

준정상 상태법을 이용한 나노유체의 열전도도 측정장치 개발

Development of Thermal Conductivity Measurement Device of Nanofluids Using Quasi-Steady State Method

박지훈* · 김현진** · 장석필***

Park, Ji-Hun · Kim, Hyun-Jin · Jang, Seok-Pil

요약

본 논문에서는 준정상 상태법을 이용한 열전도도 측정장치의 불확실도를 분석하고 측정된 열전도도의 불확실도에 가장 큰 영향을 미치는 요인이 온도 측정 센서의 정확도와 측정유체의 윗면과 아랫면의 온도 차임을 알아내었다. 특히 온도 측정센서의 정확도가 0.1°C 일 때 측정유체의 윗면과 아랫면의 온도차가 18°C 이상이면 준정상 상태법을 이용한 열전도도 측정장치의 불확실도가 $\pm 1\%$ 이내로 들어움을 알 수 있었다. 따라서 온도 측정센서가 0.1°C 의 정확도를 가지며 측정유체의 윗면과 아랫면의 온도차가 18°C 이상이 되는 불확실도 $\pm 1\%$ 을 갖는 준정상 상태법을 이용한 나노유체의 열전도도 측정장치를 개발하였다. 개발된 실험 장치의 검증을 위하여 DI-Water의 열전도도와 Al_2O_3 나노유체의 열전도도를 각각 측정하여 기존 문헌 및 선행 연구자의 결과와 비교하여 보았고 개발된 장치가 $\pm 1\%$ 이내의 불확실도를 가지고 나노유체의 열전도도를 측정할 수 있음을 확인하였다.

keywords : 준정상 상태법, 불확실도, 열전도도, 나노유체

1. 서론

Choi(Choi *et al.*, 1995)에 의해 순수유체에 나노입자를 분산한 나노유체의 뛰어난 열적성능이 보고된 이후에 많은 연구자들(Yu *et al.*, 2008)에 의해 나노유체의 물성치 연구가 현재 진행되고 있다. 특히 나노유체의 열전도도에 관한 연구가 주로 연구되고 있으며 이를 측정하는 방법으로서 비정상 상태법과 준정상 상태법이 주로 사용되고 있다. 비정상 상태법은 준정상 상태법보다 매우 짧은 측정시간을 갖는 장점이 있으나 불확실도가 준정상 상태법보다 높으며 측정시간이 길어지면 대류에 의한 열전도도 측정 오차가 나타날 수 있는 단점을 가지고 있다. 선행 연구자들(이승현등, 2009; Murshed *et al.*, 2005)의 장치의 불확실도는 $\pm 1.5\%$ 이상이다. 그에 비해 준정상 상태법을 이용한 장치들의 불확실도는 $\pm 1\%$ (Kim *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 1999)이지만 이는 측정 시 사용한 장비와 온도센서등의 불확실도를 고려하지 않고 측정된 열전도도의 정밀오차만을 고려한 불확실도이다. 따라서 본 연구에서는 준정상 상태법을 이용한 열전도도 측정 장치에서 불확실도에 가장 큰 영향을 미치는 요인을 알아내고 이를 조정하여 불확실도 $\pm 1\%$ 이내의 준정상 상태법을 이용한 나노유체의 열전도도 측정 장치를 개발하였다.

* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 석사과정 hanoulrim@kau.ac.kr

** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 석사과정 hjkim80@kau.ac.kr

*** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 부교수 spjang@kau.ac.kr

2. 불확실도 분석

2.1. 이론

준정상 상태법은 열전도도를 측정하려는 유체를 평행하게 마주 보고 있는 두 판(상부 판과 하부 판) 사이에 채워놓고 상부 판에서 열을 발생시킨다. 이 때 열이 유체를 통해서만 하부 판으로 빠져나가도록 상부 판과 유체주위는 단열시킨다. 그러면 열이 유체를 통해서만 하부 판으로 전달되고 유체의 열전도도에 따라서 상부 판은 높은 온도가 되고 하부 판은 낮은 온도를 가지게 된다. 유체의 온도가 윗면이 높고 아랫면은 낮아서 대류에 의한 열전달은 무시할 수 있고 열은 전도에 의해서만 전달되므로 유체의 윗면과 아랫면의 온도 차이를 알 수 있으면 유체의 열전도도를 측정할 수 있다. 이 때 준정상 상태법에서 열전도도를 측정하는 기본 방정식은 식 (1)과 같다.

$$k = q'' \frac{L}{\Delta T} \quad (1)$$

여기서 k 는 유체의 열전도도, q'' 는 유체를 통과하는 Heat flux, L 은 상부 판과 하부 판사이의 두께, ΔT 는 유체의 윗면과 아랫면의 온도차이다.

2.2. 불확실도 분석

측정유체의 열전도도에 관한 불확실도는 식 (2)와 같다.

$$U_k = \left[\left(\frac{\partial k}{\partial q''} U_{q''} \right)^2 + \left(\frac{\partial k}{\partial L} U_L \right)^2 + \left(\frac{\partial k}{\partial \Delta T} U_{\Delta T} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

$U_k, U_{q''}, U_L, U_{\Delta T}$ 는 각각 유체의 열전도도, 유체를 통과하는 Heat flux, 상부 판과 하부 판사이의 두께, 유체의 윗면과 아랫면의 온도차의 불확실도이다. 식 (2)을 전개하면 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{U_k}{k} = \left[\left(\frac{U_{q''}}{q''} \right)^2 + \left(\frac{U_L}{L} \right)^2 + \left(\frac{U_{\Delta T}}{\Delta T} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

식 (3)에서 유체를 통과하는 Heat flux에 의한 불확실도는 전원을 공급하는 Power Supply의 정확도에 의존하며 상부 판과 하부 판사이의 두께에 대한 불확실도는 길이 측정 장비의 정확도에 의존한다. 그러므로 이 두 불확실도는 바꾸기 어렵고 그 불확실도가 크지 않다. 하지만 유체의 윗면과 아랫면의 온도차에 의한 불확실도는 온도 측정 센서의 정확도와 유체의 윗면과 아랫면의 온도차이에 의존하므로 실험장치에 의해 조절이 가능하다. 이에 따라 온도 측정 센서가 0.1℃의 정확도를 가지고 ΔT 가 18℃이상이면 유체의 윗면과 아랫면의 온도차에 의한 불확실도는 ±1%이하가 됨을 알 수 있었다. 그러므로 준정상 상태법에서 불확실도에 가장 영향을 많이 끼치는 요인은 온도 측정 센서의 정확도와 온도차에 의한 불확실도이며 온도 측정 센서가 0.1℃의 정확도를 가지며 ΔT 가 18℃이상일 경우에 준정상 상태법을 이용한 열전도도 측정장치의 불확실도는 ±1%이하가 된다.

3. 실험 장치

위에서 불확실도를 분석한 결과를 가지고 상부 판과 하부 판의 온도차가 18℃이상을 가질 수 있도록 실험

장치를 제작하였고 그림 1에 나타내었다. 식 (1)에서 열전도도가 일정할 때 상부 판과 하부 판의 온도차 (ΔT)가 커지기 위해서는 Heat flux(q'')가 높고 상부 판과 하부 판 사이의 두께(L)가 두꺼워야 하므로 제작된 실험 장치는 상부 판과 하부 판이 10mm의 두께를 가지며 상부 판에 1300 W/m^2 이상의 Heat flux을 낼 수 있는 박막히터를 부착하였다. 상부 판과 하부 판은 지름 150mm, 두께 5mm를 갖는 원형 구리판을 사용하였고 온도차에 의한 불확실도를 줄이기 위해 0.1°C 의 정확도를 갖는 Thermistor를 각각 5개씩 삽입하여 총 10개의 Thermistor로 상부 판과 하부 판의 온도를 측정하였다. 구리의 열전도도는 유체의 열전도도에 비해 훨씬 크므로 구리의 두께는 무시할 수 있고 상부 판과 하부 판의 온도가 각각 유체의 윗면과 아랫면의 온도로 볼 수 있다. 상부 판에서 발생한 열이 유체를 통해서만 하부 판으로 전달되도록 하기 위해 상부 판의 윗면에는 충분한 두께를 가지는 단열재를 덮어두어 윗면으로 열 저항을 크게 하였다. 또한 벽면을 통한 열 손실을 막기 위해 유체의 옆 벽면은 단열재로 둘러쌌다. 하부 판은 항온조를 이용하여 준정상 상태가 될 때까지 일정 온도로 냉각시켜 주었다. 상부 판에 열을 주기 시작한 때부터 준정상 상태까지 도달하는 시간은 1시간 정도가 소요되었으며 이 때 온도변화는 2분 동안에 0.05°C 이하였다.

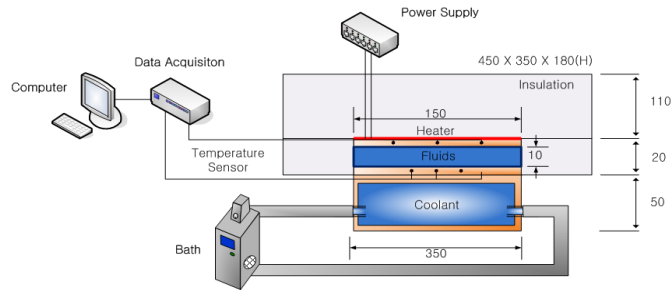
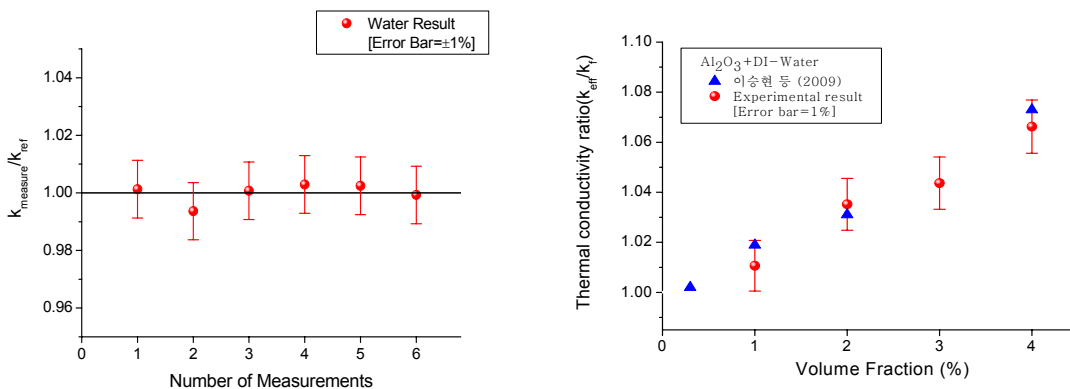


그림 1. 실험 장치

4. 실험 결과



(a) DI-Water 실험 결과

(b) Al_2O_3 나노유체 실험 결과

그림 2. 열전도도 측정 결과

개발된 실험 장치의 검증을 위하여 DI-Water의 열전도도를 측정하였고 그 결과를 그림 2의 (a)에 나타내었다. 불확실도 $\pm 1\%$ 이내에서 장치의 열전도도 측정값이 잘 맞음을 확인하였다. 또한 나노유체의 열전도도

측정을 위하여 Al_2O_3 나노유체를 1, 2, 3, 4%의 농도로 제작하여 열전도도를 측정하였고 그 결과를 그림 2의 (b)에 나타냈다. 열전도도 측정결과 Al_2O_3 나노유체의 열전도도가 농도에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 보였으며 특히 1, 2, 4%의 농도에서 Al_2O_3 나노유체의 열전도도가 기존의 $\pm 1.5\%$ 의 불확실도를 가지는 비정상 상태법을 이용한 열전도도 측정결과와 불확실도 $\pm 1\%$ 이내에서 잘 맞음을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 개발한 준정상 상태법을 이용한 나노유체 열전도도 측정장치가 불확실도 $\pm 1\%$ 이내에서 나노유체의 열전도도를 정확히 측정할 수 있음을 알 수 있었다.

5. 결론

준정상 상태법을 이용한 열전도도 측정 장치의 불확실도 분석을 통해 실험 장치의 불확실도에 가장 큰 영향을 미치는 요인이 온도센서의 정확도와 유체의 윗면과 아랫면의 온도차이며 온도센서가 0.1°C 의 정확도를 가질 때 온도차가 18°C 이상일 경우 $\pm 1\%$ 이내의 불확실도를 가질 수 있음을 알 수 있었다. 따라서 이를 고려하여 $\pm 1\%$ 이내의 불확실도를 가지는 준정상 상태법을 이용한 나노유체의 열전도도 측정 장치를 개발하였다. 검증을 위하여 물 실험 및 Al_2O_3 나노유체의 열전도도를 측정하였으며 각각 $\pm 1\%$ 이내에서 기존 결과와 잘 맞음을 확인할 수 있었다. 따라서 불확실도를 분석하고 개발한 준정상 상태법을 이용한 열전도도 측정장치가 불확실도 $\pm 1\%$ 이내에서 나노유체의 열전도도를 측정할 수 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2009년 에너지기술연구원 지원과제인 에너지·자원기술개발사업의 지원에 의하여 연구된 결과이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 이승현, 황교식, 김현진, 이욱현, 장석필 (2009) 비정상 열전법을 이용한 열전도도 측정 방법, **제 3회 한국 냉동공학학술대회 강연 및 논문집**, (사)국제냉동기구한국위원회, pp.133~136.
- Choi, S.U.S. and Eastman, J.A. (1995) Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles, **ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition**, ASME, FED-Vol. 231/MD-Vol. 66, pp.99~105.
- Kim, B.H. and Peterson, G.P. (2007) Effect of Morphology of Carbon Nanotube on Thermal Conductivity Enhancement of Nanofluids, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 21(3), pp.451~459.
- Murshed, S.M.S., Leong K.C., Yang, C. (2005) Enhanced thermal conductivity of TiO_2 -water based nanofluids, *International Journal of Thermal Sciences*, 44, pp.367~373.
- Wang, X., Xu, X., Choi, S.U.S (1999) Thermal Conductivity of Nanoparticle-Fluid Mixture, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 13(4), pp.474~480.
- Yu, W., France D.M., Routbort J.L, Choi, S.U.S (2008) Review and Comparison of Nanofluid Thermal Conductivity and Heat Transfer Enhancements, *Heat Transfer Engineering*, 29(5), pp.432~460.