

유류오염토의 마이크로파 처리 시 토양의 함수율 변화에 따른 BTEX 제거특성에 관한 연구

하상안* · 염혜경 · 유미영
신라대학교 환경공학과

A Study on BTEX Removal Efficiency for Variation of Moistures by Microwave Process

Sang An Ha* · Hae Kyong Yeom · Mi Yong Yu
Department of Environmental Engineering, Silla univervisty

ABSTRACT

This study has been focused on an application of microwave pre-treatment of soil contaminated with volatile organic chemicals, and BTEX(benzene, toluene, ethylene, xylene). Microwave experiments were carried out under different power conditions (2 kW, 4 kW) using different moisture contents and BTEX concentration. According to these results of this study, the most BTEX removal efficiency was with 20% moisture contents regardless of electric power. The result show that 2kW was determined to the optimum electric power at 10~30% moisture contents, but the optimum power was 4 kW at 50% of moisture content.

Key words : Microwave, BTEX, Electric power

요 약 문

토양복원의 기술로 마이크로파를 이용할 시 휘발성물질((PAH)s 등) 및 준휘발성((PCB)s 등) 물질 등을 처리하는데 효과적인 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 휘발성 물질인 BTEX를 마이크로파를 이용하여 수분변화 및 전력변화에 따른 제거특성을 연구하였다. 10%, 20%, 30%, 50%의 함수율 변화에 따른 BTEX 제거율은 20%일 때가 제거율이 가장 높음을 제거상수를 통해 도출할 수 있었으며, 전력의 변화에 따른 BTEX 제거율 및 제거율에 도달하는 시간은 비슷한 것으로 나타났다. 각각 다른 함수율이 마이크로파 처리 시 한계함수율에 도달하는 시간을 측정 한 결과, 한계함수율에 도달하는 시간은 함수율이 10%, 20%, 30%일 때는 2 kW와 4 kW는 큰 차이가 없음을 알 수 있었고, 함수율이 50%일 경우는 한계함수율에 도달하는 시간이 4kW가 더 빠른 것으로 나타났다. 수분함수율에 따른 최적 전력을 도출하면 수분함량이 10~30% 시 2 kW가 경제적으로 나타났으며, 함수율이 50% 일 경우는 전력이 4 kW일 때 경제적인 것으로 나타났다.

주제어 : 마이크로파, BTEX, 전력

1. 서 론

산업의 고도화와 함께 유기성 폐기물의 발생 및 유기성 용매의 사용량이 늘어남에 따라 토양 및 지하수 오염이

중요한 환경문제로 제기되고 있다. 2001년의 토양오염 및 지하수 정화 시장은 약 237억 달러 규모로 유류 오염지역의 복원사업은 선진국이나 개발도상국 모두에게 가장 큰 관심사 중 하나이다. 특히 유류오염의 경우는 주유소,

*Corresponding author : saha@silla.ac.kr

원고접수일 : 2006. 12. 29 게재승인일 : 2007. 4. 19
질의 및 토의 : 2007. 6. 30 까지

군부대 등에 많으며, 휘발유 등의 유류와 방향족 탄화수소계 용제들은 여러 지역에 많이 사용되고 있다. 석유의 80% 이상을 차지하고 있는 BTEX 화합물은 기술린과 항공기 연료, 용매제로 폭넓게 이용되고 있고 사용량 또한 증가하고 있다. 이러한 물질들은 최근 국내에서도 유류저장소와 석유관로, 사고로 인한 누출, 불법 폐기물 처리, 매립장의 침출수 유출 등으로 인한 토양, 지하수 오염물질로써 관심이 모아지고 있으며, 휘발성 유기오염물질로 발암 또는 잠재 발암 물질로 분류되어 있다. 따라서 이러한 물질은 사용하거나 저장하는 지역에서는 누출사고를 예방할 수 있는 시설의 관리가 중요하고 누출 되었을 때 즉각적인 오염여부를 확인하여 정화 대책을 강구하여야 한다.

토양오염의 정화대책으로는 생물학적 처리법과 토양중기 추출법, 토양세정법등의 물리 화학적 처리법과 열적처리법으로 나눌 수 있다. 이러한 방법들은 경제성과 처리면에서 단점을 가지고 있으며 최근에는 UV, 햇빛, 마이크로파 등의 비이온성 전자기 조사방법을 이용한 연구들이 진행되고 있다(Collin, 1985). 이 중 마이크로파를 이용하여 특정 유해물질의 처리에 이용하려는 시도가 이루어지고 있으며, pilot plant 규모와 실험실 규모의 연구들이 진행되고 있다(Suzuki, J. 1990). 또한 이미 고농도의 토양 유기오염물의 제거에 마이크로파를 적용하여 높은 제거율을 나타낸 것으로 보고된바 있고(김덕찬, 1996), 마이크로파를 이용하여 유기오염물의 휘발성을 연구한 바 있다(문경환, 1996).

유류에 오염된 토양을 처리하기 위한 마이크로파의 가열방식은 피 가열물이 발열체가 되는 내부가열방식으로 조사된 에너지가 피 가열물에만 흡수되므로 열효율이 높고, 선택적으로 가열할 수 있어 장치의 소형화가 가능할 뿐 아니라 현장(In-situ)에 적용이 가능하다는 장점이 있다.

본 논문에서는 국내 유류오염 토양의 함수율에 따른 마이크로파의 최적 운전조건을 연구하여 기초적인 데이터를 구축하고자 한다.

2. 실험재료 및 방법

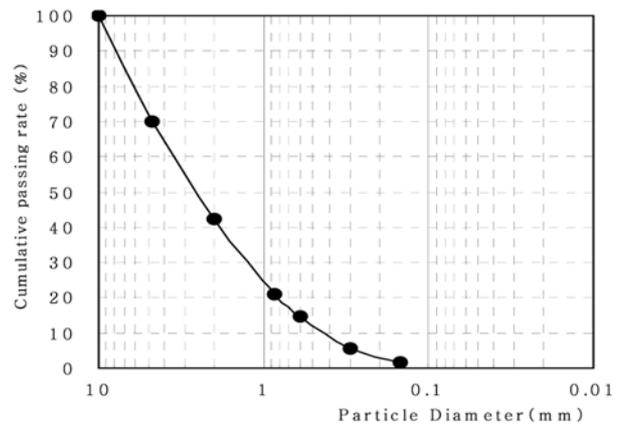
2.1. 실험재료 및 분석방법

본 실험에 사용한 토양은 OO유류 오염지역에서 BTEX 농도가 다른 두 종류의 토양을 임의로 채취하였으며, 오염도의 BTEX 농도에 따라 A, B로 분류하였고, 분류된 오염도의 특성은 Table 1에 나타났다. 토양의 분류는 표준 토양 분류법에 의거하였으며, 105~110°C의 건조기에서 4시간 이상 건조하여 수분을 완전히 제거한 후, 건조

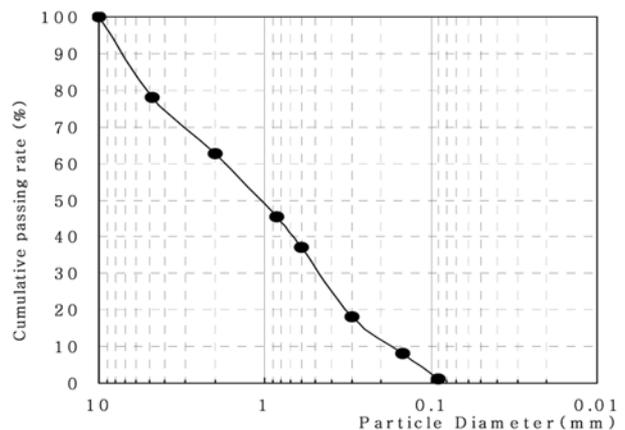
Table 1. Soil characteristics used in this study

Parameter	A	B
Uniformity coefficient	6.46	7.65
Coefficient of gradation	1.36	1.05
BTEX concentration (mg/kg)	10,013	5,005

균등계수 (Uniformity coefficient): 모래는 6이상, 자갈은 4이상, 4~5이내가 보통
 곡률계수 (Coefficient of gradation): 1~3이면 입경 균질, 1~3이하는 입도분포 불량



A) A sample



B) B Sample

Fig. 1. Cumulative passing curve.

시료를 체에 통과시켜 입도분석을 하였다.

입도분석을 토대로 Fig. 1의 누적곡선을 그렸으며, 이 곡선에서 균등계수와 균질계수를 계산하였다. 토양의 분류를 결정하는 균등계수의 경우 그 값이 6 이상이 될 경우 모래로 규정하고 있는데 A, B 시료의 균등계수는 6 이상으로, 토질의 분류 상 모래로 나타났다. 시료의 균일

Table 2. Operation condition of GC analysis

Conditions	Value
Oven temp. (°C)	50
Initial temp. (°C)	150
Detector temp. (°C)	310
Rate (°C/min)	50
Flow rate	50
Injection volume	1
Spilt ratio	10

Table 3. Experimental conditions of microwave process

Parameters	Conditions
Frequency (MHz)	2,450 MHz
Process	Batch test
Sample volume (kg)	1 kg
Ultrasonic power (kW)	2 kW, 4 kW

도를 나타내는 곡률계수는 A, B 시료 모두 1~3 사이로 나타나 입경이 균일한 것으로 나타났다.

BTEX 분석은 시료 20g에 일정량의 메탄올을 주입하여 15,000rpm에서 10분간 혼합 후 여과하여 GC-FID (Simazu-17A, Japan)로 분석하였으며 분석조건은 Table 2에 나타난 바와 같다.

2.2. 실험장치

마이크로파 파장의 범위는 300~300 GHz이며, 산업용으로 사용되는 파장은 보편적으로 2,450 MHz가 사용되며, 가열에 사용되는 주파수대는 13.56 MHz, 27.12 MHz, 433.9 MHz, 2,450 MHz 이다(Collin, 1985). 본 연구에서 사용한 마이크로파 장치의 조건은 Table 3에 나타났으며, 장치의 모식도 및 사진은 Fig. 2, 3에 나타냈다.

Fig. 2의 마이크로파의 Magnetron은 일정한 전력을 공급해주는 역할을 하고, 온도표시장치에서는 처리하는 동안 오염토의 온도를 나타낸다. 또한 온도표시장치 옆에 부착되어 있는 스위치는 1~4 kW까지 전력 조절이 가능하며, 크기는 가로×세로×높이가 800×460×737 mm로 제작하였다.

2.2. 실험방법

BTEX 농도가 다른 A, B 시료를 함수율 50, 30, 20, 10%로 조제한 후, 마이크로파 전력을 2 kW, 4 kW로 조사 시 함수율 변화 및 BTEX 제거특성을 실험하였다. 이 실험을 통하여 함수율 변화에 따른 특성과 마이크로파 처리 시 적절한 전력 도출이 가능하다.

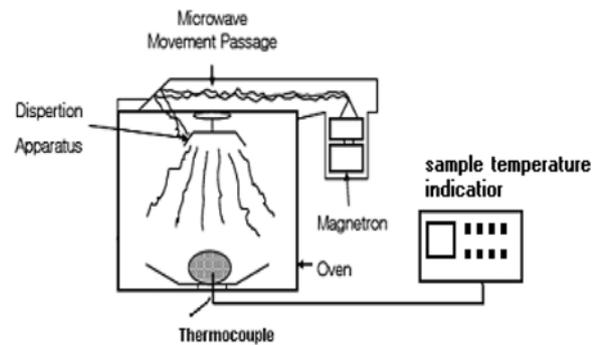


Fig. 2. Schematics of microwave process.



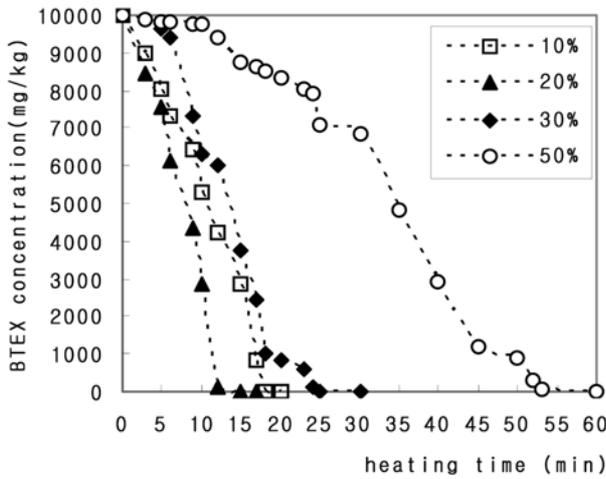
Fig. 3. Microwave process used in this study.

3. 결과 및 고찰

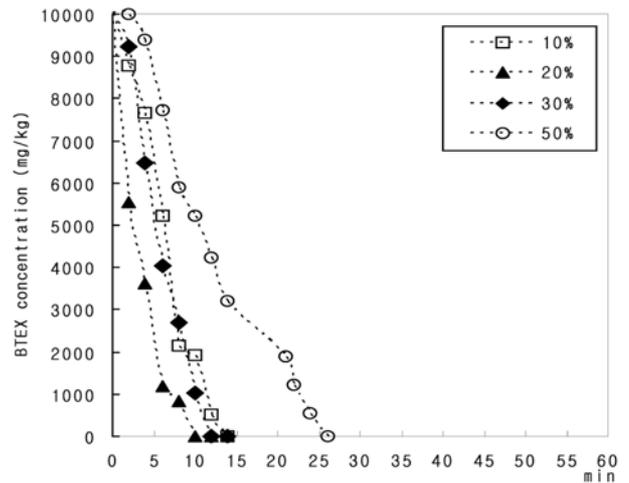
3.1. 전력 및 수분에 따른 BTEX 제거특성

함수율 변화에 따른 BTEX 농도변화 그래프는 Fig. 4와 Fig. 5에 나타냈다. Fig. 4와 Fig. 5에서도 알 수 있듯이, 전력이 2 kW, 4 kW로 변화되어도 A, B의 BTEX 제거되는데 소요 시간은 함수율이 20% 일때 약 10여분으로 가장 빠른 것으로 나타났다. 전력이 2 kW일 때 함수율이 10%인 오염토의 경우 A, B 시료 모두 15분만에 BTEX가 제거되는 것으로 나타났으며, 전력이 4 kW이고 오염토의 함수율이 10% 인 경우도 A, B 시료 모두 약 15분 만에 BTEX가 대부분 제거가 됨을 알 수 있다. 함수율이 30%, 전력이 2 kW 일때는 A, B 시료 모두 25분 만에 BTEX가 100% 가깝게 제거되었고, 4 kW 인 경우는 A, B 시료 모두 15분 내외에서 대부분 제거된다. 전력에 따른 BTEX 제거시간은 함수율이 10%, 20%, 30% 인 경우는 큰 차이를 보이지 않고 있다.

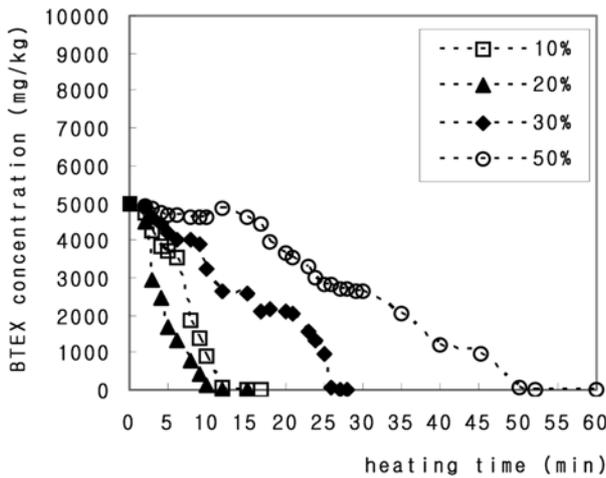
그러나 함수율이 50% 인 경우는 전력의 변화에 따른 제거시간이 차이를 보임을 알 수 있다. 마이크로파 전력이 4 kW, 함수율이 50% 인 경우 Fig. 5에 나타났듯이



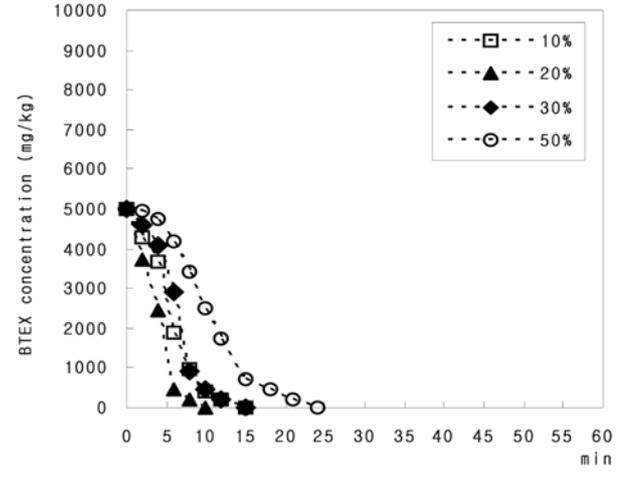
a) A sample



a) A sample



b) B sample



b) B sample

Fig. 4. Variation of BTEX concentration according to moisture at 2 kW.

BTEX가 제거되는 시간은 약 25분이 소요되나, 전력을 2kW로 운전 시는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 50분 이상이 소요되어 제거시간이 2배로 늘어나는 현상을 보인다.

3.2. BTEX 농도에 따른 함수율의 변화

Fig. 6과 Fig. 7은 마이크로파 전력을 2 kW, 4 kW로 주사 시 가열시간에 따른 수분변화를 나타낸 그래프이다. Fig. 6에 나타났듯이 전력이 2 kW, 함수율이 20%인 경우 시료 A, B의 한계함수율 도달 시간은 약 20분이 소요되었으며, 함수율이 30% 인 경우는 약 25분만에 한계 함수율에 도달함을 알 수 있다.

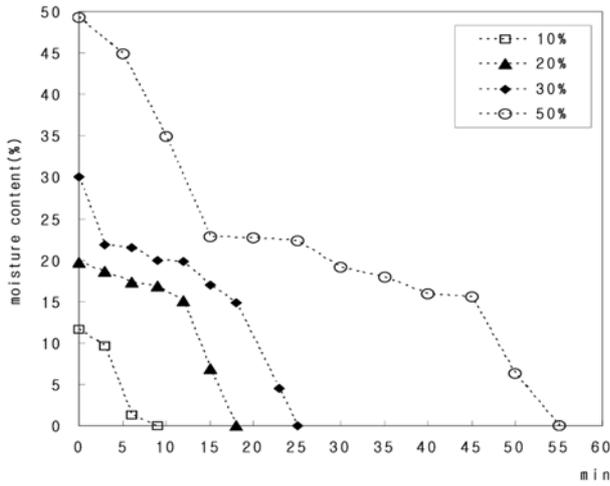
마이크로파 전력을 4kW로 운전 시 함수율 변화는 Fig

Fig. 5. Variation of BTEX concentration according to moisture at 4 kW.

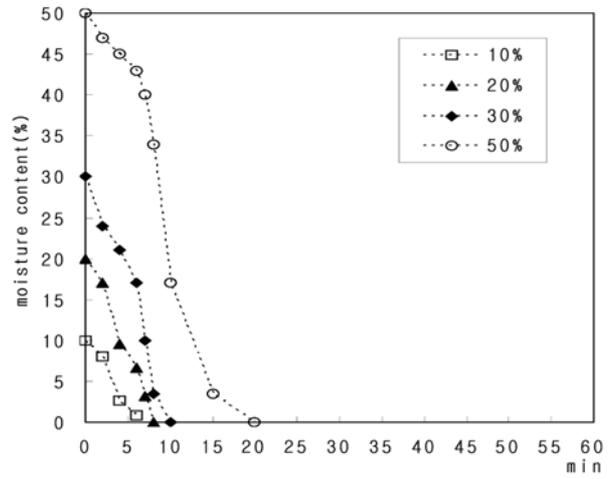
7에 나타났으며, 오염토의 함수율이 10%, 20%, 30% 시 가열시간이 10~15분 사이에 한계함수율에 도달하였고, 함수율이 50% 인 경우는 20여분만에 한계함수율에 도달함을 알 수 있다.

3.3 전력 및 함수율에 따른 온도특성

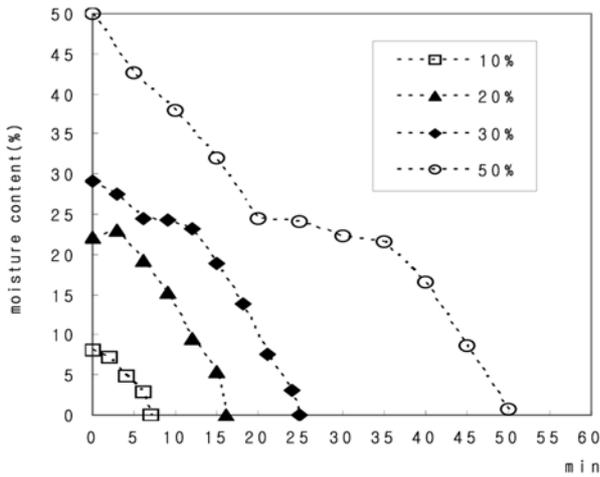
전력 및 함수율에 따른 온도 변화 그래프는 Fig. 8과 Fig. 9이며, 그래프에 나타났듯이 처음 5~10분 동안 급격하게 온다가 증가하다가 수분이 한계함수율에 도달하면 온도가 일정하게 되거나 낮아짐을 알 수 있다. 이런 현상은 마이크로파 건조의 특성 중 일정량의 수분이 존재할 경우, 토양 등 피가열 물질이 가열에 의해 온도가 급격히



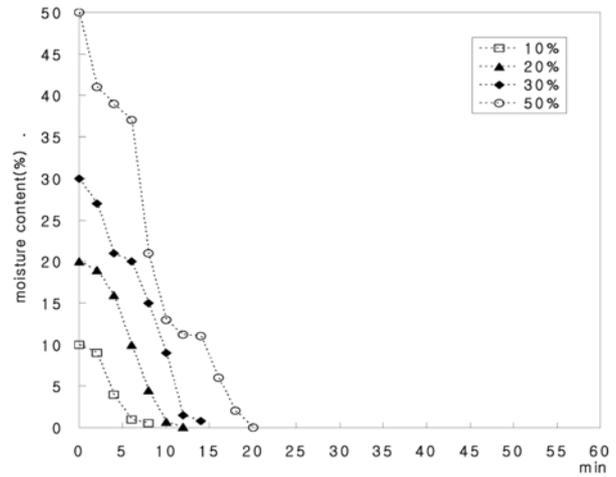
a) A sample



a) A sample



b) B sample



b) B sample

Fig. 6. Variation of different moisture content according to heating time at 2 kW.

Fig. 7. Variation of different moisture content according to heating time at 4 kW.

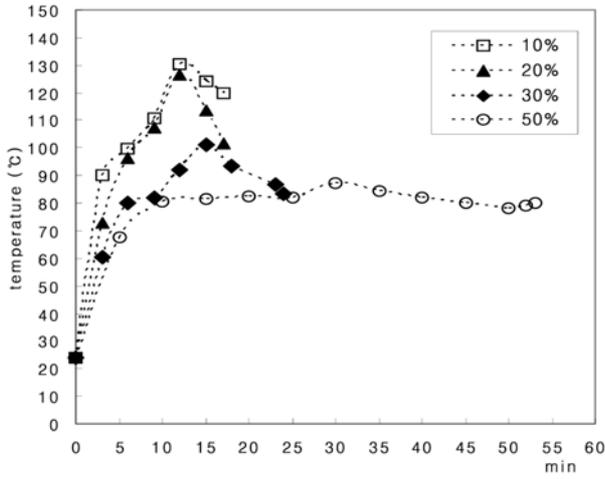
상승하게 되는 “pumping effect” 현상으로 인한 것이다(문경환, 1996). Fig. 8과 Fig. 9의 그래프에서도 pumping effect 현상을 보이고 있으며, 온도가 상승하다가 최고점에 이르르면 BTEX 농도는 거의 제로에 가까우며, 한계함수율에 도달한 시점이다. 또한 Fig. 8과 Fig. 9의 그래프의 온도범위는 비슷한 범위 내에 있는 것을 알 수 있다. 그러나 함수율이 50%인 경우는 전력변화에 따라 약간 다른 양상을 보이고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8에 나타난 바와 같이 전력이 2 kW인 경우, 함수율이 50% 시 10여분 정도 80°C까지 상승하다가 일정하게 유지되는 현상을 보이는 반면, 4kW로 처리하는 오염토의 온도는 꾸준히 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이

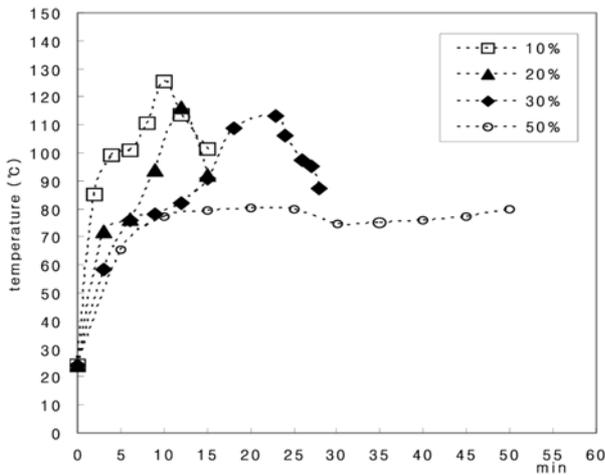
는 함수율이 50%인 경우는 전력변화에 따라 BTEX 제거 시간 및 한계함수율 도달시간이 차이가 있는 것과 연관이 있다. 함수율이 50%인 경우, 2 kW에 비해 4 kW가 오염토 내부수까지 열 전달속도가 빠른 것으로 것으로 판단된다.

3.4 제거상수 도출

전력이 4kW 일 때 시간에 따른 BTEX 농도변화를 그래프화하여 제거상수를 도출하였다. y축의 X_0 는 초기 BTEX 농도를 나타낸 것이며, X_t 는 t분 일때 BTEX 농도를 나타낸 것이다. Fig. 10의 R^2 값은 0.95 이상으로 나타나 상관관계가 높은 것으로 나타났으며, 함수율이



a) A sample



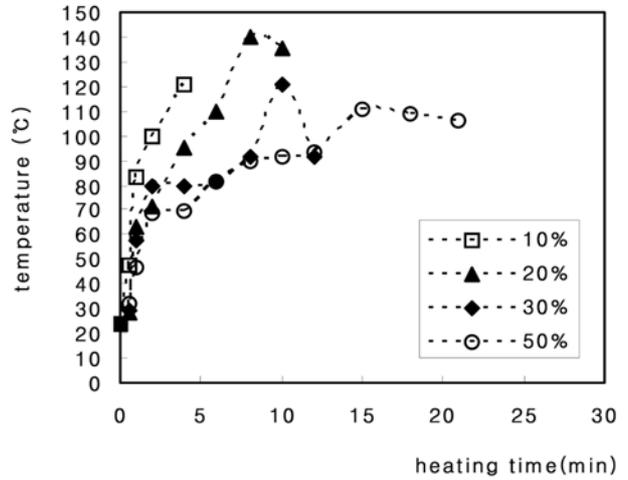
b) B sample

Fig. 8. Variation of temperature according to moisture content at 2 kW.

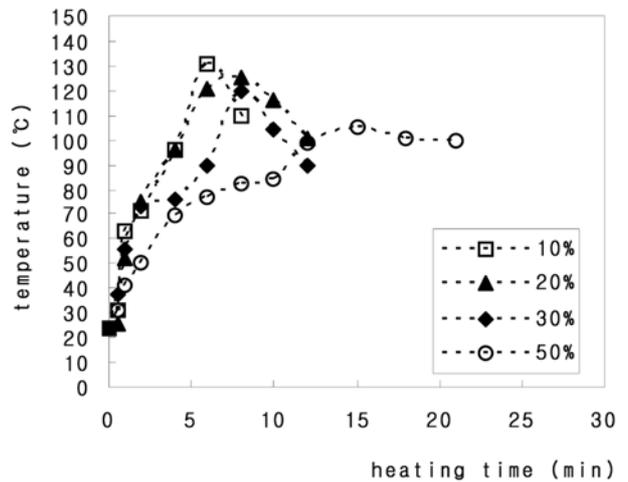
20%일 경우, A, B 제거 상수는 각각 0.3253 및 0.4218로 가장 높게 나타났다. 함수율이 10%와 30% 일 경우 제거상수는 30%가 약간 높은 값을 나타냈다. A, B시료에 따른 제거상수를 살펴보면, 농도가 높은 A시료의 제거상수가 더 높은 것으로 나타났는데 이는 A, B시료의 초기 BTEX가 차이남에도 불구하고, 제거되는 시간이 비슷하게 소요되어 상대적으로 BTEX 농도가 높은 A 시료의 제거상수가 높게 나타난 것이다.

3.5 마이크로파 전력의 효율성 평가

수분 및 전력에 따른 BTEX 제거율을 토대로 함수율 변화에 따른 최적 전력을 산출하였다. 수분함량이 10%, 20%, 30%인 경우, 2 kW와 4 kW의 BTEX 제거시간이



a) A sample



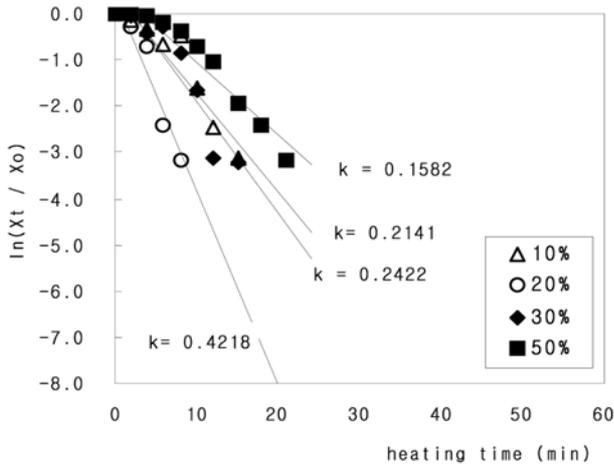
b) B sample

Fig. 9. Variation of temperature according to moisture content at 4 kW.

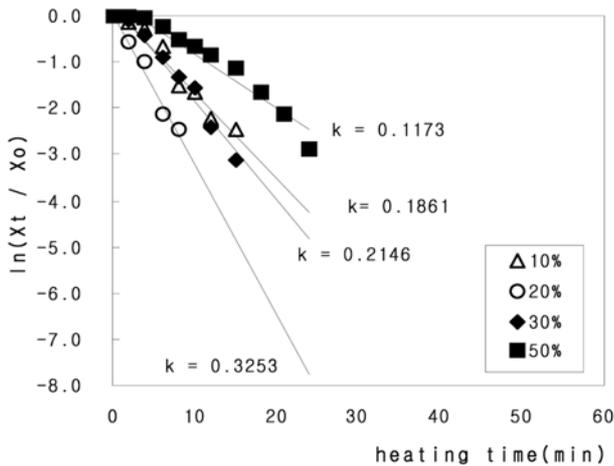
비슷한 것으로 나타나, 2 kW가 경제적으로 나타났다. 그러나 함수율이 50%인 경우는 전력이 2 kW에서 4 kW로 2배가 증가하고, 제거되는 시간은 약 2배 가까이 단축되어 전력비용은 비슷하게 소모되나, 단위시간 당 처리량을 고려한다면, 4 kW의 경우가 더 효율적임을 알 수 있다.

4. 결 론

마이크로파 전력에 상관없이 BTEX 제거율은 함수율이 20%인 경우 가장 효율적인 것으로 나타났으며, 함수율이 50%인 경우 BTEX 제거효율이 가장 낮게 나타났다. 이는 마이크로파 처리 시 20% 정도 일정한 수분이 존재 시 효율이 좋은 것을 나타내며, 과잉으로 많을 경우 오히려



a) A sample



b) B sample

Fig. 10. Removal constant as different moisture content.

효율이 감소됨을 알 수 있다.

함수율 변화 및 BTEX 농도변화의 그래프는 비슷한 경향을 나타내고 있으며, 이는 수분이 건조되면서 휘발성 물질인 BTEX가 같이 제거되는 것임을 알 수 있다.

마이크로파를 이용한 BTEX 오염토 처리 시 경제적인 운전조건은 함수율이 10%, 20%, 30%는 2 kW가 경제적이거나, 함수율이 50%인 경우는 2 kW와 4 kW가 비용면에서는 비슷하나, 단위시간당 처리량을 고려한다면 4 kW가 경제적임을 알 수 있다.

사 사

이 연구는 환경기술진흥원 사업인 “차세대 핵심환경기술개발사업”으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

문경환, 김덕찬, 1996, 마이크로파가열에 의한 토양 유기오염물질 탈착특성, *대한환경공학회*, 11(2) 66-72.

문경환, 김우현, 이병철, 김덕현, 1996, 마이크로파에 의한 휘발성 유기토양오염물질제거에 관한연구, *한국환경위생학회*, 2(3) 16-122.

토양환경공학, 향문사, 한국지하수토양환경학회, p.65-66.

Collin, R.E., 1985, *Foundations for Microwave Engineering*, McGraw-Hill, New York.

Datta, Ashim K., 1990, Heating and Mass Transfer in the Microwave Processing of Food. *Chemical Engineering Progress*, p. 47-53.

Peterson, K.W., Button, J.R., and Annett, D.A., 1986, Selected Applications in High Frequency and Microwave Heating, *An Economic Commentary, Radio Frequency Radiation Processing*.

Perkin, R.M., 1980, 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.

Suzuki, J., 1990, A Microwave Burning Processing for Waste Disposal, *J. Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 25(3) 168-176.

Tuner, I. and P. Jolly., 1988, The Effect of Dielectric Properties on Microwave Drying Kinetics. *J. Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 23(3), 211.