

해수담수화 전처리로서 가압식 MF 공정의 최적 운전조건 도출 Optimum Operating Condition for Micro-Filtration Process as a Seawater Desalination Pretreatment

김영민 · 장정우* · 김진호* · 최준석[†] · 이상호** · 김수귀

Youngmin Kim · Jung-Woo Jang* · Jin-Ho Kim* · June-Seok Choi[†] · Sangho Lee** · Sukwi Kim

한국건설기술연구원 환경연구실 · *(주)에코니티 · **국민대학교 건설시스템공학부
Environmental Engineering Research division, Korea Institute of Construction Technology
*Econity Co., Ltd. · **School of Civil and Environmental Engineering, Kookmin University

(2013년 7월 19일 접수, 2013년 9월 16일 채택)

Abstract : The relation between performance maintenance conditions and those cost efficiency was studied to choose an optimum operating condition in the seawater desalination pretreatment system. A hollow fiber microfiltration module, which was developed with domestic technology, was tested with the various operating conditions such as chemically enhanced backwash cycles and design dosages of a cleaning chemical. Transmembrane pressure was measured to investigate membrane fouling status and cleaning degree. In addition, economic analysis was performed to compare water production costs by the operation condition. As a result, The operation mode III, chemically enhanced backwash at once a day with 100 mg/L of sodium hypochlorite (NaOCl) was selected. The concurrent evaluation between membrane filtration performance and its economic analysis will be suitable to choose an efficient optimum condition.

Key Words : Seawater Desalination Pretreatment, Pressurized Microfiltration Membrane, Transmembrane Pressure, Economic Analysis

요약 : 본 연구는 해수담수화 전처리 기술로서 개발된 가압식 정밀여과(microfiltration: MF) 증공사막 모듈(막 면적 35 m²)의 성능평가를 목적으로 1,000 m³/day 규모 해수담수화 파일럿플랜트를 대상으로 하였다. 약 3개월 동안 용존공기부상법으로 처리한 원수를 공급하여 1.5 m³/m²·day 정유량 조건에서 여과주기, 유지 세정(chemically enhanced backwash: CEB) 농도와 세정 주기 변화 등에 따른 여과성능과 비용을 분석하였다. MF 막 성능 유지를 위한 유지 세정 시 약품 농도에 의한 영향보다는 반복 세정(4회/일)이 효과적이었으나, 경제적 측면에서는 회수율 제고를 위한 단일 세정 방식이 적절한 것으로 나타났다. 막간차압 및 비용분석을 통해 4가지 운전방식 중 1일 1회 NaOCl 100 mg/L 세정 방식을 최적 운전조건으로 도출하였다. MF 전처리 공정의 유지관리 조건 도출 시에는 성능 평가와 함께, 운전방식에 따른 경제성을 함께 고려하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

주제어 : 해수담수화 전처리, 가압식 정밀여과막, 막간차압, 경제성 분석

1. 서론

최근 해수담수화 공정으로서 열증류 방식에 비해 역삼투 공정(reverse osmosis: 이하 “RO”)의 활용도가 늘어나면서 전처리의 중요성이 더욱 강조되고 있다. 해수 전처리 공정은 원수에 포함된 입자성, 콜로이드성 또는 미생물 등 다양한 오염물질을 처리함으로써 후속공정인 RO 공정의 막 오염을 방지하기 위한 것이다. 효과적인 전처리를 통해 향상된 수질은 막 세정 횟수, 막 오염으로 인한 압력 손실을 줄일 수 있으므로 유지관리 비용을 낮추고 RO 막의 수명을 늘릴 수 있다.¹⁾

전통적으로 응집-침전을 포함한 여재 여과방식(media filtration)이 해수 전처리 공정으로 주로 활용되어 왔으나, 최근 정밀여과(microfiltration: 이하 “MF”) 및 한외여과(ultrafiltration: 이하 “UF”) 막 기술의 발전을 통해 해수담수화 분야에서 분리막 전처리 기술이 점차 확산되고 있다.²⁾ 분리막 전처리 공정은 기존 방식에 비해 적은 부지 면적을 필요로 하므로 투자비용(capital investment), 화학약품 및 슬러지 처

리 비용의 감소, 환경에의 악영향 감소 등 많은 장점이 있으며,¹⁾ 특히 16인치 RO 막 등의 해수용 역삼투(seawater reverse osmosis: 이하 “SWRO”) 시스템의 대형화 추세에 따라 보다 향상된 플럭스, 높은 수질의 전처리 요구에 적합하다.

외국의 경우 2010년 현재 이스라엘의 Ashkelon 등 십여 개소의 실 규모 해수담수화 플랜트에서 분리막 전처리 공정이 활용되고 있으며,³⁾ 특히 멕시코만 Corpus Christi Bay 인근의 파일럿 연구를 통해 제조사별 전처리막 성능 분석, 응집 또는 다층여과 시스템과의 비교연구 등이 진행된 바 있다. 연구 결과에 따르면 SDI (silt density index) 값의 60% 이상이 4 이상인 일반 공정에 비해 분리막 전처리 공정은 지속적으로 3 이하로 나타났으며, 후속공정인 RO 세정 빈도도 약 400%까지 감소되었다.¹⁾

한편, 국내는 윤 등⁴⁾이 5 m³/hr 규모의 RO 모형 플랜트를 대상으로 적조 및 염분도에 따른 MF 전처리 공정을 평가한 바 있으며, 김 등⁵⁾이 막 면적 7 m², 1 m³/m²·day의 정유량(constant flux) 조건에서 2년간 MF 운전 결과를 발표한 바 있다. 그러나 아직까지 실규모의 해수용 전처리막 플랜트

[†] Corresponding author E-mail: jschoi@kict.re.kr Tel: 031-910-0759 Fax: 031-910-0291

에 대한 연구가 미진한 실정이므로 외국과의 기술 격차가 상당하다.

현재까지 UF 공정이 MF에 비해 해수 원수에 포함된 부유 유기물질과 실트질에 대하여 높은 제거성능을 보임으로써 보다 폭넓게 적용되고 있는 실정이다. 20 kDa 이하의 UF 막은 0.4 bar(조류세포 파괴압력, algar cell rupture) 이하의 저압 운전 시 생물 막오염(bio-fouling)을 크게 줄일 수 있는 것으로 알려져 있다.⁶⁾ 그러나 원수 특성 상 막 오염 물질이 입자성의 탁도 유발물질이 주된 경우에는 막 공정이 상대적으로 큰 MF 막이 유지관리 및 에너지 소모 측면에서 장점이 있다.

따라서 본 연구에서는 1,000 m³/day 규모의 실증 SWRO 파일럿플랜트 대상으로 국내 기술로 개발한 중공사막 타입의 MF 전처리 상용 막을 평가하는 데 목적이 있다. 막 성능 평가와 더불어 여과, 역세에 따른 회수율과 유지 세정(chemically enhanced backwash: 이하 “CEB”) 등의 운전 변수를 최적화함으로써 그 적용성을 높이고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 대상 파일럿 플랜트

본 연구에서는 부산광역시 기장군에 위치한 16인치 SWRO 파일럿 플랜트를 대상으로 하였다. 상기 플랜트는 생산수 기준으로 1,000 m³/day 용량을 처리할 수 있으며, 전처리 공정으로서 용존공기부상법(dissolved air flotation: 이하 “DAF”), 이단복합여과(dual media filtration: 이하 “DMF”), 가압식 또는 침지식 분리막을 선택적으로 활용할 수 있다. 본 연구에서는 Fig. 1의 SWRO 공정 중 DAF 처리 후 가압식 MF 모듈만을 대상으로 하였다.

2.2. 해수 전처리용 MF 막 및 운전방식

본 연구에서는 국내 기술로 개발한 중공사막(hollow fiber) 타입의 해수 전처리용 가압식 PVDF (polyvinylidene fluoride, Ecomity) 막을 사용하였다. 막은 TIPS (thermally induced phase separation) 방식과 연신법(stretching)으로 제조하였으며, 막 공경(pore size) 0.1 μm, 모듈 단면적은 35 m²이다.

가압식 MF 모듈을 대상 파일럿 플랜트에 설치하여 2012년 3월부터 2012년 5월까지 약 3개월간 성능을 테스트하였다. 기장군 앞바다에서 취수한 후 DAF 처리수를 원수로 사용하여하였으며 그 특성은 Table 1과 같다.

Table 1. Effluent characteristics of the dissolved air flotation system (Mar.-May, 2012)

Item	Max.	Min.	Aver.
pH	8.54	7.9	8.23
TDS (mg/L)	43,830	36,830	38,595
Conductivity (mS/cm)	54.84	51.4	54.07
Turbidity (NTU)	4.25	0.08	1.09
TOC (mg/L)	2.0	0.8	1.2
Temperature (°C)	20.7	11.3	13.05

Table 2. Operational conditions for the pressurized MF membrane

Operation mode	Filtration time (minutes)	Filtration cycle (times/day)	Chemically enhanced backwash cycle (times/day)	Design dosage of NaOCl (mg/L)	Note
I-a	45	24	4	50	*
I-b					
II-a	45	24	4	25	*
II-b					
II-c					
III-a	38	31	1	100	
IV	45	24	4	100	
III-b	38	31	1	100	**

* No chemically enhanced backwash, ** After the cleaning in place

MF 모듈의 운전은 1.5 m³/m²·day의 정유량 조건으로 유지하였으며, Table 2와 같이 운전방식을 변경하여 여과시간, CEB 조건에 따라 운전성능을 실험하였다. 각 여과시간에 따라 운전 후 7분간 역세(backwash, aeration 및 급·배수 포함)를 하였으며, CEB는 세정 주기에 따라 1일 1~4회 차아염소산나트륨(NaOCl)으로 2분간 역세 후 정지, 공세(aeration) 등을 거쳐, 잔류염소 0.1 mg/L 이하로 세척(rinsing) 후 급배수 하였다. 막 성능 회복을 위한 회복 세정(cleaning in place: 이하 “CIP”)은 산세정과 염기 세정으로 구분되며, 산 세정 시 옥살산((COOH)₂) 1%와 황산(H₂SO₄) 0.1% 용액을, 염기 세정 시 NaOCl 3,000 mg/L와 수산화나트륨(NaOH)을 혼합하여 pH 11로 맞춘 용액을 이용하였다.

2.3. 분석방법

2.3.1. 막간차압 및 회수율

다양한 운전조건에 따른 막 오염 정도를 파악하기 위해서 막간차압(transmembrane pressure: 이하 “TMP”) ΔP를 식 (1)

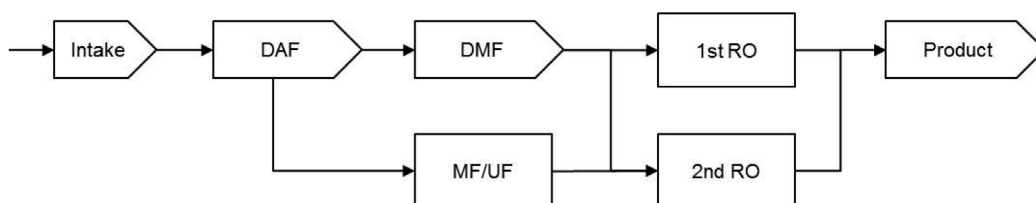


Fig. 1. A schematic diagram of the 16" seawater reverse osmosis desalination pilot plant.

을 이용하여 산정하였으며, 식 (2)를 통해 회수율 *RR* (recovery rate)을 산정하여 운전방식 별 목표 여과성능을 평가하였다.

$$\Delta P = \frac{P_i + P_o}{2} - P_p \quad (1)$$

여기서, P_i 는 유입 압력(kPa), P_o 는 출구 압력(kPa), P_p 는 처리수 압력(kPa)이다.

$$RR = \frac{Q_f - Q_{bw}}{Q_f + Q_{dr}} \times 100 (\%) \quad (2)$$

여기서, Q_f 는 처리수량을, Q_{bw} 는 역세수량, Q_{dr} 은 배출수량을 나타낸다.

2.3.2. 경제성 분석

Table 2의 운전방식 별 여과성능 비교와 함께 경제적인 운전조건 도출을 위해서 경제성 분석을 수행하였다. 분석은 USBR (United States Bureau of Reclamation)의 WaTER (Water Treatment Estimation Routine) 모형을 사용하였으며, 각 운전조건별 회수율 및 약품사용량 변화에 따라 단위 m^3 생산을 위한 연간비용을 비교하였다.

연간비용은 총 건설비용(total construction cost)과 유지관리 비용으로, 총 건설비용은 다시 직접비(direct capital cost)와 간접비(indirect capital cost)로 구분된다. 직접비는 건물 건설비용, 막 및 모듈 설치비, 부대설비 및 엔지니어링 비용을, 간접비는 건설 중 이자, 예비비(contingency) 및 프로젝트

Table 3. Design assumptions for economic analysis

Type	Parameters	Input value	Note
MF process input	Product flow rate	39,375~42,948 l/d	reference to Table 6
	Plant availability	94%	
	Planned operation time per day	100%	
	Number of modules	1	
	Number of membranes	1	
Recovery		77.3~88.9	reference to Table 6
Direct capital cost	Building cost	1,076 USD/m ²	default value of the analysis model
	Miscellaneous	5%	of module cost
	Plant interconnecting piping	5%	of module and miscellaneous cost
	Engineering	10%	
Indirect capital cost	Interest during construction	6%	
	Contingencies	20%	of total direct capital cost
	Project management	10%	
	Working capital	4%	

Table 4. Operation and maintenance cost input

Cost	Input value	Note
Electricity rate	0.07 USD/kWh	
Sodium hypochlorite cost	92 USD/kg	110 won/kg
Specific gravity	1,168	NaOCl
Membrane life	10 years	
Staff days/day	0,33	8 hours/day
Labor rate	8,33 USD/hr	2,000,000 won/month
Amortization time	30 years	
Interest rate	6%	

관리비용 등으로 구성된다. 유지관리 비용은 설비 운전엔 필요한 전기료, 막 교체 및 인건비, 화학약품 비용 등으로부터 산정하였다.

총 건설비용 산정 후 식 (3)을 활용하여 현재 가치로 환산(capital recovery)하였으며, 이자율 6%로 자본회수 기간은 30년을 적용하였다. Table 3은 MF 공정평가를 위한 입력 값과 자본비용 산정을 위한 가정치를 나타내며, 유지관리 비용은 Table 4의 각 유지관리 항목별 원단위와 사용량을 통해 산정하였다.

Capital recovery

$$[USD/m^3 \cdot yr] = TCC \cdot i \cdot (1+i)^n / ((1+i)^n - 1) \quad (3)$$

여기서, TCC 는 총 건설비용(total construction cost)을, i 는 이자율, n 은 자본회수 기간이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 운전조건 별 여과성능

대상기간 동안 운전 조건 별 TMP 변화를 통해 여과성능을 테스트하였다. CEB 농도 및 주기, 여과 주기 등을 Table 2와 같이 변경함으로써 적정 운전조건을 도출하고자 하였다. 초기 TMP 14.1 kPa 조건에서 테스트를 시작하였으며, 각 운전 조건 별(I-IV)로 순서대로 운전하였다. I-a, II (II-a, II-c) 구간에서는 CEB 4회/일 조건에서 경제성 제고를 위한 약품 사용량 변화 영향을, II-c, III-a 구간에서는 회수율 제고를 위한 1회/일 CEB 세정효과를 검토하였다. IV 구간은 같은 농도의 NaOCl 조건(100 mg/L)에서 세정주기 변화에 따른 효과를, III-b 구간은 CIP 이후 세정효과를 확인하고자 하였다. 또한 화학약품 부족과 원수 급수 중지 등 현장 문제(I-b, II-b)로 인한 CEB 미 수행 영향을 평가하였다(Fig. 2).

먼저 I-a, II-a 구간에서 1일 4회 CEB 수행조건에서 약품 사용량 변화 영향을 검토한 결과, 약품 사용량의 차이(50 ppm, 25 ppm)는 있으나 TMP의 급격한 상승 없이 초기 값과 유사한 결과를 나타내었다. 낮은 농도의 NaOCl 농도에서도 안정적인 세정효과를 보임에 따라 농도에 의한 영향보다는 반복적인 CEB 수행이 막 오염 방지에 효과적인 것으로 판단

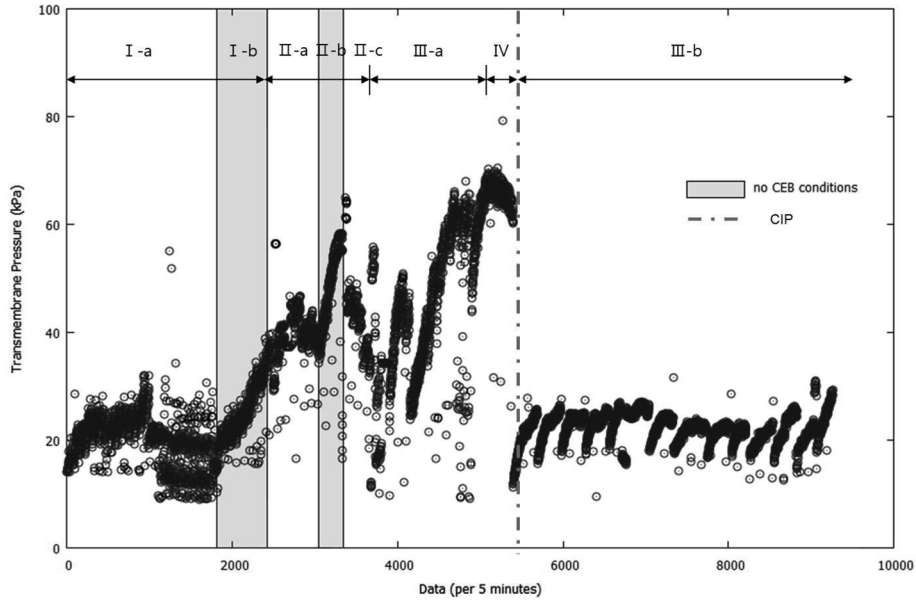


Fig. 2. Trans-membrane pressure variations during the MF operation.

되었다. 반면, CEB를 실시하지 않는 경우 평균 1 NTU, TOC 1.2 ppm 정도의 양호한 원수 수질에도 불구하고 막 오염이 급격히 발생하는 것으로 나타났다. 입자성 물질이나 유기물에 의한 막오염 이외에도 생물 막오염에 대한 영향이 있을 것으로 판단되며, 주기적인 유지세정이 해수용 MF 막 성능 유지에 필수적인 것으로 사료된다.

III-a 구간을 통해 회수율 상승을 위한 1일 1회 CEB 조건을 살펴본 결과, 구간 초기에는 지속적인 TMP 감소가 관측되었으나, 이후 급격한 상승 또는 하강이 반복되는 등 세정 효과가 미미한 것으로 나타났다. 막 오염이 상당히 진행되었기 때문에 판단되며, 회수율 상승을 위한 세정주기 변경(1일 1회)에 대한 정확한 평가가 어려웠다. IV 구간을 통해 동일 농도 1일 4회 세정한 결과, TMP 감소를 통해 세정 효과는 일부 확인하였으나 CEB 미수행 등에 따른 막 오염으로 인해 CIP를 통한 막 성능 회복이 필요할 것으로 판단되었다.

CIP 이후 III-b 조건에서는 TMP가 운전 초기 이하(11.3 kPa)로 회복되었으며 약 20 kPa 이하로 안정적으로 유지되었다. NaOCl 100 ppm 조건에서 회수율 상승을 위한 1일 1회 CEB 가능성을 확인하였다.

운전방식에 따른 TMP 변화율을 산정하여 Table 4에 나타내었다. 각 시구간 별 총 변화율과 1일 변화율로 환산하였다. CEB를 수행하지 않은 경우 1일 환산 시 52.0~108.8%의 TMP 증가를 보였으며, CEB를 수행한 경우에는 막 오염으로 세정효과 확인이 어려운 조건 III-a를 제외하고 (-)2.2~(-)12.2%로 구간 초기에 비해 TMP가 감소하였다.

CEB 미 수행 조건에서는 동일 CEB 주기로 세정하였음에도 보다 고농도로 세척한 I-b 구간이 II-b 보다 TMP 상승률이 높은 것으로 나타났다. 이는 고농도 세척 후 깨끗해진 표 면에서 막 오염 진행속도가 보다 빨리 진행되는 것으로 판단된다.

CEB 수행 시 1일 4회 CEB 조건(I-a, II-a, II-c, IV)으로부터 TMP 감소효과를 수치적으로 확인한 결과, NaOCl 농도 보다는 반복 세정을 통해 세정 효과를 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 1일 1회 세정 조건도 CIP 이후 1일 6% 정도의 TMP 상승에도 20 kPa 이하로 TMP가 유지됨을 확인하였다. 이미 막 오염이 진행되어 성능 회복이 불가능한 경우(III-a)를 제외하고는 1일 1회 100 mg/L CEB 조건에서도 안정적인 운전이 가능하며, 높은 회수율 확보가 가능할 것으로 판단된다.

3.2. 회수율

식 (2)를 통해 각 운전조건 별로 달성 가능한 회수율을 산정하여 비교하였다. 회수율은 운전방식에 따라 MF 막 모듈이 직접 생산 가능한 수량을 의미하므로 개발 모듈의 경제성과 상용화 가능성에 미치는 영향이 크다. 여과속도 1.5 m³/m²·d, 막 면적 35 m² 하에서의 각 운전방식 별 목표 회수율을 Table 5에 제시하였다.

검토 결과 31회/일의 여과 주기를 갖는 1일 1회 CEB 조건

Table 5. TMP variations for the pressurized MF operation

Time period (Operation mode-time section)	TMP variation		note
	%/whole time interval	%/day	
I-a	-27.6	-4.4	
I-b	272.0	108.8	*
II-a	-27.0	-15.5	
II-b	62.6	52.0	*
II-c	-2.6	-2.2	
III-a	80.3	14.5	
IV	-9.6	-13.2	
III-b	88.1	6.0	

* No CEB condition

(III)의 회수율이 24회/일의 여과 주기를 갖는 1일 4회 CEB 조건(I, II, IV)에 비해 상대적으로 높음을 알 수 있다. 이는 잦은 CEB 수행으로 인해 막 세정에 필요한 수량은 증가하는 반면, 여과 시간의 감소로 처리수량도 함께 적어지기 때문이다. 회수율 확보 측면에서는 적은 세정주기를 갖는 것이 잦은 막 세정에 비해 긍정적일 것으로 판단된다.

3.3. 경제성 분석

3.1 운전조건 별 여과성능에서 확인한 바와 같이 막 세정 측면에서는 반복세정이 효과적이거나, 회수율 측면에서는 1일 1회 세정이 적절하다. 반복 세정에 따른 유지관리 비용 증가와 회수율 증가에 따른 생산비용 절감 등이 서로 상충되므로 경제성 분석을 통해 운전조건 별 생산비용을 비교하였다. 1년간의 직접비와 간접비로부터 총 건설비용(total construction cost)을 산정하였으며, 유지관리 비용과의 합산을 통해 연간 비용(annual cost)과 연간 1 m³ 생산비용을 산정하여 비교하였다(Table 7).

비교 결과 각 운전모드 별 처리수량의 변화에 따른 capital recovery는 큰 변화가 없었으며, CEB 조건에 따른 약품 사용량의 변화로 인해 유지관리 비용의 편차가 큰 것으로 나타났다. 유지관리 비용은 운전모드 III이 가장 적었으며, 1일 4회 100 mg/L CEB 조건인 IV 경우가 가장 큰 것으로 나타났다. capital recovery와 유지관리비의 합으로 나타나는 연간 비용과 연간 1 m³ 생산비용은 유지관리비의 크기에 따라 결정되었다. 특히 연간 1 m³ 생산비용의 경우 Table 6과

Table 6. The estimated recovery rates for the pressurized MF operation

Operation mode	Permeate (l/day)	Backwash (l/day)	Drain (l/day)	Recovery rate (%)
I	39,375	6,781	1,400	79.9
II	39,375	7,875	1,400	77.3
III	42,948	3,336	1,600	88.9
IV	39,375	6781	1,400	79.9

Table 7. Detailed economic analysis

Cost items	Operation mode			
	I	II	III	IV
Direct capital cost (USD/yr)	9,792	9,792	9,839	9,792
Indirect capital cost (USD/yr)	4,000	4,000	4,000	4,000
Total construction cost (USD/yr)	13,792	13,792	13,839	13,792
Capital recovery (USD/yr)	1,002	1,002	1,005	1,002
Total O&M cost (USD/yr)	8,783	8,565	8,547	9,241
Annual cost (USD)	9,785	9,567	9,552	10,243
Annual cost per m ³ (USD/m ³)	0.72	0.71	0.65	0.76

같이 생산수량이 큰(또는 회수율이 높은) 운전모드 III이 단위 m³당 비용감소가 가장 큰 것(0.65 USD/m³)을 볼 수 있다.

막 세정 측면에서 반복세정을 통한 MF 공정의 TMP 저감효과가 컸으나, 운전모드별 약품사용량과 생산수량의 차이로 인해 운전모드 III 조건이 가장 경제적인 것으로 나타났다. III-b 구간을 통해 CIP 이후 안정적인 TMP 확보가 가능하므로 운전모드 III이 최적 조건으로 적절할 것으로 판단된다.

운전모드 III에서의 유지관리 항목 별 비중을 검토한 결과 Fig. 3과 같이 CEB 조건에 따른 화학약품 비용보다는 인건비의 비율이 대부분(93.6%)을 차지하였다. 이는 단일 모듈로 소형(막면적 35 m², 1/5 m³/m²·day) 시스템으로 운전한 결과로 판단된다. 다수의 모듈로 대용량 운전 시에는 화학세정 비용 등 기타 항목의 비중이 높아질 것으로 판단되며, 단위 m³당 생산비용 또한 감소될 것으로 기대된다.

4. 결론

본 연구는 해수담수화 전처리 공정으로서 가압식 MF 공정의 최적 운전 조건을 도출함으로써 국내 기술로 개발된 전처리 상용막을 평가하고자 하였다. 운전조건에 따른 막간 차압 결과로부터 생물 막오염 등의 영향으로 주기적인 유지

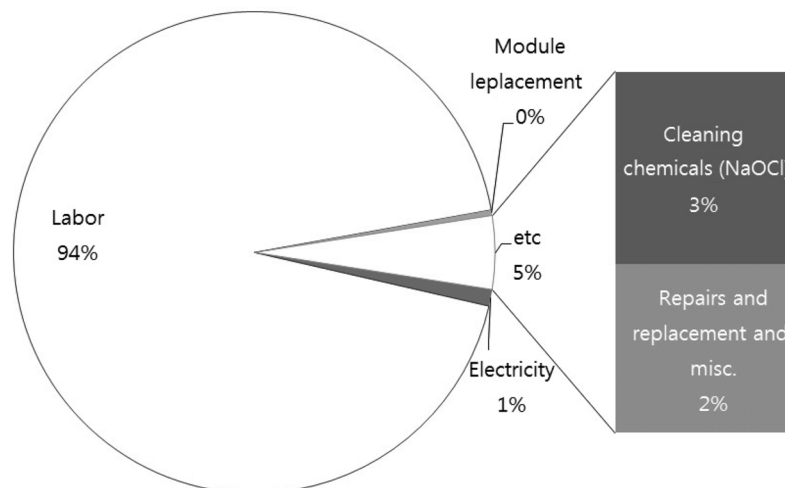


Fig. 3. Pie chart for O&M cost percentage.

세정이 필요함을 확인하였다. 막 세정 측면에서 1일 4회 CEB 조건과 같이 반복 세정이 효과적인 것으로 나타났으며, 공정 운전에 따른 경제성 측면에서는 짧은 세정주기를 통해 높은 회수율의 확보가 유리한 것으로 판단되었다. 막간차압 및 경제성 분석 결과 네 가지 운전 방식 중 1일 1회 100 mg/L CEB 조건(운전모드 III)을 최적 운전으로 도출하였다. MF 막 면적, 막/모듈 개수 및 운전 유량 등에 따라 차이가 있겠으나 안정적인 막 성능유지가 가능하다면, 가급적 세정 횟수를 줄임으로써 유지관리비를 절감하고 회수율을 높이는 것이 적절할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 국토해양부 플랜트기술고도화사업(과제번호 #07 해수담수B03-02), 플랜트연구개발사업(과제번호 13IFIP-B0 65893-01)과 R&D 정책·인프라사업 기술사업화 지원(과제번호 11TRPI-C057432-01)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

KSEE

참고문헌

1. Henthorne, L., Evaluation of Membrane Pretreatment for Seawater Reverse Osmosis Desalination, United States Bureau of Reclamation, Denver(2007).
2. Huehmer, R. P., "MF/UF pretreatment in seawater desalination: applications and trends," in Proceedings of World Congress in Desalination and Reuse, International Desalination Association, IDAWC/DB09-253, Dubai(2009).
3. Bush, M., Chu, R. and Rosenberg, S., "Novel trends in dual membrane systems for seawater desalination: minimum primary pretreatment and low environmental impact treatment schemes," *IDA J.*, **2**(1), 56~71(2010).
4. Yun, J. S., Kim, S. H., Yoon, C. H. and Kim, G. T., "Micro-filtration as Pretreatment of Reverse Osmosis for Seawater Desalination: Operation Efficiency and Factors Affecting its Efficiency," *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **26**(4), 475~480(2004).
5. Kim, S. H., Kim, C. H., Kang, S. H. and Lim, J. L., "Long Term Operation of Microfiltration as a Pretreatment for Seawater Reverse Osmosis Processes," *J. Kor. Soc. Water Wastewater*, **24**(6), 735~741(2010).
6. Voutchkov, N., "Considerations for selection of seawater filtration pretreatment system," *Desalination*, **261**, 3854~364(2010).