

증기재압축식 해수담수화장치의 구성 및 운전특성

양귀철, 김동국, 김상현, 전원표
한국에너지기술연구소

Components and Operating Characteristics of Vapor Recompression Desalination plant

G. C. Yang, D. K. Kim, S. H. Kim, W. P. Chun
Korea Institute of Energy Research

1. 서론

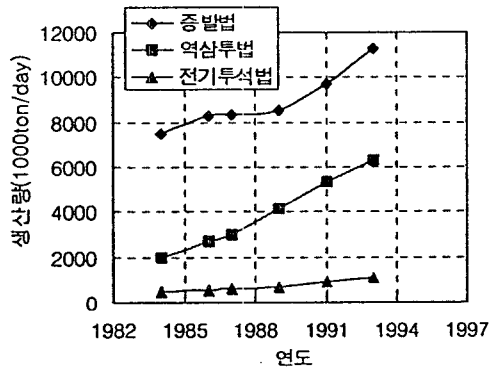
전세계가 현재 산업화와 도시화 그리고 인구증가로 물수요는 계속 증가되고 있으나 수질 오염 등으로 안정된 물공급은 이에 미치지 못하고 있어 물부족 사태에 직면해 있다. 유엔에 의하면 98년 기준, 물부족에 시달리는 환경난민은 25만명에 이르며 물이 없어 사망하는 어린이만도 하루 평균 5000명을 넘고 있는 것으로 집계하고 있다. 이 같은 물부족은 2020년대에는 전세계 인구 75억 인구중 약 30억명이 물부족을 겪게 된다고 한다. 이와 같은 추세속에 최근 세계은행은 20세기가 국가간의 분쟁이 석유때문이었다면 21세기는 물 분쟁 시대가 될 것이라고 경고하고 있다. 실제로 전세계 50여개국에 걸쳐 214개의 강이 흐르고 있는데 요르단강을 둘러싸고 이스라엘, 요르단, 레바논, 시리아가 분쟁중이며 나일강을 두고 이집트, 수단, 우간다 등이 유프라테스강은 터키, 시리아, 이라크가 다뉴브강은 헝가리, 슬로바키아가 물싸움을 벌이고 있다. 국내의 경우 대구시가 91년 발표한 위천공단 건설계획은 부산 경남 지역 주민들이 낙동강 수질오염을 이유로 건설 자체를 반대해 지금까지 해결점을 찾지 못하고 있다. 또한 정부가 93년 건설을 발표한 동강댐도 환경단체 등의 반대로 원점으로 돌아갔다. 이와 같이 국내외적으로 물 문제가 심각하게 대두되고 있는 상황에서 지구상의 97.4%를 차지하고 있는 바닷물을 이용하여 담수를 생산함으로써 물부족 문제를 해결하는 것이 가장 바람직할 것이다.

1996년도 국제담수화협회(Internation Desalination Association; IDA) 보고서에 의하면 해수담수화는 1971년도에 $1.5 \times 10^6 m^3/day$ 이었던 것이 1976년에는 3배인 $4.5 \times 10^6 m^3/day$ 을 기록하였다. 그리고 1995년말 세계적으로 11,066개의 담수화 설비가 있으며, 총생산량은 약 2천만 m^3/day 에 달하며 120여국에서 이미 담수화 시스템을 사용하고 있다고 한다.¹⁾ 국내에는 제주도 우도, 홍도, 통영 등에 약 20여기의 중,소형 해수담수화시스템이 설치되어 있으며, 현재 영광 낙월도, 제주 추자도에 각각 50, 100 m^3/day 용량 규모로 건설중에 있다. 또한 정부지원하에 약 20여기의 담수화시설이 도서지방에 추가설치될 예정이다. 현재 설치된 담수시설은 모두 역삼투막을 채택하고 있으며 규모는 10 ~ 100 m^3/day 이다. 그러나 현지 주민 대부분이 담수시스템에 의한 담수공급에 상당한 부담을 갖고 사용하고 있으며 심지어는 운전을 중단한 곳도 있다. 따라서 에너지 자원이 거의 전무한 국내 여건상 담수비용을 낮추는 것이 최우선 과제일 것이다.

2. 증기재압축식 해수담수화장치

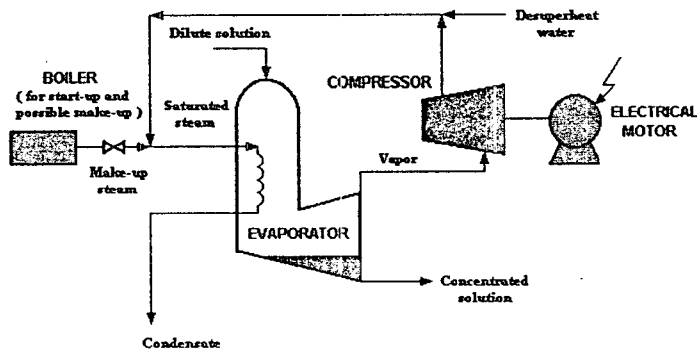
2.1 해수담수화의 개념

해수담수화란 바닷물에 포함되어 있는 불순물과 염분을 제거하여 담수로 만드는 것을 말하며 해수담수화법에는 증발법(Evaporation), 역삼투압법(Reverse Osmosis), 전기투석법(Electrodialysis)등이 있다. 먼저 증발법은 담수화에 있어서 가장 오래된 방법으로 원리는 증발된 증기를 응축하여 사용하는 것으로 설치 및 운전이 용이하지만, 에너지 비용이 많이 드는 단점이 있다. 역삼투압법은 고분자막을 이용한 삼투압과 외부 압력차에 의한 담수화법으로 에너지비용이 적게 드는 반면, 유지관리가 어렵고 화학적 전처리에 의한 2차 오염이 발생되기 쉬운 단점이 있다. 전기투석법은 에너지소비량이 많고 대규모장치에는 적용이 다소 어려우며, 높은 농도의 염수에서는 농축수로부터 염분의 역확산이 증가하는 단점이 있다. [그림 1]은 각 해수담수화법에 따른 연도별 생산량을 나타낸 것으로 증발법과 역삼투압법이 주를 이루고 있음을 알 수 있다.



[그림 1] 연도별 각 해수담수화법에 따른 생산량

2.2 증기재압축식 해수담수화장치



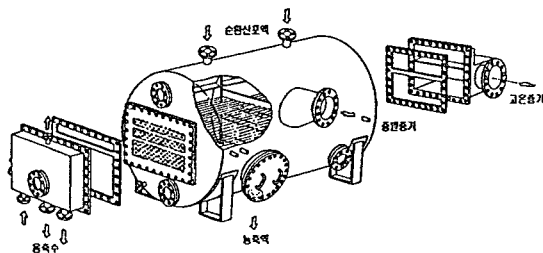
[그림 2] MVR 증발·농축시스템의 개념도

[그림 2]에서 보는바와 같이 증발법의 일종인 기계적 증기재압축(Mechanical Vapor Recompression; MVR)방식의 개념도로 증발관에서 증발된 증기를 기계적인 힘 즉, 열펌프(Heat pump)를 이용해 압축·승온하여 자체 증발열원으로 재사용하는 방식으로 대기압 증발시 온도차가 10℃인 경우 열펌프의 가역단열압축 가정하에서 이론적으로 14 kcal/kgH₂O의 열량만으로 시스템 운전이 가능하기 때문에 기존 증발법에 비하여 에너지 비용이 1/20~1/30정도만으로도 운전이 가능하다. 또한 Steam Economy(단위증기소비량당 증발수분량)가 15~25 정도로 에너지 경제면에서 다른 방식들에 비해 뛰어난 이점을 갖고 있으며 담수화뿐만 아니라 증발공정, 건조, 제습, 발효, 폐수처리분야 등에 광범위하게 적용할 수 있다. 이 해수담수화장치의 또다른 특징중 하나가 고농도 농축(10~15%)에 의한 담수회수율을 70~80%까지 올릴 수 있으며 고농축배출액을 소금생산에 필요한 원액으로 이용시, 부가가치가 발생하여 담수생산비용을 현저히 낮출 수 있을 것으로 예상된다.

이 시스템의 구성요소는 크게 증발·농축기와 열펌프로 사용된 원심식 증기압축기로 구분할 수 있으며 각각 다음과 같은 특징이 있다.

(1) 증발농축기

일반적으로 증발·농축장치는 유체흐름방식에 따라 강제순환형, 박막유하형, 자연순환형 등으로 분류되며 튜브의 형식에 따라서는 수직관식과 수평관식으로 구분된다. 수직관식은 하나의 증발·농축기내의 전열면적을 크게 할 수 있으며 바닥면적이 적게 들고 낮은 온도에서도 운전이 가능한 특징이 있다. 또한 일반적인 튜브(plain tube)를 사용하는 대신 플루트(fluted tube)형식이나 로프(roped tube)형식을 적용할 경우에는 증발관의 전열계수가 2-3배까지 증가한다. 그러나 이 두 형식은 상변화를 일으키지 않는 MSF(Multi-Stage Flash) 등의 예열기로 주로 사용되고 있다.²⁾ 수평관식은 작은 용량에 적합하고 비용이 적게 들며 수두손실이 없는 것과 전열계수가 높다는 특징이 있다. 본 시스템에서는 바닷물의 농축농도에 따른 비점상승(Boiling Point Rising)온도와 스케일(Scale)을 고려하여 [그림 3]에서 보는 바와 같이 수평관식 박막유하형 증발·농축기를 적용하였다. 이는 침수형과는 달리 분사기에 의해 균일하게 분사시켜 가열관 외면에 박막을 형성하므로써 전열속도가 크고 증발시간이 짧으며, 농축 농도에 따른 비점상승온도에 대하여 적응성이 좋으며 또한 스케일이 형성되더라도 쉽게 제거할 수 있는 특징을 가지고 있다.



[그림 3] 수평관 박막유하식 증발·농축기

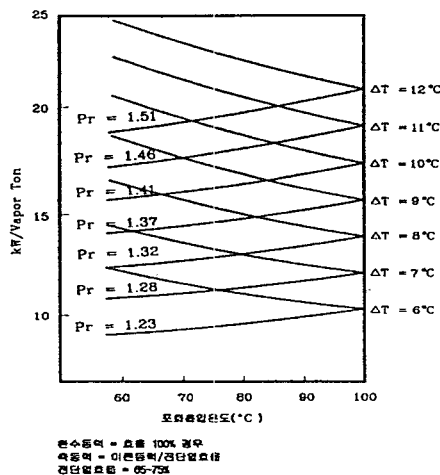
그러나 스케일문제는 모든 열교환기에서 피해갈 수 없는 문제이며 증발·농축기에 있어서 매우 중요한 인자중의 하나이다. 또한 전열계수와 아주 밀접한 관계가 있어 시스템의 성능을 좌우하는 가장 큰 요소중 하나라고 할 수 있다. 따라서 스케일형성 억제와 주기적인 청소가 필요하다. 종래에는 스케일 방지법으로 플랜트를 정지시킨 후 여러 가지 기계적 방법

을 이용하여 제거하거나 유입해수에 강산을 첨가하여 수소이온농도를 제어하는 방법 등이 이용되었으나 최근에는 초음파를 이용한 스케일방지 기술이 러시아에서 실용화되어 국내에도 도입되고 있으며 이는 초음파를 발생하는 초음파발생기와 이를 제어하는 전자제어시스템으로 구성되어 있다. 스케일 제거 원리로는 관 또는 금속의 표면에 붙어 있는 스케일에는 항상 갈라진 틈이 있으며 이는 금속과 스케일의 열팽창계수차이에 기인한 것으로 열설비와 모든 설비는 온도의 변화가 수반되므로 팽창, 수축을 반복하는 과정에서 틈이 발생된다. 이때 초음파가 금속을 통하여 물에 전달되는 과정에 있어서 공동현상의 원리에 의하여 생긴 공기방울이 스케일의 미세한 틈을 침투하여 폭발하고 그 폭발하는 에너지로 기존의 스케일이 덩어리 형태로 분리하는 것이다. 이와 같은 초음파스케일방지기에 의한 에너지 절약효과는 평균 3~10%의 절약효과가 있었다고 한다.³⁾

(2) 원심식 증기압축기

원심 압축기는 일명 반경류 압축기라고도 하며 동적압축기(Dynamic compressor)의 첫 번째에 속하는 한 종류이다. 동적압축기의 각 단은 처음에는 유동속도를 증가시키도록 작동해서 나중에는 압력을 얻을 수 있도록 그 속도를 내리게 한다. 이렇게 해서 작동유체가 연속적으로 고압영역으로 흐르도록 되는 것이며 매우 효율적이며 비교적 값이 싸고 또한 많은 양의 작동유체를 취급할 수 있다. 임펠러의 경우, 입구의 것이 유체를 유도하도록 굽혀져 있는데 이 축부분을 인듀서(Inducer) 또는 회전안내깃이라 칭하며 주임펠러와 일체로 만들 수도 있고 분리되어 각각 만들어 질 수도 있다. MVR해수담수화장치에 사용된 원심식 증기압축기(Centrifugal vapor compressor)는 수증기를 압축하기 위하여 특별히 설계된 증기압축기로 압축하는 증기의 비체적이 큰 동시에 비교적 큰 승온폭이 요구되므로 증용량이상으로 고압축비이어야 한다. 증기압축기는 이 시스템에 있어 핵심기기로 높은 신뢰성과 내구성이 요구되며 부하변동에 대해서도 적응성이 있어야 하고 정격시는 물론 부분부하 운전시에도 효율이 좋아야 한다.

원심식 압축기의 또 다른 특징으로는 1단 압축당 압축비가 1.8~2.0 범위까지 압축이 가능하며 단열효율은 70~80%정도로서 타 형식에 비해 높다. 또한 다단화가 용이하고 중간 흡입 등의 특수한 사이클을 형성할 수 있어 MVR시스템에 적용이 용이하여 가장 많이 보급되고



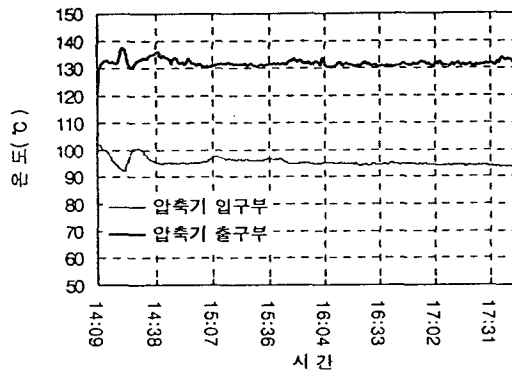
[그림 4] 압축비에 따른 MVR소요동력

있다. [그림 4]는 압축비에 따른 MVR시스템소요동력을 나타낸 것으로 포화흡입온도가 10℃이고 압축비(Pr)가 1.23인 경우, 소요동력은 약 10kW/vapor ton 이며 이때의 포화온도차는 6℃이다. 또한 압축비가 1.41일 때 소요동력은 18kW/vapor ton이 소요된다.

3. 실험 및 결과

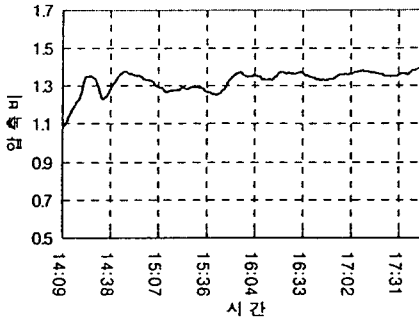
MVR해수담수화장치의 담수생산량은 10톤/일이며 압축비는 1.28(포화온도차는 7℃)로 설계되었다. 그리고 초기운전을 제외한 운전은 무인자동화 운전이 가능하도록 하였으며 본 실험에서는 순환라인상에 부착된 농도센서(Model: FOXBORO 871EC)에 의해 농도를 측정하여 농축농도에 따른 시스템을 운전·분석하였다. 또한 중요부분에 온도 및 압력센서가 있어 모든 정보를 저장토록 하여 시스템 분석자료로 활용하였다.

실험 결과, 증기압축기의 압축비는 설계 압축비보다 약간 높은 1.30을 나타내었으며, 이때의 포화온도차는 8℃로서 설계치보다 약 1℃ 크게 나왔다. 이는 실제 공력시험 규격에 준한 것이 아닌 플랜트에서의 측정치이므로 증기라인 및 센서의 위치에 따라 수치적인 차이는 있을 것으로 판단된다. 담수생산량에 있어서는 320 kg/hr으로 설계치와 유사한 결과를 얻었다. 다만 압축기에 대한 단열 압축효율을 계산한 결과 약 58%로 선진 제품과 비교시 다소 낮게 나왔다. 이는 전 시스템에 있어서 단열이 미비한 것이 한 원인일 것으로 예상된다. [그림 5]는 정상운전시 압축기의 입·출구부에 대한 온도를 나타낸 것으로 압축기의 입구부 온도는 정상운전시 평균 93℃이며 출구부 온도는 133℃로 과포화 온도차는 40℃를 나타내었다. 이러한 온도차는 실험조건과 단열조건에 따라 어느 정도 차이는 있는 것으로 나타났다.

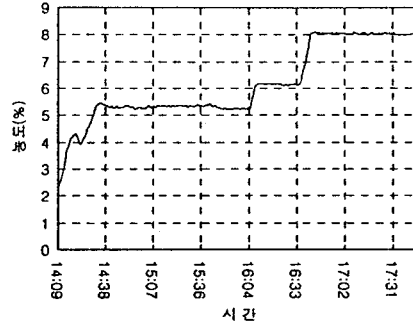


[그림 5] 정상운전시 압축기의 입·출구부온도

[그림 6]은 압축기의 입·출구부의 압축비를 운전 시간에 따라 나타낸 것이며 평균 압축비는 1.30을 나타내었다. [그림 7]은 정상운전시 5, 6, 8% 등으로 농도변화에 따른 운전을 나타낸 것으로 실험상 10%이상 농축운전이 가능하였다. 그리고 우려되었던 운전중 증기라인에서의 응축현상은 거의 발생되지 않음을 실험을 통하여 확인하였고 또한 압축기의 구동축과 후면 케이싱사이의 누설을 방지하기 위하여 라비린스셀(Labyrinth seal)법이 이용되었으며 이 부분에 일정압의 공기를 투입하여 누설방지를 보강하였다.



[그림 6] 정상운전시의 압축비 변화



[그림 7] 설정농도에 따른 정상운전

4. 결론

본 연구는 증기재압축방식을 이용한 해수담수화장치 개발에 관한 것이며 결론은 다음과 같다.

- 증기압축기에 있어 압축비가 1.30을 증발량이 320kg/hr을 나타내어 설계치와 유사하나 압축기의 단열효율 및 시일링(Sealing)에 대한 성능향상과 증발·농축기에 대한 스케일 문제 및 전열계수의 향상에 대한 연구가 필요하다.
- 해수담수화 장치에 있어 핵심 요소기기의 국산화로 인한 막대한 수입대체효과가 있을 것으로 기대되며 또한 해안지역의 환경오염으로 인한 천일염 생산이 급격히 감소하는 상황에서 배출되는 고농축액을 이용, 소금생산과 연계할 경우 담수생산비용 감소 및 부가가치 발생에 기대가 된다.
- 이를 위해서 해수담수화장치의 콤팩트(Compact)화에 대한 연구가 더욱 진행되어야 할 것이다.

참고 문헌

1. L. AWERBUCH, "Status of sea water desalination technologies", V.0, pp.25-37, IAEA, 1997
2. D.H. Foxall, P. T. Gilbert, " Selecting tubes for CPI heat exchangers-II", 1976
3. 이승구, "초음파 스케일방지기에 의한 에너지 절약", 14회 에너지절약기술웍샵, p146~p157, 1999