

실리카겔 충전층에서의 유효열전도율 측정

권 오 경[†], 윤 재 호, 김 종 하

한국생산기술연구원 에너지시스템팀

Measurement of Effective Thermal Conductivity in Silica Gel Packed Bed

Oh-Kyung Kwon[†], Jae-Ho Yun, Joung-Ha Kim

Energy System Team, Korea Institute of Industrial Technology, Chonan 330-825, Korea

(Received July 2, 2004; revision received October 11, 2004)

ABSTRACT: This paper presents an experimental measurement of effective thermal conductivity in an adsorbent packed bed with silica gel A type. The effective thermal conductivity was measured under different conditions of the adsorbent bed temperature, pressure, particle size and water content by using the transient hot wire method. The measured effective thermal conductivity showed to become bigger with decreasing particle size or increasing water content, but it was a little affected with increasing bed temperature and pressure. The bed temperature was varied in the range of $10^{\circ}\text{C} \leq T \leq 50^{\circ}\text{C}$ and the pressure in the range of $10 \text{ kPa} \leq P \leq 190 \text{ kPa}$. The results show that $0.10 \sim 0.18 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ of effective thermal conductivity measured for the zero water content.

Key words: Packed bed(충전층), Transient hot wire method(비정상 열선가열법), Effective thermal conductivity(유효열전도율), Water content(함수율), Silica gel(실리카겔)

기 호 설 명

a : 열확산율 [m^2/s]

C : 오일러정수

C_p : 비열 [$\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$]

M : 실리카겔의 질량 [kg]

P : 압력 [kPa]

q : 발열량 [W/m]

r : 히터반경 [mm]

T : 히터의 온도 [$^{\circ}\text{C}$]

t : 시간 [sec]

ΔT : 히터의 온도차 [$^{\circ}\text{C}$]

V : 실험장치의 체적 [m^3]

W : 함수율

Z : 체적분율

그리스 문자

ρ : 실리카겔의 밀도 [kg/m^3]

λ : 열전도율 [$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$]

하첨자

eff : 유효

S : 시료

W : 히터

[†] Corresponding author

Tel.: +82-41-589-8528; fax: +82-41-589-8330

E-mail address: kwonok@kitech.re.kr

1. 서 론

최근 비교적 저온의 열에너지를 유효하게 이용하는 기술 중의 하나로 흡착과 탈착현상을 이용한 흡착식 냉동기가 주목을 받고 있다. 흡착식 냉동기에서는 다공질의 흡착제 입자의 충전층을 가지는 열교환기가 시스템 전체의 성능을 지배하는 중요한 구성 요소가 되며, 흡착제에는 실리카겔(SiO_2) 혹은 제올라이트(Zeolite)가 흡착질에는 냉매 증기가 일반적으로 사용된다. 흡착제가 충전되어 있는 열교환기에서는 흡착시에는 발열반응이, 탈착시에는 흡열반응이 동반되며 이때 냉각수와 온수가 교대로 순환하여 열교환을 하지만 그 열교환 성능은 충전층의 유효열전도율에 의해서 크게 좌우된다. 따라서 흡착제 열교환기의 설계를 최적화하고 성능을 향상시키기 위해서는 충전층의 유효열전도율을 정확하게 예측하는 것이 필요하다. 보통의 고체입자를 충전한 층의 유효열전도율에 관해서는 지금까지는 다수의 측정이나 이론적 검토가 행해졌으며, 입자의 열전도율, 입자경 외에도 입자간 공극부의 기체의 열전도율이나 압력 등에 대한 연구가 수행되어졌다. 한편 흡착제는 입자 내에 다수의 세공을 가지고 흡착이 일어나면 입자 자체의 열전도율이 변화하는 등 통상의 고체입자와 다른 점을 가진다. 따라서 지금까지 흡착제 입자를 충전한 층의 유효열전도율을 정량적으로 측정할 연구는 그리 많지 않다.

Bjurström 등은 비정상 열선가열법을 이용하여 수증기를 흡착한 실리카겔 충전층의 유효열전도율의 측정을 행하였으며 층의 공극률의 감소, 수증기 흡착량, 기체의 압력 및 온도의 증대에 의해서 층의 유효열전도율이 커진다고 보고하였다. 또한 보통의 고체충전층의 유효열전도율의 예측 모델에 수증기 흡착의 효과를 고려해서 입자열전도율을 적용시켜 흡착제 충전층의 유효열전도율을 측정값과 비교하였다.⁽¹⁾

Mori 등은 정상 열선가열법을 이용하여 수증기 또는 공기를 봉입한 실리카겔 A 및 제올라이트 13X의 흡착제 충전층과 제올라이트 13X의 결합층에 대해서 평균 유효열전도율을 측정하였으며, 압력의 저하와 입자크기의 감소에 따라 저하하였으며 온도의 영향은 거의 받지 않는다고 보고하였다. 한편 결합층의 유효열전도율은 충전층보다 크게 나타났으며, Bauer-Schlunder 및 Hayashi

의 모델과 흡착에 의한 입자열전도율의 변화를 고려한 것에 의해 실험데이터와 비교적 잘 맞는다고 보고하였다.⁽²⁾

Griesinger 등은 비정상 열선 가열법을 이용하여 수소, 아르곤, 헬륨, 질소와 공기를 봉입한 여러 가지 제올라이트에 대해서 온도, 압력 및 입자크기의 영향을 파악하여 유효열전도율을 측정하였다.⁽³⁾

본 연구에서는 일반적으로 유효열전도율의 측정에 가장 많이 사용되고 있는 비정상 열선가열법을 이용하여 실리카겔 충전층의 유효열전도율의 측정을 행하였으며, 실험변수로는 충전층의 온도, 압력, 입자크기, 함수율 등이 유효열전도율에 미치는 영향을 파악하고 정량적인 유효열전도율의 값을 예측하는 것을 목적으로 한다.

2. 비정상 열선가열법의 원리

일반적으로 유효열전도율 측정방법에는 비정상 열선가열법(Transient Hot-Wire Method), 정상 열선가열법, Unit-Cell Model 등의 방법이 제안되고 있다.

본 연구에서는 유효열전도율의 측정에 가장 많이 사용되고 있는 비정상 열선가열법을 이용하여 흡착제인 실리카겔의 유효열전도율을 측정하였다. 비정상 열선가열법은 열전도율의 측정, 특히 유체를 대상으로 하는 측정법으로서 가장 신뢰되고 있는 방법 중의 하나로서 높은 정도의 데이터를 얻을 수 있는 방법이다.⁽⁴⁾

고체의 유효열전도율의 측정에 사용되는 비정상 열선가열법에는 두 가지의 방법이 사용된다. 첫째는 콘스탄탄과 같은 온도계수가 작은 열선에 석면피복된 히터를 이용하고 온도측정에는 열전대를 사용하는 방법이 있다. 이 방법에서는 열전대가 석면피복된 히터에 잘 접촉하도록 주의해야만 한다. 두번째는 백금선의 온도상승변화를 시간경과에 대해서 기록하고 그 저항치를 온도변화로 변환시키는 방법이 있다. 이 방법은 시료의 양이 소량인 경우에 많이 사용되며 시료의 양이 적으므로 극히 짧은 시간 내에 유효열전도율을 측정하지 않으면 시료가 포화상태에 도달하기 때문에 측정하는데 어려운 점이 있다.⁽⁵⁾ 본 실험에서는 이러한 점을 고려하여 첫번째의 방법을 사용하였다. 비정상열선법의 원리는 다음과 같다.

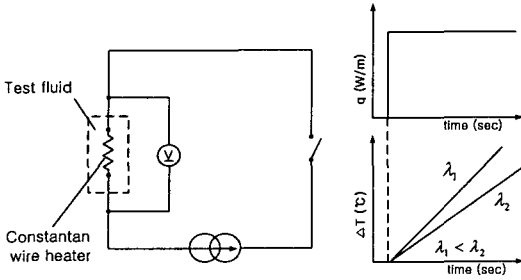


Fig. 1 Principle of transient hot wire method.

비정상 열선가열법은 Fig. 1과 같이 측정시료 중에 수직으로 길게 놓인 콘스탄탄 와이어 히터(constantan wire heater)에 어떤 순간에 step 상으로 전류를 통하는 것에 의해 히터를 가열한다. 그 결과 발생하는 히터의 온도차를 측정하고 그 발열량과 온도의 시간적 변화에 의해 열전도율을 구하는 방법이다. 이때 시료의 열전도율이 크면 히터에서 발생한 열은 빠르게 시료에 전달되어 히터 자신의 온도상승은 작게 된다. 역으로 열전도도가 작으면 히터의 온도상승은 크게 된다. 이 히터의 온도상승속도는 일차원 반경방향 원주좌표 비정상 열전도율 문제의 해법을 제시한 푸리에 법칙(Fourier's Law) 열전도방정식에 의해 따른다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (1)$$

여기서, T 는 절대온도, t 는 시간을 나타낸다. 열확산율(a)는 열전도율(λ)와 $\lambda = a/C_p\rho$ 의 관계가 있다. C_p 는 비열, ρ 는 밀도를 나타낸다. 다음의 (1)~(5)의 조건 하에서 식(1)을 풀 수 있다.

- (1) 열원의 단위길이당, 단위시간당의 발열량 q 는 항상 일정하다.
- (2) 선상 열원의 열용량이 무시 가능하다.
- (3) 열전도도 측정중의 온도상승의 범위 내에서는 매질의 물성치는 변화하지 않는다.
- (4) 매질중의 대류가 일어나지 않는다.
- (5) 열원 내부의 온도분포는 일정하다.

전류가 통하는 시간부터 t 초 사이 히터의 온도차 ΔT 는 다음 식(2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi\lambda} (\ln t + A) \quad (2)$$

$$A = \ln \frac{4a_s}{r^2 C} + \frac{\lambda_s}{2\lambda_w} + \dots \quad (3)$$

여기서, q (W/m)는 히터의 단위길이당의 발열량, r 은 히터의 반경, $C(= \exp Y)$ 은 오일러정수(1.781)을 나타낸다. 첨자 S, W 는 각각 시료와 히터를 나타낸다. 식(2)를 $\ln t$ 로 미분하면,

$$\lambda_{eff} = \frac{q}{4\pi} \frac{d(\Delta T)}{d(\ln t)} \quad (4)$$

가 된다. 이것을 다시 한번 정리하면

$$\lambda_{eff} = \frac{q}{4\pi} \frac{(T_2 - T_1)}{(\ln t_2 - \ln t_1)} \quad (5)$$

로 나타낼 수 있다. 즉, 히터의 단위길이당의 발열량 q (W/m)와 히터의 온도차를 측정하는 것에 의해 유효열전도율 λ_{eff} 를 구할 수 있다.

또한 충전층의 체적분율(Z)은 충전된 실리카 겔의 질량 M_{sil} 과 입자밀도(Particle density) ρ_{sil} , 실험장치의 체적 V 를 이용하여 다음 식으로 구하였다. 체적분율을 계산하는 데 사용된 입자밀도값은 $1,201 \text{ kg/m}^3$ 을 이용하였다.⁽¹⁾

$$Z = \frac{M_{sil}}{\rho_{sil} \cdot V} \quad (6)$$

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

유효열전도율을 측정하기 위한 실험장치는 Fig. 2와 같다. 실험장치는 충전층 내의 온도를 일정하게 맞추어 주기 위한 항온조, 실험장치 내로의 물유량을 측정하기 위한 로타메타, 물펌프, 콘스탄탄 와이어 히터에 일정한 전력량을 주기 위한 자동전압조정기(Auto Voltage Regulator, AVR), 전력량을 측정하기 위한 파워메타, 전력량을 조절하기 위한 슬라이더닥스, 데이터를 저장하기 위한 컴퓨터와 데이터로거 등으로 구성되어 있다. 또한 충전층 내의 압력을 조정하기 위해서 진공

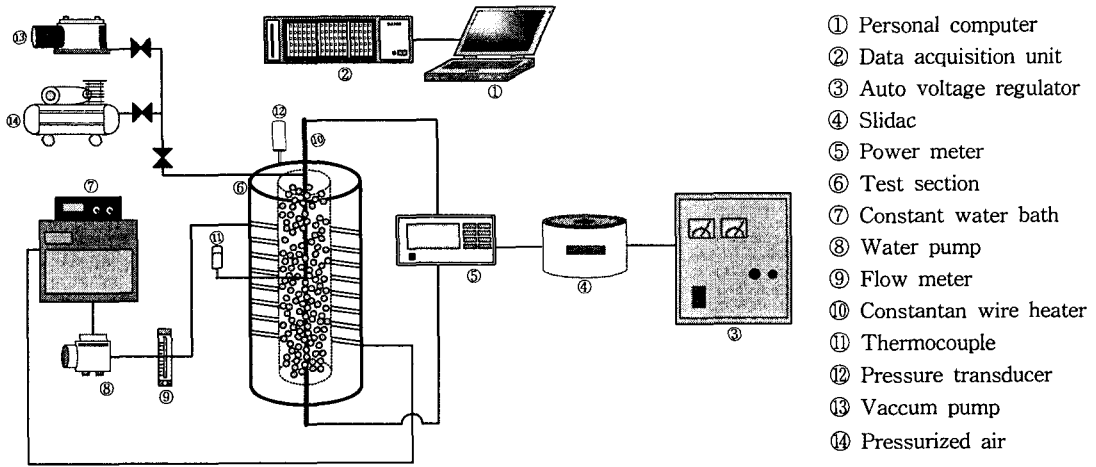


Fig. 2 Schematic diagram of the effective thermal conductivity.

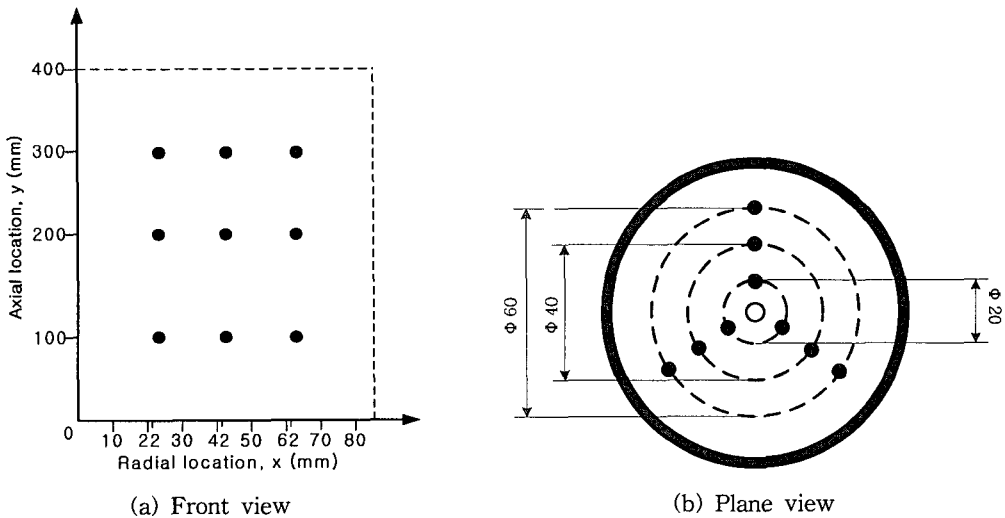


Fig. 3 Position of thermocouple.

펌프와 공기압축기에서 발생한 공기를 조절하여 충전층 내의 압력을 맞추었으며 압력은 압력트랜스듀서를 통하여 컴퓨터에 저장하였다.

테스트섹션은 내부에 유로를 설치하여 항온조에서 공급하는 물을 통해서 충전층 내의 온도를 유지할 수 있도록 설계하였으며, 전기통전을 방지하기 위해서 석면피복된 콘스탄탄 와이어 히터를 사용하였다. 히터는 구경이 0.4 mm, 히터길이 600 mm, 히터전력량은 16 W/m을 슬라이더다스를 통하여 공급하였다.

Fig. 3은 테스트섹션 내 열전대의 위치를 나타낸 것으로 (a)는 정면도를 (b)는 평면도를 나타낸

것이다. 테스트섹션은 원통형으로 제작하였으며 열전대는 9개소에서 측정하여 평균값을 사용하였다. 또한 히터의 중심부의 온도를 측정하여 실험 시작시와 종료시의 온도차를 구하였다.

실험은 우선 실험조건에 함수율이 미리 설정된 실리카겔을 원통형 테스트섹션에 1.6 kg ($Z=0.65$)를 가득 채우고 실리카겔의 체적을 계측하였다. 다음으로 충전층 내의 온도를 항온조를 이용하여 실험온도로 맞추고 실험온도에 도달하게 되면 원하는 실험압력을 공기압축기나 진공펌프 등을 이용하여 맞추었다. 그리고 나서 슬라이더다스에 의해 전압 및 전류를 조정하여 전력량이 16 W/m가

되도록 히터를 가열함과 동시에 데이터로거에서 계측을 시작하였다. 일정한 시간이 경과한 후에 계측을 종료하였다.

3.2 실험조건

흡착제인 실리카겔의 유효열전도율을 측정은 Table 1의 조건에서 행하였다. 주요 실험변수로는 충전층 압력, 충전층 온도, 함수율(Water content), 입

Table 1 Conditions of measurement

Parameters	Range
Pressure of packed bed (kPa)	10, 55, 100, 145, 190
Temperature of packed bed (°C)	10, 20, 30, 40, 50
Water content (W)	0.0, 0.1, 0.2, 0.3
Volume ratio (Z)	0.65

Table 2 Distribution of particle size

Particle size	Distribution	Analytical value
0.5~0.8 mm	0.5~0.8	99.7 wt%
	below 0.5	0.3 wt%
1.3~1.7 mm	above 1.7	3.0 wt%
	1.3~1.7	95.2 wt%
	below 1.3	1.8 wt%
2.3~2.7 mm	above 2.3	2.9 wt%
	2.3~2.7	96.7 wt%
	below 2.7	0.4 wt%
3.35~3.9 mm	3.35~3.9	96.7 wt%
	below 3.35	1.3 wt%

Table 3 Thermal properties of silica gel

Properties		Domestic K company	Japan F company
Particle size (mm)		1.3~1.7	0.5~0.8 2.3~2.7 3.35~3.9
Moisture adsorption capacity (wt%)	20%R.H.	11.0 Min	12.0 Min
	50%R.H.	25.0 Min	25.0 Min
	90%R.H.	35.0 Min	35.0 Min
Bulk density (g/ml)		0.72~0.78	0.73
Surface area (m ² /g)		690	650
PH (at 5% slurry)		5.0~7.0	5.0
Pore volume (ml/g)		0.39	0.36
Pore diameter (nm)		2.2	2.3

자크기(Particle size) 등에 대해서 측정을 하였다. 함수율은 수분이 함유된 실리카겔질량에서 건조 실리카겔 질량을 뺀 값을 건조실리카겔 질량으로 나누는 것으로 정의하였다.

Table 2는 실험에 사용된 실리카겔 입자크기별 분산분포를 나타낸 것이며, 실리카겔 각각에 대한 분산분포는 1.3~1.7 mm인 경우에 95.2 wt%, 0.5~0.8 mm인 경우에 99.7 wt%의 범위 내에 있으며, 측정에 사용된 실리카겔은 국내 K사(A타입)와 일본 F사(A타입)의 제품을 사용하였다.

Table 3은 측정에 사용된 국내 K사와 일본 F사 A타입 실리카겔의 열물성치를 나타낸 것이다. 유효열전도율에 영향을 미치는 인자로 알려진 수분흡착률(Moisture adsorption capacity), 겉보기 비중(Bulk density), 비표면적(Surface area), PH, 세공용적(Pore volume), 세공크기(Pore diameter) 등의 열물성치는 두 회사가 거의 유사하여 유효열전도율에 대한 결과를 잘 비교할 수 있다.

3.3 실험결과 및 고찰

Table 4는 실리카겔의 유효열전도율에 대한 데이터의 신뢰성을 나타내기 위해서 입자크기가 0.5~0.8 mm, 압력 10 kPa, 온도 20°C, 함수율 0인 경우에 시간변화(t_1 , t_2)에 따른 히터의 온도변화(T_1 , T_2)와 유효열전도율을 나타낸 것이다. 시간변화에 따라서 유효열전도율의 값은 오차범위 3% 이내에서 거의 일정한 값을 나타내었으며, 본 실험에서는 평균값을 취하여 데이터를 도식하였다.

Table 4 Measurement results of effective thermal conductivity on time

Particle size : 0.5~0.8 mm, Pres. : 10 kPa, Bed temp. : 20°C, W : 0.0				
t_1 (s)	t_2 (s)	T_1 (°C)	T_2 (°C)	λ (W/mK)
11	47	20.9	32.2	0.164
11	61	20.9	34.9	0.164
11	87	20.9	36.8	0.166
11	107	20.9	38.3	0.166
11	127	20.9	39.5	0.168
11	147	20.9	40.6	0.167
11	167	20.9	41.4	0.168
11	187	20.9	42.2	0.169

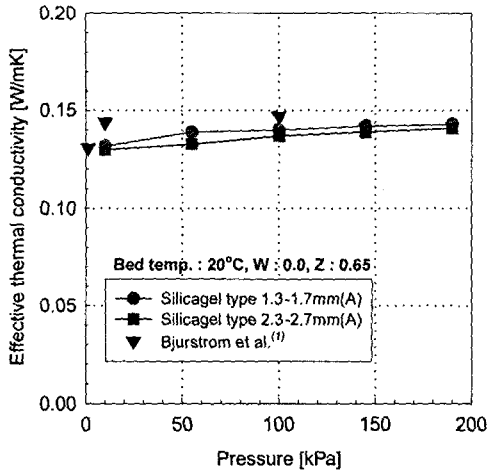


Fig. 4 Dependence of effective thermal conductivity on pressure.

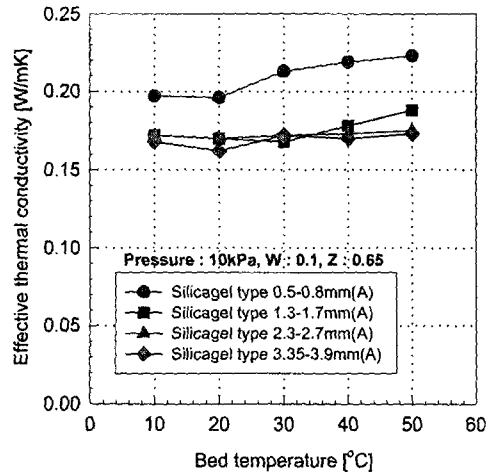


Fig. 6 Dependence of effective thermal conductivity on bed temperature (W : 0.1).

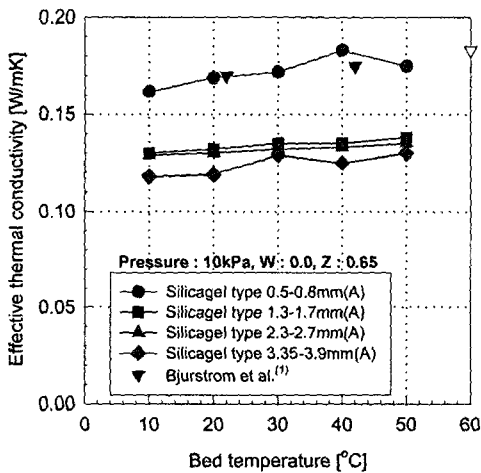


Fig. 5 Dependence of effective thermal conductivity on bed temperature (W : 0.0).

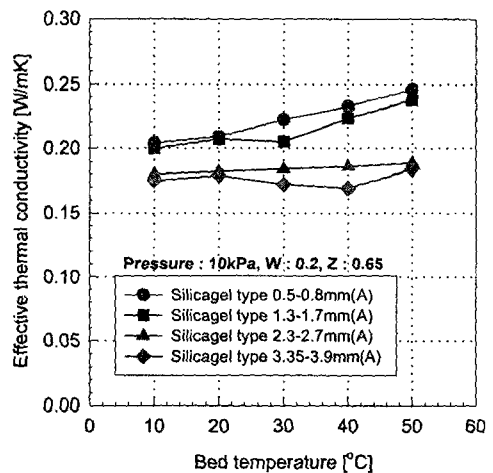


Fig. 7 Dependence of effective thermal conductivity on bed temperature (W : 0.2).

Fig. 4는 충전층 압력에 따른 유효열전도율의 변화를 나타낸 것이다. 실험에 사용된 실리카겔은 A타입, 국내 K사 1.3~1.7mm와 일본 F사 0.5~0.8mm를 사용하였으며 압력은 10kPa, 함수율(W)은 0, 체적분율(Z)은 0.65인 상태에서 실험하였다. 충전층의 압력이 증가할수록 유효열전도율은 약간 증가하는 경향을 보였으며 이러한 영향은 압력이 증가할수록 유동층 내에서 분자운동이 활발하게 일어나고 압력증가에 의한 접촉면적 증가에 의해서 유효열전도율은 다소 증가하였다고 생각된다.

실험결과의 타당성을 확인하기 위해서 실험조건(온도 22°C, 입자크기 1~3mm, 함수율 0, 체적분율 0.675)이 유사한 Bjurström et al.⁽¹⁾의 실험결과와 비교하였으며 그 경향은 수 % 내에서 거의 정성적으로 유사하게 나타났다. 실험 결과에 있어서 다소 차이가 나는 이유로는 실험에 사용된 실리카겔의 물성이나 체적분율 등이 다르기 때문에 약간의 차이가 있는 것으로 판단된다.

Fig. 5~8은 충전층 온도에 따른 유효열전도율의 변화를 나타낸 것이다. 실험에 사용된 실리카겔은 국내 K사, A타입, 1.3~1.7mm 및 일본 F

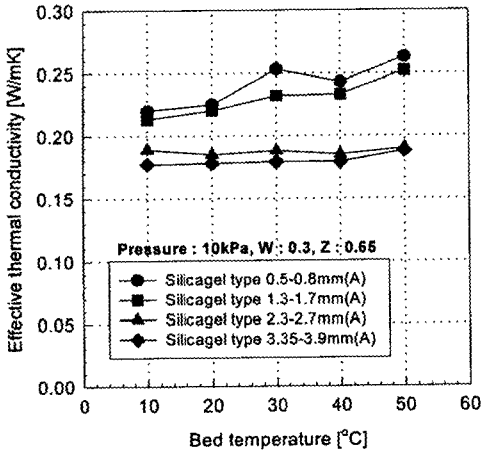


Fig. 8 Dependence of effective thermal conductivity on bed temperature (W : 0.3).

사, A타입, 0.5~0.8 mm, 2.3~2.7 mm, 3.35~3.9 mm를 사용하였으며 압력은 10 kPa, 체적분율은 0.65인 상태에서 실험한 결과이다. Fig. 5는 함수율이 0인 경우, Fig. 6은 함수율이 0.1인 경우, Fig. 7은 함수율이 0.2인 경우, Fig. 8은 함수율이 0.3인 경우이다.

실험결과로는 충전층 온도가 증가할수록 유효 열전도율은 약간 증가하는 경향을 보였으나 그 영향은 그리 크지 않았다. 또한 실리카겔의 입자 크기에 대한 유효열전도율의 영향은 입자크기가 작은 순(0.5~0.8 mm > 1.3~1.7 mm > 2.3~2.7 mm > 3.35~3.9 mm)으로 유효열전도율이 크게 나타났다.

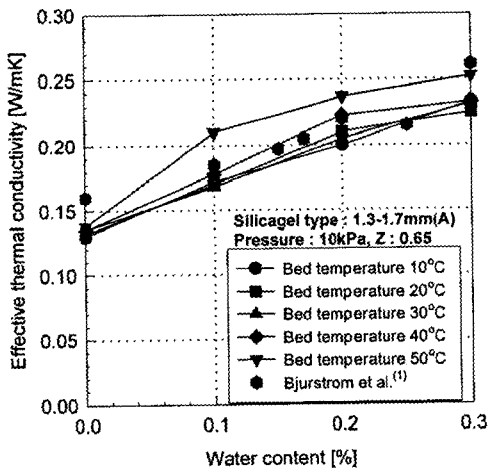


Fig. 9 Dependence of effective thermal conductivity on water content.

실리카겔 입자의 열전도율은 함수율이 0인 경우에 0.37 W/mK⁽¹¹⁾이므로 실제로 흡착탑 내에서 작동하는 실리카겔의 온도대인 40°C에서 측정된 충전층의 유효열전도율을 Fig. 5에서 보면 유효열전도율이 가장 크게 나타난 입자크기 0.5~0.8 mm인 경우에 0.183 W/mK이므로 49.5% 정도로 매우 낮은 상태이다. 이것을 통해서 알 수 있는 것은 흡착식 냉각시스템의 효율을 높이기 위해서는 열전도율이 높고 흡탈착을 빠르게 할 수 있는 고성능 흡착제의 개발이 절실함을 알 수 있다.

온도에 따른 유효열전도율 실험결과와 타당성을 확인하기 위해서 실험조건(입자크기 1~3 mm, 함수율 0, 체적분율 0.675, 압력 11 kPa)이 유사한 Bjurström et al.⁽¹¹⁾의 실험결과를 압력과 마찬가지로 비교하였으며 그 경향은 수 % 내에서 거의 정성적으로 유사하게 나타남을 알 수 있었다.

Fig. 9는 함수율에 대한 유효열전도율의 영향을 나타낸 것이다. 제시된 실험결과를 실리카겔 입자크기가 1.3~1.7 mm, 압력 10 kPa, 체적분율 0.65인 경우이다. 함수율은 교반기와 적외선 오븐을 이용하여 함수율을 조절하였다. 열전도율이 우수한 물이 실리카겔에 함유되어 있는 함수율이 높은 상태(0.3 > 0.2 > 0.1 > 0.0)가 유효열전도율이 크게 나타났으며, 함수율이 0에서 0.1로 변화시켰을 때 최소 24.5%에서 52.2%로 유효열전도율이 증가되는 경향을 보였다.

Fig. 10은 입자크기에 대한 유효열전도율의 영향을 나타낸 것이다. 측정에 사용된 실리카겔은

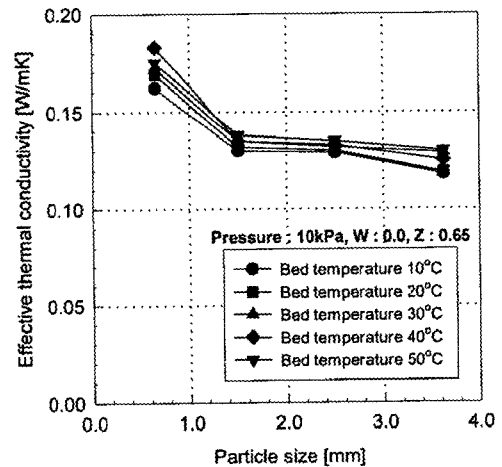


Fig. 10 Dependence of effective thermal conductivity on particle size.

A타입으로 국내 K사, 1.3~1.7 mm, 일본 F사 0.5~0.8 mm, 2.3~2.7 mm, 3.35~3.9 mm이다. 실험 결과로는 입자크기가 가장 작은 일본 F사 0.5~0.8 mm가 유효열전도율이 가장 크게 나타났다. 이것은 0.5~0.8 mm의 실리카겔 형상이 입상형(Granular)으로 접촉면적이 커서 유효열전도율이 크게 나타난 것으로 판단되며, 1.3~1.7 mm, 2.3~2.7 mm, 3.35~3.9 mm은 구형(Bead)으로 입자크기가 커질수록 접촉저항이 증가되면서 유효열전도율이 작게 나타난 것으로 판단된다. 유효열전도율은 입자크기가 작은 순(0.5~0.8 mm > 1.3~1.7 mm > 2.3~2.7 mm > 3.35~3.9 mm)으로 크게 나타나는 경향을 보였다.

4. 결 론

본 연구에서는 유효열전도율의 측정에 가장 많이 사용되고 있는 비정상 열전가열법을 이용하여 충전층의 온도, 압력, 함수율, 입자크기 등이 유효열전도율에 미치는 영향을 파악하고 그 측정값을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 실리카겔 충전층의 온도와 압력을 변화시켰을 경우 온도와 압력이 증가할수록 유효열전도율은 약간 증가되었으며 그 증가폭은 그리 크지 않음을 알 수 있었다.

(2) 함수율에 대한 유효열전도율의 영향으로는 열전도율이 우수한 물이 실리카겔에 함유되어 있는 함수율이 높은 상태(0.3 > 0.2 > 0.1 > 0.0)가 유효열전도율이 크게 나타났으며, 함수율이 0에서 0.1로 변화시켰을 때 최소 24.5%에서 52.2%로 유효열전도율이 가장 크게 증가되는 경향을 보였다.

(3) 입자크기에 대한 유효열전도율의 영향으로는 입자크기가 작은 순(0.5~0.8 mm > 1.3~1.7 mm > 2.3~2.7 mm > 3.35~3.9 mm)으로 유효열전도율이 증가되는 경향을 보였다.

후 기

본 연구는 국무총리산하 산업기술연구회가 지원하는 협동연구사업인 “차세대 냉각시스템 기술 개발”의 일환으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Bjurström, H., Karawacki, E. and Carlsson, B., 1984, Thermal conductivity of a microporous particulate medium: moist silicagel, *Int. J. Heat Transfer*, Vol. 27, No. 11, pp. 2025-2036.
2. Mori, H., Hamamoto, Y. and Yoshida, S., 2000, Effective Thermal Conductivity of Adsorbent Packed Beds, *Trans. of the JSRAE*, Vol. 17, No. 2, pp. 171-182.
3. Griesinger, A., Spindler, K. and Hahne, E., 1999, Measurements and theoretical modeling of the effective thermal conductivity of zeolites, *Int. J. Heat Transfer*, Vol. 42, pp. 4363-4374.
4. Yajima, T. and Morikawa, S., 2000, Measurement of thermal conductivity and evaluation of isobaric specific heat capacity of ethanol-water mixture by the transient hot-wire method, *Trans. of the JSRAE*, Vol. 17, No. 1, pp. 79-84.
5. The Japan Society of Mechanical Engineers, 1991, *Measurement of Thermal Properties*, Yanghyundang, Japan, pp. 50-52.
6. The Agne Technology Center, 2003, *The Latest Thermal Measurement*, Alpac Engineer, Japan, pp. 224-243.