

태양열 해수담수화를 위한 증발식 다중효용 담수기 성능평가

주홍진*, 곽희열**

*인하대학교 기계공학과 대학원(joo@kier.re.kr),

**한국에너지기술연구원(hykwak@kier.re.kr)

Performance Evaluation of Multi Effect Distillation for Solar Thermal Desalination

Joo Hong-Jin*, Kwak, Hee-Youl**

*Dept. of Mechanical Eng., Graduate School, In-Ha University(joo@kier.re.kr),

**Solar Thermal Research Center, Korea Institute of Energy Research(hykwak@kier.re.kr)

Abstract

This study was accomplished to evaluate the performance of Multi Effect Distillation(MED) for solar thermal desalination system. It was designed Multi effect distillation with 3m³/day capacity and Shell&Tube type heat exchanger. Also, The effective heat transfer of Shell&Tube heat exchanger was used Cu(90%)-Ni(10%) corrugated tube.

The parameters relating to the performance of Multi Effect Distillation are known as hot water flow rate. The experimental conditions for each parameters were 18 °C for sea water inlet temperature, 6m³/hour sea water inlet volume flow rate, 75 °C for hot water inlet temperature, 2.4, 3.6, and 4.8 m³/hour for hot water inlet volume flow rate, respectively.

The results are as follows, Development for Multi effect distillation was required about 40kW heat and 35kW cooling source to produce 3m³/day of fresh water. And, Performance ratio of Development Multi effect distillation was about 2.0191.

Keywords : 해수담수화(Seawater Desalination), 다중효용(Multi Effect Distillation), PR(Performance Ratio), GOR(Gained Output Ratio), 태양에너지(Solar Energy), 담수(Fresh Water)

기 호 설 명			
		Q	: 가열열량 (kW)
		L_T	: 증발잠열 (kJ/kg)
		C_p	: 비열 (kJ/kg °C)
		\dot{m}	: 가열유량 (kg/s)
GOR	: Gained Output Ratio	T_i	: 가열수 입구 온도 (°C)
PR	: Performance Ratio	T_o	: 가열수 출구 온도 (°C)
M_F	: 담수생산량 (kg/s)		
M_S	: 스팀공급량 (kg/s)		

1. 서 론

현재 세계적으로 인류는 심각한 물 부족 상태에 처해 있으며, 안정적인 수자원 확보를 위한 국가간 물 분쟁도 해가 갈수록 심각한 양상을 보이고 있다. 이러한 물 부족 문제를 해결 할 수 있는 방법으로 가장 대두되는 기술이 해수를 담수로 바꾸는 해수담수화 기술이다.

그러나 현재 가동되고 있는 해수담수화 대부분의 해수담수화 시스템은 화석에너지를 사용하여 해수담수화 시스템에 필요한 열 및 전기에너지를 화석에너지에 전적으로 의존하고 있으며, 이러한 화석에너지의 사용으로 온실가스가 배출될 것이고 온실가스 배출에 의한 기후변화로 물 부족이 더욱 심화 되는 악순환을 되풀이 하고 있는 실정이다.

따라서 세계적으로 해수담수화 공정에 사용되는 에너지를 최소화 시키는 방법들에 관한 많은 연구가 진행되고 있다.¹⁾ 이와 같은 연구 중에 하나로 국내에서 처음으로 물 부족 문제 및 온실가스 배출 문제를 동시에 해결 할 수 있는 방법으로 태양에너지를 이용한 해수담수화 시스템이 2005년 한국에너지기술연구원에서 개발되어 현재 제주 월정 기지에서 구동 중에 있다.²⁾

한국에너지기술연구원에서 개발된 태양에너지 해수담수화 시스템은 증발식 담수기를 이용하여 태양으로부터 얻어진 열에너지로 저압 상태에서 해수를 가열하여 증발시키며, 증발된 수증기를 다시 해수를 이용하여 응축시키는 저압증발식 해수담수화 방식이다. 그러나 현재 전 세계적으로 태양에너지 해수담수화 시스템에 적합한 고효율의 중소규모 담수기 개발은 미비한 실정이며 이러한 문제로

인해 선박에서 사용되는 저효율의 증발식 담수기를 사용하여 태양에너지 해수담수화 시스템에서 가장 많은 비용을 차지하는 집열기의 설치 요구 면적이 매우 많아 경제성 확보에 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서는 태양에너지 해수담수화 시스템의 경제성 확보 및 고효율화를 실현하기 위한 태양에너지 해수담수화에 최적화된 3m³/day 용량의 증발식 다중효용 담수기를 개발하여 성능평가를 수행하였다.

2. 증발식 다중효용 담수기 및 실험

2.1 증발식 다중효용 담수기

일반적으로 증발식 다중효용 담수기(MED)의 담수량 및 효율은 담수기의 증발기 단수에 비례한다. 다중효용 담수화 시스템은 증발기를 시리즈로 배열한 형태로 첫 번째 증발기에 열수를 공급하여 저압에서 해수를 증발시키면, 증발된 증기는 다음 증발기의 관내에서 응축되어 담수가 생산되고 동시에 가열원으로 작용하여 증발기 관외부에서는 해수를 증발시킨다. 또한 이 때 발생된 증기는 다시 다음 증발기에 보내져 가열원으로 작용한다. 다중효용 담수기의 증발기 내부압력은 각각의 증발기 단수에 따라 차압을 주어 해수의 비등을 유발한다. 이처럼 다중효용 증발식 담수기는 1단 증발식 담수기와 달리 증발기에서 발생된 증기를 다음단의 가열원으로 사용하여 적은 에너지를 갖고도 많은 양의 담수를 생산 할 수 있는 큰 특징이 있다.

일반적인 MED 담수기의 GOR(Gained Output Ratio)과 PR(Performance Ratio) 값은 식 (1), (2)와 같이 시간당 생산된 담수량을 공급된 스팀량으로 나눈 값으로 나타낸다.³⁾⁴⁾

1) John A, Aliakbar A, Jimmy L, Low-temperature solar-thermal multi-effect evaporation desalination systems, International Journal of Energy Research, Vol. 34, pp. 393~403, 2009. 11.

2) Kwak, H, Y, Joo, H, J, thermal performance of solar desalination system using plate-type fresh water generator, INTA-SEGA, 2009.

3) World Wide Water, Desalination Processes and Energy Consumption

4) Andrew Porteous, et al. Desalination Technology : Development and Practice, 1983, pp59

$$GOR_{(Mass\ Ratio)} = \frac{M_F}{M_S} \quad (1)$$

$$PR = \frac{kg\ of\ distillate}{2326kJ} \quad (2)$$

그러나 본 연구에서 사용된 증발식 다중효용 담수기는 태양에너지를 이용하는 것으로 기존의 스팀을 이용하는 담수화 시스템과 달리 증온수를 사용함으로써 가열수를 통해 공급된 열량으로 나타낸 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$PR = \frac{(M_F)}{\left(\frac{Q}{L_T}\right)} \quad (3)$$

$$Q = \dot{m} \times C_p \times (T_i - T_o) \quad (4)$$

식 (3)에서 L_T 는 물의 증발잠열이고 Q 는 담수 생성에 필요한 가열열량이며, 담수기에 공급 되는 가열수의 입·출구 온도차 및 유량으로 계산되어진다.

2.2 증발식 다중효용 담수기 설계

그림 1은 증발식 다중효용 담수기의 계통도를 나타낸 것이다.

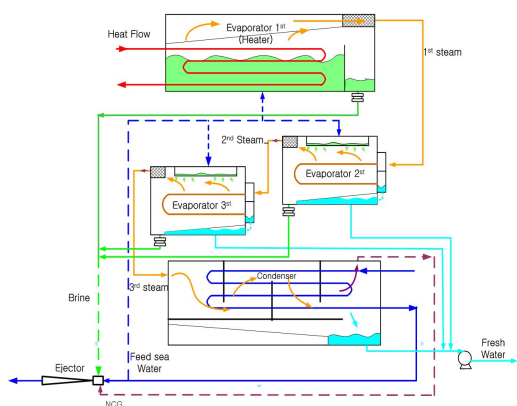


그림 1. 증발식 다중효용 담수기 계통도

본 연구를 통해 설계 및 제작된 증발식 다중효용 담수기의 구성은 1단 증발기(가열기), 2단 증발기, 3단 증발기, 응축기, 이젝터 등으로 크게 구분된다. 1단 증발기(가열기)에서 가열수(이때 사용되는 가열수를 태양에너지를 통해 열에너지를 통해 공급한다.)를 통해 해수를 증발시켜 증기가 발생되면 염분이 포함된 액적은 데미스터에 의해 제거된 후 2단 증발기로 보내진다. 2단 증발기에서 증기는 다시 해수에 의해 응축되어 담수로 바뀌고 해수는 다시 1단 증발기 보다 낮은 압력에서 증발된다. 이러한 과정은 3단 증발기에서도 반복되며 3단 증발기에서 발생된 증기는 응축기에서 모두 응축되고 증발 과정에서 발생된 NCG(Non Condensable Gas)만이 이젝터로 흡입되어 외부로 배출된다. 또한 각단에서 생산된 담수는 각단의 담수탱크에 저장된 후 담수펌프를 통해 공급된다.

표 1. 증발식 다중효용 담수기 사양

	1단	2단	3단
압력(kPa)	19	15	11
포화온도 (°C)	60	55	48
Feed water (LPM)	2	1.8	1.7
현열열량 (kJ/s)	3.91	2.92	1.96
증발잠열 (kJ/s)	38.77	34.89	32.95
담수생산량 (LPM)	0.75	0.68	0.64

표 1은 본 연구를 통해 개발된 증발식 다중효용 담수기의 각단의 상태점을 나타낸 것이다. 각각의 증발기에서 발생하는 증기량은 1단 1kg/min, 2단 0.9kg/min, 3단 0.85kg/min이며, 각단에서 증발과 응축 과정을 거쳐 생산되는 담수량은 불응축 가스와 열교환기의 효율 및 열손실을 포함하여 3m³/day 용량으로 설계 되었다. 증발식 다중효용 담수기의 특성상 증발기 각단의 압력은 단수가 높아질

수록 낮아져야 하는 특성이 있다. 따라서 본 연구를 통해 개발된 증발식 다중효용 담수기의 경우 1단 증발기의 압력은 포화온도 60℃에 해당하는 약 19kPa를 유지하며, 2단 증발기의 압력은 포화온도 55℃ 약 15kPa, 3단 증발기의 압력은 포화온도 48℃ 약 11kPa를 정상상태에서 유지 할 수 있도록 설계되었다.

그림 2는 본 연구를 통해 개발된 증발식 다중효용 담수기를 나타낸 것이다.

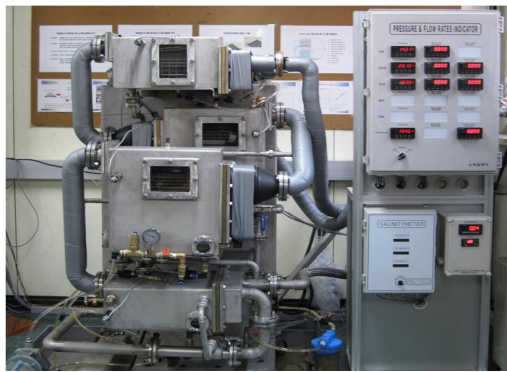


그림 2. 증발식 다중효용 담수기

2.3 실험장치 및 실험방법

실험장치는 이젝터 펌프, 가열수 펌프, 유량계, 냉각기, Demister, 증발기, 응축기로 구성되어 있다. 해수의 온도는 응축기입구와 이젝터 출구에서 가열수의 온도는 증발기 입구와 출구에서 4-Wire RTD를 사용하여 각 지점의 온도를 측정하였다. 해수온도와 유량, 가열수 온도와 유량의 최적화된 조건을 도출하기 위하여 그림 3, 4와 같이 해수담수화 시스템을 구축하였다.



그림 3. Indicator panel



그림. 4 압력센서 및 유량계

해수탱크와 가열수 탱크는 각각 1ton의 저장 능력을 가지고 있고, 해수탱크는 해수의 염도를 일정하기 위하여 개폐식, 가열수 탱크는 열손실을 최소화하기 위하여 밀폐식으로 제작을 하였다. 응축기 및 가열수의 입구 온도를 일정하게 유지하기 위하여 각각 전기히터를 설치하였다. 해수와 가열수의 온도가 실험조건에 도달하면 이젝터 펌프를 가동하여 해수를 응축기로 공급한다. 이젝터에서 토출된 해수는 냉각기를 거쳐 해수 탱크로 유입하여 해수온도를 일정하게 유지하였다. 이젝터 구동으로 담수기 내부압력이 진공상태가 되면 가열수를 증발기로 공급한다. 증발기에서 증발이 시작하게 되면 증기로 인하여 담수기 내부의 압력이 일시적으로 변하게 되지만 일정시간이 지나면 일정압력으로 정상상태가 된다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 담수기 실험결과 및 고찰

실험의 오차를 줄이기 위하여 각단의 압력은 항상 일정한 상태에서 실험을 수행하였으며, 외부의 열손실을 감안하여 담수기의 내부온도를 각각의 실험마다 항상 동일하게 유지시켜 성능 평가를 수행하였다. 증발식 다중효용 담수기는 이젝터 펌프를 통해서 공급되는 해수의 압력, 열교환기에서의 압력손실, 챔버 내부에서 증발되는 증기량, 증발되지 않고 남은 해수량, 증발된 증기량 중에서 응축된 증기량, 응축되지 않고 이젝터로 보내어진 증기량 등과 같이 매우 많은 요소들이 서로 밀접하게 상호 연관되기 때문에 어느 하나라도 오차가 발생되면 담수기의 성능에 영향을 미친다.

따라서 성능평가 실험의 경우 항상 같은 실험 조건하에서 수행되어야 한다. 또한 다중효용 증발식 담수기의 특성상 2, 3단의 가열원이 대기압 이하에서 만들어져 온도가 상대적으로 낮은 증기이기 때문에 담수기 자체에 단열 및 외부 온도에 매우 많은 영향을 받는다. 따라서 본 연구에서는 이러한 실험 오차를 최대한 줄이고자 항상 일정한 실내 온도, 압력 및 담수기 내부의 온도를 일정하게 유지하여 성능을 측정하였다.

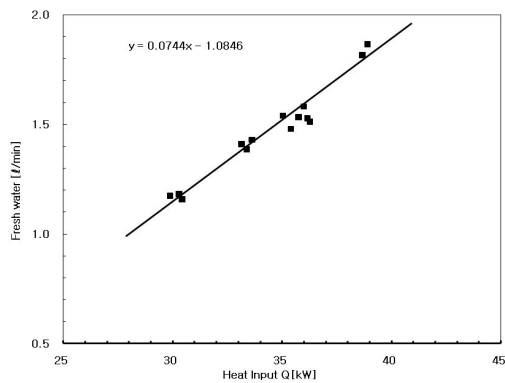


그림 6. 가열열량에 따른 담수 생산량

그림 6은 증발식 다중효용 담수기의 가열열량에 따른 담수 생산량을 나타낸 것이다. 가열 열량에 따른 담수 생산량 분석을 위한 실험조건은 가열수 공급 온도 60℃, 70℃, 80℃ 가열수 유량 각각 40, 60, 80 l/min, 응축수 100 l/min, 응축수 해수 온도 18℃의 실험 조건하에서 반복 실험을 거쳐 진행되었다.

본 연구를 통해 개발된 증발식 다중효용 담수기의 경우 일일 3m³/day의 담수를 생산하기 위해 필요한 가열열량이 약 40kW로 분석되었으며, 가열열량에 따른 담수 생산량 관계식은 $y=0.0744x-1.0846$ 으로 가열열량을 증가 시킬수록 담수 생산량은 거의 선형에 가깝게 증가되는 것으로 나타났다.

개발된 증발식 다중효용 담수기의 가열열량 대비 담수 생산량인 PR값은 평균 2.0191로 나타났으며, 이는 1단 증발식 담수기와 비교하여 동일

한 가열열량을 공급할시 만들어지는 담수량이 최소 약 2배 이상 많이 생산된다는 것을 나타낸다.

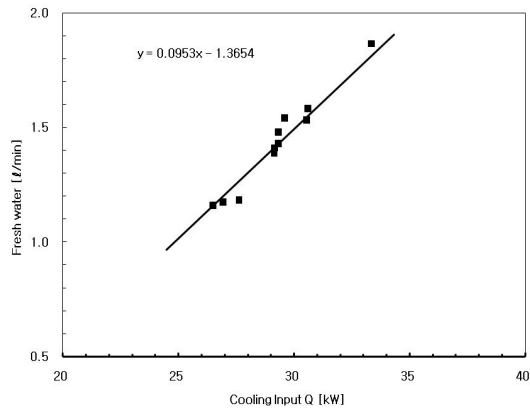


그림 7. 응축열량에 따른 담수 생산량

그림 7은 응축열량에 따른 담수 생산량을 나타낸 것이다. 일반적인 담수기의 응축열량은 증발열량에 비하여 낮은 값을 갖는 것을 알 수 있다. 이는 응축열량의 경우 현열열량 즉 해수의 초기 온도에서 포화온도 까지 높이는 열량을 응축열량에서는 배제시키기 때문이다. 또한 다중효용 담수기의 경우 1단 증발식 담수기와 비교하여 응축열량이 가열열량에 비하여 더 적게나오는 것은 각단의 증발기에 해수가 공급되기 때문에 해수를 포화온도 까지 가열하는 현열량이 많이 필요하며, 각단에서 발생된 스팀 중 마지막 단에서 발생된 스팀만을 응축시키기 때문에 상대적으로 가열열량에 비하여 응축 열량이 적게 필요하다. 본 연구를 통해 제작된 다중효용 담수기의 경우 3단(1단 증발기, 2단 증발기, 3단 증발기)에서 각단의 필요한 현열량은 전체 가열량의 10% 정도이며 1단 담수기(전체 가열량의 5%)에 비해서 약 2배 정도가 많이 사용된다. 실험결과 3m³/day의 담수를 생산하기 위해서 필요한 응축열량은 약 35kW 이내로 가열열량에 비해서 10% 이상 적게 필요하며 응축열량에 따른 담수생산량 관계식은 $y=0.0953x-1.3654$ 으로 분석 되었다.

3.2 집열기 설계를 위한 고찰

다양한 가열수 입구온도 및 유량 조건에서 수행되어 얻어진 가열열량과 담수량에 대한 실험 결과로부터 시간당 1m³의 담수량을 생산하기 위해 사용되는 평균 가열열량은 410.69 kWh/m³으로 평가되어 졌다.

그림 8은 본 연구를 통해 개발된 증발식 다중효용 담수기의 시간당 1m³의 담수량을 얻기 위해 필요한 가열열량을 나타낸 것이다.

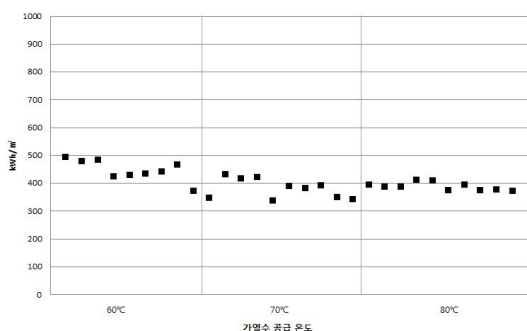


그림 8. 시간당 담수 1m³ 생산을 위한 가열열량

본 연구를 통해 개발된 다중효용 증발식 담수기의 단위 담수량당 에너지를 이용하여 단위 면적당 일사량을 500W/m²로, 집열기 효율은 단일진공관 집열기의 성능시험 결과로부터 약 60%로 고려할 경우 집열기 단위면적에 대한 생산 가능한 담수량은 0.7315 ℓ/hr m²로 분석되며, 이는 미국의 Sandia Lab.에서 태양에너지 담수화 시스템의 기초모델인 Solar Still의 성능인 0.0833~0.122 ℓ/hr m²에 비해 7.13배의 성능을 나타냄을 알 수 있었다. 따라서 본 연구를 통해 개발된 다중효용 담수기를 이용하여 일일 3 m³의 담수를 생산하기 위해 필요한 집열기의 면적은 일사량 500W/m², 집열기 효율 60%, 일일 태양에너지 이용시간을 8시간 기준으로 할 때 약 512m²의 집열면적이 필요한 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 태양에너지 해수담수화 시

스템을 위한 3m³/day 용량의 증발식 다중효용 담수기를 설계 및 제작하였으며, 그에 따른 담수기의 성능 평가를 수행하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- (1) 본 연구를 통해 개발된 증발식 다중효용 담수기는 3m³/day 용량의 담수를 생산하기 위해 필요한 순간 가열열량은 약 40kW가 사용되는 것으로 분석되었으며 개발된 담수기의 PR 값은 평균 2.0191로 나타났다.
- (2) 시간당 1m³의 담수를 생산하기 위해 공급되는 열량은 410.69 kWh/m³으로 분석되었으며, 이는 Solar still에 비하여 약 7.13배 높은 것으로 나타났다.
- (3) 일일 태양에너지 이용시간 8시간 기준 3 m³/day의 담수를 생산하기 위해 필요한 집열기 요구면적은 500W/m²의 일사량, 집열기 효율 60%를 기준으로 약 512m²의 집열기가 필요한 것으로 평가되었다.

참 고 문 헌

1. John A, Aliakbar A, Jimmy L, Low-temperature solar-thermal multi-effect evaporation desalination systems, International Journal of Energy Research, Vol. 34, pp. 393~403, 2009. 11.
2. Kwak, H, Y, Joo, H, J, thermal performance of solar desalination system using plate-type fresh water generator, INTA-SEGA, 2009.
3. <http://www.world-wide-water.com>, Desalination Processes and Energy Consumption
4. Andrew Porteous, et al. Desalination Technology : Development and Practice, Applied Science Publishers, London, 1983, pp59
6. 곽희열, 김정배, 태양에너지 해수담수화 시스템에의 적용을 위한 판형 해수담수기의 열성능에 관한 실험적 연구, 한국태양에너지학회논문집, 2007, Vol. 27, pp 35~41.