



수중 펄스코로나 방전에 의한 메틸오렌지 제거 특성

Degradation of methyl orange by pulsed corona discharges in aqueous solution

이현돈¹ · 김종오² · 김형갑³ · 정재우^{3*}

Hyeon-Don Lee¹ · Jong-Oh Kim² · Hyoung-Kab Kim³ · Jae-Woo Chung^{3*}

1. 경상대학교 환경보전학과, 2. 경상대학교 도시공학과, 3. 경남과학기술대학교 환경공학과

(2011년 11월 8일 접수; 2011년 12월 9일 수정; 2012년 2월 13일 채택)

Abstract

A laboratory experiment on methyl orange degradation in pulsed corona discharges was carried out. Effects of operating parameters such as applied voltage, pH, conductivity and initial concentration on methyl orange degradation were investigated. The pulsed corona discharges decreased the pH of solution and increased conductivity, probably due to products generated from methyl orange degradation by corona discharges. The decrease of initial pH enhanced the methyl orange degradation. The methyl orange degradation was fastest in 100 μ S/cm conductivity solution, followed by 50 and 200 μ S/cm, indicating that 100 μ S/cm is the most favorable in the aspect of radical generation among the experimented conditions. The methyl orange of initial concentration from 20 to 60mg/L was effectively degraded in pulsed corona discharges. The lower initial concentration of methyl orange, the faster degradation was observed.

Key words : Pulsed corona discharges, Methyl orange, Operating parameters, Degradation rate

주제어 : 펄스 코로나 방전, 메틸오렌지, 운전변수, 제거속도

1. 서론

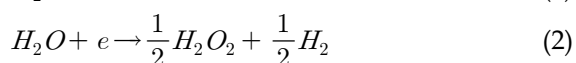
염색폐수는 발생공정의 종류나 사용되는 염료에 따라서 발생량과 성상의 변화가 크므로 효과적으로 처리하는데 많은 어려움이 있다. 현재 염색폐수를 처리하기 위해 사용되는 대부분의 공정은 응집 침전과 중화 등 물리화학적 전처리와 생물학적 처리로 이어지는 혼합공정으로 이루어져 있다. 이러한 공정은 응집침전에 의해 생성되는 다량의 고형

물질을 처리하기 위한 과도한 비용을 필요로 할 뿐 아니라 높은 색도와 난분해성물질을 포함하므로 높은 처리효율을 기대하기 어렵다는 단점을 가지고 있다(양 등, 1996, Perkins et al., 1980).

염색폐수 등 난분해성 오염물질을 함유하고 있는 폐수를 효과적으로 처리하기 위해 UV 광분해, 광촉매, 오존화공정, UV/H₂O₂, 펜톤공정, 전자빔 공정, 전기방전 기술 등과 같은 다양한 고급산화공

* Corresponding author Tel: +82-55-751-3348, Fax: +82-55-751-3484, E-mail: jwchung@gntech.ac.kr(J.W. Chung)

정(AOPs, advanced oxidation processes)이 개발되어 적용되고 있다(정 등, 2010a; Clements et al., 1987; Chun et al., 2000; Doong et al., 2001; Lin et al., 1995; Malik et al., 2001). 수중 오염물질을 처리하기 위해 적용할 수 있는 전기방전 기술은 글로우 방전(glow discharges), 무성방전(dielectric barrier discharges), 그리고 펄스 코로나 방전(pulsed corona discharges)의 3가지 형태인 것으로 알려져 있다(박과 김, 2011; 이 등, 2010; Locke et al., 2006; Malik et al., 2001). 이중에 짧은 펄스폭(pulse width)과 빠른 상승시간(rise time)을 가진 펄스 전압을 이용하는 펄스 코로나 방전은 높은 에너지 효율을 기대할 수 있으므로 활발한 연구들이 진행되고 있다(이 등, 2007; 정 등, 2010b; Grymonpre et al., 2001; Locke et al., 2006; Sun et al., 1997). 수중 펄스 코로나 방전은 액체상에 방전을 발생시켜 생성되는 OH, H, O 라디칼, O₃, H₂O₂, 등의 다양한 화학적 활성종들(chemically active species)을 오염물질의 처리에 이용하는 기술이다. 또한, 용액 특성이나 전압의 인가조건에 따라 UV radiation, shock waves, 높은 전계(electric field)와 같은 물리적인 현상들(physical processes)도 오염물질 제거에 기여할 수 있으므로 오염물질 처리의 상승효과(synergistic effects)를 기대할 수 있는 공정이다(Malik et al., 2001; Sunka et al., 1999). 수중에서 일어나는 펄스코로나 방전은 5~10eV 에너지를 가지는 전자를 발생시키며 전자들은 반응 (1)~(3)과 같이 물과 반응한다(Joshi et al., 1995; Magee and Chatterjee, 1987). 반응을 통해 생성된 화학적 활성종들은 다른 종류의 화학적 활성종들을 생성시키거나 오염물질 제거 반응에 참여하게 된다. 이러한 반응들은 펄스코로나 방전에 의해 시작되며 방전 특성에 의해 직접적으로 영향을 받게 된다(정과 Locke, 2007; Joshi et al., 1995).



연구단계에 머물고 있는 펄스 코로나 방전 기술을 상용화 기술로 개발하기 위해서는 공정의 오염물질의 제거특성에 대한 정확한 규명이 필수적이다. 본 연구에서는 펄스 코로나 방전에 의한 염색폐수 처리의 가능성을 평가하고자 하였다. 실험실 규모의 수중방전 시스템을 구성하였으며 염색폐수의 주요 성분 중의 하나인 메틸오렌지(methyl orange, MO) 제거특성을 규명하기 위한 실험을 수행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서 사용된 실험장치의 구성도와 설치 모습을 Fig. 1에 나타내었다. 실험장치는 방전 반응기, 고전압 펄스 발생장치, 분석시스템으로 구성되어 있다. 방전 반응기는 원통형 아크릴관을 사용하여 이중구조로 제작하였으며 내부관과 외부관 사이에 20°C의 냉각수를 흘려 등온조건에서 방전 화학반응이 일어나도록 하였다. 내부관의 직경은 120mm, 높이는 190mm이며 체적은 약 1.5L이다. 반응기의 하단부에 내부관으로부터 내경 10mm의 아크릴관을 설치하고 peristaltic pump(EYELA, RP-1000)를 사용하여 약 100mL/min의 속도로 용액을 순환시킴으로써 방전이 일어나는 동안에 용액이 균일하게 혼합되고 시료채취가 가능하도록 하였다.

수중에서 방전이 개시되기 위해서는 높은 전계강도(electric field strength)가 요구되므로 침 대 판(needle to plate) 형태의 전극구조를 사용하였다. 고전압 방전극으로 활용된 침 전극으로는 스테인레스 재질의 needle을 사용하였으며 접지전극으로 30mm의 직경, 2mm의 두께를 가진 스테인레스 재질의 판을 사용하였다. 두 전극 사이의 간격은 50mm 조건을 유지하였다.

방전 반응기로 정극성(positive polarity)의 고전압

펄스를 공급하기 위해 콘덴서(capacitor)와 회전스파크 갭 스위치(RSG, rotary spark gap switch)를 이용하는 펄스형성회로를 구성하였다. 전원공급장치(Glassman High Voltage Inc.)로부터 생성되는 양의 전하들은 콘덴서에 축적되며 1800rpm으로 회전하는 스파크 갭 스위치에 의해 회로가 정렬되면 60Hz의 주파수로 펄스 전압이 전극으로 공급된다.

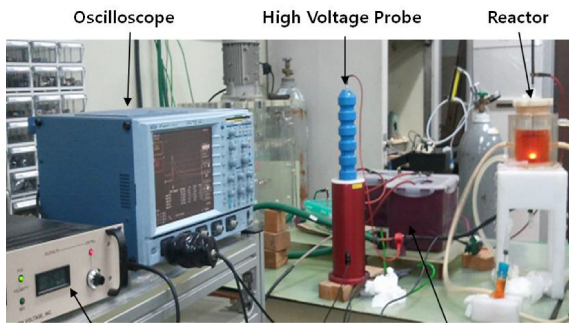
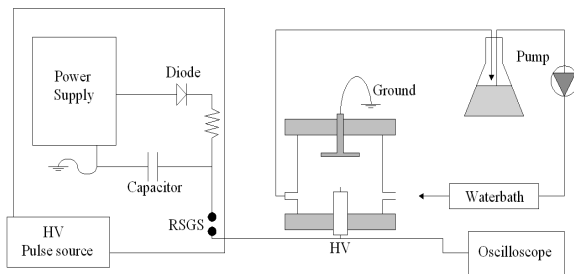


Fig. 1. Schematic and photograph of experimental setup.

2.2 실험 및 분석

Table 1은 실험의 주요 운전변수와 범위를 나타내고 있다. 펄스 코로나 방전의 주요 전기적 변수인 전압은 침투값을 기준으로 30~45kV의 범위를 가지며 주파수는 60Hz이다. 모든 실험은 일정한 초기농도를 가진 메틸오렌지 수용액 450mL를 대상으로 수행되었다. 메틸오렌지의 초기농도는 20~60mg/L의 범위에서 실험하였다. 펄스 코로나 방전에 의한 메틸오렌지 제거특성에 미치는 용액의 초기 pH 및 전도도의 영향을 관찰하기 위해 0.1N의 황산 및 수산화나트륨 수용액과 KCl을 각각 사용하

였다. 실험에 사용된 모든 용액은 2 μ S/cm 이하의 전도도를 가지는 탈이온수를 사용하여 제조하였다.

Table 1. Experimental parameters and ranges

	Parameter	Range
Electrical parameter	Applied peak voltage, V_p (kV)	35 ~ 45
	Frequency (Hz)	60
	Initial pH, pH ₀	3.5, 6.5, 10
Solution parameter	Initial conductivity, C_0 (μ S/cm)	50, 100, 200
	Initial methyl orange concentration, MO ₀ (mg/L)	20, 30, 60

방전특성을 측정하기 위해 500MHz의 bandwidth와 1GS/sec의 샘플링 속도를 지닌 오실로스코프(LT354, Lecroy)를 사용하였다. 반응기에 인가되는 전압과 발생하는 전류를 측정하기 위해 1000:1 고전압 프로브(HV probe, 태양)와 CT(current transformer, Pearson Model 411)를 각각 사용하였다. 방전에 의해 반응기로 전달되는 동력(power) 및 에너지(energy)의 양은 전극에서 측정되는 펄스 전압 및 전류의 곱형을 곱하여 시간에 따라 적분하여 얻을 수 있다(정 등, 2010b).

방전에 의해 발생하는 용액의 특성을 분석하고자 전기전도도 측정기(Trans Instruments)와 pH meter(Trans Instruments, TI900)를 사용하였다. 메틸오렌지 분석을 위해 UV/VIS spectrophotometer(Perkin Elmer Lambda25)를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 전기적 특성 및 용액특성

용액의 초기전도도가 100 μ S/cm인 조건에서 침투값이 35~45kV 범위인 펄스전압이 전극으로 인가될 때 반응기로 전달되는 전류의 침투값 및 방전에너지의 값을 Fig. 2에 나타내었다. 전압이 증가함에 따라 전류 및 방전에너지가 선형적으로 증가하는 현상을 관찰할 수 있다. 인가전압의 침투값이 35,

40, 45kV일 때 측정된 전류의 첨두값은 각각 19.5, 26.4, 31.4A이었으며 펄스당 방전에너지는 807, 1009, 1215mJ인 것으로 나타났다. 이러한 결과는 인가전압이 증가할 때 높은 전계가 형성되어 강한 방전이 유발되므로 전류가 증가하고 반응기로 전달 되는 방전에너지가 증가함을 보여준다.

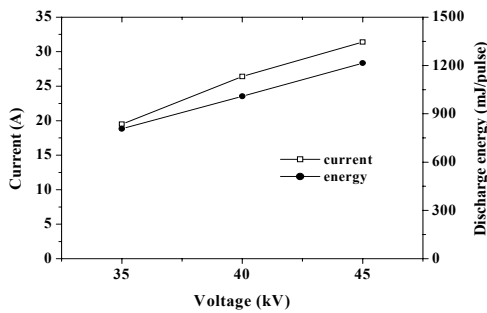


Fig. 2. Effect of applied peak voltage on peak current and energy input per pulse ($C_0=100\mu\text{S/cm}$).

Fig. 3은 용액의 초기전도도가 $100\mu\text{S/cm}$ 인 조건에서 첨두값이 45kV인 펄스전압이 인가될 때, 시간에 따른 3가지 종류(chicago sky blue, rhodamine B, methyl orange)의 염료 제거특성을 나타낸 결과이다. Chicago sky blue가 다른 염료들에 비해 상대적으로 빠르게 제거되었으나 모든 종류의 염료들이 펄스 코로나 방전에 의해 효과적으로 제거되는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 메틸오렌지를 대표물질로 선정하여 염료 제거 특성에 미치는 운전변수의 영향을 관찰하고자 하였다.

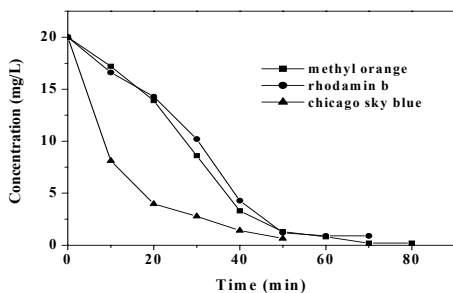


Fig. 3. Degradation of chicago sky blue, rhodamine B and methyl orange in pulsed corona discharges in aqueous solution ($C_0=100\mu\text{S/cm}$, $V_p=45\text{ kV}$).

펄스 코로나 방전에 의해 메틸오렌지를 처리할 때 일어나는 용액특성의 변화를 관찰하기 위해 $50\sim 209\mu\text{S/cm}$ 범위의 초기전도도 조건에서 20mg/L 의 메틸오렌지를 처리하기 위해 40kV의 첨두값을 가진 펄스전압을 120분간 인가할 때 일어나는 용액의 pH, 전도도 및 온도의 변화를 Table 2에 나타내었다. 펄스 코로나 방전에 의해 용액의 pH는 감소하고 전도도 및 온도는 증가하는 현상을 관찰할 수 있다. 용액의 초기전도도에 따라 pH는 5.2~5.4에서 2.9~3.0로 감소하였으며 용액의 온도는 $14\sim 17^\circ\text{C}$ 에서 $40\sim 49^\circ\text{C}$ 로 증가하였다. $50\sim 209\mu\text{S/cm}$ 의 범위를 가지는 초기전도도는 $283\sim 385\mu\text{S/cm}$ 으로 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 용액특성의 변화는 방전에 의해 일어나는 물리·화학적 작용에 의해 일어나는 현상으로 분석된다. 펄스 코로나 방전이나 오존화 공정에서 페놀 등의 유기물질이 분해될 때 일어나는 pH 감소 및 전도도 증가 현상은 다수의 논문에서 보고된 바 있다(이 등, 2007; 정 등, 2010b; Perkins, 1999). OH 라디칼이나 오존과 같은 강한 산화제에 의한 유기물 분해에 의해 발생하는 다양한 종류의 유기산은 용액의 pH를 감소시키며 펄스 코로나 방전에 의해 생성된 하전물질들과 유기물의 분해생성물이 전도도를 증가시키는 것으로 해석되어 왔다. 펄스 코로나 방전에 의해 일어나는 온도 상승은 방전에 의해 생성된 전류 흐름에 의해 액체가 가열되어 생기는 현상이다(Magee and Chatterjee, 1987). 실험 수행과정에서 외부로부터 기체의 유입이 없음에도 불구하고 방전에 의한 가열로 인해 생성되는 기포가 관찰되었다.

Table 2. Variation of solution properties due to the pulsed corona discharges

	pH		Temperature ($^\circ\text{C}$)		Final conductivity ($\mu\text{S/cm}$)	
	Initial	Final	Initial	Final		
Initial conductivity ($\mu\text{S/cm}$)	50	5.20	2.98	17.0	48.3	283
	104	5.31	2.90	15.8	40.7	314
	209	5.40	3.02	14.1	42.5	385

3.2 메틸오렌지 제거에 미치는 운전변수의 영향

메틸오렌지 제거속도에 미치는 인가전압, 용액의 pH 및 초기전도도의 영향을 관찰하기 위해 각각의 운전변수를 변화시키면서 방전시간에 따른 메틸오렌지 농도를 분석하였다. Fig. 4는 메틸오렌지 초기 농도가 30mg/L, 용액의 초기 pH와 전도도가 각각 5.6과 100 μS/cm인 조건에서 메틸오렌지 제거속도에 미치는 인가전압의 영향을 나타내고 있다. 모든 전압조건에서 일정한 시간이 경과한 후에 거의 모든 메틸오렌지가 제거되는 것으로 나타났으며 전압의 침투값이 증가함에 따라 메틸오렌지 제거속도가 증가하는 것으로 관찰되었다. 인가전압 증가에 따라 메틸오렌지 제거속도의 증가는 전압이 증가함에 따라 전계강도 및 방전에너지가 증가하여 강한 방전이 생성되므로 높은 에너지를 가진 전자가 생성되고 OH를 포함한 화학적 활성종들의 생성이 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

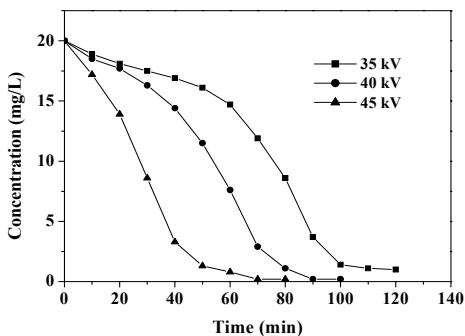


Fig. 4. Effect of applied voltage on the degradation of methyl orange in aqueous solution ($MO_0=30\text{mg/L}$, $C_0=100\ \mu\text{S/cm}$, $pH_0=5.6$).

용액의 초기 전도도가 100 μS/cm인 조건에서 45kV의 침투값을 가진 펄스전압이 인가될 때, 메틸오렌지 분해속도에 미치는 pH의 영향을 Fig. 5에 나타내었다. 메틸오렌지 제거속도는 pH가 감소함에 따라 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 고급산화 공정에서 산화반응 메카니즘은 pH에 민감한 것으로 알려져 있다(Sugiarto et al., 2002; Sugiarto et al.,

2003; Njatawidjaja et al., 2005). 일반적으로 pH가 7보다 높은 조건에서는 OH 라디칼은 비선택성이 증가하며 유기물질의 산화로부터 생성된 탄산염 이온들과 쉽게 반응할 수 있으므로 산화반응의 효율성을 감소시킬 수 있다(Kang 등, 2000). 또한, 산성 조건에서는 H₂O₂가 선택적으로 OH 라디칼로 분해되는 것으로 알려져 있다(Grymonpre et al., 2001). 따라서, 용액의 pH가 감소할수록 메틸오렌지 산화에 중요한 역할을 하는 OH 라디칼 생성이 증가하게 되고 메틸오렌지와 선택적 반응이 증진되므로 메틸오렌지 제거속도가 증가하는 것으로 판단된다.

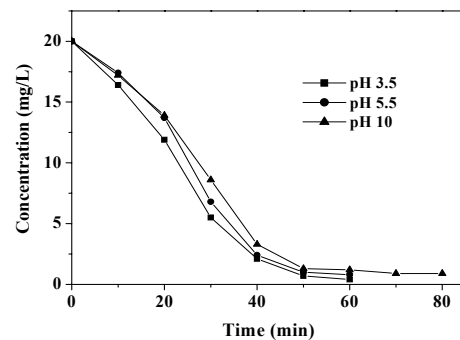


Fig. 5. Effect of pH on the methyl orange degradation in aqueous solution ($MO_0=20\text{mg/L}$, $C_0=100\ \mu\text{S/cm}$, $V_p=45\text{kV}$).

Fig. 6은 메틸오렌지 초기농도가 20mg/L, 용액의 초기 pH가 5.6인 조건에서 40kV의 침투값을 가진 펄스전압이 인가될 때, 메틸오렌지 제거속도에 미치는 초기전도도의 영향을 나타내고 있다. 비록 50 μS/cm와 100 μS/cm의 전도도 조건에서는 큰 차이를 보이지 않았으나 메틸오렌지 제거속도는 100 μS/cm의 전도도 조건에서 가장 빠른 것으로 나타났으며 50 μS/cm, 200 μS/cm의 순으로 빠르게 나타났다. 비록 실험된 전도도의 범위가 본 연구와 큰 차이를 보이지만 Zhang et al.(2009)에 의하면, 500~2000 μS/cm의 범위에서 전도도 증가는 메틸오렌지 제거속도를 감소시키는 것으로 나타났다.

용액의 전기전도도는 방전특성에 영향을 미치므로 라디칼 생성에 중요한 영향을 미칠 수 있다(정 등, 2010). Sun et al.(1997)은 펄스 코로나 방전의 방출스펙트럼 분석을 통해 OH 라디칼 생성에 미치는 전도도의 영향을 관찰하였으며 OH 라디칼 발생 강도는 전도도가 일정한 값까지 증가함에 따라 증가하였으나 그 이상으로 전도도가 증가하면 급격하게 감소하는 것으로 보고하였다. Sato et al.(1999)에 의하면, 전도도가 높은 조건에서는 농도가 진하고 차가운 플라즈마가 생성되므로 OH와 O 라디칼들의 생성은 $100 \mu\text{S}/\text{cm}$ 이하 범위의 전도도를 가진 용액에서 더 효과적이다. 이러한 경향의 원인에 대해서는 명확하지 않으나 용액전도도가 일정한 값까지 증가함에 따라 용액의 저항을 감소시켜 전자의 활성도를 증가시키지만 추가의 증가는 전계강도를 낮추고 라디칼의 생성과 무관한 이온종들로 방전에너지가 소모되기 때문일 것으로 사료된다.

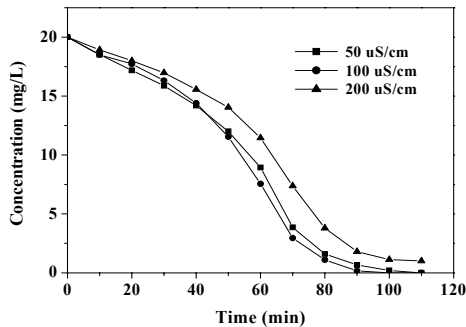


Fig. 6. Dependence of methyl orange degradation on solution conductivity ($\text{MO}_0=20\text{mg/L}$, $\text{pH}_0=5.6$, $V_p=40\text{kV}$).

용액의 초기 전도도가 $100 \mu\text{S}/\text{cm}$ 인 조건에서 40kV 의 첨두값을 가진 펄스전압을 인가할 때, 메틸오렌지 제거효율에 미치는 초기농도의 영향을 Fig. 7에 나타내었다. 모든 초기농도 조건에서 메틸오렌지는 일정한 시간까지 빠르게 제거되어 95% 이상의 제거효율이 얻어지는 것으로 나타났다. 약 95%

이상의 메틸오렌지가 제거되는데 걸리는 시간은 초기농도가 20, 30, 60mg/L 일 때, 각각 50, 80, 120분으로 나타나 초기 농도가 낮을수록 빠르게 제거되는 것으로 나타났다.

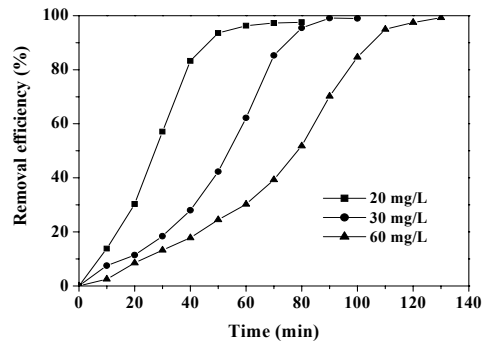


Fig. 7. Effect of initial concentration on methyl orange degradation in aqueous solution ($C_0=100 \mu\text{S}/\text{cm}$, $\text{pH}_0=5.68$, $V_p=40\text{kV}$).

4. 결론

펄스 코로나 방전에 의한 염색폐수 처리 가능성을 평가하기 위해 실험실 규모의 수중 펄스 코로나 방전시스템을 구성하여 메틸오렌지 제거 특성에 관한 실험을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 펄스 코로나 방전에 의해 메틸오렌지가 분해될 때 용액의 pH는 감소하고 전도도는 증가하는 것으로 나타났으며 이는 코로나 방전에 의한 메틸오렌지 분해생성물의 영향으로 추정된다.

2. 방전 반응기로 인가되는 펄스전압의 첨두값이 증가함에 따라 메틸오렌지 제거속도가 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 전압의 첨두값이 증가하면 전계강도 및 방전에너지가 증가하여 강한 방전이 생성되고 높은 에너지를 가진 전자가 생성되어 화학적 활성종 생성이 증가하기 때문인 것으로 사료된다.

3. 용액의 초기 pH가 감소함에 따라 메틸오렌지 제거속도가 증가하는 것으로 나타났다. 실험된 범위인 $50\sim 200 \mu\text{S}/\text{cm}$ 의 전도도 범위에서 메틸오렌지

제거속도는 $100\mu\text{S}/\text{cm}$ 조건에서 가장 높았으며 $50\mu\text{S}/\text{cm}$, $200\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 순으로 나타났다.

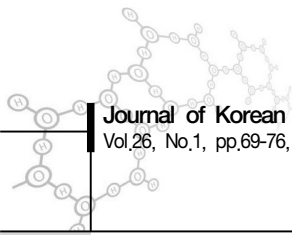
4. 20~60mg/L의 초기농도를 가진 메틸오렌지는 방전시간이 경과함에 따라 효과적으로 제거되는 것으로 나타났다. 모든 조건에서 95% 이상의 메틸오렌지가 제거되었으며 초기농도가 작을수록 빠르게 제거되는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 경남과학기술대학교 2011년도 기성회 연구비 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 박영식, 김동석 (2011) 전기분해 공정을 이용한 E. coli 소독에 미치는 인공하수 수질의 영향, 한국환경과학회지, 20(9), pp. 1115-1124.
- 양용운 (1996) 염색폐수의 색도제거기술현황 및 대책방안, 첨단환경기술, 11, pp. 2-11.
- 이현돈, 정재우, 조무현 (2007) 펄스 코로나 방전에 의한 액체상 페놀 전환 특성, 대한환경공학회지, 29(1), pp. 40-46.
- 이현돈, 김종오, 정재우 (2010) 벨러스트 수 처리를 위한 Plasma Gun의 오존생성에 미치는 운전변수의 영향, 한국향해항만학회지, 34(3), pp. 205-211.
- 정재우, 박정욱, 이춘식 (2010a) 오존 접촉 반응기의 용존 오존 농도 및 페놀 분해에 미치는 운전변수의 영향, 대한환경공학회지, 32(3), pp. 241-247.
- 정재우, 문지훈, 박은옥 (2010b) 펄스 코로나 방전에 의한 페놀 분해에 미치는 운전변수의 영향, 대한환경공학회지, 32(1), pp. 1247-1254.
- 정재우, Bruce R, Locke (2007) 기체-액체 혼합 방전 공정의 화학적 활성종 생성 특성, 대한환경공학회지, 29(5), pp. 556-563.
- Chun, H., Wang, Y. Z., Tang, H. X. (2000) Destruction of phenol aqueous solution by photocatalysis or direct photolysis, Chemosphere 41, pp. 1205-1209.
- Clements, J. S., Sato, M., Davis, R. H. (1987) Preliminary investigation of prebreakdown phenomena and chemical reactions using a pulsed high voltage discharge in water, IEEE Trans. Ind. Appl. IA-23, pp. 224-235.
- Doong, R. A., Chen, C. H., Maithreepala, R. A., Chang, S. M. (2001) The influence of pH and cadmium sulfide on the photocatalytic degradation of 2-chlorophenol in titanium dioxide suspensions, Water Res. 35, pp. 2873-2880.
- Grymonpre, D., Sharma, A. K., Finney, W. C., Locke, B. R. (2001) The role of Fenton's reactions in aqueous phase pulsed streamer corona reactors, Chem. Eng. J. 82, pp. 189-207.
- Joshi, A. A., Locke, B. R., Arce, P., Finney, W. C. (1995) Formation for hydroxyl radicals, hydrogen peroxide and aqueous by pulsed streamer corona discharge in aqueous solution," J. Hazard. Mater., 41, pp. 3-30.
- Kang, F. S., Liao, C. H., Po, S. T. (2000) Decolorization of textile wastewater by photo-fenton oxidation technology, Chemosphere, 41(8), pp. 1287-1297.
- Lin, K. J., Cooper, J. W., Nickelsen, M. G., Kurucz, C. N., Waite, T. D. (1995) Decomposition of aqueous solutions of phenol using high energy electron beam irradiation-a large scale study, Appl. Radiat. Isot., 46, pp. 1307-1316.
- Locke, B. R., Sato, M., Sunka, P., Hoffmann, M. R., Chang, J. S. (2006) Electrohydraulic discharge and nonthermal plasma for water treatment, Ind. Eng. Chem. Res. 45, pp. 882-905.
- Magee, J. L., Chatterjee, A. (1987) Radiation Chemistry; Principles and application, VCH Publisher, Inc., New York, pp. 137-171.
- Malik, M. A., Ghaffar, A., Malik, S. A. (2001) Water purification by electrical discharges, Plasma Sources Sci. Technol., 10, pp. 82-91.
- Njatawidjaja, E., Sugiarto, A. T., Ohshima, T., Sato, M. (2005) Decoloration of electrostatically atomized organic dye by the pulsed streamer corona discharge, J. Electrostatics, 63, pp. 353-359.
- Perkins, W. W., Judkins, J. F., Perry, W. D. (1980) Renovation of dyebath water by chlorination or ozonation, Part : reaction of dyes, Textile Chem. Color., 12, pp. 182-187.
- Perkins, W. S. (1999) Oxidative decoloration of dyes in aqueous medium, Text. Chem. Color., 1(4), pp. 33-37.
- Sato, M., Sun, B., Ohshima, T., Sagi, Y. (1999) Characteristics



- of active species and removal of organic compounds by a pulsed corona discharge in water, *J. Adv. Ox. Tech*, 4, pp. 339-342.
- Sugiarto, A. T., Ohshima, T., Sato, M. (2002) Advanced oxidation processes using pulsed streamer corona discharge in water, *Thin Solid Films*, 407, pp. 174-178.
- Sugiarto, A. T., Ito S., Ohshima T., Sato, M., Skalny, J. D. (2003) Oxidative decoloration of dyes by pulsed discharge plasma in water, *J. Electrostatics*, 58, pp. 135-145.
- Sun, B., Sato, M., Clements, J. S. (1997) Optical study of active species produced by a pulsed streamer corona discharge in water, *J. Electrostatics* 39, pp. 189-202.
- Sunka, P., Babicky, V., Clupek, M., Lukes, P., Simek, M., Schmidt, J., Cernak, M. (1999) Generation of chemically active species by electrical discharges in water, *Plasma Sources Sci. Technol.*, 8, pp. 258-265.
- Zhang, L., Sun, B., Zhu, X. (2009) Organic dye removal from aqueous solution by pulsed discharge on the pinhole, *J. Electrostatics*, 67, pp. 62-66.