

---

---

역삼투용 평막 및 모듈의 평가

---

---

김 노 원 박사  
(주)새한

## 역삼투용 펌막 및 모듈의 평가

서론

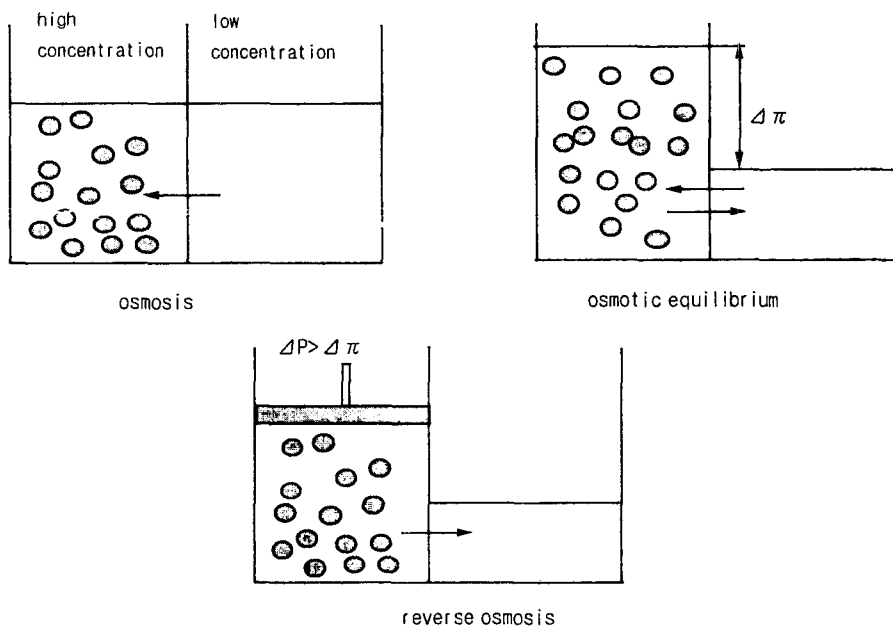
산업의 발달과 인구의 도시 집중, 산업 폐수와 생활하수의 방류로 인한 수질오염은 수자원 환경관리에 심각한 문제로 떠오르고 있다. 이에 따라 필요한 순수를 얻기 위한 순수를 얻기 위한 노력이 계속 되고 있으며 물 속의 오염물을 제거하기 위하여 역삼투, 전기투석, 증발법 및 이온 교환 등의 개발이 개발되어 왔다.

특히 역삼투 분리법은 에너지 소비량이 적고 운전이 간편하며 자동화가 쉽다는 측면에서 널리 적용되고 있다. 물 부족, 수질악화에 대응하여 가정에서는 음용수 및 생활용수의 정수에, 산업체에서는 안정된 수질의 공업용수 확보를 위하여 폐수재활용, 지하수 및 공업용수 처리에 적극적으로 활용되고 있으며 용매의 분리, 정제, 농축 등 응용분야가 점차 산업계 전반에서 자리를 잡아가고 있다. 이러한 역삼투막을 이용한 수처리 분리공정은 적용 범위가 넓어지고 있으나 대부분 수입에 의존해온 제품의 특성상 국내에는 표준이라고 할만한 제품규격 없는 현실이다. 즉, 수요자와 공급자의 이해에 따라 다양한 품종으로 산업계 전반에 이미 보급되어져 왔다. 본 발표에서는 나선형 역삼투 분리막 모듈의 제품 규격, 물성 규격에 대한 방향을 제시하고자 한다.

### 1. 역삼투에 의한 물질 수송 특성

삼투압이라는 개념이 1913년 Findly에 의하여 처음으로 알려지기 시작했다. 삼투란 반투과성막으로 격리된 두 용액사이에서 용매가 용질 농도가 낮은 용액에서 높은 용액쪽으로 분리막을 통과하여 이동하는 현상을 말한다. 이동의 구동력은 용질 농도차에 의한 용액측에 작용하는 압력을 삼투압이라고 한다. 그런데 역으로 삼투압보다 높은 외부 압력을 걸어주면 용매는 용질 농도가 낮은 용액쪽으로 이동하게 되는데 이러한 현상을 역삼투라고 한다. Fig. 1는 삼투 현상의 개념도 및 역삼투 물질 수송의 원리를 설명한 것이다.

Fig.1 Osmosis and Reverse Osmosis



$$\pi = \gamma I n R T$$

$\pi$  : osmosis pressure  
 $\gamma$  : activity coefficient  
 $I$  : ionic strength  
 $n$  : mole  
 $R$  : gas constant

$$I = 1/2 \sum (c_i z_i^2)$$

$c_i$  : concentration  
 $z_i$  : charge

$$\gamma = A Z_+ Z_- [ \sqrt{I} / (1 + \sqrt{I}) - B I ]$$

$A$  : 0.5091 (25 °C)  
 $B$  : 0.2 (monovalent)  
 $Z_+ Z_-$  : charge

일반적으로 삼투압을 간단히 계산하는 방법으로 아래의 식을 사용한다.

$$\pi (\text{lb/inch} ) = 0.01 \times \text{TDS mg/L}$$

## 2. 역삼투막의 종류

역삼투 원리를 이용하여 물질을 분리하는 막의 종류로는 역삼투 분리막 (Reverse Osmosis Membrane)과 나노여과막 ( Nanofiltration )이 있다. 역삼투 분리막은 1가 이온 및 유기물 분리까지 가능하여 주로 정수 시스템에서 많이 사용되며 나노여과막은 2가 이온의 제거가 가능하여 물질의 농축이나 오폐수 재활용 등에 많이 사용된다.

역삼투 분리막의 경우에도 제조방법에 따라 Cellulose Acetate계 비대칭막, Polyamide계 복합막, Aramide계 중공사막 등이 있다. 현재 상업화된 CA계 막은 막의 두께가 0.25 ~ 1  $\mu\text{m}$ 의 조밀한 활성층과 수십  $\mu\text{m}$ 정도의 세공이 다수 존재하는 스폰지 형태의 지지층으로 구성되어 이 두층이 같은 재질로 되어있다는 것이 특징이다. 이들 두 층 중 조밀한 구조의 활성층만이 탈염과정에 참여하며 지지층은 고압에서 견디도록 하는 역할을 한다. 염의 분리 작용을 하는 활성층의 두께가 전체의 두께에 비해 0.1% 도 안되는 이유는 투과 흐름에 대한 막의 저항을 최소한으로 줄이기 위함이다.<sup>3</sup>

PA계 복합막은 막의 분리 기능을 담당하는 활성층과 지지층이 기본적으로 다른 재질로 구성되어 있다 . 이 막의 제법은 막두께를 얇게하면 막투과의 유속이 빨라진다는 용해 확산설을 기초로 하며, 2차 코팅법, 함침법, 계면중합법 등 여러 가지 방법이 있으나 주로 계면 중합법을 이용하여 제조한다. 복합막의 경우 비 대칭막에 비해 막의 표면적을 훨씬 넓게 만들어서 단위면적 대비 생산수 양이 많으며 염제거율이 월등히 높은 특성을 갖는다.

초기 역삼투 분리막이 개발되었을때 많이 사용된 셀룰로스아세테이트계 역삼투 분리막은 운전가능한 pH가 좁고 높은 압력으로 운전하여야 한다는 점 등 여러 가지 단점이 나타나 현재는 더이상 사용되지 않는 추세이다. 이에 반해 폴리아미드계막은 pH변화에 대한 안정성이 높고 낮은 압력에서도 운전이 가능하다. 제거효율도 뛰어나 현재 사용하는 역삼투 분리막의 주종을 이룬다.

### 3. 폴리아미드계 역삼투막의 분리특성

역삼투막 (RO) 또는 나노막(NF)은 정수 분야에서 사용되는 수처리 방법으로 물의 transport coefficient와 염의 transport coefficient 의해 성능이 결정된다. transport coefficient는 막의 단위 면적, 단위시간당 특정한온도, 특정한 압력, 특정 pH에서 주어진 염의 농도에서의 물 또는 염의 수송량이다. 일반적으로 물은 생산유량 (flux)으로 표시하고 염은 투과율 (salt passage)보다는 제거율 (salt rejection)로 표시한다. 염제거율은 운전 조건에 따라 달라지지만 transport coefficient는 막이 가지는 고유의 특성이다. 물론 운전 조건에 따라 아주 미미한 차이는 있으나 정상 운전조건에서는 무시가능한 차이를 보인다. transport coefficient와 rejection을 수식으로 나타내면 아래와 같다.

$$A = F_w / (\Delta P - \Delta \pi) \quad \text{eqn. 1}$$

A	=	물의 transport coefficient	(sec <sup>-1</sup> · Pa <sup>-1</sup> )
F <sub>w</sub>	=	막 단위 면적당 투과유량	(m <sup>3</sup> · m <sup>-2</sup> · sec <sup>-1</sup> )
ΔP	=	막 투과 전후의 압력 차이	( Pa )
Δπ	=	막 투과 전후의 삼투압 차이	( Pa )

$$B = C_p F_w / (C_b - C_p) \quad \text{eqn. 2}$$

B	=	염의 transport coefficient	(m <sup>3</sup> · m <sup>-2</sup> · sec <sup>-1</sup> )
C <sub>p</sub>	=	생산수의 염농도	(mol · L <sup>-1</sup> )
F <sub>w</sub>	=	막 단위 면적당 투과유량	(m <sup>3</sup> · m <sup>-2</sup> · sec <sup>-1</sup> )
C <sub>b</sub>	=	공급수의 염농도	(mol · L <sup>-1</sup> )

$$R = (C_f - C_p) / C_f \quad X \quad 100 \quad \text{eqn. 3}$$

R	=	염 배제율	( % )
C <sub>p</sub>	=	생산수의 염농도	(mol · L <sup>-1</sup> )
C <sub>f</sub>	=	공급수의 염농도	(mol · L <sup>-1</sup> )

### 4. 역삼투막 평가 인자

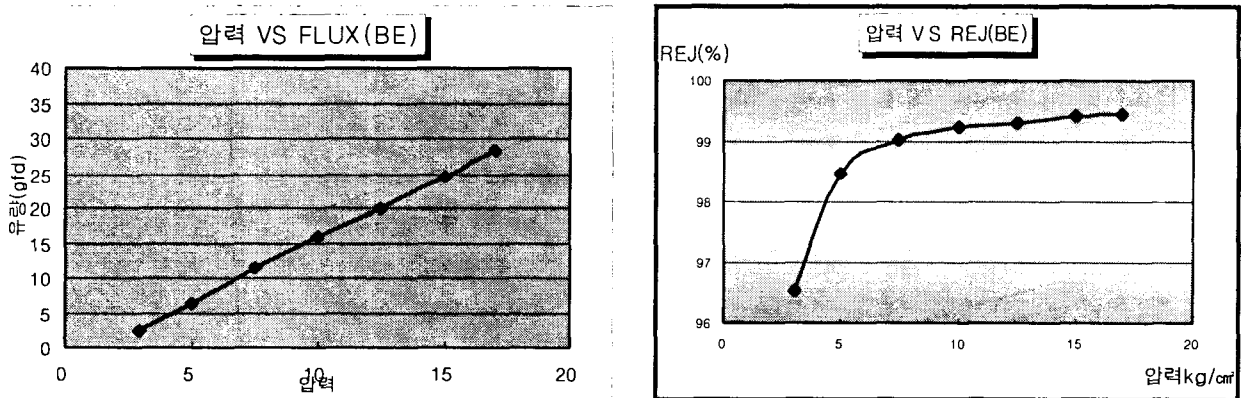
역삼투막의 물성 평가는 실제 수처리 시스템의 운전 조건에 의해 그 결과가 상당히 달라진다. 그러나 평가의 수치는 항상 생산 수량 (flux)와 제거효율 (Rejection)으로 나타낸다. 이러한 물성의 변화를 일으키는 요인은 공급되는 원수의 특성에 따라 상당히 예측하기가 힘든것이 사실이다. 그러므로 원수의 성분에 무관한 물리적인 특성들을 일반화하여 평가 기준을 만들수 있다. 이러한 총괄성을 갖는 인자를 중심으로 평가기준이 되는 인자들로는 공급원수의 압력, 온도, 회수율, 수소이온농도, 농도 등이 있다.

#### 4-1. 압력

일반적으로 생산 수량은 압력과 정비례하며 eqn. 1식으로 설명이 가능하다. 그러나 높은 압력으로 긴 시간 운전할 경우 막의 지속적인 유량 감소를 볼수 있다. 이러한 현상은 막의 compaction 현상과 fouling 축진으로 설명할 수 있다. compaction은 잉여 압의 영향으로 일어나는 것으로 막의 구조가 치밀하게 되어 유로 막힘현상을 일으킨다. 공급수의 유속이 빨라지고 foulant가 막 표면방향으로 압력을 더 크게 받아 유량의 저하가 일어난다. 생산수 양이 design된 시스템의 양보다 많을 경우 막의 표면에서는 농도 분극 현상이 일어난다. 일반 운전조건에서 막표면에서는 이온 확산이 일어나 상층부의 bulk flow와 함께 시스템 밖으로 유출이 된다. 그러나 압력이 높아지면 막표면에서의 삼투압이 높아지며 공급 원수의 수질에 비해 막 표면의 유효 수질은 높은 농도로 형성되어 생산수질을 떨어뜨리는 결과를 가져온다.

Fig.2는 직경 4인치, 길이 40인치 모듈의 초기 물성 거동을 압력에 따라 측정 한 것이다. 압력인자 이외의 조건은 일정하게 유지하여 막의 물성 거동을 살펴보았다. 평가 조건은 NaCl 농도 2000 ppm, 온도 25°C, pH 7.0, 회수율 15kg/cm<sup>2</sup>에서의 15% REC'에 해당 되는 유량으로 Drain을 고정하여 평가하였다. 유량은 압력에 선형 비례하여 증가하는 것으로 나타났으며 염제거율은 10 Kg/cm<sup>2</sup>이상에서 포화되는 양상을 보여준다.

Fig.2 Pressure vs. RO Properties



#### 4-2. 온도

온도에 따른 막의 물성 변화는 시스템의 엔탈피의 증감에 영향을 받는다. 운전 온도가 높을 수록 막을 형성하는 활성층의 매트릭스가 이완되며 막을 통과하는 유량이 늘어나며 한편으로는 공급수에 녹아있는 염의 활동성이 증가하여 염의 배제율도 낮아지게 된다. 온도 상승에 따라 어느 정도까지는 염의 막 투과량이 늘어나지만 일반적인 다른 구동조건에 비해 크게 영향을 주는 인자는 아니다.

Table.1은 현재 상업화된 제품을 평막으로 채취하여 초기 물성 거동을 온도에 따라 측정 한 것이다. 온도에 따른 막의 구조 변화나 damage가 없다는 것을 가정하면 온도에 따른 유량 변화는 eqn.4 을 따라 거동된다. eqn.4 식에 각 온도 수치를 입력하여 보정표를 만들어 사용하는 것이 일반적이다.

$$A_T = EXP \left( \frac{U}{298} - \frac{U}{273+T} \right) \quad , \text{if } U < 25, U=U1 \quad \text{else } U=U2$$

A\_T : 온도보정식

eqn. 4

Table.1 Temperature vs. RO Properties

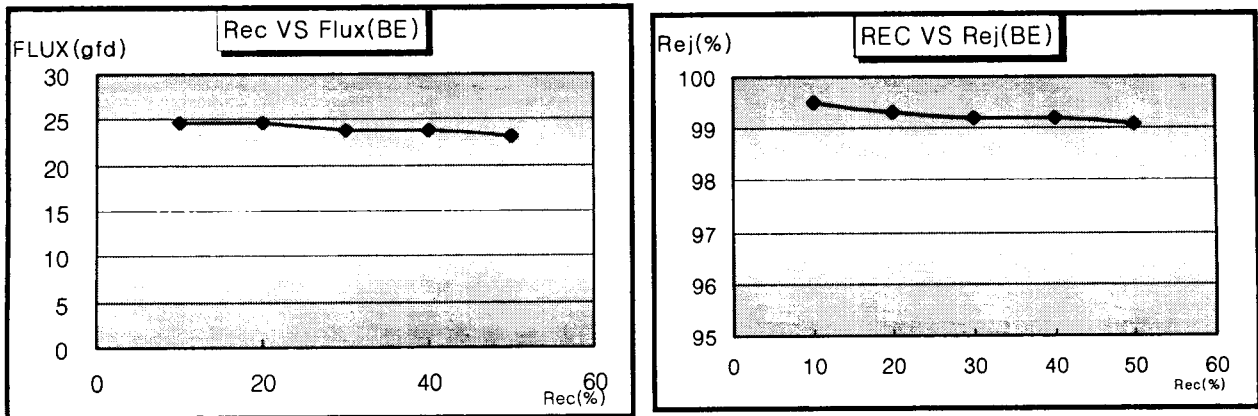
온도(℃)	Flux(GFD)	Rej(%)	비고
9	7.4	98.93	측정압력 : 10kg/cm <sup>2</sup> 농도: 2,000ppm 25℃에서의 15% REC'에 해당되는 유량으로 각온도별 측정
15	9.3	98.91	
20	11.4	98.86	
25	13.4	98.82	
30	15.6	98.74	
35	18.3	98.65	
40	20.8	98.52	

#### 4-3. 회수율

회수율은 정제된 생산수량에 대한 투입된 공급수량의 백분율값을 의미한다. 회수율의 상승은 실제 투입된 공급수에 비하여 농축된 물이 시스템 내에서 혼재되는 결과를 가져오기 때문에 실제 막이 느끼는 염의 농도는 공급수에 비해 높게 된다. 예를 들어 회수율이 75% 이상인 시스템에서 농축수의 농도는 원수의 4배로 높아지게 된다. 이 경우 막표면에서의 농도 분극에 의해 막이 실제 느끼는 삼투압이 증가하게 되고 운전 압력과의 차이는 줄어 유량의 감소와 염제거율의 감소를 유발하게 된다. 실제 회수율의 상승이 크면 클수록 ( $\Delta P - \Delta \pi$ ) 값은 급격히 작아져 구동 동력 자체가 기하급수적으로 감소하여 막의 기능을 잃게 된다. 또한 장기 물성의 측면에서도 심각한 문제를 유발하는데 농도 분극의 지속, 유량의 저하로 생긴 막표면에서의 유체 turbulence 저하로 스케일링이나 파울링의 원인으로 작용하여 막의 수명을 급격히 단축시키게 된다.

Fig.3는 직경 4인치, 길이 40인치 모듈의 초기 물성 거동을 회수율에 따라 측정한 것이다. 회수율 인자 이외의 조건은 일정하게 유지하여 막의 물성 거동을 살펴보았다. 평가 조건은 NaCl 농도 2000 ppm, 온도 25℃, pH 7.0, 회수율 15kg/cm<sup>2</sup> 에서의 운전조건으로 고정하여 평가하였다.

Fig.3 Recovery vs. RO Properties



4-4. pH 인자

공급수의 pH는 막의 유량이나 염제거율에는 직접적인 영향이 거의 없다. 그러나 막의 재질에 따라 손상되는 경우가 있으므로 권장 pH영역을 가진다. 특히 CA계 역삼투 분리막의 경우 ester 관능기는 가수분해가 쉽게 일어나므로 pH 4-6의 비교적 좁은 영역에서 사용해야 하는 문제점이 있다. PA계 역삼투 분리막의 경우에도 막의 물성에는 영향이 적지만 막의 오염이란 부분에서는 pH를 가능하면 권장 영역내에서 사용하는 것이 바람직하다. 예를 들면 pH 7.7 이상에서 온도가 올라가면 실리카의 용해도가 급격히 올라가 스케일링의 문제를 일으킨다. 또 카보네이트 또한 pH를 관리 수치 이상으로 올리면 문제가 된다. 이 경우 pH를 낮추어주면 카보네이트의 용해도가 높아지고 또한 수소탄산염이온이 이산화탄소로 전환되므로 스케일의 가능성이 낮아진다. Table.2는 직경 4인치, 길이 40인치 모듈의 초기 물성 거동을 압력에 따라 측정한 것이다. 압력인자 이외의 조건은 일정하게 유지하여 막의 물성 거동을 살펴보았다. 평가 조건은 NaCl 농도 2000 ppm, 온도 25℃, 회수율 15kg/cm<sup>2</sup>에서의 15% REC'에 해당 되는 유량으로 Drain을 고정하고 pH를 변화시켜 평가하였다.

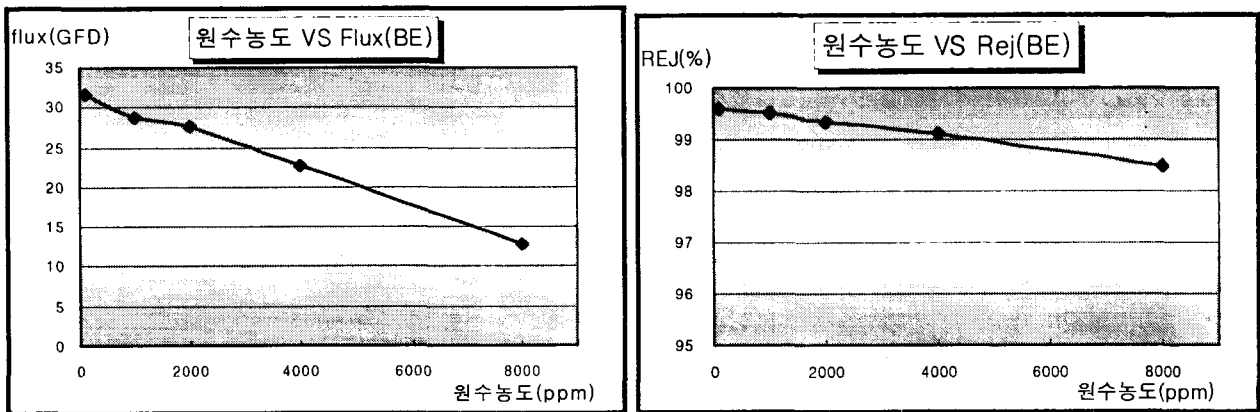
Table.2 pH vs. RO Properties

pH	Flux(GFD)	Rej(%)	비고
3.78	20.8	98.48	온도 : 25℃ 압력 : 15kg/cm <sup>2</sup> 2,000ppm 조건에서 상동
4.66	21.7	99.15	
5.79	21.9	99.26	
6.78	21.6	99.48	
7.35	21.9	99.43	
8.02	22.6	99.43	
8.91	23.1	99.49	
9.87	23.7	99.52	
10.71	24.2	99.54	

#### 4-5. 공급수 농도

역삼투막의 물성을 가장 크게 변화시키는 운전 조건은 농도 인자이다. 농도 인자는 원수압과 삼투압 차이를 일으키며 직접적으로 생산 수량에 영향을 주는 공급압력을 변화시킨다. 또한 농도의 증가는 막 표면의 분극 현상을 유발하여 막표면이 느끼는 유효농도를 크게 받게 되어 전체적인 농도보다 높은 분리계면의 농도를 갖게함으로써 제거율의 저하를 유발한다. Table.3은 직경 4인치, 길이 40인치 모듈의 초기 물성 거동을 압력에 따라 측정하는 것이다. 압력인자 이외의 조건은 일정하게 유지하여 막의 물성 거동을 살펴보았다. 평가 조건은 온도 25°C, pH 7.0, 회수율 15kg/cm<sup>2</sup>에서의 15% REC'에 해당 되는 유량으로 Drain을 고정하고 NaCl 농도를 변화시켜 평가하였다.

Fig.4 Feed Concentration vs. RO Properties



지금까지 역삼투막의 물성에 영향을 주는 인자들을 한가지 조건만 변화시키고 나머지 인자들은 고정하여 물성 거동을 살펴보았다. 그러나 실제 평가 시스템에서는 이들 인자들이 각각 독립적으로 역삼투막의 물성에 간섭을 하는 것이 아니라 복합적으로 복잡한 함수 관계를 이루며 물성에 영향을 미친다. 그러므로 적어도 역삼투막의 물성을 결정하는 외부 운전 조건만이라도 평가에 있어서 표준화가 시급한 것이 사실이다.

#### 5. 역삼투막의 평막 평가

역삼투막에서 일어나는 분리 현상을 평가하는 결과는 간단히 나타낼 수 있다. 공급수에 녹아 있는 물질이 분리막을 지나 후의 제거효율과 단위 모듈당 생산 수량으로 나타낼 수 있다. 따라서 물속에 존재하는 이온들의 종류와 사용하고자 하는 정제수의 용도 특성에 달라진다. 공급수의 수질은 취하는 방법에 따라 수많은 이온들이 물속에 존재하므로 이에 대한 모든 항목의 평가는 불가능하므로 대표적인 이온을 선택하여 측정하고 있다. NaCl은 해리하여 1가 이온의 양이온과 음이온으로 물속에 존재하여 다가 이온의 염 제거율은 1가 이온보다 높으므로 현재 상업화된 역삼투막의 이온 제거특성은 NaCl 농도의 제거효율로 나타낸다. 막의 평가에 있어 모듈 상태의 평가는 실험하는 운수조건과 시스템의 조건에 따라 항상 그 물성이 일정하게 나타내기 힘들다. 그러므로 가장 쉽게 막의 물성을 알아 보는 방법이 평막을



이용한 평가이다. 평막 평가는 조제수를 순수로 사용하고 시약으로 조제하며 pH, 온도, 압력, 회수율, 농도 등의 조절이 용이하다는 특징을 갖는다.

◆ 단위

이온투과 :

- mg/L : 물 1000g에 녹아있는 용질의 mg  
-> ppm (part per million)
- $\mu\text{s/cm}$ : 전기 전도도  
-> 저항값 M $\Omega$ 의 역수값
- % : 제거율, (eqn.3)

유량 :

- gfd : 역삼투막 단위 면적(ft<sup>2</sup>)당 1일 생산수량 (gal)  
-> gal/ft<sup>2</sup> · day
- gpd : 역삼투막 단위 모듈 1개당 1일 생산수량 (gal)  
-> gal/day

재현성이 있는 막의 측정을 위해서는 샘플의 보관부터 평가까지 항상 일정한 조건에 의해 이루어져야한다. 평막의 평가에 관련된 중요한 일반 사항은 다음과 같다.

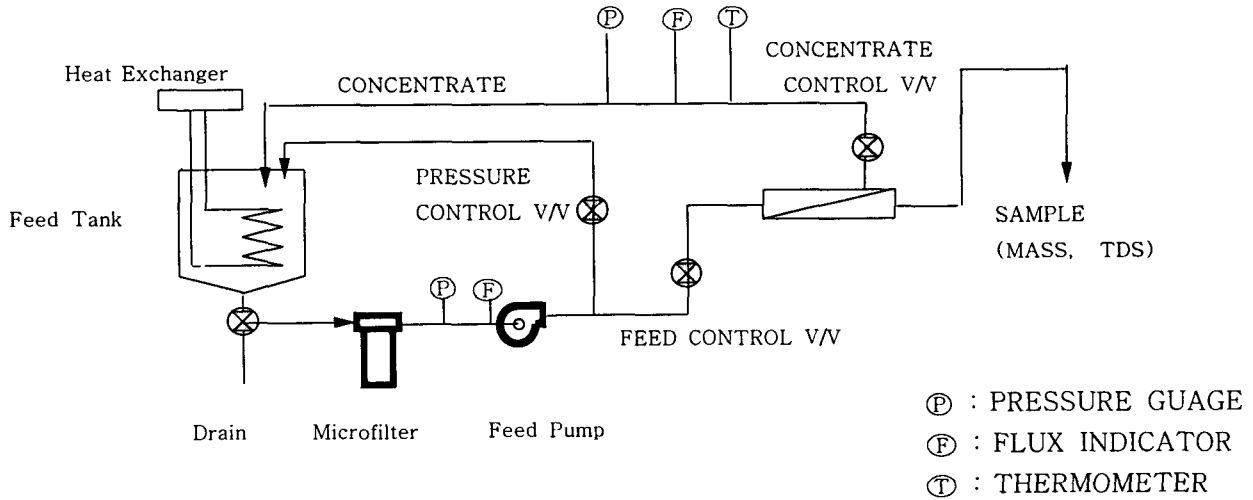
- 막은 항상 젖은 상태로 유지되어야 한다.
- 초기 1시간동안의 생산된 생산수는 버려야 한다.
- 하루 미만의 단기 보관 시에는 증류수에서 보관한다.
- 장기 보관 시 분리막은 적합한 분리막 보존 용액에 담겨 있어야 한다.
- 보존 용액은 propyleneglycol 18 - 20%, 식용 등급의 SBS (sodium bisulfite) 1%를 혼합하여 사용한다.
- 사용 직전 증류수에서 2시간 이상 씻어 보관 후 평가한다.
- 공급수는 1M $\Omega$ 의 증류수에 시약급 NaCl을 사용하여 조제한다.

막의 평가 조건은 사용하는 모듈의 용도에 따라 다르다. 원수의 조제가 1M $\Omega$ 의 증류수에 시약급 NaCl을 사용하므로 기타 이온의 부분은 없다고 가정하고 평가한다. 또, 막의 면적이 모듈 평가에 비해 작으므로 회수율은 무시하고 평가한다. 일반적으로 tap water, brackish water, sea water의 3종류로 나누며 기준은 물속에 존재하는 이온의 농도에 의해 나누어진다. Table 3에서는 평막 평가에 사용되는 원수별 평가 조건을 요약하였다.

Table 3. Test Condition Of Plate Sheet Test System

Application	Feed Conc. ppm	Pressure psi	pH	Temp.	Remark
Tap Water	500	60	7	25	Regular
	100	20	7	25	Low Pressure
	2000	150	7	25	Large Scale
Brakish Water	2000	225	7	25	Regular
	2000	150	7	25	Low Pressure
Sea Water	32000	800	7	25	Regular

FIG. 5 PLATE SHEET TEST SYSTEM



## 6. 역삼투막의 모듈 평가

역삼투막 모듈의 평가는 제조사에서 실시하는 일반 평가와 사용자가 시스템 용도별로 평가항목을 달리하는 특정항목 평가로 나뉘어진다. 일반 평가는 사용하고자 하는 용도와는 무관하게 멤브린의 물리적인 제거효능과 생산 수량을 평가하는 것으로 평막 평가조건에 회수율만 추가하여 이루어진다. 대부분의 역삼투막 제조사들이 같은 항목으로 평가하나 운전 조건은 제조사마다 약간의 차이를 나타낸다.

반면 용도별 평가는 사용하고자 하는 목적과 인입되는 원수의 조건에 따라 규정항목을 두고 평가를 하기 때문에 그 종류와 항목이 무수히 많다. 여기서는 각 용도별 평가 중 범용으로 사용되는 평가에 대해 소개하고자 한다. 평가 방법은 음용수, 산업용수가 동일하며 각기 조제수농도, 운전조건만 달라진다.

### 6-1. 모듈 평가 방법

#### (1) 조제수의 확인

먼저 조제수의 전도도, pH, 경도, 알칼리도 등을 측정하여 원수의 조제가 올바른지 확인한다. 조제수는 1 MΩ 이상의 순수, 시약급 NaCl, 시약급 NaOH 만 투입이 되므로 전도도, pH, 온도의 확인을 재점검한다.

#### (2) 밸브상태의 점검

모든 밸브가 올바른 상태에 있는지 점검한다. 특히 원수 압력 조절 밸브와 농축수 조절 밸브가 완전히 열려 있는지 확인한다.

#### (3) 모듈의 세정

원수의 공급 펌프를 사용하여 분리막에 들어있는 화학 약품 및 공기 등을 30분 이상 씻어낸

다. 이때 세정수는 1 MΩ 이상의 순수를 사용하고 가능한 낮은 압력 (60 psig미만)을 이용하여 적은 유량으로 운전한다. 유량은 시스템 용량에 따라 각각 달라지나 공급 펌프 양정의 70% 미만을 흘려주는 것을 원칙으로 한다. 이 공정에서 배관 및 밸브의 누수 상태를 확인한다. 30분 이상 세정한 후 원수의 압력 조절 밸브를 닫고 150 psig의 압력으로 30분 더 세정한다. 이 과정은 역삼투막에 흡착되어있을 수 있는 보존액을 압을 가해 충분히 세정하기 위한 단계이다.

(4) 조제수 교체

충분한 세정을 한 후 원수를 완전히 drain한 후, 순수 밸브에서 조제수 밸브로 전환시킨다. 공급 펌프를 사용하여 배관 내의 이온 농도는 물론 역삼투막 표면의 분극 농도까지 조제수의 농도와 평형을 이루도록 30분 이상 공회전시킨다.

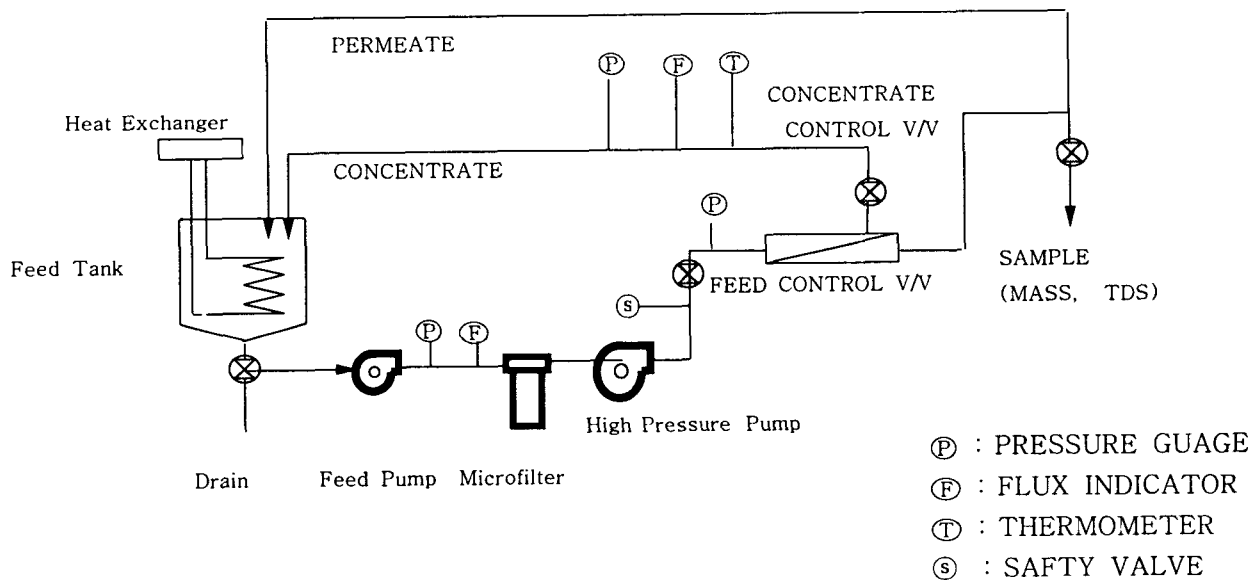
(5) 평가 공정 조절

베셀로 인입되는 부분의 원수 압력 조절 밸브를 닫은후 서서히 열기 시작하여 인입 압력계의 압력이 급격히 올라가는 시점 (일반적으로 100 psig 부근)에서 고압 펌프를 가동시킨다. 천천히 원수 압력 밸브를 열어 원수의 압력을 분당 60 psig 미만으로 상승시켜 농축수의 유량을 설계치에 이르도록 한다. 열려있는 농축수 밸브를 천천히 닫아가며 회수율이 설계치 근처에 이르도록 조절한다. 생산수 유량과 회수율이 설계치에 도달할 때까지 반복한다. 이때 회수율과 시스템 압력이 설계 한계치를 넘지 않도록 주의해야 한다.

(6) 평가

10분 간격으로 원수의 온도, pH, 농도, 공급유량, 생산수의 농도, 유량, 시스템의 회수율에 대한 자료를 작성한다. 한시간동안 평가조건에서 운전하여 시스템의 전체를 안정화되었는지 확인한 후 원수, 농축수, 생산수의 수질 및 운전 조건을 취한다.

FIG. 6 MODULE TEST SYSTEM



## 6-2. 음용수

음용수의 일반 평가 기준은 역삼투막 제조사의 catalog에 제시된 방법으로 품질 표준의 기준으로 삼고있다. 새한과 Filmtec사의 평가 결과를 별첨1에 소개 하였다. 모듈의 일반 평가는 농도, 압력, 회수율에 대한 생산 수량과 염제거율을 평가한 것이다. 그 외의 특정 항목 평가는 국내의 경우 멤브레인 제조사가 아닌 정수기 또는 음용수 설비업체에서 시스템을 통과하여 나온 정제수에 대하여 평가가 실시된다. 먹는물 관리법 제29조 제1항, 제30조 및 먹는물관리법시행규칙 제31조제5항의 규정에 의한 일반정수성능 시험 및 제거율 기준, 특수 정수 성능 시험 규격을 기준에 대한 평가가 별첨2,3의 기준으로 진행되고 있으며 원수는 조제수가 아닌 수돗물을 사용한다는 점과 구동압력이 3Kg/cm<sup>2</sup>이란 점이 일반 평가 기준과 차이점이 있다. 평가는 제조사의 표준 조건 테스트를 따른다. 표준 조건은 제품을 출하하기전 품질을 자체적으로 평가하는 조건으로 (주) 새한의 표준 테스트 조건은 회수율 10-20% 내, 원수의 조성은 NaCl 500ppm, 온도 25℃, 원수에서 공급되는 압력은 모듈의 사양에 따라 60 psig와 20 psig로 하여 시스템의 운전이 안정화된 후 유량과 제거율을 측정한다.

## 6-3. 산업용수

산업용 역삼투막의 평가 방법에 대한 규정은 음용수용과는 달리 국내외에서 찾아볼 수가 없다. 산업용수의 정수는 원수의 조건이나 필요한 생산수의 수질이 음용수에 비해 훨씬 복잡하기 때문이다. 대부분의 역삼투막은 제조사의 표준화된 품질 관리 공정에 의해 평가된 방법을 catalog 및 technical manual에 제시하고 적용에 대한 판단은 사용하고자 하는 user와 시스템 관리자에게 맡긴다. 현재 널리 사용되는 산업용 정수 시스템의 생산수 용도는 공정에 필요한 보일러수, 제약·식품용 순수, 반도체 세정용 초순수, 오·폐수 재활용, 화학 공정수, 해수담수화용수 등이 있다. 각각 취수되는 방식도 상수도, 담수, 지하수, 폐수 저장조, 해수 등 수질이 다양하여 운전 조건이나 전처리 방법이 각기 달라지므로 각각의 원수 취수 조건에 따라 평가 규격을 정한다는 것은 불가능하므로 각 시스템마다 적합한 사양의 멤브레인을 제조사가 제시한 물성에 맞추어 선정한다. 멤브레인 제조사는 평가 방법을 공개하고 있으며 방법 자체도 대부분 같고 운전압력이나 농도에 따라 약간의 차이를 보인다. 별첨 4,5에서는 국내외의 대표적인 역삼투막 제조사들의 Brackish Water와 Sea Water 에 대한 평가조건 및 물성을 제시하고 있다. 평가는 제조사의 표준 조건 테스트를 따른다. 표준 조건은 제품을 출하하기전 품질을 자체적으로 평가하는 조건으로 (주) 새한의 표준 테스트 조건은 회수율 15%, 원수의 조성은 NaCl 2000ppm, 온도 25℃, 원수에서 공급되는 압력은 225 psig로 하여 시스템의 운전이 안정화된 후 유량과 제거율을 측정한다.

## 6-4. 기타

역삼투 분리막의 이물질 제거 능력은 다른 방법에 비해 탁월하지만 이로 인한 막의 오염 또한 생기기 쉽다. 분리막에 발생하는 오염 현상은 ionic salt에 의한 scale현상, 입자나 콜로이드에 의해 생성되는 fouling, 미생물에 의해 형성되는 biofouling 등으로 나눌수 있다. 정상적인 역삼투막의 운전 조건에 맞는 전처리 설비를 놓는것은 경제성의 문제로 불가능하다. 역삼투 분리막에 영향을 주는 이러한 오염원들을 최소한으로 줄여 막의 수명과 성능을 최적화하는 것도 분리막 사용의 중요한 운전 기술이 된다. 표준 평가 조건은 원수의 이온을 단일화시킨 상태에서 일정농도로 평가하지만 실제 현장에서의 전처리 과정에 따라,

원수의 조성에 따라 표준 평가 조건과는 전혀 다른 현상을 일으킨다. 모든 변수에 관한 평가가 불가능하므로 역삼투막 평가는 염제거율, 유량, 차압 (원수 공급 압력 vs 모듈 후단 배관 압력) 만으로 막의 성능을 평가한다. 평가의 목적은 역삼투막 성능 저하 또는 시스템의 부하 여부를 확인하는데 있다. 실제 운전 중에서의 역삼투막 성능 저하는 여러 가지 원인이 있다. 성능 저하에 대한 원인은 원수의 변화, 막의 노후화 또는 물리·화학적 손상, 전처리 문제점, 배관의 문제점, 오염 등 그 원인을 찾아내기가 힘들다. 별첨 6은 이러한 막의 이상을 알아내는데 필요한 필수 점검 항목을 나타낸 것이다. 그 외 문제 발생시 전처리 조건에 따라 잔류염소농도, 탁도, bacteria counts, 농축배수, LSI (Langelier Stability Index), SDSI (Stiff and Davis Stability Index)의 추가 분석이 필요하다. 표준 평가 조건으로 전처리하는 것은 불가능하더라도 전처리를 지난 원수의 수질이 설계 시스템의 허용치를 넘는지를 확인하는 작업이 실제 실제 운전시스템에서 이루어지고 있다.

#### 6-5. 역삼투막에 대한 해외 규정

역삼투막에 대한 미국의 표준 규격을 Table 4에 제시하였다. 가정용 역삼투막 평가 장치의 운전 특성에 관한 규격, 역삼투막 평가 장치의 운전 특성에 관한 규격, 역삼투 설비 운전시 data 작성 지침, 역삼투막 평가에 있어서 물 분석 지침, 역삼투막 Leak 평가 장치, 시약급 물의 특성 등에 관한 규격이 표준화되어 있으며 각 ASTM 항목마다 각 규격을 실시하는 연관 항목들의 방법이 연결되어 규정을 결정하고 있다. 반면 일본은 JIS K 3805에서 역삼투 엘리먼트 및 모듈의 성능 시험 방법에서 역삼투막의 평가법을 제시하고 있다. 농도와 조작 압력에 관한 규정, 염의 종류 (NaCl, MgSO<sub>4</sub>, isopropanol)에 따른 투과성능, 온도, pH, 회수율에 관한 범위를 규정하였으며 장치와 기기는 관련 JIS 규정을 따르도록 규정되어 있다.

Table 4. ASTM Guide for Reverse Osmosis

Reverse Osmosis Standard	Related Standards	규격 내용
D4692	D511 D516 D1129 D3352 D4194 D4195 D4382	RO에 처리 시 SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> 평가 및 계산법 물속의 Ca <sup>+2</sup> , Mn <sup>+2</sup> 이온 분석법 물속의 SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> 분석법 물 관련 용어 규정 brackish water, sea water, brines에서의 Sr <sup>+2</sup> 이온 분석법 역삼투막 평가 장치의 운전 특성에 관한 규격 역삼투막 평가의 물 분석 지침 물속의 Ba <sup>+2</sup> 이온 분석법
D5615	D512 D1125 D1129 D1193 D1293 D4194 D4516	가정용 역삼투막 평가 장치의 운전 특성에 관한 규격 물속의 Cl <sup>-</sup> 이온 분석법 물속의 전기전도도 및 비저항 측정법 물 관련 용어 규정 시약급 물의 특성 pH의 측정법 역삼투막 평가 장치의 운전 특성에 관한 규격 역삼투막 성능 자료 기록에 관한 규격
D4194	D512 D1125 D1129 D1193	역삼투막 평가 장치의 운전 특성에 관한 규격 물속의 Cl <sup>-</sup> 이온 분석법 물속의 전기전도도 및 비저항 측정법 물 관련 용어 규정 시약급 물의 특성
D4993	D815 D1067 D1129 D1293 D3739 D4194	SiO <sub>2</sub> Scaling 평가 및 계산법 물속의 Silica 측정법 물속의 산도, 염기도 측정법 물 관련 용어 규정 pH의 측정법 LSI (Langelier Saturation Index) 평가 및 계산법 역삼투막 평가 장치의 운전 특성에 관한 규격
D3739	D511 D1067 D1129 D1293 D1888 D4194	LSI (Langelier Saturation Index) 평가 및 계산법 물속의 Ca <sup>+2</sup> , Mn <sup>+2</sup> 이온 분석법 물속의 산도, 염기도 측정법 물 관련 용어 규정 pH의 측정법 물속의 입자 및 용해고형분 측정법 역삼투막 평가 장치의 운전 특성에 관한 규격
D4582	D511 D1067 D1129 D1293 D1888 D3739 D4194 D4195	SDSI (Stiff and Davis Stability Index) 평가 및 계산법 물속의 Ca <sup>+2</sup> , Mn <sup>+2</sup> 이온 분석법 물속의 산도, 염기도 측정법 물 관련 용어 규정 pH의 측정법 물속의 입자 및 용해고형분 측정법 LSI (Langelier Saturation Index) 평가 및 계산법 역삼투막 평가 장치의 운전 특성에 관한 규격 역삼투막 평가의 물 분석 지침

Reverse Osmosis Standard	Related Standards	규격 내용
D4472	D1125 D1129 D1253 D1889 D3739 D4189 D4194 D4195 D4582	역삼투 설비 운전시 자료 작성 규격 물속의 전기전도도 및 비저항 측정법 물 관련 용어 규정 잔류 염소 측정법 탁도 측정법 LSI (Langelier Saturation Index) 평가 및 계산법 물속의 SDI (Silt Density Index) 측정법 역삼투막 평가 장치의 운전 특성에 관한 규격 역삼투막 평가의 물 분석 지침 SDSI (Stiff and Davis Stability Index) 평가 및 계산법
D4195	D511 D512 D513 D515 D516 D857 D858 D859 D888 D1068 D1129 D1179 D1253 D1293 D1428 D1888 D1889 D2579 D3352 D3370 D3561  D3867 D4189 D4194 D4832	역삼투막 평가의 물 분석 지침 물속의 Ca <sup>2+</sup> , Mn <sup>2+</sup> 이온 분석법 물속의 Cl <sup>-</sup> 이온 분석법 물속의 CO <sup>2-</sup> 이온 분석법 물속의 P 분석법 물속의 SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 분석법 물속의 Al <sup>3+</sup> 분석법 물속의 Mn 분석법 물속의 Si 분석법 물속의 용존산소 분석법 물속의 Fe 분석법 물 관련 용어 규정 물속의 F <sup>-</sup> 이온 분석법 물속의 잔류염소 분석법 pH의 측정법 물속의 Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> 이온 분석법 물속의 입자 및 용해고형분 측정법 탁도 측정법 물속의 TOC (Total Organic Contents) 측정법 brackish water, sea water, brines에서의 Sr <sup>2+</sup> 이온 분석법 Closed Conduits에서 샘플 취하는 방법 brackish water, sea water, brines에서의 Li <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> , Na <sup>+</sup> 이온 분석법 물속의 NO <sup>2-</sup> , NO <sup>3-</sup> 이온 분석법 물속의 SDI (Silt Density Index) 측정법 역삼투막 평가 장치의 운전 특성에 관한 규격 물속의 Ba <sup>2+</sup> 분석법
D3929	D1129 D1193 D4194	역삼투막 Leak 평가 장치 물 관련 용어 규정 시약급 물의 특성 역삼투막 평가 장치의 운전 특성에 관한 규격
D4189	D1129 D1193 D3370 E1	물속의 SDI (Silt Density Index) 측정법 물 관련 용어 규정 시약급 물의 특성 Closed Conduits에서 샘플 취하는 방법 ASTM 온도계 규격

Reverse Osmosis Standard	Related Standards	규격 내용
D1193	D1125 D1129 D1293 D4453 D4517 D4779  D5391 D5542 D5997  D6071	시약급 물의 특성 물속의 전기전도도 및 비저항 측정법 물 관련 용어 규정 pH의 측정법 Ultra Water Handling법 저농도 실리카 함량 측정법 초순수에서의 TC (Total Carbon), TIC (Total Inorganic Carbon), TOC (Total Organic Carbon) 측정법 초순수 유체의 전기전도도 및 저항 측정법 미량 음이온 측정법 유체의 TIC (Total Inorganic Carbon), TOC (Total Organic Carbon) 측정법 초순수에서의 Na <sup>+</sup> 이온 측정법
D6161	D1129 D2023	정밀여과, 한외여과, 역삼투여과공정의 용어 규격 물 관련 용어 규정 Coagulation 및 Flocculation에 관한 실험실 테스트 규격

#### 7. 우리나라의 역삼투막 평가 표준화

역삼투막 평가 표준화에 대한 성능 평가에 대한 표준화는 미국이나 일본 등에서 이미 제정되어 시행되고 있다. 그러나 제조사 각각의 평가 조건이 일반적으로 적용되는 것이 사실이다. 개발 과정이 달랐던 역삼투막 기술 제조 기술 공정의 차이에서 기인한 것으로 보인다. 염제거율이 뛰어난 막의 특성을 가지는 제조사, 생산 수량이 많은 막의 특성을 가지는 제조사, 이온 제거 선택성이 우수한 막의 특성을 가지는 제조사, 오염에 대한 내성이 강한 막의 특성을 가지는 제조사 등 각 제조사의 강점을 표현할 수 있는 평가 규격이 만들어져 왔기 때문이다.

우리나라의 역삼투 분리막에 대한 평가 표준화 결과물은 찾을 수 없었다. 역삼투막의 사용은 산업화와 더불어 공업 단지를 중심으로 현장에 빠르게 적용이 되어왔다. 불과 3-4년 전만 하더라도 막 제조 기술의 부재로 역삼투 분리막은 전량 수입에 의존하였으며 설비 위주의 산업만 육성되었다. 이러한 결과는 외국의 역삼투막이 각각의 설비에 수입 장착되어 그 평가 조건이 제조사의 평가에서만 이루어졌기 때문에 막의 물성에 대한 의견이 분분한 결과를 낳았다. 역삼투막에 대한 규격보다는 정수기를 통과한 물의 수질 또는 정수 처리 설비를 통과한 물의 수질만 규제되어 왔기 때문이기도 하다.

역삼투 분리막의 성능을 표준화한다는 것은 아주 방대한 작업이 될지도 모른다. ASTM에서처럼 관련 평가 규격이 체계적으로 정리가 되어야 한다는 점도 아주 많은 작업을 요하지만 그 외에도 국내의 정수 처리는 미국처럼 지하수를 사용하는 것이 아니라 지표수를 사용하기 때문에 전처리 조건에 따라 성능이 크게 바뀌어 질 수 있기 때문이다. 또한 역삼투막을 이용한 처리수의 용도에 따라 수질 규격이 다르게 적용될 것이며 역삼투막에 인입되는 공급수의 수질에 따라 또한 성능이 달라질 수 있기 때문이다. 이러한 사실들을 고려할 때 우리나라의 역삼투막 평가 표준화의 방향은 아래의 사항이 고려되어야 할 것으로



생각된다.

- 역삼투막 평가의 표준 조건 규격 설정
- 역삼투막 평가 장비의 표준 조건 규격 설정
- 측정, 계측 장비 및 측정법 표준화
- 분석 장비 및 분석법의 표준화
- 정수 용도별 전처리 기준 표준화 및 각 전처리 통과 후의 역삼투막 성능 표준화
- 표준 조건 내 사용시 장기 물성 저하에 대한 기준치 설정
- 산업용의 경우 정수의 용도별 수질 기준치 표준화  
(반도체 초순수, 보일러수, 의약· 제약용 원수, 해수담수화용수, 폐수재활용 생활용수 등)
- 가정용의 경우 정수의 수질 검사 QC 항목과 특정 물질 항목의 제거능 표준화

우리나라는 사계절에 따른 수질의 변화가 심하여 역삼투 분리막을 이용한 수처리 정수 공정에 대한 표준을 선정하기가 무척 어려운 환경이다. 또한 2003년부터는 물부족 국가로 수자원의 관리가 더욱 중요하게 취급될 것으로 예상되고 있다. 수자원의 효율적인 사용이 요구되어지는 시점에서의 역삼투막의 표준화 작업은 더욱 효율적인 정수 시스템의 정착에 큰 도움을 줄 수 있을 것으로 예상된다.

#### 참고문헌

1. M.E.Williams, D.Bhattacharya, R.J.Ray, and S.B.McCray, "Selected Applications Reverse Osmosis" in Membrane Handbook, K.K. Sirkar and W.Ho, eds., Van Nostrand Reinhold, NY (1992)
2. M.C.Wilbert, F.Leitz, E.Abart, B.Boegli, and K.linton, "The Desalting and Water Treatment Membrane Manual: A Guide to Membranes for Municipal Water Treatment (2nd Edition), Water Treatment Technology Program Report No.29", U.S. Department of The Interior, Bureau of Reclamation (1998)
3. Marcel Mulder, "Basic Principles of Membrane Technology (2nd Edition)", Kluwer Academic Publishers,Dordrecht, The Netherlands (1996)
4. R.L.Reily, "Reverse Osmosis" in Membrane Separation System, U.S.Department of Energy. Pub. Department of Commerce, National Technical Information Service, 5, 1 (1990)
5. Theodore H. Meltzer, "High-Purity Water Purification(2nd Edition)", Tall Oaks Publishing, Inc. Chap.9, pp 445 (1997)
6. 음용수 처리에서의 멤브레인 응용: 우리나라 먹는물의 수질오염과 수질기준, 2000. 7. 7. 한국막학회 심포지움
7. Toray, "ROMembra Membrane Technical Manual "(1990)
8. Hydranautics, "Technical Manual ", Technical Information (1992)
9. Trisep, "Trisep X-20 A New Membrane Chemistry " (1998)
10. Filmtec, "Filmtec Membranes, Product Information " (1996)

11. 새한, "CSM, Tehcnical Manual " (2000)
12. American Society for Test and Materials, Designation D5615-95, D4194, D4993-89  
D3739-94, D4582-91, D4472-89, D4195-95, D4189-95, D1193-99, D6161-98  
D3923-94
13. 日本工業規格, JIS K 3805-1990