

증기 재압축방식을 이용한 해수담수화에 관한 고찰

Seawater Desalination Using Mechanical Vapor Recompression Method

박 준 택

J. T. Park

한국에너지기술연구소
에너지자원기술개발지원센터 과장



- 1952년생
- 산업폐열회수, 용제회수 및 탈취 등 기술개발에 관심을 가지고 있다.

홍 성 호

S. H. Hong

한국전력기술(주)
전력기술개발연구소



- 1959년생
- 발전설비의 수명평가 및 MVR시스템 재료개발 등에 관심을 가지고 있다.

1. 서론

물은 인간의 생존에 필수적인 것으로 문명의 발달과 함께 그 소비량은 급격히 증가하여 왔다. 따라서 지하수개발, 수로 및 댐건설 등으로 수자원을 확보하여 왔으나, 최근에는 산업발달에 따른 공업용수의 막대한 소비와 물의 오염으로 인하여 안정적인 수자원의 확보가 큰 문제로 대두되고 있다. 따라서 이러한 어려움을 극복하기 위하여 지구상에 무한히 존재하는 바닷물을 진수(眞水)로 만드는 해수담수화(海水淡水化)가 주목을 받게 되었다.

해수담수화는 1950년대에 증발법에 의해 바닷물로부터 담수를 얻는 방법이 개발된 후, 1960년대에 들어오면서 각종 담수화장치가

물의 절대량이 부족한 지역이나 공업용수가 필요한 곳에 설치되었다. 그러나 해수담수화는 바닷물중의 3~4% 염분을 분리하는 만큼 대단위 에너지(열 및 전력)를 필요로 하므로 주로 석유가 많이 나는 중동지역에서 가장 많이 운용되어 왔다.

그런데 최근에 용수부족이 갈수록 심화되고 해수담수화 기술이 발달되어 생산비가 절감됨에 따라 해수담수화 설비의 수요가 증가되어 미국을 비롯하여 일본에서도 많이 건설되고 있다.

따라서 본 고에서는 해수담수화의 현 상황 및 일반적인 해수담수화 방식에 대해 간단히 알아보고 최근에 실용화 되고 있고 에너지 절약면에서 유리한 증기재압축(Mechanical Va-

por Recompression, MVR)을 이용한 해수담수화법의 기본원리 및 적용성을 분석하였다.

2. 해수담수화 설비의 설치현황 분석

해수담수화 방식을 크게 분류하면 증발법, 막(膜) 및 냉동법이 있다. 증발법에는 다단후래쉬(Multi-Stage Flash)식, 다중효용(Multiple Effect)식 및 증기압축(Vapor Com-

pression)식이 있고, 막법에는 역침투압(Reverse Osmosis)식 등이 있다.

미국 IDA(International Desalination Association)의 보고서¹⁾에 의하면 1991년 12월 말까지 용량 100ton/day인 육상용 담수화장치는 8741기 이상이 건설되어 총생산 수량은 1600만ton/day에 달하는데 이들 각 담수화방식과 설치현황은 표1과 같다.

표1 해수담수화방식과 설치상황(91년 12월말시점)

형 식	세 계		일 본	
	기 수	생산량(m ³ /日)	기 수	생산량(m ³ /日)
多段 후래쉬 蒸發法	1,113	8,361,714	306	4,059,897
逆 浸 透 法	5,232	5,339,368	1,025	1,182,756
電 氣 透 析 法	1,165	898,397	36	46,803
多 重 效 用 法	564	725,317	36	46,803
蒸 氣 壓 縮 法	493	494,191	85	26,272
膜 軟 化 法	37	221,534		
상 기 방 식 組 合	39	35,919	2	538
冷 凍 法	1	210		
기 타	97	47,468		
합 계	8,741	16,124,118	1,569	5,396,337

표1을 보면 가장 일반화된 방식은 다단후래쉬 증발법과 역침투법이다. 한편 증기압축식에 의한 담수화 방식은 최근에 실용화되기 시작하여 주로 중소형 해수담수화에 사용되고 있는데²⁾ 에너지 소비가 적어 우리나라의 해수담수화 설비로 매우 유망하다고 예상된다.

따라서 먼저 다단후래쉬 증발법과 역침투법에 대하여 간략히 알아보고 증기압축식에 의한 해수담수화 설비에 대하여 특성 및 경제성과 외국에서의 설치 사례에 대하여 분석하여 보았다.

2.1 다단후래쉬 증발법

일반적으로 고온의 액체가 감압된 용기에 유입되면 액체온도는 포화온도까지 내려가며 비등증발하게 된다. 이러한 증발현상을 후래쉬(Flash)증발이라 하며 이 원리를 이용한 것이 후래쉬식 담수화 장치이다. 작동원리는 그림1과 같다. 펌프로 보내진 해수는 증발기 관내를 냉각수로서 통과하면서 예열되어 급수가열기에서 소정의 온도로 가열되고 증발실로 들어간다. 용기내의 추기(抽氣) 이젝터(Ejector)에 의해 감압되므로 유입된 고온의 해수

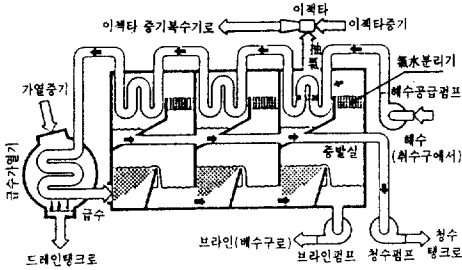


그림1 다단후래쉬 증발법

는 후래쉬증발을 일으켜 증기가 되며 발생증기는 증발기에서 복수(復水)되어 생산수가 된다. 그림1은 증발실과 증발기가 3개의 방과 3단으로 구성된 예이며 일반적인 장치는 생산수량에 따라 4~30단계 정도로 구성되어 있다. 생산수량을 높이기 위해서는 단수를 증가시킬 수 있지만 단수의 증가는 장치건설비의 증가를 초래한다. 또한 효율을 높이기 위해서는 가열기 출기의 해수 최고온도를 높이는 것이 효과적이지만 해수를 너무 높게 가열하면 염분석출이 일어나 전열면에 스케일이 발생하여 성능을 저하시키며 고온해수는 장치재료에 부식을 발생시킨다. 따라서 스케일 및 재질의 부식방지가 다단후래쉬식에 대한 기술개발의 핵심이다.

2.2. 역침투법

이 방법은 물은 투과시키지만 염분은 투과시키지 않는 반투막에 침투압에 거역하는 압력을 걸어 물을 취출하는 방법이다. 해수에도 사용할 수 있는 막은 1970년대에 개발되어 개량이 거듭되고 있다. 현재 방향족 폴리아미드, 초산세투로스, 폴리에틸 등을 소재로 한 中空 섬유(호로파이버)를 묶은 것 및 씨트형상의 막을 감은 것등이 실용화되어 있다.

그림2는 호로파이버형 막모듈의 작동도이다. 가압된 해수는 배수관에서 용기내에 분산되어 증공섬유의 외측을 흐른다. 섬유는 물만을 투과하고 물은 섬유의 증공부로 들어가 관

판에 의해 칸막이가 된 다공질 지지부를 통해 취출된다. 섬유외측을 흐르는 사이에 농축된 해수는, 용기에서 감압장치를 지나 배출된다. 이와같이 해수측을 그 해수의 침투압 이상의 압력(50~70bar)으로 유지하면 담수를 얻을 수 있다.

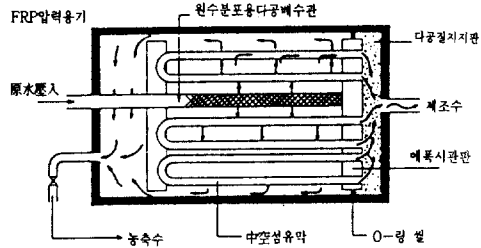
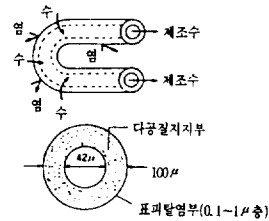


그림2 역침투법의 작동도

역침투막법은 증발법과 같이 해수의 상변화를 이용하지 않고 상온(常溫)의 해수를 가압하는 정도로 담수를 얻을 수가 있어. 에너지 소비는 증발법의 1/3~1/2이라는 점이 최대 장점이다. 또 상온에서 운전되므로 부식과 스케일방식도 증발법에 비해 일어나기 어렵다는 장점도 있다. 그러나 모듈에 도입되는 바닷물은 막힘방지를 위해 청정도가 요구된다. 또 막을 보호하기 위하여 약품처리등도 포함된 충분한 전처리가 필요하고 막의 수명, 성능열화 때문에 매년 10~20%씩의 막 교체가 필요하다. 반투막은 다소의 염분을 물과 함께 투과시키므로 역침투막법으로 얻어진 제조수의 순도는 증발법으로 얻어진 물보다 낮지만, 음료수로서 이용할 수 있을 만큼은 탈염되므로 재차 제조수를 잔물용의 막으로 처리(2단탈염)하여, 필요한 순도를 얻도록 계획할 수도

있다.

3. 증기재압축(MVR) 증발법

3.1 증기재압축 증발법의 원리

증기재압축 증발법은 원래 증발장치에서 발생된 저온의 증기를 압축기로 압축하여 가열 열원으로 재사용하는데서 시작된 폐열회수 기술의 하나로써 오래전부터 알려져 있었다. 그러나 증발공정의 경우 전반적인 공정설계 기술의 향상과 압축기의 고효율화 및 경제성등이 확보된 최근에 이르러 주요 에너지절약 기술로 등장하고 있다.

이 시스템은 가열과 냉각이 분리적으로 이루어지는 기존 증발공정에 비해 약간의 추가적인 전기에너지에 의한 기계적 압축에 의해 가열과 냉각을 연속적으로 동시에 수행할 수 있는 시스템으로써 증발기에서 발생하는 증기의 응축잠열을 전량 회수하여 응축기(재비기)의 가열열원으로 재이용할 수 있어 에너지의 효율성이 높은 장점이 있다. 이러한 MVR 증발 시스템은 가열축과 증발축의 온도차 만큼 증기의 포화온도를 올리는데 필요한 에너지만 소요되므로 통상 다중효용 방식(2중 효용)에 비하여 약 1.8배 정도의 에너지절감 효과가 있다고 알려져 있다.

최근에는 이 시스템의 경제성에 가장 큰 영향을 미치는 증발기내의 압력손실을 될 수 있는대로 적게 하고 증발기의 가열온도(시스템의 승온폭)를 최소화하기 위한 응용기술이 선진국에서 실용화되고 있으며, 이 경우 초기 시설투자비는 증가되나 압축기의 소요동력이 감소되어 보다 큰 에너지절약 효과를 달성할 수 있다.

증발공정에서 응용되는 MVR시스템은 증발기내 증기의 증발잠열을 회수·이용하는 방법에 따라 직접 증기 재압축(Direct Mechanical Vapor Recompression ; DMVR)과 간접 증기 재압축(Indirect Mechanical Vapor Recompression ; IMVR) 및 자기증발증기 재

압축(Mechanical Flashing-Vapor Recompression ; FMVR) 시스템 등으로 대별할 수 있다.

FMVR시스템은 DMVR시스템과 비교할 때 한번의 열교환만을 필요로 하는 것은 동일하나 작동매체로써 증기의 직접압축이 아닌 증발기내의 재증발(Flashing) 증기를 압축하여 증발기 하부에 직접 분사시키는 방법으로써 압축에 소요되는 일(W)은 DMVR 시스템과 비슷하다.

한편 IMVR 시스템은 DMVR 및 FMVR 시스템과는 달리 작동매체로써 제3의 물질을 이용한 폐회로 압축사이클로 구성되기 때문에 한번의 열교환이 더 필요한 방식이다. 따라서 이 IMVR 시스템은 추가된 열교환에 필요한 온도차(통상 8~10℃) 만큼의 압축기 소요동력이 증가하게 되는 단점(시스템의 경제성 저하)은 있으나 분리하고자 하는 목적 물질에 영향을 미치지 않고 용이하게 시스템 도입이 가능하다는 점과 운전의 안전성 확보에 있어서 타 시스템에 비하여 유리하기 때문에 최근에는 회수증기를 자체공정 보다는 타 저압공정에 사용하는 방법으로 응용되는 사례가 많은 실정이다.

3.2 증기재압축 증발법의 특징

증기압축식 증발법은 기체를 단열압축하면, 기체의 압력과 함께 온도가 상승하여 높은 온도에서 응축한다. 이 원리에서 증발기에서 발생한 증기를 단열압축에 필요한 에너지는 증발 잠열에 비해 대단히 적으므로 에너지 효율이 높은 담수화장치가 가능하게 된다.

압축기로서 블로어등 회전기를 쓰는 것과 증기이젝터를 쓰는 것이 있다. 증기이젝터를 사용한 장치는 블로어등의 압축기에 비해 증기 압축효율이 낮아 그만큼 열효율도 나쁘지만, 구동증기는 가열원으로 이용할 수 있으므로, 이젝터방식의 증기압축식은 다중효용과 조합시켜 적은 효용수로 高조수비를 얻는 수단으로 이용되고 있다. 여기서 조수비란 생산

수량과 사용하는 가열 증기량의 비율을 나타낸다. 증발기내에서 증발된 유출액과 증발을 완료하고 남은 원액은 급수에 열기를 통과하여 급수에 열을 주고 외부로 취출된다. 농축 관출액과 유출액의 열은 급수를 가열하고 회수되지만 완전히 회수되지 않으므로 이 열손실과 블로어에서 가해지는 열의 차이를 보충하여 증발기내를 일정한도로 유지하기 위한 보조열원으로 전기히터를 설치하고 있다. 이 전기히터 대신에 후레온 압축기를 이용한 히트펌프를 사용, 전체의 에너지소비를 절감할 수도 있고, 엔진배열을 이용하여 에너지의 유효이용도 가능하다.

증기압축식 장치도 증발기 구조는 다중효용과 같아 다중효용에서 문제가 된 스케일 발생 등은 똑같은 주의가 필요하다. 그러나 증기압축식에서는 다중효용과 같이 열효율(조수비)을 높이기 위해 효율수의 증가는 필요하지 않아 적은 온도 범위에서 작동시킬 수가 있다. 종래, 건설비 절감을 위해 100℃ 가까운 고온 장치장치가 많았지만 스케일발생, 부식문제 때문에 현재로는 50~70℃의 저온으로 운전하는 장치가 많다.

이와같이, 증기압축식 장치는 타 증발법에 비해

- 저온작동이므로 비교적 저렴한 재료의 사용이 가능하여 건설비 절감
- 효용수도 적어 프로세스도 간단하여 완전 자동화도 용이
- 전기만으로도 작동할 수 있으므로 별도의 열원이 필요치 않다는 장점을 살려 2000ton/day 이하의 중소형 해수담수화에 많이 채용되고 있다.

4. 해수담수화 방식의 경제성 분석

해수담수화에서 제일 중요한 것은 얼마만큼 싸게 물을 만들까 하는 점이다. 생산수 제조비용은 에너지비, 운전보수비, 그리고 고정비로 구성된다.

표2에 실용화되고 있는 범위에서는 각 방식별 에너지 소비를 비교해 보았다.²⁾ 연료의 열환산은 10,000cal/kg, 열의 전력 변환효율은 35%를 기준으로 한 개략적인 비교치이다.

운전보수비는, 인건비, 유지수선비, 약제비 등이다. 인건비는 장치의 자동화등에 의해 절감시킬 수 있다. 유지수선비는 통상의 발전설비와 같은 정도이다. 역침투막법에서는 전술했듯이 막의 정기적인 교체비용이 가해져 유지수선비는 크게 된다.

표2 해수담수화 방식별 에너지 소비량²⁾

방 식	필요에너지 (조수1톤당)	환산연료소비량 (kg/톤 조수)
다 단 후 래 쉬 식	열량 : 52,300kcal(조수비 10) 전력 : 3.0kWh	6.5
다 단 효 용 식	열량 : 52,300kcal(조수비 10) 전력 : 1.6kWh	6.2
증 기 압 축 식	블로워 전력 : 9kWh 히트펌프전력 : 3.7kWh	3.1
역 침 투 막 법	고압펌프전력 : 8.5kWh (에너지 회수 터빈부착)	2.1

고정비는, 설비의 감가상각비와 금리이다. 담수화장치는 상각기간 15~20년, 연간 가동율 90% 정도로 고정비를 산출하는 것이 일반적이다. 고정비는 건설비에 비례하는 것이지만, 증발법에서는 조수비의 선정에 의해 크게 영향을 받는다.

이와같이 제조수 비용은 필요한 생산수량, 에너지 단가뿐만 아니라 담수화방식의 선정도 포함된 최적화 계획하에 계산되는 것이므로 일률적으로 얼마쯤될 것이라고 말할 수는 없으나, 일반 해수담수화장치에서 제조되는 물의 비용은 1톤당 1,000원~2,500원 정도이다.

현재 우리나라에서 각 발전소의 공업용수 확보는 댐을 건설하여 저장된 물을 끌어와서 정수하여 사용하는데 주로 역침투막 방식을 채용하고 있다. 또한 해수담수화를 할 경우에도 각 방식별에 대한 우리나라 현실에 가장 맞는 방식은 역침투막방식이라 보고되고 있다.³⁾ 그러나 이 보고서에서 기타 증발법은 해수를 증발시키기 위한 열원으로 사용되는 에너지비가 너무 많아 역침투막방식보다 불리한 것으로 보고 되었으며 MVR 방식은 상세히 검토되어 있지 않다. 이에 MVR 방식과 역침투막 방식을 염분농도가 30,000ppm이고 온도가 10℃인 해수를 염분농도 10~20ppm이고 온도가 14℃의 응축수로 생산량은 100ton/hour로 제조할때 기준으로한 생산비를 개략적으로 비교검토하였다.⁴⁾

표3 및 표4에는 각 방식에 대한 설치비 및 생산비를 나타내었다. MVR 방식과 역침투막 방식은 설치비가 각각 약 29억원 및 24.5억원 정도로 역침투막방식이 약간 저렴하나 에너지비, 운전보수비 및 고정비등을 고려하면 각각 생산수 1ton당 880원 및 1,500원 정도로 산출되었다. 위의 생산비는 단순히 기본적인 시스템을 설치운영할 경우이므로 실제로 발전소등에 설치운영할 때에는 생산비가 다소 상승하리라 예상된다. 표2에서와 같이 에너지소비량은 MVR 방식보다 역침투막방식이 약간 유리하나 표3 및 표4에서와 같이 생산비가 상대적으로 저렴한 MVR 방식을 채택한 해수담수화방안이 역침투막방식보다 전체적으로 유리하리라 판단된다.

표 3(a) MVR방식의 시스템 설치비

(단위 : 천원)

항 목	갯 수	단 가	합 계
증 발 기	2 set	935,000	1,870,000
증기압축기	2 set	350,000	700,000
제 어 계 통	1 lot		130,000
배관및펌프	1 lot		160,000
화 학 약 품	1 lot		40,000
총 계			2,900,000

표 3(b) MVR방식의 ton당 생산비

(단위 : 원 /ton)

항 목	산 출 자 료	적 용 단 가	생산가	비 고
설 치 비	2,900,000,000		224	$2,900,000,000 / (15 \times 330 \times 24 \times 100) = 224$
소 비 전 력	1,000kWh	50원 / kWh	500	$1000 \times 50 / 100 = 500$
연료소비량	90ℓ / hr	92원 / ℓ	83	$90 \times 92 \times 100 = 83$
소 모 품	5,000,000원 / 년	-	6	$5,000,000 / (330 \times 24 \times 100) = 6$
약 품 비	0.84kg / 100톤	2,500원 / kg	21	$0.84 \times 500 / 100 = 21$
감가상각비	정액법 15년	운전일 330일 / 년	-	
운전 제작비	설비비의 7%적용	생산량의 100m ³ / hr	26	$365 \times 0.07 = 26$
합 계			880	

표 4(a) 역침투막방식의 시스템 설치비

항 목		공급수(TDS) 단위	1,000 (ppm)	5,000 (ppm)	20,000 (ppm)	38,000 (ppm)
공 급 수 량		m ³ /h	135	180	315	420
회 수 율	1단	%	-	70	40	80
	2단	%	75	80	80	80
생 산 수 량	1단	m ³ /h	-	125	125	125
	2단	m ³ /단	100	100	100	100
RO System Design		Stage	Single Stage Parallel	Product stage	Product stage	Product stage
생 산 수 수 질(TDS)		ppm	50	50	50	50
막 형 태	1단	-		해수용TFC	해수용TFC	해수용TFC
	2단	-	염수용TFC	염수용TFC	염수용TFC	염수용TFC
전 력 비 (’89년 발전원가)		원/kWh	29.36	29.36	29.36	29.36
설 비 비		천원	581,569	1,530,278	1,882,472	2,459,353

① 약품비 : SBS(NaHSO₃)=580원 /kg

SHMP(Sodium Hexa Meta Phosphate)=1,150원 /kg

응집제(FeCl₃)=120원 /kg

② 막세정 회수 : 1회 /3개월

③ 운전세정비 : 연간 설비비의 1.5% 적용

④ 설치비 : 중 설비비의 7% 적용

⑤ 설비비는 국내 제작용업체에서 제시한 가격임

⑥ 공급수 온도는 20℃를 기준으로 하였음.

표 4(b) 역침투막방식의 ton당 생산비

(단위 : 원 /ton)

항 목	공급수(TDS) 단 위	1,000 (ppm)	5,000 (ppm)	20,000 (ppm)	38,000 (ppm)
전 력 비 (50 원 /kwh)	· 1단 RO 펌프	—	65.68	164.21	218.94
	· 2단 생산수 펌프	—	5.46	5.46	5.46
	· 2단 RO 펌프	54.73	48.78	43.78	43.78
	· 취수 펌프	6.53	8.75	21.90	21.90
	· 세정 및 약품 펌프	0.03	0.03	0.03	0.03
	소 계	61.34	128.70	235.38	290.11
설 비 비	· 1단 RO	—	110.10	128.45	192.68
	· 2단 RO	52.80	50.16	50.16	50.16
	· 전처리 장치비	16.43	21.91	38.35	51.13
	· 설치비	4.85	12.75	15.19	20.58
	소 계	74.08	194.92	232.15	314.55
소 모 품 비	· 1단 RO 반투막	—	86.28	250.12	375.18
	· 2단 RO 반투막	68.00	61.11	61.11	61.11
	· 정밀 필터	8.11	10.65	18.76	25.35
	· Sand 및 A/C	0.01	0.01	0.02	0.03
	소 계	76.12	158.05	330.01	461.67
약 품 비	· 응집제, SBS, SHMP	10.87	10.87	17.43	25.36
	· 막 세정액	21.14	58.58	64.00	80.00
	소 계	38.01	69.45	81.43	105.36
감 가 상 각	· 정액법(10년)	69.23	182.18	216.96	293.87
가 타	· 노무비	22.85	22.85	22.85	
	· 운전제경비	10.38	27.33	32.55	
	소 계	33.23	50.18	55.40	66.95
총	계	352.01	778.48	1151.33	1532.61

5. 증기재압축을 이용한 해수담수화 적용 사례

1984년 9월경에 북프랑스의 Flamanville 원자력 발전소에 용수확보용의 MVR 방식의 용량 1,500 tons/day의 해수담수화 설비가 프랑스 Sidem회사의 설계에 의해 설치되어 있는데 이를 분석하면 다음과 같다.⁵⁾

5.1 설계 및 운전조건

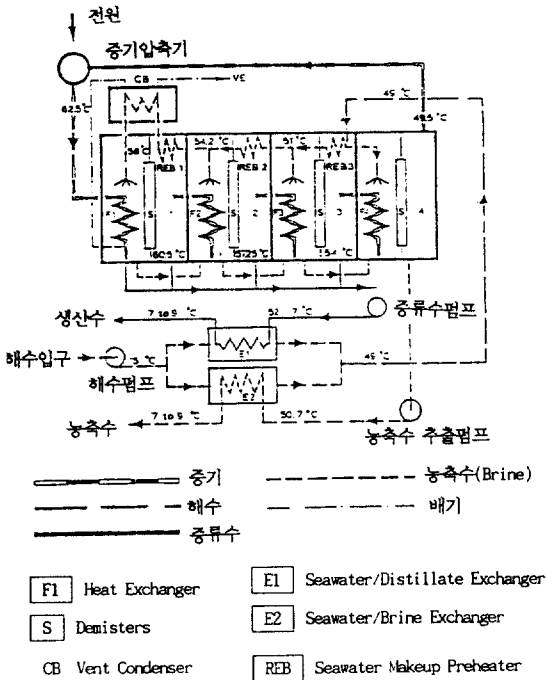
Flamanville 원자력 발전소에 설치된 MVR 방식의 설비에 대한 특성은 다음과 같다.

- 수평배관에서의 분무막 증발(Spray Film Evaporation)방식
- 스케일과 부식 방지를 위한 낮은 온도에서의 운전(60℃)
- 기계적인 압축식

-다중효용 방식

그림3에는 Flamanville 원자력 발전소에 적용된 4단효용(Four Adjacent Effects) MVR 설비에 대한 개략도를 나타내었으며 증기가 생성되는 과정은 다음과 같다. 각 증발기에는 수평배관이 설치되어 있고 바닷물은 분무되면서 배관내의 증기가 응축되면서 발생하는 열에 의해 증발된다.

첫번째 증발기에서 생산된 증기는 두번째 증발기 배관내에서 응축되며 여기서 생산된 응축수는 첫번째 증발기에서 생성된 증기의 양과 거의 비슷하게 생산된다. 계속하여 이 증기는 세번째 증발기 배관내에 들어가서 다시 응축된다. 이러한 과정은 마지막 증발기까지 반복되는데 발생한 증기는 첫번째 증발기로 보내지면서 압축기에 의해 압축된다.



순도가 10ppm 정도의 1,500tons/day 증발수를 생산하는 Flamanville 원자력 발전소의 4단효용 MVR 시스템의 운전조건은 다음과 같다. 마지막 증발기의 포화 온도 49.5℃로부터 첫번째 증발기의 포화온도 62.5℃까지 전체 증발기에서의 온도차는 13℃이고 이웃하는 각 증발기의 온도차는 3.25℃이다. 전기로 운전되는 545kw 동력의 압축기는 증기를 1ton 생산하는데 필요한 전력은 11kwh이고 증기를 1시간당 15.5ton 이송할 수 있다. 증발기에 보충되는 바닷물은 각 효용당 35tons/h로 총 140tons/h이다.

평판형(Plate-type) 열교환기는 바닷물의 유입구쪽에 설치되어 있어 각각 온도가 52.7℃와 50.7℃인 증류수 및 농축수(Brine)가 배관내로 흐르면서 온도가 약 5℃인 외부 바닷물인 원수(源水)가 49℃로 가열되어 증발기로 유입되게 하는 역할을 한다. 이 온도는 온도가 가장 낮은 마지막 각 증발기에는 보조 열교환기가 설치되어 있어 각 증발기 No.3, No.2 및 No.1의 온도가 각각 51℃, 54.2℃ 및 58℃로 점차 증가하도록 설계되어 있다.

그림3 Flamanville 원자력 발전소에 적용된 4단효용(Four Adjacent Effects) MVR 설비에 대한 개략도

MVR설비를 처음 기동할 때, 증발기의 기동온도인 45℃로 온도를 올리기 위하여 700kw 용량의 증기보일러가 설치되어 있고 정상적인 운전조건이 되기까지는 약 2시간 정도가 필요하다. 바닷물은 낮은 온도에서 증발시키기 위해서는 증발기내 포화증기온도에 적당한 낮은 압력으로 유지시키는 것이 중요하며 이를 위하여 이젝터(Hydroejector)가 채용되어 증발기내의 공기 및 증발기 배관내의 불용축가스를 추출하고 있다. 표5에 MVR설비에 대한 설계조건을 나타내었다.

표5 4단효용 MVR 설비의 설계조건

응축수	
일일당 생산량, t/d	1,500
시간당 생산량, t/h	62.5
온도, ℃	해수온도+2.5
출구 펌프압력, bar g	1.5
최고 농도, ppm	10
해 수	
온도범위 ℃	15~35
유량, t/h	140
입구 펌프압력, bar g	4.5
염도, g/l	30~55
농축수	
출구온도 ℃	해수온도+2.5
유량, t/h	77.5
출구 펌프압력, bar g	0.1
소요동력	
총동력, kW	687.5
압축기 동력, kW	650
크 기	
길이, m	30
폭, m	7.0
높이, m	6.6

5.2 시스템의 시공사양과 특징

스키드 패키지(Skid-mounted Package)형인 MVR 설비는 4개의 부분품으로 이동할 수 있도록 크기 및 설계가 이루어져 있어 건설비 및 시간을 절약할 수 있도록 하였다.

MVR설비에 채용된 각 기기는 표 6에 나타난 바와 같이 부식에 강한 재질을 채택하였고 적절한 진공도를 유지관리하기 위해서 증발기 평판의 두께 및 내부 보강지지대는 정밀한 용접이 이루어졌다.

증발기에 쉽게 접근할 수 있도록 4개의 출입구를 설치하여 보수유지를 보다 쉽게 할 수 있도록 하였다. 증발기와 완전히 별개로 자체의 스킴드(Skid)에 설치된 압축기는 직경이 2.4m 고정자(Stator) 및 직경이 1.2m이 회전자(Rotor)가 있는 단상원심 압축기(Single-stage Centrifugal Compressor)로서 속도가 1,485rpm인 비동기 전동기(Asynchron Motor)와 속도가 6,080rpm인 압축기 사이에 수평축으로 2개의 휠기어(Wheel Gear)가 연결되어 있다. 기어에서의 윤활유는 다관식 열교환기(Tubular Exchanger)에서 농축수에 의해 냉각된다.

표6 단효용 MVR 설비의 각 기기 재질

증발기 본체	
셸	316L 스테인리스강
검사창 및 플랜지	316L용 피복한 탄소강
외부 보강재	탄소강
열교환기 튜브 다발	
튜브(상단 3개)	티탄늄관
튜브(나머지)	황동
튜브 지지판	316L 스테인리스강
중간 지지판	316L 스테인리스강
승강기 분리기	316 스테인리스강
분사 노즐	316 스테인리스강 또는 합성수지
증기 압축기	
축 및 축 슬리브	내마모성 탄소강
임펠러	316 스테인리스강
케이싱	내부 코팅된 탄소강
열교환기	티탄늄관
배관	
증발 및 응축관	탄소강
해수 및 농축수관	합성수지 종류
응축수관	합성수지 또는 316L 스테인리스강
밸브	강 또는 합성수지
해수펌프	
축	스테인리스강
임펠러	스테인리스강 또는 청동
케이싱	스테인리스강 또는 청동
증발펌프	
축	스테인리스강
임펠러	스테인리스강 또는 청동
케이싱	스테인리스강
농축수 펌프	
축	스테인리스강
임펠러	스테인리스강 또는 청동
케이싱	스테인리스강 또는 청동

상기와 같은 MVR 시스템의 특징을 살펴보면 다음과 같다.

- 패키지 형태의 설계개념으로 설치작업을 최소화할 수 있다. 각 장비들은 공장에서 제작하여 현장에서 조립 건설할 수 있다.
- 모든 보조기기(펌프, 열교환기등..)은 증발기를 지지하는 스키드에 설치되어 있어서 보수유지를 위한 작업이 손쉽다.
- 낮은 온도(약65℃)에서 운전되므로 튜브 내의 스케일 발생을 최소로 하여 열교환기 부분의 화학처리 없이 제기능을 발휘할 수 있도록 한다.
- 바닷물에 의한 재질의 부식을 방지하기 위해 낮은 작동온도와 각 장비의 재질선정에 주의를 기하였다.
- 중류수의 농도는 5~15ppm 정도의 순도를 유지할 수 있다.
- 낮은 에너지 소비율(11kwh/ton)로써 생산수를 생산할 수 있고, 낮은 온도로 운전되므로 스케일 방지를 위한 화학제품 투입은 4g/ton으로 적어서 바닷물의 전처리가 간단하여 경제적인 운전이 가능하 다.

6. 결 론

가까운 시기에 우리나라에서도 급속한 공업 발전과 환경오염의 증가에 따라 용수부족사태가 발생할 가능성이 증대되고 있다. 또한 부지확보 곤란으로 인하여 발전설비를 섬에 건설하는 경우 용수확보는 매우 중요한 사안이 되고 있다. 따라서 이런 상황을 대비하여 해수담수화에 대한 적극적인 연구검토가 필요하리라 사료된다. 이에 현재 실용화된 여러가지 해수담수화 방식에 대한 특징에 대해 알아보았다.

아직까지는 해수담수화를 이루어지고 있지 않지만 건설비 절감이나 신뢰성 향상을 위한 연구등이 이루어지면 해수담수화 비용을 대폭 낮출 수 있다고 본다. 특히 최근에 낮은 에너지 소비량과 저렴한 운전비 그리고 손쉬운 운전등으로 관심의 대상이 되고 있는 증기재압축(MVR) 증발방식은 우리나라에서의 해수담수화에 크게 기여할 것으로 본다. 또한 증기재압축(MVR) 증발방식은 심야전력 및 폐열을 이용할 수 있으므로 획기적으로 에너지 절약이 가능하고 설치공간이 기존 생화학처리방식의 1/5 정도이므로 앞으로 매우 유망한 해수담수화 설비로 예상된다.

그리고 이들 기술개발은 국내 발전설비의 용수확보와 낙도지방의 식수난을 해결하고 중동의 해수담수화 설비 수출 및 중국의 환경시장 진출을 위한 독자적인 기술확보에 크게 기여하고 그린라운드에 의한 환경시장 개방시 외국과의 경쟁에 대비할 수 있으리라고 본다.

참고문헌

- 1) 外山 茂樹, “海水淡水話法の技術と動向”, 配管技術, pp.75~80, 1994. 6
- 2) 배관기술, “과워플랜트에 병설, 해수담수화 장치의 방식과 효용”, pp.88~93.
- 3) 김재평, 김영부, 김성울, “담수화에 관한 연구”, 한국전력공사 기술연구원, KRC-88C-S01, 1990. 6.
- 4) 정립 D.S.P. 산업, 회사자료, 1993.
- 5) M.Lucar and B. Tabourier, “The Mechanical Vapour Compression process applied to seawater desalination : A 1500 ton/day unit installed in the nuclear power plant of Flamanville, France”, Desalination, Vo.52, pp.123~133, 1985.