

담수화 기술의 현황 및 기술개발 동향



박 광 규 ▶▶▶

한국전력공사 전력연구원/환경기술 그룹장
kkpark@kepri.re.kr

국가에서는 유일한 대안으로서 기술개발의 필요성이 대두되고 있는 실정이다. 이 글에서는 담수화기술의 일반적인 현황 및 세계적으로 연구가 진행되고 있는 저비용 저에너지의 새로운 담수화 시스템 기술의 기술개발 현황에 대해서 소개하고자 한다.

1. 서론

물은 생명의 근원이며, 인간의 모든 경제, 사회, 문화 활동에 없어서는 안 될 중요한 자원 중의 하나이다. 그러나 인구의 증가 및 급속한 산업화에 의한 물의 소비량 증대와 환경오염에 따른 물 오염으로 인하여 물 부족이 현안 문제로 대두되면서 물 부족 사태는 매년 심각해지고 있는 실정이다. UN 보고에 의하면 현재 전 세계 인구의 20%가 심각한 물 부족 현상을 겪고 있으며 지구온난화에 따른 이상기후에 의해 2025년까지 물 부족 상황이 전 세계적으로 더욱 악화될 것으로 예상하고 있다. 우리나라도 UN에 의해 향후 물 부족이 심화될 국가로 분류되고 있으며 해마다 국부적인 갈수 문제와 더불어 지표수 및 지하수의 오염 등으로 인하여 공업용수, 생활용수 등의 부족 사태는 더욱 심화될 것이며 향후 경제규모의 증대와 산업의 발달로 용수의 수요가 지속적으로 증대될 것으로 예상되고 있어 장래 물 부족에 대비하여 안정적이고 획기적인 신규 수자원의 확보 필요성이 어느 때보다 크게 대두되고 있는 실정이며 따라서 이에 대한 기술적 준비가 절실히 필요한 시점에 있으며 담수화 기술은 지구상에 무한정 존재하는 해수 및 짠물을 갈수의 영향 없이 담수화하여 물 부족에 대처할 수 있는 유일한 방법이므로 절대적으로 담수자원이 부족한

2. 담수화 기술의 현황

2.1 담수화 기술의 역사

바닷물이나 짠물을 먹는 물이나 생활용수 또는 공업용수로 사용하지 못하는 이유는 바닷물이나 짠물에 녹아있는 우리가 일반적으로 염분이라고 말하는 여러 가지 이온성분 때문이다. 이러한 염분을 없애 먹는 물로 이용하려는 인간의 노력은 예전부터 있었다. 가장 간편한 담수화 방법은 물을 끓여 수증기만을 응축시켜 담수를 얻는 방법으로 1593년 R. Hawkins가 신대륙으로 향하는 장기간의 선박여행에서 증발기를 사용하여 해수를 담수화한 것이 담수화 기술의 시초였으며, 산업혁명의 도래 이후, 다중효용 증발법(Multiple Effect Distillation)과 다단플래시 증발법(Multi-Stage Flash Distillation, MSF)이 개발되어 이용되기 시작했으나 본격적인 담수화플랜트는 1960년 중동의 쿠웨이트에 4,000m³/일 용량을 갖는 증발법 해수담수화 플랜트가 최초였으며 1980년대에는 전체 담수화 플랜트의 3/4가 증발법을 이용한 설비였다.

그러나 현재에는 많은 에너지를 필요로 하는 증발법은 에너지 가격이 안정되고 값싼 중동지역에 편중되어 사용되고 있으며 이외의 지역에서는 증발법외에

표 1. 담수화기술의 분류

상변화	증발법	다단플래쉬법
		다중효용법
		증기압축법
		투과기화법
상불변	결정법	냉동법
		가스수화물법
상불변	막법	역삼투법
		전기투석법
	용매추출법	

역삼투막법, 전기투석법, 냉동법 등이 개발되어 활용되고 있다.

2.2 기존의 담수화 기술

담수화란 염분을 포함하고 있는 바닷물이나 짠물 등에서 염류나 기타 용도로 이용할 수 있도록 염분을 제거하여 담수를 얻는 공정을 말하며 Cl⁻, Na⁺ 뿐만 아니라 다수의 무기 염류가 제거되는 공정이다. 현재까지 일반적으로 이용되고 있는 담수화에는 여러 가지 기술이 이용되고 있으며 일반적인 기술의 분류는 표 1과 같이 상(phase)변화 유무에 따라 분류하고 있으며 각 담수화 기술별 특징은 다음과 같다.

2.2.1 증발법

증발법은 담수화 기술 중 가장 역사가 오래된 기술이며 현재 전 세계 담수화 생산용량 중 약 70%를 차지하고 있다. 이 방법은 증발기의 형상과 열원의 이용방법에 따라 크게 다중 효용방식, 다단 플래쉬방식, 증기압축식 등으로 분류할 수 있다.

(1) 다중 효용방식

(MED: Multi-Effect Distillation)

이 방식은 단순 증류기를 시리즈로 배열한 형태로 첫 번째의 증발기에 보일러에서 발생된 증기로 열을 가하여 해수를 증발시키면, 발생된 증기는 다음 증발기에서 응축되어 담수가 되고 동시에 가열 원으로 작

용하여 증발기 내부의 해수를 증발시킨다. 또한 이때 발생된 증기는 다시 다음 증발기에서 가열 원으로 작용한다. 이 때 각 효용 증발기 내의 압력을 차례로 낮게 유지하여 공정이 진행됨에 따라 더 낮은 온도에서 비등이 일어나도록 해 주어야 한다. 또, 각 효용에서 생산된 담수의 온도가 상온보다 높기 때문에 유입되는 해수와 상호 열교환을 시켜 생산 담수의 현열을 회수하는 방법도 널리 채택되고 있다.

(2) 다단 플래쉬 방식

(MSF: Multiple-Stage Flash Distillation)

다단 플래쉬 방식은 현재 대용량 담수화장치에 가장 널리 사용되는 담수화 기술로 현재 전세계 담수화 용량의 약 2/3 가량을 담당하고 있으며, 다중 효용 방식과 가장 큰 차이점은 증발관 내에서 증발이 일어나는데 비해 다단 플래쉬 방식에서는 상대적으로 고압의 열교환기 내에서 가열된 해수가 오리피스를 통해 저압의 격실로 분출되면서 열공급이 없으므로 원수의 잉여 에너지에 해당하는 부분만의 잠열로 변환되기 때문에 각 격실에서 증발량은 수 % 이내이다. 다단 플래쉬방식의 일반적인 계통은 점차 진공도가 높은 격실이 직렬로 이어진 형태를 가진다.

(3) 증기 압축식

(VCD: Mechanical Vapor Compression Distillation)

증발기에서 발생한 증기를 압축기로 압축시키면 온도와 압력이 상승하게 되는데 이를 다시 증발기의 고열원으로 사용한다. 해수가 열교환기를 거치면서 배출되는 브라인과 생산된 담수의 현열을 회수하여 약 97℃로 증발기에 들어가서 압축된 증기가 응축하면서 방출하는 열에 의하여 증발하고 증기는 다시 압축기로 고온의 증기로 압축되어 증발기에서 응축되고 이후에 열 회수기를 통과하면서 증발기로 들어가는 해수에 그 현열을 전달하여 담수화에 이용하는 공정이다.

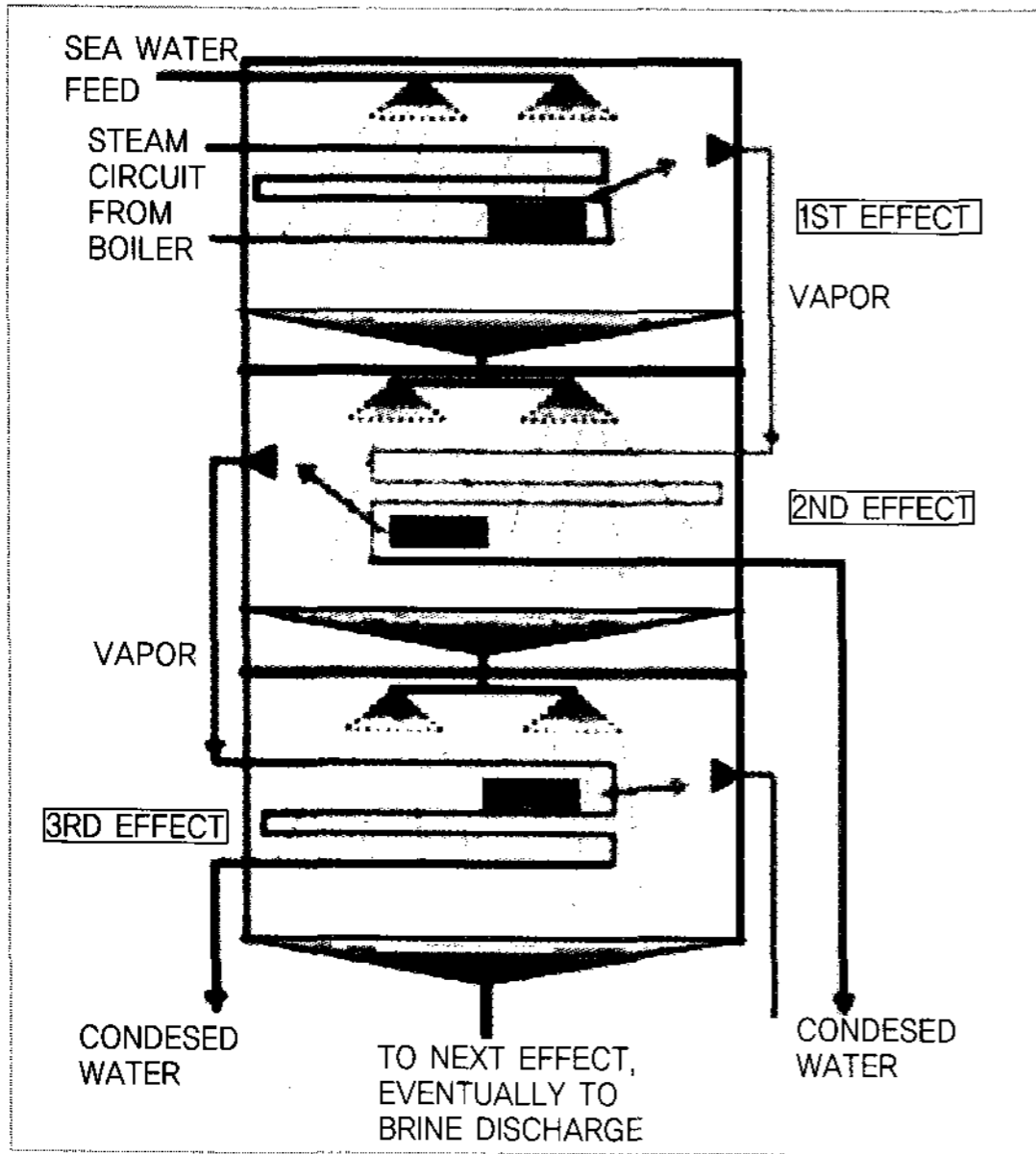


그림 1. 다중 효용방식 공정

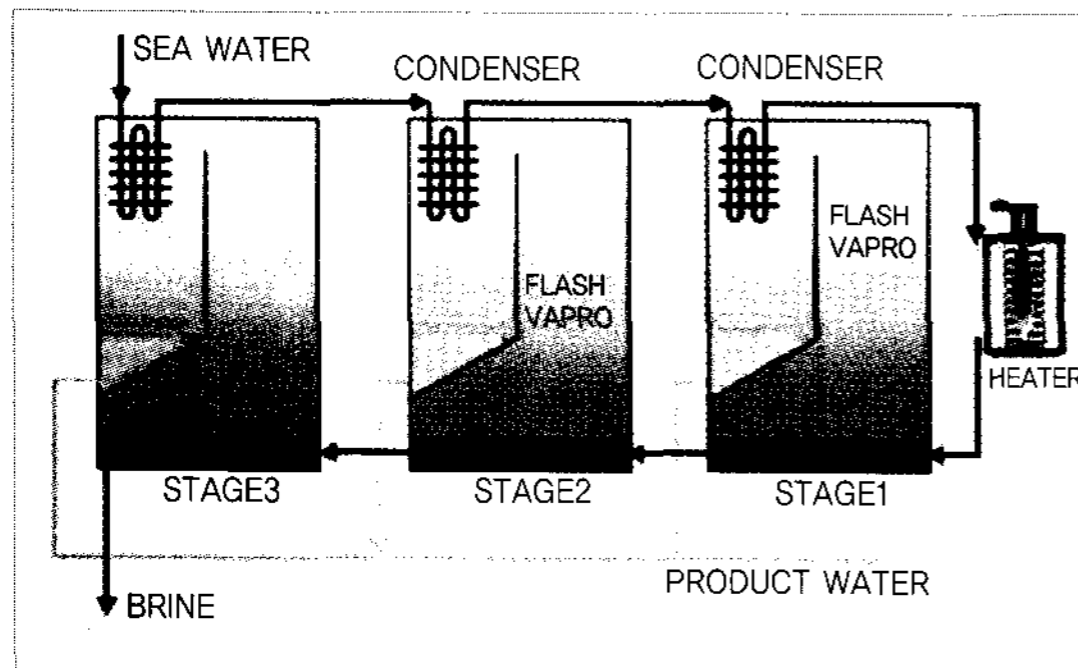


그림 2. 다단 플래쉬 방식 공정

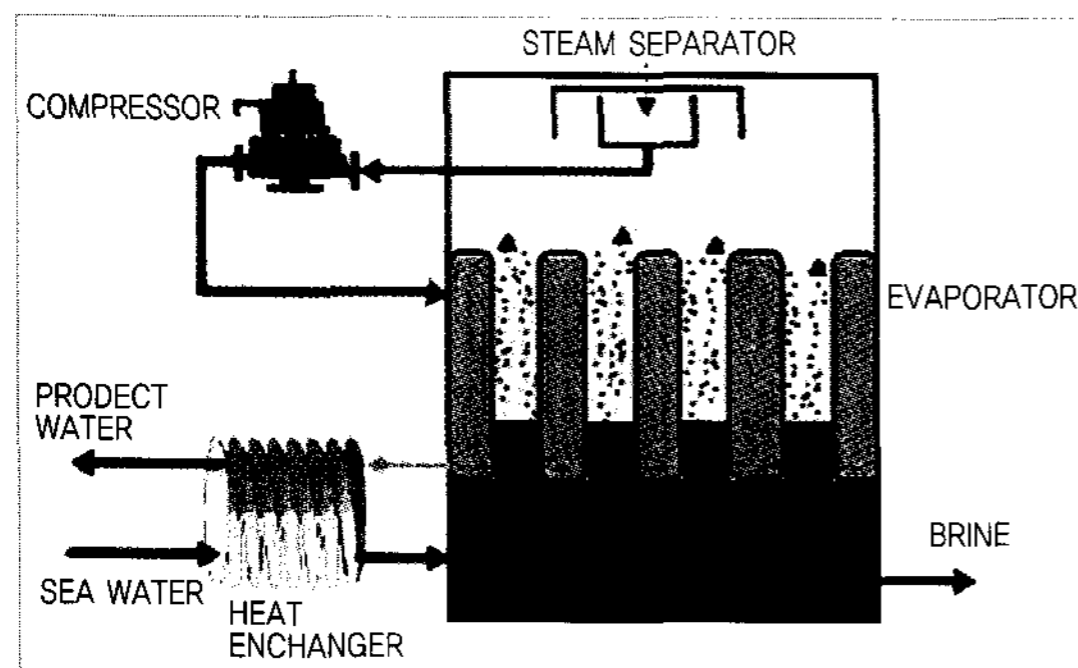


그림 3. 증기 압축식 공정

2.2.2 결정법

최근 수년간 결빙법에 의한 탈염법이 개발 중에 있으나 아직 상업적으로 이용되고 있지는 않다. 증류법이 기-액 간의 상변화를 이용한 것인데 반해, 결정법은 고-액간의 상변화를 이용한 것으로 바닷물이 얼 때 용액으로부터 분리되는 고체는 순수한 물이라는 점을 이용한 것이다. 탈염 공장에서 바닷물을 얼려서 만든 얼음은 분리하여 물로 사용될 수 있다. 결정법은 증류법에 비하여 에너지 소비가 적다는 장점이 있다. 물의 증발열은 40.77KJ/mol 인 반면에 용해열은 단지 6.01KJ/mol 이다. 캘리포니아 지방의 식수난의 부분 해결책으로 북극으로부터 태평양 연안 미국 서부 지역으로 빙산을 예인하는 방법이나 남극의 빙산을 중동으로 예인하는 방법도 과학자들에 의해 제시되고 있다.

2.2.3 역삼투막법

삼투현상이란 반투막을 사이에 두고 동일한 양의 저농도 용액(담수)과 고농도 용액(해수)을 일정한 시간동안 두면 고농도 용액 양이 증가하게 되는 현상을 삼투현상이라 하고 이 때의 수두차를 삼투압이라 하며, 유체는 일정시간 후 평형상태를 유지한다. 유체 평형상태에서 고농도 용액 측에 삼투압 이상의 압력을 가하게 되면 삼투현상과는 반대로 고농도의 용액에서 순수한 물이 저농도 용액 측으로 흘러 들어가는 현상을 역삼투 현상이라 하며 가해진 압력을 역삼투압이라 한다.

역삼투막법에 의한 해수담수화는 물에 용해되어 있는 이온성 물질은 거의 배제되고 순수한 물은 통과되는 반투막(멤브레인)에 의해 담수화하는 기술이다. 해수에서 이온성 물질과 순수한 물을 분리시키기 위해서는 삼투압 이상의 높은 압력을 필요로 하는데 이때의 압력을 역삼투압이라 하며 해수담수화의 경우 보통 $42\sim 80\text{bar}$ 정도의 높은 압력을 필요로 한다.

2.2.4 전기투석법(ED:Electrodialysis method)

수중에 용해되어 있는 무기물은 거의 대부분 이온

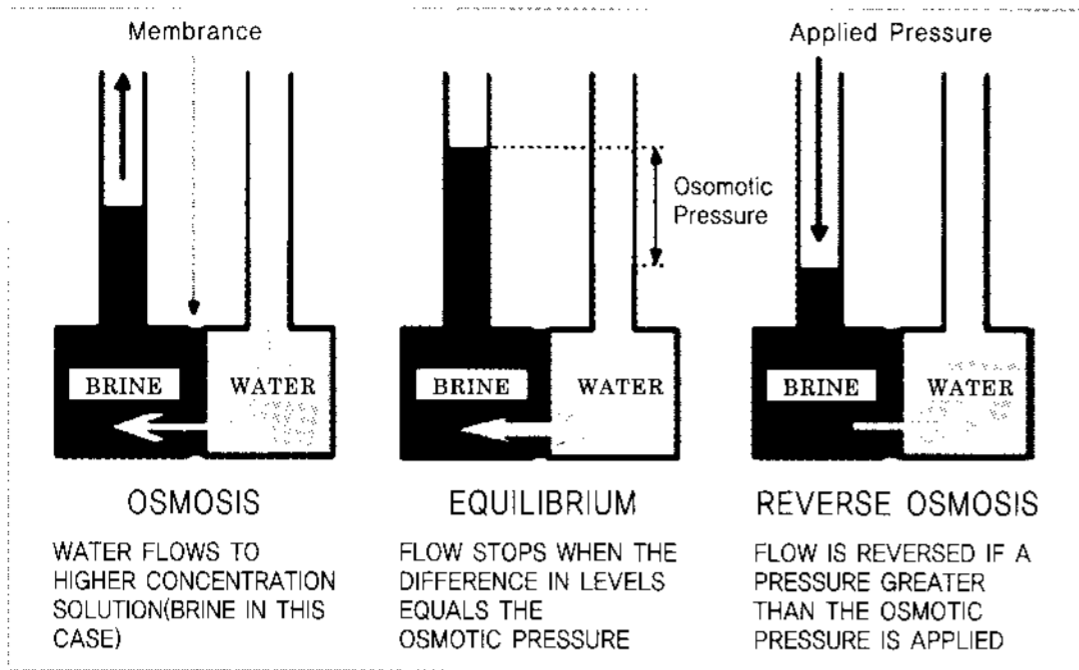


그림 4. 역삼투막 공정

화되어 있다. 여기에 전극을 삽입하여 전류를 흐르게 하면 양이온은 음극으로 음이온은 양극으로 이동한다. 따라서 양이온 또는 음이온을 선택적으로 통과시키는 막을 이용하면 이온 성분과 물의 분리가 가능하다. 전기투석법은 해수로부터 소금을 생산하기 위해 비교적 오래전부터 사용되어 왔는데 전기투석과 역삼투법은 분리막을 사용한다는 점에서 동일하다. 그러나 근본적인 차이점은 역삼투법의 경우 구동력이 압력인 반면 전기투석법에서는 전기적인 힘이다. 따라서 역삼투막 공정에서는 수중의 모든 물질이 제거되는 반면 전기투석법에서는 전기적인 전하를 가진 물질만 제거된다는 점이다. 이는 전처리를 비교적 엄격히 하지 않아도 되는 장점을 가지고 있다. 또한 설치되는 장비가 비교적 간단하여 유지, 보수가 용이하다. 전기투석법은 전류에 의해 이온 용액의 분리를 행하는 단위조작으로서 분리되는 이온에 대하여 선택 투과성을 가진 막을 매개체로 하여 전류를 통하게 함으로써 이루어진다.

3. 담수화기술 기술개발 동향

담수화는 지역의 특성과 여건에 따라 다양한 방법이 연구되고 있다. 증발법의 경우 그 동안 가장 많이 이용되어온 기술이나, 막대한 에너지 소모량 때문에 석유 등 에너지 자원이 풍부한 중동 등지에서 주로 이용되는 기술이다. 우리나라에서는 두산중공업이 증

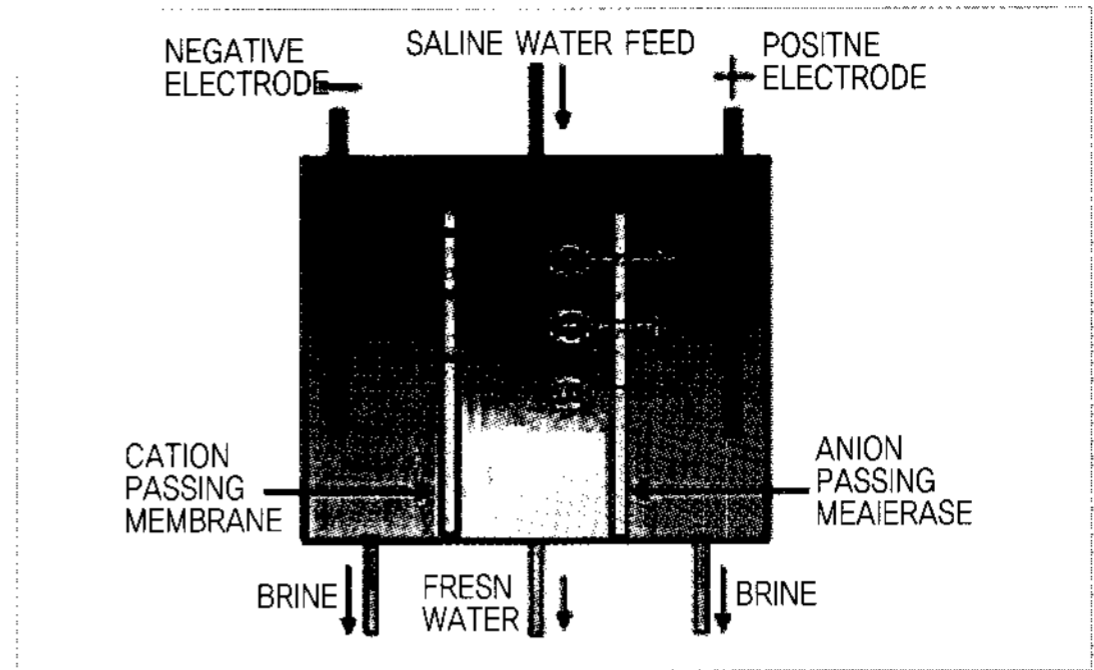


그림 5. 전기투석 공정

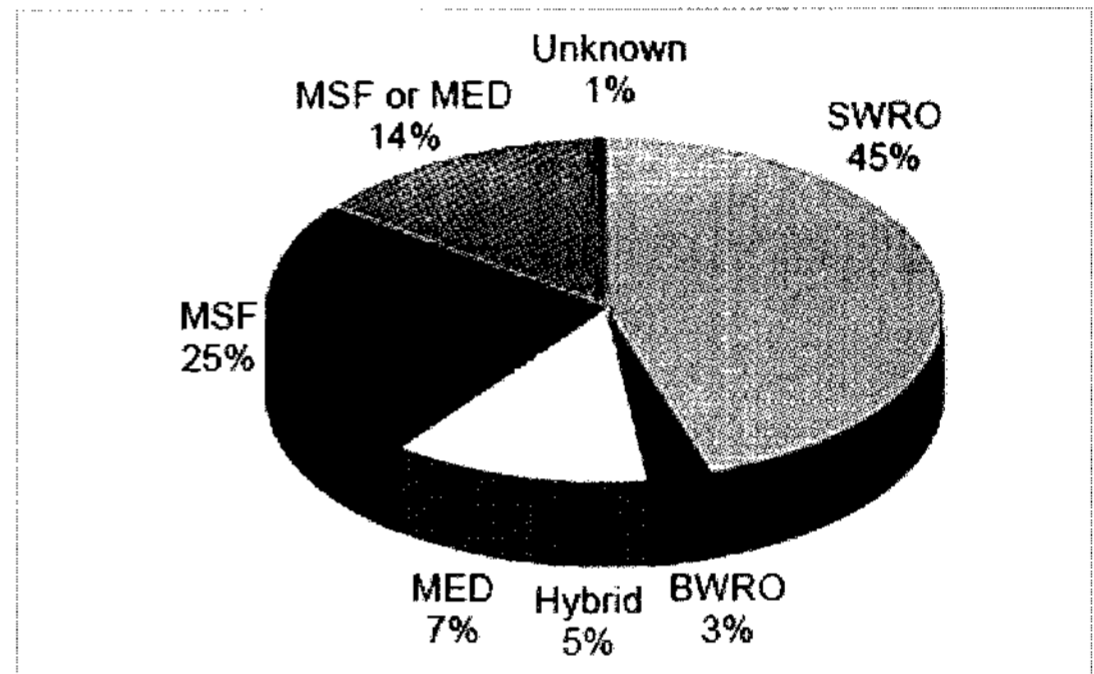


그림 6. 세계 담수화 기술별 용량 분포

발방식의 담수화기술에 있어 경쟁력 있는 기술력을 확보하고 중동지역에서 상당한 성과를 거두고 있다.

그러나 현재 세계 담수화 기술은 증발법 담수화공정의 막대한 에너지 소모량으로 인해 에너지 소모량이 보다 적은 역삼투막법 담수화 공정으로 대체되어 가고 있는 실정이며 Ondeo Degremont, Vivendi Water, B&V, GE Ionics, Siemens 등 물 관련 세계 다국적 기업들은 고효율 담수화용 역삼투막 기술 개발과 시장 확대에 적극 나서고 있다. 그림 6은 세계 담수화 기술별 용량 분포를 보여주고 있다.

우리나라에서도 두산중공업, 코오롱 등 기업과 국가적 차원의 연구 프로젝트로 역삼투막 관련 담수화 기술을 개발하고 있다. 그러나 역삼투막법의 경우 아직까지 에너지 소모량이 많은 고압펌프를 사용해야 하고 투과막의 유지 관리 등 운전 및 유지 관리기술의 기술개발이 여전히 필요한 실정이다. 따라서 현재 기존에 사용되고 있는 에너지 소비량이 많고 운영 및

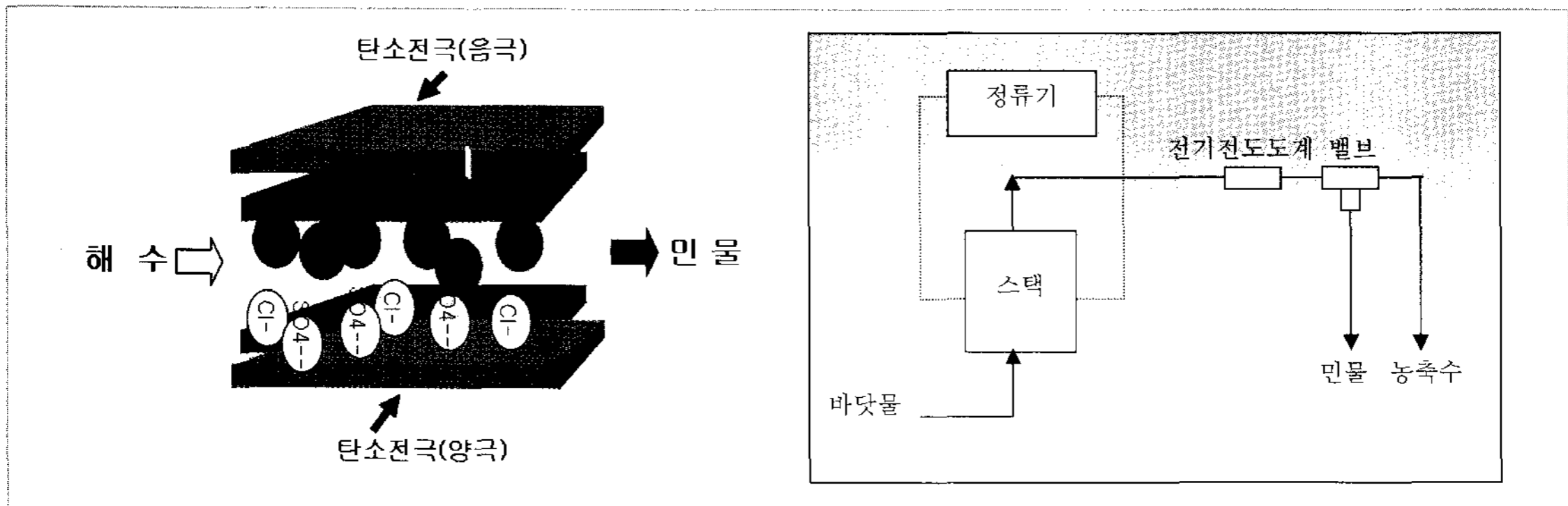


그림 7. 전기흡착식 담수화 원리 및 시스템 구성도

유지보수가 어려운 현재 널리 적용되고 있는 기존의 담수기술들의 가진 단점들을 보완하는 저비용 저에너지의 새로운 담수화 기술을 개발하고자 세계 여러 나라에서 새로운 연구들이 진행 중에 있다. 이러한 신개념의 담수화 기술에는 미국 예일대학에서 연구 진행 중에 있는 정 삼투압 해수담수화 기술, 호주의 RMIT에서 개발하고 있는 태양열 담수화 공정 그리고 미국 LLNL, Sabrex of Texas 등에서 개발 중에 있는 Capacitive Deionization(CDI) 기술 등이 있다. 그 중 전기흡착식 담수화 기술인 Capacitive Deionization(CDI)기술은 다른 방법들에 비해 에너지 소비량이 적으며 역삼투막법과 달리 화학약품에 의한 세정이 필요 없어 2차 오염이 없는 환경친화적인 새로운 담수화 공정이며 유지보수가 간편하다는 장점이 있어 차세대 담수화 기술로 국외에서 연구가 활발하게 진행되고 있다.

4. 전기흡착식 담수화 기술

활성탄소전극에 약 1.4 볼트의 직류전원만을 인가하여 해수나 짙물중의 염분을 탄소표면으로 이동시켜 흡착 제거함으로써 해수나 짙물로부터 민물을 생산하는 새로운 방식의 담수화 기술이며, 전기투석법과 근본적으로 다른 점은 전기투석법에서의 전극의 역할이 이온교환막을 이용하여 이온을 분리만 하는데 이용되

는 반면에 전기흡착법에서는 이온을 전극 자체에서 흡착하여 제거한다는 것이다. 다른 담수화 기술과 비교하여 담수를 만드는데 필요한 에너지가 기존 방법에 비하여 상당히 낮으며 화학약품을 사용하지 않아 환경친화적이며 또한 기존 방법에 비해 구성설비가 단순하고 운전이 편리하다는 장점이 있다.

이 기술의 연구개발 현황을 살펴보면 미국의 경우 Sabrex of Texas는 활성탄소섬유를 이용하여 전기화학적 이온분리전극 및 시스템을 개발하고 짙물용으로 사용할 수 있음을 발표하였으나 성능이 미약한 것으로 알려지고 있으며 미국 Lawrence Livermore National Lab. 은 고하전율의 카본 에어로젤 전극 소재를 개발하여 탈염 가능성을 발표하였으나 전극 내 압력강하, 저항문제 등이 문제점을 안고 있는 실정이다. 그리고 일본, 중국, 네덜란드 등의 일부 대학에서 전기흡착식 탈염전극 개발 및 시스템 개발을 위한 연구를 최근에 많이 수행하고 있다. 국내의 경우 과학기술연구원, 연세대학교 등에서 기초적인 연구를 수행한 실적이 있으며 한전 전력연구원에서 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술 개발 사업단의 연구비 지원으로 전기흡착식 담수화 기술의 연구개발을 2002년부터 시작하여 현재까지 수행하고 있으며 현재까지 짙물담수화용 시스템 개발 및 담수화용 탈염전극 개발에 성공하였다.

5. 향후 담수화기술의 개발 전망

현재까지의 담수화 기술은 주로 증발법 및 역삼투막법을 이용한 것으로서 기술완성도가 높은 수준이나, 높은 에너지 소비에 따른 운전비용 및 운전상의 문제점 등을 가지고 있다. 전 세계적으로 에너지 고갈에 따른 문제가 대두되고 있고 물 부족시대가 도래되고 있는 현 시점에서 대량의 물을 경제적으로 확보할 수 있고 운영이 용이한 신 개념의 담수화 방법인 전기흡착식 담수화 기술의 상용화 기술개발이 한층 활발해 질 것으로 예상된다. 또한 향후에는 에너지 고갈시대에 대처하여 풍력, 태양에너지 등 신 재생에너지에서 소비 에너지를 생산하고 전기흡착법, 역삼투막법 등 다른 담수화 기술과도 결합된 하이브리드형의 담수화 기술로 한층 발전될 것으로 전망된다.

참고문헌

1. 환경부(2001). 먹는샘물 다원화 방안에 관한 연구, pp. 42.
2. 한국전력공사 (2006). 탄소전극법 해수담수화 기술 특허맵, pp. 10-19.
3. 한전 전력연구원 (2006). 고효율 저에너지 담수화 시스템 개발, 과학기술부, pp. 197-201.
4. KISTI 글로벌 동향브리핑, 2007, 6. 5
5. Rajindar Singh (2008). "Desalination", Elsevier, Vol. 227, pp.14. ☞