

[논문] 태양에너지
Solar Energy
Vol. 14, No. 2, 1994

氣-固流動層內流動化 및 傳熱特性에 관한 研究(II)

朴鍾淳* · 白高吉** · 金殷泳*** · 全成鐸***

*韓國原子力 研究所

**大田産業大學校

***仁川專門大學

“Fluidization and Heat Transfer Characteristics in the Fluidized Bed(II)”

Park, Jong-Suen* · Baek, Ko-Kil** · Kim, Yeun-Young***

Jeon, Sung-Taek***

*Korea Atomic Energy Research Institute

**Taejon University of Technology

***Incheon Junior College

요 약

본 연구에서는 Furan foundry sand 유동층에서 유동화 특성과 Single spiral coil tube 에 대한 열전달 특성을 실험하였으며, 전열관의 Pitch 와 직경의 비($p/D_o=1.58, 2.37, 3.17, 4.75$) 및 전열관의 Pitch 와 유동입자 크기의 비($p/d_p=21.25, 25.15, 30.18, 35.93$)가 전열특성에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다.

그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) p/D_o 가 증가 할수록 평균 열전달계수는 증가한다.
- 2) 평균 Nusselt 수의 증가율은 $p/D_o=4.75$ 일 때보다 1.58 일 때가 더 크다.
- 3) 평균 Nusselt 수와 Re 수, Pr_g 수 및 p/d_p 의 상관 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있었다.

$$Nu_{mean} = C Re^m Pr_g^{0.4} (p/d_p)^n$$

ABSTRACT

The fluidization characteristics of the furan foundry sand fluidized bed and the heat transfer characteristics on a single spiral coil tube in the bed have been investigated.

In the paper, the heat transfer coefficients for a single spiral coil tube are measured in the furan foundry sand bed as a function of the ratio of heated coil tube pitch to diameter (p/D_o) and the ratio of heated coil tube pitch to particle size (p/d_p).

The experimental results are as follows.

- 1) Mean heat transfer coefficients increases according to the increasing ratio of heated coil tube pitch to diameter (p/D_o).
- 2) The increasing rates of mean Nusselt numbers are more greater in the case of $p/D_o=1.58$ than $p/D_o=4.75$.
- 3) Mean Nusselt number can be expressed by the following equation,

$$Nu_{\text{mean}} = C Re^m Pr_g^{0.4} (p/d_p)^n.$$

NOMENCLATURE

- A_o : heat transfer surface area of cooling tube (m^2)
 C_{pf} : specific heat of water ($J/kg \text{ } ^\circ C$)
 C_{pg} : specific heat of gas ($J/kg \text{ } ^\circ C$)
 D_i : inside diameter of heat transfer tube (m)
 C_L : logarithmic mean diameter (m)
 C_o : outside diameter of heat transfer tube (m)
 d_p : particle diameter (m)
 g : acceleration of gravity (m/sec^2)
 h_c : convective heat transfer coefficient ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)
 h_{gc} : gas convective heat transfer coefficient ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)
 h_i : heat transfer coefficient between tube and water ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)
 h_o : heat transfer coefficient between bed and tube ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)
 h_{pc} : particle convective heat transfer coefficient ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)
 h_r : radiative heat transfer coefficient ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)
 k_f : conductivity of water ($W/m \text{ } ^\circ C$)
 L : length of heat transfer tube (m)
 M_v : density ratio [$(\rho_p - \rho_f) / \rho_f$]

- M_w : flow rate of water through heat transfer tube (kg/sec)
 t_m : average temperature at inside and outside tube (°C)
 U_o : overall heat transfer coefficient (W/m² °C)
 X_w : wall thickness at inside and outside tube (m)
 U : velocity of gas (m/sec)
 U_f : velocity of water (m/sec)

GREEK LETTERS

- ΔT : temperature difference of cooling water (°C)
 ΔT_L : logarithmic mean temperature difference (°C)
 μ : viscosity of gas (N s/m²)
 μ_f : viscosity of water (N s/m²)
 ρ_f : density of water (kg/m³)
 ρ_g : density of gas (kg/m³)
 ρ_p : density of particle (kg/m³)

DIMENSIONLESS PARAMETERS

- Ar : Archimedes number $\{dp^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g / \mu\}$
 Re : Reynolds number for particle $\{\rho_g U dp / \mu\}$
 Re_f : Reynolds number for water $\{\rho_f U_f Di / \mu_f\}$
 Pr : Prandtl number of water $\{C_{pf} \mu_f / k_f\}$
 Pr_g : Prandtl number of gas $\{C_{pg} \mu / k_g\}$
 Nu : Nusselt number $\{Nu = h_o dp / k_g, Nu_{gc} = h_{gc} d_p / k_g\}$

I. 서 론

유동층은 입자와 유체사이의 접촉이 활발하여 종래에는 화학공업분야에 이용되었다. 최근에는 열전달 특성이 우수한 유동층을 열교환기 응용의 용도로 연구 및 실용화되고 있다. 이 경우에 가장 기본이 되는 전열관에 대한 입자직경, 관경, 유동층높이 및 유속 등이 열전달에 미치는 영향을 조사 연

구한 실험식들이 많이 제시되었다.¹⁾

유동층에 설치한 전열관과 유동층 사이의 열전달 특성에 대한 연구는 많은 사람들에 의해 이루어져 왔으며, 유동층에서의 주된 열전달은 대류 열전달과 복사 열전달로 구분할 수 있는데 대류 열전달은 유동층과 전열면과의 열전달, 그리고 유동입자와 Gas와의 열전달로 구분할 수 있다. 또한 유동층과 전열면 사이의 열전달은 전열관에 대한

입자 대류 열전달 성분(Particle convective heat transfer)과 Gas 대류열전달 성분(Gas convective heat transfer)으로 구분된다.²⁻¹⁰⁾

M.Jacob¹¹⁾ 등은 유동층에서 입자대류 열전달 성분은 열전달의 대부분을 차지하며, 이 성분에는 입자 대류를 발생시키는 기포에 의한 입자들에 의해 파괴되는 유체막이 열전달의 주 저항이 된다고 제안하였으며, V.M.Suprun¹²⁾ 등은 Gas 유동층의 열전달증진 실험에서 열전달계수의 대류성분을 다음과 같은 무차원식으로 나타내었다.

$$Nu_{conv.} = 0.0175 Ar^{0.46} Pr \dots\dots\dots(1)$$

S.Yagi and D.Kunii¹³⁾ 는 Re 수가 2,000 보다 작은 경우 다음과 같은 실험식을 발표하였다.

$$Nu_{gc} = 0.054 Re Pr \dots\dots\dots(2)$$

J.Szekeley and R.J.Fisher¹⁴⁾ 의 연구결과에 의하면, 단일입자에 대한 해석을 한 결과 1000°C까지는 복사에 대한 영향이 거의 없다고 보고했다.

유동층과 전열면 사이의 열전달은 다음과 같이 표시된다.

$$h_0 = h_{pc} + h_{gc} \dots\dots\dots(3)$$

전체 전열계수는 다음과 같으며,

$$\frac{1}{U_0} = \frac{1}{h_0} + \frac{X_w D_0}{k_w D_L} + \frac{D_0}{hi Di} \dots\dots\dots(4)$$

$$D_L = \frac{D_0 - Di}{\ln(D_0/Di)}$$

전열관 내부의 냉각수에 대한 열수지는 아래의 식으로 계산되며,

$$Q_1 = C_{pf} \Delta T \dots\dots\dots(5)$$

유동층과 전열관 사이의 열전달은 다음과

같다.

$$Q_2 = U_0 A_0 \Delta T_L \\ = U_0 A_0 \left[\frac{\Delta T_0 - \Delta T_i}{\ln(\Delta T_0 / \Delta T_i)} \right] \dots\dots\dots(6)$$

여기서 $Q_1 = Q_2$ 이므로 실험한 값을 대입하면 전체 전열 계수 U_0 를 구할 수 있다.

전열관내 냉각수에 대한 경막전열계수 hi 는 층류와 난류로 구분되어 다음의 두식을 이용하여 구할 수 있다.

난류인 경우 (Dittus-Boelter 식)¹⁵⁾

$$\frac{hi Di}{K_f} = 0.023 Pr^{0.4} Re_f^{0.8} \dots\dots\dots(7)$$

층류인 경우 (Leveque 식)¹⁵⁾

$$\frac{hi Di}{K_f} = 1.62 \left[\frac{4 M_w C_{pf}}{\pi K_f L} \right]^{1/3} \dots\dots\dots(8)$$

따라서 (1-4), (1-5), (1-6), (1-7), (1-8)식에서 유동층과 전열관 외벽 사이의 전열계수(h_0)를 구할 수 있다. 또한 전열관 표면의 온도는 다음의 열수지식에서 구할 수 있다.

$$T_w = Q_1 \left[\frac{X_w}{k_w \pi D_L L} + \frac{1}{\pi Di hi L} \right] + t_m \dots\dots\dots(9)$$

본 연구에서는 Furan foundry sand 유동층에서 유동화 특성과 Single spiral coil tube 에 대한 열전달실험을 행하였으며, 유동화 특성에서 평균최소 유동화 속도 및 유동층내 온도와 평균최소 유동화 속도의 관계, 열전달 특성에서 유동율, 유동층내 온도 및 유동입자가 전열계수에 미치는 영향에 대한 실험결과는 전보에 발표한 바 있다. 이에 본 연구에서는 전보에 이어서 전

열관의 Pitch 와 직경의 비(p/D_o)가 1.58, 2.37, 3.17 및 4.75 일 때와 전열관의 Pitch 와 유동입자 크기의 비(p/d_p)가 21, 25, 25.15, 30.18 및 35.93 일때 열전달에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다.

Table 2.1 Blower specification

Q'TY	Capacity (m ³ /min)	Static Pressure (mmAq)	RPM	Power (kW)
1	40	500	3250	7.5

II. 실험장치 및 실험방법

2-1. 실험장치

본 실험에 사용된 주요 장치로서는 Blower(Table 2.1), Electric heater(Fig. 2.1), 유동층(Fig. 2.2) 그리고 측정 장치 등으로 구성되어 있다.

유동층의 구조는 유동화가 일어나는 부분 ($\phi 210 \times H 430 \times 3T$), Freeboard ($\phi 290 \times H 365 \times 2T$), Air chamber ($\phi 306 \times 200L \times 6.4T$), Air 유도관 ($\phi 80 \times 400L$) 그리고 Distributor (Pitch 6mm, 912ea- $\phi 1$, 개공율 2.07%)로 제작하였으며, Air 공급장치는 Blower 에서

surge tank 를 통하여 Air flow meter (YS-500R) 를 거쳐 Air chamber 로 유입되게 하였다.

Electric heater 는 $\phi 250 \times 5T$ 의 STS304 재질로 casing 를 제작하여 열응력 및 부식에 견디도록 하였으며, Siliconit (A-12-8A) 재질의 2kwx4ea 의 Heater 를 내장시켜 실험에 필요한 온도까지 올리는데 충분하도록 하였다.

유동입자는 Furan foundry sand 를 K.S 표준체로 Sieve shaker 를 30분간씩 작동시켜 채취하였으며, Furan foundry sand 입자 분포는 Table 2.2, 본실험에 사용된 전열관은 Table 2.3 과 같다.

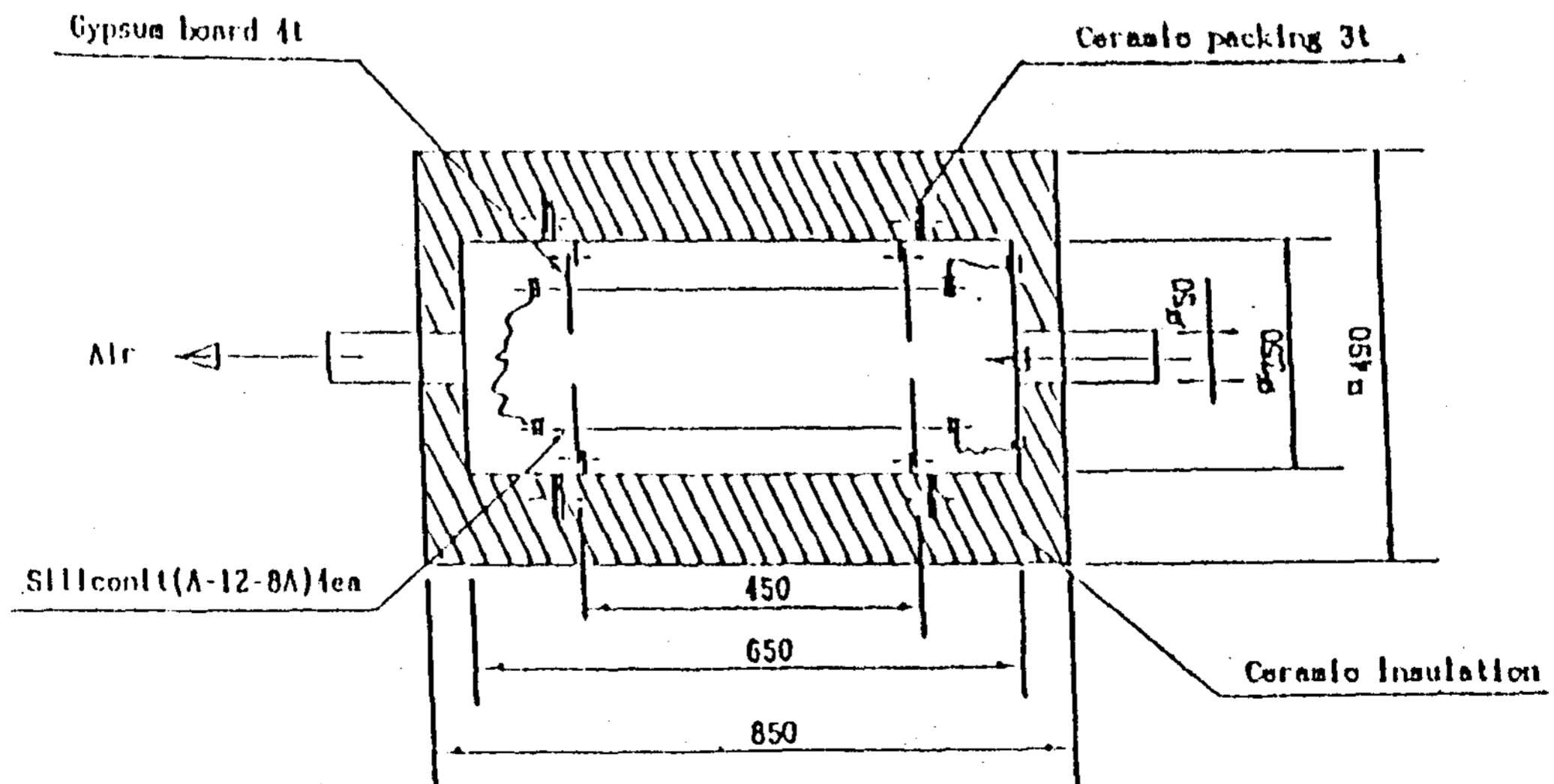


Fig. 2.1. Details of electric heater

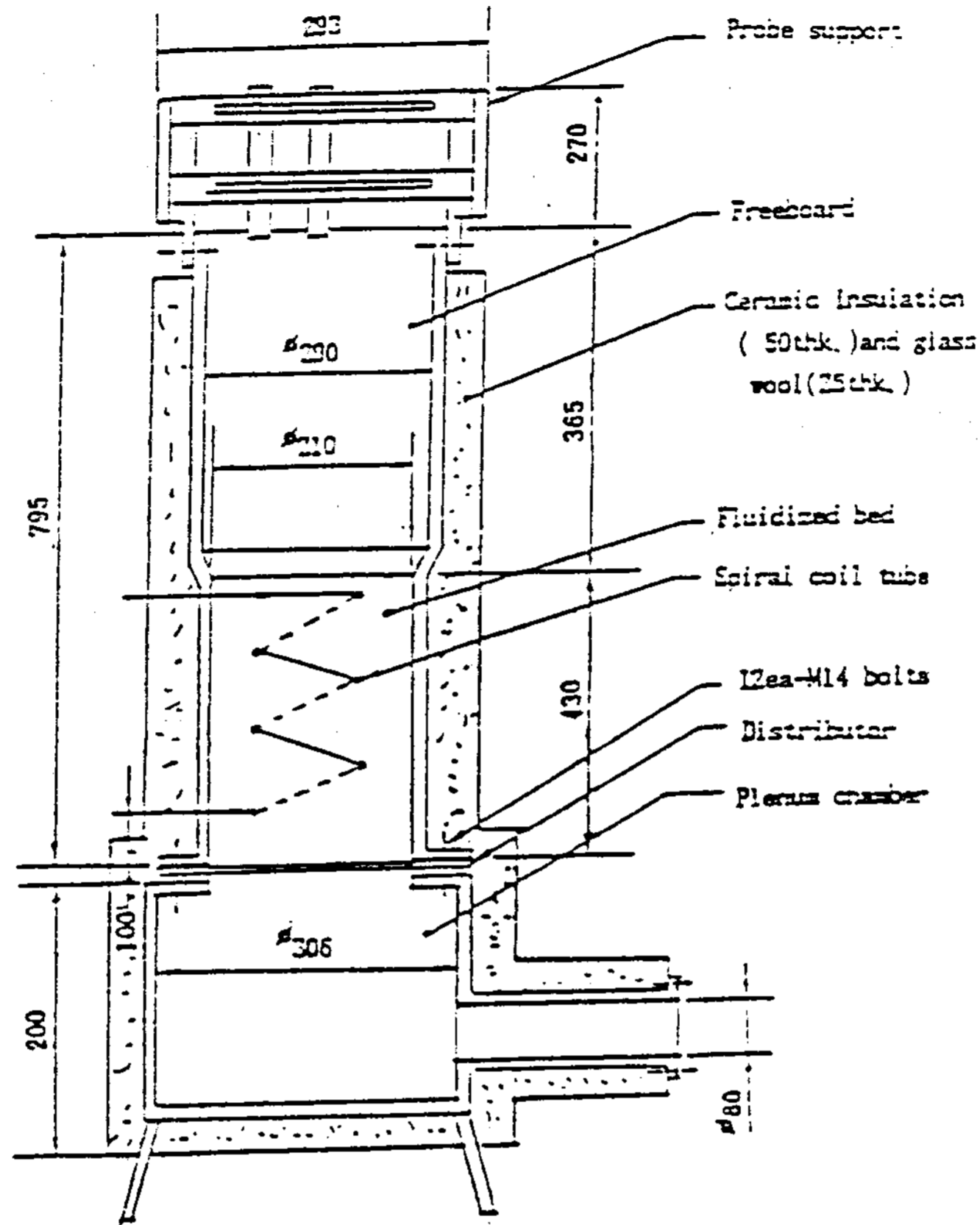


Fig. 2.2. Details of fluidized bed

Tabel 2.2 Particle size distribution of furan foundry sand

Particle size (μm)	Weight (g)	%
250	8.67	1.43
355-420	216.15	35.60
420-500	152.28	25.08
500-600	140.72	23.18
600-710	32.05	5.28
710-850	2.00	0.33
Total	607.16	100.00

Tabel 2.3 Spiral coil tube

Coil No	Size	Pitch (mm)	p/D ₀	Remark
1	KSD 5301 1/4" L-type	45.27	4.75	O.D. : 9.52mm Thk : 0.76mm
2	"	30.18	3.17	"
3	"	22.63	2.37	"
4	"	15.09	1.58	"

2-2. 실험방법

유동층내 온도는 75°C, 100°C, 150°C 및 200°C로 단계적으로 Electric heater 를 사

용하여 공기를 가열하였으며, 유동층내 온도 편차가 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 이내 유지하도록 Electric heater의 Control panel를 조정하였다.

유동입자는 Furan foundry sand로 그 크기는 $420\mu\text{m}$, $500\mu\text{m}$, $600\mu\text{m}$ 및 $710\mu\text{m}$ 이며, 전열관의 Pitch와 직경의 비가(p/Do)가 1.58, 2.37, 3.17 및 4.75인 Spiral coil tube를 설치하여 유동층내 온도 및 전열관 입출구의 온도를 K-type($\phi 0.25$) 열전대를 사용하여 Data logger(OM-500)로 그 값을 기록하였다.

III. 실험결과 및 고찰

Fig. 3.1에서 Fig. 3.4까지는 유동층내 Furan foundry sand 유동입자($420\mu\text{m}$, $500\mu\text{m}$, $600\mu\text{m}$ 및 $710\mu\text{m}$)를 사용한 경우, 전열관의 Pitch와 직경의 비(p/Do)가 열전달에 미치는 영향을 무차원으로 나타낸 것이며, 유동입자가 $420\mu\text{m}$ 에서 $p/Do=1.58$ 일 때보다 $p/Do=4.74$ 일 때가 전열효과는 약 46%, $500\mu\text{m}$ 에서 약 49%, $600\mu\text{m}$ 에서 약 43%, $710\mu\text{m}$ 에서 약 40% 각각 높은 것으로 확인되었다. 또한 Re수 증가에

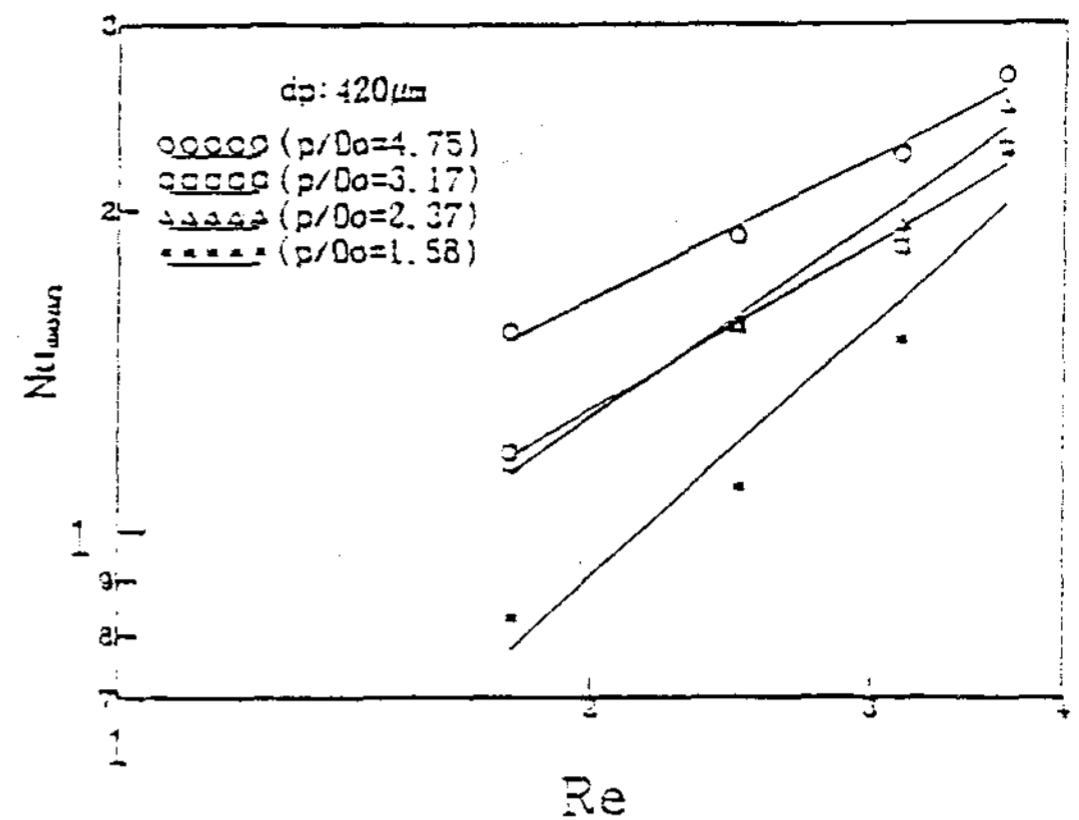


Fig. 3.1. Comparison of the mean heat transfer coefficients at the particle size of $420\mu\text{m}$ for the various p/Do .

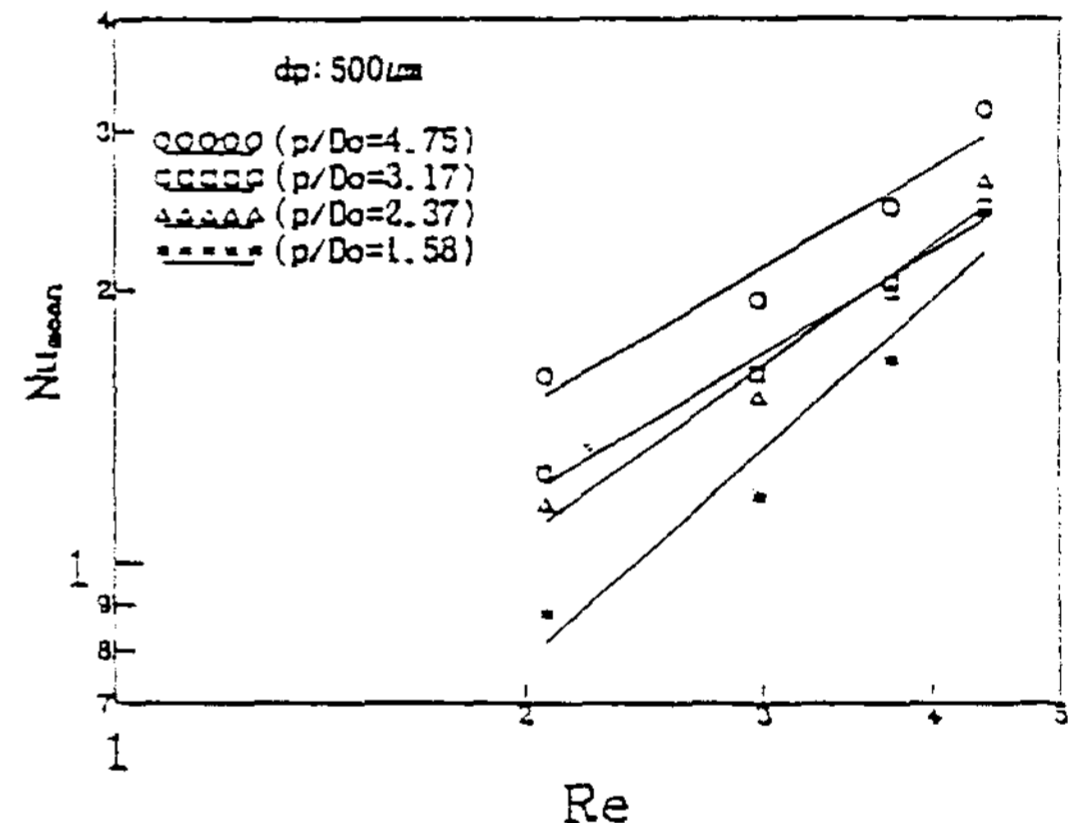


Fig. 3.2. Comparison of the mean heat transfer coefficients at the particle size of $500\mu\text{m}$ for the various p/Do .

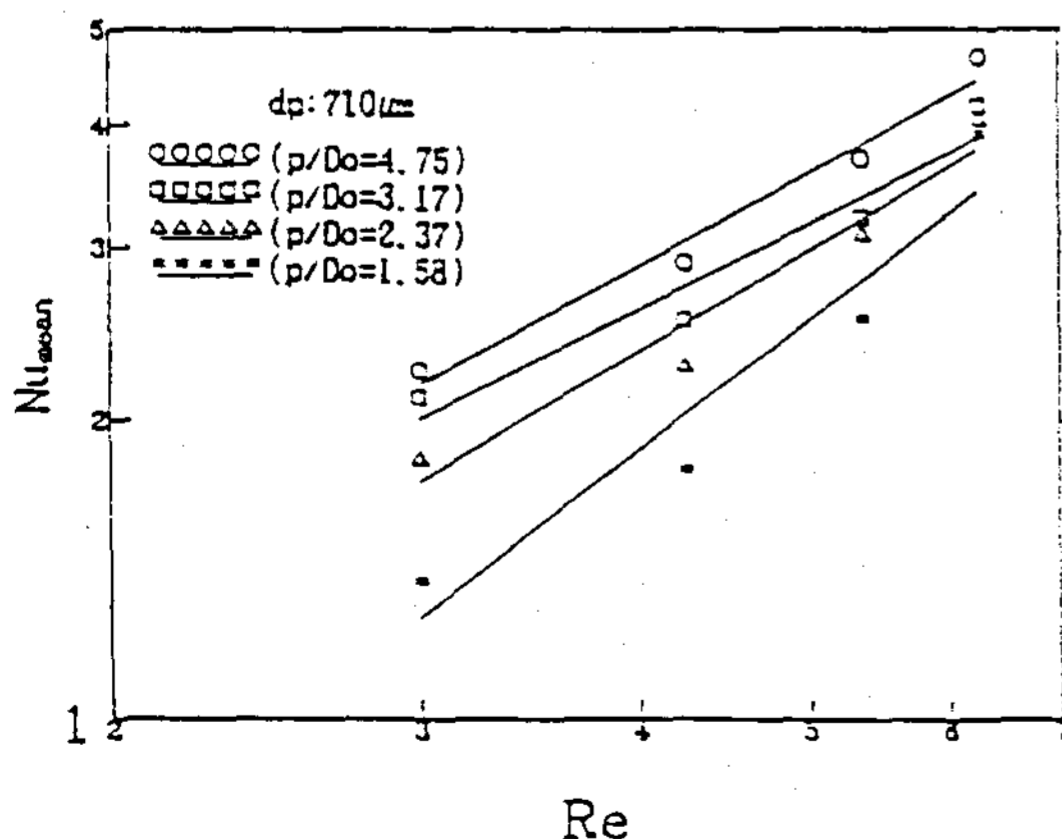


Fig. 3.4. Comparison of the mean heat transfer coefficients at the particle size of $710\mu\text{m}$ for the various p/Do .

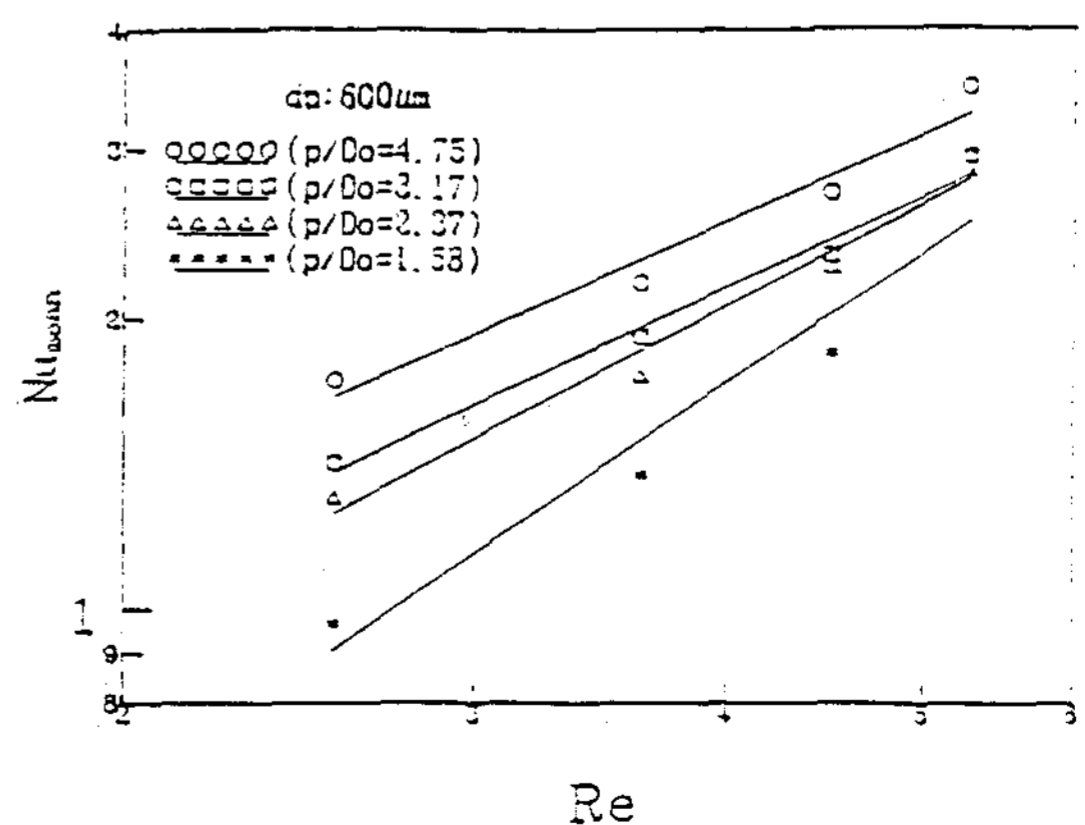


Fig. 3.3. Comparison of the mean heat transfer coefficients at the particle size of $600\mu\text{m}$ for the various p/Do .

따른 전열계수의 증가율은 유동입자 420 μm 에서 $p/Do=4.75$ 일 때와 $p/Do=1.58$ 일 때가 평균 Nusselt 수의 증가율은 약 98%, 500 μm 에서 약 80%, 600 μm 에서 약 92%, 710 μm 에서 약 76% 큰 것으로 조사되었다.

Re 수가 증가할 수록 단위 시간당 전열관과 접촉하는 유동입자의 교체빈도는 증가하게 되며 전열관의 Pitch가 작을수록 유동입자의 접촉면적이 커지므로 평균 Nusselt 수의 증가율은 높아지는 것으로 판단된다.

Fig. 3.5에서 Fig. 3.8까지는 각 전열관의 Pitch와 직경의 비(p/Do)가 1.58, 2.37, 3.17 및 4.75 이고, Pr_g 수가 0.695 일 때, 평균 Nusselt 수와 Re 수, Pr_g 수 및 전열관의 Pitch와 유동입자의 비(p/dp)의 상관 관계를 무차원 식으로 표현한 것이다. $p/Do=1.58$ 일 때 $\pm 25\%$, $p/Do=2.37$ 일 때 $\pm 24\%$, $p/Do=3.17$ 일 때 $\pm 14\%$, $p/Do=4.75$ 일 때 $\pm 15\%$ 의 각각 최대오차 범위내에 들어가는 것으로 실험 범위에서 확인되었고, 관련식들은 다음과 같이 구할 수 있었다.

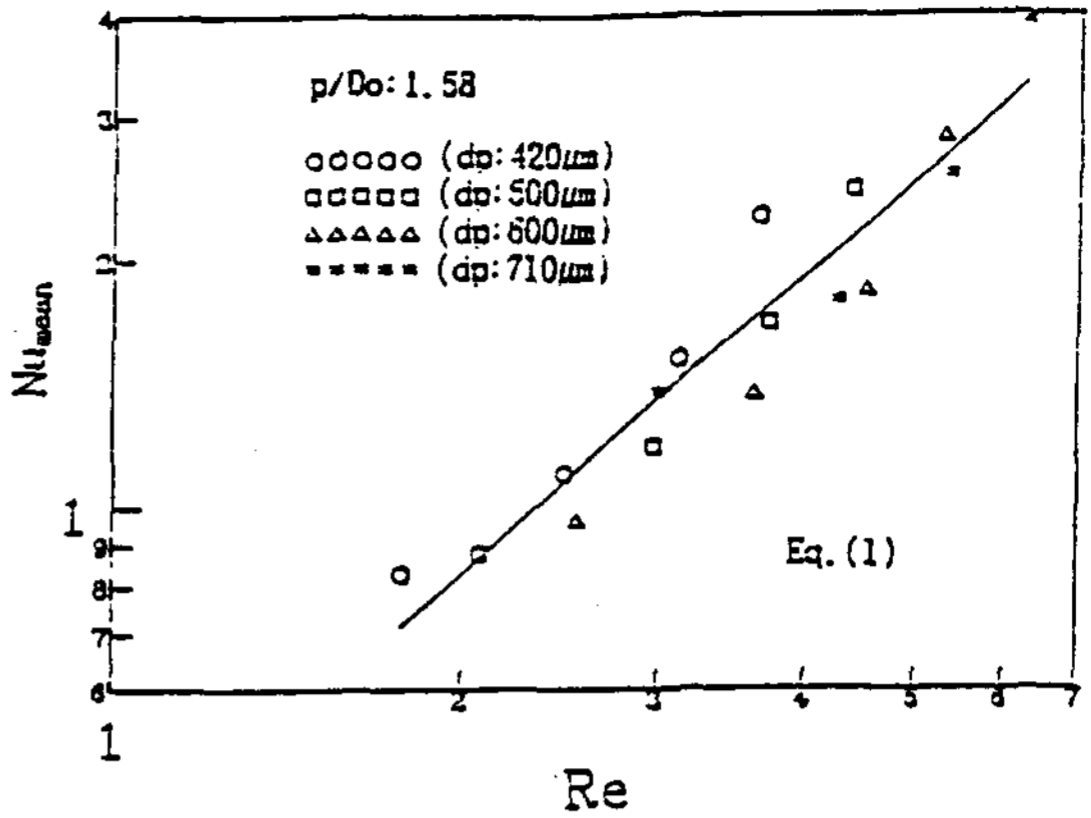


Fig. 3.5. Correlation of the mean Nusselt number on the $p/Do=1.58$ for various particle sizes.

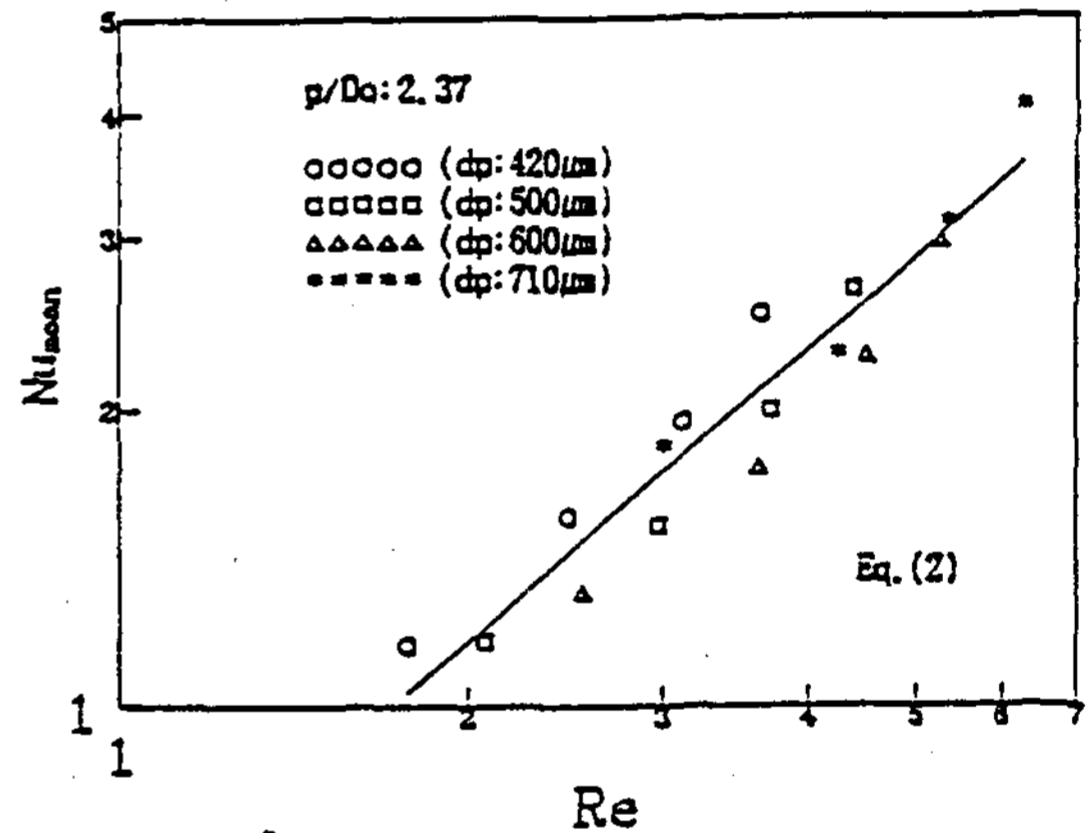


Fig. 3.6. Correlation of the mean Nusselt number on the $p/Do=2.37$ for various particle sizes.

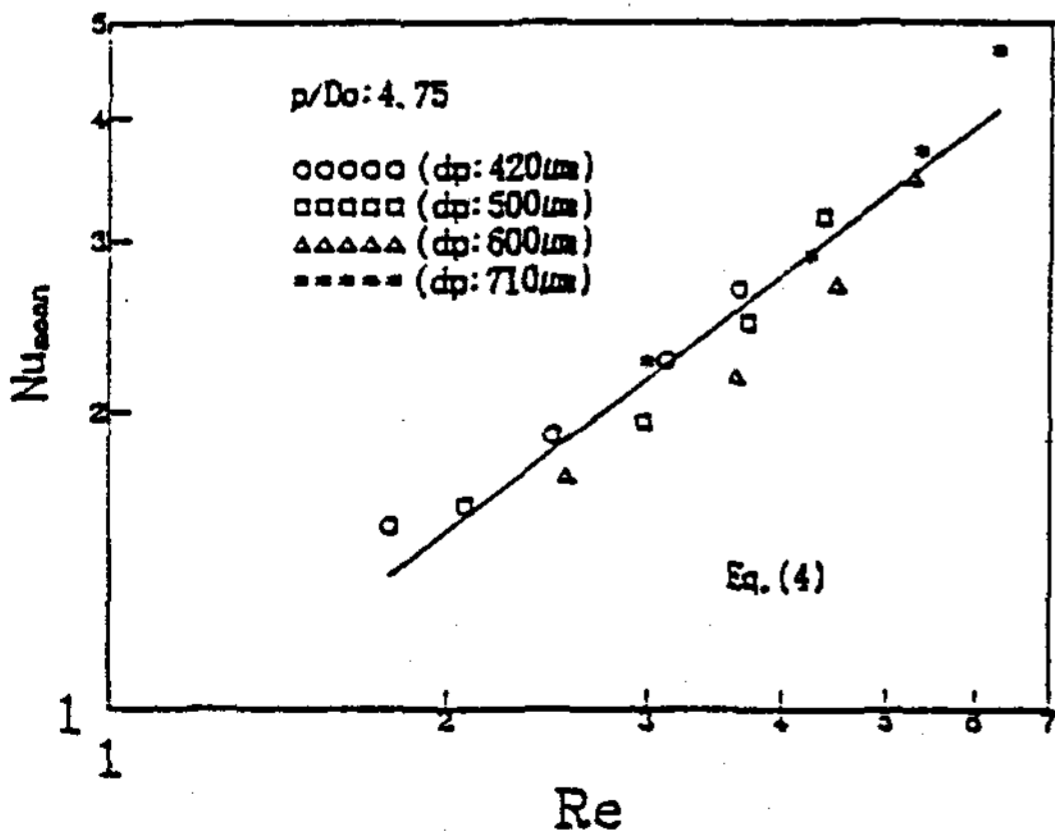


Fig. 3.8. Correlation of the mean Nusselt number on the $p/Do=4.75$ for various particle sizes.

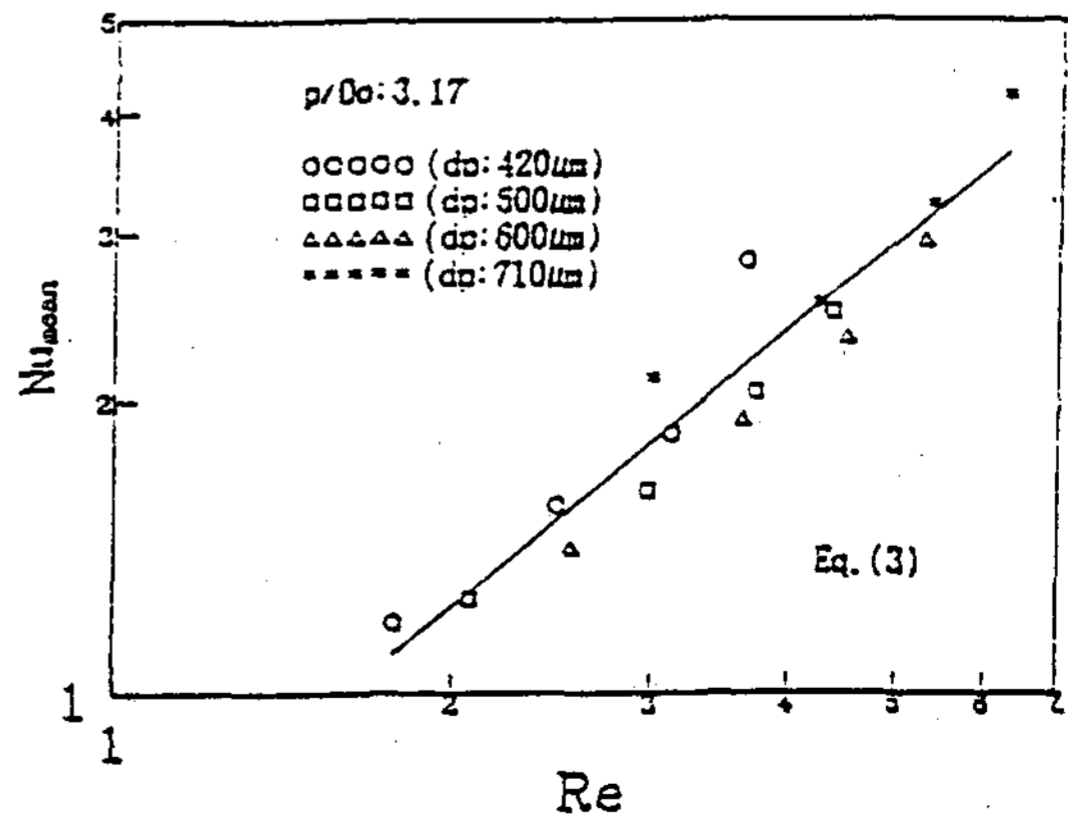


Fig. 3.7. Correlation of the mean Nusselt number on the $p/Do=3.17$ for various particle sizes.

$p/D_o=1.58$ 일 때

$$Nu_{mean}=1.1844 Re^{1.2} Pr_g^{0.4} (p/dp)^{-0.31}$$

.....(1)

$p/D_o=2.37$ 일 때

$$Nu_{mean}=1.1648 Re^{0.96} Pr_g^{0.4} (p/dp)^{-0.16}$$

.....(2)

$p/D_o=3.17$ 일 때

$$Nu_{mean}=1.1435 Re^{0.95} Pr_g^{0.4} (p/dp)^{-0.13}$$

.....(3)

$p/D_o=4.75$ 일 때

$$Nu_{mean}=1.1486 Re^{0.86} Pr_g^{0.4} (p/dp)^{-0.05}$$

.....(4)

IV. 결 론

본 연구는 furan foundry sand 유동층에서 유동화 특성과 Single spiral coil tube에 대한 열전달 특성을 실험하였으며, 전보에 이어서 전열관의 Pitch와 직경의 비($p/D_o=1.58, 2.37, 3.17, 4.75$) 및 전열관의 Pitch와 유동입자 크기의 비($p/dp=21.25, 25.15, 30.18, 35.93$)가 전열특성에 미치는 영향을 실험적으로 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 전열관의 Pitch와 직경의 비(p/D_o)가 증가할 수록 평균 전열계수는 증가한다.

2) 평균 Nusselt 수의 증가율은 $p/D_o=4.75$ 일 때 보다 1.58 일 때가 더 큰 것으로 나타났다.

3) 평균 Nusselt 수와 Re 수, Pr_g 수 및 p/dp 의 상관관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있었다.

$$Nu_{mean}=C Re^m Pr_g^{0.4} (p/dp)^n$$

(C : 상수, m, n : 지수)

References

- (1) 福迫尙一外 3人, “流動層內에서 管群의 熱傳達特性”, 20TH Natl. Heat Transfer Symp. JPN, pp.301~303, 1983.
- (2) D.Kunii, O.Levenspiel, “Fluidization Engineering”, John Wiley & Sons, Inc., 1969.
- (3) J.R.Howard, “Fluidized Beds Combustion and Applications”, Applied Science Publishers, 1983.
- (4) J.S.M.Botterill, “Fluid-Bed Heat Transfer”, Academic Press, 1975.
- (5) H.S.Mickley, D.F.Fairbanks and R.D. Hawthorn, “The Relation between the Transfer Coefficient and Thermal Fluctuation in Fluidized Bed Heat transfer”, Chem. Eng. Prog. Symposium series, Vol. 57, No.32, pp.51~60, 1961.
- (6) O.Levenspiel and J.S.Walton, “Bed-wall Heat Transfer in Fluidized Systems”, Chem. Prog, Symposium Series, No.9, pp.1~13, 1961.
- (7) N.Decker and L.R.Glicksman, “Heat Transfer in Large Particle Fluidized Beds”, Int.J.Heat Mass Transfer, Vol.26, No.9, pp.1307~1320.
- (8) V.D.Chernow, B.R.Serebryakov and M.A. Dalin, “Heat Transfer from a Vertical Tube to a Fluidized Bed filled with a Cylindrical Helical Packing”, Int.Chem., VOL.2, No.6, pp.239~241, 1972.
- (9) L.R.Glicksman and J.Modlin, “Heat Transfer with Low Density particles in a Fluidized Bed”, United States Military Academy, pp.2650~2659, 1984.
- (10) H.Hikita, S.Asai, H.Kikukawa, T.Zalke

- and M.Ohue, "Heat Transfer Coefficient in Bubble Columns", *Ind. Eng. Process Des. Dev.*, Vol.20, No.3, pp.540~545, 1981.
- (11) W.M.Dow and M. Jacob, "Heat transfer between a Vertical Tube and a Fluidized Air-solid Mixture", *Chem. Eng. Prog.*, Vol.47, pp.637~648, 1951.
- (12) A.P.Baskakov and V.M.Suprun, "Determination of the Convective Component of the Heat Transfer Coefficient to a Gas in a Fluidized Beds", *Int. Chem. Eng.*, Vol.12, No.2, pp.324~326, 1972.
- (13) S.Yagi and D.Kunii, "Studied on Heat Transfer near Wall Surface in Packed Beds", *A.I.Ch.E.*, Vol.6, No.1, pp.97~104, 1960.
- (14) J.Szekely and R.J.Fisher, "Bed to Wall Radiation Heat Transfer in a Gas-solid Fluidized Bed", *Chem. Eng. Science*, Vol.24, pp.833~849, 1969.
- (15) H.P.Holman, "Heat Transfer", McGraw-Hill Book Company, 1981.

Experiments have been conducted to measure the heat transfer coefficient and pressure drop in fluidized bed double pipe heat exchangers with smooth tube and longitudinal finned tube. The effect of particle size (alumina beads; $d_o = 0.41, 0.54, 0.65, 0.77$ mm) and static bed height on the heat transfer coefficient has been evaluated in terms of pumping power. The heat transfer coefficient for the smooth tube and finned tube heat exchangers has been compared with single phase double pipe heat exchanger.

Results show that the heat transfer coefficients for the finned tube is 2.96~3.45 times higher than the smooth tube.

The heat transfer coefficients for the fluidized bed heat exchanger is higher than the single phase heat exchanger for the most of pumping power range tested. The maximum increase in the heat transfer coefficient for fluidized bed is 91.3% for the smooth tube and 127.1% for the finned tube.

“Fluidization and Heat Transfer Characteristics in the Fluidized Bed (II)”

Park, Jong-Suen* · Baek, Ko-Kil** · Kim, Yeun-Young*** · Jeon, Sung-Taek***

*Korea Atomic Energy Research Institute

**Taejon University of Technology

***Incheon Junior College

The fluidization characteristics of the furan foundry sand fluidized bed and the heat transfer characteristics on a single spiral coil tube in the bed have been investigated.

In the paper, the heat transfer coefficients for a single spiral coil tube are measured in the furan foundry sand bed as a function of the ratio of heated coil tube pitch to diameter (p/D_o) and the ratio of heated coil tube pitch to particle size (p/d_p).

The experimental results are as follows.

- 1) Mean heat transfer coefficients increases according to the increasing ratio of heated coil tube pitch to diameter (p/D_o).
- 2) The increasing rates of mean Nusselt numbers are more greater in the case of p/D_o .

$Do=1.58$ than $p/Do=4.75$.

3) Mean Nusselt number can be expressed by the following equation,

$$Nu_{\text{mean}}=C Re^m Pr_g^{0.4} (p/dp)^n.$$

A Study on the Atmospheric Clearness of Major Cities in Korea

Jo, Dok-Ki · Kim, Eun-Il · Lee, Tae-Kyu · Park, Kyung-Ho · Chun, Il-Soo · Jeon, Hong-Seok · Ahn, Chung-Moo

Korea Institute of Energy Resources

Since the atmospheric clearness index is main factor for evaluating atmosphere circumstance, it is necessary to estimate its characteristics all over the cities in Korea.

We have began collecting clearness index data since 1982 at 16 different cities and considerable effort has been made for constructing a standard value from measured data at each city.

The new clearness index data will be extensively used by evaluating atmospheric circumstance analysies as well as by solar application system designer or users.

From the results, we can conclude that

- 1) Yearly mean 63 % of the atmospheric clearness index was evaluated for clear day all voer 16 cities in Korea.
- 2) Atmospheric clearness index of spring and summer were 63 % and 64 % and for fall and winter their values wre 61 % and 59 % respectively. So, spring and summer were higher, and fall and winter were lower then the yearly value.
- 3) A significant difference of atomospheric clearness index is observed between 1982 ~ 1987 and 1988~ 1993 through 16 different cities in Korea.

Convective Heat Transfer in a Channel with an Isothermal Rectangular Beam

Kwon, Sun-Sok* · Ree, Jae-Shin