

MVRS해수담수화 및 제염기술

*김상현, 김동국, 전원표
한국에너지기술연구원

Abstract

At the present time the desalination technology of sea water for portable water in islands employs the RO method.

The technology which needs complicated pretreatment processes with various chemicals can generate secondary water pollution and the high maintenance costs such as replacements of filters and membranes make islanders nearly impossible to operate.

The MVRS technology for desalination of sea water however has several advantages such as constant production of quality portable water and capability of managing broad operating load.

The variable-speed turbo-type vapor compressors employed in the system can utilize wind energy which is abundant in most Korean islands. Salt as a by-product can be produced by applying solar energy to the salt-concentrated waste water from the system.

This paper discusses the relating topics such as technical and economical viabilities of the new MVRS desalination system for the production of portable water and salt as a by-product using new & renewable sources of energy.

I. 서론

유엔 국제인구행동연구소(PAI)는 한국의 1인당 물 소비량이 1990년에 1,472m³에서 2025년에는 1,258m³로 내려가 물 기근국가군(1,000m³미만)으로 전락될 것으로 예측하고 있다. 반면에 우리 나라의 물 사용량은 매년 평균1.2%씩 증가, 2006년에는 4억 톤이 부족할 것으로 전망되고 있다. 현재 건설 중인 황성댐 등 5개 댐을 완성하더라도 전국적 물 부족 현상이 우려되는 가운데 미래에는 절대적인 지표수 부족으로 해수담수화에 의한 식수조달이 불가피한 실정이다.

특히 우리 나라는 3,149개의 섬을 보유하고 있으며 이중 457개 유인도(약 8만 세대)의 물 사용량은 55만톤/1일로서 대부분 빗물과 육지에서 운송되는 식수에 의존하고 있으나

절대 공급량이 부족한 상태이다.

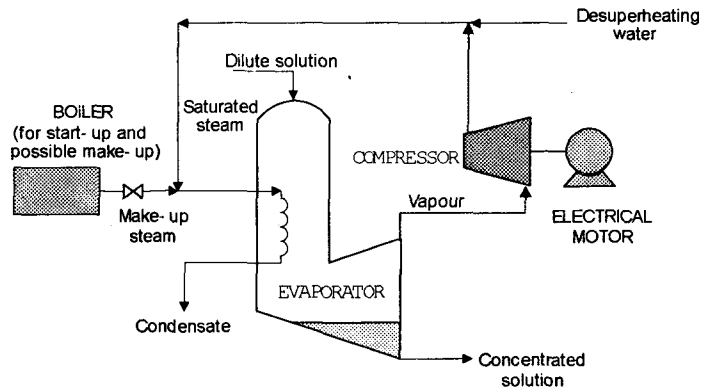
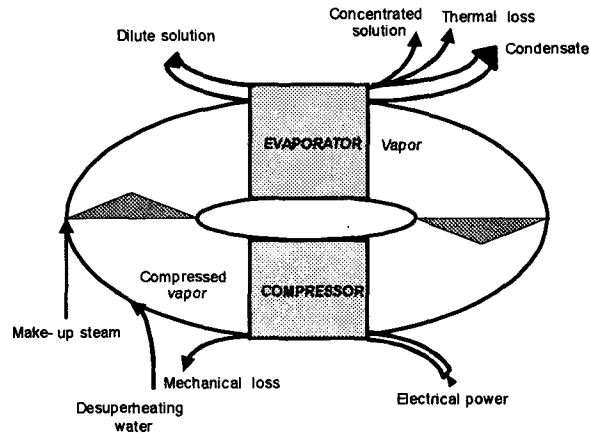
정부는 식수난을 겪고 있는 도서지역의 식수공급을 위해 지난 1887년도부터 20여기의 역삼투압법에 의한 해수담수시설을 설치하였으나 필터 및 분리막의 주기적인 교체로 인한 유지비용 부담과 환경적으로 유해한 화학적 전처리과정 등 문제가 발생, 주민 및 지방자치단체로부터 외면 당하고 있는 실정에 있다.

본 MVR방식의 해수담수화 기술은 장치가 간단하고 교체부분이 없어 유지관리가 용이하고 RO방식처럼 전처리 과정과 약품주입 등에 따른 2차 오염발생 우려가 없을 뿐 아니라 담수 회수율이 높고 담수과정에서 발생하는 농축된 퇴수를 이용해서 고품질의 제염이 가능함으로 부산물인 천일염 생산에 의한 경제성을 제고시킬 수 있다.

II. 핵심기술

일반적으로 식품공업, 화학공업 등에서 증발·농축 및 건조공정은 원하는 목적의 제품을 얻기까지 가열과 냉각을 반복하는 과정이 필요하다. 이때 다량의 수분을 제거하기 위해 많은 에너지를 필요로 하게 된다. MVR방법은 가열과 냉각을 반복하는 기존의 증발법과는 달리 증발관에서 발생하는 저온의 증기를 약간의 기계적으로 압축하여 자체 가열원으로 재 이용하는 기술로서 기존의 증발법에 비해 약 25배의 높은 에너지효율을 갖는 히트펌프 기술이다.

본 기술은 1988년에 선일포도당(주) 물엿농축공정에 적용하여 연간 432백만원의 에너지 절감 효과를 얻었으며, 1996년에는 풍국주정(주) 주정폐액 농축공정에 적용하여 연간 420백만원의 에너지절감효과를 얻은 바 있다. 이러한 연구, 적용결과를 토대로 지난해 MVR방법에 의한 해수담수화 실험을 실시한 결과 경제성과 안정성을 동시에 확보할 수 있는 결론을 얻게 되었다.



[그림2-1] MVR증발시스템의 증기회수 개념도

III. Pilot Plant의 해수담수화 성능실험

1. 시스템의 설계조건

MVR증발·농축시스템(Pilot Plant)의 설계기준으로 담수생산량 400kg/hr(약 10톤/day)로서 염분농도 3%의 해수를 6-15%로 증발·농축하는 시스템에 단단 원심식 증기압축기를 적용하였다. 증발·농축장치는 수평관 박막 유하식이며 기본 설계조건은 <표 3-1> 과 같다.

〈표 3-1〉 수평관 박막유하식 증발·농축기의 기본설계 조건

Description		Unit	Value	Remarks
Feed Liqor	Feed flow rate	kg/h	400	예열온도
	Normal solid rate	kg/h	10.8	
	Normal feed temperature	C	90	
	Normal concentration	%	3	
Product Liqor	Concentration	%	6-15	
BPR(염도농도 9%기준)		C	3	

원심식 증기 압축기의 설계조건은 국내 압축기 제작기술(압축기의 본체 및 증속기 등)수준을 고려하여 증속기의 회전수 27,000rpm(증속비:167/22), 유량0.089kg/s(320kg/h), ΔT 7 °C(유효온도차 4 °C), 압축비 1.28을 기준으로 하였다.

〈표3-2〉 원심식 증기압축기의 기본설계 조건

구분	설계조건	비고
작동유체	증기(H ₂ O Vapor)	분자량(M):18.016
입구 질량유량	0.089kg/sec(320kg/h)	
입구 압력(P ₁)	1.0332kg/cm ² (1001.32kpa)	
출구 압력(P ₂)	1.3196kg/cm ² (129.41kpa)	
입구 온도(T ₁)	100 °C	
출구 온도(T ₂)	107 °C	승온폭(ΔT):7 °C
압축비(P _r)	1.28	$P_r = P_2/P_1$
회전수(N)	27,000rpm	증속비(ϵ):167/22

2. Pilot plant의 운전개요

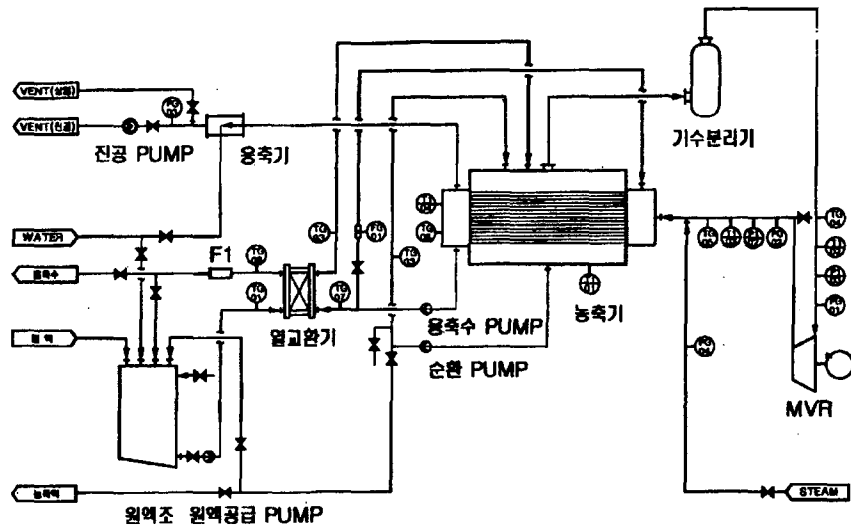
기본설계조건으로부터 주요장치를 설계 및 제작하여 해수담수화용 MVR증발·농축 Pilot plant를 건설하였으며 본 Pilot plant의 P&ID는 그림 [2-1] 과 같다.

본 시스템은 원액탱크로부터 공급펌프(P-1)에 의해 원액(20 °C, 3%정도)이 공급되어 예열용 열교환기(H/E-1)에 의해 원액이 증발·농축기의 가열측 열원으로 사용된 가열 증기의 응축수와 열교환되어 약 90 °C로 예열된 후 증발·농축기로 공급된다. 증발 농축기의 하부의 공급원액이 적정수위에 도달하면, 순환펌프(P-2)를 가동하여 증발·농축기 상부의 분배기에 의해 수평관식 열교환기 외부로 고르게 분배된다.

증발·농축기 내부에 공급된 가열용 증기가 응축할 때 발생하는 응축잡열에 의해 원액중의 발생증기는 기액 분리기에서 증발증기의 비말동반(entrainment)에 의해 포함된 액적을 분리한 후, MVR에 의해 가압, 승온되어 증발·농축기의 가열 열원으로 재 사용되는 시스템이다.

이때 증기압축기의 단열압축과정에 의한 과열증기 상태의 토출증기는 증발판의 전열 특성을 고려하여 공정용 응축수를 분무노즐을 통해 과열 증기중에 분부하함으로써 포화 수증기 상태의 열원으로 증발·농축기에 공급된다.

한편 증발·농축기를 통해 농축된 최종 농축액(6-15%)은 별도의 탱크로 배출하며 증발·농축기에서 액의 농축에 필요한 열을 전달한 후 응축된 응축수는 펌프(P-3)를 통해 예열용 열교환기에서 원액으로 열교환 후 모두 응축수 저장조로 집수된다.



[그림3-1] MVR증발·농축Pilot plant의 P&ID

3. 성능 실험

1) 운전 방법

(1) 운전조작 순서

- 동력반 및 중앙 제어반의 점검, 펌프상태 및 각 밸브상태를 확인한다.
- 냉각수 및 펌프 sealing water 등 utility를 공급한다.
- MVR의 기동준비를 위해 제어반 점검, 운행을 한다.
- 액 순환 펌프(P-2)를 가동, 증발·농축기의 액위를 조정 후 계속 순환한다.
- 액 순환의 상태가 정상으로 유지되면 증기(live steam)를 공급하여

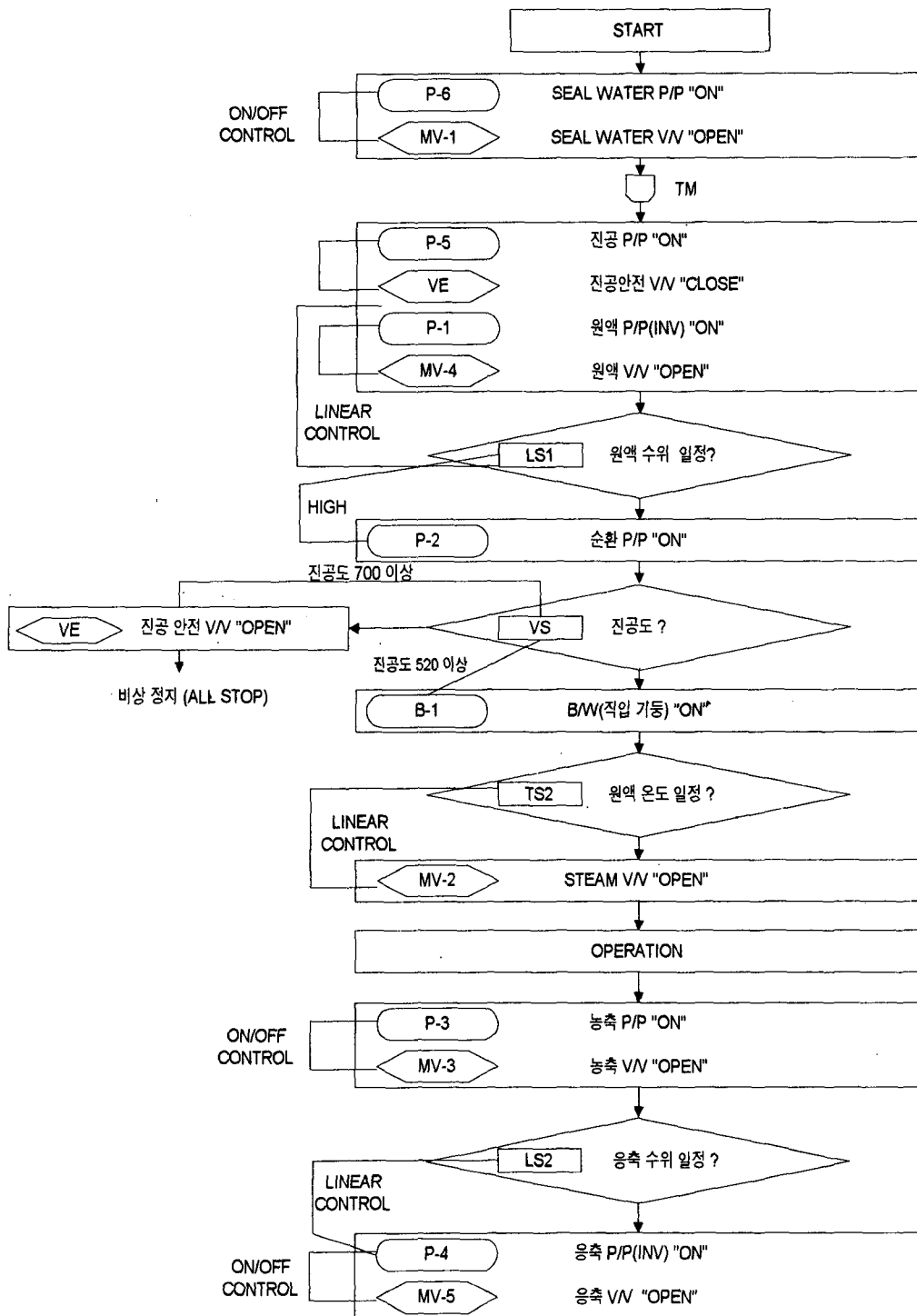
시스템의 온도를 일정 온도까지 승온 한다.

- 기액분리기 및 증기라인상의 응축수를 제거한다.
- 시스템이 일정온도에 도달하여 증발이 이루어지면 MVR을 가동한다.
- MVR(throttling valve 개도 및 증기 소요량 조정)을 정상 운전상태를 확인한다.
- 증발농축기내에서 열교환 후, 응축된 응축수는 저장조로 배출한다.
- MVR의 throttling valve를 서서히 전폐하여 증발이 일어나지 않도록 한다.
- MVR운전을 정지한 후 계내의 응축수를 모두 배출한다.
- 각 냉각수의 공급을 중단한다.
- 모든 펌프의 작동을 중지한다.
- 원액공급 탱크의 밸브를 수동으로 개방하여 원액을 공급한다.
1시간 정도 원액으로 증발기를 세정한다.
- 용수를 공급하고 순환펌프(P-2)는 기동되어야 하며 순환펌프에 의해 세척수는 증발기의 return line을 통해 순환한다.
- 약품세정은 NaOH등을 사용하며 이때는 밸브를 전개한다.

(2) 운전방법

MVR증발·농축 Pilot plant의 운전방법에 대한 개략적인 Flow sheet는 [그림3-2] 와 같다. 본 Pilot plant는 주요장치의 기동용 panel을 별도로 설치하고 PLC panel을 통해 컴퓨터에 연결하여 자동제어가 가능토록 하였으며 증기압축기와 각종 펌프를 기동할 수 있도록 하였다.

또한 계측기를 통해 압축기의 증발농축장치의 운전 상태(온도, 변화량, 압력, 유량 등)에 대하여 모니터링이 가능하게 하였으며 일정 간격으로 운전상태에 대한 정보를 기록하도록 하여 차후 시스템 분석이 용이하도록 하였다.



[그림 3-2] MVR증발·농축 Pilot Plant의 운전조작 방법

2) 운전조건

MVR시스템은 계절적 수요변동을 고려하여 예상 부하별 운전조건을 결정하나, 본 MVR 증발·농축 pilot plant의 경우 담수생산량이 일정하다고 가정하고, 시스템 설계조건으로부터 증발·농축장치와 증기압축기의 운전조건을 다음 <표 3-3> 및 <표 3-4>와 같이 설정하였다.

Pilot plant의 운전은 원액조에서 원액 공급펌프를 연결하여 농축기에 원액을 공급하고 순환펌프를 가동하여 원액을 순환시키며, 정상운전상태가 되었을 때, 보일러로서 가열용 증기를 공급하여 순환되는 원액과 열 교환된 후, 원액으로부터 증발증기가 발생하면 증기압축기를 서서히 가동한다. 증기압축기가 정상가동 되면, 보일러의 공급 Steam을 중단한다. 한편 증발·농축기내에서 증발과 응축이 동시에 일어나고 응축수가 생성되면 농축된 농축액을 계외로 배출한다. 이와 같은 가동시험을 반복하면서 부하율에 따라 MVR시스템의 운전성능을 측정하였다.

<표 3-3> 증발·농축장치의 운전조건

항목	단위	설계치	운전조건			비고
취급유체	-	해수				
부하율	%	100	90	80	70	
원폐수조건						
· 유량	kg/hr	400	360	320	280	
· 농도	%	3	←	←	←	
· 온도	℃	90	←	←	←	
농축액조건						
· 유량	kg/hr	16	14.4	12.8	11.2	
· 농도	%	6-15	←	←	←	
· 온도	℃	100	←	←	←	
증발수분량	kg/hr	320	280	250	220	

<표3-4> 증기압축기의 운전조건

항목	단위	설계치	운전조건			비고
취급유체	-	증발증기				
부하율	%	100	90	80	70	
흡입조건						
· 유량	kg/hr	320	280	250	220	
· 압력	%	1.0332	←	←	←	
· 포화온도	℃	100(103)	←	←	←	
토출조건						
· 유량	kg/hr	316.5	284.9	253.2	211.6	
· 압력	ata	1.0332	←	←	←	
· 포화온도	℃	100(103)	←	←	←	
Recycle유량	kg/hr	16.5	14.9	13.2	11.6	

4. 운전결과 분석

MVR 증발·농축 pilot plant에 자동제어장치를 설비하기 전에 여러 차례의 수동운전을 통하여 자동제어의 설계조건을 찾아내었다. 이렇게 하여 초기기동을 제외한 운전은 무인자동화로 운전이 가능하도록 하였다. 그 결과, <표 3-5>과 <표 3-6>에 나타난 바와 같이 농축액의 온도는 약 95℃를 유지하였으며 증기압축기의 압축비는 설계 압축비보다 약간 높은 1.30을 나타내었으며, 이때의 포화온도차는 7.5℃로 설계치 보다 약 0.5℃ 크게 나왔다. 이는 실제 공력시험 규격에 준한 것이 아닌 plant에서의 측정치이므로 증기라인 및 센서의 위치에 따라 수치적인 차이는 있을 것으로 판단된다. 담수생산량에 있어서는 324 kg/hr으로 설계량과 유사한 결과 얻었다. [그림 3-3]는 정상 운전시 압축기의 입·출구부에 대한 온도를 나타낸 것으로 압축기의 입구부 온도는 정상운전시 평균 94℃이며 출구부 온도는 139℃로 과포화 온도차는 45℃이다. 이러한 온도차는 실험조건과 단열조건에 따라 어느 정도 차이는 있는 것으로 나타났다. [그림 3-4]은 압축기의 입·출구부에 대한 압력을 나타낸 것으로 출구부에 있어서 불규칙적인 압력변동을 볼 수 있는데 이는 plant 여건상 센서가 압축기 출구에 근접해 있기 때문이며 [그림 3-5]은 압축기의 입·출구부의 압축비를 나타낸 것이다. 그리고 염분농도 센서가 원액순환 라인상에 설치되어 원액의 염분농도를 측정하게 된다. [그림 3-6]은 정상운전시 시간에 따른 원액의 염분농도를 10%에서 6%로 변경해 가면서 운전한 상태를 나타내고 있다. 이와 같이 염분농도를 제한된 범위(6-15%)내에서 자유로이 사용자가 설정하여 운전 가능하도록 하였다. <표

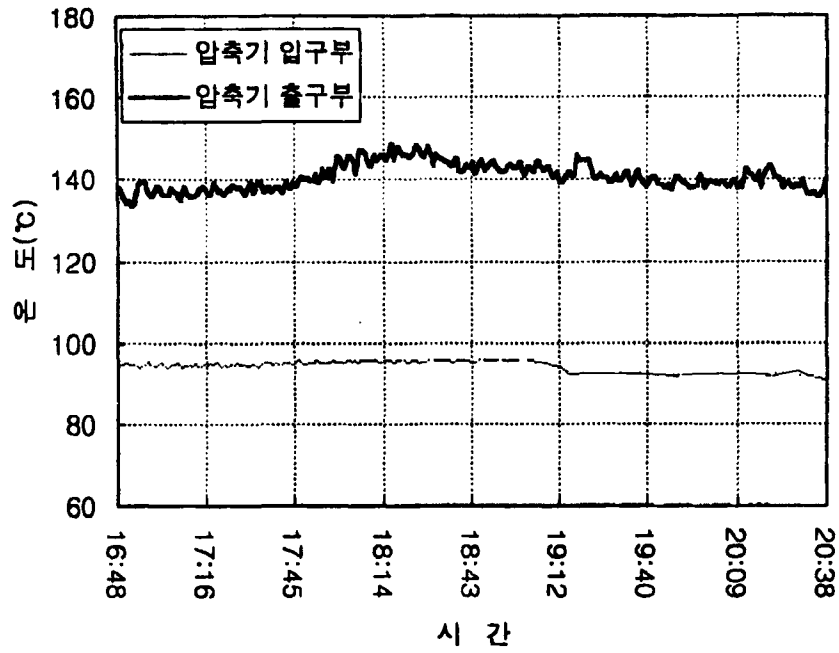
3-7>은 MVR시스템 운전결과 생산된 담수의 수지분석결과 나타낸 것으로 이는 먹는 물 기준에 모두 적합한 것으로 나타났다.

<표 3-5> 증발·농축장치의 실험운전 결과

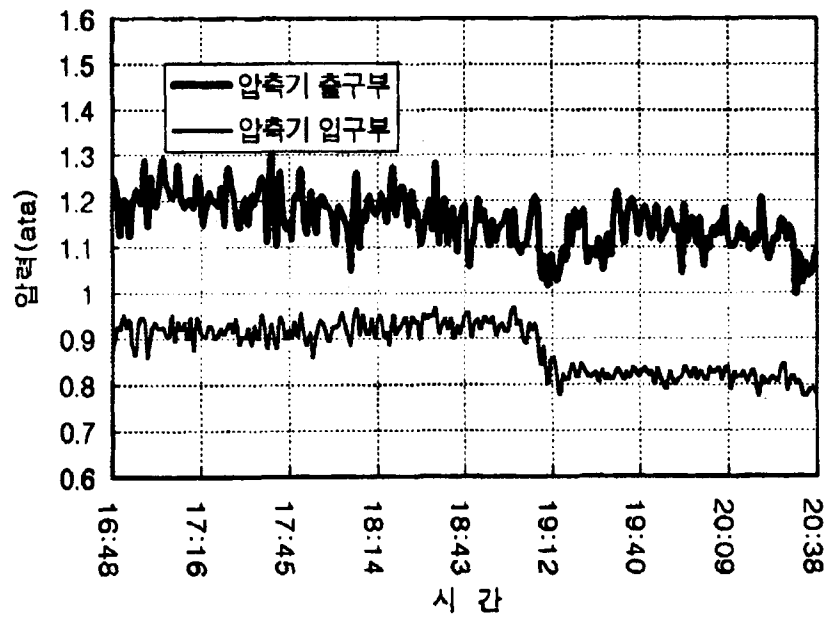
항목	단위	설계치	운전조건	비고
취급유체	-		해수	원액 및 농축액의 온도는 열교환 후, 온도
부하율	%		100	
원폐수조건				
· 유량	kg/hr		400	
· 농도	%		3	
· 온도	℃		90	
농축액조건				
· 유량	kg/hr		16	
· 농도	%		6-15	
· 온도	℃		100	
증발수분량	kg/hr		320	

<표 3-6> 증기압축기의 실험운전 결과

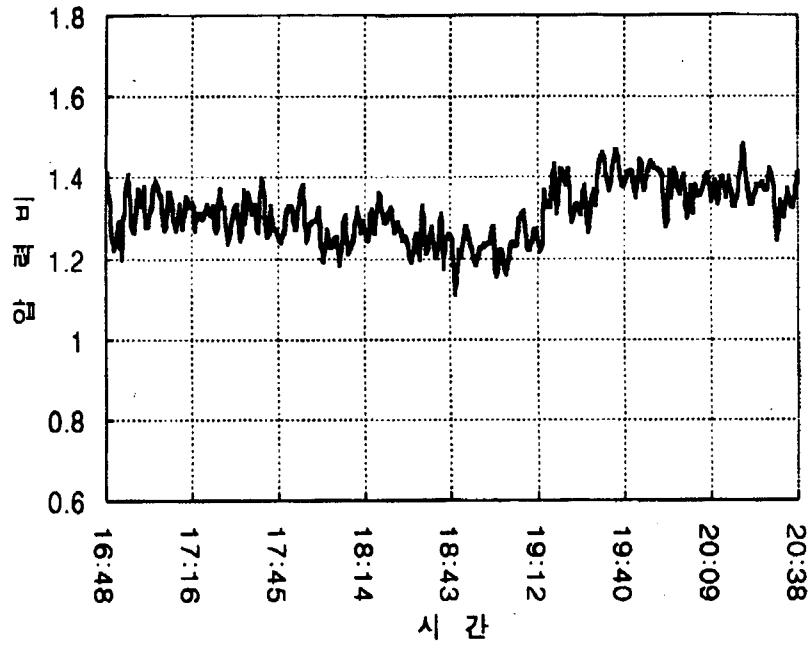
항목	단위	설계치	운전조건	비고
취급유체	-		증발증기	흡입증기의 과열도 : +3℃
부하율	%		100	
흡입조건				
· 유량	kg/hr		320	
· 압력	%		1.88491	
· 포화온도	℃		95.5	
토출조건				
· 유량	kg/hr		316.5	
· 압력	ata		1.14994	
· 포화온도	℃		103	
Recycle유량	kg/hr		16.5	



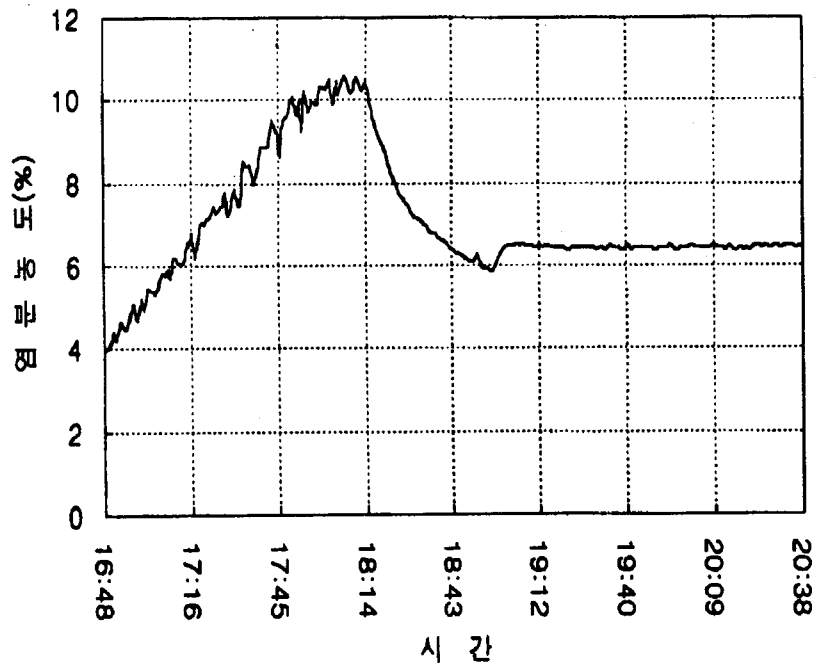
[그림 3-3] 정상 운전시 압축기의 입·출구부 온도



[그림 3-4] 정상운전시 압축기의 입·출구부 압력



[그림 3-5] 정상운전시의 압축비 변화



[그림 3-6] 시간에 따른 습분농도 설정변화

<표 3-7> 생산된 담수의 성분검사결과
(한국화학시험연구소 1999.12)

성분	농도(mg/kg)	성분	농도(mg/kg)
		염분농도(NaCl, %)	0.0001이하
증발잔유물(TDS)	15	Ammoniacal	-
pH	7.4	Nitrogen	-
경도 as CaCO ₃	0.23	Potassium(K)	-
Calcium(Ca)	0.08	Cadmium(Cd)	-
Magnesium(Mg)	0.01	Arsenic(As)	-
Bicarbonate(HCO ₃)	10.4	Bromide(Br)	-
Chloride(Cl)	0.88	Lead(Pb)	-
Sulfate(SO ₄)	0.31	Selenium(Se)	-
Strontium(Sr)	0.01	Mercury(Hg)	-
Sodium(Na)	0.36	Chromium(Cr)	-
Boron(B)	0.1	Fluoride(F)	-
		Nitronic Nitrogen	-

IV. 기타 관련 시스템

1. 풍력이용

장치의 주기기인 증기압축기는 풍차와 동일한 터보기기로 유사한 용량특성을 갖고 있기 때문에 압축기 회전속도 조절에 의해 풍력이용이 가능하다. 따라서 내륙에 비해 상대적으로 풍부한 풍력자원을 지닌 도서 및 해안지역(미 전원지역)은 풍력을 이용하는 방법이 있다.

2. 태양열을 이용한 제염

현재 국내 도서지역에 설치된 RO방법은 막의 성능유지를 위해 취수 해수의 평균농도인 약 30% °의 원수로부터 최대 약 40% °까지 밖에 농축할 수 없어 회석 후 바다로 버리고 있다. 그러나 농축운전 범위가 넓은 MVR방법은 기존의 천일염 제조시 결정지염전에서 필요한 150% °의 염수농도까지 농축이 가능하기 때문에 담수의 부산물로서 양질의 천일염 생산이 가능하다.

V. 결론

대체 수자원개발 기술은 해수담수화, 인공강수, 중수도 등이 거론되고 있다. 지표수의 30배가 넘는 지하수개발도 대안으로 제시되고 있으나 수질오염과 지반 침하 등 부작용이 우려되고 있어 지표수의 보조수단으로 활용될 전망이다. 이들 기술 중 해수담수화 기술은 3면이 바다로 둘러싸여 있는 우리 나라로서는 풍부한 자원량을 확보할 수 있기 때문에 가장 유력한 대안으로 인식되고 있다. 그럼에도 불구하고 해수담수화기술은 아직은 초보 단계에 머무르고 있는 실정이다.

본 연구는 그간 산업분야에 적용하여 일정한 성과를 획득한 MVR시스템을 해수담수화에 적용한 국내 최초의 연구사례로서 향후 가장 경제성과 안정성이 뛰어난 담수기술로 발전할 수 있을 것으로 사료된다.

실험결과를 토대로 예측한 기대효과는 다음과 같다,

○ 과학 기술적 기대효과

- 물 부족 해결에 기여 및 서 남해안의 간척지 증가로 천일염의 수입개방으로 염전이 감소되고 있는 상황에서 본 기술은 부차적으로 고품질의 천일염 획득이 가능 함.
- 본 기술이 확립되면 식품, 사료, 화공 섬유, 금속, 제지 등 제조업 분야에 응용, 에너지절감 및 환경처리비용 절감 등 파급 효과가 지대 함.

○ 사회경제적 기대효과

- 에너지효과(전기 : 54kwh, 보일러 스팀 : 톤당 10,000원, 운전시간 : 연7,200시간 기준)
 - 에너지절약효과 : 연간 1기당 7억원
 - 대체에너지효과 : 연간 1기당 0.5억원
- 제염생산에 따른 부가적 이익
 - 1기당 2.7억원(3톤 소금/일×300,000원/톤 천일염=900,000원/일)
- 수입대체 및 플랜트 수출 효과
 - 요소기술 국산화에 따른 수입대체효과 : 1기당 6억원/년
 - 개발완료 후 수출효과 : 1기당 10억원/년(세계시장 5%점유시 연간 약 500기 수출)