

2003 춘계학술발표회 논문집  
한국원자력학회

## 해수담수화의 기술 및 경제성

### The technology and economics of Desalination

김승수, 이만기

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

원자력발전과정에서 발생하는 열에너지를 해수담수화의 공정에 활용하고자 하는 노력이 지속적으로 전개되고 있다. 가까운 미래에 전 세계적으로 물부족 현상이 심화될 것으로 전망되고 있으며 기존의 지표수 혹은 지하수를 이용한 식수 및 산업용수의 공급은 멀지 않아 한계에 부딪칠 것으로 예상하고 있다. 본 논문에서는 해수담수화 기술의 기본적 특성을 살펴보고 열 공급원으로서 고려되고 있는 다양한 담수기술에 대한 경제성 전망을 중심으로 정리하였다.

#### Abstract

Heat energy arising from nuclear generation process is an important resource not to be wasted. In the near future, it is expected that the water supply for drinking or industrial use will be very deficient on an average in the whole world. This thesis shows about the basic characteristics for existing technologies of desalination and surveys the economic perspective for nuclear desalination.

#### 1. 서 론

급속한 산업화와 경제성장, 보다 향상된 생활수준을 추구하려는 인류의 요구수준에 따라 우리가 사용할 수 있는 물의 양이 부족함과 동시에 수질은 더욱 악화되어 가고 있다.

전세계에 있는 물의 2.5%만이 담수이며 11억명의 사람들이 안전한 식수의 부족현

상을 겪고 있다. 2025년까지 절대적인 물 부족 인구는 전 인구의 33%인 약 20억명에 이를 것으로 예상하고 있다. 전세계 물의 약 97.5%는 해수로 되어 있으며 주요 해안 지역은 메탈라 있다. 개발도상국에 있어서는 모든 질병의 80%-90%와 사망의 30% 정도는 그 원인이 안전하지 않은 물의 사용으로 인해 유발된 것으로 평가하고 있다.

금년은 유엔이 정한 “세계 물의 해”이다. 전망에 의하면 향후 20년 이내에 물의 소비가 현재보다 약 40% 정도 증가할 것으로 예상하고 있으며 사용가능한 수자원의 확보는 더욱 어려워져 물 문제 극복을 위한 수자원의 개발이 중요한 이슈로 부각될 전망이다. 한편 과학기술부는 2001년부터 21세기 프론티어 국가연구개발프로그램의 일환으로 수자원 프론티어사업을 추진하고 있다.

지리적 특성으로 인한 물 부족 문제의 해결을 위해 중동지역의 국가들은 과거로부터 해수를 담수화하여 식수 및 산업용수로 사용해 오고 있다. 본 논문에서는 해수담수화 과정에 이용되는 열 혹은 전기에너지의 공급원으로서 원자력을 중심으로 하여 전개하였다.

## 2. 해수담수화의 기술 및 시장 현황

해수담수화의 기본과정은 해수에 열에너지 혹은 기계/전기적 에너지를 이용하고 적절한 방식을 활용하여 담수를 생산하게 된다.

해수담수화는 크게 두 가지 방식으로 나뉘어 있는데 첫 번째로는 멤브레인 방식으로써 이는 전기적 에너지를 이용하여 해수 혹은 Brackish water가 멤브레인을 통과하도록 하게 하는 것으로써 주로 역삼투압 작용을 이용하는 RO(Reverse Osmosis)방식이 있다. 두 번째로는 증류방식(Distillation process)인데 이것은 열에너지를 이용하여 해수를 증류시키는 것이 주요 공종으로 되어 있으며 대표적인 것으로는 MSF(Multistage Flash)와 MEE(Multiple Effect Evaporation) 방식 등이 있다. 증류방식으로 생산된 담수는 염분의 농도가 거의 0에 가까운 상태인데 반해 멤브레인 방식에서 생산된 물은 어느 정도의 염분농도를 함유하고 있는 것이 특징이다.

담수화 기술을 개략적으로 분류하면 표 1과 같다.

표 1. 담수화 기술의 분류

구 분	세 분류
-----	------

Distillation(thermal) Processes	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Multi-Stage Flash(MSF)</li> <li>▪ Multi Effect Distillation(=Evaporation) (MED=MEE)</li> <li>▪ Vapor Compression</li> <li>▪ Solar evaporation</li> </ul>
Membrane Processes	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reverse Osmosis(RO) / Nanofiltration(NF)</li> <li>▪ Electrodialysis(ED)</li> </ul>
기타	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Freezing</li> <li>▪ Ion exchange</li> </ul>

RO방식은 주로 해수의 염분 농도가 낮거나 약간의 소금기가 있는 지하수 등에 많이 활용되고 있으며 미국을 비롯해 일본 등에서 선호되고 있다. 열에너지를 이용하는 Distillation방식의 시설은 1912년 이집트에 처음 설치되었으며 6개의 effect와 75 m<sup>3</sup>/d의 용량을 가진 것이었다. 그후 1930년대 석유산업의 부흥을 계기로 담수화 설비 생산용량이 확장되었으며 1960년대까지 괄목할 만한 성장을 거듭했다. 최초의 MSF 설비는 1957년 웨스팅하우스사에 의해 쿠웨이트에 설치되었으며(4 stage flash) 1960년대부터 Stage의 수가 훨씬 더 많고 큰 규모의 설비들이 본격적으로 도입되기 시작하였다. 1996년에는 최대규모인 57,735 m<sup>3</sup>/d의 대용량 MSF 설비를 두산중공업에 의해 아랍에미리트(UAE)에 건설되었다.

담수화 시장의 전망은 상당히 밝은 편이다. 2001년말 현재 담수화시설의 총 용량은 32.4 \* 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/d인데 1999년말 이래 약 6.5 \* 10<sup>6</sup>의 용량이 증가하였다. 또한 운영중인 기수는(units) 12,500개 이상인 것으로 추정되고 있다. 또한 총 120여 개국 이상에서 해수담수화 시설을 운영하고 있으며 향후 20년 동안의 신규 시장 규모는 약 700억불 이상이 될 것으로 전망하고 있다. 이 중에서 향후 5년 안에 100억불 정도(5.3 \* 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/d 규모)의 시장이 있을 것으로 추정된다.

1996년에는 전세계 생산량의 65% 정도가 걸프지역과 미국에 집중되어 있었는데 이와 같은 상황은 2000년도에도 비슷하게 전개되고 있다. 다만 일본, 한국, 스페인, 이탈리아 등의 국가들이 생산능력을 확장시키고 있는데 스페인의 경우는 그들의 생산능력을 2배정도까지 확장시켰다.

2001년말 현재 총 담수화설비용량(32.4 mil. m<sup>3</sup>/d) 중에서 MSF와 RO의 점유율은 각각 39%와 44%를 차지하고 있으며 해수담수화 만을 대상으로 한 시장에서는 MSF와 RO가 각각 65%, 22%로 나타나고 있다. 이 중에서 MSF는 Thermal desalination process의 약 93% 정도를 차지하고 있으며 멤브레인의 경우 88%는 RO설비로 평가되고 있다. 대부분의 MSF설비들은 Brine circulation type을 적용하고 있으며 MEE(=MED)는 parallel feed mode를 주로 채택하고 있다. 대부분의 걸

프지역의 국가에서는 MSF를 주로 채택하고 있고 미국, 일본, 스페인 등에서는 RO 방식이 우위를 차지하고 있다.

원자력 (해수)담수화(Nuclear Desalination)는 담수화공정에 소요되는 에너지원으로 원자로에서 생산되는 전력과 폐열을 이용하고자 하는 것이며 이는 기존의 에너지원에 비해서도 경제적 경쟁력을 충분히 갖출 수 있다고 예상하고 있으며 기술적 가능성/신뢰성의 문제는 이미 확보되어 있다. 즉, 원자로+MSF, 원자로+MED(=MEE), 원자로+RO의 기본적 결합생산방식을 의미한다. 이에 부가하여 근래에 와서는 Hybrid 방법을 선호하고 있는데 이는 2개의 담수화공정을 연결하여 생산하는 방식으로서 원자로+MSF+RO, 원자로+ MED(=MEE)+RO 등의 개념을 말한다. 현재 인도의 Kalpakkam 지역에 건설되고 있는 원자력 Hybrid 해수담수화플랜트는 PHWR(170 MWe)+MSF(4,500 m<sup>3</sup>/d)+RO(1,800 m<sup>3</sup>/d)의 공정을 적용하고 있다.

### 3. 담수화기술의 경제성

원자료를 이용하여 전력과 담수를 동시에 생산하는 설비의 경제성은 전력설비와 담수화설비 각각의 비용인 내부적요인 뿐만 아니라 전력과 담수의 생산 비율 등의 외부적 요인에 의해 영향을 받게 된다. 담수의 생산 비용에 영향을 주는 주요 요인을 정리하면 표 2와 같다.

표 2. 담수생산비용의 영향 요인

영향 요인	효과
유입수의 염분 농도와 품질 특성	<ul style="list-style-type: none"> <li>낮은 염분농도는 더 높은 전환비율을 나타내며 RO 플랜트의 경우 전력소비량을 경감시킬 수 있다. 또한 스케일을 방지하는 화학물질의 사용을 줄일 수 있다.</li> </ul>
플랜트의 용량	<ul style="list-style-type: none"> <li>규모의 경제 효과</li> </ul>
부지 조건	<ul style="list-style-type: none"> <li>기존플랜트에 부가하여 건설시 부대시설 비용의 감소</li> </ul>
숙련된 인력	<ul style="list-style-type: none"> <li>운전이용률의 향상, 운전비용의 감소</li> </ul>
에너지 비용	<ul style="list-style-type: none"> <li>값싼 전력 혹은 열에너지의 이용 가능성은 운영비용에 절대적인 영향을 준다.</li> </ul>
플랜트의 수명기간과 감가상각	<ul style="list-style-type: none"> <li>자본투자비의 결정 및 연간 수익성에 영향을 준다.</li> </ul>
경제적인 변수(할인율, 물가상승률)	<ul style="list-style-type: none"> <li>총투자비, 연료비 등에 직접적인 영향</li> </ul>

한편, 담수화플랜트의 생산비용(자본비, 운영비)을 구성하고 있는 요소를 정리하면 표 3과 같다.

표 3. 담수생산비용의 구성 요소

Well supply	직접투자비	자본회수계수(CRF)에 의해 연간 자본투자비로 변환됨	연간 총 운영비
염수의 처분			
부지구입 및 조성			
기자재 구입			
보조기자재			
토목공사			
멤브레인 구입	간접투자비		
수송 및 보험료			
건설 overhead			
사업주비	연간 운전유지비용		
예비비			
전력비용			
인건비			
멤브레인 교체			
유지보수			
보험료			
화학물질 (황산, 염소, 스케일방지제, 가성소다)			

기존 담수생산비용의 실적을 살펴보면 담수의 용량이 클수록, 담수의 단일 생산보다는 전력과 담수를 동시에 생산하는 경우가 저렴한 것으로 나타났는데 MEE 혹은 MSF의 실적자료에 의하면(Darwish and Al-Najim(1987)) 전력과 담수를 동시에 생산하는 것이 담수만 생산할 때와 비교해 담수생산비용이 절반에도 미치지 못하는 것으로 나타났다.

비용분석에 관한 과거의 결과물을 살펴보면, 총 담수생산비용에서 차지하는 각 비용요소의 점유율은 MSF에 있어서 연간 자본투자비와 증기공급비용이 각각 총비용의 35%, 45% 정도를 차지하고 있는데 반해 MEE에 있어서는 연간자본투자비와 증기공급비용, 전력비용이 각각 30%, 38%, 22% 정도를 차지하는 것으로 나타나고 있고 생산비용은 두가지 공정에 있어서 비슷한 결과를 보여주었다. 이러한 결과로부터 증기의 공급비용은 MSF, MEE에 있어서 담수생산비용의 경제성을 좌우할 수 있는 절대적인 위치를 차지하고 있다. 또한 RO를 이용한 담수생산비용은 MSF, MEE 방법에 비해 담수생산비용이 훨씬 저렴한데 연간자본투자비와 전력비용이 각각 약 30%씩 차지하고 있으며 멤브레인의 교체비용 또한 약 30%를 차지하는 것으로 나타나고 있다.

물론 담수생산비용의 수치는 절대적인 것이 아니며 부지특성 혹은 해수의 특성에 따라 크게 달라질 수 있게 된다. 일반적으로 해수의 염분농도가 30,000 ppm이하에서는 RO방법이 경제적으로 우수한 것으로 평가되고 있으며, 담수생산용량이 큰 경우에는(약 25,000 m<sup>3</sup>/d이상) MSF방법이 선호되고 그 이하의 용량에서는 MEE방법이 유리한 것으로 예상하고 있다.

전력과 담수를 동시에 생산하는 경우, 각각의 단위당 비용 산정을 위한 방법으로서는 IAEA에서 이용하고 있는 Power credit 방법이 있다. 이는 결합생산으로 인한 혜택의 전부를 담수의 생산비용 인하에 집중하는 것으로서 전력의 균등화 발전원가를 적용하여 전력의 판매단가를 결정하고 담수화설비에 공급하는 열에너지를 전력 생산 감소분을 평가하여 저렴하게 공급함을 기본 논리로 하고 있다. 원자력발전에서 생산되는 폐열을 담수생산에 활용할 경우 원자력의 낮은 발전원가로 인해 열에너지를 더욱 저렴한 비용으로 공급할 수 있는 장점이 있으며 담수생산비용에서 차지하는 열에너지 비용의 중요성을 고려할 때 매우 매력적인 대안으로 부상하고 있다. 물론 원자로와 담수설비를 Coupling할 경우의 안전성확보를 위한 비용, 전력과 담수 수요의 변동성 정도 등에 따라 경제성이 달라질 수 있다.

#### 4. 결 론

원자력을 이용한 해수담수화 기술은 아직 성숙되어 있지 않지만 기술적으로나 경제성 측면으로 충분히 가능한 것으로 예상되고 있으며 우리나라에서는 SMART 원자로를 대상으로 하여 상용화를 적극 추진하고 있다. 원자력 해수담수화의 경제성 평가를 위한 도구로써는 IAEA에서 개발한 DEEP 프로그램이 있는데 이를 통해 원자력뿐만 아니라 다른 화석연료 발전원의 결합생산 방식을 상호 비교할 수 있다. 원자력을 이용한 담수화설비의 경제성을 향상시킬 수 있는 요소를 분석/평가함으로써 원자력발전의 활용성을 증대시킬 수 있는 전략이 필요할 것으로 판단된다.

#### 5. 참고문헌

- 1) Hisham El-Dessouky, "Process Economics", 2003.
- 2) Ron S. Faibish, " Cogeneration and Hybrid desalination system", IAEA, 2003.