

역삼투막법 해수담수화 시스템의 최적 설계

(먹는물을 생산하기 위한 시설을 중심으로)

(한국수자원공사 수자원연구소)

김 충 환

역삼투법 해수담수화 시스템의 최적설계 (먹는물을 생산하기 위한 시설을 중심으로)

한국수자원공사 수자원연구소
선임연구원 김 충 환

요 약 문

먹는물 생산용 역삼투법 해수담수화 시설의 도입에서 시설은 원수의 수질에 대하여 먹는물 수질기준을 충분히 달성할 수 있는 능력을 가져야 하고, 또한 시설의 배치, 유지관리 및 경제성을 고려한 최적공정이 선정되어야 한다. 역삼투법에 의한 먹는물 생산용 담수화시스템의 설비는 기본적으로 막의 성능을 안정적으로 유지하기 위한 전처리설비, 역삼투막모듈로 원수를 공급하기 위한 고압펌프 및 용존염을 제거하기 위한 역삼투막모듈 등의 세부분으로 구성되지만, 실용화 장치에서는 원수를 공급하기 위한 취수설비, 막으로 처리된 생산수를 먹는물로 급수하기 위한 후처리설비, 기타 세정설비 및 세정배수처리설비 등으로 구성된다.

1.1 서론

최근에 빈발하고 있는 극심한 가뭄은 영·호남지방을 비롯한 여러 곳에서 생활용수 및 공업용수 수급에 많은 지장을 초래하였을뿐만 아니라 일부 도서지역은 이러한 가뭄과 더불어 지형여건상 수자원 확보의 어려움 때문에 만성적인 용수 부족현상을 나타내고 있다. 이와 같은 용수공급 부족은 이용 가능한 수자원의 부족과 지역간의 수자원부존량 편차뿐만 아니라 인구 및 공업화의 지속적인 증가로 물수요가 크게 증대되고 아울러 지표수 및 지하수의 오염확대 등으로 인하여 더욱 심화될

것이 예상된다.

이러한 수자원의 부족에 대비하여 2011년까지 추가로 34개의 다목적 댐과 47개의 광역상수도 및 공업용수도를 건설하여 상수도 보급율을 95%까지 높여 나갈 계획이고, 또한 지역적으로 용수공급이 곤란한 도서지역에는 항구적인 용수공급 방안의 하나로 해수의 담수화 시설을 2001년까지 26개 도서지역에 설치할 예정이다.

따라서 여기서는 장래 공급이 예상되는 소규모 먹는물 생산용 역삼투법 해수담수화 시설에 대하여, 우리나라의 실정에 적합한 역삼투법 해수담수화 시스템의 최적화를 위한 기초자료를 검토 하였다.

1.1.1 기본시스템

역삼투법에 의한 먹는물 생산용 담수화 시스템의 설비는 기본적으로 막의 성능을 일정하게 유지하기 위한 전처리설비, 역삼투막모듈로 원수를 공급하기 위한 고압펌프 및 용존염을 제거하기 위한 역삼투막모듈 등의 세부분으로 구성되지만, 실용화장치에서는 원수를 공급하기 위한 취수설비, 막으로 처리된 생산수를 먹는물로 급수하기 위한 후처리설비, 세정설비 및 세정배수 처리설비 등으로 구성된다.

현재 먹는물 생산용 소규모 역삼투법 해수담수화 시설에 많이 채용되고 있는 기본 단위공정은, 전처리설비로는 응집제주입에 의한 압력식 급속여과조와 카트리지식 전처리필터, 역삼투설비로는 고압펌프와 와권형(Spiral Type)막을 사용한 1단 역삼투막모듈, 후처리설비로는 pH조정설비, 미네랄주입조 및 소독설비 등이 있다.

시설의 장애제거 및 성능을 일정하게 하기 위하여 주입되는 화학약품은 살균제로서 염소(NaClO), 응집제로서 염화제2철(FeCl_3), 폴리아미드 제질의 막을 사용할 경우, 잔류염소를 제거하기 위한 환원제로서 SBS(Sodium Bisulfite)등이 있다. 또한 먹는물로서 급수하기 위하여 NaOH 나 Ca(OH)_2 에 의한 pH조정과 맛을 내기 위한 미네랄성분 첨가 및 염소(NaClO)소독 등을 한다.

1.1.2 취수설비

전처리설비의 부하를 적게 하기 위해서는 깨끗한 원수를 안정하게 취수할 필요가 있으므로 취수지점 및 방식의 선정은 대단히 중요하다. 취수방식은 입지조건과 플랜트의 규모를 고려하여 결정하지만 일반적으로 깨끗한 해수를 얻을 수 있는 심층 취수방식은 대규모 플랜트에서만 가능하고 중소규모 플랜트에서는 해안구조물이나 해안에 지하관정을 개발하여 취수하고 있다. 특히 중소규모시설에서 지하관정을 개발할 경우 해수보다 부유물질의 농도가 낮은 원수를 취수할 수 있기 때문에 전처리시설의 부하를 줄일 수 있으며, 또한 염분의 농도도 일부 감소되기 때문에 고압펌프의 동력비를 줄일 수 있는 등의 장점이 있다.

해수를 직접 취수하는 대규모 플랜트에서는 유입물 및 부착물의 방지를 위하여 해저 취수구를 상방향으로 하거나 염소를 주입하기도 한다. 그러나 염소주입에 의한 취수배관의 생물부착의 방지는 염소주입관의 부식이나 파손에 의한 염소의 누출로 인하여 해양생물에 나쁜 영향을 미칠 우려가 있기 때문에 바람직하지 않으며, 일반적으로 깨끗한 해수를 취수할 경우에는 관내의 생물부착의 영향을 고려하여 관경이 큰 취수배관을 사용하고 있다.

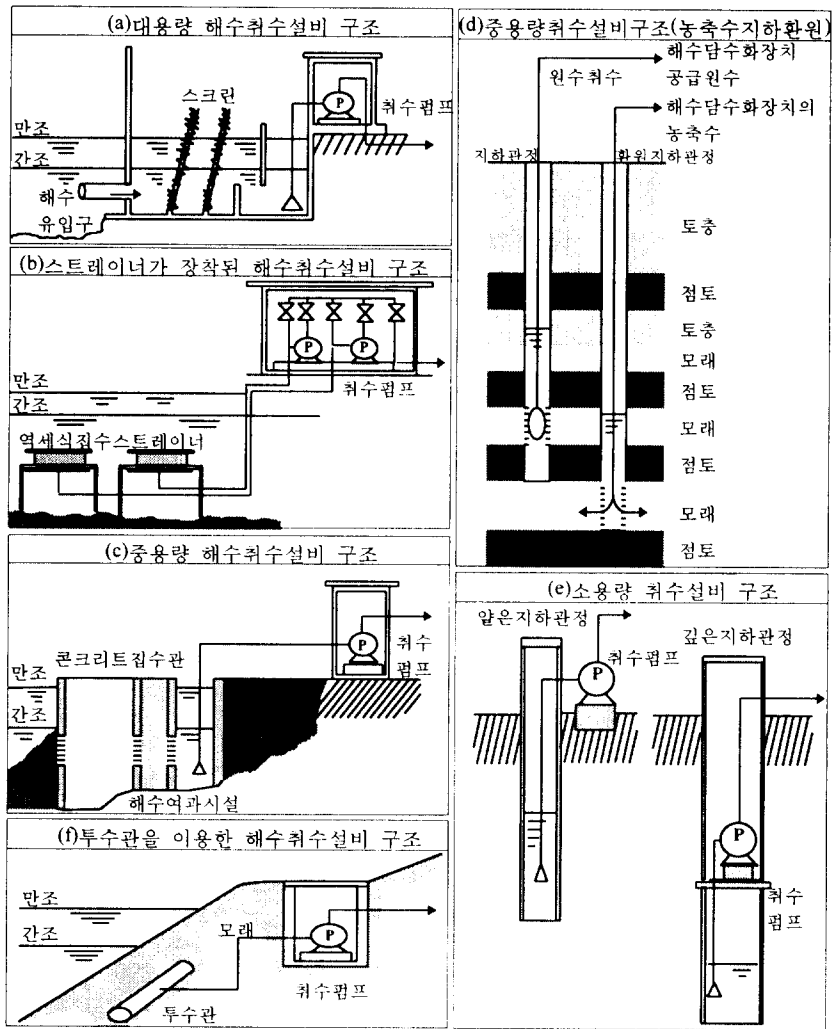


그림 1.1 해수담수화 원수의 취수방법 예

1.1.3 전처리설비

막성능을 장기간 일정한 성능으로 유지하기 위해서는 역삼투막에 나쁜 영향을 미치는 물질을 미리 제거하여야 한다. 해수를 원수로 사용할 경우에는 주로 해수중에 존재하는 미생물, 점토성물질 및 그 외의 콜로이드성물질이 전처리 대상물질이 되며, 이러한 물질이 제거되지 않고 막모듈내로 유입하게 되면 눈막힘 현상을 일으켜 막성능의 저하를 유발하게 된다. 또한 해수는 칼슘 및 마그네슘경도가 높아 모듈내에서 해수가 농축될 때 칼슘과 마그네슘이 막면에서 석출하여 스케일을 형성하게 된다. 따라서 막면의 스케일(Scale)을 방지하기 위해 전처리과정에서 부유물질의 제거 및 경도성분의 제어는 매우 중요하다. 전처리의 방식은 막재료 및 모듈의 형식에 따라 다르지만 일반적으로 전처리에서는 현탁물질의 제거, 막성능저하의 원인이 되는 화학적요인의 제거 및 조정, 스케일 방지대책, 슬라임(Slime)방지대책 및 온도조정 등이 있다.

가. 전처리공정에서 제거되어야 할 물질 및 제어방법

(1) 부유물질

해수를 직접 취수할 경우 해수중에 존재하는 부유물질의 주성분은 동식물성플랑크톤, 점토성물질, 금속수산화물 및 선박에 의해 유출된 유분 등이나 기타 외부로부터 유입된 물질이며, 지하관정을 개발하여 원수로 사용할 경우에는 주로 점토성물질이 부유물질의 주성분이다. 이러한 물질의 제거에는 일반적으로 경제성, 기술의 범용성 등을 고려하여 응집침전-모래여과법이나 응집여과법을 많이 사용하며, 역삼투막모듈로 원수를 공급하기 전에 카트리리지식 정밀여과막을 사용한다. 응집여과법은 응집제를 주입하여 큰 플록을 형성시킨 후 직접 모래여과나 압력식 급속여과기로 여과하는 것이다.

또한 양질의 물을 생산할 수 있는 고액분리공정으로서 한외여과법이나 정밀여과법이 유용한 방법이기도 하나 기술의 개발 및 경제성이 다소 결여되어 있는 것으로 인식되어 있다. 그러나 막제조기술과 공정의 개발 등을 고려하면 전처리공정으로서 실용화가 가장 앞 선 기술이라 할 수 있다. 부유물질에 의한 막투과수량 저하를 방지하기 위하여 각

막모듈의 형상에 따른 탁도 혹은 SDI(Silt Density Index, 혹은 FI : Fouling Index)에 의한 공급원수의 수질기준을 설정하고 있다. 특히 중공사형모듈(Hollow-Fiber)이나 와권형모듈(Spiral-Wound)은 평막모듈에 비해 공급수 유로가 좁기 때문에 전처리를 엄격하게 하여야 하며, 전처리를 엄격하게 하면 할수록 막모듈의 내구성은 향상된다. 특히 중공사형모듈이나 와권형모듈에서 SDI값은 3~4정도를 요구하고 있다.

(2) 슬라임의 방지(살균)

공급원수중에 미생물이 존재하면 막면에 슬라임의 형태로 부착되어 셀룰로오스 아세테이트막의 경우에는 막자체를 열화시키거나 배관 및 전처리설비에 부착하여 성능을 저하시키는 성질을 가지고 있으므로 전처리로서 살균이 필요하다. 미생물의 살균에는 염소(Cl_2)나 차아염소산염(NaClO)이 사용되나 폴리아미드제질막의 경우에는 염소에 의하여 화학적 산화분해가 일어나기 쉽다. 따라서 공급수중에 포함된 잔류염소를 제거하기 위하여 환원제인 SBS(Sodium Bisulfite: NaHSO_3)를 주입한다. 또한 다른 방법으로는 염화암모늄(NH_4Cl)을 주입하여 산화력이 약한 크로라민(NH_2Cl)으로 살균을 하여 막에 미치는 영향을 감소시키기도 하며, 염소의 사용에 의한 막의 화학적 산화분해를 방지하기 위하여 살균제로서 황산동(CuSO_4)을 사용하기도 한다.

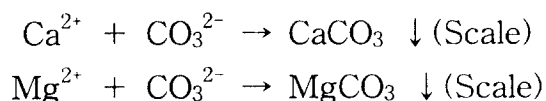
염소는 일반적으로 잔류염소농도로서 $0.2\sim 0.5\text{mg/l}$ 이 되도록 주입하며, 액체염소(Cl_2)나 차아염소산염(NaClO)이 용해되어 유리형 잔류염소인 Cl_2 , HOCl , OCl^- 혹은 암모니아나 유기물과 결합한 결합잔류염소로 존재하여 살균력을 발휘하게 된다.

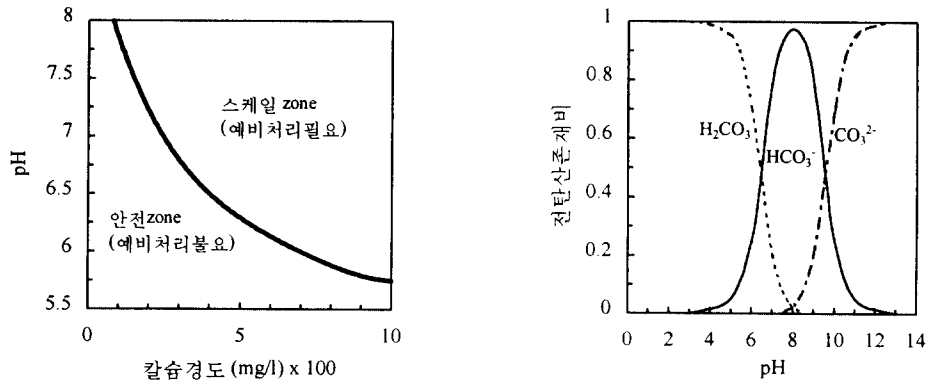
(3) 스케일(Scale)의 방지

막면에 부착되어 막투과수량을 감소시키는 스케일은 유입수중에 용해되어 있는 철, 망간, 실리카, 칼슘, 마그네슘 등이 HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} 등과 결합하여 형성된다. 특히 CaCO_3 , SiO_2 는 막의 역세정이나 화학적세정에 의해 어느 정도 제거가 가능하지만 CaSO_4 는 스케일이 형성되면 제거가 곤란하기 때문에 용해성을 고려하여 석출이 되지 않는 범위에서 운전을 하여야 한다.

실리카(SiO₂)는 불용성과 용해성이 있으며 불용성에는 현탁성과 콜로이드성이 있다. 불용성의 실리카성분은 응집침전 혹은 정밀여과나 한외여과에 의해 제거가 가능하다. 실리카는 해수를 원수로 사용할 경우 용해성뿐만 아니라 콜로이드성분의 양이 적기 때문에 전처리로서 특별히 제거할 필요는 없다. 그러나 여과공정에서 처리가 되지 않는 용해성 실리카의 농도가 높은 원수의 경우, pH와 온도를 조정하거나 농축률을 조정하여 실리카가 석출되지 않도록 하여야 한다. 실리카의 용해도는 pH와 수온에 따라 다르지만 25℃, pH 7에서 100mg/l이며, 석출되지 않을 최대허용농도는 40℃에서 160mg/l이다. 따라서 중성부근에서 운전할 경우 농축후 실리카의 농도가 160mg/l이 넘지 않도록 회수율을 조절할 필요가 있다.

칼슘(Ca) 및 마그네슘(Mg)은 해수중에 각각 약 400mg/l, 1,350mg/l 정도 용해되어 있으며, 역삼투막 모듈내에서 농축이 진행됨에 따라 석출하여 탄산칼슘(CaCO₃)이나 탄산마그네슘(MgCO₃)과 같은 스케일을 형성한다. 특히 탄산칼슘은 해수중에 용해도가 낮으며 약 2배 정도의 농축에 의해 석출이 일어나게 된다. 스케일이 발생하는 pH는 기수(Brackish Water)는 Langlier Saturation Index (LSI), 해수의 경우에는 Stiff and Davis Stability Index(S & DSI)를 수정한 식에 의해 계산이 가능하므로 스케일을 방지하기 위하여 pH를 조정하거나 연화(Softing) 처리를 한다. 해수를 원수로 사용할 때는 pH 조정에 의해 전탄산(CO₃²⁻, HCO₃⁻, H₂CO₃)의 비를 조정하여 스케일의 형성을 방지한다. pH의 변화에 따른 전탄산 존재비의 관계는 그림 1.2 (a)에 나타낸 것과 같으며, 특히 스케일의 형성에 관여하는 CO₃²⁻ 이온의 존재비는 pH가 7이상에서 증가하기 시작하여 pH 13이상에서 100%가 된다. 아울러 그림 (b)에 나타낸 것과 같이 pH를 7이하로 조절하면 칼슘 스케일의 생성 농도가 높아져, pH 6에서 칼슘농도 600mg/l정도까지는 예비처리를 할 필요가 없다는 것을 알 수 있다.





(a) pH에 따른 전탄산 존재비의 변화 (b) 칼슘이온의 pH에 따른 스케일 형성

그림 1.2 전탄산 존재비의 변화 및 칼슘이온의 스케일 형성

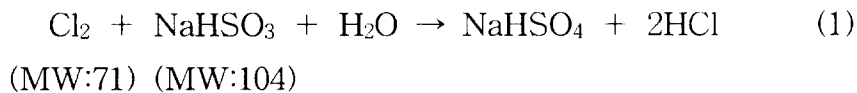
따라서 CO_3^{2-} 이온의 생성을 억제하여 스케일의 형성을 방지하려면 그림 1.2(a)에 나타낸 것과 같이 pH를 7이하로 조절하는 것이 필요하다. 예를 들면 pH 5.5에서는 HCO_3^- 는 10%, H_2CO_3^* 는 90%로 거의가 탄산으로 변화되며, CO_3^{2-} 이온은 대기중으로 방산되어 CaCO_3 를 형성하지 못하고 칼슘 콜로이드로서 존재하게 된다. 실공정에서는 pH를 약 5~6.5정도로 조절하여 스케일의 형성을 방지하고 있다. pH조정용의 산으로는 산의 주입에 의한 막분리성능의 저하를 방지하기 위해서는 황산(H_2SO_4)이 유리하나 침전물이나 스케일의 생성 가능성이 있는 원수의 경우에는 염산(HCl)의 사용이 바람직하다. 이러한 역삼투막 공급원수의 약산성화에 의해 다른 중금속이온(Fe , Cu , Ni , Zn)의 수산화물 생성 방지에도 도움이 되며 전처리필터의 눈막힘 현상 방지에도 도움이 된다.

(4) 막성능 저하의 원인이 되는 화학적 요인의 제거 및 조정

일반적으로 담수화용으로 사용되고 있는 막은 셀룰로오스 아세테이트(Cellulose acetate)와 폴리아미드(Polyamide)계 고분자 재질의 막이 주종을 이룬다. 이러한 막은 원수의 화학적인 요인에 의해 노화(Degradation)되어 막의 분리성능이 저하되기 때문에 이러한 요인을 제

어할 필요가 있다. 특히 화학적인 노화의 인자는 pH와 미생물의 증식을 억제하기 위하여 주입한 염소 및 원수에 존재하는 산소 등이다. 셀룰로오즈막은 가수분해에 의해 막성능이 저하되기 쉬우며, 특히 가수분해속도는 pH 7이상에서 빠르고, pH 4.7에서 최소치를 나타낸다. 그러나 pH가 너무 낮으면 장치의 부식이 촉진되기 때문에 실장치에서는 pH를 5~6.5정도로 조절하여 운전한다. 이렇게 pH를 조정하면 칼슘이나 마그네슘에 의한 스케일 방지에도 유효하다. pH의 조정은 황산 혹은 염산을 이용하여 전처리로서 응집여과를 하는 경우에는 응집제 주입전에 주입한다.

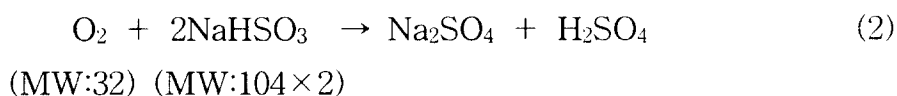
폴리아미드계의 합성고분자막은 잔류염소에 의해 화학적 산화분해가 되기 쉽다. 따라서 막모듈에 전처리한 원수가 공급되기 전에 잔류염소를 제거하는 조작이 필요하다. 탈염소처리방식으로는 활성탄흡착법, 화학약품환원법 등이 있지만 최근에는 중아황산나트륨(SBS, NaHSO₃, Sodium Bisulfite)을 이용한 화학약품환원법이 사용되고 있다. 살균제로 염소(Cl₂)를 주입할 경우 SBS와의 반응은 다음과 같다.



수중에 잔류염소가 1mg/l 존재하면 필요한 SBS의 양은 1mg/l × (104/71)=1.5mg/l로서 잔류염소의 1.5배 양의 SBS가 필요하다.

일부 역삼투막중에는 원수중에 존재하는 산소에 의해 화학적인 열화를 받기 쉬운 재질이 있다. 예를 들면 T사의 폴리아미드재질의 막은 최대용존산소농도를 0.5mg/l로 정하고 있다. 따라서 용존산소의 농도가 허용치 이상으로 높을 경우에 소규모시설에서는 SBS(Sodium Bisulfite) 환원법, 대규모시설에서는 진공탈기법으로 처리를 하고 있다.

용존산소와 SBS의 반응식은 다음과 같다.



25℃ 해수중에 포화산소 농도는 8mg/l정도로 당량적으로는 52mg/l의 SBS가 필요하지만 실제로는 80mg/l정도 주입한다. 만약에 탈염소와 탈산소처리를 필요로 한다면 앞에서 설명한 식 (1)과 (2)의 합이 된다. 용존산소와 SBS의 반응은 5~10분정도 시간이 소요되고 잔류염소와 SBS의 반응은 순간적으로 일어나므로 산소제거를 필요로 하는 역삼투막을 장착한 장치에서는 5~10분정도의 체류시간을 가지는 탈산소조가 필요하다. 그러나 셀룰로오즈막을 사용할 경우의 잔류염소 농도는 공급수 입구쪽에서는 조절을 하지 않고 농축수의 출구에서 0.5mg/l이상이 되도록 조절하여야 한다. 잔류염소 및 용존산소 제거에 사용하는 SBS는 공급수 입구쪽에서 주입하며 동시에 농축수쪽의 농도를 측정하여 효과의 지속성을 확인하여야 한다.

이와 같이 화학적요인의 제거 및 조절을 위하여 pH조정, 탈염소 및 탈산소처리를 할 필요는 있으나, 이러한 처리는 원수 및 막재질의 특성을 고려하여 결정하여야 한다.

나. 전처리의 단위공정

(1) 응집

(염화제2철 응집제 : FeCl_3)

철염으로부터 생성된 플록은 생성, 응집, 침전 등에 요하는 시간이 짧고, 플록이 강하므로 처리수 중에 잔류철분이 적으며, 또한 이취미성분, 색도 등의 제거성능이 우수하다. 그러나, 부식성이 강하고 응집제의 사용을 잘못할 경우 적갈색으로 착색할 우려가 있다. 적정 pH범위가 5~11로서 넓기 때문에 해수담수화의 전처리로서 많이 사용되고 있다.

(황산알루미늄 응집제 : $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$)

황산알루미늄은 대부분의 부유물질에 대하여 응집효과가 있으며 독성이 없어 대량으로 주입할 수 있다. 그러나 철염에 비하여 생성한 플록이 가볍고, 슬러지가 많이 발생하며, 또한 적정 pH범위가 6~8로서 좁은 것이 단점이다.

(2) 압력식급속여과설비

압력식급속여과조는 밀폐구조로 되어 있어, 유입압력을 높임으로서 여과저항을 줄여 여과속도를 크게 할 수 있는 잇점이 있다. 장치구조는 압력용기, 여제, 펌프, 브로아 등으로 구성되어 있다. 여제의 두께는 일반적으로 500~1000mm 정도이며, 여제하부에 200~300mm 정도의 지지체를 두고 있다. 여제의 층은 주로 2~3층으로 하며, 여제는 주로 안트라사이트와 모래를 사용하고 있다.

구조는 물의 흐름에 따라 상향류, 하향류 및 상하향류식으로 구분하며, 주로 하향류식을 많이 채용하고 있다. 상향류식은 여과층의 구조를 균일하게 유지하여 여과유속을 크게 할 수 있는 장점이 있기 때문에 일부 채택하고 있다. 그러나 여과유속이 한도를 넘을 경우 부유물이 여제에 역류되지 않을 우려가 있기 때문에 이러한 단점을 보완하기 위하여 상하에 유입수압을 가하여 여과하는 상하향류식을 채택하고 있다.

1.1.4 역삼투설비

가. 막모듈의 특징

역삼투막모듈에는 와권형(Spiral Type), 중공사형(Hollow-Fiber Type), 평막형(Plat Type) 및 관상형(Tubular Type) 등이 있다. 막모듈의 특징은 표 1.1에 나타낸 것과 같이 와권형 및 중공사형은 막교환의 용이함, 높은 비표면적 등으로 인하여 해수나 염수의 담수화에 많이 사용되고, 평막형이나 관상형은 막의 세정이 용이하기 때문에 고농도의 부유물질(SS)이 함유된 원수에 주로 사용된다. 특히 해수의 담수화에 많이 사용하는 와권형의 막모듈은 구조는 막(Membrane), 막베이킹(Membrane Backing), 투과수로(Permeate Carrier), 투과수튜브(Permeate Tube), 난류를 촉진시키는 메쉬스페이서(Mesh Spacer) 및 투과수와 농축수의 혼합을 방지하는 오링(O Ring), 압력용기 등으로 구성되어 있다.

표 1.1 각종 막모듈의 특징

항 목	와 권 형	중공사형	평 막 형	관 상 형
부유물질(SS)허용성	○	△	◎	◎
막의 세정성	○	○	◎	◎
막충진밀도(비표면적)	○	◎	○	△
모듈구조의 간단함	○	◎	△	△
막교환의 용이	◎	◎	○	△
용 도	기수 및 해수담수화	기수 및 해수 담수화	고농도SS 함유수	고농도SS 함유수

(◎○△: 상대적우위 ◎>○>△)

나. 해수담수화 시설의 역삼투설비 배치 예

그림 1.3는 해수담수화 시설의 설비 배치 예를 역삼투설비만 나타낸 것으로 (a)는 일반적인 해수담수화 설비의 구성도이다. 이 설비는 1단 역삼투막 1기로 구성되어 있으며 먹는물 생산용 해수담수화 시설에 많이 사용된다. 또한 (b)는 (a)와 같은 구조로 먹는물 생산용 해수담수화 시설에 많이 사용하는 시설이나, 1기의 시설에 2계열의 역삼투설비가 장착된 구조로 1계열은 예비기로서 사용한다. 즉 1계열이 고장이나 수리를 위하여 정지하여도 사용이 가능한 시설이기 때문에 離島 등 유지관리가 곤란한 지역에 사용할 수 있는 시설이다. 아울러 여름철과 같이 물수요가 많은 시기에는 2계열을 가동하다가 겨울철과 같이 물수요가 적은 시기에는 1계열만 가동할 수 있는 등의 장점도 있다. (c)는 2단 역삼투설비로서 해수로부터 순수를 만들기 위한 설비이다. 1단 역삼투막에서 TDS 200~300mg/l정도 처리한 후 2단 역삼투막에서 이 농도의 1/100정도까지 처리하여 발전소 용수 및 화학공장용수에 사용한다.

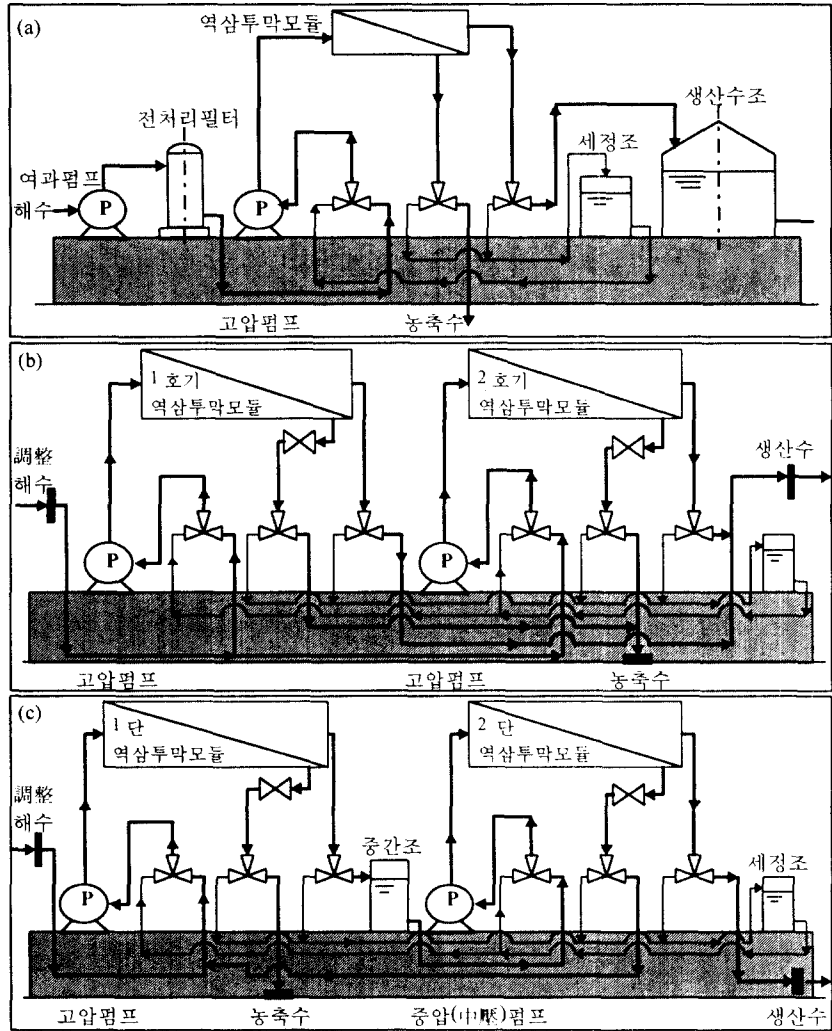


그림 1.3 해수담수화 시설의 역삼투설비 배치 예

다. 기수(Brackish Water)담수화 시설의 역삼투설비 배치 예

그림 1.4는 기수담수화 시설의 역삼투설비 배치 예를 나타내었다. (a)는 기수담수화 시설에서 역삼투설비의 일반적인 배치로서 TDS 500~1,000mg/l정도의 원수를 TDS 5~10mg/l정도까지 처리할 수 있다. 이러한 생산수를 먹는물로 사용할 경우 경도 성분이 부족하기 때문에 미네랄을 주입할 필요가 있다. 미네랄의 주입은 원수를 적당량 혼합하여 조정하며 이런 경우에는 생산수의 수질을 측정할 수 있는 전기전도도계가

장착되어야 한다. 그러나 원수에 경도 성분의 농도가 낮은 경우에는 미네랄주입 설비가 필요하다. (b)는 높은 회수율을 얻을 수 있는 설비의 배치로서 TDS 1,000mg/l 정도의 기수를 90~95%의 회수율을 얻을 수 있다. 그러나 끝부분의 막모듈은 앞부분의 막모듈에서 90%정도가 투과하여 유속의 감소로 인한 막면에 스케일이 부착할 우려가 있다.

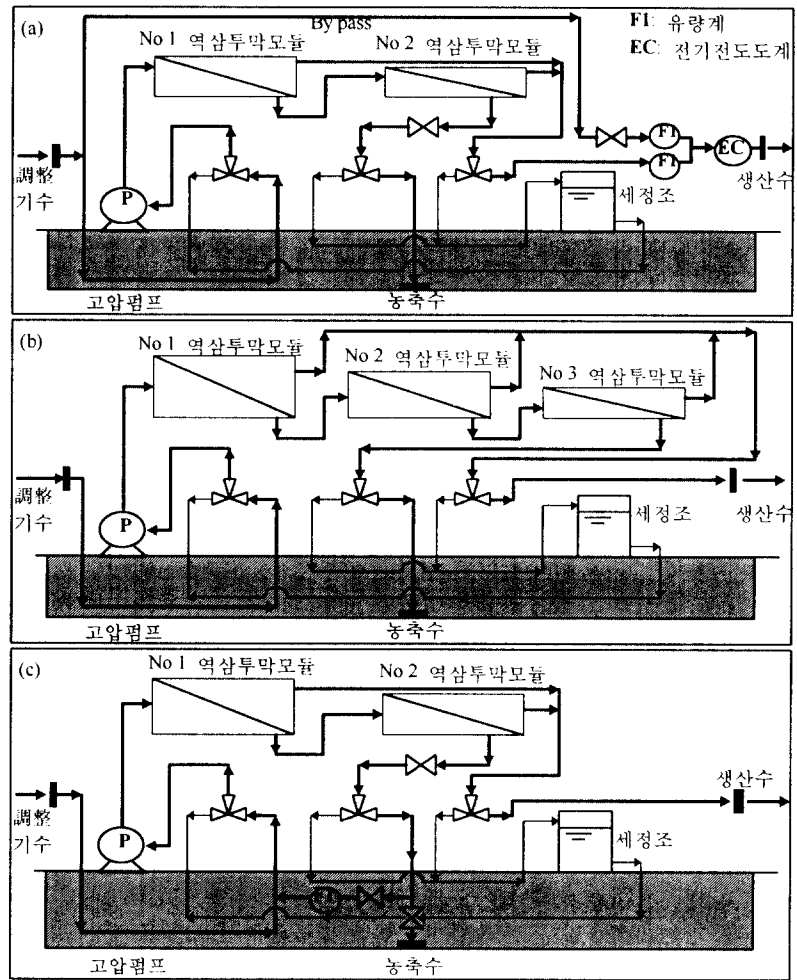


그림 1.4 기수담수화 시설의 역삼투설비 배치 예

따라서 끝부분의 막모듈은 엘리먼트의 수를 줄여 막모듈내의 유속을 유지하게 한다. (c)는 하루 100m³이하의 소용량 고회수율을 얻을 수 있는 설비 배치 예이다. 소용량의 경우 원수의 공급량이 적어 역삼투막 모듈내의 유속이 늦어 스케일이 부착하기가 쉽다. 따라서 공급량을 높이기 위하여 농축수의 일정량을 원수와 혼합한다.

1.1.5 후처리설비

1단 역삼투시설의 생산수는 대부분의 항목에서 먹는물의 수질기준을 만족하지만 pH는 5~6정도로서 약간 낮다. 이러한 현상은 H₂CO₃의 배제율이 낮아 생산수중에 잔존하기 때문에 일어난다. 또한 칼슘과 마그네슘의 2가이온이 거의 제거되기 때문에 생산수의 경도가 상당히 낮으며, 이러한 생산수를 직접 배수하면 배관 및 급수설비의 부식과 적수의 문제를 발생시킬 우려가 있다. 따라서 역삼투막 생산수를 먹는물로서 사용하기 위해서는 염소소독, pH조정, 경도조정 등의 후처리가 필요하다. pH와 경도조정을 위하여서는 Ca(OH)₂나 NaOH을 주입하거나 미네랄탑을 통과시킨다. 미네랄탑은 역삼투막 생산수가 미네랄石과 장시간 접촉하지 않고 충전탑을 즉시 통과하는 구조로 하여야 한다. 또한 pH조정은 공기폭기에 의해 탈탄산처리를 하는 것이 유효하다. 소독은 잔류염소량이 유리형 잔류염소로서 0.1mg/l로 기준이 설정되어 있다.

따라서 셀룰로우스 아세테이트(Cellulose acetate)막의 경우는 전처리 공정에서 살균제로 주입된 잔류염소가 존재하기 때문에 후처리로서 염소소독을 할 필요가 없으나, 폴리아미드계 고분자막의 경우는 필요하다. 특히 염소소독은 물의 맛이 변화하지 않도록 pH 및 경도성분을 조정한 후에 필요 최소량을 주입하여야 한다.

역삼투시설을 일시 정지하거나 화학세정을 한 후 운전을 재개할 경우에 생산수의 염분농도가 높아지기 때문에 생산수 출구에 전기전도도계를 설치하여 수질을 감시할 필요가 있다. 고압펌프를 정지하면 역삼투막의 1차측 압력이 역삼투압 이하가 되기 때문에 생산수탱크로부터 고압펌프쪽으로 역류하는 현상이 생긴다. 이러한 현상을 Suck-back현상이라고 하며, 이러한 현상에 의한 막의 손상을 방지하기 위하여

Suck-back탱크를 두어 염소소독이 되지 않은 생산수가 역류하도록 한다.

1.1.6 농축수 및 배출수처리 설비

가. 농축수의 배출

역삼투법에서 폐기되는 농축수는 해수보다 염분농도, 밀도 및 온도가 높은 상태에 있다. 이런 농축수를 해안에 방류하면 농축수가 해저에 침강하여 고밀도층을 형성하고 이로 인해 염분농도가 높아져 해양생태계에 악영향을 미칠 우려가 있다.

따라서 농축수가 주변해수와 쉽게 혼합 및 희석이 되도록 배수설비가 되어야 한다. 플랜트로부터 주변해역으로의 농축수의 배출방법에는 기계중력식, 희석방류식 및 자연방류식 등을 예로 들 수 있으며, 이러한 방법은 시설의 규모, 주변해역의 지형, 조류 및 해류의 형태에 따라 적절하게 선정되어야 할 것이다.

나. 여과설비 세정배수의 처리

소규모 해수담수화 시설에서 발생하는 세정 배수는 일반적으로 농축수와 혼합하여 바로 바다로 희석 방류한다. 그러나 대규모시설에서는 세정배수중에 포함된 고농도의 부유물질은 고액분리를 한 후 탈수하여 케이크로서 폐기하기도 한다.

이러한 세정배수는 법적기준 및 주변해역의 수질에 따라 규모에 관계없이 적당한 처리가 이루어져야 할 것이다.

다. 막보관폐액 및 막세정폐수의 처리

막의 화학세정수는 사용약품의 종류 및 농도에 따라 다르지만 일반적으로 소규모 시설에서 배출되는 산알칼리 세정수는 중화처리하여 바다로 방류한다. 그 외의 화학세정수는 주변해역의 수질 등을 고려하여 폐기장소 및 처리방법을 선정하여야 한다. 그러나 내륙의 해안에 설치된 대용량의 시설에서는 주변의 폐수처리장에서 처리하기도 한다.

1.2 생산수의 수질 특성

해수담수화 시설의 생산수는 목표로 하는 수질기준에 적합하여야 하며, 특히 먹는물 생산용 역삼투법 해수담수화 시설의 생산수는 먹는물의 수질기준에 적합하여야 한다. 해수에는 75종 이상의 원소가 포함되어 있으며 주성분은 Cl^- , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ , Br^- , Sr^{2+} , SO_4^{2-} 등으로 이러한 성분의 역삼투막에 의한 제거율은 99%이상으로서 상당히 높고 또한 유기물 및 세균도 충분히 제거된다.

일반적으로 해수담수화용 역삼투막 생산수의 수질은 우리나라의 먹는물 수질기준 45개 항목중에서 pH를 제외하고는 기준에 적합하다. 역삼투막을 통과한 직후의 생산수는 경도성분이 10mg/l이하, pH 5.5정도이며, 또한 잔류염소가 없는 특징을 가지고 있다. 따라서 후처리공정으로서 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 주입이나 미네랄탑의 통과 및 지표수와 혼합하여 pH 및 경도성분을 조정하여야 하며, 또한 염소를 주입하여 위생적으로 안전성을 확보하여야 한다.

해수중의 트리할로메탄전구물질(THMFP) 및 약 65mg/l정도 포함된 브롬이온(Br^-)은 염소와 반응하여 THMBr(CHBr_3) 및 HOBr이 된다. 역삼투막에 공급되기 전에 HOBr은 SBS에 의해 Br^- 이온으로 환원되지만 THMBr는 그대로 존재한다. 여기서 Br^- 와 THMBr의 역삼투막에 의한 제거율은 염분과 같은 정도의 제거율을 가지는 것으로 추측되기 때문에 생산수중에 Br^- 이온은 0.4mg/l 및 THMBr은 5 μg /l정도 존재하는 것으로 추측된다. 그러나 이러한 농도는 먹는물의 수질기준인 THMs 0.1mg/l에는 적합하나, 지표수와 혼합할 경우에는 THMs농도의 증가에 약간의 영향을 미칠 것으로 우려되므로 평가를 할 필요가 있다.

특히 THMs의 제거성능은 폴리아미드재질의 해수담수화용 역삼투막에서는 약 80~90%이나 셀룰로오스 아세테이트 재질의 막에서는 생산수의 THM이 공급수의 THM보다 1.2~1.5배정도 높게 나타났다. 이러한 현상은 셀룰로오스 아세테이트막의 경우 THMs이 막과 親和性이 강하고 물보다 막투과성이 더 크기 때문이며, 폴리아미드재질의 막은 THMs과 막사이의 친화성이 약하기 때문인 것으로 조사되었다.

해수중에 포함된 붕소(B)는 4~5mg/l정도로서 주로 遊離形이나 염의

형태로 존재해 있으며, 역삼투막으로는 제거가 잘 되지 않는다. 붕소는 인체에 근육이나 장기에 존재하지만 많은 양을 섭취할 경우에는 중추 및 말단신경계통과 소화기관에 장애를 일으키는 물질로 알려져 있다. 우리나라의 먹는물 수질기준에서는 대상항목에서 제외되어 있으나, 일본의 수도수 수질기준에서는 감시항목에 0.2mg/l이하로 정하고 있다.

해수를 pH 9이상으로 조절하면 이온화되어 막에 대한 저지율이 높아 지지만 스케일 발생의 우려가 있기 때문에 pH 조절에 의한 제어는 곤란하다. 따라서 해수를 담수화하여 먹는물로 이용할 경우 붕소의 제거에 대한 연구는 장래의 과제이다.

1.3 운전조건의 변화가 막의 투과수량 및 수질에 미치는 영향

역삼투설비에서 온도와 압력이 변화하면 막의 성능, 내구성, 화학반응성 등에 영향을 미친다. 특히 수온과 압력이 변하면 생산수의 수질과 수량이 변하며 다시 온도와 압력이 원상태로 되면 수량과 수질도 원상태로 회복된다. 이러한 변화는 가역적인 변화이며 역삼투막의 품질이나 내구성이 변화한 것은 아니다. 수온이 높아질 경우, 막을 투과하는 생산수량의 증가와 더불어 염의 투과량도 증가한다. 복합막의 경우는 물의 투과량의 증가보다 염분의 투과량의 증가정도가 크기 때문에 투과수중의 염분의 농도가 높아지게 된다. 또한 압력이 높아질 경우에는 투과하는 수량이 증가하지만 염분의 투과량은 거의 영향을 받지 않는다. 따라서 물의 투과량보다 염분의 투과량의 증가정도가 작기 때문에 투과수중의 염분의 농도가 낮게 나타난다. 압력이 낮아지면 물의 투과속도가 적게 되고 염분의 농도가 높아지기 때문에 일정이상의 압력에서 운전하는 것이 중요하다.

역삼투막 장치에서 운전조건이 일정하여도 막의 구조가 영향을 받아 투과수량이 시간의 경과와 더불어 감소하는 것을 壓密化현상이라고 한다. 사용한계범위와 압밀화의 정도는 막의 제조방법과 막의 종류에 따라 다르지만 셀룰로오즈 아세테이트막은 압밀화가 일어나기 쉽기 때문

에 이러한 현상을 전제로 하여 설계할 필요가 있다. 살균제로서 사용한 염소에 대하여 내염소성이 강한 셀룰로오즈 아세테이트막의 경우에도 수온이 높아지면, 염소의 산화력이 증가하여 막의 내구성에 영향을 미치기 때문에 염소의 사용을 제한하는 등 운전관리에 주의하여야 한다.

역삼투막 장치에서 중요한 운전조건은 압력, 수온, 농도, 공급수유량, 회수율이 있다. 이러한 운전조건중에서 회수율이 일정하고 수온이 변화할 경우 수량 및 수질의 변화는 다음과 같다. 회수율이 일정하므로 투과수량의 증감에 따라 공급수의 유량도 변화하며 그림 15, 그림 16, 그림 17의 실선에 나타난 것처럼 온도의 증가와 더불어 수량 및 염분의 농도도 증가한다. 공급수량이 일정하고 수온이 변화하였을 경우 투과수량의 변화는 수온의 상승과 더불어 증가하며 또한 회수율도 증가한다. 여기서 회수율이 증가하면 농축수의 농도가 증가하기 때문에 삼투압이 증가하게 된다. 따라서 회수율이 온도의 상승과 더불어 증가할 경우 앞에서 설명한 수온이 증가한 경우와 비교하여 볼 때 삼투압이 가산되기 때문에 그림 15, 그림 16, 그림 17의 파선과 같이 변화한다. 따라서 역삼투막 공급수의 연간 수온 변화폭이 클 경우 높은 수온에서는 생산수량을 많게 하고, 낮은 수온에서는 생산수량을 적게 하여 수질의 변화를 감소시켜야 한다.

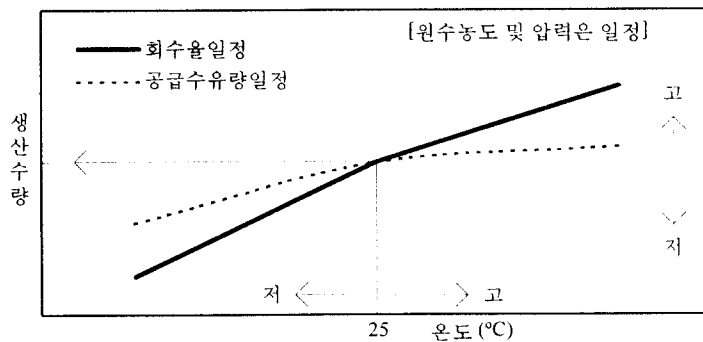


그림 15 해수온도와 생산수량의 관계

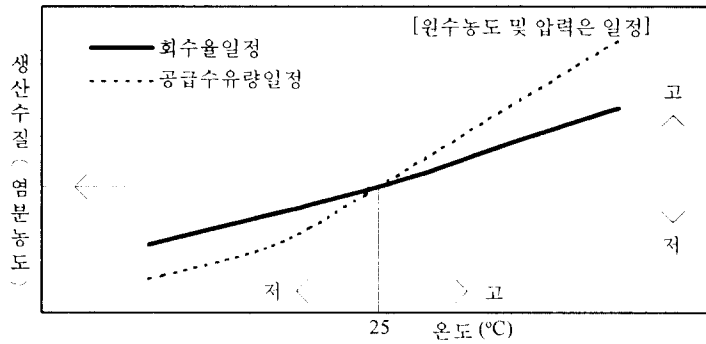


그림 1.6 해수온도와 생산수질의 관계

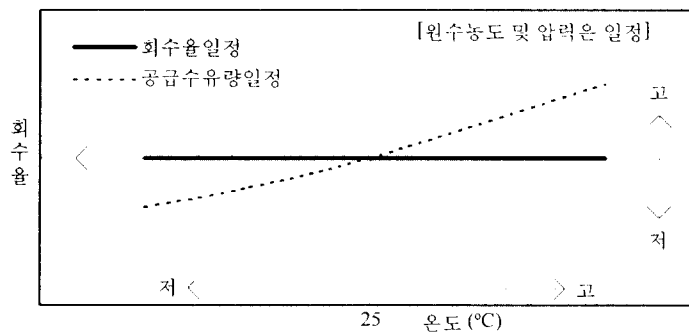


그림 1.7 해수온도와 회수율의 관계

1.4 역삼투법의 전망

최근에 일부지역의 만성적인 식수부족을 해결하기 위한 방안으로 도입하고 있는 역삼투법은 다른 방법과 비교하여 불 때 에너지절약형의 해수담수화 방법으로서 주목을 받고 있다. 담수를 공급할 수 없는 이도의 대체 수자원으로서의 개발과 더불어 장래에 물수요에 대비한 수원의 확보에 있어서도 해수담수화는 댐과 비교하여 싼 건설비, 짧은 건설기간, 수요의 인접지역에 건설이 가능, 적은 송수설비 등으로 인하여 해수

담수화 시설의 건설이 이루어질 것으로 기대하고 있다. 그러나 역삼투법에 의한 해수담수화는 막의 내구성의 향상, 플랜트의 살균방법, 전처리 방법 및 운전관리 방법을 향상시킬 필요가 있다. 또한 먹는물 공급원으로서 역삼투법 해수담수화를 이용하기 위해서는 생산비용의 삭감, 트리할로메탄 및 우리나라의 수질기준에는 없지만 붕소의 제거성능 향상 및 효과적인 제거시스템을 구축할 필요가 있고 아울러 유기물의 제거에도 관심을 기울여야 할 것이다.

우리나라에서도 이러한 연구와 더불어 장래의 수요에 대비하여 해수담수화용 막 및 고압펌프 등 핵심부품의 국산화가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

1.5 맺음말

우리나라에서는 현재 만성적인 식수부족 현상을 겪고 있는 일부 도서지역에 수십톤규모의 역삼투법 해수담수화 장치가 가동중에 있으나, 비싼 물값과 운전자의 기술부족 및 설치기술 부족으로 많은 어려움을 겪고 있는 실정이다. 또한 현재 일부도서 지역에 식수를 생산하기 위한 역삼투법 해수담수화시설을 설치할 예정이나 경험부족 및 설치기술 부족으로 많은 어려움이 예상된다. 따라서 우리공사에서는 우리나라의 실정에 적합한 먹는물 생산용 역삼투법 해수담수화 시설의 최적화를 위한 연구를 진행하고 있다. 특히 먹는물 생산용 해수담수화 시설은 염분을 제거하기 위한 설비뿐만 아니라 먹는물로서 급수하기 위한 후처리 설비 및 배수시설 등과 더불어 주변의 환경을 고려한 최적 시스템이 도입되어 설치되어야 할 것이다.

아울러 먹는물을 생산하기 위한 역삼투법 해수담수화 시설의 도입에 있어서는 시설의 설치지역이 오지임을 감안하여 민관이 유기적으로 협조하여 유지관리 및 기술지원 등에 관심을 기울여야 할 것이다.