

## VMD 모듈의 열성능 특성 연구

A Study on the Thermal Characteristics  
of Vacuum Membrane Distillation Module

주홍진\* · 양용우\*\* · 곽희열\*\*\*†

Hong-Jin Joo\*, Yong-Woo Yang\*\* and Hee-Youl Kwak\*\*\*†

(Submit date : 2014. 7. 21., Judgment date : 2014. 7. 30., Publication decide date : 2014. 9. 29.)

**Abstract :** This study was accomplished to get the foundation design data of VMD(Vacuum Membrane Distillation) system for Solar Thermal VMD plant. VMD experiment was designed to evaluate thermal performance of VMD using PVDF(polyvinylidene fluoride) hollow fiber hydrophobic membranes. The total membrane surface area in a VMD module is 5.3 m<sup>2</sup>. Experimental equipments to evaluate VMD system consists of various parts such as VMD module, heat exchanger, heater, storage tank, pump, flow meter, micro filter. The experimental conditions to evaluate VMD module were salt concentration, temperature, flow rate of feed sea water. Salt concentration of feed water were used by aqueous NaCl solutions of 25g/l, 35g/l and 45 g/l concentration. As a result, increase in permeate flux of VMD module is due to the increasing feed water temperature and feed water flow rate. Also, decrease in permeate flux of VMD module is due to increasing salinity of feed water. VMD module required about 590 kWh/day of heating energy to produce 1 m<sup>3</sup>/day of fresh water.

**Key Words :** 진공 막 증류 담수화(Vacuum membrane distillation), 막 증류 담수화(Membrane distillation), 중공사막(Hollow fiber), 태양열 해수담수화(Solar Thermal Desalination)

\*\*\*† 곽희열(교신저자) : 한국에너지기술연구원  
E-mail : hykwack@kier.re.kr, Tel : 042-860-3516  
\*주홍진 : 한국에너지기술연구원  
\*\*양용우 : 제주대학교 에너지공학과 대학원

\*\*\*† Kwak Hee-Youl (corresponding author) : Solar Energy Research Center, Korea Institute of Energy Research.  
E-mail : hykwack@kier.re.kr, Tel : 042-860-3516  
\*Joo Hong-Jin : Solar Energy Research Center, Korea Institute of Energy Research.  
\*\*Yang Yong-Woo : Department of Nuclear & Energy Engineering, Graduate School of Jeju National University

## 기 호 설 명

$A_m$  : 막 면적( $m^2$ )  
 $BPE$  : 비등점 증가치 ( $^{\circ}C$ )  
 $C_p$  : 비열 ( $kJ/kg^{\circ}C$ )  
 $k_{fw}$  : 담수 열전도도 ( $W/m \cdot K$ )  
 $k_{sw}$  : 염수 열전도도 ( $W/m \cdot K$ )  
 $LMH$  : 투과유량 ( $\ell/m^2 \cdot h$ )  
 $\dot{m}_f$  : 공급수 유량 ( $kg/s$ )  
 $\dot{m}_w$  : 담수 유량 ( $kg/s$ )  
 $\dot{m}_h$  : 담수 유량 ( $kg/h$ )  
 $Q$  : 가열열량 ( $kW$ )  
 $P$  : 압력 ( $Pa$ )  
 $S$  : 염도 ( $g/kg$ )  
 $T_i$  : 공급수 입구 온도( $^{\circ}C$ )  
 $T_0$  : 공급수 출구 온도( $^{\circ}C$ )  
 $ppm$  : 100만분율  
 $VMD$  : Vacuum Membrane Distillation

## 1. 서 론

최근 전 세계적으로 기후변화에 의한 물 부족 문제가 심화됨에 따라 물 부족 문제를 해결 할 수 있는 대안으로 해수담수화에 대한 관심이 증폭되고 있다. 해수담수화기술은 지구상에 존재하는 물의 양에 있어서 절대 다수를 차지하고 있을 만큼 무한한 자원인 해수를 인류가 사용할 수 있는 담수로 변환 시키는 기술이다. 해수담수화 공정 기술은 현재 가장 널리 사용되는 방법으로 크게 증발법과 막 분리법 두 기술로 나눌 수 있다.

증발법은 해수를 가열하여 염분과 수증기를 분리하는 기술로 MED(Multi Effect Distillation), MSF(Multi Stage Flash) 등의 기술이 대표적이다. 증발법 담수기술은 해수를 증발시켜 발

생되는 수증기를 응축하여 담수를 생산하기 때문에 염 제거율이 매우 높은 장점이 있으나 해수를 가열하는데 필요한 열 에너지소비가 높은 단점이 있다. 막 분리 담수기술 중 현재 가장 많이 사용되고 있는 역삼투(Reverse Osmosis, 이하 RO)기술은 압력 막과 압력 에너지를 이용한 담수기술로 높은 압력의 해수를 막에 통과시켜 담수만을 분리하는 기술이다. 이러한 RO 공법은 증발법에 비하여 에너지가 적게 사용되는 장점이 있으나 낮은 회수율에 따른 처리효율 저하, 전력비용 상승 및 농축수 처리문제가 크게 대두되고 있다.

따라서 증발법과 역삼투 공법의 단점을 보완할 수 있는 막 증발법(Membrane Distillation, 이하 MD) 기술이 담수 시장에 새로운 기술로 부각되고 있다. MD 공법은 온도차를 구동력으로 사용하는 기술로 선택적 투과막의 성질과 증류 현상을 접목시켜 비교적 낮은 에너지를 이용하여 담수를 생산할 수 있으며, 역삼투 공정에 비하여 회수율이 높아 농축수 배출 문제를 줄일 수 있는 담수 기술이다. MD 공정은 막 모듈의 형태 및 운전 방식에 따라 4가지의 공정으로 구분된다. 고온 수용액이 막 표면과 직접 접촉하는 DCMD(Direct Contact Membrane Distillation), 공기의 간극에 의해 막으로부터 응축 표면이 떨어져있는 형태의 AGMD(Air Gap Membrane Distillation), 비활성 기체에 의해 응축 표면이 간극을 이루는 SGMD(Sweep Gas Membrane Distillation), 진공을 이용해 압력차를 형성하는 VMD(Vacuum Membrane Distillation 이하 VMD) 등이 대표적이다.

MD 공법은 1980년대 막 소재 기술의 발전으로 관련 기술연구가 활성화 되었으나 기존의 증발법 및 역삼투 공정을 대체할 경우 발생하는 경제성이나 장점이 없었기 때문에 응용분야 측면에서 실용화와 사업화에 대한 실

적이 많지 않았다. 그러나 원유가격 상승 및 기존 역삼투 공정의 농축수 배출 문제가 심화됨에 따라 2000년대 들어 MD 공정에 필요한 열 에너지를 태양열이나 신재생에너지로부터 얻는 에너지 절약형 담수 기술로 새롭게 부각되고 있으며, 이미 선진국에서는 많은 연구가 활발히 진행되고 있다.

Ying<sup>1)</sup>은 중공사막을 사용한 VMD 시스템을 선박에 설치하여 배의 엔진에서 발생하는 폐열을 열원으로 사용하는 테스트를 수행하였다. Elena<sup>2)</sup>는 스웨덴 Scarab사의 평판형 AGMD모듈을 사용하여 모듈에 필요한 열원을 태양열 시스템을 통해 공급 하였으며 공급 온도, 유량, 염도와 에너지 소비량이 증류 생산에 미치는 영향을 위한 실험을 수행하였다. Samira<sup>3)</sup>는 MD 시스템에 공급되는 열에너지는 태양열 집열기를 통해 공급하며, 시스템 구동에 필요한 전기에너지는 PV모듈을 통해 공급할 수 있는 독립적인 태양에너지 VMD 시스템에 대한 타당성 조사 연구를 수행하였다. Rosalam<sup>4)</sup>은 지열을 이용한 VMD 시스템의 실험장치를 구축하여 담수 생산량 측정과 지열수 사용에 따라 기존 담수 시스템과의 경제성 평가 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 MD 공정 중 열 에너지 사용량이 적으며 담수생산량이 비교적 높은 VMD 모듈을 이용한 태양열 해수담수화 시스템의 기초 설계 데이터를 확보를 위해 1 m<sup>3</sup>/day 용량의 Lab scale VMD 시스템을 구축하였으며, 공급수의 온도, 유량 및 염도변화에 따른 VMD 모듈의 열 성능 특성을 분석 하였다.

## 2. VMD 모듈 실험 장치

본 연구에 사용된 VMD 모듈의 막은 소수성의 다공성 PVDF(Polyvinylidene fluoride)

중공사막을 사용하였다. 고온에 사용 가능한 CPVC(Chlorinated polyvinyl chloride) 재질의 원통형 용기 내에 PVDF 재질의 중공사막을 다발형태로 삽입하였으며, 중공사막 내부로 공급되는 공급수가 막의 관내를 통과할 때 발생하는 증기는 중공사막의 기공을 통과하여 막 외부로 배출된다. 배출된 증기는 압력차에 의해 응축기로 수집되며 수집된 증기는 응축기에서 냉각수와 열교환을 통해 응축된다. 본 연구에서 사용된 VMD 모듈의 경우 모듈 내부에 설치된 PVDF 재질의 중공사막의 전체 유효면적은 5.3 m<sup>2</sup>이며, 담수 생산 용량은 1 m<sup>3</sup>/day 이다. Fig. 1은 본 연구에서 사용된 VMD 모듈의 계략도를 나타낸 것이다.

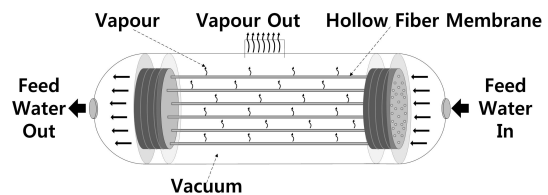


Fig. 1 Schematic of Vacuum Membrane Distillation

Table 1 은 VMD 모듈의 열성능 특성을 도출하기 위해 구축된 실험 장치의 사양을 나타낸 것이다. 본 연구를 통해 구축된 VMD 시스템은 실내 실험 장치로 설계 및 제작 되었으며 일일 1 m<sup>3</sup>/day 용량의 담수를 생산할 수 있는 시스템으로 구축되었다. VMD 모듈의 열성능을 평가하기 위해 구축된 실험장치의 구성은 VMD 모듈에 열원을 공급하기 위한 염수 온수 탱크, VMD 모듈에 열 에너지 공급을 위한 전기히터 10 kW 1 EA, 12 kW 2 EA가 설치되었으며, VMD 모듈에 염수를 공급하기 전 염수의 이물질 제거를 위한 전처리 시스템으로 0.2 μm의 MF(Micro Filter) 필터를 사용하였다.

Table. 1 configuration of experimental system

Contents	Specification
Sea water tank	0.3m <sup>3</sup>
Electric heater	10kW 1EA, 12kW 2EA,
Pretreatment MF filter	0.2μm
Sea water pump	13m <sup>3</sup> /h
Electromagnetic Flowmeter	1~45m <sup>3</sup> /h
Condenser	47,120 kcal/h
Vacuum pump	120LPM 690mmHG
Pressure transducer	1 to 20bar
Vacuum pressure transducer	0 to 100kPa
VMD module membrane area	5.3m <sup>2</sup>



Fig. 2 Experimental equipment of VMD system

염수를 사용하는 실험장치의 특성상 부식방지를 위해 모든 배관의 재질은 고온에 사용가능한 HT 배관을 사용하였으며 전기히터, 전처리 시스템 및 증기 응축을 위한 응축기는 티타늄 재질을 사용하여 실험 장치를 구축하였다. VMD 모듈의 운전 특성상 진공 시스템을 필요함으로 모듈 내부 및 증기 배관등의 진공 유지를 위하여 오일리스 왕복동식 진공펌프를 사용하여 진공을 유지하도록 설계되었다. Fig. 2는 본 연구를 통해 구축된 VMD 시스템의 실험 장치를 나타낸 것이다.

### 2.1 실험방법

Fig. 3 은 VMD 시스템의 계략도를 나타낸

것이다. VMD 시스템의 운전은 모듈에 공급되는 열원을 전기히터를 사용하여 염수를 가열 시키며 전기히터를 통해 가열된 해수는 0.2 μm의 MF 필터를 통과시켜 이물질 제거하여 공급수의 수질을 일정한 상태로 유지시킨 후 VMD 모듈로 염수를 공급한다. 이때 공급되는 염수의 온도, 압력 및 유량은 각각의 온도센서, 압력 트랜스미터 및 유량계를 통해 수집되며 밸브 및 Bypass 라인을 통해 유량 및 압력을 조절한다. 가열된 공급수가 들어가는 VMD의 내부 압력은 절대 압력 기준으로 15kpa 이하를 유지하며 이때 공급되는 해수의 온도와 VMD 모듈을 통해 증발되는 증기의 온도는 모듈 내부 압력의 영향을 받는다.

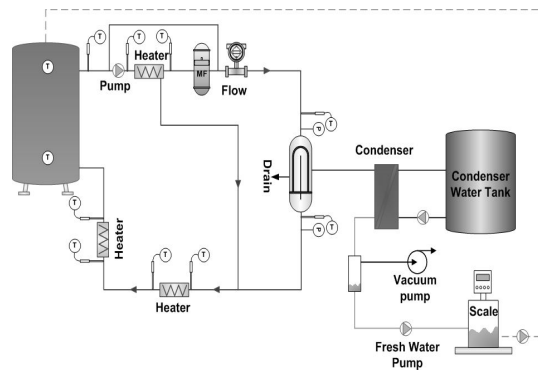


Fig. 3 Schematic diagram of VMD system

VMD 모듈에서 생산된 증기는 응축기를 통과하며 이때 증기는 응축수와 열교환을 통해 증기에서 액체로 응축되며 응축된 담수는 담수 탱크에 저장되고 응축되지 못한 불응축 가스는 진공펌프를 통하여 외부로 방출된다. 담수탱크에 모아진 담수는 VMD 모듈에 공급되는 염수의 염도를 일정하게 유지하기 위하여 담수의 무게 및 수질을 측정 후 다시 염수탱크로 회수되도록 설계 및 제작하였다.

## 2.2 실험결과 처리방법

VMD 모듈의 열 성능비인 Performance Ratio(이하 PR)은 식 (1)과 같이 생산된 담수량에 대해서 증기로 상변화 시키기 위해 필요한 열량과 실제 모듈에 공급된 열량의 비로 나타낸다.

$$PR = \frac{\dot{m}_w L_T}{Q} \quad (1)$$

식 (1)에서  $L_T$ 는 물의 증발잠열이고  $\dot{m}_w$ 는 모듈을 통해 생산된 담수량,  $Q$ 는 VMD 모듈에 필요한 가열열량으로 VMD 모듈에 공급되는 가열수의 입·출구 온도차 및 유량으로 나타낼 수 있으며, 식 (2)와 같다. 식 (2)에서  $\dot{m}_f$ 는 공급되는 염수의 유량,  $C_p$ 는 염수의 비열,  $T_i$ 은 VMD 모듈 공급수 입구 온도,  $T_o$ 는 VMD 모듈 공급수 출구 온도이다.

$$Q = \dot{m}_f \times C_p \times (T_i - T_o) \quad (2)$$

VMD모듈의 입·출구 온도차는 VMD 모듈의 열성능 비인 PR 값에 매우 많은 영향을 미친다. VMD 모듈에 공급되는 공급수의 염도가 증가 할수록 공급수의 열전도도 값은 감소하며, 따라서 VMD 모듈의 입·출구 온도차 역시 감소한다. 염도에 따른 염수의 열전도도 값은 식 (3)과 같다.<sup>5)6)</sup>

$$\frac{k_{fw}}{k_{sw}} = 0.00022 \times S + 1 \quad (3)$$

$$k_{sw} = 0.5715(1 + 0.003T - 1.025 \times 10^{-5} T^2 + 6.53 \times 10^{-3} P - 0.00029S) \quad (4)$$

$$k_{fw} = 0.797015 \times T^{-0.194} - 0.251242 \times T^{-4.717} + 0.096437 \times T^{-6.385} - 0.0032696 \times T^{-2.134} \quad (5)$$

식 (3)에서  $T$ 는 염수의 공급온도, 0.00022는 상수로 염분대비 해수의 열전도도 비율을 나타낸다.  $k_{sw}$ 는 해수의 열전도도,  $k_{fw}$ 는 생산된 담수의 열전도도로 각각 식 (4)와 (5)로 계산된다.

VMD 모듈에 공급되는 염수의 염도가 증가 할수록 염수의 Boiling Point가 증가하며 따라서 염수를 증발시킬 때 사용되는 열량도 증가한다. 염도에 따른 Boiling point elevation(이하 BPE) 값은 식 (6)과 같다.<sup>7)</sup>

$$BPE = AS^2 \times BS \quad (6)$$

$$A = -4.584 \times 10^{-4} T^2 + 2.823 \times 10^{-1} T + 17.95 \quad (7)$$

$$B = 1.536 \times 10^{-4} T^2 + 5.267 \times 10^{-2} T + 6.56 \quad (8)$$

식 (6)에서  $S$ 는 해수의 염도이며  $A$ 와  $B$ 는 각각 식 (5)와 (6)으로 나타낼 수 있다. 여기서  $T$ 는 염수의 온도이다.

$$LMH = \frac{\dot{m}_h}{A_m} \quad (9)$$

Membrane Distillation 모듈의 막 성능 지표로 사용되는  $LMH$ 는 모듈에서 생산된 담수의 투과 유량을 나타낸 것으로 막 면적당 생산 담수량으로 계산되며 식 (9)와 같다. 식 (9)에서  $\dot{m}_h$ 는 생산된 시간당 담수량  $A_m$ 는 VMD 모듈에 사용된 막의 면적이다.

### 3. 결과 및 고찰

VMD 모듈의 열성능 평가를 수행하기 위해서는 외부 환경이 각 실험 조건마다 동일한 환경에서 수행되어야 한다. VMD 모듈의 특성상 외기온도 보다 높은 염수를 사용하기 때문에 열손실에 의한 영향을 반드시 고려해야 한다. 따라서 각 실험 조건마다 동일한 외부 온도 조건에서 실험을 수행하였다. 또한 실험의 오차를 최소화하기 위해서 VMD 모듈로 공급되는 가열수의 공급온도 및 유량의 오차 범위를  $\pm 1\%$  이내로 유지하여 실험을 수행하였다.

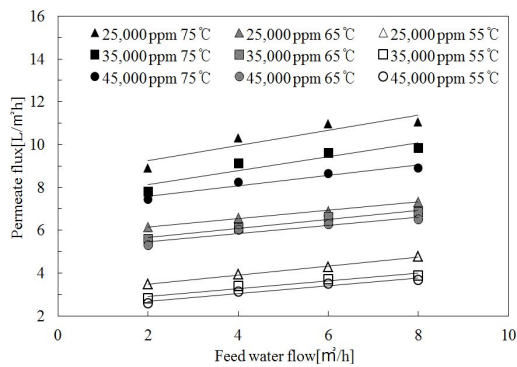


Fig. 4 Permeate flux according to feed flow rate

Fig. 4는 공급수의 염도, 온도 및 유량에 따른 VMD 모듈의 *LMH* 값을 나타낸 것이다. 공급온도에 따른 *LMH* 값을 도출하기 위한 실험 조건으로는 공급수의 염도는 TDS 기준으로 25,000 ppm, 35,000 ppm, 45,000 ppm 공급수 온도 55°C, 65°C, 75°C, 공급유량 2 m³/h, 4 m³/h, 6 m³/h, 8 m³/h, VMD 모듈 진공압력은 절대압력 기준으로 15 kpa 이하의 동일한 조건에서 각 10분간 실험을 수행하였다.

공급수의 온도와 유량이 증가함에 따라 VMD 모듈의 막 투과 플럭스 값인 *LMH*가 비례하여 증가 하는 것을 알 수 있다. 이는 VMD

모듈에 공급되는 염수의 온도와 유량이 증가함에 따라 공급된 열량이 증가함으로 VMD 모듈의 *LMH* 값도 증가하기 때문이다. 또한 공급수의 염도가 증가할수록 *LMH* 값은 감소한다. 이는 공급수의 염도가 증가할수록 염수의 Boiling Point가 증가하기 때문에 VMD 모듈 내부에서 증기를 생산하기 위해 필요한 열량이 증가함으로 동일한 열량을 VMD 모듈에 공급할 때 생산되는 담수량은 감소한다. 이러한 결과는 선행연구 결과와 일치하는 것으로 나타났다.<sup>8)9)10)</sup>

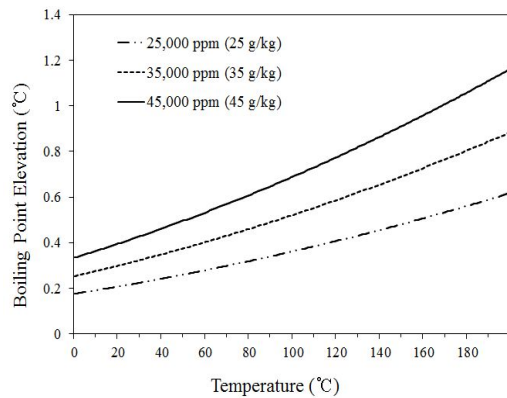


Fig. 5 Boiling point elevation according to salinity

Fig. 5는 본 연구에서 사용된 염수의 염도조건에 따른 BPE 값을 나타낸 것이다. 해수의 염도가 증가할수록 증기압이 낮아져 염수의 Boiling Point가 상승하는 것을 알 수 있다. 따라서 동일한 온도 및 압력 조건에서 염수를 증발시키기 위해 필요한 열 에너지는 염도가 증가할수록 비례하여 증가한다.

Fig. 6은 VMD모듈의 공급수 온도 조건에 따른 *LMH* 값을 나타낸 것이다. 실험결과 공급온도 75 °C, 공급유량 8 m³/h의 동일조건에서 25,000, 35,000, 45,000 ppm의 염수를 공급수로 사용한 결과 25,000 ppm의 염수를 공급수로 사용하였을 때 모듈을 통해 생산된 담수

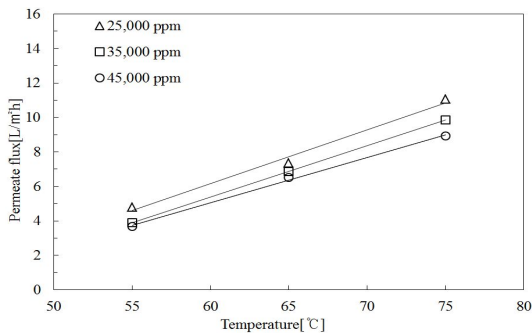


Fig. 6 Permeate flux according to feed temperature

의 *LMH* 값은 11.05로 각 조건별 모든 실험결과 중 가장 높게 나타났다. 공급수의 염도가 증가함에 따라 VMD 모듈의 막 투과 플럭스 값인 *LMH* 값이 감소되며 이는 앞에서 언급한 바와 같이 공급수의 염도 증가로 Boiling point가 증가 하여 VMD 모듈 내부에서 발생하는 증기량이 감소하기 때문이다.

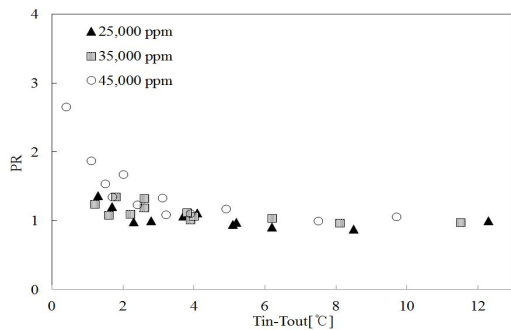


Fig. 7 Performance Ratio according to inlet and outlet temperature difference

Fig. 7은 VMD 모듈로 공급되는 공급수의 입·출구 온도차에 따른 VMD 모듈의 PR 값을 나타낸 것이다. 동일한 유량과 온도 조건에서 공급수의 염도가 증가할수록 입·출구 온도차는 줄어든다. 이는 공급수의 염도가 증가할수록 공급수의 열전도도가 감소하여 VMD 모듈의 입·출구 온도차가 감소한다. 따라서 VMD 모

듈에 공급되는 열량 역시 감소한다. 공급수 온도 55 °C, 유량 8 m³/h, 45,000 ppm의 염도를 공급수로 사용하였을 때 모든 실험결과 중 VMD 모듈로 공급되는 열량은 가장 작게 나타났으며, 이와 반대로 PR 값은 가장 높은 것으로 분석되었다. 이러한 값은 식 (1)에서 담수생산량인  $\dot{m}_w$ 의 감소 비율보다 입·출구 온도차의 감소로 인한 공급 열량 값인  $Q$  값의 감소 비율이 더욱 크기 때문에 오히려 PR 값은 증가하기 때문이다.

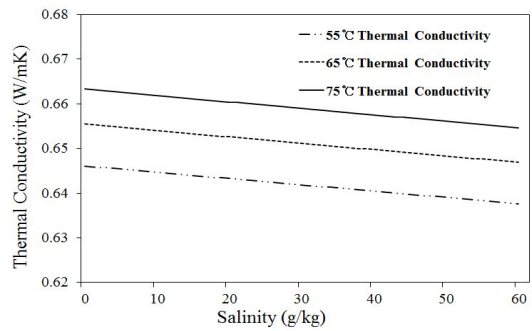


Fig. 8. Seawater thermal conductivity for temperature at a salinity

Fig. 8은 해수의 염도와 온도에 따른 열전도도 값을 나타낸 것이다. 염수의 염도가 증가할수록 열전도도는 감소하며, 이는 염도가 증가할수록 염수에 용해된 전해질 함유량이 증가하여 해수의 열전도도가 감소하기 때문이다.

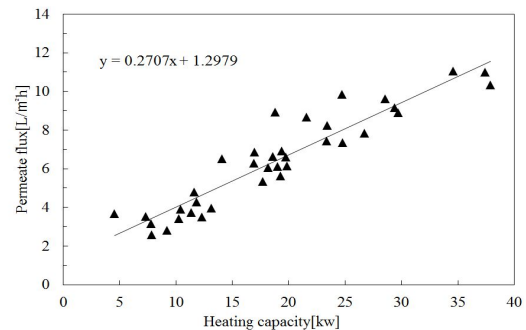


Fig. 9 Permeate flux according to heating capacity

Fig. 9는 VMD 모듈에 공급되는 가열열량에 따른 *LMH* 값을 나타낸 것이다. 본 연구에서 사용된 VMD 모듈의 경우 일일 1 m<sup>3</sup>/day의 담수를 생산하기 위해 필요한 가열열량은 시간당 약 24.2 kWh가 필요한 것으로 나타났으며, 이에 따라 하루 총 필요한 가열열량은 약 580 kWh/day 으로 나타났다. 가열열량에 따른 *LMH* 상관식은  $y = 0.2707x + 1.2979$  로 가열열량이 증가할수록 VMD 모듈의 투과 플럭스인 *LMH* 값도 비례하여 증가한다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 VMD 모듈을 이용한 태양열 해수담수화 시스템의 태양열 시스템 용량 산출 및 적정규모 설계를 위한 기초 데이터 확보를 위해 1 m<sup>3</sup>/day 용량의 VMD 시스템을 구축하였으며, 공급수 온도, 유량 및 염도 변화에 따른 VMD 모듈의 열 성능 특성을 분석하였다.

- (1) 공급수 온도 및 유량의 증가에 따라 VMD 모듈의 *LMH* 값은 비례하여 증가하며, 공급수의 염도가 증가할수록 공급수의 증기압 감소로 Boiling Point가 상승하여 VMD 모듈의 *LMH* 값은 감소한다.
- (2) 공급수의 염도가 증가할수록 염수의 열전도도는 감소하며 VMD 모듈의 입·출구 온도차는 감소한다. 따라서 염수의 염도가 증가할수록 담수생산량의 감소 비율보다 입·출구 온도차 감소에 의한 공급 열량의 감소 비율이 커져 VMD 모듈의 열성능 비인 PR 값은 오히려 증가하는 것으로 나타났다.
- (3) 본 연구에서 사용된 VMD 모듈은 PVDF 재질의 중공사막을 이용한 모듈로 일일 1 m<sup>3</sup>/day의 담수를 생산하기 위해 필요한

열량은 580 kWh/day로 분석되었다.

#### 후 기

본 연구는 국토교통부 플랜트연구개발사업의 연구비지원으로 수행되었음.(과제번호: 13FIP-B067529-01)

#### Reference

1. Ying, X., Bao-Ku, Z. and You-yi, X., Pilot test of vacuum membrane distillation for seawater desalination on a ship, Vol. 189, pp. 165~169, 2006.
2. Elena, G. B., Julian B., Guillelmo Z., Diego, C. A., Patricia, P., Mercedes I. and Wolfgang, G., Experimental analysis of an air gap membrane distillation solar desalination pilot system, Journal of Membrane Science, Vol. 379, pp. 386~396, 2011.
3. Samira, B. A., Nader, N. and Slimane, G., Design of an autonomous solar desalination plant using vacuum membrane distillation, the MEDINA project, Chemical Engineering Research and Design, Vol. 91, pp. 2782~2788, 2013.
4. Rosalam, S. and Chel, K. C., Evaluation of geothermal energy in desalination by vacuum membrane distillation, Applied Energy, Vol. 112, pp. 737~746, 2013.
5. Mostafa, H. S., John, H. L. V. and Syed, M. Z., Thermophysical properties of seawater : a review of existing correlations and data, Desalination and Water Treatment, Vol. 16, pp. 354~380, 2010.
6. Mostafa, H. S., New correlations for seawater and pure water thermal conductivity at different temperatures and salinities, Desalination, Vol. 313, pp. 97~104, 2013.
7. Isdale, J. D. and Morris, R., Physical properties



- of seawater solutions : density, 1971.
8. Minglue, S., May M, T., KaI, Y, W., Jincal, S. and Tai, S. C., Effect of inner-layer thermal conductivity on flux enhancement of dual-layer hollow fiber membranes in direct contact membrane distillation, Vol. 364, pp. 278~289, 2010.
  9. Elena G. B., Guillermo, Z., Sara, M. C. and Julian B., Experimental evaluation of two pilot-scale membrane distillation modules used for solar desalination, Journal of Membrane Science, Vol. 409, pp. 264~275, 2012.
  10. Elena G. B., Julian B., Guillermo Z., Die혜, C. A., Patricia, P., Mercedes I. and Wolfgang G., Experimental analysis of an air gap membrane distillation solar desalination pilot system, Journal of Membrane Science, Vol. 379, pp. 386~396, 2011.