



[2017-9-ST-002]

다중효용방식 해수담수기의 성능특성에 관한 2차원 수치해석

임병주^{1)*} · 유상석²⁾ · 박창대^{1,3)} · 여세동³⁾ · 정경열¹⁾

Two-dimensional Numerical Analysis on the Performance of a Multi-effect Solar Distiller

Byung-Ju Lim^{1)*} · Sang-Seok Yu²⁾ · Change-Dae Park^{1,3)} · Se-Dong Yeo³⁾ · Kyung-Yul Chung¹⁾

Received 10 February 2017 Revised 5 September 2017 Accepted 5 September 2017

ABSTRACT A tilted multiple-effect solar distiller was proposed and analyzed theoretically. The distiller consisted of a glass cover, number of parallel plates, and saline-soaked wicks contacted with the plates. The wick color contacted with the glass cover used black to increase the absorptance of solar energy. A 2D numerical analysis model of heat and mass transfer was developed to analyze the optimum operating and design conditions of the distiller. The parameters analyzed were the feeding flow rate of seawater, slope of the distiller, and number of effects. The results showed that the distillate water flow rate depends strongly on the lower feeding rate of seawater but is rarely affected by the decreasing rate of the seawater feed in the multi-effect section. The optimum numbers of effects were founded to be 14-16, which was determined based on the productivity at the summer solstice. The total daily distillate production was predicted to be approximately 0.337, 3.18, and 7.80 kg/m² on the winter solstice, equinox, and summer solstice, respectively.

Key words Solar distiller(태양열 증류기), Multiple effect(다중효용), Desalination(해수담수), Numerical analysis(수치해석), Diffusion(확산)

Nomenclature

A : area, m²

AST: apparent solar time, minute

c_{sw} : specific heat of seawater, J/kg/°C

D : diffusivity of vapor, m²/s

DR : decrease rate of feeding seawater flowrate between

effects, %

d : distance or diffusion gap, m

ET : equation of time, minute

F : shape factor

G : solar irradiance, W/m²

H : enthalpy, J/kg

h : hour angle, °

h_a : convective heat transfer coefficient, W/m²

I_0 : extraterrestrial radiation measured on the plane normal to the radiation on the n_d^{th} day of the year, W/m²

I_{sc} : solar constant, W/m²

1) Department of Plant Safety Technology, Korea Institute of Machinery and Materials

2) Mechanical Engineering, ChungNam National University

3) Department of Plant System and Machinery, University of Science and Technology

*Corresponding author: bzoo77@kimm.re.kr

Tel: +82-42-868-7322

Fax: +82-42-868-7355

k : thermal conductivity, W/m/K
 L : latent heat, J/kg
 LL : local longitude, °
 LST : local standard time, minute
 \dot{m} : mass flowrate, kg/s
 \dot{m}_{f1} : feeding flowrate of the first effect, cm³/min (ccm)
 m_a : air mass
 n_d : day number (1-365)
 P : total pressure, Pa
 p : partial pressure of saturated vapor, Pa
 \dot{Q} : heat flow rate, W
 R : thermal resistance, K/W
 R_v : specific gas constant of water vapour, J/kg/K
 S : seawater concentration, kg/kg
 SL : standard longitude, °
 t : time or Celsius temperature, °C
 T : Kelvin temperature (t+273.15), K
 u : air velocity, m/s
 V : volume, m³

cd : cold part
 d : conduction
 e : condensation or evaporation
 df : diffuse radiation
 dr : direct radiation
 g : glass or ground
 ga : between glass and ambient
 ht : hot part
 in : inlet
 n : horizontal surface
 out : outlet
 p : plate
 pa : between plate and ambient
 pw : pure water
 r : radiation or reflection
 sw : seawater
 slr : solar energy
 v : vapor
 w : wick
 wn : between plate and wick in same effect
 wp : between wick and next-effect plate
 (n,j) : nth cell of wick and plate in jth effect

Greek

α : solar altitude angle, °
 β : tiled angle of distiller, °
 δ : declination, °
 η : absorptance
 ϵ : emittance
 θ : solar incident angle, °
 ρ : density, kg/m³
 ϕ : latitude, °
 σ : Stefan-Boltzmann constant, W/m²/K⁴
 τ : transmittance, °
 ξ : azimuth angle, °
 ϕ : solar zenith angle (=90- α), °

subscript

atm : atmosphere
 c : convection

1. 서론

전세계 인구는 1950년에 약 25억 명이었으나 1999년 약 60억 명을 돌파한 데 이어 2025년에는 약 83억 명, 그리고 2060년에는 100억 명을 초과할 것으로 전망하고 있다^[1]. 또한 OECD의 “2020년의 세계-글로벌 시대의 개막”이라는 보고서에서는 현재 전 세계적으로 28개국 3억 4천만 명이 충분한 물을 구하지 못해 어려움에 처해 있으며, 2025년에는 10배가 증가하여 52개국의 약 30억 명이 물 부족을 겪게 될 것으로 예측하였다. 세계 인구의 기하급수적인 증가에 따라 지구상에 인간이 이용할 수 있는 물 자원 부족이 더욱 심각되고 있으며, 더불어 저개발국가의 경우 물자원 분포의 불균일로 발생하는 물부족 문제도 지속적으로 대두되는 상황이다. 이러한 물부족 문제를 해결하기 위해 다양

한 담수화 방법이 개발되어 왔다. 그 중 신재생에너지 중 태양열을 이용한 담수기의 경우 구조가 간단하고 별도 에너지 지원이 필요 없기 때문에 도서지역, 오지, 및 저개발국가 등에서 유용한 기술로 각광받고 있다.

태양열 담수화 기술은 크게 직접식과 간접식으로 구분할 수 있다. 직접식 담수기는 태양 복사에너지가 별도의 열교환 없이 곧바로 담수기 내부의 해수나 장치에 열에너지를 전달하여 담수를 생산한다. 간접식의 경우 주로 태양열 집열기의 열매체에 복사에너지를 전달한 후 열매체와 해수와의 열교환을 통해 담수를 생산한다. 직접식의 경우 에너지 밀도가 낮기 때문에 대체로 생산량이 적은 단점이 있지만, 구조가 단순하기 때문에 관리가 쉬우며 유지비용 적다^[2]. 간접식은 상대적으로 높은 에너지 밀도로 인해 담수 생산량이 많지만 집열기, 축열기, 열교환 장치, 순환 펌프, 배관, 제어 밸브 등의 추가 장치가 필요하기 때문에 복잡하고 설치 및 유지비용이 높은 단점이 있다.

직접식 태양열 담수기 기술의 경우 단위면적 당 생산량을 높이기 위한 연구가 지속적으로 진행되어 왔다. 그 중 다중효용종류(MED, Multi-effect Distillation) 기술은 담수기에 입사된 태양 복사에너지를 반복적으로 사용하면 담수를 생산하기 때문에 단위면적당 생산량을 높일 수 있어 많은 관심을 받고 있다.

기존 연구에서 Tanaka et al.은 베이진(Basin)과 다중효용부를 결합한 복합식 다중효용 해수담수기(HMED, Hybrid

Multi-effect distiller)를 개발하여 일사량 22.4MJ/m²에서 하루에 18.7kg/m² 까지 담수를 생산하였다^[3]. 그리고 Park et al.은 Fig. 1과 같이 HMED 베이진부의 해수에 태양열뿐만 아니라 이동식 발전기의 배기가스 폐열을 공급할 수 있도록 열교환관을 설치하여, 태양이 없는 조건에서도 발전기를 이용하여 물과 전기를 모두 얻을 수 있도록 하였다. 이 담수기는 폐열을 22.37MJ/m² 공급했을 때 하루에 18.02kg/m²까지 생산하였다^[2].

기존 연구에서 개발된 HMED의 베이진부와 다중효용부의 크기를 비교해보면 10개의 효용단을 사용할 경우 다중효용부의 두께는 약 10cm 이지만, 베이진부는 약 70cm로 7배 정도 크다. 그리고 담수생산량을 비교해보면 베이진부 보다 다중효용부의 생산량이 약 3~4배 더 많기 때문에 HMED 방식에서 베이진부를 사용하지 않고 다중효용부만 사용할 경우 구조를 단순화하면서 설치면적을 크게 감소시키므로 단위면적당 생산량을 높일 수 있을 것으로 기대된다. Tanaka et al.은 Fig. 1의 다중효용부의 첫 번째 효용단으로 입사되는 일사량을 증가시키기 위해 베이진부를 사용하지 않고 반사판을 적용한 담수기를 개발하였으며, 일사량 13.4~15.7 MJ/m²에서 하루에 13.3kg/m²을 얻었다^[4]. 그러나 지면과 10°로 기울어져 설치되는 반사판은 다중효용부의 평판 크기와 비슷하기 때문에 설치 면적이 증가하며, 생산효율을 높이기 위해서는 최적 반사위치로 담수기를 회전시켜야 하는 번거로움이 있다.

본 연구에서는 기존 복합식 다중효용 해수담수기의 다중효용부만을 이용하는 태양열 해수담수기의 개발을 위해 2차원 수치해석 모델을 개발하고, 이를 이용하여 담수기의 설계 및 환경 변수에 따른 계절별 성능특성을 분석하고자 하였다.

2. 태양열 다중효용 담수기

본 연구의 태양열 다중효용 담수기의 개략도를 Fig. 2에 제시하였다. 담수기의 다중효용부는 유리와 다수개의 평판 및 워(wick)으로 구성된다. 첫 번째 효용단은 태양광선의 투과율이 높은 저철분 유리와 복사에너지의 흡수율이 높은 검은색 워를 유리에 부착하여 담수기에 태양 복사에너지를

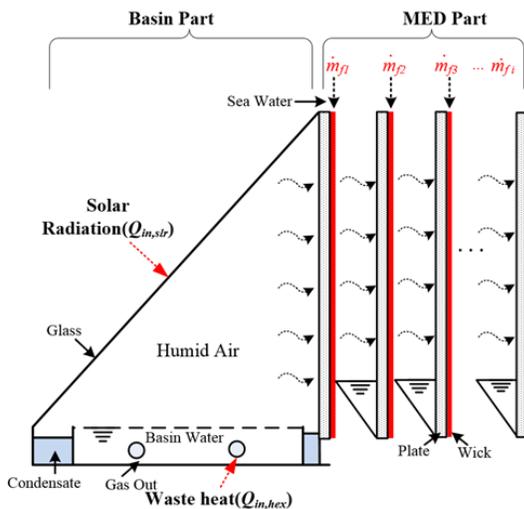


Fig. 1. Schematics of HMED

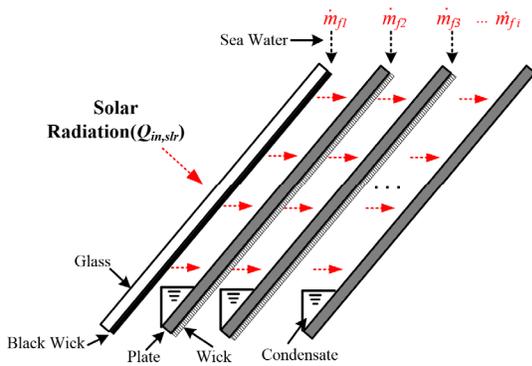


Fig. 2. Schematics of solar distiller of this study

전달한다. 두 번째 효용단부터 마지막 단까지 stainless steel 평판과 익을 사용한다. 각 효용단에서 익은 열접착시트를 사용하여 유리 및 평판에 부착된다. 담수기 상부에서 익으로 공급된 해수는 중력에 의해 아래로 흐르고, 이 해수는 첫 번째 효용단으로 부터 전달된 열에너지에 의해 온도가 점차 상승하면서 증발된다. 이 때 발생한 습공기는 확산에 의해 5mm 이격된 다음 효용단 평판까지 이동하는데, 이 때 온도가 상대적으로 낮은 평판의 표면에서 응축되면서 응축 잠열을 평판에 전달한다. 평판에 응축된 증류수는 중력에 의해 흘러내려 하부에서 집수된다. 이러한 방식으로 첫 번째 효용단에서부터 마지막 효용단까지 증발, 확산 및 응축과정이 반복되면서 담수를 얻는다. 그림에서 다중효용부 맨 오른쪽에 위치한 마지막 평판은 익이 부착되지 않으며 열에너지가 대기로 곧바로 방출된다. 담수기로 인입되는 태양열 복사에너지의 입사량을 증가시키기 위해 Fig. 2에서와 같이 기울여 설치한다. 그러나 생산량보다 담수기의 설치면적이 더 중요할 경우 수직으로 설치할 수 있다.

3. 해석 모델

3.1 태양열 일사량

본 담수기의 열원은 태양 복사에너지이므로 담수기의 성능을 해석하기 위해서는 지역, 날짜 및 시간에 따라 변하는 일사량을 예측할 수 있는 수치해석 모델이 필요하다.

지표면의 수평면에 도달하는 일사량은 직달성분, 확산성분 그리고 반사성분으로 구분할 수 있으며 이를 예측하기

위해 널리 사용되는 모델이 isotropic sky model이다^[5]. 본 모델을 이용하여 경사진 다중효용부 첫 번째 유리표면에 도달하는 총 일사량은 다음 식과 같다.

$$G_t = G_{dr} + G_{df} + G_r = G_{dr,n} \frac{\cos(\theta)}{\sin(\alpha)} + G_{df,n} \frac{1 + \cos(\beta)}{2} + \rho_g (G_{dr,n} + G_{df,n}) \left[\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right] \quad (1)$$

여기서 ρ_g 는 지표반사도(ground albedo)를 의미하며 Liu and Jordan이 제안한 0.2를 사용하였다^[6]. 식 (1)에서 $G_{dr,n}$ 과 $G_{df,n}$ 은 식 (2)와 식 (3)의 Bouguer and Berlage's equation을 이용하여 계산하였다^[7]. 두 식에서 외기복사(I_0)와 태양의 고도(α)는 식 (4)와 식 (5)으로부터 값을 얻었다. 또한 대기 투과도(τ_{atm})는 식 (6)을 사용하였으며^[8], 기단(m_a , air mass)은 식 (7)의 Kasten and Young의 관계식^[9]을 이용하였다.

$$G_{dr,n} = I_0 \sin(\alpha) \tau_{atm}^{1/\sin\alpha} \quad (2)$$

$$G_{df,n} = 0.5 I_0 \sin(\alpha) \frac{1 - \tau_{atm}^{1/\sin\alpha}}{1 - 1.4 \ln \tau_{atm}} \quad (3)$$

$$I_0 = I_{sc} [1 + 0.033 \cos\{360n_d/365\}] \quad (4)$$

$$\sin\alpha = \cos(h) \cos(\delta) \cos(\phi) + \sin(\delta) \sin(\phi) \quad (5)$$

$$\tau_{atm} = 0.5 \sqrt{\exp(-0.65m_a) + \exp(-0.095m_a)} \quad (6)$$

$$m_a = \frac{1}{[\sin\alpha + 0.50572 \times (\alpha + 6.07995)]^{-1.6364}} \quad (7)$$

식 (4)에서 n_d 는 연중통상일로서 1월 1일의 경우 1, 그리고 12월 31일의 경우 365이며, 태양상수(I_{sc})의 값은 미국재료시험협회의 ASTM E490-2014 규정에서 제시한 1366.1 W/m²을 사용하였다. 자전축의 경사각(δ)은 Cooper의 관계식에 의해 식 (8)과 같이 표현할 수 있다^[10]. 태양의 시간각(h)는 식 (9)와 같다.

$$\delta = 23.47 \sin \left\{ \frac{360(284 + n_d)}{365} \right\} \quad (8)$$

$$h = 15 \times (AST - 12) \quad (9)$$

태양시(AST)는 식 (10)~식 (12)를 이용하여 도출할 수 있다.

$$AST = LST + ET \pm 4(SL - LL) \quad (10)$$

$$ET = 9.87 \sin 2B - 7.53 \cos B - 1.5 \sin B \quad (11)$$

$$B = (n_d - 81) \frac{360}{364} \quad (12)$$

식 (10)에서 표준경도가 동경일 경우 수식의 기호는 음수이며, 서경일 경우 양수이다. 본 논문에는 대한민국을 기준으로 해석을 수행하였기 때문에 표준경도(SL)은 E135°이며, 지역경도(LL)은 E127°를 사용하였다.

Fig. 3에서는 태양광선이 지구에 입사될 때 특정지역 P에서의 위도(ϕ)와 시간각(h) 및 적위(δ)를 도식화하였다.

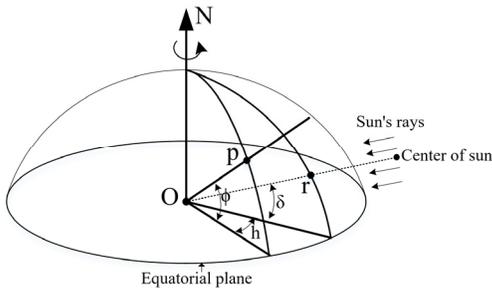


Fig. 3. Definition of latitude, hour angle and solar declination

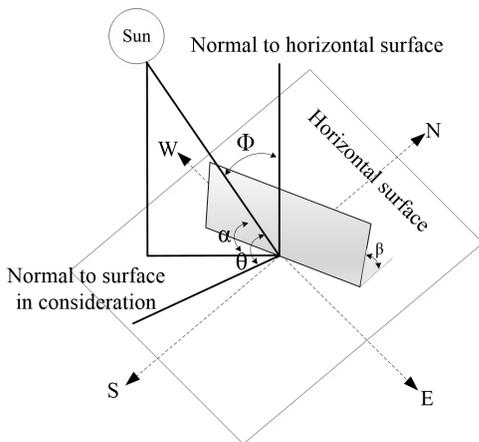


Fig. 4. Solar angles diagram

그리고 Fig. 4에서는 지표면의 경사진 평판에 입사되는 태양광선의 천정각(ϕ), 고도(α), 및 입사각(θ)을 도시하였다.

3.2 다중효용부

본 연구에서 고려하는 담수기의 다중효용부 수치해석 모델의 방정식을 도출하기 위해 다음과 같은 가정을 하였다.

- 유리 내부의 온도편차는 없다.
- 워에서 다음단 평판까지 간격이 5mm로 좁기 때문에 전도와 복사 열전달이 지배적이다(대류 열전달 무시).
- 평판 및 워의 두께가 0.5mm 이하로 얇기 때문에 내부 두께방향인 수평방향의 온도변화는 없으나 수직방향은 고려한다.
- 워를 흐르는 물의 양과 관계없이 워는 충분히 젖어있다. 따라서 워의 밀도, 열용량 등의 물성치는 물과 동일하다.
- 워에서 증발된 습공기는 다음단 평판에서 모두 응축된다.

위 가정을 근거로 다중효용부의 유리, 평판, 및 워의 격자에서 일어나는 열 및 물질 전달을 Fig. 5에 제시하였다. 워를 흐르는 해수는 평판에서 전달되는 열에너지에 의해 아래로 내려갈수록 점차 온도가 상승한다. 이 때 워의 상부에서부터 해수가 증발하기 때문에 하부로 갈수록 유량은 점차 감소한다. 결국, 평판과 워의 수직방향으로 온도와 유량이 변하기 때문에 수직방향으로 격자를 다수개로 나누었다.

일반적으로 검사체적에서의 에너지방정식은 식 (13)과 같이 나타낼 수 있으므로 이를 이용하여 유리, j번째 효용단의 워 및 평판의 에너지방정식을 도출하면 식 (14)~식 (16)과 같다.

$$\sum \dot{Q} + \sum \dot{m}_{in} H_{in} = \frac{dE}{dt} + \sum \dot{m}_{out} H_{out} \quad (13)$$

$$\dot{Q}_{n, str} = \rho_g V_g c_g \frac{dT_g}{dt} + \dot{Q}_{d, g(1,1)} + \dot{Q}_{c, g(1,1)} + \dot{Q}_{r, g(1,1)} \quad (14)$$

$$\dot{Q}_{d, p(i,j)} + \dot{m}_{f(i,j)} H_{sw} = \rho_w V_w c_w \frac{dT_{w(i,j)}}{dt} + \dot{Q}_{d, w(i,j)} + \dot{Q}_{r, w(i,j)} + \dot{Q}_{e, w(i,j)} + \dot{m}_{f(i+1,j)} H_{sw} \quad (15)$$

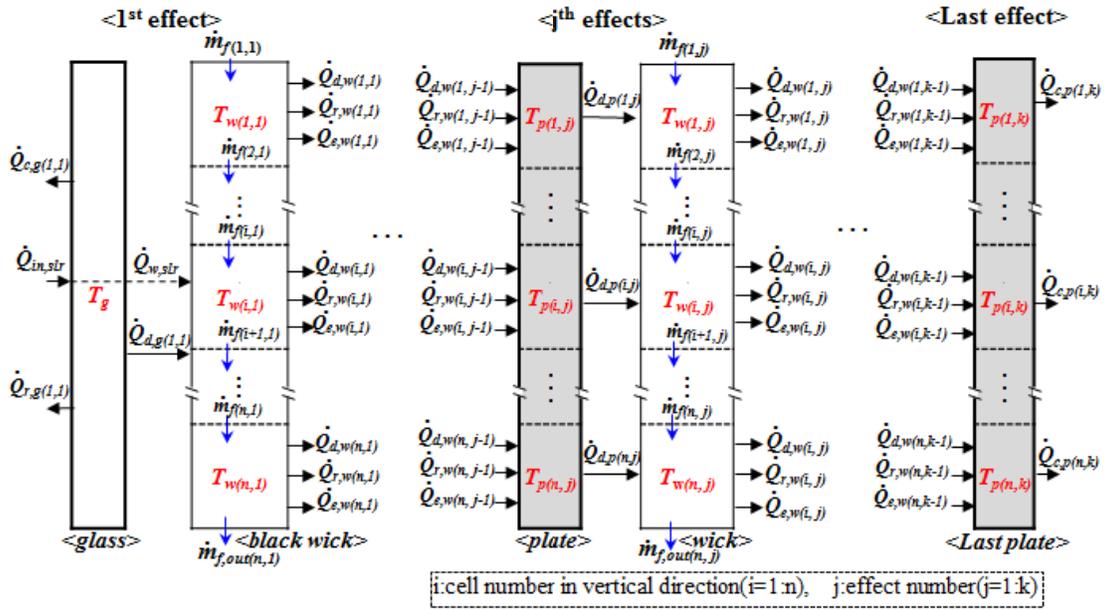


Fig. 5. Schematics of thermal energy transfer in MED

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{d,w(i,j-1)} + \dot{Q}_{r,w(i,j-1)} + \dot{Q}_{e,w(i,j-1)} \\ = \rho_p V_p c_p \frac{dT_p(i,j)}{dt} + \dot{Q}_{d,p(i,j)} \end{aligned} \quad (16)$$

여기서 (i,j)는 Fig. 5에서 나타내었듯이 j번째 효율단에 있는 수직방향 i번째 격자를 의미한다. 유리의 경우 태양 복사에너지가 대부분 투과되지만 일부분 유리에 흡수되며, 대류 및 복사를 통해 에너지를 대기로 방출한다. 또한 유리의 열에너지는 전도에 의해 검은색 워크로 전달된다. 워크의 경우 유리 또는 평판에서 전도에 의해 열에너지를 공급받으며, 앞의 가정대로 다음단의 평판까지 거리가 좁기 때문에 전도와 복사에 의해 평판으로 열이 방출된다. 또한 워크에서 해수가 증발되면서 잠열로 인해 열에너지가 방출된다. 워크의 경우, 위쪽 격자에서 유입된 해수는 증발된 양을 뺀 나머지 아래쪽 격자로 이동한다. 평판은 5mm 이격된 이전 (왼쪽) 효율단의 워크에서 전달된 전도 및 복사에너지와 습공기의 응축잠열을 전달받으며, 이 에너지를 부착된 워크 전도로 전달한다. 마지막 효율단 평판의 i번째 격자에서 에너지방정식은 식 (17)과 같다. 마지막 평판에 부착된 워크이 없기 때문에 워크로의 열전달은 없지만, 대류 열전달에 의해 대기로 열이 방출된다. 첫 번째 효율단의 유리에 부착된 검은색 워크의 에너지 방정식을 식 (18)에 제시하였다. 검은색

워크는 유리를 투과한 태양 복사에너지와 유리로부터 전도 열에너지를 전달받으며, 다음 효율단으로 전도 및 복사에 의해 열에너지를 전달한다. 또한 워크의 해수가 증발되면서 발생한 증발 잠열이 방출된다.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{d,w(i,k-1)} + \dot{Q}_{r,w(i,k-1)} + \dot{Q}_{e,w(i,k-1)} \\ = \rho_p V_p c_p \frac{dT_p(i,k)}{dt} + \dot{Q}_{e,p(i,k)} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{w,slr} + \dot{Q}_{d,g(1,1)} + \dot{m}_{f(i,1)} H_{sw} = \rho_w V_p c_w \frac{dT_w(i,1)}{dt} + \\ \dot{Q}_{d,w(i,1)} + \dot{Q}_{r,w(i,1)} + \dot{Q}_{e,w(i,1)} + \dot{m}_{f(i+1,1)} H_{sw} \end{aligned} \quad (18)$$

식 (14)에서 유리에 전달되는 태양 복사에너지($\dot{Q}_{in,slr}$)는 식 (19)를 이용하였다^[7]. 첫 번째 효율단의 검은색 워크로 전달되는 태양 복사에너지($\dot{Q}_{w,slr}$)는 식 (20)~식 (22)로부터 도출하였으며, 워크의 격자에서 같은 값을 사용하였다.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{in,slr} = \eta_g G_{dr,n} \times A_g (\cos\beta + \sin\beta \frac{\cos\xi}{\tan\alpha}) \\ + \eta_g G_{df,n} \times A_g \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) \end{aligned} \quad (19)$$

$$\dot{Q}_{w,slr} = \dot{Q}_{w,dr} + \dot{Q}_{w,df} \quad (20)$$

$$\dot{Q}_{w,dr} = \tau_{g,dr} \eta_g G_{dr,n} \times A_w (\cos\beta + \sin\beta \frac{\cos\xi}{\tan\alpha}) \quad (21)$$

$$\dot{Q}_{w,df} = \tau_{g,df} \eta_g G_{df,n} A_w \times \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) \quad (22)$$

익과 평판 내 격자들의 전도 및 복사 열전달에너지는 식 (23)을 이용하였다. 습공기의 증발 및 응축에 의한 열전달 에너지는 식 (24)와 같다.

$$\dot{Q}_d = \frac{(T_{ht} - T_{cd})}{R_d}, \quad \dot{Q}_r = \frac{(T_{ht}^4 - T_{cd}^4)}{R_r} \quad (23)$$

$$\dot{Q}_e = \dot{m}_e L_{sw} \quad (24)$$

식 (14)와 식 (17)에서 유리 및 마지막 효용단의 평판으로부터 대류에 의해 방출되는 열전달에너지는 식 (25)와 같다. 여기서 평판의 대류열전달계수는 Malik and Tran이 제안한 풍속의 함수로 표현된 식 (26)를 사용하였다^[11].

$$\dot{Q}_c = h_a \times A \times (T_{ht} - T_{cd}) \quad (25)$$

$$h_a = 5.7 + 3.8u \quad (\text{when } u \leq 5 \text{ m/s}) \quad (26)$$

평판에서 응축되는 담수량은 정지유체의 확산에 대한 관계식을 이용하여 다음의 식 (27)을 유도할 수 있다^[12].

$$\dot{m}_e = \frac{DP_{atm}}{R_v T_m d} \times \ln \left(\frac{P_{atm} - p_{cd}}{P_{atm} - p_{ht}} \right) \quad (27)$$

$$D = 0.187 \times 10^{-9} \times T_m^{2.072} \quad (28)$$

여기서 D 는 습공기의 확산계수로 식 (28)로부터 구하였으며, T_m 은 익과 평판 온도의 평균이다. 습공기의 기체상수 R_v 는 461.6J/kg/K을 사용하였다. p_{ht} 는 익에서 해수의 분압, p_{cd} 는 평판에서 응축되는 수증기의 분압을 뜻한다. 수증기의 분압은 식 (29)의 Fernandez and Chargooy 관계식^[13]을 이용하였다. 해수의 분압은 Emerson and Jamieson 관계식^[14]인 식 (30)과 앞의 식 (29)을 조합하면 $p_{v,sw}(S, T)$ 에 관한 식 (31)을 도출할 수 있다.

$$p_v = \exp(25.317 - \frac{5144}{T_v}) \quad (29)$$

$$\log \frac{p_{v,sw}}{p_v} = -2.1609 \times 10^{-1} \times S - 3.5012 \times 10^{-1} S^2 \quad (30)$$

$$p_{v,sw} = \exp(25.317 - \frac{5144}{T_v}) \times \exp(-0.49757S - 0.80618S^2) \quad (31)$$

효용단에서 평판과 부착된 익 간의 전도 열저항은 다음 식과 같다.

$$R_{d,wn} = \left(\frac{d_p}{2} \right) \frac{1}{k_p A_p} + \left(\frac{d_w}{2} \right) \frac{1}{k_w A_w} \quad (32)$$

식 (32)에서 d_p 대신 d_g 를 대입하면 첫 번째 효용단에서 유리 와 익 사이의 전도열저항을 계산할 수 있다. 익과 다음단의 평판 사이의 전도열저항 및 복사열저항은 다음식과 같다.

$$R_{d,wp} = \frac{d}{k_v A_p} \quad (33)$$

$$R_{r,wp} = \frac{1}{\sigma A_p F_{wp}} \quad (34)$$

여기서 σ 는 Stefan-Boltzmann 상수로 $5.6697 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$ 이다. 익과 평판사이의 복사형상계수 F_{wp} 는 식 (35)로부터 도출하였다. 유리 와 대기 그리고 평판 와 대기 간의 형상계수는 식 (36)과 같다.

$$F_{wp} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_p} + \frac{1}{\epsilon_w} - 1} \quad (35)$$

$$F_{ga} = \epsilon_g, \quad F_{pa} = \epsilon_p \quad (36)$$

익의 각 격자에서 해수는 질량보존에 의해 식 (37)과 식 (38)과 같은 관계가 성립된다. 해수의 질량보존으로부터 증발될수록 해수의 유량은 줄어든다. 그리고 해수 내 염분의 양은 항상 일정하기 때문에 해수가 증발하면 농도는 증

Table 1. Physical properties and constants

$L_{pw} = -1.702381 \times T^2 - 1.321786 \times T^3 + 2.98786 \times 10^6$	[15]
$L_{sw} = L_{pw} \times (1 - S)$	
$H_{pw} = 4184.4 \times T - 1142700$	[16]
$H_{sw} = H_{pw} - [27062.623S + S^2 + (4835.675S + S^2)t]$	[17]
$c_{sw} = 1.0049 - 0.0162s + 3.5261 \times 10^{-4}s^2 - (3.2506 - 1.4795s + 0.0777s^2) \times 10^{-4}t + (3.8013 - 1.2084s + 0.0612s^2) \times 10^{-6}t^2$	[18]
Radiation	
$\eta_w = 0.9, \eta_g = 0.05, \epsilon_g = \epsilon_w = 0.9$	
$\tau_{g,df} = -2.03 \times 10^{-5} \times \beta^2 - 2.05 \times 10^{-3} \times \beta + 0.667$	[7]
$\tau_{g,dr} = 0.697\cos^4\theta - 0.31\cos^3\theta - 2.096\cos^2\theta + 2.56\cos\theta$	[19]
$(\cos\theta = \sin\alpha\cos\beta + \cos\alpha\sin\beta\cos\xi)$	

가한다. 한편, 식 (31)에 따라 해수의 농도가 증가하면 해수 분압은 감소하며, 식 (27)로부터 해수 분압이 감소하면 응축량은 줄어들게 되므로, 해수 농도가 증가할수록 담수 생산량이 감소하게 되는 것을 알 수 있다.

$$\dot{m}_{f(i,j)} = \dot{m}_{f(i+1,j)} + \dot{m}_{e(i,j)} \quad (37)$$

$$S_{f(i,j)}\dot{m}_{f(i,j)} = S_{f(i+1,j)}\dot{m}_{f(i+1,j)} \quad (38)$$

본 수치해석에 사용되는 물성치를 도출하기 위한 방정식 및 상수의 값을 Table 1에 정리하였다.

4. 해석결과 및 고찰

4.1 해석조건

한국에서 위도 N36.5°, 경도 E127°에 위치한 다중효용 태양열 해수담수기를 대상으로 하지, 동지, 춘추분일 때의 각종 운전 및 설계 변수에 따른 성능특성을 확인하고자 수치해석을 수행하였다. 각 계절별 대기온도, 일조/일몰 시간의 계산결과를 Table 2에 제시하였다. 담수기의 생산량에 영향을 미치는 운전 및 설계변수로 해수공급유량, 담수기 경사도, 효용단 개수 및 효용단의 공급유량감소율(DR) 등을 고려하였으며, 수치해석에 사용된 값을 Table 3에 정리하였다. 여기서 DR은 식 (39)와 같다.

Table 2. Weather conditions of seasons

Seasons	Conditions			
	T _{atm} , °C	Sunrise	Sunset	Insolation
Summer Solstice	30	AM 5:26	PM 19:58	9.43 MJ
Winter Solstice	5	AM 7:41	PM 17:12	3.45 MJ
Equinox	20	AM 6:30	PM 18:30	7.97 MJ

Table 3. Condition variables and values

Variables	Values
Flowrate of feeding seawater, ccm	1-10
Incline degree, °	10-90
The number of effects	2-24
Decreasing rate (DR) of feeding seawater flow rate between effects, %	0-4

Table 4. Size of components of the distiller

List	Dimension
Glass and plate size	0,5 m (W) × 0,82 m (H) = 0.41 m ²
Glass thickness	5 mm
Plate thickness	0,5 mm
Wick thickness	2,5 mm
Gap between effects	5 mm

$$DR = \frac{m_{f(1,j)} - m_{f(1,j+1)}}{m_{f(1,j)}} \times 100 \quad (39)$$

해석대상 담수기의 일사면적은 0.41m²이며 주요 구성품의 크기를 Table 4에 정리하였다. 모든 해석조건에서 풍속은 3m/s로 설정하였다. 본 수치해석에 적용된 경계조건은 다음과 같다.

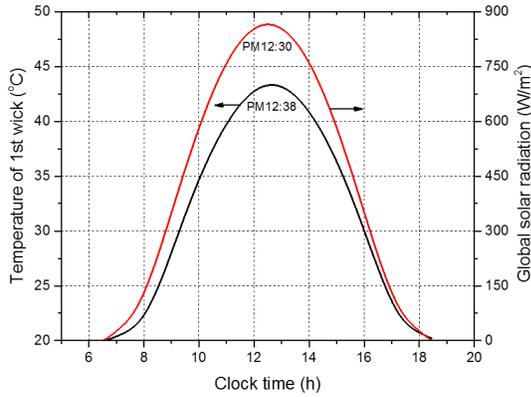
- 유리, 평판, 워 및 해수의 초기온도는 Table 2의 대기온도와 동일하다.
- 공급해수의 농도는 3.5wt%이다.

해석시 수직방향의 격자수는 10개로 설정하였다. 본 수치 해석 모델은 Mathworks사의 MATLAB을 이용하였으며, 비선형 미분방정식을 풀기위해 본 소프트웨어에서 제공하는 ode15s 함수를 이용하였다. 수치해석의 절대오차 및 상대오차는 각각 10⁻³과 10⁻⁶으로 설정하였다.

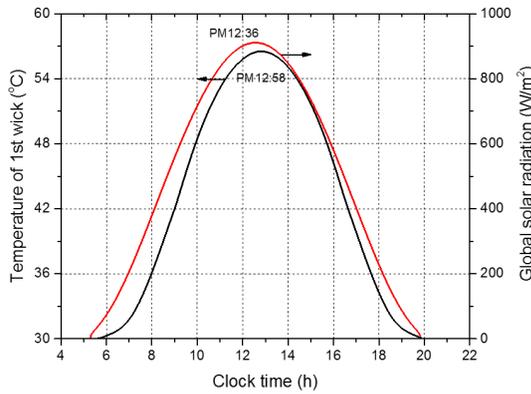
4.2 해석결과 및 고찰

4.2.1 계절에 따른 일사량

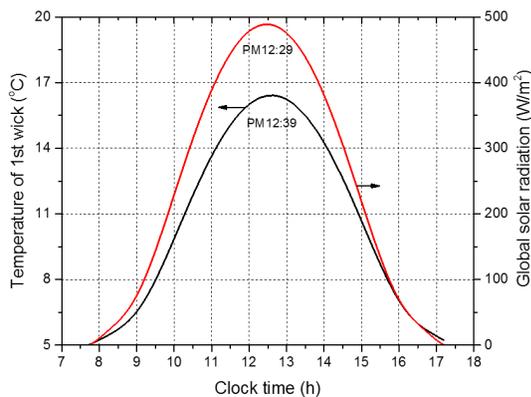
3.1절에서 제시한 경사진 면의 일사량 관련 방정식을 이용하여 일조시간 동안 담수기에 입사되는 단위면적당 일사량과 이에 따른 첫 번째 워의 온도 프로파일을 도출하였으



(a) Equinox



(b) Summer solstice



(c) Winter solstice

Fig. 6. Global solar radiation and temperature of first wick during duration of sunshine in each season

며 그 결과를 Fig. 6에 제시하였다. 일사량과 온도 프로파일의 경향은 유사하였으며, 일사량이 최댓값이 도달 후 약 8~22분 경과 후 첫 번째 워의 온도는 최댓값에 도달하였다. 담수기에 입사되는 계절별 총 일사량은 춘추분, 하지 및 동지일 때 각각 19.4, 23.0, 8.4MJ/m² 이었다. 일조량이 최대일 때는 시간은 각각 PM 12:30, PM 12:36, PM 12:29, 첫 번째 워의 온도가 최대일 때는 각각 PM 12:38, PM 12:58, PM 12:39 이었다. 첫 번째 워의 최대 온도는 하지일 때 56.5°C로 가장 높았으며, 춘추분일 때 43.3°C, 동지일 때는 16.4°C로 나타났다.

Fig. 7은 수치해석의 일사량 분포 결과와 실제 서울에서 측정된 청명한 날의 일사량^[20]를 비교한 것으로 일출/일몰 시간 및 시간에 따른 일사량이 거의 유사하였다.

4.2.2 환경변수에 따른 성능변화

Fig. 2의 태양열 담수기 상부에서 다중효용단의 워으로 해수를 공급하면 평판의 열에너지에 의해 가열되어 증발한 후 확산되어 다음 효용단의 평판에서 응축되어 담수가 생성되는데, 이 때 워의 해수 공급유량은 담수 생성량과 밀접한 관련이 있다. 기존 연구에서는 공급 해수의 온도는 대기와 같기 때문에 공급 유량이 너무 많으면 담수기의 전체 열에너지를 낮추게 되어 생산량이 감소하며, 유량이 너무 적으면 워에서 해수가 모두 증발하여 역시 생산량이 감소하였다^[2]. 또한 각 효용단의 평균온도는 첫 번째 효용단에서 마지막 효용단으로 갈수록 점차 감소하기 때문에 해수 공급 유량 역시 점차 감소시키는 것이 바람직한 것으로 나타났다^[21].

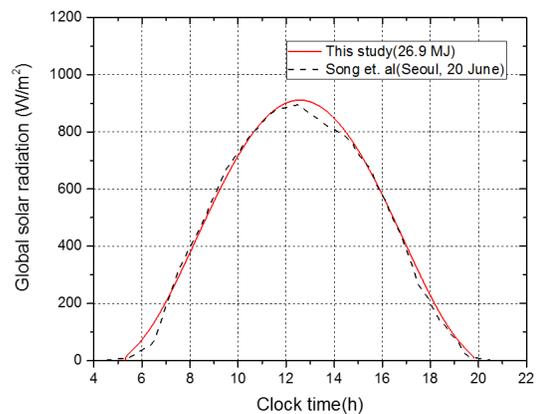


Fig. 7. Comparison with numerical analysis and measuring data for global solar radiation

본 태양열 담수기의 최적 해수공급 유량 및 유량 감소율 (DR)을 도출하기 위한 해석 결과를 Fig. 8에 제시하였다. 해석 시 효용단수 및 기울기는 각각 10개, 40°로 설정하였

다. 계절별 담수생산량은 하지 2.96~3.2kg/day, 춘추분 1.2~1.304kg/day, 동지 0.135~0.138kg/day로 하지가 가장 많았으며 춘추분, 동지 순으로 감소하였다. 특히 동지 일 때 생산량은 다른 계절의 약 4.4~11% 수준이었다. 해석 결과 모든 계절에서 첫 번째 단의 공급유량(\dot{m}_{f1})이 1ccm에서 10ccm까지 증가할수록 담수 생산량은 감소하였다. 그러나 기존 연구결과^[2]와는 달리 최적 공급유량보다 낮은 유량에서 생산량이 감소하는 특성은 나타나지 않았다. 이는 본 담수기의 다중효용부로 공급된 열에너지가 기존 연구의 담수기 보다 낮기 때문에 발생한 것으로 추정된다. 본 담수기의 열원은 태양 복사에너지이지만 HMED의 경우 다중효용부의 첫 번째 평판으로 베이진부 습공기의 응축잠열과 대류 열전달에너지 그리고 태양 복사에너지가 동시에 전달된다. 따라서 HMED는 다중효용부의 공급 열에너지가 상대적으로 충분하기 때문에 해수 유량을 증가시키더라도 공급 해수의 온도를 상승시켜 증발량을 높일 수 있다. HMED의 성능실험 결과 \dot{m}_{f1} 이 8.2ccm에서도 첫 번째 워의 온도가 약 61°C까지 상승하였다^[2]. 그러나 본 담수기의 경우 Fig. 6에서 보는 바와 같이 하지 때 \dot{m}_{f1} 이 3ccm으로 더 낮음에도 불구하고 최대 56.5°C까지 상승하였다. 만일 본 담수기의 첫 번째 워 온도가 60°C까지 증가하려면 공급유량을 더 낮춰야 한다. 수치해석 방법으로 더 낮은 유량에서 HMED와 같은 경향이 나타날 수 있지만 실제 해수 유량을 2ccm 이하로 공급하고 제어하는 것이 매우 어렵기 때문에 본 연구에서는 고려하지 않았다. 따라서 실제 현장에서 본 담수기 사용시 제어 가능한 최소유량으로 공급하는 것이 바람직하다.

한편, 본 수치해석 결과에서 효용단의 DR이 0%에서 4%까지 증가할 때 담수생산량은 거의 변하지 않았다. 반면 기존 HMED의 수치해석 연구에서는 DR에 따라 생산량이 변화하였으며, 일사량이 24MJ/m² 일 때 DR 8%에서 최대 생산량을 얻었다^[21]. 두 해석결과의 차이는 본 연구에서 고려하는 해수공급 유효 유량 범위(3ccm 이상)와 관련이 있다. \dot{m}_{f1} 이 3ccm, DR 4%일 경우 효용단의 공급유량 범위는 2~3ccm으로 유효 유량 범위를 벗어난다. 물론 \dot{m}_{f1} 이 4ccm 이상으로 증가하면 공급 가능 범위가 될 수 있으나 DR에 따른 생산량 편차가 너무 적어 역시 그 결과는 큰 의미가 없

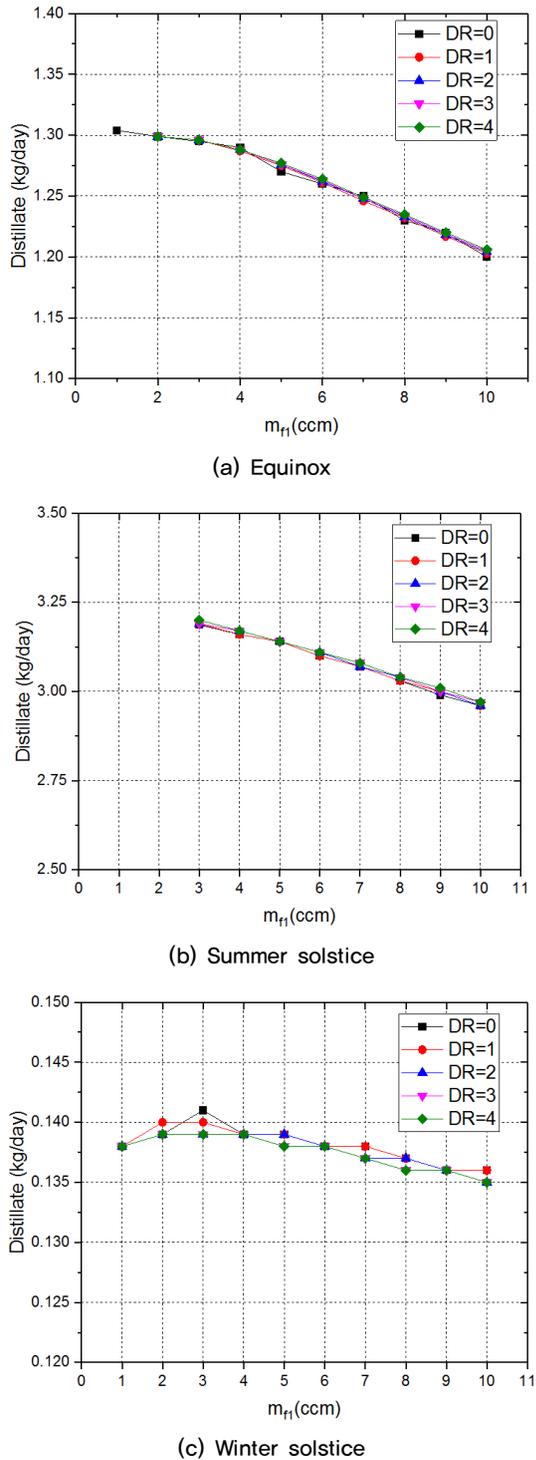


Fig. 8. Distillate according to DR and \dot{m}_{f1}

다고 판단된다. 예를 들어 하지 기준 \dot{m}_{f1} 10ccm에서 DR이 0%에서 4%까지 증가함에 따라 생산량은 겨우 0.007kg 증가하였다. 결국 DR을 계속 증가시키면 기존 연구와 같이 최적 DR을 얻을 수 있을 것으로 기대되지만 실용적인 관점을 고려하여 더 이상 해석을 수행하지 않았다.

따라서 해수 공급유량의 제어 편의성과 유효성 그리고 해수 공급부 구조의 단순화 측면을 고려하면 각 효용단에 같은 유량으로 약 3ccm 정도 해수를 공급하는 것이 적합하다고 판단된다. 이 결과는 향후 담수기의 제작 및 운전 비용을 절감하는데 크게 기여할 수 있을 것으로 보인다.

한편 수치해석 시 하지 조건에서 \dot{m}_{f1} 이 2ccm 이하일 때는 수렴이 되지 않아 결과를 얻을 수 없었다. 2ccm 이하에서는 일사량에 비해 해수 공급유량이 너무 적어 워의 해수가 모두 증발하게 되는 현상이 발생하여 해석시 오류가 발생한 것으로 보인다. 향후 수치해석 모델의 보완을 통해 워에서 해수의 완전 증발까지 반응이 되도록 개선할 필요가 있다.

담수기의 기울기에 따른 생산량을 Fig. 9에 제시하였다. 해석 시 효용단수, \dot{m}_{f1} , DR은 각각 10개, 3ccm, 0%로 설정하였다. 기울기에 따른 생산량의 변화 특성은 계절별로 다르게 나타났다. 하지의 경우 기울기가 90°에서 10°로 감소함에 따라 생산량은 계속 증가하고 점차 기울기는 감소하였으며, 3.281kg에서 평형상태가 되었다. 춘추분에는 40°, 동지일 때는 50°와 60°에서 각각 1.295kg/day, 0.148kg/day로 생산량이 가장 많았다. 담수기의 기울기가 90°로 수

직으로 설치했을 경우 하지 때의 생산량은 0.91kg/day, 춘추분 일 때 1.03kg/day으로 오히려 춘추분 일 때 생산량이 더 많았다. 하지 일 때 기울기에 따라 생산량의 감소 경향이 상대적으로 뚜렷하였으나 춘추분과 동지일 때는 변화폭이 0.004~0.115kg/day으로 미미하였다. 계절별로 최대 생산량을 얻을 수 있는 담수기의 기울기는 서로 다르지만 연중 총 생산량과 기울기에 따른 생산량의 변화를 고려하면 하지를 기준으로 기울기를 선정하는 것이 더 바람직하다. 담수기의 기울기가 감소할수록 생산량은 증가하지만 설치면적이 증가하고, 자중에 의해 평판이 아래쪽으로 처지면서 휘게된다. 평판의 휨은 부착된 워에서 국부적인 해수 유량 불균일을 초래하고, 워이 다음단의 평판과 접촉하여 생산수가 오염될 수가 있다. 따라서 본 담수기는 기울기를 약 40° 이상으로 설치하는 것이 담수기 유지 및 보수 측면에서 유리할 것으로 보인다. 한편 설치면적을 기준으로 생산량을 고려하면 하지 기준 기울기가 10°일 때 설치면적은 0.446m²으로 생산량은 하루 7.35kg/m²이다. 수직으로 설치할 경우 10개의 효용단의 수평방향의 두께는 유리, 평판, 워의 두께 그리고 효용단의 이격 거리의 합으로 겨우 0.085m이다. 담수기의 폭 0.5m를 고려하면 설치면적은 0.0425m²으로 단위면적당 생산량은 하루 21.41kg/m²이 되어 기울기가 10°일 때 보다 약 2.9배 증가한다. 결국 담수기 설치시 설치면적과 절대 생산량 간의 중요도에 따라 기울기를 선정할 필요가 있다. 절대 생산량이 중요 변수일 경우 기울기가 약 40°가 적절하지만, 설치면적일 경우 수직으로 설치하는 것이 바람직하다.

다중효용단 개수의 증가에 따른 생산량의 변화를 Fig. 10에 제시하였다. 해석 시 \dot{m}_{f1} , DR, 경사도는 각각 3ccm, 0%, 40°로 설정하였다. 해석 결과 계절별 최대 생산량을 얻을 수 있는 다중효용단의 개수는 춘추분, 하지, 동지일 때 각각 12개, 16개, 8개로 나타났다. 결과 그래프에서 최대 생산량을 기준으로 효용단 개수가 증가할수록 생산량이 약간 감소하였으나 그 값은 매우 적었다. 다중효용단 개수가 최적 효용단 개수보다 적을 경우 마지막 효용단 이후에도 담수를 생산할 수 있는 열에너지가 여전히 남아있지만 효용단 부족하여 더 이상 담수를 생산할 수 없다는 것을 뜻한다. 반대로 최적 효용단의 개수보다 많을 경우 다중효용부에서 공급열에너지를 모두 담수 생산에 이용하였기 때문에

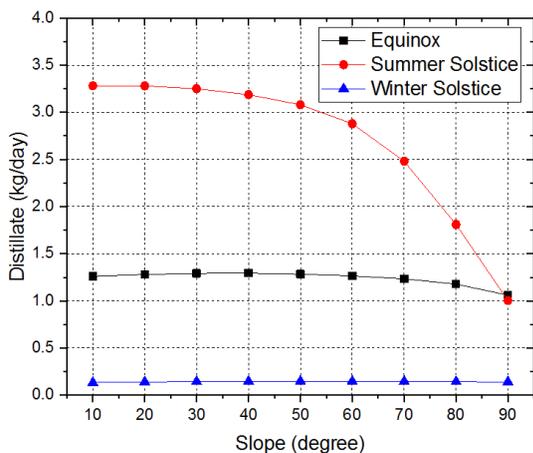


Fig. 9. Distillate according to slope of the distiller

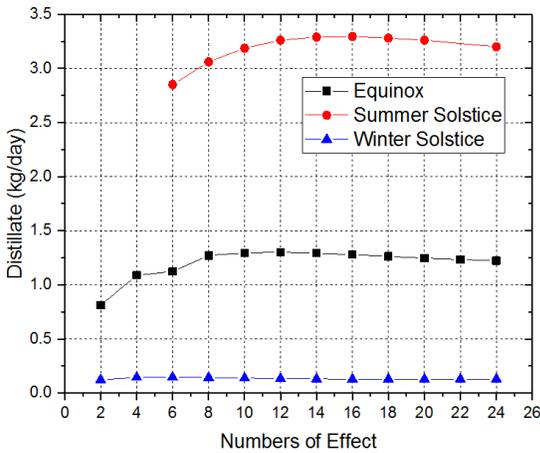


Fig. 10. Distillate according to the number of effect

효용단의 증가에 따라 더 이상 담수가 생산되지 않게 된다. 최적 효용단 개수보다 많을 때 담수 생산량이 약간 감소하였는데 이는 최적 효용단을 초과한 효용단에 공급된 해수가 담수기의 열에너지를 낮추기 때문으로 판단된다. 하지만 결국 최적 효용단 개수를 훨씬 초과하면 담수 생산량은 일정한 값으로 수렴하게 된다. 본 결과로부터 최적 효용단 개수가 가장 많은 하지를 기준으로 효용단 개수를 정하는 것이 적절하다고 판단된다. 계절별 최적 효용단 개수가 다르기 때문에 하지를 기준으로 해서 충분히 많은 개수를 사용하면 최대 담수량을 얻을 수 있다. 담수기의 효용단수가 최적 단수를 초과하더라도 생산량의 감소가 매우 미미하기 때문에 보수적인 설계 관점에서 최적단수 보다 더 많이 설치하는 것이 유리하지만 효용단 증가에 따른 비용의 증가와 유지 및 보수 측면을 고려하면 과다하게 효용단 개수를 늘리는 것은 바람직하지 않다.

4.3 담수기 성능지수의 비교 분석

본 담수기의 성능을 평가하기 위해 다른 담수기와 성능지수(performance ratio, PR)를 서로 비교 분석하였다. PR은 담수를 생성하는데 필요한 열에너지와 공급된 태양에너지의 비율을 나타내며 다음과 같은 식으로 도출할 수 있다.

$$PR = \frac{\sum(\dot{m}_e \times H_e \times \Delta T)}{\sum(\dot{Q}_{in, slr} \times \Delta T)} \quad (40)$$

P.I. Cooper는 이론적으로 Basin-type 담수기의 최대 PR은 0.6 이하라고 밝혔다. 그리고 그는 실험을 통해 일사량 22.55MJ/m² 조건에서 4.884kg/m²/day를 생산하였고, 이 때 PR은 0.513이었다^[22]. Tanaka et al.은 15중 효용 HMED-type 담수기의 수치해석을 통해 하지 때 27.8 MJ/m²에서 최대 1.97, 추분일때 23.2MJ/m²에서 1.87을 얻었으며^[23], 10중효용 HMED의 실험을 통해 22.4MJ/m²에서 15.4kg/m²/day를 얻어 PR은 1.62에 도달하였다^[24]. Yeo et al.은 HMED type의 담수기의 성능 실험을 통해 일사량 21.46MJ/m²에서 10.47kg/day를 얻었으며 PR은 1.33이었다^[25].

본 연구의 담수기는 Fig. 10의 계절별 최대 생산량을 기준으로 하지 때 0.76으로 가장 높았으며, 춘추분 및 동지 때 각각 0.36, 0.1이었다. 하지를 기준으로 본 담수기의 PR은 P.I. Cooper의 Basin type 담수기의 실험 결과보다 약 1.5배 높았으나 HMED type 담수기 PR보다 최대 2.6배 낮았다. 본 담수기는 HMED type 담수기에 비해서 생산량이 낮지만 1절에서 언급한 바와 같이 유지 보수성을 향상시키기 위한 장치의 단순성과 설치 면적의 감소에 초점을 두고 있기 때문에 상용화 관점에서 더 유리할 것으로 판단된다. 수치해석 결과 수직설치 시 생산량은 최대 21.41 kg/m²/day로 HMED-type 담수기보다 단위면적당 생산량은 더 많다.

5. 결론

본 연구에서는 태양열 다중효용 해수담수기의 성능을 모사할 수 있는 수치해석 모델을 개발하고 이를 이용하여 해수공급량, 담수기의 설치 기울기 및 효용단 개수에 따른 계절별 담수기의 성능특성을 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 본 해수담수기의 PR은 하지기준 0.76으로 Basin type 담수기보다 1.5배 높지만 HMED type보다는 2.6배 낮다.
- 2) 담수기의 국내 계절별 최대 담수생산량의 경우 하지 일사면적을 기준으로 7.80kg/m²/day, 춘추분 3.18

kg/m²/day, 동지 0.337kg/m²/day이다. 설치면적을 고려하면 기울기 40°일 때 0.314m²이므로 10.2 kg/m²/day, 춘추분 4.15kg/m²/day, 동지 0.44 kg/m²/day이다. 생산량을 고려했을 때 동지 일사량 (8.4MJ/m²) 조건에서는 생산효율이 너무 낮아서 본 담수기를 사용하기 적절하지 않다.

- 3) 해수공급 유량에 따른 담수 생산량 해석 결과를 분석한 결과 첫 번째 효용단의 해수 공급유량을 기준으로 약 3ccm 이하로 공급해야 최대 생산량을 얻을 수 있다. 그러나 해수공급 장치의 제작 및 유량 제어의 어려움을 고려하면 2ccm 이하의 유량을 공급하는 것은 추천하지 않는다.
- 4) 본 담수기는 효용단의 공급유량 감소율이 0% 즉, 모든 효용단에 동일한 유량을 공급하는 것이 바람직하다. 이 결과는 해수공급 장치의 구조나 제어를 단순화 할 수 있는 근거가 되기 때문에 담수기의 상용화 관점에서 매우 중요한 의미를 갖는다.
- 5) 담수기의 설치 기울기는 하지에서 최대 생산량을 얻는 조건을 기준으로 설계해야하며, 절대 생산량을 고려하면 약 40°, 설치면적을 고려하면 90°를 적용하는 것이 바람직하다. 해석 결과 30°이하에서 더 많은 담수를 얻을 수 있었으나, 기울기 감소 시 발생하는 담수기 설치면적의 증가 및 자중에 의한 평판의 휨 등의 문제를 고려하면 이 기울기는 바람직하지 않다.
- 6) 담수기의 최적효용단 개수 역시 하지를 기준으로 선정해야하며 14~16개가 적당하다. 만일 담수기 제작 시 성능특성의 편차를 고려한다면 최적효용단수 보다 1~2개 더 많이 설치하는 것이 유리하다.
- 7) 본 연구의 수치해석을 통해 담수기의 설치 위치와 조건을 고려하여 설계 및 제작 조건을 적용하면 매우 유용할 것으로 판단된다.

감사의 글

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

References

1. 2016, "Current world population", <http://www.worldometers.info/world-population>.
2. Park, C.D., Lim, B.J., Chung, K.Y., Lee, S.S., Kim, Y.M., 2016, "Experimental evaluation of hybrid solar still using waste heat", *Desalination*, 379, pp. 1-9.
3. Tanaka, H., Nosoko, T., Nagata, T., 2002, "Experimental study of basin-type, multiple-effect, diffusion-coupled solar still", *Desalination*, 150, pp. 131-144.
4. Tanaka, H., 2009, "Experimental study of vertical multiple-effect diffusion solar still coupled with a flat plate reflector", *Desalination*, 249, pp. 34-40.
5. Soteris, A.K., 2014, "Solar Energy Engineering: Processes and System", 2nd ed., Elsevier, Massachusetts, pp. 100-102.
6. Liu, B.Y.H., Jordan, R.C., 1963, "The long-term performance of flat-plate solar-energy collectors", *Solar energy*, 7(2), pp. 53-74.
7. Tanaka, H., 2011, "Tilted wick solar still with flat plate bottom reflector", *Desalination*, 273, pp. 405-413.
8. Yang, X., 2016, "Prediction of thermal behavior and trajectory of stratospheric airships during ascent based on simulation", *Advanced in space research*, 57, pp. 2326-2336.
9. Kasten, F., Yuoung, A.T., 1989, "Revised optical air mass tables and approximation formula", *Applied Optics*, 28(22), pp. 4735-4738.
10. Cooper, P.I., 1969, "The absorption of solar radiation in solar stills", *Solar Energy*, 12, pp. 333-346.
11. Malik, M.A.S., Tran, V.V., 1973, "A simplified mathematical model for predicting the nocturnal output of a solar still", *Solar Energy*, 14, pp. 371-385.
12. Bird, R.B., Stewart, W.E., Lightfoot, E., N., 2002, "Concentration distributions in solids and in laminar flow", Wayne Anderson, "Transport phenomena", John Wiley & Sons, Inc., New york, pp. 545-551.
13. Fernandez, J., Charoy, N., 1990, "Multistage indirectly heated solar still", *Solar energy*, 44, pp. 212-215.
14. Emerson, W.H., Jamieson, D.T., 1967, "Some physical properties of sea water in different concentrations", *Desalination*, 3, pp. 207-212.

15. Japan Society of Mech. Eng., 1986, "JSME Data Book", 4th ed., Tokyo.
16. Borgnakke, Sonntag, 2014, "Fundamentals of Thermodynamics", 8th ed., Wiley, Michigan.
17. Bigg, P., 1967, "Density of water in S.I. unit over the range 0~40°C", British Journal of Applied Physics, 18, pp. 521-537.
18. Bromley, L.A., Diamond, A.E., Salami, E., Wilkins, D.G., 1970, "Heat capacities and enthalpies of sea salt solution to 200°C", Journal of Chemical and Engineering Data, 15, pp. 246-253.
19. Tanaka, H., 2016, "Theoretical analysis of a vertical multiple-effect diffusion solar still coupled with a tilted wick still", Desalination, 377, pp.65-72.
20. Song, S.W., Cho, D.W., 2015, "Analysis of direct and global solar radiation on a vertical window according to the projection factor (PF) of external horizontal and vertical shadings in summer", JAIK, 31(4), pp. 195-202.
21. Lim, B.J., Yu S.S., Park, C.D., Chung, K.Y., 2016, "One-dimensional Numerical Analysis of the Effect of Seawater Feed Rate on Multi-effect Solar Stills", Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B, 40, pp. 477-484.
22. Cooper, P.I., 1973, "The maximum efficiency of single-effect solar still", Solar energy, 15, pp. 205-217.
23. Tanaka, H., Nosoko, T., Nagata, T., 2000, "Parametric investigation of a basin-type-multiple-effect coupled solar still", Desalination, 130, pp. 295-304.
24. Tanaka, H., Nosoko, T., Nagata, T., 2000, "A highly productive basin-type-multiple-effect coupled solar still", Desalination, 130, pp.279-293.
25. Yeo, S.D., Lim, B.J., Yu, S.S., Chung, K.Y., 2017, "Performance of Hybrid Solar Still Under Operating Conditions", Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B, 41, pp. 511-519.