



응집-UF 전처리 공정에 의한 잔류 금속염이 역삼투막에 미치는 영향

Effect of residual metal salt on reverse osmosis membrane by coagulation-UF pretreatment process

고길현·김수현·강임석*

Gilhyun Go·Suhyun Kim·Limseok Kang*

부경대학교 환경공학과, 부산광역시 남구 용소로 45, 48513

Department of Environmental Engineering, Pukyong National University, 45, Yongso-ro, Nam-Gu, Busan 48513, 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

Pretreatment system of desalination process using seawater reverse osmosis(SWRO) membrane is the most critical step in order to prevent membrane fouling. One of the methods is coagulation-UF membrane process. Coagulation-UF membrane systems have been shown to be very efficient in removing turbidity and non-soluble and colloidal organics contained in the source water for SWRO pretreatment. Ferric salt coagulants are commonly applied in coagulation-UF process for pretreatment of SWRO process. But aluminum salts have not been applied in coagulation-UF pretreatment of SWRO process due to the SWRO membrane fouling by residual aluminum. This study was carried out to see the effect of residual metal salt on SWRO membrane followed by coagulation-UF pretreatment process. Experimental results showed that increased residual aluminum salts by coagulation-UF pretreatment process by using alum lead to the decreased SWRO membrane salt rejection and flux. As the salt rejection and flux of SWRO membrane decreased, the concentration of silica and residual aluminum decreased. However, when adjusting coagulation pH for coagulation-UF pretreatment process, the residual aluminum salt concentration was decreased and SWRO membrane flux was increased.

Key words: SWRO membrane, Residual aluminum salts, Membrane fouling, Coagulation-UF pretreatment, Adjust pH

주제어: SWRO 막, 잔류 알루미늄염, 막 오염, 응집-UF 전처리, pH 조절

1. 서 론

최근 전 세계적으로 용수부족 문제와 물 공급의 부족으로 인한 문제가 심각하게 대두 되고 있다. 이러한 문

제를 해결하기 위한 대안으로 지구상 물의 97%를 차지하는 해수를 탈염공정을 통하여 용수부족 문제를 해결하기 위한 해수담수화 방법이 제시 되고 있다. 해수담수화는 해수로부터 염분 등을 제거하여 담수를 얻는 탈염

Received 21 June 2019, revised 23 August 2019, accepted 30 August 2019.

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

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.

기술로서 증발법과 역삼투법이 가장 많이 이용되나, 상대적으로 에너지 비용이 적은 역삼투법 탈염공정이 가장 많이 이용되고 있다. 역삼투법에서 사용 되는 역삼투막은 1가 이온을 포함해서 99% 이상의 염배제율을 가지는데, 역삼투막 유입수 내 입자상 및 용존 물질들은 역삼투막의 막오염을 유발시켜 여과플럭스(투과수량) 감소 및 여과수의 수질을 악화시킬 수 있고, 이러한 물질들의 제거는 전처리에 전적으로 의존하므로 전처리 과정은 매우 중요하다 (Bates and Cuozzo, 2019; Brehant et al., 2003). 최근 낮은 SDI(Silt Density Index) 값을 가지면서도 역삼투 공정 공급수의 수질을 안정적으로 운영할 수 있는 UF(Ultrafiltration)막 공정을 해수담수화 전처리 공정으로 연구 및 파일럿 플랜트에 가장 많이 활용하고 있다 (Vedavyasan, 2007; Wilf and Bartels, 2019, Xu et al., 2007). 이러한 UF막 공정의 막오염 저감과 여과플럭스를 증가시키는 방법으로 응집공정이 매우 효과적인 것으로 알려져 있다 (Brehant et al., 2003).

일반적으로 해수 응집공정에 사용되는 무기 응집제는 주로 Fe(III)염의 응집제가 이용되고 있다. 실험실 규모나 파일럿 규모의 플랜트에서는 Al(III)염을 이용한 연구는 있어 왔으나 비교적 용해도가 높은 Al(III)염이 UF막을 통과하여 역삼투막 표면에 침착 및 침전물 생성을 일으킬 수 있기 때문에 주로 역삼투 공정에서는 Fe(III)염을 이용한다 (Edzwald and Haarhoff, 2011; Gabelich et al., 2007). 하지만 국내에서 해수담수화 시설에 적용시 Al(III)계 응집제는 Fe(III)계 응집제 보다 가격이 저렴하여 경제적이며, 국내 알루미늄염 생산 인프라를 유지 및 증대시킬 수 있을 것으로 보인다. 또한 잔류응집제가 역삼투 공정으로 전달되어 역삼투막의 막오염을 일으키는 것은 빈번하게 일어난다고 보고된 바 있다 (Letterman and Driscoll, 1994). 그러나 Al(III)염의 잔류 응집제가 UF막을 통과한 후 잔류 된 금속염이 역삼투막에 미치는 영향에 대한 연구는 미비한 실정이다. 잔류 알루미늄은 0.05 mg/L 이상일 때 역삼투막에 손상을 준다고 알려졌으며, 잔류 알루미늄에 의한 무기질 스케일은 알루미늄과 실리카의 반응에 의해서 생성되는 알루미늄 규산염에 의해 일어나며 저농도의 silica (≤ 10 mg/L)에서 0.05 mg/L 이상의 알루미늄과 반응한다고 알려져 있다 (Gabelich et al., 2002). 하지만 소량의 잔류 알루미늄이 역삼투막의 막오염에 미치는 영향에 대한 연구결과는 거의 보고된바 없다.

이에 본 연구에서는 역삼투 공정의 전처리로서의 응

집-UF 공정에서의 Al(III)염 응집제와 Fe(III)염 응집제를 비교하고, 응집-UF 공정에서 잔류 알루미늄이 역삼투 공정에 미치는 영향을 알아보고자 하였으며, 또한 응집 pH 조절을 통한 잔류 알루미늄 농도를 제어하여 해수담수화 공정의 응집-UF공정에서 활용 가능성을 연구하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 원수의 수질특성

본 연구에 사용된 해수 원수는 부산시 기장군 앞바다의 해수를 취수하여 사용하였으며 그 특성을 Table 1에 나타내었다. 본 실험에 사용된 해수는 여름에는 수온이 20°C까지 상승하며 겨울에는 10°C까지 낮아진다. pH는 8.0~8.2로 거의 일정하며, 정상시의 탁도는 1 NTU 이하로 낮은 편이다. TDS는 평균적으로 30,000~32,000 mg/L이었으며, SDI₁₅는 평균 5.54이다. 알칼리도는 평균 120 mg/L as CaCO₃의 값을 나타내었다.

Table 1. Characteristics of seawater quality

Parameters	Unit	Range
Temperature	°C	10~22.5
pH	-	7.98~8.48
Turbidity	NTU	0.5~2.97
UV ₂₅₄	cm ⁻¹	0.008~0.012
Alkalinity	mg/L as CaCO ₃	118~122
Conductivity	mS/cm	47.3~50.2
TDS	g/L	29,114~34,146
DOC	mg/L	0.7~1.46
SDI ₁₅	-	4.77~6.47

2.2 응집 및 UF 여과

2.2.1 응집

본 연구에서 Al(III)염 응집제로 alum as Al₂(SO₄)₃·16H₂O(Sigma Aldrich, USA), Fe(III)염 응집제로 ferric chloride as FeCl₃·6H₂O(Sigma Aldrich, USA)를 사용하였으며, 실험에 사용하기 전 0.25 M stock solution(as alum, FeCl₃)을 제조 후 실험 하루 전 초순수를 사용하여 10 g/L(as alum, FeCl₃)로 희석한 dosing solution을 사용하였다. Dosing solution 제조 시 희석에 의한 alum 정상변화에 따른 오차를 최소화하기 위하여 dosing



solution을 실온에서 하루 방치하여 안정화 시킨 후 사용하였다. Jar test 실험기기는 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 mmH인 정방향 2 L 사각 jar를 사용하였다. Jar test에서의 급속혼화와 완속혼합의 교반 강도를 각각 250 rpm($G=550 \text{ sec}^{-1}$ at 20°C)과 45 rpm($G=40 \text{ sec}^{-1}$ at 20°C)으로 모든 실험에서 동일하게 하였으며 급속혼화 시간 및 완속혼합 시간은 각각 1 분과 30분으로 실험을 실시하였다.

2.2.2 UF(Ultra filtration)

본 연구에서 사용된 batch type UF막 장치(Millipore, USA)는 전량여과 형태로 Fig. 1과 같다. 실험에 사용된 UF막의 면적은 $4.54 \times 10^3 \text{ m}^2$ 이며 분획분자량이 100 kDa (pore size: $0.018 \mu\text{m}$)의 친수성 재질의 regenerated cellulose 막을 사용하여 실험을 실시하였다. 압력은 4.8~8.3 bar의 토출압력을 가지는 모터(KOTEC, DX-8000-0350)를 사용했으며, 0.5~8.5 bar 범위를 가진 압력조절기(CKD, R1000)를 사용하여 1 bar로 일정하게 주입하였다. 막의 물리적 세척은 막 분리 압력의 2배인 2 bar의 압력에서 초순수를 이용하여 막 분리와는 역방향으로 세척하였으며 화학적 세척은 막에 흡착된 비가역적인 오염물질의 제거를 위하여 0.1 N NaOH 용액에 2시간 동안 보존한 후 초순수를 사용하여 깨끗이 세척하였다.

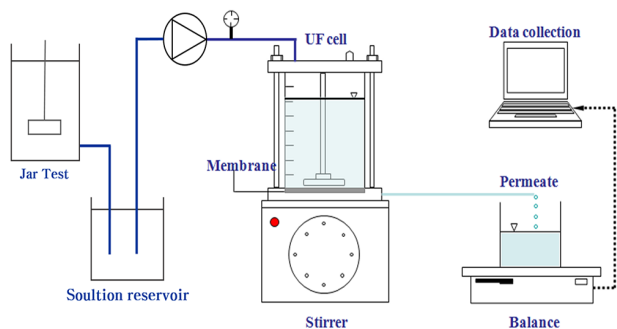


Fig. 1. Schematics of batch type UF membrane filtration assembly.

2.3 역삼투막 실험 장치

역삼투막 실험을 위해 십자류 여과 방식으로 구성된 bench-scale 장치를 사용하였고 그 구성을 Fig. 2에

나타내었다. 역삼투막 장치의 크기는 200 mm×255 mm×45 mm이며 유입구의 유입 면적은 95 mm×146 mm로 설계되었으며 재질은 SUS-316 L을 선택하였다. 투과수 유출구는 직경 1.5 mm 크기의 구멍을 2.5 mm 간격으로 95 mm 길이로 직선으로 배열되었다. 고압 펌프는 맥동식 Hytra Cell사의 펌프를 사용하였으며, 허용 압력은 70 bar까지 가능하다. 압력은 역삼투막 장치를 빠져나가는 농축수 라인에 밸브를 통하여 조절하였고 유량은 고압 펌프의 모터 회전수를 제어할 수 있는 인버터(inverter)에서 조절할 수 있게 하였다. 수온은 수온 조절장치를 통해 조절하였다. 사용된 역삼투막은 RE8040-SHN(Toray Chemical)을 잘라내어 평막 형태로 사용하였고 막 면적은 0.014 m^2 이다.

일반적으로 해수를 이용한 역삼투압 실험실 규모의 실험 장치는 회수율이 매우 낮기 때문에 운전 시간에 따른 여과플럭스 감소, 압력에 따른 생산수 TDS 변화, 수온에 따른 생산수 TDS 변화 등을 관찰하기 위해서는 장시간을 요구하게 된다. 역삼투막의 투과플럭스와 물질 전달 계수에 대한 수온의 영향을 살펴본 연구에서 수온이 20°C 에서 40°C 로 증가할 때 NaCl이 존재하지 않은 물의 투과플럭스는 $12.4 \text{ L/m}^2\cdot\text{h}$ 에서 $24 \text{ L/m}^2\cdot\text{h}$ 으로 증가한다고 보고한바 있다 (Mattheus et al., 2002). 그래서 본 연구에서는 단기간(24 h)에 역삼투막의 투과플럭스 변화를 관찰하기 위하여 수온을 35°C 로 조절하여 실험 설정치를 구성하였다. 본 연구의 목적인 잔류 알루미늄 농도가 막의 오염에 미치는 영향을 알아보기 위하여 잔류 알루미늄을 생성시키기 위해 응집제를 주입하여 실험하였으며 잔류 알루미늄의 농도는 DR-6000(Hach, USA)을 사용하여 측정하였다. 실험실 규모에서 단기간에 스케일 오염에 의한 역삼투막의

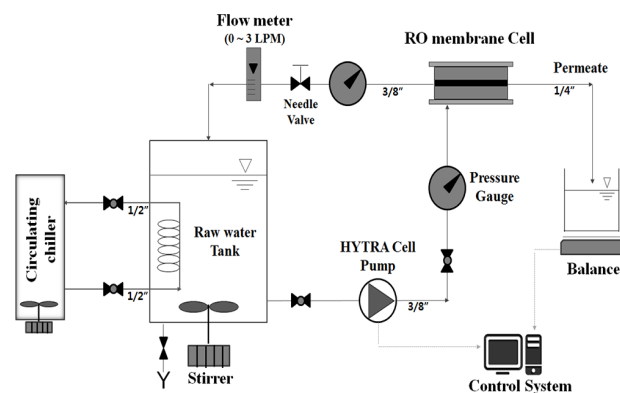


Fig. 2. Schematic of SWRO bench scale system.

여과플렉스 저하를 관찰하기는 쉽지 않아 농축수를 원수로 재순환시켜 단기간에 오염 및 여과플렉스 저하를 보고자 하였다. 모든 실험에서 역삼투막 장치의 유입 압력은 50 bar로 고정하였으며 1회 실험 후 역삼투막을 새로 교체하여 실험하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 응집제 주입농도에 따른 탁도 제거효율 및 잔류금속염의 농도 변화

응집제 주입농도의 경우 FeCl₃ 응집제가 해수 응집에 일반적으로 적용되는 주입농도 5~30 mg/L 범위(Wilf and Bartels, 2019)에서 주입하였다. Alum의 경우 FeCl₃ 응집제와 같은 금속 물 농도로 주입하여 비교하였으며 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Alum과 FeCl₃ 모두 0.02~0.06 mM의 농도 범위에서 최적 주입농도를 도출하였으며, UF막을 투과하고 난 후의 잔류 금속염의 농도를 Table 2에 나타내었다. FeCl₃의 경우 UF막을 투과한 후 잔류 철이 검출되지 않았다. 이는 검출한계 이하의 미량의 농도이거나 대부분 산화된 침전물(Fe₂O₃) 형태로 입자상을 형성해 UF막에 의해 여과된 것으로 판단된다. Alum의 경우 0.02 mM의 주입량에서 0.34 mg/L, 0.04 mM의 주입량에서 0.76 mg/L, 0.06 mM의 주입량에서 0.89 mg/L의 잔류 알루미늄이 검출되었다. 이는 역삼투막에 손상을 줄 수 있는 잔류 알루미늄 농도라 보고된바 있다 (Gabelich et al., 2002; Gabelich et al., 2006).

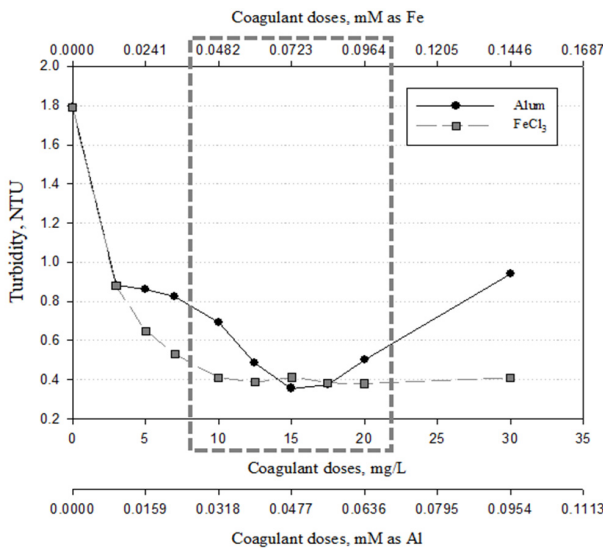


Fig. 3. Effect of coagulat dose on residual turbidity.

Table 2. Residual metal ion concentrations after coagulation followed by UF filtration process

Coagulant dose mM as Al or Fe	Residual ion (mg/L as ion)	
	Alum	FeCl ₃
0.02	0.34	N/D
0.04	0.76	
0.06	0.89	

3.2 잔류 알루미늄에 의한 탁도 변화

잔류 알루미늄과 silica는 UF막을 통과한 후 역삼투막 내에서 반응을 일으키게 되는데, 단시간에 일어나는 반응만으로는 스케일 형성에 대한 변화를 자세히 확인 할 수 없기 때문에 TDS 농도 60,000 mg/L에 해당하는 역삼투막 농축수에 alum을 주입한 후 UF막을 통과한 물을 48시간 동안 암소에서 교반시킨 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 원수의 경우 48시간 경과 후에도 일정한 탁도를 나타냈으나, alum을 주입한 경우 48시간 뒤 세 가지 주입량 모두 탁도가 2배 이상 상승한 것을 확인 할 수 있었다. 또한 Fig. 5는 alum 주입량에 따른 48시간 후의 silica의 농도 변화를 나타낸 것이다. Alum이 주입된 세 가지 농도에서 모두 silica의 농도 감소가 나타났으며, 주입량이 증가 할수록 48시간 후의 silica 농도는 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 두 가지 결과를 바탕으로 잔류 알루미늄과 수중에 존재하는 silica가 반응하여 kaolinite를 형성하거나 kaolinite가 칼륨 이온과 반응하여 muscovite를 형성(Gabelich et al., 2002)하여 탁도가 증가하며 수중의 silica 농도는 낮아진 것으로 판단된다.

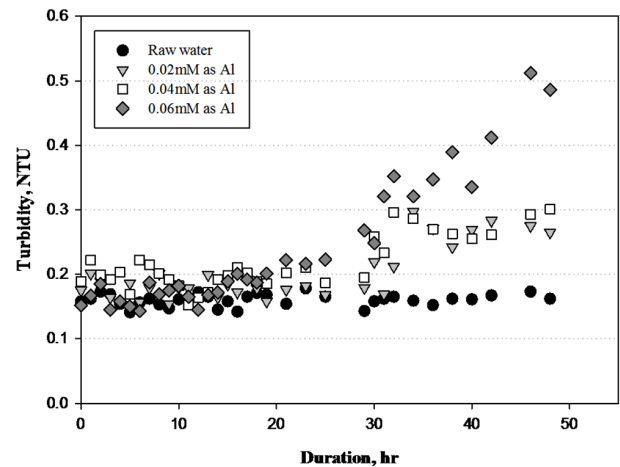


Fig. 4. Degree of scale formation measured with turbidity according to operating time with varied alum doses.

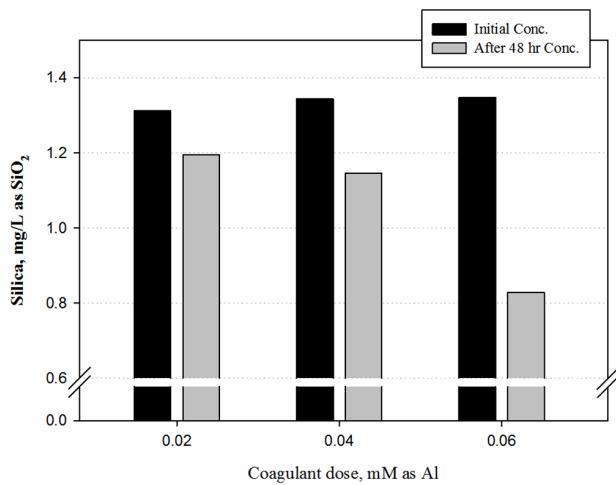
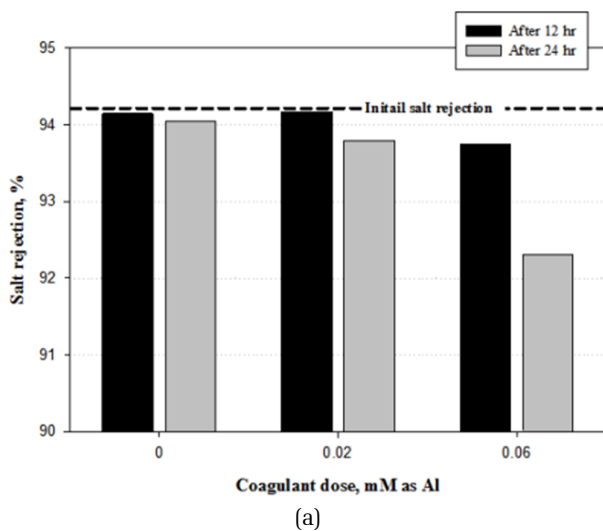


Fig. 5. Residual silica ion concentration according to operating time with varied alum doses.

3.3 잔류 금속염에 의한 역삼투막의 성능 변화

Fig. 6은 잔류 금속염이 역삼투막에 미치는 영향을 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 6의 (a)는 역삼투막의 테스트시간 12시간 및 24시간 후의 염 배제율을 나타낸 것이며, (b)는 누적투과수량에 따른 여과플럭스의 변화를 나타낸 것이다. 초기의 염 배제율은 94.17%과 여과플럭스는 19.6 L/m²·h로 나타났다. 12시간 경과 후 alum을 주입하지 않은 경우와 0.02 mM 주입한 두 경우 모두 염 배제율의 감소는 0.02% 이하로 나타났으나, 0.06 mM 주입한 경우 약 0.5%의 감소를 보였다. 24시간 경과 후 alum을 주입하지 않은 경우에는



0.15% 감소하였으나, alum을 주입한 경우 각각 0.5%, 1.8%의 감소를 보였다. 누적투과수량에 따른 여과플럭스의 변화는 alum을 주입한 경우 보다 alum을 주입하지 않은 경우의 여과플럭스의 감소가 가장 낮게 나타났으며, 0.06 mM을 주입한 경우 보다 0.02 mM을 주입한 경우 여과플럭스의 감소가 낮게 나타났다. 보고된 연구결과(Gabelich et al., 2005)에 의하면 잔류 알루미늄과 silica는 막여과와 같은 처리공정에서 쉽게 통과 된다고 하였다. 일반적으로 무기물에 의한 스케일은 용액 내의 염이 용해도 한계를 넘어서는 경우 침전물을 형성하여 발생하는데(Crittenden et al., 2012), UF막에서 통과된 잔류 알루미늄과 silica는 용해도 한계를 넘지 않은 상태에서 역삼투막에서 상호 반응하여 kaolinite나 muscovite를 형성하여 막에 침착됨으로써 염 배제율 및 여과플럭스의 감소가 나타난 것으로 판단된다 (Gabelich et al., 2002).

3.4 응집 pH 조절을 통한 잔류 알루미늄의 제거 및 역삼투막의 성능 변화

응집 pH는 응집 효율과 알루미늄의 용해도와 관련 있기 때문에 중요하다. pH와 관련된 응집 메커니즘은 charge neutralization과 sweep flocculation이며 각각의 발생 pH 범위는 4~6 및 6~8로 알려져 있다 (Amirtharajah and Mills, 1982). Alum의 경우 잔류 알루미늄의 농도를 낮추기 위해 잔류 되는 알루미늄을 Al(OH)_{3(s)}의 입자상 물질의 형태로 UF막에서 배제하기 위해 알루미늄의

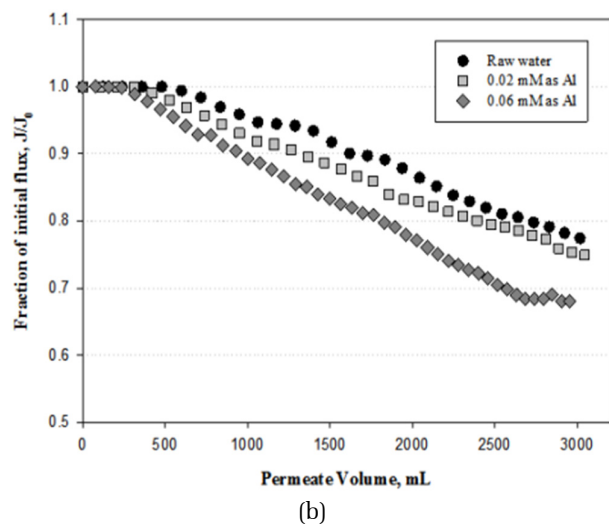


Fig. 6. Effect of SWRO performance by coagulant doses. (a) Change of salt rejection, (b) Change of SWRO membrane flux.

pp. 413-420

pp. 421-428

pp. 429-436

pp. 437-446

pp. 447-456

pp. 457-467

pp. 469-480

pp. 481-489

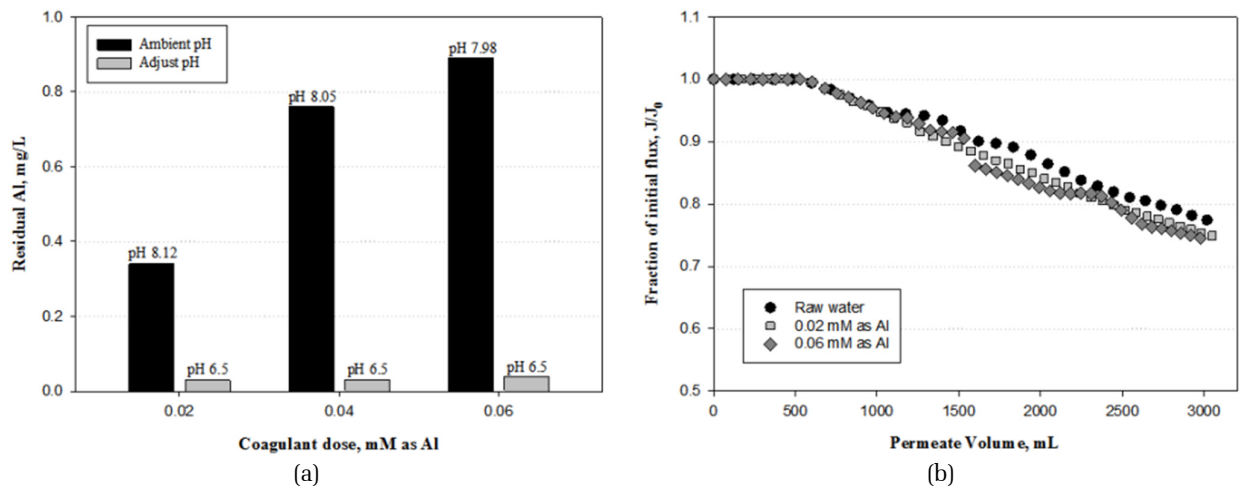


Fig. 7. Effects of pH on residual Al and alum dose on SWRO performance. (a) Change of residual Al, (b) Change of SWRO membrane flux.

최소용해도 pH 범위 인 pH 6.5로 조절한 후 UF막을 통과시킨 후 잔류 알루미늄의 농도와 역삼투막 테스트 결과를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7의 (a)는 pH 조절 없이 UF막을 통과시킨 결과와 pH 6.5로 조절 후의 잔류 알루미늄 농도를 비교한 것이며, (b)는 pH 6.5 조건에서 투과수량에 따른 역삼투막의 여과플럭스 변화를 나타낸 것이다. 먼저 pH를 조절 하지 않은 경우 0.02 mM, 0.04 mM, 0.06 mM의 농도에서 각각 0.34, 0.76, 0.89 mg/L의 잔류 알루미늄이 검출되었으며, pH를 6.5로 조절한 경우 각각 0.03, 0.03, 0.04 mg/L로 0.05mg/L 이하의 농도로 검출 되었다. 이는 역삼투막에 막오염을 유발할 수 있는 ≥ 0.05 mg/L (Gabelich et al., 2002; Butt et al., 1995)의 농도 이하이므로 역삼투막의 유입수에 함유된 Al의 농도로는 적절한 수준으로 판단된다. 또한 누적투과수량에 따른 역삼투막의 여과플럭스 변화는 alum의 주입 유무, 주입량과 상관 없이 유사한 감소를 보였다.

4. 결론

UF막의 전처리로서 alum과 FeCl_3 모두 최적의 탁도 제거 효율을 보이는 주입량은 0.02~0.06 mM로 나타났다. 이때 UF막을 통과한 처리수의 잔류 금속염은 alum의 경우 0.34~0.89 mg/L이 검출되었으며, FeCl_3 의 경우 검출되지 않았다. Alum을 주입한 UF 처리수의 탁도 변화 테스트 결과 48시간 후의 탁도가 2~4 배 상승하는 것을 볼 수 있었으며, 수중에 존재하는

silica의 농도 또한 낮아진 것을 확인할 수 있었다. 이는 잔류 알루미늄과 silica의 반응으로 인해 탁도는 높아지고 수중의 silica농도는 낮아진 것으로 판단된다. Alum을 주입한 UF 처리수의 SWRO 테스트 결과 잔류 알루미늄이 SWRO 유입수에 존재할 경우 24시간 후 염 배제율이 최대 1.8% 감소하였으며, 여과플럭스 감소율 또한 높은 것으로 나타났다. RO막의 fouling에 영향을 주는 잔류 알루미늄을 제어하기 위해 pH 6.5로 조절하여 UF막을 통과시킨 결과 잔류 알루미늄 농도는 0.05 mg/L 이하로 검출되었으며, SWRO 테스트 결과 alum을 주입하지 않은 경우와 주입한 경우 모두 유사한 여과플럭스의 감소를 보였다. 이러한 결과를 바탕으로 Al(III)계 응집제를 해수담수화 공정에서 전처리(응집-UF)에 사용할 경우 잔류 알루미늄에 의한 막 오염이 발생하는 것으로 나타났지만, pH 조절을 통해 잔류 알루미늄을 제어한다면 실험실 또는 파일럿 규모에서의 연구 뿐만 아니라, 대규모 역삼투 담수화 시설에서도 충분히 전처리용 응집제로서 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- Amirtharajah, A., and Mills, K.M. (1982). Rapid-mix design for mechanisms of alum coagulation, *J. Am. Water Work Assoc.*, 74(4), 210-216.
- Bates, W.T. and Cuozzo, R., Hydranautics Nitto group company, <http://membranes.com/knowledge-center/technical-papers/> (June 17, 2019).



- Brehant, A., Bonnelye V., and Perez, M. (2003). Assessment of ultrafiltration as a pretreatment of reverse osmosis membranes for surface seawater desalination, *Water Sci. Technol: Water Supply*, 3(5-6), 437-445.
- Butt F.H., Rahman F. and Baduruthamal U. (1995). Identification of scale deposits through membrane autopsy, *Desalination*, 101(3), 219-230.
- Edzwald, J.K. and Haarhoff, J. (2011). Seawater pretreatment for reverse osmosis: Chemistry, contaminants, and coagulation, *Water Res.*, 45, 5428-5440.
- Gabelich C.J., Chen W.R., Yun T.I., Coffey B.M., and Sufet I.H. (2005). The role of dissolved aluminum in silica chemistry for membrane process, *Desalination*, 180, 307-319.
- Gabelich C.J., Yun T.I., Coffey B.M., and Suffet I.H.M. (2002). Effects of aluminum sulfate and ferric chloride coagulant residuals on polyamide membrane performance, *Desalination*, 150, 15-30.
- Gabelich, C.J., Ishida, K.P., Geringer, F.W., Evangelista, R., Kalyan, M., and Suffet, I.H. (2006). Control of residual aluminum from conventional treatment to improve reverse osmosis performance, *Desalination*, 190, 147-160.
- Gabelich, C.J., Williams, M.D., Rahardianto, A., Franklin, J.C., and Cohen, Y. (2007). High-recovery reverse osmosis desalination using intermediate chemical demineralization, *J. Membrane Sci.*, 301, 131-141.
- Crittenden J.C., Trussell R.R., Hand D.W., and Howe K.J. George Tchobanoglous. (2012). *MWH's Water treatment: principles and design*, 3rd Ed., John Wiley&Sons, Inc., New Jersey.
- Letterman R.D. and Driscoll C.T. (1994). *Control of residual aluminum in filtered water*. AWWA, Denver, Colo.
- Mattheus F.A. Goosen, Shyam S. Sablani, Salha S. Al-Maskari, Rashid H. Al-Belushi, and Mark Wilf. (2002). Effect of feed temperature on permeate flux and mass transfer coefficient in spiral-wound reverse osmosis systems, *Desalination*, 144, 367-372.
- Vedavyasan, C.V. (2007). Pretreatment trends and overview, *Desalination*, 203, 296-299.
- Wilf, M., and Bartels, C., Hydranautics Nitto group company, <http://membranes.com/knowledge-center/technical-papers/> (June 17, 2019).
- 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.

pp. 413-420

pp. 421-428

pp. 429-436

pp. 437-446

pp. 447-456

pp. 457-467

pp. 469-480

pp. 481-489

