

담수플랜트의 특성

글 | 서정호 | 플랜트건설부 부장 | 전화 : 02-3433-7993 E-mail : sfaith@ssyenc.com

글 | 임형희 | 플랜트공사부 과장 | 전화 : 02-3433-7808 E-mail : hhlhim@ssyenc.com

인간의 산업 활동은 물론이고 모든 생물의 생존 그 자체에 필수적인 물(H₂O)은 지구상에 엄청난 양이 있지만 그 96.5%는 해수(Salt Water)의 형태로 존재한다. 염수는 항해운송과 어업 외에는 인간의 경제 활동에 별로 이용되지 못하며 산업용수와 생활용수는 모두 담수(Sweet Water)라는데 물 문제의 심각성이 있다.

특히 범세계적으로 인구가 늘어나고 농업, 공업 및 가정에서 담수의 수요량이 점차 지속적으로 증가하고 있어 전 세대에는 사막 지역 등 일부 물 부족 지역을 제외하고 부족 없이 공급 가능하던 담수의 공급이 이미 제약을 받기 시작하거나 앞으로 심각한 문제에 봉착할 지역이 많아지리라 예상된다.

1. 세계 용수 부족 현황

지구상에서 자원의 고갈을 일으키지 않고 인간과 생물이 사용할 수 있는 담수의 연간 공급량은 9,000,000톤이며 이중 인간이 실제 사용하는 양은 4,300,000톤이다. 이렇게 볼 때 아직 절대량이 부족한 것은 아니지만 인구 증가에 따른 물 사용량의 급증과 지역적인 편차가 문제이다.

세계 50개국을 대상으로 한 1인당 물 가용량은 1950년대에는 50,068톤, 1990년대는 28,665톤이었지만 2025년에는 24,795톤으로 감소할 것으로 보인다.

경제협력개발기구(OECD)는 “2020년의 세계-글로벌 시대의 개막”이란 보고서에서 현재 28개국의 3억4천만명이 물 부족으로 인한 어려움에 처해 있지만 2025년에는 52개국의 약 30억명이 물 부족으로 고통을 받으리라 보고했고 아부 제이드 세계물회의의 회장은 아프리카와 중동 등지에서 이미 3억명이 심각한 물 부족을 겪고 있으며 2050년에는 전 세계 인구의 3분의 2가 물 부족 사태에 직면하리라 예측했다.

지구상의 이용 가능한 담수도 접근의 어려움으로 물 사정을 더욱 어렵게 만드는 경우도 많다. 예를 들면 남미의 아마존강은 세계 담수의 15%로 엄청난 양이지만 강 유역의 95%가 접근할 수 없는 울창한 열대 우림지역이어서 이 강물을 이용하는 인구는 2천5백

만명 정도에 불과하다. 극히 제한된 이 사용 가능한 지표수를 비롯한 담수도 인간의 산업 활동과 생활에서 발생하는 폐기물에 오염이 점차 심해짐에 따라 실제 가용 수자원은 시간이 갈수록 제한되고 있다.

2. 담수화의 역사

해수는 근본적으로 그 속에 이물질이 이온 형태로 녹아 있어 음용수나 생활용수 및 농공업등 산업 용수로 직접 이용할 수 없다. 따라서 인간은 이들 이물질을 해수에서 제거하고 음용수 등으로 이용하려고 옛날부터 노력해왔다.

고대 이집트에서 도기를 이용하여 해수를 담수화 했고 아리스토텔레스는 기원전 4세기에 이미 이 방법을 알고 있었다고 알려졌다. 가장 간편한 방법은 해수를 끓여 수증기만을 응축, 담수를 얻는 방법이다.

문헌에 나타난 첫 해수 담수화의 개념은 A.D 8세기 아라비아의 화학자인 자비르가가 선원들에게 바다 물을 끓여 그 증기를 해면체에 포집할 것을 권고한 기록이다.

바다에서 해수 담수화는 1593년 호킨스가 신대륙으로 향하는 장기간의 선박 여행에서 이 방법으로 음용수를 얻음으로서 처음으로 실현되었고 1560년 튀니지에 주둔한 스페인 수병 700명에게 물을

공급하기 위하여 하루 약 5.4톤의 담수를 생산한 것이 육지에 세운 최초의 해수의 담수화 공장이다.

19세기 중엽 영국이 수에즈운하를 건설하면서 해수의 담수화 공장을 건설하였다. 2차 대전 중 전략적인 지역에 사막 등 충분한 물을 확보할 수 없는 지역이 포함되고 여기에 주둔한 군대에 물을 공급하기 위하여 해수의 인공적인 담수화 기술이 본격적으로 개발되기 시작하였다. 전쟁 후에도 이 기술의 중요성을 인식하고 여러 나라에서 연구 개발이 더욱 활기를 띠게 되었다.

3. 우리나라의 물 사정

유엔은 현재 우리나라의 활용 가능한 물 자원량을 630억톤로 보고 있고 이를 국민 1인당으로 환산하면 1955년 2,941톤이었으나 1990년에는 1,470톤으로 줄어 유엔은 우리나라를 물 부족국가(1,700톤/인/년)로 분류하고 있다. 현재 344억톤의 용수 공급능력을 가지고 있어 수요량 337억톤에 비하여 2.1%의 예비율을 보이고 있으나 2025년에는 1인당 가용 용수량이 1,200톤으로 감소하고 2011년에는 현재보다 수요량이 30억톤이 늘어나는데 비하여 용수 공급은 3억톤밖에 증가하지 않아 용수 부족량이 20억톤에 이르리라 예상된다.

그 해결책으로 우리나라 하천에 더 많은 크고 작은 댐을 건설하여 사용되지 않고 유실되는 수자원을 줄이고 용수의 활용도를 높여야 하나 강수량이 계절적, 시간적, 지역적 편차가 심하여 수자원 관리상 매우 불리한 조건이다. 그럼에도 불구하고 이미 경제성을 지닌 입지에는 대부분 댐이 건설되어 있고 경제성을 가진 새로운 대규모 댐 건설 후보지가 그리 많지 않다. 더구나 댐의 건설은 그 인근 지역의 기후변화 등의 환경 문제와 그로 인해 수몰되는 지역 주민들의 격심한 반발을 초래하여 실제 입안된 계획을 실현하기가 쉽지 않다.

4. 왜 해수의 담수화인가

그 해결책은 지구상에 풍부히 존재하는 해수로부터 구하는 수밖에 없다. 해수 중에 포함된 염기를 값싸고 효율적으로 제거하면 인류의 생산 활동과 생활에 필요한 담수를 충분히 그리고 경제적으로 공급할 수 있다.

일반적으로 공업용수나 생활용수로 도시 주민에게 공급하는 급수는 1리터 중 염기 함량이 1,000mg 이하이어야 한다. 따라서 이 순

도의 물을 충분히 얻을 수 없는 곳은 인간의 생활이 불가능하기까지는 않더라도 발전에 심각한 지장을 받아 왔다. 그러나 지난 50년의 염수의 탈염 기술 발전은 건조 지역과 물 부족 지역에서도 염수나 해수가 인접해 있다면 이 기술의 응용으로 인간 취락을 가능하게 했을 뿐 아니라 그런 지역도 대도시로 번영하고 공업의 발전을 가능하게 했다.

이러한 현상은 오늘 날 중동 지역, 북부아프리카의 건조 지역 및 카리브 해의 섬 등에서 발견할 수 있다. 해수로부터 탈염은 자연 상태에서도 쉬지 않고 일어난다. 자연계의 물의 순환도 탈염과 염화의 반복이라 볼 수 있다. 해수를 포함한 지구상의 물은 태양 에너지를 받아 끊임없이 증발하는데 이 과정에서 염기를 포함한 물에 용해되어 있는 미네랄은 증발과정에 동반되지 않으므로 탈염 과정으로 볼 수 있다. 이 수증기가 구름을 이룬 후 비가 되어 지상에 떨어지면 크고 작은 하천을 이루어 바다에 도달할 때까지 동식물의 생존에 필수적이며 인간이 각종 목적에 이용 할 수 있는 담수로서 존재한다.

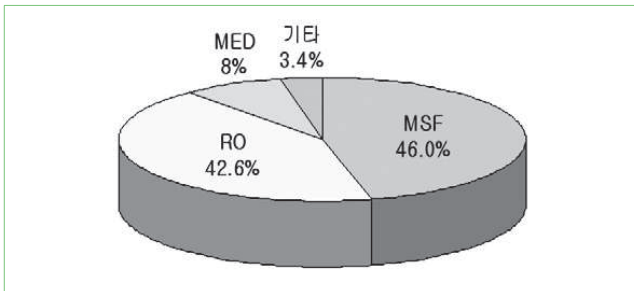
이 과정 중에도 물은 용해도가 커서 끊임없이 각종 미네랄과 기타 여러 가지 물질을 용해하며 궁극적으로 바다 또는 사해나 Great Salt Lake 같이 낮은 지역에 이르게 된다. 여기서 이미 다량의 염기 등을 함유하고 있는 해수 등과 섞임으로서 물은 담수로서의 가치를 잃게 된다. 그러나 태양 에너지에 의한 물의 증발은 끊임없이 계속되어 지상의 담수가 고갈되지 않고 유지된다.

5. 해수 담수화 기술의 분류

지금까지 여러 가지 서로 다른 아이디어를 응용한 담수화 공정이 개발되었다. 이들 해수의 담수화 공정은 본질적으로 염분을 지닌 해수를 염분의 농도가 더 높아진 농축수 유선과 염분이 거의 없는 담수 유선으로 나누는 공정이다. 분리 공정에 필요한 에너지와 그 공급 방법에 따라 여러 가지 공정으로 나눌 수 있다.

주요 담수화 공정은 분리 에너지를 열의 형태로 공급하는 열이용 공정(Thermal Process)과 막의 물질에 대한 차별성과 선택적 통과 능력의 차이를 이용한 막분리공정(Membrance Process)으로 대별되며 그 상업적 성공정도에 따라 주요 담수화 공정과 부차적 담수화공정으로 나눈다.

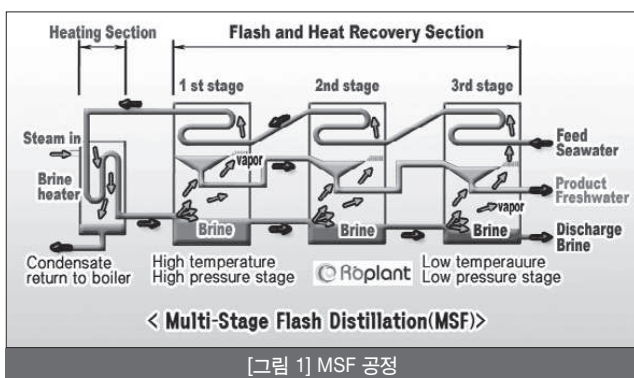
〈표 1〉 단위 용량 일산 100톤 이상 규모(1970-2000 누적 실적)



5-1. 다단플래쉬방식(MSF ; Multiple-Stage Flash Distillation)

다단플래쉬방식은 현재 대용량 담수화장치에 가장 널리 사용되는 담수화기술로 전 세계 담수화 용량의 약 60% 정도를 차지하고 있으며, 일반적인 계통은 그림처럼 점차 진공도가 높은 격실로 이어진 형태이다.

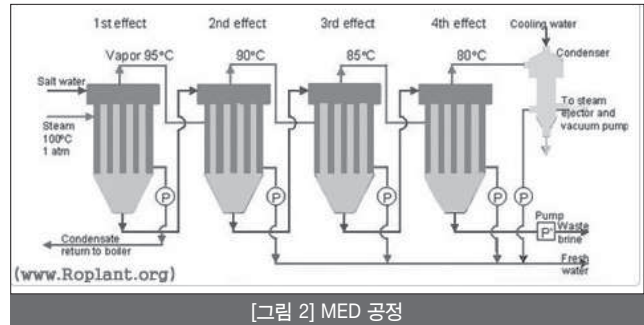
- 1) 어떤 온도의 액체를 그 온도에 대응하는 포화증기압 이하로 급감압하면 액체는 유지하고 있던 열을 증발잠열로 소비하게 되어 자기증발 혹은 플래쉬증발이 발생한다.
- 2) 다중효용방식은 증발관 내(또는 외부)에서 증발이 일어나는데 비해 다단플래쉬방식에서는 상대적으로 고압의 열 교환기 내에서 가열된 해수가 오리피스스를 통해 저압의 격실로 분출되면서 증발, 이때 전체의 열에너지는 동일한 상태로 각 격실에서 외부로부터의 열 공급이 없으므로 원수의 잉여 에너지에 해당 하는 부분만의 잠열로 변환되기 때문에 각 격실에서의 증발량은 수 % 이내이다.



5-2. 다중효용방식(MED ; Multi-Effect Distillation)

다중효용방식은 단순 증류기를 시리즈로 배열한 형태로 첫 번째 증발기 보일러에서 발생된 증기가 다음 효용증발기의 가열원으로 작용하고 냉각 응축되어 담수가 되고, 두 번째 증발기에서 발생된

증기는 다음 효용의 증발기에서 가열원으로 작용하여 증발기 내부의 해수를 증발시킨다. 즉, 전단에서 받은 증기가 다음단이 열원이 됨과 동시에 이증기는 냉각 응축되어 담수가 되고, 이때 재차 증발된 증기는 다음단에서 동일하게 작용한다.

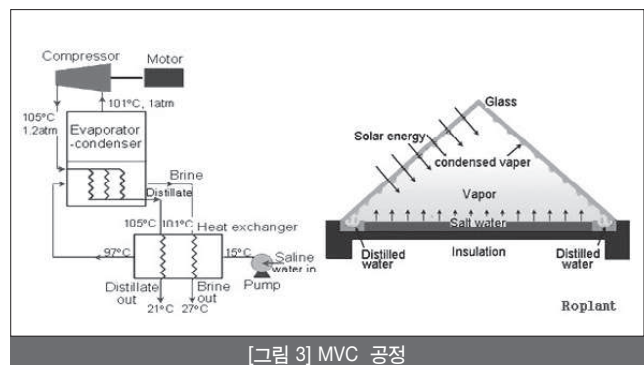


5-3. 증기압축식(MVC ; Mechanical Vapor Compression Distillation)

증기압축법은 증발조에서 발생한 증기를 압축기에 넣은 후 단열압축에 의해 온도를 상승시켜 이것을 같은 조내에 있는 액체의 가열용 증기로 공급하여 담수를 얻는 방법이다.

증발조에서 발생한 증기를 압축기로 압축시키면 온도와 압력이 상승하게 되는데 이를 증발기의 가열원으로 사용, 해수가 열교환기를 거치면서 배출되는 브라인과 생산된 담수의 현열을 회수하여 약 97℃로 증발기에 들어가서 압축된 증기가 응축하면서 방출하는 열에 의하여 증발하고, 증기는 다시 압축기로 고온(105℃)의 증기로 압축되어 증발기에서 응축되고 이후에 열회수기를 통과하면서 증발기로 들어가는 해수에 그 현열을 전달한다.

[특징] 증기압축방식에서 압축기를 소형엔진으로 구동시키고 그 폐열을 활용하는 경우 연료 1kg으로 200kg 이상의 담수를 생산할 수 있는 것으로 알려져 있고 주로 소용량의 담수화 장치에 강점을 가지고 있다.

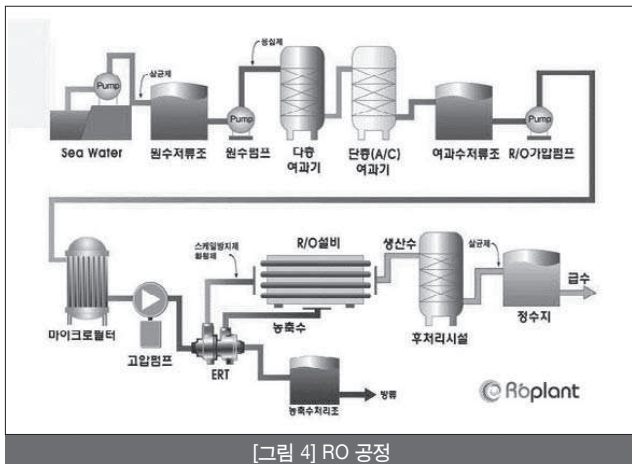


5-4. 역삼투법(RO ; Reverse Osmosis)

역삼투법은 압력에너지를 이용한 방법으로 물은 통과시키지만 용질(이온성 물질)은 거의 투과시키지 않는 역삼투막(Reverse Osmosis Membrane)에 해수를 가압하여 담수만을 분리해내는 공법으로, - 역삼투막을 거친 생산수는 이온성 물질(Cl-, Na+, SO4²⁻, Mg²⁺, Ca²⁺, K+등)이 거의 배제된다.

멤브레인은 물에 용해되어 있는 이온성 물질은 거의 배제되고, 순수한 물만 통과시키는 특수한 막(반투막)

[역삼투현상] 유체 평행 상태에서 고농도 용액측에 삼투압 이상의 압력을 가하게 되면 삼투현상과는 반대로 고농도의 용액에서 순수한 물이 저농도 용액측으로 흘러 들어가는 현상을 역삼투현상이라 하며 가해진 압력을 역삼투압이라 한다.



[그림 4] RO 공정



[그림 5] 역삼투법에 의한 담수화시설(한국)

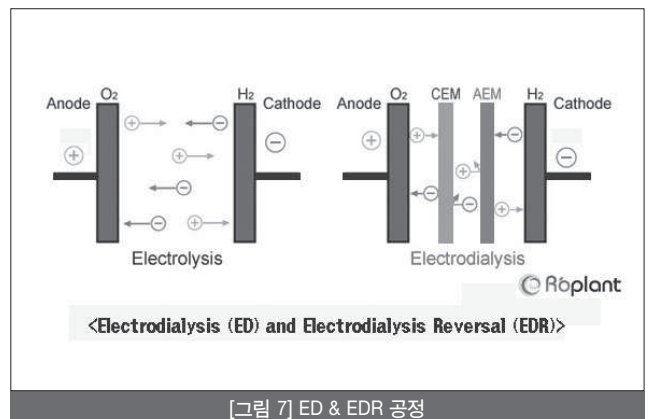
5-5. 전기투석법(ED ; Electrodialysis)

ED(전기투석법)이란 전기투석조(Electrodialysis Stack) 양단에서 공급되는 직류전원에 의해 형성되는 전기장을 구동력으로 하고 물속에 녹아 있는 화학성분 중 전기적 성질을 갖는 전해질(양+)이온 또는 음(-)이온을 선택적으로 투과하는 이온교환막을 이용하여 이온성



[그림 6] 역삼투법에 의한 담수화시설(일본)

물질을 분리하는 막분리 공정이다. ED 공정은 전기적 흐름을 구동력으로 하여 압력을 구동력으로 하는 일반적인 막여과 공정과는 구별된다.



[그림 7] ED & EDR 공정

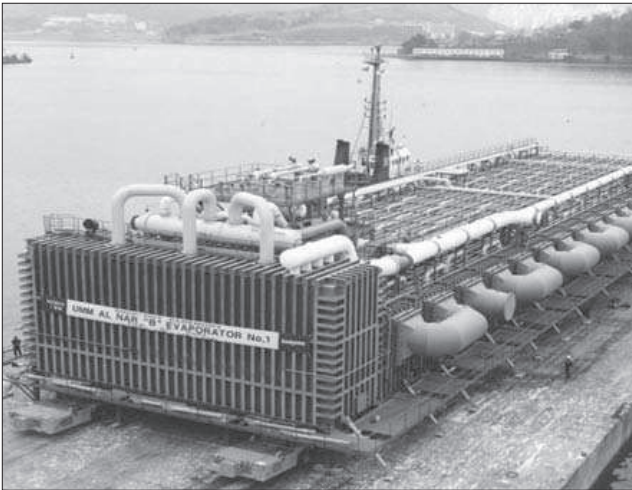
6. 세계 주요 담수화현장



[그림 8] Taweelah A2 Desalination Plant, UAE (두산중공업, 1998년~2001년)



[그림 9] Az-Zour Desalination Plant, Kuwait
(두산중공업, 1999년~2002년)



[그림 10] Umm Al Nar Desalination, UAE
(현대중공업, 2000년~2002년)



[그림 11] Shoiba Ph.2 Desalination Plant, KSA
(두산중공업, 1993년~2001년)

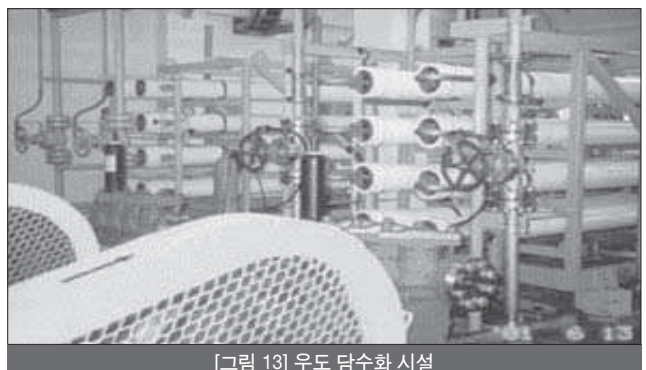


[그림 12] Marafiq Desalination Plant, KSA
(佛 SIDEM-쌍용건설, 2008년~2009년 시공 중)

7. 우리나라의 담수화 설비 현황

우리나라는 해수의 담수화 기술을 전국적으로 응용하기에 아직 시장 조건이 갖추어지지 않았다. 일반적으로 역삼투법에 의한 담수의 생산 단가가 광역 상수도에 비하여 아직 4~5배 높고 공업용수에 비하여 약 2배 더 비싸기 때문이다. 그러나 지리적 조건으로 수자원 확보가 어려워 만성적인 용수 부족을 겪고 있는 지역, 특히 도서지역에서 담수화 기술의 응용은 경제성이 있다.

국내에서 해수 담수화 시설이 건설되기 시작한 것은 약 10년 전으로 용수부족 지역에서 공업용수나 생활용수를 얻기 위한 것이다. 우리나라의 해수 담수화 시설의 특징은 모두 역삼투법을 사용하고 있다는 점이다. 주민의 식수를 위해 설치된 담수화 시설은 1995년 전남 죽도에 일본이 기증한 2톤/일의 소규모 시설이 처음이다. 그 외에 북제주군 우도면의 500톤/일 용량의 염지하수 담수화시설을 비롯한 도서지역을 중심으로 40여 곳에서 시범플랜트를 운영하고 있는데 그 용량은 하루 수백톤부터 수만톤 규모의 공업용수 시설이거나 하루 수십톤 이하의 음용수 생산시설이다. 그 중 가장 대규모적인 것은 대산 석유화학단지에서 있으며 삼교호에서 취수한 염수로 70,000톤/일의 공업용수를 생산한다.



[그림 13] 우도 담수화 시설



[그림 14] 대산 석유화학단지 담수화시설

8. 담수플랜트의 전망

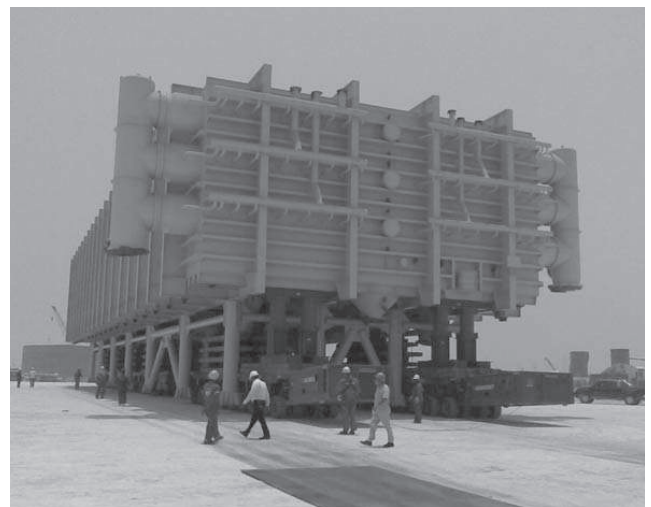
지구상의 물은 엄청난 양이나 그 중 인간이 생활과 산업에 이용할 수 있는 담수의 양은 그 물의 2.5%에 불과하다. 인구가 증가하고 일인당 물의 사용량이 급증하고 있어 세계 여러 지역에서 물 부족 사태가 발생하고 있다. 더구나 인간의 생활과 산업 활동에 의해 배출하는 폐기물로 이 귀중한 담수의 오염이 심해져 그 심각성을 더하고 있다. 따라서 일인당 물의 가용량이 점차 감소하고 국제적으로 국가 간에 하천의 이용을 놓고 분쟁이 증가하고 있다. 심지어는 20세기가 석유 분쟁시대라면 21세기는 물 분쟁시대가 될 것이라는 예측도 있다.

우리나라는 강수량은 풍부하나 인구밀도가 높고 강수량이 여름철 3개월에 집중되어 한꺼번에 바다로 유실되는 특성으로 유엔은 우리나라를 물 부족국가로 분류하고 있다. 2011년에 우리나라는 20억톤의 용수부족에 봉착하리라 예상된다. 이 문제의 해결책은 지구상에 무한히 존재하는 해수로부터 인간의 생활과 산업 활동에 필요한 담수를 얻는 것이다.

인간은 해수를 음용수로 이용하려고 예로부터 노력해왔으며 가장 간편한 방법으로 해수를 끓여 그 증기를 응축시켜 담수를 얻었다. 이 방법을 공업적으로 대규모화 한 것이 증발법과 증류법 등 열을 이용한 해수의 담수화 공정이다. 중동지역 같이 석유가 풍부히 산출되어 열 에너지를 값싸게 공급 받을 수 있는 곳에서는 아직도 이 열 이용 해수의 담수화 방법을 많이 이용한다. 아직 해수를 담수화한 물은 기존의 방식대로 지표수를 처리하여 공급하는 수돗물 보다 일반적으로 비싼 것이 사실이다.

그러나 해수 담수화 공장의 초기비용과 운전비용이 시간이 갈수록 감소하고 있다. 많은 물 기근 지역에서 다른 방법으로 얻은 물의 원가가 이미 상당히 높아 담수화 비용을 상회하는 경우도 많다. 우리나라의 도서 지방을 위시한 여러 지역에서도 이 현상이 나타나 해

수를 담수화 하는 것이 다른 방법으로 물을 얻는 것보다 싸다. 따라서 우리나라에서도 역삼투법을 이용한 소규모 해수의 담수화 시설이 있고 비록 시대적으로 사양 공정인 다단증류 공정이 주이나 담수화 장비 건설 기술에서 세계의 선두 그룹에 속한다. 많은 해수 담수화 방법은 존재하지만 앞으로 가장 기본적이면서도 기술적인 방법을 요구하고 있는 만큼 우리도 이에 맞춰 보다 신뢰성 있는 연구와 개발이 이루어져야 할 것이다. S



참고문헌

1. International Desalination Association, The ABCs of Desalting
2. 배관기술, 2001년 11월 pp.142-181
3. 김세권, 현대해양, 2000년 3월, pp.57-63
4. 일본 경제신문, 2002년 9월 8일
5. 한국수자원공사, 2001년
6. 이재평, 한국특허, 2001-0088963
7. 김동국 등, 한국특허, 특2001-0106805
8. 오전근, News & Information for Chemical Engineers, vol.20, No.5, 2002년
9. 이홍래, 건설기술정보, 1999년 7월, pp.24-29
10. 막여과 해수담수화연구센터(Roplant)