



해수담수화 전처리공정 비교 및 적용 방법

Comparison and application method of seawater desalination pre-treatment process

임환규* · 김승현

Hwanky Lim* · Seunghyun Kim

경남대학교 토목공학과, 경상남도 창원시 마산합포구 경남대학로 7, 51767

Civil Engineering Department, Kyungnam University, 7, Gyeongnamdaehak-ro, Masanhappo-gu, Changwon-si, Gyeongsangnam-do 51767, Republic of Korea

pp. 413-420

pp. 421-428

pp. 429-436

pp. 437-446

pp. 447-456

pp. 457-467

pp. 469-480

pp. 481-489

ABSTRACT

Reverse osmosis seawater desalination facilities can extend the cleaning cycle and replacement time of the reverse osmosis membrane by pretreatment process. Selection of pretreatment process depends on water quality. It was attempted in this study to select appropriate pretreatment process for the Masan bay, which was high in particles and organic content. For this purpose, performances of pretreatment processes such as filter adsorber (FA), pore controllable fiber (PCF), and ultrafiltration (UF) were compared based on the silt density index (SDI). The SDI value of the filtrate should be less than 3. The study results showed that UF can produce the filtrate quality satisfying the requirement. However, the transmembrane pressure (TMP) of UF increased quickly, reaching 0.6 bar within 4 days. In order to secure stable operation, FA and PCF were combined with UF. The study results showed that combination of PCF and UF was able to extend the filtration duration (more than 2 months) until to reach TMP of 0.6 bar.

Key words: SDI, Pre-treatment, Filter adsorber, Pore controllable fiber, Ultrafiltration

주제어: 막 오염 지수, 전처리 공정, 흡착 여과, 섬유사 여과, 한외 여과

1. 서 론

현재 해수담수화 시장이 점차 증가하는 추세이다. 대표적인 해수담수화 공정에는 증발법과 막 여과 공정이 있지만, 전기투석법, 이온교환과 같은 다른 방법도 있다. 본 연구에서는 역삼투막을 이용한 해수담수화 공정에 대해 연구하였다. 공극 크기가 미세한 역삼투막은 높은 압력을 해수에 가하면 이온은 통과되지 못하고 담수만 생산하게 된다. 이를 이용해 세계적

로 해수담수화 플랜트가 적용되고 있다 (Xu et al., 2008). 그러나 역삼투 공정은 공극이 작기 때문에 막 오염으로 인한 막힘 현상이 발생한다. 막힘 현상에 주요 장애가 되는 인자는 무기물, 유기물 등으로 나타난다. 역삼투막의 막 오염을 제어하는 방법으로는 화학세정이 있으나 잦은 세정은 막 손상뿐만 아니라 약품비용의 증가라는 문제점을 일으킬 수 있다 (Jezowska et al., 2009; Khawaji et al., 2009).

막 오염의 대표적인 현상은 입자성 물질로 인한 기공

Received 9 August revised 20 November 2019, accepted 22 November 2019.

*Corresponding author: Hwan-kyu Lim (E-mail: okhawncyu@gmail.com)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

의 막힘과 그것이 표면에 쌓여 형성되는 케이크층이 대부분이고, 장기 운전으로 인한 막 표면에 흡착되는 유기 물질이 있다. 이와 같은 막 오염이 발생되었을 때 처리 수량이 감소하고, 처리수의 수질 농도가 기준에 도달하지 못하는 문제점이 발생한다 (Jiang et al., 2017).

전처리 공정은 후단 막여과 공정에서 공극을 막히게 하는 인자들을 사전에 제거하는 공정으로(Xu et al., 2007), 원수의 수질에 따라 적절한 공정이 필요로 하다. 이에 따라, 본 연구의 목적은 마산만의 해수에 적합한 역삼투법 해수담수화 전처리 공정을 선정하는 것이다. 전처리 공정으로는 응집-침전, 모래를 이용한 이중 여과 장치, 가압 부상 법, 섬유사 여과, 저압 막 여과 공정 등 다양한 방법들이 있다. 국내 동해, 서해, 남해의 해수 수질을 2012년 분석한 결과 마산만의 경우 유기 물질에 대한 농도가 높게 측정되었고, 입자성 물질의 경우 대부분 유사한 것으로 나타났다 (KOSIS, 2012). 이로 인해 전처리 공정으로 흡착 여과(filter absorber, FA)와 섬유사 여과(pore controllable fiber, PCF)를 선정하였다. 활성탄을 이용한 흡착 여과의 경우 유기물 제거에 효과적이라 알려져 있고(Min et al., 2010), 섬유사 여과는 공극을 조절하여 모래 여과보다 뛰어난 입자성 물질 제거에 효과적이다 (Lee et al., 2006; Ong et al., 2014). 또한 유기 물질과 입자성 물질 제거에 효과적인 한외여과 공정을 도입하여 비교하였다 (Halpern et al., 2005; Lau et al., 2014). 한외여과 공정의 경우 변동이 심한 해수의 수질로 인해 유기물 파울링에 취약하며, 적절한 전처리 공정 도입 시 RO 공급수로 안정적인 수질을 보여준다 (Brehant et al., 2003). 이에 따라 본 연구에서는 한외 여과 전처리 공정으로 흡착여과와 섬유사 여과를 도입하여 RO 공급수로 적합한지 평가하였다.

최적의 전처리 공정 선정은 처리수의 수질 평가 방법인 막 오염 지수(silt density index, SDI)를 이용해 평가하였다. 역삼투법 해수담수화의 공급수는 SDI 3 이하 또는 탁도 0.25 NTU 이하를 권장한다 (Mitrouli et al., 2008). SDI는 역삼투막 공정에 공급되는 수질 내에 무기물, 유기물, 박테리아와 같은 인자들을 포함하여 수치적 표현이 가능하다 (Prihasto et al., 2009; Valavala et al., 2011).

본 연구는 경상남도 마산만의 해수를 이용하여 다양한 전처리 공정을 비교하여 SDI 3 이하 수준의 공급수를 생산하는 데 목적을 둔다. 또한 안정적인 해수담수화 전처리 공정 처리수를 생산하는 방법과 그에 따른 타당성을 검토하려고 한다.

2. 연구방법 혹은 재료 및 실험방법

2.1 해수 성상

본 연구에서는 경상남도 창원시 두산중공업 내에 설치된 취수 시설을 이용하여 마산만 해수를 사용하였다. 마산만의 해수 수질은 2007년 12월부터 2012년 12월까지 월 단위로 수온, 탁도, UV흡광도, pH, 화학적 산소요구량, 전기전도도, 엽록소-a, 용존 고형 물질, 입자수를 측정된 결과 Fig. 1과 같다. 본 연구에서 해수

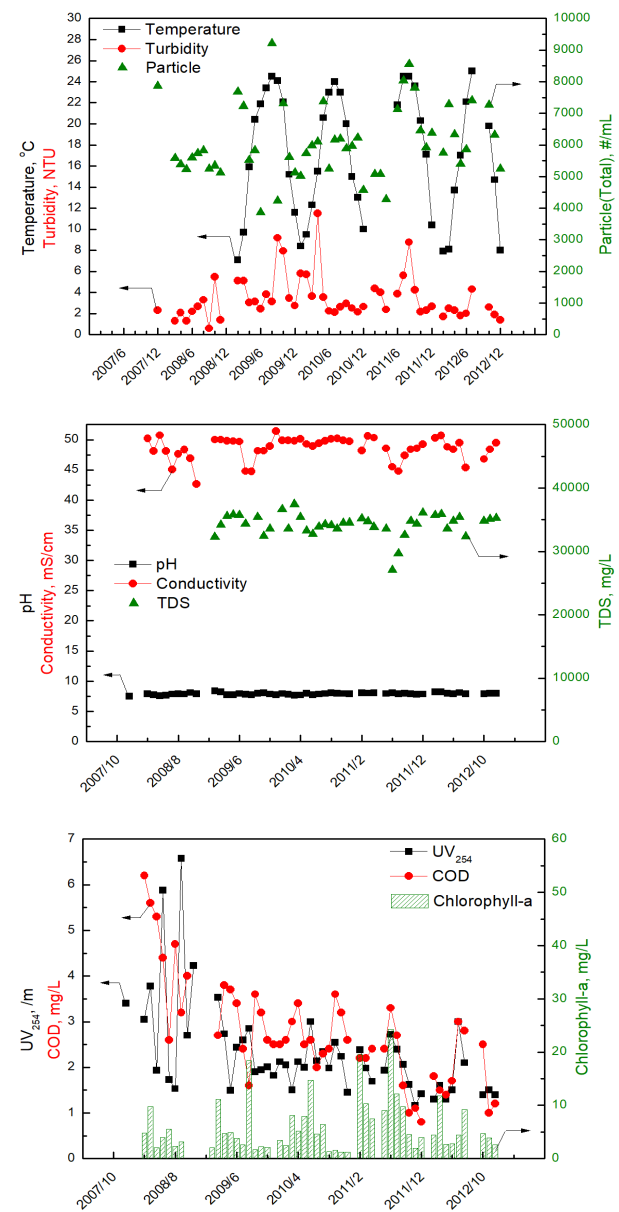


Fig. 1. Seawater quality characteristics in masanbay.

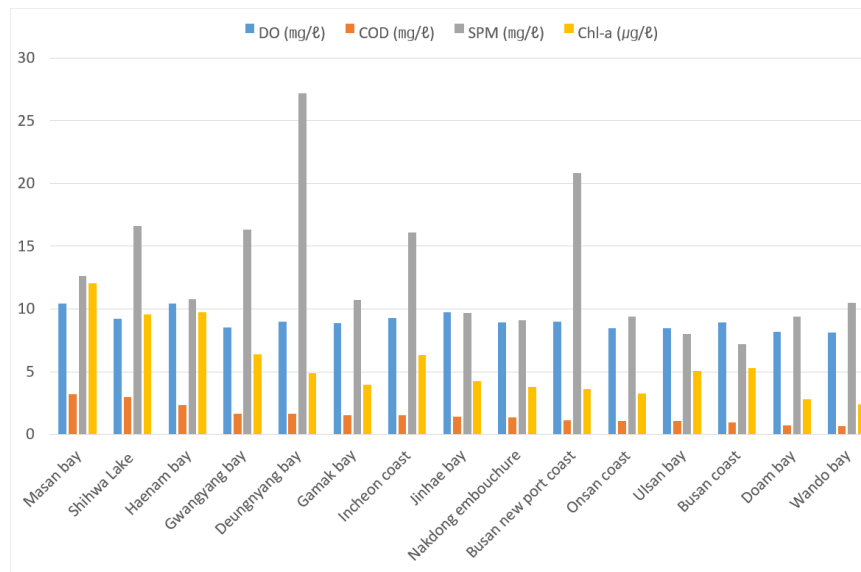


Fig. 2. Seawater quality characteristics.

Table 1. Water quality of seawater (Masan bay, 2011. 12. ~ 2012. 03.)

| Parameter | Raw water |
|-------------------------|--------------------|
| Temperature, (°C) | 4.5 ~ 4.9 (4.7) |
| Turbidity (NTU) | 4.2 ~ 7.9 (5.7) |
| Particle (>2μm per mL) | 4572 ~ 5028 (4832) |
| UV ₂₅₄ (1/m) | 1.9 ~ 3.8 (3.1) |
| DOC (mg/L) | 4.2 ~ 5.2 (4.3) |

및 전처리 공정 처리수질 값은 2011년 12월부터 2012년 3월까지의 최저, 최대 평균값이다. 이후 전처리 공정이 적용된 UF 공정은 2012년 3월부터 6월까지이다. 전처리 공정 운영 시점의 해수 수질은 Table 1과 같고, 타 지역 해수 수질과 비교한 결과 Fig 2과 같이 용존 산소량, 부유 물질, 클로로필 수치가 다른 지역에 비해 높은 편이다.

2.2 전처리 실험 장치 및 운전 조건

본 실험에서 해수는 취수 시설을 통해 파일럿 플랜트 내에 배치된 스크린을 통과 한 후에 해수 탱크 내에 저장되어 각 전처리 공정으로 공급된다. 취수 시설과 이송 중 발생하는 해조류와 어패류의 유입을 막기 위해 1차적으로 스크린을 거친 후 해수 탱크 내, 파일럿 플랜트 성장을 억제하기 위해 통과된 해조류와 어패류에 NaOCl 6 ppm을 주입하였다. 이후 공정별 유입되는 해수의 잔류 염소를 측정 한 결과 0.2~0.4 ppm이었다.

2.2.1 흡착 여과

FA 장치 운전에 관한 모식도는 Fig. 3에 제시하였다. 본 실험은 내경 29 cm, 높이 2.5 m의 아크릴 여과지와 2가지의 여재를 사용하였다. 사용된 여재는 모래, Norit 사의 GAC 1240 순으로 각 50 cm 충전 하였다. 사용된 여재의 특성은 체 분석을 통해 분석한 결과 Table 2에 제시하였다.

본 실험에 적용된 FA 여과 장치의 여과 속도는 빠르게 할 경우 수질이 악화되고 높은 손실수두가 발생되어서 5 m/h로 운전하였고(Hyun, 2010), 하루 7.9 m³ 처리수가 생산되었다. 역세척은 공기와 물을 이용하여 하루 한 번 실시하였고, 각 0.5 m/min의 유속으로 7분 동안 세척하였다. 역세척 시작 처음 2분 동안은 공기 세척을 진행하고, 그다음 3분 동안은 물과 공기를 동시에 주입하고, 마지막은 2분간 물로 세척하였다. 투입되는 응집제는 염화제2철을 사용하여 최적 운전 조건을 도출하였고, 사전 연구를 통해 4 ppm (FeCl₃·6H₂O)임을 확인 후 주입하였다 (Kim et al., 2011, a,b).

Table 2. Characteristics of the two media

| Description | Effective Size(ES), mm | Uniformity Coefficient(UC) |
|-------------|------------------------|----------------------------|
| GAC 1240 | 0.7 | 1.9 |
| Sand | 0.6 | 1.3 |

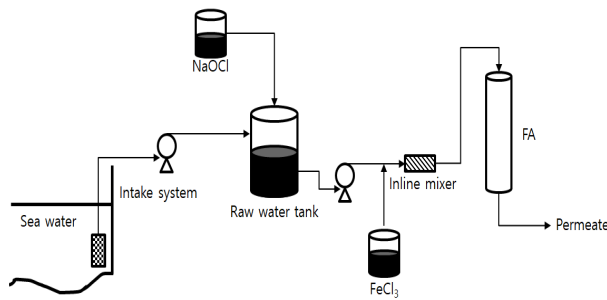


Fig. 3. Schematic flow diagram of the FA system.

2.2.2 섬유사 여과 장치

PCF는 원통형 다공관을 두고 그 주위 방사형으로 미세한 섬유사 다발을 이용하여 공극의 크기를 조절하는 방법으로 운전되는 급속 여과 장치이다. 섬유의 공극을 조절하는 방법은 하단을 고정한 채, 상단 부분에 유압기를 이용하여 섬유를 수축시켜 공극을 조절한다.

주식회사 생에서 제공한 PCF는 150 m³/d 처리가 가능한 2단 섬유사 여과 장치이다. 이 여과 장치의 여과 방식에 대한 모식도는 Fig. 4에 제시하였다. 운전방식은 동일한 제품의 PCF를 2단 직렬로 연결하여 처리수질을 개선하였고, 1단 PCF의 여과 압력이 0.5 bar 되면 공기와 물을 이용해 역세척을 진행한다. 역세척을 위해, 최초 2분간 물(50 L/min)과 공기(1 m³/min)를 주입하고, 30초간 물로 세척하였다. PCF 장치의 특성은 아래 Table 3에 제시하였다.

PCF의 운전 조건은 사전 실험을 통해 도출하였고, 주입량이 많을수록 역세척 주기가 짧아져 낮은 회수율을 보였다. 이에 따라 처리수질의 변동이 적어지는 시점에서 최적 응집제 주입량을 선정하였다. 여과 유속과 응집제 주입량에 따른 수질을 분석하여 각각의 인자를 도출한 결과 5 m/h의 유속과 4 ppm의 응집제를 적용하였다 (Lim, 2011). 응집제는 염화제2철을 사용하였으며 최초 인라인 믹서로 급속 교반 후 반응조에서 2분간 체류한 후 PCF로 유입하였다.

Table 3. Characteristics of the pore controllable fiber

| Item | Value |
|-----------------------|---------------------------------|
| Fiber material | Denia : No.2600 / Fila : No.220 |
| Fiber area | 0.6 m ² |
| Backwashing frequency | △p=0.5 bar |

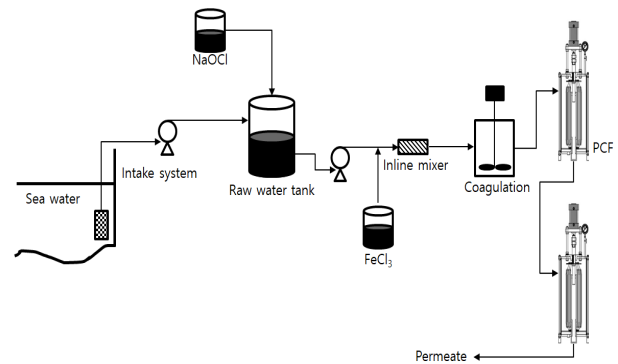


Fig. 4. Schematic flow diagram of the two PCF systems.

2.2.3 한외 여과

실험에 사용된 NITTO DENKO 사의 HYDRANAUTICS HYDRAcap40-LD 동일 막 2개를 사용하였고, 막힘형 (Dead end) 형태의 Inside to outside 방식을 따랐다. 막 면적은 19.3 m²이며, 분획 분자량이 150,000 Daltons의 친수성 재질의 polyethersulfone 막을 사용하여 실험하였다.

UF 공정의 공정도는 Fig. 5과 같고, 운전 조건은 여과 속도 1 m/d로 30분간 여과가 진행되고, 30초간 여과의 역방향으로 1.5 m/d 유속으로 세척을 진행하였다. 역세척 시 주입되는 약품으로 NaOCl 5 ppm을 주입하였다 (Brehant et al., 2002). 본 실험에 사용된 UF 막은 운전 여과 압력이 최대 1.4 bar까지 운전이 가능하나 0.6 bar에서 약품 세정을 하였다. 약품 세정은 무기세정과 유기세정으로 나누어 진행하였고, 사용된 약품은 H₂SO₄와 NaOH이다. 약품 세정 방법은 산 세정(pH 2)과 염기 세정(pH 12) 순으로 진행하였고, 순환 세정 2분, 휴지 2분씩 5회 반복하였다. 산 세정과 염기 세정 이후에는 2분간 UF 처리수로 세척 후 배출하였다.

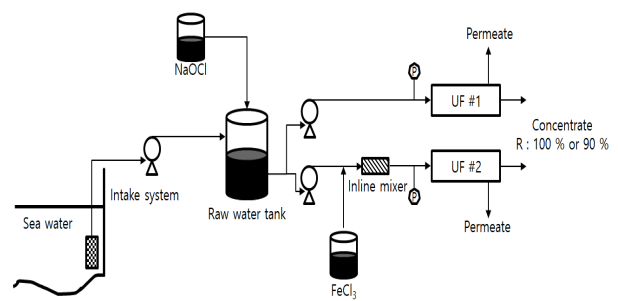


Fig. 5. Schematic flow diagram of the UF system.



2.3 해수 수질 및 처리수 분석 방법

막 오염 가능성을 예측할 수 있는 silt density index (SDI; ASTM standard D4189-07)는(Robert, 2007) 0.45 μm 막을 통과하여 500 ml를 여과하는데 걸리는 시간(T_0)과 15분(T)을 여과한 후 같은 부피를 여과하는데 걸리는 시간(T_f)을 계산하여 다음의 식으로 구하였다. 해수의 SDI 값은 막 표면 입자성 fouling이 심각하여 15분 뒤 500ml 여과수를 투과되지 않아 측정이 불가능하였다.

$$SDI = \frac{\left[1 - \left(\frac{T_0}{T_f}\right)\right]}{T} \times 100 \quad (1)$$

무기물 측정은 탁도와 입자수 측정기를 사용하였다. 이외 유기물의 특성을 파악하기 위해 UV₂₅₄와 용존유기탄소를 측정하였고, GF/F(Whatman, USA)로 여과시킨 후 분석 장비를 이용하여 측정하였다. 분석 장비에 대한 정보는 Table 4과 같다.

3. 결 과

3.1 전처리 공정에 따른 처리 수질 비교

Table 5는 해수 수질 성상과 각 전처리 공정에 따른 수질 분석 결과이다. 각 공정별 막 오염 지수로 SDI를

측정한 결과, 운전기간 동안 원수와 각 처리수의 SDI 값은 FA 4.5, PCF 3.3, UF 2.6으로 점차적으로 낮아졌고 한외여과가 가장 낮아 역삼투법 해수담수화 공급수로 적합하였다. 해수의 평균 탁도는 5.7 NTU이고 이에 따른 입자수는 4832이다. 전처리 공정에 따른 탁도 제거율은 FA 95%, PCF 96%, UF 97%이고, 입자수는 FA 82%, PCF 85%, UF 92% 제거되었다. 각 공정별 유기물 제거율은 FA 49%, PCF 42%, UF 29%로 활성탄 흡착 공정이 가장 높게 나타났다.

3.2 각 전처리 공정의 여과 특성

각 전처리 공정 별 여과 특성을 살펴본 결과는 Fig. 6와 같다. 여과 시간이 지남에 따라 손실수두 및 여과 압력이 상승하는 것으로 나타났다. 이는 응집제와 해수에 포함된 물질이 플록을 형성하여 공극을 막아 여과되지 못한 결과이다. 본 전처리 공정에 따라 여과의 특성은 정밀한 여과일수록 역세척 주기가 짧아 하루 기준 FA는 1회(회수율 99.7%), PCF는 8회(회수율 99.4%), UF는 47회 역세척 하였다.

FA는 Fig. 6(a)와 같이 초기 손실수두의 높이가 30 cm 도달하는 시점까지 초기파과가 발생하였다. 초기 파과는 운전 시작 지점의 탁도 0.93 NTU에서 30분이 지난 시점의 탁도 0.29 NTU부터 평균 처리수질이 Fig. 7과 같이 나타났다. PCF는 Fig. 6(b)와 같이 평균적으로

Table 4. Method of water analysis

| Parameter | Unit | Method and instruments |
|-------------------|------|--|
| Turbidity | NTU | HACH 2100N(USA) |
| | NTU | Microtech, Dr.mini(USA) |
| Particle | #/ml | Chemtrac, PC2000(USA) |
| UV ₂₅₄ | /m | K LAB, OPTIZEN POP QX(korea) |
| DOC | mg/l | SHIMADZU, TOC-5000A(Japan) |
| SDI | - | Millipore, SDI test kit(USA)/ Advantec, 0.45 μm membrane(Japan) |

Table 5. Average permeate composition during long-term pre-treatment experimentation

| | FA | PCF | UF |
|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| SDI ₁₅ | 3.8 ~ 5.7 (4.5) | 2.7 ~ 3.8 (3.3) | 2.5 ~ 2.8 (2.6) |
| Turbidity (NTU) | 0.109 ~ 0.580 (0.273) | 0.200 ~ 0.324 (0.241) | 0.116 ~ 0.201 (0.167) |
| Particle (>2 μm per ml) | 464 ~ 1406 (883) | 624 ~ 920 (711) | 247 ~ 468 (349) |
| UV ₂₅₄ (1/m) | 1.40 ~ 1.70 (1.6) | 1.42 ~ 2.41 (1.8) | 1.7 ~ 2.7 (2.2) |
| DOC (mg/L) | 2.27 ~ 3.29 (3.2) | - | 3.59 ~ 4.23 (3.6) |

pp. 413-420

pp. 421-428

pp. 429-436

pp. 437-446

pp. 447-456

pp. 457-467

pp. 469-480

pp. 481-489

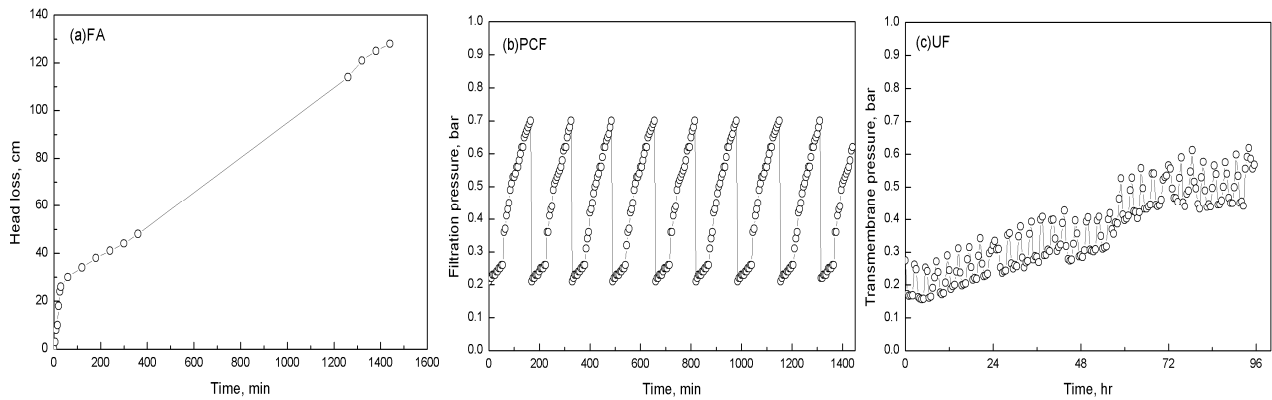


Fig. 6. Head loss and TMP trends of the pre-treatment process.

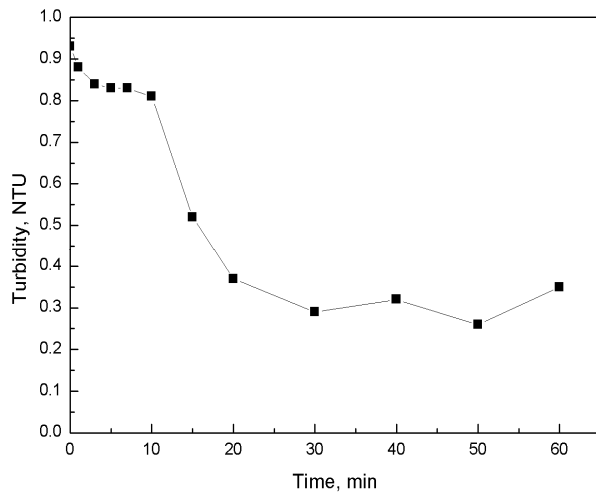


Fig. 7. Initial breakthrough of FA.

약 160 min간 여과하고 역세척하는 주기로 운전이 된다. UF의 막힘 현상은 처리수질과 연관성을 가지고 있으므로, 적절한 역세척이 중요하다. 현재 UF 장치는 여과 압력이 상승하는 경향이 크기 때문에 잦은 세정을 필요로 한다. 그러나 bleeding으로 인한 10% 감소 및 세정에 필요한 UF 처리수를 사용하기 때문에 회수율이 87.5%이다. UF 장치 여과 압력은 Fig. 6(c)과 같이 측정 포인트가 상단과 하단으로 나누어진다. 상단은 역세척 과정에서 측정된 압력 값이고, 하단은 여과 과정에 측정된 압력 값이다. 주기적인 세정에도 불구하고 여과 압력이 회복되지 않아 일정 압력에 도달 시 화학적 세정을 필요로 하였다.

즉, UF 공정에서 전처리 공정 도입하여 안정적인 처리수질과 높은 회수율로 운전하는 것이 경제적으로 유리해 보였다.

3.3 전처리 공정을 이용한 UF 공정 장기 운전 결과

UF 막 오염으로 인한 전처리 공정을 도입 후 수질 평가로는 SDI, particle, SDI, particle, UV₂₅₄를 측정하였다. SDI 평균값은 Fig. 8(a)과 같이 FA 5.0, PCF 4.2, FA-UF 3.5, PCF-UF 3.1이고, UF 단독 공정에 따른 SDI는 3.3로 측정되어 전처리 공정을 도입한 결과와 큰 차이점은 없었다. 이에 따른 수질의 입자성 물질과 유기 물질을 측정한 결과 입자성 물질은 Fig. 8(b)와 같이 평균값은 해수 8834, FA 1378(제거율 84.4%), PCF 302(제거율 96.6%), UF 119(제거율 98.7%)로 나타났다. 추가적으로 FA-UF 공정과 PCF-UF 공정에서는 173, 107로 UF 공정을 거칠 경우 98%가 제거됨을 확인하였다. 이외 해수를 포함한 각 공정별 UV₂₅₄를 측정한 결과 Fig. 8(c)와 같다. 해수는 2.1, FA 0.46, PCF 0.17, FA-UF 0.07, PCF-UF 0.06로 측정되었다. 전처리 공정의 FA 공정은 유기물 제거로 효과적이거나 본 연구에서는 78.4%로 나타났다. 앞서 실험한 FA 공정의 유기물 제거율에 비해 낮지만 해수의 유기물 농도가 상이하여 나타난 결과이다. FA 공정은 GAC의 높이가 50 cm인 경우 여과 유속을 5 m/h에서 2.5 m/h로 낮추어 체류시간을 늘일 경우 유기물이 GAC에 흡착되어 제거에 효과적이다 (Min et al., 2010). 반면에 PCF 공정에서는 유기물 제거가 92%로 나타났다. PCF 공정 중에 염화제2철을 주입하고 인라인 믹서를 통해 급속 교반과 완속 교반 공정의 반응조가 앞단에 포함되어 있다. 플록 사이즈가 커짐에 따라 유기물 흡착이 원활하게 진행되어 PCF 처리수의 유기물 제거율이 높게 나타났다.

FA 공정과 PCF 공정을 전처리로 적용 시 UF의

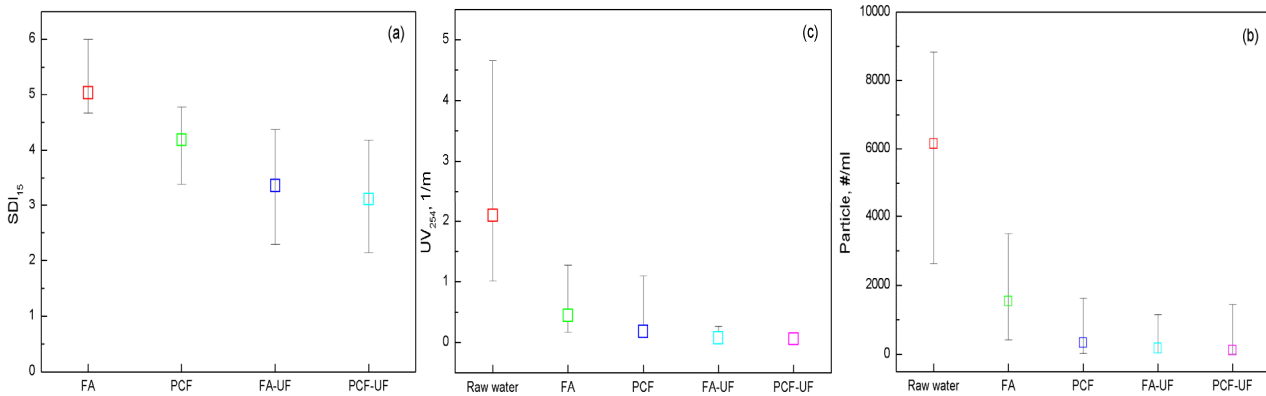


Fig. 8. Water quality of pre-treatment process.

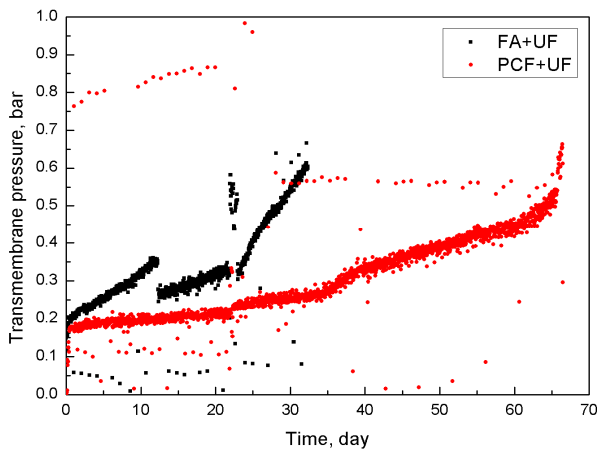


Fig. 9. Transmembrane pressure in UF process with FA permeate and PCF permeate.

여과 압력은 Fig. 9과 같이 상이하게 나타났다. FA-UF 공정은 여과 압력 0.6 bar까지 32일 동안 운전이 가능하고, PCF-UF 공정은 66일간 운전이 가능하였다. SDI 값은 각 3.5, 3.1로 0.4 차이가 나지만 UF의 여과 압력이 상승하는 경향은 다르게 나타났다. 수질 분석 결과 SDI값, 입자성 물질, 유기 물질 제거율을 보았을 경우 PCF가 UF 전처리 공정으로 적합하다.

3.4 PCF-UF 공정에 따른 역삼투 해수담수화 경제성 평가

해수담수화 전처리 공정에 따라 경제성 평가는 해수의 성상과 시설의 규모, 공정의 차이로 정확한 수치로 표현하기는 어렵다. 이중 여과 장치 또는 저압 막 여과 공정에 따른 각 공정별 평가된 자료를 토대로 비교해 보았다. 기본적인 FA를 통해 역삼투 해수담수화에 관한 경제성

평가를 UF 공정과 비교하였다. 수질 부분은 Fig. 6(b), (c)와 같이 FA 공정에서 해수 변동에 따른 차이의 폭이 크게 나타나고, UF 공정은 안정적인 수질로 나타났다. 이에 따라 RO 공정에 전처리 공정으로 UF 공정을 도입할 경우 20% 높은 생산 수량과 RO 막 세척 주기가 약 4~6배 증가할 수 있었고, 약 33% 막 교체율 절감이 가능하였다 (Wolf et al., 2005). 반면에 시설비나 전력 사용량은 증가하는 경향을 보였다. 여기서 RO 막에 대한 경제적으로 효과적인 결과를 나타냈지만 전처리 공정의 일반적인 수명은 기본 공정 20~30년, 저압 막 공정 최대 5~10년으로 capex 대비 저조한 부분이다 (Kim et al., 2009). 이에 따른 시설비 측면에서 UF 공정은 1톤당 USD 265(2013년 기준)이고, PCF의 시설비는 1톤당 USD 102(2004년 기준)로 알려져 있다 (Chew et al., 2016; SSENG Corp., 2004). Capex 측면에서는 PCF와 UF 공정 도입 시 1톤당 USD 367로 증가한다. RO 막의 교체 및 세정은 5 US cent/m³이고, UF를 이용한 전처리 공정 도입 시 3~4 US cent/m³로 절감 가능하다 (Knops et al., 2007; Pearce, 2007). 그러므로 PCF와 UF를 이용한 실험 결과 opex는 약품 세정 비용이 RO와 유사할 경우 Table 6과 같이 USD 4.3/m³가 절감된다.

Table 6. Comparison of conventional, PCF and UF membrane pre-treatments cost

| | UF | | |
|-------|---------------------------|-----|-----|
| | pre-treatment | - | PCF |
| Capex | | 265 | 367 |
| Opex | Cleaning frequency (day) | 4 | 66 |
| | Cleaning count | 91 | 5 |
| | Cost(USD/m ³) | 4.6 | 0.3 |

pp. 413-420

pp. 421-428

pp. 429-436

pp. 437-446

pp. 447-456

pp. 457-467

pp. 469-480

pp. 481-489

즉, PCF-UF 전처리 공정으로 인한 SWRO의 capex는 증가하였으나, 저압과 고압의 막 세정 및 교체 비용을 절감할 수 있어서 장기적으로 유효한 공정으로 판단된다. 또한 전처리 수질 개선으로 인한 RO 생산수 또한 증가될 것으로 기대해 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 해수담수화 공정에서 역삼투막에 미치는 무기물과 유기물 제거에 따른 막 오염 지수와 전처리 공정 개선에 따른 경제성을 평가하였다. 도출된 결론은 다음과 같다.

1) 3가지 전처리 공정에서 흡착 여과, 섬유사 여과, 한외 여과 장치의 처리수 수질을 분석해 본 결과 UF 공정만 SDI 3이하로 측정되었고 역삼투막 공정 전처리 공정으로 적합하다고 판단된다. 그러나 잦은 물리세정과 화학 세정이 요구되며 전단의 전처리 공정이 필요하다.

2) UF 공정의 전처리 공정으로 FA와 PCF 공정을 적용하였을 경우 입자성 물질과 유기물 제거에 용이한 PCF 공정이 FA 공정 적용보다 약 3배가량 장시간 운전이 가능하였다. 그러나 해수의 수질이 좋지 않은 2012년 3월부터 6월까지 운전된 결과에서는 UF 처리수의 SDI 값이 3이하로 측정되지 않은 경우가 많았다.

3) 전처리 공정을 추가적으로 도입한 결과 시설비 부분에서 전처리 공정 시설비가 25%에서 46%로 많은 비용이 발생하지만, RO의 생산수량 증가, 약품세정 비용 절감 그리고 막 교체시기를 절감할 수 있다. 또한 전처리 공정이 도입된 저압 막 여과 공정 또한 운영비가 절감되어 해수담수화 전처리 공정으로 긍정적인 결과를 기대할 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 건설교통부 플랜트기술고도화사업의 연구비지원(07해수담수B0102-03)에 의해 수행되었습니다.

References

Brehant, A., Bonnelye, V. and Perez. (2002). Comparison of MF/UF pretreatment with conventional filtration prior to

RO membranes for surface seawater desalination, *Desalination*, 144, 353-360.

Chew, C.M., Aroua, M.K., Hussain, M.A. and Ismail, W.M.Z.W. (2016). Evaluation of ultrafiltration and conventional water treatment systems for sustainable development: an industrial scale case study, *J. Clean. Prod.*, 112, 3152-3163.

Coastal Water Quality Status, Korea Statistical Information Service. (2012). http://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=146&tblId=DT_MLTM_1740&vw_cd=MT_OTITLE&list_id=116_12319&scrId=&seqNo=&lang_mode=ko&obj_var_id=&itm_id=&conn_path=E1 (August 6, 2019).

Gao, W., Liang, H., Ma, J., Han, M., Chen, Z.L., Han, Z.S. and Li, G.B. (2011). Membrane fouling control in ultrafiltration technology for drinking water production: A review, *Desalination*, 272, 1-8.

Halpern, D.F., McArdle, J. and Antrim, B. (2005). UF pretreatment for SWRO: pilot studies, *Desalination*, 182, 323-332.

Hyun, I.H., Ministry of Environment. (2010). Water and waste water facility standard, 372-378.

Jezowska, A., Bottino, A., Capannelli, G., Fabbri, C. and Migliorini, G. (2009). Ultrafiltration as direct pre-treatment of seawater - a case study, *Desalination*, 245, 723-729.

Jiang, S., Li, Y. and Ladewig, B.P. (2017). A review of reverse osmosis membrane fouling and control strategies, *Sci. Total Environ.*, 595, 567-583.

Knops, F., Hoof, S.V., Futselaar, H. and Broens, L. (2007). Economic evaluation of a new ultrafiltration membrane for pretreatment of seawater reverse osmosis, *Desalination*, 203, 300-306.

Khawaji, A.D., Kutubkhanah, I.K. and Wie, J.M. (2007). A 13.3 MGD seawater RO desalination plant for Yanbu Industrial City, *Desalination*, 203, 176-188.

Kim, S.H., Min, C.S. and Cho, J.W. (2011). Comparison of different pretreatments for seawater desalination, *Desal. Water Treat.*, 32, 339-344.

Kim, S.H., Lim, H.K., Jeong, W.C. and Park, N.S. (2011). Optimum backwash method for granular media filtration of seawater, *Desal. Water Treat.*, 32, 431-436.

Kim, Y.M., Kim, S.J., Kim, Y.S., Lee, S.H. and Kim, I.S. (2009). Overview of systems engineering approaches for a large-scale seawater desalination plant with a reverse osmosis network, *Desalination*, 238, 312-332.

Lee, C.W., Lee, B.G., Lee, I.K., Lee, S.H., Bac S.D. and Kang, L.S. (2006). Application of pore-controllable fiber filter(PCF) as a pretreatment for water treatment process, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, 20(2), 235-244.



- Lim, H.K. (2013). Determination of optimum operating conditions for pre-treatment process of seawater desalination using FA, UF and PCF, Master, Kyungnam University.
- Lau, W.J., Goh, P.S., Ismail, A.F. and Lai, S.O. (2014). Ultrafiltration as a pretreatment for seawater desalination: A review, *Membr. Water Treat.*, 5(1), 15-29.
- Mitrouli, S.T., Yiantsios, S.G., Karabelas, A.J., Mitrakas, M., Follesdal, M. and Kjolseth, P.A. (2008). Pretreatment for desalination of seawater from an open intake by dual-media filtration: Pilot testing and comparison of two different media, *Desalination*, 222, 2437.
- Min, C.S., Kim, S.H. and Lee, S.H. (2010). A comparison of organic matter removal efficiency of GAC in pre-treatment process of SWRO, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, 21, 359-360.
- Ong, C.B., Mohammad, A.W., Abdullah, S.R.S., Hasan, H.S. and Koo, C.H. (2014). Pilot study for sewage wastewater reclamation and reuse using RO membrane: comparison of different pre-treatment systems, *Desal. Water Treat.*, 1-8.
- Prihasto, N., Liu, Q.F., Kim, S.H. (2009). Pre-treatment strategies for seawater desalination by reverse osmosis system, *Desalination*, 249, 308-316.
- Pearce, G.K. (2007). The case for UF/MF pretreatment to RO in seawater applications, *Desalination*, 203, 286-295.
- Robert, B. (2007). Reverse osmosis and nanofiltration, AWWA, *Manual of practice M46 2nd Edn. Ed.* 205-206.
- SSENG Corporation and Korea Environment Corporation. (2004). Removal of suspended solids in sewage effluent using torsion and relaxation of bundles of fiber, 41-49.
- Valavala, R., Sohn, J.S., Han, J.H., Her, N.G. and Yoon, Y.M. (2011). Pretreatment in reverse osmosis seawater desalination: A short review, *Environ. Eng. Res.*, 16(4), 205-212.
- Wolf, P.H., Siverns, S. and Monti, S. (2005). UF membranes for RO desalination pretreatment, *Desalination*, 182, 293-300.
- Xu, J. Ruan, G., Chu, X., Yao, Y., Su, B. and Gao, C. (2007). A pilot study of UF pretreatment without any chemicals for SWRO desalination in China, *Desalination*, 207, 216-226.
- Xu, J., Ruan, G., Gao, X., Pan, X., Su B. and Gao, C. (2008). Pilot study of inside-out and outside-in hollow fiber UF modules as direct pretreatment of seawater at low temperature for reverse osmosis, *Desalination*, 219, 179-189.

| | |
|-------------|---|
| pp. 413-420 | ○ |
| pp. 421-428 | ○ |
| pp. 429-436 | ○ |
| pp. 437-446 | ● |
| pp. 447-456 | ○ |
| pp. 457-467 | ○ |
| pp. 469-480 | ○ |
| pp. 481-489 | ○ |

