역삼투방식의 해수담수화(SWRO)공정에서 UF 전처리공정의 유입원수 조정공정으로서 URC[®]-A공정의 적용성 연구

Application Study of URC[®]-A Process as a Feedwater Controlling Step of UF Pretreatment in SWRO Process

윤태일^{1,*} · 이원일² · 임현택¹ · 임병권¹ · 정준연² · 박태신²

Tai-Il Yoon^{1,*} · Won-Il Lee² · Hyeon-Taek Lim¹ ·

Byeong-Gwon Lim¹ · Jun-Yeon Jeong² · Tae-Sin Park²

¹네오엔비텍(주) · ²GS건설

¹Neoenvitech Co., Ltd. · ²GS Engineering & Construction

(Received February 7, 2019; Revised March 25, 2019; Accepted March 25, 2019)

Abstract : In this study, a pilot study combining UF pretreatment with URC[®]-A process was carried out in SWRO desalination. From these experiments, it was confirmed that source seawater quality parameters required for SWRO desalination such as turbidity below 0.1 NTU, TOC below 1.0 mg/L, SDI below 3, algal cells below 300 cells/mL were obtained from this pilot system. In case of high turbidity such as over 40 NTU, 99.2% removal from 42.59 NTU to 0.35 NTU was obtained after URC[®]-A process. In case of high algal condition, over 90% removal was achieved and turbidity below 0.4 NTU, TOC below 1.0 mg/L, algal cells below 300 cells/mL were obtained. By introducing URC[®]-A process, TMP of UF membrane was lowered 33% than without URC[®]-A process, after then TMP was maintained continuously at 0.4 bar. In case of high turbidity and high algal conditions, UF process operation was very stable without any bad influence, thanks to good and stable performance of URC[®]-A process. After then, when, without applying URC[®]-A, original source seawater entered the UF pretreatment, TMP was raised to about 16%. This shows that particulate matter and organic matter in source seawater can cause membrane fouling within a month. The introduction of URC[®]-A process as pretreatment step enabled stable operation of UF process and the lower TMP level of 0.4 bar could be maintained continuously to increase maintenance cleaning cycle and CIP cycle. This operation mode with longer maintenance cleaning and CIP cycles can be more economical than conventional operation mode.

Key Words : UF (Ultra Filtration) Pretreatment, SWRO (Seawater Reverse Osmosis), URC[®]-A, TMP (Trans-Membrane Pressure), SDI (Silt Density Index), Algae, TOC (Total Organic Carbon)

요약 : 본 연구에서는 SWRO처리에서 UF전처리시스템 앞에 URC[®]-A공정을 조합하여 파이로트실험을 수행하였다. 이 실험을 통하여 이 전처리시스템이 SWRO공정에서 요구되는 수질인 탁도 0.1 NTU, TOC 1.0 mg/L, SDI 3, 조류 300 cells/mL 이하를 제공할 수 있는지를 확인하였다. 해수 원수의 고탁도 조건 실험에서 유입 해수 원수 탁도 42.59 NTU에서 처리수 탁도는 0.35 NTU로 99.2%의 제거효율을 보였으며 고농도 조류의 유입 조건에서도 90% 이상의 제거효율을 보여 조류변성 시에도 탁도 0.4 NTU, TOC 1.0 mg/L, 조류 300 cells/mL 이하의 매우 양호한 결과를 확인할 수 있었다. URC[®]-A공정의 도입으로 인하여 UF공정의 TMP는 이전보다 33% 감소하였으며 그 이후 TMP는 0.4 bar로 지속적으로 유지 되었다. 고탁도 고조류 조건에서도 URC[®]-A공정의 안정적인 운전으로 UF공정에 미치는 영향은 없었다. 이후 URC[®]-A를 적용하지 않고 기존의 일반 해수 원수가 유입되었을 때, UF공정의 TMP는 약 16% 상승하였다. 이는 제거되지 않은 해수 원수의 입자성 물질과 유기물질이 한 달 내에 UF막에 막오염을 유발함을 보여준 것이다. 따라서 URC[®]-A공정의 도입은 UF공정을 안정적으로 운전할 수 있게 하며 0.4 bar 수준의 낮은 TMP유지로 유지세정 및 CIP 주기를 증가시켜 기존의 운전 방식보다 경제적으로 운전이 가능하게 해줄 수 있다.

주제어 : UF 전처리, SWRO, URC[®]-A, TMP, SDI, 조류, TOC

1. 서론

해수담수화기술은 크게 증발법과 같은 열기반의 담수화 기술과 역삼투막 해수담수화와 같은 막분리기반의 담수화 기술로 구분되며 최근에는 증발법에서 막분리기반의 담수화 기술로 급격히 변화하고 있다.¹⁾ 역삼투막 기반의 공정은 유기물, 조류 및 박테리아 등의 미생물에 의해 야기되는 유기성 막오염에 매우 취약하고 막오염(fouling)은 막의 수명을 단축시키고 운영에 필요한 에너지 소비를 증가시켜

유지관리비용을 증가시키는 등 많은 문제점을 유발한다.^{2,3)}

따라서 해수담수화의 전처리시스템은 막분리 기반의 해수 담수화플랜트에서 중요한 요소이며 해수 원수에 함유된 입자, 콜로이드, 유기물, 미네랄 및 미생물 오염원을 제거하는 것을 목적으로 하고 있다.⁴⁾ 해수 원수는 취수 위치나 취수 방식에 따라 그 특성이 다르고 특히 연안역에서 취수한 경우, 해수 원수의 수질은 조류의 번성, 육수의 유입, 조류 운동, 지형적 특성이나 기후적 변화에 의해 영향을 받아 변화한다.⁴⁾ 역삼투막 해수담수화플랜트에서의 전처리공정은 해수

* Corresponding author E-mail: tiyoon@inha.ac.kr Tel: 02-890-3950 Fax: 02-890-3954

원수의 특성에 따라 응집 침전, 여과, 흡착 등 물리·화학적 방법이 적용될 수 있으며 최근에는 정밀여과(microfiltration, MF)와 한외여과(ultrafiltration, UF) 막 공정이 해수담수화를 위한 RO (reverse osmosis)막의 막오염 방지를 위한 방법으로 적용되고 있다.⁵⁾ 하지만 MF나 UF 막 역시 막을 이용한 방법으로 막오염의 영향을 받는다. 이러한 단점을 보완하기 위해 물리·화학적 공정과 MF 또는 UF 막 공정을 조합시킨 RO 전처리공정을 적용하였거나 연구가 진행 중에 있다.⁶⁾

2010년 전후의 전형적인 UF 전처리를 채택한 역삼투막 해수담수화 플랜트는 조목 및 정밀스크린, 분리막에 피해를 줄 수 있는 미세 입자들을 제거하는 미세여과와 UF 막 시스템으로 구성된 전처리시스템을 갖추고 있다. UF 막은 해수 원수 중에 포함된 탁도, 비용해성 콜로이드성 유기물을 매우 효과적으로 낮출 수 있다고 알려져 있다. 탁도는 0.1 NTU (nephelometric turbidity unit) 이하로 낮출 수 있고 SDI₁₅ (silting density index₁₅) level도 90%의 시간에서 3아래로 떨어진다.⁴⁾ 그러나 만약 탁도 50 NTU 이상의 해수 원수가 1시간 이상 유입되면 UF막 처리 전에 침전이나 가압 부상(dissolved air flotation, DAF)에 의한 전처리가 필요하다. UF전처리로 SWRO (seawater reverse osmosis) 막에 생물학적 막오염(biofouling)을 일으키는 용존 유기물과 해양 미생물은 상당량 제거되지 못하는 것으로 알려져 있다. 그 이유는 막분리 전처리시스템에서 해수의 체류시간이 너무 짧아서 의미있는 생물학적 여과(biofiltration) 효과를 얻을 수 없기 때문이다. 그런데 만약 총유기탄소(total organic carbon, TOC)가 2 mg/L 이상이면 SWRO막에 생물학적 막오염이 일어날 가능성이 매우 크다. 반대로 만약 0.5 mg/L 이하이면 생물학적 막오염의 가능성은 거의 없다.⁴⁾

조류가 번성하는 경우 쌍원모조류와 같은 일부 해양플랑크톤은 0.4~0.6 bar의 낮은 압력에서 운영되는 막분리 시스템에서도 쉽게 깨져서 내부의 원형질을 용출시키고 이 원형질은 쉽게 생분해되는 다당류성분을 다량 함유하고 있어 이 성분이 일정 농도 이상이 되면 미생물 성장을 가속화하고 SWRO막에 생물학적 막오염을 일으킨다. 따라서 UF전처리 앞에 DAF나 지구중력으로 운전되는 입상여과방식의 전처리를 필요로 할 수도 있다.⁴⁾

SWRO 공정에서 요구되는 전처리공정의 처리수질은 평균 탁도 0.1 NTU이하, SDI 3이하(90% 시간), TOC 0.5 mg/L, pH 4.0~9.0 로 유지되는 것이 적절하다.⁴⁾ 다른 문헌에서는 SDI 5이하, TOC 1.0 mg/L를 언급하기도 한다.⁷⁾ 반면 우리나라 연안역에서 취수한 해수 원수는 40 NTU이상의 높은 탁도, 3,000 cells/mL 이상의 해양조류를 함유할 수 있다.⁸⁾

따라서 UF전처리에 나쁜 영향을 주지 않도록 탁도와 조류를 동시에 제거 가능할 수 있는 해수조절(전처리)방법이 필요하다. 그러한 방법으로 UF전처리시스템 앞에 URC[®]공정(ultra rapid coagulation process)에서 분말활성탄(powdered activated carbon, PAC)을 첫 번째 반응조에 투입하도록 변형된 URC[®]공정의 변법인 URC[®]-A공정을 검토하였다.

URC[®]공정⁹⁾¹⁰⁾은 2002년 하·폐수처리에 첫 적용 이후 국내

70여개 현장에서 하루 300만 톤 이상의 하·폐수처리장의 2차 처리수를 한 단계 더 처리하는 마무리 처리시설로 설치되어 운전되고 있다. 한편 URC[®]-A공정은 PAC를 투입함으로써 기존 URC[®]공정 보다 탁도와 TOC의 제거 효율을 상당부분 더 향상시킬 수 있음을 연구를 통하여 확인하였고 그 결과 하수처리수의 전자공업용수로의 재이용을 위한 막분리 공정의 전처리공정으로 설치되어 운용되고 있다.¹¹⁾

지금까지 해수를 처리하기 위해 URC[®]공정을 적용한 적은 없다. 해수담수화에 대해 폭넓은 조사를 한 자료에 의하면 일반적으로 응집침전방법보다는 응집부상을 선호하고 있음을 보이고 있다. 그 이유는 밀도가 가벼운 조류의 제거에 가압부상이 침전보다 유리하고 높은 처리속도에서 침전되지 않는 입자들 때문에 SDI관리에 응집부상이 더 유리하기 때문이다.¹²⁾

Actiflo[®]공정에 PAC를 주입한 Actiflo[®] Carb공정은 기존의 Actiflo[®]공정보다도 더 좋은 처리결과를 보이고 있다. TOC는 약 50%까지 T-P와 색도 제거율도 개선되며 조류는 Actiflo[®]에서 1000~3000 cells/mL에 대해 75~95%의 제거율을 얻는다. 따라서 고품질의 정수 생산(나쁜 맛과 악취의 제거), 색도 제거, 하수 처리수 중의 미량 유해물질의 제거 등을 위하여 단독으로 또는 Actiflo[®] + Actiflo[®] Carb 의 2단으로 적용을 하고 있다.¹³⁾

URC[®]-A공정도 Actiflo[®] Carb공정과 마찬가지로 PAC를 주입함으로써 URC[®]공정에서 10여% 제거된 TOC가 PAC주입량에 따라 50~60% 이상으로 제거될 수 있음을 보여주고 있고 T-P, 탁도, 색도, COD도 더 제거되는 것을 확인할 수 있다.¹¹⁾ 한편 Actiflo[®]공정의 운영 시 polymer(고분자응집제)의 주입량은 1.5~3.2 mg/L로 상당히 높은 편이고¹⁴⁾ polymer의 이러한 과량 주입이 UF막의 오염에 영향이 있음을 언급하고 있으며¹⁵⁾ 또 다른 자료에 의하면 막분리 앞에 설치할 전처리로 여러 응집 공정을 검토하였는데 Actiflo[®]공정은 micro silt와 polymer의 이송(carry-over)이 문제이고 Densadeg[®]공정은 PAC를 잡아둘 수 있는 장점이 있으나 polymer의 이송이 문제가 될 수 있다고 언급하고 선정 대상공정에서 제외시키고 있다.¹⁶⁾ URC[®]-A공정은 URC[®]공정 보다 동일한 polymer의 주입의 경우에 polymer 이송의 문제가 완화됨을 이전의 연구에서 확인하였다.¹¹⁾

SWRO에서 RO 막에서 있을 수 있는 생물학적 막오염을 예방하기 위해 TOC를 적극적으로 제거하고 고탁도와 고농도 조류를 90% 이상 제거하고 polymer의 이송(carry-over)을 고려하여 URC[®]공정에 PAC를 주입하는 URC[®]-A공정을 채택하여 pilot시스템을 설치하고 운전하였다.

이 실험을 통하여 URC[®]-A공정의 해수 원수에 대한 처리 가능성과 성능을 조사하고 UF막분리와 조합하여 운영하여 UF막분리에 미치는 영향을 조사하고 URC[®]-A공정과 UF막분리를 조합한 전처리시스템이 SWRO공정에서 요구되는 수질을 제공할 수 있는지를 확인함으로써 URC[®]-A공정의 UF막분리 공정의 전처리로서의 활용가능성을 검증하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 유입수 성상

본 연구는 부산시 이기대공원 인근 용호만의 해수 원수를 수심 5 m 지점에서 취수하였으며 그 성상은 Table 1에 나타내었다. 실험기간은 7월 말부터 10월 말까지 실시하였고 수온은 18.9~29.3℃, pH는 7.5~8.2, 조류 총세포수 1,300~2150 cells/mL 정도이며 탁도는 1.21~5.53 NTU, TOC는 1.07~2.08 mg/L로 낮은 편이었다.

2.2. URC[®]-A 및 UF 막 pilot process

2.2.1. URC[®]-A pilot process

RO 전처리공정으로 Fig. 1에서 보는 바와 같이 URC[®]-A pilot은 분말활성탄(PAC)접촉조가 결합된 고속응집침전장치이며 유입→PAC접촉→급속반응→응집·반응→경사판침전→처리로 구성된다. Pilot의 설계용량은 350 m³/day이며, 체류시간은 PAC접촉 25분, 급속반응 12분, 응집 5분, 완속응결 14분, 침전 52분으로 총 108분이고, 경사판침전조의 수면적 부하율은 6.5 m/hr로 설계되었다.

취수된 해수는 거름망(strainer)으로 거른 후 PAC접촉조로 이송되어 급속교반(180 rpm)조건 하에서 경사판침전조의 침전된 슬러지 중 일부가 유입유량 대비 2~3%가 순환되어 투입되고, 유입유량에 따라 일정량의 PAC(요오드흡착력; 1,000 mg/g 이상, Sieve size; 200 mesh)는 슬러리형태로 투입되어 해수에 존재하는 유기물질들과 적절한 접촉시간만큼 분

산 혼합되어 일련의 흡착반응을 통해 제거한 후 응집반응조로 이송된다. 또한 응집제 투입 전에 PAC를 우선 투입하여 응집플럭에 의해 PAC가 둘러싸이는 현상(entrapment)을 최소화하고 유기물질이 PAC에 흡착될 수 있는 기회를 제공하였다.

급속 및 응집 반응조는 급속교반(각각 180 rpm, 120 rpm) 조건 하에서 유입유량에 따라 응집제(FeCl₃, 38%)를 투입시켜 수중의 콜로이드성 입자와 용존성 오염물질 등과 반응하게 된다. 이때 최적의 응집조건과 RO 막 공정에서 탄산칼슘에 의한 스케일(scale) 방지를 위해⁵⁾ 필요시 알칼리보충제(NaOH, 20%)를 투입하여 pH를 조정하였다.

완속반응조는 완속교반(60 rpm) 조건하에서 polyacrylamide(anionic, OCI-SNF Co., Ltd. A-331P)를 투입하여 PAC와 결합된 응집플럭은 가교작용을 통해 조대화된 고밀도의 응집플럭으로 성숙된다.

경사판침전조는 응집조와 일체형 구조로서 조대화된 응집플럭이 침전조 유입시 sweep-coagulation 효과와 상부에 수직 단면의 갈매기형 이중 대칭구조의 경사판(counter current type)을 설치하여 유효 침전면적을 극대화하고 유체 흐름의 안정성을 확보하였다. 침전된 슬러지의 일부는 PAC접촉조로 이송되며 나머지는 인발된다.

2.2.2 UF pilot process

UF pilot은 3개의 유닛(2 모듈/유닛)으로 구성되어 있으며, 사용된 UF 모듈은 Dow의 SFP-2880XP 모듈이 사용되었다. 총 생산유량은 500 m³/d로 1개의 모듈의 생산량은 80 m³/d이다. 운전방식은 3개의 유닛이 동시에 운전되는 개념이며, 적용된 URC[®]-A공정의 생산유량이 350 m³/d로 기존 플럭스(flux)인 50 L/m²/h (LMH) 보다 낮은 유량인 약 33 LMH로 운전하였다. 운전 중 1계열 역세척공정 진행시에는 2개의 유닛에서 flux를 증가시켜 운전하기 때문에 전체적인 UF 투과는 일정하게 유지되며, 1개의 단위 화학세정(chemically enhanced backwashing, CEB) 또는 역세척공정 진행 도중에 다른 1개의 유닛이 화학세정 또는 역세척공정

Table 1. Characteristics of raw water

Parameters	Unit	Value
Temperature	℃	18.9~29.3
pH	-	7.5~8.2
Turbidity	NTU	1.21~5.53
TOC	mg/L	1.07~2.08
Total number of algae cells	cells/mL	1,300~2,150

Fig. 1. Schematic diagram of the URC[®]-A pilot.

Fig. 2. UF modules.

이 도래하면, 기존에 가동 중인 화학세정 또는 역세척공정이 끝나기 전까지 서비스(service)를 유지함으로 전체적인 UF 투과 유량은 일정하게 유지된다. UF 유닛의 운전은 정해진 시간에 따라서 다음과 같은 공정 순서를 반복적으로 진행하게 된다. 역세척공정은 자동으로 진행되고 air scrub, bottom backwash, top backwash 그리고 forward flushing 순으로 진행된다. Air scrub 단계에서는 feed flow 하부로 air를 주입하여 fiber의 표면에 쌓인 이물질들을 탈거하게 한다. Air는 backwash outlet line으로 배출된다. Air Scrub 공정 후, bottom backwash (1차), top backwash (2차)가 진행된다. UF 유닛의 처리수 라인을 통해 역세수가 유입되며 모듈의 하부로 배출되는 것이 1차, 모듈의 상부로 배출되는 것이 2차 역세척 공정이다. 2차 top backwash는 막오염의 정도에 따라 여러 번 반복될 수가 있으며, 역세척이 끝난 후, 막에 남아있는 오염물과 fiber의 외부에 맺힌 공기를 제거하기 위해 flushing를 시행한다. flushing공정 후, 운전모드로 전환된다. Fig. 2는 UF공정에 적용된 UF 모듈을 보여주며 2개의 모듈이 1개의 유닛으로 구성되어 SWRO의 원

수로 유입된다.

Test를 진행한 4월부터 12월까지의 해수의 온도차가 10℃ 이상 벌어지기 때문에 수온의 영향을 보정한 막오염 지표로서 아래 식을 사용한 보정차압이 활용되었다.¹⁷⁾ 아래 식에서 A는 1.26×10^{-2} , B는 -5.81×10^{-3} , C는 1.13×10^{-3} , D는 -5.72×10^{-7} , T는 온도(K)이다.

$$\Delta P_{T=25^{\circ}\text{C}} = \Delta P \left(\frac{\mu_{25}}{\mu_T} \right) \quad (1)$$

$$\mu_T = A \exp \left[(1 + BT) / (CT + DT^2) \right] \quad (2)$$

2.3. 운전 및 실험방법

URC[®]-A pilot의 운전방식은 PLC (programmable logic controller) program을 구성하여 제어하는 방식으로 Fig. 3과 같다. 유입유량계에 따라 일정량을 주입하기 위해 반송슬러지 펌프(pump)와 각 반응조의 약품 pump에 인버터(inverter) 함수식을 입력하여 주파수(Hz)가 자동 계산되면 그 출력 값에 의해 주입된다. 또한 NaOH 주입 pump는 pH meter에 의해 설정 값에 따라 제어되는 PID제어(proportional integral differential control)방식이며 인발슬러지 pump는 타이머(timer)에 의한 시간설정 값에 따라 제어된다.

URC[®]-A pilot 운전의 적정 약품주입량은 앞선 연구¹¹⁾에서 도출한 결과를 토대로 선정하였으며 그 값은 Table 2와 같다.

Table 2. Operating conditions of URC[®]-A pilot

Item	Dosage (mg/L)	G Value (sec ⁻¹)	HRT (min)
PAC	30	500	25
FeCl ₃	60	550	12+5
NaOH	pH 6.8~7.2	340	-
Polymer	0.6	180	14
Settling Tank	-	-	52 (6.5 m/hr)

Fig. 3. HMI (human machine interface) controller for the URC[®]-A pilot.

URC[®]-A공정을 PAC 30 mg/L, FeCl₃ 60 mg/L, polymer 0.6 mg/L의 약품주입량과 해수 원수의 pH 평균 7.9, 응집 반응조의 pH 6.8로 운영하였으며 이 운영조건에서 알칼리도 보충을 위한 알칼리제 주입은 불필요하였다. URC[®]-A공정의 PAC접촉조는 유기물에 대한 활성탄의 흡착능력을 극대화하기 위하여 25 min의 체류시간을 갖도록 하였다.

2.3.1. 실험방법

본 연구는 부산광역시 소재 환경공단남부사업소 내에 Fig. 4와 같이 기존에 설치되어 운영 중인 SWRO-PRO 해수담수화 pilot plant에 URC[®]-A pilot plant를 연계하여 설치·운영 하였으며 수질항목으로 pH, 탁도, TOC, 조류 총세포수 등을 분석하였다.

URC[®]-A공정의 TOC, 탁도, 조류 총세포수의 유입 및 처리수를 측정하였으며 UF 막 공정과 연계 후 운전시 그 처리수에 대해 SDI, TMP (trans-membrane pressure) 등을 측정하여 SWRO 전처리공정으로서의 적용 타당성을 조사하였다. 또한 URC[®]-A공정에 의해 처리된 처리수는 SWRO-PRO (pressure retarded osmosis) hybrid pilot plant의 유입 원수로 사용되며 SWRO공정의 전처리 공정인 UF공정으로 유입된다. UF공정에서 TMP, Flux 변화를 측정하여 URC[®]-A공정이 UF공정에 미치는 영향을 알아보았다.

2.3.2. 고탁도와 조류의 Spike test

2.3.2.1. 고탁도 유입시 URC[®]-A 적용성 평가

해수 원수의 평균 탁도는 3.2 NTU로 대체적으로 낮은 수준이며 고탁도의 해수를 가정하여 URC[®]-A공정의 적용성에 대한 평가를 위해 bentonite를 주입하여 spike test를 시행하였다. 이때 본 실험에서 사용한 bentonite는 수분함량 8.1%, pH 7.02, 입도 200 mesh로 그 성분은 Table 3과 같다.

이 실험은 Fig. 5와 같이 교반기가 설치된 1 m³ 용량의조에 해수 원수를 희석수로 bentonite를 1.0% 용액으로 희석하여 24 hr 교반 후 탁도를 측정, 모 용액을 제조하였다. 해수 원수 유입량에 따라 정량 pump를 이용하여 이 모 용액을

Table 3. Chemical compositions (%) of bentonite used in the spike test

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	IG-LOSS
65.8	14.4	2.39	1.36	1.72	1.43	1.43	6.1

Fig. 4. Pretreatment process scheme for SWRO-PRO.

Fig. 5. Devices for the spike test.

주입하여 혼합수의 탁도가 40 NTU 이상이 되도록 자동 주입시켜 URC[®]-A 유입수로 제조하였다. 이 URC[®]-A pilot의 유입수와 처리수의 탁도를 측정하였다.

2.3.2.2. 조류 유입시 URC[®]-A 적용성 평가

해수 원수의 조류 총세포수를 측정한 결과 1,300~2,175 cells/mL로 측정되었다. 하루는 조류의 추가 주입없이 실험하고 다음 두 번 즉 2일 동안은 고농도의 조류 유입 시 URC[®]-A 적용에 대한 평가를 위해 조류 spike test를 시행하였다. 사용된 미세조류는 *Chlorella vulgaris*로 2~10 μm의 구형 단세포식물(chlolland Co., Ltd)을 분양받아 사용하였다. 100억 cells/mL로 고농축된 미세조류를 Fig. 5와 같이 교반기가 설치된 1 m³ 용량의 tank에 염분농도 0.5% 이하의 담수와 혼합하여 약 5백만 cells/mL로 희석하였다.

약 10시간 정도 공기와 교반시켜 배양한 후 3,000 cells/mL 이하로 해수의 유입량에 따라 정량 tube pump에 의해 해수 원수와 자동 주입되도록 하여 URC[®]-A 유입수와 처리수의 조류 총세포수(cells/mL)를 측정하였다. 조류 총세포수 측정방법은 시험수 1 L를 lugol solution으로 고정된 후 1 mL를 분취해 S-R counting chamber에서 30분간 정제한다. 10 strips (200 cells, 0.2 mL) 계수 후 2회 반복하여 총 20 strips (400 cells, 0.4 mL) 관찰한다. 출현한 모든 종을 합산하여 1 mL로 환산한 후 cells/mL로 결과를 분석하였다.

2.3.3. 분석방법

pH는 pH meter (YSI, model PRO-10)을 사용하여 측정하였으며 탁도는 탁도계(HACH, model 2100Q)를 사용하여 측정하였다. TOC분석은 고온연소산화법으로 TOC meter (Shimadzu Model TOC-L)를 사용하여 분석하였다. 막오염을

예측하기 위한 SDI₁₅는 0.2 MPa과 0.45 μm 의 여과막을 이용하여 측정하였다. UF공정에서의 유입 및 여과압력, 온도, 유량은 실시간으로 HMI에 자동 저장되며 실험을 진행하면서 저장된 데이터를 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 분말활성탄과 URC[®]-A공정에 의한 TOC제거

PAC접촉조와 결합한 URC[®]-A공정의 TOC를 측정한 결과 유입 해수는 평균 1.68 mg/L 처리수는 평균 0.87 mg/L로 평균 48%의 제거효율을 보였으며 실험기간 중 URC[®]-A공정에 의한 TOC제거율과 유입 해수 및 처리수의 변화는 Fig. 6과 같다.

실험기간 중 유입 해수의 TOC는 1.07~2.08 mg/L, 처리수는 0.53~1.09 mg/L의 범위 내에서 변화하였다.

PAC접촉조와 결합된 URC[®]-A는 유기물 중 응집제에 의한 응집과정에서 제거가 어려운 용존 유기물이나 낮은 분자량을 갖는 유기물이 PAC 흡착과정을 통해 제거된 것으로 보이며 Fig. 7과 같이 흡착단계에서 생성된 부유물(PAC+흡착질)이 응집제에 의해 응집되어 미세한 응집 플록을 이루며 밀도를 증가시켜 최종응집물의 침강속도를 증진시키는 가중응집보조제의 역할 및 침전단계에서 sweep coagulation 효과로 안정적인 처리수를 확보할 수 있는 것으로 보인다.

3.2. 저탁도와 고탁도 해수의 URC[®]-A 적용성 평가

실험기간 중 해수 원수의 탁도는 최소 1.21 NTU에서 최대 5.53 NTU까지 변화하였으며 평균 탁도는 3.19 NTU를 보였다. 처리수의 탁도는 최소 0.30 NTU에서 최대 0.76 NTU를 보였으며 처리수 평균 탁도는 0.43 NTU로 평균 84%의 제거효율을 얻을 수 있었다. 그 결과 Fig. 8에 보이는 바와

Fig. 6. TOC removal by URC[®]-A process (PAC dose : 30 mg/L).

Fig. 7. (a) Typical URC[®] floc without PAC, (b) URC[®]-A floc with PAC.

Fig. 8. Turbidity removal by URC[®]-A pilot.

Table 4. Turbidity removal by URC[®]-A pilot spike test

Events	pH		Temp. (°C)	Turbidity (NTU)		
	Influent	Effluent		Influent	Effluent	Efficiency
1	7.76	6.72	19.2	45.10	0.33	99.3%
2	7.66	6.65	19.3	38.80	0.37	99.0%
3	7.85	6.80	19.2	44.10	0.34	99.2%
4	7.75	6.73	19.4	44.00	0.35	99.2%
5	7.78	6.75	19.2	44.30	0.38	99.1%
6	7.82	6.80	19.4	40.40	0.37	99.1%
7	7.72	6.75	19.4	41.40	0.33	99.2%
Average	7.76	6.74	19.3	42.59	0.353	99.2%

Table 5. Comparison of turbidity removal between normal and spike test (average values and standard deviation)

Item	pH		Temp. (°C)	Turbidity (NTU)		
	Influent	Effluent		Influent	Effluent	Efficiency
Normal test	7.88	6.85	24.3	3.28 (±1.455)	0.432 (±0.100)	83.9%
Spike test	7.76	6.74	19.3	42.59 (±2.383)	0.353 (±0.020)	99.2%

같이 처리수의 탁도는 0.5 NTU 이하로 매우 안정적인 결과를 보였다.

해수의 고탁도 유입조건을 가정한 spike test를 7회 수행하였고 그 결과는 Table 4와 같으며 유입수/처리수 평균 탁도는 42.59 NTU, 0.35 NTU로 평균 제거율 99.2%을 얻었다.

실험기간 중 해수 원수가 대체적으로 저탁도인 평상시 유입조건에서의 처리결과와 고탁도를 가정한 spike test 결과를 Table 5와 같이 비교하였다. 탁도가 높은 경우의 처리수 질이 0.35 NTU로서 평상시의 낮은 탁도의 해수를 처리한 결과 0.43 NTU보다 더 좋은 처리수 탁도를 보이고 있다. 이것은 탁도를 높이기 위해 사용한 bentonite 분말이 가중응집제의 역할을 함으로써 더 완성도가 좋은 플러를 생성하기 때문으로 보인다.

3.3. URC[®]-A공정에 의한 조류 제거

URC[®]-A공정이 RO 전전처리로서 조류에 대한 대응성을 판단하기 위해 두 번의 spike test를 하여 조류 제거율을 측정하였다. 1번 실험은 조류를 추가하지 않은 경우이고 나머지 두 번은 조류를 추가한 실험결과이다. 그 결과 Table 6에서 볼 수 있듯이 해수 원수의 평균 유입수와 처리수 조류 총세포수는 각각 2,545 cells/mL, 242 cells/mL로 평균 제거율은 90.4%를 보였으며 그때 평균 유입수와 처리수 탁도는 각각 2.95 NTU, 0.33 NTU로 평균 제거율 88.8%를 보였다. 조류를 추가하지 않은 해수 원수도 이미 조류 농도가 2000 cells/mL 이상으로 상당히 높은 것을 알 수 있었으며 조류를 추가로 주입한 경우나 주입하지 않은 경우나 응집침전에 의한 제거율은 크게 차이가 없음을 알 수 있었다. 조류가 높은 경우라도 300 cells/mL 이하로 처리할 수 있음

Table 6. Total number of algal cells removal by URC[®]-A pilot spike test (event 1 : without algal spike)

Events	Turbidity (NTU)			Total number of algal cells (cells/mL)		
	Influent	Effluent	Efficiency	Influent	Effluent	Efficiency
1	2.71	0.34	87.5%	2,175	185	91.5%
2	3.25	0.35	89.2%	2,535	260	89.7%
3	2.90	0.30	89.7%	2,925	280	90.4%
Average	2.95	0.33	88.8%	2,545	242	90.6%

을 보여주고 있으며 동시에 처리수의 탁도도 매우 낮은 수준을 얻을 수 있음을 보여주고 있다.

3.4. UF 막 공정을 거친 후의 해수 수질

URC[®]-A공정과 UF공정을 거친 본 pilot 실험에서도 실험기간 중 7회의 분석결과 탁도는 0.061 NTU에서 0.121 NTU까지 평균 0.087 NTU를 보였으며 SDI는 2.08에서 2.84까지 평균 2.47을 보였다. 이 결과는 SWRO 전처리 목표 수질에 잘 부합하는 수질이다.^{4,7)} TOC는 한 차례 측정하였는데 UF막 처리수도 URC[®]-A 처리수의 TOC 0.64 mg/L에서 더 변화가 없어 UF 막 분리 과정에서 TOC가 더 제거되지 않음을 확인할 수 있었다.

조류 spike test시에 한 차례 UF막분리 후 처리수의 SDI와 탁도를 측정한 결과 SDI는 2.46, 탁도는 0.077 NTU로서 평상시의 SDI, 탁도와 유사한 결과를 보였다. 따라서 조류 번성으로 인해 고농도의 조류가 유입되더라도 전처리수의 수질은 변화가 없어 UF 막오염에 미치는 영향은 크게 다르지 않을 것으로 보인다.

UF를 거친 후 해수질을 보면 탁도 평균 0.087 NTU, 조류 0 cells/mL, SDI₁₅ 평균 2.47, TOC 평균 0.87 mg/L의 수질을 보여 RO공정에 유입되기에 적합한 수질을 보여주었다.^{4,7)}

즉 URC[®]-A 공정의 도입이 밀도가 높은 점토광물에 기인한 고탁도, 낮은 밀도의 조류, 생물학적 막오염의 요인인 유기물질, 입자성 막오염 요인을 동시에 제거할 수 있는 수단이 될 수 있음을 확인할 수 있었다.

3.5. URC[®]-A공정 도입 전·후의 UF 막의 운전 특성 변화

URC[®]-A공정을 RO 전전처리공정으로 도입하기 전, 즉 UF 단독 전처리 공정에서 해수의 수질에 따라 UF공정의 TMP(보정 TMP@25°C)는 0.6~1.2 bar로 나타났다. URC[®]-A공정을 적용하기 전에 CIP (cleaning in place)를 실시하였다.

URC[®]-A공정이 도입되기 전 UF 유입 해수 원수의 수질은 탁도 평균 3.19 NTU, TOC 평균 1.68 mg/L로 직접 UF공정으로 유입되어 운전되었다. 그러나 URC[®]-A공정의 도입으로 UF 유입 해수 수질은 탁도 평균 0.43 NTU, TOC 평균 0.87 mg/L로 각각 84%, 48%가 URC[®]-A공정에서 제거되어 UF공정으로 유입되었다. 평균 1.0 NTU 미만의 수질이 UF공정으로 유입되기 때문에 기존의 URC[®]-A가 적용되기 전보다 UF공정은 안정적으로 운전이 진행되었으며, TOC

Fig. 9. Evolutions of TMP and Flux in UF process by applying URC[®]-A process.

또한 1.0 mg/L 이하의 깨끗한 수질로 유기물질에 의한 막 오염으로 TMP의 상승과 같은 막오염 인자의 변화가 거의 없었다.

Fig. 9는 URC[®]-A공정 도입이전부터 URC[®]-A공정의 철거 이후의 UF공정의 TMP 변화와 Flux 변화를 보여준다. Flux의 변화로 인한 TMP의 변화를 줄이기 위해서 약 33 LMH로 UF 운전을 지속적으로 진행하였다. URC[®]-A공정을 도입하기 전 UF공정에 변화를 줄 수 있는 변수를 최소화하기 위해 그리고, TMP가 1.2 bar까지 상승하였을 때 UF 막의 막오염을 제거하기 위하여 CIP를 진행하였다. CIP를 진행한 후 URC[®]-A를 도입하여 약 3개월간 운전하며 UF 공정에 미치는 영향을 관찰하였다. URC[®]-A 공정에 의한 전처리 도입 초기에 UF 막의 TMP는 0.6 bar로 출발하였으나 URC[®]-A공정에 의해 처리된 탁도 1.0 NTU 이하의 해수가 계속 UF공정으로 유입된 결과 30일 운전 후에 UF 막의 TMP가 0.4 bar로 약 33% 감소하였다. 그 이후 TMP는 0.4 bar를 지속적으로 유지하였다.

URC[®]-A에 의한 전처리로 막의 오염을 유발하는 입자성 물질의 유입농도가 감소하면서 1시간에 한 번씩 진행되는 UF막의 역세척에 의해 추가로 부착된 입자성 물질이 제거되어 막에 부착되는 입자성 물질의 개수가 더 이상 증가하지 않아 TMP가 감소하였으며, 입자성 물질이 지니는 한번 부착되면 더 이상 떨어지지 않고 막과 완전히 결합되는 비가역적 특성으로 인하여 UF막의 역세척으로도 이러한 특성을 지닌 입자성 물질은 제거되지 않기 때문에 TMP가 0.4 bar이하로는 감소하지 않고 유지되는 것으로 보인다.¹⁸⁾ 또한 URC[®]-A에 의해 제거되지 않은 0.45 μ m 이하의 입자성 물질이 막 내부에서 비가역적 막오염 현상을 보였으며, 이러한 현상은 Table 7에서 알 수 있듯이 URC[®]-A 처리수의 SDI가 평균 6으로 미세 입자성물질의 막 내부에 비가역적 막오염을 유발한 것으로 판단된다. UF공정은 50분 여과를 진

Table 7. Results of SDI₁₅ test by URC[®]-A and UF process

	Seawater	URC [®] -A	UF
SDI ₁₅	6.43	6.01	2.47

행 후 순차적으로 5분간 역세척을 진행하므로 TMP 0.4 bar를 지속적으로 유지한 것으로 판단된다.

가혹한 환경에서의 UF공정의 영향을 테스트하기 위해 인위적으로 만들어준 약 40 NTU의 해수와 고조류 실험을 위해 인위적으로 해수의 조류 농도를 2,500 cells/mL로 맞춰 URC[®]-A공정으로 처리하고 그 처리수는 UF 유입수로 유입되어 고탁도 및 고조류 테스트를 각각 3일간 실시하였다. Fig. 10에서 해수 원수의 평균 탁도 3.19 NTU 보다 10배 이상의 고탁도로 유입되어도 URC[®]-A공정의 처리수의 탁도는 0.35 NTU로 높은 제거율을 보였으며, UF막을 거친 후에는 탁도 0.1 NTU 미만(평균 0.087 NTU)으로 대부분의 탁도 유발물질이 제거되었다. Fig. 11과 같이 고농도의 조류의 유입을 가정한 실험에서도 URC[®]-A공정으로 약 90%, UF공정으로 100%로 각각 제거되어 조류가 검출되지 않았다(Fig.

Fig. 10. Seawater quality (Turbidity) by URC[®]-A and UF process.

Fig. 11. Seawater quality (Algal cells) by URC[®]-A and UF process.

10, Fig. 11). 그 결과 고탁도 및 고농도의 조류 시 URC[®]-A 공정의 안정적인 운전으로 인하여 UF공정에 미치는 영향은 보이지 않았으며, 일정한 TMP로 UF공정의 운전이 진행되었다.

고탁도 및 고농도 조류 테스트를 진행한 후 URC[®]-A공정의 운전을 하지 않고 바로 해수가 UF공정의 유입수로 유입되었다. 전전처리를 거치지 않은 해수 유입의 경우 UF의 TMP가 한 달 동안 약 16% 정도 상승하였다. 해수 원수의 평균 TOC는 1.68 mg/L로 유입되어 URC[®]-A공정에 의해 TOC 0.87 mg/L로 약 50%가 제거되어 UF공정의 영향이 적었지만 URC[®]-A공정을 적용하지 않은 경우 해수 원수의 평균 TOC 1.68 mg/L가 UF공정으로 직접 유입되기 때문에 유기물질에 의해서도 UF의 TMP가 상승한 것으로 판단된다. 또 다른 TMP 상승 요인으로 탁도, SDI₁₅까지 생각한다면 Fig. 10, 11에서 보이는 바와 같이 URC[®]-A 처리수질보다 다소 높은 탁도와 SDI₁₅에 기인한 것으로 판단된다. 그 결과 URC[®]-A공정 처리수의 수질보다 해수 중의 입자성 물질과 유기물질이 더 많이 UF 막오염에 악영향을 미치는 것으로 나타났다.

결론적으로, URC[®]-A공정의 도입은 UF막분리 공정을 안정적으로 운전할 수 있게 하며 TMP를 0.4 bar 수준으로 지속적으로 낮게 유지시킬 수 있었다. 이 낮은 TMP에서의 운전으로 유지세정 및 CIP 주기를 증가시킬 수 있을 것으로 보여 기존의 운전 방식보다 경제적으로 운전이 가능하게 해줄 수 있을 것으로 예측할 수 있다. 유지세정 주기나 CIP주기에 대해서는 좀 더 장기간의 운전데이터를 축적하여야 나타낼 수 있기 때문에 좀 더 정확한 세정주기는 향후 추가 실험을 통해 확인할 예정이다.

4. 결론

SWRO 전전처리로 URC[®]-A공정의 적용 가능성 여부를 판단하기 위하여 URC[®]-A공정과 UF막분리 공정을 조합하여 pilot연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

URC[®]-A공정에서 총유기탄소(TOC)는 평균 제거율 48%로 비교적 안정된 제거효율을 보였으며 TOC 1.0 mg/L 이하의 처리수를 얻을 수 있었다.

해수 원수의 고탁도 조건 실험에서 유입 해수 원수 탁도 42.6 NTU에서 처리수 탁도는 0.35 NTU로 99.2%의 제거효율을 보여 URC[®]-A공정으로 고탁도의 해수 원수 처리 시에도 정상시의 경우와 마찬가지로 매우 낮은 탁도를 얻을 수 있었다.

고농도 조류의 유입 조건에서도 90.0% 이상의 제거효율을 보여 조류번성 시에도 URC[®]-A공정으로 전처리를 하는 경우, 탁도 0.4 NTU, TOC 1.0 mg/L, 조류 300 cells/mL 이하의 매우 양호한 UF공정 유입원수를 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다.

UF를 거친 후에는 탁도 평균 0.087 NTU, 조류 0 cells/mL, SDI₁₅ 평균 2.47의 수질을 보여 RO에 유입되기에 적합한 수질을 보여주었다.

URC[®]-A공정의 도입으로 UF공정의 TMP는 도입 초기보다 33% 감소하였으며 그 이후 TMP는 0.4 bar로 지속적으로 유지되었다. 또한 고탁도 및 고농도 조류 테스트를 실시하였음에도 불구하고 URC[®]-A공정의 안정적인 운전으로 UF공정에 미치는 영향은 없었다. 이후 URC[®]-A를 적용하지 않고 기존의 일반 해수 원수가 유입되었을 때, UF공정의 TMP는 약 16% 상승하였다. 이는 제거되지 않은 해수 원수의 입자성 물질과 유기물질이 한 달 내에 UF막에 막오염을 유발함을 보여준 것이다.

URC[®]-A공정 도입 시 낮은 TMP에서의 운전으로 유지세정 및 CIP 주기를 증가시킬 수 있을 것으로 보여 기존의 운전 방식보다 경제적으로 운전이 가능하게 해줄 수 있을 것으로 예측할 수 있다.

즉 URC[®]-A 공정의 도입이 밀도가 높은 점토광물에 기인한 고탁도, 낮은 밀도의 조류, 생물학적 막오염의 요인인 유기물질, 그리고 입자성 막오염 요인을 동시에 해결할 수 있는 수단이 될 수 있음을 확인할 수 있었다.

KSEE

References

1. Choi, C. and Kim, I. S., "Characterization and seawater filtration performance of commercial microfiltration and ultrafiltration membranes," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **39**(9), 542~547(2017).
2. Cha, S., "Microfiltration biofouling by marine bloom-forming algae; Comparison with bacterial biofouling," Master thesis of Seoul National University(2013).
3. Voutchkov, N., *Desalination engineering planning and design*, McGraw Hill e-book, United States, pp. 343~357(2010).
4. Voutchkov, N., "Considerations for selection of seawater filtration pretreatment system," *Desalination*, **261**, 354~364(2010).
5. Bonnellye, V., Guey, L. and Del Castillo, J., "UF/MF as RO

- pre-treatment: the real benefit," *Desalination*, **222**(1), 59~65 (2008).
6. Valavala, R., Sohn, J. S., Han, J. H., Her, N. K. and Yoon, Y. M., "Pretreatment in Reverse Osmosis Seawater Desalination: A Short Review," *Environ. Eng. Res.* **16**(4), 205~212 (2011).
 7. Jamaly, S., Darwish, N. N., Ahmed, I. and Hasan, S. W., "A short review on reverse osmosis pretreatment technologies," *Desalination*, **354**, 30~38(2014).
 8. Jang, I. S., Won, D. H., Baek, W. D., Shin, C. J. and Lee, S. H., "Turbidity Characteristics of Korean Port Area," *J. Korea Academia-Ind. Cooperat. Soc.*, **16**(12), 8889~8895 (2015).
 9. Park, S. J., Kim, C. G. and Yoon, T. I., "The study of rapid coagulation adding weighted coagulant additives and settled sludge," *J. Korean Soc. Water and Wastewater*, **24**(8), 1325~1338(2002).
 10. Yoon, T. I. and Kim, C. J., "Case studies on rapid coagulation processes to cope with total emission controls," *Desalination*, **231**(1-3), 290~296(2008).
 11. GS E&C, Process and Design Team, Report on pilot test for Kumi sewage treatment plant effluent reuse as process water, pp. 79, sept.(2013).
 12. Gaid Kader, "A Large Review of the Pre Treatment," Expanding Issues in Desalination, Robert Y. Ning, IntechOpen, DOI:10.5772/19680. available from www.intechopen.com, (2011).
 13. veolia water technologies, Actiflo process for drinking water treatment retrieved from <https://www.veoliawatertechnologies.co.uk/tech-resource/brochure-actiflo-process-drinking-water-treatment>(2015).
 14. Treguer, R. and Royer, S., Actiflo Carb Process in the Removal of a Series of Trace Organic Compounds, as well as Phosphorous, in Addition to a Conventional Wastewater Treatment Line-Final Report, May(2012).
 15. Lee, G., "Upgrading of a Conventional Surface Water Treatment Plant Utilizing Ultra Filtration Membrane Technology Preceded by Ballasted Coagulation Flocculation Clarification," *Environ. and Pipeline Eng.*, **2000**, 317~327(2000).
 16. United Water New York, Conceptual design report Haverstraw water supply project, Black & Veach project No. 146323 pp. 28, sept.(2008).
 17. Kim, S., Kim, C. H., Kang, S. H. and Lim, J. L., "Long term operation of microfiltration as a pretreatment for seawater reverse osmosis processes," *J. Korean Soc. Water and Wastewater*, **32**(6), 735~741(2010).
 18. Kim, W., Elimelech, M., Shon, H. K. and Hong, S. K., "Combined organic and colloidal fouling in forward osmosis : Fouling reversibility and the role of applied pressure," *J. Membr. Sci.*, **460**, 206~212(2014).