

스크래퍼형 해수 제빙장치의 성능특성에 관한 연구

A Study on the Performance Characteristics of Scraper Type Sea Water Ice Maker

김재돌*†
Jae-Dol Kim*†

(Received 7 May 2021, Revision received 13 October 2021, Accepted 13 October 2021)

Abstract : As a result of understanding the performance characteristics of the device according to the change in the number of rotations of the scraper, the following conclusions were obtained. When the rotation speed of the scraper was changed from 255 rpm to 400 rpm, ice crystals generated on the heat exchange surface in the evaporator were removed thoroughly and the temperature of the slurry ice at the outlet of the evaporator and the evaporation temperature of the apparatus showed a slight change due to the increase in heat transfer efficiency. Within the scope of this experiment, the refrigeration capacity of the device increased slightly as the number of rotations of the scraper increased, but the power consumption of the compressor did not change significantly. Thus, the coefficient of performance of the device was not significantly affected. In addition, it was confirmed that the ice filling rate, the overall heat transfer coefficient of the evaporator and the amount of ice making per day increased due to the increase in heat exchange efficiency as the ice crystal thickness on the surface of the heat exchanger decreased inversely proportional to the number of rotations of the scraper.

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

— 기 호 설 명 —

A : heat transfer area [m^2]
 C_p : specific heat [$kJ/kg \cdot ^\circ C$]
 L : latent heat [kJ/kg]
 m : mass flow rate [kg/min]
 P : pressure [desi bar]
 S : salinity [%]
 T : temperature [$^\circ C$]
 U : overall heat transfer coefficient [$kJ/m^2 \cdot ^\circ C$]

Q : refrigeration capacity [kW]
 W : power consumption [kW]

참 자

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

*† 김재돌(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-6438-0303) :
교수, 동명대학교 냉동공조공학과
E-mail : Kjkd@tu.ac.kr, Tel : 051-629-1682

*† Jae-Dol Kim(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-6438-0303)
: Professor, Department of Refrigeration and Air-Conditioning
Engineering, Tongmyong University.
E-mail : Kjkd@tu.ac.kr, Tel : 051-629-1682

1. 서론

현행 원근해 조업 및 운반 어선들의 어획물 운반 및 저장에 있어서 담수 얼음은 결빙이 큰 얼음을 어선의 어창에 해수와 함께 보관하면 얼음은 수면으로 뜬게 되어 어창 내에서 온도 구배와 농도의 변화가 발생된다. 그리고 결빙이 크고, 날카로워 어체와의 접촉면이 작고, 상처가 발생되어 선도유지뿐만 아니라 품질에도 큰 장애 요인으로 작용하고 있다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 최근 해수 슬러리형 얼음을 이용한 연구가 이루어지고 있다.¹⁾

슬러리형 얼음은 유동성을 가지는 얼음물로서 물속에 작은 얼음 입자가 섞여 있는 형태이다. 얼음과 물의 비율은 적절이 조절이 가능하고, 그 비율을 빙 충전율이(Ice Packing Factor : IPF)라 한다. 슬러리형 얼음은 입자의 크기가 매우 작아 접촉면을 증가시켜 냉각 속도를 빠르게 할 수 있다. 또한 얼음이 물과 섞여 있어 일반 펌프로 수송이 가능하여 취급이 쉽고, 일반 냉각수에 비해 약 80 배의 잠열을 가지기 때문에 많은 냉열을 가지는 이점도 있다.²⁾ 이와 같이 슬러리형 얼음은 잠열과 유동성의 장점으로 빙축열 시스템 적용에 대해 여러 가지 연구가 시도되었고, 최근에는 식품의 보관에 관한 연구들도 진행되고 있다. 특히, 해수 슬러리형 제빙 장치는 일본, 프랑스, 아이슬랜드 등에서 개발 보급되고 있지만, 국내에서의 연구는 미미한 실정이다.³⁾

해수 슬러리형 얼음은 일반적으로 표면 스크래퍼 방식의 제빙을 통해 해수를 연속 슬러리형 얼음으로 제조하고 있다. 그러나 얼음 제조시에 표면을 긁어내는 스크래퍼가 얼음 표면과의 마찰로 인하여 고착되거나, 스크래퍼의 작동 상태에 따라 생산되는 얼음이나 장치의 성능도 영향을 받게 된다. 따라서 본 연구에서는 티타늄 이중관을 이용한 스크래퍼형 해수 슬러리 제빙 장치에서 스크래퍼의 고착 방지와 효율적 제빙이 가능하도록 스크래퍼의 회전수 변화에 따른 장치의 성능특성을 파악하여 장치 설계에 대한 자료를 제공하고자 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

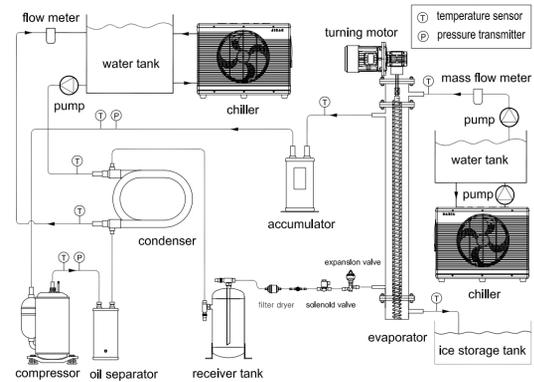


Fig. 1 Schematic diagram of an experimental apparatus

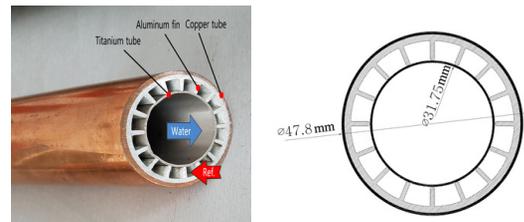


Fig. 2 Schematic diagram of the double tube evaporator

Fig. 1은 본 연구에 사용된 스크래퍼형 해수 슬러리 제빙 장치의 개략도이다.

장치는 증기 압축식 냉동장치인 압축기, 응축기, 증발기 및 팽창장치와 부속기기들로 구성하였다. 장치에서 냉매는 압축기에서 고온 고압으로 토출되어 수랭식 응축기로 유입되고, 냉매가 가진 열량은 냉각수로 방출, 냉각되어 수액기로 유입되며, 필터드라이어를 거쳐 팽창밸브를 통해 증발기로 유입된다.

이때, 증발기는 전열효율 증대를 위해 Fig. 2와 같은 티타늄 이중관식으로 냉매는 외부 동관과 내부 티타늄관 사이 하부로 공급되어 열교환기 외부로 액으로 채우면서 상부로 유출되도록 하였다. 실험에 사용된 증발기 티타늄 내관의 외경은 31.75 mm, 동 외관의 외경은 47.8 mm이다. 총 길

이는 1000 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.

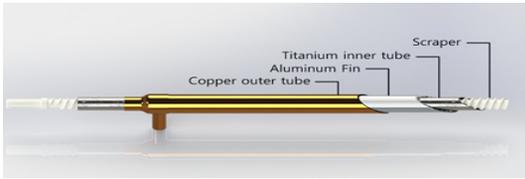


Fig. 3 Schematic diagram of the double tube evaporator using scraper

Fig. 3은 증발기 내관에 스크류형 스크래퍼가 삽입되어 있는 증발기 구조를 나타낸 것으로 상단에는 모터를 통해 스크래퍼를 회전할 수 있는 구조이다. 해수 원수는 증발기 상부에서 공급되어 내관의 벽면에서 얼음 결정이 성장하고, 이것을 스크래퍼가 회전하면서 긁어내면 슬러리형 얼음이 되어 하부로 밀려 나오는 구조이다.

이때, 스크래퍼의 회전수는 상부 모터에 인버터를 부착하여 주파수 변환을 통해 조절할 수 있도록 하였다.

실험에 사용된 냉매 압축기는 1 HP급 로터리 압축기를 사용하였으며, 수랭식 응축기는 해수와 담수를 사용하여 냉매 응축이 가능하고, 부식에 강한 티타늄 소재를 이용한 이중관식을 사용하였다.

팽창밸브는 0~500 step까지 개도 변화가 가능한 전자식으로 PID제어에 의해 증발기 입·출구 과열도가 일정하게 유지되도록 하였다.

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

2.2 실험 방법 및 조건

해수 원수는 원수 탱크에 보관된 해수를 냉각기를 통해 원하는 일정온도로 유지하였으며, 원하는 온도와 농도로 조성된 후 질량 유량계에서 원

Table 1 Experimental nominal conditions

Parameters	Value	Unit
Initial salinity of seawater	3.0	%
Flow rate of seawater	47	kg/h
Scraper rotation speed	255~400	rpm
Inlet temperature of seawater	15	°C
Cooling water temperature	32	°C

수 공급량을 측정된 다음 제빙기의 증발기로 이송시켜 제빙을 수행하였다.

응축기에 필요한 냉각수는 냉각수 탱크에 연결된 냉각기를 이용하여 실험에 필요한 온도로 설정하여 제빙기로 공급하였다. 제빙기에서 만들어진 슬러리형 얼음은 제빙기 출구에 있는 저빙 탱크에 보관하였으며, 원수 해수 탱크와 섞여 원수 해수의 조성 과 온도가 변경되지 않도록 하였다.

이와 같은 방법으로 장치가 정상상태가 되면 계측 장비를 이용하여 장치 각부의 온도와 압력을 데이터 수집 장치로 측정하여 컴퓨터로 처리하였다.

실험은 Table 1과 같은 조건에서 스크래퍼의 회전수를 변경함에 따라 장치의 특성을 파악하였다.

2.3 데이터 해석

본 연구에서 사용한 해수의 열물성 값 계산은 K.G. Nayar 등이 제시한 자료⁴⁾를 이용하였으며, 스크래퍼의 회전수 변화에 따른 장치의 성능특성 분석은 다음과 같은 식들을 사용하였다.

빙 충전율은 전체 수용액에 대한 얼음의 비율로, 식 (1)과 같이 Melinder 등이 제시한 제빙 전·후의 염분 농도를 이용한 관계식^{5,6)}을 이용하였다.

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

슬러리형 얼음은 냉각된 해수와 얼음 결정이 섞여있으며, 빙 충전율에 따라서 제빙량이 달라진다. 본 연구에서는 IPF 30%를 기준으로 1일 제빙량(Ton/day)을 환산하여 식 (2)와 같이 제빙능력을 계산하였다.

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

제빙기의 냉동능력은 해수 원수가 입구에서 출구까지 온도가 변화는 현열과 얼음 결정으로 변경된 잠열의 비로서 IPF를 이용하여 식 (3)과 같이 계산하였다. 그리고 제빙기의 냉동능력과 압축기의 압축일량(W)의 비를 제빙기의 성능계수(COP)라 하며, 식 (4)와 같이 계산하였다. 또한 증발기에서의 총괄열전달계수는 증발열량과 전열면적 및 LMTD를 이용하여 식 (5)와 같이 계산하였다.

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

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

$$U = Q_{eva} / (A \times LMTD) \quad (5)$$

3. 결과 및 고찰

스크래퍼의 회전 속도는 난류 및 와류를 형성하여 상변화를 위한 핵 결정이 쉽게 발생할 수 있도록 하였으며, 얼음이 내측 관 벽면에 붙어 성장하는 시간을 결정하기 때문에 열전달량 및 IPF와 밀접한 관계가 있다.

Fig. 4는 증발기 내 스크래퍼의 회전수가 증발기 출구에서 생성되는 슬러리형 얼음의 온도에 미치는 영향을 나타낸 결과이다. 실험에서 스크래퍼의 회전수는 인버터를 이용하여 255~400 rpm까지 변화시켰으며, 그림에서와 같이 출구 슬러리형 얼음의 온도는 약 -2.03℃에서 -2.15℃ 사이로 약 0.12℃ 정도의 미소한 변화를 나타내었다. 이와 같은 이유는 회전수가 증가함에 따라 증발관 내 벽에 생성되는 얼음 결정이 잘 제거되어 열전달 효율이 증가하기 때문으로 판단된다.

Fig. 5는 동일한 조건에서 압축기 소비동력의 변화를 나타낸 결과이다. 그림에서와 같이 스크래퍼의 회전수 변화에 따라 본 실험범위 내에서 소비동력의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다.

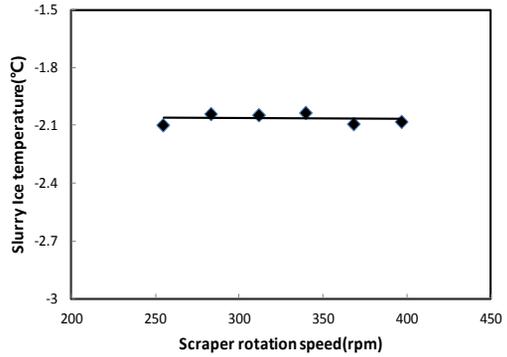


Fig. 4 Influence of scraper rotation speed on slurry ice temperature

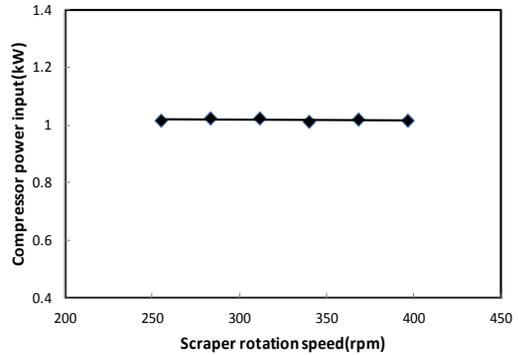


Fig. 5 Influence of scraper rotation speed on compressor power input

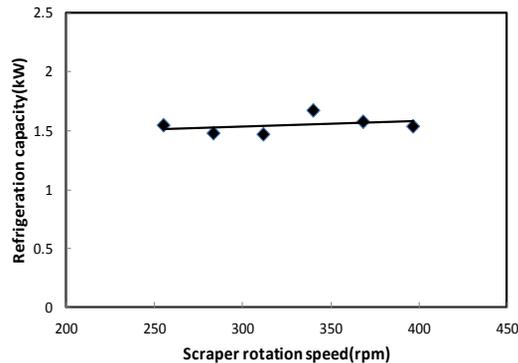


Fig. 6 Influence of scraper rotation speed on refrigeration capacity

Fig. 6은 스크래퍼의 회전수 변화에 따른 냉동능력의 변화를 나타낸 결과이다. 냉동능력은 액상의 물이 고상의 얼음으로 변화는 잠열과 액상의

물 온도가 하강하는 현열의 합으로 이루어진다. 그림에서와 같이 회전수가 증가할수록 냉동능력은 미소하게 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 열교환기 표면에서 스크래퍼의 회전수가 증가하면서 표면의 대류열전달이 증가하기 때문으로 판단된다. 그러나 본 실험범위 내에서 냉동능력의 변화는 미미한 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 7은 냉동능력과 압축일량의 비율로 장치의 성능계수(COP)를 나타낸 결과이다. 회전수가 증가함에 따라 압축일량과 냉각능력의 변화가 미미하여 성능계수도 미소하게 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 스크래퍼 모터 동력까지 고려할 경우, 시스템 전체의 성능계수는 다소 감소할 것으로 판단된다. Fig. 8은 스크래퍼의 회전수 변화에 따른 빙 충전율(IPF)변화를 나타낸 결과이다. 그림에서와 같이 회전수가 증가할수록 빙 충전율은 미소하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 회전수가 증가할수록 열교환기 표면에서의 얼음 결정 두께가 줄어들어 총괄열전달계수가 증가하기 때문으로 판단된다. 그리고 Fig. 9는 스크래퍼의 회전수 증가에 따른 증발기 총괄열전달계수의 변화를 나타낸 결과이다. 회전수가 증가함에 따라 열교환기 표면에서의 얼음 결정 두께 감소에 의해 총괄열전달계수는 증가하였다.

Fig. 10은 빙 충전율 30%시를 기준으로 1일 제빙량의 변화를 나타낸 결과로, 회전수가 증가함에 따라 빙 충전율의 증가로 제빙량도 증가하였다.

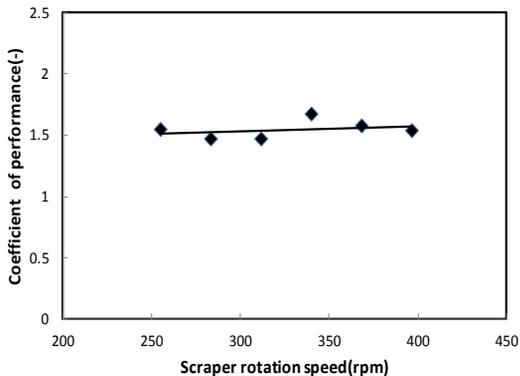


Fig. 7 Influence of scraper rotation speed on coefficient of performance

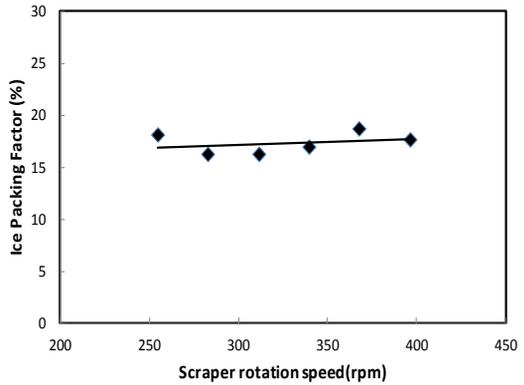


Fig. 8 Influence of scraper rotation speed on ice packing factor

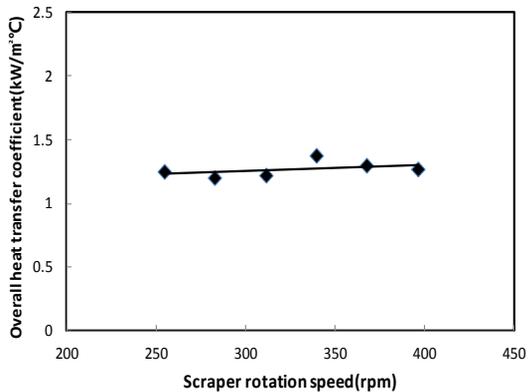


Fig. 9 Influence of scraper rotation speed on overall heat transfer coefficient

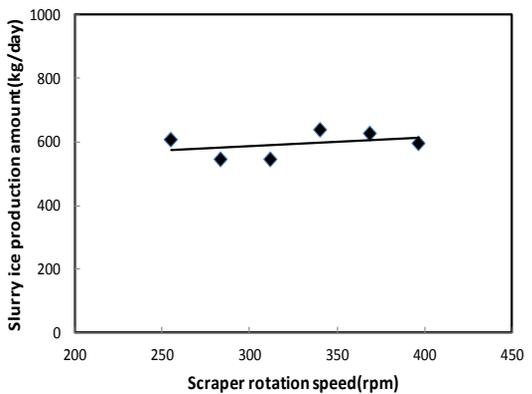


Fig. 10 Influence of scraper rotation speed on slurry ice production amount

4. 결 론

스크래퍼형 해수 슬러리 제빙 장치의 회전수 변화에 따른 장치의 성능특성을 파악한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 스크래퍼의 회전수를 255~400 rpm까지 변화시켰을 때, 증발기 내 열교환 표면에 생성되는 얼음의 결정을 잘 제거하여 열전달률 증가로 인하여 증발기 출구 슬러리 얼음의 온도는 미소한 증가를 나타내었다.

2) 스크래퍼의 회전수 증가에 따라 장치의 냉동 능력은 미소하게 증가하였으나 압축기의 소비동력은 큰 변화가 없어 장치의 성능계수도 큰 영향이 없는 것으로 나타났다.

3) 빙 충전율, 증발기의 총괄열전달계수 및 1일 제빙량은 스크래퍼의 회전수가 증가할수록 열교환기 표면에서의 얼음 결정 두께가 줄어들어 열교환 효율 증대로 인하여 증가하는 것을 알 수 있었다.

4) 이상의 실험 결과, 스크래퍼형 해수 슬러리 제빙 장치에서 스크래퍼의 회전수 변화는 빙 충전율, 총괄열전달계수 및 생산되는 제빙량에 영향을 미치는 요소로 장치 설계 시 고려해야 할 중요 요소로 판단되었다.

후 기

“이 논문은 2020학년도 동명대학교 교내학술연구비 지원에 의하여 연구되었음(과제번호 : 2020A207)”.

References

1. K. S. Kong and J. D. Kim, 2019, "Characteristic analysis of slurry ice maker with a double tube

according to sea water temperature", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 23, No. 6, pp. 88-94.

(DOI:10.9726/kspse.2019.23.6.088)

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.

(DOI: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.

(<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2004.07.009>)

4. K. G. Nayar, M. H. Sharqawy, L. D. Banchik and J. H. Lienhard V, 2016, "Thermophysical properties of seawater: A review and new correlations that include pressure dependence", Desalination, Vol. 390, pp. 1-24.

(<https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.02.024>)

5. 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. 1, pp. 13-19.

(<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2004.07.013>)

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.

(DOI:10.9726/kspse.2019.23.2.112)