



해수 담수화 공정의 비교 및 에너지 저감화

담수화를 위한 여러 가지 공정들의 특성을 살펴보면 그 중 에너지 소모량이 적은 박막공정에서의 에너지 저감화에 대해서 논의하고자 한다.

홍대석

한국원자력연구원 (dshong@kaeri.re.kr)

인류의 4대 문명 발상지가 모두 하천유역인 것을 고려할 때 물은 지구상 모든 생명체의 생명 유지를 위한 필수 요소임과 더불어 문명과 산업의 원동력임을 알 수 있다. 또한 현대문명 사회의 혜택을 영유함에 있어 반드시 필요한 것 중의 하나가 충분한 물의 공급이다. 그러나 약 13.86억 km³에 달하는 지구 전체의 수량에 비해 담수가 차지하는 비율은 2.6%인 약 3천 5백만 km³밖에 되지 않으며 중동, 북아프리카, 인도, 남미 등의 전세계 인구의 40%가 식수난과 용수난에 허덕이고 있고 개도국 질병의 80%는 비위생적인 식수에 기인하는 것이 현실이다.

따라서 음용수원의 다원화에 대한 연구 및 산업화가 전 세계적으로 수행되고 있으며 국내에서도 에너지 집약적인 해수 담수화 공정의 에너지 저감화, 담수화 공정의 개선 등에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다.

담수화 공정의 종류

담수화 공정은 크게 증류법과 박막법으로 분류할 수 있다. 증류법은 역사적으로 가장 오래된 방법으로 물을 가열하여 증발시키고 이를 다시 응축시켜 담수를 만들게 된다. 이러한 공정에는 MSF(다단플래시, multistage flash)법, MED(다중효용증발, multi-effect distillation)법, VC(증기압축, vapor compression)법 등이 있다. 박막을 이용한 담수화 공정은 용해된 성분을 제거할 수 있는 박막의 발명

및 도입으로 인해 가능해졌는데 ED(전기투석, electro dialysis)법, RO(역삼투압, reverse osmosis)법 등이 있다. 그 외에도 원수에 용해된 염을 동결 과정을 통해 배제시키는 결빙법도 있으나 상업적 설비로 건설되지는 않았으며 태양열로 원수를 직접 가열하는 태양열 증발식 담수화 공정이 있다. 담수화 공정의 기본적인 원리는 그림 1과 같다.

물을 가열하여 담수를 얻는 공정은 초기 담수화 공정에서 주로 사용되었으나 박막이 등장하고 박막을 이용한 공정에 대한 지속적인 성능개선이 이루어져 최근에는 박막공정을 이용한 담수화 공정이 많이 사용되고 있다. 그림 2에서 나타난 바와 같이 최근에는 박막공정을 이용한 담수화 공정이 많은 주목을 받고 있다.

담수화 공정의 비교

MSF 공정은 고순도의 담수 생산은 가능하지만 단시간 내의 운전개시(start-up) 및 운전정지(shut-down)가 불가능하다. 운전 온도가 MED 공정에 비하여 상대적으로 높아 고급 재질을 사용하여야 한다. 주로 대용량의 담수 플랜트에서 사용하는 방법으로 운전 효율을 향상시키기 위하여 주변의 발전소에서 증기를 공급받아 운전되기도 한다. MSF 공정을 이용하는 주요 국가는 사우디아라비아, 아랍에미레이트 연합국, 리비아, 이란 등의 중동과 북아프리카(North African)국가들이다. 1960년대의 단위 생산비용은 9.0

$\$/m^3$ 이었으나 최근에는 $1.0 \$/m^3$ 까지 낮추어졌다. MSF 공정을 이용해서 담수를 생산할 경우 일반적인 기준을 적용했을 때 $4.0 \text{ kWh}/m^3$ 의 에너지가 소요되며 회수율은 10 ~ 20% 정도인 것으로 평가되었다.

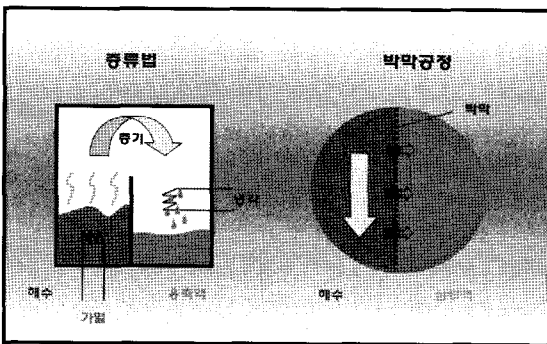
MED 공정은 고순도의 담수 생산이 가능하며 짧은 시간 내에 운전개시(start-up) 및 운전정지(shut-down)가 가능하다. 운전이 용이한 편으로 운전 경험에 대한 참고 자료들도 많다. 중간 이하의 용량에 적용된다. 담수화 비용은 1950년대의 $10.0 \$/m^3$ 에서 최근의 $1.0 \$/m^3$ 으로 낮추어졌다. 담수 생산시 소요되는 에너지는 $1.9 \sim 2.6 \text{ kWh}/m^3$ 정도이며 회수율은 약 20 ~ 35%로 알려져 있다.

RO 공정은 지난 수십 년간의 기술적인 발달과 가격의 하락으로 세계적으로 널리 사용되고 있는 공정으로 미국, 사우디아라비아, 스페인, 일본, 한국 등에서 사용되고 있는 담수화 공정이다. 공정의 운전시 박막의 파손을 방지하기 위해 일정한 조건의 해수 공급이 필요하고 지속적이며 세심한 주의가 요구된다. 담수화 비용은 1970년대에 $5.0 \$/m^3$ 이었으나 오늘날은 해수 담수화 비용으로는 $1.0 \$/m^3$, 기수,

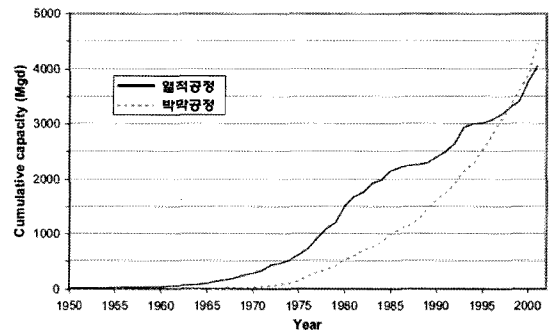
강물 등의 담수화 비용은 $0.6 \$/m^3$ 정도까지 감소되었다. 운전시 소요되는 에너지는 $2.6 \sim 4.2 \text{ kWh}/m^3$ 정도이며 회수율은 35 ~ 55% 정도로 알려져 있다.

담수화 공정의 선택

적절한 담수화 공정의 선택은 담수화 설비에 대한 현지 설치여건과 응용 가능성에 대한 세심한 조사에 기초해야 하며 그 중 지역적인 여건이 그 지역에 가장 적합한 담수 공정을 결정하는 가장 중요한 요소가 된다. 또한 각 담수화 공정의 특성도 고려되어야 하는데 일반적으로 해수의 담수화에는 증발법과 박막법이 사용되며 기수의 담수화에는 박막법이 주로 사용된다. 2002년까지 전 세계적으로 15,000개 이상의 산업화된 담수화시설이 설치되었으며 이들의 용량은 $32.4 \times 106 \text{ m}^3/\text{d}$ 이었다. 이 중 해수 담수화 공정이 $19.1 \times 106 \text{ m}^3/\text{d}$ 을 비해수 담수화 시설이 $13.3 \times 106 \text{ m}^3/\text{d}$ 을 차지하고 있다. 담수화 대상 원수 및 담수화 공정으로 도달 가능한 담수화 정도에 대해서는 표 1에 나타나 있다.



[그림 1] 증류와 박막을 이용한 담수화 공정의 원리



[그림 2] 담수화 공정별 누적 용량의 연간변화

<표 1> 원수, 담수의 목적, 담수 공정별 TDS(Total Dissolved Solid)

원수		담수의 사용목적		공정	
종류	TDS [단위 : ppm]	종류	TDS [단위 : ppm]	종류	담수의 TDS [단위 : ppm]
강물	500 ~ 3,000	산업용수	10 이하	MSF	1 ~ 25
염수	3,000 ~ 20,000			MED	0.5 ~ 25
해수	20,000 ~ 50,000	음용수	1,000 이하	RO	< 500
농염수	50,000 이상				



해수 담수화 공정에서의 에너지 소모

기존의 수원으로부터 물을 처리해 공급하는 비용은 보다 엄격한 수질기준의 적용으로 가격이 지속적으로 상승한 반면, 기술적 발전으로 인해 담수화된 물의 가격은 많이 저감화되었다. 일반적으로 담수화 비용은 시설의 위치, 에너지 및 기타 비용 등으로 구성된다. 해수로부터 대량으로 담수를 생산할 때는 주요 상업적 담수화 공정인 MSF와 RO를 놓고 기술적 및 경제적 측면에서 비교하게 된다. 이 때 고려되는 기술적 인자는 해수의 특성, 생산되는 담수의 품질, 에너지원 및 소모량, 시설규모, 시설의 신뢰성, 농축액의 처리, 필요 공간, 유지 및 관리 측면 등이 고려된다. 반면 경제적 측면에서 고려되어야 할 인자로는 시설, 에너지, 노동력, 수처리 약품, 재료, 소모품 등이 고려된다(그림 3).

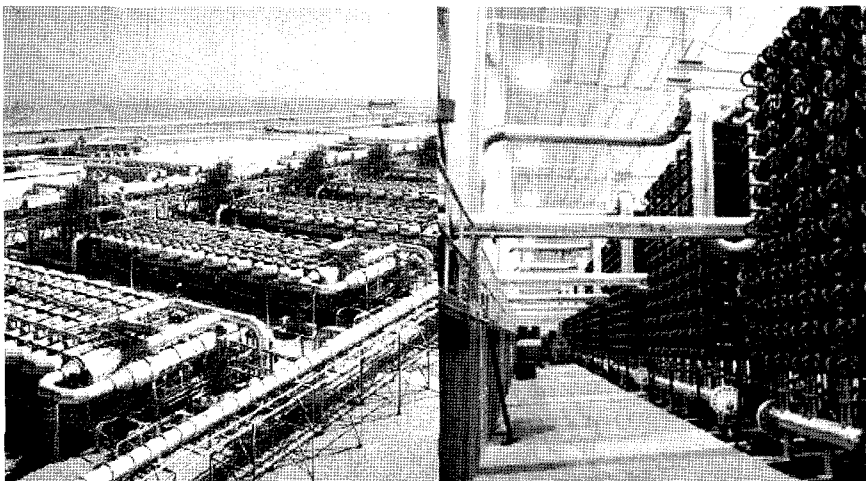
에너지 소비 측면에서 고려할 때 열적 공정에서 소요되는 비용은 에너지 : 수처리 약품 : 노동력 = 0.87 : 0.05 : 0.08로 에너지의 소모가 많고 에너지 비용의 변동에 따라 담수화 비용의 변동도 크게 된다. 앞서 논의된 바와 같이 RO 공정이 규모면에서는 열적 공정에 비하여 대형 공정은 없지만 에너지 소모량은 적다.

RO 공정의 에너지 소모량에 영향을 나타내는 인자는 회수율과 flux 등이 있다. RO 공정의 회수율은

해수의 경우 35 ~ 55%, 기수의 경우 75 ~ 85% 정도가 된다. Flux는 매우 중요한 설계 인자의 하나로 설계 flux가 높을수록 설치비용이 낮아지는데 이는 필요한 박막 및 압력용기의 숫자가 줄어들기 때문이다. 그러나 flux를 너무 높게 설정하면 과도한 부착물이 생성되어 막세정 주기가 짧아지게 되고 운전 정지시간 증가, 박막 수명의 감소 및 시설용량의 제한 등이 유발될 수 있다. 이외에도 flux의 증가에 따라 운전압력과 에너지 소모량이 증가하게 된다. 또한 박막의 특성도 RO 공정의 운전을 결정하는 중요한 인자 중의 하나로 지난 30년 동안 SWRO 박막의 투과성은 2배 이상, 배제율은 7배로 증가한 반면 박막의 가격은 감소하였다. 현재 사용되는 해수 박막의 한 가지 제한점은 보론 배제율이다. 93% 이상의 보론이 일반적인 운전 pH인 6 ~ 7.5 사이에서 비해리형으로 존재하고 있으며, 전형적인 해수 담수화 RO 박막에 의해 제대로 걸러지지 않는다(80 ~ 90%).

RO 공정에서의 에너지 저감화

담수화 공정의 핵심인 RO 장치를 단일 담수화 시스템으로 적절하게 통합하는 것은 원하는 여과수의 수질 유지 및 에너지 소모량 저감에 매우 중요하다. 표준적인 방법은 6 ~ 8개의 해수용 RO박막 장치를



[그림 3] MSF 공정(좌)과 RO 공정(우)을 이용한 담수화 시설

단일 압력용기에 설치하는 것이다. 최근 2단계 박막 시스템이 개발되었는데 고배제용 기수 박막장치 또는 고투과성 해수 장치가 첫 번째 단계, 표준 해수 장치가 두 번째 단계에서 사용된다. 이로 인해 시스템은 첫 단계에서 물이 생산되기에 충분한 압력(즉 원수의 삼투압보다 40% 정도만 넘으면 되는 압력)으로 첫 단계가 운전될 수 있게 한다. 해수가 첫 단계에서 원하는 범위로 농축된 후에 농축액은 보다 가압되어 두 번째 단계의 해수 장치로 처리된다. 대부분의 여과수가 첫 단계에서 생성되므로 유동량 중 일부분의 압력만이 증가되며 상당량의 에너지가 저감화된다. 첫 단계에서 기수 또는 고투과성 해수 박막 장치를 사용하는 또 다른 이점은 박막의 저항성이 해수 박막보다 낮아 에너지를 크게 낮출 수 있다.

해수 담수화 공정에서 농축액 내에 남아있는 에너지는 주입수에 가해진 에너지의 대략 40~50%에 해당하며 다양한 장치를 이용하여 회수될 수 있다. 현재 사용되는 에너지 회수장치는 적용원리에 따라 크게 원심력장치와 positive-displacement 장치로 나눌 수 있다. 과거에 폭넓게 사용되던 원심력 장치는 농축액의 유체에너지지를 기계적 에너지로 변환시켜 주입수의 수력에너지로 전달한다. 전체적 효율은 일반적으로 50~70%이다. hydraulic turbocharger와 Pelton drive pump는 터빈을 common shaft를 이용해 직접적으로 pump impeller와 연동시키며 그로 인해 효율을 65%에서 85%까지 향상시킨다. 농축액의 수력에너지를 직접적으로 주입수에 전달하는 Positive-displacement 장치의 효율성은 보다 더 좋다. 이 경우, 주입수의 일부분은 에너지회수 장치에 전달된다. 에너지 회수장치 내에서 농축액의 유체에너지는 주입수에 전달되어 압력을 증가시킨다. 농축액이 보다 낮은 압력을 가지며, 시스템 내에서는 수력손실(hydraulic loss)이 어느 정도 발생하기 때문에 에너지회수장치를 떠나는 가압된 주입수는 펌프에 의해 더욱 가압되며 고압 급수펌프 배출물과 혼합된다. 그 뒤 혼합된 물은 RO 박막에 의해 처리된다. 이러한 장치의 효율은 이미 95%에 근접한다고 알려져 있다.

취수시스템을 적절하게 선택하고 설계하는 것은 급수되는 수질에 중요한 인자이며, 이때의 수질은 전처리, RO의 성능, 에너지 효율에 영향을 미친다. 해수

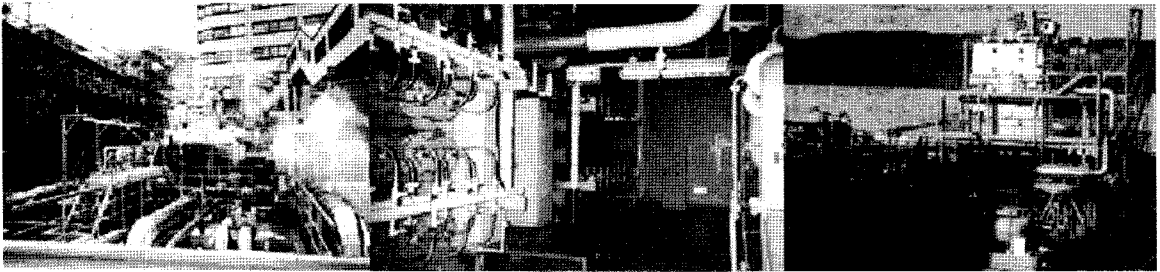
취수 시스템의 주요 목적은 급수의 안정적인 공급이지만 일정한 수질을 유지할 수 있어야 한다. 여러 유형의 해수 취수 시스템이 있으며 open intake과 subsurface intake 시스템으로 폭넓게 분류된다.

Open intake 시스템에는 바다 내의 습정(wet well) 또는 바다 쪽으로 도출된 파이프 등이 포함된다. 이러한 시스템에는 부유물의 흡입을 최소화하기 위한 거친 망과 보다 작은 부유물을 걸러내기 위한 traveling screen등이 설치되어 있다. Open intake에서 들어오는 급수의 질은 조수간만의 차이 및 계절적 변화에 의해 크게 영향을 받는다. 따라서 open intake 시스템은 보통 subsurface 시스템이 적합하지 않은 곳에서만 사용된다. Open intake는 또한 탈염 시설이 발전소와 부지를 공유할 때 취수시설을 공유하여 경제성을 갖게 된다.

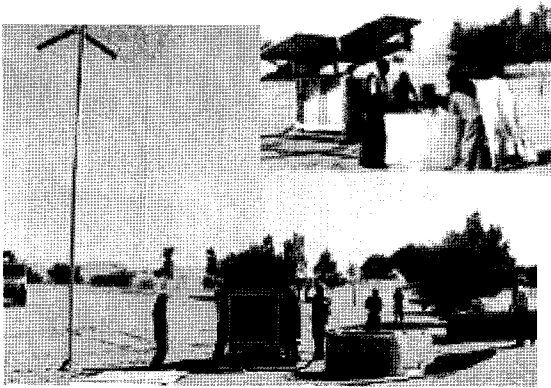
담수화시설에서 사용되는 subsurface 취수 시스템의 유형에는 해안 근처에 뚫린 sea wells, beach gallery 취수 시스템, 해저 및 취수 파이프 gallery 시스템 등이 포함된다. Subsurface 취수시스템의 해수에는 부유물질 또는 유기체의 농도가 더 낮으며 보다 작은 온도 변화 및 보다 작은 생물학적 활동에 영향을 받기 쉽고 용존 산소량이 보다 낮다. 이 때문에 subsurface 시스템에서 취수한 해수는 부착물을 유발시킬 가능성이 더 낮다.

부착물 방지 및 RO 박막의 성능 향상을 위해 해수의 광범위한 전처리가 요구된다. 해수 전처리에는 전통적인 방법이 널리 사용되고 있는데 이는 현존하는 대다수의 해수 담수화 RO 시설이 표면취수(surface intake)를 이용하기 때문이다. 일반적인 전처리에는 응고, 응집, DMF(dual-media filtration)등이 포함된다.

최근 수년간 저압 MF(microfiltration)/UF(ultrafiltration) 박막이 RO공정에서 발생하는 upstream의 전처리에 고려되고 있다. 이의 주요 장점은 일관된 고품질의 물을 생산할 수 있다는 것이다. 여러 연구에서 MF/UF는 부착물이 낮은 RO 주입수를 생산하는 데 사용되었다. MF/UF공정에서도 에너지를 필요로 하기는 하지만 여과액의 부착물 가능성이 보다 낮기 때문에 RO운전 압력의 증가를 최소화하며 그에 따라 RO공정의 에너지 소모량은 더 낮아진다. 청소빈도 저감화로 운전효율 및 박막의 수명이 증가한다.



[그림 4] 원자력발전소를 이용하는 담수화 시설 (좌측부터 MSF, RO, MED)



[그림 5] 재생에너지를 이용하는 담수화 시설

과거에는 고비용이 한계로 작용하였으나 현재에는 MF/UF시스템의 가격이 낮아져 새로운 시설들이 MF/UF에 기반한 전처리를 SWRO의 상류 전처리에 고려하게 되었다.

에너지원의 다양화

재생에너지(조력, 풍력, 태양열 등)를 담수화에 직접적으로 사용한 새로운 공정은 활발한 연구분야이다. 하지만, 이러한 공정은 현재 규모가 제한되어 있으며, 외딴 곳의 소규모 시설에 가장 적합하다(그림 5).

또한 원자력발전소를 담수화 공정에 이용하는 것에 대한 논의가 국제원자력기구(IAEA)에서 1960년대부터 논의되기 시작하였으며 현재 회원국 간의 공동연구를 통하여 활발히 연구되고 있다(그림 4).

참고문헌

1. Journal AWWA, Reducing energy consumption for seawater desalination, srinivas veerapaneni, bruce long, scott freeman, and rick bond, 2007. 6
2. 환경부, 먹는물 다원화에 대한 정책방안 수립, 한국환경정책·평가연구원, 2005. 2
3. 海水の淡水化に関する検討會, の海水淡水化の現況と原子力利用の課題, 2006. 7
4. Sandia National Laboratories, Review of water resources and desalination technologies, James E. Miller, 2003.3
5. David H. Furukawa, Desalination Technology 2006, AMBAG Conference, Monterey, CA, 2006.9
6. Fawzi Banat, Economic and technical assessment of desalination technologies, 2007. 6
7. Ulrich Ebersperger and Phyllis Isley, Review of the current state of desalination, water policy working paper 2005-008, 2005.1
8. Yuan Zhou and Richard S. J. Tol, Evaluating the costs of desalination and water transport, 2004.9
9. 한국원자력연구소, 해수담수화 공정의 기술현황 분석 보고서, 황영동, 김영인, 이두정, 장문희, 홍종명, 임종성, KAERI/AR-575/2000