

전기삼투에 의한 활성탄 속의 Cadmium 제거

김부웅[†] · 김원호

부산대학교 공과대학 화학공학과
(1997년 8월 25일 접수, 1997년 12월 20일 채택)

Removal of Cadmium in Activated Carbon by Electro-osmosis

Bu-Ung Kim[†] and Won-Ho Kim

Dept. of Chem. Eng., Pusan National Univ., Pusan 609-735, Korea
(Received 25 August 1997; accepted 20 December 1997)

요 약

활성탄의 재생 목적으로 cadmium 흡착 활성탄에 대하여 용출액을 염산 수용액으로 하여 정전류 조건에서 전기삼투 실험을 수행하였다. 전기삼투투과 계수, 전기삼투 물 이동 효율 및 겔보기 전기전도도의 값은 시간에 따라 변화하고 H⁺ 이온은 양극에서 음극 쪽으로 이동하며 cadmium 제거효율은 90 % 이상임을 알 수 있었다.

Abstract—For the purpose of activated carbon regeneration, electro-osmosis tests were conducted on activated carbon specimens loaded with cadmium under constant currents using hydrochloric acid aqueous solution as a purge solution. Electro-osmotic permeability, electro-osmotic water-transport efficiency and apparent conductivity values were time-dependent. The results show that H⁺ ions move from anode to cathode compartment and the cadmium removal efficiency is over 90 %.

Key words : Regeneration of Activated Carbon, Electroosmosis, Cadmium

1. 서 론

전기화학적 방법은 다음과 같은 이점[1]이 있어서 재활용이나 정화에 다양하게 응용되고 있다.

- (1) 직접 또는 간접 산화·환원, 상분리, 농축 또는 회석 등 다양한 응용
- (2) 저온 조작, 최적설계를 통한 고에너지 효율
- (3) 제어 용이
- (4) 전자가 산화제나 환원제의 역할을 하므로 환경친화적임
- (5) 장비와 조작이 단순하여 비용 절감

특히 전기삼투가 재활용이나 정화에 많이 응용되고 있다. 전기삼투는 대전한 입자가 반대 전하를 가진 전극 쪽으로 전기적 인력에 의하여 이동하는 전기영동과 반대되는 현상으로 전기장 속에서 대전입자를 고정시킬 때 용액이 이동하는 현상이다.

문헌에 보고된 전기삼투의 응용에는 토양의 고화를 위한 수분 제거[2], 슬러지 탈수[3], 오염된 막의 세척[4], 이외에 오염물질 제거 등이 있다.

지하수에서 무기 오염물질의 이동에 관한 연구가 Ferguson과 Nelson[5]에 의하여 수행된 이후, Lageman 등[6]은 점토, 카올리나이트(kaolinite) 및 이탄 등으로부터 중금속(Cd, Cr, Pb)의 90 % 이상이 제

거된다고 보고하였다. Shapiro와 Probst[7], Bruell 등[8] 및 Acar와 Gale[9]은 유기 오염물질인 acetic acid, phenol, gasoline 탄화수소 및 trichloro-ethylene의 제거에 관하여 발표하였다.

흡착에 사용된 활성탄은 2차 오염 방지, 자원 절약, 탄소 자원의 고도이용, 유용한 피흡착질의 회수 및 생산성 향상의 면에서 재사용이 일반화되어 있다. 일반적인 재생법인 가열 재생법은 입상 활성탄에는 이용이 가능하나 분말 활성탄에는 응용이 불가능한 점, 과도한 연소 손실, 입자의 기계적 파손, 마모에 의한 미분화, 재생기체에 의한 2차 오염 및 많은 투자를 필요로 하는 문제점[10]이 있다.

흡착 공정에 사용된 활성탄의 재생에 전기삼투를 응용한 연구가 최근 김과 윤[11]에 의하여 수행되었다. 이들은 독성 유기물의 하나인 phenol을 흡착시킨 활성탄에 대한 정전류 조건에서의 전기삼투 특성을 조사하여 50 mg phenol/g carbon의 phenol 흡착 활성탄 속의 phenol은 전기삼투로써 효과적으로 제거된다고 보고한 바 있다.

Cadmium은 안료, 안정제 및 도금 등에 이용되는 물질로서 회수 불가능한 수준의 대표적인 유해 중금속 물질로서 calcium 대사와 관련된 골다공증 등을 일으키는 물질로 알려져 있다.

본 연구에서는 금속 이온을 흡착한 활성탄의 재생 가능성을 알아보기 위하여 cadmium을 흡착시킨 활성탄에 대한 전기삼투 특성과 cadmium 제거에 미치는 전기화학적 변수의 영향에 관하여 조사하였다.

2. 전기삼투

전기삼투는 전극과 전해액이 상대적으로 운동하는 전기·운동 현

[†]E-mail : bukim@hyowon.pusan.ac.kr

상의 하나이다. 대부분의 물체는 극성매체와 접촉하게 되면 이온화, 이온 흡착, 이온 용해 및 쌍극자의 흡착과 배향으로 대전[12]하게 된다.

대전물체의 계면은 반대 전하의 이온을 끌어당기고 동일 전하의 이온을 배척하게 되므로 대전계면의 이온 분포에 영향을 미쳐 고정층과 유동층으로 구성되는 전기 이중층을 형성하게 된다.

전기 이중층을 형성하고 있는 대전물체를 고정시키고 여기에 전기를 걸어주면 유동층 이온의 이동으로 거시적인 액의 이동이 일어나게 된다. 이 현상이 전기삼투이다.

전기삼투 유량 q_e 는 다음과 같이 정의된다.

$$q_e = k_e \cdot i_e \cdot A = k_e \cdot I \quad (1)$$

전기삼투 투과계수 k_e 와 전기삼투 물-이동 효율 k_e 는 전기삼투의 특성 값으로 이용된다. 낮은 전류에서의 전기삼투 실험에서도 물의 전기분해가 일어나 양극에서는 산성이 강하게 되고 음극에서는 알칼리성이 강하게 된다. pH는 전류밀도에 따라서 다르나 양극에서는 2.0까지 감소하고 음극에서는 12.0까지 증가한다.

양극에 형성된 산전선(acid front)은 시간이 경과하면 음극 쪽으로 다음과 같은 기구에 의하여 이동하게 된다.

- (1) 수두차에 의한 흐름
- (2) 농도구배에 의한 확산
- (3) 전압구배에 의한 이온의 이동
- (4) 전기삼투

산전선의 이동은 다공성 물질의 표면에 흡착된 물질을 용출시켜 산전선과 함께 이동하게 된다.

3. 실험

3-1. 실험 재료

실험에 사용된 약품은 모두 특급 시약으로 $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 와 NaCl은 Junsei사, HCl은 Osaka사 그리고 NaCl은 Tedia사의 것을 사용하였다.

활성탄은 American Norit사의 갈탄을 산세척하여 범용으로 제조된 Darco 활성탄으로 굵기 4-12 mesh, 표면적 $650[\text{m}^2/\text{g}]$, 세공용적 $0.92[\text{cm}^3/\text{g}]$, 밀도 $0.353[\text{g}/\text{cm}^3]$ 이며 세공용적과 밀도로부터 계산한 공극률은 0.245이다.

3-2. 실험장치

전기삼투 실험장치는 Hamed 등[13]의 장치를 변형·개량하여 사용하였다. Fig. 1과 같이 내경 31 mm, 길이 55 mm의 아크릴 관의 양단에 전극을 달고 일정한 수두가 유지되도록 하였다. 한 쪽 전극에는 유출량을 계량할 수 있게 하고 다른 쪽 전극에는 10 ml 용량의 저장 용기를 설치하여 시료 채취가 가능하도록 하였다. 각 전극의 상부에는 내경 8 mm의 배기관을 설치하여 생성 기체가 쉽게 배출되도록 하였다.

전극은 양극 산화가 적고 전극의 표면 석출물을 쉽게 제거할 수 있는 흑연 재질로써 외경 24 mm, 내경 6 mm 그리고 두께 10 mm의 워셔(washer) 형으로 만들어 사용하였다. 전극 재료로 일본 Toyo 탄소의 고순도의 등방성 고밀도 흑연을 사용하였다. 흑연 전극에 도선이 들어갈 수 있도록 구멍을 뚫고 여기에 동분(銅粉)을 넣고 전기 방전으로 용융 접착시켜 흑연 전극과 도선을 연결하였다.

시료와 전극은 다공성 아크릴 판과 여과지로써 분리시켰다. 양단의 전극 부분과 본체를 플랜지로써 연결시켜 본체와 전극을 쉽게 분리·결합할 수 있도록 하였다.

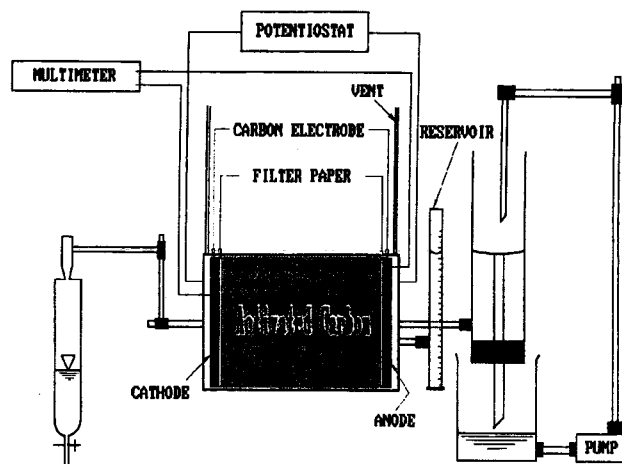


Fig. 1. Schematic diagram of electro-osmosis apparatus.

최대 전류 1 A, 제어 전압 $\pm 10\text{V}$, 최대 출력 전압 32 V인 EG & G사의 scanning potentiostat model 362를 전원 장치로 사용하였다.

Cd 분석은 Varian사의 Spectr AA-30 원자흡수 분광광도계를 이용하였다. 두 전극 사이의 전위차 측정에는 digital multimeter를, pH 측정에는 Orion사의 pH/ISE model 720 A와 semi-micro pH 전극을 사용하였다.

3-3. 실험방법

3-3-1. Cd 분석

원자흡수 분광광도계를 사용하여 측정한 Cd 농도는 0-2 ppm 범위에서 검량선이 직선 범위 안에 있으므로 2 ppm 이상 농도의 것은 희석하여 분석하였다.

3-3-2. 시료의 조제

활성탄 일정량을 취하여 끓는 물 속에서 30분 이상 가열하여 세공 속의 공기 및 수용성 물질을 제거하였다.

일정량의 Cd를 흡착시킨 활성탄 시료는 흡착등온선을 근거로 하여 만들었다.

3-3-3. 전기삼투 실험

일정량의 Cd를 흡착시킨 활성탄 시료를 용출액과 혼합하여 페이스트 상태로 만들어서 셀(cell) 내부에 빈 공간이 생기지 않도록 주의하면서 주입하고 다음에 일정수위를 연결한다. 액의 유출 부분으로부터 액이 흐르도록 셀의 위치를 낮춘 다음, 받침 잭(jack)을 천천히 조금씩 높여서 액의 흐름이 멈출 때까지 셀의 위치를 조절하였다. 이 상태에서 최소한 30분 이상 용액의 흐름이 없을 때에 일정 수위와 셀의 용액 유출구가 수평을 이룬 것으로 판단하였다.

전원장치로부터 일정한 양의 전류를 공급하면서 시간 경과에 따른 양극과 음극 사이의 전압과 유출액량을 측정하였다. 또한 일정 시간 간격으로 유출액과 저장조 액의 Cd 농도와 pH를 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

4-1. Cd 흡착등온선

일정량의 활성탄을 취하여 100°C 의 물 속에서 30분 동안 가열하여 물과 분리시키고 여기에 일정 농도의 $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ 수용액 일정량을 넣고 항온조 속에서 교반하면서 평형에 이르게 한다.

일정한 시간 간격으로 시료를 채취하여 Cd 농도를 원자흡수 분광광도계로써 측정하여 더 이상의 농도 변화가 없을 때에 평형 상태에 도달한 것으로 보고, 초기 농도와 평형 농도의 차이로부터 흡착량을

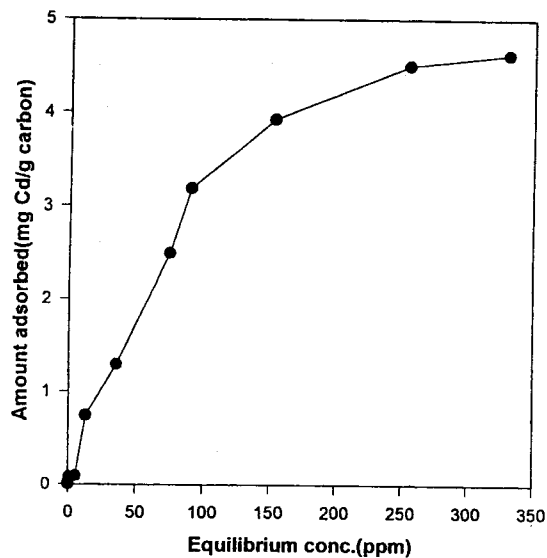


Fig. 2. Adsorption isotherm for Cd on Darco activated carbon at 20 °C.

계산하였다.

20 °C에서의 흡착등온선은 Fig. 2와 같다. 평형농도 250 ppm 이상에서 흡착량의 변화가 없는 것은 흡착이 평형상태에 도달한 것을 의미한다. 포화 흡착량은 4.5 mg Cd/g carbon이었다.

이후의 실험에서 포화흡착량의 약 50%에 해당하는 2.5 mg Cd/g carbon의 Cd 흡착 활성탄 시료를 사용하였다.

Yuki와 Ohsaki[14], Dobrowolski 등[15]은 활성탄의 Cd 흡착에서 pH와 chelating agent의 첨가 영향 등에 관하여 조사하여 보고한 바 있다.

4-2. 용출액의 선택

용출액으로 NaCl, NaOH 및 HCl 수용액을 사용할 경우의 Cd 흡착 활성탄의 전기삼투 특성을 알아보기 위하여 농도를 0.01 mol/(M)로 하고 정전위 25 V의 조건에서 시간 경과에 따른 용출액량 및 제거효율을 조사하여 Fig. 3, 4의 결과를 얻었다.

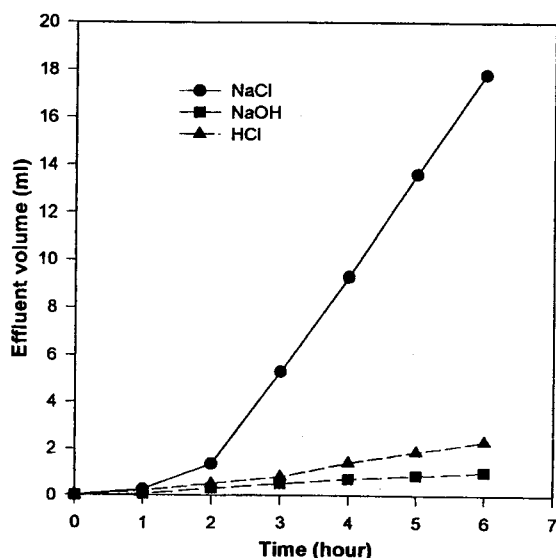


Fig. 3. Effluent volume for different purge solutions vs. time(0.01 M aqueous solution, 25 V).

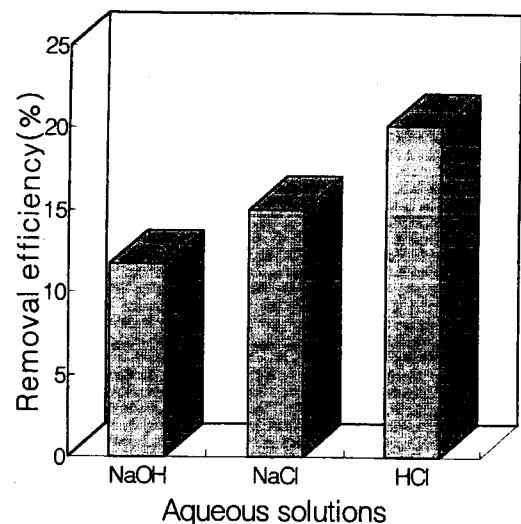


Fig. 4. Removal efficiency for different purge solutions(0.01 M, 6 hr, 25 V).

HCl 수용액의 경우에는 2시간 이후에도 용출액량의 변화는 미미하였으며 6시간까지의 Cd 제거효율은 NaOH 수용액 12%, NaCl 수용액 15%, 그리고 HCl 수용액의 경우에는 20%로서 HCl 수용액에서 가장 높은 값을 보였다. Cd 제거효율은 흡착된 Cd 양에 대한 전기삼투로써 제거된 Cd 양의 비를 나타낸 것이다. 전기삼투에 의하여 제거된 Cd는 용출액 속의 것과 음극에 전해석출된 양을 합한 것이다. HCl 수용액의 경우에 Cd 제거효율이 높은 이유는 HCl 수용액이 산성으로서 Cd의 용출을 쉽게 하기 때문이라고 생각된다.

본 연구의 목표는 활성탄에 흡착된 Cd를 분리하여 제거하는 것이므로 HCl 수용액을 용출액으로 선택하였다.

4-3. 전압구배와 용출량

HCl 수용액을 용출액으로 하여 정전류 조건에서 전기삼투 실험을 수행하여 용출액의 흐름이 음극 방향임을 확인하였다. 이것은 활성탄 주위의 전기 2중층의 확산층에 양이온이 많이 분포되는 경우에 나타나는 현상으로서 용출액의 이동은 양이온의 음극쪽 이동에 의한 것으로 이해된다.

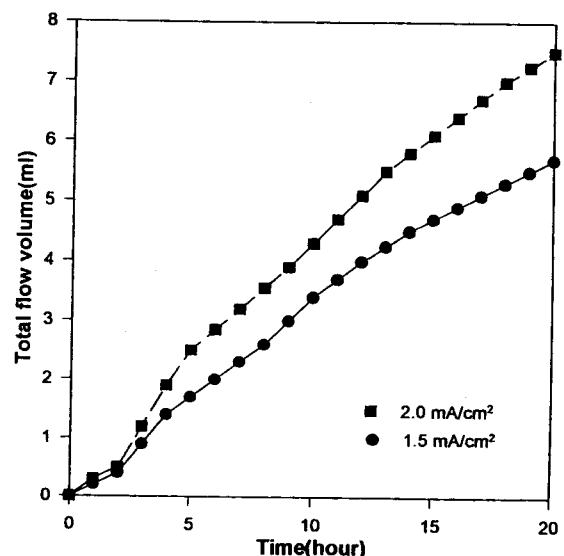


Fig. 5. Total effluent volume vs. time(2.5 mg Cd/g carbon, 0.01 M HCl).

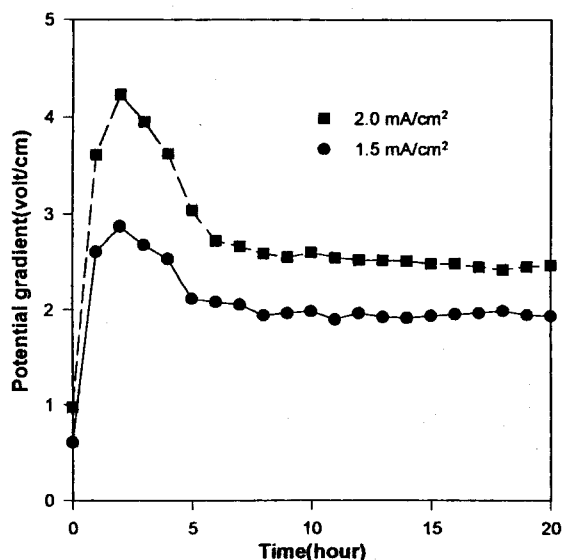


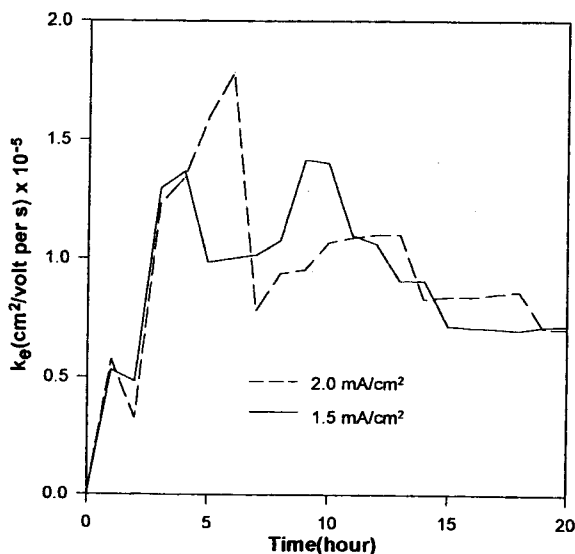
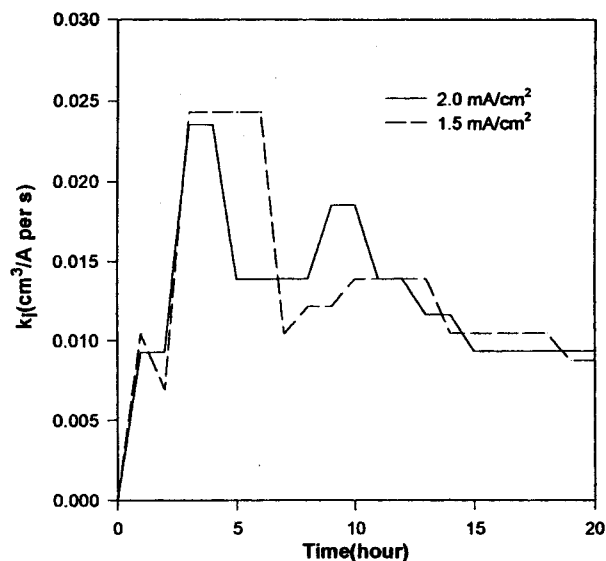
Fig. 6. Potential gradient vs. time.

0.01 M HCl 수용액에 1.5 mA/cm²와 2.0 mA/cm²의 전류밀도에서의 시간 경과에 따른 유출액량의 변화는 Fig. 5, 전압구배의 변화는 Fig. 6과 같다.

Fig. 5에서 최초 약 2시간 사이에는 흐름량이 적으나 이후 흐름량 증가를 나타내며 전류밀도 2.0 mA/cm²에서는 1.5 mA/cm²에서 보다 많은 흐름량을 보여준다.

Hamed 등[13]과 Putnam 등[16]도 토양에 대한 전기삼투 실험에서 흐름량이 시간 경과에 따라 변화함을 보였다. Renault와 Probst[17]에 의하면 이 현상은 시간 경과에 따라 이온 농도와 pH가 변화하고 이에 따른 zeta 전위와 전기장의 분포가 변하기 때문이라고 하였다.

시간에 따른 전위차 구배의 변화를 나타내는 Fig. 6에서 초기에는 전위차 구배가 상승하다가 이후에는 거의 일정한 값을 보여준다. 전류밀도 변화에 따른 전위차 구배의 변화 모양은 거의 일정하며 높은 전류밀도에서 높은 전위차 구배를 나타낸다. 초기의 전위차 구배 상승은 전해질 흡착에 의한 전극 부근에서의 농도 감소, 전극 표면에서의 전하이동 및 셀 내부에서의 전기화학적 변화를 나타내는 가스 발생, 전해질 용액의 공급 부족 및 전기삼투에 의한 흐름에 영향을

Fig. 7. Changes in electro-osmotic permeability(k_e) vs. time.Fig. 8. Changes in electro-osmotic water transport efficiency(k_t) vs. time.

받는 때문으로 생각된다.

전류밀도 변화에 따른 흐름량 변화를 나타내는 식 (1)로부터 전기삼투투과 계수 k_e 와 전기삼투 물 이동 효율 k_t 를 계산할 수 있다.

시간 경과에 따른 k_e 값의 변화는 Fig. 7에, k_t 값의 변화는 Fig. 8에 나타내었다. k_e 와 k_t 값은 모두 시간에 따라서 변화하며 전위차 구배가 크고 흐름량이 적은 초기에 변화의 폭이 클 수 있다. k_e 값은 토양의 종류에 따른 값의 차이인 $1 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-6}$ [cm²/V per s]의 범위 안에 있으나 k_t 값은 토양의 범위인 0-1.2 [cm³/A per s]의 100분의 1 정도의 낮은 값이다. k_t 값이 작은 것은 공극률의 차이로 토양에 비하여 유출액량이 적은 것에 기인한다고 생각된다.

4.4. 겔보기 전기전도도

겔보기 전기전도도 k_a 는 식 (2)로 표현된다.

$$k_a = \frac{I \cdot L}{V \cdot A} \quad (2)$$

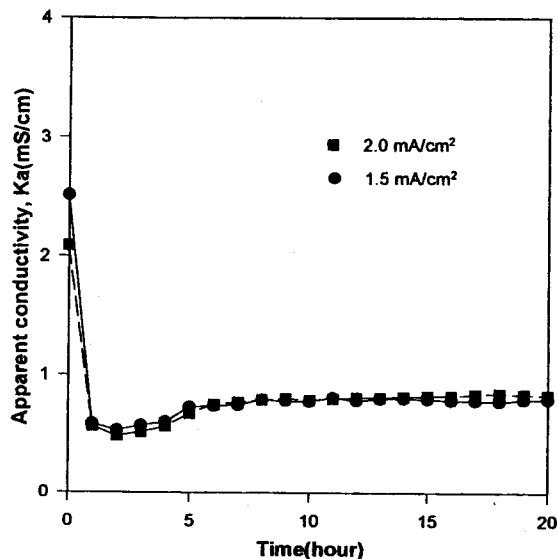


Fig. 9. Changes in apparent conductivity vs. time.

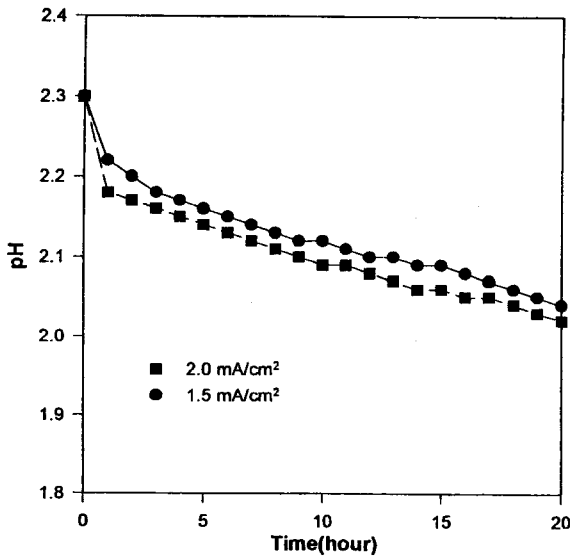


Fig. 10. pH changes at anode vs. time.

Fig. 9는 시간 경과에 따른 전위차 측정으로부터 계산한 겉보기 전기전도도의 변화를 나타낸 것이다. 초기의 겉보기 전기전도도는 1.05-1.35 mS/cm 범위의 높은 값을 나타내지만 5시간 이후에는 전류밀도에 무관하게 거의 일정한 값이다.

초기의 겉보기 전기전도도 값은 전기삼투가 시작되기 이전의 활성탄과 전해질의 전기전도도로 볼 수 있으며 시간 경과에 따른 겉보기 전기전도도 감소는 전기삼투의 진행에 따른 물의 전기분해 반응에서의 과전압 상승과 전해질 농도 감소에 따른 저항 증가에 기인하는 것으로 생각된다.

특히 Hamed 등[13]은 음극 부근에서는 물의 전기분해로 생성된 OH^- 이온이 양극에서 생성된 H^+ 이온의 이동으로 중화될 뿐만 아니라 전기삼투에 의한 흐름으로 전해질의 농도가 감소하기 때문이라고 하였다.

Acar와 Gale[9]은 카오리나이트로부터 Cd의 분리 연구에서 양극에 가까운 시료에서는 겉보기 전기전도도 값이 높고 음극 쪽 시료에서는 낮음을 확인하였다. 유출액 겉보기 전기전도도 값의 시간 경과에 따른 감소는 Pb 흡착 토양에 대한 전기삼투에서 보고된 Hamed 등[13]의 결과와 일치하며 활성탄으로부터 전기삼투로써 phenol 제거를 연구한 김과 윤[11]의 결과와도 잘 일치한다.

4-5. pH 변화

2.5 mg Cd/g carbon 시료, 0.01 M HCl 수용액 용출액, 전류밀도 1.5 mA/cm²와 2.0 mA/cm² 조건의 실험에서 시간 경과에 따른 양극과 음극에서의 pH 변화는 각각 Fig. 10, 11과 같다.

양극에서의 pH는 초기 값 2.3에서 서서히 감소하여 20시간 이후에는 2.0이 된다. 전류밀도 차이에 의한 pH 변화는 적지만 전류밀도가 큰 경우에 변화량이 약간 많다. 이 결과는 양극에서 H^+ 이온의 농도가 시간 경과에 따른 증가를 의미한다. H^+ 이온의 증가는 물의 전기분해에 의한 것이며 전류밀도 차이는 반응속도의 차이에서 비롯된다고 생각된다.

음극에서의 pH 변화를 나타내는 Fig. 11에서 pH는 초기 값 2.3에서 10시간까지 급격하게 증가하다가 이후에는 변화가 완만하며 7-8의 안정된 값을 나타낸다. 전기삼투가 일어나는 동안 음극에서는 물의 환원 반응이 예상된다. 그렇게 되면 음극에서는 OH^- 이온의 농도 증가로 pH가 증가하여야 하나 Fig. 11에서는 pH가 오히려 감소한다.

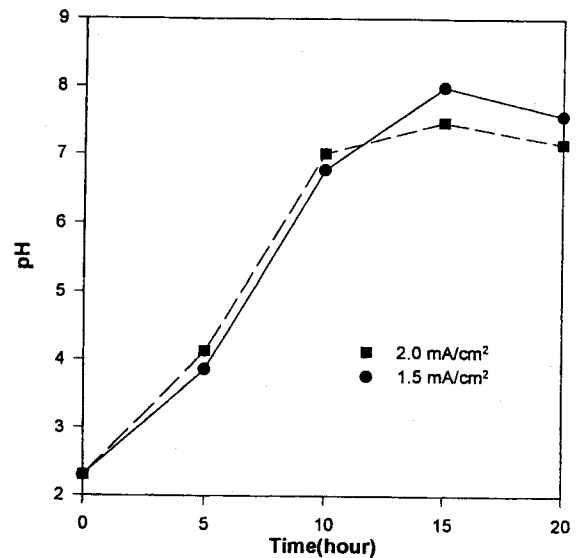


Fig. 11. pH changes at cathode vs. time.

Hamed 등[13], Burton 등[18] 및 Acar 등[19]은 토양에 대한 전기삼투 연구에서 셀 내부 시료의 위치에 따른 pH를 측정하였다. 즉, 일정 시간 동안의 전기삼투 실험 후에 토양 시료를 위치별로 분할하여 pH를 측정하여 양극 부근의 시료의 pH는 낮으나 음극 쪽으로 갈수록 증가하고 중앙 부근에서 변화가 크며 시간이 경과하면 그 변화 폭이 더 커짐을 확인하고 이 결과는 양극에서 생성된 H^+ 이온이 음극 쪽으로 이동하기 때문이라고 하였다.

따라서 Fig. 10과 11에서의 pH 변화는 전기삼투가 진행됨에 따라서 양극에서는 H^+ 이온이, 음극에서는 OH^- 이온이 생성되나 양극의 H^+ 이온은 전기적 인력, 확산 및 전기삼투 흐름에 의하여 음극으로 이동하는 현상으로써 설명될 수 있다.

4-6. Cd 제거효율

2.5 mg Cd/g carbon 시료에 0.01 M HCl 수용액을 용출액으로 한 20시간 동안의 전기삼투 실험에서 Cd 제거효율은 1.5 mA/cm²에서는 30.0%, 2.0 mA/cm²에서는 34.6%이었다. 높은 전류밀도에서는 반응속도의 영향으로 제거효율의 증가를 가져온다고 이해된다.

2.0 mA/cm² 전류밀도에서 시간 증가에 따른 제거효율 변화를 조

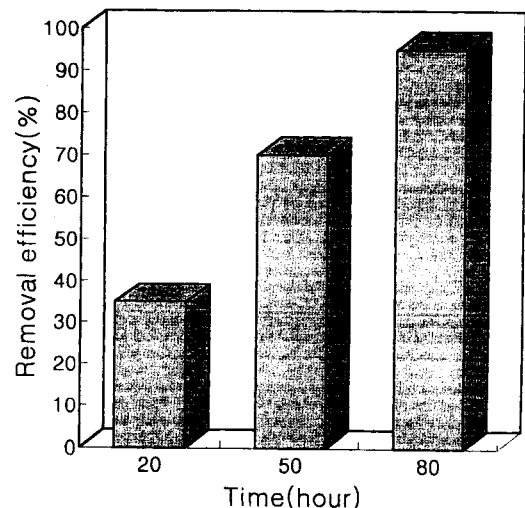


Fig. 12. Removal efficiency at 2.0 mA/cm² vs. time.

사하여 Fig. 12의 결과를 얻었다. 40시간에서는 제거효율이 61.2%이 나 80시간에서는 94.7%의 높은 값이며 이후에는 거의 일정한 값이었다. 이는 시간 경과에 따라서 음극 부근에서는 pH가 중성에 가까운 값을 유지하므로써 음극 부근 시료에서는 흡착 Cd의 용출이 어렵기 때문인 것으로 판단된다.

Pb 흡착 카오리나이트로부터 전기삼투를 이용한 Pb 제거를 연구한 Hamed 등[13]은 일정 시간 동안 전기삼투가 진행된 시료를 위치별로 분할하여 Pb 농도를 측정하여 양극 부근에서는 Pb가 거의 제거되었으나 음극 부근에서는 Pb의 일부가 제거되지 않음을 확인하고 음극 부근에서는 pH의 증가로 Pb가 침전의 형태나 흡착 상태로 잔존한다고 하였다.

Cd 흡착 활성탄에서 94.7%의 Cd를 제거하는데에 적은 양의 유출액량(활성탄 시료 공극 체적의 약 60%)이 소요되었을 뿐만 아니라 흑연보다 양극 산화에 더욱 안정한 전극을 사용하여 전류밀도를 높이면 더욱 짧은 시간에 Cd를 제거할 수 있을 것이므로 전기삼투는 Cd 흡착 활성탄으로부터 Cd를 효과적으로 제거할 수 있는 한 방법이 될 수 있다고 판단된다.

5. 결 론

활성탄의 재생 목적으로 cadmium 흡착 활성탄에 대하여 용출액을 염산 수용액으로 하여 정전류 조건에서 전기삼투 실험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 전기삼투투과 계수와 전기삼투 물-이동 계수 값은 시간에 따라 변화한다.
- (2) 걸보기 전기전도도 값은 초기에는 감소하나 이후 거의 일정한 값을 갖는다.
- (3) 전기삼투가 진행됨에 따라 H^+ 이온은 양극에서 음극 쪽으로 이동한다.
- (4) 본 실험 조건에서 얻은 cadmium 제거 효율은 최대 94.7%이다.

감 사

본 연구는 재단법인 일주학술문화재단의 연구비 지원에 의하여 수행된 것으로 이에 사의를 표합니다.

사용기호

- A : electrode area [cm^2]
 i : potential gradient [volt(V)/cm]
 I : current [ampere(A)]
 k_a : apparent conductivity [siemens(S)/cm]

- k_e : electro-osmotic permeability [$cm^2/volt$ per s]
 k_w : electro-osmotic water-transport efficiency [$cm^3/ampere$ per s]
 L : length of specimen [cm]
 q_e : effluent flow rate [cm^3/s]
 V : potential difference across electrodes [volt(V)]

참고문헌

1. Rajeshwar, K., Ibanez, J. G. and Swain, G. M.: *Journal of Applied Electrochemistry*, **24**, 1077(1994).
2. Lockhart, N. C.: *Colloids and Surfaces*, **6**, 229(1983).
3. Buijs, P. J., Van Diemen, A. J. G. and Stein, H. N.: *Colloids and Surfaces, A: Physicochemical and Engineering Aspect*, **85**, 29(1994).
4. Bowen, W. R. and Sabuni, H. A. M.: *Ind. Eng. Chem. Res.*, **33**, 1245(1994).
5. Ferguson, J. F. and Nelson, P.: Proceedings, Workshop on Electrokinetic Treatment and Its Applications in Environmental-Geotechnical Engineering for Hazardous Waste Site Remediation, Seattle, Wash. Sect V, 1(1986).
6. Lageman, R., Pool, W. and Sebsinge, G.: *Chemistry and Industry*, **18**(9), 585(1989).
7. Shapiro, A. P. and Probst, R. F.: *Environ. Sci. Technol.*, **27**(2), 283(1993).
8. Bruell, C. J., Segal, B. A. and Walsh, M. T.: *Journal of Environ. Eng.*, **118**(1), 68(1992).
9. Acar, Y. B. and Gale, R. J.: *Journal of Geotechnical Eng.-asce*, **118**(1), 1837(1992).
10. 柳井弘: "活性炭讀本", 日刊工業新聞社, 東京, 223(1976).
11. Kim, B. U. and Yoon, J. M.: *J. Research Inst. Ind. Technol.*(Pusan National Univ.), **50**, 127(1996).
12. Shaw, D. J.: "Colloid and Surface Chemistry", 4th ed. Butterworth-Heinemann, London, 174(1989).
13. Hamed, J., Acar, Y. B. and Gale, R. J.: *Journal of Geotechnical Eng.*, **117**(2), 241(1991).
14. Yuki, N. and Ohsaki, K.: *Japan Kokai*, **73**(95), 994(1973).
15. Dobrowolski, R., Jaronilc, M. and Kosmulski, M.: *Carbon*, **24**, 15(1986).
16. Putnam, G.: MS Thesis, Louisiana State Univ.(1991).
17. Renauld, P. O. and Probst, R. F.: *Physicochem. Hydrodyn.*, **9** (1/2), 345(1987).
18. Burton, A. S. and Clifford, J. B.: *Journal of Environ. Eng.*, **118** (1), 84(1992).
19. Acar, Y. B., Hamed, J. T., Alshawabke, A. N. and Gale, R. J.: *Geotechnique*, **44**(2), 239(1994).