

R123 열원 적용 증발식 담수 시스템 특성 연구

윤상국*, 곽희열**

*한국해양대학교 기계정보공학부(skyun@hhu.ac.kr),

**한국 에너지 기술연구원(hykwak@kier.re.kr)

Characteristics of Solar Desalination System Using Refrigerant-123 As a Heating Source

Yun, Sang-Kook* Kwak, Hee-Youl**

*Division of Mechanical and Information Engineering, Korea Maritime University(skyun@hhu.ac.kr)

**Korea Institute of Energy Research (KIER), Deajeon Korea(hykwak@kier.re.kr)

Abstract

The evaporative desalination system using solar thermal energy would be the efficient and attractive method to get fresh water from brine due to low carbon dioxide generation. In this research the solar desalination system as a heating source of refrigerant R123 in the evaporator was considered. The circulation of refrigerant in the evaporator can reduce the energy consumption of the system, because of using the latent heat of the refrigerant 123 instead of the sensible heat of present hot water.

The system was comprised of the single-stage fresh water production unit on the capacity of 1ton/day with shell and tube type evaporator, heaters instead of solar collector to supply the proper heat to refrigerant, and refrigerant and brine circulation systems. Various operating flowrate and temperature ranges were varied in the experiments to get the optimum design data. The results showed that the optimum flow rate of brine feed rate to evaporator was 1.2Liter/min, and the yield of fresh water was increased as higher temperature of feed brine.

It was confirmed that the circulation flowrate of heating source of refrigerant was decrease of one fifth of the present warm water system, and very efficient system for solar desalination.

Keywords : 증발식 담수(Evaporative desalination), 태양열(Solar thermal energy), 담수(Fresh water), 냉매 R123(Refrigerant R123), 주입 해수온도(Feed brine temperature)

1. 서 론

우리나라를 포함하여 지구상의 수많은 국가

들이 물이 부족한 여건에 있다. 우리나라 경우 서남해안의 도서지방에서 갈수기에 식수와 생활 용수의 부족 그리고 일부 지역은 공업용수의

부족을 겪고 있다. 외국은 특히 중동지역 국가들을 중심으로 다수의 대형 담수설비가 건설되어 있으며 2002년 이후 담수설비 증가에 따른 세계 담수생산량은 매년 $3.0 \times 10^6 \text{m}^3/\text{day}$ 정도 증가하고 있다.[1]

이러한 담수를 생산하는 방식으로는 증발법과 역삼투압법이 적용되고 있으며, 이들 중에서 증발법이 중동지역의 75%를 차지할 정도로 널리 적용되고 있다. 그러나 이 증발법은 해수를 증발시켜 물을 얻는 방식으로 대량의 담수의 생산이 가능한 반면 생산에 필요한 다량의 에너지가 요구된다. 이 담수 생산에 필요한 에너지량을 줄이고 탄소배출량을 효과적으로 감소시킬 수 있는 효과를 얻을 수 있는 방법으로는 자연에너지인 태양열을 이용하는 방법이나 산업공정의 폐기되는 열을 적용하는 방법이 있다.[2]~[6]

태양열이나 산업 폐기열을 담수제조에 이용할 수 있는 설비규모는 수만톤급 설비에는 적용할 수 없겠지만, 중소형 설비 즉 일 50~2,000톤의 담수 용량에 적용할 수 있는 적절한 규모가 된다. 우리나라의 산재한 도서지역이나 리비아 등 중동국가의 해변지역을 중심으로는 대규모 용량설비 보다는 오히려 이러한 태양열을 이용한 중소규모의 담수설비가 활발히 보급될 수 있을 것으로 전망된다.

본 연구는 태양열이용 위성(Satellite)형 소형 담수장치의 개발에 있어서 소요 에너지의 절감과 소형화를 위한 기술로, 본 연구에서는 증발기에 열을 제공하는 물 대신에, 냉매를 적용하여 냉매가 기상에서 액상으로 변화되는 잠열(latent heat)를 사용하는 담수 시스템을 연구하였다.

냉매적용 해수 담수화 시스템의 증발기의 최적 설계를 위하여 담수 생산용량 일 1Ton 규모의 냉매적용 담수시스템을 제작하여 특성을 실험하였다. 증발기는 셀튜브식을 채택하였으며 증발기 내 주입열량변화, 해수 유입유량변화 등에 따른 담수생산량 변화를 실험

함을 통하여 시스템의 특성을 파악하였다.

2. 냉매적용 담수시스템 특징

기존의 증발기 관내 열원수의 물 순환시스템 대신에 냉매를 적용하는 시스템은 열원매체의 순환에 소요되는 동력이 크게 절감되고 설비의 배관경과 길이 등이 감소하는 효율적 시스템을 갖추게 된다. 기존의 증발식 담수기의 증발기의 증발열은 고온수가 지니고 있는 현열 온도차를 이용하여 해수를 증발시키게 된다. 반면, 상변화 잠열을 사용하는 냉매 시스템은 태양열이나 태양열 축열조의 열원에 의하여 냉매가 가열, 기체화되어 증발기에 주입되는 것이다. 증발기에 주입된 냉매기체는 해수를 증발시키고 다시 액화되어 반송된다. 본 연구에서는 상변화 잠열을 이용하는 냉매로 R123을 적용하였다.

냉매 적용 담수시스템의 장점으로는 첫째, 해수의 증발을 위한 열원의 순환동력이 절감된다. 일반 담수기의 열원을 제공하는 물은 태양열 집열부에서 $60 \sim 70^\circ\text{C}$ 로 가열된 후 축열조에 포집되어 진다. 축열조의 열수는 펌프에 의하여 담수기의 증발기에 주입되면서 해수를 증발시키고 10°C 정도로 냉각되어 축열조로 반송되는 물의 현열 온도차를 이용하는 시스템이다. 이때 유량은 통상 담수기 1Ton 생산 용량을 기준할 때 물의 순환유량은 35 L/min 정도로 대용량의 열수가 순환되어 펌프 동력의 소요가 크게 된다. 그러나 본 기술개발인 상변화 냉매인 R123을 적용하는 시스템은 동일한 열량을 기준할 경우 하루 담수 1Ton의 생산을 위한 순환유량 7.27L/min로 21%가 순환된다.

두 번째는 증발기 전열면적이 감소된다. 증발기의 열전달 현상을 보면 기존 담수기는 관 내부로 단상의 액체 즉 물의 흐름 그리고 관 외부는 해수의 비등현상이 발생하게 된다. 반면 상변화 냉매를 적용하는 증발기는 관내부에서 기상에서 액상으로 관내 응축열

전달 그리고 관외는 동일하게 해수의 비등열 전달이 발생하게 된다. 그러므로 냉매적용 시스템은 관내 열전달계수가 증가되어 전열 면적을 크게 감소시킬 수 있게 된다. 증발기 관 내부를 흐르는 냉매는 기상과 액상이 존재하는 2상 흐름으로 열전달계수가 증가하여 R123을 적용하면 전열면적이 기존 열수 순환형에 비하여 20% 정도가 감소하게 된다.

3. 성능실험

3.1 실험장치

특성실험을 위하여 본 연구에서는 하루 1Ton 담수를 생산할 수 있는 용량의 실험 장치를 구축하였다. 장치의 구성을 보면 담수기, 이젝터 펌프, 이젝터, 해수탱크, 냉매탱크, 냉매가열기, Feed 해수탱크 등으로 그림. 1과 같이 구성된다.

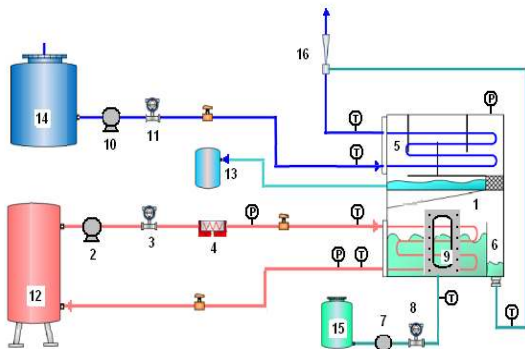


그림 1. Schematic diagram of experimental apparatus

- ① Evaporator, ② Refrigerant pump,
- ③ Mass flowmeter, ④ Heater,
- ⑤ Condenser, ⑥ Overflow port,
- ⑦ Feed brine pump, ⑧ Flowmeter,
- ⑨ Sight glass, ⑩ Sea water pump,
- ⑪ Flowmeter, ⑫ Refrigerant tank,
- ⑬ Fresh water tank, ⑭ Sea water tank.
- ⑮ Feed brine tank, ⑯ Ejector

해수는 해수펌프를 사용하여 바다로부터 직

접 취수하여 해수탱크에 저장한 다음 응축기의 냉각용, 이젝터 펌프용 그리고 증발기의 증발용 해수로 사용하였다. 이젝터용 해수는 이젝터펌프에 의하여 유량 35L/min로 응축기를 거친 후 이젝터로 유입시켜 시스템의 진공을 8kPa로 유지시켰다. 시스템의 진공도를 조절하기 위하여 응축기와 이젝터 사이에 유출관(by-pass)을 설치하여 이젝터 유입 유량을 조절하였다. 증발용 Feed 해수는 가열기를 사용하여 15 ~ 25℃로 가열하여 증발기 내 하부로 주입되었다.

냉매액은 인버터가 부착된 마그네틱 펌프를 사용하여 유량을 조절하였으며 펌핑된 냉매액은 질량유량계를 거쳐 가열기에서 55 ~ 65℃로 가열, 기화되어 담수기의 증발기로 주입되었다. 주입된 냉매증기는 증발기의 관 내부를 흐르면서 관외부의 해수를 증발시키고 자신은 액화되어 냉매탱크로 반송된다. 증발기 관경은 8mm, Cu관으로 전열길이는 총 40m를 적용하였다. 증발기에서 증발된 수증기는 응축기에서 관내를 흐르는 해수에 의하여 관 외부에서 응축된 후 하부에 적하되며, 담수펌프를 사용하여 포집하였다. 응축기 배관은 10mm 외경, 0.7T의 두께 백동관을 사용하였다. 이 때 응축기를 흐르는 해수유량은 35L/min이며, 입출구 온도차는 10 ~ 11℃가 된다. 증발기 외부에는 증발현상의 관찰이 용이하고 증발기를 넘쳐(over-flow) 이젝터의 해수에 빨려가는 해수 Feed의 양을 조절할 수 있도록 가시창을 설치하였다.

시스템의 온도측정은 증발기 냉매 입출구, 응축기 해수 입출구, Feed 해수 입구를 T형 열전대를 사용하였고, 압력은 증발기와 냉매 입출구 지점을 압력 Transmitter로 측정하였으며, 모든 측정값은 Data acquisition 장치를 사용하여 실시간 기록하였다.

3.2 실험방법 및 조건

실험방법은 증발법이 진공상태에서 운전되

므로 먼저 이젝터를 통과시켜 시스템의 진공도를 운전압력인 8kPa로 낮춘다. 진공압력에 도달하면 증발기에 증발용 해수를 실험 유량만큼 유입시켜 흐름을 정상적으로 유지시킨다. 냉매 펌프를 가동시켜 냉매를 순환시키면서 전열기로 가열하여 증발기 주입부에서 냉매의 상태가 기체가 유지되도록 조절한다.

이 때 응축기에서 생성되는 담수는 담수펌프를 구동시켜 포집하여 단위 시간당 담수 무게를 측정한다. 측정은 오차를 줄이기 위하여 하나의 조건에 대하여 20분씩 측정을 수회 수행하여 평균하였다.

실험조건으로는 냉매액 유량은 4~10 kg/min, 온도는 가열기에서 기화시켜 포화온도 55~65℃, 게이지 압력 2~3bar로 증발기에 주입한다. 응축기와 이젝터의 해수는 35kg/min으로 일정하게 순환시키며, 증발기에서 증발되는 Feed 해수는 0.5~3.0L/min, 온도 15~25℃로 주입하였다.

4. 실험결과

4.1 Orifice 유무에 따른 담수 생성량

증발기에 유입된 증발용 해수는 50~70% 정도가 증발하고, 잔여 해수는 증발기 후측의 격막(baffle) 상부로 Over-flow되어 이젝터로 빨려 나가게 된다. 이 넘치는 해수는 격막 후면의 체류공간에서 증발이 추가로 발생하게 된다. 그러나 증발기 해수 Feed 유량이 적게 되면 Over-flow된 해수는 체류하지 못하고 Over-flow 즉시 이젝터로 모두 빨려 나가는 현상이 발생하게 된다. 이로 인하여 추가적인 증발효과의 감소뿐만 아니라 증발된 수증기 일부가 이젝터로 같이 배출되어 담수생성량을 감소시키게 된다.

그러므로 Over-flow된 해수가 체류할 수 있도록 이젝터 전 해수 배출구에 5mm 구경의 Orifice를 설치하여 Orifice 유무에 따른 담수량 비교 실험을 수행하였다.

증발기에서 증발되지 않고 Over-flow된 해수는 증발기의 압력과 온도 조건과 동일한 증발 포화상태로 Orifice가 설치됨으로 인하여 체류시간이 증가하여 이젝터로 배출 전까지 증발이 추가로 발생하게 된다.

오리피스구의 구경은 5mm를 적용하였으며 그림. 2는 Orifice 채용 전후 Feed 유량의 변화에 따른 담수량 비교를 보여준다. 해수유입량은 0.5~1.5 L/min로 변화시키면서 담수생성량을 측정하였으며 유입해수의 온도는 25℃, 주입 냉매 포화온도 Tri는 55℃로 하였다. Orifice 적용 후 담수량이 16% 증가를 나타냈으며 이는 이젝터로 배출되는 증발 증기를 차단하기 때문으로 판단된다.

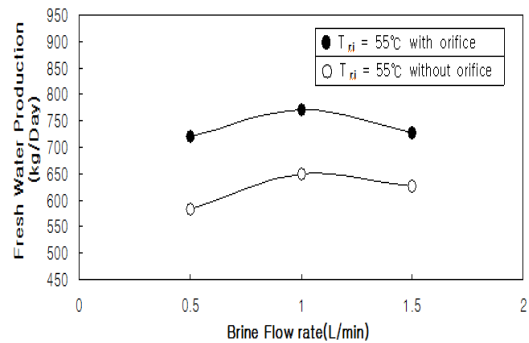


그림 2. Fresh water production with the overflow orifice

4.2 증발기 해수 주입량에 따른 담수 생성량

그림. 3은 증발기에 주입되는 Feed 해수의 유량 변화에 따른 담수 생성량 실험을 결과를 보여준다. 해수유입량은 0.5~3 L/min로 변화시키면서 담수생성량을 측정하였으며 유입해수의 온도는 25℃로 하였다. 또한 증발기입구 냉매 포화온도는 55℃, 60℃ 경우를 실험하였다.

냉매 포화온도가 55℃일 때 담수생성량이 제일 큰 경우는 해수 유입량이 1L/min일 때로 772kg/D가 얻어졌고, 냉매 포화온도가 60℃일 경우 담수 생성량이 814kg/D로 증가하였다. 냉매 유량이 1L/min보다 적거나 증가하면 담

수 생성량이 감소하는 것으로 나타났다. 그 이유는 해수 Feed량이 적으면 증발기 외벽에 접촉하는 해수량이 감소하여 담수생성량이 줄어들며, Feed 량이 과다한 경우에는 해수의 유입온도에서 증발온도까지의 현열량이 증가하기 때문이다.

그림. 4는 해수 Feed량에 따른 담수생성량을 보다 정밀하게 측정하기 위하여 주입 유량을 0.5 ~ 1.5L/min으로 변화시키면서 실험한 결과이다. 해수 Feed량이 1.2 L/min 일 때 최대 810kg/D의 담수량이 얻어졌다. 담수 수율이 낮은 이유는 벽면의 열손실 때문으로 분석된다.

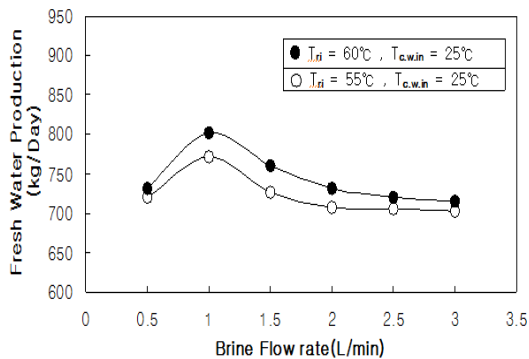


그림 3. Fresh water production with brine flow rate of 0.5 ~ 3.5L/min

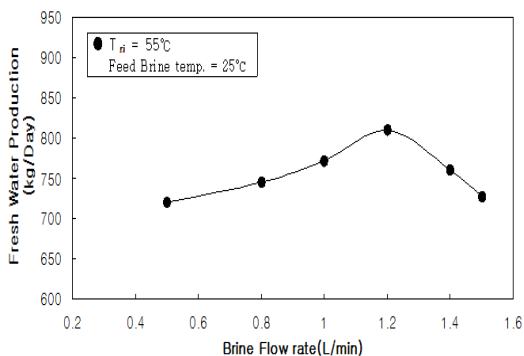


Fig 4. Fresh water production with brine flow rate of 0.5 ~ 1.5L/min

4.3 증발기입구 냉매온도에 따른 담수량

그림. 5는 증발기에 주입되는 냉매증기의

열량에 따른 담수생성량의 실험 결과이다. Feed 해수 유량은 1.2 L/min, 온도는 25°C이며, 냉매의 유량은 10kg/min이었다. 최대 담수생성량은 온도 75°C에서 860 kg/D이었다. 결과를 보면 주입 열량이 증가할수록 담수량이 증가함을 나타내나 온도의 증가율에 비하여 담수량의 증가율이 적은 것은 냉매의 현열에너지가 작기 때문인 것으로 보인다. 즉, 55°C에서 포화기체로 주입되어 증발기에서 사용되는 에너지량은 냉매가 액체에서 기체로 변환되는 잠열이며, 65°C로 주입되는 열량은 55°C까지의 잠열에 10°C에 해당하는 현열량 만큼이 증가하기 때문이다.

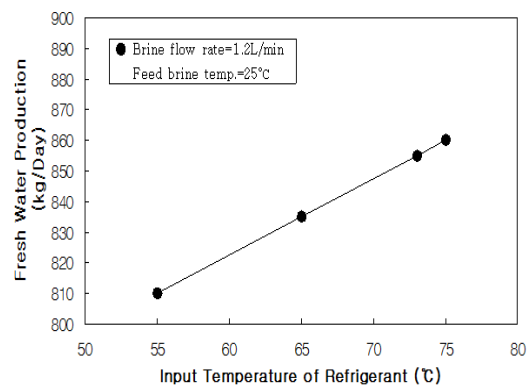


그림 5. Fresh water production with refrigerant temperature

4.4 증발기 해수 유입온도에 따른 담수량

그림. 6은 증발기에 주입되는 해수의 온도에 따른 담수 생성량을 나타낸다. 가열원인 냉매온도는 55°C, 진공압은 8kPa, Feed 해수 유량은 1.0L/min, 1.2L/min, 1.5L/min의 결과로, 해수 유입량이 1.2L/min일 때 그리고 해수 유입온도가 높을수록 담수생성량이 증가하여 최대 담수생성량은 912 kg/D이 되었다. 해수 유입온도가 낮을 때 담수 생성량이 적은 것은 진공도 8kPa일 때 증발온도가 41.5°C이기 때문에 온도가 낮은 경우는 증발온도까지 가열이 되기 위한 현열이 소요되기 때문인 것으로 판단된다.

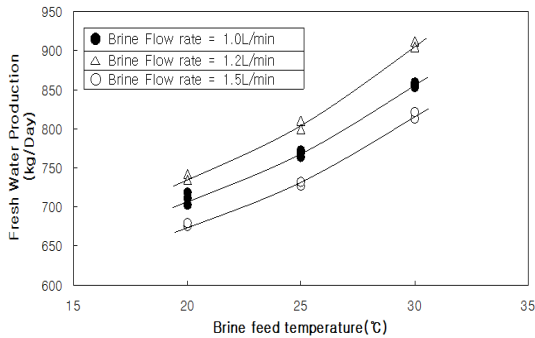


그림 6. Fresh water production with brine feed temperature

그림. 7은 Feed 해수 유량과 온도에 따른 증발기의 총괄전열계수이다. 총괄전열계수의 값은 관내 응축 열전달계수와 관외 비등 열전달계수를 포함한 값으로 Feed 해수유량 1.2L/min 그리고 Feed 해수온도가 높을수록 증가하였다.

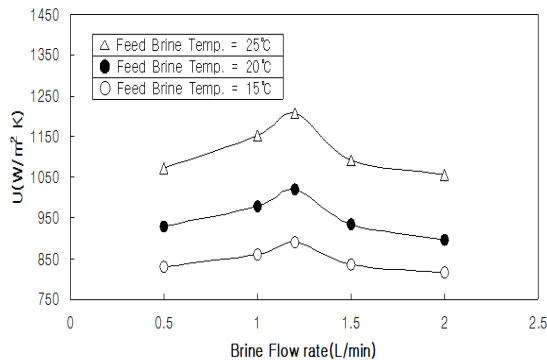


그림 7. Overall heat transfer coefficient of evaporator with feed brine flow rate

5. 결 론

본 연구에서는 증발식 담수시스템의 열원으로 온수 대신에 냉매 R123을 적용함으로써 온수 순환량과 동력을 절감하고자 냉매적용 시스템 특성 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 냉매가 열원인 증발기의 순환량은 온수 시스템의 20% 정도로 열원을 제공할 수

있었다.

- (2) 증발기에 주입되는 해수 유량이 1.2L/min 일 때 최대의 담수량이 생성되었다.
- (3) 증발기의 총괄열전달계수는 Feed 해수유량 1.2L/min 그리고 Feeds 해수 온도가 높을수록 증가하였다.

본 특성 실험결과는 증발식 담수장치에 냉매를 적용하는 시스템 설계의 기본 데이터를 제공하게 될 것이다. 향후 본 연구에 추가하여 R141b 냉매를 적용한 담수생성 특성 연구를 수행하고자 한다.

참 고 문 헌

1. 2006, "The 19th IDA Worldwide Desalting Plant Inventory", Media analytics lfd.
2. 광희열, 태양에너지 해수담수화시스템 운전 성능, 한국태양에너지학회 2009년도 춘계 학술대회 논문집, pp.250-255, 2009.
3. Lundstorm J.E., Water Desalting by Solar Power, Desalination, 31, pp.469-488, 1979.
4. Porteous A., Saline Water Distillation Process, Longman, London, 1975.
5. Kreith F., Cas실 J.N., Wyman C.E., An Overview of intermediate temperature solarCollector and Energy Storage Technology, 6th Int. Heat Transfer Conf., Canada, Vol. 6, pp.255-268, 1978.
6. Fenton G.G., Design Requirements for Solar Powered Desalination, Proc. 7th Int. Symp. on Fresh Water from the Sea, Amsterdam, Vol.2, pp.389-398, 1980.