

모래의 2 또는 3성분계의 유효열전도도 예측 모델

박상일* · J. G. Hartley**

(1998년 6월 8일 접수)

A Model for Predicting Effective Thermal Conductivity of 2- or 3- Component Sand System

Sang Il Park and James G. Hartley

Key Words: Effective Thermal Conductivity (유효열전도도), Sand (모래), Liquid Binder (액체 접착제), Granular Material (고체입자)

Abstract

A theoretical model to predict the effective thermal conductivity of sands is developed by considering the participating heat transfer mechanisms and their relationship to the model geometry. Comparison between the calculations and the measurements indicates that the assumptions to introduce two model constants (ϕ_{ef} and δ) for model development were justified. As a results, the model was proved to predict the effective thermal conductivities of 2- and 3-component systems of two silica sands saturated with fluids or bonded with liquid binders in a reasonable accuracy.

기호설명

- a_b : 식 (2)의 상수
- a_f : 식 (3)의 상수
- h : 모델의 고체입자 구형면의 높이
- k : 열전도도
- k_e : 유효열전도도
- K : 열전도(conductance)
- r : 모델의 고체입자 원통의 반경
- r_b : 모델의 접착제의 반경
- R : 모델의 고체입자 구형면의 곡률반경
- x : 모델의 좌표
- y : 모델의 좌표
- δ : 모델의 고체입자간의 간극
- ϕ : 각 성분의 체적분

ϕ_{ef} : 모델의 간극유체의 유효체적분

하첨자

- a : 공기
- b : 접착제
- d : 건조상태
- f : 간극유체
- s : 고체입자
- w : 물에 잠긴 상태

1. 서론

고체입자의 유효열전도도의 예측을 위한 연구가 지난 수십년간 꾸준히 수행되고 있다. 이러한 모델들의 대부분은 2성분계의 유효열전도도를 예측하기 위하여 2가지 성분의 열전도도와 체적율만을 사용한다. 그러나 모래와 같은 2성분계의 유효열전도도는 모래입자의 형상에 대한 특성에 영향을 받는다. 모래입자형상의 특성으로는

* 회원, 한국에너지기술연구소

** Georgia Institute of Technology

입자의 평균입경, 입자의 모양, 그리고 입자크기 분포등이 있다. 여기에 접촉계등은 모래의 기계적 특성을 향상시키거나 모래입자 사이의 접촉을 좋게하여 접촉된 모래의 유효열전도도를 향상시키기 위하여 사용될 수 있다.

고체입자의 2성분계의 유효열전도도를 예측하기 위한 모델은 Kunii and Smith,⁽¹⁾ Woodside and Messmer,⁽²⁾ de Vries⁽³⁾ 와 Masamune and Smith⁽⁴⁾ 등에 의하여 개발되었다. 그러나 이러한 모델은 2가지 성분의 열전도도와 체적율만의 함수로 표시되었다. Park⁽⁵⁾ 는 이들의 예측결과와 측정결과를 서로 비교하였다. 이러한 측정결과와의 비교에서 보면 어떠한 모델도 측정결과와 정확하게 일치하지 않는다. 일반적으로 고체입자의 유효열전도도는 고체입자와 간극유체의 열전도도, 유효밀도, 표면의 성질, 고체입자의 형상에 대한 특성 등에 의하여 결정될 수 있다고 판단된다. 그리고 고체입자의 종류가 결정되면 고체입자의 열전도도, 형상특성, 표면성질 등이 결정될 수 있다. 따라서 주어진 고체입자의 유효열전도도는 간극유체의 체적율과 열전도도에 의하여 결정될 수 있다.

그리고 모래에 접촉제를 사용한 경우에 대한 많은 실험결과들이 있다. 예를 들면 Jackson⁽⁶⁾ 은 Ottawa sand 에 Gulf wax 와 Dow Therm-A 을 접촉제로 사용한 경우에 유효열전도도를 측정하였다. 이러한 경우 역시 유효열전도도를 결정하는 인자가 너무 많기 때문에 접촉된 고체입자에 대한 유효열전도도의 정확한 예측은 매우 어려운 것으로 보고되었다.

Park and Hartley⁽⁷⁾ 는 이러한 고체입자의 유효열전도도를 예측하기 위한 모델을 개발하였다. 그러나, 이 모델은 고체입자가 서로 점접촉한다고 가정하여 실험결과와의 오차가 생기는 문제점이 있었다. 따라서 본 연구에서는 Park and Hartley⁽⁷⁾ 의 모델을 일부 수정하여 좀 더 정확한 예측이 가능한 수정모델을 개발하였다. 이러한 모델에서는 고체입자간의 접촉면 사이에 유효간극유체와 미세한 접촉간극이 존재하는 것으로 가정하였으며, 이러한 가정들이 고체입자의 유효열전도도에 미치는 영향을 고찰하였다. 이러한 수정예측모델을 사용한 2성분계와 3성분계에 대한 예측결과와 규사를 사용한 실제의 실험결과와 비교하여 수정모델의 정확성을 검증하였다

그리고 이러한 수정모델을 사용하여 각 성분의 체적율과 열전도도 그리고 고체입자의 형상특성을 나타내는 모델상수가 모래의 유효열전도도에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 유효열전도도 예측 수정모델

Park⁽⁵⁾ 에 의하면 고체입자층내에서의 열전달 기구는 다음과 같다.

- (1) 간극유체만을 통한 열전도
- (2) 고체입자 사이의 접촉간극을 통한 열전도
- (3) 고체입자 사이의 접촉점을 통한 열전도
- (4) 고체입자 내부와 고체입자 사이의 공극에서의 복사 열전달
- (5) 공극에서의 대류열전달

고체입자의 열전도도는 대개 간극유체의 열전도도에 비하여 매우 높다. 규사의 경우 고체입자와 공기와의 열전도도의 비율은 상온에서 약 340 정도이다. 따라서 고체입자 사이의 간극유체를 통한 열전도는 비교적 적다. 그리고 고체입자 사이의 공극의 크기가 매우 작으므로 공극에서의 대류열전달의 영향은 매우 적다. 또한 복사열전달의 영향도 상온에서는 매우 적어 무시할 수 있다고 보고되었다.

고체입자에서의 열전달은 고체입자 사이의 접촉점 부근에서의 열전도에 의하여 많은 영향을 받는다. 따라서 고체입자의 접촉점 근처의 형상이 매우 중요한 인자가 된다. 모델을 개발하기 위하여 접촉점부근의 고체입자의 형상을 구형으로 가정하였으며 Park and Hartley⁽⁷⁾ 의 모델과 달리 고체입자사이의 접촉면 부근에 미세한 간극이 존재하는 것으로 가정하여 기존의 모델을 수정하였다. 이러한 가정을 채택하여 수정된 모델을 Fig. 1 에 나타내었다. 모델의 형상을 보면 전체모델은 원통형이며 반경이 1이고 높이는 $1 + \delta$ 이다. 그리고 모래입자는 역시 반경이 r 인 원통형이며 상면은 구형으로 이의 폭을반경은 R 이다. ϕ_s 는 모래의 체적율이며 δ 는 모래입자사이의 접촉간극을 나타낸다. ϕ_{ef} 는 모래입자의 상면인 구형면의 윗영역의 체적율이며 ϕ_f 는 간극유체의 체적율로 $1 - \phi_s - \phi_b$ 이다.

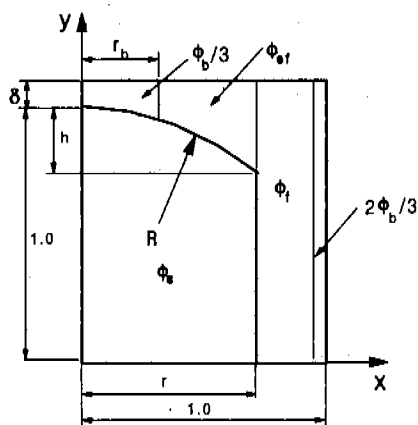


Fig. 1 Modified model for 2- or 3-component sand system.

이러한 모델형상에서 y-방향으로의 일차원적인 열전도를 가정하면 고체입자와 간극유체를 포함한 미소두께를 가진 원통형의 미소체적을 통과하는 열전도는 다음의 식으로 표시될 수 있다.⁽⁵⁾

$$dK = \frac{2\pi x dx}{y/k_s + (1 + \delta - y)/k_f} \quad (1)$$

이 식을 적분하여 고체입자와 접촉체를 동시에 통과하는 열전도를 구하면 다음과 같다.

$$K_1 = \frac{2\pi}{1/k_s - 1/k_b} \left[a_b \ln \left(\frac{\sqrt{R^2 - r_b^2} + a_b}{R + a_b} \right) - \sqrt{R^2 - r_b^2} + R \right]$$

여기서 $a_b = \frac{(1-R)/k_s + (\delta+R)/k_b}{1/k_s - 1/k_b}$ (2)

비슷하게 고체입자와 간극유체를 동시에 통과하는 열전도는 다음과 같다.

$$K_2 = \frac{2\pi}{1/k_s - 1/k_f} \left[a_f \ln \left(\frac{\sqrt{R^2 - r^2} + a_f}{\sqrt{R^2 - r_b^2} + a_f} \right) - \sqrt{R^2 - r^2} + \sqrt{R^2 - r_b^2} \right]$$

여기서 $a_f = \frac{(1-R)/k_s + (\delta+R)/k_f}{1/k_s - 1/k_f}$ (3)

그리고 접촉재와 간극유체만을 통과하는 각각의 열전도의 합은 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$K_3 = \frac{2\pi\phi_b k_b}{3(1+\delta)} + \frac{(1-r^2 - 2\phi_b/3)\pi k_f}{(1+\delta)} \quad (4)$$

그리고 모델을 통과하는 전체 열전도와 유효열전도도에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$K = K_1 + K_2 + K_3 = \frac{\pi k_s}{1+\delta} \quad (5)$$

따라서 모델을 사용하여 계산한 유효열전도도는 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$k_e = \frac{2(1+\delta)}{1/k_s - 1/k_b} \left[a_b \ln \left(\frac{\sqrt{R^2 - r_b^2} + a_b}{R + a_b} \right) - \sqrt{R^2 - r_b^2} + R \right] + \frac{2(1+\delta)}{1/k_s - 1/k_f} \left[a_f \ln \left(\frac{\sqrt{R^2 - r^2} + a_f}{\sqrt{R^2 - r_b^2} + a_f} \right) - \sqrt{R^2 - r^2} + \sqrt{R^2 - r_b^2} \right] + \left(\frac{2\phi_b k_b}{3} + (1-r^2 - \frac{2\phi_b}{3})k_f \right) \quad (6)$$

모델에서의 고체입자의 체적율은 다음과 같다.

$$\phi_s = \frac{h(6R - 3Rh - 3h + h^2)}{3(1+\delta)} \quad (7)$$

여기서 $h = R - \sqrt{R^2 - r^2}$

그리고 고체입자 사이의 간극유체의 체적(ϕ_{sf})은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\phi_{sf} = \frac{h(3Rh - 2h^2 + 6R\delta - 3h\delta)}{3} \quad (8)$$

2성분계의 경우 모델은 비교적 간단한 식으로 표시될 수 있으며 이 경우 모델에서 유효열전도도를 구하기 위하여 필요한 모델상수는 R, r 과 δ 이다. 이러한 모델상수들은 고체입자의 형상 특성에 따라 다르나 고체입자나 간극유체의 열전도도와는 무관하다고 가정하였다. 그리고 간극유체의 체적인 ϕ_{sf} 는 역시 고체입자의 형상특

성에 따라 변하나 동일한 고체입자의 경우 고체입자의 체적율이 변하더라도 일정하게 유지된다고 가정하였다. 또한 δ 는 고체입자의 체적율에 대하여 직선적으로 변한다고 가정하였다.

따라서 고체입자의 유효열전도도를 구하기 위하여 이러한 모델상수들을 주어진 고체입자에 대하여 먼저 알고 있어야 한다. 이러한 모델상수들을 구하는 방법은 다음과 같다.

(1) 동일한 고체입자 체적율에서 고체입자가 건조한 경우의 유효열전도도 (k_d) 와 물에 잠긴 경우의 유효열전도도 (k_w) 를 측정한다.

(2) 2성분계에 대한 식(6) 을 사용하여 미지수인 R, r, δ 을 알고있는 값인 k_d, k_w, ϕ_s 를 사용하여 계산한다.

(3) 식(8)을 사용하여 ϕ_{ef} 를 계산한다.

(4) 또 다른 고체입자의 체적율 (ϕ_s') 에서 건조한 고체입자의 유효열전도도 (k_d')을 측정하고 식(6)과 식(8)로 부터 모델상수인 R, r, δ 을 알고있는 값인 k_d', ϕ_s', ϕ_{ef} 를 사용하여 계산한다.

(5) δ 의 고체입자의 체적율 (ϕ_s) 에 대한 1차함수를 구한다.

이러한 절차를 거치면 특정한 고체입자에 대한 모델상수인 ϕ_{ef} 와 δ 의 1차함수를 얻을 수 있다. 특정한 고체입자에 대하여 위의 2가지의 모델상수들 알고 있으면 2성분계의 경우 알고 있는 고체입자와 간극유체의 열전도도와 고체입자의 체적율로부터 고체입자의 유효열전도도를 구할 수 있다.

3. 측정결과와의 비교

3.1 모래의 유효열전도도 비교

Park⁽⁵⁾은 Ottawa sand 의 건조상태의 유효열전도도와 물에 잠긴 경우의 유효열전도도를 측정하였다. 이러한 측정결과로부터 Ottawa sand의 2성분계에 대한 모델상수인 ϕ_{ef} 와 δ 를 구하였다.

$$\phi_{ef} = 0.0614 ; \delta = 0.03830 - 0.05392 \phi_s$$

$$\text{for } 0.58 \leq \phi_s \leq 0.66 \tag{9}$$

Ottawa sand는 입자모양이 비교적 등립다. 반면에 Masonry sand는 비교적 각진 형태를 갖는다. 이러한 입자형태의 영향을 관찰하기 위하여 Masonry sand 의 유효열전도도를 측정하여 이로부터 2성분계의 모델상수를 구하였다.

$$\phi_{ef} = 0.0554 ; \delta = 0.01986 - 0.02965 \phi_s$$

$$\text{for } 0.50 \leq \phi_s \leq 0.62 \tag{10}$$

이러한 모델상수를 사용하여 모래의 건조상태와 물에 잠긴 상태의 유효열전도도를 모델식을 사용하여 구하였다. 이러한 계산결과와 Ottawa sand 와 Masonry sand 의 측정결과를 비교하여 Table 1 에 나타내었다.

Table. 1 의 비교결과를 보면 모델을 사용한 계산결과는 실험결과와 잘 일치하여 최대오차가 2.6% 이하가 된다.

Table 1 Comparison between model predictions and measured results for unbonded silica sands.

Sand type	Volume fraction of sand particles	Effective thermal conductivity (W/mK)			
		Air		Water	
		measured	calculated	measured	calculated
Ottawa sand	0.58	0.2839	0.2821(0.6%)	2.925	2.9212(0.1%)
	0.62	0.3281	0.3293(0.4%)	3.153	3.1556(0.1%)
	0.66	0.3918	0.3897(0.5%)	3.406	3.3983(0.2%)
Masonry sand	0.50	0.2528	0.2543(0.6%)	2.652	2.5836(2.6%)
	0.54	0.2957	0.2946(0.4%)	2.821	2.8079(0.5%)
	0.58	0.3429	0.3417(0.4%)	3.012	3.0395(0.9%)
	0.62	0.3945	0.3981(0.9%)	3.226	3.2769(1.6%)

Table 2 Effect of thermal conductivity of saturating fluid.

Sand type	Volume fraction of sand particles	Effective thermal conductivity (W/mK)			
		Transformer oil		Prestone II	
		measured	calculated	measured	calculated
Ottawa sand	0.60	1.0473	276(1.9%)	1.8505	1.8784(1.5%)
	0.62	1.0935	1.0903(0.3%)	1.9385	1.9707(1.7%)
	0.64	1.1467	1.1571(0.9%)	2.0024	2.0667(3.2%)
Masonry sand	0.534	0.9562	0.9464(1.0%)	-	-
	0.56	-	-	1.7973	1.8267(1.6%)

이 경우 수정전의 최대오차는 3.1%로 정확도가 조금 개선되었다. 따라서 유효열전도도의 예측을 위한 모델을 결정하기 위하여 사용된 가정들이 합당한 것으로 판단된다.

3.2 간극유체의 열전도도의 영향

모델에 사용된 상수인 ϕ_{ef} 와 δ 는 고체입자와 간극유체의 열전도도의 함수가 아니다. 따라서 고체입자의 특성이 결정되면 모델의 형상은 일정하다. 모델의 유효열전도도를 결정하는 주요 인자의 하나는 간극유체의 열전도도이다. 본 연구의 모델을 사용하여 간극유체가 변하는 경우 모래의 유효열전도도를 예측할 수 있는지 검토하였다. 간극유체가 Gulf oil company 에서 공급하는 transformer oil (982-68) 과 ethylene glycol 인 Prestone II 인 경우 이 2가지 액체에 Ottawa sand 와 Masonry sand 를 담은 경우의 유효열전도도에 대한 Park⁽⁵⁾의 측정결과와 모델을 사용한 계산결과를 Table 2 에 비교하였다.

Table 2 의 비교결과를 보면 모델예측결과와 측정결과와의 최대오차는 transformer oil 의 경우 1.9%, 그리고 Prestone II의 경우 3.2% 이다. 이 경우 수정전의 최대오차는 transformer oil 의 경우 9.4%, Prestone II 의 경우 7.5%로 정확도가 크게 개선되었다. 따라서 이러한 모델을 사용하면 간극유체가 변하는 경우 모래의 유효열전도도에 미치는 영향을 비교적 정확하게 예측할 수 있다고 판단된다. 참고로 모래의 유효열전도도를 계산하기 위하여 사용한 간극유체의 열전도도를 Table 3 에 나타내었다. 따라서 간극유체의 열전도도가 $0.0254 \text{ W/mK} \leq k_f \leq 0.609 \text{ W/mK}$ 인 경우 모델을 사용한 모래의 유효열전도도의 예측은 비교적 정확한 것으로 판단된다.

Table 3 Thermal conductivity of saturating fluids.

Saturating fluid	Thermal conductivity at 25 °C (W/mK)
air	0.0254
transformer oil	0.11
Prestone II	0.263
water	0.609

Table 4 Thermal conductivity of binders.

Binder	Thermal conductivity(W/mK)
Dow therm-A	0.142
Kerosene	0.145
Epoxy	0.188
Ethylene glycol	0.260
Gulf wax	0.270

3.3 접착제의 영향

모래의 2성분계 모델의 형상은 각 성분의 열전도도의 함수가 아니며 고체입자의 형상특성에 의해서만 결정된다. 이러한 모델의 특성을 사용하면 접착제를 사용한 3성분계에 대한 예측모델의 개발은 비교적 단순하게 된다. 본 연구에서는 액체상의 접착제에 대하여 고찰하였으며 이 경우 접착제는 고체입자의 접촉점 부근으로 모이게 된다고 가정할 수 있다. 이 경우 고체입자층내에서 고체입자사이의 접촉점은 3축방향으로 균등하게 분포된다고 가정할 수 있으므로 주어진 접착제 체적의 1/3 만이 모델의 접촉간극 부근으로 모이게 된다고 가정하였다.

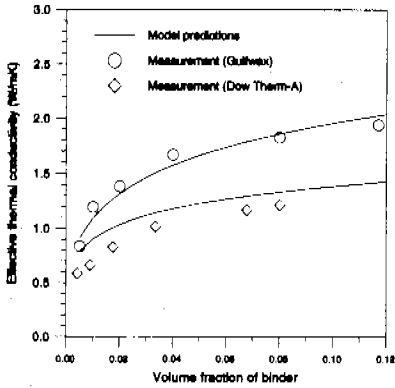


Fig. 2 Comparison of predictions with measurements at various binder volume fractions.

Jackson⁽⁶⁾ 은 gulfwax, ethylene glycol, epoxy, Dow therm-A 와 kerosene 등의 액상의 접착제를 사용한 경우의 Ottawa sand 의 유효열전도도를 측정하였다. 여기에 사용된 접착제의 열전도도를 Table 4 에 나타내었다.

Jackson⁽⁶⁾ 은 Ottawa sand 의 체적율이 0.66 로 일정하게 유지한 경우 Gulf wax 와 Dow therm-A 의 접착제의 체적율을 변화시키며 Ottawa sand 의 유효열전도도를 측정하였다. 이 실험에서 Gulf wax 의 경우 접착제의 체적율을 12% 까지 변화시켰으며 Dow therm-A 의 경우 8% 까지 변화시키며 측정하였다.

본 연구에서는 Ottawa sand 의 모델로부터 이러한 접착제를 사용한 경우의 유효열전도도를 계산하여 Jackson 의 측정결과와 비교하였으며 이러한 비교결과를 Fig. 2 에 나타내었다.

Fig. 2 에서 보면 Gulf wax 의 경우 모델의 예측결과와 측정결과는 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 그러나 Dow therm-A 의 경우 유효열전도도의 모델예측치가 비교적 높게 나타나나 변화의 경향은 비슷하게 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 Dow therm-A 의 경우 접착제의 체적율이 낮을 때 오차율이 커진 것을 감안하면 접착제가 모래에 고르게 분포되지 못한 것이 하나의 이유가 될 수 있을 것으로 판단된다.

Jackson⁽⁶⁾ 은 또한 여러가지 접착제를 사용하여 Ottawa sand 의 유효열전도도를 측정하였다.

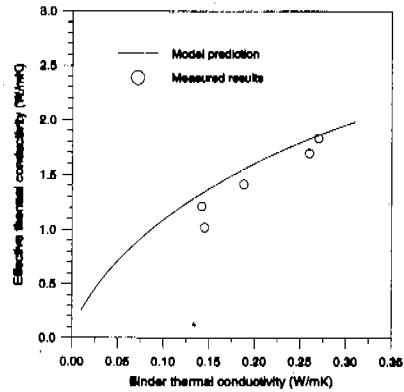


Fig. 3 Comparison of predictions with measurements for various binder types.

이 경우 모래입자의 체적율은 0.66 이었으며 각 접착제의 체적율을 0.08 로 유지하였다. 각 접착제를 사용한 경우에 대하여 모델을 사용한 유효열전도도의 예측치를 계산하여 측정한 결과와 Fig. 3 에 비교하였다.

Fig.3 에서 보면 유효열전도도의 변화 경향은 비슷하나 전반적으로 모델을 이용한 예측치가 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 오차의 이유는 Dow therm-A 와 Kerosene 의 측정결과를 비교하여 추측할 수 있듯이 접착제의 특성에 따라 모래입자 사이에 접착제가 고르게 분포되지 못한 것이 주요한 이유로 볼 수 있다. 따라서 이러한 접착제의 불균일한 분포로 인하여 접착제를 사용한 Ottawa sand 에 대한 유효열전도도의 측정치가 대체로 낮게 나타나는 것으로 판단된다. 그리고 이러한 액상 접착제를 사용한 경우 모래의 유효열전도도를 높이기 위해서는 모래입자 사이에 접착제의 매우 균일하게 분포시켜야 함을 알 수 있다.

이러한 비교결과로부터 접착제를 사용한 모래의 3성분계에 대한 유효열전도도의 예측을 위하여 본 연구에서 개발한 모델을 이용할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 이 경우 모래입자 사이의 접착제의 불균일한 분포가 중요한 예측결과의 오차의 원인이 될 수 있음을 알 수 있다.

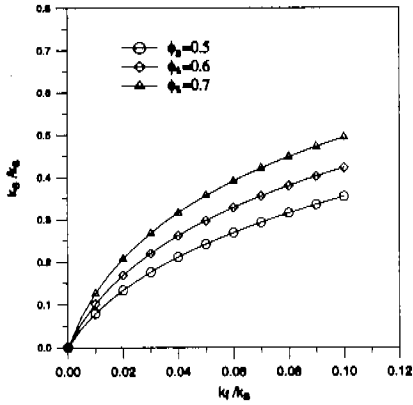


Fig. 4 Effect of normalized thermal conductivity of saturating fluid.

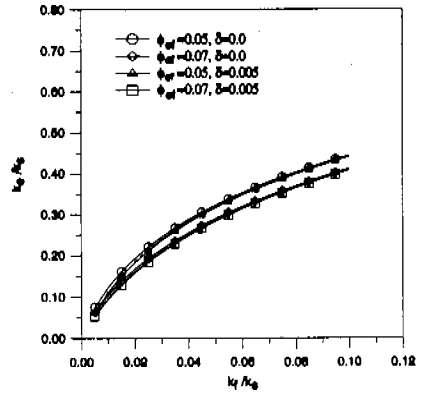


Fig. 5 Effect of model constants at various thermal conductivities of saturating fluid.

4. 모델을 이용한 유효열전도도 예측

4.1 2성분계

모래입자가 주어졌을 때, 모래의 2성분계의 유효열전도도는 간극유체의 열전도도와 고체입자의 체적율만의 함수이다. 모래입자의 모델상수인 ϕ_{ef} 와 δ 를 각각 0.05 와 0.005 로 가정하여 간극유체의 열전도도에 따른 모래의 유효열전도도의 변화를 계산하여 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4에서 보면 간극유체의 열전도도가 증가하면 모래의 유효열전도도도 함께 증가하는 것으로 나타났으며 고체입자의 체적율이 큰 경우 역시 모래의 유효열전도도가 크게 나타났다.

모래입자의 형상특성이 변하는 경우 각 모래에 해당하는 모델의 상수는 변하게 된다. Fig. 5 에는 간극유체의 열전도도가 비교적 광범위하게 변하는 경우 각 모델의 상수가 모래의 유효열전도도에 미치는 영향을 나타내었다.

Fig. 5 에서 보면 역시 모래의 유효열전도도는 간극유체의 열전도도의 증가에 따라 함께 증가하며 각 곡선의 경향도 서로 비슷하다. 모래의 유효열전도도는 간극유체의 체적(ϕ_{ef})과 접촉간극(δ)이 작을수록 증가한다. 그러나 이들의 영향은 간극유체의 열전도도의 크기에 따라 달라지는 것을 볼 수 있다.

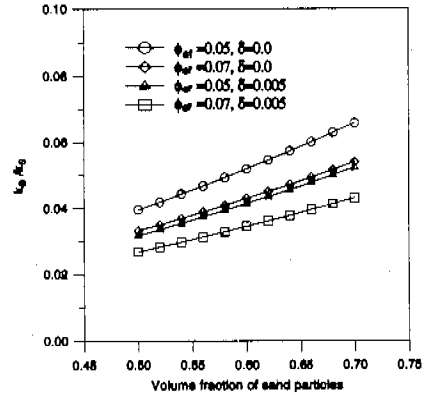


Fig. 6 Effect of model constants at various volume fractions of sand particles.

특히 간극유체의 열전도도가 높은 경우 접촉간극(δ)의 영향은 비교적 적으며 오히려 간극유체의 체적(ϕ_{ef})의 영향이 비교적 크게 나타난다.

Fig. 6 에는 k_f/k_s 가 0.003 로 비교적 간극유체의 열전도도가 낮은 경우에 모델상수의 크기에 의한 영향을 나타내었다. 이 경우 고체입자의 체적율이 0.5 에서 0.7 사이인 범위에서 모래의 유효열전도도는 거의 직선적으로 변화하는 것을 볼 수 있다. 그리고 모래의 유효열전도도는 고체입자의 체적율이 증가하면서 함께 증가한다.

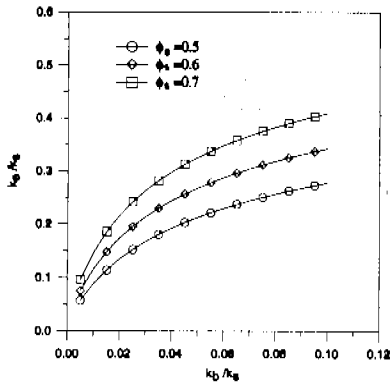


Fig. 7 Effect of binder thermal conductivity.

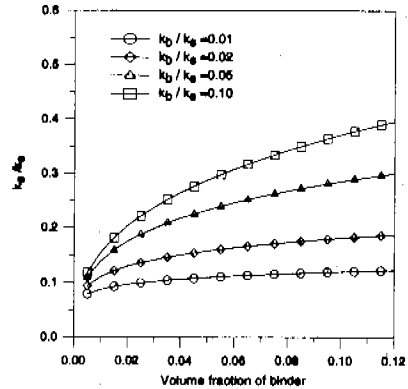


Fig. 8 Effect of binder content.

2가지의 모델상수의 영향은 상당히 크게 나타난다. 따라서 간극유체의 열전도도가 비교적 낮은 경우 2가지 모델상수의 영향을 동시에 고려하여야 한다.

4.2 3성분계

모래에 접착제를 사용한 경우 모래입자, 접착제, 간극공기의 3가지 성분이 존재한다. 이러한 모래의 3성분계에서의 접착제의 열전도도의 영향을 고찰하였다. 이 경우 모래입자의 열전도도에 대한 간극공기의 열전도도의 비율은 0.003으로 가정하였으며 이러한 모래입자의 모델상수인 ϕ_{0f} 와 δ 는 0.05 와 0.005 로 가정하였다. 그리고 접착제의 체적율은 0.08 로 가정하여 접착된 모래의 유효열전도도를 계산하였으며 이 계산 결과를 Fig. 7 에 나타내었다.

Fig. 7 에서 보면 접착제의 열전도도가 증가함에 따라 모래의 유효열전도도가 함께 증가하는 경향을 갖는다. 이 경우 역시 모래의 유효열전도도는 고체입자의 체적율이 큰 경우 더욱 크게 나타나며 고체입자의 체적율의 영향도 비교적 크게 나타난다.

Fig. 8 에는 모래의 3성분계의 유효열전도도에 대한 접착제의 체적율의 영향을 나타내었다. 이 경우 고체입자의 체적율은 0.6이며 고체입자 열전도도에 대한 간극유체의 열전도도의 비율은 0.003 이다. 고체입자의 모델상수인 ϕ_{0f} 와 δ 는 0.05 와 0.005 로 가정하였다.

Fig. 8 에서 보면 역시 접착제의 체적율이 증가하면서 모래의 유효열전도도가 함께 증가하는 것을 볼 수 있다. 접착제의 체적율이 적은 경우 접착제 체적율의 영향은 비교적 크게 나타나며 접착제의 체적율이 크고 접착제의 열전도도가 낮은 경우 접착제의 체적율의 영향은 그다지 크지 않다. 그리고 접착제의 열전도도가 높은 경우 접착제의 체적율의 영향은 비교적 크게 나타난다.

고체입자의 모델상수인 ϕ_{0f} 와 δ 의 영향을 고찰하기 위하여 접착제를 사용한 모래의 유효열전도도를 모델을 사용하여 계산하였다. 이 경우 고체입자의 열전도도에 대한 간극유체의 열전도도의 비율을 0.003 으로 가정하였으며 접착제의 열전도도의 비율을 0.02로 가정하였다. 그리고 접착제의 체적율은 0.08 로 가정하여 고체입자 체적율에 따른 모델상수의 영향을 계산하여 Fig. 9 에 나타내었다.

Fig. 9 에서 보면 모래의 2성분계와는 달리 2가지 모델상수의 영향이 각각 다르게 나타난다. 이 경우 접착간극인 δ 의 영향은 비교적 적게 나타나고 간극유체의 체적율인 ϕ_{0f} 의 영향은 비교적 크게 나타난다.

5. 결론

본 연구에서는 모래의 2성분계와 3성분계의 유효열전도도에 대한 수정모델을 개발하여 측정결

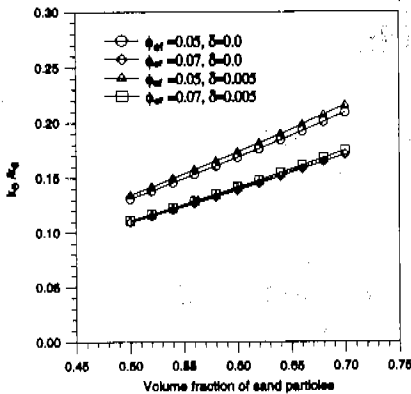


Fig. 9 Effect of model constants for 3-component system.

과와 비교하였다. 이러한 모델의 예측결과와 고찰을 통하여 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 모래의 2성분계의 경우 모래의 유효열전도도를 예측하기 위한 모델을 개발하는 과정에서 모래입자의 형상특성을 고려하기 위하여 모래입자의 접촉간극과 간극유체의 체적의 2가지 모델 상수를 사용하였다. 이러한 2성분계의 모래에 대한 예측모델을 사용하는 경우 모래가 건조한 경우와 물에 잠긴 경우의 모래의 유효열전도도에 대한 예측결과와 최대오차는 2.6% 이하로 매우 정확한 이론적 예측이 가능하였다.

(2) 모래의 2성분계에서 간극유체의 영향을 비교적 정확하게 예측할 수 있었으며 모델예측결과와 측정결과의 비교결과 최대오차는 3.2% 이었다.

(3) 액상의 접착제를 사용한 모래의 3성분계에 대하여 모델의 예측치는 실험결과와 약간의 오차를 보이고 있으나 비슷한 경향을 나타내는 것을 알 수 있었다.

(4) 모델을 이용하여 모래입자의 형상, 각 성분의 체적율과 열전도도가 모래의 2성분계와 3성분계의 유효열전도도에 미치는 영향을 예측할 수 있었다.

참고문헌

- (1) Kunii, D. and Smith, J. M., 1960, "Heat Transfer Characteristics of Porous Rocks," *AIChE J.*, Vol. 6, No. 1, pp. 71 ~ 77.
- (2) Woodside, W. and Messmer, J. H., 1961, "Thermal Conductivity of Porous Media, I. Unconsolidated Sands," *J. Appl. Phys.*, Vol. 32, No. 9, p. 1688.
- (3) de Vries, D. A., 1952, "Thermal Conductivity of Soil," Mededel, Landbouwhogeschool Wagenlügen Nederland, Vol. 52.
- (4) Masamune, S. and Smith, J. M., 1963, "Thermal Conductivity of Beds of Spherical Particles," *Ind. and Engng. Chem. Fundamentals*, Vol. 2, No. 2, pp. 136 ~ 143.
- (5) Park, S., 1987, "Thermal Conductivity of Bentonite-Bonded Molding Sands at High Temperatures," Ph.D thesis, School of M. E., Georgia Institute of Technology.
- (6) Jackson, K. W., 1980, "Enhancement of Thermal Energy Transport through Granular Media," Ph.D thesis, School of M. E., Georgia Institute of Technology.
- (7) Park, S. I. and Hartley, J. G., 1992, "A Model for Prediction of the Effective Thermal Conductivity of Granular Materials with Liquid Binder," *KSME J.*, Vol. 6, No. 2, pp. 88 ~ 94.