

## AOPP-g-AN 섬유이온교환체를 이용한 간수로부터 우라늄 이온 흡착특성에 관한 연구

황택성<sup>†</sup> · 최재은\* · 이재천\* ·

충남대학교 공과대학 화학공학과, \*한국 지질 자원 연구원 자원환경연구부  
(2001년 8월 8일 접수, 2001년 11월 20일 채택)

### A Study of Adsorption Characteristics of Uranium Ion Using Amidoximated PP-g-AN Fibrous Ion-exchanger in Brine Water

Taek-Sung Hwang<sup>†</sup>, Jae-Eun Choi\*, and Jae-Chun Lee\*

Department of Chemical Engineering, College of Engineering,  
Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

\*Korea Institute of Geology, Mining and Materials, Daejeon 305-350, Korea

<sup>†</sup>e-mail: tshwang@cuvic.cnu.ac.kr

(Received August 8, 2001; accepted November 20, 2001)

**요약** : Acrylonitrile을 그래프트시킨 아미드옥심화 polypropylene 섬유이온교환체(AOPP-g-AN)의 충전 bed 높이를 변화시켜 간수 중 우라늄 이온 흡착 특성 및 흡착 공정 특성을 관찰하였다. 아미드옥심형 섬유이온교환체의 팽윤율은 그래프트율 100%, 물과 과산화수소 용매에 대하여 각각 8.54, 8.87 g/g을 나타내었다. 이온교환용량은 그래프트율이 증가함에 따라 증가하였으며, 그래프트율 100%에서 3.99 meq/g으로 최대를 나타내었다. 회분식 흡착에서 우라늄 흡착은 10분 이내에 초기 흡착 평형에 도달하며, 흡착 속도는 9.50 mg/min으로 나타났다. 최종 흡착 용량은 3.95 meq/g이었으며, pH에 따른 흡착 특성 변화는 관찰되지 않았다. 충전비에 따른 연속식 흡착시 흡착 용량은  $L/D=1$ 에서 3.92 meq/g으로 최대를 나타내었으며,  $L/D<2$ 에서 편류 및 불균일 흡착에 의한 2단계 과정으로 파과가 나타남을 확인하였다. 실제 간수에 대한 우라늄 흡착 실험 결과, 흡착 용량 및 파과시간은 각각 3.63 meq/g, 26 min으로 모의용액과 비교 시 주목할만한 흡착능 저하는 관찰되지 않았다.

**ABSTRACT** : We investigated uranium adsorption and adsorption process characteristics in brine water, changing column bed height packed with amidoximated polypropylene-g-acrylonitrile(AOPP-g-AN) fibrous ion-exchanger. Swelling ratios of AOPP-g-AN in fibrous ion-exchanger were 8.54 g/g H<sub>2</sub>O and 8.87 g/g for H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> solvent respectively. Ion exchange capacity increased with degree of graft and showed the maximum, 3.99 meq/g at 100% degree of graft. In batch process, uranium adsorption had reached an initial equilibrium in 10 min with the adsorption rate of 9.5 mg/min. Final adsorption capacity was 3.95 meq/g, and pH effect could not be observed. In continuous process, adsorption capacity depended on various packing ratios and showed the maximum, 3.92 meq/g at  $L/D=1$ . In  $L/D<2$ , breakthrough curve was shown two step by channeling flow and ununiform adsorption. Breakthrough time and adsorption capacity were 26 min and 3.63 meq/g, respectively, in brine water adsorption. When compared with actual brine water and model solution, there was no significant difference of adsorption characteristics.

**Keywords** : uranium adsorption, fibrous ion exchanger,  $L/D$ , brine water.

## 서 론

최근 산업과 문명의 발달로 에너지 수요가 증가하고 있으며, 이에 따른 새로운 에너지 자원의 확보에 많은 관심이 집중되고 있다. 현재 사용되고 있는 원료의 대부분은 석탄, 석유와 같은 화석연료와 수력발전에 의한 에너지의 확보가 주종을 이루고 최근 들어 환경오염 규제가 강화됨에 따라 원자력 발전에 의한 에너지 공급이 증가하고 있는 실정이다. 그러나 원자력 발전에 사용되고 있는 연료인 우라늄의 육상 매장량에 한계가 있어 이의 고갈에 대비한 새로운 공급원의 개발이 시급한 실정이다.<sup>1-4</sup> 따라서 최근 해양자원의 활용에 관심이 집중되고 있는데 해수 중에는 원자력 발전 연료인 우라늄이 약 3 ppb로 안전한 착염 형태로 존재하며 전 대양을 기준할 때 약 46억톤으로 추정되며 이를 회수할 수 있는 소재만 개발된다면 우라늄 자원의 무한한 보고로 등장할 것이다.<sup>5-7</sup> 그러나 해수 중 우라늄은 그 농도가 매우 희박하여 이들을 회수하기 위해서는 막대한 비용이 소요되며 현재 이 부분에 대한 간헐적 연구만 이루어지고 있는 실정이다. 지금까지 알려진 해수 우라늄 회수 방법에는 공침법, 산화·환원법, 흡착법, 생물학적 방법 및 이온교환법 등이 있다. 이 중에서 이온교환법은<sup>8</sup> 특정 금속이온에 선택흡착성이 있고 제조가 간편하며 타 공정에 비해 저렴하며 특히 재생성이 있어 관심이 집중되고 있다. 이온교환법은 오래 전부터 알려진 기술로 종래에는 주로 비드 형태를 칼럼에 충전시켜 흡착 처리하였으나 비드 이온교환체를<sup>9</sup> 장시간 사용 시 크랙이 발생하고 압력 손실이 커져 분리능이 낮아지고 처리속도가 낮아지는 단점이 있다. 따라서 최근에는 이들 단점을 보완한 섬유이온교환체를 이용한 연구에 많은 관심이 집중되고 있는 실정이다. 지금까지 이 분야에 대한 연구결과를 살펴보면 Egawa 등은<sup>10-12</sup> 우라늄분리를 위하여 acrylonitrile-divinylbenzene(AN-DVB) 구상 공중합체를 합성한 후 아미드옥심화하여 우라늄 분리 실험을 행하였고, Sugasaki 등은<sup>13</sup> 아크릴로니트릴과 PVC 공중합체를 합성 아미드옥심화시킨 후 우라늄 분리 실험을 행하였으며, 섬유이온교환체를 이용한 연구로는 Soldatov 등은<sup>14,15</sup> PP-g-AN 섬유 이온교환체를 방사선 조사에 의해 합성하고 해수우라늄 분리 실험을 행하였다. 지금까지의 연구결과를 볼 때 해수로부터 우라

늄 흡착 소재로는 아미드옥심기를 함유한 소재가 가장 우수한 것으로 알려져 있다. 그러나 해수 우라늄은 농도가 너무 낮고 안정한 착물형태로 존재하여 이의 회수를 위해서는 공정 변수를 고려할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 기존 연구경험을 토대로 정제염 제조 시 발생하는 우라늄농도가 해수보다 매우 높은 간수로부터 우라늄을 보다 경제적으로 회수하기 위하여, 섬유 이온교환체의 충전비(L/D)에 따른 우라늄의 흡착성능을 고찰하였고, ICP 분석을 통해 우라늄의 흡착량을 분석한 후 이를 토대로 섬유 이온교환체의 칼럼 충전 최적조건을 규명하였다.

## 실 험

**시 약.** 본 연구에 사용한 섬유 이온교환체는 아미드옥심화 PP-g-AN(AOPP-g-AN)을 사용하였다.<sup>16</sup> Uranyl nitrate-6-hydrate ( $UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ )는 Merck Chemical사의 특급시약을 사용하였으며, pH 조절용 완충표준용액은 Junsei Chemical사의 제품을 사용하였다. 또한 HCl, NaOH,  $H_2SO_4$ 는 Wako Pure Chemical사의 특급시약을 사용하였으며 기타 용매 등은 특급 시약을 정제하지 않고 그대로 사용하였다.

**팽윤율 측정.** 흡착 공정에 있어 섬유이온교환체 내의 용매 확산 및 용질의 내부 확산 특성을 관찰하기 위하여 AOPP-g-AN 섬유 이온교환체의 증류수 및 각종 용매에 대한 팽윤 특성을 관찰하였다. 팽윤 특성을 관찰하기 위하여 건조된 아미드옥심형 섬유 이온교환체를 증류수 및 각종 용매에 24시간 담가 완전히 팽윤시킨 후, 꺼내어 섬유주변의 용매를 완전하게 제거한 후 무게를 측정하여 다음 (1)식을 이용하여 섬유 이온교환체의 팽윤율을 계산하였다.<sup>17</sup>

$$\text{Swelling Ratio(\%)} = \frac{\text{swelling volume of copolymer}}{\text{apparent volume of dry copolymer}} \quad (1)$$

**이온교환용량 측정.** AOPP-g-AN 섬유 이온교환체의 표준 이온교환용량을 측정하기 위하여 각각의 섬유 이온교환체에 대해 다음과 같은 과정을 통하여 이온교환용량을 측정하였다. 우선 시료 0.1 g을 250 mL 삼각플라스크에 넣은 다음 0.1 N HCl로 총 부피가 100 mL 되도록 제조한 용액을 넣고 24시간 교반시켜 평형

에 이르게 한 후 상등액 10 mL를 분취하여 페놀프탈레인 지시약을 넣고 0.1 N NaOH 표준용액으로 적정하고 (2)식에 의하여 각 시료의 이온교환용량을 계산하였다.<sup>18</sup>

$$\text{Capacity}(\text{meq/g}) = \frac{(V_{\text{NaOH}} \times N_{\text{NaOH}}) - 5 \times (V_{\text{HCl}} \times N_{\text{HCl}})}{\text{weight of fibrous ion-exchanger}} \quad (2)$$

여기서  $M_{\text{HCl}}$ 은 염산용액의 노르말 농도이며,  $M_{\text{NaOH}}$  및  $V_{\text{NaOH}}$ 는 각각 수산화나트륨의 노르말 농도와 소비된 수산화나트륨의 mL 수이다.

**회분식 우라늄 흡·탈착시험.** AOPP-g-AN 섬유이온교환체의 우라늄 이온에 대한 흡착 속도, 초기 흡착평형 시간, 최종 흡착용량 및 흡착 친화도를 관찰하기 위하여 우라늄 모의 용액을 제조하여 회분식 흡·탈착 시험을 수행하였다. 흡·탈착 실험을 위하여 제조한 500 ppm 우라늄 용액 500 mL를 1 L 삼각플라스크에 넣고 AOPP-g-AN 섬유이온교환체 1 g을 넣은 후 0.1 N HCl과 0.1 N NaOH 표준 용액으로 pH=2~10으로 조절한 후 교반하면서 일정간격으로 상등액 10 mL씩 분취하고, 자외선 분광기를 이용하여 Arsenazo(III) 발색시약을 이용한 비색법으로 우라늄 흡착량을 구하였다.<sup>19</sup>

한편 우라늄이 흡착된 이온교환체의 탈착능을 실험하기 위하여 1 N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 용액으로 탈착 실험을 행하였으며, 흡·탈착 반복 실험을 통하여 AOPP-g-AN 섬유 이온교환체의 내구성을 관찰하였다.

**칼럼 충전비(L/D) 변화에 따른 흡·탈착시험.** AOPP-g-AN 섬유 이온교환체의 우라늄 이온에 대한 흡착용량, 파파시간 및 칼럼 충전비에 따른 파파특성을 관찰하기 위하여 Figure 1의 자체 제작한 흡착 장치틀을 이용하여 연속식 흡착 실험을 수행하였다. 사용한 아미드옥심형 섬유 이온교환체는 그래프트율이 100%인 수지를 사용하였다. 이때 흡착실험은 칼럼에 일정량의 섬유를 L/D를 0.5, 1, 2, 3으로 변화시켜 충전하고, 간수 중 우라늄 농도와 동일한 1000 ppm 우라늄 모의용액을 제조한 후 증류수로 희석시켜 200 ppm으로 제조하였다. 우라늄 용액의 유속을 1 mL/sec로 고정하고 칼럼 상부에서 하부로 공급하면서 일정 시간 간격으로 시료를 채취하여 UV-Visible 스펙트럼 분석을 통하여 우라늄 이온의 흡착량을 구하였다. 탈착은 1 N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 용액으로 역세척하여 행하였으며 내

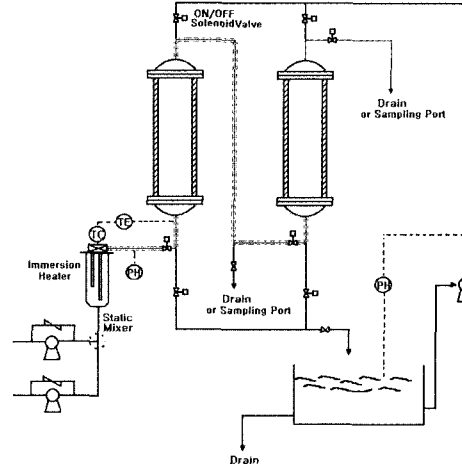


Figure 1. Scheme of continuous adsorption apparatus.

구성 시험 또한 회분식 공정과 동일한 방법으로 10회 흡·탈착 실험을 반복하여 행하였다. 다음 식 (3)을 이용하여 칼럼 충전비에 따른 섬유 이온교환체의 우라늄 이온에 대한 이온교환용량을 계산하였다.

$$\text{Ion Exchange Capacity}(\text{meq/g}) = \frac{T \times V \times C_0}{W \times W_u} \times 2 \quad (3)$$

where,  $T$  = break-through time,

$V$  = inlet flow velocity,

$C_0$  = concentration of modeling solution,

$W$  = weight of packed ion exchanger,

$W_u$  = weight of uranyl ion

**간수에 대한 우라늄 흡착 실험.** AOPP-g-AN 섬유이온교환체의 간수로부터 우라늄 흡착 성능을 시험하기 위하여 모의용액을 이용한 연속 흡착실험과 동일한 방법으로 충전 칼럼의 높이를 변화시켜 흡·탈착 실험을 행하였고, 여액을 분리하여 ICP-AES 분석을 통하여 우라늄 흡착량의 변화를 관찰하였다.

**자외선 분광분석.** 간수 중 우라늄의 흡착량을 비색법으로 분석하기 위해 Perkin Elmer 자외선 분광기를 이용하여 분석하였다. 이때 1 mL의 시료 용액에 0.05% Arsenazo(III)용액 1 mL 가하고, KCl 25 mL와 0.2 M HCl 25 mL, 증류수를 사용하여 제조한 완충 용액 8 mL를 가하여 총 부피가 10 mL가 되게 하여 1시간 동안 방치시켜 발색시킨 후 이 용액을 시료로 하여 스

펙트럼 분석하였다.

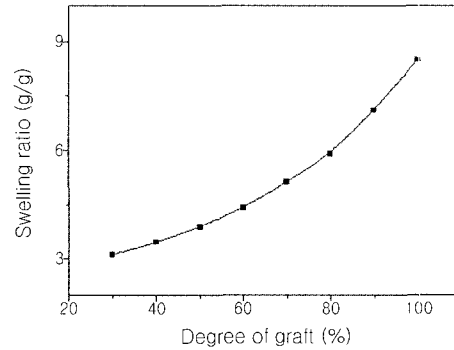
**원소분석.** 흡·탈착 전후의 AOPP-*g*-AN 섬유 이온교환체의 원소의 조성 변화를 관찰하기 위하여 CE Instrument사(model : EA 1110)의 원소분석기를 이용하여 시료를 분석하였다. 운반 기체로 헬륨을 사용하였으며 유속을 180 mL/min로 하였다. 또한 산소의 유속은 15 mL/min였으며 완전 연소 후 연소 가스를 흡수관에 흡수시켜 분석하였다.

**ICP-AES 분석.** AOPP-*g*-AN 이온교환체의 우라늄 이온에 대한 선택 흡착 성능을 시험하기 위하여 자체 제작한 컬럼( $\Phi$  1 cm×10 cm)에 시료 1 g을 충전하고 200 ppm 우라늄 모의 용액을 이용하여 흡·탈착실험을 행하였으며, 일정 시간 간격으로 여액을 채취하여 ICP-AES 분석으로 우라늄 농도를 분석하였다.

**결과 및 고찰**

**흡수율 측정.** 섬유 이온교환체의 흡수율은 흡착 공정에 있어서 섬유 이온교환체 내에서의 용매 및 용질의 확산 속도 및 친화도에 따른 흡착 공정 특성을 나타낸다. 따라서 본 연구에서 사용한 AOPP-*g*-AN 섬유 이온교환체의 흡수율을 측정하였는데 그 결과가 Figure 2와 Table 1에 나타나 있다. Figure 2는 AOPP-*g*-AN 섬유 이온교환체의 그래프트율에 따른 흡수량과의 관계를 나타낸 것이다. Figure 2에서 보는 바와 같이 흡수율은 섬유 이온교환체의 그래프트율이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다. 이와 같이 그래프트율이 증가함에 따라, 흡수율이 증가하는 것은 공중합체 내에 도입된 AN 단량체의 친수 시아노기의 증가로 친수성이 증가하기 때문으로 사료되었다.

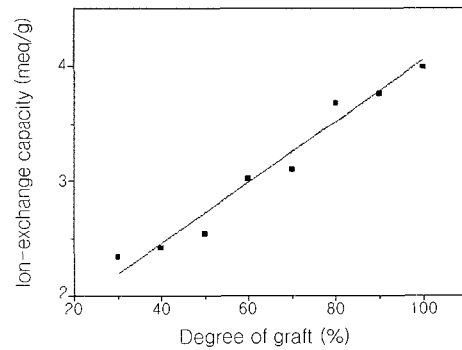
한편 Table 1은 그래프트율 100%인 아미드옥심형 섬유 이온교환체의 서로 다른 용매에 대한 팽윤을 시험한 결과이다. Table 1에서 보는 바와 같이 AOPP-*g*-AN의 팽윤율은 H<sub>2</sub>O와 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>에서 각각 8.54, 8.87 g/g으로 가장 크게 나타났는데 이는 알콜보다 H<sub>2</sub>O가 극성이 커서 AOPP-*g*-AN 섬유 이온교환체의 아미드옥심기와 친화력이 있어 팽윤율이 증가하는 것으로 사료되었다. 따라서 이러한 결과로부터 AOPP-*g*-AN 섬유 이온교환체는 본 연구의 목적인 해수로부터 우라늄 분리 시 해수 중에서 섬유 이온교환체의 팽윤성이 증가하여 우라늄이온의 내부 확산이 용이해져 섬유 이



**Figure 2.** Plot of swelling ratio of amidoximated fibrous ion-exchanger(AOPP-*g*-AN) vs degree of graft.

**Table 1. Measured Swelling Ratio of AOPP-*g*-AN Fibrous Ion-exchanger in Various of Solvents**

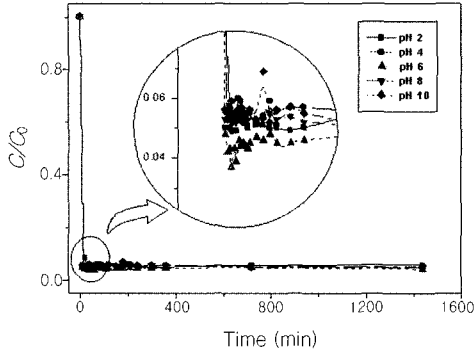
solvent	CH <sub>3</sub> OH	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> OH	C <sub>4</sub> H <sub>11</sub> OH	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
swelling ratio (g/g)	7.12	7.28	7.52	7.88	3.54	8.87



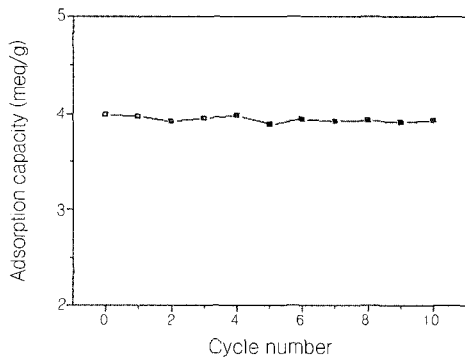
**Figure 3.** Relationship between ion-exchange capacity and degree of graft of AOPP-*g*-AN ion-exchanger.

온교환체의 리간드에 우라늄이온이 착물 형성반응을 용이하게 한 것으로 사료되었다.

**AOPP-*g*-AN 이온교환용량.** AOPP-*g*-AN 섬유 이온교환체의 그래프트율변화에 따른 이온교환용량 측정 한 결과가 Figure 3에 나타나 있다. Figure 3에서 보는 바와 같이 AOPP-*g*-AN이온교환 용량은 그래프트율이 증가함에 따라 이온교환용량이 증가하였으며, 그래프트율 100%에서 3.99 meq/g으로 최대를 나타내었다. 이는 그래프트율의 증가에 따라 관능화 반응 시 아미드옥심기의 도입량이 관능화도의 증가로 인하



**Figure 4.** Adsorption capacity of AOPP-g-AN fibrous ion-exchanger for uranium ion as function of time for several different pH ( $C_0$ : inlet concentration,  $C$ : outlet concentration).



**Figure 5.** Plot of adsorption capacity of AOPP-g-AN fibrous ion-exchanger vs. regeneration frequency for uranium ion.

여 팽윤율이 증가하고, 이온들의 내부확산이 용이해져 도입된 아마이드옥심기와 이온교환이 용이해지기 때문으로 사료되었다.

**회분식 공정에 의한 우라늄 흡착.** AOPP-g-AN 섬유 이온교환체의 섬유 충전 bed비 변화에 따른 흡착량 변화를 시험하기 위한 전단계로 회분식공정에 의한 우라늄 흡착실험을 한 결과가 Figure 4, 5에 나타나 있다.

Figure 4는 pH의 변화에 따른 AOPP-g-AN 섬유 이온교환체의 우라늄 흡착 시험을 한 결과이다. Figure 4에서 보는 바와 같이 AOPP-g-AN 섬유 이온교환체의 우라늄 흡착은 pH 변화에 크게 영향이 없는 경향을 보였다. 이렇게 pH 변화에 따른 우라늄의 흡착능이

크게 변하지 않는 것은 사용한 우라늄 용액이 고농도이기 때문에 이온교환체내로의 확산속도가 빨라져 리간드와 우라늄 이온간의 착물형성이 용이하기 때문으로 사료되었다. 한편 우라늄의 흡착은 10분 이내에 초기 평형에 도달하였으며, 초기 도달 시 흡착율은 90% 이상인 것으로 나타났다. 이렇게 흡착속도가 빠른 것은 앞의 팽윤율과 이온교환용량 실험결과에서 논의하였듯이 섬유 이온교환체가 용매 내에서 팽윤되어 우라늄이온이 섬유 이온교환체의 내부로 확산이 용이하게 되어 아마이드옥심기와 이온교환속도가 빠르게 이루어지기 때문으로 사료되었다. 한편 섬유 이온교환체의 우라늄 이온에 대한 흡착 평형속도는 pH 8에서 9.50 mL/min으로 나타났으며, 최종 흡착 용량은 3.95 meq/g으로 앞에서 관찰한 이온교환용량과 유사한 결과를 보였으며, 이로부터 본 연구에 사용한 섬유 이온교환체는 간수 pH가 약 7.8~8.2임을 감안할 때 적합한 소재로 판단되었다.

Figure 5는 회분식 흡착 실험을 통한 섬유 이온교환체의 우라늄이온 흡·탈착 반복실험 결과이다. Figure 5에서 보는 바와 같이 아마이드옥심형 섬유 이온교환체의 흡·탈착 성능은 10회 이상 반복 실험하여도 흡착성능은 거의 변화가 없는 것으로 보아 내구성이 우수한 것으로 생각되었다.

**충전 bed비 변화에 따른 우라늄 흡착.** 본 연구에서는 이온교환체를 이용한 중금속이온 흡착 실험 시 경제성을 고려할 때 중요한 공정변수인 충전 bed 높이 변화(충전 밀도  $L/D$ )에 따른 우라늄이온의 흡착실험을 하였는데 그 결과가 Figure 6, 7에 나타나 있다.

Figure 6은 섬유 이온교환체의 컬럼 충전 bed 높이를  $L/D=0.5\sim3$ 까지 변화시켜 충전하고 우라늄 이온에 대한 흡착 실험을 행한 결과이다. Figure 6에서 보는 바와 같이 컬럼 충전비 0.5, 1, 2, 3에 대하여 파과 시간은 각각 9, 30, 65, 98분으로 나타났으며 이때 흡착용량은 각각 3.81, 3.92, 3.64, 3.00 meq/g으로 나타났다. 이런 결과로부터 우라늄 이온에 대한 파과시간은 컬럼 충전비가 증가할수록 증가하였으며, 흡착량은  $L/D=1$ 에서 3.92 meq/g으로 최대치를 나타내었다.  $L/D=1$  이상에서는 흡착용량이 오히려 감소하는 경향을 보였는데, 이는  $L/D$ 가 증가함에 따라 일정시간에서 우라늄 이온의 확산속도가 낮아져 표면 흡착만 이루어지기 때문으로 사료되었다. 또한  $L/D$ 가 0.5의 경우 우

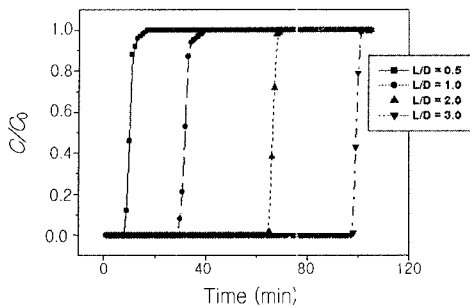


Figure 6. Plot of adsorption ratio( $C/C_0$ ) uranium ion vs. time in various column bed ratios( $L/D$ ), packed with AOPP-*g*-AN fibrous ion-exchanger.

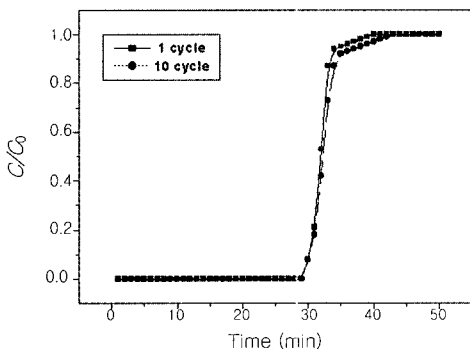


Figure 7. Plot of adsorption ratio( $C/C_0$ ) for uranium ion vs. time for two regeneration frequencies.

라늄 이온의 이동속도가 빠르고 흡착량도 3.81 meq/g으로 AOPP-*g*-AN 섬유 이온교환체의 본래 이온교환용량보다 다소 낮게 나타났으며, 빠른 시간 내에 90% 이상의 흡착 및 우라늄 이온의 통과 길이가 짧아 편류 현상이 일어나는 경향을 보였다. Figure 6에서  $L/D < 2$ 의 경우 2단계 파과특성 및 편류현상이 관찰되어졌으며, 짧은 시간에서의 흡착 성능이 우수함을 알 수 있다. 즉, 흡착 공정의 설계시  $L/D < 2$ 의 흡착 컬럼을 이용하여 흡·탈착 공정의 반복시,  $L/D > 2$ 의 흡착 컬럼에 비하여 낮은 압력 손실, 높은 흡착 속도를 통한 적은 공정 비용, 높은 흡착 효율이 기대되어진다. 따라서 본 연구 결과로부터 간수로부터 우라늄 흡착을 위한 충전 bed 설계 시 흡착시간, 경제성 등을 고려할 때  $L/D$ 를 1 이하로 하는 것이 적합하다고 판단된다.

한편 Figure 7은 Figure 6의 실험결과를 토대로 흡

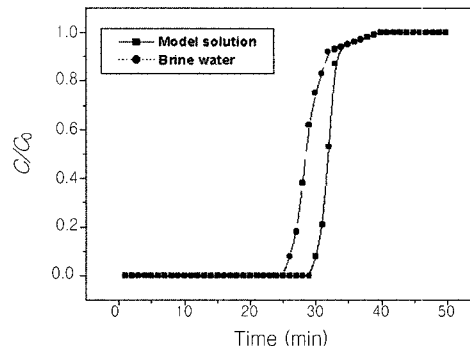


Figure 8. Plot of adsorption ratios( $C/C_0$ ) for uranium ion vs. time in brine water and model solution with column ( $L/D=1$ ) packed with AOPP-*g*-AN fibrous ion-exchanger.

착용량이 가장 우수한  $L/D=1$ 로 충전 bed 높이를 고정하고 연속실험에 의한 흡·탈착 실험을 반복한 결과이다. Figure 7에서 보는 바와 같이 우라늄 이온에 대한 흡·탈착 실험을 10회 반복한 결과 섬유 이온교환체의 흡착성능은 전혀 저하되지 않았으며 이와 같은 결과는 회분식 공정 실험 결과와 유사한 경향을 보였다.

간수 중 우라늄 흡착. 앞의 실험을 통한 흡착용량이 최대인 흡착량( $L/D=1$ )에서 Figure 6과 동일한 조건으로 우라늄 이온 흡착 실험을 하였는데 그 결과가 Figure 8에 나타나 있다. Figure 8에서 보는 바와 같이  $L/D=1$ 에서 섬유 이온교환체의 우라늄이온 흡착은 30분으로 모의용액에서 흡착시간보다 짧았으며 흡착량도 약간 낮아지는 경향을 보였다. 이렇게 모의용액보다 간수에서 흡착시간이 빠르고 흡착용량이 낮아지는 것은 간수 중에 비교적 고농도로 존재하는  $Na^+$ ,  $Li^+$  이온 등과 이온경쟁반응이 일어나 흡착 속도가 빨라지며, 이들 이온의 일부가 흡착되어 우라늄이온의 흡착성능은 약간 낮아지는 것으로 사료되었다. 그러나 간수 중 우라늄 농도가 180 ppm으로 해수 농도보다 수만배 높고 흡착용량 또한 3.63 meq/g으로 약간 감소하는 것으로 보아 AOPP-*g*-AN은 간수 중 우라늄 흡착 소재로 적합하다고 사료되었다.

## 결론

AOPP-*g*-AN 섬유이온교환체의 충전 bed 높이를

변화시켜 간수 중 우라늄 분리 실험을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. AOPP-g-AN 섬유이온교환체의 팽윤율은 그래프트율이 증가할수록 증가하였으며, 용매의 극성이 증가할수록 증가하였으며, 그래프트율 100% 섬유 이온교환체의 물과과산화수소 용매에서 팽윤율은 각각 8.54, 8.87 g/g을 나타내었다.

2. 우라늄 이온의 회분식 흡착은 pH에 별다른 영향을 받지 않으며 초기 흡착 평형이 10분 이내, 흡착 속도 9.50 mg/min으로 매우 빠르게 나타났고 최대 흡착 용량은 3.95 meq/g으로 매우 우수한 것으로 나타났다.

3. 우라늄 이온의 흡착성능은  $L/D=1$ 에서 최대 3.92 meq/g 이었으며  $L/D$ 가 클수록 압력 손실 증가로 인하여 흡착 성능이 저하되었으며 충전 bed 높이는  $L/D < 2$  이하가 적합함을 확인하였다.

4. 간수 중 우라늄 이온의 흡착은 모의 용액을 이용한 흡착시간보다 다소 빠르게 나타났으며 흡착 용량은  $L/D=1$ 에서 3.62 meq/g으로 약간 낮게 나타났으나, 흡착 시간과 용량으로 볼 때 간수 중 우라늄 흡착 시 충전 bed 높이는  $L/D=1$ 이 적합함을 확인하였다.

감사의 글 : 본 연구는 해양 수산 연구 개발 사업 위탁 연구의 연구 기금으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다

### 참 고 문 헌

1. I. Tabshi and Y. Kobuke, *Nippon Kaisui Gakkaishi*, **36**, 205 (1982).
2. H. Miyasaki, *J. Mech. Soc. Jpn.*, **81**, 475 (1978).
3. N. J. Keen, *J. Brit. Nucl. Energy Soc.*, **7**, 178 (1968).
4. R. V. Davies, J. Kennedy, R. W. Mchroy, R. Spense, and K. M. Hill, *Nature*, **203**, 110 (1964).
5. N. Ogata and H. J. Kakikana, *Atm. Energy Soc. Japan*, **11**, 82 (1969).
6. H. Egawa, H. Harada, and T. J. Nonaka, *Chem. Soc. Japan*, 1769 (1980).
7. H. Omichi, A. Katakai, T. Sugo, and J. Okamoto, *Sep. Sci. Technol.*, **20**, 163 (1985).
8. M. Suzuki, T. Fuji, and S. Tanaka, *Rep. Sprc. Proj. Res. Energy*, 49 (1987).
9. M. Suzuki, K. Chihara, M. Fujimoto, H. Yagi, and A. Wada, *Bull. Seawater Soc. Japan*, **39**, 152 (1985).
10. H. Egawa, T. Nonaka, and M. Ikuri, *J. Appl. Polym. Sci.*, **29**, 2045 (1984).
11. H. Egawa, T. Nonaka, and M. Ikuri, *J. Appl. Polym. Sci.*, **33**, 1933 (1987).
12. H. Egawa, T. Nonaka, and N. Kozakura, *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **55**, 3536 (1982).
13. K. Sugasaka, S. Katoh, N. Taki, A. Takahashi, and Y. Umezawa, *Sep. Sci. Technol.*, **18**, 307 (1983).
14. V. S. Soldatov, G. I. Sergeev, and R. V. Martsinkevich, *Dock. Akad. Nauk USSR*, **28**, 1009 (1984).
15. V. S. Soldatov, *Izvest Acad. and Nauk BSSR. Chem. Ser.*, **6**, 39 (1982).
16. T. S. Hwang, D. S. Hwang, and Y. C. Nho, *Polymer(Korea)*, **24**, 174 (2000).
17. M. B. S. Osman, E. A. Hegazy, A. E. B. Mostafa, and A. M. Maksoud, *Polymer International*, **36**, 47 (1995).
18. H. M. Anasthas, V. G. Caikar, *Reactive & Functional Polymers*, **27**, 23 (2001).
19. K. Motojima, T. Yamamoto, and Y. Kato, *Japan Analyst.*, **18**, 208 (1969).