

태양에너지 해수담수화 실증시스템 장기 운전 열성능

곽희열*, 윤응상**, 주문창***, 주홍진****

*한국에너지기술연구원(hykwak@kier.re.kr), **한국에너지기술연구원(mcjoo@kier.re.kr)

한국에너지기술연구원(mcjoo@kier.re.kr), *인하대학교 대학원(joo@inhaian.net)

Evaluation of long-term performance for single-stage desalination system with solar energy

Kwak, Hee-Youl*, Yoon, Eung-Sang**, Joo, Moon-Chang***, Joo, Hong-Jin****

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

**Korea Institute of Energy Research(yoon@kier.re.kr)

***Korea Institute of Energy Research(mcjoo@kier.re.kr)

****Dept. of Mechanical Engineering, Inha University(joo@inhaian.net)

Abstract

This study was carry out evaluation of long-term performance for the decentralized desalination system with the solar thermal system and the photovoltaic power system.

First operating demonstration system was set up in Cheju in 2006. These system comprises the desalination unit with designed daily fresh water capacity of 2m³ and is supplied by a 120m² evacuated tubular solar collector, a 6m³ heat storage tank, and a 5kW photovoltaic power generation supply the electricity for hydraulic pumps to move the working fluids.

In a clear day more than 400W/m², the daily fresh water showed to produce more than about 500liter, and from January, 2007 to October, 2008 for 2 years, solar irradiance daily averaged was measured 370W/m², the daily fresh water yield showed that can be produced about 330liter.

Keywords : 해수담수화 시스템(desalination system), 진공관형 태양열집열기(evacuated tubular solar collector), 장기 성능(long-term performance), 1단 증발식(single stage distillation)

1. 서 론

이미 전 세계적으로 물 부족현상에 심각성을 느끼고 있고 지속가능한 수자원의 확보가 중요하게 인식되고 있다. 현재 세계인구의 40%를 구성하는 80여 개국이 심각한 물 부

족 상태다. OECD보고서에 따르면 2025년에는 52개국 30억 명이 물 부족을 겪을 전망이며, 현재 아프리카 중동 등지에서 이미 3억 명이 심각한 물 부족을 겪고 있으며, 2050년에는 전 세계 인구의 3분의 2가 물 부족사태에 직면할 것 이라고 발표하였다.

인구의 폭발적 증가와 급격한 산업화로 최근 40년간 세계의 물 소비량은 3배나 늘어났고, 안정적인 수자원 확보를 위한 국가간 물 분쟁도 해가 갈수록 심각한 양상을 보이고 있다. 이러한 심각한 물 부족 문제를 해결할 수 있는 대안으로 가장 대두되는 것이 해수 담수화 기술이다.

담수화란 바닷물에 녹아있는 염분을 제거하여 사람이 먹고 사용할 수 있는 담수로 바꾸어 주는 기술로, 염분을 제거하여 담수를 얻으므로 해수탈염(海水脫鹽)이라고도 한다. 담수화 공정으로는 역삼투법(reverse osmosis), 증발법(distillation), 전기투석법(electro dialysis) 등이 개발되었으며, 가장 간편하고 오래된 방법은 바닷물을 끓여 생긴 수증기를 응축시켜 담수를 얻는 방법인 증발법이다.

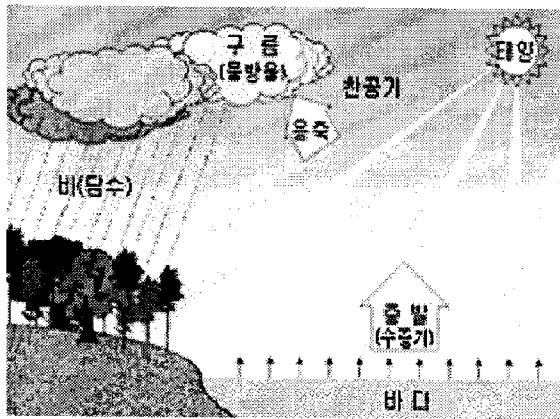


그림 1. 자연에너지를 이용한 해수담수화 공정

증발법의 기본 사이클은 지구상에서 발생하는 자연 현상을 이용한 것으로 해수면에서 증발한 수증기가 상승하여 대류권 상층부의 저온 분위기 중에서 응축하여 구름이 되고, 다시 비의 형태로 지표 또는 해수면에 떨어지는 현상을 공학적으로 응용한 것이다.(그림 1 참조)

일반적으로 증발식 해수담수화 공정은 많은 에너지를 필요로 함에 따라 에너지 소비를 줄이는 것이 최대 관건인데, 해수 담수화

시스템으로 해수를 가열하는데 필요한 열은 중온용 고효율 진공관형 태양열 집열기로부터 얻고, 순환펌프는 태양광 집광판에 의해 작동되는 새로운 태양에너지 해수담수화 시스템이 제안되었다.

태양열 증발법은 해수를 담수화하는데 필요한 에너지를 태양열 집열기로부터 공급받는 친환경적인 담수화 장치로 직접법과 간접법이 있다. 직접법은 태양에너지를 모으는 집열기와 해수 증발기가 하나가 되어 있는 방식이며[그림 2], 간접식은 태양열시스템과 담수화 장치가 분리되어 있는 것으로 태양열 집열기에 모아진 열에너지를 MED나 MSF의 에너지원으로 간접 이용하는 방식이다.

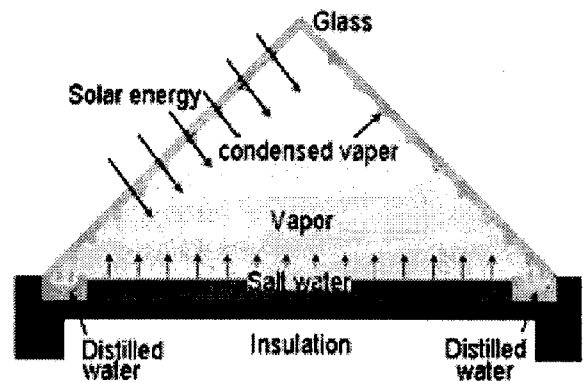


그림 2. 직접 증발식 해수담수화 장치 개념도

본 연구에서는 담수화 설비를 위해 펌프구동은 태양광 발전 시스템에 의존하고, 열원은 태양열 집열기에 의해 100% 공급받는 독립형 태양에너지 해수담수화 시스템 실증연구를 수행하였다. 실증연구를 통하여 국내 최초로 실용화된 중온용 단일 진공관형 태양열 시스템(집열면적 약 120㎡)과 태양광 PV 시스템(5kW)을 이용하여 1단 증발식 해수담수화 시스템(2톤/일)의 2년간의 장기 운전 성능 결과를 정량적으로 기술 하였다. 또한 태양열 해수담수화 시스템의 사후관리 측면에서 담수시스템의 성능을 저하 시키는 담수기 내의 스케일 제거 작업 전 후의 담수 생산량을 분석하여 담수기 내의 스케일이 담수

생산량에 미치는 영향을 정량적으로 기술 하였다.

2. 태양에너지 해수담수화 시스템

그림 3은 태양에너지 해수담수화 시스템의 구성도를 나타낸 것이다. 태양에너지 해수담수화 시스템은 열을 생산하는 태양열시스템, 전력을 생산하는 태양광 발전시스템, 증발식 담수기와 원격제어 및 모니터링 시스템으로 크게 구성되어 있다.

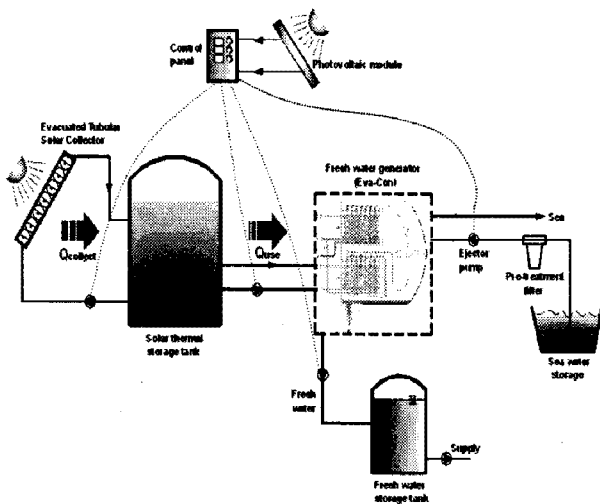


그림 3. 태양에너지 해수담수화 시스템 구성도

그림 4는 태양에너지 해수담수화 시스템의 원격제어 및 모니터링 화면을 나타낸 것이다. 개발된 모니터링 프로그램은 전동밸브와 펌프들의 동작 현황을 파악할 수 있도록 만들어 졌다. 그리고 컴퓨터에 의한 제어와 배전반 판넬에 의한 제어가 가능하도록 선택적으로 제어가 가능한 기능을 가지고 있다. 이는 컴퓨터 제어시에 다운이나 기타 예러가 발생시에 이에 대처하기 위하여 자동으로 배전반 판넬 제어로 전환되게 설계되어 있다. 또한 정확한 태양열 집열량, 담수기 공급열량 및 생산 담수량의 평가를 위하여 유체 흐름부의 입출구 온도와 유량을 정밀하게 측정할 수 있도록 시스템을 설계 제작하였다. 원

격 제어모드에서는 태양열 차온기 제어, 방열기 제어, 담수기 펌프제어, 동파방지 제어, 그리고 염도 제어를 쉽게 조절할 수 있도록 프로그램을 구성하였다.

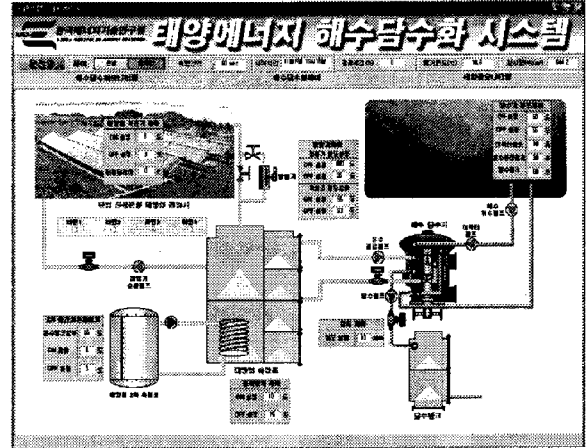


그림 4. 해수담수화 제어화면

3. 결과 및 고찰

태양에너지로부터 열과 전력을 공급받는 독립형 태양에너지 해수담수화 시스템을 국내 최초로 한국에너지기술연구원 제주 월정기지에 설치하였으며, 장기 운영을 통하여 천재지변(낙뢰, 태풍 등)에 의한 시스템의 안정성과 내구성 측면에서 제어 시스템이 수정되었고, 해수담수화 시스템의 장기 운전 성능을 분석 하였다.

3.1 해수담수화 시스템 일일 운전 성능

그림 5는 2008년 9월 8일의 제주월정기지에서 측정된 일사량 및 축열조 온도 분포를 나타낸 것이다. 9월 8일의 일일 평균 일사량은 $518\text{W}/\text{m}^2$ 으로 매우 높았으며, 외기온도는 28.8°C 로 측정되었다. 그림에서 보듯이 일사량이 높아지는 오전 8시30분부터 축열조의 온도가 높아지며 축열조의 온도가 55°C 이상 되는 오전 10시 20분부터 축열조의 온도가 급격히 떨어지는 것을 알 수 있다. 이는 담수기의 온수 공급 조건으로 축열조의 상부 온

도가 55℃ 이상 되면 담수기에 온수를 공급하고 축열조의 중단 온도가 50℃이하로 떨어지면 담수기의 온수 공급이 중단 되도록 제어 조건을 설정하였기 때문이다. 본 논문에서 사용된 일사량 데이터는 담수가 생산된 일자에 대해서 일출에서 일몰까지를 평균하여 얻어진 값들을 사용하였다.

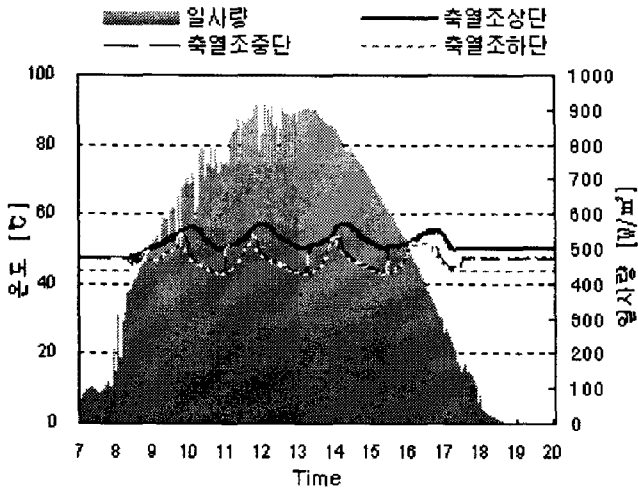


그림 5. 일사량 및 축열조 온도 분포

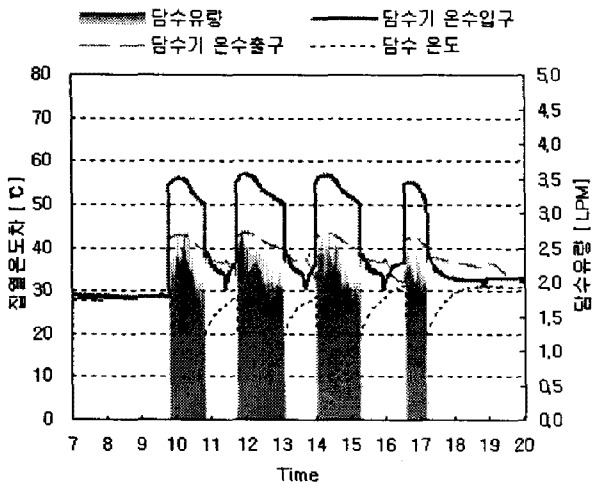


그림 6. 담수기 작동 상태

그림 6은 2008년 9월 8일의 담수기의 작동 상태를 나타낸 것이다. 앞서 언급한대로 축열조의 중단 온도가 55℃이상 되는 시점부터 담수기에 공급되며, 담수기에 55℃의 온수를 공급 하는 순간부터 담수가 생산되는 것을

알 수 있다. 담수기에 공급 되는 온수의 공급 온도가 낮아질수록 담수 생산량이 적게 나타나는 것을 알 수 있다. 담수기의 작동이 중간중간 ON OFF 되는 것을 알 수 있다. 이는 태양에너지로부터 획득한 열량이 담수기에 공급되는 양보다 적기 때문에 축열조 내의 온도가 담수기에 공급 할 수 있는 충분한 온도를 유지 하지 못하기 때문이다. 담수기의 작동을 OFF 상태 없이 연속적으로 가동하기 위해서는 제주월정기지에 설치되어진 집열기 설치 면적인 120㎡ 보다 많은 양의 집열기가 요구되어 진다고 할 수 있다.

표 1은 2008년 9월 8일의 일사량, 외기온도, 집열기 획득 열량, 집열 효율, 담수기 공급 열량, 담수기 운전시간, litter당 생산열량 및 측정 담수량을 나타낸 것이다. 표에서 보는 바와 같이 9월 8일 축열조로부터 담수기에 공급된 총 열량은 29,880 kW로 측정 되었다. 담수기에 공급되는 열량은 담수기 온수 공급 유량, 입출구온도와 공급되는 온수의 비열로 계산한 값이다. 9월 8일의 담수기 운전 시간은 총 259분이 가동 되었으며, 평균 1ℓ의 담수를 생산하기 위해 소요된 열량은 52.8 kW로 계산되었으며, 9월 8일의 일일 측정 담수량은 총 565.5ℓ로 나타났다.

표 1. 담수기 공급 조건

평균 일사량	443 W/m ²
외기온도	28.8 ℃
담수기 공급 열량	29,880 kW
담수기 운전 시간	259 분
litter당 생산열량	52.8 kW
측정 담수량	565.5 ℓ

3.2 해수담수화 시스템 장기 운전 성능

한국에너지기술연구원 제주월정기지에 설치된 태양에너지 해수담수화 시스템은 2006년 10월부터 시험 운전을 시작 하였으며, 약

3개월에 걸쳐 시스템의 최적의 제어조건 도출을 위해 안정성 테스트를 위한 시험 가동이 이루어졌으며 2007년 1월부터 태양에너지 해수담수화 시스템의 본격적인 가동이 시작되었다.

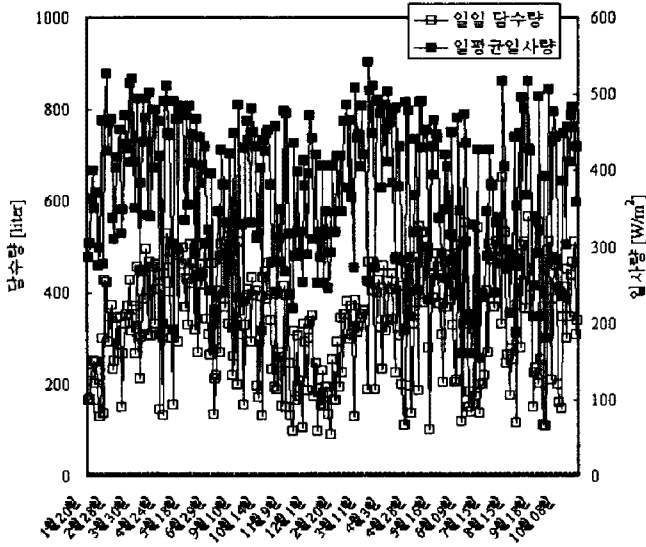


그림 7. 일별 일사량 및 일일 담수 생산량

그림 7은 2007년 1월부터 2008년 10월 까지 한국에너지기술원 제주월정기지에서 측정된 일평균 일사량 데이터 및 일일 담수량을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 담수 생산량은 일사량 데이터와 매우 밀접한 관계를 갖고 있는 것을 알 수 있다. 일사량이 높은 날은 그만큼 집열기로부터 많은 양의 태양에너지를 획득하여 담수기에 공급하는 열량이 많기 때문에 담수 생산량은 많아진다.

태양에너지해수담수화 시스템의 2년간의 걸친 운전 결과 예상 집열기 설치 면적시 고려한 제주월정기지의 평균 일사량 값인 500 W/m² 보다 제주월정기지의 평균 일사량이 20% 이상이 적은 약 370 W/m²로 낮아 태양에너지 해수담수화 시스템 설치 시 일일 담수 생산량 목표치인 500 l에 못 미치는 평균 약 330 l로 나타났다.

그림 8은 제주월정기지에 설치된 태양에너지 해수담수화 시스템에 설치된 1단 증발식 실증시스템에 대하여 2007년 1월부터 2008년

10월까지 일사량에 따른 담수량 생산량 관계식을 나타낸 것이다. 일사량과 담수량에 대한 상관식은 $y=1.0805x - 69.27$ 로 나타났다. 그림에 나타낸 바와 같이 일사량이 증가하면 담수량도 비례하여 증가하는 것으로 나타났다.

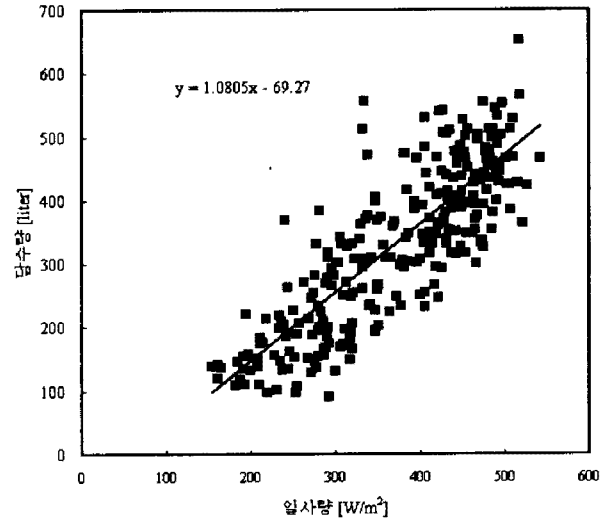


그림 8. 일사량별 담수 생산량 관계식

3.3 스케일 제거 작업 전후의 운전 성능

태양열 해수담수화 시스템 성능에 영향을 주는 담수기 내의 스케일 제거 작업을 통해 스케일이 담수 생산량에 미치는 영향을 알아보기 위해 스케일 제거 작업 전후의 담수 생산량 데이터를 비교 분석 하였다.

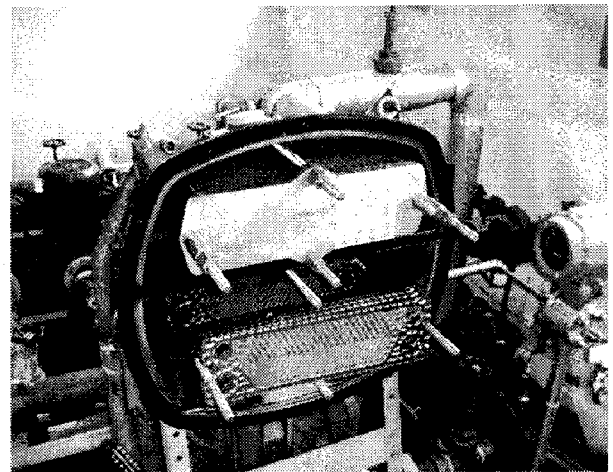


그림 9. 관형 담수기

그림 9는 담수기 내의 판형 열교환기의 스케일 제거를 위해 제주월정기지에 설치된 태양에너지 해수담수화 시스템의 판형 담수기를 분해한 그림이다. 그림에서 보듯이 판형 열교환기 부분에 스케일이 낀 것을 알 수 있다. 판형 담수기의 스케일 제거 작업은 2008년 5월 28일에 수행되었다.

그림 10은 스케일 제거 작업 전후의 일사량에 따른 담수 생산량을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 스케일 제거 작업후의 담수 생산량이 스케일 제거 작업 전보다 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 스케일 제거 작업 전인 2007년 1월부터 2008년 5월 28일까지 일평균 담수 생산량은 325ℓ, 일평균 일사량은 380 W/m²이며, 스케일 제거 작업 후인 2008년 6월 1일부터 2008년 10월 24일 까지 일평균 담수 생산량은 343ℓ, 일평균 일사량은 341 W/m²으로 일평균 일사량은 약 10% 낮아진 반면 일평균 생산 담수량은 평균 약 6%가 높아 졌다. 따라서 태양에너지 해수 담수화 시스템의 경우 사후관리 차원에서 주기적인 스케일 제거 작업이 이루어 져야 할 것으로 사료된다.

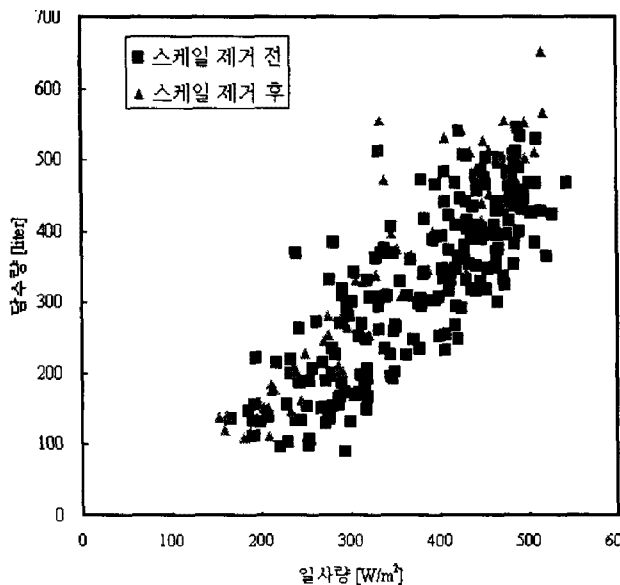


그림 10. 스케일 제거 전후의 일사량별 담수 생산량

4. 결론

태양에너지로부터 열과 전력을 공급받는 독립형 태양에너지 해수담수화 시스템을 한국에너지기술연구원 제주 월정기지에 설치하여 장기 운전해 본 결과 시스템 성능에 대하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 국내 처음으로 제주 월정기지에 설치된 태양에너지 해수담수화 실증시스템의 장기 운전 결과를 통하여 태양에너지 해수담수화 시스템의 제어 및 설계기술이 확보 되었고, 2년여 간의 장기운전을 통하여 시스템의 유용성과 안정성이 검증 되었다.

(2) 일평균 일사량이 400 W/m² 이상으로 날씨가 화창한 날의 일일 생산 담수량은 약 500ℓ 이상으로 분석되었다.

(3) 2007년 1월부터 2008년 10월까지 약 2년여 간의 장기 운전 성능 결과 일일 담수 생산량은 평균 약 330ℓ가 생산된 것으로 분석되었다.

(4) 태양에너지 해수 담수화 시스템의 경우 사후관리 차원에서 담수기내의 주기적인 스케일 제거작업을 통하여 장기간에 걸쳐 담수기의 성능을 유지할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 곽희열 외, “태양에너지 해수담수화 시스템 실용화 연구”, 한국에너지기술연구원 보고서 KIER-A52416, 2005.
2. 곽희열 외, “Evaluation of seasonal performance for single-stage desalination system with solar energy” SET2008,
3. Kwak, H. Y. et. al. 2007. KSES Fall Conference. pp55-60
4. 김정배 외, “태양에너지 해수담수화 실증”, 한국태양에너지학회 논문집, v.27 n.4 pp. 27-33.