

드럼형 증발기를 적용한 2단 압축 해수 제빙시스템의 성능 특성 Performance Characteristics of Two-stage Compression Seawater Ice Machine Applied Drum type Evaporator

손창효* · 윤정인* · 전민주* · 이현경** · 허성관****
Chang-Hyo Son*, Jeong-In Yoon*, Min-Ju Jeon*,
Hyun-Kyung Lee** and Seong-Kwan Heo****

(Received 06 February 2017, Revision received 09 March 2017, Accepted 09 March 2017)

Abstract: In the fishing boat, freshwater ice is loaded on the fishroom in advance and it is used for storage of fishes. However, it causes degradation of catches' freshness. Therefore, seawater ice machine on board is necessary for the fishing industry. In this study, seawater ice machine with drum type evaporator was manufactured, and the system was tested under various operating conditions having an influence on the COP and amount of ice produced. The main results are as follow : The COP of the system gets larger when the evaporation temperature and rotation speed of the drum in the evaporator increases. The most effective refrigerant is R22 and the value of the COP was 1.43 times higher than that of R404A. The amount of produced ice increases with respect to increment of the evaporation temperature, while that decreases with respect to increment of the evaporator drum rotation speed.

Key Words : Drum Evaporator, Seawater, Ice Machine, Coefficient of Performance, 2-Stage Compression Refrigeration System

1. 서 론

국내 연·근해 어선은 30~100 ton 미만의 소형 선박이 대부분이며, 통상 항해 일수가 7일 이내이다. 또한 어획량이 많은 경우에도 냉동장치가 선박 내에 탑재되어 있지 않은 어선들은 이미 어획한 어류의 신선도를 유지하기 위해서는 어류가

부패하기 전에 돌아와야만 하며, 출항 후 초기 어획한 고기들은 필수적으로 저온 저장을 해야만 한다.

현재 냉동장치를 가진 연·근해 어선은 극히 드물기 때문에, 대부분의 어선에서는 담수빙을 미리 어선 내 어창에 적재하고, 출항 후 조업시 어획한 고기를 미리 적재한 얼음과 함께 섞어서 어창에

**** 허성관(교신저자) : ㈜대일
E-mail : gjtjdrhks@naver.com, Tel : 051-731-0003
*손창효, 윤정인, 전민주 : 부경대학교 냉동공조공학과
**이현경 : 부경대학교 대학원 냉동공조공학과

**** Seong-Kwan Heo (corresponding author) : Daeil cooler Co., Ltd.
E-mail : gjtjdrhks@naver.com, Tel : 051-731-0003
*Chang-Hyo Son, Jung-In Yoon, Min-Ju Jeon : Department of Refrigeration and Air-conditioning Engineering, Pukyong National University.
**Hyun-kyung Lee : Graduate School, Department of Refrigeration and Air-conditioning Engineering, Pukyong National University.

드럼형 증발기를 적용한 2단 압축 해수 제빙시스템의 성능 특성

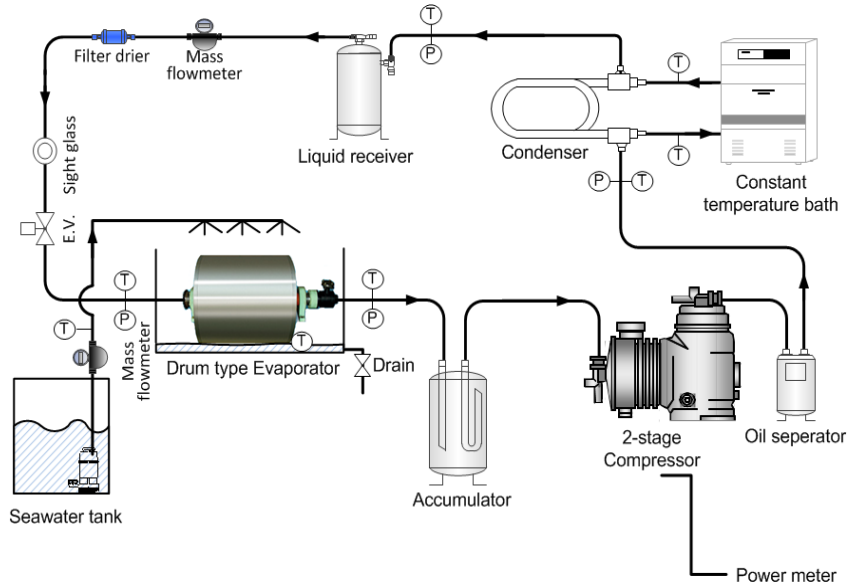


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

저장한다. 담수병은 그 결정이 크고 각진 형태로 인해 느린 냉각속도와 냉각능력 부족, 어획물의 손상으로 선도유지와 품질이 저하된다. 이에 따라, 가격이 저렴하고 좁은 공간에도 설치가 용이한 어선 탑재용 해수 제빙 시스템 개발이 필요하다.

국외에서는 이전부터 수산물의 고품질화를 위해 고·액 이상류 형태의 사베트형 제빙 시스템에 대한 연구¹⁻³⁾가 진행되어 왔으며, 어선에서 해수를 통해 직접 제빙이 가능한 이중관 방식과 플레이크(flake) 아이스 혼합 방식을 이용한 시스템^{4,6)}이 상용화 되어 있다. 반면, 국내에서는 최근 육상 및 해상용 해수 제빙시스템의 연구 개발⁷⁻⁸⁾을 하기 시작하였지만, 그 연구의 범위가 매우 좁으며, 사베트형 제빙 시스템에 대한 연구가 많이 부족한 실정이다.

이에 따라, 소용량의 해수 제빙 시스템을 제작하고, 실험을 통하여 주어진 조건에서 성능 분석을 진행함으로써 다양한 운전 조건에 따른 영향을 파악하여, 어선 탑재를 위한 해상용 해수 제빙시스템의 기초 설계 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험 장치

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 드럼형 증발기를 적용한 2단 압축 해수 제빙 시스템의 개략도이며, Photo. 1은 프로토타입으로 제작한 IPF(Ice Packing Factor : 전체 용액에 대한 얼음의 비율) 30% 기준일 때 1.5 Ton/day 제빙 용량의 실험 장치이다.



Photo. 1 Photograph of experimental apparatus

본 연구에 사용된 시스템은 부스터 압축기, 유분리기, 응축기, 수액기, 전자식 팽창밸브, 드럼형 증발기, 액분리기(Accumulator) 등으로 구성된다.

증발온도 -30°C 이하의 증발온도를 안정적으로 얻기 위해서 왕복동식 단단 압축기 2개가 하나로 케이싱 되어있는 부스터 압축기를 사용하였으며, 판형 열교환기를 사용하여 저단과 고단 압축기 사이에서 냉매의 온도를 냉각시키는 중간냉각기의 역할을 하였다. Fig. 2는 드럼형 증발기를 나타내고 있다. 본 실험에서 사용된 드럼형 증발기는 모터와 연결되어 회전하며 내측으로는 냉매가 흐르고, 대기에 노출된 외표면에 해수가 분사되어 흐르며 냉매의 증발에 의해 제빙된다. 표면에서 제빙되어 부착된 얼음은 일정한 간격을 둔 칼날에 의해 절삭되어 건조열음을 완성하고, 이후 해수와 일정한 비율로 섞어 슬러리 아이스를 생산하게 된다.

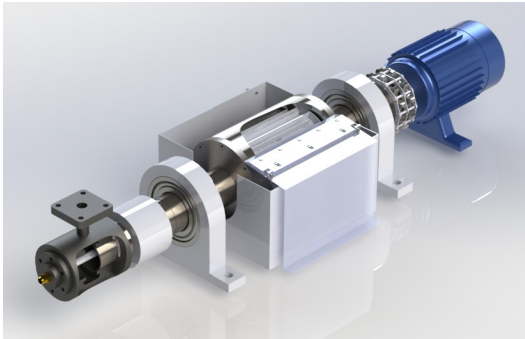


Fig. 2 3D drawing of drum evaporator.

시스템의 냉매 순환을 살펴보면 저단 압축기로부터 압축된 후 중간냉각기인 판형열 교환기에서 응축기 출구 냉매와 열교환하여 냉각된 후 다시 고단 압축기로 들어가 압축된다. 압축기에서 나온 냉매 증기는 이중관 형태의 수냉식 응축기에서 열교환 후 일부는 중간냉각기로, 나머지는 팽창밸브를 통과한 후 저온 저압으로 떨어지게 된다. 저온 저압의 냉매는 드럼형 증발기 내부로 흐르며, 증발기 외표면으로 분사되는 해수를 제빙시킴과 증발한 후 다시 저단 압축기로 들어가는 과정을 반복한다.

각 주요 기기의 입·출구에 절대 압력계와 백금측온 저항체를 설치하여 압력과 온도를 측정하였으며, 해수의 유량은 증발기 입구, 냉매의 유량은

수액기 출구에 질량유량계를 설치하여 측정하였다. 압축기에서 실제로 소비되는 동력은 파워 미터(Power meter)를 이용하여 측정하였다.

2.2 실험 방법 및 조건

실험은 냉매, 증발온도(T_e), 증발기 드럼의 회전수를 변화시켜가며 실시하였다. 드럼의 회전수는 드럼형 증발기에 연결된 모터에 장착한 인버터의 주파수(f)를 통해, 냉매의 증발온도는 팽창밸브의 개도 조절을 통해 변화시킨다.

Table 1 Experimental Conditions

Parameter	Value	Unit
Refrigerants	R22, R507A*, R404A	-
T_e	$-40, -35^*, -30$	$^{\circ}\text{C}$
T_c	35	$^{\circ}\text{C}$
T_{sub}	0	$^{\circ}\text{C}$
T_{sup}	$5 \sim 10^*$	$^{\circ}\text{C}$
G_m / G_H	0.3	-
Frequency of Inverter : f	40, 50, 60*	Hz

* Standard Condition

응축기 자체의 과냉도(T_{sub})는 발생하지 않으며, 압축기의 안정적인 작동을 위해 과열도(T_{sup})는 $5 \sim 10^{\circ}\text{C}$ 를 유지하였다. 중간냉각기로 By-pass 되는 유량비(G_m / G_H)는 0.3으로 고정하였다.

본 시스템이 정상상태(15분 동안에 온도측정변이가 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 이내, 압력측정 변이가 $\pm 0.5\text{ kPa}$, 질량유량의 변화가 $\pm 0.05\text{ kg/min}$ 이내이면 시스템은 정상상태라고 간주한다.)가 되면 계측장비를 가동하여 측정부의 온도, 압력, 질량유량 및 압축기 축동력을 5분 간격으로 3번 측정하였다. 드럼형 증발기에서 생산된 얼음량은 정상상태에 도달한 후 30분간 생산되는 얼음을 전자 저울로 측정 한 뒤 [ton/day] 단위로 환산한다.

상기 시스템의 실험 조건은 Table 1에 나타내었다.

2.3 데이터 해석

본 실험에서 사용한 냉매와 열원수의 열물성치 값과 그 계산은 EES(Engineering Equation Solver,

v8.574-3D, 2010) 소프트웨어를 이용하였다. 우선, 증발기에서의 증발열량, 즉 냉동능력 (Q_{eva})은 식 (1)로 계산할 수 있다.

$$Q_{eva} = G_L \times (h_{eva,out} - h_{eva,in}) \quad (1)$$

식 (1)에서 $h_{eva,in}$ 과 $h_{eva,out}$ 은 증발기 입·출구의 엔탈피 [kJ/kg]을 각각 나타내며, G_L 은 저단축 압축기에 흐르는 냉매 유량 [kg/s]이다.

$$COP = \frac{Q_{eva}}{W_L + W_H} \quad (2)$$

식 (2)에서 W_L 과 W_H 는 저단, 고단 압축기의 소요 동력을 의미한다. 식 (1)을 통해 계산된 냉동능력과 파워미터를 통하여 측정된 압축기 소요 동력을 이용하면 2단 압축 냉동시스템의 COP (Coefficient of performance)를 알 수 있다.

3. 실험결과 및 고찰

본 논문에서는 드럼형 증발기를 적용한 2단 압축 해수 제빙 시스템을 소용량(IPF 30% 기준 1.5 ton/day)의 프로토타입으로 제작하여 실험을 통해 성능 특성을 분석하였으며, 이를 통해 어선 탑재용 샤페트형 해수 제빙시스템의 기초 설계 자료를 제공하고자 한다. 따라서 냉매와 증발온도드럼 증발기의 회전수에 따른 성능계수와 제빙량을 살펴보았다.

3.1 냉매별 증발온도의 영향

3.1.1 증발온도에 따른 COP

Fig. 3은 일정한 조건(인버터 주파수(f) 60 Hz, 응축온도(T_c) 35°C가 일정하게 유지되고 있는 상태)에서 증발온도의 증가에 따른 COP를 냉매별로 나타낸 것이다. 증발온도가 증가함에 따라 모든 냉매의 COP가 증가하였다. 이는 증발온도가 증가할수록 압축비가 감소하고, 이에 따라 압축기 소요동력이 감소함에 따른 결과이다.

또한, 세 가지 냉매를 비교하면, 가장 낮은

COP를 보인 R404A 대비 R22 (1 : 1.44)로 큰 수치를 보였지만 증발온도가 낮아질수록 그 차이는 줄어들었다. R404A의 경우 증발온도에 따른 COP 감소폭이 적는데, 이는 단일냉매나 공비 혼합냉매와는 다른 비공비 혼합냉매의 비가역성 때문이다.

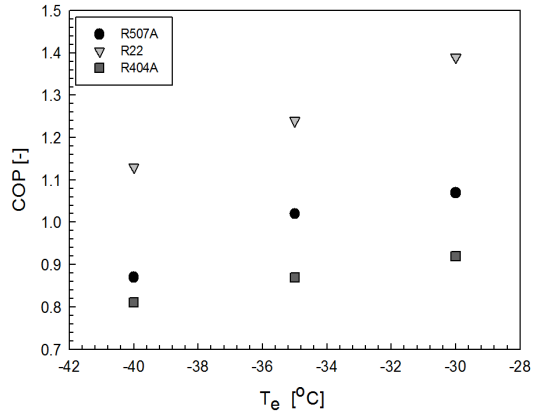


Fig. 3 Influence of COP with respect to evaporation temperature for the tested refrigerants.

3.1.2 증발온도에 따른 제빙량

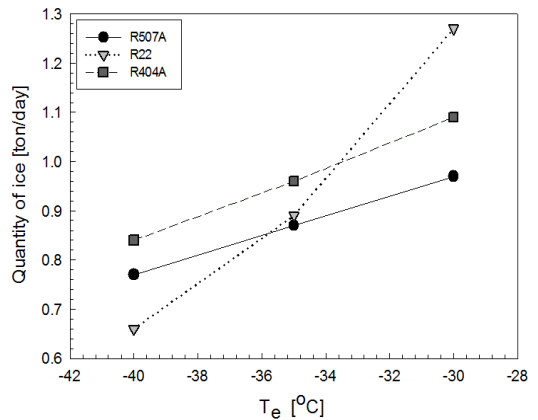


Fig. 4 Quantity of ice versus evaporation temperature.

Fig. 4는 일정한 조건에서 증발온도의 증가에 따른 제빙량을 냉매별로 나타낸 것이다. 3가지 냉매 모두 증발온도가 증가할수록 제빙량이 증가하는 경향을 보인다. 이는 팽창밸브 개도와 관계가

있다. 증발온도가 낮아지려면 팽창밸브 개도가 줄어들어야 하며, 이에 따라 드럼형 증발기 내부로의 냉매량이 줄어들어 외 표면에 해수 얼음이 만들어 질 수 있는 유효전열면적에 따른 결과이다.

혼합냉매인 R404A와 R507A에 비해 R22가 증발 온도 증가에 따른 제빙량 증가비율이 1.48배로 크다. 하지만 -35℃를 전후로 생산량이 역전된다. 증발온도가 낮아질수록 그 생산량의 감소비율이 작은 혼합냉매가 저온에서 유리한 것으로 판단된다.

3.2 증발온도별 드럼 회전수의 영향

3.2.1 드럼 회전수에 따른 COP

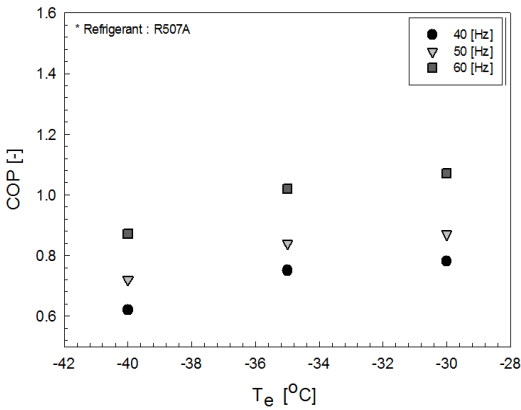


Fig. 5 Influence of evaporation temperature on COP for frequency of inverter

Fig. 5는 R507A 냉매에 대하여 응축온도(T_c) 35℃가 일정하게 유지되고 있는 상태에서 증발온도의 증가에 따른 COP를 인버터의 주파수 변화, 즉 드럼의 회전수별로 나타낸 것이다. Fig. 5에서 알 수 있듯이, -30℃ 기준에서 회전수에 따른 COP의 최대값은 1.07, 최소값은 0.87로 약 23%의 증가를 보이며 모든 증발온도에서 드럼형 증발기의 회전수가 증가할수록 COP가 증가한다.

이는 증발기 드럼의 회전수가 증가하여 커터와 드럼형 증발기 표면 사이에 형성되는 해수 얼음의 두께가 얇아져 얼음층의 전도 열저항이 감소되어 열전달능력이 향상됨에 따른 결과로 보인다.

3.2.2 드럼 회전수에 따른 제빙량

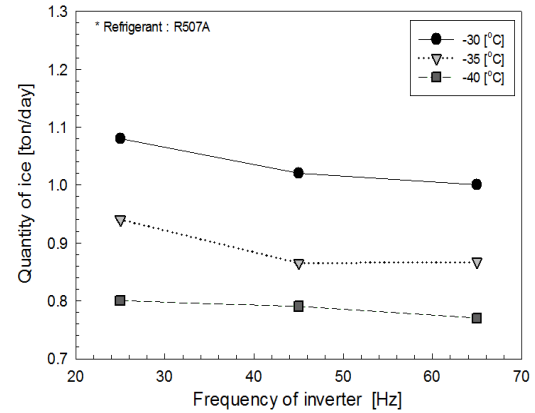


Fig. 6 Quantity of ice versus frequency of inverter.

Fig. 6은 R507A 냉매에 대하여 응축온도(T_c) 35℃가 일정하게 유지되고 있는 상태에서 드럼형 증발기 모터에 장착된 인버터의 주파수 증가에 따른 제빙량을 증발온도에 따라 나타낸 것이다. Fig. 6에서 알 수 있듯이, 인버터의 주파수가 증가할수록 드럼의 회전수가 증가하면 제빙량이 감소한다. 이는 빨라진 회전속도 때문에 얼음층의 두께가 두꺼워지기 전에 얼음이 잘려나가게 되고, 이에 따라 상대적인 얼음 입자 크기는 작아지게 되며 제빙량이 감소한다.

4. 결론

어선 탑재용 해수 제빙시스템의 기초 설계 자료를 제공하기 위하여 드럼형 증발기를 적용한 2단 압축 해수 제빙 시스템을 소용량의 프로토타입으로 제작하였다. 실험을 통해 냉매(R507A, R22, R404A)와 증발온도(-40℃, -35℃, -30℃), 드럼 증발기의 회전수 즉, 인버터의 주파수(40 Hz, 50 Hz, 60 Hz)에 따른 성능계수와 제빙량을 살펴본 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 드럼형 증발기를 적용한 2단 압축 해수 제빙시스템의 증발온도가 높을수록 COP와 제빙량은 증가하였다. 본 제빙장치에서 생산되는 얼음은 일

반 제빙장치보다 더 낮은 온도 레벨에서 만들어 지는 건조 얼음이므로 증발온도를 높이는 것에 한계가 있다. 따라서 빙질을 유지하면서 COP와 제빙량을 향상시킬 수 있는 최적의 증발온도를 찾기 위한 연구가 필요하다.

2) 드럼형 증발기를 적용한 2단 압축 해수 제빙 시스템에서 드럼의 회전수가 증가할수록 COP는 증가하였지만 제빙량은 감소하였다. 드럼의 회전수는 생성되는 얼음의 입자 크기와 연관되므로, 냉각하는 대상에 맞는 입자 크기와 회전수의 상관관계를 고려해야 한다.

후 기

이 논문은 2016년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (육해상용 샤페트형 해수제빙장치 개발).

References

1. E. Stamatou, J. W. Meewisse and M. Kawaji, 2005, "Ice slurry generation involving moving parts", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 28, No. 1, pp. 60-72.
2. T. A. Mouneer, M. S. El-Morsi, M. A. Nosier and N. A. Mahmoud, 2010, "Heat transfer performance of a newly developed ice slurry generator : A comparative study", *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 1, No. 2, pp. 147-157.
3. M. B. Lakhdar, R. Cerecero, G. Alvarez, J. Guilpart, D. Flick and A. Lallemand, 2005, "Heat transfer with freezing in a scraped surface heat exchanger", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 25, No. 1, pp. 45-60.
4. M. J. Wang, T. M. Hansen, M. Kauffeld, K. G. Christensen and V. Goldstein, 1999, "Application of ice slurry technology in fishery", *Proceedings of the 20th International Congress of Refrigeration IIF/IIR*, Vol. IV, paper 569.
5. J. Paul, 2002, "Innovative applications of pumpable ice slurry", Paper given at Institute of Refrigeration, 7 Feb, London, UK.
6. EPS Ltd. <http://www.epsLtd.co.uk/slurryice.htm> (accessed in 2004).
7. H. Li, W. J. Joo and S. K. Jeong, 2010, "Experimental Study for Investigating the Optimum Operating Conditions of a Seawater Ice Machine", *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 14, No. 5, pp. 76-82.
8. J. I. Yoon, C. H. Son, S. K. Heo, M. J. Jeon and T. Y. Jeon, 2016, "Performance Analysis of a Seawater Ice Machine Applied Two-stage vapor compression refrigeration system for Various Refrigerants", *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 20, No. 2, pp. 85-90.