



식물성 식용유 첨가가 PAHs 오염토양 펜톤처리에 미치는 영향

강명화, 김승호, 박영구, 박준석[†]

강원대학교 공학대학 환경방재공학과

(2006년 2월 20일 접수, 2006년 3월 20일 채택)

Effect of Vegetable Oils Addition on Fenton Treatment of PAHs-Contaminated Soil

Myung-Hwa Kang, Seung-Ho Kim, Young-Goo Park, Joon-Seok Park[†]

Department of Environmental Disaster Prevention Engineering, Kangwon National University

ABSTRACT

This study was performed to evaluate the effect of the addition of vegetable oils on Fenton treatment of PAHs-contaminated soil. Fenton reaction can be proceeded in the soils contaminated with PHAs only in the presence of H_2O_2 because of Fe content in the soil. In this case, optimum H_2O_2 concentration was 3%. When 17.5 mM $FeSO_4(III)$ was added with 3% H_2O_2 , the removal rate was increased up to 25%, whereas 19% of PAHs was removed with H_2O_2 alone. The addition of 1% of olive oil to the contaminated soil before the Fenton reaction or simultaneously increased the removal rate about 15%, compared to the case of Fenton reaction only. There were no significant differences in the removal rates of PAHs, regardless of different kinds and concentration of oils. (olive oil, soybean oil, and used-vegetable oil). The used-vegetable oils were not different from the new, expensive oils in the removal rate, so their use will be desirable in saving the money. In addition of 1% of olive oil after the reaction of 3% H_2O_2 and 2.5 mM $FeSO_4(III)$, the removal rates of 3~4 and 5~6 ring compounds were increased 13% and 17%, respectively, compared to the case of Fenton reaction only.

Keywords : vegetable oil, Fenton reaction, H_2O_2 , $FeSO_4$

초 록

본 연구에서는 PAHs 오염토양의 펜톤처리시 식물성 식용유와 폐식용유의 첨가가 처리효율에 미치는 영

[†]Corresponding author (wan5155@mail.kangwon.ac.kr)

향을 알아보고자 실시하였다.

토양 중 철성분 때문에 철용액을 첨가하지 않고 과산화수소만을 첨가한 경우에도 펜톤반응이 진행되었으며, 과산화수소는 3%에서 최대 효율을 나타내었다. 3%의 과산화수소만을 첨가한 경우에는 총 PAHs가 약 19% 제거되었는데 여기에 17.5 mM FeSO₄(III)를 첨가한 경우에는 25%가 제거되어 6% 정도의 효율증진을 나타내었다. 올리브유 1%를 펜톤반응과 동시 또는 전에 첨가한 경우 제거효율은 37~38%로써 펜톤처리만을 한 경우의 22.3% 보다 약 15%정도 제거효율을 증가시킬 수 있었다. 올리브유, 콩식용유, 그리고 폐식용유 농도를 1%와 5%로 하여 주입한 결과 대부분 35% 이상의 처리효율을 나타내었으며, 오일의 종류와 농도에 따른 영향은 크지 않았다. 폐식용유를 사용하였을 때 고가의 올리브유를 사용한 경우와 큰 효율차이를 나타내지 않았으므로 폐식용유 사용시 추가비용이 거의 소요되지 않는 장점이 있을 것으로 판단된다. 3% 과산화수소와 2.5 mM FeSO₄에서 1% 올리브유 첨가 후 15분이 지나서 펜톤반응을 실시한 경우 벤젠고리 3~4개와 5~6개인 화합물의 제거율은 펜톤반응만을 실시한 경우 보다 각각 13%와 17% 정도 증가하였다.

핵심용어 : 식물성 식용유, 펜톤반응, 과산화수소, FeSO₄

1. 서론

산업폐기물의 불법매립과 지하유류저장탱크의 누출로 인한 토양오염 문제는 심각한 수준에 이르렀으며, 많은 국민들이 이에 대한 우려와 관심을 가지고 있다. 기존에 일반적으로 적용되어 왔던 방법은 처리 후 재 매립과 소각 등에 국한되어 있었다. 그러나 재매립은 굴착비용이 많이 소요되고 소각은 PCDFs와 PCDDs 같은 다이옥신 물질은 배출한다는 단점이 있어 적용에 많은 제약이 따르므로 오늘날에는 on-site 또는 in situ 처리방법이 더욱 각광을 받고 있는 실정이다. 토양오염의 물리화학적, 생물학적, 그리고 열적 처리방법 중에서 생물학적 처리는 가장 비용효과적인 방법이다. 그러나 이러한 생물학적 처리방법은 오염물질이 고농도로 존재할 경우에는 미생물의 활성에 독성을 일으키며 또한 겨울과 같은 저온에서는 미생물의 활성에 저해를 유발한다. 그러므로 이 경우에는 독성물질을 우선적으로 저감 또는 제거시킨 후 생물학적 처리를 시도하는 것이 바람직하다.

PAHs란 2개 이상의 벤젠고리 구조를 가지는 방향족 탄화수소로서, 벤젠고리가 2~4개인 물질은 기체나 고체에 흡착된 형태로, 5개 이상인 물질은 주로 고체에 흡착된 형태로 환경 중에 존재하게 된

다. 구성성분에 따라 200여 물질이 있지만, 미국 환경보호청(US EPA)에서는 인체위해도에 따라서 특별 관리하여야 할 16개의 PAHs물질을 선정하였고, 그 물질들 중 발암성이 있는 것으로 생각되는 7개의 물질을 7-PAHs로 분류하여 관리하고 있다¹⁾. PAHs로 오염된 지역의 토양복원은 환경복원 중에서도 매우 어려운 과제 중의 하나로 알려져 있는데 이는 오염물질을 토양으로부터 효과적으로 분리해 내기가 어렵기 때문이다.

오염토양의 화학적 처리 중 과산화수소(H₂O₂)와 철이온의 화학반응을 이용한 펜톤 처리는 저온에서도 유기화합물질을 산화시킬 수 있는 장점이 있으며, 반응 후 오염물을 산화시킬 수 있는 hydroxyl radical(OH·)이 생성되어 폐수 처리에 많이 이용되어 왔다²⁻⁵⁾. 이러한 펜톤 반응을 응용하여 Watts 등(1996)⁶⁾은 과산화수소의 촉매로 토양 내 철광석 성분을 사용한 펜톤 유사반응을 제시한 바 있다. 토양에 강하게 흡착된 유기화합 물질은 생물학적 처리가 어려울 뿐만 아니라 화학적 처리에서도 실제 현장에서는 그 목적을 달성하기가 쉽지 않은 것으로 알려져 있다. 그러므로 오염이 진행된 지 상당한 시간이 경과된 토양의 경우에는 토양에 흡착된 오염물질과의 반응을 유도하는 것이 중요하다.

최근에는 기존의 펜톤산화 반응에 식물성 오일 등을 첨가하여 효율을 증대시키려는 연구^{7,8)}가 일부 진행되고 있지만 아직까지 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 PAHs 오염토양을 기존의 펜톤산화 반응으로 처리시 시중에서 시판되는 식물성 식용유 뿐만 아니라 조리과정을 거친 폐식용유를 첨가함으로써 처리효율에 미치는 영향을 알아보려고 하였다.

2. 실험방법

2.1 실험재료

본 연구에서는 기존에 PAHs로 오염된 적이 없는 삼척시 S대학 내에서 지표 15cm 이내의 토양을 채취하여 풍건시키고 2 mm 체로 거른 후 통과한 것만을 사용하였다. 채취된 토양은 토성분석 결과 모래 48.8%, 미사 37.3%, 점토 13.9%인 양토(loam)이었다(Table 1] 참조). 본 토양의 CEC와 pH는 각각 3.4 meq/100g(토양)과 8.6이었다. 콜타르는 C화공사에서 판매하는 것을 사용하였으며, 12개의 분석대상 물질을 가스크로마토그래피로 분석한 결과 질량비로 약 40%를 차지하였다. 풍건시킨 토양에 콜타르를 메틸렌클로라이드(methylene chloride)에 용해하여 고르게 살포한 후 혼합하여 약 10,000 mg/kg으로 오염시켜 인공 오염 시료를 제조하였다. 첨가제로 사용된 식물성 오일은 주변에서 쉽게 구할 수 있는 올리브유, 콩 식용유와 폐식용유를 사용하였다. 올리브유와 콩

식용유는 시중에 시판되고 있는 C사의 제품을 구입하였으며, 폐식용유는 강원도 삼척시 소재 패스트푸드 업소인 G사로부터 튀김식품 제조 후 폐기되는 식용유를 공급받아 시료로 사용하였다.

2.2 실험조건 및 분석방법

펜톤반응을 유발시키기 위해서 토양과 농도별 과산화수소 용액을 1 : 1 (w:v)로 혼합하여 반응시켰다. 반응 후 토양시료는 수분을 제거하기 위해 일정량의 무수황산나트륨(Na_2SO_4)을 첨가한 후 용매(메틸렌클로라이드)를 첨가하여 250rpm에서 1시간 진탕하였다. 진탕 후 용매를 0.2 μm PTFE 여지로 여과하고 여액을 감압휘발장치기(Eyela Co., Japan)로 농축하여 분석에 사용하였다. 시료는 FID(Flame Ionization Detector)가 장착된 가스크로마토그래피(Perkin Elemer, USA)를 사용하여 분석하였으며, 표준물질로는 16개의 PAHs를 포함하고 있는 혼합표준물질(Accustandard Inc., USA)을 사용하였다. 사용된 칼럼은 길이 25m, 내경 0.32mm, film thickness가 0.52 μm 인 methyl silicone칼럼(HP-1)이었으며, 초기온도는 60 $^{\circ}\text{C}$, 최종온도는 325 $^{\circ}\text{C}$ 이었다. 승온률은 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 으로 하였다. [Fig. 1]에 PAHs 표준물질에 대한 가스크로마토그램을 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

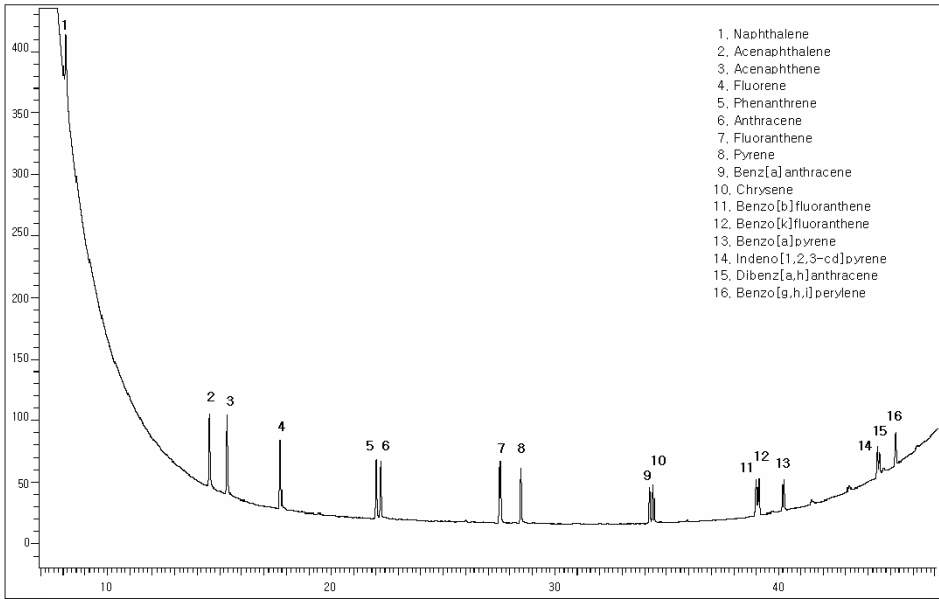
3.1 과산화수소 및 황산철(III) 농도의 영향

펜톤반응은 과산화수소와 철이온 존재하에서 일어난다. 그러나 폐수처리와는 다소 다르게 토양에는 철성분이 존재하므로 과산화수소만 투입하더라도 일부 펜톤반응이 발생할 수도 있다. 본 실험은 식물성 식용유 첨가의 영향을 알아보기 전에 과산화수소 및 철이온의 투입농도를 결정하기 위한 사전 실험으로 수행되었다.

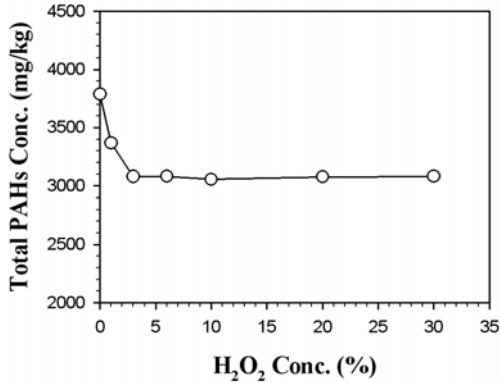
과산화수소 농도에 따른 PAHs 농도변화를 [Fig. 2]에 나타내었다. 과산화수소의 농도는 1, 3, 6, 10, 20, 30%로 하였다. 콜타르를 약 10,000 mg/kg으로 오염시킨 토양을 분석한 결과 표준물질과 일치하는 초기 PAHs 성분의 합은 3,786

[Table 1] Characteristics of Soil Used for This Study

Characteristic		Value
Soil Texture		Loam
Particle size percent (%)	Sand(0.05-2mm)	48.8
	Silt(0.002-0.05mm)	37.3
	Clay(<0.002mm)	13.9
CEC (meq/100g)		3.4
pH		8.6
Fe (wt%)		0.85



[Fig. 1] Chromatogram of PAHs standard mixtures using gas chromatograph.



[Fig. 2] Variation of PAHs concentration with different H₂O₂ concentrations.

mg/kg이었다. PAHs 오염토양과 농도를 변화시킨 과산화수소를 1 : 1 (w:v)로 혼합하여 1시간 방치한 후 분석을 하였다. 과산화수소의 투여농도가 1%이었을 때에는 PAHs 농도가 3,369mg/kg이었으며, 3%이었을 때에는 3,079mg/kg으로 감소하였다. 그러나 3% 이상의 과산화수소를 투여하였을 때에는 큰 농도감소는 나타나지 않았다. 과산화수

소 투여만으로도 농도가 이 정도 감소한 것은 토양 중에 존재하는 철성분 때문에 다소나마 펜톤반응이 일어난 것으로 판단된다. 실험에 사용된 토양은 철성분을 질량비로 0.85% 함유하고 있었다 (Table 1 참조). 최 등 (2004)⁹⁾은 디젤오염토양에 과산화수소를 투여하여 펜톤 유사반응으로 처리를 하였다. 철성분이 0.69% 함유된 디젤오염토양은 철이온은 따로 첨가하지 않았음에도 불구하고 과산화수소의 투여만으로 제거가 가능하였다. Kong 등(1998)¹⁰⁾도 자연토양에 존재하는 철성분을 이용하여 펜톤 유사반응으로 유류오염토양을 처리하였으며, 자연토양이 일반적으로 0.5~5wt%의 철성분을 함유하고 있기 때문에 H₂O₂에 의한 토양오염물질제거는 적용할 만한 기술이라고 보고하였다. Watts 등(2000)¹¹⁾은 펜톤 유사반응 처리방법이 굴착 처리 후 매립하는 방법보다는 경제적이라고 하였다.

과산화수소의 농도를 3%로 결정하고 여기에 철이온을 투여하였을 때 추가적인 효율증가가 있는지의 여부를 검토하여 보았다(Fig. 3 참조). 철이온은 FeSO₄(III) 용액으로 투여하였으며, 농도

는 2.5, 5.0, 10.0, 17.5, 25.0, 그리고 30.0 mM로 하였다. FeSO₄(III) 용액 농도가 증가함에 따라 총 PAHs 농도도 점차적으로 감소하여 17.5 mM 일 때 2,842 mg/kg을 나타내었다. 그러나 17.5 mM 이상에서는 더 이상의 감소를 나타내지 못하고 있다. 3%의 과산화수소만을 첨가한 경우에는 총 PAHs가 약 19% 제거되었는데 3% 과산화수소에 17.5 mM FeSO₄(III)를 첨가한 경우에는 25%가 제거되어 6% 정도의 효율증진을 나타내었다. Nam 등(2001)¹²⁾은 PAHs의 펜톤처리에서 과산화수소와 황산철의 영향을 검토하였으며, 과산화수소와 FeSO₄의 최적 첨가비는 10 : 1 (w:w)이라고 하였다.

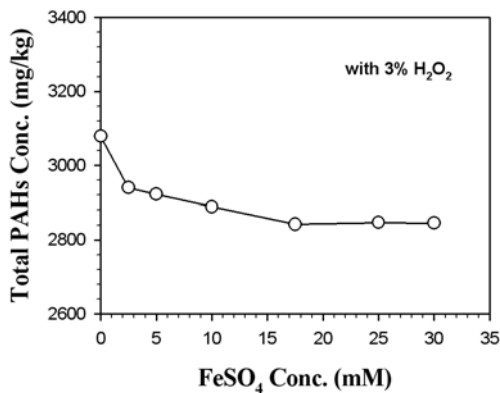
과산화수소와 철용액이 PAHs 펜톤처리에 미치는 영향의 실험결과를 바탕으로 Sigma Plot 프로그램으로 상관성을 추정하여 [Fig. 4]에 나타내었다. [Fig. 4]에서 볼 수 있듯이 과산화수소의 농도는 3% 이상으로 하고 FeSO₄(III) 농도가 약 15 mM 이상일 때에 높은 제거효율을 나타내었다. 최적의 제거효율은 약 10%의 과산화수소와 약 22 mM FeSO₄(III)를 첨가할 때인 것으로 추정되었다.

실험에서 높은 제거효율을 나타내었던 과산화수소와 FeSO₄(III) 농도를 각각 3%와 17.5 mM로 하였을 때 PAHs 농도를 벤젠고리수로 분류하여 [Fig. 5]에 나타내었다. 벤젠고리수가 3~4개인 화합물로는 Phe(phenanthrene), Ant(anthracene),

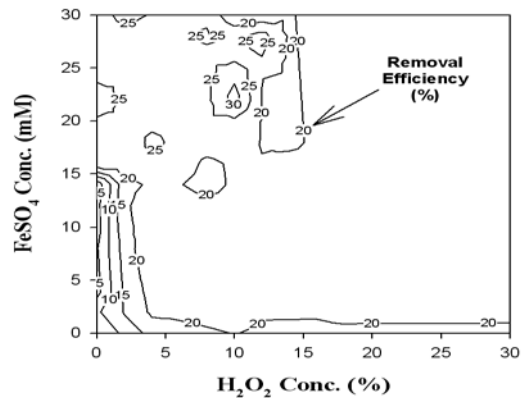
Fla(fluoranthene), Pyr(pyrene), BaA(benz(a)nathracene), 그리고 Chr(chrysene)을 선정하였으며, 5~6개인 화합물로는 BbF(benzo(b)fluoranthene), BkF(benzo(k)fluoranthene), BaP(benzo(a)pyrene), IcP(indeno(1,2,3-cd)pyrene), DaA(dibenz(a,h)anthracene), 그리고 BgP(benzo(g,h,i)perylene)를 선정하였다. 벤젠고리수가 3~4개인 화합물에서는 chrysene과 benz(a)nathracene가 가장 높은 제거효율을 나타내었으며, 5~6개인 화합물에서는 benzo(k)fluoranthene만이 높은 제거효율을 나타내었다. Nam 등(2001)¹²⁾은 펜톤산화 반응과 미생물 처리를 연계하여 PAHs를 처리하였으며, 벤젠고리수가 증가함에 따라 미생물 분해율이 감소하고 독성이 강한 benzo(a)pyrene를 제외하고 대부분 생물학적 처리가 가능하다고 하였다. 또한 벤젠고리수가 2~3개인 PAHs 화합물은 미생물 처리 후 펜톤처리를 하고, 4~6개인 화합물은 펜톤 처리 후 미생물 처리가 바람직하다고 보고하였다.

3.2 식물성 식용유 첨가의 영향

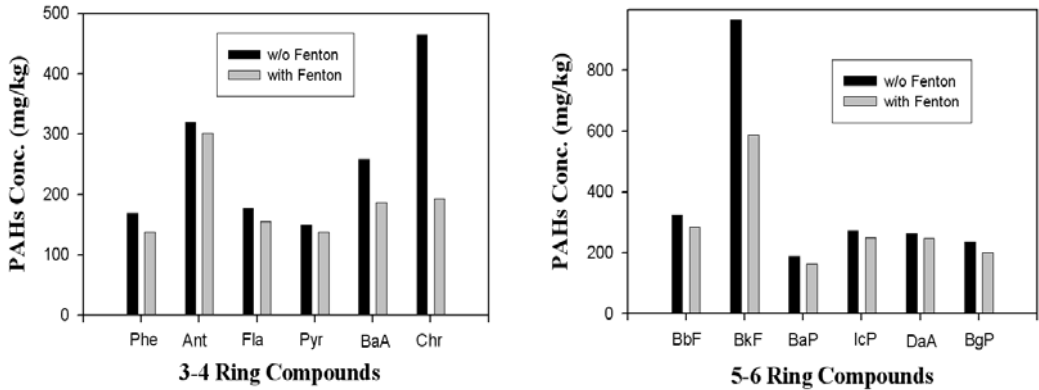
3% 과산화수소와 2.5 mM FeSO₄(III)를 첨가한 펜톤반응 조건에서 1% 올리브유를 첨가하였을 때의 PAHs 농도와 제거효율을 [Fig. 6]에 나타내었다. A는 처리 전 오염도양이며, B는 펜톤처리만 실시한 경우, C는 1% 올리브유와 펜톤시약을 동시에



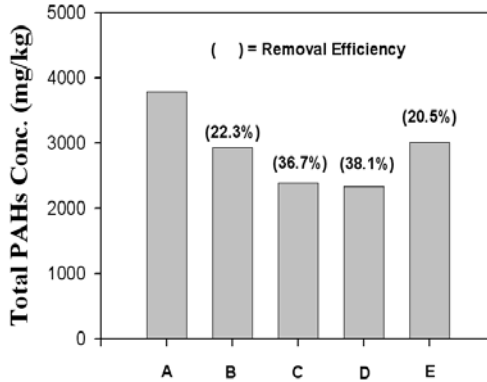
[Fig. 3] Variation of PAHs concentration with different FeSO₄ concentrations.



[Fig. 4] Removal Efficiency of PAHs with several H₂O₂ and FeSO₄ concentrations.



[Fig. 5] Removal efficiencies of individual PAH compounds with and without Fenton reaction ($H_2O_2 = 3\%$ and $FeSO_4 = 17.5\text{ mM}$).

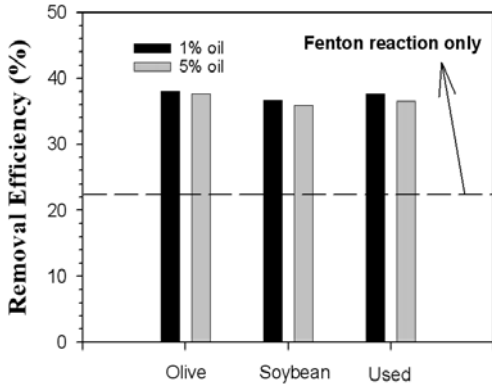


[Fig. 6] PAHs concentration and removal efficiency in 3% H_2O_2 and 2.5 mM $FeSO_4$ (A = w/o Fenton; B = Fenton reagent only; C = simultaneous injection of 1% olive oil + Fenton reagent; D = Fenton reagent injection after 1% olive oil addition; E = 1% olive oil addition).

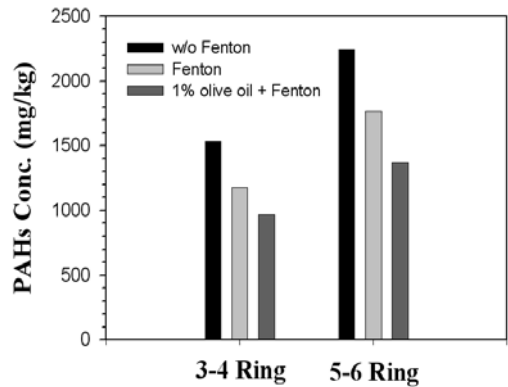
투입한 경우, D는 1% 올리브유를 주입하고 15분 경과 후 펜톤시약을 투입한 경우, 그리고 E는 펜톤 처리를 실시한 후 1% 올리브유를 첨가한 경우를 나타낸다. 초기 PAHs 농도는 3,786 mg/kg이었으나, 펜톤처리 후에는 2,940 mg/kg, 펜톤처리와 올리브유를 동시 또는 전에 주입한 경우에는 각각 2,396과 2,343 mg/kg을 나타내었다. 그러나 펜톤반응을 먼저 일으키고 올리브유를 첨가한 경우에는 3,011 mg/kg으로 단순 펜톤처리만을 한 경우와 크게 다르지 않았다. 이로써 올리브유를 펜톤반응과 동시 또는 전에 첨가한 경우 제거효율은 37~38%로써

펜톤처리만을 한 경우(22.3%)보다 약 15%정도 제거효율을 증가시킬 수 있었다. 식물성 오일에서 생성되는 포화지방산인 potassium laurate에서 발견되는 자유지방산(free fatty acid)은 계면활성제와 비슷한 역할을 하여 토양내 오염물질의 탈착을 도와주는 것으로 보고되고 있다⁷⁾.

과산화수소와 $FeSO_4(III)$ 농도를 각각 3%와 2.5 mM로 고정하고 올리브유, 콩식용유, 그리고 폐식용유 농도를 1%와 5%로 하여 주입한 결과를 [Fig. 7]에 나타내었다. 펜톤처리만을 실시한 부분은 점선으로 표시되었으며 22.3%의 제거효율을 나



[Fig. 7] Removal efficiency of total PAHs in 3% H₂O₂ and 2.5 mM FeSO₄ with 1% and 5% oil concentration.



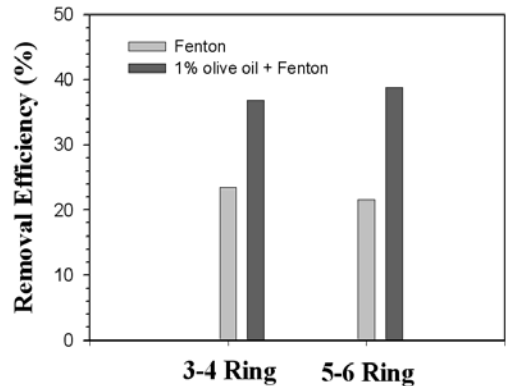
[Fig. 8] PAHs concentration of 3-4 ring and 5-6 compounds after Fenton reaction only and 1% olive oil + Fenton reaction (3% H₂O₂ and 2.5 mM FeSO₄).

타내었다. 그러나 여러 가지 오일을 첨가한 경우에는 대부분 35% 이상의 처리효율을 나타내었으며, 오일의 종류와 농도에 따른 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 그러나 Bogan 등(2003)⁷⁾은 PAHs 오염토양의 펜톤처리에서 1%와 5%의 옥수수유와 아자유를 주입한 결과 충분한 반응을 유발시키기 위해서는 5%의 주입이 필요하다고 하였다. 본 실험에서 주목할 만한 것은 폐식용유를 사용하였을 때 고가의 올리브유를 사용한 경우와 큰 효율차이를 나타내지 않았으므로 폐식용유 사용시 비용이 거의 소요되지 않는 장점이 있을 것으로 판단된다.

펜톤처리만을 한 경우와 가장 효율이 우수하였던 1% 올리브유를 첨가하고 15분 경과 후 펜톤처리를 한 경우에 대하여 벤젠고리수 별로 PAHs 농도 (Fig. 8 참조) 및 제거효율 (Fig. 9 참조)을 살펴보았다. 두 그림에서 알 수 있듯이 올리브유를 첨가함으로써 벤젠고리수가 3~4개인 화합물의 제거율은 36.9%로 펜톤처리만을 한 경우(23.5%)보다 13% 정도 증가하였으며, 5~6개인 화합물의 제거율은 38.9%로 펜톤처리만을 한 경우(21.6%)보다 17% 정도 증가하였다.

4. 결론

본 연구에서는 PAHs 오염토양의 펜톤처리시 과



[Fig. 9] Removal efficiency of 3-4 ring and 5-6 compounds after Fenton reaction only and 1% olive oil + Fenton reaction (3% H₂O₂ and 2.5 mM FeSO₄).

산화수소와 철용액의 영향을 평가하고 이를 바탕으로 식물성 식용유와 폐식용유의 첨가가 처리효율에 미치는 영향을 알아보고자 하였으며 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 철용액을 첨가하지 않고 과산화수소만을 첨가한 경우에도 펜톤반응이 진행되었으며, 이는 토양 중의 철성분 때문에 가능한 것으로 판단된다. 과산화수소는 3%에서 최대 효율을 나타

내었으며, 그 이상의 농도에서는 효율증진을 나타내지 못하였다.

2. 3%의 과산화수소만을 첨가한 경우에는 총 PAHs가 약 19% 제거되었는데 3% 과산화수소에 17.5 mM FeSO₄(III)를 첨가한 경우에는 25%가 제거되어 6% 정도의 효율증진을 나타내었다.
3. 과산화수소와 철용액이 PAHs 펜톤처리에 미치는 영향을 Sigma Plot 프로그램으로 상관성을 추정한 결과 최적의 제거효율은 약 10%의 과산화수소와 약 22 mM FeSO₄(III)를 첨가할 때로 나타났다.
4. 올리브유를 펜톤반응과 동시 또는 전에 첨가한 경우 제거효율은 37~38%로써 펜톤처리만을 한 경우(22.3%)보다 약 15%정도 제거효율을 증가시킬 수 있었다.
5. 올리브유, 콩식용유, 그리고 폐식용유 농도를 1%와 5%로 하여 주입한 결과 대부분 35% 이상의 처리효율을 나타내었으며 오일의 종류와 농도에 따른 영향은 크지 않았다. 폐식용유를 사용하였을 때 고가의 올리브유를 사용한 경우와 큰 효율차이를 나타내지 않았으므로 폐식용유 사용시 추가비용이 거의 소요되지 않는 장점이 있을 것으로 판단된다.
6. 3% 과산화수소와 2.5 mM FeSO₄에서 1% 올리브유 첨가 후 15분이 지나서 펜톤반응을 실시한 경우 3~4개와 5~6개인 화합물의 제거율은 펜톤반응만을 실시한 경우 보다 각각 13%와 17% 정도 증가하였다.

사사

본 연구는 2004년도 신입교수 교내학술연구 지원에 의해 수행되었으며, 연구비를 지원해 주신 삼척대학교에 감사드립니다.

참고문헌

1. US EPA, Clean Air Act, Section 112(c), Specific Pollutants, Federal Register

Online via GPO Access (1997).

2. Bentrán, R.J., González, M., Rivas, F.J., and Alvarez, P., "Fenton reagent advanced oxidation of polynuclear aromatic hydrocarbons in water", *Water, Air, Soil Pollutant*, 105, pp. 685~700 (1998).
3. Gates, D. and Siegrist, R.L. "In-situ chemical oxidation of trichloroethylene using hydrogen peroxide", *J. Environ. Eng.*, 121, pp. 639~644 (1995).
4. Mader, B.T., Goss, K.U. and Eisenreich, S.J., "Sorption of nonionic, hydrophobic organic chemicals to mineral surfaces", *Environ. Sci. Technol.*, 31, pp. 1079~1086 (1997).
5. Fallman, H., Krutzler, T., Bauer, R., Malato, S. and Blanco, J., "Applicability of the photo-Fenton method for treating water contaminating pesticides", *Catal. Today*, 54, pp. 309~319 (1999).
6. Watts, R. and Dilly, S., "Evaluation of iron catalysts for the Fenton-like remediation of diesel-contaminated soils". *J. Hazard. Materials*, 51, pp. 209~224 (1996).
7. Bogan, B.W., Trbovic, V., and Paterek, J.R., "Inclusion of vegetable oils in Fenton's chemistry for remediation of PAH-contaminated soils", *Chemosphere*, 50, pp. 15~21 (2003).
8. Gong, Z., Alef, K., Wilke, B.-M., and Li, P., "Dissolution and removal of PAHs from a contaminated soil using sunflower oil", *Chemosphere*, 58, pp. 291~298 (2005).
9. 최석중, 최현진, 박진희, 이태진, "펜톤 유사반응을 이용한 디젤 오염토양의 처리와 잔류 과산화수소가 생물학적 처리에 미치는 영향, 대한환경공학회지, 26(3), pp. 334~339 (2004).

10. Kong, S.-H., Watts, R.J., and Choi, J.H., "Treatment of petroleumcontaminated soils using iron mineral catalyzed hydrogen peroxide", *Chemosphere*, 37, pp. 1473~1482 (1998).
11. Watts, R.J., Haller, D.r., Jones, A.P., and Teel, A.L., "A foundation for the risk-based treatment of gasolinecontaminated soils using modified Fenton's reactions", *J. Hazard. Materials*, B76, pp. 73~89 (2000).
12. Nam, K., Rodriguez, W., and Kukor, J.J., "Enhanced degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by biodegradation combined with a modified Fenton reaction", *Chemosphere*, 45, pp. 1~20 (2001). 