

동시에 측정된 두 열선센서의 저항변화 신호를 이용한 나노유체와 기본유체의 열전도율 비교장치

이 신 표**

* 경기대학교 공과대학 기계시스템공학과

Apparatus for Comparing Thermal Conductivity of Nanofluids and Base Fluid Using Simultaneously Measured Resistance Variation Signals from Two Hot Wire Sensors

Shin Pyo Lee**

* Dept. of Mechanical Engineering, Kyonggi Univ.

(Received May 12, 2014 ; Revised September 11, 2014 ; Accepted October 2, 2014)

Key Words: Base Fluid(기본유체), Nanofluids(나노유체), Transient Hot-wire Method(비정상열선법), Thermal Conductivity(열전도율), Absolute Measurement(절대측정), Relative Measurement(상대측정)

초록: 나노유체 개발 초기단계에서 기본유체 대비 제조한 나노유체의 열전도율이 얼마나 상승했는지 그 값을 정확히 비교하는 것이 중요하다. 지금까지는 기본유체와 나노유체의 열전도율을 비정상열선법으로 별도 측정한 후 수치적으로 나누어 비교하는 단순한 방법을 사용하였다. 이 때 두 유체의 열전도율 측정이 동시에 이루어지지 않고 절대측정방법의 특성상 측정시스템의 관련 수치들이 정확히 사용되지 않으면 개별 열전도율에 나타나는 오차를 피할 수 없다. 본 연구에서는 비교대상인 두 유체를 동시에 사용하여 열전도율 비를 상대적으로 측정하는 새로운 방법을 제시하였다. 기존 비정상열선법 회로를 변형한 측정회로와 데이터 처리과정을 자세히 설명하였고 엔진오일과 글리세린을 이용한 검증실험을 통하여 제시된 방법의 타당성을 검토하였다.

Abstract: Exact comparisons of the thermal conductivities of the base fluid and a nanofluid are very important in the early stages of nanofluid development. A simple procedure of measuring the thermal conductivity of the two fluids by the transient hot wire method and numerically dividing these values is used for this purpose. However, because the experiments are not performed simultaneously and the physical properties of the measurement system are sometimes not properly known, large errors are incurred during the evaluation process. This article proposes a new apparatus for thermal conductivity comparison where the working principle is mainly based on relative measurement rather than absolute measurement. The measuring circuit and data processing steps are explained in detail; a validation test was performed using the well-known glycerine and engine oil.

1. 서 론

나노유체는 물, 엔진오일 등 순수유체에 나노미터 크기의 금속입자를 소량 첨가하여 제조한 혼합유체를 말한다. 이 경우 순수유체와 비교하

여 나노유체의 열전도율이 상승한다는 연구결과들이 보고되었고 작동유체로 사용할 경우 열교환 시스템의 소형화, 펌프동력의 감소 등 열교환 시스템의 성능향상을 기대할 수 있어서 관련 연구가 진행되고 있다.^(1~4)

나노유체 열전도율 k_n 의 증가정도를 판단하기 위하여 지금까지는 순수유체와 나노유체의 열전도율을 별도 측정한 후 두 값을 나누어 비교하는

† Corresponding Author, shinpyo@kgu.ac.kr

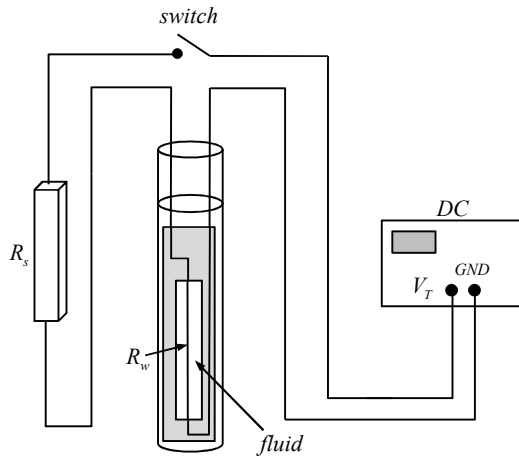


Fig. 1 Schematic of transient hot wire method

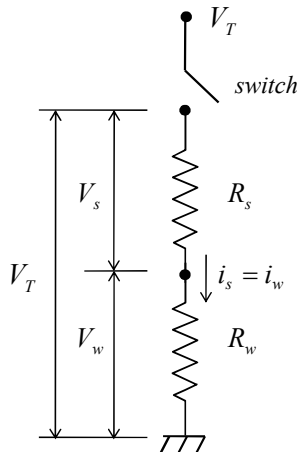


Fig. 2 Equivalent circuit of Fig. 1

방법을 사용하였다. 보통 비정상열선법을 사용하여 열전도율을 측정하는데^(5,6) 이 과정에서 정확한 측정센서의 물성치(온도저항계수, 0°C에서의 센서 저항 절대값, 센서의 길이 등)를 알지 못할 경우 오차가 발생한다. 또한 측정된 전체 데이터에서 일부분을 선택하여 센서의 온도상승기울기를 구해야 하는데 실험자의 방법에 따라 환산된 열전도율은 큰 변동을 보이게 된다.

나노유체 초기 제조단계에서는 크기별 농도별로 여러 종류의 입자를 사용하여 나노유체를 제조하고 열전도율을 측정하게 된다. 이 때 열전도율의 절대값 보다는 순수유체 대비 열전도율의 비율 k_n/k_b 를 정확하고 신속하게 구하여 나노유체 샘플의 유용성을 판단하는 것이 매우 중요하다. k_n/k_b 가 1보다 크게 나타난다면 열전달 유체로서 나노유체의 유용성은 우수할 것이다.^(7,8)

본 연구에서는 기존 비정상열선법 측정방법을 변형하여 상온에서 순수유체 대비 나노유체의 열전도율 상승정도를 비교할 수 있는 새로운 장치와 데이터 처리방법을 제시하였다. 데이터 처리과정에서 사용되는 수식을 통하여 두 유체의 열전도율 비를 측정할 경우 각 센서들의 열물성 데이터들이 상쇄되어 나타나지 않게 됨을 보였다. 또한 동시에 두 센서로부터의 신호데이터를 획득하고 동일한 시간구간의 데이터를 신호처리에 사용함으로써 신호처리의 일관성을 유지할 수 있도록 하였다. 이 두 가지 특징을 갖는 방법에 대하여 이후 자세히 설명할 것이다.

2. 비정상열선법

Fig. 1은 비정상열선법 장치의 개략도를 나타낸 것이다. 열선 센서가 측정대상 유체와 함께 용기에 담겨 있으며 이 센서는 저항값이 알려진 고정 저항 R_s 와 스위치를 통하여 전원과 연결되어 있다. 센서는 발열체 및 온도센서로서 동작하는데 보통 지름 $50\mu m$ 이하의 가는 백금선이 사용된다. Fig. 1에 R_w 로 센서를 표시하였는데 회로에서 저항으로 작용한다. 순간적으로 스위치를 닫으면 가열전류가 흐르기 시작하고 열선에서는 주울열(Joule heating)이 발생한다. 이 열의 일부는 센서 자체의 온도를 높이는데 사용되고 일부는 유체로 전달된다. 유체의 열전도율이 높으면 센서자체의 온도상승은 미미할 것이고 반대로 유체로의 열전도가 작다면 센서의 온도는 크게 상승할 것이다. 이와 같이 시간에 따른 센서의 온도상승정보가 유체의 열전도율과 관련된다는 것이 비정상열선법의 기본이론이다.^(9,10)

Fig. 2는 Fig. 1의 회로도이다. 스위치를 닫는 순간을 포함하여 시간의 경과에 따라 전체전압 V_T 와 센서전압 V_w 를 획득한다. 식 (1)은 비정상열선법에서 열전도율 산출을 위하여 사용하는 기본식이다.

$$k = \frac{q}{4\pi l} \frac{\ln t_2 - \ln t_1}{T_{w2} - T_{w1}} \quad (1)$$

여기서 k , q , l , t , T_w 는 각각 열전도율, 열량, 센서의 길이, 시간, 열선의 온도이며 첨자 1, 2는 측정시작시점, 측정종료시점을 의미한다. 따라서 T_{w1} 과 T_{w2} 는 측정시작 및 종료시점에서의 센서의

온도를 나타낸다. 비정상열선법에 의하면 시간축을 로그축으로 하여 센서의 온도상승을 표시할 경우 직선영역이 얻어지는데 그 직선의 기울기가 식 (1)에서 $(\ln t_2 - \ln t_1)/(T_{w2} - T_{w1})$ 이다.(실제로는 전체 실험데이터의 초기부분, 끝부분을 제외한 중간부분에서 선형데이터가 얻어진다. 초기에는 열용량을 가진 열선의 가열에 따른 시간지연 때문에, 실험의 끝부분에서는 자연대류의 효과가 나타나기 때문이 측정된 신호에서 이 두 부분은 제외한다.)⁽⁹⁻¹¹⁾

q 와 T_w 를 저항과 전류로 표현하면 식 (2), (3)과 같고 이어지는 (4)-(7)은 실제 측정된 V_T 와 V_w 로 이 저항과 전류를 구하는 식을 표현한 것이다.⁽¹²⁾

$$q = i^2 R_w \quad (2)$$

$$(T_{w2} - T_{w1}) = \frac{R_{w2} - R_{w1}}{R_0 \alpha} \quad (3)$$

식 (2)는 저항에서 발생하는 주울열이고 식 (3)은 다음의 식 (4)를 이용하여 센서의 온도변화를 저항변화로 나타낸 것이다. 식 (4)는 센서의 온도저항관계식인데 저항을 측정하면 온도를 알 수 있음을 의미한다. (α 는 센서의 온도저항계수로서 백금선의 경우 $0.0039092/^\circ\text{C}$ 이다.)⁽¹³⁾

$$R_w = R_{w0}(1 + \alpha T_w) \quad (4)$$

식 (2), (3)을 (1)에 대입하면 식 (5)가 얻어진다.

$$k = \frac{i^2 R_w}{4\pi l} \frac{\ln t_2 - \ln t_1}{\left(\frac{R_{w2} - R_{w1}}{R_{w0} \alpha}\right)} \quad (5)$$

식 (5)에서 전류 i 와 센서저항 R_w 는 Fig. 2의 직렬 회로에 오옴의 법칙을 적용하면 다음 식 (6), (7)로 계산할 수 있다. 이것은 두 전압 V_T 와 V_w 를 측정하고 고정저항값 R_s 를 안다면 열전도율을 계산할 수 있음을 나타낸다.⁽¹⁴⁾

$$i = \frac{V_s}{R_s} = \frac{(V_T - V_w)}{R_s} \quad (6)$$

$$R_w = \frac{V_w}{i} \quad (7)$$

서론에서 언급하였듯이 식 (5)를 보면 센서를 흐르는 전류와 저항을 측정해야 할 뿐만 아니라

센서의 길이 (l), 센서의 온도저항계수 (α), 센서의 냉저항 (R_0) 등의 물성치를 사전에 알고 있어야 한다. 또한 데이터를 처리하는 적절한 시간구간 ($t_2 - t_1$)을 선정해야 한다. 많은 노력이 소요되는 예비실험을 통하여 이들 수치들을 확보해야 하고 만약 그렇지 않을 경우 절대측정방법인 기존 비정상열선법에서 오차의 발생은 불가피하다.

3. 열선센서 두 개를 사용한 새로운 측정방법

센서 I이 측정하는 유체의 열전도율을 k_I , 센서 II가 측정하는 유체의 열전도율을 k_{II} 라고 하면 두 유체의 열전도율 비는 식 (1)을 이용하여 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\frac{k_{II}}{k_I} = \frac{q_{II}}{4\pi l_{II}} \frac{4\pi l_I}{q_I} \left(\frac{\ln t_2 - \ln t_1}{T_{w2} - T_{w1}}\right)_{II} / \left(\frac{\ln t_2 - \ln t_1}{T_{w2} - T_{w1}}\right)_I$$

분모 분자의 4π 가 약분되고 식 (4)를 이용하여 $t_2 - t_1$ 동안 센서의 온도변화를 저항변화로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{k_{II}}{k_I} = \frac{q_{II}}{q_I} \frac{l_I}{l_{II}} \left(\frac{\ln t_2 - \ln t_1}{R_{w2} - R_{w1}}\right)_{II} / \left(\frac{\ln t_2 - \ln t_1}{R_{w2} - R_{w1}}\right)_I \frac{(R_{w0} \alpha)_{II}}{(R_{w0} \alpha)_I}$$

온도저항계수 α 는 센서의 고유 물성치이므로 동일한 재질로 센서를 제작하면 $\alpha_I = \alpha_{II}$ 가 되어 정리하면 식 (8)이 된다.

$$\frac{k_{II}}{k_I} = \frac{q_{II}}{q_I} \frac{l_I}{l_{II}} \frac{S_I}{S_{II}} \frac{(R_0)_{II}}{(R_0)_I} \quad (8)$$

여기서 $S = \frac{R_{w2} - R_{w1}}{\ln t_2 - \ln t_1}$ 이다.

열선의 저항은 센서의 길이에 비례하므로 냉저항 $R_{w0}(0^\circ\text{C}$ 에서 열선의 저항)도 길이에 비례한다.

$$R_{w0} \sim l$$

따라서 식 (8)에서 냉저항의 비는

$$\frac{(R_{w0})_{II}}{(R_{w0})_I} = \frac{l_{II}}{l_I}$$

이므로 이것을 식 (8)에 대입하면 센서의 길이 항

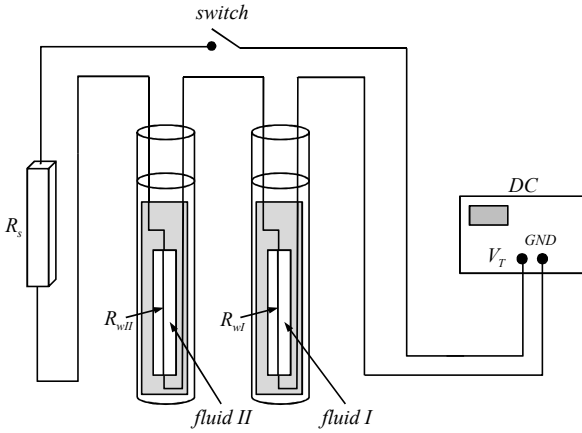


Fig. 3 Thermal conductivity ratio measuring system

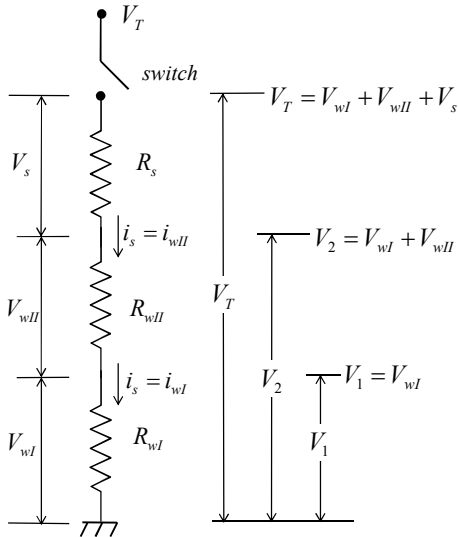


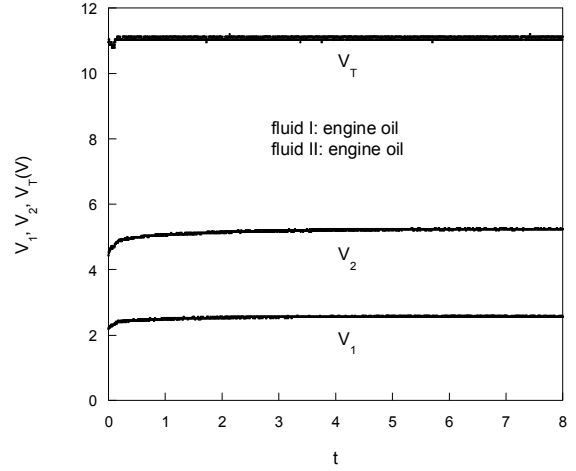
Fig. 4 Equivalent circuit of Fig. 3

은 상쇄되고 최종식은 다음과 같이 표시된다.

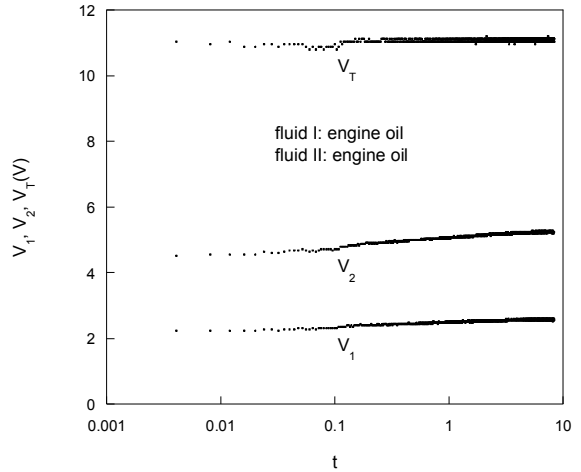
$$\frac{k_{II}}{k_I} = \frac{q_{II}}{q_I} \frac{S_I}{S_{II}} \quad (9)$$

식 (9)에는 각 센서의 길이 및 냉저항이 사용되지 않으며 동시에 측정되고 동일한 시간구간에서 획득된 신호가 사용되므로 시간측정과 관련된 오차는 나타나지 않는다. 따라서 기존 열전도를 절대 측정방법보다 정밀도가 향상될 것으로 예상된다. 4장 후반부에 Fig. 4의 회로구성과 전압측정 그리고 실험수행과 관련하여 식 (9)에 포함되어 나타날 수 있는 두 유체의 열전도를 측정 불확실성을 95%의 신뢰도 수준에서 추정하였다.

본 연구에서는 기존 비정상열전법에 1개의 센서



(a)



(b)

Fig. 5 Voltages from engine oil experiment (a) time in linear scale, (b) time in log scale

를 추가한 Fig 3의 장치를 제안하였다. 센서가 두 개 직렬 연결되어 동일한 전류가 흐르므로 센서의 가열이 동시에 일어나게 된다. Fig. 4는 Fig. 3을 회로로 나타낸 것이다. 식 (9)에서 필요한 전류와 저항은 아래의 식으로 계산한다. 세 전압 V_T , V_2 , V_1 을 측정하고 고정저항값 R_s 를 알고 있으면 다음과 같이 전류와 센서저항을 계산할 수 있다.

$$i = \frac{V_s}{R_s} = \frac{(V_T - V_2)}{R_s} \quad (10)$$

$$R_{wII} = \frac{V_{wII}}{i} = \frac{(V_2 - V_1)}{i} \quad (11)$$

$$R_{wI} = \frac{V_{wI}}{i} = \frac{(V_1)}{i} \quad (12)$$

3. 측정방법의 검증

본 연구에서 제안된 장치와 데이터 처리방법을 검증하기 위하여 두 종류의 실험을 실시해 보았다. 먼저 한 종류의 유체(여기서는 엔진오일)를 Fig. 3에 보인 두 개의 측정용기 속에 넣고 신호를 획득하여 열전도율을 비교해 보았다. 본 연구에서 제안한 방법 및 장치가 올바르게 작동한다면 결과로 얻어진 열전도율의 비는 1이 되어야 할 것이다. 다음에 글리세린과 엔진오일을 사용하여 그 열전도율 비를 측정해 보았다. 300K에서 교과서⁽¹⁵⁾에 나와 있는 엔진오일과 글리세린의 열전도율은 각각 0.145W/mK, 0.286W/mK로 두 열전도율의 비는 대략 두배(0.286/0.145=1.9724)정도이다. 열전도율이 알려진 두 유체의 열전도율 비가 적절히 얻어지는 지를 검토하였고 마지막으로 엔진오일과 금속입자를 혼합하여 제조한 나노엔진오일의 열전도율 비를 측정하여 이전 연구에서 비정상열전법으로 각각 측정한 후 나누어 얻은 열전도율 비와 비교해 보았다.

4. 결과 및 검토

Fig. 5(a)는 Fig. 3에서 fluid I, II가 엔진오일로 동일한 경우 획득한 전압으로서 Fig. 4의 V_1 , V_2 , V_T 를 나타낸 것이다. V_T 는 직류전원에서 설정한 전압으로 일정하며 V_1 , V_2 는 시간에 따라 증가한다. Fig. 5(b)는 (a)의 데이터를 시간축만 로그축으로 나타낸 것이다. 비정상열전법은 획득된 데이터의 시간축을 로그축으로 나타낼 때 선형적인

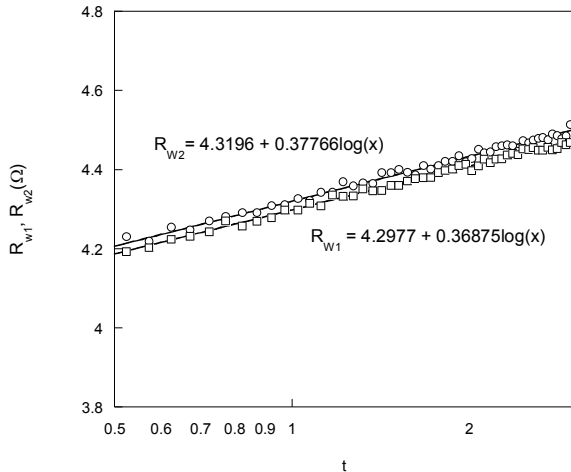


Fig. 6 Resistances changes from 0.5 to 3 seconds out of Fig. 5

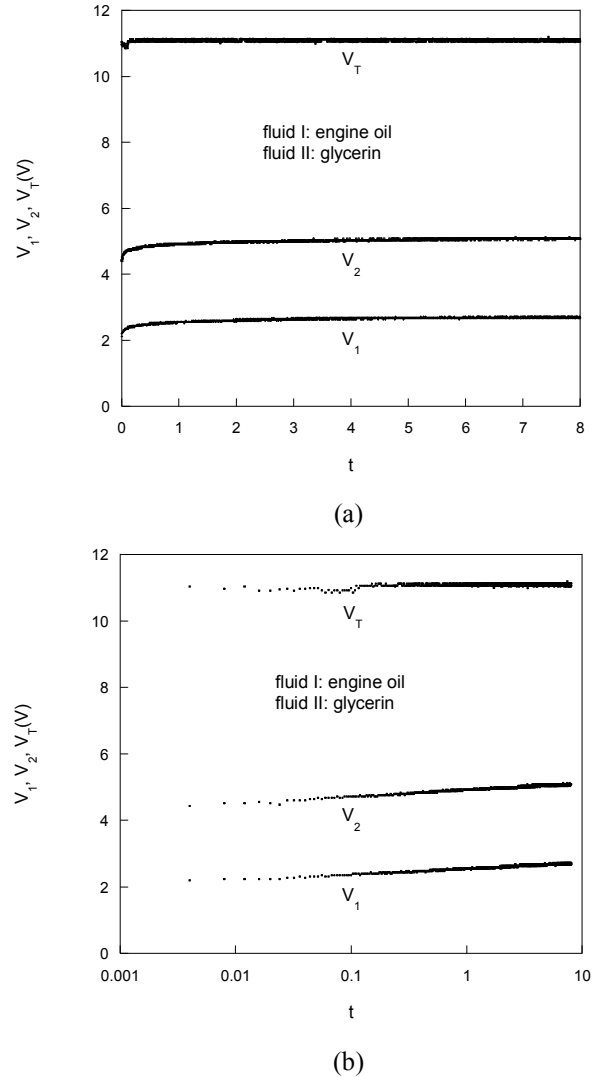


Fig. 7 Voltages from engine oil-glycerin experiment (a) time in linear scale, (b) time in log scale

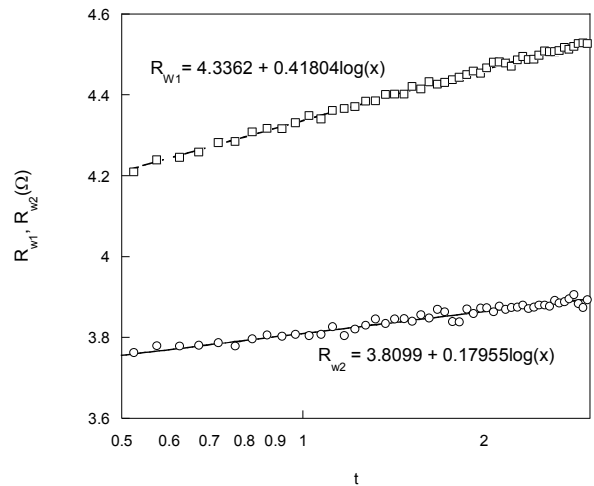


Fig. 8 Resistances changes from 0.5 to 3 seconds out of Fig. 7

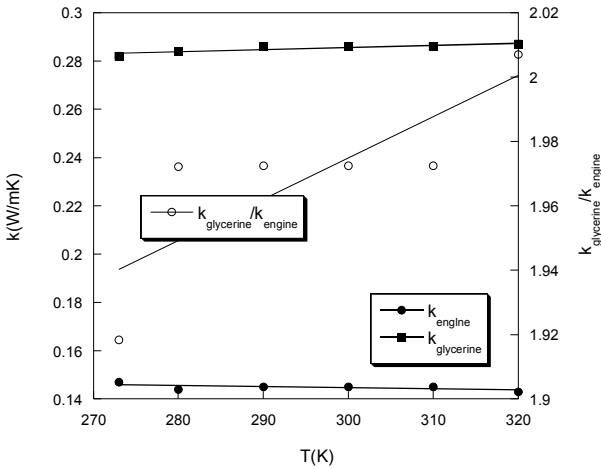


Fig. 9 Thermal conductivity variations of engine oil and glycerin with temperature

구간이 얻어지는데 이 구간의 온도상승 데이터를 이용하여 열전도율을 환산한다. 실험데이터에서 선형적인 구간이 명확하게 나타나는 것은 실험이 적절하게 이루어졌음을 표시한다. Fig. 6은 0.5초에서 3초 사이의 구간 데이터를 이용하여 식 (9)에서 필요한 열선의 저항변화 기울기 S를 구한 것이다.

0.5초에서 3초 동안 두 센서에서 발생하는 평균열량은 $q_I=1.5252$, $q_{II}=1.5346$ Watt로 계산되었다. 식 (9)를 통하여 열전도율 비율을 측정하면 아래와 같이 0.9824이 얻어진다. 사실 이 값은 정확히 1이 되어야 한다. 유체가 동일하고 두 개의 센서가 경험하는 열적 환경이 동일하므로 1이 되어야 하는 것이다. 현재로서는 이 장치가 약 2%의 오차를 보인다고 말할 수 있다.

$$\frac{k_{II}}{k_I} = \frac{k_{engine}}{k_{engine}} = \frac{1.5346}{1.5252} \cdot \frac{0.36875}{0.37766} = 0.9824$$

다음으로 Fig. 7(a)는 Fig. 3의 fluid I과 II로 표시한 용기에 각각 엔진오일과 글리세린을 넣고 측정한 것이며 (b)는 시간축을 로그로 표시한 것이다. 0.5에서 3초 사이의 데이터를 이용하여 얻은 두 센서의 저항변화 기울기를 Fig. 8에 표시하였다. 두 센서에서 발생하는 평균열량은 각각 $q_I=1.6744$, $q_{II}=1.4333$ Watt이다. 식 (9)에 이들 수치를 대입하면 글리세린과 엔진오일의 열전도율 비는 1.9930로 얻어진다.

$$\frac{k_{II}}{k_I} = \frac{k_{glycerin}}{k_{engine}} = \frac{1.4333}{1.6744} \cdot \frac{0.41804}{0.17955} = 1.9930$$

Table 1 Calculation of thermal conductivity ratio with heat generation and slope data from nano and base engine oil

sample	q_{II} (nano)	S_{II} (nano)	q_I (base)	S_I (base)	k_n/k_b
0.5 vol%	1.5143	0.3380	1.5550	0.3786	1.0907

Fig. 9는 글리세린과 엔진오일의 열전도율과 이들의 비를 온도에 따라 나타낸 것이다. 온도증가에 따라 엔진오일의 열전도율은 감소하고 글리세린의 열전도율은 증가하므로 $k_{glycerin}/k_{engine}$ 은 증가하게 된다. 300K(27°C)에서 두 유체의 열전도율 비는 1.97이지만 320K에서는 거의 2근처까지 증가한다.⁽¹⁵⁾ 비정상열선법 실험 중에 유체의 온도는 일정하지만 열선의 발열로 인하여 열선의 온도는 증가하게 된다. 따라서 측정된 열전도율은 실험이 실시된 시간구간에서 열선의 온도를 평균하고 다시 유체온도와 평균된 온도에서의 값이 된다. 위에서 얻어진 1.9930이 수치는 이 효과가 반영된 수치로 생각된다. 향후 열전도율비에 미치는 온도(유체온도, 실험조건에 따른 센서온도)의 영향을 자세히 검토할 필요가 있다.

다음의 Table 1은 나노엔진오일과 순수엔진오일의 열전도율비를 측정된 것이다. 나노엔진오일은 순수엔진오일에 0.5 vol%로 graphite입자를 혼합하여 제조한 것이다. 입자의 평균직경은 55nm이다.⁽¹⁶⁾ 이전 연구에서 비정상열선법으로 측정하였을 때 15%의 열전도율 상승이 나타났었는데⁽¹³⁾ 이와 비교하면 본 장치로 측정된 열전도율 비는 9.07% 증가로 낮게 측정되었다. 이와 같은 증가율의 차이는 측정방법 및 시료와 관련이 있다고 추정된다. 열전도율의 절대값 측정방법은 센서의 물리량 및 시간에 따른 전압측정과 관련하여 측정 불확실성이 발생하므로 정밀한 측정기기를 사용하지 않을 경우 증가율도 부정확하게 예측될 수 있다. 나노유체시료는 이전 연구에서 제조한 시료를 사용하였는데 입자의 뭉침과 이에 따른 침전 등 분산특성을 저하시키는 aging문제가 열전도율의 감소로 나타났다고 설명할 수 있다.

식 (9)에서 열량은 전압과 전류의 곱으로 바꾸어 쓸 수 있고 Fig. 4에서 전류는 동일하게 흐르므로 분모와 분자에서 상쇄된다. 두 열전도율의 비를 기호 K로 표시하면 K는 두 개의 전압과 두

개의 온도상승의 기울기의 함수가 된다.

$$K = \frac{k_{II}}{k_I} = \frac{i V_{II} \cdot S_I}{i V_I \cdot S_{II}} = \frac{V_{II} \cdot S_I}{V_I \cdot S_{II}}$$

$$K = K(V_I, V_{II}, S_I, S_{II}) = V_I^{-1} \cdot V_{II} \cdot S_I \cdot S_{II}^{-1}$$

$w_{V_I}, w_{V_{II}}, w_{S_I}, w_{S_{II}}$ 를 V_I, V_{II}, S_I, S_{II} 의 변수들이 가진 불확실성이라고 하면 K에 포함된 상대불확실성은 식 (13)으로 표시될 수 있다.⁽¹⁷⁾

$$\frac{w_K}{K} = \left[\left(\frac{w_{V_I}}{V_I} \right)^2 + \left(\frac{w_{V_{II}}}{V_{II}} \right)^2 + \left(\frac{w_{S_I}}{S_I} \right)^2 + \left(\frac{w_{S_{II}}}{S_{II}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (13)$$

각 변수들에는 random 특성을 갖는 A형 불확실성과 bias 특성을 갖는 B형 불확실성이 포함되어 있다. 본 연구에서는 글리세린과 엔진오일에 대한 30회의 측정실험에서 표준편차를 구하고 식 (14)에 의하여 A형 불확실성을 추정하였다. 여기서 N은 30이고 σ_{x_i} 는 변수들의 표준편차이며 t는 95% 신뢰수준으로 추정할 경우 2가 사용된다. 전압의 bias 특성은 0V와 10V 두가지 직류입력에 대하여 데이터를 획득하여 평균한 후 입력과의 차이를 계산하여 B형 불확실성을 구하였다.⁽¹⁷⁾

$$S_{x_i} = t \frac{\sigma_{x_i}}{\sqrt{N}} \quad (14)$$

A형과 B형 불확실성은 Root Sum Square방법으로 합산하여 각 변수들에 포함된 불확실성을 구하였는데 온도상승 기울기는 차이에 해당하므로 A형 불확실성만 고려하였다. Table 2는 K의 불확실성을 계산한 것으로 95% 신뢰수준에서 K에 포함된 상대불확실성은 1.604%로 추정된다.

Table 2 Uncertainty analysis for K

x_i	value	random $S_{x_i} = t \frac{\sigma_{x_i}}{\sqrt{N}}$	bias B_{x_i}	w_{x_i} $(B_{x_i}^2 + S_{x_i}^2)^{1/2}$	$\left(\frac{w_{x_i}}{x_i} \right)^2 \times 10^5$
V_I	2.5582	0.01426	0.00267	0.014508	3.216
V_{II}	2.2170	0.01536	0.00241	0.015548	4.918
S_I	0.41272	0.002381	-	0.002381	3.328
S_{II}	0.18023	0.002155	-	0.002155	14.29
K=				$\sqrt{\sum} \times 100 =$	
1.9845				1.604%	

5. 결론

두 유체의 열전도율 절대값을 측정하는 대신 그 비를 측정하는 새로운 방법을 제시하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 이론식의 전개 및 두 가지 검증실험을 통하여 본 연구에서 제시한 새로운 회로와 데이터 처리 방법은 두 유체의 열전도율 비를 측정하는 방법으로 타당하다고 판단된다.

(2) 동일한 유체로 열전도율을 비교할 경우 그 비는 온도조건 등에 관계없이 항상 1이 얻어져야 하므로 장치의 타당성을 검증할 수 있는 중요한 수단이 된다.

(3) 본 연구에서 시도하였던 엔진오일과 글리세린과 같이 열전도율이 알려진 유체로 두 유체의 열전도율을 비교하는 것은 장치의 검증을 위해 유용한 수단이 될 수 있다. 단, 온도변화에 따른 이들 유체의 열전도율 변화효과를 추가적으로 고려해야 한다.

(4) 제한적인 실험을 통하여 나노유탄유와 순수 유탄유 열전도율 상승정도를 예시적으로 측정하였으며 제시된 방법이 나노유체 개발단계에서 유용하게 쓰일 수 있음을 확인할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2012학년도 경기대학교 교내연구비 수혜로 연구되었음.

참고문헌 (References)

- (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) Yang, Y., Zhang, Z. G., Grulke, E. A., Anderson, W. B. and Wu, G., 2005, "Heat Transfer Properties of Nanoparticle-in-fluid Dispersions (nanofluids) in Laminar Flow," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, pp. 1107~1116.
- (3) Xuan, Y. and Li, Q., 2003, "Investigation on Convective Heat Transfer and Flow Features of Nanofluids," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 125, pp. 151~155.
- (4) Wen, D. and Ding, Y., 2004, "Experimental

- Investigation into Convective Heat Transfer of Nanofluids at the Entrance Region under Laminar Flow Condition," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 5181~5188.
- (5) 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. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 29, No. 9, pp. 1065~1073.
- (6) 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.
- (7) Lee, D. and Kim, J., 2006, "A New Mechanism for Enhanced Heat Transport of Nanofluid," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 30, No. 6, pp. 560~567.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) 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.
- (12) Lee, S., 2008, "Measuring Convective Heat Transfer Coefficient Around a Heated Fine Wire in Cross Flow of Nanofluids," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 32, No. 2, pp. 117~124.
- (13) Lee, S., 2011, "An Experimental Apparatus Measuring Convective Heat Transfer Coefficient from a Heated Fine Wire Traversing in Nanofluids," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 25, No. 1, pp. 135~142.
- (14) Lee, S., 2012, "Measuring Convective Heat Transfer Coefficients of Nanofluids over a Circular Fine Wire Maintaining a Constant Temperature," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 36, No. 1, pp. 9~16.
- (15) Incropera, F. P. and DeWitt, D. P., 2001, Introduction to heat transfer, 6th Ed., Wiley, A-20.
- (16) Lee, C., Hwang, Y., Choi, Y., Park, M., Lee, J., Choi, C. and Oh, J., 2008, "Comparative Study to the Tribological Characteristics of Graphite Nano Lubricants after Thermal Degradation," *Journal of the KSTLE*, Vol. 24, No. 4, pp. 190~195.
- (17) Moffat, R. J., 1988, "Describing the Uncertainties in Experimental Results," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol 1, pp. 3~17.