

화학적으로 표면처리된 활성탄소섬유 디스크에 의한 코발트이온의 전기흡착

김한상 · 유승곤[†] · 정종현* · 박광규**

충남대학교 화학공학과

305-764 대전시 유성구 궁동 220

*한국원자력연구소 제염해체 기술연구개발부

305-353 대전시 유성구 덕진동 150

**한국전력연구원 원자력 연구실

305-380 대전시 유성구 문지동 103-16

(2003년 8월 11일 접수, 2003년 10월 20일 채택)

Electrosorption of Cobalt Ions by Chemically Treated ACF Discs

Han Sang Kim, Seung Kon Ryu[†], Chong Hun Jung* and Kwang Kyu Park**

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

*Nuclear Chemical Engineering Research Team, Korea Atomic Energy Research Institute,
150, Duckjin-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-353, Korea

**Nuclear Power Laboratory, Korea Electric Power Research Institute, 103-16, Munji-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-380, Korea
(Received 11 August 2003; accepted 20 October 2003)

요 약

활성탄소섬유로 디스크를 만들고 NaOH 또는 HNO₃로 처리하여 표면특성을 변화시킨 후 흑연봉에 연결하여 직류전기를 공급하면서 수용액으로부터 코발트이온을 전기흡착시켰다. 활성탄소섬유를 NaOH로 처리하면 미세공의 평균크기와 비표면적은 변화가 없으나 총산도가 감소되었고 HNO₃로 처리하면 미세공의 평균크기는 변화가 없으나 비표면적은 약 20% 감소하고 총산도는 증가하며 특히 carboxyl 그룹이 많이 생성되었다. 약품처리에 의하여 활성탄소섬유의 등전점은 pH 3.1에서 pH 2.6, pH 2.2로 각각 낮아졌고 zeta 전위도 감소하였는데 이것은 표면에 음이온 하전밀도가 증가하였기 때문이다. NaOH 처리된 활성탄소섬유 디스크에 의한 코발트이온의 흡착속도는 처리되지 않은 활성탄소섬유에 의한 흡착속도보다 2배 증가하였으나 HNO₃ 처리 활성탄소섬유는 1/5로 감소하였다. 코발트 이온의 전기흡착능력은 0.2 N NaCl까지는 전해질의 농도에 비례하였으나 전해질의 농도가 더 증가하면 양이온의 경쟁으로 코발트 이온의 흡착속도는 감소하였다.

Abstract – ACF discs were surface treated using NaOH, HNO₃ and connected to a graphite bar, for the electrosorption of cobalt ions from an aqueous solution. The total acidity of ACF decreased by NaOH treatment which maintaining the same average pore size and specific surface area. The total acidity, specially carboxyl groups, increased by HNO₃ treatment, although the specific surface area was reduced by ca. 20%. The Point of Zero Charge (PZC) of ACF decreased from pH 3.1 to 2.6 and 2.2 by HNO₃ and NaOH treatment, as a result of increases in anode ion density on ACF disc surface. Therefore, the adsorption rate of cobalt ion by NaOH treated ACF disc was twice larger than that of non-treated ACF disc, while that of HNO₃ treated ACF disc was only one fifth of the non-treated ACF disc in electrosorption. The electrosorption rate increased with the electrolyte concentration, however, it slowly decreased above 0.2 N NaCl because of competition between Co²⁺ and Na⁺.

Key words: Activated Carbon Fiber, Electrosorption, Acidity, Co(II)

1. 서 론

전기흡착기술은 기존의 흡착제에 전기적인 구동력을 부가하여 수행하는 기술로서 전기전도성 흡착제의 전위 조절에 의하여 전극 표면전하의 제어가 가능하고, 전위차를 이용하여 수용액내 존재하는 이온, 분자 및 부유입자를 흡·탈착 할 수 있는 특징을 갖고 있다[1].

전기흡착의 구성요소인 전극은 적합한 재료특성 즉, 높은 전기전도도와 큰 비표면적을 갖추어야 하는데, 탄소체는 상기 두 가지 특성을 만족할 뿐만 아니라 내열성 및 내약품성이 우수하므로 폐액 처리용 전극 소재로서 사용되어 왔다. 한편, 그동안 사용되어 온 활성탄소나 흑연은 입상이나 분말상으로 취급이 불편하고, 비표면적이 비교적 적어 최근에는 새로운 타입의 다공성 탄소전극이 요망되고 있다.

근래에 개발된 활성탄소섬유는 비표면적이 활성탄소에 비하여 월등히 커서 수용액내 불순물을 흡착할 수 있는 면적이 넓을 뿐만 아니라 미세공들이 표면에 균일하게 발달되어 있어서 흡착속도가 빠르다[2]. 또

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: skryu@cnu.ac.kr

한 전기전도성도 활성탄소보다 훨씬 우수하고, 부직포나 직포의 형태로 쉽게 가공할 수 있어서 화학적 활성종의 전기흡·탈착 전극재로 매우 효과적일 것으로 판단된다.

실제로, 활성탄소섬유에 음전기를 통과시켜 양으로 하전된 무기이온들을 전기적으로 흡착하려는 시도가 보고되었다[3, 4]. 그러나 활성탄소섬유를 이용한 전기흡착연구는 이제 시작 단계이며 또한 활성탄소섬유도 탄소체이므로 무기이온의 효과적 흡착을 위해서는 표면처리가 필수적이다. 특히, 공급된 전류가 전면에 균일하게 전달되는 탄소전극을 준비할 필요가 있다.

원자력발전소나 방사성 물질 취급장에서는 폐기물의 양을 저감하려는 노력이 이루어지고 있다. 제염공정후 발생하는 최종 폐액에는 Co(II), V(III), Fe(II) 등이 존재한다. 이들 금속이온은 동시에 제거하기 어려우므로 선택적으로 제거하고 있다. 특히, Co(II)는 방사성이 강하므로 이를 먼저 선택적으로 제거하려는 노력이 수행되었으나[5] 이를 더욱 효과적으로 흡착할 수 있는 기술 개발이 필요하다.

그러므로, 본 연구는 전기흡착에 응용하고자 활성탄소섬유를 분체로 갈았다가 전류의 전달이 균일해지도록 다시 디스크 형태로 성형하여 전극을 만들고 이 전극의 무기이온 흡착능력을 향상시킬 수 있도록 화학약품처리하면서 처리조건에 따른 비표면적과 미세공도, 표면작용기 그룹, 수용액 내에서의 pH 변화에 따른 등전점과 zeta potential의 변화를 분석하고 화학약품으로 표면처리된 활성탄소섬유 디스크전극에 의한 수용액 내 코발트이온의 전기흡착 효과를 제시하고자 하였다.

2. 실험

실험에 사용된 활성탄소섬유는 셀룰로스가 부직포(KF-1500, Toyobo Co.)로 물성치는 겉보기 밀도가 0.01-0.2 g/cc, 평균세공 크기가 14 Å이다. 이것을 습식방법으로 0.1-0.5 nm 길이로 분쇄하여 다시 디스크(직경 2.5 cm, 두께 0.5 cm)형태로 진공성형한 후 화학약품처리하여 전극으로 사용하였다. 디스크 전극의 표면처리는 Yoon[6] 및 Chang[7]의 방법에 따라 시료를 1 M NaOH, 1 M HNO₃ 용액에 담겨있는 비커에 넣고 20 °C, 40 °C, 60 °C에서 각각 24시간동안 교반하면서 수행하였다. 표면처리하는 동안 ACF의 화학약품에 대한 안정성을 조사하기 위하여 40 °C, 800 시간 동안 교반하면서 용액의 pH변화, 시료의 중량변화를 측정하였다. 표면처리가 완료된 후 증류수로 여러 번 세척하고 110 °C에서 24시간 건조하였다. Fig. 1에 제조된 성형디스크의 사진을 도시하였다. 4 nm 직경의 흑연봉이 통과하는 부피를 제외하고 한 개 disc의 실제 무게는 0.5 g이며 겉보기 밀도는 0.21 g/cc이다.

코발트 이온의 전기흡착은 자체 제작한 3전극 전기화학 흡·탈착장치를 사용하여 수행하였다. 전기 흡·탈착 장치는 Fig. 2에 보인 바와 같이 potentiostat(EG&G 273)와 용적 1 l의 플라스크 흡착조로 구성되었다. 흡착조에는 집전체로 사용된 흑연봉(EG&G PARC M-G0091)이

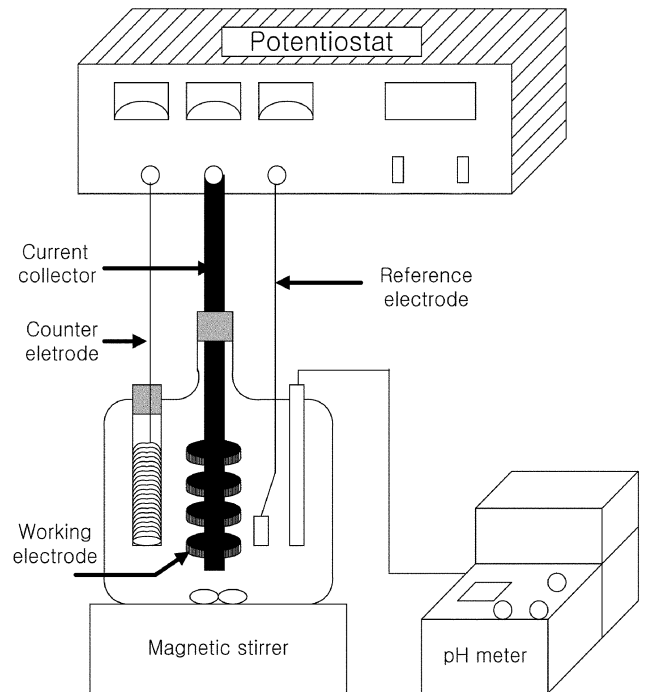


Fig. 2. Schematic view of electroosorption apparatus.

potentiostat과 연결되어 있고 이 흑연봉의 아랫부분에 활성탄소섬유 디스크 4개를 0.5 cm 간격으로 연결하여 작업전극(working electrode)으로 사용하였다. 상대전극으로는 가스발생에 비부식성인 백금선(0.2 nmΦ)을 기공크기 40 Å인 Vycor 튜브(No 7930)내에 나선형으로 설치하여 작업전극과 분리시켰다. 기준전극은 포화 칼로멜전극(saturated calomel electrode)을 사용하였다. 전해질 용액으로는 0.05 N, 0.1 N, 0.2 N, 0.5 N NaCl(Junsei Chemical Co.)용액을 증류수로 제조하였으며 이 전해질 용액에 CoCl₂ 용액을 첨가하여 Co⁺⁺의 농도가 30 ppm이 되도록 하였다. 용액이 균일하게 혼합되도록 자석식 교반기를 사용하여 100 rpm의 속도로 서서히 용액을 교반시켰다. 탈착실험은 전해질용액을 새로 주입한 후 pH 5로 조절하여 실험하였으며, 모든 용액의 pH는 0.1 N NaOH 또는 0.1 N HCl을 첨가하여 조절하였다.

화학약품처리된 활성탄소섬유 성형체 표면의 구조적 특성은 BET 비표면적 측정장치를 사용하여 분석하였고 표면산도는 Boehm의 선택중화법[8]으로 측정하였다. 화학처리된 활성탄소섬유 디스크의 수용액에서의 pH변화에 따른 zeta 전위와 등전점 변화는 zeta 전위 측정기(ELS-6000)를 사용하여 측정하였으며 전해질 용액내의 코발트 이온의 농도는 원자흡수 분광계(Perkin Elmer, 1100B)로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 표면처리된 활성탄소섬유 디스크의 구조적·화학적 특성

Fig. 3에 활성탄소섬유 디스크의 HNO₃, NaOH 용액에서의 내약품성을 측정한 결과를 나타내었다. 40 °C에서 pH 1.6의 강산, pH 6.75의 중성 및 pH 12.25의 강염기 용액에서 일주일동안 체류하였어도 활성탄소섬유 디스크가 들어있는 용액의 pH 변화는 무시할 만 하였고 중량변화 또한 없었다. 따라서 활성탄소섬유는 40 °C에서는 강산과 강염기에서 비교적 안정함을 알 수 있었다.

흡착제는 세공의 크기와 분포에 따라 흡착질의 흡착에 영향을 주므로 표면처리를 수행한 활성탄소섬유 디스크의 세공 크기 분포를 조사할 필요가 있다. Fig. 4는 일반 활성탄소섬유 디스크와 산·염기처리된 활성

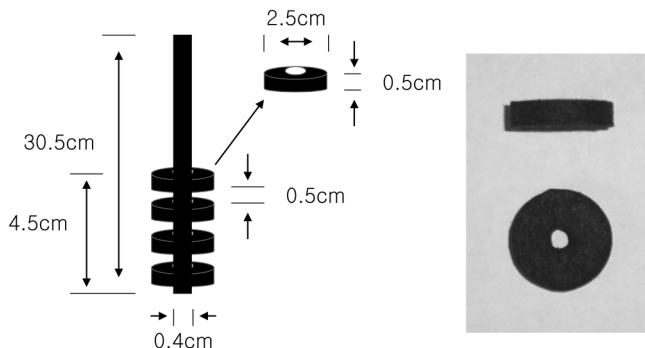


Fig. 1. Photographs of ACF-discs.

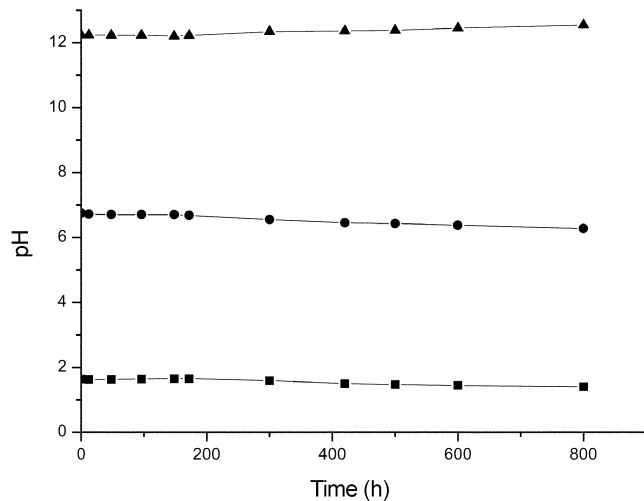


Fig. 3. pH monitoring of ACF-disc contained NaOH and HCl solution at 40°C, 100 rpm.

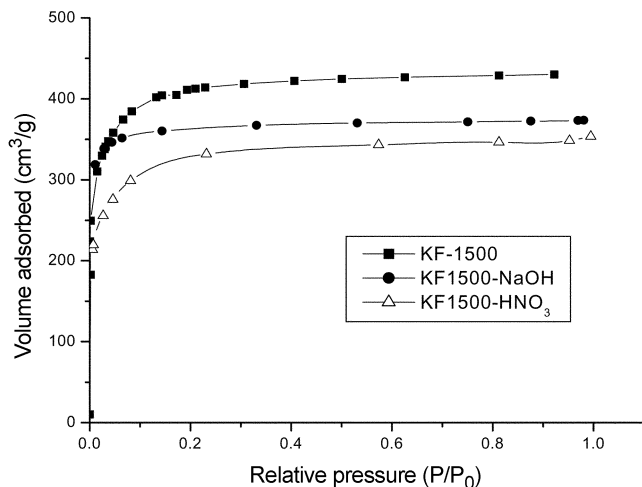


Fig. 4. Adsorption isotherms of chemically treated ACF-discs.

탄소섬유 디스크의 77 K에서의 질소 흡착등온곡선을 도식한 것이다. 그림으로부터 모든 곡선은 type I을 보이고 있는데 이것은 활성탄소섬유에 발달된 세공은 대부분 미세공들이고 이들이 모두 표면에 노출되어 있기 때문이며, 이들을 디스크의 형태로 성형하고 산·염기로 처리하면 질소흡착량은 감소하지만 미세공의 크기에는 큰 변화가 없음을 의미한다. 질소흡착량의 감소는 표면에 관능기가 발달하여 이 관능기가 미세공을 막기 때문으로 판단된다. Pittman 등[9]은 탄소섬유를 진한 HNO_3 로 표면처리하면 결정화가 덜 된 부분이 질산과 반응하여 표면에 작은 구멍이나 부스러짐이 발생한다고 보고하였고, Manocha[10]도 표면의 산소작용기들이 탄소의 구멍 입구나 평판의 모퉁이 등에 주로 형성된다고 보고하였다. Table 1에 20 °C, 40 °C 및 60 °C에서 HNO_3 및 NaOH로 24시간동안 표면처리된 활성탄소섬유 디스크의 구조적 특성을 정리하였다. 표로부터 총세공부피의 감소는 미세공부피의 감소와 일치한 사실로부터 표면처리에 의하여 발달된 작용기들의 미세공이 입구를 막았음을 알 수 있으며 이러한 결과는 Park 등[11]의 보고와 일치한다. 따라서 질소흡착량과 비표면적이 감소하였지만 평균세공의 크기는 거의 변화가 없다. 비표면적은 20 °C 처리에서는 10-18% 감소하지만 처리온도가 상승함에 따라 다시 증가하는 경향을 보였는데 이는 작용기들의 생성 또는 소멸에 관계가 있는 것으로 생각된다.

Table 2에는 화학적 표면처리된 활성탄소섬유 디스크의 표면산도를

Table 1. Structural characteristics of chemically treated ACF-discs

ACF	S_{BET} (m^2/g)	V_t (cc/g)	V_m (cc/g)	Aver. pore dia. (\AA)
KF-1500	1,614	1.06	0.83	14
KF-1500- HNO_3 (20 °C)	1,315	0.80	0.57	17
KF-1500- HNO_3 (40 °C)	1,560	0.70	0.64	18
KF-1500- HNO_3 (60 °C)	1,576	0.72	0.67	18
KF-1500-NaOH (20 °C)	1,460	0.82	0.59	15
KF-1500-NaOH (40 °C)	1,557	0.71	0.66	18
KF-1500-NaOH (60 °C)	1,568	0.71	0.67	18

Table 2. Surface acidity of chemically treated ACF-discs

ACF	Functional group (meq/g)			Total acidity (meq/g)
	Carboxyl	Lactone	Phenol	
KF-1500	0.044	0.487	0.314	0.850
KF-1500- HNO_3 (20 °C)	0.785	0.861	0.633	2.230
KF-1500- HNO_3 (40 °C)	0.668	0.614	0.344	1.626
KF-1500- HNO_3 (60 °C)	0.640	1.164	0.112	1.916
KF-1500-NaOH (20 °C)	0.012	0.542	0.125	0.680
KF-1500-NaOH (40 °C)	0.086	0.072	0.456	0.610
KF-1500-NaOH (60 °C)	0.060	0.128	0.392	0.580

정리하였다. Shim과 Ryu[12], Donnet과 Bansal[13]의 결과와 같이 표면 처리된 활성탄소섬유 디스크의 총 산도는 0.850 meq/g인데 20 °C에서 HNO_3 로 처리한 경우는 2.230 meq/g의 산도값을 나타내어 처리전보다 2.6배 증가하였다. Lactone기와 phenol기는 약 2배 증가하였고 carboxyl기는 0.044 meq/g에서 0.785 meq/g으로 약 17.8배나 증가하였다. 처리온도를 40 °C, 60 °C로 상승시킴에 따라 carboxyl기와 phenol기는 감소했으나 lactone기는 감소했다가 다시 증가하였다. 반면에, NaOH로 처리한 경우 총 산도값이 0.680 meq/g으로 감소하였다. 작용기가 감소하면 막혀있던 미세공들이 개방되어 비표면적이 증가될 수 있을 것으로 예상하였지만, 실험결과는 비표면적이 오히려 감소하였다. 이러한 결과는 작용기와 결합되어 있던 표면탄소원자가 작용기로부터 탈리된 후 이웃 탄소원자와 이웃 관능기와 결합하여 미세공의 입구를 막았기 때문으로 판단된다.

Fig. 5는 20 °C에서 화학약품처리된 활성탄소섬유 디스크의 Zeta-전위의 변화를 측정한 것이다. 약품처리를 하지 않은 디스크의 등전pH(p_{PZC})는 3.1이었다. 즉, pH 3.1 수용액에서 활성탄소섬유 표면의 양이온 하전

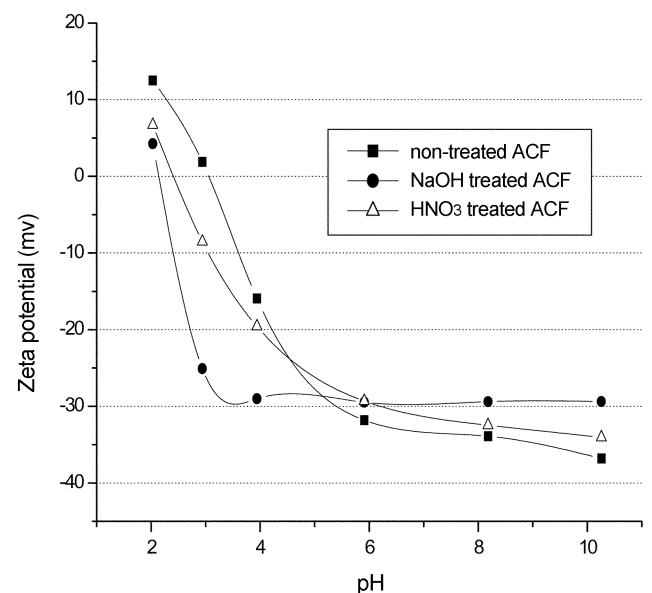


Fig. 5. Zeta potentials of chemically treated ACF-discs.

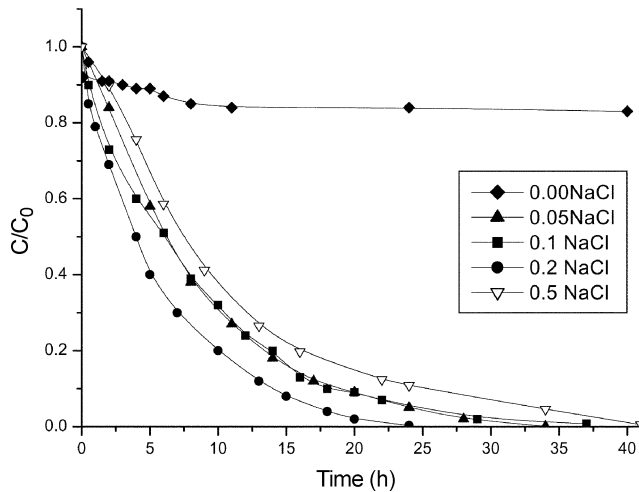


Fig. 6. Electrosorption of Co(II) on non-treated ACF-disks at various concentration of electrolyte solution.

밀도는 음이온 하전 밀도와 같아짐을 알 수 있다. 그러나 HNO_3 및 NaOH 로 표면 처리하였을 경우에는 등전전위 pH가 각각 2.6, 2.2로 낮아졌다. 표면처리에 의하여 등전 pH가 낮아지고 Zeta 전위가 더 큰 음의 값을 갖는 것은 흡착제 표면의 양이온 하전 밀도가 감소하고 음이온 하전 밀도가 증가했음을 의미하며 이러한 결과는 Blum과 Henderson[14]의 설명과 일치한다. 따라서 수용액내 양이온으로 하전된 무기금속이온의 흡착이 훨씬 용이해질 것으로 판단된다.

3.2. 활성탄소섬유 디스크에 의한 코발트 이온의 전기흡착

전극에 의한 수용액내 무기이온의 전기흡착공정에서는 전해질용액의 농도가 큰 영향을 미친다. 수용액으로부터 코발트 이온의 전기흡착을 위한 적절한 전해질 용액의 농도를 조사하기 위해서 수행한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 그림으로부터 전해질을 사용하지 않았을 경우에는 24시간의 접촉에서도 코발트 이온의 흡착량은 16%에 지나지 않았다. 그러나 NaCl 전해질을 사용한 경우에는 0.05 N의 전해질농도에서도 코발트 이온의 흡착량이 크게 증가하였다. 흡착량은 전해질 농도가 증가함에 따라 증가하다가 0.2 N 이상이 되면 다시 감소하였다. 이것은 Na^+ 의 증가가 Co^{2+} 의 전기흡착을 억제한 것으로 판단되는데 이러한 결과는 Lee와 Jung[15]이 보고한 결과와 같았다. 또한, Graham[16]이 전극전하

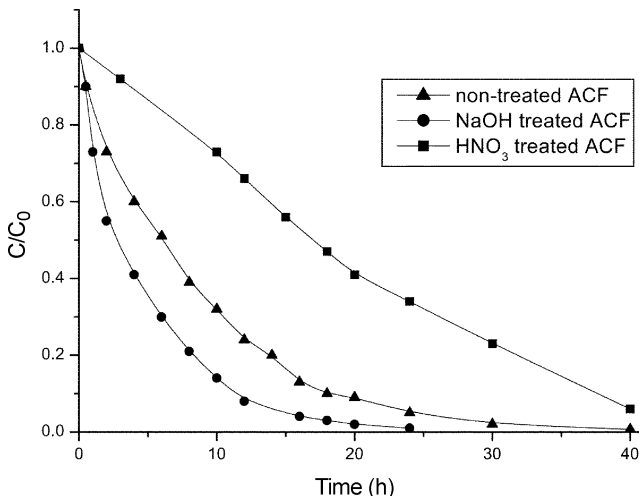


Fig. 7. Electrosorption of Co(II) on chemically treated ACF-disks at -0.2 V, 0.05 N NaCl , $\text{Co}=30$ ppm.

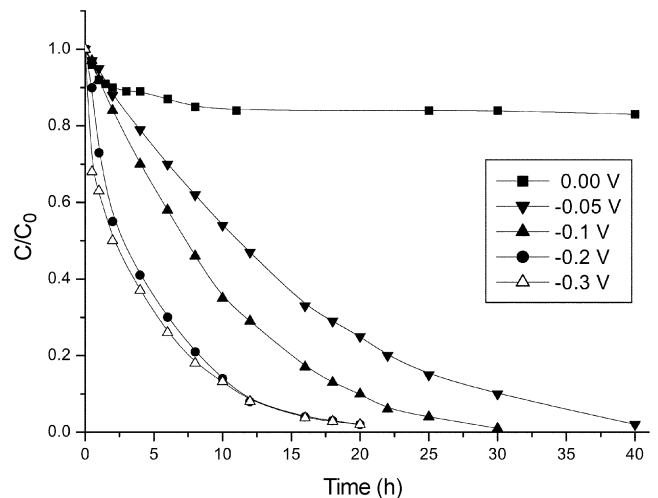


Fig. 8. Electrosorption of Co(II) on NaOH treated ACF-disks at 0.05 N NaCl , $\text{Co}=30$ ppm.

의 크기를 변화시키면서 수은 계면의 Na^+ 및 Cl^- 의 흡착을 연구하여 각 이온종에 대한 최적 가용 전극전하의 영역을 제시한 바 있다. 따라서 전해질의 농도가 전기흡착 능력에 미치는 영향은 이온종에 따라 다른 것으로 판단된다.

Fig. 7은 전해질 농도와 전극전하를 일정하게 유지하고 화학약품처리를 달리하여 제조한 활성탄소섬유 디스크에 의한 코발트 이온의 전기흡착능력을 측정된 결과이다. 그림으로부터 NaOH 로 표면처리한 디스크의 흡착능력은 크게 증가하여 짧은 접촉시간에 대부분의 코발트 이온을 흡착하였다. 반면에 HNO_3 으로 처리한 디스크는 처리하지 않은 디스크보다 전기흡착 효율이 감소하였다. 이러한 결과로부터 활성탄소섬유의 무기이온 전기흡착능은 비표면적 증가와 더불어 전극 표면에 발달한 관공기에 의한 음이온 하전 밀도의 증가 또한 중요한 영향을 미치는 것으로 판단된다.

Fig. 8은 NaOH 처리된 활성탄소섬유 디스크의 가용전위를 달리하면서 pH 5.0, 0.05 N NaCl 전해질용액에서의 코발트 이온 흡착능을 측정한 결과이다. 그림으로부터 전위를 가하지 않았을 때에는 흡착능력이 최대 16%에 지나지 않았으나 음의 가용전위가 증가할수록 코발트 이온의 흡착능력이 증가하고 -0.2 V의 가용전위에서는 20시간 내에 100% 흡착이 이루어졌다. 이러한 결과는 유기산을 첨가하여 착화합물의 형태로 제거한 연구[5]보다 훨씬 우수한 흡착능을 보이고 있다. 한편, -0.3 V의 경우는 초기 흡착속도가 -0.2 V의 가용전위에서 크지만 시간이 경과함에 따라 유사한 결과를 나타내었다. 이것은 실험에 사용한 코발트 이온의 농도가 낮아져 기인하여 흡착질의 초기농도를 증가시키면 전기흡착능력은 가용전위에 비례하여 증가할 것으로 판단된다.

Fig. 9는 코발트 이온을 흡착한 활성탄소섬유 디스크로부터 양의 전위를 가하여 코발트 이온을 탈착하는 실험결과를 보인 것이다. 즉, Fig. 8에 제시한 -0.2 V의 전위로 24시간동안 코발트 이온을 흡착한 디스크를 코발트 이온이 없는 1/l의 0.05 N NaCl 용액에 넣고 양의 전위를 가하면서 탈착을 실시한 결과 그림과 같이 초기 탈착속도는 매우 컸으며 $+0.7$ V의 전위에서는 4시간동안 약 85%의 탈착율을 보였다. 일반적으로 탈착 시에는 흡착 시보다 훨씬 높은 전위를 공급해야 한다는 연구[17]와 일치하며, 낮은 전위를 가할 경우 평형에 이르는 시간이 매우 길어짐을 알 수 있다. 이러한 연구결과들로부터 표면처리 활성탄소섬유 전극을 충전한 고정탑에서 무기이온 수용액을 연속으로 통과시키면서 음과 양의 전위를 흡·탈착을 수행하면 수용액으로부터 여러 가지 무기이온을 효과적으로 제거할 수 있을 것으로 판단된다.

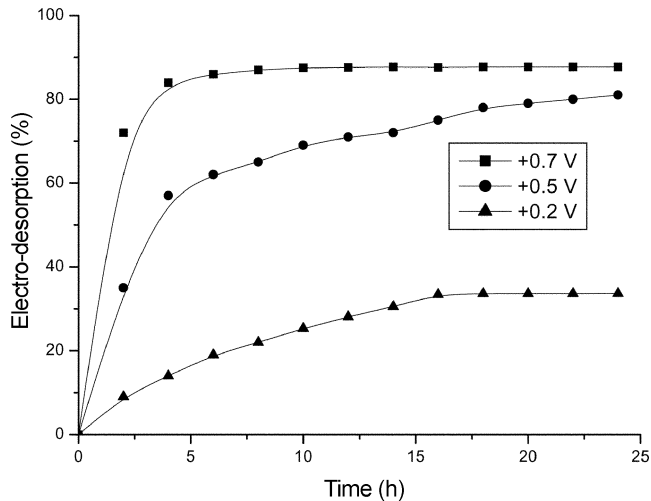


Fig. 9. Electrodesorption of Co(II) from NaOH treated ACF-discs at 0.05 N NaCl.

4. 결 론

활성탄소섬유를 갈아서 평판 디스크를 만들고 이것을 NaOH 또는 HNO_3 로 표면처리한 후 흑연봉을 연결하고 전류를 공급하면서 수용액으로부터 코발트 이온을 전기흡착시킨 결과 NaOH 처리 디스크로부터 괄목할만한 성과를 얻었다. 즉, HNO_3 로 처리하면 탄소흡착제의 비표면적이 감소하고 코발트 이온의 흡착에 도움이 안 되는 carboxyl 그룹이 많이 생성되었으나, NaOH로 처리하면 비표면적은 변화 없고 carboxyl 기를 포함한 작용기들이 감소하여 탄소흡착제의 표면에 음이온 하전 밀도가 증가하게 된다. 이 음이온 하전 밀도의 증가로 등전점과 zeta 전위를 낮추어 양이온의 접근을 쉽게 하므로 전기흡착을 용이하게 한다. NaOH로 표면처리된 활성탄소섬유 디스크에 의한 코발트 이온의 전기적 흡착은 비전기적 흡착에 비하여 흡착속도가 2배 이상 증가하였다. 전기적 흡착능력은 가해준 전류량에 선형으로 증가하였고, 0.2 N NaCl 까지는 전해질의 농도에 비례하였으나 전해질의 농도가 과하면 양이온의 경쟁으로 코발트 이온의 흡착속도가 감소되는 경향이 있다.

감 사

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(#4-4-1)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- Woodard, F. E., McMackins, D. E. and Jansson, R. E. W., "Electrosorption of Organic on Three Dimensional Carbon Fiber Electrode," *J. Electroanal. Chem.*, **214**, 303-330(1986).
- Ryu, S. K., "Porosity of Activated Carbon Fiber," *High Temperature-High Pressure*, **22**, 345-354(1990).
- Kim, J. S., Jung, C. H., Oh, W. Z. and Ryu, S. K., "Electrosorption and Separation of Co^{2+} and Sr^{2+} Ions from Decontaminated Liquid Wastes," *Carbon Science*, **3**(1), 6-12(2002).
- Xu, Y., Zondlo, J. W., Finklea, H. O. and Brennsteiner, A., "Electrosorption of Uranium on Carbon Fibers as a Means of Environmental Remediation," *Fuel Processing Technology*, **68**(3), 189-208 (2000).
- Lee, S. M., Jung, C. H., Moon, J. K., Oh, W. Z. and Ryu, S. K., "The Adsorption of Cu(II), Co(II), Ni(II) from Aqueous Solution onto Activated Carbon Fibers and the effect of Picolinic Acid," *HWAHAK KONGHAK*, **37**(1), 34-40(1999).
- Yoon, Y. Y., "A Study on the Treatment of Chromium(VI) by Activated Carbon and Surface Treated Activated Carbon," *J. Kor. Soc. Env. Eng.*, **9**(2), 2001-2005(1987).
- Chang, G. H., "The Adsorption Characteristics of Phenol by Surface-modified Activated Carbon Fibers," *Engineering Research*, **22**, 311-322(1991).
- Boehm H. P., "Chemistry of Heteroatoms on the Surface of Carbon (Plenary Lecture)," *Carbon*, **7**(6), 715(1969).
- Jr Pittman, C. U., He, G. R., Wu, B. and Gardner, S. D., "Chemical Modification of Carbon Fiber Surfaces by Nitric Acid Oxidation Followed by Reaction with Tetraethylenepentamine," *Carbon*, **35**(3), 317-331(1997).
- Manocha, L. M., Bahl, O. P. and Singh, Y. K., "Mechanical Behaviour of Carbon-carbon Composites Made with Surface Treated Carbon Fibers," *Carbon*, **27**(3), 381-387(1989).
- Park, S. J., Kim, Y. M. and Shim, J. S., "Studies on Anodic Oxidation Treatment of Surface and Heavy Metal Adsorption Properties of Activated Carbon Fibers," *J. Kor. Soc. Env. Eng.*, **14**(1), 41-47(2003).
- Shim, J. W. and Ryu, S. K., "Effect of Surface Modification of Activated Carbon Fiber for Adsorption on Copper and Nickel Ions," *HWAHAK KONGHAK*, **36**(6), 903-907(1998).
- Donnet, J. B. and Bansal, R. C., *Carbon Fibers*, 2nd ed., Marcel Dekker inc, New York, USA(1990).
- Blum, L. and Henderson, D., "Mixtures of Hard Ions and Dipoles Against a Charged Wall: The Ornstein-Zernike Equation, Some Exact Results, and the Mean Spherical Approximation," *J. Chem. Phys.*, **74**(3), 1902-1910(1981).
- Lee, S. M. and Jung, C. H., "The Effect of Electric Potential on the Desorption of Co(II) Ions," *Applied Chemistry*, **3**(1), 237-240(1999).
- Grahame, D. C., "The Electrical Double Layer and the Theory of Electrocapillarity," *Chemical Rev.*, **41**(3), 441-501(1947).
- Jung, C. H., Lee, S. M., Oh, W. Z. and Park, H. S., "The Electrical Regeneration of Carbon Based Electrode," *Applied Chemistry*, **3**(1), 281-284(1999).