



중공사막 진공 막증류 모듈의 하우징 누수가 담수 생산에 미치는 영향 분석

Analysis of Effect on Freshwater Production of Vacuum Membrane Distillation Module according to Housing Leak

주흥진·곽희열*

Hongjin Joo·Heeyoul Kwak*

한국에너지기술연구원 태양열연구실

Solar Thermal Division, Korea Institute of Energy Research (KIER)

ABSTRACT

In this study, the performance experiment was conducted to compare the permeate flux of hollow fiber Vacuum Membrane Distillation module according to leak problem between module housing and membrane bundle. For the permeate flux performance experiment of the two Vacuum Membrane Distillation modules, the Lab-scale experimental equipment was built in the capacity of 1m³/day. The performance test of the two Vacuum Membrane Distillation modules were analyzed according to the feed water conditions. As a result, it was analyzed that the leak VMD module decreased about 14% of permeate flux than normal VMD module.

Key words: Desalination, Hollow Fiber Membrane, Housing Leak, Vacuum Membrane Distillation

주제어: 해수담수화, 중공사막, 누수, 진공 막 증류법

1. 서 론

최근 들어 인구증가, 산업화, 도시화 등에 따른 물 수요는 기하급수적으로 증가하고 있으나 지구온난화에 따른 이상기후 및 사막화로 인하여 1인당 사용 가능한 물의 양은 급격히 줄어들고 있는 추세이다. 따라서 안정적인 수자원 확보를 위한 국가간 물 분쟁도 해가 갈수록 심각한 양상을 보이고 있다. 이러한 물 부족 문제를 해결할 수 있는 방안으로 가장 부각되고 있는 기술이 해수를 담수로 바꾸는 해수담수화 기술이다. 해수는 지구상의 물의 양에 있어서 절대 다수를 차지하고 있으나 인류가 생활용수나 산업용수로 이용하기에는 염도가 너무 높아서 사용하지 못하고 있는

실정이다(McGinnis et al, 2008).

해수를 담수로 바꾸는 해수담수화에 공정에는 매우 많은 양의 전기 및 열에너지가 사용된다. 이러한 공정에 사용되는 에너지가 화석연료로부터 얻어진 것이라면 이에 따른 온실가스 배출은 지구온난화에 따른 기후변화를 가속시켜 더 많은 물 부족 문제를 일으키는 악순환의 원인으로 작용된다.

따라서 물 부족 문제와 온실가스 배출 문제를 동시에 해결하기 위해 세계 각국에서는 친환경 해수담수화 공정에 대한 연구가 크게 부각되고 있다(Chung et al, 2012). 이러한 친환경 담수화 기술 중 막 증류법(Membrane Distillation, 이하 “MD”) 기술은 기존 증발법 및 역삼투 공정의 문제점으로 지적되고 있는 에너지 소비량 및 농축수 배출에 대한 단점을 보완할 수 있는 차세대 해수담수화 기술로 부각되고 있다(Greenlee et al, 2009).

Received 20 April 2016, revised 17 May 2016, accepted 1 June 2016

*Corresponding author: Heeyoul Kwak (E-mail: hykwak@kier.re.kr)

pp. 225-231

pp. 233-240

pp. 241-251

pp. 253-261

pp. 265-270

pp. 271-278

pp. 279-284

pp. 285-291

pp. 293-297

pp. 299-312

pp. 313-319

pp. 321-325

pp. 327-334

pp. 335-341

pp. 343-350

막 증류법 기술은 MED(Multi Effect Distillation 이하 “MED”) 및 MSF(Multi Stage Flash 이하 “MSF”) 공법과 같이 해수의 증발 및 응축 과정을 통해 담수를 생산하는 열 구동 방식의 담수 기술로 소수성(Hydrophobic)의 다공성(Microporous) 분리막을 사용하여 높은 온도의 유입수와 낮은 온도의 처리수 사이의 온도 차를 구동력으로 이용하는 담수화 기술이다. 높은 온도의 유입수는 분리막 표면에서 분리되고 증기만이 기공을 통과해 처리수 쪽에서 응축된다. 이러한 공정은 분리막을 사용하는 RO(Reverse Osmosis 이하 “RO”) 공정과 달리 낮은 압력으로 운전이 가능한 담수화 기술이며 기존 MED 및 MSF와 같은 증발법 공정과 달리 비교적 낮은 온도에서 운전 할 수 있는 장점이 있다. 또한 막 증발법은 이론적으로 회수율이 매우 높아 최근 해수담수화 공정에 환경 문제점으로 지적되고 있는 농축수 배출 문제를 줄일 수 있는 담수 기술로 활발한 연구가 진행되고 있다(Suk et al, 2006).

MD 공정은 막 모듈의 형태 및 운전 방식에 따라 4가지의 공정으로 구분할 수 있다. 유입수와 처리수를 직접 접촉시키는 DCMD(Direct Contact Membrane Distillation), 공기의 간극에 의해 막으로부터 응축 표면이 떨어져 있는 형태의 AGMD(Air Gap Membrane Distillation), 비활성 기체에 의해 응축 표면이 간극을 이루어 응축 효율을 높인 SGMD(Sweep Gas Membrane Distillation), 진공을 이용해 더 높은 압력차를 형성하여 여과 플럭스를 높일 수 있는 VMD(Vacuum Membrane Distillation 이하 VMD) 등이 대표적이다.

Ji et. al, (2010)은 RO 플랜트에서 발생하는 농축수를 MD (Membrane Distillation 이하 “MD”) 공정에 사용할 때 회수율 및 NaCl 결정화에 대한 연구를 수행하였으며 RO 공정의 농축수 처리 장치로 MD 공정의 적용성 평가를 수행하였다.[5] Manna et. al, (2010)은 PVDF 재질의 분리막을 이용하여 평판형 DCMD(Direct Contact Membrane Distillation 이하 “DCMD”)를 제작하여 DCMD에 필요한 열원을 태양열을 통해 공급하였으며 DCMD에 공급되는 공급수의 온도 및 유량이 담수 생산에 미치는 영향을 분석하였다.[6] Schwantes et. al,(2013)은 신재생에너지 원중 태양열과 폐열을 이용한 소규모 MD 플랜트에 대한 성능 시험을 수행하였으며 폐열 및 태양열 시스템의 공급 열량에 따른 담수 생산 특성 연구를 수행하였다.[7] Naidu et. al, (2014)은 VMD 시스템에 공급되는 공급수의 NaCl 및 CaSO₄의 조건에 따른 담수 생산량

및 회수율에 대한 연구를 수행하였으며 기존 VMD 시스템의 성능을 향상 시킬 수 있는 V-MEMD (Vacuum-Multi-Effect-Membrane-Distillation) 설계 방법에 대한 연구를 수행하여 기초 데이터를 제시하였다. V-MEMD의 경우 MED 방식과 유사하게 각각의 막에서 발생하는 증기를 다음 막의 증발 열원으로 사용하여 비교적 높은 GOR(Gain Output Ratio) 값을 확보할 수 있다.[8] Zaho et. al, (2013)은 2단, 4단의 V-MEMD 실험 장치를 설계 및 제작 하였으며 이에 따른 성능 실험을 수행하여 각 단의 막 면적에 따른 담수 생산량 분석 및 GOR 값에 대한 연구를 수행하였다.[9] Joo, Kwak, (2015) (2016)은 태양열을 이용한 MD 실증플랜트 구축에 앞서 VMD 공급수의 염도 및 온도 조건에 따른 담수 생산량을 분석하였으며 VMD 모듈을 이용한 10 m³/day 용량의 태양열 해수담수화 플랜트 구축시 필요한 태양열 시스템의 규모를 예측할 수 있는 기초 설계 데이터를 제시하였다(Joo et al, 2016).

그러나 기존의 연구들은 VMD 시스템의 설계 및 막의 성능 실험이 주로 연구되어졌으며 VMD 모듈을 이용한 해수담수화 시스템 운전 시 발생하는 문제점에 관한 연구는 다루어지지 않고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 PVDF 재질의 중공사막 VMD 모듈의 운전 중 발생하는 문제점 중에 하나인 VMD 모듈 하우징과 막 Bundle 사이의 누수 문제가 담수 생산에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고자 하였으며 이를 위해 누수가 아직 발생되지 않은 정상적인 VMD 모듈과 누수 문제가 발생된 VMD 모듈 2개를 이용하여 동일한 조건에서 담수 생산량에 대한 특성을 분석하였다. 이를 위해 실험실 규모의 VMD 해수담수화 시스템을 이용하여 성능실험을 수행하였으며 본 연구를 통해 중공사막 VMD 모듈의 성능 개선 및 설계를 위한 데이터를 확보 하고자 한다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 진공 막 증발 모듈

VMD 모듈의 하우징과 막 Bundle 사이의 누수 문제에 따른 담수 생산 특성을 위해 본 연구에서 사용된 중공사막 VMD 모듈은 싱가포르 H사에서 시제품 형태로 제작된 VMD 모듈이며 VMD 모듈의 형태는 비교적 고온에서 변형이 없는 CPVC(Chlorinated polyvinyl chloride) 재질의 원



통형 용기 내에 소수성의 다공성 PVDF 재질의 증공사막이 다발로 삽입된 형태이다. 증공사막 VMD 모듈은 내부로 공급되는 공급수가 막의 관내를 통과할 때 막 외부와의 온도차에 유발되는 증기압의 차이로 증기가 발생되며 이때 발생된 증기만 증공사막의 기공을 통과하여 막 외부로 배출된다. 배출된 증기는 압력차에 의해 압력이 낮은 응축기로 수집되며 수집된 증기는 응축기에서 냉각수와의 열교환을 통해 응축되어 담수화 된다. 본 연구에서 사용된 2개의 VMD 모듈 내부에 설치된 증공사막의 전체 유효면적은 5.3 m²로 동일하다. Fig. 1은 본 연구에서 사용된 VMD 모듈의 개략도를 나타낸 것이다. Table 1은 H 사의 VMD 모듈의 사양을 나타낸 것이다.

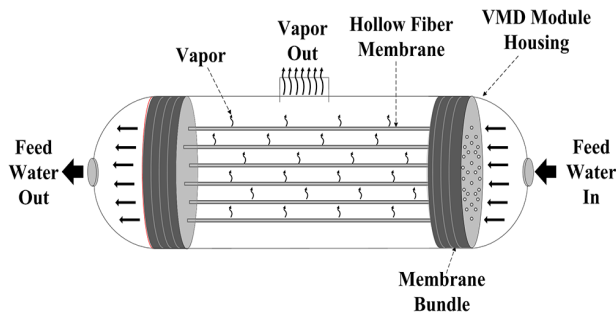


Fig. 1. Schematic of VMD module.

Table 1. VMD module specification

Contents	Description	Specifications
Dimension	Feed Water Inlet	1.5 inch
	Concentrate Water Outlet	1.5 inch
	Vapor Outlet	3 inch
	Drain	0.5 inch
Material	Housing	CPVC
	End Cap	CPVC
Membrane Material	Material	PVDF
Module Description	Length	820 mm
	Diameter	8" SCH 80
	Width	320 mm
	Height	360 mm
	Weight (without water)	18 kg
	Weight (with water)	28 kg
module Description	Total Membrane Surface Area (inner diameter)	5.3 m ²
Flow Rate	Design Recirculation Flow	2.6 to 8.0 m ³ /hr

2.2 VMD 모듈 성능 실험방법

누수 문제에 따른 VMD 모듈의 담수 생산 특성을 분석하기 위해서 본 연구에서는 실험실 규모의 VMD 모듈 성능 실험장치를 구축하였다. VMD 모듈에 공급되는 공급수를 가열하기 위하여 전기히터를 사용하여 공급수를 가열하도록 설계 및 제작하였다. 전기히터를 통해 가열된 공급수는 VMD 모듈로 공급되기 전 0.2 μm의 MF 필터를 통과하는 전처리 과정을 거친 후 VMD 모듈로 공급된다. VMD 모듈로 공급되는 공급수의 온도, 압력 및 유량은 각각의 온도센서, 압력센서 및 전자식 유량계를 통해 실시간으로 수집되며 VMD 모듈의 공급수의 유량 및 압력을 조절할 수 있도록 바이패스라인 및 밸브를 설치하였다. VMD 모듈 내부에서 일부 증발되고 온도가 낮아진 공급수는 전기 히터를 통해 재 가열된 후 다시 공급수 탱크로 환수 되도록 설계되었다. VMD 모듈에 공급되는 공급수의 염도는 해수와 유사한 성분을 갖기 위하여 천일염을 사용하여 공급수의 염도를 55,000 ppm으로 설정하였으며 각 실험마다 동일한 염도 조건을 조성하기 위해 실험 시작 전, 후 염도를 측정하여 공급수의 염도를 동일하게 유지시키며 성능실험을 수행하였다. VMD 모듈 내부에서 발생된 증기는 압력차에 의해 응축기로 수집되며 응축기 내부에서 응축수와의 열교환을 통해 담수로 응축

- pp. 225-231
- pp. 233-240
- pp. 241-251
- pp. 253-261
- pp. 263-270
- pp. 271-278
- pp. 279-284
- pp. 285-291
- pp. 293-297
- pp. 299-312
- pp. 313-319
- pp. 321-325
- pp. 327-334
- pp. 335-341
- pp. 343-350

된다. 응축기에 사용된 응축수는 탱크 용량 7 m³의 응축수 탱크에서 공급되며 응축수의 온도를 일정하게 유지하기 위하여 28,000 kcal/h의 냉각기를 설치하여 응축수의 온도를 항상 동일하게 공급하도록 실험장치를 구성하였다. 응축기에서 생산된 담수는 펌프를 통해 담수 탱크로 보내지며 VMD 모듈에 공급되는 공급수의 일정한 염도유지를 위해 생산된 담수의 염도 및 질량 측정 후 다시 공급수 탱크로 환수 되도록 실험장치를 설계 및 제작 하였다.

VMD 모듈 누수에 따른 성능실험은 VMD 모듈 내부 기준으로 절대압력 10 kPa 도달 시 실험 조건에 따른 유량 및 온도 조건으로 VMD 모듈에 공급수를 투입하였으며 공급수 투입 후 600초 후에 공급수 투입을 중지 시키는 방법으로 성능실험을 수행하였다. VMD 모듈은 외기온도 보다 높은 공급수를 활용하여 증기를 발생시키기 때문에 열손실에 의한 영향을 반드시 고려해야 한다. 따라서 본 연구에서는 각 실험

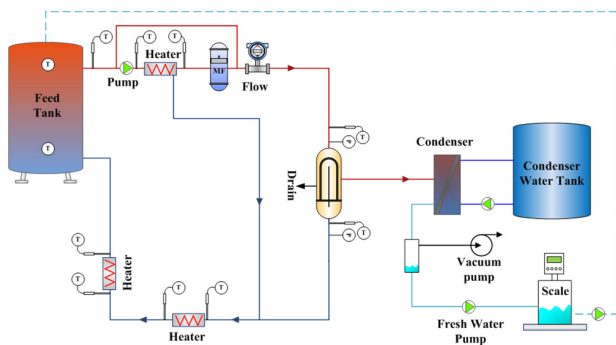


Fig. 2. Schematic diagram of VMD experimental system.



Fig. 3. Experimental equipment of VMD system.

Table 2. Configuration of experimental system

Contents	Specification
Feed Tank	0.3 m ³ , FRP
Electric Heater	32 kW, Titanium
MF Pretreatment	0.2 μm, Polypropylene
MF Filter Housing	20 l, Titanium
Feed Pump	13 m ³ /h, E-CTFE
Flowmeter	1~45 m ³ /h, Teflon
Condenser	47,120 kcal/h, Titanium
Vacuum Pump	120 LPM, 690 mmHG
Pressure Transducer	1 to 20 bar, Hastelloy
Vacuum Pressure Transducer	0 to 100 kPa, SUS316L

조건마다 실내온도를 동일하게 유지시켜 성능실험을 수행하였다. 또한 VMD 모듈로 공급되는 공급수의 온도 및 유량의 오차 범위를 ±1 % 이내로 유지시켜 실험을 수행하였다. Fig. 2 및 Fig. 3은 본 연구에서 사용된 VMD 모듈 실험장치 및 개략도를 나타낸 것이다. Table 2는 VMD 성능실험 장치 항목 및 사양을 나타낸 표이다.

2.3 실험결과 처리방법

누수에 따른 VMD 모듈의 성능 특성 분석을 위해서는 2개의 VMD 모듈 실험 조건이 동일한 환경에서 수행되어야 한다. VMD 모듈의 특성상 외부온도보다 높은 공급수가 VMD 모듈 내부로 공급됨으로 열손실에 의한 영향을 반드시 고려해야 한다. 따라서 본 연구에서는 2개의 VMD 모듈 성능 실험 조건을 동일한 외부 조건에서 성능 테스트를 수행하였다. 또한 실험 결과의 오차 값을 최소화하기 위해서 VMD 모듈에 공급되는 공급수의 온도, 유량 및 압력의 오차 범위를 ±1% 이내로 유지시켜 성능 분석을 수행하였다. VMD 모듈의 하우징과 막 Bundle 사이의 누수가 VMD 모듈의 담수 생산에 미치는 영향을 분석하기 위해서는 MD 모듈의 막 성능 지표로 사용되는 여과 플럭스인 LMH 값(이하 LMH)을 사용하여 VMD 모듈의 성능 특성을 파악 할 수 있다. LMH 값은 막 증발 모듈에서 생산된 담수의 여과 플럭스를 나타낸 것으로 막 면적당 담수 생산량으로 계산되며 식 (1)과 같다. 식 (1)에서 \dot{m}_h 는 VMD 모듈을 통해 생산되는 시간당 담수량이며, A_m 은 VMD 모듈 내부에 설치된 중공사막의 전체 내경 면적이다(Ji et al, 2010, Manna et al, 2010).



$$LMH = \frac{\dot{m}_h}{A_m} \quad (1)$$

3. 결과 및 고찰

Fig. 4는 VMD 모듈 하우징과 막 Bundle 사이에 누수가 발생된 VMD 모듈의 를 나타낸 것이다. VMD 모듈 하우징과 막 Bundle 사이에 발생하는 누수는 VMD 모듈에 공급되는 공급수가 중공사막을 통과 하지 않고 하우징과 막 Bundle 사이에 발생한 틈으로 유입되는 현상으로 VMD 모듈 하우징과 막 Bundle은 서로 다른 재질을 사용함에 따라 열팽창 계수가 틀려 발생하는 문제이다. VMD 모듈은 비교적 높은 온도의 공급수로 인하여 운전 시 온도에 의한 수축팽창이 발생되며 따라서 수축팽창에 의하여 VMD 모듈 하우징과 막 Bundle 사이에 누수가 발생된다. 누수에 의한 VMD 모듈 내부에 Brine 축적은 VMD 모듈 내부에 설치된 막의 오염은 물론 막을 통해 발생하는 증기량 감소 및 증기 유로에 영향을 미침으로 VMD 모듈을 통한 담수 생산량에 큰 영향을 준다. 그러나 VMD 모듈의 특성상 VMD 모듈 하우징 내부는 진공 상태이기 때문에 모듈 내부에 축적되는 Brine에서도 Flash 증발로 인하여 증기가 발생된다. Flash 증발을 통해 발생된 증기는 VMD 모듈을 통해 생산되는 담수의 수질에 영향을 미치며 생산된 담수의 염도를 증가시키는 문제에 원인이 된다.

Fig. 5는 VMD 모듈에 공급되는 공급수의 염도를 TDS 기준 55,000 ppm 조건에서 공급수의 유량 및 온도에 따른 2개의 VMD 모듈의 LMH 값을 나타낸 것이다. VMD 모듈에 공급되는 공급수의 온도 조건으로는 55°C, 65°C, 75°C이며 각각의 온도에서 공급수의 유량을 4 m³/h, 6 m³/h, 8 m³/h의 유량 조건으로 VMD 모듈의 담수 생산 성능 실험을 수행하였다. 또한 담수

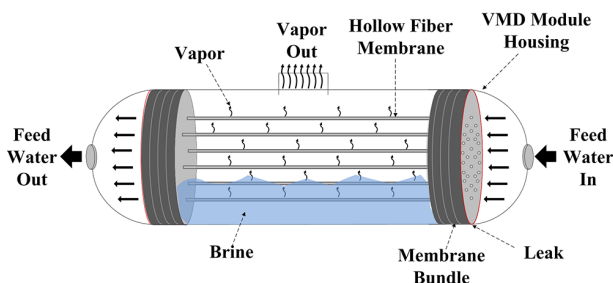
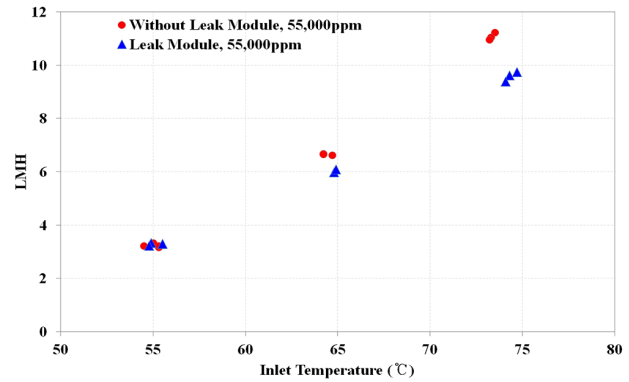


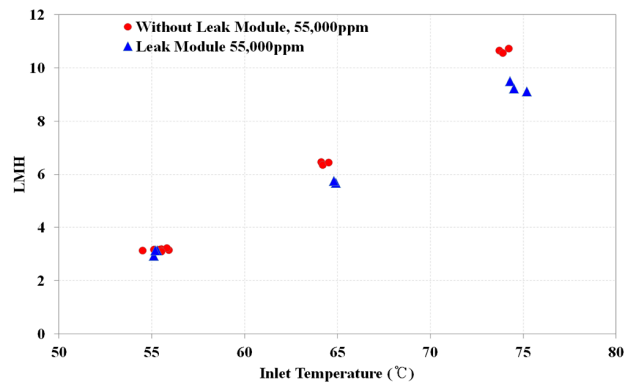
Fig. 4. Schematic diagram of leak VMD module.

생산 시 진공 상태를 유지하는 VMD 공정의 특성상 VMD 모듈 내부 압력은 운전 시 절대압력 기준 15 kPa 이하를 유지하도록 설정하였다.

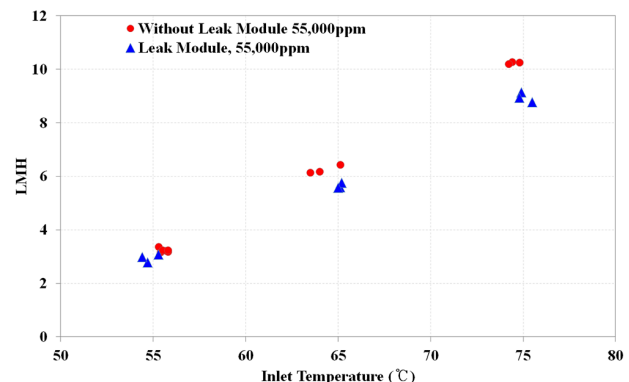
실험결과 Fig 5에서 보는 바와 같이 공급수의 온도가 증가 할수록 누수 문제가 있는 VMD 모듈 및 정상적인 VMD 모듈 모두 생산되는 담수량이 증가하는 것을 알 수 있다. 공급수의 온도가 가장 낮은 55°C에서는



(a) 4 m³/hr



(b) 6 m³/hr



(c) 8 m³/hr

Fig. 5. Permeate flux according to feed flow rate and temperature.

- pp. 225-231
- pp. 233-240
- pp. 241-251
- pp. 253-261
- pp. 265-270
- pp. 271-278
- pp. 279-284
- pp. 285-291
- pp. 293-297
- pp. 299-312
- pp. 313-319
- pp. 321-325
- pp. 327-334
- pp. 335-341
- pp. 343-350

누수가 발생된 VMD 모듈 및 정상적인 VMD 모듈과의 담수 생산량의 차이가 적은 것을 알 수 있다. 이는 공급수의 온도가 낮은 상태에서는 VMD 모듈 내부에서 막을 통과하는 증기량 자체가 적어 누수로 인한 증기 생산 저하 문제가 크게 부각되지 않는 것으로 나타났다. 공급수의 온도가 65°C로 증가하면 누수가 발생된 VMD 모듈과 정상적인 VMD 모듈간의 담수 생산량 값인 LMH 값의 차이는 4 m³/h, 6 m³/h, 8 m³/h 공급수 유량 조건에서 평균 약 10%로 나타났다. 공급수의 온도 조건이 75 °C로 높아지면 두 개의 VMD 모듈에서 생산되는 담수량 차이는 최대 14%이상 벌어지는 것으로 나타났다. VMD 모듈에 공급 되는 공급수의 온도 및 유량 증가는 VMD 모듈에 투입되는 열량이 증가하는 것으로 따라서 VMD 모듈을 통한 담수 생산량인 LMH 비례하여 증가한다. 공급수의 온도가 증가할수록 담수생산량의 차이를 보이는 것은 VMD 모듈 내부에서 발생하는 증기량이 공급수의 온도가 증가 할수록 많아지기 때문이며 누수가 발생된 VMD 모듈의 경우 VMD 모듈 내부에 축적되는 Brine이 증기 발생을 억제하고 막을 통과하는 수증기에 유로를 막아 VMD 모듈을 통한 담수 생산량에 영향을 주는 것으로 나타났다. 또한 공급수의 온도뿐만 아니라 공급 유량이 증가할 경우도 2개의 VMD 모듈간의 담수 생산량에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 누수가 생긴 VMD 모듈의 경우 공급수의 유량이 증가할수록 누수를 통해 VMD 모듈 내부로 투입되는 Brine 양이 증가하며 이로 인해 증기 발생량에 영향을 주는 것으로 나타났다.

Fig. 6은 누수가 발생된 VMD 모듈 및 정상적인 VMD 모듈의 공급수 온도 및 유량 조건에 따른 LMH 값을 나타낸 것이다. Fig. 6에서 나타낸 바와 같이 VMD 모듈에 공급되는 공급수의 온도가 증가

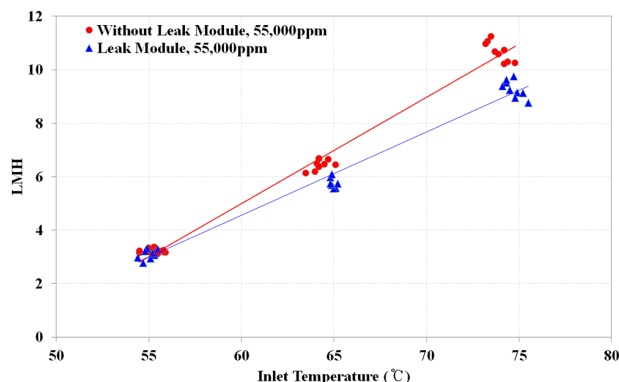


Fig. 6. Permeate flux comparison of leak VMD module with normal VMD module.

할수록 VMD 모듈을 통해 생산되는 담수량이 증가하는 것을 알 수 있다. 누수가 발생된 VMD 모듈의 경우 정상적인 VMD 모듈과의 담수 생산량 차이는 온도가 상승할수록 그 차이가 더욱 증가되며 담수 생산량인 LMH의 최대 차이 값은 22%로 나타났으며 평균 약 14%가 감소하는 것으로 나타났다.

위와 같은 결과는 VMD 모듈 하우징과 막 Bundle 사이에 누수가 형성된 VMD 모듈은 정상적인 VMD 모듈과 비교하여 공급되는 열 에너지 투입 시 더 적은 양의 담수를 생산하며 따라서 전체 VMD 해수담수화 시스템의 효율저하는 물론 일일 담수 생산량에 매우 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 따라서 중공사막 VMD 모듈 설계 시 모듈 하우징과 막 Bundle 사이에 형성되는 누수를 고려한 설계가 반드시 필요할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 중공사막 VMD 모듈에서 모듈 하우징과 막 Bundle 사이에 누수가 VMD 모듈의 담수 생산에 미치는 영향을 파악하고자 정상적인 VMD 모듈과 누수 형성된 VMD 모듈을 이용하여 동일한 조건에서 담수 생산량에 대한 특성을 분석하였다.

- 1) 중공사막 VMD 모듈 하우징과 막 Bundle 사이에 누수가 형성된 VMD 모듈의 경우 동일한 공급 조건에서 정상적인 VMD 모듈에 비하여 담수 생산량인 LMH 값은 평균 14%가 감소한다.
- 2) 누수가 형성된 VMD 모듈과 정상적인 VMD 모듈의 담수 생산량의 차이는 공급수의 온도가 증가할수록 더욱 커지는 것으로 나타났다.
- 3) 중공사막 VMD 모듈을 이용한 해수담수화 시스템의 경우 시스템 성능저하를 막기 위해 VMD 모듈 하우징과 막 Bundle 사이에 형성되는 누수를 고려한 VMD 모듈 설계가 필요할 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 국토교통부 플랜트연구개발사업의 연구비지원(과제번호 15IFIP-B065893-03)에 의해 수행되었습니다.



기호설명

A_m : Membrane area, m^2

LMH : permeate flux, $L/m^2 \cdot h$

\dot{m}_h : flow rate, L/h

References

- McGinnis, R. L. and Elimelech, M. (2008). Global challenges in energy and water supply: the promise of engineered osmosis, *Environ Sci Technol*, 42 , pp. 8625 - 8629.
- Chung, T.S., Li, X., Ong, R.C., Ge, Q.C., Wang, H. L., Han, G. (2012) Emerging forward osmosis(FO) technologies and challenges ahead for clean water and clean energy applications, *Curr. Opin. Chem. Eng.* 1, pp. 246 - 257.
- Greenlee, L.F., Lawler, D.F., Freeman, B.D., Marrot, B. and P. Moulin, (2009) Reverse osmosis desalination: water sources, technology, and today's challenges *Water Res.*, 43, pp. 2317 - 2348
- Suk, D.E. and Matsuura, T. (2006) Membrane-based hybrid processes: a review, *Separ. Sci. Technol.*, 41, pp. 595 - 626
- Ji, X.S., Curcio E., Obaidani, S.A., Profio, G.D., Fontananova, E. and Drioli, E. (2010). Membrane distillation-crystallization of seawater reverse osmosis brines, *Sep. Purif. Technol*, 71, 76 - 82.
- Manna, A. K., Sen, M., Martin, A. R. and Pal, P. (2010). Removal of arsenic from contaminated groundwater by solar-driven membrane distillation, *Environmental Pollution*, 158, 805-811
- Schwantes, R., Cipollina, A., Gross, F., Koschikowski, J., Pfeifle, D., Rolletschek, M. and Subiela, V. (2013). Membrane distillation : Solar and waste heat driven demonstration plants for desalination, *Desalination*, 323, 93-106.
- Naidu, G., Jeong, S., Choi, Y., Jang, E., Hwang, T. M. and Vigneswaran, S. (2014). Application of vacuum membrane distillation for small scale drinking water production, *Desalination*, 354, 53-61.
- Zhao, K., Heinzl, W., Wenzel, M., Buttner, S., Bollen, F., Lange, G., Heinzl, S., and Sarda, N. (2013) Experimental study of the memsys vacuum-multi-effect-membrane-distillation (V-MEMD) module, *Desalination*, 323, 150-160.
- Joo, H. J. and Kwak H. Y. (2016). Experimental evaluation for the freshwater production characteristics according to the salinity conditions of vacuum membrane distillation module, *Desalination and Water Treatment*, 57, 10005-10011.
- Joo, H. J. and Kwak H. Y. (2016). Freshwater Production Characteristics according to the Feed Sea Water Conditions of Vacuum Membrane Distillation Module for Solar Desalination, *Journal of New & Renewable Energy*, 12, S1, 10-17.

pp. 225-231

pp. 233-240

pp. 241-251

pp. 253-261

pp. 265-270

pp. 271-278

pp. 279-284

pp. 285-291

pp. 293-297

pp. 299-312

pp. 313-319

pp. 321-325

pp. 327-334

pp. 335-341

pp. 343-350