

마이크로파를 적용한 에너지 효율적인 오염토양 정화를 위한 예비연구

함석진¹ · 양인호² · 오현상¹ · 조현조¹ · 김건인³ · 정상조^{1*}

¹육군사관학교 건설환경학과

²서울대학교 지구환경과학부

³육군사관학교 무기기계공학과

A Preliminary Study for Microwave Application to Energy Efficient Contaminated Soil Cleanup

Seokjin Ham¹ · Inho Yang² · Hyunsang Oh¹ · Hyeonjo Cho¹ · Gunin Kim³ · Sangjo Jeong^{1*}

¹Department of Civil Engineering and Environmental Sciences, Korea Military Academy

²School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University

³Department of Weapons and Mechanical Engineering, Korea Military Academy

ABSTRACT

A preliminary study for energy efficient soil heating and contaminant removal using microwave was conducted. Soils sampled from floodplain were heated with microwave oven, and soil heating property and energy efficiency were compared to those heated with electrical furnace. In addition the effects of water, soil organic matter, and contaminated diesel on soil heating with microwave were investigated. Even though the electrical power consumption of electrical furnace and microwave oven were similar, temperature of soil heated with microwave oven was significantly higher than that of soil heated with electrical furnace. The increase of soil moisture content delays the raise of soil temperature during heating it with microwave oven. However, the effects of total petroleum hydrocarbon (TPH) (<10%) in contaminated soil matrix and small amount of soil organic matter (<5%) on the increase of soil temperature by microwave were not significant. Further studies for contaminated soils with different texture using pilot scale microwave reactor are required for application of this technique in the field.

Key words : Microwave, Furnace, Soil, Organic matter, Heating

1. 서 론

도시지역이나 향후 활용도가 높은 지역에 위치한 토양 오염 부지는 정화 비용이 다소 증가하더라도 신속한 복원을 통하여 부지의 활용성을 제고 시키는 것이 보다 경제적이다. 특히 계획에 의하여 도심에 위치한 공장지대 및 군부대의 외곽 이전이 실시될 경우 도심의 효율적인 개발을 위하여 이들 부지에 위치한 오염된 토양에 대한 신속한 정화가 요구된다.

오염된 토양의 복원을 위하여 다양한 공법들이 개발되어 사용되고 있으나 각각의 공법들은 적용에 따른 장단점

들을 가지고 있다(환경부, 2007). 미국 연방복원 기술자문회의(Federal Remediation Technologies Roundtable, FRTR)에서는 각 복원 공법에 대한 기술 개발 정도, 운영 및 유지 비용, 복원 시간, 오염 물질의 종류에 따른 효과 등에 대한 종합적인 평가표를 제시하였다(FRTR, 2011). 평가표에 따르면 열탈착(thermal desorption) 공법은 고농도의 다양한 유기오염물질들로 오염된 토양을 신속하게 복원할 수 있는 효과적인 복원 방법 중의 하나로 평가되었다.

전통적인 직접 및 간접 가열식 열탈착 공법은 다양한 유기오염물질로 오염된 토양을 신속하게 복원할 수 있는

*Corresponding author : sangjoj@kma.ac.kr

원고접수일 : 2011. 3. 14 심사일 : 2011. 6. 14 게재승인일 : 2011. 6. 15

질의 및 토의 : 2011. 8. 31 까지

장점이 있지만 많은 에너지를 소모하여 복원 비용이 과다하게 소모되는 단점이 있다(양지원과 이지원, 2007; Kawala and Atamanczuk, 1998). 또한 뜨거운 증기를 이용한 토양가열은 효율적이지만, 투수성이 우수한 토양에만 적용가능한 방법이다(Schmidt, et al., 2002; Roland et al., 2008).

마이크로파를 이용한 토양가열 방법은 전통적인 가열 방법과 비교하여 설치장치가 간단하고 에너지 효율적인 기술이다. 마이크로파 가열은 마이크로파 에너지가 유전체 내부에서 마찰에 의해 열로 전환되는 원리를 이용하는 것으로서, 내부로부터 가열되는 방식이므로 가열시간이 짧고 온도분포가 균일하며 열효율이 높은 특성을 지닌다(Kawala and Atamanczuk, 1998). 현재 마이크로파 오븐을 이용한 요리는 전통적인 오븐과 비교하여 시간과 에너지를 절약할 수 있기 때문에 보편화 되어 있으나, 이를 이용한 오염토양 정화는 아직 일반화 되어 있지 않다. 그러나 이를 이용한 오염토양 정화시 요리와 유사하게 전통적인 가열방식과 비교하여 에너지와 시간을 절약할 수 있다(Thostenson and Chou, 1999). 즉 마이크로파를 이용한 오염토양 정화 방법은 전통적인 열탈착 공법의 장점을 유지하면서 보다 에너지 및 시간 효율적인 오염토양 정화를 가능하게 할 수 있을 것이다.

마이크로파를 이용한 가열은 가열하고자 하는 물질에 에너지를 집중할 수 있으므로 에너지 효율적이다. 또한 대상물체 체적 전체가 비교적 균등하게 가열되기 때문에 가열시간을 감소시킬 수 있는 장점이 있다(Pickering, 2006). Liu et al.(2004)는 마이크로파를 이용하여 pentachlorophenol 흡착에 사용된 활성탄 재활용, Huang et al.(2011)은 PCBs로 오염된 토양에 MnO_2 와 마이크로파를 적용하여 정화효율 증진을 연구하였다. Kawala and Atamanczuk (1998)은 trichloroethylene으로 오염된 모래 1톤에 마이크로파를 75시간 동안 적용하여 토양의 온도상승 및 오염물질 탈착 특성에 대해 고찰하였으나 토양의 온도는 $70^{\circ}C$ 를 넘지 않았다.

국내에서도 하상안 외(2006)는 마이크로파를 적용하여 하수슬러지 케이크를 건조시켜 재활용하는 방안에 대해 연구하였으며, 염혜경 외(2006)는 유류 오염토를 마이크로파로 처리했을 때 함수율 변화에 따른 제거효율의 차이에 대해 연구하였다. 이병철 외(1996)는 토양의 조성에 따른 마이크로파 가열특성, 문경환 외(1996)는 점토성 토양에 오염물질을 투입한 후 마이크로파 가열에 따른 휘발성 유기오염물질의 제거효율, 그리고 최호은 외(2007)는 마이크로파 조사강도에 따른 total petroleum hydrocarbon

의 분해 특성에 대해 연구하였다. 이러한 마이크로파를 이용한 연구는 주로 오염물질의 제거효율에 집중하거나, 소량의 토양만을 대상으로 실험하여 마이크로파의 투과 깊이에 의한 한계나 처리 토양 체적 내 특정 지점의 가열 특성 등에 대해서는 파악하기 어려웠다. 또한 오염된 토양에서 소수성 유기오염물질들은 주로 휴믹물질과 같은 탄소물질들에 집중되어 분포하는데 기존의 연구는 토양의 종류와 유기물 함량에 따른 에너지 효율 비교 등이 미흡하였다.

본 연구에서는 하천변 퇴적층에서 채취한 양질사토층과 사양토층을 대상물질로 전기로와 마이크로파 오븐을 이용하여 위치별 가열특성을 비교하고, 그 에너지 효율에 대해 평가하였다. 또한 함수율과 유기물 함량의 변화에 따른 토양 가열의 효율성을 비교 분석하였고, 토양을 인위적으로 유류로 오염시킨 후 마이크로파 처리에 따른 유류의 탈착 특성을 고찰하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 마이크로파를 이용한 토양가열의 장점들은 에너지 효율적인 오염토양 정화에 활용할 수 있으리라 판단된다.

2. 재료 및 실험방법

2.1. 토양시료

실험에 사용한 토양시료는 2007년 10월 경기도 파주시에 위치한 00훈련장 부근에서 채취하였으며, 토양시료 채취지역(경도: $126^{\circ}47'41.1''E$, 위도: $37^{\circ}54'7.40''N$)은 민간인 통제선 이북에 위치하여 지난 50여년 동안 사람들에 의한 훼손이 최소화된 지역이다. 시료 채취 지역은 임진강변에 위치하여 홍수시 주기적인 하천범람으로 토양입자의 퇴적이 이루어지는 충적층이다(정상조, 2010).

시료 채취는 포크레인을 이용하여 지표 토양을 제거한 후 지하 50-100 cm에 있는 성층화된 모래층과 점토/실트층을 삽으로 채취하였다. 실험실로 운반된 시료들은 전기오븐($40^{\circ}C$)을 이용하여 건조하였으며, 체질(체번호 10)을 통하여 2 mm 보다 큰 자갈이나 나뭇가지 등을 제거하였다. 실험에 사용한 토양시료들은 드럼믹서를 사용하여 균질화하였으며 10 L 용량의 용기에 균일하게 분배하여 실험실에 보관하고 실험에 사용하였다. 시료의 토성은 (주)제일분석센타에 의뢰하여 분석하였다.

2.2. 토양의 연속적인 가열특성 고찰

토양시료의 연속적인 가열은 Barnstead사(미국)의 전기로와 가정용 마이크로파 오븐을 이용하여 실시하였으며, 시간에 따른 토양의 가열특성은 Testo사(독일)의 177-T4

모델 Type K probe를 사용하여 3초 간격으로 측정하였다.

전기로를 이용한 토양시료 가열은 토양시료를 전기로 가운데에 위치시키고 전기로 온도를 상온에서 400°C까지 상승시키고, 전기로 내부온도가 400°C에 이른 다음에는 약 3시간 동안 전기로의 온도를 400°C로 유지하면서 토양의 온도를 측정하였다. 가정용 마이크로파 오븐을 이용한 토양가열은 토양시료를 오븐의 가운데에 위치시키고 최대 파워로 토양을 가열하였을 때 토양내부의 온도가 400°C에 이르면 가열을 중단하였다.

실험을 위하여 약 600 g의 토양시료를 0.6 L 비이커에 담아 준비하고 3개 지점에서 온도변화를 측정하였다(Fig. 1). 온도계 센서는 수평적으로는 비이커의 중앙, 중앙으로부터 1.5 cm 바깥쪽, 중앙으로부터 3 cm 바깥쪽에 위치시키고, 수직적으로는 3지점 모두 토양시료의 가운데에 위치시켰다. 시료의 크기와 양은 가정용 마이크로파 오븐 내에서 3개의 온도계 센서를 설치하고 측정할 수 있는 현실적인 최대 크기로 설정하였다. 마이크로파에 의한 영향으로 급속으로 이루어진 온도계 센서가 편향된 값을 나타낼 수 있으므로, 본 연구에서는 온도계의 센서를 구리판 속에 넣어 마이크로파의 영향을 차단한 후 온도를 측정하였다. 마이크로파가 조사(照射)될 때와 중단 직후 측정된 토양온도의 변화가 거의 없었고, 마이크로파 조사 중단시 다

른 온도계를 사용하여 토양 온도를 측정한 결과 토양 시료 내에 설치된 온도계의 온도와 유사하였으므로, 토양 내부에서 실시간 온도 측정시 마이크로파에 의한 영향은 크게 받지 않는 것을 확인하였다. 가정용 마이크로파 오븐에 설치된 시료 회전장치는 제거하여 온도계 센서들이 움직이지 않도록 하였다. 토양시료의 가열에 사용된 전기로와 마이크로파 오븐의 제원은 Table 1과 같다. 토양 가열에서 수분의 영향을 고찰하기 위하여 함수율을 0%, 10%, 30%로 변화시키면서 실험하였다.

2.3. 시료토양의 위치별 가열 특성과 소모 에너지 측정

시료의 위치별 가열특성은 1 L 비이커에 토양시료 900 g을 담고 전기로(furnace)와 가정용 마이크로파 오븐을 이용하여 10분간 가열한 직후 토양 시료를 반응기 외부로 이동시켜 토양시료의 위치별 온도를 측정하였다. 수분의 변화에 따른 가열특성을 고찰하기 위하여 함수율을 0%, 10%, 30%로 변화시켰으며, 유기물의 양에 따른 토양의 가열 정도를 측정하기 위하여 900g의 토양에 45g의 휴믹산(Sigma-Aldrich)을 추가하여 실험하였다.

전기로를 이용한 토양시료 가열은 전기로의 온도를 상온에서 400°C로 상승시키면서 10분간 실시하였다. 마이크로파를 이용한 토양시료 가열은 가정용 마이크로파 오븐 내에서 토양시료를 회전시키면서 이루어졌다. 토양시료들의 온도는 실험이 종료된 즉시 시료를 외부로 이동시킨 후 Testo사(독일)의 177-T4 모델에서 Type K probe를 사용하여 측정하였다. 토양 온도측정은 probe를 토양시료의 원하는 위치에 위치시킨 다음 20초 동안 평형시간을 부여한 후 측정하였다. 온도계의 센서 끝부분은 한쪽 끝이 막힌 구리판에 삽입하여 토양 속의 온도를 쉽게 측정할 수 있게 하였다. 가열 중 소모된 전기에너지 양은 Voltcraft사(독일)의 Energy Check 3000을 이용하여 측정하였다.

토양시료의 가운데 부분과 바깥쪽 부분의 가열특성을 비교하기 위하여 수평적으로 토양시료의 중앙, 중앙으로

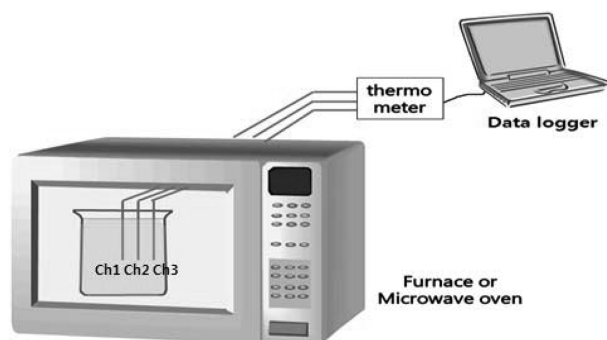


Fig. 1. Schematic view of a continuous measurement of soil temperature heated by furnace and microwave oven.

Table 1. Parameters of conventional furnace and microwave oven used for soil heating.

Parameter	Microwave Oven	Furnace
Model	MWO-2019	F 62730
Voltage(V/Hz)	A.C. 220/60	A.C. 240/50-60
Power(W)	Maximum 800	Maximum 1488
Frequency(MHz)	2,450	-
Dimensions(mm)	W461 × D359 × H280	W597 × D476 × H413
Inner dimensions(mm)	W295 × D315 × H218	W292 × D292 × H191
Capacity(L)	20	25
Weight(kg)	13.2	25

부터 1.5 cm 바깥쪽, 중앙으로부터 3 cm 바깥쪽에서 각각 측정하였다. 토양의 수직적 가열 특성을 고찰하기 위하여 3개의 센서를 이용하여 바닥에서부터 7 cm, 4 cm, 1 cm 부분(총 9개 지점)에서 온도를 순차적으로 측정하였다. 토양의 위치별 가열특성 및 소요 에너지 측정 실험은 2회 이상 반복 실시하였으며, 측정값의 평균값을 이용하여 Golden Software사(미국)의 Surfer 프로그램으로 도시하고 분석하였다.

2.4. TPH 탈착 특성 고찰

마이크로파를 이용한 오염토양 탈착 특성을 고찰하기 위하여 시내 주유소에서 구입한 경유에 토양시료를 1달 동안 담가두었다. 오염시료의 자유상 유류를 파이펫을 이용하여 제거하고, 입자 사이에 위치한 유류는 1 L의 물을 추가하여 제거한 후 그늘에서 풍건하였다. 경유로 오염된 토양시료는 건조 후 위치별 가열특성 고찰 실험 방법과 동일한 요령으로, 토양시료 900 g을 1 L 비이커에 채운 후 가정용 마이크로파 오븐을 이용하여 10분 그리고 20분간 가열하였다. 처리 후 토양시료는 넓은 스테인레스 판에 부어 냉각시키고 균질화 한 후 일정량의 대표적인 시료를 채취하여 잔류된 오염물질은 민형식 외(2009)의 방식을 사용하여 추출하였다. 추출한 TPH는 Flame Ionized Detector를 갖춘 가스크로마토그래피(Agilent 7890)를 이용하여 토양오염공정시험법에 따라 분석하였다. 시료의 추출 및 분석은 2회 이상 실시하였으며 그 평균값으로 TPH 제거 효율을 결정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 전기로를 이용한 토양시료 가열

실험에 사용된 파주 범람원에서 채취한 토양의 토성은 모래층의 경우 양질사토(loamy sand, 모래 86.0%, 실트 3.3%, 점토 10.7%)로, 실트/점토층은 사양토(sandy loam, 모래 54.0%, 실트 14.5%, 점토 29.5%)로 분석되었다. 전기로를 이용한 토양시료의 가열특성은 Fig. 2와 같다. 전기로를 이용한 가열은 전기로부터 열에너지가 토양 속으로 전도되어 토양 내부를 가열하는 방법이다. 따라서 토양시료 외부가 먼저 가열되고 열전도에 의해 내부가 가열된다.

전기로를 이용한 건조한 양질사토층 가열의 경우 전기로 내부의 공기는 가열 후 약 20분에 400°C에 도달하였으나, 토양시료 중 가장 바깥쪽 부분에 위치한 온도계는 145°C, 가장 안쪽의 토양 심부에 위치한 온도계는 약

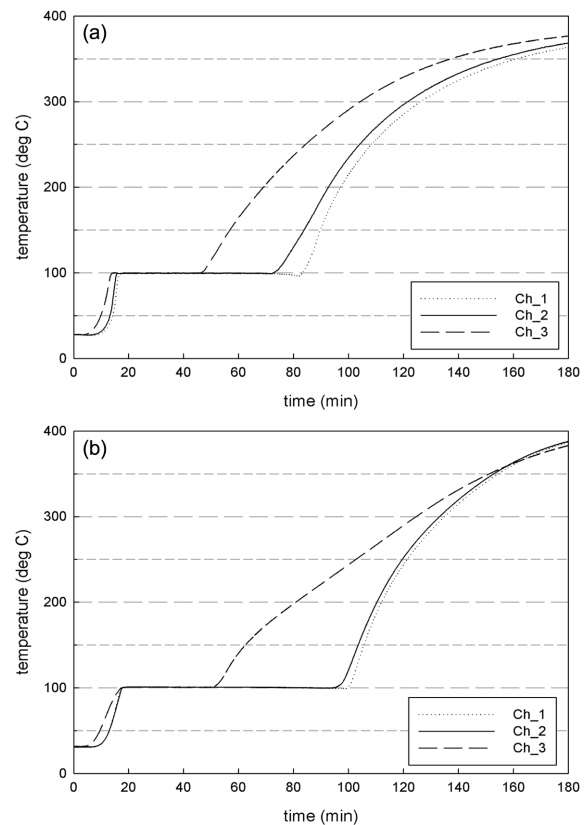


Fig. 2. Temperature-time profiles of (a) Paju loamy sand(10% moisture content) and (b) Paju sandy loam layer(10% moisture content) using electrical furnace.

35°C를 나타내었다. 토양시료는 40°C에서 건조하였음에도 불구하고 포함하고 있는 수분에 의해 토양 심부의 온도는 100도 부근에서 수분의 상변화에 따른 온도상승 정체가 나타났다. 전기로를 이용한 토양 시료의 가열특성은 양질사토층과 사양토층에서 유사하게 나타났으나, 사양토층 시료가 100도 부근에서 수증기 상변화에 따른 온도상승 정체가 양질사토층에 비하여 길게 나타났다(Fig. 2).

함수율이 증가함에 따라 양질사토층과 사양토층 시료를 가열하는데 소요되는 시간이 증가하였다. 이러한 증가는 토양 속에 존재하는 물의 상변화에 추가적인 에너지가 소모되기 때문이다. 시료의 가장 안쪽에서 측정한 토양온도의 경우 물의 상변화를 위해 건조한 양질사토층과 사양토층은 각각 10분과 18분이 소요되었으며, 함수율 10%에서는 각각 66분과 82분이 소요되었다.

3.2. 마이크로파 오븐을 이용한 토양시료 가열

전기로를 이용한 가열 실험과 동일한 양과 특성의 시료를 가정용 마이크로파 오븐의 가운데에 위치시키고 가열

하였다. 가열은 시료의 온도가 400°C에 도달할 때까지 실시하였다. 마이크로파 오븐을 이용한 가열은 전기로를 이용한 가열과 달리 토양시료의 안쪽과 바깥쪽의 온도가 거의 유사하게 상승하였으며, 상승하는 속도가 전기로와 비교하여 매우 빨랐다. 건조한 양질사토층의 경우 모든 지점의 온도가 150°C에 도달하는데 4분, 함수율 10% 양질사토층의 경우 18분이 소요되었다. 건조한 사양토층의 경우도 150°C에 도달하는데 12분, 함수율 10% 사양토층의 경우 15분이 소요되었다. 결과적으로 마이크로파 오븐을 이용하여 토양시료를 150°C이상으로 가열하는데 걸리는 시간은 전기로를 이용하는 경우의 10~20%에 지나지 않았다(Table 2). 함수율 30%의 양질사토층 및 사양토층 시료들 역시 수분의 상변화 구간을 제외하면 신속하게 가열됨을 알 수 있다(Fig. 3).

마이크로파로 가열한 토양시료를 냉각시킨 후 관찰해본 결과 토양시료 내부에서 일부가 용융되어 뭉쳐져있는 구체 덩어리를 발견하였으며, 양질사토층의 용융점을 고려해 볼 때, 일부 영역에서는 1,000°C 이상 가열된 것으로 추측된다(Fig. 4). 위의 결과들은 마이크로파 오븐을 이용하여 단시간에 많은 에너지를 토양시료에 집중시킬 수 있으며 이는 토양을 용융시킬 수 있을 정도라는 것을 보여준다. 이러한 에너지를 효율적으로 배분하면 적은 에너지를 활용하여 효과적인 열탈착을 달성할 수 있을 것으로 사료된다.

3.3. 토양시료의 위치별 가열 특성

토양시료의 위치별 가열 특성을 고찰하기 위하여 전기로와 마이크로파 오븐을 이용하여 토양시료를 10분간 가열한 직후 반응기 외부에서 9개 지점의 온도를 측정하였다. Fig. 5는 건조한 양질사토층과 사양토층을 전기로와 마이크로파 오븐을 이용하여 10분간 가열한 후의 온도분포를 보여준다.

전기로를 이용하여 양질사토층 가열시 측정된 9개 지점의 평균 온도는 $23.5 \pm 8.8^\circ\text{C}$ 이며, 토양시료들은 바깥 부분이 안쪽 보다 높은 온도 분포를 보였다. 마이크로파 오븐을 이용한 가열 시에는 측정된 9개 지점의 평균 온도는

Table 2. Required time(min) to heating soil samples above 150°C with furnace and microwave oven. (unit : minutes)

Heating method	Paju loamy sand		Paju sandy loam	
	0% MC	10% MC	0% MC	10% MC
Furnace	42.5	89.8	63.2	105.6
Microwave oven	3.9	17.8	12.0	14.9

where MC = moisture content

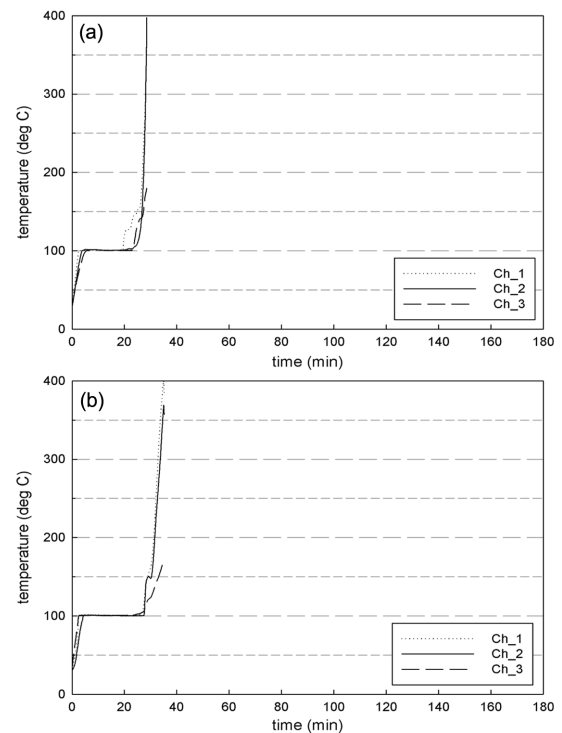


Fig. 3. Temperature-time profiles of (a) Paju loamy sand(30% moisture content) and (b) Paju sandy loam layer(30% moisture content) using microwave oven.

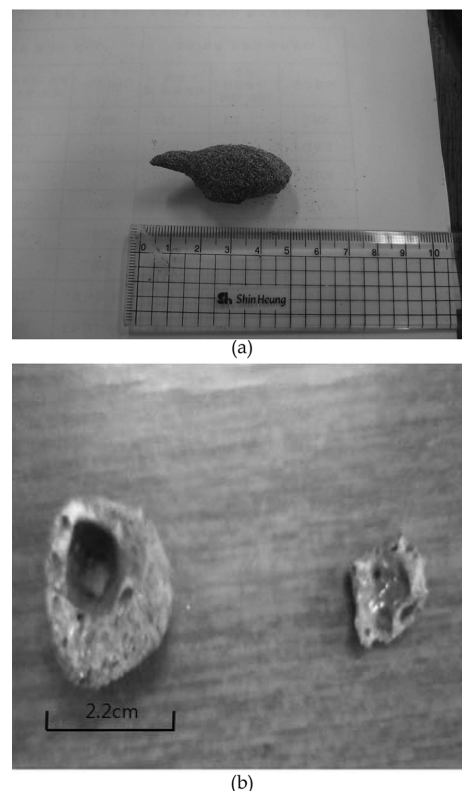


Fig. 4. (a) Paju sandy loam aggregate after microwave oven heating and (b) cross sections of Paju sandy loam aggregate.

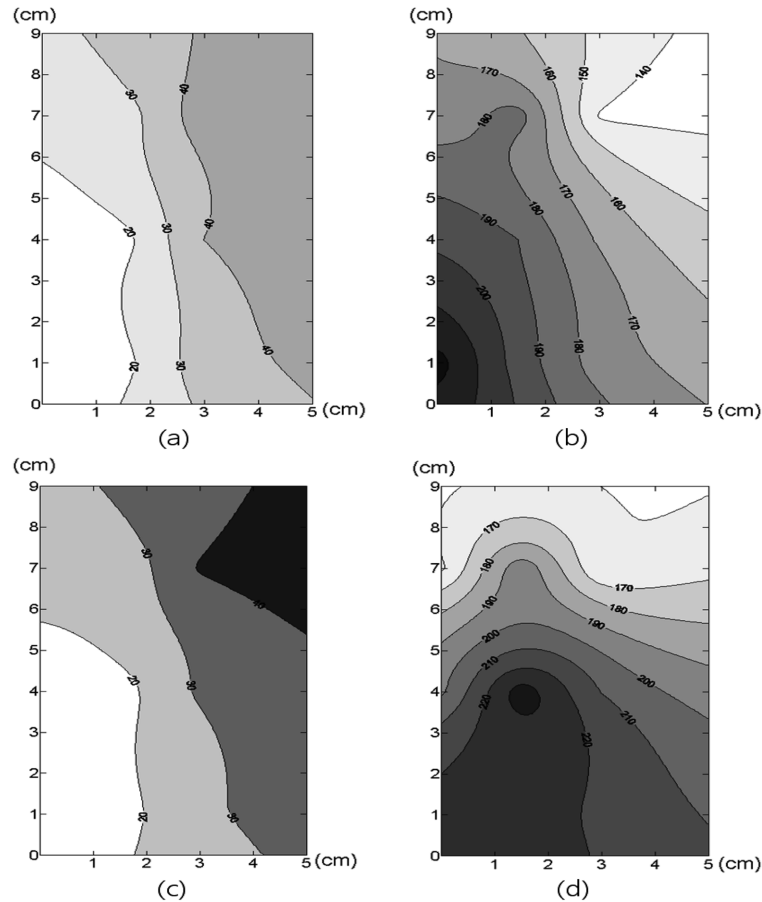


Fig. 5. Temperature distribution of (a) Paju loamy sand heated with furnace, (b) Paju loamy sand heated with microwave oven, (c) Paju sandy loam heated with furnace, and (d) Paju sandy loam heated with microwave oven. Each soil sample was dried, and heated for 10minutes. The initial temperature of the soil bed was $10 \pm 3^\circ\text{C}$.

$182.9 \pm 23.5^\circ\text{C}$ 이며 전기로와 달리 안쪽 아래 부분이 다른 지점에 비해 높은 온도 분포를 보였다. 마이크로파를 이용하여 양질사토층을 10분간 가열시 양질사토층의 9개 지점 모두에서 뚜렷한 온도 상승이 나타나며, 최고 온도는 235.2°C , 최저 온도는 158.4°C 로 최고와 최저간에 76.8°C 의 차이가 있었다. 사양토층 시료에서도 9개 지점 모두에서 뚜렷한 온도 상승이 나타나며 10분간 가열하였을 시, 최고 온도는 223.8°C , 최저 온도는 138.9°C 였다. 반면에 가열로의 경우엔 양질사토층의 최고 온도가 45.6°C , 최저 온도는 12.4°C , 사양토층의 최고 온도가 40.9°C , 최저 온도 14.5°C 로 마이크로파로 가열한 것에 비해 훨씬 낮은 온도 분포를 나타내었다.

마이크로파에 의해 가열된 양질사토층의 개략적인 온도 분포 특성은 수직단면도인 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 시료의 바닥으로부터 7 cm, 4 cm, 1 cm 중에는 1 cm 부근의 온도가 높고, 수평적으로 중앙부의 온도가 비깍쪽 보다 높게 나타났다. 이러한 현상은 마이크로파의 공명현상으로

에너지가 안쪽 아래 부분에 집중되기 때문인 것으로 판단 된다.

가열을 위해 10분간 사용된 에너지는 각각 전기로는 205 Wh, 마이크로파 오븐은 200 Wh로서 유사하였으나, 양질사토층과 사양토층의 평균온도는 마이크로파 오븐으로 가열한 시료가 전기로를 이용하여 가열한 시료보다 각각 159.4°C , 177.3°C 높았다.

3.3.1. 함수율에 따른 토양시료의 가열 특성

수직단면도 Fig. 6은 10%의 함수율을 가진 토양시료에 대한 전기로와 마이크로파 오븐을 이용한 가열 결과를 나타낸다. 함수율이 증가함에 따라 물의 끓는점 이상으로 토양 온도를 상승시키는데 보다 많은 에너지가 소요되지만, 가열시 토양시료의 온도는 보다 균일한 분포를 보인다. 마이크로파 오븐을 이용하여 10분간 가열시 양질사토층의 9개 지점 평균적인 온도는 $109.1^\circ\text{C} \pm 8.6^\circ\text{C}$ 로서 건조한 시료에 비해 약 73.8°C 낮은 분포를 보이며, 사양토층은

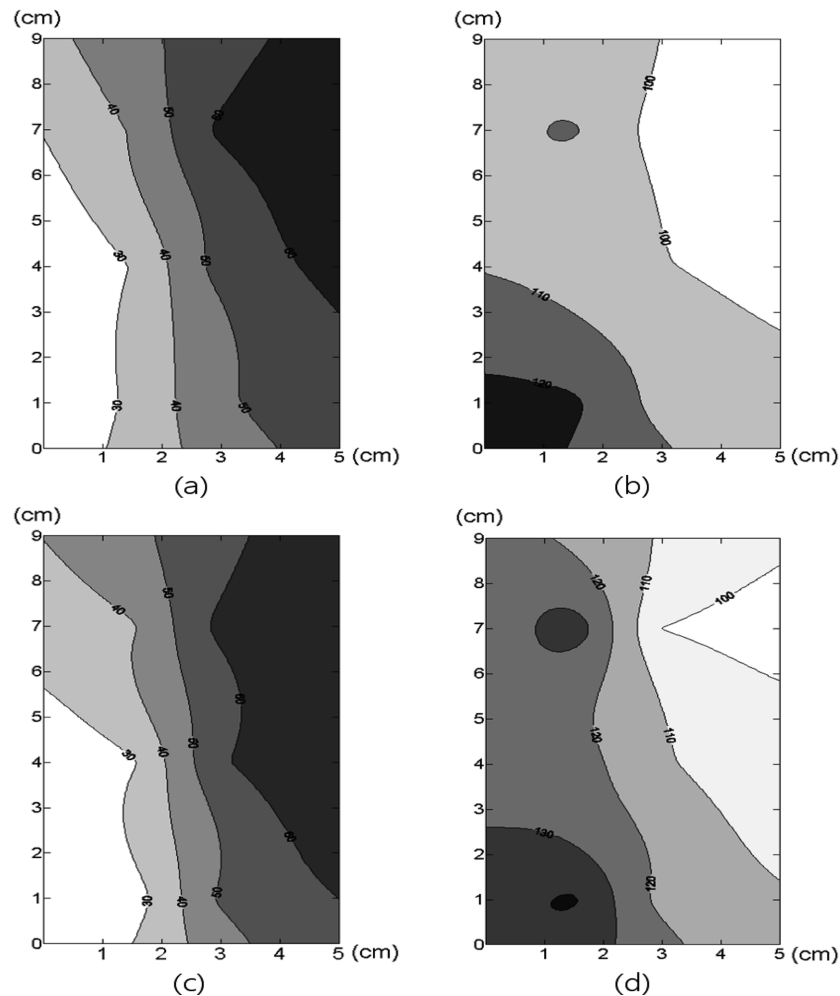


Fig. 6. Temperature distribution of (a) Paju loamy sand heated with furnace, (b) Paju loamy sand heated with microwave oven, (c) Paju sandy loam heated with furnace, and (d) Paju sandy loam heated with microwave oven. Each soil sample has 10% of moisture content. Each soil sample was heated for 10 minutes. The initial temperature of the soil bed was $10 \pm 3^\circ\text{C}$.

$123.3^\circ \pm 13.2^\circ\text{C}$ 로서 건조한 시료에 비해 약 79.9°C 낮은 분포를 보인다. 이는 물의 상변화에 에너지가 사용되기 때문이다. 한편 전기로를 이용하여 10분간 토양 가열시 토양층은 건조한 시료의 가열특성과 유사한 변화 특성을 보인다.

3.3.2. 유기물 함량에 따른 토양시료의 가열 특성

유기물의 양에 따른 토양의 가열 특성을 고찰하기 위하여 토양시료에 대표적인 토양 유기물인 휴믹산을 추가하고 골고루 혼합한 후 동일한 요령으로 실험하였다. 수직단면도 Fig. 7은 약 45 g의 휴믹산(humic acid)을 900 g의 토양시료에 추가한 후 가열한 결과를 나타낸다.

휴믹산을 토양시료에 추가하고 동일한 시간 동안 동일한 에너지를 사용하여 가열하였을 때 토양의 온도는 휴믹

산을 추가하지 않은 시료와 표준편차 범위 내에서 유사하였다. 하지만, 휴믹산의 추가는 토양만을 가열할 때와는 다른 가열 특성을 나타낸다. 순수 토양 만을 가열할 때 가장 온도가 높은 지점은 안쪽 하부로서 바깥쪽과 비교하여 중심부일수록 온도 상승률이 높았다. 반면 휴믹산이 첨가되었을 때는 토양의 바깥쪽에서도 안쪽과 유사하게 온도가 높게 나타났다. 이는 조사되는 마이크로파가 토양 시료에 있는 탄소와 반응하여 토양 온도가 상승하기 때문인 것으로 판단된다. 그러므로 탄소물질들의 적절한 배치는 마이크로파 가열시 hot spot 문제를 해결할 수 있는 하나의 방안이 될 수 있다.

3.4. 유류로 오염된 토양의 탈착 특성

수직단면도 Fig. 8은 유류로 오염된 토양을 마이크로파

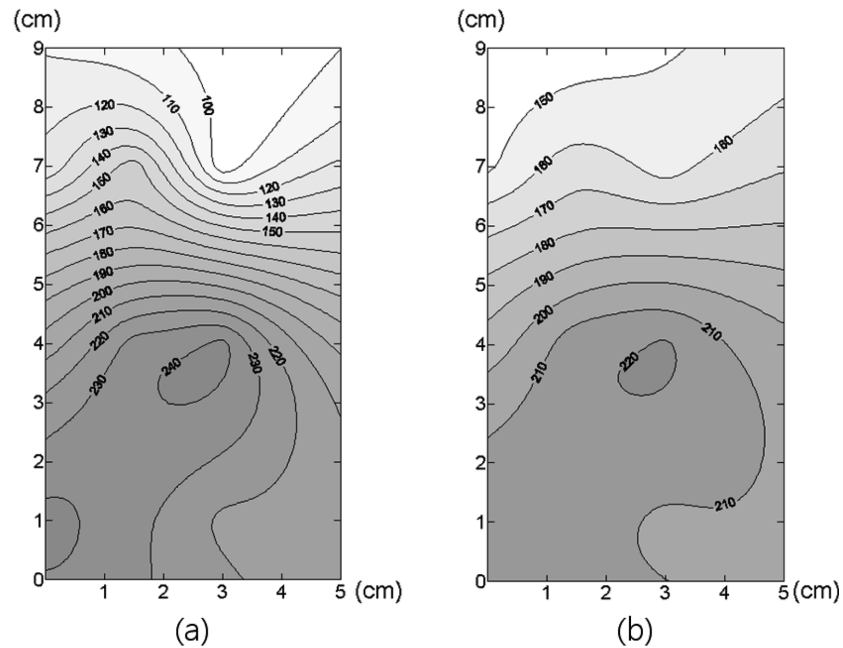


Fig. 7. Temperature distribution of (a) Paju loamy sand heated with microwave oven, (b) Paju sandy loam heated with microwave oven. Each soil sample has about 5% of humic acid content. Each soil sample was heated for 10 minutes. The initial temperature of the soil bed was $10 \pm 3^\circ\text{C}$.

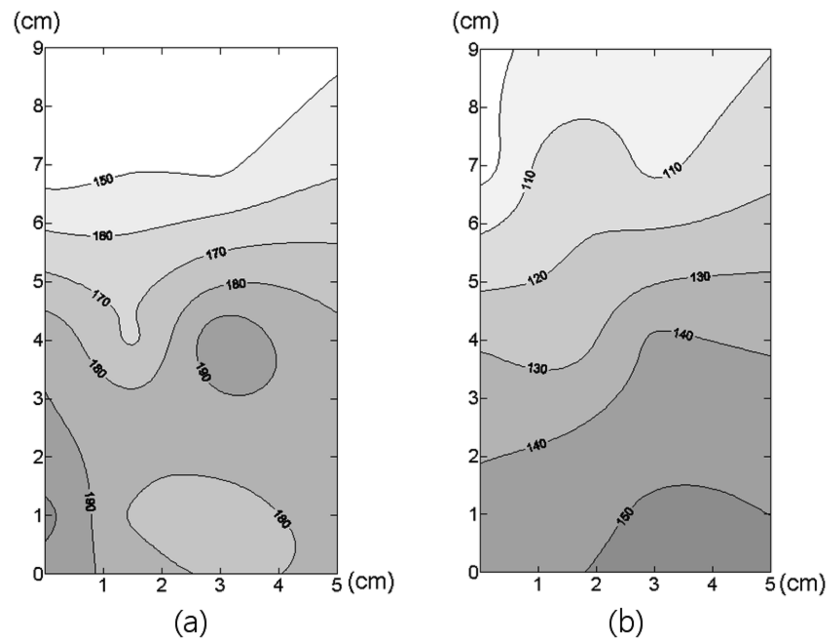


Fig. 8. Temperature distribution of (a) TPH contaminated Paju loamy sand and (b) contaminated Paju sandy loam layer heated with microwave oven for 10 minutes. The initial temperature of the soil bed was $10 \pm 3^\circ\text{C}$.

오븐을 이용하여 10분간 가열한 특성을 나타낸다. 오염토양의 온도분포는 오염되지 않은 토양, 5% 휴믹산을 추가한 토양과 비교하여 낮은 온도분포를 보였다. 유류로 오

염된 토양의 수분은 양질사토층과 사양토층이 각각 1.3%, 5.3%이다. 오염되지 않은 양질사토층과 사양토층의 유기물 함량은 각각 0.4%와 1.4%로서 유류 오염에 기인한

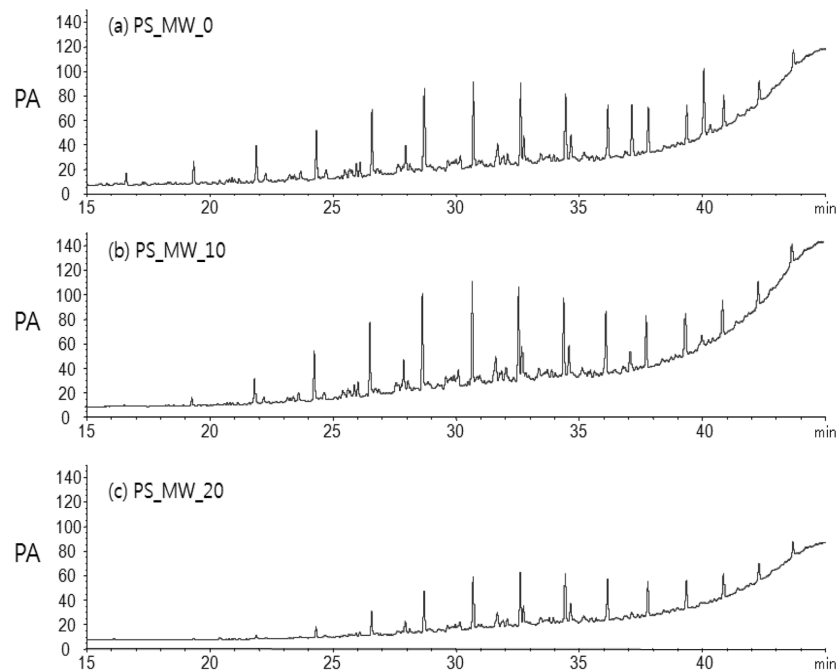


Fig. 9. Total petroleum hydrocarbon extracted from (a) diesel contaminated Paju loamy sand, (b) heated (a) for 10 minutes, and (c) heated (b) for 20 minutes by microwave oven.

유기물은 각각 2.6%, 10.8%이다. 특히 사양토층의 많은 수분함량은 온도 상승을 지연시켰으며, 추가된 약 10%의 TPH는 마이크로파 오븐을 이용하여 가열시 토양온도를 상승시키는데 기여하였으나 그 정도는 미미하였다.

마이크로파를 이용한 오염토양의 가열에 따른 TPH의 제거는 오염토양을 마이크로파 오븐을 이용하여 10분간 가열하고 TPH 추출을 위한 시료를 채취 후 추가적으로 20분간 가열하였다. 가열된 토양시료들은 냉각 후 용매를 이용하여 추출하고, GC-FID를 이용하여 분석하였다(Fig. 9). 마이크로파 오븐을 이용하여 10분, 그리고 20분 가열 시 TPH 제거 효율은 양질사토층에서 24%, 50%, 사양토층에서 16%, 24%로서 양질사토층에서 효율이 높게 나타났다. Fig. 9에서 오염토양을 가열함에 따라 분자량이 적은 가벼운 오염물질들은 분자량이 큰 오염물질들에 비하여 빨리 제거되지만, 30분 가열 후에도 잔류된 TPH가 존재하였다. 오염된 사양토층은 양질사토층에 비하여 단위 질량당 많은 오염물질의 양을 포함하고 있으며, 마이크로파 가열을 이용한 TPH 오염물질 제거효율도 양질사토층에 비해 낮았다. 이는 입자 크기가 작고 유기물 함량이 높은 사양토층에서 TPH와의 강한 흡착으로 제거 효율이 낮은 것으로 판단된다. 전반적으로 마이크로파 오븐을 이용한 가열은 TPH 제거 효율면에서 로타리킬른 방식을 이용한 직접가열식(민형식 외, 2009)으로 200°C에서 10분

동안 처리한 효율보다 낮았으며, 반응조 디자인이 다른 것이 그 주요한 원인으로 판단된다. 따라서 유기오염물질을 효과적으로 제거하기 위해서는 토양 가열 뿐만 아니라 교반을 통하여 오염물질 제거의 효율을 높이는 메커니즘이 요구된다. 마이크로파를 로타리킬른 반응조에 적용하여 오염물질 제거 효율을 높이는 시도가 필요하다.

4. 결 론

다양한 유기물질로 오염된 토양을 신속하게 정화하기 위한 열탈착 공법의 단점인 에너지 효율성을 향상시키기 위해 마이크로파 오븐을 이용한 토양가열 특성에 대해 고찰하였다. 양질사토층과 사양토층 시료들의 함수율 변화에 따른 가열과 휴믹산을 추가하였을 때 가열 특성들을 전기로와 마이크로파 오븐을 이용하여 고찰하고, 그 에너지 효율을 비교하였다.

마이크로파를 이용한 가열은 전기로를 이용한 가열과 비교하여 에너지 효율적이며 가열 속도가 빨랐다. 또한 전기로를 이용한 가열이 토양시료의 비깅쪽에서부터 안쪽으로 전도를 통해 이루어지는데 반해, 마이크로파를 이용한 가열은 토양시료를 균등하게 가열하면서 파장이 중첩되는 특정 지점은 더 가열되는 특성을 나타낸다.

마이크로파 오븐을 이용한 토양 가열시 에너지가 집중

되는 안쪽 하부의 온도가 가장 빨리 상승되었으며, 토양의 함수율이 증가할 때에는 물의 증발로 토양 온도의 상승률은 감소하지만 보다 균질하게 가열되는 특징을 나타낸다. 토양유기물 함량(< 5%)과 소량의 TPH는 마이크로파를 이용한 토양가열에 미치는 효과가 미미하였다. 그러나 토양유기물은 마이크로파 에너지를 흡수하여 국지적으로 토양온도를 상승시켰다. 따라서 마이크로파를 이용한 토양 복원 방법은 군부대와 같이 유류, 솔벤트류 등의 유기오염물질에 의한 오염의 정도가 심한 토양에 적용이 가능한 경제적이고 효율적인 방법 중의 하나가 될 수 있다. 마이크로파를 이용한 현장 오염토양의 정화를 위해 다양한 오염토양을 대상으로 파일럿 규모의 테스트가 요구된다.

사 사

이 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국과학기술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2007-331-D00232). 익명의 심사위원들에게도 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 문경환, 김우현, 김덕찬, 동종인, 1996, 마이크로파를 이용한 휘발성 유기물질에 오염된 토양의 처리, 화학공학의 이론과 응용, **2**(1), 641-644.
- 민형식, 양인호, 정상조, 김한승, 2009, 직접 가열식 열탈착 공정을 이용한 유류오염토양의 정화, 지하수토양환경, **14**(5), 62-70.
- 양지원, 이지원, 2007, 국내 오염토양 복원현황과 기술동향, Korean Chemical Engineering Research, **45**(4), 311-318.
- 염혜경, 하상안, 유미영, 김기열, 2006, 유류 오염토의 마이크로파 처리 시 최적조건 산정, 대한환경공학회 추계학술연구발표회 논문집, 강릉대학교, p. 620-626.
- 이병철, 문경환, 김효, 김덕찬, 1996, 마이크로파 가열에 의한 토양의 가열 특성과 오염유기물질의 제거 특성, 화학공학의 이론과 응용, **2**(2), 1963-1966.
- 정상조, 2010, 임진강변 퇴적층내 탄소물질들의 분포 및 특성 연구, 지하수토양환경, **15**(3), 34-43.
- 최호은, 신민정, 정병길, 최병혁, 안영희, 하상안, 성낙창, 2007, 마이크로파 조사강도에 따른 디젤오염토의 TPH 분해특성에 관한 연구, 대한상하수도학회 · 한국물환경학회 2007 공동 추계학술발표회 논문집, p. 968-972.
- 하상안, 염혜경, 유미영, 2006, 하수슬러지 케이크의 마이크로파 건조 후 재활용 연구, 유기물자원화, **14**(3), 77-84.
- 환경부, 2007, 오염토양 정화공법 가이드라인.
- FRTR, 2011, Federal Remediation Technologies Roundtable, <http://www.frtr.gov>, 2011.03.14
- Huang, G., Zhao, L., Dong, Y., and Zhang, Q., 2011, Remediation of soils contaminated with polychlorinated biphenyls by microwave irradiated manganese dioxide, *Journal of Hazardous Materials*, **186**, 128-132.
- Kawala, Z. and Atamanczuk, I., 1998, Microwave-enhanced thermal decontamination of soil, *Environ. Sci. Technol.*, **32**, 2602-2607.
- Liu, X., Quan, X., Bo, L., Chen, S., and Zhao, Y., 2004, Simultaneous pentachlorophenol decomposition and granular activated carbon regeneration assisted by microwave irradiation, *Carbon*, **42**, 415-422.
- Pickering, M., 2006, Hot stuff microwave heating, *Materials World*, **14**(6), 18-20.
- Roland, U., Buchenhorst, D., Holzer, F., and Kopinke, F.D., 2008, Engineering aspects of radio-wave heating for soil remediation and compatibility with biodegradation, *Environ. Sci. Technol.*, **42**, 1232-1237.
- Schmidt, R., Gudbjerg, J., Sonnenborg, T.O., and Jensen, K.H., 2002, Removal of NAPLs from the unsaturated zone using steam: Prevention of downward migration by injecting mixtures of steam and air, *J. Contam. Hydrol.*, **55**, 233-260.
- Thostenson, E.T. and Chou, T.W., 1999, Microwave processing: fundamentals and applications, *Composites A*, **30**, 1055-1071.