

채널 간격 변화에 따른 해수냉난방용 판형 열교환기의 열전달과 압력강하에 대한 수치해석적 연구

김현주¹ · 이호생² · 윤정인³ · 손창효⁴ · 정영권[†]

(원고접수일 : 2014년 5월 21일, 원고수정일 : 2014년 7월 8일, 심사완료일 : 2014년 7월 21일)

A numerical study on heat transfer and pressure drop of plate heat exchanger using at seawater air conditioning with the variation of channel spaces

Hyeon-Ju Kim¹ · Ho-Saeng Lee² · Jung-In Yoon³ · Chang-Hyo Son⁴ · Young-Kwon Jung[†]

요약: 판형열교환기는 해양온도차와 해수냉난방 시스템과 같은 해양플랜트 및 화학공업의 분야에 사용되어 왔다. 본 연구의 목적은 판형열교환기의 채널 간격과 같은 설계 변수를 결정하기 위해서 판형열교환기 내 열전달과 압력강하 특성을 분석하는 것이다. 본 논문에서는 판형열교환기의 채널 간격 변화에 따른 열전달 성능을 수치적으로 연구하였다. 수치적 분석 결과로부터 해수 유량 변화와 함께 j factor는 선형적으로 감소하였다. 판형열교환기 채널 간격 변화에 따라 유량이 증가할수록 j factor는 선형적으로 감소하였다. 그리고 유량의 증가와 함께 f factor는 선형적으로 감소하였다. 물측과 해수측의 열전달 특성과 압력강하 특성을 각각 더하여 비교한 결과, 열전달 성능은 2.4-2.4 mm가 가장 우수하므로, area goodness factor가 가장 우수함을 알 수 있었다.

주제어: 판형열교환기, 해수냉난방, j factor, f factor, 채널 간격

Abstract: Plate heat exchanger is being applied in the field of marine plants and chemical industry, such as OTEC and SWAC equipment. The study aims to interpret the heat transfer and pressure drop characteristics of plate heat exchangers to determine the geometric design parameters such as the channel space. In this study, heat transfer performance was numerically studied with respect to the variation of channel spaces. The results from numerical analysis indicated that the j factor was linearly decreased with the flowrate of seawater over every cases. As the flowrate of water increased with respect to channel spaces, the j factor decreased linearly. And the f factor decreased linearly with the increase of flowrate. When the channel space is 2.8~3.2 mm and 3.2~3.2 mm, respectively, the area goodness factor of plate heat exchanger showed the highest performance.

Keywords: Channel space, f factor, j factor, Plate heat exchanger, Seawater air conditioning

† Corresponding Author: Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Seawater Utilization Plant Research Center, E-mail: ykjung@kriso.re.kr, Tel: 033-630-5024

1 Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Seawater Utilization Plant Research Center, E-mail: hyeonju@kriso.re.kr, Tel: 033-630-5000

2 Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Seawater Utilization Plant Research Center, E-mail: hslee@kriso.re.kr, Tel: 033-630-5021

3 Department of Refrigeration and Air Conditioning Engineering, Pukyong National University, Yongdang-dong, Nam-gu, Busan, 608-739, Korea, E-mail: yoonji@pknu.ac.kr, Tel: 051-629-6180

4 Department of Refrigeration and Air Conditioning Engineering, Pukyong National University, Yongdang-dong, Nam-gu, Busan, 608-739, Korea, E-mail: sonch@pknu.ac.kr, Tel: 051-629-6183

기호 설명

- c_p : 비열
- D_h : 수력학적 직경
- G : 질량유속
- L : 유로길이
- Nu : Nusselt 수
- Pr : Prantle 수
- Δp : 입출구 압력차
- Re : Reynolds 수
- ρ : 평균 밀도
- u : 평균 속도

1. 서론

기존 냉난방시스템(Air Conditioning System)은 여름철 실내의 냉방과 겨울철 실내의 난방이 동시에 가능한 기기로서, 주로 대기의 공기를 열원으로 이용한다. 반면에, 해수냉난방시스템(Seawater Air Conditioning System)은 해수를 열원으로 사용한다. 즉, 해수냉난방시스템은 물을 해수와 열교환하여 만들어진 고온과 저온의 물을 이용하여 건물 내를 냉난방하는 것이다. 이때 물과 해수를 열교환하는데 필요한 대표적인 기기 중의 하나가 판형 열교환기(Plate Heat Exchanger, 이하 PHE)이다. 판형 열교환기는 1950년대부터 개발되어 식품산업 및 플랜트 분야뿐만 아니라, 최근에는 해양온도차발전(Ocean Thermal Energy Conversion, 이하 OTEC) 및 해수냉난방시스템에도 적용되고 있다. 해수냉난방시스템뿐만 아니라 기타 냉동 및 히트펌프 시스템에 판형열교환기를 적용할 경우, 열교환기의 채널 간격, 유로 형성, 판 배치 등은 대단히 중요한 설계인자이다.

지금까지 발표된 관련 논문들을 살펴보면, 우선 다양한 주름각도에 대하여 열전달 성능실험을 실시하였다[1]. 그리고, 판형 열교환기의 입구 유동 변화가 성능 변화에 미치는 영향에 대해서 실험적으로 연구하였으며, 판형 열교환기의 세브론 각도가 열교환기 열특성에 미치는 영향을 수치해석적으로 연구하였다[2][3]. 또한, 다층 및 대향류 유동을 가지는 판형 열교환기의 특성을 수치해석적

로 분석하였다[4]. 국내에서는 오블롱 셀 플레이트 열교환기에 대해서 채널간격 변화에 따른 열전달 특성을 수치해석적으로 연구하였고 그리고 세브론 각도변화에 따른 판형열교환기의 성능평가를 실험적으로 고찰하였으며, 입구영향과 주름높이가 고려된 판형열교환기의 유동 및 열전달특성을 수치적으로 해석하였다[5][7].

Table 1 : Numerical analysis conditions

Parameter	Conditions
Water inlet temperature (°C)	14.5
Seawater inlet temperature (°C)	7
Seawater inlet flow rate (kg/s)	0.77
Water inlet flow rate (kg/s)	0.65, 0.72, 0.8, 0.88, 0.97
Channel space (mm)	2.4, 2.8, 3.2
Plate material	Titanium

따라서 본 논문에서는 판형열교환기를 해수냉난방 시스템에 적용시 채널 간격에 따라 전열 성능 및 압력 강하 특성을 수치적으로 연구하여, 판형 열교환기 최적 설계에 관한 자료를 제공하고자 한다. 이를 위해 판형 열교환기를 모델링한 후, 고온 및 저온측의 채널 간격에 따른 판형 열교환기의 열전달 성능과 압력강하 특성을 각각 무차원수인 j factor와 f factor로 분석하였다.

2. CFD 해석

2.1 해석조건

경계조건을 설정하기 위하여 작동유체는 물과 해수로 하며 완전 발달된 난류유동, 상변화는 발생하지 않는다고 가정하였다. 열교환기의 입구 측으로부터 유입되는 유량은 모두 출구 측으로 유출되어 전체 해석영역을 통하여 질량보전 법칙이 유지

되도록 하였다. 해양심층수연구센터(강원 고성)에 설치된 해수냉난방용 열교환기의 조건과 유사하게 설정하기 위하여, Table 1과 같이 수치해석의 해석 조건을 설정하였다.

Table 2 : Channel spaces for numerical analysis of PHE

Item	seawater channel space(mm)	water channel space(mm)
2.4-2.4	2.4	2.4
2.4-2.8	2.4	2.8
2.4-3.2	2.4	3.2
2.8-2.8	2.8	2.8
2.8-3.2	2.8	3.2
3.2-3.2	3.2	3.2

2.2 모델링 및 수치해석적 방법

판형 열교환기를 모델링하기 위하여 Solid Works 2012를 사용하였으며, 수치해석에는 Solid Works Flow simulation을 사용하였다. Figure 1의 판은 모델링한 것으로서, 현재 국내에서 생산되고 있는 모델중 원활한 수치해석을 위하여 가장 적은 것을 선정하였다. 판형 열교환기의 크기는 91x176 mm(가로x세로), 세브론 각도는 116.42°, 그리고 판의 깊이는 3.1 mm이다. Figure 2는 수치해석에 사용된 해석모델로써 Figure 1과 같은 판(plate)을 총 9장 겹쳐서 물 측와 해수 측의 유로가 각각 4개씩 되게 모델링하였다. 물은 아래에서 들어가서 위에서 나오며, 해수는 위쪽에서 들어가서 아래쪽으로 나오게 되는 유동방향을 적용하였다.

Table 2는 수치해석에 사용된 물과 해수측의 채널간격으로서, 각 item에 따라 해수의 유량은 0.77kg/s로 고정하였으며, 물의 유량은 0.8kg/s를 기준으로 10, 20, 30% 증감하여 하나의 item별로 5번 해석하였다.

유체의 유동은 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 해석하였다. 다음 식 (1)-(3)은 유체 흐름에 대한 질량, 운동량, 에너지 보존 방정식이다.

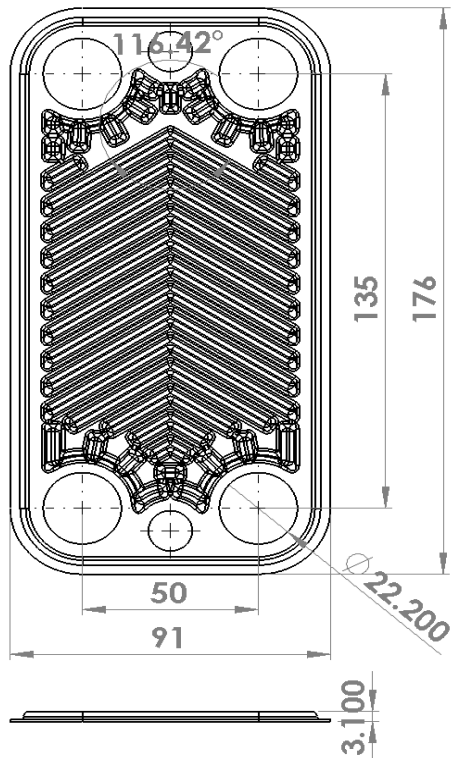


Figure 1 : Schematic diagram of PHE.

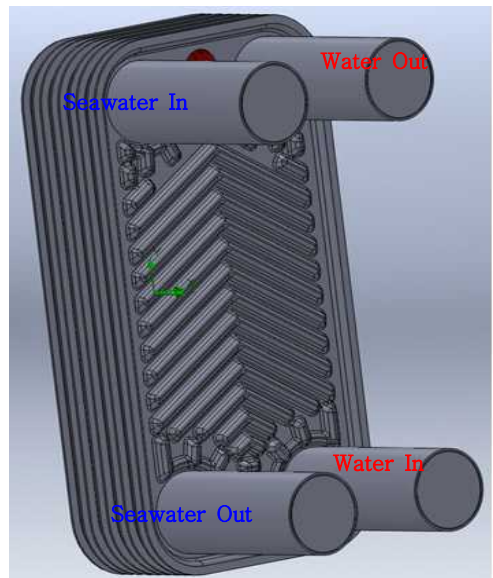


Figure 2 : Modeling diagram of PHE.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x_j}[\mu(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) - (\rho u_i u_j)] \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho c_p T u_i) = -\frac{\partial}{\partial x_i}(-k \frac{\partial T}{\partial x_i} + \rho c_p \overline{u_i T'}) \quad (3)$$

열전달 및 압력강하계산에 사용된 물성치는 입출구에서 추정한 물성치 값에 대한 평균값을 사용하였다. 다음은 판형열교환기의 열전달 성능을 파악하기 위해서 사용한 j factor의 정의이다.

$$j = \frac{h}{G \cdot c_p} Pr^{2/3} = \frac{Nu \cdot Pr^{-1/3}}{Re} \quad (4)$$

판형열교환기의 압력강하 특성을 분석하기 위해 사용한 f factor에 대한 정의 식이다.

$$f = \frac{\Delta p}{\frac{4L}{D_h} \frac{1}{2} \rho u^2} \quad (5)$$

식 (4)와 (5)는 각각 열전달 및 압력강하에 관련된 무차원 수이며, 두 식을 이용하여 식 (6)을 도출할 수 있다. 식 (6)은 전열성능과 압력강하의 상관관계를 나타낸 식이다.

$$\text{Area goodness factor} = \frac{j}{f} \quad (6)$$

식 (6)의 값이 커지면 작은 압력강하로 큰 열전달 성능을 나타낼 수 있다는 것을 의미한다.

3. CFD 해석 결과

본 절에서는 해수냉난방용 판형열교환기의 채널 간격별 유체의 열전달과 압력강하 특성을 위의 식 (4)와 (5)의 j factor 와 f factor를 이용하여 파악 및 분석하였다. 이에 대한 결과로서, 우선 판형열교환기의 열전달 특성을 나타내는 j factor에 대한 결과

를 다음과 같이 나타내었다.

Figure 3은 판형열교환기의 물측과 해수측 채널 간격 변화에 따른 물측의 j factor를 비교한 것이다. 이는 다른 연구자의 연구결과와도 비슷한 경향을 나타내었다[8]. Figure 3으로부터, 모든 채널 간격별로 물측의 유량이 증가함에 따라 j factor 값이 선형적으로 감소함을 알 수 있었다. 이는 유량을 증가시킬수록 난류를 촉진시켜 Re 값이 증가하였기 때문이다. 또한 채널간격이 넓어질수록 j factor 값은 작아지는 것을 알 수 있었는데, 이는 j factor 인자인 Re 값이 유량이 증가할수록 크게 증가한 반면에, Nu값은 증가폭이 작기 때문으로 판단된다. 이상의 결과로부터, 모든 분석조건에서 판형열교환기의 채널 간격이 2.4~2.4 mm일 때 j factor의 값이 가장 높은 것으로 나타났다.

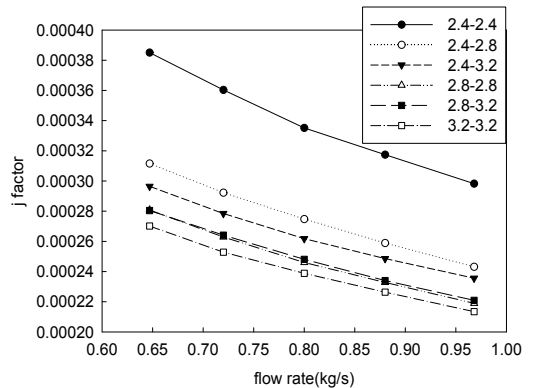


Figure 3 : j factor vs. channel space according to flow rate(water side)

Figure 4는 판형열교환기의 물측과 해수측 채널 간격 변화에 따른 해수측의 j factor를 비교한 것이다. Figure 4에서 알 수 있듯이, 모든 형태의 채널 간격에서 해수 유량이 증가할수록 j factor 값이 선형적으로 증가함을 알 수 있었다. 이는 모든 채널 간격에서 해수의 유량은 일정하여 Re 값은 거의 변화가 없었으나, 물 유량의 증가로 인해 해수 출구 온도가 변화하여 Nu 수가 선형적으로 증가하였기 때문이다. Figure 3과 마찬가지로, 판형열교환기의 채널 간격이 2.4~2.4 mm일 때 해수의 j factor가 가장 높은 수치를 나타내었다.

해수냉난방용 판형열교환기의 채널 간격별 작동 유체의 압력강하 특성을 f factor를 이용하여 수치적으로 분석하였으며, 이에 대한 결과는 다음과 같이 나타내었다. 우선, **Figure 5**는 판형열교환기의 물측과 해수측 채널 간격 변화에 따른 물측의 f factor 변화를 나타낸 것이다. **Figure 5**로부터, 모든 해석에서 유량이 증가함에 따라 f factor 값은 선형적으로 감소하였고, 채널간격이 넓을수록 작아짐을 알 수 있다. 이는 유량을 증가할수록 입출구의 압력차는 커지지만, 평균속도 또한 크게 증가하였기 때문이다.

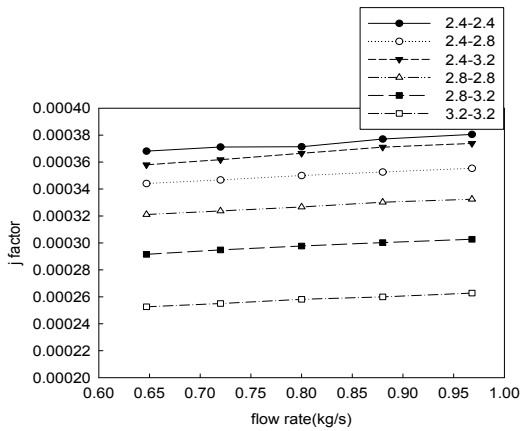


Figure 4 : j factor vs. channel space according to flow rate(seawater side)

Figure 5의 결과로부터, 채널간격이 2.4~2.4 mm 일 때 물측의 f factor가 가장 높은 수치를 나타내었고, 2.4~3.6 mm 일 때 가장 작은 값을 나타내었다. 이는 물 측의 채널간격이 작을수록 입출구의 압력차이가 크게 증가하기 때문이다.

Figure 6은 판형열교환기의 물측과 해수측 채널 간격 변화에 따른 해수측의 유량에 따른 f factor 변화를 나타내고 있다. **Figure 6**으로부터, f 값은 거의 일정하였으며, 채널간격이 좁을수록 f 값은 커짐을 알 수 있었다.

앞에서 살펴본 바와 같이, 해수냉난방용 판형열교환기의 열전달과 압력강하 특성은 각각의 채널 간격별로 상반되는 특성을 가진다. 따라서 이에 대한 특성을 식 (6)을 이용하여 살펴보았다.

Figure 7은 판형열교환기의 물측과 해수측 채널

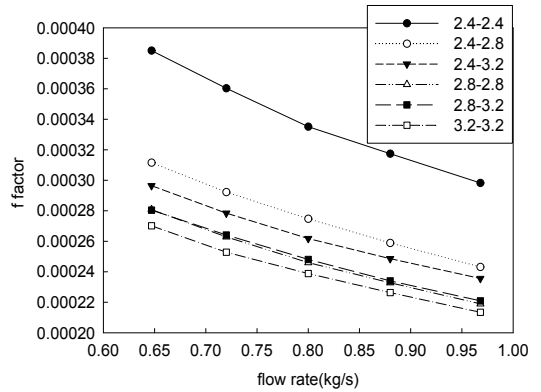


Figure 5 : f factor vs. channel space according to flow rate(water side)

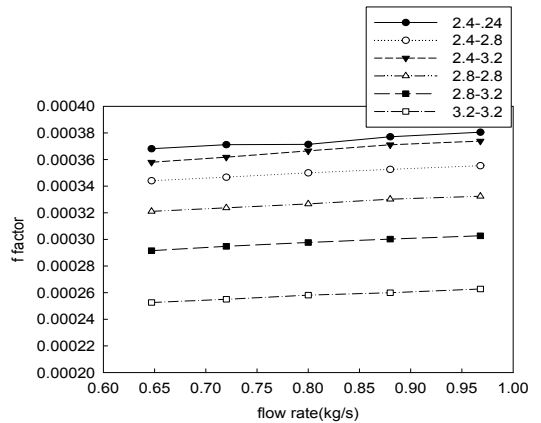


Figure 6 : f factor vs. channel space according to mass flow(seawater)

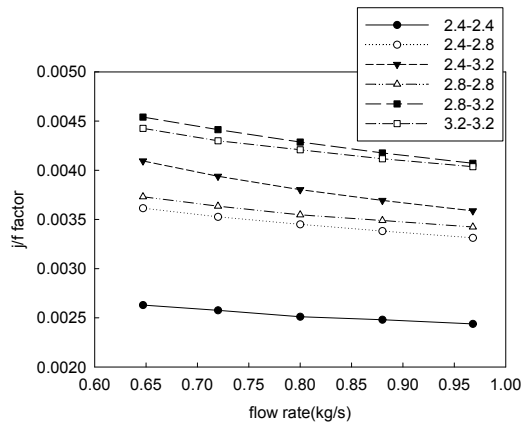


Figure 7 : j factor/ f factor vs. channel space according to mass flow(seawater+water)

간격 변화에 따른 물측과 해수측의 유량에 따른 area goodness factor 값을 나타낸 것이다. Figure 7로부터 알 수 있듯이, 물과 해수 유량이 증가할수록 area goodness factor 값은 선형적으로 감소하였으며, 2.8~3.2 mm와 3.2~3.2 mm에서 가장 우수한 값을 나타내었다. 이 두 개의 채널간격에서 작은 전열 면적으로 동일한 열전달 성능을 나타낼 수 있는 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

지금까지 판형열교환기의 해수냉난방시스템 적용 시 채널 간격 변화에 따른 전열 성능 및 압력강하 특성을 수치적으로 알아보고자 하였다. 이에 대한 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

물측의 유량이 증가할수록 j factor는 선형적으로 감소하는 반면, 판형열교환기의 채널간격이 좁을수록 그 값이 커짐을 알 수 있었다. 이는 유량을 증가시킬수록 난류를 촉진시켜 Re 값이 증가하였기 때문이다. 그리고 해수측의 열전달 특성은 유량이 증가할수록 물측과 마찬가지로 j factor는 증가하였으나, 그 증가폭은 물측에 비해 적음을 알 수 있었다.

물측의 유량이 증가할수록 f factor는 선형적으로 감소한 반면, 채널간격이 좁을수록 그 값이 증가하였다. 그러나 해수측은 유량이 증가하여도 f factor는 변화가 거의 없었다. 그리고 판형열교환기의 채널간격이 좁을수록 f factor 값은 증가하였다. 물측과 해수측의 열전달 특성과 압력강하 특성을 각각 총괄적으로 비교하였을 때는 열전달 성능은 2.4~2.4 mm가 가장 우수하므로, area goodness factor 가 가장 우수함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 해양수산부가 지원하는 “해양심층수의 에너지 이용기술 개발” 성과 중 일부이며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

[1] W. W. Focke, J. Zachariades, and I. Oliver, “The effect of the corrugation inclination angle

on the thermohydraulic performance of plate heat exchanger,” *International Journal of the Heat Mass Transfer*, vol. 28, no. 8, pp. 1469-1479, 1985.

- [2] A. K. Dwivedi and S. K. Das, “Dynamics of plate heat exchangers subject to flow variations”, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 50, vol. 50, no. 13-14, pp. 2733-2743, 2007.
- [3] G. M. Zhang, M. C. Tian, “Simulation and analysis of flow pattern in cross-corrugated plate heat exchangers”, *Journal of Hydrodynamics*, vol. 18, no. 5, pp. 547-551, 2006.
- [4] M. Vera, A. Linan, “Laminar counterflow parallel-plate heat exchangers: Exact and approximate solutions”, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53, vol. 53, no. 21-22, pp. 4885-4898, 2010.
- [5] J. H. Park, Y. S. Kim, “Study on evaporation heat transfer of R-134a, R-407C, and R-410A in the oblong shell and plate heat exchanger”, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, vol. 16, no. 9, pp. 845-855, 2010.
- [6] O. K. Kwon, D. A. Cha, J. H. Yun, and H. S. Kim, “Performance evaluation of plate heat exchanger with chevron angle variation,” *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*, vol. 33, no. 7, pp. 520-526, 2009.
- [7] J. H. Moh, “Investigation of flow and heat transfer characteristics of plate heat exchanger taking into account entrance effects and variation in corrugation height,” *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*, vol. 34, no. 11, pp. 965- 973, 2010.
- [8] S. S. Kim, S. H. Hwang, H. S. Chung, and H. M. Jeong, “A study on heat transfer and pressure drop characteristics in plate heat exchanger with cifferent chevron phenomenon”, *Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers Autumn Annual Conference*, pp. 2395-2398, 2010.