

금속성과 비금속성 나노파티클을 활용한 판형열교환기의 열전달 성능에 대한 해석적 연구

흡수식냉온수기 시스템의 용액열교환기에서 판형열교환기의 적용 시 금속성과 비금속성 나노파티클을 활용한 열전달 성능에 대하여 해석한 결과를 소개하고자 한다.

서론

지난 수십 년 동안, 에너지와 차량 및 기타 산업에서 열전달과 관련된 주제의 연구가 급속하게 활성화되고 있다. 판형열교환기는 1921년 낙농업분야에서 이용하기 위해 개발되었으며 최근에는 다양한 분야에서 사용되고 있다. 다양한 판형열교환기 중에서 세브런 판형열교환기가 가장 폭넓게 이용되고 있다. 일반적으로, 세브런 판형열교환기는 비교적 높은 난류를 제공하며, 일반적인 판형열교환기와 비교하였을 때 효과적인 열전달을 가능하게 한다. Troupe¹⁾에 따르면 판형 열교환기가 세브런 판형열교환기와 같은 열전달계수를 가지기 위해서는 5배 높은 레이놀즈수를 가져야 한다고 알려져 있다.

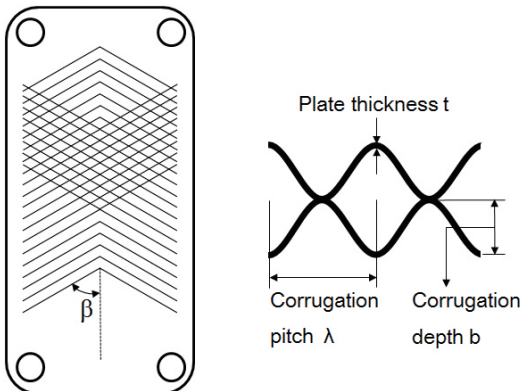
또한, 연구자들은 판형열교환기의 형상을 변경하는 것 외에도 작동유체의 물성치를 개선하는데 많은 노력을 기울이고 있으며 물결모양의 판형열교환기에서 열전달성능을 향상시킬 수 있는 강한 가능성을 가진 물질로는 나노유체가 고려되고 있다. 1990년대 중반, Choi²⁾는 금속성 또는 비금속성 나노입자가 들어간 고체-액체 혼합물을 나노유

조흥현
조선대학교 기계공학과
부교수
hhcho@chosun.ac.kr

체라고 명명하였으며, 일반적인 유체와 비교하였을 때 열전도도를 많이 증가시키는 것을 발견하였다. 그리고 최근 20년 동안 나노유체에 대한 연구는 많은 발전이 있었다.

Shive³⁾은 나노유체의 농도를 변화시켜 세브린 판형열교환기의 열전달 성능을 실험을 통해 조사하였다. 물-물 열교환과 비교하여 2%의 Al_2O_3 -Water 나노유체에서 대류열전달이 약 11% 향상되었으며, 나노유체 적용 시 더 우수한 열전달 성능이 나타났다고 보고하였다. Na와 OH ⁴⁾는 일정한 열유속 조건에서 원형 관내 층류유동시 Al_2O_3 -Water의 유효열전도율과 비열을 정지상태의 Al_2O_3 -Water와 비교하였으며, 2 Vol%의 Al_2O_3 -Water 나노유체가 순수 물보다 10% 향상된 유도열전도율을 가지며 대류 열전달 계수도 비슷하게 증가함을 보였다. 또한, 대류 유동조건에서 나노유체의 비열은 나노입자의 부피비율만 고려하여 계산한 값보다 작음을 확인하였다.

또한, Kabeel⁵⁾ 세브린 판형열교환기에 Al_2O_3 나노입자를 적용하였으며 나노입자의 농도가 증가함에 따라 열전달계수가 증가하지만, 압력강화와 펌프동력 또한 증가함을 확인하였고 Cho⁶⁾는 나노유체를 적용한 판형열교환기에 체



[그림 1] 판형열교환기의 개략도

<표 1> 판형열교환기의 제원

항목	제원
크기(mm×mm×mm)	289×119×48.8
깊이, b (mm)	2.0
판 두께, t (mm)	0.3
피치, λ (mm)	6.0
세브린각, β	30°/30°, 60°/60°

<표 2> 시뮬레이션 조건

항목	고온측유체	저온측유체
입구측 농도(wt%)	62.5	58.5
입구측 온도 (°C)	155	70
용액 질량 유량 (kg/h)	150, 250, 350, 450, 550	380

적유량 증가에 따른 열전달 효율과 압력강화를 조사한 결과 물 대비 열전달 증가는 미미하며 농도가 6 Vol%일 때 열전달 효율은 최대 7% 증가하였으며, 압력손실은 선형적으로 증가한다고 보고하였다. 그리고 Pantzali⁷⁾는 판형열교환기에 나노유체의 점도가 열교환기의 성능의 중요한 요인임을 실험을 통하여 제시하였다. 이와 같이 판형열교환기에 사용되는 작동유체를 나노입자를 적용하여 판형 열교환기의 성능을 향상시키고자 하는 연구가 지속해서 수행되고 있다.

이 연구에서는 LiBr 수용액을 기본으로 세브린 판형열교환기의 열전달 성능을 시뮬레이션하였으며 3가지 다른 나노파티클을 적용한 나노유체를 작동유체로 하여 열전달 성능 시뮬레이션을 진행하였다.

모델링 및 분석 방법

모델링 및 시뮬레이션 방법

본 실험에서 LiBr 용액은 기본적인 작동유체로 사용되었고, 농도가 다른 copper, Al_2O_3 와 MWCNT를 용액에 추가하였다. 그림 1은 세브린

PHE(Plate heat exchanger)의 도식을 보여주고, 표 1은 PHE의 상세 제원을 나타낸 것이다. 또한 표 2는 실험조건을 나타내고 있다.

해석 방법

본 연구에서는 PHE의 효과를 평가하기 위해 다양한 세브런 각도를 가진 PHE의 성능, 열전달 유효 열전달계수를 다음과 같은 식으로 계산하였다.

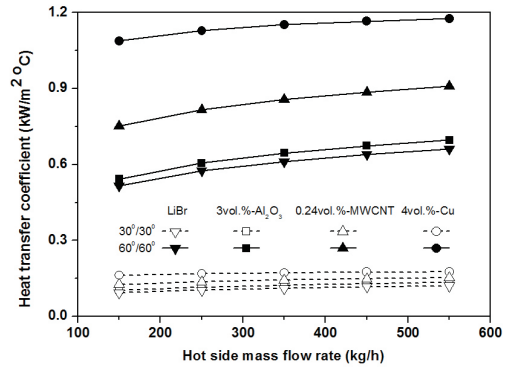
$$Q = m_h \cdot C_{p_h} \cdot \Delta T_h \quad (1)$$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_h} + \frac{1}{h_c} + \frac{t}{k_m} \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{m_h \cdot C_{p_h} \cdot (T_{h,i} - T_{h,o})}{(m \cdot C_p)_{min} \cdot (T_{h,i} - T_{c,i})} \quad (3)$$

나노유체의 물성치는 특히 열전도성과 점성, 유체의 미세 구조에 결정된다⁸⁾. 현재 나노유체의 미세 구조 전체를 세세하게 알기 전에는 나노유체의 물성치를 측정하는 것은 불가능하다. 따라서 나노유체가 유효 물성치를 가진 균일한 액체라고 가정하여 부족한 물성치를 설정하였다.

유효 밀도와 나노유체의 비열은 Pak과 Cho⁹⁾에 의해 제안된 다음과 같은 식을 적용함으로써



[그림 3] 고온측의 질량유량 변화에 따른 열전달 계수 변화

구할 수 있다.

$$\rho_{nf} = (1 - v_p) \cdot \rho_{bf} + v_p \cdot \rho_p \quad (4)$$

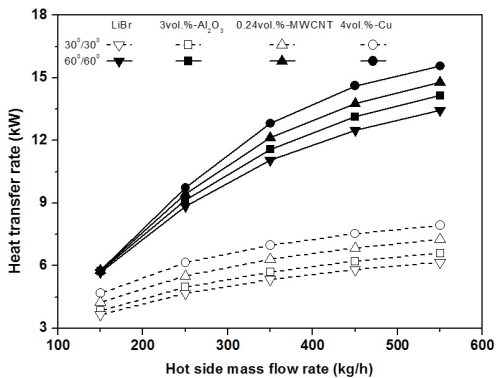
$$C_{p,nf} = (1 - v_p) \cdot C_{p,bf} + v_p \cdot C_{p,p} \quad (5)$$

유효 점성은 Brinkman¹⁰⁾방정식에 의해 구할 수 있다.

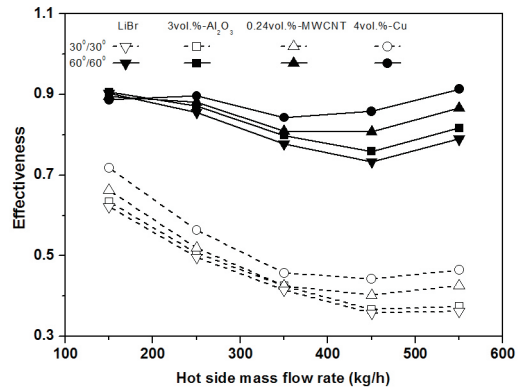
$$\mu_{nf} = \frac{\mu_{bf}}{(1 - v_p)^{2.5}} \quad (6)$$

결과 및 고찰

그림 2는 각각의 나노파티클을 적용한 나노유



[그림 2] 고온측의 질량유량 변화에 따른 열전달률 변화



[그림 4] 고온측 질량유량 변화에 따른 유효도 변화

체와 고온 측 질량유량의 변화에 따른 열전달률을 보여주고 있다. 해석 결과, 고온 측 질량유량이 증가함에 따라 세브론 각이 $30^\circ/30^\circ$ 와 $60^\circ/60^\circ$ 인 PHE에서 열전달률이 모두 증가하는 것으로 나타났다. $60^\circ/60^\circ$ PHE에서의 열전달률은 $30^\circ/30^\circ$ PHE 보다 더 크게 증가하는 것으로 나타났다. $30^\circ/30^\circ$ PHE에서의 다양한 나노유체의 열전달량의 평균 증가율은 71%이며, $60^\circ/60^\circ$ PHE에서의 증가율은 157%로 $30^\circ/30^\circ$ PHE에 비해 열전달률이 약 2배 증가하는 것으로 나타났다. $60^\circ/60^\circ$ PHE에서, 4 Vol% copper 나노유체를 적용했을 경우 가장 큰 열전달률을 보이며, 이는 0.24 Vol% MWCNT 나노유체보다 4% 크고, 3 Vol% Al_2O_3 나노유체보다 7.8% 증가하는 것으로 나타났다.

그림 3은 각각의 나노파티클을 적용한 나노유체에 고온 측 질량유량의 증가에 따른 열전달계수 변화를 보여주고 있다. 해석결과 고온 측 질량유량이 증가함에 따라 열전달계수는 $30^\circ/30^\circ$ 와 $60^\circ/60^\circ$ PHE에서 모두 증가하는 것으로 나타났으며 각각의 나노유체에서의 열전달계수의 평균 증가율은 $30^\circ/30^\circ$ PHE에서 20%, $60^\circ/60^\circ$ PHE에서는 19% 증가하였다. 또한, $30^\circ/30^\circ$ PHE에서 질량유량의 변화에 따른 각각의 나노유체에 대한 열전달계수의 변화는 큰 차이가 없지만, $60^\circ/60^\circ$ PHE에서는 큰 차이가 나타났다. 다양한 나노유체에서 4 Vol% copper 나노유체가 가장 큰 열전달계수를 보이며, 이는 0.24 Vol% MWCNT 나노유체보다 36% 크고, 3 Vol% Al_2O_3 나노유체보다 81% 더 큰 것으로 나타났다.

그림 4는 각각의 나노파티클을 적용한 나노유체에 고온 측 질량유량의 증가에 따른 유용도 변화를 보여주고 있다. $60^\circ/60^\circ$ PHE는 $30^\circ/30^\circ$ PHE에 비해 매우 큰 유용도가 나타났다. 그리고 처음에는 유용도가 감소하는 경향을 보이다가 어느정도 질량유량이 증가함에 따라 유용도가 증가

하는 경향이 나타났다. 이는 비열 비율의 상대적인 값이 고온 측 질량유량에 대해 반대되기 때문이다. 따라서, 각각의 나노유체에서 역전 현상은 발생하게 되며 이 중 제일 높은 열전달률을 가지는 4 Vol% copper 나노유체에서 가장 빠르게 역전 현상이 발생하는 것으로 나타났다.

결론

본 연구에서는 세브론 각도의 변화와 리튬브로마이드(LiBr) 수용액을 기본으로 다양한 나노유체에 따라 고온 측 질량유량의 변화에 따른 판형열교환기의 열전달 성능을 수치적으로 해석하였다.

(1) 본 연구에서 사용된 나노유체는 4 Vol% copper, 3 Vol% Al_2O_3 , 0.24 Vol% MWCNT 이며, 각각의 나노유체 모두 세브론 각도가 $60^\circ/60^\circ$ PHE 일 경우 $30^\circ/30^\circ$ PHE보다 높은 열전달률을 보였으며, 4 Vol% copper를 적용했을 경우 가장 큰 열전달률을 가지는 것으로 나타났다.

(2) 해석결과 열전달계수의 변화는 열전달률 변화와 유사하게 나타났으며 4 Vol% copper 나노유체를 $60^\circ/60^\circ$ PHE에 적용했을 경우 열전달계수가 다른 해석 결과에 비하여 가장 큰 수치를 나타냈다.

(3) 비열 비율의 상대적인 값의 역전 때문에, 질량유량에 따라 유용도는 처음에는 감소하는 경향을 보이지만 일정 값 후에 증가하였다. 또한 4 Vol% copper 나노유체가 가장 큰 유용도를 가지는 것으로 확인되었다.

참고문헌

1. Troupe, R. A., Morgan, J. G., & Prifti, J., 1960, The plate heat exchanger – versatile chemical engineering tool, *Chemical Engineering Progress* 56 (1) 124-128.
2. S.U.S. Choi, 1995, Developments and application of Non-Newtonian flows, vol. 66, ASME FED V.231/MD-V, New York, pp.99-105.
3. S.D. Pandey, V.K. Nema, 2012, Experimental analysis of heat transfer and friction factor of nanofluid as a coolant in a corrugated plate heat exchanger, *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 38, pp. 248-256.
4. Y.S. Na, D.W. Oh, J.S. Lee, 2007, Effective thermal conductivity and specific heat of Al_2O_3 nanofluid under convective flow, *Effective thermal conductivity and specific heat of Al_2O_3 nanofluid under convective flow*
5. A.E. Kabeel, T. Abou El Maaty, Y. El Samadony, 2013, The effect of using nanoparticles on corrugated plate heat exchanger performance, *Applied Thermal Engineering*, vol. 52, pp. 221-229.
6. Y.H. Cho, Y.H. Kwon, C.G. Lee, J.K. Lee, D.H. Kim, 2010, Heat Transfer Characteristics and Pressure Drop of Al_2O_3 Nanofluids in a Plate Heat Exchanger, *Proceedings of the SAREK 2010 Summer Annual Meeting*, pp. 1208-1213.
7. M.N. Pantzali, A.A. Mouza, S.V. Paras, 2009, Investigating the efficacy of nanofluids as coolant in plate heat exchangers (PHE), *Chemical Engineering Science*, vol. 64, pp. 3290-3300.
8. W. Yu, D.M. France, S.U.S. Choi, and J.L. Routbort, 2007, Review and assessment of nanofluid technology for transportation and other applications.
9. Pak, B.C., Cho, Y.I., 1998, Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles, *Experimental Heat Transfer* 11 (2) 151-170.
10. H.C. Brinkman, 1952, The viscosity of concentrated suspensions and solution, *The Journal of Chemical Physics* 20 571-581.

