

〈 논문 〉

## 나노유체 열전도율의 온도의존성 평가를 위한 비정상열선법의 시험방법

이 신 표<sup>†</sup> · 강 경 민<sup>\*</sup>

(2006년 10월 10일 접수, 2007년 3월 7일 심사완료)

### Validation Test for Transient Hot-wire Method to Evaluate the Temperature Dependence of Nanofluids

Shinpyo Lee and Kyoungmin Kang

**Key Words:** Nanofluids(나노유체), Transient Hot-wire Method(비정상열선법), Base Fluids(기본유체), Thermal Conductivity(열전도율), Temperature Dependence(온도의존성)

#### Abstract

One of the controversial research issues on nanofluids is the temperature dependence of the thermal conductivity of nanofluids, that is, whether it will increase or decrease according to the temperature rise. To evaluate precisely the thermal conductivity behavior of nanofluids, a systematic way of validation experiments for the measuring instrument has been highly recommended. In this paper, procedure of the validation test for transient hot-wire method using the temperature dependence of the base fluids was explained comprehensively and the comparison of the temperature dependence of water-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluids is made between the present work and that of Das et al.

#### 1. 서 론

본 연구는 나노유체의 열전도율 측정을 위해 사용되는 비정상열선법 장치의 정확도를 엄밀하게 시험하는 방법에 대한 것이다. 나노유체는 물, 에틸렌그리콜(ethylene glycol), 글리세린(glycerine) 등과 같은 전통적인 열전달 유체에 열전도율이 높은 미세 금속입자를 첨가하여 제조한 혼합유체를 말한다. 입자혼합 전의 유체를 기본유체라 부르며 소량의 금속입자를 혼합하여 이들 유체가 가진 낮은 열전도율을 대폭 상승시켜 개선하려는 시도로 연구가 시작되었다.

연구가 시작된 이후 지난 10여년 동안 다양한

입자와 기본유체를 조합한 나노유체의 제조와 열전도율 변화에 대한 연구가 우리나라를 포함하여 세계적으로 매우 활발히 이루어졌다. 여기서 특히 우리나라를 언급한 것은 나노유체의 열전도율 상승을 측정 한 연구<sup>(1,2)</sup> 그리고 열전도율 상승에 대한 메커니즘의 개발단계<sup>(3,4)</sup>에서 우리나라의 연구자들이 주도적인 역할을 담당했기 때문이다.

그러나 입자의 혼합농도 증가에 따라 나노유체의 열전도율이 증가한다는 사실 이외에는 명백하게 확인된 결과가 부족하며 심지어 측정결과들이 연구자들마다 서로 일치하지 않는 경우도 있다. 대표적인 예가 최근에 활발히 연구되고 있는 탄소나노튜브(carbon nanotube)로 제조한 나노유체의 열전도율에 관한 사항이다. 탄소나노튜브는 열전도율이 매우 높으며 따라서 이를 이용하여 제조한 나노유체의 열전도율은 극소량의 첨가에도 당연히 높을 것으로 예상된다. 그렇지만 발표된 열전도율이 예상보다 낮고 연구자들마다 큰 차이를

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 경기대학교 기계공학과

E-mail : shinpyo@kyonggi.ac.kr

TEL : (031)249-9814 FAX : (031)244-6300

<sup>\*</sup> 회원, 경기대학교 대학원 기계공학과

보인다. 혼합유체가 오랜 시간동안 침전이 일어나지 않도록 분산제를 사용하기도 하는데 이와 같은 화학적 처리방법이 열전도율에 크게 영향을 미치는 것으로 생각된다. 따라서 이와 같은 제조상의 세부사항을 무시하고 단순히 입자와 기본유체만을 가지고 나노유체의 성질을 모두 규정하는 것은 처음부터 불가능한 일이라고 생각된다.

또 다른 논란의 대상이 되고 있는 주제가 나노유체 열전도율의 온도의존성에 관련된 사항이다. 즉, 온도증가에 따라 열전도율이 증가할 것인가 일정할 것인가 아니면 감소할 것인가에 대한 것이다. 대표적 연구로서 Das 등은 나노유체의 열전도율이 온도의 증가에 따라 매우 큰 폭으로 증가하며 입자의 혼합비율이 높을수록 그 상승효과가 크다는 것을 보고하였다. 이와 같은 이유로 나노유체는 저온에서 보다 고온에서 장치의 냉각에 더욱 효과적으로 사용될 수 있음을 주장하였다.<sup>(5)</sup>

Das 등은 유체 열전도율 측정에 전통적으로 사용되어 왔던 비정상열선법 대신 비교적 새로운 측정법인 Temperature Oscillation Method를 사용하여 나노유체 열전도율을 측정하였다. 그들은 본 논문의 저자인 Lee 등<sup>(1)</sup>이 비정상열선법을 이용하여 측정한 상온에서의 물-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 물-CuO 열전도율과 자신들의 데이터 일치를 근거로 그들의 장치에 대한 타당성을 주장하였다. 그러나 최근 본 연구자들이 실험한 결과는 상온에서의 열전도율은 일치한다고 판단되나 열전도율의 온도의존성은 이들의 결과와 크게 달랐다. 논문의 후반부에 본 연구자들이 갖고 있는 기존 연구 및 측정장치에 대한 의문사항을 논의할 것이다.

측정실험의 경우에는 장치에 대한 철저한 검증과정이 선행되어야 한다. 그러나 지금까지는 이 검증과정이 대부분 생략되고 결과에 대한 해석만이 중요시되어 왔다. 본 연구자들은 나노유체 열전도율 측정의 경우에는 사용된 장치에 대한 연구자 나름대로의 검증과정이 연구결과에 반드시 포함되어야 하며 이를 위해 반드시 실험 전에 열전도율이 잘 알려진 기본유체들에 대한 엄밀한 측정실험을 실시할 것을 주장한다. 본 논문에서는 이와 같은 검증과정에 대하여 자세히 설명하고자 한다.

기초적인 검증단계로 상온에서 기본유체들의 열전도율을 측정하고 비교하는 시험을 먼저 생각

할 수 있다. 300K에서 에틸렌그리콜, 글리세린 그리고 물의 열전도율은 각각 0.252, 0.286, 0.613W/mK로서 에틸렌그리콜과 글리세린은 비슷하고 물과는 약 2배의 열전도율 차이를 보인다.<sup>(6)</sup> 따라서 이들 유체들의 열전도율 절대값이 크게 다르기 때문에 보유한 장치로 이 값들을 측정해 낼 수 있다면 상온에서는 최소한의 장치검증을 실시했다고 말할 수 있다.

그러나 위에서 “최소한의 장치검증”이라고 언급한 것은 본 연구자들이 나노유체의 열전도율 측정과 관련된 연구를 해오면서 새로운 사실을 발견했기 때문이다. 앞서 언급한 기본유체의 열전도율은 280K에서 약 40도의 온도증가에 따라 물의 경우 약 10%의 상승, 글리세린 약 1% 미만의 상승, 에틸렌그리콜 약 6%의 상승을 보인다.<sup>(6)</sup> 그런데 신호의 데이터 처리과정에서 사용되는 증폭기의 이득(gain)이나 열선센서의 저항값 등 고유수치를 잘못 사용하면 글리세린의 열전도율이 온도에 따라 감소하거나 또는 에틸렌그리콜의 열전도율이 일정하게 얻어질 수도 있음을 경험하였다.

이것은 명백히 측정과정 및 장치에 대한 전반적인 오류이다. 흥미로운 것은 높은 온도에서 오류를 가졌던 장치로 다시 상온에서 이들 유체의 열전도율을 측정해 보면 다시 원래의 값이 얻어지기도 한다. 기본 측정원리가 같아도 연구자들마다 세부적인 장치 제작과정이 다르고 데이터의 처리과정도 다르므로 동일한 나노유체 시료에 대해서도 전혀 다른 결과가 나타날 수 있다. 그러나 장치가 열전도율의 온도에 따른 변화를 검출해 내고 데이터를 반복성 있게 재현해 낸다면 그 장치는 제작과정 및 측정원리가 다르더라도 측정 결과는 신뢰할 수 있을 것이다.

언급한 바와 같이 위에서 예시한 논란에 대한 근본적 원인은 측정장치의 정확도에 대한 철저한 검증이 이루어지지 않은 결과에 일부 기인한다고 생각된다. 본 연구는 비정상열선법에 대한 새로운 이론이나 장치구성에 대한 것은 아니며 나노유체에 한정하여 연구자들이 사용하는 서로 다른 시스템들을 최종 환산된 열전도율 결과를 이용하여 통합적으로 비교하고 검증하는 방법을 제안하는 것이다. 이를 위해 온도에 따른 유체들의 열전도율 변화를 비교지표로 사용하는데 두 가지 실험방법을 2장에서 자세히 서술하고 각 방법의

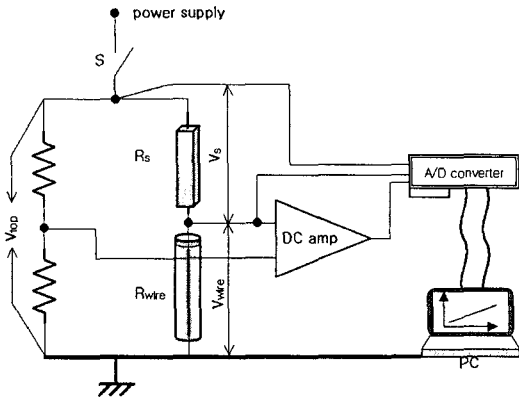


Fig. 1 Schematic of transient hot-wire apparatus

장단점을 언급할 것이다. 두 방법을 이용한 장치의 검증은 마친 후 온도변화에 따른 물-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 열전도율을 시험하고 Das 등의 연구 결과와 비교해 보고자 한다.

## 2. 기본유체 열전도율의 온도의존성을 이용한 장치 검증방법

### 2.1 비정상열선법 데이터 획득구간과 대표온도

유체의 열전도율 측정에는 예외없이 비정상열선법이 사용되어 왔는데 최근에 나노유체의 연구가 활발해짐에 따라 다시 그 중요성이 강조되고 있다. 이 방법은 정상상태법<sup>(7)</sup>(steady state method)과 비교하여 유체가 정지한 상태에서 측정을 시작하고 완료하므로 대류에 의한 오차발생을 방지할 수 있고 신속하고 매우 정확하게 열전도율을 측정할 수 있는 장점이 있다. 참고문헌 (8~11)에는 비정상열선법 장치 구성과 관련된 상세내용이 잘 기술되어 있다.

두개의 시험관을 준비하고 한 쪽에는 열전도율이 매우 높은 유체시료를 넣고 다른 시험관에는 열전도율이 낮은 시료를 넣었다고 가정한다. 두 시험관의 중심에 각각 동일한 길이와 직경 즉, 동일한 저항을 갖는 가는 금속열선을 위치시킨다. 예를 들면 길이 150mm, 직경 25 $\mu$ m의 백금선(platinum wire)을 위치시킨다. 만약 이 두 열선에 동일한 열량을 순간적으로 가한다면 열전도율이 높은 유체 속에 위치한 열선의 경우에는 발생된

열이 대부분 유체쪽으로 전달되어 열선의 온도상승이 적지만 열전도율이 낮은 유체속에 놓인 열선의 경우에는 그 반대로 열선의 온도상승이 높게 나타날 것이다.

즉, 순간적으로 열선에 전력을 공급하였을 때 시간에 따른 열선의 온도상승은 잠겨있는 유체의 열전도율에 따라 차이를 보이게 되는데 이것이 비정상열선법의 기본원리이다. Carslaw와 Jaeger<sup>(12)</sup>의 열전도 교과서에 의하면 이 같은 열선의 온도상승은 시간을 로그축으로 표시하였을 때 실험의 시작과 끝 부분을 제외하면 일정한 기울기의 직선으로 나타나게 된다. 이것을 요약한 것이 다음의 식 (1)이다.

$$k = \frac{1}{4\pi} \frac{q}{L} \frac{1}{S}, \quad S = \left( \frac{T_w(t_2) - T_w(t_1)}{\ln t_2 - \ln t_1} \right) \quad (1)$$

여기서 k는 열전도율, q/L은 열선 단위길이당 발생열량, t는 시간, T<sub>w</sub>는 열선의 온도(wire temperature), S는 기울기 그리고 첨자 1과 2는 측정 시점과 종점을 의미한다. 예를 들면 T<sub>w</sub>(t<sub>2</sub>)는 측정을 마치는 순간의 열선온도이다. 식 (1)에서 괄호안의 기울기는 획득한 데이터를 직선으로 곡선맞춤(curve-fitting)하여 얻는다. 본 연구에서 소요된 총 측정시간은 시작부터 종료시까지 약 3초였으며 1kHz의 sampling rate로 3000개의 데이터를 이용하여 괄호안의 기울기를 환산하였다.

Fig. 1은 비정상열선법 장치의 개략도로서 열선 센서의 저항 변화(resistance change of a wire)를 검출하는 브릿지(bridge)회로, 미세한 신호를 증폭하기 위한 차동증폭기(differential amplifier), 그리고 데이터 획득과 저장을 위한 A/D 변환기와 PC를 나타내었다. 브릿지 회로에서 열선센서 부분(hot-wire side)만을 생각해 보면 두개의 저항이 직렬 연결되어 전류가 동일하게 흐르는 전압분할기(voltage divider)로 동작한다. R<sub>s</sub>는 표준저항으로 저항값이 일정한 저항이고 R<sub>wire</sub>는 열선센서로 다음의 식 (2)로 표시되는 온도저항관계에 따라 저항값이 변하는 가변저항이다.

식 (2)는 센서에 대한 고유식으로 온도저항관계 식이라고 부르며 온도를 알면 저항을 알고 반대로 저항을 알면 온도를 안다는 의미이다. R<sub>0</sub>는 0°C에서 열선센서의 저항으로 냉저항이라 부르며  $\alpha$ 는 온도저항계수(coefficient of temperature resistance

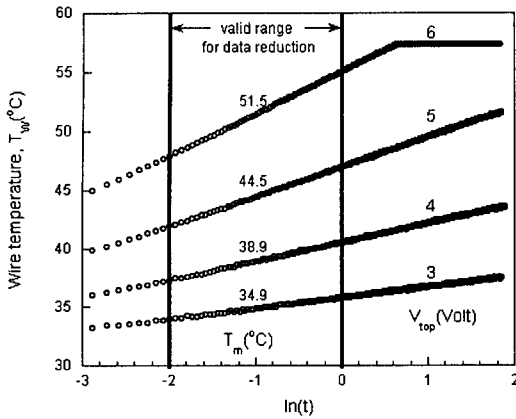


Fig. 2 Temperature rise of sensor wire under the testing mode of change of heating voltage

relation)로서 백금의 경우 0.0039092°C의 고유값을 갖는다.

$$R_{wire} = R_0(1 + \alpha T_w) \tag{2}$$

S로 표시한 스위치가 닫히면 열선센서에 전류가 흐르고 가열되면서 열선의 온도가 변하고 식 (2)에 따라 저항이 변한다. 직류전압  $V_{top}$ 은 브릿지 상단전압(bridge top voltage) 또는 본 논문에서는 열선의 가열에 사용되므로 가열전압(heating voltage)이라고 부른다. 가열에 의하여  $T_w$ 가 증가하면 식 (2)에 따라  $R_{wire}$ 가 증가한다.  $R_{wire}$ 의 증가는 상대적으로  $V_{wire}$ 는 증가,  $V_s$ 는 감소하는 결과를 가져온다.  $V_{top}$ 이 일정하게 주어진 조건에서  $V_{top} = V_s + V_{wire}$  이므로  $V_{wire}$ 가 증가하면  $V_s$ 는 감소하기 때문이다. 다음의 식 (3)에 의하여 표준저항  $R_s$ 의 값을 알고 있을 때 두개의 전압  $V_{top}$ 과  $V_{wire}$ 를 시간에 따라서 기록하면  $R_{wire}$ 가 계산된다.

열전도율은 온도의 함수이므로 비정상열선법을 통하여 얻은 열전도율도 당연히 실험이 실시된 해당 대표온도가 있다. Roder<sup>(8)</sup>는 이 온도를 다음의 식 (4)로 표시하였다. 여기에서  $T_{ref}$ 는 실험시작 전 평형상태의 유체온도이며 기호  $\Delta T$ 는  $T_w(t) - T_{ref}$ 로서 평형온도에 대한 열선의 온도상승을 나타내는데 이를 이용하면 식 (4)는 식 (5)로 표시된다.  $t_1$ 과  $t_2$ 는 획득한 전체 데이터 중에서 열전도율 환산에 사용한 유효데이터의 시간구간으로 결국 이 온도는 이 시간구간에서 열선의

평균온도가 된다.

$$R_{wire} = \frac{V_{wire}}{i} = \frac{V_{wire}}{\left( \frac{V_{top} - V_{wire}}{R_s} \right)} \tag{3}$$

가열전압이 작아서 일정한 시간동안 열선의 온도상승이 작다면 온도의 대표성이 강하지만 반면에 가열전압이 높아서 열선의 온도상승이 크면 온도의 대표성이 줄어든다. 2.2절에서 더 상세히 설명하겠으나 궁금한 독자는 Fig. 2에서 3Volt, 34.9도의 경우와 6Volt, 51.5도의 경우를 비교해 보기 바란다. 실험도중 열선에 의한 가열이 발생하므로 열전도율이 측정된 대표온도는  $T_{ref}$ 보다 항상 높게 된다.

$$T_m = T_{ref} + \frac{1}{2} [\Delta T(t_1) + \Delta T(t_2)] \tag{4}$$

$$T_m = \frac{T_w(t_2) + T_w(t_1)}{2} \tag{5}$$

### 2.2 열선가열전압 조절을 이용한 장치검증방법

Fig. 2는 에틸렌그리콜에 대하여 가열전압  $V_{top}$ 을 3Volt에서 6Volt까지 바꾸면서 실험한 결과를 로그시간-열선온도 그래프에 나타낸 것이다.  $V_{top}$ 을 조절하는 것은 열선에 가해지는 전력을 조절하는 것을 의미한다. 가열전압을 조절한 후 2.1절에서 설명한 절차(스위치를 순간적으로 On시키고 데이터를 샘플링하는 것)에 따라 동일한 실험을 반복하면 Fig. 2에 표시한 결과들을 모두 얻게 된다. 각 가열전압에 대하여 열전도율 환산이 가능한 선형구간이 명백히 나타남을 알 수 있다. 지적하였듯이 가열전압이 증가함에 따라 동일한 시간구간에 대한 열선의 온도상승이 커져서 평균온도가 상승하는 것을 보여준다.

본 장치의 경우 6Volt 실험에서는  $t=1.92$ 초 이후(로그축 시간으로는 0.65 근처) 신호가 포화되어 직선으로 나타났는데 신호의 상승이 커서 측정 전압범위를 벗어났기 때문이다. Table 1은 각 가열전압에 대하여 Fig. 2의 데이터에서 얻은 온도상승기울기, 열선의 단위길이당 열량을 이용하여 열전도율을 환산한 것이다. 이와 같은 방법으로 얻을 수 있는 열전도율의 온도범위는 대략

**Table 1** Summary of experimental conditions for each heating voltage

$V_{top}$ (Volt)	$q/L$ (W/m)	slope	$T_m$ (°C)	$k$ (W/mK)	$\left  \frac{(k_{max} - k)}{k_{max}} \right $ ×100
3	2.9656	0.9298	34.9	0.2538	0.24
4	5.2563	1.6256	38.9	0.2573	0.70
5	8.1763	2.5423	44.5	0.2559	0.54
6	11.720	3.6010	51.5	0.2590	0.04

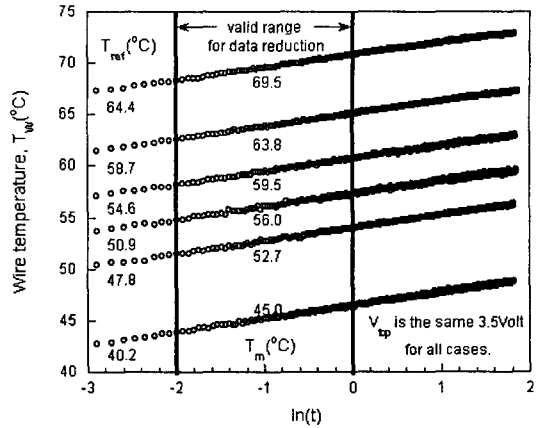
35-50°C 범위임을 알 수 있다. 교과서를 참고하면 이 구간에서 에틸렌그리콜의 열전도율은 약 2% 미만으로 증가하는데 본 장치는 이와 같은 열전도율의 온도의존성을 잘 보여주고 있다. 물, 글리세린에 대해서도 유사한 실험을 실시하였으며 실험결과는 2.3절의 Fig. 4에 모두 나타내었다.

보유한 장치에 대하여 열전도율이 다른 3가지 기본유체에 대한 상온에서의 열전도율 측정실험뿐만 아니라 온도의존성에 대한 실험을 실시하고 비교 확인한다면 장치의 정밀도에 대한 1차 검증 단계는 마쳤다고 말할 수 있다. 이 방법은 대상 기본유체를 가열 또는 냉각시켜 온도를 변화시키지 않으므로 상온근처의 온도에서 기본유체의 온도의존성을 이용하여 장치를 검증하는 것이다. 2.3절에서 설명하는 항온조를 이용한 실험과 비교하면 직류전원으로 가열전압만 바꾸면서 동일한 실험을 반복하므로 비교적 쉽고 빠르게 장치를 검증할 수 있다.

**2.3 항온조를 이용한 장치 검증방법**

이 절에서는 상온보다 높은 온도에서 기본유체 열전도율의 온도의존성을 이용하여 장치를 검증하는 방법에 대하여 설명한다. 실험은 유체시료를 담은 용기와 항온조를 이용하여 실시한다. 실험은 2.2절과 다를 것이 없으나 실제로는 유체의 온도를 정확하게 설정하기 위한 세부적인 사항이 많아서 매우 어렵다.

비정상열선법은 정적인 상태의 유체시료에 대한 순간적인 열전도 현상을 이용하는 것이다. 그런데 유체용기에 온도의 불균일이 존재하면 유체 속에 미세한 자연대류 유동(natural convection)을 유발하고 유체용기를 항온조에 직접 넣고 실험하는 경우에는 항온조 내부의 교반기나 냉각기 압축기의 진동에 의한 미소 교란이 존재하게 된다.



**Fig. 3** Temperature rise of sensor wire under the testing mode of change of temperature of thermal bath

이 경우 열전도율이 과다하게 평가되거나 결과가 재현되지 않는 문제들이 발생한다. 항온조를 이용하여 유체의 온도를 새로운 평형상태로 이르게 하는 과정도 많은 시간이 소요된다.

본 연구에서 사용한 장치는 열매체(본 연구에서는 물)의 가열에 사용되는 항온조 그리고 시료 저장 용기 두 부분으로 구성된다. 시료저장용기는 황동으로 제작하였으며 중심에 시료를 담은 부분이 있고 그 외부에는 항온조의 열매체가 순환하여 시료의 온도를 평형에 이르게 하는 구조로 되어있다. 시료저장용기의 외벽은 단열재를 사용하여 외부와의 열교환을 가능한 차단하였다. 실험결과 시료저장용기는 비정상열선법으로 신호가 측정되는 약 3초와 비교해서는 충분히 긴 시간동안 일정하게 시료의 온도를 유지시킬 수 있었다. ( $\Delta T_{ref} = -0.5^\circ\text{C}/\text{min}$  at  $60^\circ\text{C}$ )

Fig. 3은 에틸렌그리콜의 온도를 항온조를 이용하여 바꾸어 가면서 열전도율을 측정한 것이다. 이 경우에 열선의 가열전압  $V_{top}$ 은 모두 3.5Volt를 사용하였다. 3.5Volt는 Fig. 2에서 시험된 여러 가열전압의 결과를 참고하여 결정하였는데 노이즈의 수준이나 전압획득에 문제가 없었다. Table 2는 본 절의 실험에서 열전도율 환산을 위한 수치를 정리한 것이며 Fig. 4는 시험한 기본유체에 대한 실험결과를 모두 표시한 것이다. 실선은 교과서에서 인용한 열전도율 데이터이다. 그림에서 수직으로 표시한 화살표들은 실험방법이 구분되

**Table 2** Summary of experimental conditions under the mode of change of temperature of thermal bath

$T_{ref}$ (°C)	$q/L$ (W/m)	slope	$T_m$ (°C)	$k$ (W/mK)	$\left  \frac{(k_{text} - k)}{k_{text}} \right $ ×100
40.2	4.2043	1.2941	45.0	0.2585	1.02
47.8	4.1841	1.2897	52.7	0.2581	0.03
50.9	4.1728	1.2756	56.0	0.2603	0.58
54.6	4.1655	1.2784	59.5	0.2593	0.08
58.7	4.1530	1.2595	63.8	0.2624	0.85
64.4	4.1354	1.2596	69.5	0.2612	0.17

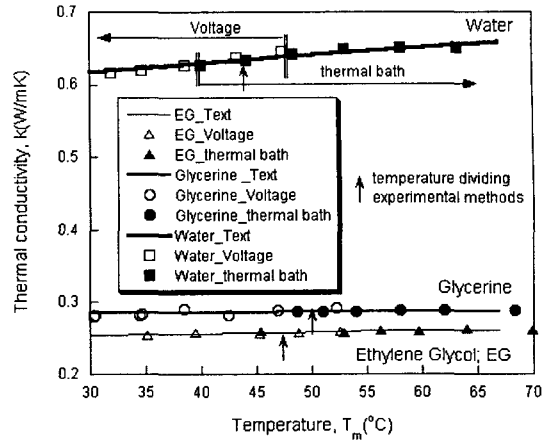
는 중심온도를 나타낸다. 중심온도의 좌측데이터는 가열전압을 조정하는 방법으로 구한 것이며 우측데이터는 항온조를 이용한 실험으로 얻어진 것이다. 중심온도에서 두 실험방법의 데이터가 교차되는 것을 알 수 있다.

유체의 온도의존성을 이용한 두 가지 실험을 통하여 Fig. 4를 완성하였으며 비교적 넓은 온도 범위에 대하여 장치를 검증하였다고 말할 수 있다. 가열전압을 조절하는 방법이 실용적으로 간단하고 시간도 크게 소요되지 않으며 항온조와 같은 특별한 장치도 필요하지 않아서 일차적인 장치의 검증을 위하여 성공적으로 사용될 수 있다고 생각된다. 간단하지만 나노유체 연구자들도 자신의 장치를 가지고 반드시 실시해 보기 바란다.

### 3. 물-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 나노유체 열전도율의 온도의존성 실험

검증된 장치를 이용하여 물-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 나노유체의 온도에 따른 열전도율 변화를 측정해 보았다. 물-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 나노유체를 택한 이유는 입자의 특성이 친수성이어서 물과의 혼합이 쉬워 초음파 분산기 등의 특별한 장치를 사용하지 않고 용기 속에 물과 같이 넣고 흔들기만 해도 비교적 오랜 시간 동안 침전이 심하게 일어나지 않는 분산성이 우수한 나노유체를 만들 수 있기 때문이다. 본 연구에서 사용한 물-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 나노유체 시료는 Das 등의 시료와 거의 동일하다고 말할 수 있다.<sup>(5)</sup>

사실 나노유체의 경우 각 연구자들마다 제조방법이 상이하여 연구결과와의 비교가 어려운 것이



**Fig. 4** Temperature dependence of base fluids measured by the two validation tests proposed in this article

대부분인데 이 경우에는 입자제조사(Nanophase Technology)도 같고 분산성을 위해 다른 화학적 첨가물을 사용하지 않은 것도 동일하여 결과의 비교가 가능하다. Das 등은 상온에서 측정된 시료의 열전도율이 본 연구자의 이전 물-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 결과와 일치하는 것을 확인하여 두 시료가 동일한 것을 확인한 바 있으며 따라서 본 실험에서 제조한 시료가 Das 등의 것과 거의 유사하다고 말할 수 있다. 본 연구에서 사용한 나노유체 제조방법은 입자를 2-liter 생수병에 증류수와 같이 넣어 심하게 흔드는 것으로 단순하다.<sup>(1)</sup>

Fig. 5는 본 연구자들이 제조한 물-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 나노유체에 대한 열전도율의 온도의존성 실험 결과를 나타낸 것이다. 체적농도 4%와 1% 시료에 대하여 가열전압을 조절하는 방법과 항온조를 이용하는 방법으로 실험을 실시하였다. 순수한 물에 대하여 농도가 높을수록 열전도율이 높고 온도 증가에 따라 열전도율이 증가하는 것을 보여주고 있다. 외견상 Das 등의 연구결과와 비슷하다고 판단할 수도 있으나 다음에 설명하는 바와 같이 그들의 결과와 경향이 크게 다른 것을 발견하였다.

Fig. 6은 Fig. 5의 데이터를 동일한 온도에서의 물의 열전도율로 나눈 상대열전도율을 표시한 것이다. Das 등의 결과는 상대 열전도율이 온도증가에 따라 매우 큰 폭으로 증가하는 반면 본 연구의 결과는 그 증가폭이 매우 완만하였다. Fig. 5

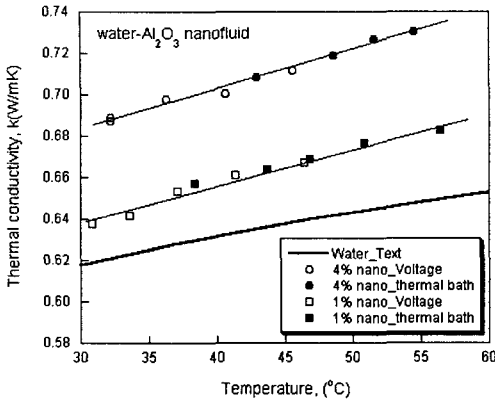


Fig. 5 Temperature dependence of thermal conductivity of water-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid by present work

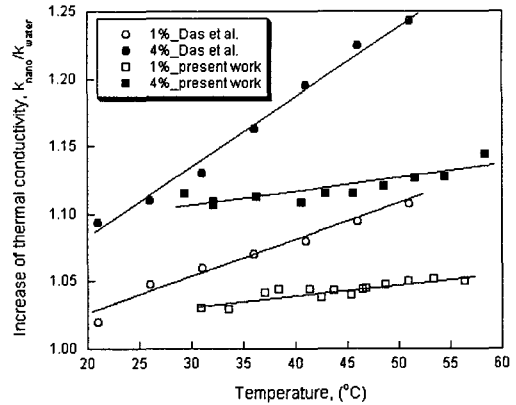


Fig. 6 Temperature dependence of relative thermal conductivity of water-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluids by Das et al. and present work

를 보면 물과 물-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 나노유체의 열전도율이 거의 비슷한 기울기로 선형적인 증가를 보이고 그 차이는 육안으로 구별하기 어려울 정도였다. 따라서 상대 열전도율은 미약하게 증가하는 것으로 나타난 것이다. 만약 Das의 결과가 옳다면 온도증가에 따라 물과의 열전도율 차이가 온도가 높아질수록 더 큰 폭으로 증가해야만 한다.<sup>(5)</sup>

그렇다면 여러 가지 제조상의 차이와 오차를 감안하여도 동일한 나노유체의 열전도율이 크게 다른데 그 가능한 원인에 대하여 생각해 보았다. 첫 번째로 언급하고 싶은 사항은 측정방법이 다르다는 것이다. 비정상열전법은 열전도율을 직접 측정하는 방법이지만 Temperature Oscillation Technique이나 Laser Flash Method는 열확산율(Thermal diffusivity)을 측정하고 식 (6)에 의하여 열전도율을 환산한다. 다르게 표현하면 간접 측정방법인 것이다.

$$k = \alpha \rho C_p \quad (6)$$

여기서  $\alpha$ ,  $\rho$ ,  $C_p$ 는 각각 열확산율, 밀도, 비열을 나타내는데 열확산율을 정확히 측정한다고 해도 나머지 밀도와 비열을 직접 알 수 있는 방법은 없다. Das 등은 물과 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자의 혼합비를 이용하여 비열을 추정하였는데 이것이 정확한지는 확인할 수 없다. 예를 들어 열확산율이 일정한데 밀도와 비열을 크게 예측한다면 열전도율은 증가하는 것으로 계산될 것이다. 이들 장치들은

측정 정확도의 근거로 기본 유체들에 대한 교과서 데이터와의 열전도율 일치를 주장하지만 이 경우에는 밀도와 비열 등의 물성치가 정확히 알려져 있기 때문에 정확한 열전도율 측정이 가능한 것이다. 나노유체의 경우에는 나머지 물성치들이 불명확하므로 열확산율을 측정하여 열전도율을 환산하는 방법은 심각한 측정의 불확실성(uncertainty)을 포함할 수 밖에 없다고 생각된다.

열전도율에 차이를 보이는 두 번째 이유로 초음파 분산기의 사용여부이다. 본 연구의 시료와 Das 등이 제조한 시료 사이의 유일한 차이점은 초음파 분산기의 사용 유무이다. Das 등도 입자 크기를 38.4nm로 보고하였으나 hand shaking 방법으로 제조한 본 연구의 시료와 기계를 사용하여 오랜 시간 입자를 유체속에 혼합시킨 시료사이에는 분산성에 차이가 있을 것으로 추정한다. 브라운 운동효과에 근거하여 입자의 크기가 작고 분산성이 우수할수록 나노유체 열전도율이 증가한다는 이론 결과들이 발표되고 있기 때문에 이와 같이 열전도율에 차이가 발생했다고 추정할 수 있다.<sup>(3,4)</sup>

검토결과 나노유체의 온도의존성에 대한 Das의 결과와 본 실험에서의 측정결과가 많은 차이가 있음을 알 수 있었다. 이와 같은 차이의 원인을 보다 엄밀히 규명하기 위하여 열전도율 이외의 나노유체 물성치에 대한 측정실험이 수행되어야 한다. 특히 나노입자의 분산에 따른 유체 열전도율의 온도의존성의 변화에 대한 연구가 향후 필

요함을 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 기본유체의 온도의존성을 이용하여 비정상열전법 장치의 정밀도를 엄밀하게 시험할 수 있는 방법을 제시하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 제조된 나노유체의 열전도를 측정실험을 실시하기 전에 보유한 장치가 열전도율이 잘 알려진 기본유체의 온도의존성을 정확히 측정해 낼 수 있는지 사전에 검토하는 것이 필요하다.

(2) 열선의 가열전압을 조정하는 방법은 상온근처 낮은 온도에서 기본유체의 온도의존성을 이용하여 장치를 신속하게 검증할 수 있는 방법을 제공한다.

(3) 항온조를 이용한 장치검증방법은 높은 온도에서 장치를 검증하는 방법을 제공한다. 그렇지만 가열전압을 조정하는 방법과 비교하여 시간이 많이 소요되고 유체의 온도조절을 위한 추가적인 장치가 필요하다.

(4) 연구에서 제시한 두 가지 방법으로 보유한 장치를 엄밀히 검증한 후 물-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 나노유체의 온도의존성을 시험한 결과 Das 등의 실험결과와 비교하여 매우 완만하게 온도에 따라 열전도율이 증가하는 결과를 얻었다.

#### 후 기

본 연구는 2006년도 전력산업연구개발사업 “고효율 나노절연유 개발 및 전력기기에의 응용” 과제의 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- (1) Lee, S., Choi, U. S., Li, S., and Eastman, J. A., 1999, "Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles," *ASME Tran. J. Heat Transfer*, Vol. 121, pp. 280~289.
- (2) Kim, S. H., Choi, S. Hong, J. and Kim, D. S.,

2005, "Measurement of the Thermal Conductivity of Alumina/Zinc-Oxide/Titanium-Oxide Nanofluids," *Journal of KSME B*, Vol. 29, No. 9, pp. 1065~1073.

- (3) Jang, S. P. and Choi, U. S., 2004, "Role of Brownian Motion in the Enhanced Thermal Conductivity of Nanofluids," *Applied Physics Letters*, Vol. 84, Issue 21, pp. 4316~4318.
- (4) Lee, D. and Kim, J., 2006, "A New Mechanism for Enhanced Heat Transport of Nanofluid," *Journal of KSME B*, Vol. 30, No. 6, pp. 560~567.
- (5) Das, K. D., Putra, N., Thiesen, P. and Roetzel, W., 2003, "Temperature Dependence of Thermal Conductivity Enhancement for Nanofluids," *ASME Tran. J. Heat Transfer*, Vol. 125, pp. 567~574.
- (6) Incropera, F. P. and DeWitt, D. P., 2001, "Introduction to heat transfer," 4th Ed., Wiley.
- (7) Lee, S., 2006, "Measuring Thermal Conductivity of Nanofluids by Steady State Method," *Journal of KSME B*, Vol. 30, No. 9, pp. 898~904.
- (8) Roder, H. M., 1981, "A Transient Hot-wire Thermal Conductivity Apparatus for Fluids," *Journal of Research of the NBS*, Vol. 86, No. 5, pp. 457~493.
- (9) Perkins, R. A., Roder, H. M. and Nieto de Castro, C. A., 1991, "A High Temperature Transient Hot-wire Thermal Conductivity Apparatus for Fluids," *Journal of Research of the NIST*, Vol. 96, No. 3, pp. 247~269.
- (10) Nagasaka, Y. and Nagashima, A., 1981, "Absolute Measurement of the Thermal Conductivity of Electrically Conducting Liquids by the Transient Hot-wire Method," *Journal of Physics. E: Scientific Instrument*, Vol. 14, pp. 1435~1440.
- (11) Johns, A. I., Scott, A. C., Watson, J. T. R. and Ferguson, D., 1988, "Measurement of the Thermal Conductivity of Gases by the Transient Hot-wire Method," *Phil. Trans. R. Soc. Lond. Vol. A 325*, pp. 295~356.
- (12) Carslaw, H. S. Jaeger, J. C., 1959, "Conduction of Heat in Solids," 2nd Ed., Oxford University Press.