

담수화 기술 현황



김 병 덕

(KIMM 산업설비연구부장)

- '75. 2 한국해양대학교 기관공학(학사)
- '77~'81 동지상선 1등 기관사
- '83. 8 충남대학교 시스템공학(석사)
- '94. 2 한국해양대학교 시스템공학(박사)
- '81~현재 한국기계연구원 책임연구원



최 준 석

(KIMM 산업설비연구부)

- '82. 2 인하대학교 기계공학(학사)
- '84. 2 연세대학교 기계공학(석사)
- '84~'86 현대엔지니어링(주)
- '87~현재 한국기계연구원 선임연구원



이 양 래

(KIMM 산업설비연구부)

- '80. 2 전남대학교 물리학(학사)
- '82. 2 전남대학교 고체물리학(석사)
- '95. 2 전남대학교 고체물리학(박사)
- '82~현재 한국기계연구원 선임연구원

1. 물부족 현황

21세기에 접어들면서 물부족으로 인한 분쟁이 세계도처에서 빈번히 발생할 것으로 여러 전문가들은 예측하고 있다.

세계은행 보고에 의하면 21세기에는 석유나 식량이 아닌 수자원 부족으로 인한 전쟁이 일어날 것이라고 하며, 물부족으로 국민건강과 경제가 위협받고 있는 나라가 80개국에 이르며 세계인구의 40%인 20억 인구가 물부족을 겪고 있다고 한다. 또한 미국의 지구 물 정책계획(GWPP)은 현재의 농·공업용수 및 가정용수의 물 소비 양식이 계속된다면 앞으로 30년 안에 세계 물 기근이 발생할 것이라고 경고하고 있다.

우리나라의 경우에 있어서도 물이 부족한 것은 마찬가지이다. 매년 가뭄으로 고통을 겪고 있으며 3월 현재에도 약 78만명이나 간헐적으로 식수공급을 받고 있는 실정이다. 경북 의성을 비롯하여 전남 고흥, 남해 등지의 45개 지역이 제한급수를 받고 있으며, 포항, 울산, 부산, 창원, 여수 등지의 공단에 있어서는 공업용수가 부족하여 조업을 단축해야 할 실정이다. 뿐만 아니라 전남지역의 100여개 도서지방을 비롯한 해안지역은 연중 물이 부족한 곳으로 수리시설의 해택을 거의 받지 못하고 빗물을 이용하는 경우가 많다.

우리나라의 1인당 수자원 총량은 세계평균의 1/10에 불과하며, 따라서 현재에도 물이 부족한 나라로 분류되고 있다. 현재 건설중인 다목적댐 6개의 총 저수량은 13억톤 정도로 대청댐 하나의 용량에도 못미치고 있으며, 2000년대에는 물기근 국가로 분류될 전망이다.

수자원 부족은 세계적인 현상이며 인구증가, 산업화, 자연환경의 오염, 기상이변 등으로 이러한 현상은 앞으로 더욱 악화될 전망이다. 91년말 기준, 세계 물 소비량은 지난 50년대 보다 무려 3배나 증가했다고 한다. 또한 2010년까지는 현재 수요량의 50% 정도가 증가할 것이라고 전망하는 기관도 있다.

세계 수자원 분포를 보면 약 97% 정도의 물이 바다에 있으며 나머지 담수의 대부분도 빙산이나 만년설의 형태로 약 2% 정도가 저장되어 있고, 나머지 1% 정도의 담수도 아마존 같은 특정지역에 집중적으로 분포되어 있기 때문에 수자원 이용이 용이하지 않다.

해수는 그 양이 무한정이고 또한 쉽게 접근할 수 있다는 측면에서 볼때 해수의 담수화가 장기적인면에서 수자원 확보의 중요한 역할을 하게 될 것임을 암시한다고 볼 수 있다. 댐 건설비나 상수도 건설비 등은 계속적으로 상승하고 있으나 담수화 기술에 의한 담수 생산비용은 기술발전 등으로 낮아지고 있다.

현재 국내 상수도 요금은 생활용수 및 공업용수를 포함하여 톤당 100원대에서 900원대까지 크게 차별화되어 있으나(그림1 참조), 그 가격이 계속 상승하고 있기 때문에 21세기 초에는 일부의 상수도료는 톤당 1,000원대에 이를 것이 확실시 되고 있다. 담수화 기술에 의한 담수생산비는 현재 톤당 1,000원~1,500원대로 기술 및 시설규모에 따라서 차이를 보이고 있다. 그러나 향후 시스템의 대형화, 하이브리드 시스템과 같은 기술의 발달, 발전설비 및 공장의 폐열활용, 풍력 등의 자연에너지 활용을 통해서 담수생산비용은 21세기 초에는 톤당 1,000원대 이하로 될 것이 예측되고 있다.

따라서 수자원 확보 및 수자원 시설이 어려운 도서지방, 해안지방(특히 공단지역) 발전시설지역 등은 담수화에 의한 용수공급이 경제적인 측면에서 뿐만 아니라 적응성 및 융통성 측면에서 유리할 것으로 예측되고 있다. 댐 건설이나 상수도시설 등은 장기간의 계획이 필요하며, 그 건설비용이 막대할 뿐만 아니라 기술적으로도 댐 및 상수

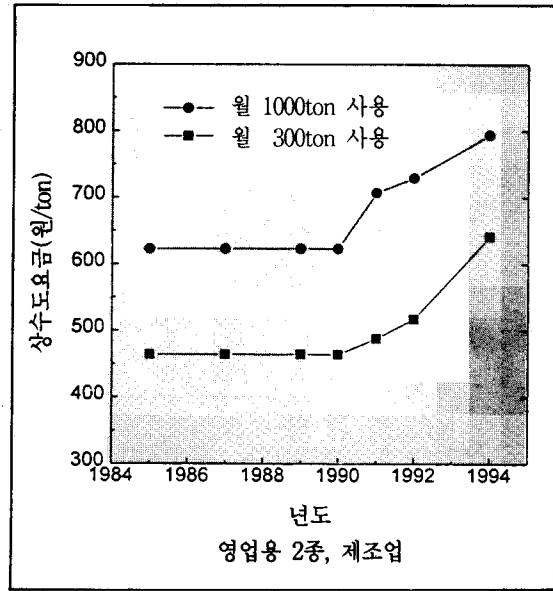


그림 1. 서울시 상수도 요금 변화 추이

도 시설의 입지조건이 제한을 받을 수 있다. 그러나 담수화 설비의 경우 해수를 원수로 사용할 경우 시설의 입지선정이 용이할 뿐만 아니라 제작기간이 짧고 또한 적절한 생산관리를 할 수 있기 때문에 기술적으로는 충분한 장점을 가지고 있다.

2. 담수화 시설 현황

담수화 설비는 기술적으로 볼때 증발법, 막분리법, 냉동법 등이 있으며, 증발법은 다시 플래쉬 증발법(Flash Evaporation)과 다중 효용법(Multi-Effect)로 막분리법은 역삼투막법과 전기막법으로 나누어진다(그림2 참조). 해수담수화의 경우 오래 전 부터 증발법이 많이 사용되고 있으나 역삼투막법도 최근들어 막기술의 발달로 많이 사용되고 있는 추세다.

에너지 측면에서 보면 화석에너지(석유, 가스 등)이용 시스템, 폐열이용 시스템, 전력이용 시스템, 풍력이용 시스템, 태양열이용 시스템, 원자력 이용 시스템 등이 있을 수 있다. 대부분의 증발법은 석유나 가스 등을 연소시켜 에너지를 얻어 증

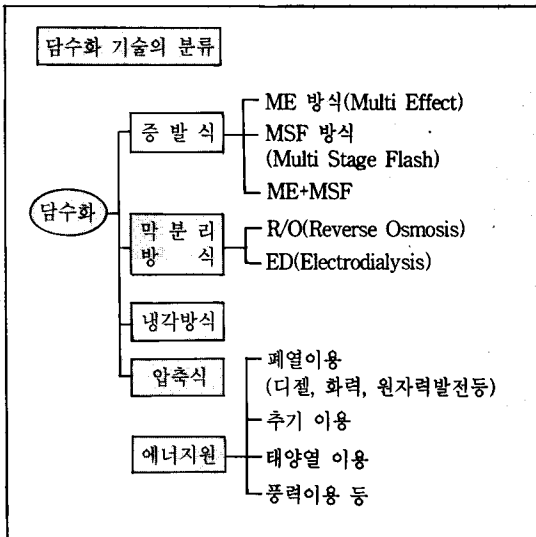


그림 2. 담수화 기술분류

발시키거나 폐열을 동시에 활용하고 있으며, 역삼투막법은 전력을 사용하여 담수를 생산하고 있다. 풍력을 이용하는 기술은 소규모로 실용화되고 있으나 아직 대형 시스템으로 작동되는 예는 없다. 향후 전망되는 시스템으로서 태양열을 활용하는 방법과 원자력을 이용하는 방법이 거론되고 있으며, 현재 이에 대한 집중적인 연구가 진행되고 있는 정도로 실용화되어 있는 시스템은 아직 없다.

그간의 세계 담수화시설 현황을 보면 1일 약 1000만톤의 담수를 생산하고 있으며, 1일 1000톤 이상의 담수를 생산하는 설비만도 약 30여대가 넘게 가동되고 있다. 이것은 연간 약 30억톤의 담수를 생산하는 규모이며 우리나라 대청댐의 2배 이상의 담수량과 같은 양이다(표1 참조). 우리나라와 자연조건이 비슷한 일본의 경우에도 1일 약 10만톤의 담수를 생산하고 있으며(그림3 참조), 이는 우리나라 인천 남동공단의 공업용수의 양과 비슷하고, 광주 하남공단이나 군산 임해공단 규모의 공단 5개 정도의 공업용수를 해결할 수 있는 양과 맞먹고 있다. 국내의 경우 담수생산 용량이 극소하여 정확한 통계자료가 집계되어 있지 않으나, 선박용을 포함하고 1일 수톤을 생산하는 소형 설비를 포함하여 1000여대가 가동되고 있는 것으로 추산된다. 대형선박의 경우 폐열을 활용하는

증발식이 많이 쓰여지고 있으며, 열원이 적당하지 않은 선박은 역삼투막법이 많이 사용되고 있다.

기타 몇곳의 도서지방과 발전설비에 역삼투막법의 담수화 설비가 가동되고 있다.

표 1. 세계 담수화 설비 용량

· 용량별 현황(1000 Ton/day 이상)(용량:톤/일)

용량	용량	%/전체
증발법	5,525,294	75.9%
역삼투압법	1,478,180	20.3%
전기투석법	274,582	3.8%
냉동법	95	-
계	7,278,151	100%

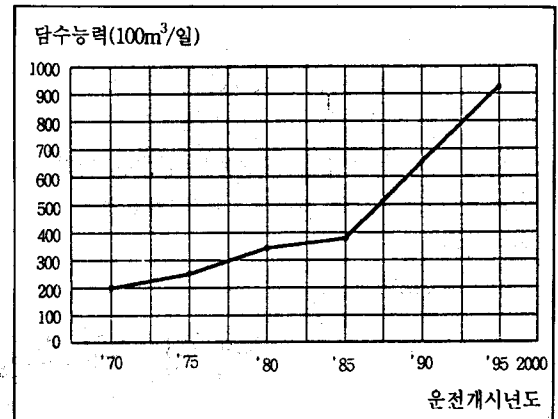


그림 3. 일본의 담수화 능력

3. 담수화 시스템 기술현황

해수담수화 시스템은 증발법, 역삼투막법이 주종을 이루고 있으며, 현재까지 대부분 증발법은 증발법만으로 시스템을 구성하고 역삼투막법은 그 자체만으로 시스템을 구성하여 서로 경쟁적으로 사용하여 오고 있다. 이는 양 시스템이 근본적으로 다른 기술을 가지고 있기 때문에 이에 종사하는 기술자들이 이 두 시스템의 장점을 동시에 불러는 노력이 결여되었기 때문이기도 하다. 그러나 최근들어 담수생산의 경제성이 시스템의 구성에 크게 좌우되기 때문에 여러시스템을 결합하는 복합시스템에 대한 연구가 활발해지고 있다.

우선 디젤엔진을 동력원으로 사용할 경우를 고려해 보면(그림4 참조)

- 폐열만을 활용할 경우 디젤엔진 냉각수 폐열만을 활용하는 방법, 냉각수 폐열과 배기가스 폐열을 동시에 활용하는 방법이 있을 수 있으며, 이때 생성되는 동력은 전력으로 사용하거나 선박의 경우 추진력으로 사용하게 된다.
- 또한 위와같은 폐열을 활용하는 증발법에 의한 담수화 시스템과 이것과 병행하여 엔진에서 생산되는 전력을 사용하는 역삼투막법을 생각할 수 있다.

이 경우에 두 담수화 시스템을 각각 독립적으로 사용하는 것도 물론 가능하나 상호 보완적으로 양 시스템의 하이브리드 시스템을 구성할 수 있다.

이때 역삼투막법의 해수온도(원수온도)의 가열원을 디젤엔진의 폐열로부터 확보하는 것이 가능하다.

위의 디젤엔진을 베이스로하는 경우, 에너지의 최적활용을 위해서 시스템의 구성방법은 여러가지 있을 수 있다. 즉,

- 폐열만을 사용하는 증발법의 경우에도 증발기의 단수를 최적 조정하는 문제와
- 역삼투막 시스템으로 인도하는 폐열의 인출점을 어디에 두느냐에 따라 최적의 에너지 사용을 유도할 수 있다.

이러한 디젤엔진을 동력원으로 할 경우에도 5~6여개의 모델이 있을 수 있으며 이에대한 연구가 진행중이다.

다음에는 연료를 연소시켜 발생된 증기를 직접 활용하는 경우를 생각하면

- 증기를 사용하여 일차적으로 발전을 하고 다음 단계에서 배기되는 증기를 이용하여 증발법으로 담수를 생산하고
- 생산된 전력을 활용하여 역삼투막 시스템을 가동시키는 방법을 고려할 수 있다.

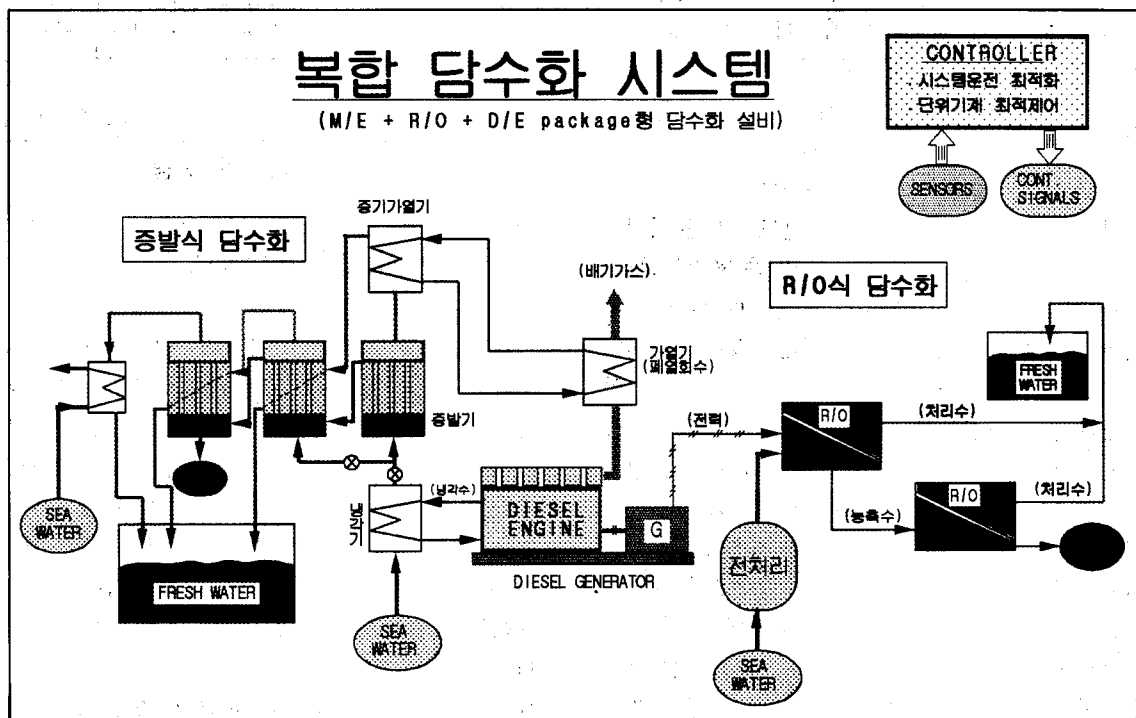


그림 4. 디젤발전시스템을 이용한 증발법과 역삼투막법의 복합시스템

위의 경우에 있어서도 에너지 발란스 문제는 효율의 측면에서 매우 중요하다. 특히 증발법 담수화의 경우 플래쉬(Flash) 방법과 다중효용(ME)방법을 최적상태로 결합시키는 것도 매우 중요하다.

동력원의 다양화 측면에서도 낙도에 담수화를 설치할 경우에는 디젤발전시스템과 풍력발전시스템을 결합하는 방법도 매우 중요하다.

이와같이 이종의 기술을 결합하는 하이브리드 시스템에 대한 기술도 매우 중요하나 담수화 설비의 경제성은 시설규모(Scale Merit)에 따라서 크게 좌우된다. 따라서 대형시스템에 대한 최적설계와 경제성 평가도 중요한 연구대상이 되고 있다. 특히 원자력 설비를 이용한 담수화 기술개발도 한창 연구중에 있으며, 가장 경제성있는 담수발전시스템이 될 것으로 예측하고 있다. 이 경우에 있어서도 에너지의 최적 발란스는 매우 중요하며, 이를 통하여 담수생산량에 따라서 최적생산코스트를 주기위한 시스템 설계가 필요한 바, 이에 대한 연구가 수행되고 있다.

4. 증발식 담수화 기술

증발식 담수화 기술은 해수담수화 기술중 가장 오래된 기술로 가장 널리 사용되고 있으며 대용량 담수설비에도 적용이 가능하다.

이방식의 기본원리는 액체와 증기사이의 상변화를 이용하여 해수로 부터 담수를 분리하는 것이다. 즉 해수를 비등점까지 가열하면 염분을 포함하지 않은 물은 증발하여 증기가 발생하게 되고, 발생된 증기를 응축시킴으로서 담수를 얻는 기술이다. 이때 증발하지 않은 해수의 염도는 증가하게 된다.

역삼투막법과는 달리 해수의 염도가 성능에 중요한 인자는 아니지만 해수의 비등온도에는 영향을 미친다. 증발식 담수화 기술의 가장 큰 영향인자는 해수의 증발잠열로 아주 큰 열량을 가진다. 증발식 담수화공정은 해수의 증발잠열로 인해 상변화에 많은 열에너지를 소비하는 공정이 되고

있다. 따라서 효율향상 및 에너지절약을 위하여 관련된 요소기술 과 시스템 설계기술에 대한 연구가 계속되고 있다. 특히 폐열(화력, 원자력발전 폐열등)을 이용하는 경우 에너지 비용을 크게 절감할수 있어 충분한 경쟁력을 가질수 있다. 또한 폐열 재활용에 의해 발전플랜트에서 발생하는 고온의 냉각수 온도를 낮춤으로서 고온의 냉각수 방류에 의한 해양생태계 파괴 등의 환경오염을 줄이는 효과도 있다. 현재 사용되는 증발식 담수화 기술은 다단후래쉬(MSF)방법, 다중효용방식(ME) 및 증기압축식(VC)을 들수 있으며 각각의 특성 및 증발식 담수기술 성능향상을 위한 요소기술을 간략히 요약하면 다음과 같다.

4.1 증류방식별 특성

4.1.1 다단후래쉬방식(MSF, Multistage Flash Distillation)

현재 가장널리 사용되는 담수화기술 중의 하나로 그림 5는 개략도를 나타낸다. 증발기로 유입된 해수는 차례로 낮은 압력의 챔버를 연속적으로 지나면서 각 챔버에서 차례로 낮은 온도에서 비등하게 되는 원리에 의해 작동한다. 증발기는 단(stage)이라고 불리는 여러개의 챔버로 분리되어 있으며 처음단은 저진공으로 유지되고 차례로 높은 진공도를 유지하도록 되어 있다. 이러한 단(stage)의 역할에 의해 열전달 효율을 증가시키게 된다. 이 기술에서 첫단은 저진공에서 작동하게 되며 차례로 진공도가 증가하여 마지막 단은 고

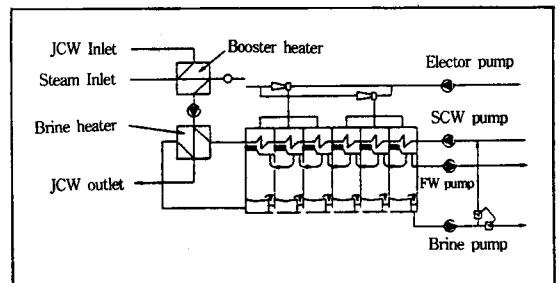


그림 5. 다단후래쉬(MSF) 방식 담수장치

진공에서 작동하므로 단과 단 사이의 압력차와 각단에서 해수가 머무르는 시간을 조절하는 기술이 계속하여 후래쉬를 일으키는 핵심이 된다.

4.1.2 다중효용방식(ME, Multieffect Distillation)

다중효용방식의 증류기술은 전형적인 증류기술 중의 하나로 수평관 및 수직관 증발기를 이용한 기술이 있다. 많은 양의 담수를 생산하는 해수담수화에 처음으로 이용된 증발식 담수화기술로 현재 아주 대용량의 담수화 설비에서는 다단후래쉬 방식에 자리를 내 주었으나 중대형의 경우에는 다중효용방식이 이용되고 있다.(그림 6)

다중효용방식의 담수기술은 여러개의 증발기를 시리즈로 배열하여 첫 번째의 증발기에 보일러에서 발생된 증기로 열을 가하여 해수를 증발시키며, 발생된 증기는 다음 효용의 증발기에서 응축되어 담수가 되고 동시에 가열원으로 작용하여 증발기 내부의 해수를 증발시킨다. 또한 이때 발생된 증기는 다시 다음효용의 증발기에서 가열원으로 작용한다. 이와같은 원리에 의해 다중효용방식은 하나의 증발기를 이용하는 일중효용방식(single effect)에 비해 같은 에너지를 가지고 더 많은 양의 담수를 생산할 수 있다. 즉 초기에 가열원으로 필요한 증기의 질량과 증발기에서 생산되는 담수의 양의 비를 성능계수로 정의 하는 경우 다

중효용방식은 일중효용방식에서 발생하는 폐열을 재 이용하게 되므로 더높은 성능계수를 가지게 된다. 이론적으로 다중효용방식 에서의 성능계수는 효용의 수 즉 증발기의 수에 비례하지만 실제적으로는 여러 요인에 의한 열손실과 각 증발기에서 압력이 감소함에 따라 잠열이 증가하게 되어 연속된 증발기에서 생성되는 증기의 양은 이전 증발기에서 생성된 증기의 양보다 적게된다. 이 기술에서 해수의 증발은 압력강하에 의한 후래싱(flashing)과 가열에 의한 비등(boiling)의 2가지 요인에 의해 일어난다.

4.1.3 증기압축식(Vapor Compression distillation)

다단후래쉬방식과 다중효용방식이 증기에 의한 열에너지를 주로 이용하는데 반하여 증기압축식은 기계적인 에너지를 이용한다. 즉 증기를 압축시키면 온도와 압력이 상승하는 원리를 이용하는 기술이며 단단(single effect) 혹은 다단(multi effect)으로 구성할 수 있다. 해수는 증발관의 외부로 주입되어 증발하게 되며 생성된 증기는 압축기에서 가압된 후 증발관 내부를 지나면서 응축 됨으로서 청수를 생산하게 된다. 이때 증기의 응축열은 관 외부로 흐르는 해수를 증발시키기 위한 에너지로 이용된다.

4.1.4 증발식 담수기술의 요소기술

증발식 담수기술에 필요한 요소기술은 에너지 이용효율을 계속적으로 극대화 하기 위한 기술로 집약되고 있으며 이를 위하여 필요한 기술들을 간략히 요약하면 다음과 같다. 증발관에 관련된 요소기술로는 증발관 유동해석기술, 증발 및 응축 열전달 해석기술, 증발관 내부의 fouling 및 scale 방지 기술을 들수 있다, 증발기에 관련된 요소기술은 내부의 유동 및 온도분포해석, demister에서의 압력강하 특성해석, 내부진공유지 기술, 불응축 가스 제거기술 등이 있으며 이를 이용하여 증발기 최적설계기술 등을 확보하여야 한다. 진공유지

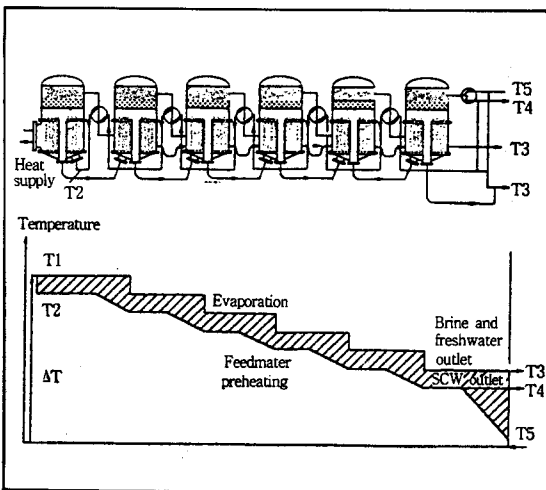


그림 6. 다중효용방식(ME) 담수장치

및 불용축가스 제거 등에 필요한 에젝터와 열압 축기에 관련된 기술로는 혼합부에서의 유동해석 및 부하변동에 따르는 성능특성해석등이 수행되어야 한다. 또한 증발식 담수설비의 증발기는 에너지 절약을 위하여 진공 및 포화온도에서 작동하므로 작동유체를 이송하기 위해 이용되는 펌프는 cavitation을 억제하기 위한 기술을 필요로 한다.

4.2 스케일 방지기술

4.2.1 스케일 방지의 중요성

1962년 Silver는 “증류의 역사는 스케일 형성의 제어에 관한 역사이다” 라고 표현했을 정도로 불결 (fouling)은 증기발생장치의 발전과 밀접한 관련을 갖고 있다. 즉, 운전중의 열교환기는 열전달 표면에 하나 또는 여러종류의 퇴적물로 불결하게 되고, 이 결과 열유동의 통로에 열저항이 증가하면서 열전달률이 감소된다. 따라서 불결로 인한 막대한 경제적 손실을 초래하여 왔다.

Epstein에 따르면 불결은 다음과 같이 분류되고 있으며, 스케일은 무기물이 단단하게 결정화한 것으로서 fouling의 한 종류에 속하는 것이지만 흔히들 fouling과 스케일을 혼용하고 있으며 일반적으로 스케일이라는 말을 많이 사용하고 있기 때문에 여기서도 스케일로 통일하기로 한다.

- ① 스케일링 (scaling) 또는 침전불결 (precipitation fouling)
- ② 입자불결 (particulate reaction fouling)
- ③ 화학반응불결 (chemical reaction fouling)
- ④ 부식불결 (corrosion fouling)
- ⑤ 생물학적불결 (biological fouling)
- ⑥ 응고불결 (solidification fouling)

한편, 스케일로 인한 경제적 손실로는 다음과 같은 것들을 들 수가 있다.

- ① 열적 비효율로 인한 에너지 손실

※ 스케일 두께에 따른 연료 손실을

스케일의 두께(mm)	0.5	1	2	3	4	5	6
연료 손실 (%)	1.2	2.2	4.0	4.7	6.3	6.8	8.2

- ② 스케일 방지목적의 과대한 장치투자
- ③ 열교환기의 주기적인 청소와 관련된 비용
- ④ 청소로 인한 작업중단으로 생산의 손실

4.2.2 스케일 방지기술 현황

보일러에서의 스케일 제어는 1821년 감자전분이 스케일의 침전속도를 감소시킨다는 것이 알려지면서 시작되었으며, 종래에는 플랜트를 정지시킨 후, chipping, drilling, hydrojetting, thermal shock 등의 기계적인 방법을 이용하여 스케일을 제거하거나, 유입해수에 강산(acid)를 첨가하여 수소이온농도를 제어하는 방법 등이 이용되었다. 그 후 스케일의 결정성장을 방지해 주는 첨가제를 사용하는 방법이 개발되었으며, 화학양론적 농도보다 훨씬 적은 정도의 화학약품을 주입하기 때문에 한계치 농도처리(threshold treatment)로 더 잘 알려져 있으며, 1930년대 후반부터 많은 연구가 수행되었다.

비교적 최근에는 tube의 직경보다 약간 큰 sponge ball을 plant에 순환시키는 방법과, lime-magnesium carbonate precipitation process가 1969년도에 보고되었고, ion-selective membrane 법이 1980년에 보고되었으나 이러한 방법들은 실제 적용하는 데는 복잡성과 비효율성 등의 문제점을 안고 있다.

한편, 미세한 유리구슬 같은 particle을 순환시켜서 particle의 표면에 scale이 생성되도록 함으로써 전열표면의 scale 생성을 방지하는 방법이 연구되어 카스피해의 Shevchenko에 있는 multiple effect distillation plant에 성공적으로 적용된 예가 보고되었으며, 1979년도에는 vertical multistage flash evaporator에 적용한 결과가 보고되어 있다. 또한 자석으로 둘러싸인 metal tube 내로 물을 흐

르게 하여 scale이 생성되지 않도록 물의 물리적 성질을 바꾸주는 방법이 제안되었으며, 1980년에 러시아 과학자에 의해 그 mechanism의 규명이 시도된 바 있다.

한편, 최근에는 초음파를 이용하여 스케일을 방지하는 기술이 러시아에서 실용화되어 국내에도 도입되고 있기 때문에, 여기서는 이 기술에 대해서 좀더 서술해 보고자 한다.

4.2.3 초음파를 이용한 스케일 방지기술

① 기술현황

- 본기술은 음향진동(초음파)의 발생방법과 그 근원에 관한 특허 (Australian Pat. AU-AI 70308/8, 1982)에 근거하여 이를 여러 산업분야에 적용하는 방법들 (초음파 절단, 용접, 기계가공, 열교환기 스케일 방지, 유화, 수중 입자의 응집 및 분산, 의료용 수술 및 치료기 등) 중에서 발췌한 것으로 실제 응용 장치는 러시아의 음향 연구소가 설립한 IN-VAC 사가 80년대초에 개발한 것이다. (USSR Pat. 1,189,186, 1,205,383, 1,058,408, 1,075,508)
- 일년내내 보일러를 가동해야 하는 러시아에서는 보일러에 부착된 스케일제거 및 방지를 위해 국가적 차원에서 여러가지 과학적 방법을 연구하던 중 초음파를 이용하는 것이 가장 안전하며 우수하다는 결론을 내리고 80년대초 기기를 완성, 중반 이후부터 러시아 전역에 최초의 기기를 보급하기 시작 하였다.
- 또한 러시아에서는 90년대초 기존기기를 토대로 동 기기의 사용상 나타난 단점을 보완, 개선하여 기존 coil type을 집적회로 type으로 변경 하면서 기기의 중량과 크기를 약 5분의 1로 줄였으며, 고장율과 소비전력이 현저하게 낮아 졌고 설치, 시공성이 용이해졌으며, 특히 초음파 발생기의 내열성과 출력이 획기적으로 개선되어 러시아 전역에 보급 되었다.

② 원리

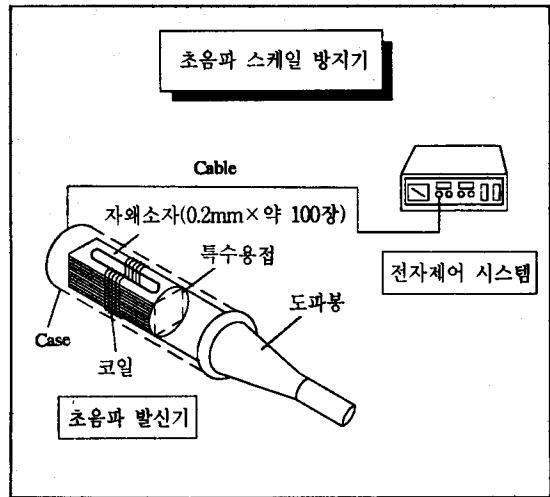


그림 7. 초음파 스케일 방지기

초음파 스케일 방지기는 위의 그림7에서 보는 바와 같이, 초음파를 발생하는 초음파 발생기 (ultrasonic transmitter)와 이를 제어하는 전자제어시스템 (electronic control unit)로 구성된다. 이와같은 초음파 발생기를 보일러 등의 열교환기 동체에 부착하여 작동시키면 초음파 에너지에 의해 스케일이 방지 또는 제거되는 기능을 갖게되며 그 원리는 다음과 같다. 주요과정은

- ① '초기' 입자를 둘러싸고 있는 물속의 굳고 미세한 입자-예를 들어 칼슘탄화물 - 들을 초음파로 분열시켜 더욱 미세한 상태로 만든다.
- ② 스케일 성분이 붙어있는 물속의 공기방울을 초음파로 터뜨려 스케일 성분을 분리시킨다.
- ③ 초음파에 의해 스케일과 관내벽 사이에서 생긴 공기방울이 터져 나오면서 스케일이 관벽에서 떨어져 나오게 한다.
- ④ 초음파로 인한 물의 미세한 유동이 관벽의 가장자리에서 관의 중심방향으로 형성되게 함으로써 스케일이 관벽에 부착되는 것을 막는다.

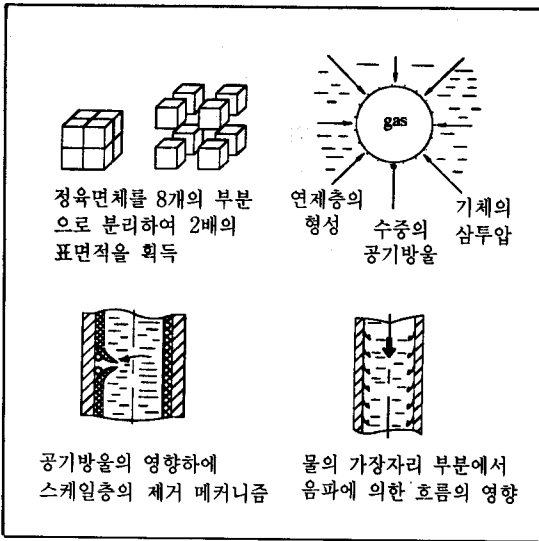


그림 8. 초음파에 의한 스케일 방지 및 제거의 여러유형

5. 역삼투법(RO, Reverse Osmosis)을 이용한 담수기술

용액과 용매를 접촉시키면 열역학적으로 안정된 희박상태를 이루려고 하기 때문에 용매가 반투막을 투과해 용액측으로 이동하려고 한다. 용액측에 적절한 압력을 가함으로써 이 용매의 이동을 막을수 있으며, 이 압력을 바로 삼투압 현상이라고 하고, 역으로 이러한 현상을 이용하여 해수에 압력을 가하여 청수를 만드는 기술이 역삼투막법을 이용한 해수 담수화 기술이다.

이 기술은 증발식 담수화기술과는 달리 해수로부터 담수를 분리하는데 액체와 기체사이의 상변화를 수반하지 않기 때문에 소요 에너지가 적고, 막모듈의 증가에 의해 담수시설 용량을 증가시킬수 있기 때문에 최근들어 많은 관심의 대상이 되고 있다.

역삼투장치에서의 염류 투과량은 농도차에 비례하고 압력차와는 관계가 없으며, 막을 통한 물의 투과량은 압력차에 비례하기 때문에 역삼투막법에 의한 해수 담수장치는 해수측에 작용하는

압력이 높을수록 장치의 효율이 높아진다. 실제 역삼투막법을 이용한 플랜트에서는 해수에 56-80 kg/cm^2 정도의 압력을 연속적으로 가하여서 담수가 제조되고 있으며 동력의 대부분이 압력을 가하는데 이용되는 고압펌프에 소요되고 있다. 최근에는 막모듈에서 배출되는 브라인의 고압에너지를 재활용 하기위해 에너지 회수장치를 설치하는 기술도 개발되고 있다.

5.1 역삼투막 모듈의 구조

역삼투막 모듈의 구조에는 중공 섬유형(hollow fiber type), 두루마리형(spiral wound type), 판형(plate type), 관형(tubular type)의 4종류가 있으며 각각의 구조에 대한 소개를 하면 다음과 같다.

5.1.1 중공섬유형

Du Pont B9, B10과 같은 중공섬유형은 일종의 나일론인 아로마틱 폴리아미드(aromatic polyamide)의 막으로 이루어진 중공섬유로 만들어진다. 이것은 물에 대하여 화학 작용을 일으키지 않으며 내경 35μ , 외경 45μ 이고 넓은 막의 면적을 제공한다. 그림9는 중공섬유막모듈의 구조를 나타내며 섬유소는 수천개를 다발로하여 압력용기내에 내장된다.

이 모듈에서 압력수는 삼투기의 자유단으로부터 각 섬유소의 외피, 즉 투막을 통하여 중공심으로 통과하게 되며 염분과 불순물은 섬유소의 외벽에 머물게 되고 농축액의 출구쪽으로 모이게

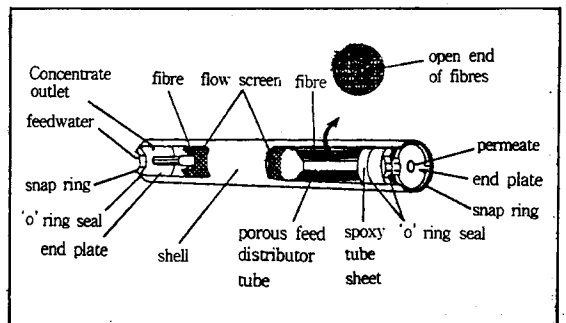


그림 9. 중공섬유막의 구조

되는 데 반하여 탈염된 물은 삼투액 출구에 모이게 된다.

5.1.2 두루마리형

이것은 매우 다공질의 지지층위에 아세틸 셀룰로스 피막을 특별히 처리한 박판을 최소부피로 최대의 표면적을 갖도록 두루마리처럼 말은 것이다. 다공질 지지층은 두 개의 인접한 막층에 끼이게 되고 급수에 의하여 정화된 물이 오염되지 않도록 양 단과 급수측이 밀봉된다. 밀봉된 한 쌍의 막층은 그물로된 그물구조의 성층으로 분리된다. 그림10은 반투막 구성의 상세도 이다. 급수는 그림11과 같이 두루마리형 카드릿지가 내장된 원통용기의 공급단으로 들어가서 축방향으로 흘러서 출구로 나간다.

펌프에 의해 고압으로 공급된 해수는 용기로 들어가서 그물로된 격간형성층을 흐르고 막층의 외부에 염분을 남기면서 막을 통과하여 다공질 지지층으로 밀려간후 다공질 층을 따라 내부로 선회하면서 진행하고 중심부의 집수관을 통하여 용기 출구로 흘러간다.

농축액중의 제거된 고용분은 농축액 출구를 통하여 제거된다. 이 막형상은 고용질과 색소 또는 유기물질이 많아서 오염도가 높은 물에 사용할 수있다. 같은 크기의 중공섬유형과 비교할때 담수의 분리용량은 작지만 스케일이나 오염된 물의 공급상태에 별로 예민하지 않기 때문에 유지관리는 용이한 것으로 알려져 있다.

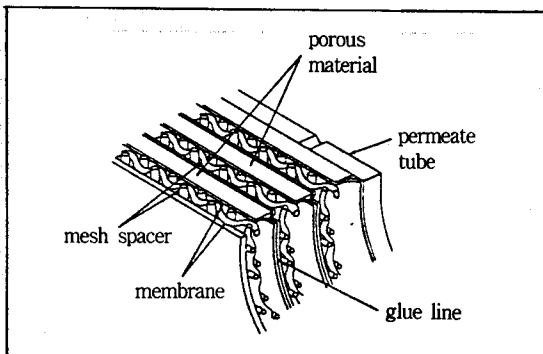


그림 10. 두루마리형 반투막의 구성 상세도

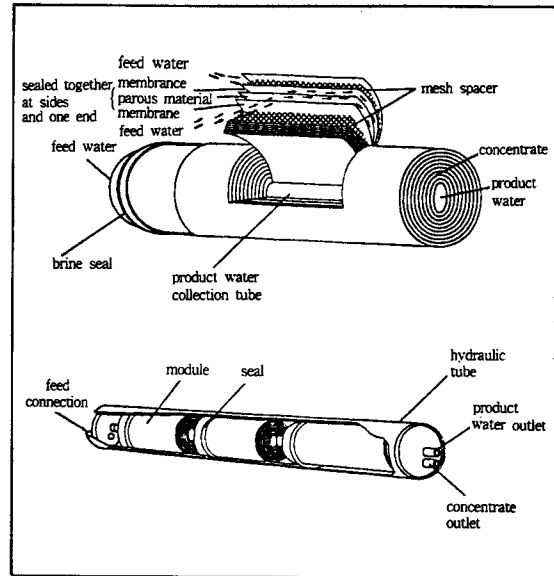


그림 11. 두루마리형 역삼투 모듈

5.1.3 판형

세 번째의 판형으로서 비교적 최근에 나온 것이다.

판형구조이기 때문에 통로가 개방되어 있고 급수는 충분한 난류를 형성하게 된다. 이 모듈은 고용질이 막에 끼이지 않고 따라서 보수유지관리가 좀더 간단하게 된다. 이 모듈에 주입되는 급수는 고용질과 콜로이드상의 고체에 의한 오손 방지, 용해 염분의 침전에 의한 스케일 형성 방지 및 화학물질이나 미생물의 작용을 방지하기 위해 전처리를 하여야 한다. 전처리는 통상의 여과방법을 이용하여 고형분을 제거하며, PH억제제 및 자외선 살균, 염소살균등이 이용된다.

5.1.4 관형

그림12는 관형 역삼투 반투막장치의 구조를 보여주고 있다. 외경 1인치의 동관 내벽에 3층의 나일론 포를 부착하고 이의 내부 표면에 반투막을 시공한 것이다. 또한 동관의 외부에 10분의 1인치 구멍을 군데 군데 가공하여 정화된 물이 빠져나가도록 되어 있다.

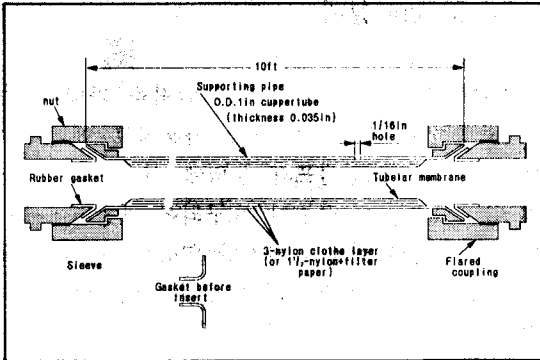


그림 12. 관형 역삼투모듈

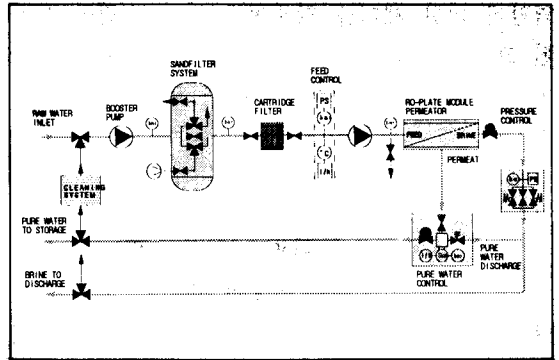


그림 13. 역삼투 담수화장치 계통도

5.2 역삼투식 담수장치

그림13은 역삼투식 담수장치의 계통도를 나타낸다.

공급된 해수는 승압펌프(booster pump), 1차 여과기(sand filter)를 거친다음 2차 여과기(cartridge filter)로 들어간다. 2차 여과기에서 여과된 해수는 급수 조절장치(feed control)를 거쳐서 고압펌프에 의하여 가압되어 역삼투 모듈에 공급된다. 역삼투 모듈에서 분리된 정수는 필요에 따라 탈취, 탈색, pH를 조절, 살균 등의 과정을 거쳐 저장탱크로 보내진다. 이 때의 염도는 525ppm정도이며 WHO의 식료수로서의 최대 기준치는 1500 ppm이다.

해수의 염도와 해수중의 성분 - 특히 0.3~1.0 μm인 응집성 콜로이드 입자와 역삼투 모듈중에서 번식해 입자모양을 띄고 있는 미생물의 농도 - 은 해역마다 상당한 차이가 있다. 따라서 역삼투압을 이용한 해수 담수화플랜트는 그 설치장소의 해수에 대한 정밀한 검토 및 분석을 거쳐 전처리에 대한 충분한 고려를 한후 역삼투 모듈의 선정 및 시스템설계가 이루어져야 한다. 일반적인 전처리는 해수를 염소멸균하여 미생물을 죽이고 응집제를 첨가하여 콜로이드를 응집시켜 용존 염류가 모듈중에서 석출되어 스케일이 생기지 않도록 pH를 조정하며, 모래 여과와 규조토 여과로 입자상 물질을 제거한 후 아황산 나트륨을 첨가하고 잔류 염소를 환원시켜 분해한다. 이후 카트

리지 필터를 통과시켜 미립자를 제거하여 전처리를 완료하며, 전처리된 해수는 가압펌프로 역삼투 모듈에 주입된다.

5.3 막 기술의 문제점

막을 이용한 분리기술은 해수 담수화 장치 뿐만 아니라 폐수처리장치, 식품의 농축장치, 반도체의 제작공정에 이용되는 초순수 생산장치, 의약품의 생산, 빌딩용 폐수의 재활용 분야등 그 이용범위는 열거할 수 없을 정도로 많다.

목적에 따라서 사용되는 막의 종류도 다양하고, 시스템의 구성 또한 요구하는 특성과 목적에 맞도록 다양하게 구성되고 있다.

역삼투막법을 이용한 해수 담수화장치는 막에서의 fouling을 방지하는 것이 아주 중요하며 적절한 전처리로 실트밀도지수(SDI : Silt Density Index 또는 Fouling Index라고도 함)를 3-5이하로 유지할 필요가 있다.

5.3.1 막기능의 저하

fouling에 의한 투과속도 저하와 분획분자량의 변화가 일어나기 쉽다.

해수에 함유되어 있는 성분은 다양하고 광물성의 성분중에는 막의 표면에 달라붙어서 고형분을 형성시키기 때문에 화학적인 처리나, 물리적으로

역압에 의한 세척을 행하여도 막의 표면에 부착된 고형분을 분리하기가 어렵다. 해수중에 포함되어 있는 광물성분 뿐만 아니라 이물질이 흡착층의 형성과 세분의 막힘 현상을 일으켜 용매를 투과시키는데 저항으로 작용하고 또한 분획분자량의 변화를 일으키게 된다.

전처리 과정에서는 SDI를 적게 하기 위한 여러 가지 방법이 시도되고 있으며 막의 기능을 지속적으로 유지시키기 위하여 운전중에 적절한 주기로 염산, 구연산, 암모늄염 또는 세제 등 수질에 적용할 수 있는 세정액으로 역삼투장치의 모듈 내부를 정기적으로 세척하고 있으나 이것만으로 막기능이 저하되는 것을 방지하는 것은 한계가 있다.

5.3.2 위생관리와 보전관리의 어려움

막의 내열성 내약품성의 제약에 따라서 막장치의 내부를 완전히 무균화 하는 것이 어렵다. 최근 한 외여과막 모듈에서는 120°C에서 증기로 살균하는 재질이 개발되었고, 역삼투막에서도 종래의 셀룰로오스 아세테이트 막보다는 확실히 내열성, 내약품성이 강한 막이 개발되어 있어서 이전보다는 이 문제가 상당히 개선되고 있다.

그러나 상온처리를 장시간동안 계속하면 장치 내의 dead space 및 체류구역에서 미생물이 증식하여 썩은 냄새 등에 의해 담수의 품질 저하를 일으킬 수가 있다. 식수의 경우 위생상의 문제점과 청결도는 절대적으로 중요한 요인이기 때문에 필히 고려해야 할 점이다.

5.3.3 농축의 한계

막을 이용한 해수 담수화 장치는 역삼투원리를 이용하고 있다. 그러나 삼투압과 점도의 밀접한 관계 때문에 막처리 기술만으로는 원료를 고농도까지 농축하기가 어렵다. 따라서 증발식 담수장치는 생산된 물의 염도를 거의 없도록 할 수 있으나 역삼투식 담수장치는 생산된 물에 막의 특성 및 해수의 특성에 따라 어느 정도의 염분을 포함하게 된다.

5.4 System 설계

역삼투막법에서는 기계적인 압력을 가해야 하는 특성 때문에 고압펌프가 사용되고 에너지의 대부분은 이 고압펌프의 동력에 사용된다. 이들 펌프는 고양정, 고유량이 요구되어 개발면에서는 막과 비교하면 상당히 늦지만 역삼투막법의 발전과 더불어 급속히 진전되고 있다. 고압펌프의 재질이 부식되면 그에 따른 부식물이 모듈을 오염시켜 막성능저하의 원인이 되기 때문에 재질의 선택은 매우 중요하다. 또한 시스템의 주요 설비로는 원수를 가압시켜주는 고압 펌프와 역삼투모듈(Membrane Module), 그리고 회수율을 조정해 주기 위해 브라인 라인에 설치되는 밸브장치(Control valve)등이 있다. 또한 역삼투모듈 주위에 막을 보호해 주기 위해 압력과 온도측정장치, 급속차단장치(Shut Down Switch) 그리고 회수율 조정을 위한 유량계 등의 설비가 설치된다.

이러한 상황을 고려하여 모듈을 효율적으로 배열하는 방법이 필요하고, 생성수의 수질과 처리수의 회수율을 높이기 위하여는 최적단수(Stage) 선정에 관한 기본적인 실험이 필요하다. 또한 멤브레인 시스템 설계시 element housing, size, element배열, 회수율, 운전압력, 투과유량을 결정해야 한다. 이와 같은 공정설계를 위하여 고유의 초기 입력 데이터를 결정하면 생성수와 브라인의 수질, 해수 공급압력 및 출구압력, 유량, 전처리 요구 등에 관한 결과를 알 수 있도록 시스템에 관련된 소프트웨어의 개발이 요구된다. 이러한 결과를 근거로하여 시스템설계를 최적화 시킬 필요가 있다.

6. 결 언

21세기를 바라보면서 물에 대한 많은 경고가 이어지고 있고 우리나라도 물 부족에 대한 영향을 서서히 피부로 느껴가고 있다.

이제 물은 천연의 혜택만은 아니며, 물의 상당량을 담수화 설비로 만들어 생산해야 되는 공산

품으로 서서히 자리잡아 가고 있다. 따라서 담수화 설비의 기술적인 핵심은 역시 저렴한 담수의 생산, 즉 경제성을 갖기 위한 기술개발에 중점이 될 것이다.

이를 위하여 최적 하이브리드 시스템을 위한

기술개발, 시스템의 대형화를 위한 연구, 증발법의 경우 오염방지기술(Fouling 방지), 전열향상을 위한 유동연구등이 수행되고 있으며, 역삼투막법의 경우에는 전처리 기술과 에너지 재 이용을 위한 요소기술들이 연구되고 있는 실정이다.