수중 플라즈마 공정을 이용한 Rhodamine B 염료의 제거

김동석 · 박영식*

대구가톨릭대학교 환경과학과, *대구대학교 기초교육원

Removal of Rhodamine B Dye Using a Water Plasma Process

Dong-Seog Kim and Young-Seek Park**

Department of Environmental Science, Catholic University of Daegu, Daegu, Korea

*Faculty of Liberal Education, Daegu University, Daegu, Korea

ABSTRACT

Objectives: In this paper, a dielectric barrier discharge (DBD) plasma reactor was investigated for degrading the dye Rhodamine B (RhB) in aqueous solutions.

Methods: The DBD plasma reactor system in this study consisted of a plasma component [titanium discharge (inner), ground (outer) electrode and quartz dielectric tube], power source, and gas supply. The effects of various parameters such as first voltage (input power), gas flow rate, second voltage (output power), conductivity and pH were investigated.

Results: Experimental results showed that a 99% aqueous solution of 20 mg/l Rhodamine B is decolorized following an eleven minute plasma treatment. When comparing the performance of electrolysis and plasma treatment, the RhB degradation of the plasma process was higher than that of the electrolysis. The optimum first voltage and air flow rate were 160 V (voltage of trans is 15 kV) and 3 l/min, respectively. With increased second voltage (4 kV to 15 kV), RhB degradation was increased. The higher the pH and the lower conductivity, the more Rhodamine B degradation was observed.

Conclusions: OH radical generation of dielectric plasma process was identified by degradation of N, N-dimethyl-4-nitrosoaniline (RNO, indicator of OH radical generation). It was observed that the effect of UV light, which was generated as streamer discharge, on Rhodamine B degradation was not high. Rhodamine B removal was influenced by real second voltage regardless of initial first and second voltage. The effects of pH and conductivity were not high on the Rhodamine B degradation.

Key words: Dielectric barrier discharge, Dye, UV, Water plasma, Wastewater treatment

I. 서 론

우리나라의 하천 오염에서 큰 비중을 차지하고 있는 산업폐수로는 섬유, 피혁 및 도금 폐수 등이며, 처리에 있어 고도의 처리기술이 필요한 폐수이기도 하다. 이중에서 배출량이 16.6%로 높은 비율을 차지하는 폐수가 염색 또는 염료 폐수인데 색도 등의

문제가 있어 재래식 처리법으로는 처리하기 어렵고 재사용도 많은 어려움이 있다.¹⁾

섬유, 제지, 천연색 인쇄, 제약, 식품 및 화장품과 다양한 산업에서 유기 합성염료가 착색제로 광범위하게 사용되어 왔는데, 전 세계에서 연간 70만 톤 이상의 유기 합성염료가 생산되고 있다. 이들 합성염료의 약 12%가 염료 제조와 공정의 운전 중에 소실되

†Corresponding author: Faculty of Liberal Education, Daegu University, Gyeongbuk 712-714, Korea, Tel: 053-850-4571, Fax: 053-850-4369, E-mail: ysparkk@daegu.ac.kr

Received: 17 March 2011, Revised: 20 May 2011, Accepted: 20 June 2011

는 것으로 알려져 있다.^{2,3)} 더욱이 염색 폐수는 온도가 높고, pH의 변동이 심하고 색도 유발물질이 고농도로 존재한다. 용해성이 높고 독성이 있는 염료는 흡착이나 생물학적 산화와 같은 종래의 처리방법은 완전한 처리가 매우 어렵고, 2차 폐기물을 생성한다.²⁾

지난 수십 년간 수계에서 염료와 같은 물질을 처리하기 위하여 고급산화법(advanced oxidation processes, 이하 AOPs)에 관한 관심과 연구가 지속되고 있다. UV와 TiO_2 를 이용하는 광촉매 산화, 전자 빔 조사, 초음파 화학 공정, 전기 산화, UV/Fenton 산화공정 등이 염료와 같은 유기오염물질을 파괴하기 위한 산화제로 비선택적이고 활성이 있는 OH 라디칼을 이용하는 효율적인 공정으로 알려져 있다.³⁻⁶⁾ 최근 다양한 저온 플라즈마 공정이 강유전체 박막제조, 플라즈마 디스플레이 및 플라즈마 CVD (chemical vapor deposition) 공정과 같은 반도체 공정, 고분자 소재, 금속 소재 분야, 막분리 분야 등 고분자와 소재 분야, 합성가스 제조, 메탄 전환반응과 같은 화학반응은 물론 난분해성 화합물 분해, 온실가스 처리와 같은 환경분야에도 적용되고 있다.⁷⁾ 환경분야 중 수처리에 이용되는 저온 플라즈마 공정은 주로 코로나(corona) 플라즈마나 DBD 플라즈마(dielectric barrier discharge plasma)를 이용한다. DBD 플라즈마 공정은 하나나 둘 이상의 유전체가 두 전극 사이에 삽입되어 있는 플라즈마 공정으로 보통 교류(AC)를 사용하며, 코로나 플라즈마는 직류(DC)를 사용한다.⁸⁾

수중에서 플라즈마를 발생시키면 $\cdot\text{OH}$, $\cdot\text{H}$, $\cdot\text{O}$, $\cdot\text{O}_2^-$, $\cdot\text{HO}_2$, H_2O_2 와 O_3 등과 같은 화학적 활성종, 라디칼 및 산화제 등이 생성되는데, 이들 화학종들의 산화력이 높은 것으로 알려져 있다. 수중 플라즈마에서는 화학종 외 자외선이나 shock wave도 산화반응에 관여하는 것으로 알려져 있다.^{9,10)}

본 연구는 난분해성 염료인 Rhodamine B의 색도를 제거하는 공정으로 수중에서 플라즈마를 발생시키는 수중 유전체방전 플라즈마 공정의 적용가능성을 살펴보고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 실험 재료 및 실험 방법

분해대상물질로 염료인 Rhodamine B(RhB)를 사

Fig. 1. Study of a dielectric barrier discharge plasma for the water treatment.

용하였다. 실험에 사용한 반응기는 회분식으로 제작하였으며 반응 부피는 1 l이었고, Fig. 1에 개요도를 나타내었다. 유전체 방전 플라즈마 반응기 시스템은 방전 전극(내부 전극), 유전체인 석영관, 접지 전극(외부 전극) 및 산기관으로 이루어진 플라즈마 반응기, 슬라이더스와 네온트랜스로 이루어진 전원 공급장치 및 공기 펌프와 유량조절장치로 이루어진 공기 공급장치로 이루어져 있다. 유전체는 두께가 1 mm, 내경이 7 mm인 석영관을 사용하였다. 방전 전극과 접지 전극은 모두 티타늄을 사용하였다. 방전 전극은 직경이 2 mm인 봉 형 전극을 사용하였고, 접지 전극은 직경이 1 mm인 전극을 스프링 형태로 만든 후 사용하였다. 방전 전극은 산기관과 연결되는 석영관보다 1 cm 짧게 설치하고, 접지 전극의 끝은 방전 전극보다 1 cm 짧도록 제작하였다. 전극의 재질과, 지름, 유전체 직경 등은 기초 실험을 통하여 최적 인자를 도출한 후 제작하였다(data not shown). 반응기에 주입하는 가스로는 공기를 사용하였으며 공기 펌프에서 발생한 공기를 rotameter를 이용하여 유량을 조절한 뒤 공급하였다. 전원 장치로 2차 전압이 4, 7.5 및 15 kV이고 주파수가 20 kHz인 네온트랜스를 이용하였다. 1차 전압은 슬라이더스를 이용하여 전압을 180~220 V로 조절하였다. $\cdot\text{OH}$ 은 생성량을 직접적으로 측정하기 어렵기 때문에 $\cdot\text{OH}$ 과 선택적으로 반응하는 물질의 분해를 통하여, $\cdot\text{OH}$ 의 생성 여부를 간접적으로 확인이 가능하도록 하였다. 표백효과에 의해 육안으로 쉽게 확인이 가능하고 분석이 간편한 N, N-Dimethyl-4-nitrosoaniline

(RNO)을 사용하였다.¹¹⁾

2. 분석 및 측정

RhB와 RNO의 초기 농도는 각각 20 mg/l와 50 mg/l이었으며, UV-VIS spectrophotometer(Genesis 5, Spectronic)를 사용하여 최대 흡수파장인 각각 554 nm와 440 nm에서 흡광도를 측정하여 검량선을 사용하여 농도로 나타내었다.¹¹⁾ 플라즈마에서 발생하는 자외선은 반응기에서 1 cm 떨어진 지점에 반사판 표면의 광세기기는 254, 312 및 365 nm의 센서를 장착한 자외선강도측정기(VLX-3W, Cole Parmer Instrument Co.)를 사용하여 측정하였다. 플라즈마 반응기에 걸리는 전압의 측정은 20 kV의 전압까지 측정 가능한 고전압 probe(Pintek, DP-20K)을 장착한 디지털 오실로스코프(Rigol, DS1062CA)를 사용하여 측정하였다.

III. 결 과

1. 플라즈마 공정에서의 RNO 분해와 UV 생성

수중 플라즈마 공정에서 발생한 OH 라디칼의 생성 여부와 정도를 알아보기 위하여 RNO 50 mg/l를 초기 농도로 하여 2차 전압이 15 kV인 네온트랜스를 사용하여 1차 전압이 220 V, 공기 공급량이 5 l/min인 조건에서 RNO 용액 1 l에서의 분해 정도를 Fig. 2에 나타내었다. 또한 전기 분해 공정에서의 RNO 분해 경향과 비교하기 위하여 기 발표한 논문에서 RNO 분해 성능이 우수하였던 붕소 도핑 다이

Fig. 2. Comparison of RNO degradation with electrolysis (●) and plasma (○) process.

Fig. 3. Variation of UV light intensity with voltage.

아몬드 전극(boron doped diamond electrode, 이하 BDD)의 RNO 분해 경향도 같이 나타내었다.¹²⁾

BDD 전극을 이용한 전기분해 실험의 경우 적용 전류는 1 A(9.25 V; W = 9.5 W), 전해질인 NaCl 농도는 1 g/l이었다. 플라즈마의 경우 30분 경 대부분의 RNO가 제거되었으나 BDD 전극을 이용한 전기분해의 경우 30분은 48%의 RNO가 제거되었고 50분은 80.9%가 제거되었다.

Fig. 3에 자외선 강도 측정기를 이용하여 플라즈마 반응기 측면에서 발생하는 자외선 UV-V, UV-B 및 UV-A를 측정할 수 있는 254, 312 및 365 nm 센서를 이용하여 1차 전압에 따른 자외선 강도를 측정하여 나타내었다. 그림에서 보듯이 오염물질 제거에 역할이 가장 큰 UV-C의 파장인 254 nm는,¹³⁾ 1차 전압이 200 V까지 전혀 검출되지 않았으며, 220V에서 검출되었는데 0.001 mW/cm²로 나타나 UV-C는 유기물질 분해에 이용되지 않는다고 볼 수 있었다. UV-B와 UV-A 모두 1차 전압의 증가에 따라 자외선 강도가 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. UV-B(312 nm)의 경우 220 V에서 평균 자외선 강도는 0.01 mW/cm²로 나타났고, UV-A(365 nm)의 경우 0.06 mW/cm²로 나타났다.

2. RhB 분해에 대한 1차 전압, 공기 유량 및 2차 전압의 영향

RhB 농도에 대한 기초 실험을 수행한 결과 20 mg/l 이상인 RhB도 분해가 잘 이루어지지만 반응기에 공급하는 공기의 영향으로 인해 RhB를 포함한 기포가 반응기 밖으로 넘치는 일이 발생하고 이로 인해

Fig. 4. Effect of 1st voltage on the degradation of RhB.

플라즈마의 단락이 발생하여 운전이 불가능한 경우가 발생하여 기포가 반응기 밖으로 넘치지 않는 농도 범위인 RhB 20 mg/L에서 분해실험을 수행하였다. 공기 공급량이 5 l/min인 조건에서 네온트랜스(출력 전압: 15 kV)에 연결하는 1차 전압을 80~220 V로 변화시켰을 때 RhB 농도 변화를 Fig. 4에 나타내었다.

그림에서 보듯이 1차 전압이 증가할수록 RhB 농도가 감소하였으며, 160 V 이상에서는 RhB 제거율이 유사하게 나타났다.

유전체 방전 플라즈마의 특성상 가스를 공급해주어야 하는데, 가스 공급량이 적을 경우 석영관 내부의 수분으로 인해 단락이 생겨 플라즈마가 발생하지 않는 문제점이 발생할 수 있다.¹⁴⁾ 또한 공급하는 가스의 종류에 따라 발생하는 산화제가 달라진다. 본 실험에 사용한 공기의 경우 함유되어 있는 산소에 의해 오존이 발생하는데, 유량의 영향을 받는 것으로 알려져 있다.¹⁵⁾ Fig. 5에 1차 전압이 160 V인 조건에서 공기 유량에 따른 RhB 분해 성능을 나타내었다. 공기 유량이 1 l/min에서 3 l/min로 증가하면서 RhB 농도가 급격하게 감소하는 것으로 나타났으며, 4 l/min 이상의 공기 공급량에서는 더 이상의 RhB 농도 감소가 없어 최적 공기 공급량이 존재하며, 3 l/min으로 나타났다.

Fig. 6에 1차 전압을 160 V로 유지하면서 출력 전압인 2차 전압을 4, 7.5 및 15 kV로 변화시켜 RNO 분해에 미치는 2차 전압의 영향을 고찰하였다. 출력 전압인 2차 전압이 4 kV인 경우 15분의 반응시간에서 RhB가 63.3% 제거되었으며, 2차 전압이 증가할

Fig. 5. Effect of air flow rate on the degradation of RhB.

Fig. 6. Effect of high voltage on the degradation of RhB.

수록 RhB 제거가 증가하는 경향을 나타내었다.

전원에서 네온트랜스로 공급되는 1차 전압(입력 전압)과 네온트랜스에서 플라즈마 반응기로 출력되는 2차 전압(출력 전압)과의 관계를 고찰하기 위하여 15 kV 네온트랜스에서 1차 전압을 80 V에서 240 V로 변화시켰을 때 오실로스코프로 관찰되는 실제 출력인 2차 전압의 변화를 고전압 probe를 장착한 디지털 오실로스코프로 측정하여 Fig. 7(a)에 나타내었다. 그림에서 보듯이 15 kV의 네온트랜스를 사용하여도 1차 전압을 변화시킬 경우 출력이 변화하였으며, 220 V에서 원래 출력인 15 kV를 나타내었다. Fig. 6에서 4 kV의 네온트랜스를 사용하고 입력 전압을 160 V로 하였을 경우와 15 kV의 네온트랜스를 사용하였지만 실제 출력 전압이 4.3 kV로 나타났던 80 V의 경우(Fig. 7(a))의 RhB 분해를 비교하여 Fig. 7(b)에 나타내었다.

Fig. 7. Change of high voltage with change of 1st voltage at 15 kV (a) and comparison of RhB degradation with different 1st and high voltage (b).

Fig. 8. Effect of pH on the degradation of RhB.

3. RhB 분해에 대한 용액 pH와 전도도의 영향

15 kV 네온트랜스를 사용하여, 160 V, 3 l/min의 공기를 공급한 조건에서 pH 변화에 따른 RhB 제거 경향을 Fig. 8에 나타내었다. 그림에서 보듯이 pH에

Fig. 9. Effect of conductivity on the degradation of RhB.

따른 RhB 제거는 pH 11 > pH 7 > pH 3의 순서로 나타났다.

일반적으로 전기분해를 이용한 공정의 경우 전기전도도는 공정의 성능에 큰 영향을 미치는 중요한 요소이고, 전기전도도를 높이기 위해서 NaCl과 같은 전해질을 첨가하기도 한다.¹⁶⁾ 그러나 유전체 방전 플라즈마 공정은 본질적으로 전극 간에 직접 방전이 일어나지 않도록 전극의 한 쪽 또는 양쪽 전극의 표면을 유리 등의 절연체로 감싸는 공정이기 때문에 절연이 잘 이루어져야 하므로 물의 전도도가 플라즈마 반응기의 반응 동력학(kinetic)에 영향을 미칠 수 있다.^{15,17)} Fig. 9에 전기전도도의 변화에 따른 RhB 농도 변화를 나타내었다. Fig. 9에 나타내었듯이 4종류의 초기 전기전도도를 가지는 용액 중에서 초순수 증류수에 RhB 용액을 제조한 용액의 RhB 분해율이 가장 높은 것으로 나타났고, 전기전도도 값이 증가할수록 분해율은 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 NaCl 0.5% 용액인 5 g/l 첨가한 용액에서도 처리율은 대략 7분간의 초기반응에서 속도가 느릴 뿐 총 15분의 반응시간에서 9분 이후의 RhB 처리성능은 유사한 것으로 나타났다.

IV. 고 찰

1. 플라즈마 공정에서의 RNO 분해와 UV 생성

플라즈마 공정의 RNO 제거율이 전기분해 공정보다 높아 OH 라디칼이 많이 발생된다고 볼 수 있다. 플라즈마 반응기의 경우 220 V에서 운전할 때 70 W가 소요되고 전기분해의 경우는 9.25 W가 소요되어

에너지 비용이 플라즈마가 훨씬 높은 것으로 나타났다. 그러나 전기분해 공정의 경우 NaCl과 같은 전해질이 필요하고, 환경인자에 영향을 많이 받고, 반응시간이 느리고, 전극의 수명도 고려해야 한다. 또한 실제 유기물질의 완전 무기화에 소요되는 모든 인자를 종합적으로 고려해야 총괄적인 경제성에 대한 평가를 내릴 수 있는 것으로 사료되었다.

플라즈마 반응에서 발생하는 자외선 강도를 9월에 서 10월 사이에 날씨가 맑은 오후 1시에 측정된 태양광에서 312 nm의 평균 강도 값인 0.024 mW/cm²와 비교할 때(태양광에서는 254 nm의 강도 값은 0 임, 365 nm는 순간적으로 빨리 변하기 때문에 측정하지 않음,¹⁸⁾ 태양광보다 낮은 강도의 자외선이 발생하는 것으로 나타났다. 김과 박¹⁸⁾은 태양광과 고정화 광촉매를 이용한 광촉매 분해 반응에서 5 mg/l의 RhB 용액이 0.1 mg/l로 감소하는데 80분이 소요된다고 보고하였다. 광촉매가 없는 순수 자외선만 이용한다고 가정할 때 시간이 더 많이 필요할 것으로 사료되었다. 따라서 공기를 가스로 이용한 유전체 장벽 플라즈마 반응에서 자외선도 분해 역할을 하지만 자외선 단독에 의한 유기물질 분해 효과는 적은 것으로 사료되었다.

2. RhB 분해에 대한 1차 전압, 공기 유량 및 2차 전압의 영향

RhB 제거를 위한 최적 전압은 160 V인 것으로 나타났다. 99%의 RhB 제거에 소요되는 시간은 대략 11분 정도로 빠른 것으로 나타났다. 공기 공급량이 1 l/min에서는 단락을 생기지 않아 석영관 내에서 플라즈마가 발생하는데 문제는 없지만 적은 공기 공급으로 인해 오존과 같은 산화제가 적게 발생하며, 공기 공급량의 증가에 따라 산화제 발생량도 증가하지만 일정 공기 공급량 이상에서는 산화제도 많이 발생하지만 산기관을 통해 공급되는 과량의 공기에 의해 오존 등의 산화제의 체류시간이 짧아지기 때문에 반응에 참여하는 산화제가 줄어드는 역 효과를 나타

낸 것으로 사료되었다.¹⁶⁾ 따라서 단락을 막고 반응에 참여할 수 있는 산화제 생성을 최대로 할 수 있는 공기 공급량이 중요하며 본 연구에서는 3 l/min으로 나타났다.

Fig. 7(b)에서 보듯이 1차 전압과 2차 전압이 달라도 실질적인 출력 전압이 유사한 경우 RhB 제거율이 유사한 것으로 나타났다. 따라서 상용 네온트랜스를 이용한 AC 플라즈마의 경우 1차 전압인 입력 전압을 변화시켜 출력을 변화시킬 수 있는 것으로 나타나 향후 실제 플라즈마 기기의 상용화시 전원 장치 설계에 이용할 수 있는 것으로 사료되었다.

3. RhB 분해에 대한 용액 pH와 전도도의 영향

Zhang 등¹⁵⁾은 유리구슬을 충전한 3상 유전체 방전 플라즈마 반응기에서 azo 염료인 Acid Red 27 처리시 염기성 pH에서 반응속도가 가장 높다고 보고하였다. Hoigen 등¹⁹⁾은 염기성 영역의 pH에서는 오존이 분해되어 OH 라디칼이 생성되는데 오존의 산화전위는 2.07 V이고, OH 라디칼의 산화 전위가 2.850 V이기 때문에 처리율이 높다고 보고하였다. 반면 산성영역의 pH에서 오존은 OH 라디칼로 변하지 않는다고 하였다. 그러나 플라즈마에 의한 RhB와 같은 염료처리는 pH가 산성에서 가장 처리율이 높고 염기성에서 처리율이 가장 낮았다고 보고한 박과 김¹²⁾의 전기분해 공정과는 정반대의 효과를 나타내었고, 전기분해공정에서는 pH에 따른 처리율 차이가 큰 것으로 나타났지만 플라즈마 공정의 경우 pH의 영향은 크지 않은 것으로 사료되었다. Table 1에 다른 초기 pH에서 플라즈마 반응에 따른 용액의 pH와 전기전도도 변화를 나타내었다. 초기 pH에 따른 초기 전기전도도가 다른 것은 모든 용액은 수돗물을 사용하였으나 pH 3과 11의 경우 pH를 조절하기 위해 첨가한 NaOH와 H₂SO₄로 인한 전기전도도 증가 때문이었다. 실험한 모든 영역의 pH에서 15분의 반응 후 pH가 감소하고, 또한 전기전도도도 증가하는 것으로 나타났다. pH가 감소하는 이유는 공기 중에

Table 1. Variation of solution pH and conductivity with plasma reaction at different initial pH

	pH 3		pH 7		pH 11	
	pH	Conductivity (μs/cm)	pH	Conductivity (μs/cm)	pH	Conductivity (μs/cm)
Time (0 min)	3.03	1316	7.02	274	10.99	932
Time (15 min)	2.92	1450	6.77	284	10.72	939

Table 2. Variation of conductivity with plasma reaction at different initial conductivity

	Conductivity ($\mu\text{s/cm}$)			
	Deionized water ($\mu\text{s/cm}$)	Tap water ($\mu\text{s/cm}$)	NaCl 1 g/l (ms/cm)	NaCl 5 g/l (ms/cm)
Time (0 min)	28.1	274	2.26	9.44
Time (15 min)	213	284	2.32	9.53

포함된 질소가 산소와 반응하여 질산이 형성되기 때문으로 사료되었다.²⁰⁾

실제 염색 폐수 처리 공정은 초순수와 같은 조건이 없고 각종 이온의 결합되어 있다는 사실과 초순수 자료를 제외한 실험 자료를 비교할 때 전기전도도는 처리에 큰 영향을 미치지 않는다고 사료되었다. Zhang 등¹⁵⁾은 초기 전기전도도가 200~1500 $\mu\text{s/cm}$ 인 조건에서 azo 염료의 유전체 방전 플라즈마 처리에서 전기전도도가 증가할수록 초기 반응속도가 감소한다고 보고하였다. 그들은 전기전도도가 증가할수록 용액 중 더 많은 이온이 존재하게 되는데 이들 이온이 절연을 막는 작용을 하기 때문이며 이온들이 활성종의 생성을 방해하여 활성종의 생성이 감소하기 때문이라고 보고하였다. 반면 Li 등²¹⁾은 초기 전기전도도가 30~500 $\mu\text{s/cm}$ 인 조건에서 페놀 처리는 전기전도도의 영향을 거의 받지 않는다고 보고하였다. 두 연구자와 본 연구 결과를 비교하면 본 연구 결과가 훨씬 더 넓은 범위의 전기전도도 범위에서 실험을 하였는데, 초기 반응속도는 Zhang 등¹⁵⁾의 결과와 같이 전기전도도에 따라 차이가 조금 나지만 반응 종결시는 Li 등²¹⁾의 결과와 같이 큰 차이가 나지 않는 것으로 사료되었다. Table 2에 초기 전기전도도와 반응 15분 후의 전기전도도를 나타내었다. Table 1에서 관찰된 결과와 같이 전기전도도는 반응시간이 경과함에 따라 증가하는 경향을 나타내었는데, 이는 플라즈마에서 각종 산화제가 생성되어 수종의 이온의 증가 때문인 것으로 사료되었다. 전기전도도는 초기 반응속도에 영향을 미치지만 반응 종결시 큰 차이가 나지 않아 전기전도도의 영향은 적은 것으로 사료되었다.

V. 결 론

본 연구는 염료와 같은 난분해성 물질을 제거하기 위한 유전체 방전 방식의 플라즈마를 수중에서 발생

시켜 처리하는 공정으로 운전인자가 RhB 염료 제거에 미치는 영향을 고찰하여 다음의 결과를 얻었다.

1. OH 라디칼 생성 지표인자인 RNO가 빠르게 분해되어 유전체 방전 플라즈마에서 OH 라디칼이 다량 생성되는 것을 확인할 수 있었다. 맑은 날 태양광에서 조사되는 UV-B(312 nm)의 자외선 강도에 비해 220 V에서 운전한 유전체 방전 플라즈마 반응기에서 발생한 자외선 강도가 2배 이상 낮은 것으로 나타나 자외선 만의 RhB 분해 효과는 적은 것으로 사료되었다.

2. 출력이 15 kV인 네온트랜스에 연결하는 1차 전압을 80~220 V로 변화시켰을 때 1차 전압이 증가할수록 RhB 농도가 감소하였고, RhB 제거에 대한 최적 전압은 160 V인 것으로 나타났으며 99%의 RhB 제거에 10분이 소요되는 것으로 나타났다. 1차 전압이 160 V인 조건에서 최적 공기 공급량이 존재하며, 3 l/min으로 나타났다. 2차 전압이 증가할수록 RhB 제거가 증가하는 경향을 나타내었다. 1차 전압과 2차 전압을 동시에 변화시켰을 때 실질적인 출력 전압인 2차 전압이 유사한 경우 RhB 제거율이 유사한 것으로 나타났다.

3. pH에 따른 RhB 제거는 $\text{pH } 11 > \text{pH } 7 > \text{pH } 3$ 의 순서로 나타났으나 pH의 영향은 크지 않은 것으로 사료되었다. 실험한 모든 영역의 pH에서 15분의 반응 후 pH는 감소하고 전기전도도는 증가하는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. Lee HS, Kim NJ, Yoon CH. A study on the removal of COD and color to wastewater using plasma generator. *J Kor Oil Chem Soc.* 2006; 23(4): 273-279.
2. Zheng Z, Levin RE, Pinkham JL, Shetty K. Decolorization of polymeric dyes by a novel penicillium isolate. *Proc Biochem.* 1999; 34: 31-37.

3. Socha A, Sochocka E, Podsiadly R, Sokolowaka J. Electrochemical and photoelectrochemical treatment of C.I. Acid Violet 1. *Dyes and Pigments*. 2007; 73: 390-393.
4. Lin SH, Lai CH. Kinetic characteristics of textile wastewater ozonation in fluidized and fixed activated carbon beds. *Wat Res*. 2002; 34: 763-772.
5. Sun G, Xu X. Sunflower stalks as adsorbents for color removal from textile wastewater. *Ind Eng Chem Res*. 1997; 36: 808-812.
6. Coast CR, Botta CMR, Espindola ELG, Oliva P. Electrochemical treatment of tannery wastewater using DSA electrodes. *J Hazard Mater*. 2008; 153: 616-627.
7. Kim DS, Park YS. Removal of Rhodamine B in Water by Ultraviolet Radiation Combined with Electrolysis (II). *J Environ Sci*. 2009; 18(6): 667-674.
8. Panizza M, Cerisola G. Electrocatalytic materials for the electrochemical oxidation of synthetic dyes. *Appl Catal B: Environ*. 2007; 75: 95-101.
9. Joshi AA, Locke BR, Arce P, Finney WC. Formation of hydroxyl radicals, hydrogen peroxide and aqueous electrons by pulsed streamer corona discharge in aqueous solution. *J Hazard Mater*. 1995; 41: 3-30.
10. Sugiarto AT, Ito S, Ohshima T, Sato M, Skalny JD. Oxidative decolorization of dyes by pulsed discharge plasma in water. *J Electroanal Chem*. 2003; 58: 135-145.
11. Li M, Feng C, Hu W, Zhang Z, Sugiura N. Electrochemical degradation of phenol using electrodes of Ti/RuO₂-Pt and Ti/IrO₂-Pt. *J Hazard Mater*. 2009; 162: 455-462.
12. Park YS, Kim DS. Effects of operating parameters on electrochemical degradation of Rhodamine B and formation of OH radical using BDD electrode. *J Environ Sci*. 2010; 19(9): 1143-1152.
13. Park YS. Removal of Rhodamine B in water by ultraviolet radiation combined with electrolysis (I). *J Environ Health Sci*. 2008; 34(6): 439-445.
14. Yoon SH. A study on the discharge characteristics of hybrid-plasma torch in water, Master Thesis. Masan: Gyeongnam University; 2008.
15. Zhang R, Zhang C, Cheng XX, Wang L, Wu Y, Guan Z. Kinetics of decolorization of azo dye by bipolar pulsed barrier discharge in a three-phase discharge plasma. *J Hazard Mater*. 2007; 142: 105-110.
16. Kim DS, Park YS. Characteristic of oxidants production and dye degradation with operation parameters of electrochemical process. *J Environ Sci*. 2009; 18(11): 1235-1245.
17. Choi JO, Na BK. Application technology of low plasma. *News Inform Chem Eng*. 2001; 19(5): 596-603.
18. Kim DS, Park YS. A study on the optimization of reflector for reactor using solar light/TiO₂. *Kor J Environ Health Soc*. 2006; 32(4): 373-380.
19. Hoigen J, Bader H. Rate constants of reactions of ozone with organic and inorganic compounds in water-. *Wat Res*. 1983; 10: 185-194.
20. Ryu SM, Park HK, Lee BJ. Study on the characteristics of dielectric barrier discharging system and usability as a disinfectant. *J Kor Soc Wat Wastewater*. 2004; 18(4): 529-536.
21. Li J, Sato M, Ohshima T. Degradation of phenol in water using a gas-liquid phase pulsed discharge plasma reactor. *Thin Sol Films*. 2007; 51/54: 283-288.