

전기분해를 이용한 크롬과 아연함유 폐수처리

김재용 · 엄명헌*

충북대학교 환경공학과 · 천안공업대학 신소재 응용화학과*

Treatment of Wastewater containing Chromium and Zinc by Electrolysis

Jae Yong Kim · Myeong Hun Um*

*Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University,
Department of Advanced Materials Chemical Technology, Chonan National College**

Abstract

We've been investigated to find the optimum operation condition of electrolysis which have an influence on disposal efficiency of heavy metals.

When we electrolyzed the testing wastewaters containing each 250mg/L of Cr and Zn ions, we experimented with using variables like as pH, NaCl, electrode gap, electric current strength, the number of electrodes, after fastening positive electrode plate with Al, Fe, Ti and negative electrode plate with Stainless Steel plate.

I. 서론

중금속에 의한 오염은 중금속이 가진 체내 농축 특성 및 잔류독성으로 인하여 피해가 매우 크므로 적절한 관리가 요구된다. 중금속에 의한 오염 중 수질오염원은 합금, 도금, 피혁, 조립금속, 페인트 제조등 광범위한 영역에 이르며, 대부분 소규모 사업장에서 적절히 처리되지 못하여 야기되는 것으로 조사된바 정부차원에서도 집단화하여 공동 폐수처리시설을 도모하고 있으나 전면적으로 실시되지는 못하고 있다.

여타 폐수에 비하여 Cr을 많이 함유한 폐수는 피혁폐수와 도금폐수 사인 감광폐수이다. 또 Zn은 산화성이 강한 금속의 부식을 방지하기 위하여 실시하며 대부분 용융 도금방법을 사용하는 과정에서 많이 발생한다. 도금공정에서 Cr은 마찰과 마

멸에 잘 견디도록 하기 위해 사용되고 있다. 한편 Cu 도금은 부식 방지를 위해 실시하는 도금으로서 Ni, Cr 도금 전단계에서 실시하며 Ni 이나 Cr이 피도금물에 균일하고 강하게 부착되도록 할 목적으로 실시한다. Zn도금은 산화성이 강한 금속의 부식을 방지하기 위하여 실시하며 대부분 용융 도금방법을 사용한다. Ni은 부식 방지와 광택을 내기 위해서 실시하고, Cr은 마찰과 마멸에 잘 견디도록 하기 위해 사용되고 있다. 이러한 공정에서 발생하는 중금속 함유 폐수는 대부분 화학적으로 환원시킨 후 알카리 조건에서 침전시키는 방법으로 처리하고 있으나 이는 슬러지의 발생량이 많으며 유지관리가 불편하다. 또 여타의 방법으로 이온교환법, 역삼투압법, 증발회수법 등이 있으나 시설비가 많이 들고 유지관리비 또한 높다는 문제점을 갖고 있다. 특히 유독성을 지닌 Cr⁶⁺과 Zn처리에 관한

연구는 현재 국내 뿐만아니라 세계적으로 많이 연구되어지고 있다.^{1~10)}

이런 문제점을 갖고 있는 중금속 함유 슬러지는 매립하거나 소각시킨 후 살포 처리하고 있으나, 대부분의 중금속은 비등점이 높기 때문에 소각시켜 처리하고자 할 경우 타고난 후 재의 발생과 소각 과정에서 대기 중으로 방출되는 유해가스로 인하여 2차적으로 매우 심각한 대기오염 문제를 유발한다. 또한 소각시 필요한 에너지 비용도 많이 소요되므로 특별히 부피 축소를 요하지 않는 경우라면 중금속을 함유한 슬러지는 고형화하여 매립시키는 방법을 사용하고 있다. 그러나 고형화의 경우에도 사전에 안정화 처리 과정을 거치지 않으면, 매립 후 토양오염 유발과 함께 생태계파괴와 아울러 자연 환경조건의 변화에 따른 심각한 2차오염을 야기 시킨다.

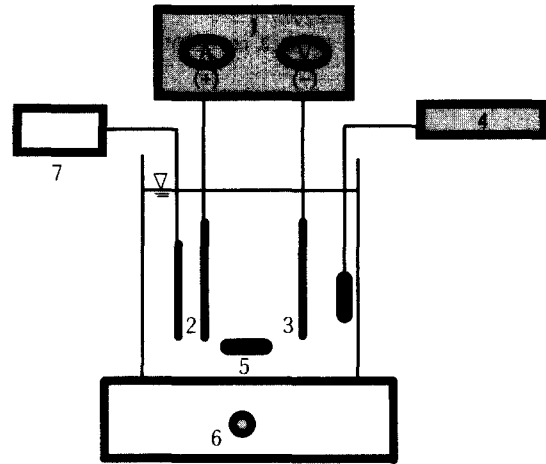
따라서 본 연구는 기존의 처리법이 갖고있는 문제점을 보완하고자 전기화학 반응을 이용한 방법을 적용하고자 하였으며, 이때 처리 효율에 영향을 미치는 폐수의 pH, 전해질 농도, 전극종류 및 전극 간격, 전극매수, 인가전압 변화 등을 변수로 설정하여 이에 따른 중금속 제거 효율에 대하여 실험을 실시하였다.

II. 실험

1. 시료 및 장치

전기분해에 의한 중금속 함유 폐수의 처리 효율을 알아보기 위해 시료로 사용한 도금 폐수는 Zn, Cr 도금을 실시하는 공장에서 발생하는 것으로, Zn, Cr 도금시 발생하는 Zn, Cr을 각각 250 mg/L으로 조제한 시험 폐수를 양극판 Al, Fe, Ti극판과 음극판은 Stainless Steel 극판으로 고정시키고 자체적으로 주문·제작한 반응조에서 전기 분해법에 따라 실험하였다.

D.C power supply 는 0 - 15 V , 0 - 50 A로 직접 조절이 가능한 형태로 주문 제작하였으며 전기 산화 반응조의 용량은 회분식의 경우 반응 시간동안 교반해주기 위하여 3.375 L로 하였고, 장치의 구성은 Fig. 1과 같다.



1. D.C Power Supply
2. Electrode(Al, Fe, Ti)
3. Stainless Steel Electrode
4. pH Meter
5. Magnetic Bar
6. Magnetic Stirrer
7. Thermometer

Fig. 1. Schematic diagram of the electrolysis at batch System

이때 반응에 사용되는 폐수의 양은 2.5 L로 하였고, 반응 전극 면적은 100 cm²(10×10 cm), 두께는 3 mm로 하였다.

2. 실험방법

D.C power supply를 이용하여 교류를 0~15 V, 0~50 A로 직접 조절이 가능한 직류전류로 바꿔 출력단의 +, - 단자에서 $\phi 2$ mm의 전선으로 극판에 전류를 공급할 수 있도록 함으로써 전기분해를 실시하였다. 아크릴판으로 제작한 반응조 내에는 마그네틱 교반기를 장착한 후 사용하여 일정한 회전을 줌으로써, 반응조 내 균일한 농도와 pH meter sensor 주위에 전기분해 시 발생하는 gas에 의해 야기 될 수 있는 pH 측정 오차를 줄일 수 있도록 하였다. 본 연구에서 사용한 극판은 Al, Fe, 백금 도금 처리한 Ti극판, Stainless Steel극판으로 Al, Fe 및 백금 도금 처리한 Ti극판(이하 Ti극판으로 칭함)을 양극으로 사용하였고 음극판으로는 Stainless Steel을 사용하였다. 반응시간은 40분으로 하였으며 5-10분 간격으로 sample 채취하여 여과기로 충분히 여과 후 ICP(Inductively Coupled Plasma)로 측정하여 중금속 처리 효율을 측정하였다.

III. 결과 및 고찰

1. pH변화에 따른 중금속 처리효율

전기분해 반응시 Zn과 Cr의 제거에 따른 pH의 영향을 알아 보고자 pH의 변화에 따른 제거 효율을 측정하였다. 이때 극판은 양극판으로 Al, Ti 극판을 사용하고 음극판은 Stainless Steel로 고정시킨 후 H₂SO₄ 와 NaOH를 사용하므로써 pH를 조절하여 pH 2, pH 5, pH 7, pH 10으로 변화를 주고 실험을 실시하였다.

폐수는 앞에서 조제한 시험폐수를 사용하였고, 반응조는 회분식을 사용하였다. 또한 지지염을 부가하여 예비실험결과 구한 전해질 농도를 2,000 mg/L, 전극간격 10 mm, 전력 30 watt로 고정시킨 후 실험을 실시하였다. 반응시간을 40분간 하는 동안 sample채취는 각각 10분 간격으로 실시하였다.

Zn, Cr의 처리효율을 Fig. 2, 3에 나타내었다. Zn은 Al극판을 사용한 경우 반응 10분 경과 후 pH 2일 때 21.7%, pH 5에 24.76%, pH 7에 78.44%, pH 10에 99.81%를 나타냈고, 반응시간이 경과하여도 pH 2에서는 효율의 변화가 없었으며 pH 5의 경우 61%, pH 7의 경우 95%까지 증가하였다. 또 Ti극판을 사용한 경우 pH 2일 때 21.35%, pH 5에 21.59%, pH 7에 57.19%, pH 10에 99.85%의 처리효율을 나타냈다. Cr의 처리 효율은 Al극판을 사용한 경우 40분 반응 후 pH 2일 때 18.2%, pH 5에 78.82%, pH 7에 65.23%, pH 10에 55.32%를 처리하였고 Ti극판을 사용한 경우 pH 2 일 때 24.6%, pH 5에 66.17%, pH 7에 59.66%, pH 10에 55.25%의 Cr처리 효율을 나타냈다.

Zn, Cr의 경우 각기 pH 10일 때 서로 99.85%와 55.25%로 매우 다른 경향을 나타내었다. 하지만 본 논문에서는 과거의 일련의 연속적인 실험의 일환으로써 Cu분과 Ni분의 함유도금폐수에 대한 연구를 진행한 바 있으며 또한 서론부분에서 언급한 바 있듯이 각각의 중금속들이 서로 복합적인 연관이 있는 관계로, 중금속 함유 복합도금폐수에 대한 처리방안으로, 모든 중금속 처리과정에서 비교적 높은 처리효율을 나타낸 영역인 pH 7을 기준으로 하여 이후의 실험을 진행하고자 하였다.

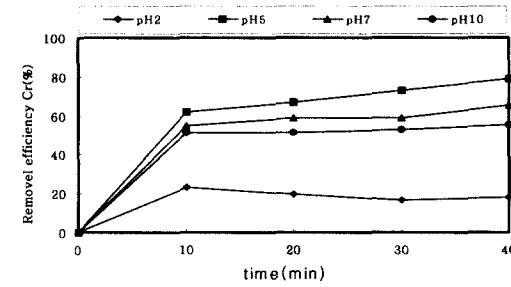
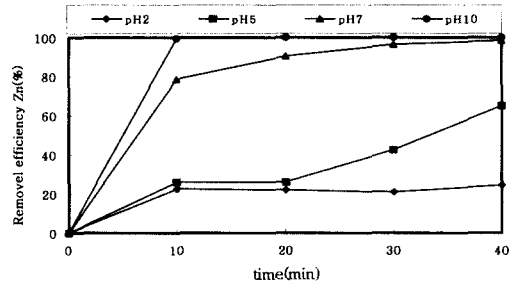


Fig. 2. Removal efficiency of Zn and Cr by electrical treatment with cond'n. (Al anode, NaCl 2,000 mg/L, electrode gap 10 mm, electric power 30 watt)

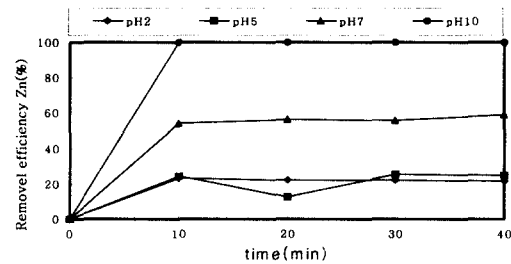
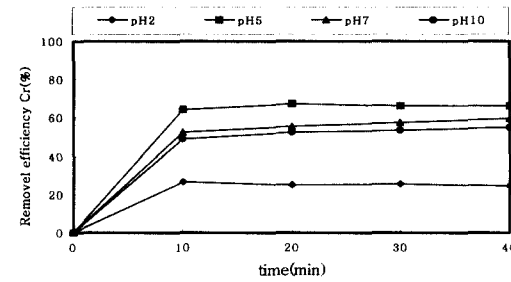


Fig. 3. Removal efficiency of Zn and Cr by electrical treatment with cond'n. (Ti anode, NaCl 2,000 mg/L, electrode gap 10 mm, electric power 30 watt)

2. 전해질 농도변화에 따른 중금속 처리효율

전기 전도도에 따른 중금속 처리 효율을 확인하기 위하여 pH 7 전극 간격 10 mm, 전력량 30watt로 고정시키고, 지지염으로 NaCl을 넣어, NaCl 농도를 1,000 mg/L, 2,000 mg/L, 3,000 mg/L으로 변화시켜 보았다. 양극판은 Al극판과 Ti극판을 사용하고 음극판은 Stainless Steel극판을 사용하여 실험을 실시하고 40분 동안 반응시킨 결과는 Fig. 4, Fig. 5와 같았다. 40분 경과 후 Zn의 처리 효율은 Al판 사용 시 NaCl농도가 1,000 mg/L일 때 97.55%, 2,000 mg/L일 때 98.71%, 3,000 mg/L일 때 97.46%였고, Ti극판 사용시 NaCl 2,000 mg/L일 때 52.85%, 1,000 mg/L일 때 59.27%, 3,000 mg/L일 때 57.26%의 Zn 처리 효율을 보였다.

Cr의 처리 효율은 Al판일 경우 전해질 농도가 2,000 mg/L일 때 40분 반응 후 처리 효율이 43.15%, 1,000 mg/L일 때 43.85%, 3,000 mg/L일 때 43.4%를 나타냈고, Ti극판일 경우 1,000 mg/L일 때

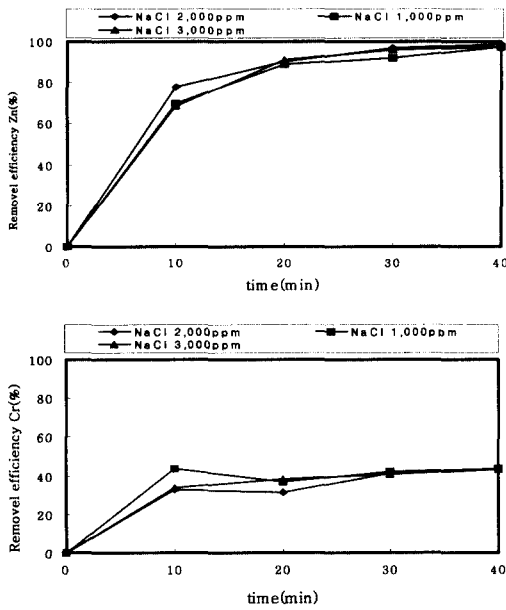


Fig. 4. Removal efficiency of Zn and Cr by electrical treatment with cond'n. (Al anode, pH 7, electrode gap 10 mm, electric power 30 watt)

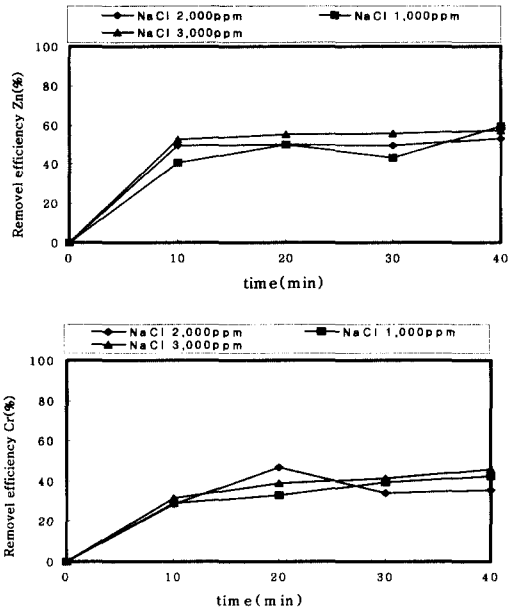


Fig. 5. Removal efficiency of Zn and Cr by electrical treatment with cond'n. (Ti anode, pH 7, electrode gap 10 mm, electric power 30 watt)

42.2%, 2,000 mg/L일 때 35.6%, 3,000 mg/L일 때 45.85%의 효율을 나타냈다. 또 Al 판을 사용한 경우 Cr의 처리 효율은 시간에 따른 변화가 적은 것으로 나타났으나 Zn의 경우 전해 시간이 증가함에 따라 처리 효율도 증가를 보였으며, Ti 판을 사용한 경우 전해 시간이 증가 하여도 처리 효율의 변화는 크지 않았다.

따라서 전해질 농도 변화에 따른 중금속 처리 효율은 2,000 mg/L일 때가 가장 좋게 나타났다. 중금속 폐수 처리시 NaCl 농도가 가장 낮은 경우 처리효율이 높게 나타내는 것을 본 실험을 통하여 알 수 있었다.

3. 전극간격 변화에 따른 중금속 처리효율

전극간격의 변화에 따른 처리 효율을 확인하기 위하여 극간 거리 변화를 10, 20, 30 mm로 하였고, pH 7, NaCl농도는 2,500 mg/L, 전력 30 watt로 고정시킨 후 조제 폐수를 이용하여 실험을 실시하였다. 문헌 고찰을 통하여 전극간의 거리를 5 mm로 할 경우 제작상의

어려움과 부유물질 등이 음극판 부착에 의한 대전 현상으로 불꽃 방전 등의 문제점이 발생할 우려가 있었으므로 최소 전극간격은 10 mm로 하였다.¹⁰⁾ 따라서 전극 간격의 변화를 10 mm단위로 하여 10, 20, 30 mm로 변화를 주어 실험을 실시하였다. 전극간격 변화에 따른 처리 효율을 Fig 6, 7에 나타냈다.

Zn의 처리 효율은 Al극판일 경우 10 mm일 때 62.2%, 20 mm일 때 52.03%, 30 mm일 때 37.23%였고, Ti극판일 때 극간 거리가 10 mm일 경우 76.94%, 20 mm일 때 66.69%, 30 mm일 때 75.21%였다. 또 Cr의 처리 효율은 Al극판을 양극판으로 사용한 경우 전극 간격을 10 mm로 할 때 53.97%, 20 mm일 때 48.62%, 30 mm일 때 50%였고, Ti극판을 양극판으로 사용하여 실험한 경우 전극 간격이 10 mm일 때 56.01%, 20 mm일 때 52.12%, 30 mm일 때 51.78%의 처리 효율을 나타냈다.

결과적으로 Zn, Cr 등의 모든 중금속 처리과정에서 전극 간격이 가장 좁은 10 mm일 때 효율이 높게 나타났다. 이는 참고 문헌에서 밝힌 전극 간격을 작게 할수록 전극 사이의 전기 저항이 낮아져 전기분해에 의한 직·간접 산화에 의한 중금속 처리 효율이 높아짐을 알 수 있다.¹⁰⁾

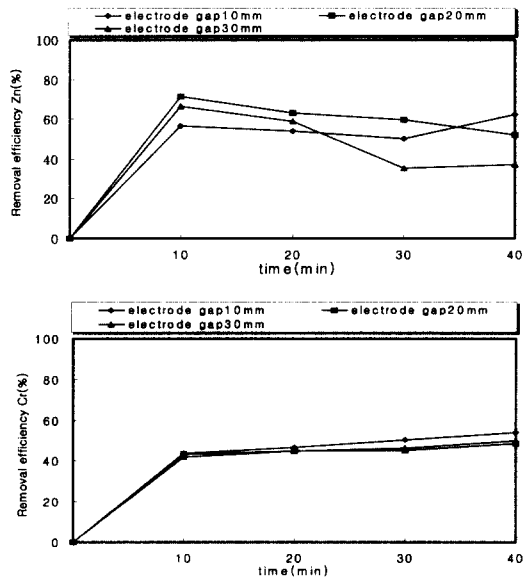


Fig. 6. Removal efficiency of Zn and Cr by electrical treatment with cond'n. (Al anode, pH 7 NaCl 2,000 mg/L, electric power 30 watt)

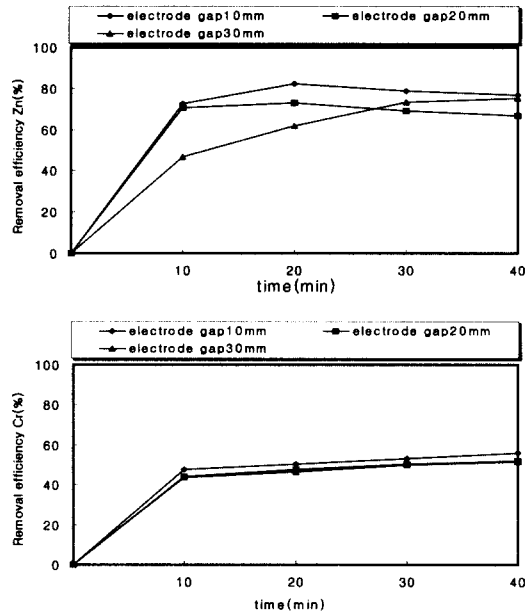


Fig. 7. Removal efficiency of Zn and Cr by electrical treatment with cond'n. (Ti anode, pH 7 NaCl 2,000 mg/L, electric power 30 watt)

4. 전력 변화에 따른 중금속 처리효율

중금속을 함유하고 있는 조제 폐수에 전력변화를 주며 처리 효율을 알아보기 위한 실험을 실시하였다.

pH 7, 전해질 농도 2,000 mg/L, 전극 간격은 10 mm로 일정하게 유지한 후 전압을 직접 조절하여 전력을 10 watt, 30 watt, 50 watt로 변화시켜 중금속 제거 효과의 정도를 알아보았다.

Fig. 8, 9 는 전력 변화에 따른 처리 효율의 변화를 나타 내었다. Zn 처리 효율은 양극판으로 Al극판을 사용한 경우 10 watt일 때 71.43%, 30 watt일 때 95.55%, 50 watt일 때 98.9%이었고, Ti극판일 경우 10 watt일 때 48.24%, 30 watt일 때 43.52%, 50 watt일 때 48.12%였다. Cr 처리 효율은 Al극판일 경우 10 watt일 때 48.76%, 30 watt일 때 56.36%, 50 watt일 때 55.04%였고, Ti극판일 경우 10 watt일 때 56.96%, 30 watt일 때 56.84%, 50 watt일 때 64.17%의 처리 효율을 나타내었다.

따라서 중금속 처리 효율을 살펴보면 Zn의 경우는 Ni과 비슷한 처리 효율을 나타냈으며, Cr의 경우도 모든 전력 변화 실험에서 비슷한 처리효율

을 나타냈다. 또한 전력변화에 따른 중금속 처리 효율에서 10 watt와 30 watt의 경우 처리 효율 면의 큰 차이를 보였으나, 30 watt와 50 watt 사이에서는 3% 이내의 근소한 차이를 나타냈다.

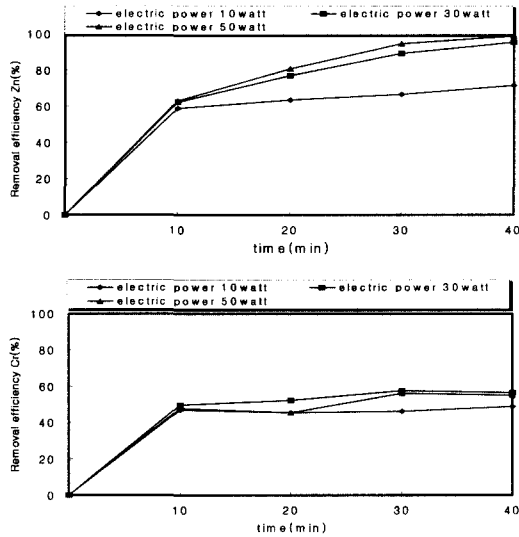


Fig. 8. Removal efficiency of Zn and Cr by electrical treatment with cond'n. (Al anode, pH 7 NaCl 2,000 mg/L, electrode gap 10 mm)

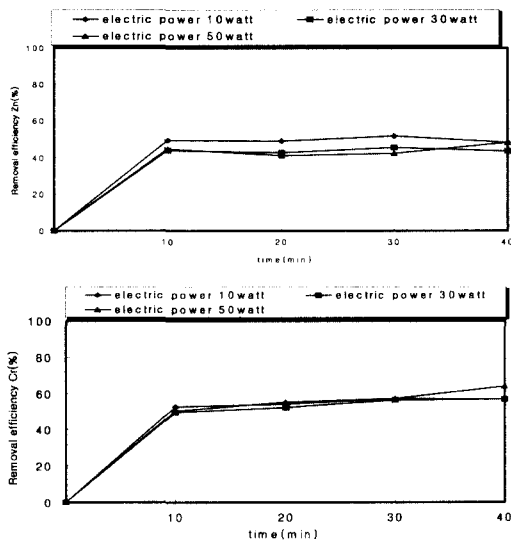


Fig. 9. Removal efficiency of Zn and Cr by electrical treatment with cond'n. (Ti anode, pH 7 NaCl 2,000 mg/L, electrode gap 10 mm)

5. 극판재질 및 극판 수 변화에 따른 중금속 처리효율

전기분해를 이용하여 조계 폐수 내 존재하는 중금속 처리에 극판 수 증가와 극판 재질에 따른 처리 효율을 알아보기 위해 실험하였다.

양극판 재질로는 Al, Fe, Ti극판을 사용하고, 음극판으로는 Stainless Steel을 사용하였다. 양극판을 1, 2, 3개로 점차 증가시키고 음극판은 양극판의 숫자에 맞추어 증가시켜 실험을 실시하였다. pH 7, 전해질 농도 2,000 mg/L, 전극 간격은 10 mm, 전력 30 watt로 일정하게 유지하고, 반응 시간은 40분, sample채취는 매 5분마다 채취하여 중금속 처리 효율을 알아보았다.

5.1. Al극판 - Stainless Steel극판

극판 수 증가에 따른 전기 분해 시 최적의 반응 조건은 앞에서 실험하여 얻은 결과를 기초로 하여 설정하였다. pH 7, NaCl 농도 2,000 mg/L, 전극 간격 10 mm, 전력 30 watt로 일정하게 하고, Al극판을

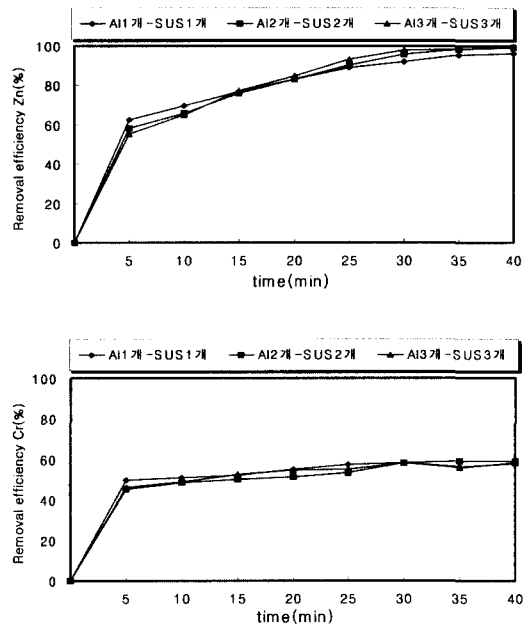


Fig. 10. Removal efficiency of Zn and Cr by electrical treatment with cond'n. (Al anode, pH 7 NaCl 2,000 mg/L, electrode gap 10 mm, electric power 30 watt)

1, 2, 3개로 각각 증가시켜 실험을 실시하였다. 반응 40분 후 Zn의 처리효율은 Fig. 10(left)과 같은 결과를 나타내었다. Al극판이 1개일 때 Zn 처리효율은 96.35%, 2개일 때 99.19%, 3개일 때 99.40%였고, Cr의 경우 처리효율은 Al극판이 1개일 때 58%, 2개일 때 59.24%, 3개일 때 58.36%를 나타냈다.(Fig. 10(right))

5.2. Fe극판 - Stainless Steel극판

Al극판 대신 Fe극판을 사용하여 실험을 실시하였다. pH 7, NaCl 2,000 mg/L, 전극 간격 10 mm, 전력을 30 watt로 일정하게 유지하고 철극판수를 점차적으로 증가시켜 처리효율에 미치는 정도를 알아보았다. Fe극판을 사용했을 경우가 Al극판이나 Ti극판을 사용했을 때보다 Cr의 처리율에서 40% 정도 높은 수치를 얻을 수 있었다. Zn의 경우 1개일 때 79.29%, 2개일 때 99.07%, 3개일 때 99.97%로 Fig. 11(left)와 같고, 마지막으로 Cr의 처리효율은 양극판 수가 1개일 때 84.91%, 2개일 때 99.98%, 3개일 때 99.76%의 처리효율을 나타

냈다.(Fig. 11(right)) Al, Ti극판과는 달리 Cr의 처리효율이 높게 나타나는 것은 Al극판과 Ti극판에 비해 pH가 중성에서 알칼리에 가깝게 상승하므로 참고 문헌을 통해 살펴보면 Cr³⁺는 pH가 약산성 영역에서, Cr⁶⁺는 약알칼리 영역에서 침전이 잘 일어나며, pH가 낮아지면 Cr⁶⁺가 Cr³⁺로 환원되고, 반대로 pH가 높아지면 Cr³⁺이 Cr⁶⁺로 산화된다고 밝혀지고 있다. 따라서 Al극판이나 Ti극판에서 Cr³⁺이, Fe극판일 때는 Cr⁶⁺가 잘 처리된다고 알려져 있다.⁽⁷⁾

5.3. Ti극판 - Stainless Steel극판

양극이 Ti극판일 경우 pH 7, NaCl 농도 2,000 mg/L, 전극 간격 10 mm, 전력은 30 watt로 일정하게 한 후 40분 반응시켰다. Zn의 경우 양극판 수가 1개일 때 43.52%, 2개일 때 62.47%, 3개일 때 56.36%로 Fig. 12(left)에 나타낸 바와 같은 결과를 얻었고, Fig. 12(right)에 나타낸 Cr의 처리효율은 극판 수가 1개일 때 56.84%, 2개일 때 64%, 3개일 때 70.04%의 처리효율을 나타내었다.

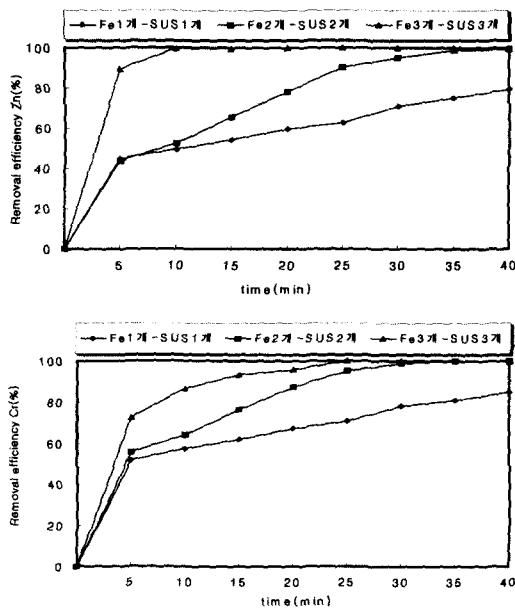


Fig. 11. Removal efficiency of Zn and Cr by electrical treatment with cond'n. (Fe anode, pH 7 NaCl 2,000 mg/L, electrode gap 10 mm, electric power 30 watt)

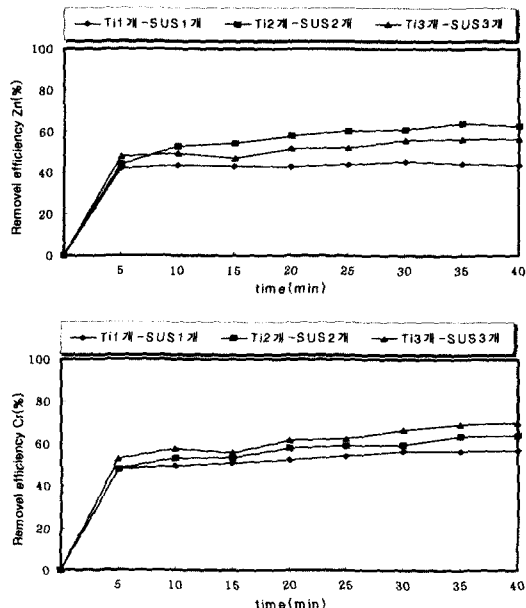


Fig. 12. Removal efficiency of Zn and Cr by electrical treatment with cond'n. (Ti anode, pH 7 NaCl 2,500 mg/L, electrode gap 10 mm, electric power 30 watt)

본 실험을 통해 고가인 Ti극판은 Al, Fe극판에 비해서 처리 효율 면에서 떨어진다는 사실을 알 수 있었다.

IV. 결 론

전기분해에 의한 중금속 함유 폐수의 처리 효율을 알아보기 위해 시료로 사용한 도금 폐수는 Zn, Cr 도금을 실시하는 공장에서 발생하는 것으로, Zn, Cr 도금시 발생하는 Zn, Cr을 각각 250 mg/L으로 조제한 폐수를 양극판 Al, Fe, Ti극판과 음극판은 Stainless Steel극판으로 고정시킨 제작반응조에서 전기 분해법에 따라 실험하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. pH 변화에 따른 실험 결과 다른 pH조건 보다 pH 7에서 Zn, Cr의 처리효율이 비교적 높게 나타나는 것을 알 수 있었다.
2. 전해질 농도 변화에 따른 실험을 통해 전해질 농도가 2,000 mg/L에서 처리 효율이 가장 좋게 나타나므로 지지염의 농도를 2,000 mg/L이상으로 유지 할 필요가 없다.
3. 전극 간격을 변화 시켜 실험한 결과 전극간격이 좁을수록 처리 효율이 높았다.
4. 전력을 10, 30, 50 watt로 변화시켜 실험한 결과 전력증가에 따라 Zn, Cr의 처리효율 역시 증가하였다. 전력변화 실험에서 50 watt일 경우 처리효율이 가장 높으나, 전력을 30 watt로 하여 실험한 결과 50 watt와 3%내외로 근소한 차이를 보였다. 따라서 전력변화에 따른 중금속 처리효율에서 30 watt가 보다 경제적인임을 알 수 있었다.
5. 극판 재질과 극판 수 변화에 따른 실험 결과 Fe극판일 경우가 Zn, Cr의 처리효율이 가장 높게 나타냈고, 극판수를 증가시킴에 따라 중금속 처리효율도 증가함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 두산그룹 재단법인 연강재단의 2000년도 환경관련 학술연구 지원사업에 의해 수행된

과제로서, 연구비 지원에 대하여 감사의 뜻을 표합니다.

Reference

1. Jun-ichi Takahashi, Takahiro Fukamachi, Keiji Toyabe, Hideyuki Ueda, Keita Kouda : A Study of production process of uranium metal by molten salt electrolysis using zinc cathode-A Study of Molten Salt Electrolysis Step, Proceedings of the 11th International Symposium on Molten Salts XI, 158-169, May. 1998.
2. Izaki M. : Preparation of transparent and conductive zinc oxide films by optimization of the two-step electrolysis technique, Journal of the Electrochemical Society, Vol.146, No.12, 4517-4521, Dec. 1999.
3. Omel'chuk AA, Kozin VF. : Zinc refining by thin-layer electrolysis in melts, Russian Journal of Applied Chemistry, Vol.71, No.11, 2023-2025, Nov. 1998.
4. Nakano H, Araga K, Iwai M, Kawahuku J. : Effect of electrolysis conditions on the morphology and crystal orientation of zinc electrodeposit, Tetsu to Hagane-Journal of the Iron & Steel Institute of Japan, Vol.83 No.12, Dec. 1997.
5. Gattrell. M. and Kirk. D. W. : The electrochemical oxidation of aqueous phenol at a glassy carbon electrode, The Canadian journal of Chemical Engineering, Vol. 68, 997-1003(1990).
6. E. A. Vik, D. A. Carlsen, A. S. Eikum, and E. T. Gjessing : Electrocoagulation of potable water, Water Research, Vol.18, No.11, 1355~1360, 1984.
7. Cenkin. V. E. and Belevtsev. A. N. : Electrochemical treatment of industrial wastewater., Effluent and Water Treatment Journal, Vol. 25, 243-247, 1985.
8. C. H. Weng, C. P. Huang, P. B. Leavens,

- and P. F. Sanders : Chemical interactions between Cr(VI) and hydrous concrete particles, *Environmental Science & Technology*, Vol.30, No.2, 371-376, 1996.
9. Stucki. S., Kotz. R. and Carcer. B : Electrochemical wastewater treatment using high overvoltage anodes. part II : Anode performance and applications." *Journal of Applied Electrochemistry*, Vol.21, 14-20, 1998.
10. Rosas WR. Robin A. : Cathodic film formation during chromium electrolysis on low-carbon steel using short duration current steps, *Journal of Applied Electrochemistry*, Vol.31 No.5, 531-536, May. 2001.