

효과적인 펜톤산화처리법을 이용한 경유오염토양 복원에 관한 연구

이의상^{1*}, 김지영¹, 오세원¹
¹상명대학교 환경공학과

Effective Methods of Fenton Oxidation for Remediation of Diesel-contaminated Soil

Eui-Sang Lee^{1*}, Ji-Young Kim¹ and Se-Won Oh¹

¹Department of Environmental Engineering, Sangmyung University

요 약 본 연구는 주유소 부지와 같이 소규모 오염지역에 가장 많이 적용되는 굴착된 오염토양에 펜톤산화반응이 적용될 때 투입되어야 할 과산화수소와 철 촉매의 적정량을 산정하고 혼합방식 및 투입방식을 개선하여 과산화수소와 철 촉매의 과량 투입으로 인한 2차오염과 과다한 처리비용 문제를 해결하고자하였다. 경유 10,000mg/kg의 농도로 오염시킨 인공오염토양을 사용하여 실험을 진행하였고 회분식 실험결과 과산화수소의 농도가 증가할수록 경유제거효율이 높아지는 경향을 보였다. 또한 철 촉매를 주입했을 경우 과산화수소만 주입했을 시보다 훨씬 높은 경유제거효율을 보였으며 Fe(II)에 비해 Fe(III)을 주입하였을 때 제거효율이 더 높게 나타났다. 칼럼실험은 회분식 실험결과를 바탕으로 진행되었고 펜톤산화반응에 의한 현장복원이 이루어질 때 문제시되고 있는 혼합문제의 해결방법을 모색하고자 칼럼을 사용하여 시약 주입방법을 달리하며 실험하였으며 분리 분할 주입의 경우 가장 높은 효율을 얻을 수 있었다. 칼럼실험을 비교해 본 결과 단을 분리시켜 Fe(III)철 촉매를 주입하고 과산화수소를 분할 주입한 경우 92.8%의 높은 제거효율로 현장주입 조건을 모사한 과산화수소만 주입한 첫 번째 방법의 경유제거효율 10.5%보다 9배가량 높은 것으로 나타났다. 따라서 본 연구결과를 경유오염토양의 펜톤산화 복원 시 현장에 적용하면 과산화수소와 철 촉매의 과량 투입으로 인한 2차 오염과 과다한 처리비용 문제를 해결 할 수 있을 것으로 사료된다.

Abstract This study was performed to solve the problem of the 2nd contamination and excessive treatment cost by determining proper quantity of hydrogen peroxide, iron catalyst, mixing method, and input mode that should be provided when Fenton oxidation (this is mostly applied to small contaminated areas such as service station sites) is applied to the excavated and diesel-contaminated soil. Soil artificially contaminated with 10000mg/kg of diesel was used for the experiment. In the batch test, diesel removal seemed to increase as the concentration of hydrogen peroxide increases. When iron catalyst was added, removal efficiency of diesel was much higher than the time when hydrogen peroxide was added solely. The removal efficiency showed greater when Fe(III) was added compared to Fe(II). Column experiment was executed on the basis of results of the batch test to investigate adequate reagent mixing and input methods. The highest efficiency was acquired in the case of separate input mode. Also, it was found that when inputting Fe(III) iron catalyst and separately inputting hydrogen peroxide after dividing the bundle in the column, removal efficiency was 92.8%, which was 9 times greater than that of the first method, 10.5%, when only hydrogen peroxide was added. Thus, it is expected that if the result of this research is applied to Fenton oxidation for the remediation of soil contaminated by diesel, the problem of the 2nd contamination and excessive treatment charge caused by excessive addition of hydrogen peroxide and iron catalyst could be solved.

Key Words : Soil remediation, Fenton oxidation, Diesel-contaminated soil, Mixing method, Input mode

*교신저자 : 이의상 (euisang@smu.ac.kr)

접수일 09년 05월 11일

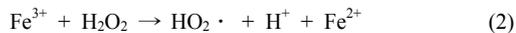
수정일 (1차 09년 09월 14일, 2차 09년 10월 07일)

게재확정일 09년 10월 14일

1. 서론

유류의 소비가 증가하면서 산업체나 주요소 등에서 사용되고 있는 유류 누출로 인한 토양오염이 빈번하게 발생하고 있으며 유류누출은 저장탱크의 부식, 과저장, 외부부하, 틈새발생, 탱크 설치 및 건설에 있어서의 흠림으로 인해 일어난다. 유류저장시설은 유류비축기지, 정유회사의 원유저장·제조시설, 유류 일반대리점, 주유소, 유류 일반판매소, 송유관시설, 기타 유류저장시설 등으로 구분 할 수 있고, 세계적으로 지하유류저장시설의 부식에 의한 유류누출사고가 전체 유류누출사고의 약 23%를 차지하고 있으며 미국에서는 10~25%의 지하저장탱크에서 기름이 유출되어 토양 및 지하수의 오염이 상당히 심각한 것으로 보고된 바 있다.[1,2] 우리나라의 경우 52,859개의 지하유류저장탱크가 있으며, 이 중 5년 이상 기간이 지난 지하유류저장탱크는 27,430개로 52%를 차지하고 있고 지하유류저장시설 중 누출이 예상되는 탱크 수는 5600개로 추정된다[3,4]. 지하저장탱크에서 유출된 유류 오염물질은 대부분 소수성으로 토양과 강력한 흡착을 이루고 비수용상액체(NAPLs : Non-Aqueous Phase Liquids)로 남아 장기간 잔류하며 지하수와 함께 이동하여 광범위한 지역에 오염원으로 작용하기 때문에 대상 오염물질과 현장 조건에 따른 적절한 처리가 요구된다.[5]

유류오염토양을 복원하는 방법에는 토양세척법, 토양 증기추출법, 열탈착법, 식물복원공정, 펜톤산화방법 등이 있으며 최근 고급산화공정을 이용한 유류오염토양처리에 관한 연구들이 활발히 진행되고 있다. 펜톤산화반응의 원리는 다음의 식 (1)~(2)와 같으며,



발생되는 OH·와 HO₂· 라디칼의 강한 산화력을 이용하여 토양 내 유기오염물을 제거하는 방법으로 최근 주목받고 있다.[6,7]

이 방법은 유류오염토양을 단기간에 복원할 수 있다는 장점을 가지고 있어 이미 여러 유류오염토양에서 활용되고 있다. 현재 현장에서의 펜톤산화반응을 이용한 유류오염토양복원은 인공오염토양을 대상으로 하여 얻어진 실험결과를 현장에 고압주입방식, 관정주입방식, 표면살포 방법을 사용하여 토양 내 존재하는 유류를 제거하고 있으며, 고농도인 35% 과산화수소와 철 촉매를 과량 투입하여 유류 분해 처리기간을 단축하고 있다. 하지만 기존에 적용한 방법들은 과량의 과산화수소와 철 촉매의 주

입, 혼합방식에 의한 처리효율 감소로 야기되는 고비용의 경제적 손실과 고농도의 과수 주입으로 발생하는 발암성 오염물질의 잔류 및 토양 미생물에 악영향을 미치는 등의 2차 오염을 발생시키고 있다. 따라서 본 연구에서는 주유소 부지와 같이 소규모 오염지역에 가장 많이 적용되는 굴착된 오염토양에 펜톤산화반응 처리가 적용될 때 투입되어야 할 과산화수소와 철 촉매의 적정량을 산정하고 혼합방식 및 투입방식을 개선하여 과산화수소와 철 촉매의 과량 투입에 의한 2차 오염과 과다한 처리비용 문제를 해결하고자 한다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 실험재료

2.1.1 토양시료

경유오염토양을 만들기 위해 천안시 안서동에 위치한 인근 야산의 오염되지 않은 토양을 채취하여 토양오염공정시험법에 따라 토양시료를 풍건시킨 다음 눈금간격 2mm의 표준체(10 mesh)를 사용하여 균일화하였다.[8] 표 1에는 시료로 쓰인 비오염토양의 물리·화학적 특성을 나타내었다.

[표 1] 실험에 사용된 토양의 특성

Characteristics	Value
Soil pH	6.45
Organic Matter Contents(%)	0.8
Water Contents(%)	1.22
CEC(cmol/kg)	11.34
Soil Classification	Loamy Sand
Sand(%)	83.64
Silt(%)	6.64
Clay(%)	9.72
Total Iron(mg/kg)	100

대상 토양은 Sand 83.64%, Silt 6.64%, 그리고 Clay가 9.72%로 양질사토(Loamy sand)로 나타났고 토양의 비옥도를 나타내는 CEC(Cation Exchang Capacity)는 11.34 cmol/kg으로 일반 토양의 평균적인 CEC(10cmol/kg)와 유사했으며 토양의 pH는 6.45로 약산성 토양으로 나타났

2.1.2 펜톤산화반응

산화제는 30% 과산화수소(H₂O₂, Junsei Chemical Co.,

Japan) 용액을 희석하여 사용하였으며, 펜톤산화반응을 위한 철 촉매로는 Iron(II) chloride tetrahydrate($\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, Samchun Pure Chemical Co., Korea)와 Iron(III) chloride hexahydrate($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, Samchun Pure Chemical Co., Korea)를 사용하였다.

2.2 실험방법

2.2.1 인공오염토양제조

인공오염토양을 제조하기 위하여 대상오염물질인 경유는 인근 주유소에서 판매되고 있는 경유를 사용하였고, 경유를 용매 Methylene Chloride(CH_2Cl_2 , J.T. Baker Co., USA)에 용해시킨 다음 오염되지 않은 토양시료를 넣어 오염물질의 농도가 10,000mg/kg이 되도록 오염시켰다. 충분히 교반 혼합 후 Hood(SACO-21, Sancheon Bio-Tech Co., Korea)에서 용매를 완전히 휘발시킨 다음 상온에서 1주일간 안정화 기간을 거쳐 사용하였다.

2.2.2 회분식실험

10,000mg/kg의 농도의 경유로 오염시킨 인공오염토양에 적정 농도로 희석시킨 과산화수소를 각각의 농도별로 희석하여 주입한 후 혼합시켜 반응을 진행하였다. 반응시약을 주입하는 경우, 철 촉매와 과산화수소의 급격한 반응에 의해 대부분의 과산화수소가 소진되는 것을 막기 위하여 철 촉매를 먼저 토양시료에 균일하게 섞어준 후 과산화수소 용액을 주입하여 반응을 진행하였다.

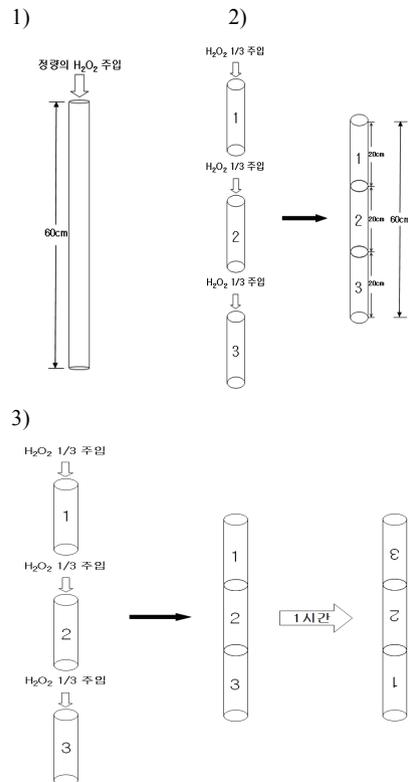
2.2.3 Column실험

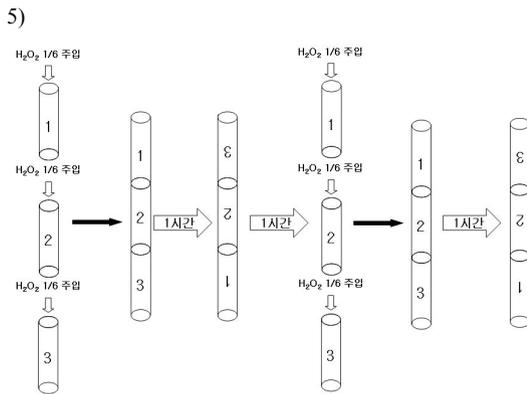
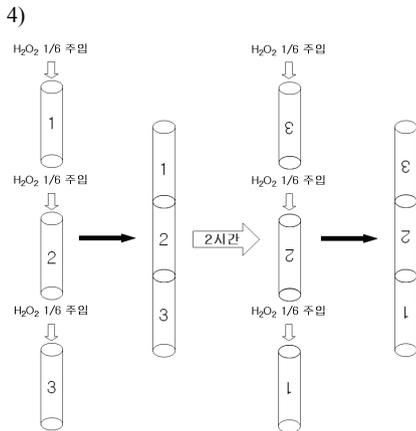
본 연구에 사용된 칼럼 구조는 그림 1에 나타내었다. 칼럼은 기존의 현장 표면살포방식(경유오염토양을 굴착 후 1~2m 높이의 pile로 쌓아올린 뒤 그 위에 과산화수소를 살포하는 방식, 본 실험에서 칼럼은 오염토양 pile을 모사하였음)을 모사하기 위한 단일칼럼과 현장에서 문제시 되는 혼합방법을 해결하기 위해 앞의 칼럼을 세단으로 분리시켜 제작하였다. 칼럼의 재질은 내경이 5cm인 아크릴을 사용하였고 오염토양을 반응시킬 칼럼의 길이는 단이 없는 현장모사칼럼의 경우는 60cm, 단분리 실험용 칼럼 한 단의 길이는 20cm로 하였다.



[그림 1] 칼럼 구조

경유 농도 10,000mg/kg으로 오염시킨 토양을 칼럼에 넣고 적정량의 과산화수소(토양대비 1:1 부피비)와 철 촉매(토양대비 wt%)를 주입하였으며, 오염토양 내 경유를 효율적으로 제거 할 수 있는 혼합 방법을 찾기 위해 아래 그림 2와 같이 다양한 방법으로 실험을 진행하였다.





[그림 2] 혼합 방법

1)번의 방법은 기존 현장에서 주로 행하고 있는 주입 방식을 모사하기 위한 방법으로 토양을 채운 후, 적정량의 시료를 한꺼번에 주입하는 방식으로 실험을 진행하였고, 2)번은 각 단계에 경유오염토양을 넣은 후 과산화수소와 철 촉매를 주입하여 단을 쌓아두고 반응시켰다. 3)번은 2)번과 같은 방법으로 실험을 진행 한 후 그림과 같이 뒤집어 쌓아올려 반응시켰으며, 4)번과 5)번은 산화제를 분할 주입하는 방식으로 실험 방법은 2), 3)번과 동일하다.

2.3 분석방법

반응이 끝난 토양 시료를 풍건시킨 후 토양오염공정시험법에 따라 여과정제 후 상등액을 취하여 가스크로마토그래피(Shimadzu GC-17A, Japan)를 사용하여 분석하였다. TPH 분석 시 칼럼은 HP-5(Agilent Technologies, USA)를 사용하였고, 검출기는 FID(Flame Ionization Detector)를 이용하여 토양오염공정시험법에 따라 분석하였으며 분석조건은 표 2에 나타내었다.

[표 2] 가스크로마토그래피의 분석 조건

Factor	Condition
GC model	Shimadzu GC-17A
Column	HP-5 30m × 0.32mm × 0.25 μ m
Detector	FID detector Heater: 300 $^{\circ}$ C
Inlet	Mode : Split Heater : 280 $^{\circ}$ C
Flow rate	1.7ml/min
Oven Parameter	45 $^{\circ}$ C(2min) at 10 $^{\circ}$ C/min to 310 $^{\circ}$ C(25min)
Injection Volume	1 μ l

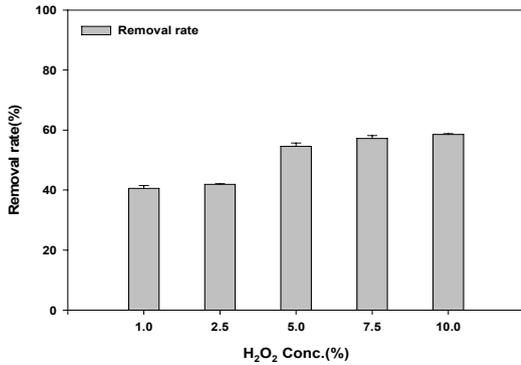
3. 결과 및 고찰

3.1 회분식 실험

초기농도 10,000mg/kg으로 오염시킨 경유오염토양에 반응조건(철 촉매의 양, 과산화수소의 농도)에 따른 오염토양 내 경유 제거효율을 측정하고자 촉매제와 과산화수소를 선택적으로 반응시켜 실험을 진행하였다.

3.1.1. 과산화수소농도에 따른 경유제거효율

과산화수소의 농도 증가에 따른 경유제거효율을 알아 보기 위하여 경유오염토양에 촉매제를 주입하지 않고, 과산화수소의 미생물 독성을 고려하여 비교적 낮은 농도 범위인 1, 2.5, 5, 7.5, 10% 범위의 과산화수소를 주입하여 실험을 진행하였으며, 그 결과를 그림 3에 나타내었다. 경유의 제거효율은 60%이하로 낮은 분해 효율을 보였고, 1%, 2.5%의 과산화수소를 주입하였을 때 각각 40.6%, 41.9%로 그 차이가 미미했으며 5%의 과산화수소를 주입했을 때 경유의 제거효율은 54.6%로 비교적 높게 나타났다. 또한 7.5%, 10%의 과산화수소를 주입했을 때에는 57.2%와 58.5%의 분해효율을 나타냈으며 이는 1%, 2.5%의 과산화수소를 주입했을 시에 비해 높은 효율이지만 5%의 과산화수소와는 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 일반적으로 철의 양(100mg/kg)에 비해 과산화수소를 과량으로 주입 할 시 과산화수소가 hydroxyl radical의 분해자로 작용해 자체분해 시키기 때문인 것으로 판단된다.

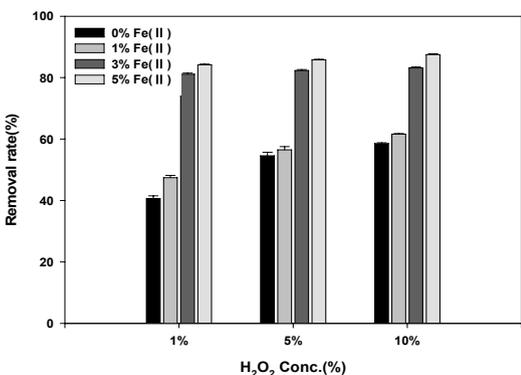


[그림 3] 과산화수소 농도에 의한 디젤 제거율

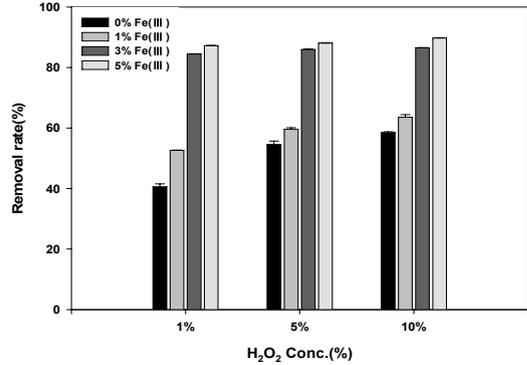
3.1.2 반응조건에 따른 경유제거효율 비교 분석

과산화수소의 농도가 증가함에 따라 제거효율도 증가하지만 펜톤산화반응에서의 그 경향을 정확히 파악하기 위해서는 좀 더 자세한 비교분석이 필요할 것으로 판단된다. 따라서 본 절에서는 펜톤산화반응에서 과산화수소의 농도와 철 촉매의 주입 농도 변화에 따른 제거효율을 알아보고자 하였다.

그림 4와 그림 5에 결과를 나타냈으며, 결과에서 볼 수 있듯이 철 촉매의 양과 과산화수소의 농도가 증가할수록 제거효율은 높아지는 경향을 보였으며 Fe(II)과 Fe(III) 모두 같은 경향으로 나타났다. 과산화수소만 주입했을 때와 철을 주입했을 경우를 보면 확실히 철을 주입했을 때가 경유의 제거효율이 높았으며 1%의 철을 주입했을 때는 제거효율에서 큰 차이가 나지 않았지만 전체적으로 3%와 5%의 철을 주입하였을 때는 제거효율이 80% 이상으로 높은 결과를 보였다. 과산화수소의 농도를 기준으로 보면 농도 증가에 따라 제거효율이 증가하기는 하나 그 차이가 작았으며 오히려 철의 양이 증가할수록 제거효율이 크게 증가하는 것으로 나타났다.



[그림 4] 과산화수소와 Fe(II) 농도에 의한 디젤 제거율



[그림 5] 과산화수소와 Fe(III) 농도에 의한 디젤 제거율

오염토양 내에 과량의 철이 존재하면 과산화수소 분해와 함께 발생하는 hydroxyl radical을 소모하는 scavenger로서의 철의 작용효과가 증대되며, 철의 양에 비해 과산화수소를 과량으로 주입 할 시에도 마찬가지로 과량 주입된 과산화수소가 hydroxyl radical의 scavenger로 작용해 자체분해 시키면서 hydroxyl radical이 유기물과 접촉하기 전에 먼저 과산화수소 분해에 이용되기 때문에 경제성을 고려해서 분해효율을 높이기 위해서는 과산화수소와 철 촉매의 적정량을 찾는 것이 중요하다.[9] 본 실험 결과 경유제거효율을 철 촉매 기준으로 보면 5%의 철 촉매를 주입하였을 경우 제거효율이 가장 높지만 3%의 철 촉매를 주입했을 때와 거의 차이가 없는 것으로 나타났고, 과산화수소 농도 기준으로 보았을 때 10%의 과산화수소를 주입하였을 때 가장 높은 제거효율을 보이긴 하였으나 1%의 과산화수소를 주입했을 때와 경유제거효율 차이는 미미한 것으로 보였다. 따라서 과산화수소의 적정 농도는 1%, 철 촉매는 3%로 정하여 실험을 진행하는 것이 좋을 것으로 판단되며 칼럼 실험에서는 회분 실험에서 얻어진 결과를 토대로 실험을 진행하였다.

3.2 Column실험

과산화수소를 경유오염토양에 표면 살포하는 기존의 펜톤유사반응은 철 촉매의 부족과 오염토양이 충분히 산화제와 혼합되지 못하는 문제점 때문에 필요이상의 과산화수소를 주입하여 비효율적으로 운영되고 있다. 따라서 현장에서 문제시 되는 혼합방법을 개선하고 과산화수소의 과량 투입으로 인한 과도한 처리비용 문제를 해결하고자 칼럼실험을 진행하였다.

토양시료는 회분식 실험과 같은 10,000mg/kg의 농도로 오염된 경유오염토양을 사용하였고 칼럼은 적절한 혼합방법을 찾자 3단으로 나누어서 다섯 가지의 방법을 적용시켜 경유제거효율을 비교하였다. 첫 번째 방법은 실

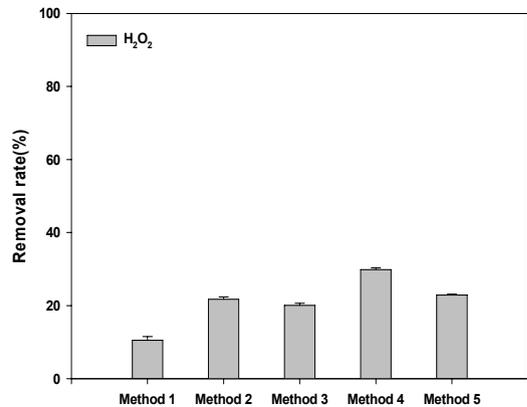
제 현장에서 가장 많이 사용되고 있는 방식을 모사하기 위하여 분리되지 않은 60cm 단일칼럼에 시료를 주입하는 방법으로 실험을 진행하였고, 두 번째 방법은 칼럼을 3단으로 분리 하여 각 단에 시료를 주입하고 쌓아올려 반응시키는 것이며 세 번째는 세 개의 단에 시료를 주입한 후 쌓아두고 일정시간 후 다시 뒤집어 반응시키는 방법이다. 네 번째와 다섯 번째 방법은 두 번째, 세 번째 방법과 동일하나 시료를 분할 주입해 준다는 차이가 있다. 현장조사조건에서 철 촉매의 종류에 따른 경우제거효율을 알아보고자 Fe(II)과 Fe(III)에 대한 실험도 함께 진행하였다.

3.2.1 펜톤산화제 주입방법에 따른 경우제거효율

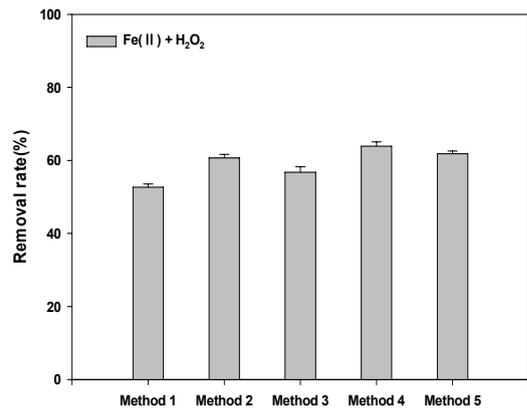
각각의 주입시약 별 주입방법에 따른 제거효율을 비교하기 위해서 실험결과를 그림 6에 나타내었다. 그림 6의 (1)에서는 과산화수소만 주입하여 다섯 가지 방법으로 실험한 값을 나타낸 것으로 첫 번째 방법에서는 10.5%, 두 번째는 21.8%, 세 번째는 20.0%, 네 번째는 29.9%, 마지막 다섯 번째 방법에서는 22.9%로 매우 낮은 제거효율을 보였다. 이는 주입되는 과산화수소의 양에 비해 토양 내 존재하는 철의 양이 적기 때문에 과산화수소가 경우오염물질 뿐 아니라 자체분해 작용도 함께하면서 오염토양과 충분한 펜톤산화반응을 이루지 못하기 때문인 것으로 판단된다. 제거효율을 향상시키기 위해서는 과량의 과산화수소를 주입 할 수도 있지만 환경독성과 경제성을 고려 하였을 때 철 촉매의 양을 증가시키는 것이 더욱 바람직할 것으로 사료된다. (2)의 그림은 철 촉매 Fe(II)을 주입한 것으로 첫 번째 방법부터 차례로 52.7%, 60.7%, 56.8%, 63.9%, 61.8%의 제거효율이 나타나 과산화수소만 주입했을 때에 비해 더 많은 양의 경우오염물질이 제거된다는 것을 알 수 있었다. Fe(III)을 주입 했을 경우 첫 번째 방법에서 69.8%, 두 번째는 84.6%, 세 번째는 80.1%, 네 번째는 92.8%, 마지막 다섯 번째 방법에서는 89.1%의 제거효율을 보였으며 이를 그림 6의 (3)에 나타내었다.

(1), (2), (3)의 결과를 살펴보면 주입시약에 관계없이 네 번째 방법으로 실험을 했을 때 가장 높은 제거효율을 나타냈으며 분할 주입하지 않은 두 번째, 세 번째 방법을 분할 주입한 네 번째, 다섯 번째 방법과 비교해 봤을 때 분할 주입한 방법의 경우제거효율이 더 높은 것을 알 수 있었다. 과산화수소를 분할 주입하지 않았을 때와 분할 주입했을 때 Fe(III)을 기준으로 대략 10% 더 높은 효율을 얻을 수 있었으며 이는 처음 주입된 과산화수소가 거의 소모될 시점에 재 주입함으로써 과산화수소의 산화반응으로 인한 토양 내 유기오염물질이 분해되어 토양 공

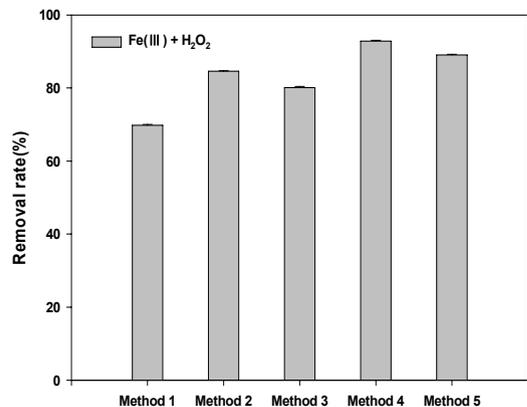
극을 더욱 확장시켜 추가되는 과산화수소와 오염토양과의 접촉분해반응을 증가시키는 것으로 보여 지며, 또한 한 번에 많은 양의 과산화수소를 주입했을 때 나타나는 자체분해로 인해 소진되는 과산화수소의 양을 줄일 수 있기 때문인 것으로 판단된다.



(1) H₂O₂

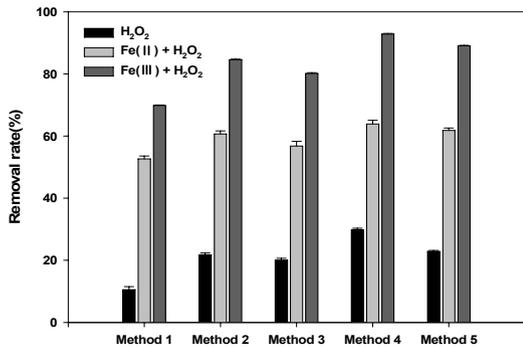


(2) Fe(II) + H₂O₂



(3) Fe(III) + H₂O₂

[그림 6] 혼합 방법에 의한 디젤 제거율



[그림 7] 주입 시약에 따른 디젤 제거율

그림 7에서는 최적의 주입시약과 주입방법을 찾고자 주입시약에 따른 경유제거효율을 비교하였다. 회분식 실험과 마찬가지로 Fe(III)을 주입하였을 때 가장 높은 제거효율을 보였으며 Fe(II)을 주입했을 때에 비해 Fe(III)을 주입했을 때 최소 17.2%에서 최대 27.2%까지의 차이를 보였다. 특히 Fe(III)을 주입한 네 번째 방법에서는 92.8%로 가장 높은 제거효율을 보였으며 이는 현장주입 조건을 모사한 과산화수소만 주입한 첫 번째 방법의 경유제거효율 10.5%보다 약 9배가량 증가한 것으로 나타났다. 결과적으로 현장에서 펜톤산화반응을 효과적으로 적용하기 위해서는 3%의 Fe(III)촉매와 1%의 과산화수소를 분할 주입하는 방법이 가장 적절할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 소규모의 굴착된 오염토양에 펜톤산화반응에 적용될 때 과산화수소와 철 촉매의 적정량을 산정하고 혼합 및 투입방식을 개선하기 위해 진행하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 경유 10,000mg/kg의 농도로 오염된 인공오염토양에 과산화수소의 농도를 1%, 2.5%, 5%, 7.5%, 10%로 반응시킨 결과 경유제거효율은 60%이하로 나타났고 과산화수소의 농도가 증가할수록 경유제거효율은 높아지는 경향을 보였으나 5%이상의 과산화수소를 주입하였을 때 그 차이는 미미한 것으로 나타났다.
2. 칼럼실험에 적용할 과산화수소의 농도와 철 촉매의 적정량을 산정하기 위해 펜톤산화반응에서 과산화수소의 농도와 철 촉매의 주입농도 변화에 따른 경유제거효율을 알아보았다. 펜톤산화반응에서 Fe

(II)과 Fe(III)을 주입했을 경우 모두 시약의 농도가 높아질수록 높은 제거효율을 나타냈다. 5%의 철 촉매를 주입하였을 경우 제거효율이 가장 높았지만 철 촉매 3%를 주입했을 때와 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 또한 과산화수소의 농도를 기준으로 제거효율을 비교해 봤을 때 10%의 과산화수소를 주입하였을 때 가장 높은 제거효율을 보이긴 하였으나 1%의 과산화수소를 주입했을 때와 제거효율 차이는 미미한 것으로 나타났다. 따라서 과산화수소의 적정농도는 1%, 철 촉매는 3%로 실험을 진행하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

3. 칼럼실험은 회분식 실험결과를 바탕으로 현장에서 적용되고 있는 방식을 모사하였으며 과산화수소만 주입하는 경우와 철 촉매에 의한 현장 효율을 평가하기 위해 철 촉매 Fe(II)과 Fe(III)을 주입하는 방법으로 실험을 진행하였다. 실험결과 과산화수소만 주입했을 경우에는 30%미만의 낮은 제거효율을 나타냈으며, Fe(II)를 주입했을 경우 65%미만, Fe(III)를 주입했을 때에는 최고 92.8%의 제거율로 철 촉매를 주입하지 않았을 때에 비해 철 촉매를 주입하였을 때 2배 이상의 높은 제거율을 나타냈다. 또한 Fe(II)보다는 Fe(III)의 경유제거효율이 더 높은 것으로 나타났으며 펜톤산화반응의 현장 적용 시 Fe(III)촉매를 이용하면 과산화수소의 과다사용으로 인한 독성문제와 함께 처리비용도 감소시킬 수 있을 것이라 사료된다.
4. 펜톤산화반응에 의한 현장복원이 이루어질 때 문제 시되고 있는 혼합문제의 해결방법을 모색하고자 칼럼을 사용하여 시약 주입방법을 달리하며 실험을 진행하였다. 현장에서 가장 많이 쓰이고 있는 방식을 모사하기 위해 단일칼럼에 한 번에 시약을 주입하는 방법과 적절한 혼합방법을 찾고자 칼럼을 세 개의 단으로 분리시켜 총 다섯 가지 방법으로 실험을 수행하였으며 단일칼럼을 사용하는 것에 비해 분리시킨 칼럼을 사용하는 경우에 더 높은 효율을 얻을 수 있었다. 또한 다섯 가지 방법 중 단 분리 분할 주입(Mixing method 4)의 경우 가장 높은 효율을 얻을 수 있었다.
5. 칼럼실험을 비교해 본 결과 과산화수소만 주입했을 때 10.5%의 제거율에서 혼합방식에 따라 최고 29.6%까지 제거율이 높아졌으며, Fe(II)를 주입한 경우, 52.7%에서 최고 63.9%의 제거율을 보였다. 또한 Fe(III)과 과산화수소를 주입한 경우에는 69.8%에서 실험방법에 따라 80.1%~92.8%의 높은 제거효율로 현장주입 조건을 모사한 과산화수소만

주입한 첫 번째 방법의 경유제거효율 10.5%보다 9 배가량 증가한 것으로 나타났다.

따라서 본 연구결과를 바탕으로 경유오염토양의 현장 복원에 적용한다면 과산화수소의 과다사용으로 인한 토양생태계 독성 문제와 경제적인 손실 문제를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] 박용하, 윤서성, 방상원, 김미정, 양재의, 이양희, “토양오염지역의 관리 및 복원방안 연구 I - 미국의 법, 제도를 중심으로”, 한국환경정책·평가연구원, 2002.
- [2] Maresca, J. W., Roach, R. D., Sibel, M., Star, J. W., "Volumetric Leak Detection Methods for Underground Fuel Storage Tanks", Pollution Technology Review No. 180. Noyes Data Corp., Park Ridge, New Jersey, 1990.
- [3] 박용하, 이승희, “토양환경보전을 위한 오염방지기준 및 관리대책”, 한국환경기술개발원, 1995.
- [4] 환경부, “환경백서”, 2006.
- [5] 신은철, 연직배수시스템을 이용한 유류오염지역의 복원기술 개발, 인천지역환경기술개발센터, 2006.
- [6] Watts, R., Udell, M., Monsen, R., "Use of iron Minerals in optimizing the peroxide treatment of contaminated soil", Water Environ. Res., 65, pp.839~844, 1993.
- [7] 이민효, 최상일, 이재영, 이강근, 박재우, “토양지하수 환경”, 신광문화사, 2006.
- [8] 환경부, 토양오염공정시험방법, 2007.
- [9] Tang, W. Z., Chen, R. Z., "Decolorization kinetics and mechanism of commercial dyes by H2O2/Iron powder system, Chemosphere Vol. 32, No. 5, pp.979-988, 1996.

이 의 상(Eui-Sang Lee)

[종신회원]



- 1982년 2월 : 한양대학교 화학공학과 (공학사)
- 1989년 5월 : Oregon State University (공학석사)
- 1996년 3월 : Kansas State University (공학박사)
- 1996년 2월 ~ 1999년 2월 : 도로교통기술연구원 책임연구원
- 1999년 3월 ~ 현재 : 상명대학교 토목환경공학부 부교수

<관심분야>

폐기물관리, 토양 지하수오염처리, 폐기물 자원화, 환경신재생에너지

김 지 영(Ji-Young Kim)

[준회원]



- 2007년 8월 : 상명대학교 환경공학과(공학사)
- 2009년 2월 : 상명대학교 환경공학과(공학석사)

<관심분야>

폐기물관리, 토양 지하수오염처리

오 세 원(Se-Won Oh)

[정회원]



- 1990년 2월 : 서울대학교 공업학과 (공학사)
- 1992년 2월 : 서울대학교 공업학과 (공학석사)
- 2001년 5월 : Florida University (공학박사)
- 2001년 9월 ~ 현재 : 상명대학교 토목환경공학부 부교수

<관심분야>

대기오염제어, 자원재활용 및 소각