한국환경과학회지 제17권(제2호), 203~210, 2008
Journal of the Environmental Sciences

디젤로 오염된 토양에의 펜톤 산화공법 적용을 위한 산화제의 주입비 영향 연구

임명희 · 손영규 · 윤준기* · 김지형
고려대학교 건축사회환경공학과, *삼성물산(주) 건설기술연구소
(2007년 11월 9일 접수; 2008년 1월 9일 채택)

Treatment of Diesel-Contaminated Soils by Fenton Oxidation

Myunghee Lim, Younggyu Son, Junki Yun* and Jeehyeong Khim
Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea
**Research institute of technology, Samsung Corporation, Seoul 137-070, Korea*
(Manuscript received 9 November, 2007; accepted 9 January, 2008)

Abstract

The batch tests were performed to determine the ratio of Fenton reagent on diesel contaminated soil. The objective of a column test was to determine and optimize the hydrogen peroxide requirements for the remediation of a soil contaminated with diesel fuel. The batch test were done on 5 g diesel contaminated soil containing hydrogen peroxide (35%) and Iron (II) sulfate. The H_2O_2(g):Fe^{2+}(g) ratio varied 1:0, 30:1, 15:1, 5:1, 1:1, with contact reaction time 120min. Initial diesel concentration were 2,000 mg/kg, 5,000 mg/kg, and 10,000 mg/kg. Average diesel removal from the contaminated soil is 97% after 2hrs. Results of this study showed possible application of without addition of iron source. In column test, treatment of a diesel-contaminated soil (initial diesel concentration: 2,000 mg/kg, 5,000 mg/kg, and 10,000 mg/kg) with hydrogen peroxide (35%) only was containing natural-occurring minerals. The time required for the column test was approximately 90min, 180min, 270min; column length was 5 cm, 10 cm, and 15 cm. The most effective stoichiometry (final diesel conc.: 200~300 mg/kg) of 0.2 g peroxide consumed/mg diesel degraded. Further investigation is required to identify the effect of soil organic matter and soil mineral.

Key Words : Fenton oxidation, Diesel, Soil, Hydrogen peroxide

1. 서 론

국내 산업의 고도화, 복잡화가 가속화됨에 따라 에너지원 및 여러 화학제품의 원료로 사용되는 유류의 소비량이 기하급수적으로 증가하고 있다. 근래에 들어 이러한 유류를 보관하고 있는 지하저장탱크(Underground Storage Tank)의 노후화 및 취급부주의 등의 이유로 유류의 유출 사고가 빈번하게 발생하고 있다. 외국의 경우에도 20%의 유류저장탱크에서 기름이 유출되어 상당한 양의 토양 및 지하수가 오염되고 있는 것으로 보고되고 있다[1].

국내에서도 이러한 토양오염의 심각성을 인지하여 환경부에서는 2001년 토양환경보전법을 개정하여 토양환경평가 제도를 도입하고 오염원인자 책임을 대폭 강화하는 등 오염토양에 대한 조사 및 정화사업을 적극적으로 추진할 수 있는 제도적 기반을

Corresponding Author : Jeehyeong Khim, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea
Phone: +82-2-3290-3318
E-mail: hyeong@korea.ac.kr

마련하였다.

이러한 유류를 처리하는 공법으로는 원위치(in-situ)에서 생물학적으로 분해하는 방법과 biopile, landfarming과 같은 기술처럼 바원위치(ex-situ)에 의한 방법이 있다. 하지만 생물학적인 처리 방법은 운전 시 제어가 어렵고, 모니터링 비용이 많이 들며, 비교적 정화기간이 오래 걸린다는 단점이 있다. 또한 비원위치의 방법들은 토지굴착에 대한 추가적인 비용이 소요되고, 지상에 구조물이 있을 경우 적용이 곤란하다. 따라서 본 연구에서는 비교적 짧은 시간 내에 고농도의 디젤을 처리하는데 있어서 화학적 산화공법 중의 하나인 펜톤 산화 방법을 이용하고자 하였다.

펜톤 산화 방법은 다음 식과 같이 2가의 철과 과산화수소를 이용하여 발생되는 $\cdot OH$을 이용하여 유기물을 산화시키는 것이다.

$$Fe^{2+} + H_2O_2 \rightarrow OH\cdot + OH^- + Fe^{3+} \quad (1)$$

과산화수소와 철과 반응하여 생성되는 $\cdot OH$는 다른 산화제보다 산화력이 크고 (산화력이 $\cdot OH$의 경우 2.8V, MnO_4^-의 경우 1.3V, O_3의 경우 2.1V) 2차 오염물질을 발생시키지 않기 때문에 다양한 오염물질의 처리를 위해 사용되고 있다. 대표적으로 펜톤 산화 공법은 주로 염색폐수[2], 침출수[3], 일반 폐수[4], 슬러지[5] 등의 처리에 사용되어왔다. 최근에는 토양에 오염된 유기물[6,7], 유류 등을 처리하는 연구가 많이 진행되고 있다.

이 중 디젤로 오염된 토양을 펜톤 산화 공법으로 처리하는 연구들은 주로 과산화수소의 농도[1,8~15], pH[10~13,16,17], 초기 디젤의 농도[1,8,10,11,13,14], 철화합물의 종류[1,9,10], 그리고 철화합물의 농도[1,9~12,17] 등에 관한 연구들이 주로 이루어졌다. 또한 펜톤 유사 반응 (Fenton like oxidation, 2가의 철화합물 대신 3가의 철화합물을 사용하여 실험한 것)[9,12] 에 대한 연구와 인위적으로 철 화합물을 주입하지 않고 본래 토양에 함유되어있는 철을 이용하여 실험한 연구[1,8,14,15]들도 진행되었다.

본 연구에서는 기존 연구들을 바탕으로 회분식 실험에서 인위적으로 디젤을 오염시킨 토양에 과산화수소와 철화합물의 주입비를 조정하여 최적의 주입비를 산정하고자 하였다. 또한 회분식 실험에서 결정된 주입비를 바탕으로 연속식 실험에서 디젤을 분해하는데 필요한 과산화수소의 주입량을 결정하는 것이 목적이다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험재료

토양은 경기도 의정부에서 채취하였고 그 특성은 다음 표 1과 같다. 기존 문헌들에서 사용한 토양에 함유되어 있는 유기탄소(organic carbon) 함량을 조사해본 결과 유기탄소 범위가 0.04%[18]에서 1.28%[8]까지였다. 본 실험에서 사용할 토양의 유기 탄소 함량은 2.83%로 기존 문헌 값보다 2배 이상 많은 것을 알 수 있었다.

2.2. 실험방법

2.2.1. 회분식 실험

회분식 실험에서는 디젤의 초기 농도를 2,000, 5,000, 10,000 mg/kg으로 인위적으로 오염시켜 각각의 농도마다 과산화수소와 철화합물의 주입비를 1:0, 30:1, 15:1, 5:1, 1:1로 조정하여 실험하였다. 다음 표 2에 실험의 구성을 나타내었다.

우선 토양을 일정하게 오염시키기 위해 디젤 정량을 n-pentane에 녹인 후 토양에 주입하여 일주일 동안 오염시켰다. 실험하기 전에 n-pentane을 휘발시키기 위하여 후드에 시료를 1시간 정도 방치하였다. 디젤의 초기농도는 실험시작 전에 분석하여 초기 농도를 확인하였다. 40 mL vial에 5 g의 오염된 흙을 넣고 디젤의 초기 농도의 30배인 과산화수소

Table 1. Characteristics of the soil used in the experiment

Characteristics	Value
Density (g/mL)	1.93
Water contents (%)	14.39
Organic matter (%)	5.44
Organic carbon (%)	2.83
Total iron (mg/kg)	424.0

Table 2. Treatment conditions for the batch test

Diesel concentration (mg/kg)	H_2O_2 : Fe^{2+}
2,000	1:0, 30:1, 15:1, 5:1, 1:1
5,000	1:0, 30:1, 15:1, 5:1, 1:1
10,000	1:0, 30:1, 15:1, 5:1, 1:1

를 주입하였다. 각 초기농도 별로 그 양을 살펴보면 2,000, 3,000, 5,000 mg/kg의 초기 농도에 대해 각각 과산화수소 34.5%를 0.62, 1.55, 3.09 mL 주입하였다. 철화합물은 과산화수소와의 질량비로 1:0, 30:1, 15:1, 5:1, 1:1로 하여 주입하였다. 총 반응 시간은 120분으로 하였고 반응시간 동안에는 교반기 (교반기: 한국종합기기제작소, 교반 속도: 120rpm)에 시료를 방치하였다.

반응시간 후에 시료를 추출하기 전에 일정량의 무수황산나트륨 (sodium sulfate anhydrous, powder)을 사용하여 수분을 제거하였다. 그 후 시료에 dichloromethane (20mL)을 넣고 15분 정도 Probe 타입의 초음파기계 (Sonics & Materials, VCX750)를 이용하여 추출하였다. 추출이 종료된 후 시료 1㎕를 FID가 장착된 GC (HP 6890N)를 이용하여 분석하였다. 과산화수소는 요오드에 의한 적정법을 사용하여 측정하였다.

2.2.2. 연속식 실험

컬럼의 재질은 아크릴로서 지름은 4 cm이고 길이는 15, 25, 35 cm로 하였다. 실제 실험할 토양의 깊이는 5, 10, 15 cm이지만 디젤로 오염된 토양과 과산화수소와의 반응 시 거품 생성되어 실제 반응기는 실제 길이보다 길도록 (원래의 길이보다 10~20 cm 길게) 설계하였다. 반응기 아랫부분에는 스테인리스 재질의 wire-mesh를 깔고 반응한 후의 과산화수소가 흘러나올 수 있도록 밸브를 설치하였다. 다음 그림1에 컬럼의 구성을 나타내었다.

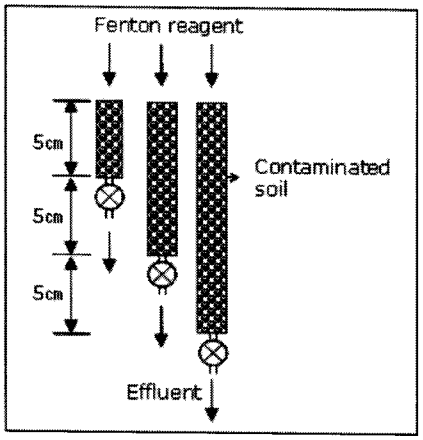

Fig. 1. Experimental apparatus of the column system.

디젤의 초기 농도 2,000, 5,000, 10,000 mg/kg에 대하여 과산화수소를 1PV(pore volume)에서 4PV까지 주입하여 (디젤의 초기 농도에 따라 reagent 주입 부피 결정) 그에 따른 처리 효율을 살펴보았다. 연속식 실험에서도 농도 34.5%의 과산화수소를 사용하였다. 다음의 표3에 연속식 실험의 구성에 관해 나타내었다.

컬럼에 인위적으로 오염시킨 토양을 채우고 이때 컬럼에 채운 토양의 공극은 현장에서의 조건과 동일하게 (ε=0.4) 유지하였다. 토양을 채운 후 과산화수소 (과산화수소:철화합물=1:0, 회분식 실험의 결과를 통해 얻어진 비율)를 주입하였다. 반응이 끝난 후 컬럼의 제일 밑 부분의 토양을 채취하여 회분식 실험과 같은 방법으로 토양을 분석하여 함유하고 있는 TPH의 양을 측정하였다.

3. 결 과

3.1. 회분식 실험

과산화수소와 철화합물의 최적 주입비를 산정하고자 디젤을 인위적으로 2,000, 5,000, 10,000 mg/kg으로 오염시켜 디젤의 농도의 30배에 해당하는 과산화수소를 주입하고 과산화수소와 철과의 질량비는 다음의 5가지 1:0, 30:1, 15:1, 5:1, 1:1에 따른 영향을 알아보았다. 다음 그림 2에 회분식 실험의 결과를 나타내었다.

초기 농도에 상관없이 과산화수소 주입 후 약 30분 내에 모든 반응이 거의 완료되는 것을 알 수 있었다. 초기 농도가 2,000 mg/kg의 경우 과산화수소와 철화합물의 주입비 1:0, 30:1, 15:1, 5:1, 1:1에 따라 최종 농도가 각각 56.3, 69.3, 89.3, 92.0, 147.7 mg/kg이었고, 초기 농도가 5,000 mg/kg의 경우 57.0, 70.1, 64.8, 92.1, 98.0 mg/kg, 초기 농도가 10,000 mg/kg의 경우 51.3, 64.8, 76.1, 102.8, 117.1 mg/kg으로 나타났다. 따라서 목표 최종 농도에 따라서 과산화수소와 철화합물의 주입비를 주입하면 원하는 농

Table 3. Treatment conditions for the column test

Condition	Value
Diesel concentration (mg/kg)	2000, 5000, 10,000
Reagent volume (pore volume)	1PV + [2, 3, 4 PV]
Column length (cm)	5, 10, 15

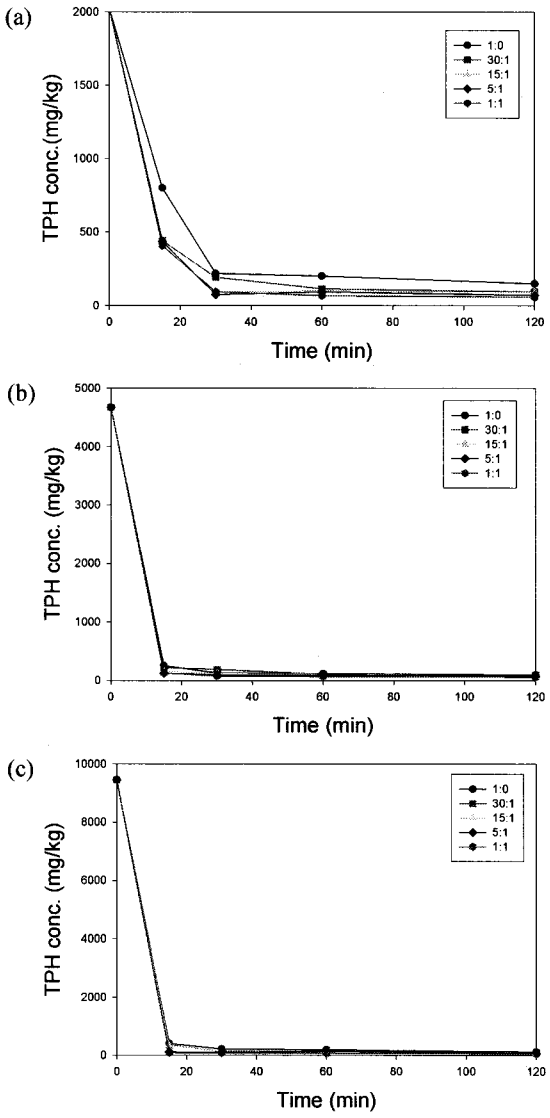

Fig. 2. Degradation diesel by Fenton oxidation ((a) Diesel initial conc.: 2,000 mg/kg, (b) Diesel initial conc.: 5,000 mg/kg, (c) Diesel initial conc.: 10,000 mg/kg).

도를 얻을 수 있을 것이다.

회분식 실험의 결과를 디젤 1 mg을 분해하는데 필요한 과산화수소의 양으로 계산해 본 결과 (분해된 디젤의 양을 소모된 과산화수소의 양으로 나누어 계산), 디젤의 초기 농도가 2,000 mg/kg인 경우에는 0.201~0.206 g, 5,000 mg/kg인 경우에는 0.207~0.216 g, 그리고 10,000 mg/kg인 경우에는 0.181~0.213 g 정도였다. 따라서 초기 농도에 상관없이 디젤 1 mg을 분해하는데 필요한 과산화수소의 양은 비슷하다는 것을 알 수 있었다. 기존의 논문들에서의 결과를 이용하여 디젤 1 mg을 분해하는데 필요한 과산화수소의 양을 계산한 결과 0.01~0.35 g[1,14]으로 본 연구의 결과와 비슷하거나 20배 이상 차이나는 결과도 보였다. 이것은 실험에 사용된 토양의 특성, 과산화수소의 농도, 철화합물의 종류 그리고 초기 pH 조건이 다르기 때문인 것으로 판단된다.

과산화수소의 농도변화를 다음 그림 3에 나타내었다. 모든 농도의 경우에 과산화수소와 철의 주입비가 1:0인 것을 제외하고 과산화수소가 1시간 이후에 거의 남아있지 않았다. 이것은 과산화수소와 철이 초기에 활발하게 반응하여 과산화수소가 소모되기 때문이다. 그림 2의 디젤의 농도 변화 결과와 비교해 보면, 디젤의 농도가 약 30분 내에 떨어지고 그 이후에는 농도가 거의 떨어지지 않는다. 따라서 과산화수소의 농도 결과를 보면, 1시간 후 과산화수소가 토양에 남아있지 않기 때문에 디젤의 분해도 일어나지 않는 것으로 판단된다.

과산화수소의 잔존 농도는 디젤의 초기 농도 2,000 mg/kg일 때, 과산화수소와 철화합물의 주입비 1:0, 30:1, 15:1, 5:1, 1:1에 대해 8시간 후 잔존 과산화수소의 농도는 각각 1.7, 0.9, 0.1, 0, 0 %이고 디젤의 초기 농도는 5,000 mg/kg일 때, 1.8, 0.2, 0.1, 0.1, 0.06 %, 디젤의 초기 농도는 10,000 mg/kg일 때 5.3, 0.19, 0.21, 0.09, 0.1 % 의 과산화수소가 남아있음을 확인하였다. 세가지 디젤의 초기 농도에서 모두 과산화수소와 철화합물의 주입비가 1:0일 경우를 제외하고는 거의 과산화수소가 남아있지 않은 것을 확인할 수 있었고, 철화합물을 넣지 않은 경우에는 8시간이 지난 이후에도 과산화수소의 농도가 8~10% 정도를 유지하였다. 따라서 잔류되어있는 과산화수소는 실험시간을 넘어서도 남아있는 디젤 분해에 사용될 가능성이 있을 것으로 보인다.

3.2. 연속식 실험

연속식 실험의 목적은 회분식 실험에서 얻은 결과를 바탕으로 실제 현장을 모사 할 수 있도록 하는 것이다. 회분식 실험에서 철화합물을 넣지 않은 경우에서도 충분한 반응이 이루어지고, 잔류 과산화수소의 농도가 유지되는 것을 알 수 있었기 때문에,

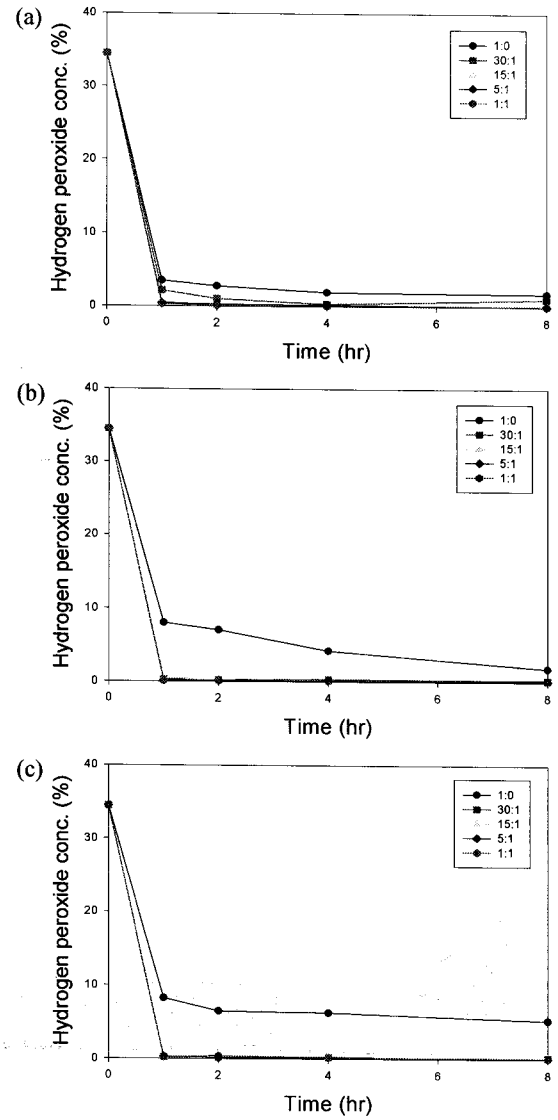

Fig. 3. Degradation hydrogen peroxide by Fenton oxidation ((a) Diesel initial conc.: 2,000 mg/kg, (b) Diesel initial conc.: 5,000 mg/kg, (c) Diesel initial conc.: 10,000 mg/kg).

연속식 실험에서는 철화합물을 넣지 않고 토양 자체가 함유하고 있는 철 함량(424 g/kg)을 가지고 실험하였다.

본 실험 전에 오염되지 않은 토양을 컬럼 (컬럼 길이 5 cm)에 채운 후 과산화수소를 주입하여 토양에 함유되어있는 유기물과 철화합물과의 반응으로 소모되는 과산화수소의 양을 파악하기 위한 실험을 하였다. 그 결과 34.5%의 과산화수소 주입 후 약 10%의 과산화수소가 소모되는 것을 확인할 수 있었다.

연속식 실험에서는 디젤의 초기 농도 2,000, 5,000, 10,000 g/kg에 대하여 컬럼의 길이를 각각 5, 10, 15 cm로 하여 과산화수소를 주입하여 실험하였다. 과산화수소의 농도는 35%로 하여 1PV pore volume)에서 4PV까지 주입하여 디젤의 분해 경향을 살펴보았다. 다음 그림 4에 연속식 실험의 결과를 나타내었다.

TPH의 분석은 과산화수소가 주입되고 반응이 충분히 일어났을 때 약 8시간 정도 후) 분석하였다. 컬럼의 길이가 5 cm였을 때 1PV Pore Volume)만 주입하여도 농도가 240 g/kg 정도로 떨어졌다. 하지만,

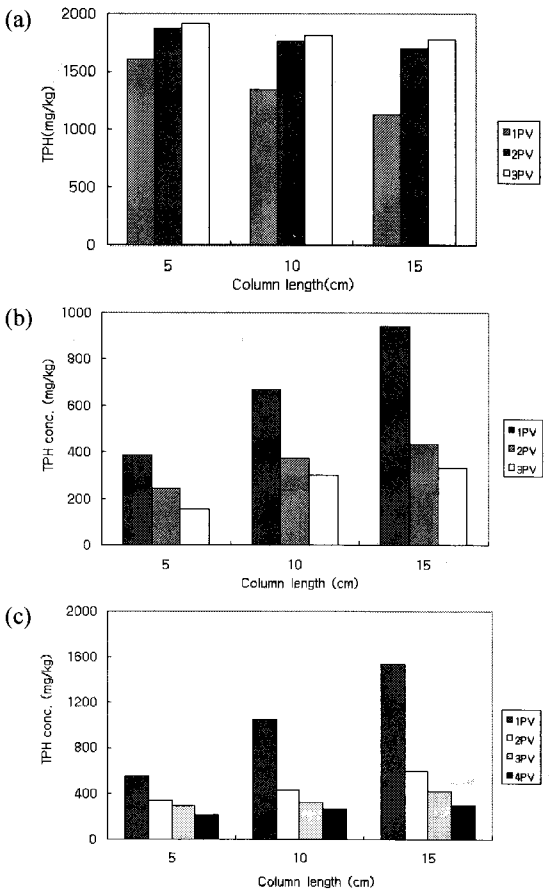

Fig. 4. Degradation diesel by Fenton oxidation ((a) Diesel initial conc.: 2,000 mg/kg, (b) Diesel initial conc.: 5,000 mg/kg, (c) Diesel initial conc.: 10,000 mg/kg).

10, 15 cm인 경우에는 2PV을 주입하여야 100 mg/kg 이하로 떨어졌다. 디젤의 초기 농도가 5,000 mg/kg인 경우에는 컬럼의 길이가 5 cm였을 때 1PV만 주입 시에 농도가 400 mg/kg 정도로 떨어졌고, 2PV 주입 시에는 130 mg/kg 이하로 떨어지는 것을 알 수 있었다. 컬럼의 길이가 10, 15 cm인 경우에는 2PV 주입 시 200 mg/kg 이하로 떨어졌다. 디젤의 초기 농도가 10,000 mg/kg 인 경우에는 컬럼의 길이가 5 cm였을 때 3PV 주입 시에 농도가 300 mg/kg 정도로 떨어졌다. 하지만, 10, 15 cm인 경우에는 4PV 이상 주입하여야 300 mg/kg 이하로 떨어졌다.

다음 그림 5에 연속식 실험에서 유출되는 과산화수소의 농도를 분석하여 나타내었다. 디젤의 농도가 2,000 mg/kg 일 경우, 주입 유량에 따라 유출되는 과산화수소의 농도는 1PV의 과산화수소를 유입하였을 때 컬럼의 길이가 5 cm인 경우에는 유출되는 과산화수소 농도가 3% 정도였고 10, 15 cm인 경우에는 1PV의 과산화수소를 주입하였을 때 과산화수소의 농도가 완전히 소모됨을 알 수 있었다. 디젤의 농도가 5,000 mg/kg 일 경우, 주입 유량에 따라 유출되는 과산화수소의 농도는 1PV의 과산화수소를 유입하였을 때 컬럼의 길이가 5 cm인 경우에는 유출되는 과산화수소 농도가 1~2% 정도였고 10, 15 cm인 경우에는 1PV의 과산화수소를 주입하였을 때 과산화수소의 농도가 완전히 소모됨을 알 수 있었다. 디젤의 농도가 10,000 mg/kg 일 경우, 주입 유량에 따라 유출되는 과산화수소의 농도는 1PV의 과산화수소를 유입하였을 때 컬럼의 길이가 5 cm인 경우에는 과산화수소 농도가 5% 정도였고 10, 15 cm인 경우에는 1PV의 과산화수소를 주입하였을 때 과산화수소의 농도가 완전히 소모됨을 알 수 있었다.

회분식 실험의 결과와 마찬가지로 1 mg의 디젤을 분해하는데 필요한 과산화수소의 양을 계산한 결과 디젤의 초기 농도가 2,000 mg/kg일 경우에는 0.107~0.210 g, 5,000 mg/kg일 경우에는 0.096~0.194 g, 그리고 10,000 mg/kg인 경우에는0.148~0.229 g/kg으로 나타났다.

기존에 디젤로 오염된 토양을 펜톤 산화 방법으로 처리하는데 있어서 연속식 실험을 수행한 연구가 없었기 때문에 기존의 문헌의 결과와 비교할 수 없었다. 본 실험에서 얻은 회분식 실험의 결과값과 비교해 보면 회분식 실험에서 최종농도 100 mg/kg

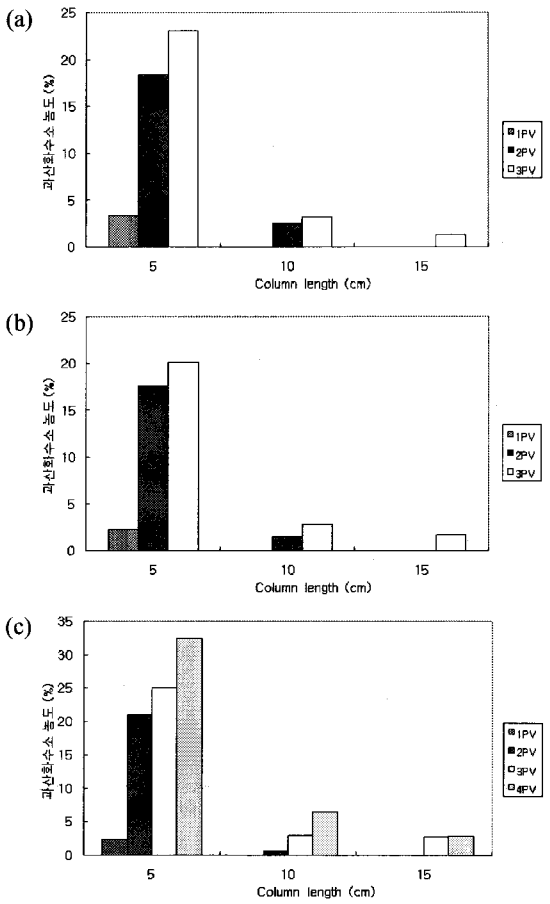

Fig. 5. Degradation Hydrogen peroxide by Fenton oxidation ((a) Diesel initial conc.: 2,000 mg/kg, (b) Diesel initial conc.: 5,000 mg/kg, (c) Diesel initial conc.: 10,000 mg/kg).

이하로 떨어뜨리기 위해 필요한 과산화수소의 양이 약 0.2 g이었음에 반해서 연속식 실험에서는 최종농도 200 mg/kg으로 떨어뜨리기 위해 과산화수소가 0.2 g정도 필요했다. 따라서 회분식 실험보다 연속식 실험에서 필요한 과산화수소의 양이 많음을 확인할 수 있었다. 그 이유는 회분식 실험과 달리 연속식 실험에서는 과산화수소가 충분히 반응할 시간 없이 빠져 나오기 때문일 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 디젤로 오염된 토양에 펜톤 산화 방법을 적용하여 회분식 실험에서는 과산화수소와

철화합물의 주입비 산정, 연속식 실험에서는 회분식 실험을 바탕으로 디젤을 분해하는데 필요한 과산화수소의 양을 산정하는 실험을 하였다.

1) 과산화수소와 철화합물의 주입비 산정하는 회분식 실험에서는 모든 농도에서 철화합물의 비가 높을 수록 분해는 잘 되었다. 하지만 철화합물을 넣지 않은 경우에도 본래의 토양이 가진 철 함량과 과산화수소의 반응으로 충분한 반응이 이루어짐을 확인할 수 있었다.

2) 회분식 실험에서 시간에 따른 과산화수소의 농도를 측정한 결과 철화합물을 넣지 않은 경우에는 반응 시작 후 8시간이 지난 후에도 과산화수소 농도가 8~10% 정도 남아있었다. 하지만 철화합물을 넣은 경우에는 초기에 과산화수소의 반응으로 인해 과산화수소가 전부 소모되었다.

3) 회분식 실험을 바탕으로 연속식 실험에서는 인위적으로 철화합물을 넣지 않고 과산화수소만 주입하여 실험한 결과 1 mg의 디젤을 분해하는데 필요한 과산화수소의 양을 계산해 보면 디젤의 초기 농도가 2,000 mg/kg일 경우에는 0.107~0.210 g, 5,000 mg/kg일 경우에는 0.096~0.194 g, 그리고 10,000 mg/kg인 경우에는 0.148~0.229 g였다.

4) 기존에 디젤로 오염된 토양을 펜톤 산화 방법으로 처리하는데 있어서 연속식 실험을 수행한 연구가 없었기 때문에 기존의 결과값과 비교할 수 없었다. 하지만 본 실험에서 얻은 회분식 실험의 결과값과 비교해 보면 회분식 실험에서는 1 mg의 디젤을 분해하는데 필요한 과산화수소의 양이 약 0.2 g (최종농도 100 mg/kg이하)이었음에 반해서 연속식 실험에서는 1 mg의 디젤을 분해하는데 필요한 과산화수소의 양이 약 0.2 g(최종농도 200 mg/kg이하)이었다. 따라서 회분식 실험보다 연속식 실험에서 필요한 과산화수소의 양이 많음을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 삼성물산(주) 건설기술연구소의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1) 최진호, 김재호, 공성호, 1997, 석유로 오염된 토양의 과수를 이용한 처리에 관한 연구, 한국토양환경학회지, 2(3), 49~57.
2) Kang S., Laio C., Chen M., 2002, Pre-oxidation and coagulation of textile wastewater by the Fenton process, Chemosphere, 923~928.
3) Lopez A., Pagano M., Volpe A., Pinto A. C., 2004, Fenton's pre-treatment of mature landfill leachate, Chemosphere, 54, 1005~1010.
4) Matinez N. S., Fernandez J. F., Segura X. F., Ferrer A. S., 2003, Pre-oxidation of an extremely polluted industrial wastewater by the Fenton's reagent, J. Haz. Mat., 101, 315~322.
5) 남영우, 한금석, 박태욱, 2004, 펜톤 산화를 이용한 하수 슬러지의 유기산 생성 및 탈질에 관한 연구, 한국폐기물학회 춘계학술연구발표, 192~195.
6) Baclocchl R., Boni M. R., D'Aprile L., 2003, Hydrogen peroxide lifetime as an indicator of theefficiency of 3-chlorophenol Fenton's and Fenton-like oxidation in soils, J. Haz. Mat. 96, 305~329.
7) Kakarla P. K. C., Watts R. J., 1997, Depth of fenton-like oxidation in remediation of surface soil, J. Env. Eng., 123(1), 11~17.
8) Spencer C. J., Stanton P. C., Watts R. J., 1996, A central composite rotatable analysis for the catalyzed hydrogen peroxide remediation of diesel-contaminated soils, Air & Waste Manage. Assoc. 46, 1067~1074.
9) Watts R. J., Dilly S. E., 1996, Evaluation of iron catalysts for the fenton-like remediation of diesel-contaminated soils, J. Hazardous Materials. 51, 209~224.
10) 최진호, 김상대, 문제기, 공성호, 1999, 디젤과 등유로 오염된 토양의 철광석으로 촉매화된 과수를 이용한 처리에 관한 연구, J. of Korean Ind. & Eng. Chemistry, 10(1), 24~29.
11) Kong S. H., Watts R. J. Choi J. H., 1998, Treatment of petroleum-contaminated soil using iron mineral catalyzed hydrogen peroxide, Chemosphere. 37(8). 1473~1482.
12) Watts R. J., Haller D. R., Jones A. P., Teel A. L., 2000, A foundation for the risk-based treatment of gasoline-contaminated soils using modified fenton's reactions, J. Hazardous Materials. 76, 73~89.
13) 지원현, 2001, Chemical oxidation treatment of diesel-contaminated soil by Fe^0/H_2O_2 system, 석사학위논문, 환경시스템협동과정, 고려대학교.
14) 최창석, 박진희, 김영식, 이태진, 2003, 과산화수소에 의한 디젤 오염 토양의 처리, 대한환경공학회, 431~435.
15) 최석종, 최현진, 박진희, 이태진, 2004, 펜톤 유사반응을 이용한 디젤 오염토양의 저리와 잔류 과산화수소가 생물학적 처리에 미치는 영향, 대한환경공학회지 26(3), 334~339.
16) Chen C. T., Tafuri A. N., Rahman M., Forest M. B.,

1998, Chemical oxidation treatment of petroleum contaminates soil using fenton's reagent, J. Environ. Sci. Health. A33(6), 987～1008.
17) Millioli V. S., Freire D. D. C., Cammarota M. C., 2003, Petroleum oxidation using Fenton's reagent over beach sand following a spill, J. Hazardous Materials. 103, 79～91.
18) Ravikumar J. X., Gurol M. D., 1994, Chemical oxidation of chlorinated organics by hydrogen peroxide in the presence of sand, Environ. Sci. Technol., 28, 394～400.
19) 최희철, 지재성, 유도윤, 1997, 탄화수소화합물로 오염된 지반환경복원기술 개발연구, 한국건설기술연구원.
20) 토양오염공정시험방법, 2002, 환경부.
21) 토양환경보전정책방향, 2004, 환경부.
22) In situ chemical treatment, 1999, GWRTAC.