

DCA 미셀을 이용한 한외여과에서 카드뮴의 제거특성

이 호 원[†] · 김 승 건* · 강 영 주*

제주대학교 청정화학공학과, *제주대학교 식품공학과
(2003년 8월 30일 접수, 2003년 11월 27일 채택)

Removal Characteristics of Cadmium in Micellar Enhanced Ultrafiltration Using DCA

Ho-Won Lee[†], Seung-Gun Kim*, and Yeung-Joo Kang*

Department of Chemical Engineering and Clean Technology, Cheju National University, Jeju 690-756, Korea

*Department of Food Science and Engineering, Cheju National University, Jeju 690-756, Korea

(Received August 30, 2003, Accepted November 27, 2003)

요 약: 생분해성 음이온 계면활성제인 deoxycholic acid(DCA)의 미셀을 이용한 한외여과에서 카드뮴의 제거 특성을 살펴보았다. 본 연구에서는 교반 한외여과 셀을 사용하였으며, 한외여과 막은 분획분자량(molecular weight cut-off)이 서로 다른 Millipore사의 YM1, YM3, YM10 및 YM30을 사용하였다. DCA와 카드뮴의 혼합용액에서 DCA의 임계미셀농도는 순수 DCA 용액에서 보다 낮아지고, 미셀의 크기는 증가되었다. 카드뮴이온의 제거율은 사용한 막의 분획분자량에 의해서는 거의 영향이 없었으나, 카드뮴이온에 대한 DCA의 몰 비의 증가에 따라서는 급격히 증가하였다. 카드뮴이온에 대한 DCA의 몰 비가 3일 때 카드뮴이온의 제거율은 사용한 막에 관계없이 99.6% 이상이었다. 순수 투과플럭스에 대한 혼합용액의 투과플럭스의 비로 정의한 상대 투과플럭스는 YM3 > YM1 > YM10 > YM30 막의 순서로 감소하였다.

Abstract: The removal characteristics of cadmium in micellar enhanced ultrafiltration (MEUF) were investigated by using an anionic biosurfactant, deoxycholic acid (DCA). The ultrafiltration experiments were performed in a batch-type stirred cell. The ultrafiltration membranes used were Millipore YM1, YM3, YM10, and YM30 which had a difference in molecular weight cut-off. The presence of cadmium ion in DCA solution tends to reduce the critical micell concentration considerably and increase the micell size. The molecular weight cut-off of ultrafiltration membrane had a minimal effect on cadmium removal whereas DCA/Cd ratio had a substantial influence. When DCA/Cd ratio was 3, the removal efficiency of cadmium was more than 99.6%. A relative flux, which is defined as ratio of the flux for a separation trial to that of deionized water run using the same piece of membrane, decreased in the order of YM3 > YM1 > YM10 > YM30.

Keywords: micellar enhanced ultrafiltration(MEUF), deoxycholic acid(DCA), Cadmium

1. 서 론

구리, 아연, 납의 광산 및 제련소와 안료, 도금, 유리 제조, 전지, 합금 등 관련 공장에서 배출되는 카드뮴은 이타이이타이병의 원인 물질로서 알려진 대표적인 중금속 중의 하나이다. 카드뮴은 철이나 강철의 부식 방지 도금용으로 가장 많이 사용되는데, 미국의 경우에는 카드뮴 생산량의 약 70%가 도금용으로 생산된다[1,2].

카드뮴을 함유한 폐수의 처리법으로는 이온교환법,

응집 및 침전법, 화학적 처리법, 활성탄흡착법 등이 사용되어 왔으며, 최근에는 분리막 기술의 적용이 시도되고 있다[3,4].

계면활성제는 친수성기와 소수성기로 구성되어 있다. 계면활성제는 일정 농도 이상에서 Figure 1과 같이 소수성기들은 서로 안쪽으로 모이고, 친수성기는 수용성 용액 쪽으로 향하게 되어 미셀(micell)이라고 하는 집합체를 형성하게 되는데, 이와 같이 계면활성제가 미셀을 형성하는 농도를 임계미셀농도(critical micell concentration, CMC)라 한다[5]. 미셀을 이용한 한외여과법(micellar enhanced ultrafiltration, MEUF)은 계면

[†]주저자(e-mail : hwlee@cheju.ac.kr)

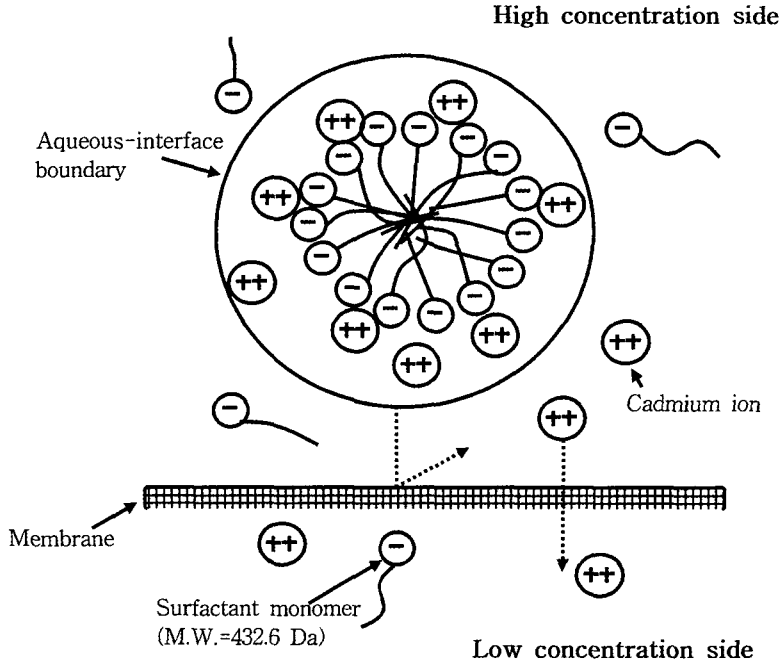


Fig. 1. Separation of cadmium ions by micellar enhanced ultrafiltration(MEUF).

활성제(surfactant)의 분자 집합체인 미셀의 가용화 능력과 미셀에 대한 한외여과 막의 분리능력을 결합한 방법이다[6,7]. 즉, 중금속 또는 유기화합물 등의 제거 대상 물질은 분자 크기가 작아 한외여과에 의해 배제되지 않으나, 이와 같은 작은 분자들이 미셀 표면에 결합되면 분자 크기가 증대되고, 이렇게 크기가 증가된 미셀은 한외여과 막에 의해 분리된다. 따라서 미셀을 이용한 한외여과는 한외여과가 갖고 있는 높은 투과유속을 유지하면서 높은 선택도를 얻을 수 있는 장점을 가질 수 있다.

미셀을 이용한 한외여과가 갖고 있는 높은 선택도와 빠른 투과유속의 장점을 이용하여 중금속 또는 저분자 유기화합물 제거에 관한 연구가 점차 증가하고 있다. Park 등[8]은 *o*-cresol을 제거하기 위하여 음이온 계면활성제인 SDS(sodium dodecyl sulfate) 미셀을 이용하였으며, 양현수 등[9]은 SDS와 금속의 비가 코발트(Co)와 마그네슘(Mg)의 제거에 미치는 영향을 조사하였다. Scamehorn 등[10]은 2가의 중금속을 분리하기 위하여 SDS를 사용하였고, 이근우 등[11]은 시안이 함유된 중금속 폐수의 처리에 CPC(cetylpyridinium chloride)를 사용하였으며, Huang 등[12]은 DCA(deoxycholic acid)와 SDS를 각각 사용하여 중금속의 분리효과를 살펴보았다. 또한, Hong 등[13]은 biosurfactant인 sodium

salt of 2-(carboxyethyl)-3-decyl maleic anhydride(DCMA-3Na)를 사용하여 2가 금속 양이온의 제거 특성을 고찰한 바 있다.

그러나, 이러한 연구 결과들은 미셀과 처리 대상물 질과의 반응이 매우 빠르게 진행되어 바로 평형이 이루어진다는 가정 하에 제거율이 계산되었다. 그러나 김승진 등[14]이 DCA(deoxycholic acid) 미셀을 이용한 카드뮴 및 납 이온의 한외여과 실험을 통하여 제시한 결과에 의하면, 카드뮴 및 납 이온의 제거율과 DCA의 배제율에 있어서 경시변화가 있었으며, 약 60분 이후에는 평형상태에 도달한다고 보고한 바 있다. 따라서 본 연구에서는 평형상태에서 계면활성제의 농도, 한외여과 막의 분획분자량(molecular weight cut-off), pH 등의 조업인자의 변화가 카드뮴의 제거율과 계면활성제의 배제율에 미치는 영향을 고찰함으로써 미셀을 이용한 한외여과의 최적 조업인자를 규명하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용한 계면활성제는 sodium salt of deoxycholic acid(DCA)로서 Acros 사의 특급시약을 사용하였다. DCA는 음이온 계면활성제로서 생분해성이며, 화학식은 $C_{24}H_{39}O_4Na$ 이고 분자량은 414.6 Dalton

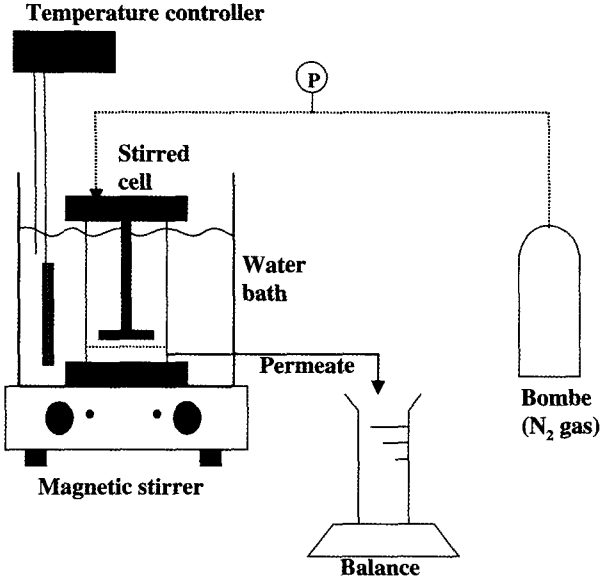


Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus.

이다. 카드뮴 이온은 Sigma 사의 CdCl₂를 물에 용해하여 사용하였으며, 본 실험에 사용된 모두 물은 탈이온화된 3차 증류수를 사용하였다.

본 연구에서는 Millipore사의 교반 한외여과 장치(stirred ultrafiltration cell)를 사용하였으며, Figure 2에 나타낸 바와 같이 cell 전체를 항온수조에 넣어 일정 온도가 유지되도록 하였다. 한외여과 cell의 용량은 400 mL이고, 유효 막면적은 48.1 cm²이었다. 본 연구에서 사용한 막은 Millipore사의 regenerated cellulose 재질의 한외여과 막으로서 분획분자량(molecular weight cut-off, MWCO)이 서로 다른 YM1, YM3, YM10 및 YM30을 사용하였으며, 이 한외여과 막의 분획분자량은 각각 1,000 Da, 3,000 Da, 10,000 Da 및 30,000 Da이다. 한외여과의 구동력은 bombe 내의 질소 기체를 이용하였으며, 이때의 압력은 YM1과 YM3 막을 사용한 경우에는 2 kg/cm²로 YM10 과 YM30 막의 경우에는 0.5 kg/cm²로 각각 일정하게 하였고, 조업온도는 30±0.5°C로 일정하게 하였다.

실험의 진행은 먼저 pH 조절이 된 DCA 용액 100 mL과 카드뮴 용액 100 mL를 혼합하고, 완전히 평형상태에 도달하도록 하기 위하여 혼합용액을 60 분 동안 충분히 교반하였다. 이 때 pH를 다시 조절 하였으며, pH의 조절에는 0.1 N 또는 0.01 N의 NaOH 용액과 HCl 용액을 각각 사용하였다.

교반 후 용액을 한외여과 cell로 옮겨 한외여과를 수

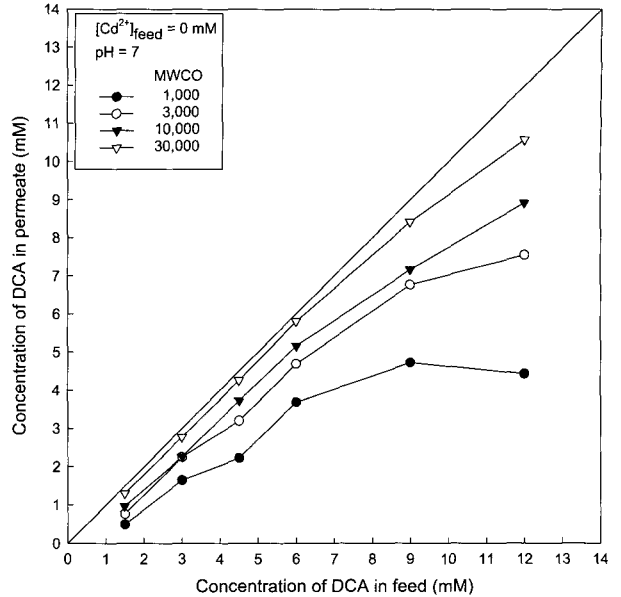


Fig. 3. Concentration of DCA in permeate as a function of concentration of DCA in feed at a cadmium-free solution.

행하였다. 처음 유출된 투과수의 20 mL는 버리고, 다음에 유출되는 10 mL를 채취하여 분석하였고, 투과플럭스(permeate flux)는 이 10 mL를 채취하는 시간을 측정하여 평균 투과플럭스로 나타내었다. 한외여과를 실시한 후에는 막을 0.1 N NaOH 수용액으로 30 분간 세척하고 다시 증류수로 세척하였다. 막세정 후에 순수플럭스를 다시 측정하고, 이를 초기 순수플럭스와 비교하여 초기 플럭스에 대한 여과 후의 순수플럭스의 비가 90% 이상이 되는 경우에만 막을 재이용하였다.

도입액과 투과액의 중금속의 농도는 원자흡광광도계(Atomic Absorption Spectrometer, AA6701/6601, Shimadzu, Japan)를 사용하여 분석하였고, 투과액의 DCA의 농도는 유기탄소분석기(Total Organic Analyzer, TOC-500, Shimadzu, Japan)를 사용하여 분석하였으며, pH는 pH 미터(pH meter, Orion, U.S.A)로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. DCA의 투과 특성

분획분자량(MWCO)이 서로 다른 YM1, YM3, YM10 및 YM30 막을 사용하여 카드뮴이 없는 DCA 용액을 대상으로 DCA 농도 변화에 따른 투과액의 DCA 농도를 측정하여 이 결과를 Figure 3에 나타내었다. 모든

막에서 투과액의 DCA 농도가 feed 용액의 DCA 농도보다 낮게 나왔으며, 막의 분획분자량이 증가할수록 투과액의 DCA 농도는 feed 용액의 DCA 농도에 접근하였다.

DCA 수용액의 임계미셀농도는 Sigma 사에서 5 mM로 보고하였으며, Huang 등[12]이 전도도법에 의해 측정한 DCA 수용액의 임계미셀농도는 4.8 mM에서 6.0 mM로 보고된 바 있다. 임계미셀농도 이하에서는 대부분의 DCA 분자들이 미셀을 형성하지 못하고 단량체(monomer)로 주로 존재하기 때문에 막에 의해 배제되지 못하고 대부분이 투과되며, 반면에 임계미셀농도 이상의 농도에서는 60-200 개의 계면활성제 분자들이 거대분자 또는 미셀을 형성됨으로서 막에 의해 배제된다[12]. 그러나 임계미셀농도 이상에서도 이량체(dimer), 삼량체(trimer) 등과 같이 적은 수의 계면활성제 분자들만이 결합하여 거대분자를 형성하지 못해 막에 의해 배제되지 못하고 투과될 확률도 매우 크다.

본 연구의 실험 결과에서도 투과액에서의 DCA 농도가 도입액의 DCA 농도의 증가에 따라 거의 선형적으로 증가하다가, DCA 농도가 6 mM인 점을 경계로 증가율이 감소함을 알 수 있었다. 그 이유는 Huang 등[12]이 제시한 바와 같이 이 부근에서 임계미셀농도에 도달되어 미셀이 형성되기 때문으로 판단된다. 또한 막의 분획분자량이 증가함에 따라 투과액에서의 DCA 농도가 증가하는 결과가 뚜렷하게 나타나는 것으로 보아 임계미셀농도 이상에서도 분자량이 415 Da인 DCA 단량체부터 분자량이 30,000 Da 이상인 DCA 미셀에 이르기까지 매우 다양하게 존재함을 알 수 있다.

Figure 3의 실험 결과를 배제율(rejection ratio, R)로 환산하여 Figure 4에 나타내었다. 이 때, DCA의 배제율은 다음의 식(1)에 의해 계산하였다. 여기서, C_p 는 투과액의 농도, C_0 는 도입액의 농도이다.

$$R = \left(1 - \frac{C_p}{C_0}\right) \times 100 \quad (1)$$

분획분자량이 작은 막을 사용할수록 DCA에 대한 배제율의 증가가 현저히 나타났다. 또한 모든 막에서 DCA의 농도가 6 mM 인 점을 경계로 하여 DCA 농도의 증가에 따라 DCA의 배제율은 감소하다가 증가하였다. 이것은 앞에서 설명한 바와 같이 DCA의 임계미셀농도가 6 mM 부근에서 형성됨을 의미한다. 즉, DCA

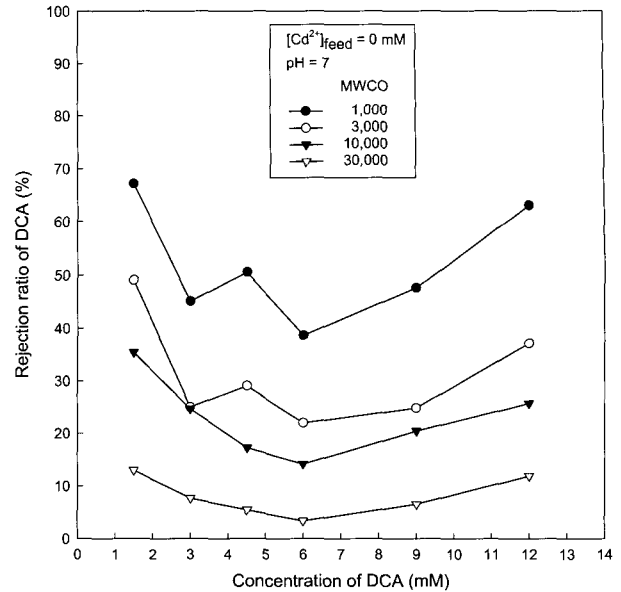


Fig. 4. Rejection ratio of DCA as a function of concentration of DCA in feed at a cadmium-free solution.

의 농도가 6 mM 이상일 때, DCA의 농도가 증가됨에 따라 미셀의 형성이 활발해지고, 그에 따라 분자 크기가 증대되어 배제되기 때문이다. 반면에 DCA의 농도가 6 mM 이하일 때는 미셀은 형성되지 않으며, 단지 일정한 양의 DCA가 막에 흡착되는 것으로 판단된다. 이러한 결과는 Figure 3에 나타난 바와 같이 DCA의 투과농도가 도입농도에 직선적으로 비례하는 결과로부터 유추할 수 있으며, 이에 따라 DCA 농도의 증가에 따라 DCA의 배제율이 감소하는 것으로 판단된다.

Figure 5에는 도입액에 카드뮴이온이 있을 때, 도입액의 DCA 농도의 변화에 따른 투과액의 DCA의 농도 변화를 나타내었다. 도입액에 카드뮴이온이 없는 경우(Figure 3)와 비교할 때, 투과액의 DCA의 농도가 상대적으로 크게 하락함을 알 수 있었다. 그 이유는 도입액 중의 카드뮴이온이 미셀과의 착화물을 형성하고, 미셀간의 결합을 촉진하여 막을 투과하지 못하는 거대분자를 형성하기 때문으로 판단된다.

도입액에 카드뮴이온이 있을 때, 도입액의 DCA 농도의 변화에 따른 DCA 배제율의 변화를 Figure 6에 나타내었다. 도입액에 카드뮴이온이 없는 경우(Figure 4)와 비교할 때, 앞에서 설명한 바와 같이 카드뮴이온과 미셀과의 착화물 형성에 의해 DCA 배제율은 크게 상승함을 알 수 있다. 그러나 도입액에 카드뮴이온이 없을 때와는 반대로 DCA의 농도가 증가됨에 따라

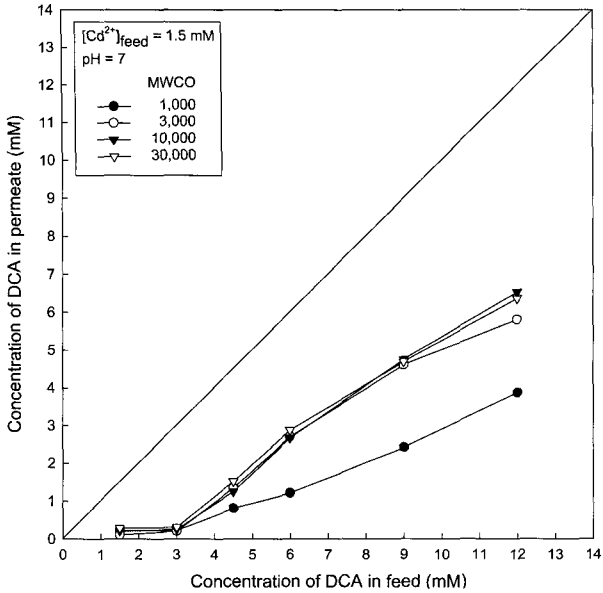


Fig. 5. Concentration of DCA in permeate as a function of concentration of DCA in feed at a constant cadmium concentration of 1.5 mM.

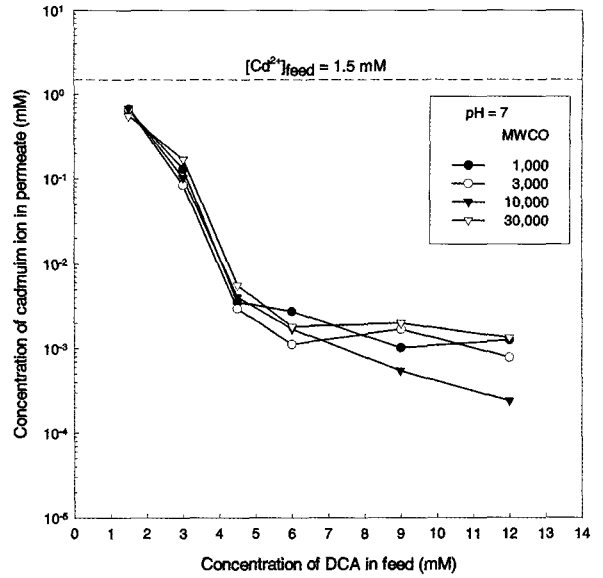


Fig. 7. Concentration of cadmium ion in permeate as a function of concentration of DCA in feed at a constant cadmium concentration of 1.5 mM.

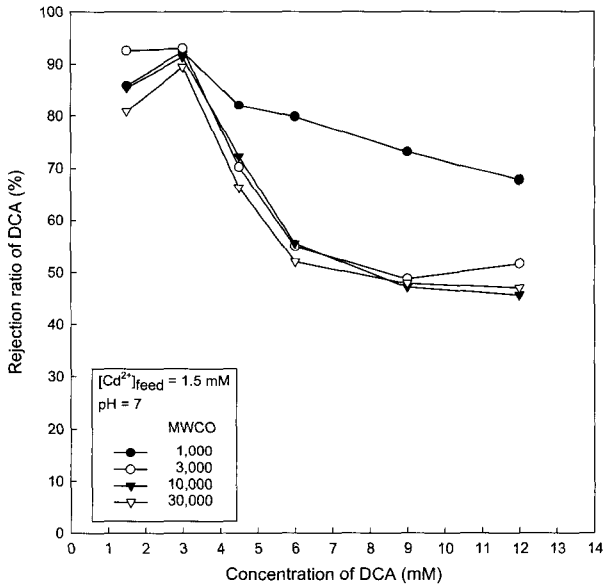


Fig. 6. Rejection ratio of DCA as a function of concentration of DCA in feed at a constant cadmium concentration of 1.5 mM.

DCA의 배제율은 오히려 감소하였다. 그 이유는 DCA의 농도가 증가함에도 불구하고 카드뮴이온의 양은 한정되어 있으므로 카드뮴이온과 미셀과의 착화물 형성이 제한적으로 이루어지기 때문에 카드뮴이온과 결합하지 못한 DCA가 도입농도의 증가에 따라 상대적으

로 증가되기 때문으로 판단된다.

3.2. 카드뮴이온의 투과특성

도입액의 DCA 농도변화에 따른 투과액에서의 카드뮴이온의 농도변화를 Figure 7에 나타내었다. 투과액에서의 카드뮴이온의 농도는 도입액에서의 카드뮴이온의 농도보다 모두 낮게 나타났으며, 도입액의 DCA 농도증가에 따라 투과액에서의 카드뮴이온의 농도는 급격히 감소하였다. 그러나 도입액의 DCA 농도가 4.5 mM인 점을 경계로 하여 투과액에서의 카드뮴이온의 농도가 큰 차이를 나타냈다. 그 이유는 4.5 mM 부근에서 DCA가 미셀을 형성하고, 이 미셀과 카드뮴이온이 착화물을 형성하기 때문으로 판단된다. 따라서 카드뮴이온이 존재할 때 카드뮴이온이 없을 때 보다 DCA의 임계미셀농도는 낮아짐을 알 수 있었다.

DCA와 카드뮴이온의 몰비의 변화에 따른 카드뮴이온의 배제율 변화를 Figure 8에 나타내었다. 카드뮴이온에 대한 DCA의 몰 비의 증가에 따라 카드뮴이온의 배제율은 급격히 증가하였으며, 카드뮴이온에 대한 DCA의 몰 비가 3(이 몰비는 DCA 농도 4.5 mM에 해당)이상일 때 카드뮴이온의 배제율은 99.6% 이상이었다. 그러나 사용한 한외여과 막의 분획분자량은 카드뮴이온의 배제율에 큰 영향을 주지 않았다. 따라서

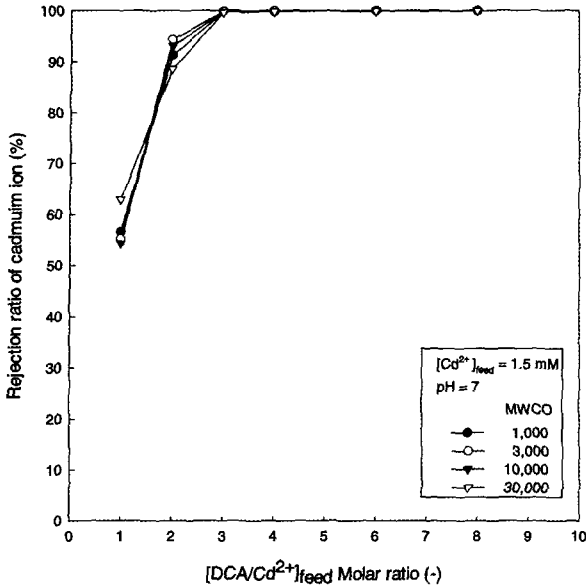


Fig. 8. Rejection ratio of cadmium ion as a function of concentration of DCA/Cd²⁺ molar ratio in feed at a constant cadmium concentration of 1.5 mM.

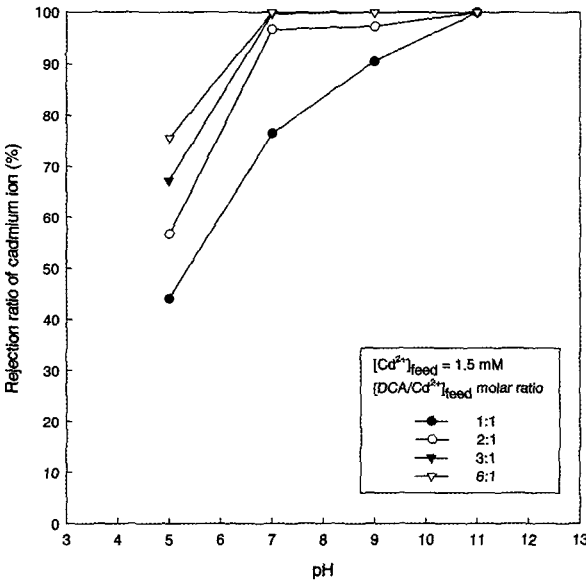


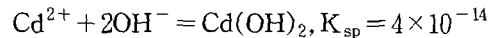
Fig. 9. Comparison of rejection ratio of cadmium ion for different pH in feed solution.

DCA 미셀과 한외여과를 이용한 카드뮴이온의 제거에 있어서 DCA의 임계미셀농도와 카드뮴이온에 대한 DCA의 몰 비는 매우 중요한 운전 인자임을 알 수 있었다.

카드뮴이온의 제거에 pH가 미치는 영향을 살펴보기 위하여 pH 변화와 카드뮴이온에 대한 DCA의 몰 비에

따른 투과액의 카드뮴이온 농도를 각각 측정하고, 이를 배제물로 환산하여 Figure 9에 나타내었다. pH 변화에 대한 실험은 막의 제조사인 Millipore 사에서 제시한 3<pH<13인 범위 내에서만 실시하였다. 카드뮴이온에 대한 DCA의 모든 몰 비에 대해 pH의 증가에 따라 카드뮴이온의 배제율은 증가하였다. pH가 5인 경우에는 pH를 조절하기 위해 첨가된 묽은 염산이 DCA와 반응하여 침전물이 형성됨이 관찰되었으며, 이러한 현상은 염산뿐만 아니라 질산, 황산 및 아세트산 등 pH를 조절하기 위해 첨가된 모든 산에서 나타났다. 따라서 산성조건하에서는 DCA가 H⁺기와 반응하여 침전됨으로써 카드뮴이온과의 착화물을 형성하지 못하기 때문에 카드뮴이온의 배제율이 낮게 나타나는 것으로 판단된다.

한편, Cd²⁺는 다음과 같이 OH⁻와 반응하여 Cd(OH)₂의 침전물을 형성하며, Cd(OH)₂의 용해도적(solubility product, K_{sp})은 4×10⁻¹⁴이다[15]. 따라서 염기성 하에서는 카드뮴이온의 일부만이 용해하고, 용해도 이상의 카드뮴이온은 수산화물로 침전된다.



도입용액의 pH를 9로 조절하면, 이 용액의 pOH는 5이고, [Cd²⁺] [OH⁻]² = 4×10⁻¹⁴이므로 카드뮴이온의 농도는 0.4 mM이 된다. 즉, 도입용액의 농도 1.5 mM (cell 내의 용액 부피를 200 mL로 하였으므로 이 농도는 카드뮴이온 0.3 mmol에 해당됨) 중 0.4 mM에 해당되는 양(0.08 mmol)만이 이온상태로 남아있고, 나머지 1.1 mM에 해당되는 카드뮴이온(0.22 mmol)은 수산화물로 침전 된다.

또한, 도입용액의 pH를 11로 조절했을 때는 pOH가 3이 되므로 [Cd²⁺] [1×10⁻³]² = 4×10⁻¹⁴로부터 카드뮴이온의 농도는 4×10⁻⁵ mM이 된다. 즉, 도입용액의 농도 1.5 mM에 해당되는 카드뮴이온의 양, 0.3 mmol 중 4×10⁻⁵ mM에 해당되는 양, 0.8×10⁻⁵ mmol 만이 이온상태로 남아있고, 대부분의 카드뮴이온은 수산화물로 침전하게 된다.

이와 같이 pH가 증가될수록 많은 양의 카드뮴이온은 수산화물로 침전되어 제거되고, 상대적으로 DCA 미셀에 의해 제거되는 양은 적어진다. 따라서 고농도의 카드뮴이온을 함유한 폐수를 처리할 때는 먼저 카

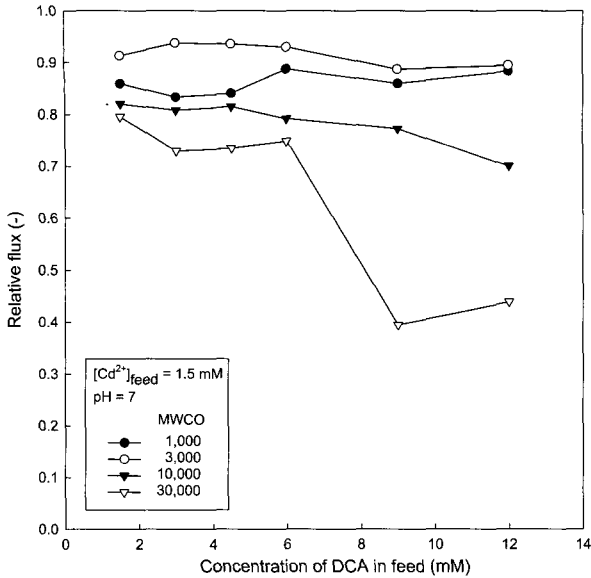


Fig. 10. Comparison of relative permeate fluxes for different membranes in MFCO.

카드뮴이온을 수산화물로 침전시킨 후, 미셀을 이용하는 제거하는 방법이 보다 효과적일 것으로 판단된다.

3.3. 투과플럭스

분획분자량(MWCO)이 서로 다른 YM1, YM3, YM10 및 YM30 막을 사용하여 순수의 투과플럭스와 DCA와 카드뮴의 혼합용액의 투과플럭스를 각각 측정하고, 이 결과를 상대 플럭스(순수 투과플럭스에 대한 혼합용액의 투과플럭스의 비)로 환산하여 DCA 농도 변화에 따라 Figure 10에 나타내었다. 이때, YM1과 YM3 막의 순수 투과플럭스는 2 kg/cm^2 에서 각각 $2.02 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{min}$ 과 $2.91 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{min}$ 이었으며, YM10과 YM30 막의 순수 투과플럭스는 0.5 kg/cm^2 에서 각각 $3.21 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{min}$ 과 $13.29 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{min}$ 이었다.

상대 투과플럭스는 YM3, YM1, YM10 및 YM30 막의 순서로 감소하여 YM3 막의 상대 투과플럭스가 가장 큼을 알 수 있었다. 또한 YM1과 YM3 막의 경우에는 도입액의 DCA 농도가 증가함에 따라 큰 변화가 없었으나, YM10과 YM30 막의 경우에는 도입액의 DCA 농도가 증가함에 따라 상대 투과플럭스가 감소하였다. 그 이유는 한계미셀농도 이상의 농도에서 미셀이 생성되고, 이 중에서 분자량이 10,000 Da에서 30,000 Da 정도 되는 미셀에 의해 plugging이 생기기 때문으로 판단된다.

4. 결론

생분해성 음이온 계면활성제인 deoxycholic acid(DCA)의 미셀을 이용한 한외여과에서 카드뮴과 DCA의 투과 특성을 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) DCA 용액에 대한 한외여과에서 사용한 막의 분획분자량 감소에 따른 DCA 배제율의 증가가 현저히 나타났으며, DCA의 농도가 6 mM 인 점을 경계로 하여 DCA 농도의 증가에 따라 DCA의 배제율은 감소하다가 증가하였다.

(2) DCA와 카드뮴의 혼합용액인 경우, 순수 DCA 용액을 대상으로 한 경우와 비교할 때 DCA 배제율은 크게 상승하였으며, 카드뮴이온이 없을 때와는 반대로 DCA의 농도가 증가됨에 따라 DCA의 배제율은 감소하였다.

(3) DCA와 카드뮴의 혼합용액에서 DCA의 임계미셀농도는 순수 DCA 용액에서 보다 낮아지고, 미셀의 크기는 증가되었다.

(4) 카드뮴이온에 대한 DCA의 몰 비의 증가에 따라 카드뮴이온의 배제율은 급격히 증가하였으며, 카드뮴이온의 농도가 1.5 mM이고 카드뮴이온에 대한 DCA의 몰 비가 3일 때 카드뮴이온의 배제율은 99.6% 이상이었다.

(5) 순수 투과플럭스에 대한 혼합용액의 투과플럭스의 비로 정의한 상대 투과플럭스는 YM3, YM1, YM10 및 YM30 막의 순서로 감소하여 YM3 막의 상대 투과플럭스가 가장 큼을 알 수 있었다.

참고 문헌

1. 최기련, 박원훈, "지속 가능한 미래를 여는 에너지와 환경", 김영사, 서울 (2002).
2. H. F. Mark, D. F. Othmer, C. G. Overberger, and G. T. Seaborg, "Encyclopedia of Chemical Technology", Vol. 4, 387-410, John Wiley & Sons, NY (1978).
3. G. P. Broom, R. C. Squires, M. P. J. Simpson, and I. Martin, "The treatment of heavy metal effluents by crossflow microfiltration", *J. of Mem. Sci.*, **87**, 219 (1994).

4. 이동훈, 김래현, 정건용, “분리막을 이용한 무전해 PCB 도금 폐수의 재활용”, *멤브레인*, **13**(1), 9 (2003).
5. L. L. Schramm and D. G. Marangoni, *Surfactants: Fundamentals and Applications in the Petroleum Industry*, “Surfactants and Their Solutions: Basic Principles”, eds. L. L. Schramm, 3, Cambridge University Press, UK (2000).
6. P. E. M. Overdeest, J. T. F. Keurentjes, A. van der Padt, and K. van't Riet, *Surfactant-Based Separations: Science and Technology*, “Resolution of Enantiomers Using Enantioselective Micells in Ultrafiltration Systems”, eds. J. F. Scamehorn and J. H. Harwell, 123, American Chemical Society, Washington (2000).
7. B. L. Roberts, J. F. Scamehorn, and S. D. Christian, *Surfactant-Based Separations: Science and Technology*, “Micellar-Enhanced Ultrafiltration in a Spiral Wound Ultrafiltration Module and Comparison with Stirred Cell Performance”, eds. J. F. Scamehorn and J. H. Harwell, 158, American Chemical Society, Washington (2000).
8. S. J. Park, H. H. Yoon and S. K. Song, “Solubilization and micellar-enhanced ultrafiltration of *o*-cresol by sodium dodecyl sulfate micelles”, *Korean J. of Chem. Eng.*, **14**(4), 233 (1997).
9. 양현수, 한광희, 강덕원, 송명재, 김영호, “미셀형성을 이용한 한외여과 막에서의 코발트(Co), 마그네슘(Mg) 이온 제거”, *HWAHAK KONGHAK*, **34**(4), 482 (1996).
10. J. F. Scamehorn, S. D. Christian, D. A. El-Sayed, H. Uchiyama, and S. S. Younis, “Removal of divalent metal cations and their mixtures from aqueous streams using micellar-enhanced ultrafiltration”, *Sep. Sci. Technol.*, **29**(7), 809 (1994).
11. 이근우, 조순행, “미셀을 이용한 한외여과 막 공정에 의한 시안함유 중금속폐수의 처리”, *대한환경공학회지*, **16**(3), 391 (1994).
12. Y. C. Huang, B. Batchelor, and S. S. Koseoglu, “Crossflow surfactant-based ultrafiltration of heavy metals from wastewater streams”, *Sep. Sci. Technol.*, **29**(15), 1979 (1994).
13. J. J. Hong, S. M. Yang, C. H. Lee, Y. K. Choi, and T. Kajiuchi, “Ultrafiltration of divalent metal cations from aqueous solution using polycarboxylic acid type biosurfactant”, *J. Colloid Interf. Sci.*, **202**, 63 (1998).
14. 김승건, 이호원, 강영주, “미셀을 이용한 한외여과에서 카드뮴, 납 이온의 제거에 대한 교반시간의 영향”, *첨단기술연구소 논문집*, **13**(2), 111 (2002).
15. D. A. Skoog and D. M. West, “Analytical Chemistry”, 3rd ed., Holt, Rinehart & Winston, PA (1979).