

등온으로 유지되는 가는 열선주위를 흐르는 나노유체의 대류열전달계수 측정실험

이 신 표^{**†}

* 경기대학교 기계시스템공학과

Measuring Convective Heat Transfer Coefficients of Nanofluids over a Circular Fine Wire Maintaining a Constant Temperature

Shinpyo Lee^{**†}

* Dept. of Mechanical Engineering, Kyonggi Univ.

(Received April 29, 2011 ; Revised July 18, 2011 ; Accepted July 21, 2011)

Key Words: Nanofluids(나노유체), Convective Heat Transfer Coefficient(대류열전달계수), Constant Temperature Anemometer(정온도형 열선유속계), Mean Film Temperature(막온도)

초록: 본 논문은 열전달 유체로서 나노유체의 유용성을 평가하기 위한 장치를 설명한 것이다. 열선센서를 이용한 나노유체 대류성능 평가장치는 몇 가지가 제안되었으나 센서의 작동조건이 불명확한 단점이 있었다. 본 연구에서는 일정한 온도로 유지되는 가는 열선 주위를 흐르는 대류열전달계수를 측정하여 나노유체의 유용성을 평가하였다. 제시된 장치의 동작원리와 실험방법을 자세히 설명하였으며 먼저 순수유체에 대한 실험을 통하여 장치의 타당성을 검증하였다. 그래파이트 나노오일을 이용하여 대류열전달계수에 미치는 농도와 속도 그리고 온도의 영향을 종합적으로 고찰하였다.

Abstract This paper describes a measuring apparatus that can be used to appraise the effectiveness of nanofluids as new heat-transfer-enhancing fluids. A couple of apparatuses using fine hot wires as sensors have been proposed for this purpose; however, they have a technical weakness related to the uncertain working conditions of the sensor. The present method uses the convective heat transfer coefficient from a hot wire as an indication of the heat transfer effectiveness of the nanofluid, where the temperature of the wire remains constant during the experiment. The operating principle and experimental procedure are explained in detail, and the validity of the system is tested with pure base fluids. The effects of particle concentration, velocity, and temperature on the heat transfer coefficients of the nanofluids are discussed comprehensively using the experimental data for graphite nanolubrication oil.

1. 서 론

본 논문은 제조된 나노유체의 대류열전달 성능을 간단하며 정확하게 평가할 수 있는 장치의 개발에 관한 것이다.

나노유체는 물, 엔진오일 등 기존 유체에 나노미터 크기의 금속입자를 혼합하여 제조한 새로운 유체를 말한다.⁽¹⁾ 금속은 유체와 비교하여 열전도율이 수백배 높기 때문에 나노유체는 순수한 유체와 비교하여 상승된 열전도율을 가지게 된다. 따라서 나노유체를 사용하는 시스템은 기존 유체

를 사용하는 시스템과 비교하여 높은 열교환효율을 갖게 될 것으로 기대할 수 있다. 나노유체 열전도율 측정에 대한 실험 결과들은 기존 이론에 의한 예상보다 높은 열전도율 상승 결과들을 보여주고 있다.^(2,3) 이론 연구자들은 이와 같은 실험 데이터를 근거로 나노유체의 열전도율 상승효과를 설명하는 여러 가지 메커니즘을 제시하였다. 가장 널리 인정되는 이론은 나노입자들의 불규칙적인 운동이 유체속에서 부가적인 혼합을 일으켜 열전도율 상승결과를 가져왔다고 설명하는 것이다.⁽⁴⁾ 나노유체의 최종목표는 대류열전달 효율을 높이는 것이다. 그러나 나노유체를 실용적으로 사용하기에는 아직도 해결해야 할 여러 가지 기술적 어려움이 있다. 또한 열전도율 향상이 직접

† Corresponding Author, shinpyo@kgu.ac.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

적으로 대류열전달효율 즉 대류열전달계수의 상승으로 나타나지 않을 수도 있기 때문에 적용 효과에 대한 의문은 여전히 남아 있다. 따라서 나노유체의 개발단계에서 소량의 시료를 이용하여 나노유체 사용의 정당성을 쉽게 판단할 수 있는 방법이 있다면 매우 유용할 것이다.

지금까지 개발된 나노유체 사용에 대한 평가방법은 열전도를 상승정도를 이용하는 것이다. 이 경우 비정상열선법(transient hot-wire method) 장치가 주로 이용되었다.^(2~4) 이 장치의 가장 큰 특징은 시료를 정적인 상태로 유지하면서 측정하는 것이다. 따라서 측정된 열전도를 상승결과를 동적인 상황에서의 대류열전달 증가로 예상하는 것은 다소 무리가 따른다. 최근에 나노유체의 열전도를 상승과 대류열전달계수 변화 사이의 관계를 규명하려는 연구가 이루어지고 있다. Yang 등⁽⁵⁾은 그래파이트를 물속에 분산시킨 나노유체를 이용하여 층류 대류열전달 현상을 연구하였다. 나노입자의 사용은 대류열전달계수를 증가시키지만 그 정도는 Xuan과 Li⁽⁶⁾의 예측보다는 낮게 측정되었다. Wen과 Ding⁽⁷⁾은 알루미늄 입자를 1.6%의 농도로 물속에 분산시킨 나노유체의 경우 약 47%의 대류열전달계수 증가를 관찰하였는데 이 값은 열전도를 상승값 10% 보다도 높은 결과였다. Ding 등⁽⁸⁾은 물-CNT(Carbon Nano Tube) 나노유체에 대하여 3배이상 증가된 대류열전달계수를 보고하였다. 제시된 데이터들은 서로 차이를 보이는데 이들이 사용한 열전달 평가장치가 대류특성을 엄밀히 시험하기에는 부적절하였기 때문으로 판단된다.

이들의 실험들은 모두 원형 파이프의 벽이 등열유속조건으로 가열되는 경우에 대하여 수행된 것이었다. 이 경우 대류열전달계수를 환산하기 위하여 장치의 여러 곳에서 온도, 압력, 유량, 전력 등을 측정해야 하는데 이들 데이터의 작은 오차는 최종 대류열전달계수에 크게 영향을 미치게 된다. 이 장치는 하나의 샘플을 시험하고 난 후 내부에 나노입자에 의한 파울링(fouling)이 불가피하다. 이를 철저히 세척하지 않으면 이후 다른 농도의 샘플 실험에 영향을 주게 된다. 또한 보통 장치가 대형이고 그 결과 많은 양의 시료가 필요한데 열전달 효과에 대한 확신도 없이 대량의 시료를 만든다는 것은 시간적, 비용적으로 여전히 많은 어려움이 따른다. 따라서 나노유체 개

발의 초기 단계에서 소량의 시료로 간단하고 정확히 열전달 유용성을 평가할 수 있는 장치가 매우 필요함을 알 수 있다.

2. 나노유체 대류열전달계수 평가장치

2.1 이전장치들에 대한 고찰

본 연구자는 나노유체의 대류열전달 성능을 평가할 수 있는 몇 가지 방식들을 제안하였다. 첫 번째 방식⁽⁹⁾은 아크릴 튜브에 유체를 채우고 유체가 튜브 속을 흐를 때 튜브의 끝에 위치한 열선으로부터의 냉각 열량을 측정하여 대류열전달계수를 환산하는 것이었다. 이 장치는 물, 글리세린, 엔진오일에 대하여 명백한 열전달 특성차이를 보였으며 나노유체의 농도별 특성도 파악할 수 있었다. 시험결과는 Churchill과 Bernstein⁽¹⁰⁾의 실린더 대류관계식을 잘 만족하여 장치의 정당성을 증명할 수 있었다. 이 방식은 정지된 열선주위를 유체가 흐르는 방식인데 튜브내를 흐르는 유체의 속도를 정확히 설정하는데 어려움이 있었다. 이를 개선하여 정지한 유체속을 가열된 열선이 이동하도록 선형이송장치를 도입하여 장치를 개선하였다.⁽¹¹⁾ 위에서 설명한 방식과 유사한 원리를 채택한 장치를 일본 특허⁽¹²⁾에서 찾을 수 있다. 세라믹공정에서 혼합물 농도에 따라 열선으로부터의 신호가 달라지는데 이를 통하여 혼합물 상태를 판단하였다.

대류열전달 특성은 열선(발열체) 표면온도와 유체온도의 평균인 막온도에서 보통 표현된다.⁽¹³⁾ 그런데 이전의 연구들^(9,11,12)은 모두 그 열선의 작동조건이 불분명하다. 즉 센서의 조건을 등열유속조건이나 등온조건으로 명확하게 설정하는 것이 불가능한데 그 결과 데이터 정리가 복잡해진다. 온도변화에 따른 열전달 특성 규명을 위해서는 열선의 온도를 연구자의 의도에 맞게 정확히 설정하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 열선을 이용한 대류열전달 평가장치에 등온조건하에서 대류열전달계수 실험이 가능하도록 정온도형 열선유속계 회로를 도입하였다. 또한 열선센서를 흐르는 유속이 정확히 설정되도록 회전대(turtable)를 도입하여 실험장치를 개선하였다. 개발된 새로운 장치를 이용하여 나노유체의 대류열전달 특성을 혼합농도, 유동속도, 막온도의 관점에서 고찰할 수 있었다.

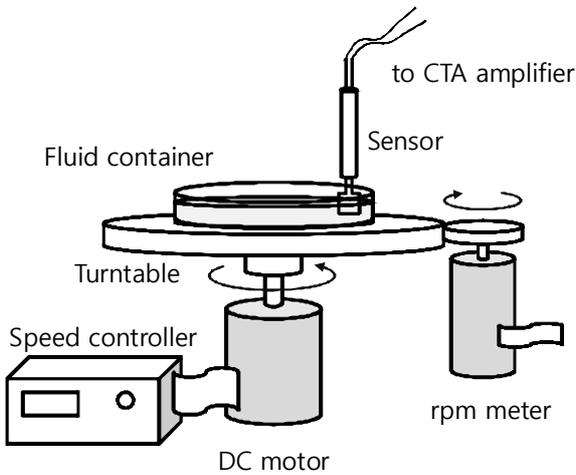


Fig. 1 Schematic diagram of turntable system

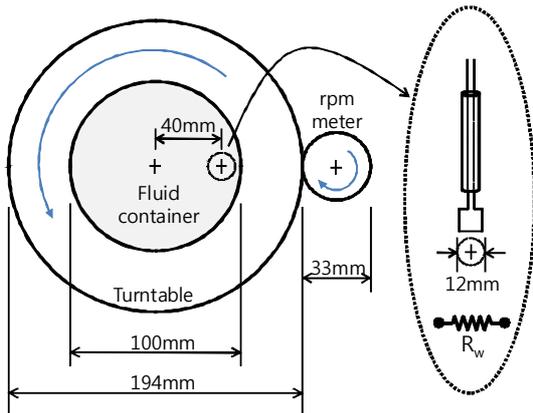


Fig. 2 Dimensions of turntable and hot-wire sensor

2.2 회전대에 의한 유동발생 장치

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 회전대에 의한 유속 발생장치의 개략도이다. 속도조절이 가능한 DC모터를 이용하여 회전테이블의 회전수를 조절하였다. 회전대 측면에 rpm meter(DT-2235A)가 부착되어 회전수를 모니터링 하였다. 중심에는 유체 용기(Schale: 샬레)가 부착되어 있으며 그림에 표시한 바와 같이 용기의 원주 근처에 센서가 설치된다. 열선센서는 정온도 유지회로(원리는 다음 절 참조)에 연결되어 측정 기간 동안 온도가 일정하게 유지된다. 이전의 장치⁽¹¹⁾에서는 직선 이송장치에 센서가 장착되고 이 센서가 정지된

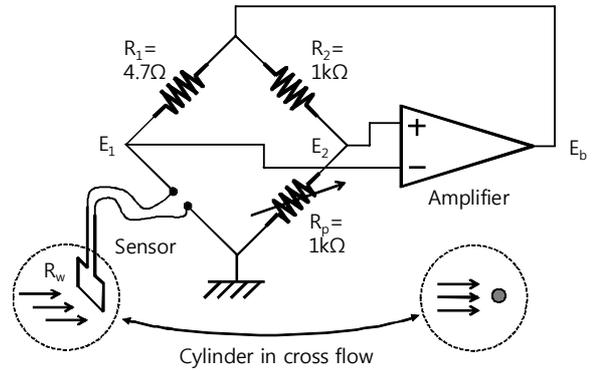


Fig. 3 Schematic diagram of negative feedback circuit to maintain the temperature of a hot-wire sensor constant

유체 속을 왕복 운동하였다. 그런데 고속 왕복운동에서 센서지지대에 의하여 시료에 파동이 발생하였다. 이와 비교하여 Fig. 1의 장치는 일정한 방향으로 회전하므로 센서주위로 안정된 유속 확보가 가능하다. Fig. 2는 Fig. 1에 표시한 장치의 각부 치수를 나타낸 것이다. 중심에서 40mm의 위치에 열선센서를 위치시킨다. 센서는 직경 50 μ m의 백금선을 사용하였으며 길이는 12mm이다.

2.3 정온도 열선 유지회로의 작동원리

전기 도선 발열체가 있고 이 도선의 온도를 일정하게 유지하는 경우를 가정해 보자. 도선 외부의 유체가 공기이고 온도와 속도가 일정할 때 이 도선에 일정한 전류를 흘리면 외부로의 대류열전달과 자체발열이 균형을 이루는 조건에서 도선의 온도가 결정되고 일정하게 유지된다. 그러나 만약 유속이 증가하면 대류열전달이 증가하게 되고 도선의 온도는 낮아지게 된다. 다시 이 도선의 온도를 처음의 상태로 되돌리려면 도선에 가하는 전압(전류)을 증가시켜 발열량을 증가시켜야 한다. 이와 반대로 공기의 속도가 감소하면 대류열 전달량이 감소하고 도선의 온도는 증가하게 될 것이다. 도선의 온도를 처음 상태로 되돌리려면 도선에 가하는 전압을 낮추어서 흐르는 가열전류를 줄여야한다. 따라서 도선 발열체의 온도를 일정하게 유지하기 위하여 제어회로가 필요함을 알 수 있다.

연구에서 사용한 정온도 열선 유지회로를 Fig. 3에 나타내었다. 휘스톤브릿지(Wheatstone bridge)와 증폭기로 구성되어 있으며 이 두 부분이 부귀

환 제어회로(negative feedback control circuit)를 이루도록 연결되어 있다. R_w 로 표시한 것이 열선센서이며 이 온도를 일정하게 유지하는 것이 회로의 목적이다. 사용한 센서는 공기 난류유동 측정에 사용하는 길이 2mm, 직경 5 μ m의 텅스텐 열선과 비교하여 표면적($=\pi \cdot d \cdot L$)이 약 60배(길이 6배, 직경 10배)이다. 또한 액체의 경우는 공기보다 보통 대류열전달계수가 10배 이상이다. 대류열전달양은 대류열전달계수와 표면적에 비례하므로 Fig. 3에 표시한 회로는 공기용과 비교하여 충분한 가열전류를 공급할 수 있도록 설계되어야 한다. 이점이 기존 열선유속계 회로와의 차이점이며 나머지 회로의 작동원리는 같다.

열선은 온도에 따라 그 저항이 식 (1)과 같이 선형적으로 변하는데 (절편 R_0 , 기울기 $R_0 \cdot \alpha$) 이를 열선의 온도-저항관계식이라고 부른다.

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

R_w 는 동작 저항이고 R_0 는 0°C에서 저항이다. α 는 온도저항계수인데 백금선의 경우 0.0039092/°C이다. 식 (1)은 온도가 증가하면 저항이 증가하고 저항을 측정하면 그 온도를 알 수 있음을 나타낸다.

브릿지는 4개의 저항으로 구성되는데 R_1 , R_2 , 그리고 R_p 는 고정저항이고 R_w 는 위의 식 (1)에서 설명한 바와 같이 온도에 따라 저항이 변한다. R_p 는 표면에 눈금(dial)을 가지고 있어서 0에서 1k Ω 까지 저항을 바꿀 수 있는데 한번 설정하면 고정저항으로 동작한다. 브릿지 상단에 가해진 전압(bridge top voltage) E_b 는 4개의 저항에 의해 분할되어 다음 식 (2), (3)과 같이 E_1 과 E_2 로 표시된다.

$$E_1 = \frac{R_w}{R_1 + R_w} E_b \quad (2)$$

$$E_2 = \frac{R_p}{R_2 + R_p} E_b \quad (3)$$

부귀환 제어회로의 기능은 증폭기에 입력되는 이 두 전압의 차이가 0이 되도록 E_b 를 조절하는 것이다. 이에 따라 R_w 가 조절되어 식 (2)와 (3)이 같아진다. E_1 과 E_2 가 같으면 브릿지가 균형을 이루었다고 말하고 다음의 식 (4)를 얻게 된다.

$$R_1 \cdot R_p = R_2 \cdot R_w \quad (4)$$

부귀환 작용을 간략히 설명하면 다음과 같다. 열선 외부 냉각조건이 변화되면 T_w 가 변하고 식 (1)에 따라 R_w 가 변한다. 이 때 식 (2)와 (3)에서 R_w 를 제외한 나머지 저항들은 모두 고정저항이므로 E_1 과 E_2 사이엔 차이가 발생하여 직류증폭기에 전달되는 전압은 (+) 또는 (-)가 될 것이다. 예를 들어 균형을 이루고 있던 열선주위의 속도가 증가했다고 가정하자. 속도가 증가하면 대류열전달계수가 증가하고 열선은 순간적으로 냉각될 것이다. 이것은 열선온도 T_w 가 감소되는 것을 의미하고 식 (1)에 따라 R_w 는 감소하게 된다. R_w 의 감소는 식 (2)에서 E_1 이 E_2 와 비교하여 순간적으로 작아지는 것을 의미하며 증폭기의 이득(gain)을 G 라고 할 때 다음의 식 (5)로 표시되는 출력 E_b 가 증가하는 효과로 나타난다.

$$E_b = G(E_2 - E_1) \quad (5)$$

증가된 E_b 에 의하여 열선에는 더 많은 가열전류가 흐르게 되므로 열선의 온도는 증가하게 된다. 즉, 외부속도의 증가로 냉각되어 낮아진 열선의 온도가 다시 증가되도록 부귀환 제어회로가 작동하고 열선은 다시 처음 온도가 된다. 속도가 감소한 경우는 위의 설명을 정확히 반대로 하여 설명할 수 있다. 냉각조건의 변화로서 속도변화율 예로 들었다. 유체온도의 변화와 순수유체에서 나노유체로의 열물성 변화가 센서의 또 다른 냉각조건 변화가 된다. 순수유체와 나노유체의 대류열전달 성능이 다르다면 동일한 유동조건 아래에서 열선을 동일한 온도로 유지시키기 위하여 필요한 전력양이 다를 것이다.

Fig. 3에 나타낸 회로 제작에 대한 상세한 도면과 설명은 여러 연구에서 찾을 수 있다. Kauh와 Lee⁽¹⁴⁾는 열선유속계의 요소를 모델링하여 정특성과 동특성을 해석하였다. Paik 등⁽¹⁵⁾은 실리콘 베이스에 20개의 백금선을 증착시켜 마이크로히터를 제작하고 이 히터위에서 액적을 증발시킬 때 각각의 히터를 등온으로 유지하기 위한 전력을 측정하여 액적의 증발 특성을 정량적으로 고찰하였다.

Fig. 3에서 고정저항의 공칭값은 각각 4.7 Ω 과 1k Ω 이나 LCR미터(HP E4925A)로 정밀하게 측정

한 결과는 4.888Ω, 995.3Ω이다. 브릿지가 균형을 이루면 저항 R_p 의 수치는 식 (4)에 의하여 R_w 를 나타낸다고 할 수 있다. 실험실온도 21.8°C에서 R_p 를 176Ω으로 설정하였을 때 $E_1=E_2$ 가 되었다. $R_p=176\Omega$ 을 식 (4)에 적용하면 R_w 로 0.8643Ω (=4.888 · 176/995.3)을 얻는다. 이 저항값은 센서 지지대와 앰프로 연결되는 전선의 저항 0.21Ω을 포함한 것으로 순수하게 열선의 저항은 0.6543Ω이다. 이 저항은 21.8°C에서의 저항인데 식 (1)을 이용하면 20°C의 저항으로 환산할 수 있다. 식 (1)을 이용하여 R_0 를 계산해보면 0.6029Ω (=0.6543/(1+0.0039092 · 21.8))이다. 이 값을 이용하여 20°C에서의 저항을 계산해보면 0.650Ω (=0.6029×(1+0.0039092 · 20.0))이다. 열선의 직경 (=50 μm), 20°C에서의 비저항(=ρ=10.5×10⁻⁸Ω · m), 길이(=2mm)를 이용하여 잘 알려진 다음의 식 (6)으로 이론적인 저항을 계산하면 0.6420Ω이 된다. 이를 통하여 R_p 를 통한 측정값은 R_w 를 잘 표시하고 있다고 말할 수 있다.

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (6)$$

R_p 를 176Ω으로 설정하면 실험실온도에서 브릿지가 균형을 이루므로 이론상 열선을 가열하기 위한 전력은 필요하지 않다. 만약 R_p 를 176Ω보다 높은 200Ω으로 설정하였다고 가정하자. 이 경우 부귀환증폭기는 브릿지가 균형을 이루도록 동작할 것이다. 즉, 식 (4)가 만족되도록 E_b 를 증가시키는데 이것은 열선의 저항이 0.8643Ω에서 0.9822Ω(=4.888 · 200)/995.3)으로 증가됨을 의미한다. 연결선의 저항 0.21Ω을 빼면 열선만의 저항은 0.7722Ω인데 식 (1)로 작동온도를 추정하면 71.8°C(=(0.7722-0.6029)/(0.6029 · 0.0039092))이다.

이 때 열선에서 발생된 열량은 다음의 식 (7)과 같이 대류에 의하여 유체로 전달된다.

$$i^2 R_w = hA(T_w - T_f) \quad (7)$$

3. 대류열전달계수 계산과정

본 연구에서는 나노유체의 대류열전달 평가지표로 대류열전달계수를 사용하였다. 식 (7)의 좌측 발열량은 오옴의 법칙과 Fig. 3의 기호를 이용

하여 $i \cdot E_1$ 으로 나타낼 수 있다. ($i^2 \cdot R_w = i \cdot i \cdot R_w = i \cdot E_1$) 따라서 대류열전달계수는 다음과 같다.

$$h = \frac{(i \cdot E_1)}{A(T_w - T_f)} \quad (8)$$

식 (8)에서 A 는 열선의 표면적이며 유체온도 T_f 는 온도계로 측정한다. i 와 T_w 는 Fig. 3에서 두 개의 전압 E_1 과 E_b 를 측정하여 계산할 수 있다. i 는 저항값 R_1 을 알면 다음 식 (9)로 계산한다.

$$i = \frac{(E_b - E_1)}{R_1} \quad (9)$$

T_w 는 열선의 작동온도인데 직접측정은 불가능하고 저항을 측정후 식 (1)을 이용하여 온도로 환산한다. Fig. 3에서 R_1 을 흐른 전류는 R_w 와 직류증폭기의 (-)측으로 흐른다. 그런데 직류증폭기의 입력임피던스는 이론상 무한대로 매우 높기 때문에 직류증폭기로의 전류흐름은 무시할 수 있다. 따라서 R_1 을 흐른 전류는 모두 R_w 로 흘러간다고 가정할 수 있다. 전류가 공통이므로 다음 식 (10)으로 R_w 의 계산이 가능하다.

$$i = \frac{(E_b - E_1)}{R_1} = \frac{E_1}{R_w} \quad \text{에서}$$

$$R_w = \frac{R_1 \cdot E_1}{(E_b - E_1)} \quad (10)$$

R_w 를 얻으면 식 (1)에 의하여 T_w 가 계산되고 식 (8)에 의하여 대류열전달계수를 얻을 수 있다.

4. 결과 및 검토

제안된 장치에 대한 타당성을 검토하기 위하여 열물성이 잘 알려진 순수유체에 대하여 먼저 대류열전달계수 측정실험을 실시하였다. Fig. 4는 엔진오일과 글리세린에 대한 결과로서 실험조건은 열선온도와 유체온도가 일정한 것이다. 따라서 두 온도의 평균인 막온도가 일정하다. 이때 포텐시오미터 저항 R_p 는 196Ω으로 설정하였고 유체온도는 21.8°C였다. 열선의 작동온도는 72.8°C로 환산되고 막온도를 계산하면 46.8°C이다. 이를 절대온도로 표시하면 319.95K (~320K)인

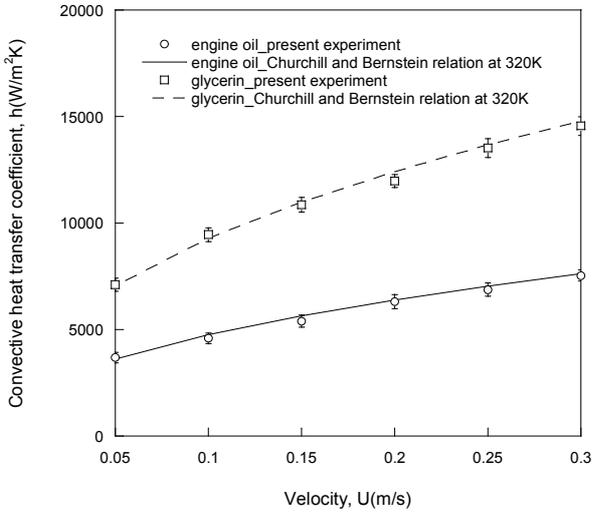


Fig. 4 Data comparison between the experimental measurements by the present system and the predictions by Churchill and Bernstein relation

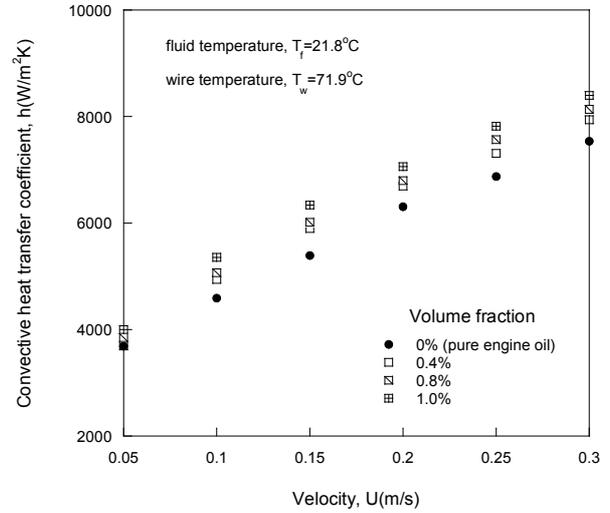


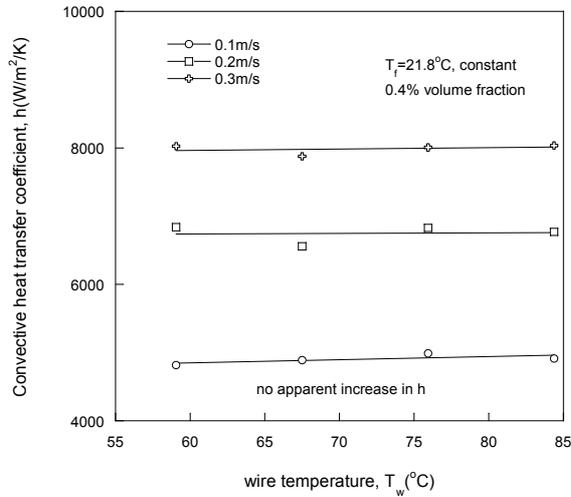
Fig. 5 Effect of concentration of nano particle on the convective heat transfer coefficients of nano lubrication oil

데 이렇게 막은도를 설정한 이유는 측정된 실험 데이터와 320K에서 엔진오일과 글리세린의 열물 성치를 이용하여 Churchill과 Bernstein관계식으로부터 구한 데이터를 비교하기 위해서이다. 이 관계식은 $Re \times Pr > 0.2$ 인 경우 적용이 가능하다. Fig.4의 실험조건에서 엔진오일과 글리세린에 대하여 이 값을 계산하면 대략 87과 80이다. 따라서 실험결과는 이 관계식과 비교가 가능하다. Fig. 4는 각 속도에 대하여 동일한 실험을 4회 반복한 것인데 두 결과가 잘 일치하고 있다.

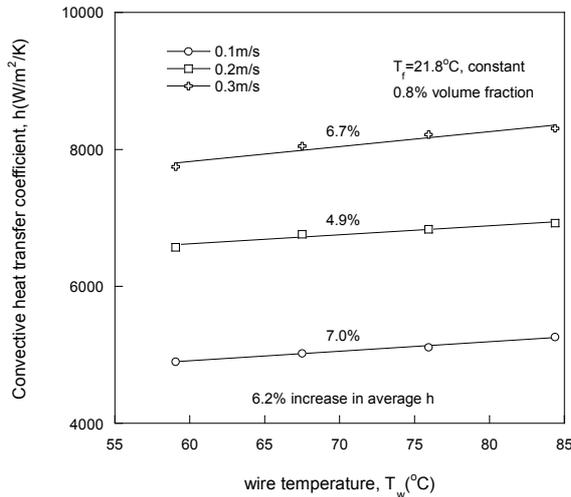
Fig. 5는 순수한 엔진오일과 혼합농도가 다른 3개의 그래파이트 나노오일을 이용하여 대류열전달계수를 측정된 것이다. 그래파이트 나노입자와 기본유체에 대한 물성치는 Lee 등⁽¹⁶⁾의 연구에 서술되어 있다. R_p 는 196Ω, 유체온도는 21.8°C로 Fig. 4와 같은 실험조건이다. 동일한 속도에서 보면 혼합농도가 높아질수록 대류열전달계수가 증가하는 것을 알 수 있다. 1%농도의 나노오일은 순수한 엔진오일과 비교하여 10%이상의 대류열 전달계수 상승을 보인다. Fig. 4에 의하면 측정값과 관계식의 차이는 5%이내였다. 이 차이를 고려하여도 고농도의 나노오일이 더 높은 대류열전달 계수를 갖는다고 판단할 수 있다. 0.4%와 0.8% 농도의 나노유체 결과는 거의 일치하거나 역전되어 나타나기도 하는데 그 증가범위가 5% 이내이기 때문이다. 따라서 대류열전달계수는 농도에 따라 선형적으로 증가한다고 말할 수 있다. 이것

은 이전연구⁽¹¹⁾에서 그래파이트 나노오일의 열전도율이 선형적으로 증가한 결과와 관련이 있다고 생각된다. 속도가 증가함에 따라 대류열전달계수의 증가정도가 달라지는 것은 확인할 수 없었다. 즉 낮은 속도에서나 높은 속도에서 대류열전달계수의 증가경향은 동일하였는데 이 점은 이전⁽⁵⁻⁷⁾ 실험결과들과 다른 것이다.

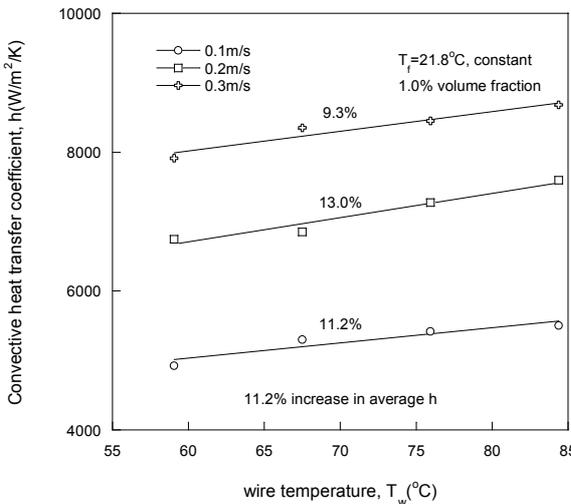
Fig. 6은 나노유체 대류열전달계수의 온도, 속도 그리고 농도에 따른 의존성을 종합적으로 실험한 결과이다. Fig. 6 (a), (b), (c)는 각각 0.4%, 0.8%, 1.0%의 혼합농도를 가진 나노오일에 대한 실험이며 이때 유체온도는 모두 21.8°C였다. 실험 순서는 다음과 같다. 먼저 Fig. 1에 나타낸 용기에 시험할 농도의 나노오일을 채우고 회전대가 계획한 속도로 회전하도록 회전수를 조절한다. 일정한 속도를 얻은 후 Fig. 3의 R_p 를 조절하여 센서의 온도를 원하는 온도로 설정한다. Fig. 6을 보면 설정된 한 개의 속도에 대하여 4가지 열선 온도가 시험되었음을 알 수 있다. 이것은 R_p 를 190, 194, 198, 202Ω으로 단계적으로 바꾼 것을 의미하는데 이에 따라 열선온도는 대략 59, 67, 76, 84°C가 된다. 이 과정이 끝난 후 회전대의 속도를 조절하여 0.2m/s로 맞추고 각각의 R_p 에 대하여 위의 실험을 반복한다. 동일한 과정을 0.3m/s에 대하여 반복하면 하나의 농도(예를 들면 Fig. 6(a)는 0.4% 농도의 나노오일에 대한 것이다.)에 대한 실험을 마치게 된다. 다른 농도(0.8%



(a) 0.4%



(b) 0.8%



(c) 1.0%

Fig. 6 Effect of temperature on the convective heat transfer coefficients of nano lubrication oil; (a)0.4%, (b)0.8%, (c)1.0%

와 1.0%)에 대한 동일한 실험을 실시하여 (b), (c)의 결과를 얻는다.

Fig. 6 (a)는 혼합농도가 0.4%로 가장 낮은 경우인데 일정속도 아래에서 열선온도 증가에 따른 대류열전달계수의 변화를 관찰할 수 없었다. 이와 비교하여 Fig. 6 (b)와 (c)는 나노입자 혼합농도가 높아진 경우인데 (a)와 비교하여 온도증가에 따라 대류열전달계수가 증가하는 것이 명백하다. (b)보다 (c)의 경우 대류열전달계수 변화에 대한 농도의 영향을 더 확실하게 관찰할 수 있다. 이것은 나노입자의 농도가 어느 정도 이상 되었을 때 온도의 영향이 대류열전달계수에 나타나기 시작한다고 해석할 수 있다. 혼합농도, 온도 그리고 대류열전달계수 사이의 관계에 대한 추가 연구가 필요하다. Das 등⁽¹⁷⁾은 나노유체의 열전도율(정적 열전달특성)이 온도에 따라 크게 증가한다고 보고하였다. 본 연구 결과는 또한 나노유체의 대류열전달계수(동적 열전달특성)도 온도에 따라 변화함을 보여준다.

5. 결론

본 연구에서는 열선센서의 온도를 일정하게 유지하는 기능을 가진 나노유체 대류열전달 성능 평가 장치를 제안하였다. 이 장치를 이용하여 나노유체 대류열전달계수의 특성을 종합적으로 파악할 수 있었으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 순수유체를 이용한 정온도 실험결과 대류열전달계수는 잘 알려진 Churchill과 Bernstein관계식과 일치하였고 이를 통하여 장치의 타당성을 검증할 수 있었다.

(2) 동일한 속도에서는 혼합농도가 높아질수록 온도증가에 따라 대류열전달계수가 증가하는 것을 관찰할 수 있었다. 낮은 혼합농도에서는 온도에 따른 대류열전달계수의 변화를 관찰할 수 없었다.

(3) 동일한 농도의 나노유체 실험에서는 각각의 속도에 대하여 온도증가에 따른 대류열전달계수 증가가 동일하였다.

(4) 본 연구에서 제안된 장치는 정온도 열선유지회로 기능을 가지고 있어서 향후 나노유체 연구에 많은 사용이 기대된다.

후 기

본 연구는 2009년도 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., pp. 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. Journal of 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) 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.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) 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.
- (12) Japan Patent, 3055164, B., 2004, "An Acidity or Alkalinity Like Metering Device".
- (13) Incropera, F. P. and DeWitt, D. P., 2001, *Introduction to Heat Transfer*, 6th Ed., Wiley, pp. 116~118.
- (14) Kauh, S. K. and Lee, T. S., 1986, "Manufacture of Hot-Wire Anemometer and the Improvement of Its Performance," *Trans. of the KSME*, Vol. 10, No. 4, pp. 541~557.
- (15) Paik, S. W., Kihm, K. D., Lee, S. P. and Pratt, D. M., 2007, "Spatially and Temporally Resolved Temperature Measurements for Slow Evaporating Sessile Drops Heated by a Microfabricated Heater Array," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 129, pp. 966-976.
- (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) 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.