

전기 저항열을 이용한 유류 오염토 복원공정 적용을 위한 토양의 가열특성 연구

윤여복¹ · 고석오^{1*} · 박기호² · 박민호²

¹경희대학교 토목공학과 환경연구센터

²(주)대우건설기술연구소 환경연구팀

Heating Characteristics of the Soils for the Application of Electrical Resistance Heating with Soil Vapor Extraction

Yeo-Bog Yun¹ · Seok-Oh Ko^{1*} · Gi-Ho Park² · Min-Ho Park²

¹Department of Civil Engineering, Environmental Research Center, Kyunghee University

²Daewoo Institute of Construction Technology

ABSTRACT

This study was performed to evaluate the heating characteristics of soils for the application of electrical resistance heating process combined with soil vapor extraction. Laboratory tests were conducted to find out optimum heating conditions by the adjustment of electrical supply and electrode. Results show that fine soil particles are more efficient for electrical heating. As water content of soil increases, more efficient electrical heating is observed. However, as the soil is saturated with water above the soil porosity, decrease in the heating efficiency is observed. The higher the voltage is and the shorter the distance between the electrodes is, the better the heating efficiency is. The soil contaminated by fuel is also more efficient than non-contaminated soil in electrical resistance heating. From the relationship between the initial electrical current and the conductivity obtained in this study, soil temperature by electrical heating can be estimated.

Key words : Electrical Resistance Heating (ERH), Soil Vapor Extraction (SVE), Water content, Electric Conductivity, Electrode

요 약 문

본 연구에서는 토양의 전기가열 특성을 실험을 통해 규명함으로써, 전기저항열을 이용한 토양증기추출법을 실제 현장에 적용 시 토양가열 효율을 증가시키는 방안을 도출하기 위하여, 반응조를 이용한 토양 종류별 자체 특성에 따른 가열 특성과 외부에서의 전기적 특성의 조절을 통한 가열 특성을 살펴보았다. 토양의 입자가 작을수록, 토양 내 이온이 풍부할수록 전기가열 효율이 증가되었으며, 토양이 물로 포화된 경우에도 전기 가열 효율이 증가하였으나 공극률 이상으로 수분이 있는 경우는 오히려 효율이 떨어졌다. 전압이 증가할수록, 전극 사이가 짧아질수록, 유류 오염된 토양일수록 효율은 증가되었다. 본 연구에서는 초기 전류와 전기전도도의 정량적 상관관계를 도출함으로써 직접적인 전기가열 실험 없이 전기전도도로 반응조 내 토양이 100°C 온도 상승의 가능성을 예측할 수 있게 됐다.

주제어 : 전기저항가열, 토양증기추출법, 유류오염토 복원, 전기전도도, 토양특성

*Corresponding author : soko@khu.ac.kr

원고접수일 : 2005. 8. 22 게재승인일 : 2005. 12. 26

질의 및 토의 : 2006. 4. 30 까지

1. 서 론

전기저항열을 이용한 유류오염토 복원은 기존의 토양증기추출법(soil vapor extraction, SVE)을 향상시킨 기술로서 기존의 SVE의 적용성의 제한을 극복한 기술이다. 전통적인 토양증기추출법은 휘발성이 낮은 성분의 유류일 경우 복원 기간이 장기화 되었으며(Poppendieck et al., 1999), 또한 Heron et al.(1998)은 지하수위 아래나 또는 오염물이 용존된 상태로 존재할 경우에는 복원이 어려운 단점이 있음을 밝혔다. Ivory and Roote(2003)와 Fleming(2003)은 전기저항열을 이용한 복원기술은 토양 내 직접적으로 열을 공급하기 때문에 단시일에 낮은 휘발성의 토양내의 유류오염물질을 제거가 가능함을 밝혔다. 토양 내 전기가 흐를 때 복원을 위한 열이 발생되는데 이때 전기가 흐를 수 있게 하는 것은 토양 내 수분이다. 즉, 지하수위가 존재할 경우 오히려 더 좋은 복원력을 보이게 된다(Beyke and Fleming., 2005). 이러한 전기저항열에 의한 복원기술은 토양 내 전기 물리적 특성에 의해 가열 효과에 큰 차이를 보이게 된다.

건조된 토양은 저항이 크기 때문에 토양에 전압을 걸어도 전기는 흐르지 않으며 토양 내 전류가 흐를 수 있게 하는 것은 토양이 함유하고 있는 수분이다. 전류가 토양 내 함유하고 있는 수분에 따라 흐를 때 저항에 의한 에너지 손실이 이뤄지는데 이렇게 손실된 전기 에너지는 열에너지로 바뀌게 된다. 전기에 의한 발열량 공식은 다음과 같이 간단히 표시가 된다(Beyke, 2002, Sawyer et al., 1994).

$$Q = I \times V \times t(\text{sec}) \quad (1)$$

여기서 I: 전류(A), V: 전압(Volt), t: 시간(sec)이다.

$$V = I \times R \quad (2)$$

여기서 R: 저항(Ω)이다.

전압과 시간은 일정하다고 하면, Q(발열량)를 크게 하기 위해선 토양 내 전류의 흐름이 향상돼야 하고 식(2)를 보면 저항이 작아질 때 같은 전압에서 전류의 흐름이 커지게 된다. 전류 흐름의 향상은 첫째, 토양의 특징에 의해 결정되고 둘째, 외부조건에 의해 향상시킬 수 있다. 토양의 특징에 의해서 결정되는 것은 궁극적으로 토양 전기전도도 상승이며 주로 토양광물의 성분, 입자의 종류, 함유하고 있는 간극수의 전기전도도, 간극의 용적, 간극의 배치, 입자의 결합방향, 온도와 압력에 의해 영향을 받는다(윤길림이용길, 2000). 그리고 외부 조건에 의한 영향은 전압을 높여서 전류를 높이거나, 전류를 증가하기 위해서

저항을 감소시키거나 전극봉 간의 거리를 줄이는 방법을 사용할 수 있다. 전압을 높이는 것은 현실적 한계가 있으므로, 전극봉간 거리의 조정이 중요하며, 토양 전기전도도 증가를 위해선 수분함량과 토양이 함유하고 있는 미네랄 성분의 양이 가장 큰 요인으로 작용한다. 본 연구에서는 전기저항열을 이용하여 토양 내 유류 성분을 효과적으로 제거하기 위하여 다양한 토양 종류 및 조건에서의 토양의 전기물리학적 특성을 분석하였다.

2. 실험방법

2.1. 재료

연구에 사용된 토양은 A지역 야산의 토양(A)과 비교 대조를 위해서 주문진사(B)와 C지역 공사장에서 채취한 토양(C)과 D지역 야산에서 채취한 표토층 토양(D)을 사용했다. 통일분류법에 의해서 각 토양을 분석한 결과, A, B, C, D 토양은 각각 SP(Poorly graded Sand), SP(Poorly graded Sand), SP-SM(Poorly graded Sand with Silt), SP-SM(Poorly graded Sand with Silt)으로 분류되었다. 토양은 4번체를 통과한 흙을 사용했으며, 완전 건조시킨 후 증류수로 임의의 함수비로 만들어 사용했다.

본 연구 수행을 위해 사용된 기기는, AC 전류공급을 위해 세가지의 Power Supply(0.2 kw, 4 kw, 6 kw)를 사용하였다. 여기서 출력되는 값의 모니터링을 위하여 DM-1010 DIGITAL METER를 이용하였다. 전자온도계로는 Autonics 사의 TZ4W기종과 K-type의 Digital Thermometer를 사용했고 센서로는 대진센서제작소에서 구입한 TC-4010센서를 사용했다. 그리고 실험 시 정확한 전류를 측정하기 위해서 Kaise 사의 Clamp-meter 모델 SK-7611 기종을 사용하였다. 전기전도도 측정을 위해서는 Orion-160을 사용하였다.

2.2. 실험방법

2.2.1. 토양의 가열과 전류측정 방법

토양은 원하는 함수비의 증류수를 공급한 후 충분히 교반한 후 함수된 물이 충분히 토양에 흡수되게 하기 위하여 24시간 동안 기밀이 유지되는 반응조에 저장한 후 사용하였다. 반응조는 Box 형태의 (24.5×18×13 cm) 플라 스틱을 사용하였으며 일정 중량의 토양을 넣은 후 0.2 kw 용량의 Power Supply를 이용하여 전압을 공급한 후 시간에 따른 전력과 온도변화를 관측하였다. 전극은 각 반응조 양단의 끝 부분에 설치하였으며 온도 측정을 위한 센서는 반응조의 중앙부에 위치하도록 하였다.

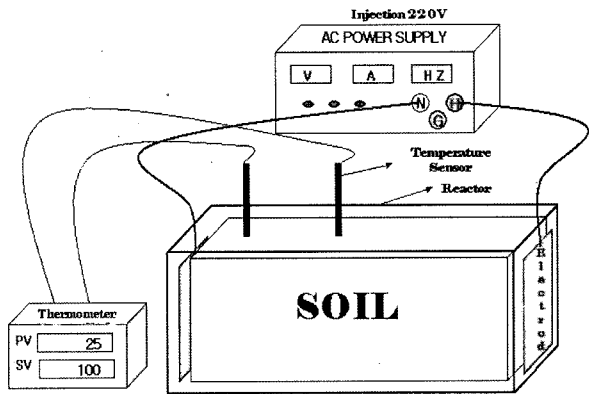


Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup.

2.2.2. 전기전도도 측정

전기전도도를 측정하기 위해서 토양공정시험법에 나오는 1:5 물침법을 이용했다. 건조된 토양에 대한 물의 비가 1:5가 되도록 물을 첨가하여 60분간 진동혼합한 후, 현탁액을 측정액으로 했다. 전극을 측정액에 넣고 그 수치를 읽는다. 전기전도도계는 Orion-160을 사용했다.

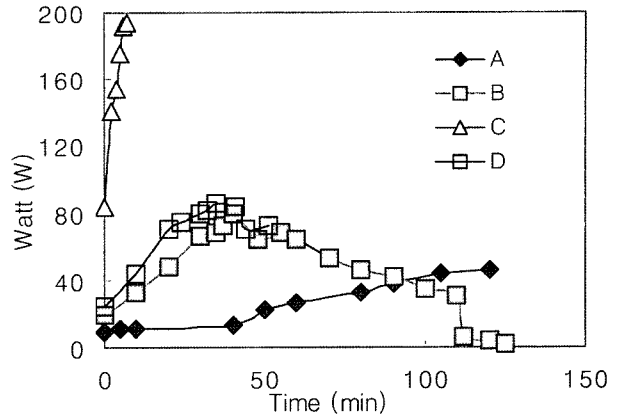
3. 결과 및 고찰

3.1. 토양의 특징에 의한 효율분석

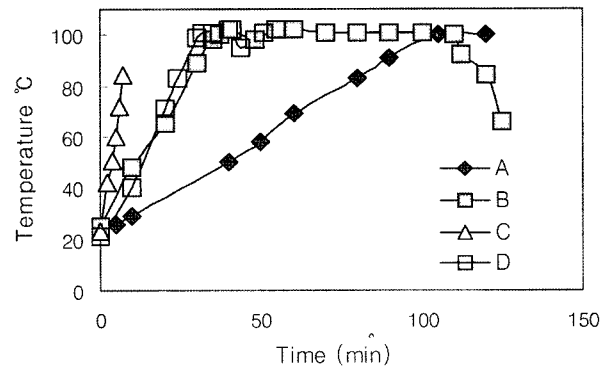
3.1.1 토양의 종류에 따른 효율분석

토양마다 함유하고 있는 미네랄 성분의 종류와 농도가 다르며 토양의 주위 환경에 의해, 혹은 오염에 의해 토양의 전기전도도는 변하게 된다. 각 토양에 따른 전력상승과 온도변화를 살펴보기 위하여 위 실험에는 각각의 500g의 토양에 증류수(160g)를 이용해서 함수비 32%로 만들었다. 그런 다음 220V 전압을 걸어서 시간에 따른 전력과 온도변화를 보았다. 위 실험에서는 A, B, C, D 토양을 사용하였다.

위 그래프의 결과를 살펴보면, C 토양이 가장 효율이 좋았고, A 토양은 가장 효율이 떨어짐을 보였다. 이러한 차이는 전기전도도의 차이에 기인되는 것으로 판단된다. 즉, 토양의 입자가 작으면 작을수록 토양의 표면적이 증가하고, 증가된 표면적을 구성하는 많은 미네랄 성분이 존재하기 때문이며, 중금속이나 염류에 의한 효율의 증가는 전기가 통할 수 있는 이온을 제공하기 때문이다(Snoeyink and Jenkins, 1980). 각 토양의 전기전도 측정 결과는 39 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 79 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 160 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 85 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이었고, 전기전도도 크기에 의해서 C 토양의 가열효율이 가장 뛰어났다. 시간에 따른 전력을 나타낸 그림을 살펴보면 정점의



(a)



(b)

Fig. 2. Temporal changes in electrical power and temperature as a function of soil type (a: Power, b: Temperature).

최대 전력이 유지되지 못하고 급격히 하락하는 양상을 볼 수 있는데 그 원인은 전극봉 주변의 수분이 급격히 증발해서 전류가 흐르지 못하기 때문이며 이때 전체 함수량의 변화는 크지 않았다. 그러므로 실제 복원현장에서는 전극봉 주변의 급격한 건조를 방지하기 위해 일정하게 수분을 공급해야 할 필요가 있다고 판단된다.

3.1.2. 함수비에 따른 효율분석

위 실험에는 500g의 토양에 각각 함수비를 변화시킨 후 220V 전압을 걸어서 시간에 따른 전력과 온도변화를 보았다. B 토양으로 실험을 수행한 결과, 함수비가 증가할수록 전력상승과 온도 상승률이 점점 커져가다가 함수비 100%에서는 그 증가율이 현저히 떨어지는 것을 볼 수 있다. 이런 현상의 이유는 함수비가 증가할수록 전기가 흐를 수 있는 통로가 넓어지는 것이기 때문에 효율이 증가했다가 함수비가 더욱 커지면, 전력이 토양을 가열하는 것과 함수를 가열하기 위해서 그 에너지가 양분되기 때문에 효율이 떨어진다. 일반적인 토양의 공극을 최

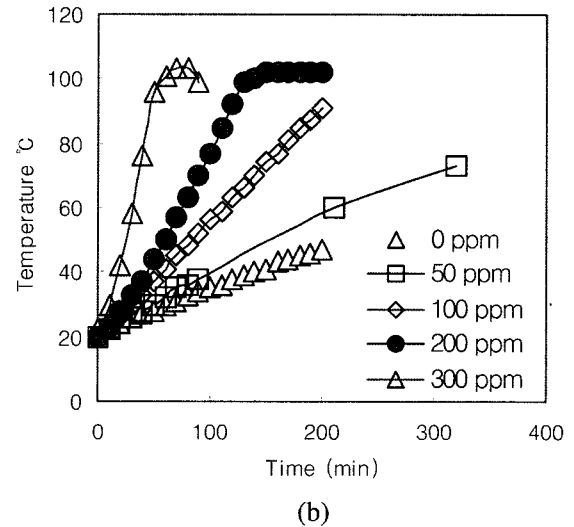
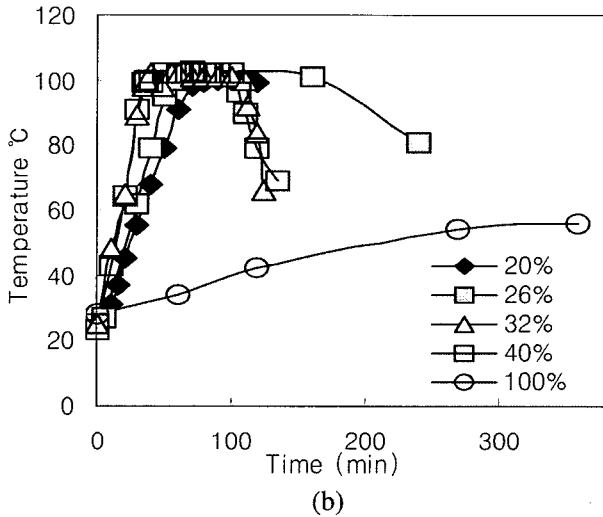
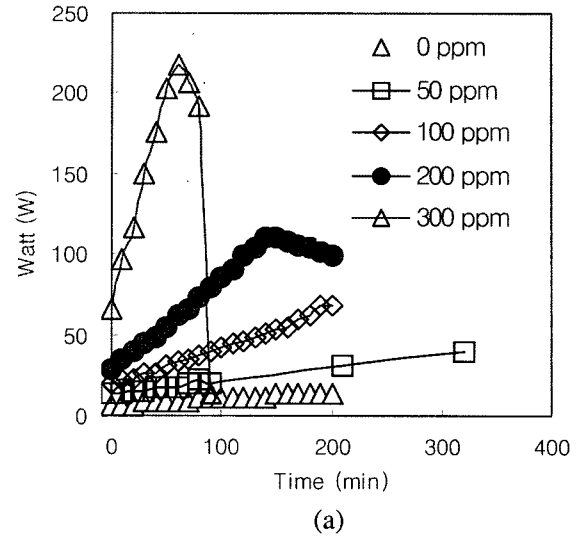
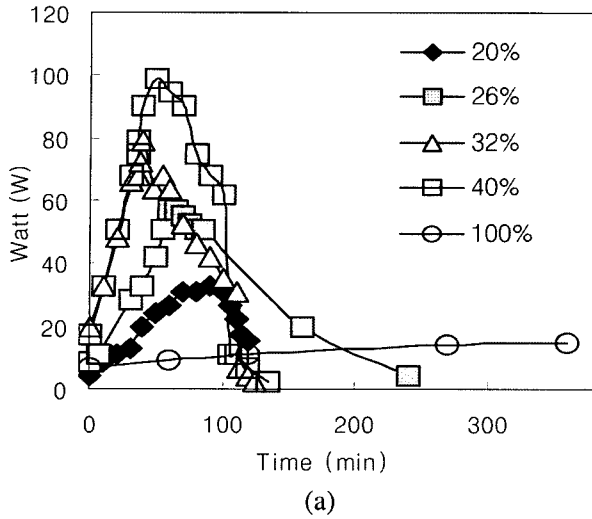


Fig. 3. Temporal changes in electrical power and temperature as a function of water content (a: Power, b: Temperature).

Fig. 4. Temporal changes in electrical power and temperature as a function of salt content (a: Power, b: Temperature).

대 0.3~0.4 사이로 볼 경우 실제 토양의 함수비는 이 값을 초과하기 어려운 조건이 존재하므로 실제 오염 현장에서는 나타나기 어려운 현상이라 할 수 있다.

3.1.3. 토양 내 염류에 의한 효율

토양 내에 존재하는 염류에 의해서 효율이 증가될 수 있다(Snoeyink and Jenkins, 1980). 여기서는 인위적으로 NaCl을 사용하였고 함수비 20%의 A 토양을 사용하였다. 그리고 전극간 거리는 20 cm로 사용하였다.

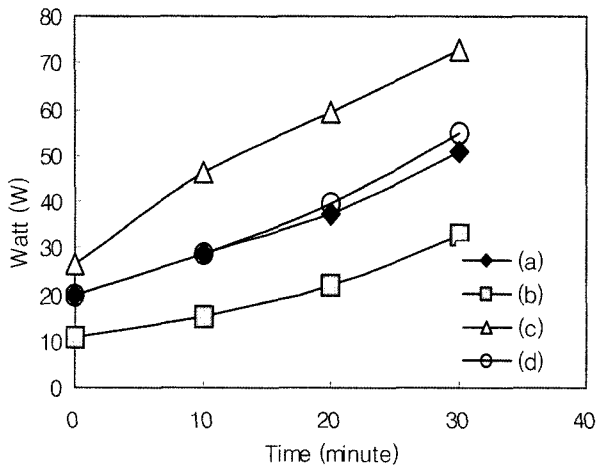
NaCl의 농도가 커질수록 효율이 좋아짐을 보인다. 즉, 토양 내 이온성분이 많거나, 토양 내 흐르는 간극수의 전기전도도가 좋을수록 효율이 좋아짐을 의미한다. 실제 현장 복원 시 낮은 전기전도도의 토양일 경우, 토양 내 염

류를 공급하여 효율을 높이는 것도 현실적인 방안임을 의미한다.

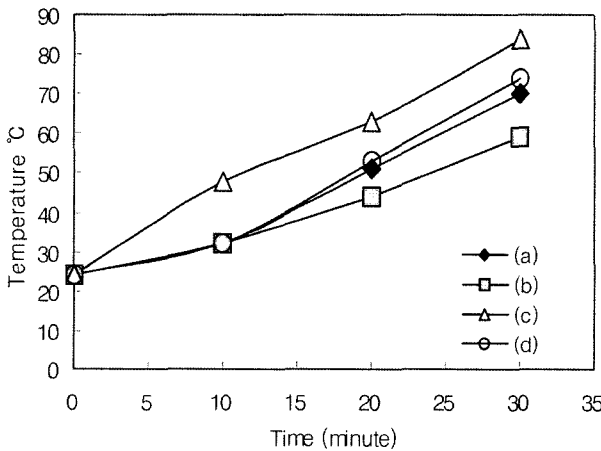
3.1.4. 유류성분에 의한 토양 오염에 따른 효율

디젤유와 같은 유류성분은 전기가 통하지 않는 부도체이다. 그렇기 때문에 토양이 디젤로 오염됐을 경우 효율이 저하됨을 예측할 수 있다. 하지만, 본 실험에서는 오염이 어떻게 이루어졌는지에 따른 저항열 발생의 차이에 대한 조사를 토양 B를 대상으로 함수비 32%로 하여 100% 포화시켜 하여 실시하였다.

4가지 오염 상황을 가정하여 실험을 수행하였는데, 주문진사 500 g에 함수비 32%를 만든 후 디젤을 모래위에 층을 이루게 조심스럽게 넣은 경우(a)와, 건조된 주문진사



(a)



(b)

Fig. 5. Temporal changes in electrical power and temperature as a function of mixture type of diesel and soil (a: Power, b: Temperature).

에 30 g의 디젤로 먼저 균질하게 토양을 오염을 시킨 후에 함수비 32%를 맞춘 경우(b), 건조된 주문진사를 함수비 32%를 먼저 맞추고 그 다음 디젤 30 g으로 토양을 균질하게 오염시킨 경우(c), 마지막으로 건조된 주문진사에 함수비 32%로만 맞춘 경우(d)이다.

단지 디젤을 표면에 조심스럽게 뿌려 토양 내에 디젤이 영향이 없는 (a)의 경우와 함수만 존재하는 (d)의 경우가 결과가 거의 같게 나온다. 그 이유는 둘 다 디젤이 토양에 직접적으로 간섭하지 않기 때문이고, 같은 양으로 토양 내 오염을 시킨 (b)와 (c)의 경우 확실한 차이를 보여 주는데, 그 이유는 (c)의 경우 함수가 먼저 토양 내에 흡착한 뒤 디젤이 들어온 경우인데 이럴 경우 전류가 흐르는데 방해가 일어나지 않는다. (b)의 경우는 디젤이 먼저 토양에 흡착한 후에 수분이 공급되는 경우인데 토양에 먼

저 흡착한 디젤이 토양에 수분이 접촉하는 것을 막아 결론적으로 전기가 흐를 수 있는 길을 봉쇄한다. (b)와 (c) 중에서 실제 상황에서의 유사여부는 현장 오염 조건에 의해 좌우된다. 하지만 기본적으로 토양은 일정한 수분을 가지고 있기 때문에 오염초기상태에서는 (c)의 조건에 더 가깝고, 오염된 시간이 길어질수록 현장조건은 (b)에 점점 가깝게 될 것이다. 또한 (c)와 (d)를 비교했을 때는 부도체인 디젤을 공급했을 때가 함수만 존재하는 경우보다 효율이 좋았다. 그 이유는 토양 입자 외부를 둘러싸고 있는 디젤이 보온효과를 일으켜 열 방출을 방지하며, 디젤이 반응조 상부 표면에 막을 형성함으로써 100°C에서 물이 기화되는 것을 막아 에너지 손실을 줄이게 된다. 또한 전기 전도도는 1°C 상승할 때 마다 2%씩 증가되므로, 온도 방출이 적어질수록 온도가 급하게 상승하므로, 이에 따라서 전기 전도도가 증가하게 되고 이것은 온도상승이 빨리 이뤄지게 한다(배재근 · 오종민, 2002).

3.2. 외부조건에 의한 효율분석

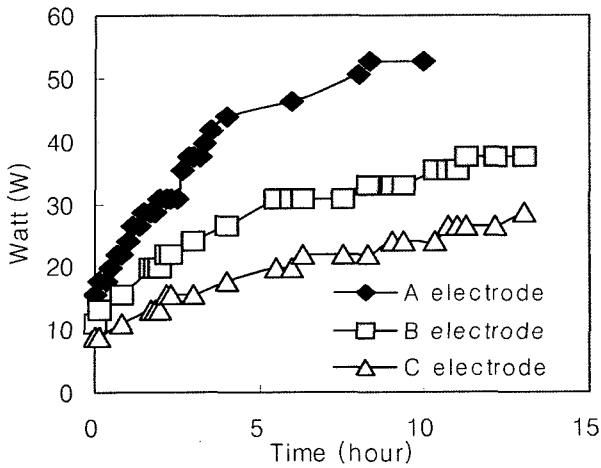
3.2.1. 전극의 표면적에 의한 효율분석

일정한 전압에서 단면적이 증가하면 전류가 증가되므로 저항은 작아지게 된다. 식(1)에서 일정한 전압과 시간에서 전류가 증가하므로 발열량은 증가하게 된다. 이 효과를 알아보기 위해서 다양한 전극 크기로 실험을 해보았다. 본 실험에서는 토양무게는 3 kg 그리고 함수비는 20%로 고정했고 전극간 거리는 20 cm이다. 각 전극판의 크기는 A 대(4.5×7.2×0.15 cm), B 중(4.5×2.0×0.15 cm), C 소(4.5×0.4×0.15 cm)이고, 전극판의 표면적 비는 A 66.15 cm²:B 19.35 cm²:C 4.95 cm²=13.36:3:1과 같다.

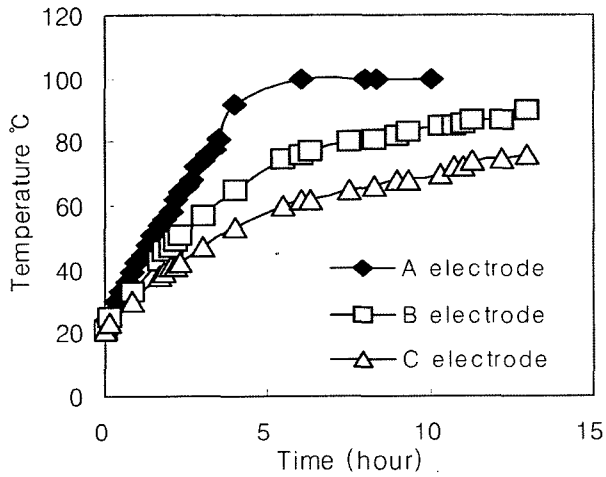
각 전극판에서의 전류값을 비교하기 위해선 같은 온도 조건일 때 비교 가능하므로 초기 21°C에서 전류 값인 0.7 A: 0.5 A: 0.4 A와 60°C일 때의 0.14 A: 0.11 A: 0.09 A를 간단히 하면 21°C에서는 1.8:1.3:1, 그리고 60°C에서는 1.6:1.2:1 정도의 비율이 나왔다. 이 비율로부터 표면적이 증가할수록 흐르는 전류의 양도 늘어나지만 그 표면적의 비율만큼 커지지 않는 것을 알 수 있다. 전류는 실제 전극봉의 면적보다 토양을 통해 넓게 흐른다. 즉 실제 전류의 흐름에 영향을 주는 것은 토양이며 전극봉은 전기를 분배하는 터미널로 볼 수 있다. 그렇기 때문에 전극봉 표면적이 증가한 만큼 전류의 크기가 증가하지 않았다고 판단된다.

3.2.2. 전극봉간 거리에 따른 효율분석

전극봉이 20 cm, 10 cm 간격으로 설치된 경우 중앙부



(a)

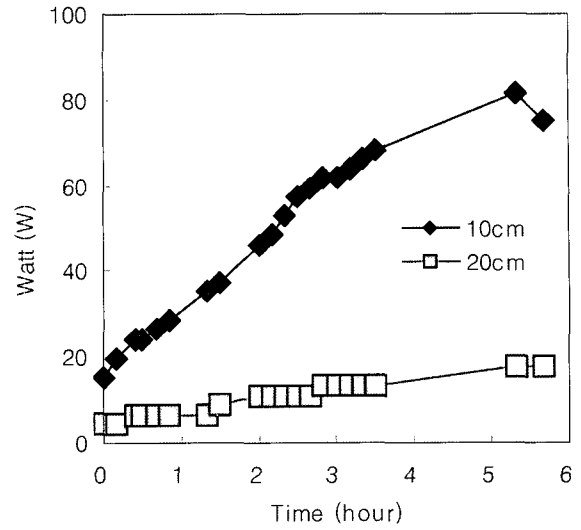


(b)

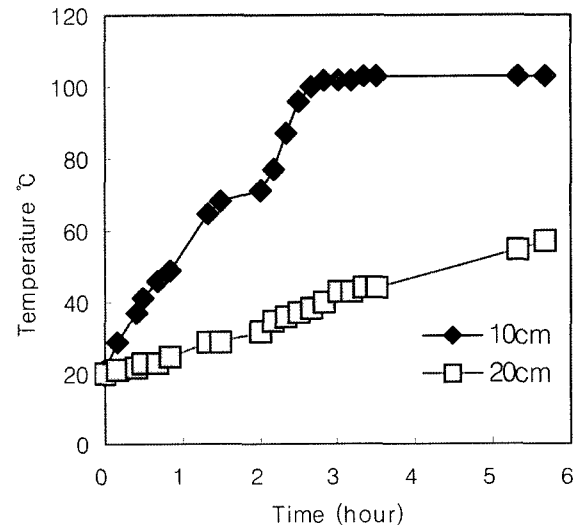
Fig. 6. Temporal changes in electrical power and temperature as a function of electrode type (a: Power, b: Temperature).

분 온도효율을 살펴본 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 이때, 실험에 사용된 전극봉의 직경이 7 mm이고 토양무게는 3 Kg 그리고 함수비 20%로 실험을 진행하였다.

동일한 단위 토양을 전기로 가열할 경우 전력소비량에 따라서 온도의 상승을 가져온다. 그래서 많은 전류가 흐르면 그만큼 온도는 크게 상승하게 된다. 식(2)에서 전류는 전류가 흐르는 길이에 반비례하며 면적에 비례한다. 그러므로 두 전극간 거리가 가까워질수록 전류는 증가하며 이에 비례해서 온도도 증가하게 된다. 실제로 같은 온도일 경우의 전류값을 비교해 보면 20°C에서는 0.07 A : 0.02 A, 30°C에서는 0.09 A : 0.03 A, 50°C에서는 0.13 A : 0.07 A의 값을 보여줬다. 즉, 거리가 2배 짧아짐에 따라 2~3배 정도 효율이 좋게 나타났다. 이는 전극봉의 크기를 크게 하는 것보다 더 큰 효율을 보여주며 실제로



(a)



(b)

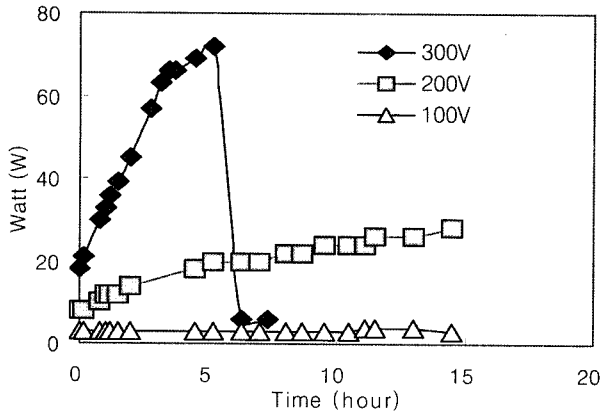
Fig. 7. Temporal changes in electrical power and temperature as a function of electrode's distance (a: Power, b: Temperature).

현장 복원 시 전극봉 사이의 거리를 조정 하는 것이 가장 중요한 인자중 하나임을 나타내고 있다.

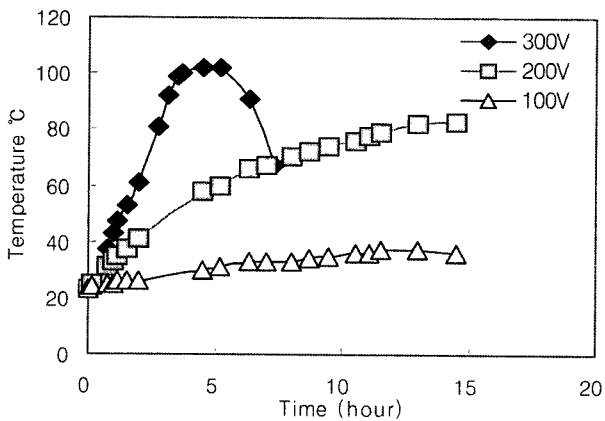
3.2.3. 주입전압에 따른 효율분석

본 실험에서는 20 cm 거리에서의 주입전압에 따른 중앙부분 온도효율을 알아보았으며, 실험에 사용된 전극봉의 직경이 7 mm이고 토양무게는 3 Kg 그리고 함수비 20%로 실험을 진행하였다.

Fig. 8에서 보는 바와 같이 전압이 작아짐에 따라 전류의 흐름도 작아졌다. $V=I \times R$ 이므로 전압에 비례해서 커지거나 작아져야 한다. 온도가 같을 때를 전류를 비교하



(a)



(b)

Fig. 8. Temporal changes in electrical power and temperature as a function of Voltage (a: Power, b: Temperature).

면 23°C일 때 300 V : 200 V : 100 V = 0.06 A : 0.04 A : 0.03 A = 2 : 1.3 : 1, 35°C일 때 300 V : 200 V : 100 V = 0.09 A : 0.06 A : 0.03 A = 3 : 2 : 1, 80°C일 때 300 V : 200 V = 0.19 A : 0.13 A = 1.5 : 1이 나온다. 이는 $V = I \times R$ (식2)에 흡사하게 나타나고 있음을 보여 준다. 즉, 주입전압을 크게 하면 복원에 필요한 온도를 쉽게 얻을 수 있으나 현장에서 공급할 수 있는 전압은 한계가 있다. 그렇기 때문에 가능한 다른 인자들을 조정해서 복원에 필요한 조건을 만족시켜 줘야 함을 나타내고 있다.

3.3. 전기저항을 이용한 복원기술의 현장 적용성 평가

전기저항을 이용한 토양내의 유류오염물질을 현장에서 제거 시 온도는 100°C로 유지하여야 하며 토양 내 압력은 70 Pa 이상 유지가 되어야한다(Poppendieck et al., 1999). 이를 위하여 현장조건에서 전기 공급 시 100°C 까지 온도 상승여부를 우선적으로 평가할 필요가 있다.

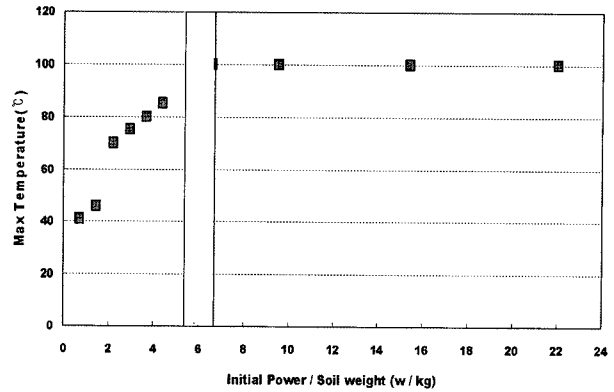


Fig. 9. Changes in maximum temperature with initial power as a function of soil weight.

100°C에서 Hexadecane까지 70 Pa에 도달하며 Eicosane 이 70 Pa까지 이르기 위해서는 150°C까지 온도상승이 필요하다. 유류오염물질 중 소량을 차지하며 휘발성과 물에 대한 용해성이 작고 또한 독성이 상대적으로 크기 않는 Hexadecane 이상을 제거하기 위하여 에너지를 사용하는 것은 효율적인 측면에서 합리적이지 않다고 판단되며 탄소수가 16 이상인 유류 오염물질에 대해서는 미생물이나 산화제를 함께 사용하여 복원하는 것이 합리적이라 사료 된다.

Fig. 9는 Box형(가로 24.5×세로 18×높이 13 cm) 반응조에서 20%의 함수와 임의로 조성된전기전도도를 지닌 3 kg의 마사토(A)에 220 V 전압을 흘려보냈을 때의 초기 전력 및 최고 온도 값을 나타냈다. 이때 전극간 거리는 20 cm였다. 즉, 토양 온도 100°C로 상승하기 까지 필요한 초기 전력은 18 W/3 kg으로 나타났다.

초기 주입 에너지에 따라 100°C 상승이 결정되는 이유는 초기 주입에너지로 토양의 온도를 목표한 만큼 올릴 수 없지만 초기 주입 에너지가 토양의 온도를 1°C 증가 시키면 2%의 전기전도도의 증가를 야기하고 증가된 전기 전도도는 전류를 증가시켜 주입에너지 상승을 일으키며 동시에 열에너지가 전도, 대류현상을 통해 방출된다. 방출되는 에너지 보다 누적되는 에너지가 클 때 목표한 온도 까지 상승이 가능하다. 즉, 이러한 일련의 관계를 통해 토양의 온도가 100°C까지 상승되는데 이러한 상승과정이 발생할 수 있는 최소 주입 에너지가 실험을 통해 6 W/kg 임을 밝혔다.

이는 초기 전력으로부터 100°C 상승 가능성을 예측할 수 있으며 또한 토양 고유의 전기전도도값은 초기 전력값을 결정하는 중요한 인자중 하나임을 아래 식으로 나타내었다.

$$\text{저항식: } (\Omega)R = [\rho(\Omega \cdot \text{cm}) \times t(\text{cm})] / A(\text{cm}^2) \quad (3)$$

여기서 ρ 는 비저항이며, t 는 전극간 거리, A 는 전류가 흐르는 단면적 임.

$$\text{전기전도도: } L(\mu\text{s/cm}) = 1/R. \quad (4)$$

$$\text{발열량공식: } Q = I \times V \times t \quad (1)$$

$$\text{전력 공식: } P(W) = V \times I \quad (5)$$

발열량 공식과 전력 공식은 (식 1)과 (식 5)번 으로 표현되는데 (식 4)번으로부터 토양의 전기전도도값이 커지면 저항이 작아지게 되므로 전압이 고정일 때 $V = I \times R$ (식 2)에서 전류(I) 값은 커지게 된다. 그러므로 발열량과 전력량은 커지게 된다. 이를 통해서 초기전력량이 토양 고유의 전기전도도에 기인함을 알 수 있다. 또한 Fig. 2와 같은 결과가 나타낸 것도 토양 고유의 전기전도도값으로부터 나타났음을 알 수 있다. 초기전력이 18 W/3 kg인 토양의 전기전도도값은 1:5물침법으로 구했을 때 70 $\mu\text{s/cm}$ 였다. 즉, 함수비가 20%인 임의의 토양의 전기전도도가 70 $\mu\text{s/cm}$ 가 넘으면 본 반응조 내에서 100°C까지 온도 상승이 이루어짐을 예측할 수 있다. 다양한 상황에서 예측이 가능할 수 있도록 각 함수와 전기전도도에 따른 초기전력을 측정하였고 Fig. 10에 결과를 나타내었다.

Fig. 10은 Box형(가로 24.5×세로 18×높이 13 cm) 반응조에서 임의로 조성된 각 함수와 전기전도도를 지닌 3 kg의 마사토(A)에 220 V 전압을 흘려보냈을 때의 초기 전류 및 전력 값을 나타냈다. 이때 전극간 거리는 20 cm였으며 토양의 전기전도도는 1:5 물침법으로 측정하였다. 0.08 A와 18 W에 수평으로 그어져 있는 선은 Fig. 9로부터 도출한 결과로, 반응조 토양이 100°C까지 상승을 위한 초기 전류 및 전력의 최소값이다.

임의의 토양의 1:5 물침법에 의한 전기전도도와 함수비를 알고 있으면 실험실 규모의 기본 설계에서 토양의 온도가 100°C 상승 가능성을 예측할 수 있다. 예를 들면 미지의 토양의 전기전도도가 100 $\mu\text{s/cm}$ 이며 토양의 함수비가 20%일 경우 Fig. 10으로부터 20% 일 때 직선인 전기전도도 100 $\mu\text{s/cm}$ 에서 17~18 W를 초과했기 때문에 100°C까지 상승할 수 있음을 알 수 있고 같은 전기전도도의 토양의 함수비가 10%였다면 100°C 온도 상승할 수 없음을 예측할 수 있다. 이렇게 100°C 온도 상승이 어렵다고 판단 될 경우 공급 전압이나 전극의 사이의 거리 및 주입 수분에 미네랄 첨가 등 다른 설계 인자를 조절을 해서 현장에 적용할 수 있다.

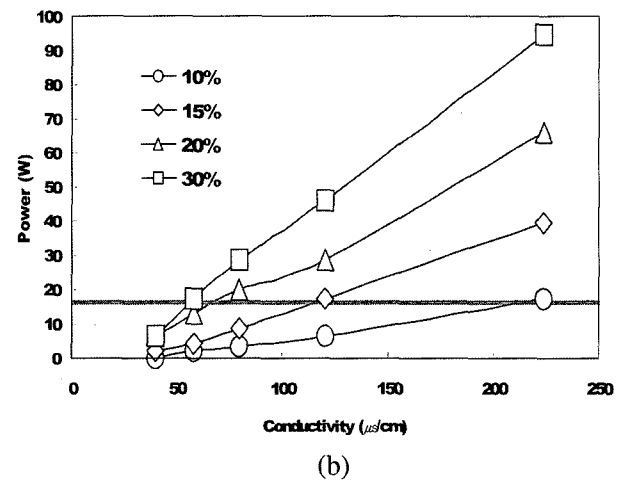
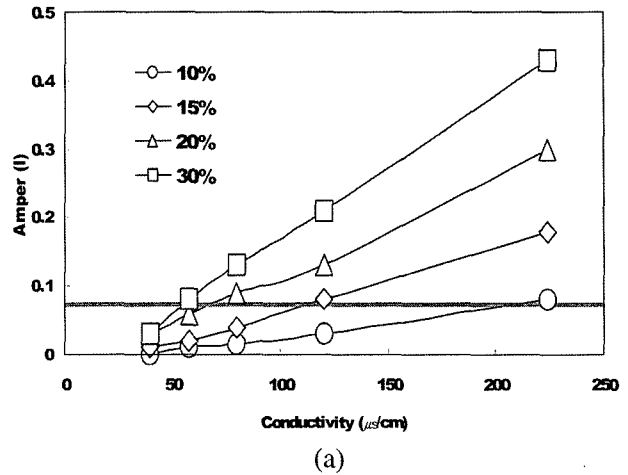


Fig. 10. Changes in initial current and initial power with electric conductivity as a function of water content. (a) Initial current, (b) Initial electrical power. Horizontal line in figure is a criteria of initial current and initial power to raise the soil temperature up to 100°C.

4. 결 론

전기저항열(ERH)을 이용한 복원공정을 사용하면 기존의 토양증기추출법(SVE)의 한계로 지적된 유류로 오염된 세립토나 점토지역의 복원이 가능해 지며, 또한 불포화층 뿐만 아니라, 지하수위 아래의 포화층의 복원도 용이하게 이뤄낼 수 있다. 본 연구에서는 토양 조건에 따른 가열되는 특성과 외부조건에 의한 가열 효율 증대를 살펴보고, 토양이 가열되는 현상에 대한 물리적 연구를 수행하였다. 구체적인 결론은 아래와 같다.

1) 토양의 입자가 작을수록 전기저항열이 더 많이 발생하였다. 그 이유는 토양의 입자가 작아질수록 표면적은 증가하고 증가된 표면적으로부터 미네랄 성분이 용해되는 비율이 더 커지기 때문이다.

2) 토양 내 함수비가 증가하면, 효율은 증대되지만 함수비가 무한대로 늘어난다면 오히려 효율이 떨어졌다. 그 이유는 토양을 가열하는데 써야할 에너지가 수분을 가열하는데 오히려 더 많이 소비가 되기 때문이다.

3) 디젤로 오염된 토양에서 가열효율은 오염되지 않는 토양에서의 효율보다 좋았다. 그 이유는 함수가 존재하는 토양에 디젤에 의해 오염이 되면 디젤은 전류의 흐름을 방해하기 보다는 오히려 열의 방출을 막는 보온 효과와, 100°C 이상의 온도를 저장하여 물의 기화에너지 방출을 억제하기 때문이다. 하지만 건조된 토양이 있어서 디젤로 오염이 됐을때 디젤은 토양 입자를 감싸서 전류의 흐름을 방해하여 온도 상승이 낮게 되는 결과를 초래했다.

4) 전극공간 거리가 짧아질수록 가열효율은 거리에 비례해서 늘어났고, 이온성분 주입 비율이 늘어날수록 가열 효율도 비례해서 늘어났다. 전극봉의 표면적이 늘어나면 약간의 효율은 기대할 수 있으나 궁극적인 전류의 통로는 토양을 통하여 발생되므로 선형적 비례는 하지는 않았다. 전압을 가변해서 증가시키면 그 증가 시킨 차이만큼 반응조 내 토양에 더 많은 에너지가 공급된 것이기 때문에 그로 인해서 온도는 상승하게 됐다.

5) 실험실 규모의 실험에서는 토양의 전기전도도 측정으로 100°C 온도 상승 가능성을 알아 볼 수 있었다. 토양 3 kg 기준으로 초기 전력이 약 18 W 이상 일 때 반응조의 온도가 100°C까지 올라갔다. 이때 토양의 전기전도도는 50~80 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이었다. 즉, 실험을 하지 않고도 토양의 전기전도도 측정만으로도 실험실 규모의 반응조의 토양이 100°C 상승 가능성을 예측할수 있을 것으로 판단된다. 토양의 전도도와 함수를 인위적으로 변화시켜서 함수별, 전도도에 따른 토양의 100°C 상승 관계를 Fig. 10에 나타냈으며 본 실험 데이터를 바탕으로 실제 복원현장에서 가열 가능성과 가열을 위한 설계 인자를 도출할 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 환경부의 “차세대핵심환경기술개발사업 (Ecotechnopia 21 project)”으로 지원받은 과제입니다.

참 고 문 헌

- 배재근, 오종민, 2002, 환경인을 위한 토양오염 측정분석, 신평문화사, 서울, p. 190-191.
- 윤길립, 이용길, 2000, 오염토양의 전기 비저항치 변화 연구, 한국지하수토양환경학회 춘계학술발표회, 한국지하수토양환경학회, p. 84~89.
- Beyke, Gregory., and Fleming, David., 2005, In Situ Thermal Remediation of DNAPL and LNAPL Using Electrical Resistance Heating, Wiley Periodicals, Inc.
- Beyke, Gregory., 2002, Enhanced Removal of Separate Phase Viscous Fuel by Electrical Resistance Heating, 9th Annual International Petroleum Environmental Conference, Thermal Remediation Services, Inc., Marietta, GA.
- Fleming, David., 2003, Electrical Resistance Heating for Rapid Remediation of DNAPL, 29th Environmental and Energy Symposium & Exhibition, Thermal Remediation Service, Inc.
- Heron, G., Van Zutphen, M., Christensen, T. H., and Enfield, C. G., 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(8)**, 1474-1481.
- Ivory, Thomas. M., and Roote, Diane. S., 2003, Technology Status Report: In Situ Thermal-Enhanced Remediation Technology, Concurrent Technologies Corporation Pittsburgh, EPA.
- Poppendieck, D. G., Loehr, R. C., and Webster, M. T., 1999, Predicting hydrocarbon removal from thermally enhanced soil vapor extraction systems: 1. laboratory studies, *J Hazard Mater*, **67(1)**, 81-91.
- Sawyer, Clair N., McCarty, Perry L., and Parkin, Gene F., 1994, Chemistry for Environmental Engineering, 동화기술, 서울, p. 95-100.
- Shoeyink, Vernon L., and Jenkins, David., 1980, Water Chemistry, John Wiley & Sons, Inc. p. 76-77.