

증발방식에 따른 증발식 담수화 장치의 특성



박 상 진(KIMM 산업설비연구부)

- '90 서울대학교 기계공학과(학사)
- '92 서울대학교 기계공학과(석사)
- '96 서울대학교 기계공학과(박사)
- '96-현재 한국기계연구원 선임연구원

1. 증발식 담수화법의 개요

해수(sea water) 또는 그보다 염도가 낮은 염수(brackish water)로부터 담수를 만드는 담수화 기술은 크게 기-액간의 상변화를 이용한 증발법, 고-액간의 상변화를 이용하는 냉동법, 분리막을 이용하는 막 분리법의 세 가지로 분류할 수 있다. 이 중에서 증발법은 해수담수화 기술 중 가장 역사가 오래된 기술로서 현재까지 가장 널리 사용되고 있다. 그러나 근래에 와서는 막기술의 발달 및 설치의 편의성으로 인하여 막을 이용한 역삼투막식(reverse osmosis) 또는 전기투석법(electrodialysis) 등의 방법이 소규모 담수화 장치에 많이 사용되고 있는 추세이고 특히 이들 방법들은 해수보다 염도가 낮은 염수를 담수화 할 때 증발법에 비하여 탁월한 성능을 발휘하는 까닭에 점점 그 영역을 넓혀가고 있다. 그러나 대용량 중, 대형 담수설비에서는 아직까지 증발법이 경제성 및 강점을 가지고 있고 해수로부터 바로 담수를 만드는 경우에는 중소형 장치에서도 경쟁력을 갖추고 있다. 이러한 이유로 현재 사용중인 대용량 해수담수화 장치의 대부분이 증발식으로 만들어지고 있고 앞으로도 증발법이 계속 중요한 역할을 할 것으로 판단된다. 또 증발식으로 만들어진 담수의 염도는 이론적으로 0 이므로 보일러용 초순수의 제조 등에도 많이 응용되고 있다.

증발법의 경우, 얼마나 효율적으로 해수를 증발시켜 증기로 만드느냐 하는 것이 가장 중요한 요소이고 따라서 이러한 현상이 실제로 일어나는

증발기의 설계가 가장 핵심 기술이라 하겠다. 증발기의 설계에서 고려되어야 할 가장 중요한 사항은 열전달의 향상 및 안정성을 들 수 있고 증발법의 단점중의 하나인 스케일(scale 또는 fouling)형성을 방지하는 것도 반드시 고려되어야 할 사항이다. 증발식 담수화 장치에서는 초기 설치비의 대부분이 증발기와 열회수기 등의 열교환기 제작에 들어가므로 소형의 고효율 증발기를 설계하는 것이 에너지 절감 뿐 아니라 투자비를 줄이는 효과를 가져올 수 있다. 증발법은 비등이라는 동일한 현상을 이용하지만 증발방식 즉, 증발기의 형상과 열원의 이용방법에 따라 다중효율방식(ME), 다단플래쉬방식(MSF), 증기압축식(VC) 등의 몇 가지로 분류할 수 있다. 이밖에도 태양열, 풍력 등의 자연에너지를 이용한 증류기가 있다. 본 연구에서는 우선 증발법의 기초적인 원리를 설명하고 증발방식에 따른 각 방식의 특성과 기술현황 및 연구동향에 대하여 정리하고자 한다.

2. 증발법의 원리 및 영향 인자

증발법의 기본원리는 용액을 증발시킬 때 용매만 증발하고 용질은 잔류하는 성질을 이용하여 해수로부터 담수를 분리하는 것이다. 즉 그림 1에 나타난 바와 같이 해수(또는 염수)를 스팀 등의 고온 열원으로 비등점까지 가열하면 용매인 물은 증발하여 수증기가 되고, 발생된 증기를 다시 저온 열원(냉각수등)을 이용하여 응축시킴으로서 담수를 얻는 기술이다. 이때 증발하지 않은 해수의 염도는 염분의 잔류로 인하여 증가하게 된다. 거시적인 관점에서 볼 때 지구도 하나의 거대한 증발식 담수화 사이클을 구성하고 있다. 태양으로부터의 복사열(고온열원)과 대류현상에 의해, 지표면의 2/3 이상을 점유한 해수면에서 증발한 수증기는 상승하여 대류권의 상층부에서 상대적으로 낮은 기온(저온열원)으로 인하여 액적으로 응축하게 되고(구름), 다시 비(담수)의 형태로 지표 또는 해수면에 떨어지게 된다. 증발식 담수화 장치는

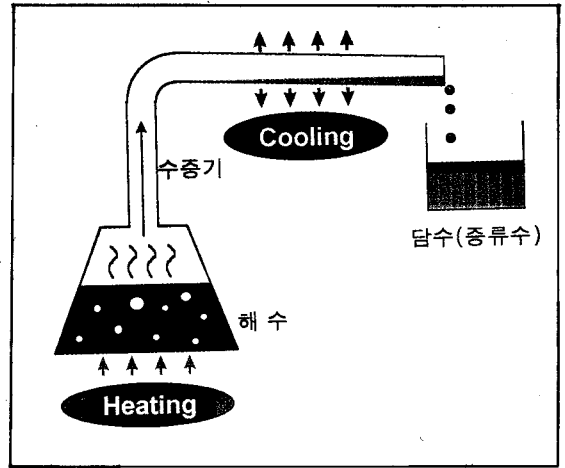


그림 1. 증발법의 원리

바로 이와 같은 원리를 인공적으로 구현한 것으로 볼 수 있다.

일반적으로 담수화공정에 있어서 해수의 물성치가 매우 중요한데, 가장 큰 영향을 미치는 염도는 지역과 계절에 따라 변화를 보이지만 대략적으로 35,000ppm(TDS) 정도이고 염수의 경우에는 그 이하이다. 그리고 염분의 조성 역시 장소와 시간에 따라 변화한다. 막분리법의 경우에는 이러한 염도 및 조성이 전체 성능 뿐 아니라 경우에 따라서는 시스템의 구성을 바꿔주어야 할만큼 큰 영향을 미친다. 예를 들면 염도가 낮아지면 삼투압이 급격하게 떨어지므로 훨씬 낮은 작동압력으로도 운전이 가능해진다. 막분리법이 염수의 담수화에 경제성 및 강점을 가지는 이유도 바로 여기에 있다. 그러나 증발법의 경우에는 이러한 영향이 상대적으로 매우 작는데 그 이유는 염도 및 조성의 변화가 염수의 열역학적 물성치에 미치는 영향이 상대적으로 작기 때문이다. 즉, 염수를 가열하여 비등시키는데 필요한 열에너지의 양이 염도에 관계없이 거의 일정하므로 염도가 낮다고 해서 더 적은 양의 열에너지로 담수를 만들 수 없다. 또 해수의 염도가 비등온도에 약간의 영향을 끼치기는 하지만 포화 온도-압력은 대략적으로 순수와 비슷한 양상을 보인다. 앞서 언급한 바

와 같이 염도가 낮은 염수의 담수공정에 증발법이 잘 사용되지 않는 직접적인 이유도 역시 이러한 점에 있다.

해수의 비등점은 상압에서 담수와 비슷한 100°C 근처인데, 비등점의 온도가 압력에 의해 결정되므로 압력을 대기압 이하로 낮추어 주면 비등점이 낮아지게 되고 상대적으로 낮은 온도의 열원을 고온열원으로 이용할 수 있는 이점이 있다. 실제로 증발기 내의 압력을 낮추는데 필요한 기계적인 동력이 가열 및 증발에 드는 열에너지에 비하여 작기 때문에 진공증발법이 널리 이용되고 있는데, 저온열원의 이용 뿐 아니라 감압을 적절히 응용하면 다단증발방식으로 시스템을 꾸밀 수 있어 같은 열량으로 더 많은 담수를 생산할 수 있는 이점이 있다.

증발법에서 담수를 생산하는데 드는 에너지 E 는 다음의 식(1)과 같이 해수를 비등점까지 가열하는데 필요한 열(현열), Q_h 와 비등시키는데 필요한 열(잠열), Q_b 및 펌핑 일 W_p 로 구성된다.

$$E = Q_h + Q_b + W_p \quad (Q_h \gg Q_b, W_p) \quad (1)$$

물의 경우 현열에 비하여 증발잠열이 매우 크므로(500배 이상) 결과적으로 담수를 만드는데 필요한 에너지는 대부분 해수를 비등시키는 고온의 열에너지가 되고 따라서 효율향상 및 에너지절약을 위해서는 얼마나 저렴한 열원으로부터 열을 공급받아 얼마나 효과적으로 이용하느냐 하는 것이 매우 중요하다. 이런 이유로 이와 관련된 요소 기술과 시스템 설계기술에 대한 연구가 계속되고 있다. 특히 폐열(화력, 원자력발전 폐열 등)을 이용하는 경우 에너지 비용을 크게 절감할 수 있어 충분한 경쟁력을 가질 수 있다. 또한 폐열 재활용에 의해 발전플랜트에서 발생하는 고온의 냉각수 온도를 낮춤으로서 고온의 냉각수 방류에 의한 해양생태계 파괴 등의 환경오염을 줄이는 효과도 있다. 또 앞서 언급한 바와 같이 감압 등을 이용하여 보다 저온의 열원에 의하여 작동하는 담수화 장치에 대한 연구도 활발하게 진행되고 있다.

3. 다중효용방식(ME; Multi-Effect Distillation)

초기의 선박 등에서 조수기로 사용된 증발식 담수화 장치는 그림1)의 기본개념을 실제로 적용하여 한 개의 증발기와 한 개의 응축기로 구성되고 해수를 비등시켜 그 증기를 유입되는 저온의 해수로 응축하는 단순증류방식을 취하고 있다. 이 경우에는 만일 고온열원으로 보일러에서 공급되는 스팀을 사용한다면 결국 그 스팀과 비슷한 양의 해수만을 증발시킬 수 있으므로 담수생산량은 최대한 공급 스팀 량으로 제한되게 된다. 이러한 증발식 담수화 장치의 한계를 극복하고 에너지를 보다 효율적으로 사용하기 위하여 개발된 것이 다중효용방식의 담수화 장치이다. 다중효용방식의 증류기술은 단순 증류기를 그림 2)에서와 같이 시리즈로 배열한 형태로 첫 번째의 증발기의 보일러에서 발생된 증기로 열을 가하여 해수를 증발시키면, 발생된 증기는 다음 효용의 증발기에서 응축되어 담수가 되고 동시에 가열 원으로 작용하여 증발기 내부의 해수를 증발시킨다. 또한 이때 발생된 증기는 다시 다음효용의 증발기에서 가열 원으로 작용한다. 이 때 각 효용 증발기 내의 압력을 차례로 낮게 유지하여 효용이 진행됨에 따라 더 낮은 온도에서 비등이 일어나도록 해주어야 한다. 또 각효용에서 생산된 담수의 온도가 상온 보다 높기 때문에 유입되는 해수와 상호 열교환을 시켜 생산담수의 현열을 회수하는 방법도 널리 채택되고 있다. 이와 같은 원리에 의해 다중효용방식은 하나의 증발기를 이용하는 일중효용방식에 비해 같은 에너지를 가지고 더 많은 양의 담수를 생산할 수 있다. 초기의 단순 증류기가 선박용 조수기와 같이 비용에 관계없이 소량의 담수를 만드는데 주로 사용되었던 한계에서 벗어나 많은 양의 담수를 생산하는 본격적인 해수담수화에 처음으로 이용된 증발식 담수화기술로 현재 아주 대용량의 담수화에는 다단플래쉬방식에 자리를 내주었으나 중대형의 경우에는 아직까지 다중효용방식이 많이 이용되고 있다.

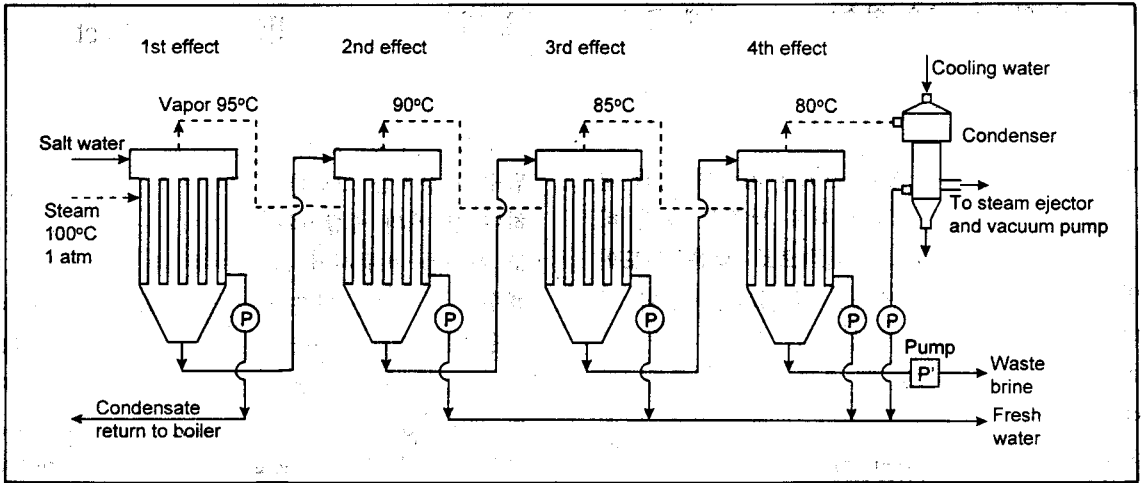


그림 2. 다중효용(ME) 담수화 장치(4중효용)

초기에 가열 원으로 필요한 증기의 질량과 증발기에서 생산되는 담수의 양의 비를 성능계수 (GOR ; gained output ratio)로 정의하는 경우 다중효용방식은 단순 증류기에서 버려지는 폐열을 재이용하게 되므로 더 높은 성능계수를 가지게 된다. 일반적인 일중효용방식의 증류기의 경우, GOR은 대략 0.8~1.0 정도인데, 다중효용방식은 효용의 수가 n 개일 때 약 $0.8n$ 의 성능계수를 가지게 된다. 그러나 효용이 진행될수록 비등점이 점차 낮아지므로 해수의 증발잠열이 증가하여 각 효용에서 실현할 수 있는 실제 성능계수는 점점 떨어지게 된다.

앞단에서 설명한 바와 같이 이론적으로 효용(증발기의 수)이 많을수록 같은 열에너지로 더욱 많은 양의 담수를 만들 수 있으나 각 효용에서 열전달을 위해 유한한 온도차를 유지하여야 하고 증발기가 늘어날수록 초기 투자비가 증가하므로 효용의 수를 무조건 늘이는 것이 유리한 곳이 아니라 최적의 효용수가 존재한다. 최적의 효용수를 결정하기 위하여 실제 설계 시에 다음의 식(2)가 많이 사용되고 있는데,

$$C = An + S/n \quad (2)$$

여기서 C 는 담수의 단위생산비용이고 A 는 단위

생산량당 각단의 고정비용, S 는 일중효용방식에서 단위생산량당의 스팀비용이다. 단위생산비용이 최소가 되는 조건을 구하면 $n_{opt} = \sqrt{S/A}$ 으로 일반적으로 8-14효용정도가 많이 사용되고 있다.

다중효용방식의 성능계수는 효용의 수와 고온의 열원(증기)과 저온열원(해수)의 온도차에 의하여 주로 결정되지만 실제적으로는 증발기 내의 열교환 특성이나 증발 방식 등에 의하여 영향을 받는다. 특히 열교환기의 형태와 해수의 주입 방법에 의하여 증발기의 열전달 특성이 매우 다른 양상을 보이는데, 이는 열전달율이 달라져서 전열면적 즉, 열교환기의 크기가 다르고 스케일 형성 등의 부대효과가 다르기 때문이다. 다중효용증류기는 열교환기의 형태에 따라 ST(submerged tube design), VTE(vertical tube evaporator design), LTV(long tube vertical design)으로 분류할 수 있고 다시 해수의 주입방법에 따라 상향식(하부주입)과 하향식(상부주입) 증발기로 나눌 수 있다.

ST방식은 말 그대로 해수탱크속에 가열코일이 있고 가열코일 내에서 스팀이 응축하면서 가열관 표면의 해수를 증발시키는 방법이다. 초기에는 헬리컬타입이나 평판타입의 가열코일이 주로 사용되었지만 증발기의 크기가 커지면서 수평 관다발

(horizontal tube bundle)형태의 가열관으로 대체되었다. ST방식의 증발기에서는 탱크내의 해수유동이 없어 비등이 거의 순수한 핵비등(nuclear boiling)으로 일어나므로 열전달율의 측면에서는 성능이 매우 떨어지는 경향이 있어 다른 형태에 비하여 필요 전열면적이 커져 같은 용량일 경우 증발기가 큰 단점이 있다. 또 브라인(해수)의 유속이 매우 느리므로 가열코일의 표면에 스케일 잘 생기는 경향이 있다. 그러나 안정적인 운전이 용이하므로 별다른 제어기술을 필요로 하지 않기 때문에 최근에도 가끔 사용되는 경우가 있다. ST방식의 경우 해수의 주입은 주로 탱크의 하부에서 이루어지는데 수직관식의 증발기라도 이와 같이 아래에서 해수가 주입되는 방식(상향식)이면 일반적인 ST방식의 증발기와 그 특성이 대동소이하므로 크게 보아 ST방식의 증발기로 분류하는 것이 타당할 것이다.

브라인의 유동이 없기 때문에 생기는 단점들을 보완하기 위하여 개발된 것이 LTV방식으로 그림 3과 같이 브라인을 증발관의 표면을 따라 액막의 형태로 흘러보내고 증발관 바깥쪽에서 스팀을 응축시켜 그 열로 브라인을 증발시키는 형태를 취하고 있다. 이 경우 액막이 유한한 유속을 가지므로 표면에 스케일이 잘 부착되지 않고 또 해수가 얇은 액막의 형태로 흐르면서 가열되므로 그 열저항이 작아져서 열전달율이 매우 향상되는 장점을 가지고 있다. 이때의 증발현상은 대류증발(convective boiling)로서 핵비등에 비하여 열전달계수가 크다. 그러나 증발기를 큰 전열면적을 가지는 형태로 만들기 힘들므로 전열면적의 확보를 위하여 튜브의 길이가 길어져 보통 6~7 m 정도로 설계하고 있다. 따라서 LTV가 상부주입방식이기 때문에 다음 효용으로 브라인을 공급하기 위해서는 별도의 공급 펌프가 필요하다. 이와 같은 상부주입방식(하향식)의 증발기는 액막을 안정적으로 유지해주는 것이 매우 중요하다. 액막이 끊어지면 그 부분의 증발관의 온도가 높아져 부분적으로 스케일이 급격하게 형성되는 현상이 일어나 심한 경우 증발관이 막히는 상태에 도달하기도 한다.

액막의 형성은 증발관의 입구에서 이루어지는데, 입구에 축방향으로 여러 개의 슬릿(slot)을 두어 액막을 만드는 방법, 증발관 입구 위에 여러 개의 노즐을 설치하여 해수를 스프레이(spray) 시키는 방법, 다공성물질(porous material)을 통과시키는 방법 등의 여러 가지 방식이 사용되고 있으나 최근에는 스프레이 방식이 해수가 액적화 되면서 푸레쉬효과로 인하여 증발되는 효과가 크므로 많이 사용되고 있는 추세이다.

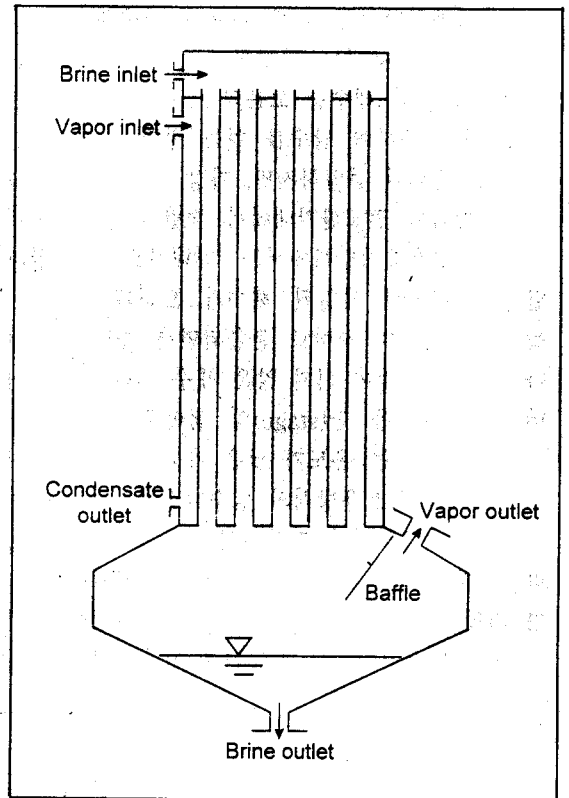


그림 3. LTV방식의 증발기

한편 VTE방식은 LTV의 변형으로서 금속면을 따라 증력에 의하여 떨어지고 있는 액막에서 전단에서 증발한 증기의 응축에 의하여 증발이 일어나는 기본원리는 LTV와 유사하다. 수직 튜브의 구성방법도 LTV와 같지만 열전달의 향상으로 인하여 튜브의 길이가 짧아 별도의 이송펌프가 없이도 압력차만으로 브라인을 다음 단으로 공급할

수 있다. 이 방식은 그 구조가 복잡하다는 단점이 있지만 모듈화하기가 쉽기 때문에 대용량 담수화 장치에 적합한 장점을 가지고 있다. 초기에는 안정성 및 간단한 구조 때문에 ST방식의 증발기가 많이 사용되었으나 현재는 열전달 성능이 탁월한 하향식의 VTE 또는 LTV가 주로 사용되고 있다.

4. 다단후래쉬방식(MSF, Multiple-Stage Flash Distillation)

다단플래쉬방식은 현재 대용량 담수화 장치에 가장 널리 사용되는 담수화기술로 그 개략도는 그림 4와 같다. 해수를 고온의 열원으로 증발시킨 후 다시 응축하여 담수를 얻는 방법은 일반적인 다중효용방식과 동일하지만, 가장 큰 차이점은 다중효용방식이 열교환기내에서 증발이 일어나는데 비해 다단후래쉬방식에서는 상대적으로 고압의 열교환기내에서 가열된 해수가 오리피스(orifice)를 통해 저압의 챔버로 분출되면서 증발이 일어나게 된다. 증발이 되지 않은 해수는 다시 압력이 더욱 낮은 다음 단(stage)의 챔버로 플래쉬되고 증발된 수증기는 온도가 낮은 유입해수에 의하여 응축된다. 다중효용방식의 담수화장치에서는 응축을 위한 저온열원이 전단에서 증발하지 못한 브라인이지만 다단플래쉬방식에서는 유입되는 해수가 저압 단에서부터 응축열원으로 사용되어 점점 그 온도가 올라가면서 가열기를 거쳐 1단의 챔버

에 플래쉬된다. 다단플래쉬방식의 장점은 증발이 열교환기내에서 일어나지 않기 때문에 증발식에서 가장 큰 문제인 열교환기내에서의 파울링(fouling)이 다중효용방식에 비하여 비교적 적다는 것이다. 바로 이 스케일 문제가 다단플래쉬방식을 다중효용방식에 비하여 더욱 각광을 받게 만든 이유이다.

사실 다단플래쉬방식에서는 가열기내에서 상변화가 일어나지 않기 때문에 다중효용방식에 비하여 열전달율이 낮아 단수를 증가시킬 때 다중효용방식만큼 열에너지의 소비율이 급격하게 줄어드는 효과가 덜하지만 각단을 독립적인 셀구조로 할 필요가 없고 연결방식이 간단하여 다중효용방식에 비하여 단수를 증가시키기가 용이하므로 더 고효율, 대용량의 장치를 만들 수 있다. 실제 장치에서 12단의 담수를 가질 때 성능계수(GOR)는 약 8정도로 다중효용방식보다 약간 떨어지지만 다단후래쉬방식의 경우 보통 20단 이상으로 설계되는 경우가 많기 때문에 다중효용방식보다 더 높은 성능계수를 구현할 수 있다. 다단플래쉬방식의 열교환기는 통상 수평 또는 수직으로 설치되는데 최근에는 수평설치가 보다 대용량의 시스템을 만드는 데 용이하므로 많이 사용되고 있다.

이론적으로는 첫단의 가열온도를 첫단의 챔버를 상압보다 가압한다면 100°C 이상으로 높여 단수를 더욱 늘릴 수 있지만 실제로는 첫단의 가열온도가 100°C 부근이 되도록 하고 첫단부터 감압

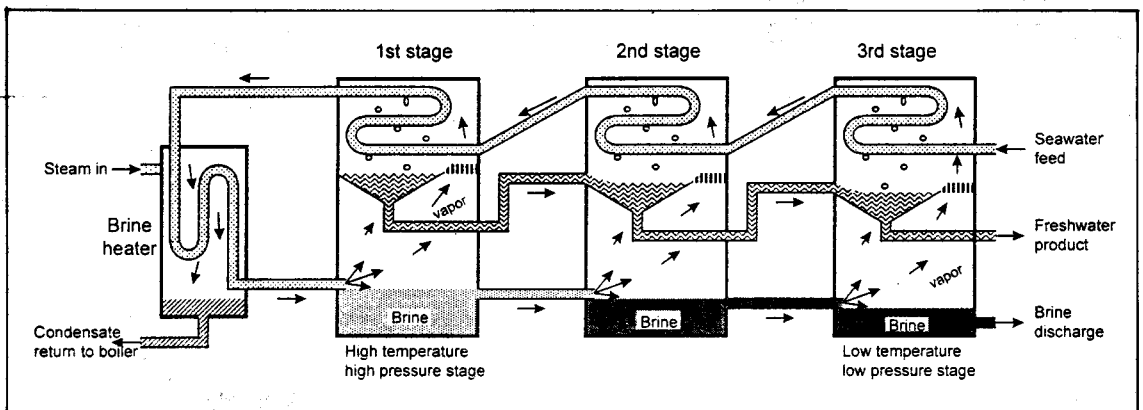


그림 4. 다단플래쉬(MSF) 방식 담수화 장치(3단)

을 해나가는 형태를 취하고 있다. 그 이유는 첫째 첫단에 공급하는 고온열원을 되도록 저압상태로 유지하기 위함이고 둘째는 해수관에 부착되는 스케일을 방지하기 위함이다. 스팀은 통상 1.0~1.5기압, 100~115°C정도로 공급된다. 핵발전소와 같이 저온의 스팀이 풍부한 곳에서의 활용도 꾸준히 모색되고 있다.

이 기술에서 첫단은 저진공에서 작동하게 되며 차례로 진공도가 증가하여 마지막 단은 고진공에서 작동하므로 단과 단 사이의 압력차와 각 단에서 해수가 머무르는 시간을 조절하는 기술이 연속적으로 플래쉬를 일으키는 핵심기술이 된다. 또 다단플래쉬방식의 담수화장치에서 투자비의 대부분이 배관자재에 들어가므로 투자비는 전열면적에 의하여 결정되고 따라서 가열관 내에서 얼마나 효과적으로 열전달이 일어나게 하느냐가 전체 생산비용을 결정짓는 중요한 변수이다. 이와 같은 이유로 다중효용방식과 마찬가지로 생산비가 가장 적게 드는 최적의 단수가 존재하게 된다. 한편, 다단플래쉬방식에서는 구조적으로 응축되는 증기와 관내의 해수간의 온도차가 작기 때문에 일반적인 플래쉬증발기는 매우 큰 전열면적을 필요로 한다. 이러한 견지에서 열교환면적을 줄이기 위한 여러 가지 시도가 이루어지고 있는데, 기존의 다단플래쉬방식에 열회수개념을 가미한 증기재열방식(vapor-reheat flash evaporation process)도 그 중의 하나이다. 이 방법은 기름을 이용하여 액 대액 직접접촉열교환 방식을 통하여 전열효과를 극대화한 것으로 생산된 담수의 현열을 회수하여 공급해수를 데우는 방식을 취하고 있다.

5. 증기압축식(VC, Vapor Compression Distillation)

다단후래쉬방식과 다중효용방식이 증기 또는 고온의 열원에 의한 열에너지를 주로 이용하는데 반하여 증기압축식은 기계적인 에너지를 이용하여 증기를 발생시켜 해수를 담수화 하는 방식이

다. 증발기에서 발생한 증기를 압축기로 압축시키면 온도와 압력이 상승하게 되는데 이를 다시 증발기의 고온열원으로 사용하여 담수를 생산하는 장치이다.

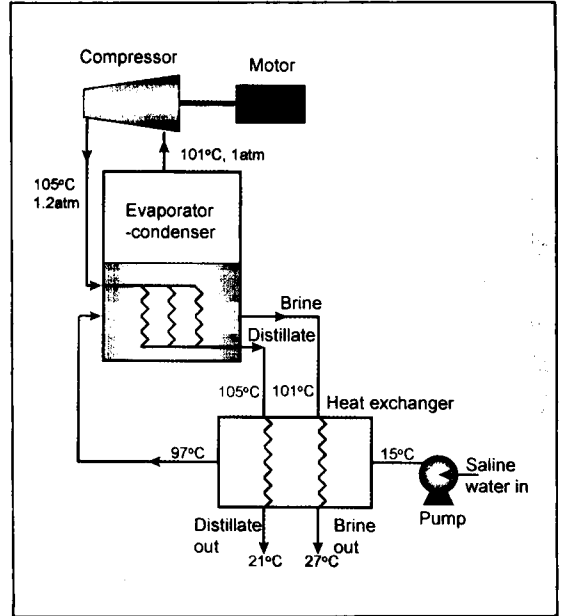


그림 5. 증기압축식 담수화 장치의 작동원리

이 방식의 개략도는 그림 5와 같은데, 해수는 열교환기를 거치면서 배출되는 브라인과 생산된 담수의 현열을 회수하여 약 97°C로 증발기에 들어가서 압축된 증기가 응축하면서 방출하는 열에 의하여 증발하고 증기는 다시 압축기로 고온(105°C)의 증기로 압축되어 증발기에서 응축되고 이후에 열회수기를 통과하면서 증발기로 들어가는 해수에 그 현열을 전달한다. 압축기는 주로 전력을 이용하여 모터로 구동하거나 별도의 엔진으로 추구동하고 특별한 경우에는 증기압축기구로서 스팀이젝터를 사용하는 경우도 있다. 증기를 압축하는데 필요한 축일은 다음의 식으로 계산할 수 있다.

$$W_c = 24.0 \times \frac{r^2 - 1}{r} \text{ kwh/m}^3 \text{ fresh water} \quad (3)$$

여기서 r 은 압축비이다. 전기구동방식의 경우 에너지소비율은 대략 $40\sim 100\text{kwh/m}^3$ 정도이고 소용량이 될 수록 단위생산량당 에너지소비는 큰 경향을 보인다. 이는 작을수록 단열재를 통한 열손실이 상대적으로 커지기 때문이다. 따라서 증기 압축방식에서는 열손실을 최소화하면서 브라인과 생산수의 현열을 최대한 회수하는 것이 전체 성능을 결정짓는 매우 중요한 요소이다. 그리고 압축비를 낮추면 필요축일이 줄어들지만 증발기에서 온도차 역시 줄기 때문에 더 큰 전열면적이 필요한 단점이 있다.

한편 증기압축방식에서 압축기를 소형엔진으로 구동시키고 그 폐열을 활용하는 경우 연료 1kg 으로 200kg 이상의 담수를 생산할 수 있는 것으로 알려져있고 주로 소용량의 담수화 장치에 강점을 가지고 있다. 특히 운반이 가능한 이동식 담수화 장치로 많이 제작되어 사용되고 있다. 이 때 에너지소비율은 전기구동방식의 $1/25$ 에 불과하다.

최근에는 다단압축방식을 이용하거나 또는 ME, MSF 등의 장치와의 복합시스템을 이용하여 증대

형 담수화 장치로의 활용이 활발하게 모색되고 있다. 또 그림 5와 같은 형태 이외에 그 변형으로서 원심압축식장치(centrifugal compression stills)가 있는데, 50°C 정도에서 작동하므로 스케일 방지면에서 탁월한 성능을 발휘한다.

6. 태양열 증류기 (Solar Evaporation)

해수를 담수화하는데 필요한 에너지를 태양에너지(태양열)로부터 공급받는 것이 태양열을 이용한 증발식 담수화 장치이다. 태양열 증류기에는 직접법과 간접법의 두가지 방식이 있다.

직접법(direct solar distillation process)은 태양 에너지를 모으는 집열기와 해수 증발기가 하나로 되어 있는 것으로서 그림 6과 같이 유리판을 통과한 태양광이 해수조에 있는 브라인을 가열하여 증발시키면 이 증기가 유리판의 내면에서 응축되어 경사진 유리면을 따라 흘러내려 아래의 홈통에 모이게 되는 방식이다. 이 방식은 비교적 구조가 간단하고 고도의 기술을 요구하지 않으나 설

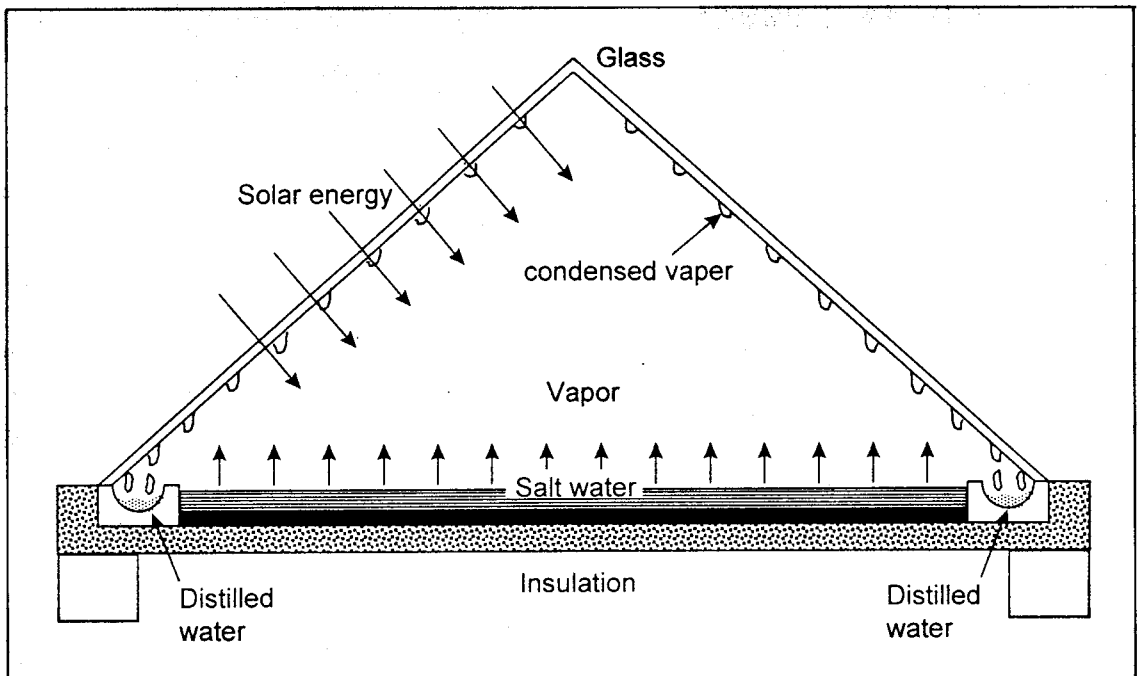


그림 6. 태양열을 이용한 증발식 담수화 장치

계의 자유도가 적고 아직까지 그 기술이 정립되지 않은 상태이다. 이 방식 역시 증류식이므로 생산수의 순도는 높지만 내부에 세균의 번식이 용이하기 때문에 음용수로 사용할 때에는 반드시 소독과정을 거쳐야하는 단점이 있다. 직접식의 경우 필요한 에너지는 펌핑동력만이므로 에너지 효율은 매우 높으나($1\text{kwh}/\text{m}^3$ fresh water) 열손실 등으로 인하여 조사되는 태양에너지의 약 32% 정도만이 실제 증발과정에 사용되므로 과도한 건설비와 시스템의 신뢰성 등의 문제로 대용량의 장치에는 아직 사용되지 못하고 소규모 장치로만 적용되고 있다. 실제로 실용화할 수 있는 한계는 $50\text{m}^3/\text{day}$ 정도이다.

간접식(indirect solar distillation process)은 집열기와 담수화 장치가 분리되어 있는 것으로 집열기에 모아진 태양에너지를 ME나 MSF의 에너지원으로 간접적으로 이용하는 방식을 말한다. 또 솔라셀(solar cell)을 이용하여 태양에너지를 전기 에너지로 변환시킨 후 역삼투막식이나 전기투석식 담수화 장치의 에너지원으로 사용하는 방법에 대한 연구도 이루어지고 있다.

7. 결어

증류식 담수화 장치는 가장 오랫동안 사용되어 온 담수화 기술로서 앞서 살펴본 바와 같이 증발 방식에 따라 여러 가지 방법으로 나눌 수 있고 각각 그 특성 다름을 알 수 있다. 그러나 증발식에서 가장 중요한 요소는 크게 두 가지로 나눌 수 있는데, 열교환 성능의 향상과 스케일형성의 방지이다. 현재 진행되고 있는 증발식 담수화법에 대한 기초연구 역시 이 두 가지 요소에 관한 것이 대부분을 차지하고 있다. 현재로서는 대용량의 경우 다단플래쉬방식이 주류를 이루고 있고 중대형은 다중효용방식과 다단플래쉬방식이 소형은 증기압축식이 많이 사용되고 있으나 근래에 와서는 이들을 조합 구성하여 운전하는 복합 담수화

시스템에 관심이 모아지고 있다. 또 증발식 뿐만 아니라 역삼투막식과의 연계운전도 모색되고 있다. 증발식은 본론에서 언급한대로 주 에너지원이 해수를 증발시키는데 필요한 열에너지이므로 이를 얼마나 저렴하게 얻어서 잘 활용하느냐 하는 것이 가장 중요한 핵심기술이라 하겠다. 따라서 증발기 내부에서 열전달을 향상시키는 것도 중요하지만 거시적으로 볼 때 자연에너지를 포함한 다양한 에너지원에 대하여 그 적용 가능성을 타진해 보는 것도 공학적인 측면 뿐 아니라 환경보호적인 측면에서도 매우 유익한 일이라 하겠다.

참 고 문 헌

- [1] K. S. Spiegler, Salt-Water Purification 2nd Ed., Plenum Press, New York, 1977.
- [2] E. D. Howe, Fundamentals of Water Desalination, Marcel Dekker Inc., New York, 1974.
- [3] K. S. Spiegler, Principles of Desalination, Academic Press, New York, 1966.
- [4] A. Porteous, Desalination Technology-Development and Practice, Applied Science Publishers, London, 1983.
- [5] A. H. Khan, Desalination Processes and multistage Flash Distillation Practice, Elsevier, Amsterdam, 1986.
- [6] 김재평, 김영부, 김성울, 담수화에 관한 연구, 한국전력공사 기술연구원, 1990.
- [7] Z. Zimerman, "Development of Large Capacity High Efficiency Mechanical Vapor Compression(MVC) Unit," Proceeding of IDA, Vol.1, pp.43-50, 1993.
- [8] S. N. Levine, Desalination and Ocean Technology, Dover Publications, New York, 1968.