

해수냉각시스템용 Aluminium Brass Tube의 R-134a 증발열전달 특성

강인호¹ · 설성훈² · 윤정인[†] · 손창효³

(Received January 17, 2017 ; Revised March 3, 2017 ; Accepted March 5, 2017)

Evaporating heat transfer characteristics of Aluminum-brass tube for seawater cooling system using R-134a

In-Ho Kang¹ · Sung-Hoon Seol² · Jung-In Yoon[†] · Chang-Hyo Son³

요약: 대부분의 어선에서는 포획된 어류를 관리하고 저장하기 위해 얼음 냉각 시스템을 사용한다. 그러나 얼음 냉각 시스템은 작동 시간의 제한뿐만 아니라 적절한 온도와 염분 농도를 유지하는 것이 어려운 단점이 있다. 본 연구의 목적은 어류 운반선의 어창에 적절한 해수 온도 유지를 위한 해수 냉각 시스템용 만액식 증발 열전달 특성을 파악하는데 있다. 실험은 냉매의 해수 온도, 유량 및 포화 온도의 변화를 주며 열전달 특성을 파악하였다. 동일 열유속에서 Aluminium-Brass tube가 Copper-Nickel tube 보다 외측 열전달계수가 약 10% 큰 것으로 확인할 수 있었으며, 이를 통해 해수용 열교환기의 전열관으로 Aluminium-Brass를 적용하는 것이 열전달 측면에서 효과적인 것을 확인할 수 있었다. 만액식 단관 열전달계수와 18 kW급 만액식 해수냉각시스템의 총괄열전달계수의 비교를 통해 동일 조건에서는 25% 정도 단관의 열전달계수가 큰 값을 나타내었으며, 이러한 결과는 만액식 관군 열교환기의 설계를 위한 중요한 자료가 되리라 판단된다.

주제어: 해수냉각 시스템, 만액식 증발기, 알브라스관 및 카파니켈관, 증발열전달계수, 냉수 온도

Abstract: Most fishing vessels use an ice cooling system to manage and store captured fish. However, it is difficult to maintain an adequate temperature and salt concentration as well as operating time limitations in ice cooling systems. The purpose of this study is to investigate the heat transfer characteristics of flooded-type evaporators for a seawater cooling system to maintain proper seawater temperature in a fish tank. Experiments were conducted to investigate the heat transfer characteristics by changing the seawater temperature, flow rate, and saturation temperature of the refrigerant. It was confirmed that the heat transfer coefficient of an aluminum-brass tube was approximately 10% higher than that of a copper-nickel tube at the same heat flux. Furthermore, it was confirmed that applying the aluminum-brass tube to the heat transfer tube of a seawater heat exchanger was effective in terms of heat transfer. A comparison of the overall heat transfer coefficient of a single-tube heat exchanger and the flooded-type multi-tube heat exchanger for an 18-kW cooling system showed that the heat transfer coefficient of the single-tube heat exchanger was 25% higher under the same conditions. These results are considered to be important data for designing a flooded-type multi-tube heat exchanger.

Keywords: Sea water cooling system, Flooded type evaporator, Aluminium-brass and Copper-Nickel tube, Evaporating heat transfer coefficient, Chilled water temperature

Nomenclature

A : Area [m²]

C : Specific heat [kcal/kg·°C]

d : Pipe diameter [m]

G : Mass flow rate [kg/h]

h : Boiling heat transfer coefficient [kW/m²·K]

k : Thermal conductivity [kW/m²·K]

L : Pipe length [m]

p : Static pressure

q : Heat flux [kW/m²]

Q : Heat capacity [kW]

R : Resistance of heat conduction [kw/m²·°C]

† Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1099-3435>): Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University, 365, Sinseon-ro, Nam-Gu, Busan 48547, Korea, E-mail: yoongi@pknu.ac.kr, Tel: 051-629-6180

1 Graduate School, Pukyong National University, E-mail: kgoodh0214@naver.com, Tel: 051-629-6180

2 Graduate School, Pukyong National University, E-mail: seolnara00@gmail.com, Tel: 051-629-6180

3 Pukyong National University, E-mail: sonch@pknu.ac.kr, Tel: 051-629-6183

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

- T : Temperature [$^{\circ}\text{C}$]
- U : Overall heat transfer coefficient [kW/m^2]
- Δ : Difference
- cw : Cooling water
- e : Evaporator
- i : Inside
- LMTD : Logarithmic mean temperature difference
- o : Outside
- w : Wall of pipe

1. 서론

최근 연근해 어업 축소와 선망어업의 생산성 감소, 육상빙 사용에 따른 어류 손상 등의 많은 문제점들을 일괄적으로 해소하고 어획물의 가치를 높일 수 있는 방법으로 운반선 탑재용 해수냉각시스템에 관한 연구의 필요성이 대두되고 있다.

해수냉각시스템에 대한 종래연구[1]-[4] 등을 살펴보면, 우선 선망어업 시 운반선 어창 내 어획물의 선도 유지를 위해 기존 방식인 육상빙을 사용하는 것 보다 해수냉각시스템의 탑재를 통해 어창 내 해수를 직접 냉각하는 방식이 유리하다고 알려져 있다. 그리고 이러한 시스템이 기존 방식보다 비용절감에 효과적이라는 것을 Perigreen *et al.* [5] 과 Kolbe [6]에 의해 확인 되었다. Yoon *et al.* [7]은 소형 해수냉각시스템의 실험적 연구를 통해 어창의 냉수 투입구 위치에 따른 어창 내 해수 온도 분포에 대한 연구를 수행하였다. Cha [8]는 쉘-튜브 만액식 증발기의 비등 성능이 우수한 가공관을 적용하기 위해 서로 다른 4가지의 전열관에서 비등열전달 계수를 Wilson Plot을 이용하여 측정하였고, 가장 효율적인 전열관 및 설계 자료를 얻고자 실험적 연구를 진행 하였다. 또 Jung *et al.* [9]은 Plain관과 26 로핀, Turbo-B, Thermoexcel-E 관의 비교를 위해 전기히터를 이용한 열유속 변화에 따라 냉매 별 열전달계수 실험을 실시하였다. Kim [10]은 고효율 냉동시스템에 적용되는 만액식 증발기 내의 오일 함유량이 비등에 미치는 영향에 대하여 실험적으로 확인하였고, 그 결과 오일 1% 주입 시 총괄 열전달 계수의 감소가 급격하게 변화하지만 그 이상의 오일 주입시 감소 폭은 점차 줄어든다는 것을 확인하였다.

이상의 종래연구에서 확인 하였듯이, 해수에 이용할 수 있는 만액식 증발기를 적용한 해수냉각시스템에 대한 연구는 대단히 부족한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 선망어업 운반선에 적용되는 해수냉각시스템의 만액식 증발기 열전달 특성과 함께 설계의 기초자료를 제공 하는 것을 목적으로 하고 있다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

해수냉각시스템용 만액식 증발기의 열전달특성을 실험적으로 분석하기 위하여 완성된 실험장치의 개략도 및 사진을

Figure 1에 나타내었다. 시험부인 증발기는 쉘 앤 튜브 형으로 튜브 내에 냉수가 흐르고 쉘 내 냉매가 비등한다. 실험 장치는 냉매 순환부와 물 순환부, 브라인 순환부로 구성된다.

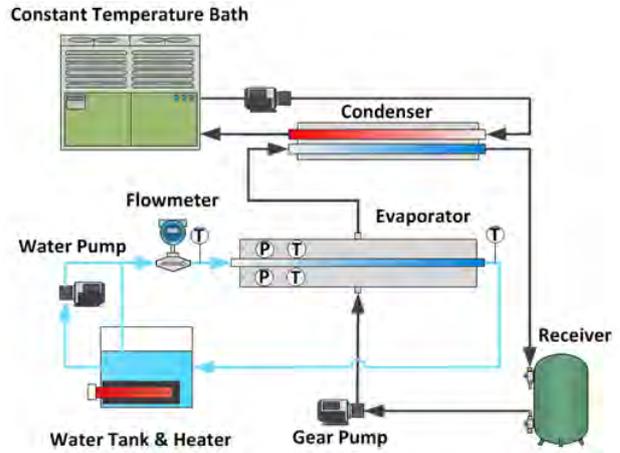


Figure 1: Schematics of experimental equipment

만액식 증발기의 단관 열전달을 실험하기 위하여 냉매 순환부에 다양한 장치들로 구성되어 있다. 먼저 압력차에 의해 증발기에서 증발된 냉매증기가 상부에 위치한 응축기로 이동하게 되는데, 이는 저온 브라인의 열교환으로 상대적으로 저압이 형성되기 때문이다. 응축기에서 응축된 냉매증기는 수두에 의해 장치 가장 하단부의 수액기로 흘러내려 가게 된다. 수액기는 증발기로 항상 액을 보내주기 위해 사용되었으며, 수액기 후단부에 설치된 기어펌프를 통해 증발기 하단부로 냉매를 이송시킨다. 이때 냉매의 상태를 확인하기 위해 사이트글라스를 사용하였다. 또한 만액식 증발기 내의 냉매액 수위를 일정하게 유지하기 위해 유량 조절을 위한 바이패스 밸브와 기어펌프에 인버터를 적용하였다.

만액식 증발기 튜브 내측으로 열원이 일정하게 공급하기 위해서 5 kW 히터를 물탱크에 설치하여 입구온도를 조절할 수 있도록 하였다. 또한 유량 조절을 위해 물 펌프 후단부에 바이패스 밸브를 설치하였다. 조절된 유량은 유량계를 통해 확인하였다.

냉매 순환부는 진공 후 냉매를 주입한 밀폐 사이클이기 때문에 전체 시스템에 압력은 외부의 온도가 결정하게 된다. 시스템의 전체 온도와 압력을 제어하고 증발된 냉매를 응축시키기 위해 응축기에 저온 항온조의 브라인을 순환시켜 제어하였으며, 브라인 또한 바이패스 밸브를 통해 유량 조절을 할 수 있다. 저온 항온조는 -50°C 의 온도범위를 제어 가능하였다.

만액식 증발기는 쉘 외측 사이트 글라스를 통해 냉매 액을 70%이상 차있도록 하여 실험을 진행하였으며, 튜브 측 냉수의 유량과 온도 조절을 통해 다양한 실험을 실시하였다. 또한 충분한 단열을 통해 열손실을 최소화하였다.

아래의 Table 1은 만액식 증발기의 구체적인 사양을 나타낸 것이다.

Table 1: Specifications of the flooded evaporator

Parameter		Unit	Value
Shell	Size	mm	Φ200.3 × 1054L
	Working fluid	-	R-134a
Tube	Size	mm	Φ15.88 × 1,000L
	Material	-	Aluminium-Brass, Copper-Nickel
	No. of tubes	ea	6
	Shape	-	Plain, Low-fin
	Working fluid	-	Water

2.2 실험조건

만액식 증발기의 열전달 특성 실험의 조건은 다음과 같다. 냉매는 R-134a를 사용하였으며, 실험 조건은 냉수 입구 유속, 증발온도, 입구온도 변화 실험에서 열전달 특성을 분석하였다. 기준 냉수 입구온도는 10°C이며, 5°C~15°C의 온도범위에 대한 분석을 실시하였으며, 이에 따라 증발온도는 0°C에서 -5°C~5°C로 변화시켜 분석을 실시하였다. 기준 냉수 입구 유속은 1.2m/s이며, 유속 구간 0.6~2.1m/s에 대한 열전달 특성 분석을 실시하였다.

2.3 데이터 해석

실험에서 획득한 데이터를 통해 증발열량, 대수평균온도차, 내측열전달 계수, 총괄열전달계수, 등을 확인할 수 있었으며, 아래와 같은 식을 통해 해석하였다. 식 (1)은 만액식 증발기에서의 증발열량을 구하는 식이다. 전열관을 통해 투입된 냉수의 입구온도와 출구온도의 차와 냉수유량을 통해 확인할 수 있다.

$$Q_e = G_{cw} C_{p,cw} (T_{cw,i} - T_{cw,o}) \tag{1}$$

식 (2)는 총괄열전달계수를 구하는 식이다. 열량은 식 (1)에서 확인할 수 있으며, 외측면적 또한 전열관의 재원을 통해 알 수 있다.

$$U_o = \frac{Q_e}{A_o \cdot \Delta T_{LMTD}} \tag{2}$$

이때, 대수평균온도차를 구하는 식은 식 (3)과 같다.

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \tag{3}$$

$$\Delta T_1 = T_{cw,i} - T_{e,o} \tag{4}$$

$$\Delta T_2 = T_{cw,o} - T_{e,i} \tag{5}$$

열교환기에서 총괄 열 저항 식은 아래 식 (6)과 같으며, 전열관 벽의 열전도 저항은 식 (7)을 통해 확인할 수 있다.

$$\frac{1}{U_o A_o} = \frac{1}{h_i A_i} + R_w + \frac{1}{h_o A_o} \tag{6}$$

$$R_w = \frac{\ln(d_o/d_i)}{2\pi Lk} \tag{7}$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 상관식 비교

본 실험장치를 통해 획득한 데이터의 검증을 위해 상관식과 비교를 실시하였다. Copper Plain Tube의 열유속 변화에 따른 실험을 통해 실험과 상관식을 비교하였으며, 사용된 상관식은 Copper Plain Tube에서 비등열전달계수의 예측이 우수한 Cooper 상관식[11]을 사용하였다. 본 실험은 물측 입구 온도를 10°C로 유지하고, 증발온도를 0°C로 고정 한 후 냉수 측 유량의 증가시켜 전열관의 열유속의 증가에 따라 외측 열전달계수를 확인하였다. 분석결과 Figure 2에 나타난 것과 같이 적용된 열유속 구간 조건에서 실험을 통해 획득한 데이터가 10% 내외의 오차범위를 보이며 Copper 상관식이 실험결과를 적절히 예측하는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 실험 데이터의 신뢰성을 보여주는 것으로 판단된다.

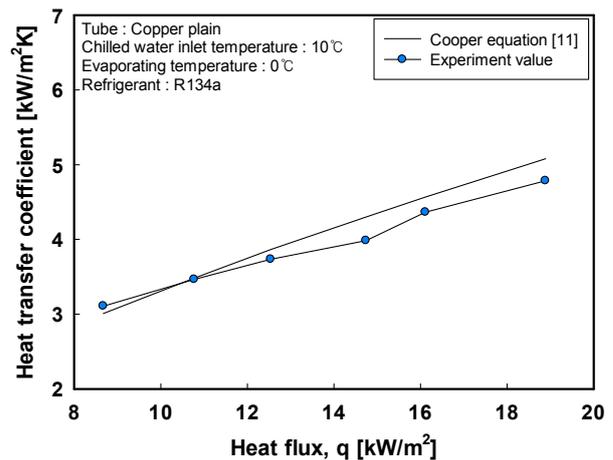


Figure 2: Heat transfer of copper plain with heat flux increase

3.2 냉수 유속에 의한 영향

Figure 3은 선정된 Aluminium-Brass관에서의 냉수 유속변화에 따른 열전달계수 실험결과를 나타낸 것이다. 냉수 유속은 전열관 내측 냉수 유량 조절을 통해 유속을 0.6 ~ 2.1 m/s 변화시켰다. 유속 증가에 따라 총괄열전달계수(U)와 외측 열전달계수(h_o)의 증가를 확인할 수 있었다. 이는 냉수 유속증가로 인해 레이놀즈수의 증가로 내측 대류열전달계수의 증가가 지배적인 것으로 판단되며, 일정 유속 이상으로 증가시 증가율이 변화가 감소하는 것을 볼 수 있으며, 유속 범위가 2.1 m/s 이상으로 증가할 경우 총괄열전달계수 및 외측 열전달계수의 증가가 미미하거나 일정할 것으로 예상된다. 본 실험과의 결과와 18 kW급 만액식 해수냉각시스템에서의 총괄열전달 계수를 동일 유속에서 비교 시 2배 이상 큰 것을 확인할 수 있었다. 이는 두 실험장치의 분석 조건이 다른

점과 18 kW급 만액식 증발기의 전열관 관군에 의한 냉매의 비등으로 열전달의 감소와 냉동시스템에서의 원활한 작동을 위한 냉동유의 함유에 따른 감소가 원인으로 판단된다.

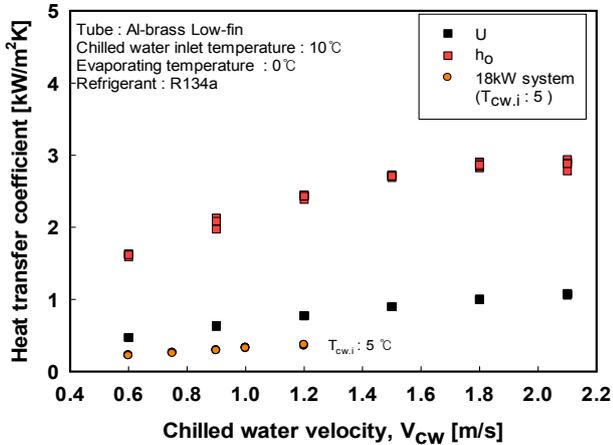


Figure 3: Heat transfer of Aluminium-Brass low-fin with velocity increase of chilled water

3.3 증발온도에 의한 영향

증발온도에 변화에 따른 열전달계수를 Figure 4에 나타내었다. 실험은 냉수 입구온도를 10°C, 냉수 유속을 1.2 m/s로 하여 실험을 실시하였다. 그 결과 증발온도가 감소함에 따라 총괄 열전달계수(U) 및 외측 열전달계수(h_o)가 증가하는 경향을 그래프에서 확인 할 수 있다. 증발온도 -5°C에서 5°C로 증가함에 따라 U과 외측h 값이 각각 65%, 85% 감소하였다. 이는 증발온도의 증가에 따른 대수평균온도차의 감소보다 증발열량의 감소율이 크기 때문이라 판단된다.

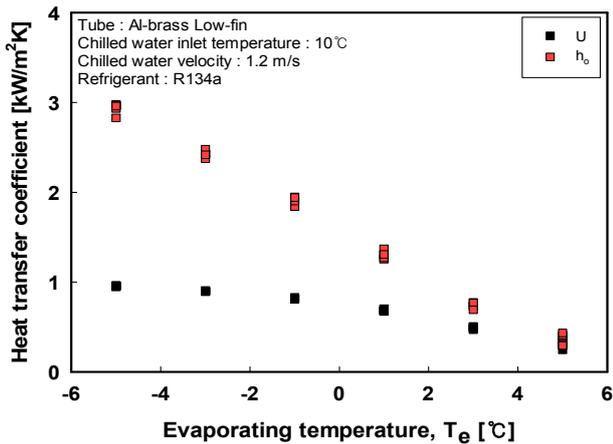


Figure 4: Heat transfer of Aluminium-Brass low-fin with temperature increase of evaporating

3.4 냉수 입구온도에 의한 영향

Figure 5는 냉수 입구온도의 증가에 따라 총괄 열전달계수와 외측 열전달계수를 나타낸 그래프이다. 증발온도 실험과 같이 대수평균온도차의 증가보다 증발열량의 증가가

지배적인 것을 알 수 있었다. 또한 냉수의 온도가 증가할수록 물의 열전도율의 증가로 인한 대류열전달계수의 증가 또한 추가적인 원인으로 판단된다.

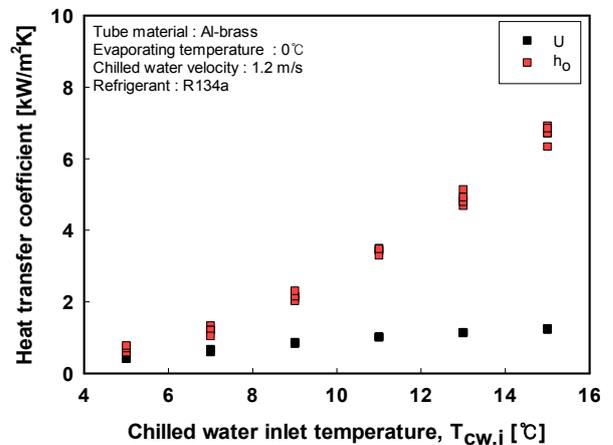


Figure 5: Heat transfer of Aluminium-Brass low-fin with temperature increase of chilled water

4. 결 론

해수냉각시스템용 만액식 증발기의 열전달 특성에 관한 실험적 연구를 통하여 Aluminium-Brass 관의 증발열전달특성을 파악하였다. 냉수 유속을 0.6~2.1 m/s로 범위에서의 실험과 입구온도 5~15°C 범위에서의 실험, 증발온도 -5~5°C에서의 실험에서 총괄열전달계수와 외측열전달계수를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 유속변화에 따른 실험에서 냉수의 유속은 1.8 m/s 이상에서 총괄 열전달계수 및 외측 열전달계수의 증가율이 급격히 감소하는 것을 확인하였다. 이는 열역학적으로 비등곡선에서 핵비등 영역에 해당하는 부분으로 냉수의 유속 증가에 따른 열 유속의 증가량이 감소하는 것으로 판단하였다. 결론적으로 냉수 측의 유속 설계 시 1.8 m/s 이하의 유속 설계가 바람직하다고 판단된다.
- (2) 증발온도와 냉수 입구온도의 일정 온도차 실험을 통해 고온레벨 보다 저온레벨에서 약 60% 총괄열전달계수의 감소를 확인 하였으며, 해수냉각시스템의 냉수 입구 온도가 낮을수록 냉매의 증발량이 줄어들어 압축비 증가, 냉동효과 감소 등으로 인한 성능이 낮아지게 되므로 이는 만액식 열교환기 설계를 위한 주요 고려 사항이 되어야 할 것이다.
- (3) 만액식 단관 열전달계수와 18 kW급 만액식 해수냉각시스템의 총괄열전달계수의 비교를 통해 동일 조건에서는 25% 정도 단관의 열전달계수가 큰 값을 나타내었다. 이는 단관인 본 실험에 비해 18 kW급 만액식 증발기의 관군(number of tube :180)에 따라 관 사이 냉매의 흐름 방해 및 비등 열전달 방해의 결과로 비등 열전달의 저하와 시스템의 냉동유 함유가 그 원인으로 판단된다.

따라서 만액식 관군형 열교환기에 본 단관 열전달 특성 실험결과를 직접적으로 적용 시 시스템 성능 저하가 야기될 수 있음을 유의해야 한다.

후 기

본 연구는 2016년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(선망 어선용 해수냉각 시스템 도입 연구).

References

- [1] I. G. Han, C. G. Moon, J. D. Kim, and J. I. Yoon, "Heat load characteristics of sea water cooling apparatus on inshore fishing boat," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 25, no. 6, pp. 1317-1323, 2001 (in Korean).
- [2] J. I. Yoon, K. H. Choe, C. H. Son, I. H. Kang, C. L. Kim, and S. H. Seol, "Performance comparison of flooded seawater cooling system with respect to heat sink temperature," *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, vol. 20, no. 2, pp. 91-96, 2016 (in Korean).
- [3] C. H. Son, I. H. Kang, J. N. Lee, C. L. Kim, and J. I. Yoon, "Characteristics of refrigeration system for fishing-ships applying flooded evaporator," *Proceedings of 2016 International Conference on Engineering, Technology, and Applied Science Spring Meeting*, Taipei, Taiwan, 2016.
- [4] C. H. Son, J. I. Yoon, S. H. Jung, C. L. Kim, S. H. Seol, and I. H. Kang, "Experimental study on seawater cooling system of effects on heat source temperature," *Proceeding of the 40th the Korean Society of Marine Engineering Spring Conference*, p. 83, 2016 (in Korean).
- [5] P. A. Perigreen, S. A. Pillal, P. K. Surendran, and T. K. Govindan, "Studies on preservation of fish in refrigerated sea-water," *Central Institute of Fisheries Technology*, vol. 12, no. 2, pp. 105-111, 1975.
- [6] E. Kolbe, "Refrigeration energy prediction for flooded tanks on fishing vessels," *American Society of Agricultural Engineers*, vol. 6, no. 5, pp. 624-628, 1990.
- [7] J. K. Lim, H. M. Jeong, J. D. Kim, and J. I. Yoon, "Fluid and thermal characteristics of fish hold storage for sea water cooling system," *Proceedings of 1991 The Korean Society of Mechanical Engineers Meeting*, pp. 885-890, 1991 (in Korean).
- [8] I. H. Cha, *Experimental Correlation of Heat Transfer for Enhanced Surface Tubes used in Flooded Evaporating using Wilson Polt Method*, M.S. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Kyunghee University, Korea, 2005 (in Korean).
- [9] D. S. Jung, "Pool boiling heat transfer coefficients of new refrigerants on various enhanced tubes," *Korean Journal Of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, vol. 13, no. 8, pp. 710-720, 2001 (in Korean).
- [10] S. G. Kim, *An Experimental Study of Heat Transfer Performance by Oil Concentration in a Flooded Evaporator*, M.S. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Pusan University, Korea, 2011 (in Korean).
- [11] M. G. Cooper, "Heat flow rate in saturated nucleate pool boiling-a wide-ranging examination using reduced properties," *Advances in Heat Transfer*, vol. 16, pp. 157-239, 1984.