



TECHNICAL MANUAL

REVERSE OSMOSIS MEMBRANE



Toray Advanced Materials Korea Inc.

1. 도레이첨단소재

- 1-1. 주요 사업장
- 1-2. 회사 연혁
- 1-3. 역삼투필터 개발 이력

2. 역삼투분리막(Reverse Osmosis Membrane) 개요

- 2-1. 개 요
- 2-2. 역삼투 원리
- 2-3. 역삼투막의 종류
- 2-4. 역삼투막의 특성
- 2-5. **CSM**의 성능

3. 역삼투분리막 모듈 **CSM**

- 3-1. CSM 역삼투필터의 모델명
- 3-2. 염수(brackish water)용 멤브레인
- 3-3. 내오염성(Fouling resistant)용 멤브레인
- 3-4. 저압(Low Pressure)용 멤브레인
- 3-5. 해수(Sea Water)용 멤브레인
- 3-6. 나노(Nanofiltration)용 멤브레인
- 3-7. 상수(Tap water)용 멤브레인
- 3-8. 한외여과(Ultrafiltration)용 멤브레인
- ※ 가정용 역삼투분리막

4. 물화학(Water Chemistry)

- 4-1. 개 요
- 4-2. 주요 분석 항목
 - 1) 일반적인 이온
 - 2) 기타 이온
 - 3) 수질의 일반적인 지표
 - SDI(Silt Density Index)
 - 탁도(Turbidity)
 - 제타전위(Zeta Potential)
 - SCD (Streaming Current Detector)
- 4-3. 분석 항목별 특성
 - pH
 - 알칼리도(Alkalinity)
 - SO₄(Sulfate)
 - Cl(Chloride)
 - F(Fluoride)
 - NO₃(Nitrate)
 - S(Sulfide)
 - PO₄(Phosphate)
 - 실리카(Silica)

- 경도(Hardness)
- Na(Sodium)
- Fe, Mn(Iron and Manganese)
- Ba, Sr(Barium and Strontium)
- Al(Aluminum)
- Cu, Zn(Copper and Zinc)

5. 전처리(Pretreatment)

- 5-1. 개 요
- 5-2. 스케일 제어 관련 이론
 - 농축수에서 염농도
 - LSI (Langelier Saturation Index)
 - SDSI(stiff and davis saturation index)
 - 용해도곱(solubility product)
- 5-3. 스케일 제어
 - 1) 산 주입(Acid Injection)
 - 2) 스케일 억제제 및 분산제
 - 3) 연수화(Water Softning)
 - 강산성 양이온 교환 수지
 - 약산성 이온교환수지
 - 4) 석회(lime)를 이용한 연수화
- 5-4. 산화제의 제어
- 5-5. 파울링 제어
 - 1) 일반 여재를 이용한 여과
 - 2) 산화 여과(oxidation filtration)
 - 3) 응집(coagulation)
 - 4) 카본여과(activated carbon filtration)
 - 5) 일반 마이크로필터 여과

6. 운전(Operation)

- 6-1. 개 요
- 6-2. 시운전
 - 1) 운전전 확인 항목
 - 2) 시운전 순서 및 방법
- 6-3. 주기적 관리항목
 - 1) 전처리 설비
 - 2) 역삼투 설비
 - 3) 작업일지 기록
- 6-4. 데이터 보정
 - 1) 염제거율
 - 2) 차압
 - 3) 보정된 생산수량

7. 세정(Cleaning In Place)

- 7-1. 개 요
- 7-2. 역삼투분리막의 오염 발생 원인
- 7-3. 오염물질 분석
- 7-4. 세정 시기
- 7-5. 세정조의 크기 및 세정액의 양
- 7-6. 세정 과정
- 7-7. 세정 약품
- 7-8. 미생물 방지 약품

8. 역삼투분리막 모듈 교체

- 8-1. 베셀 열기
- 8-2. 역삼투분리막 모듈 교체
- 8-3. 베셀 닫기

9. 문제해결(Trouble Shooting)

- 9-1. 개 요
- 9-2. 염제거율이 감소한 경우 문제파악
 - 1) 계측기 보정
 - 전도도 측정기 / 유량계 / 압력계
 - pH / 온도
 - 2) 염 제거율이 낮은 부분 파악
 - 각각의 베셀 생산수 TDS 검사
 - 베셀내 모듈별 수질 측정
 - 모듈의 개별 물성 측정
- 9-3. 염제거율 감소 원인과 방지
 - 1) 첫번째 모듈의 염제거율 저하원인
 - 2) 마지막 모듈의 염제거율 저하원인
 - 3) 부분적으로 염제거율이 낮은 경우
- 9-4. 차압의 증가 원인 및 방지
- 9-5. 분석적 접근

1-1. 주요 사업장

■ 본 사

주 소 : 서울특별시 강서구 마곡동로10길7 한국도레이R&D센터

■ 기술연구소

주 소 : 경상북도 구미시 4공단로 249-29

■ 구미 1공장

주 소 : 경상북도 구미시 구미대로 102

■ 구미 2공장

주 소 : 경상북도 구미시 1공단로 4길 141-11

■ 구미 3공장

주 소 : 경상북도 구미시 3공단2로 300

■ 구미 4공장

주 소 : 경상북도 구미시 4공단로 249-29

■ 구미 5공장

주 소 : 경상북도 구미시 산동면 도종리 5산업단지 하이테크밸리 7-1-1블록

■ 군산 공장

주 소 : 전라북도 군산시 새만금북로 90

■ 유구 공장

주 소 : 충청남도 공주시 유구읍 유구마곡사로 122

■ 안성 공장

주 소 : 경기도 안성시 공단1로 90

1-2. 회사연혁

- 1999년 도레이새한(주) 설립
- 2000년 기술연구소 설립
- 2001년 대한민국 에너지혁신 경영대상 수상
- 2002년 IT소재산업 진출
- 2003년 국제 안전보건경영시스템(OHSAS 18001) 화섬업계 최초인증
- 2004년 첨단소재연구센터 설립
- 2005년 구미4공장 기공
- 2006년 2층 FCCL 메트로알 사업진출
- 2007년 폴리에스터 광학 전용라인 준공
- 2008년 구미3공장 태양광발전 개시
- 2009년 기술연구소 신축
- 2010년 도레이첨단소재(주)로 사명변경
- 2011년 에너지경영시스템(ISO 50001) 인증획득
- 2012년 자회사 티시케이텍스테일 설립
- 2013년 슈퍼 엔지니어링 플라스틱 PPS 사업진출
- 2014년 세계최초 일관생산체제 PPS군산공장 설립
- 2015년 자회사 티시케이마이크로필터 설립
- 2016년 구미5공장 기공
- 2017년 중국자회사 TAK첨단박막남동 (TFN) 개업식
- 2019년 한국도레이 R&D센터 준공

1-3. 역삼투분리막 개발 이력

- 1990년 분리막 개발 착수 (제일합섬 기술연구소)
- 1993년 LAB. 개발 완료
염수(brackish water) & 해수(sea water)용 역삼투분리막
- 1994년 (日) 후생성 승인 획득 (3월)
(美) F.D.A. 승인 획득 (6월)
시험 생산설비(pilot plant) 및 평가설비 제작 완료
삼성전자 정수기용 가정용 분리막 생산·판매
분리막 판매팀의 영업 개시
삼성그룹 기술상 수여
산업용 분리막 삼성 계열사 테스트 실시
- 1995년 연구소 설비 이전 및 공장 건설 (경북 경산)
가정용 분리막 본격 판매 개시
- 1996년 산업용 분리막 본격 생산 및 판매
중국, 대만, 인도 등 아시아지역에 수출 시작
- 1997년 장영실상 수상 (IR52, 2월) -- 매일경제
생산 설비 증설 (산업용 8040 생산 능력 : 2만개/년) -- 경북 경산
가정용 정수기 분리막 시장 점유율 : 50%이상
저압용(LP, pumpless) 분리막 개발
KT마크
ISO 14001, ISO 9002
- 1998년 해수용(SW) 분리막 해군적용
- 2000년 내오염성 역삼투분리막 개발
- 2001년 고염제거용 해수담수용 역삼투분리막 개발
- 2003년 초순수용 역삼투분리막 개발
- 2009년 신성장동력 경영대상 수상
- 2011년 내오염성 해수담수화용 역삼투 분리막 개발
고염제거용 내오염성 역삼투 분리막 개발

- 2012년 설페이트 제거형 나노 분리막 개발
- 2014년 1가/2가 분리형 나노 분리막 개발
전착도료 및 식품 정제용 한외여과막 개발
정삼투(FO) 분리막 개발
- 2015년 저압용 내오염성 역삼투 분리막 개발
탈산성수 가정용 나노 분리막 개발
- 2016년 내산성 나노분리막 개발
- 2017년 압력지연삼투(PRO) 분리막 개발
- 2019년 양전하필터(Olbio-Cut) 개발

2

역삼투분리막(Reverse Osmosis Membrane) 개요

2-1. 개 요

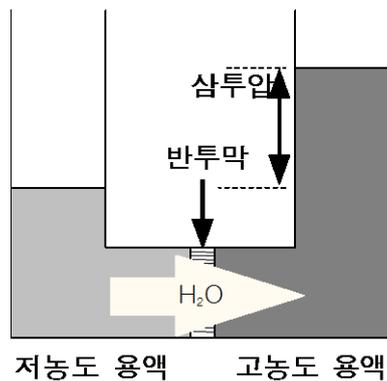
산업이 발달하고 인구가 도시에 집중되어, 산업폐수 및 생활하수로 인한 수질오염이 심해지고, 강수량의 등락에 의한 용수부족이 보편화되어, 용수원의 확보 및 양질의 순수생산이 어려워지고 있는 것이 현실이다. 이에 따라 필요한 순수를 얻기 위한 노력이 계속되고 있으며, 물 속의 불필요한 이온들을 제거하기 위해 역삼투법(reverse osmosis), 전기투석법(electro dialysis), 증류법(distillation) 및 이온교환(ion exchange) 등의 방법이 개발되어 왔다. 이 중 에너지 소비량이 적고 운전이 간편하며, 자동화가 쉬운 역삼투법에 대한 관심이 고조되고 있다. 원수의 화학적 산소요구량(COD)이 4~10ppm이고 증발잔류물(TDS)이 100ppm이상인 물에서는 역삼투법을 활용하면 효율적으로 양질의 순수를 생산할 수 있다. 특히 유기물 오염이 심하고 미생물이 번식하고 있을 때는 활성탄 및 이온교환수지의 오염이 심해지므로 역삼투법을 이용하는 것이 효율적이다.

역삼투법은 최근 물 부족과 그에 따른 수질악화에 대응해 양질의 물을 확보하기 위하여 폐수재활용, 음용수 생산 및 초순수 생산 등에 적극적으로 활용되고 있으며, 특정 공업용수 처리, 물질의 분리, 정제, 농축 등의 다양한 응용 분야에까지 활발하게 적용되거나 검토되는 상황이다.

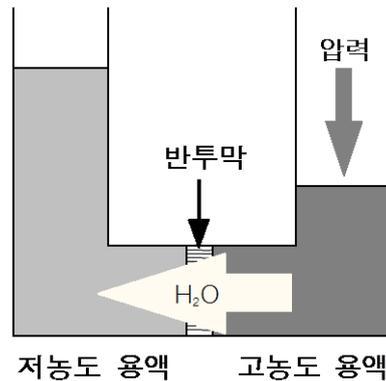
2-2. 역삼투 원리

역삼투막은 지지층(두께 약 $50\mu\text{m}$)과 분리기능을 가지는 활성층(두께 $0.2\sim 0.8\mu\text{m}$)으로 구성되어 있으며 역삼투 현상을 이용하여 용매와 용질을 분리하는 막이다.

농도차가 있는 두 가지의 용액을 반투막으로 나누어진 수조 또는 용기에 분리해 놓았을 때 일정한 시간이 경과하면 저농도 용액의 물이 고농도 용액 측으로 이동하여 수위에 차이가 생기게 된다. 이러한 현상이 "삼투"현상이며 이때 발생하는 수위 차이 만큼의 압력이 "삼투압"이다. 이러한 상황에서 고농도 용액 측에 삼투압 이상의 압력을 가하면 저농도 용액 측으로 물이 이동하게 되는데 이것을 "역삼투(reverse osmosis)"현상이라고 한다.



삼투현상



역삼투현상

2-3. 역삼투분리막의 종류

역삼투막은 재질 및 제조된 형태에 따라 과거에 많이 사용되던 비대칭막(asymmetric membrane)과 복합막(thin film composite)으로 나뉘며 각각의 특징은 다음과 같다.

◎ 비대칭막(Asymmetric Membrane) ... 셀룰로오스계(cellulose acetate, CA type)막

Lobe와 Sourirajan에 의해 개발된 막으로 두께가 100~200 μm 의 반투막이다. 이 막은 두께가 0.25~1 μm 의 조밀한 활성층과 수십 μm 정도의 세공이 다수 존재하는 스폰지 형태의 지지층으로 구성되며 이 두 층이 같은 재질로 되어있는 것이 특징이다. 이들 두 층 가운데 조밀한 구조의 활성층만이 염의 분리작용에 영향을 주며 지지층은 활성층이 고압에서도 견딜 수 있도록 지지하는 역할을 한다.

염의 분리작용을 하는 활성층의 두께가 전체의 1/1000 정도로 얇은 것은 물의 투과에 대한 저항을 감소시켜 물의 막 투과 속도를 증가시키기 위함이다. 활성층을 이용하여 고압으로 염을 제거할 때 압력이 증가함에 따라 염제거율은 상승한다.

◎ 복합막(Composite Membrane) ... 폴리아미드계(polyamide, PA type)막

복합막은 막의 분리기능을 담당하는 활성층(비대칭막의 조밀층)과 지지층(미세다공층)이 기본적으로 다른 재질로 구성되어 있다. 이 막의 제법은 막 두께를 얇게 하면 막 투과 유속이 증가한다는 용해 확산설을 기초로 하며 CARNELL & CASSIDY법, FRANCIS법 및 초박막을 다공층 지지체에 직접 코팅(coating)하는 방법 등이 있다. 현재는 주로 계면중합법을 이용하여 역삼투 복합막을 제조한다.

복합막은 비대칭막에 비해 막의 표면적이 넓어서 단위압력 대비 막 투과 유량이 많으며 염제거율이 월등히 높은 특성을 가진다.

◎ 폴리아미드계막과 셀룰로오스계막의 비교

과거 역삼투분리막(reverse osmosis membrane)이 최초 개발된 시점에서 많이 사용된 셀룰로오스계막은 운전 가능한 pH범위가 좁다는 점, 높은 압력을 사용하여 운전에 필요한 비용이 많이 든다는 점, 미생물 방지를 위해 염소를 투입해야 된다는 점 등의 여러 가지 단점 때문에 현재는 거의 사용되지 않는 추세이다. 이에 반해 폴리아미드계막은 셀룰로오스계막과 비교할 때 pH 변화에 대해 안정성이 높고 낮은 압력에서도 운전이 가능하며, 염 제거효율까지 뛰어나 현재 사용되는 역삼투분리막의 주종을 이루고 있다.

2

역삼투분리막(Reverse Osmosis Membrane) 개요

항 목		폴리아미드계막	셀룰로오스계막	비 고
pH 범위		2~12	4~6	pH조정 범위 차이
운전압력 (Kg·f/cm ²)		15	30	동력비 차이
염제거율(%)	증발잔유물 (TDS)	99+	98	제거율 차이
	실리카(SiO ₂)	99+	95	제거율 차이
물리/화학적 안정성		안정	불안정	
장기 운전시 물성저하		생산수량	염제거율	
3년 후	염투과율	30%↑	100%↑	후단 이온교환수지의 재생주기에 영향
	염제거율	99% → 98.7%	98% → 96%	
살균용 산화제		제거	첨가	
막의 오염		많음	적음	

2-4. 역삼투분리막의 특성

◎ 역삼투막의 분리 특성

- 1) 무기물은 유기물보다 잘 분리된다.
- 2) 전해질은 비전해질보다 잘 분리된다.
- 3) 전해질이 다가 이온일수록 분리성이 높다. (3가 이온 > 2가 이온 > 1가 이온)
- 4) 무기 이온 제거율은 그 이온 특유의 수화값(hydration number), 수화이온 반경에 따라 영향을 받고 이온 반경이 큰 이온은 잘 제거된다.
- 5) 비전해질의 경우는 분자의 크기가 크면 잘 제거된다.
- 6) 가스염은 막을 투과하기 쉽고 암모니아, 염소, 탄산가스, 산소, 황화수소 등은 제거율이 낮다.
- 7) 약산의 제거율은 낮다. 유기산중에서는 구연산 > 주석산 > 초산의 순서로 제거율이 높다.

분리 특성의 개요는 위와 같고 용질과 막의 선택적 흡착, 정전기적 작용, 수소결합성 등을 모두 고려하여 용질의 분리 특성을 이해하는 것이 바람직하다.

◎ CSM 역삼투막의 특성

- 1) 생산수량(permeate flux), 염제거율(salt rejection)이 높다
- 2) 높은 강도를 가지는 얇은 활성층을 가진다
- 3) 넓은 pH범위에서 화학적으로 안정하다
- 4) 막의 수명이 길다
- 5) 물리적으로 미생물에 견디는 힘이 크다
- 6) 다른 형태에서도 사용될 수 있는 다양성을 가진다
- 7) 압력, 온도 등의 운전조작 범위가 넓다
- 8) 비용이 적게 든다

2-5. CSM의 성능

◎ 용질의 제거율(BE 등급의 CSM)

NO	용 질	제 거 율 (%)	분 자 량
1	불화나트륨(NaF)	99	42
2	시안화나트륨(NaCN)	98	49
3	염화나트륨(NaCl)	99	58
4	실리카(SiO ₂)	99	60
5	탄산수소나트륨(NaHCO ₃)	99	84
6	질산나트륨(NaNO ₃)	96	85
7	염화마그네슘(MgCl ₂)	99	95
8	염화칼슘(CaCl ₂)	99	111
9	황산마그네슘(MgSO ₄)	99	120
10	황산니켈(NiSO ₄)	99	155
11	황산구리(CuSO ₄)	99	160
12	포름알데히드	35	30
13	메탄올	25	32
14	에탄올	70	46
15	이소프로판올	90	60
16	요소(Urea)	70	60
17	젓산(pH2)	94	90
18	젓산(pH5)	99	90
19	포도당(Glucose)	98	180
20	자당(Sucrose)	99	342
21	염소 살균제	99	-
22	생물학적 산소 요구량(BOD)	95	-
23	화학적 산소 요구량(COD)	97	-

※ 각 항목의 제거율은 제품사양서의 일반적인 테스트 기준에서 측정한 것임.

◎ 이온의 제거율(BE 등급의 CSM)

NO	이 온	제 거 율 (%)
1	나트륨(Na)	97
2	칼슘(Ca)	99
3	마그네슘(Mg)	99
4	칼륨(K)	98
5	철(Fe)	99
6	망간(Mn)	99
7	알루미늄(Al)	99
8	암모니아(NH ₄)	99
9	구리(Cu)	99
10	니켈(Ni)	99
11	아연(Zn)	99
12	스트론튬(Sr)	98
13	카드뮴(Cd)	99
14	은(Ag)	99
15	수은(Hg)	99
16	염소(Cl)	99
17	탄산수소(HCO ₃)	98
18	황산(SO ₄)	99
19	질산(NO ₃)	96
20	불소(F)	98
21	실리카(SiO ₂)	99
22	인산(PO ₄)	99
23	바륨(Br)	98

※ 각 항목의 제거율은 제품사양서의 일반적인 테스트 기준에서 측정한 것임.

3-1. CSM 역삼투필터의 모델명

R E 8 0 4 0 - B E

① 모듈의 종류

- RE : 역삼투분리막(Reverse Osmosis Element)
- UE : 한외여과막(Ultrafiltration Element)
- NE : 나노필터(Nanofiltration Element)

② 모듈의 직경

- 80 : 8.0 인치
- 40 : 4.0 인치
- 25 : 2.5 인치

③ 모듈의 길이

- 40 : 40 인치
- 21 : 21 인치

④ 모듈의 특성

1) 첫째 자리

- B : 염수용 분리막(Brackish Water Membrane)
- T : 상수용 분리막(Tap Water Membrane)
- S : 해수용 분리막(Sea Water Membrane)
- F : 내오염성 분리막(Fouling Resistant Membrane)

2) 두번째 자리

- N : 일반(Normal grade)
- E : 넓은 막면적(Extended effective area)
- R : 높은 염제거율(High rejection)
- L : 저압용(Low pressure use)

3) BL 제품의 경우(세자리)

- BLN : BL 일반 제품
- BLR : 고염제거율 제품
- BLF : 고정수량 제품

4) NE 제품의 경우

- 40 : NaCl 제거율 40%인 제품
- 90 : NaCl 제거율 90%인 제품

5) UE 제품의 경우 : PF

3-2. Brackish Water Elements

Parameter		Unit	Brackish Water Elements			
			RE8040-BE	RE8040-BE34	RE8040-CE	RE4040-BE
Performance (Nominal)	Permeate Flux	GPD	11000	11000	12000	2400
		m ³ /d	39.7	39.7	45.4	9.1
	Salt Rejection	%	99.7	99.7	99.0	99.7
Test Conditions	Operating Pressure	psig	225	225	225	225
	Temperature	°C	25	25	25	25
	NaCl Concentration	ppm	2000	2000	2000	2000
	pH	-	6.5 ~ 7.0	6.5 ~ 7.0	6.5~7.0	6.5 ~ 7.0
	Recovery	%	15	15	15	15
Operating Limits	Max. SDI(15min.)	-	5	5	5	5
	Max. Turbidity	NTU	1	1	1	1
	Max. Chlorine Concentration	ppm	0.1	0.1	0.1	0.1
	Max. Feed Flow Rate	m ³ /hr	17	17	17	4.0
	Min. Concentration Flow Rate	m ³ /hr	3.6	3.6	3.6	0.91
	Max. Pressure Drop/Element	psig	15	15	15	15
	Max. Operating Temperature	°C	45	45	45	45
	pH Range	Normal	2 ~ 11	2 ~ 11	2 ~ 11	2 ~ 11
Cleaning		1 ~ 13	1 ~ 13	1 ~ 13	1 ~ 13	
Size	Effective Area	ft ²	400	365	400	85
		m ²	37.2	33.9	37.2	7.9
	Element Length	inch	40	40	40	40
	Element Diameter	inch	8.0	8.0	8.0	4.0
	Permeate Tube Inner Dia.	inch	1.125	1.125	1.125	-
	Permeate Tube Outer Dia.	inch	-	-	-	0.75
	Permeate Tube Protrusion	inch	0	0	0	1.0
Maximum Permeate Flow Rate	Surface Water	GPD	7180	6180	4078	1530
		m ³ /d	27.3	23.5	15.5	5.8
	Softened Water	GPD	9160	7890	5207	1950
		m ³ /d	34.8	30.0	20.0	7.4
	RO/UF Permeate	GPD	11200	9630	6355	2370
		m ³ /d	42.4	36.6	24.2	9.0

3-3. Fouling Resistant Elements

Parameter		Unit	Fouling Resistant Elements			
			RE8040-FEN	RE8040-FLR	RE4040-FEN	RE4040-FLR
Performance (Nominal)	Permeate Flux	GPD	11000	10000	2400	2100
		m ³ /d	41.6	37.9	9.1	7.9
	Salt Rejection	%	99.7	99.6	99.7	99.6
Test Conditions	Operating Pressure	psig	225	150	225	150
	Temperature	°C	25	25	25	25
	NaCl Concentration	ppm	2000	1500	2000	1500
	pH	-	6.5~7.0	6.5~7.0	6.5~7.0	6.5~7.0
	Recovery	%	15	15	15	15
Operating Limits	Max. SDI(15min.)	-	5	5	5	5
	Max. Turbidity	NTU	1	1	1	1
	Max. Chlorine Concentration	ppm	0.1	0.1	0.1	0.1
	Max. Feed Flow Rate	m ³ /hr	17	17	4.0	4.0
	Min. Concentration Flow Rate	m ³ /hr	3.6	3.6	0.91	0.91
	Max. Pressure Drop/Element	psig	15	15	15	15
	Max. Operating Temperature	°C	45	45	45	45
		pH Range	Normal	2~11	2~11	2~11
		Cleaning	1~13	1~13	1~13	1~13
Size	Effective Area	ft ²	400	400	85	85
		m ²	37.2	37.2	7.9	7.9
	Element Length	inch	40	40	40	40
	Element Diameter	inch	8.0	8.0	4.0	4.0
	Permeate Tube Inner Dia.	inch	1.125	1.125	-	-
	Permeate Tube Outer Dia.	inch	-	-	0.75	0.75
	Permeate Tube Protrusion	inch	0	0	1.0	1.0
Maximum Permeate Flow Rate	Surface Water	GPD	6180	6180	1530	1530
		m ³ /d	23.5	23.5	5.8	5.8
	Softened Water	GPD	7890	7890	1950	1950
		m ³ /d	30.0	30.0	7.4	7.4
	RO/UF Permeate	GPD	9630	9630	2370	2370
		m ³ /d	36.6	36.6	9.0	9.0

3-4. Low Pressure Elements

Parameter		Unit	Low Pressure Elements			
			RE8040-BLF	RE8040-BLN	RE8040-BLR	RE4040-BLF
Performance (Nominal)	Permeate Flux	GPD	11500	12000	1000	2500
		m ³ /d	43.5	45.4	37.9	9.5
	Salt Rejection	%	99.2	99.5	99.6	99.2
Test Conditions	Operating Pressure	psig	100	150	150	100
	Temperature	°C	25	25	25	25
	NaCl Concentration	ppm	500	1500	1500	500
	pH	-	6.5~7.0	6.5~7.0	6.5~7.0	6.5~7.0
	Recovery	%	15	15	15	15
Operating Limits	Max. SDI(15min.)	-	5	5	5	5
	Max. Turbidity	NTU	1	1	1	1
	Max. Chlorine Concentration	ppm	0.1	0.1	0.1	0.1
	Max. Feed Flow Rate	m ³ /hr	17	17	17	4.0
	Min. Concentration Flow Rate	m ³ /hr	3.6	3.6	3.6	0.91
	Max. Pressure Drop/Element	psig	15	15	15	15
	Max. Operating Temperature	°C	45	45	45	45
	pH Range	Normal		2~11	2~11	2~11
Cleaning			1~13	1~13	1~13	1~13
Size	Effective Area	ft ²	400	400	400	85
		m ²	37.2	37.2	37.2	7.9
	Element Length	inch	40	40	40	40
	Element Diameter	inch	8.0	8.0	8.0	4.0
	Permeate Tube Inner Dia.	inch	1.125	1.125	1.125	-
	Permeate Tube Outer Dia.	inch	-	-	-	0.75
	Permeate Tube Protrusion	inch	0	0	0	1.0
Maximum Permeate Flow Rate	Surface Water	GPD	8484	8484	8484	1808
		m ³ /d	32.1	32.1	32.1	6.4
	Softened Water	GPD	10822	10822	10822	2304
		m ³ /d	40.9	40.9	40.9	6.7
	RO/UF Permeate	GPD	13216	13216	13216	2413
		m ³ /d	50.0	50.0	50.0	9.1

3-5. Sea Water Elements

Parameter		Unit	Sea Water element			
			RE8040-SHF	RE8040-SHN	RE4040-SHF	RE4040-SHN
Performance (Normal)	Permeate Flux	GPD	9000	6500	1900	1200
		m ³ /d	37.5	24.6	7.2	4.5
	Salt Rejection	%	99.7	99.75	99.7	99.75
Test Conditions	Operating Pressure	psig	800	800	800	800
	Temperature	℃	25	25	25	25
	NaCl Concentration	ppm	32000	32000	32000	32000
	pH	-	6.5~7.0	6.5~7.0	6.5~7.0	6.5~7.0
	Recovery	%	8	8	8	8
Operating Limits	Max. SDI(15min.)	-	5	5	5	5
	Max. Turbidity	NTU	1	1	1	1
	Max. Chlorine Concentration	ppm	0.1	0.1	0.1	0.1
	Max. Feed Flow Rate	m ³ /hr	17	17	4.0	4.0
	Min. Concentration Flow Rate	m ³ /hr	3.6	3.6	0.91	0.91
	Max. Pressure Drop/Element	psig	15	15	15	15
	Max. Operating Temperature	℃	45	45	45	45
	pH Range	Normal	2~11	2~11	2~11	2~11
Cleaning		1~13	1~13	1~13	1~13	
Size	Effective Area	ft ²	400	400	75	75
		m ²	34.4	34.4	6.9	6.9
	Element Length	inch	40	40	40	40
	Element Diameter	inch	8.0	8.0	4.0	4.0
	Permeate Tube Inner Dia.	inch	1.125	1.125	-	-
	Permeate Tube Outer Dia.	inch			0.75	0.75
	Permeate Tube Protrusion	inch	0	0	1.0	1.0
Maximum Permeate Flow Rate	Surface Water	GPD	5932	5932	1100	1100
		m ³ /d	22.5	22.5	4.2	4.2
	Softened Water	GPD	6790	6790	1530	1530
		m ³ /d	25.8	25.8	5.8	5.8
	RO/UF Permeate	GPD	8660	8660	1950	1950
		m ³ /d	32.9	32.9	7.4	7.4

3-6. Nanofiltration(NF) Elements

Parameter		Unit	Nanofiltration(NF) Elements			
			NE8040-90	NE8040-70	NE8040-40	NE4040-90
Performance (Nominal)	Permeate Flux	GPD	8000	7000	10000	1700
		m ³ /d	30.3	26.5	37.9	6.0
	Salt Rejection [MgSO ₄ (NaCl)]	%	97(85~95)	97(40~70)	97(40~70)	97(85~90)
Test Conditions	Operating Pressure	psig	75	75	75	75
	Temperature	°C	25	25	25	25
	MgSO ₄ (NaCl) Concentration	ppm	2000(2000)	2000(2000)	2000(2000)	2000(2000)
	pH	-	6.5~7.0	6.5~7.0	6.5~7.0	6.5~7.0
	Recovery	%	15	15	15	15
Operating Limits	Max. SDI(15min.)	-	5	5	5	5
	Max. Turbidity	NTU	1	1	1	1
	Max. Chlorine Concentration	ppm	0.1	0.1	0.1	0.1
	Max. Feed Flow Rate	m ³ /hr	15	15	15	4.0
	Min. Concentration Flow Rate	m ³ /hr	3.6	3.6	3.6	0.91
	Max. Pressure Drop/Element	psig	15	15	15	15
	Max. Operating Temperature	°C	45	45	45	45
	pH Range	Normal	2~11	2~11	2~11	2~11
Cleaning		1~13	1~13	1~13	1~13	
Size	Effective Area	ft ²	400	400	400	85
		m ²	37.2	37.2	37.2	7.9
	Element Length	inch	40	40	40	40
	Element Diameter	inch	8.0	8.0	8.0	4.0
	Permeate Tube Inner Dia.	inch	1.125	1.125	1.125	-
	Permeate Tube Outer Dia.	inch	-	-	-	0.75
	Permeate Tube Protrusion	inch	0	0	0	1.0
Maximum Permeate Flow Rate	Surface Water	GPD	6180	6180	6180	1340
		m ³ /d	23.5	23.5	23.5	5.1
	Softened Water	GPD	7890	7890	7890	1710
		m ³ /d	30.0	30.0	30.0	6.5
	RO/UF Permeate	GPD	9630	9630	9630	2080
		m ³ /d	36.6	36.6	36.6	7.9

3-7. Tap Water Elements

Parameter		Unit	Tap Water Elements			
			RE4040-TL	RE2540-TL	RE4021-TL	RE2521-TL
Performance (Nominal)	Permeate Flux	GPD	2600	800	1050	350
		m ³ /d	9.8	3.0	4.0	1.3
	Salt Rejection	%	99.2	99.2	99.2	99.2
Test Conditions	Operating Pressure	psig	150	150	150	150
	Temperature	°C	25	25	25	25
	NaCl Concentration	ppm	1500	1500	1500	1500
	pH	-	6.5~7.0	6.5~7.0	6.5~7.0	6.5~7.0
	Recovery	%	15	15	15	15
Operating Limits	Max. SDI(15min.)	-	5	5	5	5
	Max. Turbidity	NTU	1	1	1	1
	Max. Chlorine Concentration	ppm	0.1	0.1	0.1	0.1
	Max. Feed Flow Rate	m ³ /hr	4.0	1.3	4.0	1.3
	Min. Concentration Flow Rate	m ³ /hr	0.91	0.22	0.91	0.22
	Max. Pressure Drop/Element	psig	15	15	15	15
	Max. Operating Temperature	°C	45	45	45	45
		pH Range	Normal	2~11	2~11	2~11
		Cleaning	1~13	1~13	1~13	1~13
Size	Effective Area	ft ²	85	27	35	12
		m ²	7.9	2.5	3.3	1.1
	Element Length	inch	40	40	21	21
	Element Diameter	inch	4.0	2.5	4.0	2.5
	Permeate Tube Inner Dia.	inch	-	-	-	-
	Permeate Tube Outer Dia.	inch	0.75	0.75	0.75	0.75
	Permeate Tube Protrusion	inch	1.0	1.0	1.0	1.0
Maximum Permeate Flow Rate	Surface Water	GPD	1808	574	744	255
		m ³ /d	6.4	2.2	2.8	1.0
	Softened Water	GPD	2304	732	949	325
		m ³ /d	6.7	2.8	3.6	1.2
	RO/UF Permeate	GPD	2413	766	994	340
		m ³ /d	9.1	2.9	3.8	1.3

Parameter		Unit	Tap Water Elements			
			RE4040-TE	RE2540-TE	RE4021-TE	RE2521-TE
Performance (Nominal)	Permeate Flux	GPD	2400	800	1050	300
		m ³ /d	9.1	3.0	4.0	1.1
	Salt Rejection	%	99.5	99.5	99.5	99.5
Test Conditions	Operating Pressure	psig	225	225	225	225
	Temperature	°C	25	25	25	25
	NaCl Concentration	ppm	2000	2000	2000	2000
	pH	-	6.5~7.0	6.5~7.0	6.5~7.0	6.5~7.0
	Recovery	%	15	15	8	8
Operating Limits	Max. SDI(15min.)	-	5	5	5	5
	Max. Turbidity	NTU	1	1	1	1
	Max. Chlorine Concentration	ppm	0.1	0.1	0.1	0.1
	Max. Feed Flow Rate	m ³ /hr	4.0	1.3	4.0	1.3
	Min. Concentration Flow Rate	m ³ /hr	0.91	0.22	0.91	0.22
	Max. Pressure Drop/Element	psig	15	15	15	15
	Max. Operating Temperature	°C	45	45	45	45
	pH Range	Normal	2~11	2~11	2~11	2~11
Cleaning		1~13	1~13	1~13	1~13	
Size	Effective Area	ft ²	85	27	35	12
		m ²	7.9	2.5	3.3	1.1
	Element Length	inch	40	40	21	21
	Element Diameter	inch	4.0	2.5	4.0	2.5
	Permeate Tube Inner Dia.	inch	-	-	-	-
	Permeate Tube Outer Dia.	inch	0.75	0.75	0.75	0.75
	Permeate Tube Protrusion	inch	1.0	1.0	1.0	1.0
Maximum Permeate Flow Rate	Surface Water	GPD	1530	470	630	210
		m ³ /d	5.8	1.8	2.4	0.8
	Softened Water	GPD	1950	630	790	260
		m ³ /d	7.4	2.4	3.0	1.0
	RO/UF Permeate	GPD	2370	760	970	340
		m ³ /d	9.0	2.9	3.7	1.3

3-8. Ultrafiltration(UF) Elements

Parameter		Unit	Ultrafiltration(UF) Elements		
			UE8040-ES10	UE8040-CEP	UE4040-CEP
Performance (Normal)	Permeate Flux	GPD	7200	6500	1400
		m ³ /d	27.2	24.6	5.3
	Salt Rejection		10k		
Test Conditions	Operating Pressure	psig	20	14.5	14.5
	Temperature	°C	25	25	25
	Feed Water	-	Pure water	Pure water	Pure water
	pH	-	6.5~7.0	6.5~7.0	6.5~7.0
	Recovery	%			
Operating Limits	Max. SDI(15min.)	-			
	Max. Turbidity	NTU			
	Max. Chlorine Concentration	ppm			
	Max. Feed Flow Rate	m ³ /hr	17	17	4.0
	Min. Concentration Flow Rate	m ³ /hr	3.6	3.6	0.91
	Max. Pressure Drop/Element	psig	15	15	15
	Max. Operating Temperature	°C	45	45	45
	pH Range	Normal			
Cleaning					
Size	Effective Area	ft ²	400	400	85
		m ²	37.2	37.2	7.9
	Element Length	inch	40	40	40
	Element Diameter	inch	8.0	8.0	4.0
	Permeate Tube Inner Dia.	inch	1.125	1.125	-
	Permeate Tube Outer Dia.	inch	-	-	0.75
Permeate Tube Protrusion	inch	0	0	1.0	
Maximum Permeate Flow Rate	Surface Water	GPD	12653	12653	2600
		m ³ /d	47.9	47.9	9.8
	Softened Water	GPD	17700	17700	3000
		m ³ /d	67.0	67.0	11.4
	RO/UF Permeate	GPD	19900	19900	3360
		m ³ /d	75.3	75.3	12.7

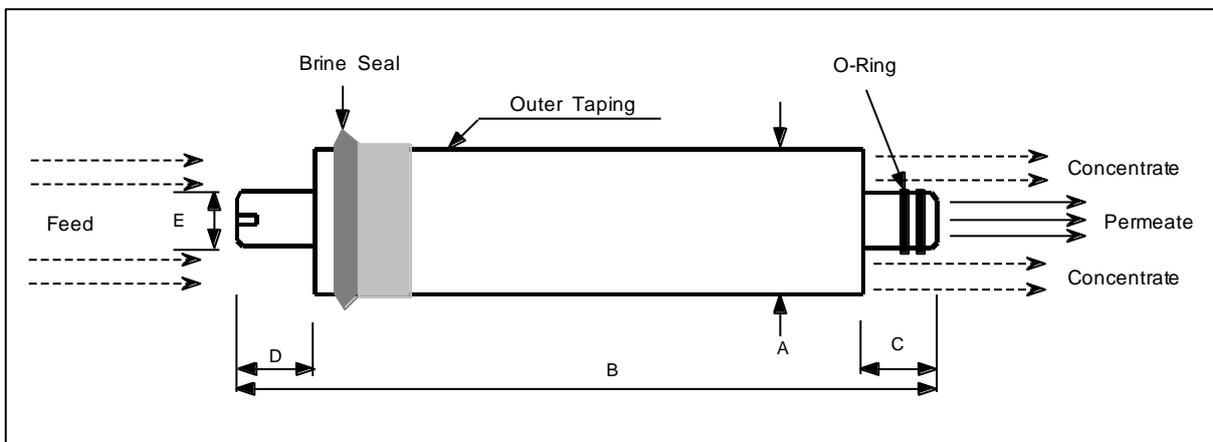
◎ 가정용 역삼투 분리막

Model No.	Flux (GPD)	Salt Rej' (%)	Test Conditions				Size(mm)				
			Pressure (psig)	Temp. (°C)	Feed Conc. (ppm)	Recovery (%)	A	B	C	D	E
RE1810-30	30	98	60	25	200	15	45.0±0.5	256	25	14	17
RE1810-50	50	98	60	25	200	15	45.0±0.5	256	25	14	17
RE1810-80	80	98	60	25	200	15	45.0±0.5	298	22	22	17
RE1812-50	50	98	60	25	200	15	48.5±0.5	298	23	12	17
RE1812-60	60	98	60	25	200	15	48.5±0.5	298	23	12	17
RE1812-80	80	98	60	25	200	15	48.5±0.5	298	23	12	17
RE2012-LP	50	93	20	25	100	15	50.0±0.5	298	23	12	17
RE2012-LPF	60	93	20	25	100	15	50.0±0.5	298	23	12	17

■ Operating Limits

- Maximum Operating Pressure 125psig
- Maximum Feed Flow Rate 2gpm
- Maximum Operating Temperature 45 °C
- Feed Water pH Range 3.0~10.0
- Maximum Turbidity 1.0NTU
- Maximum Silt Density Index 5.0
- Free Chlorine Tolerance <0.1ppm

※ Consult CSM for other operating conditions.



4

물화학 (Water Chemistry)

4-1. 개요

물 속에서 일어나는 화학적 현상을 이해하는 것은 역삼투설비에서 생산수의 회수율에 따른 스케일(scale) 형성의 가능성을 판단하는데 아주 중요하다. 따라서, 물 속에 존재하는 이온들의 종류와 그 특성 및 반응하는 방식에 대해서 정확하게 이해할 필요가 있다.

■ 단위

mg/L : 물 1,000g(1L)에 용질 1mg이 존재. 즉, 물 1,000,000g(1,000L)에 1g 존재
→ ppm (Parts Per Million)

ppm as Calcium Carbonate (as CaCO₃) :

- 물에 존재하는 이물질을 전하를 띤 분자의 상대적인 농도로 나타냄
- 다른 이온들과의 반응 가능성을 효과적으로 나타낼 수 있는 단위
- CaCO₃(분자량:100, 2가 이온)의 분자량과 이온의 원자가 전하를 기준으로 사용
- 비이온 물질인 경우에는 원자가를 1로 계산
- 부록 10-4 참조

EX) 'A'가 CaCO₃ 분자량의 두배(MW : 200)이고 3가의 전하를 가질 때,
'A'의 농도를 CaCO₃에 대한 상대적 수치로 환산하면 ;
'A'의 측정 농도에 곱할 계수를 다음과 같이 구한다

$$A \text{ 농도 as CaCO}_3 = A \text{의 측정치} \times \frac{100(\text{CaCO}_3 \text{의 분자량})}{200(A \text{의 분자량})} \times \frac{3(A \text{의 전하})}{2(\text{CaCO}_3 \text{의 전하})}$$

- 안정된 상태에서 물에 함유되어 있는 양이온과 음이온의 양은 CaCO₃의 농도로 환산할 때 서로 같다. 일반적으로 물을 분석하여 양이온의 양과 음이온의 양의 차이가 10% 이내가 되어야 어느 정도 정확한 분석이 되었다고 할 수 있다. 만일 오차가 10%를 넘으면 원수 샘플을 다시 분석해보는 것이 좋다.

4-2. 주요 분석 항목

1) 물속에 존재하는 일반적인 이온(ION)

■ 음이온 ;

알칼리도(alkalinity) - 탄산수소기(HCO_3), 탄산기(CO_3), 수산기(OH)

황산 - SO_4

염소 - Cl

불소 - F

질산 - NO_3

■ 양이온 ;

경도성분(hardness) - 칼슘(Ca), 마그네슘(Mg)

나트륨 - Na

칼륨 - K

2) 기타 이온

■ 음이온 ;

실리카 - SiO_2

황화물 - S (2가)

인산 - PO_4

■ 양이온 ;

철 - Fe (2가 혹은 3가)

망간 - Mn (2가 혹은 기타)

알루미늄 - Al (3가)

바륨 - Ba

스트론튬 - Sr

구리 - Cu

아연 - Zn

3) 수질의 일반적인 지표

■ SDI(Silt Density Index)

파울링 지수(fouling index)라고도 하여 분리막(membrane)에 오염(fouling)이 일어날 수 있는 가능성을 나타내는 척도로 사용된다. 0.45 μ m 필터를 사용하여 부유물(SS, suspended solid)성분에 의해 일어나는 오염의 정도를 측정한다.

47mm 직경의 필터에 30psig의 압력으로 물을 흘려 측정한다. 처음 500mL의 물이 흐르는데 걸리는 시간(T_0)을 잰 후 15분(T)이 지난 후 다시 500mL의 물이 흐르는데 걸리는 시간(T_1)을 재 이 두 가지 시간의 비율을 척도로 사용한다(이때 계산할 T의 단위는 분으로 한다).

$$SDI = 100 \times \frac{1 - (T_0 / T_1)}{T}$$

SDI 측정은 역삼투분리막에서 일어나는 것과 동일한 현상을 이용하는 것이 아니라는 데 한계점이 있다. SDI를 측정할 때 모든 SS 성분이 필터에 여과된다. 하지만 역삼투분리막에서는 상당 부분의 오염물질들(foulants)이 역삼투분리막 표면을 따라 농축수 쪽으로 흘러나간다. 따라서 높은 SDI 수치가 역삼투분리막에 즉각적인 오염이 일어날 수 있다는 절대적인 근거는 아니다. 반대로 낮은 SDI 수치라 해도 역삼투분리막의 오염이 심하게 일어날 수 있다. 일반적으로 볼 때 SDI가 3 아래이면 오염은 심하지 않으며 5이상이 될 경우 심한 오염이 일어날 수 있다.

■ 탁도(Turbidity)

탁도는 물의 맑은 정도로 오염 가능성(fouling potential)을 나타내는 지표이다. 탁도계(turbidometer, nephelometer)로 물 속의 불순물들에 의해 산란되는 빛을 측정한다. 탁도가 1.0 이상이면 역삼투분리막 표면이 오염(fouling)되는 경향이 대단히 높다. 이 수치는 대체로 NTU(Nephelometric Turbidity Unit)으로 표시하나 다른 상대적인 단위를 사용하기도 한다.

SDI와 마찬가지로 탁도도 오염에 대한 잠정적인 지표일 뿐이다. 탁도가 높다고 높은 탁도를 나타내는 물질들이 모두 역삼투분리막에 침전된다는 것을 의미하지는 않는다. SDI와 같이 낮은 탁도에서 심한 오염이 생기는 경우도 발생한다. 또한 빛이 그대로 투과하는 오염물질들(foulants)도 상당수 있다. 결국 탁도나 SDI가 원수의 상태를 나타내는 완벽한 척도는 아니다. 하지만 매우 유용하며 전처리 설비의 성능을 잘

나타내는 척도가 된다.

■ 제타전위(ZETA potential)

유기물질의 부유물(SS, suspended solids) 성분은 외부에 음(-)전하를 가지는 경향이 있다. 이 때문에 이들은 서로 뭉쳐지지 않는 반발력을 지니며 물에 분산되어 존재한다. 하지만 이들이 역삼투분리막에서와 같이 농축되는 경우에는 큰 덩어리의 콜로이드로 뭉쳐질 수 있으며 물에 분산될 수 있는 한계를 넘으면 침전된다.

제타전위는 물 속에 분산되어 있는 입자들이 지닌 전하의 전체적인 경향을 나타내는 수치이다. 제타전위가 음일 경우 (-)전하의 부유물(SS) 성분들이 물에 분산되어 있을 가능성이 높다는 것을 의미한다. 제타전위가 0이라면 부유물(SS) 성분들이 서로 반발하는 전하를 더 이상 가지지 않는다는 의미가 되며 이 때부터는 더 큰 입자로 응집되어 침전할 가능성이 높아진다.

고분자 응집제를 투입하는 설비에서 제타전위는 큰 의미가 있다. 응집제의 투입량은 미디어필터(media filter)의 전단에서 제타전위가 0이 되도록 조절해야 한다. 하지만 역삼투설비의 전처리(pretreatment) 과정에 응집제를 투입하는 것이 반드시 추천되는 사항은 아니다.

■SCD (Streaming Current Detector)

SCD는 응집제를 투입하는 공정일 경우 사용하는 경우가 많다. SCD는 부유입자(suspended particle)를 둘러싸고 있는 이온들이 움직일 수 있도록 빠른 유속을 주었을 때 그 움직이는 이온들이 내는 전류를 측정하는 장비이다. 만약 부유물질들의 전하들이 응집제에 의해 중성화(neutralization)되었다면 이들 입자를 둘러싼 자유 이온들의 수는 줄어들 것이다. 따라서 SCD에 낮은 전류가 흐른다.

4-3. 분석 항목별 특성

■ pH

pH는 물에 녹는 염(salt)의 용해도와 직결된다. 일반적으로 pH가 높아질수록 염의 용해도는 낮아진다. 또한 pH가 낮을 경우에는 물 속에 CO_2 가 기체 형태로 존재하는 반면 pH가 높아질수록 HCO_3^- 또는 CO_3^{2-} 형태로 존재하며 이때 양이온들과 반응하여 스케일이 형성될 수 있다(부록 10-12 참조).

■ 알칼리도(Alkalinity)

알칼리도는 물에서 수소 양이온을 제거하는 음이온들로 구성된다. HCO_3^- (bicarbonate), CO_3^{2-} (carbonate), OH^- (hydroxyl) 이온들이다. 이 이온들은 H^+ 를 제거하여 물의 pH를 높이는 작용을 한다.

일반적인 물에서 알칼리도의 대부분은 HCO_3^- 의 형태로 존재한다¹. pH 8.3 이하에서 HCO_3^- 이온은 용해된 이산화탄소 이온과 평형상태를 이룬다. 또한 pH가 8.3이 넘을 경우 HCO_3^- 이온은 CO_3^{2-} 이온과 평형상태를 이룬다. 알칼리도는 자연적인 완충용액(buffer solution, pH의 변화를 둔화시킴)으로 이산화탄소와의 평형유지를 통해 pH의 변화를 억제하는 역할을 한다.

물은 대기중의 이산화탄소를 녹이며 산성의 물일 경우 지표에서 탄산칼슘(CaCO_3)을 녹여 pH가 올라가게 된다. 물이 HCO_3^- 이온으로 과포화된 상태에서 물이 산성을 지닌다면 과량의 HCO_3^- 는 이산화탄소로 바뀐다. 반대로 HCO_3^- 가 과포화된 상태에서 물이 염기성을 지닌다면 과량의 HCO_3^- 는 CO_3^{2-} 로 되며 이것은 다른 양이온 성분들과 함께 석출될 수 있다.

물은 알칼리도를 흡수하는 능력이 있으므로 자연상태의 물에는 탄산칼슘(CaCO_3)이 거의 포화되어 있다. 이러한 물이 역삼투분리막에서 농축되면 탄산칼슘(CaCO_3)의 침전물이 생길 수 있으며 다른 염(salt)들보다 선행하여 침전하는 것이 보통이다.

■ SO_4^{2-} (Sulfate)

Ca(calcium), Mg(magnesium), Ba(barium), Sr(strontium) 등 2가 이온이 존재할 경우 SO_4^{2-} (sulfate)의 용해도는 아주 낮다. 즉 상기 2가 이온들의 적은 양과도 반응하여 석출될 가능성이 높다. SO_4^{2-} 는 대부분의 원수에 상대적으로 높은 농도로 존재한다. 또한 pH를 조절하기 위해 황산을 첨가하면 SO_4^{2-} 의 농도는 높아진다. 이로 인한 스케일(scale) 형성은 원수의 2가 양이온을 줄이거나 통제하여 방지한다.

¹부록 10-12 참고

■ Cl⁻(Chloride)

스케일(scale) 형성이라는 관점에서 Cl⁻(chloride)는 역삼투설비에 큰 영향을 주지 않는다. 대부분의 Cl⁻염(salt)들은 물에 잘 녹는다. 하지만 높은 농도의 Cl⁻는 304급의 스테인레스 스틸에 부식을 일으킬 수 있다. 농축수의 Cl⁻농도가 수천 ppm을 넘으면 316급의 스테인레스 스틸이 필요하다.

■ F⁻(Fluoride)

F⁻(fluoride)의 농도는 일반적으로 아주 낮다. 하지만 F⁻가 적절한 농도만큼 존재할 경우 불화칼슘(CaF₂, calcium fluoride) 염(salt)이 형성될 수 있으며 이것은 난용성 물질이다.

■ NO₃⁻(Nitrate)

NO₃⁻(nitrate)는 용해도가 크게 문제되지 않는다. 문제는 역삼투설비에서 제거율이 낮다는 점이다². NO₃⁻는 전하를 띄는 정도가 약하기 때문에 역삼투분리막이나 이온교환수지에서 다른 이온에 비해 잘 제거되지 않는다.

음용수에 존재하는 NO₃⁻를 포유동물이 먹을 경우 NO₂(nitrite)가 생성될 수 있고 이 물질은 혈액의 산소 교환능력을 떨어뜨려 심각한 문제를 일으킬 수 있다.

■ S²⁻(Sulfide)

일반적으로 용해된 가스의 형태인 황화수소(H₂S, hydrogen sulfide)로 존재한다. 산소나 다른 산화제에 의해 산화되면 황 원소가 석출되어 나온다.

H₂S 가스는 탈가스장치(degasifier)에 물을 통과시켜 제거할 수 있다. 혹은 미디어 필터(media filter) 전에서 의도적인 산화를 일으켜 석출되는 황을 여과할 수도 있다.

■ PO₄³⁻(Phosphate)

강한 3가의 -전하를 띄는 PO₄³⁻(phosphate)는 다가의 금속들과 결합하는 경향이 있다. 중성 pH에서 인산칼슘(calcium phosphate)은 아주 제한된 용해성을 지니며 높은 pH에서도 용해도가 낮다. PO₄³⁻가 역삼투설비의 원수에 존재하고 이 설비에 산을 주입하는 장치를 하지 않은 경우 침전물이 형성될 가능성이 높다.

■ 실리카(Silica)

실리카(silica)는 한 번 침전되면 매우 안정한 물질이 되기 때문에 역삼투설비에서는 특별히 관심을 가져야 한다. pH9 이하에서는 대부분의 실리카가 H₄SiO₄나 Si(OH)₄(silicic acid)의 형태로 존재한다. 낮은 pH에서 이 H₄SiO₄는 사슬을 형성하여 콜로이드성 실리카가 된다. pH가 8을 넘으면 SiO₃(silicate anion)가 되고 높은 pH에서는 Ca²⁺(calcium), Mg²⁺(magnesium), Fe²⁺ 또는 Fe³⁺(iron), Al³⁺(aluminum)

²제2장 개요의 2-5 참조

등의 염(salt)과 침전할 수 있다.

실리카로 인한 침전물질은 다시 용해시키기 매우 어려우나 상태가 심하지 않을 경우 암모늄바이플로라이드(ammonium bifluoride) 용액으로 상당부분 세정할 수 있다. 하지만 암모늄바이플로라이드는 유독성 물질로 방류할 때 문제가 될 수 있다.

실리카의 용해도는 pH와 온도에 영향을 받는다. 역삼투설비의 원수에 실리카가 20ppm 이상 존재하면 이들의 침전 가능성을 고려해야 한다.

■ 경도(Hardness)

Ca^{2+} (calcium)과 Mg^{2+} (magnesium)이 대부분의 경도 성분이며 다른 종류의 다가 이온들은 경도에 미치는 영향이 미미하다. 경도 성분은 용액에서 침전되어 스케일(scale)을 일으킬 수 있다.

대부분의 세제는 PO_4^{3-} (phosphate)나 다른 음이온성의 계면활성제(Surfactant)를 이용하기 때문에 경도 성분이 있을 경우 세정 성능이 떨어진다.

경도 성분은 높은 농도의 HCO_3^- (bicarbonate), CO_3^{2-} (Carbonate), SO_4^{2-} (sulfate), F^- (fluoride), SiO_3^{2-} (silicate) 등이 있을 경우 석출, 침전되기 때문에 역삼투설비를 효과적으로 운용하기 위해서는 경도 성분을 조절할 수 있는 방법을 강구해야 한다.

■ Na^+ (Sodium)

Na염(sodium salt)은 물에 아주 잘 녹는 물질이기 때문에 스케일 형성과는 관계가 없으나 고순도의 물을 제조하는 공정에서 아주 중요한 요소가 된다. 역삼투분리막에 의해 다른 이온들처럼 잘 제거되지 않기 때문이다³. 또한 역삼투설비 후단에 있는 이온교환수지에서도 잘 제거되지 않는다. 따라서 고순도를 요하는 설비에서는 주요 오염물질이 될 수 있다. 이 때문에 Na^+ 은 반도체 등의 회로에서 불량을 내는 주요 원인이 될 수 있다.

■ Fe^{2+} 또는 Fe^{3+} , Mn^{2+} (Iron and Manganese)

Fe^{2+} 또는 Fe^{3+} (iron)과 Mn^{2+} (manganese)은 물에 녹는 환원된 상태(Fe^{2+})나 물에 녹지 않는 산화된 형태(Fe^{3+})로 존재한다. Fe^{2+} or 3+의 농도는 지하수의 경우에도 높을 수 있으며, 철(steel)이 배관재, 전처리 여재용 탱크 등으로 사용된다면 전처리 설비가 철분 발생의 원인이 될 수 있다. 전처리 설비의 전단에 산을 첨가한다면 이 문제는 더욱 커진다.

Fe^{2+} 이나 Mn^{2+} 이 0.05ppm 이상 존재한다면 이 물질들을 제거할 수 있는 장치가

³제2장 개요의 2-5 참조

구비되어야 한다. 이 물질들이 물에 녹는 환원된 형태로 존재한다면 별 문제가 되지 않을 수 있다. 그러나, 산소가 설비 안에 들어오거나 다른 산화제가 있을 경우 Fe^{2+} 과 Mn^{2+} 은 물에 녹지 않는 형태로 산화된다. 이렇게 되면 역삼투분리막에 오염(fouling)이 일어날 수 있으며 물에 잔류하는 산화제의 산화 작용 촉매 역할을 한다.

■ Ba^{2+} , Sr^{2+} (Barium and Strontium)

Ba^{2+} (barium)과 Sr^{2+} (strontium)은 일반적으로 수질분석 항목에 포함시키지 않는다. 하지만 이 물질들은 0.01ppm 정도의 낮은 농도로 존재한다고 해도 SO_4^{2-} (sulfate)와 쉽게 스케일(scale)을 형성하며 이 스케일을 다시 용해시키는 것은 굉장히 어렵다. 이러한 이유 때문에 Ba^{2+} 와 Sr^{2+} 의 스케일은 만들어지지 않도록 특별한 주의가 필요하다.

■ Al^{3+} (Aluminum)

일반적인 물에 용해된 Al^{3+} (aluminum)은 거의 존재하지 않는다. Al^{3+} 은 상대적으로 작은 크기에 높은 전하를 가져 반응성이 좋다. 이러한 성질 때문에 많은 수처리 설비에서 응집제로 사용한다(Aluminum Sulfate- Al_2SO_4 , Sodium Aluminate- NaAlO_2). Al^{3+} 은 철과 비슷한 반응을 하며 산소와 결합할 경우 불용성의 산화물이 생긴다. Al^{3+} , Fe(iron) 두 금속은 (-)전하를 띄는 유기 콜로이드 성분과 혼합물을 형성할 수 있다. 또한 SiO_3^{2-} (silicate)가 존재할 경우 쉽게 침전한다.

Al^{3+} 은 pH가 아주 낮을 때 용해도가 높으며 5.3 이상의 범위에 있을 때는 잘 녹지 않는다. 이런 이유로 Al^{3+} 계열의 응집제를 사용하면서 산을 주입하는 설비에서는 산을 미디어 필터(media filter) 전단에 투입해야 한다.

■ Cu^{2+} , Zn^{2+} (Copper, Zinc)

Cu^{2+} (copper)와 Zn^{2+} (zinc)는 일반적인 물에 존재하지 않으나 배관자재에서 미량이 녹아 나올 수 있다. 이 물질들은 역삼투분리막에서 염(salt)이 농축되면 pH가 올라가는 현상에 의해 침전될 수 있다. 하지만 정상적인 pH에서 일반적으로 농도가 아주 낮기 때문에 오랜 기간의 침전이 형성되어야 역삼투설비의 성능에 영향을 준다. Cu^{2+} 와 Zn^{2+} 이 관심사가 되는 이유는 이러한 전이금속들이 산화제들의 산화력을 증가시킨다는 데에 있다. 폴리아미드계(PA type) 역삼투분리막에 미생물을 방지하기 위해 산화성 살균제(peracetic acid, hydrogen peroxide, chlorine)를 사용하는 경우 이러한 전이금속들에 의해 역삼투분리막의 산화가 급격하게 촉진될 수 있다.

5

전처리 (Pretreatment)

5-1. 개요

역삼투분리막의 이물질 제거 능력은 탁월하지만 이러한 이물질로 인해 오염(fouling, scaling) 또한 생기기 쉽다. 분리막에 발생하는 오염 현상은 크게 보아 물 속의 이온들이 결합하여 생성된 염(salt)이 침전되는 스케일(scaling)과 기타 입자, 콜로이드, 미생물 등에 의해 발생하는 파울링(fouling)으로 나눌 수 있다.

역삼투설비를 효율적으로 사용하기 위해서 역삼투분리막에 영향을 주는 이러한 오염원(foulants, scalants)들을 가능한 한 최소로 줄여 막의 수명과 성능을 최적화해야 한다. 전처리는 이러한 목적을 위한 부대설비 및 방법들을 통칭한다. 전처리의 구체적인 주요한 목적은 다음과 같다.

- 역삼투분리막에 적합한 원수를 만든다
- 역삼투분리막의 표면이나 원수 유로에 오염을 일으킬 수 있는 가능성을 없앤다
- 원수가 가지는 오염 요소를 최소화하여 CIP(Cleaning In Place)주기를 연장한다

5-2. 스케일 제어(Scale Control) 관련 이론

역삼투설비는 역삼투분리막을 통해 깨끗한 물을 생산하는 반면 걸러진 이물질들이 농축되어 흘러 나가는 고농도의 물(농축수, concentrate)도 생산한다. 이러한 현상은 역삼투분리막의 후단으로 갈수록 더 높은 농도의 물이 막 표면과 접촉하는 상황을 만든다. 결국 농축수(concentrate)에 존재하는 염(salt)이 용해도를 초과하는 경우가 발생할 수 있고 그에 따라 스케일(scale)이 생길 수 있다. 스케일이 형성되는 정도, 시간 등은 각 물질에 따라 독특한 특성을 지닌다.

스케일이 일어날 가능성을 알아보려면 역삼투분리막 표면에서 침전을 일으킬 수 있는 모든 물질들의 농도 및 용해도를 검토하여야 한다. 그 결과로 어떤 물질의 농도가 용해도를 초과할 가능성이 있다고 판단되면 그 물질의 스케일을 방지할 수 있는 방법을 강구해야 한다.

표 5-2.1 물에 일반적으로 존재하는 염

구 분	화학식	구 분	화학식
탄산칼슘 Calcium Carbonate	CaCO ₃	실리카(무수규산) Silica	Si(OH) ₄
황산칼슘 Calcium Sulfate	CaSO ₄	규산칼슘 Calcium Silicate	CaSiO ₃
불화칼슘 Calcium Fluoride	CaF ₂	규산마그네슘 Magnesium Silicate	MgSiO ₃
황산스트론튬 Strontium Sulfate	SrSO ₄	규산제1철 Ferrous Silicate	FeSiO ₃
황산바륨 Barium Sulfate	BaSO ₄		

2가철(ferric ion, Fe²⁺), 망간(manganic, Mn³⁺), 알루미늄(aluminum, Al³⁺) 등의 금속염은 물에 녹지 않는다. 원수에 존재한다면 역삼투분리막에 침전하는 것을 막기 위해 여과 등의 방법으로 제거해야 한다.

■ 농축수에서 염농도(salt concentration in concentrate)

농축수(concentrate)에서 염(salt)을 비롯한 이물질들의 농도를 개략적으로 알아보려면 회수율을 통해 계산할 수 있다. 원수의 농도에 농축배율을 곱해주면 된다. 이 경우 농축배율(concentration factor)은 다음과 같다.

$$\text{농축배율} = \frac{1}{1 - \text{회수율}}$$

그러나, 실제적으로 일어나는 현상은 이 식과는 다르다. 순수한 물이 막을 통과하면서 남는 이물질이 농축수에 전체적으로 고르게 확산되어야 농축수가 전체적으로 균일한 농도를 유지하게 되는데 실제로는 막 표면층의 농도가 전체 농도보다 약간 높게 된다. 이를 농도분극(concentration polarization)이라고 한다.

농도분극의 정도는 원수유로를 흘러 나가는 물이 일으키는 와류(turbulence)에 의해 영향을 받는다. 일반적인 나선형(spiral wound) 형태의 막에서는 보통 막 표면의 농도가 전체농도에 비해 10~20% 정도 높다. 이를 고려하면 농축배수는 다음과 같다.

$$\text{농축배율} = \frac{\text{분극율}}{1 - \text{회수율}} \qquad \text{분극율} = \frac{\text{막표면 농도}}{\text{전체 농도}} = 1.1 \sim 1.2$$

■ LSI (Langelier Saturation Index)

LSI는 탄산칼슘(CaCO₃)의 스케일(scale) 형성 가능성을 나타내는 지수로 원수의 TDS 농도가 5,000ppm 이하인 경우에 잘 맞는다. LSI가 0보다 낮은 물에서는 탄산칼슘의 스케일 형성 가능성은 매우 낮다. 반대로 0보다 커지면 스케일이 형성될 가능성이 높다. 이 수치를 이용하면 농축수에서 스케일이 형성되지 않는 가능한 농도를 추산할 수 있다. 또한 이 LSI를 이용해 물의 부식성을 판단할 수 있다. LSI가 낮을 수록 부식성이 크다고 말할 수 있다.

$$\text{LSI} = \text{pH} - \text{pH}_s$$

$$\text{pH}_s = (9.3 + A + B) - (C + D)$$

여기에서 : $A = (\text{Log}_{10}[\text{TDS}] - 1) / 10$

$$B = -13.12 \times \text{log}_{10}(\text{°C} + 273) + 34.55$$

$$C = \text{Log}_{10}[\text{Ca}^{2+} \text{ as CaCO}_3] - 0.4$$

$$D = \text{Log}_{10}[\text{alkalinity as CaCO}_3]$$

pH_s : Saturation $\text{pH}(\text{CaCO}_3$ 가 물과 평형 상태로 있을 때의 pH)

TDS(mg/L)를 제외한 나머지 괄호의 단위는 moles/L

■ SDSI (Stiff and Davis Saturation Index)

원수의 TDS 농도가 5,000ppm을 넘을 때 LSI는 정확도가 떨어진다. 원수의 TDS 농도가 5,000ppm 이상인 물에 대해서는 실험을 통해 LSI를 수정한 SDSI가 사용된다.

$$\text{SDSI} = \text{pH} - \text{pCa} - \text{pALK} - K$$

ALK : Total Alkalinity Concentration

K : 온도와 Ionic Strength에 의존하는 상수

■ 용해도곱(Solubility Product)

포화점에서 용해도곱 상수는 염(salt)을 구성하는 이온들의 농도와 다음과 같은 관계를 가진다.

$$K_{\text{SP}} = [\text{양이온}]^x \times [\text{음이온}]^y$$

특정 염에 대해서 이온들의 농도곱이 K_{SP} 보다 클 경우 염들의 침전이 일어날 수 있다. 용해도곱 상수는 pH, 온도 및 용액에 존재하는 다른 염들의 특성에 영향을 받는다. 하지만 개략적인 계산에서 이들은 무시될 수 있다. CO_3^{2-} (carbonate) 침전이 아닌 경우 대부분은 침전이 상당히 느리게 일어나기 때문에 침전이 일어나기 시작하는 정확한 시점을 판단하기는 어렵다. 역삼투설비에서는 물이 계속해서 이동하기 때문에 용해도 한계 정도의 범위에서 일어나는 침전은 큰 문제가 되지 않는다. 충분한 크기의 결정이 생기더라도 막 표면에 침전되기 전에 흘러 나갈 가능성이 높다.

5-3. 스케일 제어(Scale Control)

1) 산 주입(Acid injection)

탄산칼슘 스케일(calcium carbonate scale)을 막을 수 있는 가장 효과적인 방법은 원수의 pH를 낮추는 것이다. 산은 HCO_3^- (bicarbonate)를 이산화탄소로 바꾼다. 일반적으로 pH가 6.0 정도로 낮아지면 HCO_3^- 는 약 80% 가량 감소한다¹.



HCO_3^- 는 CO_3^{2-} (carbonate)의 공급원이 되므로 물의 pH를 낮추어 HCO_3^- 의 농도를 줄이면 탄산칼슘 스케일을 방지할 수 있다. 또한, pH를 낮추게 되면 탄산칼슘의 용해도가 커진다.

산 주입의 다른 이점은 이미 침전된 탄산칼슘을 녹일 수 있다는 것이다. 이러한 방법을 이용하면 침전된 스케일들을 어느 정도 다시 녹여 낼 수 있다. 하지만 SO_4^{2-} (sulfate)나 실리카(silica)에 의한 침전인 경우에는 이러한 방법으로도 제거하기 어렵다. 어떠한 이유로든 산을 주입하여 스케일을 제어하는 역삼투설비에서 가동이 정지되는 경우, 과포화된 이산화탄소가 물에서 분리되어 pH가 올라간다. 이럴 때 후단의 분리막에서는 고농도의 염이 존재하므로 침전이 일어날 가능성이 높아진다. 운전정지 시간이 길어질 경우 문제를 일으킬 수 있으며, 특히 셀룰로오스계(cellulose acetate type)막의 경우 침전되는 탄산칼슘(calcium carbonate)으로 인해 막 표면 측의 pH가 상승해 가수분해 현상이 일어나기 쉽다.

산을 주입하게 되면 부유물(SS) 성분의 음전하를 줄여 응집을 일으킨다. 따라서 산을 주입하는 지점은 다층여과필터(multi media filter)의 전단이 바람직하다.

산 주입의 가장 큰 단점은 많은 이산화탄소 가스가 발생하는 것이다. 이산화탄소는 역삼투분리막을 쉽게 통과하며 역삼투설비 후단의 후처리 과정에서 주요 오염물질이 될 수 있다.

2) 스케일 억제 및 분산(Scale inhibition and dispersion)

스케일 억제제(scale inhibitor)는 염(salt)의 결정이 침전될 정도로 커지는 것을 방지한다. 결정을 형성하는 면에 억제제가 흡착하여 과포화된 염이 결정의 표면으로 끌려가지 않도록 한다.

¹부록 10-12 CO₂용액의 pH에 따른 이온화도 참조

5

전처리 (Pretreatment)

대부분의 억제제는 어느 정도의 분산작용을 한다. 염(salt), 철(Fe), 유기물 등의 입자를 음전하의 스케일 억제제가 둘러싸 입자들끼리 뭉치는 것을 방해하기 때문이다. 스케일 억제제는 스케일이 형성되는 과정 및 스케일 결정들이 뭉치는 과정을 늦추는 작용을 하며, 역삼투설비에서는 농축수가 시스템 밖으로 흘러나가는 시점까지 작용을 해야 한다.

황산과 스케일 억제제를 동시에 주입하는 경우에 억제제는 산보다 전단에서 투입해야 한다. 산을 주입하는 과정에서 SO_4^{2-} (sulfate)의 농도가 지엽적으로 높아져 침전물의 결정이 생기는 현상을 효과적으로 막아 줄 수 있어야 하기 때문이다.

만약 스케일 억제제가 너무 많이 투입된다면 양이온과 억제제의 화합물이 용해도를 초과하여 침전될 수 있다. 여러 가지 스케일 억제제가 혼합된 약품을 사용하여 이러한 현상을 최소화할 수 있다. 스케일 억제제의 효과는 부가적이거나 혹은 그 이상이며 자체가 침전될 가능성은 줄어든다. 각 억제제는 서로를 용액 내에 유지시키는 작용을 한다. 스케일 억제제의 작용은 역치(threshold)효과를 나타내므로 필요한 일정량 이상의 과량은 크게 효과를 나타내지 못한다.

구 분	특 징	비 고
SHMP	<ul style="list-style-type: none"> · 저가이며 스케일제어 효능 우수 · 섞기 어렵고 불안정 · 적절한 사용이 어려워 사용 감소 추세 · 가수분해시 효율 저하 	인산염으로 가수분해되어 중성과 염기성에서 칼슘과 침전 가능
Organo-Phosphonate	<ul style="list-style-type: none"> · 가수분해에 대해 SHMP보다 안정적 · 억제능력과 분산능력은 SHMP와 비슷 	SHMP보다 고가
Polyacrylic acids(PAA)	<ul style="list-style-type: none"> · 분자량 2,000~5,000일 경우 억제력, 분산력 우수 · 분자량 6,000~25,000일 경우 분산력은 우수하나 스케일 억제 능력은 떨어짐 	
혼합형	<ul style="list-style-type: none"> · 저분자량의 PAA + Organophosphonate · 저분자량의 PAA + 고분자량의 PAA · 분산력과 스케일제어 능력 증대 	

※ SHMP : Sodium Hexa Meta Phosphate

■ 스케일억제제(scale inhibitor)의 종류

SHMP가 가장 많이 사용되는 스케일 억제제이지만 효과가 좀 떨어지는 편이다. SHMP는 최종 농축수에 20ppm 정도의 농도로 존재하게 주입한다. 고분자 유기 응집제는 SHMP에 비해 효과적이지만 양이온성 물질들과 만나 껌같은 아주 제거하기 어려운 침전물을 형성할 수 있다. 대부분의 고분자 억제제는 COOH나 PO₄ 작용기를 가지며 2,000~5,000 정도의 분자량을 지니는 폴리아크릴레이트(polyacrylic acids)가 보통 사용된다. 이들은 CO₃(carbonate)나 SO₄(sulfate)를 억제하는데 최적의 효과를 낸다.

3) 연수화(Water softening)

역삼투설비로 들어가는 원수를 이온교환수지로 경도 성분을 제거하는 것을 연수화라 한다. 주로 칼슘(calcium), 마그네슘(magnesium), 철(iron) 등의 성분들이 제거된다.

■ 강산성 양이온 교환 수지

일반적으로 연수장치에는 강한 음전하를 띄는 작용기들이 있는 수지가 사용된다. 다가의 이온들(Ba, Ca, Mg, Sr 등)이 통과하면서 Na와 교환되는 과정으로 경도 성분이 제거된다. 경도 성분이 생산수에서 검출되는 경우 재생을 해야 하며 NaCl 수용액을 사용한다. 이온교환 과정에서 원수의 pH 변동은 없으므로 원수에 존재하는 양 이상으로 CO₂가 발생하지 않아 탈탄산 장치를 필요로 하지 않는다.

이 방법은 재생이 적절하게 이루어지는 경우에는 매우 효과적이며 안전하다. 하지만 과량의 NaCl이 사용되어 환경문제나 비용문제가 발생한다. 작은 규모의 염수용으로 적합하며 해수에는 사용하지 않는다.

재생은 일반적으로 다음과 같은 과정을 거친다.

역세

수지 위에 쌓인 고형물들을 제거하기 위해 필요하다. 수지가 약 50% 정도까지 떠오를 만큼의 유량으로 역세 한다. 대개 시간은 10분 정도 혹은 역세수가 깨끗해질 때까지 한다. 수지가 떠오르는 정도는 온도에 큰 영향을 받기 때문에 역세시 주의를 할 필요가 있다. 같은 유량에서 수온이 높을 경우 팽창율은 떨어진다.

재생

경도 성분이 Na보다 더 큰 이온성을 띠기 때문에 수지에 더 강한 친화력을 가진다. 하지만 Na 이온이 절대적으로 많아질 경우 수지에 있는 경도 성분은 떨어질 수 있다.

일반적으로 10%의 NaCl 용액을 사용하고 유량은 1.0GPM/ft³ 정도로 한다.

세척

약 1GPM/ft³으로 과량의 NaCl을 씻어 낸다. 천천히 진행하여 바닥의 수지가 NaCl 용액과 충분한 반응 시간을 갖도록 한다.

이 후 1.5GPM/ft³ 정도의 유량으로 잔류하는 경도 성분과 과량의 NaCl을 씻어 낸다. 대체로 경도 성분이 먼저 씻겨 나온다. 어떤 경우에는 경도 성분이 원수와 생산수에서 같은 농도가 될 때 연수장치를 정상 가동하기도 한다. NaCl의 농도가 전 후단에서 같아지도록 하려면 역세 시간이 매우 길어진다.

■ 약산성 이온교환수지

수소이온과 양이온을 교환하는 수지로 재생시 강산을 사용한다. 대체로 대용량의 염수(brackish water)용 설비에 부분적인 연수화 장치로 적용된다. 수소이온이 흘러나오기 때문에 사용하면서 pH가 낮아지고 수지의 산성기를 띠는 작용기가 COOH기 이므로 COOH기가 더 이상 수소이온을 해리하지 않는 pH4.2 정도에 이를 때까지 이온교환이 이루어진다. 따라서 부분적인 연수화 작용을 하여 HCO₃에 붙어 스케일을 형성하는 양이온들만을 제거한다. 높은 농도의 HCO₃를 함유하고 있는 원수에 적합한 처리 방법이며 HCO₃를 이산화탄소로 바꾼다.

이 약산성 이온교환수지는 자체적으로 산을 주입하는 것과 같은 효과를 낸다. 또한 Na를 재생에 사용할 필요가 없어 잔량의 Na이 문제가 되는 반도체나 음료수 등의 응용분야에서는 매우 중요한 전처리가 될 수 있다. 재생을 위해 사용되는 산의 양이 적어 운전비용이 적게 들고 환경에 대한 부담이 적다.

단점은 HCO₃를 제거하면서 이산화탄소가 발생하는 것과 경도 성분이 생산수에 남는다는 점이다. 완전한 연수화가 필요하다면 강산성 양이온 교환 수지를 후단에 사용할 수 있다. 재생을 위해 들어가는 약품은 강산성 양이온 교환 수지를 한 번만 거치는 것에 비해 적게 들지만 초기 투자비가 많이 든다.

운전 중에 발생하는 수소이온 때문에 생산수의 pH가 3.5 ~ 6.5 사이에서 변화한다. pH가 낮은 곳에서는 무기질산(mineral acid)의 투과가 증가하기 때문에 생산수 수질이 나빠진다. 두 개 이상의 설비를 병렬로 장치해 일정한 pH 범위 안에서 운전하면 이러한 문제를 줄일 수 있다.

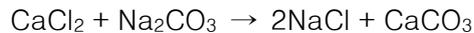
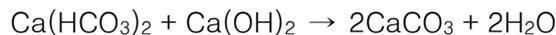
연수장치의 기타 작용

콜로이드의 안정화 : 콜로이드의 전하를 중화시켜 침전할 여지를 남기는 양이온들을 제거하여 콜로이드를 안정화시킨다. 다가의 양이온을 나트륨(Na)으로 치환할 경우 콜로이드 성분은 훨씬 더 높은 농도로 설비 내에 존재할 수 있다.

잔류 응집제의 제거 : 양이온성(cation) 고분자 응집제를 사용했을 경우 응집제가 설비를 통과해 문제를 일으킬 가능성이 있지만 연수장치로 이를 제거할 수 있다. 응집제의 경우 역세시 고농도의 염소(Chlorine)를 역세수에 넣어 주어야 제거가 용이하다.

4) 석회를 이용한 연수화(Lime softening)

수산화칼슘(Ca(OH)₂)을 사용하여 CO₃를 제거할 수 있으며 CO₃와 관련 없는 과량의 칼슘경도 성분은 소석회(soda ash, Na₂CO₃)를 사용하여 추가로 줄일 수 있다. 이 방법은 시간당 200톤 이상의 염수(brackish water)처리 설비에서 고려할 만하다.



응집을 위해 알루미늄나트륨(sodium aluminate)과 제2염화철(ferric chloride)을 약품으로 사용하는 경우 탄산칼슘(calcium carbonate), 규산화합물(silicic acid complex), 산화알루미늄(aluminum oxide), 철(iron) 등이 침전물에 포함된다. 섭씨 70도에서 석회를 이용해 규산(silicic acid)을 제거하는 공정에서는 석회(lime)와 다공성 산화마그네슘 (magnesium oxide)의 혼합물을 사용하여 규산을 1ppm 정도까지 줄일 수 있다.

석회를 이용한 연수화 방법으로 바륨(Ba), 스트론튬(Sr) 및 유기물 등도 제거할 수 있다. 이 방법을 사용하려면 결정화 과정의 핵으로 작용하는 고농도의 침전물이 있는 반응조가 필요하다. 또한 후단에서 미디어필터 여과와 pH 조절을 해주어야 한다. 이 때 고체와 액체의 분리가 잘 되도록 철 계통의 응집제가 사용될 수 있다. 고분자 응집제

5

전처리 (Pretreatment)

(flocculent, 음이온성 혹은 비이온성)를 함께 사용할 수도 있다.

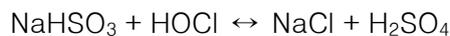
표 5-2.2 스케일(scale)을 막는 일반적인 방법

스케일 종류	제 어 방 법	원 리
카보네이트 Carbonate	산 주입	HCO ₃ 를 CO ₂ 로 바꿈
	연수화	양이온 경도 낮춤
	스케일억제제/분산제 주입	입자들의 뭉침 억제
	회수율 낮춤	농축수에서의 농도 낮춤
황산기 Sulfate	연수화	양이온 경도 낮춤
	스케일억제제/분산제 주입	입자들의 뭉침 억제
	산 주입	황산기(Sulfate)의 용해도 증가
	회수율 낮춤	농축수에서의 농도 낮춤
이산화규소 (실리카) Silica	회수율 낮춤	농축수에서의 농도 낮춤
	온도 올림	용해도 높임
	분산제(dispersant) 주입	입자들의 뭉침 억제
철 혹은 망간	산화 후 여과	불용성 상태로 산화시켜 여과
	연수화	철과 망간을 제거

5-4. 산화제의 제어

원수에 존재하는 철, 망간, 구리 등의 전이 금속이 산화제(잔류염소 등)와 함께 있을 경우 산화제의 활성이 촉매 역할을 하여 역삼투분리막의 산화를 촉진한다. 전이금속의 존재 하에서는 폴리아미드계(PA type) 분리막의 경우 아주 미량의 산화제만 존재하여도 역삼투분리막의 산화가 일어날 수 있다. 셀룰로오스아세테이트계(CA type) 분리막도 예외는 아니어서 산화제에 잘 견디기는 하지만 전이금속에 의한 촉매작용으로 분리막에 손상이 올 수 있다. 이러한 경우 분리막의 손상은 앞쪽에서 두드러진다. 미생물을 제어하기 위한 약품으로 잔류염소(NaOCl)를 사용하지 않고 반응성이 훨씬 약한 클로라민(chloramine) 등을 이용하면 어느 정도 문제를 해결할 수 있다. 클로라민은 발암물질로 알려진 트리할로메탄(THM)을 형성하지 않는 장점도 있다. 하지만, 이 클로라민도 정도는 약하지만 역삼투분리막을 산화시키는 작용을 하므로 폴리아미드계 분리막을 사용할 때는 역삼투설비에 주입되기 전에 제거하는 방법을 고려하는 것이 좋다.

산화제를 제거하기 위해서는 활성탄 여과장치나 환원제를 사용할 수 있다. 환원제로는 Na_2SO_3 (sodium sulfite), NaHSO_3 (sodium bisulfite, SBS), $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ (sodium metabisulfite), $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (sodium thiosulfate) 등이 있다. 이러한 약품들은 산화제와 반응하고 1ppm 정도가 남을 정도로 충분하게 주입하여야 한다.



폴리아미드계 분리막에 산화제가 유입되지 않도록 하는 것은 아주 중요하기 때문에 주입장치를 이중으로 설치하는 것도 자주 검토된다. 또 다른 안전장치로 실제 약품의 작용을 확인할 수 있는 ORP 미터를 장착하기도 한다. ORP 미터는 원수가 산화된 상태인지 환원된 상태인지를 수치로 나타내 준다. 일반적으로 역삼투설비 원수의 산화환원전위는 175mV 이하여야 한다.

참고로 물이 환원된 상태(-100~-200 mV)에 있으면 황산기(SO_4)를 소모하는 혐기성 세균이 잘 번식하므로 산화환원 전위를 약간 산화된 상태(+)쪽에 있도록 유지하는 것이 미생물의 오염 방지에 도움이 된다.

5-5. 파울링 제어

많은 종류의 물에는 실트(silt), 콜로이드 등이 존재하며 세균, 진흙, 콜로이드성 실리카, 철이 부식된 부산물 등이 포함되어 있을 수 있다. 이러한 물을 원수로 하여 역삼투 설비를 운전하게 되면 이물질들이 농축되어 감에 따라 서로 뭉쳐서 침전물을 형성하게 된다. 이런 현상을 파울링이라 하는데 이것은 역삼투분리막의 성능에 영향을 주며 특히 생산수량에 큰 영향을 미친다.

파울링 현상은 전처리 과정에서 주입하는 명반(alum), 제2염화철(ferric chloride), 양이온성 고분자전해질(cationic polyelectrolyte) 등의 약품이 침전조나 여과장치에서 제거되지 않고 남아 있는 경우에도 발생한다.

파울링에 의해 역삼투분리막의 성능이 저하되면 세정(CIP)을 해야만 한다. 그러나 이는 시간과 돈이 투자되는 과정이기 때문에 역삼투설비의 경제성 있는 운전을 위해서는 세정주기를 길게 유지해야만 한다. 파울링 현상의 가능성에 대한 지표로는 SDI가 사용될 수 있으며 일반적으로 SDI는 5보다 낮게 유지되어야 하며, 4이하로 관리하는 것이 바람직하다. 이를 위해 응결(coagulation), 응집(flocculation), 여재를 이용한 여과(media filtration), 미세여과(micro filtration), 한외여과(ultrafiltration) 등이 사용된다.

1) 일반 여재를 이용한 여과(media filtration)

여재를 이용한 여과는 부유물(SS, suspended solids)을 줄이기에 매우 효과적인 방법이다. 여재로 모래, 석류석(garnet), 무연탄(anthracite) 등을 한 층 혹은 다층으로 사용한다. 크게 중력식 필터(gravity filter)와 압력식 필터(pressure filter) 두 종류로 나누어 볼 수 있다.

■ 중력식 필터

중력에 의해 물이 여재층을 투과한다. 두 가지 여과원리가 작용하는데 하나는 입자의 크기에 의한 분리이다. 대부분의 입자의 분리는 여재의 상층에서 이루어진다. 다른 하나의 원리는 중력이다. 개개의 여재 위에 입자들이 중력의 힘으로 달라 붙게 된다. 가압이 되지 않으므로 단위 면적당 통과유량이 적어 큰 규모의 장치가 필요하다.

중력식 필터의 효과는 여재를 통과하는 물의 속도를 얼마나 느리게 하느냐에 달려 있다. 빠른 유속은 이물질이 여재층에 걸러지는 것을 방해하며 차압이 증가하는 효과도 나타낸다.

■ 압력식 필터

펌프를 이용하여 물이 다양한 크기와 밀도를 지니는 여재층을 통과하도록 한다. 위층에 크고 낮은 밀도의 여재를 아래층에는 작고 높은 밀도의 여재를 사용하여 중력식 필터에 비해 여재층의 전체를 효과적으로 사용하기 위해 고안되었다. 약 20 GPM/ft²의 유속으로 운전될 수 있지만 5 GPM/ft² 정도로 운전하여야 최적의 효과를 얻을 수 있다.

여기에 사용되는 여재로서 모래보다 크고 낮은 밀도를 가지는 무연탄(anthracite)이 상층에 많이 사용된다. 이 여재는 불규칙한 표면 형태를 가지고 있어 부유물질(SS)을 여과하는 기능이 향상된다. 하지만 균일한 크기를 지니는 여재에 비해 높은 차압이 걸리는 단점이 있다.

규산알루미늄(aluminium silicate)은 불규칙한 표면을 지니고 크기가 비슷해 무연탄(anthracite) 대용으로 사용하기도 한다. 무연탄보다 더 가벼워 무거운 아래층과 역세 후 더 잘 분리될 수 있다. 무수규산(silica sand)을 무연탄의 아래층에 사용하기도 하나 밀도차가 충분히 크지 않아 역세 후 두 층이 섞여 다층을 이용하는 효과가 점점 줄어든다.

석류석(garnet)은 무수규산(silica sand)과 비슷한 크기에 높은 밀도를 지녀 무연탄(anthracite)의 아래층에 사용하기에 적합하다. 원수의 성상에 따라 여재층을 달리 구성할 수 있지만 일반적인 구성은 다음과 같다.

여 재	크 기	밀 도	총진깊이
무연탄(anthracite)	0.8 ~ 0.9mm	54 lb/ft ³	14" - 16"
석류석(garnet)	30 × 40 MESH	130 lb/ft ³	8" - 10"
석류석(garnet)	8 × 12 MESH	144 lb/ft ³	6"

일반적으로 다층여재여과필터(multi-media filter)의 역세는 차압이 10psig (약 0.7Kg/cm²) 정도 상승했을 때 시행하지만 역삼투설비에 들어가는 압력이 충분하지 않은 경우는 차압에 관계없이 역세할 필요가 있다. 차압이 15psig(약 1.0 Kg/cm²) 이상이 되면 부유물(SS)성분이 케익을 형성할 수 있고 반면에 이는 제거하기 매우 어렵다. 역세주기를 길게 가져가기 위해서는 필터의 직경을 크게 하여 유속을 줄여 준다. 이렇게 하면 제거효율도 좋아진다.

역세기 유속은 약 15GPM/ft²이며 이 때 하우징내에 약 50% 정도의 빈 공간이 필요하다.

다층의 여재를 이용하는 여과방식(depth filtration)은 여재사이의 간극에 의한 단순한 물리적 여과보다 훨씬 더 좋은 여과 효율을 얻을 수 있다. 작은 입자들을 여재표면 가까이 이동시키는 작용(mechanism)과 입자를 여재 표면으로 끌어 당기는 힘으로 여과효율을 높인다.

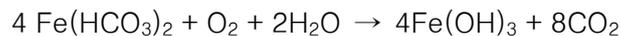
유속(flow rate)과 더불어 증가하는 관성력(inertial force)은 입자의 운동량(momentum)과 작용하여 여재와 접촉하도록 한다. 마이크론 이하(submicron) 크기의 입자에는 확산력(diffusive force)이 작용하여 입자가 여재와 접촉하도록 하는 무작위적 운동(random motion)을 일으킨다. 여재 사이를 지나는 물에 의해 생기는 유체 역학적 힘(hydrodynamic force)은 입자들이 여재사이의 공간에서 회전운동(rotational movement)을 하게 한다. 회전을 통해 발생하는 원심력에 의해 입자가 여재의 표면에 붙는다.

일단 입자가 여재의 표면에 붙게 되면 반데르발스힘(van der waals force)이 작용하여 떨어지지 않게 된다. 입자가 작을수록 물의 흐름에 의한 힘, 즉 전단력(shear force)에 의한 영향을 적게 받는다.

거친 여재 표면이 마모에 의해 없어지고, 역세로 제거되지 않는 유기물 등에 의한 오염은 대체로 시간에 비례하므로 여재는 주기적으로 교체해야 한다.

2) 산화 여과(oxidation filtration)

지하수는 경우에 따라 환원된 상태로 존재하는데 용존산소가 없고 2가의 철이나 망간(Fe^{2+} , Mn^{2+})이 있는 경우가 많다. 이러한 물이 염소약품(chlorine)으로 처리되거나 산소가 5ppm 이상 유입되는 경우 이 2가 이온들은 산화가 되어 녹지 않는 콜로이드성 수산화물을 만든다.



반응하는 방식은 비슷하지만 철(Fe^{2+})은 망간(Mn^{2+})보다 낮은 pH에서 반응이 일어나므로 철에 의한 파울링이 일반적으로 잘 나타난다. 이런 파울링은 SDI가 5보다 낮으면서 철의 농도가 0.1ppm 이하인 경우에서도 생길 수 있다. 물의 알칼리도가 높은 경우에는 철의 농도가 탄산철($FeCO_3$)에 의해 제한되므로 알칼리도가 낮은 물에 Fe^{2+} 의 농도가 높은 것이 일반적이다.

이러한 물을 처리하는 방법은 두 가지로 나누어 볼 수 있다. 하나는 물이 공기나 산화제에 노출되는 것을 막는 것이다. pH6 아래에서 산소가 0.5ppm 미만일 때

철(Fe²⁺)의 허용가능 농도는 최대 4ppm이다

인위적으로 산화시켜 침전물을 만든 후 여과하는 방법을 사용할 수도 있다. 염소 (Cl₂), 과망간산칼륨(KMnO₄)등이 산화제로 사용된다. 산화력이 있는 녹사(greensand) 나 birm같은 여재를 사용하면 산화와 여과를 동시에 수행할 수 있다.

■ 녹사여과(greensand filtration)

녹사(galuconite sand, green sand)에 화학적으로 처리하여, 산화망간(manganese oxide)을 표면에 입혀 망간녹사(manganese greensand)를 만든다. 이 여재는 물 속에 존재하는 철, 망간, 황화수소(H₂S)를 산화시켜 물에 녹지 않는 상태로 만들어 여과한다. 약 0.01ppm 수준까지 여과할 수 있다. 여재의 산화력이 감소하면 과망간산칼륨(약 1 온스/ft³ 여재)으로 재생한다.



2ppm 이상 고농도의 철(Fe²⁺)이 물 속에 존재하면 환원제를 연속적으로 주입하여 사용한다. 산화제가 역삼투 분리막에 유입되지 않도록 하는 주의가 필요하다.

염소 필요량

산화대상 물질	필요량(Cl ₂)	최소 사용량(Cl ₂)
Fe ²⁺ 1 ppm(Ion)	1.3 ppm	1.3 ppm
Mn ²⁺ 1 ppm(Ion)	2.6 ppm	2.6 ppm
H ₂ S 1 ppm(Sulfur,S)	4.4 ppm	5.0 ppm

■ BIRM FILTRATION

birm filtration 역시 철(Fe²⁺)을 효과적으로 제거할 수 있으나 pH 상승으로 인해 스케일 발생의 여지가 있으므로 주의가 필요하다. birm은 자체적으로 산화시키는 능력은 없고 산화를 촉진할 뿐이다. 따라서 일정 농도의 용존산소가 필요하다. 가격이 싸고 화학약품의 사용이 필요 없다는 장점이 있다.

3) 응결(coagulation)

응결 방법은 물 속에 존재하여 탁도를 나타내는 진흙입자, 유기물, 세균, 조류, 색소 등의 콜로이드성 물질들을 모아 덩어리를 이루도록 하여 제거하는 것을 말한다. 응결제는 이러한 작용을 하여 이물질의 침전을 도우며 처리수의 수질을 개선한다.

■ 원리

물 속에 녹아 있는 콜로이드성 입자들은 대부분 표면에 음전하를 띠고 있어 침전되지 않는 상태로 존재한다. 이 상태에서는 제타전위(zeta potential), 반데르 바알스힘(van der waals force), 중력 등이 평형을 이루고 있다. 응집제는 입자 표면의 전하를 중화하여 제타전위를 감소시키므로 입자들이 큰 덩어리로 뭉칠 수 있게 한다. 고분자 계열의 응집제는 여러 입자들을 묶어 함께 침전하는 방식으로 이와 같은 작용을 한다. 하지만 과량이 투입되어 제타전위가 (+)가 되면 실질적인 SS의 용해도가 오히려 증가할 수 있다.

■ 문제점

고분자 응집제는 과량으로 투입되어 미디어필터를 지나는 경우 그 자체가 역삼투 분리막에 큰 문제를 일으키는 오염 요소(foulant)가 된다. 또한 스케일방지제(antiscalant) 등이 함께 투입되는 경우 이들과 침전물을 형성할 수도 있다. 이러한 이유로 고분자 응집제를 역삼투설비에 사용하는 경우는 많지 않다. 단순히 높은 SDI를 낮추기 위한 수단으로 응집제를 사용하는 것은 바람직하지 않을 수도 있다. SDI가 높더라도 CIP주기 및 효율정도가 응집제의 사용에 의한 오염의 경우보다 좋게 나타나는 경우가 많다.

양이온성 고분자 응집제를 사용하면서 응집제의 투과가 문제로 대두될 경우 이것은 강산성의 양이온교환수지로 해결할 수 있다. 응집제의 양이온성이 강산성 이온교환수지의 음전하에 끌려 제거된다. 수지를 응집제 제거용으로만 사용한다면 염화나트륨(NaCl)을 사용하지 않을 수도 있다. 1% 정도의 고농도 염소약품(chlorine)으로 가끔 처리해주는 것으로 충분할 수 있다.

■ 응집제의 종류

구분	종류	화학식 및 이름
유 기 응집제	Cationic Polymer	Polyacryl Amine
	Cationic Detergent	Dodecyl Amine
	Anionic Detergent	Dodecyl Benzene Sulfonate
무 기 응집제	Ferrous Sulfate	FeSO ₄ , 녹반
	Ferric Sulfate	Fe ₂ (SO ₄) ₃
	Ferric Chloride	FeCl ₃
	Aluminum Sulfate	Al ₂ (SO ₄) ₃ , 유산반토, Alum
	Aluminum Potassium Sulfate	Al ₂ (SO ₄) ₃ K ₂ SO ₄ , 칼륨명반
	PAC(Polyaluminum Chloride)	Al(OH) _n Cl _{6-n}

4) 활성탄여과(activated carbon filtration)

활성탄(activated carbon)은 유기물, 잔류염소, 클로라민 등을 제거하는데 아주 효과적인 여재이다. 반데르발스(van der waals) 힘에 의한 인력이 유기물을 흡착하는 주요 요인이다. 유기물을 제거하는 능력은 유기물의 성상에 따라 다르지만, humic acid나 fulvic acid 같은 높은 분자량의 유기물을 잘 제거한다.

활성탄은 잔류염소(chlorine)나 클로라민(chloramine) 등을 역삼투설비 전단에서 제거하는데 자주 이용되어 수질의 개선 및 폴리아미드계 분리막 보호 등의 기능을 한다. 잔류염소의 흡착이나 분해에는 아주 뛰어나지만 클로라민에 대해서는 효과가 그보다 낮다.

■ 트리할로메탄(THM) 제거

잔류염소와 유기물의 반응물질인 트리할로메탄(THM)은 발암물질로 알려져 있다. 음용수에서 주요 제거 대상 물질이지만 일반적인 산업 전반에서도 문제가 된다. 미량의 트리할로메탄은 역삼투 분리막, 이온교환수지 등에 의해서도 잘 제거되지 않는 물질이기 때문이다. 고순도의 물을 만들어 내는 시스템에서 미량의 THM은 자외선살균기(UV) 사용 후 비저항이 감소하는 것으로 확인할 수 있다. UV가 THM을 분해하여 Cl⁻ 이온을 형성하기 때문이다.

THM을 제거하는데 필요한 활성탄의 양을 계산하기 위해 EBCT(Empty Bed Contact Time) 개념을 사용한다. 물이 활성탄으로 채워지게 될 필터탱크의 내부를 흘러

나가는데 걸리는 시간을 EBCT라 한다. 활성탄을 사용한 일반적인 수처리의 경우 약 3분의 EBCT가 적용된다. 이것을 이용하여 필요한 활성탄의 양은 다음과 같이 계산한다.

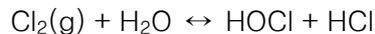
$$V = (Q \times EBCT) \times 97.48$$

V : 필요한 활성탄의 부피(FT³)

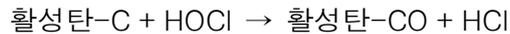
Q : 유량(water flow rate, GPM)

■ 활성탄과 잔류염소(chlorine) 혹은 클로라민(chloramine)의 반응

잔류염소(chlorine)는 물과 반응하여 차염소산(hypochloric acid)과 염산(HCl)으로 바뀌다가 어느 시점에서 평형을 이룬다.



활성탄은 다음과 같은 반응을 통해 잔류염소를 제거한다.



차염소산이 활성탄과 반응하여 줄어들면서 잔류염소가 계속 줄어들게 된다. 반응이 진행되면서 활성탄은 그만큼 산화된 형태로 남게 되어 잔류염소 제거능력이 떨어진다. 활성탄 1g은 Cl₂ 5g을 제거할 수 있다. 이를 토대로 활성탄의 수명을 계산하면 10년 이상이 나오지만 실제로는 유기 오염물이 유출되어 나오는 현상과 미생물의 활동을 막기 위해 6개월에서 1년 사이에 교체를 해야 한다.

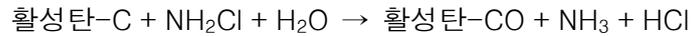
활성탄의 잔류염소제거 능력은 상당히 뛰어나기 때문에 활성탄층의 상층 일부만 잔류염소를 없애는데 사용된다. 따라서 활성탄층의 대부분은 살균력이 없는 물에 접촉하고 있게 된다. 여기에다 유기물들을 흡착하는 기능이 합쳐져 활성탄은 미생물이 번식할 수 있는 아주 좋은 환경을 조성한다. 역삼투설비의 전처리로 활성탄을 사용할 경우 미생물에 의한 파울링이 흔하게 나타난다.

활성탄에 여과된 부유 고형물(SS) 등을 제거하기 위해 역세를 할 수 있는데 보통 12GPM/ft² 정도로 한다. 역세시에 발생하는 문제점은 여재층이 다시 자리를 잡는 과정에서 유기물들이 유출될 수 있다는 것이다. 또한 활성탄의 미세한 가루들도 떨어져 나온다. 이러한 이유로 활성탄을 역세한 후에는 보통 10분 이상 세척을 해주어야 한다.

미생물에 의해 활성탄이 오염된 경우에는 NaOH(pH 10) 용액을 역세시 사용하여

제거할 수 있으며 증기를 이용할 수도 있다.

클로라민(chloramine)의 반응은 다음과 같다.



5) 카트리지 마이크로필터 여과(cartridge microfiltration)

고압펌프의 바로 전단에 반드시 사용하는 것이 좋다. 역삼투분리막과 고압펌프를 보호하는 기능을 한다. 아주 제한된 표면적을 가지고 있기 때문에 경제성에 대해서는 점검해 볼 필요가 있다. 너무 자주 막히는 수질 조건에서는 미디어필터 등을 전단에 사용해야 한다.

제거하는 이물질의 크기에 대한 것도 검토의 대상인데 역삼투설비의 세정주기와 카트리지 필터의 교체주기 사이의 경제성을 고려해야 한다. 대체로 역삼투설비 전단에는 5~25 μm 기공 크기의 노미날(norminal) 필터를 사용한다. 노미날 필터는 생산업체에서 제시하는 기공 크기에 대해 60%에서 80% 수준으로 정규분포 곡선의 제거효율을 가진다. 실리카의 농도가 높은 경우는 실리카와 철 및 알루미늄 등의 콜로이드가 반응하는 것을 막기 위해 1 μm 크기의 제품을 사용하는 것이 좋다.

고압펌프 바로 전단에 사용하는 용도의 필터로 가장 보편적인 것은 depth filter이다. 물이 일정 두께의 여재층을 지날 때 여재 밀도가 낮은 바깥쪽부터 높은 안쪽까지 전체의 필터에 이물질이 크기에 따라 여과되는 형식이다. 이렇게 하여 여과 효율을 좋게 하고 필터의 수명을 연장시킨다.

6-1. 개 요

역삼투설비에 적용되는 원리는 아주 간단하므로 몇 가지 항목들이 미치는 영향을 이해하고 분석하면 쉽게 관리할 수 있다. 역삼투설비에 파울링, 스케일링, 분리막 손상 등의 문제가 발생하면 바로 운전압력, 생산수 유량, 염제거율, 차압 등의 항목에서 이상을 나타내게 되기 때문이다. 간혹 멤브레인의 손상이 표면에 생긴 오염 때문에 겉보기로는 드러나지 않는 경우도 있으나 약품을 사용하여 세정(CIP)을 하면 그 손상 정도가 완전히 드러난다¹. 이러한 경우 분리막의 성능 저하는 약품의 부정확한 사용에 의한 것이 아님을 판단할 수 있어야 한다.

운전 과정에서 기록된 각 항목에 대한 자료들을 바로 객관적인 비교 자료로 사용하기는 어렵다. 운전 시점별로 각 항목들이 변화하고 있고, 각각이 서로 영향을 미치기 때문이다. 이러한 이유로 생기는 모호함을 없애기 위해 최초 운전 후 설비가 안정화된 상태의 조건들을 기준으로 삼고 향후 운전 시점에서의 측정된 자료들을 최초의 운전조건에 맞추어 보정했을 때의 결과를 가지고 설비의 상태를 판단하는 것이 좋다.

¹역삼투 분리막의 표면 활성층은 폴리아미드로 만들어져 있는 약 0.1~0.2 μ m 두께의 박막이다. 이 활성층이 여러 가지 오염원들의 문제로 굽힘 현상 또는 결합의 파괴 등으로 손상이 생겼을 때 스케일 등의 형성으로 손상부위가 일정 기간 막혀 있을 수 있다. 그러나 이런 스케일 등은 세정(CIP)을 통해 제거가 되므로 세정 이후 성능이 급격히 감소한 것처럼 보여질 수 있다.

6-2. 시운전

1) 운전전 확인 항목

역삼투설비를 시운전하기 전에 우선적으로 전처리 설비가 정상적으로 작동되는지 확인하여야 한다. 역삼투설비로 유입되는 원수의 중요한 수질분석 항목들이 적절한 기준 이내에 들지 않는 경우 전체적인 수질분석을 통해 원수의 상태를 확인할 필요가 있다.

- 원수 수질 : 유량, SDI, 탁도, 온도, pH, TDS, 잔류염소 등 기본 항목
- 각 여과장치의 운전 상태
- 각 약품 주입장치들의 운전 상태 및 주입량
- 각종 계측기기의 보정 및 장착 상태
- 이상 고압 및 저압 등에 대처하기 위한 안전장치들의 장착 상태
- 배관의 연결 부위, 베셀의 고정 상태
- 펌프의 상태
- 각종 밸브의 개폐

2) 시운전 순서 및 방법

- 원수가 분리막에 유입되지 않도록 한 상태에서 전처리 부분 전체의 이물질을 완전히 씻어 낸 후에 다음과 같은 시운전을 한다.
- 모든 밸브가 올바른 상태에 있는지 점검한다. 특히 원수 압력 조절 밸브와 농축수 조절 밸브가 완전히 열려 있는지 확인한다.
- 원수 공급 펌프가 설치되어 있는 경우에는 이것을 사용하고, 설치되어 있지 않은 경우에는 원수 측으로부터 공급되는 원수의 낮은 압력을 이용하여 분리막에 들어있는 화학약품 및 공기 등을 30분 이상 씻어 낸다. 가능한 낮은 압력(60psig 이하)을 이용하여 적은 유량으로 운전하면 좋다. 이때 농축수와 생산수는 버린다. 이 공정에서 파이프의 이음 상태 및 밸브의 누수 여부를 상태를 점검한다. 30분 이상 씻어 낸 후에 원수 압력 조절밸브를 닫는다. 이때, 농축수 조절 밸브가 완전히 열려 있어야 한다.
- 베셀로 인입되는 부분의 원수 압력 조절밸브를 닫아 약간만 열어 둔 상태에서 고압펌프를 가동시킨다.
- 천천히 원수 압력 조절 밸브를 열어 원수 압력을 천천히 상승(분당 4.0 kg/cm² 미만)시키면서 농축수 유량이 설계치에 이르도록 한다. 열려 있는 농축수 밸브를 천천히 닫아 가며 회수율이 설계치 근처에 이르도록 조절한다. 생산수 유량과 회수율이 설계치에 도달될 때까지 반복한다. 이때, 회수율과 시스템 압력이 설계 한계치를 넘지 않도록 주의해야 한다.
- 조절이 끝나면 시스템 회수율을 다시 계산하여 시스템 설계치와 비교한다.
- 각 종 약품의 주입량을 확인한다.
- 전도도, pH, 경도, 알칼리도 등을 측정하여 주어진 회수율에서 스케일 형성의 문제가 없는지 판단한다.
- 운전 후 약 1시간 후 모든 운전 자료를 기록하고 특별한 문제가 없는지 확인한다.

운전 후 약 이틀 후 다시 모든 운전 자료를 기록하여 향후 운전자료와 비교하는 기준이 되도록 한다.

- 원수와 생산수 및 농축수의 수질을 분석한다.
- 운전 자료와 수질분석 자료를 참고하여 설비가 설계기준에 비추어 정상적으로 운전되는지 점검한다.
- 시운전 후 첫 주 동안은 전체 관리항목에 대해 매일 점검을 해 보는 것이 좋다.

6-3. 주기적 관리 항목

1) 전처리 설비

■ 각 여과장치의 인입 압력과 토출 압력(차압관리)

모래 여과장치(sand filter), 다층 여과장치(multi-media filter), 활성탄 여과장치(activated carbon filter) 등의 역세 시기를 판단

■ 잔류염소(free chlorine) 측정

- 활성탄 여과장치 후단 혹은 역삼투설비 전단에서 잔류염소의 양을 측정
- 활성탄의 정상적인 작용 및 환원제의 적절한 주입 상태를 확인

■ 연수장치(softener) 재생주기 및 생산수 수질

- 재생 후 다음 재생 때까지의 생산수량을 확인하여 수지의 경도 제거 능력 관리
- 연수장치 생산수 경도를 측정하여 재생주기를 지나지 않도록 관리

■ 마이크로필터의 인입 압력과 토출 압력

- 고압펌프에 충분한 압력으로 물을 밀어주고 있는지 확인
- 차압을 통해 마이크로필터의 오염 정도 판단

■ SDI(Silt Density Index)

각 여과장치의 전후단에서 측정하여 각각의 운전 상태를 확인

■ 탁도

SDI와 함께 측정하여 상호 보완

■ pH

스케일을 제어하기 위해서 pH 조절 방식을 사용하는 경우 매우 중요한 항목

■ 각종 전처리 약품의 소모량

2) 역삼투설비

■ 원수 수질에 대한 정확한 분석

■ 농축수의 LSI(5,000 ppm 미만) 혹은 SDSI(5,000 ppm 이상)

■ 역삼투설비의 생산수량

역삼투설비가 실제로 가동된 정도를 확인하여 세정주기 산정시 참고

■ 역삼투설비 인입 압력

고압 펌프 후단에 밸브가 있을 경우 밸브 후단의 압력
 → 압력계가 밸브의 바로 뒤에 설치되면 압력계를 지나는 유속이 빠르기 때문에 실제 걸리는 압력보다 낮은 압력이 측정될 수 있으므로 주의가 필요

■ 베셀별 차압

물이 분리막을 지날 때 생기는 저항을 나타내 주는 지표

■ 생산수 유량, 농축수 유량 및 회수율

스케일 형성의 주요 요인

■ 원수 TDS, 생산수 TDS 및 염제거율

염제거율 = $(1 - \text{생산수TDS}/\text{원수TDS}) \times 100$

■ 농축수 농도

원수 농도와 농축수 농도를 통해 평균적으로 분리막에 작용하는 농도를 계산하여 평균 염제거율을 계산한다. 유량과 농도의 정확성을 확인하기 위해 사용되기도 한다.

$$\text{생산수유량} \times \text{생산수TDS} + \text{농축수유량} \times \text{농축수TDS} = \text{원수유량} \times \text{원수TDS}$$

■ 베셀별 생산수 농도 및 생산수 유량

■ 계측기 보정

기록 중인 자료가 신빙성을 가지기 위해서는 주기적인 계측기의 보정이 필요하다.

6

운전 (Operation)

- pH 측정계

측정치의 변동이 심한 계측기이므로 매달 정기적인 점검이 필요하다

- 유량계

물을 세정 탱크 등에 직접 받거나 다른 계측기를 장착해 보아 상태를 확인할 수 있다.

- 전도도계

매달 센서를 닦아 주는 것이 좋으나 측정치가 크게 흔들리지 않으면 괜찮다.

- 압력계

압력계 보정 장치나 보조 측정장치를 사용하여 점검할 수 있다.

3) 작업일지 기록

■ 설비 보수를 위한 주기적인 작업상황 기록

→ 부품 교체, 설비추가 및 보수

■ 역삼투분리막의 장착위치 변경 등에 관한 정보 기록

■ 각종 계측기의 보정 내용

■ 분리막 세정작업 내용

→ 일자, 시간, 약품종류 및 사용량, 유량, 압력, pH, 온도

6-4. 데이터 보정(data normalization)

데이터 보정은 기록한 운전 자료를 설비 상태를 가장 잘 반영하는 형태로 변환하는 것을 말한다. 각각의 운전 자료는 상호 연관되어 있으므로 하나의 항목에 변화가 있다고 하더라도 다른 항목들의 변화를 함께 고려하지 않는다면 실제 일어난 변화인지 아닌지를 판단할 수 없다. 따라서 서로 연관성이 있는 항목들을 상수로 표준화하여 주요한 항목 1개의 변화만을 비교할 수 있도록 하는 자료의 보정 작업이 필요하다. 보정된 자료는 일반적으로 설계 성능 혹은 시운전 후의 안정화된 성능과 비교한다. 주기적으로 기록된 운전 자료를 보정하여 그래프를 그리면 설비에 나타날 수 있는 문제를 사전에 알아낼 수 있다. 자료의 보정을 통해 확인하고자 하는 설비상의 변화는 다음의 네 항목이며,

- 분리막의 오염(fouling, scaling)
- 분리막 조직의 화학적 손상
- 물리적 파손(O-ring, 접착부위, 기타)
- 유로 막힘(비정상적으로 들어온 이물질 혹은 막 표면의 오염에 의한)

이러한 현상을 나타내 주는 변수들은 다음과 같다.

- 보정된 염제거율(normalized salt rejection)
- 보정된 차압(normalized differential pressure)
- 보정된 생산수량(normalized permeate flux)
- 보정된 가동압력(normalized operating pressure)
 - 보정된 생산수량과 같은 개념이 된다.

1) 염제거율(salt rejection)

염제거율을 계산하는 방법 중 보편적인 것은 원수의 TDS를 전체 분리막에 균일하게 걸리는 것으로 간주하여 계산하는 방법이다. 이는 실제 분리막이 내는 성능보다 높은 염제거율을 보여 주게 된다. 회수율이 높을수록 실제값과 계산값의 차이가 커진다.

$$\text{염제거율} = \frac{\text{원수TDS} - \text{생산수TDS}}{\text{원수TDS}} \times 100$$

이를 보완하기 위해서 사용되는 방법은 평균 TDS를 분리막에 걸리는 TDS로 간주하는 것이다. 이 방법은 회수율에 의해 변화하는 농도를 어느 정도 보정해 줄 수 있다.

$$\text{평균TDS} = \frac{\text{농축수TDS} - \text{원수TDS}}{2} \times 100$$

$$\text{염제거율} = \frac{\text{평균TDS} - \text{생산수TDS}}{\text{평균TDS}} \times 100$$

농축수의 농도를 측정하기 어려운 경우에는 다음의 식을 이용한다.

$$\text{농축수TDS} = \text{원수TDS} \times \frac{1}{1 - \text{회수율}}$$

염제거율은 각 이온별로 상당히 차이가 크게 나타나므로 정확한 변화를 알기 위해서는 특정 이온의 제거율을 계산하는 것이 좋다. 시운전시 원수와 생산수의 수질을 분석하여 각 이온별 제거율을 기록해 두면 차후 관리에 큰 도움이 된다. 원수 구성 성분이 다르기 때문에 발생하는 염제거율의 차이(실제 성능에는 변화가 없지만)를 확인할 수 있다. 분리막의 물리적인 파손과 화학적 변화 등의 문제는 1가 이온의 제거율보다 2가 이온의 제거율을 통해 더 잘 확인된다.

TDS값 대신 전도도를 이용하여 염제거율을 계산할 수도 있으나 TDS와 전도도 간의 변환비가 농도에 따라 달라지므로 TDS값을 기준으로 할 때와 약간의 차이를 보일 수 있다. 일반적으로 전도도로 계산한 염제거율이 더 낮은 것으로 나타난다².

²전기전도도의 측정 지표로 사용되는 이온들의 경우 비이온의 경우보다도 비교적 투과성이 높기 때문에 증발잔유물(TDS)로 원수와 생산수의 농도를 계산한 것 보다 높게 나타날 수 있다.

2) 차압(pressure differential, differential pressure, delta-P, ΔP)

분리막에 들어가는 압력과 농축수쪽으로 나오는 압력의 차이를 차압이라 하는데 역삼투설비에서는 대체로 1개 베셀을 통과할 때 생기는 압력 차이를 관리항목으로 한다. 차압은 물의 흐름에 저항하는 정도를 나타내는 지표이며 일정한 유량에서 차압이 증가한 것은 유로가 막혔음을 말한다.

차압은 생산수와 농축수의 변화, 온도의 변화 등의 여러 가지 변수에 의해 영향을 받으므로 기록된 차압의 직접적인 비교는 어렵다. 따라서 보정이 필요하다. 유량의 변화에 따른 차압을 보정하기 위해 다음의 식을 이용할 수 있다.

$$\text{보정된 차압} = \frac{\text{측정한 차압} \times (2 \times \text{농축수유량초기치} + \text{생산수유량초기치})^{1.5}}{(2 \times \text{농축수유량} + \text{생산수유량})^{1.5}}$$

3) 보정된 생산수량(normalized permeate flowrate)

$$Q_N = Q_0 \times \frac{P_1 - \frac{\Delta P_1}{2} - P_{P1} - \pi_1}{P_0 - \frac{\Delta P_0}{2} - P_{P0} - \pi_0} \times \frac{TCF_1}{TCF_0}$$

여기에서 : Q_N = 보정된 유량, Q_0 = 측정시 유량
 P_1 = 초기 운전압력, P_0 = 측정시 운전압력
 ΔP_1 = 초기 차압, ΔP_0 = 측정시 차압
 P_{P1} = 초기 생산수압, P_{P0} = 측정시 생산수압
 π_1 = 초기 평균삼투압³, π_0 = 측정시 평균 삼투압
 TCF_1 = 초기 온도보정 계수⁴, TCF_0 = 측정시 온도보정 계수

생산수량은 분리막의 관리항목 중 가장 중요한 요소이며 역삼투설비의 상태를 가장 잘 반영한다. 생산수량은 가동압력, 삼투압(원수의 농도), 온도 등에 영향을 받으므로 이들의 영향을 생산수량에 반영시켜야만 분리막의 상태를 직접적으로 판단해볼 수 있는 지표를 얻게 된다. 앞 쪽의 식을 이용하면 개략적인 값을 구할 수 있다.

³부록(10-10, 11, 13, 14) 참조

⁴부록(10-16) 참조

7

세정 (Cleaning In Place)

7-1. 개 요

역삼투분리막의 표면에는 원수에 존재할 수 있는 실트(silt), 콜로이드성 물질, 유기물, 미생물 그리고 스케일 등의 이물질에 의한 오염이 생길 수 있다. 역삼투설비에 유입되는 물을 전처리하는 과정이 분리막 표면을 오염시키는 물질들을 가능한 많이 제거하기 위해 설계되지만 이것을 통해 모든 오염을 완전하게 막아 낼 수는 없다. 따라서, 설비를 운전하는 도중 오염물질을 제거해주는 작업을 주기적으로 해주어야만 하는데 이 과정을 세정(CIP, Cleaning In Place)이라 한다.

역삼투분리막의 표면에 오염이 일어나면 정수량이 줄거나 염투과율이 증가하는 등으로 성능감소가 발생한다. 이는 막 성능에 영향을 주는 다른 요인들(압력, 온도 등)의 변화에 의해 겉보기로는 나타나지 않을 수도 있으므로 주의가 필요하다.

기본적으로 폴리아미드계(PA type)의 분리막은 넓은 pH 범위에서의 안정성과 온도에 대한 내성이 있기 때문에 세정을 아주 효과적으로 수행할 수 있다. 하지만, 세정해야 할 시기를 놓치고 장시간이 지나면 분리막의 표면에서 오염 물질을 완전히 제거하는 것은 어렵다.

최적의 세정 과정을 선택해야 할 때, 다음의 사항들을 고려해야 한다.

- 사용되는 세정 용액(EDTA, 살균제 등)에 의한 환경영향을 최소화해야 한다
- 오염물질의 제거효율을 최대화한다.
- 막에 대한 충격을 최소화한다. (순한 약품을 우선 적용)
- 비용을 최소화한다.

7

세정 (Cleaning In Place)

7-2. 역삼투분리막에 오염이 발생하는 원인

- ★ 부적절한 전처리(원수수질 및 유량 대비 설계의 부적절, 필요장비 미비) 혹은 비정상적인 전처리 설비 운전(SDI 성분, 탁도, 콜로이드 등의 제거능력 저하)
- ★ 부적절한 재료의 선택(펌프, 배관, 기타)
- ★ 화학약품 주입 장치의 고장(산, 스케일방지제, 분산제, 산화방지제, 기타)
- ★ 가동중지 후 적절하지 못한 처리
- ★ 적절하지 않은 운전(회수율, 생산수량, 농축수량, 차압, 세정 기타)
- ★ 장기간 동안의 침전물 퇴적[황산바륨($BaSO_4$), 실리카(SiO_2)]
- ★ 원수 구성 물질의 변화
- ★ 미생물 오염

7-3. 오염 물질 분석

- ★ 설비의 성능을 기록한 자료를 분석한다.
- ★ 원수를 분석한다.
- ★ 기존의 세정 결과를 확인한다.
- ★ SDI 값을 측정하는 필터($0.45\mu\text{m}$)에 걸린 이물질을 분석한다.
- ★ 마이크로 필터의 퇴적물을 분석한다.
- ★ 원수가 유입되는 배관의 내부와 분리막의 원수가 유입 되는 쪽 맨 앞부분을 검사한다.

7

세정 (Cleaning In Place)

7-4. 세정시기

다음의 경우에는 언제나 세정을 해주어야 한다.

- 보정된 생산수량(normalized permeate flux)이 15% 감소한 경우
→ 보정된 가동압력(normalized operating pressure)이 15% 증가한 경우

- 보정된 염투과율(normalized salt passage)이 정상치에 비해 15% 증가한 경우

- 초기 조건(처음 25시간에서 48시간의 작동에 의해 얻어진 운전기록)에 비해 차압이 15% 증가한 경우

역삼투설비의 성능에 영향을 주는 요소에는 압력, 온도, pH, 회수율, 원수농도 등의 여러 가지 변수가 있으므로 데이터 보정(data normalization)¹ 순서에 따라 정수의 유량과 염제거율을 보정하는 것이 매우 중요하다. 또한, 역삼투설비가 사용되는 지역의 원수 및 기타 환경의 특성에 따라 세정 시기가 달라질 수 있으므로 현장 특성에 맞는 적절한 관리가 필요하다.

¹제6장 6-4 데이터보정 참조

7-5. 세정조(cleaning tank)의 크기 및 약품의 양

역삼투 분리막의 세정에 필요한 세정용액의 양은 베셀의 부피와 인입수 쪽과 회수쪽 배관내부의 부피를 더하면 된다. 세정조의 크기는 세정용액의 양을 충분히 담을 수 있을 정도의 크기가 되어야 한다. 배관의 부피를 정확하게 계산하기 어려울 때는 대략적으로 베셀 부피의 1.2배 정도를 세정용액의 양으로 하면 된다.

7-6. 세정 과정

- 1) 적당한 세정용액을 준비하고 pH를 확인한다. 용액을 역삼투설비에 순환시키기 전에 충분한 교반을 통해 약품을 완전히 녹여 농도분극이 생기지 않도록 한다.
- 2) 세정에 필요한 유량의 절반 정도의 유량과 낮은 압력으로 세정용액을 역삼투설비에 흘러 보내 베셀 내부에 남아 있는 물을 제거한다. 세정용액이 처음 나올 때까지 농축수 및 생산수를 버리면 세정용액이 희석되는 것을 방지할 수 있다. 정수가 전혀 나오지 않을 정도의 최소압력(원수와 농축수 사이의 차압에 해당하는 만큼의 압력)만 사용한다. 낮은 압력은 분리막에 이물질이 다시 퇴적되는 것을 최소화한다.
- 3) 베셀에 남아 있던 물이 모두 제거되면 농축수 및 생산수를 세정조로 순환시키고 온도가 안정화되도록 한다. 순환시키기 전에 반드시 온도와 pH가 기준치에 맞는지를 확인해야 한다. 세정의 효율성을 판단하기 위해 세정용액의 탁도 및 pH 등을 확인한다. 만약 세정용액이 색을 띠거나 탁해지면 새로 세정용액을 준비하여 세정한다. pH가 0.5 이상 올라가면 산을 더 첨가하거나 용액을 바꾸는 것이 좋다.
- 4) 펌프를 끄고 밸브를 닫아서 분리막이 약품에 침적되도록 방치한다. 대체로 1시간 정도면 충분하다. 제거하기 어려운 오염일 경우 더 오래 동안 해주면 좋다. 장시간 동안 침적시키며 온도를 유지하기 위해서는 순환과 침적을 반복하도록 한다.
- 5) 약 30분 정도 적당한 유량의 세정용액을 흘려 준다.

★ 세정시 필요한 유량

Element 직경 (Inch)	베셀당 원수유량	
	GPM	m ³ /hr
2.5	~5	~1.1
4	~10	~2.3
8	~40	~9

- 6) 사용한 세정약품을 배출하고 남아 있는 세정용액을 씻어 낸다. 세정용액을 씻어 낼 때는 순수나 깨끗한 물(역삼투설비 생산수 등)을 사용하는 것이 좋다. 물의 온도는 20℃ 이상으로 해주는 것이 재침전을 막는데 효과적이다.
- 8) 역삼투설비를 다시 정상조건으로 가동시켜 10분 이상 생산수를 버린다. 이때 현장에서 필요한 수질이 되는지 점검하도록 한다. 여러 가지 약품으로 세정할 경우 각각이 진행되기 전 생산수쪽도 씻어 주도록 한다. 화학약품들간의 화학반응을 막기 위해서이다.

※ 다단 설비인 경우 세정시 첫 단의 유량이 너무 적거나 마지막 단의 유량이 너무 많지 않도록 각 단을 따로 세정하여야 한다. 이는 첫 단에서 제거된 퇴적물이 다음 단으로 들어가 원수 유로에 얽히는 것을 방지한다.

7-7. 세정약품

CSM 분리막의 안정성 때문에 넓은 범위의 세정약품이 적용될 수 있다. 그러나, 분리막의 성능에 영향을 주는 약품과 영향을 주지 않는 것의 뚜렷한 경계는 없다. 일반적으로 잦은 세정(일반적으로 염투과율이 증가할 때)은 분리막의 수명을 단축시킨다.

염기성 세정제는 생물학적 물질 및 유기물질에 의한 오염을 제거하는 데 효과적이고 산성 세정제는 철 등의 무기물에 의한 오염을 제거하는 데 효과가 좋다.

경우에 따라 전문회사의 세정약품을 사용할 수 있다. 분리막의 물 투과성에 대해 어떻게 영향을 주는지 불분명하고 세정조건(온도 및 pH)에서 장기 실험결과가 없기 때문에 사용자의 조심스런 선택이 필요하다. 세정시에 약품 제조자들의 지침을 정확히 따르고 조건에 따른 pH 한계를 주의해야 한다.

★ 세정시의 pH와 온도의 범위

구 분	세 정 시			
	45 °C	35 °C	30 °C	25 °C
온 도	45 °C	35 °C	30 °C	25 °C
pH 범위	3 ~ 10	2 ~ 11	2 ~ 11.5	2 ~ 12

7

세정 (Cleaning In Place)

★ 오염물질에 따른 세정 용액(%는 질량비)

오염물질	추천약품	화학식	비고
무기물 Inorganic	· 0.2% 염산(Hydrochloric Acid) · 0.5% 인산(Phosphoric Acid) · 2.0% 구연산(Citric Acid)	HCl H ₂ PO ₄ C ₃ H ₄ (OH)(CO ₂ H ₃)	Best O.K O.K
산화금속 Metal Oxides	· 0.5% 인산(Phosphoric Acid) · 1.0% 황산나트륨(Sodium HydroSulfite)	H ₂ PO ₄ Na ₂ S ₂ O ₄	Good Good
침니(沈泥) Silt	· 0.1% 수산화나트륨(Sodium Hydroxide) · 0.025% 12황산나트륨(SodiumDodecylsulfate) / 0.1% NaOH, 30℃	NaOH	Good Good
미생물층 Bio Films	· 0.1% 수산화나트륨(Sodium Hydroxide) · 1.0% 에틸렌디아민-4초산 나트륨(Sodium Ethylene Diamine Tetra-acetatic Acid) / 0.1% NaOH, 30℃	NaOH Na-EDTA	Best Best
유기물 Organics	· 0.025% 12황산나트륨(Sodium Dodecylsulfate)/ 0.1% NaOH, 30℃ · 0.1% 3인산나트륨(Sodium Triphosphate) / 0.1% NaOH, 30℃	Na-DDS Na ₅ P ₃ O ₁₀	Good Good
실리카 Silica	· 0.1% 수산화나트륨(Sodium Hydroxide), 30℃ · 1.0% 에틸렌디아민-4초산 나트륨(Sodium Ethylene Diamine Tetra-acetatic Acid) / 0.1% NaOH, 30℃	NaOH Na-EDTA	O.K O.K

7-8. 미생물 방지 약품

약 품 명	사용농도	비 고
염소 Chlorine	~0.1ppm	· 멤브레인을 산화시키므로 주의 필요 · 철 등 전이금속이 있으면 사용 불가
아황산나트륨 Sodium Bisulfite(SBS)		
과산화수소 Hydrogen Peroxide	~0.2%	· 최적의 살균력과 분리막 수명유지를 위해 pH3 정도 유지 · 염투과율 유지를 위해 25℃이하의 온도 유지 · 철 등의 전이금속이 있으면 사용 불가 · 유기 및 무기 세정 후 사용
과초산 Peracetic Acid	~0.2%	· 철 등의 전이금속이 있으면 사용 불가 · 유기 및 무기 세정 후 사용
포름알데히드 Formaldehyde	0.5~3%	· 규제물질이므로 취급 주의
4기살균요오드 Iodine Quaternary Germicide		· 생산수량 감소, 사용하지 않는 것이 좋음

8

모듈교체작업

8-1. 베셀 열기

1단계 : 운전을 중단하고 고압이 풀리도록 한다.

2단계 : 생산수 및 농축수 연결 배관(port)을 푼다.

3단계 : 베셀 뚜껑(end closure)의 부식 상태를 확인한다.

(재결합시의 편리를 위해 원수와 농축수 포트(port)의 원래 위치를 표시해 둔다.)

4단계 : 잠금장치(interlock)를 푼다(securing ring, locking ring set).

※ 부품들을 분리한 후 모든 이물질들을 베셀에서 제거해야 한다.

8-2. 역삼투분리막 모듈 교체

1단계 : 모듈 연결 부품(element interface hardware)를 분리한다

- 압력이 풀렸는지 확인 후 베셀의 뚜껑을 분리
- 모듈 양쪽 끝부분의 연결부품(End-connector)를 분리

2단계 : 모듈을 원수흐름 방향으로 분리¹ 한다.

3단계 : 새로운 모듈을 삽입한다.

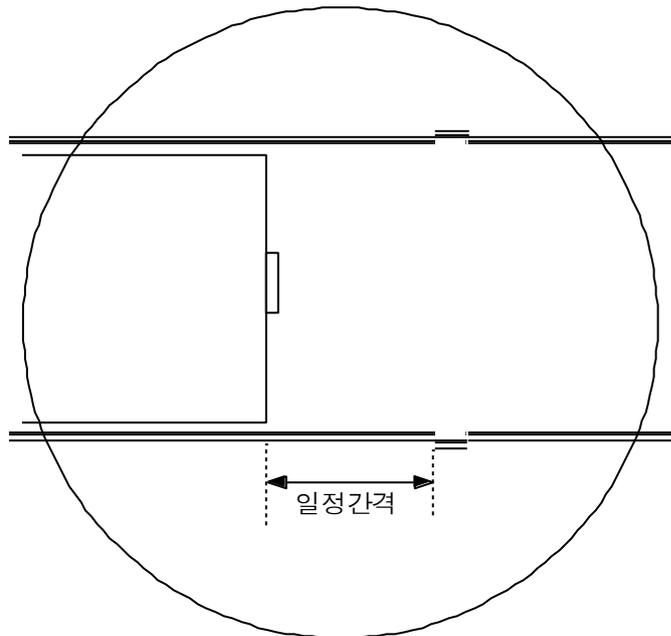
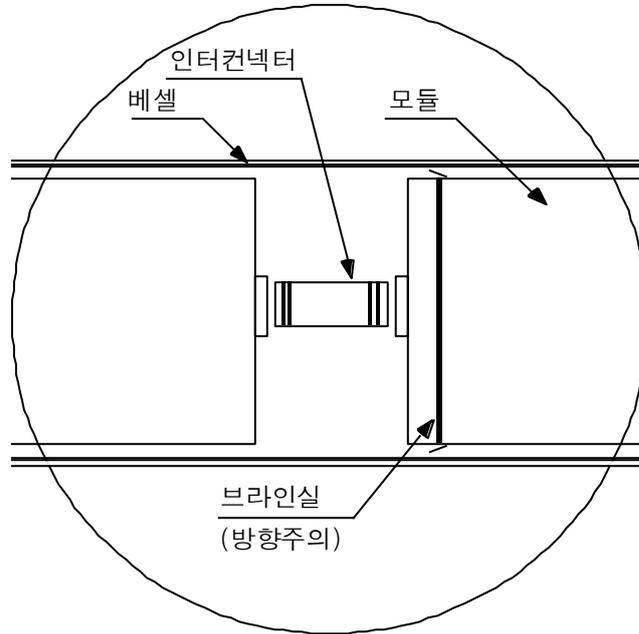
- 베셀 내부의 굽힘, 부식, 과량의 윤활제 기타 이물질의 퇴적 등을 확인
- 새로운 모듈을 삽입하기 전에 베셀 내부를 세척
- 모듈 표면과 텔레스코핑 방지(anti-telescoping) 장치²의 상태와 브라인씰의 방향을 확인
- 50%의 글리세린용액을 베셀 내부에 흘려줌(장착을 쉽게 하고 베셀 굽힘 방지)
- 첫 모듈의 장착(모듈 끝부분을 베셀 밖으로 약간 나오도록 하여 인터컨넥터 삽입을 용이하게 함)
- 글리세린용액을 인터컨넥터의 O-링에 발라 장착된 모듈에 끼움
- 다음 모듈을 위와 같은 방식으로 장착
(인터컨넥터에 무게가 실리지 않도록 주의)

- 모듈은 항상 원수가 진행하는 방향으로 제거하고 장착
- 윤활제의 사용량은 최소한으로
- 모듈 장착을 용이하게 글리세린/물(50/50) 용액으로 베셀 세척 가능
- 모듈의 번호를 확인하고 장착되는 위치를 기록
- 특별한 경우가 아니면 브라인씰(brine seal)은 원수 쪽에 장착

- 마지막 모듈은 처음에 삽입한 모듈이 베셀의 끝부분에 도달할 때까지 삽입

¹모듈을 분리할 때 원수의 흐름방향으로 하는 이유는 모듈의 외부에 있는 브라인씰(brine seal)이 원수가 흐르는 방향으로 장착되어 있기 때문이다. 원수 흐름의 반대방향으로 모듈을 분리하려 하면 브라인씰이 베셀 내부에서 뒤집혀 밀착되어 앞뒤 어느 방향으로도 움직이지 않는 경우가 있다.(3장 제품소개의 모듈도면 참조)

²모듈 내에 차압이 기준치 이상 발생하게 되면 생산수 파이프를 기준으로 망원경처럼 모듈이 밀려 분리막이 파손되는 경우가 많다. 그렇기 때문에 모듈의 양쪽 끝부분에는 이를 방지해주기 위한 장치가 있다.(3장 제품소개의 기준차압 및 모듈도면 참조)



8-3. 베셀 닫기

1단계 : 셸(shell)과 헤드실(head seal)에 윤활제 바르기

- 글리세린은 분리막에 파울링을 일으키지 않는다.
- 실리콘 계열이 성능면에서 우수하나 파울링의 가능성이 있다.

2단계 : 뚜껑(head) 결합

- 열기 전에 표시한 방향으로 뚜껑(head)을 결합(결합 후 뚜껑을 돌려서는 안됨)
- 장착하는 동안 뚜껑이 좌우로 흔들리면 헤드실(head seal)이 이탈했을 수 있다.

3단계 : 잠금장치(interlock) 결합

- 반드시 올바르게 결합되어야 한다.
- 너무 심하게 조이지 않도록 주의한다.

4단계 : 원수 및 농축수 배관을 연결한다.

9

문제해결 (Trouble Shooting)

9-1. 개요

역삼투 시스템에서 가장 빈번하게 발생하는 문제는 염 제거율(salt rejection)과 생산수량(permeate flux)의 저하이다. 만일 염 제거율이나, 생산수량의 감소가 서서히 일어나는 경우에는 파울링(fouling) 혹은 스케일링(scaling)으로서 일반적인 세정(CIP)으로 회복이 가능하다. 생산수량이 보다 빠르게 감소하거나 갑작스러운 감소를 보이는 경우에는 설비 운전상의 실수 또는 설비의 결점이 있음을 암시한다. 어떠한 경우라도 가능한 한 빨리 적합한 조치를 취하는 것이 매우 중요하다. 왜냐하면, 생산수량이 급격히 저하된 경우나 염 제거율이 심하게 저하된 경우에는 조치가 지연됨에 따라 시스템의 성능을 회복시킬 수 있는 기회가 줄어들기 때문이다.

잠재되어 있는 문제점을 조속히 파악하기 위해서는 운전일지가 보관되어 있어야 하며, 모든 계측기가 적합하게 보정되어 있는 상태에서 설비의 성능 보정(system performance normalization)이 진행되어야 한다¹. 성능의 저하가 발견되면 문제점을 확인한 후 원인을 파악하는 순서로 문제를 해결한다. 운전 일지와 설비의 성능 보정을 통해서도 문제점의 원인을 파악하기 힘든 경우에는 한 개 이상의 분리막 모듈을 빼내어 정밀한 분석²을 시행한다.

¹제6장의 6-4 데이터 보정 참고

²역삼투설비의 성능보호 및 적합한 전처리 설계를 위한 KOLAS 인증 수질분석과 더불어 분리막의 막 표면 검사를 수행하고 있다. 이를 통하여 보다 정밀한 원인분석과 더불어 문제해결책을 제시할 수 있다.

9-2. 염 제거율이 감소한 경우의 문제 부분 파악

역삼투설비에서 염 제거율은 가장 중요한 요소이기 때문에 염 제거율이 감소되면 즉각적으로 관심을 기울여야 한다. 그런데 많은 엔지니어나 기술자들은 염 제거율이 감소되었을 경우에 어떤 새로운 원인에 의해서 일어났을 지도 모른다고 생각하는 경우가 많다. 그러나, 대부분의 이러한 문제는 이미 수많은 역삼투설비에서 발생하였던 것이고, 기록되었던 것임을 알아야 한다.

아래와 같은 이유로 인해 염 제거율 감소의 원인은 신속히 밝혀야 한다.

- 생산수의 수질이 규제치 이하가 될 수 있다.
- 매우 미미한 수준의 염 제거율 저하라 할지라도 경우에 따라서는 심각한 막의 손상이나, 오염 또는 스케일이 원인이 될 수 있고, 반대로 염 제거율 저하 때문에 막이 손상되거나 오염이 생길 수 있다.
- 유기물이나 콜로이드 물질이 막을 통과하여 후단의 이온 교환 수지를 심각하게 오염시킬 수 있다.
- 역삼투설비 후단의 이온 교환 수지에 이온 부하를 증가시켜 재생주기가 짧아진다.

염 제거율은 일반적으로 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$\text{염 제거율(\%)} = \left[1 - \frac{\text{정수TDS}}{\text{원수TDS}} \right] \times 100$$

상기와 같은 식으로 계산된 염 제거율은 원수가 막을 통과하면서 농도가 높아지는 것을 고려하지 않았기 때문에 정확한 진단을 위해서는 다음과 같은 방법이 필요하다. 농축되는 농도를 고려하여, 즉 시스템 회수율을 고려하여 염 제거율을 얻는 방법이 있다.

$$\text{염 제거율(\%)} = \left[1 - \frac{\text{정수TDS}}{\text{평균TDS}} \right] \times 100$$

여기서, 평균 TDS는 원수와 농축수 TDS의 평균으로 다음과 같이 구해진다.

$$\text{평균TDS} = \frac{\text{원수TDS} + \text{농축수TDS}}{2}$$

일반적으로 역삼투설비의 염제거율은 새로운 막을 장착했을 경우에 90~99%의 성능을 나타낸다. 그러나, 설비의 염제거율은 막의 종류, 운전 조건, 물의 조성 등에 따라 크게 달라질 수 있다. 분리막의 일반적인 특성에 의해 설비의 가동 압력이 높아지면 염제거율은 높아지고 2가 이온 같은 다가 이온의 염 제거율은 1가 이온 보다 높다. 또한 원수의 pH 조절을 위해 황산을 사용하는 경우가 염산을 사용하는 경우 보다 염제거율이 높게 나타나는데, 이는 황산(sulfate) 이온은 2가이고, 염산(chloride) 이온은 1가이기 때문이다. 염 제거율이 저하된 것을 인지한 후에는 원인을 파악하기 위해 다음과 같은 순서를 거쳐야 한다.

1) 계측기 보정

문제점을 해결하고자 할 때는 항상 계측기의 보정(Calibration)이 최우선으로 시행되어야 한다.

■ 전기전도도 측정기

각각의 전도도계는 정확히 보정된 제3의 전도도 측정기로 보정을 하여야 한다. 만일 차이가 나타나면 제조사가 추천하는 보정 방법대로 보정을 하여야 한다. 보정하기 전에는 측정감지기(probe)에 이물질이 묻어 있는지를 확인하여야 한다. 또한, 제조사가 추천하는 방법에 맞게 올바르게 설치되었는지도 확인하여야 한다. 감지기(probe)가 적합하게 설치되지 않은 경우에는 장치가 공기에 노출(trap)되거나 감지기(probe)를 통과하는 물의 순환이 충분하지 않을 수도 있다.

■ 유량계

보정된 생산수량은 막이 손상되어 가고 있는지 혹은 오염(Fouling)되어 가고 있는지를 파악하는데 중요한 정보를 제공하는 요소이다. 만일 유량계가 부정확한 상태에 있다면 역삼투설비의 성능 변화를 감지하지 못하거나 잘못 해석할 수 있다.

유량계를 보정하는 방법에는 두 가지가 있다. 한가지의 방법은 "물통과 초시계를 이용한 방법(bucket and stopwatch method)"이다. 이 방법은 정확한 부피를 알 수 있는 물통에 생산수를 받아 일정한 부피의 물을 생산하는데 걸리는 시간을 재서 유량을 측정하는 방법이다. 유량계가 안정화 된 이후에 물통에 물을 받는다. 이때 물통으로 세정탱크(CIP tank)를 사용할 수 있다. 정확성을 위해서 여러 차례 반복하여야 한다. 또 다른 방법으로는 "유량계를 상호 비교하면서 보정하는 방법"이 있다. 보정 이후에는 원수, 생산수 및 농축수 양을 확인하여 이들간의 mass balance를 비교해 보면 유량계의 정확성을 간접적으로 확인할 수 있다.

■ 압력계

압력계가 정확해야 막 표면에 이물질이 쌓이는 것을 정확히 알 수 있다. 만일 일반적인 기계식 압력계(mechanical pressure gauge)를 사용하는 경우에는 정확히 보정된 압력계를 이용하여 주기적으로 보정을 해 주어야 한다.

전기적인 압력 센서를 사용하는 것이 정확도를 더 높일 수 있지만 고압 펌프의 진동이나 기타 원인에 의해서 오차가 생기거나 고장이 생길 수 있다. 진동이 심한 고압 펌프가 연결된 스텐레스 파이프에 전기적인 압력 센서를 설치하는 것은 피하는 것이 좋다. 진동이나 맥동의 효과를 방지하기 위해서는 센서를 가능한 한 먼 곳에 설치하거나 1/4인치 스텐레스 스틸 파이프나 고압 나일론 튜브로 연결하는 것이 좋다.

압력계의 위치도 굉장히 중요하다. 압력조절밸브(throttle valve)의 바로 뒷부분이나 혹은 유속을 제한하는 곳은 피해야 한다. 압력계 센서를 보정할 때는 배관에 연결이 쉬운(quick connect fitting) 보정 압력계를 사용하는 것이 편리하다. 또한, 중하(重荷)시험기(dead weight tester)도 유용하다.

■ pH 측정계

역삼투 시스템은 제한된 pH 범위에서 사용되도록 설계되어 있다. 이 범위를 넘을 경우에는 막에 스케일이 형성되거나 혹은 막의 손상을 초래할 수 있다.

■ 온도계

온도가 조금 변할 경우에 염 제거율에는 큰 영향을 끼치지 않으나 생산수량에는 커다란 영향을 미치기 때문에 보정된 생산수량³을 정확히 구하기 위해서는 정확한 온도가 필요하다.

이와 같이 계측기들이 보정된 후에야 역삼투설비 성능을 정확히 진단할 수 있다. 계측기의 보정 이후에도 여전히 염 제거율이 감소된 것으로 나타났을 경우에는 어느 부분에서 문제가 발생되었는지 확실히 밝혀야 한다.

2) 염 제거율이 낮은 부분 파악

염 제거율 저하는 전체 모듈에서 전반적으로 균일하게 낮아진 경우가 있고, 첫째 모듈 혹은 마지막 모듈에서 부분적으로 낮아진 경우도 있다. 또는, 개별적인 베셀이나 모듈에 한정된 경우도 있다. 다음과 같은 순서에 의해서 염 제거율 저하가 나타난 위치를 파악한다.

■ 각 베셀의 생산수 TDS 검사

각 베셀의 생산수 TDS를 측정하여 이상이 있는 베셀이 있는지를 검사한다. 이때 2단의 생산수 수질은 1단보다 나쁘고, 3단은 2단보다 나쁘다는 것을 염두에 둔다⁴. 1개월에 한번 정도 베셀별 생산수 TDS를 측정해 두면 각 베셀에 대한 기준치(base line)를 알 수 있어서 좋다.

■ 베셀내 모듈별 수질 측정

나권형 역삼투분리막 설비에서는 염 제거율이 낮아진 경우 각 모듈별로

³부록 10-22 온도보정계수를 활용

⁴역삼투 설비의 시뮬레이션 프로그램 CSM-PRO2000을 사용하면 베셀의 각 모듈별 염 제거율 및 생산수량 등에 대하여 알 수 있다.

성능변화를 확인할 수 있다. 아래의 그림과 같이 인터넥터의 내경보다 작은 튜브(plastic tube)를 모듈의 집수관(central tube)에 끼워 넣으면서 위치별로 TDS를 측정한다. 베셀에서 생산수 집수관에 연결된 배관을 떼어 낸 후 그 속으로 튜브를 삽입한다

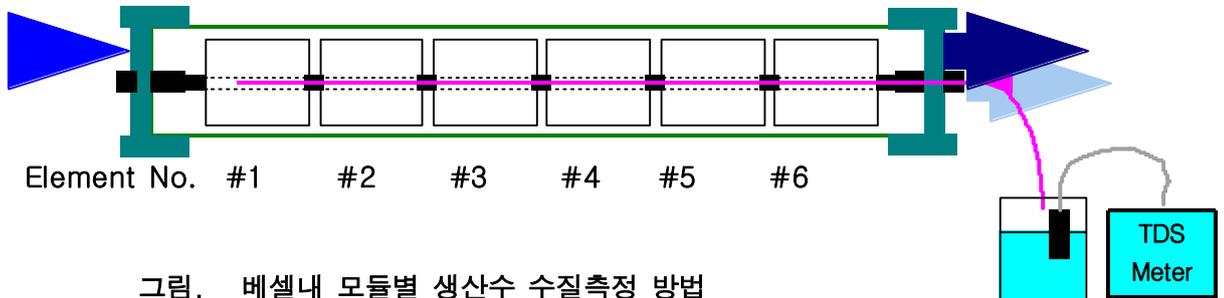


그림. 베셀내 모듈별 생산수 수질측정 방법

모듈별 수질 측정의 예를 들면 다음과 같다.

모듈 장착위치 #	생산수 TDS (ppm)
# 1 (첫째)	12
# 2	10
# 3	14
# 4	10
# 5	26
# 6 (마지막)	18

상기 분석치에 의하면 #5 위치에 장착되어 있는 모듈이 염 제거율을 저하시키는 역할을 했음을 쉽게 알 수 있다. 이와 같은 방법으로 손상된 모듈의 위치를 알 수 있지만, 측정된 TDS는 바로 이전에 장착되어 있는 모듈의 TDS와 합쳐져 평균으로 나타난 수치이기 때문에 정확한 염 제거율 수치를 알 수 없다는 사실을 이해해야 한다.

■ 모듈의 개별 물성 측정

모듈의 물성 변화를 개별적으로 정확히 알기 위해서는 설비 내에서가 아니라 설비에서 꺼낸 후 별도의 평가 장비에서 개별적 모듈의 물성을 측정해야한다

9-3. 염 제거율 감소 원인과 방지

1) 첫째(Front-end) 모듈의 염 제거율 저하 원인

맨 앞에 장착된 모듈의 염 제거율 저하는 산의 과량 주입, 산화제의 과량 주입, 수압 불균형(hydraulic imbalance), 높은 원수 온도, 그리고 전이 금속에 의한 산화 등이 원인이 된다. 운전 현장에서 수치를 적절히 기록하여 관리가 잘 되어야 이러한 현상을 신속히 인지하여 적절한 조치를 할 수 있다. 또한, 적절한 예방 대책이 세워져 있어야 이러한 현상을 사전에 방지 할 수 있다.

■ 산의 과량 주입

역삼투설비에서는 탄산계열(CO_3) 스케일을 방지하기 위하여 원수내에 산을 주입하는 경우가 많이 있다. 셀룰로오스계(CA)재질의 막인 경우에는 이와 같은 이유 이외에도 막 재질의 가수분해를 방지하기 위하여 산을 주입한다. 일반적으로 산에 대한 저항성은 CA 재질의 막 보다는 폴리아미드계(PA) 재질의 막이 우수하다.

역삼투설비에서 산이 과량 주입되는 경우, 수소 이온은 막을 투과하기 쉽기 때문에 원수 공급 부위보다 농축수 부분이 pH가 증가하는 현상을 나타낸다. 과량의 산 주입에 의한 영향이 주로 첫번째 모듈에 미치는 이유가 바로 이것 때문이다. 이와 같이 산이 과량 주입되는 원인은 주입 조절 장치의 작동이 원활하지 못하기 때문에 많이 발생한다. pH 계측기가 보정되어 있지 않거나, 지정되지 않은 사람이 주입 장치를 조작하는 경우도 있다. 또한, 어떤 역삼투설비에서는 산이 과량 주입되었을 경우에 시스템의 가동이 일시 중지되어도, 산 주입 장치는 계속 가동되도록 설계되어 있는 경우도 있는데 이러한 경우에는 고농도의 산이 설비에 주입되어 역삼투설비에 치명적인 손상을 입힐 수 있다.

농축수나 생산수 배관의 끝이 역삼투설비 아래 레벨 보다 낮게 설치되어 있고 대기에 방치되어 있는 경우에는 역삼투설비에 약한 진공이 걸리게 되어 약품 주입 장치의 탱크에 있는 약품을 당겨 오는 역할을 하는 경우가 있다. 이와 같은 사이폰 현상은 약품 탱크의 배관에 체크 밸브가 달려 있어도 발생할 가능성이 많다. 이러한 현상은 배관의 가장 높은 위치에 진공 방지장치를 설치해 막을 수 있다.

가동을 하지 않는 동안 역삼투설비 내부의 용액을 모두 배출시킨 경우에 고압 펌프를 재가동하는 순간 비슷한 현상이 일어날 수 있다. 공간이 비어 있는 상태에서 고압 펌프 가동이 개시되면 흡입부의 유속이 굉장히 크기 때문에 약품탱크에서 과량의 약품이 주입될 가능성이 높다. 이러한 현상을 방지하기 위해서는 고압 펌프와 약품 주입 장치 사이에 자동 차단밸브(auto shut-off valve)를 장착해주는 것이 좋다.

■ 산화제에 의한 역삼투분리막의 손상

잔류염소 혹은 기타 다른 산화제가 폴리아미드계 막과 접촉하면 막의 손상을 균일하게 가져오지만, 첫번째 모듈이나 마지막 모듈에만 국한되어 영향을 미치는 경우도 자주 발생한다.

대부분의 수처리 시스템 전처리 측에는 산화제를 제거하기 위한 장치를 갖고 있기 때문에 산화제에 의해 막이 손상을 입었다고 생각하지 않는 경우가 많다.

매우 낮은 농도의 산화제가 잔류해서 막으로 유입되는 경우에는 산화제의 농도가 너무 낮거나 산화제와의 접촉 시간이 짧아서 대체로 막이 영향을 받지 않는다. 그러나, 만일 철이온 등이 원수에 미량이라도 포함되어 있다면 아주 적은 양의 산화제 (0.1ppm 미만)라도 막 성능에 커다란 영향을 미친다.

3가 철(ferric ion)은 물에 녹지 않기 때문에 막으로 유입되면 막 표면에 침전되기 쉽다. 막 표면에 3가 철(ferric ion)이 부착되어 있으면 3가 철의 강한 산화력 때문에 미량의 산화제에도 막 표면이 산화되어 손상을 입을 가능성이 매우 크다. 이러한 현상을 막기 위해서는 철, 아연, 구리, 망간 등의 전이 금속이 잔류하지 못하도록 전처리 과정에서 세심한 처리를 해야 한다. 아니면 원수에 함유된 산화제를 확실히 제거하여 산화/환원 전위를 환원 쪽으로 가깝게 관리하는 방법이 있다.

■ 수력학적 불균형

역삼투설비 내부를 비우고 가동을 중지시킨 상태에서 다시 운전을 할 경우, 설비 내에 원수가 채워지는 초기 상황에서 정상 가동시 보다 훨씬 빠른 유속의 물이 첫번째 모듈에 흐를 수 있다. 이 영향으로 순간적인 차압이 크게 발생할 수 있고, 모듈에 충격(hammering)을 줄 가능성이 매우 크다. 이와 같은 영향으로 모듈에

텔레스코핑(telescoping) 현상⁵이 일어나는 경우가 종종 발생한다. 또한, 베셀 내부에서 모듈이 움직여 오링(O-ring)이 손상을 입을 수 있다. 텔레스코핑이 발생하면 막의 물성에 영향을 주지 않는 경우도 있지만, 어떤 경우에는 열 제거율의 심한 저하를 일으키기도 한다. 이와 같은 현상을 방지하기 위해서는 재가동시 압력조절 밸브(throttle valve)의 조정을 세밀히 할 필요가 있다.

■ 열교환기

대부분의 역삼투설비에는 열교환기가 설치되어 있고, 때때로 이것이 고온 스파이크를 발생시켜 문제를 발생시키기도 한다. 고온 스파이크는 보통 역삼투설비가 정지해 있을 경우에 발생하는데 열교환기에 정체되어 있는 원수가 열교환기의 열원과 평형을 이루게 되어 온도가 높게 형성 된다. 역삼투설비를 재가동할 때에 설비에 열교환기에 정체되어 있던 고온의 원수가 흘러 들어가게 된다. 이와 같은 현상을 방지하기 위해서는 열교환기에 인입되는 열원을 조절할 수 있도록 설계하여야 한다.

역삼투설비를 가동하는 동안에 원수의 일부가 열교환기의 주변을 맴돌고 지나갈 수 있도록 설계하는 방법도 있다. 이 방법은 에너지를 재사용한다는 측면에서 장점을 가지고 있다.

또한 열교환기에서 열원이 새어 나와 원수와 섞이는 경우도 고려해볼 수 있다. 보통 열원으로 사용되는 뜨거운 물이나 스팀에는 부식 방지제가 포함되어 있는데 이러한 부식 방지제가 역삼투모듈을 손상시킬 가능성도 있다.

⁵ 텔레스코핑(telescoping) 현상은 나권형 모듈의 생산수 파이프(central pipe)를 중심으로 망원경처럼 밀리는 현상으로 역삼투분리막과 생산수 파이프의 접촉부위 및 막표면에 손상을 줄 수 있다.

2) 마지막(Tail-end) 모듈의 염 제거율 저하 원인

역삼투설비의 경제성은 회수율에 많은 영향을 받는다. 회수율이 높은 경우에는 원수의 사용량이 줄어 원수 비용이 절감되고, 전처리 비용, 에너지 비용, 화학약품 비용 등이 절감된다.

반면에 회수율이 높으면 원수의 용존 무기물과 파울링 유발 물질의 농도가 높아지기 때문에 스케일 형성이나 파울링에 대한 위험성이 높다.

스케일링이나 파울링이 발생하면 염 제거율이 저하된다. 이와 같은 현상은 설비에서 가장 뒤에 장착되어 있는 모듈에 발생할 확률이 높다.

원수에 포함되어 있는 부유 고형물(suspended solids) 혹은 왕성한 미생물의 활동에 의해서 생기는 극심한 파울링도 마지막에 장착된 모듈에 잘 발생한다.

이러한 현상은 대부분 너무 높은 회수율, pH 조절에서의 오류, 스케일 방지제 주입에서의 문제, 혹은 박테리아의 번식 등의 원인에 의해 발생한다.

■ 높은 회수율

회수율과 농축수 농도는 다음과 같은 상관관계를 갖는다.

$$\text{농축배율} = \frac{1}{1 - \text{회수율}}$$

위의 식에 의하여 회수율이 75%인 시스템에서 농축수의 농도는 원수의 4배로 높아진다. 따라서, 회수율의 유지에 조금이라도 실수가 발생하면 즉시 심각한 결과를 초래할 수 있다. 유량계가 보정되어 있지 않거나, 밸브가 정확히 작동을 하지 않는 경우에는 정확한 회수율을 유지시킨다는 것이 매우 어렵다고 보아야 한다. 회수율을 75% 기준으로 설계한 설비가 90%의 회수율로 운전된다고 가정하면 이 경우 농축수의 농도는 원수 농도의 10배(설계치 기준은 4배)로 증가되기 때문에 스케일링(scaling)이나 파울링(fouling)이 생길 가능성이 매우 커진다. 또한, 농축수의 유량이 설계치보다 적어져⁶ 높은 회수율로 운전되는 경우, 높은 오염물 농도, 유량 감소로 인한 난류(turbulence)의 저하 등 두 가지 요인에 의해 스케일링과 파울링이 발생할 가능성이 매우 높아진다.

⁶ 제3장 제품소개의 운전제한 조건내 최소 농축수 유량 참조

■ 스케일링(scaling)과 파울링(fouling)

스케일링은 용해도가 낮은 염이 막 표면에 침전되는 현상이고, 파울링은 부유물질(suspended solids)이나 유기물질이 막 표면에 쌓여 생기는 현상으로 구분한다. 스케일링은 종류에 따라 방지, 회복이 가능한 것이 있는 반면, 그렇지 않은 경우도 있다. 황산기(sulfate)나 실리카(silica)는 침전물이 생긴 후에는 세정으로 회복시키기가 매우 어렵다. 그러므로 이와 같은 종류의 스케일링은 적합한 전처리, 약품주입, 설계 등의 방법을 통해서 해결해야 한다. 스케일이 형성되면 물의 난류 흐름성(turbulence)을 저하시키므로 막 표면의 실제 농도는 더 높아져 염 제거율이 떨어지는 현상⁷이 나타난다.

난류 흐름성이 저하되면, 스케일이 형성될 가능성도 높아지지만, 침적된 스케일을 제거하는 것도 더욱 어렵게 된다. 세정을 하지 않고 스케일링이나 파울링을 방치하게 되면 막은 물리적으로 막히게 되어 차압이 급속도로 상승된다. 급속한 차압의 상승은 막이 밀려나오는 현상(telescoping)을 발생시키며 모듈에 회복할 수 없는 손상을 입힌다. 보정 차압이 15% 상승하는 수준에서 세정하는 것이 카보네이트(CO₃) 스케일이나 철 스케일을 사전에 방지하는 한계점으로 본다. 스케일 방지제(anti-scalant)는 LSI지수⁸ 2.0 수준까지 카보네이트 스케일을 방지하여 준다. 황산(sulfate) 스케일이나 실리카 스케일의 경우에는 침전 속도가 느리기 때문에 적합한 스케일 방지제를 적절한 농도로 주입하면 쉽게 조절할 수 있다.

만일 이전에 없었던 스케일링이 갑자기 발생되었다면, 운전 조건을 세심히 관찰해야 한다. 원수의 조성이 바뀌어 생기게 되었다면, 스케일 방지제의 농도를 높여 쉽게 방지할 수 있다. 스케일 방지제는 단지 스케일이 일어나는 속도를 늦게 해주는 역할만을 한다. pH 조절을 위해 황산을 사용하는 경우에는 스케일 방지제를 주입한 후에 황산을 주입해야 한다. 반대의 경우에는 부분적으로 높은 황산(sulfate) 농도를 형성하여 스케일 방지제가 주입되는 부분에서 침전을 빠르게 진행시킬 수 있다.

SHMP는 비용이 적게 드는 스케일 방지제 중의 하나이다. 공급탱크에서 물에 녹는 시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 또한, 효과가 떨어지는 orthophosphate

⁷ 모듈을 구성하는 요소에는 원수가 난류를 형성할 수 있도록 분리막 표면 활성층 사이에 위치한 원수유로라는 것이 있다. 그런데 스케일이 생기면 원수의 난류가 감소하고 이로 인해 분리막 표면에는 전체농도 보다 상대적으로 높은 농도의 용액이 접촉하게 되는데 이를 농도분극(concentration polarization)이라 한다. 이렇게 되면 동일한 염 제거율을 갖는 모듈이더라도 원수의 농도보다도 더욱 높은 농도의 용액이 막 표면과 접촉하게 되고 더욱 많은 이물질들이 막을 투과하게 되어 전체적으로 염 제거율이 저하된 것처럼 보여진다.

⁸ 제5장 5-2 스케일제어 관련 이론의 LSI 참조

로 변성되는 단점도 있다. 외부에 방치되어 있는 경우에는 3일에 한번 정도 약품을 다시 혼합해서 사용해야 한다.

스케일이 형성될 가능성이 비교적 낮은 경우에는 SHMP를 보통 5ppm 주입한다. 주입 펌프의 토출량은 반드시 정확히 보정되어야 한다.

■ 높은 원수의 pH

원수의 pH가 관리 수치보다 높아지면 카보네이트 스케일이 일어날 가능성이 높아진다. pH를 낮추면 카보네이트 스케일의 용해도가 높아지고, 또한 HCO_3^- 이온이 이산화탄소로 전환되기 때문에 스케일의 가능성이 감소한다. 만일, 마지막 부분에 장착된 모듈에 카보네이트 스케일이 심하지 않게 형성되어 있으면 낮은 pH의 세정용액으로써 회복할 수 있다. 그러나, 스케일이 심하게 형성되어 있는 경우에는 공급수 유로(feed channel)를 통하여 세정 용액을 효과적으로 주입하는 것 자체가 어렵기 때문에 교체하는 방법 밖에 없다.

pH 계측기가 고장 났거나 보정되어 있지 않을 경우, 산 주입 펌프에 공기가 차있어 주입이 되지 않을 경우, 산 주입 펌프의 다이어프램이 새거나 파손된 경우, 주입 펌프의 용량이 모자랄 경우에는 원수의 pH가 높아진다.

■ 박테리아의 번식

한번 박테리아가 역삼투설비로 들어오게 되면 어느 곳에서든지 번식할 수 있다. 세정을 하지 않고 박테리아가 성장할 시간을 준다면 박테리아가 자라서 차압을 증가시키고, 물리적 손상(mechanical damage)를 가져오게 된다.

■ 농축수 라인으로의 폐수 유입

흔한 경우는 아니지만, 농축수 라인이 폐수 라인과 직접 연결되어 있는 경우에는 폐수가 역삼투설비로 흘러 들어와서 마지막에 설치된 모듈에 손상을 일으키는 경우도 있으므로, 이러한 배관은 피해야 한다.

3) 부분적으로 염 제거율이 낮은 경우

이와 같은 현상은 오링과 같은 각종 씰(Seal)의 잘못된 선택, 초기 장착시 박테리아 감염, 혹은 막 제조상의 문제 등이 원인이다. 역삼투설비에서 전반적으로 염 제거율이 감소한 경우에는 농도가 높은 산화제에 막이 노출되었거나, 적합하지 않은 방법으로 세정을 한 것이 문제일 수 있다. 여러 가지 가능성 있는 방법들 중에서 가장 효과적이고 가장 정확한 방법을 이용하여 문제를 해결해야 한다.

■ 부분적으로 염 제거율이 감소한 경우

오링(O-ring)을 빠뜨리고 설치하였거나, 오링에 손상이 왔을 경우가 대표적인 경우이다. 만일 가동 중에 오링이 손상되는 경우에는 각 베셀의 첫번째 부분에 설치된 모듈에 연결된 오링이 파손되었을 가능성이 매우 크다. 이 부분은 설비가 운전, 정지를 반복할 때 모듈의 위치가 가장 심하게 변하는 부분이다.

브라인씰(혹은 U-cup이라고 부르기도 함)은 모듈에 붙여서 원수가 모듈 단면 밖으로 우회하여 흐르는 것(bypass)을 방지하는 역할을 한다. 만일 이 브라인씰이 설치 도중에 빠지거나 혹은 뒤집혀서 장착될 경우에는 원수의 일부분이 막을 통과하지 않고 우회하여 지나가게 된다. 그렇게 되면 막으로 흘러 들어가는 유량이 적어지므로 난류 흐름성을 감소시켜 농도분극을 심화시키고, 따라서 스케일링이나 파울링을 발생시킬 수 있다. 이렇게 계속 방치되는 경우에는 모듈 1개에 지속적으로 스케일링이나 파울링이 일어나 결국 통과되는 원수와 농축수의 유량을 감소시켜 같은 베셀내에 장착되어 있는 다른 모듈의 스케일링이나 파울링을 유발시키는 원인이 된다.

■ 높은 생산수축 압력

역삼투설비에서 생산수축의 압력은 어떠한 경우라도 원수축 압력보다 높아지면 아니 된다. 한 순간이라도 이런 일이 발생하면 영구적으로 막에 손상을 입혀 회복이 불가능하다. 생산수 배관이 이온교환 설비 쪽으로 직접 연결된 경우는 역압(back pressure)이 발생할 수 있다. 후단 이온교환 시스템 쪽이 막혀 있는 상태에서 역삼투 시스템이 정지되는 경우에는 순간적으로 생산수축 압력이 원수축 압력보다도 높아질 수 있다. 역삼투설비가 가동되고 있는 동안에 이러한 일이 발생할 가능성은 없다. 만일 생산수축 밸브가 닫혀 있는 상태에서 설비가

가동되면 생산수축의 압력이 점점 높아져서 원수의 압력과 같아지게 된다. 이러한 경우에는 일반적으로 PVC로 배관이 되어있는 생산수축의 배관이 터질 가능성이 있다.

■ 박테리아

마지막에 장착된 모듈의 경우 염 제거율 하락 원인 중의 하나가 박테리아의 번식 때문이다. 이것을 방지하면 뒷 단부터 앞 단으로 점차 증상이 전이되므로 조속히 살균을 하여야 한다.

■ 배관 막힘

배관이 부분적으로 막히는 경우 초기의 성능은 제대로 유지되지만, 공급수의 유량을 감소시키기 때문에 사용할수록 스케일이나 파울링이 급속도로 진행될 수 있다.

■ 가동 중지시의 문제

설비에서 물을 완전히 뺀 경우에는 분리막이 공기와 접촉되기 때문에 세균의 번식이 용이하다. 또한, 재운전할 경우에도 수력학적인 손상을 받을 수 있다. 가동을 중지하는 경우에도 설비에서 물을 완전히 빼는 것은 좋지 않다.

■ 모듈 제조시의 문제

만일 모듈 제조시에 문제가 생긴 것이라면 시운전시 발견할 수 있다. 그러나 **CSM** 은 전 제품을 모두 검사한 후 합격품만을 출고하여 이런 일을 사전에 방지하고 있다.

■ 막의 위치 이동

최초 장착된 위치에서 모듈의 위치가 바뀌면 문제의 원인을 파악하는데 혼란을 초래할 수 있다. 새 모듈을 장착할 경우에는 일련번호를 기록하여 각각의 위치를 표시해 둘 필요가 있다. 어떠한 경우에도 모듈의 위치를 이동하게 되면 원래의

위치보다는 뒤로 이동시키는 것이 좋다. 새 모듈을 뒤에 장착하는 경우에는 앞에 장착되어 있던 잔류 스케일 입자에 의해서 오염이 빠르게 진행될 수 있다.

새 모듈은 첫번째 단에 장착하는 것이 가장 좋다. 하지만 반드시 유량 균형(flux balance)을 고려해야 한다.

4) 전체적으로 염 제거율이 감소한 경우

■ 산화제

철 이온이나 망간 이온 같은 물질이 없을 경우에 산화제는 전체적으로 고르게 손상을 입힌다. 아황산나트륨(SBS, sodium bisulfite)이나 다른 종류의 환원제가 잔류 염소 같은 산화제를 제거하기 위하여 사용된다. 때때로 역삼투설비 전단에 활성탄을 사용하는 경우가 있다. 활성탄은 잔류 염소를 매우 효과적으로 제거할 수 있는 장점이 있으나, 활성탄층의 아래 부분은 살균제가 없기 때문에 박테리아가 번식하기 아주 좋은 장소가 되어 결국에는 역삼투설비의 원수로 박테리아를 공급하는 결과를 초래할 수도 있다. 또한, 활성탄이 너무 무른 경우에는 활성탄이 오염(fouling)을 일으키는 원인이 될 수도 있다.

■ 직접적인 햇빛

역삼투설비를 가동 중지 상태에서 햇빛에 직접 노출시키는 경우에는 설비의 온도가 급격히 올라가서 막에 손상을 일으킬 수 있다. 또한, 상승된 온도 및 햇빛은 미생물의 번식속도를 증가시킨다. 일반적으로 베셀의 외부에 불투명 페인트를 칠하기는 하지만, 햇빛의 노출은 금해야 한다.

■ 열교환기의 누수

열교환기의 물이나 증기에 포함되어 있는 부식 방지제가 원수로 유입될 경우에는 전반적으로 설비의 성능을 저하시킬 수 있다.

■ 세정 실수

세정작업을 하는 중에 작업상의 실수로 인해 전반적으로 막의 성능을 저하시킬 수 있다. 가장 자주 발생하는 실수는 세정액의 조액 후 순환 전에 pH를 맞추는

9

문제해결 (Trouble Shooting)

공정을 거치지 않는 것이다. 알칼리 세정제를 조액 한 후에 산으로 pH 조정을 하지 않으면, pH가 11을 넘을 수 있다. PA 막은 어느 정도의 시간은 견딜 수 있지만 CA 막은 빠르게 손상된다. 대부분의 PA막은 음이온을 띠었기 때문에 세정제에 포함된 양이온 계면 활성제나, 비이온 계면활성제에 적합성이 없다. 또한, 타회사 제품과 마찬가지로 **CSM**은 세정시 온도별로 견딜 수 있는 pH가 있으므로 각 온도 범위에서의 pH를 정확히 체크한 후 세정을 행해야 한다⁹.

⁹ 제7장 7-7 세정약품 참조

9-4. 차압 증가의 원인 및 방지

차압은 원수 압력과 농축수 압력의 차이를 말하는데 이는 물이 시스템을 통과하면서 생긴 수력학적인 저항의 크기를 나타낸다. 이 차압은 모듈의 공급수 유로를 통해 지나가는 유량에 큰 영향을 받는다. 생산수량이 증가하거나, 농축수 유량이 증가하면 차압이 증가한다. 만일 농축수와 생산수의 유량이 일정하다면 원수 압력이 변하여도 차압은 변하지 않는다. 따라서, 차압의 변화를 정확히 인지하기 위해서는 생산수량과 농축수량이 변하지 않은 기준으로 보정을 해 주어야 한다.

일정한 유량에서 차압의 증가는 각종 이물질이 막의 공급수 유로에 존재하기 때문이다. 일반적으로 기준보다 15 %이상 차압이 증가하면 적합한 세정을 통해 차압을 감소시켜 주어야 한다.

회복이 불가능한 차압의 증가에 대해서 맨 앞에 장착된 모듈을 검사해 이물질을 확인하여 간단히 원인을 찾는 경우도 있다. 스케일링이나 파울링이 일어난 경우는 원인을 밝히기가 조금 더 힘들게 된다. 이러한 경우는 전처리와 적절한 설비의 운전조건으로 예방할 수 있는 부분이다.

원수의 조성이 최초의 설계시와 달라지는 경우에는 설비의 운전 조건을 변경시킬 필요가 있다. 이물질이 유로를 막고 있는 경우에는 카트리지가 필터의 설치 및 보전에 신경을 써야 한다. 스케일이 형성된 경우에는 운전조건 변경, 스케일 방지제 투입, pH 조절 등을 통하여 해결할 수 있다.

1) 첫번째(front-end) 장착된 모듈의 차압이 증가한 경우

■카트리지가 필터 문제

역삼투설비의 바로 전단에 설치하는 카트리지가 필터의 가장 중요한 역할은 큰 입자가 막에 유입되는 것을 막는 것이다. 그러나, 카트리지가 필터가 하우징에 헐겁게 장착되는 경우가 종종 있다. 20인치, 30인치, 40인치 길이의 필터를 사용해야 하는 하우징에 10인치 길이의 카트리지가 필터를 사용하면서 인터넥터를 쓰지 않고 결합하면 입자들이 막으로 넘어올 가능성이 매우 커진다. 필터의 차압이 변하지 않기 때문에 몇 개월이고 계속 필터를 교체하지 않는 경우도 있는데 오히려 차압이 변하지 않는다는 것은 필터 어딘가에 새는 부분이 있을 가능성이 많다는 것을 염두에 두어야 한다. 압력에 의해서 필터가 부서지는 경우도 있다.

■ 전처리 미디어필터의 손상(breakthrough)

모래, 멀티미디어, 카본, 규조토(diatomaceous earth) 필터로부터 유출된 미세한 물질들이 역삼투설비의 원수로 유입되는 경우가 종종 발생한다. 일반적인 5 마이크론 카트리지 필터는 모래나 무연탄 같은 대부분의 큰 입자는 잡아 주지만 미세 카본 입자나, 규조토 같은 미세 입자는 충분히 잡아 주지 못한다. 이와 같은 물질들은 막의 공급 유로를 영구적으로 막을 수 있다.

규조토 필터는 전처리 필터로 뛰어난 성능을 보일 수 있는 반면 역삼투설비에 가장 나쁜 위험을 줄 수도 있다. 이 필터는 1 마이크론 이하의 매우 작은 오염물질(foulant)를 제거할 수 있는 능력을 지녔지만 새어 나올 경우에는 역삼투 모듈의 공급수(원수) 유로를 막을 수 있다. 이 필터를 역삼투설비의 전단에 설치할 경우 뛰어난 성능만큼 커다란 위험이 있다는 것을 알아야 한다.

시간이 흐르면서 활성탄도 많은 양의 미세한 입자를 방출하여 막을 손상시킨다는 것도 밝혀졌다. 석탄(coal)으로 만든 활성탄이 문제를 발생시킨다. 코코넛(coconut shell)으로 만든 경도 95 이상의 활성탄이 좋다. 활성탄을 새로 채울 경우에는 제조 과정에서 함유된 잔류 미세 입자를 제거하는 것이 중요하다. 높은 유속으로 역세(back washing)하여 세정하는 것이 좋다. 일반적으로 SDI 값이 처리수에서 나오던 수준으로 떨어질 때까지 계속적으로 역세 해주는 것이 좋다.

■ 펌프 임펠러의 손상

다단 원심펌프는 적어도 1개 이상의 플라스틱 임펠러를 갖고 있는 것이 보통이다. 이 임펠러들이 올바르게 정렬되어 있지 않을 경우에는 임펠러에서 작은 플라스틱 조각들이 떨어져 나올 수 있다. 이러한 경우에는 맨 앞에 장착된 모듈의 원수 투입구 부분을 막는다. 이러한 현상을 막기 위해서는 펌프를 구매할 때 펌프 토출 부위에 사용하는 스크린을 같이 주문하는 것이 좋다. 펌프 토출 부위에 설치된 스크린은 주기적으로 점검하여 상태를 확인하는 것이 좋다. 또한, 주기적으로 펌프의 토출 유량 및 압력을 점검하여 펌프의 성능을 확인해야 한다.

■ 텔레스코핑(telescoping, 막이 밀려 나오는 현상)

텔레스코핑은 기본적으로 차압에 의해 발생한다. 막 리프(leaf) 사이에 삽입되어 있는 공급수 유로보다 막 리프가 더 튀어나와 있는 경우에는 모듈에 물이

유입되는 것을 방해한다. 경우에 따라서는 염 제거율에 영향을 주기도 한다. 또한, 온도가 높은 원수가 흘러 들어올 경우에도 텔레스코핑이 발생할 수 있다.

2) 마지막(tail-end)에 장착된 막의 차압이 증가한 경우

■ 스케일 방지제의 부족

원수의 조성이 바뀌는 경우 회수율을 조절하여 운전하든가 스케일 방지제의 농도를 바꾸어 운전해야 한다.

균질(homogeneous)의 실리카가 막 표면에 침전되면 CIP로 제거하기가 굉장히 어렵다. 암모늄바이플로라이드(ammonium bifluoride) 같은 유해물질을 사용해야 한다. 그러나, 원수가 알칼리 조건일 경우 대부분은 실리케이트(silicate) 염의 형태로 침전되거나 혹은 다른 유기물질 혹은 이온 물질을 함유하는 콜로이드 형태로 침전된다. 스케일 방지제를 주입하면 실리케이트의 양이온 파트너인 칼슘이나 마그네슘 이온과 반응하는 것을 막아서 침전 속도를 떨어뜨린다. 분산제 역할을 하는 스케일 방지제는 실리카 콜로이드 화합물을 분산시켜 침전을 저지하는 역할을 한다.

일단 실리카 스케일이 형성 되면 가능한 한 빨리 세정을 해야 한다. 막 표면에서 머무르도록 시간을 주면 가교반응을 일으켜 세정으로 제거가 불가능한 균질의 실리카로 변할 수 있다. 만일 실리카의 농도가 역삼투설비에서 한계치를 초과하여 설비를 정지시키는 경우에는 높은 농도의 실리카가 포함되어 있는 원수를 설비로부터 완전히 제거하여야 한다. 원수가 아닌 깨끗한 물로 처리한 후 밸브를 닫아 두면 된다.

대부분의 설비 제조자들은 실리카 침전을 방지할 수 있는 최대의 회수율을 갖도록 설비를 설계하기 때문에 스케일 방지제를 사용한다고 하더라도 원수의 실리카 농도가 높아졌을 경우에는 설비의 회수율을 낮추어 운전하는 것이 바람직하다.

■ 높은 회수율

역삼투설비를 제대로 유지하기 위해서는 유량계의 보정이 매우 중요하다. 계측기의 부정확성 때문에 회수율을 정확히 조절하기가 어려워 스케일이 생기는 경우가 많다. 대부분의 오염물질(foulants)은 세정으로 제거할 수 있지만,

균질(homogeneous)의 실리카나 황산바륨(arium sulfate)은 세정으로 제거하기 매우 힘들다. 따라서, 정확한 회수율을 유지하는 것이 무엇보다도 중요하다.

3) 비규칙적인 차압의 증가

■ 브라인씰(brine seal, U-cup)의 손상

설치시 혹은 운전 중에 브라인씰이 손상되거나 뒤집힌 경우에는 유량이 부분적으로 모듈 밖으로 우회하여 통과해 버리기 때문에 오염을 발생시켜 차압을 증가시키는 원인이 된다.

■ 세정 장치의 오염

세정 장치내에 이온 교환 수지나 카본 입자 등이 포함되어 있으면, 세정에 의해 모듈이 오염(fouling)되어 차압이 증가되는 현상이 발생하기도 한다. 이러한 경우에는 세정 이후에 차압이 더 높아진다. 세정 장치에는 커다란 입자를 거를 수 있는 카트리지 필터가 장착되어 있어야 하며, 화학적으로 안정한 폴리프로필렌 필터가 좋다. 셀룰로스 카트리지 필터는 분해되어 모듈을 막을 수 있으므로 사용하지 않는 것이 좋다.

■ 생물학적 오염

떤 특정한 조건에서는 미생물이 매우 빨리 자라서 오염(fouling)을 일으킬 수 있다. 이 같은 현상은 특히 염소에 민감한 폴리아미드계(PA type)막 설비에서 염소나 요오드를 주입하지 않는 경우에 발생할 수 있다. 주기적으로 원수, 생산수, 농축수의 박테리아를 조사함으로써 이와 같은 현상을 조기에 파악, 해결할 수 있다.

4) 전체적인 차압의 증가

■ 밸브의 누수

시스템을 정지시키고 농축수 밸브를 닫아 놓은 상태에서 원수측의 밸브가

고장으로 인해 새는 경우에는 전체적으로 고르게 파울링이 일어날 수 있다. 그러나 대부분의 경우 설비의 운전 정지시 농축수 밸브를 열어 놓는 경우가 많기 때문에 이러한 현상의 발생은 매우 드물다.

9-5. 분석적인 접근

1) 육안 검사

많은 경우에 오염물질(foulant)을 육안으로도 판별할 수 있다. 오염물질의 모양이 오염원의 성질에 대한 단서를 제공한다. 활성탄과 같이 크기가 큰 여재 입자는 육안으로 충분히 판별할 수 있다. 미생물에 의한 오염물질은 스케일과는 다른 모양을 가지며 다른 냄새가 난다. 또한, 스케일이 심한 경우에는 모듈 무게가 매우 무거워질 수 있고 기계적인 문제점도 발견할 수 있다.

2) 표준 조건 테스트

문제가 발생한 후 여러 가지 방법으로 역삼투설비가 장착된 현장에서 해결되지 않는 경우에는 장착되어 있는 모듈을 설비에서 빼내어 정확하게 물성을 확인할 필요가 있다. CSM 제품을 출하하기 전에 품질을 평가하는 기준으로 회수율, 원수 농도, 온도, 원수 압력을 맞춘 상태에서 모듈의 성능을 확인하여 정확한 물성 변화를 확인한다.

3) 산에 녹임

막 표면에 있는 오염물질이 결정으로 구성되어 있다면 분명히 스케일일 것이다. 간단한 방법으로 스케일의 종류를 알 수 있다. 카보네이트 스케일인 경우에는 pH 3, 4에서 쉽게 녹는다. 이러한 경우에는 이산화탄소가 발생되어 기포가 형성된다. 황산염(sulfate)이나 실리카(silica)는 매우 낮은 pH가 아니면 녹지 않는다. 만일 스케일이 녹지 않는다면 0.1 몰의 HF(hydrofluoric acid) 용액에 넣는다. 실리카 스케일이면 녹는다.

4) 염료 테스트

역삼투분리막은 분자량이 300 이상인 염료에 대해 매우 높은 제거율을 나타낸다. 손상을 입은 막은 표면과 뒷면에 염료를 흡수하는 정도가 다르게 나타난다. 또한, 기계적으로 손상이 있는 부분이 드러난다. 화학적으로 손상을 입은 부분에서는 염료가 묻는 정도가 정상인 부분과 전체적으로 차이를 보인다. 강산이나 매우 뜨거운 원수에 일시적으로 손상을 입은 경우에는 원수 방향으로 표시가 나타날 가능성이 크고, 염소와 같은 산화제로 인한 손상은 전체적으로 균일하게 현상이 나타날 것이다.

5) 광학 현미경

미생물이 오염원인 경우에는 광학현미경으로 쉽게 판단할 수 있다. 또한, 스케일인 경우에도 광학현미경으로 결정구조를 관찰하여 판별이 가능하다. 모듈의 원수 유입구 쪽에 젤라틴과 비슷하게 생긴 미세한 필라멘트가 코팅되어 덮여 있는 경우에는 미생물인지 단순한 섬유소인지 육안으로는 구분하기가 어렵다. 왜냐하면 필라멘트처럼 자라는 미생물도 있기 때문이다. 이러한 경우에는 광학 현미경으로 판별이 가능하다. 광학 현미경에서 편광(polarized light)를 사용하면 오염물질에 대한 여러 가지 정보를 얻을 수 있다. 예를 들면, 황산칼슘(calcium sulfate)은 여러 개의 굴절률을 갖기 때문에 특이한 모양을 나타낸다.

6) FT-IR

유기물질과 무기화합물의 구조를 밝힐 경우에 도움이 된다. 질소-탄소 결합의 피크(peak)는 수소-산소 결합의 피크와 매우 다른 모양을 나타낸다. 새 분리막의 피크와 오염된 분리막의 피크를 비교할 때 보이는 새로운 피크는 분리막 표면에 붙은 오염물질을 나타내고, 없어지거나 줄어든 피크는 분리막이 손상된 것을 나타낸다. 또한, 분리막 표면을 덮고 있는 유기물 오염원을 FT-IR로 알아낼 수 있다.

7) SEM / EDX

분리막 표면의 무기물 오염물질을 확인할 경우에는 매우 유용하지만, 유기물 오염물질을 파악하는 데는 크게 도움이 되지 않는다.