

역삼투법 해수담수화기술의 현황과 향후전망



김충환

한국수자원공사 K-water 연구원 상해수도연구소
정수처리연구팀장 수석연구원
☎042-870-7520, chkim@kwater.or.kr

〈필자약력〉

- 1996. 4 : K-water 연구원입사
- 2002. 4 : 수석연구원
- 2007. 1 : 정수처리연구팀장

1. 서론

물은 생명의 근본이며 인간의 모든 경제, 사회, 문화 활동에 없어서는 안 될 중요한 자원중의 하나이다. 그러나 이와 같은 물이 인구의 증가 및 급속한 산업화로 인해 부족해지면서 전세계적으로 물 부족 사태는 매년 심각해지고 있으며, 현재 전세계 인구 중 40%가 식수난을 겪고 있는 실정이다. 우리나라도 마찬가지로 물 부족국가로 분류되어 있으며, 해마다 국부적인 갈수 문제와 더불어 지표수 및 지하수의 오염 등으로 인하여 더욱 심화될 것으로 예상된다. 보고에 의하면 21세기 초에는 10%이상의 물

부족 사태가 발생된다고 한다. 따라서 새로운 물 공급원을 개발하는 것이 시급한 당면과제로 댐건설, 지하수 개발, 하수 재이용, 해수담수화 및 인공강우 등이 거론되고 있다.

특히 해수담수화는 지구상에 무한정 존재하는 해수를 갈수의 영향없이 담수화하여 물 부족에 대처할 수 있는 방법이기 때문에 절대적인 담수자원이 부족한 지역에서는 유일한 대안으로서 그 필요성이 대두되고 있다.

2. 해수담수화기술

일반적으로 수도에 상용화되어 있는 해수담수화 기술에는 [표 1]에 나타난 것과 같이 이 역삼투법, 증발법, 전기투석법이 있으나, 중대규모 뿐만 아니라 소규모에는 역삼투법, 발전시설 등과 연계한 중대규모의 복합시설에는 증발법이 도입된다. 특히 역삼투법은 유지관리가 편리하고, 원수중의 염분농도 범위에 관계없이 도입이 가능하며 적용실적이 많기 때문에 우리나라 대부분의 섬에 도입되어 있다. 그러나 이러한 역삼투법 해수담수화기술은 에너지가 많이 소요되는 기술로서 수도에 도입될 경우 일반 도시수도보다 물값 상승의 원인이 될 것으로 예상된다. 따라서 최근에는 역삼투법 해수담수화기술의 고효율화를 위한 기술이 상용화되어 도입되고 있지만 이러한 기술의 대부분은 운영비용을 절감하는 기술이다. 상용화된 기술에는 해수를 원수로 사용할 경우 고압 펌프의 에너지를 절감시키기 위한 에너지 회수장치,

담수생산의 회수율을 높이기 위한 고회수율 장치, 전처리장치의 고효율화를 위한 분리막(한외여과막 및 정밀 여과막)장치의 도입 등이 있다. 또한 수질기준의 강화에 따른 공정의 개선과 해양심층수를 사용한 연관산업과의 연계 이용 등 새로운 기술도 도입되고 있다.

[표 1] 해수의 담수화 방법에 따른 실용성 비교

항 목	역삼투법	증 발 법	전 기 투 석 법
기술의 완성	도최신의 이상적인 담수화 방법으로서 기술의 완성도가 높다.	초기 개발된 담수화 방법으로서 기술의 완성도가 높다.	기수담수화에는 실적이 있지만, 해수담수화에는 실적이 적다.
대규모 시설의 실적	최근 대규모시설에 실적이 증가하고 있다. 1유니트 5천~6천 ³ ㎥/일	중동지역 대규모시설의 주방식으로 실적이 많다. 1유니트 2만~3만 ³ ㎥/일	해수 담수화용의 대규모시설은 없다.
경제성 (에너지 소요량)	해수담수화 기술중에서 에너지 소비량이 가장 적다.	비교적 에너지 소비량이 많으며 에너지 비용이 높은 곳에는 적당하지 않다. 발전소 등 에너지 생산 플랜트와 2중목적의 플랜트에 적합하다.	해수담수화와 같이 원수의 농도가 높으면 에너지 소비량이 많아서 비경제적이다.
유지 관리	상온에서 운전을 하므로 저압부분에는 플라스틱재료를 사용한다. 따라서 재료부식문제가 비교적 적다. 운전기기는 펌프가 중심이므로 운전유지 관리가 비교적 용이하다. 막모듈의 교환이 비교적 많다.	높은 온도에서 운전하므로 재료의 부식이 많다. 보일러, 펌프, 진공장치등 유지관리를 필요로 하는 장치가 많다.	상온, 상압에서 운전을 하므로 플라스틱재료의 사용이 가능하며, 이로 인하여 부식문제는 비교적 적다. 정류기, 펌프의 운전이 중심이므로 유지관리가 쉽다. 막의 세정 교환주기가 약간 빠르다.

3. 역삼투법에 의한 해수담수화

3-1. 역삼투법

반투막을 사이에 두고 해수와 담수를 접하게 하면 담수가 염수측으로 이동하여 염수가 희석된다. 이러한 화학적포텐셜에 의한 자연현상을 삼투(Osmosis)라고 한다. 이동의 구동력(Driving force)은 용질의 농도차에 의한 화학적포텐셜(Chemical potential)이고, 물의 이동으로 용질의 농도가 높은 염수측에 작용하는 압력을 삼투압(Osmotic pressure)이라고 한다. 이러한 희석은 삼투압과 액면차의 압력이 일정할 때까지 계속되며, 삼투압은 용해되어 있는 염분농도에 거의 비례하여 용질 1,000mg/l당 0.6~0.8kgf/cm² 정도로서 표준해수(TDS(Total Dissolved Solids)=35,000mg/l)의 경우는 약 25kgf/cm² 이 발생한다. 반대로 삼투압보다 높은 외부 압력을 가하면 물은 용질의 농도가 낮은 담수 쪽으로 이동하게 되는데 이 현상을 역삼투(Reverse osmosis)라고 한다.

염분농도 35,000mg/l의 해수는 삼투압이 약 25kgf/cm² 이고, 담수율이 50%인 조건에서는 삼투압이 24.5×1.5=37kgf/cm² 이 되기 때문에 역삼투법에서는 이보다 높은 압력을 해수에 가해야 물이 투과하게 된다. 실제 해수담수화용 역삼투 공정에서는 압력이 약 42kgf/cm² 이상이 되어야 투과수가 분리되기 시작하며 약 56kgf/cm² 에서 정상운전이 가능하다.

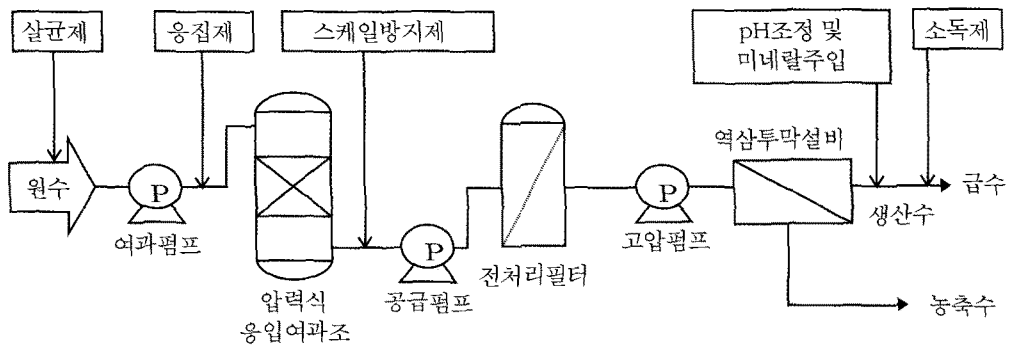
역삼투막을 수처리에서 사용할 경우 제거대상물질은 부유물질, 대장균, 세균, 바이러스, 일반유기물, 무기물질, 농약성분, 무기성이온 등이며, 담수화에서는 수만 ppm의 고농도에서 수천 ppm의 저농도까지 넓은 범위의 염분제거에 사용되고 있다.

3-2. 기본 공정

역삼투법에 의한 먹는물 생산용 담수화시스템의 설비는 기본적으로 막의 성능을 일정하게 유지하기 위한 전처리설비, 원수를 역삼투막모듈에 공급하기 위한 고압펌프, 용존염을 제거하기 위한 역삼투막모듈 등의 세 부분으로 구성되지만, 실제 시설에서는 원수를 공급하기 위한 취수설비, 막으로 처리된 생산수를 먹는물로 공급하기 위한 설비, 세정설비 및 세정배수처리설비 등이 필요하다. 먹는물 생산용 역삼투법 해수담수화 시설의 기본적인 공정도는 [그림 1]과 같다.

현재 먹는물 생산용 소규모 역삼투법 해수담수화 시설에 많이 채용되고 있는 기본 단위공정에서 전처리설비로는 응집제주입에 의한 압력식급속여과조와 카트리지식 전처리필터가 있고 역삼투설비로는 고압펌프와 와권형(Spiral형)막을 사용한 1단 역삼투막모듈이 있으며, 후처리설비로는 pH조정설비, 미네랄주입조 및 소독설비 등이 있다.

시설의 장애제거 및 성능을 일정하게 유지하기 위하여 주입되는 화학약품은 살균제로서 염소(NaClO), 응집제로서 염화제2철(FeCl₃), 폴리아미드 재질의 막을 사용할 경우 잔류염소를 제거하기 위한 환원제로서 SBS(Sodium Bisulfite)등이 있다. 또한 먹는물로서 급수하기 위하여 NaOH나 Ca(OH)₂에 의한 pH조정과 맛을 내기 위한 미네랄성분 첨가 및 염소(NaClO)소독 등을 한다.



[그림 1] 먹는물 생산용 역삼투법 해수담수화 시설의 기본공정도

4. 고효율 역삼투법 해수담수화기술

해수담수화 기술 중에서 역삼투법에 관한 신기술은 기존시스템의 비용절감에 중점적으로 도입되고 있다. 비용을 저감시킬 수 있는 요소는 [표 2]에서와 같이 건설비의 저감, 동력비의 삭감, 종합적인 설계 및 운전비용의 삭감 등으로 건설비에서는 전처리설비의 간략화, 동력비에서는 역삼투설비 농축수의 압력에너지 회수에 의한 고압펌프의 동력비 절감 등을 들 수 있다. 아울러 고압펌프·동력회수 터빈의 효율개선기술도 새로운 기술로 개발되고 있다.

[표 2] 효율적인 비용절감 대책

저감요소	대 책	기술개선대상설비
건설비의 삭감	처리공정의 간략화	전처리설비, 배수처리설비
	설비, 기기의 고효율화	역삼투설비
동력비의 삭감	설비, 기기의 고효율화	역삼투설비, 고압펌프·동력회수설비
	저가전력의 이용 / 폐열, 미이용에너지 이용 신규동력원(심층낙차)이용	-
전체비용의 저감	해수 또는 에너지 복합, 종합이용	해수담수화복합시스템 농축해수 유효이용

역삼투법 해수담수화는 현재 실용화되어 있지만 공급해수로부터 담수의 회수율은 일반적인 기술은 높아도 40% 정도이며, 막 오염방지를 목적으로 전처리 된 공급해수는 60%정도가 폐기되기 때문에 비용면에서도 상당히 비효율적이다. 이러한 높은 회수율을 얻을 수 없는 원인으로는 회수율의 증가에 의한 삼투압의 상승으로 생산수량의 감소와 공급해수의 농축에 의한 스케일성분의 농도 증가로 막면에 스케일의 부착 등이 있다.

현재 역삼투법의 평균적인 조작압력은 50~60kgf/cm²정도이지만 이것을 100kgf/cm²정도까지 높일 수 있다면 큰 폭으로 회수율(回收率)을 50~60%까지 향상시킬 수 있다. 이 경우에는 막모듈의 내구성을 향상시켜야 하며 막소재의 선정, 막구조의 최적화 및 내초고압모듈의 개발이 과제이다. 아울러 낮은 염분저지율의 막을 사용한 고압역삼투법에 의한 회수율을 향상시킬 수 있는 방법도 있다. 그러나 염분제거율이 낮은 막을 사용하면 생산수의 염분농도도 높아지며 막 양측의 삼투압차가 낮게 유지되어 많은 양의 생산수를 얻을 수 있다. 이러한 낮은 염분제거율막의 생산수를 유효하게 이용하기 위해서는 생산수를 재순환 사용하여야 하기 때문에 단 리사이클의 공정으로 구성하여야 한다.

고효율 해수담수화시스템에서는 1단 역삼투막의 압력을 약 65kgf/cm²에서 운전한 후 농축수를 다시 2단 역삼투막의 압력을 약 90kgf/cm²으로 운전한다. 1단역삼투에서 회수율 40%를 얻은 후 염분농도 5.8%(58,000 mg/ℓ)의 농축수를 다시 2단역삼투로 처리하여 회수율 20%의 담수와 염분농도 8.8%(88,000 mg/ℓ)의 농축수를 얻는다. 또한 역삼투막의 운전압력을 80kgf/cm²으로 높여 회수율 60%를 얻을수 있는 시스템도 개발되었다. 이와 같은 방법으로 운전을 실시함으로써 취수설비 및 전처리설비의 능력과 취수량, 약품사용량, 전처리설비의 소요동력을 2/3로 줄일 수 있고, 또한 방류 농축해수의 양도 1/2이하로 줄일 수 있다.

[그림 2]는 한국수자원공사(속초시, 한국해양연구원, 금호산업(주) 공동협약에 의한 추진)에서 운전중인 속초시 고효율 역삼투법 해수담수화 연구시설의 주요설비 들이다.

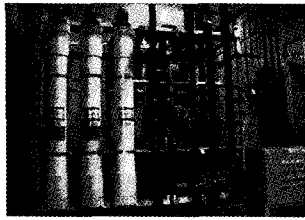
- 공 정 : 해수 취수 → 막여과(UF) → SWRO-A(60%) → BWRO ⇒ 최종 생산수
→ 모래여과 → SWRO-B(40%)
- 설계규모 : UF (500m³/일), 모래여과 (175m³/일), SWRO(60%) (180m³/일),
SWRO(40%) (70m³/일), BWRO(120m³/일)
- 운전기간 : 2009년 3월 ~ 2010년 12월
- 장 소 : 속초시 도문동 1664-3



취수원(해수 지하관정)



파일럿플랜트 전경



UF 장치



역삼투장치

[그림 2] 한국수자원공사 해수담수화 시범연구시설 (속초시)

5. 향후전망

해수담수화는 지구상에 무한정 존재하는 해수를 갈수의 영향없이 담수화하여 물 부족에 대처할 수 있는 방법이기에 때문에 절대적인 담수자원이 부족한 지역에서는 유일한 대안으로서 그 필요성이 대두되고 있다. 세계적으로 해수담수화는 1960년대부터 인구의 증가, 생활수준의 향상, 기상이변 등으로 인하여 물부족지역이 확대됨으로서 해수담수화에 대한 수요가 증대됨으로서 설치실적도 급증하고 있다. 뿐만 아니라 우리나라에서도 해수담수화시설은 가뭄과 더불어 지형여건상 수자원 확보의 어려움 때문에 만성적인 용수 부족현상을 나타내고 있는 일부 도서지역에 식수를 확보하기 위하여 해수담수화시설의 도입을 지원을 하고 있는 등 공업용수의 확보차원에서도 증가가 예상되고 있다.

특히 역삼투법 해수담수화기술은 회수율 약 30%를 기본으로 기술이 개발되어 최근에는 막여과 등 콤팩트한 전처리기술의 개발, 회수율 60%기술의 개발, 에너지회수장치의 개발, 신개념의 막모듈 개발(보론제거용 역삼투막모듈, 16인치 와권형 역삼투막모듈, 내염소성이 강한 폴리아미드제질의 역삼투막모듈, 저압고염분제거 역삼투막모듈, 초고압 역삼투막모듈) 등 신기술이 개발되어 생산수 비용이 점점 감소되는 추세에 있다. 규모면에서도 초기에 수백 수천톤 규모에서 현재에는 수십만톤 규모의 시설이 설치되고 있다.

우리나라에서도 연구개발사업으로 해수담수화플랜트사업단(광주과학기술원, 2006~2012)을 발족하여 중대규모 해수담수화시설의 도입을 목적으로 한 역삼투막모듈, 고압펌프, 벡셀, 전처리 장치 등의 부품/소재 및 엔지니어링기술을 개발하고 있고, 한국수자원공사에서는 시범연구사업도 추진중에 있어 이를 통해 기술의 자립도를 한층 높여 국내물부족 문제 해소에 기여할 뿐만 아니라 국산화 기술을 활용한 국외 사업에 진출이 기대되고 있다.

참고문헌

1. 고효율 친환경 중대규모 역삼투법 해수담수화기술 개발, 한국수자원공사, 2008
2. 역삼투법 해수담수화, 아카데미서적, 김충환, 2000
3. 해양심층수를 이용한 해수담수화, 한국수자원공사, 2008