

직접 산화와 간접 산화용 전극의 Dye 제거 성능 비교

김동석 · 박영식^{*†}

대구가톨릭대학교 환경과학과

^{*}대구대학교 기초교육원

Comparison of Dye Removal Performance of Direct and Indirect Oxidation Electrode

Dong-Seog Kim · Young-Seek Park^{*†}

Department of Environmental Science, Catholic University of Daegu

^{*}Faculty of Liberal Education, Daegu University

(Received 21 July 2010, Revised 26 August 2010, Accepted 1 September 2010)

Abstract

This study has carried out to evaluate the performance of direct and indirect oxidation electrode for the purpose of decolorization of Rhodamine B (RhB) in water. Four kinds of electrodes were used for comparison: Pt and JP202 (indirect oxidation electrode), Pb and boron doping diamond (BDD, direct oxidation electrode). The effect of applied current (0.5 ~ 2.5 A), electrolyte type (NaCl, KCl, HCl, Na₂SO₄ and H₂SO₄) and electrolyte concentration (0.5 ~ 2.5 g/L), solution pH (3 ~ 11) and initial RhB concentration (25 ~ 125 mg/L) were evaluated. Experimental results showed that RhB removal efficiency were increased with increase of current, NaCl dosage and decrease of the pH. However, the effect of operating parameter on the RhB removal were different with the electrode type. JP202 electrode was the best electrode from the point of view of performance and energy consumption. The order of removed RhB concentration per energy lie in: JP202>Pt>Pb>BDD.

keywords : Direct oxidation, Dye, Electrode, Electrolysis, Indirect oxidation

1. 서론

최근 O₃, Fenton 반응, H₂O₂/O₃, 습식공기산화 공정(wet air oxidation process), H₂O₂/UV, TiO₂/UV와 전기화학적 처리공정을 비롯한 고급산화공정(advanced oxidation processes, AOPs) 등이 염색폐수와 같은 난분해성 물질 처리를 위하여 많이 연구되고 있다(박영식, 2008; Villanueva-Rodriguez et al., 2009).

지금까지 연구된 고급산화 공정 중 광촉매 공정의 경우 이온들로 인한 광촉매 활성점의 막힘현상이나 분말 광촉매의 경우 회수가 문제가 된다(Rajkumar and Kim, 2006). 오존 공정은 COD 제거율이 낮고, 펜톤 공정은 철 이온에 의한 다량의 수산화물 형태의 슬러지 발생과 액상형태로 투입되는 펜톤 시약의 과다 등은 기술의 문제점으로 지적되고 있다(장윤영 등, 2000; Lücking et al., 1998). 습식 공기산화공정은 소요 동력이 많고 처리할 폐수의 부식성으로 인해 반응기의 재질 선택이 어려운 단점이 있다.

전기화학적 처리공정은 용해성 전극을 이용하여 전해과정 중 양극에서 생성되어 용해된 금속이온들이 가수분해되어 생성된 금속 수산화물에 의해 오염물질을 응집, 침전시키는 전해응집 공정과 불용성 전극을 이용하여 오염물질을

제거하는 전기 응집법(electrocoagulation), 전기 부상법(electroflotation), 전기 산화법(electrooxidation)등으로 나눌 수 있다(김동석과 박영식, 2009a; Chen, 2004).

불용성 전극은 전극의 수명이 길어 수용액에서 염소나 산소를 생산하기 위한 목적으로 많은 관심을 받고 있으며, 전극 표면에서 전자의 이동에 의해 오염물이 파괴되는 직접 분해와 하이드록실라디칼(OH·)과 하이드로퍼 옥시칼(HOO·)과 같은 라디칼 과산화수소 이산화염소(ClO₂), 유리 염소(free Cl), 과산화소 오존(O₃) 및 과산화수소(H₂O₂) 등의 생성 산화물질에 의한 간접 분해에 의해 난분해성 유기물 자체를 이산화탄소와 물로 변화시킬 수 있는 것으로 알려져 최근 폐수 처리 분야에서 많은 관심을 불러일으키고 있다(김광욱 등, 2002a; 김동석과 박영식, 2007; Comminellis, 1994).

불용성 전극을 이용한 전기 산화법 처리의 효율은 전극 물질을 포함한 여러 가지 인자에 의해 영향을 받는다. 전극의 산화성능을 높이기 위하여 여러 가지 전극 물질이 개발되었다. 모든 불용성 전극에서 직접 산화와 간접 산화 두 가지 공정이 동시에 오염물질을 산화하지만 직접 산화 비율이 높은 직접 산화 전극과 염소계, 산소계 산화제 생성율이 높은 간접 산화용 전극으로 구별한다(김광욱 등, 2002b; Panizza et al., 2007; Szyrkowitz et al., 2001).

많은 연구자들이 다양한 성분을 가지는 전극으로 난분해성 물질 처리에 대한 연구를 진행하였으나 사용전극의 크

[†] To whom correspondence should be addressed.

ysparkk@daegu.ac.kr

기, 전력, 분해대상 물질 등이 달라 전극의 성능을 비교하기 곤란하였다.

본 연구에서는 간접 산화용 전극인 Pt 전극, JP202 전극과 직접 산화용 전극인 Pb 전극 및 BDD(boron doped diamond) 전극을 이용하여 난분해성 물질인 염료인 Rhodamine B의 분해에 미치는 전극 종류와 운전인자의 영향에 대해 고찰하여 향후 전극 선정과 개발에 적용할 수 있는 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 실험재료 및 실험방법

본 실험에 사용할 염료는 양이온성 염료인 Rhodamine B(Sigma, 95%)로 분자식은 $C_{28}H_{31}CN_2O_3$ (mol wt. 479.00)이다. Pt 전극은 정수기, 이온수기 등 전기분해 산업에서 가장 많이 사용되는 전극이고, JP202 전극은 소다 전해에 사용되고 있는 전극이며, Pb 전극은 오존 발생용 양극으로 이용되고 있으며, BDD 전극은 전극 내성에 문제가 있는 전해액 계에 사용하고 있는 전극으로 현재 산업계에서 이용되고 있는 전극을 실험 전극으로 선정하였다(동성트레이딩, 2008; 현성E&E, 2010). Pt 전극은 현성 E&E로부터 구매하였고, JP202 전극, Pb 전극 및 BDD 전극은 동성트레이딩으로부터 구매하여 사용하였다.

양극으로 사용하는 BDD 전극은 10 × 30 mm 크기의 직사각형 전극이며, 나머지 전극은 같은 표면적을 가지는 메시형 전극으로 Ti 표면에 금속을 코팅한 전극[Pt, JP202 (Ru, 25%; Ir, 25%; 기타, 50%) 및 Pb]이다.

4종류의 양극에 대해 음극은 35 × 35 mm 크기의 메시형 Pt 전극을 같이 사용하였다. 실험에 사용할 반응기는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 회분식이며 반응 부피는 1 L이다. 반응기 내에서의 교반을 위하여 에어펌프를 사용하여 1 L/min의 공기를 공급 하였으며, 직류 전원공급기(Hyunsung E&E, 50 V 20 A)를 이용하여 전극에 전원을 공급하였다.

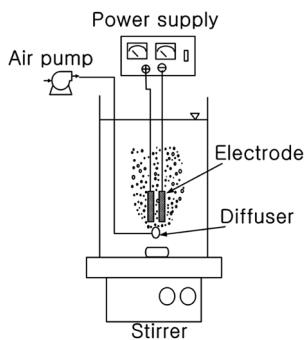


Fig. 1. Schematic diagram of electrochemical reactor system.

2.2. 분석 및 측정

RhB 농도는 UV-VIS spectrophotometer(Genesis 5, Spectronic)를 사용하여 최대 흡수파장인 554 nm에서 흡광도를 측정하여 미리 만들어진 검량선을 이용하여 농도를 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 전류의 영향

Fig. 2는 전해질인 NaCl 농도를 1 g/L로 고정한 조건에서 전류를 0.5~2.5 A로 변화시키면서 시간에 따른 RhB 농도 변화를 나타내었다. 모든 전극에서 전류의 증가에 따라 RhB 분해속도가 증가하는 것으로 나타났으나 전류 증가가 RhB 분해에 미치는 영향은 다른 것으로 나타났다.

RhB 제거율 증가가 일정하게 되는 시점의 전류를 최적 전류로 정하였다. Pt 전극의 경우 0.5 A에서는 30분의 반응시간동안 RhB 제거율이 32%에 불과하였으나 1 A로 증가되면서 RhB 분해속도가 빨라져 20분에서 대부분의 RhB가 제거 되었으며, 2 A가 최적 전류였다. JP202 전극의 경우 최적 전류는 1 A부근인 것으로 나타났고, BDD 전극의 경우 1 A이상의 전류에서는 RhB 분해속도 증가가 나타나지 않았다. 반면 Pb 전극의 경우 실험한 전류 조건에서는 최적 전류가 나타나지 않았다. 상기 성분이 다른 4 종류의 전극을 대상으로 전류의 영향을 고찰한 결과 전극의 종류에 따른 일치된 경향은 나타나지 않는 것으로 사료되었다.

Fig. 2에서 4 종류의 전극에서 전류에 따른 RhB 분해 성능은 다른 것으로 나타났다. Fig. 3(a)는 정확한 비교를 위하여 1 A를 기준으로 4 종류의 전극에서 제거된 RhB 농도를 나타내었다. RhB 제거는 JP202 > Pb > BDD ≍ Pt의 순서로 나타났다. 또한 JP202 전극은 99%이상의 RhB가 제거되는데 11분, Pb 전극은 15분, BDD와 Pt 전극은 20분이 소요되어 JP202 전극은 초기 반응속도가 4 종류의 전극 중에서 가장 빠르고 반응종결시간도 가장 적게 소요되는 것으로 나타났다.

1 A의 전류를 흘려주기 위한 전압을 전력공급기에서 모니터 한 결과 Pt 전극의 경우 14.6 V, JP202는 16.7 V, Pb는 21.2 V 및 BDD는 31.6 V로 전극에 따라 차이가 큰 것으로 나타났다. 같은 전류에서의 전극 성능 비교도 중요하지만 실제 적용에서는 전력을 고려한 조건에서의 성능 비교가 더 중요하다. 같은 전력에서의 성능 비교를 위하여 Fig. 3(b)에 99%이상의 RhB 제거에 필요한 에너지(W.h)당

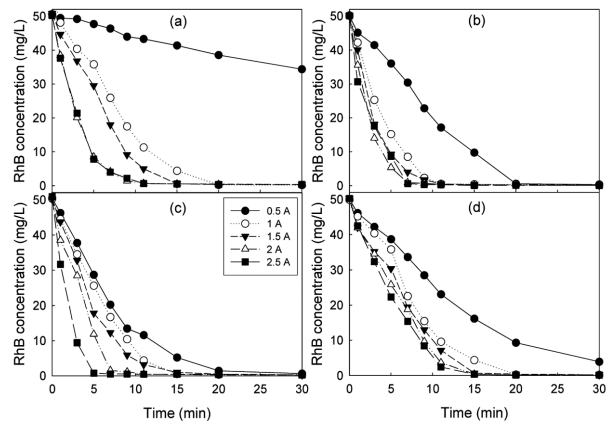


Fig. 2. Effect of current on the RhB degradation (NaCl, 1 g/L) : (a) Pt, (b) JP202, (c) Pb and (d) BDD.

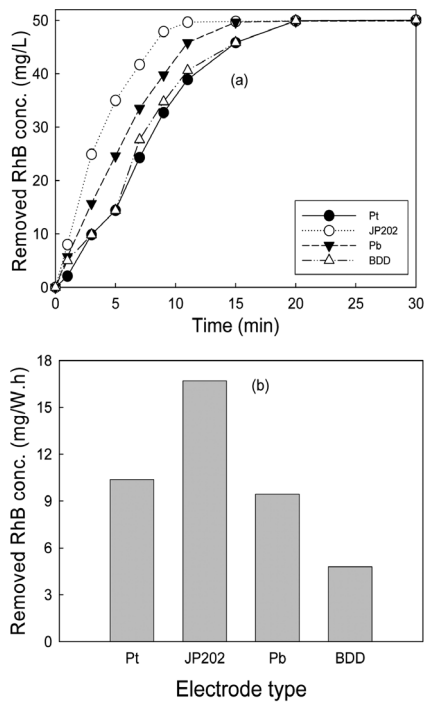


Fig. 3. Comparison of RhB removal with 1 g/L of NaCl dosage (current, 1 A): (a) removed RhB concentration with time and (b) removed RhB concentration per energy.

제거된 RhB 농도를 나타내었다. 4종류의 전극에서 에너지당 RhB 제거농도가 높은 것은 JP202 > Pt > Pb > BDD 전극의 순서로 나타났으며, 사용한 에너지당 제거되는 RhB 농도는 JP202 전극이 BDD 전극보다 3배 이상인 것으로 나타났다.

실험에 사용한 모든 전극 중에서 JP202 전극의 성능이 가장 우수한 것으로 나타났다. 전극 성분 중 Ru는 전극 활성이 좋아 Cl 방출(evolution) 전극으로 사용되지만 전극 수명이 짧은 단점이 있다. Ir은 산소 방출용 전극으로 사용되고 전극 수명이 길지만 촉매활성이 떨어지는 것으로 알려져 있다(김광욱 등, 2002a). JP202 전극은 장, 단점이 보완 관계에 있는 Ru와 Ir 성분이 혼합되어 전극의 성능이 우수한 것으로 사료되었다. 최근에는 Ru와 다른 성분을 혼합한 혼합 전극의 산화제 생성율과 유기물 분해능이 다른 성분의 전극보다 높다는 보고로 보아 전극 성분의 단점을 보완하고 성능을 높일 수 있는 복합 산화물 전극의 적용이 높아질 것으로 사료된다(김광욱 등, 2000; 김동석과 박영식, 2009b).

반면 BDD 전극은 성능이 가장 떨어지는 것으로 나타났다. 또한 BDD 전극은 가격이 다른 금속 산화물 전극에 비하여 25배 이상 비싸고 성능 대비 전력이 많이 소모되어 아직은 현장 적용하기는 이른 것으로 사료되었다.

3.2. 전해질의 영향

전기분해 반응에 첨가하기 위한 염소계 전해질로 NaCl, KCl 및 HCl, 황산계 전해질로 Na₂SO₄와 H₂SO₄를 사용하였다. NaCl 2 g/L를 수돗물에 용해시의 전기전도도와 같은 전기전도도를 가지도록 시약을 투입하여 전기전도도를 조절한

뒤 시간에 따른 RhB 농도변화를 Fig. 4에 나타내었다.

전극의 종류에 관계없이 황산계 전해질인 Na₂SO₄와 H₂SO₄를 사용한 경우의 RhB 제거가 염소계 전해질을 사용한 경우보다 제거율이 낮았으며 황산계 전해질 중 Na₂SO₄의 RhB 제거 성능이 H₂SO₄보다 낮은 것으로 나타났다. 염소계 전해질인 NaCl, KCl 및 HCl의 경우 JP202, Pb 및 BDD 전극의 RhB 분해 경향이 유사하게 나타났는데 NaCl과 KCl의 경우 NaCl의 RhB 제거가 KCl보다 약간 우수한 것으로 나타났으나 의미 있는 결과는 아닌 것으로 사료되었고, 세 종류의 염소계 전해질 중 HCl 투입시의 RhB 분해가 가장 낮은 것으로 나타났다. 반면 Pt 전극의 경우 다른 3종류의 전극과는 달리 전해질 종류에 따른 RhB 제거율이 명확한 차이를 보여주었다. Pt 전극에서 전해질 종류에 따른 RhB 제거는 NaCl > KCl > HCl > H₂SO₄ > Na₂SO₄의 순으로 나타났다. 4 종류의 전극 중 JP202 전극과 Pb 전극의 경우 황산계 전해질을 사용하였을 경우는 30분의 반응시간에서 RhB 제거율이 50%를 넘지 못하지만 염소계 전해질의 경우 반응시간이 10분 내에 종결되는 등 전해질 종류에 따라 RhB 제거가 크게 차이 나는 것으로 나타났다.

본 연구에서의 전해질 종류에 따른 유기물질 처리 경향과 다른 연구자의 경향 및 산화제 생성 경향을 비교하여 보았다. Malpass 등(2006)은 Ru_{0.3}Ti_{0.7}O₂/Ti 전극과 NaClO₄, NaOH, NaCl, H₂SO₄ 및 NaNO₃를 전해질로 이용하여 atrazine 제거에서 NaCl의 TOC 제거율이 가장 높다고 보고하였다. 김동석과 박영식(2009c)은 Ru-Sn-Sb 전극을 사용하였을 때 전극 표면에서 발생하는 염소계 산화제인 유리 염소와 이산화염소의 생성은 NaCl > KCl > HCl의 순서로 나타나고, Na₂SO₄와 H₂SO₄ 사용시 생성되는 과산화수소와 오존이 염소계 전해질보다 낮다고 보고하였다. Scialdone 등(2008)은 BDD 전극을 이용한 옥살산 제거에서 HClO₄를 이용하였을 경우의 옥살산 제거성능이 H₂SO₄보다 높았다고 보고하였다. 타 연구자의 결과와 본 결과를 비교해 볼 때 전극의 종류에 관계없이 전해질로 NaCl을 사용하는 것이 유기물의 분해성능이 우수한 것으로 나타났으며, 황산계 전해질의 경우 염소계 산화제는 발생되지 않고 산소계 산화

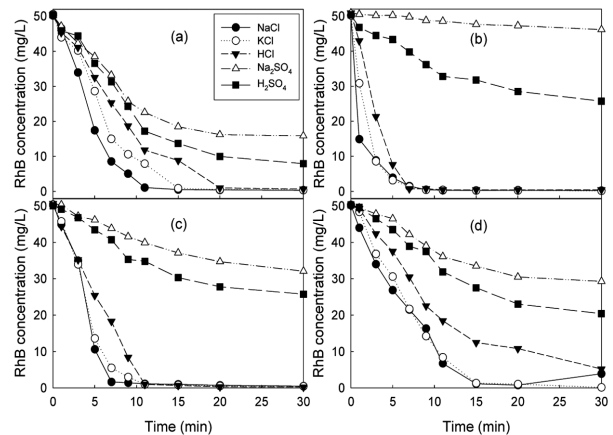


Fig. 4. Effect of electrolyte type on the RhB degradation (current, 1 A): (a) Pt, (b) JP202, (c) Pb and (d) BDD.

제인 오존과 과산화수소의 생성량이 적기 때문인 것으로 사료되었다.

3.3. NaCl 농도의 영향

RhB 분해율이 가장 높았던 전해질인 NaCl을 선정하고 전류가 1 A인 조건에서 NaCl 농도 변화에 따른 RhB 제거를 Fig. 5에 나타내었다. 실험한 모든 전극에서 NaCl 농도 증가에 따라 RhB 제거가 증가하였다.

Pt 전극의 경우 NaCl 농도 증가에 따른 RhB 제거 증가가 다른 전극보다 큰 것으로 나타났다. NaCl 농도 증가에 따라 RhB 제거가 영향을 받는 순서는 Pt > Pb > JP202 > BDD 전극의 순으로 나타났다. Pt 전극의 경우 NaCl 농도가 1.5 g/L에 이르기까지 RhB 제거 속도가 증가하였으나 1.5 g/L 이후부터는 증가속도가 감소하여 최적 NaCl 농도는 1.5 g/L 부근인 것으로 나타났다. JP202 전극과 Pb 전극의 경우 최적 NaCl 농도는 2 g/L로 나타났다. BDD 전극은 다른 전극과는 다르게 NaCl이 0.5 g/L인 경우 실험 전류인 1 A를 흘려주기 위해서는 직류전원공급기의 사양 한계를 넘는 전압이 요구되어 실험을 중단하고 1 g/L부터 실험하였다. BDD 전극의 경우 실험에 사용한 전극 중 NaCl 농도의 영향을 가장 적게 받는 것으로 나타났다. NaCl 증가에 따라 RhB 분해도 증가하지만 증가 폭은 적고 최적 NaCl 농도는 실험한 범위 내에서는 나타나지 않았다.

Fig. 6에 NaCl 투입량 증가에 따른 각 전극에서의 전력 변화를 나타내었다. 4종류의 전극 모두 NaCl 첨가량이 증가하면서 전력이 감소하는 경향을 나타내었다. Pt, JP202 및 Pb 전극에서 NaCl 첨가량 증가에 따른 전력 변화는 기울기가 비슷한 것으로 나타나 유사한 경향을 가지는 것으로 나타났다. BDD 전극의 경우 다른 전극보다 NaCl 첨가량 증가로 인한 전력 감소 효과가 가장 큰 것으로 나타났으나 가장 높은 전력이 필요한 것으로 사료되었다.

Fig. 7(a)에 대략적인 최적 NaCl 농도였던 NaCl 2 g/L 첨가를 기준으로 각 전극에서의 RhB 제거를 나타내었다. RhB 제거는 JP202 > Pb > Pt > BDD로 나타났으며, JP202와 Pb 전극의 경우 반응시간 9분에 99%이상의 RhB가 제거되었고, Pt 전극의 경우 11분, BDD 전극의 경우 15분이

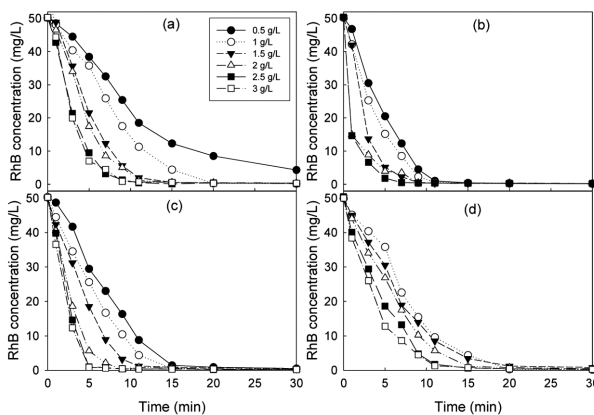


Fig. 5. Effect of NaCl dosage on the RhB degradation (current, 1 A): (a) Pt, (b) JP202, (c) Pb and (d) BDD.

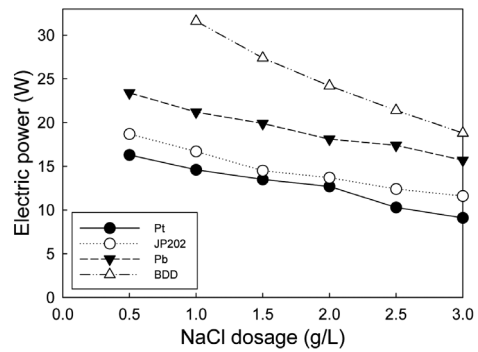


Fig. 6. Variation of electric power with NaCl dosage (Current, 1 A).

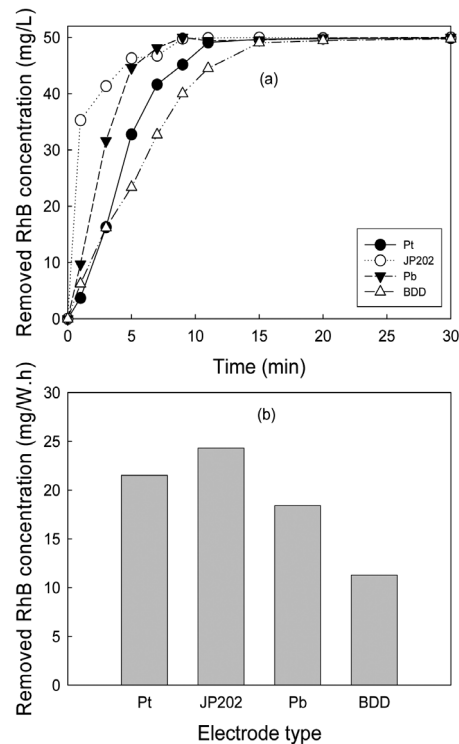


Fig. 7. Comparison of RhB removal with 2 g/L of NaCl dosage (current, 1 A): (a) removed RhB concentration with time and (b) removed RhB concentration per energy.

소요되는 것으로 나타났다. Fig. 3(a)에서 NaCl이 1 g/L 첨가시 BDD 전극의 RhB 제거농도가 Pt 전극보다 조금 높았으나 NaCl 첨가량이 2 g/L로 증가하면서 Pt 전극에서의 RhB 제거농도가 BDD 전극보다 높아진 것으로 나타났다.

Fig. 7(b)에 99%이상의 RhB 제거에 소요된 에너지당 제거된 RhB 농도(b)를 나타내었는데, JP202 > Pt > Pb > BDD의 순으로 나타났다. Pt, Pb 전극과 JP202 전극의 차이는 줄어든 것으로 나타났다.

3.4. pH의 영향

NaCl 2 g/L, 전류 1 A인 조건에서 Fig. 8에 pH 변화에 따른 각 전극에서의 RhB 제거를 나타내었다. 전극의 종류에 관계없이 pH가 감소할수록 제거 RhB 농도가 높은 것

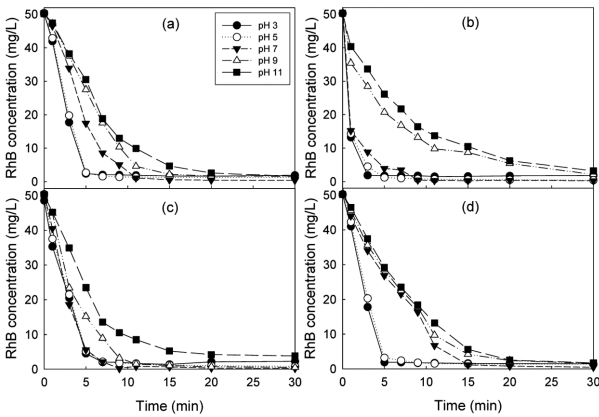


Fig. 8. Effect of pH on the RhB degradation (current, 1 A; NaCl 2 g/L): (a) Pt, (b) JP202, (c) Pb and (d) BDD.

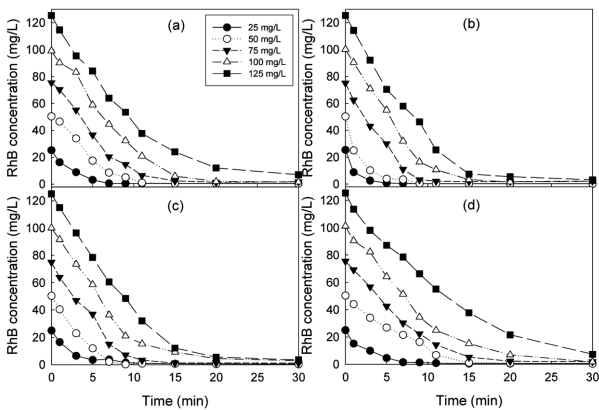


Fig. 9. Effect of initial concentration on the RhB degradation (current, 1 A; NaCl 2 g/L): (a) Pt, (b) JP202, (c) Pb and (d) BDD.

으로 나타났지만 RhB 제거에 대한 경향은 다르게 나타났다. Pt 전극은 pH 3과 5의 RhB 제거가 비슷하였고, JP202 전극은 7이하의 pH에서 RhB 제거가 비슷하지만 pH가 9로 증가하면서 초기 제거속도가 다른 전극보다 더 느려지는 것으로 나타났다. Pb 전극은 7이하의 pH에서 반응이 비슷한 것으로 나타났다. BDD 전극의 경우 7이상의 pH에서 초기 반응속도가 느려지는 것으로 나타났다. 이는 pH가 낮을수록 이산화염소와 과산화수소의 생성농도가 높다(유리 염소와 오존 생성 농도는 pH에 따라 큰 차이를 보이지 않음)고 보고한 김동석과 박영식(2009c)의 연구결과와 비교할 때 생성 산화제 농도변화 때문인 것으로 사료되었다.

4 종류의 전극 중 JP202 전극이 염기성과 산성 영역에서의 초기 반응속도가 가장 많이 차이나 pH의 영향을 가장 많이 받고, Pb 전극은 pH의 영향을 가장 적게 받는 것으로 나타났다.

pH가 염기성 영역에서 유기물질 처리율이 낮고 산성에서 높은 것은 금속 산화물 전극이나 BDD 전극에서 pH의 영향에 대해 연구한 다른 연구자들의 보고와 비슷한 결과를 나타내었지만 RhB 분해 반응에 영향을 미치는 정도가 다르게 나타나기 때문에 이에 대한 고려가 필요한 것으로 사료되었다(김동석과 박영식, 2007; Ma and Graham, 2000).

3.5. RhB 농도의 영향

초기 RhB 농도가 RhB 분해에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 NaCl 투입량 2 g/L, 전류 1 A로 고정된 조건에서 RhB 농도를 25 ~ 125 mg/L까지 증가시켜 실험하였다. 초기농도가 125 mg/L에서도 JP202 전극과 Pb 전극의 경우 30분의 반응시간에서 대부분의 RhB가 제거되었으나 Pt 전극과 BDD 전극은 시간이 더 소요되는 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 간접 산화용 전극인 Pt와 JP202 전극과 직접 산화용 전극인 Pb 전극 및 BDD 전극을 이용하여 Rhodamine B 염료의 분해에 미치는 전극과 운전인자의 영향에 대해 고찰하여 다음의 결과를 얻었다.

- 1) 전류 증가에 따라 RhB 분해속도가 증가하고 반응종결 시간이 감소하는 것으로 나타났으나 전극의 종류에 따라 일정한 경향은 없는 것으로 나타났다. 1 A의 전류를 흘려주기 위해 필요한 전압이 전극 종류에 따라 달라 성능뿐만 아니라 사용 에너지를 고려할 필요가 있었다.
- 2) 모든 전극에서 황산계 전해질(Na₂SO₄와 H₂SO₄) 사용한 경우가 염소계 전해질(NaCl, KCl, HCl)을 사용한 경우보다 RhB 제거율이 낮았으며 황산계 전해질 중 Na₂SO₄의 RhB 제거 성능이 H₂SO₄보다 낮은 것으로 나타났다.
- 3) RhB 제거에 대한 NaCl 농도의 영향은 Pt > Pb > JP202 > BDD 전극의 순으로 나타났다. 99%이상의 RhB 제거에 소요된 에너지당 제거된 RhB 농도는 JP202 > Pt > Pb > BDD의 순으로 나타났다. 모든 전극에서 pH가 낮을수록 RhB 제거가 높은 것으로 나타났다.

참고문헌

김광욱, 이일희, 김정식, 신기하(2002a). 정봉익, 김광호, 이리듬 산화물 전극의 유기물 성능 분해 개선. *화학공학*, **40**(2), pp. 146-151.

김광욱, 이일희, 김정식, 신기하, 정봉익(2002b). 고온 소결된 촉매 산화물 전극의 재료 특성 및 유기물 분해능 연구. *공업화학*, **13**(3), pp. 285-290.

김광욱, 이일희, 김정식, 최정길, 신기하, 이상훈, 김광호(2000). 3성분 혼합 Ru-Sn-Ti/Ti 산화물 전극 활성 및 전극 수명 특성(I). *화학공학*, **38**(6), pp. 774-782.

김동석, 박영식(2007). 불용성 전극을 이용한 Rhodamine B의 전기화학적 탈색. *수질보전 한국물환경학회지*, **23**(3), pp. 377-384.

김동석, 박영식(2009a). 산화제 생성율이 높은 촉매성 산화물 전극(DSA)의 개발에 관한 연구(1). *한국환경과학회지*, **18**(1), pp. 49-60.

김동석, 박영식(2009b). 산화제 생성율이 높은 촉매성 산화물 전극(DSA)의 개발에 관한 연구(2). *한국환경과학회지*, **18**(1), pp. 61-72.

김동석, 박영식(2009c). 전기화학적 공정의 운전인자에 따른 산화제 생성과 염료 분해 특성. *한국환경과학회지*, **18**(11), pp. 1235-1245.

동성트레이딩(2008). <http://www.dstweb.co.kr/>.

- 박영식(2008). 전기분해와 UV 조사에 의한 Rhodamine B의 제거(1). *한국환경보건의학회지*, **34**(6), pp. 439-445.
- 장윤영, 최상일 이철효(2000). 매립지 침출수처리를 위한 펜톤유사반응에 관한 연구. *수질보전 한국물환경학회지*, **16**(3), pp. 413-420.
- 현성E&E (2010). <http://www.hsene.com/>.
- Chen, G. (2004). Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Sep. and Puri. Tech.*, **38**, pp. 11-41.
- Comninellis, Ch. (1994). Electrolysis in the electrochemical conversion/combustion of organic pollutants for waste water treatment. *Electrochimica. Acta*, **39**, pp. 1857-1862.
- Lücking, F., Köser, H., Jank, M., and Ritter, A. (1998). Iron powder, graphite and activated carbon as catalysts for the oxidation of 4-chlorophenol with hydrogen peroxide in aqueous solution. *Wat. Res.*, **32**(9), pp. 2607-2614.
- Ma, J. and Graham, J. D. (2000). Degradation of atrazine by manganese- catalyzed ozonation- influence of radical scavengers. *Wat. Res.*, **34**(15), pp. 3822-3828.
- Malpass, G. R. P., Miwa, D. W., Machado, S. A. S., Olivi, P., and Motheo, A. J. (2006). Oxidation of the pesticide atrazine at DSA[®] electrodes. *J. of Hazard. Mater.*, **B137**, pp. 565-572.
- Panizza, M., Barbucci, A., Ricotti, R., and Cerisola, G. (2007). Electrochemical degradation of methylene blue, *Sep. and Puri. Tech.*, **54**, pp. 382-387.
- Rajkumar, D. and Kim, J. G. (2006). Oxidation of various reactive dyes with in situ electro-generated active chlorine for textile dyeing industry wastewater treatment. *J. of Hazard. Mater.*, **B136**, pp. 203-212.
- Scialdone, O., Galia, A., Guarisco, C., Randazzo, S., and Filardo, G. (2008). Electrochemical incineration of oxalic acid at boron doped diamond anodes: role of operative parameters. *Electrochimica Acta*, **53**, pp. 2095-2108.
- Szyrkowitz, L., Juzzolino, C., and Kaul, S. N. (2001). A comparative study on oxidation of disperse dyes by electrochemical process, ozone, hypochlorite and Fenton reagent. *Wat. Res.*, **35**(9), pp. 2129-2136.
- Villanueva-Rodríguez, M., Hernández-Ramírez, A., Peralta-Hernández, J. M., Bandala, E. R., and Quiroz-Alfaro, M. A. (2009). Enhancing the electrochemical oxidation of acid-yellow 26 azo dye using boron-doped diamond electrodes by addition of ferrous ion. *J. of Hazard. Mater.*, **167**(1/3), pp. 1226-1230.