

하이브리드 태양열 해수담수기의 운전 조건별 성능실험

여세동* · 임병주** · 유상석*** · 정경열* · 박창대*†

* 한국기계연구원 환경시스템연구본부(과학기술연합대학원대학교 플랜트기계공학),
** 한국기계연구원 에너지플랜트안전연구실, *** 충남대학교 기계공학과

Performance of Hybrid Solar Still Under Operating Conditions

Se Dong Yeo*, Byung Ju Lim**, Sang Seok Yu***, Kyung Yul Chung*, and
Chang Dae Park*†

* Research Division for Environment and Energy Systems, Korea Institute of Machinery & Materials (Dept. of Plant system and Machinery, Univ. of Science & Technology).

** Dept. of Plant Safety Technology, Korea Institute of Machinery & Materials.

*** Dept. of Mechanical engineering, Chungnam Nat'l Univ.

(Received December 1, 2016 ; Revised April 25, 2017 ; Accepted June 11, 2017)

Key Words: Solar Still(태양열 증류기), Multi-effect(다중효용), Performance(성능), Operating Condition(운전 조건), Flow Rate(유량)

초록: 태양열 및 발전기의 배기가스 폐열을 복합열원으로 이용하여 작동되는 하이브리드 태양열 해수담수기의 성능을 증가시키기 위한 실험을 수행하였다. 실험 장비는 집열 면적이 1m×2m인 단순 태양열 증류기와 수직 다중효용부로 구성되어 있다. 실험은 두 대의 동일한 하이브리드 태양열 해수담수기에 대하여 태양열을 열원으로 실외에서 다양한 운전 조건으로 수행하였다. 실험 결과 하이브리드 태양열 해수담수기의 담수 생산량은 다양한 운전 조건에 의존하였다. 태양열 증류기의 측면 유리에 단열을 하는 것과 낮은 초기 베이진 해수 수위는 태양열 해수담수기의 성능을 증가시켰다. 반사율이 평균 47%보다 낮은 반사회의 적용은 예상과 다르게 총 생산량을 감소시켰다. 그러나 다중효용부로 공급하는 해수 공급 유량은 실험 범위 내에서 생산량에 명확한 영향을 보이지 않았다.

Abstract: In this study, we have performed tests to improve the productivity of hybrid solar stills, which can be operated by solar thermal energy and/or waste heat of exhaust gas from electrical generators. The experimental apparatus is a hybrid solar still with a 1m×2m collecting area, which consists of a conventional simple solar still and a vertical multi-effect diffusion(MED) section. The experiments were conducted under various operating conditions, with two identical hybrid solar stills, using solar radiation as the energy source. The results of the tests showed that the yield of the hybrid solar still depends on the various operating conditions. Insulation at the side glasses and a lower basin seawater level increased the productivity of the hybrid solar still. Reflecting fins with less than 47% reflectivity unexpectedly decreased the total productivity. However, the various feeding flow rate of the seawater into MED part did not show clear effects on productivity in the tested range.

- 기호설명 -

$C_{p,w}$: 해수 정압비열(kJ/kg/K)

h_{fg} : 해수 잠열(kJ/kg)

L_w : 베이진(Basin) 해수 초기 수위(mm)

m_d : 생산 담수 총량(kg)

m_f : 다중효용부 해수 공급유량(cm³/min, ccm)

m_{f1} : 다중효용부 1단 해수 공급유량(cm³/min, ccm)

T_{amb} : 평균 주변 온도(°C)

† Corresponding Author, parkcdae@kimm.re.kr

© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

V_w : 평균 풍속(m/s)

Q_{in} : 입력 열량(W/m²)

1. 서 론

전 세계적으로 일어나고 있는 수자원의 불균형은 수자원이 풍부한 지역과 그렇지 못한 지역의 경제 및 생활수준의 차이를 크게 벌어지게 만드는 주요한 요인이다. 잘 알려진 물 부족 지역인 중동, 중앙아시아, 인도, 중국 그리고 아프리카의 내륙 사막지역과 해안 도서지역에서는 여전히 많은 사람들이 절대적인 수자원의 부족에 허덕이고 있으며 제한적인 수자원을 공급받는다고 하더라도 위생 문제로 고통을 받고 있다. 수자원은 또한 에너지 생산 및 식량 생산에도 밀접한 연관성이 있기 때문에 수자원의 부족은 지속 가능한 발전과 인류의 삶을 위협하는 주요한 원인이 된다. 이러한 수자원의 부족을 해소하기 위해 인류는 과거부터 다양한 방법을 시도해 왔고 그 중의 하나가 바닷물을 담수로 바꾸는 해수담수화이다.

과거 해수담수화는 주로 열을 가해 해수를 증발시킨 후 응축시키는 증류식을 많이 사용하였다. 역사적으로 선원들이 긴 항해 동안 식수를 얻기 위해 배 위에서 해수를 담수화하였다. 현대에 이르러서 해수담수화의 기술이 발달하고, 열 및 에너지 효율을 증가시키기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 수십여 년 전에는 주로 열에너지를 이용한 다중 효율 증류법(Multi-effect Distillation)과 다단 플래시법(Multi-Stage Flash)이 열효율의 증가를 위해 사용되어 왔다. 최근에는 막(membrane) 기술이 발달하여 역 삼투압의 투과를 이용한 해수담수화가 거대한 플랜트 규모로 이용되고 있다.

하지만 여전히 많은 지역에서는 상기 기술한 방법을 이용할 때 필요한 막대한 에너지뿐만 아니라 물이 함께 부족하여 대규모 해수담수설비가 적합하지 않을 경우가 많다. 이러한 경우에 적합한 해수담수화 방법은 바로 태양열 등 신재생에너지를 이용한 해수담수이다. 태양열을 이용하면 지구온난화 등의 환경문제를 일으키지 않으면서도 담수화에 소요되는 에너지 비용을 획기적으로 줄일 수 있으므로 지속 가능한 해수담수화를 실현할 수 있다. 하지만 기존의 직접식 태양열 해수담수 기술은 단순히 증발을 위한 유리로 된 수조를 이용하는 방식이었고, 하루에 생산할 수 있

는 최대 양이 약 3.5~5 kg/m² 수준에 불과하였다.

Telkes, Dunkle, Selkuk 등이 각각 제안한 다중 효율화산 태양열 해수담수기⁽¹⁾는 높은 열효율로 인하여 생산성을 기존 해수담수기에 비해서 크게 높일 수 있었다. 하지만 우천 등 태양열을 사용할 수 없을 때 대체 열원을 고려하지 못하여 장치의 유용성이 높지 않고, 구조적으로 복잡하며 유지 보수성이 낮은 한계를 가지고 있다. Park 등⁽²⁻⁴⁾은 태양열을 사용할 수 없을 때 도서지역 등 전력망이 없는 곳에서 많이 이용되는 소형 발전기의 배기가스(폐열)을 함께 활용할 수 있는 소형 해수담수장치를 개발하였고, 이의 상용화를 위한 후속 연구들⁽⁵⁻⁷⁾에서 해수담수기의 성능 향상 및 구조의 단순화를 위해 설계 조건 및 작동 조건을 연구하였다. 하지만 그들은 주로 폐열을 열원으로 이용하였고 태양열을 열원으로 옥외 실험을 수행한 결과를 제시하지 않았다.

본 연구에서는 기존에 설계된 1m²의 집열 면적을 가진 하이브리드 태양열 해수담수기에 비해 태양 복사에너지의 공급을 증가시킬 수 있고, 담수 생산량을 증대시킬 수 있는 집열 면적 2m²의 하이브리드 태양열 해수담수기를 설계/제작하였다. 그리고 선행 연구들⁽⁸⁻¹⁰⁾을 참조하여 태양열 해수담수기의 성능 증가를 위한 운전 변수 조건을 고안하였고 변수 조건에 대한 태양열 옥외 실험을 수행하였다. 이러한 실험을 통하여 하이브리드 태양열 해수담수기의 성능을 향상시키고 외기조건 및 공급 일사량에 따른 최적 운전점을 찾고자 하였다.

2. 실험

2.1 실험 장치

실험 장치로 사용되는 하이브리드 태양열 해수담수기의 사진과 개략도를 Fig. 1 및 Fig. 2에 각각 나타내었다. 운전 조건별 비교실험을 위해 두대의 동일한 해수담수기(각각 P2-1, P2-2)를 대상으로 실험을 수행하였다. 장치는 2 m(W)×1 m(H)의 이중 유리로 된 집열부와 2 m(W)×0.826 m(L) 크기의 베이진(basin)부, 그리고 이와 접하는 수직형 다중효용(MED)부로 구성되어 있다. 베이진부는 과거의 단순 태양열 증류기와 같이 태양열이 입사되는 전면 유리와 해수를 담아 증발시킬 수 있는 수조인 베이진으로 이루어져 있다. 전면 유리는 태양 복사에너지의 투과가 잘 이루어질 수



Fig. 1 Hybrid solar stills (Left : P2-2, Right : P2-1)

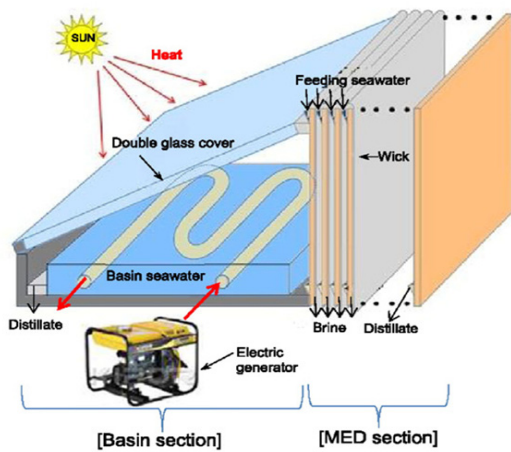


Fig. 2 Hybrid solar still with portable electric generator (reprinted in park et al.(10))

있도록 저철분 유리를 사용하였으며, 두께가 5 mm인 유리 두 개를 6 mm 간격으로 두고 그 사이 공간을 아르곤 가스로 채운 이중 유리를 적용하였다. 베이진부의 양 측면 벽에도 측면에서 태양 복사에너지가 투과될 수 있도록 576 mm(W) × 576 mm(H)의 저철분 유리를 사용하였다. 한편, 폐열을 열원으로 본 해수담수기를 운전하기 위해서 Fig. 2와 같이 베이진 내부에 열교환 배관을 설치하였다. 본 배관(직경 22 mm) 내부를 소용량(디젤) 발전기의 배기가스가 지나가면서 베이진의 해수를 가열하게 한다.

Fig. 2에서 태양 복사에너지나 배기가스 폐열에 의해 베이진의 해수가 가열되어 증발되면, 습공기는 전면 유리 내측과 MED부의 첫 째 수직평판의 표면에서 온도차에 의해 응축된다. 응축된 담수는 전면 유리 수직평판을 타고 집수로까지 흘러 내려와서 집수된다. 한편, MED부의 1단 평

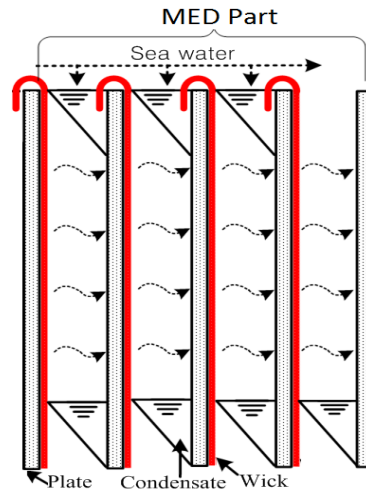


Fig. 3 Schematic diagram of Multi-effect diffusion part

판 전면에서 습공기가 응축될 때 발생하는 응축 잠열과 직접 태양복사에너지는 MED부를 구동하는 열원이 된다.

Fig. 3은 MED부의 상세한 구조 및 작동 원리를 보여준다. MED부의 각 효용 단은 스테인리스 스틸(STS 316L)의 평판과 평판의 한 쪽 표면에 부착된 Wick(wick)으로 구성되며, 총 11개의 효용 단이 각각 5 mm 간격으로 설치되어 있다. MED부의 작동 원리는 다음과 같다. 태양열 및 응축 잠열에 의해서 첫 번째 효용단의 평판이 가열되면 전도에 의해 첫 번째 단의 후면에 부착된 Wick(증발면)에 열이 전달된다. 이 열은 Wick을 타고 흘러내리는 해수를 가열하게 되어 해수가 증발한다. 증발된 습공기는 평판 사이의 5 mm 공간에서 확산되어 다음 효용 단의 평판 전면(응축면)에 응축되는데, 이때에 발생한 응축 잠열이 그 평판의 후면에 Wick을 타고 흐르는 해수를 가열하게 된다. 이 때 발생한 수증기는 세 번째 효용단의 전면에서 응축된다. 각 단의 응축면에서 응축된 물은 중력에 의해 낙하하여 하부의 응축수 포켓으로 집수된다. 따라서 베이진 부분의 해수와 1단 평판 전면에서 공급된 태양열 또는 폐열이 MED부 내에서 전도, 증발, 확산, 응축과정을 반복하면서 효용단의 수만큼 반복적으로 사용되므로 기존의 단순 태양열 증류기에 비해 열효율 및 담수 생산 성능이 증가하게 된다.

실험 중 변수별 담수 생산 성능을 분석하기 위하여 일사량, 온도, 유량, 풍속 등을 측정하였다. 일사량 측정기는 0.3~0.5 mm의 파장 범위에서 오

차범위 1% 이내로 측정 가능한 ESLAB 사의 PSP pyranometer를 사용하였다. 베이진부의 해수 및 습공기 온도, 각 효율단의 평판 온도, 주위 온도, 해수 공급 온도 등을 측정하기 위한 T-type 열전대(오차 1%)를 14개 부착하였다. 해수 공급 유량은 실제 1분간 계량을 하여서 전자저울(BCL-10L, 오차 1%)로 측정하였다. 담수 생산량은 실시간 온라인 계측을 할 수 있는 전자저울을 사용하여 측정하였고, 풍향 및 풍속은 실험장치 주변에 ADOLF THIES 사의 풍속계(오차범위 3% 또는 0.5m/s) 및 풍향계(오차범위 3%)를 사용하여 측정하였다. 해수 원수 및 생산 담수의 염도 측정은 측정 오차 ± 2 ppt인 DMT-10 Digital Marine Tester를 사용하였다. 각 센서들로부터 측정된 데이터들은 National Instrument사의 DAQ(Ni-PXIe-1082)장치를 이용하여 수집 및 저장하였다.

2.2 실험 조건

복합 태양열 해수담수기는 소형 발전기의 배기가스 폐열 및 태양열 에너지를 각각 또는 동시에 열원으로 운전할 수 있다. 본 실험에서는 태양열을 열원으로 담수기를 운전하였다.

Table 1에 본 연구에서의 실험 조건을 나타냈다. 실험 조건은 복합 태양열 해수담수기의 측면 유리의 단열 유무, 베이진부 내의 반사환(reflecting fins) 설치 유무와 같은 설계 변수와 베이진 초기 해수 수위(L_w)와 MED부에 공급되는 해수 유량(m_{fl})과 같은 운전 변수 등의 4가지를 고려하였다. 실험 시 베이진부와 다중효용부에는 해수 표준 염도인 3.5% NaCl 수용액을 사용하였다.

측면 유리에 단열재가 없을 경우 태양복사에너지가 측면 유리로부터도 통과하여 들어오기 때문에 전체 태양 입사에너지가 증가한다. 또한 베이

진 내 증발된 습공기와 측면유리의 온도차에 의해 측면에서도 응축이 되므로 담수 생산량의 증가가 예상된다. 그러나 측면유리에 단열재를 부착하면 측면 유리를 통한 열손실을 감소시킬 수 있다. Mohamad 등⁽¹¹⁾은 단순 태양열 증류기의 단열재 두께에 따른 1일 생산량 실험에서 60 mm의 단열재를 적용할 때 최대 80%까지 생산량이 증가한다고 보고하였다. 그러나 그들의 연구는 단순 태양열 증류기의 전체 단열 유무에 대한 성능 차이에 대한 연구로서, 측면부를 유리를 만들때와 단열할 때의 상반된 효과를 정량적으로 보이지는 않았다. 본 연구에서는 복합 다중효용 해수담수기의 측면부 단열재의 상반되는 효과를 실험적으로 규명하고자 측면 유리 단열재 적용 유무에 따른 성능실험을 수행하였다. 측면 유리에 부착하는 단열재로는 열전도율이 0.033W/m/k이고 두께가 25 mm인 고무발포단열재를 해수담수기의 양쪽 측면 유리에 부착하였다.

베이진부 내의 반사환은 담수기의 전체 설치면적이 증가하지 않으면서도 베이진으로 입사한 태양 복사에너지를 다중효용부로 반사시켜 전체 담수기의 성능을 향상시키고자 설치하였다. 또한 폐열을 열원으로 사용할 경우 배기가스가 내부를 지나가는 열 교환 튜브의 열전달 촉진 환(fin)으로도 동시에 작용하기 위하여 고안된 장치이다. 선행연구⁽¹⁰⁾를 통하여 하이브리드 태양열 해수담수기의 전체 담수 생산량을 지배하는 부분은 베이진 부가 아니라 다중효용부임을 확인하였다. 따라서 베이진부에 입사되는 태양에너지를 다중효용부로 반사시킬 경우, 베이진부의 담수생산량 감소보다 다중효용부의 담수생산량 증가가 더 커서 전체적인 담수 생산량의 증가를 기대할 수 있다. 베이진부 내에 설치한 반사환은 1,700 mm(L) × 130 mm(W) × 15 mm(T) 크기로서 STS 316L 재질로 제작하여 베이진부 내 열교환 튜브 위에 6개 부착하였다. 사용한 반사환은 추가 가공비를 고려하여 가공하지 않은 반사환과 반사면에 반사율을 높이기 위하여 buffing 및 wrapping 가공된 반사환 두 가지 경우로 실험하였다. 반사환의 반사율은 파장이 0.3 μ m~0.8 μ m인 입사광에 대해 가공되지 않은 반사환이 평균 11%, 래핑(wrapping) 가공된 반사환이 평균 33%, 버핑(buffing) 가공된 반사환이 평균 47%이며, 최댓값은 각각 17, 53, 63%이다.

Table 1 Experimental Conditions for hybrid solar stills

Parameter	Condition	Fixed condition
Insulation	O	$m_{fl} = 16$ ccm, $L_w = 5$ mm
Reflecting fin	O	$m_{fl} = 16$ ccm, $L_w = 5$ mm, Insulation
L_w , mm	30, 20, 10, 5, 2	$m_{fl} = 16$ ccm, Insulation
m_{fl} , ccm	4 ~ 16	$L_w =$ Fixed, Insulation

베이진 내의 초기 해수 수위의 증가는 해수의 열용량을 증가시키므로 베이진 부의 담수생산량을 감소시킬 것으로 예상된다. 그러나 베이진 부의 해수는 1일 1회 투입을 전제로 운전하므로 너무 낮은 해수 수위는 증발에 따른 수위의 감소로 베이진 바닥의 부분적 건조를 야기하여 담수생산량의 감소를 초래한다. 따라서 1일 운전시간 동안 베이진 내 건조부분의 발생 없이 최저로 유지할 수 있는 베이진의 초기 해수 수위를 결정할 필요가 있다. 베이진 내 초기 해수 수위에 대한 성능 실험은 다른 모든 조건은 동일하게 한 후 P2-1과 P2-2의 베이진 초기 해수 수위를 다르게 한 후 비교 실험을 하였다.

MED부의 해수공급유량 m_f 은 MED부의 담수생산량에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다. MED는 1단에서부터 11단으로 갈수록 각 단의 온도는 감소하므로 공급하는 해수 유량도 감소시켜야 최대의 담수 생산량을 기대할 수 있다. 각 단의 해수 공급유량은 1단의 해수 공급유량 m_{f1} 을 기준으로 일정한 비율로 감소시킬 수 있으므로 최적의 1단 해수 공급유량 m_{f1} 의 결정이 중요하다. MED부의 해수 공급 유량에 따른 성능실험은 다른 모든 조건은 동일하게 유지하면서 P2-1과 P2-2에 다른 해수 공급 유량을 적용하면서 수행하였다.

실험 도중 능동제어 변수는 없으며, 베이진 내의 해수는 실험 시작 전 1회 공급한 후 실험 종료 전까지 추가 공급하지 않는 조건으로 수행하였다. 실험의 시작과 종료는 각각 일출 시각 및 일몰 시각이며, 실험 시작과 동시에 MED부에 해수를 공급하였다. 태양이 남중하였을 때 최대한의 일사량을 받기 위해 실험 기기들의 방위각을 북점을 기준으로 348°로 조정하였다. 운전 조건별 성능실험에 앞서 두 해수담수기 간의 생산량 편차를 확인하기 위한 실험을 네 차례 수행하였고, 두 기기 간 4.61%(P2-1이 많이 생산됨)의 평균 편차를 확인하고 이후 모든 실험결과에 보정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 측면 단열 유무에 따른 결과

Fig. 4는 하이브리드 태양열 해수담수기 측면유리의 단열재 적용 유무에 따른 실험결과를 보여준다. 실험의 일사량 및 외기조건을 Table 2에 정리하였다. 운전 조건은 $L_w = 5 \text{ mm}$, $m_{f1} = 16 \text{ ccm}$ 으로 설정하였다. 실험결과 측면유리에 단열을 하

Table 2 Weather conditions for the insulation condition test in Fig. 4

Date	Q_{in} , MJ	T_{amb} , °C	V_w , m/s
15.07.02	22.48	28.89	0.62
15.07.03	23.47	28.32	0.65
15.07.06	18.09	27.96	0.37

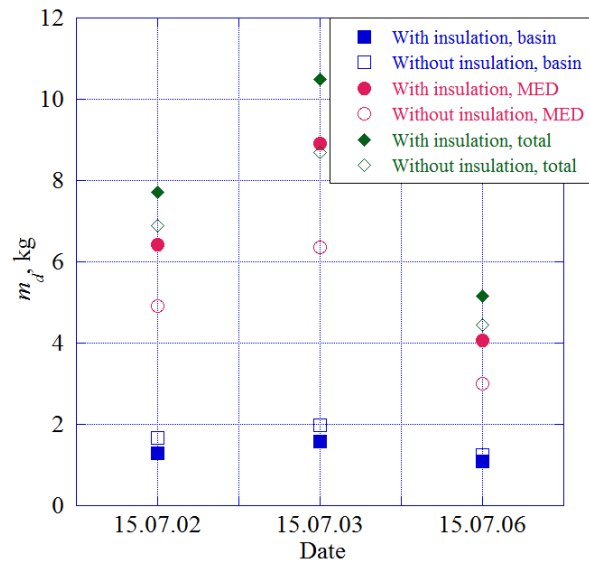


Fig. 4 Daily yields with insulation condition on the side glasses

였을 때 베이진부의 생산량은 3회 평균 18.3% 감소하지만, MED부의 생산량은 평균 35.4% 증가하였다. 결과적으로 총 생산량은 측면 유리에 단열을 적용하였을 때가 3회 평균 16.1%(0.7~1.8 kg) 증가하였다. 본 실험결과는 베이진부의 측면을 통하여 입사되는 태양에너지의 증가보다는 측면을 통하여 손실되는 열에너지의 양이 더 크다는 것을 의미한다. 베이진부의 담수생산량은 측면 단열이 없을 때 측면에서 응축되는 양이 더해져서 증가하는 결과를 보이지만 이에 따른 열손실이 더 크다는 것을 나타낸다. 따라서 본 하이브리드 태양열 해수담수기 또한 선행 연구와 마찬가지로 측면 유리의 단열 조건에서 더 우수한 성능을 나타낸다. 이것은 본 해수담수기의 측면을 유리가 아닌 베이진 라이너(바닥) 재질로 구성해야 함을 의미하며, 단순 태양열 증류기의 경우에도 같은 결과를 나타냄을 의미한다. 본 실험에서는 일사량이 증가할수록 담수 생산량도 증가하는 것을 확인할 수 있으며 최대 담수량은 일사량이 23.47 MJ일 때 10.5 kg이다.

Table 3 Weather conditions for reflecting fins condition test in Fig. 5

Date	Q_{in} , MJ	T_{amb} , °C	V_{w_s} , m/s
15.07.10	17.09	32.75	1.39
15.07.17	16.97	27.68	0.31
15.07.26	20.38	34.40	0.50
16.03.25	22.01	13.36	1.5
16.03.30	23.17	18.11	1.7
16.04.25	23.81	22.17	1.3

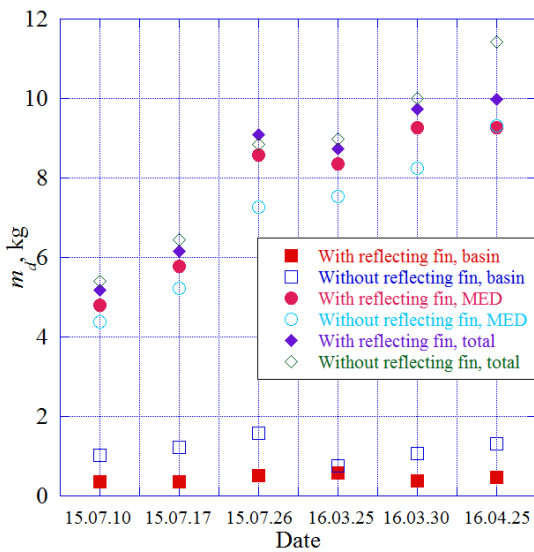


Fig. 5 Daily yields with reflecting fins condition in the basin

3.2 반사흰 설치 유무에 따른 결과

베이진 내부에 반사흰을 설치할 경우의 생산량에 대한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 2015년 수행한 3회의 실험은 표면가공을 하지 않은 반사흰의 결과이고, 2016년 수행한 3회의 실험은 buffing 및 wrapping가공된 반사흰을 3개씩 설치하여 실험한 결과이다. 실험의 일사량 및 외기조건을 Table 3에 정리하였다. 운전 조건은 $L_w=5$ mm, $m_{fl}=16$ ccm이다. 실험결과 베이진부와 MED부의 담수생산량은 반사흰의 설치에 따라 상반된 효과를 나타내었다. 베이진부의 경우, 가공되지 않은 반사흰을 설치했을 때 생산량이 각각 64.7%, 70.5%, 67.1% 만큼 감소하였고, 가공된 반사흰을 설치했을 때 65.1%, 65.2%, 56.2% 만큼 감소하여 6회 평균 64.8%의 생산량 감소를 보였다. MED의 경우, 가공되지 않은 반사흰의 설치시 생산량이 각각 9.8%, 10.7%, 17.9% 증가하였고, 가공된 반사흰을 설치 시 11.0%, 12.4%

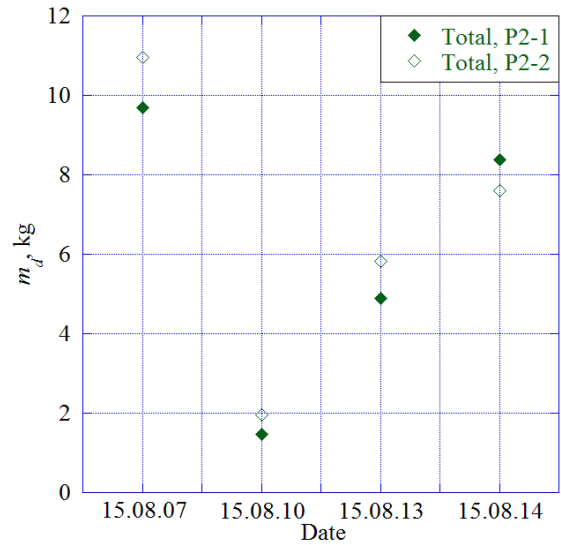


Fig. 6 Daily yields with L_w condition

-0.5% 증가하여 6회 평균 10.4% 증가하였다. 결과적으로 총 담수생산량은 6회 평균 6.3% 감소하였다. 한편, 반사흰에 의해 베이진에 입사한 복사에너지의 일부분은 MED의 1단으로 반사되어 MED부의 담수생산량이 증가함을 볼 때 태양열이 열원일 때의 반사흰은 반사판으로의 긍정적 역할을 할 수 있음을 알 수 있다. 하지만, 반사흰을 설치하였을 경우 MED부의 생산량 증가가 베이진부의 생산량 감소보다 작아서 총 담수생산량은 감소함을 알 수 있다. 이것은 반사흰의 반사율이 낮아서 MED부로 반사되는 복사에너지보다 반사흰에 흡수되어 버려지는 에너지가 더 많기 때문으로 판단된다.

본 연구에서 사용한 반사흰의 반사율을 증가시키기 위해서는 STS 316L재질의 표면에 전해연마, 바렐 연마, 표면코팅 등을 적용할 수 있다. 이러한 가공법을 이용하여 반사율이 높은 반사흰을 적용할 경우 본 실험결과도 상당히 달라져서 전체 담수생산량도 증가할 것으로 예상된다. 그러나 추가 가공비 및 열전달 촉진 흰의 역할 등을 동시에 고려하여 반사흰을 선택할 필요가 있다.

3.3 베이진 해수 수위에 따른 결과

Fig. 6에 베이진 초기 해수 수위 L_w 에 따른 담수생산량에 대한 실험결과를 나타내었다. 다양한 L_w 별 비교실험을 위해 총 4차례 실험을 수행하였으며, Table 4에 실험 조건을 나타내었다. 본 실험에서는 4회 모두 P2-1은 P2-2보다 높은 L_w 로

Table 4 Weather and operating conditions for L_w tests

Date	Q_{in} , MJ	L_w , mm		m_f , ccm	T_{amb} , °C	V_w , m/s
		P2-1	P2-2			
15.08.07	21.46	10	5	8	35.47	0.37
15.08.10	11.46	20	10	8	29.49	0.25
15.08.13	18.21	30	20	8	30.65	0.54
15.08.14	20.62	5	2	8	31.05	0.56

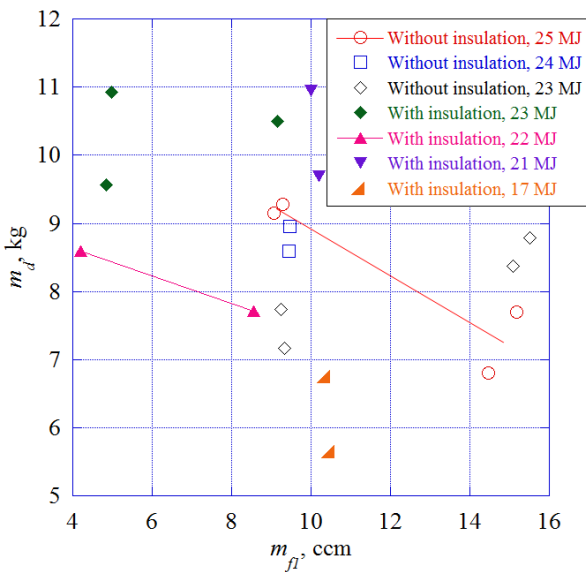


Fig. 7 Variation of the daily yields with m_f

설정하였다. 실험 결과 낮은 L_w 로 실험한 P2-2의 담수생산량이 P2-1보다 각각 7.4%, 24.4%, 12.2% 만큼 증가하였다. 즉, 하이브리드 태양열 해수담수기의 베이진 초기 해수 수위는 일조량과 무관하게 낮을수록 생산량이 증가함을 확인하였다. 하지만 2015년 8월 14일 실험 결과의 경우에는 $L_w = 5$ mm인 P2-1의 담수생산량이 $L_w = 2$ mm인 P2-2 보다 15.3% 더 많이 생산되었음을 알 수 있다. 이것은 베이진의 해수는 운전시작 시 1회만 공급하는데 $L_w = 5$ mm 보다 낮은 수위에서는 증발이 진행됨에 따라 수위가 감소하여 베이진 바닥 면적이 부분적으로 드러나 증발면적이 감소하기 때문이다. 따라서 해수담수기의 제작 정밀도에서 기인하는 베이진 바닥의 편평도를 고려할 때 최적 베이진 해수수위는 5 mm로 판단된다.

3.4 MED부 해수공급 유량에 따른 결과

Fig. 7은 MED부에 공급하는 해수의 유량 변화

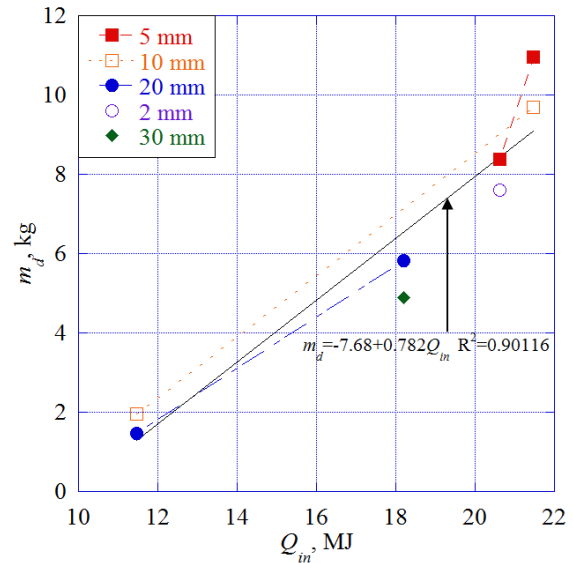


Fig. 8 Variation of the daily yields with Q_{in} at various L_w condition

에 따른 실험 결과이다. 동일한 설계 변수 조건과 운전 변수 조건에서 해수 공급 유량이 증가하면 담수 생산량이 감소하는 전체적인 경향을 보이고 있다. 그러나 일부 조건에서는 상이한 결과를 보이는 등 실험한 4~16 ccm의 유량 범위에서는 m_f 의 변화에 따른 m_d 의 변화가 명확한 경향성을 보이지 않았다. 이것은 위의 건조 부분이 발생하는 최저 m_f 까지는 m_f 가 감소할수록 m_d 가 증가할 것이라는 기대와는 다른 결과이다. 실험한 m_f 의 범위가 좁아서 경향성을 보이지 않거나, 실험 별로 태양 복사에너지 공급이 일정하지 않거나, 주변 온도나 풍향과 풍속과 같은 외기조건이 다소 다른 것 등에 기인하는 것으로 추정된다. 따라서 개선된 실험기법과 해수 공급방식을 개발하여 향후 추가 연구가 더 필요할 것으로 판단된다.

3.5 해수담수기 일사량에 따른 성능 결과

Fig. 8은 하이브리드 태양열 해수담수기의 베이진 초기 해수 수위 운전 조건에서의 공급 열량에 따른 담수 생산량 실험 결과 및 모든 데이터에 대한 선형회귀분석 관계식을 보여주고 있다. 담수 생산량은 $Q_{in} = 11\sim 22$ MJ 범위 내에서 Q_{in} 에 대해 선형적으로 증가하는 결과를 보이고 있으며, 식 (1)과 같은 상관관계를 가진다.

$$m_d = -7.68 + 0.782Q_{in} \quad (1)$$

L_w 운전 조건에서의 하이브리드 태양열 해수담수기의 최대 생산량은 $Q_{in} = 21.46$ MJ일 때 10.47 kg이다. 본 실험에서 설계/제작된 하이브리드 태양열 해수담수기의 열 성능을 평가하기 위해 PR(Performance Ration)를 도입하였으며,⁽¹⁰⁾ 식 (2)와 같다.

$$PR = \frac{m_d(h_{fg} + C_{p,w}dT)}{Q_{in}} \quad (2)$$

해수의 잠열 h_{fg} 은 온도가 100°C인 물의 엔탈피인 2,257 kJ/kg이며, 물의 정압비열 $C_{p,w}$ 은 온도가 100°C 물의 정압비열인 4.219 kJ/kg/K이다. 이러한 조건에서 하이브리드 태양열 해수담수기의 PR은 1.33이다.

한편, 본 하이브리드 태양열 해수담수기에서 생산된 생산수의 수질은 TDS 측정 결과 12.5~21.6 mg/L이고, 환경부 지정 수질검사기관의 음용수 검사 전 항목(46항목)을 만족하였다.

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 태양열을 열원으로 이용하여 하이브리드 태양열 해수담수기의 성능을 향상시키고 최적 운전점을 찾기 위해 베이진 측면 유리의 단열, 베이진 내 반사환 설치, 베이진 내 해수 수위, MED부의 해수 공급 유량과 같은 운전 조건에서의 성능 실험을 수행하였다.

(1) 하이브리드 태양열 해수담수기의 베이진부 측면을 유리로 구성할 경우 측면을 통한 태양에너지 일사량 증가 및 응축면적 증가를 기대할 수 있으나, 실험결과 베이진 측면을 단열하였을 경우 측면단열을 적용하지 않은 경우보다 최대 20.6% 더 높은 담수생산량을 보였다.

(2) 베이진부로 입사되는 태양에너지를 MED부로 반사시키기 위해 베이진부에 반사율이 최대 63%인 반사환을 설치하였다. 반사환을 적용하였을 경우 적용하지 않은 경우에 비해 MED부의 담수생산량은 증가하였지만 총 담수 생산량은 오히려 6.3% 만큼 감소하였다. 즉 하이브리드 태양열 해수담수기에 반사환을 적용할 때 최소 반사율이 63% 이상인 반사환을 설치해야 총 담수생산량의 증가를 기대할 수 있다.

(3) 베이진 내의 초기 해수수위 조건 실험에서 수위가 낮을수록, 태양 복사에너지의 일사량과

무관하게 담수생산량이 증가하였다. 그러나 5 mm보다 낮은 수위에서는 오히려 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 하이브리드 태양열 해수담수기의 제작 상 일반적인 바닥편평도를 고려하여 초기 해수 수위를 5 mm 이상으로 설정하는 것이 바람직함을 보여준다.

(4) MED부에 공급하는 해수의 유량 경우 위의 건조가 일어나는 최저 유량 한계 내에서 유량이 감소할수록 생산량이 증가할 것이라는 기대와 달리 실험 범위인 4~16 ccm에서는 뚜렷한 생산량의 변화 경향이 관찰되지 않았다. 이는 본 실험에서의 해수 공급 유량 범위보다 더 넓은 범위를 설정하여 그 경향의 차이를 규명할 필요가 있다.

후 기

본 연구는 2017년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No. 20173030083420)

참고문헌 (References)

- (1) Grag, H. P., 1987, *Advances in solar energy technology*, Dordrecht, Boston, Vol. 1, pp. 97~98.
- (2) Park, C. D., Lim, B. J. and Tanaka, H., 2010, "Development of Seawater Distiller Utilizing Waste Heat of Portable Electric Generators," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 34, No.6, pp. 607~613.
- (3) Park, C. D., Lim, B. J. and Chung, K. Y., 2011, "Two-effect Distillation of a Seawater Distiller Utilizing Waste Heat of a Small Electric Generator," *Desalination and Water Treatment*, Vol. 33, pp. 359~364.
- (4) Jang, H., Yi, C. S., Suh, J. S., Jeong, K. Y. and Park, C. D., 2013, "Study on Prediction of Performance with Design Variables of Solar-Assisted Still Using Waste Heat from Diesel Generator," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 37, No. 12, pp. 1064~1068.
- (5) Noh, Y. D., Park, C. D., Lim, B. J. and Chung, K. Y., 2014, "Performance Experiment of Seawater Distiller using Waste Heat of Portable Electric Generator," *Spring conference 2014 Korean Soc. Mech. Thermal engineering*, pp. 279~280.
- (6) Park, C. D., Lim, B. J., Noh, C. D., Lee, S. S. and Chung, K. Y., 2015, "Parametric Performance Test of Distiller Utilizing Solar and Waste Heat,"

- Desalination and Water Treatment*, Vol. 55, pp. 3303~3309.
- (7) Lim, B. J., Park, C. D., Chung, K. R. and Yu, S. S., 2015, "Experiments for Hybrid Solar Distiller with Waste Heat," *Spring conference 2015 Korean Soc. Mech. Thermal engineering*, pp. 187~188.
- (8) Tanaka, H., 2009, "Experimental Study of Vertical Multiple-effect Diffusion Solar Still Coupled with a Flat Plate Reflector," *Desalination*, Vol. 249, pp. 34~40.
- (9) Ali, F. M., Alghoul, M. A., Fudholi, A., Abdul-Majeed, M. M. and Sopian, K., 2014, "Factors Affecting Basin Type Solar Still Productivity: A Detailed Review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 32, pp 430~447.
- (10) Park, C. D., Lim, B. J., Chung, K. Y., Lee, S. S. and Kim, Y. M., 2016, "Experiemntal Evaluation of Hybrid Solar Still using Waste Heat," *Desalination*, Vol. 379, pp. 1~9.
- (11) Mohamad, M. A., Soliman, S. H., Abdel-Salam, M. S. and Hussein, H. M. S., 1995 "Experimental and Financial Investigation of Asymmetrical Solar Stills with Different Insulation," *Applied Energy*, Vol. 52, pp. 265~271.