

<응용논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2016.40.7.477>

ISSN 1226-4881(Print)
2288-5324(Online)

태양열 담수기 다중효용부의 해수 공급유량에 관한 1차원 수치해석[§]

임병주^{**} · 유상석^{**} · 박창대^{*} · 정경열^{*}

* 한국기계연구원 환경에너지기계연구본부, ** 충남대학교 기계공학부

One-dimensional Numerical Analysis of the Effect of Seawater Feed Rate on Multi-effect Solar Stills

Byung-Ju Lim^{**}, Sang-Seok Yu^{**}, Change-Dae Park^{*} and Kyung-Yul Chung^{*}

* Environment and Energy Systems Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials

** School of Mechanical Engineering, ChungNam Nat'l Univ.

(Received January 28, 2016 ; Revised May 9, 2016 ; Accepted May 23, 2016)

Key Words: Solar Still(태양열 증류기), Multiple Effect(다중효용), Desalination(해수담수), Numerical Analysis(수치해석), Optimization(최적화)

초록: 다중효용 태양열 담수기에서 다중효용부 각 효용단의 해수 공급유량은 효용수 증가에 따른 열에너지 감소를 고려하여 점차 줄어드는데, 선행연구에서는 효용단 별 서로 다른 공급유량 감소율을 제시하였다. 이론적으로 열에너지 감소율이 일정하기 때문에 효용단 별 서로 다른 유량감소율은 적절하지 않다. 본 논문에서는 수치해석을 통해 다중효용부의 공급유량 감소율에 따른 담수생산량 특성을 분석하였다. 해석결과 공급에너지가 같은 조건(12MJ)에서 동일한 감소율(11%)일 때와 그렇지 않을 때의 생산량 차이는 0.56%로 거의 비슷하였다. 또한 수치해석을 통해 고온의 배기가스로부터 얻은 공급 에너지량에 따라 다중효용부 해수공급유량의 최적값을 도출하였다. 최적 유량은 에너지의 공급 형태에 따라 선형적으로 증가하거나 증가 후 평형상태에 도달하는 현상이 발생하였다.

Abstract: In a multi-effect solar distiller, a feeding rate of seawater to each effect should be decreased as the effect number is increased. In previous studies, the feed rate of seawater was not reduced evenly between the effects, which is unreasonable, since the thermal energy input of each effect decreases by the same amount. In this work, numerical analysis was carried out in order to elucidate this discrepancy. The results showed that the amount of distillates produced was almost the same for both evenly and unevenly reduced flow rates between the effects. Optimum feed rates of seawater with various energy inputs from exhaust gas heat exchanger were also obtained. The results showed that the optimum feed rate of the first effect increased linearly or reached a steady state depending on the heat flux.

- 기호설명 -

c_p : 정압비열(J/kg·K)

L_w : 베이진(basin) 해수 수위(mm)

\dot{m}_f : 다중효용부 공급유량(ccm, cm³/min)

m_d : 담수생산량(kg)

Q_i : 총 공급에너지(MJ)

\dot{Q}_{in} : 총 공급에너지 유량(J/s)

T : 온도(K)

t : 작동시간(s)

\dot{V} : 체적 유량(m³/s)

그리스문자

ρ : 밀도(kg/m³)

§ 이 논문은 대한기계학회 창립 70주년 기념 학술대회 (2015. 11. 10-14., ICC제주) 발표논문임.

† Corresponding Author, bzoo77@kimm.re.kr

© 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

하첨자

amb : 대기

- b : 베이진 해수
- c : 대류
- d : 전도
- e : 증발 및 응축
- g : 배기가스
- i : 효율단의 순서
- in : 입구
- out : 출구
- pi : i번째 평판
- r : 복사
- wi : i번째 워

1. 서론

소형 담수화 기술 중 태양열을 이용한 다중효용 방식은 태양열과 폐열을 동시에 사용할 수 있으며, 에너지를 반복적으로 사용함으로써 생산 효율 극대화할 수 있다.

다중효용 해수 담수기(Hybrid Multi-effect Solar Distiller, HMED)는 Fig. 1과 같이 크게 Basin부와 다중효용부(Multiple Effect Distiller, MED)로 구성되어 있다. Basin부는 유리, 해수(basin water) 및 습공기층(humid air)으로 구성되어 있다. 유리를 통과하여 전달된 태양 복사에너지는 해수와 MED의 1단 평판(plate)에 열에너지를 공급한다. 또한 폐열을 열교환할 수 있는 튜브를 Basin부의 바닥에 설치하여 대류 열교환을 통해 열에너지를 공급받을 수 있다. 열에너지에 의해 가열된 basin water에서 증발된 수증기는 습공기층으로 확산되며, 유리 및 1단 plate의 표면에서 응축되어 담수가 생성된다. 그리고 수증기의 응축잠열은 Stainless Steel 평판을 통해 다중효용부로 전달된다.

다중효용부는 평판에 워(wick)이 부착된 형태로 효율단이 설치되어 있으며, 5 mm 간격으로 서로 이격되어 있다. 평판은 Basin부의 열에너지와 수증기의 응축에너지를 워에 전달하며, 동시에 수증기의 응축에 의해 생성된 담수를 집수한다. 워는 평판으로 해수를 균등하게 공급하는 역할을 하며, 동시에 평판으로부터 전달된 열에너지에 의해 해수를 가열되어 증발하도록 한다. 각 효율단에서는 같은 원리에 의해 반복적으로 열에너지가 사용되기 때문에 담수의 생산효율을 높일 수 있다.

HMED의 성능은 L_w , \dot{m}_f , Q_t , T_{amb} , 효율단 개

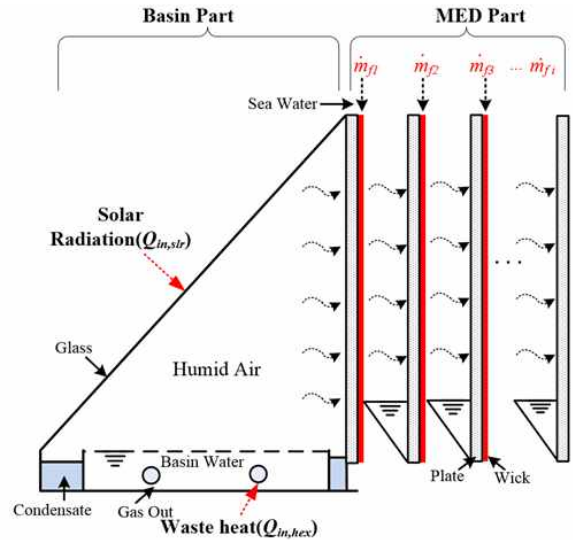


Fig. 1 Schematics of HMED

수 등 다양한 변수들에 영향을 받기 때문에 각 변수에 대한 성능특성을 파악하고 최적화를 수행하는 것이 매우 중요하다. 기존 연구에서는 이러한 환경 변수에 따라 HMED의 성능 특성을 분석하기 위한 실험⁽¹⁻⁴⁾이 수행되었으며, 시뮬레이션 모델을 개발하여 성능 특성 분석 및 예측을 하고자 하였다.⁽⁵⁻⁸⁾

한편 HMED의 성능은 MED의 성능에 더 많이 영향을 받기 때문에 MED에 영향을 미치는 변수들의 최적화가 필요하다. MED의 성능과 밀접한 관련있는 제어 변수로 \dot{m}_f , Q_t , 효율단 개수 등이 있다. 일반적으로 다중효용부의 열에너지 흐름방향(Fig. 1의 왼쪽에서 오른쪽 방향으로) 각 효율단의 입력열량이 감소하므로 공급해수 유량도 감소시켜 공급해야한다. 기존 연구에서는 실험 및 해석 결과를 토대로 각 효율단의 \dot{m}_f 값과 서로 다른 \dot{m}_f 감소율을 제시하였다.^(2,9) 그러나 이론적으로 MED부에서 효율단의 증가에 따라 열유속(heat flux) 감소율은 동일하기 때문에 서로 다른 유량 감소율을 사용하는 것은 적절하지 않다고 판단된다. 또한 담수기의 생산량을 높이기 위해서는 \dot{Q}_in 에 따라 최적 \dot{m}_{fi} 에 대한 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 HMED의 성능을 모사할 수 있는 시뮬레이션 모델을 통해 폐열을 열원으로 작동시 MED부의 \dot{m}_f 유량 감소율이 담수기의 성능에 미치는 영향을 밝히고, 주요 성능 변수인

Q_i 와 \dot{m}_f 의 최적화에 대한 연구를 수행하였다.

2. HMED 열해석 모델링

HMED를 유리(내측유리+외측유리), basin water, 습공기층, 평판, 워 등으로 구분하고, 각 부위에 대한 에너지 방정식을 수립하여 1차원 수치해석을 수행하였다.

본 연구에서 대상으로 하는 MED부의 해석모델은 다음과 같다. 식 (1)과 식 (2)는 첫 번째 평판과 wick, 식 (3)과 식 (4)는 i번째 평판과 wick 그리고 식 (5)는 마지막 평판에서의 에너지보존방정식을 나타낸다.

$$\dot{Q}_{i n, p1} = \rho_{p1} \dot{V}_{p1} c_{p1} \frac{dT_{p1}}{dt} + \dot{Q}_{d, p1-w1} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{d, p1-w1} &= \rho_w V_w c_w \frac{dT_{w1}}{dt} + \dot{Q}_{d, w1-p2} \\ &+ \dot{Q}_{r, w1-p2} + \dot{Q}_{e, w1-p2} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{d, w(i-1)-p(i)} + \dot{Q}_{r, w(i-1)-p(i)} + \dot{Q}_{e, w(i-1)-p(i)} \\ = \rho_p \dot{V}_p c_p \frac{dT_{pi}}{dt} + \dot{Q}_{d, pi-wi} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{d, pi-wi} &= \rho_w \dot{V}_w c_w \frac{dT_{wi}}{dt} + \dot{Q}_{d, wi-p(i+1)} \\ &+ \dot{Q}_{r, wi-p(i+1)} + \dot{Q}_{e, wi-p(i+1)} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{d, w(i-1)-pi} + \dot{Q}_{r, w(i-1)-pi} + \dot{Q}_{e, w(i-1)-pi} \\ = \rho_p \dot{V}_p c_p \frac{dT_{pi}}{dt} + \dot{Q}_{d, pi-wi} \end{aligned} \quad (5)$$

Wick에서 질량보존에 대한 해수 공급량과 증발량의 관계는 다음과 같다.

$$\dot{m}_{fi} = \dot{m}_e + \dot{m}_{out} \quad (6)$$

수치해석 시 1차 비선형 미분방정식을 풀기 위해 급경사 미분방정식(stiff differential equation)의 MATLAB solver 중 ode15s 함수를 사용하였다. 수치해석의 오차범위는 10^{-6} 으로 설정하였다.

담수기의 설계 조건 및 환경조건을 이용하여 미분방정식으로부터 각 부의 시간에 따른 온도 프로파일을 도출하였다. 그리고 온도 프로파일을 이용하여 담수량을 계산하였다.

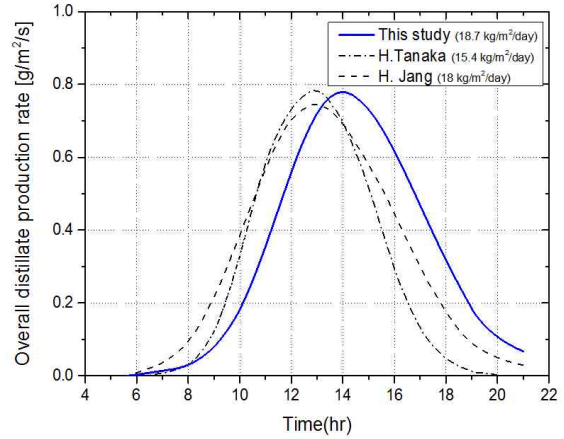


Fig. 2 Comparison of variation of product rate over a day at the summer solstice

3. 해석 결과 및 검증

3.1 해석 검증

수치해석 모델을 검증하기 위해 선행연구와 동일한 해석 조건을 적용하여 그 결과를 비교하였다. Fig. 2는 하지에 5시 30분부터 21시까지 담수기를 작동했을 때 시간당 생산되는 담수량 분포를 나타낸 것으로 본 연구와 H. Tanaka⁽⁶⁾ 및 H. Jang⁽⁸⁾의 결과를 서로 비교한 것이다.

선행연구의 경우 시간당 생산되는 담수량이 최대일 때는 13시로 본 연구의 결과보다 1시간 더 빠르게 나타났다. 이는 두 선행연구의 경우 습공기층과 유리는 정상상태로 해석을 하고 그 값을 경계조건으로 나머지 부분을 비정상상태로 해석을 수행하였지만, 본 연구에서는 실제 조건을 반영하기 위해 모든 부위의 해석을 비정상상태로 해석하였기 때문에 기존 연구보다 시간당 담수생산이 지연되었을 것으로 판단된다. 담수생산량은 H. Jang의 해석모델과 거의 동일하였으며, H. Tanaka모델 보다 약간 높게 나왔다. 이는 H. Tanaka의 해석모델에서는 워의 물성치를 고려하지 않은 반면 H. Jang과 본 해석모델에서는 고려하였기 때문에 H. Tanaka의 결과보다 담수량의 분포가 완만하고 생산량은 더 많이 나온 것으로 판단된다.

3.2 해석 조건

HMED 1차원 열해석 모델의 주요 파라미터를 Table 1에 정리하였다.

해석 시 Basin의 경우 내측유리, 외측유리,

Table 1 Parameters for HMED Optimization

Variables	Value	Type
L_w (mm)	30	fixed
T_{amb} (°C)	25	fixed
$T_{g,in}$ (°C)	283.5	fixed
t (hr)	3.5~15.2	variable
	8	fixed
\dot{V}_g (m ³ /hr)	4.5~21.4	variable
	10.8	fixed
Q_t (MJ)	6, 12, 18, 24	variable

Table 2 Specifications for dimension and property of HMED

Specifications	Value	Unit
Thickness of plate	0.005	m
Thickness of wick	0.0025	m
Thickness of glass	0.005	m
Gap between multi-effects	0.005	m
Width of glass	1	m
Slope of glass	40	degree
Length of basin	0.766	m
Height of plates	1	m
Area of plate	1	m ²
Area of basin	0.766	m ²
Area of glass	1	m ²
Specific heat of plate	903	J/kg/K
Specific heat of glass	750	J/kg/K
Specific heat of wick	2,000	J/kg/K
Specific heat of waste gas	1,007	J/kg/K
Density of plate	2,702	kg/m ³
Density of glass	2,500	kg/m ³
Density of wick	0.6964	kg/m ³
Conductivity of plate	14	W/m/K
Conductivity of water	0.62	W/m/K

Basin water, 습공기층을 개별 노드로 설정하였다. 다중효용부의 효용단 수는 10개이며, 각 효용단의 워크와 평판을 개별 노드로 구분하였다. 다중효용부의 마지막 단은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 평판으로만 구성되어 있어 노드는 평판 11개, 워크 10개이다. 해석 모델에서 담수기 주요 구성 요소에 대한 크기 및 물성데이터 등을 Table 2에 정리하였다.

해석 시 담수기로의 에너지공급원은 폐열(waste heat)만을 고려하였다. 배기가스의 폐열은 열회수관을 통해 basin water로 공급되며, 이 때 공급된 에너지의 \dot{Q}_{in} 와 Q_t 는 식 (6)과 식 (7)에 의해 계산된다.

$$\dot{Q}_{in} = \rho_g \times \dot{V}_g \times c_p \times (T_{g,in} - T_{g,out}) \quad (7)$$

$$Q_t = \sum_n^t \rho_g \times \dot{V}_g \times c_p \times (T_{g,in} - T_{g,out}) \times \Delta t_n \quad (8)$$

해석시 Q_t 는 \dot{V}_g 와 t 의 함수로 하여 Table 1에 제시된 값을 도출하였다. 식 (6)에서 $T_{g,out}$ 의 값을 T_b 는 같다고 두어 배기가스의 열에너지가 전열관을 통해 모두 basin water로 전달되는 것으로 가정하였다.

다중효용부 각 효용단의 \dot{m}_f 값은 1단에서부터 10단까지 주어진 유량 감소율에 의해 각 단의 공급유량을 계산한 후 식 (8)과 같이 인접한 2개 단의 평균 \dot{m}_f 를 사용하였다.

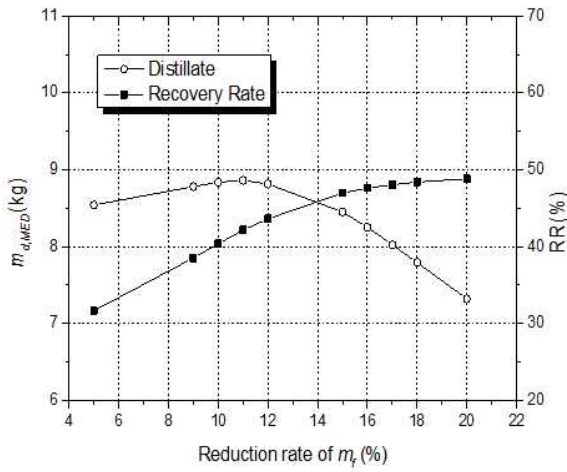
$$\dot{m}_{f_i} = \dot{m}_{f_{(i+1)}} = (\dot{m}_{f_i} + \dot{m}_{f_{(i+1)}})/2, (i = 1, 3, 5 \dots 9) \quad (9)$$

이는 효용단의 간격이 매우 좁기 때문에 실험시 각 워크에 서로 다른 유량을 공급하지 않고 2개 효용단에 동일한 \dot{m}_f 를 공급하는 실제 운전 조건을 반영한 것이다. 또한 효용단 사이의 습공기층 간격이 좁은 관계로 전도 열전달만 고려하였다. 해석시 공급해수 및 각 노드의 초기 온도 조건은 25 °C로 설정하였다.

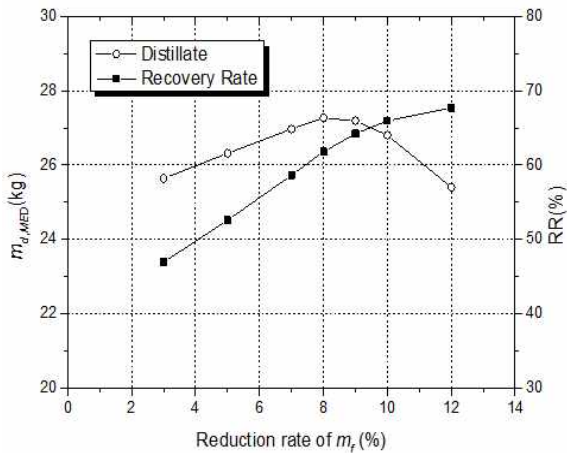
3.3 해석 결과

3.3.1 다중효용부 유량감소율의 특성

MED부의 1단에서 마지막 단까지 \dot{m}_f 감소율의 특성을 분석하기 위한 해석을 수행하였다. 해석조건 중 Q_t 와 \dot{m}_{f1} 의 값은 추후 비교를 위해 실험과 동일한 값을 선정하였다. Q_t 와 \dot{m}_{f1} 가 각각 12 MJ, 6.7 ccm 그리고 24 MJ, 13 ccm 일 때 동일한 \dot{m}_f 감소율을 적용한 결과 Fig. 3과 같이 \dot{m}_f 감소율에 따른 MED부의 담수량($m_{d,MED}$)과 회수율(Recovery Rate, RR) 분포를 얻을 수 있었다. 여기서 회수율은 \dot{m}_f 대비 생산되는 담수의 비율을 의미한다. Fig. 3(a)에서 볼 수 있듯 Q_t 가 12 MJ일 때 \dot{m}_f 감



(a) $Q_t=12$ MJ, $m_{fi}=6.7$ ccm



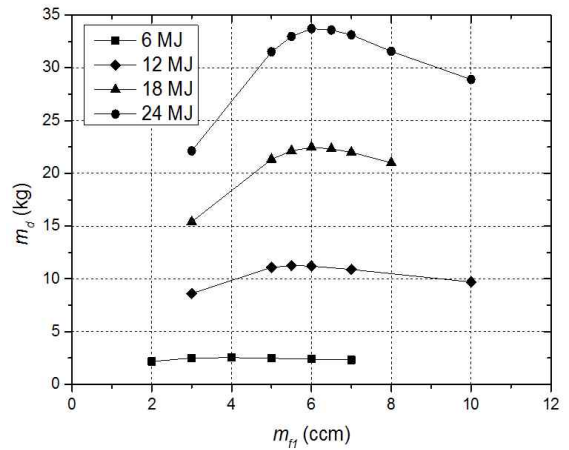
(b) $Q_m=24$ MJ, $m_{fi}=13$ ccm

Fig. 3 Distillate and RR with reduction rate of feeding rate of MED

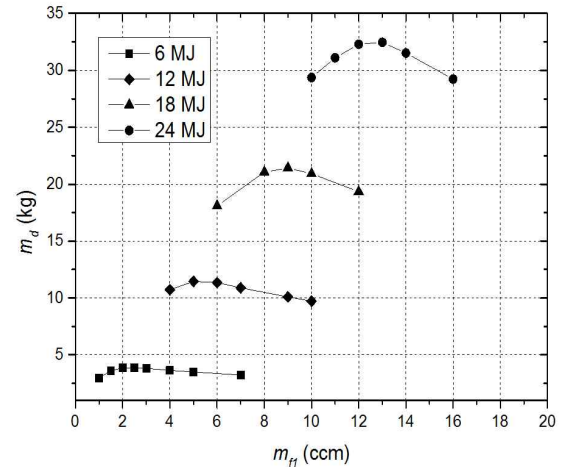
소용이 5%에서 11%로 증가함에 따라 $m_{d,MED}$ 도 증가하다가 11%에서 최대 8.86 kg을 나타내었다. 최대 담수생산량 조건에서 RR은 42.2%이며, \dot{m}_f 감소율 증가시 선형적으로 증가하다가 점차 그 기울기가 감소하는 경향을 나타내었다. 그리고 Q_t 가 24 MJ로 증가할 경우 Fig. 3(b)에서 보는 바와 같이 \dot{m}_f 감소율이 8%에서 최대 생산량을 나타내었으며, 이 때 RR은 61.8%였다. 본 해석결과를 통해 MED 부로 인입되는 열에너지가 증가할 경우 최적 \dot{m}_f 감소율은 감소하고, RR은 증가하는 것을 알 수 있다. \dot{m}_f 감소율이 감소한다는 것은 MED 부로 공급되는 해수량이 증가한다는 것을 뜻한다. 결국 MED부에 열에너지가 많이 공급될 경우 더 많은 해수를 공급해야 담수량과 회수율이 증가한다는 것을 알 수 있다.

Table 3 \dot{m}_f decrease rate of previous study

i,i+1 (\dot{m}_f decrease rate from i to i+1)									
1,2	2,3	3,4	5,6	6,7	7,8	8,9	9,10	10,11	
9.09	10	11.11	8.33	9.09	5	10.53	5.88	6.25	



(a) Distillate at condition of variable operating time(constant heat flux)



(a) Distillate at condition of variable gas velocity (variable heat flux)

Fig. 4 \dot{m}_{f1} in terms of total energy input

한편, Q_t 가 12 MJ일 때 H. Tanaka의 연구⁽²⁾에서 제시한 서로 다른 \dot{m}_f 감소율(Table 3 참조)을 적용하여 해석을 수행한 결과 $m_{d,MED}$ 는 8.81 kg이 생성되었다. 이 값은 동일한 \dot{m}_f 감소율의 담수생산량 8.86 kg과 비교했을 때 0.56% 정도 낮은 것으로 담수기 작동시 제어 및 기기의 오차를 고려하면 무시 가능한 차이이므로 작동 및 제어 편의성을 고려하면 동일한 \dot{m}_f 감소율을 적용하는 것

Table 4 Optimum \dot{m}_{f1} and maximum m_d in terms of total energy input

Q_t	m_{f1} (ccm), m_d (kg)	
	Variable heat flux	Constant heat flux
6	2.5, 3.9	4, 3.0
12	5, 11.5	5.5, 11.3
18	9, 21.4	6, 22.5
24	13, 32.5	6, 33.7

이 바람직하다고 판단된다.

3.3.2 다중효용부의 최적 공급유량

배기가스의 $T_{g,in}$ 과 \dot{V}_g 을 Table 1과 같이 고정 변수로 두고(일정 열유속 조건) 작동시간 변경에 의해 Q_t 를 변동시키면서 해석을 수행하였다. 해석결과 Q_t 가 6 MJ, 12 MJ, 18 MJ, 24 MJ일 때 최대 m_d 를 갖는 MED부의 1단 공급 유량(\dot{m}_{f1})은 Fig. 4(a)에서 보는 바와 같이 각각 4 ccm, 5.5 ccm, 6 ccm, 6 ccm이었다. 그래프에서 알 수 있듯이 MED부의 최적 \dot{m}_{f1} 은 Q_t 에 따라 증가하다가 평형상태에 도달하는 경향을 보였다. 최대 m_d 는 6 MJ일 때 3.0 kg이며 24 MJ일 때 33.7 kg으로 Q_t 가 4배 증가했을 때 m_d 는 11.2배 증가하였다. Q_t 가 6 MJ일 때 작동시간은 3.5 hr이며 24 MJ일 때는 15.2 hr이었다.

담수기를 8 hr의 일정한 시간 동안 작동시킬 때 \dot{V}_g 를 변수로(가변 열유속 조건) 앞의 해석조건과 동일한 Q_t 조건에서 해석을 수행하였다. Fig. 4(b)에서 보는 바와 같이 각 Q_t 에 대해 최대 m_d 을 얻는 \dot{m}_{f1} 은 2.5 ccm, 5 ccm, 9 ccm, 13 ccm이고, 최적 \dot{m}_{f1} 과 Q_t 는 거의 선형적인 관계를 보였다. 최대 m_d 는 6 MJ일 때 3.9 kg이며, 24 MJ일 때 32.5 kg으로 약 8.3배 증가하였다.

두 경우의 해석 결과에서 같은 Q_t 조건에서 m_d 를 비교할 경우 Table 3에서 보는 바와 같이 6 MJ일 때는 가변 열유속 조건일 때, 24 MJ일 때는 일정 열유속 조건일 때 m_d 가 더 많았다. 그리고 같은 Q_t 에 대해 작동시간이 더 길수록 생산량이 많다는 것을 알 수 있었다. 이는 담수생산량은 Q_t 가 같을 때 담수기로 유입되는 열유속 보다 작동시간에 더 영향을 많이 받는다고 볼 수 있다.

Table 4에 제시한 바와 같이 Q_t 의 증가에 따라

Table 5 Experimental conditions and results

Date	Q_t	L_w	m_{f1}	m_d
2013/12/20	6.04	10	11.16	2.23
2013/12/21	6.13	10	18.4	1.62
2013/12/22	6.11	10	14.5	1.82
2013/12/22	6.04	10	8.3	2.82
2013/12/23	6.07	10	4.6	1.61
2013/12/24	6.16	10	4.4	1.95

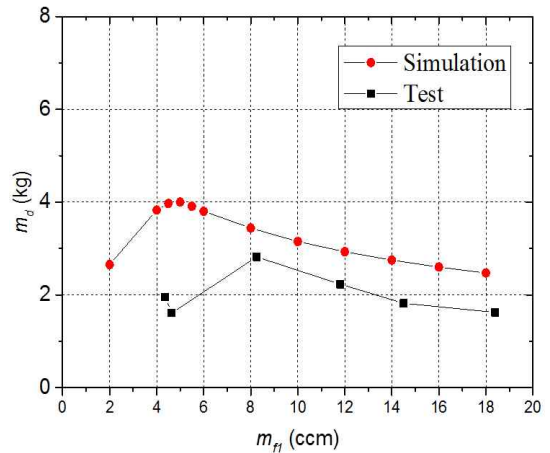


Fig. 5 Comparison with distributions of distillate with feeding rate of MED

일정한 열유속일 때 최적 \dot{m}_{f1} 범위는 4~6 ccm으로 Q_t 에 따라 큰 차이를 보이지 않았으나, Q_t 의 증가에 따라 열유속이 증가할 때 최적 \dot{m}_{f1} 범위는 2.5~13 ccm으로 상대적으로 차이가 크게 나타났다. 본 결과는 담수기 작동방식에 따라 \dot{m}_{f1} 제어와 관련이 있다. 일정 열유속일 때 제어 및 계측 오차를 고려하면 \dot{m}_{f1} 을 약 5 ccm의 일정한 값으로 설정하더라도 적정 성능을 얻을 수 있으나, 가변 열유속일 때는 \dot{m}_{f1} 의 제어가 필요할 것으로 판단된다. 그리고 최적 \dot{m}_{f1} 값은 Q_t 보다 열유속에 더 큰 영향을 받는 것을 알 수 있었다.

3.4 실험 결과와의 비교

기존 연구에서 수행한 HMED의 성능실험⁽¹⁰⁾과 본 수치해석 결과를 비교하기 위해 성능실험 조건을 적용하여 수치해석을 수행하였다. Table 5에 제시한 바와 같이 성능 실험은 2013년 12월 20일 ~ 2013년 12월 24일에 수행되었으며, 각 실험의 열에너지 공급량은 6 MJ, L_w 는 10 mm이다. Fig. 5에 성능실험 결과와 수치해석 결과를 제시하였

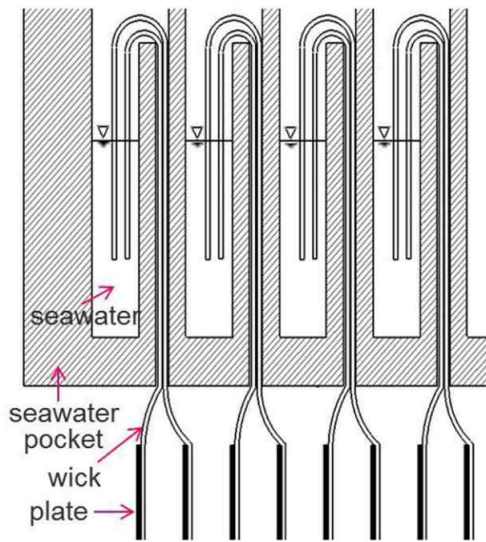


Fig. 6 Seawater feeding device to wick⁽¹⁰⁾

다. 실험 결과 \dot{m}_{f1} 이 4.4 ccm에서 18.4 ccm까지 증가했을 때 담수는 1.61 kg~2.82 kg 생산되었으며 8.3 ccm에서 가장 높았다. 그리고 동일한 조건에서 수치해석 결과 \dot{m}_{f1} 이 2 ccm에서 18 ccm까지 증가할 때 2.47 kg~4.0 kg 생산되었으며 5 ccm에서 최댓값을 나타내었다. Fig. 5에서 알 수 있듯 두 결과의 분포는 서로 유사하다. 그러나 실험에 비해 담수 생산량은 수치해석에서 더 많이, 최적 \dot{m}_{f1} 의 경우 더 낮게 나타났다.

실험시 워에 해수를 공급할 때는 Fig. 6과 같이 해수 포켓(seawater pocket)에 워를 잠기게 한다. 이 때 워에 자연스럽게 흡수된 해수는 중력에 의해 평판을 따라 아랫방향으로 흐르게 된다. 그런데 포켓에 해수를 공급하는 튜브 위치, 해수 포켓의 폭 방향 구조적 불균일성 등에 의해 워의 폭 방향으로 해수 유량의 불균일이 발생한다. 이러한 경우 동일한 워 내에서 일부 구간에서는 해수가 완전 증발되거나, 과도하게 흘러 역시 생산량이 줄어드는 현상이 발생하게 된다. 하지만 수치해석의 조건은 모든 표면에서 고르게 동일한 유량이 흐르는 최적 조건이기 때문에 실험보다 생산량이 더 많다고 판단된다. 이러한 워의 유량 불균일성은 수치해석 보다 더 많은 유량을 공급해야 동일한 조건을 만족할 수 있기 때문에 최적 \dot{m}_{f1} 값이 실험결과가 더 높게 나왔을 것으로 보인다. 수치해석의 생산량이 더 높게 나타나는 다른 원인으로 실험시 워를 따라 흐르는 해수 농도의 증가를 들 수 있다. 워의 상부에서 하부로 해

수가 흘러갈 때 해수가 증발하면 해수의 농도가 점차 높아져서 해수의 끓는점이 상승하게 된다.⁽⁷⁾ 이는 해수의 증발압 감소로 이어져 역시 생산량이 줄어들게 된다.

4. 결 론

본 연구에서는 다중효용 해수담수기의 성능을 모사할 수 있는 시뮬레이션 모델을 이용하여 수치해석을 통해 폐열을 열원으로 작동시 다중효용부의 \dot{m}_f 감소율이 담수기의 성능에 미치는 영향을 분석하고, 성능 변수인 Q_t 와 \dot{m}_f 의 최적 성능 특성에 대한 해석 결과를 도출하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) HMED의 다중효용부 해수공급 시 단순성을 고려하여 각 단별 일정한 \dot{m}_f 감소율을 적용하는 것이 바람직하다.
- (2) 작동시간이 일정한 조건에서 공급 열유속을 변수로 Q_t 가 공급될 경우 Q_t 에 따른 최적 \dot{m}_{f1} 의 변동이 작다. 그러나 일정한 일정 열유속 조건에서 작동시간을 변수로 Q_t 가 공급될 경우 Q_t 에 따른 최적 \dot{m}_{f1} 값의 변동이 크기 때문에 Q_t 를 고려하여 \dot{m}_{f1} 값의 제어가 필요하다.
- (3) Q_t 가 동일하지만 공급열원의 열유속과 시간이 서로 다른 조건들의 경우 작동시간이 길수록 더 많은 담수가 생산된다.
- (4) 본 수치해석 모델의 정확성을 높이기 위해서는 워의 폭 방향 유량 불균일성과 농도가 증가에 따른 증발양 감소 영향을 반영할 필요가 있다.

후 기

본 연구는 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No.20133030080830)

참고문헌 (References)

- (1) Park, C. D., Lim, B. J. and Chung, K. Y., 2011, "Experimental Results of a Seawater Distiller Utilizing Waste Heat of a Portable Electric Generator," Desalination and Water Treatment, Vol. 31, No. 1-3, pp. 134~137.
- (2) Tanaka, H., Nosoko T. and Nagata T., 2002,

- “Experimental Study of Basin-Type, Multiple-Effect, Diffusion-Coupled Solar Still,” *Desalination*, Vol. 150, No. 2, pp. 131~144.
- (3) Tanaka, H., 2009, “Experimental Study of a Basin Type Solar Still with Internal and External Reflectors in Winter,” *Desalination*, Vol. 249, No. 1, pp. 130~134.
- (4) Tanaka, H., 2009, “Experimental Study of Vertical Multiple-Effect Diffusion Solar Still Coupled with a Flat Plate Reflector,” *Desalination* Vol. 249, No. 1, pp. 34~40.
- (5) Tanaka, H. and Yasuhito, N., 2004. “A Vertical Multiple-Effect Diffusion-Type Solar Still Coupled with a Heat-Pipe Solar Collector,” *Desalination*, Vol. 160, No. 2, pp. 195~205.
- (6) Tanaka, H., Nosoko, T. and Nagata, T., 2000, “A Highly Productive Basin-Type-Multiple-Effect Coupled Solar Still,” *Desalination*, Vol. 130, No. 3, pp. 279~293.
- (7) Nosoko, T., Kinjo, T. and Park, C. D., 2005, “Theoretical Analysis of a Multiple-Effect Diffusion Still Producing Highly Concentrated Seawater,” *Desalination*, Vol. 180, No. 1-3, pp. 33~45.
- (8) 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. 1061~1068.
- (9) Tanaka, H., Yasuhito, N. and Katsuhiko, W., 2004, “Parametric Study on a Vertical Multiple-Effect Diffusion-Type Solar Still Coupled with a Heat-Pipe Solar Collector,” Vol. 171, pp. 243~255.
- (10) Park, C. D., Lim, B. J., Chung, K. Y., Lee, S. S. and Kim, Y. M., 2016, “Experimental Evaluation of Hybrid Solar Still using Waste Heat,” *Desalination* Vol. 379, pp. 1~9.