

나노유체의 열확산율 측정을 위한 비정상열선법 센서모듈 실험

이 신 표*

* 경기대학교 기계시스템공학과

An Experimental Study of Transient Hot-wire Sensor Module for Measuring Thermal Diffusivity of Nanofluids

Shin Pyo Lee*†

* Dept. of Mechanical System Engineering, Kyonggi Univ.

(Received March 15, 2010 ; Revised October 19, 2010 ; Accepted November 3, 2010)

Key Words: Nanofluids(나노유체), Thermal Diffusivity(열확산율), Thermal Conductivity(열전도율), Transient Hot-wire Method(비정상열선법)

초록: 본 논문은 나노유체의 열확산율을 측정하는 센서와 주변회로 그리고 데이터의 처리방법을 제시한 것이다. 기존 비정상열선법을 이용하면 이론상 유체의 열전도율과 열확산율을 동시에 측정할 수 있으나 열전도율과 비교하여 열확산율은 많은 오차가 발생한다. 본 연구에서 제시한 방법은 측정변수가 단순하고 복잡한 센서의 교정과정을 생략할 수 있는 실용적 측면의 장점이 있다. 먼저 열확산율이 잘 알려진 유체들에 대한 검증실험을 실시하였고 나노유체의 열확산율을 측정하여 기본유체와 비교하는 과정을 예시적으로 설명하였다. 본 연구는 기존 열전도율측정에 한정되어 왔던 나노유체 연구의 범위를 열확산율 또는 비열의 개념으로 확장하였다는 관점에서 중요성을 갖는다.

Abstract: A technique for measuring the thermal diffusivity of nanofluids is proposed in this study. In theory, it has been well known that the transient hot-wire method can be used to measure the thermal conductivity and diffusivity of fluids simultaneously. However, when traditional methods were employed, the accuracy of the calculated thermal conductivity was considerably higher than that of diffusivity. The proposed method has two advantages for practical use: it only needs a simple data-conversion process for calculating the diffusivity, and it can skip the tedious calibration process involved in the case of a wire sensor. A validation experiment for the new system has been performed with the basic fluids, and the comparison experiment to compare the change in diffusivity of the base oil and the change in diffusivity of the nano oil has been carried out. It is expected that the present system will provide numerous methods for investigating the variation in the thermal properties other than thermal conductivity.

1. 서 론

본 논문은 유체의 열확산율을 정밀하게 측정하기 위한 장치의 개발에 관한 것이며 개발된 장치는 나노유체의 열물성 연구에 도움을 줄 것으로 기대된다.

나노유체는 물, 엔진오일 등 기존 열전달유체에 나노미터 크기의 금속입자를 혼합하여 제조한 유체를 말한다.⁽¹⁾ 금속입자의 열전도율은 유체의 열전도율과 비교하여 보통 수백 배 높기 때문에 미세 금속이 혼합된 유체의 열전도율은 순수유체

와 비교하여 매우 높을 것으로 예상할 수 있다. 지난 10여년 동안 혼합입자의 크기, 혼합농도, 순수유체 또는 혼합입자의 열전도율, 유체 평균온도 등 다양한 변수들을 고려한 연구가 수행되었다.⁽²⁻⁵⁾

지금까지 나노유체 열전도율 물성 측정과 관련하여 비정상열선법은 가장 중요한 측정수단이었다. 수직으로 놓인 가는 열선에서 유체로의 과도 열전달 현상에 대한 Carslaw와 Jaeger의 해석해가 비정상열선법의 측정근거를 제시한다. 이 방법을 이용하면 이론상 열전도율뿐만 아니라 열확산율 측정도 가능하다.⁽⁶⁻⁸⁾ Nagasaka와 Nagashima⁽⁹⁾는 toluene에 대하여 이와 같은 동시 측정 방법을 최

† Corresponding Author, shnpyo@kgu.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

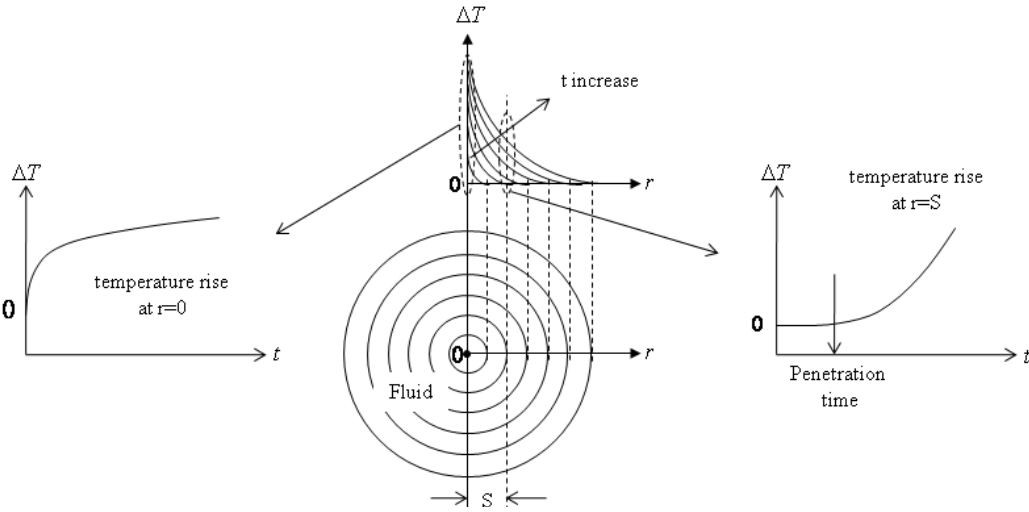


Fig. 1 Temperature rise in the fluid at r=0 and r=S

초로 시험하였다. 이 경우 열전도율과 열확산율의 오차는 각각 0.5%와 5%였다. Glatzmaier와 Ramirez⁽¹⁰⁾는 글리세린의 열전도율과 열확산율을 측정하였으며 오차는 각각 0.4%와 4.5%로 나타났다. 전기전도성 성질을 갖는 용융염에 대한 열물성 측정은 Zhang과 Fujii⁽¹¹⁾에 의하여 수행되었다. 열전도율과 열확산율이 갖는 오차는 3%, 20%로 비전도성 물질과 비교하여 매우 높게 나타났다. Jwo와 Teng⁽¹²⁾은 물과 에틸렌그리콜을 기본유체로 여기에 구리입자를 혼합한 나노유체의 열물성을 측정하였다. 열전도율은 기본유체와 비교하여 거의 동일하나 나노유체의 열확산율이 크게 증가하는 결과를 제시하였다. 반면 Zhang, X. 등⁽¹³⁾은 나노유체의 열전도율과 열확산율이 기본유체와 비교하여 거의 변하지 않는 데이터를 제시하였다. 지금까지의 결과를 보면 비정상열선법에 의한 측정에서 열전도율은 대략 1% 이내의 오차를 갖는다. 반면 열확산율은 매우 정밀한 계측기를 사용하여도 보통 6% 이상의 높은 오차가 나타난다고 보고되었다. 이것은 주로 센서에 대한 교정과정에서의 오차와 측정 후 자료처리과정의 복잡함 때문이다.⁽⁷⁻⁹⁾

열확산율은 열시스템의 과도적인 특성을 해석하는데 필수적인 데이터이며 다음의 식 (1)과 같이 정의된다.

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \tag{1}$$

지금까지 나노유체의 열물성 연구가 오직 열전도

율 측정에만 집중되어 왔다. 이와 비교하여 열확산율을 정확히 측정할 수 있는 방안이 제시된다면 나노유체의 비열과 밀도를 간단히 추정할 수 있는 다른 수단이 제공되므로 물성 연구의 다양성이 더욱 확대될 것으로 기대된다.

본 논문에서 제시될 방법은 기존 방법과 비교하여 여러 가지 장점을 갖는다. 먼저 센서의 교정과정 즉, 온도에 따른 저항변화특성을 파악하기 위한 예비 실험단계가 불필요하다. 이 과정은 보통 온도가 정밀하게 제어되는 항온조, 고정밀도의 저항측정기가 필요하고 시간이 많이 소요되는데 이 과정이 생략될 수 있다. 또한 측정회로 구성에 사용되는 직류증폭기와 브릿지회로의 특성과악이 불필요하다. 장치에서 얻어진 최종 신호를 이용하여 열확산율이 잘 알려진 기본 유체들에 대한 교정과정을 거치므로 중간단계에서 오차가 개입되지 않는다. 본 연구에서는 열확산율이 알려진 엔진오일과 글리세린에 대한 측정실험을 실시하였다. 이를 통하여 제시된 방법의 타당성을 검증하였고 나노유체 샘플에 대한 열확산율 측정을 예시하였다.

2. 측정원리와 실험장치

2.1 기존 비정상열선법의 열확산율 측정원리

정지된 유체 속에 잠겨 있는 수직 금속열선에 순간적으로 전류가 흐르면 주열열이 발생하고 이 열은 반경방향으로 퍼져 나가는데 이 현상을 묘사한 것이 Fig. 1이다. 좌측은 중심부 그리고 우

측은 중심에서 S만큼 떨어진 위치에서의 온도상승 개략도이다. 초기상태로부터 유체의 과도적 온도변화관계식은 다음과 같이 표시된다.⁽⁶⁻⁸⁾

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi k} E_1\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right) \quad (2)$$

$$E_1(x) = \int_x^\infty x^{-1} \exp(-x) dx$$

여기서 ΔT 는 초기상태로부터 유체의 온도상승, q 는 센서의 단위길이당 열발생량, k 는 열전도율, r 는 열원으로부터의 거리, α 는 열확산율, t 는 시간을 나타낸다. 식 (2)는 이론상 r 과 t 의 제한이 없이 모든 영역에서 만족된다. 이에 대하여 열선과 접한 유체에 적용가능한 근사해는 다음의 식 (3)과 같이 표시할 수 있음이 잘 알려져 있다.

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi k} \ln\left(\frac{4\alpha t}{a^2 C}\right) \quad (3)$$

여기서 C 는 상수(=1.781)이다. 식 (3)을 개략적으로 표시하면 Fig. 1의 좌측 그래프와 같다. 식 (4)는 식 (3)을 전개한 것인데 획득된 ($t, \Delta T$) 데이터를 변환하여 ($\ln(t), \Delta T$)로 나타내면 로그함수 형태의 곡선을 직선으로 변환하여 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta T &= \frac{q}{4\pi k} \ln t + \frac{q}{4\pi k} \ln\left(\frac{4\alpha}{a^2 C}\right) \\ &= A \ln t + B \end{aligned} \quad (4)$$

이때 기울기 A 는 열전도율의 정보를 가지고 있고 절편 B 는 열확산율의 정보를 가지고 있다. $t=1$ 이면 $\ln(1)=0$ 이고 $\Delta T=B$ 가 되므로 $B = \frac{q}{4\pi k} \ln\left(\frac{4\alpha}{a^2 C}\right) = A \cdot \ln\left(\frac{4\alpha}{a^2 C}\right)$ 로부터 열확산율 계산을 위한 식 (5)가 얻어진다.⁽⁹⁾

$$\alpha = \frac{a^2 C}{4} \exp\left(\frac{B}{A}\right) \quad (5)$$

식 (4)에서 기울기 A 는 다음과 같다.

$$A = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln t_2 - \ln t_1} \quad (6)$$

실제 측정에서 시간 t 에는 오차가 거의 포함되

지 않는다. 그러나 열선의 온도(wire temperature, T_w)는 식 (7)에 표시한 열선의 온도저항 관계식을 통하여 저항(wire resistance, R_w)을 측정한 후 온도로 환산되는데 이 과정에서 열선의 냉저항 R_0 , 열선의 온도저항계수 β 의 정확도에 따라 환산되는 온도에 오차가 포함된다.⁽¹⁴⁾ (금속의 온도저항계수로 보통 기호 α 를 사용하나 본 논문에서는 열확산율 α 와의 중복문제 때문에 기호 β 를 사용하였다.)

$$R_w = R_0(1 + \beta T_w) \quad (7)$$

열전도율의 정보를 가지고 있는 A 의 표현식 (6)에서 분자는 온도상승의 차이로 표시된다. 따라서 측정된 온도에 오차가 존재하여도 그 오차가 일부 상쇄되어 최종적인 열전도율에 오차가 확대되어 나타나지는 않는다. 그러나 열확산율의 경우에는 온도환산과정의 오차가 B 에 그대로 전달되어 식 (5)를 거치며 매우 큰 오차로 나타나게 된다.

2.2 열확산율 측정원리와 센서모듈

기존 방법과 다른 열확산율 측정방법을 검토하였는데 그 출발은 열확산율을 수식에 포함하면서 기존의 관련식 (예를 들면 식 (3))과는 다른 형태의 식을 검토해 보는 것이었다. Fig. 1의 우측 그래프는 중심부와 거리 S만큼 떨어진 위치에서의 온도상승 그래프인데 좌측과 그 형태가 전혀 다르다. 따라서 온도상승 관계식도 서로 다를 것으로 예상할 수 있다. 엄밀해인 식 (2)로부터 거리 S만큼 떨어진 지점에서 유체의 온도상승을 나타내는 근사해를 구해본다.

식 (2)의 함수 $E_1(x)$ 를 Mathcad s/w를 이용하여 데이터를 구하면 Fig. 2와 같고 지수함수로 곡선 맞춤하면 식 (8)로 표시할 수 있다. 본 연구에서 시험한 센서모듈에서 중심부 히터와 온도센서 사이의 간격 S는 3mm이고 엔진오일의 열확산율은 $0.859 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ 그리고 측정시간은 10초 이내였다. 이 수치들을 사용하여 식 (8)의 x 를 구해보면 2이상으로 데이터와 근사식이 잘 일치하는 영역에 해당된다.

$$\begin{aligned} E_1(x) &\approx 0.59141 \cdot \exp(-1.2048x) \\ x &= \frac{r^2}{4\alpha t} \end{aligned} \quad (8)$$

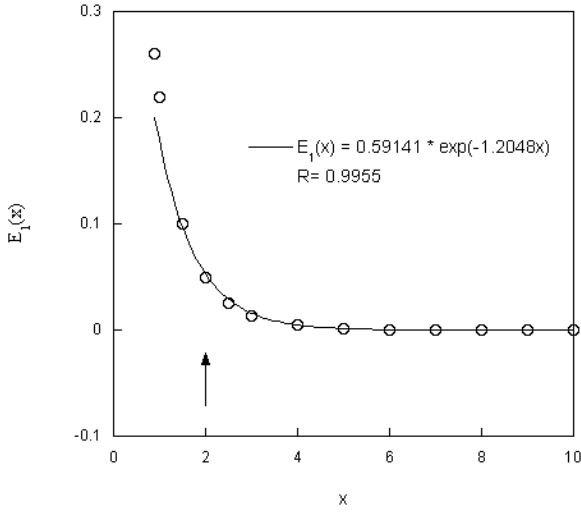


Fig. 2 Curve fitting of $E_1(x)$ in Eq. (2)

식 (8)을 식 (2)에 대입하면 발열체로부터 거리 S만큼 떨어진 위치에서 시간에 따른 유체의 온도 상승 근사해를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi k} \left[0.59141 \cdot \exp\left(-1.2048 \frac{S^2}{4\alpha t}\right) \right] \quad (9)$$

상수들을 묶으면 식 (9)는 다음과 같이 정리되는데 여기서 C_2 가 열확산율의 정보를 가지고 있다.

$$C_1 = \frac{q}{4\pi k} 0.59141$$

$$C_2 = 1.2048 \frac{S^2}{4\alpha}$$

$$\Delta T = C_1 \cdot \exp\left(-\frac{C_2}{t}\right) \quad (10)$$

발열체로부터 S만큼 떨어진 위치에서 시간에 따른 온도변화를 기록하고 이를 지수함수로 곡선 맞춤하면 C_2 를 구할 수 있고 이를 이용하면 열확산율을 식 (11)로 계산할 수 있다.

$$\alpha = 1.2048 \frac{S^2}{4C_2} \quad (11)$$

Fig. 3은 위에서 설명한 측정원리를 실험적으로 구현하기 위하여 제안한 센서부분의 개략도이다. 유체의 중심에 히터의 작용을 하는 제 1 열선 R_H 를 두고 이 열선과 거리 S만큼 떨어진 위치에 유체의 온도를 검출할 수 있는 온도센서로서 제 2 열선 R_T 를 둔다. 이들 열선들은 전기적으로 저항

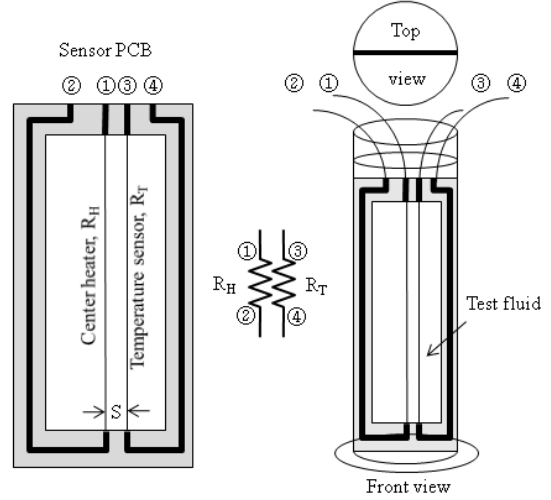


Fig. 3 Sensor module composed of two fine wires

의 작용을 하며 연결선(1, 2, 3, 4)을 통하여 외부 회로와 연결된다. 본 연구에서는 직경 $25 \mu\text{m}$ 의 백금선을 히터와 센서로 사용하였고 길이는 60mm이다. 우측에 나타난 바와 같이 센서모듈은 유체가 담겨진 매스실린더 형태의 원형용기 중심에 설치된다.

2.3 온도검출을 위한 센서 주변회로

시간의 변화에 따라 유체의 온도상승에 대한 신호를 검출하기 위한 회로를 Fig. 4에 나타내었다. 온도검출의 원리는 저항온도계의 원리와 같다. 즉, 센서 주위 온도가 증가하여 저항이 증가하면 전류가 일정한 경우 출력되는 전압이 증가한다. 따라서 센서양단의 전압 변화를 검출하는 것은 온도의 변화를 검출하는 것과 같다.

온도검출 회로 설계시 고려되어야 할 사항은 센서에 흘리는 전류가 일정해야 한다는 것 (constant current mode)과 저항검출을 위해 흘리는 전류의 양이 센서의 자체발열효과(self-heating effect)를 무시할 수 있을 정도로 작아야 한다는 것이다.⁽¹⁴⁾

회로도의 가장 좌측 부분은 Fig. 3의 센서모듈에서 중앙의 히터 열선을 가열하기 위한 회로이다. 스위치(s/w)가 처음에 off 상태로 있다가 on 상태가 되면서 열선히터에 전류가 흐르고 유체가 가열되어 반경방향으로 열전달이 시작된다.

다음 회로는 휘트스톤브릿지(wheatstone bridge)로서 4개의 저항으로 구성된다. 상부 두 개의 저

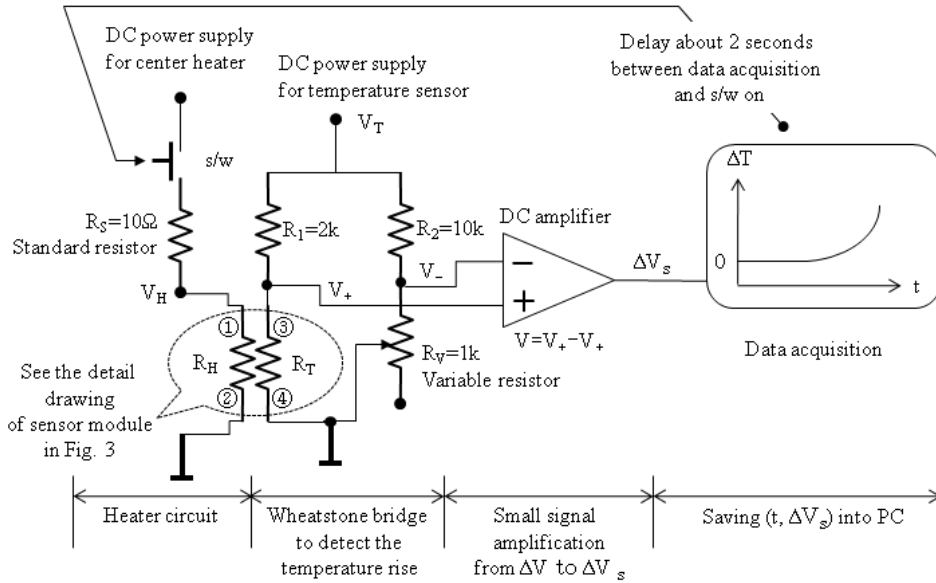


Fig. 4 Schematic of the circuit to detect the temperature rise at $t=S$

항 R_1, R_2 는 고정저항이고 하부 좌측에 온도검출용 센서 R_T 가 연결된다. R_T 의 반대편에는 최대 $1k\Omega$ 포텐시오미터 가변저항(variable resistor) R_V 가 연결된다. 브릿지 상단전압을 V_T 라고 할 때, 옴의 법칙에 의해 직류앰프로 입력되는 (+), (-)단자의 전압은 다음과 같이 표시된다.⁽¹⁵⁾

$$V_+ = \frac{R_T}{R_1 + R_T} V_T$$

$$V_- = \frac{R_V}{R_2 + R_V} V_T \quad (12)$$

이 두 전압의 차이는 다음의 식 (13)과 같이 표시할 수 있다. 처음에 가변저항 R_V 를 브릿지 균형식 $R_1 R_V = R_2 R_T$ 를 만족하도록 설정하면 출력 V 는 0이 된다.

$$V = V_+ - V_- \quad (13)$$

중심부 히터가 가열되기 시작하면 일정시간 경과 후 열경계층이 온도센서 위치에 도달하고 유체온도가 상승하기 시작한다. 이 경우에 식 (12)에서 V_- 는 유체온도 변화의 영향을 받는 변수가 포함되어 있지 않기 때문에 일정하게 유지된다. 그러나 R_T 의 저항은 증가하고 이에 따라 V_+ 가 상승한다. 본 실험에서 사용한 온도센서의 저항은 20°C 에서 12.35Ω 로 브릿지에서 이 열선과 직렬

연결된 저항 R_1 의 $2k\Omega$ 과 비교하면 상대적으로 작은 것을 알 수 있다. ($2000\Omega \gg 12.35\Omega$) 이에 따라 V_+ 는 다음과 같이 단순화된다.

$$V_+ = \frac{R_T}{R_1 + R_T} V_T \approx \frac{R_T}{R_1} V_T \quad \text{or}$$

$$\Delta V_+ = \frac{\Delta R_T}{R_1} V_T \quad (14)$$

V_- 가 일정하게 유지되므로 직류앰프로 전달되는 브릿지의 출력변동양 ΔV 는 식 (13)으로부터 $\Delta V = \Delta V_+$ 로 표시된다. 또한 온도상승 ΔT 에 따른 온도센서의 저항 증가분 ΔR_T 는 식 (7)을 이용하면 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\Delta R_T = R_{T0} \beta \Delta T \quad (15)$$

이를 식 (14)에 대입하면 브릿지 출력전압을 온도 변화의 향으로써 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\Delta V = \frac{R_{T0} \beta \Delta T}{R_1} V_T \quad (16)$$

식 (16)에서 ΔT 이외의 값들은 모두 상수이므로 온도변화와 전압변화는 비례함을 알 수 있다. ($\Delta V \sim \Delta T$) 앰프의 증폭도를 고려한 상수 C_3 를 도입하여 온도상승에 대한 식 (10)을 전압상승으로 나

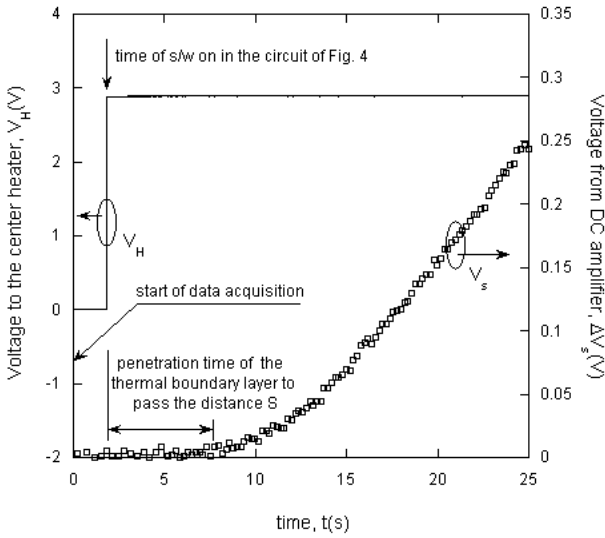


Fig. 5 Typical output voltage signals V_H , ΔV_s from the circuit shown in Fig. 4

타내면 식 (17)이 된다. 여기서 ΔV_s 는 직류앰프를 거쳐 증폭된 신호를 표시한다. 열확산율의 정보를 가지고 있는 상수 C_2 는 식 (10)과 비교하여 변하지 않으므로 열확산율을 계산하는 식 (11)은 그대로 유효하다. Fig. 4에 $(t, \Delta T)$ 를 기록하는 것으로 표시하였으나 실제 측정되는 데이터는 증폭된 전압으로 $(t, \Delta V_s)$ 가 기록된다.

$$\Delta V_s = C_3 \cdot \exp\left(-\frac{C_2}{t}\right) \quad (17)$$

3. 기본유체와 나노유체의 열확산율 측정

3.1 기본유체를 이용한 장치의 검증

본 연구에서 제시한 측정 장치로부터의 대표적인 출력신호를 Fig. 5에 나타내었다. 시간 0에서 신호의 기록이 시작되고 약 2초 후 히터 열선을 가열하기 위한 스위치가 닫히면 히터에 전압 V_H 가 가해지면서 유체가 가열되기 시작한다. 이후 중심부 히터에는 계속 가열전류가 흐른다. 약 5초의 시간이 경과한 후 열경계층이 거리 3mm를 지나서 온도센서 위치까지 도달함을 보여준다. 이후 온도센서가 위치한 지점의 온도가 상승하고 이에 따라 직류앰프를 거쳐 출력되는 전압 ΔV_s 도 상승하게 된다.

실험에서 사용한 기본유체는 엔진오일과 글리세린이다. 280K에서의 이들의 열확산율을 참고문헌에서 인용하여 Table 1에 정리하였다.⁽¹⁶⁾ 이들

Table 1 Thermal diffusivity of fluids from the reference (16) and C_2 from curve-fitting of experimental data of Fig. 6

case	fluids	α (m ² /s) ref. (16)	C_2 from Fig. 6	$\frac{1}{C_2}$
1	engine oil	0.872×10^{-7}	38.116	0.02623
2	glycerine	0.955×10^{-7}	33.953	0.02945
	ratio (2/1)	1.095		1.123

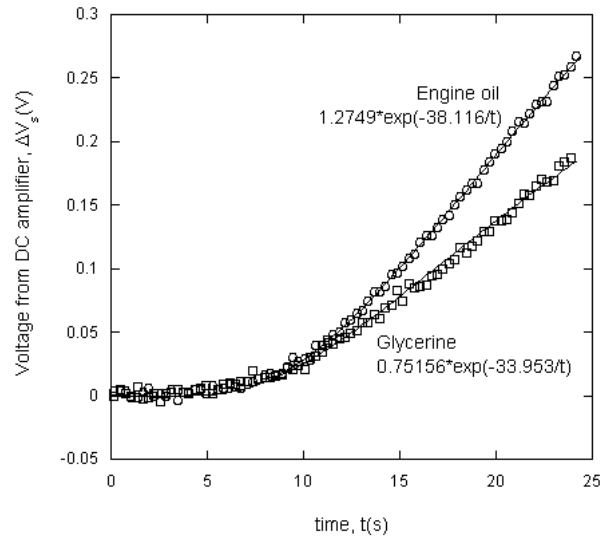


Fig. 6 Curve fitted data of engine oil and glycerine according to Eq. (17)

유체들에 대한 실험결과가 Fig. 6인데 곡선맞춤을 통하여 얻어진 C_2 와 그 역수를 Table 1에 정리하였다. 식 (11)을 보면 열확산율은 열선사이의 거리 S 와 C_2 의 역수에 의하여 결정된다. 동일센서의 경우 S 가 같으므로 두 유체의 열확산율 비를 계산할 경우 S 가 상쇄되어 비율에는 영향을 미치지 않는다. 실험을 통하여 얻어진 비율은 글리세린의 열확산율이 엔진오일보다 약 10% 높은 경향을 잘 보여주며 이것은 참고문헌의 값을 이용하여 계산한 비율과 일치한다. 센서의 거리를 3mm로 두고 두 유체의 열확산율을 계산하면 Table 2에서 0.003m로 표시한 행의 데이터를 얻는다. 이 경우 엔진오일은 참고문헌의 값과 비교하여 18.5%, 글리세린은 16.4%의 차이를 보인다. 그러나 S 를 0.0033으로 근소하게 변화시키면 참고문헌 값들과 비교하여 각각 1.26, 1.14%의 적은

Table 2 Effect of S on the calculation of thermal diffusivity from measured data

fluids	S(m)	$\alpha \times 10^7$ (m ² /s)	difference to ref. (16) (%)
engine oil	0.003	0.711	18.5
	<u>0.0033</u>	0.861	<u>1.26</u>
glycerine	0.003	0.798	16.4
	<u>0.0033</u>	0.966	<u>1.14</u>

Table 3 Thermal diffusivity of base and nano oil with experimental data in Fig. 7 and thermal conductivity data of two fluids

fluids	C ₂ from Fig. 7	$\alpha \times 10^7$ (m ² /s)	k (W/mK)
Base oil	40.389	0.812	0.148
Nano oil	39.037	0.840	0.164

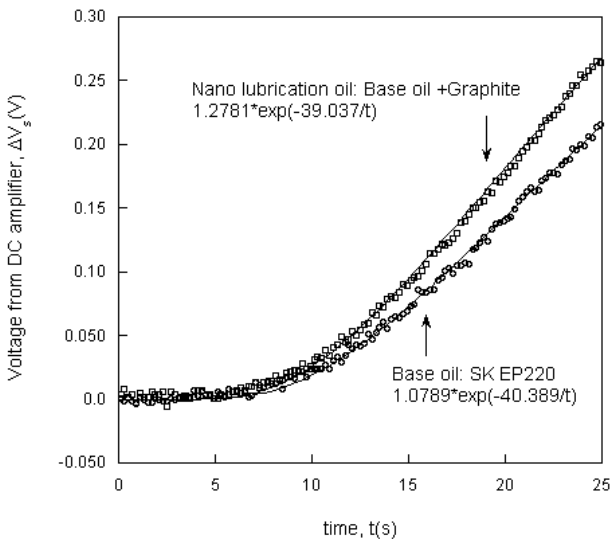


Fig. 7 Curve fitted data of base and Nano lubrication oil

오차를 갖도록 장치를 교정할 수 있다. 이와 같은 검토를 통하여 본 연구에서 제시한 장치가 열확산율의 변화를 정성적으로 잘 예측하고 알려진 열확산율 수치를 이용하여 센서 거리에 대한 교정과정을 수행할 경우 열확산율도 대략 1.3%이내에서 절대값 추정이 가능함을 보여준다.

3.2 나노유체의 열확산율 측정실험

Fig. 7은 기본유체와 나노유체(nano lubrication

oil)에 대하여 실험된 데이터의 곡선맞춤 결과이며 Table 3은 이 값을 이용하여 계산된 열확산율을 정리한 것이다. 베이스유체는 윤활유 제조용 오일(SK EP220)이며 나노유체는 이 베이스유체에 Graphite 나노입자를 체적분율 1%로 첨가한 것이다. 나노유체의 열확산율은 기본유체와 비교하여 3.4% 증가한 것으로 측정되었다. 이 나노윤활유 샘플의 열전도율은 기본유체 대비 약 11%가 상승한 것으로 보고되었는데 이와 같은 측정결과를 식 (1)에 적용하여 해석해보면 열용량 (ρC_p)가 대략 7.1% 상승했을 것으로 추정할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 나노유체의 열확산율을 정확히 측정할 수 있는 센서와 주변회로를 제시하였으며 실험데이터의 처리방법을 설명하였다.

열물성이 잘 알려진 기본유체로 엔진오일과 글리세린에 대하여 본 논문에서 제시한 방법으로 열확산율을 측정하였는데 약 1.3%의 차이를 가지고 참고문헌의 값을 예측할 수 있었다.

순수윤활유와 나노윤활유에 대하여 열확산율을 환산할 수 있었으며 열전도율 데이터를 이용하여 열용량변화를 추정할 수 있었다.

지금까지 나노유체 물성과 관련된 연구는 열전도율측정에만 한정되어 왔으나 본 연구의 결과는 열확산율과 비열의 변화에 대한 추정을 가능하게 하여⁽¹⁷⁾ 향후 나노유체 연구에 다양성을 줄 수 있을 것으로 예상된다.^(18,19)

후 기

본 연구는 2008년도 경기대학교 학술연구비(일반연구과제) 지원에 의하여 수행되었음.

참고문헌

(1) Choi, U. S., 1995, "Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles," *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, San Francisco, CA, Nov., 12~17.
 (2) 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.

- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) Lee, S. and Kang, K., 2007, "Validation Test for Transient Hot-wire Method to Evaluate the Temperature Dependence of Nanofluids," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 31, No. 4, pp. 341~348.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) Nagasaka, Y. and Nagashima, A., 1981, "Simultaneous Measurement of the Thermal Conductivity and the Thermal Diffusivity of Liquids by the Transient Hot-wire Method," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 52, No. 2, pp. 229-232.
- (10) Glatzmaier, G. C. and Ramirez, W. F., 1985, "Simultaneous Measurement of the Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Unconsolidated Materials by the Transient Hot Wire Method," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 56, pp. 1394~1398.
- (11) Zhang, X. and Fujii, M., 2000, "Simultaneous Measurements of the Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Molten Salts with a Transient Short-hot-wire Method," *International Journal of Thermophysics*, Vol. 21, No. 1, pp. 71~84.
- (12) Jwo, C. and Teng, T., 2005, "Experimental Study on Thermal Properties of Brines Containing Nanoparticles," *Review of Advanced Material Science*, Vol. 10, pp. 79-83.
- (13) Zhang, X., Gu, H. and Fujii, M., 2006, "Effective Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Nanofluids containing Spherical and Cylindrical Nanoparticles," *Journal of Applied Physics*, Vol. 100, 044325.
- (14) Brunn, H. H., 1995, *Hot-Wire Anemometry*, Oxford University Press, pp. 219-231.
- (15) Coughlin, R. F. and Driscoll F. F., 1991, *Operational Amplifier and Linear Integrated Circuit*, 4th Ed., Prentice-Hall International Ed., pp. 218-226.
- (16) Incropera, F. P. and DeWitt, D. P., 2001, *Introduction to Heat Transfer*, 6th Ed., Wiley, pp. 116~118.
- (17) Na, Y. S., Lee, J. S. and Kihm, K. D., 2009, "Effect of Convective Flow Condition on Effective Thermal Diffusivities of Water-based Alumina Nanofluids," *Proceedings of the KSME fall Annual meeting*, pp. 2984-2989.
- (18) Lee, S., 2008, "Measuring Convective Heat Transfer Coefficient Around a Heated Fine Wire in Cross Flow of Nanofluids," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 32, No. 2, pp. 117~124.
- (19) Lee, W. H. and Park, S. I., 2010, "A Study on the High Temperature Thermal Conductivity Measurement of Nanofluid Using a Two-Phase Model," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 34, No. 2, pp. 153~156.