

## 정밀여과를 이용한 역삼투법 해수담수화 전처리 공정의 장기운전 특성

### Long Term Operation of Microfiltration as a Pretreatment for Seawater Reverse Osmosis Processes

김수한<sup>1</sup> · 김충환<sup>2</sup> · 강석형<sup>2</sup> · 임재림<sup>2\*</sup>

Suhan Kim<sup>1</sup> · Chung H. Kim<sup>2</sup> · Suk H. Kang<sup>2</sup> · Jae L. Lim<sup>2\*</sup>

1 부경대학교 건설공학부(토목공학과), 2 한국수자원공사 수자원연구원 상하수도연구소

(2010년 11월 8일 접수 ; 2010년 12월 10일 수정 ; 2010년 12월 13일 채택)

#### Abstract

A pilot test was carried out to investigate the long term operation characteristics of Microfiltration (MF) system as a pretreatment for seawater reverse osmosis (SWRO) processes for two years. A commercialized MF module with pressurized operation type was used to filter seawater to remove particles which can foul reverse osmosis (RO) membrane. Silt Density Index (SDI) values of filtered seawater by the MF system were ranged from 0.14 to 1.79, which meet the SDI standard for RO feed water as depicted in previous literatures. Although the tested seawater is quite clean (i.e., dissolved organic carbon (DOC) concentration and turbidity were about 1 mg/l and less than 1 NTU, respectively) enough not to foul the MF membrane, steep increase in trans-membrane pressure (TMP) with a constant flux were observed over a whole operation period. A set of operation and water analysis data implies that the steep increase in TMP was resulted from iron and maganese fouling by the combination of metal corrosion by seawater and oxidation state by aeration and residual chlorine.

Key words : Microfiltration, Pretreatment, Seawater Reverse Osmosis (SWRO), Long Term Operation

주제어 : 정밀여과, 전처리, 역삼투법 해수담수화, 장기 운전

#### 1. 서론

20세기 후반부터 환경오염이슈, 21세기 들어서 기후변화 이슈가 대두되면서 양질의 수원 부족에 대한 두려움은 더욱 커지고 있다. 해수나 하수처리수와 같은 대체수자원을 활용하기 위한 노력이 계속 진행 중이다. 역삼투법 해수담수화는 1가 이온을 분리할 수 있는 역삼투막을 사용하여 해수로부터 염분을 분리, 담수를 생산하는 공정으로서, 부족한 수자원을 확보하기 위한 좋은 대안으로 각광받고 있다.

모든 막여과 공정이 그렇듯이, 역삼투 공정에서도 막오염(혹은 파울링)은 피할 수 없고, 반드시 극복해야만 하는 벽이다(Kim and Hoek, 2007). 막오염 대처방법으로는 크게 물리 및 화학세척, 전처리 공정 도입 등이 있다. 수십 기압이 넘는 고압에서 운전되는 특성상 역삼투법 해수담수화에서는 물리 세척을 도입하기가 어려우므로, 화학세척과 전처리 공정의 조합으로 최적의 막오염 대책을 세워야 한다.

본 논문에서는 두 가지 막오염 대책 중 전처리 공정에 초점을 맞추어 논의해보고자 한다. 역삼투법 해수담수화와 함

\* Corresponding author Tel:+82-42-870-7523, Fax:+82-42-870-7549, E-mail: jllim@kwater.or.kr(Lim, J.L.)

계 도입된 전처리 공정은 압력식 모래여과이다. 모래와 함께 안트라사이트와 같은 여재를 도입하여 Duel Media Filter(DMF)라고 불리기도 한다(AWWA, 2006). DMF는 경제성과 안정성을 다 갖춘 공정으로서 현재까지도 많이 활용되고 있으나, 거의 모든 상황에서 응집제와 병용되어야 한다는 것이 단점이다. 막여과 기술의 발전과 함께, 정밀여과(Microfiltration, MF)와 한외여과(Ultrafiltration, UF)도 강력한 DMF의 대안으로 떠오르고 있다. MF나 UF의 장점 중 가장 부각되는 것은 확실한 수질 보증과 응집제 투입량 감소에 의한 슬러지 발생량 저감이다(Wilf and Schierach, 2001). MF보다 UF의 공극이 작다는 차이점은 있지만, 탁도유발물질 제거가 주목적이라는 점, 최대 운전 압력 범위(가압식의 경우는 2~3기압이라는 점, 운전 방식이 같다는 점 등으로 인해, 최근에는 같은 공정으로 인식되고 있는 추세이다.

MF나 UF를 이용한 해수담수화 전처리에 대한 연구는 많이 이루어져 있다(김수한 등, 1998; Tuler et al., 1999; Knops et al., 2007; Pears, 2007). 대부분의 사례가 실험실 규모에서 단기간 연구, 타 공정과의 비교 연구 위주로, 본 논문에서 다루고자 하는 모형플랜트 규모의 2년 이상 장기간 운전된 사례는 찾아보기 힘들다. 장기 운전 사례 분석

을 통해, 향후 역삼투법 해수담수화를 위한 전처리 공정으로서 MF나 UF를 도입할 때의 고려 사항을 제안하고자 한다.

## 2. 연구방법

### 2.1 모형플랜트

본 연구에 사용된 모형플랜트에 적용된 막모듈은 공경 0.05  $\mu\text{m}$ 의 외압식의 가압식(케이싱형) PVDF 정밀여과막을 사용하였다. 2006년 11월부터 2008년 12월까지 약 2년간 운전조건의 변화 없이 막여과유속(플럭스)를 1  $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{일}$ 로 고정하여 운전하여 장기 운전 특성을 분석하였다. 실험에 사용한 막여과장치의 사양 및 막의 특성을 Table 1에 나타내었다.

### 2.2 운전방식

본 연구에 사용된 모형플랜트는 급수→여과→세정→배수의 cycle로 자동반복 운전된다. 실제 막여과 정수처리에 적용되는 압력강하시험(Pressure Decay Test, PDT; 환경부, 2008)은 해수담수화 전처리라는 본 연구 특성상 시행되지 않았다. 한 cycle 운전에서 소요되는 시간은 모두 31

Table 1. 막여과장치 사양 및 막의 특성

대상 원수		해수	막의종류	정밀여과막(MF)
운전방식		가압식(케이싱)	Fiber형태/치수(mm)	중공사(Hollow fiber) / 외경 1.5, 내경 0.9
여과방식		전량여과		
통수 및 제어방식		외압식, 정유량제어	모듈형상/치수(mm)	케이싱(Casing Type) / 외경 114, 전장 1,078
세정 방법	역세	여과수(NaOCl 첨가)+공기 동시세정		
		30분여과 / 30초 역세	막 면적( $\text{m}^2$ )	7
	화학세정	옥살산, NaOCl	막재질	PVDF

Table 2. 정밀여과 운전 cycle 구성

Flux	운전구성	여과 공정	세 정 공 정		배수	급수	주기
			역세정 + 공기세정				
1.0 ( $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{일}$ )	30분	30분	30초		30초	30초	31분 30초
			역세정유량(L/분)	10			
			공기세정유량(L/분)	100			
			염소주입농도(mg/L)	5			

분 30초이며, 공정순서는 급수 30초→여과 30분→세정 30초→배수 30초로 이루어진다. 급수 30초 동안에는 원수가 막 모듈에 채워지게 되고 나머지 원수는 막 모듈 상부에 있는 배수라인으로 배출되게 된다. 여과 30분 동안에는 급수된 원수 전량이 여과되어 여과수 탱크로 집수된다. 여과가 끝난 이후 30초 동안에는 여과수를 역세수로 하는 수세정과 공기세정이 동시에 이루어지게 된다. 미생물에 의한 막 오염을 방지하기 위해 역세 시에 차아염소산나트륨(NaOCl)을 주입하였다(역세배출수의 잔류염소 0.5 mg/l). 30초간의 세정이 끝나면 막 모듈내에 차있던 세정수를 하단부 배수라인을 통해 모두 배출하게 된다. Table 2는 운전 cycle 구성을 정리한 것이다.

본 모형플랜트는 정유량 제어방식으로 운전되며, 막오염이 누적되면 막간 차압(Trans-membrane Pressure, TMP)이 상승된다. 차압의 상승이 어느 한계값을 넘어서게 되면, 펌프 용량 한계로 더 이상 정유량 제어가 불가능하게 되므로 화학세정 등의 방법을 통해 오염물질을 제거해야 한다. 화학세정은 무기물질을 주로 제거하는 산 세정과 유기물질을 주로 제거하는 염기 세정으로 나뉜다. 본 연구에서는 산 세정 시 염산(HCl) 1N과 옥살산((COOH)<sub>2</sub>) 1% 용액을, 염기 세정 시 차아염소산나트륨(NaOCl) 3,000 ppm과 수산화나트륨(NaOH)을 혼합하여 pH를 12로 맞춘 용액을 이용하였다. 화학 세정 시에는 산 세정과 염기 세정을 번갈아가면서 수행하는 것이 일반적이는데, 본 모형플랜트에서는 산→염기→산의 순으로 세정하였고, 각 세정공정 사이에는 수돗물로 세정하여 잔류 약품과 노폐물을 배출하였다.

### 2.3 분석항목

모형플랜트의 운전 과정을 모니터링하기 위한 분석 항목은 수질 인자와 운전 인자로 나뉘는데, Table 3에 정리하였다.

수온은 보정차압을 계산하기 위해 사용되는 인자이다. 수온이 증가하면 물의 점성이 낮아져서 동일 압력에서도 물을

투과하는 플럭스가 높아진다(US EPA, 2005). 예를 들어 다른 조건이 동일하다고 가정하면, 온도가 높은 여름철에는 겨울철에 비해 낮은 차압으로 동일한 유량을 생산할 수 있다. 앞서 언급되었듯이 정유량 제어 시에 차압은 막의 오염도를 나타내는 인자인데, 온도에도 영향을 받기 때문에 차압만으로는 막의 오염도를 정확하게 파악할 수 없다. 보정차압은 온도의 영향을 배제시켜 실제 측정 차압보다 신뢰성 있게 막의 오염도를 나타내는 인자가 되고, 식 1과 같은 방법으로 계산된다.

$$\text{보정차압} = \text{실제차압(측정차압)} \div \text{온도보정계수} \quad (\text{식 1a})$$

$$\text{온도보정계수} = \frac{\eta_T}{\eta_{25}} \quad (\text{식 1b})$$

$$\eta_T (\text{점성계수, mPas}) = A \exp[(1+BT)/(CT+DT^2)] \quad (\text{식 1c})$$

식 1에서, T는 온도(K), A, B, C, D는 점성계수  $\eta_T$ 를 구하기 위한 상수로 각각 A:  $0.1257187 \times 10^{-1}$ , B:  $-0.5806436 \times 10^{-2}$ , C:  $0.1130911 \times 10^{-2}$ , D:  $-0.5723952 \times 10^{-6}$ 와 같다. 상수 A, B, C, D는 온도에 따른 점성계수 데이터를 이용한 회귀분석을 통해서 구한다.

## 3. 연구결과 및 토의

### 3.1 모형플랜트 수질 분석

원수로 사용된 해수의 TDS(Total Dissolved Solids) 농도는 약 32,000mg/l였고, 주요 이온 성분으로서 Cl<sup>-</sup>는 19,000mg/l, Na<sup>+</sup>은 10,500mg/l, K<sup>+</sup>은 350mg/l, Ca<sup>+</sup>은 400mg/l, Mg<sup>+</sup>은 1,200mg/l 범위로 분석되었다. 막의 오염에 영향을 줄 수 있는 용존성 철과 망간은 원수에서 검출되지 않았다. 정밀여과 전처리에서 TDS 및 이온 성분은 제거되거나 농축되는 요소가 아니므로 이하의 표나 그래프에서 나타나지 않았다. 정밀여과 모형플랜트의 원수(공급수)와 생산수의 탁도를 모니터링한 결과가 Fig. 1에 정리되어

Table 3. 모형플랜트 분석 항목

분석 위치	수질 인자	운전 인자
원수(공급수)	탁도, pH, DOC	압력, 수온
생산수(여과수)	탁도, SDI	유량
역세 배출수	탁도	해당사항 없음
화학세정 배출수	SS, DOC, Ca, Mg, Fe, Mn	해당사항 없음

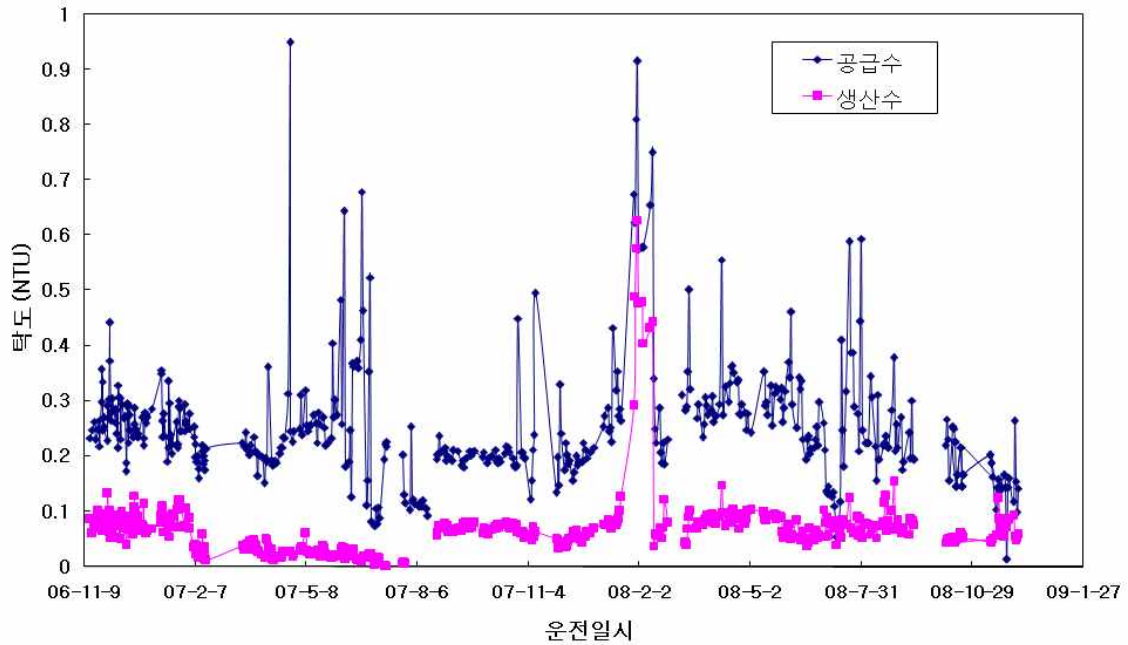


Fig. 1. 정밀여과 모형플랜트의 공급수와 생산수의 탁도

Table 4. 원수, 생산수, 역세 배출수 수질 분석결과

항목	원수(공급수)			생산수	역세 배출수
	pH	DOC	수온	SDI	탁도
		mg/l	°C		NTU
최대	8.16	1.03	19.0	1.79	5.5
최소	7.16	0.79	4.7	0.14	0.678
평균	7.71	0.88	9.99	0.58	1.68

있다. 공급수의 탁도는 1 NTU 미만이고, 생산수의 탁도는 주로 0.1 NTU 미만으로 막여과 공정의 특징인 탁질 제거 특성을 잘 보여주고 있다. 단, 2008년 2월 부근에 생산수 탁도가 0.6 부근으로 상승하는 결과가 관찰되고 있는데, 이는 모형플랜트에 설치된 생산수 측 탁도계의 오작동으로 인한 것으로 나타났다. 오작동의 원인은 탁도계 유리 셀(cell)의 오염과 계기내부의 습기를 제거하는 건습제의 노화였다. 건습제의 교체와 유리 셀의 세척을 통해 오작동을 바로잡을 수 있었다.

Table 4는 2년간의 운전 기간 동안 정밀여과 모형플랜트의 원수, 생산수, 역세 배출수의 수질 분석결과이다. 생산수의 SDI(Silt Density Index)는 0.14~1.79 범위로 일반적인 역삼투 공정의 원수 기준인 3 미만을 만족시키고 있다.

해수담수화 전처리로서 정밀여과의 수질의 탁월함을 입증하는 데이터이다. 한편, 원수의 용존유기탄소(Dissolved Organic Matter; DOC) 농도는 1 mg/l 내외로 유기물 함유량이 매우 낮은 청정한 해수임을 알 수 있다. 역세 배출수의 탁도가 수 NTU 범위로 상당히 낮은 편이다.

### 3.2 장기운전 결과 분석

앞서 언급된 대로, 본 연구에서 사용된 해수는 탁도 1 미만, DOC 1 mg/l 내외로 상당히 청정한 해수에 속하므로 전처리로서 사용된 정밀여과의 막오염 발생 가능성이 매우 낮을 것으로 예측된다. Fig. 2는 2006년 11월부터 2009년 1월까지 약 2년간 역삼투법 해수담수화 공정의 전처리로서 정밀여과를 운전한 결과이다. 정유량 제어 방식으로 운전되

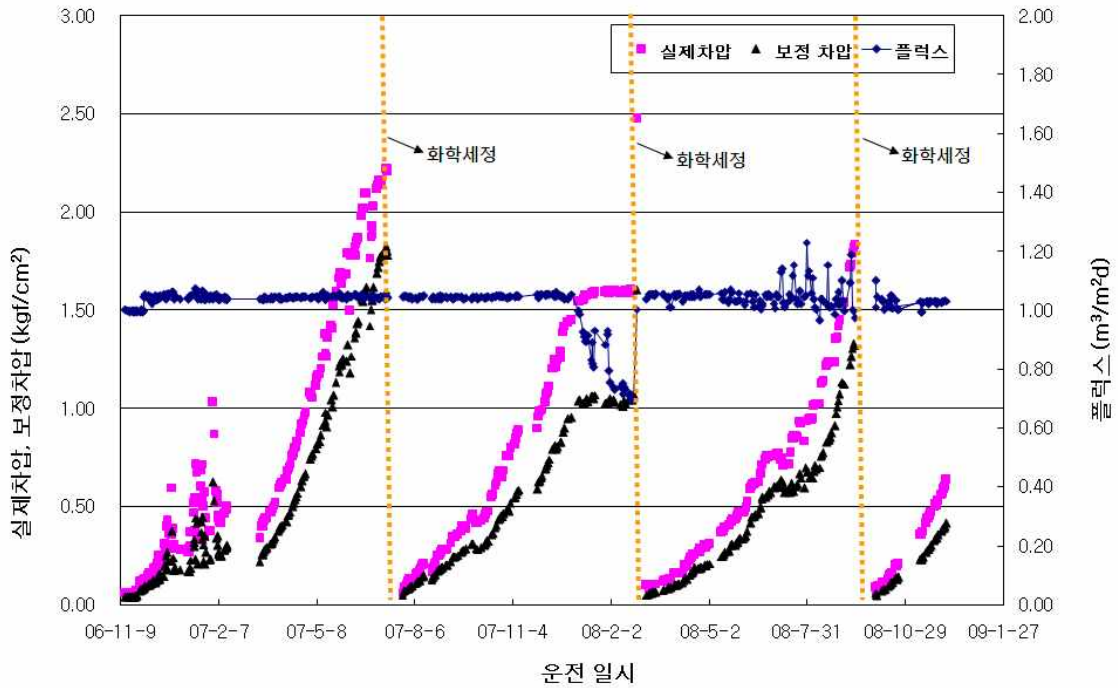


Fig. 2. 정밀여과 모형플랜트의 장기운전 결과: 차압과 플럭스

었으므로, 플럭스는  $1 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{일}$  내외가 주로 유지되었다. 2007년 12월부터 2008년 3월까지의 제어 장치의 고장으로 인해 플럭스는 떨어지고, 차압이 유지되는 현상을 관찰할 수 있다.

당초 예측과는 달리 운전기간 동안 차압 증가 속도, 즉 막오염 증가 속도가 상당히 빠르다는 사실을 Fig. 2로부터 알 수 있다. 화학세정 주기는 각각 9개월, 8개월, 7개월로 점점 짧아졌다. 최초 운전 시, 각각의 화학세정 직후의 보정 차압은  $0.05 \text{ kgf}/\text{cm}^2$  범위에서 큰 변동이 없었다. 이는 화학세정으로 거의 완전히 오염물질이 제거되어 막이 원상태로 회복되었다는 사실을 의미한다. 일반적으로 유기물질로 막이 오염되는 경우보다 무기물질로 오염되는 경우에 화학세정 후의 막의 회복도가 높다. 따라서, 본 모형플랜트의 주요 파울링 원인물질은 무기물질이라는 가설을 세울 수 있다.

무기물질로 오염되는 경우는 크게 두 가지 경우로 나누어 볼 수 있다. 해수 내 미량으로 포함된 철과 망간이 산화되어 정밀여과막의 공극 내부에서 석출되는 현상과, 역세수에 주입된 차아염소산나트륨( $\text{NaOCl}$ )으로 인한 pH 상승으로 탄산칼슘 스케일이 정밀여과막 공극 내부에서 발생하는 현상이다. 후자의 경우, 차아염소산나트륨 농축액(농도  $2,250 \text{ mg}/\text{l}$ , pH 11.4)이 들어 있는 약품조에 해수가 침투해 들어온다면 생길 수 있는 현상이다. 이는 일반적으로 잘

일어나지 않는 현상이지만 장기 운전 시에 사고로 발생할 가능성도 있음을 염두에 두었다. 이를 배제하기 위해 세 번째 화학세정(2008년 9월) 이후는 역세수에 차아염소산나트륨을 주입하는 것을 중단하였다. 2008년 9월 이전까지의 파울링이 무기물질에 의한 것이라는 예측과 유입 해수의 DOC가  $1 \text{ mg}/\text{l}$  내외라는 점 등을 고려하면, 차아염소산나트륨 주입 중단으로 인한 추가 막오염 발생 가능성은 매우 낮을 것으로 판단되었다.

Fig. 2에서 알 수 있듯이, 차아염소산나트륨 주입을 중단한 이후에도 막오염 증가 속도에는 큰 차이가 나타나지 않았다. 즉, 본 모형플랜트에서는 차아염소산나트륨 약품조에 해수가 유입되는 사고로 인한 탄산칼슘 스케일에 의한 막오염 정도가 미미하다는 의미이다. 따라서, 철이나 망간이 주요 오염원으로 의심된다.

### 3.3 화학세정을 통한 막오염 분석

Fig. 2에 나타난 바와 같이, 본 모형플랜트에서는 2년간 화학세정이 3회 실시되었다. 화학세정 후 배출되는 세정폐액(이하 화학세정 배출수)을 분석함으로써, 오염물질을 파악할 수 있다. Table 5는 화학세정 배출수의 칼슘(Ca), 마그네슘(Mg), 철(Fe), 망간(Mn), 부유물질(SS), 유기물 농도(DOC)를 분석한 결과를 정리한 것이다.

Table 5. 화학세정 배출수의 수질 분석(세정약품 용액 100L 기준)

항 목	세정약품	Ca mg/l	Fe mg/l	Mg mg/l	Mn mg/l	SS mg/l	탁도 NTU	DOC mg/l
1차 화학 세정 (2007년 7월)	염산(35%)+(COOH) <sub>2</sub> (100%)	43.76	72.69	88.07	5.621	-	-	-
	NaOCl(3,000mg/L)+ NaOH(pH12)	11.44	0.82	9.54	0.053	-	-	-
	염산(35%)+(COOH) <sub>2</sub> (100%)	19.54	31.48	4.47	0.857	-	-	-
2차 화학 세정 (2008년 2월)	염산(35%)+(COOH) <sub>2</sub> (100%)	22.79	16.57	5.37	1.18	1.6	0.15	14.85
	NaOCl(3,000mg/L)+ NaOH(pH12)	4.83	<0.01	1.12	<0.01	3.4	0.26	1.243
	염산(35%)+(COOH) <sub>2</sub> (100%)	25.74	0.88	4.75	0.03	6.4	0.15	11.62
3차 화학 세정 (2008년 9월)	염산(35%)+(COOH) <sub>2</sub> (100%)	17.4	3.62	9.13	9.13	1.8	0.19	-
	NaOCl(3,000mg/L)+ NaOH(pH12)	15.9	10.87	1.98	1.98	3.2	0.25	19.97
	염산(35%)+(COOH) <sub>2</sub> (100%)	18.7	3.51	5.08	5.08	1	0.08	-

1, 2, 3차 화학세정의 경우 모두 철과 망간의 농도가 해수 내 농도와 비교했을 때, 수백 배에서 수천 배 높은 것으로 나타났다(해수 내 철과 망간 농도는 0.05mg/l 미만). 이는 철과 망간이 모형플랜트 내에 농축되었다는 의미이고, 철, 망간 산화물이 막의 공극 내에 침전되었기 때문이다. Table 5의 SS와 탁도 데이터에 따르면, 화학세정 배출수 내 부유 물질 농도가 일반적인 세정배출수 대비 상당히 낮다는 사실을 알 수 있다. 철, 망간이 주요 오염물질이고, 막 공극 내부에 있는 철, 망간 산화물은 세정액에 의해 용해되어 탁도나 SS로 측정되지 않기 때문에 이런 현상이 나타난다.

단순히 농도만으로 볼 때, 칼슘과 마그네슘도 상당량 화학세정 배출수 내에 포함되어 있었다. 그러나, 화학세정 배출수 내 칼슘과 마그네슘의 농도는 해수의 그것과 비교했을 때 훨씬 낮다(해수 내 칼슘은 약 400mg/l, 마그네슘은 약 1,300mg/l 존재). 철과 망간의 농축율과 비교해 보았을 때, 칼슘과 마그네슘은 막오염을 발생시켰다고 보다는 배관이나 막모듈 내부 등에 일부 묻어 있는 차원으로 보는 것이 타당하다. 즉, 화학세정 시에는 막 내부만 세척이 되는 것이 아니라 막모듈 및 배관 내부도 세척이 되기 때문에, Table 5에서 나타난 칼슘과 마그네슘 농도는 막모듈 및 배관에 일부 포함된 칼슘 및 마그네슘 석출물일 가능성이 매우 높다.

화학세정 배출수의 수질 검토 결과 철과 망간이 주요 막 오염 물질이라는 것을 결과론적으로 알 수 있었다. 그러나, 앞서 언급되었듯이 해수 내 철과 망간은 0.05mg/l 미만의 미량으로 존재한다. Fig. 2에 나타나듯이 막을 빠른 시간에 오염시키기에는 부족한 양으로 판단된다. 본 연구에서 사용

된 펌프의 재질은 스테인레스 강으로, SUS304 등급(철이 주성분이고, 망간도 일부 포함됨)이다. 이는 부식성 강한 해수에서 사용되기에는 내부식성이 떨어진다. 참고로, STS304 등급은 일반적으로 해수담수화에 잘 사용되지 않는 재질이나 본 연구에서는 과일롯 플랜트 수명을 2년 정도로 보고, 비용절감 차원에서 채택하였다. 실제 해수담수화 플랜트를 설계하기 위해서는 최소한 SUS316, SUS316L 등이 채택되어야 하며, 누수가 우려되는 고압이 작용되는 배관 부분은 듀플렉스 재질을 채택하는 것이 부식을 막기 위해 추천되는 방법이다.

다시 한번 정리하면, 부식으로 인해 모형플랜트 내 스테인레스 강이 산화되어 철과 망간 이온이 정밀여과막 내부로 침투했을 가능성이 매우 높다. 그 증거로, 2008년 초부터(즉, 가동후 1년이 지나면서부터) 펌프에 누수가 발생하였고, 2008년 9월에는 펌프를 교체해야 할 정도로 누수가 심각했다. 정리하면, 펌프 등 스테인레스 강이 해수에 의해 부식되어 철과 망간 이온이 일반 해수내 포함된 농도보다 높은 값으로 정밀여과막 내부로 침투했고, 역세척 시 주입된 공기나 차아염소산나트륨으로 인해 철과 망간이 산화되어 막 공극 내부에 침적했을 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

모형플랜트를 위한 장기운전 연구를 통해 역삼투법 해수담수화 전처리로서의 정밀여과 공정의 특성을 알아보았다. 각종 문헌으로 이미 잘 알려져 있는 정밀여과의 특징인 우

수한 생산수 수질이 운전 기간 동안 확인되었고, 운전 시 발생할 수 있는 여러 가지 문제점(계측기기 고장 등)을 확인, 해결하였다.

본 연구의 본래 의도는 청정 원수를 더욱 청정하게 만들기 위하여 막여과 공정이 사용될 때 여과 플럭스를 최대 얼마까지 올릴 수 있는지, 장기오염 특성은 어떤지를 관찰하는 것이었다. 그러나, 펌프 등 부품에 포함된 스테인레스 강의 부식으로 인해 철, 망간에 의한 막오염이 예상 외로 발생하면서, 본래 목적을 달성할 수 없었다. 해수의 부식성으로 담수화 장치의 누수가 발생할 수 있다는 것은 이미 잘 알려진 상식이지만, 이로 인해 심각한 파울링이 발생할 수 있다는 사실을 발견하고, 논리적으로 입증할 수 있는 데이터를 확보한 것이 본 연구의 가장 큰 의의라 할 수 있다.

## 참고문헌

- 김수한, 강석태, 박희경 (1998) RO를 이용한 해수담수화에 있어서의 전처리 최적화 방안, *대한환경공학회지*, **20**(10), pp.1367-1376.
- 환경부 (2008) 막여과 정수시설 설치기준 고시마련 연구, 환경부 수도정책과.
- AWWA (2006) Desalination of seawater and brackish water, American Water Works Association.
- Kim, S., and Hoek E.M.V. (2007) Interactions controlling biopolymer fouling of reverse osmosis membranes, *Desalination* **202**, pp.333-342.
- Knops, F. van Hoof, S., Futselaar, H., Broens, L. (2007) Economic evaluation of a new ultrafiltration membrane for pretreatment of seawater reverse osmosis, *Desalination* **203**, pp.300-306.
- Pearce, G.K. (2007) The case for UF/MF pretreatment to RO in seawater applications, *Desalination* **203**, pp.286-295.
- Tuler, A., Glucina, K., Laine, J.M. (1999) Assessment of UF pretreatment prior RO membranes for seawater desalination, *Desalination* **125**, pp.89-96.
- US EPA (2005) Membrane Filtration Guidance Manual, United States Environmental Protection Agency.
- Wilf, M., and Schierach, M.K. (2001) Improved performance and cost reduction of RO seawater systems using UF pretreatment, *Desalination* **135**, pp.61-68.