

‘2001 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

MEUF 공정에 의한 방사성 폐액처리시 미셀표면에서 우라늄이온의 흡착특성

Adsorption Characteristics of Uranyl Ions onto Micelle Surface for Treatment of
Radioactive Liquid Wastes by Micelle Enhanced Ultrafiltration Technique

이 근우*, 최 왕규, 정 경환, 이 동규, 정 기정

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

본 연구는 최근 폐수처리공정으로 개발된 MEUF(Micelle Enhanced Ultrafiltration)에 의해서 우라늄함유 폐액의 처리를 목적으로 용액내 다양한 형태로 존재하는 우라늄 이온의 제거거동을 조사하였다. 이의 실험은 회분식 UF Stirred Cell을 이용하였으며 용액의 pH, 우라늄 및 계면활성제 농도와 같은 조업조건에 따라 우라늄의 제거효율을 측정하였다. 우라늄의 제거효율은 pH 및 우라늄과 계면활성제의 몰비에 따라 결정되며, pH가 3~5이고 SDS의 농도가 40 mM인 조건에서 우라늄은 95%이상 제거되었다. 그러나 전해질의 농도 증가에 따라 우라늄의 제거성능은 감소하였으며, 전해질이 1가 이온보다 2가 이온인 경우 더 급격히 감소하였다. 제거효율은 용액내 개별 우라늄 이온들의 크기나 전하 뿐만아니라 용액내 화학종의 존재 비율에 의해서 크게 좌우되었고, 이들의 제거특성을 겔보기 분배계수를 정의하여 평가하였다. 실험조건하에서 미셀에 대한 각 우라늄이온들의 흡착 정도는 $UO_2^{2+} > UO_2OH^+ > (UO_2)_2(OH)_2^{2+} > (UO_2)_4(OH)_7^+ > (UO_2)_3(OH)_5^+$ 의 순으로 관찰되었다.

Abstract

The objective of this investigation is to establish the rejection behavior of uranium bearing waste water by micelle enhanced ultrafiltration technique. An extensive experimental investigation was conducted with uranium only and uranium in the presence of electrolyte, utilizing ultrafiltration stirred cell. The effects of experimental parameters such as solution pH and concentration of uranium on rejection were examined from the change of micelle concentration. The rejection dependence of the uranium was

found to be a function of pH and uranium to surfactant concentration ratio. Over 95% removal was observed at pH 3~5 and SDS concentration of 40 mM. In the presence of electrolytes, the rejection of uranium was observed to decrease significantly, the addition of cobalt ion showed more reduction than that obtained by presence of sodium and cesium ions on rejection of uranium. The rejection behavior was explained in terms of apparent distribution constants. The rejection efficiencies of uranyl ions was significantly affected by the chemical species of the given system. For all cases, the rejection was highly dependent on uranium complex species.

1. 서론

핵연료 변환시설이나 핵연료 가공시설 등 핵연료주기 시설로부터 발생하는 액체 폐기물 내 존재하는 α -핵종인 우라늄은 반감기가 길고 방사성 위험지수가 상대적으로 커서 처리 및 처분 관점에서 세심한 주의를 요한다. 우라늄함유 폐기물은 발생 시설의 사용목적에 따라 폐기물의 특성이 매우 다르기 때문에 이에 적합한 처리기술이 요구된다. 특히 국내 우라늄 변환시설은 이산화우라늄분말 생산과 관련 연구개발 시설로 연구개발 과정에서 발생되어 우라늄뿐만 아니라 여러 가지 유·무기 화학물질이 혼합된 혼성폐기물로서 다양한 특성을 갖기 때문에 이에 적합한 처리기술을 개발해야 한다.

지금까지 이러한 폐기물의 처리기술은 철이나 명반(Alum)을 사용한 응집-여과, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 및 MgCO_3 를 사용하여 우라늄을 침전시켜 슬러지로 만든 후 슬러지를 탈수하여 최종 처분 또는 저장조건에 따라 고화하는 방법으로 처리하여 왔다. 그러나 고농도 염이나 유기물을 포함한 폐액인 경우 용해도가 pH에 민감하여 좁은 범위의 최적 pH를 벗어날 경우 다시 용해되어 처리 성능을 유지할 수 없게 되고, 아울러 금속수산화물 형태의 침전물은 처분시 침출문제를 야기시키는 문제점도 지적되고 있다.

최근 폐수처리공정으로 제시된 MEUF(micelle-enhanced ultrafiltration)공정은 처리효율이 좋고 운전이 용이하며, 금속 및 유기오염물을 동시에 처리할 수 있는 공정으로써 관심의 대상이 되고 있다.

MEUF공정은 폐수내에 존재하는 계면활성제를 이용하거나 미량의 계면활성제를 주입하여 CMC(Critical Micelle Concentration)이상으로 조절하면 50~150개의 계면활성제 분자가 결합하여 형성되는 미셀에 금속이나 유기물질을 흡착시켜 UF(Ultrafiltration)으로 분리 제거하는 개념으로 Fig. 1에 이를 나타내었다.

미셀은 처리대상 물질의 특성에 따라 양이온, 음이온 및 비이온성 미셀을 사용하며, 양이온 금속의 처리를 위해서는 음이온성 미셀을 사용하게 된다. 이러한 미셀은 미셀의 크기보다 작은 세공크기를 갖는 한외여과막에 의하여 효율적으로 분리할 수 있다. 이 단계

에서 미셀은 막에 의해서 제거되고, CMC 이하의 미량의 계면활성제와 미셀에 결합하지 못한 오염물은 막을 투과하게 된다. 막을 투과하지 못한 미셀은 고농도의 오염물과 함께 농축하게 된다. 따라서 MEUF의 성능은 미셀표면에서 오염물질의 결합(흡착)용량과 UF 공정에 의한 미셀의 분리능력에 의해서 좌우된다. 이 공정은 실험실 단계에 있으며, 현재 실용화를 위한 많은 연구가 수행되고 있다.

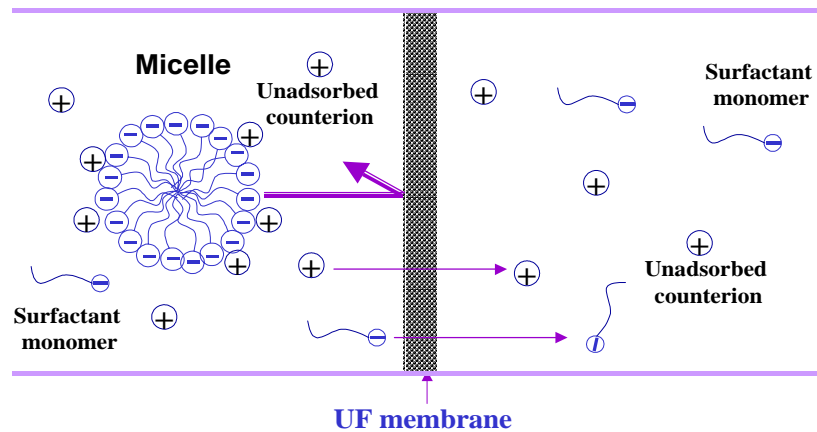


Fig. 1. Concept for removal of radionuclides by micelle and ultrafiltration membrane.

본 연구에서는 MEUF공정에 의해서 우라늄함유 방사성 폐액의 처리를 목적으로 미셀에서의 우라늄이온의 흡착특성과 한외여과막에 의한 미셀의 분리성능을 조사하였다. 이의 연구는 MEUF공정의 성능을 결정하는 주 인자인 미셀표면에서 여러종류의 우라늄이온의 결합정도를 조사하기 위한 것으로, 회분식 UF stirred cell을 이용하였다. 실험은 용액의 pH, 우라늄 및 계면활성제의 농도 변화에 따라 우라늄의 제거효율을 측정하였다. 이들의 흡착거동은 complex species distribution model식을 이용하여 각각의 우라늄이온들에 대한 흡착특성을 설명하였고, 이로부터 개별 분배계수를 구하였다.

2. 실험

2.1. 시약 및 재료

실험에 사용한 계면활성제는 순도 99%의 Sodium dodecyl sulfate(SDS : sigma)로 정제하지 않고 사용하였다. 순수조건(deionized water condition)에서 이 물질이 미셀을 형성하는 최소농도인 CMC는 8.6×10^{-3} M이며 실험중 계면활성제 용액에 금속이온을 주입하면 CMC가 감소하므로 이 값이 최대의 CMC가 된다. 우라늄(VI) stock solution은 $UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ (BDH Chemiacs, 98%)을 사용하여 제조하였다. 또한 전해질 영향을 보기 위해 NaCl, CsCl, $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ 을 각각 주입하였다. 실험전반에 걸쳐 사용된 물은 1차 증류수를 이온교환수지와 초정밀여과기로 정제하여 사용하였다.

UF막은 친수성인 cellulose계이며 분극분자량(Molecular Weight Cut-off)이 10,000인 YM10(Amicon사)막을 사용하였다.

2.2. 실험장치 및 방법

실험장치는 Amicon사 제품의 UF stirred cell(용량: 50ml)를 사용하였고, 막의 유효면적은 13.4cm²이었다(Fig.2). SDS, U(VI), NaCl, CsCl, CoCl₂·6H₂O의 농도는 실험목적에 따라 적절히 변화시켰으며 용액의 pH는 NaOH와 HCl을 사용하여 조절하였다. 각 실험은 SDS 용액에 금속이온을 주입하여 pH를 조절한 후 충분히 혼합하여 UF막에 주입하였다. UF막의 주입압력은 40 psi로 일정하게 유지시켰고 시료채취는 초기에 투과되는 3ml은 버린 다음 10ml을 취하였다.

우라늄의 농도는 ICP(JOBIN YVON, JY 38 Plus), Na⁺, Cs⁺, Co²⁺이온의 농도는 원자흡수분광기(Perkin Elmer, 1100B)를 사용하여 분석하였고 투과액의 SDS 농도는 전위차적정법(Metrohm 716 DMS Titrino)을 이용하여 측정하였다.

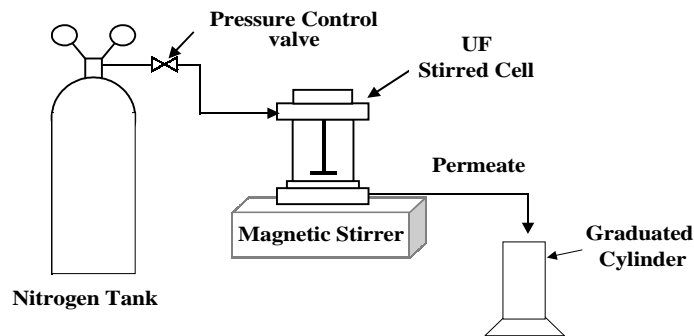


Fig. 2. Schematic diagram of ultrafiltration experimental equipment.

용액내에 형성된 미셀을 UF막에 의하여 분리시키면 UF막을 투과한 계면활성제의 농도가 CMC가 된다. 한편 실험중 계면활성제 용액내의 금속이온 농도가 변하면 CMC가 변하므로 UF막에 의한 미셀의 분리정도를 확인하기 위하여 주기적으로 UF막을 투과한 계면활성제의 농도를 측정하였다.

UF공정의 제거효율(% R) 미셀에 결합된 우라늄이온이 UF막에 의해서 완전히 분리되고 미셀에 결합하지 못한 분자는 막을 투과한다고 가정하여 공급액의 농도 및 막의 투과액 농도로부터 다음 식에 의해서 계산하였다.

UF공정에 의한 제거효율(R[%])은 다음 식에 의해서 계산하였다.

$$R(\%) = \left(1 - \frac{C_P}{C_R}\right) \times 100$$

이 식에서 C_P는 막의 투과액 농도이고 C_R는 공급액(retentate)의 농도이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 우라늄의 제거

우라늄이 함유된 용액내에는 UO_2^{2+} , UO_2OH^+ , $(\text{UO}_2)_2(\text{OH})_2^{2+}$, $(\text{UO}_2)_3(\text{OH})_5^+$, $(\text{UO}_2)_4(\text{OH})_7^+$, $(\text{UO}_2)_3(\text{OH})_7^-$ 등과 같은 여러종류의 우라늄수산화물 형태로 존재하게 되고, 또한 이들은 용액의 pH 및 농도에 따라 분포비율은 변한다. Fig. 3은 우라늄 농도 5 ppm에서 pH에 따른 각 화학종의 분포율을 나타내었다. pH 7 이하에서는 대부분이 양이온 형태의 우라늄 수산화물 형태로 구성되고 미량만이 분자상태로 존재함을 관찰할 수 있다. 이온성 미셀에 의한 금속이온의 흡착은 미셀의 표면특성과 이온의 크기 및 원자가에 의해서 결정되는 것으로 알려져 있다. 따라서 음이온 미셀에 의한 우라늄이온의 흡착은 미셀의 농도, U_T 의 농도 및 용액의 pH에 의해서 결정될 수 있다.

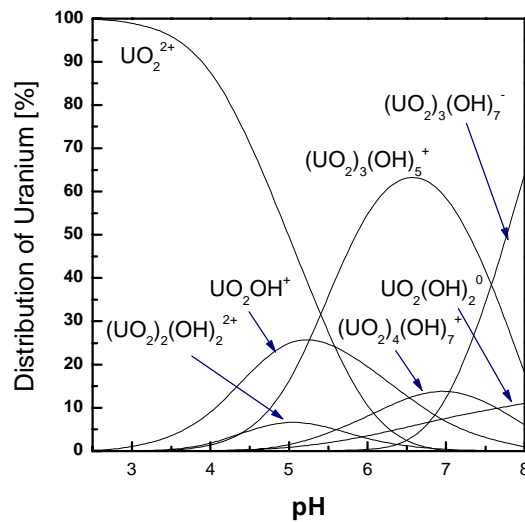


Fig. 3. Distribution diagram of uranyl species as a function of pH.

Fig. 4은 SDS 농도를 70 mM로 일정하게 유지시키고 pH 3과 pH 5에서 우라늄의 농도를 50 ppm에서 200 ppm로 증가시켰을 경우 우라늄 제거율의 관계를 나타내고 있다. 먼저 용액의 pH를 3으로 조정 한 경우, 우라늄의 농도변화에 따른 제거율에는 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다. pH 3의 경우, 우라늄의 농도와 상관없이 용존우라늄의 99% 이상이 UO_2^{2+} 의 형태로 존재하므로 충분히 높은 계면활성제의 농도(70 mM)에서는 대부분의 UO_2^{2+} 가 미셀에 흡착되어 제거율을 97%이상으로 유지할 수 있다. 반면 pH 5로 조정 한 경우는 우라늄의 농도가 증가할수록 용존 우라늄중 UO_2^{2+} 와 $(\text{UO}_2)_2(\text{OH})_2^{2+}$ 의 양은 감소하고 $(\text{UO}_2)_3(\text{OH})_5^+$ 가 차지하는 비율이 증가하여 우라늄 농도가 증가할수록 제거율이 서서히 감소하는 경향을 관찰할 수 있다. 전반적으로 우라늄의 농도 증가에 따라 제거율은 점점 감소하며 우라늄의 농도가 200 ppm인 경우 약 92%로 제거율을 나타내어 음이온

미셀표면에서의 우라늄의 결합은 매우 효율적임을 보여준다.

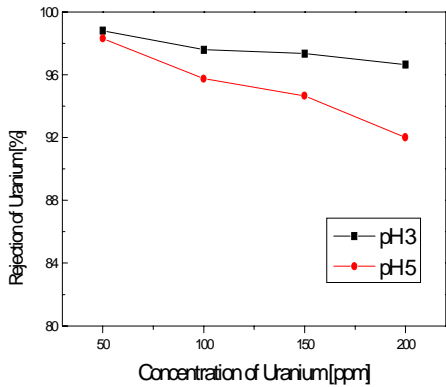


Fig. 4. Effect of uranium concentration on [U]_T rejection.

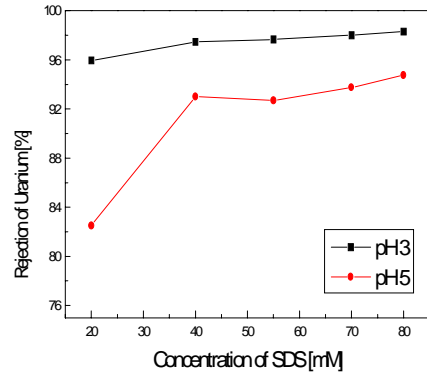


Fig. 5. Effect of SDS concentration on [U]_T rejection.

Fig. 5는 SDS의 농도에 따른 우라늄의 제거율은 나타내었다. SDS의 농도를 20 mM에서 80 mM까지 증가시켰을 때 우라늄의 제거율은 점점 증가하였다. 이는 SDS의 농도가 증가하여도 CMC는 일정하게 유지되기 때문에 SDS 미셀과 SDS 단분자 사이의 평형관계로부터 SDS의 농도증가에 따라 미셀의 농도분율 증가에 의해서 흡착 Site가 증가하기 때문에 우라늄의 흡착량이 증가하는 것으로 설명할 수 있다.

Fig. 6은 용액의 평형 pH에 따른 우라늄 이온의 제거율을 본 것이다. 우라늄이온은 실험조건하에서 대부분이 UO_2^{2+} , UO_2OH^+ , $(UO_2)_2(OH)_2^{2+}$, $(UO_2)_3(OH)_5^+$, $(UO_2)_4(OH)_7^+$, $(UO_2)_3(OH)_7^-$ 의 형태로 존재하게 되고 이들은 용액의 pH 및 농도에 따라 분포비율이 변한다. 실험 결과 낮은 pH에서는 주로 UO_2^{2+} 로 존재하다가 pH가 증가할수록 UO_2OH^+ 의 생성으로 제거율이 감소한다. 그 이상의 pH에서는 미셀과 결합이 용이한 UO_2^{2+} 은 미량 존재하고 $UO_2(OH)_2^0$ 및 UO_2^{2+} 에 비해 상대적으로 미셀과의 결합력이 약한 화합물의 생성에 기인하는 것으로 생각된다.

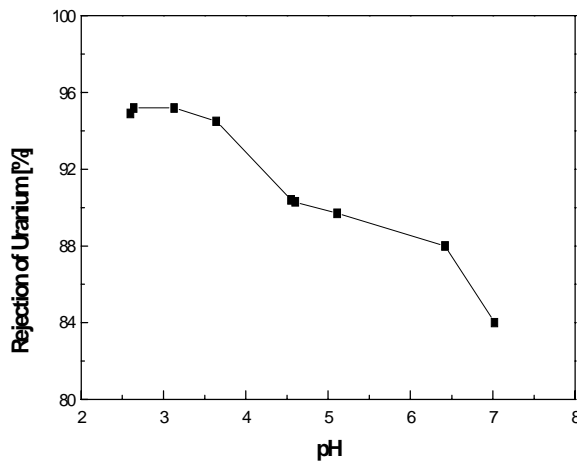


Fig. 6. Effect of solution pH on [U]_T rejection.

이와 같은 결과로부터 우라늄의 제거성능은 용액내 존재하는 각 화학종들의 평형관계와 미셀에 대한 결합력과의 상관작용에 의해서 결정됨을 알 수 있다.

전해질의 농도가 증가함에 따라 permeate SDS의 농도는 감소한다. 이는 계면활성제 용액내에 전해물질이 존재하면 미셀을 둘러 싸고 있는 전기이중층의 압축(compression)이 일어나고 그로 인해 미셀머리 사이의 정전기적 반발력이 감소하여 CMC값이 감소하기 때문이다. 수용액상에서 계면활성제의 CMC값은 상대이온의 미셀에 대한 결합도를 반영하는데 상대이온의 결합도가 증가할수록 CMC값은 낮아진다. 상대이온의 결합도는 이온의 편극률(polarizability)과 원자크가 클수록 증가하며 수화반경에 반비례한다. 수화반경은 크기가 작고 높은 전하의 이온이 작는데 같은 전하를 가진 이온에서는 수화반경이 CMC에 어느 정도 영향을 주겠지만 보통 수화반경보다는 이온의 전하에 따라 CMC가 크게 변한다. Fig. 7에서 보이는 바와 같이 상대이온이 일가에서 다가이온으로 교환될수록 계면활성제의 CMC값은 급격하게 감소한다. 위 실험경과에서도 알수 있듯이 같은 1가 이온인 Na^+ 나 Cs^+ 보다는 2가 이온인 Co^{2+} 를 주입했을 때 CMC값이 급격하게 감소함을 알 수 있다.

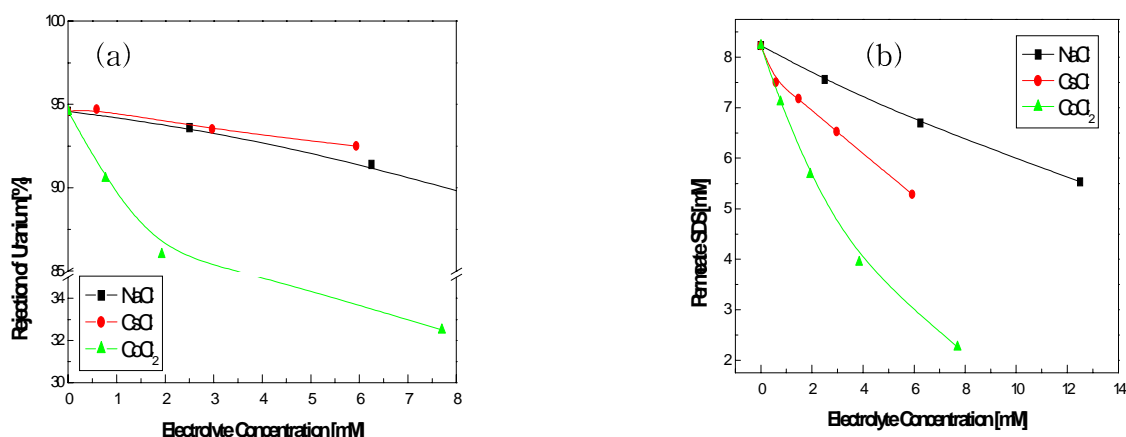
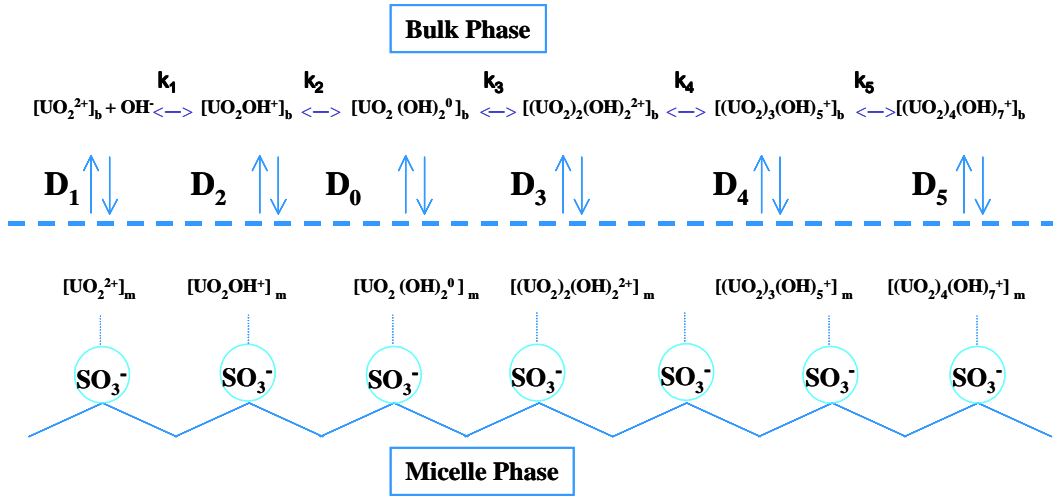


Fig. 7. Effect of electrolyte concentration on the rejection of uranium(a) and on the permeate SDS concentration(b).

3.2. 분배계수 평가

미셀용액내에 존재하는 우라늄은 가수분해반응에 의해서 여러 가지 화학종을 이루게 되고, 이들 각 화학종들은 미셀상의 작용기와의 상호작용에 의해서 흡착하게 된다. 각각의 화학종들이 미셀과 평형을 이룰 때 이들이 미셀과의 결합력과 평형상수와의 관계는 다음과 같이 표현할 수 있다.



여기서 D 는 미셀상과 bulk상 사이에서의 분배계수를 나타내고 K_i 는 평형상수 그리고 m 및 b 는 미셀상과 bulk상을 나타낸다. 미셀상의 부피는 일반적으로 알려져 있지 않지만 계면활성제의 량에 비례한다고 가정하면 겉보기 분배계수 D_U 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$D_U = \frac{[U_T]_m/[S]}{[U_T]_b}$$

여기서 $[U_T]_m$ 은 미셀상에서의 U_T 의 농도이고, $[U_T]_b$ 는 bulk상에서의 U_T 의 농도이다. 또한 $[S]$ 는 우라늄의 존재하에서 계면활성제의 CMC값으로부터 얻을 수 있는 미셀의 농도이다.

본 실험조건(pH 3~10)하에서 우라늄은 대부분이 UO_2^{2+} , UO_2OH^+ , $(UO_2)_2(OH)_2^{2+}$, $(UO_2)_3(OH)_5^+$, $(UO_2)_4(OH)_7^+$, $(UO_2)_3(OH)_7^-$ 의 형태로 존재하며, $(UO_2)_4(OH)_7^-$ 은 음이온 미셀에서 흡착이 일어나지 않는다고 가정하면 $[(UO_2)_4(OH)_7^-]_m$ 은 무시될 수 있다.

$$[U_T]_b = [UO_2^{2+}]_b + [UO_2OH^+]_b + [(UO_2)_2(OH)_2^{2+}]_b + [(UO_2)_3(OH)_5^+]_b + [(UO_2)_4(OH)_7^+]_b + [(UO_2)_3(OH)_7^-]_b$$

$$[U_T]_m = [UO_2^{2+}]_m + [UO_2OH^+]_m + [(UO_2)_2(OH)_2^{2+}]_m + [(UO_2)_3(OH)_5^+]_m + [(UO_2)_4(OH)_7^+]_m$$

미셀상과 bulk상 사이에서의 각각 화학종에 대한 크기 인자와 bulk상에서의 평형관계식은 다음과 같다.

$$D_1 = \frac{[UO_2^{2+}]_m/[S]}{[UO_2^{2+}]_b}$$

$$k_1 = \frac{[UO_2OH^+]_b[H^+]}{[UO_2^{2+}]_b}$$

$$D_2 = \frac{[(UO_2OH^+)]_m / [S]}{[(UO_2OH^+)]_b}$$

$$k_2 = \frac{[(UO_2)_2 (OH)_2^{2+}]_b [H^+]^2}{[(UO_2^{2+})]_b^2}$$

$$D_3 = \frac{[(UO_2)_2 (OH)_2^{2+}]_m / [S]}{[(UO_2)_2 (OH)_2^{2+}]_b}$$

$$k_4 = \frac{[(UO_2)_3 (OH)_5^+]_b [H^+]^5}{[(UO_2^{2+})]_b^3}$$

$$D_4 = \frac{[(UO_2)_3 (OH)_5^+]_m / [S]}{[(UO_2)_3 (OH)_5^+]_b}$$

$$k_5 = \frac{[(UO_2)_4 (OH)_7^+]_b [H^+]^7}{[(UO_2^{2+})]_b^4}$$

$$D_5 = \frac{[(UO_2)_4 (OH)_7^+]_m / [S]}{[(UO_2)_4 (OH)_7^+]_b}$$

$$k_9 = \frac{[(UO_2)_3 (OH)_7^-]_b [H^+]^7}{[(UO_2^{2+})]_b^3}$$

상기 각각의 개별 크기인자와 평형관계식을 결합하여 정리하면 U_T 의 총괄 걸보기 분배계수는 다음과 같다.

$$D_U = \frac{[U_T]_m / [S]}{[U_T]_b}$$

$$= \frac{D_1 [H^+]^7 + k_1 D_2 [H^+]^6 + k_4 D_3 [H^+]^5 [UO_2^{2+}]_b + k_5 D_4 [H^+]^2 [UO_2^{2+}]_b^2 + k_9 D_5 [UO_2^{2+}]_b^3}{[H^+]^7 + k_2 [H^+]^3 [UO_2^{2+}]_b + k_4 [H^+]^2 [UO_2^{2+}]_b^2 + k_5 [UO_2^{2+}]_b^3 + k_9}$$

따라서 U_T 의 걸보기 분배계수는 미셀의 농도에 무관하게 pH와 우라늄 각 화학종의 흡착에 대한 크기인자 그리고 평형상수의 관계로 나타낼 수 있다.

또한 각 화학종의 제거율(R_i)과 용액내 화학종의 분율(θ_i) 및 분배계수와의 관계는 다음과 같다.

$$R_i = 1 - [U_i]_b / [U_i]_T, \quad 1 - R_i = 1 / (1 - D_i [S])$$

$$\theta_i = [U_i] / [U]_T$$

상기 관계식으로부터 총 제거율(R_T)는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} R_T &= 1 - \sum([U_i]_b / [U]_T) = 1 - \sum \theta_i (1 - R_i) \\ &= 1 - \sum (\theta_i / 1 + D_i [S]) \end{aligned}$$

U_T 의 흡착거동을 조사하기 위해서 상기 식에 의해서 SDS와 U_T 의 농도 및 pH 변화에 의해서 각각의 화학종별 크기입자를 구한 결과 UO_2^{2+} 는 $1,116 \text{ [mole/L]}^{-1}$, UO_2OH^+ 는 $639 \text{ [mole/L]}^{-1}$, $(UO_2)_2(OH)_2^{2+}$ 은 $498 \text{ [mole/L]}^{-1}$, $(UO_2)_3(OH)_5^+$ 는 $120 \text{ [mole/L]}^{-1}$, $(UO_2)_4(OH)_7^+$ 은 $432 \text{ [mole/L]}^{-1}$ 를 얻었다. 이를 검증하기 위해서 각 화학종별 크기 인자로부터 구한 제거율과 실험에 의해서 구한 총괄제거율과의 관계를 Fig. 8에 나타내었다. 그림에서 보이는바와 같이 pH 5이하에서는 비교적 잘 일치하였으나 높은 pH 영역에서는 큰 편차를 나타내었다. 이와같은 결과는 낮은 pH 범위에서는 UO_2^{2+} 이 주 화학종으로 존재하고 미량의

UO_2OH^+ 및 $(\text{UO}_2)_3(\text{OH})_5^+$ 이온이 존재하여 UO_2^{2+} 이온과 경쟁흡착으로 이루어지기 때문인 것으로 생각된다. 반면에 pH가 증가하면서 $\text{UO}_2(\text{OH})_2^0$ 과 UO_2CO_3 의 분율이 증가하게 되며, 이는 미셀에 흡착에 의한 것 보다는 한외여과막 자체에 의해서 분리 제거되어 막 표면에 농축되므로서 높은 농도의 계면활성제와의 작용으로 인하여 막의 fouling에 의한 실험오차에 기인되는 것으로 판단된다.

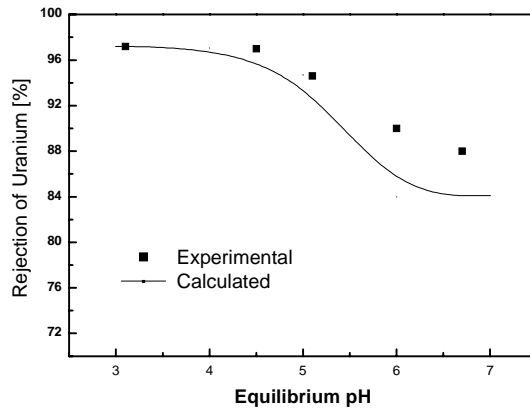


Fig. 8. Uranium rejection as a function of pH compared to the model results.

4. 결론

MEUF에 의해서 우라늄을 제거하기 위해서 수행한 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

우라늄의 제거효율은 용액내 다양한 형태로 존재하는 우라늄 수산화물의 분포비율에 따라 크게 좌우된다. 이는 용액의 pH 및 우라늄과 계면활성제의 몰비에 따라 결정되며, 100 ppm 우라늄에 대해서 pH 3~5이고 40 mM SDS인 조건에서 95% 이상의 제거성능을 얻었다. 용액내 전해질의 농도 증가에 따라 투과되는 계면활성제의 농도는 감소하며, 1가 이온인 Na^+ 이나 Cs^+ 보다 2가이온인 Co^{2+} 를 주입하였을 경우 농도는 급격히 감소하였다. 이는 전해질에 의해서 미셀 머리기 사이의 정전기적 반발력이 감소하여 CMC값이 감소하기 때문인 것으로 생각되며, 전해질 농도를 8 mM까지 증가하였을 때 제거율은 1가 이온인 경우 약 4%, 2가이온인 경우 약 62%까지 감소하였다. 각각의 개별 우라늄 이온들의 흡착 특성은 겔보기 분배계수를 정의하여 평가하였으며, 이 결과 각 이온들의 흡착 정도는 이온의 크기나 전하 뿐만아니라 용액내 존재하는 이온의 분율에 의해서 크게 좌우되는 것으로 보이며, 실험조건에서 이들의 흡착은 $\text{UO}_2^{2+} > \text{UO}_2\text{OH}^+ > (\text{UO}_2)_2(\text{OH})_2^{2+} > (\text{UO}_2)_4(\text{OH})_7^+ > (\text{UO}_2)_3(\text{OH})_5^+$ 의 순으로 관찰되었다.

참고문헌

- 1) Reiller P., Lemordant D., Hafiane A., Moulin C., Beaucaire C., Extraction and release of metal ions by micellar-enhanced ultrafiltration - influence of complexation and pH., *J. Colloid Interface Sci.*, 177, 519(1996)
- 2) Tondre C., Hebrant M., Perdicakis M., Bessiere J., Removal of copper ions by micelle-based separation processes. Electrochemical behavior of copper ions trapped in micellar particle., *Langmuir*, 13(6), 1446(1997)
- 3) Masayuki N., Shoko Y., Distribution of acetylcholine chloride between the micellar and bulk phases as studied by ultrafiltration., *J. Chem, Pharm. Bull.*, 33(7), 2654(1985)