

역삼투막을 이용한 해수 담수화장치에 관한 기술



송 치 성

(KIMM, 산업설비연구부)

- '79-'83 한국해양대학교 기관학과(학사)
- '83-'87 영국 Zodiac Maritime Co.(Engineer)
- '87-'89 한국해양대학교 선박기계공학과(석사)
- '89-현재 한국기계연구원 선임연구원



김 재 윤

(KIMM, 산업설비연구부)

- '88-'93 서울대학교 기계공학과(학사)
- '93-'95 서울대학교 기계공학과(석사)
- '95-현재 한국기계연구원 연구원

1. 서 론

물은 인간의 생명 유지와 산업에 있어서 필수 불가결한 요소이다. 따라서 오랜기간동안 안정적인 물공급을 위한 다양한 방법들이 개발되어 왔다. 그러나, 최근 급격한 산업의 발달과 환경오염으로 인하여 지상이나 지하의 물의 공급은 어려움이 심각해지고 있다. 그러한 면에서 지구의 물 중 97% 이상을 차지하고 있는 바닷물을 이용하여 담수를 만드는 기술은 그 의미를 더해가고 있다.

우리나라의 경우에도 새로운 공업단지 조성과정의 무수한 도서지방의 만성적인 물부족 현상을 해결하기위해서 해수의 담수화 장치에 대한 연구 및 개발이 시급하며 중요한 의미를 지니고 있다.

해수의 담수화는 역사적으로 보아 선박에서의 물공급을 위한 조수장치로부터 발달하여 왔으나 근년에 와서는 육상의 물부족이 심화되고 있기 때문에 해상보다는 오히려 육상에서 대규모로 이용되고 있는 실정이다.

해수로부터 청수를 생산하는 造水裝置에는 蒸發法, 結晶法, 逆滲透膜法, 이은 交換樹脂法, 電氣투석법 등 여러 가지 방법이 있다.[1] 그중에서 현재까지 가장 많이 사용되고 있는 기술은 증발법이다. 그러나 증발법은 에너지 소비가 많은 편이어서 에너지가 풍부한 지역을 중심으로 발달되었으며 우리나라와 같이 에너지가 부족한 지역에

적합한 저에너지 소비의 담수화기술의 개발이 요구되고 있다.

이런 관점에서 개발된 역삼투막법은 증발법과는 달리 막의 반투성질을 이용하기 때문에 에너지 소모량이 매우 감소되었으며 사용 영역이 계속해서 확대되고 있다. 또한 역삼투막법은 화학공정 및 폐, 오수처리 등에 대한 파급효과가 커서 응용 범위가 상당히 넓은 편이다. 하지만 기술 개발의 역사가 짧은 편이어서 막의 성능 향상, 전처리 방법 개선, 해수 성분에 따른 운전 조건의 최적화 등의 많은 과제들이 남겨져 있다. 특히 우리나라의 현실에 적합한 담수화 기술 연구는 매우 미약한 상태이다.

2. 역삼투막법

2.1 역삼투막법의 역사

1748년 Abbe Nallet에 의해서 발견된 滲透現象은 모든 생물체가 갖고 있는 생리현상이며 이 기능에 의하여 생물체는 영양분을 세포막내로 흡수한다. 즉 삼투현상은 반투막을 사이에 두고 저농

도의 용매가 고농도의 용액으로 이동하는 현상으로 막 양측 용매의 화학포텐셜이 같아지면 용매의 이동은 정지되고 양쪽 수두차 만큼의 삼투압차가 발생한다. 이때 그림1과 같이 고농도 용액측에 삼투압차 이상의 압력을 가하게 되면 삼투현상과는 반대로 고농도 용액측의 용매가 저농도의 용액측으로 역류하는데 이것을 逆滲透現象이라한다.

이러한 역삼투현상은 1877년에 Pfeffer에 의해 처음으로 정량적인 측정이 이루어졌고 그후 Vant hoff는 이러한 실험결과를 토대로 「물은 용액의 삼투압은 용액의 몰농도와 절대온도에 비례하고 용매나 용질의 종류에는 관계없다.」는 희박용액 이론을 정립하였다.[2]

1920년대에는 Nernst Plank에 의해 鹽透過의 구동력이 공식화되었고 Gibbs의 열역학에 대한 이론확립의 성과에 따라 삼투현상의 이론적인 연구가 완성되었다. 1934년에 F.G.Donnan은 반투막에 의해 분리된 두 액간의 평형개념을 제시하였다. 그 후 고분자 용액에 대한 관심이 높아져 용액의 삼투압 측정이 분자량 결정 및 용액의 열역학적 특성을 이해하는데 가장 유효한 방법의 하나가 되었고 1950년대 이후 전기에너지와 압력에너지를 사용하고 막을 이용하면 해수에서 담수를

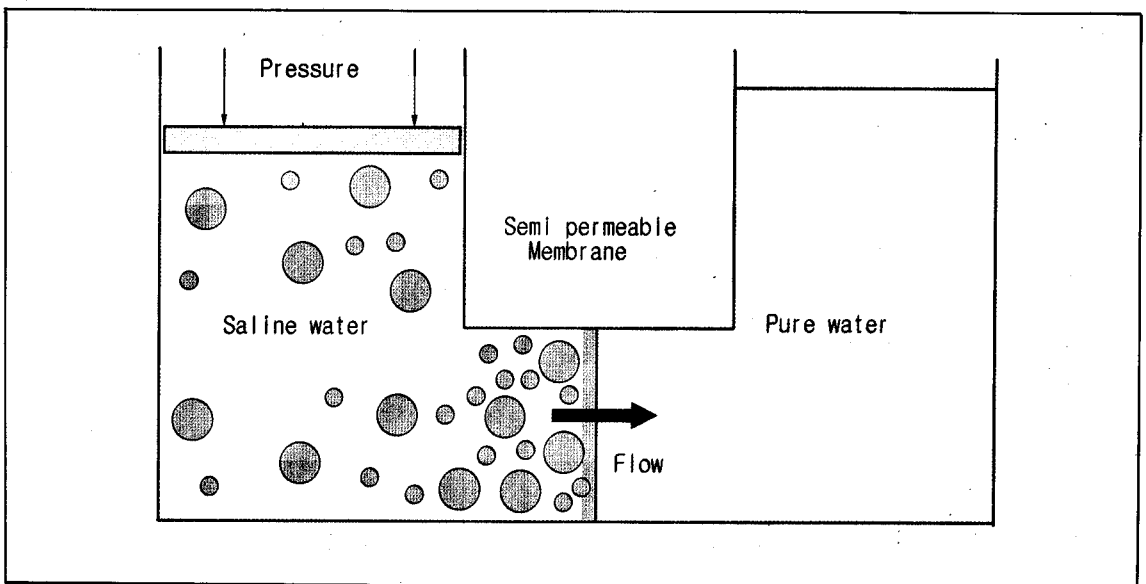


그림 1. 역삼투법의 원리

얻을 수 있다는 가능성이 제시되었다.

특히 1953년 미국 Florida 대학의 C.E.Reid 교수에 의해서 溶媒(해수의 경우 純水)는 통과시키나 溶質(해수의 경우 鹽分)은 통과시키지 않는 막, 즉 반투막을 이용하고 원액의 삼투압력보다 높은 압력을 가하여 용액만을 투과시켜서 청수를 채취하는 역삼투막식 담수화 방법이 공식적으로 제안되었다. 또한 Loeb 및 Sourirajan 등이 염배제율이 높고 물의 투과 유속이 획기적으로 개선된 아세틸-셀룰로오스(acetylcellulose)막을 개발함으로써 역삼투막법의 실용가능성이 인정되었다.[3]

그후 증발법이나 냉동법과는 달리 조작에 있어서 상변화를 수반하지 않아서 소요 에너지가 적어도 된다는 경제적 이점 때문에 많은 응용연구와 실제 플랜트 가동이 계속해서 늘어나고 있다. 우리나라의 경우는 아직까지는 전자산업의 초순수생산, 병원 및 제지산업의 폐수처리 등에 소규모적으로 응용되고 있을 뿐 담수장치에 적극적으로 활용되고 있지는 못한 실정이다.

2.2 역삼투막법의 중요인자

역삼투막 담수화 장치에서 半透膜의 특성으로서 중요한 것은 염분배제율과 막의 물 투과량이다.[4] 염분배제율은 말 그대로 처리되기전 原水에 용해되어 있던 염분이 얼마나 제거되었나를 의미하며 식으로는

$$R_S = (1 - C_p/C_f) \times 100 \quad (1)$$

으로 표시된다. 여기서

C_p : 膜투과액 C_f : 原液中の對象溶存物濃度이다.

용액과 용매를 접촉시키면 열역학적으로 안정된 희박상태를 이루려고 하기 때문에 용매가 반

투막을 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 장치가 역삼투막법을 이용한 해수 담수화 장치이다. 이때 삼투압 π 는 용액의 절대온도 T 와 용질의 몰 농도 C 에 비례하며 반트호프의 법칙에 의해 (2)식과 같이 표시된다.

$$\pi = iRCT \quad (2)$$

여기서 i : 반트호프 계수, R : 기체상수

역삼투 공정에서 원료인 해수가 연속적으로 공급되어도 막을 통과하지 못하고 막의 표면에 남아있는 해수와 동등한 양으로 혼합되기 때문에 염류의 평균 농도는 1.5배가 되고 (2)식에 따라서 삼투압도 1.5배가 된다.

또한 역삼투압에 의해 반투막을 통과한 물의 유량을 Q_w 반투막의 물 삼투계수를 K_w 해수측에 작용하는 압력과 청수(담수)측에 작용하는 압력의 차이를 ΔP 해수와 담수와의 삼투압 차를 $\Delta \pi$ 반투막 표면적을 A 두께를 t 로 하면 이들 사이에는 (3)식의 관계가 성립한다.

$$Q_w = K_w (\Delta P - \Delta \pi) A/t \quad (3)$$

해수에서 담수중으로 이동하는 염류의 이동량을 Q_s 반투막의 염류투과 계수를 K_s 해수와 담수의 염류 농도차를 ΔC 라고 하면 (4)식으로 표현할 수 있다.

$$Q_s = K_s \Delta C A/t \quad (4)$$

(3)식과 (4)식에서 알 수 있는 바와 같이 염류 투과량 Q_s 는 농도차 ΔC 에 비례하고 압력차 ΔP 와는

관계가 없으며, 막을 통한 물의 투과량 Q_w 는 압력차 ΔP 에 비례하기 때문에 역삼투막법에 의한 해수 담수장치는 해수측에 작용하는 압력이 높을수록 장치의 효율이 높아짐을 알 수 있다.

실제 역삼투막법을 이용한 플랜트에서는 해수에 56-80 kg/cm² 정도의 압력을 연속적으로 가하여서 담수가 제조되고 있고 동력의 대부분이 압력을 가하는데 이용되는 펌프에 소요되고 있으며, 펌프는 일반적으로 소형의 경우 플란저 펌프를 이용하고 있다.

한편 물을 투과시키는 반투막으로서 매우 넓은 범위의 고분자 재료가 검토되었으나 현재 실용화되고 있는 것은 Loeb형 막과 아로마틱·폴리아미드의 2가지 종류가 있다. Loeb형 막은 아세틸화(acetylation) 39.3% 정도의 아세틸셀룰로스를 아세톤과 물에 용해하여 (이것을 평활한 면, 경우에 따라서는 원통의 내면)에 얇게 입혀서 잠간사이에 아세톤을 증발시킨다음 수중에서 겔화(gelation)시켜서 생성된 막을 熱水중에서 열처리하여 만든다. 그리고 아세틸화도가 높은 아세틸 셀룰로스를 이

용할수록 염분배제율은 높게되나 물 투과율은 저하한다.[5]

또한 그림2에서 보이는 바와 같이 열처리 농도가 높을수록 배제율은 향상되고 물의 투과량은 감소하므로 운전 조건에 알맞은 막의 선택은 무척 중요하다. 이와 같이 형성된 막은 일반적으로 100마이크론 정도의 두께이고 전자현미경으로 보면 아세톤을 증발시킨 면에 0.2-1마이크론 정도의 조밀한 층이 존재한다. 이 층은 최대 20Å 이상의 구멍은 발견되지 않으며 염분의 배제는 이층에서 일어나며 이를 활성층(Activ layer)이라고 부른다. 다른 부분은 이것을 받치고 있는 거치른 부분으로서 하부구조라 불리워지며 공극률 55%정도, 수천 Å의 구멍이 관찰된다. 막의 유효한 염분배제는 조밀한 면을 고압에 노출시켰을 때 발생한다. 이 막은 각종 이온에 대하여 선택적인 배제율을 보인다. 아세틸 셀룰로스 막은 알칼리성으로 가수분해하여 현저한 열화가 일어나기 때문에 pH 5-6으로 사용하는 것이 바람직 하다. 원액측의 압력이 높으면 壓密化現象이 일어나고 물의 투과량이

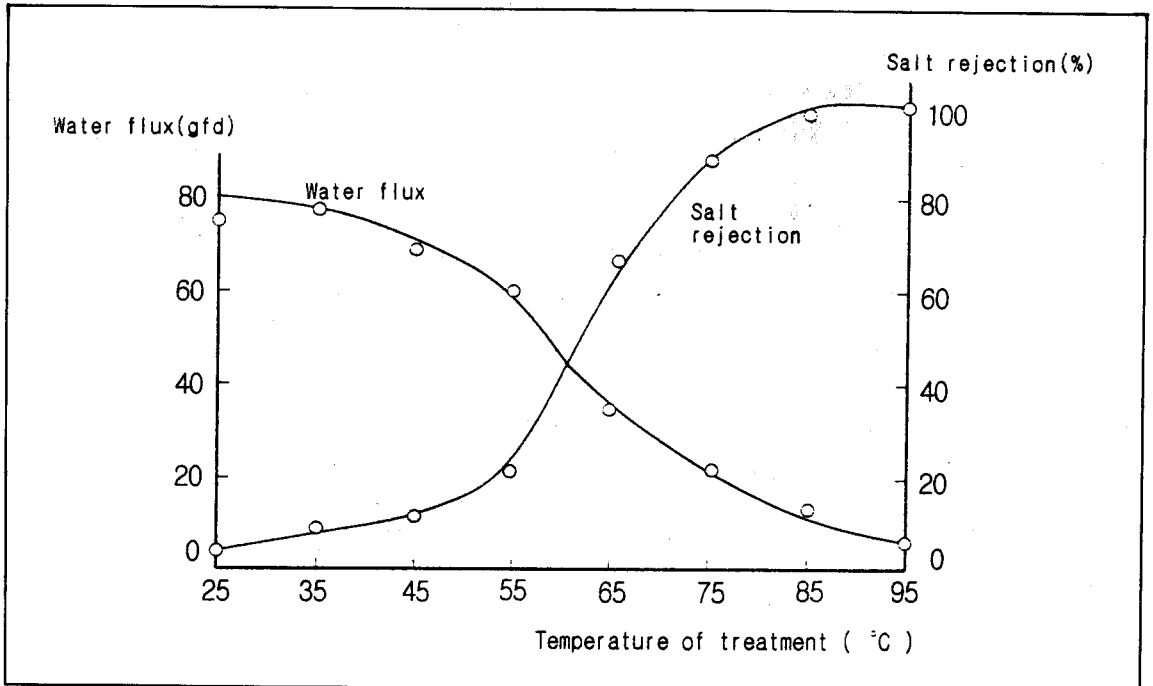


그림 2. 역삼투막법에 의한 해수담수장치에서 온도와 투과율의 관계

급격하게 감소한다. 이 때문에 해수와 같이 침투 압력이 25atm 정도의 것은 100atm 정도의 압력을 작용시킬 필요가 있고 특별한 막을 개발할 필요가 있다.

3. 분리막의 종류와 특성

3.1 분리막의 역사

분리막의 체계적인 연구는 1748년 Nallet의 동물 세포막의 삼투압 현상에 관한 보고로부터 시작되었다. 1886년 Vant hoff는 삼투막을 이용하여 삼투압 이론을 발표하였으며 Gibbs의 열역학적인 이론이 토대가 되어, 열역학적인 상평형의 원리에 기인한 분리방법과 물질이동, 혼합물의 동적인 성질, 특히 확산성이나 침투속도 등을 예측할 수 있는 이론적인 근거를 제공하였고 1920년대 초에는 삼투압과 열역학적인 변수들과의 상관관계가 알려지기 시작하였다.

고분자막에 의한 물질의 분리는 약 20년전 S. Leob에 의하여 고효율의 비대칭 분리막이 개발되면서 급속하게 발전되었으며 상변화가 없고 에너지의 소모가 적은 장점 때문에 해수담수화 장치를 비롯한 공업용수의 처리, 폐수 재활용 등의 수처리 분야에서 상업화된 이후 분리막 재질의 개발에 의해 식품공업의 분리, 농축 화학공업의 분리, 정제, 산소부화 등의 기체분리, 인공신장에 의한 혈액 투석에 이르기 까지 광범위하게 응용되고 있다.

Reid는 미국정부가 집행하는 해수 담수화 프로젝트에 삼투막응용에 관한 연구를 시작하여 1959년에 Cellulose Acetate(CA)로 해수 담수화에 필요한 5 μ m 두께의 역삼투막을 만들었으나 투과율이 적어서 실용화 될 수 없었다.

1960년대에 Loebd와 Sourirajan이 CA로 염배제율과 투과율이 높은 비대칭 막을 개발하면서 분리막에 의한 해수 담수화가 실용화 될 수 있었으며 이후 복합막이 개발되면서 분리막의 성능과 경제성이 월등히 좋아졌다.[3]

3.2 분리막의 종류

분리막은 구동력, 분리원리, 응용분야 등에 따라서 표1과 같이 분류할수 있다.[6]

3.3 역삼투막 장치의 구조

분리막 만으로는 탈염되지 않기 때문에 막을 하나의 set으로 장치화 할 필요가 있다. 막의 두께는 매우 얇으므로 실제로 이용할 수 있도록 막을 장치에 넣은 것을 module이라고 한다. 현재 주로 사용되고 있는 module에는 다음과 4종류가 있다.[7]

1. 중공 섬유형(hollow fiber type)
2. 두루마리형 (spiral wound type)
3. 板型(plate type)
4. 管型(tubular type)

이들은 각각 장단점이 있기 때문에 직접 비교하기가 곤란하며 아래에 이들의 구조에 대한 개요를 소개하고자 한다.

3.3.1. 중공섬유형

Du Pont B9, B10과 같은 중공섬유형은 1種의 나일론인 아로마틱 폴리아미드(aromatic polyamide)의 막으로 이루어진 中空纖維로 만들어진다. 이것은 물에 대하여 화학 작용을 일으키지 않으며 내경 35 μ m, 외경45 μ m이고 넓은 막의 면적을 제공한다. 섬유소는 그림3과 같이 수천개를 다발로하여 압력용기내에 내장된다. 압력수가 삼투기의 자유단으로부터 각 섬유소의 외피, 즉 투막을 통하여 중심공으로 통과하게 된다. 염분과 불순물은 섬유소의 외벽에 머물게 되고 농축액의 출구 쪽으로 모이게 되는데 반하여 脫鹽된 물은 삼투액 출구에 모이게 된다. 이 장치를 이용하여 해수 중의 용해질을 99%까지 제거할 수 있으며 단 한 번의 처리로 식료수를 마련할 수 있다. 中空纖維型的 조밀한 구조특성은 장치설계에 있어서 고도

표.1 막분리 기술의 특성

분리방법	막 형태	구동력	분리 원리	적용 분야
정밀여과	대칭형 다공성 막 (pore size 0.1-10 μ m)	정수압 차 (0.1 - 1bar)	pore size 및 흡착현상에 기인한 체결름	· 전자공업의 超純水 제조 · 무균수 제조 · 식품의 무균여과
한외여과	비대칭 다공성 막 pore size skin층 support층1-10 μ m	정수압 차 (0.5 - 1bar)	체 결름 (Sieving)	· 전자공업의 초순수제조 · 유수 혼합물의 분리 · 도료 페인트 회수, 효소농축 · 혈장 단백질분리 · 섬유제지공업의 폐수처리
역삼투	비대칭성Skin형膜 Skin층: 균일막 pore size : A	정수압 차 (20-100 bar)	용해, 확산	· 海水, 工業用水의 脫鹽 · 액체식품의 탈수 · 전기 도금공업의 脫 이온수 · 화학,약품공업의 무균, 탈이온 수, 농축, 폐수처리, 재이용
투석	비대칭성 다공성 막 (균일팽윤막, pore size : 0.1 - 10 μ m)	농도 차	대류가 없는 층에서의 확산	· 인공신장 및 의료공업 · 화학,식품,약품공업에서의 고분 자와 저분자의 분리
기체분리	균일, 다공성 막	정수압 차 농도 차	용해, 확산 확 산	· 공업용, 의료용 산소부화 · 메탄-이산화탄소 분리 · 천연가스에서의 수소회수 · 공기중의 질소농축 · 핵공업의 희소가스 회수
투과증발	균일계 막	농도차	용해, 확산	· 에탄올의 탈수 · 공비 혼합물의 탈수
전기투석	양이온,음이온 교환막	전위차	입자의 전하, 크기	· 염수의 탈염 · 알칼리 제조, 공업용수의 연화, 도금공정의 중금속회수, 약품· 제당 공업의 탈이온화, 폐수처리

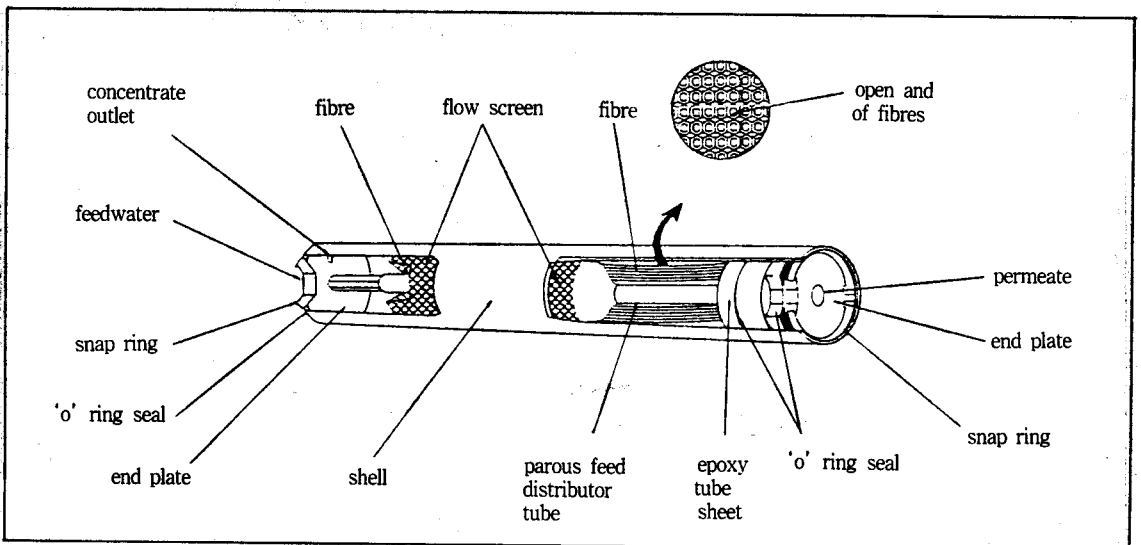


그림 3. 중공섬유형 역삼투막

의 표준화를 가능하게 하며 경쟁력있는 가격과 관리유지를 하는데 드는 비용을 감소시키는데 기여하고 있다.

3.3.2 두루마리형

두 번째로 많이 볼 수 있는 막의 형태가 두루마리 형이다. 이것은 매우 다공질의 지지층위에 아세틸 셀룰로스 皮膜을 특별히 처리한 박판을 최소부피로 최대의 표면적을 갖도록 두루마리처럼 말은 것이다. 다공질 지지층은 두 개의 인접한 막층에 끼이게 되고 급수에 의하여 정화된 물이 오염되지 않도록 양단과 급수측이 密封된다. 밀봉된 한 쌍의 막층은 그물로 된 그물구조의 성층으로 분리된다.그림4는 반투막 구성의 상세도이다. 급수는 그림5와 같이 두루마리형 카드릿지가 내장된 원통용기의 공급단으로부터 들어가서 축

방향으로 흘러서 출구로 나간다. 펌프압력을 받은 물은 용기로 들어가서 그물로 된 隔間形成層을 흐르고 막층의 외부에 염분을 남기면서 막을 통과하여 다공질 지지층으로 밀려들어간다. 정화된 물은 다공질 층을 따라 내부로 旋回하면서 진행하고 중심부의 집수관을 통하여 용기 출구로 흘러간다. 농축액중의 제거된 고용분은 농축액 출구를 통하여 제거된다. 이 막형성은 고용질과 색소 또는 유기물질이 많아서 오염도가 높은 물에 사용할 수있다. 일반적으로 같은 크기의 중공섬유형보다 적은 량의 정수를 생산한다.그러나 이것은 스케일이나 오염된 물의 공급상태에 별로 예민하지 않기 때문에 유지관리가 좀더 용이하다. 비록 적절하게 배치하더라도 조밀하게 채워진 재료는 고품질에 의하여 막히기 쉽고 따라서 이것에 대처하기 위하여 공급수는 미리 처리하여야 한다.

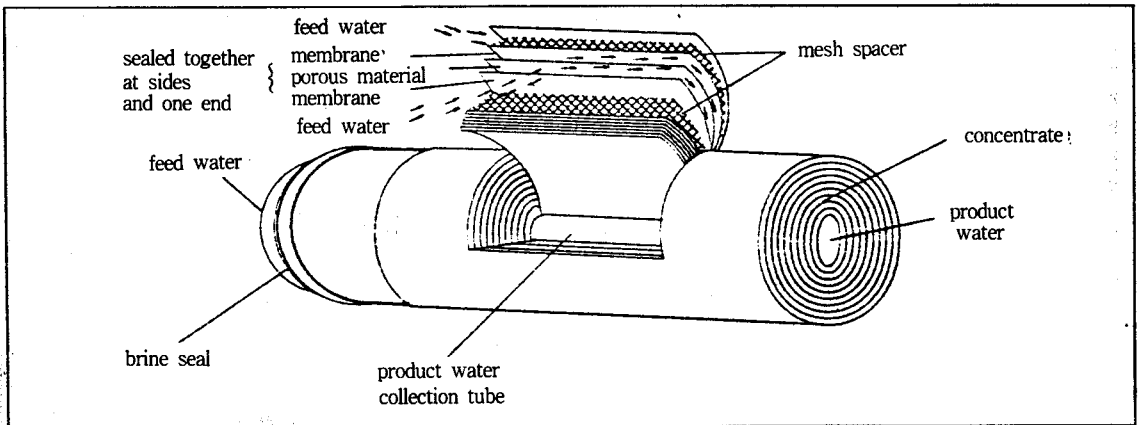


그림 4. 두루마리형 역삼투막

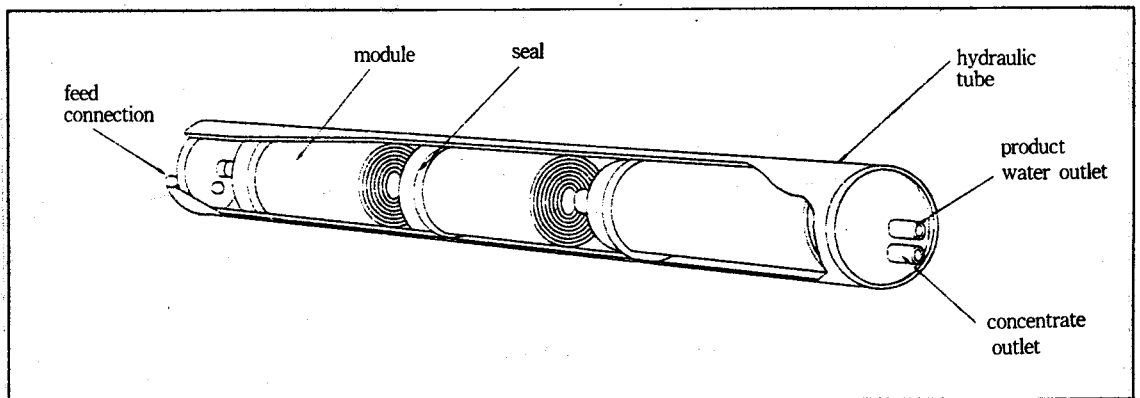


그림 5. 두루마리형 역삼투막의 막분리 모델

3.3.3. 板型

세 번째는 판형으로서 비교적 최근에 나온 것이다. 그림6에서 보이듯이 판형구조이기 때문에 통로가 개방되어있고 공급수는 충분한 난류를 형성하게 된다. 이는 고용질이 막에 끼이지 않고 따라서 보수유지관리가 좀더 간단하게 된다. 그외에도 막의 수명이 길고 교체비용이 낮으며 막을 손질하기가 쉬우며 자동적으로 운전상태가 조정되고 표준화된 설계와 구조로 만들었기 때문에 설치가 용이하고 공간이용에 신축성이 있다.

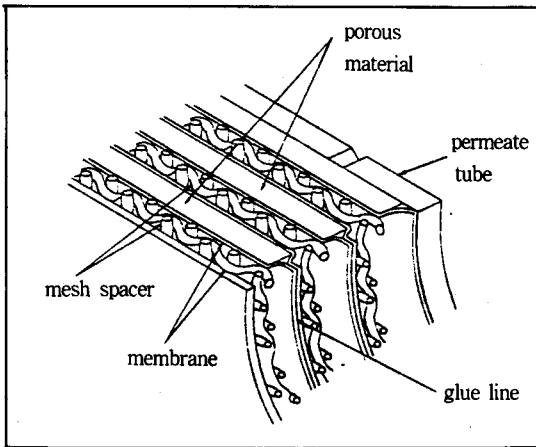


그림 6. 판형 역삼투막

3.3.4 관형

그림7은 관형 역삼투 반투막장치의 구조를 보여주고 있다. 외경 1인치의 동관 내벽에 3층의 나일론 포를 부착하고 이의 내부 표면에 반투막을 시공한 것이다. 또한 동관의 외주에 10분의 1인치 공을 균등군데 가공하여 정화된 물이 빠져나가도록 되어 있다.

4. 역삼투압법 담수화 장치의 공정

역삼투법 담수화 장치의 공정은 크게 전처리, 막분리, 후처리의 과정으로 구성된다.[8]

4.1 전처리 공정

일반적으로 막의 수명과 성능은 처리수의 조성 및 상태에 크게 영향을 받는다. 즉, 막에 치명적인 해를 끼칠 성분들을 미리 제거하는 전처리가 무척 중요한 위치를 차지한다. 해수중에는 염분외에도 미세한 모래, 미생물, 고형성분 등 많은 물질들이 존재하고 있고 이것들이 막의 표면에서 눈막힘(Fouling)을 일으키거나 막재질을 손상시켜 막

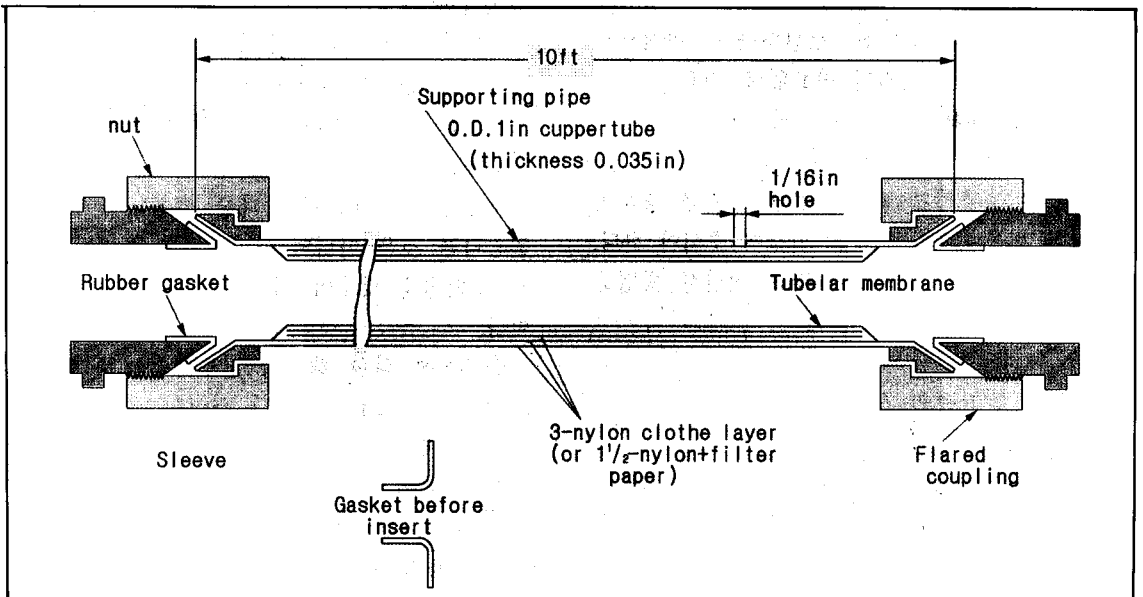


그림 7. 관형 역삼투 장치

성능을 저하시키고 수명을 단축시킨다. 이러한 현상을 방지하기 위해서 응집, 여과, 흡착 등의 물리적 방법이나 산화, 환원 등의 화학적 방법을 이용하는 전처리 기술들이 개발되어 이용되고 있다. 그리고 이런 전처리는 절대적인 기준이 정해져 있다기 보다는 海水의 구체적인 상태 및 요구되는 淡水의 정도에 따라 적절하고 경제적인 방법을 찾아야 하기 때문에 대상에 따라 실제적인 연구가 요구된다.

4.2 막분리 공정

막분리 공정이라 함은 전처리를 거친 해수를 고압 펌프로 가압시켜 역삼투현상을 일으켜 농축된 염수와 담수로 분리하는 과정을 말한다. 이때 중요한 점은 앞서 설명한 염배제율과 물의 투과량을 최대화할 수 있는 운전조건을 구현하는 것이다. 즉 해수의 온도, 압력, 농도 등이 막의 성능과 수명에 미치는 영향들을 찾아내고 주어진 조건에서 최적화된 운전조건을 확립해야 한다.

4.3 후처리 공정

역삼투막법에서 얻어진 생산수는 일반적으로 깨끗하기 때문에 후처리가 필요없다. 그러나 물의 용도에 맞게 후처리를 필요로 하기도 한다. 예를 들면 음료수로 사용하기 위해서는 탄산칼슘의 첨가로 pH를 조정하고 염소나 오존 소독을 통하여 생산수를 먹을 수 있는 물로 만들어 주어야 한다. 후처리 역시 원하는 상황에 맞는 적합한 방법들이 연구되고 채택되어야 한다.

4.4 역삼투막법의 전체 공정

역삼투막법의 공정에는 그 구성에 막이 한 개 설치된 단일 투과 시스템과 2개 이상을 설치한 다수 투과기 시스템이 있다. 또한 다수 투과기 시스템은 그 배열 방식에 따라 평행 일단 시스템,

배출수 재처리 시스템, 생산수 재처리 시스템 등으로 나뉘는데 상세한 설명은 생략한다.[9]

그중에서 2단의 배출수 재처리 시스템을 예로 전체 공정을 설명하고자 한다. 그림[8]에서 보여지듯이 Booster Pump로 취수된 해수는 각종 필터들을 통한 전처리의 과정을 거친다. 전처리된 해수는 고압 펌프로 가압되어 1단의 역삼투막장치로 유입되고 농축수와 담수로 분리된다. 1단의 농축수는 다시 2단으로 유입되어 담수와 더욱 진한 농축수로 분리된다. 2단의 농축수는 배출되고 1단과 2단에서 분리된 생산수(담수)는 후처리를 거친 후 이용하고자 하는 곳으로 공급된다. 이와 같은 과정을 통하여 염도 35000ppm 정도의 해수가 500ppm 정도의 담수로 생성되게 된다.

5. 역삼투막법의 장, 단점

5.1 증발식과 역삼투막식 담수장치의 비교

역삼투식 담수장치와 관련된 기술은 급속한 진전을 보이게 있고 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 플라쉬법이나 다중 효용법이 설자리를 잃는다는 것은 아니며 역삼투법과 증발법이 각자의 장단점에 맞추어 적격적소를 찾게 된다는 뜻이다.

증발식에 의한 해수의 담수장치는 역삼투식과는 달리 엔진의 폐열이나 터빈 발전장치의 저온배기, 또는 배기보일러의 증기관을 이용할 수 있는 중요한 잇점이 있다. 이는 일단 시설의 설치가 완료된 다음에는 매우 싼값으로 담수를 얻을 수 있음을 의미한다. 또한 생성된 담수는 매우 순수하며 급수의 질에 영향을 받지 않는다. 또한 증

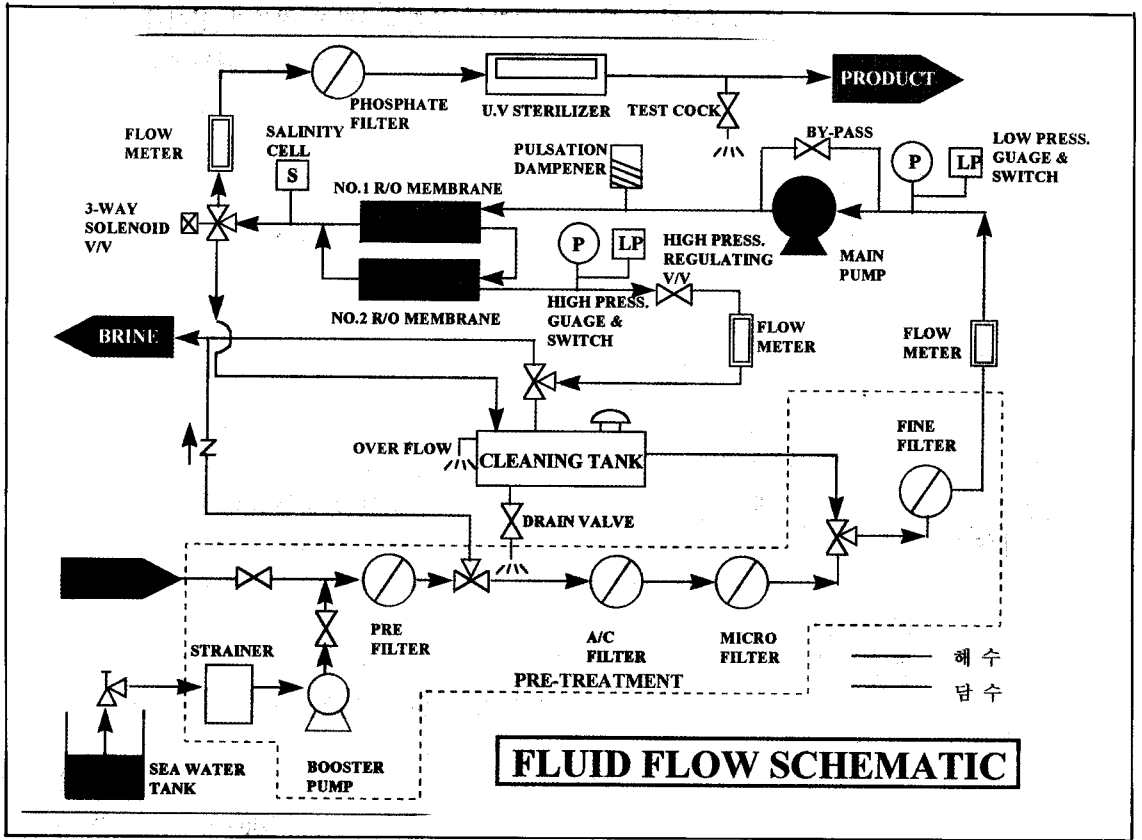


그림 8. 2단 배출수 재처리 시스템

발식은 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 양질의 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 임의

의 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 역삼투식은 생산할 수 있다.
- (2) 공업용수나 보일러의 보급수로서 이온교환

수지법에 의한 처리에 앞서서 1차적인 처리 방법으로서 적절하다.

- (3) 이동식 담수장치로서 적합하다.
- (4) 귀중한 용존성분을 회수하거나 방출기준에 맞추기 위하여 공장폐수를 처리할 경우에 유리하다.

5.2 역삼투식 담수장치의 문제점

- (1) 막의 두께가 얇을수록 투과율이 좋기 때문에 성능면에서도 양호하나, 높은 압력이 작용할 경우 이를 지지하는 문제
- (2) 물의 투과 계수는 크고, 이와는 대조적으로 염류의 투과계수는 작은 막을 개발해야 하며
- (3) 막의 두께가 얇을수록 담수장치의 요구조건에 적합하며, 장시간 운전해도 막이 물리적 및 화학적으로 안정되어야 하고
- (4) 해수중의 미생물 침식에도 강하고, 상술한 바와 같이 요구되는 여러 가지 특성이 약화되지 않아야 한다.
- (5) 막과 액과의 경계면에 생기는 염분농도의 상승을 낮추는 문제 등이 있다.

1,2번의 문제점에 대하여서는 일반적으로 다공성의 耐壓판등을 사용하거나 반투막자신으로 중공의 섬유를 만들고 외압으로 관이 찌그러지지 않도록 비교적 두껍게하여 투과수가 관 내부에 모이게 하는 방법등이 실용화 되고 있다. 후자에 대해서는 물 투과량을 적게하여 경계면의 염분농도가 높게 되지 않도록 하는것도 한 방법이며 원액의 막 표면에 유량을 높이고 충분한 난류를 얻도록 할 필요가 있다. 물의 투과량을 적게하여 경계면의 염분농도가 높게 되지않도록 하는 것도 한가지 방법이다.

또한 역삼투막법을 이용한 해수 담수화장치는 막의 더러움을 방지하는 것이 아주 중요하며 적절한 전처리로 실트밀도지수(SDI: Silt Density Index 또는 Fouling Index라고도 함)를 3-5이하로 유지할 필요가 있으며 Fouling에 의한 투과속도

저하와 분획분자량의 변화가 일어나기 쉽다. 해수에 함유되어 있는 성분은 다양하고 광물성의 성분중에는 막의 표면에 달라붙어서 고형분을 형성시키기 때문에 화학적인 처리나, 물리적으로 逆壓을 행하여도 막의 표면에 부착된 고형분을 분리하기가 어렵다.[10]

해수중에 포함되어있는 광물성 뿐만 아니라 이 물질이 흡착층의 형성과 세분의 막힘 현상을 일으켜 용매를 투과시키는데 저항으로 작용하고 또한 분획분자량의 변화를 일으키게 된다. 따라서 전처리 과정에서 SDI를 적게하기위한 여러 가지 방법이 시도되고 있으며 막의 기능을 지속적으로 유지시키기 위하여 운전중에 적절한 주기로 염산, 구연산, 암모늄용액 또는 세제 등 수질에 적용할 수 있는 세정액으로 역삼투장치의 모듈 내부를 정기적으로 세척하고 있으나 이것만으로 막기능이 저하되는 것을 방지하는 것은 어려우며 한계가 있다.

또한 막의 내열성, 내약품성의 제약에 따라서 막장치의 내부를 완전히 무균화 하는 것이 어렵다. 최근 한외여과막 Module에서는 120℃에서 증기로 살균하는 재질이 개발되었고, 역삼투막에서도 종래의 셀룰로오스 아세테이트 막보다는 확실히 내열성, 내약품성이 강한 막이 개발되어 있어서 이전보다는 이 문제가 상당히 개선되고 있다.

그러나 이 문제에 대해서는 충분한 주의를 기울일 필요가 있고, 상온처리를 장시간동안 계속하면 장치내의 dead space 및 체류구역에서 미생물이 증식하여 제품이 부패취 등에 의해 품질의 저하를 일으킬 수가 있다. 식수의 경우 위생상의 문제점과 청결도는 절대적으로 중요한 요인이기 때문에 필히 고려해야할 점이다.

한편 막을 이용한 해수 담수화 장치는 소형의 경우 대부분 이동식으로 만들어진다. 따라서 원액에 해당하는 해수로부터 다량의 물을 추출하는 기술이 요구되고, 이에 따라서 효율을 높게 할 필요가 있다. 그러나 삼투압과 점도의 밀접한 관계 때문에 막처리 기술만으로는 원료를 고농도까지 농축하기가 어렵다. 농축된 해수를 상품으로

활용하기 위해서는 삼투압과 점도의 관계상 어느 한계 이상으로는 이것이 불가능하다.

6. 결론

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

6.1 막제조부문

국내에서는 역삼투막법을 이용하여 해수담수장치에 활용되는 막을 제조할 수 있는 업체가 전무한 실정으로 우선 막을 국산화 할 수 있는 기술 축적 및 시스템의 구축이 빠른 시일내에 이루어져야 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 정상상태에서 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 방법 밖에는 없다.

내열성, 내약품성이 높은 막 모듈의 개발이 요구된다. 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.

6.2 장치설비부분

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 주변설비, 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 $CaCO_3$, $CaSO_4$ 등의 스케일을 형성시키지 않도록 해야한다.

6.3 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 주요설비로는 원수를 가압시켜 주는 고압 펌프와 막 모듈, 그리고 회수율을 조정해 주기 위해 브라인 라인에 설치되는 제어밸브 등이 있다. 또한 막 모듈 주위에 막을 보호해 주기 위해 압력과 온도, Shut Down Switch 그리고 회수율 조정을 위한 유량계 등의 설비가 설치된다. 이러한 상황을 고려하여 모듈을 효율적으로 배열하는 방법이 필요하고 생성수의 수질과 처리수의 회수율을 높이기 위하여 최적의 Stage를 선정하기 위해서 기본적인 실험이 필요하다.

멤브레인 시스템 설계시 Element Housing, Size, Element 배열, 회수율, 운전압력, 투과유량을 결정해야한다. 이와 같은 공정설계를 위하여 고유의 초기입력 데이터를 결정하면 Product 및 배출수의 수질, 공급 및 배출압력, 유량, 전처리 요구 등에 관한 결과를 알수 있도록 시스템에 관련된 소프트웨어의 개발이 요구된다. 이러한 결과를 근거로하여 공정설계를 최적화 시킬 필요가 있다.

또한 우리나라와 같이 에너지 자원이 부족한

현실에서는 에너지 소비를 극소화 시킬수 있는 다양한 방법에 대한 연구가 절실히 요구되고 있다. 현재 이러한 요구에 부합하기위하여 증발식과의 복합시스템, 디젤엔진의 폐열을 이용한 역삼투법 담수화 장치에 대한 연구등이 진행중이다.

참 고 문 헌

- [1] Arshad Hassan Khan, "Desalination Process and Multistage Flash Distillation Practice", Elsevier, 1985
- [2] Everett D. Howe, "Fundamentals of water Desalination", Marcel Dekker, Inc., 1974
- [3] K. S. S piegler, "Salt Water Purification", Pienum Press, 1977
- [4] Summer N. Levine, "Desalination and Ocean Technology", Dover Publications, Inc., 1968
- [5] 윤규식, '역삼투용 Cellulose Acetate 막제조와 투과 특성', 서울대학교 대학원 논문집, 1992
- [6] 고석문, 박청길, 김오식, "막분리기술", 동화기술, 1994
- [7] 한국전력공사, "담수화에 관한 연구", 1990
- [8] Rovert Backish, "Practice of Desalination", Noyes Data Coporation, 1973
- [9] Sourirajan S., "Reverse Osmosis", Academic Press, 1970
- [10] Proceedings of the IDA and WRPC World Conference on Desalination and Water treatment, Nov. 1994