

# 마이크로파를 활용한 유류오염 토양 정화 기술

## Oil-contaminated soil remediation technology using indirect microwave



**고태훈 Tae-Hoon Koh**  
한국철도기술연구원  
첨단궤도토목본부  
궤도노반연구팀 책임연구원  
E-mail : thkoh@krri.re.kr



**유한주 Han-Ju Yoo**  
한국철도기술연구원  
첨단궤도토목본부  
궤도노반연구팀 연구원  
E-mail : kcdoc2@krri.re.kr



**이동근 Dong-Geun Lee**  
한국철도기술연구원  
첨단궤도토목본부  
궤도노반연구팀 연구원  
E-mail : dglee82@krri.re.kr



**강상준 Sang-Joon Kang**  
한국철도기술연구원  
첨단궤도토목본부  
궤도노반연구팀 연구원  
E-mail : kangsj1@krri.re.kr



**김창주 Chang-Ju Kim**  
한국철도기술연구원  
첨단궤도토목본부  
궤도노반연구팀 연구원  
E-mail : cjkim@krri.re.kr

### 1. 기술개발 배경

최근 지구환경과 생활환경에 대한 관심이 커지고 환경오염에 따른 폐해가 인식되면서 전 세계적으로 환경오염복원사업이 실시됨에 따라 관련 시장이 성장하고 있다. 환경오염복원사업은 자발적이기보다 정부의 규제와 조정에 의하여 실행되며, 인간의 건강과 환경보호를 위한 환경법과 규제의 도입·개발이 환경복원사업을 움직이는 원동력이다.

현재, 국내의 많은 지역에서 유류 저장시설의 노후화 및 수송관의 누수로 인한 유류 및 유기물 관련 토양 오염이 중요한 환경 문제로 대두되고 있으며, 이를 해결하기 위한 방안으로 단기간에 정화가 가능하고 고효율의 정화율을 가지는 열탈착 기술에 대한 수요가 점차 증가하는 추세이다. 하지만 국내에서는 1995년 토양환경보전법을 제정하고 토양 오염 방지와 오염토양 복원에 대한 연구와 사업이 정책적으로 추진되어 제도적 기반은 마련되었으나, 1980년대부터 대규모의 복원사업이 시작된 선진국에 비해 국내기술은 미비한 실정이며 이에 따라 국내 토양이 지니고 있는 이력 특성을 고려한 신기술 개발이 시급한 실정이다.

또한, 중국의 경우 대형 도시 주변과 오염이 심각한 광공업 기업주변, 집중 오염처리시설의 주변, 유류 오염방지 중점구역, 음용수상수원 주변지역, 폐기물 퇴적장 등 전형적인 오염부지와 오염된 논밭을 중점으로 토양을 복원하는 토양정화 산업이 환경 분야의 블루오션으로 떠오르고 있으나 아직 중국내 기준이 미비하고 기술력이 부족한 실정이며, 세계에서 토양 오염이 가장 심각한 국가 중 하나로, 앞으로 토양정화 관련 수요가 증가할 것으로 전망되고 있다.

기존의 경우 경유나 윤활유 등 유류로 오염된 토양은 대부분 토양 경작법, 세척, 증기 추출, 화학적 산화·환원 등의 방식으로 처리했으나, 고농도 오염토양을 처리하기 위해서는 오랜 시간이 필요하거나 고온의 열로 유기물을 탈착하여야 하지만 기존의 열탈착 기술은 정화과정에서 화석연료의 사용, 온실가스 배출 등의 문제가 발생하였다.

이를 해결하고자 한국철도기술연구원(이하 철도연) 고태훈 박사팀은 유류 및 유기물로 오염된 토양을 저비용으로 깨끗하게 되살려 재활용하고 2차 배출가스인 온실가스의 배출을 저감할 수 있는 마이크로파를 활용한 유류오염 토양 정화 기술을 개발했다.

## 2. 개발기술 주요 내용

### 2.1 마이크로파 열탈착 기술의 특징

유류 및 유기 오염토양을 가장 효과적으로 정화하는 공법 중의 하나로 평가되는 열탈착 기술은 오염물질을 99% 이상 제거할 수 있어 효율성이 높고, 휘발유, 경유, 등유, 병커C유, 윤활유 등 모든 유류 오염물질을 정화시킬 수 있다. 그러나 유류 및 유기물 휘발·탈착에 필요한 고온의 열을 발생시키는 과정에서의 경제성이 낮고 2차 오염물질의 배출로 인해 적용이 제한적이었다. 이를 해결하기 위해 1. 효율적인 에너지 기술에 의한 정화비용 절감 2. 2차 배기가스 감소에 의한 온실

가스(CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> 등) 배출저감이 가능한 열탈착 기술을 개발하였다.

철도연에서 개발한 마이크로파를 활용한 유류오염토양 정화 기술은 전자레인지에서 음식을 데우는 원리를 활용하여 유류 및 유기물로 오염된 오염토양을 300~700℃의 온도로 가열하여 토양에 흡착된 유기오염물질을 휘발·탈착 방식으로 처리하여 토양을 정화시키는 신기술이다. 본 마이크로파를 활용한 유류오염토양 정화 기술은 간접가열방식으로 외통/내통으로 구성되어 있으며, 유류 및 유기물로 오염된 토양을 회전하는 내통으로 투입하면 외통에 설치된 마그네트론에서 마이크로파를 조사하여 내통 외주면에 부착한 마이크로파 반응발열체를 가열하여 간접적으로 오염된 토양 및 자갈에 균일하게 고온의 열이 전달되어 오염물질을 휘발 및 탈착시켜서 에너지 효율이 기존의 방법보다 높다. 또한, 외통과 내통 사이 공간으로 마이크로파가 외부로 누설되지 않게 마이크로파 누출방지장치를 설치하여 현장설치 시 안전성을 높이고, 마이크로파가 환경에 미치는 영향을 최소화하여 친환경적이고 오염물 휘발·탈착 과정에서 발생하는 폐에너지를 재사용함으로써 에너지 효율성 증대하는 기술이다.



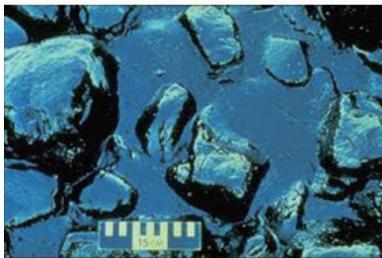
[중동지역 원유오염토 정화]



[해양선박 원유사고 정화]



[준설 유류오염토 정화]



[철도 유류오염 도상자갈 정화]



[군부대지역 유류오염토 정화]



[유류저장소 누유오염토 정화]

그림 1. 마이크로파 열탈착기술 적용가능 정화분야

[표 1] 기존 정화기술 비교

구분	마이크로파 열탈착 기술	기존 열탈착 기술	토양경작 기술
적용기술	- 마이크로파 열탈착	- 화석연료 열탈착	- 미생물을 이용한 생분해
처리방법	- 마이크로파를 흡수 발열체에 조사하여 고온 발생 (간접가열방식)	- 화석연료를 이용한 버너를 사용하여 열 발생 (직접가열방식)	- 미생물을 현장에 직접 배양
특징	- 정화비용 저가 - 2차 오염물질 발생량 적음 - 장비의 이동성이 편리 - 장비가 소형이며, 좁은 작업공간에서 작업 가능	- 정화비용 고가 - 2차 오염물질 발생량 많음 - 장비의 이동성이 불편 - 장비가 대형이며, 넓은 작업공간 필요	- 정화에 장시간 필요 - 고농도 오염물질처리 어려움 - 오염토를 이동하기 위한 운반비 발생 - 넓은 작업공간 필요

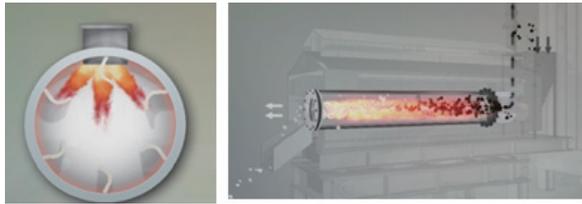


그림 2. 기존 열탈착 기술(버너직화방식)

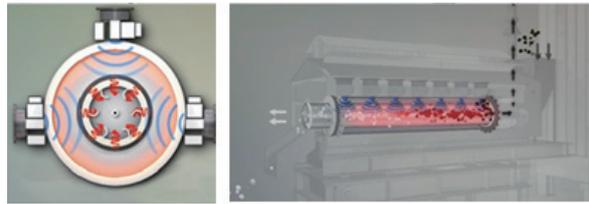


그림 3. 마이크로파 열탈착 기술 (간접가열방식)

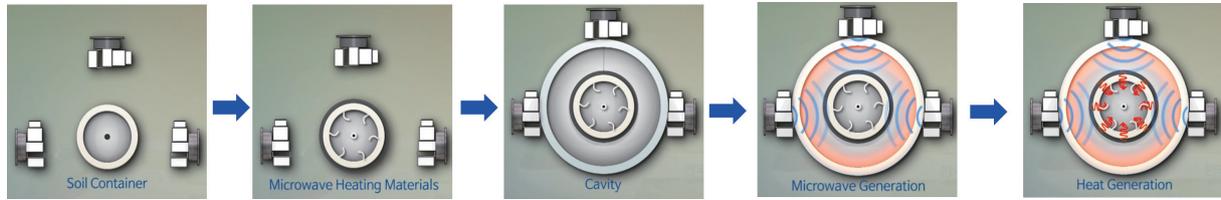


그림 4. 마이크로파 열탈착기술 원리

[표 2] 기존 열탈착 기술 비교

구분	기존 열탈착 기술 (직접가열방식)	마이크로파 열탈착 기술 (간접가열방식)
장 점	- 신속한 대규모 유류 및 유기물 오염토양의 처리 - 오염물질 정화 시 체류시간 조절 가능	- 유류 및 유기 오염토양 및 오염자갈의 오염 탈착 체류시간 조절 가능 - 오염토 내 유류 및 유기물과 열원의 직접적인 접촉이 원천적으로 차단되어 안전한 운영이 가능 - 회전로 내 균일한 온도 분포 가능 - 정화비용 절감 가능 - 전기만을 에너지원으로 사용함으로써 화석연료 연소 시 발생하는 배출가스가 발생하지 않아 친환경적이며, 후단의 정화 설비용량을 기존 대비 절감시킬 수 있음
단 점	- 오염토 내 유류 및 유기물과 열원의 직접적인 접촉으로 폭발·화재의 위험성 - 화석연료의 사용으로 높은 에너지 비용이 소모되어 경제성이 낮음 - 회전로 내 불균일한 온도분포로 인한 비효율적인 정화처리 - 화석연료의 사용으로 인해 배출가스가 발생하여 2차 오염물질 발생 - 고온처리시 안정성, 경제성 문제 (승은 6시간 이상, 내벽의 스케일, 결로 그을음 문제 등)	- 기존 대비 고용량의 전기설비 필요

## 2.2 마이크로파 열탈착 기술 개발 현황

마이크로파 열탈착 기술은 한국철도기술연구원에서 2014

년 초기기획을 통해 연구가 시작되어 Lab-scale의 간접가열 방식 마이크로파 열탈착 설비를 제작하였고, 성능검증을 통하여 토양정화 용량을 점차 증가시켜 실제 오염현장에 적용



그림 5. 1차(Lab-scale) (2014년)



그림 6. 2차(Pilot-scale) (2015년)



그림 7. 3차(Real-scale element) (2016년)



그림 8. 4차(Real-scale)(2017~2018년)

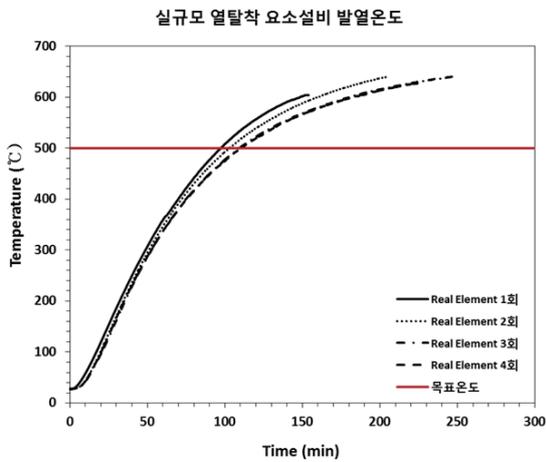


그림 9. Real-scale element 발열온도 분포

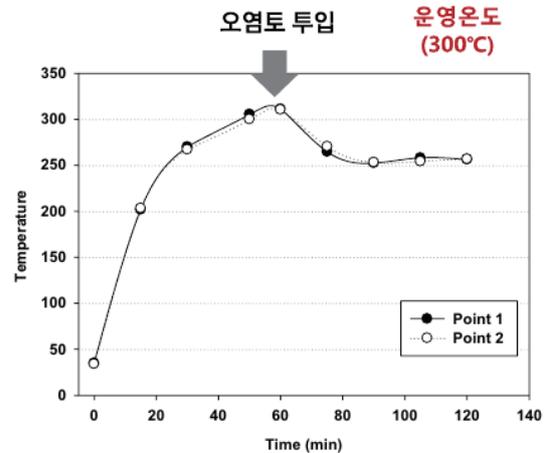


그림 10. Real-scale 발열온도 분포

이 가능한 Real-scale의 간접가열방식 마이크로파 열탈착 설비를 제작하여 현장실증화를 진행하였다. 간접가열방식 마이크로파 열탈착 설비의 발열성능은 내부 온도 300~700℃까지 측정하였으며, 토양정화 용량은 시간당 0.05 ton/hr에서 4.50 ton/hr로 증가한 설비를 제작하였다.

### 2.3 마이크로파 열탈착 기술 평가

마이크로파 열탈착 기술의 정화성능 평가를 위해서 경유 오염토(12,000 ppm), 원유 오염토(350,000 ppm), 윤활유 오염토상자갈(10,000 ppm)에 대한 정화성능을 측정한 결과는 아래 그림과 같다. 각 오염토양은 약 10분의 체류시간으로 정

[표 3] 마이크로파를 활용한 열탈착 기술과 기존 열탈착 기술의 비교

구분	마이크로파 열탈착 기술	기존 열탈착 기술	비고
톤당 정화 비용 (원/ton)	약 14만원	약 20만원	약 30% 절감
CO <sub>2</sub> 배출량(ton-CO <sub>2</sub> )	0.017	0.162	약 30% 절감

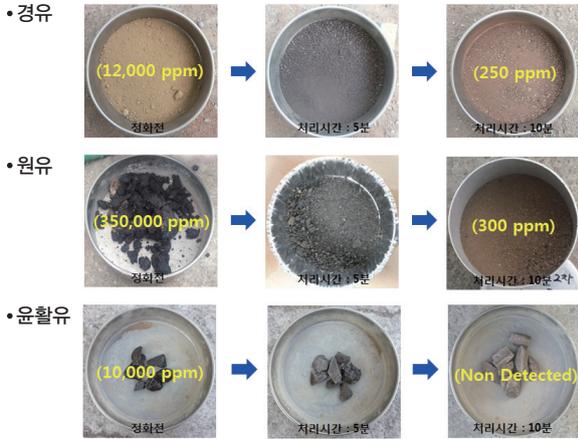


그림 10. Real-scale 정화성능 비교

화를 진행한 결과 경유오염토의 경우 250 ppm(정화율 98%), 원유오염토는 300 ppm(정화율 99%), 윤활유 오염토상자갈은 검출되지 않았으며(정화율 100%), 토양오염공정기준 1 지역 500 ppm을 만족시키는 결과를 나타냈다.

개발된 마이크로파를 활용한 열탈착 방식의 오염토양 정화기술은 정화 비용이 기존의 약 30% 수준으로 경제적이고, 정화 과정에서 발생하는 이산화탄소 배출량도 기존의 10% 수준으로 친환경적인 기술이다. 또한, 정화된 토양은 성토, 복토, 기층재, 채움재 등 건설재료로 재활용이 가능할 것으로 예상된다.

### 3. 개발기술 시장성 및 전망

국내 오염 토양 정화 시장규모는 2005년 569억 원 규모에서 연평균 38.6%로 성장하여 2012년 5,604억 원으로 증가하였으며, 2012년 이후 연평균 7.2%로 증가하여 2018년도에는 8,525억 원으로 시장규모가 성장하였다. 시장 성장에 따라 토양 및 지하수 기술지원/발전을 위한 연구개발과 정부 관련 예산증가가 지속적으로 증액되고 있는 실정이다.

또한, 해외의 경우 중국 오염 토양 정화 시장은 2014년 198억 위안에서 연평균 49.4%로 급격히 성장하여 2020년에는 2199억 위안 규모로 성장하고 있으며, 2013년에서 2015년까지 1,000여 개에 달하는 정화업체가 중국 토양 정화 시장에 출범하였고, 관련 오염 토양 정화 시장에 대한 관심도가 증가하고 있다.

마이크로파 열탈착 기술은 국내의 유류 및 유기물질로 오염된 부지에 대하여 기존 열탈착 기술에 비하여 친환경적이고 경제적이며 효율적인 유류 및 유기 오염토양 정화가 가능할 것으로 기대된다.

담당 편집위원 : 박준우(한국철도기술연구원)