

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2016.40.2.103>

ISSN 1226-4881(Print)
2288-5324(Online)

더미스터 온도센서를 이용한 나노유체의 대류열전달계수 측정 장치

이 신 표*†

* 경기대학교 공과대학 기계시스템공학과

Measuring Apparatus for Convective Heat Transfer Coefficient of Nanofluids Using a Thermistor Temperature Sensor

Shin Pyo Lee*†

* Dept. of Mechanical Engineering, Kyonggi Univ.

(Received September 10, 2015 ; Revised December 28, 2015 ; Accepted December 29, 2015)

Key Words: Nanofluids(나노유체), Pure Fluid(순수유체), Convective Heat Transfer Coefficient(대류열전달계수), Thermistor(더미스터), Platinum Hot Wire(백금 열선), Positive/Negative Temperature Coefficient of Resistance(정/부 저항온도계수), Cold Resistance(냉저항)

초록: 나노유체의 대류열전달 성능을 평가하는 센서로서 가는 백금 열선이 많이 사용되었다. 그러나 센서의 강도가 약해서 취급에 주의가 필요하고 측정실험에서 센서에 대한 엄밀한 교정과정을 생략하거나 정밀도 높은 기구들을 사용하지 않으면 비현실적인 대류열전달계수가 얻어졌다. 본 연구에서는 백금 열선 대신 더미스터 센서를 채택한 새로운 나노유체 대류 성능 평가장치를 제안하였고 그 작동 원리를 자세히 설명하였다. 순수 엔진오일에 대한 두 센서의 비교 실험을 통하여 더미스터 센서의 실용적 장점을 확인할 수 있었다. 제안된 장치는 개발된 나노유체의 채택 여부를 판단하는 유용한 도구로 사용될 수 있을 것이다.

Abstract: Fine wires made from platinum have been used as sensors to evaluate the convection performance of nanofluids. However, the wire sensor is difficult to handle due to its fragility. Additionally, an unrealistic convective heat transfer coefficient (h) is obtained if a rigorous calibration process combined with precision equipment is not used for measurement. This paper proposes a new evaluation apparatus for h of nanofluids that uses a thermistor sensor instead of the platinum wire. The working principles are also explained in detail. Validation experiments for pure engine oil comparing h from the two sensors confirmed numerous practical benefits of the thermistor. The proposed system can be used as a useful tool to justify the adoption of developed nanofluids.

1. 서론

나노유체는 물, 엔진오일 등 순수유체에 열전도율이 높은 나노 크기의 금속 입자를 혼합, 부유시켜 순수유체의 열전도율을 향상시킬 목적으로 제안된 유체이다.⁽¹⁾

나노유체의 성능은 순수유체 대비 열전도율의 상승이 어느 정도인가로 평가되지만 최종 목표는 이 나노유체가 순수유체를 대체하였을 때 얼마나

대류열전달 성능이 향상되는가를 정량적으로 평가해 보는 것이 실용적인 측면에서 중요하다. 나노유체가 제안된 초기에는 입자의 혼합비, 종류를 바꾸어 가면서 정적인 상태에서 열전도율 상승을 측정하는 연구가 진행되었다. 그러나 열전도율은 유체특성이고 대류열전달계수는 유동특성이기 때문에 정적인 상태에서 측정한 열전도율이 반드시 높은 대류열전달성능을 보인다고 보장할 수는 없다. 따라서 대류열전달계수를 직접 측정해 보는 것이 중요하다.⁽²⁾ 나노유체의 대류열전달 성능을 평가하는 원리는 대류를 이용하여 발열체

† Corresponding Author, shinpyo@kgu.ac.kr

를 생각하는 경우 한번은 순수유체에 대하여 대류열전달계수를 측정하고 같은 조건의 실험을 나노유체에 대하여 시행하여 그 결과를 비교해 보는 것이다. 대류열전달 성능이 우수한 유체 속에서 작동하는 발열체는 냉각이 활발하게 일어나므로 그렇지 않은 유체보다 낮은 작동 온도를 보이게 될 것이다.

대류열전달 성능 실험을 위하여 흔히 사용되는 발열체는 가는 백금 열선(fine platinum wire)으로 이 열선은 센서와 히터의 두가지 기능을 갖는다. 즉, 열선에 별도의 온도센서를 부착하는 것이 아니라 발열 중인 열선의 저항을 측정하면 온도-저항 관계식 (1)에 의하여 그 온도를 추정할 수 있다. 저항을 측정하면 온도를 알 수 있고 반대로 온도를 알면 저항을 아는 것으로 이해하면 된다.

$$R_w = R_0(1 + \alpha T_w) \tag{1}$$

R_0 는 0°C에서의 저항으로 냉저항이라 부르며 센서의 공칭저항으로 이해하면 되고 α 는 저항온도계수로 온도변화에 따른 저항변화를 나타낸다. T_w 와 R_w 는 각각 작동온도와 센서의 작동저항이다. 센서의 기능면에서 온도에 따른 저항의 변화가 큰 것이 좋고 이를 위해 R_0 와 α 가 모두 큰 것이 유리하다.⁽³⁾

본 논문의 전반부에서는 열선센서를 이용할 경우 발생하게 되는 온도측정 오차를 R_0 와 α 의 향으로 유도하여 그 문제점을 검토하고 새로운 센서로서 더미스터(thermistor)를 사용할 경우 열선과 비교하여 오차가 크게 줄어드는 것을 보일 것이다. 후반부에서는 엔진오일에 대하여 두 센서를 이용한 대류열전달계수 측정실험을 수행하고 결과의 비교를 통하여 더미스터의 장점을 설명하고 마지막으로 더미스터를 이용한 나노엔진오일의 대류열전달계수 측정 예를 설명할 것이다.

2. 작동중인 열선 저항 측정회로

2.1 이상적 전압분할회로

만약 순수유체보다 나노유체의 대류열전달 성능이 우수하다면 동일한 유체 온도, 속도조건에서 같은 전류를 열선에 흘릴 때, 나노유체의 경우 더 낮은 작동온도가 얻어지고 식 (1)에 의하여 나노유체 속에서 작동하는 열선의 저항은 낮아지

Table 1 Physical properties of the platinum sensor

symbol	value	unit	remarks
R_0	0.5651	Ω	cold resistance at 0°C
α	0.003909	$1/^\circ\text{C}$	temperature resistance coefficient
d	50	μm	wire diameter
L	12	mm	wire length

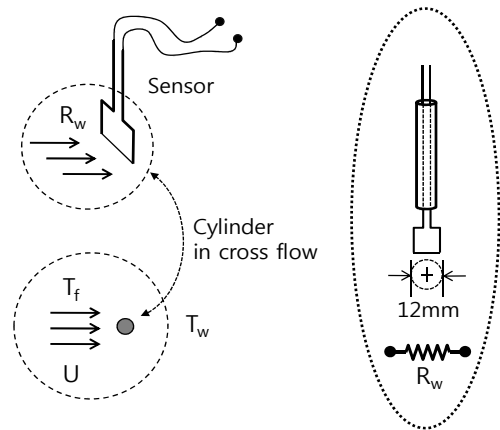


Fig. 1 Schematic diagram of platinum wire sensor

게 될 것이다. 그 결과 열선 양단의 전압은 오옴의 법칙에 의하여 낮아지게 되는데 두 유체로부터의 전압 신호 비교를 통하여 일차적으로 대류열전달 성능의 변화를 판단할 수 있다. 당연히 센서 양단의 전압을 정밀하게 측정하는 것이 필수적이다.

다음의 Fig. 1은 가는 열선을 이용하여 제작한 센서가 속도 U , 온도 T_f 의 유동 속에 놓여 있는 개략도이다. 센서는 열선유속계 센서와 유사하게 제작하였는데 순수저항으로 취급할 수 있다.⁽⁴⁾ 사용한 센서는 지름 $50\mu\text{m}$, 길이 12mm 의 백금 열선으로 HP E4925A LCR미터를 사용하여 19°C에서 측정된 저항은 0.6071Ω 이었다. 식 (1)로 R_0 를 계산하면 0.5651Ω 이다. Table 1은 열선 센서와 관련된 물성치를 정리한 것이다.

작동중인 열선의 저항은 직접 측정할 수 없으므로 전압과 전류를 측정 후 오옴의 법칙을 통하여 환산해야 한다. 이를 위하여 Fig. 2에 표시한 전압분할회로(voltage divider)가 사용된다. 이것은 센서 R_w (모르는 저항)에 고정저항 R_s (저항값이 알려진 저항)를 직렬 연결한 것이다. V_t 는 직류 고정전압이고 V_s 와 V_w 는 고정저항에 걸리는 전압, R_w 에 걸리는 전압을 표시한다. 직렬회

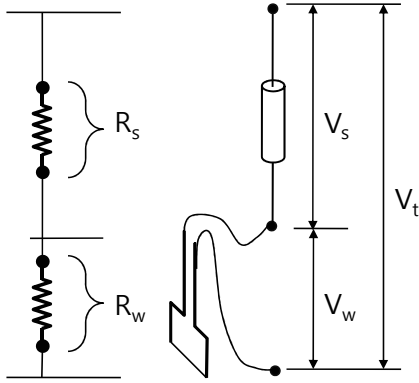


Fig. 2 Voltage divider circuit to get R_w from R_s , V_t , V_w

로 이므로 두 저항을 통하여 흐르는 전류 i 는 공통이고 따라서 다음의 식이 성립한다.

$$V_t = V_s + V_w \quad (2)$$

$$i = \frac{V_s}{R_s} = \frac{V_w}{R_w} \quad (3)$$

식 (2)와 (3)을 이용하면 V_s 와 V_w 를 측정함으로써 식 (4)로 R_w 를 계산할 수 있으며 온도 T_w 는 식 (1)을 이용하여 아래 (1)'으로 환산할 수 있다.^(3,4)

$$R_w = \frac{V_w}{V_s} R_s = \frac{V_w}{(V_t - V_w)} R_s \quad (4)$$

$$T_w = \frac{R_w - R_0}{R_0 \alpha} \quad (1)'$$

식 (2)에서 V_s 와 V_w 가 더해져 전체전압 V_t 가 되는데 전류가 공통이므로 결국은 저항이 큰 쪽에 더 큰 전압이 걸리게 된다. 언급한 것처럼 T_w 가 낮아지면 식 (1)에서 R_w 가 작아지고 그 결과 V_w 가 작아지고 V_s 는 커진다.⁽⁵⁾

나노유체 개발의 초기 단계에서는 동일 유동조건에서 순수유체와 나노유체에 따른 V_w 의 변화를 관찰함으로써 나노유체의 대류 열전달 효과를 예측해 볼 수 있다. 그런데 단순히 전압을 측정하는 것이 아니라 대류열전달계수 h 를 얻기 위하여 신호를 처리하는 과정에서 큰 오차가 발생할 수 있다. 이 경우 최종 h 가 오차에 의해 가려

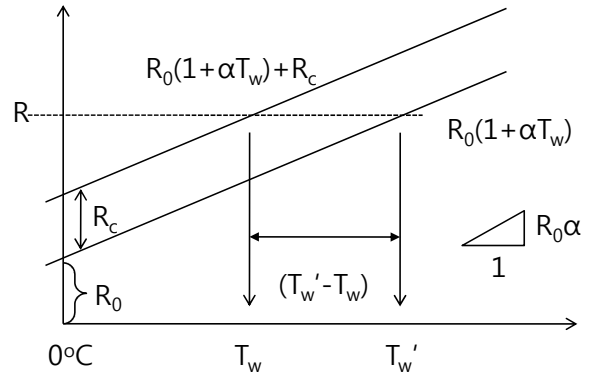


Fig. 3 Effect of R_c on the deviation of T_w

지면 h 를 가지고 나노유체의 열전달 유용성을 판단하는 것은 불가능하다. 이 오차는 데이터 처리 과정에서 수정이 가능한 계통오차에 해당하는 데 이에 대하여 다음과 같이 고찰해 본다.

2.2 온도환산 과정에서의 오차

2.2.1 연결선에 의한 오차

열선에서 발생하는 열량은 양단의 전압과 전류를 곱하여 계산하고 이 열량이 대류에 의하여 유체에 전달된다는 식 (5)에 의해 h 가 산출된다.⁽⁶⁾

$$i V_w = h A_s (T_w - T_f) \quad (5)$$

$$h = \frac{i V_w}{A_s (T_w - T_f)}$$

여기서 A_s 는 열선의 표면적으로 πdL 로 계산한다. 전류와 전압은 정밀한 측정이 가능하다 해도 이 신호들을 이용하여 T_w 를 환산하는 과정에서 오차가 발생할 수 있고 이것은 대류열전달계수에 영향을 주게 된다. Fig. 3은 온도에 따른 열선의 순수한 저항 변화를 나타내는 식 (1)과 여기에 연결선의 고정저항 R_c (connector resistance)를 더하여 식 (1)을 위쪽으로 R_c 만큼 평행이동한 두 선을 나타낸다.

센서의 저항을 R 로 측정하였다면 이것은 열선의 저항과 연결선 저항이 합쳐진 것이다. 연결선의 저항을 고려하지 않는다면 실제 열선의 작동 저항은 T_w 이나 온도를 T_w' 로 환산하게 되고 $(T_w' - T_w)$ 만큼의 오차를 가져오게 된다. $R_c > 0$ 이므로 Fig. 3에서 R_c 를 고려하지 않을 경우 $T_w' > T_w$ 이 된다. 그 결과 식 (5)를 통하여 환산

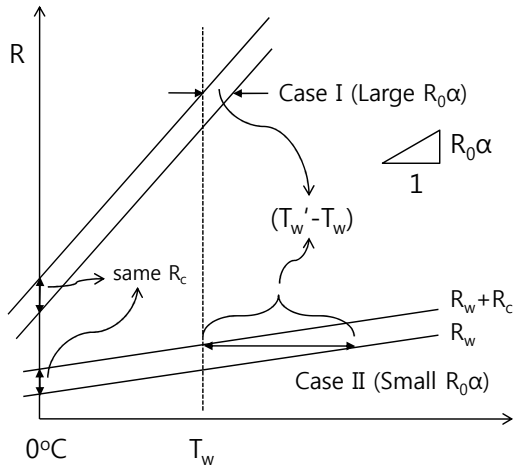


Fig. 4 Effect of $R_0\alpha$ on the error of $(T'_w - T_w)$

된 h 값은 실제 h 보다 줄어들게 된다. 이 오차는 다음과 같이 계산할 수 있다. Fig. 3에서 열선의 저항에 연결선 저항을 더한 저항(아래 식 (6)의 좌측 항)이 열선만의 저항(우측 항)이라고 하면

$$R_c + R_0(1 + \alpha T_w) = R_0(1 + \alpha T'_w) \quad (6)$$

이 되고 이것을 T'_w 에 대하여 정리하면

$$T'_w = T_w + \frac{R_c}{R_0\alpha} \quad (7)$$

이 된다. 식 (7)에서 두 온도의 차가 작아지려면 R_c 가 작거나 $R_0\alpha$ 의 값이 커야 한다. α 는 물질의 특성이므로 센서를 바꾸지 않는 한 변경이 불가능하고 R_0 는 센서를 길게 제작하면 커질 수 있으나 실용적 측면에서 한계가 있다. 연결선 저항 R_c 를 작게 하려면 가능한 굵고 짧은 선을 사용해야 한다. 그러나 실제 사용시 연결선은 가늘고 길수록 편리하므로 오차를 줄이기 위하여 요구되는 연결선의 조건과 상반되는 어려움이 있다.

Fig. 4는 연결선 R_c 가 동일하게 주어진 경우에 $R_0\alpha$ 가 큰 경우(Case I)와 $R_0\alpha$ 가 작은 경우(Case II)에 온도환산과 관련된 오차가 달라지는 것을 보여주는 개념도이다. R_c 가 동일한 것은 두 경우에 선들 사이의 폭이 동일한 것을 의미한다. Fig. 4를 통하여 R_0 와 α 가 큰 센서를 선택하는 것이 대류열전달계수의 오차를 줄이는데 유리함을 알 수 있다.

본 연구에서 연결선으로 사용된 전선의 지름은 0.511mm로 AWG 24(American Wire Gauge)에 해당한다. 이 줄의 단위길이당 저항은 $0.0842\Omega/m$ 로 줄의 길이 2.76m에 대하여 0.2324Ω 로 계산되는데 측정된 줄의 저항 0.2329Ω 과 일치한다. Table 1의 데이터와 식 (7)을 이용하여 연결선에 의한 오차를 계산하면 다음과 같이 비현실적인 값이 될 수 있으므로 반드시 보정해야 한다.

$$\begin{aligned} T'_w - T_w &= \frac{R_c}{R_0\alpha} \\ &= \frac{0.2329}{(0.5651 \times 0.0039092)} = 105.42^\circ\text{C} \end{aligned}$$

2.2.2 냉저항에 의한 오차

이번에는 연결선에 의한 오차를 완벽히 제거하였다는 전제하에 부정확한 열선의 냉저항에 의하여 발생하는 오차를 검토해 본다. 식 (1)에서 정확한 T_w 를 계산하기 위해서 정밀한 R_0 와 α 를 사용하는 것이 필수적임을 알 수 있다. α 는 문헌에서 제시하고 있는 고유값을 사용하여도 큰 차이가 나지 않는 것이 저자의 경험이다. 반면 R_0 는 특정길이의 센서를 제작하고 반드시 측정해야 하는 값이다.

냉저항의 오류에 의한 오차는 다음과 같이 예상할 수 있다. 저항 R 이 측정되면 아래 식 (8)과 같이 두 가지 식에 의하여 작동온도가 환산될 것이다. 좌측의 식은 센서에 대하여 정확한 교정이 이루어진 식 (1)이며 우측은 부정확한 냉저항 R'_0 과 이에 따라 오차를 갖는 부정확한 온도 T'_w 로 이루어진 식이다.

$$R_0(1 + \alpha T_w) = R'_0(1 + \alpha T'_w) \quad (8)$$

이를 T'_w 로 정리하면 식 (9)가 얻어진다.

$$T'_w = \frac{R_0}{R'_0} T_w + \frac{(R_0 - R'_0)}{R'_0\alpha} \quad (9)$$

식 (9)를 통하여 두 가지를 생각해 볼 수 있다. 먼저 $R'_0 \approx R_0$ 라고 가정한다면 식 (9)의 우측 첫째항은 T_w 가 되고 따라서 두 번째항이 대략 오차 $T'_w - T_w$ 가 된다. 이 값이 작아지려면 분모가 커야 하므로 R_0 와 α 가 커야 오차가 줄어들 수

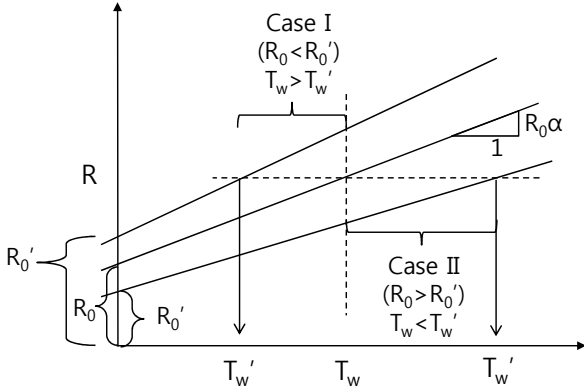


Fig. 5 Effect of R_0 on the wire temperature T_w

있다. 둘째 R_0' 은 R_0 와 비교하여 크거나 작게 측정될 수 있으므로 T_w' 은 T_w 와 비교하여 클 수도 작을 수도 있다.

Fig. 5는 도식적으로 이것을 설명한 것이다. Case I은 $R_0 < R_0'$ 의 경우에 $T_w > T_w'$ 인 경우로 실제 온도보다 낮게 평가되는 것을 보여주며, Case II는 $R_0 > R_0'$ 의 경우에 $T_w < T_w'$ 로 실제 온도보다 높게 환산될 수 있음을 보여주고 있다. 부정확한 냉저항을 나타내는 지수로서 γ (1이면 정확한 냉저항을 의미)를 도입하고 $R_0' = \gamma R_0$ 라고 표시하면 식 (9)는 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$T_w' = \frac{1}{\gamma} T_w + \frac{(1-\gamma)}{\gamma\alpha} \quad (10)$$

Fig. 6은 γ 에 따라 예상되는 온도 환산 오차 $T_w - T_w'$ 를 나타낸 것이다. 작동온도 T_w 에 따른 차이는 크지 않으며 대략 1%오차($\gamma=1.01$)에 대하여 약 2.8°C의 오차가 발생하였다.

3. 더미스터 온도센서

2절에서 센서의 R_0 와 α 가 클수록 T_w 를 측정하는 과정에서 발생할 수 있는 오차가 줄어들 수 있음을 알 수 있었다. 이와 같은 특성을 고려하여 대류열전달 성능평가 장치에서 열선을 대체하는 센서로 더미스터의 사용을 제안하고자 한다.

이미 더미스터 센서가 사용된 다양한 공기유량계(air flow meter)를 시장에서 구매할 수 있으며 환경분야에서 하수 슬러지의 성상을 판단하는

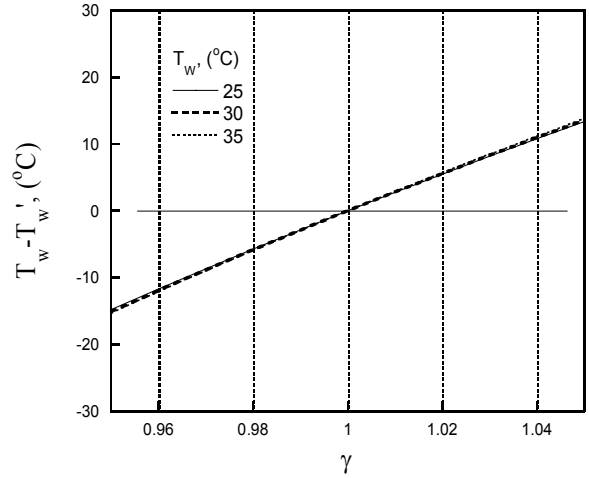


Fig. 6 Effect of γ on the temperature error of the wire

장치⁽⁷⁾에서도 더미스터 센서가 사용된다. 이들은 열선의 경우와 마찬가지로 모두 가열된 더미스터 주위의 대류열전달 특성에 따라 센서의 온도가 달라지는 특성을 이용한다.

Fig. 7은 온도변화에 따른 열선과 더미스터의 저항변화를 나타낸 것이다. 사용된 더미스터는 GE sensing사의 제품(AL03006-165.9-55-G1)으로 지름은 1.9mm, 길이는 3.93mm로 Table 1에 제시한 열선 센서 12mm보다 크기가 작다. 25°C에서 더미스터의 저항은 250Ω으로 대략 열선 저항의 400배 이상이다. 그림에서 온도변화에 따른 열선의 저항변화는 더미스터와 비교하여 확인이 불가능할 정도로 작다. 열선의 R_0 와 α 가 너무 작기 때문이다. 열선의 저항은 온도의 증가에 따라 저항이 증가하지만 더미스터는 저항이 감소하는 부저항온도계수 특징을 갖는다.

동일한 온도변화에 대하여 α 는 대략 0.0164/°C로 열선보다 4.2배 정도 크다. 연결선의 저항은 동일하다는 가정하에 더미스터를 사용하는 경우에 연결선에 의하여 예상되는 오차를 계산해보면

$$\frac{R_c}{R_0\alpha} = \frac{0.2329}{(250 \times 0.0164)} = 0.0568^\circ\text{C}$$

로 열선의 경우인 105.42°C보다 크게 감소된 것을 알 수 있다.

더미스터의 특성은 다음 식 (11)로 표시된다. R_{t0} 는 $T_0=298.15\text{K}$ 에서의 저항이며 β 는 특성값으로 본 연구에서 사용한 센서의 경우 2983K이다.

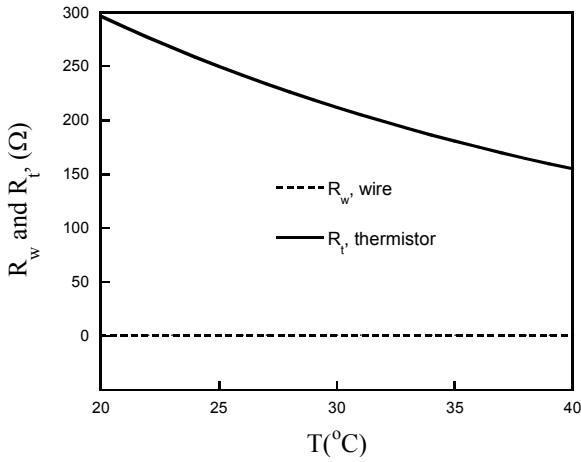


Fig. 7 Resistance change of platinum wire and thermistor sensor

$$R_t = R_{t0} \exp \left[\beta \left(\frac{1}{T_t} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (11)$$

만약 R_{t0} 에 오류가 있다면 환산된 온도는 오차를 갖게 된다. 열선에 대한 비슷한 유도과정을 통하여 그 오차는 다음과 같이 계산할 수 있다. 아래 식 (12)에서 R'_{t0} 과 T'_t 은 각각 부정확한 더미스터 냉저항과 그 결과 잘못 환산된 온도를 의미한다.

$$R_t = R'_{t0} \exp \left[\beta \left(\frac{1}{T'_t} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (12)$$

식 (11)과 (12)를 같다고 놓고 T'_t 에 대하여 정리하면 식 (13)이 얻어진다.

$$\frac{1}{T'_t} = \frac{1}{T_t} + \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{R_{t0}}{R'_{t0}} \right) \quad (13)$$

열선의 경우와 마찬가지로 $\gamma(R'_{t0} = \gamma R_{t0})$ 를 도입하면 식 (13)은 다음과 같다.

$$\frac{1}{T'_t} = \frac{1}{T_t} + \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{1}{\gamma} \right) \quad (13)'$$

Fig. 8은 식 (13)'을 이용하여 γ 에 따라 $T_t - T'_t$ 를 나타낸 것이다. 열선의 경우와 비교하면 온도 환산오차가 약 1/10로 줄어든 것을 알 수 있다. 실제로는 더미스터의 경우에 γ 값이 열선의 경우와 비교해 더 작기 때문에 이 오차는 더 줄어들게 된다. 열선이나 더미스터나 동일한 저항 측정

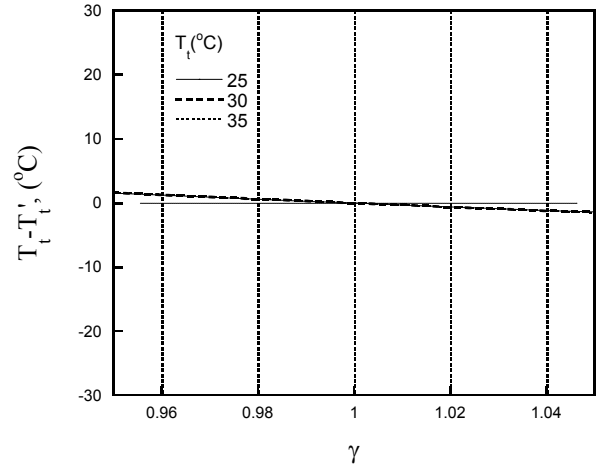


Fig. 8 Effect of γ on the temperature error of the thermistor

방법을 사용한다면 측정 절대오차는 두 경우에 동일하지만 두 센서의 냉저항이 400배 이상 다르기 때문에 더미스터의 경우 γ 가 열선의 1/100정도로 작아지기 때문이다. 이와 같은 분석을 통해서도 냉저항이 큰 것이 오차를 줄이는데 유리함을 알 수 있다.

4. 순수 및 나노엔진오일 실험

Fig. 9는 열선을 이용하여 순수한 엔진오일에 대한 대류실험을 실시하였을 때 획득된 전압 신호를 표시한 것이다. 사용된 회로는 Fig. 2의 전압분할회로이며 $V_t=10$ Volt, $R_s=10.22\Omega$ 일 때, 속도의 증가에 따라 V_w 는 감소하고 V_s 는 증가하는 것을 보여준다. 속도가 증가하면서 열선의 온도가 낮아지면 센서의 저항이 감소하고 그 결과 센서 양단의 전압이 감소하기 때문이다.

Fig. 10은 Fig. 9의 신호 데이터를 3가지 방식으로 처리한 결과이다. case I은 연결선 저항과 냉저항을 모두 고려하여 h 를 구한 것이고 case II는 냉저항은 고려하되 연결선 저항을 무시하고 신호를 처리하여 오차가 발생한 경우이다. 대류열전달계수가 낮게 평가된 것을 알 수 있다. case III은 연결선 저항은 고려하였으나 냉저항을 참값과 비교하여 5%정도 높게 설정하여 오차가 발생한 경우이다. 대류열전달계수가 높게 평가된 것을 알 수 있다. case I의 데이터는 수직 유동속에 놓인 가열된 실린더 주위의 대류열 전달상관식인 Churchill-Bernstein⁽⁸⁾ 관계식과 잘 일치하는 것을 보여준다.

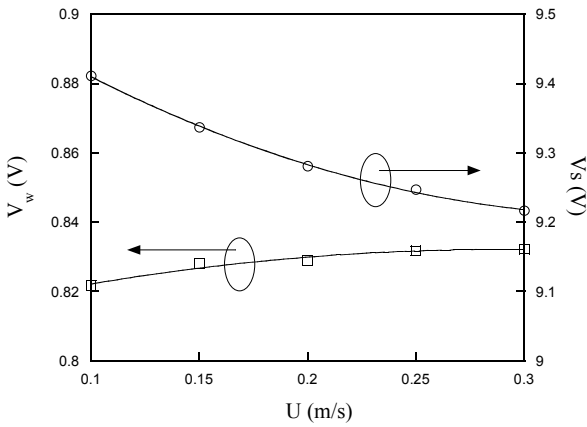


Fig. 9 Signals from the voltage divider circuit using the wire sensor

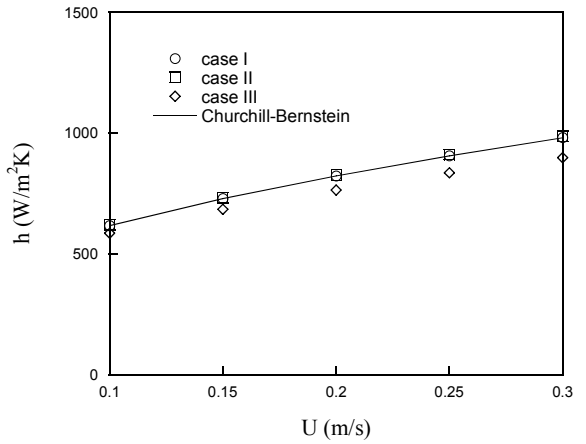


Fig. 11 Change of h by thermistor system depending on the processing methods of data

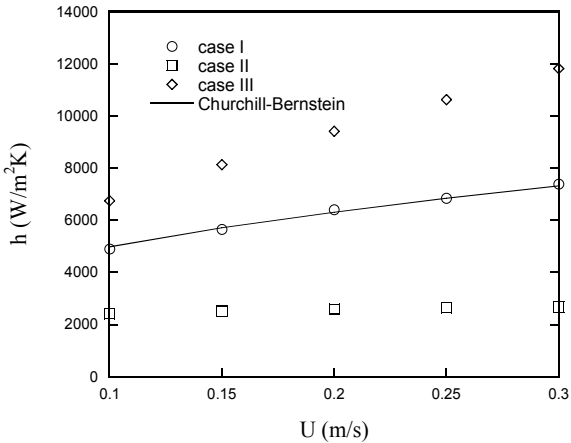


Fig. 10 Change of h by platinum wire system depending on the processing methods of data

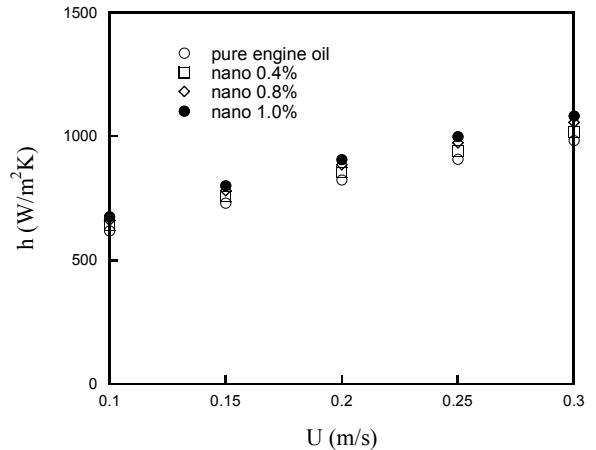


Fig. 12 Convective heat transfer enhancement of nanofluids

Fig. 11은 더미스터를 이용하여 순수 엔진오일에 대한 대류실험을 실시한 것이다. Fig. 10의 결과와 마찬가지로 연결선과 냉저항의 영향을 포함 또는 포함하지 않은 경우의 결과를 표시하고 있다. case I, II, III은 이전 Fig. 9에서 설명한 데이터의 처리조건을 나타낸다. 열선의 경우와 비교하여 연결선이나 냉저항의 포함여부가 Churchill-Bernstein 관계식으로부터 벗어나는 정도가 크지 않은 것을 알 수 있다.

Fig. 12는 본 연구에서 제시한 더미스터 측정시스템을 이용하여 나노엔진오일⁽⁹⁾의 대류열전달계수를 측정하는 것이다. Fig. 10에서 표시한 순수 엔진오일 데이터와 비교할 때 대류열전달계수가 증가한 것으로 나타나는 데 그 증가정도는 나노엔진오일의 열전도율 증가와 비례하는 것으로 나타나 나노유체 기존 연구결과⁽⁵⁾와 다르지 않았다.

5. 결론

본 연구에서는 나노유체의 대류열전달 성능을 평가하는 센서로서 더미스터를 사용하는 새로운 장치를 제안하였으며 이 과정에서 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 열선 센서를 사용하는 경우 냉저항과 저항 온도계수가 작아서 이들의 영향을 무시할 경우 작동온도의 환산과정에서 큰 계통오차가 발생할 수 있음을 보였고, 열선과 비교하여 냉저항과 저항 온도계수가 큰 더미스터 센서를 사용할 경우 오차가 크게 줄어들 수 있음을 이론적으로 설명하였다.

(2) 순수 엔진오일에 대한 대류열전달계수 측정 실험을 통하여 정밀도 측면에서 더미스터가 열선보다 오차가 크게 줄어든 것을 확인하였고, 나노

엔진오일 실험을 통하여 더미스터를 채택한 새로운 시스템이 나노유체 대류열전달 평가에 사용될 수 있음을 보였다.

(3) 더미스터는 정밀도 측면에서 유리할 뿐만 아니라 가는 열선과 비교하여 외부 충격에 강하기 때문에 실용적으로 그 사용이 기대된다.

후 기

본 연구는 2013년도 경기대학교 학술연구비(일반연구과제) 지원에 의하여 수행되었음.

참고문헌 (References)

- (1) Lee, S., Choi, U. S., Li, S. and Eastman, J. A., 1999, "Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 121, pp. 280~289.
- (2) Na, Y. S., 2012, "Effective Thermal Conductivity of Alumina Nanofluids in Laminar Circular Tube Flow," Ph. D. thesis, Seoul National University.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) Lee, S., 2015, "Apparatus for Comparing Thermal Conductivity of Nanofluids and Base Fluid Using Simultaneously Measured Resistance Variation Signals from Two Hot Wire Sensors," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 39, No. 1, pp. 29~36.
- (6) Incropera, F. P. and DeWitt, D. P., 2001, Introduction to Heat Transfer, 6th Ed., Wiley, pp. 116~118.
- (7) Japan Patent, 3055164, B., 2004, "An acidity or alkalinity like metering device".
- (8) Churchill, S. W. and Bernstein, M., 1977, "A Correlating Equation for Forced Convection from Gases and Liquids to a Circular Cylinder in Cross Flow," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 99, pp. 300~306.
- (9) 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.