

# 펜톤 산화법을 활용한 한강 물 정화에 관한 연구

신우진 · 박성원 · 송석윤 · 윤서형

하나고등학교

## Study on the Application of Fenton Oxidation for Water Purification in the Han River

Woo-Jin Shin · Seong-Won Park · Seok-Yoon Song · Seo-Hyoung Yoon

Hana Academy Seoul

**Abstract** This study addresses Han River pollution, a regional issue. Water samples were collected, and COD was measured before and after purification. Fenton oxidation was chosen for its efficiency in small-scale experiments. Results highlight pollution levels and propose sustainable strategies for water quality improvement.

**Key words:** Han River pollution, COD, Fenton oxidation, purification

### 1. 서론

현대 도시화와 산업화의 진행으로 환경오염 문제가 심화됨에 따라, 수질 오염은 지역 사회와 생태계에 영향을 미치는 중요한 환경적 과제로 부각되고 있다. 특히, 한강은 대한민국의 주요 수자원으로서 사람들에게 생활, 농업, 산업 등의 측면에서 물을 공급하는 중요한 역할을 담당하고 있으나, 점점 심화되는 오염 문제로 인해 수질 개선에 대한 관심이 증가하고 있다(조용철, 2019). 한강의 수질 오염은 주변 산업 활동, 생활하수, 그리고 비점오염원 등 다양한 원인에 의해 발생하며, 이는 지역 주민들의 건강과 생태적 안정성에 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 이러한 맥락에서, 한강의 수질 개선을 위한 과학적인 방법을 탐구하는 연구는 환경 보존 및 자원 관리 등에서 중요한 의미를 가진다. 많은 연구들은 수질 오염을 해결하기 위해 다양한 정화 방법을 제시해왔다. 특히, 펜톤 산화법(Fenton oxidation)은 효율적이고 경제적인 처리 기술로 주목받고 있으며, 소규모 실험에서도 그 효과가 입증된 바 있다(안준수, 2011). 펜톤 산화는 산화-환원 반응을 통해 화학적 산소 요구량(COD)을 효과적으로 감소시킬 수 있는 기술로, 유기 화합물과 같은 복합적인 오염물 제거에 유리하다. 본 연구는 한강의 수질 오염 문제를 해결하기 위해 수집된 물 샘플을 분석하고, 펜톤 산화법을 활용한 정화 과정을 실험적으로 검증하였다. 정화 전후의 COD 변화를 측정함으로써 오염 수준을 정량적으로 평가하였고, 이를 바탕으로 한강의 수질 개선을 위한 지속 가능한 전략을 제안하고자 한다. 본 연구는 지역적 수질

관리와 정책 개발에 실질적인 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 이론적 배경

한강 물의 오염도를 측정하기 위한 지표로는 수질의 좋고 나쁨을 따져보는 데에 가장 보편적으로 사용되는 기준인 화학적 산소요구량이 이용되었다.

### 2.1. COD(화학적 산소요구량)

화학적 산소요구량(Chemical Oxygen Demand, COD)은 물 속의 유기물질을 화학적 산화제를 사용하여 화학적으로 분해 및 산화시키기 위하여 소비되는 산소의 양을 말한다. 수용액에 들어 있는 유기물이나 아질산염, 황화물 등의 물질은 산화제를 넣어주면 산화반응이 일어나면서 분해되는데, 이 때 사용된 산화제의 양에 따른 산소량을 COD라고 한다. COD 측정은 산화제를 유기물에 천천히 지속적으로 투입하여 완전히 산화되기까지 투입된 산화제의 양을 측정함으로써 수중의 유기물량을 간접적으로 도출하는 방법으로, 이때 도출된 COD 값의 단위는 mg/L 또는 ppm으로 표시한다. 오염된 물일수록 유기물이 많기 때문에 산화에 필요한 산화제의 양이 늘어나고, 따라서 COD 값도 커지게 된다. COD 값에 대한 공식은 다음과 같다.

$$COD(mg/L) = (b - a) \times f \times 1000/V \times 0.2$$

이때 b는 소비된 0.005M 과망간산칼륨의 양(mL), a는 공시험에 소비된 0.005M 과망간산칼륨의 양 (mL), f는 0.005M 과망간산칼륨의 역가, V는 검수량(=100mL)을 말한다.

수질 오염도를 측정할 시에 미생물의 분해시간을 요구하는 BOD 측정법과 비교했을 때, COD를 측정하는 방법은 산화제가 빠르게 반응하여 측정기간이 짧다는 이점을 가진다.

### 2.2. 펜톤 산화법

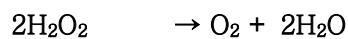
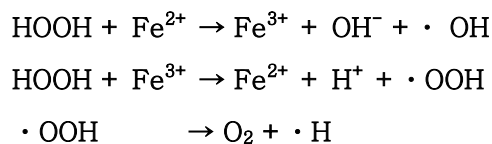
수처리 과정에서 난분해성 유기물을 분해할 때 일반적으로 고도산화공정이 사용된다. 고도산화공정은 하이드록실 라디칼을 산화제로 사용하는 수처리 방법을 일컫는다. 펜톤 산화법은 고도산화공정의 일종으로, 산성 조건에서 철 이온( $Fe^{2+}$ )과 과산화수소( $H_2O_2$ )를 혼합하면 산화제인 하이드록실 라디칼( $\cdot OH$ )이 형성되어 강력한 산화 반응을 일으키게 되는데, 이것이 펜톤 산화반응의 기본 메커니즘이다. 하이드록실 라디칼은 산화 전위가 2.70V로 매우 높은 산화력을 가지며, 이를 통해 폐수 내 난분해성 유기물을 효과적으로 분해하고 제거할 수 있다. 펜톤 산화법은 공정 운영이 간단하며 특별한 장비가 필요하지 않아 초기 처리나 보완 처리 단계에서 폭넓게 사용된다. 이러한 특성으로 인해 펜톤 산화법은 산업 폐수뿐만 아니라 하천 및 강물 정화와 같은 환경 분야에서도 그 적용 범위가 점차 확대되

고 있다. 본 연구에서는 공정의 용이성, 효율성과 소모 시간을 따져 펜톤 산화법을 한강 물의 수질 정화 방법으로 채택하였다.

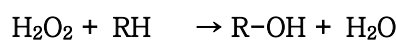
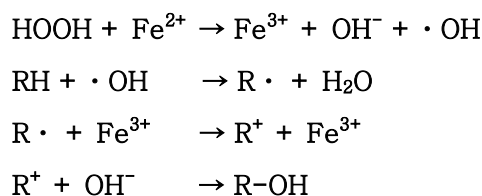
### 2.3. 펜톤 산화반응의 메커니즘

위에서 명시했듯, 펜톤 산화반응의 기본 메커니즘은 과산화수소와 철 이온을 반응시켜 산화제인 하이드록실 라디칼을 형성하는 것이다. 이때 과산화수소와 철 사이에 연쇄적인 반응이 일어나며, 이를 Haber-Weiss cycle이라고 부른다. 과산화수소의 분해 반응에 대한 촉매로는 3가 철 이온도 사용 가능한 것으로 알려져 있으나, 본 실험에서는 2가 철 이온을 사용하였다.

펜톤 산화법을 시행할 때, 반응물에 유기물이 없는 경우 반응 양상은 다음과 같다.



반응물에 유기물이 있는 경우 반응 양상은 다음과 같다.



펜톤 산화법은 약 pH 4 이하의 산성 조건에서만 실행이 가능한데, 이는 pH 6~8 가량의 중성 조건에서 철 이온의 용해도가 매우 낮아지기 때문이다. 철은 산성 조건에서는 이온 상태로 존재한다. 중성 조건 영역에서는 무전하 상태인  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  혹은  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 로 전환되어 녹지 않고 침전된다. 따라서, 중성 혹은 염기성 조건에서 위와 같은 반응으로 펜톤 산화법을 실행할 경우 수산화 라디칼을 발생시키지 못한다.

## 3. 연구 방법 및 절차

### 3.1. 연구 방법

한강의 수질 오염 정도를 측정하기 위해 본 연구는 한강에서 직접 물을 채취하였으며 실험의 정확도를 높이기 위해 주요 지점을 정하고, 채취한 각각의 샘플에 대해 모두 실험을 진행했다. 채취는 허가된 장소에서 진행되었으며 최선의 결과를 얻기 위해 수로와 가까운 지점, 또는 사람들이 다니는 길과 가까운 지점은 피했다. 또한 500mL 채취과정에서 한 지점에서 500mL를 채취하지 않고 근방 2~3m 내외의 물을 골고루 채취하고 교반하여 사용했다. 오염된 물일수록 COD 값이 커진다는 점을 이용해 질산은 분말과 같은 산염을 진행했다. 오염된 물일수록 COD 값이 커진다는 점을 이용해 황산은 분말과 같은 산염을 진행했다. 오염된 물일수록 COD 값이 커진다는 점을 이용해 황산과 같은 산화제를 이용해 유기물질을 화학적으로 분해하는 방식을 사용했다. 채취한 한강 물은 둥근바닥 플라스크에 담아 water bath에서 가열했으며, 이때 시료의 증발을 최소화하기 위해서 리비히 냉각기를 사용했다. 모든 시료에 대해서 이를 반복했으며 용액의 적정을 통해 COD에 필요한 수치인 소비된 과망간산칼륨용액의 값을 파악했다. 얻은 수치는 기록해두었으며 펜톤 산화 기법을 활용한 정화 실험 이후의 값과 비교하여 원하는 결과를 얻어내었다. 증류수는 펜톤 산화 기법에서 기준이 되는 수치이므로 여러 번 실험하여 그 평균값을 사용해 실험의 정확도를 높이하고자 했다. 정화 과정에서는 pH 조정과 응집제 투입을 거친 시료를 침전시켜 침전되지 않은 부분을 사용하였다. 실험 과정에서 예상값과 차이가 많이 나는 경우 재실험을 진행하거나 문제가 발생한 것으로 예상되는 부분을 수정하여 실험했다. 최종적으로는 이론적 배경의 COD 공식에 대입하여 수치 변화를 관찰하고 표로 정리했다.

### 3.2. 연구 절차

본 연구는 다음과 같은 절차로 수행되었다. 연구는 먼저 시료로 사용될 한강의 물 샘플을 채취하고 3개의 시료 각각에 대해 COD값을 측정하는 것으로 시작되었다. 채취한 시료는 구분을 위해 채취 지점의 특징을 따 각각 ‘홍제천’, ‘마포인트나루’, ‘잠두봉선작장’ 이라고 명명했다. 먼저 COD를 측정하는 과정은 다음과 같다. 실험에는 채취한 시료 3가지, 과망간산칼륨용액, 옥살산나트륨용액, 황산 등이 재료로 사용되었다. 추가적인 재료로는 일반적인 화학실험에 사용되는 플라스크와 비커, 시료의 증발을 위한 water bath, 시료의 증발을 막기 위한 리비히 냉각기, 그리고 교반기와 수은 온도계 등이 사용되었다. 이제 실험 과정을 구체적으로 설명하겠다. 실험 계획 과정에서 water bath의 예열 및 증탕 온도를 100℃로 계획했으나 실험기구의 한계와 실험 시간의 제약 등으로 85℃에서 진행했음을 우선 알린다. 시료 3개를 각각 100mL씩 증류수 100mL와 함께 둥근바닥 플라스크에 옮긴 뒤 황산 10mL를 넣고 5분간 방치했다. 다음으로는 0.005M에 맞추어 미리 제조한 과망간산칼륨용액 10mL를 추가하여 water bath에 넣고 리비히 냉각기와 연결해 15분간 가열했다. (선행 연구에서는 30분 가열 과정을 거쳤으나 학교에서 실험하는 여건을 고려하여 증류수를 포함한 4개의 용액 모두 15분간 증탕하여 차이를 두지 않는 정도로 진행했다.) 가열 이후 0.0125M에 맞춘 옥살산나트륨용액 10mL를 넣고 60℃-80℃를 유지하면서 용액의 색이 옅은 홍색을 띠 때까지 적정했다. 이때 온도를 유지시킬만한 환경이

존재하지 않아 오차가 발생한다면 오류 요인으로 작용했을 가능성을 염두에 두었다.



Figure 1. Use of water bath with Liebig condenser

다음으로 펜톤산화법을 통한 수질 정화 실험 과정은 다음과 같다. 이때  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaOH}$ ,  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , 증류수 등이 사용되었다. 추가적으로 pH측정에 사용되는 pH측정기의 기준을 잡아주는 pH가 7.01인 buffer도 사용했다. 그 외에는 교반기와 전자저울 외에 플라스크와 비커 등을 사용했다. 우선 각각의 채취한 시료(증류수 포함)를 각각 삼각플라스크에 100ml씩 덜어낸다.  $\text{H}_2\text{SO}_4$ 를 시료에 투여한 후 pH를 4-5사이로 조정한다. 조정이 완료된 각각의 용액에 대해서  $\text{FeCl}_2$  (33%)와 과산화수소 (35%)를 각각 3ml, 1ml씩 주입한 뒤  $\text{H}_2\text{SO}_4$ 를 이용해 pH를 다시 3-4 사이로 조정한다. 이렇게 조정된 시료는 교반기에서 0.5시간 동안 교반했다. (선행 연구에서는 실험의 정확도 향상을 위해 1.5시간 이상 교반을 진행했지만 실험 여건상 시료를 관찰하면서 가용 시간 내에서 최대한 많은 시간을 진행하였다.) 교반이 완료된 시료에는  $\text{NaOH}$ 를 시료에 투여해 pH를 6-7, 즉 중화에 가까운 상태로 조정한다. 마지막으로 침전이 일어날 수 있도록  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 를 시료에 투여해 슬러지를 응집시키고 랩으로 증발을 막은 뒤 방치했다. 이때 실험이 완료된 시료들은 환경에 따른 오차 발생을 최소화하고자 화학실 후드 내에서 보관했다.



Figure 2. The stirring process of pH-adjusted samples

마지막 실험은 앞서 보여준 COD 측정과 같은 과정을 거친다. 실험 과정은 동일하지만 앞 문단에서 설명한 펜톤산화법을 통해 침전된 시료를 사용했다. 이때 용액의 상태가 침전이 완전하게 이루어졌다고 보기 어려워 기존에 설계했던 100mL가 아닌 50mL만 실험에 설계하고 이에 맞춰 황산, 과망간산 칼륨용액, 옥살산나트륨용액 등의 물농도는 같게 유지하되 주입 비율을 바꾸어 실험했다.

#### 4. 연구 결과

이번 연구에서는 펜톤 산화법을 적용하여 한강 주변의 세 지점에서 물 정화 실험을 진행했다. 실험에서 지정된 세 지점은 홍제천, 마포인트 나무, 잠두봉 선착장이었으며, 각 지점에서 실험 전후의 COD 값을 측정하여 정화 효율을 평가하였다. 각 지점의 실험 결과는 다음과 같다.

Table 1. COD values before and after purification

	Hongje Stream	Mapoint port	Jamdubong dock
COD before purification (mg/L)	2.2	3.8	4.7
COD after purification (mg/L)	22.9	29.9	34.3

실험 결과, 각 지점에서 정화 후 COD 값이 급격히 증가하는 현상이 관찰되었다. 이는 예상과 다른 결과로, 일반적인 경우에는 펜톤 산화법 후에는 COD 값이 감소해야 한다. 그러나, 오히려 큰 폭으로 증가한 것을 알 수 있다. 홍제천에서는 정화 후 COD 값이 20.7mg/L만큼 증가하였고, 마포인트 나무에서는 26.1mg/L, 잠두봉 선착장에서는 29.6mg/L 증가하였다.

이러한 COD 값의 급격한 변화는 펜톤 산화법의 산화 반응에서 중간 생성물이나 과잉된 시약의 잔여물이 반영되었을 가능성을 시사한다. 또한, 샘플 채취 및 실험 과정에서 오염이 발생했을 수도 있다. 본 연구의 실험에서는  $\text{FeCl}_2$  수용액을 제작할 때, 철 이온이 충분히 용해되지 않아 COD 값이 높아진 것이라 예상된다.  $\text{Fe}^{2+}$ 는 펜톤 산화에서 과산화수소와 반응하여 hydroxyl radical를 생성하는 역할을 한다. 그러나 이때,  $\text{Fe}^{2+}$ 가 충분히 제공되지 않으면, 과산화수소와의 반응이 제대로 일어나지 않아 산화 능력이 떨어진다. 이에 따라 반응이 비효율적으로 진행된다면, 중간 생성물이 축적되거나 과잉된 시약이 반응에 영향을 미쳐 COD가 증가하는 결과를 초래할 수 있다. 실제로 실험에서  $\text{FeCl}_2$  수용액과 과산화수소를 넣은 후에 pH가 감소된 것을 볼 수 있었는데, 이는  $\text{FeCl}_2$  수용액에 비해 과잉된 과산화수소가 약산성을 띄기 때문으로 예상되며, 이는 펜톤 산화에서 중요한 pH 환경에 변화를 주어 실험이 계획대로 진행되지 않도록 했을 것이다.

또한, 만약 실험이 계획에 따라 철 이온이 충분히 용해된  $\text{FeCl}_2$  수용액을 사용했다라도 문제가 생겼을 것으로 예상된다. 펜톤 산화시, 과산화수소와  $\text{Fe}^{2+}$ 의 주입비율을 1:1로 주입한 경우가 유기물의 제거량을 기준으로 최적의 조건이라고 한다(최영수, 1996). 그러나 본 실험에서는 33%의  $\text{FeCl}_2$  3mL와 34.5%의 과산화수소 1mL를 반응시키기로 계획하였다. 이때에  $\text{Fe}^{2+}$ 는 0.00054mol, 과산화수소는 0.00034mL이다. 따라서 이상적인 1:1 몰 비율에서 철이온이 과잉으로 존재했을 것이다. 이는 펜톤 산화에서 hydroxyl radical의 생성에 방해가 될 수 있었다. 너무 많은  $\text{Fe}^{2+}$ 는 과도하게 산화되면,  $\text{Fe}^{3+}$ 로 산화되는 과정이 제대로 이루어지지 않아서 hydroxyl radical의 생성이 적어져 유기물의 산화가 충분히 이루어지지 않게 된다. 결과적으로, 유기물의 분해가 효과적으로 일어나지 않는다.

한편, 실험 전 측정된 COD 값은 상대적으로 낮았으며, 이는 한강이 전반적으로 유기 오염물질 관리가 잘 이루어지고 있다는 점을 시사한다. 각 지점의 초기 COD 값은 2.2-4.7mg/L로, 청정한 상태였음을 보여주고 있다. 그러나 COD는 유기오염물질에만 국한된 지표이므로, 이를 바탕으로 한강 물이 ‘전체적으로 깨끗하다’라고 단정 짓기는 어렵다. 무기 오염물질, 미세 플라스틱, 중금속 등 기타 오염원이 여전히 존재할 가능성이 있고, 이러한 오염물질은 COD 측정으로 확인할 수 없다. 따라서 한강 수질을 더 종합적으로 평가하고 개선하기 위해서는 COD 외에 다양한 오염 지표를 종합적으로 측정하고 분석할 필요가 있다.

이번 연구는 펜톤 산화법을 한강 수질 정화에 적용하는 과정에서 나타날 수 있는 예기치 않은 결과를 확인한 사례이다. 향후 연구에서는 펜톤 산화법의 최적화된 조건을 찾기 위한 추가 실험이 필요하며, 시약의 농도, 반응 시간, pH 등 다양한 변수에 대한 세부 분석이 이루어져야 할 필요가 있다.

## 5. 결론 및 논의

이번 연구는 한강의 세 지점에서 채취한 시료를 대상으로 펜톤 산화법을 활용한 물 정화 실험을 수행하였으나, 결과적으로 예상과 달리 정화 후 COD 값이 증가하는 결과를 얻었다. 이는 실험 조건 설정의 문제나 반응 중 발생한 화학적 이상 현상에 기인한 것으로 판단된다. 비록 실험 결과가 실패로 나타났으나, 다음과 같은 의의를 도출할 수 있다.

첫째, 본 연구는 한강의 초기 COD 값(2.2-4.7mg/L)를 통해 한강의 유기 오염물질 수준이 비교적 낮고, 유기 오염물질 관리가 잘 이루어지고 있음을 확인할 수 있었다. 이는 단순히 한강의 수질이 유기 오염물질에 있어 청정하다는 점을 나타내는 것뿐만 아니라, 한강 주변에서 이루어진 유기오염물질 배출 관리 및 정화 활동이 효과적으로 작용했음을 의미한다. 이러한 결과는 현재의 환경 정책이 올바른 방향으로 나아가고 있다는 점을 뒷받침하며, 향후 유사한 수질 개선 정책이 지속적으로 시행될 필요성을 제기한다.

둘째, 이번 연구는 한강 수질 정화에 있어 기존의 펜톤 산화법을 직접 적용하기 위해 고려해야 할 다양한 요소(pH 조건, 시약 비율, 반응 시간 등)를 밝혀내는 데 기여했다. 실험 과정에서 pH의 변화가 산화 반응에 미치는 영향, 시약 주입 비율의 최적화 필요성, 반응 시간에 따른 정화 효율 등을 체계적으로 관찰함으로써 펜톤 산화법을 실제 환경에 적용할 때 주의해야 할 현실적 문제들을 확인할 수 있었다. 이러한 시도는 향후 지역 수질 정화에 효과적인 방법을 적용하기 위한 기초 자료로 활용될 수 있으며, 특정 지역의 물리화학적 특성에 맞는 최적화된 정화 방법을 개발하는 데 중요한 자료 중 하나가 될 것이라 생각한다.

셋째, 실험 과정에서 얻어진 데이터를 바탕으로 유기 오염물질 외에도 무기 오염물질, 미세 플라스틱, 중금속 등 다양한 오염원에 대한 종합적인 분석 필요성을 제시하였다. COD가 유기오염물질의 지표로서 한계가 있음을 인식하고, 다양한 오염원을 종합적으로 평가하는 것이 한강 수질의 전반적인 상태를 보다 정확하게 이해하는 데 필수적임을 확인하였다. 이는 한강뿐만 아니라 유사한 환경 조건을 가진 다른 지역의 수질 개선 연구에도 시사점을 제공한다. 특히, 무기 오염물질이나 중금속의 축적, 미세 플라스틱의 분포와 같은 비유기적 오염원이 생태계와 인간 건강에 미치는 영향을 고려할 때, 이를 정량적으로 평가하고 관리하기 위한 추가적인 연구가 요구된다. 이번 연구를 통해 이러한 오염원들에 대한 필요성을 부각시켰다.

따라서 이번 연구는 예상한 성과를 달성하지는 못했지만, 한강의 유기 오염 상태를 평가하고, 펜톤 산화법의 한계와 최적화 필요성을 탐구하며, 지역 사회와 학문적 발전에 중요한 통찰을 제공하였다. 향후 연구에서는 다양한 오염 지표를 추가로 분석하고, 펜톤 산화법의 개선점을 반영한 실험을 통해 보다 효과적인 수질 정화 방안을 모색해야 할 필요가 있다.



## 참고문헌

- 김나희, 이상빈, 박건 & 박재우. (2022). UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 산화를 활용한 유기오염물질 유출수 처리용 공정 연구. 한국지반환경공학회 논문집, 23(10), 5-12.
- 김형엽, 김종신, 원찬희. (2001). 응집공정과 Fenton 산화공정에 의한 침출수 처리. 대한환경공학회지, 23(6), 979-987.
- 안준수, 박태술 & 조정호 (2011). Fenton 산화공법을 적용한 염색폐수처리 연구. *한국산학기술학회논문지*, 12(9), 4274-4282.
- 윤제용, 임학규 and 남궁규철. (2005). 펜톤 화학 반응의 이론적 이해. *공업화학*, 16(1), 9-14. 이창하. (2012). 고도산화기술을 이용한 수처리. 울산과학기술대학교 도시환경공학부, 8-16
- 정경민, 홍순강. (2005). Fenton 산화법에 의한 침출수중의 유기성 오염물 제거. *한국환경기술학회지*, 6(3), 179-185.
- 조순행, 최영수, 유희찬, 박철휘 & 윤제용. (1997).
- 수도권 매립지 침출수의 물리·화학적 처리(1). *대한환경공학회지*, 19(2), 141-151.
- 조용철, 박민지, 신경용, 최현미, 김상훈 & 유순주. (2019). 한강 수계 지류 하천의 수질 특성 및 수질 개선을 위한 등급화 방안 연구. *환경영향평가*, 28(3), 215-230.
- 조일형, 정효준, 성기석, 이홍근, 조경덕. Fenton 및 Photo-Fenton 산화공정을 이용한 염색폐수의 처리에 관한 연구. 한국보건교육건강증진학회 학술대회 발표논문집,
- Matavos-Aramyan, Sina & Moussavi, Mohsen. (2017). Advances in Fenton and Fenton Based Oxidation Processes for Industrial Effluent Contaminants Control-A Review. *International journal of Environmental Science and Natural Resources*. 2(4). 1-18.
- Walling, S.A., Um, W., Corkhill, C.L. *et al.* Fenton and Fenton-like wet oxidation for degradation and destruction of organic radioactive wastes. *npj Mater Degrad* 5, 50 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41529-021-00192-3>