



# 담수화 기술현황 및 연구동향

김병덕, 송치성, 박상진<한국기계연구원 산업설비연구부>

## 1. 서 언

### 1.1 물부족 현황

“20세기의 국제간의 분쟁원인이 석유에 있었다면, 21세기의 분쟁은 물부족으로 일어날 것이다.” 1995년 8월에 열린 스웨덴 스톡홀름의 ‘국제 물 심포지움’에서 세계물정책연구소의 샌드러 포스텔소장이 지적한 경고이다. 이 심포지움에서 보고된 바에 의하면 오늘날 80여 국가에서 세계인구의 40%인 20억명이 물부족을 겪고있고 현재의 물소비형태가 계속 된다면 앞으로 30년안에 세계 물기근이 발생할 것이라고 지적하고 있다. 또한, 미국의 지구물정책계획(GWPP)에서는 현재 국제적으로 물부족을 겪고있는 대표적인 예로서 요르단강을 둘러싼 이스라엘-요르단-레바논-시리아 간의 분쟁, 시리아-이라크-터키를 흐르는 티그리스강 분쟁 및 수단-이집트-우간다를 흐르는 나일강 분쟁, 인도-방글라데시의 갠지스강 분쟁 등을 들 수 있다. 또한 이스라엘과 팔레스타인 사이의 자치협상도 수자원배분이 가장 큰 난제가 되고 있다.

우리나라의 경우에 있어서도 물이 부족한 것은 마찬가지이다. '94년말 현재 수자원 예비율은 7%이지만 2000년에 들어서면은 2%로 떨어질 전망이다 매년 가뭄으로 고통을 겪고 있으며 3월 현재에도 약 78만명이나 간헐적으로 식수공급을 받고있는 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 될 실정이다. 뿐만 아

니라 전남지역의 100여개 도서지방을 비롯한 해안 지역은 연중 물이 부족한 곳으로 수리시설의 혜택을 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.

### 1.2 국내 물값 상승추세

현재 국내 상수도 값은 생활용수 및 공업용수를 포함하여 톤당 100원 대에서 900원대 까지 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 공장 폐열활용, 풍력 등의 자연에너지 활용을 통해서 담수생산비용은 21세기 초에는 톤당 1,000원대

이하로 될 것이 예측되고 있다.

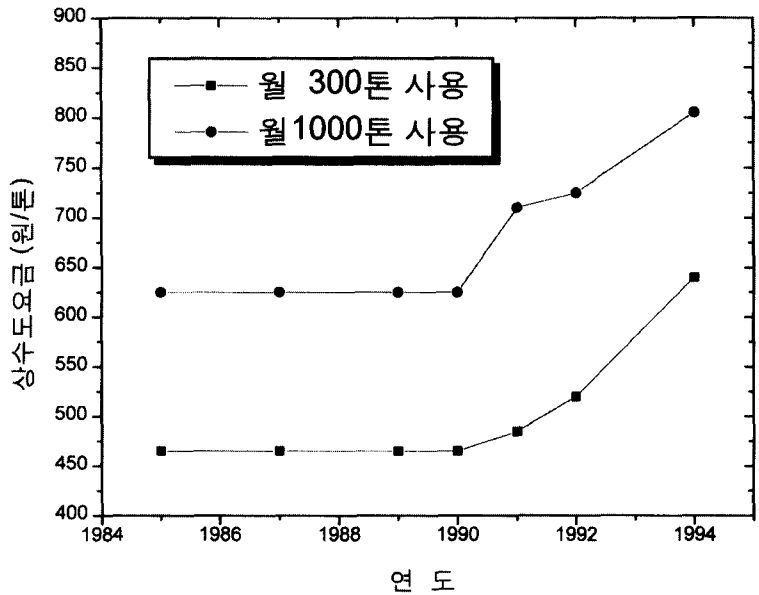
### 1.3 담수화 기술도입의 필요성

우리나라의 경우, 수자원 확보는 댐건설에 의존해오고 있다. 그러나 종래의 댐건설에는 많은 문제점이 있다. 우선 천문학적인 비용이 소요된다. 우리나라에 있어서 지난 20년 사이 댐건설비는 93배가 늘어났다고 한다. 또한 댐을 건설하는데 10년 가까운 시간이 소요되며, 댐건설에 따른 환경문제, 지역간의 갈등 등으로 댐의 건설이 경제적인 측면에서 뿐만 아니라 사회여건상 용이하지 못하다.

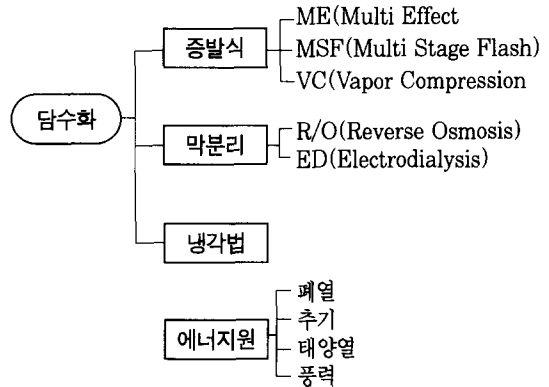
이에 반하여 담수화의 경우 보다 용이하게 설비를 갖출 수 있다. 우선 건설기간이 짧고 건설비도 저렴할 뿐 아니라 환경문제를 최소화 할 수 있고 설치장소가 해안이나 근해가 된다는 점에서 지역간의 갈등이나 지역주민의 저항을 줄일 수 있다. 또한, 해수는 그 양이 무한하고 또 쉽게 접근할 수 있다는 국내 여건을 고려할 때에도 해수 담수화가 장기적인 측면에서 수자원 확보의 중요한 수단이 될 것임을 암시한다고 볼 수 있다. 따라서 수자원 확보 및 수자원 시설이 어려운 도서지방, 해안지방(특히 공단지역) 발전시설지역 등은 담수화에 의한 용수공급이 경제적인 측면에서 뿐만 아니라 적응성 및 융통성 측면에서 유리할 것으로 예측하고 있다.

## 2. 담수화 시설 현황

담수화 설비는 기술적으로 볼때 증발법, 막분리법, 냉동법 등이 있으며, 증발법은 다시 플래쉬 증발법(Flash Evaporation)과 다중효용법(Multi-Effect)으로 막분리법은 역삼투막법과 전기막법으로 나누어진다(그림2 참조). 해수담수화의 경우 오래전부터 증발법이 많이 사용되고 있으나 역삼투막법도



〈그림1〉 서울시 상수도요금 변화추이



〈그림 2〉 담수화 기술분류

최근들어 막기술의 발달로 많이 사용되고 있는 추세다.

에너지 측면에서 보면 화석에너지(석유, 가스 등) 이용 시스템, 폐열이용 시스템, 전력이용 시스템, 풍력이용 시스템, 태양열이용 시스템, 원자력이용 시스템 등이 있을 수 있다. 대부분의 증발법은 석유나 가스 등을 연소시켜 에너지를 얻어 증발시키거나 폐열을 동시에 활용하고 있으며, 역삼투막법은 전력을 사용하여 담수를 생산하고 있다. 풍력을 이용하는 기술은 소규모로 실용화되고 있으나 아직 대형 시스템



템으로 작동되는 예는 없다. 향후 전망되는 시스템으로서 태양열을 활용하는 방법과 원자력을 이용하는 방법이 거론되고 있으며, 현재 이에대한 집중적인 연구가 진행되고 있는 정도로 실용화되어 있는 시스템은 아직 없다.

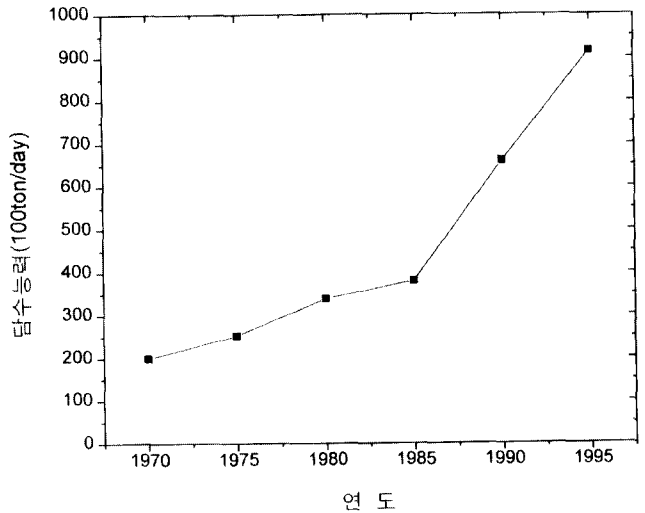
그간의 세계 담수화시설 현황을 보면 1일 약 1000만톤의 담수를 생산하고 있으며, 1일 1000톤 이상의 담수를 생산하는 설비만 도 약 30여대가 넘게 가동되고 있다. 이것은 연간 약 30억톤의 담수를 생산하는 규모이며 우리나라 대청댐의 2배 이상의 담수량과 같은 양이다(표1 참조). 우리나라와 자연조건이 비슷한 일본의 경우에도 1일 약 10만톤의 담수를 생산하고 있으며(그림3 참조), 이는 우리나라 인천 남동공단단의 공업용수의 양과 비슷하며, 광주 하남공단이나 군산 임해공단 규모의 공단 5개 정도의 공업용수를 해결할 수 있는 양과 맞먹고 있다. 국내의 경우 담수생산 용량이 극소하여 정확한 통계자료가 집계되어 있지 않으나, 선박용을 포함하고 1일 수톤을 생산하는 소형설비를 포함하여 1000여대가 가동되고 있는 것으로 추산된다. 대형 선박의 경우 폐열을 활용하는 증발식이 많이 쓰여지고 있으며, 열원이 적당하지 않은 선박은 역삼투막법이 많이 사용되고 있다. 기타 몇곳의 도서지방과 발전설비에 역삼투막법의 담수화 설비가 가동되고 있다.

### 3. 담수화 시스템 기술현황

해수담수화 시스템은 증발법, 역삼투막법이 주종

〈표 1〉 세계 담수화 설비용량(용량별 현황-1000ton/day)

|       | 용 량 (ton/day) | 점 유 율 |
|-------|---------------|-------|
| 증 발 법 | 5,525,294     | 75.9% |
| 역삼투압법 | 1,478,180     | 20.3% |
| 전기투석법 | 274,582       | 3.8%  |
| 냉 동 법 | 95            | -     |
| 계     | 7,278,151     | 100%  |



〈그림 3〉 일본의 담수화 능력

을 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.

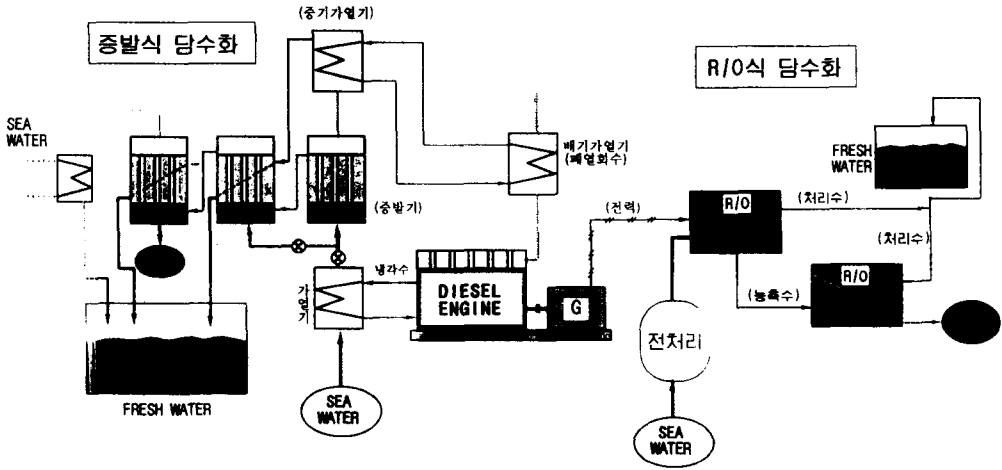
- 또한 위와같은 폐열을 활용하는 증발법에 의한 담수화 시스템과 이것과 병행하여 엔진에서 생산되는 전력을 사용하는 역삼투막법을 생각할 수 있다.

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

이때 역삼투막법의 해수온도(원수온도)의 가열원

# 복합 담수화 시스템

(M/E + R/O + D/E package형 담수화 설비)



〈그림 4〉 디젤발전시스템을 이용한 증발법과 역삼투막법의 복합시스템

을 디젤엔진의 폐열로부터 확보하는 것이 가능하다.

위의 디젤엔진을 베이스로 하는 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 가

동시키는 방법을 고려할 수 있다.

위의 경우에 있어서도 에너지 발란스 문제는 효율의 측면에서 매우 중요하다. 특히 증발법 담수화의 경우 플래쉬(Flash) 방법과 다중효용방법(ME)를 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 한참 연구중에 있으며, 가장 경제성있는 담수발전시스템이 될 것으로 예측하고 있다. 이 경우에 있어서도 에너지의 최적 발란스는 매우 중요하며, 이를 통하여 담수생산량에 따라서 최적생산 코스트를 주기위한 시스템 설계가 필요한 바, 이에대한 연구가 수행되고 있다.



#### 4. 증발식(distillation) 담수화 기술

증발현상을 이용한 담수화 기술은 해수담수화 기술중 가장 오래된 기술로 가장 널리 사용되고 있으며 특히 대용량 담수설비에 경제성 및 강점을 가지고 있다.

이방식의 기본원리는 용액을 증발시킬때 용매만 증발하고 용질은 잔류하는 성질을 이용하여 해수로부터 담수를 분리하는 것이다. 즉 해수를 고온 열원으로 비등점까지 가열하면 용매인 물은 증발하여 수증기가 되고, 발생된 증기를 다시 저온 열원을 이용하여 응축시킴으로서 담수를 얻는 기술이다. 이때 증발하지 않은 해수의 염도는 염분의 잔류로 인하여 증가하게 된다.

해수의 염도가 비등온도에 약간의 영향을 끼치기는 하지만 포화 온도-압력은 대략적으로 순수와 비슷한데, 비등점은 압력에 의해 결정되므로 압력을 대기압이하로 낮추어 주면 비등점이 낮아지므로 상대적으로 낮은 온도의 열원을 고온열원으로 이용할 수 있는 이점이 있다. 증발식 담수화 기술에서는 액상에서 기상으로의 상변화를 이용하기 때문에 현열에 비하여 매우 큰(500배 이상) 증발잠열이 매우 중요한 영향인자로 작용한다. 결과적으로 담수를 만드는데 필요한 에너지는 대부분 해수를 비등시키는 열에너지가 되고 따라서 효율향상 및 에너지절약을 위해서는 얼마나 저렴한 열원으로부터 열을 공급받아 얼마나 효과적으로 이용하느냐 하는 것이 매우 중요하다. 이런 이유로 이와 관련된 요소기술과 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. 또 앞서 언급한 바와 같이 감압등을 이용하여 보다 저온의 열원에 의하여 작동하는 담수화 장치에 대한 연구도 활발하게 진행되고 있다. 현재 사용되는 증발식 담수화기술은 그 방법에 따라 크게 다중효용방식(ME), 다단후래쉬(MSF)

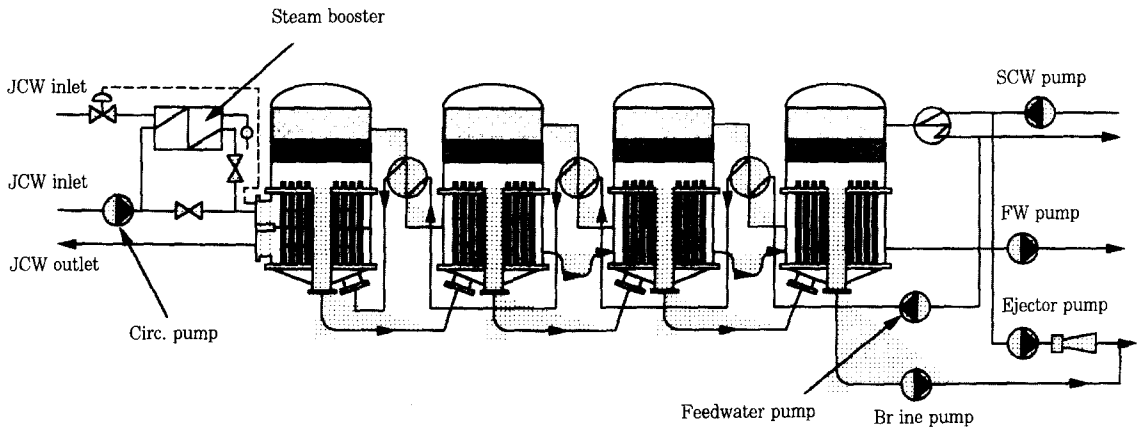
방법 및 증기압축식(VC)의 세가지 방식으로 나눌 수 있으며, 각각의 특성 및 증발식 담수기술 성능향상을 위한 요소기술을 간략히 요약하면 다음과 같다.

##### 4.1 증류방식별 특성

1) 다중효용방식(ME, Multi-Effect Distillation)

다중효용방식의 증류기술은 증발식 담수화 장치의 가장 단순한 형태인 해수를 증발기에서 가열하여 다시 응축기에서 응축하는 단순 증류기(simple distiller)가 발전한 형태로 그림 5에서와 같이 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 일중효용방식에 비해 같은 에너지를 가지고 더 많은 양의 담수를 생산할 수 있다. 즉 초기에 가열원으로 필요한 증기의 질량과 증발기에서 생산되는 담수의 양의 비를 성능계수로 정의하는 경우 다중효용방식은 단순 증류기에서 버려지는 폐열을 재이용하게 되므로 더높은 성능계수를 가지게 된다. 이 때 각 효용 증발기 내의 압력을 차례로 낮게 유지하여 효용이 진행됨에 따라 더 낮은 온도에서 비등이 일어나도록 해주어야 한다. 다중효용방식은 초기의 단순 증류기가 선풍용 조수기와 같이 비용에 관계없이 소량의 담수를 만드는데 주로 사용되었던 한계에서 벗어나 많은 양의 담수를 생산하는 본격적인 해수담수화에 처음으로 이용된 증발식 담수화기술로 현재 아주 대용량의 담수화에는 다단후래쉬 방식에 자리를 내주었으나 중대형의 경우에는 아직까지 다중효용방식이 많이 이용되고 있다.

이론적으로 효용(증발기의 수)이 많을수록 같은 열에너지로 더욱 많은 양의 담수를 만들 수 있으나 각 효용에서 어느 정도의 온도차를 유지하여야 하고 증발기가 늘어 날수록 초기 투자비가 증가하므로 일



〈그림 5〉 다중효용(ME) 담수장치

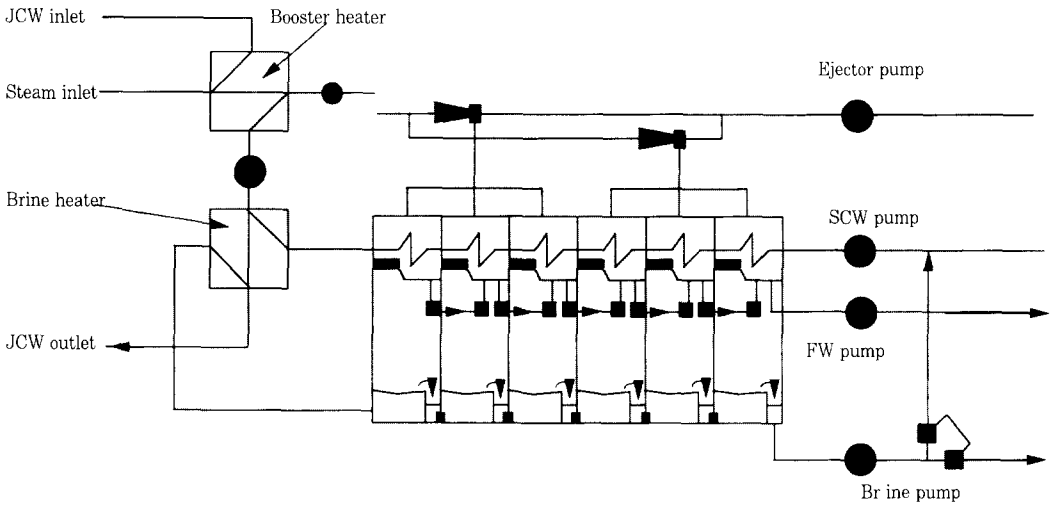
반적으로 8-14효용정도가 많이 사용되고 있다. 다중효용방식의 성능계수는 효용의 수와 고온의 열원(증기)과 저온열원(해수)의 온도차에 의하여 주로 결정되지만 실제적으로는 증발기 내의 열교환 특성이나 증발 방식 등에 의하여 영향을 받는다. 특히 열교환기의 형태와 해수의 주입 방법에 의하여 증발기의 열전달 특성이 매우 다른 양상을 보이는데, 열교환기의 형태에 따라 ST(submerged tube design), VTE(vertical tube evaporator design), LTV(long tube vertical design)으로 분류할 수 있고 다시 해수의 주입방법에 따라 상향식(하부주입)과 하향식(상부주입) 증발기로 나눌 수 있다. 예전에는 열전달 성능은 떨어지지만 운전의 안정성이 좋은 ST방식의 증발기가 많이 사용되었으나 현재는 열전달 성능이 탁월한 하향식의 VTE 또는 LTV가 주로 사용되고 있다.

## 2) 다단후래쉬방식(MSF, Multiple-stage Flash Distillation)

다단후래쉬방식은 현재 가장 널리 사용되는 담수화기술 중의 하나로 그 개략도는 그림 6과 같다. 해수를 고온의 열원으로 증발시킨 후 다시 응축하여 담수를 얻는 방법은 일반적인 다중효용방식과 동일하지만, 가장 큰 차이점은 다중효용방식이 열교환기 내에서 증발이 일어나는데 비해 다단후래쉬방식에

서는 상대적으로 고압의 열교환기내에서 가열된 해수가 오리피스(orifice)를 통해 저압의 챔버로 분출되면서 증발이 일어나게 된다. 증발이 되지 않은 해수는 다시 압력이 더욱 낮은 다음 단(stage)의 챔버로 후래쉬되고 증발된 수증기는 온도가 낮은 유입해수에 의하여 응축된다. 다단후래쉬방식의 장점은 증발이 열교환기내에서 일어나지 않기 때문에 증발식에서 가장 큰 문제인 열교환기 내에서의 파울링(fouling)이 다중효용방식에 비하여 비교적 적다는 것이다. 또 다중효용방식에 비하여 단수를 증가시키기 용이하므로 더 고효율의 장치를 만들 수 있다. 실제로 다단후래쉬방식의 경우 20단 이상으로 설계되는 경우가 많아지고 있다. 이 기술에서 첫단은 저진공에서 작동하게 되며 차례로 진공도가 증가하여 마지막 단은 고진공에서 작동하므로 단과 단 사이의 압력차와 각 단에서 해수가 머무르는 시간을 조절하는 기술이 연속적으로 후래쉬를 일으키는 핵심기술이다. 다단후래쉬방식은 브라인의 진행방향과 유입해수의 진행방향에 따라 순진행방식과 역진행방식으로 나눌 수 있고 기존의 다단후래쉬방식에 열회수 개념을 가미한 증기재열방식(vapor-reheat flash evaporation process)등의 변형도 사용되고 있다.

## 3) 증기압축식(Vapor Compression distillation)



〈그림 6〉 다단후래쉬(MSF) 방식 담수장치

다단후래쉬방식과 다중효용방식이 증기 또는 고온의 열원에 의한 열에너지를 주로 이용하는데 반하여 증기압축식은 기계적인 에너지를 이용하여 증기를 발생시켜 해수를 담수화 하는 방식이다. 증발기에서 발생한 증기를 압축기로 압축시키면 온도와 압력이 상승하게 되는데 이를 다시 증발기의 고온열원으로 사용하여 담수를 생산하는 장치이다. 압축된 증기는 증발기에서 응축되고 이후에 열회수기를 통과하면서 증발기로 들어가는 해수에 그 현열을 전달한다. 이방식은 압축기를 소형엔진으로 구동시키고 그 폐열을 활용하는 경우 연료 1kg으로 200kg 이상의 담수를 생산할 수 있는 것으로 알려져있고 주로 소용량의 담수장치에 강점을 가지고 있다. 특히 운반이 가능한 이동식 담수화 장치로 많이 제작되어 사용되고 있다. 최근에는 다단압축방식을 이용하거나 또는 ME, MSF 등의 장치와의 복합시스템을 이용하여 중대형 담수장치로의 활용이 활발하게 모색되고 있다. 증기압축식의 경우 증기를 압축하는 압축기의 설계 및 제작이 매우 중요한 요소이다. 압축비는 1.2~1.4 정도이고 이때 약 3~6°C의 온도상승을 수반한다.

#### 4) 증발식 담수기술의 요소기술

증발식 담수기술에 필요한 요소기술은 에너지 이

용효율을 계속적으로 극대화 하기위한 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 scale방지 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 및 불응축가스 제거 등에 필요한 에젝터와 열압축기에 관련된 기술로는 혼합부에서의 유동해석 및 부하변동에 따르는 성능특성해석등이 수행되어야 한다. 또한 증발식 담수설비의 증발기는 에너지 절약을 위하여 진공 및 포화 온도에서 작동하므로 작동유체를 이송하기위해 이용되는 펌프는 cavitation을 억제하기 위한 기술은 필요로 한다.

#### 4.2 스케일 방지기술

##### 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 열전달표면에 하나 또는 여러종류의 퇴적물로 불결하게되고, 이 결과 열유동의 통로에 열저항이 증가하면 열전달률이 감소된다. 따라서 불결로 인한 막대한 경제적 손실을 초래하여 왔다.

Epstein에 따르면 불결(Fouling)은 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

## 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. 그후 스케일

의 결정성장을 방지해 주는 첨가제를 사용하는 방법이 개발되었으며, 화학양론적 농도보다 훨씬 적은 정도의 화학약품을 주입하기때문에 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 복잡함과 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 흐르게 하여 scale이 생성되지 않도록 물의 물리적 성질을 바꿔주는 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.

## 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, 수증입자의 응집 및 분산, 의료용 수술 및 치료기 등) 중에서 발체한 것으로 실제 응용 장치는 러시아의 음향 연구소가 설립한 INVAC 사가 80년대초에 개발한 것이다.





(USSR Pat. 1,189,186, 1,205,383, 1,058,408, 1,075,508)

- 일년내내 보일러를 가동해야하는 러시아에서는 보일러에 부착된 스케일제거 및 방지를 위해 국가적 차원에서 여러가지 과학적 방법을 연구하던중 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 동기기의 사용상 나타난 단점을 보완, 개선하여 기존 Coil Type을 집적회로 Type으로 변경 하면서 기기의 중량과 크기를 약 5분의 1로 줄였으며, 고장율과 소비전력이 현저하게 낮아졌고 설치, 시공성이 용이해졌으며, 특히 변환기의 내열성과 파장, 출력이 획기적으로 개선되어 러시아 전역에 보급되었다.

## ② 원리

초음파 스케일 방지기는 <그림 7>에서 보는 바와 같이, 초음파를 발생하는 초음파 발신기 (ultrasonic transmitter)와 이를 제어하는 전자제어시스템 (electronic control unit)로 구성된다. 이와같은 초음파 발신기를 보일러 등의 열교환기 동체에 부착하여 작동시키면 초음파 에너지에 의해 스케일이 방지 또는 제거되는 기능을 갖게되며 그 원리는 다음과 같다. 주요과정은

㉠ '초기' 입자를 둘러싸고 있는 물속의 굳고 미세한 입자-예를 들어 칼슘탄화물 - 들을 초음파로

분열시켜 더욱 미세한 상태로 만든다.

㉡ 초음파 성분이 붙어있는 물속의 공기방울을 초음파로 터뜨려 스케일 성분을 분리시킨다.

㉢ 초음파로 인해 스케일과 관내벽 사이에서 생긴 공기방울이 터져 나오면서 스케일이 관벽에서 떨어져 나오게 한다.

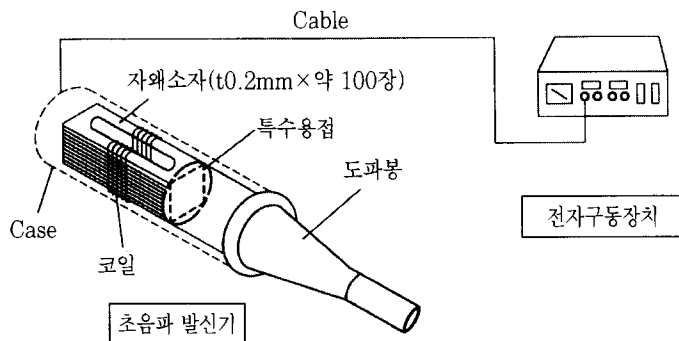
㉣ 초음파로 인한 물의 미세한 유동이 관벽의 가장자리에서 판의 중심방향으로 형성되게 함으로써 스케일이 관벽에 부착되는 것을 막는다.

## 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 담수시설용량을 증가 시킬수 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<sup>2</sup> 정도의 압력을 연속적으로 가하여서 담수가 제조되고 있으며 동력의 대부분이 압력을 가하는데 이용되는 고압펌프에 소요되고 있으며, 최근에는 막모듈에서 배출되는 브라인의 고압에너지를 재활용 하기위해 에너지



<그림 7> 초음파 스케일 방지기

회수장치를 설치하는 기술도 개발되고 있다.

의 삼투압, 막의 눈막힘 및 막에의 흡착등이 일어난다.

### 5.1 분리막의 종류

분리막은 구동력, 분리원리, 응용분야 등에 따라서 표2와 같이 분류할수 있다.

역삼투막은 해수의 담수화를 목적으로 개발되었지만 에너지 절약 및 새로운 막 재질의 개발과 분리공정의 개발로 희박한 유기용질의 농축에까지 응용되고 있다.

한외 여과막은 고분자량의 용질을 대상으로 이용되고 있으나 한외여과공정의 중요한 문제점은 투과유속이 압력에 비례하지 않고 일정하여 한계유속이 존재하는 점이다. 이는 막표면에 Gel층의 형성, 용질

### 5.2 역삼투막 모듈의 구조

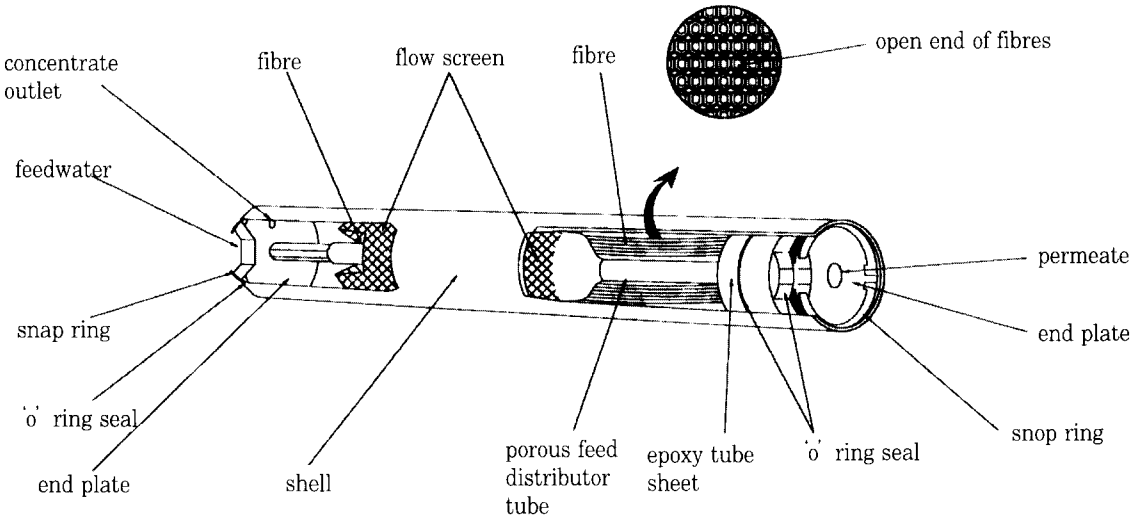
역삼투막 모듈의 구조에는 중공 섬유형(hollow fiber type), 두루마리형(spiral wound type), 판형(plate type), 관형(tubular type)의 4종류가 있으며 각각의 구조에 대한 소개를 하면 다음과 같다.

#### 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 않

〈표 2〉 막분리 기술의 특성

| 분리방법 | 막 형태   | 구 동 력                  | 분 리 원 리                         | 적 용 분 야  |
|------|--|------------------------|---------------------------------|--|
| 정밀여과 | 대칭형 다공성 막<br>(pore size 0.1-10 $\mu$ m)                | 정수압 차<br>(0.1 - 1bar)  | pore size 및<br>흡착현상에<br>기인한 체결름 | · 전자공업의 超純水 제조<br>· 무균수 제조<br>· 식품의 무균여과   |
| 한외여과 | 비대칭 다공성 막<br>pore size skin층<br>support층1-10 $\mu$ m   | 정수압 차<br>(0.5 - 1bar)  | 체결름<br>(Sieving)                | · 전자공업의 초순수제조<br>· 유수 혼합물의 분리<br>· 도료 페인트 회수, 효소 농축<br>· 혈장 단백질분리<br>· 섬유제지공업의 폐수처리        |
| 역삼투  | 비대칭성 Skin형膜<br>Skin층: 균일막<br>pore size : Å             | 정수압 차<br>(20 - 100bar) | 용해, 확산                          | · 海水, 工業用水의 脫鹽<br>· 액체식품의 탈수<br>· 전기 도금공업의 脫 이온수<br>· 화학, 약품공업의 무균, 탈이온수,<br>농축, 폐수처리, 재이용 |
| 투석   | 비대칭성 다공성 막(균일팽<br>윤막, pore size :<br>0.1 - 10 $\mu$ m) | 농도 차                   | 대류가 없는<br>층에서의 확산               | · 인공신장 및 의료공업<br>· 화학, 식품, 약품공업에서의<br>고분자와 저분자의 분리   |
| 기체분리 | 균일, 다공성 막  | 정수압 차<br>농도 차          | 용해, 확산<br>확 산                   | · 공업용, 의료용 산소부화<br>· 메탄-이산화탄소 분리<br>· 천연가스에서의 수소회수<br>· 공기중의 질소농축<br>· 핵공업의 희소가스 회수        |
| 투과증발 | 균일계 막  | 농도 차                   | 용해, 확산                          | · 에탄올의 탈수<br>· 공비 혼합물의 탈수  |
| 전기투석 | 양이온, 음이온 교환막   | 전위차                    | 입자의 전하, 크기                      | · 염수의 탈염<br>· 알칼리 제조, 공업용수의 연화,<br>도금공정의 중금속회수, 약품,<br>제당 공업의 탈이온화, 폐수처리                   |



〈그림 8〉 중공섬유막의 구조

으며 내경 35, 외경 45 이고 넓은 막의 면적을 제공한다. 그림 8은 중공섬유막모듈의 구조를 나타내며 섬유소는 수천개를 다발로하여 압력용기내에 내장된다.

이 모듈에서 압력수는 삼투기의 자유단으로부터 각 섬유소의 외피, 즉 투막을 통하여 중심공으로 통과하게 되며 염분과 불순물은 섬유소의 외벽에 머물게 되고 농축액의 출구쪽으로 모이게 되는데 반하여 탈염된 물은 삼투액 출구에 모이게 된다.

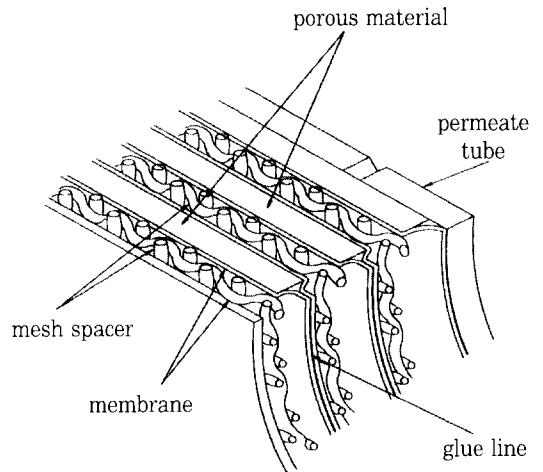
## 2) 두루마리형

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 급수층이 밀봉된다. 밀봉된 한 쌍의 막층은 그물로된 그물구조의 성층으로 분리된다. 그림 9는 반투막 구성의 상세도이다. 급수는 그림 10과 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 수 있다. 같은 크기의 중공섬유형과 비교할때 담수의 분리용량은 작지만 스케일이나 오염된 물의 공급상태에 별로 예민하지 않기 때문에 유지관리는 용이한 것으로 알려져 있다.



〈그림 9〉 두루마리형 반투막의 구성 상세도

### 3) 판형

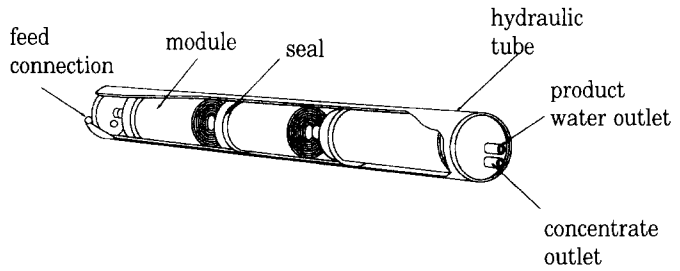
세 번째의 판형으로서 비교적 최근에 나온 것이다. 판형구조이기 때문에 통로가 개방되어있고 공급수는 충분한 난류를 형성하게 된다. 이모듈은 고용질이 막에 끼이지 않고 따라서 보수유지관리가 좀더 간단하게 된다. 이모듈에 주입되는 공급수는 고용질과 콜로이드상의 고체에 의한 오손 방지, 용해 염분의 침전에 의한 스케일 형성 방지 및 화학물질이나 미생물의 작용을 방지하기 위해 전처리를 하여야 한다. 전처리는 통상의 여과 방법을 이용하여 고형분을 제거하며, pH억제제 및 자외선 살균, 염소살균등이 이용된다.

### 4) 관형

그림11은 관형 역삼투 반투막장치의 구조를 보여주고 있다. 외경 1인치의 동관 내벽에 3층의 나일론포를 부착하고 이의 내부 표면에 반투막을 시공한 것이다. 또한 동관의 외부에 10분의 1인치 구멍을 균등군데 가공하여 정화된 물이 빠져나가도록 되어 있다.

### 5.3 역삼투식 담수장치

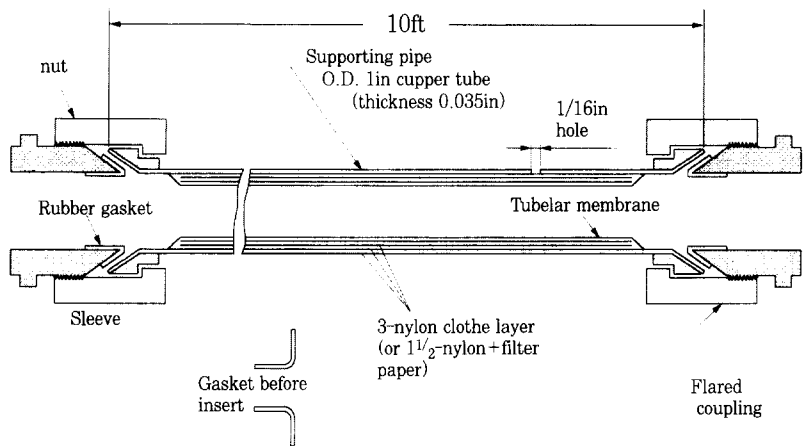
그림12는 역삼투식 담수장치의 계통도를 나타낸다. 공급된 해수는 승압펌프(booster pump), 1차 여과기(sand filter)를 거친다음 2차여과기(cartridge filter)로 들어간다. 2차여과기에서 여과된 해수는 급수 조절장치(feed control)을 거쳐서 고압펌프에 의하여 가압되어 역삼투 모듈에 공급된다. 역삼투 모듈에서 부리된 정수는 필요에 따라 탈취, 탈색, pH를 조절, 살균 등의 과정을 거쳐 저장탱크로 보내진다. 이때의 염도는 525ppm 정도이며 WHO의 식료수로서의 최대 기준치는



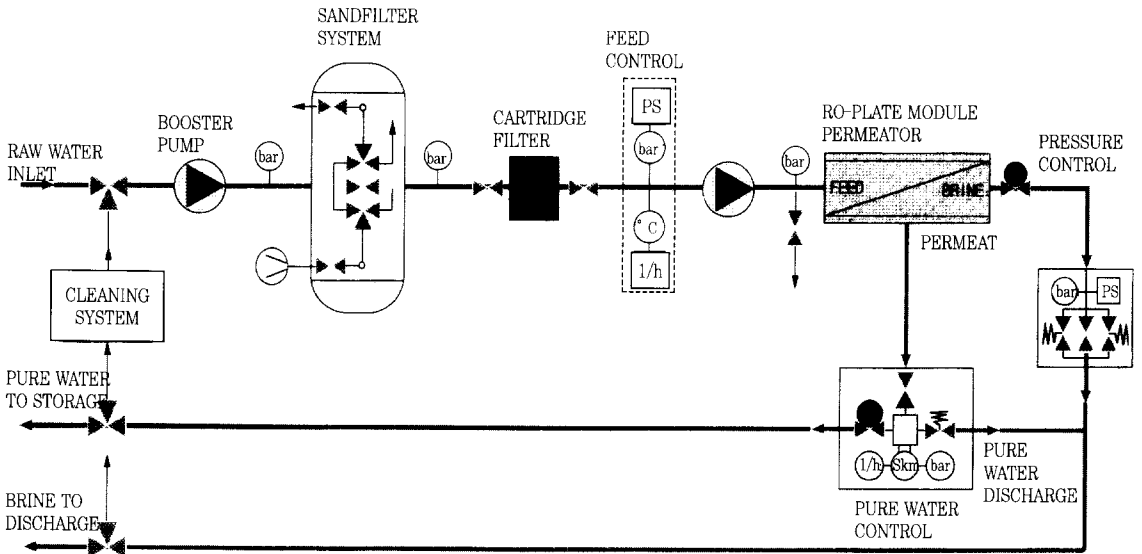
〈그림 10〉 두루마리형 역삼투 모듈

1500 ppm이다.

해수의 염도와 해수중의 성분 - 특히 0.3~1.0 $\mu$ m 인 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 역삼투모듈의 선정 및 시스템설계가 이루어져야한다. 일반적인 전처리는 해수를 염소멸균하여 미생물을 죽이고 응집제를 첨가하여 콜로이드를 응집시켜 용존염류가 모듈중에서 석출되어 스케일이 생기지 않도록 pH를 조정하며, 모래 여과와 규모조도 여과로 입자상 물질을 제거한후 아황산 나트륨을 첨가하고 잔류 염소를 환원시켜 분해한다. 이후 카트리지를 통과시켜 미립자를 제거하여 전처리를 완료하며, 전처리된 해수는 가압펌프로 역삼투 모듈에 주입된다.



〈그림 11〉 관형 역삼투 모듈



〈그림 12〉 역삼투 담수화장치의 계통도

#### 5.4 증발식과 역삼투식 담수장치의 비교

역삼투식 담수장치와 관련된 기술은 급속한 진전을 보이게 되고 이에 따라서 그의 이용도 점차적으로 증가하고 있는 상황이다. 선박의 경우에는 증발식이 지금까지 사실상 유일한 造水장치였으나 이제 역삼투식 조수기가 강력한 경쟁상대로 등장할 가능성이 보이고 있으며 현재까지의 추이로 보아 앞으로 전체 담수장치 시장의 상당한 몫을 차지할 것으로 예상된다. 그러나 이것은 종래의 다단 플래쉬법이나 다중 효용법이 설자리를 잃는다는 것은 아니며 역삼투법과 증발법이 각자의 장담점에 맞추어 적재적소를 찾게 된다는 뜻이다.

증발식에 의한 해수의 담수장치는 역삼투식과는 달리 엔진의 폐열이나 터빈 발전장치의 저온배기, 또는 배기보일러의 증기관을 이용할 수 있는 중요한 특징이 있다. 이는 일단 시설의 설치가 완료된 다음에는 매우 싸값으로 담수를 얻을 수 있음을 의미한다. 또한 생성된 담수는 매우 순수하며 급수의 질에 영향을 받지 않는다. 이러한 조건은 특히 적도로부터 북극지방에 까지 이르는 광범위한 항로를 이용하는 선박이나, 하천을 운항하는 선박 등에 있어서 중요한 요인이 될 수 있다.

한편 증발식은 튼튼하며 장기간에 걸쳐 돌보지 않고서도 운전이 가능하고 폐열을 이용한 시스템에 응용될 수 있기 때문에 발전소와 같은 시스템에서 버려지는 열원으로 해수를 담수화 하기에는 최적의 방법이다. 이에 반하여 역삼투식 조수장치는 그 발전속도가 급속하게 개량되고 있기는 하나 고압의 펌프가 있어야 하기 때문에 량질의 기계적에너지가 필요하고 장치의 운전경비가 급수의 질과 생성수의 순도에 따라 광범위하게 변동한다.

그러나 설치장소나 크기에 대한 제한이 중요한 요인으로 작용할 경우 또는 추가로 보충해서 장치하는 경우에는 역삼투식이 간단하고 유연성이 있기 때문에 설계상의 문제점을 해결해줄 수 있다.

그 외에도 역삼투식의 장점으로는

- (1) 1일 1톤정도의 수량으로부터 시작하여 임의의 수량에 이르기까지 기준요소에 의한 구성이 가능하므로 매우 편리하다.
- (2) 일련의 반투막을 각 사용자의 요구에 맞출 수 있다.
- (3) 연속적인 자동운전이 가능하다.
- (4) 물의 손실을 최소한으로 줄이고 에너지의 소모가 적다.

상기와 같은 장점은 역삼투식 담수장치를 광범위한 곳에 활용할 수 있는 여지가 있다.

(1) 다른 방법을 이용할 수 없는 곳에서 증발법을 이용하여 물을 생산할 경우 물의 순도가 너무나 높기 때문에 식음료수로는 부적당하나 WHO기준에 맞는 식료수를 역삼 투식은 생산할 수 있다.

(2) 공업용수나 보일러의 보급수로서 이온교환 수지법에 의한 처리에 앞서서 1차적인 처리 방법으로 적절하다.

(3) 이동식 담수장치로서 적합하다.

(4) 귀중한 용존성분을 회수하거나 방출기준에 맞추기 위하여 공장폐수를 처리할 경우에 유리하다.

## 5.5 앞으로의 개발과제

전술한 문제점을 근간으로하여 앞으로 개발하여야 할 과제를 막 제조부문, 장치설비부문, 그리고 해수 담수화부문으로 나누어서 지적해 보면 다음과 같다. 이들 내용은 상호간에 밀접한 관계를 갖는 것으로 서로의 협의에 의해 각각의 과제가 해결될 수 있다고 생각된다.

### 1) 막제조부문

국내에서는 역삼투막법을 이용하여 해수담수장치에 활용되는 막을 제조할 수 있는 업체가 전무한 실정으로 우선 막을 국산화 할 수 있는 기술축적 및 시스템의 구축이 빠른 시일내에 이루어 져야 한다. 이를 자본 기술로하여 막을 사용하는 업종에 국산화된 소재의 보급이 급속히 확산되어야 하며 막을 사용하는 산업의 공정에서 발생하는 기능상의 문제점을 해결 할 수 있도록 하기 위하여 fouling이 적고 정상 상태에서 투과유속이 빠르며 내구성이 높은 막의 개발이 필요하다.

Fouling이 발생하는 원인으로는 막의 재질과 밀접한 관련성이 있으며 여기에 대한 깊은 연구는 이루어지지 않았다. Fouling에 의한 유속저하 현상이 확실하게 규명되지 않은 현재로서는 각종의 막을 사용하여 그중에서 선별적으로 막을 선택하여 경험적인 방법에 의하여 막을 선택하는 방법밖에는 없다.

내열성·내약품성이 높은 막 모듈의 개발이 요구

된다. 보통 해수담수화장치로 사용되는 막은 스파이럴튜브형의 막을 많이 사용하고 있지만 보수정비과정에서 높은 온도나 화학약품과 직접 접촉되는 경우가 있다. 이 때 막이 손상되지 않고, 내구성이 우수한 형태의 재질을 개발할 필요가 있다.

### 2) 장치메이커

내열성·내약품성이 높은 막의 개발에 의해 막 기능의 회복은 용이하게 되고, fouling이 적은 막의 개발에 의해 기능의 유지가 용이하게 되지만 막처리에서는 반드시 농도의 분극이 일어나므로 막 표면의 부착과 Plugging현상이 발생한다. 따라서 역압에 의한 세척법과 sponge ball세척법이 개발되어 있지만 완전한 해결책은 되지 못하고 있다. 앞으로 완벽한 기능유지법이 개발되려면 상황에 따라서 다양하고 적절한 방법을 이용하는 것이 필요할 것이다. 이들 기능유지법의 하나로서 가스세척법의 실용화를 위한 연구가 진행중에 있다. 이 방법의 특징으로는 스폰지 세척처럼 막표면을 문지르지 않으므로 막의 손상도 적고 장치도 간단하다. 막의 기능의 유지 및 회복법은 해수담수장치의 경우 효율과 직접적인 관련이 있기 때문에 적극적인 대응이 필요하다.

장치의 위생에 대한 인식도 최근에는 차츰 높아져서 기존의 사용되고 있는 장치들도 일부는 이 문제로 인하여 교체되고 있는 실정이다. 막표면의 세균의 번식을 막기위한 방법이 요구되고 있으며 특수한 경우에 사용되는 용수의 경우 물의 순도를 높이는 것이 현장의 요구사항이기 때문에 적극적으로 대응할 필요가 있다.

막의 형태가 다양한 가운데 평판형 모듈이 일반적으로 사용되고 있지만 나선형과 중공 섬유형을 사용할 수 있다면 장치 비용이 저렴해진다. 이와 같은 조건에 대응하여 처리하고자 하는 원수의 조건을 고려하여야 한다. 원수의 특성에 따라 막 재질의 선정 주 변설비, 공장설계등이 결정된다. 원수의 특성중 공정에 영향을 미치는 요인을 파악하여 설계시 이를 반영하여야 하는데 체계적인 연구가 이루어져 있지 않기 때문에 원수의 특성을 정리하여 막 내에서 농도의 변화에 의하여 생성되는  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4$  등의



스케일을 형성시키지 않도록 해야한다.

## 6. 결론

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 공산품으로

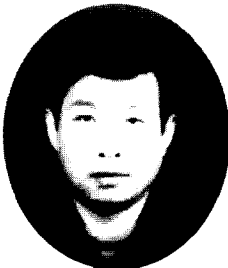
서서히 자리잡아 가고 있다. 따라서 담수화 설비의 기술적인 핵심은 역시 저렴한 담수의 생산, 즉 경제성을 갖기위한 기술개발에 중점이 될 것이다.

이를 위하여 최적 하이브리드 시스템을 위한 기술 개발, 시스템의 대형화를 위한 연구, 증발법의 경우 오염방지기술(Fouling 방지), 전열향상을 위한 유동연구등이 수행되고 있으며, 역삼투막법의 경우에는 전처리 기술과 에너지 재이용을 위한 요소기술들이 연구되고 있다.



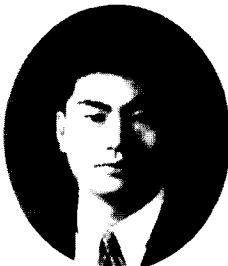
김 병 덕

- 1952년 11월 20일생
- 1994년 2월 한국해양대학교 시스템공학 박사
- 1981년 ~ 현재 한국기계연구원 책임연구원
- 관심분야: 시스템제어



송 치 성

- 1961년 4월 1일생
- 1989년 2월 한국해양대학교 기계공학(석사)
- 1989년 ~ 현재 한국기계연구원 선임연구원
- 관심분야: 내연기관, 열전달



박 상 진

- 1967년 10월 7일생
- 1996년 2월 서울대학교 기계공학(박사)
- 1996년 ~ 현재 한국기계연구원 선임연구원
- 관심분야: 열공학