

강제대류에 의해 냉각되는 다공물질의 열응답 특성

Thermal response of porous media cooled by a forced convective flow

백진욱*, 강병하*, 현재민**
 J. W. Paek, B. H. Kang, J. M. Hyun

Key words : Porous media(다공물질), Cool-down response(냉각응답), Convective heat transfer (대류열전달), Pressure loss(압력손실), Heat discharge(열방출)

Abstract

The experimental investigation of thermal response characteristics by the air flow through the porous media has been carried out. The packed spheres of steel or glass were considered as the porous media in the present study. Temperature distributions of the fluid in the porous media as well as pressure drops through the porous media were measured. The transient temperature variations in the porous media are compared favorably with the analytical results in the high Reynolds number ranges. However, in the low Reynolds number ranges, the experimental data deviate from the analytical results, due to the dominant heat conduction penetration to the upstream direction, which is not considered in the analytical model. The cool-down response of porous media is found to be dependent upon the specific dimensionless time considering the material property and air velocity. The heat discharge process is recommended to be operated until a certain time, considering the cost efficiency.

기호설명

A	: 다공물질로 채워진 영역의 유효 단면적, $\pi R^2[m^2]$	f	: 마찰계수, 식(8)
C	: 정압 비열[J/kg°C]	L	: 다공물질로 채워진 영역의 길이[m]
D	: 다공물질로 채워진 영역의 유효 직경[m]	ΔP	: 다공물질의 압력손실[Pa]
d	: 구의 직경[m]	Q(x,t)	: 다공물질의 무차원 열방출량, 식(3)
d _h	: 다공물질내의 수력직경, 식(6)[m]	Q _{Local} (X)	: 다공물질의 무차원 국소 열방출량, 식(4)
		Q _{total} [*] (t)	: 전체다공물질의 열방출량, 식(10)[J]
		R	: 다공물질로 채워진 영역의 유효반경, (D/2)[m]
		Re	: 레이놀즈수 $\left(\frac{dU}{\nu}\right)$
		t	: 시간[s]

* 한국과학기술연구원 공조·환경제어연구팀

** 한국과학기술원 기계공학과

- T : 온도[℃]
- T_∞ : 외부온도[℃]
- T_i : 다공물질의 초기 온도[℃]
- U : 상류에서의 공기의 단면 평균속도[m/s]
- u : 다공물질내의 기공을 통과하는 공기의 평균속도[m/s]
- W(t) : 유체를 다공물질로 보내기 위해 필요한 일, 식(9)[J]
- x : 길이 방향 좌표[m]
- X : 무차원 좌표 $\left(\frac{x}{L}\right)$

그리스문자

- ε : 다공도(porosity)
- ρ : 밀도[kg/m³]
- ν : 동점성계수[m²/s]
- θ : 무차원 온도, 식(1)
- τ : 무차원 시간, 식(2)

첨자

- f : 유체
- s : 고체

1. 서 론

다공물질은 단위 부피당 많은 표면적을 가지고 있기 때문에 열에너지의 저장과 회수과정이 짧은 주기로 반복되어 빠른 열응답 특성이 요구되는 분야와 고효율이 필요한 분야에 폭 넓게 응용되어 왔다. 고온과 저온의 열원사이에서 빠른 주기로 작동하는 재생기나 태양열에너지 집열장치 등은 좋은 예이다.⁽¹⁻⁵⁾ 다공물질의 열응답 특성에 대한 자세한 정보는 이러한 장치들의 비정상상태에서의 성능 평가에 매우 중요한 요소이다. 특히 실제적인 문제에서는 다공물질내의 고체매질과 내부를 흐르는 유동이 서로 열평형상태에 있지 않는 경우가 대부분이며 따라서, 두 물질간의 상호 열전달현상은 깊이 있는 연구가 필요한 분야이다.

다공물질의 열응답 특성에 관한 초기연구는 주

로 Schumann모델⁽⁶⁾에 바탕을 둔 해석모델을 기본으로 하였다. 이러한 접근방법은 다공물질의 고체매질과 유동사이의 대류열전달계수가 일정하다는 가정에 바탕을 두고 있다. 최근에는 다공물질을 형성하는 고체내의 열전도현상, 유동방향으로의 열전도현상과 다공물질내부의 복잡한 유로에 의한 열확산(thermal dispersion)현상 등을 고려하여 좀더 실제적인 현상을 설명하기 위한 변형된 모델이 제시되었으며, 이러한 모델들에 의한 해석값과 실험결과와의 비교가 진행되어 왔다.⁽⁷⁻⁹⁾

또한, 지금까지 이루어진 많은 실험결과들은 다공물질로 유입되는 유체와 방출되는 유체의 시가너에 따른 온도변화만을 측정하였으며 그 결과로서 다공물질의 고체매질과 유동사이의 대류열전달현상에 관한 관계식을 제시하였다.⁽⁷⁻⁹⁾ 그러나, 다공물질의 열응답 특성을 규명하기 위해서는 다공물질내부를 통과하는 유체의 위치와 시간에 따른 온도변화와 열전달현상에 관한 실험적인 접근방법이 필요하지만 이에 관한 기존의 실험결과는 거의 제시되지 않아 왔다.

본 연구에서는 관 내부를 가득 채우고 있는 고온의 다공물질에 갑자기 일정한 온도를 유지하는 찬 공기가 유입되어 다공물질을 냉각시키는 경우의 열응답 특성을 실험을 통해 고찰하였다. 이와 같은 다공물질의 냉각현상에 관한 물리적인 모델은 Fig. 1에 나타나 있다. 단열된 관 내부에 균일한 온도분포(T_i)를 가지는 다공물질이 관 직경 D, 관 길이 L만큼 채워져 있으며 갑자기(t=0.0) 외부의 낮은 온도(T_∞)의 공기가 유입된다. 이 때 다공물질로 채워진 관 내부의 위치와 시간에 따른 온도변화와 전체압력손실을 측정하였으며 이 결과를 기존의 해석모델과 비교하였다. 또한, 본 연구에서는 이를 위해 다공물질의 재질과 크기, 그리고, 공기의 유량이 변화하였을 때 다공물질의 열전달 특성과 압력손실 특성에 미치는 영향을 실험을 통하여 규명하였다.

2. 실험장치 및 방법

실험장치는 Fig.2에 나타나 있는 것처럼 공기공급부, 시험부, 측정장치부 등으로 구성되어 있다. 공기의 공급은 매우 큰 저장용기와 압력조절계가 설

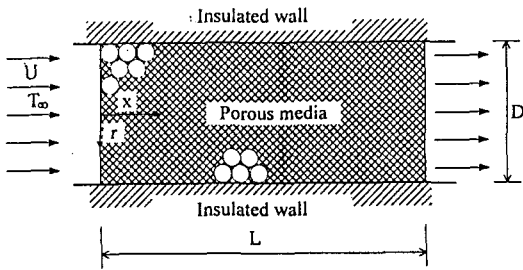


Fig.1 Physical model

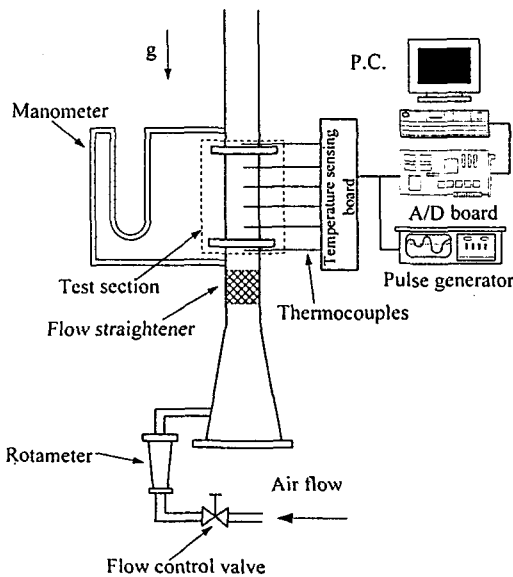


Fig.2 Schematic diagram of the experimental system

치된 압축기를 이용하였으며 공기의 유량은 유량조절밸브와 잘 보정된 유량계(rotameter)를 이용하여 조절하였다. 시험부 입구에서 균일한 유속을 얻기 위해 금속망을 시험부의 상류에 적층(flow straightener)하였으며 이를 통과하여 시험부 입구로 유입되는 공기의 속도는 열선 유속계를 이용하여 단면에 걸쳐 균일함을 확인하였다. 시험부의 입구($x/L=0.0$)로 유입되는 공기의 온도는 공기조화된 실내의 온도(T_∞)로서 실험시간동안 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 이내로 유지되었다.

시험부는 다공물질과 용기로 구성되며 우레탄계 열의 단열재로 외부와 단열되어 있다. 시험부의 용

기는 내경 50mm, 길이(L) 100mm로 경계벽면의 영향을 줄이기 위해 열전도도가 작은 엔지니어링 플라스틱을 사용하였으며 벽면의 두께를 얇게 하여 용기 자체의 열용량을 최소화하였다.

다공물질은 일정한 크기의 구를 무작위로 적층한 충전층(packed bed)으로 구의 직경과 재질의 영향을 고찰하기 위해 각각 직경 3.0mm와 6.35mm의 탄소강구(탄소함유율 1%), 직경 3.0mm의 유리구(soda lime glass)를 사용하였다. 탄소강과 유리의 밀도, 비열, 열전도도는 각각 $7,850\text{kg/m}^3$, $500\text{J}/(\text{kg K})$, $52\text{W}/(\text{K m})$, 그리고 $2,350\text{kg/m}^3$, $820\text{J}/(\text{kg K})$, $1.0\text{W}/(\text{K m})$ 이다. 이런 충전층에서는 벽면 근처에서 국소다공도가 증가하며 이로 인해 벽면 근처에서 유속이 증가하는 채널링효과가 나타나게 된다.⁽¹⁰⁾ 이 현상을 줄이기 위해 3mm 두께의 부드러운 단열재를 용기의 안쪽에 부착하고 이 면에 접촉하는 구를 1/3정도 묻히게 하였다. 이 때문에 유동이 통과하는 관 내의 유효직경(D)은 약 45mm가 된다. 또한, 구의 배열이 무작위가 되도록 용기에 잘 흔들어서 채웠다. 이 경우 충전층의 전체다공도는 직경 3.0mm와 6.35mm의 경우 각각 0.38과 0.40로 측정되었다. 용기의 양 끝에는 금속망을 부착하여 충전층을 고정시켰다. 출구($x/L=1.0$) 단면에서의 속도와 온도분포를 측정된 결과 유동은 실질적으로 1차원이며 온도장도 중심부분($r/R \leq 0.5$)에서는 벽면의 효과가 거의 나타나지 않음을 확인할 수 있었다. T-형 열전대(AWG35)를 이용하여 충전층의 중심선($r/R=0.0$)을 따라 온도를 측정하였다. 2개의 열전대는 용기 양 끝의 금속망에 고정되었으며 4개의 열전대는 입구로부터 각각 $x=20, 40, 60, 80\text{mm}$ 위치에 가는 강철 튜브(직경 1.0mm)를 통해 고정되었다. 충전층의 중심($r/R=0.0$)에 위치한 열전대의 정션(Junction, 직경 약 0.3mm)은 주변의 구와 직접 접촉되는 것을 방지하기 위해 매우 가는 철사로 만든 코일(외경 1.5mm)을 튜브 끝에 부착하였다.

다공물질의 냉각 특성을 명확히 하기 위해 찬 공기가 유입되는 순간($t=0.0$)의 다공물질은 균일한 고온(T_i)의 온도분포를 나타내야 한다. 이를 위해 충전층으로 채워지고 열전대가 설치된 완성된 시험부를 고온(T_i)의 항온조에 넣어 열평형에 도달시켜 시

험부 전체가 균일한 온도분포가 되도록 하였다. 그 후 이미 지정된 유속의 공기가 흐르는 실험장치에 연결하였다. 연결에 소요된 시간은 수초에 불과하며 연결과 동시에 찬 공기가 다공물질로 유입되므로 이 순간을 실험의 시작점($t=0.0$)으로 하였다. 이 연결과정에 의한 실험결과의 반복오차는 무시할 만큼 작음을 확인하였다.

일정한 시간 간격으로 온도를 측정하기 위해 합수발생기에서 발생된 1.0Hz의 구형파와 PC와 연결된 온도측정장치를 동조시켜 1초에 한번씩 열전대에서 신호를 얻었으며 측정온도의 오차는 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 로 전체적인 실험결과에 미치는 영향은 매우 적었다. 또한, 다공물질에 의한 압력손실은 저속영역에서는 1/100mm의 측정오차를 가지는 액주압력계(manometer), 고속영역에서는 일반적인 경사액주압력계(inclined manometer)를 이용하여 다공물질의 양단에서 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

본 연구에서 측정한 시험부 내부의 온도는 다공물질을 통과하는 공기의 온도라고 가정할 수 있다. 이것은 다공물질을 이루는 구의 평균 표면온도와 구사이의 공간을 채운 유체의 평균온도와 차이는 구사이의 공간을 채운 유체내의 온도분포의 차이보다 훨씬 크기 때문이며 이런 가정은 구의 밀도, 다공도, 그리고, 일반적인 유동 특성으로 인해 가능하다. 또한, 실험에 사용된 열전대의 정선크기가 매우 작고(직경 약 0.3mm) 주위의 구와 직접적인 접촉을 막기 위해 부착된 코일형태의 보호대의 크기는 열전대의 정선과 접촉되지 않을 만큼 충분히 크기 때문이다.

본 연구에서 수행된 모든 실험조건은, 다공물질의 초기온도는 $T_i=100^\circ\text{C}$ 로 거의 일정하였지만 입구로 유입되는 공기의 온도는 각각의 실험경우에 따라 $T_\infty=23\sim 26^\circ\text{C}$ 로 약간의 변화가 있었지만 각 경우의 실험시간 동안에는 거의 일정하였다. 이러한 온도조건은 다공물질을 사용하는 전형적인 열에너지 저장장치의 경우와 부합되는 것이다.^(2~5) 이 온도조건을 이용하여 다음과 같이 무차원 온도를 정의하였다.

$$\theta(x, t) \equiv \frac{T(x, t) - T_\infty}{T_i - T_\infty} \quad (1)$$

직경 3.0mm의 탄소강으로 이루어진 다공물질로 $Re=201$ 의 공기가 유입되는 경우의 온도변화를 Fig. 3(a)에 보이고 있다. 여기서 무차원 시간 τ 는 다음과 같이 정의하였다.

$$\tau \equiv \frac{\rho_f C_f U t}{(1 - \varepsilon) \rho_s C_s L} \quad (2)$$

무차원 시간 τ 는 다공물질내의 고체매질의 열용량과 어떤 시간까지 다공물질로 유입된 유체의 열용량의 비를 의미한다. Wakao와 Kaguei⁽⁹⁾의 해석모델(modified Dispersion-Concentric model)로부터 계산된 결과는 실선으로 표시하였는데, 전체적으로 본 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 그러나, 유입공기의 유속이 낮은 경우($Re=33$)에서는 Fig.3(b)와 같이 해석모델의 결과와 본 실험결과와의 정량적인 차이가 좀 더 커지게 되며, 특히 실험결과의 길이방향 온도구배는 해석결과보다 작게 나타나고 있다. 이것은 다공물질의 상류방향으로 고체매질을 통한 열전도현상 때문이며 기존의 해석모델은 이를 고려하지 않고 있기 때문이다. 열전도현상은 낮은 Re 수 영역에서 중요성이 커지므로 실험값과 해석값의 차이는 Fig.3(a)보다는 Fig.3(b)에서 더 뚜렷해진다. 또한, 입구로 찬 공기의 유입이 시작된 지 무차원 시간 $\tau=0.5$ 까지 출구의 온도는 거의 영향을 받지 않음을 알 수 있다(Fig.3(a) & (b)). 이것은 유입되는 공기의 관점에서는 이 시간 동안 최대의 열을 흡수하며 시간이 지날수록 다공물질로부터 얻을 수 있는 열량이 감소함을 의미한다.

Fig.4는 공기의 속도변화에 따른 다공물질내의 시간에 따른 온도변화를 나타내고 있다. $Re \geq 106$ 의 영역에서는 다공물질내의 각 위치에서 온도변화가 유속에 관계없이 거의 한 개의 선으로 모임을 볼 수 있다. 그러나, 낮은 Re 수($Re=54$)의 경우에는 θ 값이 다른 경우에 비해 약간 높게 나타나는 경향을 볼 수 있다. 이것은 Fig.3에서 설명한 것처럼 낮은 Re 수에서는 상류로의 열전도현상이 크게 나타나기 때문이다.

다공물질내의 온도분포는 다공물질을 이루는 구

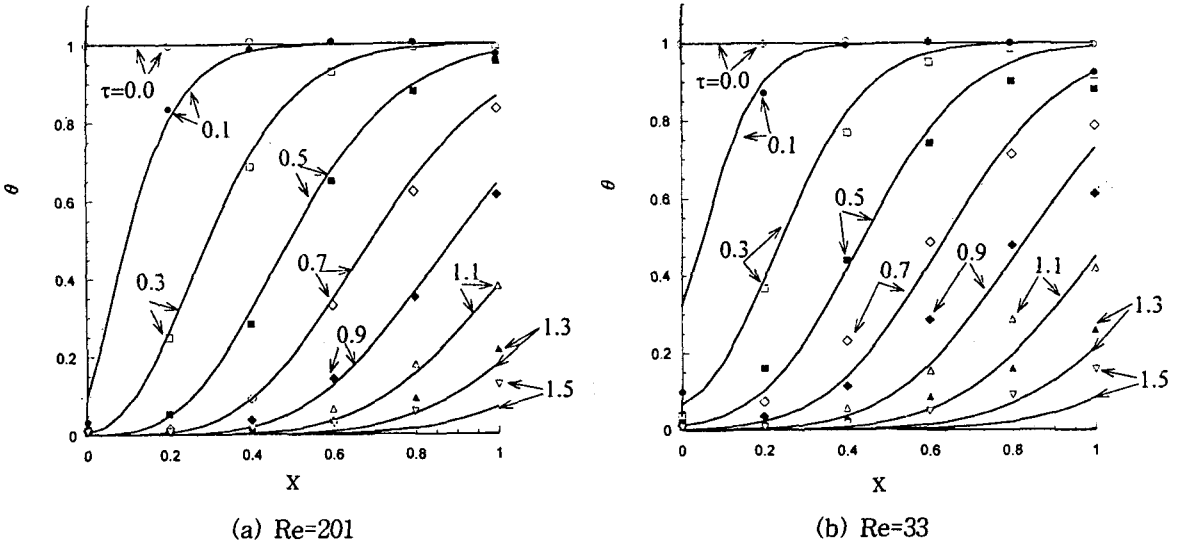


Fig.3 Transient temperature distribution of the fluid flow in the porous media

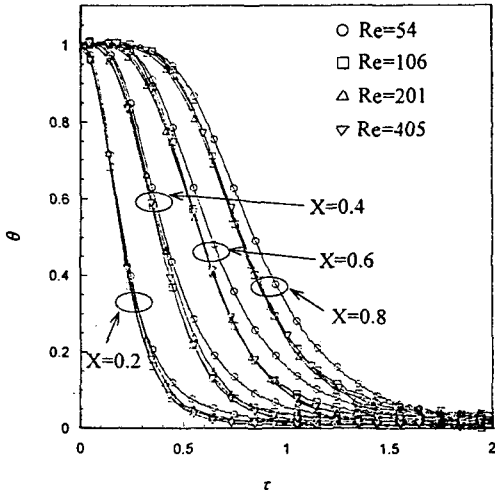


Fig.4 Temperature variations of fluid flow in the porous media

의 재질과 크기에 따라서 변화하게 된다. 다공물질을 이루는 구의 재질과 크기의 영향을 Fig.5에 나타내었다. 본 연구영역에서 다공물질의 재질변화는 전체의 온도변화 특성에 거의 영향을 미치지 못함을 알 수 있다. 다공물질을 이루는 구의 크기가 같을 경우 다공물질내의 고체와 유체간의 대류열전달 계수는 서로 같으며,⁽⁹⁾ 다공물질을 이루는 구의 재

질은 주로 다공물질의 유효 열전도도에 영향을 미친다. 그러나, 유동이 존재하는 경우에는 다공물질내의 복잡한 유로에 의한 확산현상(thermal dispersion)의 영향이 유효 열전도도에 의한 영향보다 훨씬 커지기 때문에 온도변화 특성은 재질의 열전도도변화에 거의 영향을 받지 않게 된다. 또한 재질의 열용량의 변화는 식(2)의 무차원시간에 포함되므로 Fig.5와 같은 결과가 나타난다. 한편, 구의 크기의 변화는 다공물질의 단위 부피당 열전달면적의 변화를 가져오며 그 결과로 유체와 고체사이의 열전달량이 달라진다. 구의 직경이 증가함에 따라 다공물질내의 표면적이 감소하므로 열전달량이 줄어들며, 이 때문에 다공물질내의 유체의 시간에 따른 온도구배가 작아지게 된다.

본 연구에서 다루고 있는 것처럼 차가운 유체에 의해 고온의 다공물질이 냉각되는 경우는 열에너지의 저장 및 방출과 관련된 많은 실제적인 문제에서 찾아볼 수 있다. 다공물질에 저장된 열에너지를 유동을 통해 회수하는 경우에는 다공물질이 고온(T_i)에서 저온(T_∞)으로 냉각되는 동안에 방출하는 열량의 시간에 따른 변화가 중요하게 된다. 이를 고차하기 위해 다음과 같은 무차원 열량을 정의하였다.⁽¹¹⁾

$$Q(X, t) = \frac{\rho_f C_f U \int_0^t (T(X, t) - T_\infty) dt}{(1 - \epsilon) \rho_s C_s L X (T_i - T_\infty)} \quad (3)$$

식(3)의 분모는 입구로부터 X까지의 다공물질내에 초기에 저장된 열량을 나타내고, 분자는 다공물질로 유입되는 유체가 X까지 흐르면서 흡수한 열량을 나타낸다. 따라서, 식(3)은 길이 X의 다공물질이 초기 저장열량에 대하여 시간 t까지 방출한 열량의 비를 의미한다. Fig.6에서 Q_{total} 은 $X=1.0$ 에서 정의하였으므로 직경 3.0mm의 탄소강으로 이루어진 다공물질전체($0.0 \leq X \leq 1.0$)의 냉각 특성을 나타내고 있다. Q_{total} 의 기울기로부터 다공물질로부터의 열전달량이 초기시간에서 가장 크다는 것을 확인할 수 있다. 각각 무차원 시간 $\tau=0.5$ 와 1.0까지 초기에 저장된 전체열량중 약 45%와 85%가 유체유동을 통해 방출되고 있다.

Fig.7은 다공물질을 이루는 구의 크기와 재질이 열방출 특성에 미치는 영향을 보이고 있다. Fig.5에서 논의된 바와 같이 구의 크기가 큰 경우에는 구의 크기가 작은 경우보다 표면적이 작아지고 이로 인해 열전달량이 감소하므로 모든 시간영역에서 구의 크기가 작은 경우보다 큰 경우가 열방출량 Q_{total} 값이 작게 된다. 이것은 초기에 저장된 열량이

일정비율만큼 유체로 전달되는데 소요되는 시간이 길다는 것을 의미한다. 또한, 유리와 탄소강으로 이루어진 다공물질내의 온도장은 무차원시간에서 재질의 영향을 거의 받지 않으므로 열방출량도 무차원시간에서는 거의 같은 특성을 보이고 있다.

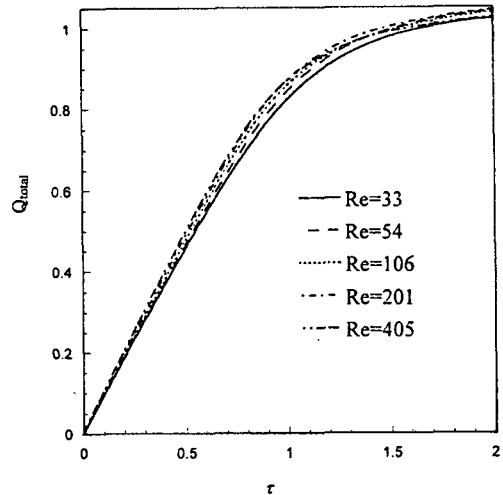


Fig.6 Heat discharge variations from the porous media

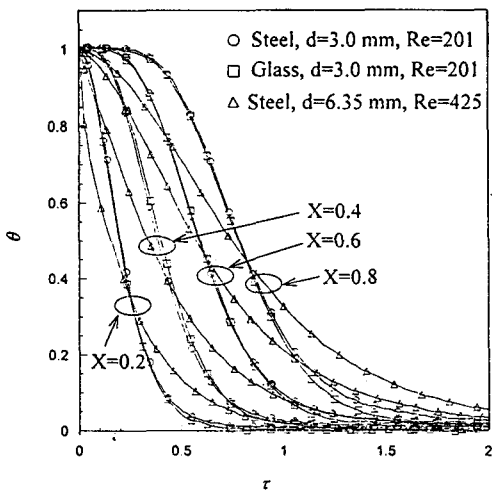


Fig.5 Effects of material properties and particle sizes on the temperature variations of fluid flow in the porous media at the fixed flow rate($U=1.0\text{m/sec.}$)

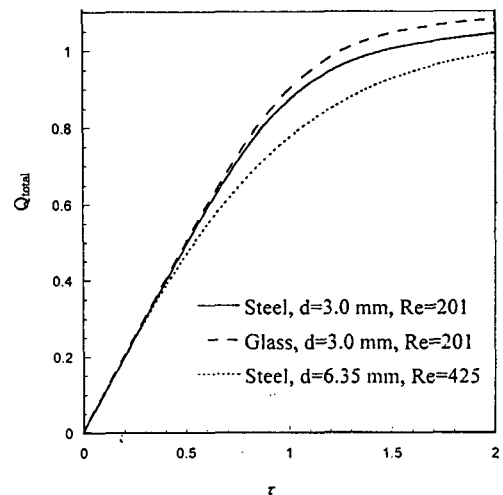


Fig.7 Effects of material properties and particle sizes on the heat discharge variations

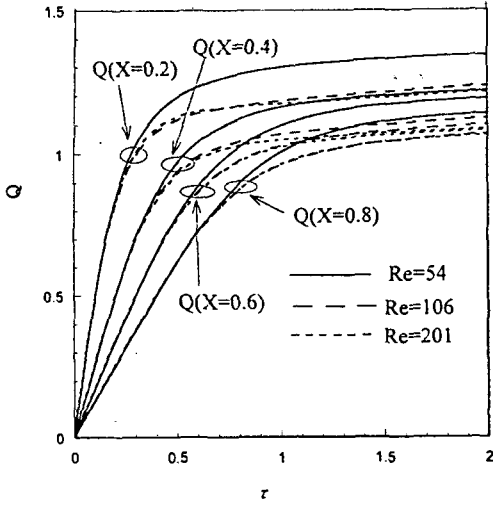


Fig.8 Heat discharge variations along X direction of the porous media

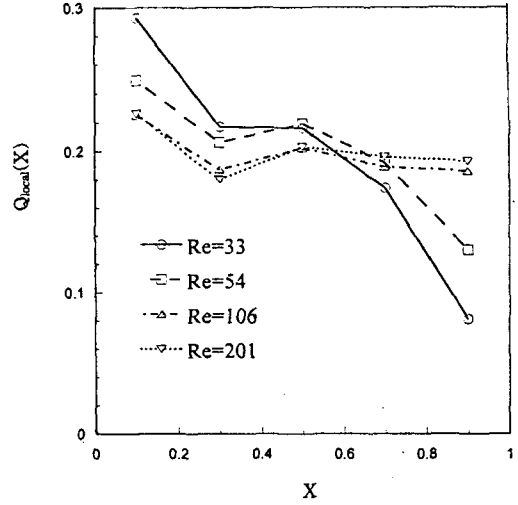


Fig.9 Local heat discharge in the porous media

다공물질내부에서 위치에 따른 열방출 특성의 변화는 다공물질 전체(0.0 ≤ X ≤ 1.0)의 열방출 특성을 규명하는데 중요한 요소이다. Fig.8은 입구에서의 거리 X=0.2, 0.4, 0.6, 0.8에서 시간에 따른 Q값의 변화를 보이고 있다. Re수의 변화에 관계없이 입구 영역(0.0 ≤ X ≤ 0.2)에서는 시간이 지남에 따라 열방출량(Q(X=0.2))이 1.0을 넘어서고 있다. 이것은 다공물질내에 상류방향으로 열전도가 존재하여 이 영역(0.0 ≤ X ≤ 0.2)에 초기(t=0.0)에 저장된 열량보다 더 많은 열이 유체로 전달되었음을 의미한다. 낮은 Re수(Re=54)에서는 이런 경향이 더 크게 나타나고 있다. 이것은 다공물질내에 형성된 유동방향의 온도구배가 위치에 따라 다르며 상류영역의 온도구배가 하류영역의 온도구배보다 크기 때문이다.(Fig. 3) 이 결과로 구를 통한 상류방향으로 전도에 의한 열확산이 나타나며 이 현상은 대류에 의한 열전달량이 작은 낮은 Re수 영역에서 좀 더 명확해진다.

다공물질내의 온도측정위치를 기준으로 전체다공물질(길이L)을 같은 길이(0.2L)의 5개의 영역으로 분리하여 각 영역에서의 열방출량(Q_{Local})을 조사하였다. 각 영역에서 조사한 열방출량 Q_{Local}은 식(4)와 같이 정의된다.

$$Q_{Local}(X) = \frac{\rho_f C_f U \int_0^{\infty} (T(X+0.1, t) - T(X-0.1, t)) dt}{(1-\epsilon)\rho_s C_s L (T_i - T_{\infty})} \quad (4)$$

Q_{Local}(X)은 다공물질 전체영역에 초기에 저장된 열량에 대하여 각 영역(X-0.1 ≤ x/L ≤ X+0.1)에서 방출된 최종열량의 비를 의미한다. Fig.9는 각 영역의 위치에 따른 Q_{Local}(X)의 변화를 보이고 있다. 상류영역의 Q_{Local}값은 구간길이의 평균값인 0.2보다 크며 Re수가 작을수록 더욱 증가하고 있다. Fig.8에서 설명한 것처럼 낮은 Re수의 영역에서는 다공물질 상류로의 전도에 의한 열확산이 상당히 크게 나타남을 확인할 수 있다. 이 결과로 하류영역에서 유체유동으로 방출된 열량은 0.2보다 작게 된다. 이런 열전도에 의한 상류로의 열확산현상은 낮은 유속으로 인해 대류열전달현상이 미약한 경우 주요한 열전달요소로 작용하고 있다.^(12~13)

다공물질은 단위 부피당 표면적이 매우 큰 물질이기 때문에 다공물질을 통과하는 유체는 많은 압력손실이 발생한다. 따라서, 다공물질의 효율적인 이용을 위해서는 다공물질의 압력손실에 관한 고찰이 필요하다. Fig.10은 본 연구에서 사용된 다공물

질의 압력손실특성을 나타내고 있다. 다공물질의 마찰계수 f 는 다공물질의 수력직경 d_h 와 기공(pore)을 통과하는 평균 유동속도 u 를 기준으로 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$f \equiv \frac{\Delta P}{L} \frac{d_h}{\frac{1}{2} \rho u^2} \quad (5)$$

구로 채워진 충전층의 경우 d_h 와 u 는 다음과 같다.

$$d_h = \frac{2d\epsilon}{3(1-\epsilon)} \quad (6)$$

$$u = \frac{U}{\epsilon} \quad (7)$$

식(5), (6), (7)로부터 다공물질내의 마찰계수는 다음과 같이 표현된다.

$$f \equiv \frac{4}{3} \frac{\Delta P}{L} \frac{d}{\rho U^2} \frac{\epsilon^3}{1-\epsilon} \quad (8)$$

식(8)을 기준으로 Ergun⁽¹⁴⁾의 마찰계수와 비교한 결과 본 연구에서 얻은 압력손실 특성이 기존의 연구결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

지금까지 얻은 다공물질의 열방출 특성과 압력손실 특성을 이용하여 다공물질을 이용한 열에너

지 저장시스템의 운용 효율성을 평가할 수 있다. 시간 t 동안 필요한 송풍에너지($W(t)$)와 이 시간동안 다공물질에서 방출된 열량($Q_{total}^*(t)$)은 다음과 같다.

$$W(t) = \int_0^t (\Delta P \cdot A \cdot U) dt \quad (9)$$

$$Q_{total}^*(t) = \rho_f C_f UA \int_0^t (T(L, t) - T_\infty) dt \quad (10)$$

식(7)과 식(6)의 비, Q_{total}^*/W 는 유동을 통한 열에너지 회수의 효율을 의미하며, 이를 Fig.11에 표시하였다. 유체가 다공물질을 통과하기 위해 필요한 송풍동력은 최종적으로 U^3 에 비례하므로, 압력손실이 작아질수록(Re수가 낮아질수록 또는 구의 크기가 커질수록) 이 비율은 높아지지만 열에너지의 회수에 오랜 시간이 필요하게 된다. 구의 재질의 변화는 무차원시간 τ 에 의해 표현되며 탄소강과 유리의 Q_{total}^*/W 가 거의 같게 나타난다. 전체적으로 이러한 비율은 약 $\tau=0.8$ 까지는 일정하게 유지되며 그 후에 급격히 작아짐을 볼 수 있다. 이런 경향은 Re수의 변화에는 별로 영향을 받지 않고 있다. 실제의 시스템 운영 측면에서 유체유동을 통해 열을 회수하는 경우에는 약 $\tau=0.8$ 까지 작동시키는 것이 비용의 효율성 면에서 바람직함을 알

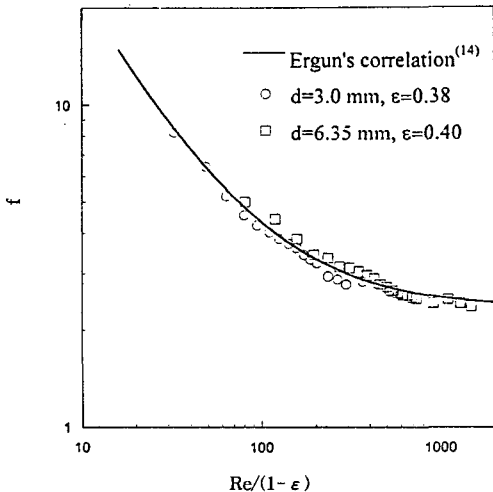


Fig.10 Friction factors by the porous media

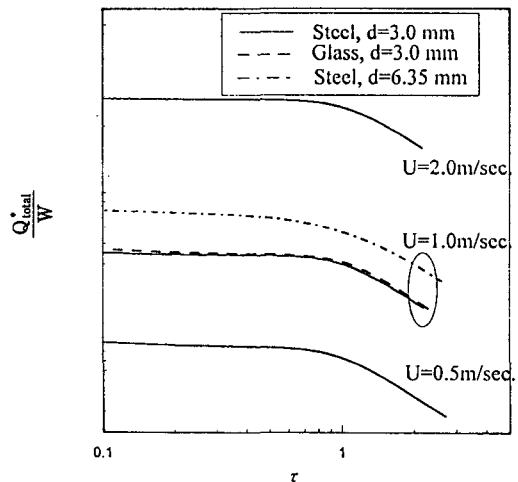


Fig.11 Heat discharge per fan-blowing work

수 있다. 이 시간까지 다공물질내에 초기에 저장된 열량의 약 70%가 유체로 전달되어 방출된다.

4. 결 론

초기에 고온으로 가열된 다공물질이 공기유동에 의해 냉각될 때의 온도변화를 다공물질내의 위치와 시간에 따라 측정하였다. 다공물질을 이루는 구의 크기, 재질과 공기의 유속을 변화시키면서 다공물질의 열전달 특성과 압력손실을 측정하였으며 이를 바탕으로 다공물질의 냉각 특성을 고찰하였다.

대류열전달이 지배적인 영역에서 다공물질을 통과하는 공기의 온도는 다공물질의 열용량과 유입유체의 열용량의 비를 의미하는 무차원 시간(τ)에 따라 변화하며 다공물질의 재질과 유속의 영향은 미미하였다. 다공물질을 이루는 구의 직경변화는 전열면적의 변화를 의미하며 구의 크기가 큰 경우는 작은 경우보다 냉각에 걸리는 시간이 길어진다. Re 수가 큰 경우(대류열전달이 지배적인 경우)에는 다공물질내의 열방출량이 위치에 관계없이 균일하지만 낮은 Re 수 영역에서는 유동방향의 온도구배로 인해 고체매질을 통한 상류로의 열전도현상이 중요한 역할을 하며, 상류에 위치한 다공물질의 열방출량이 하류의 경우보다 더 크게 나타난다. 기존 해석모델은 상류로의 전도에 의한 열확산현상을 잘 나타내지 못했다.

구의 크기가 커질수록 다공물질의 단위부피당 표면적이 감소하므로 압력손실은 줄어든다. 또한, 공기의 유속과 다공물질의 재질에 관계없이 일정한 무차원시간(약 $\tau=0.8$)까지 유체를 통과시키는 것이 열의 방출(약 70%)와 비용 측면(송풍동력 비용)에서 효율적으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. Tanaka, M., Yamashita, I. and Chisaka, F., 1990, "Flow and heat transfer characteristics of the Stirling engine regenerator in an oscillating flow," JSME International Journal series II, Vol. 33, No. 2, pp. 283~289.
2. Choudhury, C. and Garg, H. P., 1993, "Performance of air-heating collectors with packed airflow passage," Solar Energy, Vol. 50, pp. 205~221.
3. Sozen, M., Vafai, K. and Kennedy, L. A., 1991, "Thermal charging and discharging of sensible and latent heat storage packed bed," J. Thermophysics, Vol. 5, pp. 623~625.
4. Beasley, D. and Clark, J. A., 1984, "Transient response of a packed bed for thermal energy storage," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 27, pp. 1659~1669.
5. Saez, A. E. and McCoy, B. J., 1982, "Dynamic response of a packed bed thermal storage system—a model for solar air heating, Solar Energy," Vol. 29, pp. 201~206.
6. Schumann, T. E. W., 1929, "Heat transfer: Liquid flowing through a porous prism," Journal of the Franklin Institute, Vol. 208, pp. 405~416.
7. Handley, D. and Hegggs, P. J., 1968, "Momentum and heat transfer mechanism in regular shaped packings," Trans. Inst. Chem. Engrs. (London), Vol. 46, pp. T251~T264.
8. Bradshaw, A. V., Johnson, A., McLachlan, N. H. and Chiu, Y-T., 1970, "Heat transfer between air and nitrogen and packed beds of non-reacting solids," Trans. Inst. Chem. Engrs. (London), Vol. 48, pp. T77~T84.
9. Wakao, N., Kaguei, S. and Funazkri, T., 1979, "Effect of fluid dispersion coefficients on particle-to-fluid heat transfer coefficients in packed beds," Chem. Engng. Sci., Vol. 34, pp. 325~336.
10. Benenati, R. F. and Brosilow, C. B., 1962, "Void fraction distribution in beds of spheres," A. I. Ch. E. J. Vol. 8, pp. 359~361.

11. Schmidt, F. W. and Willmott, A. J., 1981, Thermal Energy Storage and Regeneration, McGraw-Hill.
12. Stamps, D. W. and Clark, J. A., 1992, "Thermal destratification in a cylindrical packed bed," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 35, pp. 727~737.
13. Sullivan, H. F., Hollands, K. G. T. and Shewen, E. C., 1984, "Thermal destratification in rock beds," Solar Energy, Vol. 33, pp. 227~229.
14. Ergun, S., 1952, "Fluid flows through packed columns," Chem. Eng. Proc., Vol. 48, pp. 89~94.