

## 방사성 액체폐기물 내 코발트 제거를 위한 전기응집공법의 활용 가능성 평가

고명수 · 김용태 · 김영광 · 김경웅\*

광주과학기술원 지구환경공학부

### Assessment of Cobalt Removal from Radioactive Liquid Waste Using Electrocoagulation

Myoung-Soo Ko, Yong-Tae Kim, Young-Gwang Kim and Kyoung-Woong Kim\*

School of Earth Sciences and Environmental Engineering, Gwangju institute of Science and Technology (GIST)

(Received: 20 March 2018 / Revised: 2 April 2018 / Accepted: 4 April 2018)

This study assessed an application of electrocoagulation (EC) for the removal of cobalt (Co) in radioactive liquid waste from nuclear power plant. The EC process is an electrochemical means to remove a contaminant in wastewater and a novel process to complement the disadvantage of chemical treatment and membrane process. Radioactive liquid waste has been produced from washing process of radio nuclide power plant cooling system. The EC process eliminates Co from the electrolyte within 10 min; in addition, the dewatered sludge produced in EC process is only 0.2 g. Therefore, the EC process is a promising technique for the removal of Co in radioactive liquid waste and volume reduction of wastes.

**Key words :** Cobalt (Co), Electrocoagulation, Wastewater treatment, Radioactive liquid waste, Volume reduction

본 연구는 원자력 발전시설에서 발생하는 방사성 액체폐기물 내 코발트의 제거를 위해 전기응집공법의 적용 가능성을 확인하였다. 전기응집공법은 전기화학반응을 이용하여 폐액 내 오염물질을 제거하는 방법으로 기존의 화학처리와 막공정의 단점을 보완하는 새로운 기술이다. 원자력 발전시설에서는 냉각 배관의 세척과정에서 코발트를 포함한 방사성 액체폐기물이 발생한다. 용액 내 코발트의 농도를 1 mg/L와 10 mg/L로 조성하여 전기응집공법을 적용한 결과 약 10분 이내에 코발트가 완전히 제거되었다. 또한 500 mL의 코발트 용액을 처리하는 과정에서 0.2 g의 슬러지가 발생하여 폐기물의 부피감소에 매우 효과적인 것으로 나타났다.

**주요어 :** 코발트(Co), 전기응집, 폐수처리, 방사성 액체폐기물, 부피감소

## 1. 서 론

코발트(Cobalt; Co)는 원자번호 27번으로 강자성을 띠는 은백색의 금속원소이다. 코발트는 반응성이 철보다 낮아 상온에서 산소와 물의 반응에 안정하여 합금, 자석, 안료, 리튬이온전지 등 다양한 분야에서 폭넓게 사용 중이다. 또한 코발트는 철, 니켈, 크롬, 구리 등과

함께 원자력 발전소에서 냉각제와 접촉하는 시설의 소재로 사용 중이다. 그러나 원자력 발전소의 운전과정에서 고온·고압의 환경에 노출된 코발트는 물 또는 용존산소와 반응하여 부식생성물을 형성하고 핵연료로부터 발생하는 방사화물과 함께 냉각수 파이프라인에 산화막(Chalk River Unidentified Deposit; CRUD)을 형성한다. 산화막은 주로 니켈, 철, 코발트 등으로 구

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided original work is properly cited.

\*Corresponding author: kwkim@gist.ac.kr

**Table 1.** Classification of Radioactive wastes (IAEA, 1999)

Class	Typical characteristics
EW (Wastes to exempt)	Activity levels at or below clearance levels (<0.01 mSv)
LILW (Low- and intermediate-level wastes)	Activity levels above clearance levels
LILW-SL (Short lived)	Long live radionuclide concentration (alph emitting to 4000 Bq/g)
LILW-LL (Long-lived)	Long live radionuclide concentration exceeding LILW-SL
HLW (High-level wastes)	Thermal power above 2 kW/m

성 되어 있으며 (Tsai *et al.*, 2013), 냉각에 필요한 열전달 효율을 감소시키는 요인이다. 또한 산화막에 존재하는 코발트는 주로 방사선을 방출하는 Co-60으로 작업자의 방사선 피폭량을 증대시키는 원인이 된다. 원자력 발전시설에서는 냉각수 파이프라인에 침착된 방사성 부식생성물을 제거하기 위해 Ethylenediaminetetraaceticacid (EDTA)와 같은 세정제를 주입하는데, 이때 다량의 방사성 액체폐기물이 발생한다. 원자력 발전시설에서 발생하는 방사성 폐기물은 방사능 준위와 반감기에 따라 5가지로 분류하여 취급하고 세부적인 분류는 Table 1과 같다 (IAEA, 1999; Rahman *et al.*, 2011). 방사성 액체폐기물도 IAEA에서 제시하는 분류기준에 따라 구분하고 폐기물의 효과적인 관리를 위해 증발과 고화처리를 실시한다. 방사성 액체폐기물의 증발처리는 태양열, 상대습도, 온도 등의 기상조건과 송풍기를 활용한 강제통풍조건에서 물을 증기상태로 제거하여 폐기물의 부피를 줄이는 방법이다 (KAERI, 1994). 고화처리는 시멘트, 아스팔트 등을 고화매질로 사용하여 방사성 액체폐기물의 증발처리과정에서 발생하는 농축 폐기물의 처리에 활용한다. 원자력 발전시설에서 발생하는 액체폐기물의 증발과 고화처리는 방사성 액체폐기물의 부피감소와 효과적인 폐기물 관리를 위해 반드시 필요하다. 그러나 기존의 증발처리공정은 방사성 액체폐기물의 처리를 위해 증발기, 가열기, 응축기 등 순차적인 처리시설과 운전이 필요하고 빠른 증발을 위해 추가 에너지가 필요한 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 코발트에 대한 환경지구화학적 특성을 이해하고 원자력 발전 시설에서 발생하는 폐액 내 코발트를 제거하고 폐기물의 부피를 감소시키기 위한 방법으로 전기용집공법의 적용 가능성을 고찰하고자 한다.

## 2. 코발트의 환경지구화학적 특성 및 노출 경로

주기율표상 8족 원소인 코발트는 골드슈미츠 (Goldschmidt) 원소 분류에 따르면 친철원소에 해당한다. 원자량은 58.9 g/mol, 밀도는 8.90 g/cm<sup>3</sup>이며 안정

동위원소인 Co-59외에 약 22가지의 방사성 동위원소가 존재한다. 방사성 동위원소 중 Co-60은 5.3년의 상대적으로 긴 반감기와 1.17-1.33 MeV의 높은 감마선준위를 가져 방사선 촬영과 같은 의료용 감마선 생성장치에 사용된다. 지각에 함유된 코발트는 약 27 mg/kg으로 30번째로 풍부한 원소이다 (Carr and Turekian, 1961). 현무암질 마그마의 분화과정에서 코발트는 철 (iron; Fe)과 마그네슘(Magnesium; Mg)이 풍부한 철 고토광물(ferromagnesian)인 감람석(olivine), 휘석(pyroxenes), 각섬석(amphibole), 흑운모(biotite)에 포획되어 나타난다 (Alloway, 1995). 이는 Mg<sup>2+</sup> (이온반경 7.8 nm)과 Fe<sup>2+</sup> (이온반경 8.3 nm)의 전자가와 이온반경이 Co<sup>2+</sup> (이온반경 8.2 nm)과 유사하여 결정화 과정에서 동형 치환되어 나타나기 때문이다. 자연 상태에서 코발트는 비소(arsenic; As)와 황(sulfure; S)과 결합하여 산출되고, 코발트를 함유한 주요 광물로는 Cobaltite (CoAsS), Linnaeite (Co<sub>3</sub>S<sub>4</sub>), Skutterudite ((Co,Ni,Fe)S<sub>3</sub>)가 있다. 토양 내 코발트농도 분포는 모암의 특성에 따라 0.05-65 mg/kg의 농도분포를 보이고, 담수에서는 0.04-8 µg/L, 해수에서는 0.01-4.1 µg/L의 농도분포를 보인다 (Bowen, 1979). 코발트가 지구 화학적 순환 과정에서 동식물에 노출되는 경로는 다양하다. 공기, 음식, 식수 등에 함유된 코발트를 직접 섭취하기도 하고 (ATSDR, 2004), X-ray와 폐활량검사 등 의료과정에서 코발트에 노출되는 사례가 보고된 바 있다 (Barceloux and Barceloux, 1999; ATSDR, 2004). 특히, 코발트는 비타민B<sub>12</sub> (hydroxocobalamin)의 구성 성분으로 동식물의 효소활성에 기여한다. 코발트의 결핍은 빈혈과 신경조직의 이상을 야기하고 광량 섭취 시 적혈구 과다증 등 심장기능부전을 유발한다 (Sung, 1984). 또한 코발트의 방사성 동위원소인 Co-60에서 방출하는 감마선은 DNA의 이중나선 구조의 변형을 야기하여 자매염색분체교환, 세포자멸과 같은 염색체 이상을 유발한다 (Min *et al.*, 2003; Gault *et al.*, 2010). 원자력 발전시설에서 발생하는 코발트 및 방사성원소의 노출은 주변의 토양과 지하수 오염을 유발한다. 토

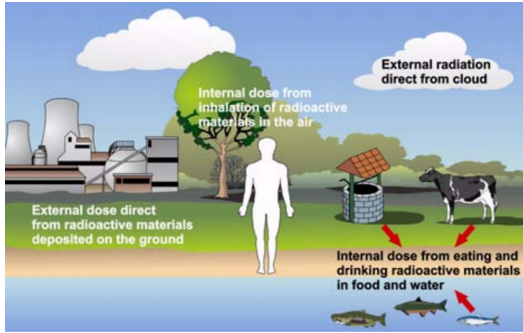


Fig. 1. Exposure pathway of radionuclide (IAEA, 2006).

양과 지하수의 오염은 경작활동을 통해 방사성 원소가 작물로 전이되고 이를 섭취하는 인간에게 유해한 영향을 미칠 수 있다. 이러한 간접노출은 공기 중에 노출된 코발트 및 방사성원소의 흡입을 통한 직접노출과 함께 인간에게 노출되는 주요한 과정이다 (Fig. 1).

### 3. 전기응집

전기응집(Electrocoagulation)은 전기화학반응을 이용하여 용액 내 오염물을 처리하는 방법으로 전기분해(electrolysis)와 전기부상(electroflotation)과 함께 대표적인 전기화학처리법이다. 전류를 흘려주어 전기응집공법을 진행하면 양극판(Anode)에서는 용해된 금속이온과 용액 내 오염물이 응집·흡착하여 제거됨과 동시에 음극판(Cathode)에서는 물의 전기분해(electrolysis) 반응이 일어난다. 대상 오염물질의 제거에 영향을 미치는 응집(coagulation)과정은 Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek (DLVO) 이론에 따른다 (Matilainen *et al.*, 2010). 즉, 응집제와 대상 유·무기 오염물의 응집반응은 척력으로 작용하는 이중층힘(double layer force)과 인력으로 작용하는 반데르발스힘(Van der Waals force)의 영향을 동시에 받아 두 힘의 합력에 따라 진행된다. 따라서 단위부피 조건에서 응집제의 농도가 높아질수록 각각의 전기이중층의 거리가 짧아져 척력이 감소하고 인력이 증가하여 오염물과의 응집이 더 잘 일어날 수 있다 (Missana and Adell, 2000). 전기응

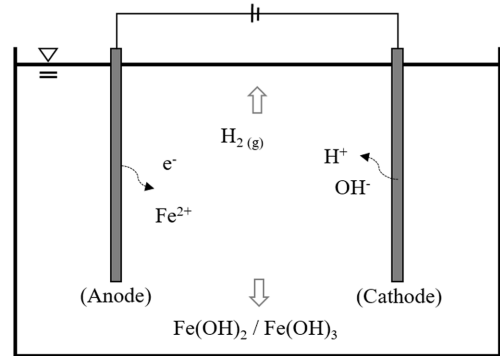
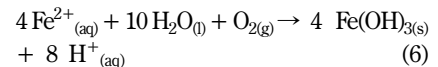
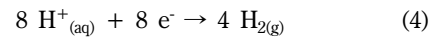
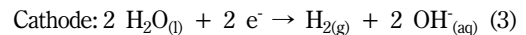
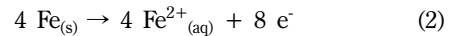


Fig. 2. Schematic diagram of electrocoagulation using iron electrode.

집공법에서 전극의 선택은 전기용해에 따른 응집제의 특성을 결정하는 요인으로 대상 오염물질의 제거에 큰 영향을 미치며, 주로 철과 알루미늄 전극을 사용한다. 철 전극을 사용하였을 때 양극판과 음극판에서 나타나는 반응은 다음과 같다 (Un and Ocal, 2015; Garcia-Segura *et al.*, 2017).



철 전극을 사용할 경우 양극에서는 전극판의 철이 산화되어  $\text{Fe}^{2+}$ 가 용해되고 수소이온( $\text{H}^{+}$ )이 발생되며, 음극에서는 물 분자가 분해되어 수소가스( $\text{H}_2$ )와 수산화이온( $\text{OH}^{-}$ )이 발생된다 (Fig. 2). 이후 용존된 철과 수산화이온은 서로 반응하여  $\text{Fe(OH)}_2$ ,  $\text{Fe(OH)}_3$ 의 형태로 침전한다. 전기응집과정에서 생성되는 철수산화물은 용액 내 금속이온을 흡착하여 제거할 수 있으며, 최근에는 전기응집기술이 용액 내 중금속, 유기물, 의

Table 2. Advantages and disadvantages of electrocoagulation (Brillas and Martínez-Huitle, 2015; Yang *et al.*, 2015)

Advantages	Disadvantages
<input type="checkbox"/> Effective and rapid separation	<input type="checkbox"/> Inhibition of electrolytic process by sludge deposition on electrodes
<input type="checkbox"/> Applicable for various pH	<input type="checkbox"/> Anode consumption and replacement
<input type="checkbox"/> Low sludge precipitation and operating costs	<input type="checkbox"/> Deposition of metal hydroxides

약물질 등 다양한 수처리 분야에 활용되고 있다 (Dolati *et al.*, 2017; Mamelkina *et al.*, 2017; Nariyan *et al.*, 2017). 기존의 폐수처리 기술과 비교하여 전기응집공정은 상대적으로 빠른 오염물 제거, 다양한 폐수의 pH조건에 적용 가능 등의 장점이 있는 반면 전극판 표면에 침전물 부착에 따른 전기응집 효율 감소 등의 단점도 있다 (Table 2).

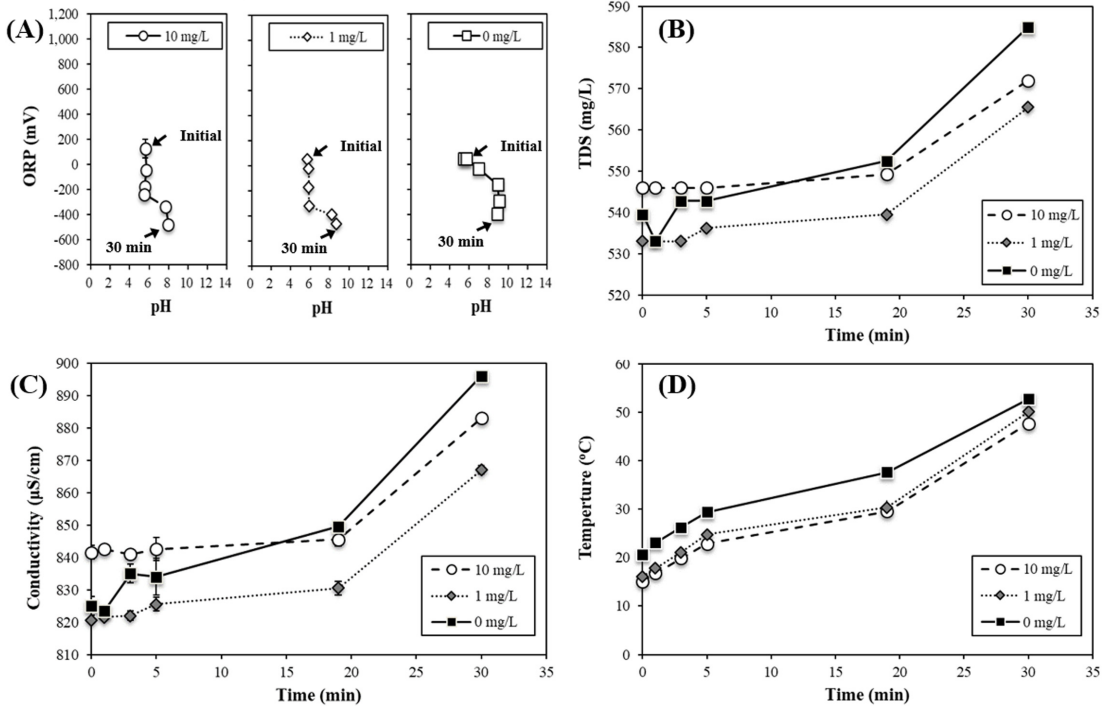
#### 4. 전기응집을 활용한 용액 내 코발트 제거 실험

전기응집을 활용하여 용액 내 코발트 제거 가능성을 확인하기 위해 실험을 진행하였다. 전기응집장치는 파워서플라이, 철 전극판 (4 cm × 3 cm × 0.3 cm)으로 구성하였으며 전극판의 간격과 유효면적은 각각 1.5 cm와 25 cm<sup>2</sup>으로 조정하였다. 전기응집을 통한 용액 내 코발트 제거실험은 0.25 A의 전류를 사용하여 10 mA/cm<sup>2</sup>의 전류밀도 조건에서 진행하였고, 전해용액으로 10 mM NaCl용액을 활용하였다. 실험에 사용한 전기응집장치의 코발트 제거효율을 확인하기 위해 코발트의 초기농도를 1, 10 mg/L로 조성하여 실험을 진행하였으며 0,

**Table 3.** Variations of electrolyte properties by electrocoagulation

Properties	Value	
	t = 0 (min)	t = 30 (min)
pH	5.5 ± 0.0	8.9 ± 0.0
ORP (mV)	48.7 ± 1.6	-395.0 ± 25.1
TDS (mg/L)	539.5 ± 0.0	585.0 ± 0.0
EC (μS/cm)	825.0 ± 2.8	896.0 ± 0.0
Turbidity (NTU)	-	43.7 ± 4.9
Sludge (g)	-	0.2 ± 0.0

1, 3, 5, 10, 30분에 시료를 채취하고 0.45 μm 필터를 이용하여 필터 후 용액 내 코발트 농도를 ICP-MS (Agilent 7500 ce, USA)를 이용하여 측정하였다. 또한 코발트가 존재하지 않는 실험군을 두어 전기응집과정에서 나타나는 전해용액의 수화학 특성변화를 비교 관찰하였다. 전기응집 전·후 전기응집 반응기 중앙에서 측정된 전해용액 (10 mM NaCl)의 pH, ORP, TDS, EC, 온도, 슬러지 발생량은 Table 3과 같다. 전기응집을 시작하자 전해용액의 탁도가 급격히 증가하였으며 검붉은색의 침전물 0.2 g이 생성되었다. 이는 양극판에서 용해된 철과 음극판에서 물의 전기분해에 의해 생



**Fig. 3.** Variations of pH, ORP, TDS, EC, and Temperature by electrocoagulation (■ initial Co conc. = 0 mg/L, ◆ initial Co conc. = 1 mg/L, ○ initial Co conc. = 10 mg/L).

정에서 발생한 것으로 판단된다. 또한 전류를 흘려주어 전기응집을 진행하는 동안 전해용액의 pH, 온도, TDS, EC가 증가하고 ORP는 급격하게 감소하였다 (Fig. 3). 전해용액의 pH 상승은 물의 전기분해과정에서 발생한 다량의 수산화이온(OH<sup>-</sup>)의 영향이며, TDS와 EC는 물의 전기분해와 철의 용해과정에서 용존이온이 증가했기 때문으로 판단된다. 또한 ORP의 감소는 전기응집장치로부터 다량의 전자가 공급되어 전해용액 내 전자의 농도가 증가했기 때문으로 판단된다. 전해용액의 수리화학특성 변화는 코발트의 유무에 상관없이 유사한 결과를 보였다. 이는 모든 실험에서 전기응집공정이 동일하게 진행되었음을 나타낸다. 전기응집공정을 사용하여 용액 내 코발트의 농도변화를 확인한 결과 모든 조건에서 코발트가 빠르게 제거되었다 (Fig. 4). 코발트의 초기농도를 1 mg/L로 조성한 실험에서는 전류를 흘려줌과 동시에 용액 내 코발트의 농도가 급격히 감소하여 약 3분 만에 완전히 제거되었다. 또한 초기농도 10 mg/L에서는 약 10분이 경과하였을 때 코

발트가 완전히 제거되었다. 실험에서 나타난 코발트의 제거는 전기응집공정에서 발생한 철수산화물에 의한 것으로 판단되며 흡착제거가 우세하게 나타난 것으로 판단된다. Wang *et al.*, (2011)과 Nassar (2012)는 철수산화물과 코발트의 흡착은 langmuir 흡착모델에 따라 매우 빠르게 진행됨을 보고한바 있다. 본 연구에서 나타난 코발트의 제거반응을 명확히 확인하기 위해서는 발생한 슬러지의 특성과 코발트와의 상호반응등 추가 연구가 필요하다. 실험을 진행한 pH-Eh 조건에서 코발트는 Co<sup>2+</sup>로 존재함을 알 수 있다 (Fig. 5(a)). 그러나 용액 내 Fe<sup>2+</sup>가 존재하는 경우 Co와 Fe가 결합된 형태로 존재하는 것으로 나타났다 (Fig. 5(b)). 이는 철수산화물과 코발트가 결합한 침전물이 실험이 진행된 조건에서 광물학적 안정성을 유지함을 보여주는 결과로 철수산화물의 존재에 따른 코발트의 상변화와 안정성의 변화를 보여준다. 향후 전기응집의 조건을 다양하게 수행하여 철수산화물의 발생량 및 회수방안, 코발트의 최대제거량 등 다양한 조건을 도출한다면 용액 내 코발트를 제거하기 위한 전기응집공법의 적용성을 확대할 수 있을 것으로 판단된다. 이상의 결과로 보아 전기응집공정을 통해 용액 내 Co의 제거가 가능함을 확인하였다. 그러나 지하수, 방사성 액체폐기물과 같은 매질에는 다양한 유·무기물이 존재하여 코발트 제거를 위한 전기응집공법의 적용에 많은 영향을 미칠 수 있어 향후 다양한 추가연구가 필요하다.

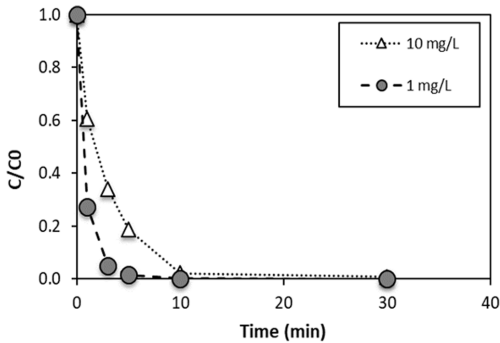


Fig. 4. Variation of cobalt concentration with time during the electrocoagulation process.

### 5. 방사성 폐액 내 코발트 제거를 위한 전기응집공법의 적용 가능성 제안

전기응집공법은 폐수처리 분야에서 기존의 화학처리와 막(membrane)을 활용한 필터링 기술을 대체할 수

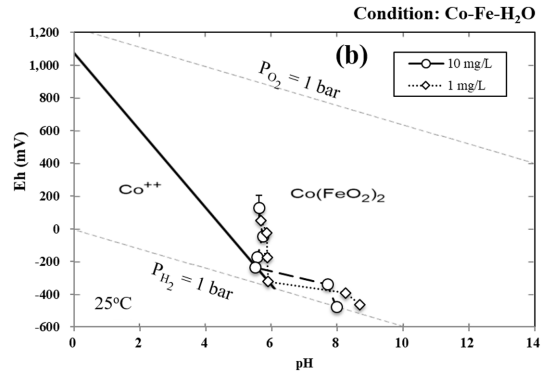
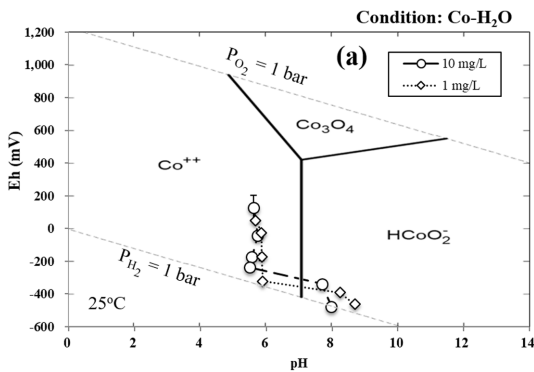


Fig. 5. The pH-Eh stability diagram of cobalt: (a) Co-H<sub>2</sub>O and (b) Co-Fe-H<sub>2</sub>O.

있는 새로운 기술로 부상하고 있다. 실제로 화학약품 제조, 제지, 유류정제 공정에서 발생한 폐수처리에 전기응집을 활용한 사례도 보고된 바 있다 (Lai and Lin, 2006; Ugurlu *et al.*, 2008; El-Naas *et al.*, 2009). 또한, 국내에서도 물 자원의 재이용에 관심이 높아지면서 정부 부처에서는 하폐수의 재이용율을 2020년까지 기존 10%에서 30%까지 향상할 계획에 있다. 원자력 발전소에서는 원자로 냉각과 배관정화 과정에서 폐액이 발생하며 이를 처리하기 위해 증발, 여과, 이온교환 등의 방법을 적용하여 폐액 내 방사성 원소를 제거하고 부피를 감용하여 최종보관을 하고 있다. 현재 사용 중인 방사성 폐액의 처리방법은 막대한 처리비용과 보관비용 그리고 보관공간을 필요로 하여 이를 보완하기 위한 방법이 필요하다. 전기응집공법은 방사성 폐액으로부터 코발트와 같은 방사성원소를 완전히 제거할 수 있어 원전폐기물처리와 물 자원의 재이용을 동시에 달성할 수 있는 기술이다. 또한 500 mL의 코발트 용액을 전기응집으로 처리하였을 때 0.2 g의 슬러지가 발생하였는데 (Table 3) 이는 폐기물의 부피감용에도 매우 효과적인 방법이라 할 수 있다. 그러나 현재까지의 결과는 용존 코발트의 제거를 통한 초기단계의 시도에 불과하며 원자력 발전과정에서 발생하는 방사성 폐액을 전기응집공법으로 처리하기 위해서는 다양한 핵종원소에 대한 이해와 전기응집 처리조건의 도출과정이 필요하다. 특히 전기응집공법은 전극판의 재질과 배치방법, 전류밀도, 전해용액의 특성, 전기응집 셀의 구조에 따라 대상물질의 제거 효율이 달라지는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서 도출한 결과를 바탕으로 방사성 폐액 내 코발트 제거를 위해서는 전극판의 재질과 배치방법, 전류밀도, 전해용액의 특성, 전기응집 셀의 구조 등 전기응집공법 최적 조건의 검토가 필요하다.

## 6. 결 론

전기응집공법을 활용한 방사성 액체폐기물 내 코발트의 제거 가능성을 평가해 보았다. 코발트는 원자력 발전소의 운전과정에서 냉각시설의 배관에 생성된 산화막을 제거하는 과정에서 발생한 액체폐기물에 다량 존재한다. 이러한 방사성 액체폐기물 내 코발트의 제거는 물자원의 재활용과 방사성 폐기물의 부피감용을 위해 반드시 필요한 과정이다. 전기응집공법을 통해 용액 내 코발트의 제거가 가능하며, 이는 원자력 발전시설에서 발생하는 액체폐기물을 정화하고, 폐기물의 부

피를 획기적으로 줄일 수 있는 방법이다. 그러나 현재까지는 코발트의 제거 가능성만을 확인한 기초연구 수준으로 방사성 액체폐기물에 적용하기 위해서는 전기응집의 운전 조건 및 액체폐기물 내 공존이온의 영향 등에 대한 추가연구가 필요하다.

## 사 사

본 연구는 2017년 원자력연구기반확충사업의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2017M2B2B1072408)을 받아 수행하였습니다.

## References

- Alloway, B.J. (1995) Heavy Metals in Soils. Springer Science & Business Media. 368p.
- ATSDR (2004) Toxicological profile for cobalt. U.S. Department of Health and Human Services, Atlanta, 486p.
- Barceloux, D.G. and Barceloux, D. (1999) Cobalt. *Journal of Toxicology: Clinical Toxicology*, v.37, p.201-216.
- Bowen, H.J.M. (1979) *Environmental Chemistry of the Elements*. Academic Press, New York. 320p.
- Brillas, E. and Martínez-Huitle, C.A. (2015) Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods. An updated review. *Applied Catalysis B: Environmental*, v.166-167, p.603-643.
- Carr, M.H. and Turekian, K.K. (1961) The geochemistry of cobalt. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v.23, p.9-60.
- Dolati, M., Aghapour, A.A., Khorsandi, H. and Karimzade, S. (2017) Boron removal from aqueous solutions by electrocoagulation at low concentrations. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v.5, p.5150-5156.
- El-Naas, M.H., Al-Zuhair, S., Al-Lobaney, A. and Makhlof, S. (2009) Assessment of electrocoagulation for the treatment of petroleum refinery wastewater. *Journal of Environmental Management*, v.91, p.180-185.
- García-Segura, S., Eiband, M.M.S.G., de Melo, J.V. and Martínez-Huitle, C.A. (2017) Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other technologies. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, v.801, p.267-299.
- Gault, N., Sandre, C., Poncy, J.L., Moulin, C., Lefaix, J.L. and Bresson, C. (2010) Cobalt toxicity: Chemical and radiological combined effects on HaCaT keratinocyte cell line. *Toxicology in Vitro*, v.24, p.92-98.
- IAEA (1999) International Atomic Energy Agency. Review of the Factors Affecting the Selection and Implementation of Waste Management Technologies; IAEA-TECDOC-1096; International Atomic Energy Agency: Vienna, Austria
- IAEA (2006) Environmental consequences of the Chernobyl accident and their remediation: twenty years of experience, International Atomic Energy

- Agency, Vienna, Austria, 180p.
- KAERI (1994) The management of radioactive waste treatment facility, Korea Atomic Energy Research Institute: Deajoen, Korea, 245p.
- Lai, C.-L. and Lin, K.-S. (2006) Sludge conditioning characteristics of copper chemical mechanical polishing wastewaters treated by electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, v.136, p.183-187.
- Mamelkina, M.A., Cotillas, S., Lacasa, E., Sáez, C., Tuunila, R., Sillanpää, M., Häkkinen, A. and Rodrigo, M.A. (2017) Removal of sulfate from mining waters by electrocoagulation. *Separation and Purification Technology*, v.182, p.87-93.
- Matilainen, A., Vepsäläinen, M. and Sillanpää, M. (2010) Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, v.159, p.189-197
- Min, J., Lee, C.W. and Gu, M.B. (2003) Gamma-radiation dose-rate effects on DNA damage and toxicity in bacterial cells. *Radiation and Environmental Biophysics*, v.42, p.189-192.
- Missana, T. and Adell, A. (2000) On the Applicability of DLVO Theory to the Prediction of Clay Colloids Stability. *Journal of Colloid and Interface Science*, v.230, p.150-156.
- Nariyan, E., Aghababaei, A. and Sillanpää, M. (2017) Removal of pharmaceutical from water with an electrocoagulation process; effect of various parameters and studies of isotherm and kinetic. *Separation and Purification Technology*, v.188, p.266-281.
- Rahman, R.O.A., Ibrahim, H.A. and Hung, Y.-T. (2011) Liquid Radioactive Wastes Treatment: A Review. *Water*, v.3, p.551-565
- Sung chungja, 1984, The effect of trace element, Minumsa, Korea, 403p.
- Tsai, T.-L., Lin, T.-Y., Su, T.-Y., Wen, T.-J., Men, L.-C. and Lin, C.-C. (2013) Chemical and radiochemical analysis of corrosion products on BWR fuel surfaces. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, v.295, p.289-296.
- Uğurlu, M., Gürses, A., Doğar, Ç. and Yalçın, M. (2008) The removal of lignin and phenol from paper mill effluents by electrocoagulation. *Journal of Environmental Management*, v.87, p.420-428.
- Un, U.T. and Ocal, S.E. (2015) Removal of Heavy Metals (Cd, Cu, Ni) by Electrocoagulation. *International Journal of Environmental Science and Development*, v.6, p.425-429.
- Yang, Z.-H., Xu, H.-Y., Zeng, G.-M., Luo, Y.-L., Yang, X., Huang, J., Wang, L.-K. and Song, P.-P. (2015) The behavior of dissolution/passivation and the transformation of passive films during electrocoagulation: Influences of initial pH, Cr(VI) concentration, and alternating pulsed current. *Electrochimica Acta*, v.153, p.149-158.