

전기응집 공정을 이용한 Rhodamine B의 제거

Removal of Rhodamine B using Electrocoagulation Process

김동석 · 박영식^{†,*}

Dong-Seog Kim · Young-Seek Park^{†,*}

대구가톨릭대학교 환경과학과 · *대구대학교 보건과학부

Department of Environmental Science, Catholic University of Daegu

*Department of Health & Environmental, Daegu University

(2009년 7월 2일 접수, 2009년 11월 12일 채택)

ABSTRACT : The performance of a electrocoagulation (EC) process was examined for the removal of Rhodamine B (RhB) using iron electrode. The effects of operational parameters such as electrode material (aluminum and iron), current density, NaCl dosage, initial pH and initial dye concentration on RhB removal efficiency were investigated. The optimum range for each of these operating variables were experimentally determined. The experimental results showed that the iron is superior to aluminum as sacrificial electrode material. The optimum time of electrolysis, current density, NaCl dosage and pH were 10 min, 1630 A/m², 4 g/L and neutral pH, respectively. Under these conditions, RhB was effectively removed (> 93.4%) and also more than 80% of COD was removed (> 88.9%) when the initial concentration of RhB was 230 mg/L. The electrical energy consumption in the above conditions for the color and COD of RhB removal were 10.3 and 10.8 kWh/kg RhB, respectively. The electrocoagulation process could be a promising technology to treat dye wastewater containing RhB.

Key words : Electrocoagulation, Dye, Sacrificial electrode, Iron electrode, Energy consumption

요약 : Rhodamine B (RhB)의 제거를 위해 철 전극을 이용한 전기응집 (EC) 공정의 성능에 대해 연구하였다. RhB 제거 효율에 대한 전극 물질 (알루미늄, 철), 전류밀도, NaCl 첨가량, 초기 pH 및 초기 염료 농도와 같은 운전인자의 영향을 연구하였다. 이들 운전 인자에 대한 최적 운전 범위는 실험을 통하여 결정되었다. 희생 전극 물질로서 철 전극의 성능이 알루미늄 전극보다 우수하였다. 최적 전기분해 시간, 전류밀도, NaCl 첨가량 및 pH는 각각 10 분, 1630 A/m², 4 g/L 및 중성의 pH 이었다. 최적의 공정 조건하에서 RhB 농도가 230 mg/L인 조건에서 RhB는 효과적으로 제거되었고 (> 93.4%), RhB의 COD도 역시 감소하였다(> 88.9%). RhB의 색도와 COD 제거에 대한 상기 조건에서의 전기 에너지 소비량은 각각 10.3 and 10.8 kWh/kg RhB으로 나타났다. 전기응집 공정은 RhB와 같은 염색폐수 처리에 효과적인 것으로 나타났다.

주제어 : 전기응집, 염료, 희생 전극, 철 전극, 에너지 소비

1. 서론

일반적으로 화학적 폐수 처리에 있어 알루미늄염이나 철염 등의 화학약품을 주입하는 화학응집 공정을 많이 사용하고 있다. 그러나 이러한 약품주입이 필요한 화학응집 공정은 약품 및 에너지 등의 운전비가 많이 소요되며, 응집 공정의 결과 발생하는 슬러지의 처리에 많은 비용이 들고 있어 이에 대한 개선이 필요하다.^{1,2)} 김 등³⁾은 TiO₂ 폐수 처리시 응집제인 황산알루미늄을 사용하는 것보다 알루미늄 전극을 이용한 전기응집 공정의 TiO₂ 처리율이 높았다고 보고함으로써 전기응집 공정이 화학응집 공정을 대체할 수 있다는 것을 보여주었다.

전기응집 공정은 알루미늄이나 철 등의 희생 전극

(sacrificial electrode)을 이용할 경우 전기분해 반응 중에 양극에서 Al³⁺, Fe²⁺ 등의 금속 양이온이 산화되어 용출이 일어나고 음극에서는 물의 전기화학적 반응에 의해 OH⁻가 생성되어 응집제 역할을 할 수 있는 Fe(OH)₂, Fe(OH)₃ 또는 Al(OH)₃ 등과 같은 금속 수산화물이 생성된다.⁴⁾ 폐수 중의 유기 또는 무기성 물질 및 콜로이드성 물질과 같은 입자들과 용출된 금속이온이 전기적으로 결합하여 중성화되고 응집, 침전한다. 그리고 전기분해 반응 동안 생성된 수소와 산소는 전해액 내에 대류작용을 발생시키고 금속 수산화물의 일부를 부상시켜 수중과 수면에 존재하는 각종 입자형 불순물과 유분 등을 흡착, scum을 형성시키는 등의 다양한 물리화학적 반응을 통해 정화작용이 일어난다.^{5,6)}

[†] Corresponding author : E-mail : ysparkk@daegu.ac.kr Tel : 053-650-8043 Fax : 053-650-8049

전기응집 공정은 온도, pH의 영향이 거의 없고 약품비가 필요하지 않고 생물학적 처리에 비하여 부지면적당 처리 용량이 커 소요 부지면적을 감소시킬 수 있으며 슬러지 발생량이 적은 장점이 있다. 또한 운전이 간단하고 전압과 전류 등의 변화로 제어가 용이하여 자동화가 가능하며 처리비를 절감할 수 있는 장점이 있다.^{5,7~10)}

전기응집 반응은 전극에 전류가 원활히 흐르기 위해서는 전해질이 필요한데, 폐수 자체에 전해질을 함유하고 있는 경우 처리효율이 좋은 것으로 알려져 있다.¹¹⁾ 염색폐수와 같은 산업폐수에는 Cl^- , SO_4^{2-} 및 PO_4^{2-} 등과 같은 무기 음이온들이 많이 존재하는 것으로 알려져 있어,¹²⁾ 염색폐수의 처리에 전기응집 공정의 적용이 충분하다고 판단되어 모델 염색폐수로서 발암성 염료인 Rhodamine B (RhB)를 난분해성 폐수인 염료 폐수를 처리하는 방안에 대하여 모색하였다.

본 연구는 전극 재질에 따른 제거효율, 전원공급 시간, 전류밀도, 초기 NaCl 농도, pH 및 RhB 농도의 변화에 따른 실험을 수행하여 전기응집 공정의 적용을 위한 최적 인자를 도출하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 실험재료와 실험방법

알루미늄과 철 판을 양극으로 사용하였으며, Ti 판에 Pt가 코팅된 Pt/Ti 판을 음극으로 사용하였다. 전극의 크기는 35 × 35 mm이었으며, 지름이 3 mm인 구멍이 일정하게 뚫려 있는 전극을 사용하였고, 전극 간격은 2 mm이었다. 실험에 사용한 반응기는 아크릴로 제작하였으며(8 × 8 × 25 cm), 반응 부피는 1 L이었다(Fig. 1). pH 실험을 제외한 모든 실험은 수돗물을 이용하였으며, pH 조절은 NaOH와 H₂SO₄를 이

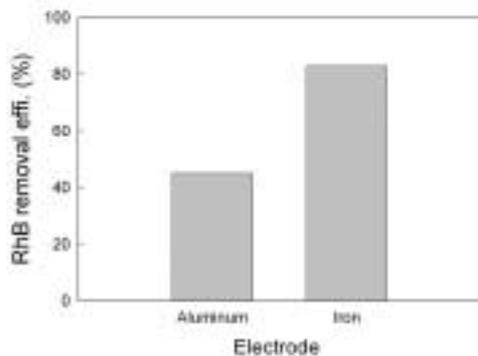


Fig. 1. Effect of electrode materials on the RhB removal(dye conc., 50 mg/L; current density, 1630 A/m²; NaCl conc., 4 g/L).

용하여 조절하였다. 샘플은 반응기 하부 2 cm 지점에 설치된 샘플 채취구에서 채취하여 분석에 사용하였다. 직류 전원공급기 (Hyunsung E&E, 50 V 20 A)를 이용하여 전극에 전원을 공급하였다. 반응기에 NaCl이 첨가된 RhB 용액을 반응기에 투입하고 전원을 일정시간 공급하여 응집과 부상이 일어난 후 전원을 끄고 용액 속에 남아있는 기포가 부상하는 시간인 부상시간은 5분으로 고정하여 실험하였다. 분해대상 물질은 양이온성 염료인 Rhodamine B (RhB)를 사용하였다.

2.2. 분석 및 측정

RhB 농도는 UV-VIS spectrophotometer (Genesis 5, Spectronic)를 사용하여 RhB의 최대 흡수파장인 554 nm에서 측정하여 검량선을 사용하여 나타내었다. COD 분석은 Standard methods¹³⁾에 준하여 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 전극과 전원공급 시간 선정

NaCl 농도를 4 g/L, RhB 농도를 50 mg/L, 전류밀도를 1630 A/m²으로 유지하면서 전원공급 시간(전기분해 시간)을 10분간 유지한 뒤 5분의 부상시간을 주었을 때 알루미늄 전극과 철 전극에서의 RhB 색도 제거율을 Fig. 1에 나타내었다. 알루미늄 전극의 경우 RhB 색도 제거율이 45%에 지나지 않았으나 철 전극의 경우는 82.8%의 색도 제거율을 나타내었다. 두 전극의 RhB 색도 제거율 차이가 커서 2450 A/m²으로 변화시켜 실험한 경우에서도 알루미늄 전극의 RhB 색도 제거효율은 52%, 철 전극은 94.3%로 철 전극의 성능이 우수한 것으로 나타나 향후 실험은 철 전극을 사용하여 실험하였다.

이 등⁵⁾은 전기응집 공정을 이용한 하수처리에서 알루미늄, 철 및 스테인리스 스틸 전극을 조합하여 처리할 경우 양극과 음극 모두 알루미늄을 이용한 경우의 하수의 COD와 탁도 처리율이 높았다고 보고하였다. Ilhan 등¹⁴⁾은 알루미늄과 철 전극을 이용한 침출수 처리에서 알루미늄 전극의 침출수 COD 처리율이 높았다고 보고하였다. Gomes 등¹⁵⁾은 Al-Fe, Fe-Fe 및 Al-Al 전극을 이용한 비소 폐수 처리에서 Fe-Fe 전극의 비소 처리율이 높았다고 보고하였다. Kobya 등¹⁶⁾은 pH < 6 이하인 산성 영역에서는 철 전극보다 알루미늄 전극에서 염색폐수의 COD와 탁도 제거율이 높지만, 중성 영역과 알칼리 영역의 pH에서는 철 전극의 처리율이 높다고 보고하였는데 수돗물을 이용하여 pH가 7.4였던 본 연구와 같은 결과를 얻

었다. Arslan-Alaton 등¹⁷⁾은 알루미늄과 스테인리스 스틸을 전극으로 사용하여 반응성 염색폐수를 처리한 결과 슬러지 생성 속도, 처리 지속시간과 효율을 고려할 때 스테인리스 스틸 전극이 반응성 염색폐수의 색도와 COD 처리에 더 적절하다고 보고하였다. 반면 Zongo 등¹⁸⁾은 알루미늄 전극과 철 전극을 이용한 전기응집에 의한 염색폐수 처리에서 철 전극이 알루미늄 전극보다 용출되는 질량이 많아 COD 처리율이 높다고 보고하였다.

전기응집 공정에서는 주로 알루미늄과 철 전극이 주로 사용되고 있는데, 연구자들에 따라 실험 폐수가 다르고, 같은 성상의 폐수라고 하더라도 다른 결과를 나타내는 등 일관된 전극 선정기준이 없지만 본 연구결과와 다른 연구결과를 종합해보면 염색폐수의 경우 철 전극이 용출 철 이온의 질량이 높아 염색폐수의 응집에 효율적으로 이용되어 대체적으로 처리율이 높은 것으로 나타났다.

전기응집 공정에서 전원공급 시간은 오염물질 제거 성능은 물론 에너지 소비와 전극 소모와 관계되는 중요한 인자 중의 하나로 에너지 소비를 줄이면서 최고의 제거율을 얻을 수 있는 최적의 전원공급 시간이 필요하므로,^{19,20)} 전원공급 시간을 결정하기 위하여 NaCl 농도가 4 g/L인 조건에서 전원공급 시간을 0~20분으로 2.5분씩 변화시키면서 전원공급 시간

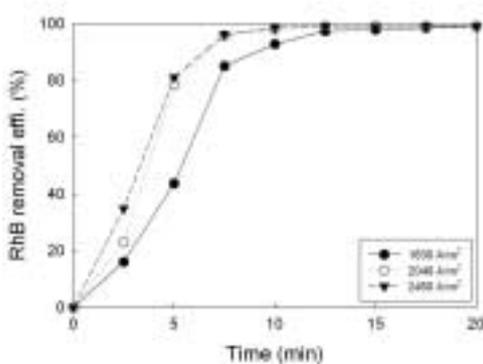


Fig. 2. Effect of electrolysis time on the removal efficiency of RhB(dye conc., 50 mg/L; electrode, Fe; NaCl conc., 4 g/L).

Table 1. Effect of flotation time for RhB removal(dye conc., 50 mg/L; electrode, Fe; current density, 1630 A/m²; NaCl conc., 4 g/L)

Flotation time (min)	RhB removal efficiency (%)
2.5	93.2
5	97.3
7.5	97.4
10	97.5
12.5	97.5
15	97.5

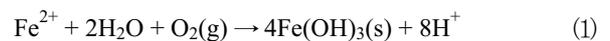
변화에 따른 RhB 색도 제거율을 Fig. 2에 나타내었다. 전류 변화시의 영향을 고찰하기 위하여 전류를 최적 전류에 가까운 1630~2450 A/m²로 변화시키고 실험하였다.

적용 전류에 관계없이 전원공급 시간이 7.5분까지는 RhB 색도 제거율이 빠르게 증가하였으며 1630 A/m²에서 약 12.5분, 2040 A/m² 이상에서는 10분이면 대부분의 RhB가 제거 되는 것으로 나타나 10분을 전원공급 시간으로 결정하였다. 전원공급 시간을 결정한 후 전원공급 시간 이후의 용액 속에 남아 있는 기포가 부상하면서 플럭을 부상시키는 시간인 부상 시간을 결정하기 위하여 2.5분부터 15분까지 2.5분의 시간 간격으로 실험하였을 때 RhB 색도 제거율이 5분과 크게 차이나지 않아 부상시간은 5분으로 고정하였다(Table 1).

3.2. RhB 색도 제거율에 미치는 전류밀도의 영향

전기화학 공정에서 전류의 세기는 전기화학 반응기 내에서 반응속도를 조절할 수 있는 가장 중요한 인자로,²¹⁾ 응집제 생성속도, 기포 생성에 영향을 주어 플럭의 성장에 영향을 주며 전기응집 공정의 효율에 큰 영향을 줄 뿐만 아니라 에너지 소비와 직접 관계되기 때문에 적절한 전류 세기에서 운전하는 것이 중요하다.²²⁾

RhB 제거에 대한 전류밀도의 영향을 고찰하기 위하여 NaCl 농도 4 g/L, 전원공급 시간 10분, 부상시간 5분으로 고정한 조건에서 전류 변화에 따른 RhB 색도 제거율을 Fig. 3에 나타내었다. 전류밀도가 410 A/m²에서 1220 A/m²에 이르기까지 전류밀도 증가에 따라 RhB 색도 제거율이 빠르게 증가하였으며, 1220 A/m² 이상의 전류밀도에서는 RhB 색도 제거율 증가 폭이 줄어들었다. 전류밀도가 증가할 때 양극으로부터 방출되는 철 이온이 증가하고 식 (1)과 같이 전류밀도의 증가에 따른 철 전극의 용해 후에 Fe(II)가 산소와 반응하여 Fe(III)로 산화되어 응집제 역할을 하는 Fe(OH)₃의 생성도 증가하게 되어,²³⁾ RhB 처리율이 증가하는 것으로 사료되었다. 2040 mA/cm² 이상의 전류밀도에서는 처리율이 거의 100%에 도달하였다.



Kalyani 등²⁵⁾은 전류 세기가 증가하면 양이온 용해량 증가 외에도 전극에서 발생하는 기포량이 증가하고 플럭 형성에도 영향을 주기 때문에 처리율이 증가하며, 일정 전류 세기 이상에서는 처리율이 일정하게 유지하였다고 보고하였다. Sengil 등²⁶⁾은 열 생성, pH 상승 및 과잉 산소 등의 부반응 때문에 일정 전류 세기 이상에서는 처리율 증가가 크지 않기 때문에

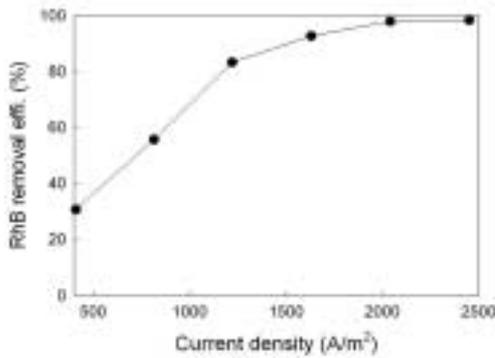


Fig. 3. Effect of current on the removal efficiency of RhB(dye conc., 50 mg/L; electrode, Fe; NaCl conc., 4 g/L).

전류 세기를 제한할 필요가 있다고 보고하였다. 또한 일정 전류밀도 이상에서는 전극의 용출성이 급격하게 증가하여 전극의 교체시기가 빨라지고, 정류기의 규격이 증가하기 때문에 경제성이 저하될 수 있어 최적 전류밀도에서 운전하여야 한다.²⁴⁾ 본 실험에서는 처리율, 에너지비용, 온도 및 pH 상승 등을 고려하여 최적 전류밀도를 1630 mA/cm²로 결정하고 다음 실험을 수행하였다.

3.3. RhB 색도 제거율에 미치는 NaCl 농도의 영향

염색폐수에서는 염색과 마무리 공정에서 화학물질이 다량으로 첨가되기 때문에 염색폐수는 넓은 범위의 이온강도를 가진다. 전해질 농도 증가는 대상 폐수의 전기전도도를 증가시킨다. 전기전도도의 증가는 일정 셀 전압에서는 전류밀도가 증가하고, 일정 전류밀도에서는 폐수 전기전도도 증가에 따라 셀 전압이 감소한다.¹⁶⁾ 특히, NaCl을 전해질로 사용할 경우, 유리염소, 이산화염소와 같은 산화제가 발생하여 오염물질의 간접산화에 이용되고 한다.²⁷⁾ 따라서 RhB 색도 제거율, 전극 소모와 에너지 소비의 측면에서 전기응집 공정에서 전기전도도의 영향을 고찰하여 적절한 전기전도도를 유지할 필요가 있다.

전류밀도를 1630 A/m²로 고정하고 NaCl 농도를 1~5 g/L로 변화시키면서 NaCl 변화에 따른 RhB 색도 제거율과 전압 변화를 Fig. 4에 나타내었다. NaCl 농도가 1 g/L에서 2 g/L로 증가하면서 RhB 색도 제거율이 빠르게 증가하였으며, 2 g/L 이상의 NaCl 농도에서는 RhB 색도 제거율 증가가 둔화되었으며 4 g/L와 5 g/L의 RhB 색도 제거율은 각각 92.7%와 93.0%로 4 g/L부터 색도 제거율에 평형에 도달되는 것으로 나타났다. 수돗물의 전기전도도는 359 μ S/cm, NaCl 1 g/L는 2.3 mS/cm, 5 g/L는 10.0 mS/cm로 나타나 전해질 첨가량 증가에 따라 전기전도도는 직선적으로 증가하는 경향

을 보였고, 2 A의 일정한 전류밀도 하에서 NaCl 첨가에 따라 전압이 낮아졌으나 NaCl 첨가량이 증가하면서 전압 감소량은 조금씩 줄어드는 경향을 나타내었다(Fig. 5).

Şengil 등²⁶⁾은 철 전극을 이용한 C.I. Reactive Black 5 제거 실험에서 전류밀도가 일정한 조건에서 NaCl 첨가량이 증가하면서 전력량이 크게 낮아졌지만 처리율 증가는 크지 않았으며 최적 NaCl 첨가량은 3 g/L라고 보고하였다. Mollah 등²⁸⁾은 철 전극을 이용한 전기응집 공정에서 Orange II 제거 반응에서 전기전도도는 NaCl 첨가량에 따라 직선적으로 증가하였고, 93.0%에서 98.0%의 색도 제거율을 얻었다고 보고하였다. Merzouk 등²⁹⁾은 알루미늄 전극을 이용한 염색폐수 처리에서 NaCl 첨가량 증가에 따른 제거율은 큰 차이가 없지만 NaCl이 첨가되지 않은 경우 비에너지소비(kWh/kg dye removed)가 증가한다고 보고하였다. 또한 NaCl이 과다 함유되어 있을 때는 공식(pitting corrosion) 때문에 전극의 과다 소모가 일어나고 전극의 용해가 불규칙하게 되어 첨가량은 5 g/L 이하로 제한하여야 한다고 보고하였다. 이 등⁵⁾은 알루미늄 전극을 이용한 하수처리에서 NaCl 투입(0~1 g/L)에 따른 BOD, COD, SS, T-N, T-P 제거율은 차이를 보이지 않았다고 보고하였다. Hu 등³⁰⁾은 NaCl의 첨가량 증가에 따라 염색폐수의 색도 제거도 증가하지만 증가량이 일정하거나 일반적인 경향이 없기 때문에 NaCl 첨가량에 따른 제거율을 모니터링해야 한다고 보고하였다. 본 연구결과와 다른 연구자들의 연구결과를 종합하면 NaCl 첨가량이 증가하면 전기전도도가 증가하고 적용 전압이 낮아져 전력량이 낮아지며, RhB 처리율도 증가하지만 일정 농도 이상의 투입량에서는 RhB 색도 제거율 증가도 적고 전압 감소량도 적어지지만 시약 첨가량이 증가되므로 성능과 비용적인 측면에서 4 g/L가 최적 NaCl 첨가량이라고 판단되었다.

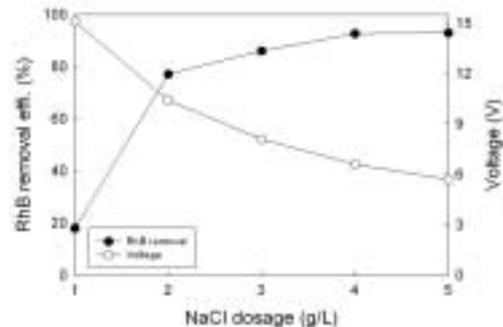


Fig. 4. Effect of NaCl dosage on the removal efficiency of RhB and (dye conc., 50 mg/L; electrode, Fe; current density, 1630 A/m²).

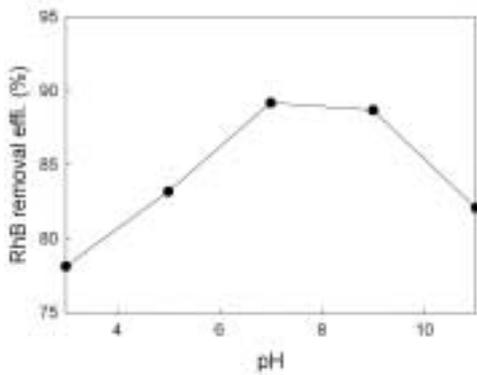


Fig. 5. Effect of pH on the removal efficiency of RhB(dye conc., 50 mg/L; electrode, Fe; current density, 1630 A/m²; NaCl conc., 4 g/L).

3.4. RhB 색도 제거율에 미치는 pH의 영향

pH는 전기응집 공정의 성능에 영향을 주는 중요한 인자로 알려져 있다.¹⁷⁾ 전기응집 공정에서 RhB 제거에 대한 pH의 영향을 고찰하기 위하여 전류밀도 1630 A/m², NaCl 농도 4 g/L의 조건에서 pH를 3~11로 변화시켜 pH에 따른 RhB 색도 제거율을 Fig. 5에 나타내었다.

산성 영역의 pH에서 RhB 색도 제거율이 가장 낮았고 pH가 증가됨에 따라 RhB 색도 제거율이 증가되어 pH 7에서 최대 색도 제거율을 나타낸 후 알칼리 영역에서 RhB 색도 제거율이 다시 감소하는 경향을 보였다. 최대 RhB 색도 제거율을 보인 pH는 중성 부근이라고 판단되었다.

이와 같은 결과는 철 전극을 이용한 전기응집 공정에서 C.I. Reactive Black 5 제거 실험에서 최적 pH 범위는 중성이라고 보고한 Şengil 등²⁶⁾과 알루미늄 전극을 이용한 염색 폐수 처리에서 최적 pH는 6.1~9.0이라고 Merzouk 등²⁹⁾의 결과와 철 전극을 이용한 Orange II 제거에서 최적 pH는 6.9라고 보고한 Mollah 등²⁸⁾의 결과와 유사하였다. 중성 부근의 pH에서 RhB 색도 제거율이 높은 이유는 응집제 역할을 하는 철 복합체인 Fe(OH)₂⁺, Fe(OH)₃⁺가 중성 부근의 pH에서 많이 형성되고 이 복합체가 응집에 이용되기 때문인 것으로 사료되었다.²⁸⁾

Lin 등³¹⁾은 염색폐수를 조사한 결과 유량균등조에서 수집된 대부분의 염색폐수 pH는 5~10 범위에 있다고 보고한 결과와 본 연구결과를 비교해 볼 때 전기응집을 이용한 염색 폐수처리에서 pH의 영향은 적을 것이라고 사료되었다.

3.5. RhB 색도 제거율에 미치는 RhB 농도의 영향

Fig. 6은 전원공급 시간, 전류밀도, NaCl 농도 및 pH에 대한 최적 조건에서 초기 RhB 농도(5, 50, 95, 140, 185, 230 mg/L)가 RhB와 RhB의 COD 제거에 미치는 영향을 나타내

었다. 초기 RhB 농도가 95 mg/L까지 98.3%의 제거효율을 나타내었다. 초기 RhB 농도가 140 mg/L 이상에서는 RhB 처리효율이 감소하였으나 230 mg/L에서도 93.4%의 색도 제거율을 나타내어 실험범위 내에서 모두 90% 이상의 색도 제거율을 나타내었다. COD는 RhB 초기 농도가 5 mg/L일 때의 색도 제거율 98.6%에서 RhB 농도가 증가함에 따라 직선적으로 감소하는 경향을 나타내었으며, 230 mg/L에서는 88.9%의 COD 제거율을 나타내었다. 일정 전류밀도와 전원 공급 시간에서 RhB 제거에 참여하는 철 이온의 양이 일정하기 때문에 고농도의 RhB에서 COD 처리효율을 높이기 위해서는 전류밀도를 높이거나 전원공급 시간을 늘려 철 이온의 공급을 늘려야 하는 것으로 사료되었다.

전기응집/전기부상 공정의 성능을 다른 고급산화 공정과 비교하여 적용가능성을 평가하기 위하여 RhB 제거에 대한 각 공정의 성능과 적용 전력을 비교하여 보았다.

박 등³²⁾은 8 W의 UV 램프와 분말 광촉매를 이용한 광촉매 반응에서 9.6 mg/L의 RhB 제거에 3시간이 소요되었다고 보고하였고, 김 등³³⁾은 Ru-Sn-Sb/Ti 전극을 이용한 전기분해 반응에서 RhB 63 mg/L 탈색에 11.2 W의 전력이 9분이 필요하지만 95% 이상의 COD 제거에는 7시간이 소요된다고 보고하였다. 박³⁴⁾은 15 mg/L의 RhB 제거를 위해 고급산화 공정(photo-Fenton, UV/TiO₂/H₂O₂, Fenton, UV/H₂O₂, UV/TiO₂) 비교 연구에서 가장 높은 RhB 색도 제거율과 COD 제거율을 얻은 공정인 photo-Fenton 공정(30 W의 UV 램프와 5 mM의 H₂O₂, 0.05 mM의 Fe²⁺ 사용)을 이용하여 처리한 결과 95% 이상의 RhB 제거에는 5분이 소요되지만, 95% 이상의 COD 제거에는 대략 60분이 소요된다고 보고하였다. 본 연구결과와 다른 연구자들의 결과를 비교해보면 전기분해와 photo-Fenton 반응 등 일부 고급산화 공정에서의 RhB 색도 제거율은 전기응집 공정과 비슷하게 10분 내의 시간에 RhB가 제거되는 것으로 나타났지만 COD 제거율을 비교해보면 다른 공정의 경우 95% 이상의 COD 제거율

Table 2. Comparison of electric energy consumption for RhB and COD of RhB removal between this and other researcher's study

Process	Initial RhB conc. (mg/L)	Electric energy consumption for RhB removal (kWh/kg dye)	Electric energy consumption for COD of RhB removal (kWh/kg dye)
This research	230	10.3	10.8
Photocatalysis ³²⁾	5	2500	over 3000
Electrolysis ³³⁾	63	26.7	1309.9
Photo-Fenton ³⁴⁾	15	166.7	2000

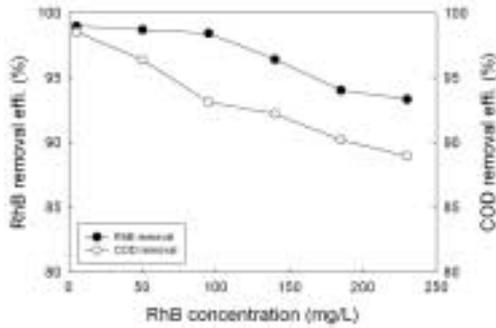


Fig. 6. Effect of initial RhB concentration on the removal efficiency of RhB(dye conc., 50 mg/L; electrode, Fe; current density, 1630 A/m²; NaCl conc., 4 g/L).

을 얻기 위해서는 시간이 많이 소요되어 에너지 소모율이 높은 것으로 나타났다.

정확한 비교를 위해 본 연구와 다른 공정에서의 RhB 제거와 COD 제거에 대한 에너지 소모량을 Table 2에 나타내었다.

RhB 제거의 경우 전기응집 공정과 전기분해 공정의 에너지 소비량이 가장 낮고 광촉매 공정의 에너지 소비량이 가장 높은 것으로 나타났다. COD의 경우는 다른 공정에서의 에너지 소비량이 매우 높은 것으로 나타났다.

이와 같은 결과는 다른 공정의 경우 RhB의 발색단이 먼저 분해 되어 수중에서 중간생성물을 생성한 후 최종적으로 분해되기 때문에 시간이 많이 소요되지만 전기응집 공정의 경우 전극에서 분해된 철 이온이 RhB와 응집된 후 전극에서 발생하는 기포에 의해 부상되고 수중에 존재하는 소량의 RhB가 분해 되기 때문에 다른 고급산화 공정과 COD 제거율 차이가 나는 것으로 사료되었다.³⁵⁾

그러나 전기응집은 적은 에너지 비용으로 유기물의 완전처리가 가능하지만 본 연구에서 1 L 처리시 실험조건에 따라 0.1~0.2 g/L의 철 슬러지가 발생하고 광촉매 공정은 광촉매 비용, UV 램프비용을 고려해야 하고, 전기분해 공정은 전극 교체비용, 광-펜톤은 UV 램프 교체비용, 시약비 등이 발생하기 때문에 공정의 최종 선택은 처리효율, 에너지 비용, 슬러지 처리 및 교체비용 등을 종합해서 판단해야 된다고 사료되었다.

4. 결론

본 연구는 염료인 Rhodamine B (RhB)를 이용하여 전기응집-전기부상 공정에서 전극 재질에 따른 제거효율, 전원공

급 시간, 전류밀도, 초기 NaCl 농도, pH, 및 RhB 농도의 변화에 따른 실험을 수행하여 최적 인자를 도출하였고 다른 공정과의 성능 비교를 통하여 적용가능성을 평가하여 다음의 결과를 얻었다.

- 1) 철 전극의 RhB 색도 제거율이 알루미늄 전극보다 높아 철 전극을 전기응집 공정에 사용하였다. 최적 전원공급 시간은 10분, 부상시간은 5분으로 나타났다.
- 2) 전류밀도 변화에 따른 RhB 색도 제거율을 고찰한 결과 RhB 색도 제거율, 온도 및 pH 상승 등을 고려하여 최적 전류밀도를 1630 A/m²로 결정하였다.
- 3) 전기전도도는 NaCl 첨가량 증가에 따라 직선적으로 증가하였으며, NaCl 첨가에 따라 전압이 낮아졌으나 NaCl 첨가량이 증가하면서 전압 감소량은 조금씩 줄어드는 경향을 나타내었다. 전기전도도, 전압 강하, 처리율, 시약비용 등의 측면에서 4 g/L가 최적 NaCl 첨가량이라고 판단되었다.
- 4) 산성과 알칼리 영역의 pH에서 RhB 처리율이 감소하였으며, 최대 RhB 색도 제거율을 보인 pH는 응집제 생성량이 많은 중성 부근이라고 판단되었다. 230 mg/L의 높은 RhB 농도에서도 93.4%의 RhB 색도 제거율을 나타내었고, COD는 88.9%의 제거율을 나타내었다. 일정 전류밀도와 전원공급 시간에서 RhB 제거에 참여하는 철 이온의 양이 일정하기 때문에 고농도의 RhB에서 COD 처리효율을 높이기 위해서는 전류밀도를 높이거나 전원공급 시간을 늘려 철 이온의 공급을 늘려야 하는 것으로 사료되었다.

다른 고급 산화공정과 처리성능과 에너지 소비를 비교해본 결과 RhB 제거의 경우 전기응집 공정과 전기분해 공정의 에너지 소비량이 가장 낮은 것으로 나타났으나 최종적인 경제성은 전극, UV 램프, 광촉매 비용, 슬러지 처리 비용 및 시약비 등을 종합적으로 고려해서 판단하여야 할 것으로 사료되었다.

KSEE

참고문헌

1. 한무영, 송재민, 박상철, "정수처리에서 전기응집과 화학응집의 처리효율 비교," 상하수도학회지, **18**(5), 689~695 (2004).
2. 정종식, 이재복, "화학폐수 처리를 위한 전처리 공정으로서 전기응집의 경제성 분석," 상하수도학회지, **16**(4), 447~454(2002).

3. 김달중, 이광형, 권아영, 한무영, “전해부상에서의 TiO₂ 폐수 처리에 대한 최적운전조건,” 상하수도학회지, **15**(1), 34~39(2001).
4. 오미영, 김영관, “전기응집에 의한 매립지 침출수의 유기물 제거 특성,” 대한환경공학회지, **23**(1), 31~38(2001).
5. 이승민, 한인섭, “전기응집공정을 이용한 하수의 처리효율에 대한 연구,” 대한환경공학회 추계학술발표회 논문집, pp. 23~30(2003).
6. 윤창곤, “전해부상을 이용한 하수슬러지 고액분리의 최적화,” 성균관 대학교 석사학위논문, pp. 1~30(2005)
7. Hosny, A. Y., “Separating oil from oil-water emulsions by electro-flotation technique,” *Sep. Sci. Technol.*, **6**, 9~17(1996).
8. 김동석, 박영식, “전해부상공정을 이용한 TiO₂ 폐수의 처리,” 대구가톨릭대학교 자연과학 논문집, **5**(1), 93~98(2007).
9. Daneshvar, N., Ashassi-Sorkhabi, H., and Tizpar, A., “Decolorization of orange II by electrocoagulation method,” *Sep. Technol.*, **31**, 153~162(2003).
10. Gurses, A., Yalcin, M., and Dogan, C., “Electrocoagulation of some reactive dyes: a statical investigation of some electrochemical variables,” *Waste Management*, **22**, 491~499 (2002).
11. 김병호, 정병곤, 오동필, 김종대, 이정준, “병원폐수처리용 전기응집공정에서 전해질로서 응집제의 이용가능성 평가,” 대한환경공학회 춘계학술발표회 논문집, pp. 31~38(2008).
12. Raghu S., and Basha C. A., “Electrochemical treatment of Procion Black 5B using cylindrical flow reactor-a pilot plant study,” *J. Hazard. Mater.*, **B139**, 381~390(2007).
13. APH-AWWA-WPCE : Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 18th Ed., APHA, Washington D.C.(1992).
14. Ilhan, F., Kurt, U., Apaydin, O., and Gonulla, M. T., “Treatment of leachate by electrocoagulation using aluminum and iron electrodes,” *J. Hazard. Mater.*, **154**, 381~389(2008).
15. Gomes, J. A. G., Daida, P., Kesmez, M., Weir, M., Moreno, H., Parga, J. R., Irwin, G., McWhinney, H., Grady, T., Peterson, E., and Cocke, D. L., “Arsenic removal by electrocoagulation using combined Al-Fe electrode system and characterization of products,” *J. Hazard. Mater.*, **B139**, 220~231 (2007).
16. Kobya, M., Can, O. T., and Bayramolu, M., “Treatment of textile wastewater by electrocoagulation using iron and aluminium electrodes,” *J. Hazard. Mater.*, **B100**, 1630~178 (2003).
17. Arslan-Alaton, İ., Kabdaşlı, V., Vardar, B., and Tünay, O., “Electrocoagulation of simulated dyebath effluent with aluminium and stainless steel electrodes,” *J. Hazard. Mater.*, **164**, 1586~1594(2009).
18. Zongo, I., Maiga, A. H., Wétheé, J., Valentin, G., leclerc, J.-P., Paternotte, G., and Lapicque, F., “Electrocoagulation for the treatment of textile wastewater with al or Fe electrodes: Compared variations of COD levels, turbidity and absorbance,” *J. Hazard. Mater.*, In Press(2009).
19. Kobya, M., Demirbas, E., Can, O. T., and Bayramolu, M., “Treatment of levafix orange textile dye solution by electrocoagulation,” *J. Hazard. Mater.*, **B132**, 183~188(2006).
20. Bayramolu, M., Kobya, M., Can, O. T., and Sozbir, M., “Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater,” *Sep. Purification Technol.*, **37**, 117~125(2004).
21. Mollah, M. Y. A., Schennach, R., Parga, J. R., and Cocke, D. L., “Electrocoagulation(EC)- science and applications,” *Journal of Hazardous Materials*, **84**, 29~410(2001).
22. Mollah, M. Y. A., Morkovsky, P., Gomes, J. A. G. Kesmez, M., Parga, J., and Cocke, D. L., “Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation,” *J. Hazard. Mater.*, **B114**, 199~210(2004).
23. Kadbaşlı, İ., Vardar, B., Arslan-Alaton, I., and Tünay, O., “Effect of dye auxiliaries on color and COD removal from simulated reactive dyebath effluent by electrocoagulation,” *Chem. Eng. J.*, **148**, 89~96(2009).
24. 정호진, 성현석, “전기응집/산화를 이용한 축산폐수 처리에 관한 연구,” 한국수처리학회지, **16**(2), 101~108(2008).
25. Kalyani, K. S. P., Balasubramanian, N., and Srinivasakanan, C., “Decolorization and COD reduction of paper industrial effluent using electro-coagulation,” *Chem. Eng. J.*, **151**, 97~104(2009).
26. Şengil, I. A., and Özacar, M., “The decolorization of C .I. Reactive Black 5 in aqueous solution by electrocoagulation using sacrificial iron electrodes,” *J. Hazard. Mater.*, **161**, 1369~1376(2009).
27. 김동석, 박영식, “불용성 전극을 이용한 Rhodamine B의 전기 화학적 탈색,” 한국물환경학회지, **23**(3), 377~384(2007).
28. Mollah, M. Y. A., Pathsk, S. R., Patil, P. K., Vayuvegula, M., Agrawal, T. S., Gomes, J. A. G., Kesmez, M., and Cocke, D. L., “Treatment of orange II azo-dye by electrocoagulation (EC) technique in a continuous flow cell using sacrificial iron electrodes,” *J. Hazard. Mater.*, **B109**, 165~171 (2004).

29. Merzouk, B., Gourich, B., Sekki, A., Madani, K., Vial, C., and Barkaoui, M., "Studies on the decolorization of textile dye wastewater by continuous electrocoagulation process," *Chem. Eng. J.*, **149**, 207~214(2009).
30. Hu, C. Y., Lo, S. L., and Kuan, W. H., "Effects of co-existing anions on fluoride removal in electrocoagulation (EC) process using aluminum electrodes," *Water Research.*, **37**, 4513~4523 (2003).
31. Lin, S. H., and Peng, C. F. "Treatment of textile wastewater by electrochemical method," *Water Research.*, **28**(2), 277~282 (1994).
32. 박영식, 나영수, 안갑환, "UV/TiO₂ 시스템을 이용한 Rhodamine B의 색도 제거," *환경위생학회지*, **28**(5), 59~64(2002).
33. 김동석, 박영식, "산화제 생성율이 높은 촉매성 산화물 전극(DSA)의 개발에 관한 연구(2)," *한국환경과학회지*, **18**(2), 61~72(2009).
34. 박영식, "고급산화공정에 의한 안료폐수 처리: 비교 연구," *한국환경과학회지*, **15**(1) 67~75(2006).
35. 박영식, 김동석, "전해질 첨가 전기/UV 공정을 이용한 염료의 색 제거," *한국환경과학회 추계학술발표대회*, **17**(1) 368~372(2008).