

[논문] 태양에너지
Solar Energy
Vol.18, No.2, 1998

주물사 재생 유동층내 폐열회수 증진에 관한 실험적 연구

백고길* · 박종순** · 이은표** · 최승일*** · 최국광**** · 전성택*****

* 대전산업대학교 ** 한국원자력연구소 *** 충남직업전문학교 **** 인천대학교 *****인천전문대학

An Experimental Study on the Promotion of the Waste-Heat Recovery in the Fluidized Beds used in Reclamation of Foundry Sand

Baek Ko-Kil* Park Jong-Suen Lee Eun-Pyo** Choi Sung-Il***
Choi Guk-Gwang**** Jeon Sung-Taek*******

* *Taejon National University of Technology* ** *Korea Atomic Energy Research Institute*
*** *Choongnam Vocational Institute of Technology* **** *University of Incheon* ***** *Incheon Junior College*

요약

본 연구는 furan 주물사의 재생시 냉각효율을 크게 높이며 폐열의 회수를 증진하는 데 활용 할 수 있는 자료들을 얻기 위하여, 재생된 Furan foundry sand를 유동입자로 사용한 유동층에서 평활관(smooth tube), 나선관(spiral tube) 및 핀관(finned tube)을 수평으로 설치하여, 유동층내 온도를 50~200°C로 유지하면서 전열 관에 대한 열 전달계수를 실험적으로 구하였다.

유동층의 내경은 210mm이고, 전열관의 외경은 모두 12.7mm인 동관을 각각 사용하였다. 본 실험은 관내 냉각수의 Reynolds수 4,000~18,000범위이고, 유동층내 유동입자 Reynolds수 0.8~7.5의 범위에서 수행하여 다음과 같은 결과들을 얻었다.

1. 유동층내 온도가 높으면 모든 전열관에서 열 전달계수는 커진다.
2. 최대 열 전달계수는 평활관에서는 Re_p 수 3.5~5.5, 나선관에서는 Re_p 수 4.4~5.2, 핀관에서는 Re_p 수 3.5~4.8의 범위에서 각각 얻을 수 있다.
3. 유동층내의 온도에 따라 약간 다르지만 평활관, 나선관 및 핀관에서의 최대 Nu수들은 각각 대략 1:1.5:3.0의 비를 얻는다.

ABSTRACT

In this experimental study, for obtaining the data to be used in the increased recover rate of waste heat from the recirculated sand, the furan foundry sand were used as the fluidized particle in the fluidized bed in which the smooth, spiral and finned tubes ($D_o = \phi 12.7$) were horizontally installed and used as the heat-transfer tubes.

The heat transfer experiments were performed in the conditions of water Reynolds number of inside tubes in the range of 4,000 to 18,000 and particle Reynolds number of outside tube in the range of 0.8 to 7.5.

The heat-transfer coefficients (h_o) increase as the higher inside temperature of the fluidized bed and the maximum heat-transfer coefficients can be obtained in the range of 3.5 to 5.5 of particle Reynolds number in the all tubes. The maximum Nu numbers of smooth, spiral and finned tubes are figured as about 1:1.5:3 in order even if the ratios show little different as the temperatures of bed.

NOMENCLATURES

- C_{pg} : Specific heat of gas (J/kg $^{\circ}$ C)
 D_i : Inside diameter of the heated tube (m)
 D_o : Outside diameter of the heated tube (m)
 d_p : Average particle diameter (m)
 g : Acceleration of gravity (m/s 2)
 h_o : Heat transfer coefficient between bed and external surface of tube (w/m 2 $^{\circ}$ C)
 k_g : Conductivity of gas (w/m $^{\circ}$ C)
 L : Length of the heated tube (m)
 p_p : Pitch of spiral tube (m)
 p_f : Pitch of finned tube (m)
 t : Thickness of the heated tube (m)
 U : Fluidizing air velocity (m/s)
 U_{mf} : Minimum fluidization velocity (m/s)
 U_{opt} : Gas velocity at which maximum value of h_o occurs (m/s)

GREEK LETTERS

- μ_g : Viscosity of gas (Ns/m 2)
 ρ_g : Density of gas (kg/m 3)
 ρ_s : Density of particle (kg/m 3)

DIMENSIONLESS PARAMETERS

- Re_p : Reynolds number of particle [$\rho_g U d_p / \mu_g$]
 $Re_{p,opt}$: Reynolds number at which maximum value of h_o occurs [$\rho_g U_{opt} d_p / \mu_g$]
 Nu : Nusselts number of particle [$h_o d_p / k_g$]
 Nu_{max} : Maximum Nusselts number of particle [$h_{o,max} d_p / k_g$]

I. 서론

유동층에 대한 연구는 16세기부터 시작되며, 1973년과 1979년의 두 차례의 유류 파동으로 석유가격의 상승에 따라 에너지 절약에 대한 국민적 관심이 높아 졌으며, 1990년대 들어와서는 산업폐기물 및 도시 생활 쓰레기 처리가 문제되면서 이것을 유동층 기법을 이용한 소각시설 개발에 많은 연구자들이 관심을 갖게 되었다.

유동층의 높은 열 전달 특성을 이용하여 열 교환기⁽¹⁾, 폐열회수⁽²⁾ 및 석탄연소^(3,4,5) 등에 응용되고 있으며, 유동입자로는 모래(sand), 유리구슬(glass bead), 동(copper) 및 철(iron) 등이 사용되고, 전열관으로는 평활관, 나선관 및 핀관 등을 주로 사용하고, 유동입자의 크기는 Geldart^(6,7)에 의해 분류된 "B" 와 "D" group에 해당되는 것들이 가장 많이 이용되고 있다.

본 연구는 Furan 주물사 600 μ m을 이용한 유동층에서 폐열회수에 사용되는 국내 S사의 제품인 관 외부에 핀이 없는 평활관, 평활관을 나선형으로 만든 나선관 및 국내 최초로 전조(轉造)기술에 의해 제작된 핀관에 대한 열 전달 특성을 실험적으로 연구하여 주물사의 냉각 폐열회수 열 교환기 설계 및 제작에 필요한 기초적인 자료를 제공하는데 그 목적이 있다.

II. 실험장치 및 실험 방법

1. 실험장치

본 실험의 계통은 Fig. 2-1과 같으며, 주요

실험장치의 제원은 다음과 같다.

- (1) Air blower : 40 m³/min
500 mmAq
7.5 Kw
- (2) Surge tank : 200 L
- (3) Air flow meter : 1.9 ~ 9.4 Nm³/hr
4.5 ~ 24 Nm³/hr
8.0 ~ 42 Nm³/hr
2.5 ~ 25 Nm³/hr
- (4) Electric heater : Φ 250 x 5T (STS 304)
Siliconit 2 Kw x 4ea
- (5) Distributor : Φ 210, 사각 pitch 6 mm,
912ea - Φ 1
개공율 2.07%
- (6) Fluidized bed : Φ 210 x 430H x 3T
(STS304)
- (7) Data logger : Model No. Therm.
5500-3
- (8) Cooling water flow meter : 0 ~ 18
L/min

실험 조건

- (1) 유동입자 : Furan foundry sand 600 μ m
- (2) 유동층내 온도 : 50 $^{\circ}$ C ~ 200 $^{\circ}$ C
- (3) 유동가스량 : 6 Nm³/hr ~ 30 Nm³/hr
- (4) 전열관 : a) Copper smooth tube
b) Copper spiral tube
c) Copper finned tube

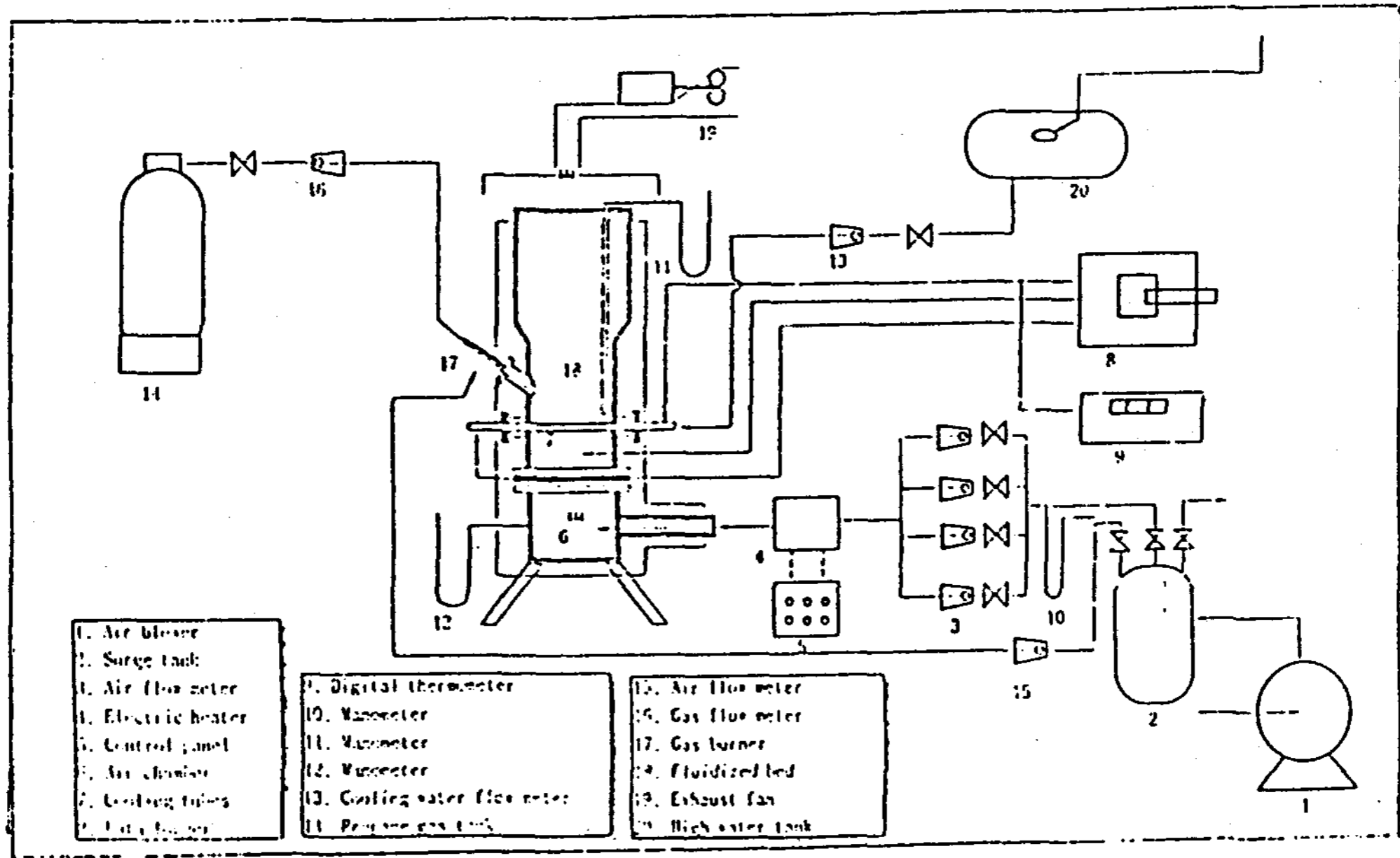


Fig. 2-1 Schematic diagram of fluidized bed.

2. 실험 방법

유동층내 온도조절은 electric heater를 사용하여 1차로 50℃까지 가열하고, 그 이후 200℃까지는 유동층벽에 설치한 2개의 gas burner를 이용하여 유동층내 온도를 상승시켰다.

유동입자는 Furan foundry sand로 평균입자 직경은 600μm이며, 유동층에 공급되는 공기의 온도는 50℃에서 200℃까지 유지하면서 유동층에 공급되는 공기량은 유동층의 온도에 따라 최소 6 Nm³/hr에서 최대 30 Nm³/hr 범위에서 이 때 유동층내 온도를 시각적으로 확인이 가능하도록 data logger와 digital 온도계를 병렬로 연결하여 실험하였다.

전열관은 국내 S사의 제품으로 전열관 외

부에 핀이 없는 편할관, 평할관을 나선형으로 만든 나선관 및 전조로 완전한 일체 구조체로 제작한 편관을 사용하였으며, 전열관의 규격은 Table 2.1에 나타내었다.

Table 2.1 전열관(Copper)

No	Tube	Do	Di	t	L	p _p	p _r
1	Smooth tube	12.7	11	0.85	210	-	-
2	Spiral tube	12.7	11	0.85	210	11	-
3	Finned tube	12.7	8.8	1	210	-	2.5

단위 : mm

III. 실험 결과 및 고찰

1. 유동층내 온도와 열 전달계수 관계

Fig. 3-1에서 Fig. 3-3까지는 유동층내 온도 변화에 따라 평활관, 나선관 및 핀관에 대하여 열 전달계수(h_o)를 나타낸 것으로, 유동층내 온도를 50°C, 100°C, 150°C 및 200°C까지 가열하면서 실험한 결과, 열 전달계수는 유동층내 온도 상승에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 유동화 기체의 열전도 도는 열 전달계수에 매우 큰 영향을 미치므로 유동화 기체의 온도가 상승할수록 복사에 의한 효과가 증가되어, 이것이 열 전달계수에 상승적인 영향을 주기 때문이다.

2. Reynolds 수와의 관계

열 전달계수의 변화는 Fig. 3-1부터 Fig. 3-3까지 표시한 바와 같이 Re_p 수의 증가에 따라 상승하다가 일정 범위의 Re_p 수 이상이 되면 그 값(h_o)이 감소하는 것을 볼 수 있으며, 각 전열관에 대해서 기술하면, 평활관에서는 Re_p No 3.5~5.5, 나선관에서는 Re_p No 4.4~5.2, 핀관에서는 Re_p No 3.5~4.8의 범위 이상이 되면 열 전달계수는 감소한다.

본 실험에서 정확한 최대 열 전달 값($h_{o,max}$)을 얻지는 못하였으나, 위의 각각 Re_p 수 범위에서 최대 열 전달 값에 대응하는 최적 Reynolds number($Re_{p,opt}$)가 존재한다⁽¹⁵⁾는 것을 알 수 있다. 또한 유동층내 온도가 높을수록 최대 열 전달 값에 대응하는 최적 Reynolds number($Re_{p,opt}$)가 감소하는 경향을 볼 수 있으며, 이것은 Kharchenko and Narkhorin^(10,11) 등이 0.34mm 모래 유동층에서 실험한 결과로 발표한 바 있었다.

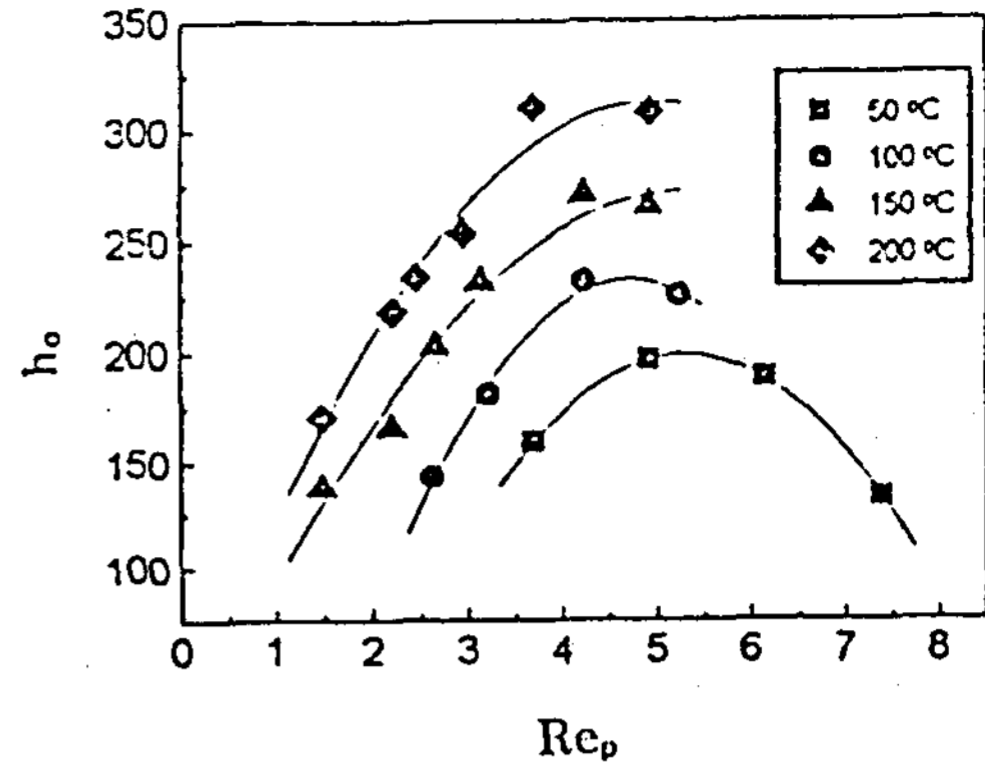


Fig. 3-1 Variation of h_o with Re_p for smooth tube immersed in fluidized beds of sand particle.

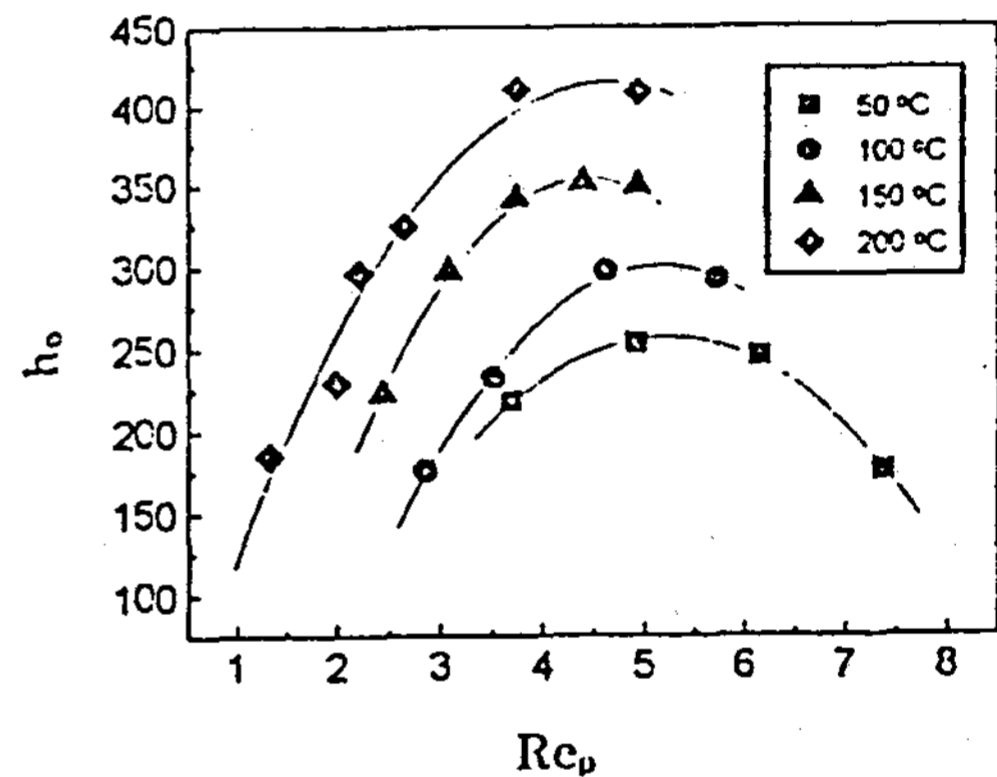


Fig. 3-2 Variation of h_o with Re_p for spiral tube immersed in fluidized beds of sand particle.

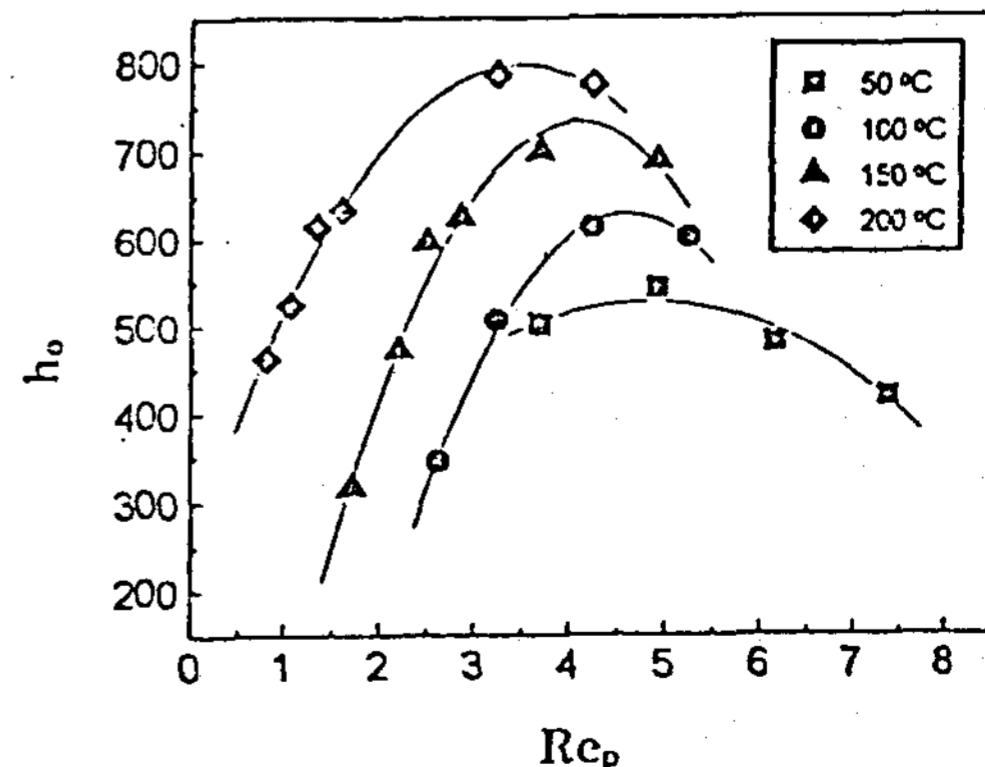


Fig. 3-3 Variation of h_o with Re_p for finned tube immersed in fluidized beds of sand particle.

3. 전열관의 영향

Fig. 3-4에서 Fig. 3-7까지는 전열관의 열 전달 증진효과를 Nu와 Re_p 수의 관계로 나타낸 것으로, Fig. 3-4는 유동층내 온도를 50°C로 유지하면서 평활관, 나선관 및 핀관에 대한 전열특성을 표시한 것으로, 핀관을 사용하였을 때 가장 높은 열 전달 증진효과를 얻을 수 있었으며, 이것은 유동층내 온도 100°C, 150°C 및 200°C 일 때도 같은 결과를 보였다.

Fig. 3-4는 유동층내 온도 50°C 일 때 3개의 전열관에 대하여 최대 열 전달 증진효과를 비교한 것으로, 평활관에서 얻은 열 전달계수보다 나선관이 약 1.29배의 열 전달 증진효과가 있었으며, 핀관은 평활관 보다 약 2.64배 높은 열 전달 증진효과가 있었고, 또한 나선관과 핀관 사이에는 핀관이 약 2.0배 높은 열 전달 증진효과를 얻을 수 있었다.

Fig. 3-5는 유동층내 온도 100°C 일 때 3개의 전열관에 대하여 전열효과를 나타낸 것으로, 나선관은 평활관 보다 약 1.43배, 핀관은 평활관 보다 약 3.0배, 나선관 보다 약 2.1배의 각각 높은 열 전달 증진효과를 나타내었다.

Fig. 3-6 유동층내 온도 150°C 일 때 3개의 전열관을 비교하여 보면, 평활관에서 얻은 열 전달계수보다 나선관에서 얻은 열 전달계수가 약 1.58배, 핀관에서 얻은 열 전달계수는 약 3.28배 높은 증가율을 보였으며, 나선관과 핀관 사이에는 핀관이 약 2.07배 높은 전열효과가 있었다.

Fig. 3-7은 유동층내 온도 200°C 일 때 3개의 전열관을 비교한 것으로, 평활관에서 얻은 열 전달계수보다 나선관에서 얻은 열 전달계수가 약 1.78배, 핀관에서 얻은 열 전달계수는 약 3.42배 높은 증가율을 보였으며, 나선관과

핀관 사이에는 핀관이 약 1.92배 높은 열 전달 증진효과가 있는 것을 볼 수 있었다.

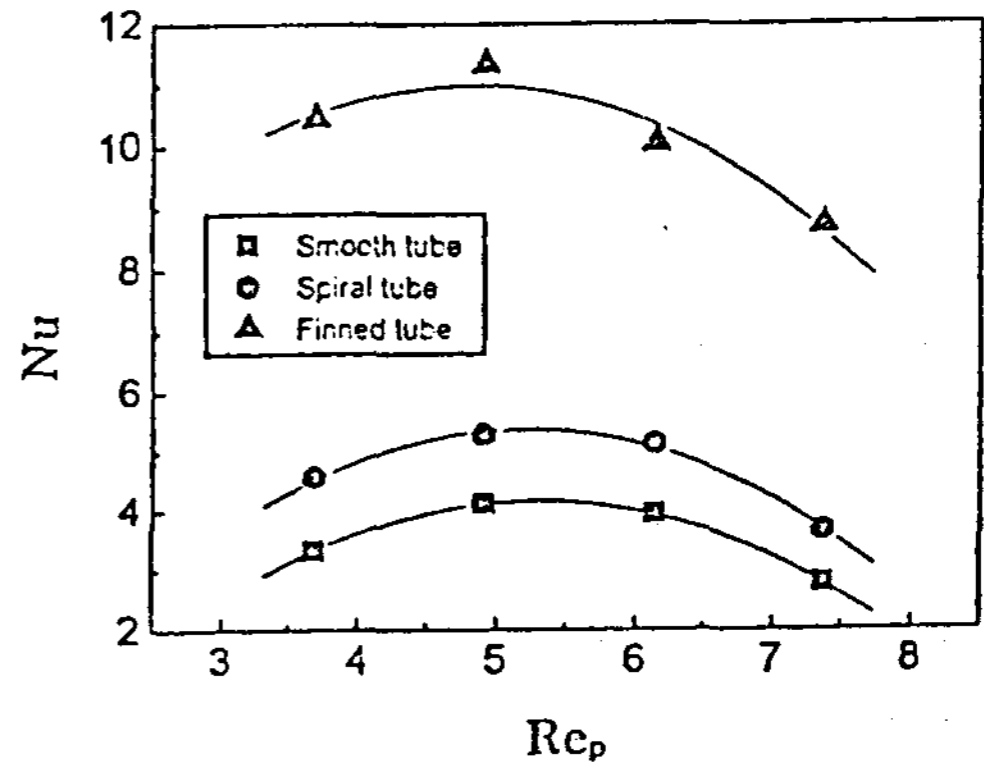


Fig. 3-4 Variation of Nu with Re_p for smooth tube, spiral tube and finned tube immersed in fluidized beds (bed temp. 50°C).

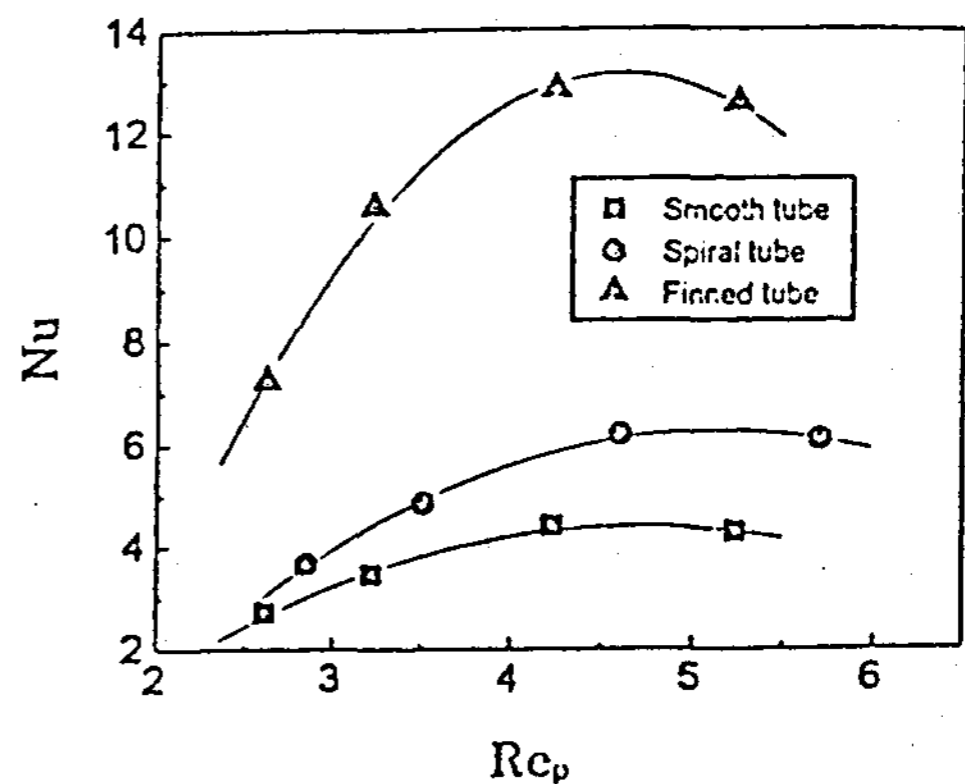


Fig. 3-5 Variation of Nu with Re_p for smooth tube, spiral tube and finned tube immersed in fluidized beds (bed temp. 100°C).

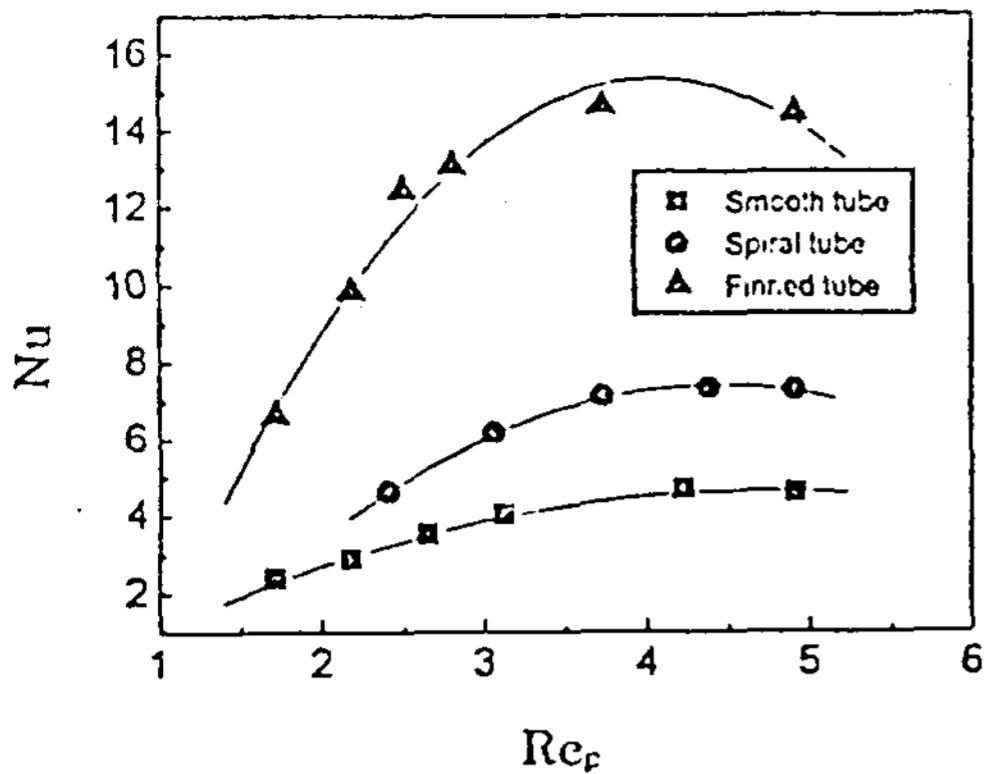


Fig. 3-6 Variation of Nu with Re_p for smooth tube, spiral tube and finned tube immersed in fluidized beds (bed temp. 150°C).

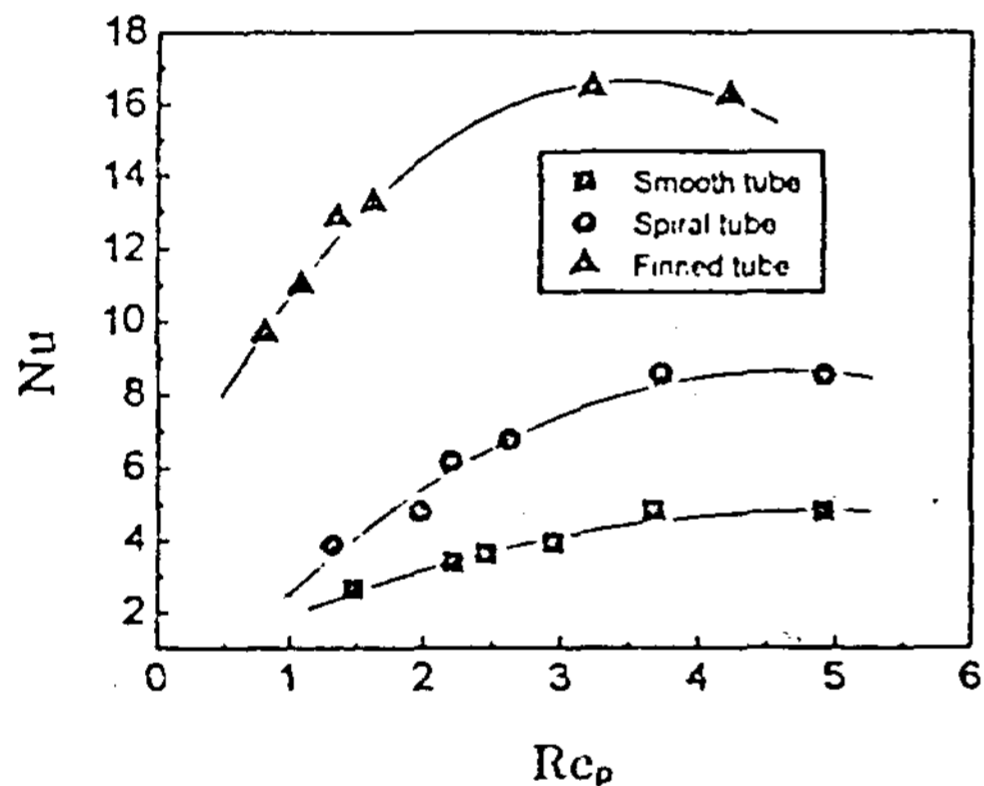


Fig. 3-7 Variation of Nu with Re_p for smooth tube, spiral tube and finned tube immersed in fluidized beds (bed temp. 200°C).

IV. 결론

본 연구는 Furan foundry sand의 재생시 냉각효율을 크게 높이며, 폐열회수를 증진시키는데 활용할 수 있는 자료들을 얻기 위하여 재생된 주물사를 유동입자로 사용한 유동층에 편활관, 나선관 및 핀관을 수평으로 설치고, 유동층내 온도를 50°C ~ 200°C 범위를 유지하

면서 각 전열관에 대한 열 전달특성을 실험적으로 연구하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 유동층내 온도가 높으면 모든 전열관에서 열 전달계수(h_o)는 커진다.
2. 최대 열 전달계수($h_{o,max}$)는 편활관에서 Re_p 수 3.5~5.5, 나선관에서 Re_p 수 4.4~5.2, 핀관에서 Re_p 수 3.5~4.8에서 각각 얻을 수 있다.
3. 유동층내 온도에 따라 약간 다르지만 편활관, 나선관 및 핀관에서의 최대 Nu 수 (Nu_{max})들은 각각 대략 1:1.5:3.0의 비를 얻는다.

REFERENCES

1. H. Martin, "Fluid Bed Heat Exchangers", Heat Exchangers Theory and Practice, pp. 535~548, 1983.
2. M.I. Rudnick, S.S. Mah, and H.W. Williams, "Status of Fluidized Bed Waste Heat Recovery," Heat Exchangers Theory and Practice, pp.549~568, 1983.
3. W.F. Podolski et al, "Pressure Fluidized Bed Combustion Technology," Park. Ride, New. Jersey, U.S.A., pp.1~9, 1983.
4. Robert J. Sheyd, "Energy Recovery from Fluidized-Bed Combustion," CEP, pp.48~54, Jan, 1984.
5. Melvin W. First, "Gas Cleaning System for the High Temperature, High Pressure Fluidized Beds Coal Combustor," JAPC35, pp.1286~1297, 1985.
6. D. Geldart, "Types of Gas Fluidization," Powder Techn., Vol.7, pp.285~292, 1973.

7. J.S.M. Botterill, "Fluid-Bed Heat Transfer," Academic Press, London and N. Y., 1975.
8. R.H. Thring, "Fluidized Bed Combustion for the Stirling Engine," *Int.J. Heat Mass Transfer*, 20, pp.911~918, 1977.
9. S.S. Zabrodsky, "Hydrodynamics and Heat Transfer in Fluidized Beds," M.I.T. Press, Mass, pp.7~8, 1966
10. D. Kunii and O. Levenspiel, "Fluidization Engineering," John Wiley & Sons, Inc., 1969.
11. N.V. Kharchenko and K.F. Narkhorin, "The Problem of Intensifying Heat Transfer between a Fluidized Bed," *Int. Chem. Eng.*, 4, 4, pp.650~654, 1964
12. S.C. Saxena et al, "heat Transfer Between a Gas fluidized Bed Immersed Tubes," *Advances in Heat transfer*, Vol.14, pp.149~247, 1978.
13. I. Goel, "Heat Transfer from Immersed Smooth and Finned Horizontal Tubes in a Gas Fluidized Bed," M.S. thesis, University of Illinois at Chicago, Dec. 1982.
14. I. Goel, S.C. Saxena, and A.F. Dolidoovich, "Heat Transfer from Rough and Finned Horizontal Tubes in a Gas Fluidized Bed," *Journal of Heat Transfer*, Vol.106, pp.91~97, 1984.
15. N.S. Grewal and S.C. Saxena, "Maximum Heat Transfer Coefficient Between a Horizontal Tube and Gas-Solid Fluidized Bed," *Ind.Eng. Chem. Process Des. Dev.* Vol.20, No.1, pp.108~116, 1981.
16. J.P. Holman, "Heat Transfer," McGraw-Hill Book Company, 1981
17. J.R. Howard, "Fluidized Beds Combustion and Applications," Applied Science Publishers, 1983.

An Experimental Study on the Promotion of the Waste-Heat Recovery in the Fluidized Beds used in Reclamation of Foundry Sand

Baek Ko-Kil* Park Jong-Suen Lee Eun-Pyo** Choi Sung-Il***
Choi Guk-Gwang**** Jeon Sung-Taek*******

* *Taejon National University of Technology*

** *Korea Atomic Energy Research Institute*

*** *Choongnam Vocational Institute of Technology*

**** *University of Incheon*

***** *Incheon Junior College*

ABSTRACT

In this experimental study, for obtaining the data to be used in the increased recover rate of waste heat from the recirculated sand, the furan foundry sand were used as the fluidized particle in the fluidized bed in which the smooth, spiral and finned tubes ($D_o = \phi 12.7$) were horizontally installed and used as the heat-transfer tubes.

The heat transfer experiments were performed in the conditions of water Reynolds number of inside tubes in the range of 4,000 to 18,000 and particle Reynolds number of outside tube in the range of 0.8 to 7.5.

The heat-transfer coefficients (h_o) increase as the higher inside temperature of the fluidized bed and the maximum heat-transfer coefficients can be obtained in the range of 3.5 to 5.5 of particle Reynolds number in the all tubes. The maximum Nu numbers of smooth, spiral and finned tubes are figured as about 1:1.5:3 in order even if the ratios show little different as the temperatures of bed.