

전기분해와 UV 조사에 의한 수중의 Rhodamine B의 제거(I)

박영식[†]

대구대학교 보건환경전공
(2008. 10. 13. 접수/2008. 11. 5. 수정/2008. 12. 10. 채택)

Removal of Rhodamine B in Water by Ultraviolet Radiation Combined with Electrolysis(I)

Young-Seek Park[†]

Department of Health & Environment, Daegu University
(Received October 13, 2008/Revised November 5, 2008/Accepted December 10, 2008)

ABSTRACT

The feasibility study for the application of the removal and mineralization of Rhodamine B (RhB) was performed in a batch electrochemical reactor. The electro/UV process was consisted of DSA (dimensionally stable anode) electrode and UV-C or ozone lamp. The experimental results showed that RhB removal by the ozone lamp was higher than that of the UV-C lamp. Optimum current of the electro/UV process was 1 A. The electrochemical, UV and electro/UV process could completely degrade RhB, while a prolonged treatment was necessary to reach a high level RhB mineralization. It was observed that RhB removal in electro/UV process is similar to the sum of the UV and electrolytic decolorization. However, it was found that the COD of RhB could be degraded more efficiently by the electro/UV process (90.2 %) than the sum of the two individual oxidation processes [UV (19.7%) and electrolytic process (50.8%)]. A synergetic effect was demonstrated between the UV and electrolysis.

Keywords : electrolysis, electro/UV process, dye, COD, color, synergetic effect

I. 서 론

전 세계적인 염료와 안료의 생산량은 1년에 750,000~800,000톤에 달하며, 약 12%의 염료와 안료가 생산과정의 여러 단계에서 손실되는 것으로 알려져 있다.¹⁾ 염색폐수는 잔류 염료가 수중에 mg// 단위로 존재하여도 색도가 높아 미처리된 것과 같은 시각 효과를 나타내는 특징이 있다. 염색폐수와 같이 색깔을 띠는 폐수가 수계 환경에 방출되면 확산성이 매우 크고 높은 색도로 인해 태양광을 흡수하여 광합성을 방해하며, 수계 미생물의 자정활동을 방해하여 수계의 오염도를 가중시킬 우려가 있다 또한 일부 염료는 발암성 물질이거나 돌연변이 유발요인이 되기도 한다.²⁾

염색폐수를 처리하는 가장 일반적인 방법은 생물학적 처리, 화학적 처리(O₃나 Cl₂) 또는 물리적 처리(흡착,

여과 등)이다. 그러나 그런 방법들은 다량의 고품 폐기물이 생성되거나 그 자체로 해로운 산화제를 사용하거나 다량의 부지가 필요한 단점이 있다. Robinson 등³⁾은 산업계에서 현재 이용되고 있는 염색폐수 처리법에 대하여 조사해본 결과 물리, 화학적 처리법은 처리유량이 소량이고 비용이 제한인자(limiting factor)인 경우만 효율적이며, 생물학적 처리에서 연속 공정에서 염료 처리시 미생물의 활성도가 떨어진다고 보고하였다.

최근에는 기존 공정들의 문제점들을 해결하기 위하여 전기분해법, 오존산화법, 펜톤산화법, E-beam(전자빔), 광촉매 공정(UV/TiO₂) 등과 같은 고도산화법(AOPs, advanced oxidation processes)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.^{4,5)} 고도산화법은 상대적으로 비선택적이며 순간적으로 빠르게 반응하는 OH 라디칼을 생성시켜 유기물질을 분해하는 방법으로, 화학적 방법으로 H₂O₂/Fe²⁺(펜톤시약)과 H₂O₂/O₃, 광화학적 방법으로 H₂O₂/UV, O₃/UV, H₂O₂/Fe³⁺/UV, 광촉매적 방법으로 TiO₂/UV, TiO₂/UV/O₃와 Fe²⁺/UV/O₃를 포함하는 기술들에 의해 생성될 수 있다.⁶⁻⁸⁾

[†]Corresponding author : Department of Health & Environment, Daegu University
Tel: 82-53-650-8043, Fax: 82-53-650-8049
E-mail : ysparkk@daegu.ac.kr

최근에는 고도산화법 중 자동화가 용이하고, 처리효율이 높으며 환경적 적합성이 우수하여 수중에서 유기오염물질의 전기화학적 분해법에 대한 관심이 증가되고 있다. 전기화학적 분해법인 전기분해법은 사용하는 모든 전극에서 유기물이 분해 되는 직접 양극 산화와 발생하는 산화제에 의한 간접 산화 2가지 산화 경로에 의해 유기물이 분해 되는데 주요 분해 메커니즘에 따라 OH 라디칼이 많이 생성되는 직접 양극 산화용 전극과 free Cl, ClO₂, H₂O₂ 및 O₃ 등의 산화제가 많이 발생하는 간접 산화용 전극으로 나눌 수 있다.⁹⁾

직접 양극 산화는 PbO₂ 전극, 붕소-도핑 다이아몬드(BDD, boron doped diamond) 전극 등을 이용하여 Amaranth, Indigo carmine, Orange 2 등과 같은 여러 가지 염료의 분해에 사용되어 왔는데, PbO₂ 전극은 유기물 산화성능은 우수하지만 전극으로부터 Pb가 침출(leaching)될 우려가 있으므로 환경적 우려와 함께 실용성이 떨어지며, BDD 전극과 같은 비 금속성 전극은 높은 산소 방출 과전압(high oxygen overvoltage)을 가지고 있어 다른 전극에 비해 OH 라디칼이 많이 생성되어 OH 라디칼 생성에 의한 직접 산화용 전극으로 사용되고 있지만 전극 가격이 비싸고 제조공정이 복잡하여 실용화가 잘 이루어지지 않고 있다.¹⁰⁾

반면 직접 산화에 의해 발생하는 OH 라디칼 발생량은 적은 대신 전극 표면에서 전기분해시 발생하는 산소와 수소 등에 의해 생성되는 H₂O₂, O₃ 등의 산화제와 전해질로 첨가하는 NaCl 등에 의해 생성되는 ClO₂, free Cl 등의 염소계 산화제 등에 의해 처리하는 DSA(dimensionally stable anode) 전극을 이용하는 간접 산화법이 수처리에서 많이 이용되고 있는데, 주로 Ir, Ru 등을 산화시킨 금속산화물 전극이 간접 산화에 주로 이용되는 것으로 알려져 있다.¹¹⁾

본 연구진들은 간접 산화용 DSA 전극인 Ru-Sn-Sb/Ti 전극에서 발생하는 H₂O₂, O₃ 등의 산화제가 직접 유기물 산화에 이용되는 것보다 UV를 조사하여 H₂O₂/UV, O₃/UV 공정에서 발생하는 OH 라디칼을 이용하는 것이 전기화학 공정의 성능을 높일 수 있다고 판단하여 DSA 전극을 이용한 전기분해 공정과 UV 단일 공정과 전기/UV 복합 공정에서 난분해성 염료인 Rhodamine B의 색도와 COD 처리를 비교하여 전기/UV 복합 공정의 적용가능성을 평가하고자 하였다.

II. 연구방법

1. 실험 재료 및 실험 방법

분해대상 물질은 양이온성 염료인 Rhodamine

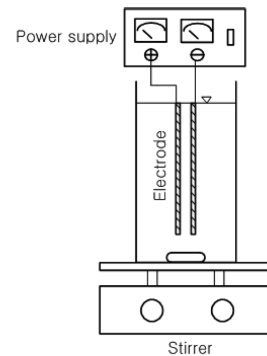


Fig. 1. Schematic diagram of electrochemical reactor.

B(RhB)를 사용하였다. 실험에 사용한 반응기는 회분식으로 제작하였으며 양극과 음극으로는 63×115 mm 크기의 메쉬형 Ru-Sn-Ti/Ti 전극을 사용하였다. 반응기의 부피는 1 l이며, 반응기 내에서의 교반을 위하여 에어펌프를 사용하여 2 l/min의 공기를 주입하였다(Fig. 1). Ru-Sn-Sb/Ti 전극은 전극 재료의 몰 비와 용매는 Chen 등¹²⁾의 방법을 사용하고, 건조 및 소성은 Li 등¹³⁾의 방법을 기준으로 제조하였다. RuCl₃ hydrate 2 g을 기준으로 SnCl₄·5H₂O와 Sb₂O₃를 몰비로 10:80:10으로 비율을 맞춘 후 채 후 농염산(35%) 용액과 2-propanol을 1:1로 혼합한 용액 100 ml에 넣고 혼합하였다. 붓으로 코팅액을 Ti 메쉬에 도포한 후 80°C로 유지되는 건조기에서 30분 동안 건조시키고, 450°C로 유지되는 전기로에서 5분 동안 소성시킨 뒤 상온으로 냉각시켰다. 이 과정을 20회 반복하고 최종적으로 450°C로 유지되는 전기로에서 1시간동안 소성시켜 전극을 제조하였다. UV 램프는 10 W의 UV-C 램프(중심파장, 254 nm)와 10 W 오존 램프(254 nm의 오존 발생 파장인 185 nm의 파장도 발생)를 실험조건에 따라 1-3개 사용하였고 직류 전원공급기(Hyunsung E&E, 50 V 20 A)를 이용하여 전극에 전원을 공급하였다. 실험에 사용한 오존 등은 UV-A, B, C 및 가시광선 영역의 파장이 발생하고 있으며, 오존을 발생시키는 185 nm 파장도 254 nm의 파장(100%)에 대해 17~18% 정도의 출력을 나타내고 있고 공기 중에서 3 g/h의 오존을 생성시키는 것으로 알려져 있다.¹⁴⁾

2. 분석 및 측정

RhB의 농도는 UV-VIS spectrophotometer(Genesis 5, Spectronic)를 사용하여 RhB의 최대 흡수파장인 554 nm를 측정하여 검량선을 사용하여 농도로 나타내었다. COD 분석은 Standard methods¹⁵⁾에 준하여 수행하였다.

III. 결과 및 고찰

1. UV공정에서 램프 종류와 전력에 따른 RhB 분해
 기존 광촉매 공정이나 H₂O₂/UV, O₃/UV 공정에서 많이 사용하는 UV-C 램프와 오존 램프 중 전기/UV 공정에 적합한 UV 램프를 선정하기 위하여 같은 전력을 소비하는 10 W 램프 3개를 장착하여 시간에 따른 RhB 농도변화를 Fig. 2에 나타내었다.

그림에서 보듯이 UV-C 램프에 의한 RhB 분해는 20분 경과 후 18.3%, 오존 램프는 90.8%로 나타났다. 이와 같은 결과는 색도 제거에 효과적인 것으로 알려진 오존 램프에서 발생하는 오존이 일반적으로 사용하고 있는 UV-C 램프보다 RhB의 색도 제거에 더 큰 효과를 나타내는 것으로 사료되었다.¹⁶⁾

이와 같은 결과는 광촉매 공정에서 오존 램프/TiO₂ 공정의 초기 반응속도 상수가 UV-C/TiO₂ 공정보다

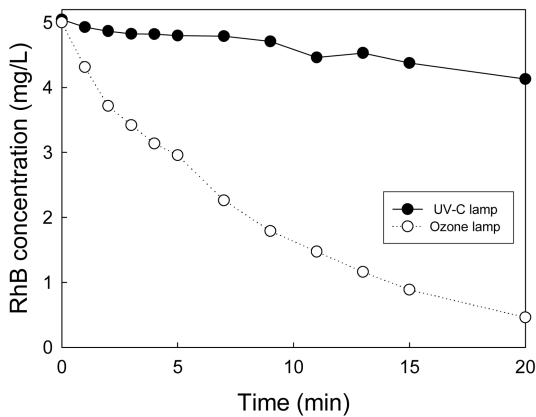


Fig. 2. Effect of UV lamp type on RhB concentration (lamp power 30 W; air supply, 2 l/min).

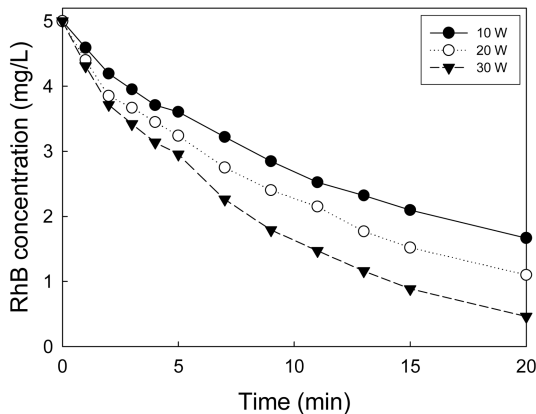


Fig. 3. Effect of ozone lamp power on RhB concentration (air supply, 2 l/min).

1.34배 빠른 것으로 나타났다고 보고한 안 등¹⁷⁾의 결과와 비슷한 것으로 나타났다. 향후 전기/UV 공정은 같은 램프 가격과 출력을 가지면서 처리성능이 우수한 오존 램프를 이용하여 실험하였다.

Fig. 3에 오존 램프 전력에 따른 RhB 분해를 나타내었다. 전력이 10 W에서 30 W로 증가할 때 20분의 반응시간에서 각 전력당 RhB 제거율은 각각 66.6%, 78.0% 및 90.7%로 나타나 램프 전력 증가에 따라 RhB 제거율이 선형적으로 증가하는 경향을 보였으며, 30 W의 RhB 분해율이 가장 높아 향후 실험은 30 W에서 행하였다.

2. 전기분해 공정과 전기/UV 공정의 비교

전기분해 공정과 전기/UV 공정에서 전류 변화에 따른 RhB 농도 변화를 Fig. 4(a)와 (b)에 나타내었다. 전기분해 공정에서 0.5 A까지 시간에 따라 RhB가 직선적으로 감소하는 경향으로 보였으나 0.75 A 이상의 전류에서는 초기반응속도가 증가하여 반응 10분까지의 빠른 분해와 그 이후의 느린 분해의 2단계로 분해 되

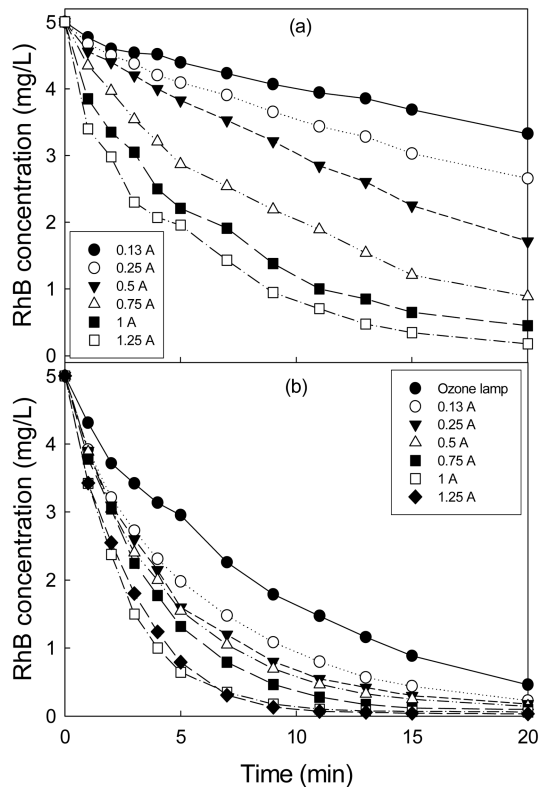


Fig. 4. Effect of current on RhB concentration in electrolysis (a) and electro/UV (b) process (lamp power 30 W; air supply, 2 l/min).

는 경향을 나타내었다. 1.25 A의 적용 전류까지 최적 전류는 관찰되지 않았으며 전기분해만으로 처리시 완전 RhB 처리를 위해서는 1.25 A이상의 전류가 필요한 것으로 나타났다. Fig. 4(b)의 전기/UV 공정에서는 30 W의 오존 램프에 0.13 A(평균 적용 전압, 4.2 V)의 낮은 전류를 적용할 경우에도 오존 램프만 적용한 UV 반응에 비해 RhB 초기 반응속도가 증가하였을 뿐만 아니라 최종 농도도 감소하는 것으로 나타났다. 전류가 1 A까지 증가될 때 초기 반응속도가 증가하였으며, 1.25 A에서는 1 A와 비슷한 분해 경향을 나타내어 최적 전류는 1 A인 것으로 사료되었다. 이는 UV 램프를 사용하지 않는 일반적인 전기분해 공정에서 최적 전류밀도가 나타난다고 보고한 김 등¹⁸⁾의 보고와 같이 전기/UV 공정에서도 최적 전류가 나타난다고 판단되었다.

복합 공정(AB)의 유기물 제거율이 단일 공정의 제거율 합보다 클 경우(즉, $AB > A + B$) 시너지 효과가 나타난다고 알려져 있다.¹⁹⁾ 전기/UV 공정에서 최적 전류량인 1 A를 기준으로 전기분해(1 A)와 UV(30 W)의 단일 공정에서 RhB 제거량을 구하여 전기/UV 공정의 RhB 제거량을 비교하여 Fig. 5에 나타내었다(전기분해와 UV의 단일 공정의 RhB 분해 농도 합이 초기 농도인 5 mg/l보다 높은 경우는 5 mg/l로 표현하였다.).

그림에서 보듯이 단일 공정의 RhB 분해농도와 복합 공정의 분해는 5분 까지는 같았으나 5분 이후부터는 단일 공정의 합이 높은 것으로 나타나 단일 공정의 결합으로 인한 시너지 효과는 관찰되지 않았다. 이는 전기분해 공정과 UV 공정 단일 공정 자체의 RhB 색도 처리율이 높기 때문에 복합 공정의 시너지 효과가 없는 것으로 사료되었다.

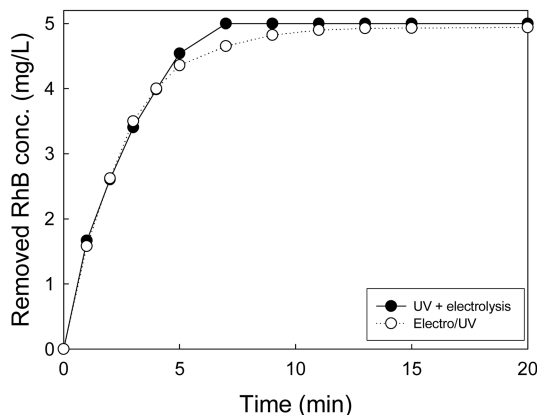


Fig. 5. Comparison of removed RhB concentration between UV+electrolysis and electro/UV (lamp power 30 W; air supply, 2 l/min; current, 1 A).

3. COD 분해율

전기분해 공정에 UV 공정을 첨가한 전기/UV 공정을 이용한 RhB 처리에서는 예상과는 다르게 복합 공정으로 인한 시너지 효과가 나타나지 않았다. 일반적으로 염료는 발색단이 제거되면 색도를 나타내지 않지만 발색단이 깨어진 중간분해 산물이 완전 무기질화까지는 시간이 더 많이 소요되는 것으로 알려져 있다.²⁰⁾ Fig. 6(a)에 전기분해 공정, UV 공정 및 전기/UV 공정에서의 RhB의 COD 농도변화를 나타내었다. 90분의 반응 시간 후 UV 공정에 의한 COD 제거는 19.7%로 RhB 제거에 비해 낮은 것으로 나타났으며, 전기분해 공정에 의한 COD 제거도 90분 후 50.8%의 제거율을 나타내어 RhB 제거율에 비해 두 단일 공정 모두 낮은 COD 제거를 보였다. 이는 염색폐수의 후처리 공정에서 오존과 UV 후처리 공정의 COD 제거율이 낮았다고 보고한 박 등¹⁶⁾의 결과와 같았으며, 두 단일 공정에서 COD의 완전 제거를 위해서는 더 긴 시간이 필요한 것으로 나타났다.

반면 전기/UV 공정에서는 반응시간에 따라 COD가 선형적으로 감소하였으며, 90분 후 90.3%의 COD가

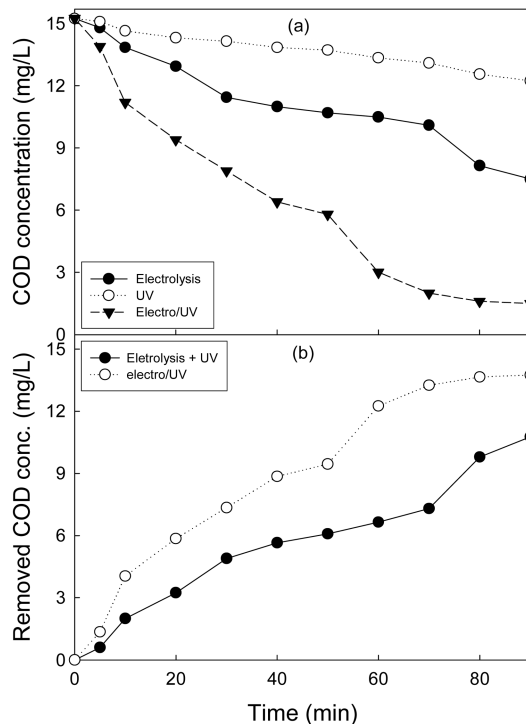


Fig. 6. Comparison of single and UV/electrolysis process for the COD concentration (a) and removed COD (b). (lamp power 30 W; air supply, 2 l/min; current, 1 A).

제거되어 단일 공정보다 높은 COD 제거율을 나타내었다. Fig. 6(b)에 전기분해와 UV 단일 공정의 COD 제거 합과 전기/UV 복합 공정의 COD 제거를 나타내었다. 90분의 반응시간 후 복합 공정에서의 COD 제거(90.2%)가 단일 공정의 COD 제거 합(70.5%)보다 높은 것으로 나타나 RhB 제거와는 다르게 시너지 효과가 나타나는 것으로 사료되었다.

RhB의 시간에 따른 흡광도 변화를 고찰한 결과 RhB의 광촉매 분해에서 RhB의 최대 흡수 파장인 554 nm 부근의 파장은 시간이 지나면서 점차 감소되었으며 새로운 peak가 나타나지 않았다(data not shown). RhB의 광촉매 분해에서 반응시간에 따라 RhB peak가 감소하고 새로운 peak가 나타나지 않은 것은 RhB의 색도제거가 변색작용(discoloration)이 아니라 발색단(chromophore)의 파괴에 의한 것이며, 색도 감소 이후 TOC 감소에는 더 큰 에너지와 시간이 필요하다고 보고한 박 등²¹⁾의 보고와 비교할 때 RhB 제거에 있어 RhB의 경우 빠른 시간 내에 발색단이 파괴되어 색도가 빨리 제거되지만 발색단만 파괴된 분해 중간 생성물질이 분해 되어 CO₂와 H₂O로 완전 분해 되는 데는 시간이 더 소요되기 때문인 것으로 사료되었다.²²⁾

이와 같은 결과는 Ru-Sn-Sb/Ti 전극을 이용한 전기분해 반응(초기 RhB 농도, 63 mg/l; 전류 2 A; NaCl conc., 1 g/l)에서 RhB는 9분 내에 제거되었지만 COD는 7시간 후 95.9%가 제거되었다고 보고한 박 등²³⁾의 연구결과와 비교할 때 전기분해 반응을 이용한 염료 제거에서 비교적 제거하기 쉬운 염료의 발색단은 빠른 시간 내에 제거되지만 COD 제거에는 전기분해 반응만으로는 더 많은 에너지를 소요하여야 한다고 사료되었다. Grimaud 등²⁴⁾은 염색폐수 처리에 있어 생물학적 처리는 유기물 처리율은 우수하지만 색도 처리율은 낮고, 전기분해 처리는 색도 처리율은 높지만 유기물 처리율이 낮아 에너지 비용이 많이 소요되기 때문에 전기분해 처리는 생물학적 처리공정의 전처리 공정으로서 색도만 처리하고 유기물은 후처리 공정의 생물학적 처리공정에서 처리하는 것이 색도와 유기물을 경제적으로 처리할 수 있는 방법이라고 보고한 결과와 본 연구에서의 전기분해 결과와 일치하는 것으로 나타났다.

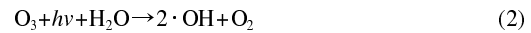
본 연구에서 사용한 DSA 전극인 Ru-Sn-Ti/Ti 전극은 OH 라디칼은 거의 발생하지 않는 것으로 알려져 있으며 H₂O₂와 O₃과 같은 산화제가 발생하며,²⁵⁾ 오존 램프도 오존이 발생한다. 따라서 본 실험 공정 중에서 OH 라디칼이 발생할 수 있는 경로는 O₃/H₂O₂, UV/O₃ 및 UV/H₂O₂ 공정이다.

O₃/H₂O₂ 공정에서 OH 라디칼은 오존과 과산화수소

사이의 상호작용 때문에 라디칼-연쇄 메커니즘(radical-chain mechanism)에 의해 생성된다.^{25,26)}



UV/O₃ 공정에서는



UV/H₂O₂ 공정에서는



전기/UV 공정에서는 전기분해 반응과 UV에 의한 유기물의 분해 작용의 전극과 오존 램프에서 발생하는 과산화수소와 오존이 식 (1)-(3)과 같은 작용에 의하여 발생하는 OH 라디칼이 RhB 분해에 참여하기 때문에 전기분해 공정과 UV 단일 공정보다 전기/UV 공정에서 Fig. 6의 결과와 같이 COD 제거율이 높고 시너지 효과가 나타나는 것으로 사료되었다.

(1)-(3)의 OH 라디칼 발생 공정 중 (1) 공정은 전기분해에 의해 발생하는 H₂O₂와 2O₃에 의해 UV가 없는 전기분해 공정에서도 발생할 수 있는 공정이며 (2)와 (3) 공정이 전기/UV 만의 복합 공정에서 OH 라디칼이 발생할 수 있는 공정이다. DSA 전극에서 발생하는 H₂O₂와 O₃ 농도는 적용 전류와 전해질 농도에 따라 다르지만 H₂O₂가 O₃ 농도의 10-50배에 달하는 것으로 보고되고 있어²⁷⁾ UV-C 램프를 이용하는 전기/UV 공정에서 OH 라디칼 생성의 주요 기작은 반응 (3)이지만 본 연구에 적용한 오존 램프를 이용한 전기/UV 공정에서는 오존 램프에서 오존이 발생하기 때문에 (1)과 (2) 반응에 의한 어느 정도 기여할 것이라고 사료되었다. 그러나 정확한 사실은 전기분해 과정 및 오존 램프에서의 과산화수소, 오존 및 OH 라디칼 농도 및 전기/UV 공정에서의 세 가지 산화제 농도를 측정하여 비교하여야 정확한 메커니즘을 알 수 있다고 판단되었으며, 향후 실험에서 이를 규명할 계획이다.

IV. 결 론

본 연구는 난분해성 염료인 RhB의 완전 처리를 위한 전기분해 공정과 UV 단일공정과 전기/UV 복합 공정의 RhB와 COD 처리 비교를 통하여 전기/UV 공정의 적용가능성을 고찰한 결과 다음의 결과를 얻었다.

1) 전기/UV 공정에 사용하기 위해 일반적인 살균 램프인 UV-C 램프와 오존도 같이 발생하는 오존 램프의 RhB 분해능을 고찰한 결과 오존 램프의 RhB 제거율이 UV-C램프보다 높은 것으로 나타났다. RhB는 오존 램

프의 전력 증가에 따라 선형적으로 증가하였다.

2) 전기분해 단일 공정에서는 1.25 A까지 전류 증가에 따라 RhB 분해능이 증가하였으며, 30 W의 오존 램프를 적용한 전기/UV 공정에서는 최적 전류는 1 A로 나타났다. 전기/UV 공정에서 RhB 제거의 경우 전기분해 공정과 UV 공정의 단일 공정의 RhB 농도감소와 전기/UV 복합 공정의 RhB 제거는 같아 공정의 시너지 효과는 관찰되지 않았다. 그러나 COD의 경우 전기분해 공정과 오존 램프에 의한 단일 공정의 COD 제거보다는 전기/UV 공정의 COD 제거농도가 높아 시너지 효과가 나타나는 것으로 사료되었다.

사 사

본 연구는 2008년도 대구대학교 교내연구비의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Booth, G., Zollinger, H., McLaren, K., Sharples, W. G. and Westwall, A. : 1985 Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry, 5nd ed., VCH, Weinheim, A9, 70-75, 1985.
- Yoo, Y. E. : A study on the textile wastewater treatment by sonochemical process. *Korean Journal of Environmental Health*, **29**(5), 10-16, 2003.
- Robinson, T., McMullan, G., Marchant, P. and Nigam, P. : Remediation of dyes in textile effluent: A critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. *Bioresource Technology*, **77**, 247-255, 2001.
- Cho, I. H., Kho, Y. L., Lee, S. J., Lee, H. K. and Zoh, K. D. A. : Study on the dye-wastewater treatment by fenton and photo-fenton oxidation process. *Korean Journal of Environmental Health*, **26**(4), 29-37, 2000.
- Kunz, A., Peralta-Zamora, P., Gomes de Moraes, S. and Durán, N. : New tendencies on textile effluent treatment. *Química Nova*, **25**, 78-82, 2002.
- Daneshvar, N., Aber, S., Vatanpour, V. and Rsoulfard, H. : Electro-fenton treatment of dye solution containing orange II: Influence of operational parameters. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, **615**, 165-174, 2008.
- Kim, D. S. and Park, Y. S. : Decolorization of Rhodamine B by fenton, fenton-like, and photo-fenton-like oxidation. *Korean Journal of Environmental Health*, **33**(2), 150-157, 2007.
- Rosenfeldat, E., Linden, K. G., Canonica, S. and Gunten, U. V. : Comparison of the efficiency of ·OH radical formation during ozonation and the advanced oxidation processes O_3/H_2O_2 and UV/H_2O_2 . *Water Research*, **40**, 3695-3704, 2006.
- Panizza, M. and Cerisola, G. : Electrocatalytic materials for the electrochemical oxidation of synthetic dyes. *Applied Catalysis B: Environmental*, **75**, 95-101, 2007.
- Simond, O., Schaller, V. and Comnillis, C. : Theoretical model for the anodic oxidation of organics on metal oxide electrodes. *Electrochimica Acta*, **42**(13/14), 2009-2012, 1997.
- Jütner, K., Galla, U. and Schmieder, H. : Electrochemical approaches to environmental problems in the process industry. *Electrochimica Acta*, **45**, 2575-2594, 2000.
- Chen, G., Chen, X. and Yue, P. L. : Electrochemical behavior of novel $Ti/IrO_2-Sb_2O_5-SnO_2$ anodes. *Journal Physical Chemistry B.*, **106**, 4364-4369, 2002.
- Li, X. Y., Cui, Y. H., Feng, Y. J., Xie, Z. M. and Gu, J. D. : Reaction pathways and mechanisms of the electrochemical degradation of phenol on different electrodes. *Water Research*, **39**, 1972-1981, 2005.
- UV shop homepage, <http://www.uvshop.co.kr>
- APH-AWWA-WPCE : Standard methods for the examination of water and wastewater. 18th Ed., APHA, Washington D.C., 1992.
- Park, Y. S. and Ahn, K. H. : Effect of coagulation, ozone, and UV post-process on COD and color removal of textile wastewater. *Korean Journal of Environmental Health*, **27**(4), 93-98, 2001.
- Ahn, K. H., Kwon, S. K. and Park, Y. S. : Ozone lamp/photocatalytic decolorization of Rhodamine B. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, **26**(10), 1063-1069, 2004.
- Kim, D. S. and Park, Y. S. : Electrochemical decolorization of a Rhodamine B using dimensionally stable anode. *Journal of Korean Society on Water Quality*, **3**(3), 377-384, 2007.
- Matos, J., Laine, J. and Herrmann, J. M. : Association of activated carbons of different origins with titania in the photocatalytic purification of water. *Carbon*, **37**, 1870-1872, 1999.
- Kim, D. S. and Park, Y. S. : Comparison study of dyestuff wastewater treatment by the coupled photocatalytic oxidation and biofilm process. *Chemical Engineering Journal*, **139**, 256-263, 2008.
- Park, Y. S., Na, Y. S. and Ahn, K. H. : Decolorization of Rhodamine B using UV/TiO₂ system. *Korean Journal of Environmental Health*, **28**(5), 59-64, 2002.
- Wang, Y. : Solar photocatalytic degradation of eight commercial dyes in TiO₂ suspension. *Water Research*, **34**(3), 990-994, 2000.
- Park, Y. S. : Indirect oxidation of dye using quaternary dimensionally stable anode (DSA) with High generation rate of oxidants. *Korea Research Foundation, 2007 Regional University Researchers Program, Final Report(E00115)*, 8-22, 2008.
- Grimau, V. L. and Gutierrez, M. C. : Decolorization of simulated reactive dyebath effluents by electrochemical oxidation assisted by UV light. *Chemo-*

- sphere*, **62**, 106-112, 2006.
25. Wu, J. J., Yang, J. S., Muruganandham, M. and Wu, C. C. : The oxidation study of 2-propanol using ozone-based advanced oxidation processes. *Separation and Purification Technology*, **62**, 39-46, 2008.
26. Muguganandham, M. and Swaminathan, M. : Solar photocatalytic degradation of a reactive azo dye in TiO₂-suspension. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, **81**, 439-457, 2004.
27. Park, Y. S. and Kim, D. S. : Inactivation of *Legionella pneumophila* by electrochemical disinfection. *Journal of Korean Society on Water Quality*, **23**(5), 613-619, 2007.