

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.2.153

2상 모델을 이용한 나노유체의 고온 열전도도 측정 연구<sup>§</sup>

박 상 일\*\* · 이 옥 현\*

\* 한국에너지기술연구원 산업효율연구센터

A Study on the High Temperature Thermal Conductivity Measurement of Nanofluid Using a Two-Phase Model

Sang-il Park\*\* and Wook-Hyun Lee\*

\* Industrial Energy Efficiency Research Center, Korea Institute of Energy Research

(Received September 15, 2009 ; Revised December 2, 2009 ; Accepted December 7, 2009)

**Key Words:** Nanofluid(나노유체), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(알루미나), Thermal Conductivity(열전도도), High Temperature (고온), Thermal Probe(열침), Prediction Model(예측 모델)

**초록:** 나노유체로 기공이 채워진 규사와 같은 2상 물질의 고온에서의 유효 열전도도를 비정상열침법을 사용하여 측정하였다. 본 연구의 나노유체는 물과 0.1% 체적분의 입경이 45 nm 인 알루미나 나노입자의 혼합유체이다. 본 연구의 측정방법은 액체가 모래의 미세한 기공 내에 존재하므로, 열전도도의 측정에서의 액체의 대류에 의한 문제가 적다. 본 연구의 모래에 대한 예측모델을 사용하여 나노유체와 모래입자의 2상 물질의 유효 열전도도의 측정결과로부터, 고온의 나노유체의 열전도도를 결정하였다. 실험결과, 30°C ~ 80°C의 온도 범위에서 순수한 물에 대한 본 연구의 나노유체의 열전도도의 증가율은 4.87% ~ 5.48%의 범위에서 변화하는 것으로 나타났다.

**Abstract:** The effective thermal conductivity of two-phase materials such as unbonded silica sands saturated with a nanofluid was measured at high temperature using the transient thermal probe method. The nanofluid used in this study was a water-based mixture of 0.1 vol% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles with a diameter of 45 nm. The convection problem for fluids was prevented with this measurement method because the fluid was confined to within very small pore spaces. Based on the prediction model for unbonded sands, the thermal conductivities of the saturating nanofluid at high temperatures could be determined with the measured effective thermal conductivities for the two-phase material. In the results, increases in the thermal conductivity ratios of the nanofluid to pure water when temperatures were varied from 30° to 80°C were within the range of 4.87%~5.48%.

- 기호설명 -

- k : 열전도도(W/m K)
- k<sub>eff</sub> : 유효 열전도도(W/m K)
- q' : 열량(W/m)
- T : 온도(°C)
- t : 시간(sec)
- δ : 모델상수(유효입자간극)
- φ<sub>bm</sub> : 모델상수(유효유체체적분)

1. 서 론

고온의 나노유체 열전도도의 측정은 주로 비정

상열선법(hot wire method)을 사용하며 일부 정상상태의 측정법을 사용한 경우도 있다. 이러한 측정방법에서 측정시 온도구배에 따른 유동이 없다는 가정을 사용한다. 본 연구에서는 다상 물질(모래-유체 또는 모래-나노유체)에 대한 고온의 유효 열전도도를 비정상열침법(thermal probe method)을 사용하여 측정하였다. 그리고 2상 물질에 대한 예측 모델을 사용하여 고온의 나노유체의 열전도도를 결정하였다. 이러한 측정 방법은 기존의 측정방법에 비하여 유체의 유동 문제가 적다. 이것은 액체가 미세한 모래입자 사이의 공간에 존재하여 온도구배에 의한 유체 유동이 제한되기 때문이다. 본 연구의 측정시간은 약 7분 내외로 측정결과의 신뢰성이 우수한 것으로 판단된다. 본 연구에서는 0.1 vol%의 알루미나와 물의 나노유체의 30 °C - 80 °C 범위의 고온

§ 이 논문은 2009년도 열공학부문 춘계학술대회(2009. 5. 20-22, BEXCO) 발표논문임

† Corresponding Author, sipark@kier.re.kr

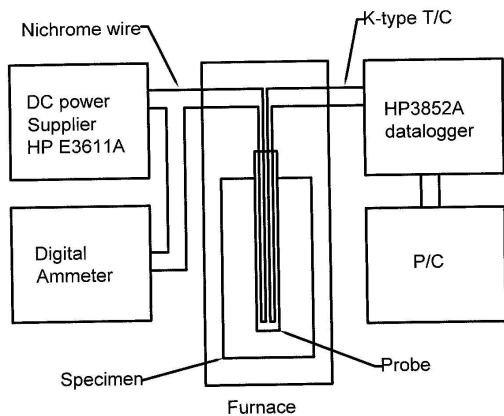


Fig. 1 Thermal probe measurement apparatus

영역을 포함한 열전도도를 측정하였다. 나노입자는 구형이며 입경은 45 nm이고, 나노입자의 제작사는 Nanophase Tech 이다.

### 2. 모래-유체의 유효 열전도도 측정

본 연구에서 규사(silica sand)를 사용한 다상 물질의 고온의 유효 열전도도를 측정하였다. 유효 열전도도의 측정을 위하여 비정상열침법(transient thermal probe method)을 사용하였다. 이러한 열침(thermal probe)은 열선(line heat source)의 역할을 한다. 이 측정 방법은 비교적 간단하며, 측정 시간이 짧다.

실험 방법은 열침을 장착한 시편을 항온챔버에 넣어 일정온도를 유지한 후, 열침의 니크롬선을 일정 전력으로 가열하고 전류계를 사용하여 전력을 측정한다. 그리고 열침의 온도상승을 열전대를 사용하여 측정하고 온도상승곡선으로부터 식 (1)과 같이 열전도도를 계산하였다.

$$k = \frac{q'}{4\pi} \cdot \frac{\ln(t_2 - t_1)}{T_2 - T_1} \quad (1)$$

Figure 1에 고온 유효 열전도도의 측정장치의 개략도를 나타내었다. 본 연구의 열침은 니크롬선을 사용하여 전기 가열하였으며, 열전대를 사용하여 열침의 온도를 측정하였다. 열전대와 히터선을 4공 세라믹 튜브에 넣고, 스테인레스 튜브로 보호하였다. 프로브의 외경은 약 2.1 mm이며, 길이는 약 17 mm이다. 이러한 열전도도 측정 장치의 시편의 직경은 약 10 cm, 길이는 약 20 cm 이다. 본 연구의 비정상열침법의 측정오차는

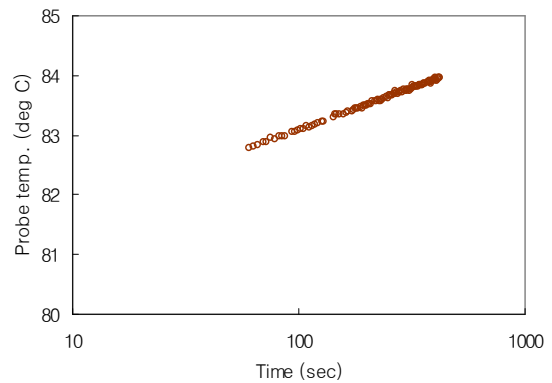


Fig. 2 Thermal probe temperature rise

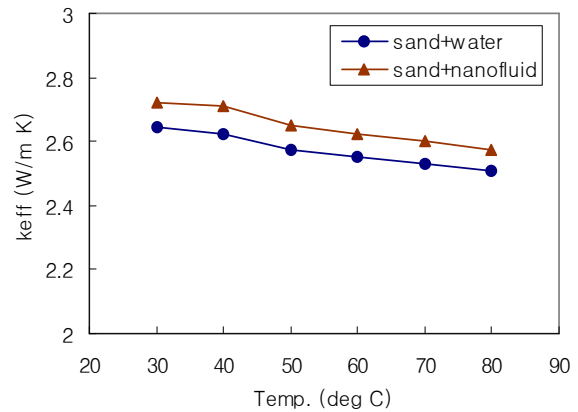


Fig. 3 Measured effective thermal conductivities of sand+water and sand+nanofluid mixtures

2.7%이며,<sup>(1)</sup> 본 연구에 사용한 규사의 입자 크기는 #30-#50이다.

### 3. 실험결과

본 연구에서는 0.1 vol% 알루미늄-물 나노유체와 모래의 혼합물질에 대한 고온 열전도도를 측정하였다. 이 경우의 모래입자의 체적률은 0.54이다. 열침을 사용한 규사와 나노유체의 혼합물질의 유효 열전도도를 측정하는 경우의 시간에 따른 온도상승 곡선의 한 가지 사례를 Fig. 2에 나타내었다.

이 경우의 측정시간은 7분이며, Fig. 2에서 보는 바와 같이 온도상승곡선은 직선으로 나타나며, 이에 따라 유체 유동의 영향이 무시할 수 있는 것으로 판단된다.

그리고 나노유체의 열전도도의 증가에 대한 영향을 비교하기 위하여 모래와 물의 혼합물질의

유효 열전도도를 측정하였다. 모래의 체적률이 0.54인 경우의 측정결과를 Fig. 3에 비교하여 나타내었다.

#### 4. 실험결과 분석

Park<sup>(2)</sup>은 모래를 사용한 2상 물질의 유효 열전도도를 예측할 수 있는 모델을 개발하였다. Park<sup>(3)</sup>은 이러한 모델을 사용하여 순수 액체의 고온 열전도도를 측정 결과를 발표하였다. 본 연구에서 사용한 규사의 열전도도의 예측모델을 결정하였다. 이러한 예측 모델을 결정하기 위한 상수는 유효유체의 체적률( $\phi_{bm}$ )과 유효입자간극( $\delta$ )이며, 이러한 모델 상수들은 모래와 공기 그리고 모래와 물의 2상 물질의 유효 열전도도 측정결과로부터 계산할 수 있다. 모래의 체적률이 0.52이고 온도가 35 °C인 경우의 모래와 공기의 유효 열전도도의 측정값은 0.2877 W/m K 이며, 모래와 물의 유효 열전도도의 측정값은 2.541 W/m K이다. 이로부터 본 연구의 모래에 대한 예측 모델의 유효유체체적률을 식 (2)와 같이 계산하였다.

$$\phi_{bm}=0.2405 \quad (2)$$

그리고 본 연구에서는 Park<sup>(2)</sup>의 모델을 약간 수정하여 유효유체체적률이 모래입자의 체적률과 온도의 변화에 따라 일정하며, 유효입자간극은 모래의 체적률과 온도에 따라 변화한다고 가정하였다. 이것은 본 연구에서 사용한 규사의 모래입자와 문헌의 순수 규사입자의 온도에 따른 열전도도가 약간 다를 수 있기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 각 온도에서의 유효입자간극( $\delta$ )는 그와 동일한 온도에서 측정한 모래와 물의 혼합물질의 유효 열전도도로부터 계산하였다. 그리고 각 온도에서의 모래와 나노유체의 혼합물질의 유효 열전도도의 측정 결과로부터 예측 모델을 사용하여 그 온도에서의 나노유체의 열전도도를 계산하였다.

본 연구에서 측정한 0.1 vol% 알루미늄과 물의 나노유체의 물에 대한 온도에 따른 열전도도의 상승효과를 Fig. 4에 나타내었다.

Figure 4에서 보면 열전도도의 상승률은 4.87% ~ 5.48% 범위에서 변화하며, 나노유체의 온도에 따른 열전도도의 상승 효과는 매우 적은 것으로 나타났다. 이러한 측정 결과를 검토하기 위하여

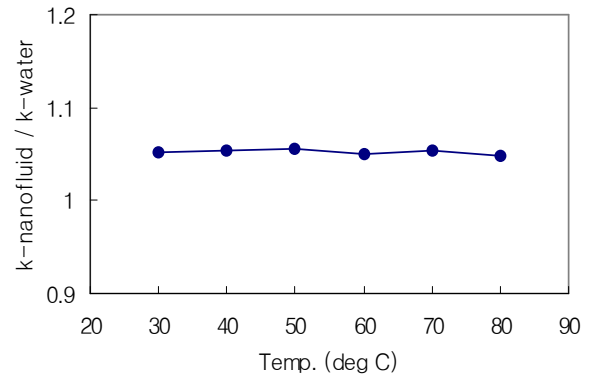


Fig. 4 Thermal conductivity Enhancement of 0.1 vol% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> water base nanofluid

다른 문헌에 나타난 연구결과와 비교하였다.

Li and Peterson<sup>(4)</sup>은 정상상태측정법의 “cut-bar” 방법을 사용하여 나노유체의 열전도도를 측정하였으며, 36 nm와 47 nm의 알루미늄과 물의 나노유체의 열전도도의 온도의 영향을 고찰하였다.

Das et al.<sup>(5)</sup>은 temperature oscillation technique을 사용하여 온도에 따른 물-알루미늄 나노유체의 열전도도를 측정하였다. Li et al.와 Das et al.의 측정 결과를 Fig. 5에 비교하여 나타내었다. 이 경우, 온도에 따른 열전도도의 상승율은 나노입자의 함량의 증가에 따라 함께 증가하는 것으로 나타났다. 그러나, 나노입자의 함유율이 0.5 vol%의 경우, 온도에 따른 열전도도의 상승은 매우 적은 것으로 나타났다.

그리고 Zhang et al.<sup>(6)</sup>은 비정상열선법(short-hot-wire method)를 사용하여 20 nm의 알루미늄과 물의 나노유체의 온도에 따른 열전도도의 변화를 측정하였으며, 이 경우의 측정결과를 Fig. 6에 나타내었다. 이 경우, 온도에 따른 나노유체 열전도도의 상승 현상은 나타나지 않는다.

따라서 본 연구의 0.1 vol%의 알루미늄과 물의 나노유체의 경우, 나노유체의 열전도도의 상승률은 4.87% ~ 5.48% 이나, 나노유체의 온도에 따른 열전도도의 상승 효과는 매우 적은 것으로 나타났으며, 이것은 다른 연구자의 측정 결과와도 일치하는 것으로 판단되었다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 규사(silica sand)와 나노유체의 혼합물질에 대한 유효 열전도도의 온도에 대한 변화를

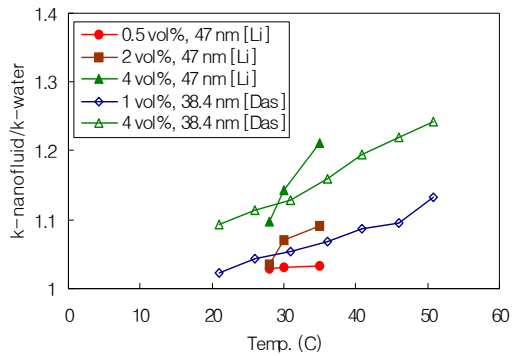


Fig. 5 Thermal conductivity enhancement at high temperatures<sup>(4,5)</sup>

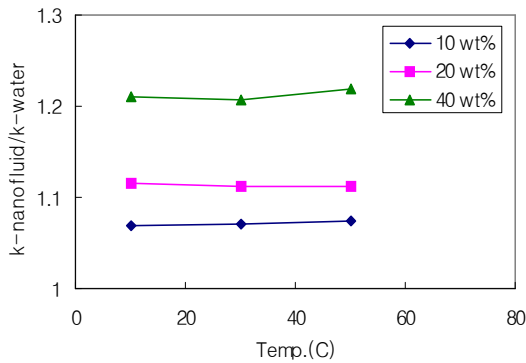


Fig. 6 Thermal conductivity enhancement at high temperatures<sup>(6)</sup>

비정상열침법(transient thermal probe method)을 사용하여 측정하였다. 그리고 규사와 유체의 혼합물질에 대한 유효 열전도도 예측모델을 사용하여 나노유체의 열전도도를 계산하였다. 이러한 측정 방법은 유체의 유동에 의한 문제가 적은 것으로 나타났으며, 이에 따라 고온에서의 열전도도 측정이 비교적 쉽다.

본 연구에서 측정한 0.1 vol%의 알루미늄과 물의 나노유체의 열전도도의 상승효과는 30 °C ~ 80 °C의 온도 범위에서 4.87% ~ 5.48% 정도이나, 저농도 영역에서의 타연구자들의 결과와 같이 본 연구의 나노유체 열전도도의 온도 증가에 따른 상승 효과는 매우 적은 것으로 나타났다.

#### 참고문헌

- (1) Park, S. I., 1987, "Thermal Conductivities of Bentonite-Bonded Molding Sands at High Temperatures," Ph. D Thesis, Georgia Institute of Technology.
- (2) Park, S. I. and Hartley, J. G., 1999, "Predicting Effective Thermal Conductivities of Unbonded and Bonded Silica Sands," *J. of Applied Physics*, Vol.86, No.9, pp.5263~5269.
- (3) Park, Sang-il, 2005, "A Study on Determination of High Temperature Fluid Thermal Conductivity Using Prediction Model for Sands," *Proceedings of the KSME 2005 Fall Annual Meeting*, 05F049, pp. 1336~1341.
- (4) Li, C. H. and Peterson, G. P., 2007, "The Effect of Particle Size Conductivity of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Water Nanofluids," *J. of Applied Physics*, Vol.101, 044312.
- (5) Das, S. K., Putra, N., Thiesen, P. and Roetzel, W., 2003, "Temperature Dependence of Thermal Conductivity Enhancement for Nanofluids," *J. of Heat Transfer*, Vol.125, pp.567~574.
- (6) Zhang, X, Gu, H. and Fujii, M., 2007, "Effective Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Nanofluids Containing Spherical and Cylindrical Nanoparticles," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.31, pp.593~599.