

< 논문 >

## 정상상태 방법을 이용한 나노유체의 열전도율 측정

이 신 표\*

(2006년 5월 10일 접수, 2006년 7월 20일 심사완료)

### Measuring Thermal Conductivity of Nanofluids by Steady State Method

Shin Pyo Lee

**Key Words:** Nanofluids(나노유체), Transient Hot-wire Method(THM, 비정상열선법), Steady State Method(정상상태법), Effective Thermal Conductivity(유효열전도율), AlN(Aluminum Nitride, 질화알루미늄)

#### Abstract

A new method measuring thermal conductivity of fluids is proposed in this research. It is based on the steady state heat transfer from a hot central cylinder to a cold outer cylinder located concentrically. This method guarantees more stable measurement than conventional THM(transient hot-wire method) due to its simplicity of theoretical principle. Measurements was made for the three nanofluid samples with different particle concentration of pure, 2% and 4%. Nanofluids are made by mixing the pure transformer oil with AlN nano particles. Design of the sensor module and experimental procedures are explained and comparison of the measuring data between present method and THM was made in detail.

#### 1. 서론

기존에 사용되어 왔던 열전달 유체에 열전도율이 높은 초미세 금속입자(nano particles)를 소량 첨가하여 혼합유체의 평균적인 열전도율을 상승시키려는 연구가 최근 활발히 이루어지고 있다. 이 새로운 유체를 나노유체라고 부르며 지난 수년간 국내외적으로 다양한 연구가 진행되었다. 연구의 초기에는 나노입자의 종류와 크기, 혼합농도, 기본유체(base fluid, 혼합전 열전달 유체)의 종류에 따른 열전도율 상승데이터를 측정하고 이를 통하여 각 변수들의 영향을 조사하는 연구가 주로 이루어졌다. 발표된 실험결과들을 정리해보면 낮은 혼합농도에서 매우 큰 폭으로 열전도율이 상승된 경우도 보고되고 있으나 초기 Lee 등

의 연구나<sup>(1)</sup> 최근 Kim 등의 연구를<sup>(2)</sup> 종합하면 대체적으로 체적농도 4%에서 약 20% 정도가 현재의 기술로 얻어진 최대 열전도율 상승으로 생각된다.

나노유체의 열전도율 상승효과는 기존의 이론으로 설명할 수 없는 부분이 많았으며 이에 따라 이론연구를 통하여 실험결과를 설명하려는 시도가 많이 이루어졌다. 이론연구에서의 주요 관심사항은 입자의 크기 영향, 혼합유체의 평균온도 상승에 따른 입자의 미세운동(Brownian motion)이 열전도율 상승에 미치는 영향을 설명하는 것이었다. 대표적인 예로서 Jang 등의 연구,<sup>(3)</sup> 최근에 Chon 등의 연구를<sup>(4)</sup> 들 수 있다.

연구의 양적 증가에도 불구하고 지금까지의 성과를 종합하여 볼 때 문제점도 발견된다. 예를 들어 제조조건이 동일한 나노유체에 대해서도 각 연구자들마다 측정결과가 상이하거나 너무 큰 폭으로 상승된 열전도율 데이터가 때때로 발표되기

\* 회원, 경기대학교 기계공학과

E-mail : shinpyo@kyonggi.ac.kr

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

도 한다. 이와 같은 문제는 입자제조 방법, 입자의 안정된 분산을 위한 화학적 처리방법 등의 차이에 의해 부분적으로 발생하지만 나노유체의 열전도율 측정에 사용된 장치 즉, 비정상열선법 센서와 회로, 데이터의 처리과정 등이 각 연구자들마다 다르고 일부 오차가 개입하여 발생하였다고 생각된다. 만약 이와 같은 측정데이터에 오류가 개입된다면 이를 기반으로 전개된 실험상관식이나 이론식의 경우도 당연히 오류를 포함하게 될 것이다.

향후 나노유체와 관련된 연구의 신뢰성 확보를 위하여 측정장치의 교차 검증뿐만 아니라 열전도율이 대폭 향상된 나노유체 시료에 대해서는 별도의 방법으로 측정을 실시하여 결과를 제시하는 것도 매우 흥미있는 일이라고 생각된다. 본 연구자도  $Al_2O_3$ ,  $CuO$  등의 산화물 입자(oxide particles)를 물과 에틸렌그리콜에 혼합하여 제조한 나노유체의 열전도율을 비정상열선법으로 측정한 경험을 가지고 있다. 비정상열선법이 데이터의 정밀도나 측정의 신속성 등을 고려하면 액체의 열전도율을 측정하는 경우 최선의 방법이라고 판단되나 실험자의 숙련도와 실험 내용에 대한 이해 여부에 따라 측정값에는 많은 오차가 개입될 수도 있다.<sup>(5,6)</sup>

최근 본 연구자는 보유한 비정상열선법 장치의 검증을 위하여 레이저섬광법(laser flash method)으로 동일한 나노유체 시료를 측정하여 데이터를 비교한 경험이 있다. 원인은 불분명하나 측정을 의뢰한 국내기관의 경우 교체시료의 경우에는 정확도와 재현성을 가지고 열전도율 데이터를 측정하였으나 나노유체 시료의 경우에는 데이터의 편차가 심하여 장치를 신뢰할 수 없었다. 장비를 제조한 국외기관에 의뢰하여 나노유체 열전도율을 측정한 결과가 본 연구자가 최초 측정한 데이터와 일치하였다. 이상에서 언급한 여러 가지 사실들을 통하여 정확하고 재현성 있는 열전도율 측정이 나노유체 연구를 위하여 필수적 요소임을 다시 한번 확인할 수 있었다.

따라서 본 연구에서는 비정상열선법과 다른 형식으로 작동하는 새로운 열전도율 측정방법을 제시하고 동일한 농도의 나노유체 시료에 대한 측정을 실시하여 데이터를 비교함으로써 향후 비정상열선법 장치를 최종 검증하는 기기로서의 이용가능성을 제시하고자 한다. 본 논문에는 장치의

제작을 위하여 연구 초기단계에서 도입한 설계개념, 이론 및 자료처리방법과 측정 예, 기존 비정상열선법으로 측정한 데이터와의 상호 비교 등이 결과로서 제시될 것이다.

## 2. 정상상태 방법에 의한 열전도율 측정

### 2.1 실험장치의 기본개념

나노유체는 시스템의 열전달 성능향상을 위하여 사용될 물질이다. 그러나 현재까지의 거의 모든 연구가 나노유체의 열전도율 측정과 측정된 데이터를 이용한 이론모델식의 개발에 집중되어 왔다. 나노유체의 열전도율이 높아져서 정적인 상태에서의 열전달 특성이 우수하여도 대류상태에서의 동적인 열전달특성 즉, 대류열전달계수는 순수유체의 경우보다도 낮을 수 있고 그 반대의 경우도 나타날 수 있다. 향후 나노유체의 보급을 위해 관련된 응용연구가 많이 이루어져야 하며 실제 열전달과정 실험을 통하여 열전달 향상이 입증된다면 응용측면에서 그 의미가 크다고 생각된다.

비정상열선법은 액체의 열전도율 측정에 오래 전부터 사용되어 왔으며 그 관련 이론도 잘 알려져 왔다. 그렇지만 장치를 구성하기 위하여 센서 신호의 획득과 데이터 저장 등에 초보적인 전자회로 지식이 사용되는데 단기간에 재현성 있게 이 기술을 구현하는 것이 쉬운 것은 아니다. 그러므로 본 연구에서 제시할 장치는 가능한 한 전자회로의 구성을 필요로 하지 않고 실제 열전달 과정을 통하여 물질의 열전도율을 구하는 방법으로서 측정이론이 단순하여 누구나 직관적으로 이해할 수 있는 방법을 채택할 것이다.

잘 알려진 열전달문제로서 중심이 가열되고 열전달이 반경방향으로 일어나는 원통형 좌표에서의 정상상태 열전달을 생각한다. Fig. 1에 나타난 환상공간 속에 열전달 대상물질이 채워진 경우에 단위길이당 열전달은 원통좌표계에서 1차원 전도 열전달과 유사하게 식 (1)과 같이 표시된다.<sup>(7,8)</sup>

$$\frac{q}{L} = \frac{2\pi k_e (T_s - T_w)}{\ln\left(\frac{r_w}{r_s}\right)} \quad (1)$$

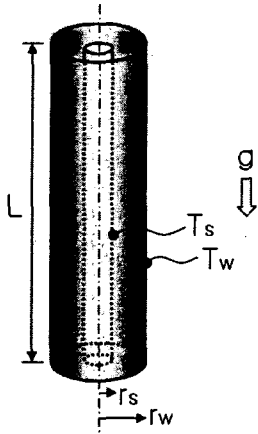


Fig. 1 Heat Transfer from heated wire in concentric cylinder

여기서  $r_s$ 와  $r_w$ 는 환상공간의 내측 및 외측 반지름을 표시하며  $T_s$ 와  $T_w$ 는 각각 내측벽의 온도와 외측벽의 온도이고  $L$ 은 환상공간의 길이이다.  $k_c$ 는 유효열전도율(effective thermal conductivity)로서 열전달이 완전히 전도에 의해서만 일어난다면 물질의 열전도율  $k$ 와 동일하다. 본 연구에서 제시하는 정상상태 열전달 장치의 경우 열선의 가열전류가 유한한 경우 열선주위로 자연대류가 발생하여 항상  $k_c$ 가  $k$ 보다 크게 될 것이나 전류를 0에 가깝게 줄이면서 데이터를 획득하고 최종적으로 전류가 0인 상태를 외삽(extrapolation)하여 추정하면 이때 얻어진 유효열전도율이 액체의 열전도율과 일치하게 됨을 예상한다.

유효열전도율 데이터의 곡선맞춤을 이용하여 물질의 열전도율을 추정하는 방법은 열역학 교과서에 소개되는 이상기체 온도계를 이용한 온도측정방법과 개념적으로 유사하다. 즉, 이상기체 온도계의 경우에 온도계를 구성하는 기체의 종류가 다르면 유한한 압력에서는 유체의 종류에 따라 각각 지시하는 온도가 다르게 된다. 그렇지만 온도계 체적을 채우는 물질의 양을 줄이면서 즉, 압력을 낮추면서 온도데이터를 획득하고 최종적으로 압력이 0으로 접근하도록 외삽한 후 온도를 구하면 기체의 종류에 관계없이 모두 동일한 온도를 지시하게 된다.<sup>(9)</sup>

본 연구의 경우에서도 가열전압에 따른 유효열전도율 데이터를 얻고 가열전압(또는 열선과 유체의 온도차)이 0으로 접근하는 경우에는 근사적

으로 열전달이 전도에 의해서만 이루어지며 이 경우 유효열전도율이 정지한 유체에서의 열전도율에 가까워질 것이라고 가정하고 이를 실험을 통하여 증명하였다.

2.2 실험장치 제작 및 측정

식 (1)에 의한 정확한 유효열전도율 측정을 위해서는 가열체에 공급되는 전류와 전압을 정확히 측정해야 하고 또한 발생한 열이 부차적인 열손실 없이 반경방향으로만 전달되어야 한다. 중심 가열체의 직경이 크면 축방향으로의 전도 열전달 양이 반경방향 열량에 비하여 크게 되므로 직경이 가는 열선이 적합할 것이다.

본 실험장치의 경우, 반지름  $r_s$ 를 갖는 중심의 발열체는 지름  $50 \mu\text{m}$ 의 가는 백금열선(platinum wire)이 사용되었다. 이 백금열선은 가열체인 동시에 저항온도센서(resistance temperature detector)로 작동한다. 열선에서 발생하는 발열량 즉, 전력은 열선양단에 걸리는 전압  $V$ 와 이때 흐르는 전류  $i$ 를 측정하여 계산한다. 즉, 식 (1)에서  $q$ 는 다음 식 (2)로 계산된다.

$$q = i \cdot V \tag{2}$$

가열되어 작동중인 열선의 저항은 오옴의 법칙에 의해 다음의 식 (3)으로 계산된다.

$$R_s = \frac{V}{i} \tag{3}$$

$R_s$ 는 백금센서(platinum sensor)의 저항을 의미하는데 다음 식 (4)와 같은 금속의 저항-온도관계(resistance temperature relation)를 이용하면 열선의 작동온도  $T_s$ 를 식 (5)로 환산할 수 있다.<sup>(6)</sup>

$$R_s = R_0(1 + \alpha T_s) \tag{4}$$

$$T_s = \frac{(R_s - R_0)}{R_0 \alpha} = \frac{(V/i - R_0)}{R_0 \alpha} \tag{5}$$

여기서  $R_0$ 는  $0^\circ\text{C}$ 에서 백금센서의 저항으로 센서의 길이와 직경에 의해 정해지는 값이며  $\alpha$ 는 저항온도계수(resistance temperature coefficient)로서 물질의 고유특성이다. 백금의 경우  $0.0039092^\circ\text{C}$ 로 알려진 고유 상수가 사용된다.

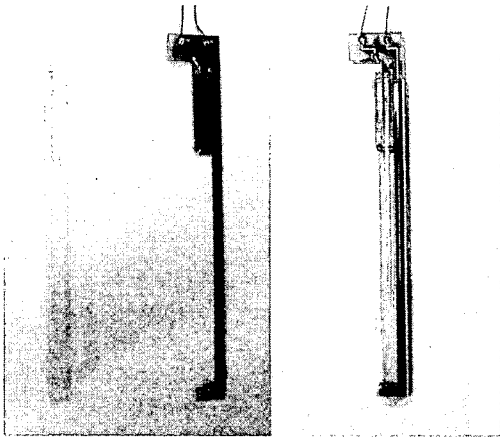


Fig. 2 Sensor module with platinum fine wire on PCB in the glass tube

제작한 센서모듈을 Fig. 2에 나타내었다. 좌측은 나노유체 용기인 내경 15.9mm, 두께 1.01mm, 길이 180mm의 유리 시험관과 센서 PCB를 보여 주며 오른쪽은 이 두 요소가 결합된 모양이다.

백금센서의 길이는 128mm이며 시험관의 중심에 센서가 오도록 센서 PCB의 외경과 시험관의 내경이 같게 PCB를 제작하였다. 센서 PCB를 시험관에 설치하기 전 사포로 미세하게 센서 PCB의 측면을 연마하여 미세하게 다듬었다. 시험관의 하부는 좁아지는 형태가 되어 시험관이 중력과 일치되게 놓인 경우 센서 PCB는 자연스럽게 중력에 대하여 평행하게 놓일 수 있는 구조를 갖는다. 또한 반경방향 열전달이 PCB의 두께 영향을 받지 않도록 백금센서의 하부는 제작한계인 0.4mm 두께로 제작하고 외부와 연결되는 상부는 1.2mm 두께로 제작하였다. 따라서 시험관의 원주 길이와 PCB 두께를 비교하여 이 PCB가 전체 열전달 면적에 미치는 효과는 약 1% 이내로 판단되었다.

$$\frac{PCB\text{두께}}{\text{원주길이}} = \frac{0.4\text{mm}}{\pi \cdot 15.9\text{mm}} = 0.008008$$

측정된 전류와 전압데이터를 이용하여 식 (2)-(5)에 의해 식 (1)에 나타난 발열량  $q$ 와  $T_s-T_w$ 를 계산할 수 있으며 최종적으로 유효열전도율  $k_e$ 를 계산할 수 있다. 실험에 사용한 2% 농도의 나노유체 시료에 대한 기본 데이터의 측정 예를

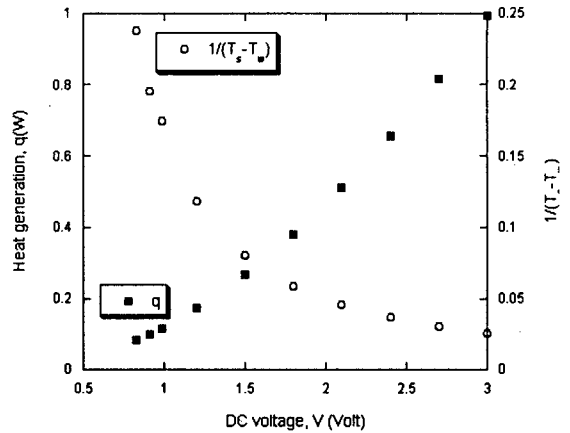


Fig. 3 Heat generation and  $1/(T_s-T_w)$  for 2% nano transformer oil

Fig. 3에 표시하였다. 열선양단에 가하는 전압  $V$ 가 증가함에 따라  $q$ 는 비선형적 증가 그리고  $1/(T_s-T_w)$ 는 비선형적 감소를 보여준다.

전압과 전류의 측정 그리고 열선의 가열에는 Agilent DC power supply 6632B를 사용하였다. 6632B의 경우에 소숫점 이하 4자리 모두 유효숫자를 갖는 가열전류 조건에서만 의미있는 열전도율 측정이 가능했다. 좀더 자세히 예를 들어 설명하면 순수기분유체 실험에서 공칭전압 0.3V에서 0.0408A(3자리 유효숫자)의 전류가 흐르는데 이 전류 수준에서는 정확한 열전도율 산출이 불가능하였다. 그렇지만 전압을 올려 공칭전압 0.9V에서 0.1214A(4자리 유효숫자)의 전류가 흐르는 경우에는 문제없이 열전도율의 산출이 가능했다. Fig. 3에 나타낸 데이터의 하한값은 0.826V, 0.1101A이다.

식 (1)에 사용된  $T_w$ 는 시험관과 접한 유체의 온도로서 엄밀하게는 시험관의 벽을 관통하여 온도센서를 설치하고 측정해야 한다. 그러나 사용한 실린더 벽의 두께와 유리의 열전도율을 고려하면 유리 시험관 내벽과 외벽의 온도차는  $0.05^\circ\text{C}$  이하로서 최종적인 유효열전도율 계산에 미치는 불확실성은 1% 이내였다. 이와 같은 해석결과와 제작의 편이성을 고려하여 시험관 외측에 OMEGA사의 T형 열전대 센서를 설치하였고 Fluke Hydra II multimeter를 이용하여 온도를 측정하였다. 앞으로는 유리 시험관 대신 벽의 두께

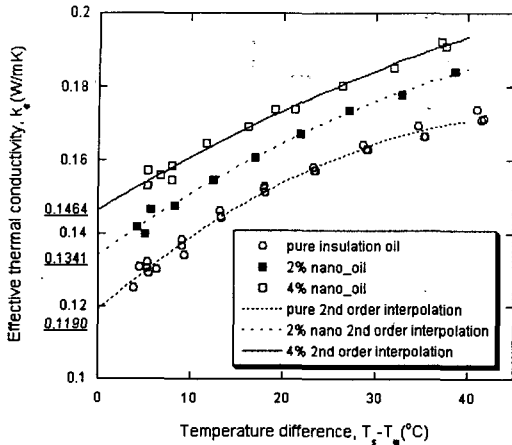


Fig. 4 Effective thermal conductivity of three fluid samples and its curve fitting

가 얇은 금속용기를 사용한다면 온도센서를 벽 외부에 부착하여 발생하게 되는 오차는 극히 미미할 것이다.

측정시험에 사용한 나노유체는 변압기 절연유를 기본유체로 사용하고 여기에 질화알루미늄(AlN, Aluminum Nitride)입자를 혼합한 것이다. 제안된 장치를 이용한 열전도를 측정을 위하여 체적농도 0%의 순수절연유, 2%, 4% 나노절연유 시료를 준비하였다. 시험관에 센서 PCB를 설치하고 백금센서가 유체속에 잠길 정도만 스포이드를 이용하여 시험관에 나노절연유를 채웠다.

이와 같이 준비된 시험관은 4.5리터 용량의 항온조 속에 놓인 후 계획된 설정전압으로 열선을 가열시키며 일정시간 경과 후에 가열전류와 시험관 외부 벽온도가 변동없이 정상상태로 일정하게 유지되는 것을 확인하고 데이터를 기록하였다. 본 연구에서 사용한 열선과 유체용기 그리고 가열전류의 크기는 비정상열선법 측정관련 논문인 참고문헌 (6)에서 사용했던 값과 대략적으로 동일하다. 비정상열선법의 경우 대략 30초 이후에는 열선센서의 온도변화가 없는 것으로 나타나는데 이 시간이후에 장치는 준정상상태에 도달되었다고 판단된다. 그러나 보다 정밀한 실험을 위하여 1개의 정상상태 실험데이터를 획득하는데 대략 1시간의 측정시간을 사용하였다.

Table 1 Comparison of thermal conductivity

samples	pure oil	2% nano	4% nano
method 1	0.1264	0.1376 (+8.9%)	0.1489 (+17.8%)
method 2	0.1190	0.1341 (+12.7%)	0.1464 (+23.0%)
method 3	0.1181	0.1320 (+11.8%)	0.1420 (+20.2%)

method 1: steady state method, 1st order fitting  
 method 2: steady state method, 2nd order fitting  
 method 3: transient hot-wire method

### 3. 결과 및 검토

자연대류 열전달에서 구동력은 다음 식 (6)과 같이 Gr수로 표시된다.<sup>(7)</sup> Gr수는 다른 물성치가 일정하다고 하면 온도차에 비례하므로 유효열전도를 증가를 나타내는 Fig. 4에서 가로축을 열선센서와 시험관 벽의 온도차 ( $T_s - T_w$ )로 그리고 세로축을 유효열전도를  $k_e$ 로 나타내었다.

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_w)r_d^3}{\nu^2} \sim (T_s - T_w) \quad (6)$$

준비된 시료에 대하여 순수절연유, 4% 나노절연유, 2% 나노절연유의 순서로 실험을 실시하였다. 순수절연유에 대하여 가열전압을 0.3볼트씩 증가시키면서 동일한 실험조건으로 2차례 실험을 실시하였고 이후 0.3볼트씩 전압을 낮추면서 1차례 실험을 실시하여 모두 3차례 실험을 실시하였다. 온도를 높이면서 실험하고 낮추면서 실험한 것은 유효열전도를 측정에 있어서 이력현상(hysteresis)이 존재하는지를 알아보기 위함이었으나 특이한 현상은 관찰되지 않았다. 다음으로 4% 나노절연유에 대하여 첫 번째에는 절연유와 동일한 실험조건으로 0.3볼트씩 전압을 증가시키면서 실험하고 두 번째 실험에서는 온도차의 증분을 1.0볼트로 증가시켜 실험을 실시하였다. 마지막으로 2% 나노절연유에 대하여 0.3볼트씩 전압을 증가시켜 실험을 실시하였다.

순수 절연유를 비롯하여 3가지 시료의 경우 모두 온도차가 증가할수록 유효열전도율이 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 가열전압의 증가에 따라 열선과 벽의 온도차가 증가하여 자연대류

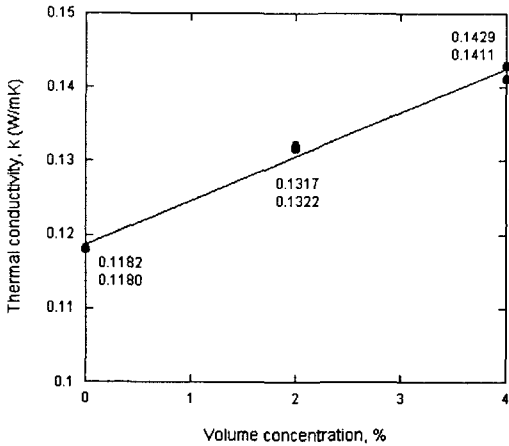


Fig. 5 Measurement of thermal conductivity by transient hot-wire technique

열전달이 활발해졌기 때문이다. Fig. 4에서 온도차 약 20도까지는 농도증가에 따른 유효열전도율 증가폭이 거의 일정하게 나타났다. 그렇지만 그 이상의 온도차에서는 순수절연유 의 경우 유효열전도율 증가가 감소하는 것처럼 보이나 2%, 4% 농도의 나노절연유는 계속 비슷한 증가율을 갖는 것으로 나타났다.

최근의 나노유체 이론은 고온에서 나노유체의 급격한 열전도율 증가의 원인을 브라운운동의 활성화에 따른 입자와 유체사이 또는 입자사이의 상호작용 증가로 설명하고 있다. 본 실험이 실시된 온도차 약 40도의 범위에서 위의 현상을 나노유체 내의 입자 활동도 증가의 증거로 단정하기는 부족하다. 향후 이 효과를 보다 자세히 관찰하기 위하여 더 큰 온도차 또는 고온에서의 유효 열전도율 측정실험이 필요함을 본 결과를 통하여 제안할 수 있다.<sup>(3,4)</sup>

Fig. 4에는 데이터를 2차로 곡선 맞춤한 경우의 y축 절편을 함께 표시하고 있다. 이 값은 열선센서와 벽의 온도차가 줄어들어 자연대류가 일어나지 않는 정적인 조건에서의 유효열전도율을 의미하고 이것이 바로 본 연구에서 제안한 실험장치를 통하여 최종적으로 구하려는 열전도율이 된다. 측정결과를 정리하여 Table 1에 나타내었다. method 1은 정상상태 방법의 데이터를 1차식으로 곡선 맞춤하여 유체의 열전도율을 추정한 것이며 method 2는 정상상태 데이터를 2차식으로 곡선 맞춤하여 구한 것으로 Fig. 4에서의 y축 절편이다.

추하여 구한 것으로 Fig. 4에서의 y축 절편이다.

Fig. 5는 본 연구에서 사용한 동일한 농도의 나노절연유 시료의 열전도율을 비정상열선법으로 2회씩 측정한 결과를 나타낸다. 실험된 농도 범위에서 열전도율이 선형적으로 증가하였으며 결과를 평균하여 method 3에 나타내었다. Table 1에는 각 방법으로 측정한 시료의 열전도율 절대값과 함께 순수절연유 대비 열전도율 상승률이 표시되어 있다. 비정상열선법을 사용한 method 3과 유효열전도율을 2차로 곡선 맞춤하여 열전도율을 추정한 method 2의 측정값이 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 온도차가 0으로 줄어들면 유효열전도율이 유체 열전도율에 접근할 것이라는 장치 설계 초기의 가정이 타당함을 알 수 있다. Fig. 4에서 유효열전도율의 증가 형식은 비선형적이므로 유효열전도율을 1차식으로 곡선 맞춤하여 추정한 method 1의 열전도율은 다른 방법과 차이를 보이게 된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 정상상태 방법으로 나노유체의 열전도율을 측정할 수 있는 방법을 제시하였으며 이 장치를 이용한 측정 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 새로운 나노유체의 제조와 열전도율 측정 과정에서 상당한 정도의 열전도율 상승이 얻어진 경우 다른 측정법을 사용하여 열전도율을 측정하고 비교하는 과정이 반드시 필요하며 이 과정에서 본 연구에서 제시된 장치는 유체의 열전도율 측정에서 기존의 비정상열선법과 함께 상호 데이터의 검증을 위해 효과적으로 사용할 수 있음을 확인 할 수 있었다.

(2) 나노유체의 유효열전도율은 자연대류를 일으키는 구동력인 열선과 시험관 벽의 온도차가 증가할수록 증가하였다. 유효열전도율 데이터를 온도차 0인 경우로 곡선 맞춤하면 이 경우의 유효 열전도율이 비정상열선법으로 측정한 나노절연유 의 열전도율에 접근함을 확인 할 수 있었다.

(3) 낮은 온도차의 경우에는 유효열전도율 증가 폭이 일정하였으나 약 30도 이상의 온도차에서는 순수절연유 의 유효열전도율은 감소하는 경향을 갖는 반면 나노절연유 의 유효열전도율은 증가폭이 둔화되지 않았다. 나노유체의 경우 고온에서

혼합입자의 역할에 대하여 많은 논의가 이루어지고 있는데 이와 같은 관점에서 향후 높은 온도차에 대한 실험이 필요하다고 생각된다.

### 후 기

본 연구는 2005년도 경기대학교 교내연구과제 지원사업에 의하여 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," *Trans. of the 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) Chon, C., Kihm, K. D., Lee, S. and Choi, U. S., 2005, "Empirical Correlation of Finding the Role of Temperature and Particle Size for Nanofluid ( $Al_2O_3$ ) Thermal Conductivity Enhancement," *Applied Physics Letters*, Vol. 87, 153107.
- (5) Roder, H. M., 1981, "A Transient Hot-wire Thermal Conductivity Apparatus for Fluids," *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, Vol. 86, No. 5, pp. 457~493.
- (6) Lee, S., Lee, M., Kim, M. and Oh, J., 2003, "Development of a New Sensor and Data Processing Method in Transient Hot-wire Technique for Nanofluid," *KSME Fall Conference*, pp. 210~215.
- (7) Holman, J. P., 1981, *Heat Transfer*, 5th Ed., McGraw Hill, pp. 289~290.
- (8) Roder, H. M., Perkins, R. A. and Laesecke, A., 2000, "Absolute Steady State Thermal Conductivity Measurement by Use of a Transient Hot-wire System," *Journal of Research of the NIST*, Vol. 105, No. 2, pp. 221~253.
- (9) Zemansky, M. W. and Dittman, 1997, *Heat and Thermodynamics*, 7th Ed., McGraw Hill, pp. 106~108.