

응집제 종류에 따른 RO막 표면 흡착 특성

Characteristics of Adsorption on the RO Membrane Surface by Coagulants Types

정영미¹ · 박찬혁¹ · 이상협^{1,*} · 권지향²

Youngmi Jeong¹ · Chanhyuk Park¹ · Sanghyup Lee^{1,*} · Jihyang Kweon²

1 한국과학기술연구원 환경기술연구원

2 건국대학교 공과대학 환경공학과

(2007년 6월 8일 논문 접수; 2007년 8월 6일 최종수정논문 채택)

Abstract

A coagulation process for RO (reverse osmosis) membrane pretreatment system was an effective technology to remove colloidal and particulate matters. However, coagulant residuals from the pretreatment process may negatively affect RO membrane performance. The bench-scale coagulant exposure study was performed to investigate the effect of their residual on adsorbed mass which related to the membrane performance. Coagulant addition in this study ranged from 0 to 5mg/L ferric chloride, alum, and 2mg/L cationic polymer (poly-di-methyldiallyl ammonium chloride) as coagulant aids. This results showed that adsorbed mass is not significantly increased during short-time period, however, accumulated mass of coagulants on the membrane surface is significantly increased during long-time experimental period. The effect of pH on coagulants adsorption characteristics was significantly differed due to the electrostatic repulsive interactions between soluble coagulants and membrane surface charge. This data suggest that the RO membrane performance of drinking water treatment plant could be decreased by adsorption of residual coagulants when applied for the coagulant pretreatment process.

Key words: Coagulation Process, Coagulants, Aluminum Sulfate, Ferric Chloride, Adsorption

주제어: 응집 공정, 응집제, 황산알루미늄, 염화철, 흡착

1. 서 론

최근 국내 뿐만 아니라 전세계적으로 물 부족 문제가 심각하게 대두되고 있어 대체 수자원 개발 및 확

보에도 다양한 노력을 기울이고 있다(건설교통부, 2001). 특히, 음용수 확보에 있어서는 해수담수화와 같은 사업이 대안으로 제시되고 있으며, 세계 담수시장에서는 전통적인 증발법과 더불어 RO(reverse osmosis)막 방식의 시장도 급격히 성장하고 있다

*Corresponding author Tel: +82-2-958-6945, FAX: +82-2-958-5839, E-mail: yisanghyup@kist.re.kr Lee, S.H.)

(Pearce, 2007). RO막을 활용한 수처리 기술은 적용 범위가 점차 확대되고 있으나, 막오염(membrane fouling)에 대한 문제로 인하여 실제 플랜트 설계에 어려움이 있다. 따라서, 막오염을 제어하기 위한 막오염 예측 방법과 전처리 공정의 개발은 필수적이며(Boerlage et al., 2003; Park et al., 2006), 미국 tampa bay의 예에서 나타난 바와 같이 전처리 기술은 전체 막여과 공정의 성패를 좌우할 수 있는 중요한 사항이다(Wilf and Klinko, 2001). 한편, 미국 내에서의 전처리 시장은 2012년까지 연평균 11.7%의 성장을 보일 것으로 예상되고 있으며(Grobal Water Intelligence, 2004), 원수의 성상에 적절한 최적의 전처리 공정 선정에 관한 연구가 활발히 진행중이다(Vrouwenvelder et al., 2003). 전처리 공정으로는 원수 내 콜로이드 물질을 제거하기 위해 정밀여과나 한외여과를 이용하기도 하지만(Knops et al., 2007), 전통적인 물리화학적 처리방법인 응집 공정도 선호되고 있다(Wiesner and Aptel, 1996; Cho et al., 2006).

응집 공정에 사용되는 응집제로는 표면적이 상대적으로 넓고 흡착효율이 뛰어난 흡착제인 알루미늄 계통(alum, poly aluminum chloride)과 철 계통(ferric sulfate, ferric chloride)의 응집제를 주로 사용하며, 이를 간략히 요약하여 Table 1에 나타내었다. 원수 내의 콜로이드 물질 표면은 대부분 음전하를 띠고 있으므로, 응집 공정에서는 다가(multi-valent)의 양이온을 지닌 응집제를 사용하여 큰 플록형성을 유도한다(Gregory, 1988). 하지만, 이 과정에서 응집제에 포함된 양이온과 응집 효과를 극대화하기 위해 첨가하는 응집보조제에 의해 막의 성능이 저하되는 것으로 알려져 있다(Gabelich et al., 2002). 특히, 양이온의 폴리머 계통을 응집보조제로 사용하는 경우에 막 성능에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있으나(Ning and Shen, 1998), 저농도(0.5~1.0mg/L)에서는 큰 영향이 없는 것으로 알려져 있다(Gabelich et al., 2002). 이와 같이 응집제에 의한 막 성능 저하에 관한 연구는 체계적으로 진행되지 않았으며, 원인을 명확히 파악할 수 없는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 응집제 종류에 따라 응집제가 RO막 표면에 흡착되는 현상(adsorption)과 응집제와 막 표면 전하차에 의한 전기적 반발 상호작용(electrostatic repulsive interaction) 영향을 고려하였다.

Table 1. Advantages and disadvantages of coagulants used in this study.

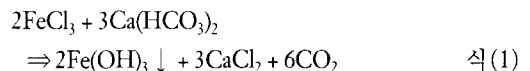
응집제 종류	장 점	단 점
ferric chloride (FeCl ₃ · 6H ₂ O)	· flocc이 무겁고 침강 속도 빠름 · 적정 pH 범위가 넓음 (pH 4-12)	· 철 이온이 잔류하여 처리수 색도 유발 · 부식성이 강함
alum (Al ₂ (SO ₄) ₃ · 14H ₂ O)	· 탁도, 세균, 조류 등 거의 모든 현탁물질, 부유물 제거 유효 · 독성이 없어 대량 주입 가능 · 결정체가 부식성이 없어 취급이 용이함	· 생성된 flocc의 비중이 가벼움 · 적정 pH 범위가 좁음(pH 4.5-8.5) · 알칼리 조제 또는 응집보조제의 첨가가 별도로 필요함

본 연구에서는 정수처리 공정에서 주로 사용되는 응집제(ferric chloride, alum)를 선택하였으며, 막 표면을 대상으로 batch식 흡착 실험을 수행하고, 전기적 상호작용 등을 분석하였다. 이는 RO막의 전처리 기술로 응집 공정을 조합하여 수처리에 적용하는 경우, 기본적인 막오염 특성을 제시하는 기초 자료로 활용될 것이다.

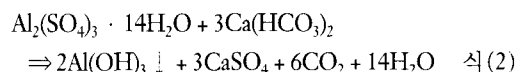
2. 실험 재료 및 방법

2.1. 응집제

본 연구에서 사용한 응집제는 알루미늄 계열인 alum(Al₂(SO₄)₃ · 14H₂O)과 철 계열인 ferric chloride(FeCl₃)이다. 우선, ferric chloride의 경우는 식(1)과 같은 반응 통해 침전물(Fe(OH)₃)을 생성하며, pH에 의해 Fig. 1(a)와 같은 형태로 존재한다.



반면, alum의 경우 물에 용해되면 다음과 같은 식(2)를 통해 침전물(Al(OH)₃)이 생성되며, pH에 따라 Fig. 1(b)와 같은 다양한 형태로 존재하게 된다.



본 연구에서 사용한 응집제는 알루미늄 이온과 철

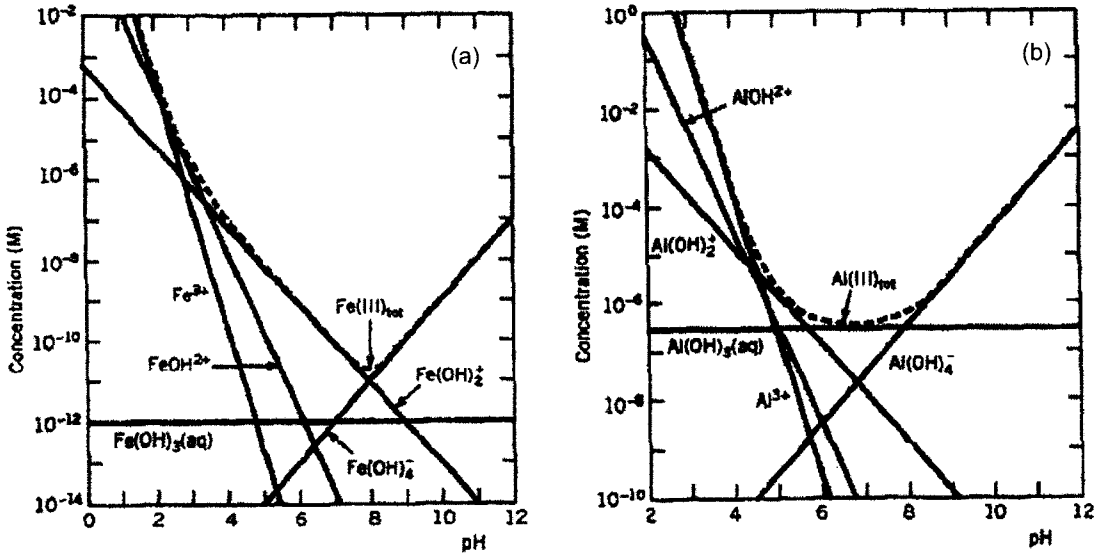


Fig. 1. Solubility of amorphous (a) Fe(OH)₃ and (b) Al(OH)₃.

이온의 농도를 각각 초기농도 5mg/L로 조정하여 사용하였으며, 응집제의 농도는 DR2500(HACH Company, USA)을 사용하여 철은 HACH Method 8008, 알루미늄은 HACH Method 8012법으로 측정하였다. 한편, 응집보조제로는 양이온 계통의 폴리머로 poly-DADMAC(diallyldimethyl ammonium chloride)를 사용하였다. Fig. 1에서와 같이 pH 변화에 의해서 다양한 형태로 전환됨으로, 이에 따라서 RO막에 미치는 영향이 다를 것으로 예측하여 pH 변화에 따른 흡착 정도 및 전기적 상호작용을 조사하였다.

2.2. RO막 특성분석

본 연구에 사용한 RO막은 (주)새한에서 제작한 상업용 thin film composite(TFC) polyamide RO막이며, 막 표면 특성으로 거칠기(roughness), 전하(charge), 친/소수성(hydrophobicity) 여부를 측정하였다. 표면 거칠기는 AFM(Atomic Force Microscopy, Digital Instruments Nanoscope, USA)을 사용하여 측정하였으며, RMS(root mean square)값으로 87.62nm가 측정되었다. 표면 전하는 SPA(Streaming Potential Analysis, BI-EKA, Brookhaven Instruments, USA) 방법으로 pH 변화에 따라 측정하였으며(Fig. 2), iep(isoelectric point)값은 pH 5.3으로 나타났다. 막의 친/소수성 여부는 goniometer(Ramehart Company)를

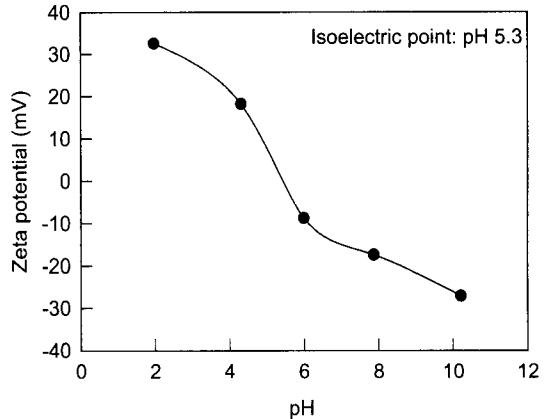


Fig. 2. Zeta potential measurements of RO membrane surface under various pH conditions.

이용한 분석방법에 의하여 판단하였으며, 막 표면에 물을 떨어뜨려 생성되는 접촉각(contact angle)이 36.5°로써 막 표면은 소수성에 가까운 특성을 지니는 것으로 나타났다.

2.3. 응집제 노출 시험

응집제 노출 시험은 응집 공정에서 잔류된 응집제가 RO막 표면에 흡착되는 현상을 체계적으로 분석하기 위하여 수행하였다. 일반적인 재래식 정수처리공정에서 주로 사용하는 ferric chloride와 alum을 노출

시험의 응집제로 사용하였으며, 본 노출 시험에서는 각각 5mg/L as Fe(III)과 Al(III)으로 초기 농도를 설정하였다. 한편, 응집제와 함께 사용되는 응집보조제가 RO막의 응집제 흡착 특성에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 응집보조제로는 양이온 계통의 폴리머인 poly-DADMAC(poly-dia-lyldimethyl ammonium chloride)를 2.0mg/L의 농도로 사용하였다. 우선, 응집제 종류와 pH가 RO막 흡착에 미치는 영향을 살펴보고자 하였으며, 그 후에는 응집보조제에 의한 흡착 영향을 살펴보고자 하였다. 응집제 노출 시험에 사용한 막은 RO막으로 직경이 1.8inch, 길이가 12inch인 나선형 모듈(spiral wound module)을 평막 상태로 절단하였으며, 유효면적을 5cm², 10cm²으로 사용하였다. 노출 시험은 250mL의 갈색 scott병에 각각의 노출 농도에 해당하는 응집제와 응집보조제 용액을 채우고 절단한 막을 넣어 막표면과 쉽게 접촉할 수 있도록 일정한 속도(100rpm)로 shaking하였다. 노출 시험은 1주일 동안 지속되었으며, 시간에 따라 감소하는 응집제 농도를 일정하게 유지하기 위해 하루에 한 번씩 새롭게 제조한 용액으로 교체하였다. 응집제 노출에 의한 RO막의 표면 분석을 위해 노출 시험이 끝난 후에는 일정한 수분상태를 유지하여 4°C로 냉장 보관하였다. 응집제 노출에 의한 표면 변화는 SEM(Scanning Electron Microscopy)의 EDS(Energy Dispersive Spectrocope)분석을 통해 RO막 표면에 흡착된 성분을 관찰하였으며, FT-IR(Infinity Gold 60AR, Thermo Mattson, USA)을 이용하여 RO막의 functional group 변화를 조사하였다.

3. 결과 및 토의

3.1. 막 면적에 따른 응집제의 흡착 특성

응집 공정에서 사용되고 남은 잔류 응집제가 막여과 공정으로 유입되면 막 표면에 흡착되어 성능에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Gabelich et al., 2002). 그러므로, 응집제가 RO막에 흡착되는 현상에 전통적인 흡착 이론의 적용 여부를 판단하고자 Freundlich와 Langmuir 식을 사용하였다. 그러나, 응집제의 노출 시험결과에서 단기간에 흡착되는 현상을 보이지 않아, 전통적인 흡착 이론은 본 연구결과에 적합하지 않은 것으로 판단하였다. Table 2는 1일 동

Table 2. Variations of adsorbed coagulant mass with time. (Initial Concentration = 5.0 mg/L, pH = 7.0)

(단위: mg/L)

Time(min)	Ferric chloride		Alum	
	5cm ²	10cm ²	5cm ²	10cm ²
0	-	-	-	-
20	0.2	0.4	0.1	-
40	0.2	0.4	0.1	0.1
60	0.2	0.5	0.1	0.1
80	0.1	0.4	0.2	0.1
160	0.2	0.5	0.1	0.2
240	0.2	0.5	0.1	0.1
1440	0.3	0.5	0.1	0.1

안의 응집제 노출 시험 결과를 나타낸 것이다. 단기간(1일)의 흡착 실험에서 pH 7로 변화하지 않았으며, 시간 경과에 따라 응집제의 잔류농도를 측정하였다. 그 결과, Alum 응집제의 경우는 ferric chloride에 비하여 시간이 경과해도 응집제 농도의 변화가 거의 없었으며, 이는 응집제가 막 표면에 흡착되지 않는 것으로 판단된다. 특히, ferric chloride의 경우에는 면적이 증가함에 따라 흡착되지 않은 잔류농도가 다소 감소하는 결과를 보였으며, 단위 면적당 흡착량은 0.015~0.108mg/cm²으로 alum의 단위 면적당 흡착량(0.003~0.004mg/cm²)보다 큰 것으로 나타났다.

막 표면에의 흡착량을 정확히 확인하기 위해, 막 표면의 성분 변화를 파악할 수 있는 EDS 분석을 수행하였다. Fig. 3과 같이, RO막 표면이 지니고 있는 초기 성분과 노출 시험 후의 성분 변화가 없음을 통해 흡착된 양이 거의 없음을 확인하였다.

한편, 응집제 흡착에 의한 functional group 변화를 관찰하기 위해 FT-IR 분석을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Polyamide계 막의 주요 흡수 피크는 amide group의 C=O 피크인 1660cm⁻¹과 N-H 피크인 1540cm⁻¹이다. 또한, polysulfone 계열의 지지층으로 인하여, 1586, 1503, 1488, 1242cm⁻¹가 주로 나타나며, 1488cm⁻¹에서의 C=C bond와 1400~1180 cm⁻¹에서의 esters, ethers, C-O bond에 의한 피크 등이 나타난다(Gabelich et al., 2006; Craver, 1982). 응집제 노출 시험 후, 막 표면의 IR 분석결과, ferric sulfate의 경우 1580, 1480, 1230cm⁻¹, alum의 경우 1580, 1480, 1230cm⁻¹에서 피크가 나타나, polyamide

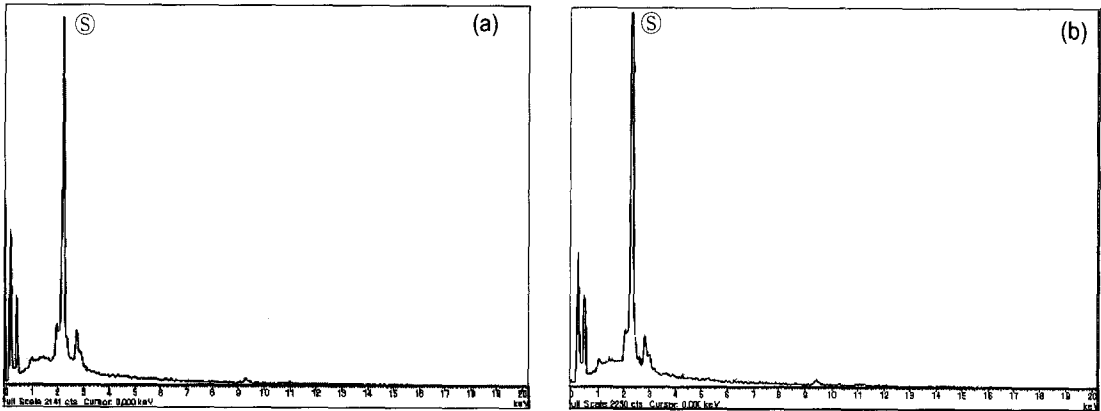


Fig. 3. EDS analysis for adsorbed mass during coagulant exposure experiments: (a) Virgin membrane; (b) Exposed membrane.

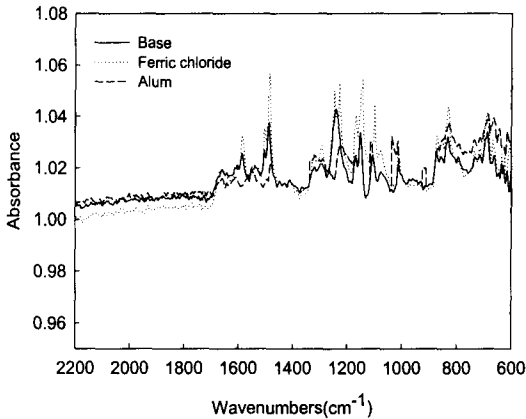


Fig. 4. FT-IR spectra of polyamide membranes exposed to ferric sulfate and alum coagulants.

계열이 지닌 막 특성과 큰 변화가 없음을 관찰하였으며, 이는 응집제의 흡착이 일어나지 않은 것으로 판단할 수 있다.

3.2. pH에 따른 응집제의 흡착 특성 및 응집보조제의 영향

2일간의 노출 시험을 통해 응집제와 더불어 응집보조제가 RO막 표면에 미치는 영향을 pH에 따라 관찰하였다. Fig. 5(a)는 ferric chloride를 사용한 결과로써, pH7에서 약 30%의 흡착을 확인하였으며, pH4에서는 상대적으로 적게 흡착되는 것으로 나타났다. pH7에서는 $Fe(OH)^{2+}$ 가 dominant하여 (-) 전하를 띠는 RO막과 전기적 반발력이 감소하여 흡착량이 증가하는 것으로 판단된다. 한편, 응집보조제에 의한 영향을 관찰한 결과, 응집제만 노출시킨 시험결과와 유사

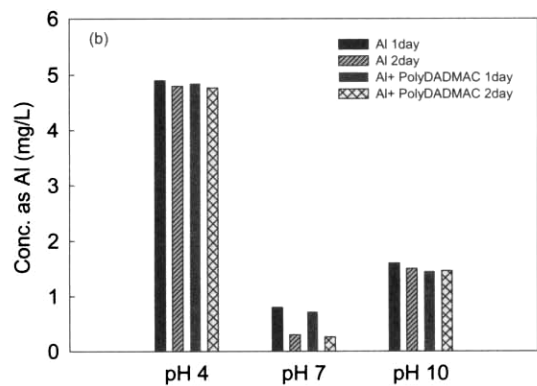
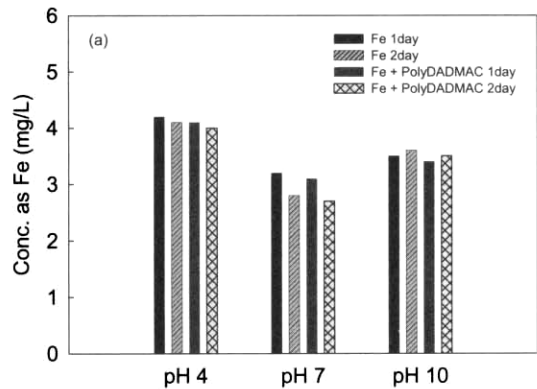


Fig. 5. Effect of coagulant and coagulant aids on adsorbed mass under various pH conditions: (a) ferric chloride; (b) alum.

하게 나타나, 기존 문헌에서의 결과보다 높은 농도 (2mg/L)에서 노출되었음에도 불구하고 응집제가 RO막에 흡착되는 양에 큰 영향을 미치는 않는 것으로 확인하였다.

Fig. 5(b)는 alum 응집제를 대상으로 막에 흡착되는 정도를 조사한 결과이다. pH에 의한 영향을 살펴본 결과, ferric chloride의 경우와 전체적으로 유사한 경향을 나타냈다. Alum은 pH 7에서 $Al(OH)_3$ 형태가 dominant하기 때문에, 물에 용해되어 생성되는 alum의 침전물(식(2))에 의해 흡착되는 정도가 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 반면, pH 4에서는 Al^{3+} 가 dominant하며 막 표면전하가 +18mV(pH 4)이므로 전기적 반발력이 증가하여 흡착량이 극히 적은 것을 알 수 있다. 한편, Alum 응집제를 사용한 경우에 있어서도 응집보조제는 응집제의 흡착량에 큰 영향을 미치지 않았다.

3.3. 장기간 응집제 노출에 따른 흡착 특성

응집제 노출에 의한 영향을 보다 확실히 파악하기 위해, 장기간 노출에 따른 흡착 특성을 평가하였다. 1주일간 지속적으로 각각의 응집제 농도에 노출시킨 다음, pH를 조절하여 흡착량의 변화를 관찰하였다 (Fig. 6). Fig. 6(a)는 ferric chloride의 장기간 노출에 의한 흡착량 변화를 나타낸 것이다. 시간이 경과함에 따라 응집제 농도가 감소하여 막 표면에 흡착되는 경향이 나타나며, 특히 pH 7에서는 흡착이 급격히 일어나는 현상을 나타냈다. 이는 pH 7에서 ferric chloride 형태가 주로 $Fe(OH)_2^+$ 로 존재하게 되는데 (Fig. 1(a)), pH 7에서 RO막의 표면 전하가 -15mV를 띄므로, 전기적 반발력이 감소하여 흡착이 크게 진행됨을 알 수 있다. 반면, pH 4에서는 ferric chloride가 $FeOH^{2+}$, Fe^{3+} 형태로 존재하는데, RO막의 표면 전하가 pH 4에서 +18mV이므로 전기적 반발력이 증가하여 상대적으로 흡착이 덜 발생하게 된다. 따라서, ferric chloride가 잔류되어 RO막에 유입될 경우에 pH 7에서 흡착에 의한 영향을 크게 고려해야함을 알 수 있으며, pH 4 또는 10에서도 단기적으로는 응집제의 흡착이 나타나지 않아 막여과 공정 효율에 영향이 없을 수 있으나, 장기적 측면에서는 잔류 응집제의 흡착에 의해 성능이 저하될 수 있음을 간과할 수 없다.

Fig. 6(b)는 alum의 장기간 노출에 의한 흡착량 변화를 나타낸 것이다. pH에 의한 영향은 ferric chloride의 경우와 유사한 경향을 보였으나, 흡착 정도는 크게 차이를 알 수 있다. 특히, pH 7에서 1일 정도가 경과하여도 대부분의 잔류 응집제가 RO막에 흡착되

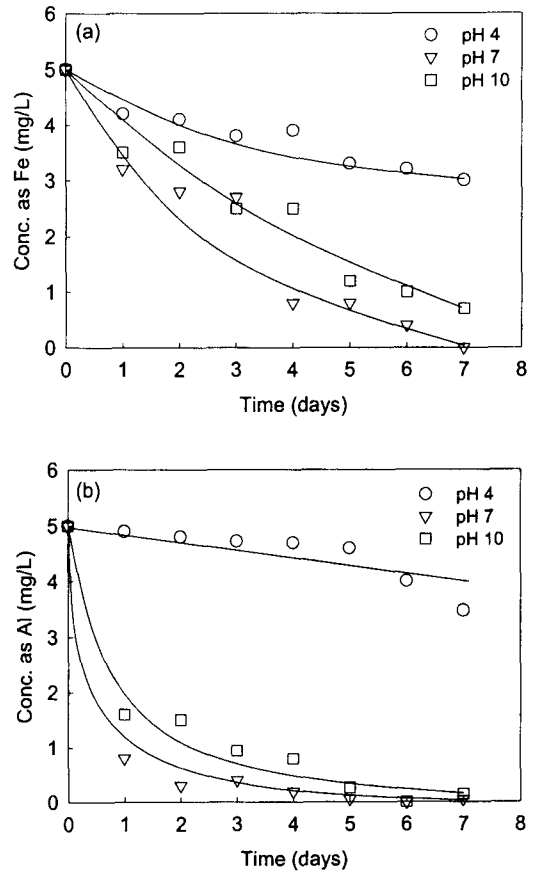


Fig. 6. A long-time exposure experimental of coagulants under various pH conditions: (a) ferric chloride; (b) alum.

는 것을 알 수 있다. 이는 pH 7에서 alum 응집제는 주로 $Al(OH)_3$ 상태로 존재하므로 (Fig. 1(b)), 침전물 형성에 의해 막 표면에 침전형태로 축적되어 나타나는 것으로 판단된다. 한편, pH 10에서 alum 응집제는 $Al(OH)_4^-$ 로 존재하기 때문에, -27mV를 띄는 RO막과의 전기적 반발력이 생성되며, pH 7과 비슷한 경향으로 흡착되었음을 알 수 있다. 반면, pH 4에서는 흡착이 거의 발생하지 않는데, alum은 pH 4에서 Al^{3+} , $AlOH^{2+}$, $Al(OH)^{2+}$ 의 양이온이 dominant하므로, pH 4에서 +18mV를 띄는 RO막 표면과의 큰 전기적 반발력으로 인해 흡착이 진행되지 않음을 확인할 수 있다. 따라서, alum을 사용한 응집 공정의 경우에서 잔류 응집제가 RO막으로 유입되면, pH를 7 또는 10으로 운전할 경우, 단기에도 흡착에 의해 막 성능이 저하될 수 있다. RO막의 막오염 방지를 위해 도입되는 전처리 공정의 하나로 응집 공정이 사용될

때, 이러한 응집제 사용으로 인해 잔류 응집제가 RO 막에 흡착되어 성능이 저하되는 등에 관한 연구의 필요성을 인식할 수 있으며, 본 연구를 바탕으로 실제 RO막의 성능 변화 등을 장기간 운전을 통해 체계적인 연구결과를 도출하고 있다.

4. 결 론

RO 막여과 공정의 전처리 공정으로 사용가능한 응집공정은 입자성 물질 또는 콜로이드 물질을 제어하기 위한 효과적인 방법이지만, 잔류 응집제에 의해 막 성능이 저하되는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 재래식 정수처리공정에서 흔히 사용되는 ferric chloride와 alum 응집제가 RO막에 노출되었을 경우, 막 성능 저하 원인을 규명하는 기초 자료로써, 흡착의 영향을 중점적으로 고려하였다. 그 결과, 단기간(1일)에는 응집제가 막 표면에 흡착되지 않았으며, 이를 EDS분석과 FT-IR 결과를 통해 확인하였다. 한편, 기존 문헌에서보다 높은 농도의 응집보조제를 사용하여도 응집제의 흡착양에는 변함이 없었다. pH에 의한 영향을 살펴본 결과, pH에 따라 응집제의 solubility가 달라지며 해당 pH에서 막 표면의 전하가 변하므로 전기적 반발력에 의해 흡착 정도에서 차이를 보이는 것으로 나타났다. pH 7에서 ferric chloride는 주로 $Fe(OH)_2^+$ 의 형태로 존재하며, alum 응집제는 $Al(OH)_3$ 상태로 존재하는데, pH 7에서 RO막의 표면 전하는 $-15mV$ 를 띄므로, 전기적 반발력이 감소하여 흡착이 크게 진행되고, alum 응집제의 침전물 형성에 의해 흡착양이 증가함을 보였다. 반면, pH 4에서는 RO막의 표면 전하가 양전하($+18mV$)를 띄고 있으며, 응집제가 각각 $FeOH^{2+}$, Fe^{3+} , Al^{3+} , $AlOH^{2+}$, $Al(OH)^{2+}$ 등의 양이온이 dominant하여, 전기적 반발력이 크게 작용하므로 흡착이 거의 발생하지 않은 것으로 판단된다. 하지만, 이러한 경우 실제 응집-RO막 공정에서 응집제에 막을 장기간 노출 시 흡착이 지속적으로 진행되어 궁극적으로 RO막의 성능 저하에 영향을 미칠 것으로 사료된다. 그러므로 pH 조절을 통해 막 표면의 흡착양을 최소화해야 하며, 실제 응집-RO막 조합 공정 운전을 통해 막 성능 저하에 대한 장기적인 운전결과 도출과 이에 대한 체계적인 연구가 필요하다.

참고문헌

1. 건설교통부 (2001) 수자원 장기 종합 계획.
2. Pearce G.K. (2007) The case for MF/UF pretreatment to RO in seawater applications, *Desalination*, **203**, pp. 286-295.
3. Boerlage S.F.E., Kennedy M., Aniyi M.P. and Schippers J.C. (2003) Applications of the MFI-UF to measure and predict particulate fouling in RO systems, *Journal of Membrane Science*, **220**, pp. 91-116.
4. Park C., Kim H., Hong S. and Choi S.-I. (2006) Variation and prediction of membrane fouling index under various feed water characteristics, *Journal of Membrane Science*, **284**, pp. 248-254.
5. Wilf M. and Klinko K. (2001) Optimization of seawater RO systems design, *Desalination*, **138**, pp. 299-306.
6. Global Water Intelligence (2004) *Desalination Markets: 2005-2015*.
7. Vrouwenvelder J.S., Kappelhof J.W.N.M., Heijman S.G.J., Schippers J.C. and Kooij D. (2003) Tools for fouling diagnosis of NF and RO membranes and assessment of the fouling potential of feed water, *Desalination*, **157**(1-3), pp. 361-365.
8. Knops F., Van Hoof S., Futselaar H. and Broens L. (2007) Economic evaluation of a new ultrafiltration membrane for pretreatment of seawater reverse osmosis, *Desalination*, **203**, pp. 300-306.
9. Wiesner M.R. and Aptel P. (1996) *Mass transport and permeate flux and fouling in pressure-driven processes. Water Treatment: Membrane Processes*, McGraw-Hill, New York.
10. Cho M.-H., Lee C.-H. and Lee S. (2006) Effect of flocculation conditions on membrane permeability in coagulation-microfiltration, *Desalination*, **191**, pp. 386-396.
11. Gregory J. (1988) Colloidal interactions, *Materials Science Forum*, **25-26**, pp. 125-144.
12. Gabelich C.J., Yun T.I., Coffey B.M. and "Mel" Suffet I.H. (2002) Effects of aluminum sulfate and ferric chloride coagulant residuals on polyamide membrane performance, *Desalination*, **150**, pp. 15-30.
13. Ning R.Y. and Shen P.T.L. (1998) Observations from analysis of reverse osmosis membrane foulants, *Ultrapure Water*, **15**, pp. 37-40.
14. Gabelich C.J., Ishida K.P., Geringer F.W., Evangelista R., Kalyan M. and "Mel" Suffet I.H. (2006) Control of residual aluminum from conventional treatment to improve reverse osmosis performance, *Desalination*, **190**, pp. 147-160.
15. Craver C.D. (1982) *The Coblenz Society Desk Book of Infrared Spectra*, 2nd edition, The Coblenz Society, Kirkwood, MO.