

# 태양열 해수담수화 시스템을 위한 다중효용 담수기 개발

주흥진\*, 황인선\*\*, 곽희열\*\*\*

\*인하대학교 기계공학과 대학원(joo@kier.re.kr), \*\*한국에너지기술연구원(ishwang@kier.re.kr),  
\*\*\*한국에너지기술연구원(hykwak@kier.re.kr)

## Development of Multi Effect Distillation for Solar Thermal Seawater Desalination System

Joo, Hong-Jin\* Hwang, In-Seon\*\* 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(ishwang@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 3m<sup>3</sup>/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, 6m<sup>3</sup>/hour sea water inlet volume flow rate, 75 °C for hot water inlet temperature, 2.4, 3.6, and 4.8 m<sup>3</sup>/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 3m<sup>3</sup>/day of fresh water. Based on the results of this study, It makes possible to secure economics of desalination system with solar energy which is basically needed development of high efficiency fresh water generator.

Keywords : 해수담수화(Seawater Desalination), 다중효용(Multi Effect Distillation), 태양에너지(Solar Energy), 담수(Fresh Water)

### 1. 서론

현재 전 세계적으로 인류는 심각한 물 부족

문제를 겪고 있다. 물 부족 문제는 인류의 존재를 위협할 정도의 심각한 문제로 부각되고 있으며 세계 각국에서는 이러한 물 부족 문제

접수일자 : 2010년 9월 16일, 심사완료일자 : 2010년 9월 21일, 게재확정일자 : 2011년 1월 15일  
교신저자 : 곽희열(hykwak@kier.re.kr)

를 해결하기 위하여 엄청난 양의 자금과 인력을 쏟아 붓고 있는 실정이다. 이러한 물 부족 문제를 해결하기 위한 방법 중에 하나로 가장 널리 사용되고 있는 방법은 바닷물을 인간이 사용할 수 있는 담수로 만드는 공정인 해수담수화 공정이라고 할 수 있다.

일반적으로 해수담수화 시스템은 매우 많은 양의 전기 및 열에너지가 해수의 염 제거 공정에 소요된다. 이에 사용된 전기 및 열에너지가 화석연료로부터 얻어진 것이라면 온실가스 배출이 더욱 심화될 것이며, 이에 따른 기후변화는 더 많은 물 부족을 야기시키는 악순환이 계속된다고 할 수 있다. 따라서 전 세계적으로 해수담수화 공정에 사용되는 에너지를 최소화 시키는 방법들에 관한 많은 연구가 진행되고 있다. 이와 같은 연구 중에 하나로 물 부족 문제 및 온실가스 배출 문제를 동시에 해결할 수 있는 방법으로 태양에너지를 이용한 해수담수화 시스템이 2005년 한국에너지기술연구원에서 개발되어 현재 제주 월정 기지에서 구동 중에 있다.

그러나 제주 월정 기지에서 구동중인 태양에너지 해수담수화 시스템은 비교적 담수 생산 효율이 낮은 선박용 증발식 1단 담수기를 사용하여 집열기 설치 요구면적이 많아 태양에너지 해수담수화 시스템의 경제성 확보에 어려움이 있다. 이러한 저효율의 선박용 담수기는 주목적이 선박 엔진의 냉각장치로 사용되어 담수 생산량 대비 열효율이 비교적 낮다. 따라서 이러한 저효율의 담수기를 태양에너지 해수담수화 시스템에 사용할 경우 태양에너지 해수담수화 시스템의 설치비용 중 가장 많은 부분을 차지하는 집열기의 설치 요구면적이 증가하여 태양에너지 해수담수화 시스템의 경제성을 떨어뜨리는 가장 큰 원인이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 태양에너지 해수담수화 시스템의 경제성 확보 및 고효율화를 실현하기 위한 태양에너지 해수담수화 시스템에 최적

화된 3m<sup>3</sup>/day 용량의 다중효용 증발식 담수기를 개발하여 실제 시스템에 적용하기 전에 Pre-Test 통한 성능평가를 수행하였다.

## 2. 증발식 다중효용 담수기 및 실험

### 2.1 증발식 다중효용 담수기

일반적으로 증발식 다중효용 담수기(MED)는 1단 증발식 담수기와 비교하여 이론적으로는 같은 열량을 공급 할 시 생산되는 담수량은 담수기의 증발기 단수에 비례한다. 다중효용 증발식 담수화 시스템은 증발기를 시리즈로 배열한 형태로 첫 번째 증발기에 열수를 공급하여 저압에서 해수를 증발시키면, 증발된 증기는 다음 증발기에서 응축되어 담수가 생산되고 동시에 가열원으로 작용하여 증발기 내부의 해수를 증발시킨다. 또한 이 때 발생된 증기는 다시 다음 증발기에 보내져 가열원으로 작용한다. 이 때 각 증발기의 내부압력을 차례로 낮게 유지하여 저압에서 해수가 비등이 발생한다. 또한 각 증발기에서 발생된 담수의 온도가 상온보다 높기 때문에 유입되는 해수와 열교환 시켜 생산된 담수의 현열을 회수하면 보다 높은 효율의 담수화 설비를 구성할 수 있다. 이처럼 다중효용 증발식 담수기는 1단 증발식 담수기와 달리 증발기에서 발생된 증기를 다음단의 가열원으로 사용하여 적은 에너지를 갖고도 많은 양의 담수를 생산할 수 있는 큰 특징이 있다.

그러나 전 세계적으로 현재까지 개발된 육상용 다중효용 증발식 담수기는 대부분이 대규모(1,000 m<sup>3</sup>/day 이상) 시스템으로 개발되어 있으며 아직까지 육상용 소규모 다중효용 증발식 담수기의 개발은 대규모 담수시스템에 비하여 상대적으로 미미한 실정이다.

또한 현재 개발되어 운영되고 있는 대규모 증발식 담수기의 경우 발전소에서 터빈을 돌리고 남은 스팀을 이용하는 방법이 거의 대부분이며 태양에너지 이용에 최적화된 증발식

다중효용 담수기의 연구 개발은 미미한 상태이다.

대규모 증발식 다중효용 담수 시스템의 경우 설치 면적 및 시스템 비용이 매우 높아 담수 시스템을 설치하는데 많은 어려움이 있으며, 또한 대규모 담수시스템의 경우 많은 양의 열 및 전기에너지가 사용되어 대부분이 발전소와 함께 건설되는 특징이 있어 일반적으로 부하(소규모 인구, 낙도)가 적은 곳에는 설치할 수 없는 단점이 있다.

## 2.2 증발식 다중효용 담수기 설계

본 연구를 통해 개발된 증발식 다중효용 담수기는 일일 3m<sup>3</sup>/day의 용량으로 설계되었다. 그림 1은 증발식 다중효용 담수기의 계통도를 나타낸 것이다.

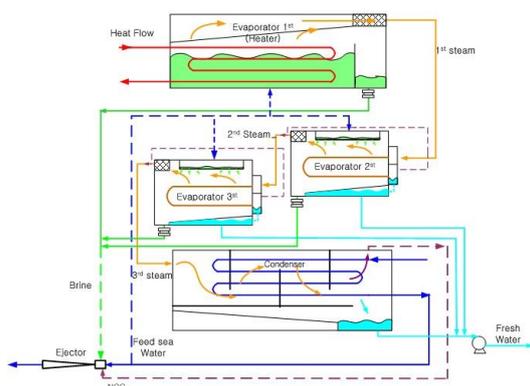


그림 1. 증발식 다중효용 담수기 계통도

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 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 3m<sup>3</sup>/day 용량으로 설계되었다. 증발식 다중효용 담수기의 특성상 증발기 각단의 압력은 단수가 높아질수록 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 유지할 수 있도록 설계되었다.

표 1. 증발식 다중효용 담수기 사양

	1단	2단	3단
압력(kPa)	19	15	11
포화온도(℃)	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

증발식 다중효용 담수기는 각단의 압력차에 따라 발생하는 증기의 온도 및 담수량에 밀접한 관계를 갖고 있으며 압력차가 적을 경

우 온도 차가 적으며, 온도 차가 적을 경우 발생하는 증기량이 적어 생산되는 담수량이 감소한다. 또한 각단의 압력차가 클 경우 각 단에서 발생하는 증기의 양은 증가하나 이젝터의 용량이 커져야 하기 때문에 비용적인 문제가 발생되며, 단수가 증가 할 경우 각단의 압력차를 크게 할 수 없는 문제점이 발생된다. 그림 2는 본 연구를 통해 개발된 증발식 다중효용 담수기를 나타낸 것이다.

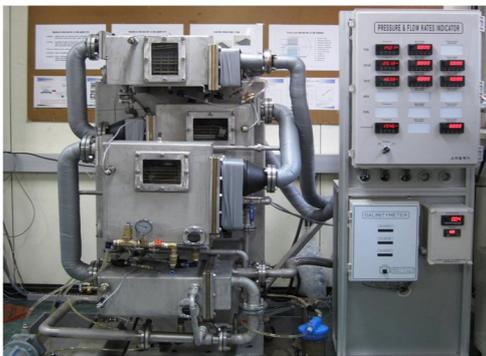


그림 2. 증발식 다중효용 담수기

### 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 전기 히터를 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. 그림 5는 다중효용 증발식 담수기의 성능평가를 수행하기 위해 Labview 프로그램을 이용한 모니터링 화면을 나타낸 것이다.

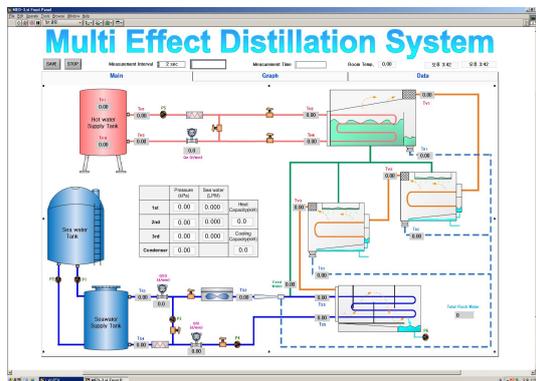


그림 5. 증발식 다중효용 담수기 모니터링

### 3. 실험결과 및 고찰

본 연구를 통해 개발된 증발식 다중효용 담수기의 모든 열교환기는 Shell & Tube Type 열교환기를 사용하였으며 열전달 촉진효과를 위하여 Cu-Ni Corrugated Tube를 사용하였다.

실험의 오차를 줄이기 위하여 각단의 압력은 항상 일정한 상태에서 실험을 수행하였으며, 외부의 열손실을 감안하여 담수기의 내부 온도를 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.

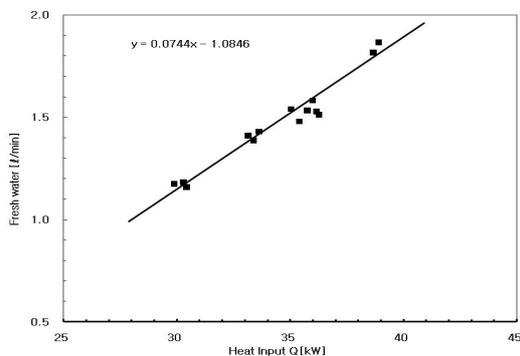


그림 6. 가열열량에 따른 담수 생산량

그림 6은 증발식 다중효용 담수기의 가열 열량에 따른 담수 생산량을 나타낸 것이다. 가열 열량에 따른 담수 생산량 분석을 위한 실험조건은 가열수 공급 온도 75°C, 가열수 유량 각각 40, 60, 80 l/min, 응축수 100 l/min, 응축수 해수 온도 18°C의 실험 조건하에서 반복 실험을 거쳐 진행되었다.

본 연구를 통해 개발된 증발식 다중효용 담수기의 경우 일일 3m<sup>3</sup>/day의 담수를 생산하기 위해 필요한 가열열량이 약 40kW로 분석되었으며, 가열열량에 따른 담수 생산량 관계식은  $y=0.074x-1.0846$ 으로 가열열량을 증가시킬수록 담수 생산량은 거의 선형에 가깝게 증가되는 것으로 나타났다.

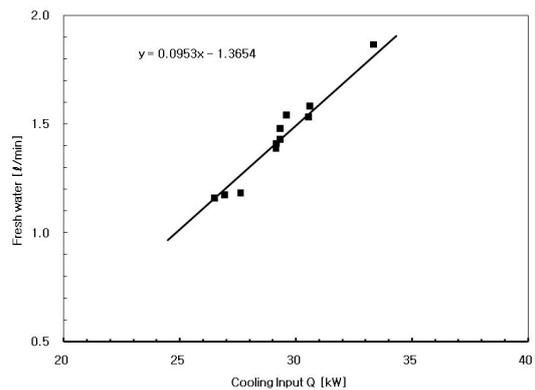


그림 7. 응축열량에 따른 담수 생산량

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 담수기 와 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 응축시키기기 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 3m<sup>3</sup>/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.

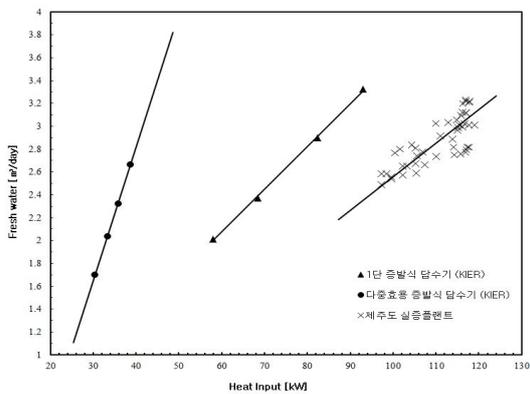


그림 8. 담수기 성능 비교

그림 8은 본 연구를 통해 개발된 증발식 다중효용 담수기, 증발식 1단 담수기 및 제주 월정기지에 설치된 태양에너지 담수화 시스템의 가열열량 대비 담수 생산량을 나타낸 것이다. 그림 8과 같이 가열열량 대비 담수 생산량이 증발식 1단 담수기에 비하여 증발식 다중효용 담수기가 월등히 많은 것을 알 수 있다. 본 연구에서 사용된 제주도 실증 플랜트의 데이터는 단순 가열열량 대비 담수 생산량을 비교한 것으로 열교환기 면적, 가열수 유량, 가열수 입구 온도 등은 고려하지 않은 순수 가열열량 대비 담수량 데이터만을 사용하였다. 그 결과 본 연구를 통해 제작된 증발식 다중효용 담수기의 경우 가열열량 대비 담

수 생산량은 실제 사용되고 있는 제주도 담수화 시스템에 비하여 240% 이상 성능이 향상된 것으로 나타났으며 이러한 결과는 현재 제주도에 설치되어 있는 태양에너지 해수담수화 시스템에 본 연구를 통해 개발된 증발식 다중효용 담수기를 적용할 때 담수 생산량이 240% 이상 증가할 수 있을 것으로 사료된다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 태양에너지 해수담수화 시스템을 위한 3m<sup>3</sup>/day 용량의 증발식 다중효용 담수기를 설계 및 제작하였으며, 그에 따른 담수기의 성능 평가를 수행하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- 본 연구를 통해 개발된 증발식 다중효용 담수기는 3m<sup>3</sup>/day 용량의 담수를 생산하기 위해 필요한 가열열량은 약 40kW가 사용되는 것으로 분석되었으며 이는 현재 제주도에서 운전되고 있는 일단 증발식 담수기와 비교하여 동일한 열량을 공급할 때 담수 생산량은 240% 이상 증가할 것으로 나타났다.
- 본 연구결과를 바탕으로 태양에너지 해수담수화 시스템에 최적화된 고효율의 증발식 다중효용 담수기를 개발함으로써 기존의 태양열 해수담수화 시스템의 가장 큰 문제점이었던 담수기의 성능 문제를 해결할 수 있으며, 따라서 담수기의 고효율화를 통해 집열기 설치 면적의 감소로 태양에너지 해수담수화 시스템의 경제성을 확보 할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 가열수 공급 온도는 일정한 상태에서 가열수 공급 유량 변화 값에 대한 담수량 관계식을 도출하기 위한 실험이며 차후 가열수 공급 온도 및 해수 온도가 담수 생산량에 미치는 영향에 관한 연구가 진행될 예정이다.

## 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. Kwak H, Y, Joo, H, J, Hwang, I, S Thermal performance of single stage shell & tubes (SAT) fresh water generator, INTA-SEGA, 2009.
4. 광희열 외, Evaluation of seasonal performance for single-stage desalination system with solar energy SET2008,
5. Joseph, J, Saravanan, R, and Renganarayanan, S, Studies on a Single-stage Solar Desalination System for Domestic Applications, Desalination, 2004, Vol. 173, pp. 77~82.
6. 광희열, 김정배, 태양에너지 해수담수화 시스템에의 적용을 위한 관형 해수담수기의 열성능에 관한 실험적 연구, 한국태양에너지학회논문집, 2007, Vol. 27, pp 35~41.