

해수 히트펌프를 이용한 냉동법 담수화시스템 개념설계

이호생¹ · 이승원¹ · 윤정인² · 김현주[†]

(원고접수일 : 2010년 11월 21일, 원고수정일 : 2011년 2월 16일, 심사완료일 : 2011년 5월 22일)

Performance Analysis of Freezing Desalination System using Seawater Heat Pump

Ho-Saeng Lee¹ · Seung-Won Lee¹ · Jung-In Yoon² · Hyeon-Ju Kim[†]

요약 : 해수 히트펌프를 이용한 냉동법 담수화시스템의 개발을 위한 시스템 설계 및 성능 해석을 수행하였다. 해수 히트펌프시스템의 열역학적 모델은 냉동사이클을 이용하였고, 이를 해수 담수화시스템에 적용하였다. 응축기의 유입 해수온도 및 증발기의 얼음 생성 비율에 따른 해수 히트펌프 시스템의 성능을 분석하고, 이에 따른 담수 생산량 및 담수 1kg 생산에 대한 소요 에너지 등 냉동법 담수화 시스템의 성능을 비교·분석하였다. 압축기 소요동력 및 응축기 용량은 응축기로 유입되는 해수온도가 감소함에 따라 감소하였다. 담수 1kg 생산에 따른 소요 에너지는 응축기 유입 해수온도가 8°C일 때가 20°C일 때에 비해 약 28.9% 감소하였다.

주제어 : 간접 냉동법 담수화, 히트펌프시스템, 해수 담수화

Abstract: The freeze desalination cycle with seawater heat pump system is simulated and designed for the basic data for the design of freeze desalination system. The basic model of seawater heat pump system is refrigeration cycle and indirect freeze desalination method is used for seawater desalination. The cycle performance of seawater heat pump such as COP, compressor work, condensing capacity was analyzed and the desalination performance such as fresh water productivity and energy per unit fresh water productivity was compared with respect to the seawater temperature of condenser inlet and ice ratio in the evaporator. The compressor work and condensing capacity decreased with respect to the decrease of seawater inlet temperature. The energy per unit fresh water productivity in case of 8°C seawater inlet temperature showed 28.9% lower than that of 20°C.

Key words: Indirect freezing desalination, Heat pump system, Seawater desalination

1. 서 론

유엔 환경 보고서에 따르면 현재 세계 인구 중 3분의 1 정도는 심각한 물 부족 상태에 놓여 있다. 2025년이 되면 거의 모든 국가들이 물 부족을 겪게 되며 그 중 절반의 국가들은 수자원 확보에 위기를 맞을 것으로 예상된다[1]. 우리나라의 경우도 연안 지방에서는 제한적으로 물 부족이 심화될 수

있어 수자원 공급에 대한 국가적 대책 마련이 필요하다. 지구에 존재하는 물의 양은 약 13억 8,500만 km³으로 추정되며 이 중 약 97.5% 이상이 해수로 되어 있으며 담수는 불과 2.5% 정도이다. 이 중에서 지하수를 제외한 인간이 사용할 수 있는 담수는 약 9만 km³에 불과하며, 이는 전 세계 물 총량의 2.5% 밖에 되지 않는 담수 전체량 중에서도

[†] 교신저자(한국해양연구원 해양심층수연구센터, E-mail:hjkim@moeri.re.kr, Tel: 033-630-5000)

1 한국해양연구원 해양구조물·플랜트연구부

2 부경대학교 냉동공조공학과

겨우 0.26%에 불과하다. 이로 인해 물이 절대적으로 부족한 중동이나 아프리카를 비롯한 전 세계 많은 국가들이 물 부족에 대한 대안을 모색하고 있으며, 이 중 가장 현실적이며 기술적인 접근이 바로 해수 담수화이다. 종래 해수담수화 기술은 상변화법이 주류를 이루었지만 1970년대에 막기술이 발전하면서 막분리법을 이용하는 경우가 많아지고 있는 추세이다[2]. 상변화법은 증발법과 냉동법으로 나눌 수 있으며, 증발법은 해수담수화 기술 중 가장 역사가 오래된 기술로서 현재로서도 널리 사용되고 있다[3]. 또한, 냉동법 담수화는 저온에서 이루어지므로 낮은 온도로 인해 시스템의 부식이 최소화되고 스케일이나 침전의 우려가 적다[4]. 냉동법 담수화 기술의 하나인 간접 냉동법은 증기압축식 냉동시스템을 이용하는 것으로 증발기에서 냉매와 해수를 열교환하여 해수를 냉각시켜 수분만 결정으로 만드는 것으로 증기압축식 냉동시스템 대신 해수를 열원으로 하는 히트펌프시스템을 사용하게 되면 해수 냉난방시스템과 연계가 가능하여 냉난방을 수행하는 동시에 냉동법 담수화를 시행하여 담수를 추가적으로 얻을 수 있어 각 시스템의 이용 효율을 향상시킬 수 있다. 이런 해수 히트펌프시스템의 응축기 냉각열원으로 해양표층수를 이용하게 되는데, 해양표층수는 계절적으로 온도가 변화하게 되어 히트펌프시스템의 성능에 영향을 미치게 되고, 그로 인해 냉동법 담수화 시스템에도 영향을 미치게 된다. 이런 냉동법 담수화는 1950년대부터 개념이 도입되었고, 이후 냉동법 담수화를 이용한 시스템 사이클에 대한 연구 [5, 6] 등이 있어왔지만, 전 세계적으로 아직 상용화된 플랜트가 없어 향후 냉동법 담수화시스템을 구성하는 주요 구성기기 및 사이클 성능 개선에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 해수 히트펌프시스템을 이용한 간접식 냉동법 담수화시스템을 모사하여 응축기 유입 해수 온도에 따른 해수 히트펌프 및 냉동법 담수화 사이클의 성능 해석을 수행하고자 한다.

2. 냉동법 담수화

2.1 시스템 개념

해수 히트펌프시스템을 이용한 냉동법 담수화에

대한 개념도를 **Figure 1**에 나타내었다. 그림에서와 같이 해수 히트펌프시스템을 이용한 냉동법 담수화는 크게 해수 히트펌프시스템과 냉동법 담수화 시스템으로 나눌 수 있다. 해수 히트펌프시스템은 해수를 히트펌프시스템의 열원으로 사용하여 운전하고, 이와 동시에 냉동법 담수화시스템을 연계하여 담수를 생산하게 된다. 해수 히트펌프시스템은 해양표층수를 응축기의 냉각열원으로, 해양심층수를 증발기의 가열열원으로 사용하여 운전된다. 증발기에서 해양심층수는 작동유체와 열교환하여 수분이 동결되면서 얼음 알갱이와 농축수 혼합 슬러쉬 형태로 분리기에 유입된다. 분리기에서 얼음과 농축수가 분리되고, 분리된 얼음은 세정기로 유입되어 생산된 담수 일부분을 이용해 얼음 알갱이 표면의 농축수를 세정한다. 세정된 얼음은 열교환기로 유입되어 해수 히트펌프시스템의 응축기에서 열교환하고 나오는 해양표층수와 열교환하여 용해되어 담수가 생성된다. 해수 히트펌프시스템을 이용한 냉동법 담수화 시스템 성능은 열교환기로 유입

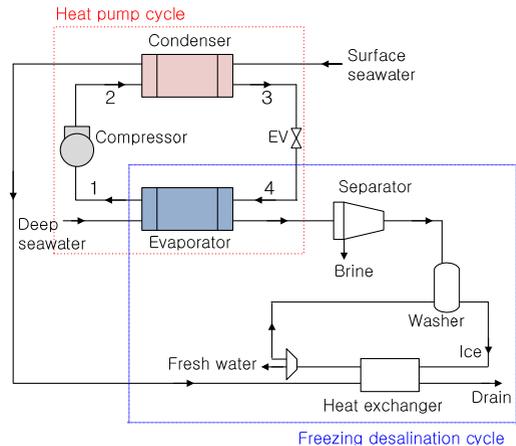


Figure 1: Schematic diagram of freezing desalination cycle with heat pump system

Table 1: Simulated condition

Parameter	Value
Evaporating capacity Q_e (RT)	60
Working fluid (-)	R-134
Isentropic compressor efficiency (%)	75
Heat source ($^{\circ}\text{C}$)	5
Heat sink ($^{\circ}\text{C}$)	8~20
Ice ratio (-)	0.2~0.8

되는 해수의 온도 및 증발기에서 작동유체와 열교환 후 해수 중 생성되는 얼음의 비율 등에 영향을 받게 된다. 따라서 앞에서 언급한 변수 등에 대한 냉동법 담수화 사이클의 성능을 분석하기 위해서 해수 히트펌프 사이클을 EES (Engineering Equation Solver) 프로그램을 이용하여 모사하였고, 기본적인 냉동 사이클을 설계하여 시뮬레이션에 이용하였다. **Table 1**은 사이클 모사를 위한 조건을 나타내고 있다. 해수 히트펌프 사이클의 용량은 60RT, 작동유체는 R-134a, 압축기 효율은 75%, 증발기 유입 해양심층수 온도를 5°C, 응축기 냉각열원으로 유입 해수 온도를 8~20°C, 증발기에서의 얼음 생성 비율을 0.2~0.8로 변화시켜 응축기 해수 유입 온도 및 얼음 생성 비율에 따른 냉동법 담수화 사이클 성능을 비교·분석하였다.

2.2 사이클 분석 및 계산식

해수 히트펌프 사이클에서 증발열량인 Q_e [W]는 아래 식 (1)로 계산할 수 있다.

$$Q_e = m_r (h_4 - h_1) = m_{ew} C_p (T_{sw} - T_{freeze}) + R m_{ew} \gamma \quad (1)$$

여기서, m_r 과 m_{ew} 는 작동유체 및 증발기 유입 해수 순환량 [kg/s]를 나타내며 h_1 와 h_4 는 각각 증발기 입·출구 엔탈피 [kJ/kg]를 나타낸다. C_p 는 비열 [kJ/kgC], T_{sw} , T_{freeze} [°C]는 증발기로 유입되는 해수 입구 온도 및 해수 빙점을 나타낸다. R은 증발기 내 얼음 생성 비율을 나타내고, γ [kJ/kg]는 물의 응고잠열을 나타낸다.

해수 히트펌프 사이클에서 응축열량인 Q_c [W]는 아래 식 (2)로 계산할 수 있다.

$$Q_c = m_r (h_2 - h_3) = m_{cw} C_p \Delta T_c \quad (2)$$

여기서, m_{cw} 는 응축기 유입 해수 순환량 [kg/s]를 나타내며 h_2 와 h_3 은 각각 응축기 입·출구 엔탈피 [kJ/kg], C_p 는 비열 [kJ/kgC], ΔT_c [°C]는 응축기로 유입되는 해수 입·출구 온도차를 나타낸다.

압축기 소요동력 W [W]는 아래 식 (3)으로 계산할 수 있다.

$$W = m_r (h_2 - h_1) \quad (3)$$

여기서, h_1 과 h_2 는 각각 압축기 입·출구 엔탈피 [kJ/kg]를 나타낸다.

해수 히트펌프 사이클 성능 COP는 아래 식 (3)으로 계산할 수 있다.

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

냉동법 담수화를 통해 생성되는 담수량 W_{fw} [t/h]은 아래 식 (5)와 같다.

$$m_{fw} = R m_{ew} \quad (5)$$

냉동법 담수화를 통해 생성되는 담수 1kg에 소요되는 에너지 E_{fw} [kJ/kg]는 아래 식 (6)과 같다.

$$E_{fw} = \frac{W}{R m_{ew}} \quad (6)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 냉동법담수화시스템 성능

Figure 2는 증발기에서의 얼음 생성 비율 및 응축기로 유입되는 해수 온도 변화에 따른 증발기의 허용 가능한 해수량 변화를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 증발기 내 얼음 생성 비율이 증가할수록 증발기에서의 허용 해수량은 감소하고 있다. 이는 고정된 해수 유입온도에 대해 얼음 생성 비율이 증가할수록 해수 중 수분이 얼음으로 상변화하는데 소요되는 에너지가 증가하게 되므로 증발기에서의 허용 가능한 해수량은 감소하게 된다. 증발기로 유

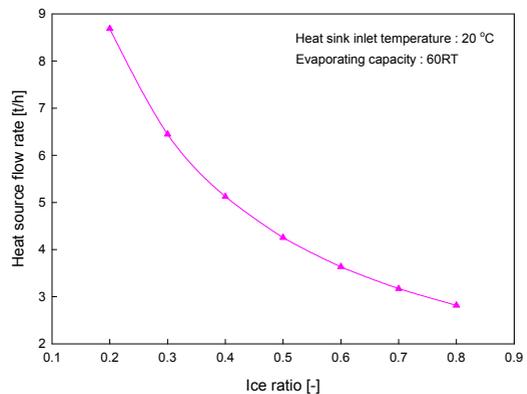


Figure 2: Heat source flow rate

입되는 해수온도가 5℃인 해양심층수인 경우, 20℃인 경우에 비해 증발기에서 허용 가능한 해수량은 평균 약 28.9% 높은 값을 나타내어 더 많은 양을 담수화할 수 있음을 알 수 있다.

Figure 3은 증발기에서의 얼음 생성 비율 및 응축기로 유입되는 해수 온도 변화에 따른 생성 담수량을 나타내고 있다. 그림에서와 같이 얼음 생성 비율이 증가할수록 증발기에서의 생성 담수량은 증가하고 있다. 얼음 생성 비율이 0.8일 경우가 0.2일 때에 비해 생성 담수량은 약 29.7% 증가하였다.

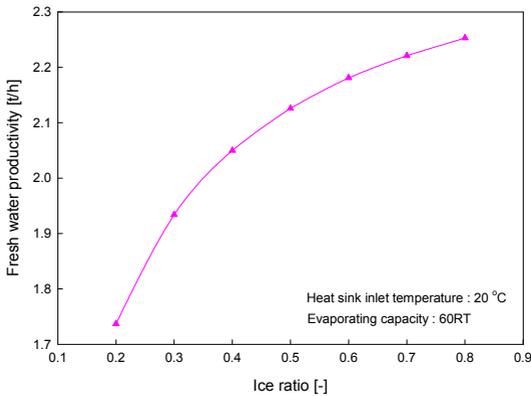


Figure 3: Fresh water productivity

Figure 4는 증발기에서의 얼음 생성 비율 및 응축기로 유입되는 해수 온도 변화에 따른 담수 1kg 생성에 따른 소요 에너지를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 응축기로 유입되는 해수온도가 감소할수록, 얼음 생성 비율이 증가할수록 담수 1kg 생성에 필요한 소요 에너지는 감소하였다. 이는 응축기로 유입되는 해수온도가 감소할수록 해수 히트펌프시스템의 성능이 상승하게 되고 그로 인해 냉동법 담수화 시스템에서의 소요 에너지를 줄일 수 있게 됨을 알 수 있다. 해수 유입온도가 8℃인 경우, 20℃에 비해 담수 1kg 생산에 소요되는 에너지는 평균 약 28.9% 감소하였다.

3.2 해수 히트펌프시스템 성능

Figure 5는 응축기 유입 해수 온도 변화에 따른 해수 히트펌프시스템의 압축기 소요동력의 변화를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 응축기 유입

해수 온도가 증가할수록 해수 히트펌프 사이클의 고압이 높아지게 되고, 그로 인해 압축기에서의 비가열 손실이 증가하게 되어 압축기 소요동력이 증가함을 알 수 있다.

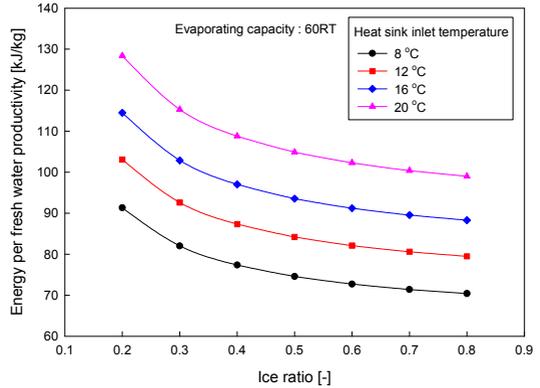


Figure 4: Energy per fresh water productivity

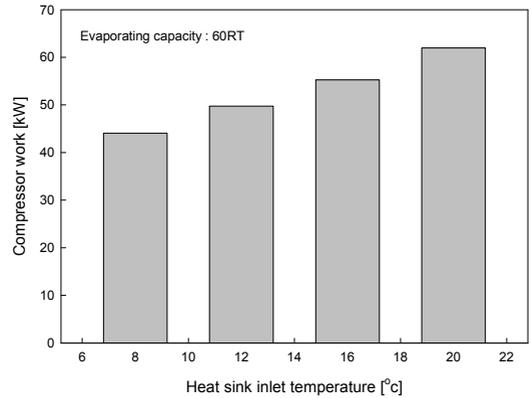


Figure 5: Compressor work variation

Figure 6은 응축기 유입 해수 온도 변화에 따른 해수 히트펌프시스템의 응축기 용량 변화를 나타내고 있다. 얼음 생성 비율은 냉동법 담수화시스템에 영향을 미치게 되고, 해수 히트펌프시스템 측에는 영향을 미치지 않는다. 그림에서와 같이 응축기 유입 해수 온도가 증가할수록 응축기 용량이 증가함을 알 수 있다.

Figure 7은 응축기 유입 해수 온도 변화에 따른 해수 히트펌프시스템의 성능 계수 변화를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 응축기 유입 해수 온도가

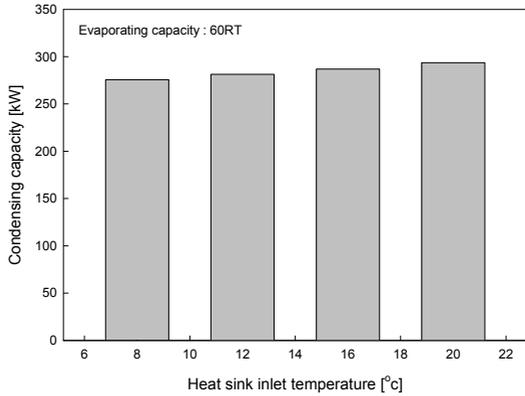


Figure 6: Condensing capacity variation

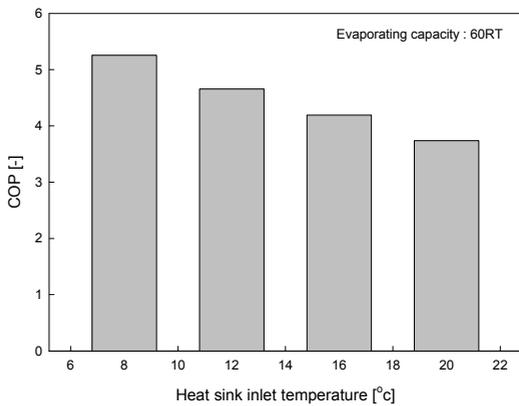


Figure 7: COP variation

감소할수록 압축기에서의 비가열 손실 감소로 인해 해수 히트펌프 사이클의 성능이 증가하였고, 응축기 해수 유입온도가 8°C일 때가 20°C에 비해 약 40.5% 성능이 향상됨을 알 수 있다.

Table 2는 해수 히트펌프시스템을 이용한 냉동법 담수화 시스템의 소요 에너지를 증발법 담수화 방식[2]과 비교한 결과이다. 본 시뮬레이션에서 사용된 냉동법 담수화는 해수히트펌프시스템을 이용하는 것으로, 해수히트펌프시스템이 난방모드로 작동할 때의 냉동법 담수화시스템의 소요 에너지를 계산하였다. 냉동법 담수화는 응축기 냉각열원으로 난방수 45°C, 얼음 생성 비율을 0.5로 가정했을 때, 증발기 가열열원으로 해양심층수 5°C 일 때가 20°C 해수 보다 소요 에너지는 약 24.1% 감소하였고, 해양심층수 이용시 냉동법 담수화는 다중 효

용 방식에 비해 14.6% 에너지를 감소시킬 수 있어 해수 히트펌프시스템을 이용한 냉동법 담수화시스템의 가능성을 보여준다고 할 수 있다.

Table 2: Energy comparison

Classification	Energy (kWh/ton)
Freeze desalination (20°C)	70.9
Freeze desalination (5°C)	53.8
Multi fresh distillation	43
Multiple effect distillation	63

4. 결 론

해수 히트펌프시스템을 이용한 냉동법 담수화 성능을 분석하기 위하여 해수 히트펌프 사이클을 모사하였으며, 응축기 해수유입온도 및 증발기 내 얼음 생성 비율에 따른 성능을 시뮬레이션한 결과 다음의 결론을 얻을 수 있다.

(1) 응축기 유입 해수 온도가 감소할수록 압축기 소요동력 및 응축용량이 감소하였고, 히트펌프 사이클 성능은 증가하였다.

(2) 증발기 내 얼음 생성 비율이 증가할수록 증발기에서의 소요 해수량은 감소하였고, 생성 담수량은 증가하였다.

(3) 응축기 유입 해수온도가 8°C인 경우, 20°C에 비해 담수 1kg 생산에 소요되는 에너지는 평균 약 28.9% 감소하였다.

(4) 냉동법 담수화의 소요 에너지는 다중 효용법에 비해 약 14.6% 낮은 값을 보여 해양심층수를 이용한 냉동법 담수화 시스템의 가능성을 보여주었다.

후 기

본 연구는 국토해양부가 지원하는 “해양심층수의 에너지 이용기술 개발”성과 중 일부이며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

[1] 김인수, 오병수, “물부족 해결을 위한 해수담수화와 물 재이용 기술”, 대한환경공학회지, 제30권, 제12호, pp. 1197-1202, 2008.
 [2] 김현주, 해양심층수의 다목적 개발(I), 한국해

양연구원 보고서, 2001.

- [3] 정형호, “증발법에 의한 해수담수화”, 대한설비 공학회 설비저널, 제37권, 제1호, pp. 40-44, 2008.
- [4] M. S. Rahman and M. Ahmed, “Freezing-melting process and desalination : Review of present status and future prospects”, International Journal of Nuclear Desalination, Vol. 2, No. 3, pp. 253-264, 2007.
- [5] R. D. C. Shone, “The freeze desalination of mine waters”, Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, vol. 87, no. 4, pp. 107-112, 1987.
- [6] A. A. A. Attia, “New proposed system for freeze water desalination using auto reversed R-22 vapor compression heat pump”, Desalination 254, pp. 179-184, 2010.



김현주(金鉉周)

1995년 부경대학교 해양공학과 졸업(공학박사) 2009년 The University of Hawaii, 방문연구원 현재 한국해양연구원 해양심층수연구센터장

저 자 소 개



이호생(李虎生)

2006년 부경대학교 냉동공조공학과 졸업(공학박사) 2007년 The University of Illinois, ACRC, post-doc 현재 한국해양연구원 해양구조물·플랜트연구부 선임연구원



이승원(李昇遠)

2001년 일본북해도대학 생물자원생산학 졸업(농학박사), 현재 한국해양연구원 해양심층수연구센터 전문연구원



윤정인(尹政仁)

1995년 Tokyo Univ. of A&T 졸업(공학박사), 현재 부경대학교 냉동공조공학과 교수, 한국마린엔지니어링학회 편집이사, 한국동력기계공학회 편집이사, 냉동기기의 정밀온도제어 및 초저온 액화사이클 개발 등의 연구에 종사