

MVR해수담수화플랜트의 개발 및 성능에 관한 연구

김영민 · 천원기 · 김동국*[†]

제주대학교, *한국에너지기술연구원

(2016년 8월 11일 접수, 2016년 9월 9일 수정, 2016년 9월 19일 채택)

A study on the development of MVR desalination plant and its performance analysis

Yeongmin Kim, Wongee Chun, Dongkook Kim*[†]

Jeju National University, *Korea Institute of Energy Research

(Received 11 August 2016, Revised 9 September 2016, Accepted 19 September 2016)

요 약

MVR 증발법은 담수의 증발을 위해 연료를 지속적으로 연소시켜 나오는 열에너지를 이용하지 않고 대신 전기압축기를 통해 증발된 증기를 압축시켜 고온으로 만들고, 이를 다시 열교환기를 통해 재활용함으로써 에너지의 소비를 최소화하는 방식이다. MVR 증발법은 안정적이라 할 수 있는 계통선에 의해 공급되는 전기 대신 가변적인 풍력에너지를 그 에너지원으로 활용하여 담수 생산을 피할 수 있다. 본 연구에서는 일일 담수 생산량이 30톤인 제주 MVR 담수화 시스템의 설계, 제작 그리고 작동 과정에 대하여 살펴보고자 하였다. 실험결과, MVR 압축비는 1.5 이상이며 주열교환기의 온도차는 5~7℃로 설계치와 동일한 성능을 보여준다.

주요어 : 담수화, MVR 시스템, 풍력에너지, 성능 분석

Abstract - MVR evaporation is a method of pressurizing the evaporating steam to raise its temperature with an electric compressor instead of burning fuel and reusing the heat source through the embraced heat exchanger to minimize energy use. MVR desalination system with wind power uses varying wind power instead of stable electricity and can flexibly control the volume of fresh water production. The present study introduces the design, construction and operation of a MVR desalination system of 30ton/day capacity. Experimental results, MVR compression ratio is higher than 1.5, temperature difference of the main heat exchanger is 5~7°C. This value shows the same performance as the designed value.

Key words : Desalination, MVR system, Wind energy, Performance analysis

1. 서론

지구상에서 자원의 고갈을 일으키지 않고, 인간과 생물이 사용할 수 있는 담수의 연간 공급량은 90억 ton이며, 이 중 인간이 실제 사용하는 양은 43억 ton으로 아직 절대량이 부족한 것은 아니지만 인구 증가에 따른 물 사용량의 급증, 생활 폐수의 증가 및 공업용수의 공급량 증가로

물 부족 문제는 더욱 심화될 것으로 전망된다. 이러한 세계적인 물 부족 현상과 산업화에 따른 수질오염에 직접적으로 피해를 보는 지역은 수도 및 하수처리장이 제대로 정비가 되어 있지 않은 즉, 도시화가 미흡한 중소규모 지역이며, 이런 지역 내에서 직접 담수할 수 있는 중소규모 단위용 담수화 플랜트의 필요성이 세계적으로 절실히 요구되는 실정이다. 따라서, 물 부족을 겪고 있는 중소규모(1,000명 음용 가능/set) 도서 지역에는 해수(바닷물)를 이용하고, 지하수 또는 강물이 오염된 육지 지역에는 오염수를 이용하여, 깨끗한 먹는 물(담수)을 만들어 공급

[†]To whom corresponding should be addressed.

Tel : +82 42 860 3152 E-mail: dokkim@kier.re.kr

할 수 있는 담수 플랜트의 개발이 요구된다.

일반 증발법으로는 통상 원수(해수, 폐수, 식품용 액체)를 1 리터(liter) 증발시키는데 에너지가 620 kcal 소모된다. 이에 비하여 기계증기재압축법(MVR: Mechanical Vapor Recompression)을 이용한 담수화 기술은 증발된 증기를 증기압축기를 이용하여 압축해 주고, 이 증기가 보유한 열량을 열교환기를 통하여 처리(재활용)하므로 상당량의 에너지를 절약할 수 있다[1,2]. 즉, 일반 증발법에서 1 리터(liter)의 원수를 증발시키는데 소비하는 620 kcal의 열에너지를 재활용하는 방식으로, 이론적으로 이 MVR 기술을 이용하여 1리터의 담수를 생산하기 위해서 증기압축기를 구동하는데 필요한 전기에너지는 20 kcal 가 전부이다. 따라서 기존에 620 kcal의 에너지 소모에 비해, 20 kcal의 에너지를 가지고도 동일한 양의 담수를 얻을 수 있으므로, 획기적인 에너지 재활용 기술이라 할 수 있다[3].

MVR 담수화 시스템은 계통선의 안정적인 전력 뿐 아니라, 풍력 및 폐열 발전 등 다양한 에너지 자원을 활용할 수 있다. 제주도의 경우, 풍부한 풍력 자원의 활용은 시스템의 효율성을 상당히 증대시킬 수 있을 것이며, 해양으로 방출되는 폐열을 이용한 발전시스템의 적용도 고려해 볼 수 있을 것이다. 후자의 경우, 현존하는 열 엔진 중 가장 우수한 열 성능을 지닌 스틸링 엔진을 고려할 수 있는데, Fig. 1은 작은 온도차에서도 전기를 생산할 수 있는 발전 시스템의 3D모델을 보여주고 있다.

본 연구에서는 설치면적이 작고, 이동성이 용이한 담수용량 30ton/day급 고효율 기계증기재압축법 (MVR) 담수화플랜트의 개발에 관하여 주요 장치의 설계 및 작동 특성을 살펴보고 아울러 성능분석을 수행하였다.



Fig. 1. 3D model of the Complete Stirling Engine System

2. MVR 해수담수화플랜트의 설계조건

2-1. 설계인자 검토

MVR 해수담수화플랜트는 증발과 응축이 열교환면에서 동시에 일어나면서 상이 변화하는 장치이기 때문에 열교환면에서의 열 및 물질수지, 열전달 특성 등을 검토하는 것이 중요하다. 또한 용액의 증발·농축과정에서 발생하는 용액의 비등점상승을 결정하는 해수의 물리적 성질을 정확히 파악하여 최적의 시스템을 선정하여야 한다[4,5].

2-2. 설계방법

MVR 해수담수화플랜트의 주요 요소기기 및 Pilot plant를 설계하였으며, 개략적인 설계방법의 Flow chart는 다음의 Fig. 2와 같다.

2-3. 주요장치의 설계 및 제작

MVR 해수담수화플랜트의 설계기준으로 담수생산량 30 ton/day로서 염분농도3%의 해수를 6~15%로 증발·농축하는 시스템에 단단형 원심 증기압축기를 적용하였다. Table 1은 단단형 원심 압축기의 주요 제작 사양을 보여준다.

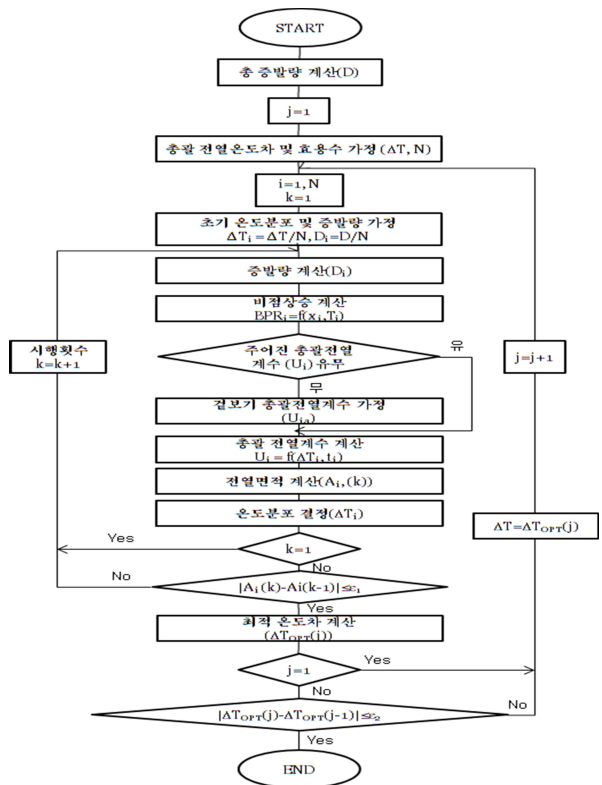


Fig. 2. Flow Chart of MVR Evaporation System

Table 1. Specifications of Single Stage Centrifugal Compressor

명칭	작동유체	유량 (m ³ /min)	동력 (kW)	극수	전압 (V)	주파수 (Hz)	기동방법	압력비
단단형 원심압축기	H ₂ O(Steam)	41	55	2	380	60	Inverter	1.6

Table 2. Specification of Flash Evaporator

구분		SPECIFICATION
형식		Flash Evaporator
		Single Effect
		2 Pass Switching Operation
		상압운전
재질	Shell	SUS316L
	Head/Bottom	SUS316L
	Demister	SUS316L
	Stiffener	SUS304L(외장)
규격		φ 1,940 * 3,080H(2,430H _{Shell})

Table 3. Specification of Main Heat Exchanger

구분		SPECIFICATION	
형식		Plate Heat Exchanger	
		Wide Gab Heating Plate	
		2 Section	
재질	Plate	Titanium	
	Packing	EPDM	
	Frame	SS400	
용량	Cold Side		Feed
	A Section	유량	49,531 kg/hr
		입구온도	102.2 °C
		출구온도	110.0 °C
		열용량	386,344 kcal/hr
	B Section	유량	49,531 kg/hr
		입구온도	102.2 °C
		출구온도	110.0 °C
열용량		386,344 kcal/hr	

증발·농축장치는 Flash Evaporator 형식을 채택하였으며, 기본설계 조건에 따라 설계 및 제작된 증발·농축

장치의 주요사양은 Table 2와 같다.

MVR 토출부로부터 공급된 고온 증기와 증발·농축

Table 4. Specifications of the Pumps

NO	장치명	유량 (m ³ /hr)	소요동력 (kw)	재질 (Impeller)
P-101	원액 공급펌프	10	2.2	SUS316L
P-201A P-201B	순환펌프(Flash Evaporator)	50	11	SUS316L
P-121	저농도 농축액 공급펌프	5	1.5	SUS316L
P-301	순환펌프(결정화농축장치)	5	1.5	SUS316L
P-231	응축수펌프	5	5.5	SUS304
P-111	냉각수 공급펌프	5	1.5	SUS304

Table 5. Specification of Pre-Heat Exchanger

구분		SPECIFICATION	
형식		Plate Heat Exchanger	
		Standard Heating Plate	
		1 Section	
재질	Plate	Titanium	
	Packing	EPDM	
	Frame	SS400	
용량	Cold Side		Seawater
	Cold Side	유량	1,422 kg/hr
		입구온도	15.0 ℃
		출구온도	86.8 ℃
		열용량	102,075 kcal/hr
	B Section	유량	1,361 kg/hr
		입구온도	100 ℃
		출구온도	25.0 ℃
열용량		102,075 kcal/hr	

장치 내 해수의 열교환용 주 열교환기의 사양은 Table 3과 같다.

MVR해수담수화플랜트에 적용된 펌프는 원액 공급펌프, 저농도 농축액 공급펌프, 순환펌프, 응축수 펌프, 냉각수공급펌프 등으로 구성되어 있으며, 각종 펌프의 사양은 Table 4와 같다.

원액 공급펌프로부터 공급된 원액과 주 열교환기에서 가열용 증기가 응축된 응축수와 열교환용 예열기의 사양은 Table 5와 같다.

3. MVR해수담수화플랜트 설치 및 운전개요

기본 설계조건으로부터 주요 장치를 설계 및 제작하여 MVR해수담수화플랜트를 Fig. 3과 같이 설치하였으며, Fig. 4는 본 플랜트의 간단한 공정 흐름도를 보여준다.

본 시스템은 원액탱크로부터 공급펌프에 의해 원액(15℃, 3.5% 정도)이 공급되어 예열용 열교환기에 의해 주 열교환기의 가열측 열원으로 사용된 가열증기의 응축수와 열교환 되어 약 60℃로 예열된 후 Flash Evaporator로 공급된다. Flash Evaporator에서는 순환펌프를 이용



Fig. 3. MVR Desalination Plant

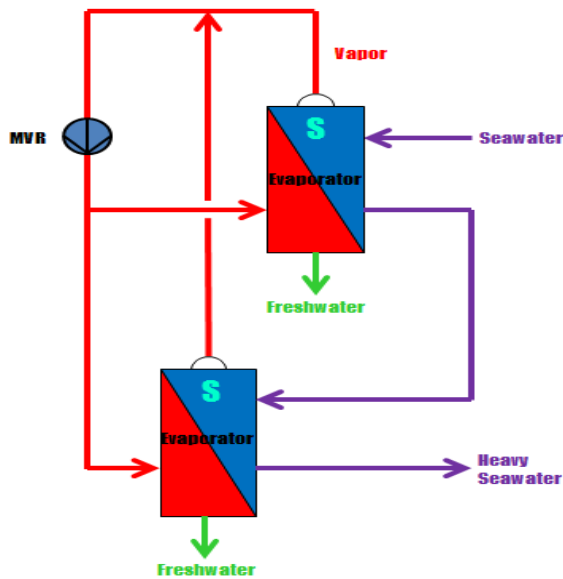


Fig. 4. Flow diagram of the MVR Desalination Plant

하여 Flash Evaporator 내의 원액을 주 열교환기로 거쳐 다시 Flash Evaporator로 순환시키며 증발하게 된다. 주 열교환기에서는 Flash Evaporator에서 발생하는 증기를 MVR로 가압·승온하여 Flash Evaporator 원액의 가열 열원으로 재사용되는 시스템이다.

증기압축기의 단열압축과정에 의한 과열증기 상태의

토출증기는 열교환기의 전열특성을 고려하여 공정용 응축수를 분무노즐을 통해 과열증기 중에 분무함으로서 포화증기 상태의 열원으로 주 열교환기에 공급된다.

Flash Evaporator를 통해 농축된 저농도 농축액(약 12%)은 저농도 농축액 저장탱크에 저장되며, 주 열교환기에서 Flash Evaporator의 원액의 증발에 필요한 열을 전달한 후 응축된 응축수는 응축수 저장탱크에 저장 후 응축수 펌프를 통해 예열용 열교환기에서 원액과 열교환된 후, 응축수 저장탱크로 집수된다.

4. 성능실험 분석

4-1. MVR 성능분석

MVR의 특성 분석은 시스템의 정상 운전의 가능성을 검토하기 위하여 실시하게 되었다. MVR시스템은 계절적 수요변동 및 해수투입 유량 등을 고려하여 예상 부하별 운전조건을 결정하나, 본 MVR시스템의 경우 기타 고려요인을 배제하고 MVR의 Inverter 회전수에 따른 압축비와 온도 특성만을 고려하여 분석을 실시하였다.

Fig. 5는 MVR-Inverter 회전수에 따른 압축비를 분석한 그래프이다. Inverter 회전수에 따라 MVR의 흡입 및 토출압력이 변화되는 걸 확인할 수 있으며, Inverter 회전수가 최대인 55Hz일 때 압축비는 평균 1.5 이상으로

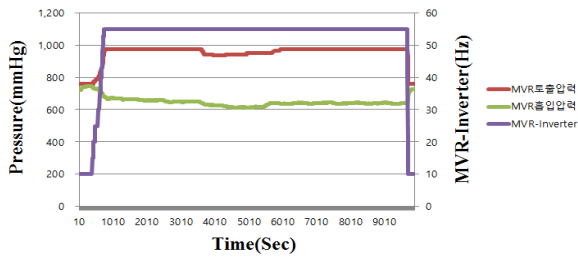


Fig. 5. Compression Ratio of the MVR-Inverter Ration

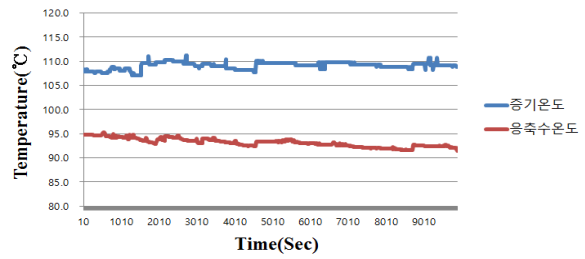


Fig. 7. Steam Side Temperature of the Main Heat Exchanger

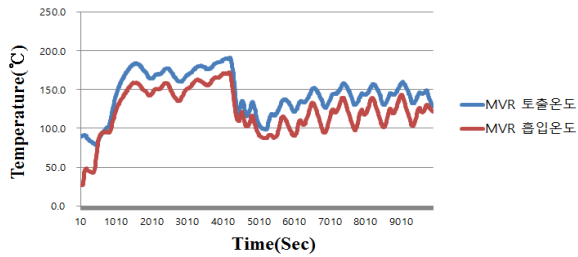


Fig. 6. Inlet and Outlet Temperature of the MVR

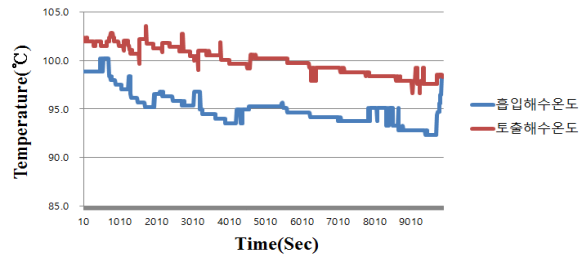


Fig. 8. Seawater Side Temperature of the Main Heat Exchanger

MVR 성능이 설계 압축비와 큰 차이 없이 작동됨을 알 수 있다.

Fig. 6은 MVR 흡입 및 토출온도 변화를 보여주는 그래프이다. MVR의 서어징을 예방하기 위하여 증기 발생량 부족 시 토출되는 증기 일부분을 흡입하도록 설계되어 흡입 및 토출온도가 일정하게 유지되진 않았다. 그러나 평균 ΔT 가 약 11~15°C로 압축비에 따른 정상적인 온도변화를 나타내고 있다.

4-2. 주열교환기 성능분석

주열교환기는 MVR에서 토출되는 증기와 증발기에서 순환되는 해수를 열교환하며 ΔT 가 약 7°C로 설계되었다.

Fig. 7과 Fig. 8은 주열교환기 내의 온도변화를 보여주고 있다. 계내의 압력변화로 인하여 온도변화가 있지만 ΔT 가 약 5~7°C로 이론적인 설계치에 비해 약 0.8~2.8°C 차이를 보여주고 있다(Table 3). 이는 실제 공력시험 규격에 준한 것이 아닌 플랜트에서의 측정치이므로 증기라인 및 센서의 위치에 따라 수치적인 차이는 있을 것으로 판단된다.

4-3. 예열용 열교환기 성능분석

예열용 열교환기는 원수와 응축수가 열교환하며 원수의 온도가 너무 낮게 계내로 투입될 경우 플랜트의 평형상태가 깨지므로 매우 중요한 설비 중에 하나이다. Fig. 9

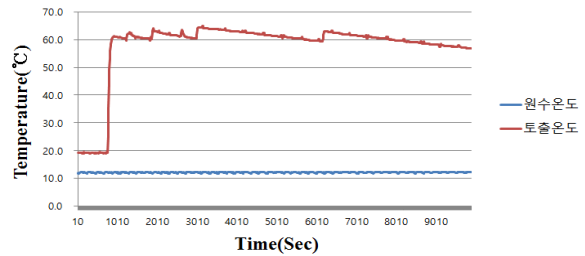


Fig. 9. Temperature of the Pre-Heat Exchanger

는 예열용 열교환기의 온도분포를 보여주고 있다. 약 12°C 원수가 약 60°C까지 승온된 것을 확인할 수 있으며 설계치에 맞게 작동됨을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 MVR해수담수화플랜트 주요장치를 설계 및 제작하고 주요장치별 성능분석을 통해 설계치와 동일하게 작동하는지 확인하였다.

(1) MVR 시스템은 Inverter 회전수가 최대인 55Hz일 때 압축비는 평균 1.5 이상이며 흡입온도와 토출온도차가 평균 약 11~15°C로 설계치와 큰 차이가 없음을 확인할 수 있었다.

(2) 주열교환기는 MVR에 의한 압력변화로 인하여 온도변화가 있지만 ΔT 가 약 5~7°C로 이론적인 설계치와 비교할 때 약 0.8~2.8°C 차이를 보인다. 이는 증기라인 및 센서 위치에 따른 수치적인 차이에 기인하는 것으로 판단된다.

(3) 예열용 열교환기인 경우 약 12°C 원수가 약 60°C까지 승온된 것을 확인할 수 있었으며 설계치를 벗어나지 않고 작동됨을 보여주고 있다.

본 실험결과 주요장치의 작동이 설계치와 큰 차이가 없음을 확인할 수 있었다. 향후 실증운전을 통하여 담수 용량 및 농축수 범위를 확인할 수 있을 것이다. 아울러, 증발법 해수담수화의 가장 큰 문제점인 높은 에너지 소비를 낮추기 위하여 단중 효용과 2중 효용의 스위칭 시스템을 적용할 수 있으며, 이를 통하여 보다 효율적으로 에너지를 절약할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원의 지원과 한국과학재단 기초연구사업 “저열원의 하베스팅을 위한 TM(Thermal to Mechanical energy) 발전변환시스템 개발” 연구비 지원으로 수행되었음 (과제번호: 2014R1A2A01006421)

References

1. GEA Wiegand GmbH., 2014, Evaporation Technology using Mechanical Vapour Recompression, <http://www.dwa.nl/wp-content/uploads/2014/09/Gea-Wiegand-MVR.pdf>
2. Moser, H., Denisart, J. P., 1984, Mechanical Vapor compression(MVC), Heat Recovery System, Vol. 4, No. 5, pp. 333-336
3. Wolf, R., 1986, Mechanical Vapour Compression for Concentration by Evaporation, UIE.
4. Kim, D. K., et al., 1998, A Development on the Effective Management Technology of Energy Conservation(II), KIER-982211, Korea Institute of Energy Research, pp. 203-261
5. Backer, F. E., Zakak, A. I., 1985, Recovering Energy by Mechanical Vapor Recompression, Chem. Eng. Progress, Vol. 81, No. 7, pp. 45-49
6. Anon., 1982, Heat pump systems. a technology re-

view, IEA/OECD, Paris.