

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2008.32.2.117

나노유체의 수직유동 속에 놓인 가는 열선주위의 대류열전달계수 측정

이 신 표*

(2007년 9월 4일 접수, 2007년 11월 13일 심사완료)

Measuring Convective Heat Transfer Coefficient Around a Heated Fine Wire in Cross Flow of Nanofluids

Shinpyo Lee

Key Words: Nanofluids(나노유체), Base Fluid(기본유체), Thermal Conductivity(열전도율), Convective Heat Transfer Coefficient(대류열전달계수), Nano Lubrication Oil(나노윤활유), CNT(탄소나노튜브), Graphite(흑연)

Abstract

Recent researches on nanofluids have mainly focused on the increase of thermal conductivity of nanofluids under static condition. The ultimate goal of using nanofluids, however, is to enhance the heat transfer performance under fluid flow. So it has been highly necessary to devise a simple and accurate measuring apparatus which effectively compares the heat transfer capability between the base and nanofluids. Though the convective heat transfer coefficient is not the complete index for the heat transfer capability, it might be one of useful indications of heat transfer enhancement. In this article, the working principles of experimental system for convective heat transfer coefficient around a heated fine wire in cross flow of nanofluids and its application example to three samples of nano lubrication oils are explained in detail.

1. 서 론

본 논문은 소량의 나노유체 시료를 사용하여 대류열전달계수를 신속하게 측정할 수 있는 새로운 장치를 제안하고 그 사용법과 측정 예를 설명한 것이다.

나노유체는 물, 에틸렌그리콜 등과 같은 열전달 기본유체에 열전도율이 매우 높은 나노크기의 입자를 소량 첨가하여 그 열전도율을 높여서 전체적인 열전달성능을 높이고자 제안되었다.⁽¹⁾ 최근 국내외적으로 나노유체의 제조,^(2,3) 열물성측정,^(4,5) 자연⁽⁶⁾ 및 강제대류 열전달^(7,8) 그리고 비등

열전달⁽⁹⁾ 등과 관련된 폭넓은 연구가 활발히 이루어지고 있다.

지금까지는 정적(static)상태에서 열전도율을 측정하여 일차적으로 나노유체의 열전달 성능 향상 가능성 여부를 판단하였다.⁽¹⁰⁻¹²⁾ 그러나 유체에 나노입자를 첨가하였을 때 열전도율의 향상과 함께 보통 점도의 증가가 수반된다. 나노유체의 열전도율은 향상되었지만 만약 이 유체를 구동시키는데 더 많은 펌프동력(pumping power)이 소요된다면 열전달과 소요동력을 고려한 전체적인 비용을 계산해서 나노유체의 사용 여부를 판단해야 할 것이다.⁽¹⁾ 따라서 나노유체 시료의 최종적인 열성능 판단을 위해서는 대류열전달 실험이 필수적이다. 그러나 정적상태에서 실시하는 열전도율 측정과 달리 대류열전달 실험은 많은 비용과 시간이 소요되며 경우에 따라 최종 계산된 대류열전달계수에 많은 오차가 포함될 수 있다.

* 회원, 경기대학교 기계공학과
E-mail : shinpyo@kyonggi.ac.kr
TEL : (031)249-9814 FAX : (031)244-6300

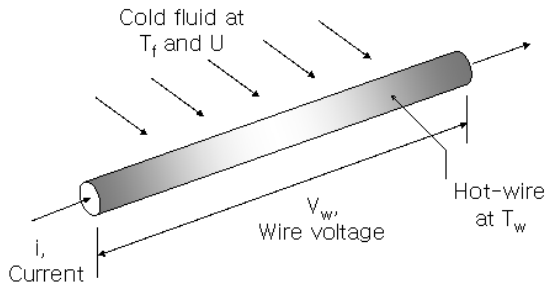


Fig. 1 Hot-wire in cross flow

본 연구자는 비정상열선법(transient hot-wire technique)을 이용한 나노유체의 열전도율 측정과 관련된 연구를 수행하면서 이 장치와 마찬가지로 소량의 유체시료를 사용하고 동시에 정확성과 재현성 그리고 신속성을 갖는 간단한 휴대용 측정기 형태의 소형 대류열전달계수 비교 실험장치를 고안할 수 없는가 생각하였다.^(2,13)

대표적인 대류열전달 실험장치로 이중관 열교환기 또는 가열된 파이프를 이용한 내부유동 장치를 생각할 수 있다.^(14,15) 그러나 보통 항온조와 펌프 등 주변장치까지 고려하면 이 장치들은 대형이고 복잡하여 나노유체의 대류열전달 성능을 평가하는데 있어 여러 가지 어려움이 예상된다. 예를 들면, 장치의 내부를 채울 충분한 양의 나노유체 시료를 확보하기 위한 제조시간과 비용 문제, 시료를 교환할 경우 장치 내부를 세척하는 어려움, 장치를 정상상태에 도달시키는데 오랜 시간이 걸리는 문제, 획득된 데이터의 정밀도와 측정과정에서 발생한 열손실 등을 정확하게 산정하지 못할 때 대류열전달계수에 포함될 불확실성(uncertainty)의 증가 문제 등을 생각할 수 있다. 여기에 시료를 폐기해야 하는 경우의 비용 및 환경적인 측면을 생각한다면 기존의 장치와는 차별화된 장치가 필요함을 알 수 있다.

본 연구자는 기존 유탄유에 나노입자를 첨가한 새로운 유탄유를 사용하여 마모성과 열전달 성능을 향상시키기 위한 연구를 수행하고 있다. 제조된 나노유탄유에 대하여 유동상태에서의 열전달 성능을 평가할 수 있는 장치를 개발하는 것이 연구의 목표이다. 본 논문에서는 위에서 언급한 단점들을 배제하고 정밀하고 간단하게 대류열전달 성능을 평가할 수 있는 새로운 장치를 제안하였으며 제작과정과 측정 예를 자세히 설명하였다.

대류열전달계수는 유체의 물성이 아니며 열전달표면과 유체사이의 주어진 기하학적 구조, 유체의 속도, 레이놀즈 수 등에 따라 달라지는 유동특성이다. 따라서 엄밀한 의미로 일반화된 나노유체의 대류열전달계수를 정의하기 어려우며 대류열전달계수가 나노유체 사용의 정당성을 완벽히 설명하는 변수는 아니다. 본 연구에서 측정하는 가는 열선 주위의 대류열전달계수도 엄밀하게는 가는 열선과 나노유체 사이의 열전달에만 한정하여 적용 가능한 수치임을 독자들에게 알린다. 단지 본 연구자는 나노유체라는 새로운 열전달유체의 도입에 있어 이 유체의 열전달 성능을 나타내는 여러 가지 인자들 중 대류열전달계수에 초점을 맞추어 설명하고자 한다.

2. 실험장치 설계

2.1 실험장치 기본원리

유동 속에 놓인 금속 열선(hot-wire, 예를 들어 니크롬선)에 전압 V_w 를 가하면 주울열 q 가 발생하고 발생한 열은 대류에 의해 유체로 전달된다. Fig. 1은 이 현상을 개략적으로 표현한 것이다. 열선에서 발생하는 열량과 유체로의 대류열전달이 균형을 이루면 식 (1)이 성립하는데 열선의 작동온도 T_w 는 q , h , T_f 에 의하여 결정됨을 알 수 있다. 여기서 h 는 열전달 성능을 표시하는 대류열전달계수로 유속과 유체의 종류에 따라 달라지는 값이며 i 는 열선에 흐르는 전류, A 는 열선의 표면적 그리고 T_f 는 외부 유체온도이다. q 가 일정할 때, 만약 열선주위의 외부 열유동 조건이 변하게 되어 h 가 증가하면 냉각이 활발히 이루어져 열선의 온도가 낮아지게 된다. 유체가 정지된 상

$$q = V_w \cdot i = hA(T_w - T_f) \quad (1)$$

태에서 10m/s의 속도로 변화되거나 유체가 공기에서 물로 바뀌는 것, 그리고 기본유체 대신 나노유체를 시스템에 도입하여 유체 열전도율이 증가하는 경우 등이 모두 열선이 경험하는 외부 열유동조건 변화에 해당한다.

이와 반대로 열선 양단의 전압과 전류를 측정하여 발열량을 알고 열선의 온도와 주위 유체의 온도를 알 수 있다면 주어진 조건하에서 h 를 다음의 식 (2)로 환산할 수 있다. 이상의 원리에 기

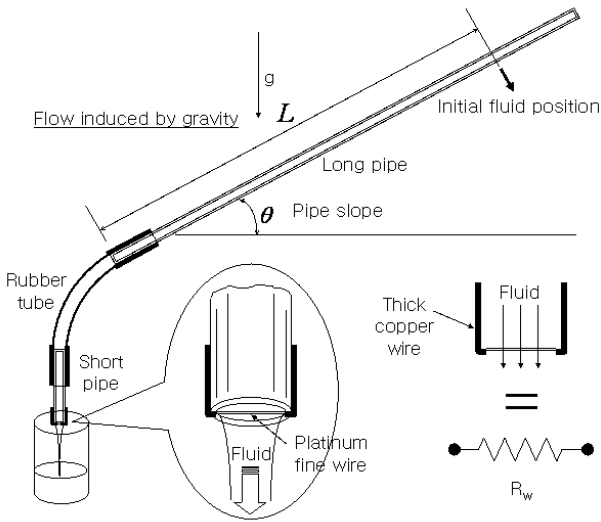


Fig. 2 Experimental set up with detail drawing of hot-wire sensor at the exit of short pipe

$$h = \frac{q}{A(T_w - T_f)} \quad (2)$$

초하여 열선 외부의 대류열전달계수를 측정하는 방법은 열전달 교과서⁽¹⁵⁾에서 직교유동 속에 놓인 가열된 실린더(heated cylinder in cross flow) 주위의 유동으로 소개되는 내용이다. 본 연구에서 사용한 열선은 직경 50 μ m의 백금선으로 매우 직경이 작은 실린더에 해당한다. 열선유속계(hot-wire anemometer)나 비정상열선법^(16,17) 등도 모두 가느다란 열선으로부터의 열전달 현상을 이용한 장치들이다.

본 논문에서는 자유낙하에 의한 원형 파이프 내의 유체유동과 미소 열선 주위의 강제대류 열전달 현상을 이용한 나노유체 대류열전달계수 측정장치를 제안하고자 한다. 측정장치의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 장치는 긴 파이프(1m)와 짧은 파이프(15cm) 그리고 이들을 연결하는 고무튜브로 구성되어 있다. 파이프의 재질은 아크릴이며 벽두께는 1.5mm, 내경 7mm 따라서 외경은 10mm이다. 상세도에 나타낸 바와 같이 짧은 파이프의 끝에는 직경 50 μ m, 길이 7mm의 백금열선이 센서로 설치되어 있다. 출구의 열선센서가 Fig. 1에 표시한 가열된 실린더에 해당하며 등가적으로는 금속 저항체로 작동한다.

긴 파이프와 짧은 파이프는 고무튜브로 연결되어 있다. 짧은 파이프는 고정되어 있지만 긴 파이프는 고무튜브가 휘어지므로 중력에 대한 기울

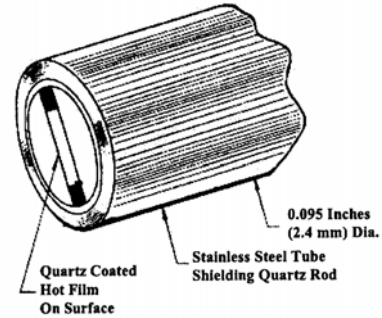


Fig. 3 Flush mounted type hot-film sensor

기를 조절할 수 있다. 이 기울기에 따라 유체의 낙하속도 즉, 파이프 내의 유속이 변한다. Fig. 2에서 initial fluid position으로 표시한 초기 유체의 위치(길이 75cm이며 부피로 환산하면 약 30mL이다.)까지 유체를 채우고 유체가 토출되는데 걸리는 시간을 측정했을 때 동일한 파이프 기울기에 대하여 반복성있는 데이터를 얻을 수 있었다. 따라서 본 장치를 이용할 경우 유속변화에 대한 정밀한 실험이 가능함을 확인할 수 있었다.

Fig. 3은 Flush mounted type 열필름 센서(hot-film sensor)를 표시한 것이다. Fig. 2에서 짧은 파이프 끝단에 설치된 센서의 상세도와 외형이 유사함을 알 수 있다. 구조는 다르지만 본 실험장치를 구상하면서 전체적인 형태를 많이 참고하였다. 열필름센서의 경우는 속이 모두 채워진 석영봉의 표면에 박막 저항체가 부착된 것이고 Fig. 2의 열선은 내부가 비어있는 아크릴 파이프를 가로 질러서 열선이 설치된다. 보통 고체벽에서의 전단력 측정에 사용하는데 자세한 측정법과 응용에 대한 사항은 Fig. 3을 인용한 인터넷 사이트⁽¹⁸⁾를 참고하기 바란다.

2.2 신호측정 및 자료처리

주어진 열유동 조건에서 대류열전달계수 h 를 환산하기 위해서는 V_w , i , T_w , T_f 를 알아야 한다. 시료의 온도 T_f 는 실험전 표준온도계를 이용하여 측정하였다. 열선과 관련된 V_w , i , T_w 는 Fig. 4에서 설명하는 전압분할회로(voltage dividing circuit)를 이용하여 측정할 수 있다. Fig. 4(a)는 표준저항(standard resistor, 하첨자 std로 표시)과 열선이 전원에 연결된 개략도이며 (b)는 저항으로 구성된 등가회로이다. 여기서 R_{std} , V_{std} 는 각각 표준저항의 저항값, 표준저항에 걸리는 전압이다. 표준저항과 열선이 직렬로 연결되어 있으므로 두 요소

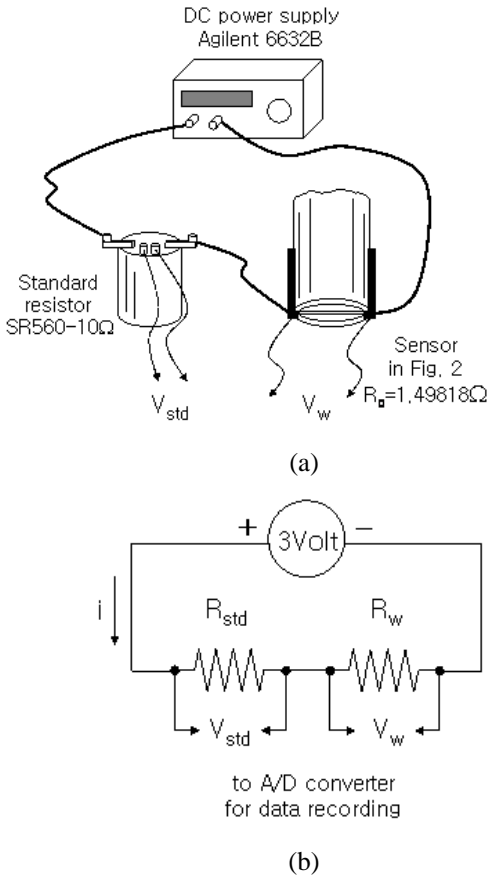


Fig. 4 Schematic (a) and equivalent (b) circuit of voltage divider by standard resistor and hot wire

를 흐른 전류는 동일하고 오옴의 법칙에 의하여 식 (3)이 성립한다.

$$\frac{V_w}{R_w} = \frac{V_{std}}{R_{std}} \tag{3}$$

식 (3)을 변환하면 작동중인 열선의 저항 R_w 를 식 (4)로 얻을 수 있다. 즉, 표준저항과 열선양단의 전압을 측정하면 알려진 표준저항값 R_{std} 를 이용하여 R_w 를 구할 수 있게 된다. 열선의 저항과 온도 사이에는 식 (5)와 같은 저항-온도 관계식이

$$R_w = \frac{V_w}{V_{std}} R_{std} \tag{4}$$

$$R_w = R_0(1 + \alpha T_w) \text{ 또는 } T_w = \frac{(R_w - R_0)}{R_0 \alpha} \tag{5}$$

성립한다. 따라서 작동저항을 알면 식 (5)를 이용하여 작동온도를 추정할 수 있다. 여기서 R_0 는 0°C 에서의 열선의 저항이며 α 는 온도저항계수로 백금의 경우 $0.0039092/^\circ\text{C}$ 이다.^(5,6,13) 이상의 과정을 통하여 h 의 환산에 필요한 모든 수치적 데이터를 획득할 수 있다.

2.3 실험순서

실험은 다음의 괄호에 표시한 순서에 따라 크게 7단계로 나누어 진행된다. (1)먼저 시료가 담긴 용기를 Fig. 2의 짧은 파이프 하부 중심에 놓는다. (2)각도기를 이용하여 긴 파이프의 기울기를 설정하고 파이프를 고정한다. (3)피펫필러 (pipette filler)를 이용하여 시료용기의 유체를 Fig. 2에서 표시한 긴 파이프 위의 initial fluid position까지 빨아올려 채운다. 피펫필러는 정밀하게 시약을 흡입하는데 사용하는 고무 재질의 원형 주머니로 개념상 스포이드의 타원형 고무 주머니와 같다. (4)직류전원에 미리 설정하여 놓은 전압을 표준저항을 거쳐 열선에 가한다. 본 실험에서는 직류 3Volt를 사용하였다. (5)데이터 획득장치를 가동하여 표준저항과 열선 양단에서의 전압을 읽기 시작하며 (6)약 2초의 시간이 경과한 후 피펫필러를 긴 파이프에서 제거하여 긴 파이프 상부를 진공에서 대기로 개방한다. 이에 따라 파이프에 채워진 유체는 중력에 의하여 장치 하부로 이동하기 시작하고 이 순간부터 가열된 열선을 지나는 대류열전달 실험이 이루어진다. 긴 아크릴 파이프의 기울기 정도에 따라 관을 흐르는 유속이 달라진다. (7)마지막으로 유체가 장치를 모두 통과하면 전원을 차단하고 획득된 전압데이터를 파일의 형태로 컴퓨터에 저장한다.

Fig. 4에 표시한 두 채널의 전압은 National Instrument사의 A/D 변환기와 LabView S/W를 사용하여 1kHz의 율로 30초 동안 샘플링하였다. 동일한 시료에 대하여 긴 파이프의 각도를 바꾸어가면서 위의 실험을 처음부터 반복한다. 설정된 하나의 기울기에 대하여 측정에 소요되는 총 시간은 30초 이내이며 데이터를 후처리하는 시간을 포함해도 최종 대류열전달계수를 환산하는데 소요되는 시간은 3분 이내이다. 이중관 열교환기와 같은 대형화된 장치에서는 불가능했던 신속한 대류열전달 실험이 가능하다.

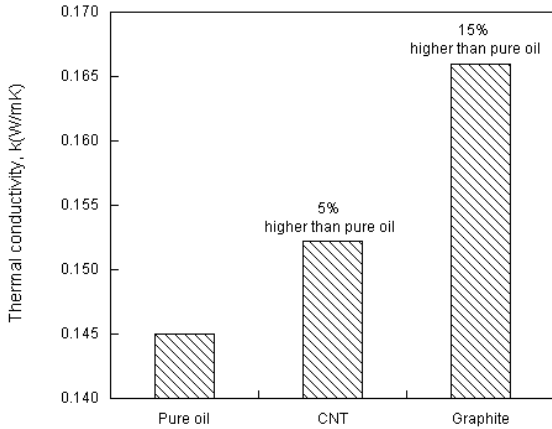


Fig. 5 Thermal conductivities of pure and nano lubrication oils by transient hot-wire technique

3. 실험결과 및 토의

3.1 나노유체 시료들의 열전도율

대류열전달 실험을 위하여 순수윤활유, 탄소나노튜브(CNT)를 혼합한 나노윤활유 그리고 흑연(Graphite)을 혼합한 나노윤활유 등 3종류의 시료를 준비하였다. 나노윤활유의 경우 혼합농도는 두 시료 모두 체적농도(volume percent) 기준으로 0.5%이다. Fig. 5는 비정상열선법을 이용하여 상온에서 열전도율을 측정하는 것이다. 순수윤활유 대비 CNT의 경우는 약 5%의 열전도율 상승, Graphite의 경우는 약 15%의 열전도율 상승을 나타내고 있다. Graphite의 경우가 CNT의 경우보다 열전도율 상승이 10%이상 높은 것이 흥미롭다. 0.5% 혼합농도에서 15%의 열전도율 상승은 기존 연구결과와 비교하여 비교적 높은 증가율에 해당한다.

3.2 획득된 전압 신호의 설명

표준저항과 열선으로부터 획득된 전압신호의 하나의 예를 Fig. 6에 표시하였다. 좌측 세로축이 열선 그리고 우측 세로축이 표준저항으로부터의 신호이며 가로축은 시간이다. 측정이 수행된 전체 시간동안 두 신호의 합은 3Volt인 것을 알 수 있다. 전원에서 공급한 3Volt를 두 저항의 상대적 크기에 따라 전압을 분할하여 나누었기 때문이다. 즉, 표준저항의 저항은 일정하데 열선이 가열되어 저항이 증가하면 전체 전압 3Volt 중에서 열선에 걸리는 전압이 증가하는 반면 전체 전압

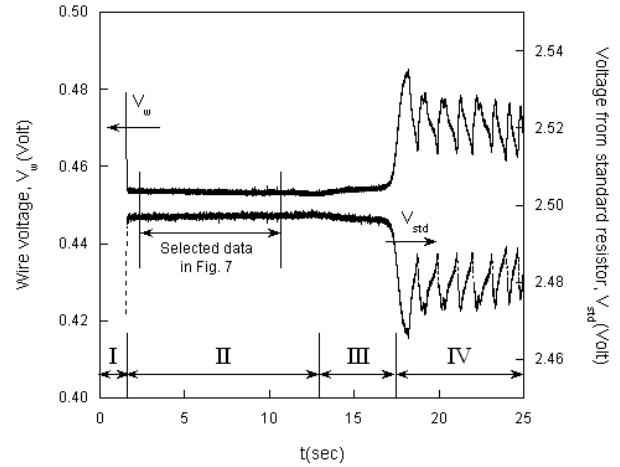


Fig. 6 Typical example of voltage signals from standard resistor and sensor wire

은 동일하므로 표준저항에 걸리는 전압이 감소하게 된다. 반대로 열선이 냉각되면 열선의 전압은 감소하게 되고 표준저항에 걸리는 전압은 증가한다. 열선의 전압변화는 저항변화 즉, 작동온도의 변화를 의미하는 것이다.

1.6초와 13초 사이의 수평한 전압신호(Fig. 6에서 구간 II)는 파이프 내의 유체가 출구의 열선을 냉각하면서 통과하는 기간에 얻어진 것이다. 처음 실험이 시작된 후 1.6초까지는(구간 I) 유동이 없는 상태로 열선에 전류만 흐르는 상태이다. 따라서 자연대류에 의한 냉각만이 일어나므로 강제 대류 유동이 있는 구간 II보다 열선의 온도가 높고 저항이 높아 결과적으로 전압이 높게 나타난다.

신호가 구간 II에서 거의 일정한 것은 이 기간 동안 토출되는 유체의 속도가 대략 일정함을 의미한다. 구간 III에서는 구간 II의 신호보다 수평에서 벗어난 형태를 보이는데 유체가 긴 파이프를 모두 통과하고 고무튜브와 짧은 파이프에 남아있는 유체들이 열선을 통과하면서 만든 것이다. 17초 이후 구간 IV에서 나타난 톱니파 형태의 신호는 내부 파이프 벽면에 남은 유체들이 쌓이면서 큰 방울들로 형성되어 출구에서 단속적(on and off)으로 떨어져서 생긴 것이다. 용기나 튜브에서 윤활유가 마지막 순간에 흘러내리는 것을 상상하면 현상이 쉽게 이해될 것이다. 이 기간에서 열선은 단속적으로 떨어지는 윤활유에 의하여 냉각과 가열을 반복하게 되고 이에 따라 열선의 저항도 증가와 감소를 반복한다. 이에 따라

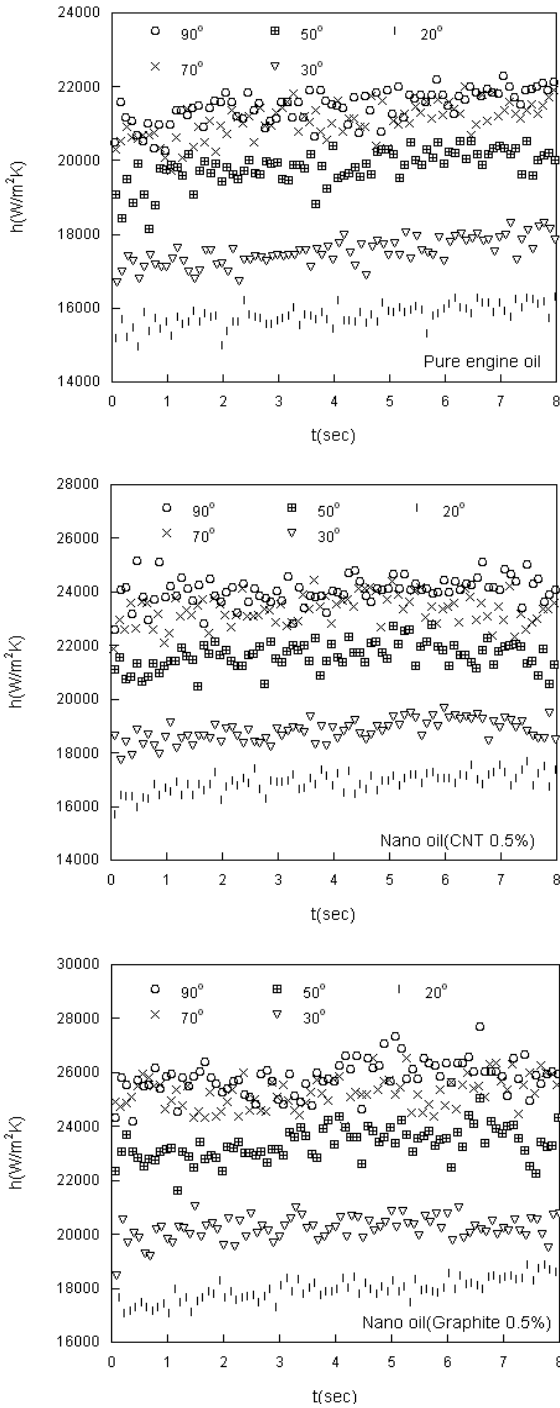


Fig. 7 Temporal convective heat transfer coefficient for three nano oil samples

표준저항에 대한 열선의 상대적인 저항의 크기가 변하게 되어 열선과 표준저항에 걸리는 전압이 진동하는 형태로 나타나는 것이다.

3.3 나노유탄유에 대한 대류열전달계수 비교

Fig. 7은 준비한 3가지 시료에 대하여 긴 파이프

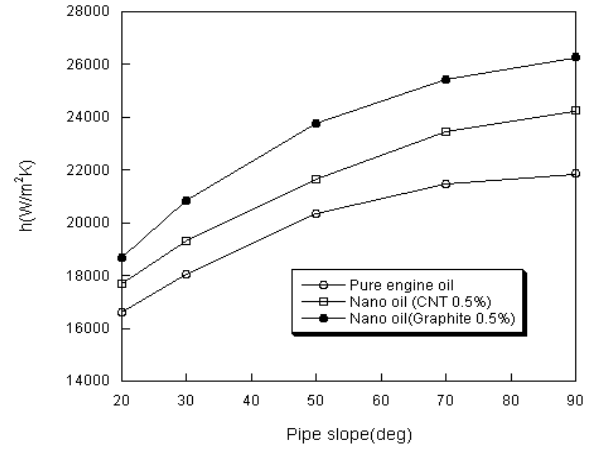


Fig. 8 Time averaged convective heat transfer coefficient with tube slope

프의 기울기를 바꾸면서 실험한 결과이다. Fig. 6의 구간 II에서 가장 안정한 8초의 데이터를 이용하여 각 순간(temporal)마다 대류열전달계수를 계산하여 표시한 것이다. 모든 경우에 대류열전달계수가 일정하지 않고 소폭 증가하는 것으로 보인다. 이것은 유체가 정지상태에서 시간이 지남에 따라 가속되어 유속이 증가하고 이에 따라 대류열전달계수가 증가한 결과이다. 90도로 표시한 것이 긴 파이프가 지면에 수직인 경우이며 20도가 수평에 가까운 경우이다. 기울기 변화(속도의 증가)에 따라 대류열전달계수들 사이에 명백한 차이를 나타낸다.

Fig. 8은 Fig. 7의 데이터를 8초 동안 시간 평균하여 계산한 대류열전달계수를 나타낸다. 각도가 동일할 때, 3가지 시료의 대류열전달계수가 명백한 차이를 보이며 나노유탄유의 대류특성이 높음을 확인할 수 있다. 본 장치의 경우 중력이 시스템에 작용하는 유일한 외력이므로 동일한 각도는 동일한 유체구동력(pumping power)을 의미한다.

순수유체에 나노입자를 첨가함에 따라 열전도를 뿐만 아니라 점도도 달라진다. 그러므로 Fig. 7에서 나노유탄유의 열전도율이 높게 나타난 것은 이 두 가지 열물성 변화가 합해진 결과이다. 입자의 혼합에 의하여 점도가 감소하고 열전도율이 증가한다면 열전달 매체로서는 가장 바람직할 것이다. 물론 유탄유의 경우에는 기계의 작동조건에 따라 유탄유를 위한 최적의 점도수치가 있을 것이다.

Fig. 9는 파이프 내의 유체가 움직이기 시작하여 유체가 모두 장치 외부로 배출되기까지의 시

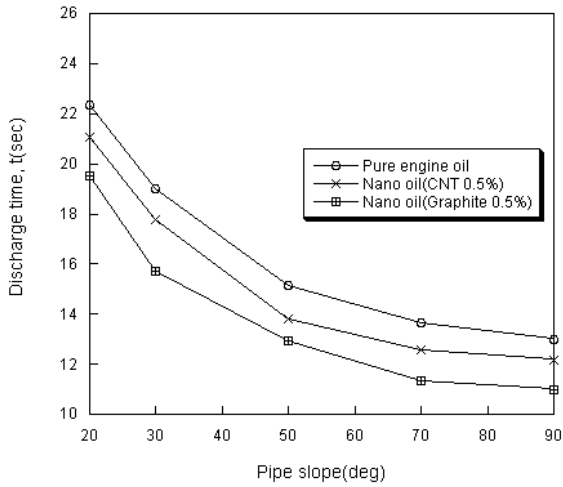


Fig. 9 Discharge time for each fluid sample

간(discharge time, Fig. 6에서 구간 II와 III이 더해진 시간)을 각도별로 나타낸 것이다. 본 장치는 일정부피의 유체가 파이프 외부로 배출되는 시간을 측정하는 모세관점도계(capillary viscometer)와 원리가 동일하다. 그러나 유체흐름을 민감하게 검출하는 열선센서와 고속 데이터 획득장치를 이용하므로 초시계를 이용하여 육안으로 배출시간을 측정하는 모세관점도계보다는 더 정확하다고 말할 수 있다. 대류열전달계수 측정과 동시에 대략적인 점도변화를 관정할 수 있는 것은 본 장치의 또 다른 장점이다.

파이프의 단면적을 알고 일정한 부피의 유체가 방출되는데 걸리는 시간을 알고 있으므로 파이프 내를 흐르는 유체의 평균속도를 계산할 수 있다. Fig. 8의 평균 대류열전달계수 데이터를 유속에 따라 나타낸 것이 Fig. 10이다. 동일 속도상의 데이터들은 점도의 영향을 배제하고 순수하게 열전도율의 상승에 의한 대류열전달계수 변화만을 나타낸다고 말할 수 있다. 이 경우에도 나노유탄유체의 대류열전달계수가 순수유탄유체보다 높은 것으로 나타남을 알 수 있다. 물론 세 유체의 점도가 다르므로 동일한 속도를 내기 위하여 점도가 높은 유체는 더 많은 펌프동력이 소요될 것이다. 열전도율과 점도의 효과를 모두 포함하여 효과적으로 대류열전달 성능을 표현하는 방법은 Fig. 10 보다는 Fig. 8이라고 생각된다.

4. 결론

본 논문에서는 기본유체와 나노유체 사이의 대

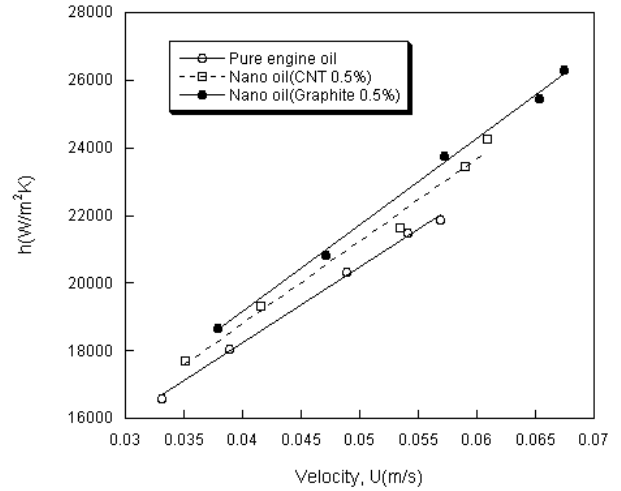


Fig. 10 Convective heat transfer coefficient with fluid velocity

류열전달 계수를 간단히 비교할 수 있는 새로운 장치를 제시하였으며 열전도율과 점도가 다른 3가지 유체시료(순수유탄유와 두 종류의 나노입자를 혼합하여 제조한 나노유탄유)에 대한 실제 측정을 통하여 사용법을 자세히 설명하였다. 실험을 통하여 확인한 측정장치의 특징을 결론으로 요약하면 다음과 같다.

- (1) 측정에 필요한 시료는 약 30mL 정도였다. 이것은 매우 소량으로 나노유체 초기 개발단계에서 시료제조에 소요되는 많은 비용과 시간을 절약할 수 있음을 의미한다.
- (2) 측정에 필요한 시간은 30초 이내였으며 데이터를 후처리하는 시간을 포함해도 최종 대류열전달계수를 환산하는데 소요되는 시간은 3분 이내로 매우 신속한 측정이 가능하였다.
- (3) 실험을 통하여 얻어진 유체의 토출시간 데이터를 이용하면 기본유체와 나노유체의 대략적인 점도변화를 비교할 수 있다.
- (4) 본 연구에서 제시한 대류열전달계수 측정 결과는 가는 열선에 수직으로 유동이 흐를 때, 단지 기본유체와 나노유체의 열전달계수를 비교하는 경우에만 유효하다. 향후 나노유체에 의한 열전달계수 증진이 유동형태에 따라 어떤 관계를 가지고 변화하는지 검토하는 것이 필요하다.

후 기

본 연구는 전력기반조성사업센터(과제번호 312)와 한국전력공사의 연구비 지원에 의하여 수행

되었습니다.

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," *Journal of KSME B*, Vol. 29, No. 9, pp. 1065~1073.
- (4) 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.
- (5) Lee, S., 2006, "Measuring Thermal Conductivity of Nanofluids by Steady State Method," *Journal of KSME B*, Vol. 30, No. 9, pp. 898~904.
- (6) Lee, S., 2007, "Natural Convection Heat Transfer from a Heated Fine Wire in Nanofluids," *Journal of KSME B*, Vol. 31, No. 9, pp. 807~813.
- (7) Hwang, K. S., Lee, J., Lee, B. H. and Jang, S. P., 2007, "Fluid Flow and Convective Heat Transfer Characteristics of Al_2O_3 Nanofluids," *Journal of KSME B*, Vol. 31, No. 1, pp. 16~20.
- (8) Lee, J. and Jang, S. P., 2006, "Fluid Flow Characteristics of Al_2O_3 Nanoparticles Suspended in Water," *Journal of KSME B*, Vol. 30, No. 6, pp. 546~552.
- (9) You, S. M., Kim, J. H. and Kim, K. H., 2003, "Effect of Nanoparticles on Critical Heat Flux of Water in Pool Boiling Heat Transfer," *Applied Physics Letters*, Vol. 83, pp. 3374~3376.
- (10) 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.
- (11) Lee, D. and Kim, J., 2006, "A New Mechanism for Enhanced Heat Transport of Nanofluid," *Journal of KSME B*, Vol. 30, No. 6, pp. 560~567.
- (12) Koblinski, P., Phillpot, S. R., Choi, S. U. and Eastman, J. A., 2002, "Mechanisms of Heat Flow in Suspensions of Nano-sized Particles(Nanofluids)," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 855~863.
- (13) Lee, S., 2007, "Validation Test for Transient Hot-wire Method to Evaluate the Temperature Dependence of Nanofluids," *Journal of KSME B*, Vol. 31, No. 4, pp. 341~348.
- (14) Holman, J. P., 1981, *Heat Transfer*, 5th Ed., McGraw Hill, pp. 289~290.
- (15) Incropera, F. P. and DeWitt, D. P., 2001, *Introduction to heat transfer*, 4th Ed., Wiley.
- (16) Carslaw, H. S. Jaeger, J. C., 1959, *Conduction of Heat in Solids*, 2nd Ed., Oxford University Press.
- (17) 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.
- (18) <http://www.aoe.vt.edu/aoe4154/hotwirelab.pdf>