

원자력 폐수의 양이온 처리를 위한 전기화학적 이온교환체의 특성

Characteristics of the Electrochemical Ion Exchanger for the Treatment of Cations in Nuclear Wastewater

황영기*

Young-Gi Hwang

〈Abstract〉

Electrochemical ion exchange method is expected to be one of the most acceptable techniques for the separation of radioactive cations from nuclear wastewater. In this study a thin film of hexacyanoferrate on nickel surface was derivatized chemically in an aqueous potassium-ferricyanide solution. Electrochemical redox behavior of the nickel hexacyanoferrate(NiHCNFe) film electrode was investigated with the use of cyclic voltammetry potentiostated from -100 to 800 mV versus SCE. The electro-reduction characteristics of the NiHCNFe film were examined in the cobalt solutions. The NiHCNFe ion exchanger was more useful at lower concentration, lower temperature, and pH7 of the cobalt solution. The capacity loss of NiHCNFe was 0.018%/cycle that was less than the average loss of 2~3%/cycle of the convective organic exchanger. The 45~55% of the initial cobalt ions was electro-deposited on the NiHCNFe by using continuous recirculating reactor system. As a result, it was found that the electroactive NiHCNFe films showed better performance than the organic resins for the separation of cobalt ion from the aqueous solutions.

Keywords :

nickel hexacyanoferrate, electrochemical ion exchange, separation of cations, nuclear wastewater

* 경남대학교 전기공학과 교수,
yghwang@kyungnam.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Kyungnam University,
Republic of Korea

1. 서 론

2015년도 한국전력의 통계자료[1]에 의하면, 국내 원자력 발전기는 고리, 월성, 한빛, 한울 발전소에 각각 6기가 설치되어 있다. 총 24기의 발전설비 용량은 21,716MW이고, 연간 발전량은 164,762GWh이며, 총 발전량 중 원자력 발전이 차지하는 비중은 약 33%이다. 또한 고리 2기, 한울 2기가 추가로 건설 중에 있다. 2006년도 기준으로 설비용량이 17,716MW, 연간 발전량이 148,749GWh, 원자력 비중이 39%인 점을 고려할 때, 비록 원자력의 의존도는 다소 감소하였지만 원자력 에너지의 수요가 해마다 지속적으로 증가하고 있다. 이에 따라 원자력 발전소의 문제점으로 지적되고 있는 사용후 핵연료와 중저준위 방사성 폐기물의 안전한 처분과 피폭 방지를 위한 기술은 계속 발전되어 나가야 한다. 2015년도 기준으로, 우리나라의 사용후 핵연료 저장소의 저장용량은 19,468MTU이고, 저장품이 이미 차지하고 있는 공간은 74.3%인 14,468 MTU이다. 부족한 저장용량을 확장하기 위해 현재 2개소에 확충 공사가 진행 중에 있다. 또한 중저준위 방사성 폐기물의 2015년도 통계에 의하면, 연평균 8천 여 드럼이 발생되며, 총 누계로 136,753 드럼이 저장 처분되어 있다. 중저준위 방사성 폐기물 저장소의 저장률도 70% 이상인 관계로 현재 확충공사가 진행되고 있다.

중저준위 방사성 폐기물은 작업자의 장갑이나 의복과 같은 고체 폐기물과 원자로 및 냉각수 유로 장치의 세정 작업에서 배출되는 세척수와 같은 액상 폐기물로 구분되는데, 액상 폐기물의 부피는 고체 폐기물에 비해 월등히 많다. 원자력 에너지 산업체에서 배출되는 액상 폐기물이 계속적으로 발생함에 따라 폐기물 저장소의 면적 요구량이 날로 증가하고 있다. 이러한 문제점은 우리나라뿐만 아

니라 원자력 발전 의존도가 높은 선진국 대다수가 공통적으로 안고 있는 과제이다. 또한 이들 방사성 폐기물의 취급 과정에서 피폭되는 사례가 종종 발생하고 있다. 이에 따라 미국에서는 연방정부의 주도로 원자력법규위원회(Nuclear Regulatory Commission; NRC)를 설치하여 방사성 피해를 차단하기 위해 방사성 원소의 배출 허용농도를 극히 낮은 초저준위(Very Low Level Waste; VLLW) 수준으로 제한하고 있으며, 미국(PNNL), 프랑스(LAA), 스웨덴(ENS), 영국(AEAT), 일본(NUPEC, Hitachi), 핀란드(IVO) 등을 비롯한 선진국들은 폐기물의 저장 부피를 감축시키기 위한 연구를 집중적으로 수행하고 있다.

방사성 원소의 처리를 위해 일반적으로 유무기물 이온교환체를 이용하는 대류 이온교환법(Convective Ion Exchange)[2]을 사용하는데, 최근 선진국에서는 전기화학적 이온교환법(Electrochemical Ion Exchange)[3][4]을 응용하고자 활발한 연구를 진행하고 있다. 이 기법은 대류 이온교환법이 가지는 저농도 양이온의 처리가 가능한 특성과 전해전착법이 가지는 우수한 성능과 폐기물이 극히 적은 특성을 결합한 신기술이다. 특히 화학 약품을 투여하지 않고, 용존 농도와 무관하며, 전기적인 운전으로 방사성 원소의 분리 및 농축이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 또한 교환체의 제조와 재생이 간단하고 화학적으로 안정하며, 수명이 길고 최종 처리수가 극히 작다는 특성을 가지고 있다.

이 연구에서는 전기화학적 이온교환법을 이용하여 원자력 액상 폐기물에 용해되어 있는 양이온들을 처리하기 위해, 니켈 헥사시아나 철(nickel hexacyanoferrate; NiHCNFe)을 전기화학적 이온교환체로 제조하고, 단일 평행 평판 전극 반응기(parallel plate ion exchange electrode reactor; PPIER)에 운전전극(시험전극)으로 설치하였으며,

비방사성 코발트 이온 수용액을 Fig. 1과 같은 유로 장치에서 회분식으로 연속 순환시키면서, 처리 효율을 조사하였다.

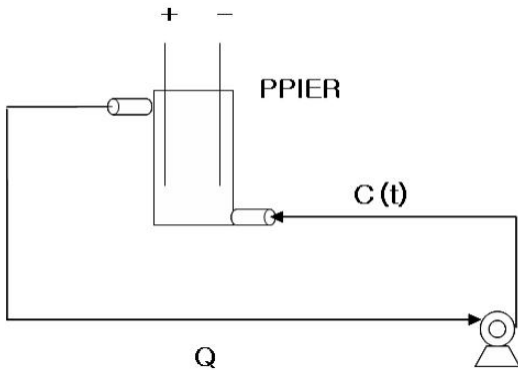


Fig. 1 Schematic diagram of PPIER flow system with batch recirculating solution.

전극 반응기 내에서의 물질 수지식은 이온교환 및 전착 반응을 1차 반응이라 가정하고 한계전류보다 낮은 정전류 공정으로 운전하면 시험전극과 상대전극간의 전위 경사에 의한 물질이동(migration)은 무시할 수 있으므로, 다음 식과 같이 정리된다.

$$A \frac{\partial C}{\partial t} = -Q \frac{dC}{dx} - KAC$$

여기서 A는 반응기의 유로 단면적, C는 환원 반응종인 코발트 양이온의 농도, Q는 용액의 부피유속, K는 반응속도상수이다. 또한 x는 시험전극으로부터 상대전극으로의 거리로서 공간변수를 나타내고, t는 반응시간으로서 시간변수를 나타낸다.

유속이 비교적 빠른 조건에서는 반응기 입구 농도와 출구 농도의 차가 극히 작기 때문에 전극간 농도구배인 ∇C 를 무시할 수 있으므로, 다음 식과 같이 간략히 정리된다.

$$C(t) = C(0) \exp(-Kt)$$

이 식에 의하면, 반응시간(전류인가시간)의 경과에 따라 잔류농도는 지수함수적으로 감소하는 경향을 가질 것으로 예상할 수 있다.

2. 실험

실험은 NiHCNFe 막전극을 제조하는 과정, 전위순환곡선을 측정하는 과정, 코발트 양이온 수용액으로부터 코발트를 전기화학적 이온교환법으로 처리하는 과정으로 진행하였다. 첫 번째 과정에서 사용한 기지금속은 50x150x2 mm 규격의 니켈 판을 사용하였고, 표면을 사포로 연마하고, 진한 질산 수용액으로 화학적 에칭 및 산화피막 제거 후에 알코올로 유기물을 제거하였다. 증류수로 세정한 니켈 판을 5mM K₃Fe(CN)₆와 100mM KNO₃로 조성한 수용액에 담가 118시간 동안 화학적으로 자생결합시켜 NiHCNFe를 니켈 판 표면에 피막형태로 생성되게 하였다. 전보[5]에서 기술한 바와 같이, NiHCNFe 피막은 전기화학적 산화 유도법[6]이나 화학적 자생결합법[7]으로 제조할 수 있는데, 이 연구에서는 후자의 방법을 이용하였다.

전위순환곡선을 측정하는 과정은 흐름식 반응공정에서 코발트 양이온 처리를 수행하기 위한 전 단계로서, NiHCNFe 전극을 장시간 사용할 수 있는지를 확인하기 위한 목적으로 수행되었다. NiHCNFe 막이 도포된 니켈 판 전극을 PPIER에 운전전극으로 설치하고, 백금 도금한 티타늄 판을 상대전극으로 설치하였다. EG&G 273A potentiostat/galvanostat를 이용하여 운전전극 표면에 밀착시켜 설치한 포화 칼로멜 전극(saturated calomel electrode; SCE) 대비 -100mV부터 800mV까지

100mV/s의 주사속도로 전위를 상승하고, 다시 하강시키는 전위순환을 수행하였다. 코발트 수용액에서 4,000회 동안 전위순환을 실시한 후에, 측정된 전위순환곡선으로부터 산화용리반응에 소모된 전기량과 환원침적반응에 소모된 전기량을 산출하였다. 이 결과로부터 NiHCNFe 막 전극의 유용성, 내구성(성능 감소율), 반응공정 변수에 따른 경향성 등을 파악하였다.

코발트 양이온의 흐름식 정전류 처리공정에서 인가한 전류는 전위순환곡선 측정 과정에서 구한 침투 환원전류의 평균값을 적용하였다. 질산코발트를 증류수에 용해시켜 1.0dm³의 처리용액을 제조하였고, 코발트 이온 농도를 0.01M~1.0M로, 용액온도를 20°C~50°C로, 유속을 0.5cm/s~2.5cm/s로, pH를 2~12로 각각 변화시키면서 코발트 양이온의 환원전착 실험을 수행하였다. 각 조건에서 실험 중간에 5cm³의 샘플을 7~10차례 채취하여, ICP(inductively coupled plasma)로 농도 분석을 시행하였고, 실험이 종료된 후에 NiHCNFe 전극 표면 상태를 SEM(scanning electron microscope)으로 사진 촬영하여 확인하였으며, 전극 표면의 원자 조성을 EDS(energy dispersive X-ray spectrometer)로 분석하였다. 용액은 튜브 펌프를 이용하여 유속을 제어하면서 반응 시스템 유로를 따라 연속적으로 순환되게 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 NiHCNFe 전극의 제조

전보[5]에서 기술한 바와 같이, NiHCNFe 막은 한 번이 100~300nm 규격인 정육방체 결정체로 매우 조밀하게 니켈 판 표면에 생성되었으며, 막의 두께는 약 5μm 정도로 측정되었다.

3.2 NiHCNFe 전극의 성능

코발트 양이온 수용액에서 수행한 전위순환 곡선에서 침투 산화전류는 SCE 대비 500~600mV에서 측정되었으며, 침투 환원전류는 300~400mV에서 측정되었다. 이 결과로부터 코발트 이온을 정전위 공정으로 환원침적시켜 제거할 경우에는 350mV 내외로 전극전위를 인가해주어야 함을 알 수 있었다. 하지만, 350mV 부근에서 환원반응과 산화반응이 동시에 일어나므로 정전위 공정보다 정전류 공정이 유리하다고 판단되었다. pH 7과 용액온도 25°C로 일정하게 유지시킨 조건에서 코발트 양이온의 농도를 0.01M~1.0M로 변화시키면서, 4,000회 동안 전위순환한 곡선들로부터 산화반응에 소모된 전기량과 환원반응에 소모된 전기량을 산출하여 도시한 것이 Fig. 2이다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 NiHCNFe 전극의 성능은 500회 순환까지 급격히 감소하는 경향을 보였으며, 그 이후에는 서서히 감소하는 특성을 보였다. 또한 특이하게 고농도보다 저농도에서 성능 감소율이 적음을 알 수 있다.

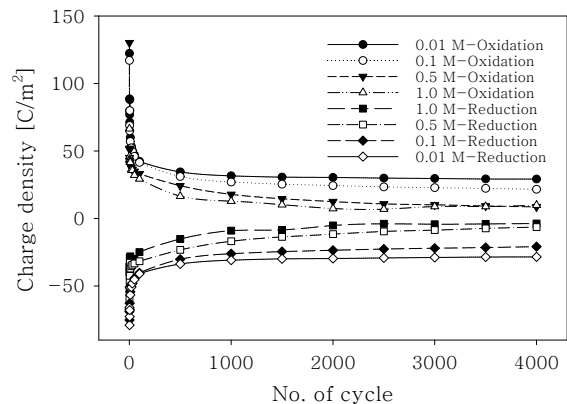


Fig. 2 Charge degradation by the repeated cyclic voltammetry at various concentrations of Co(NO₃)₂.

이러한 실험 결과는 용액에 용해되어 있는 코발트 농도가 높을수록 많은 양의 코발트가 NiHCNFe로의 침적과 용리에 가담하기 때문으로 판단된다. 또한 농도가 높을수록 NiHCNFe의 빈격자 내에 상당량의 코발트가 침적되어 잔류하는 것으로 판단된다. 반대로 저농도인 경우는, 침적된 양이온 대부분이 저항 없이 용리되기 때문에 성능 감소가 적은 것으로 판단된다. Fig. 2로부터 NiHCNFe의 이온교환 성능 감소율을 산출한 결과에 의하면, 저농도에서는 0.01%/cycle이고 고농도에서는 0.02%/cycle 정도이다.

Fig. 3은 용액온도를 25oC로, 코발트 농도를 1.0M로 일정하게 유지시키고, pH 버퍼 태블릿 (buffer tablet)을 코발트 수용액에 첨가하여 pH를 2~12 범위로 변화시키면서 전위순환곡선을 측정 한 결과이다. 전위순환곡선으로부터 환원 전기량과 산화 전기량을 산출하여 도시한 그림인데, Fig. 2와 마찬가지로 NiHCNFe의 성능은 초기 500사이클 동안은 급격하게, 그 이후에는 서서히 감소함을 알 수 있었다.

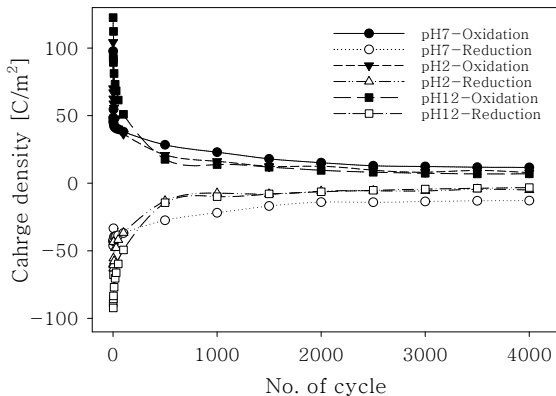


Fig. 3 Charge degradation by the repeated cyclic voltammetry at several pHs of Co(NO₃)₂ solution.

거시적인 관점에서는 모든 범주의 pH에서 성능

감축이 유사하게 측정되었지만, 미시적인 관점에서는 중성 용액에서 성능 감축률이 적고, 산성과 알칼리 용액에서는 거의 동일함을 알 수 있었다. 하지만 Fig. 2와 달리, pH 변화에도 불구하고 성능 감소율은 0.02%/cycle 정도로 거의 일정하게 산출되었다. 따라서 원자력 산업체에서 발생하는 방사성 액상 폐기물을 처리할 경우에는 사전에 인위적으로 pH를 조절할 필요가 없다는 의미이다.

Fig. 4는 코발트 이온 농도를 0.1M로, 용액의 pH를 7로 일정하게 유지시키고, 용액온도를 40oC와 50oC로 변화시키면서 측정 한 전위순환곡선으로부터 산화 전기량과 환원 전기량을 산출하여 도시한 그림이다. 이 실험결과에서, 40oC의 조건이 50oC보다 유리함을 알 수 있었으며, 25oC의 경우는 40oC의 경우보다 더욱 우수하였다. 따라서 방사성 액상 폐기물을 처리할 경우에는 고온의 배출수를 사전에 상온까지 냉각시킨 후에 처리함이 유리하다는 사실을 알 수 있었다. 40oC에서의 성능 감소율은 0.017%/cycle이고 50oC에서는 0.02%/cycle임을 알 수 있었다.

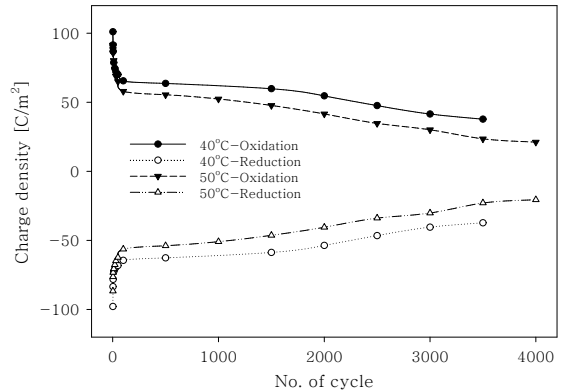


Fig. 4 Charge degradation by the repeated cyclic voltammetry at 40oC and 50oC of Co(NO₃)₂ solution.

Fig. 2, Fig. 3, 그리고 Fig. 4에서 NiHCNFe 막 전극은 코발트 양이온을 4,000회 동안 환원-

산화반응 시키더라도 그 수명이 완전히 소멸되지는 않음을 알 수 있었다. 전체 실험조건에서 산출한 성능 감소율은 평균 0.018%/cycle이었다. 이 결과는 대류 이온교환법에서 사용되는 유무기물 교환체의 성능 감소율이 평균 2~3%/cycle[8][9]인 점과 비교할 때, 매우 우수한 성능임을 알 수 있다.

3.3 PPIER 공정에서의 이온교환처리

4,000회 동안의 전위순환곡선에서 구한 평균 침투 환원전류 값인 -24A/m²(운전조건에 따라 약 -20~60A/m²)을 인가하면서, pH 7, 온도 25°C에서 0.1M의 코발트 양이온 수용액을 처리하면서, 처리수의 특성을 조사하였다. 전도성 용액이 가지는 일반적인 경향과 동일하게, 농도와 온도가 높을수록 그리고 중성보다 산성이나 알칼리성에서 전도도가 높게 측정되었다. 유속에 따른 전도도는 Fig. 5에 나타난 바와 같이, 유속이 낮을수록 용액 전도도가 높게 측정되었다. 일반적으로 비전도성 유체에서는 유속이 클수록 용액 저항이 증가하므로 낮은 유속에서 전도도가 높다. 0.1M 코발트 수용액은 전도성 용액이지만, 그 농도가 희박하여 비전도성 유체와 동일한 거동을 가지는 것으로 판단된다. Fig. 5에서 SFR은 단일 흐름식 반응기(single flow reactor)를 의미한다.

Fig. 6은 흐름공정에서 유속의 변화에 따른 용액의 pH 거동을 조사한 결과이다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 초기 pH를 7로 일정하게 유지하였지만 전원을 공급하기 전에 코발트 양이온이 NiHCNFe와 반응하는 관계로 pH가 5.8까지 낮아졌으며, 전원을 공급한 후에는 1시간 이내에 pH가 2~3 범위까지 낮아지고, 그 이후에는 일정한 값을 가졌다.

Fig. 6 외의 많은 실험조건에서 이러한 거동이 나타났다. 이러한 거동은 다소 특이한 경우로서

향후에 보다 면밀한 검토와 연구가 필요함을 알 수 있다. 특히 비록 그 차이는 크지 않지만 산성이나 알칼리성 용액보다 중성에서 NiHCNFe의 성능이 우수하게 나타난 Fig. 3의 실험결과를 고려할 때, 그 원인 규명과 대처 방법은 강구되어야 한다. Fig. 6의 결과는 방사성 액상 폐기물을 전기화학적 이온교환법으로 처리할 경우에는 반응 진행 정도에 따라 중화 처리를 해주어야 유리하다는 의미를 가지기 때문이다.

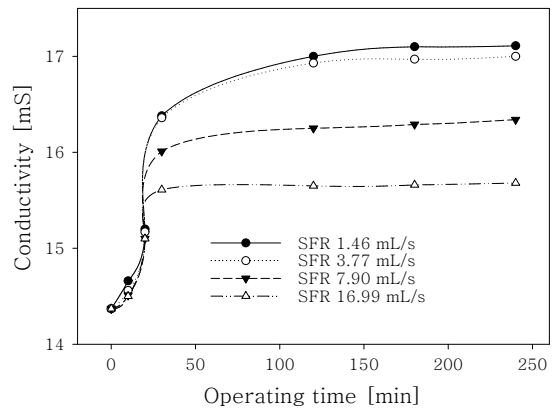


Fig. 5 Plots of solution conductivity with operation time during electrochemical removal of cobalt at several flow velocities.

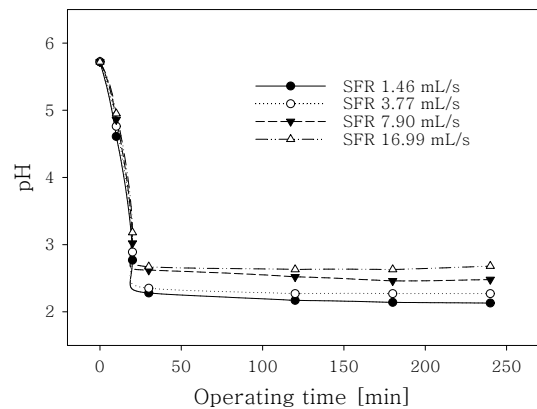


Fig. 6 Plots of solution pH with operation time during electrochemical removal of cobalt at several flow velocities.

25°C, pH7 일정조건에서, Fig. 1과 같은 PPIER 흐름공정으로 0.5M 코발트 양이온을 2시간 동안 처리한 결과, Fig. 7과 같이 나타났다. Fig. 7에서 2시간 동안에 초기 농도의 약 45~55%가 환원 전착되었음을 알 수 있다. 이 연구에서 사용한 NiHCNFe의 반응면적이 극히 작고 단일 반응기를 사용한 점을 감안하면, 처리율이 결코 낮지 않다고 판단된다. 또한 유속이 높을수록 처리율이 높게 나타났는데, 이러한 결과는 유속이 빠를수록 반응기를 통과하는 횟수가 많기 때문에 나타난 현상으로 판단된다. Fig. 7의 실험 결과로 미루어 볼 때, 원자력 발전소에서 배출되거나 저장되는 방사성 액상 폐기물을 전기화학적 이온교환법으로 처리하면, 상당히 낮은 농도까지 처리될 것으로 유추된다. 또한 앞서 서론에서 기술한 바와 같이, 전류 인가시간 경과에 따라 코발트 잔류농도가 지수함수로 감소한다는 이론식과 동일한 거동을 나타냈음을 알 수 있다.

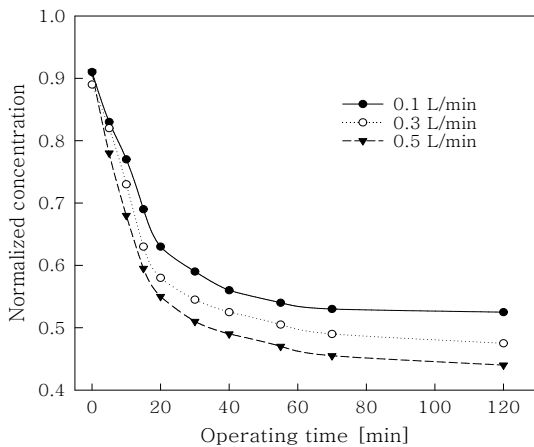


Fig. 7 Plots of normalized concentration for 2 hr removal of cobalt through a PPIER system at different flow velocities.

코발트 양이온을 처리한 후에 NiHCNFe 전극을 반응기로부터 분리한 다음, 사진 촬영한 것이 Fig.

8이다. 왼쪽 사진은 처리반응 전의

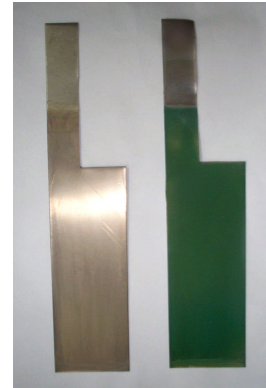


Fig. 8 Photograph of NiHCNFe electrode before and after reduction of cobalt cation.

전극으로서, 은색의 니켈 금속과 달리 금색인 상태이다. 이는 니켈 금속판에 NiHCNFe 막을 입히면, 금색으로 변하기 때문이다. 또한 오른쪽 사진의 색상은 전형적인 코발트색임을 알 수 있다. NiHCNFe 전극에 전류를 가할수록 전극의 표면은 금색에서 점점 청록색으로 변하였으며, 1시간 후부터는 전극 앞뒷면 전체가 골고루 코발트색으로 변하였다. 2시간 반응 후에는 막 전극 위에 전착된 코발트가 상당히 규칙적이고 조밀한 조직으로 매우 단단히 부착되어 있음을 알 수 있었다. 환원 전착반응을 수행한 NiHCNFe 전극의 표면을 SEM으로 촬영한 사진이 Fig. 9이고, 그 표면 조성을 EDS로 분석한 결과가 Fig. 10이다. Fig. 9에서, 적하된 코발트 성분의 형상은 비늘모양과 흡사함을 알 수 있다. Fig. 10에서, 원자 조성백분율은 17.10% C, 3.60% N, 43.59% O, 0.94% S, 그리고 34.68% Co로 나타났다. 또한 원자 질량백분율은 C, N, O, S, Co가 각각 6.81%, 1.66%, 23.03%, 1.00%, 67.49%로 나타나 전착 박막은 대부분이 코발트원자인 것으로 분석되었다.

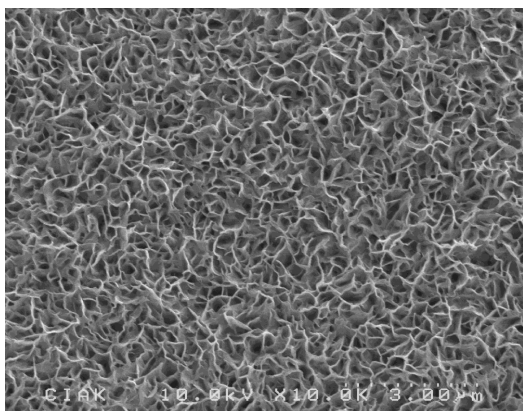


Fig. 9 SEM photograph of the surface of NiHCNFe electrode after 2 hr reduction of cobalt cation.

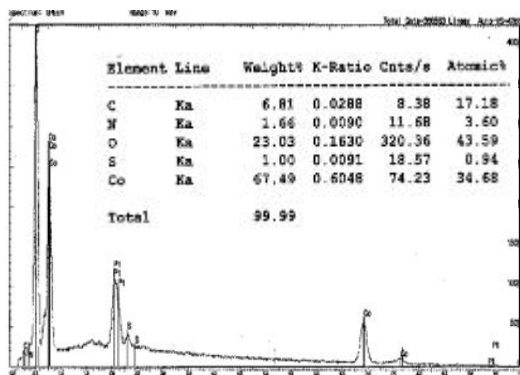


Fig. 10 EDS spectrum and analyzed atomic composition of NiHCNFe electrode after 2 hr reduction of cobalt cation.

4. 결론

Nickel Hexacyanoferrate(NiHCNFe) 이온교환막 전극을 화학적 자생결합 방법으로 생성하여 시험전극으로, 백금 도금한 티타늄을 상대전극으로 각각 설치한 평행평판 이온교환 전극반응기에 질산코발트 수용액을 유입한 다음, -100mV부터 800mV까지 100mV/s의 주사속도로 4,000회의 전위순환을 수행하였다. 코발트 양이온의 초기농

도, 용액온도와 pH, 유속 등을 변화시키면서 측정 한 전위순환곡선으로부터 NiHCNFe 막전극의 산화-환원반응에 소모된 전기량을 산출하였다. 코발트 수용액에서 NiHCNFe 막전극의 성능은 저농도일수록, 산성이나 알칼리성보다 중성에서, 저온일수록 우수하였다. 또한 전기화학적 이온교환체인 NiHCNFe의 성능 손실률이 평균 0.018%/cycle로 나타나, 일반 유기물 이온교환체의 평균 성능 손실률 2~3%/cycle보다 월등히 낮은 특성을 보였다.

또한 튜브 펌프를 사용하여 질산코발트 시험 수용액을 단일 전극반응기로 회분 순환시키면서, 코발트 양이온을 2시간동안 환원 전착하여 분리하는 연구 실험을 수행하였다. 농도와 온도가 높을수록, 유속이 낮을수록, 그리고 중성보다 산성이나 알칼리성에서 수용액의 전도도는 높게 측정되었다. 수용액의 pH는 전류인가시간이 경과함에 따라 2~3까지 급격히 산성화된 후에 일정한 값을 유지하였다. 전류 인가시간이 경과함에 따라 매우 조밀한 비늘 모양의 형태를 갖는 코발트가 막전극 표면에 침적됨을 확인할 수 있었으며, EDS로 측정 한 결과에 의하면 2시간 환원반응 후의 NiHCNFe 표면은 원자조성백분율 35%, 질량백분율 67%의 코발트로 분석되었다. 2시간동안의 전기화학적 이온교환 반응에서 45~55%가 환원 분리되었으며, 잔류농도가 시간 경과에 따라 지수함수적으로 감소하는 경향을 가짐을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2014학년도 경남대학교 연구년 연구비의 지원에 의해 수행된 결과임.

참고문헌

- [1] 한국원자력안전기술원 : 2015년 원자력안전 연감, 한국원자력안전기술원, p. 247, 2016.
- [2] M. R. Duignan and C. A. Nash, "Removal of cesium from Savannah River site waste with spherical resorcinol formaldehyde ion exchange resin : experimental tests", Sep. Sci. Technol., vol. 45, p. 1828, 2010.
- [3] X. Hao, T. Yan, Z. Wang, S. Liu, Z. Liang, Y. Shen, and M. Pritzker, "Unipolar pulse electrodeposition of nickel hexacyanoferrate thin films with controllable structure on platinum substrates", Thin Solid Film, vol. 520, p. 2438, 2012.
- [4] C. A. Basha, P. K. Ghosh, and G. Gajalakshmi, "Total dissolved solids removal by electrochemical ion exchange (IEX) process", Electrochim. Acta, vol 54, p. 474, 2008.
- [5] J. H. Lee and Y. G. Hwang, "Preparation of nickel hexacyanoferrate ion exchanger for electrochemical separation of cations", Appl. Chem. Eng., vol 21, p. 52 2010.
- [6] R. E. Sabzi, K. Kant, and D. Losic, "Electrochemical synthesis of nickel hexacyanoferrate nanoarrays with dots, rods and nanotubes morphology using a porous alumina template", Electrochim. Acta, vol. 55, p. 1829, 2010.
- [7] Y. G. Hwang, "A study on the separation of cesium cations by using electrochemical ion exchanger of $\text{KNiFe}(\text{CN})_6$ ", J. of the Korean Electrochem. Soc., vol. 15, p. 256, 2012.
- [8] S. T. Arm, D. L. Blanchard, and S. K. Fiskum, 'Chemical degradation of an ion exchange resin processing salt solution', Sep. Purif. Technol., vol. 43, p. 59, 2005.
- [9] S. K. Fiskum, S. T. Arm, M. J. Steele, and M. R. Thorson, 'Spherical resorcinol-formaldehyde performance testing with Hanford tank waste', Solvent Extra. Ion Exch., vol. 26, p. 435, 2008.

(접수:2016.10.26.,수정:2016.11.08, 게재확정:2016.11.27)