

해수 담수화의 기술 및 경제성

김승수, 이만기
한국원자력연구소

원자력 발전 과정에서 발생하는 열에너지를 해수 담수화의 공정에 활용하고자 하는 노력이 지속적으로 전개되고 있다. 가까운 미래에 전 세계적으로 물 부족 현상이 심화될 것으로 전망되고 있으며 기존의 지표수 혹은 지하수를 이용한 식수 및 산업 용수의 공급은 멀지 않아 한계에 부딪힐 것으로 예상하고 있다. 본 논문에서는 해수 담수화 기술의 기본적 특성을 살펴보고 열 공급원으로서 고려되고 있는 다양한 담수 기술에 대한 경제성 전망을 중심으로 정리하였다.

서론

급속한 산업화와 경제 성장, 보다 향상된 생활 수준을 추구하려는 인류의 요구 수준에 따라 우리가 사용할 수 있는 물의 양이 부족함과 동시에 수질은 더욱 악화되어 가고 있다.

전 세계에 있는 물의 2.5%만이 담수이며 11억명의 사람들이 안전한 식수의 부족 현상을 겪고 있다. 2025년까지 절대적인 물 부족 인구는 전 인구의 33%인 약 20억명에 이를 것으로 예상하고 있다. 전 세계 물의 약 97.5%는 해수로 되어 있으며 주요 해안 지역은 메말라 있다.

개발 도상국에 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 사용 가능한 수자원의 확보는 더욱 어려워져 물 문제 극복을 위한 수자원의 개발이 중요한 이슈로 부각될 전망이다.

한편 과학기술부는 2001년부터 21세기 프론티어 국가 연구 개발 프로그램의 일환으로 수자원 프론티어 사업을 추진하고 있다.

지리적 특성으로 인한 물 부족 문제의 해결을 위해 중동 지역의 국가들은 과거로부터 해수를 담수화하여 식수 및 산업 용수로 사용해 오고 있다.

본 논문에서는 해수 담수화 과정에 이용되는 열 혹은 전기 에너지의 공급원으로서 원자력을 중심으로 하여 전개하였다.

해수 담수화의 기술 및 시장 현황

해수 담수화의 기본 과정은 해수에 열에너지 혹은 기계/전기적 에너지를 이용하고 적절한 방식을 활용하여 담수를 생산하게 된다.

해수 담수화는 크게 두 가지 방식

으로 나뉘어지는데, 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 증류 방식(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.

증류 방식으로 생산된 담수는 염분의 농도가 거의 0에 가까운 상태인데 반해 멤브레인 방식에서 생산된 물은 어느 정도의 염분 농도를 함유하고 있는 것이 특징이다. 담수화 기술을 개략적으로 분류하면 <표 1>과 같다.

RO 방식은 주로 해수의 염분 농도가 낮거나 약간의 소금기가 있는 지하수 등에 많이 활용되고 있으며 미국을 비롯해 일본 등에서 선호되고 있다.

열 에너지를 이용하는 Distillation 방식의 시설은 1912년 이집트에 처음 설치되었으며 6개의 effect와 75 m³/d의 용량을 가진 것이었다.

그 후 1930년대 석유 산업의 부

<표 1> 담수화 기술의 분류

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

흥을 계기로 담수화 설비 생산 용량이 확장되었으며 1960년대까지 팔 목할 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 최대 규모인 57,735 m³/d의 대용량 MSF 설비를 두산중공업에 의해 아랍에미리트(UAE)에 건설되었다.

담수화 시장의 전망은 상당히 밝은 편이다. 2001년말 현재 담수화 시설의 총용량은 32.4 * 10⁶ m³/d 인데 1999년 말 이래 약 6.5 * 10⁶의 용량이 증가하였다.

또한 운영중인 기수는(units) 12,500개 이상인 것으로 추정되고 있다. 또한 총 120여 개국 이상에서 해수 담수화 시설을 운영하고 있으며 향후 20년 동안의 신규 시장 규모는 약 700억불 이상이 될 것

로 전망하고 있다. 이중에서 향후 5년 안에 100억불 정도(5.3 * 10⁶ m³/d 규모)의 시장이 있을 것으로 추정된다.

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

2001년 말 현재 총담수화 설비용량(32.4 mil. m³/d) 중에서 MSF와 RO의 점유율은 각각 39%와 44%를 차지하고 있으며, 해수담수화만을 대상으로 한 시장에서는 MSF와 RO가 각각 65%, 22%로 나타나고 있다.

이중에서 MSF는 Thermal desalination process의 약 93% 정도를 차지하고 있으며 멤브레인의 경우 88%는 RO 설비로 평가되



고 있다.

대부분의 MSF 설비들은 Brine circulation type을 적용하고 있으며 MEE(=MED)는 parallel feed mode를 주로 채택하고 있다.

대부분의 걸프 지역의 국가에서는 MSF를 주로 채택하고 있고 미국·일본·스페인 등에서는 RO 방식이 우위를 차지하고 있다.

원자력 (해수)담수화(Nuclear Desalination)는 담수화 공정에 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 결합 생산 방식을 의미한다.

이에 부가하여 근래에 와서는 Hybrid 방법을 선호하고 있는데 이는 2개의 담수화 공정을 연결하여 생산하는 방식으로서 원자로+MSF+RO, 원자로+MED(=MEE)+RO 등의 개념을 말한다.

현재 인도의 Kalpakkam 지역에 건설되고 있는 원자력 Hybrid 해수 담수화 플랜트는 PHWR(170 MWe)+MSF(4,500 m³/d)+RO(1,800 m³/d)의 공정을 적용하고 있다.

〈표 2〉 담수 생산 비용의 영향 요인

영향 요인	효과
유입수의 염분 농도와 품질 특성	• 낮은 염분 농도는 더 높은 전환 비율을 나타내며 RO 플랜트의 경우 전력 소비량을 경감시킬 수 있다. • 또한 스케일을 방지하는 화학 물질의 사용을 줄일 수 있다.
플랜트의 용량	• 규모의 경제 효과
부지 조건	• 기존 플랜트에 부가하여 건설시 부대 시설 비용의 감소
숙련된 인력	• 운전 이용률의 향상, 운전 비용의 감소
에너지 비용	• 값싼 전력 혹은 열 에너지의 이용 가능성은 운영 비용에 절대적인 영향을 준다.
플랜트의 수명 기간과 감가 상각	• 자본 투자비의 결정 및 연간 수익성에 영향을 준다.
경제적인 변수(환율, 물가 상승률)	• 총투자비·연료비 등에 직접적인 영향

담수화 기술의 경제성

원자로를 이용하여 전력과 담수를 동시에 생산하는 설비의 경제성은 전력 설비와 담수화 설비 각각의 비용인 내부적 요인뿐만 아니라 전력과 담수의 생산 비율 등의 외부적 요인에 의해 영향을 받게 된다.

담수의 생산 비용에 영향을 주는 주요 요인을 정리하면 〈표 2〉와 같다.

한편 담수화 플랜트의 생산 비용(자본비·운영비)을 구성하고 있는 요소를 정리하면 〈표 3〉과 같다.

기존 담수 생산 비용의 실적을 살펴보면 담수의 용량이 클수록 담수의 단일 생산보다는 전력과 담수를 동시에 생산하는 경우가 저렴한 것으로 나타났는데, MEE 혹은 MSF의 실적 자료에 의하면(Darwish and Al-Najim(1987)) 전력과 담수를 동시에 생산하는 것이 담수만

생산할 때와 비교해 담수 생산 비용이 절반에도 미치지 못하는 것으로 나타났다.

비용 분석에 관한 과거의 결과물을 살펴보면, 총담수 생산 비용에서 차지하는 각 비용 요소의 점유율은 MSF에 있어서 연간 자본 투자비와 증기 공급 비용이 각각 총비용의 35%, 45% 정도를 차지하고 있는데 반해, MEE에 있어서는 연간 자본 투자비와 증기 공급 비용, 전력 비용이 각각 30%, 38%, 22% 정도를 차지하는 것으로 나타나고 있고, 생산 비용은 두 가지 공정에 있어서 비슷한 결과를 보여주었다.

이러한 결과로 부터 증기의 공급 비용은 MSF·MEE에 있어서 담수 생산 비용의 경제성을 좌우할 수 있는 절대적인 위치를 차지하고 있다.

또한 RO를 이용한 담수 생산 비용은 MSF·MEE 방법에 비해 담수 생산 비용이 훨씬 저렴한데, 연

〈표 3〉 담수 생산 비용의 구성 요소

Well supply	직접 투자비	자본 회수 계수(CRF)에 의해 연간 자본 투자비로 변환됨	연간 총운영비
염수의 처분			
부지 구입 및 조성			
기자재 구입			
보조 기자재			
토목 공사			
멤브레인 구입	간접 투자비		
수송 및 보험료			
건설 overhead			
사업주비	연간 운전 유지 비용		
예비비			
전력 비용			
인건비			
멤브레인 교체			
유지 보수			
보험료			
회확 물질			
(황산·염소·스케일 방지제·가성소다)			

간 자본 투자비와 전력 비용이 각각 약 30%씩 차지하고 있으며 멤브레인의 교체 비용 또한 약 30%를 차지하는 것으로 나타나고 있다.

물론 담수 생산 비용의 수치는 절대적인 것이 아니며 부지 특성 혹은 해수의 특성에 따라 크게 달라질 수 있게 된다.

일반적으로 해수의 염분 농도가 30,000 ppm 이하에서는 RO 방법이 경제적으로 우수한 것으로 평가되고 있으며, 담수 생산 용량이 큰 경우에는(약 25,000 m³/d 이상) MSF 방법이 선호되고 그 이하의 용량에서는 MEE 방법이 유리한 것으로 예상하고 있다.

전력과 담수를 동시에 생산하는 경우, 각각의 단위당 비용 산정을

위한 방법으로서 IAEA에서 이용하고 있는 Power credit 방법이 있다.

이는 결합 생산으로 인한 혜택의 전부를 담수의 생산 비용 인하에 집중하는 것으로서 전력의 균등화 발전 원가를 적용하여 전력의 판매 단가를 결정하고 담수화 설비에 공급하는 열 에너지를 전력 생산 감소분을 평가하여 저렴하게 공급함을 기본 논리로 하고 있다.

원자력 발전에서 생산되는 폐열을 담수 생산에 활용할 경우 원자력의 낮은 발전 원가로 인해 열 에너지를 더욱 저렴한 비용으로 공급할 수 있는 장점이 있으며 담수 생산 비용에서 차지하는 열에너지 비용의 중요성을 고려할 때 매우 매력적

인 대안으로 부상하고 있다.

물론 원자로와 담수 설비를 Coupling할 경우의 안전성 확보를 위한 비용, 전력과 담수 수요의 변동성 정도 등에 따라 경제성이 달라질 수 있다.

결론

원자력을 이용한 해수 담수화 기술은 아직 성숙되어 있지 않지만 기술적으로나 경제성 측면으로 충분히 가능한 것으로 예상되고 있으며 우리 나라에서는 SMART 원자로를 대상으로 하여 상용화를 적극 추진하고 있다.

원자력 해수 담수화의 경제성 평가를 위한 도구로서는 IAEA에서 개발한 DEEP 프로그램이 있는데 이를 통해 원자력뿐만 아니라 다른 화석 연료 발전원의 결합 생산 방식을 상호 비교할 수 있다.

원자력을 이용한 담수화 설비의 경제성을 향상시킬 수 있는 요소를 분석/평가함으로써 원자력 발전의 활용성을 증대시킬 수 있는 전략이 필요할 것으로 판단된다. ☞

〈참고 문헌〉

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