

Research Paper

## 중질유 오염토양의 세정효과를 증진시키기 위한 전기저항가열의 최적 운전조건 도출

이 환\* · 정재윤\*\* · 강두레\*\* · 이철효\*\*  
(재)에스지환경기술연구원\*, (주)대일이앤씨\*\*

### Derivation of Optimum Operating Conditions for Electrical Resistance Heating to Enhance the Flushing Effect of Heavy Oil Contaminated Soil

Hwan Lee\* · Jaeyun Jung\*\* · Doore Kang\*\* · Cheolhyo Lee\*\*

SG Institute of Environment Science & Technology\*  
Daeil Engineering and Construction Co., Ltd\*\*

**요약:** 본 연구에서는 해안매립지역내 병커C유로 오염된 토양을 대상으로 토양세정 효과를 증진시키기 위한 전기저항가열의 운전인자 별 최적 조건을 도출하여 융복합 적용가능성을 평가하였다. 회분식 실험결과 Tween-80 세정제 보다 VG-2020 세정제에서 약 1.5배 이상의 높은 세정효율 보였으며, 상온 시 대비 60℃에서 약 1.4배의 세정효율 증가를 가져왔다. 전기저항가열 박스 실험결과, 함수율 20~40%의 토양에서 약 40~80분 내에 100℃까지 상승하였으며, 포화 토양층 내 STS 316재질의 파이프형 전극봉을 3각 배열 시 열전달효율이 우수한 것으로 나타났다. 또한 상기 최적조건으로 토양온도를 60℃ 이상을 유지하기 위한 전극봉의 간격은 1.5 m인 것으로 확인되었고, 전기저항가열과 동반된 토양세정 박스실험에서는 5 PV(Pore Volume)에서 약 55%의 급격한 TPH 저감효율을 보였으며 10 PV(Pore Volume)에서 토양오염 우려기준(TPH 2,000 mg/kg 미만)을 만족하였다.

**주요어:** 전기저항가열, 토양세정, 병커C유, 해안매립지역

**Abstract:** This study evaluated the applicability of the convergence technology by deriving the optimum conditions about operating factors of electrical resistance heating to enhance the soil flushing effect on soil contaminated with bunker C oil in the coastal landfill area. As a result of the batch scale experiment, the flushing efficiency of the VG-2020 was higher than that of the Tween-80, and the flushing efficiency increased by about 1.4 times at 60℃ compared to room temperature. As a result of the electrical resistance heating box experiment, soil temperature rose to 100℃ in about

First & Corresponding Author: Hwan Lee, Tel: +82-63-911-6558, E-mail: kzy9018@hanmail.net, ORCID: 0000-0002-1910-6388

Co-Authors: Jaeyun Jung, Tel: +82-2-581-2502, E-mail: i3219427@nate.com, ORCID: 0000-0001-6811-1880

Doore kang, Tel: +82-2-581-2502, E-mail: ihanabi@naver.com, ORCID: 0000-0001-7521-6402

Cheolhyo Lee, Tel: +82-2-581-2502, E-mail: lch275@daeilenc.co.kr, ORCID: 000-0001-8401-8408

Received: 15 May, 2020. Revised: 5 June, 2020. Accepted: 8 June, 2020.

40~80 minutes in soil with water content of 20~40%, and it was found that the heat transfer efficiency is excellent when the pipe-shaped electrode rod with STS 316 material is located in a triangular arrangement in saturated soil. In addition, it was confirmed that the interval between the electrode rods to maintain the soil temperature above 60°C under the optimum conditions was 1.5 m, and the soil flushing box experiment accompanying electrical resistance heating showed TPH reduction efficiency of about 55% at 5 Pore Volume, and satisfied the Korean standard for the conservation of soil (less than TPH 2,000 mg/kg) at 10 Pore Volume.

**Keywords :** electrical resistance heating, soil flushing, bunker-C oil, coastal landfill area

## I. 서론

국내 대부분의 시멘트, 철강, 화학회사의 대부분의 유류취급시설은 해안가 주변에 존재하며, 이는 선적의 접근가능성이 높아 원자재, 원유 등의 수급이 용이하고 대규모 생산품 이송에도 수월하기 때문이다. 그러나 이러한 유류취급시설들은 원료의 공급 및 완제품 반출시 시설물의 노후 및 취급부주의로 인한 유류 및 화학물질로 기인한 오염이 존재하며 뿐 만 아니라 지하에 매설되어 있는 배관의 노후화 인한 지중 내 유류오염도 빈번하게 발생된다(Kwon 1999; Shin et al. 2009).

특히 해안매립지에서 발생하는 유류오염의 경우 부지 매립시 조성된 사석층의 영향으로 오염의 이동 및 확산이 빠르게 진행되고 해수와 담수의 경계의 특성으로 인해 고심도 오염이 발생하는 특성이 있어(Ojuri & Ola 2010), 오염사고가 발생하면 해안매립 지역의 특수성을 고려한 빠른 정화 대책이 요구된다.

해안가 유류저장시설의 유류오염물질은 경유, 휘발유에 의한 오염보다는 정제되지 않은 원유, 병커C유 등 중질유 오염물질도 확인된다. 이런 오염물질은 고분자이거나 생분해에 독성을 가지고 있어 생물학적인 방법으로는 오염물질을 제거하기 힘들기 때문에 단일공법으로는 적용이 힘들고 복합적인 정화공법을 적용하여 오염물질을 정화시켜야 한다(NFESC 1998; Speight & Arjoon 2012). 또한 해안매립지역이라는 부지특성상 해안가 항만 접안시설로 현장 접근성이 어려워 적극적인 굴착정화 적용이 불가함에 따라 정화효율을 극대화할 수 있는 해안가 지중정화(In-situ) 기술개발이 필요한 실정이다. 기존의 고압주입

방식의 화학적 산화공법은 단기간에 정화효율의 증대를 보일 수 있으나 대수층의 불균질성에 의해 약품의 과다하게 사용하게 되며(Seol et al. 2003), 지반침하 내지 미세토사가 포함된 슬라임의 상부유출 및 배가스 발생 등 지중 해양환경에 악영향을 미치고 있다.

연구부지의 오염물질인 병커C유는 비중이 0.9~1.1의 비수용성 물질이며, 인화점 65°C, 유동점 30°C로 점성이 높고 낮은 용해성을 가지며 밀도가 물보다 낮아 지하수위 상부에 고농도 오염물질이 분포하는 특성을 보인다(KOSHA 2018). 따라서 병커C유의 추출을 위해서는 유동점 온도인 최소 30°C 이상이 되어야 추출 효율이 있으며, 실제 60°C 이상 유지가 필요하다(Jung et al. 2019).

특히 지중 열 주입을 통하여 오염물질의 표면 장력 감소에 따른 비점이 감소되어 저휘발 오염물질들의 증기압도 증가시켜 오염된 토양의 정화기간을 단축하고 저 휘발성 오염물의 제거율도 향상시킨다(Heron et al. 1998; Beyke 2002; Yun et al. 2006). 하지만 오염된 부지를 100°C까지 온도를 상승시켰을 때 Hexadecane까지는 제거가 잘 되지만 이보다 탄소수를 더 가지고 있는 유류오염물의 제거는 용이하지 않을 것으로 알려져 있다(Gu & Ko 2004).

본 연구부지는 병커C유로 오염된 해안매립지역로 굴착정화가 어렵고, 높은 점도 및 낮은 용해도를 가지는 오염물질의 특성상 단일 지중정화공법을 적용하는 것 보다 지중 열적처리를 동반된 토양세정을 융복합적으로 적용함으로써 안정적으로 중질유 오염지역을 정화될 것으로 판단되었다.

따라서 본 연구에서는 병커C유로 오염된 해안매립 지역 내 실증규모의 전기저항가열과 동반된 토양세정

운전 수행에 앞서, 토양세정 회분식 실험, 전기저항 가열 실내 및 파일럿 박스실험을 통하여 중질유 오염 토양의 세정효과를 증진시키기 위한 전기저항가열의 최적 운전조건을 도출하고 최종적으로 2가지 기술의 융복합 적용가능성을 평가하고자 하였다.

## II. 연구방법

### 1. 실험재료 및 분석방법

대상 연구부지는 강원도 ○○시 위치한 해안매립 지역 내 시멘트 제조회사로서 과거 해상에서 지상 저장시설로 유류이송 시 송유관의 노후화로 인해 병커 C유 유출로 오염사고가 발생하였으며 현재까지도 자유상유류 회수가 진행되고 있는 지역이다.

실험에 사용한 토양은 유류 오염토양을 채로 분리하여 2mm 이하의 토양을 선별한 후 상온에서 1일간 일정 속도로 교반하여 토양을 균일화하였으며, 준비된 토양에서 무작위로 3개의 시료를 채취하여 토양 중 TPH(Total Petroleum Hydrocarbon) 농도를 측정하여 5% 내의 오염도 차를 확인한 후 실험에 사용하였다. 토양 TPH 분석은 토양오염시험기준(국립환경과학원 고시 2018-53호)에 따라 토양 10 g에 30 g의 무수황산나트륨을 첨가하여 수분을 제거한 후 추출용매 Methylene Chloride를 주입하고 초음파 추출장치(SONICS & MATERIALS Inc.)를 사용하여 Sonication 방법으로 추출하였으며, 추출 상등액은 여과지(5B, HYUNDAI Micro Co., Ltd)로 여과하여 Capillary Column과 FID가 장착된 Gas Chromatography(Agilent 6890 plus)에 주입하여

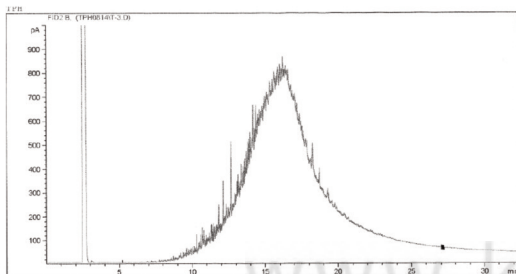


Figure 1. GC peak of soil sample.

TPH를 측정하였다. GC의 운전조건은 2분간 45℃ 조건에서 10℃/min 속도로 승온시킨 후 310℃에서 25분간 유지하였으며, TPH 농도는 노말알칸표준원액(C8~C40)의 측정범위에 있는 모든 농도를 합산하여 나타내었다. 토양의 유류 농도(TPH) 분석을 위한 표준시약은 Chem Service로부터 구입한 TPH 500 mg/L 농도로 Hexane에 혼합한 것을 사용하였으며, 혼합시약은 Carbon의 개수가 8(n-Octane)~40(n-Tetracontane)까지 짝수개의 alkane을 함유하고 있다. 토양 시료에 대한 유류 오염물질의 GC피크를 살펴볼 때(Figure 1), 병커C유 성분으로 TPH 평균 농도는 7,500 mg/kg이었다.

### 2. 실험 장치 및 방법

#### 1) 토양세정 회분식 실험

Tween-80(Polyoxyethylene Sorbitan Monoleate, 삼전화학), VG-2020(High Performance Bio-Solvent, FutureSafe Technology Co., Ltd) 계면활성제를 이용한 대상 오염토에 대한 세정성능을 파악하고자, 250 mL 삼각플라스크에 오염토양 일정량(50 g)을 주입하고 계면활성제 농도를 0.5%, 1.0%, 2.0%로 조절한 세정액 150 mL를 주입한 후 온도 승온이 가능한 교반기(BF-45SB, Biofree Co., Ltd)에서 상온(25℃), 40℃, 60℃로 온도를 설정한 다음 일정한 교반속도(130 rpm)에서 2시간 동안 회분식 실험을 수행하였다. 각 조건별 세정반응 후 현탁액을 5분간, 4,000 rpm으로 원심분리(VS 5000i, VISION SCIENTIFIC Co., Ltd)하고 상등액을 0.45 μm membrane filter로 여과한 다음, 일정량의 토양시료를 채취하여 수분을 측정하고 토양 중의 잔류 TPH 농도를 측정하였다.

#### 2) 전기저항가열 실내 박스실험

전기저항가열법의 실내실험은 다양한 토양의 함수율 조건에서 100℃까지의 온도상승 시간을 확인하기 위해 Figure 2와 같이 실내실험용 전기저항가열 박스(3.8cmD×4.5cmH)를 제작하였다. 실험조건은 약 50 L의 반응조 내에 오염토양을 충전하였고, 직경

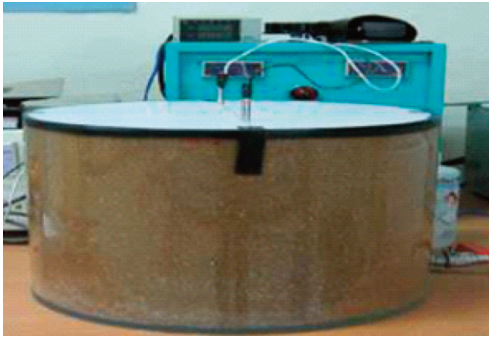


Figure 2. Indoor laboratory box for electrical resistance heating experiment.

1.5 mm의 전극봉을 설치(220V 교류 전류) 하였다. 전극간의 거리는 20 cm로 설치하였으며, 전기전도체로는 증류수를 사용하였고 단열재로써 스티로폼을 사용하였다.

3) 전기저항가열 파일럿 박스실험

앞서 수행한 실내실험용 박스실험을 바탕으로 전기저항가열 및 토양세정의 융복합 적용성을 확인하고

자 파일럿 실험용 박스(3,0mL×3,0mW×1,0mH)를 제작하였다(Figure 3). 전력 공급을 위한 3상 6KVA의 전기저항 전원공급장치(Figure 3)는 지중 내 전기를 주입 시 지락이 발생하지 않도록 트랜스를 이용하여 전류와 전압이 자동으로 변경되도록 제작하였고, 출력전압은 0~380 V, 전류 1~8 A, 주파수 50~67 Hz로 고정부하가 아닌 지중 내 전기저항가열이 가능하도록 제작하였다.

파일럿 박스실험에서 1) 대수층 형태에 따른 전달 효율, 2) 전극봉의 배열에 따른 전달효율, 3) 전극봉의 형태 및 재질에 따른 전달효율, 4) 전극봉의 간격에 따른 유효 영향반경 등의 다양한 인자에서의 최적인전조건을 도출하였고, 이 결과를 바탕으로 최종적으로 토양세정 효과를 증진시키기 위한 전기저항가열의 적용성을 평가하고자 하였다.

모니터링 항목은 전기저항가열법은 전극봉 및 지중 토양 온도를 측정하고(Figure 4), 토양세정과의 융복합 운전을 위해 계면활성제는 2.0% 농도의 VG-

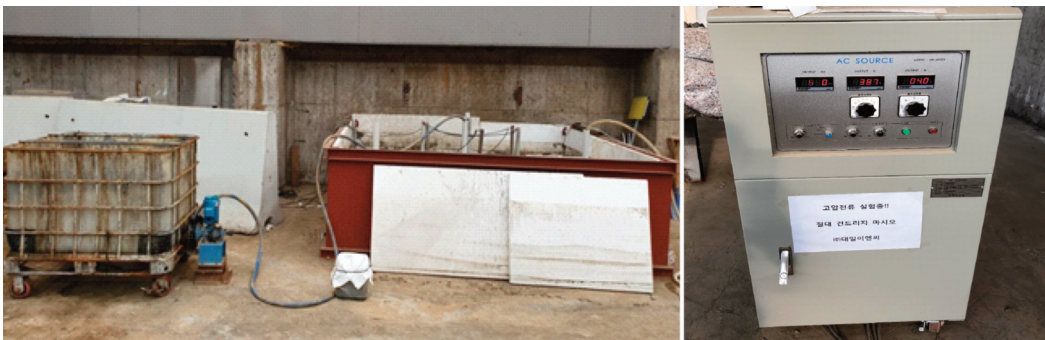


Figure 3. Electrical resistance heating box and power supply for pilot experiment.



Figure 4. Monitoring of the electrode and soil temperature.

2020을 분당 0.5 L의 속도로 주입 및 추출을 동시에 실시하였다. 주입 공극부피는 총 20 PV(Pore Volume)으로 하였으며 5 PV(Pore Volume) 마다 토양 및 추출수 시료를 채취하여 TPH 농도를 분석하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 토양세정 회분식 실험

계면활성제인 Tween-80, VG-2020의 세정성능을 알아보하고자 0.5%, 1.0%, 2.0%로 조절된 세정액을 온도조건을 상온(25℃), 40℃, 60℃로 설정한 후 2시간 동안 회분식 실험을 실시하였다. 또한 비교 실험으로 증류수를 사용하여 같은 조건으로 실험을 실시하였다.

Figure 5 ~ Figure 7은 온도조건(상온(25℃), 40℃, 60℃) 별 Tween-80 및 VG-2020의 세정액 농도 별 TPH 저감효율에 대한 추이곡선을 보여주고 있다.

60℃ 온도조건에서 2.0%의 VG-2020 세정액으로 TPH 저감효율이 약 83.4%로 가장 높은 값을 나타냈다. 온도 조건에 관계없이 Tween-80보다 VG-2020이 약 1.5배 세정효율이 우수한 것으로 나타났으며 상온 시 대비 40℃에서 약 1.2배, 60℃에서 약 1.4배의 세정효율의 증가를 가져왔다. 증류수를 세정액으로 사용한 실험에서는 약 9~14% 내외의 TPH 제거율만 보여 타 세정액에 비하여 매우 낮은 세정효과

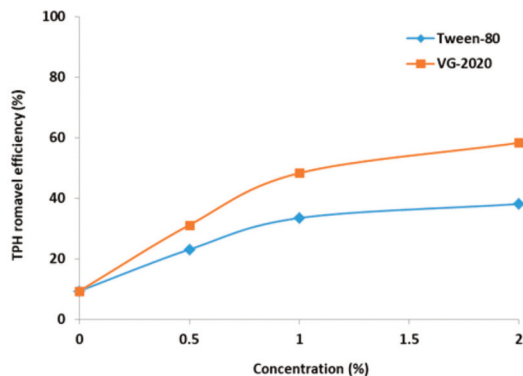


Figure 5. Change curve of TPH reduction efficiency by flushing solution concentration at room temperature (25°C).

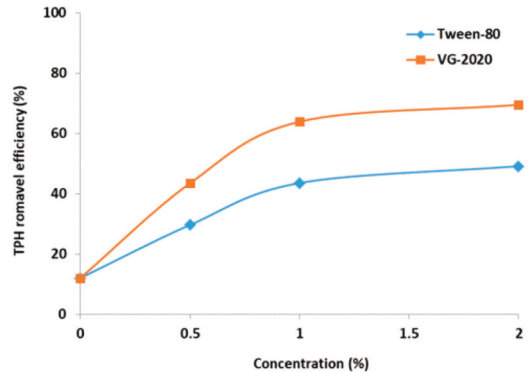


Figure 6. Change curve of TPH reduction efficiency by flushing solution concentration at 40°C.

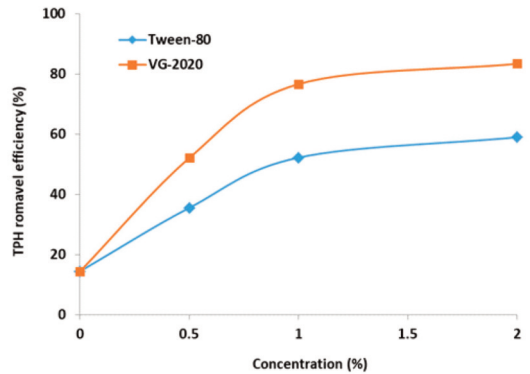


Figure 7. Change curve of TPH reduction efficiency by flushing solution concentration at 60°C.

가 나타났다.

따라서 본 실험조건에서 수행한 세정실험 결과, 2.0%의 VG-2020 세정액에서 타 조건에 비해 상대적으로 우수한 세정효율을 확인할 수 있었다. 다만 오염물질인 벵커C유가 점성도 높고 용해도가 낮기 때문에 60℃로 승온 후 토양세정을 수행해야 세정효율이 극대화되는 것으로 확인되었다.

#### 2. 전기저항가열 실내 박스실험

연구대상 오염토양의 시료는 해안매립지역 내 조수간만의 차에 의한 해수 유입이 원활하기 때문에 함수율이 약 35%로 비교적 높게 나타났다. Figure 8은 함수율이 20~40% 범위의 토양에 대해서는 약 40~80분 내에 100℃까지 수월하게 상승할 수 있음을 확인하였다.

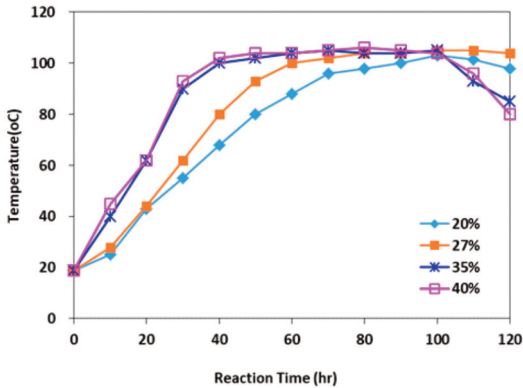


Figure 8. Change of soil temperature according to reaction time of electrical resistance heating by soil water contents.

### 3. 전기저항가열 파일럿 박스실험

#### 1) 대수층 형태

토양 내에 전도체인 물의 존재여부에 따른 열전달 효율 실험을 실시하였다(Figure 9). 박스 내에 불포화 상태 및 현장조건과 유사한 함수율 35%의 포화상

태로 유지한 채, 주파수 60 Hz에서 전압변화 및 열전달 효율을 평가하였다. 대수층의 형태실험은 STS 316 재질의 파이프형 전극봉을 3각 배열로 배치하여 실시하였다.

불포화토양의 경우 토양공극 내 수분이 사라지면서 전량사용량이 감소하였으며 온도 증가가 거의 발생되지 않았다. 반면에 포화토양의 경우 약 3시간 후 온도가 90°C까지 상승하였으며, 전력사용량은 2시간의 반응시간 이후에는 안정적인 수치를 보였다(Figure 10).

건조된 토양은 저항이 크기 때문에 전압을 걸어도 전기는 흐르지 않으며, 포화토양 조건에서 전류가 토양 내 수분에 따라 흐를 때 저항에 의한 에너지 손실이 이뤄지는데 이렇게 손실된 전기에너지는 열에너지로 바뀌게 되기 때문이다(Beyke & Fleming 2005).

#### 2) 전극봉의 배열

전기저항 가열에 사용하는 전극봉의 배열방법을



Figure 9. Pilot box experiment for evaluating heat transfer efficiency according to unsaturated (left) / saturated (right) soil conditions (Type: Pipe, Material: STS 316, Array: a triangular arrangement).

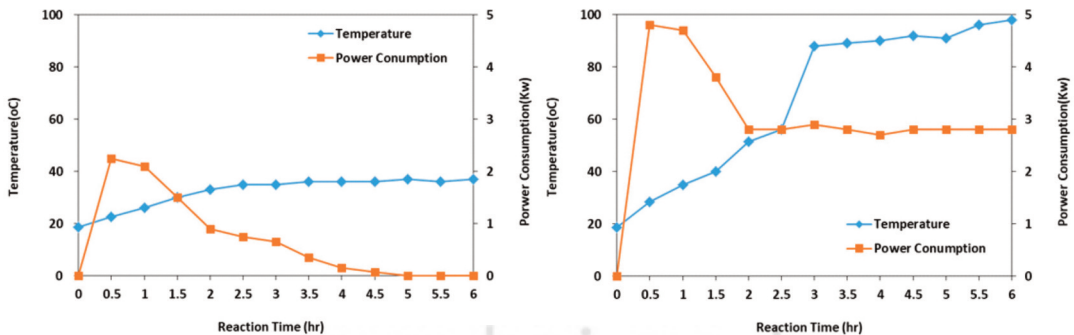


Figure 10. Changes of the soil temperature and electrical power according to reaction time in unsaturated (left) / saturated (right) soil conditions (Type: Pipe, Material: STS 316, Array: a triangular arrangement).



Figure 11. Pilot box experiment for evaluating heat transfer efficiency by hexagonal (left) and triangular (right) arrangement (Type: Pipe, Material: STS 316, Water content: 35%).

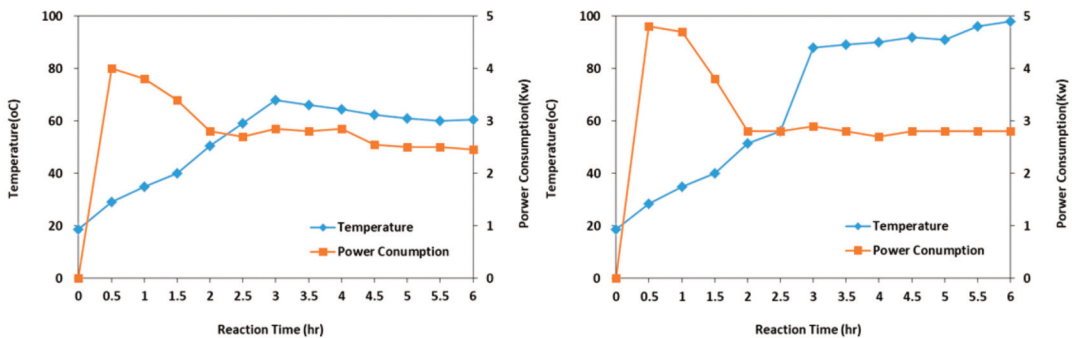


Figure 12. Changes of the soil temperature and electrical power according to reaction time by hexagonal (left) and triangular (right) arrangement (Type: Pipe, Material: STS 316, Water content: 35%).

6각 구조와 3각 구조로 하여 열전달효율을 평가하였다(Figure 11). 6각 구조는 6상의 교류 전기를 이용하는 것으로서 전압은 100~2,000 V 사이의 값을 이용하는데 현장조건에 따라 다르게 선택된다. 전극은 6각 모양의 각 꼭짓점에 설치되어 지중으로 전기를 공급하고 50~60 Hz의 주파수를 가지는 교류전류(AC)를 이 전극들에 통과시킨다. 각 전극은 분리된 각각의 상(phase)에 연결되고 바로 옆의 전극과는 60°의 위상차를 갖게 된다. 3각 구조는 삼각형 모양의 각 꼭짓점에 전극이 설치되어 지중으로 전기를 공급하는 구조이며 다른 조건들은 6각 구조와 동일하다. 전극봉의 배열 실험은 함수율 35%의 포화토양 내 STS 316 재질의 파이프형 전극봉을 이용하여 실시하였다.

6각 배열에서는 온도가 70°C까지 상승하다 이후 점차 감소하였고, 3각 배열에서는 온도가 90°C까지 안정적으로 상승하여 유지되었다(Figure 12). 이는 6각 배열 시 전극봉의 개수가 많아질수록 상(phase)간 전압의 영향으로 인하여 열전달효율이 감소되는 것

으로 판단된다. 반면에 3상 배열은 모든 3상에 연결된 전극봉의 개수와 더불어 전기적으로 자연스러운 균형이 이루어져 안정적인 열전달효율이 유지될 수 있는 것으로 판단된다(Thermal Remediation Services Inc.).

### 3) 전극봉의 형태 및 재질

전극봉의 형태는 안이 비어있는 파이프 형태와 전체가 스테인리스로 되어 있는 봉강형 형태로 구분하였고, 전극봉의 재질은 STS 316과 STS 304로 선정하여 열전달효율 실험을 실시하였다. 전극봉의 형태 실험은 함수율 35%의 포화토양 내 STS 316 재질의 전극봉을 3각 배열로 배치하여 실시하였고, 재질 실험은 함수율 35%의 포화토양 내 파이프형의 전극봉을 3각 배열로 배치하여 실시하였다.

형태에 따른 열전달 효율 실험에서는 Figure 13과 같이 파이프형이 봉강형보다 열전달 효율이 우수한 것으로 나타났다. 이는 토양과의 접촉면이 열전달에

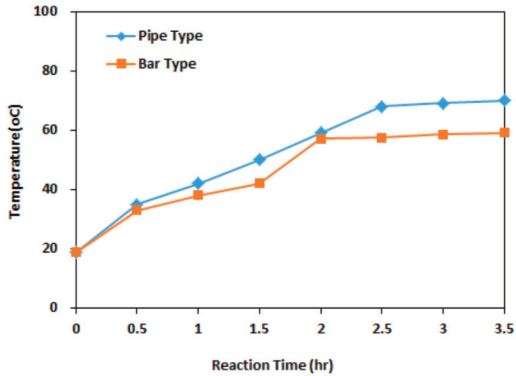


Figure 13. Changes of soil temperature according to reaction time with each electrode type (Material: STS 316, Array: a triangular arrangement, Water content: 35%).

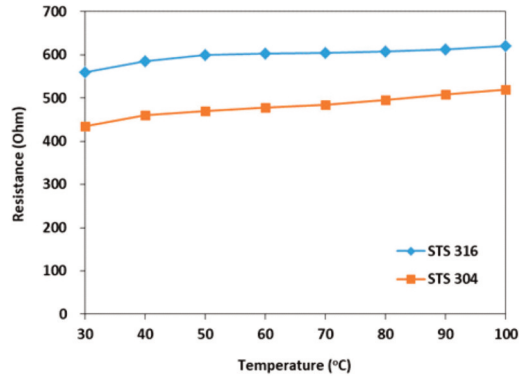


Figure 14. Change of resistance value according to electrode temperature with each electrode material (Type: Pipe, Array: a triangular arrangement, Water content: 35%).

있어서 중요한 인자이며 표면적의 비율만큼 비례적으로 증가하지는 않지만 표면적이 증가할수록 흐르는 전류의 양도 늘어나기 때문이다(Yun et al, 2006).

전극봉의 재질에 따른 열전달효율 실험결과, Figure 14와 같이 STS 316이 STS 304에 비하여 약 20%의 전력을 더 발산할 수 있는 것으로 나타났다. 특히 연구부지가 해안매립지역임을 감안할 때 내열성 및 내식성이 상대적으로 우수한 STS 316이 적합할 것으로 판단된다.

#### 4) 전극봉의 간격

전극봉의 영향반경을 확인하기 위하여 전극봉의 설치간격을 Figure 15의 모식도와 같이 1.0 m, 1.5 m, 2.0 m의 3가지로 구분하여 토양온도의 변화실험

을 실시하였다. 전극봉의 간격 실험은 함수율 35%의 포화토양 내 STS 316 재질의 파이프형 전극봉을 3각 배열로 배치하여 실시하였다.

3각 구조의 전극봉 배열의 정 가운데에 위치한 토양측정 지점의 토양 온도는 1.0 m에서 89°C, 1.5 m에서는 77°C, 2.0 m에서는 51°C로 측정되어, 전극봉의 설치간격은 1.5 m 이내에서는 목표 온도인 60°C를 유지할 수 있는 것으로 판단된다. 각 상간 전압의 영향보다는 토양이 음극이 되어 R-N, S-N, T-N으로 작용하여 220 V로 토양을 가열하고 있는 것으로 확인되었다. 전류는 전류가 흐르는 길이에 반비례하며 면적에 비례하고 두 전극간 거리가 가까워 질수록 전류는 증가하며 이에 비례하여 온도도 증가하기 때문이다(Beyke 2002).

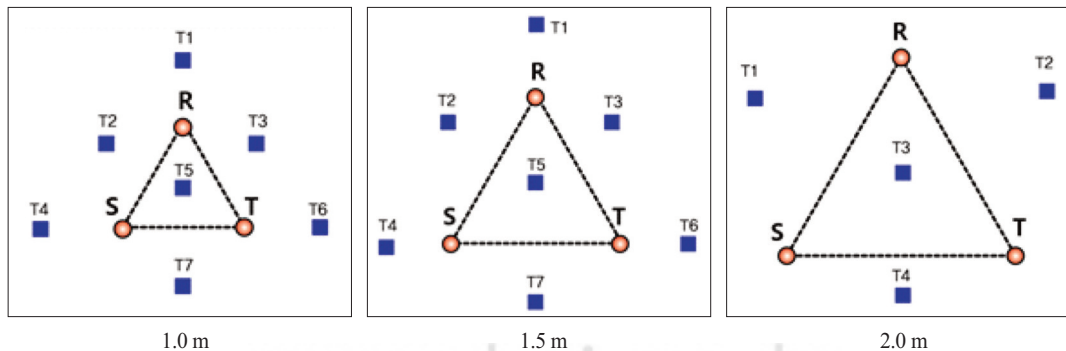


Figure 15. Monitoring points for measurement of soil temperature according to the interval of electrode (Type: Pipe, Material: STS 316, Array: a triangular arrangement, Water content: 35%).

Table 1. Temperature results of monitoring points according to the interval of electrode (°C)

Interval of electrode	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
1.0 m	70	75	73	71	89	69	69
1.5 m	65	63	67	73	77	69	66
2.0 m	47	48	51	47			

Table 2. Detailed conditions of complex box experiment

Operation condition	Indoor/Pilot test results; application of optimal operation factors
Average Con. of contaminated soil	TPH 7,500 mg/kg
Condition of soil flushing	2.0%, VG-2020
Condition of electrical resistance heating	Saturated soil, Triangular arrangement, Pipe type, STS 316, Electrode interval of 1.5 m

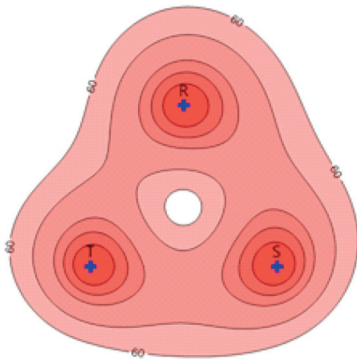


Figure 16. Visualization of soil temperature at an electrode interval of 1.5 m.

전극봉 설치간격별 세부 지점에 대한 온도 측정값은 Table 1과 같으며, 전극봉의 설치간격을 1.5 m일 때 세부지점별 토양온도 측정값을 Surfer 10 프로그램을 이용하여 Figure 16과 같이 시각화하였다.

#### 5) 전기저항가열과 동반된 토양세정

상기 전기저항가열 박스실험에서 도출된 열전달 효율을 높이기 위한 최적 조건은 포화 토양층 내 STS 316재질의 파이프형 전극봉을 3각 배열로 운전했을 때이며, 이 조건으로 토양온도를 60°C 이상을 유지하기 위한 전극봉의 간격은 1.5 m인 것으로 확인되었다.

상기 조건을 바탕으로 병커C유 오염토를 정화하기 위한 전기저항가열과 동반된 토양세정 박스실험을 실시하였으며, 세부 실험조건은 Table 2와 같다.

Figure 17과 같이 분석결과 5 PV(Pore Volume)에서 약 55%의 급격한 토양 내 TPH 저감효율을 보

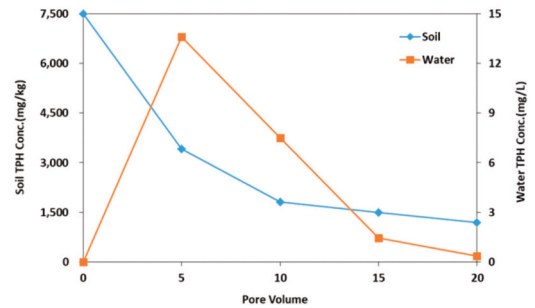


Figure 17. TPH concentration changes of soil and extracted water according to the injection pore volumes of flushing solution along with electric resistance heating.

였으며 이후 완만한 저감추이를 보였다. 5 PV(Pore Volume)에서 높은 세정효과를 가져와 13.3 mg/L의 높은 추출수 TPH 농도를 보였으나 주입 공급부피가 증가함에 따라 세정에 의한 토양 내 잔류된 TPH 농도가 감소함에 따라 추출수내 TPH 농도도 감소하는 경향을 보였다.

10 PV(Pore Volume)에서 토양오염우려기준(TPH 2,000 mg/kg 미만)을 만족하는 것으로 나타났다.

## IV. 결론

본 연구에서는 해안매립지역내 병커C유로 오염된 토양을 대상으로 토양세정 효과를 증진시키기 위한 전기저항가열의 운전인자 별 최적 조건을 도출하여 최종적으로 2가지(전기저항가열, 토양세정) 기술에 대한 융복합 적용가능성을 평가하고자 하였으며, 최

종적으로 얻은 결론은 아래와 같다.

1. Tween-80 세정제 보다 VG-2020 세정제에서 약 1.5배 이상의 높은 세정효율 보였으며, 상온 시 대비 60℃에서 약 1.4배의 세정효율 증가를 가져왔다. 최적조건으로 60℃ 온도조건에서 2.0%의 VG-2020 세정액으로 약 83.4%의 TPH 저감효율을 보였다.
2. 전기저항가열 실내 박스실험결과, 함수율이 20~40% 범위의 토양에 대해서는 약 40~80분 내에 100℃까지 상승하였다.
3. 전기저항가열의 최적운전 도출을 위한 박스 실험결과, 포화 토양층 내 STS 316재질의 파이프 형 전극봉을 3각 배열시 열전달효율이 우수한 것으로 나타났다.
4. 상기 전기저항가열의 최적운전 조건으로 토양 온도를 60℃를 유지할 수 있는 전극봉의 간격은 1.5 m인 것으로 확인되었다.
5. 전기저항가열과 동반된 토양세정 박스실험결과, 5 PV(Pore Volume)에서 약 55%의 급격한 TPH 저감효율을 보였으며, 10 PV(Pore Volume)에서 토양오염우려기준(TPH 2,000 mg/kg 미만)을 만족하였다.

## 사사

본 연구는 “지중환경오염위해관리기술개발사업(과제번호 2018002480001)”의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## References

- Beyke G, Fleming D. 2005. In situ thermal remediation of DNAPL and LNAPL using electrical resistance heating. Wiley Periodicals Inc.
- Beyke G. 2002. Enhanced removal of separate phase viscous fuel by electrical resistance heating. 9th Annual International Petroleum Environmental Conference. Thermal Remediation Services Inc. Marietta. GA.
- Gu CW, Ko SO. 2004. Soil heating method for the removal of semi-volatile organic contaminants from soils. Proceedings of KSEE. Kyungshung Univ. 513-519. [Korean Literature]
- Heron G, Zutphen MV, Christensen TH. 1998. Soil heating for enhanced remediation of chlorinated solvents: a laboratory study on resistive heating and vapor extraction in a silty, low permeable soil contaminated with trichloroethylene. Environ Sci. Technol. 32(10): 1474-1481.
- Jung JY, Lee CH, Kang DR, Lee H. 2019. Application test of thermal treatment for recovery of intermediate oil free phase in coastal area. Proceedings of KoSSGE Spring Meeting. [Korean Literature]
- KOSHA MSDS. Bunker Fuel CAS No. 68553-00-42018.
- Kwon NJ. 1999. Marine pollution accident status and countermeasures. Journal of KPA. 9: 58-61. [Korean Literature]
- Naval Facilities Engineering Service center (NFESC). 1998. Application guide for thermal desorption system. Port Huenene : NFESC.
- Ojuri OO, Ola SA. 2010. Modelling LNAPL plume breakthrough and saltwater intrusion for a coastal site in the south-western nigeria. AU J.T. 14(2): 119-130.
- Seol Y, Zhang H, Schwartz FW. 2003. A review on in-situ chemical oxidation and heterogeneity. Journal of Environmental and Engineering Geoscience. 9(1): 37-49.
- Shin YS, Han SW, Jeon JH. 2009. Analysis of mid-to long-term effects of marine oil spill accidents and plans to improve the system.

- Research report of KEI. [Korean Literature]
- Speight JG, Arjoon K. 2012. Bioremediation of petroleum and petroleum products. Wiley & Sons and Scrivener Publishing, Hoboken and Salem. USA. 97.
- Thermal Remediation Services INC. Three Phase Heating? Six Phase Heating? Which is Better?. <http://www.thermalrs.com>.
- Yun YB, Ko SO, Park GH, Park MH. 2006. Heating characteristics of the soils for the application of electrical resistance heating with soil vapor extraction. Journal of KoSSGE. 11(1): 45-53. [Korean Literature]