



응집-UF 전처리 공정이 압력지연삼투 공정에 미치는 영향

Effects of coagulation-UF pretreatment on pressure retarded osmosis membrane process

고길현¹·김수현¹·김정선²·강임석^{3*}

Gilhyun Goh¹·Suhyun Kim¹·Jungsun Kim²·Limseok Kang^{3*}

¹(주)한국멤코 연구전담부서, ²국제환경정책연구원 연구개발실, ³부경대학교 환경공학과

¹Department of R&D, MEMCOREA Co.,Ltd., ²Universal Environment Policy Institute

³Department of Environmental Engineering, Pukyong national University

pp. 259-275

pp. 277-284

pp. 285-292

pp. 293-300

pp. 301-309

ABSTRACT

Osmotic power is to produce electric power by using the chemical potential of two flows with the difference of salinity. Water permeates through a semipermeable membrane from a low concentration feed solution to a high concentration draw solution due to osmotic pressure. In a pressure retarded osmosis (PRO) process, river water and wastewater are commonly used as low salinity feed solution, whereas seawater and brine from the SWRO plant are employed as draw solution. During the PRO process using wastewater effluent as feed solution, PRO membrane fouling is usually caused by the convective or diffusive transport of PRO which is the most critical step of PRO membrane in order to prevent membrane fouling. The main objective of this study is to assess the PRO membrane fouling reduction by pretreatment to remove organic matter using coagulation-UF membrane process. The experimental results obtained from the pretreatment test showed that the optimum ferric chloride and PAC dosage for removal of organic matter applied for the coagulation and adsorption process was 50 mg/L as FeCl₃ (optimum pH 5.5). Coagulation-UF pretreatment

Received 20 May 2021, revised 7 August 2021, accepted 10 August 2021.

*Corresponding author: Limseok Kang Choi (E-mail: kangls@pknu.ac.kr)

• 고길현 (책임연구원) / Gilhyun Goh (Principal Researcher)

경기도 남양주시 순화공로 272, 12106
272, Sunhwagung-ro, Namyangju-si, Gyeonggi-do 12106, Republic of Korea

• 김수현 (연구원) / Suhyun Kim (Researcher)

경기도 남양주시 순화공로 272, 12106
272, Sunhwagung-ro, Namyangju-si, Gyeonggi-do 12106, Republic of Korea

• 김정선 (실장) / Jungsun Kim (General Manager)

경기도 안양시 동안구 흥안대로 427번길 16, 14059
16, Heungan-daero 427beon-gil, Dongan-gu, Anyang-si, Gyeonggi-do 14059, Republic of Korea

• 강임석 (교수) / Limseok Kang (Professor)

부산광역시 남구 용소로 45, 48513
45, Yongso-ro, Nam-gu, Busan 48513, Republic of Korea

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.

process was higher removal efficiency of organic matter, as also resulting in the substantial improvement of water flux of PRO membrane.

Key words: Pressure retarded osmosis, Pretreatment, Coagulation-UF, PAC adsorption-UF, Water flux

주제어: 압력지연삼투, 전처리, 응집-UF, PAC 흡착-UF, 투과수량

1. 서론

현재 해수담수화 공정으로 가장 널리 사용되고 있는 역삼투(RO) 해수 담수화 공정은 담수의 생산에 사용되는 전력량이 2.0~3.5 kWh/m³ (Phillip and Elimelech, 2011; Lee et al., 2019) 수준으로 기존의 재래식 정수처리 공정의 0.2~0.4 kWh/m³보다 10배 정도 높다고 알려져 왔다 (Wakeel et al., 2016; Voutchkov, 2018). 또한 해수보다 대략 1.6배 이상 염분 농도가 높은 RO 농축수는 해양 방류 후 해저면에서 넓게 확산이 되어 해저생물의 고유 삼투압 기능에 영향을 미치며 특히 고착생물에 큰 영향을 미친다고 알려져 고농도의 방류수 처리가 해결되어야 한다 (Lee et al., 2013; Park et al., 2016).

이러한 문제들을 해결하기 위한 방안 중 하나로 압력지연삼투(Pressure Retarded Osmosis: PRO) 공정이 제시되었는데, 압력지연삼투 공정은 서로 다른 염분 농도를 가진 두 용액의 삼투압 차를 이용하여 농도 구배 차이에 의해 물이 막을 투과하는 현상을 이용하여 에너지를 생산하는 기술이다 (Loeb, 1976). PRO 공정은 기존의 풍력, 태양열 발전 등과 달리 날씨에 큰 영향을 받지 않고 일정한 에너지를 생산할 수 있는 장점이 있으며 이산화탄소와 같은 유해 물질을 배출하지 않는 청정에너지 기술이다 (Hong et al., 2011). 최근 PRO 공정을 역삼투 담수화 공정에 융합하여 역삼투 공정에서 배출되는 농축수를 PRO 공정의 유도 용액(draw solution)으로 사용하여 삼투 에너지를 회수함으로써 역삼투 담수화 공정의 에너지 소비량을 줄이는 SWRO-PRO 공정에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한 PRO 공정은 에너지 소비량을 줄일 뿐만 아니라 농축수의 해양 배출에 의한 환경적 악영향 저감 효과가 있다 (Altaee, 2012).

이러한 PRO 막은 다른 가압형 막 공정과 같이 막 오염에 의한 투과수량 및 내구성 감소와 같은 문제가 있는데(Li and Elimelech, 2004; Zularisam et al., 2006), 이러한 막 오염은 부유물질과 콜로이드성 입자들의 이동, 유기물의 흡착 및 축적 등의 원인으로 발생한다 (Baker and Dudley, 1998; Fritzmann et al., 2007). PRO

막의 막오염에 대한 연구는 She et al. (2013)에 의해 처음으로 진행 되었으며, 이후 Thelin et al. (2013), Yip and Elimelech (2013), Chen et al. (2015, 2016)과 같은 연구자들에 의해 연구되고 있지만 압력지연삼투 막의 막오염에 대한 정확한 메커니즘과 제어 방안에 대한 연구는 여전히 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 하수 2차 처리수를 유입 용액(feed solution)으로 사용할 때 압력지연삼투 공정의 전처리로서 응집, PAC (Powdered activate carbon) 흡착과 UF 막 공정을 적용하여 PRO 유입 용액의 수질에 따른 압력지연삼투 공정의 성능 변화에 대하여 연구하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 응집 및 UF 여과

2.1.1 응집

본 연구에서 사용한 응집제는 해수의 응집에 일반적으로 사용되고 있는 Fe(III)염 무기응집제로 염화제이철(FeCl₃ · 6H₂O)(Sigma Aldrich, USA)를 사용하였으며, 응집제를 실험에 사용하기 전 0.25 M Stock solution(as FeCl₃)을 제조 후 실험 하루 전 초순수를 사용하여 10 g/L(as FeCl₃)로 희석한 dosing solution을 사용하였다. Dosing solution 제조 시 희석에 의한 응집제의 정상변화에 따른 오차를 최소화하기 위하여 dosing solution을 실온에서 하루 방치하여 안정화시킨 후 사용하였다. Jar test 실험장치는 6개의 교반장치를 갖춘 것으로 Phipps and Birds사의 jar tester를 사용하였으며, 임펠러는 paddle(two-blade) 형식으로 크기는 75 mmW × 25 mmL이다. 응집실험에서 사용된 Jar는 115 mmW × 115 mmL × 210 mmH 인 2 L 사각형 jar를 사용하였다. Jar test에서의 급속혼화와 완속혼합의 교반강도를 각각 250 rpm(G=550 sec⁻¹ at 20°C)과 30 rpm(G=22 sec⁻¹ at 20°C)으로 모든 실험에서 동일하게 하였으며 급속혼화 시간 및 완속혼합 시간은 각각 1 분과 30분으로 실험을 실시하였다.



2.1.2 UF(Ultrafiltration) 여과 장치

UF 막을 이용한 압력지연삼투 공정의 전처리 실험 장치는 Fig. 1에 나타내었다. 본 연구에서 사용된 UF 막은 PVDF 재질의 hollow fiber 막이며 pore size는 0.03 μm 이다. Paddle 형태의 교반기가 설치되어 있는 원수 조에서 응집제(FeCl_3) 및 PAC가 주입되어 교반 되고, 교반이 끝난 후 feed pump에 의해 UF 막 모듈로 유입된다. 이때 UF 막의 유입 압력은 1.0 bar로 일정 하게 가압하였으며, UF 막을 통과해 나온 생산수는 전자저울을 이용하여 30초 단위로 무게를 측정하여 water flux를 측정하였다. 막의 물리적 세척은 막 분리 압력의 2배인 2.0 bar의 압력에서 초순수를 이용하여 막 분리와는 역방향으로 1분간 실시하였으며, 이후 원 수를 30초 동안 순환시켜 막 표면에 붙어있는 입자들 을 제거할 수 있도록 하였다.

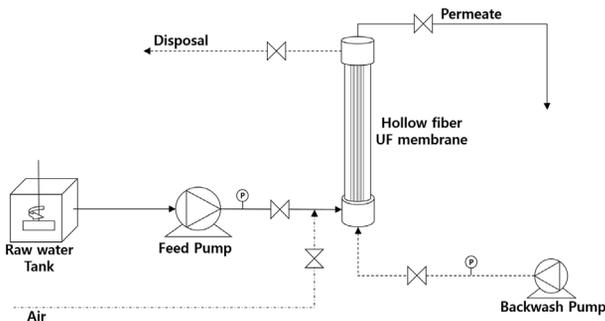


Fig. 1. Schematics of UF membrane filtration device.

Table 1. Analytical method and instruments

Item	Unit	Analytical method and instruments
Jar-test	-	Jar tester (Phipps & Bird, Model 7790-500)
pH	-	pH meter (Thermo ORION 4 STAR)
Turbidity	NTU	Turbidimeter (HACH, 2100AN)
DOC	mg/L	TOC Analyzer (SHIMADZU, TOC-v)
UV_{254}	cm^{-1}	UV-Spectrophotometer (SHIMADZU, UV2600)
Alkalinity	mg/L	Standard method 22nd (Titration method)
Conductivity	$\mu\text{s}/\text{cm}$	Conductivity meter (YSI, 600LS)

2.2 PRO 장치

본 연구에 사용된 lab-scale 실험의 유도 용액 및 유입 용액은 NaCl을 사용하여 제조하였다. Fig. 2은 lab-scale PRO 장치의 모식도를 나타낸 것이다. Membrane cell의 유효 막면적은 0.002 m^2 이며, 유도 용액의 유입부 단면적은 $6.5 \times 10^{-5} \text{m}^2$, 유입 용액의 유입부 단면적은 $5.2 \times 10^{-5} \text{m}^2$ 이다. 유도 용액과 유입 용액이 각각 펌프를 통해 PRO membrane cell로 유입 되고, membrane cell을 통과 한 유도 용액과 유입 용액은 다시 각각의 원수조로 유입 된다. 이때 유입 용액의 무게 변화를 통해 water flux를 측정하였다. 식 (2-1)을 이용하여 전력밀도를 측정하였다. Membrane cell에서 각 용액의 유입부 바로 앞에 압력 계와 유량계가 설치되어 있으며 유도용액을 위한 고압 펌프는 인버터에 의해 제어되며, 유입 용액용 저압펌프 는 유량 조절을 위해 수동으로 조절 되었다. 유도 용액 의 압력은 유도 용액 유출구 후단에 설치되어 있는 back pressure valve에 의해 조절되었다.

$$W = J_w \Delta P \quad (\text{식 2-1})$$

여기서, W = 전력밀도, W/m^2

J_w = water flux, $\text{L}/\text{m}^2\text{hr}$

ΔP = 유입용액과 유도용액의 압력차, bar

2.3 수질 분석 방법

본 연구에서 사용된 모든 수질 분석은 Standard methods(APHA, AWWA, WPCF, 2012)에 따라 수행 하였으며, 수질 분석에 사용되는 항목 및 방법과 분석 기기는 Table 1에 나타내었다. 유기물의 정상분석은 이온교환수지(XAD, SIGMA)를 이용하여 분류 하였다 (Thurman and Malcom, 1981).

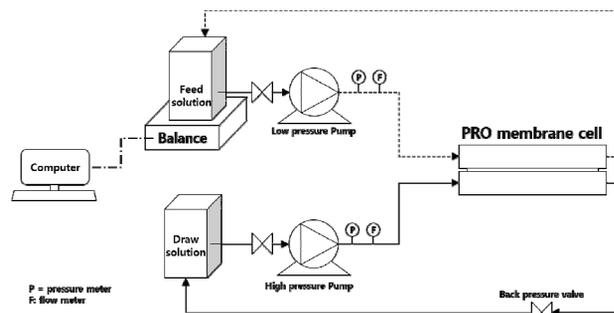


Fig. 2. Schematic diagram of the lab-scale PRO process.

3. 결과 및 고찰

3.1 원수의 수질특성

본 연구에서 사용된 하수 2차 처리수는 부산시 소재의 N 하수처리장의 하수 2차 처리수를 사용하였다. N 하수처리장의 2차 처리수는 MLE 공법 처리수와 MBR 처리수가 혼합된 형태로 배출되며, 하수 2차 처리수의 수질을 Table 2와 같이 나타내었으며, 연구기간 중 수온은 14.1~16.3°C로 계절에 따른 온도 변화가 크지 않았으며, 0.7~2.3 NTU의 낮은 탁도와 3.3~5.9 mg/L의 DOC, SDI₁₅는 6.12~6.54를 나타내었다. 일반적인 thin film composite(TFC) 막의 적정 유입 DOC 농도는 3 mg/L 이하로 보고되고 있으며, SDI₁₅ 또한 3 이하 일 때 가장 적절하다고 한다 (Filmtec, 2011). 이에 비해 본 실험에 사용된 하수 2차 처리수의 DOC 농도 및 SDI₁₅는 적정 수질 기준에 미치지 못하기 때문에 PRO 공정의 유입 용액으로는 부적절한 것으로 판단되며, 따라서 적절한 전처리 공정이 필요할 것으로 판단된다. 이온교환수지를 이용하여 하수 2차 처리수의 유기물 성상 분류를 수행한 결과 Fig.3과 같이 친수성 성분이 65.2%로 나타났으며, humic acid는 5.2%, fulvic acid는 29.6%로 나타났다. SUVA(Specific UV adsorbance) 또한 1.91~2.62로 3 이하의 값을 나타내어 하수 2차 처리수 유기물의 성상은 상대적으로 친수성이고 비방향족 물질과 저분자량 성분을 많이 함유하고 있는 것으로 판단된다. Hawang (1999)의 수원에 따른 유기물 특성분류에서 하수처리장의 유출수는 인위적인 오염으로 인해 소수성 성분보다 친수성 성분이 더 높게 나타났다고 하였다.

본 연구에 사용된 부산 N 하수처리장의 2차 처리수의 수질 분석결과, PRO 공정의 유입 용액으로 사용하기

Table 2. Characteristics of secondary effluent from wastewater treatment plant quality

Parameters	Unit	Range
Temperature	°C	14.1 ~ 16.3
pH	-	7.1 ~ 7.5
Turbidity	NTU	0.7 ~ 2.3
UV ₂₅₄	cm ⁻¹	0.077 ~ 0.13
Alkalinity	mg/L as CaCO ₃	100 ~ 120
TDS	mg/L	1,450 ~ 1,720
DOC	mg/L	3.3 ~ 5.9
SDI ₁₅	-	6.12 ~ 6.54

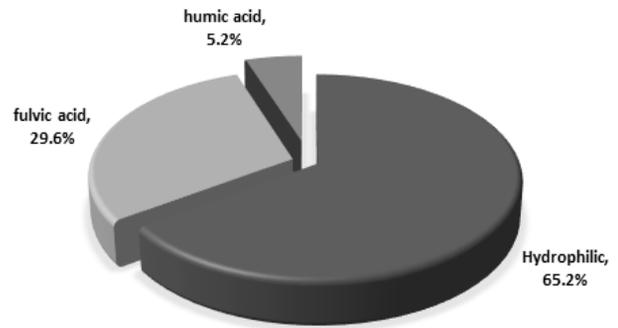


Fig. 3. DOC fraction of organic matters in secondary effluent of wastewater treatment plant.

위해서는 탁도 및 유기물을 저감하기 위한 적절한 전처리 공정이 필요하다고 판단된다. 따라서 본 연구에서는 전처리로서 응집, PAC 흡착, UF 막 전처리 공정을 통해 PRO 공정의 유입 용액으로 적절한 상태의 수질 조건에 대하여 조사하였으며, 또한 유기물의 농도가 PRO 공정에 미치는 영향에 대하여 연구를 진행하였다.

3.2 응집제 주입량에 따른 유기물 농도 변화

본 연구에서는 하수 2차 처리수의 응집-UF 막 공정을 PRO 공정의 전처리 공정으로서 적용하여 PRO 막의 fouling을 최소화하기 위한 응집조건을 도출하고자 하였다. Fig. 4는 응집제 주입량에 따른 급속혼화, 급속혼화+완속혼합, 급속혼화+완속혼합+침전 공정의 UV₂₅₄ 변화를 나타낸 것으로 응집제 주입량이 증가할수록 UV₂₅₄는 감소하며, 급속 혼화와 급속혼화+완속 혼합의 경우 UV₂₅₄는 2.0% 이내의 차이를 보였으며,

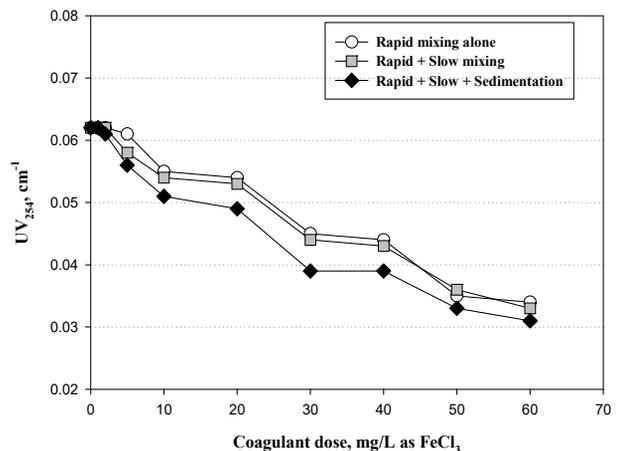


Fig. 4. Effect of coagulant dose on UV₂₅₄ removed under various coagulation conditions.

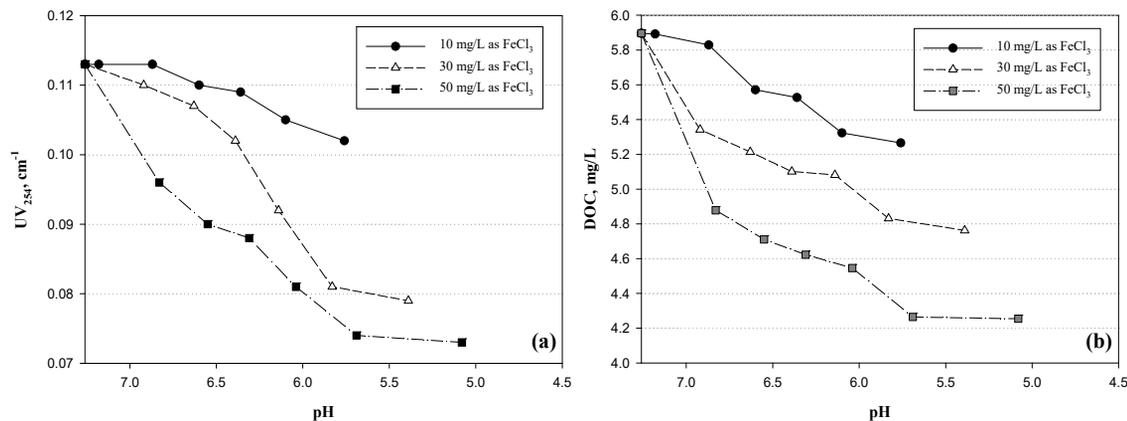


Fig. 5. Effect of coagulation pH on organic matters removal under varied coagulant doses.

두 가지 공정과 급속혼화+완속혼합+침전의 경우 다른 두 가지보다 UV₂₅₄가 1.6~4.8%의 높은 제거 효율을 보였다.

응집을 통한 유기물의 제거에 있어 응집제 주입량은 유기물 응집에 많은 영향을 미치지만, 응집 pH 또한 중요한 인자 중 하나이다. 본 실험에서 pH 조절은 0.1 N H₂SO₄를 사용하여 조절하였다. Fig. 5는 Fig. 4의 결과를 바탕으로 응집제 주입량을 10, 30, 50 mg/L를 선정하여 응집 pH 조절에 따른 UV₂₅₄, DOC 값의 변화를 나타낸 것이다. 유기물 제거의 최적 응집 pH는 5.5 부근에서 최적의 제거 효율을 보였다. 이는 Christian Volk et al. (2000)의 연구에서 보고된 ferric chloride(FeCl₃)의 최적 응집 pH 4.4~6.7의 범위 안에 들어가는 결과이다. 또한 낮은 pH에서 응집 효율이 좋은 이유는 pH에 따른 유기물의 특성변화와 응집시 형성된 가수분해 종들의 양전하 밀도차로 인해 유기물 제거효율이 우수한 것으로 판단되어 진다 (Robert et al., 1995). Fig. 5에서 나타낸 바와 같이 UV₂₅₄의 제거율은 각각의 주입량에서 9.7%, 30.1%, 35.4%로 나타났지만, DOC 제거율은 각각 10.7%, 19.2%, 27.8%로 나타났다. 이는 하수 2차 처리수의 유기물 성상이 소수성 성분보다 친수성 성분이 더 많은 부분을 차지하여, 응집을 통해 소수성 성분의 제거가 주로 이루어져 UV₂₅₄ 제거율 보다 DOC의 제거율이 더 낮게 나타난 것으로 판단된다.

3.3 응집-UF 막 전처리 공정의 적용

응집제 주입량에 따른 하수 2차 처리수의 UF 막에 대한 water flux 변화 및 역세척에 따른 회복율을 조사하기 위해 ferric chloride를 각각 0, 10, 30, 50 mg/L로 주입

한 후 급속혼화(250 RPM, $G=550 \text{ sec}^{-1}$)를 1분간 실시한 후 UF 막을 여과-역세척을 수행한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 역세척은 여과시 유입 압력의 1.5배의 압력으로 1분간 실시하였다. 응집제 주입 유무에 따른 water flux 비교 결과 응집제를 주입하지 않은 경우가 응집제를 주입한 경우와 비교하여 급격한 water flux 감소를 보이는 것을 알 수 있다. 하지만 응집제를 주입한 경우 응집제 주입량 50, 30, 10 mg/L 순으로 water flux가 더 작게 감소하였는데 이는 응집제 주입량이 증가할수록 수중에 존재하는 입자의 크기가 큰 입자들이 차지하는 비중이 증가하면서 cake layer층의 저항이 감소되어 차이가 나는 것으로 판단된다. 응집 후 막오염은 응집에 의해 제거되지 않은 유기물의 일부분과 응집제 자체가 유발시킨다고 알려져 있는데, 순수에 50 mg/L의 응집제를 주입한 후 침전과정 없이 바로 막분리를 실시하였을 때 초기 water flux보다 20% 가량의 water flux 감소가 나타났으며, 이는 높은 응집제 주입량과 침전과정 없이 여과시 Fe 성분의 precipitation에 의한 영향으로 볼 수 있다고 하였다 (Howe and Clark, 2002). 즉, 응집 시 과도한 응집제 주입은 수산화 침전물(예: FeOH₃(s))을 형성할 수 있으며 이는 water flux를 감소시키는 주요 원인이 될 수 있기 때문에 응집제 주입량의 결정에 주의할 필요가 있다고 판단된다. 또한 역세척 실험 결과 응집제를 주입하지 않은 경우 역세척 후 회복률은 97.2%로 나타났으나, 응집제를 주입한 경우 회복률은 85~87%로 응집제를 주입한 경우가 주입하지 않은 경우보다 회복률이 낮게 나타났다. 하지만 이는 일반적인 UF 공정에서의 water flux(40~100 L/m²hr)보다 약 2~5배 가량 높은 200 L/m²hr에서 수행된 결과이며, 실제 공정에서는 더

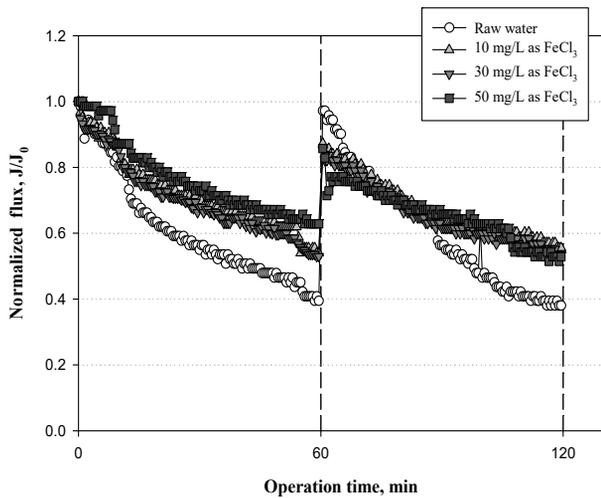


Fig. 6. Effect of various coagulant doses on water flux decline and backwash effects.

낮은 water flux 감소 상태에서 역세척이 이루어지기 때문에 보다 높은 회복률을 나타낼 것으로 판단된다. 또한 회복률은 응집제를 주입하지 않은 경우 더 높게 나타나지만 water flux의 감소율은 응집제를 주입한 경우가 15~20% 가량 낮은 감소율을 보인다. 이 두 가지를 고려하면 실제 공정에서는 응집제를 주입한 경우 응집제를 주입하지 않은 경우보다 더 낮은 water

flux 감소율을 가지며, 응집제를 주입하지 않은 경우의 회복률과 유사한 결과를 보일 것으로 판단된다.

3.4 전처리 공정에 따른 PRO 막의 성능 변화

응집제 주입 후 UF 막을 투과한 물을 PRO 공정에 유입 용액으로 적용 하였을 때의 PRO 막의 성능 변화를 알아보기 위해 lab-scale PRO 실험을 실시하였다. PRO 공정 실험 시 유도 용액의 TDS 농도는 60,000 mg/L이며, 유입 용액 및 유도 용액의 유입 유량은 1.0 L/min으로 동일하게 하였으며 압력은 10 bar로 고정하였다. 또한 막오염에 의한 water flux 감소를 보다 빨리 확인하기 위하여 유도 용액 및 유입 용액의 온도를 30°C로 조절하여 3시간 동안 실험하였다. Table 3은 응집제 주입 후 UF 막을 투과한 물의 수질을 나타낸 것이다. 응집제 주입 유무와 상관없이 TDS 농도는 일정하게 나타났으며, 전처리로 인한 유입 용액의 삼투압 변화는 크지 않은 것으로 나타났다. 그러나 응집제 주입량이 증가할수록 UV₂₅₄, DOC, SUVA는 감소하는 것으로 나타났으며, SUVA 값으로 판단 시 유기물 성상 중 소수성 성분이 주로 제거되어 감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 7은 응집+UF 전처리 된 유입 용액을 PRO 공정

Table 3. Water qualities of pre-treated waters after coagulation-UF process.

Pre-treatment condition	TDS (mg/L)	UV ₂₅₄ (cm ⁻¹)	DOC (mg/L)	SUVA (m ¹ /mg DOC/L)
Only UF	1,524	0.085	4.20	2.02
10 mg/L as FeCl ₃ + UF (adjust pH 5.5)	1,518	0.076	3.98	1.91
30 mg/L as FeCl ₃ + UF (adjust pH 5.5)	1,536	0.061	3.51	1.74
50 mg/L as FeCl ₃ + UF (adjust pH 5.5)	1,530	0.055	3.24	1.70

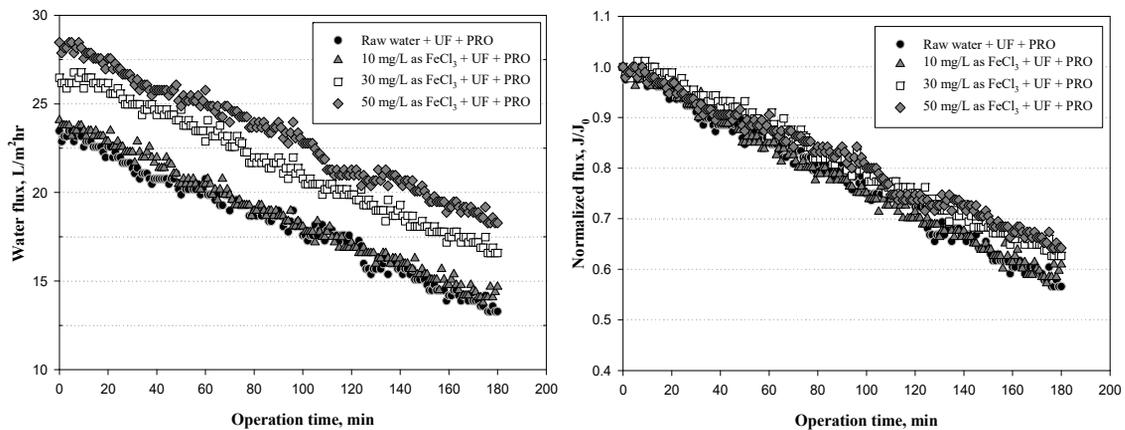


Fig. 7. Effect of coagulant does on water flux decline of PRO membrane with operation time.



에 적용 하였을 때 운전 시간에 따른 (a) water flux 및 (b) normalized flux 변화를 나타낸 것이다. 먼저 Fig.7 (a)에서 응집제 주입 없이 UF 막만 투과한 경우 초기 water flux는 23.5 L/m²hr로 나타났으며, 180분 후에 초기 water flux 보다 40% 가량 감소하는 것으로 나타났으며, 단위 면적당 생산 가능 전력인 전력밀도는 6.5 W/m²으로 나타났다. 반면 응집제를 주입(pH 5.5 조절)한 경우에는 응집제 주입량 10 mg/L에서 초기 water flux는 24.1 L/m²hr, 30 mg/L에서 26.5 L/m²hr, 50 mg/L에서 28.5 L/m²hr로 높게 나타났다. 이에 따라 전력밀도 또한 각각 6.7 W/m², 7.4 W/m², 7.9 W/m²로 나타났다. 즉, 유입 용액의 수질에 따라서 초기 water flux가 변화한다는 것은 전처리를 통한 수질 개선을 통해 PRO 공정의 에너지 생산량을 증가시킬 수 있다는 것이다. 반면에 normalized flux를 나타낸 (b)에서 운전 시간이 증가할수록 water flux의 감소율은 전처리 조건과 상관없이 거의 일정하게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 Thelin et al. (2013)의 연구에서 보고된 PRO 공정의 water flux는 유입 용액의 DOC 농도와는 상관관계가 없다는 것과 일치하는 결과를 보인다. Fig 7에서 나타난 결과를 종합하였을 때, 전처리를 통한 유입 용액의 DOC 농도가 낮을수록 높은 초기 water flux로 인해 더 많은 에너지를 생산할 수 있지만, 유입 용액의 DOC 농도가 PRO 공정의 막 오염에는 큰 영향을 주지 않는다는 것을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구는 PRO 공정에서 전처리 공정에 따른 PRO 막의 성능변화를 확인하기 위해 시작되었으며, 응집-UF 막분리 공정을 전처리로 하여 PRO 공정에 유입시켜 전처리 후 유입 용액의 유기물 농도에 따른 PRO 공정의 water flux 변화에 대하여 조사하였다.

본 연구에서 도출된 중요한 결과로 친수성 성분이 65.2%, 소수성 성분이 36.8%로 구성된 하수 2차 처리수의 유기물 제거를 위한 최적 응집제 주입량은 50 mg/L as FeCl₃(응집 pH 5.5)로 나타났으며, 이에 따른 PRO 공정 실험에서 유입 용액의 유기물 농도에 따른 PRO 공정의 막오염은 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 그러나 유입 용액의 유기물 농도가 낮을수록 초기 water flux는 높게 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로 하였을 때, 전처리 공정을 통한 유기물의 제어는 막오

염 저감에 큰 영향을 미치지 않지만 초기 water flux를 향상시킴으로써, 더 많은 에너지를 생산할 수 있을 것으로 판단된다. 향후 본 연구에서의 PRO 운전 시간보다 더 장시간의 시험을 통해 유기물 농도가 PRO 공정에 미치는 영향에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2020년)에 의하여 연구되었습니다.

References

- Altaee, A. (2012). Forward osmosis, potential use in desalination and water reuse, *J. Membr. Sep. Technol.*, 1, 79-93.
- Amirtharajah, A., and Mills, K.M. (1982). Rapid-Mix Design for Mechanisms of Alum Coagulation, *J. Am. Water Works Assoc.*, 74(4), 210-216.
- APHA-AWWA-WEF. (2012). Standard methods for the examination of water and wastewater, 22nd ed. APHA AWWA WEF.
- Baker, J.S. and Dudley, L.Y. (1998). Biofouling in membrane systems-a review, *Desalination*, 118(1-3), 81-90.
- Chen, S.C., Amy, G.L., Chung, T.S. (2016). Membrane fouling and anti-fouling strategies using RO retentate from a municipal water recycling plant as the feed for osmotic power generation, *Water Res.*, 88, 144-155.
- Chen, S.C., Wan, C.F., Chung, T.S. (2015). Enhanced fouling by inorganic and organic foulants on pressure retarded osmosis (PRO) hollow fiber membranes under high pressures, *J. Membr. Sci.*, 479, 190-203.
- Delgado, S., Diaz, F., Garcia, D., and Otero, N. (2003). Behaviour of inorganic coagulants in secondary effluents from a conventional wastewater treatment plant, *Filtr. Sep.*, 40(7), 42-46.
- Filmtec. (2021). Filmtec™ Reverse Osmosis membrane Technical Manual, Dupont Water Solutions.
- Fritzmann, C., Löwenberg, J., Wintgens, T., Melin, T. (2007). State-of-the-art of reverse osmosis desalination, *Desalination*, 216, 1-76.
- Hawang, J.E., Kang, L.S., Kim, S.H., Yoon, C.H. (2000). Variation of natural organic matter characteristics through water treatment processes, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 22(7), 1253-1261.

- Hong S., Lee S., Kim J. H., Kim J. H. and Ju Y. (2011). Evolution of RO process for green future, Korea Ind. Chem. News, 14(6), 9-20.
- Howe, K.J. and Clark, M.M. (2002). Coagulation pretreatment for membrane filtration, AWWA research Foundation, Denver, AWWARF&AWWA.
- Lee, S.H., Choi, J.S., Hwang, T.M. (2013). What can we expect on the next generation desalination technology in the future civil and environmental engineering?, The magazine of the Korean Society of Civil Engineers, 61(5), 102-107.
- Lee, S., Choi, J., Park, Y.G., Shon, H., Ahn, C.H., Kim, S.H. (2019). Hybrid desalination processes for beneficial use of reverse osmosis brine: Current status and future prospects, Desalination, 454, 104-111.
- Li, Q. and Elimelech, M. (2004). Organic fouling and chemical cleaning of nanofiltration membrane: Measurements and mechanisms, Environ. Sci. Technol., 38(17), 4683-4693.
- Loeb, S. (1976). Production of energy from concentrated brines by pressure retarded osmosis: I. Preliminary technical and economic correlations, J. Membr. Sci., 1(1), 49-63.
- Park, S., Seo, J., Kim, T. (2018). Environmental Impacts of Brine from the Seawater Desalination Plants, J. Environ. Impact Assess., 27(1), 17-32.
- Phillip, W.A., Elimelech, M. (2011). The future of seawater desalination: energy, technology, and the environment, Sci., 333, 712-717.
- Randtke, S.J. (1988). Organic contaminant removal by coagulation and related process combination, J. AWWA, 80(5), 40.
- Robert, C.C., Stuart, W.K., James, F.G., and Kevin, L.W. (1995). Enhanced coagulation: A preliminary evaluation, J. AWWA, 87(2), 91-103.
- She, Q., Wong, Y.K.W., Zhao, S., Tang, C.Y. (2013). Organic fouling in pressure retarded osmosis: Experiments, mechanisms and implications, J. Membr. Sci., 428, 181-189.
- Thelin, W.R., Sivertsen, E., Holt, T., Brekke, G. (2013). Natural organic matter fouling in pressure retarded osmosis, J. Membr. Sci., 438, 46-56.
- Thurman, E.M. and Malconlm, R.L. (1981). Preparative isolation of aquatic humic substances, Environ. Sci. Technol., 15(4), 463-466.
- Volk C., Bell K., Ibrahim E., Verges D., Amy G. and Le Chevallier M. (2000). Impact of enhanced and coagulation on removal of organic matter and its biodegradable fraction in drinking water, Water Res. 34(12), 3247-3257.
- Voutchkov, N. (2018). Energy use for membrane seawater desalination-current status and trends, Desalination, 431, 2-14.
- Wakeel, M., Chen, B., Hayat, T., Alsaedi, A., Ahmad, B. (2016). Energy consumption for water use cycles in different countries: a review, Appl. Energy, 178, 868-885.
- Yip, N.Y., Elimelech, M. (2013). Influence of natural organic matter fouling and osmotic backwash on pressure retarded osmosis energy production from natural salinity gradients, Environ. Sci. Technol., 47, 12607-12616.
- Zularisam, A.W., Ismail, A.F., and Salim, R. (2006). Behaviours of natural organic matter in membrane filtration for surface water treatment-a review, Desalination, 194(1-3), 211-231.