

## 열원수 온도에 따른 만액식 해수냉각시스템의 성능 비교 Performance Comparison of Flooded Seawater Cooling System with respect to Heat Sink Temperature

윤정인\* · 최광환\* · 손창효\*† · 강인호\*\* · 김청래\*\* · 설성훈\*\*  
 Jung-In Yoon\*, Kwang-Hwan Choi\*, Chang-Hyo Son\*†, In-Ho Kang\*\*, Chung-Lae Kim\*\* and Sung-Hoon Seol\*\*

(Received 28 March 2016, Revision received 5 April 2016, Accepted 15 April 2016)

**Abstract:** A fleet consists of a main vessel, light vessels and carrying vessels for purse seine fishery. Carrying vessels contains fish storages to maintain freshness of catches. Currently most carrying vessels applies the cooling system using plain ice though accompanied various shortcomings. Seawater cooling system directly chilling seawater are now in use on carrying vessels in some developed countries to make up for these shortcomings and maximize advantages. This research deals with necessity of seawater cooling systems and establishes system criteria using AspenTech HYSYS program, prior to an experiment of compact-scale seawater cooling system which now in progress of manufacture. Performance comparison on condensation capacity, mass flow rate of working fluid, compressor power input, pump power input and others of the seawater cooling system applying a flooded evaporator is conducted with respect to the temperature of surface seawater varying according to seasons. The result presents that mass flow rate circulating the system is increased about 16.7% as the temperature of surface seawater increases. At the same condition, condensation capacity and compressor input work also increase about 9.8% and 91.2%, respectively.

**Key Words :** Flooded type evaporator, Fish storage, Heat sink temperature, Surface seawater temperature

### — 기 호 설 명 —

	G	: 질량유량	[kg/h]
	h	: 엔탈피	[kJ/kg]
A : 전열면적	[m <sup>2</sup> ]	P	: 압력 [kPa]
Aw : 압축기동력	[kW]	Q	: 전열량 [kW]
C : 비열	[kJ/kg °C]	T	: 온도 [°C]
COP : 성능계수	[—]	W	: 일량 [kW]

\*† 손창효 : 부경대학교 냉동공조공학과

E-mail : sonch@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6183

\*윤정인, 최광환 : 부경대학교 냉동공조공학과

\*\*강인호, 김청래, 설성훈 : 부경대학교 냉동공조공학과 대학원

\*† Chang-Hyo Son : Department of Refrigeration and Air Conditioning, Pukyong National University.

E-mail : Sonch@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6183

\*Jung-In Yoon, Kwang-Hwan Choi : Pukyong National University.

\*\*In-Ho Kang, Chung-Lae Kim, Sung-Hoon Kim : Graduate School, Pukyong National University.

## 그리스 문자

△ : 변화량

## 하첨자

c : 응축기  
 co : 압축기  
 e : 증발기  
 p : 정압  
 pu : 펌프  
 ref : 냉매  
 hs : 열원수 (표층수)  
 rat : 비율

## 1. 서 론

현재 연근해 어업의 조업방식은 선망어업 방식으로 조업이 진행되는데, 이 경우 본선과 등선 및 운반선이 한 선단을 이룬다. 이중 어종을 보관하는 운반선은 어창이 배의 대부분을 차지하며, 어창 내 해수 냉각은 육상얼음의 용해열을 이용하는 냉각방식이 일반적이다. 어창 온도 유지를 위해 육상얼음 구입 및 운반시간, 인력투입, 하중의 증가 등 경제적 시간적 문제점과 육상얼음의 용해로 인한 어창 내 염도 및 온도의 불균일성이 발생하여 어획물의 신선도 확보가 힘들다는 단점이 있다. 이러한 여러 단점들을 보완하기 위하여 선진국에서는 운반선에서 직접 해수를 냉각시킬 수 있는 해수냉각 시스템을 설치하여 운항하고 있다. 우리나라에서는 수산물 유통 선진화를 위하여 이러한 설비를 갖추기 위한 도입 연구가 시작되고 있는 단계이다.

이러한 해수냉각시스템과 관련된 종래연구를 살펴보면, 우선 Govindan<sup>1)</sup> 등은 등푸른 생선류인 정어리의 어창 저장에 있어 육상빙을 사용한 냉각방식과 해수를 냉각방식을 비교하였으며, 그 결과, 해수를 이용한 냉각방식을 채택하는 것이 유리하다고 밝히고 있다. Kolbe<sup>2)</sup>는 어선에 탑재된 해수냉각시스템의 에너지 소비량을 확인하고 육

상빙의 빙축열을 이용한 어창 냉각에 대한 데이터와 자료수립을 하였으며, 이를 바탕으로 해수냉각시스템의 효율성을 분석하였다. 그 결과, 해수냉각시스템을 적용한 선박과 육상빙을 사용하는 선박의 비교를 통해 절반 정도의 에너지를 절약할 수 있다고 하였다. 또한 에너지 소비는 해수 온도에 따라 큰 영향을 주고 있다는 것을 확인하였다. Yoon<sup>3,4)</sup> 등은 R-22용 소형 해수냉각 장치를 제작하여 압축기 회전수와 냉매유량이 어창 내 온도변화에 미치는 영향에 대하여 분석하였으며, 또 어창 투입 및 출구 위치에 따라 어창 내 온도 분포에 미치는 영향에 대하여 분석하였다. 그 결과, 어창용 해수냉각장치의 부하특성을 확인하였으며, 그에 따른 어창내의 열유동 특성에 대하여도 수치해석적으로 연구하여 분석하였다.

이상의 종래 연구로부터 알 수 있듯이, 지금까지의 관련 연구는 해수냉각방식과 육상빙 냉각방식의 비교 연구가 대부분으로, 실질적인 해수 냉각방식의 접근에는 그 한계가 있다. 따라서 본 논문에서는 냉각수로 사용되는 표층수(열원수)가 계절의 온도변화에 따라 해수냉각 시스템의 특성을 파악하고자 하였다. 이를 위해 본 연구에서는 AspenTech사의 상용프로그램인 HYSYS<sup>5)</sup>를 사용하여 제작 중인 해수냉각장치의 실증실험에 앞서 기초 이론 성능분석 자료를 구축하는데 그 목적이 있다.

## 2. 해수냉각시스템 구성

해수냉각시스템은 선박의 기계실이 협소한 이유로 장치의 소형화가 중요하다. 따라서 냉각능력이 뛰어난 만액식 증발기를 적용<sup>6,7)</sup>하고자 한다. Fig. 1은 현재 제작중인 만액식 해수냉각장치의 개략도이다. 해수냉각장치는 냉매 순환루프와 열원수 순환루프로 구성되며, 그 주요 구성기기로는 압축기, 응축기, 팽창밸브, 만액식 증발기 등과 수액기, 오일 분리기, 액분리기 등의 부속기기가 추가적으로 설치되어 있다. 그리고 일정한 열원수 공급을 위한 항온조와 물탱크, 판형열교환기로 구성되어 있다.

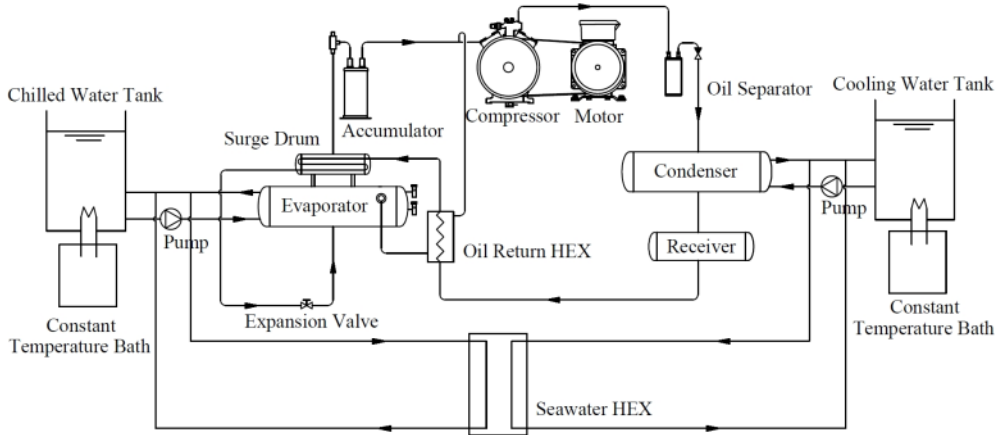


Fig. 1 Schematics of seawater cooling system

장치도에서 증발기를 지난 냉매 증기는 압축기로 흡입되어 고온고압으로 토출된다. 토출된 냉매 증기는 응축기를 지나 냉매 액이 되고, 수액기를 거쳐 서지드럼과 오일 회수 열교환기를 지나면서 과냉된다. 이후 팽창밸브를 지난 냉매 액은 만액식 증발기에서 저온저압의 냉매 증기가 되어 서지드럼을 지나면서 과열된 냉매 증기는 압축기로 재순환하는 사이클이다.

만액식 증발기에서 냉각된 냉수를 어창으로 보내기 위하여 물탱크를 설치하여 순환되도록 하였다. 그리고 어창으로 공급되는 냉수 온도는 항온조와 판형열교환기를 통해 조절이 가능하도록 하였다. 또한 응축기의 열원수 온도는 항온조와 판형열교환기를 이용하여 조절할 수 있도록 하였다.

### 3. 시스템 분석 조건 및 방법

#### 3.1 표층수 온도 조건

선박 냉동장치의 설계 시 사용목적에 부합하도록 적절한 조건과 기준을 적용하여야 한다.<sup>8)</sup> 즉 본 연구에서 적용하는 선박용 냉동장치의 응축기의 열원수는 해수의 표층수를 사용하기 때문에 설계시 계절별 표층수 온도 변화를 충분히 고려하여 설계하여야 한다. 우리나라의 경우 사계절이 뚜렷하여 표층수 온도는 계절에 따라 변화가 크다. 그리하여 표층수 온도 확인을 위해 선망어선

의 조업이 가장 많이 이루어지는 제주해협의 수온 데이터를 대상으로 하였으며, 이는 2013년에서 2015년까지 최근 3년간의 평균 수온 데이터로 Fig. 2에 정리하였다.

제주해협 1년 중 하루 평균 수온이 가장 높은 날은 여름철로 약 28℃로 나타났으며, 반면에, 가장 낮은 날은 겨울철로 약 11℃를 나타내었다. 따라서 본 연구에 적용한 열원수 최고와 최저온도는 각각 28℃와 11℃로 설정하였다.

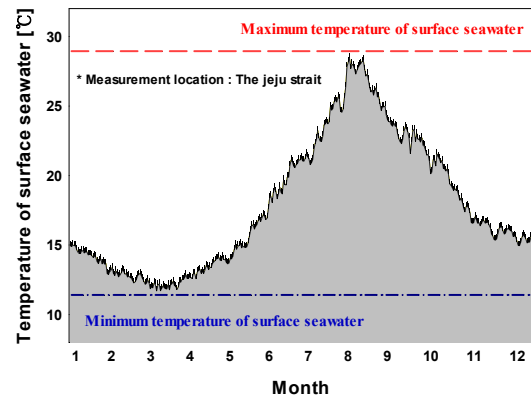


Fig. 2 Temperature of surface seawater over 3 years at Jeju strait

#### 3.2 분석조건과 계산식

Table 1은 시스템의 분석조건에 대해서 정리한 것이다. 본 연구에서는 각국의 선급에서는 냉매의

안정성, ODP 및 GWP에 따른 규정을 모두 만족하는 R-134a를 작동유체로 선정하였다. 그리고 응축기의 열원수는 전술한 바와 같이, 계절별로 온도가 변하기 때문에, 겨울과 여름으로 나누어 분석하였다. Fig. 2의 데이터를 토대로 겨울철 열원수 온도를 11℃부터 14℃까지 0.5℃ 간격으로 하여 분석하였으며, 여름철 열원수 온도는 25℃부터 28℃까지 0.5℃ 간격으로 분석하였다. 또한 증발기 출구 냉수 온도는 항상 3℃를 유지하도록 하였다.

Table 1 Analysis conditions

Parameter	Values
Refrigerant	R-134a
Evaporation capacity [kW]	15
Evaporation temperature [°C]	0
Pressure drop of heat exchanger [kPa]	30
Compressor efficiency [%]	75
Water pump efficiency [%]	45~50
Chilled water temperature at evaporator outlet [°C]	3
Heat sink temperature at condenser inlet [°C]	11~14 Winter 25~28 Summer

여름과 겨울의 열원수 온도변화에 따른 응축열량은 식 (1)로 계산하였다.

$$Q_c = G_{hs} \cdot C_{p,hs} \cdot \Delta T_{c,hs} \quad (1)$$

또한, 압축기 입력동력은 식 (2)로 구하였다.

$$Aw = G_{ref} \cdot \Delta h_{co,ref} \quad (2)$$

응축기 열원수 펌프 일량은 식 (3)으로 계산하였다.

$$W_{pu} = G_{wat} \cdot \Delta h_{p,wat} \quad (3)$$

해수냉각시스템용 압축기의 압축비는 식 (4)로 구하였다.

$$P_{rat} = P_c / P_e \quad (4)$$

해수냉각시스템의 냉동능력과 압축동력의 비인 성능계수(COP)는 다음의 식 (5)로 계산하였다.

$$COP = Q_e / Aw_{co} \quad (5)$$

#### 4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 열원수 온도변화에 따른 해수 냉각시스템의 성능특성, 즉 냉매유량, 응축열량, 압축기동력, 펌프동력, 열원수유량, 압축비 등의 변화를 살펴보았다.

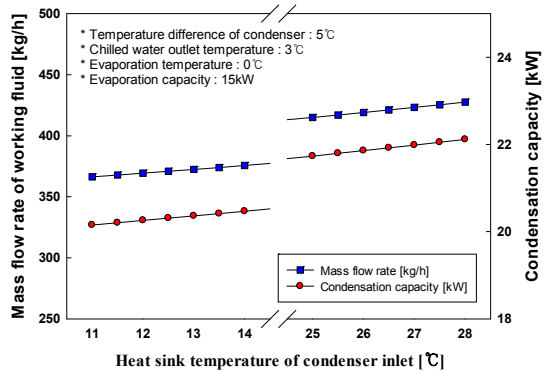


Fig. 3 Mass flow rate of working fluid and condenser capacity with heat sink temperature

Fig. 3은 여름과 겨울 조건에서 열원수온도 변화에 따른 해수 냉각시스템의 냉매유량과 응축열량 특성을 나타낸 것이다. 열원수 온도가 증가할수록 응축열량이 증가하여 냉매유량이 증가하였다. 즉 겨울철의 경우 증가율은 2.5%이고, 여름철 증가율은 3.0%로 겨울철보다 여름철의 냉매유량 변동이 크다. 그리고, 응축열량은 열원수온도가 증가할수록 응축압력의 증가로 인해 증가하는 경향을 보였다. 즉 겨울철 응축열량 증가율은 약 1.6%, 여름철은 약 1.8%로 나타났다. 이상의 결과로부터 겨울철보다 여름철에 해수냉각시스템의 응축열량이 크다는 사실을 확인할 수 있었다.

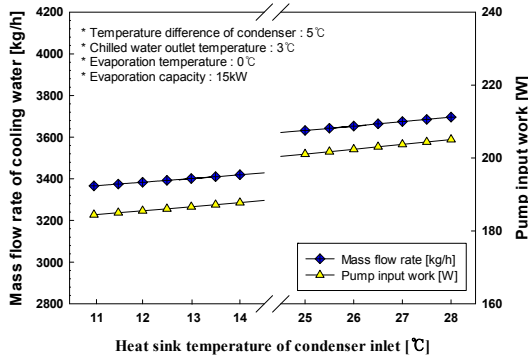


Fig. 4 Mass flow rate of cooling water and pump input work with heat sink temperature

Fig. 4는 열원수 온도 증가에 따른 열원수 유량과 펌프동력의 특성을 나타낸 것이다. Fig. 3의 결과에서, 열원수 온도가 높아짐에 따라 응축열량이 증가하여 열원수 유량이 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 열원수 유량의 증가에 따라 펌프동력이 함께 증가하였지만 최대 205W로 작았으며, 또한 전체시스템의 성능계수에 미치는 영향도 미미하였다.

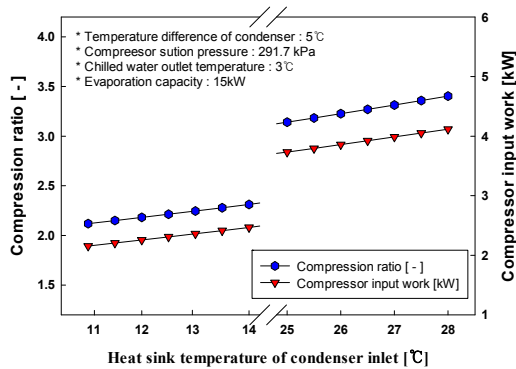


Fig. 5 Compression ratio and compressor input work with heat sink temperature

Fig. 5는 Table 1의 분석조건에서 열원수 온도 증가에 따라 압축비와 압축기 동력의 관계를 나타낸 것이다. 압축비는 식 (4)로 계산한 것으로, 냉동능력과 증발압력이 일정하기 때문에 압축기 토출압력인 응축압력이 열원수 온도의 증가에 따

라 높아지면서 압축비가 증가하게 된다. 열원수 온도의 증가로 압축기 동력은 약 60% 정도 증가하였다. 이는 Fig. 3에서 확인할 수 있듯이 냉매유량이 증가에 기인한 것이라 볼 수 있다.

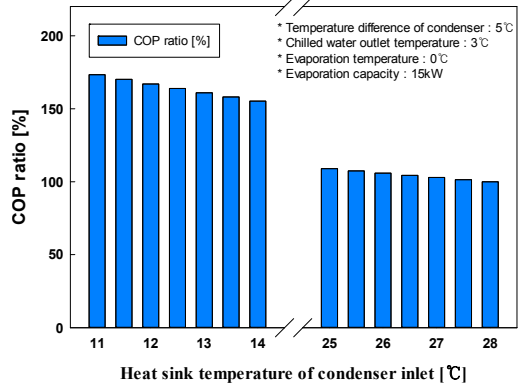


Fig. 6 COP ratio with heat sink temperature of condenser inlet

열원수 온도에 따른 해수냉각시스템 성능계수(COP) 비율 변화를 Fig. 6에 나타내었다. COP 비율은 여름철 가장 높은 열원수 온도인 28°C의 COP 값을 100%으로 하여, 다른 열원수 온도의 COP를 상대적인 비율로 나타낸 것이다. 그래프에서 알 수 있듯이 온도가 감소할수록 COP 비율은 점점 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 겨울철 열원수의 최소온도일 때 COP가 가장 높았다. 이는 Fig. 5에서 확인할 수 있듯이 열원수 온도가 감소함에 따라 압축 입력동력이 감소하기 때문이며, 겨울철에는 9%가 증가하며, 여름철에는 18.2% 증가하는 것을 알 수 있었다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 열원수 온도 변화에 따른 만액식 증발기 적용 해수냉각시스템의 성능 특성 변화를 확인하고, 실제 선박탑재용 냉각시스템의 기초 데이터베이스를 구축하기 위하여 상용프로그램인 HYSYS를 사용하여 성능 특성을 분석하였다. 그리고 계절에 따라 열원수로 사용되는 표층

수 온도를 11℃에서 28℃까지 변화시켜 분석하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

해수의 표층수 온도가 증가함에 따라 시스템의 냉매유량은 16.7% 증가를 확인할 수 있으며, 응축 열량과 압축기 입력동력 또한 각각 9.8%, 91.2% 증가하였다. 그리고 표층수의 온도가 감소함에 따라 COP 비율은 최대 73.4%까지 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구를 통해 해수냉각 시스템이 사계절 내내 안정적이고 효율적으로 작동할 수 있도록 열교환기, 압축기, 펌프 등의 최적 설계 및 제작이 이루어져야 함을 알 수 있었다.

## 후 기

이 논문은 2015년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임. (선망 어선용 해수 냉각 시스템 도입 연구)

## References

1. P. A. Perigreen, S. A. Pillal, P. K. Surendran and T. K. Govindan, 1975, "Studies on Preservation of Fish in Refrigerated Sea-water", Central Institute of Fisheries Technology, Vol. 12, No. 2, pp. 105-111.
2. E. Kolbe, 1990, Refrigeration Energy Prediction for Flooded Tanks on Fishing Vessels, American Society of Agricultural Engineers, Vol. 6, No. 5, pp. 624-628.
3. I. G. Han, C. G. Moon, J. D. Kim and J. I. Yoon, 2001, "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. 139-145.
4. J. K. Lim, H. M. Jeong, J. D. Kim and J. I. Yoon, 1991, "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.
5. AspenTech HYSYS, 2014, Version 8.6, Aspen Technology Inc.
6. S. W. Yang, Y. S. Lee, J. H. Jeong and Y. T. Kang, 2006, "Experimental Study on Heat Transfer Characteristics of HFC134a for Enhanced Tubes Used in a Flooded Evaporator", Korean Journal Of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 18, No. 12, pp. 971-976.
7. S. Minetto and E. Fornasieri, 2011, "An innovative system for feeding once-through evaporators in flooded conditions", Applied Thermal Engineering, Vol. 31, pp. 370-375.
8. K. W. Park, 2005, "Design Basis of Marine Refrigeration system", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 29, No. 8, pp. 14-19.
9. C. H. Son, I. H. Kang, J. M. Lee, C. L. Kim and J. I. Yoon, 2016, "Characteristics of Refrigeration System for Fishing-ships Applying Flooded Evaporator", Proceedings of 2016 ICETA Spring Meeting, Taipei, Taiwan.