

## Faraday's Law에 의한 전기응집공정의 분석

### Analysis of Electrocoagulation Process using Faraday's Law

김혜숙\*    윤영임\*    조은정\*    최윤희\*    오미영\*\*    김영관\*\*\*  
Kim, Hye-Sook    Yun, Young-Im    Cho, Eun-Jeong    Choi, Yun-Hee    Oh, Mi-Young    Kim, Yeong-Kwan

#### Abstract

This research was carried out to find out the possibility of using Faraday's law in analyzing the electrocoagulation system. Bench-scale reactor equipped with aluminum electrode plates was operated using synthetic wastewater which received sodium chloride for conductivity adjustment. Phosphate was added to the wastewater to induce the precipitation with Al. The amount of aluminum dissolved from the electrodes could be predicted by Faraday's law with a difference less than 5%. This difference was greater at a higher electric current, probably due to the increased solution temperature. However, effect of pH on the dissolution of the aluminum was negligible. The result of this study suggested that the operating condition of electrocoagulation system could be developed using the Faraday's law when the pollutant concentration is given.

키워드 : 전기응집, Faraday 법칙, 알루미늄  
Keywords : electrocoagulation, Faraday's law, aluminum

#### 1. 서론

전극을 이용한 전기화학개념의 수 처리 방법으로서 철과 알루미늄 등을 전극재료로 하는 폐수처리 공정이 있는데, 알루미늄 전극을 사용한 전기화학공정을 음용수 정화시스템에 적용한 예가 있다.[1] 음용수 이외에도 산업 폐수 처리에 적용이 시도되고 있는데, 염색폐수의 경우 최고 95% 이상의 색도 제거율을 나타냈고,[2] 선박에서 발생하는 에멀전 광유분의 경우에도 좋은 처리효율을 보이고 있다.[3] 그러나 전기화학반응의 수 처리 적용

을 위한 본격적인 연구가 시작된 것은 비교적 최근의 일로서, 보다 효과적인 적용을 위한 기초 실험이 필요한 실정이다.

전기화학반응은 폐수에 전기 에너지를 가하여, 폐수 중에 함유되어 있는 오염물질을 전기 화학적으로 제거하는 처리방법으로 전기분해, 전기응집, 전기부상과 같은 방법들이 있다. 폐수 중에 함유되어 있는 콜로이드 물질은 대부분 (-)전하를 띠고 있으며, 유사 전하사이의 반발력의 작용에 의해 부유 상태로 존재한다. 콜로이드 상태로 존재하는 물질들을 포함한 폐수 속의 오염물질은 전기에너지에 의해 전극에서 용집되어진 금속 양이온과 전기적으로 중화되어 응집반응이 일어나는 동시에 산화, 환원 반응도 일어나 제거된다. 전기응집은 전기화학반응의 주요 반응으로서 양극에서 용출되어지는 금속의 가수분해에 의한 금속 수산화물 생성에 의한 것으로서, 일반적으로 양극으로 이용되

\* 강원대학교 환경공학과 학사 과정  
\*\* 강원대학교 환경공학과 박사 과정  
\*\*\* 강원대학교 환경공학과 교수

는 금속에는 철과 알루미늄 등이 있다. 전기화학반응은 폐수의 물리·화학적 특성, 전극의 재질 및 면적과 간격 등의 여러 가지 설계 조건에 의해 좌우되며 양극에서 용출되어지는 금속 양이온의 양에도 크게 영향을 받는다. 금속 양이온은 Faraday의 법칙에 따라 전극에 통해준 전기량에 비례하여 용출되어지는데, 이를 계산식으로 나타내어보면 다음 식과 같다.[4]

$$W = \frac{Itm}{zF} \quad (1)$$

여기서,  $W$ : 단위 면적 당 금속의 용출량 ( $gM/cm^2$ )

$I$ : 전류밀도 ( $A/cm^2$ )

$t$ : 시간 (sec)

$M$ : 금속의 분자량

$z$ : 산화·환원 반응에서의 전자수

$F$ : Faraday constant (96500 C)

즉, 전극에 통해준 전기량을  $Q$ 라고 하면, 전극으로 사용한 금속의 이온가가  $z$ 인 경우  $z$ 개의 금속 양이온 1 mol이 용출되는데 필요한 전기량은  $zF$ 가 된다. 따라서 용출되어지는 금속 양이온의 몰수는

$$\int idt = \frac{Q}{zF} \text{이다.}[5]$$

이에 본 연구에서는 Faraday 법칙에 기초한 위식을 이용하여 전기용집반응을 일으키는 금속 양이온의 용출량과 공급하는 전기량의 상관관계를 알아봄으로서 일정 농도의 오염물질의 처리를 위해 필요한 금속 양이온의 양과 전기량을 유추하여 보다 효율적으로 적정 처리 조건을 찾고자 하였으며, 2차 오염 문제를 일으킬 수 있는 처리수의 잔류 금속을 최소화 하고자 하였다.

## 2. 실험 재료 및 방법

### 2.1 시료

실험에 사용한 인공폐수는 두 가지로 첫 번째는 NaCl을 첨가하여 전기전도도가 2000  $\mu S/cm$ 가 되도록 조제하였으며, 두 번째는  $KH_2PO_4$ 를 수돗물 1L 당 0.439 g을 첨가하여  $PO_4^{3-}$ 의 농도를 100 mg/L로 조절하였고 NaCl을 첨가하여 전기전도도가 2000  $\mu S/cm$ 가 되도록 하였다.

### 2.2 실험장치

#### (1) 전극(Electrode)

전극으로 사용한 알루미늄 5052는 Al-Mg-Si계 합금으로 인성과 용접성 및 내식성이 우수하고 전기저항이 작은 특징을 가지고 있어 전기화학반응에 적합한 것으로 판단되어진다.[6] 표 1은 Al 5052 전극의 화학적 조성을 나타낸 것이다.

표 1. Al 5052 전극의 화학적 조성

	Chemical Composition of Al 5052							
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Al
Weight percent	0.25	0.4	0.1	0.1	2.8	0.35	0.1	95.9

#### (2) 반응조

반응조는 유리 소재의 장방형으로 실용적은 3.2  $\ell$ 으로 그림 1과 같다. 20cm×17cm의 크기로 제작된 전극을 15mm의 간격으로 4개를 설치하였으며 전극의 전체 표면적은 2,720 $cm^2$ 이었다. 시료의 완전 혼합을 위하여 반응조의 하부에 마그네틱바를 사용하여 완전 혼합이 이루어지도록 하였다. 반응이 일어나는 과정에서 온도가 상승하는 현상이 생기게 되는데 이는 결과적으로 지속적인 전류의 상승을 초래하기 때문에 이를 해결하기 위하여 반응조를 실용적 7.6  $\ell$ 의 수조 속에 설치하여 온도 상승으로 인한 전류의 증가를 방지하였다. 전기의 공급은 30V, 50A 용량의 정류기(Daelym regulated DC power supply)를 사용하여 (+)극과 (-)극을 교대로 설치하여 공급하였다.

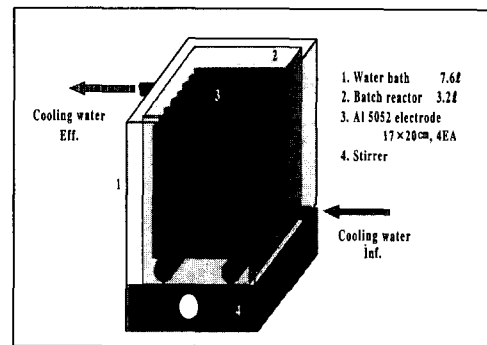


그림 1. 반응조 모식도

### 2.3 실험 방법

#### (i) 이론적 금속 용출량과 실제 실험값의 비교

공급하는 전류의 통전력이 좋도록 조제한 첫 번째 시료를 이용하여 pH 7, 전류 2 A, 반응시간 60분에서 전극에서의 알루미늄 용출량을 이론적 금속 용출량과 비교하여 보았다.

(2) 전류와 pH 변화의 영향

전극에서의 알루미늄 용출량에 직접적으로 영향을 미칠 것으로 예상되어지는 전류와 pH를 각각 2, 4, 8 A와 4, 7, 10으로 변화시키면서 실제 용출량과의 이론적 금속 용출량과의 차이를 비교하였다.

(3) 금속 용출량이 인산염 이의 제거에 미치는 영향

이론적 금속 용출량의 고려가 오염물질의 처리에 미치는 영향을 알아보기 위하여 100 mg/L의  $PO_4^{3-}$ 를 함유하고 있는 인공폐수를 이용하여 pH 7, 전류 2, 4, 8 A, 반응시간 60분의 조건에서 실험하였다.

2.4 분석방법

모든 시료의 분석은 Standard Methods[7]와 국내 환경오염 공정시험법[8]에 의거하여 시료 채취 후 즉시 수행하였다. 알루미늄은 시료 부피의 1%에 해당하는 중금속 측정용 질산( $HNO_3$ , 60%)을 첨가하여 전처리 하였으며 ICP(Hewlett Packard Co.)를 이용하여 측정하였다.

3. 실험 결과

3.1 이론적 금속 용출량과 실제 실험 값의 비교

pH 7, 전류 2 A 그리고 반응시간 60분에서 이론적 금속 용출량과 실제 용출량을 비교하여 보았다. 실제 실험에 의한 알루미늄 용출량은 처리수와 슬러지 그리고 슬러지 여과액에서의 알루미늄 농도를 측정하여 총량을 계산하였다. 실험 결과 실제 알루미늄 용출량은 0.699 g을 나타냈다. 이를 Faraday's law에 의하여 계산한 이론적 알루미늄 용출량인 0.67 g과 비교해 보면 오차 5% 이하로 Faraday's law에 의한 이론적 금속 용출량 계산식을 신뢰할 수 있는 근거가 되었다.

3.2 전류와 pH 변화의 영향

이론적 금속 용출량은 식 (1)에 나타난 것과 같이 전류와 반응 시간에 비례하여 증가한다. 이에 전류의 영향을 알아보기 위하여 반응 시간을 60분으로 고정하고 전류를 2, 4, 8 A로 증가시키면서 실제 알루미늄 용출량과 비교하여 보았다. 그 결과 전류의 증가에 따라 실제 알루미늄 용출량도 증가

하였다. 한가지 특이한 것은 전류의 증가로 인한 이론적 알루미늄 용출량의 증가율에 비하여 실제 알루미늄 용출량의 증가율이 더 컸다. 그림 2에서 확인할 수 있듯이 전류 2 A에서 4.3%이었던 이론적 알루미늄 용출량과 실제 용출량의 오차가 4 A에서는 5.2% 그리고 8 A에서는 12.3%로 증가하였다. 이와 같은 결과는 전류의 증가에 따라 시료의 급격한 온도 상승으로 인하여 알루미늄의 인성이 저하되기 때문인 것으로 판단되어진다.[6]

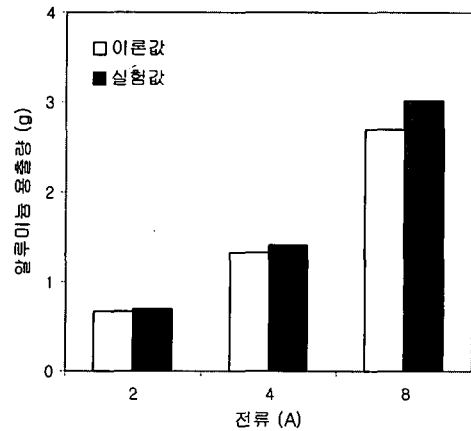


그림 2. 전류의 영향 (pH 7, 반응시간 60분)

또한, 일반적으로 전기화학반응에서 금속산화물의 용해도는 침전물 생성 정도에 큰 영향을 주며, pH의 변화에 민감한 것으로 알려져 있어[9] 이에 관련하여 pH 변화가 금속 용출량에 미치는 영향을 알아보기 위하여 전류 4 A에서 반응시간 60분 동안 pH를 4, 7, 10으로 변화시키면서 실험하였다. 그러나 실험 결과 그림 3과 같이 pH 변화가 알루미늄 용출량에 미치는 영향은 미미한 것으로 나타났다.

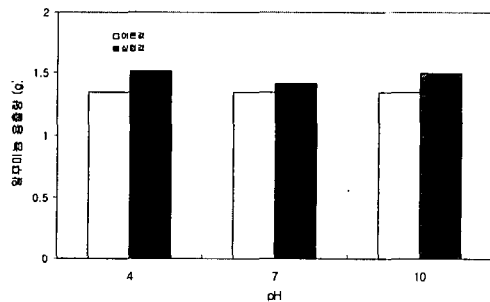


그림 3. pH에 따른 알루미늄 용출량 (전류 4 A, 반응시간 60분)

3.3. 금속 용출량이 인산염 인의 제거에 미치는 영향

인산염 인을 100 mg/L 함유한 인공폐수를 이용하여 pH 7, 전류 2, 4, 8 A, 반응시간 60분의 조건에서 반응시켰다. 그림 4는 전류의 변화에 따른 인산염 인의 제거효율을 나타낸 것으로 모든 적용 전류에서 98% 이상의 좋은 제거효율을 보였다.

100 mg/L의 인산염 인을 함유하고 있는 3.2 L의 시료는 총량 0.32 g의 인산염 인을 포함하고 있다. 이는 약  $3.37 \times 10^{-3}$  mol로서 알루미늄과 인산염 인의 반응이 1:1 반응인 것을 고려하면 100 mg/L의 인산염 인을 제거하기 위해서는 최소 0.091 g 이상의 알루미늄을 필요로 한다.

인산염 인의 존재와 부재에 따른 전기화학반응 후 처리수의 잔류 알루미늄의 변화와 pH를 그림 5와 6에 나타내었다. 인산염 인의 첨가로 인하여 처리수의 잔류 알루미늄의 농도는 전류의 증가에 상관없이 감소하였다. 뿐만 아니라 감소 정도는 모든 전류에서 비슷한 11.7 mg/L로서 약  $1.39 \times 10^{-3}$  mol의 알루미늄이 감소하였다. 이는 용출되어지는 알루미늄 금속이온과 인산염 인이 1:1로 반응하기 때문이며, 알루미늄의 감소량이 비슷한 것은 첨가한 인산염 인의 농도가 같기 때문인 것으로 판단되어진다.

인산염 인  $3.37 \times 10^{-3}$  mol 중 처리수의 잔류 알루미늄이 감소된 양을 근거로 할 때 제거된 것으로 예측되어지는  $1.39 \times 10^{-3}$  mol을 제외한  $1.98 \times 10^{-3}$  mol의 인산염 인은  $AlPO_4$  이외의 형태인 수돗물시료의 Ca 또는 Fe와의 침전반응에 의하여 제거된 것으로 유추된다. 한편, 반응시간이 길어짐에 따라 음극에서 발생되어지는 수산화이온의 양도 증가하는데 극판에서 용출된 대부분의 알루미늄은 수산화이온과 반응하여  $Al(OH)_3$ 의 형태로 침전, 제거되었을 것으로 판단된다.

그림 6에서와 같이 인산염 인의 첨가로 인하여 처리수의 pH는 전류의 크기에 상관없이 모두 증가하여 11.2 ~ 11.6 정도를 나타냈다. 이는 인산염 인의 부재 시 음극에서 발생되어져 알루미늄 금속이온과 반응하여  $Al(OH)_3$ 를 형성하던 수산화이온이 인산염 인의 첨가로 인하여 알루미늄 금속의  $AlPO_4$ 의 침전물이 생성됨으로써 수산화이온이 잉여되어 처리수의 pH를 높인 것으로 판단되어진다.

본 실험의 결과는 오염물질의 농도를 아는 시료의 경우 오염물의 총량과 이론적 금속 용출량 계산을 통해서 적절한 반응조건을 도출할 수 있는 가능성을 제시하였다.

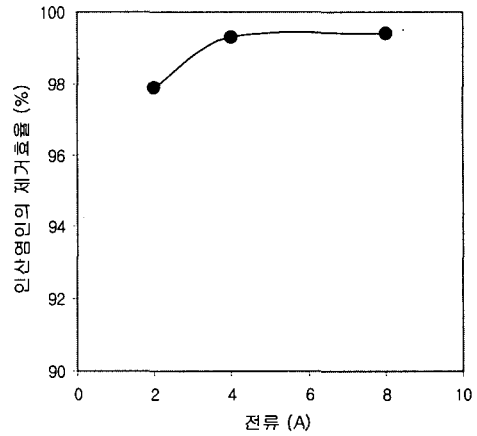


그림 4. 전류의 변화에 따른 인산염 인의 제거 효율 변화 (pH 7, 반응시간 60분)

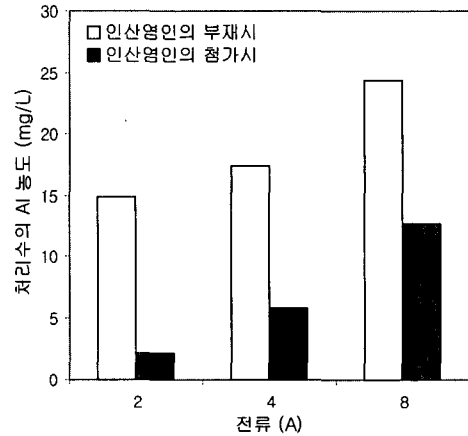


그림 5. 인산염 인의 첨가에 따른 처리수의 잔류 Al 농도 (pH 7, 반응시간 60분)

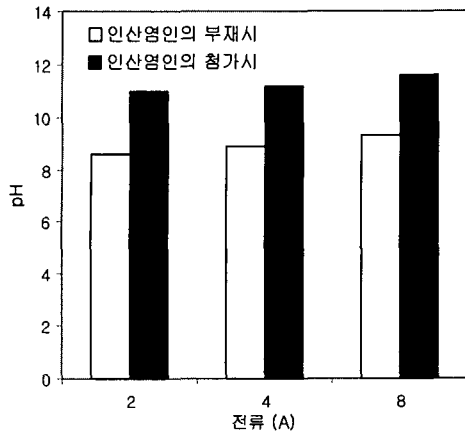


그림 6. 인산염 인의 첨가에 따른 반응 후의 처리수의 pH 변화 (초기 pH 7)

#### 4. 결론

본 연구를 통해서 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. pH 7, 전류 2 A 그리고 반응시간 60분에서 Faraday's law에 의한 이론적 금속 용출량과 실제 용출량을 비교해 본 결과 5 % 이하로 나타났다.
2. 전류의 증가는 시료의 급격한 온도 상승을 유발하여 알루미늄의 인성을 저하시켜 이론적 알루미늄 용출량과 실제 용출량의 오차를 증가시켰으나 용출량에 미치는 pH의 영향은 미미한 것으로 나타났다.

3. 오염물질의 농도를 아는 시료의 경우 총량을 추정하여 이론적 금속 용출량 계산을 이용한 적절한 반응 조건 도출이 가능할 것으로 판단되어진다.

#### 참고 문헌

- [1] E.A. Vik, D.A. Carlson, A.S. Eikum and E.T. Gjessing, "Electrocoagulation of potable water", *Water Res.*, Vol. 18, No. 11, pp. 1355-1360, 1984.
- [2] S.H. Lin and M.L. Chen, "Treatment of textile wastewater by chemical methods for reuse", *Water Res.*, Vol. 31, No. 4, pp. 868-876, 1997.
- [3] 박승조, 김인수, "전기화학적 방법에 의한 예 멀전 유분제거", *대한환경공학회지*, 제14권, 제4호, pp. 265-271, 1992.
- [4] D. Pletcher and F. C. Walsh, *Industrial Electrochemistry*, 2nd Ed., Blackie Academic & Professional, London, 1993.
- [5] 문경만, *실용전기화학*, 효성출판사, 1999.
- [6] 조현기, *금속재료*, 형설출판사, 1982.
- [7] APHA-AWWA-WEF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 19th Ed., Washington, D.C., 1995.
- [8] *환경오염 공정시험법*, 환경부 고시 제 97-111 호, 1997.
- [9] V. L. Snoeyink and D. Jenkins, *Water Chemistry*, John Wiley & Sons Inc., N.Y., 1980.