

나노입자를 이용한 유체의 열전달 향상 연구

강현욱, 김운귀, 김성현*
고려대학교 화공생명공학과
(kimsh@korea.ac.kr*)

Heat Transfer Enhancement of nanofluid in laminar flow

Hyun Uk Kang, Wun-Gwi Kim, Sung Hyun Kim*
Department of Chemical and Biological Engineering, Korea University
(kimsh@korea.ac.kr*)

서론

유체의 열전달 특성은 그 유체의 열전도도, 점도, 밀도, 비열 등의 물리적 특성에 영향을 받는다. 특히 이 중에서 유체의 낮은 열전도도는 가장 중요한 열전달 저해 요인이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 유체 내에 고체 나노입자를 넣어 열전도도를 높이고자 하는 연구가 1990년대 중반부터 진행되고 있는데 이러한 유체를 나노유체라고 한다. 나노유체는 일반적인 열전달용 유체인 물이나 에틸렌글리콜 등의 유체에 비해 더 높은 열전달 성능을 가지고 있기 때문에 최근 여러분야에서 관련 응용연구를 수행하고 있다. 이러한 나노유체의 열전달 특성은 상당부분 첨가된 나노입자의 물성에 의해 좌우된다고 알려져 있으며, 실제 다양한 입자에 대하여 나노유체의 열전도도가 측정되었다. 그러나 나노유체의 열전달 특성에 중요한 영향을 미치는 다른 두 가지 중요요소인 나노입자의 표면구조의 영향 및 유체내 입자의 이동의 영향에 대해서는 상대적으로 연구가 미흡한 실정이다. 이는 기본적으로 나노유체가 다상계이며, 분산된 고체 나노입자의 거동이 매우 복잡하기 때문이다. 다만 최근에 와서 몇몇 연구자들에 의해 층류 영역에서의 나노유체의 열전달 특성에 대한 연구 결과가 일부 보고되고 있는 실정이다[1-3].

본 연구에서는 알루미늄 입자를 절연유에 분산시켜 이중관 열교환기에서 그 열전달 특성을 살펴보고, 이를 통해 나노유체의 열전달 거동을 해석해보고자 하였다.

본론

앞에서 기술한 것처럼, 나노유체는 다상계이며, 분산된 나노입자의 특성 및 유체의 물성에 따라 복잡한 거동을 보인다. 이러한 이유 때문에 나노유체의 대류 열전달 계수 예측을 위한 관계식이 거의 개발되어 있지 않다. 그러나 유체 내 입자의 첨가 분율이 작고, 입자의 크기가 매우 작을 경우 나노유체를 하나의 단일 유체로 가정할 수 있다. 이때의 유체의 점도, 밀도, 비열, 열전도도 등의 물성은 입자와 유체의 분율을 이용하여 관계식을 형성할 수 있다. 이러한 시스템에서 일반적으로 수평관에서 적용되는 관계식은 다음과 같이 수평관 내의 층류 흐름에 대해 적용되는 Sieder-Tate 식(1) [4], 일정한 열흐름 조건에서 층류에 적용되는 Shah 식(2) [5] 등이 있다.

$$Nu_d = 1.96 \left(Pe \frac{D}{L} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (1)$$

$$Nu = 1.953 \left(Re Pr \frac{D}{x} \right)^{0.33} \quad \left(Re Pr \frac{D}{x} > 33.3 \right) \quad (2-1)$$

$$Nu = 4.364 + 0.0722 Re Pr \frac{D}{x} \quad \left(Re Pr \frac{D}{x} < 33.3 \right) \quad (2-2)$$

여기에서 Nu는 Nusselt 수, Pe는 Peclet 수, Re는 Reynolds 수이고, D는 관의 내경, L은 관의 길이이며, μ_b , μ_w 는 각각 벌크에서의 유체의 점도와 벽에서의 유체의 점도를 뜻한다.

그러나 이러한 식들은 모두 입자 효과를 고려하지 않고 균일한 하나의 유체로 가정하였기 때문에 나노유체의 열전달 추정에는 문제점이 있다. 이를 보완하기 위해 Li와 Xuan은 구리-물 나노유체의 Nusselt 수를 다음과 같이 제시하였다 [6].

$$Nu = 0.4328(1 + 11.285\phi^{0.754}Pe^{0.218})Re^{0.333}Pr^{0.4} \quad (3)$$

여기에서 ϕ 는 입자의 부피분율이다. 그러나 보다 엄밀한 예측을 위해서는 많은 연구가 추가적으로 진행되어야 한다.

실험 및 해석 방법

본 연구에서 측정하려고 하는 총괄 열전달 계수는 냉각수의 총열교환량(Q)과 이중관 열교환기의 로그평균온도차(ΔT_{lm}), 그리고 열교환기의 전열면적(A)으로부터 구하여진다.

$$U = \frac{Q}{A\Delta T_{lm}} \quad (4)$$

한편 에너지 수지식으로부터 유체의 총괄 전달 계수는 다음과 같이 개별 열전달 계수들의 함수로 표현할 수 있으며, 이를 역으로 계산하여 나노유체 측의 개별 열전달 계수를 구할 수 있고, 이를 이용해 Nusselt 수를 계산할 수 있다.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i \left(\frac{A_i}{A_o}\right)} + \frac{D_o}{2k} \ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right) + \frac{1}{h_o} \quad (5)$$

냉각수측 열전달계수 h_o 는 다음과 같은 Monrad-Pelton식으로 계산하였다 [7].

$$h_o = 0.02 Re^{0.8} Pr^{1/3} \left(\frac{D_{out}}{D_o}\right)^{0.53} \quad (6)$$

본 연구에서 사용된 이중관 열교환기는 500cm 길이에 내관 1/4", 외관 1/2"의 SUS관으로 제작하였다. 내관으로는 나노유체가 흐르게 하였고 외관으로는 냉각수 또는 가열수가 흐르면서 열교환이 일어나게 하였다. 각 열교환기의 입 출구, 냉각수와 가열수의 입 출구 배관엔 축운저항체를 설치하여 온도를 측정하여 로그평균온도차를 구하였다. 그림 1에 장치의 개요를 나타내었다. 또한 이중관 열교환기와 열교환 성능을 비교하기 위해 Alfa Laval(Sweden)사의 판형 열교환기를 이용한 열교환 실험도 동시에 수행하였다.

실험에 사용된 유체는 절연유 1종 4호를 이용하였으며, 사용된 입자는 γ -알루미나로 약 40nm 정도의 크기를 가진다. 나노유체는 분산을 위해 약간의 분산제가 첨가되어 제조되었다.

결과 및 토론

그림 2는 절연유와 알루미나-절연유 나노유체에 대하여 열교환 실험을 수행한 결과이다. 층류 영역에서 알루미나 나노입자의 분율이 증가함에 따라 열전달 성능이 향상됨을 알 수 있다. 이러한 경향을 입자의 분율과 관계시키면 다음과 같은 형태의 관계식을 얻을 수 있다.

$$Nu = 2.4323 + 0.023Re^{0.67} Pr^{0.4}(1 + \phi^{0.2787}) \quad (7)$$

그림 2에서 선은 위 식을 이용하여 도식한 결과이며, 실험값과 비교적 근접한 결과를 보임을 알 수 있다.

그림 3은 분산제의 종류에 따른 열교환 성능 측정 결과이다. 이 실험은 총괄열전달계수를 측정하는 형태로 진행하였으며, 사용된 분산제는 각각 Oleic 산과, Lauric 산이다. 실험 결과로부터 분산이 잘 되어 있다면 분산제의 종류가 유체의 열전달 성능에 미치는 영향은 미미함을 알 수 있다.

그림 4는 판형 열교환기를 이용한 열교환 성능 측정 결과이다. 순수한 절연유를 이용했을 경우와 나노유체를 이용했을 경우 이중관 열교환기에서는 약 9% 정도의 성능향상이

있었음에 비해, 관형 열교환기에서는 약 12% 정도의 성능향상이 있었다. 이러한 결과로부터 열교환기의 형태가 열교환 성능의 한 인자가 되기는 하지만, 나노유체의 열전달 성능 향상 자체는 특정한 시스템에서 일어나는 부분적인 현상이 아니라, 전반적인 열교환 장치 모두에서 활용될 수 있는 효과임을 추정할 수 있다. 그러나 이러한 부분에 대한 보다 엄밀한 이해는 나노유체의 열전달 메커니즘을 바탕으로 많은 추가적인 연구가 진행되어야 얻을 수 있을 것이다.

결론

본 연구에서는 알루미늄-절연유 나노유체를 이용하여 두가지 형태의 열교환기에서 층류 영역에서의 대류 열전달 계수를 측정하고, 그 결과를 분석하였다. 절연유의 경우 자체 열전달 특성이 낮기 때문에 이러한 연구를 통해 열교환 성능을 상대적으로 많이 향상시킬 수 있었다. 실험적인 결과를 보면, 열교환기 형태에 따라 열교환 향상폭이 달라지기는 하나, 전반적으로 나노유체를 이용하였을 때 층류 영역에서 약 10% 정도의 열교환량 증가가 있었다. 이러한 열전달 향상은 기존의 일반적인 균일 유체에 적용되던 관계식을 이용해 예측한 값보다 월등히 높다. 이러한 증가를 예측하기 위해서는 입자의 부피분율, 조업 온도, 입자의 특성, 유체의 특성을 포함한 새로운 관계식이 제안되어야 한다. 본 연구에서는 부분적으로 이러한 특성을 포함한 관계식을 제안하였다. 추가적인 연구를 통해 열전달 성능 향상에 대한 메커니즘을 보다 엄밀히 밝히고, 더 적절한 열전달 특성 예측을 위한 관계식을 제시할 필요가 있다.

감사

본 연구는 산업자원부 전력산업연구개발사업의 일환으로 한국전력연구원(KEPRI)의 연구 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. G. Roy, C.T. Nguyen, P.R. Lajoie, Superlattices and Microstructures, 35, 497 (2004)
2. D. Wen, Y. Ding, Int. J Heat and Mass Trans., 47, 5181 (2004)
3. Y. Yang, Z.G. Zhang, E.A. Grulke, W.B. Anderson, G. Wu, Int. J. Heat and Mass Trans., 48, 1107 (2005)
4. E.N. Sieder, G.E. Tate, Ind. Eng. Chem., 28(12), 1429 (1936)
5. R.K. Shah, , Prod. 3rd National Heat and Mass Transfer Conference, 1, Indian Institute of Technology, Bombay, HMT-11-75 (1975)
6. Q. Li, Y. Xuan, Sci. China, Series E: Technol. Sci., 45(4), 408 (2002)
7. C.C. Monrad, J.F. Pelton, Trans. Am. Inst. Chem. Eng., 38, 593 (1942)

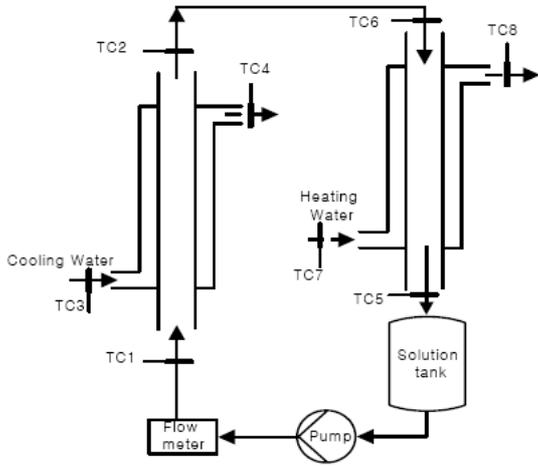


그림 1. 열교환 시스템 장치도

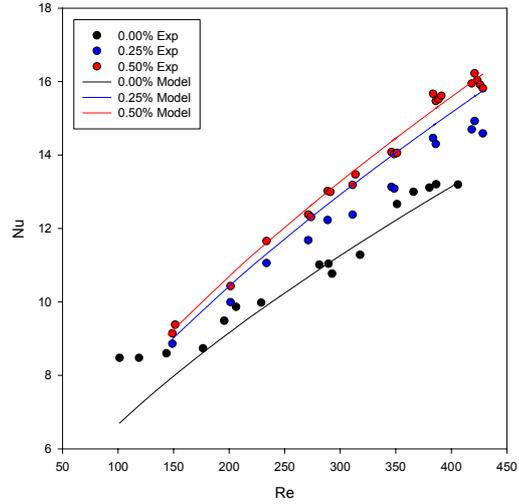


그림 2. 나노입자의 분율에 따른 이중관열교환기에서의 열교환 성능 측정

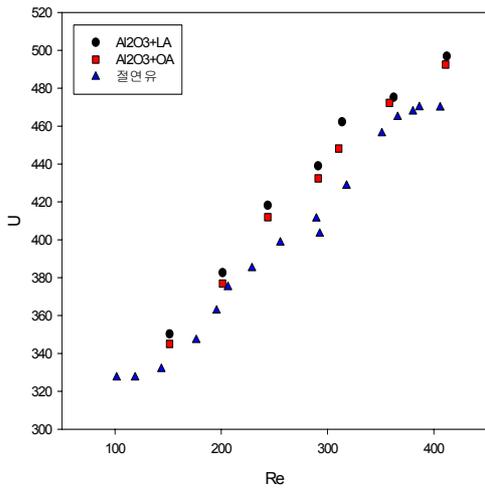


그림 3. 첨가제에 따른 이중관열교환기에서의 열교환 성능 측정

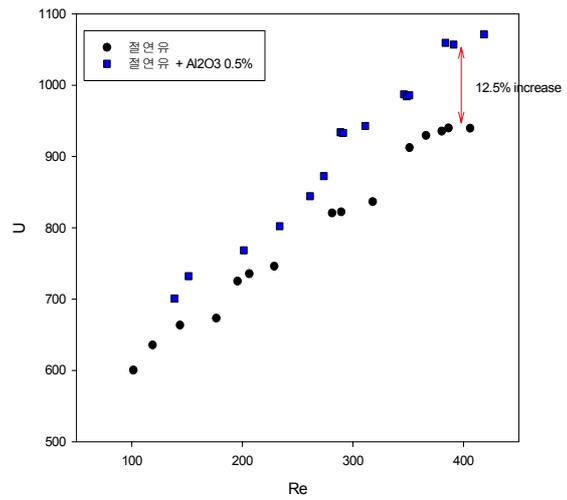


그림 4. 관형열교환기에서의 열교환 성능 측정