

## 막온도 변화를 고려한 가는 열선주위 나노유체의 대류열전달계수 측정 실험

이 신 표<sup>\*†</sup>

\* 경기대학교 기계시스템공학과

### Measuring Convective Heat Transfer Coefficient of Nanofluids Considering Effect of Film Temperature Change over Heated Fine Wire

Shinpyo Lee<sup>\*\*</sup>

\* Dept. of Mechanical Engineering, Kyonggi Univ.

(Received December 9, 2012 ; Revised July 5, 2013 ; Accepted July 8, 2013)

**Key Words:** Nanofluids(나노유체), Convective Heat Transfer Coefficient(대류열전달계수), Thermal Conductivity(열전도율), Mean Film Temperature(막온도)

**초록:** 본 논문에서는 가는 열선 주위를 흐르는 나노유체의 대류열전달 특성을 실험을 통하여 검토하였다. 입자 혼합 농도가 다른 4개의 나노엔진오일에 대하여 열선온도가 증가하는 경우, 유체온도가 증가하는 경우 그리고 막온도가 일정하게 유지되는 경우 등 세가지 온도경계조건에 대하여 대류열전달계수를 측정하였다. 내부유동에서 나노유체의 대류열전달계수 상승이 열전도율 상승을 초과한다는 결과가 최근 발표되기도 했지만 본 연구에서는 이 결과를 확인할 수 없었다. 온도조건에 따른 대류열전달계수의 변화 거동을 분석함으로써 나노유체의 열전도율과 경계층두께의 관계를 설명할 수 있었다.

**Abstract:** This study examined the convective heat transfer characteristics of nanofluids flowing over a heated fine wire. Convective heat transfer coefficients were measured for four different nano-engine-oil samples under three different temperature boundary conditions, i.e., both or either variation of wire and fluid temperature and constant film temperature. Experimental investigations that the increase in the convective heat transfer coefficients of nanofluids in the internal pipe flow often exceeded the increase in thermal conductivity were recently published; however, the current study did not confirm these results. Analyzing the behavior of the convective heat transfer coefficient under various temperature conditions was a useful tool to explain the relation between the thermal conductivity and the boundary layer thickness of nanofluids.

### 1. 서론

본 논문은 가열된 열선 주위를 나노유체가 흐를 때 온도조건의 변화가 대류열전달계수에 미치는 영향을 실험을 통하여 검토한 것이다.

온도조건의 변동에 따른 대류열전달계수의 변화 거동을 분석하면 시험 대상유체의 열전도율 변화, 경계층두께의 변화 특성을 파악할 수 있다.<sup>(1)</sup> 막온도는 고체벽과 주위유체의 평균온도로 정의되는데 경계층 내에서 유체의 열물성 변화를 설명하기 위하여 도입된다.<sup>(2)</sup> 본 연구에서는 두 온도의 변화를 종합적으로 나타내는 변수로서 사용되

었다. 이전 연구를 검토해 볼 때 온도는 나노유체의 열전달 특성을 설명하는 핵심 변수가 분명하다.<sup>(3,4)</sup> 그렇지만 나노유체의 열물성과 대류열전달 사이의 관련성을 설명하는 체계적 연구는 여전히 미흡하다.

나노유체는 물, 엔진오일 등 기존 유체에 나노미터 크기의 금속입자를 혼합하여 제조한 유체를 말한다.<sup>(5,6)</sup> 금속은 유체와 비교하여 열전도율이 수백배 높기 때문에 나노유체는 순수한 유체와 비교하여 상승된 열전도율을 가지게 된다.

최근에 나노유체의 열전도율 상승과 대류열전달계수 변화 사이의 관계를 규명하려는 연구가 이루어지고 있다. Yang 등<sup>(7)</sup>은 그래파이트를 물속에 분산시킨 나노유체를 이용하여 층류 대류열전달 현상을 연구하였다. 나노입자의 사용은 대류

† Corresponding Author, [shinpyo@kgu.ac.kr](mailto:shinpyo@kgu.ac.kr)

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

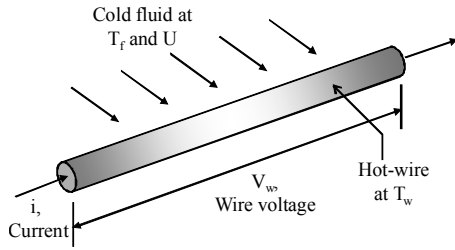


Fig. 1 Convective heat transfer from a hot wire in cross flow of cold fluid

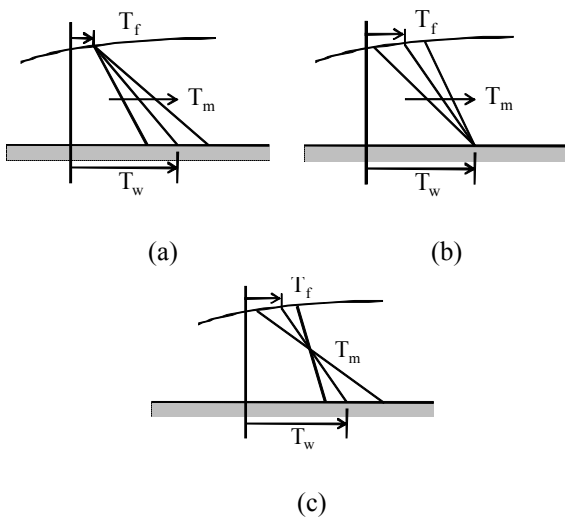


Fig. 2 Various temperature boundary conditions (a) increase of wall temperature, (b) increase of fluid temperature, (c) constant film temperature

열전달계수를 증가시키지만 그 정도는 Xuan과 Li<sup>(8)</sup>의 예측보다는 낮게 측정되었다. Wen과 Ding<sup>(9)</sup>은 물-알루미늄 나노유체에 대하여 그리고 Ding 등<sup>(10)</sup>은 물-CNT(Carbon Nano Tube) 나노유체를 이용하여 대류실험을 수행하였다. 이들의 실험은 원형 파이프의 벽이 등열유속조건으로 가열되는 경우에 대한 것으로 모두 나노유체의 대폭적인 대류열전달계수 상승을 보고하였다.

나노유체의 효과와 관련하여 일반적으로 받아들여지고 있는 사항들은 다음과 같다. 나노유체의 열전도율은 혼합농도가 증가할수록 증가한다.<sup>(4-6)</sup> 농도가 일정할 때 열전도율은 온도가 증가할수록 증가한다.<sup>(4)</sup> 점도는 혼합농도가 증가할수록 증가한다.<sup>(7,8)</sup> 나노유체가 원형파이프 속을 흐르는 내부유동에서 대류열전달계수의 증가정도는 열전도율 증가보다 크다.<sup>(9,10)</sup> 본 연구자는 혼합농

도에 따라 열전도율이 증가한다는 결과에 정성적으로 동의한다. 그러나 정량적으로는 다른 연구자들이 제시한 대폭적인 열전도율 상승 수치는 확인할 수 없었다. 대류열전달계수의 경우에도 열전도율 증가에 비례하여 증가하는 결과를 얻었지만 열전도율 증가폭을 상회하는 증가결과는 얻을 수 없었다.<sup>(11,12)</sup>

본 논문에서는 가열된 열선 주위를 흐르는 나노유체의 대류열전달계수를 다양한 온도경계조건 하에서 실험을 통하여 측정하고 그 결과를 분석하였다. 이를 통하여 나노유체의 열전도율과 경계층 변화가 대류열전달계수 변화에 미치는 영향을 설명하였다.

## 2. 실험 조건의 선정

Fig. 1은 가열된 열선 주위로 냉각 유체가 흐르면서 대류열전달이 이루어지는 경우를 나타낸다. 열선표면의 온도를 일정하게 등온으로 제어할 수 있다면 다양한 대류열전달 실험이 가능하다.<sup>(13)</sup> Fig. 2는 경계층에서 여러 가지 온도경계조건을 보여주고 있다. (a)는 유체온도가 일정할 때 열선의 온도가 증가하는 경우, (b)는 열선의 온도가 일정할 때 유체온도가 증가하는 경우이다. 막온도  $T_m$ 을 식 (1)로 표시할 때 (a), (b) 모두 막온도가 증가되는 경우이다. 이에 대하여 (c)는 열선의 온도  $T_w$ 가 높아지고 유체의 온도  $T_f$ 가 낮아져서 동일한 막온도를 갖는 경우이다.

$$T_m = \frac{T_w + T_f}{2} \quad (1)$$

가열된 고체표면에서 유체로의 열전달은 식 (2)로 표시할 수 있다.

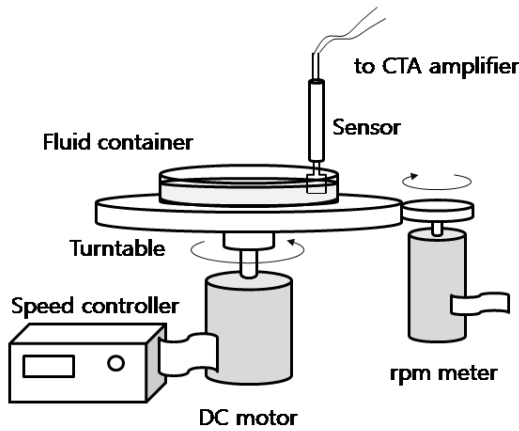
$$k_f A \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_w = h A (T_w - T_f) \quad (2)$$

온도변화가 일어나는 길이는 경계층 두께  $\delta_t$ 가 되고 이때 온도변화는  $(T_w - T_f)$ 의 크기를 가지므로 대류열전달계수  $h$ 는 다음의 크기를 갖는다.<sup>(2)</sup> 식 (3)은 대류열전달계수가 고체벽과 접한 유체막의 열전도율  $k_f$ 에 비례함을 나타낸다.

$$h \sim \frac{k_f}{\delta_t} \quad (3)$$

**Table 1** Experimental conditions

engine oil samples	$U$ (m/s)	$T_w$ (°C)	$T_f$ (°C)
pure	0.1	110	70
0.6wt%	0.2	101	60
1.2wt%	0.3	93	50
2.4wt%		85	40



**Fig. 3** Schematic diagram of experimental setup from reference [13]

나노유체의 열전도율은 온도증가에 따라 대폭 증가한다고 알려져 있으므로 고체벽면의 온도증가에 따라  $h$ 는 증가하게 될 것이다. 온도증가에 따라  $\delta_t$ 가 일정하면  $h$ 는  $k_f$ 의 증가에 비례하게 되지만  $\delta_t$ 가 감소하면  $h$ 는  $k_f$ 의 증가보다 더 크게 증가하는 것으로 나타나게 될 것이다. 반면  $\delta_t$ 의 증가가  $k_f$ 의 증가보다 더 크게 된다면 온도증가에 따라  $h$ 는 감소하게 될 것이다. 다양한 온도 변화에 따른  $h$ 의 변화를 분석한다면 이를 통하여  $k_f$ 의 변화와  $\delta_t$ 의 변화에 대한 평가가 가능하다고 짐작할 수 있다.

본 연구에서 수행한 실험조건을 Table 1에 정리하였다. 유체시료는 순수엔진오일을 포함하여 4종류로서 엔진오일에 0.6, 1.2, 2.5wt%로 graphite 입자(평균직경 55nm)를 혼합하여 제조한 것이다. 2.5wt%는 체적농도로 대략 1%에 해당하며 상온에서 열전도율 상승은 10%정도이다.<sup>(14)</sup> 속도, 열선온도, 유체온도를 각각 3, 4, 4가지 경우에 대하여 실험하였고 따라서 모두 192개의 데이터를

획득하게 된다.

### 3. 실험 장치 및 방법

유속 측정에 사용되는 정온도형 열선유속계 (CTA, Constant Temperature Anemometer) 회로<sup>(15)</sup>를 이용하여 본 연구자는 나노유체 대류열전달 특성을 평가할 수 있는 장치를 제안하였는데 Fig. 3은 그 개략도이다.<sup>(13)</sup>

회전테이블과 열선센서 그리고 정온도 증폭기 (amplifier)가 주요 구성부이다. 유체 속에 놓여지는 센서는 50 $\mu$ m의 백금선으로 제작된다. 이 가는 열선의 온도는 정온도 증폭기의 작용에 의하여 일정하게 유지된다. 유체를 담은 원형용기는 회전테이블에 부착되어 설정된 rpm으로 회전된다. 따라서 중심에서 일정 거리만큼 떨어진 위치에서 일정한 유속을 얻을 수 있다. 이 장치를 이용하여 엔진오일과 글리세린을 실험한 결과 환산된 대류열전달계수는 Churchill과 Bernstein<sup>(16)</sup>의 관계식으로 구한 값과 잘 일치하였다. 대표적 실험 조건에서 열선센서 주위의 Re수를 계산해보면 0.24로 기존 선행 연구들에서 다루었던 Re수 보다 많이 낮아서 동일한 유동조건에서 결과들의 직접 비교에 어려움이 있다. 장치를 개선하여 Re수를 높인다면 더욱 다양한 조건에서의 데이터 획득과 비교가 가능할 것이다.

유체온도 변화에 대한 실험을 실시하려면 대상 유체를 가열 하는 장치를 Fig. 3에 도입해야 한다. 본 연구에서는 유체를 용기 속에 넣고 용기 속에 설치된 가열용 저항에 전류를 흘려서 유체와 용기를 직접 가열하는 방법을 사용하였다. 실험실 온도가 25°C일 때 직류전원을 인가하면 30분 후 유체온도가 90°C까지 도달하였다. 이후 가열을 중단하면 유체온도가 1°C 떨어지는데 대략 1분 정도가 소요되었다.

정온도 증폭기에서 열선센서가 포함된 브릿지의 좌측부분을 Fig. 4에 나타내었다. 브릿지 상단 전압  $V_T$ 와 열선전압  $V_w$ 를 기록한다면 대류열전달계수를 환산할 수 있다. 그림에서  $R_T$ 는 고정저항이고  $R_w$ 는 열선의 저항이다. 직렬회로이므로  $R_T$ 를 흐른 전류는  $R_w$ 를 흐른다.<sup>(13)</sup>

$$i = \frac{V_T - V_w}{R_T} = \frac{V_w}{R_w} \quad (4)$$

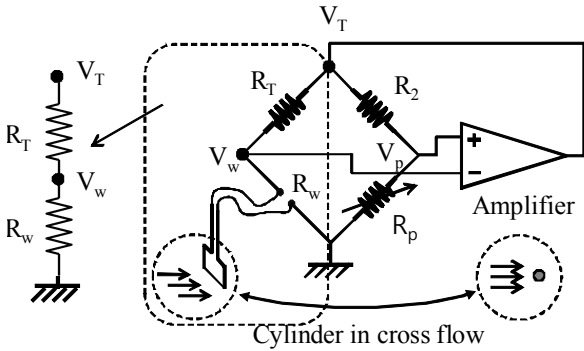


Fig. 4 Voltage dividing circuit out of wheatstone bridge of CTA comprising hot wire sensor  $R_w$

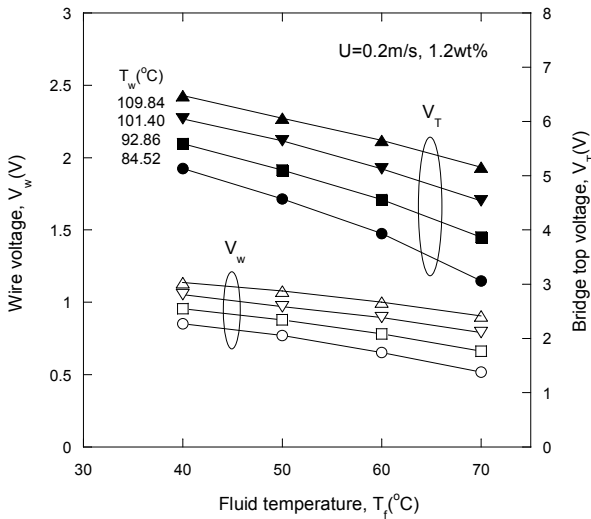


Fig. 5 Typical data of  $V_T$  and  $V_w$  for the evaluation of convective heat transfer coefficient

식 (4)를 통하여  $R_w$ 를 알 수 있고 식 (5)의 온도 저항 관계식을 이용하면 열선의 온도  $T_w$ 를 알 수 있다.  $R_0$ 는  $0^\circ\text{C}$ 에서 센서의 저항값이고  $\alpha$ 는 온도저항계수로서 백금의 경우  $0.0039092^\circ\text{C}$ 이다.

$$R_w = R_0(1 + \alpha T_w) \quad (5)$$

센서에서의 발열량은 대류열전달에 의하여 유체로 전달되므로 식 (6)이 성립하고 이를 통하여  $h$ 를 환산할 수 있다.  $A_w$ 는 센서의 표면적으로 센서의 직경과 길이가  $d$ 와  $l$ 일 때,  $\pi dl$ 이다.

$$\frac{V_w^2}{R_w} = hA_w(T_w - T_f) \quad (6)$$

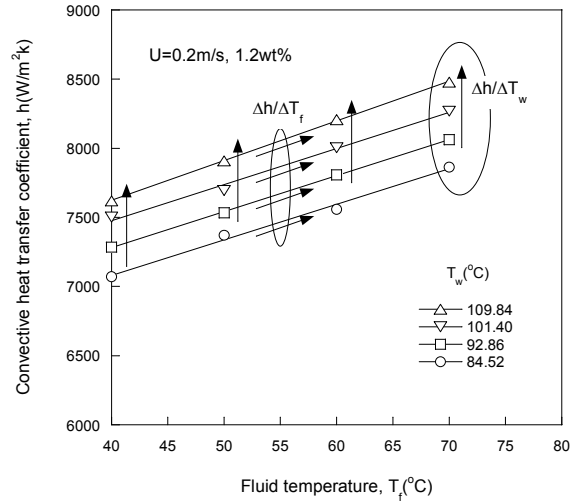


Fig. 6 Change of  $h$  with  $T_f$  when  $U$  and  $T_w$  are kept constant

Fig. 5는 실험에서 획득된 두 개의 전압  $V_T$ 와  $V_w$ 의 예시이다. 열선의 온도를  $109.84^\circ\text{C}$ 로 유지한 상태에서 최초  $90^\circ\text{C}$ 로 가열된 유체의 온도가 70, 60, 50,  $40^\circ\text{C}$ 로 낮아질 때 두 전압을 획득한다. 유속은  $0.2\text{m/s}$ 이고 시료 농도는  $1.2\text{wt}\%$ 이다. 동일한 실험을  $101.40, 93.86, 84.52^\circ\text{C}$ 에 대하여 반복하여 추가 데이터를 획득한다.

#### 4. 결과 및 검토

Fig. 6은 Fig. 5의 데이터와 식 (4), (5), (6)을 이용하여 대류열전달계수를 환산한 것이다. 온도의 영향을 설명하기 위하여 두 개의 기울기를 도입하였다.  $\Delta h/\Delta T_f$ 는 열선온도가 일정할 때 유체 온도의 변화에 따른 대류열전달계수의 변화이며,  $\Delta h/\Delta T_w$ 는 유체온도가 일정할 때 열선온도의 변화에 따른 대류열전달계수 변화를 나타낸다. 열선온도( $110, 101, 93, 84^\circ\text{C}$ )에 따라 4개의  $\Delta h/\Delta T_f$  값을 얻게 되고(그림에서  $\nearrow$ 로 표시) 일정 유체온도( $70, 60, 50, 40^\circ\text{C}$ )에서 열선온도에 따른 4개의  $\Delta h/\Delta T_w$ 를 얻게 된다.(그림에서  $\uparrow$ 로 표시)

Fig. 7의 (a)-(d)는 농도별 데이터이다. 한 농도에는 12개의 직선이 보이는데 속도별로 3그룹으로 구분된다. 아래에서부터  $0.1, 0.2, 0.3\text{m/s}$ 이다. (a)에서  $0.3\text{m/s}$ 의 경우  $\Delta h/\Delta T_f$ 로  $25.70$ 을 표시하였는데 4개 직선 기울기를 평균한 것이다.

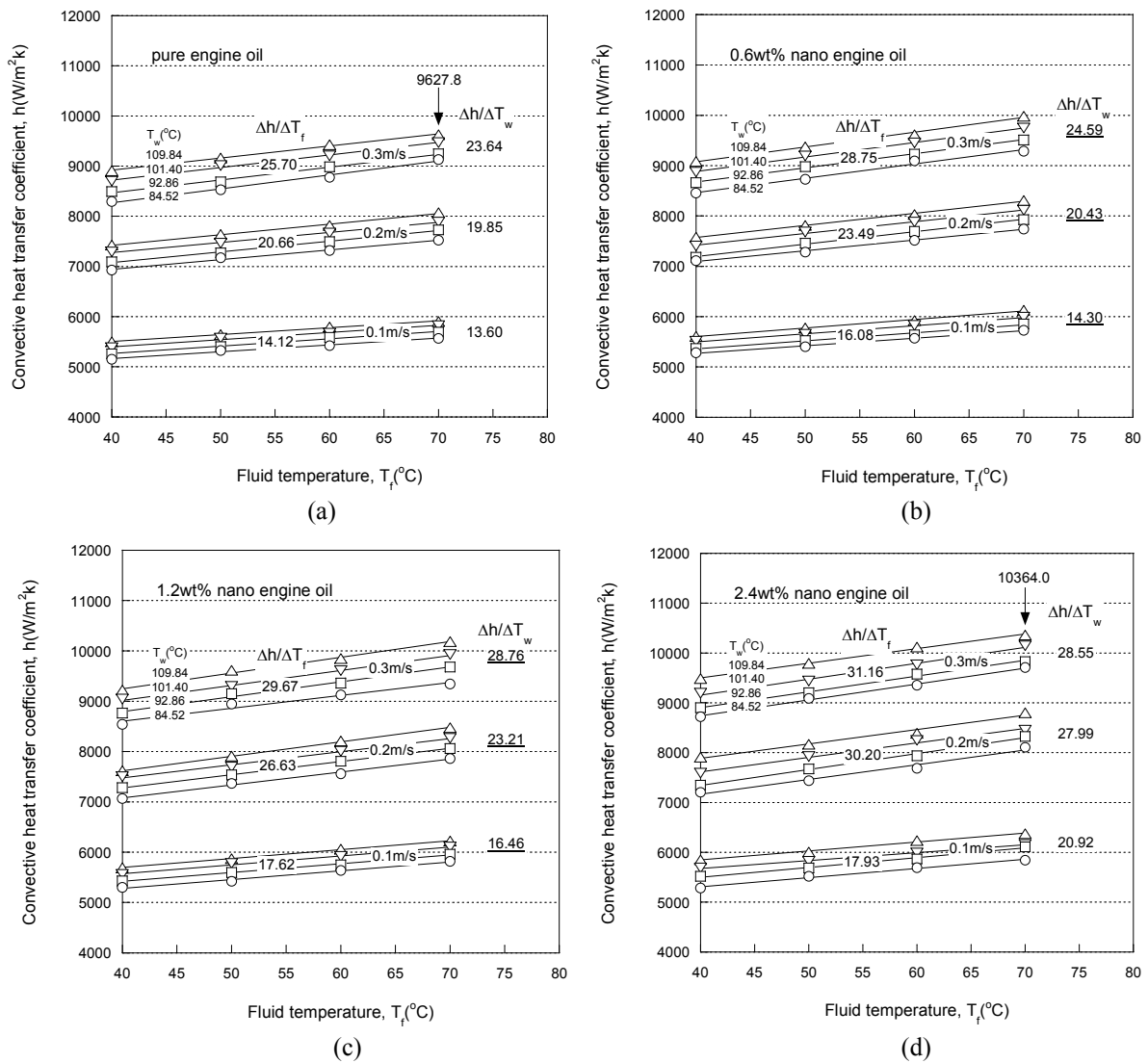


Fig. 7 Effect of wall and fluid temperature on the convective heat transfer coefficient of nano engine oil; a) pure, b) 0.6wt%, c) 1.2wt%, d) 2.4wt%

$\Delta h/\Delta T_w$ 는 23.64를 얻었는데 유체온도 40, 50, 60, 70°C에서 얻은 4개의 기울기를 평균한 것이다.

$h$ 를 환산하기 위하여  $V_T$ ,  $V_w$ ,  $R_T$ 와  $T_f$ 를 측정해야 하는데 이들은 항상 불확실도(uncertainty)를 포함하게 된다. 이들 불확실도가 식 (4), (5), (6)을 통하여  $h$ 의 총불확실도에 전파된다.  $V_T$ ,  $V_w$ 와  $R_T$ 는 Fluke Hydra Series II 2620A 멀티미터를 사용하였는데 사용자 매뉴얼을 근거로 전압 측정 불확실도는 0.018%, 저항 측정의 불확실도는 0.013%로 산정하였다. 유체온도 측정에 0.1°C의 눈금을 가진 정밀온도계를 사용하였는데 이 눈금을 온도측정의 불확실도로 고려하였다. Fig. 7(c)

에서 유체속도 0.2m/s, 유체온도 60°C, 열선온도 101.4°C의 경우  $h$ 는 7998.16W/m<sup>2</sup>K인데 각각의 변수들의 불확실도를 고려하면 여기에 포함되는 총불확실도는 21.38W/m<sup>2</sup>K로 평가된다. Fig. 7(c)에서  $\Delta h/\Delta T_w = 23.21$ ,  $\Delta h/\Delta T_f = 26.63$ 의 숫자를 볼 수 있는데 이것은 열선의 온도와 유체의 온도가 10°C 변화했을 때  $h$ 의 변화가 232.1, 266.3정도임을 의미한다. 불확실도 21.38W/m<sup>2</sup>K이 고정적으로 모든 데이터에 나타난다고 가정하였을 때 최소한 온도의 증분이 10°C 정도는 되어야  $h$ 의 변화를 정성적으로 설명할 수 있다고 판단하였다. 즉, Table 1의 실험조건들은 불확실도 해석 결과를 고려하여 설정한 것이다.

(a)-(d)의 결과비교를 통하여 다음 사항을 확인할 수 있다. 첫째, 열선온도가 일정할 때 유체온도가 증가하면 대류열전달계수는 증가한다. 같은 유체 농도에서는 속도가 높을수록  $\Delta h/\Delta T_f$ 가 큰 것을 확인할 수 있다. 또한 (a)-(d)를 동일속도 조건에서 비교하면 입자 혼합농도가 높을수록  $\Delta h/\Delta T_f$ 가 크게 나타났다. 식 (3)에서 벽온도의 직접 영향을 받는  $k_f$ 는 벽온도가 일정한 경우 일정하게 유지될 것이다. 그런데 실험결과는 벽온도가 일정해도 유체온도가 증가하는 경우  $h$ 가 증가하는 것으로 나타났다. 이것은  $\delta_t$ 가 유체온도 증가에 따라 감소하였다는 것을 의미한다. 벽온도가 일정하여도 유체온도의 증가는 막온도를 증가시킨다. 이에 따라 경계층의 평균온도가 올라가고 유체의 점성이 감소되어  $\delta_t$ 가 감소된다고 설명할 수 있다.

둘째, 유체온도가 일정할 때 열선온도가 증가하면 대류열전달계수는 증가한다. 그래프에 유체온도가 일정한 가상의 수직선을 따라가면 열선온도가 일정한 직선들과 만나는데 선들 사이에 간격이 거의 동일함을 알 수 있다. 이것은 열선온도 증가에 따라 대류열전달계수가 증가하지만 동일한 농도, 속도조건에서는 열선온도 증가에 따른 대류열전달계수 증가가 일정함을 의미한다.

일정한 농도에서 나노유체의 열전도율은 온도에 따라 크게 증가한다고 알려져 있다. Das 등<sup>(3)</sup>은 1%와 4% 체적농도의  $Al_2O_3$ -물 나노유체에 대하여 상온에서는 각각 3%와 10%의 열전도율 증가가 생기지만 온도가 30°C로 증가함에 따라 순수유체 대비 10%와 25%로 열전도율이 크게 증가하는 결과를 보고하였다. CuO에 대해서는 30°C 증가에 대하여 이 결과보다도 더 큰 30%, 40%의 증가를 보고하였다. Das 등의 열전도율 측정결과는 물을 기반으로 한 나노유체에 대한 것으로 오일을 기반으로 한 본 연구의 결과와 직접 비교할 수는 없다. 일단은 나노입자들의 불규칙한 운동이 온도의 증가에 따라 더욱 활발해져서 열전도율이 대폭 증가하는 Das 등의 결과가 나노오일의 경우에도 정성적으로 적용된다고 가정하자. 그렇다면 동일한 속도의 직선 그룹에서 유체온도가 일정할 경우, 직선들 사이의 간격이 등간격이 아니고 열선의 온도가 상승할수록 넓어져야 한다. 왜냐하면 열선의 온도 상승에 따라 열전도율이 크게 증가하기 때문이다. 그러나 본 실험에서는 간격의 차이를 관찰할 수 없었다. 이것은 온도의 증가에 따른 열전도

율 증가가 크지 않거나 열전도율 상승이 크다고 해도  $\delta_t$  또한 증가하여 대류열전달계수의 증가가 나타나지 않는다고 해석된다. 그러나 첫 번째 논의에 의하면 열선온도의 증가도 결국 막온도를 증가시키므로 나노유체의 경우  $\delta_t$ 가 감소할 수는 있어도 증가할 수는 없다. 이 효과는 대류열전달계수의 증가로 나타난다. 만약 열전도율의 급격한 증가가 더해진다면 대류열전달계수는 Fig. 7의 결과보다 열선온도 변화에 더 민감할 것이다. 그러나 대류열전달계수 변화가 열선온도 변화에 따라 크지 않은 것으로 판단할 때 온도에 따른 열전도율 증가는 크지 않다고 말할 수 있다.

셋째, (a)-(d)를 보면 그래프의 형태가 거의 비슷하다. 그러나 입자 농도가 증가할수록 두 가지 변화율 크기가 커지는 것을 확인할 수 있다. 예를 들어 0.2m/s의 경우  $\Delta h/\Delta T_f$ 가 20.66, 23.49, 26.63, 30.20로 커진다. (a)와 (d)에서 ↓로 표시한 점은 같은 온도 및 속도조건에서 농도만 다른 경우의  $h$ 이다. 2.4wt% 나노오일이 순수엔진오일과 비교하여 약 7.6%의 증가된 대류열전달계수를 갖는다. 상온에서 순수오일 대비 2.4wt% 나노오일의 열전도율 증가를 10%라고 할 때 대류열전달계수의 증가정도는 열전도율 증가를 초과하지 못하였다. 이 결과는 대류열전달계수의 대폭적인 상승을 제시한 이전 연구와 차이를 보인다. Wen과 Ding<sup>(9)</sup>은 알루미늄 입자를 1.6%의 농도로 물속에 분산시킨 나노유체의 경우 약 47%의 대류열전달계수 증가를 보고하였는데 이 값은 열전도율 상승값 10% 보다 매우 높은 결과이다. 물론 기본유체와 사용된 입자가 다르고 내부유동과 외부유동의 차이가 있기 때문에 이전 결과와 본 연구 결과의 직접 비교는 어렵다. 기존 연구결과와의 차이를 설명할 수 있는 추가적인 연구가 필요함을 알 수 있다.

Hong 등<sup>(1)</sup>은 수치해석을 통하여 가열된 열선 주위에 공기가 흐를 때 열선과 공기의 온도조건에 따른 대류열전달계수의 변화를 검토하였다. 이들의 해석모델은 Collis와 Willims<sup>(17)</sup>의 실험결과와도 잘 일치한다. 공기의 경우에는 유속과 열선의 온도가 일정할 때 유체온도가 증가하면 대류열전달계수가 감소한다. 그 이유는 벽온도가 일정하므로  $k_f$ 는 일정한데 유체온도의 증가에 따른 점도의 증가(결국 Re수 감소)가 경계층의 두께 증가로 나타나서 식 (3)에서 분자는 일정하고 분

**Table 2** Convective heat transfer coefficient at the same film temperature of 80°C

1.2wt%, 0.2m/s				
case	$T_w$ (°C)	$T_f$ (°C)	$T_m$ (°C)	$h$ (W/m <sup>2</sup> K)
1	109.84	60	84.92	8208.81
			<u>80.00</u>	<u>7950.86</u>
	109.84	50	79.92	7946.67
	101.40	60	80.70	8005.06
2			<u>80.00</u>	<u>7969.29</u>
	101.40	50	75.70	7749.59
	92.96	70	81.48	8063.51
			<u>80.00</u>	<u>7987.52</u>
3	92.96	60	76.48	7806.79

모는 증가하게 되어 대류열전달계수가 감소하기 때문이라고 설명하였다. 반면 유체온도와 속도가 일정할 때 열선온도가 증가하면  $h$ 는 증가한다.  $T_w$ 의 증가에 의하여 전체 경계층의 온도가 증가하면 점도증가(Re수 감소)가 나타나고 경계층은 두꺼워진다. 그러나 동시에  $T_w$ 의 증가는  $k_f$ 의 증가를 가져온다. 엄밀한 해석에 의하면  $k_f$ 의 증가율이  $\delta_t$ 의 증가보다 크게 나타나게 되어 식 (3)에서  $h$ 가 증가하는 결과를 얻게 된다. 그러므로 공기의 경우에는 온도조건에 따라 대류열전달계수가 증가할 수도 감소할 수도 있다.

그러나 오일의 경우에는 열선온도나 유체온도의 증가에 의하여 막온도가 증가하면 점도가 감소하고 경계층두께는 얇아진다.<sup>(2)</sup> 그런데 고체와 접한 유체막의 열전도율은 일정하거나 증가하므로 나노오일의 대류열전달계수는 증가하는 경향을 가지게 되며 감소되는 경우는 나타나지 않는다. 그리고 본 연구 결과에 의하면 대류열전달계수의 증가정도는 상온에서 농도에 따른 열전도율 증가 정도와 비슷하였다.

마지막으로 Table 2에서 넷째 열의 밑줄이 그려져 표시된 수치들은 1.2wt%, 0.2m/s의 실험데이터에서 막온도 80°C에서의 대류열전달계수를 추정한 것이다. 정확히 막온도 80°C에서의 실험을 구현하기 곤란하므로 Fig. 7의 실험자료에서 선형보간으로 데이터를 추정하였다. 자료 처리 전에는 case 1과 같이 열선온도가 높은 경우의 대류열전달계수가 case 3과 같이 유체온도가 높은 경우와 비교하여 더 클 것으로 예상하였다. 위에서도 설명하였지만 이전 Das 등의 연구에서 열전도

율의 온도의존성이 매우 크다고 보고하였기 때문이다. 식 (3)을 통하여 판단할 때 열전도율의 온도의존성이 매우 크다면 막온도가 같아도 열선의 온도가 높은 경우에 더 높은 대류열전달계수가 나타나야 한다. 그러나 동일한 막온도 조건인 case 1, 2, 3에서 얻은 대류열전달계수들 사이에는 큰 차이를 볼 수 없었다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 나노유체 대류열전달 성능 평가장치를 이용하여 다양한 온도조건하에서 대류열전달계수를 측정하였고 그 결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 열선온도가 일정할 때 유체온도가 증가하면 대류열전달계수는 증가하였다. 이 경우 대류열전달계수 상승의 주요 원인은 열전도율 증가가 아니고 유체온도 증가에 따른 점도감소이다.
- (2) 유체온도가 일정할 때 열선온도가 증가하면 대류열전달계수는 증가하였다.
- (3) (1)항과 (2)항의 경우에 공통적으로 입자혼합농도가 높고 속도가 높을수록 대류열전달계수는 크게 나타났다.
- (4) (2)항의 경우 동일한 유동조건에서 열선온도 증가에 따른 대류열전달계수 증가는 비슷하였다. 이것은 나노유체의 열전도율이 온도증가에 따라 크게 증가하지 않음을 의미한다. 열전도율의 온도의존성에 대한 재검토가 필요함을 알 수 있다.
- (5) 막온도가 일정한 경우에도 대류열전달계수의 급격한 변동은 없었다. 이것은 상온에서의 열전도율 상승이 대류열전달계수에 반영되고 온도 상승에 따른 추가적 상승은 점도감소가 영향을 미쳤기 때문이다.
- (6) 본 연구는  $Re \sim 0.24$  정도의 낮은 Re수에 대한 외부유동 결과로서 내부유동 또는 높은 Re수에 대한 결과와는 차이가 있을 것이다.

### 후 기

이 논문은 2011학년도 경기대학교 연구년 수혜로 연구되었음.

### 참고문헌

(1) Hong, G. H., Kang, S. H. and Kauh, S., 1993,

- "Effects of Variable Properties on the Laminar Heat Transfer around a Circular Cylinder in a Uniform Flow," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng.*, Vol. 17, No. 6, pp. 1584~1595.
- (2) Incropera, F. P. and DeWitt, D. P., 2001, *Introduction to Heat Transfer*, 6th Ed., Wiley, pp. 116~118.
- (3) Das, K. D., Putra, N., Thiesen, P. and Roetzel, W., 2003, "Temperature Dependence of Thermal Conductivity Enhancement for Nanofluids," *ASME Tran. Journal of Heat Transfer*, Vol. 125, pp. 567~574.
- (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) Choi, U. S., 1995, "Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles," *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, San Francisco, CA, Nov., pp. 12~17.
- (6) Lee, S., Choi, U. S., Li, S. and Eastman, J. A., 1999, "Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles," *ASME Tran. Journal of Heat Transfer*, Vol. 121, pp. 280~289.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) Ding, Y., Alias, H., Wen, D. and Williams, R. A., 2006, "Heat Transfer of Aqueous Suspensions of Carbon Nanotubes (CNT Nanofluids)," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, pp. 240~250.
- (11) 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.
- (12) 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.
- (13) 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.
- (14) 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.
- (15) Kauh, S. K. and Lee, T. S., 1986, "Manufacture of Hot-Wire Anemometer and the Improvement of Its Performance," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng.*, Vol. 10, No. 4, pp. 541~557.
- (16) 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.
- (17) Collis, D. C., and Willims, M. J., 1959, "Two-Dimensional Convection from Heated Wires at Low Reynolds Numbers," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 6, No. 3, pp. 357~384.