

# 마이크로파 조사와 발열체를 이용한 벙커C유 오염토양의 복원 Remediation of Bunker Fuel Oil C Contaminated Soil with Microwave Radiation and Heating Elements

오다경 · 이태진<sup>†</sup>

Da-kyung Oh · Tae-jin Lee<sup>†</sup>

서울과학기술대학교 환경공학과

Department of Environmental Engineering, Seoul National University of Science & Technology

(Received July 15, 2015; Revised August 25, 2015; Accepted August 29, 2015)

**Abstract :** Total petroleum hydrocarbon (TPH) removal and temperature variations in bunker fuel oil C contaminated soil were investigated by using microwave radiation in the presence of triiron oxide or activated carbon as a heating element. Temperature increments of 1.4~1.6°C/Watt were observed, when 100~500 watt of microwave radiation was applied for the contaminated soil in the presence of triiron oxide or activated carbon. Temperature variation of the soil was more rapid in the presence of triiron oxide than activated carbon. 10% or 25% of heating element content was required to reach the temperature of thermal desorption for triiron oxide and activated carbon respectively. After radiation, 44.1% and 89.4% of initial TPH in soil was removed in the presence of triiron oxide and activated carbon respectively. It was observed that activated carbon was more reactive than triiron oxide for the removal of high molecular carbon of bunker fuel oil C.

**Key Words :** Oil-Contaminated Soil, Total petroleum Hydrocarbon (TPH), Microwave, Bunker Fuel Oil C, Triiron Oxide, Activated Carbon

**요약 :** 본 연구에서는 사산화삼철과 활성탄을 발열체로 하여 벙커C유 오염토양에 마이크로파를 조사한 후 온도변화 양상 및 TPH 제거효율을 살펴보았다. 사산화삼철 및 활성탄 함유 오염토양에 100~500 Watt로 마이크로파를 조사하였을 때 승온율은 1.4~1.6°C/Watt로 나타났다. 조사시간에 따른 온도의 변화는 활성탄보다 사산화삼철 함유토양에서 민감하게 나타났으며, 사산화삼철과 활성탄의 경우 발열체 함량이 각각 10% 이상과 25%에서 열탈착을 위한 충분한 온도가 확보될 수 있음을 관찰하였다. 사산화삼철은 평균 44.1%, 활성탄은 평균 89.4%의 TPH 제거 효율을 나타냈으며, 벙커C유의 제거 양상은 활성탄이 함유되었을 때 사산화삼철 보다 고분자탄화수소의 휘발이 더욱 원활하게 진행되고 있음을 확인하였다.

**주제어 :** 유류오염, 석유계총탄화수소, 마이크로파, 벙커C유, 활성탄, 사산화삼철

## 1. 서론

유기화합물에 의한 토양오염은 주변 생태계와 주민들에게 잠재적인 위해성을 가지고 있으며, 오염물질이 지하수나 토양공기를 따라 넓은 지역으로 확산되어 피해가 더욱 커질 수 있다.<sup>1)</sup> 유류오염 토양의 정화방법에는 열탈착법, 토양세척법, 토양세정법, 토양경작법 등이 있으며, 국내에서는 현장 적용이 우수하고 경제적인 토양증기추출법과 생물학적 통풍법과 같은 정화비용이 상대적으로 저렴한 기술이 주를 이루고 있다.<sup>2-4)</sup> 유럽 및 미국 등은 최근 들어 2차 오염을 최소화하는 기술의 개발에 중점을 두고 있으며, 국내에서도 2차 오염을 최소화하는 청정기술에 대한 연구를 시작하고 있다.<sup>5)</sup>

기존의 토양복원 방법 중 열처리(thermal treatment)를 이용한 토양복원 방법은 유기오염물질들로 오염된 토양을 신속하게 복원할 수 있는 가장 확실한 방법 중의 하나로, 고농도로 오염된 지역이나 난분해성 물질이 포함된 토양을 가온함으로써 토양으로부터 오염물질을 분리하여 회수하거나

연소하는 방법이다.<sup>6)</sup>

열탈착법은 오염된 토양에 적용하는 온도에 따라 저온열탈착법(400°C 이하)과 고온열탈착법(400-800°C)으로 구분되어진다.<sup>6)</sup> 열탈착법의 열원은 일반적으로 유류를 연소시켜 사용되었으나, 최근에는 마이크로파(300 MHz~300 GHz)를 열원으로 이용하여 오염토양을 정화하는 방법에 관심이 집중되고 있다. 일반가열의 경우, 열이 외부의 열원에서 발생되어 시편에 전도(conduction), 복사(radiation)되어 가열되지만, 마이크로파 가열의 경우 시편자체가 발열하여 가열함으로써 토양 고유의 성분은 변질시키지 않으면서 가열속도가 빠르고, 온도분포가 균일한 특징이 있다.<sup>7,8)</sup> 또한 열효율이 높고 마이크로파 조사 중단 시 바로 토양의 온도가 떨어져 유류성분만을 목표로 한 적용이 가능하다.<sup>9,10)</sup>

마이크로파에 의한 유류 오염토양 제거 기술은 토양 내 극성물질들이 회전하면서 분자간의 마찰에 의해 열이 발생한다. 이를 통하여 토양에 흡착되어 있는 유류의 휘발성을 높여 수분 및 복합 유류를 기화하고, 토양과 분리함으로써 토양에서의 유류오염 제거효율을 향상시키게 된다. 마이크

<sup>†</sup> Corresponding author E-mail: leetj@seoultech.ac.kr Tel: 02-970-6614 Fax: 02-971-5776

로파에 의한 발열은 극성물질인 물 분자의 회전운동에 의해 가열되며, 물 이외에도 탄소섬유(carbon fibers), 탄소막대(carbon rods), 활성탄(active carbon), MnO<sub>2</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, PbS 등이 효과적인 발열체이라고 보고된 바 있다.<sup>10-15)</sup> 이러한 기초적 연구결과가 보고되어 있음에도 불구하고 발열체와 마이크로웨이브를 이용한 오염토양의 적정 전력 및 발열체 함량, TPH 처리 효율에 대한 자료가 많지 않고, 발열체 함량 및 전력에 따라 TPH 처리 효율 및 적정 반응시간이 다르게 나타나므로 마이크로파 조사에 의한 열탈착 공정의 설계인자를 확보하는데 어려움이 있다.<sup>16-18)</sup>

따라서 본 연구에서는 병커C유 오염토양을 마이크로파와 반응하는 가열성 물질 중 사산화삼철과 활성탄을 이용해 복원처리 할 때, 마이크로파의 적용성을 확보하고, 발열체로서 사산화삼철 및 활성탄에 의한 온도변화 및 TPH 제거 특성을 연구하여 최적의 처리조건을 산정하는데 목적을 두었다. 이를 위하여 토양 내 마이크로파 파장 및 발열체 함량에 따른 오염토양의 온도 변화와 조사시간에 따른 오염토양의 온도변화, 오염농도에 따른 TPH 제거 양상을 살펴 보았으며, 고분자 유류오염토양 처리 시 발열체로서 사산화삼철과 활성탄의 적용 가능성을 살펴보고자 하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1. 실험재료

토양시료는 50~70 Mesh의 분포를 가진 표준토양(SIGMA-ALDRICH)을 구입하여 사용하였으며, 표준토양의 입경분포 및 물리·화학적 성상은 Table 1에 나타난 바와 같다. 마이크로웨이브 발열체로서는 약 2 mm의 입경을 가지는 입상

Table 1. Physical and chemical characteristic of the standard soil

Composition	Chemical analysis (%)	Particle size distribution	Compound (%)
SiO <sub>2</sub>	99.778		
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.026	+50 Mesh	1.8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.051	+60 Mesh	62.5
TiO <sub>2</sub>	0.025	+70 Mesh	33.4
CaO	<0.01	+80 Mesh	2.2
MgO	<0.01	-80 Mesh	0.1

Table 2. Composition of bunker fuel oil C

Composition	Chemical analysis (%)
C	84
H	12
S	3.5
etc	0.5

활성탄(GAC, Samchun, Korea)과 분말타입(0.025 mm 이하)의 사산화삼철(Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, Samchun, Korea)을 이용하였으며, 병커C유의 조성은 Table 2에 나타내었다. 병커C유는 표준토양 10 g에 20,000~100,000 mg/kg의 농도로 오염시켜 섞은 후 n-hexane을 넣어 병커C유를 토양 전체에 균질하게 오염시켜 microwave 실험을 진행하였다.

### 2.2. 실험장치

마이크로파 열탈착 실험장치는 (주)한국고주파용용기기(Suwon, Korea)에서 제작하였으며, 장치의 외관은 Fig. 1에 나타내었다. 마이크로파는 0~1 kW 범위에서 출력이 가능하도록 설계 되었으며, 마이크로파 처리장치의 규격과 특성은 Table 3과 같다. 오염토양은 석영으로 제작된 원통형 실린더(지름 4 cm)에 넣은 후 반응기 내부에 장치하였으며 상단에 온도계를 장착하여 온도변화를 모니터링 하였다.

TPH 분석은 토양오염공정시험법에 준하였으며 오염토양에 소량의 추출용매(n-hexane, Samchun, Korea)를 주입하여 TPH를 추출한 후, 가스크로마토그래피(Gas Chromatography, GC-17A, Shimazu, Japan)를 이용하여 분석하였다.

Table 3. Microwave heating system

Magnetron type	OM75P
Frequency	2450 ± 50 MHz
Output power	0 - 1 kW
Peak anode voltage	4.2 KV dc
Average anode current	300 mA dc
Filament voltage	3Vac
Cavity dimension	W 485 * D 370 * H280 (mm)
Cavity profile	W 485 * D 370 * H280 (mm)
Cavity	Microwave oven
Temperature censor	K-TYPE Thermalcouple 10 ea

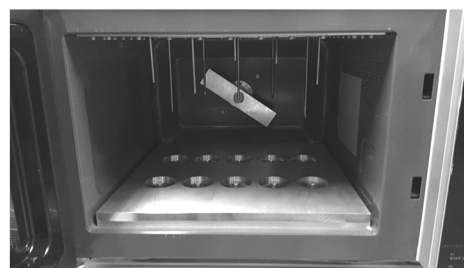


Fig. 1. Microwave radiation facility for thermal desorption treatment of bunker fuel oil C contaminated soil.

### 2.3. 실험방법 및 분석방법

마이크로파를 조사해 오염토양에서 온도의 변화를 측정 한 뒤, 최대온도 및 승온 온도를 도출하기 위해 다음 식 (1) 을 적용하여 회귀분석 하였다.

$$f = a(1 - e^{(-b \cdot x)}) \quad (1)$$

여기서,  $f$ 는 온도(temperature, °C),  $a$ 는 최대 온도(maximum temperature, °C),  $b$ 는 온도변화율(heating rate),  $x$ 는 조사시간(time, min) 또는 발열체량(%)을 나타낸다. 각  $a$ ,  $b$ 의 값은 SIGMA PLOT 2002 (SPSS Science, UK) software를 사용하였다.

마이크로웨이브 조사 시 토양 내 수분함량은 20%가 최적이라고 보고된 기존의 연구결과<sup>1)</sup>를 이용하였으며 이때 측정된 온도는 200°C 전·후로 보고된 바 있다. 표준토양에서 사산화삼철 및 활성탄을 발열체로 이용하였을 때, 각 발열체의 최적 전력량 산출을 위하여 100~500 Watt의 조건에서 실험하였으며, 최적 발열체 함량은 표준토양 시료에 10~30%의 사산화삼철과 활성탄을 각각 혼입하여 실시하였다. 발열체의 혼입은 표준토양 10 g에 토양 무게 대비 발열체를 비율 별로 넣은 뒤 microwave 실험을 진행하였다. 표준토양에 마이크로웨이브 적정 조사시간은 5분으로 산정한 기존의 연구결과<sup>1)</sup>에 따라 본 실험의 경우 조사시간을 최대 5분으로 설정하여 온도의 변화를 살펴보았다.

발열체가 포함된 20,000~100,000 mg/kg의 벙커C유로 오염된 오염토양은 마이크로웨이브 조사 시 5분 동안 승온된 온도에서 복원 효율을 산정하였으며, 이를 위하여 오염토양의 TPH 잔류량을 크로마토그램으로 분석하여 저분자 및 고분자 유류의 제거량을 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 전력량에 따른 토양의 온도변화

Fig. 2는 마이크로파와 발열체를 이용해 토양에 오염된 유류를 제거하고자 할 때 필요한 적정 전력량을 도출하기 위해 마이크로파 전력을 100~500 Watt로 공급 했을 때의 선형회귀분석 온도변화 그래프이다(활성탄:  $R^2=0.96$ , 사산화삼철:  $R^2=0.95$ ). 토양 내 수분량은 토양무게 대비 20%를 유지하면서 발열체는 토양무게 대비 25%로 고정한 후, 마이크로파 전력량을 달리하여 조사하였다. 전력량이 증가할수록 토양 내 온도는 상승하였으며, 전력량이 증가함에 따라 토양에서의 온도는 약 100°C에서 750°C까지 상승하였다. 이는 본 연구와 유사한 조건에서 실시하였던 기존의 연구결과<sup>14)</sup>보다 높은 온도 분포를 나타냈으며, 이는 마이크로파를 3분간 오염토양에 조사했으며, 발열체의 비율도 5%로 낮아 조사시간 및 발열체 함량에 따른 온도의 차이가 있을 것으로 생각된다.

사산화삼철과 활성탄의 온도 상승 패턴은 비슷하게 나타

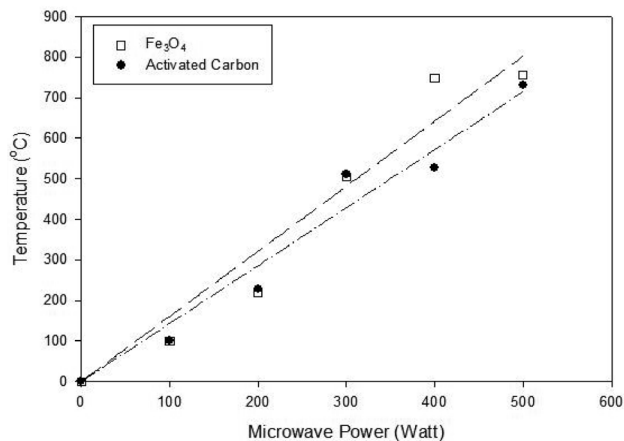


Fig. 2. Temperature profiles with different microwave radiation power supply in the presence of triiron oxide or activated carbon.

났으나 활성탄의 경우 약 1.4°C/Watt가 증가하였고, 사산화삼철의 경우 약 1.6°C/Watt가 증가해 와트 당 사산화삼철의 온도 상승폭이 더 큰 것을 알 수 있었다. 벙커C유의 비등점은 350°C로 알려져 있고, 벙커C유로 오염된 토양에서 TPH를 열탈착 하기 위해 필요한 온도는 350°C 이상이므로 350°C 이상의 온도 분포를 나타내는 300 Watt를 경제성 있는 적정 마이크로파 전력량으로 판단하고, 차후 실험을 진행하였다.

### 3.2. 조사시간에 따른 토양의 온도변화

Fig. 3은 마이크로파 조사에 의한 오염토양의 처리에 있어서 발열체 별 적정 조사시간을 산출하기 위해 발열체 별 시간에 따른 토양의 온도변화를 관찰한 것이다. 토양 내 수분 함유량은 20%로 유지하였으며, 발열체로서 사산화삼철 및 활성탄은 무게비로 각각 20%가 되도록 조성하였다. 1분 단위로 측정된 온도변화곡선은 식 (1)에 의해 회귀분석하였으며, 이때  $R^2$  값은 각각 0.87과 0.99로 나타났다.

사산화삼철의 경우 조사시간이 증가함에 따라 온도가 증

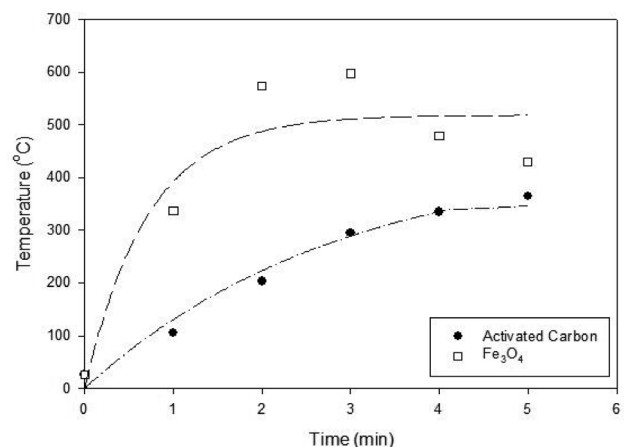


Fig. 3. Temperature profiles with time course in the presence of triiron oxide or activated carbon under microwave radiation.

가해 3분에서 최고온도 597°C가 관찰되었으며, 3분 이후 오히려 온도가 감소되었다. 회귀분석결과 약 2분이 경과하였을 때 최고온도에 도달하는 것으로 나타났으며, 활성탄의 경우 사산화삼철에서 관찰되는 것과 같이 조사시간이 증가됨에 따라 온도가 증가하는 양상을 나타내어 조사시간 5분에서 최고 365°C가 관찰되었다. 식 (1)에 따른 회귀분석결과 최적조사시간은 약 4분으로 나타났다. 사산화삼철의 a값은 518.8°C, b값은 1.4 min<sup>-1</sup>, 활성탄의 a값은 448.0°C, b값은 0.3 min<sup>-1</sup>으로, 사산화삼철이 활성탄에 비해 높은 최대 온도 및 승온 속도를 보였다. 이는 사산화삼철이 활성탄에 비해 빠르게 높은 온도에 도달하여, 조사시간에 따른 온도의 증가폭은 사산화삼철이 활성탄보다 더 높음을 나타내며, 전력량에 따른 온도변화와 같은 양상을 보여주었다.

3.3. 발열체 함유율에 따른 토양의 온도변화

Fig. 4는 마이크로파 조사에 의한 오염토양의 처리에 있어서 적정 발열체 함유량을 산출하기 위해 10~30%의 발열체 함유량을 가지는 표준토양에 300 Watt로 전력을 공급한 뒤 발열체 함유율별로 토양에서의 온도변화를 나타낸 그래프이다. 전력량 실험과 같이 토양 내 수분함유량은 20%로 고정하였으며, 마이크로파 조사시간은 5분으로 설정하였다. 측정된 온도들은 식 (1)에 의해 회귀분석 되었으며 각각 R<sup>2</sup> 값은 활성탄의 경우 0.96, 사산화삼철의 경우 0.91으로 나타났다.

발열체로서 사산화삼철과 활성탄은 함유율에 따라 마이크로파 조사 시 온도변화 양상이 확연히 다르게 나타났으며, 사산화삼철의 경우 급격한 온도변화가 관찰되었으나 활성탄의 경우 비교적 온도 변화가 완만하였다. 사산화삼철의 경우 발열체 함유 10~30% 범위에서 451~584°C의 온도 변화가 관찰되었고 활성탄의 경우 약 264~488°C의 온도 변화가 측정되었다. 벙커C유의 열탈착을 위한 온도가 약 400°C 정도의 온도가 적용된다는 점을 감안하면 적정 함유량은 사산화삼철의 경우 가장 높은 온도가 측정된 10% 이상이 바람직하고, 활성탄의 경우 25% 이상이 적정할 것으로 판단하였다.

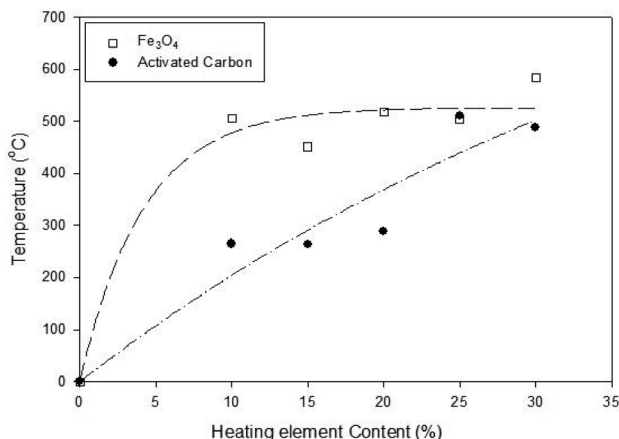


Fig. 4. Temperature profiles with different heating element content with 300 Watt of microwave radiation.

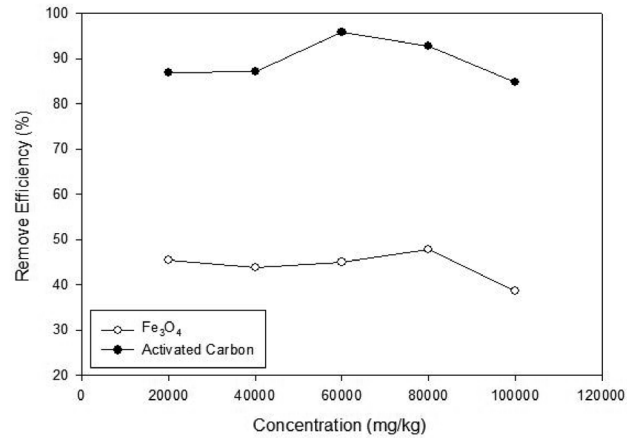


Fig. 5. TPH removal of bunker fuel oil C contaminated soil with microwave radiation in the presence of heating elements.

3.4. 벙커C유 오염토양의 TPH 제거율

Fig. 5는 TPH 초기 농도가 20,000~100,000 mg/kg인 벙커C유 오염토양의 복원 효율을 관찰하기 위해 사산화삼철의 경우 최대 온도값을 나타내는 20% 그리고 활성탄은 25%의 비율로 오염토양에 투입 후 300 Watt의 전력량으로 마이크로파를 5분 동안 오염토양에 조사 후 제거율을 나타내었다. Fig. 5에 나타나는 바와 같이 전체 오염농도 범위에서 비슷한 TPH 제거율이 관찰되었으며, 사산화삼철의 경우 평균 44.1%, 활성탄은 평균 89.4%의 제거율을 보였다.

Fig. 4에 나타난 바와 같이 발열체로서 사산화삼철과 활성탄이 포함된 경우 마이크로파 조사 시 오염토양의 온도분포는 동일하나 TPH의 제거율은 현격한 차이가 나타나는 것은 발열체의 입자형태에 기인하는 것으로 판단되었다. 사산화삼철의 경우 입자의 구성이 0.025 mm 이하의 분말로 되어 있으나, 활성탄의 경우 2 mm 이하의 입자로 구성되어 있어 입자간 공극이 크게 형성되어 열탈착이 진행되기에 양호한 형태를 가지고 있었다. 기존의 연구에서도 입도가 큰 토양은 뭉치지 않는 경향이 있어 오염물질들이 쉽게 탈착되지만 입도가 작은 토양은 오염물질의 탈착을 어렵게 만드는 것이 관찰된 바 있다.<sup>19,20)</sup> 따라서 토양에서의 유류 오염물질의 열탈착은 토양의 온도분포만이 아니라 또 다른 물리적인 환경(본 실험의 경우 입도분포)이 TPH 제거에 영향을 미칠 수 있음을 확인할 수 있었다. 추후 입도(공극)에 따른 발열체의 TPH 저장량에 대한 연구가 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

3.5. 마이크로파 적용 시 발열체에 따른 TPH 제거 양상

Fig. 6은 벙커C유로 오염된 토양을 300 Watt로 마이크로파를 5분간 조사했을 때 발열체 별로 잔류하는 벙커C유를 기체크로마토그램으로 분석한 그림이다. (a)는 20,000 mg/kg의 농도로 오염시킨 벙커C유의 초기 크로마토그램이며, (b)는 사산화삼철 20% 함유율로 마이크로파 300 Watt를 적용하였을 때의 크로마토그램, (c)는 활성탄 25% 함유율로 마이크로파 300 Watt를 적용 하였을 때의 크로마토그램을 나타냈다.

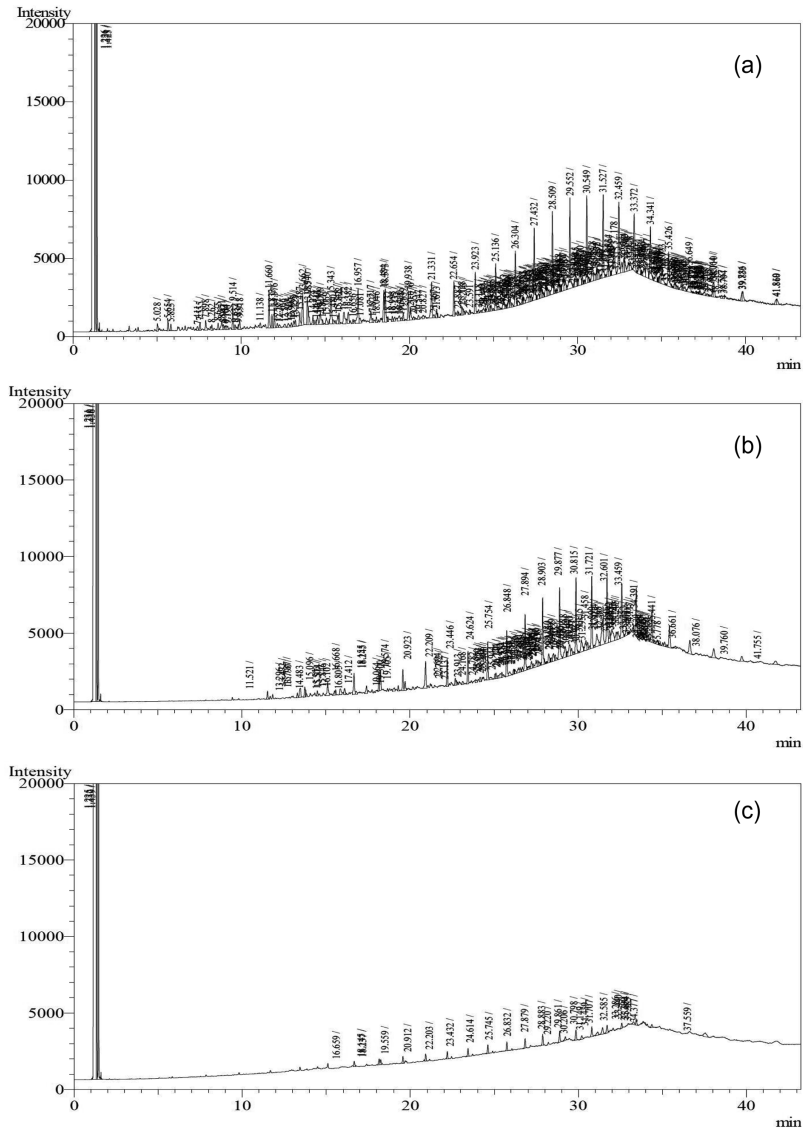


Fig. 6. Chromatograms of the initial and residual TPH. (a) Initial bunker fuel oil C chromatogram, (b) bunker fuel oil C chromatogram after microwave radiation in the presence of triiron oxide (c) bunker fuel oil C chromatogram after microwave radiation in the presence of activated carbon.

초기 병커C유의 크로마토그램(a)과 비교하였을 때 사산화삼철(b)과 활성탄(c)이 함유된 상태에서 마이크로파가 조사되었을 때 고분자의 탄화수소보다 저분자의 탄화수소가 많이 제거되었음을 확인하였으며 이는 승온된 조건에서 휘발성이 강한 낮은 탄소수의 유류오염물질들이 쉽게 제거되는 것을 나타낸다.

탄소수를 나타내는 크로마토그램 상 저분자 탄화수소(C < 20)와 고분자 탄화수소(C > 20)로 구분하여 탈착률을 비교하였을 때 사산화삼철을 이용한 마이크로파의 처리는 저분자 탄화수소의 경우 82.6%, 고분자 탄화수소의 경우 20.1% 제거되었으나, 활성탄을 이용한 마이크로파의 처리는 저분자 탄화수소의 경우 88.7%, 고분자 탄화수소의 경우 86.1% 제거되었다. 이는 사산화삼철을 발열체로 이용하였을 경우 고분자 탄화수소의 제거가 비교적 원활하지 못하였음을 나타내는 것으로, 이에 반하여 입자상 형태의 활성탄은 고분

자 탄화수소의 탈착이 수월하게 진행되었음을 나타낸다. 따라서 사산화삼철(0.025 mm 이하)과 활성탄의 입자크기에 따라 저분자 및 고분자 탄화수소 제거효율이 차이가 나는 것으로 생각되며, 이를 기초로 동일한 입자크기에서의 TPH 열탈착 연구가 추가적으로 수행되어야 할 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 마이크로파 조사와 사산화삼철 및 활성탄을 발열체로 병커C유로 오염된 토양의 적정 처리 조건을 확보하기 위해 발열체의 종류, 반응시간, 그리고 전력량을 달리하여 온도 승온 과정과 TPH 제거 양상을 살펴보았다. 본 실험을 통하여 나타난 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 사산화삼철 및 활성탄 함유 병커C유 오염토양에 마이크로파를 전력량을 달리하여 5분 동안 조사하였을 때 공급된 전력량과 비례하여 온도의 상승효과를 확인할 수 있었다. 발열체에 따른 승온율은 1.4~1.6°C/Watt로 나타났으며, 발열체 종류에 따른 온도 상승률은 크게 차이가 나지 않는 것으로 관찰되었다.

2) 조사시간에 따른 승온은 사산화삼철을 발열체로 사용하였을 경우 활성탄 보다 빠르게 나타났으며 오염토양에 투입되는 발열체 양이 같은 경우 활성탄보다 사산화삼철의 온도가 더 높게 형성되었다. 약 20%의 함유량일 때 최적온도에 도달하기까지 사산화삼철의 경우 2분이 소요되었으나 활성탄의 경우 약 4분 이상이 요구되었다.

3) 병커C유를 열탈착 하기 용이한 온도에 도달하기 위해 사산화삼철의 경우 발열체 함량이 10% 이상, 활성탄의 경우 25%가 적정하다고 판단되었다. 단, 함수량 및 토양의 물성에 따라 발열체 함량은 다르게 나타날 수 있으므로 이에 대한 설정은 물리적 환경에 따라 추가적인 실험이 필요할 것으로 사료된다.

4) 토양 내 함수량은 20%로 고정시킨 후, 사산화삼철 및 활성탄을 발열체로서 토양에 각각 20%, 25%로 혼합 후 마이크로파를 300 Watt로 병커C유 오염토양에 조사하였을 때 TPH 제거량은 사산화삼철은 평균 44.1%, 활성탄은 평균 89.4%의 제거 효율을 보였다.

5) 발열체가 포함된 병커C유 오염토양을 마이크로파 조사 후 TPH 잔류량을 살펴보았을 때 저분자 탄화수소가 많이 제거되었으며, 특히 활성탄이 포함된 오염토양의 경우 사산화삼철보다 고분자 탄화수소의 제거가 원활하게 진행됨을 관찰할 수 있었다.

본 연구결과 사산화삼철 및 활성탄을 이용한 마이크로파 열탈착 시, 열탈착에 필요한 승온 조건을 손쉽게 달성할 수 있으며, 열탈착 시 고분자 탄화수소보다는 저분자 탄화수소의 제거가 수월함을 확인하였다. 본 연구결과를 바탕으로 활성탄이나 사산화삼철 이외에도 MnO<sub>2</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, PbS과 같은 다른 발열체에 대한 연구와 더불어 탄소와 철 등을 포함한 산업부산물의 재활용에 대한 가능성에 대한 추가 연구 및 TPH 저감 방안에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 본 실험을 통하여 제시된 기초적인 실험결과가 발열체와 마이크로파를 적용한 효과적인 유류 오염 토양 열탈착 처리방법 모색의 계기가 될 수 있기를 기대한다.

## Acknowledgement

본 연구는 2015년 서울녹색환경지원센터 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

KSEE

## References

1. Jeong, S. W. and Lee, T. J., "The Characteristics of TPH removals by Microwave Radiation for Diesel Contaminated Soil," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **35**(11), 776~780(2013).
2. Kostecki, P. T. and Calabrese, E. J., *Petroleum Contaminated Soil : Remediation Technique, Environmental Fate, Risk Assessment, Analytical Methodologies*, 2<sup>nd</sup> ed, Lewis Publishers (1989).
3. Bricka, R. M., Williford, C. W. and Jones, L. W., *Heavy Metal Soil Contaminated at U.S. Army Installations: Proposed Research and Strategy for Technology Development*, Technical Report IRRP-94-1, U.S. Army Corps of Engineers(1994).
4. Kwak, M. Y., "Prospect and Present Status of soil Environmental Remediation Industry," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **29**(3), 271~274(2007).
5. Kim, K. W., "Emerging Remediation Technologies for the Contaminated Soil/groundwater in the Metal Mining Area," *Econ. Env. Geol.*, **37**(1), 99-106(2004).
6. Kim, G. J., Lee, S. H., Park, K., J., Kim, C. K., Lee, C. H., Kim, D. S., Cho, S. H. and Chang, Y. Y., "Development of Low Temperature Thermal Desorption System and Remediation of Soil Contaminated with Petroleum Hydrocarbon," *J. Soil Groundwater Environ.*, **13**(4), 62~68(2008).
7. Moon, K. W., Kim, W. H., Lee, B. C. and Kim, D. C., "Microwave Remediation of Soils Contaminated by Volatile Organic Chemicals," *Korean J. Environ. Hlth Soc.*, **22**(3) 116~122(1996).
8. Jones, D. A., Lelyveld, T. P., Mavrofidis, S. D., Kingman, S. W. and Miles, N. J., "Microwave heating applications in environmental engineering - a review," *Resour. Conservation and Recycling*, **34**, 75~90(2002).
9. Ha, S. A. and You, M. Y., "A Study of Treatment of a Contaminated Soil by Oil using Continuous System of High Temperature Heating Element and Microwave," *J. Soil Groundwater Environ.*, **17**(1), 8~12(2012).
10. Ha, S. A. and Yeom, H. K., "The Evaluation of Drying Characteristics and Energy Consumption by Microwave Treatment for Oil Contaminated Soil," *J. Korean Soc. Waste Manage.*, **27**(6), 467~475(2010).
11. Holzwarth, A., Lou, J., Hatton, T. A. and Laibinis, P. E., "Enhanced microwave heating of nonpolar solvents by dispersed magnetic nanoparticles," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **37**, 2701~2706(1998).
12. Tai, H. S. and Jou, C. J. G., "Application of granular activated carbon packed bed reactor in microwave radiation field to treat phenol," *Chemosphere*, **38**, 2667~2680(1999).
13. Walkiewicz, J. W., Kazonich, G. and McGill, S. L., "Microwave heating characteristics of selected minerals and compounds," *Mineral and Metallurg. Proc.*, **5**, 39~42(1988).
14. McGill, S. L., Walkiewicz, J. W. and Clark, A. E., "Microwave Heating of Chemicals and Minerals," Bureau of Mines(1955).
15. Jeong, S. J. and Choi, H. J., "Removal of Semi-volatile Soil Organic Contaminants with Microwave and Additives," *J. Soil Groundwater Environ.*, **18**(1), 67~77(2013).

16. Cravotto, G., Carlo, S. D., Ondruschka, B., Tumiatti, V. and Roggero, C. M., "Decontamination of soil containing POPs by the combined action of solid fenton-like reagents and microwaves," *Chemosphere*, **69**, 1326~1329(2007).
17. Li, D., Zhang, Y., Quan, X. and Zhao, Y., "Microwave thermal remediation of crude oil contaminated soil enhanced by carbon fiber," *J. Environ. Sci.*, **21**, 1290~1295(2009).
18. Kim, Y. K., "Remediation of Oily Contaminated Soil Using the Thermal Characteristic of Microwave," *J. Korean Soc. Environ. Adm.*, **15**(3), 155~161(2009).
19. Son, J. H., "The Remediation and Natural Attenuation of Oil Contaminated Soils Considering the Site Characterization at Munhyeon-dong, Busan," Doctoral dissertation, Pukyong National University, pp. 120~121(2007).
20. Ou, J. S., "An experimental study on the trend of thermal conductivities with respect to the particle shape and size of PIM feedstock," Master's thesis, AjOu University, pp. 39~40(2001).