

표면처리 활성탄소섬유에 의한 U(VI)의 전기흡착

이유리 · 정중현^{*,†} · 유승곤 · 오원진^{*}

충남대학교 화학공학과
305-764 대전시 유성구 궁동 220
*한국원자력연구소 제염해체기술연구개발부
305-353 대전시 유성구 덕진동 150
(2004년 9월 9일 접수, 2004년 10월 10일 채택)

Electrosorption of U(VI) by Surface-Modified Activated Carbon Fiber

Yu Ri Lee, Chong Hun Jung^{*,†}, Seung Kon Ryu and Won Zin Oh^{*}

Department of Chemical Engineering, Chungnam National University, 220, Gung-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-764, Korea

^{*}Korea Atomic Energy Research Institute, 150, Duckjin-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-353, Korea

(Received 9 September 2004; accepted 10 October 2004)

요 약

연속적 전기흡착 셀에서 활성탄소섬유 부직포 전극을 사용하여 U(VI) 함유 폐액을 처리하였다. 더 낮은 전위에서 U(VI)의 전기흡착 효율을 높이기 위하여 ACFs를 화학약품으로 표면처리하고 그의 세공구조 및 관능기의 변화를 조사하였으며 처리조건이 U(VI)의 흡착에 미치는 영향을 고찰하였다. 표면처리한 모든 ACFs의 비표면적은 감소하였다. 중성염 및 염기성 용액으로 처리한 ACFs의 산성관능기는 감소했지만 산성 용액으로 처리한 ACFs의 산성관능기는 증가하였다. 산성관능기는 U(VI)의 흡착을 차단하여 산성용액 처리 ACFs 전극은 처리하지 않은 ACFs 전극에 비하여 U(VI)의 흡착용량이 감소했다. 중성염과 염기성 용액으로 처리한 ACFs 전극은 흡착용량이 크게 증가하여 -0.3 V의 낮은 전위에서도 처리하지 않은 ACFs 전극의 -0.9 V에 상응하는 결과를 얻었다. 이러한 결과는 ACFs 표면의 산성관능기 감소에 의한 이온의 차폐효과(Shielding effect)가 줄어들 뿐만 아니라 음전위 가용에 의한 전기이중층 내에서의 OH⁻의 증가로 U(VI) 흡착이 효율적으로 진행되었기 때문이다.

Abstract – The electrosorption of U(VI) from waste water was carried out by using activated carbon fiber(ACF) felt electrode in a continuous electrosorption cell. In order to enhance the electrosorption capacity at lower potential, ACF felt was chemically modified in acidic, basic and neutral solution. Pore structure and functional groups of chemically modified ACF were examined, and the effect of treatment conditions was studied for the adsorption of U(VI). Specific surface area of all ACFs decreases by this treatment. The amount of acidic functional groups decreases with basic and neutral salt treatment, while the amount increases a lot with acidic treatment. The electrosorption capacity of U(VI) decreases on using the acid treated electrode due to the shielding effect of acidic functional groups. Base treated electrode enhances the capacity due to the reduction of acidic functional groups. The electrosorption amount of U(VI) on the base treated electrode at -0.3 V corresponds to that of ACF electrode at -0.9 V. Such a good adsorption capacity was not only due to the reduction of shielding effect but also the increase of OH⁻ in the electric double layer on ACF surface by the application of negative potential.

Key words: Electrosorption, Activated Carbon Fiber, Uranium Ion(VI), Surface Modification, Electric Double Layer

1. 서 론

폐액으로부터 우라늄(VI)의 제거나 회수 방법으로, 미생물에 의한 환원/침전, 응고, 이온교환, lime-softening, 활성 알루미늄이나 활성 탄소에 의한 흡착 등과 같은 다양한 물리적, 화학적 그리고 생물학적 방법들이 사용되어 우라늄(VI) 제거에 비교적 성공적으로 이용

되었으나[1-3] 대부분 이러한 종류의 기술들은 폐액 중 우라늄(VI) 농도가 높은 경우 제한된 제거용량 때문에 적용에 한계가 있으며, 다양한 다공성 탄소전극물질에 의한 구리, 납, 카드뮴 및 니켈 등과 같은 금속이온 처리에 효과적으로 사용될 수 있는 전착방법은 우라늄과 스트론튬 같은 환원 전위가 매우 높은 금속의 처리는 비효과적인 것으로 보고되고 있다[4].

전기흡착은 이러한 단점을 보완할 수 있는 기술로 기존의 흡착체에 전기적인 구동력을 부가하여 수행하는 기술로써 전기전도성 흡

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: nchjung@kaeri.re.kr

작제의 전위 조절에 의하여 전극 표면전하의 제어가 가능하고 전위를 이용하여 수용액 내 존재하는 이온, 분자 및 부유물질을 흡탈착할 수 있는 특징을 지니고 있다[2]. 또한, 투자비가 적게 들어 우라늄(VI) 등 환원전위가 높은 금속이온의 제거를 위하여 시도할만한 기술이라고 믿어진다.

근래 개발된 활성탄소섬유(activated carbon fiber, ACFs)는 전기전도성이 우수하며 열이나 화학약품에 안정하고 활성탄소보다 비표면적이 월등히 커서 수용액내 오염물을 흡착할 수 있는 면적이 넓을 뿐만 아니라 미세공들이 표면에 균일하게 발달되어 흡착속도가 빨라 전기 흡착 전극으로 적합할 것으로 판단된다[5, 6]. 더욱이 ACFs 표면에 형성된 많은 관능기는 무기이온이 흡착하는데 유용하고[7] 전기장이 충전되었을 때 이온의 흡착 site로서 작용할 수 있다. 최근, 무기이온의 선택적 흡착에 있어 흡착에 영향을 미치는 미세기공, 표면의 극성 및 표면의 산소 관능기 등과 같은 인자들을 표면처리를 통하여 제어하려는 여러 가지 시도가 이루어지고 있다[8]. 탄소섬유의 표면처리 방법은 화학약품 처리방법[9] 전기화학적 산화방법[10] 등이 있다.

본 연구는 ACFs의 표면을 화학약품으로 처리하여 표면관능기를 부여하고 보다 낮은 전위에서 U(VI) 이온을 효과적으로 전기흡착하는데 목적이 있다. 즉, ACFs를 산성, 염기성 및 중성염 용액으로 표면처리하였다. 이렇게 처리된 ACFs의 비표면적과 미세공도와 같은 구조적 변화와 표면관능기의 변화를 고찰하였고 이러한 변화와 폐액의 pH 및 가용전위에 따라 ACFs 전극에 의한 U(VI)이온 전기흡착능에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 실험

2-1. 실험재료

실험에 사용된 전극재료는 120 mm의 폭과 4 mm 두께를 가진 피치계 활성탄소섬유 부직포(Osaka Gas Co., FN-200PS-15)로서 본 실험에 앞서 증류수로 3차례 세척하고 80 °C로 유지된 진공건조로에서 24시간 건조한 후 테시케이터내에 보관하면서 사용하였다. 이것을 R-ACF로 명명하였다. 실험에 사용된 용액은 1 M NaNO₃ 전해질 용액에 우라늄 이온의 농도가 100 ppm이 되도록 UO₂(NO₃)₂·6H₂O를 정량하여 제조하였다. 용액의 pH는 0.1 M NaOH와 0.1 M HNO₃를 이용하여 조절하였다.

2-2. 활성탄소섬유의 표면처리

활성탄소섬유를 전기흡착 전극으로 사용하기 위하여 화학약품 처리를 하였다.

화학약품 처리는 산성용액 처리와 염기성용액 처리 및 중성염 용액 처리로 나누어 실시하였다. 즉, 산성용액 처리는 10 wt% H₃PO₄에 염기성 용액 처리는 10 wt% KOH에 R-ACF를 넣고 24시간 동안 침적시킨 후 증류수로 세척하면서 불순물을 완전히 제거하고 80 °C로 유지된 진공건조로에서 24시간 건조한 후 테시케이터내에 보관하면서 사용하였다. 중성염 처리는 약 1시간 동안 1 M NaCl 용액에 침적시켜 준비하였다. 이렇게 처리된 ACFs 전극을 각각 A-ACF, B-ACF, N-ACF로 명명하였다.

2-3. 실험장치

전기흡착 장치의 개략도를 Fig. 1에 도시하였다. 작업전극, 기준

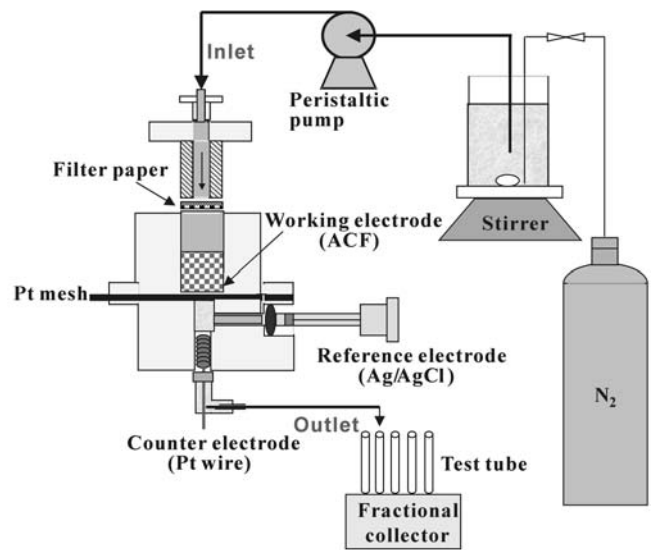


Fig. 1. Schematic diagram of continuous flow-through cell.

전극 및 상대전극의 3전극이 장착된 고정층 전기흡착 셀은 전류 흐름과 용액 흐름이 평행인 flow-through cell이다. 내경 2 cm인 PTFE 원형 고정층에 작업전극인 직경 2 cm의 표면처리된 ACFs 부직포가 충전되어 있고 여과지를 통과한 용액이 작업전극을 통과하는 동안 아래에 위치한 백금망이 작업전극과의 전기전도도가 효과적으로 이루어지도록 집전체로 사용되었다. 기준전극은 전위의 재현성이 좋고 취급이 용이한 Ag/AgCl(with saturated KCl) 전극을 사용하였고, 상대전극으로는 백금선을 사용하였다. 전류 공급은 potentiostat(Radiometer, PGP201)을 사용하였다.

2-4. 분석

ACFs 표면의 구조적 특성은 BET 비표면적 측정 장치(Quantachrome, Autosorb-1 MP)를 사용하여 77 K에서의 질소 등온흡착 곡선을 측정하여 분석하였다[11]. 각각의 시료 표면에 형성된 산소 화합물에 의한 표면 산도는 Bohem의 선택 중화법[12]으로 측정하였고, 전해질 용액내의 U(VI)의 농도는 UV spectrophotometer(Cecil Instruments, CE2021)를 이용하여 655 nm의 파장에서 흡광도를 측정하고 표정곡선에 의하여 환산하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 표면처리 ACFs의 구조적, 화학적 특성

탄소 흡착제의 흡착능에 영향을 미치는 요인은 흡착제의 기공크기와 비표면적과 같은 구조적 특성뿐만 아니라 흡착제 표면에 존재하는 관능기의 종류 및 양도 포함된다[13].

표면처리한 ACFs의 기공구조 변화를 살펴보기 위하여 측정한 질소등온흡착선을 Fig. 2에 나타내었다. 처리하지 않은 ACF와 표면처리한 ACFs의 질소등온흡착선들은 모두 낮은 상대압력에서 매우 급속하게 상승한 후, 이어서 상대압력을 높여도 흡착량이 더 이상 증가하지 않고 흡착 평형에 도달하여 Langmuir 등온선 형태인 Type I을 보임으로서[11] 표면처리를 하여도 미세공의 크기는 거의 변하지 않았음을 알 수 있다. 그러나 동일한 상대압력에서의 질소흡착량은 미처리 ACFs 보다 처리한 ACFs 경우에 크게 감소하는 경향을 보였

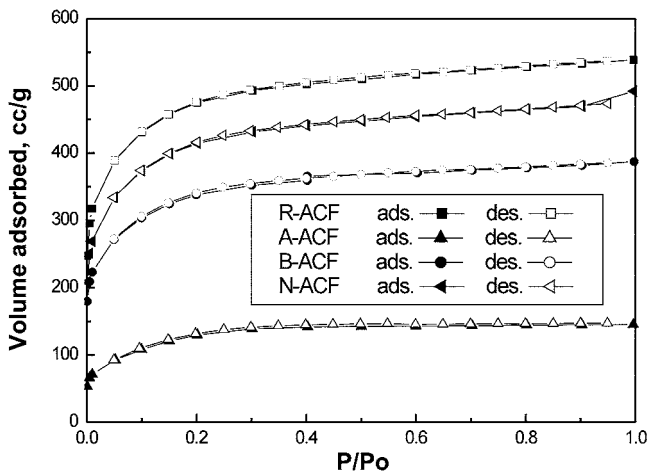
Fig. 2. Adsorption isotherms of N_2 on ACFs at 77 K.

Table 1. Structural properties of surface modified ACFs

ACF	R-ACF	A-ACF	B-ACF	N-ACF
Structural property				
Specific surface area (m^2/g)	1733	482	1234	1617
Total pore volume (cc/g)	0.83	0.23	0.59	0.77
Micropore volume (cc/g)	0.59	0.14	0.40	0.53

다. Table 1은 질소등온흡착선으로부터 BET식을 이용하여 비표면적, 미세기공부피 및 전체 기공부피 등을 정리한 것으로 표면처리를 했을 경우 표면적이 크게 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 그리고 전체 기공에 대한 미세 기공의 비율도 약간 감소하는 경향을 보였다. 이는 Shim 등[14]이 보고한 것처럼 산성 용액 처리의 경우는 새로 형성된 산소 관능기가 미세공의 입구를 막음으로써 생긴 결과라 판단된다. 염기성 용액 처리 ACFs의 경우는 산성관능기가 감소하여 관능기에 의한 질소흡착의 역제는 줄었지만 Pittman 등[15]이 보고한 바와 같이 높은 농도 염기 용액에 의한 장시간의 활성화는 ACFs 표면을 더욱 불균일한 에너지 상태로 만들고 기존의 기공이 부식되어 총 세공부피가 감소한 것으로 생각된다.

일반적으로 ACFs 표면에 존재하는 산성 관능기로는 carboxyl, lactone 그리고 phenol기 등이다. Table 2는 표면처리 후 ACFs 표면의 산성관능기들의 변화를 나타낸 것이다. 표면 처리에 따른 A-ACF의 총 산도의 증가는 화학적 표면처리로 용액에서 생성되는 발생기 산소와 ACFs 표면의 탄소가 반응하여 형성된 새로운 관능기, 특히 carboxyl기의 증가 때문이다. 반면에, B-ACF와 N-ACF의 표면산도는 상당량 감소하였는데, 이는 작용기와 결합되어있던 표면 탄소 원자가 작용기로부터 탈리되었기 때문이다[16]. 결과적으로, 산-염기 처리가 표면의 화학적 성질을 변화시킴을 알 수 있었다.

3-2. U(VI)의 전기 흡착

최대 U(VI) 제거 효율과 최소 전기 소비량으로 시스템을 운전하

Table 2. Surface acidities of modified ACFs

ACF	R-ACF	A-ACF	B-ACF	N-ACF
Acidity				
Functional group (meq/g)				
Carboxyl	0.12	3.68	0.01	0.13
Lactone	1.30	1.67	0.13	0.12
Phenol	1.04	1.77	0.69	1.09
Total acidity (meq/g)	2.46	7.12	0.83	1.34

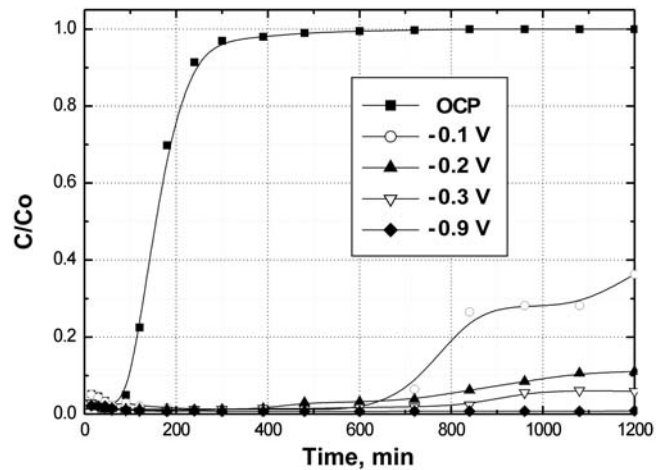


Fig. 3. Electrosorption of U(VI) with a variation of potentials on R-ACF at pH 4.

고자 셀 조립 후 가용 전위와 pH 그리고 전극을 변화시켜 그 효율성을 조사하였다. Fig. 3에 표면처리 하지 않은 R-ACF 전극을 사용하여 pH 4에서 가용전위 변화에 따른 폐액 중 U(VI) 전기흡착 결과를 나타내었다. 전위 실험의 결과로부터 폐액 중 U(VI) 이온이 전기화학 셀을 통과함으로써 효과적으로 제거됨을 알 수 있었다. 전위를 가하지 않은 일반흡착(open-circuit potential, OCP)은 약 100분 이후 과포화선이 급격히 상승하여 일반흡착의 한계가 있음을 보여주고 있다. 반면에 음의 가용 전위에서는 전기흡착에 의해 U(VI)이 효과적으로 제거되며 가용전위가 클수록 제거능력이 증가함을 알 수 있었다. -0.9 V의 높은 전위를 걸어주었을 때는 장시간 연속적으로 적정기준(무구속 방출 농도: 1 ppm 이하)을 만족시키는 우수한 제거효과를 나타내었다. 이는 공급용액 100 ppm의 99.7% 제거효율에 해당하며 실험기간 동안 이러한 경향이 계속 유지되었다. 시간에 따라 흡착 누적량을 도시한 Fig. 4의 결과로부터 전기흡착 공정의 중요한 변수인 가용전위의 크기가 U(VI)의 흡착속도를 조절한다는 사실을 알 수 있다. 즉, 전위가 증가할수록 흡착속도가 선형적으로 증가하는 경향을 보이며 -0.9 V에서의 흡착속도는 -0.1 V에 비해 약 15% 증가함을 알 수 있었고 미가용 전위 OCP의 경우 2시간 이후부터는 흡착이 이루어지지 않음을 알 수 있다. -0.3 V

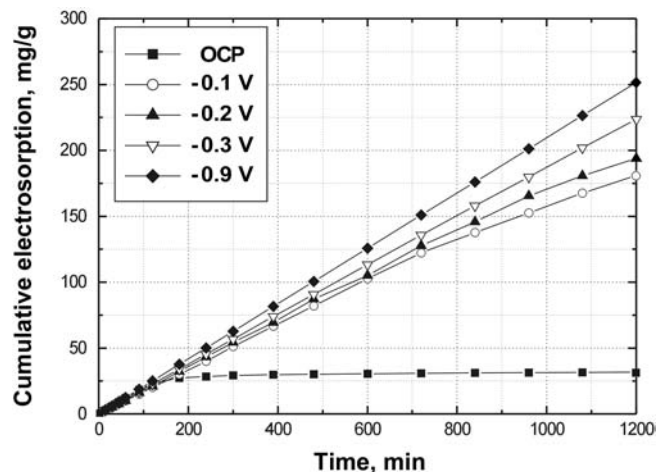


Fig. 4. Cumulative electrosorption of U(VI) with a variation of potentials on R-ACF at pH 4.

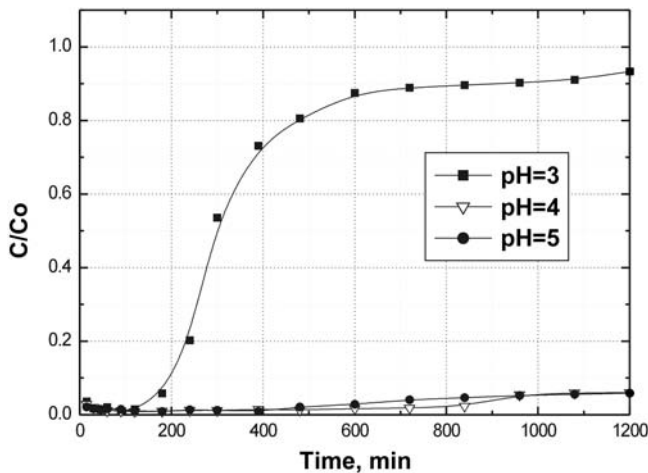


Fig. 5. Electrodesorption of U(VI) with a variation of pH on R-ACF at -0.3 V.

이하의 낮은 전위에서는 전 구간에 걸쳐 연속적으로 원하는 U(VI) 유출액의 농도($U < 1$ ppm)를 만족하지 못하였다. 결과적으로, R-ACF를 사용한 전기흡착공정에서 -0.9 V 이상의 높은 전위에서만 1 ppm 이하의 유출농도를 유지할 수 있다는 사실을 알 수 있었다.

수용액 중 무기이온의 흡착에 있어서 주요 제어 변수의 하나는 pH이다. 그러므로 U(VI)이온의 전기흡착을 위한 최적 pH 조건 조사를 위해 pH 변화에 따른 흡착거동을 조사할 필요가 있다. Fig. 5에 -0.3 V 전위에서 R-ACF를 사용하여 폐액의 pH 변화에 따른 U(VI)의 흡착거동을 나타내었다. 그 결과 pH 3에서는 2시간 후 파과곡선이 급격히 상승하였다. 이러한 결과는 ACFs의 제타전위가 pH 3 이하에서는 양의 값을 가져 양이온을 배척한다는 Jung[17]의 결과와 일치하였다. pH 4와 5에서는 20시간 동안 비교적 좋은 흡착 능력을 보여주었다. pH 5 이상에서는 좋은 흡착 능력을 보여주지만 pH 조절을 위해 대량의 폐액을 처리해야 하는 단점이 있다. 그러므로 U(VI)이온의 전기흡착공정에 적합한 폐액의 pH는 4가 효과적일 것이라고 판단하였다. 전기 소비량을 최소화하고 실제 공정 적용을 위해 이온강도를 유지하고 흡착 효율의 증가를 위해 지지 전해질의 환원을 억제할 수 있는 조건으로 전극의 표면을 처리하여 U(VI) 전기 흡착거동을 조사할 필요가 있다.

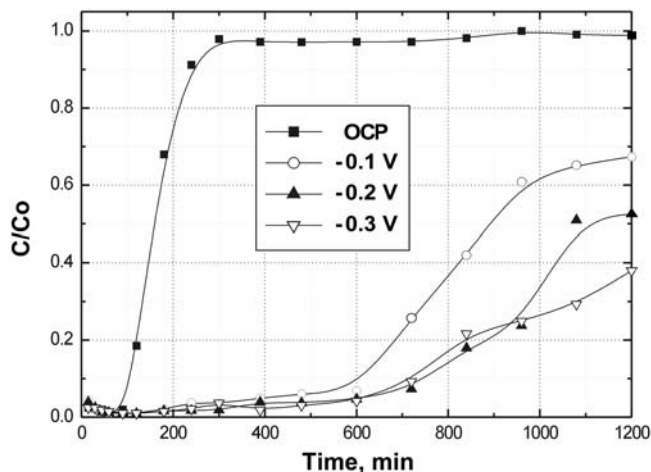


Fig. 6. Electrodesorption of U(VI) with a variation of potential on A-ACF at pH 4.

Table 3. Electrodesorption capacity (mg/g) of U(VI) by surface modified ACFs

Potential	ACF	R-ACF	A-ACF	B-ACF	N-ACF
OCP		21	20	46	31
-0.1 V		180	152	207	205
-0.2 V		193	181	212	210
-0.3 V		223	189	239	236

Fig. 6은 산성용액으로 표면처리한 A-ACF의 전위에 따른 흡착 특성을 나타낸 것이다. ACFs를 산처리 했을 때 ACFs 표면에 관능기가 증가하며 관능기가 흡착 site로 작용하여 이온교환 형태의 흡착이 일어나 흡착량이 증가한다는 보고가 있다[18]. 그러나 앞에서 설명한 바와 같이 산처리시 표면 관능기가 크게 증가했음에도 불구하고 U(VI) 이온의 흡착량은 OCP 뿐만 아니라 전위를 가용했을 때에도 R-ACF에 비해 감소한 것을 볼 수 있다. 이는 전극 표면의 관능기가 차단층(shielding layer)으로 작용하여[19] U(VI)의 흡착을 방해하는 것으로 판단된다. -0.3 V에서 A-ACF는 R-ACF에 비해 흡착량이 16.6% 감소하였고 실험 전 구간에 걸쳐 -0.3 V에서 1 ppm 이하의 유출농도를 얻지 못했을 뿐만 아니라 비교적 초기 단계부터 파과가 시작되었으며 전위가 낮아수록 파과시간이 더 빨라짐을 관찰할 수 있었다. 이는 U(VI)의 흡착용량(Table 3)의 변화와 표면산도(Table 1)와의 관계에서 볼 수 있듯이 염기처리시 흡착용량이 증가하는 경향을 보였고 반대로 산처리시에는 흡착용량이 감소했으며 표면산도가 증가함에 따라 흡착용량은 감소하였다.

Fig. 7은 염기성 용액(B-ACF) 및 중성염(N-ACF)으로 표면처리한 ACFs의 전위 변화에 따른 흡착능을 나타낸 것이다. 처리된 ACFs 전극을 사용한 U(VI) 이온 흡착농도 처리하지 않은 전극을 사용할 때와 마찬가지로 높은 전위 의존성을 보였다. OCP일때 B-ACF는 2시간 이후 급격하게 농도가 증가하면서 파과가 일어났고 N-ACF의 경우에도 1.5시간 이후 파과가 시작되었다. 그러나 이것은 R-ACF의 파과점보다 더 느린 것으로 일반 흡착에 대해서도 ACFs의 표면 처리가 약간 더 효율적이라는 사실을 알 수 있었다. 이렇게 표면처리한 ACFs 전극에 -0.3 V의 전위를 가용했을 때 30분 이내에 거의 흡착평형에 도달하였고 유출 농도가 1 ppm이하로 20시간까지 유지되면서 99%이상의 제거 효율을 나타내었다. 이는 R-ACF -0.9 V에 상응하는 결과로서 본 연구의 목적과 일치하는 결과이다. 그리고 OCP와 비교하여 B-ACF의 경우 5.2배, N-ACF 7.6배 이상의 제거효율을 나타내었다. 또한, R-ACF가 -0.3 V 이하에서 20시간 동안 1 ppm 이하의 유출농도를 얻지 못하였지만 B-ACF 및 N-ACF는 -0.2 V에서 각각 14, 10시간까지, -0.1 V에서도 10, 8시간까지 1 ppm 이하의 유출농도를 얻을 수 있었다. 흡착용량 또한 R-ACF에 비해 -0.2 V에서 9.8%, 8.8% 증가하였고, -0.1 V에서 15%, 13.8% 증가하였다. 이처럼 염기성 혹은 중성염처리 ACFs 전극에 의한 U(VI)이온의 전기흡착 제거 효율이 높은 것은 ACFs 표면에 전위가 가용 될 때 염기성 용액이나 중성염으로 처리한 흡착 전극이 전극 표면의 전기 이중 층 내에서 OH^- 의 증가로 U(VI) 흡착이 효율적으로 진행되며 특히 중성염 처리시 처리된 전극이 NaNO_3 지지전해질의 환원을 억제하기 때문이다. 또한, 처리한 ACFs의 비표면적과 세공부피가 미처리 ACFs보다 크게 감소했음에도 불구하고 U(VI) 흡착량이 많은 사실로부터 ACFs 전극의 표면산도가 구조적 특성에 비해 지배적임을 알 수 있다.

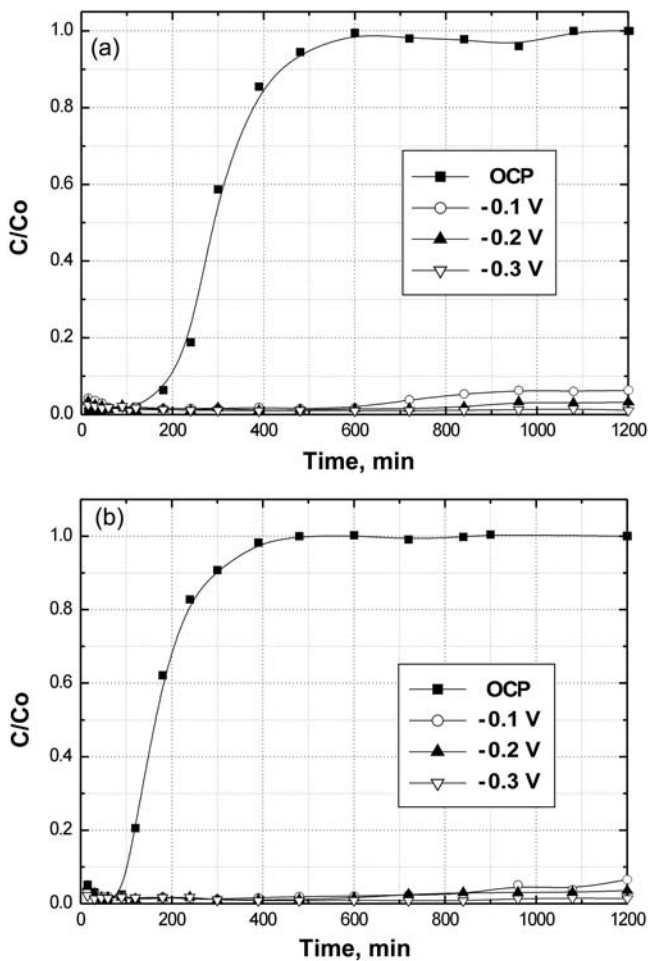


Fig. 7. Electrodesorption of U(VI) with a variation of potential on B-ACF, N-ACF at pH 4; (a) B-ACF and (b) N-ACF.

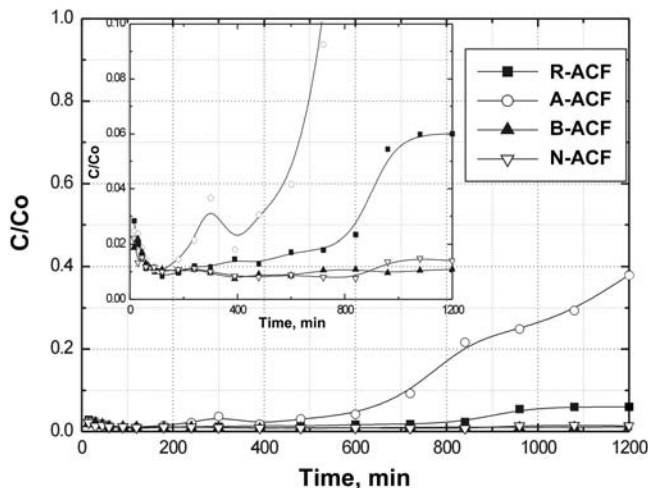


Fig. 8. Electrodesorption of U(VI) on various ACFs at -0.3 V.

Fig. 8은 -0.3 V에서 처리한 ACFs에 대한 U(VI) 흡착을 종합한 것이다. 약 2시간까지는 모든 ACFs에 대해 거의 비슷한 거동을 나타냈지만 2시간 이후부터 유출농도의 차이를 보이기 시작했다. B-ACF는 실험 조건에서 거의 일정한 수준의 농도를 유지하였고 본 실험에서 얻고자 하는 무구속 방출수준 1 ppm 이하를 만족시킬 수 있었다. N-ACF 또한 비교적 1 ppm 이하의 유출농도를 유지했으나

16시간부터 20시간까지 약 1.5 ppm의 유출농도를 나타냈다. 그러나 R-ACF와 A-ACF는 2시간 이후 서서히 유출농도가 증가하는 경향을 보였으며 R-ACF는 6.5시간 후 1.4 ppm, A-ACF는 3시간 후에 1.6 ppm으로 파도가 진행되었다. 20시간까지의 흡착효율은 $B-ACF > N-ACF > R-ACF > A-ACF$ 의 순으로 감소하는 경향을 보였다.

4. 결 론

연속적 전기흡착 셀에서 보다 낮은 가용전위 조건에서 U(VI) 전기흡착 효율을 높이고자 화학적 방법으로 활성탄소섬유 부직포를 표면처리하여 U(VI) 전기흡착 공정의 전극으로 사용하였다. 처리된 ACFs의 표면구조 및 관능기의 변화를 조사하고, 표면처리에 따른 U(VI)의 흡착에 미치는 영향에 대하여 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

U(VI) 이온 100 ppm이 함유된 $NaNO_3$ 전해질 속에서 ACFs 전극을 이용하여 수행한 고정층 전기흡착 셀에서의 U(VI) 이온 제거는 처리하지 않은 ACFs를 전극으로 사용한 흡착에 비해 효과적으로 제거되었다. 흡착효율을 높이기 위한 방법으로 ACFs를 화학약품으로 표면처리한 결과, 처리된 ACFs는 모두 비표면적이 감소했으며, 산처리시 표면산도가 증가하였고 중성염과 염기처리시에는 감소하는 경향을 보였다. R-ACF를 중성염 또는 염기성 용액으로 처리함으로써 흡착속도 및 흡착용량이 증가하였다. 즉, ACFs 전극을 표면처리함으로써 -0.3 V의 전위에서도 -0.9 V 이상의 높은 전위에서 얻어진 전기흡착 효율(제거율 99.5% 이상, 유출액 농도 1 ppm 이하)을 얻을 수 있음을 확인하였다. 반대로 산처리시에는 흡착효율이 감소하였다. 염기성 혹은 중성염 처리 ACFs 전극의 U(VI) 흡착효율이 높은 것은 ACFs 표면의 산성관능기 감소에 의한 차단효과(shielding effect)가 줄어들 뿐만 아니라 전위 가용에 의한 전기 이중층 내에서의 OH $^-$ 의 증가로 U(VI) 흡착이 효율적으로 진행되기 때문이다.

감 사

본 연구는 과학기술부 및 한국과학기술기획평가원의 지원을 받아 원자력연구개발 사업을 통해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Carley-Macauy, K. W. and Gutman, R. G., *Radioactive Waste: Advanced management methods for Medium Active Liquid Waste*, Harwood Academic Pub(1981).
2. Woodard, F. E., McMackins, D. E. and Jansson, R. E. W., "Electrodesorption of Organic on Three Dimensional Carbon Fiber Electrode," *J. Electroanal. Chem.*, **214**, 303-330(1986).
3. Oren, Y. and Soffer, A., "Water Desalting by Means Of Electrochemical Parametric Pumping," *J. Applied Electrochemistry*, **13**, 473-484(1983).
4. Jayson, G. G., Sangster, J. A., Thompson, G. and Wilkinson, M. C., "Adsorption and Electrodesorption of Mercury(II) Acetate onto Activated Charcoal Cloth from Aqueous Solution," *Carbon*, **25**, 523-531(1987).
5. Oren, Y. and Soffer, A., "Graphite Felts as an Efficient Porous

- Electrode for Impurity Removal and Recovery of Metals," *Electrochimica Acta*, **28**, 1649-1654(1983).
6. Ryu, S. K., "Porosity of Activated Carbon Fiber," *High Temperature-High Pressure*, **22**, 345-354(1990).
7. Marsh, H., Heintz, E. A. and Rodríguez-Reinoso, F., "Introduction to Carbon Technologies," University of Alicante, 42-45(1997).
8. Park, S. J., Park, B. J. and Ryu, S. K., "Electrochemical Treatment on Activated Carbon Fibers for Increasing the Amount and Rate of Cr(VI) Adsorption," *Carbon*, **37**, 1223-1226(1999).
9. Hong, L. I., Moshonov, A. and Muzzy, J. D., "Electrochemical Polymerization of Xylene Derivatives on Carbon Fiber," *Polym. Compos.*, **12**, 191-201(1991).
10. Drzal, L. T. and Madhukar, M., "Fibre-Matrix Adhesion and its Relationship to Composite Mechanical Properties," *J. Mater. Sci.*, **28**, 569(1993).
11. Brunauer, S., Emmett, P. H. and Tellet, E., "Adsorption of Gases in Multimolecular Layers," *J. Am. Chem. Soc.*, **60**, 309(1938).
12. Boehm, H. P., "Chemistry of Heteroatoms on the Surface of Carbon(Plenary Lecture)," *Carbon*, **7**, 715(1969).
13. Park, S. J., *Interfacial forces and field: theory and application*, 1st ed, J. P. Hsu, Marcel Dekker, New York(1999).
14. Shim, J. W., Park, S. J. and Ryu, S. K., "Effect of Modification with HNO_3 and NaOH on Metal Adsorption by Pitch-Based Activated Carbon Fibers," *Carbon*, **39**, 1635-1642(2001).
15. Jr. Pittman, C. U., He, G. R., Wu, B. and Garner, S. D., "Chemical Modification of Carbon Fiber Surfaces by Nitric Acid Oxidation Followed by Reaction with Tetraethylenepentamine," *Carbon*, **35**, 317-331(1997).
16. Kim, H. S., Ryu, S. K., Jung, C. H. and Park, K. K., "Electrosorption of Cobalt Ions by Chemically Treated ACF Discs," *HWAHAK KONGHAK*, **41**(6), 744-748(2003).
17. Jung, C. H., "A Study on the Preparation of Activated Carbon Fibers and Their Radioactive Co(II) Adsorption Characteristics," Ph.D. Dissertation, Chungnam National Univ., Deajeon, Korea (1994).
18. Park, S. J., Kim, Y. M. and Shin, J. S., "Studies on Anodic Oxidation Treatment of Surface and Heavy Metal Adsorption Properties of Activated Carbon Fibers," *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **14**, 41-47(2003).
19. Takamura, T., Awano, H., Ura, T. and Ikezawa, Y., "Effective Surface Treatment to Improve the Li Doping and Undoping Characteristics of Carbon Fiber as a Li Secondary Battery Anode," 36th Battery Symposium, Japan, 92-92(1995).