이다.

이들 그림에서 알 수 있는 바와 같이 유동화 공기속도에 따른 열전달계수는 공기유속이 증가하면 초기에는 열전달계수 증가율이 증대하면서 서서히 그 증가율이 감소하여 일정속도 이후에서는 오히려 열전달계수가 감소하는 경향을 나타내고 있다.

이와같은 傾向은 공기유속이 0 으로부터 증

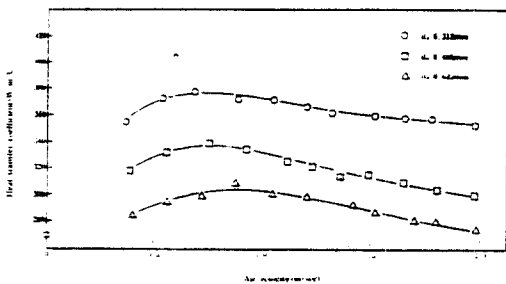


Fig. 6. Effect of air velocity on heat transfer coefficients at the bed temperature of 800°C for smooth tube

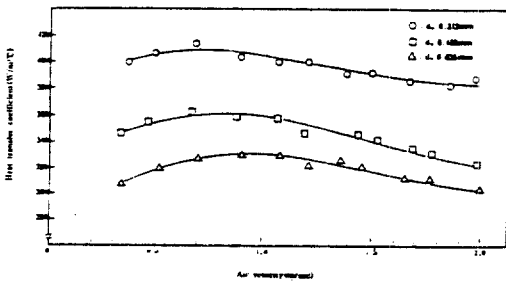


Fig. 7. Effect of air velocity on heat transfer coefficients at the bed temperature of 1,000°C for smooth tube

가하여 유동화 개시상태에 이르면 입자들의 혼합이 활발해지고, 또 입자의 체류시간이 짧아지므로 초기 열전달계수는 급격히 증가하게 된다. 더욱 더 유동화 공기속도를 증가시키면 기포가 발생하게 되는데 이러한 상승기포가 입자들의 表面積을 크게하여 공기속도와 최소 유동화 속도와의 비(U/U_{mf})가 6~8인 범위에서 열전달계수의 최고점을 나타낸다.

3.3.2 流動層 溫度의 影響

Fig. 8과 Fig. 9는 유동화공기속도 0.5m/s와 2.0m/s일때 각각의 평균입자직경에 대한 유동층온도와 열전달계수와의 관계를 나타낸 것이다. 이들 그림에서 알 수 있는 바와 같이 유동층온도가 높을수록 열전달계수는 증가한다. 이와같은 理由는 층온도가 증가함에 따라 층물질의 열전도도가 증가하기 때문으로 생각된다.

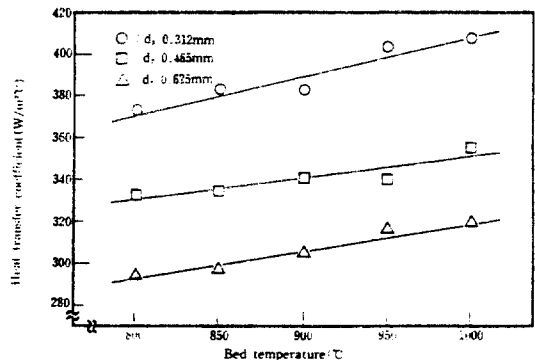


Fig. 8. Effect of bed temperature on heat transfer coefficients at the air velocity of 0.5m/s for smooth tube

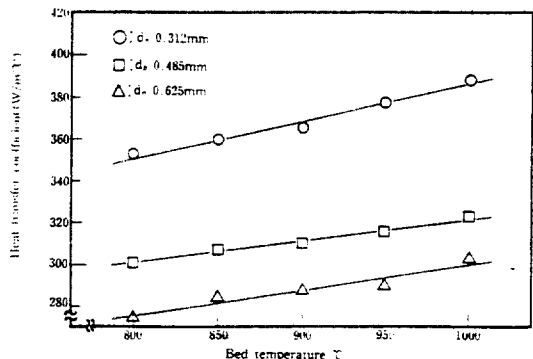


Fig. 9. Effect of bed temperature on heat transfer coefficients at the air velocity of 2.0m/s for smooth tube

3.3.3 粒子 直径의 影響

Fig. 10과 11은 유동화 공기속도가 0.5 m/s와 2.0 m/s 일때 각 유동층 온도에 따른 유동 물질의 평균입자직경과 열전달계수와의 관계를 나타낸 것이다. 이들 그림에서 알 수 있는 바와 같이 입자직경이 작을수록 열전달계수는 높은 것으로 나타났다. 이와같은 이유는 입자경이 작을수록 입자 체류시간이 짧아져 입자가 전열관과 接觸하는 빈도수가 증가하기 때문에 전열관 벽면과 입자 덩어리(Packet) 사이의 Gas 막의 薄膜化로 열열저항을 감소시키기 때문이라고 생각된다.⁹⁾

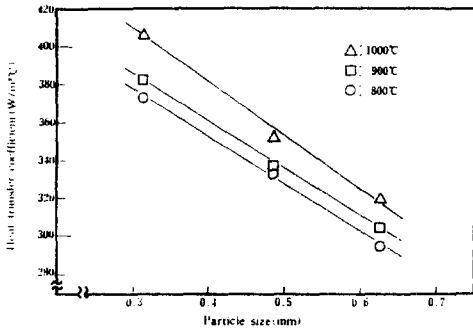


Fig. 10. Effect of particle size on heat transfer coefficients at the air velocity of 0.5 m/s for smooth tube

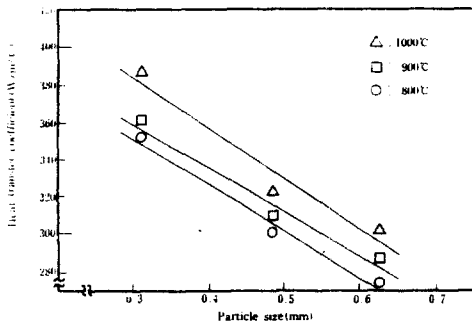


Fig. 11. Effect of particle size on heat transfer coefficients at the air velocity of 2.0 m/s for smooth tube

3.4 Fin管的 熱傳達係數

3.4.1 流動化 空氣速度的 影響

Fig. 12, 13은 전열관으로서 Fin 관을 사용할 경우 유동층 온도 800 °C와 1,000 °C 일때 각 평균입자직경에 대한 유동화공기 속도와 열전달계수와의 관계를 나타낸 것이다.

이들 그림에서 알 수 있는 바와 같이 Fin 관의 경우도 평활관과 마찬가지로 공기유속이 증가하면 초기에는 열전달계수 증가율이 증대하면서 서서히 그 증가율이 감소하며, 일정속도 이후에는 오히려 열전달계수가 감소하는 경향을 나타내고 있으며, Fin 관의 경우가 평활관보다 25~30% 정도의 열전증진 효과가 있는 것으로 나타났으며, U/U_{mf} 의 값이 7~10인 범위에서 열전달계수의 최고점을 나타낸다.

이와같은 이유는 Fin 관의 경우 전열관의 유효접촉 면적이 평활관에 비해 훨씬 크고, 특히 $P_f/dp > 2$ 인 경우는 입자매움현상이 나타

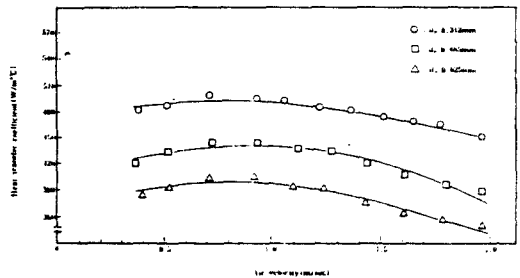


Fig. 12. Effect of air velocity on heat transfer coefficients at the bed temperature of 800 °C for finned tube

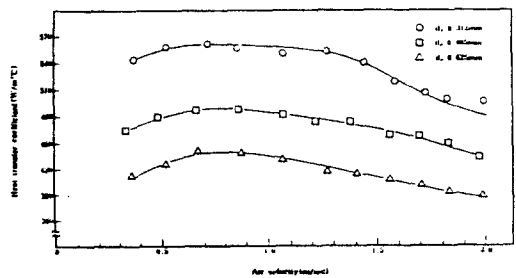


Fig. 13. Effect of air velocity on heat transfer coefficients at the bed temperature of 1,000 °C for finned tube

나지 않아 입자체류시간이 감소하게 되므로 결국 입자와 전열관의 접촉 빈도수가 증가하게 되어 열전달계수가 평활관에 비해 훨씬 크게 나타나는 것으로 생각된다.¹⁰⁾

한편 열전달계수의 최고점을 나타내는 점에서의 U/U_{mf} 의 값이 평활관에 비해 Fin 관이 다소 큰 이유는 Fin관에 의한 기포의 분쇄로 유동층내의 기포크기가 감소하기 때문으로 생각된다.

3.4.2 流動層 溫度의 影響

Fig. 14와 15는 유동화 속기속도 0.5m/s와 2.0m/s일때 각 입자직경에 따른 유동층 온도와 열전달계수와의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와같이 층온도에 따른 Fin 管의 열전달계수도 평활관과 거의 유사한 경향을 나타내고 있으며 평활관보다 30% 정도의 전열증진 효과를 나타내고 있다.

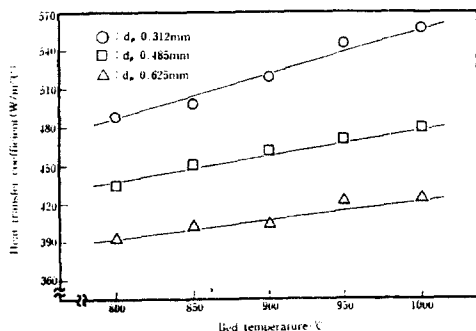


Fig. 14. Effect of bed temperature on heat transfer coefficients at the air velocity of 0.5m/sec for finned tube

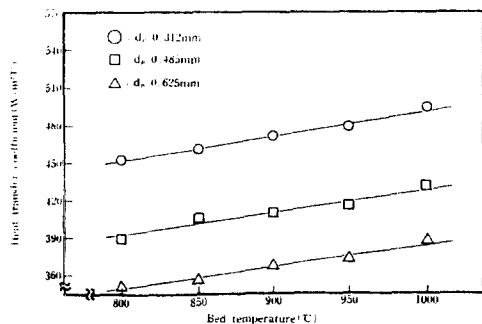


Fig. 15. Effect of bed temperature on heat transfer coefficients at the air velocity of 2.0m/sec for finned tube

3.4.3 粒子 直徑의 影響

Fig. 16과 17은 유동화 공기속도 0.5m/s와 2.0m/s일때 각 유동층 온도에 따른 입자직경과 열전달계수와의 관계를 나타낸 것으로 평활관과 마찬가지로 입자직경이 작을수록 열전달계수는 증가하는 경향이 나타나고 있으며, Fin 관의 경우가 평활관에 비해 35% 정도의 전열증진효과를 나타내고 있다. 이와같은 이유는 입자직경이 작을수록 평활관에 비해서 Fin 관의 입자체류시간이 더욱 짧아져 입자가 전열관과 접촉하는 빈도수가 증가하며, 동시에 전열관 벽면과 집단 입자사이의 Gas 막의 薄膜化로 전열저항이 감소되기 때문으로 생각된다.

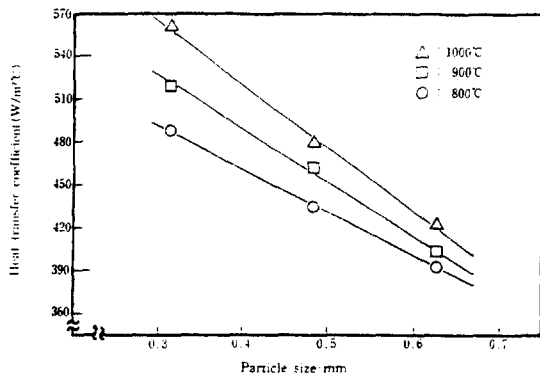


Fig. 16. Effect of particle size on heat transfer coefficients at the air velocity of 0.5m/sec for finned tube

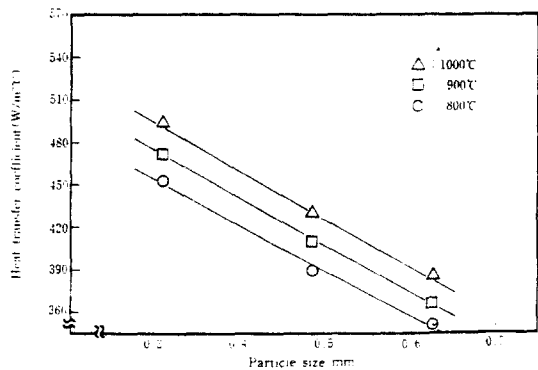


Fig. 17. Effect of particle size on heat transfer coefficients at the air velocity of 2.0m/sec for finned tube

4. 結 論

(1) 최소유동화속도 U_{mf} 는 총물질의 평균입자직경이 클수록 증가한다.

(2) 유동화공기속도에 따른 최대열전달계수는 평활관의 경우 공기속도와 최소유동화속도와의 비(U/U_{mf})가 6~8인 범위에서 412W/m² °C를, 그리고 Fin 관의 경우는 7~10의 범위에서 561W/m² °C를 나타내며, 이들 속도비에서는 평활관 보다 Fin 관이 약 25~30 % 정도의 전열증진 효과를 나타낸다.

(3) 층온도에 따른 열전달계수는 평활관보다 Fin 관이 30 % 정도의 전열증진 효과를 나타내며, 평활관과 Fin 관 공히 층온도가 올라갈수록 열전달계수는 증가한다.

(4) 총물질의 평균입자직경에 따른 열전달계수는 평활관보다 Fin 관이 35 % 정도의 전열증진효과를 나타내며, 평활관과 Fin 관 공히 입자직경이 작을수록 열전달계수는 증가한다.

後 記

이 論文은 1988年度 文敎部 支援 韓國學術 振興財團의 自由公募 課題 學術研究 助成費에 의하여 研究되었음.

參 考 文 獻

1. F.D. Hussein, P.P. Maltra and R. Lackson, "Heat Transfer to a Fluidized Bed using a Particulate Heat Transfer Medium," Ind. Eng., Chem., Process Des. Dev. Vol. 20, pp.511-519, 1981.
2. S.E. George and J.R. Grace, "Heat Transfer to Horizontal Tubes in a Pilot-Scale Fluidized Bed," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.24, No.4, pp.592-594, 1982.
3. W.K. Lewis, E.R. Gilliland and H. Girouard, "Heat Transfer and Solids Mixing in Beds of Fluidized Solids", Chem. Eng. Prog. Symposium Series, Vol.58, No.38, pp.87-97, 1981.
4. H. Mickley and C. Trilling, "Heat Transfer Characteristics of Fluidized Beds, Ind. and Eng. Chemistry, Vol.41, No.6, pp.1135-1147, 1949.
5. B.R. Andeen, L.R. Glicksman and R. Bowman, "Heat Transfer from Flattened Horizontal Tubes", Fluidization, Cambridge Univ. Press, pp.345-350, 1978.
6. L.S. Cohen, "Fluidized Bed Combustion", CEP, 1984.
7. H.P. Holman, "Heat Transfer", McGraw-Hill Book Co., 1981.
8. N.V. Kharchenko and K.E. Makhorin, "The rate of Heat Transfer between a Fluidized Bed and an Immersed Body at High Temperature", Int. Che. Eng., Vol.4, No.4, pp.650-654, 1964.
9. L.P. Golan, D.C. Cherrington, R. Diener, C.P. Golan, D.C. Scarborough and S.C. Weiner, "Particle Size Effects in Fluidized Bed Combustion", CEP, pp.63-72, 1979.
10. N.S. Gremal, S.C. Saxena, "Effect of Surface Roughness on Heat Transfer from Horizontal Immersed Tubes in a Fluidized Bed", J. of Heat Transfer, Vol.101, pp.397-403, 1979.