

층류 영역에서의 나노유체의 열전달 특성 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

나노 유체란 나노미터 크기의 입자가 유체에 안정적으로 분산된 유체를 말한다. 1990년 대 중반 Choi와 Eastman이 미량의 나노입자가 첨가된 나노유체가 순수한 유체에 비해 월등히 높은 열전도도를 보인다는 사실을 보고한 이후[1], 나노 유체를 이용한 열전달 향상에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 나노유체를 열교환 장치에 이용하면 장치의 열전달을 획기적으로 향상시킬 수 있는 장점이 있다. 그러나 이러한 나노유체의 열전달 메커니즘에 대해서는 아직 개념 정립 수준으로 정확한 관련 메커니즘이 제시되지 않고 있다. 또한 실제 열교환 장치의 조건인 대류 조건에서의 열전달 효과 향상에 대한 연구는 최근에 와서야 부분적으로 진행되고 있다[2-3].

본 연구에서는 알루미늄 나노입자를 절연유에 분산시킨 나노유체에 대해 이중관 열교환기와 평판형 열교환기를 이용하여 열전달 성능을 측정하고, 이를 입자의 유체 내 이동과 연관시켜 해석하고자 하였다.

본론

나노유체는 기본적으로 고체와 액체로 구성된 이상계이며, 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.

$$\rho_{NF} = \rho_{BF}(1 - \Phi) + \rho_{NP}\Phi \quad (1)$$

$$Cp_{NF} = Cp_{BF} \frac{\rho_{BF}(1 - \Phi)}{\rho_{BF}(1 - \Phi) + \rho_{NP}\Phi} + Cp_{NP} \frac{\rho_{NP}\Phi}{\rho_{BF}(1 - \Phi) + \rho_{NP}\Phi} \quad (2)$$

$$\mu_{NF} = \mu_{BF}(1 + a\Phi) \quad (3)$$

$$k_{NF} = k_{BF} \left(\frac{k_{NP} + 2k_{BF} - \frac{2a}{2.5} \Phi(k_{BF} - k_{NP})}{k_{NP} + 2k_{BF} + \frac{a}{2.5} \Phi(k_{BF} - k_{NP})} \right) \quad (4)$$

여기에서 NP, BF, NF는 각각 나노입자, 순수유체, 나노유체를 뜻하는 첨자이며, a는 현탁액의 점도 측정에서 얻어지는 상수, Φ 는 입자의 부피분율을 나타낸다. 위 식에서 보듯이 나노유체의 물성을 계산하기 위해서는 입자의 부피분율을 정확히 알아야 한다. 기존 나노유체의 연구에서는 입자의 부피분율을 전체 용액에서 균일하다고 가정하고 입자의 물

성을 계산한 바 있다. 그러나 실제 도관을 흐르는 유체 내 입자는 유체 내의 점도 분포, 전단응력 분포, 입자 농도 분포 등의 차이에 의해 이동하게 되며, 이에 따라 입자의 분포가 위치에 따라 달라지게 된다. 이중관 열교환기의 경우 입자의 농도 분포는 다음과 같은 미분식으로 표현되어진다[4].

$$K_{\mu} \dot{\gamma} \Phi^2 \frac{d^2 \mu}{\mu dr} + K_c d_p^2 \Phi^2 \frac{d\dot{\gamma}}{dr} + K_c d_p^2 \Phi \dot{\gamma} \frac{d\dot{\gamma}}{dr} + D_b \frac{d\Phi}{dr} = 0 \quad (5)$$

여기에서 K_{μ} , K_c 는 각각 점도차에 의한 입자이동계수, 전단속도차이에 의한 입자이동계수이며, D_b 는 브라운 운동에 따른 입자의 이동계수이다. (5)식을 풀면, 반경 방향으로 입자의 농도 분포를 알 수 있으며, 실제 열전달에서 중요한 부분은 열전달의 저항층이라고 할 수 있는 벽면 부근의 열경계층이므로, 이 부분의 입자의 농도를 채택하여 나노유체의 물성을 추정할 수 있다.

이러한 시스템에서 일반적으로 이중관 열교환기를 흐르는 유체에 대해서는 일반적으로 다음과 같은 Sieder-Tate 식이 주로 사용된다[5].

$$Nu_d = 1.96 \left(Re Pr \frac{D}{L} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (6)$$

여기에서 Nu는 Nusselt 수, Pr는 Prandtl 수, Re는 Reynolds 수이고, D는 관의 내경, L은 관의 길이이며, μ_b , μ_w 는 각각 벌크에서의 유체의 점도와 벽에서의 유체의 점도를 뜻한다. 한편 평판형 열교환기의 경우 시스템에 따라 여러 가지 표현식이 있으나, 일반적으로는 다음과 같은 식을 사용한다[6].

$$Nu = 1.68 \left(Re Pr \frac{d_e}{L} \right)^{0.4} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.1} \quad (7)$$

그러나 이러한 식들은 모두 입자 효과를 고려하지 않은 순수한 유체에 적용할 수 있는 것으로 실제 나노유체의 열전달 특성 예측에의 적합성 여부는 명확히 밝혀지지 않았다.

실험

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 축온저항체를 설치하여 온도를 측정하여 로그평균온도차를 구하였다. 그와 함께 이중관 열교환기와 열교환 성능을 비교하기 위해 Alfa Laval(Sweden)사의 판형 열교환기(NB type)를 이용한 열교환 실험도 동시에 수행하였다.

실험에 사용된 유체는 절연유 1종 4호를 이용하였으며, 표1에 기술한 여러 종류의 알루미나 나노입자를 첨가하여 그 특성에 따른 차이를 분석하였다.

결과 및 토론

그림 1과 2는 알루미나를 절연유에 분산시킨 유체의 이중관 열교환기에서의 열전달 특성 측정 결과를 나타낸 것이다. 그림 1은 입자의 표면의 친수성 차이에 따른 열전달계수의 변화를 본 것으로, 소수성인 AK 알루미나 분산액이 친수성인 AR 알루미나 입자 분산액보다 조금 높은 열전달계수 향상을 보임을 알 수 있으며, 두 입자 모두 순수한 절연유보다는 약 10% 수준의 열전달계수 향상을 보였다. 그림 2는 입자의 형상 차이에 따른 열전달계수 차이를 살펴본 것이다. 침상형인 AF 알루미나 분산액과 구형 AK 알루미나 분산액 모두 순수 절연유보다 높은 열전달 특성을 보이며, 두 형태 사이에는 큰 차이가 없었다.

그림 3은 식(5)를 이용해 계산된 반경방향으로의 입자 농도 분포 결과로, 계산을 위해 $K_c=1$, $K_{\mu}=1.5$, $a=2.5$ 를 사용하였으며, 나노유체에 대해 D_b 를 계산하였다. 일반적인 나

노유체의 경우 입자가 벽면 쪽으로 이동하는 결과를 보여준다. 이를 토대로 벽면에서의 입자 농도를 기준으로 열경계층에서의 유체의 물성을 계산한 후 식(6)과 식(7)을 통해 AR, AK 알루미나 현탁액의 이중관 열교환기에서의 열전달계수를 예측한 결과가 그림 4, 평판형 열교환기에서의 열전달계수를 예측한 결과가 그림 5이다. 두 결과 모두 나노유체의 열경계층의 물성을 이용해 계산했을 때, 기존의 모델만으로도 열전달계수를 예측할 수 있음을 보여준다. 그러나 이러한 결과는 아직 제한적으로 받아들여야 하며, 보다 엄밀한 연구가 추가적으로 필요하다.

결론

본 연구에서는 알루미나-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 0.5% 알루미나-절연유 나노유체에서 열교환 성능을 약 10% 정도 향상시킬 수 있었다. 그리고, 입자의 표면 특성이나 형태는 상대적으로 중요한 인자가 되지 않음을 확인할 수 있었다. 또한 열경계층에서의 입자 농도를 계산하여 이를 기존의 모델에 적용하였을 때 알루미나-절연유 나노유체의 열전달계수를 비교적 정확하게 예측할 수 있었다. 그러나 이를 나노유체 전반에 적용하기 위해서는 보다 많은 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. S.U.S. Choi, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, in Development and Applications of Non-Newtonian Flows, ASME, New York, pp.99-105 (1995)
2. G. Roy, C.T. Nguyen, P.R. Lajoie, Superlattices and Microstructures, 35, 497 (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. Y. Ding, D. Wen, Powder Technology 149, 84 (2005)
5. E.N. Sieder, G.E. Tate, Ind. Eng. Chem., 28(12), 1429 (1936)
6. E.U. Schlunder, "Heat Exchanger Design Handbook III, Thermal and Hydraulic Design of Heat Exchangers", Hemisphere Publishing (1983)

표 1. 알루미나의 물성

| Alumina | AK | AR | AF |
|------------------------------|-------------|--------------------|----------------------|
| Company | Degussa Co. | N & A Mater., Inc. | Nano Technology Inc. |
| Size | ~43 nm | 27~43 nm | ~7 nm |
| Shape | Spherical | Spherical | Rod like (AR 50~200) |
| Surface | Hydrophobic | Hydrophilic | Hydrophilic |
| Heat Capacity (KJ/Kg K) | 20 | | |
| Density (Kg/m ³) | 3970 | | |
| Thermal Conductivity (W/m K) | 36 | | |

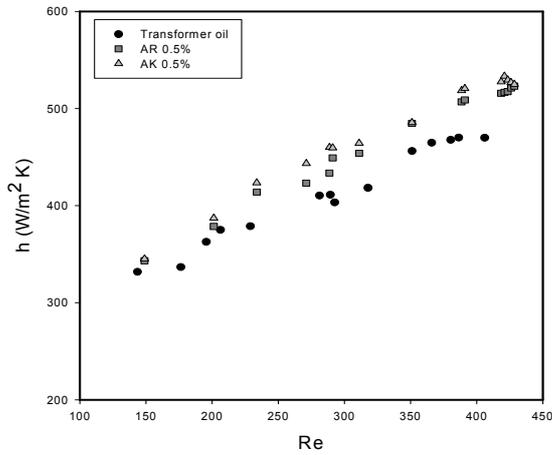


그림 1. 입자의 표면특성에 따른 열전달 특성

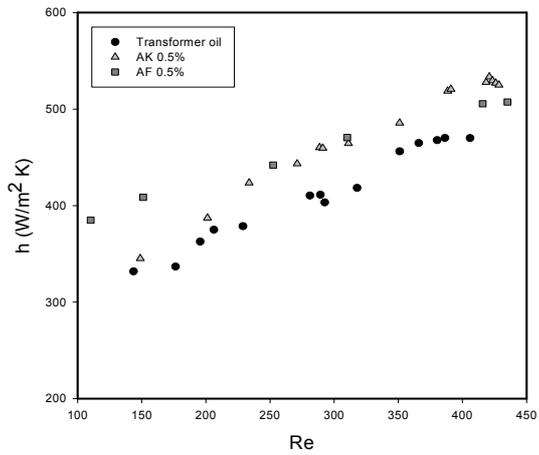


그림 2. 입자의 형상에 따른 열전달 특성

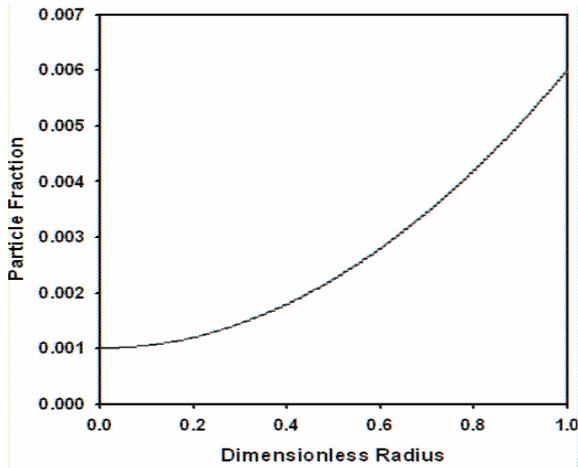


그림 3. 반경방향으로의 입자 농도 분포

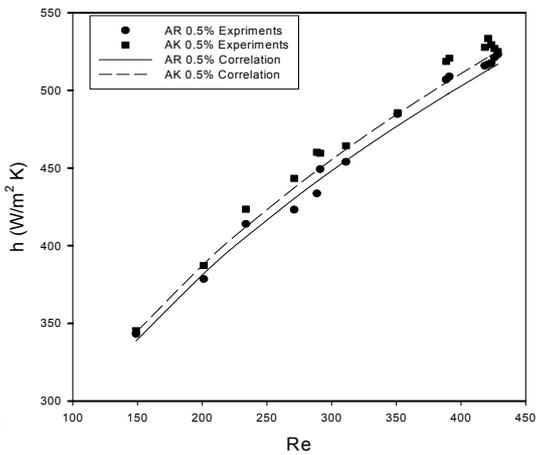


그림 4. 이중관 열교환기에서의 열전달 correlation

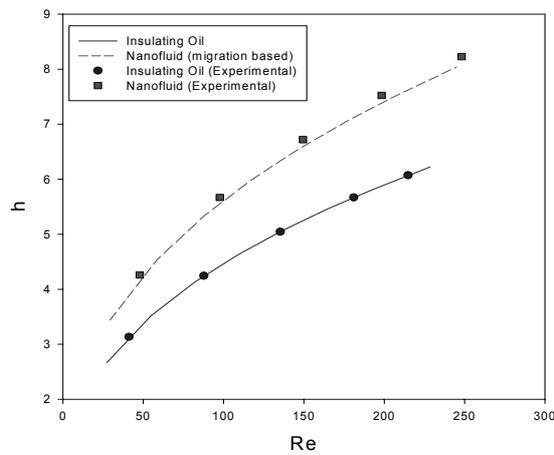


그림 5. 평판형 열교환기에서의 열전달 correlation