大 韓 衛 生 學 會 誌
KOREAN J. SANITATION
Vol. 11, No. 2, 65~73 (1996)

마이크로파 가열에 의한 토양 유기오염물질 탈착특성

문경환 · 김덕찬*
고려대학교 병설 보건전문대학 환경위생과
*서울시립대학교 화학공학과

Desorption Characteristics of Volatile Organics Compounds in Soil by Microwave Heating

Kyong Whan Moon · Dok Chan Kim*
Department of Environmental Sanitation, Junior College of Allied Health Sciences, Korea University
*Department of Chemical Engineering, Seoul City University, Seoul, Korea

Abstract

The objective of this study is to investigate the removal efficiency of volitile organic compounds in soil, and the mechanism of desorption by bench scale microwave heating.

Silt soil used for experiment and was impregnated with toluene, tetrachloroethylene, o-xylene and p-dichlorobenzene and the microwave treatment was conducted in a modified domestic microwave oven : 2450MHz, 700W.

According to the results of the research, the removal efficiency was improved with increasing water contents and the soil temperature appeared to plateau period extending to 2 ~3minutes corresponds to the temperature a which steam distillation was expected.

The value of removal rate constant (k) were calculated on dry and moisty silt soil, respectively, which showed linear with increasing microwave heating time.

Therefore, addition of a certain amount of water to the contaminated soil can efficiently enhance the ability of the soil to absorb microwave energy and promote the evaporation of the volitile contaminants.

Keywords : Microwave, soil remediation, organic chemicals, removal rate constants.

Ⅰ. 서 론

토양오염의 정화대책으로는 생물학적 처리법과 토양증기추출법, 토양세정법등의 물리화학적 처리법, 그리고 열적처리법으로 크게 나눌 수 있으나 이러한 방법들은 몇 가지 단점을 가지고 있으므로 최근에는 UV (ultraviolet) ,햇빛, IR(Infrared), RF(Radio Frequency), 마이크로파 등의 비이온성 전자기 조사방식(non-ionizing electromagne -tic irradiation)을 이용한 연구들이 진행되고 있다.

이중 마이크로파 에너지를 특정한 유해물질의 처리에 이용하려는 시도가 이루어지고 있으며 pilot plant 규모와 실험실 규모의 연구들이 진행되고 있다.[1,2] 또한 이미 김[3] 등에 의해 고농도의 토양 유기오염물질의 제거에 마이크로파를 적용하여 높은 제거효율을 나타낸 것으로 보고된 바 있다.

토양 유기화합물 제거를 위한 마이크로파 가열방식은 피가열물이 발열체가 되는 내부가열방식으로 조사된 에너지가 피가열물에만 흡수되므로 열효율이 높고 피가열물을 선택적으로 가열할 수 있으며 장치를 소형화, 원격조정이 가능하도록 할 수 있을 뿐 아니라 현장(in-situ)에서도 적용가능하고 청정에너지를 이용하므로 2차 공해를 유발하지 않는 장점을 가지고 있다.

마이크로파는 파장이 센티미터 단위로 불리우는 전자파의 총칭으로 마이크로파를 구분하는 기준은 주파수가 100MHz이하로 종래의 open wire회로를 사용했을 때를 RF(Radio Frequency) 가열이라고 하며 주파수가 300MHz를 초과하여 3GHz까지, 종래의 open wire회로 사용이 불가능하고 파워가 도파관(wave guide)를 통하여야만 전달이 가능한 경우 이를 마이크로파 가열이라 한다.

종래 오븐의 가열원리는, 전도(conduction), 대류(convection), 복사(radiation)에 의하게 되나 마이크로파에 의한 가열원리는 유전가열(dielectric heating)로서 절연체를 양극판 사이에 넣고 가열시키는 방법으로 양극판에 마이크로파를 가하면 물질내부의 분자 및 이온들이 쌍극자 모멘트(dipole monent)를 갖게 되며 전극의 극성이 초당 10^6 ~ 10^{12}정도로 전환될 때 분자의 회전 때문에 마찰이 생겨 열이 발생되는 원리이다. 즉 마이크로파에 의한 열발생이론은 쌍극자가 급격히 변화하는 전기장에 놓여 있을 때 쌍극자의 마찰을 일으키는 쌍극자 배향(orientation)의 변화에 좌우되며[4] 물분자와 같이 영구 쌍극자 모멘트(permenent dipole moment)를 갖고 있는 물질은 쉽게 가열되나 쌍극자를 갖지 않는 물질의 경우에는 마이크로파 가열이 비 효율적이라고 알려져 있다.

본 연구에서는 일반적으로 널리 분포되어 있는 점토성 토양인 silt에 인위적인 오염물질을 투입한 후 마이크로파 가열에 따른 유기오염물질의 제거효율과 휘발특성을 검토하고 동력학적변수(kinetic parameter)들을 도출하여 제거 메카니즘을 규명하고자 하였다.

Ⅱ. 이 론

마이크로파에 의해 토양은 토양이 가진 손실계수와 전자기장(electromagnetic field)의 크기에 따라 열을 흡수하고 온도가 증가되게 되므로 토양내부의 온도는 Fourier 에너지 수지식(energy balance)에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q(x, y, z, t) \quad (1)$$

여기서 C_p는 비열(J/kg · K), ρ는 밀도(kg/m^3), T는 온도(K)를, k와 Q는 각각 열전도도(W/m · K)와 흡수된 열량(W/m^3)을 나타내며 좌변의 첫 번째 항은 내부에너지의 변화속도를 두 번째항은 전도에 의한 열 전달을 나타내며 우변은 전자기장에 의해 흡수된 에너지를 나타낸다. 흡수된 에너지는 종래의 가열방식에 의해서는 매질 전반에 걸쳐 균질하므로 국부적으로 열평형 단계(local thermal eqilibrium)에 도달되나 마이크로파 가열의 경우 조사된 파워가 매질내에 존재하는 기상, 액상, 고상중 한 상에 집중되게 되며 전자기장에 흡수된 에너지는 위치에 따라 변하게 되므로 Metaxas와 Meridith[5]등이 제안한 다음식에 의해 산출할 수 있다.

$$Q = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon'' E^2 \quad (2)$$

이식은 자기장에 의한 손실(magnetic loss)은 무시한 것으로 E는 전계강도(electric field intensity, V/m), f는 마이크로파 오븐의 주파수(2450MHz), ε_0는 자유공간에 있어서의 유전상수(dielectric constant), ε''은 피가열물의 손실계수(loss factor)를 나타내며 손실계수는 매질의

구성성분과 온도에 따라 변하게 된다.

마이크로파 가열에 따른 토양내 온도분포는 토양의 종류에 따른 열적, 전기적 특성의 차이로 변화하게 되므로 (1)(2)식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon'' E^2}{\rho C_p} \quad (3)$$

일정한 온도와 압력에서 휘발된 오염물의 양은 가해진 에너지에 의해 결정되며 휘발된 오염물의 양을 $\triangle m$, 가해진 에너지를 ΔI(J)로 할 때 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\triangle m = \frac{\triangle I}{\triangle h} \quad (4)$$

여기서 $\triangle h$는 오염물이 액상에서 기상으로 변할 때의 엔탈피(J/kg)를 나타내며 마이크로파에 의해 토양에 가해진 파워를 P(W) 라고 하면

$$\frac{\triangle m}{\triangle t} \rightarrow \frac{\partial m}{\partial t} = \frac{P}{\triangle h(T)} \quad (5)$$

와 같이 나타낼 수 있으며 (1)식에 (5)식을 첨가하면

$$\triangle h(T)\frac{\partial m}{\partial t} + \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - k\nabla^2 T = Q \quad (6)$$

(6)식과 같이 나타낼 수 있으며, $\triangle m$을 토양 단위부피당 제거된 오염물의 양(kg/m^3)으로 하여 ξ라고 하면 다음식과 같이 된다.

$$\triangle h(T)\frac{\partial \xi}{\partial t} + \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - k\nabla^2 T = Q \quad (7)$$

여기서 흡수된 열량 Q는 평형상태를 유지하기 위해 오염물의 제거에 소모되게 되며, 토양 전부피를 통하여 흡수된 파워와 전장의 세기 E가 일정한 것으로 가정하면 $\partial T/\partial t$ = 0 가 되며 (7)식은

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = \frac{1}{\triangle h(T)}[Q + k\nabla^2 T] \quad (8)$$

(8)식으로 나타낼 수 있다. 즉 포화온도에 도달되게 되면 흡수된 파워는 모두 오염물의 제거에 사용되나 오염물이 모두 제거되게 되면 흡수된 파워는 토양의 가열에 사용되고 이때 토양의 온도는 토양이 가진 유전특성치에 의해 변하게 된다.

(8)식의 오염물의 제거속도를 오염물의 밀도로 나누면 다음식과 같이 토양내에 존재하는 오염물질의 제거속도를 알 수 있다.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{-1}{\rho_{contam}}\frac{\partial \xi}{\partial t} = \frac{-aX}{\triangle h} = -bX \quad (9)$$

여기서 X는 가열 후 토양내 남아있는 오염물의 부피분율, a, b는 비례상수로 (9)식의 해는

$$X(t) = X_0 e^{-b(t-t_{bp})} \quad (10)$$

(10)식과 같이 나타낼 수 있다.

여기서 X_0는 토양내 초기 오염물농도, t_{bp}은 끓는점에 도달되는데 걸린 시간을 나타낸다.

그러므로 (10)식으로부터 휘발성 유기화합물에 오염된 토양에서 오염물질 제거속도 상수를 결정하고 그에 따라 토양오염물질의 제거시간등을 예상할 수 있다.

Ⅲ. 실 험 방 법

1. 실험재료

실험에 사용된 토양시료는 북한산에서 수집하였으며 110℃ 건조기에서 48시간 건조하여 수분을 완전히 제거한 후 1mm눈의 체로 거른 입자만을 대상으로 입도(Cilas Granulometer 715, Alcatel, Germany)를 분석하였다. 한편 토양의 화학적 조성은 유도결합 플라즈마 분광광도계(Inductively Coupled Plasma, ICP, Optima 3000, Perkin Elmer)를 이용하였고 물리적인 특성은 KS F2308에 의하여 실험하였으며 분석결과는 Table 1.과 같다. 한편 실험에 사용된 토양은 USDA(U.S Department of Agriculture)와 USCS(Unified Soil Classification System)에 의한 분류방법에[6] 의해 실트(silt)로 분류되었다.

토양오염물질로는 산업체에서 널리 사용되고 있는

toluene, o-xylene, ethylbenzene등 유기용매류(organic solvents) 3종과 tetrachloroethylene, *p*-dichlorobenzene등 유기할로겐 화합물(organo-halogen compounds) 2종을 대상으로 하였으며 물리적 특성은 Table 2.과 같다

Table 1. *Chemial and physical properties of silt soil.*

Components		Particle size(㎛, %)	
SiO_2(%)	58.9	1.0<	4.2
Al_2O_3(%)	20.9	1.0~1.5	2.3
Fe_2O_3(%)	4.38	1.5~2.0	6.7
CaO(%)	0.72	2.0~3.0	1.9
Mg(%)	1.01	3.0~4.0	1.5
K_2O(%)	2.52	4.0~6.0	4.0
Na_2(%)	2.70	6~8.0	4.8
TiO_2(%)	1.04	8.0~12.0	7.3
Mn(ppm)	655	12.0~16.0	6.2
Zn(ppm)	113	16.0~24.0	13.4
Pb(ppm)		24.0~32.0	13.5
AS(ppm)		32.0~48.0	19.4
ignition loss(%)	6.84	48.0~64.0	5.0
		64.0~96.0	9.8

2. 실험장치

실험장치는 주파수 2450㎒, 최대출력 700W의 mode stirrer가 장착된 multimode 형태의 전자렌지(SAMSUNG RE-52N)를 사용하였고 전압조정기를 설치하여 항상 일정한 출력을 유지하도록 하였으며 마이크로파 가열에 따른 토양내 온도변화를 측정하기 위해 광학섬유 온도계(optical fiberview 6220ET,Williamson Co.)를 오븐상부에 장착하였다.

3. 실험방법

실험용 토양은 미리 200℃ 건조기에서 48시간 건조한 후 데시케이타에서 넣어 보관하였으며 건조기에서 건조된 토양은 비록 극히 미량의 결합수가 존재하는 경우라도 함수율 0%로 간주하였으며 함수율 0% 의 토양 시료

Table 2. *Physical properties of contaminants*

Item \ compounds	toluene	tetrachloroethylene	ethylbenzene	o-xylene	*p*-dichlorobenzene
molecular formular	$C_6H_5CH_3$	C_2Cl_4	C_8C_{10}	C_8H_{10}	$C_6H_4Cl_2$
molecular weight(g)	92.4	165.85	106.16	106.16	147.01
specific density(g/cm^3)	0.8669	1.6230	0.8672	0.8802	1.4580
melting point(℃)	-95	-22	-94.4	-225.23	53
boiling point(℃)	110.8	121	136.2	144.4	173.7
ignition point(℃)	4.4	-	24.0	32.2	65.6
vapor pressure(mmHg @20℃)	22	14	5	7	10(@55℃)
specific heat(cal/g.℃)	0.364(@10℃) 0.444(@12-99℃)	0.216(@20℃) 0.211(@24℃)	0.392(@0℃) 0.407(@30℃)	0.411(@30℃) 0.450(@39℃)	0.297(@53-99℃)
latent heat(cal/g.℃)	101.8	55.9	87.9	94.6	117.9
Log Kow	2.60	2.60	3.15		3.39

* : calculation data by Antonine equation (ln = a-b/(t+c), a,b,c : constant)
** : Kow : octanol-water partitioning coefficient

에 실제 토양의 함수율과 비슷한 조건을 유기하기 위해 물을 첨가하여 각각 10, 20%의 토양을 조제한 후 밀봉하여 24시간 보관하였다.

오염토양시료는 토양(silt) 일정량을 pyrex 용기에 넣고 오염물의 농도를 각각 50,000ppm이 되도록 조제하였으며 토양시료를 파워흡수가 가장 큰 오븐중앙에 놓고 일정시간 마이크로파를 조사하였다. 가열후 토양내에 잔류되는 오염물질은 일정량의 n-hexane을 주입하고 완전히 밀봉하여 50℃의 수욕상에서 50분간 초음파(Branson 5200, USA)로 추출하여 FID(Flame Ionization Detector)가 장착된 gas chromatograph(HP-5890A, USA)로 정량하였다.

Ⅳ. 결과 및 고찰

1. 유기화합물의 종류에 따른 휘발 특성

마이크로파를 이용하여 오염물질을 탈착시키기 위해 열은 두단계의 전환 프로세스(conversion process)에 의해 공급되게 되는데 첫 번째 단계는 전기장 에너지가 ordered kinetic 에너지로 전환되는 것이며 두 번째 단계는 전기에너지가 disordered kinetic 에너지로 전환되는 원리를 이용한 것이다.

Fig. 1은 토양내 유기오염물질의 제거효율을 나타낸 것으로 건조 토양의 경우는 약 240초간의 가열에 의해서 toluene, tetrachloroethylene, ethylbenzene, o-xylene, 1,4-dichlorobenzene이 각각 73.9, 64.8, 54.1, 50.7, 42.1%가 제거되었으나 10% 수분이 함유된 토양의 경우 210초에, 20% 수분이 함유된 경우에 150초만에 95% 이상이 제거되는 것을 알 수 있었다.

수분을 함유한 토양에 마이크로파를 조사하면 토양과 토양내 액상물질의 온도는 서로 다른 속도로 증가하게 되고 두 상간에는 열전도(heat conduction)현상이 발생되며 액상과 기상의 계면에는 국부적인 열평형(local thermodynamic equilibrium)이 존재하므로 증기분압은 Clausius Claypeyron 식에 의해 액상물질의 온도에 관계되게 된다. 즉 액상에 흡수된 에너지는 증발에 사용되며 증기와 공기분압의 합이 대기압보다 클 때 증기가 발생되게 된다. 그러나 흡수된 에너지 전부가 증발에 사용되어지는 것은 아니고 기상, 액상, 고상의 온도를 상승시키는데 일부는 사용되게 된다.[7]

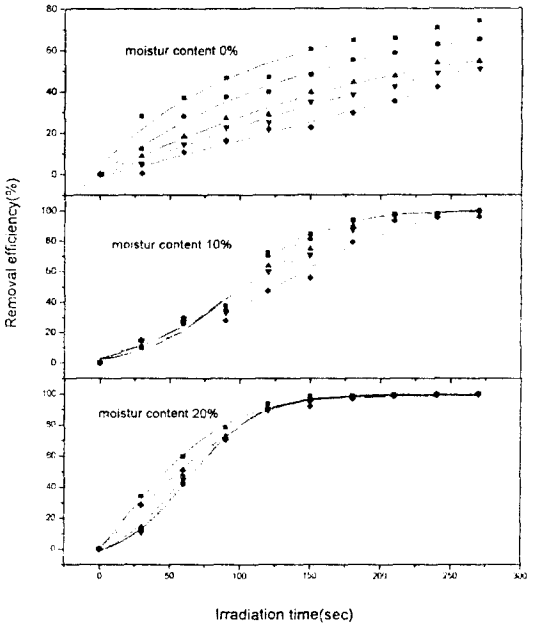

Fig.1. *Microwave heating time vs removal efficiency of silt*

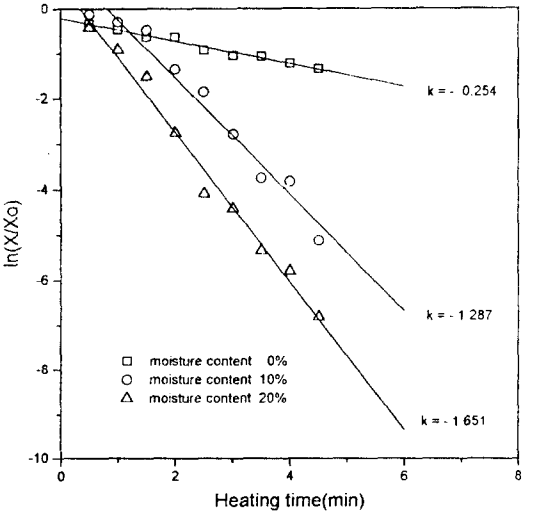

Fig.2. *Plots of ln(X/Xo) vs. microwave heating time for removal rate constant of toluene contaminated silt soil*

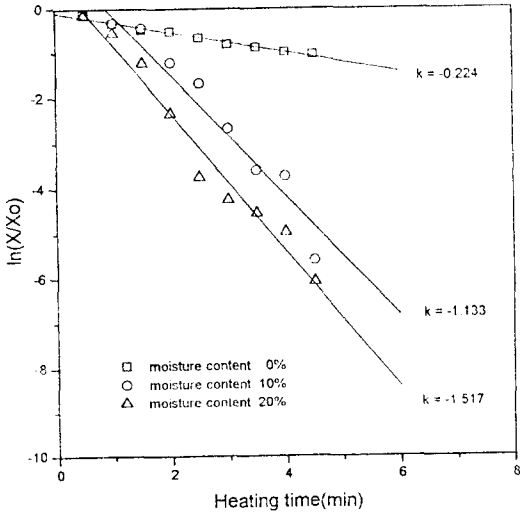

Fig.3. *Plots of in(X/Xo) vs. microwave heating time for removal rate constant of tetrachloroethylene contaminated silt soil*

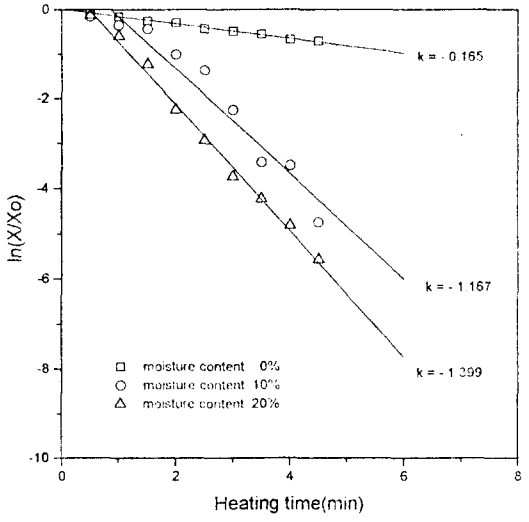

Fig.5. *Plots of in(X/Xo) vs. microwave heating time for removal rate constant k of o-xylene contaminated silt soil*

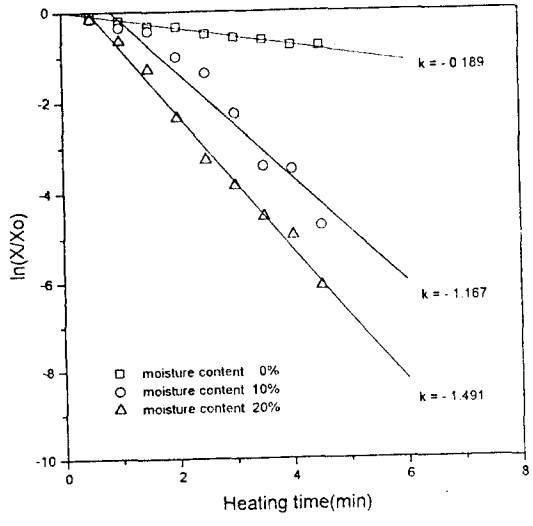

Fig.4. *Plots of in(X/Xo) vs. microwave heating time for removal rate constant k of ethylbenzene contaminated silt soil*

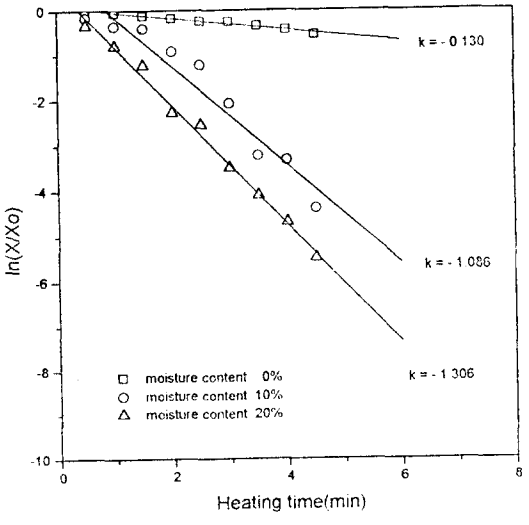

Fig.6. *Plots of in(X/Xo) vs. microwave heating time for removal rate constant k of p-dichlorobenzene contaminated silt soil*

토양과 같은 다공성매체에 있어서 액상물질의 증발은 끓는점 이하에서는 분자확산(molecular diffusion)에 의하나 끓는 점에 도달되면 공극내에 존재하는 공기가 공극으로부터 방출되고 공극은 증기로 가득차게 되어 내부증발에 의해 압력과 온도가 상승되므로 이때의 물질전달은 대류현상(convective flow)을 따르게 된다,

Fig. 2, 3, 4, 5, 6은 5종의 유기화합물질에 오염된 토양실험 결과를 식(10)에 적용하여 산출한 제거속도 상수를 나타낸 것으로 상관계수 r^2값이 전시료에 대해 0.93~0.99의 범위에 있었으므로 마이크로파를 이용한 토양 유기화합물의 제거를 1차속도식으로 생각할 수 있었으며 건조토양이나 수분이 각각 10%, 20% 함유된 토양 모두에서 실험대상 오염물질중 끓는점이 가장 높은 toluene의 제거속도상수 k값이 가장 높았으며 tetrachloroethylene, ethylbenzene, o-xylene, 1,4-dichlorobenzene의 순으로 k값이 감소됨을 알 수 있었다.

오염물질별 제거속도상수는 건조토양의 경우, k값이 0.254min^{-1}인 toluene과 0.130min^{-1}인1,4-dichlorobenzene의 경우 제거속도에서 약 2배가량의 차이를 나타냈으나 수분이 10% 함유된 경우에는 각각 1.287. 1.086으로 k값의 차가 크지 않음을 알 수 있었다.

한편 수분 함유량에 따른 제거속도 상수 k는 toluene, tetrachloroethylene의 경우 수분농도 10%에서 건조토양에 비해 5배가 증가하였으나 ethylbenzene, o-xylene, 1,4-dichlorobenzene은 수분첨가에 의해 k값이 약 10배가 증가되는 것으로 나타났다. 특히 증기압이 낮아 반휘발성 유기화합물(semi-volitile organic compounds)로 분류되는 *p*-dichlorobenzene(10mmHg @55℃)의 경우에도 수분이 함유된 경우에는 오염토양 매질에서 쉽게 제거될 수 있음을 확인하였으며 일정량의 수분농도까지는 제거효율이 급격히 증가하나 그 이상 함유된 수분은 제거속도 상수에 커다란 영향을 미치지 않을 것이라 생각되었다.

Fig. 7은 각 오염물질의 끓는 점에 따른 제거속도 상수 k_0를 나타낸 것으로 각 물질의 끓는 점이 높을수록 제거속도 상수가 선형적으로 감소함을 알 수 있었으며 일반적으로 토양의 함수율이 20~30%임을 고려할 때 유기화합물질에 오염된 토양의 처리에 마이크로파를 적용하면 부수적인 물의 첨가 없이도 높은 제거효율을 나타낼 수 있음을 확인하였다.

2. 마이크로파 가열에 따른 온도분포

마이크로파 가열에 따른 토양 유기오염물의 제거특성과 온도와의 관계를 파악하기 위해 토양 중심부의 온도를 측정한 결과는 Fig.8 과 같다.

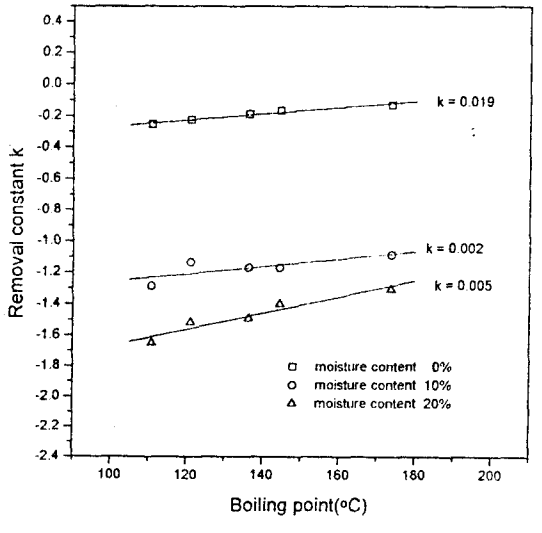

Fig.7. *Plots of removal rate constant k vs. boiling point of contaminated*

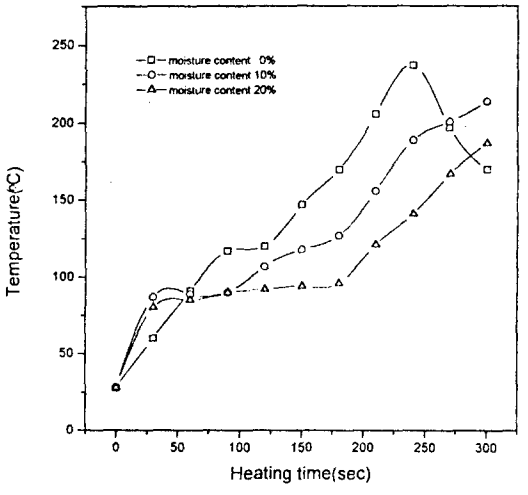

Fig.8. *Organic contaminants vapor migration heating curve of silt soil.*

Ohlsson[8]등은 마이크로파 가열시 시료의 온도는 중심이 가장 높고 표면으로 갈수록 감소하는 현상을 발견하고 이를 "core-heating effect"라고 하였으며 Chen과 Davis[9] 등은 마이크로파 가열에 따른 열의 이동은 중심으로 향하기 때문에 중심에서의 온도를 파악하는 것이 중요하다고 하였다.

건조 토양의 경우, 가열 60초경에 91℃ 까지 온도가 상승하였으며 가열시간이 증가함에 따라 일정하게 온도가 상승하였으나 240초가 경과된 후에는 다시 온도가 감소됨을 알 수 있었으며 수분이 각각 10%, 20%함유된 토양은 가열 30초만에 각각 87℃, 80℃까지 온도가 상승되었으며 약 90℃에서 일정시간 같은 온도를 유지하는 것을 알 수 있었다.

매체내에 비극성물질만이 존재할 경우 열 흡수용량은 토양이 가진 특성에 의해서만 상승되나 물과 같은 쌍극자물질이 공존할 경우 유전물질은 전기벡터(electric vector)의 빈도, 방향, 크기에 따라 회전, 진동하며 에너지가 발생되게 된다. 그러므로 매체내의 수분함량이 증가하면 유전상수가 증가하므로 모래나 토양등은 가열에 의해 온도가 급격히 상승하게 되며 증가된 내부 증기압력(internal gas pressure)으로 인해 "pumping effect"[10][11]현상이 나타나 물과 오염물은 빠른 시간동안 휘발되게 되며 휘발에 따른 에너지의 흡수로 온도는 거의 일정하게 유지된다.

그러므로 이 기간에 유기오염물질의 제거속도는 최대가 되며 Fig. 1의 결과와 일치하는 것을 알 수 있었다.

그러나 약 90℃정도로 일정시간 유지된 온도는 물과 유기오염물의 끓는 점을 고려할 때 훨씬 낮은 온도로 이 기간의 휘발특성은 수증기 증류(steam distillation)로 설명될 수 있다.

수증기 증류는 서로 혼합되지 않는 용매들이 가열될 때, 각 물질 분압의 합이 대기압과 같으면 기상으로 변환된다는 원리에 의한 것으로 오염물질은 끓는 점 보다 낮은 온도에서 증발되게 된다.

V. 결 론

점토성 토양인 silt에 toluene, tetrachloroethylene, ethylbenzene, o-xylene, 1,4-dichlorobenzene등 5종의 유기오염물질을 주입한 후 마이크로파를 조사하여 가열에 따른 제거효율과 온도에 따른 휘발특성등을 연구한 결과는 다음과 같다.

1. 건조 토양의 경우는 약 240초간의 가열로 5종의 유기화합물이 42.1~73.9%가 제거되었으나 10% 수분이 함유된 토양의 경우 210초에, 20% 수분이 함유된 경우에 150초만에 95% 이상이 제거되는 것을 확인하였다.
2. 오염물질별 제거속도상수 k는 건조토양에 있어서 휘발성이 비교적 강한 toluene이 0.254min^{-1}로 반휘발성 물질인 p-dichlorobenzene의 0.130min^{-1}에 비해 약 2배가 높게 나타났으나 수분이 10% 함유된 경우에는 각각 1.287. 1.086으로 k값의 차가 크지 않았다.
3. 수분 함유량에 따른 제거속도 상수 k는 toluene, tetrachloroethylene의 경우 수분농도 10%에서 건조토양에 비해 5배가 높았으나 ethylbenzene, o-xylene, p-dichlorobenzene은 수분첨가에 의해 k값이 약 10배가 증가되는 것을 알았다.
4. 오염물질의 증기압이 낮을수록 제거속도 상수는 선형적으로 감소되는 것을 알 수 있었다.
5. 토양에 수분이 존재할 경우 유기화합물은 수증기 증류(steam distillation)에 의해 각 물질의 끓는 점보다 훨씬 낮은 온도에서 제거되는 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Oda, S.J. : Microwave Remediation of Hazardous Waste : A Review in Microwave Processing of Materials Ⅳ Edited by M. F. Iskander, Mater. Res. Soc. Symp, Proc. 347, 371-382, 1994.
2. Suzuki, J. : A Microwave Burning Processor for Waste Disposal, J. Microwave Power and Electromagnetic Energy, 25(3), 168-176, 1990.
3. 김덕찬, 문경환, 김우현, 동종인. : 마이크로파를 이용한 휘발성 유기물질에 오염된 토양의 처리", 화학공학의 이론과 응용, 2(1), 641-644, 1996.
4. 이수경. : 초고주파 에너지를 이용한 냉동건조에 관한 연구, 서울대학교 공학박사학위 논문, 1988.
5. Metaxas, A. C., and R. J. Meridith. : Industrial

Microwave Heating, London , Peter Peregrinus, 1983.
6. Fuller,W.H. : Investigation of landfill leachte pollutant attenuation by soil. ,EPA-600/2-78-158, U.S Enviromental Protection Agency,Cincinnati, OH, 1978
7. R. M, Perkin. : The heat and mass transfer characteristics of boiling point drying using radio frequency and microwave electromagnetic fields, Int.J. Heat Mass Transfer, 23, 687-695, 1980
8. Ohlsson, T., and P.O. Risman. : J. Micro. Power, 13, 303-309, 1978.
9. Chen Kou Wei and H. T. Davis. : Heat and Mass Transfer in Water-Laden Sandstone : Microwave Heating., AIChe Journal, 31(5), 842-848, 1983.
10. Lefeuvre, P. S., Mangin, B. and Rezvan, Y. : Industrial Material Drying by Microwave and Hot Air. Proc. IMPI Microwave Power Symposium, 65-67, 1978.
11. Turner,I.W. and Jolly,P.G. : Combined microwave and convective drying of a consolidated wet porous material, 1990.