

## 계면활성제를 첨가한 미셀 형성 세라믹 정밀여과에 의한 용존 철 이온 제거

박진용\*\*\*† · 유병권\*

\*한림대학교 환경생명공학과  
200-702 강원도 춘천시 한림대학길 39  
\*\*한림대학교 에너지·환경연구소  
200-702 강원도 춘천시 한림대학길 39  
(2009년 3월 6일 접수, 2009년 3월 20일 채택)

## Removal of Aqueous Iron Ion by Micellar Enhanced Ceramic Microfiltration Adding Surfactant

Jin Yong Park\*\*\*† and Byeong Gwon Yu\*

\*Department of Environmental Sciences & Biotechnology, Hallym University, 39 Hallymdaehak-gil, Chuncheon, Gangwon-do 200-702, Korea

\*\*Institute of Energy & Environment, Hallym University, 39 Hallymdaehak-gil, Chuncheon, Gangwon-do 200-702, Korea

(Received 6 March 2009; accepted 20 March 2009)

### 요 약

본 연구에서는 공업용수 중에 미량 함유될 수 있는 철 이온을 제거하기 위해 음이온 계면활성제 SDS를 주입하여 미셀을 형성한 후, 미셀과 철 이온이 결합된 응집체를 관형 세라믹 정밀여과막으로 배제하였다. 철 모사용액을 대상으로 SDS 농도가 철과 SDS 제거율에 미치는 영향을 알아본 결과, 철의 제거율은 SDS의 임계미셀농도(CMC)인 8.00 mM에서 가장 높은 92.26%를 나타내었고, SDS 제거율은 칼슘 이온 제거 결과보다 다소 높은 61.10%를 보였다. SDS의 농도가 증가함에 따라 최종 막오염에 의한 저항  $R_f$ 가 증가하여 4 mM일 때 가장 높은 값을 보이다가 10 mM에서 가장 낮은 값을 나타내었다. SDS 10 mM인 조건에서 최종 투과선속  $J_{180}$ 가 가장 큰 값을 나타냈었고, 결국 가장 높은 총여과부피를 얻을 수 있었다. CMC 8 mM의 경우 운전시간 80분까지는 10 mM과 동일하게 낮은  $R_f$  값을 보이다가, 120분까지 급격하게 증가하다가 다시 180분까지 서서히 증가하는 경향을 보였다.

**Abstract** – In this study sodium dodecyl sulfate (SDS), which was anionic surfactant, was added for forming micelles to remove iron ion that could be contained with small amount in industrial water. Then aggregates binding between iron ions and micelles were rejected by a ceramic microfiltration membrane. As result of SDS concentration effect on removal rates of iron and SDS in modified iron solution, the removal rate of iron was the highest value of 92.26% and the removal rate of SDS was 61.10% a little higher than the result of calcium ion at 8 mM which was CMC (Critical micelle concentration) of SDS. As final resistance of membrane fouling  $R_f$  increased the more at the higher SDS concentration, it showed the highest value at 4 mM and the lowest at 10 mM of SDS. The final permeate flux  $J_{180}$  had the highest value and the largest total permeate volume could be finally acquired at SDS 10 mM. In case of CMC 8 mM, low  $R_f$  was shown as same as that of 10 mM until 80 minutes of operation, and tended to increase dramatically to 120 minutes and increase slowly again until 180 minutes.

Key words: Micelle, Ceramic Membrane, Iron, Surfactant, Microfiltration

### 1. 서 론

경제 발전과 더불어서 수질오염과 수자원의 부족을 해결하기 위해 산업폐수의 재활용율을 높이고 중수시설의 확충이 요구되어지고 있다. 이러한 목적을 달성하기 위해 최근 막 분리 공정의 응용 범위가 증가함에 따라 다양한 분리막에 대한 연구가 시도되고 있다.

또한, 다양한 용도의 고분자 분리막 및 세라믹 분리막, 금속막 등이 개발되어서 실용화되어 가고 있다. 이러한 분리막은 해수 담수화, 폐수의 재이용을 위한 고도 수처리 방법으로 사용되고 있다. 한편, 공업용수에 포함된 철 이온에 의해 시설 관로 내에 스케일 현상이 일어나기도 한다. 이러한 스케일 현상은 응축기, 증발기, 냉각탑 및 보일러 등과 같은 각종 열교환기 열전달 성능을 급격하게 감소시키며, 또한 유동저항의 증가로 인한 급격히 압력 손실을 초래할 수 있다. 또한, 열전달 표면에 축적되는 스케일의 양은 물속에 들어있는 미네랄 이온의 농도와 표면온도 pH, 시간,

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: jypark@hallym.ac.kr

\*이 논문은 서울대학교 최창균 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

유동속도 및 함유된 불순물의 양과 같은 작동 조건에 따라 달라지게 된다[1].

분리막 공정으로 수중의 다가 양이온을 제거하고자 할 때, 다가 양이온의 대부분은 MF 및 UF 분리막의 세공보다 작은 크기를 가지고 있기 때문에, 주로 NF 및 RO 공정이 사용된다. 하지만, NF 및 RO 공정은 높은 압력에서 운전되기 때문에 에너지 소모가 많고 처리 용량에도 한계가 있다. 따라서 NF 및 RO 공정에서 이러한 단점을 보완하기 위해 제안된 기술이 계면활성제를 이용한 미셀 한외여과(MEUF, Micellar-enhanced ultrafiltration) 공정이다[2].

MEUF 공정은, 임계미셀농도(Critical micelle concentration, CMC)보다 높은 농도의 음이온 계면활성제를 수중에 주입하면 미셀(micelles)을 형성한다. 이러한 미셀 표면은 높은 전하밀도(charge density)와 높은 절대 전기포텐셜(electrical potential)을 가진다. 따라서, 수중의 다가 양이온은 정전기적으로 미셀 표면에 흡착하거나 결합하여 거대분자를 형성한 후 미셀들이 다시 응집체(Aggregate)를 이루어, UF 공정에 의해 배제될 수 있다고 보고되었다[3]. 이와 같은 MEUF 공정은 1~5 bar 정도의 낮은 압력에서 이루어지므로 에너지 소비가 낮으며, RO 및 NF 공정 정도의 높은 제거율을 얻을 수 있다. 그리고 RO 및 NF보다 단위 면적 당 투과량이 많기 때문에 처리 비용이 적게 든다[2]. 한편, 본 연구실에서 지하수 내 칼슘 이온을 제거하기 위해 SDS를 주입한 후 세라믹 분리막으로 제거한 연구 결과[4]를 발표한 바 있다.

한편, 분리막 공정의 여러 가지 장점에도 불구하고 아직까지 막 오염 현상은 투과선속(Permeate flux,  $J$ )을 감소시켜 효율적인 분리막 활용에 큰 장애가 되고 있다. 막오염을 일으키는 주요 원인은 막의 종류, 공급액의 성질, 운전조건 등을 들 수 있으며 이에 따른 투과유속의 감소원인으로 막의 압밀화 및 입자의 침전, 흡착, 석출, 폐쇄와 같은 기공막힘(Pore blocking)[5, 6]과 케이크(Cake)층[7], 젤(Gel)층[8]과 같은 부착층으로 인한 오염, 농도분극[9] 현상 등으로 알려져 있다. 따라서 막오염을 제어하기 위하여 초음파 및 물 역세척, 역진동과 같은 기술들이 전 세계적으로 다양한 원수를 대상으로 연구되어 왔다[10-12]. 또한, 분리막 공정의 응용성은 분리막의 특성에 의하여 좌우될 수 있는데 현재 주로 사용되고 있는 유기질 막은 열적, 기계적, 화학 및 생물학적 안정성이 낮고 세척에 의한 재생성이 용이하지 않기 때문에 차후 이들을 대체하여 모든 조업조건 하에서 효율적으로 장시간 사용될 수 있는 세라믹 멤브레인의 개발이 요구되고 있는 실정이다[13]. 일반적으로 세라믹 분리막은 유기질 막에 비해 기계적 강도와 화학적 안정성이 우수하여 장시간 사용 가능하기 때문에, 비용 절감에 큰 효과가 있어 수처리 분야 적용에 꾸준히 연구되고 있다[14-16].

본 연구에서는 공업용수 중에 미량 함유될 수 있는 철 이온을 제거하기 위해 음이온 계면활성제 SDS를 주입하여 미셀이 형성된 후, 철 이온과 미셀들이 결합된 응집체를 관형 세라믹 정밀여과막으로 배제하였다. 철의 농도 및 막간 압력차, 유량이 일정한 실험 조건에서 철 모사용액을 대상으로 SDS 농도가 철과 SDS 제거율에 미치는 영향을 알아봄으로써 최적의 SDS 농도를 도출하였다. 실험 결과를 직렬여과저항 모델을 사용하여 해석한 후, 막오염에 의한 저항(Resistance of membrane fouling,  $R_f$ ), 무차원한 투과선속(Dimensionless permeate flux,  $J/J_0$ ), 투과선속(Permeate flux,  $J$ ) 및 총여과부피(Total permeate volume,  $V_T$ ) 측면에서 고찰하였다.

## 2. 실험 재료 및 방법

### 2-1. 실험재료 및 장치

#### 2-1-1. 세라믹 분리막

본 연구에서 사용한 분리막은 국내 나노기공소재(주)의 제품으로서 관형 세라믹 분리막이다. 이러한 세라믹 분리막의 특성으로는 유기질 막에 비해 기계적 강도와 화학적 안정성이 우수하여 장시간 사용이 가능하기 때문에, 식품 및 폐수처리 등 다양한 분야에 널리 응용되어 왔고 현재에도 활발히 연구되고 있다[14, 17]. 본 연구에서 사용한 분리막의 제원은 Table 1에 제시하였다.

#### 2-1-2. 모사용액

분리막 공정에서 철 제거를 위하여 사용한 음이온 계면활성제는 Sodium dodecyl sulfate(SDS)로써, 물리적 특성을 Table 2에 나타내었다. 한편, 한편 철 용액 제조는 황산제철첨모늄 6수화물( $\text{FeSO}_4(\text{NH}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )를 사용하여, 1 mM 농도로 준비하였다

#### 2-1-3. 실험장치

Fig. 1과 같은 질소역세척이 가능한 분리막 성능 실험장치는 공급탱크가 스테인레스강 316으로 25 L의 용량을 가지며, 항온 순환기(CDRC8, Daihan Co.)와 연결하여 온도를 20 °C로 일정하게 유지하였다. 펌프(Procon, Standex Co.)에 의해 공급탱크로부터 분리막 모듈 안으로 원수가 유입되고, 펌프 우회관을 설치하여 분리막에서의 유량과 압력을 조절할 수 있도록 하였다. 분리막에 유입되는 유

Table 1. Specification of tubular ceramic membranes used in this study

Membranes	NCMT-7231
Pore size ( $\mu\text{m}$ )	0.10
Material	$\alpha$ -alumina on $\alpha$ -alumina support
Outer diameter (mm)	8
Inner diameter (mm)	6
Length (mm)	250
Surface area ( $\text{cm}^2$ )	47.12
Company	Nano Pore Materials (Korea)

Table 2. Characterization data for surfactants employed

Surfactant	Type	Formula	MW (g/mol)	CMC (mM)	Supplier
SDS	Anionic	$\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{SO}_4\text{Na}$	288.38	8.00 [3]	Sigma, solid

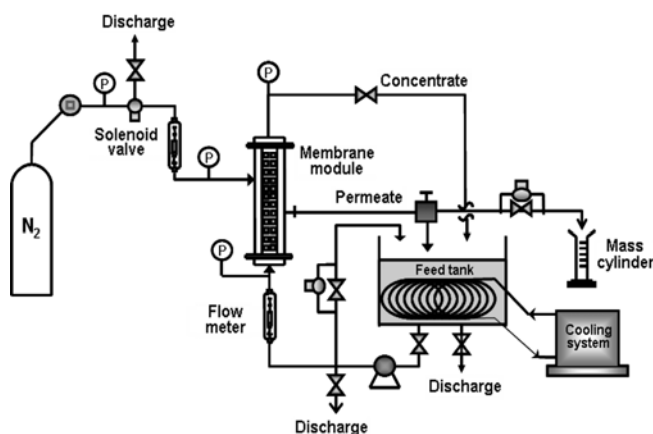


Fig. 1. Schematic diagram of the micellar enhanced ceramic microfiltration system[16].

량은 유량계(RMB-85D, Dwyer)로 측정하고, 입구와 출구부에 각각 6 bar까지 측정할 수 있는 압력계를 설치하여 막 내에서 압력차를 측정하였다. 본 여과장치는 위쪽 지지체를 조정이 가능하게 설치하여, 막모듈의 크기가 다른 경우에도 쉽게 장착하여 실험할 수 있도록 하였다[16].

## 2-2. 운전 조건

25 L의 용량을 가지는 공급탱크에 준비된 철 용액 2.0 L를 채우고, SDS 농도 변화에 따른 철 배제율을 알아보기 위하여 1.00, 2.00, 4.00, 8.00 및 10.00 mM 농도가 되도록 SDS를 주입하였다. SDS의 완전한 용해를 위해 교반기를 이용하여 30 min, 200 rpm으로 교반한 후, 막 모듈 안으로 용액을 이송하였다. 전자저울(Ohaus, GT series, USA)을 사용하여 무게를 측정하여 투과선속을 계산하였다. 또한, 모든 실험은 실온(20±1 °C)에서 수행하였으며, 60 min 운전 후 분석을 위해 공급탱크와 투과수에서 시료를 채취하였다. 한편, 각각의 실험이 끝난 뒤에는 대상용액을 배수한 후, 30분 동안 증류수를 순환시키면서 분리막을 세척하였다. 그 다음 모듈에서 분리막을 탈착하여, 초기투과플럭스의 95% 이상으로 플럭스가 회복될 때까지 수산화나트륨 및 질산수용액으로 화학세정하고 다음 실험을 진행하였다. 한편, 화학 세정 이후에도 초기투과플럭스가 95% 이상 회복 불가능한 경우에는 550 °C에서 20분간 강열하여 분리막을 회복시켰다.

## 2-3. 분석 방법

공급수 및 처리수의 수질을 평가하기 위하여 철은 페난트로린 법을 사용하여 Spectrophotometer(HACK DR/2010, USA)로 측정하였고, 탁도는 Turbidimeter(2100N, HACH, USA)로, pH 및 전기전도도, 총용존고형물은 Multi-parameter Analyzer(C861, CONSORT, GER)를 사용하여 측정하였다.

음이온 계면활성제 SDS의 농도는 COD kit(HACK, USA)를 이용하여 측정하였다. COD kit에 시료를 2 mL 주입하여 2시간 동안 150 °C에서 가열한 후 상온까지 식힌 다음 Spectrophotometer를 이용하여 COD 농도를 측정하였다[8]. 한편, COD 실험을 통한 SDS 분석은 공급수에 계면활성제를 제외한 유기물은 거의 없으며, 용액에 존재하는 철은 COD 값에 거의 영향을 미치지 않아서 SDS의 농도와 COD 값이 서로 상관관계를 보였다. 따라서 SDS의 표준용액으로 COD를 측정하여 검량선을 구한 것이 식 (1)이다. 식 (1)을 이용

하여 막분리 공정의 공급수와 처리수의 SDS 농도를 계산하였다.

$$\text{SDS(mM)} = \frac{\text{COD(mg/L)} - 9.5733}{623.26} \quad (1)$$

## 3. 결과 및 고찰

### 3-1. SDS 농도의 영향

NCMT-7231(0.10 μm)의 세라믹 분리막에 대하여 철의 농도가 1.00 mM인 모사용액을 대상으로, SDS의 농도 증가에 따른 철 및 SDS, 탁도, 총용존고형물(TDS)의 제거율을 나타낸 것이 Table 3이다. 그 결과, 철의 제거율은 SDS의 임계미셀농도(CMC)인 8.00 mM에서 가장 높은 92.26%를 나타내었다. 이러한 결과는 SDS가 8.00 mM일 때, 음이온 계면활성제인 SDS의 농도가 CMC에 이르고, 음으로 하전된 미셀 표면에 양이온인 철 이온이 흡착 또는 결합하여 응집체를 형성하여 정밀여과막의 기공보다 큰 미셀 응집체가 대부분 제거되었다는 칼슘에 대한 결과[4]와 일치한다. 한편, SDS의 농도가 8.00 mM보다 낮은 농도에서도 응집체를 형성하였음에도 불구하고 상대적으로 철의 제거율이 낮은 이유는, 철의 몰 수 당 정전기적으로 SDS와 결합할 수 있는 확률이 낮아지기 때문에 SDS와 결합하지 못한 철 이온들이 분리막을 통과한 것으로 판단된다. 또한, SDS와 TDS 역시 SDS의 CMC에서 가장 높은 제거율인 61.10%와 15.81%를 나타내었다. TDS의 제거율이 낮은 이유는 본 연구에서 사용한 정밀여과막으로는 용존물질을 제거할 수 없기 때문이다. 반면에 탁도의 제거율은 SDS 농도가 2 mM일 때 가장 높게 나타났다.

한편, 본 연구에서 사용한 세라믹 분리막에 대하여 가장 높은 철 배제율을 보인 SDS 8.00 mM 조건에서 SDS 제거율은, 칼슘 이온 제거 결과[4]인 41.55%와 44.62%보다 다소 높은 61.10%의 제거율을 보였다. 하지만 본 연구에서 사용된 SDS는 화학 합성된 계면활성제로서, 생분해되는 시간이 장시간 필요하므로 이로 인한 2차 오염이 유발될 수 있다. 이에 따라 Hong 등[18]은 화학 계면활성제 대신 생분해도가 높은 생계면활성제를 사용하는 방식을 보고하는 등, 다양한 방법[2, 19]으로 2차 오염문제를 해결하기 위해 꾸준한 연구가 진행되고 있다.

### 3-2. 분리막 공정의 여과인자 해석

1.00 mM의 철 용액에 농도 별로 SDS 주입 후, 세라믹 분리막의

Table 3. Quality of modified solution and treated water, and average removal rates

SDS Concentration	Pollutants	TDS (mg/L)	Turbidity (NTU)	SDS (mg/L)	Fe (mg/L)
2 mM	Modified Solution	268	2.55	662.3	45.45
	Treated water	245	0.40	486.8	38.06
	Average removal rate (%)	8.68	<b>83.77</b>	25.84	16.25
4 mM	Modified Solution	309	3.61	964.5	41.67
	Treated water	270	1.06	816.9	34.01
	Average removal rate (%)	12.69	73.39	15.65	18.40
8 mM	Modified Solution	381	2.91	1,911.2	44.45
	Treated water	320	1.70	743.3	3.36
	Average removal rate (%)	<b>15.81</b>	39.76	<b>61.10</b>	<b>92.26</b>
10 mM	Modified Solution	407	3.49	2318.3	41.07
	Treated water	395	2.14	1659.0	40.11
	Average removal rate (%)	2.94	37.82	28.65	2.28

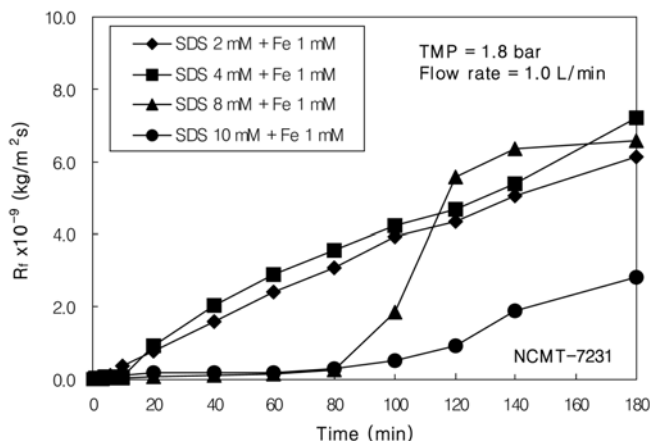
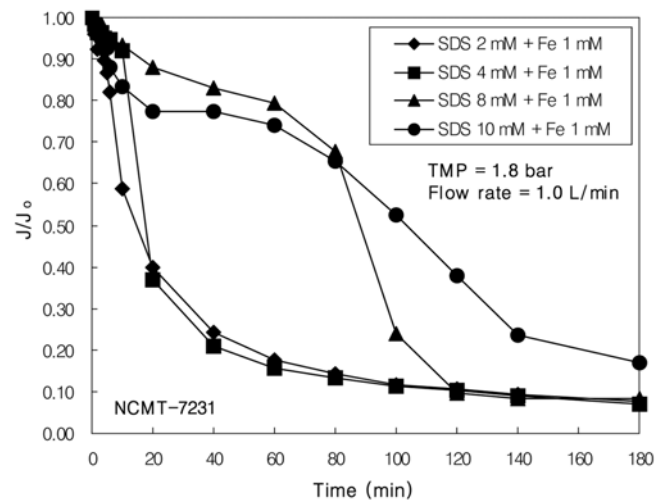
**Table 4.** Effect of SDS concentration on filtration factors at Fe 1.0 mM

SDS Concentration (mM)	2	4	8	10
$J_0 \times 10^5$ (m/s)	34.29	33.09	30.15	30.44
$R_b \times 10^{-9}$ (kg/m <sup>2</sup> s)	0.01	0.03	0.08	0.08
$R_m \times 10^{-9}$ (kg/m <sup>2</sup> s)	0.50	0.51	0.50	0.50
$R_{f180} \times 10^{-9}$ (kg/m <sup>2</sup> s)	6.14	7.19	6.58	2.83
$J_{180} \times 10^5$ (m/s)	2.65	2.28	2.46	5.18
$V_T \times 10^4$ (m <sup>3</sup> )	29.29	29.74	65.67	70.19

로 여과운전 시 SDS 농도 변화가 여과인자 즉, 막오염에 의한 저항( $R_f$ ), 무차원한 투과선속( $J/J_0$ ) 및 투과선속( $J$ )에 미치는 영향을 알아보았다. 이러한 여과인자들은 직렬여과저항 모델식(Resistance-in series model)[20]을 이용하여 선행 연구 결과[16]의 방법으로 계산하였고, 그 결과를 정리한 것이 Table 4이다.

SDS의 농도가 증가함에 따라  $R_f$ 가 증가하여 4 mM일 때 가장 높은 값을 보이다가 10 mM에서 가장 낮은 값을 나타내었다. 이는 SDS 농도가 CMC에 가까워지면, 형성된 미셀 표면에 철 이온이 흡착 및 결합되어 비교적 큰 응집체가 형성됨으로써 정밀여과로 운전 시, 분리막 표면에 배제되어 상대적으로 두꺼운 케이크층을 형성하여 높은  $R_f$ 를 나타낸 것으로 판단된다. 한편, SDS의 농도가 10.00 mM 일 때는 가장 낮은  $R_f$ 를 보인 결과는, 양현수 등[21]이 미셀 형성을 이용한 환외여과막에서 Co와 Mg 이온을 대상으로 실험 한 결과와 동일한 결과이다. 그들이 언급한 바와 같이, 계면활성제의 농도가 증가하면서 미셀의 모양이 타원형에서 막대모양으로 변하여[21], 미셀이 쉽게 분리막을 통과하여 케이크 형성이 활발하게 이루어지지 않아, 상대적으로 낮은  $R_f$ 를 보인 것으로 판단된다. 또한,  $R_f$ 가 가장 작은 값을 보인 SDS 10 mM인 조건에서 최종 투과선속  $J_{180}$ 가 가장 큰 값을 나타냈다. 이러한 결과는 미셀의 변형으로 막오염이 감소함에 따라 투과선속이 높게 유지되고, 결국 가장 높은 총여과 부피  $V_T$ 를 얻을 수 있었던 것이다.

Fig. 2는 SDS 농도가  $R_f$ 에 미치는 영향을 180분 운전시간 동안 그 변화를 나타낸 것이다. CMC 8 mM을 제외하고 다른 SDS 농도의 경우는 지속적으로 막오염이 발생하여 거의 일정한 기울기로  $R_f$ 가 증가하는 경향을 보였다. 반면에 CMC 8 mM의 경우는 운전 시간 80분까지는 10 mM과 거의 동일하게 낮은  $R_f$  값을 보이다가, 120분까지 급격하게 증가하고 다시 180분까지 서서히 증가하는 경

**Fig. 2.** Effect of SDS concentration on the resistance of membrane fouling.**Fig. 3.** Effect of SDS concentration on dimensionless permeate flux.

향을 보였다. 이러한 결과는 미셀 형성에 최적 조건인 CMC 8 mM에서 형성된 미셀이 응집체를 형성하고 막표면에 케이크층을 이루어 막오염이 80분까지 서서히 진행되고, 그 이후 120분까지 형성된 케이크 층이 응집체를 급격하게 흡착하다가, 막 모듈 내의 십자흐름 유속에 의해 케이크 층의 형성이 억제되어 다시 제한적으로 서서히 발달한 것으로 판단된다. 한편, SDS 10 mM에서 가장 낮은  $R_f$  값을 유지하는 것은 앞에서 언급한 바와 같이 공급액의 계면활성제 농도가 크고 미셀이 형성되었을 때에 미셀의 모양이 타원형에서 막대모양으로 변하여[21] 케이크 저항이 감소하게 된 것으로 판단된다.

초기 투과선속  $J_0$ 에 대한 각 시간 대의 투과선속  $J$ 인 무차원 투과선속  $J/J_0$ 에 SDS가 미치는 영향을 운전시간에 따라 도시한 것이 Fig. 3이다. 그 결과를 보면, 막오염이 지속적으로 급격하게 증가하는 SDS 농도가 2 mM과 4 mM일 때  $J/J_0$ 가 거의 유사한 곡선을 그리며 급격하게 감소하여, 4 mM일 때 가장 낮은 최종  $J/J_0$  값을 보였다. 또한, SDS 농도가 10 mM일 때 막오염이 서서히 진행되어 가장 높은 최종  $J/J_0$  값을 나타내었다. 반면에 CMC 8 mM일 때 막오염이 초기에는 10 mM과 유사한 기울기로 가장 완만하게 진행되어  $J/J_0$ 가 서서히 감소하다가, 80분과 120분 사이에 급격하게 막오염이 진행되어  $J/J_0$ 가 급격하게 감소한 후 120분 이후에는 SDS 2 mM 및 4 mM의 곡선과 거의 일치하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 앞에서 언급한 바와 같이 120분 이후에는 막 모듈 내의 십자흐름 유속에 의해 케이크 층의 형성이 억제되어 다시 제한적으로 서서히 발달한 것이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 공업용수 중에 미량 함유될 수 있는 철 이온을 제거하기 위해 음이온 계면활성제 SDS를 주입하여 미셀이 형성된 후, 철 이온과 미셀들이 결합된 응집체를 관형 세라믹 정밀여과막으로 배제하였다. 철의 농도 및 막간 압력차, 유량이 일정한 실험 조건에서 철 모사용액을 대상으로 SDS 농도가 철과 SDS 제거율에 미치는 영향을 알아보고, 실험 결과를 직렬여과저항 모델식을 사용하여 막오염에 의한 저항( $R_f$ ), 무차원한 투과선속( $J/J_0$ ), 투과선속( $J$ ) 및 총여

과부피( $V_T$ ) 측면에서 고찰한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 철의 제거율은 SDS의 임계미셀농도(CMC)인 8.00 mM에서 가장 높은 92.26%를 나타내었다. 이러한 결과는 SDS가 8.00 mM 일 때, 음이온 계면활성제인 SDS의 농도가 CMC에 이르고, 음으로 하전된 미셀 표면에 양이온인 철 이온이 흡착 또는 결합하여 응집체를 형성하여 정밀여과막의 기공보다 큰 미셀 응집체가 대부분 제거되었기 때문이다.

(2) 본 연구에서 사용한 세라믹 분리막에 대하여 가장 높은 철 제거율을 보인 SDS 8.00 mM 조건에서 SDS 제거율은, 칼슘 이온 제거 결과[4]인 41.55%와 44.62%보다 다소 높은 61.10%의 제거율을 보였다.

(3) SDS의 농도가 증가함에 따라  $R_f$ 가 증가하여 4 mM일 때 가장 높은 값을 보이다가 10 mM에서 가장 낮은 값을 나타내었다. 이는 SDS 농도가 CMC에 가까워지면, 형성된 미셀 표면에 철 이온이 흡착 및 결합되어 비교적 큰 응집체가 형성됨으로써 정밀여과로 운전 시, 분리막 표면에 배제되어 상대적으로 두꺼운 케이크층을 형성하여 높은  $R_f$ 를 나타낸 것이다.  $R_f$ 가 가장 작은 값을 보인 SDS 10 mM인 조건에서 최종 투과선속  $J_{180}$ 가 가장 큰 값을 나타냈다. 이러한 결과는 미셀의 변형으로 막오염이 감소함에 따라 투과선속이 높게 유지되고, 결국 가장 높은 총여과부피를 얻을 수 있었던 것이다.

(4) CMC 8 mM의 경우 운전시간 80분까지 10 mM과 거의 동일하게 낮은  $R_f$  값을 보이다가, 120분까지 급격하게 증가하고 다시 180분까지 서서히 증가하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 미셀 형성에 최적 조건인 CMC 8 mM에서 형성된 미셀이 응집체를 형성하고 막표면에 케이크층을 이루어 막오염이 80분까지 서서히 진행되고, 그 이후 120분까지 형성된 케이크 층이 응집체를 급격하게 흡착하다가, 막 모듈 내의 십자흐름 유속에 의해 케이크 층의 형성이 억제되어 다시 제한적으로 서서히 발달한 것이다.

(5) CMC 8 mM일 때 막오염이 초기에는 10 mM과 유사한 기울기로 가장 완만하게 진행되어  $J/J_0$ 가 서서히 감소하다가, 80분과 120분 사이에 급격하게 막오염이 진행되어  $J/J_0$ 가 급격하게 감소한 후 120분 이후에는 SDS 2 mM 및 4 mM의 곡선과 거의 일치하는 경향을 보였다.

## 참고문헌

- Pak, B. C., Kim, S. D., Baek, B. J. and Lee, D. H., "A Study of Efficacy of Physical Water Treatment Devices for Mineral Fouling Mitigation Using Artificial Hard Water," *KSME B*, **29**(11), 1229-1283(2005).
- Baeg, G. T. and Yang, J. W., "Remediation of Subsurface using Micellar-enhanced Ultrafiltration," *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **15**(2), 153-162(2004).
- Fernandez, E., Benito, J. M., Pazos, C. and Coca, J., "Ceramic Membrane Ultrafiltration of Anionic and Nonionic Surfactant Solutions," *J. Membr. Sci.*, **246**, 1-6(2005).
- Park, B. R. and Park, J. Y., "Removal of Aqueous Calcium Ion by Micellar Enhanced Ceramic Membranes Adding Surfactant," *Membrane Journal*, **18**(1), 7-25(2008).
- Rai, P., Rai, C., Majumdar, G. C., DasGupta, S. and De, S., "Resistance in Series Model for Ultrafiltration of Mosambi (Citrus Sinensis (L.) Osbeck) Juice in a Stirred Continuous Mode," *J. Membr. Sci.*, **283**, 116-122(2006).
- Nam, S.-T. and Han, M.-J., "Flux Decline Behavior in Crossflow Microfiltration of Inorganic Colloidal Suspensions," *Membrane Journal*, **15**(4), 338-348(2005).
- Vyas, H. K., Mawson, A. J., Bennett, R. J. and Marshall, A. D., "A New Method for for Estimating Cake Height and Porosity During Filtration of Particulate Suspensions," *J. Membr. Sci.*, **176**, 113-119(2000).
- Karode, S. K., "Unsteady State Flux Response: a Method to Determine the Nature of the Solute and Gel Layer in Membrane Filtration," *J. Membr. Sci.*, **188**, 9-20(2001).
- Heran, M. and Elmaleh, S., "Microfiltration Through An Inorganic Tubular Membrane with High Frequency Retrofiltration," *J. Membr. Sci.*, **188**, 181-188(2001).
- Cakl, J., Bauer, I., Dolecek, P. and Mikulasek, P., "Effect of Backflushing Conditions on Permeate Flux in Membrane Crossflow Microfiltration of Oil Emulsion," *Desalination*, **127**, 189-198(2000).
- Meacle, F., Aunins, A., Thornton, R. and Lee, A., "Optimization of the Membrane Purification of a Polysaccharide-protein Conjugate Vaccine Using Backpulsing," *J. Membr. Sci.*, **161**, 171-184(1999).
- Katsoufidou, K., Yiantsios, S. G. and Karabelas, A. J., "A Study of Ultrafiltration Membrane Fouling by Humic Acids and Flux Recovery by Backwashing: Experiments and Modeling," *J. Membr. Sci.*, **266**, 40-50(2005).
- Hyun, S. H., "Present Status and Preparation Technology of Ceramic Membranes," *Membrane Journal*, **3**(1), 1-11(1993).
- Gan, Q., Howell, J. A., Field, R. W., England, R., Bird, M. R. and McKechnie, M. T., "Synergetic Cleaning Procedure for a Ceramic Membrane Fouled by Beer Microfiltration," *J. Membr. Sci.*, **155**, 277-289(1999).
- Laitinen, N., Michaud, D., Piquet, C., Teillier, N., Luonsi, A., Levanen, E. and Nystrom, M., "Effect of Filtration Conditions and Backflushing on Ceramic Membrane Ultrafiltration of Board Industry Wastewaters," *Sep. Purif. Technol.*, **24**, 319-328(2001).
- Park, J. Y., Choi, S. J. and Park, B. R., "Effect of  $N_2$ -back-flushing in Multichannels Ceramic Microfiltration System for Paper Wastewater Treatment," *Desalination*, **202**, 207-214(2007).
- Li, M., Zhao, Y., Zhou, S., Xing, W. and Wong, F., "Resistance Analysis for Ceramic Membrane Microfiltration of Raw Soy Sauce," *J. Membr. Sci.*, **299**, 122-129(2007).
- Hong, J. J., Yang, S. M., Lee, C. H., Choi, Y. K. and Kajiuchi, T., "Ultrafiltration of Divalent Metal Cations from Aqueous Solution Using Polycarboxylic Acid Type Biosurfactant," *J. Colloid Interface Sci.*, **202**, 63-73(1998).
- Noh, S. I., Lee, S. B., Cho, K. M., Lee, Y. M. and Shim, J. K., "Removal of Pollutants using Amphiphilic Polymer Nanoparticles in Micellar-Enhanced Ultrafiltration," *Membrane Journal*, **16**(1), 59-67(2006).
- Cheryan, M., "Ultrafiltration Handbook," Technomic Pub. Co., Pennsylvania, 89-93(1984).
- Yang, H. S., Han, K. H., Kang, D. W., Song, M. J. and Kim, Y. H., "Removal of Co & Mg Ions Using Micellar Enhanced Ultrafiltration," *HWAHAK KONGHAK*, **34**(4), 482-488(1996).