

냉매 R22, R134a를 적용한 해수냉각시스템의 성능 비교

손창효¹ · 최광환² · 정석호³ · 한형민⁴ · 이정목⁵ · 윤정인[†]

(Received January 26, 2018 ; Revised March 2, 2018 ; Accepted March 8, 2018)

Performance comparison of seawater cooling system using refrigerants R22 and R134a

Chang-Hyo Son¹ · Kwang-Hwan Choi² · Suk-Ho Jung³ · Hyung-Min Han⁴ · Jung-Mok Lee⁵ · Jung-In Yoon[†]

요약: 지구온난화에 따른 해양환경의 변화로 어자원 확보를 위한 다양한 방안들이 강구되고 있다. 선망어선을 통한 어획물의 운반시 선도유지를 위하여 기존에는 얼음과 소금을 어창에 공급하는 방식이 사용되고 있었다. 어획물의 선도향상을 위해 직접 해수를 냉각해서 공급하는 선박용 해수냉각시스템 개발은 대단히 중요하다. 이러한 필요성을 바탕으로 만액식 증발기를 적용한 해수냉각시스템을 개발하고 있으며, 이에 대한 증발기 성능 특성을 냉매 R134a, R22를 적용하여 비교하였다. 먼저 시뮬레이션 프로그램인 HYSYS 프로그램을 이용하여 성능을 예측하였으며, 실험값과의 차이는 약 10% 정도로 일치하였다. R22, R134a 냉매 적용시 실험 및 HYSYS결과는 압축기 전후 압력, 냉매 순환량, 응축 및 증발 열량, 압축 동력, COP 등 대체적으로 같은 경향을 나타냈다. 시스템 성능을 나타내는 지표인 COP는 냉매 R22 적용 시, 냉매 R134a 비해 약 22% 증가함을 보였다.

주제어: 해수냉각시스템, 만액식 증발기, 냉매, R134a, R22

Abstract: Global warming is a limiting condition to the storage and maintenance of fish owing to the associated undesirable changes in the ocean environment such as the increase in seawater temperature. To address these limitations, there is a need to develop seawater cooling systems for ships. Based on this, a seawater cooling system with flooded-type evaporators was developed and its performance characteristics were compared with those of refrigerants R134a and R22. First, the performance was estimated using the simulation program HYSYS. The difference between the simulation results and the experimental values was less than 10%. When applying the R22 and R134a refrigerants, the experiment and HYSYS results showed the same tendency for most parameters such as the compressor pressure, amount of refrigerant converted, amount of condensation, heat capacity, compression power, and the coefficient of performance (COP), which is an indicator of system performance. The COP of R22 showed an increase of approximately 22% over that of R134a.

Keywords: Seawater cooling system, Flooded type evaporator, Refrigerants, R134a, R22

Nomenclature

A	: Power [kW]
Q	: Heat capacity [kW]
e	: Evaporator
w	: Working

1. 서론

지구온난화로 인한 해양온도의 변화, 환경오염에 따른 냉매의 제한, 해양수산 인력 감소 및 기존인원의 작업 능률 저

하 등으로 인해 해양 산업 기술의 고도화가 필요한 실정이다. 특히 최근 높아진 먹거리에 대한 관심은 수산물의 선도유지가 곧 경제성이라 해도 과언이 아닐 정도로 신선한 수산물에 대한 요구가 높아지고 있다. 이러한 시대적 요구를 바탕으로 선망어선용 해수냉각시스템에 대한 연구는 절실하다. 기존의 육상빙을 이용하게 되면 육상빙이 녹으면서 해수의 염분을 낮추게 되어 어획물의 신선도를 떨어뜨리게 된다. 또한 얼음 입자의 날카로운 부분에 어획물이 손상을 입을 수도 있다. 그리고 어창 내의 균일한 온도 분포가 되지 않기 때문에 신선

[†] 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: yoonji@pknu.ac.kr, Tel: 051-629-6180

1 Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University, E-mail: sonch@pknu.ac.kr, Tel: 051-629-6183

2 Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University, E-mail: choikh@pknu.ac.kr, Tel: 051-629-6179

3 Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University, E-mail: sukhojung@pknu.ac.kr, Tel: 051-629-6198

4 Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University, E-mail: alsldi02@gmail.com, Tel: 051-629-6180

5 Korea Seal Tech Co. E-mail: kstljm@daum.net, Tel: 051-315-1663

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.

도에 영향을 미치게 된다. 이외에도 지속적인 육상빙 구매 및 유지비용, 이동간의 인력 이용 등 여러 과정에서 단점을 가지고 있다. 이와 반대로 해수냉각시스템은 해수를 직접 냉각시켜 사용하는 것이기 때문에 염도 저하를 방지할 수 있다. 또한 어획물의 얼음입자에 대한 손상을 방지할 수 있다. 그리고 냉각된 해수 공급 위치를 조절하여 어창 내 균일한 온도 분포를 유지 할 수 있을 것이다.

종래연구 [1]-[4]는 이러한 장점을 가진 해수냉각시스템의 개발에 대한 연구 하였으며, 이러한 시스템의 경제적인 분석을 통하여 효율적인 시스템이란 것을 Kolbe [5]와 Perigreen *et al.* [6]이 연구 하였다. 또한 Kim [7]은 만액식 증발기에서 가장 중요한 오일 함유량에 따른 증발기의 성능과 그에 따른 시스템 성능에 미치는 영향을 잘 비교하여 나타내는 연구를 하였다. 그리고 Minetto *et al.* [8]은 액분리기의 냉매 액 양에 따른 팽창밸브의 개도를 전기 신호를 통하여 조절하며, 만액식 증발기에 냉매 액이 유지 될 수 있도록 하였고 높은 성능을 유지할 수 있도록 하였다. 그리고 S. Minetto *et al.* [9]은 병렬식 증발기에 액면 제어의 안정성과 신뢰성을 테스트하기 위한 시스템을 실시하였으며 Son과 Kim 그리고 Yoon 등 [10]-[12]은 열원수 온도에 따른 만액식 해수냉각 시스템 및 해수 열전달 특성을 냉매 R134a를 적용하여 분석하였다.

이러한 종래연구를 바탕으로 선망어선용 해수냉각시스템을 개발하기 위한 일환으로 해수용 증발기의 성능특성을 실험적으로 분석하였으며, 이 결과를 바탕으로 실제 선망어선용 해수냉각시스템을 설계 제작할 예정이다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Figure 1, Figure 2는 해수냉각장치 실제 모습과 P&ID를 나타낸 것이다. P&ID의 좌측 냉수 탱크(Chilled water tank)가 증발기와 열교환하여 직접 해수를 냉각시켜 어획물을 보관하는 어창의 역할을 하게 된다. 우측 냉각수 탱크(Chilled water tank)는 어획물이 포획되는 해역의 온도를 유지하기 위한 곳이며 응축기와 열교환 하는 부분이며 19-29℃의 해수를 투입하는 곳이다. 그리고 항온조의 열량 부족으로 인한 응축열량의 부족을 방지하기 위하여 저온·고온측 해수탱크가 서로 열교환 할 수 있게 판형 열교환기를 설치하였다.

사이클은 반만액식 증발기, 압축기, 응축기, 온도식 팽창밸브(TXV)로 이루어져 있으며 증발기 출구의 서지드럼에서는 응축기에서 나온 고온의 응축 냉매와 증발기에서 나온 저온 냉매의 열교환을 통하여 냉매의 과열, 과냉각을 추가적으로 주어 해수냉각시스템의 안정도를 높였다.

또한 실험적으로 증발기의 냉매 수위를 맞춰야하기 때문에 온도식 팽창밸브로는 한계가 있어 수동식 팽창밸브를 설치하여 냉매 수위와 증발온도를 조절할 수 있도록 하였다. 압축기는 압축기 내 모터와 압축 공간이 분리가 된 개방형



Figure 1: Experimental apparatus of the seawater cooling system

압축기를 사용하였으며 모터와 V-벨트를 압축기 축단에 장착하여 모터 회전수 조절을 통하여 모터의 회전 동력이 압축기의 압축능력 될 수 있도록 하였다. 그리고 만액식 증발기를 이용하는 시스템에서는 압축기 오일이 냉매와 혼합되어 만액식 증발기에 저장되게 된다. 이 때 압축기에 이 오일이 회수되지 않으면 압축기 내 마모 현상 등의 문제가 발생하기에 압축기 오일 회수를 위하여 오일 회수 열교환기(Oil return heat exchanger)와 유 분리기(Oil separator)를 설치하여 압축기에 오일이 원활히 공급될 수 있도록 하였다.

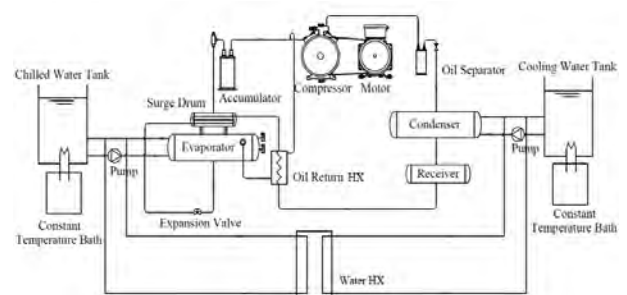


Figure 2: P&ID of the seawater cooling system [10]

또한 데이터로거, 열전대(PT-100, T-type), 압력센서, 체적유량계를 이용하여 열교환기, 압축기, 냉수, 냉각수 등의 전후 압력과 온도, 유량을 측정하였으며 이를 이용하여 각 구간의 상태량을 나타냈으며, 증발열량과 응축열량은 냉수·냉각수의 입·출구 온도와 유량을 통해 계산하였으며, 압축 열량은 입출구의 엔탈피와 냉매 유량을 이용하여 계산하였다.

2.2 실험조건

Table 1은 해수냉각시스템 실험과 시뮬레이션 분석 프로그램 HYSYS의 조건을 나타낸 것이다. 냉매는 R134a, R22를 사용하였으며, 이에 대한 성능 실험 조건은 냉수 입구 온도를 5℃, 냉수 출구 온도를 3℃로 고정하였으며 이를 통해 냉수 유량을 결정한다. 또한 냉각수 입구 온도를 19 ~ 29℃에서 2℃ 간격으로 설정하였으며 이는 어획물 포획 해역 온도의 범위로 설정한 값이다. R134a에 비해 R22가 동

Table 1: Experimental & Simulation analysis (HYSYS) conditions

Parameter	Unit	Experimental	HYSYS
Refrigerants	-	R134a, R22	
Chilled seawater temperature at evaporator inlet	℃	5	
Chilled seawater temperature at evaporator outlet	℃	3	
Cooling seawater temperature at condenser inlet	℃	19, 21, 23, 25, 27, 29	
Inverter frequency	Hz	60, 40	-
Pressure drop of heat exchanger	kPa	-	30

일 온도에서의 압력이 높다. 이 때 모터의 회전수가 증가할수록 V-belt로 연결되어 있는 압축기 회전수가 높아져 압력이 커지기 때문에 모터 회전수를 R134a 경우에는 60Hz, R22의 경우는 40Hz로 설정하였다. 또한 HYSYS 열교환기 압력강하를 일반적인 압력 강하 수치인 30kPa 로 설정하여 시뮬레이션 분석을 진행하였다.

2.3 데이터 해석

실험에서 획득한 데이터를 통해 만액식 증발기의 증발열량, 압축기 소요 동력을 확인할 수 있었으며, 아래와 같은 식을 통해 분석하였다. 식 (1)은 만액식 증발기를 가진 해수냉각시스템에서의 COP를 구하는 식이다.

$$COP = \frac{Q_e}{A_w} \tag{1}$$

여기서 Q_e 는 증발열량(kW)을 나타내며, A_w 는 압축기 소비 동력(kW)을 나타낸다.

3. 실험결과 및 고찰

Figure 3은 냉각수 온도 증가에 따른 냉매별 압축기 입·출구의 압력을 나타낸 그래프이다. 냉매 R22 와 R134a 는 같은 조건하에서 실험을 실시하였다. Figure 3과 같이, 압축기 흡입압력은 소폭 증가하는 경향을 보였다. 이것은 팽창 밸브 토출압력의 증가율이 약 5%의 범위 내에 분포하고 있어 증발압력과 증발온도의 변화가 미미하였음을 뜻한다.

R134a 경우 흡입압력과 비교하여 출구압력이 증가함을 보였으며, 냉각수 온도 19℃에서의 압축기 출구압력 기준으로 냉각수 온도 29℃에서의 압축기 출구압력은 약 21% 증가하였다. 이와 유사한 결과로 R22를 적용 시 출구압력은 약 19%의 증가함을 확인할 수 있었다. 이것은 냉각수의 온도 증가에 따라 응축온도가 증가함에 따른 결과이다. 또한 냉매 R22와 R134a의 입·출구 압력 차이는 약 400kPa 정도로 R22 냉매 이용시 시스템 안전에 적용되는 고압 및 저압 한계치에 대한 고려도 필요하다.

Figure 4는 냉각수 온도 증가에 따른 냉매유량을 나타낸 그래프이다. Figure 4에서 냉각수 온도가 증가함에 따라 두 냉매 순환량이 약 8% 증가함을 확인하였다.

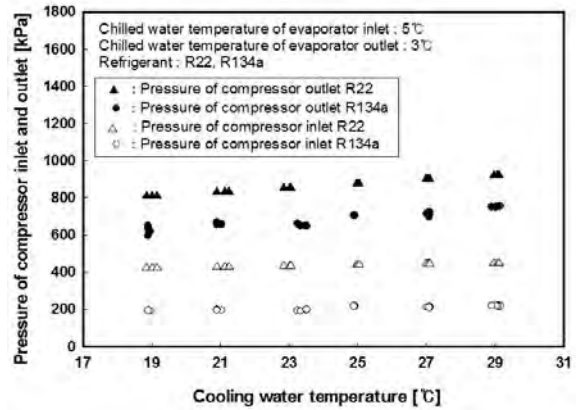


Figure 3: Pressure of compressor inlet and outlet

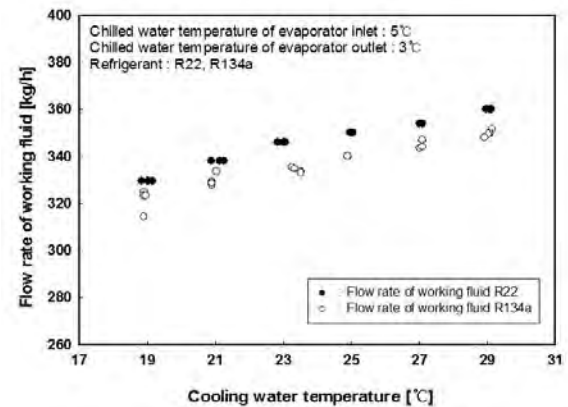


Figure 4: Flow rate of working fluid

이는 Figure 5와 같이, 동일한 과냉도 또는 포화상태에서 냉동효과가 감소하기 때문에, 각 분석조건에서의 냉동능력을 일정한 수준으로 일치시키기 위해서 냉매 순환량이 증가됨을 확인할 수 있다. 그리고 냉매가 바뀔 때 따라 선도에서 압력 범위만 다르며 같은 상변화를 나타낸다. R22냉매는 R134a의 냉매 유량과 비교하였을 시 약 20kg/h 많은 것을 알 수 있다. 동일 냉매 비교 시에는 압축기 회전수에 비례하여 냉매 유량이 증가하지만 다른 냉매와의 비교 시 낮은 증발열량과 및 압축 소요 동력과 비례하게 결정된다. 따라서 동일 조건에서 열량과 압축기 소요 동력이 큰 R22가 더 많은 냉매 유량이 필요하다고 판단하였다.

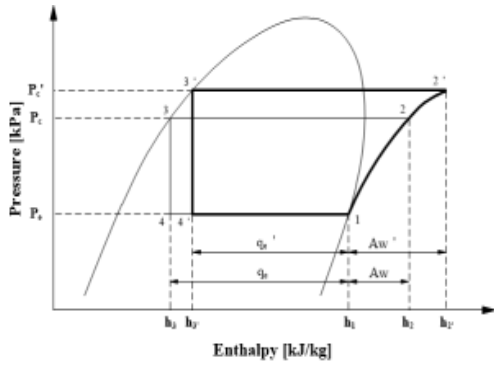


Figure 5: P-h line change with increasing cooling water [11]

Figure 6은 냉각수 온도의 증가에 따른 응축열량의 변화를 나타낸 그래프이다. 이는 응축기 입출구의 냉각수 온도와 유량을 통해 열량을 구하였다. 실험 데이터의 경우, R134a는 냉각수 온도가 증가하면서 응축열량이 약 5% 증가함을 확인하였다. R22는 냉각수 온도가 증가하면서 응축열량이 약 11% 증가함을 확인하였다.

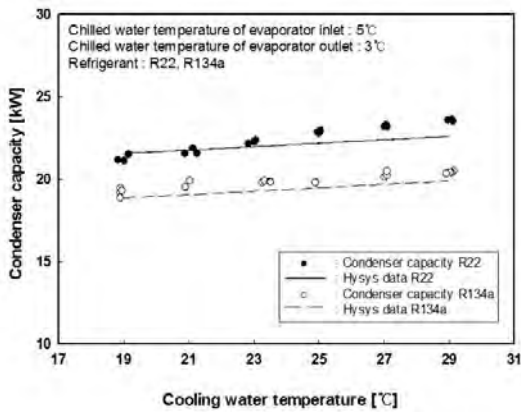


Figure 6: Condenser capacity with temperature increase of cooling water

Figure 6, Figure 7, Figure 8에서 확인 할 수 있듯이 R134a 냉매 사용 시 냉각수 온도의 증가에 따른 응축 열량과 압축 열량의 차이의 비해 R22 냉매 사용 시 차이 비율이 높음으로 냉동용량이 증가한다는 것을 알 수 있다.

응축열량의 증가는 냉매 순환량의 증가에 따른 압축기 소요 동력의 증가의 영향으로 증가함을 확인하였다. 시뮬레이션 분석조건에 따라, 상용프로그램 HYSYS를 사용하여 응축열량을 계산하였다. 이 때, 실험 데이터와 같이, 응축열량이 증가하는 경향이 나타남을 확인할 수 있었다. 또한 R134a를 사용했을 때 응축열량에 비하여 약 3~4kW 높은 것으로 나타났다. 이는 증발열량과 압축동력의 차이와 냉매의 압력이 높기 때문에 냉각수와 열교환량이 많기 때문이다.

Figure 7은 냉각수 온도의 증가에 따른 증발열량 변화를 나타낸 그래프이다. 이는 증발기 입출구의 냉수 온도와 유

량을 통해 열량을 구하였다. 증발열량 실험 데이터의 경우, 냉각수 온도의 증가에 따라 소폭 증가하는 경향을 보였다. 이는 냉매 순환량의 증가를 원인으로 하고 있으며, 거의 일정한 수준으로 유지되고 있음을 나타낸다. R134a 경우 상용프로그램 HYSYS를 사용하여 계산된 증발열량은 실험 데이터와 거의 일치하고 있다. 또한 R22 데이터의 증가율은 약 10%로, R134a에 비하여 높은 증가율을 보이고 있다.

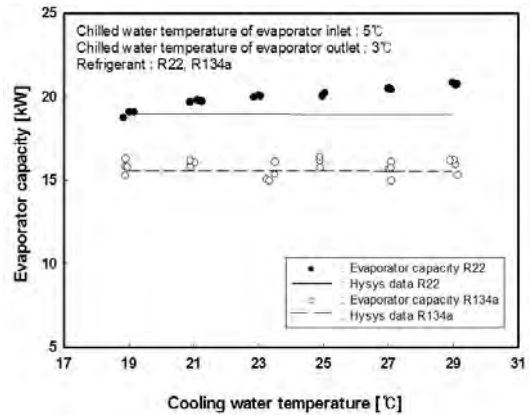


Figure 7: Evaporator capacity with temperature increase of cooling water

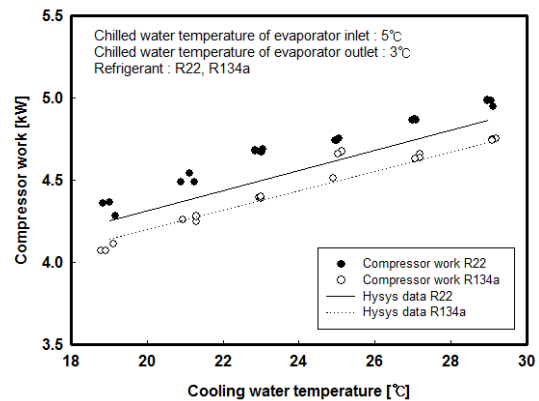


Figure 8: Compressor work with temperature increase of cooling water

Figure 8은 냉각수 온도의 증가에 따른 압축기 소요 동력의 변화를 나타낸 그래프이다.

압축기 소요 동력 실험 데이터의 경우 R134a, R22는 냉각수 온도의 증가에 따라 냉매 순환량이 증가하며 그에 따른 압축기 소요 동력의 증가율은 약 14%, 16%임을 확인할 수 있다. 이는 냉매의 순환량 차이 및 동일 온도에서의 압력 차이 등의 냉매 물성치 차이에 다른 결과임을 확인할 수 있다.

Figure 9는 본 시스템의 COP를 나타낸 그래프이다. 냉각수 온도의 증가에 따라 증발열량은 미미한 증가를 보였으나, R134a 경우 압축동력은 약 14%의 증가율을 보였다.

따라서 COP는 감소하는 경향을 보였으며, 그 감소율은 약 12%이다. R22의 경우 증발열량은 약 10% 증가를 보였으나, 압축동력은 약 16%의 증가율을 보였다. 따라서 COP는 감소하는 경향을 보였으며, 그 감소율은 10%로, 냉각수 온도에 따른 COP 감소율은 R134a와 비슷하나 성능을 나타내는 COP는 R22가 평균 22% 정도 높게 나타나고 있다. 이는 R22의 경우가 증발열량이 더 크게 나타나고 있기 때문이다.

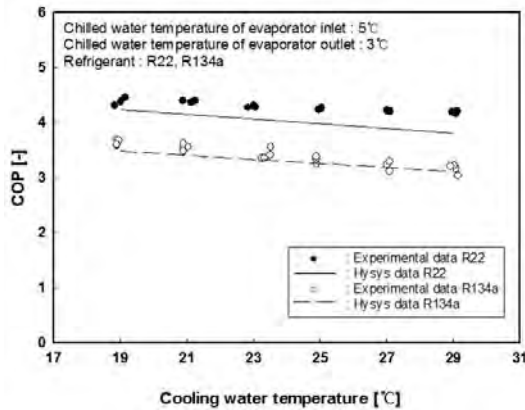


Figure 9: COP with temperature increase of cooling water

4. 결 론

냉매 R22, R134a를 적용한 해수냉각시스템의 성능 비교 실험과 HYSYS를 통하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) R22, R134a 냉매 적용시 실험 및 HYSYS결과에서 응축 및 증발 열량, 압축 동력, COP에서 경향은 동일하며 수치는 오차범위 내에서 동일하게 나타났다.
- (2) 냉각수 온도가 증가함에 따라 증발열량의 증가 비에 비해 압축 동력의 증가분이 커 두 냉매 모두 COP는 감소하였다.
- (3) 해수냉각시스템의 냉매별 성능 비교를 위하여 성능특성인 COP 계산 결과 냉매 R22 적용 시, 냉매 R134a 비해 약 22% 증가함을 보였다. 향후 국내선에 대한 냉매 R134a, R22의 규제와 이러한 시스템 성능 분석을 시스템 설계에 적용할 수 있을 것이다.
- (4) HYSYS 분석과 실험 데이터의 오차가 평균 10% 미만이므로 향후 실제 선박 적용 해수냉각시스템의 성능 예측에도 신뢰할만한 시뮬레이션 데이터 값을 도출할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 2017년 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, 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).
- [4] 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.
- [5] E. Kolbe, "Refrigeration energy prediction for flooded tanks on fishing vessels," American Society of Agricultural Engineers, vol. 6, no. 5, pp. 624-628, 1990.
- [6] 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.
- [7] 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 National University, Korea, 2011 (in Korean).
- [8] S. Minetto and E. Fornasieri, "An innovative system for feeding once-through evaporators in flooded conditions," Applied Thermal Engineering, vol. 31, pp. 370-375, 2011.
- [9] S. Minetto, R. Brignoli, C. Zilio, and S. Marinetti, "Experimental analysis of a new method for over-feeding multiple evaporators in refrigeration systems," International Journal of Refrigeration, vol. 38, no. 9, pp. 1-9, 2014.
- [10] C. H. Son, I. H. Kang, J. M. Lee, C. L. Kim, and

J. I. Yoon, "Characteristics of refrigeration system for fishing-ships applying flooded evaporator," Proceedings of 2016 ICETA Spring Meeting, pp. 20-24, 2016.

- [11] C. R. Kim, Effects of Heat Source Temperature on Characteristics of Flooded Type Seawater Cooling System, M.S. Thesis, Department of Refrigeration and Air-conditioning Engineering, Pukyong National University, Korea, 2016 (in Korean).
- [12] J. I. Yoon, C. H. Son, K. H. Choi, S. H. Jung, H. M. Han, and S. H. Seol, "Heat transfer characteristics of flood-type evaporator using R22 and R134a for fishing vessels," Heat Transfer Engineering, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/01457632.20>