

2. 역삼투막에 의한 해수 담수화

한림대학교 환경시스템공학과 교수 박진용

1. 해수 담수화의 필요성

지역개발 및 산업 고도화, 인구증가와 함께 물 수요는 세계적으로 증가하고 있으며, 이 수요를 충족하기 위한 효과적인 방법 중 하나로 대규모의 바닷물을 담수화하는 것이다. 현재 해수의 담수화 생산설비에서는 다단플래쉬 증류법 또는 역삼투법이 채용되고 있다. 에너지 수준에서 큰 차이를 보이는 액체 기체 상간의 변화를 동반하는 증류법에 비해, 상변화를 동반하지 않는 역삼투법은 생산설비 구조가 간단하고 에너지 소비량이 적다는 이점을 가지고 있다. 미국 플로리다 주의 키스 수도국은 역삼투법과 다단플래쉬 증류법을 비교한 결과, 역삼투법이 증류법에 비해 생산설비 면적 약 1/2, 건설 소요기간 약 1/3, 운전비용 약 1/2~1/3 밖에 들지 않는다는 결론을 내렸다. 이러한 결론을 바탕으로 11,400톤/일의 해수담수화 플랜트에 역삼투막법을 채용한 예가 있다. 또한, 역삼투법 생산설비는 모듈과 펌프가 한 조가 되어 있는 시스템을 추가함으로써, 증설을 용이하게 할 수 있다는 점도 매우 실용적이다.

2. 역삼투법의 원리

반투막을 사이에 두고 용액과 용매를 접촉 시키면, 용액은 열역학적으로 안정된 저농도 상태를 이루기 위하여 용매가 반투막을 통과해 용액 측으로 이동하려고 한다. 용액 측에 적절한 압력을 가함으로써 이 용매 이동을 막을 수 있다. 이 압력이 바로 삼투압으로 용액의 절대온도를 T, 용질의 몰농도를 C라 할 경우, 반트호프(van't Hoff) 법칙에 의해 삼투압 π 는 식(1)과 같이 표시된다.

$$\pi = iRTC \quad (1)$$

여기서 i 는 반트호프 계수, R 은 기체상수이다.

용액의 삼투압보다 높은 압력을 용액 측에 가하면 반대로 용액 측에서 용

때 측으로 용매가 이동한다. 이 현상이 바로 역삼투(RO, Reverse Osmosis)로서, 이 현상을 이용해 고농도 염류의 바닷물을 담수로 연속적으로 만들 수 있다. 그러나 해수의 50%가 반투막을 투과해 담수가 만들어진 경우, 잔류해수의 염류 농도는 2배가 된다. 역삼투 공정에서 원료인 해수가 연속적으로 공급되어 잔류해수와 동등한 양으로 혼합되기 때문에, 평균농도는 1.5배가 되고 식(1)에 따라 삼투압도 1.5배가 된다.

해수 중의 염류농도는 해역에 따라 다르지만, 예를 들면 35 g/L인 염류농도의 해수에서는 삼투압이 약 24.5 kg/cm^2 이고, 위에서 말한 담수화율 50%인 조건에서는 삼투압이 $24.5 \times 1.5 = 37.0 \text{ kg/cm}^2$ 이 되기 때문에 역삼투법에서는 이보다 훨씬 높은 압력을 해수에 가해야만 한다. 실제 역삼투막법 공정에서는 해수에 $56 \sim 70 \text{ kg/cm}^2$ 정도의 압력을 연속적으로 가하여 담수가 제조되고 있다.

3. 해수 담수화용 역삼투막

해수를 담수화하는데 이용하는 역삼투막의 필요조건으로는 막의 양면 사이에 큰 압력 차이가 생겨도 파손이나 변형이 일어나지 않을 정도의 강도를 가지고 있어야 하며, 물의 투과계수가 크고 염류의 투과계수가 작고 단위부피당 표면적이 크고 막의 두께가 얇아야 한다. 또한 장기간 운전해도 역삼투막이 물리적 및 화학적으로 안정되어야 하며, 해수 중의 미생물 침식에도 강하고 특성이 약화되지 않아야 한다.

듀퐁(Dupont)사에서 여러 가지 재질 및 형태에 대해 검토한 결과, 재질은 폴리아미드, 형태는 표면에 약 $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$ 의 고밀도인 얇은 층과 그 내부에 다공질 층으로 구성되어 있으며 내경 $42 \mu\text{m}$, 외경은 85 또는 $95 \mu\text{m}$ 정도로 사람의 모발처럼 미세하고 가운데 구멍이 있는 중공사형을 채용하고 있다. 이 2 종류 중 해수를 담수화하는 데는 막 두께가 두꺼운 외경 $95 \mu\text{m}$ 제품을, 용존 염류농도가 10 g/L 이하인 감조수 담수화에는 압력 조건이 해수보다 낮아도 가능하므로 외경 $85 \mu\text{m}$ 인 제품을 사용하고 있다.

4. 역삼투 모듈

폴리아미드 중공사를 사용한 역삼투 모듈은 그림 1에 나타난 구조를 가지고 있다. 원료인 해수는 모듈의 중심에 압력을 가하면서 공급되기 때문에 중심의 분배기(Distributor)에서 방사상으로 외벽을 향해 흐른다. 이해를

쉽게 하기 위해 그림 1에서는 상하 2개의 중공사 역삼투막만 보여 주었으나, 실제로는 1개의 모듈 안에 몇 백만 개의 섬유가 분배기 주위에 평행으로 평균 약 $25 \mu\text{m}$ 간격을 두고 늘어서 있다. 각 섬유의 굴곡부는 좌측의 에폭시 블록으로, 양단의 개구부는 우측의 에폭시수지 유지체로 단단하게 보호되어 있다.

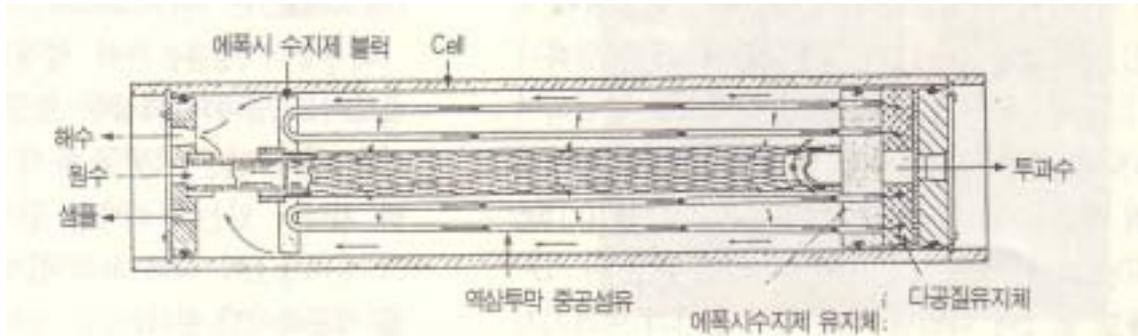


그림 1. 중공사형 역삼투 모듈의 구조

역삼투에 의해 중공사막을 통과한 담수는 막의 중공부를 통해 우측으로 흘러 다공질 유지체를 투과하여 중심부로 모인 후 계기압력 약 0.7 kg/cm^2 정도로 외부에 공급된다. 한편 염류농도가 증가한 해수는 외벽과 에폭시수지 블록 사이의 간극을 통과해 모듈의 좌측에서 외부로 배출된다. 해수에 가해지는 압력을 70 kg/cm^2 으로 하면 배출되는 농축해수의 압력은 약 67 kg/cm^2 이다. 대규모로 해수를 담수화하는 플랜트에서는 에너지 절약 관점에서 이 농축해수를 수력터빈이나 임펄스 터빈(Impulse turbine)에 도입하여 압력을 회전에너지로 전환시켜, 이를 해수 가압펌프의 동력으로 이용하는 예도 있다.

한편 Filmtech사 등에서 여러 장의 평판형 역삼투막을 유체 흐름 공간을 위한 공간재(spacer)와 함께 말이 형태로 감은 형태의 나권형 모듈을 개발하여 단위부피당 유효막면적을 극대화 시켰다. 하지만 이러한 나권형 역삼투막은 막오염이 쉽게 발생하는 단점이 있다.

5. 역삼투법에 의한 해수 담수화 플랜트

듀폰사의 중공사형 모듈을 이용한 해수 담수화 플랜트는 1974년 개발된 이후 1981년말까지 세계에 500개소를 넘었으며, 이들 공장 설비에서 제조하는 물의 총량은 약 50,000 톤/d에 달하고 있다.

해수 성분 중 입경 0.3~1.0 μm 인 응집 콜로이드 입자와 역삼투 모듈 내에서 번식해 입자 모양을 띄고 있는 미생물의 농도는 해역마다 상당히 차이가 있는데, 해수를 담수화하는 플랜트에서는 그 설치 장소에 따라 최적 설계 및 조건 등의 전처리를 채용해야만 한다. 일반적으로는 해수를 염소 멸균하여 미생물을 죽이고, 응집제를 첨가하여 콜로이드를 응집시켜 용존염류가 모듈 중에서 석출되어 스케일이 생기지 않도록 pH를 조정한다. 모래여과와 규조토 여과로 입자상 물질을 제거한 다음 아황산나트륨을 첨가해 잔류염소를 환원분해한다. 5~10 μm 의 카트리지필터(Cartridge Filter)를 통과시켜 미립자를 제거한 다음 가압펌프를 도입하는 방법이 사용되고 있다.

폴리아미드는 매우 뛰어난 내화학약품성을 지니고 있기 때문에, 세정제에 의해 손상될 염려가 없어 해수 담수화용 역삼투막 재질로 적당하다. 역삼투법의 원리에서 설명한 식(1)에서 알 수 있는 바와 같이, 삼투압은 절대온도 T에 비례하기 때문에 수온 상승은 담수화 능력 저하와 연결된다. 따라서 해수온도 상승이 우려될 경우에는 냉각장치로 원료수의 온도를 내리는 것이 효과적이다.

또한 해수 담수화 공장 설비가 정지했을 때를 대비하여 충분한 용량의 제품 담수 탱크를 모듈보다 높은 위치에 설치하고, 정지 시에는 담수를 모듈 내로 유입시켜 내부를 세정하여 역삼투막의 오염을 방지하여야 한다.

표 1은 현재 가동되고 있는 해수 담수화 플랜트의 대표적 사례이다.

표 1. 해수 담수화 플랜트 사례

설치장소	국가명	조수능력 (m^3/day)	가동개시 연도
UBF	바레인	2,300	'77
라스 알 카이머	아랍에미레이트연방	570	'78
버크	구·소련	12,500	'79
압브	사우디아라비아	3,000	'80
폴트산트	포르투갈	500	'80
플로리다주 키스수도국	미국	11,400	'80
카다페 1호	베네수엘라	3,000	'80
카다페 2호	베네수엘라	3,800	'82
愛媛縣伯方町	일본	300	'81
KISR	쿠웨이트	1,000	'82
GHAR-LAPSI	몰타	19,000	'82·3
알버크	사우디아라비아	2,300	'82·3

역삼투막이 오염되어 담수화 능력이 저하한 경우에는 모듈 내부의 막을 교환해야 한다. 표 1에 나타난 공장 설비 중에 50개의 역삼투 모듈을 설치한 라스 알 카이머의 담수화 플랜트와 525개의 모듈을 설치한 플로리다주 키스 수도국의 플랜트는 연간 막 교환량이 총 설치 분리막의 1% 이하이고, 또한 250개를 설치하여 가동 중이 카다페 1호에서 연간교환율 3% 정도라는 실적을 얻은 것을 보면, 이 역삼투막의 수명은 만족할 만한 수준이라고 볼 수 있다.