

비정상 열선법을 이용한 이성분 나노유체의 열전도도 측정

조 창 환, 설 혜 연*, 구 준 모*, 강 용 태*

경희대학교 기계공학과, *경희대학교 기계산업시스템공학부

Thermal Conductivity measurement of Binary Nanofluids by the Transient Hot-wire Method

Changhwan Cho, Hea Youn Sul*, Junemo Koo*, Yong Tae Kang*

Department of Mechanical Engineering graduate school, Kyung Hee University, Yongin 449-701, Korea

*School of Mechanical and Industrial Systems Engineering, Kyung Hee University, Yongin 449-701, Korea

ABSTRACT: Binary nanofluids(Binary mixture + nanoparticles) have been extensively paid attention for application in absorption system as a new working fluid. Thermal property evaluation of the new refrigerants is inevitable to apply them for actual system. The objectives of this paper are to measure the thermal conductivity of the binary nanofluids by the transient hot-wire method, and to assess the application possibility of the binary nanofluids for absorption system. It was found that the thermal conductivity of the binary nanofluids (H₂O/LiBr+Al₂O₃) increased with increasing the concentration of the nanoparticles (Al₂O₃) and enhanced up to 27% at 0.1 vol % of the nanoparticles.

Key words: Transient hot-wire method(비정상 열선법), Binary nanofluids(이성분 나노유체), Thermal conductivity(열전도도), Nano particles(나노입자)

기 호 설 명			
		R ₀	: 열선의 냉저항 [Ω]
		R ₁	: 표준저항 [Ω]
		R ₂	: 표준저항 [Ω]
		R _v	: 가변저항 [Ω]
		R _w	: 열선의 저항 [Ω]
		T _w	: 열선의 온도 [°C]
		V ₀	: 전원전압 [V]
		ΔV	: 측정 전압 [V]
DAQ	: Data acquisition system		
D _F	: 용액탱크 직경 [m]		
D _w	: 열선 직경 [m]		
I	: 전류 [A]		
k	: 열전도도 [W/mK]		
k ₀	: 기준 열전도도 [W/mK]		
L _F	: 용액 수위 [m]		
L _w	: 열선 길이 [m]		
q	: 전력 [W]		
		α	: 온도저항계수 [1/°C]

그 리 스 문 자

† Corresponding author

Tel.: +82-31-201-2990; fax: +82-31-202-3260

E-mail address: ytkang@khu.ac.kr

하첨자

F	:	유체
t_1	:	구간의 시작
t_2	:	구간의 끝
W	:	열선

1. 서론

기존의 열전달 매체가 갖고 있는 낮은 열전도율을 개선하기 위한 방법으로 열전도도가 높은 물질을 혼합하는 방법이 제안되어 연구되어 왔다. 하지만 기존에 연구되어 지던 고/액 혼합물의 경우 분산되는 고체의 입자가 침전, 부식, 연마 등의 문제를 발생시켜 열전달 매체로의 성능향상을 기대하지 못하였다.

그러나 최근 나노기술과 계면공학의 급속한 발전으로 인하여 모유체에 100 nm 미만의 나노입자를 안정하게 분산시킨 나노유체가 개발되면서 기존의 문제점들을 획기적으로 해결하였다. 이러한 나노유체는 모유체의 열적 성능을 현저하게 향상시킬 수 있으며, 그 메커니즘에 관한 연구가 현재 활발히 진행되고 있는 상황이다.^(1,2)

그러나 단성분 나노유체에서의 열전달 증가 메커니즘 해석과 실험적 연구에 많은 연구가 진행되어 지고 있는 반면 실제 시스템에 적용되어지는 이성분 나노유체에 관한 연구는 극히 미비한 실정이다.^(3,4)

본 연구에서는 나노유체가 가지는 장점들을 흡수식 시스템에 적용하기 위한 기초 연구로 이성분 모유체에 나노입자를 분산시킨 이성분 나노유체를 제조하여 비정상 열선법을 이용한 열전도도를 측정 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서 사용된 비정상 열선법(Transient Hot-wire Method)은 매우 가는 열선에 전류를 흘려서 시간에 따른 열선의 온도상승을 이용하여 열전도도를 측정하는 것으로 또 다른 유체의 열전도도 측정 방법인 정상 상태법과 비교하여 유체 내에서 일어나는 자연대류의 영향을 효과적으

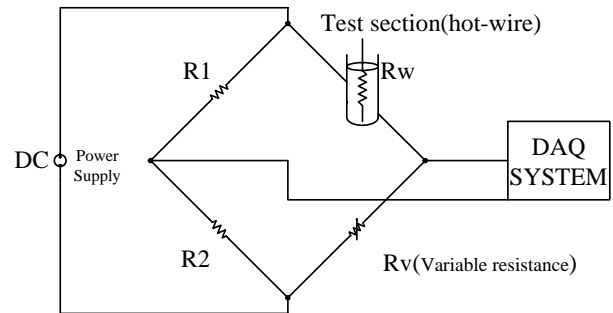


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

로 억제 할 수 있어서 정밀한 측정이 가능하고 측정에 소요되는 시간도 매우 짧고 간결한 장점이 있다.^(5,6)

실험장치의 전체 구성에 대한 개략도를 Fig. 1에 도시하였다. 실험 장치는 크게 전원전압, 표준정밀저항과 정밀가변저항으로 구성되어있는 휘스톤 브릿지(Wheatstone bridge)부분과 열선을 연결해놓은 시험부(Test section)로 나뉜다.

2.1.1 휘스톤 브릿지

휘스톤 브릿지는 100 Ω 의 값을 가지는 표준정밀저항 2개(R_1, R_2), 열선의 저항과 평형을 이룰 수 있도록 조절할 수 있는 정밀가변저항(R_v)으로 구성되어있다. 표준정밀저항은 $\pm 0.0001\%$ 의 정확도를 가지며, 가변저항은 측정온도 범위에서 열선의 저항과 같은 값을 가질 수 있고, $10^{-3} \Omega$ 까지 조절할 수 있는 정밀가변저항을 사용하였다.

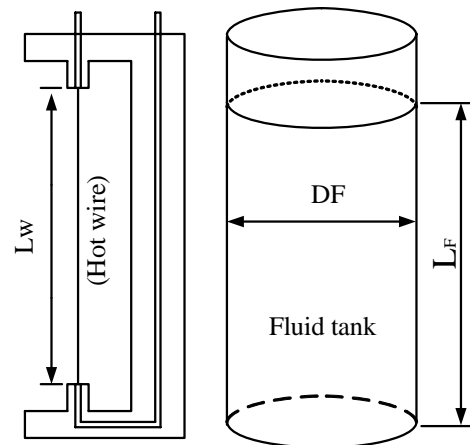


Fig. 2 Test Section

2.1.2 시험부

Fig. 2는 시험부에 대한 개략도를 나타낸다. 열선(Hot-wire)은 지름 25 μm , 길이 19 cm 의 백금선을 사용하여 열전도도를 측정하려는 유체와 직접 접촉하도록 양단에 납땜을 하였다. Table 1에 시험부에 대한 구체적인 조건들이 나타나있다.

2.2 데이터 처리

열선에 전력이 순간적으로 공급되었을 때 시간에 따른 열선의 온도상승은 잠겨있는 유체의 열전도도에 따라 차이를 보이게 되는데 이것이 비정상 열선법의 기본원리이다. Carslaw & Jaeger⁽⁷⁾의 열전도 식에 따라 열선의 온도상승은 시간을 로그축으로 표시하였을 때 실험의 시작과 끝 부분을 제외하면 일정한 기울기의 직선으로 나타나게 된다. 요약하면 식 (1), (2) 와 같이 표현되어진다.

$$k = \frac{1}{4\pi} \frac{q}{L} \frac{1}{S} \quad (1)$$

$$S = \left(\frac{T_w(t_2) - T_w(t_1)}{\ln(t_2) - \ln(t_1)} \right) \quad (2)$$

여기서 회로의 평형이 이루어졌을 때, 전압 V_0 를 가해서 측정된 전압은 열선과 가변저항에 가해진 전압의 차가 된다. 이 전압으로 열선의 저항은 아래와 같이 구할 수 있다.

$$R_w = \frac{(V_0 + \Delta V) \times R_v}{V_0 - \Delta V} \quad (3)$$

또한 직렬연결에서의 전압과 전류 공식에 따라 V_w 와 I_w 를 구할 수 있다.

$$R_w = R_0(1 + \alpha T_w) \quad (4)$$

식 (4)는 열선에 대한 고유식으로 온도저항관계식이라고 부른다. R_0 는 0 $^{\circ}\text{C}$ 에서 열선센서의 저항으로 냉저항이라 부르며, α 는 온도저항계수로서 백금선의 경우 0.0039092 / $^{\circ}\text{C}$ 의 고유값을

Table 1 Experimental conditions

Test Section	
Length of hot-wire	0.19 m
Diameter of hot-wire	25 μm
Diameter of fluid tank	0.04 m
Base fluid	
Concentrations of base fluid	Distilled water
	40 wt% EG solution
	55 wt% LiBr solution
Al ₂ O ₃ binary nanofluid	
Concentrations of nanoparticles (vol%)	0, 0.01, 0.05, 0.1
Diameter of nanoparticles	25 nm

갖는다. 열선에 가해진 전력(Power)은 다음의 식 (5)와 같다.

$$P = V_w I_w = I_w^2 R_w \quad (5)$$

전원이 공급됨에 따라 열선의 저항이 변화하게 되고 흐르는 전류도 변하므로 일정한 값을 가지지는 않게 된다. 따라서 본 실험에서는 다음의 식 (6)과 같이 측정 기간 동안의 평균값을 취하여 사용하였다.

$$q = 0.5 \times [I_w^2(t_1) R_w(t_1) + I_w^2(t_2) R_w(t_2)] \quad (6)$$

이때 t_1 과 t_2 는 앞서 언급했듯이 온도상승의 직선형태가 보이는 구간의 시작과 끝을 의미한다. 위의 관계식들을 식 (1)에 적용을 하면 유체의 열전도도를 구할 수 있다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 측정 장치 검증

본 실험에서 사용된 비정상 열선법 장치를 검증하기 위해 열전도도가 잘 알려진 증류수, 55 wt% 리튬브로마이드용액(LiBr solution)과 40 wt% 에틸렌글리콜수용액(Ethylene glycol solution)을 문헌 값과 비교하는 실험을 우선적으로 수행하였다. 각 유체의 온도는 24 $^{\circ}\text{C}$ 로 일정하게 유지하여 같은 조건에서 측정될 수 있도록 하였다.

측정된 열전도도와 이를 문헌 값과 비교하여

Table 2 Experimental results

Fluid	Distilled water		55 wt% LiBr solution		40 wt% EG solution	
Temp.	k(W/mK)		k(W/mK)		k(W/mK)	
24℃	0.5931		0.4286		0.4279	
Test No.	Measurement values	Experimental error(%)	Measurement values	Experimental error(%)	Measurement values	Experimental error(%)
1	0.5794	-2.3 %	0.4237	-1.1 %	0.4363	1.9 %
2	0.6028	1.6 %	0.4253	-0.8 %	0.4266	-0.3 %
3	0.5935	0.1 %	0.4192	-2.2 %	0.4303	0.6 %
4	0.5725	-2.5 %	0.4290	0.5 %	0.4239	0.9 %
5	0.5799	-2.2 %	0.4306	0.4 %	0.4199	1.9 %
Average	0.5856	-1.3 %	0.4256	-0.7 %	0.4274	-0.1 %

나온 실험오차를 Table 2에 표시하였다. 본 실험 장치의 평균 실험 오차는 $-0.1 \sim -1.3\%$ 로 평가되었다.

3.2 Al₂O₃ 이성분 나노유체 열전도도 향상

3.2.1 Al₂O₃ + Water nanofluid

증류수에 Al₂O₃ 나노입자를 0.01 , 0.05 , 0.1 vol%의 농도로 첨가하여 열전도도를 측정된 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 본 실험에 사용된 Al₂O₃ 나노입자의 평균 직경은 25 nm이고 모두 구형이다. 측정된 열전도도 값은 Al₂O₃ 나노입자의 농도 효과를 비교하기 위해 Al₂O₃ 나노입자가 첨가되지 않은 경우와의 비(k/k_0)로 나타내었다. Al₂O₃ 나노입자가 첨가되었을 때는 열전도도가 선형적으로 증가됨을 알 수 있다. Al₂O₃ 나노입자의 농도가 0.1 vol% 첨가되었을 때 열전도도가 최대 27%까지 향상됨을 알 수 있다. 수행된 실험 범위 내에서 Al₂O₃ 나노입자의 농도가 높아질수록 열전도도가 향상된다는 것을 확인 할 수 있다.

3.2.2 Al₂O₃ + H₂O/LiBr nanofluid

모유체를 55 wt% H₂O/LiBr로 하여 Al₂O₃ 나노입자를 각 농도별로 하여 실험한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 수행된 실험 범위 내에서 Al₂O₃ 나노입자의 농도에 비례하여 열전도도가 선형적으로 증가됨을 확인 할 수 있다. Al₂O₃ 나노입자

의 농도가 0.1 vol% 일 때, 이 이성분 나노유체의 열전도도는 최대 27% 향상됨을 알 수 있다. H₂O/LiBr 이성분 나노유체는 물과 비교하여 열전도도의 값이 안정적으로 측정되어지고, 그 분포 정도도 산만하지 않음을 알 수 있었다.

4. 결론

이성분 나노유체를 흡수식 시스템에 적용하기 위한 연구의 기초적인 단계로 비정상 열전법을 이용하여 이성분 나노유체의 열전도도를 측정하는 연구를 수행하였다. 본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 본 연구의 실험장치 오차는 $-0.1\% \sim -1.3\%$ 로 측정 되었다.
- (2) 증류수와 55 wt% H₂O/LiBr를 모유체로 하는 이성분 나노유체의 경우 Al₂O₃ 나노입자를 첨가하면 열전도도는 나노입자 농도에 따라 선형적으로 증가였다
- (3) 증류수와 55 wt% H₂O/LiBr 이성분 나노유체의 경우 나노입자 농도가 0.1 vol%일 때 모유체의 열전도도 보다 최대 27% 증가하였다.

후 기

본 연구는 에너지관리공단 에너지자원기술개발사업, 고효율 흡수식냉온수기 개발과제 (과제번호: 2005-E-BD011-P-02-3-020-2006)의 지원으로 수행되었습니다.

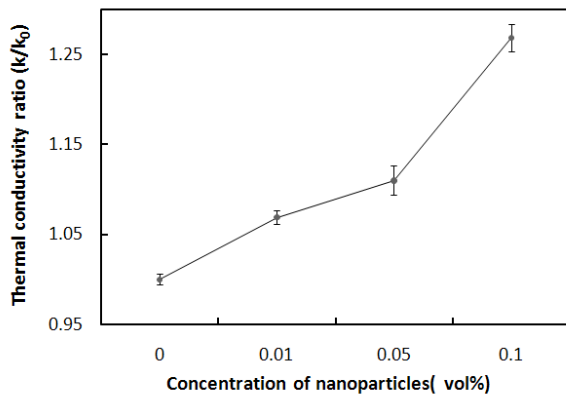


Fig. 3 Thermal conductivity enhancement for Al₂O₃+Water nanofluid

참고문헌

1. Choi, S. U. S., 1995, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, ASME New York, FED-Vol. 66, pp. 99-105
2. Koblinski, P., Phillpot, S. R., Choi, S. U. S. and Eastman J. A., 2002, Mechanism of heat flow in suspensions of nano-sized particles(nanofluids), International Journal of Heat and Mass transfer, Vol. 45, No. 4, pp. 855-863.
3. Kang, Y. T. and Kim, J. K., 2006, Comparisons of mechanical and chemical treatments and nano technologies for absorption applications, HVAC&R Research, Vol. 12, No. 3b, pp. 807-819.
4. Kim, J. K., Jung J. Y. and Kang Y. T., 2007, Absorption performance enhancement

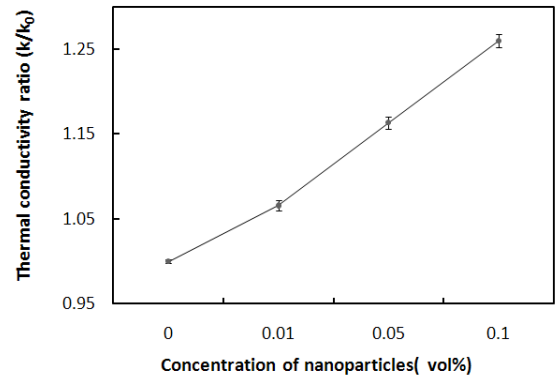


Fig. 4 Thermal conductivity enhancement for Al₂O₃+H₂O/LiBr nanofluid

by nano-particles and chemical surfactants in binary nanofluids, International Journal of Refrigeration, Vol. 30, No. 1, pp. 50-57.

5. Nagasaka, Y. and Nagashima, A., 1981, Simultaneous measurement of the thermal conductivity and the thermal diffusivity of liquids by the transient hot-wire method, American Institute of Physics, Rev. Sci. Instrum., Vol. 52, No. 2, pp. 229-232.
6. S. Lee, S. U. -S. Choi., S. Li, J. A. Eastman, 1999, Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles, ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 121, pp. 280-289.
7. Carslaw, H. S. Jaeger, J. C., 1959, Conduction of heat on solids, 2nd Ed, Oxford University Press.