

[논문] 한국태양에너지학회 논문집

Journal of the Korean Solar Energy Society

Vol. 27, No. 4, 2007

# 태양에너지 해수담수화시스템에의 적용을 위한 판형 해수담수기의 열성능에 관한 실험적 연구

김정배\*, 곽희열\*\*

\*한국에너지기술연구원 태양열연구센터(doctorkjb@kier.re.kr), \*\*태양열연구센터(hykwak@kier.re.kr)

## Experimental Study on Thermal Performance of Palte-type Fresh Water Generator for applying Solar Energy Desalination System

Kim, Jeongbae\*, Kwak, Hee-Youl\*\*

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

\*\*Solar Thermal Research Center, KIER(hykwak@kier.re.kr)

### Abstract

To demonstrate the desalination system, the demo-plant was scheduled to be installed. The system was planned to use solar thermal collector as heat source and PV as electricity source. For the design of the desalination demonstration system, firstly the solar thermal system would be well designed from the result between the supplied heat into the fresh water generator and the fresh water yield. The generator for demonstration system was chosen as the fresh water generator of the single stage and effect with plate-type heat exchanger using low pressure evaporation method.

The test facility for the tests to reveal the relationship between the fresh water yield and the supplied heat flow rate was designed and manufactured. The maximum fresh water yield of two fresh water generators applied in this study was designed as 1.5 Ton/day. The parameters relating with the performance of fresh water generator are known as sea water inlet temperature, hot water inlet temperature, and hot water flow rate.

Through the experiments, this study firstly showed detail operation characteristics of the generator and designed the solar thermal system for the demonstration system.

**Keywords** : 태양에너지(Solar energy), 진공판형 태양열집열기(Evacuated tubular solar collector), 해수담수(Sea water desalination), 판형해수담수기(Plate type fresh water generator)

접수일자 : 2007년 9월 11일, 심사완료일자:2007년 12월 2일

교신저자 : 김정배(doctorkjb@kier.re.kr)

## 기 호 설 명

$m$	: 증발기 유입 온수 유량 (kg/hr)
$Q_i$	: 증발기 가열열량 (kW)
$T_{hw,in}$	: 가열수 증발기 입구 온도 (°C)
$T_{hw,out}$	: 가열수 증발기 출구 온도 (°C)
$T_{sw,in}$	: 해수 응축기 입구 온도 (°C)

## 1. 서 론

해수를 담수로 만드는 방법에는 역삼투법(RO법, Reverse Osmosis), 냉동법(FP법, Freezing Process) 그리고 증발법 등이 있다.

저압증발법을 이용하는 경우에는 상대적으로 증발속도가 빨라 고성능화를 할 수 있고, 필요한 에너지원의 양에 있어 경제적이므로 최근에 소형으로도 많이 개발 보급되고 있다. 특히, 소형 선박에 적용되는 담수기의 경우에는 대부분이 판형 열교환기를 적용하는 담수기가 많이 보급되고 있는 실정이다.

최순열<sup>1)</sup>은 선박용 셀&튜브 방식의 1 Ton/day의 최대 담수생산량을 가진 담수기를 이용하여, 담수기 내부의 작동압력과 온수 온도를 변화시키면서 담수량 실험을 수행하였다. Joseph et al<sup>2)</sup>은 해수나 오수를 평판형 태양열 집열기를 통과시키면서 직접 가열하고, 진공펌프를 이용하여 저압으로 유지되어지는 증발기 내부로 유동시켜 증발시킨다. 해수나 오수는 저장 탱크에서 집열기로 보내기 전에 응축기에서 증발된 증기와 열교환하여 예열되고, 증기는 응축되어 담수가 생성되어진다. 최대 담수생산량은 8.5 Liter/day이었다. 이러한 운전특성을 가지는 담수시스템을 이용하여, 일사량에 따른 담수량을 평가하였다.

본 연구에서는 태양열을 열원으로, 태양광 셀에 의해 전기에너지를 공급받는 태양에너지 담수화 시스템에 적용하기 위하여, 담수기의 담수 생산 용량이 최대 1.5 Ton/day의 용량으로 설계 및

제작되어진 이젝터와 이젝터 펌프를 이용하는 상용품 판형 방식의 선박용 담수기에 직접 해수를 공급하여 담수량과 관련된 실험인자들에 대한 담수기의 성능평가와 담수기에의 열원 이용을 위하여 필요한 설계를 위한 기초 결과를 제시하기 위하여, 해수의 응축기 입구온도와 유량, 가열수의 증발기 입구온도와 유량의 변화에 따른 실험을 수행하였다.

본 연구의 연구내용과 관련되어지는 많은 기존의 연구결과들이 있으나, 본 연구와 같이 저용량의 담수기 성능을 실험인자별로 분석하여 그 결과를 제시하고 있지는 못하고 있다.

## 2. 실험

### 2.1 담수기 구조 및 운전 특성

판형 열교환 방식의 해수담수기는 그림 1에서와 같이 담수기 내부에 두개의 판형 열교환기가 설치되어 있으며, 분리판에 의해 두개의 공간으로 분리되어 있다. 상부 응축기로의 액체의 유입을 막기 위한 더미스터(Demister)가 설치되어 있으며, 하부의 열교환기는 증발기로 이용된다.

해수는 이젝터 펌프에 의해 응축기로 공급되고, 응축기에서 나오는 해수는 분리판에서 일부는 이젝터로 일부는 증발기로 유입된다. 증발기로 유입되는 해수는 가열수와 열교환하여 일부는 증발하여 증기가 되고 증발되지 못한 일부 해수는 담수기의 바닥에 고이게 된다. 증발된 증기는 응축기에서 응축되고 담수 펌프에 의해 외부로 배출된다. 응축기에서 나와서 이젝터로 분배된 해수와, 증발기에서 증발되지 못하고 담수기 바닥에 고인 해수 그리고 담수기의 상부에서 이젝터로 흡입되어지는 증기가 혼합되어 이젝터를 통과하면서 담수기 내부의 압력이 진공상태를 이루게 된다. 시작품으로 제작된 담수기의 최대 생산 가능한 담수량은 1.5 Ton/day이었다.

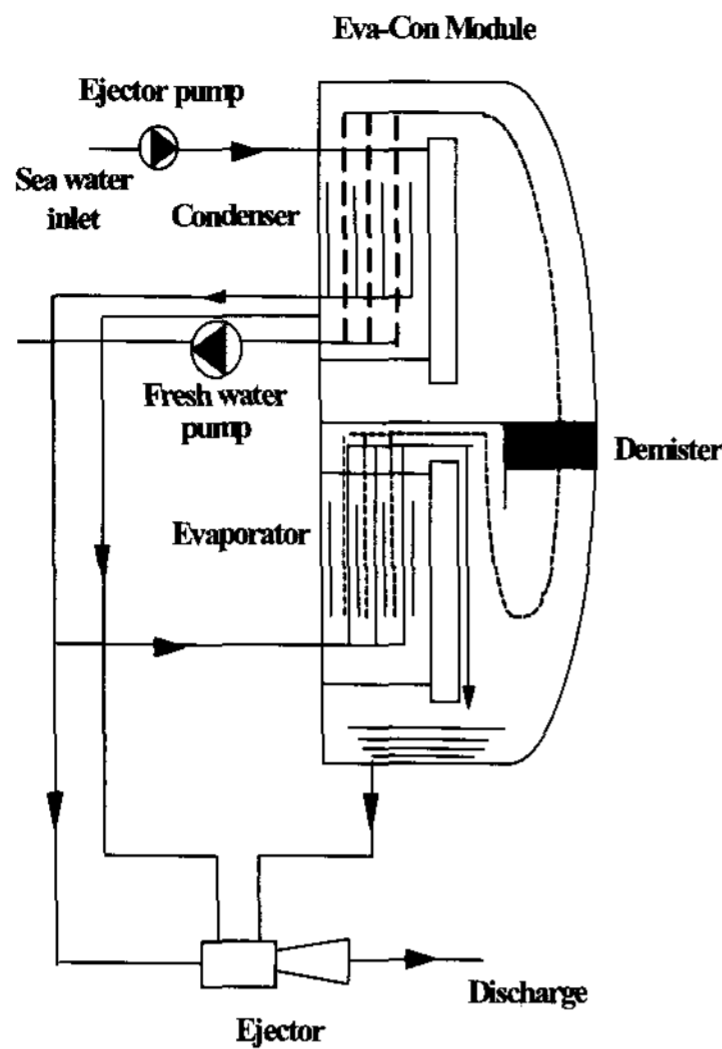


그림 1. 해수담수기의 구조

## 2.2 실험장치 및 실험방법

그림 1의 담수기를 이용하여 응축기 입구 해수 온도와 유량, 증발기 입구 가열수온도와 유량의 다양한 실험조건들에 대하여 담수량을 측정하기 위하여 그림 2와 같은 실험 장치를 구성하였다.

정해진 입구 온도를 맞추기 위하여 해수와 가열수는 각각의 순환루프를 가지고 있다. 해수 탱크와 가열수 탱크는 각각 1 Ton의 저장 능력을 가지고 있고, 해수 탱크는 개폐식으로 가열수 탱크는 밀폐식으로 설치하였다. 해수 측은 탱크의 출구 배관에 10kW 용량의 전기히터를 설치하였고, 가열수 측은 탱크 내부와 출구 배관에 각각 10kW의 전기히터를 설치하였다.

해수와 가열수의 온도가 실험을 위한 설정된 값에 도달하게 되면, 먼저 해수를 이젝터 펌프를 운전하여 담수기의 응축기로 공급하게 된다. 그리고 이젝터에서 토출되는 해수는 다시 공랭식의 방열기를 거쳐 해수 탱크로 보내어지게 된다. 이러한 운전을 통해서 담수기 내부의 압력이 특정 압력의 진공상태에 도달하면, 가열수를 증발기로 공급하게 된다. 이때 담수기 내부의 압력이 변화하게 되는데, 일정 시간(약 1분 정도) 이후에 담수 펌프

를 운전하여 담수를 외부의 담수탱크로 배출하게 된다. 이렇게 하여 일정시간 이후에 담수기 내부는 주어진 실험조건에 해당하는 진공압력으로 정상상태에 운전하게 된다. 정상상태 운전을 확인하고 나서, 저울위에 올려진 담수탱크에 저장되는 담수량의 무게로서 1분 간격으로 하여 5분 동안 담수량의 측정을 수행하게 된다. 정상상태 운전이면 매 1분 마다의 측정 담수량의 차이는 거의 없어야 한다.

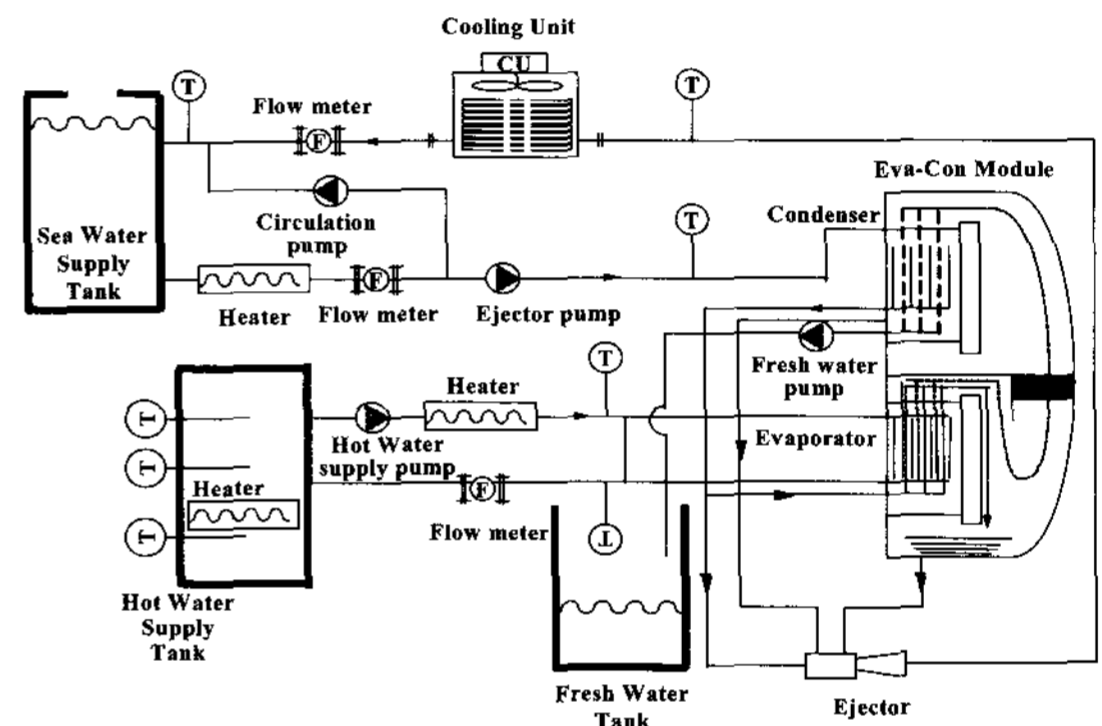


그림 2. 실험 장치의 구조도

해수의 온도와 유량은 응축기 입구와 이젝터 출구에서 측정하고, 가열수의 온도는 증발기 입구와 출구에서 유량은 증발기 출구에서 측정하게 된다. 이를 통해서 필요한 열량의 평가를 수행하였다.

해수의 응축기 입구유량은 담수기 내부의 압력과 이젝터 펌프에 의해 결정되어지고, 가열수의 유량은 가열수 공급 펌프에 독립적으로 설치된 바이패스 밸브를 이용하여 실험에 필요한 유량으로 조절하였다.

이젝터를 거치면서 해수는 담수기 내부에서 이젝터로 보내진 증기와 이상유동 상태로 변하게 되는데, 해수 측의 열량 평가를 위해서는 이상유동인 출구에서의 온도와 유량의 측정이 중요하지만 특히 해수 탱크로의 리턴 유량의 측정은 상당히 중요한 문제이다. 그러나 정상상태 운전시 담수기 내부의 압력은 거의 700 Torr에 도달하는데, 담

수기 상부에서 이젝터로 흡입되는 증기의량은 가시화 창에서 확인한 결과 상당히 적은 것을 알 수 있었다.

실험을 위한 온도의 설정과 제어를 위한 온도센서는 모두 4선식 RTD를, 유량 측정은 TOSHIBA사의 전자식 질량 유량계를, 데이터의 획득은 FLUKE 2686을 이용하였다. 데이터 획득용 프로그램은 LabView를 이용하여 제작하였다.

배관은 모두 해수 부식을 고려하여 SUS-316L 재질의 32A로 설치하였다.

### 2.3 실험조건

실험범위는 가열수 입구온도는 65, 75 및 85°C로, 유량은 담수기의 설계 조건을 기준으로 하여 2.0, 2.5 및 3.0 m<sup>3</sup>/hr으로 설정하였다. 본 연구의 최종목적은 가열원으로 태양열을 적용하는 것인데, 차후에 적용하게 될 진공관형 태양열 집열기의 담수시스템에서의 운전 조건(70에서 90°C까지)을 고려하여 설정된 것이다.

실제 실험 시에 이젝터 펌프의 출구 압력(응축기 입구 해수 압력)은 4bar이며 담수기 입구에서는 실험 장치의 압력손실이 0.5bar이므로 약 3.5bar이었다.

해수의 응축기 입구온도는 국내 표층해수의 계절별 평균온도를 고려하여 10, 20 그리고 30°C로 결정하였다. 본 실험에서 적용된 해수의 염류는 약 3.3% 이었다.

이와 함께, 담수기의 최대 생산 가능 담수량 영역의 검토를 위하여 해수의 입구온도는 실험 범위의 중간 지점인 20°C로 고정하고, 최대 공급 가능한 가열수 유량인 6 m<sup>3</sup>/hr 조건에서 가열수 온도를 65, 75 및 85°C인 경우를 추가로 실험하였다. 실험장치의 재현성 및 반복성의 평가를 위한 기준 조건으로 해수 입구온도 30°C, 가열수 입구온도 85°C 그리고 유량 3.0 m<sup>3</sup>/hr 조건을 선정하여 추가로 2회의 실험을 수행하였고, 이의 결과로부터 담수기의 성능을 분석하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 담수기 실험결과 및 고찰

본 연구에서 검토하는 담수기 성능의 특성평가는 앞서 언급한 바대로, 해수의 유량 조건은 이젝터 펌프가 고정되어 독립적으로 외부에서 조절할 수 없다. 해수의 유량은 전체 실험 조건에 대해서 약 3.57-3.67 m<sup>3</sup>/hr 범위이었다. 실험조건들은 가열원으로 실제 설치하게 될 진공관형 태양열 집열기 시스템의 운전조건을 모사하기 위하여 결정된 것이다.

이러한 실험장치의 정상상태 운전에서 온도 및 유량의 데이터들을 저장하게 되는 5분 동안의 측정 담수량은 시간에 따라 선형적인 특성을 나타내어야 한다. 기준 조건으로 선택한 해수입구 온도 30°C, 가열수입구 온도 85°C 그리고 유량 3.0 m<sup>3</sup>/hr 조건의 경우에, 정상상태 운전에서 시간에 따라 측정한 적산 담수량을 표시하면 그림 3과 같이 거의 직선에 가까운 특성을 보여주고 있다.

총 32회 실험 중에서 약 9회 마다 기준 조건으로 실험을 수행하여 재현성과 반복성을 분석하였다. 3회 실시한 실험에서 시간에 따른 측정한 담수량의 특성은 그림 4와 같고, #1 결과를 기준으로 하여 담수량 측정의 최대 오차는 약 2.5% 인 것으로 나타나고 전체 5분의 시간에 대한 표준편차는 최대 1% 이내임을 알 수 있었다.

물론 이러한 동일 조건의 반복 실험은 실험 장치가 해수를 다루고 있으므로, 부식 등 기타의 발생 가능한 문제 등의 예측을 위한 기준 결과로서도 활용가능하다.

담수기의 운전 특성은 주로 이젝터 펌프를 통해서 공급되는 해수의 압력, 열교환기에서의 압력손실, 담수기 내부에서 증발되는 양, 증발되지 않고 남은 해수량, 증발된 증기량 중에서 응축된 증기량, 응축되지 않고 이젝터로 보내어진 증기량 등이 서로 상호 연관되어 나타나게 된다.

마찬가지로 가열수 입구 온도의 상승은 가열수

유량의 증가와 동일한 특성을 나타내게 된다. 또한, 해수 입구 온도가 낮을수록 증발된 증기를 응축시키기 위한 포텐셜이 증가하게 되므로 담수량이 증가하게 된다. (그림 5 참조)

앞서 설명한 바와 같이, 가열수의 입구 온도가 증가하는 경우도 가열열량이 증가하는 것이므로 담수량은 증가하게 될 것이다. (그림 6 참조) 증발기로 공급되는 가열수 가열열량과 가열수 입출구 온도차의 특성은 열전달의 일반적인 특성에 의해 알려진 대로 해수의 입구온도와 관계없이 가열수 유량이 증가할수록 가열수의 입출구 온도차는 감소하는 특성을 보여주고 있다.

일정한 가열수의 열량이 공급되어질 때, 응축기 입구의 해수온도에 관계없이 가열수 유량이 감소하면 가열수 입출구의 온도차는 커지게 된다. 이는 동일한 온도차 특성을 가진 열교환기이면 가열열량을 증가시키기 위해서는 유량이 많이 필요한 것과 동일한 결과를 보여주는 것이다.

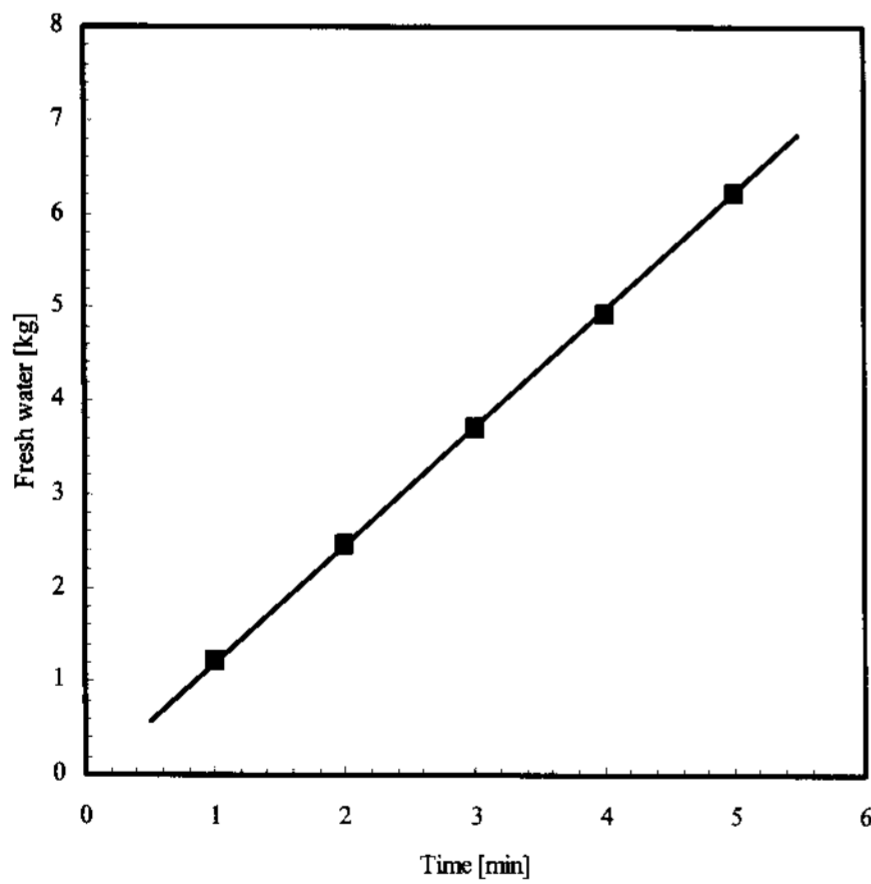


그림 3. 시간에 따른 측정 담수량

이와 함께, 응축기 입구 해수온도와 출구의 온도차는 입구 해수온도에 관계없이 가열열량에 비례하는 특성을 보여주고 있는데, 이는 응축기 입구 해수온도가 낮아도 응축기에서 응축되는 담수

량이 증가하게 되므로 예열되는 열량이 증가하고 그러한 응축기 입구 해수온도의 변화에도 담수기 내부의 압력은 크게 변화가 없어 내부 포화온도도 크게 변하지 않으므로 응축되는 열량 혹은 증발되는 열량에 비례하는 특성을 보이는 것이다.

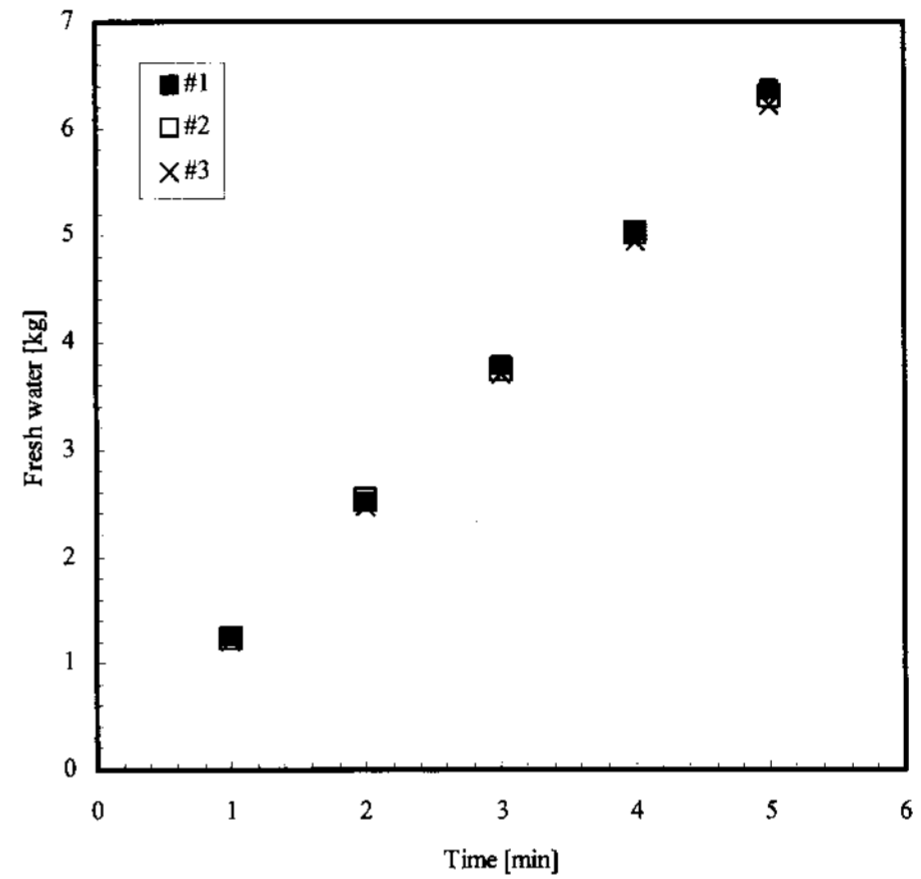


그림 4. 시간에 따른 측정담수량의 재현성과 반복성

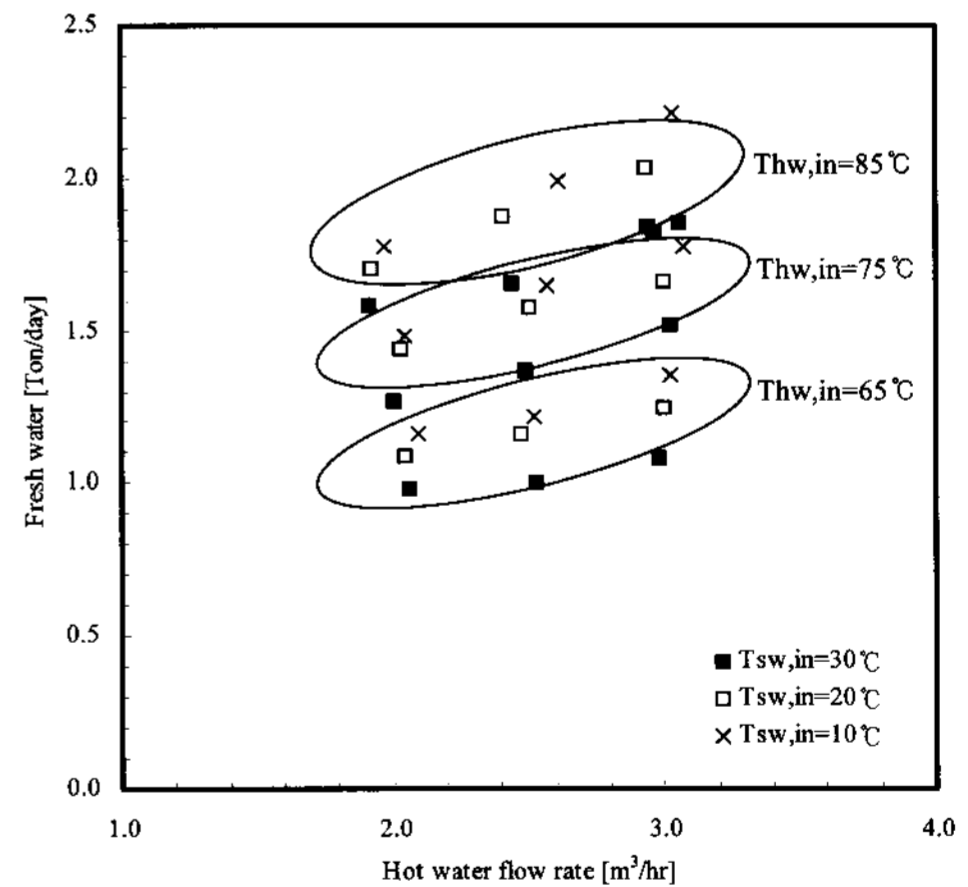


그림 5. 가열수 유량과 측정 담수량과의 관계

그림 7은 측정된 담수량과 담수기 내부의 진공 압력비 (압력비는 진공압력으로 760 mmHg에 대한 압력의 비로서 담수기에 부착된 압력센서에 의해 측정되어지고, 비가 높을수록 높

은 진공압력을 의미하고 진공도가 높음을 의미한다)의 관계를 보여주고 있다. 증발열량의 증가에 따라 증발된 증기량이 증가하여 응축된 량이 증가되어 담수량이 증가한 것이지만 담수기 내부의 포화압력은 이젝터로 분출되지 않고 담수기 내부에 존재하는 불응축가스의 량 (담수기 내부의 포화상태에서 건도를 결정) 보다는 내부의 열원들에 의한 온도 조건에 의해 결정되어지므로 가열열량이 높을수록 즉 담수량이 많을수록 담수기 내부의 포화압력은 증가하는 (압력비는 감소) 것으로 나타나는 것이다.

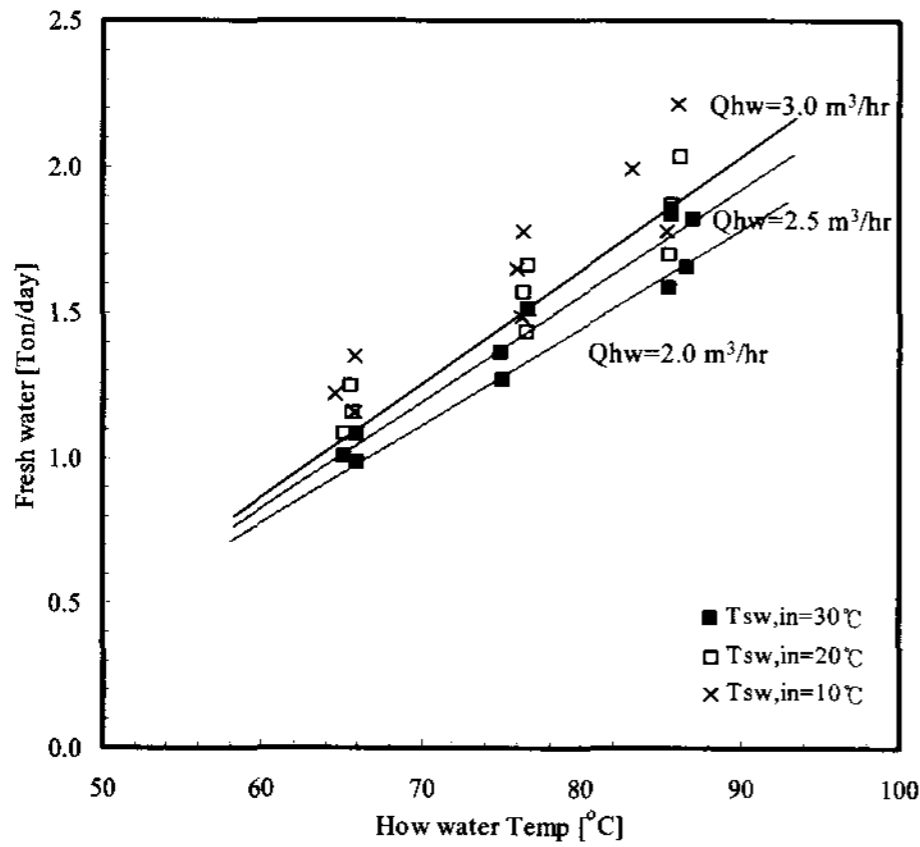


그림 6. 가열수 입구온도와 측정 담수량과 관계

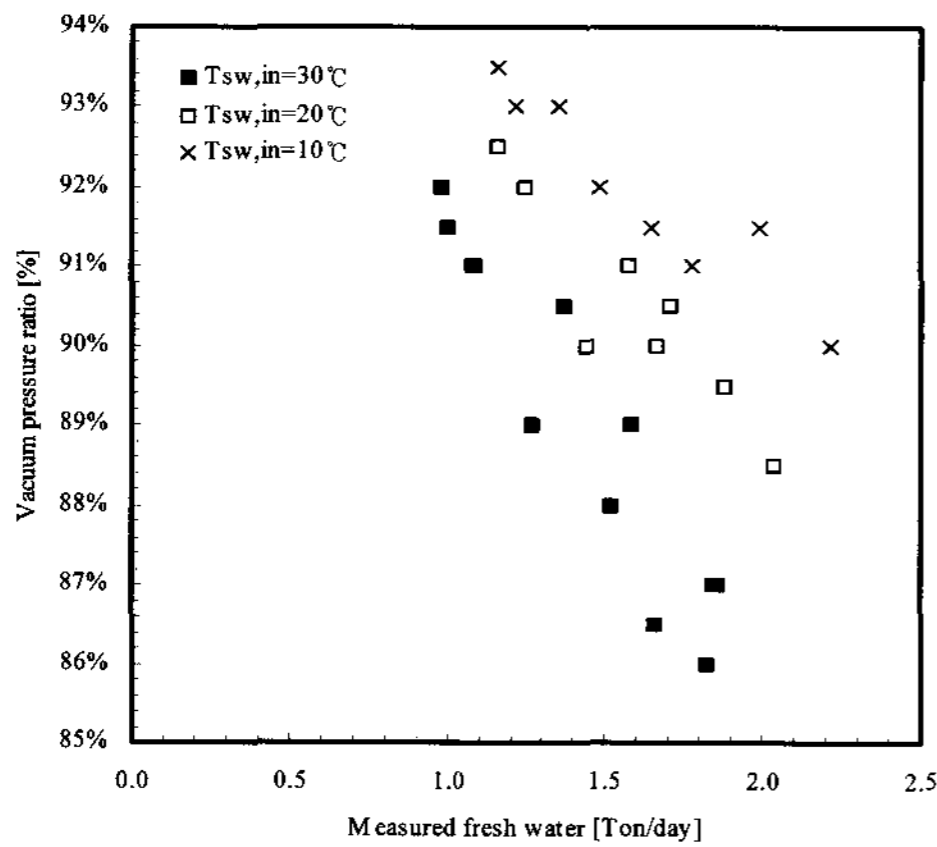


그림 7. 담수량과 담수기 챔버의 진공압력

또한, 해수 입구 온도가 높을수록 내부의 온도가 상승하게 되므로 포화압력은 증가하게 되므로, 담수기 내부의 압력 특성과 이젝터 펌프의 용량에 의해 결정되어 담수기 입구에서의 해수 유량은 그림 7과 같이 압력비의 거동과 동일한 관계를 나타낸다. (그림 8 참조)

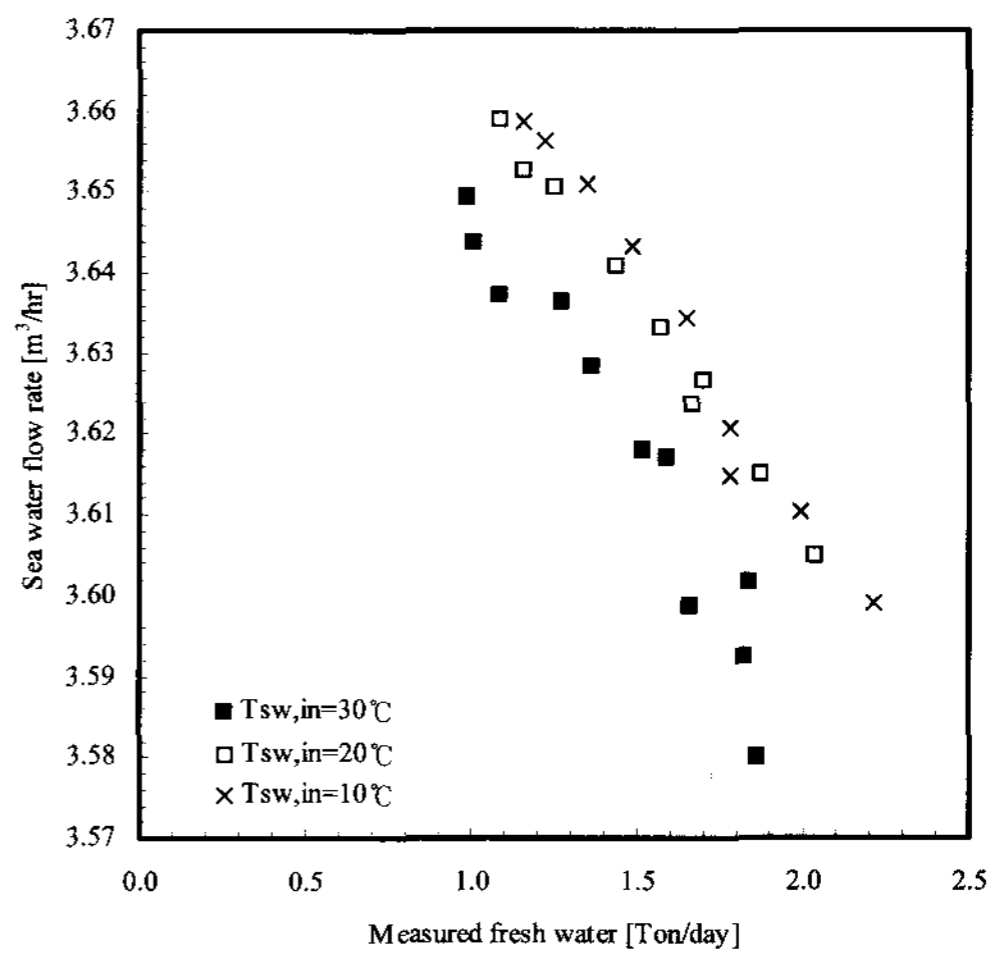


그림 8. 담수량과 해수 유량과의 관계

### 3.2 집열기 설계를 위한 고찰

다양한 해수 입구온도, 가열수 입구온도 및 유량 조건에서 수행되어 얻어진 가열량과 담수량에 대한 실험결과로부터 시간당 1톤의 담수량을 얻을 수 있는 에너지가 849.6 kW/(m³/hr)로 평가되어 졌다. 가열량(Qi)은 해수 증발을 위해 담수기의 증발기로 공급되는 유량( $\dot{m}$ )과 입출구 온도차 (Thw,out-Thw,in)를 이용하여 평가하였다.

이렇게 평가되어진 단위 담수량당 에너지를 이용하여 단위면적당 일사량을 500W/m²로, 집열기 효율은 단일진공관 집열기의 성능시험 결과로부터 약 60%로 고려하여 평가된 단일stage-단일효용의 담수기에 적용될 집열기 단위면적에 대한 생산 가능한 담수량은 0.353 [liter/hr]/m² 로 평가되었다. 이러한 값은 미국의 Snadia Lab.에서 태양에너지 담수화 시스템의 기초모델인 Solar

still의 성능인  $0.0833 \sim 0.122$  [liter/hr]/ $m^2$ 에 비해 약 3.5배의 성능을 나타냄을 알 수 있었다.

1시간 동안 1리터의 담수를 생산하기 위해서는 약  $2.833m^2$ 가 필요한 것으로 평가되었다. 이러한 값은 앞서 밝힌 바와 같이 단일stage-단일효용의 담수기와 태양열 집열기 시스템의 조합에 의해서 얻어질 수 있는 값이다.

#### 4. 결 론

1.5 Ton/day의 최대 담수량을 가지는 상용 판형 열교환 담수기를 이용하여 다양한 해수 입구온도, 가열수 입구온도 및 유량에 대하여 담수량의 성능 평가를 위하여 실험장치를 설계·제작하여, 실험을 수행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 실험장치에 의한 담수량 측정의 최대 오차는 약 2.5% 이었고, 측정시간 5분 동안의 표준편차는 최대 1% 이내 수준이었다.
- (2) 다양한 조건들에 대하여 단일stage-단일효용 담수기의 성능이  $849.6 \text{ kW}/(m^3/hr)$ 로 평가되었고, 이로부터 태양열을 열원으로 하는 담수화 시스템의 효율은 Solar still에 비하여 약 3.5배 높은 것으로 나타났다.
- (3) 단위 시간당 1 liter의 담수 생산을 위해 필요한 단일진공판형 집열기의 면적은  $500W/m^2$ 의 일사량 조건과 담수기 운전조건으로부

터 평가되는 집열기 효율 60%를 기준으로 약  $2.833m^2$  정도인 것으로 평가되었다.

#### 후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원의 기본사업 연구비 지원으로 수행되었음.

#### 참 고 문 헌

1. 최순열, 저압증발형 조수기 개발에 관한 연구, 공업기술연구논문집, 2002, Vol. 2, pp. 493-498.
2. Joseph J., Saravanan R., and Renganarayaban S., Studies on a single-stage solar desalination system for domestic applications, Desalination, 2004, Vol. 173, pp. 77-82.
3. Philip L., A new concept in marine desalination - The thermal compression distillation plant, Marine Technology, 1990, Vol. 27, pp. 153-161.
4. Porteous A., Desalination technology Developments and Practice, 1983, Elsevier Science.