

기능성 역삼투 분리막 개발 동향

홍성표, 윤성로, 김연수

(주)세한 기술연구소

1. 서 론

산업의 발달과 인구의 도시 집중, 산업 폐수와 생활하수의 방류로 인한 수질오염은 수자원 환경관리에 심각한 문제로 떠오르고 있다. UN이 분류한 자료에 따르면 우리 나라도 10년 이내 절대량의 물 부족이 발생하는 물부족 예상국가군에 속한다는 보고가 발표되었으며 실제 1995년 당시 약 7%의 예비율로 현재 추세의 물사용량 증가시 2010년 물부족 사태 발생은 예상이 아닌 현실로 그 대책이 시급하지 않을 수 없다[1]. 그러나 최근 진행된 대책의 내용들은 대부분 지표수에 한정하고 있으며 건설, 토목의 수준으로 강수량에 의존하는 대책에 머물러 문제의 심각성에 대한 논의나 인식이 부족한 상태이다. 즉 건설, 토목 중심의 지표수 저장 기술이 아직은 더욱 경제적인 수 밖에 없지만 지표수와 지하수가 고갈되어 부족현상이 나타나면 결국 수자원의 재활용 및 정수 기술의 적용이 더욱 현실적이고 경제성을 갖게 될 것이다.

이에 따라 필요한 물을 얻기 위한 노력이 계속되고 있으며 물에 존재하는 오염물을 제거하기 위하여 역삼투, 전기투석, 증발법 및 이온 교환 등의 방법들이 개발되어 왔다. 특히 역삼투 분리법은 에너지 소비량이 적고 운전이 간편하며 자동화가 쉽다는 측면에서 널리 적용되고 있다. 유기물 오염이 심하고 미생물의 번식이 문제가 되는 원수의 경우 활성탄 및 이온 교환 수지의 오염이 심해지므로 역삼

투법을 이용하는 것이 비교적 효율적이다[2].

역삼투법은 최근 물 부족, 수질악화에 대응하여 가정에서는 음용수 및 생활용수의 정수에, 산업체에서는 안정된 수질의 공업용수 확보를 위한 폐수 재활용, 지하수 및 공업용수 처리에 적극적으로 활용되고 있으며 용매의 분리, 정제, 농축 등 응용분야가 점차 넓어지고 있는 추세이다[3].

막분리(membrane separation)란 기상 또는 액상의 혼합물이 막 양단의 농도차, 압력차, 전위차 등의 구동력에 의해 얇은 막의 매질을 통과함으로써 선택적으로 분리되는 현상을 의미한다. 막(membrane)이란 서로 분리하려는 두 상간의 분자나 이온의 흐름에 대한 장벽으로 존재하는 상이다. 막분리의 원리를 이용하여 산업에 적용하면 액체나 기체의 혼합물들을 선택적으로 분리할 수 있다. 막분리 공정이 효율적이라면 막은 다른 성분에 비하여 한 성분을 빨리 통과시켜야 한다는 성질과 선택적 투과도가 높아야 하는 성질을 지녀야 한다. 막분리 기술은 사용하고자 하는 목적이나 개발 방향에 따라 다양하게 발전되어 왔다. 특히 여기에서는 막분리공정의 특성, 역삼투분리막의 특성, 그리고 최근 급격한 물성 향상을 보이는 역삼투 분리막의 개발 동향과 실제 산업체의 연구 활동에 있어 가장 이슈가 되고 있는 반도체 초순수제조공정에 사용되는 역삼투 분리막 및 내오염성 역삼투 분리막(fouling resistant R/O membrane)의 개발에 대한 case study를 소개하고자 한다.

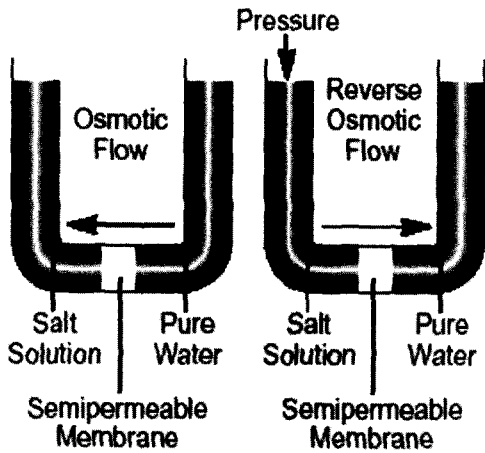


Figure 1. Osmosis and reverse osmosis.

2. 역삼투 분리막

2.1. 역삼투에 의한 물질 수송 특성

삼투압이라는 개념은 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 압력으로 이를 삼투압이라고 한다. 그런데 역으로 삼투압보다 높은 외부 압력을 걸어주면 용매는 용질 농도가 낮은 용액쪽으로 이동하게 되는데 이러한 현상을 역삼투라고 한다. Figure 1은 삼투 현상의 개념도 및 역삼투 물질 수송의 원리를 설명한 것이다[4].

일반적으로 삼투압을 간단히 계산하는 방법으로 아래의 식을 사용한다.

$$\pi(\text{lb}/\text{inch}^2) = 0.01 \times \text{TDS mg/L}$$

2.2. 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 음용수 정수 시스템뿐만 아니라 물질의 분리농축이나 오폐수 재활용 등에 많이 사용된다[4].

역삼투 분리막은 제조방법에 따라 cellulose acetate(CA)계 비대칭막, polyamide(PA)계 복합막, aramide계 증공사막 등이 있다. CA계 비대칭막은 1959년에 Reid와 Bretion이 적당한 투과율과 선택도를 갖는 효과적인 막 소재로 cellulose acetate를 발견하고, 이 필름으로 염제거 가능성을 제시하였다. 이후 Loeb & Sourirajan (UCLA)에 의해서 막에 비대칭구조의 단면구조를 부여함으로써 투과율을 획기적으로 증가시킬 수 있다는 연구보고가 연속적으로 발표되면서 막소재에 관한 문제는 역사적인 전환점을 맞이하게 되었다. 비대칭성 셀룰로스 아세테이트 개발을 성공하면서 역삼투 분리막은 상업화되기 시작하였다. 막 분리에 관한 이론적인 연구도 이 시기에 가장 활발히 진행 되었으며 대표적인 것이 B. Riley 등에 의해 제안된 이론이다[5]. Riley는 역삼투막의 물질 수송에 관한 이론을 solution-diffusion model로 설명하면서 비대칭성 셀룰로스 아세테이트 역삼투막의 수송 메커니즘을 밝혔다. 현재 상업화된 CA계 막은 막의 두께가 0.25~1 μm의 조밀한 활성층(skin layer)과 수십 μm정도의 세공이 다수 존재하는 스폰지 형태의 지지층(support layer)으로 구성되어 이 두층이 같은 재질로 되어있다는 것이 특징이다. 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%이하로 투과 흐름에 대한 막의 저항을 최소화 하고자 하였다.

PA계 복합막 또한 막의 분리 기능을 담당하는 활성층과 지지층으로 구성되지만, CA계 막과 다른점은 두층이 근본적으로 다른 재질로 구성되는 것이다. 이 막의 제법은 막두께를 얇게하면 막투과 유량이 증가하는 용해 확산설을 기초로 하며, 2차 코팅법, 함침법, 계면중합법 등 여러 가지 방법으로 제작할 수 있으나, 주로 계면 중합법을 이용하여 제

Table 1. Performance of polyamide type RO and cellulose acetate type RO

		Polyamide	Cellulose Acetate	
pH Range		2-12	4-6	Acid Addition
Operation Pressure(Kgf/cm ²)		15	30	Energy
Rejection(%)	TES	99+	98	
	SiO ₂	99+	95	
Stability		More Stable	Less Stable	long term stability
Change		Flux ↓	Rejection ↓	
3 years later	Salt Passage	30% ↑	100% ↑	IEX Regeneration
	Rejection	89% → 98.7%	98% → 96%	
Residue Cl		Remove	Ass	
Fouling Tendency		More	Less	

Table 2. Typical NF and RO performance specification

	S	B	B'	B''	N
Process	Seawater RO	Brackish RO	Brackish RO	Brackish RO	NF
Geometry	Spiral wound	Spiral wound	Hollow Fiber	Spiral wound	Spiral wound
Material	Polyamide	Composite Polyamide	Aramid	Cellulose Acetate	Composite Polyamide
Surface Area	300 ft ²	400 ft ²	9100 ft ²	528 ft ²	37 ft ²
Salt Rejection (min)	99.6%	99.0%	95.0%	98.0%	70% NaCl 95% MgSO ₄
Flux	5000 gpd*	12000 gpd	37000 gpd	10500 gpd	12500 gpd
Pressure (max)	1200 psi**	600 psi	600 psi	600 psi	250 psi
Feed Flow (max)	process dependent	75 gpm	49.5 gpm	36.4 gpm	70 gpm
Feed Temperature(max)	45 °C	45 °C	40 °C	40 °C	35 °C
pH	4-11	3-10	4-11	4-6	3-9
Turbidity (max)	1.0 NTU	1.0 NTU	1.0 NTU	1.0 NTU	1.0 NTU
Residue Chlorine (max)	0	0.1 mg/L ↓	0	1.0 mg/L ↓	0.1 mg/L ↓
Max Recovery	17%	15%	50%	20%	15%
Max Pressure Drop	Process dependent	10 psi	10 psi	15 psi	Process dependant

조한다. 복합막의 경우 비대칭막에 비해 막의 표면적을 훨씬 넓게 만들어 단위면적 대비 생산수 양이 많으며 염제거율이 월등히 높은 특성을 갖는다.

초기 개발된 셀룰로스 아세테이트계 역삼투 분리막은 운전가능한 pH가 좁고, 높은 압력으로 운전하여야 하며, 투과성능이 좋지 못하다는 점 등 여러 가지 단점으로 현재는 일부에서만 사용되고 있는 추세이다. 이에 반해 폴리아미드계막은 pH변화에 대한 안정성이 높고 낮은 압력에서도 운전이 가능하며, 제거효율도 또한 뛰어나 현재 사용하는 역삼투 분리막에서 주종을 이룬다. Table 1은 폴리아미드계 역삼투 분리막과 셀룰로스 아세테이트계 역삼투 분리막의 특성을 비교하였으며 Table 2에서는 RO와 NF, RO

중에서도 나선형타입(spiral wound type)과 중공사타입(hollow fiber type)의 막 물성을 비교하였다.

2.3. 폴리아미드계 역삼투막의 구조

상기 서술한 것과 같이 역삼투막은 지지층과 활성층으로 이루어져 있으며 지지층은 다시 polyamide 박막과 접한 다공성 polysulfone UF층과 기계적 강도를 높여주는 직물 또는 부직포로 만들어진 지지층으로 구분할 수 있다[5]. 지지층으로 사용된 직물 또는 부직포의 두께는 약 90~150 μm로 polysulfone 캐스팅 용액의 침투능과 접착력을 고려하여 선정하며, 대부분의 제조업체는 부직포를 사용하나 일본의 Toray사는 직물을 사용하기도 한다.

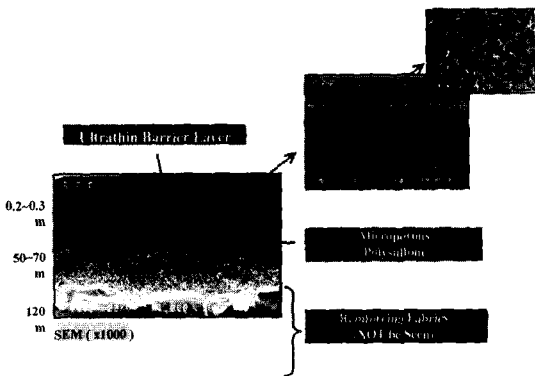


Figure 2. Typical construction of thin film composite membranes.

polysulfone 지지층은 미세 다공성 비대칭막으로 직물 표면에 polar aprotic 용매에 polysulfone을 녹인 용액을 얇게 바른 후 비용매계 용액에 quenching 시켜서 표면층과 다공층으로 이루어진 비대칭 한외여과막(ultrafiltration)의 형태로 만든다. 용액은 약 100~150 μm로 부직포 위에 캐스팅하며 quenching 후 용매가 빠져나가면 약 40~60 μm의 두께로 남게 된다. polysulfone 지지층은 분해분자량(MWCO)이 대략 50,000 수준의 한외 여과막으로 적용이 가능하다. 이렇게 만들어진 다공성 polysulfone 지지층에 다관능성 아민계와 다관능성 아실랄라이드계 화합물을 계면중합하여 polyamide 복합막을 만든다. polyamide 복합박막은 polysulfone 표면층에 얇게 입혀진 초박막 상태로 얻어지는데 그 두께는 대략 0.2 μm 미만으로 물질 분리를 담당하게 된다 (Figure 2).

2.4. 폴리아미드계 역삼투막의 분리특성

역삼투막 (RO) 또는 나노막(NF)은 정수 분야에서 사용되는 수처리 방법으로 물의 전달계수(transport coefficient)와 염의 전달계수에 의해 성능이 결정된다[4]. 전달계수는 특정한 온도, 압력, pH 농도에서 막의 단위 면적, 단위시간당 물 또는 염의 수송량이다. 일반적으로 물은 투과유량 (flux)으로 표시하지만 염은 투과율(salt passage)보다는 배제율(salt rejection)로 표시한다. 염제거율은 운전 조건에 따

라 달라지지만 전달계수는 막이 가지는 고유한 특성으로 막의 투과성능을 비교하는데 사용된다. 전달계수와 배제율(rejection)을 수식으로 나타내면 아래와 같다.

$$A = \frac{F_w}{(\Delta P - \Delta \pi)} \quad (1)$$

A = 물의 전달계수 (sec⁻¹ · Pa⁻¹)

F_w = 막 단위 면적당 투과유량 (m³ · m⁻² · sec⁻¹)

ΔP = 막 투과 전후의 압력 차이 (Pa)

Δπ = 막 투과 전후의 삼투압 차이 (Pa)

$$B = \frac{C_p \cdot F_w}{(C_b - C_p)} \quad (2)$$

B = 염의 전달계수 (m³ · m⁻² · sec⁻¹)

C_p = 생산수의 염농도 (mol · L⁻¹)

F_w = 막 단위 면적당 투과유량 (m³ · m⁻² · sec⁻¹)

C_b = 공급수의 염농도 (mol · L⁻¹)

$$R = \frac{C_f \cdot C_p}{C_f} \times 100 \quad (3)$$

R = 염 배제율 (%)

C_p = 생산수의 염농도 (mol · L⁻¹)

C_f = 공급수의 염농도 (mol · L⁻¹)

2.4.1. 압력 인자

일반적으로 생산 수량은 압력과 정비례하며 식(1)로 설명이 가능하다. 그러나 설계값 보다 높은 압력으로 운전할 경우 막의 지속적인 유량 감소를 볼 수 있다. 그 원인은 막의 압밀화(compaction) 현상과 막오염(fouling)으로 설명할 수 있다. 압밀화는 고분자 소재로 제작된 한외여과막(역삼투 분리막)에서는 지지층에서 주로 일어나며, 고압에 의해 투과수 방향으로 막이 찌그러지면서 공극률이 감소되기 때문에 발생한다. 또한 필요이상의 과도한 투과유량은 막면에서의 농도분극을 심화시켜 투과수의 수질 악화뿐만 아니라 막오염을 촉진하여 결과적으로

투과유량을 감소시킨다.

2.4.2. 온도 인자

온도에 따른 막의 물성 변화는 시스템의 엔탈피의 증감에 영향을 받는다. 운전 온도가 높을수록 막을 형성하는 활성층의 매트릭스가 이완되며 막을 통과하는 유량이 늘어나며 한편으로는 공급수(feed water)에 녹아있는 염의 활동성이 증가하여 염의 배제율도 낮아지게 된다.

2.4.3. 회수율 인자

회수율은 정제된 생산수량에 대한 투입된 공급수량의 백분율 값을 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 농도상승으로 삼투압이 증가하여 투과유량이 감소하고 염제거율이 낮아지게 된다. 실제 회수율 상승이 크면 클수록 ($\Delta P - \Delta \pi$) 값은 급격히 작아져 구동압력 자체가 기하급수적으로 감소하여 막의 기능을 잃게 된다. 또한 적정 회수율이상에서의 시스템 운전은 장기 물성의 측면에서도 심각한 문제를 유발하는데 특히 스케일링이나 파울링의 원인으로 작용하여 막의 수명을 급격히 단축시키게 된다.

2.4.4. pH 인자

공급수의 pH는 막의 유량 및 염제거율에 직접적인 영향을 준다. 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 실리콘의 용해도가 급격히 낮아져 스케일링 문제를

일으킨다. 또 카보네이트 또한 pH를 관리 수치 이상으로 올리면 문제가 된다.

2.5. 역삼투 분리막 소재 개발 과정

1959년에 Reid와 Bretion이 막의 소재로 사용가능한 셀룰로스 아세테이트 (cellulose acetate)를 발견하였고, Loeb & Sourirajan (UCLA)이 비대칭성 셀룰로스 아세테이트 개발을 성공하며 상업화 가능성을 보인 이래 Francis 등은 셀룰로스 아세테이트 복합 막막에 대한 개념을 정립하여 실용화하였다 (1964년). John. Cadotte는 PEI (폴리에틸렌아민)와 TDI(톨루엔 디이소시아네이트)의 계면중합을 통하여 NS-100 이란 복합막막을 만들었으며(1972년, North Star R&D Institute), 1978년 Filmtec에서 방향족 폴리아미드 복합막을 만들어 현재까지도 사용되는 역삼투막의 원천 기술을 개발하였다[7]. Filmtec의 FT-30은 그 물성이 다른 역삼투 분리막에 비해 월등히 우수하여 역삼투 분리막 시장을 독점하였으나 1992년 미국특허4,277,344에 관한 권리가 미국 정부로 이양됨으로서 여러 기업이 경쟁적으로 개발, 상품화 하였다. 가장 두드러진 부분은 1995년 Hydranautics에 의한 "ES-10"의 개발로 기존 역삼투막에 비해 높은 유량을 생산하는 막이 시장을 선도하였다. 한국에서의 역삼투 분리막은 1990년대 중반까지도 전량 수입에 의존하였으나 1995년 새한에서 개발, 1997년 상업화에 성공하였다.

역삼투 분리막의 개발 동향은 약 10년 주기로 구분할 수 있다. 1970년대는 역삼투를 이용한 막분리 방법의 상업화가 연구의 주를 이루었으며 1980년대는 1978년 Filmtec에서 출원한 특허 미국특허 4,277,344 방향족 폴리아미드 복합막을 피할 수 있는 공법이 주된 연구 과제이었다. 1990년대는 프레온 규제에 따른 대체 용매 공법 개발에 전력을 기울였으며, 2000년대에는 투과성능 향상뿐만 아니라 내오염성 부여 등 기능성 제품에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

기능상으로 볼때 개발 초기의 역삼투 분리막은

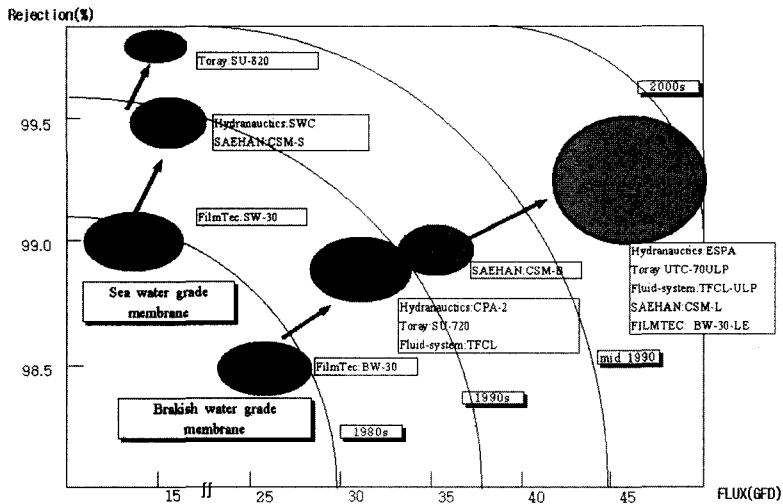


Figure 3. Recent trend of RO membrane development.

고순도의 투과수를 얻고자 하는 경우에 주로 사용되었지만, 오늘날 그 적용은 더 광범위하게 확대되었고, 설치나 운전 비용에 있어 더욱 더 경제적으로 발전해 오고 있다. 해외시장과는 달리 국내시장은 염수(brackish water)의 처리와 가정용의 간단한 정수처리 시장에서 급성장하였다. 역삼투막은 기술적인 면으로 판단할 때 실용화의 정착단계에 있지만, 분리막 시장은 동일한 막의 새로운 용도 개발이 아니라 막 자체가 보다 우수하거나 새로운 용도에 맞게끔 특화시켜 적용하기 때문에 지속적인 연구개발이 필요한 분야이다.

궁극적인 역삼투 분리막의 목표는 내염소성, 내화학적을 가져 세정이 용이하고, 높은 투과유량을 내며, 막오염이 작아 전처리 비용을 최소화할 수 있으며, 운전 경비 및 설치 경비가 작은 특성을 갖는 분리막 개발이라고 할 수 있다.

3. 역삼투 분리막 개발 현황

역삼투 분리막은 적용되는 막분리 공정이 다양하기 때문에 각각의 공정에 적합한 특화된 막이 요구되어지고 있다. 역삼투 분리막의 성능을 표현하기

위해 사용되는 염제거율, 투과유량, 산화안정성, 내열성, 내화학적 그리고 내오염성이 막의 선정 척도가 된다. CA계 막이 상용화 된 이래 각 부분별로 큰 발전을 이루어 왔으며, 고유량 막과 고염제거율 막, 그리고 이온 선택성을 갖는 막이 지금까지 가장 중요한 이슈로 개발되어 왔다. 이러한 개발 추세는 최근에 들어 내오염성막 개발로 흐름이 바뀌고 있다. 이러한 추세변화를 확인할 수 있는 연구 활동으로는 물성 향상을 위하여 막의 표면 구조에 관한 연구[7-9], 계면 중합 용매에 관계 연구[10], 표면 조성 연구[11], 개질 복합막 개발[12-13], 후처

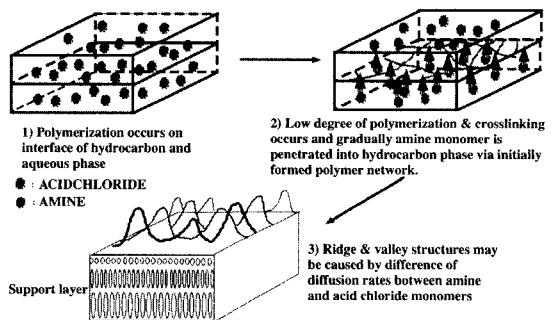
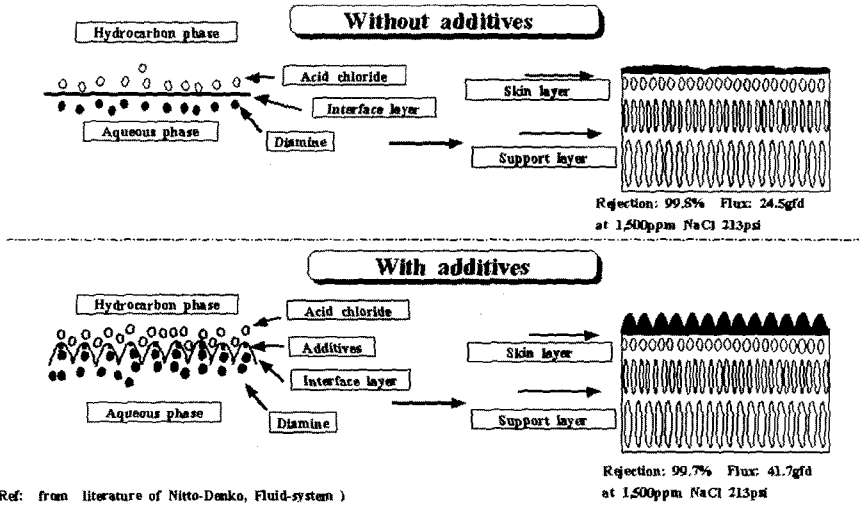
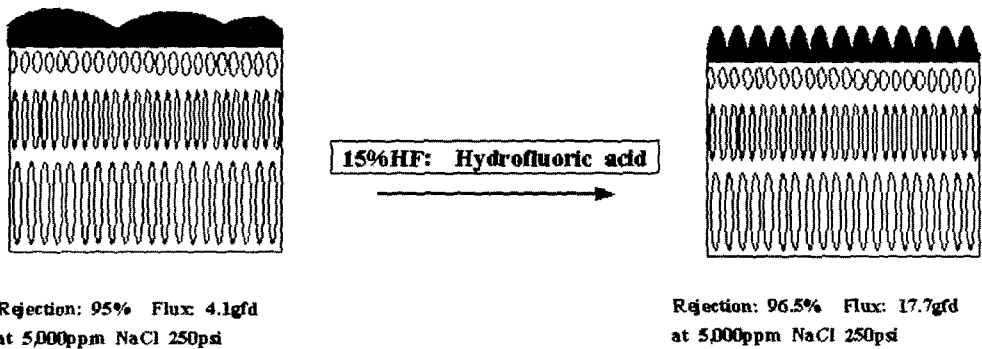


Figure 4. Typical mechanism of interfacial polymerization : formation of ridge and valley structure.



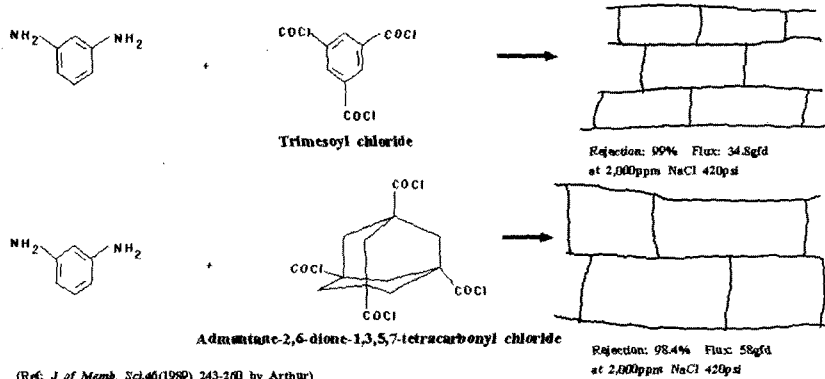
(Ref: from literature of Nitto-Denko, Fluid-system)

(a) Inducing the fluctuation in interfacial polymerization by adding the chemicals in solutions.



(Ref: *J of Memb. Sci.* 97(1994)231-249 by Mukherjee)

(b) Etching the surface : by using acidic chemicals.



(Ref: *J of Memb. Sci.* 46(1989) 243-260 by Arthur)

(c) Increasing the pore size : by using the bulky acid chlorides.

Figure 5. Preparation of high flux membrane.

리[14-19], 플라즈마 처리법[20-23], 모노머 그래프팅 방법[24,25], 표면구조-고분자 내부구조 상관관계연구[26,27] 등을 통하여 확인 할 수 있다. 이러한 연구결과를 바탕으로 막의 유량과 염제거율 부분에 있어 비약적인 발전이 가능하였다. Figure 3은 역삼투막의 개발 단계를 연대별, 물성별로 도식화한 그림이다.

3.1. 고유량 역삼투 분리막

1995년 Hydranautics의 고유량 역삼투막 “ES-10”의 출시 이후 대부분의 역삼투막 생산업체들은 역삼투 분리막의 유량 향상에 개발을 집중하였다. 역삼투 분리막의 유량 향상은 시스템에 사용되는 설비비용을 줄여주며, 에너지 절감, 운전비용 감소 등의 효과가 있다. 고유량 역삼투막은 막의 물성, 모듈의 제조기술, 후처리 기술 등 다양한 기술적 진보로 현재 역삼투 분리막 회사는 대부분 유량 차별화 제품을 생산 판매하고 있다. 고유량 역삼투 분리막 제막기술에서 있어서 핵심기술로 생각되는 표면조도(roughness) 조절을 통해 획기적인 개선이 일어났다. 아래 Figure 4,5은 고유량 막에 관한 연구로 첨가제효과 (a), 표면에칭(etching) (b), 합성방법개선(c)에 관한 핵심기술을 도식화한 것이다.

3.2. 내오염성 역삼투 분리막

내오염성 역삼투막(fouling resistant RO membrane) 개발은 현재 Trisep의 X-20, Filmtec의 FR, 그리고 Hydranautics의 LFC1,2 그리고 (주)새한외의 FE, FL 제품이 출시되어 상업화 되었으며, 지표수 처리 및 폐수 재활용 공정에서 사용되고 있다. 막오염(fouling)으로 부터의 안정성은 막분리 시스템의 영역 확장, 기존 시스템에서의 분리막의 수명연장, 운전 경비 감소 등의 장점으로 향후 분리막 시장을 이끌어 나갈 분야로 예상된다.

3.3. 고염제거용 역삼투분리막

가장 대표적인 것이 높은 제거율을 요구하는 해

수담수화용 역삼투막과 반도체초순수용 역삼투막이다. 해수담수화용 역삼투막은 고염제거율 해수담수화용 역삼투막 분야와 고유량 해수담수화용 역삼투막분야로 양분되어 발전해왔으며, 적용원수(feed water)의 특성 및 생산수 적용분야에 따라서 요구되는 분리성능이 다르기 때문에, 점차 고기능 고효율에 맞는 두 기술이 복합화하는 모습으로 진보할 것으로 예상된다[28].

해수담수화용 역삼투막은 해수로부터 가능한 높은 회수율을 유지한 상태로 음용수를 얻어내는데 필요하다. 일반적인 해수담수화용 역삼투막의 염제거율은 99.5%에서 회수율은 약 30~45%로 설계되고 있으나 최근 Toray의 99.8% 염제거율을 나타내는 막의 개발로 회수율 60%의 설계가 가능하게 되었다. 이러한 높은 회수율 시스템은 전처리 비용이 적고, 운전 경비와 설치 경비가 작은 특성을 갖기 때문에 고가임에도 불구하고 경쟁력을 갖고 있다.

반도체 초순수 제조공정에서는 높은 염제거율 뿐만 아니라 높은 저분자 유기물질에 대한 제거율을 동시에 갖는 역삼투 막이 요구된다. 반도체 제조공정에서 세척수는 TOC를 ppb 수준으로 관리되고 있으며 실제 일반 산업용 역삼투막은 사용이 곤란하여 보다 특화된 역삼투막이 요구되고 있다[29]. 현재 국내 반도체 라인에서 사용되는 초순수용 역삼투막은 전량 Toray사의 특품이 적용되고 있으며 그 외의 회사는 미국, 일본 전체에서도 적용 실적이 없어 현재 reference를 만들기 위하여 테스트 중이다. 물론, 반도체 회사의 모든 유틸리티 관리회사가 일본의 엔지니어링 업체임을 감안하더라도 Toray 외의 제품의 상업화실적이 없다는 것은 그만큼 높은 염제거율의 기술 확보가 어렵다는 것을 간접적으로 증명하고 있다.

3.4. 표준화

다양한 기술적인 진보와 용도 전개는 역삼투막 사업영역을 지속적으로 성장시켜왔다. 복합막막 모듈은 높은 성능을 지닌 해수담수화 막의 실용화를

가져왔으며 공업용수, 도서지방의 생활용수, 선박 조수기 등 여러 가지 상업 및 산업용으로의 적용을 가능하게 하였다. 막 제조 분야에서는 외관 크기, 접속 부품 등에서 규격화가 이루어져 있기 때문에 실제 현장에서의 막모듈의 교체가 쉽게 이루어지게 되었다. 이런 표준화, 범용화 역시 역삼투막 사업의 꾸준한 성장의 요인이기도 하다.

3.5. 시뮬레이션 프로그램

정보 처리 분야의 발전 또한 역삼투막의 진보를 가져다 주었다. 시카고 일리노이 대학에서 시작된 역삼투막에서 일어나는 분리현상을 컴퓨터 시뮬레이션 연구를 통한 해석은 엔지니어링 업체는 물론 역삼투막 제조사에서도 필수적인 연구분야로 인식되어 발전되어지고 있다. 알려진 프로그램으로는 Filmtec의 ROSA, Hydranautics의 RODESIGN, Osmonics사의 WINFLOWS32이 있으며 국내에도 새한의 CSM-PRO2000이 현장에 적용되고 있다. 분자 동력학, 삼투압, 역삼투압, 전해질의 확산 등의 물리화학적인 지식과 막 분리 운전에서 얻어낸 실험상수로 공급수의 수질 및 공급량, 역삼투압 모듈의 물성을 입력하면 적절한 역삼투 분리 시스템 공정도를 제시하는 수준으로 실용화 되었다.

3.6. 기초 과학 연구

분리하고자 하는 매질도 다양화되어 수용성 뿐만 아니라 비수용성 적용이 가능한 분리막에 대한 연구개발도 진행되어왔다. 이러한 여러 응용 분야에 적합한 역삼투막의 소재로서 보편적으로 요구되는 성질은 우선 높은 공급수 압력에 견디는 내압성, 그리고 내열성, 내염소성 및 친수성, 물에 대한 높은 투과성 등이다. 최근 의약 제조나 반도체 공업과 같은 고순도의 물이 다량으로 요구되는 산업이 활기를 띠고 있어 유기물 제거효율이 높은 분리막이 요구되고 있으며, 또한 각종 산업용 폐수의 처리 및 무방류 계에 의한 물의 재활용 문제가 대두됨에 따라 높은 투과성능과 내오염성을 겸비한 역삼투 분

리막에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

4. 내오염성 분리막

fouling의 인자를 알아낸다고 해도 재현성 있는 분리막을 제조하는 것 자체가 학계에서 진행하기에는 어렵기 때문에 내오염성 분리막에 관한 연구는 학계보다는 기업을 중심으로 진행되어왔다. 최근에 연구의 성과들이 활발하게 발표되어지기 시작하고 있다.

4.1. 막오염 원인과 기존 처방

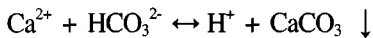
막오염(fouling)이란 원수 속에 존재하는 어떤 미지의 성분에 의해 분리막 표면에 피막을 형성 또는 분리막을 열화(劣化)시켜 투과유량 및 제거율을 감소시키는 현상이다. 실제 산업용 분리막을 사용하는 현장에서는 더 구체적으로는 막오염을 스케일링(scaling)과 구별 할 필요가 있고, 이에 대한 구별은 현장에서의 시스템 운전 시 이상 발생에 대한 처방과 응급처치를 용이하게 해준다. 막오염(fouling)은 미지 성분이 침전 없이 표면에 달라붙는 것이다. 즉 입자나 유기물질이 수압(hydraulic force) 또는 전기적 힘(electric force)에 의해서 막에 달라붙는 것이다. 반면에 스케일링(scaling)은 화학적 변화에 의해서 물질이 침전되는 것을 말한다. 예를 들면 카보네이트가 결정화 되어 침전되면서 막 표면에 침전되는 것이다. 물론 막오염(fouling)과 스케일링(scaling)은 동시에 일어날 수도 있다. 따라서 분리막 모듈의 해부를 통한 막표면 누적 물질의 화학적 분석을 통해 막오염(fouling)과 스케일링(scaling) 중 주된 원인을 찾아야하며 두가지 현상이 상호간섭을 일으키므로 내오염성은 보통 막오염과 스케일링 모두를 포함하여 고려한다. 역삼투막이 개발된 이래 막오염은 막사용에 있어서 가장 주된 문제였고 이를 해결하는 기존 방법으로는 분리막 개발 및 개선을 통한 방법보다는 다음에 예시하는 바와 같이 시스템 측면에서 해결하려는 시도가 많았다[4,30-33].

4.1.1. 스케일링

스케일링(scaling)은 RO막에 유입된 공급수가 막을 통과하면서 농축됨에 따라 농축수축의 이온 성분 농도가 점점 높아지게 되어 이 농도가 특정염의 용해도 한계치(solubility limit)이상의 농도에 도달될 경우 이온으로 존재하던 성분이 결합되어 막에 침전되는 현상이다. 스케일링을 형성하는 염들은 CaCO_3 , CaSO_4 , BaSO_4 , SrSO_4 , CaF_2 , SiO_2 등이 있으며, 이들의 형성 여부는 막에 공급되는 유입수의 이온 농도, RO 시스템의 회수율 그리고 여러 염들의 용해도 한계치 값들에 의해 결정된다. 그러나 해수의 경우에는 지역에 따라 전체 이온 농도(TDS)는 다르지만 각 이온의 조성 비율은 거의 일정하기 때문에 일반적 운전조건 범위인 30-45%의 회수율 조건에서는 CaCO_3 스케일만이 문제가 되고 다른 염의 스케일은 문제가 되지 않는다. 위에 언급된 각 염들에 의한 스케일 형성을 방지하기 위한 시스템적 접근방법은 다음과 같다.

- 산첨가

RO 시스템의 원수로 사용되는 해수, 염수, 지하수 등은 CaCO_3 로 거의 포화된 상태를 유지하기 때문에 CaCO_3 에 의한 scale위험성이 존재한다. CaCO_3 의 용해도는 다음 반응식에 보인바와 같이 pH에 의존한다.



따라서 산을 첨가하면 평형이 왼쪽으로 이동하여 CaCO_3 가 용해된 상태로 유지하게 된다.

- scale inhibitor 첨가

scale inhibitor는 CaCO_3 , 금속 황화물(주로 CaSO_4 , BaSO_4 , SrSO_4) 그리고 CaF_2 등의 scaling을 억제하기 위하여 사용된다. scale inhibitor로 주로 많이 사용되고 있는 약품은 sodium hexametaphosphate (SHMP)이다.

- 기타

scaling을 방지하기 위하여 사용되는 방법으로는

Table 3. Iron concentration in feed water

Dissolved Oxygen in the RO feed	Feed pH	Max Permissible(ppm) Fe ²⁺ in the RO Feed
< 0.5	< 6	4.0
0.5-5	6-7	0.5
5-10	>7	0.05

Table 4. Performance data

	Flux	Rejection (%)	Flux Reducing Rate (%)
MPD/TMC	20	96.0	-
RE4040 BN	28	99.1	(5)
RE4040 BL	37	98.7	(12)
RE2012 LP	45	98.4	(18)

양이온 교환 수지가 충전된 softner를 통과시켜 scaling을 형성하는 Ca이온 등을 Na 이온으로 치환시켜 scaling을 방지하는 방법 또는 lime softening 등의 방법이 사용되기도 한다.

4.1.2. 금속산화물

금속 산화물에 의한 막의 오염은 주로 Fe, Al, Mn 등에 의하여 일어나는데, 이들 성분은 공급수중에 함유되어 유입될 수도 있고 또는 전처리 공정에 사용된 장치의 부식 등에 의하여 형성되기도 한다. 금속산화물에 의한 막오염 중 가장 빈번하게 일어나는 것은 iron이다. 철(iron)이온은 Fe^{2+} 이온 형태로 존재할 경우 침전을 형성하지 않고 다른 2가 이온들과 마찬가지로 거의 대부분이 막에서 배제되어 막오염에는 문제가 되지 않지만 Fe^{2+} 이온이 O_2 나 Cl_2 등의 산화제에 의해서 Fe^{3+} 이온으로 산화될 경우 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 의 침전물을 형성하여 막에 오염을 일으키게 된다. Fe^{2+} 의 Fe^{3+} 로의 산화 정도는 원수 중에 함유된 Fe^{2+} 의 농도, 용존산소 농도 그리고 pH에 따라 크게 좌우되므로 다음 Table 3의 조건을 만족하도록 공급수의 Fe^{2+} 농도를 조절하여야 한다.

4.1.3. Colloid 물질에 의한 오염

콜로이드성 물질은 0.5 - 1 μm 의 크기를 갖는 입자로 각 입자마다 음전하를 띠고 있어 서로 응집하지 않고 안정된 상태로 용액 중에 부유하여 존재하



Figure 6. Photograph of fouling caused by scale of calcium.

지만, 모듈 내에 유입되어 농축된 이온들과 접촉하게 되면 각 입자의 전하층에 영향을 주어 서로 응집이 일어나 막에 오염을 일으키게 된다(Figure 6). 이러한 이유로 콜로이드를 일정 크기 이상 응집시킨 다음 침전조나 다층 여과기 등을 통과시켜 응집 입자를 제거해 주어야한다.

콜로이드에 의한 막의 오염 가능성을 예측하는 방법으로는 탁도와 silt density index(SDI) 값을 측정하는 방법이 있는데, SDI 값이 막의 오염을 예측하는 지수로 보편화되어 있으며, ASTM D4189에 측정 방법이 명시되어 있다. 즉, SDI는 0.45 μm 의 filter에 시험수를 30 psi의 일정 압력에서 통과시킬 때의 plugging 정도를 나타내는 지수이다. 측정 방법은 0.45 μm 의 filter를 설치한 다음 시험수를 30 psi의 일정 압력에서 통과시킬 때 초기에 500 ml의 시험수가 여과 되는데 소요되는 시간 T_i 와 일정시간(보통 15분) 경과 후 500 ml를 여과하는데 소요되는 시간을 T_f 를 구하여 다음 식으로 계산한 값이다.

$$\begin{aligned} \text{SDI} &= \text{PI30} / T_t (\%) \\ &= (1 - T_i/T_f)/T_t \times 100 \end{aligned}$$

PI30 = plugging at 30 psi feed pressure

T_t = total test time in minutes(usually 15 but may be less if 75% plugging



Figure 7. Photograph of fouling caused by bio-foulant.

occurs in less than 15 minutes)

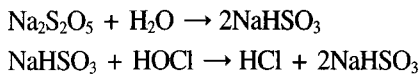
T_i = initials time(sec) required to collect 500 ml sample after test time T_t

4.1.4. 미생물(biological matter)에 의한 오염

공급수 내에 미생물이 있는 상태로 막 내부로 유입되면, 이들 미생물의 증식 및 성장에 의해 막면에 slime 이 생성될 수 있는 이상적인 조건이 된다. 따라서 미생물에 의한 막의 오염 가능성이 존재한다면 단시간 안에 막의 성능에 커다란 영향을 줄 정도로 심화될 수 있다. 미생물에 의하여 막에 오염이 생길 경우 나타나는 증상으로는 모듈내의 압력 손실(ΔP) 증가로 인하여 염배제율(rejection)이 나빠지며 투과수량이 적어지는 막 성능 저하 현상이 나타난다(Figure 7). 이 경우 Cl_2 가스나 NaOCl 등의 약품을 주입하여 원수 중에 함유된 미생물들을 제거 해주어야한다.

염소 주입의 효과는 염소 주입농도, 노출시간, 그리고 용액의 pH에 의존하게 된다. 일반적으로 RO 공정에서 염소는 원수 취수 설비에 주입되며, 주입농도는 유입수의 미생물 및 유기물 농도에 따라 다르게 되므로 전처리 설비의 모든 위치에서 잔류염소 농도가 0.5~1.0 mg/L를 유지하도록 초기 주입농도를 결정한다. 이때 RO 시스템에 사용된 막이 polyamide와 같이 Cl_2 와 반응하여 성능이 급격히 저

하되는 재질로 되어 있을 경우에는 Cl_2 로 처리된 공급수가 막에 유입되기 전에 활성탄 여과기를 통과 시키거나 sodium bisulfite($NaHSO_3$, SBS)등의 약품을 주입하여 잔류염소를 제거해주는 dechlorination 과정이 병행되어야 한다. SBS는 sodium metabisulfite ($Na_2S_2O_5$)를 물에 용해시켜 제조되며, 다음과 같은 반응에 의하여 잔류 염소가 제거된다.



그리고 잔류 염소 제거를 위하여 SBS를 사용할 때 주의할 점은 SBS는 제조 농도에 따라 유효기간이 있으므로 이에 맞추어 용액을 사용하여야 한다.

4.2. 내오염성 역삼투분리막 연구동향

4.2.1. 표면구조

지금까지 알려진 바에 의하면 초기에 개발된 cellulose acetate 역삼투막의 경우 현재 일반적으로 사용되고 있는 TFC(thin film composite) polyamide 막에 비해 막오염현상이 상대적으로 적게 나타났다. CA막은 PA막에 비해 표면이 매우 부드러운 것으로 알려져 있기 때문에 CA막에 비해 PA막이 막오염이 심한 이유를 표면구조의 차이로 인한 결과로 예상할 수 있다. 이러한 현상이 더 확실하게 나타나는 것이 PA 막중에서도 regular flux 막과 high flux 막을 비교하는 결과에서도 알 수 있다. 이 경우도 표면이 더 거칠은 고유량(high flux)막이 일반

적으로 막오염이 심하게 나타난다. Figure 8은 분리막 종류에 따른 FE-SEM 사진으로 유량과 표면 거칠기 관계를 보여준다. 이러한 이유로 고유량 막의 경우에는 수명 문제 때문에 산업용에 사용하지 못하고 가정용으로만 사용하는 경향이 있다.

기존 막의 투과유량을 높이는 노력은 최근까지 좋은 성과를 거두어 기존 막 대비 2~3배의 향상된 투과유량을 확보하였다. 그러나 이에 맞추어서 막 표면의 거칠기 또한 기존 막보다 상당히 거칠어져 막오염 현상은 오히려 심화되는 현상을 보였다. 사실상 막 표면적을 높이기 위해서 거칠어진 것이지만 최근 연구에 의하면 단순히 막 표면적 증가에 의한 효과뿐만 아니라 막 내부 밀도 즉 polymer chain 간의 mobility 또한 중요하다고 발표된 사례가 있으며, 표면적 증가에 따른 투과유량 증가가 선형적이지만은 않다는 결과도 보인다. 따라서 기존 단량체를 사용하면서 적절한 첨가제 및 촉매를 사용하여 투과유량은 기존 막과 유사 또는 향상시키면서 표면 거칠기는 기존 막과 유사 또는 하향시키는 연구가 진행되고 있다. 이와 함께 solid NMR의 분석기술 발달로 polymer chain mobility를 역삼투막 성능과 함께 해석하고자 하는 시도가 이루어지고 있으며 이 분석법 역시 내오염성 역삼투막 개발에 큰 진보를 가져오리라 예상된다[26,27,34].

Figure 9는 표면의 거칠기와 유로제(spacer)의 영향에 따른 막오염 발생 현상을 설명한 그림이다. 아래와 같은 과정으로 막오염이 일어나게 되고 이런 것이 반복적으로 일어나면서 막 표면전체에 걸쳐 오염물질이 누적된다. 특히 미생물의 경우는 얇은 organic 또는 bio film이 형성되면서 필름두께가 두꺼워지는 현상이 발견된다. 만일 이런 필름이 적절한 시기에 chemical cleaning 등의 방법에 의해 제거되지 못하고 한계두께까지 두꺼워지면 더 이상 막의 성능을 회복시킬 수 없게 된다. Figure 9(a)의 A, B는 모두 polyamide 막이며 A는 기존의 저유량 (17~23 gfd) 성능을 보이는 반면 B는 고유량 (35 gfd 이상)의 막을 개념도로 나타낸 것이다. 또 Figure 9(b)의 spacer와 flow water

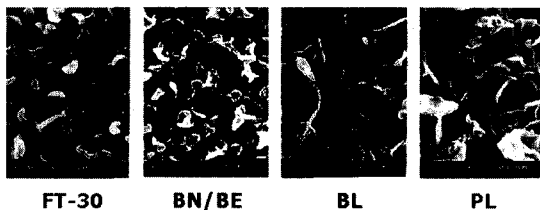


Figure 8. SEM photograph of saehan industries products (regular grade;BN/BE, high-flux grade;BL, advanced high-flux grade;PL) and Filmtec product(FT-30).

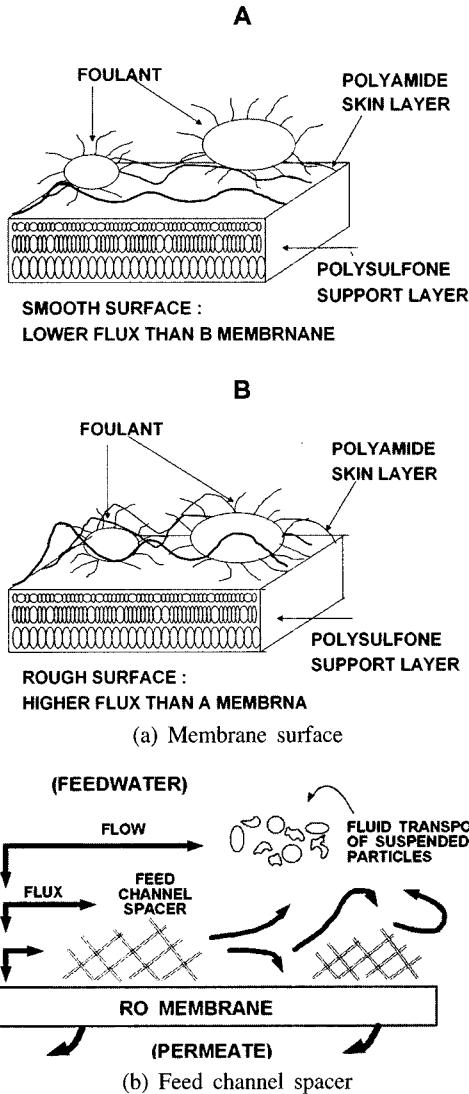


Figure 9. Effect of roughness in fouling phenomena.

의 거리에 따른 유속의 차이를 보임으로서 막오염에 영향을 주므로 유로체의 조직구조, 두께, 방향 등을 고려하여 선정하는 것이 중요하다.

Figure 10은 구상 입자인 경우 유체와 입자에 작용하는 힘들 간의 관계를 나타내었다. biofilm은 초기 foulants seed의 고착에 일정 시간이 소요되기 때문에 서서히 증가하다 일정정도 시간이 경과하면 축적이 시작된다. 초기의 seed는 막과의 접촉에 의

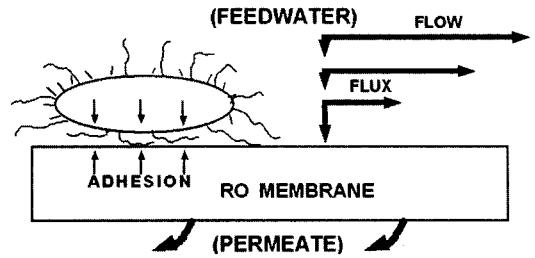


Figure 10. Adhesion of foulants.

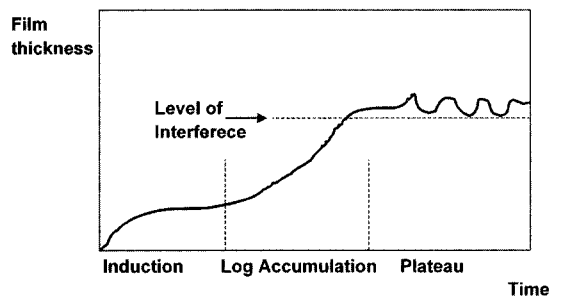


Figure 11. Time dependent development of bio-film accumulation.

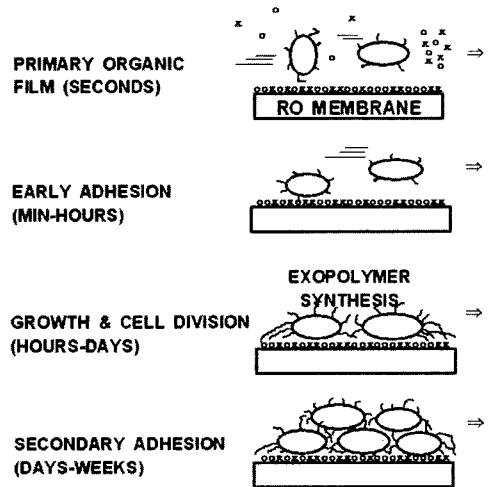


Figure 12. Fouling growth mechanism.

해 바로 고착되는 것이 아니라 수많은 결합-탈리가 짧은 시간내에 계속 반복되면서 서서히 쌓여가는 현상을 보여 준다. Figure 11에서 level of interference 단계를 지나는 것을 볼 수 있는데, 막의 수명을 보장 받기 위해서는 bio film이 포화되기 전에 세척해야 함을 시사해 주고 있다.

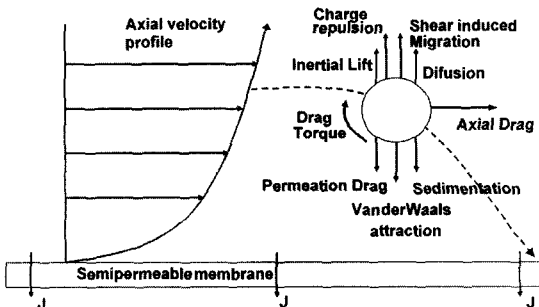


Figure 13. Force and torque acting on a charged, spherical particle suspending in a viscous fluid undergoing laminar flow in proximity of a flat porous surface.

Figure 12에서는 막오염이 일어나는 mechanism과 소요시간을 간략하게 설명하였다. 1차 오염은 미생물 또는 그 외 유기입자들이 아주 짧은 순간 막의 표면에 부착되었다가 떨어지는 현상이 반복되어 진행된다. 이런 과정이 막의 전범위에서 진행된다면 계속 부착되어 있는 영역이 점차 늘어나게 되며 이들을 먹이로 미생물이 막표면에 쌓이면서 얇은 층이 형성된다. 여기에 계속해서 미생물이 달라붙고 또는 성장하면서 exo-polymer라고 잘 알려진 gel layer가 형성된다. 이때 primary organic film의 형성 속도는 막 고유의 성질을 따르며, 미생물에 의한 2차 오염 속도는 공급수의 상태에 의존한다.

보통 필터를 사용할 때에는 tangential flow의 dead-end filter와 cross flow를 이용하는 cross flow filter로 구분되어진다. dead end filter의 경우는 보통 제거하고자 하는 물질이 유체의 흐름에 의해서 막표면에 전량 그대로 침적되는 형태이므로 막오염 현상이라는 것은 별로 의미가 없다. 그러나 cross flow filter의 경우는 단순히 표면구조의 거칠기에 의해서만 막오염이 일어나는 것이 아니라 유체의 흐름과 입자의 형태 막표면 거칠기 등이 복합적으로 상호 작용하면서 이루어진다. 특히 일반적으로 사용되는 나선형(spiral wound type)은 일종의 유로(流路) 역할을 하는 유입수 유로(feed spacer)와 이를 둘러싸

고 있는 막의 packing density도 매우 중요하다.

Figure 13에 표시된 힘들 중에서 다음 4가지의 주요한 힘이 주로 유체 속 입자에 작용한다.

- inertial Lift
- diffusion
- shear induced migration
- interaction induced migration

실제 막에서는 공급수의 유로를 형성하는 유입수 유로(feed spacer ; mesh)가 있어 매번 막오염 양상이 달라지는데 이는 유로 역할을 하는 mesh가 보통의 흐름에 vortex를 일으키기 때문이다. 이를 근거로 막오염을 방지하기 위한 방법으로 mesh구조, 두께 등을 변경하는 등의 방법이 많이 시도되었지만 근본적으로 막오염이 일어나는 곳은 막표면이므로 지금까지 결과로는 효과가 있어서 한계가 있다.

4.2.2. 표면전하

표면 구조 못지않게 최근 들어서 막오염의 원인으로 중요시되고 있는 것이 표면 전하이다[35-36]. CA 분리막의 경우 cellulose acetate구조 내에 전하를 가지고 있는 부분이 없기 때문에 표면 전하도 neutral하다. 그러나 PA막의 경우 대부분 생기는 말단기가 카르복실기(-COOH)이므로 표면전하가 통상의 운전조건에서 부분적으로 negative상태를 유지한다. 표면상의 전기 현상은 정적인 상태에서는 오히려 별 영향이 없지만 흐름이 있는 동적인 상태에서는 그 효과가 증대되는데, 실제 분리시스템에서 일어나는 전기적인 현상은 electro-kinetic(zeta) potential을 측정함으로써 관찰할 수 있다. Zeta Potential은 일반적으로 Figure 14과 같이 4가지의 다른 현상으로 분류한다. 이 중에서 실제로 분리막과 관계된 현상을 측정하는 것은 streaming potential이다.

Streaming potential은 전해질(electrolyte)액이 하전된 표면을 흐를 때 일어나는 것으로, 처음에는 hydraulic pressure에 의해서 유체의 net charge가 이

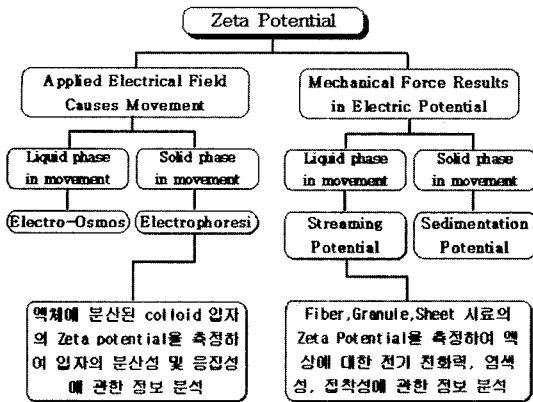
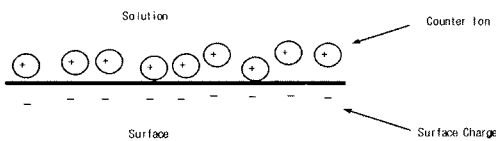


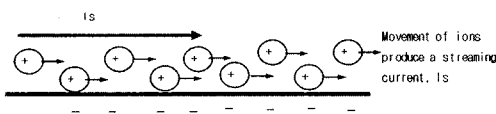
Figure 14. Various phenomena induced zeta potential.

동하며 이때 streaming current가 생기고 이것에 의해 전위차(potential difference)가 형성된다. 이 전위차는 charge의 기계적 이동을 방해하고 동시에 ion diffusion과 electro-osmotic flow에 의해 역전도(back conduction)가 일어난다. 이런 두가지 흐름에 의해 생긴 charge의 이동을 leak current라고 한다. 평형에 도달하면 streaming current가 leak current를 상쇄시키고 이 때 측정된 전위차가 streaming potential이다. 이러한 과정을 통해 charge에 의한 fouling seed를 trapping 하는 작용 기작을 농도 분극현상으로 설명하면 Figure 15와 같이 나타낼 수 있다.

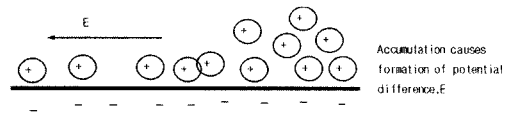
Step 1. Electric double layer at rest



Step 2. Movement of ions due to liquid flow



Step 3. Accumulation of ions downstream



Step 4. Leak current through liquid

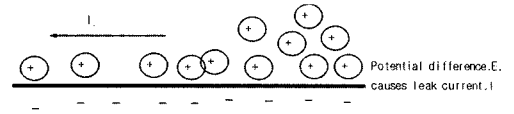


Figure 15. Streaming potential caused by charge accumulation.

Trisep사의 X-20으로 미루어보아 단량체를 달리 해줌으로써 표면 전하를 조절하는 것이 가능하다. 그러나 역삼투막의 skin layer를 만드는 계면중합에 맞는 단량체는 수용성 물질과 유기용액 층에 녹는 아실 할라이드로 나누어지고 이 두 단량체간의 반응성도 고려해야하므로 실제 조건에 맞는 단량체들을 합성하는 일은 매우 어려운 작업이 될 것으로 예상된다. 표면의 charge group을 없게 하거나 상대 전하를 삽입하여 중성으로 하는 것 또한 반응 조건에 맞는 단량체 제조를 더욱 어렵게 할 수 있다. 따라서 전하에 대한 효과 및 표면구조를 더욱 부드럽게 하는 단량체 설계와 이외에 세균에 대한 활성이 있는 functional group을 삽입하고 또한 표면에너지를 감소시키는 functional group을 함유하는 단량체를 선정하여 오염물질의 부착능력을 감소시키는 연구들이 진행되고 있다.

현재 Hydranautics(LFC1,2) 및 FilmTec(FR1,2)의 내오염성 역삼투 분리막이 채용하고 있는 방법은 2nd coating을 통한 표면 전하 조절기술로 추측되며, 주로 음이온으로 하전 된 막의 표면에 양이온을 갖고 있는 유기분자를 2차 코팅하여 전체적인 막표면 전하를 중성으로 만들어 주는 것으로 보인다. 그러나 반응성이 이미 저하된 말단기에 주로 반응시키는 것이기 때문에 말단기의 활성화 및 반응성 높은 유기 물질 또는 비교적 가혹한 반응조건이 있을 수 있으므로 자칫하면 기존 막물성을 저하시킬 수도 있다.

따라서 기존 회사들이 개발한 제품이 아직까지 내구성이 좋아야하는 해수담수화용에는 이 내오염성 역삼투막에는 적용 못하는 이유로 추측된다. 따라서 가혹한 반응 조건이 필요 없고 비교적 활성이 적은 grafting 물질을 사용할 수 있는 UV curing, plasma treatment 등을 사용하여 기존 물성을 유지시킬 수 있는 방법들이 대안으로 제시되고 있다.

4.2.3. 자동롤링을 통한 모듈의 최적화

나선형 모듈(spiral wound module)은 중공사막 형태의 모듈에 비해서 막오염현상이 많이 줄어든 모듈이지만 실제 현장에서는 더욱더 개선된 막오염 제어가 필요하다. Filmtec사의 BW30-FR 모듈은 자동 rolling으로 모듈의 진원도를 개선하여 내오염성을 향상시킨 제품이다. 또한 가공 시 모듈내부에 존재하는 dead-volume과 유체의 균일한 흐름을 방해하는 굴곡 등이 막오염을 심화시키는데 이를 해결하고자 한 것으로 판단된다. 실제 dead-volume이 예상되는 모듈 중심부의 파울링이 선행되고 그 주위로 오염물질들이 번져가는 것을 관찰할 수 있다. 따라서 membrane 자체의 내오염성을 증가시켜주는 것 외에도 모듈 자체의 개선도 필수적이다. 해결 방안으로 제시하는 가공방법은 아래와 같은 방법들이 있다.

- 자동 rolling
- 정밀 자동 재단
- 초음파 용착에 의한 접착

이와 같은 모듈의 제조 기술에 관한 개발 역시 내오염성 역삼투막의 개발의 한 영역으로 발전되고 있다

상기 내용과 같이 Dow의 계열사인 FilmTec은 산업용 모듈(8inch, 4inch)을 자동 롤링 할 수 있는 설

비를 도입하여 모듈의 진원도를 향상 시켰다. 이를 응용한 샘플을 멕시코 (화학공장 수처리 시스템)에 적용한 결과는 기존 모듈 설치시 biofouling이 매우 심각하게 발생하여 평균 2,3주에 1번씩 cleaning 실시하였으나 자동롤링된 모듈(BW30-365FR)은 동일 현장에 설치하여 2년동안 비교한 결과 24-25주에 1번씩 cleaning 주기를 갖는 결과를 얻었다고 발표하고 있다.

4.2.4. 제조메이커별 내오염성 역삼투 분리막 개발

현재까지 발표된 개발 사례는 Trisep사의 X-20, Hydranautics사의 LFC1,2, FilmTec의 FR grade, (주)새한의 FE, FL 등이 소개되고 있다. 각 회사별 제품 특성이 각각 다르며 적용 결과에 대한 자료 역시 주로 자체 평가 위주이기 때문에 우열 여부는 판단하기는 어려운 상황이다. 최초의 내오염성 제품은 Trisep사의 X-20으로 1997년으로 Dupont에서 개발한 기술을 바탕으로 기존의 가교된 아로마틱 폴리아미드(aromatic polyamide) 분리막을 폴리아미드드우레이(polyamideurea)구조로 대체함으로써 보다 표면조도가 낮은 분리막을 개발하였다.

Hydranautics사의 LFC1,2가 나온 것은 1998년이다. LFC1,2는 표면전하와 표면조도조절을 변화시킨 제품이다. 내오염성 분리막은 기존 사용되어지고 있는 RO모듈과 성능 및 운전 방법이 일치하면서 수명이 연장되었기 때문에 단기간에 시장 진입에 성공할 수 있을 것으로 예측된다. 다만 아직까지 필드테스트 결과가 부족하고 높은 투과유량 제품과 가장 막오염이 문제시되는 해수담수화용에는 아직 적용되고 있지는 못하는 실정이므로 앞으로 정착 시간이 어느 정도 소요될 것으로 판단된다. 첨

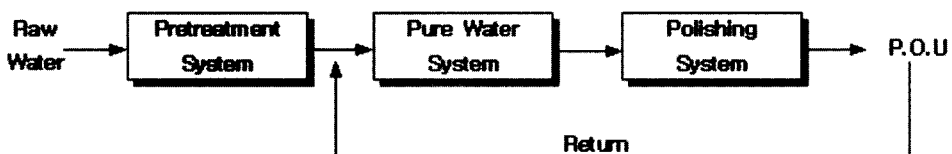


Figure 16. Typical ultra pure water system.

가제 및 촉매 선정을 통한 표면개질 기술은 1990년 대 들어서 가장 많은 발전을 한 기술로 low pressure membrane 기술은 여기에서 비롯되었다. 이 방법을

이용하여 표면 전하의 조절을 시도한 회사들이 많았으나 아직은 획기적인 개선은 찾아볼 수가 없다. 내오염성 제품은 주로 표면 전하가 음전하성(-)인

Table 5. Functions of system equipments

SYSTEM	EQUIPMENT	FUNCTION
Pre-treatment	응집여과장치, 응집및가압부상장치 활성탄여과장치	- 비교적 큰입자 제거(SS,Bacteria,Hardness) - pH조정제,살균제,응집제투입 - 유기물,산화물제거
	역삼투장치(1차,2차 RO)-2PASS 탈기탑(진공,탈탄산)	- 이온,입자,유기물제거 - 탄산가스,용존가스(DO),저분자유기물질제거
Pure water	이온교환수지 장치	- 이온,미립자,유기물질제거 - 처리수순도 10MΩcm이상 - 재생가능
	UV 살균장치	- 생균살균 - 살균성 파장 564nm부근 사용
Polishing	비재생형 이온교환장치	- 잔류하는 미량 이온,유기물제거 - 고순도 이온교환수지이용(비재생수지)
	TOC제거장치	- 자외선파장 185nm부근 사용하여 유기물질산화 제거 순수속의 TOC + 185nm UV접촉 → CO ₂ + H ₂ O
	한외여과막 장치	- 미립자 및 세균제거 - 막재질은 폴리술폰,폴리 아크릴계 - 운전압력: 4~6kg/cm ² - 최근 RO와 병행

Table 6. Property according to water sources

Raw water	Temp.	SiO ₂	Hardness	SS	TDS	Unit Price
Ground water	Low	Middle	High	Middle	High	Middle
Surface water	Ambient	Middle	Middle	High	Middle	Low
Tap water	Ambient	Low	Middle	Low	Low	High



(a) Surface Water



(b) Ground Water



(c) City Water

Figure 17. Pretreatment systems.

표면을 grafting을 통해 중성으로 바꾸어 막오염 원인 물질의 전기적 흡착기능을 제어하는 것으로 알려져 있다. Trisep사의 X-20의 경우는 기존 분리막의 단량체와는 달리 계면중합 후에 말단기가 중성 전하를 띄며, Hydranautics사의 LFC1,2의 경우는 2차 코팅으로 기존 분리막의 표면전하를 변화 시켜 준 것으로 추측된다.

Filmtec의 경우시제품(FR grade)을 내놓고 있으며, Filmtec의 제품 설명 자료에 의하면 FR grade는 기존 역삼투막 표면을 친수성 모노머를 graft-coating 방법으로 개질하고, 또한 모듈의 자동롤링으로 진원도를 향상시켜 유체의 막 투과 시 외류를 효과적으로 일으킴으로써 내오염성을 향상시킨 것으로 설명하고 있다.

4.2.5. 국내 내오염성 역삼투 분리막 개발

(주)새한의 내오염성 역삼투막 개발은 1999년 산업자원부 지원으로 개발을 추진하여 2002년에 과제를 완료하였다. 내오염성 분리막의 가장 중요한 요소는 막표면구조와 막표면전하, 그리고 유체 흐름을 원활히 하기 위해 모듈 제조법 개선 등이 핵심기술로 판단되어, grafting을 통한 표면 전하 조절 기술을 개발하였으며, 또한 생산 기술 부분으로 자동롤링을 통한 모듈의 최적화에 대한 설비 개선을 완료하여 내오염성 제품에 적용하고 있다. 하지만 위와 같은 기술이 개발했다 하더라도 fouling resistance가 non-fouling 일 수는 없고, 다만 현재까지 선진사들의 필드테스트에 의하면 모듈수명은 약

30% 연장되고 운전 경비는 약 50%까지 절감된다는 결과가 보고 되고 있는 실정이다.

5. 반도체 초순수제조용 역삼투 분리막

5.1. 초순수 제조설비 개요

초순수라 함은 수중에 포함되어 있는 불순물들을 거의 완벽하게 제거한 물로 정확하게 수치상으로 정의 되어있는 것은 없지만, 대부분의 초순수에 대한 기준 항목과 수질 기준은 생산되어지는 반도체 제품의 그레이드에 따라 조금씩 다르며, 제조시 요구되어지는 수질을 기준으로 정의하고 있다.

초순수는 그 사용처에 따라 수질 기준이 다르기 때문에 그 용도에 맞는 적절한 system의 설계가 가장 중요하다고 볼 수 있다. 초순수를 사용하는 분야는 대표적 것은 반도체 산업이고, 그 밖에 의약·의료산업, 원자력 발전용, fine chemical(약품조제 및 화장품 공업) 등이 있고, 각각 초순수의 수질에 대한 요구도 다르다.

5.2. 전처리 시스템

5.2.1. 전처리 시스템의 개요 및 중요성

전처리 시스템에는 응집 침전, 여과 흡착, 살균 등이 적용되고 있으며, 여과 시스템에 멤브레인을 적용할 수 있으나 안정성 및 경제성을 고려하여 특별한 경우를 제외하고는 대부분 멀티미디어 필터와 활성탄 필터를 병행하여 사용하고 있다. 전처리 시스템은 원수(raw water)의 source에 따라 구성이 달

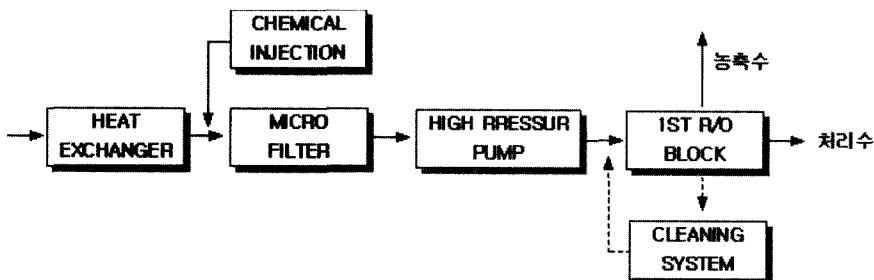


Figure 18. Flow diagram of 1st R/O System.

라질 수가 있다. 이는 후단에 일반적으로 설치되는 RO멤브레인 시스템의 오염물 부하가 큰 관계를 가지고 있다. 전처리 시스템의 전반적인 효율에 따라 후단 멤브레인 시스템의 유지 관리 및 운영에 큰 차이를 낼 수 있으므로 전처리 시스템의 효율적인 운영이 초순수 시스템의 전반적인 운영에 있어서의 중요한 key-point로 볼 수 있다.

5.2.2. 전처리 시스템의 구성방법

전처리 시스템은 그 구성 방법에 있어서 원수의 종류에 따라 일반적으로 나누어지게 되는데 원수 성상별 일반적인 수질과 이에 따른 전처리 시스템의 구성은 다음과 같다.

전처리 시스템은 원수 수질에 따라 그 구성이 다를 수가 있는데 대부분의 전처리 시스템의 주 목적은 일반적으로 후단 RO시스템에 fouling을 유발할 수 있는 SS성분, 박테리아, 경도성분의 제거 및 분리이므로, 이런 오염 물질들을 얼마나 경제적으로 제거할 수가 있느냐가 전처리 시스템의 구성에 있어서 가장 중요한 부분이라고 할 수 있다. 원수로 강물이나 호수수를 사용할 경우 또 한가지 고려해야 될 중요한 사항은 계절에 따른 원수 성상의 변동에 대한 1차 응집 침전 및 후단 여과장치의 효율적 운영이다. 이것이 효율적으로 운영되지 않을 시는 후단 RO시스템의 잦은 fouling현상으로 인한 운영비용의 증가 및 지속적인 처리수 물량 확보에 어려움에 직면 할 수 있다.

5.3. 초순수 제조용 역삼투 분리막

순수제조 시스템의 가장 핵심적인 부분이라고 할 수 있는 역삼투(Reverse Osmosis) 설비는 수중의 이온성 물질들을 분리시켜 제거하는 목적으로 사용되며, 역삼투 설비에 들어가는 핵심 부분인 멤브레인은 국내의 경우 지금까지 경쟁사(Toray, Filmtec, Hydranautics) 제품으로써 주로 수입에 의존하며, 주로 spiral wound type이 널리 사용되고 있다. 순수 및 초순수에 쓰이는 RO시스템 구성은 통상적으로 유입수의 온도를 일정하게 유지시켜 주기 위한 열교환기, 부유물질의 유입을 방지하기 위한 마이크로 필터, 가압장치인 고압펌프와 이에 따른 RO블록, 필요에 따라 chemical injection Unit 그리고 마지막으로 cleaning 시스템으로 구성 되어진다.

RO 시스템의 적용에 있어서 또한 중요한 포인트로는 회수율 및 농축수의 처리문제이다. 통상적으로 초순수 시스템에서는 2 Pass RO시스템으로 구성되며, 이 경우 1차 RO시스템의 회수율을 75%로 하고 2차 RO시스템의 회수율을 90% 정도로 설계하는 것이 시스템운영 및 전체 프로세스 상에 합리적인 구성이 될 수 있다. 농축수의 처리 또한 중요한 설계 인자로 작용하는데 1차 RO의 경우 농축수를 원수로 재사용할 경우 TDS상승에 의한 멤브레인의 분리효율 및 일관된 처리수 수질의 공급 관계를 정확히 check해야 하며, 이것이 어려울 경우는 중수로의 사용 검토를 해야 할 필요가 있다. 또한 2차 RO System의 경우는 농축수 수질이 일반적으로 1차 RO 유입수의 수질보다 양호하므로 원수로

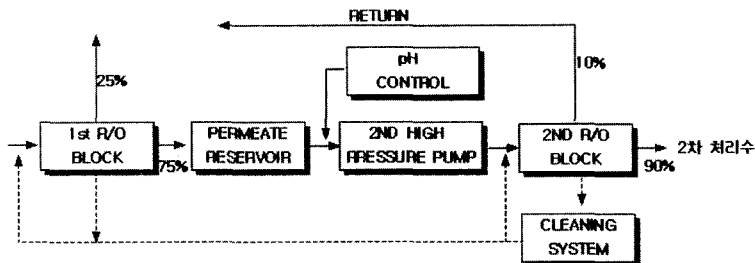


Figure 19. Flow diagram of 2nd R/O system.

Table 7. Quality of Product Water

Items	Resistivity	Particles	Bacteria (>0.05um)	TOC	Silica	DO	Ion
Quality of UPW	>18.2 MΩ-cm	<5 ea/ml	<1 cfu/L	<1 ppb	<0.5 ppb	<1 ppb	<10 ppt

* Ion : Na, K, Ca, Mn, Cu, Zn etc.

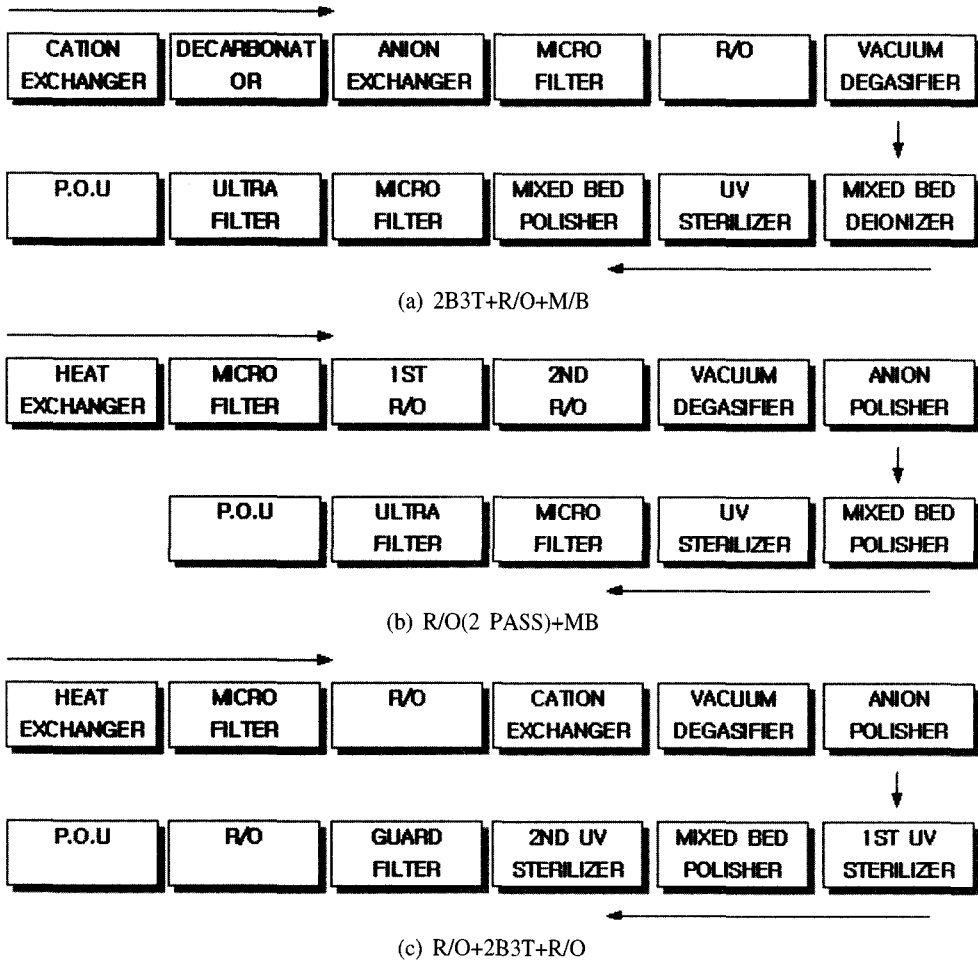


Figure 20. Polishing systems.

재사용이 가능하며 이를 근거로 물량 계산 및 system capacity를 결정해야 한다. 또한 2Pass RO시스템의 설계에 있어서 1차 RO 처리수의 일반적인 pH강하에 대한 2차 RO시스템의 유입수 수질 및 처리수 수질에 대한 pH보정도 시스템 설계에 있어서 고려해야 될 중요한 인자이다.

5.4. Polishing 시스템 구성 및 적용

5.4.1. Polishing 시스템의 개요

polishing 시스템은 진공탈기탑, UV살균장치, polishing mixed bed, cartridge filter, UF등이 적용되고 있으며 최근에는 진공 탈기탑 대신 촉매 수지법을 이용하기도 한다. 또한 최근에는 기존의 재생

식 이온교환수지법의 운영비 절감 및 보다 편리한 지속적인 유지 관리를 위해 EDR(Electro-Dialysis Reversal) 시스템이나, CDI(Continuous Deionization) 시스템과 같은 전기분해 방식의 장비를 설치하여 좋은 결과를 얻고 있다고 보고되고 있다. 초순수에서 요구되는 수질 항목 중 비저항치 이외에 DO(Dissolved Oxygen), TOC, silica, bacteria, particles 등과 같은 성분들이 polishing 시스템에서의 주 제거 대상물질이 되며, polishing 시스템의 구성 역시 초순수의 요구 수질에 따라 조금씩 상이하게 구성되어진다.

5.4.2. Polishing 시스템의 구성

Polishing 시스템은 그 구성방법에 있어서 초순수의 요구 수질에 따라 단위장치별로 필요성 유무를 판단하여 설치하게 되므로 최근 반도체의 일반적인 초순수 요구수질(처리수 수질)을 기준으로 그 구성방법의 비교를 살펴 보기로 한다.

최근 들어 R/O+MB의 방법을 대체하는 기술로 R/O+EDI 또는 R/O+CDI의 방법이 긍정적으로 검토되고 있으며, 또한 vacuum degasifier의 대체 기술로 membrane degasifier이나 촉매교환수지법 등이 검토되고 있다. Polishing 시스템의 단위장치 설계 및 선정에 있어서 여러 가지 중요한 parameter들이 있지만 그 중에서도 특히 중요한 것은 지속적인 초순수 요구 수질을 보증하는 것이고, 또한 그러한 시스템을 가장 경제적인 방법으로 도출해 내는 것이라 할 수 있다. 초기 투자비 및 처리용량당 운전비용을 정확하게 산출하기란 쉽지 않은 일이지만 국내에 설치되어 현재 가동 중인 여러 초순수 시스템들의 data들을 종합해 보면 알 수 있을 것으로 생각된다. 하지만 상세한 초순수 제조 설비들의 내용은 비공개적으로 운영되기 때문에 어느 시스템이 최적인가에 대한 객관적인 판단은 무척 어려운 것이 현실이다.

6. 결 론

이상에서 살펴본 바와 같이 역삼투 분리막은 기

존의 막에 비해 급격한 물성의 향상으로 산업 전분야에 걸쳐 그 용도가 점차 넓어져 가고 있다. 이러한 물성의 향상은 내오염성 제품 개발에 있어 볼 수 있듯이 어느 한 분야의 발달만으로는 이루어지기 힘들다. 복합적인 기술의 개발의 결과 바닷물 담수화부터 가정용 음용수에 이르기까지, 현재 국내에서도 그 수요가 점차 늘어나고 있는 추세이다.

막 분리를 이용한 수처리 분리막 개발은 국내에서 많은 연구가 진행되어 왔으나 대부분 중공사를 이용한 한외여과막을 상업화하였으며 역삼투 분리막의 연구는 일부 대학, 국가 연구기관, 그리고 기업에서 진행해오고 있다. 특히 (주)새한은 1996년 가정용 역삼투막으로 상업화에 성공한 이후 1997년 산업용 역삼투막, 1998년 고유량 역삼투 분리막, 1999년에는 나노여과막과 해수담수화용 역삼투 분리막을 개발하여 상업화에 성공하였다.

하지만 앞에서 기술한 경쟁사와 같은 개발 트렌드를 따라가지 못하면 아주 짧은 시간에 기술 격차가 벌어질 것은 자명하다. 물론 국내에서도 고염제거용 해수담수화 분리막, 고유량 산업용 분리막, 나노여과막, 그리고 내오염성 역삼투 분리막에 대한 상품화되었으며, 최근 반도체 초순수용 역삼투분리막 역시 개발 완료하여 상업화에 성공하였다. 하지만 갈수록 높아지는 기술 장벽과 정부의 관심 부족, 아직은 작은 국내 시장, 그리고 첨단 분석 기술 등의 이유로 앞서가는 기술의 도약을 따라가기에는 역부족인 실정이다. 그러므로 상업성, 기술성, 정책 지원 등을 감안한 역삼투 분리막 개발의 경우 다음과 같은 부분에 있어서 심도있는 연구가 진행되어야 할 것이다.

- 막막 및 모듈 제조 기술의 향상
고유량, 고염제거율, 내열성, 내산성, 내염기성 모듈의 제조
- 장기 물성 안정성 확보
낮은 막오염성, 세정 기술 개발
- 시스템 설계 기술의 향상
에너지 효율성 향상 시스템 개발, 저오염 시스템의 개발, 보다 효율적인 공정 설계

· 국가 정책의 관심

수자원 확보 방안으로서의 정수 시스템 검토, 해안 도서 지역의 정수 시스템 지원

즉, 멤브레인 제조업체는 보다 우수한 제품을 개발해야만 생존이 가능하지만, 그 외 시스템 개발, 엔지니어링 기술의 축적, 에너지 효율 향상, 국내 reference 확보 등에서 세계적인 경쟁력을 갖추기 위한 국가 연구기관과 시스템 설계, 엔지니어링 업체, 대학 등의 공동 노력이 필요하다.

참고문헌

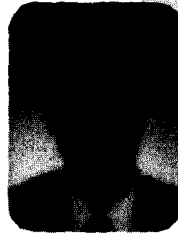
1. 한국 수자원 공사, “국내 해수담수화 기술의 타당성 조사”, 1995.
2. 김병덕 외, “역삼투식 복합 담수화 시스템 개발을 위한 요소 기술 개발”, 한국 기계연구원 1999.
3. M. E. Williams, D. Bhattacharya, R. J. Ray, and S. B. McCray, “Selected Applications Reverse Osmosis” in Membrane Handbook, K. K. Sirkar and W.Ho, eds, Van Nonstrand Reinhold, NY 1992.
4. M. C. Wilbert, F. Leitz, E. Abart, B. Boegil, 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.
5. M. Mulder, “Basic Principles of Membrane Technology (2nd Edition)”, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands 1996.
6. R. L. Reily, “Reverse Osmosis” in Membrane Separation System, U.S.Department of Energy, Pub. Department of Commerce, National Tech. Information Service, 5, 1 (1990).
7. R. J. Peterson, *J. Memb. Sci.*, 83, 81 (1993).
8. R. J. Peterson and J. Cadotte, “Thin Film Composite Reverse Osmosis Membranes” in Handbook of Industrial Membrane Technology (1990).
9. S. Y. Kwak, S. G. Jung, Y. S. Yoon and D. W. Ihm, *J. Polym. Sci.-Phys.*, 37, 1429 (1999).
10. V. Gekas, K. M. Persson, M. Walgren, and B. Sivik, *J. Memb. Sci.*, 72, 293 (1992).
11. C. R. Bartles, *J. Memb. Sci.*, 45, 225 (1989).
12. S. D. Arthur, *J. Memb. Sci.*, 46, 243 (1989).
13. K. Ikeds and J. Yomaschke, *Desalination*, 96, 113 (1994).
14. T. Sano, T. Shimomura and I. Murase, U.S Patent 4,268,662 (1981).
15. D. R. Abayasekara and R. L. Henn, U.S Patent 5,209,850 (1993).
16. F. F. Stengaard, U.S Patent 5,091,086 (1992).
17. H. P. Gergor, L. T. Hodgins, J. Kassotics, and E. Samuelson U.S Patent 5,059,659 (1991).
18. R. F. Fibiger, M. J. Colucci, D. J. Forgach, R. A. Wessing and D. L.Schmidt, U.S Patent 4,909,943 (1990).
19. H. D. W. Roesink, C. A. Smolder, M. H. V. Mulder and D. M. Koenhen, U.S Patent 4,798,847 (1989).
20. P. W. Kramar, Y. S. Yeh and H. Yasuda, *J. Memb. Sci.*, 46, 1 (1988).
21. M. Kawakami, Y. Yamashita, M. Iwamoto and S. Kagawa, *J. Memb. Sci.*, 19, 249 (1984).
22. A. T. Bell, T. Wedeven and C. Johnson, *J. Appl. Polym. Sci.*, 19, 1911 (1975).
23. J. Y. Lai and Y. C. Chao, *J. Appl. Polym. Sci.*, 39, 2293 (1990).
24. S. Takigami, F. Kobayashi and Y. Nakamura, *J. Polym. Sci. Part A: Polym. Chem.*, 25, 63 (1987).
25. F. Vigo and C. Uliana, *J. Appl. Polym. Sci.*, 38, 1197 (1989).
26. S. Y. Kwak, S. G. Jung, Y. S. Yoon and D. W. Ihm, *J. Polym. Sci.-phys.*, 37, 1429 (1999).
27. S. Y. Kwak, S. G. Jung and D. W. Ihm, *J. Memb. Sci.*, 158, 143 (1999).
28. A. Kulkarni, D. Mukhrjee, William and N. Gill, *J. Memb. Sci.*, 97, 231 (1994).
29. T. H. Meltzer, “High Purity Preparation” (2nd Edition), Tall Oaks Publishing, Inc. 1997.
30. 최광호, “막분리응용 : 역삼투”, 자유아카데미, 1996.
31. K. Riedl, B. Girade, R. W. Lenki, *J. Memb. Sci.*, 139, 155 (1998).
32. S. F. E. Boerlage, M. D. Kennedy, P. A. C. Bonne, G. Galjaard and J. C. Schippers, *Desalination*, 113, 231 (1997).
33. E. G. Dalton, *Desalination*, 113, 227 (1997).
34. 광승업, “고성능 역삼투 분리막의 성능 최적화에 따른 막 표면 형태와 박막 고분자의 화학 특성 및 분자운동 연구”, 서울대 공학연구소, 1999.
35. M. Elimelech and A. E. Childress, “Zeta Potential of Reverse Osmosis Membranes: Implication for Membrane Performance, Water Treatment Technology Program Report No.10”, U.S Department of The Interior, Bureau of Reclamation 1996.
36. M. Elimelech, W. H. Chen and J. J. Waypa, *Desalination*, 269, 113 (1994).

저자 프로필



홍성표

1993-1998. 서울대학교 천연섬유학과(학사)
1998-2000. 서울대학교 천연섬유학과(석사)
1999-2002. (주)새한 연구원
2002-현재. (주)새한 주임연구원
(712-712)경북 경산시 중산동 1 (주)새한
기술연구소 필터개발팀
전화 : 053-810-5372



윤성로

1978-1982. 경희대학교 섬유공학과(학사)
1983-1985. 서울대학교 섬유고분자공학과
(석사)
1986-1991. (주)제일합섬 연구원
1991-1997. (주)제일합섬 선임연구원
1997-2000. (주)새한 수석연구원
2000- 현재. (주)새한 책임연구원
(712-712)경북 경산시 중산동 1
(주)새한 기술연구소 필터개발팀
전화 : 053-810-5371



김연수

1981. 경북대학교 고분자공학과(학사)
1981-1987. (주)제일합섬 사원
1987-1991. (주)제일합섬 중합기술과장
1992-1999. (주)제일합섬 중합생산팀장
1999-2002. (주)새한 생산담당이사
2002-현재. (주)새한 공장장
2003-현재. (주)새한 기술연구소장
(730-707)경북 구미시 공단동 287
(주)새한 기술연구소
전화 : 054-469-5006