

왕복유동조건에서 다공성 물질의 비정상 열전달

변수영* · 이대영** · 노승탁†

(2000년 9월 7일 접수, 2001년 1월 17일 심사완료)

Transient Heat Transfer in Porous Media under Oscillating Flow Condition

Su-Young Byun, Dae-Young Lee and Sung Tack Ro

Key Words : Porous Media (다공성 물질), Oscillating Flow (왕복유동), Transient Heat Transfer (비정상 열전달), Local Thermal Equilibrium (국소열적평형), Two-Equation Model, Regenerator (재생기).

Abstract

An analytical characterization is presented on the transient heat transfer by an oscillating flow through a porous slab. Based on a two-equation model, analytic solutions are obtained for both the fluid and solid temperature variations. Two parameters are identified as the Stanton number for the internal heat exchange and the ratio of the thermal capacities between the solid and fluid phases. The heat transfer characteristics are shown to be classified into four regimes according to the two parameters and physical interpretation is presented on the particular heat transfer processes within each regime. In addition, the condition for the local thermal equilibrium between the phases is examined and the relevant criterion is suggested.

기호설명	
<p>a : 단위 체적 당 표면적 [1/m] C_p : 정압 비열 [J/kg K] g : 무차원 복소 온도진폭 h : 틈새 열전달 계수 [W/m²K] K : 열용량의 비 L : 유동방향 다공성 물질의 길이 [m] L_s : 왕복유동 거리 [m] q : 무차원 열유속 S : 상당 Stanton 수 T : 온도 [K] \bar{T} : 시간 평균 온도 [K] t : 시간 [s] t_o : 왕복유동의 시간 스케일 [s]</p>	<p>t_p : 다공성 물질의 특성 시간 [s] x : 유동방향의 좌표 [m] Z : 임피던스 z : 유동방향의 무차원 좌표</p> <p style="text-align: center;">그리스문자</p> <p>γ : 유동방향의 온도구배 [K/m] ϵ : 다공도 θ : 무차원 온도 ρ : 밀도 [kg/m³] τ : 무차원 시간 ψ : 복소 무차원 열유속 ω : 왕복유동의 각속도 [rad/s]</p> <p style="text-align: center;">하첨자</p>

* 회원, 서울대학교 대학원 기계공학부
 ** 회원, 한국과학기술연구원 열유동 제어연구센터
 † 회원, 서울대학교 기계공학부
 E-mail : stro@snu.ac.kr
 TEL : (02)880-7111 FAX : (02)883-0179

c : 열원
 f : 유체
 i : 유체-고체 사이
 s : 고체
 0 : 기준 위치

1. 서론

다공성 물질은 표면적 대 부피의 비가 매우 크며, 밀집된 고체 구조 사이에 복잡한 유체 통로를 가지는 물질이다. 다공성 물질을 열시스템에 응용하여 열전달 면적의 확대와 유동 교란에 의한 열전달 계수 증가의 효과를 동시에 얻을 수 있으며, 이에 따라 열적 조건 변화에 대한 시스템의 반응 속도를 증가시킬 수 있다. 이와 함께, 효율적인 열의 이용과 열회수를 목적으로한 왕복유동의 이용도 늘어나고 있다. 축열, 축냉 장치, 펄스 튜브 냉동기 및 스테링 냉동기의 재생기 등은 다공성 물질과 왕복유동을 응용한 것으로 여러 가지 산업 분야에 광범위하게 사용되고 있다.

다공성 물질 내에서의 열전달 과정은 고체와 유체 사이 미소 틈새에서의 미시적인 열전달 현상에 의하여 좌우되므로 다공성 물질의 미소구조가 전체적인 특성에 큰 영향을 미치게 된다. 그러나 다공성 물질은 극히 이상적인 경우를 제외하고는 그 구조가 매우 불규칙하고 복잡하기 때문에, 주로 거시적이고 평균적인 관점에서의 연구가 주류를 이루고 있다. 이러한 접근 방법의 일환으로 흔히 미소 체적에 대하여 적분된 형태의 지배 방정식을 사용하는 국소체적평균법(local volume-averaging technique)이 적용된다. 국소체적 평균법은 다시 미소 체적 내의 유체와 고체를 함께 평균하느냐, 아니면 각각의 상을 분리하여 평균하느냐에 따라서 크게 두 가지로 나뉘어 지는데, 전자를 one-equation 모델, 후자를 two-equation 모델이라고 부른다.

One-equation 모델은 다공성 물질을 고체와 유체의 평균적인 특성을 가지는 균질 물질로 취급하는 방법으로서, 유체와 고체 사이의 열교환이 충분히 효과적이어서 유체와 고체 사이의 온도차가 무시할 수 있을 만큼 작을 때 적용할 수 있다. 이 one-equation 모델은 간결한 특징으로 인해 현재까지 다공성 물질에서의 열전달 과정을 해석하기 위한 이론적, 수치적 연구에 가장 널리 적용되고 있다.⁽¹⁻³⁾ 그러나 이 one-equation 모델에서는 다공성 물질을 균질 물질로 취급함에 따라 유체와 고체 사이의 경계면 확대에 의한 효과를 고려할 수 없으며, 유체와 고체 사이의 온도차가 유한한 경우의 현상을 적절히 나타낼 수 없다. 특히 열회수 장치나 재생기 등에서는 유동조건 및 온도조건이 시간에 따라 변화하는데, 유체와 고체 사이의 열전달이 이러한 변화 속도에 비하여 충분히 빠르지 않을 경우에는 유체와 고체 사이에 유한한 온도차가 발생하게 되므로 one-equation 모

델의 적용이 적절하지 않게 된다. 이러한 경우에는 유체와 고체를 별개의 상으로 취급하고, 두 상 사이의 상호작용을 고려하는 two-equation 모델이 적용되어야 한다.

다공성 물질에서의 비정상 열전달에 관한 초기 연구로는 Riaz⁽⁴⁾의 연구를 들 수 있다. Riaz는 적층구(packed bed)를 이용한 열저장 시스템의 비정상 열전달 특성을 two-equation 모델과 one-equation 모델을 적용하여 분석하였으며, 유효 열전달율과 유효 열전달 계수를 제안하였다. Spiga와 Spiga⁽⁵⁾는 two-equation 모델을 적용하여 공기 암석으로 구성된 열저장 시스템에서 임의의 입구 온도조건에 대한 고체와 유체의 온도변화를 해석적으로 구하였다. Amiri와 Vafai⁽⁶⁾는 적층구에서의 비정상 열전달 과정에서 non-Darcian 효과, 유동 교란에 의한 열전달 향상 효과 등을 수치적으로 분석하였다. Mincowycz 등⁽⁷⁾은 벽면 열유속이 변동하는 경우에 대하여 고체와 유체의 온도변화를 해석적인 방법으로 구하였으며, 이를 바탕으로 국소열적평형(local thermal equilibrium) 상태를 만족할 수 있는 조건을 제시하였다.

한편 위에 언급한 논문들은 모두 정상 유동조건에 대하여 온도나 벽면 열유속이 시간에 대하여 변동하는 경우에 관련된 연구들이다. 그러나 일반적인 열회수 장치나 재생기의 경우, 유동의 방향이 주기적으로 바뀌므로, 이러한 경우의 열전달 과정을 분석하기 위해서는 비정상 왕복유동을 고려한 해석이 필요하다.

본 연구에서는 왕복유동이 개재되는 경우의 다공성 물질에서의 열전달 현상을 분석한다. Two-equation 모델을 적용하여 열전달 현상을 지배하는 주요 변수를 도출하고, 유체와 고체 각각의 온도변화에 대한 해석해를 구한다. 이 해석해를 바탕으로 하여 열전달 특성이 주요 변수의 크기에 따라 4 가지로 분류됨을 보이고, 각 영역에서의 상이한 열전달 특징에 대해 분석한다. 그리고 유체와 고체 사이의 온도차가 작아져 one-equation 모델의 적용이 가능해지는 국소열적평형 상태에 대한 조건을 제시한다. 또한, 전기 상사 모델을 도입하여 비정상 열전달 현상의 물리적 의미를 설명한다.

본 연구의 내용은 다공성 물질에서의 왕복유동과 관련한 비정상 열전달에 국한된 것이지만, 이에 대한 물리적인 이해는 다공성 물질에서의 일반적인 비정상 열전달 문제의 이해에도 기여할 것으로 기대된다.

2. 모델링 및 이론 해석

Fig. 1 은 폭이 L 이고 길이가 무한대인 다공성 물질을 나타낸다. 다공성 물질의 윗면과 아래면은 각각 고온과 저온으로 유지되고 있으며, 유체가 다공성 물질의 윗면과 아래면 사이를 왕복한다. 이러한 상황은 열재생을 이용한 다양한 동력 사이클 및 환기 시스템에서 발견할 수 있다. 일반적으로 다공성 물질의 미세 구조의 수력 직경은 다공성 물질의 폭 L 보다 충분히 작으며, 이 경우 다공성 물질의 윗면과 아래면 근처에서 존재하는 열적발달영역의 길이는 전체 길이에 비해서 아주 작다고 알려져 있다.^(8,9) 발달영역에 의한 영향을 무시할 경우, 완전발달영역의 폭방향 온도분포가 일정한 기울기를 가지게 된다.⁽¹⁰⁾ 이러한 경우 다공성 물질의 유체와 고체 각각에 대한 에너지 방정식은 다음과 같다.

$$\varepsilon(\rho C_p)_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + \varepsilon(\rho C_p)_f u \frac{\partial T_f}{\partial x} = ha(T_s - T_f) \quad (1)$$

$$(1-\varepsilon)(\rho C_p)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = ha(T_f - T_s) \quad (2)$$

위의 식 (1)과 식 (2)는 국소열적평형이 만족되지 않는 조건에서도 일반적으로 적용할 수 있는 two-equation 모델이다. 위의 식에서 유동방향의 전도항은 선형 온도분포를 고려하여 생략하였다. 한편 왕복유동에 의한 유속은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$u = \frac{L_s \omega}{2} \cos \tau, \quad \tau = \omega t \quad (3)$$

L_s 는 왕복유동 거리이며 L 보다 충분히 작고,

ω 는 왕복유동의 각속도이다. 식 (3)은 유체가 $-\pi/2 \leq \tau \leq \pi/2$ 동안 저온부에서 고온부로 이동(cold blow)하며, $\pi/2 \leq \tau \leq 3\pi/2$ 동안 고온부에서 저온부로 이동(hot blow)하는 것을 나타낸다.

한편 온도는 다음의 식을 이용하여 무차원화한다.

$$\theta(\tau) = \frac{T(x, \tau) - \bar{T}(x)}{L_s \lambda / 2} \quad (4)$$

위 식에서 θ 는 무차원화된 온도진폭이고, λ 는 다공성 물질 내 폭방향 온도분포의 기울기인데, 위치에 관계없이 동일한 값을 가진다. 왜냐하면 왕복유동이 시작되기 전에 고온부와 저온부 사이에 선형 온도구배가 형성되고, 열적발달영역이 충분히 짧은 경우 다공성 물질은 왕복운동하는 주위의 유체에만 영향을 받는다. 이때 완전발달영역 내에는 동일한 열적 환경이므로 선형 온도구배가 유지된다. $\bar{T}(x)$ 는 주어진 위치에서의 시간 평균 온도를 나타내며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{T}(x) = T_0 + \lambda(x - x_0) \quad (5)$$

x_0 는 임의의 기준 위치이며, T_0 는 이 위치에서의 시간 평균 온도이다. 식 (4)의 정의에 의해서 θ 는 위치에는 무관하고 시간에만 의존하는 함수가 된다. 식 (3)과 (4)를 이용하여 에너지 방정식을 무차원화하면 다음과 같다.

$$\frac{d\theta_f}{d\tau} + \cos(\tau) = S(\theta_s - \theta_f) \quad (6)$$

$$K \frac{d\theta_s}{d\tau} = S(\theta_f - \theta_s) \quad (7)$$

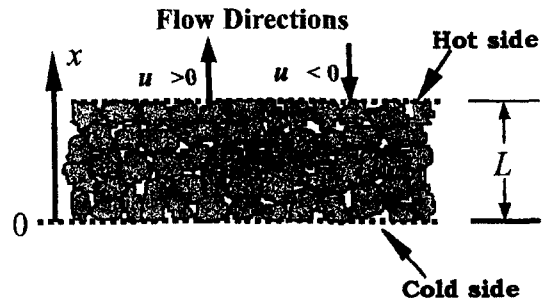
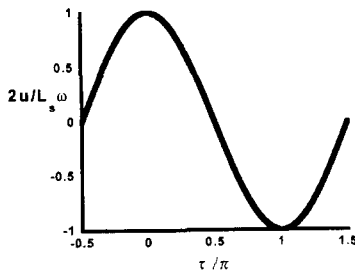


Fig. 1 Schematics of model

위 식에서 무차원 수 S 와 K 는 각각 다음과 같다.

$$S = \frac{ha}{\varepsilon(\rho C_p)_f \omega}, K = \frac{(1-\varepsilon)(\rho C_p)_s}{\varepsilon(\rho C_p)_f} \quad (8)$$

S 는 왕복유동조건에서의 Stanton 수이며, K 는 유체의 열용량에 대한 고체 열용량의 비이다. 개념적으로 S 와 K 는 열재생기의 성능과 관련된 가장 중요한 두 가지 관점 즉, 얼마나 효율적으로 (얼마나 작은 온도차를 가지고) 그리고 얼마나 많은 열을 저장할 수 있는지를 나타낸다.

식 (6)과 식 (7)은 선형 미분 방정식이고, 비제차 항이 시간에 대한 정현파 형태이므로, 해를 다음과 같이 가정한다.

$$\theta(\tau) = \text{Real}[g \cdot e^{i\tau}] \quad (9)$$

위 식에서 g 는 위상각과 진폭의 두 가지 정보를 가지는 복소수이다. 식 (9)를 식 (6)과 식 (7)에

대입하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$ig_f + 1 = S(g_s - g_f) \quad (10)$$

$$Kig_s = S(g_f - g_s) \quad (11)$$

식 (10)과 식 (11)은 연립 대수 방정식으로 이에 대한 해는 다음과 같이 얻어 진다.

$$g_f = \frac{S + iK}{K - iS(1+K)} \quad (12)$$

$$g_s = \frac{S}{K - iS(1+K)} \quad (13)$$

3. 열전달 특성

3.1 온도변화

식 (12)와 식 (13)을 식 (9)에 대입하여 얻은 온

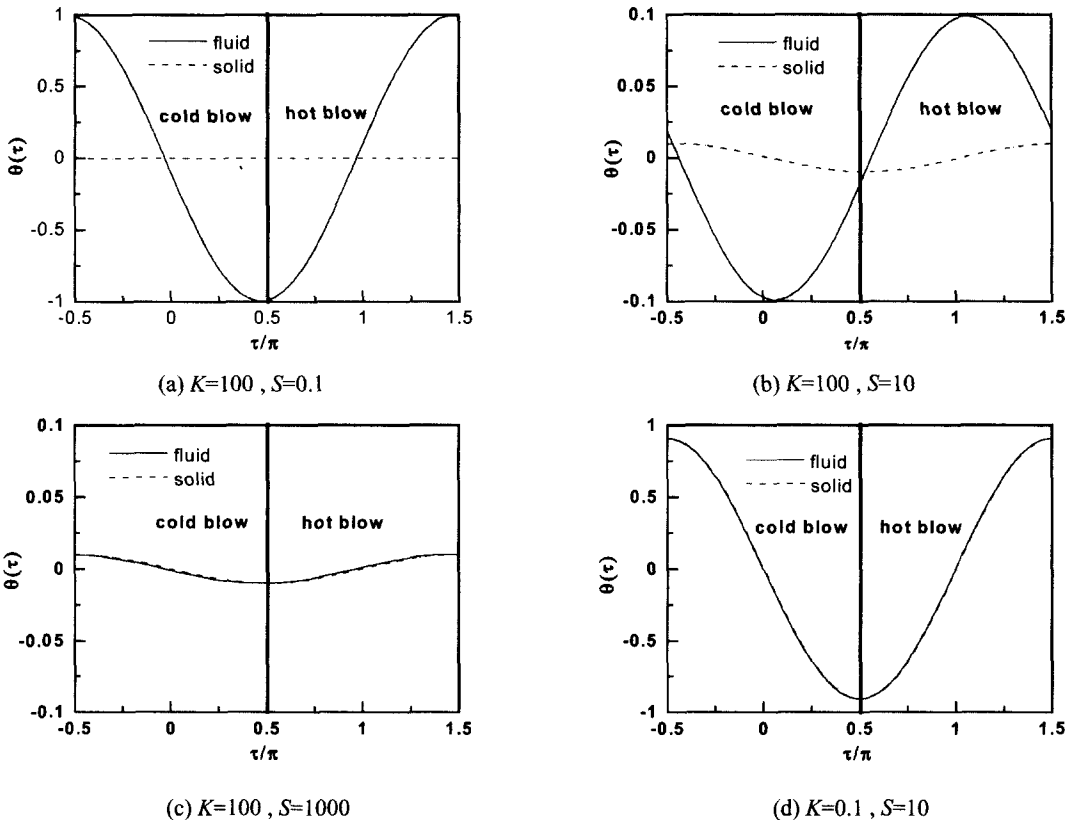


Fig. 2 Temperature variation for 4 different cases

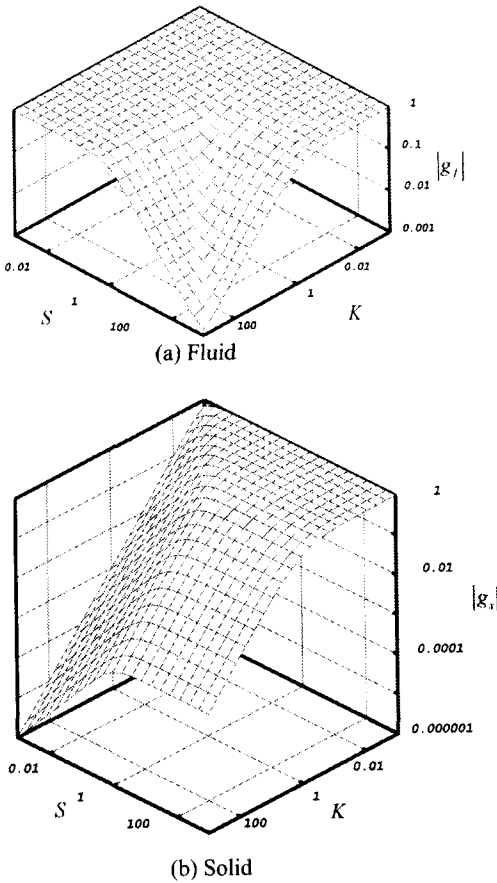


Fig. 3 Amplitudes of oscillating temperatures

도의 시간 변화를 Fig. 2 에 나타내었다. 이 그림으로부터 K 와 S 의 크기가 변함에 따라 유체와 고체의 온도변화양상이 크게 달라짐을 알 수 있다. 물리적으로 S 는 유체와 고체 사이 열전달 계수의 크기, K 는 고체 열용량의 크기로 이해할 수 있다. 각 그림에서 온도변화의 한 주기를 $-\pi/2 \leq \tau \leq 3\pi/2$ 로 취하였으며, 이렇게 함으로써 각 그림의 왼쪽 반은 유체가 저온부에서 고온부로 유동하는 cold blow, 오른쪽 반은 고온부에서 저온부로 유동하는 hot blow 동안의 온도변화를 나타내게 된다.

K 가 상대적으로 크고, S 가 작은 경우의 온도변화를 나타낸 Fig. 2(a)에서, 유체의 온도변화가 고체의 온도변화에 비해서 상대적으로 큰 것을 알 수 있다. 열저장을 목적으로 한 재생기에서 유체의 온도진폭이 큰 것은 열재생이 효과적이지 않은 것으로 해석할 수 있다. 이는 고체의 열용량이 크에도 불구하고, 유체와 고체 사이의 열전달 계수가 작아서 유체로부터 고체로 열전달이 이루

어지지 않기 때문이다. 고체에 의한 열재생이 이루어지지 않으므로, 유체의 온도는 저온의 유체가 유입되는 cold blow 기간 동안 지속적으로 감소하며, 고온 유체가 유입되는 hot blow 기간 동안은 지속적으로 증가한다. Fig. 2(a)의 경우에 비하여, S 가 증가한 경우를 나타낸 Fig. 2(b)와 Fig. 2(c)로부터 유체와 고체 사이의 열전달 계수가 증가하면 고체의 온도진폭이 증가하고 유체의 온도진폭은 감소하는 것을 알 수 있으며, 이는 고체에 의하여 흡수 방출되는 열량이 증가하는 것을 의미한다. Fig. 2(a)~ Fig. 2(c)에서 유체 온도진폭의 감소 정도는 고체 온도진폭의 증가보다 큰 것을 알 수 있는데, 이는 고체의 열용량이 유체의 열용량보다 커서 작은 온도변화의 진폭으로도 많은 열량을 흡수 방출할 수 있기 때문이다.

한편 $K=100$, $S=10$ 인 경우를 나타낸 Fig. 2(b)에서 유체 온도변화의 위상각이 다른 경우와 비교하여 특이하게 다른 것을 볼 수 있다. 이 그림은 유체 온도변화의 위상각이 왕복운동의 위상각과 π 만큼 차이가 나는 것을 보여주며, 대류되는 에너지가 가장 클 때 유체 온도도 가장 커지는 것을 나타낸다.

Fig. 2(d)는 Fig. 2(b)의 경우에 비하여 K , 즉 고체의 열용량이 감소한 경우를 나타낸다. 고체의 열용량이 감소하면서, 고체와 유체의 온도진폭이 모두 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 유체와 고체 사이의 열전달 계수는 충분히 크지만, 고체의 열용량이 작아서 유체로부터 전달된 열량에 따라 고체의 온도가 진동하기 때문이며, 고체의 열용량이 유체의 열용량보다 작으므로, 유체의 온도는 고체에 의한 열재생이 없는 경우와 유사하게 변화한다.

3.2 열전달 특성이 상이한 영역의 존재

앞 절에서 K 와 S 의 크기에 따라 한 주기 동안의 온도변화양상이 크게 달라짐을 보였다. K 와 S 의 크기가 비정상 열전달에 미치는 영향을 더욱 상세히 분석하기 위하여, K 와 S 의 변화에 따른 유체와 고체의 온도변화진폭을 Fig. 3 에 나타내었다.

유체의 온도변화진폭을 나타낸 Fig. 3(a)에서 K 와 S 의 크기가 유체 온도변화진폭에 미치는 영향이 상이한 3 개의 영역이 존재하는 것을 알 수 있다. K 또는 S 가 1보다 작은 영역에서는 유체의 온도진폭이 거의 1로 유지되며, 그 외의 경우에 있어서는 진폭이 감소하는 것을 알 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 유체의 온도진폭이 크다

는 것은 열재생이 원활하게 이루어지지 않는다는 것을 의미하므로, K 또는 S 가 1 보다 작은 영역에서는 고체에 의한 열저장이 원활하게 이루어지지 않음을 알 수 있다. 반면 K 와 S 가 모두 1 보다 큰 영역에서는 고체와 유체 사이의 열전달이 효과적으로 이루어져서, 고체에 저장되는 열량이 증가하며 유체의 온도진폭이 감소한다. 한편 K 와 S 가 모두 1 보다 큰 영역은 K 와 S 의 상대적인 크기에 따라 다시 두 영역으로 구분되며, 각 영역에서는 K 와 S 중에서 상대적으로 작은 값을 가지는 변수에 의하여 유체의 온도진폭이 결정됨을 알 수 있다. 즉 열전달 계수가 고체의 열용량에 비해서 충분히 크지 않으면 열전달 계수에 의하여 유체 온도진폭이 결정되며, 그 반대의 경우에는 고체의 열용량에 의하여 유체 온도진폭이 결정된다.

Fig. 3(b)는 고체의 온도진폭을 보여준다. Fig. 3(a)의 경우와 일치하지는 않지만, 역시 3 개의 영역이 존재하는 것을 알 수 있다. K 가 1 보다 작고 S 가 K 보다 큰 경우에 고체의 온도진폭은 1로 유지되며, K 가 S 보다 크고 S 가 1 보다 작은 경우에는 고체의 온도진폭은 K 가 커질수록 S 가 작아질수록 감소한다. 한편 K 와 S 가 모두 1 보다 큰 경우에는 고체 온도진폭은 K 만에 의하여 결정되며 K 가 커질수록 감소한다.

Fig. 3에 나타난 유체와 고체의 온도진폭에 대한 3 차원 그림을 종합하면, Fig. 4에 나타난 바와 같이 4 가지 영역이 존재함을 확인할 수 있다. 각 영역을 Regime I, II, III, IV로 구분하여 Fig. 4에 나타내었으며, 각 영역의 범위를 정리하면 다음과 같다.

- Regime I: $K \gg S$ and $S \ll 1$
 - Regime II: $K \gg S \gg 1$
 - Regime III: $S \gg K \gg 1$
 - Regime IV: $S \gg K$ and $K \ll 1$
- (14)

K 와 S 에 대한 유체와 고체의 온도진폭에 대한 의존도가 다른 4 가지 영역의 존재는 각 영역에서 열전달 특성이 상이함을 의미한다. 이러한 사실은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 K 와 S 의 값에 따라 유체와 고체의 온도변화양상이 크게 달라지는 것으로도 예상할 수 있었다. 사실 Fig. 2의 4 가지 그림 각각에 대한 K 와 S 의 값은 각각 Regime I, II, III, IV에서 유체와 고체 온도변화의 특징적인 양상을 나타내도록 결정된 것이다. 다음 절에서는 전기적 유사성을 이용하여 각 영역에서의 열전달 특성에 대한 물리적 설명을 제시

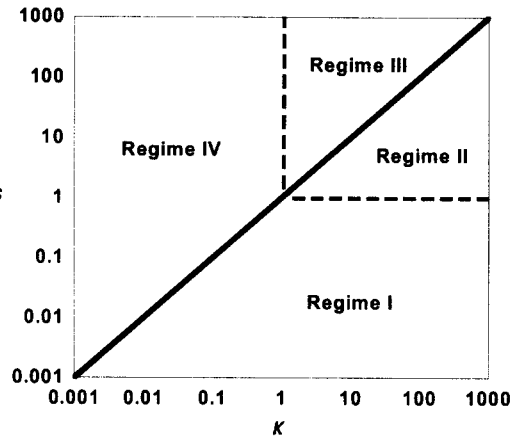


Fig. 4 Regime classification

한다.

3.3 상사 해석

유체의 왕복유동에 의하여 대류되는 에너지의 일부는 유체 자체에 저장되며, 일부는 유체와 고체의 열전달을 통하여 고체에 저장된다. 이를 식으로 나타내고, 식 (6), (7)과 비교하면 다음과 같다.

$$q_c = q_f + q_i, \quad q_i = q_s \tag{15}$$

$$q_c = -\cos \tau, \quad q_f = \frac{d\theta_f}{d\tau} \tag{16}$$

$$q_i = S(\theta_f - \theta_s), \quad q_s = K \frac{d\theta_s}{d\tau}$$

위 식에서 q_c 는 왕복유동에 의하여 대류되는 에너지, q_f 는 유체에 저장되는 에너지, q_i 는 유체와 고체 사이의 열전달량, q_s 는 고체에 저장되는 에너지를 나타낸다. 식 (15)에서 왕복유동에 의하여 대류되는 에너지가 $-\cos \tau$ 인 것은 cold blow 기간 동안 상대적으로 저온의 유체가 다공성 물질에 유입되며, hot blow 기간 동안은 상대적으로 고온의 유체가 유입되는 것을 나타낸다.

열전달과 전기흐름의 유사성을 이용하면, 식 (15)와 식 (16)에 나타난 다공성 물질에서의 비정상 열전달을 Fig. 5와 같이 병렬회로와 직렬회로가 조합된 교류회로로 나타낼 수 있다. Fig. 5의 전기회로에서 유체와 고체의 열용량은 각각 콘덴서로 묘사되었으며, 유체와 고체 사이의 열전달은 저항으로 묘사되었다. 또한 열전달량은 전류, 온도는 전압으로 상사할 수 있다.

Fig. 5 에 나타낸 전기회로에서 교류전류는, 식 (15)에 나타낸 열전달과 유사하게, 일부는 유체의 열용량에 해당하는 콘덴서에 저장되며, 나머지 일부는 유체와 고체 사이의 열저항에 해당하는 저항을 거쳐서 고체의 열용량에 해당하는 콘덴서에 저장된다.

온도의 시간 변화를 나타낸 식 (9)와 유사하게 열전달량을 복소함수의 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$q = \text{real}[\psi e^{i\tau}] \tag{17}$$

ψ 는 식 (9)의 g 와 마찬가지로 열전달량의 시간 변화와 관련된 진폭과 위상각의 정보를 가지는 복소수이다. 식 (9)와 식 (17)을 식 (15), (16)에 대입하면, 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\psi_c = -1, \psi_f = \frac{g_f}{Z_f}, \psi_i = \frac{g_f - g_s}{Z_i}, \psi_s = \frac{g_s}{Z_s} \tag{18}$$

$$Z_f = -i, Z_i = \frac{1}{S}, Z_s = -\frac{i}{K} \tag{19}$$

위 식에서 Z 는 직류회로에서의 저항과 유사하게 교류회로에서 전류에 대한 임피던스(impedance)를 의미하며, 식 (19)에 나타낸 것은 각각 유체의 열용량에 의한 임피던스, 유체와 고체 사이 열전달 저항에 의한 임피던스, 고체의 열용량에 의한 임피던스라고 할 수 있다.

병렬회로에서 전류는 임피던스가 작은 쪽으로 주로 흐르므로, Z_f 와 $Z_i + Z_s$ 의 상대적인 크기에 따라 전류의 주된 흐름 방향이 달라진다.

먼저 $|Z_f| \ll |Z_i + Z_s|$ 인 경우, 전류는 주로 유체의 열용량에 해당하는 콘덴서 쪽으로 흘러, 이 콘덴서에 저장된다. 이 경우는 식 (19)로부터

$$K \ll 1 \text{ or } S \ll 1 \tag{20}$$

인 경우에 해당하는 것을 알 수 있다. 즉 고체의 열용량이 유체의 열용량에 비하여 작거나($K \ll 1$), 유체와 고체 사이의 열저항이 큰 경우($S \ll 1$)에는 왕복유동에 의하여 대류된 에너지가 주로 유체에 저장되는 것을 의미한다. 식 (20)에 나타낸 영역은 Fig. 4 의 Regime I 과 Regime IV 와 일치하며, Fig. 2 의 (a)와 (d)의 경우에 해당한다. 대류된 에너지가 주로 유체에 저장되므로 식 (15)로부터

$$q_c \approx q_f \tag{21}$$

이며, 유체 온도의 시간 변화는 식 (17)~(19)로부터 다음과 같이 구하여 진다.

$$g_f \approx -Z_f = i, \theta_f = -\sin \tau \tag{22}$$

이는 Fig. 2 의 (a)와 (d)가 나타내는 바와 일치한다. 한편 유체와 고체 사이 열전달 저항에 의한 임피던스와 고체의 열용량에 의한 임피던스는 직렬 연결되어 있으므로, 고체에 해당하는 콘덴서에 걸리는 전압, 즉 고체의 온도진폭은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$g_s = \frac{Z_s}{Z_i + Z_s} g_f \tag{23}$$

식 (23)에 나타낸 고체의 온도진폭은 Z_i 와 Z_s 의 상대적인 크기에 따라 두 가지 경우로 나누어지며, 각 경우에 대한 g_s 의 근사값을 식 (23)과 식 (18), (19)를 이용하여 구하면 다음과 같다.

$$g_s \approx \begin{cases} \frac{Z_s}{Z_i} g_f \approx \frac{S}{K} & \text{where } |Z_i| \gg |Z_s| (S \ll K) \\ g_f \approx i & \text{where } |Z_i| \ll |Z_s| (S \gg K) \end{cases} \tag{24}$$

이 두 가지 경우는 각각 Fig. 4 의 Regime I 과 Regime IV 에 해당한다. 유체와 고체 사이 열전달 저항에 의한 임피던스 Z_i 가 고체의 열용량에 의한 임피던스 Z_s 보다 큰 경우, 즉 $S \ll K$ 인 경우, 대류된 에너지가 유체와 고체 사이 열전달 저항으로 인하여 고체에 전달되지 못하므로, 고체의 온도진폭이 작아지게 된다. 그 반대의 경우에는 유체로부터 고체로 열전달은 원활히 이루어지지만, 고체의 열용량이 작아서 전달되는 열량의 변화에 따라 고체 온도도 변화하게 된다.

한편 $|Z_f| \gg |Z_i + Z_s|$ 인 경우, 전류는 주로 유체와 고체 사이의 열전달에 해당하는 저항을 거쳐 고체의 열용량에 해당하는 콘덴서에 저장된다. 이 경우는 식 (19)로부터

$$K \gg 1 \text{ and } S \gg 1 \tag{25}$$

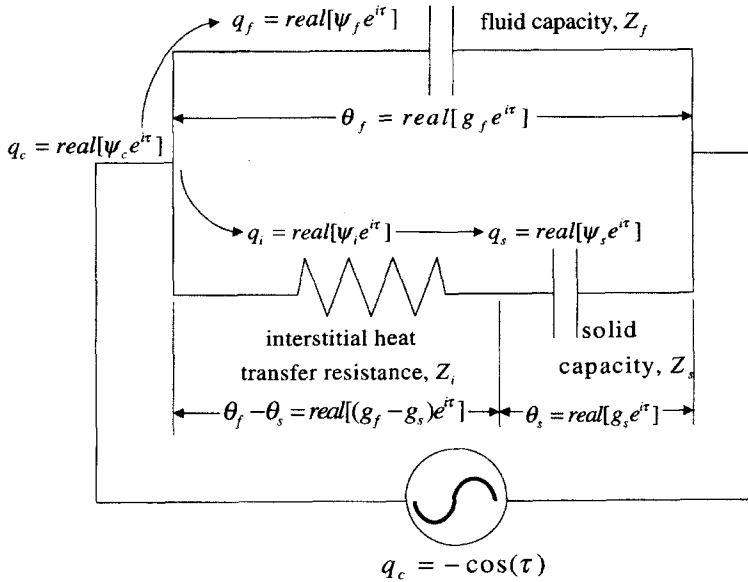


Fig. 5 Electric analogy

인 경우에 해당하는 것을 알 수 있다. 대류된 에너지가 모두 고체에 저장되므로,

$$q_c \approx q_s \tag{26}$$

로 나타낼 수 있으며, 이를 식 (17)~(19)에 대입하여 정리하면, 고체의 온도변동과 관련한 복소수 \$g_s\$를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$g_s \approx Z_s \psi_c = \frac{i}{K} \tag{27}$$

즉 이 경우, 고체의 온도진폭은 고체 열용량의 크기가 증가할수록 감소함을 알 수 있다. 한편 유체에 해당하는 콘덴서에 걸리는 전압은, Fig. 5에서 알 수 있는 바와 같이, 유체와 고체 사이 열저항과 고체에 해당하는 콘덴서가 연결된 직렬회로 전체에 걸리는 전압과 같으므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$g_f \approx (Z_i + Z_s) \psi_c = -(Z_i + Z_s) \tag{28}$$

유체의 온도진폭은 \$Z_i\$와 \$Z_s\$의 상대적인 크기에 따라 두 가지 경우로 나뉘어 지며, 각 경우에 대한 \$g_f\$의 근사값을 식 (28)과 식 (18), (19)를 이용하여 구하면 다음과 같다.

$$g_f \approx \begin{cases} -Z_i = -\frac{1}{S} & \text{where } |Z_i| \gg |Z_s| (S \ll K) \\ -Z_s = \frac{i}{K} & \text{where } |Z_i| \ll |Z_s| (S \gg K) \end{cases} \tag{29}$$

이 두 가지 경우는 각각 Fig. 4의 Regime II와 Regime III에 해당한다. 식 (25)에 나타난 조건을 만족하면서 \$S \ll K\$인 경우, 왕복유동에 의하여 대류된 에너지가 고체에 저장되며, 유체와 고체 사이의 열저항이 상대적으로 커서, 유체와 고체 사이의 온도차가 존재하므로 유체의 온도변동이 고체에 비하여 상대적으로 크다. 유체와 고체 사이의 온도차는 왕복유동에 의하여 대류되는 에너지를 고체에 전달하기 위하여 필요한 것이므로, 대류되는 에너지가 클수록 온도차도 커지며, 결국 대류되는 에너지와 동일한 위상을 갖는다. 이러한 사실은 Fig. 2(b)에 나타난 유체의 시간 변화 양상과 일치한다. 반면 \$S \gg K\$인 경우, 유체와 고체 사이의 열전달이 원활하여, 유체와 고체 사이의 온도차가 작아지며, 결국 유체의 온도는 고체의 온도와 유사하게 변화한다.

3.4 각 영역에서의 열전달 특성

각 영역에 대한 무차원 변수의 범위와 열전달 현상에 대한 이해를 바탕으로 지배방정식 (6), (7)을 간략한 형태로 나타낼 수 있으며, 이를 통하여 왕복유동조건에서의 다공성 물질의 비정상 열전

Table 1 Reduced governing equations and asymptotic solutions within each regime

Regime	Range	Reduced governing equations	Asymptotic solutions
I	$K \gg S$ and $S \ll 1$	$\frac{d\theta_f}{d\tau} \approx -\cos \tau$, $K \frac{d\theta_s}{d\tau} \approx S\theta_f$	$\theta_f \approx -\sin \tau$, $\theta_s \approx \frac{S}{K} \cos \tau$
II	$K \gg S \gg 1$	$S\theta_f \approx -\cos \tau$, $K \frac{d\theta_s}{d\tau} \approx S\theta_f$	$\theta_f \approx -\frac{1}{S} \cos \tau$, $\theta_s \approx -\frac{1}{K} \sin \tau$
III	$S \gg K \gg 1$	$S\theta_f \approx -\cos \tau$, $\theta_f \approx \theta_s$	$\theta_f \approx -\frac{1}{K} \sin \tau$, $\theta_s \approx -\frac{1}{K} \sin \tau$
IV	$S \gg K$ and $K \ll 1$	$\frac{d\theta_f}{d\tau} \approx -\cos \tau$, $\theta_f \approx \theta_s$	$\theta_f \approx -\sin \tau$, $\theta_s \approx -\sin \tau$

달에 대한 이해를 더욱 명확히 할 수 있다.

먼저 왕복유동에 의하여 대류되는 에너지는 유체를 거쳐 고체에 전달되며, 유동이 주기적으로 왕복함에 따라 온도도 주기적으로 변동하므로, 유체와 고체의 온도 사이에는 다음의 관계가 성립한다.

$$\left| \frac{d\theta_f}{d\tau} \right| = |\theta_f| \geq |\theta_s| = \left| \frac{d\theta_s}{d\tau} \right| \quad (30)$$

Regime I에서는 $S \ll 1$ 이므로, 이 조건과 식 (30)을 식 (6)에 대입하면,

$$\frac{d\theta_f}{d\tau} \approx -\cos \tau \quad (31)$$

의 식을 얻을 수 있으며, $K \gg S$ 의 조건과 식 (30)을 식 (7)에 대입하면

$$K \frac{d\theta_s}{d\tau} \approx S\theta_f \quad (32)$$

을 얻을 수 있다. 각 영역에 대하여 유사한 방법을 적용하여 지배방정식을 간략화할 수 있으며, 그 결과와 이를 이용하여 구한 유체와 고체의 온도변화를 Table 1에 정리하였다. Table 1에 나타낸 온도변화는 엄밀해인 식 (12)와 식 (13)으로부터 각 영역에서의 K 와 S 의 범위를 고려하여 구한 점근해 및 전기적 유사성을 이용하여 구한 근사해와도 일치한다. 지배방정식의 간략화는 지배적인 역할을 하는 항들만을 고려하여 복잡한 현상을 단순화함으로써, 현상에 대한 물리적인 이해

를 용이하게 하며, 유동조건이나 경계조건이 다른 경우의 현상에 대한 직관적인 이해에 도움을 준다.

Table 1로부터, Regime I과 IV에서는 대류항이 유체 저장항과 균형을 이루며, Regime II와 III에서는 고체 저장항과 균형을 이루는 것을 알 수 있다. Regime II와 III은 K 와 S 가 모두 1보다 큰 영역으로, 왕복유동에 의하여 대류되는 에너지를 고체에 효과적으로 저장하기 위해서는 $S > 1$, $K > 1$ 이 되도록 열전달 계수와 고체의 열용량을 크게 하여야 함을 알 수 있다.

한편, Regime III과 IV에서는 유체와 고체가 동일한 온도변화를 나타내는 반면, Regime I과 II에서는 그렇지 않다. Regime III과 IV인 영역은 $S \gg K$ 인 영역으로, Fig. 5에 나타낸 전기적 유사 회로에서 알 수 있는 바와 같이 유체와 고체 사이의 열저항에 의한 임피던스가 고체의 열용량에 의한 임피던스 보다 매우 작은 경우이다. 이때 유체의 고체 사이 열저항의 역할이 무시할 수 있을 만큼 작아지므로, 유체와 고체 사이의 온도차가 작아져 유체와 고체의 온도가 같아진다.

위의 관찰로부터 열전달 특성을 구별하는 2가지 기준을 도출할 수 있다. 하나는 대류된 열이 충분히 고체에 저장되느냐에 대한 것이고, 다른 하나는 고체와 유체가 동일한 온도변화를 보여주느냐에 대한 것이다. 첫번째 조건에 의한 경계를 Fig. 4에서 점선으로 나타내었고, 두번째 조건에 의한 경계는 실선으로 나타내었다.

3.5 국소열적평형

고체와 유체 사이의 열전달이 원활하여 두 상

사이의 온도차이가 충분히 작을 경우에는 one-equation 모델을 적용할 수 있으므로, 국소열적평형의 문제는 one-equation 모델의 타당성을 가늠하는 중요한 조건이 된다.

앞 절의 내용을 이용하여 국소열적평형의 조건을 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{K}{S} \ll 1 \quad (33)$$

이러한 결과는 식 (7)로부터도 이미 예상할 수 있었다. 식 (7)에 대한 order-of-magnitude 해석으로부터 국소열적평형의 조건을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\frac{|\theta_f - \theta_s|}{|\theta_s|} = \frac{K}{S} \ll 1 \quad (34)$$

위 식은 식 (7)로부터 유체와 고체 사이의 열전달을 통하여 고체에 저장되는 열량이 $K(d\theta_s/d\tau)$ 이고, 이 열량을 전달하기 위하여 필요한 유체와 고체 사이의 온도차가 $(K/S)(d\theta_s/d\tau)$ 인 것으로부터 유도된 것이다. 식 (34)는 고체의 열용량 K 보다 유체와 고체 사이의 열전달 계수 S 가 더 클 때 국소열적평형이 이루어짐을 의미한다.

한편 식 (33)은 다음과 같이 다른 형태로 나타낼 수 있다.

$$\frac{K}{S} = \frac{(1-\varepsilon)(\rho C_p)_s \omega}{ha} = \frac{t_p}{t_o} \ll 1 \quad (35)$$

$$t_o = \frac{1}{\omega}, \quad t_p = \frac{(1-\varepsilon)(\rho C_p)_s}{ha} \quad (36)$$

위에서 t_o 는 왕복유동의 시간 스케일이다. 식 (7)로부터 t_p 는 고체와 유체 사이에 유한한 온도차가 발생했을 때 고체의 온도가 유체의 온도에 접근하여 평형에 도달하는 데 걸리는 시간인 것을 알 수 있으며, 다공성 물질의 특성 시간 스케일로 이해할 수 있다. 따라서 식 (35)는 다공성 물질의 특성 시간 스케일이 왕복유동에 의한 온도조건 변화의 시간 스케일보다 짧아야 국소열적평형에 도달할 수 있음을 보여준다.

4. 결 론

왕복유동조건에서 다공성 물질 내부의 고체와 유체의 열전달을 이론적으로 해석하였다. Two-

equation 모델을 적용하여 유체와 고체 각각의 온도변화에 대한 해석해를 구하였으며, 열전달 현상을 지배하는 주요 변수, K 와 S 를 도출하였다. K 는 고체와 유체의 열용량 비이며, S 는 왕복유동에서의 Stanton 수이다. 개념적으로 K 는 얼마나 많은 양의 열량을 저장할 수 있는지를 나타내며, S 는 얼마나 작은 온도차로 유체로부터 고체로 열을 전달할 수 있는가를 나타낸다.

왕복유동이 개재된 경우 다공성 물질에서의 열전달 특성은 왕복유동에 의하여 대류되는 에너지가 다공성 물질의 고체부분에 효과적으로 저장되는가의 여부와 유체와 고체가 열적평형 상태를 만족하느냐의 여부에 따라 4 가지로 구분된다. 대류되는 에너지를 고체에 효과적으로 저장하기 위해서는 $S > 1$, $K > 1$ 이 되도록 열전달 계수와 고체의 열용량을 크게 하여야 한다. 그리고, 실제 운전 영역도 위의 조건을 만족함을 알 수 있다.⁽¹¹⁾

한편 유체와 고체의 국소열적평형은 $K/S \ll 1$ 일 때 만족된다. 이 조건은 $(1-\varepsilon)(\rho C_p)_s / ha$ 로 정의되는 다공성 물질의 특성 시간 스케일이 왕복유동에 의한 온도조건 변화의 시간 스케일 $1/\omega$ 보다 짧을 경우를 의미한다

후 기

이 논문은 2000년도 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- (1) Poulidakos, D. and Renken, K., 1987, "Forced Convection in a Channel Filled with Porous Medium, Including the Effect of Flow Inertia, Variable Porosity, and Brinkman Friction," *J. Heat Transfer*, Vol. 109, pp. 880-888.
- (2) Hunt, M.L. and Tien, C. L., 1988, "Effects of Thermal Dispersion on Forced Convection in Fibrous Media," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 31, pp. 301-309.
- (3) Vafai, K. and Kim, S. J., 1989, "Forced Convection in a Channel Filled with a Porous Medium: an Exact Solution," *J. Heat Transfer*, Vol. 96, pp. 1103-1106.
- (4) Riaz, M., 1977, "Analytic Solution for Single-and Two-phase Models of Packed-bed Thermal Storage Systems," *J. Heat Transfer*, Vol. 99, pp. 489-492.
- (5) Spiga, G. and Spiga, M., 1981, "A Rigorous Solution to a Heat Transfer Two Phase Model in Porous Media and Packed Beds," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 24 pp. 355-364.
- (6) Amiri, A. and Vafai, K., 1998, "Transient Analysis of Incompressible Flow through a Packed Bed," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 41, pp. 4259-4279.

- (7) Minkowycz, W. J., Haji-Sheikh, A. and Vafai, K., 1999, "On Departure from Local Thermal Equilibrium in Porous Media due to a Rapidly Changing Heat Source: the Sparrow Number," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 42, pp. 3373~3385.
- (8) Vafai, K. and Tien, C. L., 1981, "Boundary and Inertia Effects on the Flow and Heat Transfer in Porous Media," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 24, pp. 195~203.
- (9) Lee, D. -Y., Park, S. -J. and Ro, S. T., 1998, "Heat Transfer in the Thermally Developing Region of a Laminar Oscillating Pipe Flow," *Cryogenics*, Vol.38, pp. 585~594.
- (10) Kurzweg, U. H., 1985, "Enhanced Heat Conduction in Oscillating Viscous Flows within Parallel-Plate Channels," *J. Fluid Mech.*, Vol.156, pp.291~300.
- (11) 변수영, 이대영, 노승탁, 1999, "왕복유동과 다공성 물질의 국소열적평형 문제," 공기조화 냉동공학회 하계학술발표회 논문집, pp. 892~896.