



해수 온도변화에 따른 이중관식 슬러리 제빙기의 특성 분석

Characteristic Analysis of Slurry Ice Maker with a Double Tube according to Sea Water Temperature

공경석* · 김재돌**†
 Kong-Kyung Suk* and Kim-Jae Dol**†

(Received 22 November 2019, Revision received 03 December 2019, Accepted 03 December 2019)

Abstract: In this study, the performance characteristics of sea water slurry ice-maker were analyzed through the basic experiments on the ice-maker system using titanium double pipe evaporator to maintain the freshness of aquatic products. The main results of this study are summarized as follows. Under nominal conditions, the temperature of seawater slurry ice was -2.0°C , with an evaporating temperature of -10.6°C , an IPF of 17%, and COP of the ice maker was 1.66. The daily slurry ice production amount was 637 kg/day at IPF 30%. Within the experimental range, stable operating was possible regardless of the sea water inlet temperature, and it was confirmed that the temperature of the sea water slurry ice was decreased as the sea water inlet temperature decreased. IPF and daily slurry ice production amount were greatly increased as the sea water inlet temperature decreased. It can be seen that as the inlet sea water temperature was decreased, the power consumption of the compressor was decreased and the efficiency of the ice maker was decreased.

Key Words : Sea water, Slurry ice, Ice packing factor, COP

— 기 호 설 명 —

C_p : specific heat [kJ/kg·°C]
 L : latent heat [kJ/kg]
 m : mass flow rate [kg/min]
 P : pressure [desi bar]
 S : salinity [%]
 T : temperature [°C]
 Q : cooling capacity [kW]

W : power consumption [kW]

첨 자

i : initial
 f : final
 fre : freezing point
 sea : sea water
 eva : evaporator

**† 김재돌(ORCID:<https://orcid.org/0000-0001-6438-0303>) : 교수, 동명대학교 냉동공조공학과
 E-mail : Kjd@tu.ac.kr, Tel : 051-629-1682
 *공경석(ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-4813-908X>) : 대학원, 동명대학교 냉동공조공학과

**† Jae-Dol Kim(ORCID:<https://orcid.org/0000-0001-6438-0303>) : Professor, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Tongmyong University.
 E-mail : Kjd@tu.ac.kr, Tel : 051-629-1682
 *Kong-Kyung Suk(ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-4813-908X>) : Graduate student, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Tongmyong University.

1. 서 론

수산물은 축산물에 비해 일반적으로 변질, 부패가 되기 쉽다. 특히, 어패류는 그 조직이 축산물에 비해 수분량이 많고 연하며, 해수중의 각종 부패 미생물과 접촉할 기회도 많다. 또한 가축은 도살장에서 잡아 내장을 뽑아낸 다음 유통되지만 수산물은 어획한 다음 대부분이 부패 미생물이 많이 함유되어 있어 썩기 쉬운 내장과 아가미가 있는 그대로 유통되므로 선도의 저하가 빠르게 진행된다. 또한 수산물은 농산물이나 축산물과 달리 계획생산이 되지 않고, 어획되는 곳과 어기도 한정되어 있을 뿐만 아니라 일시에 많은 양이 어획되기도 한다. 그러므로 선어로서의 신선함과 가공 원료로서의 좋은 선도를 유지하기 위해서는 어획물에 대한 적절하고 효과적인 처리 및 유통방법이 필요하다.

슬러리형 얼음은 유통성을 가지는 얼음물로서 물속에 작은 얼음입자가 섞여 있는 형태이다. 얼음과 물의 비율은 적절히 조절이 가능하여 그 비율을 빙 충전율(Ice Packing Factor : IPF)이라 한다. 얼음 입자의 크기는 매우 작아 접촉면을 증가시켜 냉각속도를 빠르게 할 수 있다. 또한 얼음이 액체와 섞여 있기 때문에 일반 펌프로 수송이 가능하여 취급이 용이하고, 일반 냉각수에 비하여 얼음은 80배의 잠열을 가지기 때문에 많은 냉열을 가진다는 장점이 있다.^{1,4)} 이와 같은 이유로 최근 식품의 보관에 슬러리 얼음을 이용한 연구들도 진행되고 있다.^{5,6)} 그러나 해수 슬러리형 제빙장치는 일본, 프랑스 등에서 개발 보급되고 있지만, 국내에서의 개발은 미미한 실정이다.⁷⁻⁹⁾

본 연구에서는 해수 온도변화에 따라 티타늄 이중관 증발기를 사용하는 슬러리형 제빙장치의 특성을 분석하여 장치 설계에 대한 기초 자료를 얻고자 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

Fig. 1은 슬러리형 해수 제빙 실험 장치의 개략

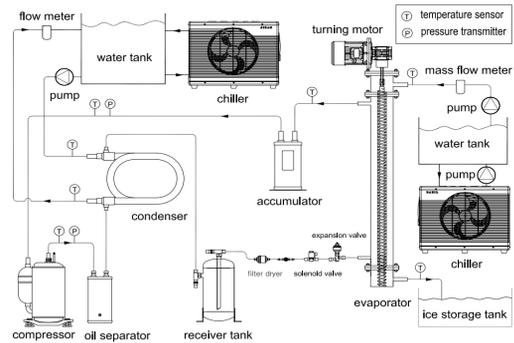


Fig. 1 Schematic diagram of an experimental apparatus



Fig. 2 Photograph of an experimental apparatus

도이며, Fig. 2는 실험 장치의 사진을 나타낸 것이다. 장치에서 냉매는 압축기에서 고온 고압으로 토출되어 냉매와 함께 토출되는 오일을 냉매와 분리하여 압축기로 회수하기 위한 유분리기를 거쳐 수랭식 응축기로 유입된다. 응축기에서 냉매가 가진 열량을 냉각수로 방열하고 냉각되어 냉매는 액화된다. 응축기에서 액화된 냉매액은 수액기로 유입되고, 필터드라이어에서 이물질과 수분을 제거한 후 팽창밸브를 통해 저온 저압의 냉매가 되어 증발기로 유입되게 된다. 팽창밸브를 통과한 냉매는 Fig. 3과 같은 티타늄 이중관 스크래퍼식 증발기로 외부 동관과 내부 티타늄관 사이로 아래

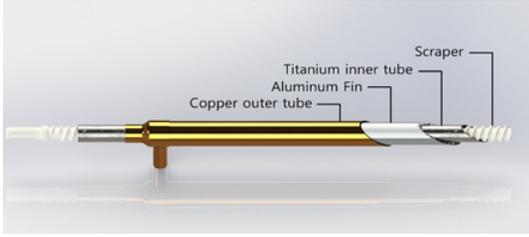


Fig. 3 Schematic diagram of the double tube evaporator using scraper

로부터 공급되도록 하였다. 이때, 냉매는 열교환기 외부를 액으로 채우면서 상부로 유출 되도록 하여 열교환기의 전열면이 냉매액과 최대한 접촉하도록 하여 전열 효율이 증대하도록 하였다.

실험에 사용된 이중관식 증발기는 티타늄 내관의 외경은 31.75 mm, 동 외관의 외경은 47.8 mm이다. 총 증발관의 길이는 1,000 mm이며, 냉매와 직접 접촉하는 유효 전열 길이는 800 mm이다. 증발관 내부에 설치된 회전 스크류 스크래퍼는 외경 29 mm로 내관과 1 mm 정도의 간격이 유지될 수 있도록 하였다. 그리고 냉매 압축기는 1 HP급 로터리 압축기를 사용하였으며, 응축기는 이중관식을 사용하였다. 팽창밸브는 증발기 입구와 출구사이의 과열도가 일정하게 유지되도록 전자식 팽창밸브를 사용하였으며, PID제어를 하였다.

냉각수 유량은 터빈 유량계를 사용하였으며, 증발기로 유입되는 해수는 질량 유량계를 사용하였다. 그리고 Fig. 1에서와 같이 장치 주요기기의 입·출구에는 T-type 열전대와 압력 트랜스미터를 부착하여 냉매 온도와 압력을 측정하였다.

2.2 실험 방법

해수 원수는 원수 탱크에 보관된 해수를 냉각기를 통하여 원하는 일정온도로 유지하였으며, 원하는 온도와 농도로 조성된 후 질량 유량계에서 원수 공급량을 측정된 다음 해수 슬러리 제빙기의 증발기로 이송시켜 제빙을 수행하였다.

응축기에 필요한 냉각수는 냉각수 탱크에 연결된 냉각기를 이용하여 실험에 필요한 온도로 설정하여 제빙기로 공급하였다. 제빙기에서 만들어진 슬러리 얼음은 제빙기 출구에 있는 저빙 탱크

Table 1 Experimental nominal conditions

Parameters	Value	Unit
Initial salinity of sea water	3.0	%
Flow rate of sea water	47	kg/h
Scraper rotation speed	340	rpm
Inlet temperature of sea water	15	°C
Cooling water temperature	32	°C

에 보관하였으며, 원수 해수 탱크와 섞여 원수 해수의 조성과 온도가 변경되지 않도록 하였다.

이와 같은 방법으로 장치가 정상상태가 되면 계측 장비를 이용하여 장치 각부의 온도와 압력을 데이터 수집장치를 이용하여 컴퓨터로 데이터를 처리하였다. 압축기와 회전 모터의 소비전력은 파워메타를 이용하여 측정하였다.

실험은 Table 1과 같은 기준조건에서 각각의 파라미터를 변경함에 따라 특성을 파악하였다.

2.3 데이터 해석 방법

본 연구에서 사용한 해수의 열물성값 계산은 K.G. Nayar등이 제시한 자료⁹⁾를 이용하였으며, 제빙 장치의 성능 파악을 위해 다음과 같은 계산식을 이용하였다.

빙층전율(IPF)은 전체 수용액에 대한 얼음의 비율을 뜻하며, 식 (1)과 같이 M'elinder 등이 제시한 제빙 전·후의 염분 농도를 이용한 IPF 관계식¹⁰⁾으로 나타낼 수 있다.

$$IPF = \frac{S_f - S_i}{S_f} \times 100[\%] \quad (1)$$

여기서, S_f 는 제빙 후 해수 슬러리 얼음의 해수 부분 염분 농도를 나타내며, S_i 는 제빙 전 해수 원수의 염분 농도를 나타낸다.

슬러리형 얼음은 냉각된 해수와 얼음 결정이 섞여있으며, IPF 30% 이상에서는 슬러리 얼음의 유동성이 없어서 펌프로 이송하기 어렵기 때문에 본 연구에서는 IPF 30%를 기준으로 아래와 같이 1일 제빙량(Ton/day)을 환산하여 제빙능력을 평가하였다.

$$ICE = m_{sea} \times \frac{IPF}{30} \quad (2)$$

여기서, m_{sea} 는 해수의 질량 유량을 뜻하며 ICE 는 IPF 30%에서 슬러리 얼음의 제빙량을 나타낸다. 또한 증발기에서 제빙기의 냉동능력은 IPF를 이용하여 식 (3)와 같이 계산하였다.

$$Q_{eva} = m_{sea} \times (C_{p,sea}(T_i - T_{fre}) + \frac{IPF}{100} \times L) \quad (3)$$

여기서, Q_{eva} 는 제빙기의 냉동능력이며, T_i 는 해수 원수의 증발기 입구 온도, T_{fre} 는 슬러리 얼음의 동결점이다. $C_{p,sea}$ 는 해수의 비열이며, L 은 물의 잠열이다. 그리고 제빙기의 성능계수(COP)는 식 (4)와 같이 계산하였다.

$$COP = \frac{Q_{eva}}{W} \quad (4)$$

3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 4는 제빙기의 증발기로 유입되는 해수 원수 입구 온도가 제빙기의 증발온도에 미치는 영향을 나타낸 결과이다. 그림에서와 같이 기준조건(15°C)에서의 증발온도는 -10.6°C를 나타내었으며, 해수 입구 온도가 증가함에 따라 증발 온도도 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 실험 범위 내에서 증발 온도는 -10.2°C에서 -10.9°C 사이로 미미하게 변화되었다.

Fig. 5는 해수 원수 온도에 따른 응축 압력의 변화를 나타낸 것으로 그림에서와 같이 해수 원수 온도가 증가함에 따라서 응축 압력도 증가하는 경향을 나타내었다. 그리고 해수 온도가 변화함에 따라 증발압력과 응축압력의 변화가 발생되고, 원수 온도가 증가함에 따라 증발압력의 상승과 응축압력의 증가로 인하여 Fig. 6에서와 같이 압축기의 소비 동력도 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 7은 원수 입구 온도변화에 따른 IPF를 나타낸 결과이다. 그림에서와 같이 입구 온도가 증가함에 따라 IPF는 감소하는 것으로 나타났다. 이

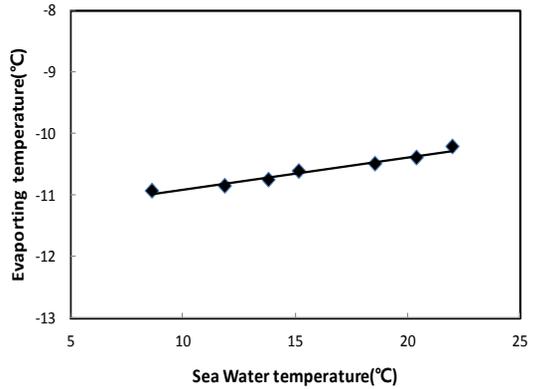


Fig. 4 Influence of sea water temperature on evaporating temperature

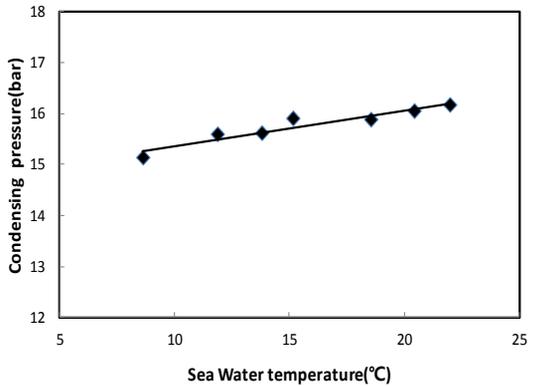


Fig. 5 Influence of sea water temperature on condensing pressure

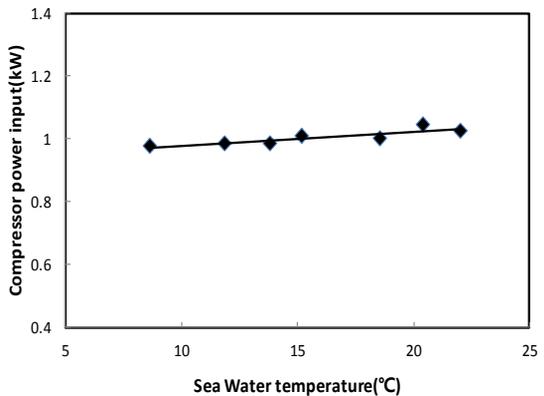


Fig. 6 Influence of seawater temperature on compressor power input

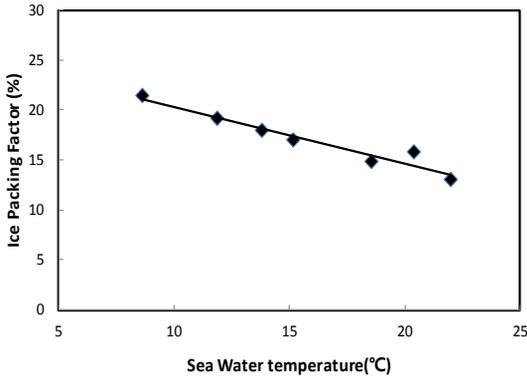


Fig. 7 Influence of sea water temperature on ice packing factor

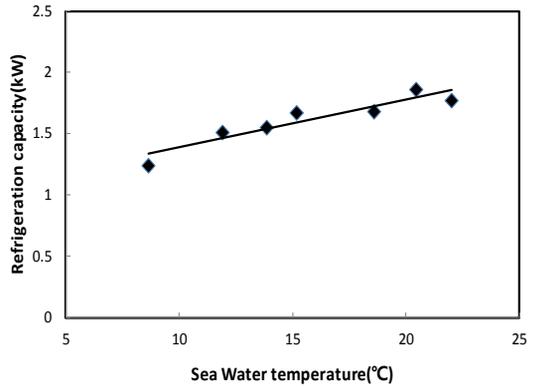


Fig. 8 Influence of seawater temperature on refrigeration capacity

는 해수 입구 온도가 낮을수록 얼음이 형성되기 쉽고, 제빙율이 높아지기 때문에 판단된다.

Fig. 8은 해수 입구 온도변화에 따른 냉동능력을 나타낸 결과이다. 냉동능력은 액상의 물이 고체의 얼음으로 변화는 잠열과 물 온도가 하강하는 현열의 합으로 이루어진다. 그림에서와 같이 입구 온도가 증가할수록 IPF가 감소하여 잠열은 감소하지만 입출구 온도차에 의한 현열은 증가하여 전체 냉동능력은 증가하는 결과를 나타내었다. 기준 조건에서 냉동능력은 약 1.67 kW를 나타내었으며, 실험 범위 내에서는 1.24~1.86 kW로 약 50%의 큰 차이를 나타내었다.

Fig. 9는 냉동능력과 압축일량의 비로 장치의 성능계수(COP)를 나타낸 결과이다. 그림에서와 같이 입구 온도의 증가에 따라 압축일량의 증가는 미미하지만 냉동능력에 지배적인 영향을 받아 성능계수는 증가하는 것으로 나타났다. 기준 조건에서 성능계수는 1.66을 나타내었으며, 실험 범위 내에서는 1.27~1.78까지 변화하였다.

Fig. 10은 IPF 30%기준으로 환산한 하루 제빙량(Ton/day)의 변화를 나타낸 결과이다. 그림에서와 같이 하루 제빙량 역시 IPF와 동일한 경향으로 해수 입구 온도가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다. IPF 30% 기준으로 환산한 하루 제빙량은 기준 조건에서 약 637 kg/day의 제빙량을 나타내었다.

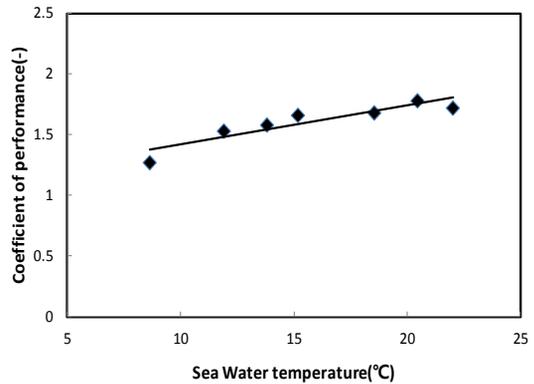


Fig. 9 Influence of seawater temperature on coefficient of performance

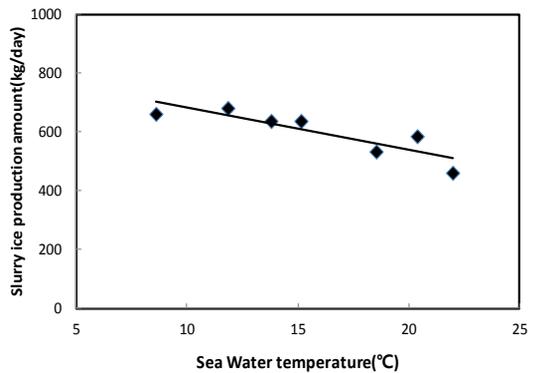


Fig. 10 Influence of seawater temperature on IPF 30% slurry ice production amount

4. 결 론

해수 온도변화에 따른 슬러리 제빙 장치의 성능 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 기준 조건에서 해수 슬러리 온도는 -2.0°C 로 제빙되었으며, 이때 증발 온도는 -10.6°C , 빙충전율(IPF)은 17%, 제빙기의 COP는 1.66이었고, 1일 제빙량은 637 kg/day를 나타내었다.

2) 실험 범위 내에서 해수 입구 온도에 관계없이 안정적인 제빙이 가능하였으며, 입구 온도의 증가는 생산되는 해수 슬러리 온도를 증가시키고, 빙충전율을 감소시키며, 1일 제빙 능력을 크게 감소시키는 것을 확인할 수 있었다.

3) 해수 원수 입구온도의 증가는 장치의 증발온도, 응축온도, 압축기 소비 동력, 냉동능력을 증가시키고, 최종적으로 장치의 성능계수(COP)도 증가시키는 것으로 나타났다. 그러나 빙충전율과 제빙 능력을 감소시키는 것을 확인할 수 있었다.

4) 이상의 실험 결과, 해수 원수 입구 온도의 변화는 장치의 성능특성에 다양한 영향을 미치는 것으로 파악되었으며, 특히 작동 조건에 따라 IPF를 0~20%까지 조정할 수 있어 수산물, 농산물 및 축산물 등의 다양한 상품의 선도 유지에 적용 가능할 것으로 판단되었다.

Author contributions

J. D. Kim; Conceptualization, Writing-review & editing. K. S. Kong; Data curation & investigation.

References

1. M. Kauffeld, M. Kawaji and P. W. Egolf, 2005, "Handbook on Ice slurries - Fundamentals and Engineering", Paris, France: International Institute of Refrigeration.
2. J. I. Yoon, H. K. Lee, M. J. Jeon, C. G. Moon,

- K. H. Choi and C. H. Son, 2018, "Experimental study on the characteristics of a sherbet type seawater ice maker using scraper", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 42 No. 1, pp. 10-15.
(<https://doi.org/10.5916/jkosme.2018.42.1.10>)
3. I. Bellas and S. A. Tassou, 2005, "Present and future applications of ice slurries", International Journal of Refrigeration, Vol. 28, No. 1, pp. 115-121.
4. S. Fukusako, Y. Kozawa and M. Yamada, 1999, "Research and development activities on ice slurries in japan", Second IIR Workshop on Ice Slurries, Switzerland, pp. 83-105.
5. C. G. Moon, 2019, "Field Control Test of Seawater Slush Ice Refrigeration System with Double-tube Evaporators", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 23, No. 2, pp. 56-65.
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2019.23.2.112>)
6. C. G. Moon, 2019, "Economic Analysis and Control Characteristics of Seawater Slurry Refrigeration System for Fishing Vessel", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 23, No. 2, pp. 112-117.
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2019.23.2.112>)
7. C. H. Son, J. I. Yoon, M. J. Jeon, H. K. Lee and S. K. Heo, 2017, "Performance characteristics of two-stage compression seawater ice machine applied drum type evaporator", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 21, No. 2, pp. 77-82.
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2017.21.2.077>)
8. G. W. Park, I. H. Moon, S. J. Cho and M. K. Min, 2000, "Study on the Ice Making Characteristics of Ice slurry maker using scraper", The Society Of Air-Conditioning And Refrigerating Engineers Of Korea Summer Conference, pp. 1109-1114.

9. K. G. Nayar, M. H. Sharqawy, L. D. Banchik and J. H. Lienhard, 2016, "Thermophysical properties of seawater: A review and new correlations that include pressure dependence", *Desalination*, Vol. 390, pp. 1-24.
10. A. Melinder and E. Granryd, 2005, "Using property values of aqueous solutions and ice to estimate ice concentrations and enthalpies of ice slurries", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 28, No. 2, pp. 13-19.