

수중 유기물처리를 위한 광페톤반응의 최적조건 도출

오태협 · 이한욱 · 박성직 · 박재우*

한양대학교 건설환경공학과

Identifications of Optimal Conditions for Photo-Fenton Reaction in Water Treatment

Tae Hyup Oh · Hanuk Lee · Sung Jik Park · Jae-Woo Park*

Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

ABSTRACT

Fenton is the reaction using the $\text{OH}\cdot$ radicals generating by interaction between hydrogen peroxide and Fe^{2+} which can oxidize the contaminants. Fe^{2+} ions are oxidized to Fe^{3+} ions by reaction with H_2O_2 and formed $\text{OH}\cdot$ radicals. UV-Fenton process includes the additional reaction that generates the $\text{OH}\cdot$ radicals by photodegradation of H_2O_2 . In methyloange (MO) decolourization experiment with UV-Fenton, optimal $\text{Fe}^{2+} : \text{H}_2\text{O}_2$ ratio was obtained at 1 : 10. Based on the obtained condition ($\text{H}_2\text{O}_2 = 10 \text{ mM}$, $\text{Fe}^{2+} = 1 \text{ mM}$) with/without UV-fenton experiment was carried out. Removal efficiency and sludge production were measured at 30 min. The case of w/o UV irradiation and only H_2O_2 was hardly treated and only Fe^{2+} showed 65% removal owing to coagulation. When UV-Fenton process in optimal ratio ($\text{Fe}^{2+} : \text{H}_2\text{O}_2 = 1 : 10$), UV irradiation showed better removal efficiency than of w/o UV irradiation. Also, MO decolourization was a function of the hydrogen peroxide concentration (x_1), $\text{Fe}^{2+} : \text{H}_2\text{O}_2$ ratio (x_2), and numbers of UV lamp (x_3) from the application of the response surface methodology. Statistical results showed the order of significance of the independent variables to be hydrogen peroxide concentration > numbers of UV lamp > $\text{Fe}^{2+} : \text{H}_2\text{O}_2$ ratio.

Key words : Fenton, UV, Response surface methodology

1. 서 론

최근 지하수 오염, 침출수 등의 문제로 지하수처리 기술로서 고도산화처리(Advanced Oxidation Processes, AOPs) 기술이 조명을 받고 있다(Antonio and Roberto, 2014; Yan and Casey, 2011). 고도산화공정은 기존의 오존, 염소산화의 한계를 극복하고자 제시된 방법으로서, 강력한 산화력을 갖는 $\text{OH}\cdot$ 라디칼(산화전위 = 2.8 V)을 인위적으로 생성시켜 난분해성 물질 및 유기오염원과 반응하여 상대적으로 무해한 CO_2 , H_2O 혹은 무기염으로 완전 분해시키는 기술이다(Table 1). 고도산화처리는 펜톤산화법, 오존산화법을 시작으로 TiO_2 등의 광촉매를 사용하는 방식까지 다양하게 발전되어 왔다.

펜톤산화법은 2가철이온과 과산화수소의 반응으로 $\text{OH}\cdot$

라디칼을 형성하여 오염물질을 산화시켜 제거하는 방식이다. (1) 식과 같이 2가철이온이 3가철이온으로 산화되면서 발생한 전자가 과산화수소와 반응하여 $\text{OH}\cdot$ 라디칼을 생성한다. 펜톤산화법은 대부분의 염료에 대해 좋은 처리효율을 보이거나 2가철이온과 과산화수소의 비율이 맞지 않을 경우 식 (4), (5)과 같이 2가철이온과 과산화수소가 $\text{OH}\cdot$ 라디칼 생성에 스케벤저 역할을 하여 처리효율을 저하시킬 수 있다. 과량의 과산화수소가 주입되면 $\text{OH}\cdot$ 라디칼과 잔존 과산화수소가 반응하여 상대적으로 낮은 산화전위를 갖는 $\text{HO}_2\cdot$ 라디칼을 생성하며 이에 따라 오염물질의 처리효율이 감소하게 된다(Neyens and Baeyens, 2003). 또한 과량의 2가철이온이 주입되면 $\text{OH}\cdot$ 라디칼이 2가철이온과 반응하여 수산화이온을 발생시켜 오염물질 산화에 사용되는 $\text{OH}\cdot$ 라디칼의 양을 저하시키는 경향을 나

*Corresponding author : jaewoopark@hanyang.ac.kr

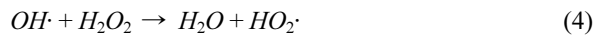
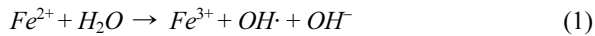
Received : 2015. 12. 7 Reviewed : 2015. 12. 9 Accepted : 2015. 12. 9

Discussion until : 2016. 4. 30

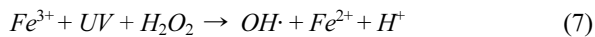
Table 1. Oxidation potential of various type of oxidants

Oxidizing agent	Oxidation potential (V)	Relative oxidation power
OH·	2.8	2.06
O ₃	2.07	1.52
H ₂ O ₂	1.77	1.3
HO ₂ ·	1.70	1.25
Cl	1.36	1

타내기 때문에 2가철이온과 과산화수소의 최적비율을 결정하는 것이 중요하다(Sun et al., 2007; Kim et al., 2004; Karthikeyan et al., 2011).



페톤반응에 광원을 추가한 광페톤반응은 식 (6)의 H₂O₂의 광분해로 인해 발생하는 OH· 라디칼과 식 (7)의 3가철이온의 광환원으로 인해 발생하는 OH· 라디칼 등에 의해 추가적인 오염물질 제거가 일어난다. 즉, 페톤반응에서 산화되어 발생하는 3가철이온은 자외선을 조사하면 2가철이온으로 광환원이 되어 지속적인 반응이 가능해 페톤반응보다 더 높은 처리효율을 보인다(Romero et al., 2016).

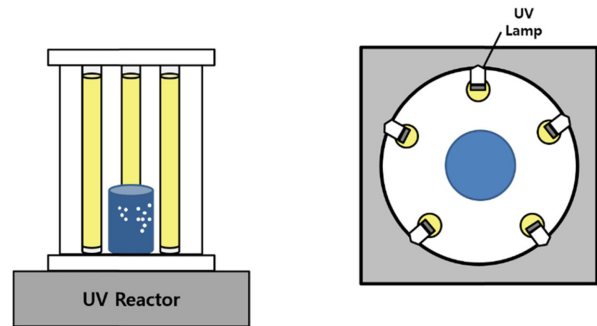


본 연구에서는 광페톤반응의 영향인자(2가철이온, 과산화수소 주입량, 과산화수소/2가철이온 비율, 자외선 램프 개수 등)를 고려하여 각 인자별 최적인전조건을 도출하고, 최적조건에서의 페톤반응과 광페톤반응간의 슬러지 발생량을 비교하여 제거효율과의 상관관계를 분석하였다. 또한 제조업체의 품질관리 및 제조공정의 최적화와 신제품 개발 예측을 위한 연구를 위해 활용되고 있으며, 생물공정 및 화학공정 등에서의 예측 및 최적화를 위한 연구에도 적용되고 있는 반응표면분석법을 통해 최적의 효율을 보이기 위한 최적 조건을 제시하였다.

2. 연구방법

2.1. 실험절차

본 실험에서는 대량염료로서 메틸오렌지(Methylorange)

**Fig. 1.** UV reactor for photo-fenton experiment.

를 사용하였으며, 페톤 반응에 사용한 2가철이온은 FeSO₄·7H₂O를 사용하였다. 최적조건의 광페톤반응 조건을 도출하기 위해 메틸오렌지 농도, 과산화수소 주입량, 과산화수소/2가철이온 비율, 자외선 램프 개수 등의 조건에 변화를 주어 메틸오렌지의 제거효율을 비교하였다. 모든 반응은 Fig. 1의 반응기 내에서 이루어졌으며, 교반속도는 150 rpm으로 고정하여 실험을 진행하였다. 광원으로는 254 nm의 파장을 조사하는 자외선램프(UV-C lamp, 6 W)를 사용하였으며, 5개를 램프를 반응기 중심에 놓여진 석영비커로부터 8cm거리를 유지하여 원형으로 배치하였다. 샘플링은 각 시간별로 시료를 채취한 후 0.5 M의 NaOH로 킨칭하여 잔존해있는 철이온들과 과수간의 반응을 억제시켰으며, 이후 메틸오렌지의 농도를 측정하였다(David A. et al., 1994).

2.2. 분석방법

초기 메틸오렌지 수용액 및 최종 처리수의 pH는 pH 측정기(MV Meter-860031)를 이용하여 측정하였으며 초기 pH는 6.6-6.8, 최종 처리수의 pH는 3.5-3.6이었다. 샘플링은 초기반응속도가 빠른 페톤반응의 제거효율을 측정하기 위해 1, 3, 5, 10, 20, 30분마다 시료를 채취하였고 0.45 µm GF/C 필터를 통과한 용액의 메틸오렌지 농도를 측정하였다. 농도는 메틸오렌지의 최대 흡수파장인 465 nm에서 UV-Vis spectrophotometer(Hach)를 사용하여 측정하였으며 TOC는 TOC Analyzers(Shimadzu, TOC-L)를 활용하여 측정하였다. 슬러지량의 경우 최종 처리수를 미리 오븐에서 건조한 GF/C(Whatman) 필터를 사용하여 걸러낸 후 2시간동안 오븐(65°C)에서 건조하여 필터링 전후의 필터 무게변화를 통해 결정하였다.

2.3. 반응표면 분석방법

반응표면분석법을 이용하여 광페톤반응에서 염료의 제

Table 2. Box-Behnken design for experiment with results

Code		Explanatory variables		
		H ₂ O ₂	Ratio (H ₂ O ₂ / Fe ²⁺)	UV lamp
Min. level	-1	5	5	1
Central level	0	10	10	3
Max. level	+1	15	15	5

Run order	Coded factor			Uncoded factor			MO Removal ratio -ln(C/C ₀)
	H ₂ O ₂	ratio	UV lamp	H ₂ O ₂	Ratio	UV lamp	
1	0	0	0	10	10	3	6.66
2	-1	0	-1	5	10	1	2.06
3	+1	-1	0	15	5	3	2.72
4	-1	+1	0	5	15	3	3.26
5	+1	0	-1	15	10	1	2.21
6	0	-1	-1	10	5	1	3.37
7	0	0	0	10	10	3	6.66
8	+1	0	+1	15	10	5	4.51
9	0	0	0	10	10	3	6.66
10	0	+1	-1	10	15	1	4.07
11	0	+1	+1	10	15	5	6.37
12	-1	0	+1	5	10	5	4.37
13	+1	+1	0	15	15	3	3.41
14	-1	-1	0	5	5	3	2.57
15	0	-1	+1	10	5	5	5.68

거 특성분석을 실시하였으며, 실험계획은 중심합성계획 중 Box-Behnken 실험설계법을 적용하였다. Box-Behnken법은 균형 불완비 블록 계획법에 2^k 요인 배치계획을 결합하여 기본계획을 수립하고, 중심점에서 실험수 n_c 를 추가시켜서 2차 반응표면식을 추정할 수 있는 새로운 실험계획법으로써 실험계획 시 설계하는 실험범위의 모서리들의 중심과 전체 실험 영역의 중심에서 실험을 하는 계획이다 (Song and Jang, 2009; An et al., 2010; Cho et al., 2007).

본 연구에서 사용한 독립변수로는 과산화수소 주입량 (x_1), 과산화수소/2가철이온 비율(x_2), 자외선 램프 개수(x_3)과 종속변수로는 메틸오렌지 제거효율(y)을 각각 설정하였다. 메틸오렌지의 최적 제거조건의 결정은 표면도 혹은 등고선도를 작성하여 판단하였으며 각 변수의 설정범위는 기초실험을 통하여 큰 영향을 미치는 변수와 그 범위를 선정하였다(Table 2). Box-Behnken법에 의한 실험 결과는 Minitab(version 16, Minitab Inc., U.S.A)을 사용하여 통계처리를 하였으며, 모든 실험은 3회 반복 측정하여 그 평균값을 회귀분석에 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 광펜톤반응의 최적 조건 도출 실험

본 연구에서는 메틸오렌지 제거에 영향을 주는 요인으로 메틸오렌지 농도, 과산화수소 주입량, 과산화수소/2가철이온 비율, 및 자외선 램프 개수 등의 조건을 선정하였으며 이 조건들을 변화시켜 메틸오렌지의 농도변화를 관찰하였다. 먼저 과산화수소 주입량에 따른 메틸오렌지의 제거 효율을 관찰하기 위해 2가철이온의 농도를 1 mM로, 자외선 램프 개수는 5개로 고정하고 과산화수소의 주입량을 5, 10, 50 mM로 변화시켜 메틸오렌지의 농도변화를 측정하였다(Fig. 2a). 실험 결과 10 mM의 과산화수소를 주입한 조건에서 가장 높은 제거효율을 보였는데 이는 과산화수소의 주입량이 중요한 요소이긴 하지만 산화제로서의 역할뿐만 아니라 2가철이온과의 반응을 통한 OH· 라디칼 생성에 대한 부분도 중요한 고려사항이라는 것을 나타낸다. 따라서 무조건적인 과산화수소의 주입보다는 2가철이온과 과산화수소 주입량과의 비율이 중요한 요소 중 하나이며, 이에 최적비율을 찾기 위한 실험을 진행하였다.

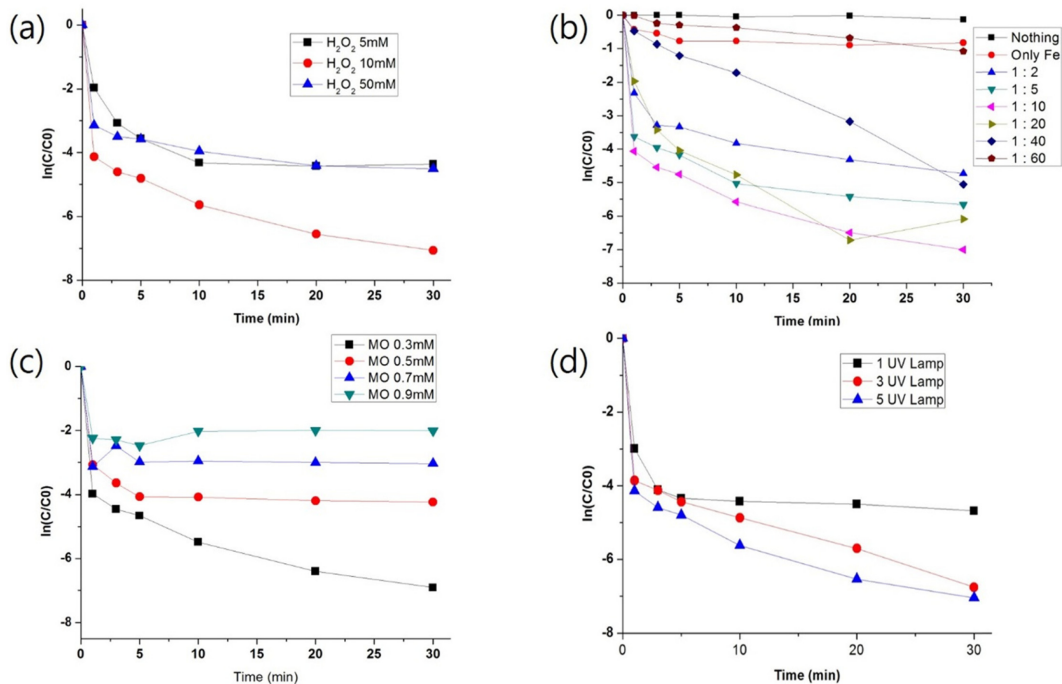


Fig. 2. (a) Effect of H_2O_2 dosage on the decolorization in photo-Fenton process ($Fe^{2+} = 1 \text{ mM}$), (b) Effect of $Fe^{2+} : H_2O_2$ ratio on the decolorization in photo-Fenton process ($H_2O_2 = 10 \text{ mM}$), (c) Photo-fenton degradation at various MO concentration ($Fe^{2+} = 1 \text{ mM}$, $H_2O_2 = 10 \text{ mM}$), (d) Photo-fenton degradation with 1, 3, 5 UV lamps.

과산화수소와 2가철이온 주입량의 최적비율(H_2O_2/Fe^{2+})을 도출하기 위해 과산화수소의 주입량은 10mM를 고정화한 후 비율을 2, 5, 10, 20, 40, 60으로 변화시키며 제거실험을 진행하였다(Fig. 2b). 실험 결과 과산화수소/2가철이온 비율이 10인 조건에서 가장 높은 처리효율을 나타내었다. 과산화수소/2가철이온 비율이 20, 40, 60인 경우에는 과산화수소의 주입량이 2가철이온에 비해 상당히 많아 과산화수소와 2가철이온과의 반응을 통해 생성된 $OH\cdot$ 라디칼이 잔존하고 있는 과산화수소와의 반응을 통해 소모됨에 따라 제거효율이 오히려 감소한 것으로 판단되며 이는 식 (6), (7)의 반응과도 일치하는 결과이다. 반대로 과산화수소/2가철이온 비율이 2, 5인 경우에는 과산화수소가 2가철이온에 비해 적게 주입되어 빠르게 과산화수소와 2가철이온과의 반응이 끝나 모든 과산화수소가 소모됨에 따라 더 이상의 메틸오렌지 제거반응이 일어나지 않은 것으로 판단된다. 한편 2가철이온만 주입한 조건에서도 메틸오렌지 일부가 제거되었는데 이는 메틸오렌지가 2가철이온에 흡착·침전됨에 따라 제거된 것으로 판단된다(Arslan, 2001).

앞서 도출된 과산화수소 주입량 10 mM, 과산화수소/2가철이온 비율 = 10의 조건을 바탕으로 메틸오렌지 초기 농도를 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 mM로 변화시켜 제거실험을 진행하였다(Fig. 2c). 실험 결과 메틸오렌지의 농도가 낮을

수록 높은 제거효율을 보였으며, 특히 초기농도가 0.7, 0.9 mM인 조건에선 5분만에 반응이 종료되었다. 이는 2가철이온과 과산화수소의 정량적인 주입량이 부족함에 따라 초기에 반응이 끝난 것으로 판단되며 따라서 고농도의 오염물질을 제거하기 위해서 비율을 유지하되 전체적인 양을 증가시킬 필요가 있는 것으로 사료된다.

자외선 램프 개수에 따른 제거효율 변화를 관찰하기 위해 메틸오렌지 초기농도 = 0.5 mM, 과산화수소의 주입량은 10 mM, 과산화수소/2가철이온 비율 = 10인 조건에서 자외선 램프를 1, 3, 5개로 변화시키면서 제거실험을 진행하였다(Fig. 2d). 실험 결과 자외선 램프의 개수가 증가함에 따라 제거효율 또한 증가하는 것으로 나타났다. 한편 초기 5분 동안에는 자외선 램프의 개수와 상관없이 처리효율에 큰 차이가 나타나지 않았는데 이는 반응 초기에는 수용액 내 2가철이온이 다량 존재하기 때문에 2가철이온과 과산화수소와의 반응에 의해 생성된 $OH\cdot$ 라디칼에 의한 메틸오렌지 분해가 주 메커니즘이기 때문이다. 하지만 반응이 시작된 지 5분 이후로는 산화된 3가철이온이 수용액 상에 증가함에 따라 자외선에 의한 2가철이온으로의 광환원반응이 시작되어 자외선 램프의 개수에 따른 제거효율 차이가 발생한 것으로 판단된다. 따라서 조사되는 자외선 에너지의 양이 많을수록 2가철이온으로의 광환원

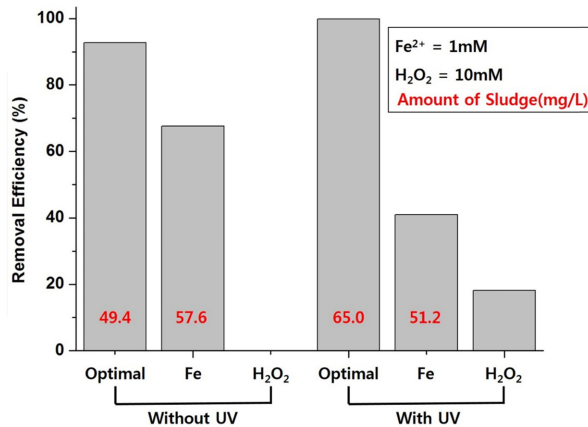


Fig. 3. Removal efficiency in the condition of with/without UV.

반응이 더 활발하게 일어나게 되고 이에 따라 더 높은 제거효율 보이는 것이라 사료된다.

3.2. 펜톤반응과 광펜톤반응의 처리효율 및 슬러지 발생량 비교

자외선 조사에 따른 펜톤반응의 영향을 살펴보기 위해 펜톤반응 및 광펜톤반응의 처리효율과 발생하는 슬러지 발생량 비교를 위한 실험을 진행하였다(Fig. 3). 실험 결과 최적조건에서 펜톤반응과 광펜톤반응의 처리 효율이 각각 92.0%, 99.9%로 나타났으며 슬러지 발생량은 49.4, 65 g/mL로 나타나 처리효율과 슬러지 발생량이 비례하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 한편 2가철이온만 주입한 경우에는 자외선을 조사하지 않은 경우의 제거효율이 자외선을 조사한 경우보다 더 높게 나타났는데 이는 자외선에 의한 3가철이온의 광환원이 2가철이온과 메틸오렌지 사이의 흡착 반응에 방해하는 요소로 작용하였기 때문이라 판단된다. 광펜톤반응과 마찬가지로 2가철이온만 주입한 경우에도 슬러지 발생량이 제거효율과 비례하는 경향을 보이는 것으로 나타났다.

3.3. 반응표면분석에 의한 반응모델 추정

실험설계법에 의해 설정된 조합에 따라 메틸오렌지 제거효율을 매치시킨 후 프로그램을 통해 반응표면분석을 실시하였다. 완전 2차식으로 분석한 분산분석 결과, 결정계수는 99.99%였으며 수정계수 또한 99.9%로 나타나 종속변수 변이의 99.9%를 설명할 수 있는 높은 기여율을 보여주고 있다. 따라서 관측점들의 변동을 표본회귀선에서 매우 높게 설명해 주고 있는 것으로 판단된다. 한편 Table 2에서 제시한 변수들의 기본단위가 다르기 때문에 이들 변수들을 코드화하여 통일된 변수로 적용한 후 모델식을 산출하였다. 산출된 모델 식은 (8)와 같으며, 여기서 x_1 , x_2 , x_3 는 각각 과산화수소 주입량, 과산화수소/2가철이온 비율, 그리고 자외선 램프 개수이다.

$$y = 2.74 + 0.074x_1 + 0.041x_2 + 1.16x_3 - 2.63x_1^2 - 0.0001x_2^2 - 0.75x_3^2 - 0.0025x_1x_3 - 0.00002x_2x_3 \quad (8)$$

또한 전체 모델의 적합성 외에 전체 모델에 어떻게 영향을 주는지를 파악하기 위하여 Table 3의 회귀분석 및 분산분석(ANOVA test)을 수행한 결과 선형항, 순수 2차항의 p값이 0.000(< 0.05), 0.000(< 0.05)로 매우 높은 유의성을 나타내었으나 교차항의 경우 p값이 높게 나타나 유의성이 많이 떨어지는 것으로 나타났다. 이는 모델 식 (8)에서의 교차항의 계수 값이 매우 낮은 값을 나타내는 것과 일치하는 결과를 보이는 것으로 판단된다. 본 연구에서는 교호작용항에 대한 p값이 유의하지는 않지만 반응모델식에서 제외하지 않고 포함하였다. F-검정값의 경우 주효과를 나타내는 선형항의 F-값이 교호항의 F-값에 비하여 월등히 높은 것으로 나타났다. 한편 순수 2차항의 F-값이 선형항의 값보다 크게 나타났는데 이를 통해 실험의 측정값에 대한 변동에 주효과도 영향을 미치지만 본 연구의 경우 반응표면 2차 모델이 더 적절하다는 것을 확인할 수 있었다 (Fereidouni et al., 2009).

Table 3. Regression analysis and response surface model fitting

Source	DF ^{a)}	Seq.SS ^{b)}	F ^{c)}	P ^{d)}
Regression	9	40.61	902514.41	0.000
Linear	3	11.63	406228.92	0.000
Square	3	28.98	1932294.89	0.000
Interaction	3	0	3.33	0.114
Residual error	5	0		
Lack-of-Fit	3	0		
Pure error	2	0		
Total	14	40.62		

a) DF : Degree of freedom, b) Seq. SS : Sum of squares, c) F : F value, and d) P : P value

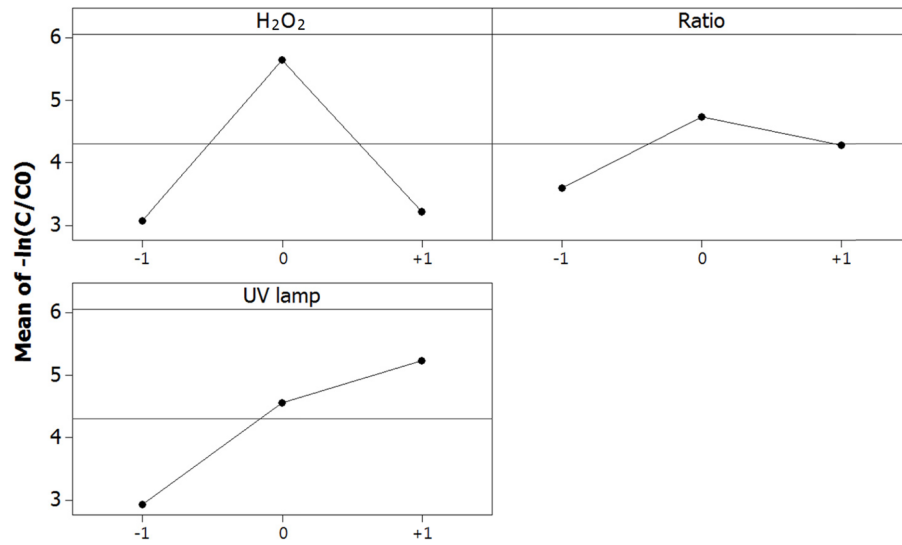
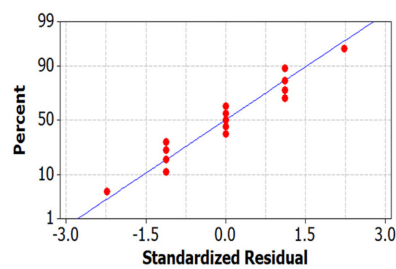
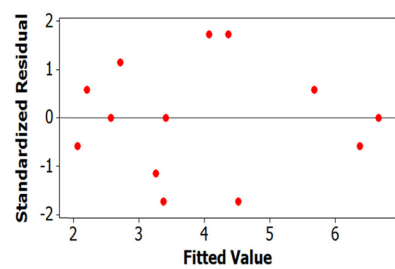


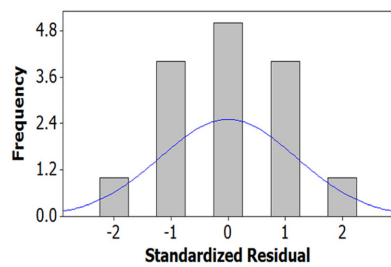
Fig. 4. Results of ANOVA test for MO removal ratio at main effect.



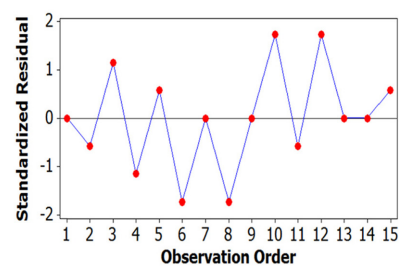
(a) Normal probability plot of the residuals



(b) Residuals versus the fitted values



(c) Histogram of the residuals



(d) Residuals versus the order of the data

Fig. 5. Residual plot of model for error values.

Fig. 4은 각 독립변수의 독립변수의 주효과도를 나타내었다. 주효과도는 기울기가 클수록 주효과가 큰 것을 나타낸다. 분석 결과 과산화수소의 주입량이 가장 큰 변수로 작용하는 것으로 나타났으며 자외선 램프 개수, 과산화수소/2가철이온 비율 순서로 효과가 작아지는 것을 확인할 수 있었다.

3.4. 반응표면분석에 의한 반응모델 추정

반응표면분석을 통해 얻어진 모형의 오차항에 대한 잔차분석을 통하여 전체적인 모형의 적합정도를 판단하였다. 회귀분석에서 잔차분석은 모형의 적합성을 도출하는데 중요한 역할을 하게 되며, 적절한 회귀모형이 가져야할 잔차에 대한 기본 가정으로 잔차는 평균이 0이고, 분석은

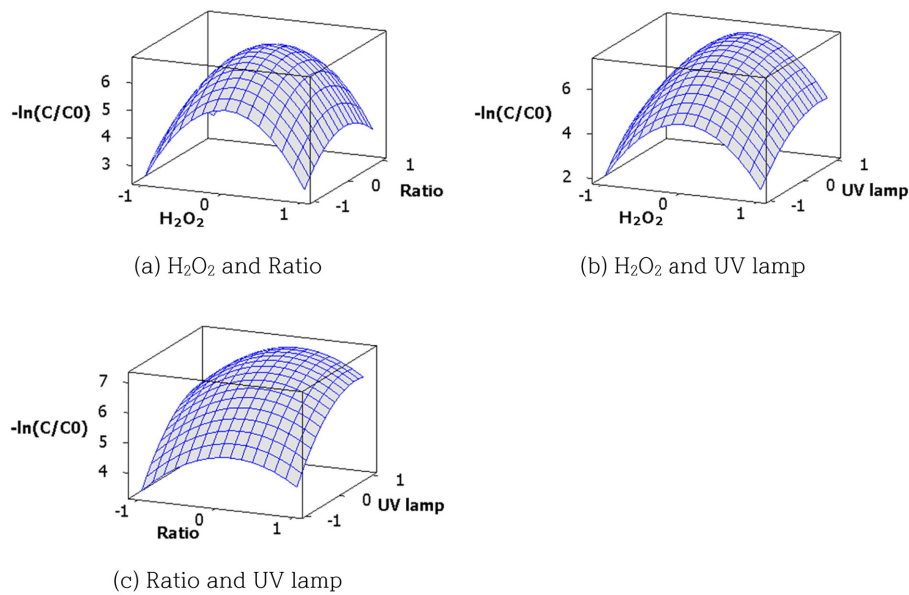


Fig. 6. Response surface plot (3D) for MO removal ratio.

일정해야 하며, 정규분포와 서로 독립적인 것으로 선정하였다. 잔차분석은 실험에서 얻어진 결과들이 정규분포, 평균과 분산, 상호독립성 그리고 독립변수와 종속변수사이의 관계가 선형관계 조건을 만족한다는 가정 하에 판단하였다(An et al., 2013).

Fig. 5의 결과 정규확률도에서 모든 데이터들이 잔차 -2에서 2사이에 직선적으로 분포됨에 따라 정규분포를 나타내었고, 잔차-적합치의 경우 잔차분포가 0을 중심으로 분포되어 있다. 또한, 히스토그램을 통해 정규분포를 보여주고 있으며, 잔차-데이터 순서의 경우 모든 관측치에서 -2에서 2사이에 모든 데이터들이 분포되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 오차항에 대한 4가지 가정인 정규성, 등분산성, 독립성, 그리고 선형성을 모두 만족하여 모델에 문제가 없는 것으로 나타났다.

3.5. 최적반응조건 결정

Fig. 6은 최적반응조건을 결정하기 위해 추정된 반응표면 모델식을 이용하여 메틸오렌지 제거효율에 관한 반응표면도(3D)를 작성하였다. 또한 이를 보다 정량화하기 위하여 만족도 함수를 이용하여 최적반응조건을 도출하였다. 반응표면도를 보면 실험범위 내에서 과산화수소의 주입량이 10 mM이고, 과산화수소/2가철이온 비율이 10일 때, 그리고 자외선 램프의 개수가 클수록 제거효율이 높아지는 것으로 나타났다. 또한, 만족도 함수를 이용하여 반응변수에 대한 개별 만족도를 산출한 후, 목표치에 대한 최적 반응변수를 도출하였는데 목표값으로 메틸오렌지를

99% 이상 제거하기 위한 최적조건으로는 과산화수소 주입량이 7.5~12.5 mM이고 자외선 램프가 2개 이상인 모든 과산화수소/2가철이온 비율에서 99% 이상의 제거효율을 만족하는 것으로 분석되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 광페톤반응의 영향인자(2가철이온, 과산화수소 주입량, 과산화수소/2가철이온 비율, 자외선 램프 개수 등)를 고려하여 각 인자별 최적운전조건을 도출하였다. 실험 결과 2가철이온 = 1 mM, 과산화수소 주입량 = 10 mM, 과산화수소/2가철이온 비율=10, 자외선 램프 5개인 조건에서 가장 높은 제거효율을 보였다. 최적조건에서 페톤반응과 광페톤반응의 슬러지 발생량을 비교한 결과, 광페톤반응이 65.0 mg/L로 페톤반응의 49.4 mg/L보다 높은 것을 나타냈고 제거효율 또한 높은 것으로 나타나 슬러지 발생량과 처리효율 간에 비례하는 경향이 있다고 사료된다. 광페톤반응에 의한 메틸오렌지 제거효율의 최적조건 도출을 위해 반응표면분석을 진행한 결과 완전 2차항 모델식이 가장 유의한 것으로 나타났고 결정계수도 99.9%와 수정 결정계수는 99.9%로 분석되었다. 또한 반응모델의 잔차분석 결과 정규성, 등분산성, 독립성 그리고 선형성을 모두 만족하여 모델이 적합한 것으로 나타났다. 모델식의 주효과 인자는 과산화수소의 주입량이 가장 큰 변수로 작용하고 자외선 램프 개수, 과산화수소/2가철이온 비율 순서로 효과가 작아지는 것을 나타냈다.

사 사

본 연구는 환경부 “토양지하수오염방지기술개발사업 (The GAIA Project, (2012000550001)) 복합오염녹색연구 단 과제”로 지원받았습니다.

References

- Antonio, Z. and Roberto, L., 2014, Evaluation of UV/H₂O₂ advanced oxidation process (AOP) for the degradation of diazo dye Reactive Green 19 in aqueous solution, *Desalin. Water Treat.*, **52**, 1571-1577.
- An, S.W., Yoo, J.Y., Choi, J.Y., and Park, J.W., 2010, Adsorption characterization of Cd by activated carbon containing hydroxyapatite using response surface methodology (RSM), *J. Korean Soc. Water Qual.*, **25**(6), 943-950.
- An, S.W., Jeong, Y.C., Yoo, J.Y., Min, J.E., Lee, S.J. and Park, J.W., 2013, Optimal condition of operation parameter for live-stock carcass leachate using Fenton oxidation process, *J. Soil Groundw. Environ.*, **18**(1), 26-35.
- Arslan, I., 2001, Treatability of a simulated disperse dye-bath by ferrous iron coagulation, ozonation, and ferrous iron-catalyzed ozonation, *J. Hazard. Mater.*, **85**(3), 229-241.
- Cho, I.H., Lee, N.H., Chang, S.W., An, S.W., Yoon, Y.H. and Zoh, K.D., 2007, Analysis of removal characteristics and optimization of livestock wastewater using a factorial design in the coagulation process, *J. Korean Soc. Water Qual.*, **23**(1), 111-121.
- David, A., Wink, Raymond, W.N., Joseph, E.S., William, E.U., Jr and Peter, C.F., 1994, The Fenton oxidation mechanism: Reactivities of biologically relevant substrates with two oxidizing intermediates differ from those predicted for the hydroxyl radical, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **91**, 6604-6608.
- Fereidouni, M., Daneshi, A., and Younesi, H., 2009, Biosorption equilibria of binary Cd(II) and Ni(II) systems onto *Saccharomyces cerevisiae* and *Ralstonia eutropha* cells: Application of response surface methodology, *J. Hazard. Mater.*, **168**, 1437-1448.
- Karthikeyan, S., Titus, A., Gnanamani, A., Mandal, A.B. and Sekaran, G., 2011, Treatment of textile wastewater by homogeneous and heterogeneous Fenton oxidation processes, *Desalination*, **281**, 438-445.
- Kim, T.H., Park, C.H., Yang, J.M. and Kim, S.Y., 2004, Comparison of disperse and reactive dye removals by chemical coagulation and Fenton oxidation, *J. Hazard. Mater.*, **B112**, 95-103.
- Neyens, E. and Baeyens, J., 2003, A review of classic Fenton's peroxidation as an advanced oxidation technique, *J. Hazard. Mater.*, **B98**, 33-50.
- Romero, V., Acevedo, S., Marco, P., Giménez, J. and Esplugas, S., 2016, Enhancement of Fenton and photo-Fenton processes at initial circumneutral pH for the degradation of the β -blocker metoprolol, *Water Res.*, **88**, 449-457.
- Song, W.Y. and Jang, S.W., 2009, The study of statistical optimization of NDMA treatment using UV-process, *J. Korean Soc. Water Qual.*, **25**(1), 96-101.
- Sun, J.H., Sun, S.P., Fan, M.H., Guo, H.Q., Qiao, L.P. and Sun, R.X., 2007, A kinetic study on the degradation of p-nitroaniline by Fenton oxidation process, *J. Hazard. Mater.*, **148**, 172-177.
- Yang, D. and Casey, M.E., 2011, Sulfate radical-advanced oxidation process (SR-AOP) for simultaneous removal of refractory organic contaminants and ammonia in landfill leachate, *Water Res.*, **45**, 6189-6194.