

이중관 열교환기 시스템에서 나노유체의 열전달 특성 연구

강승우, 이찬호, 김성현
고려대학교 화공, 생명공학과

Effect of nanofluid on heat transfer in double-pipe heat exchanger system

Seung Woo Kang, Chan Ho Lee and Sung Hyun Kim
Department of Chemical and Biological Engineering, Korea University

1. 서론

최근에 나노크기의 입자가 열전도도 향상에 기여한다는 연구 결과가 보고 되어 이를 토대로 유체가 유동하는 상태에서 열전달 효율을 측정하는 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서도 마찬가지로 Ag 나노입자를 증류수에 분산하여 열전도도를 측정한 실험이 수행되었으며, Ag 나노입자가 열전도도 향상에 기여한다는 동일한 결과를 얻었다. 이 결과를 토대로 하여 이중관 열교환기 시스템을 자체 제작하였고, 먼저 Ag 나노입자를 증류수에 분산한 나노유체를 가지고 열전달 실험을 수행하였으며, 열전달 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 그런데 증류수 자체의 열전달 계수가 크기 때문에 나노입자를 첨가함으로써 열교환 시스템에서 열전달 성능이 획기적으로 향상되기는 어려운 것으로 판단되었다. 변압기, 콘덴서, 케이ابل, 차단기 등 송변전 설비와 배전기기에 사용되는 오일로서 전기절연성과 냉각성을 중요한 역할로 하는 절연유가 있다. 증류수와 비교하여 상대적으로 열전달 성능이 떨어지지만, 변압기 내에서 절연능력을 수행하는 특수한 열전달 매체인 절연유를 대상으로 증류수의 경우보다 큰 열전달 성능향상을 기대하며 나노입자의 실험을 수행하고 있다. 또한 이 결과를 가지고 변압기 설계에 필요한 열전달 특성을 포함하는 상관식 연구를 수행할 계획이다.

2. 실험

2-1. 실험장치

본 연구의 실험장치 모식도를 Fig.1에 나타내었다. 이중관은 열전달이 일어날 수 있도록 기본적으로 60cm길이에 내관 1/4", 외관 1/2"로 제작하였으며, 실험의 정밀성을 위해서 30cm, 500cm의 장치로도 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 이중관 열교환기의 size를 Table. 1에 나타내었다. 이중관 열교환기의 내관으로는 나노유체가 흐르게 하였고 외관으로는 냉각수 또는 가열수가 흐르면서 이중관 내부에서 발생하는 열을 제거하거나 열을 공급할 수 있도록 하였다. 실험 장치는 순환시스템으로 구성하였으므로, 소량의 나노유체로도 실험이 가능하게 하였다. 각 열교환기의 입 출구, 냉각수와 가열수의 입 출구 배관엔 축운저항체를 설

치하여 온도를 측정하였다. 실험과정에서 용액, 냉각수 그리고 가열수의 온도는 $\pm 0.1\text{K}$ 의 정밀도로 유지하였다. 용액 순환 라인에는 질량 유량계(KRONE Co.)를 설치하였다. 측정된 데이터들은 전체 20채널 사용이 가능한 데이터 로거(YOKOGAWA Co.)를 이용하여 컴퓨터에 온라인으로 데이터 저장이 가능하도록 데이터 취득 시스템을 구축하였으며, 시스템이 정상 상태일 때 실험을 수행하였다. 동일한 실험장치로 용매와 나노입자를 달리하여 두 가지 연구를 수행하였는데, Table. 2에 case I 과 case II의 용매와 나노입자를 나타내고 있다.

	A	B	C	D
Length(cm)	30	30	60	500
I.D(inch)	3/8	1/4	1/4	1/4
O.D(inch)	3/4	1/2	1/2	1/2

Table 1. Dimension of double-pipe heat exchanger

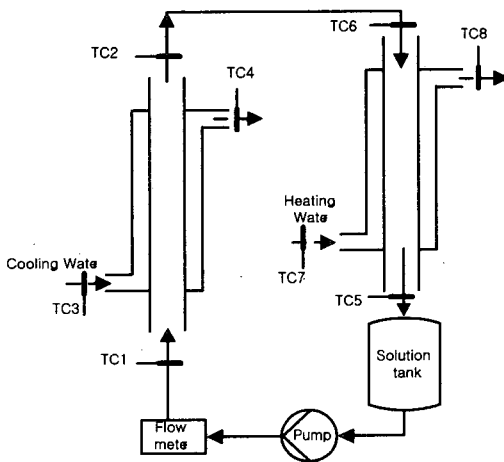


Fig. 1 Experimental apparatus

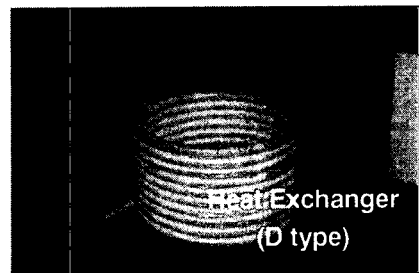


Fig. 2 D type Heat Exchanger

	case I	case II
solvent	water	insulating oil
nano particle	Ag	SiO ₂ , Al ₂ O ₃

Table. 2 Experimental map

2-2. 데이터처리법

본 연구에서 측정하고자 하는 총괄 열전달계수 U 는 냉각수(물)의 총 열교환량 Q 로부터

구한다.

$$Q = m_c C_p [T_{c,in} - T_{c,out}] \quad (1)$$

앞에서 구한 총 열교환량 Q는 총괄 열전달계수 U와 전열면적 A 그리고 열전달에 대한 구동력인 ΔT 로 나타낼 수 있으므로 구하고자 하는 총괄 열전달 계수 U는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\therefore U = \frac{Q}{A \cdot \Delta T} \quad (2)$$

그리고 열전달에 대한 구동력인 ΔT 는 식 (3)과 같이 정의한 대수평균온도차(Log Mean Temperature Difference, LMTD)를 이용하였다.

$$LMTD = \frac{(T_{s,in} - T_{c,out}) - (T_{s,out} - T_{c,in})}{\ln \frac{(T_{s,in} - T_{c,out})}{(T_{s,out} - T_{c,in})}} \quad (3)$$

여기서 구한 U를 이용하여 나노유체의 개별 열전달계수 h_i 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{1}{h_i} = \frac{1}{U} - \frac{1}{h_o} \quad (4)$$

$x_w=1\text{mm}$, $k_m=9.4\text{Btu/ft-h}^\circ\text{F}$ (STS 316)를 사용하였으며, h_o 는 난류유속 범위인 냉각수의 개별 열전달계수를 증류수의 Pr와 Re값을 Dittus-Boelter 식(5)에 대입하여 구할 수 있었다.

$$Nu = \frac{h_o D}{k} = 0.023 Re^{4/5} Pr^{1/3} \quad (5)$$

3. 결과 및 고찰

3-1. 증류수의 Ag 나노입자에 의한 열전특성(case I)

본 연구실에서 수행한 Ag 나노유체의 열전도도 측정실험 결과를 Fig. 3에 제시하였는데, Ag 농도가 2.5%이상으로 증가하여도 열전도도 향상이 거의 없기 때문에 열교환 실험은 Ag 2.5%인 경우를 대상으로 수행하였다[이찬호, 2003]. 실험 데이터의 신뢰성을 확보하기 위하여 증류수를 가지고 예비실험을 수행한 결과를 Fig. 4에 제시하였으며, 그림에서 보는 바와 같이 열수지가 잘 맞는 것을 확인할 수 있었다. 또한 size가 다른 여러 열교환기에 대해 증

류수로 혹은 나노유체로 실험할 때, 모두 유속이 증가함에 따라 총괄 열전달계수가 증가하는 경향을 나타냈으며 형태에 따라 큰 차이가 없는 것을 알 수 있었다. 단지 열교환기의 길이가 길면 더욱 정밀한 실험이 된다는 것을 확인할 수 있었다. 다음으로 유속에 따른 증류수와 Ag 나노유체의 열전달계수의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. $Re=2,000$ 을 기준으로 증류수에서는 성능향상을 확인할 만큼 증가가 있었으나, 전이영역에서는 효과가 두드러지지 않음을 알 수 있었다. 또한 증류수 자체의 열전달 계수가 크기 때문에 나노입자의 효과는 증류수에서도 열전도도와 비교하여 상대적으로 작은 것을 알 수 있었다. 하지만 나노입자 첨가에 의한 유동상태에서 열전달 성능향상의 가능성을 확인할 수 있었다.

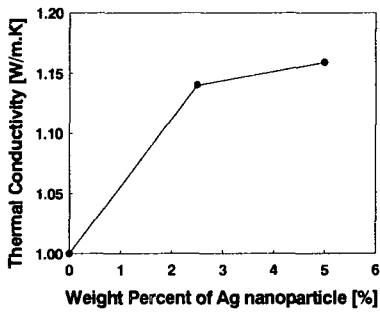


Fig. 3 Effect of Ag nano particles on thermal conductivity

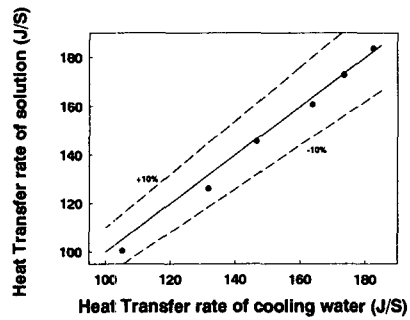
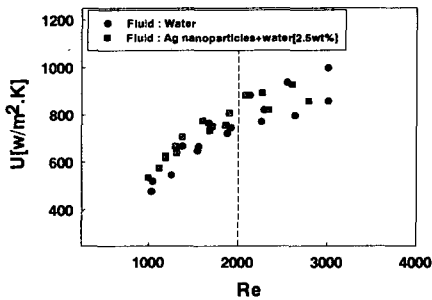
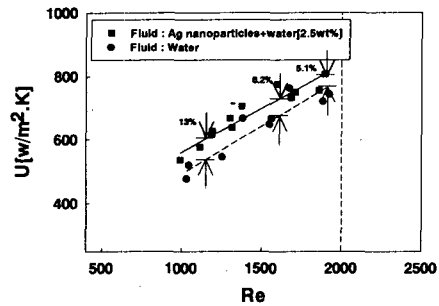


Fig. 4 Heat Balance of System



(a)



(b)

Fig. 5 Effect of Ag nano particles on overall heat transfer coefficient: (a) laminar and transient region and (b) laminar region

3-2. 절연유 의 SiO_2 와 Al_2O_3 나노입자에 의한 열전특성(case II)

절연유에 1% SiO_2 와 Al_2O_3 나노입자를 넣어서 실험한 결과를 Fig. 6에 나타내었는데, SiO_2 입자에 의해서는 열전달 성능향상을 확인할 수 있었고, Al_2O_3 입자의 경우 열전달 성능향상이 일어나지 않았다. 열전달 성능향상을 일으키는 SiO_2 나노절연유에 대한 점도를 측정해본

결과, 1%이상의 농도에서는 점도가 급격히 증가하므로 같은 동력으로 훨씬 낮은 유속을 내는 것으로 나타났다. 따라서 1%이하의 농도에서만 실험계획을 수립하여 연구를 수행하였다. 실험조건을 0%, 0.5%, 1%의 농도로 하고 실험을 수행하여 총괄 열전달계수와 개별 열전달 계수를 측정된 결과를 Fig. 7에 나타내었는데, 유속이 커질수록 입자의 농도가 높아질수록 열전달계수가 향상되는 것을 확인할 수 있다.

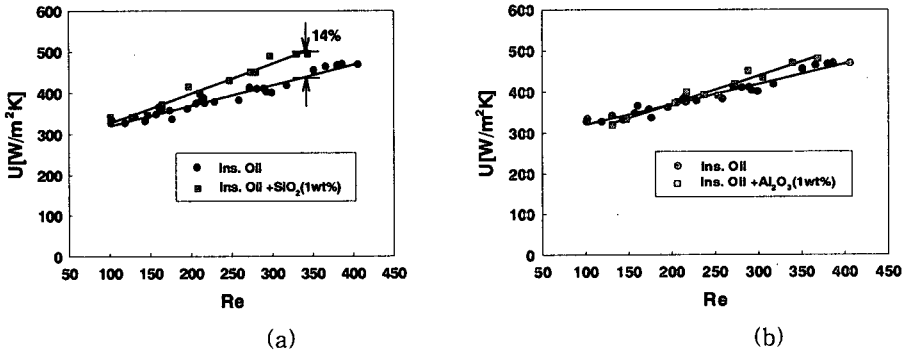


Fig. 6 Effect of (a) SiO_2 and (b) Al_2O_3 nano particles on overall heat transfer coefficient in insulating oil

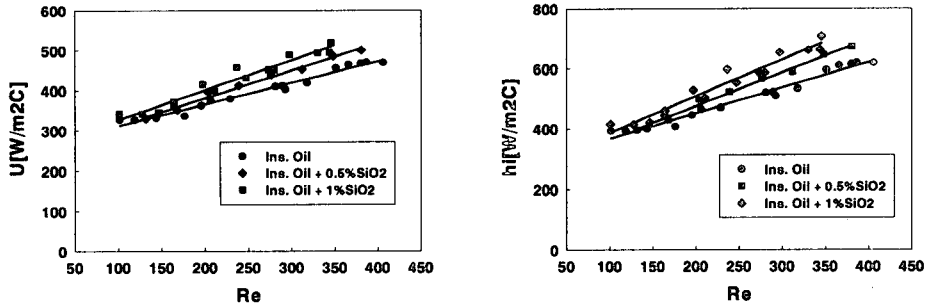


Fig. 7 Effect of SiO_2 nano particles on (a) overall and (b) individual heat transfer coefficient

4. 결론

유동상태에서 나노유체의 열전달 성능실험을 수행해본 결과, 증류수를 매체로 하는 실험에서 증류영역에서는 5~13%의 나노입자에 의한 성능향상을 확인했으나, 전이영역에서는 성능향상의 경향성을 확인할 수 없었다. 절연유의 경우와 비교할 때 상대적으로 높은농도의 나노입자를 사용하여서 획기적인 향상을 얻을 수는 없었지만, 유동상태에서 나노입자 첨가에 의한 열전달 성능향상의 가능성을 확인할 수 있는 실험이 되었다. 그리고 변압기에서 절

연능력을 수행하는 특수한 열전달매체인 절연유인 경우 상대적으로 낮은 농도의 나노입자 첨가로도 열전달성능 향상이 있었고, 이 결과를 토대로 본 실험실은 변압기 설계에 필요한 상관식 개발에 대한 연구를 계속 수행할 계획이다.

참고문헌

1. 이찬호, 강승우, 조상준, 남승백, 김태형, 김성현: 대한설비공학회 2003하계학술발표대회 논문집; 761~765(2003)
2. K.U. Leuven: 1999, *Applied Thermal Engineering* 20 417-437(2000)
3. Lee, S.U., S. Choi, S. Li and J. A. Eastman: *Journal of Heat Transfer*, 121, 280-289(1999)
4. Xuan, Y. and Q. Li: *International Journal Heat Fluid Flow*, 21, 158-164(2000)