

## 유류오염토양 처리를 위한 마이크로나노버블 토양세척에 관한 연구

최호은 · 정진희<sup>1)</sup> · 한영립<sup>1)</sup> · 김대용<sup>1)</sup> · 정병길<sup>2)</sup> · 최영익<sup>1)\*</sup>

(주)덕신건설, <sup>1)</sup>동아대학교 환경공학과, <sup>2)</sup>동의대학교 환경공학과  
(2011년 8월 10일 접수; 2011년 9월 8일 수정; 2011년 10월 5일 채택)

### A Study on the Treatment of Oil Contaminated Soils with Micro-nano Bubbles Soil Washing System

Ho-Eun Choi, Jin-hee Jung<sup>1)</sup>, Young-Rip Han<sup>1)</sup>, Dae-Yong Kim<sup>1)</sup>,  
Byung-Gil Jung<sup>2)</sup>, Young-Ik Choi<sup>1)\*</sup>

Dukshin Construction Co., Ltd, Busan 617-020, Korea

<sup>1)</sup>Department of Environmental Engineering, Dong-A University, Busan 604-714, Korea

<sup>2)</sup>Department of Environmental Engineering, Dong-Eui University, Busan 614-714, Korea

(Manuscript received 10 August, 2011; revised 8 September, 2011; accepted 5 October, 2011)

#### Abstract

The objectives of this study are to examine the processing of oils contamination soil by means of using a micro-nano-bubble soil washing system, to investigate the various factors such as washing periods, the amount of micro-nano bubbles generated depending on the quantity of acid injection and quantity of air injection, to examine the features involved in the elimination of total petroleum hydrocarbons (TPHs) contained in the soil, and thus to evaluate the possibility of practical application on the field for the economic feasibility.

The oils contaminated soil used in this study was collected from the 0~15 cm surface layer of an automobile junkyard located in U City.

The collected soil was air-dried for 24 hours, and then the large particles and other substances contained in the soil were eliminated and filtered through sieve No.10 (2 mm) to secure consistency in the samples. The TPH concentration of the contaminated soil was found to be 4,914~5,998 mg/kg.

The micronano-bubble soil washing system consists of the reactor, the flow equalization tank, the micronano-bubble generator, the pump and the strainer, and was manufactured with stainless material for withstanding acidic phase.

When the injected air flow rate was fixed at 2 L/min, for each hydrogen peroxide concentrations (5, 10, 15%) the removal percents for TPH within the contaminated soil with retention times of 30 minutes were respectively identified as 4,931 mg/kg (18.9%), 4,678 mg/kg (18.9%) and, 4,513 mg/kg (17.7%). And when the injected air flow rate was fixed at 2 L/min, for each hydrogen peroxide concentrations (5, 10, 15%) the removal percents for TPH within the contaminated soil with retention times of 120 minutes were respectively identified as 4,256 mg/kg (22.3%), 4,621 mg/kg (19.7%) and 4,268 mg/kg (25.9%).

**Key Words** : TPH, Micronano-bubble soil washing system, air flow rate, hydrogen peroxide

\*Corresponding author : Young-Ik Choi, Department of Environmental Engineering, Dong-A University, Busan 604-714, Korea  
Phone: +82-51-200-7675  
E-mail: youngik@dau.ac.kr

#### 1. 서론

국내 산업의 고도화, 복잡화가 가속화됨에 따라 에너지원 및 여러 화학제품의 원료로 사용되는 유류

의 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(임 등, 2008). 우리나라의 경우 전국적으로 산재해 있는 유류 및 유해물 관련시설, 미군부대를 포함한 군부대시설, 휴·폐광산 지역, 폐기물매립지 및 소각장 등에서 발생한 침출수 등에 의한 점오염원뿐만 아니라 골짜기, 농경지 등 기타 비점오염원에서 발생하는 각종 오염물의 증가로 인해 토양오염이 심화되고 있으며, 주요 토양오염물질로는 유류 및 중금속 등을 들 수 있다(정 등, 2009).

최근 중금속이나 난분해성 물질을 처리하기 위한 기술로서 주목받고 있는 기술이 토양세척법이다. 이 기술은 굴착토양을 세척용매와 접촉시켜 오염물질을 추출하는 공정으로 세척 후 정화된 토양은 용액으로부터 분리하여 현장에 재 매립하고 토양과 분리하고 남은 용액은 폐수처리과정을 통해 오염물질을 회수하고 용매로 재사용 된다(Reddy 등, 2000; Van Benschoten et al., 1994) 디젤은 토양오염을 발생시키는 유류 중 가장 많은 비중을 차지하며 휘발성과 용해도가 낮아 오염물의 확산이 느리며 주로 NAPL(non-aqueous phase liquid) 상태로 토양 불포화층을 통해 수직 이동하여 지하수면 위에 축적되는 경향을 보인다. 이 과정에서 다량의 디젤이 모세관 현상에 의해 불포화층 토양의 공극 사이에 잔류하여 잔류포화(residual saturation)상태로서 우수 등 침투수 또는 지하수의 장기적인 오염원으로 작용하게 된다.(백 등, 2002; 고, 2004)

마이크로나노버블 기술은 1995년 일본에서 처음 시작되어 년 60~70%이상의 성장을 지속해 왔으며, 전 산업에 걸쳐 응용이 확대되고 있다(임, 2005) 마이크로나노버블 발생장치의 경우 미세 기포크기를 이용하기 때문에 수중에서 상승속도가 느리게 됨으로써 체류시간을 길게 할 수 있을 뿐만 아니라 세척용매의 반응속도와 토양과의 비표면적을 크게 만들어 오염토양 내 유기오염물질 및 중금속 제거에 효과적일 것으로 기대된다. 따라서 본 연구에서는 유류 오염토양처리시 투입되는 과산화수소 농도의 변화와 마이크로나노버블 발생량 등 다양한 인자들의 변화를 통해 토양

중 함유되어 있는 TPH의 제거 특성을 검토하여 기존의 토양세척처리의 혼합방식 및 투입방식을 개선하여 과산화수소의 과량 투입을 막고 고처리비용 문제를 해결하는데 그 목적이 있다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 실험재료

본 연구에서 사용된 오염토양은 U시에 위치하고 있는 폐차장에서 표층 0~15 cm에서 채취한 중금속 오염토양을 사용하였다. 채취된 토양은 24시간 이상 풍건한 후 토양에 함유된 조대입자와 기타물질을 제거한 후 No.10(2 mm) 체를 이용하여 시료를 균등화하였다. 오염토양의 TPH 농도는 4,914~5,998 mg/kg로 조사되었다.

Table 1. Characteristics of TPH contaminated soil

Parameters	Contaminated soil
Texture	Sandy loam
Sand (2~0.05 mm)	60.2%
Silt (0.05~0.002 mm)	22.7%
Clay (<0.002 mm)	17.1%
Moisture content (%)	1.5
Field capacity (%)	40
pH	9.4
TPH(mg/kg) (Avg.)	4,914~5,998 (5,456)

### 2.2. 재료 및 방법

#### 2.2.1. 실험장치

유류 오염토양의 처리를 위한 마이크로-나노버블 토양세척시스템의 실험장치 사진을 Fig. 1에 나타내었으며, 유량조정조(유효용적 60 L), 유효용적 38.5 L인 마이크로-나노버블 발생장치 및 펌프 및 스트레이너로 구성되어 있으며, 과산화수소 처리시 pH의 변화에 따른 부식을 방지하기 위해서 스테인레스 재질로 제작되었다.

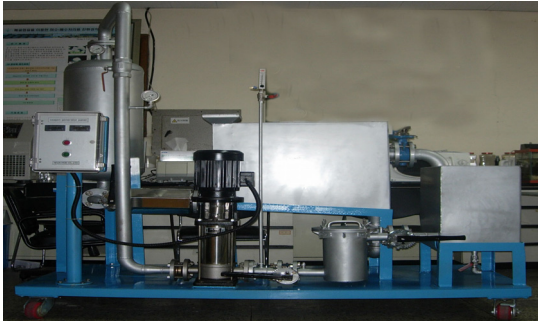


Fig. 1. Photograph of micro-nano bubbles soil washing system.

2.2.2. 실험방법

유류토양의 처리실험은 마이크로나노버블 단독처리, 과산화수소(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) 단독처리, 마이크로나노버블+과산화수소 처리를 실시하여 각 처리별로 제거된 유류의 농도 및 초기농도 대비 처리 효율을 비교 분석하였다. 마이크로나노버블 처리시 공기 주입(1, 2 및 3 L/min)량을 이용하여 마이크로나노버블의 발생량에 대한 TPH 제거율을 분석하였으며, 과산화수소(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) 세척 처리시 과산화수소농도 (5, 10 및 15%)에 따른 TPH 제거율을 분석하였으며, 마이크로나노버블 토양 세척시스템 처리시 공기주입량(1 및 2 L/min) 및 과산화수소(농도 5, 10 및 15%) 농도에 따른 TPH 제거율을 분석 하였고 운전조건은 Table 2에 나타내었다. 또

Table 2. The operating conditions

Parameters	Units	Conditions
Sampling time	min	0, 5, 10, 20, 30, 60, 120
Contaminated-soil	kg	10
Air flow	L/min	1, 2, 3
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> concentration	%	5, 10, 15

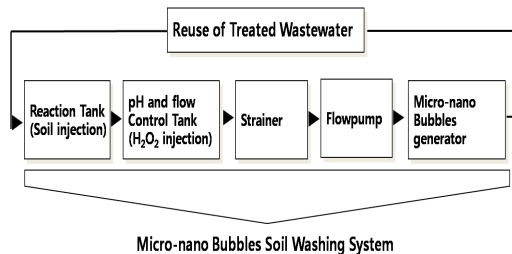


Fig. 2. A Schematic Diagram of Micro-nano Bubbles Soil Washing System.

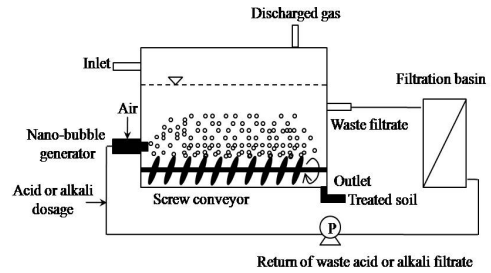


Fig. 3. Schematic of micro-nano bubbles soil washing system.

한, 장치의 처리 흐름도와 모식도를 Fig. 2 및 Fig. 3에 나타내었다. 장치는 처리용매의 효율적인 관리를 위해 내부순환 장치를 설치하여 반응이 완료되지 않은 과산화수소를 다시 토양세척조에 투입하여 100% 반응이 이루어질 수 있는 장치로 구성하였다.

2.2.3. 분석방법

유류오염토양 시료의 석유계탄화수소(TPH) 추출 및 분석은 토양오염공정시험법에 준하여 실시하였으며, 분석조건은 Table 3과 같다. GC/MS는 안지름 0.32 mm, 필름두께 0.25 μm, 모세관의 길이 30 m의 것으로 HP-5 칼럼을 사용하였다. 또한 초기온도 50 °C, 최종온도는 325 °C이였으며, 승온율은 10 °C/min이였다. 주입부와 검출부 온도는 각각 280 °C와 300 °C 이였으며, 운반 가스는 질소를 사용하여 유량을 2 mL/min으로 하여 분석하였다.

Table 3. The analytical conditions for gas chromatography

Parameters	Chromatographic conditions
GC model	Hewlett-Packard HP6890
Column	HP-5 (30 m, 0.32 mm, 0.25 μm)
Injector temperature	280
Detector temperature	300
Carrier gas	N <sub>2</sub>
Detector	FID
Injection volume	2 mL/min
Extraction solvent	Dichloromethane

3. 결과 및 고찰

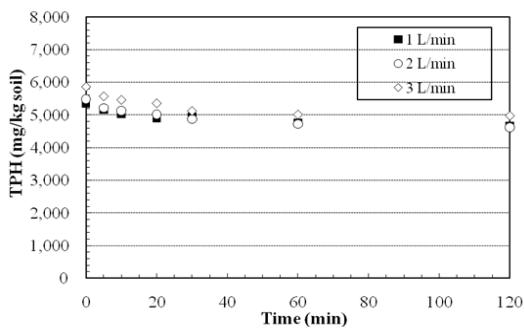
3.1. 마이크로나노버블 처리 특성

유입 공기유량 (1, 2 및 3 L/min)에 따른 디젤오염 토양의 TPH 농도 및 제거효율의 변화를 Fig. 4에 나

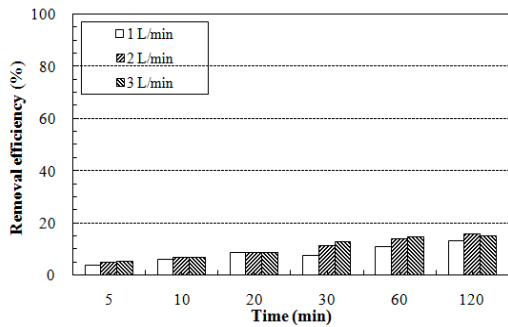
타내었다.

오염토양의 세척효과를 알아보기 위해 마이크로나노버블 발생장치로 주입되는 공기 유량의 변화에 따른 유류오염토양 세척 실험을 한 결과 초기 TPH 농도 5,352~5,856 mg/kg에서 운전시간 30분과 120분경과 후 각각 4,875~5,126 mg/kg과 4,621~4,982 mg/kg의 농도를 나타내었으며, 이때의 제거효율은 각각 7.5~12.5%와 13.0~15.7%로 나타났다. 공기유량이 늘어날수록 약간의 처리효율의 증가를 나타내었으며, 2 L/min과 3 L/min에서는 큰 차이를 나타내지 않았다.

유입공기량 (1, 2 및 3 L/min)에 따른 디젤오염토양의 TPH 분해속도 변화를 시간과 농도변화  $\ln(C_t/C_0)$ 를 두 축으로 하여 Fig. 5에 나타내었다. 또한 Table 4에 유입공기량 (1, 2 및 3 L/min)에 따른 속도상수(k)와 결정계수( $R^2$ ) 값을 계산하여 제시하였으며, 이때의 속도상수 k는 각각  $0.0010 \text{ min}^{-1}$ ,  $0.0012 \text{ min}^{-1}$ ,  $0.0011 \text{ min}^{-1}$ 이였으며, 결정계수( $R^2$ ) 값은 0.6653~0.7602의 범위를 나타내었다.



(a) TPH concentration vs. time



(b) removal efficiency vs. time

Fig. 4. The results of TPH concentration and removal efficiency of contaminated soil on various airflow.

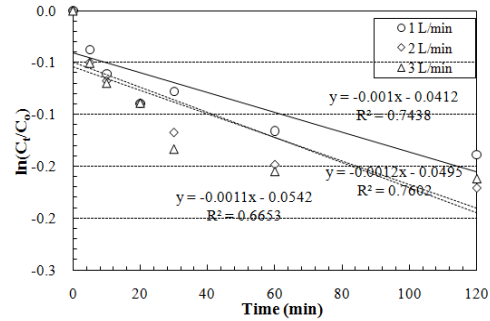


Fig. 5. The results of TPH reduction rate of heavy metal contaminated soil on various airflow.

Table 4. The reaction rate constants and correlation coefficient of TPH on various airflow at reaction time of 120 min

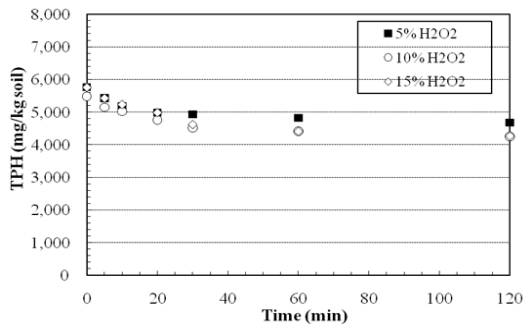
Airflow (L/min)	Reaction rate constants (k) ( $\text{min}^{-1}$ )	Correlation coefficient ( $R^2$ )
1	0.0010	0.7438
2	0.0012	0.7602
3	0.0011	0.6653

### 3.2. 과산화수소 단독 처리 특성

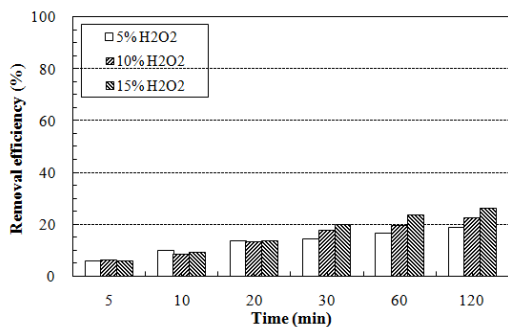
오염된 토양의 복원에는 폐수처리에서 사용되는 펜톤 반응처럼 저 농도의 과산화수소가 사용되는 것이 아니라 오염농도나 토양의 특성에 따라서 다르지만 일반적으로 높은 농도의 과산화수소가 필요한 것으로 보고되고 있다.(Tyre 등, 1991; Sheng과 Cho., 1997; Walter와 Rena, 1996) 본 연구에서는 과산화수소 농도(5, 10 및 15%)에 따른 오염토양의 TPH 농도 및 제거효율의 변화를 판단하기 위해 앞선 마이크로나노버블 단독 세척장치에서 마이크로나노버블 발생장치에 공기접촉부를 차단하고, 약품조 및 반응조에 과산화수소를 투입 후 내부순환펌프만을 이용하여 토양세척을 실시하여 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

과산화수소 농도별(5, 10 및 15%) 오염토양 내 TPH 농도 및 제거효율은 반응시간 30분과 120분에서 각각 4,931 mg/kg (18.9%), 4,678 mg/kg (18.9%), 4,513 mg/kg (17.7%)와 4,256 mg/kg (22.3%), 4,621 mg/kg (19.7%), 4,268 mg/kg (25.9%)를 나타내었다. TPH 농도는 반응시간 30분까지 지속적으로 감소하

다가 30분 이후 점차적으로 반응속도가 감소하여 30분 이후 약간의 농도 감소를 나타내었다. 이는 산화제인 과산화수소의 주입초기 반응이 빠른 속도로 일어나 오염물의 농도를 급격히 저감시킨다는 것을 의미하며, 이후 반응시간이 길어질수록 산화제와 오염물질의 접촉 가능성이 줄어들어 과산화수소의 주입량을 늘리더라도 더 이상의 TPH 감소가 일어나지 않을 것으로 판단된다. 또한, 최 등(최 등, 2004)의 연구결과에 의하면 디젤오염토양의 펜톤 유사반응 실시 후 미생물 처리의 연계가능성에 대하여 검토한 결과 50 mg/L 이상의 잔류 과산화수소의 농도에서는 미생물 저해작용이 일어난다는 것을 확인하였으며, 따라서 미생물 공정을 연계하기 위해서 과산화수소의 잔류 농도는 40 mg/L 이하로 관리하는 것이 바람직한 것으로 제시하고 있으며, 본 공정도 과량의 과산화수소 투입에 의한 과다한 스크림의 발생도 막기 위해 15% 이상의 농도에서는 처리하지 않았다.



(a) TPH concentration vs. time



(b) removal efficiency vs. time

Fig. 6. The results of TPH concentration and removal efficiency of contaminated soil on various H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentration.

김과 공(김과 공, 1998)은 과산화수소를 이용한 디젤오염토양의 처리 시 과산화수소 1%에서 field capacity의 20배에 해당하는 주입량을 사용하였음에도 불구하고 30% 정도의 디젤분해효과밖에 얻지 못하였는데, 이러한 이유를 저 농도의 과산화수소에서는 충분한 OH·를 공급하지 못하여 오염물의 탈착속도가 느려져서 TPH의 분해가 잘 안 일어났다고 하였다. 또한 10% 과산화수소의 경우 field capacity 증가에 따른 디젤의 분해율이 1% 과산화수소의 경우보다 증가하는 결과를 얻었으며, 최 등(최 등, 2003)은 1%, 3% 그리고 5%의 디젤로 오염된 토양 200 g에 각각 3%, 6%, 10%의 과산화수소 200 mL를 첨가하여 실험한 결과 초기 48시간동안 왕성한 디젤의 분해를 확인할 수 있었으며, 그 이후에는 디젤의 분해가 미미한 것으로 확인되었으나, 디젤의 분해량은 전체적으로 약 40% 미만의 결과를 나타내어 본 연구와 일치하는 것으로 판단된다.

과산화수소 농도(5, 10 및 15%)에 따른 오염토양의 TPH 분해속도 변화를 시간과 농도변화  $\ln(C_t/C_0)$ 를 두 축으로 하여 Fig. 7에 나타내었다. 또한 Table 5에 과산화수소 농도(5, 10, 15%)에 따른 속도상수(k)와 결정계수(R<sup>2</sup>) 값을 계산하여 제시하였으며, 이때의 속도상수 k는 각각 0.0014 min<sup>-1</sup>, 0.0018 min<sup>-1</sup>, 0.0023 min<sup>-1</sup>이었으며, 결정계수(R<sup>2</sup>) 값은 0.6423~0.7559의 범위를 나타내었다.

최 등(최 등, 2003)은 분해속도적 관점에서 10,000 mg diesel/kg soil과 50,000 mg diesel/kg soil의 농도로 조절된 디젤오염토양을 과산화수소로 처리한 결과가 일차반응으로 분해되는 경향이 뚜렷하였으며, 속도

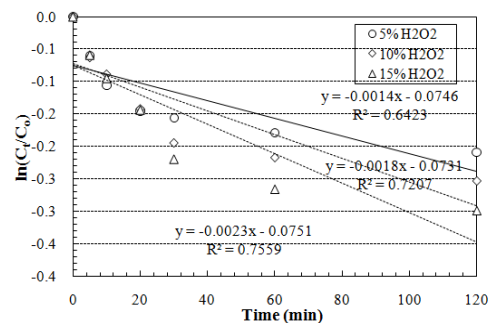


Fig. 7. The results of TPH reduction rate of heavy metal contaminated soil on various H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentration.

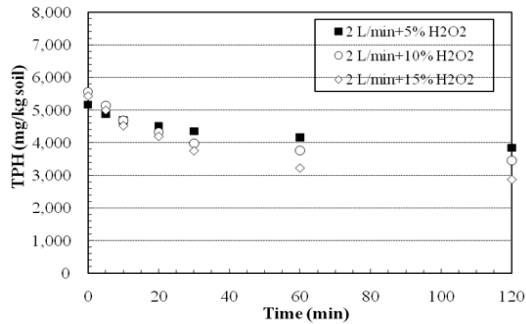
**Table 5.** The reaction rate constants and correlation coefficient of TPH on various H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentration at reaction time of 120 min

H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> concentration (%)	Reaction rate constants (k)(min <sup>-1</sup> )	Correlation coefficient (R <sup>2</sup> )
5	0.0014	0.6423
10	0.0018	0.7207
15	0.0023	0.07559

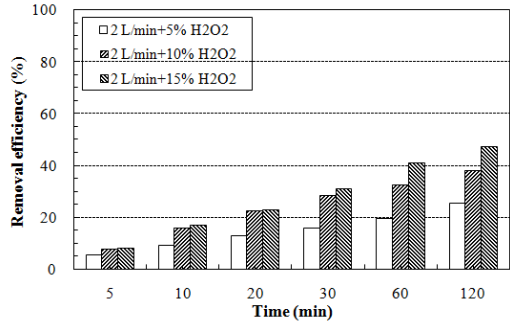
상수 값은 매우 유사하게 도출되었다. 또한 최적 과산화수소의 투여 농도는 약 5%가 적합하다고 보고하였다.

**3.3. 마이크로노버블 및 과산화수소 병합 처리 특성**

마이크로노버블 발생장치에 의한 과산화수소 토양세척의 처리효율 향상을 판단하기 위해 마이크로노버블 단독 처리시 상대적으로 안정적인 처리효율과 최적의 공기유량으로 판단되는 2 L/min 으로 고정하고 과산화수소 농도(5, 10, 15%)에 따른 유류오염토양의 TPH 농도 및 제거효율의 변화를 Fig. 8에 나타내었다.



(a) TPH concentration vs. time

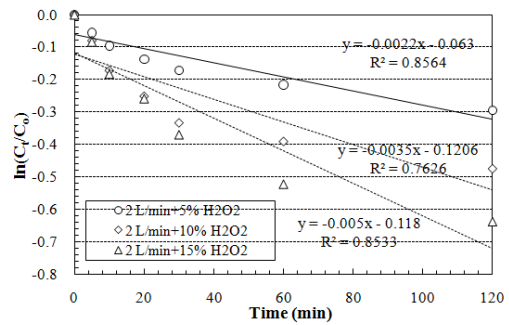


(b) removal efficiency vs. time

**Fig. 8.** The results of TPH concentration and removal efficiency of contaminated soil on airflow and various H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentration.

실험결과, 과산화수소 농도별(5, 10, 15%) 오염토양 내 TPH 농도 및 제거효율은 반응시간 30분으로 해서는 각각 4,931 mg/kg (18.9%), 4,678 mg/kg (18.9%), 4,513 mg/kg (17.7%)이었다. 그리고 같은 조건에서 반응시간을 120분으로 하였을 때 TPH 농도 및 제거효율은 4,256 mg/kg (22.3%), 4,621 mg/kg (19.7%), 4,268 mg/kg (25.9%)를 나타냈다.

유입 공기유량을 2 L/min 으로 고정하고 과산화수소 농도(5, 10, 15%)에 따른 디젤오염토양의 TPH 분해속도 변화를 Fig. 9 및 Table 6에 나타내었다. 과산화수소 농도변화에 따른 속도상수 k는 각각 0.0022 min<sup>-1</sup>, 0.0035 min<sup>-1</sup>, 0.0050 min<sup>-1</sup>이었으며, 결정계수 (R<sup>2</sup>) 값은 0.7626~0.8564의 범위를 나타내었다.



**Fig. 9.** The results of TPH reduction rate of heavy metal contaminated soil on airflow and various H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentration.

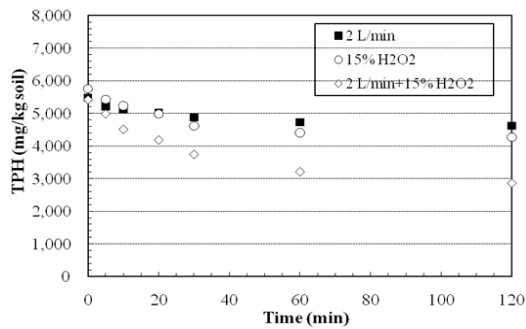
**Table 6.** The reaction rate constants and correlation coefficient of TPH on airflow and various H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentration at reaction time of 120 min

Parameters	Reaction rate constants (k) (min <sup>-1</sup> )	Correlation coefficient (R <sup>2</sup> )
2 L/min+ 5% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	0.0022	0.8564
2 L/min+ 10% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	0.0035	0.7626
2 L/min+ 15% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	0.0050	0.8533

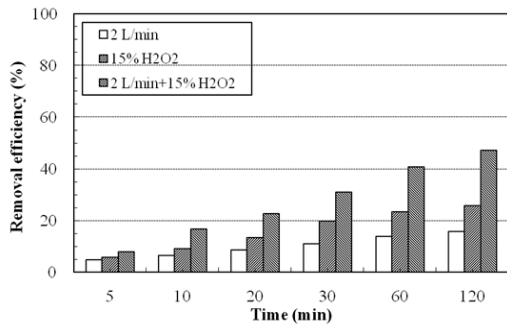
**3.4. 처리방법별 비교**

마이크로노버블과 과산화수소 단독실험결과인 2 L/min, 15% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>와 두 조건을 동시에 실험한 2L/min

+ 15% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>의 처리 시 유류오염토양의 TPH 농도 및 제거효율의 변화를 Fig. 10에 나타내었다. 처리 방법 별 오염토양 내 TPH 농도 및 제거효율은 반응시간 120분에서 각각 2 L/min의 경우 4,621 mg/kg (15.7%), 15% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>의 경우 4,268 mg/kg (25.9%), 2 L/min + 15% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>의 경우 2,864 mg/kg (47.2%)를 나타내었다.



(a) TPH concentration vs. time



(b) removal efficiency vs. time

Fig. 10. The results of TPH concentration and removal efficiency of contaminated soil on treatment methods.

Table 7. The reaction rate constants and correlation coefficient of TPH on treatment methods at reaction time of 120 min

Parameters	Reaction rate constants (k) (min <sup>-1</sup> )	Correlation coefficient (R <sup>2</sup> )
2 L/min	0.0012	0.7602
15% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	0.0023	0.7559
2 L/min+15% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	0.0050	0.8533

마이크로노버블과 과산화수소 단독실험결과인 2 L/min, 15 % H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>와 두 조건을 동시에 실험한 2L/min + 15 % H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>의 처리 시 오염토양의 TPH 분해속도 변화를 Table 7에 나타내었다. 이때의 속도상수 k는 각각 0.0012 min<sup>-1</sup>, 0.0023 min<sup>-1</sup>, 0.0050 min<sup>-1</sup> 이었으며, 결정계수(R<sup>2</sup>) 값은 0.7559~0.8533의 범위를 나타내었다. 이는 과산화수소 단독 처리보다 마이크로노버블 발생장치에 의한 처리용매 내부에서 표면적이 증가됨에 따라 과산화수소와 토양미세입자간의 접촉면적 또한 증가되어 반응속도 및 처리효율이 향상된 것으로 판단된다.

### 5. 결론

본 연구에서는 공기유량, 과산화수소, 마이크로노버블 토양세척시스템을 이용한 유류 오염토양의 분해시 TPH 처리효율을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 마이크로노버블 발생장치로 주입되는 공기 유량의 변화(1, 2 및 3 L/min)에 따른 유류오염토양 세척 실험을 한 결과 초기 TPH 농도 대기 제거효율은 운전 시간 30분과 120분경과 후 각각 7.5~12.5%와 13.0~15.7%로 나타났다.

2. 과산화수소 농도별(5, 10 및 15%) 오염토양 내 TPH 농도 및 제거효율은 반응시간 30분에서는 각각 4,931 mg/kg (18.9%), 4,678 mg/kg (18.9%), 4,513 mg/kg (17.7%)으로 나타났고 120분에서는 4,256 mg/kg (22.3%), 4,621 mg/kg (19.7%), 4,268 mg/kg (25.9%)를 각각 나타내었다.

3. 유입 공기유량을 2 L/min 으로 고정하고 과산화수소 농도별(5, 10 및 15%) 오염토양 내 TPH 농도 및 제거효율은 반응시간 30분에서 각각 4,931 mg/kg (18.9%), 4,678 mg/kg (18.9%), 4,513 mg/kg (17.7%) 나타났고, 120분에서는 4,256 mg/kg (22.3%), 4,621 mg/kg (19.7%), 4,268 mg/kg (25.9%)으로 각각 나타났다.



4. 오염토양 중 TPH 제거효율은 유입 유량의 경우 2 L/min의 경우 과산화수소의 경우 농도와 주입량이 높을수록, 또한 단독처리보다는 병합처리의 경우가 더 효율적임을 알 수 있었다. 이 중에서 오염토양의 제거시 가장 TPH 분해효율이 높은 처리방법은 2 L/min 과 15% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 의 병합처리로 나타나 기존 과산화수소 세척보다 나노버블에 의한 접촉면적 증가로 인해 처리효율이 향상 된 것으로 판단된다.

### 참 고 문 헌

- 고현웅, 정병길, 정연화, 김형석, 장성호, 성낙창, 2004, 회분식 초음파 전처리를 이용한 하수슬러지의 분해에 관한 연구, 유기물자원화, 12(4), 121-129.
- 김상대, 공성호, 1998, 과산화수소를 이용한 디젤로 오염된 토양의 처리, 2004년 추계학술발표논문집, 대한환경공학회, 517-518.
- 백경화, 김선영, 강정우, 장운영, 배범한, 이인숙, 2002, Cd 오염토양의 식물상 복원에 미치는 Cd의 영향, 2002년 춘계학술연구발표회 논문집, 대한환경공학회, 251-252.
- 임명희, 손영규, 윤준기, 김지형, 2008, 디젤로 오염된 토양에의 펜톤 산화공법 적용을 위한 산화제의 주입비 영향 연구, 한국환경과학회지, 17(2), 203-210.
- 임병락, 2005, 중금속으로 오염된 토양정화를 위한 토양 세척기술 평가, 석사학위논문, 경희대학교.
- 정병길, 노기현, 성낙창, 2009, 초음파세척을 이용한 오염토양 내 TPHs 및 중금속 제거특성, 한국환경과학회지, 18(4), 473-478.
- 최석중, 최현진, 박진희, 이태진, 2004, 펜톤 유사반응을 이용한 디젤 오염토양의 처리와 잔류 과산화수소가 생물학적 처리에 미치는 영향, 대한환경공학회지, 26(3), 334-339.
- 최창석, 박진희, 김영식, 이태진, 2003, 과산화수소에 의한 디젤오염토양의 처리, 2003년 춘계학술발표논문집, 대한환경공학회, 431-435.
- Reddy, K. R., Chinthamreddy, S., 2000, Comparison of Extractants for Removing Heavy Metals from Contaminated Clayey Soils, Soil and Sediment Contamination, 9(5), 449-462.
- Sheng, H. L., Cho, C. L., 1997, Fenton process for treatment of desizing wastewater, Water Res., 31(8), 2050-2056.
- Tyre, B. W., Watts, R. J., Miller, G. C., 1991, Treatment of four biorefractory contaminants in soils using catalyzed hydrogen peroxide, J. Environ. Qual., 20, 832.
- Walter, Z. T., Rena, Z. C., 1996, Decolorization Kinetics and mechanisms of commercial dyes, Chemosphere, 32(5), 947-958.
- Van Benschoten, J. E., Reed, B. E., Mastumoto, M. R., McGarvey, P. J., 1994, Metal Removal by Soil Wash for an Iron Oxide Coated Sandy Soil, Water Environment Research, 66(2), 168-174.