

열순환식 저온열탈착 정화장치의 개발 및 유류오염 토양 현장 적용

김국진¹ · 이선화¹ · 박광진¹ · 김치경¹ · 이철호¹ · 김도선² · 조석희² · 장윤영^{2*}

¹(주)오이코스, ²광운대학교 환경공학과

Development of Low Temperature Thermal Desorption System and Remediation of Soil Contaminated with Petroleum Hydrocarbon

Guk-Jin Kim¹ · Sun-Hwa Lee¹ · Kwang-Jin Park¹ · Chi-Kyung Kim¹ · Cheol-Hyo Lee¹
Do-Sun Kim² · Seok-Hee Cho² · Youn-Young Chang^{2*}

¹OIKOS Co. Ltd.

²Department of Environmental Engineering, Kwangwoon University

ABSTRACT

The Low Temperature Thermal Desorption (LTTD) System equipped with a soil transfer unit, a rotary kiln, RTO, cyclones and a bag filter etc. was developed. The LTTD system was designed to be economically operated using LPG as a fuel and recirculating the discharged gas from the LTTD system through RTO. For the performance test of LTTD system the soil contaminated with light and heavy oils (2,690 mg TPH/kg soil) and with particle sizes below 50 mm was fed into the rotary kiln of LTTD system at 7 m³/hr with retention time of 15 minutes. Operation temperatures of LTTD system for the removal of soil TPH were 567°C and 692°C. The residual TPH after treatment was 46 mg/kg and 32mg/kg respectively at each temperature condition, which shows high TPH removal efficiencies of the developed LTTD as 98.3% and 98.9%.

Key words : Low Temperature Thermal Desorption (LTTD), TPH, Soil remediation

요 약 문

본 연구에서는 토양 이송 장치, 로터리킬른, RTO, 사이클론 및 백필터 등으로 구성되어 있고 이동이 가능한 저온열 탈착 장치를 제작하여 현장유류오염토양의 처리시험을 수행하였다. 제작된 열탈착장치는 LPG를 연료로 사용하고 배출되는 가스를 RTO를 통하여 재순환하는 방식을 적용하여 경제적인 운전이 가능하도록 하였다. 장치의 현장시험을 위하여 경유와 C₃₀ 이상의 heavy oil로 혼합 오염된 현장토양(2,690 mg TPH/kg soil) 을 먼저 선별기를 통해 50 mm 이하의 입경을 가진 토양으로 채 분리한 후, LTTD 장치의 로터리킬른에 체류시간 15분 조건에서 시간당 7 m³의 양으로 투입하였다. 열탈착장치의 온도를 각각 평균 567°C와 692°C로 조정한 후 오염토양의 정화 운전을 수행한 결과, 배출되는 정화토양의 TPH 농도는 각각 46 mg/kg과 32 mg/kg로서 각각 평균 98.3과 98.9%의 높은 정화 효율을 얻을 수 있었다.

주제어 : 저온열탈착, TPH, 토양정화

1. 서 론

오염토양을 정화하는 공법은 크게 생물학적 공법과 물리화학적 공법으로 구분할 수 있는데, 생물학적 정화가

어려운 난분해성 물질이나 고농도 오염토양의 경우 물리화학적 공법인 토양세척이나 열탈착 공법이 국내 현장에서 적용되고 있다. 토양세척공법의 경우 동절기 운전의 제약과 토성에 좌우되는 처리성능, 후처리 비용 상

*Corresponding author : yychang@kw.ac.kr

원고접수일 : 2008. 8. 5 심사일 : 2008. 8. 9 게재승인일 : 2008. 8. 26
질의 및 토의 : 2008. 10. 31 까지

승 등으로 인해 최근 열탈착 공법이 선택적으로 적용되고 있다. 특히 최근의 토양정화사업이 대부분 “가 지역”의 토지활용도를 요구하는 경향이 있으므로 높은 정화효율을 나타내는 열탈착 처리에 대한 수요가 점차 증가하고 있다.

열탈착 기술의 특징은 오염원의 종류나 농도에 관계없이 단기간에 높은 처리효율을 나타내며 프로세스의 운전조건이 비교적 안정적이어서 기술의 신뢰성이 높다는 것이다. 특히 저온열탈착(LTTD, Low Temperature Thermal Desorption) 공법은 소각에 비해 처리 온도가 낮아 에너지 소모가 적고, 오염물질을 물리적으로 분리시켜 토양 내 유기물을 파괴하지 않아 처리 후 굴착된 지역의 되메움이 가능한 장점을 지니고 있다(Domenic, 1993). EPA에서는 Table 1과 같이 열탈착공법의 장단점을 정리하고 있다(EPA, 1994). 저온열탈착은 저온을 이용한 휘발(volatilization), thermal stripping, soil roasting 등의 적용으로 굴착토양으로부터 물리적으로 석유 탄화수소들을 분리시키기 위하여 열을 사용하는 기술이다. 일반적인 열탈착 처리장비의 주요 구성은 열탈착기(Thermal processor), 열산화기(Thermal Oxidizer), 가스냉각기(Cooling System), 집진기(Filtration System), 유인송풍기(Induction Fan), 공기압축기, 제어장치(Electronic Control System), 투입컨베이어, 배출컨베이어 등으로 이루어지며 휘발성 유기 화합물(VOCs), 준휘발성 유기화합물(semi-VOCs), 디젤, BTEX, 휘발유, 제트유 등의 오염물질에 대해 95%까지의 분해효율이 보고되고 있다(Bucala et al., 1994).

미국의 경우 RCRA와 TSCA 등의 규정에 의해 열을 이용하여 오염토양중의 VOCs 또는 SVOCs를 제거하기 위하여 개발된 열탈착 장치의 종류는 크게 로타리킬른, 열스크류, 유동상탈착장치, 마이크로파 탈착장치 등이 있다(EPA, 1992). 그 대표적인 열탈착 전문 업체로는 Astec Industries 사의 이동형 열탈착 장치, ECC사의 Multi-pass Rotary Dryer, Direct Thermal Dryer, 가열 과정에서 발생한 잔여열을 스팀을 만드는데 재사용하는 AES사의 열탈착장치, International사의 Direct fired plant 열탈착장치, Midwest Soil Remediation사의 이동형 열탈착시스템 (100~2,500톤/일)을 들 수 있다. 그 외 캐나다의 경우, 재활용폐유를 사용하여 가동하는 Envirosoil Limited사의 열탈착장치, ENVIRO-KLEAN REMEDIATION GROUP사의 이동식 열탈착(500톤/일) 장치 등이 있고, 영국의 경우 MEL Environmental Solution사의 Batch Type 열탈착장치, TARMAC Remtech사의 이동식 열탈착장치 등 대용량의 이동식 고효율 열탈착 시스템을 개발하여 운

영하고 있다.

국내에서는 대규모 유류오염지역의 최초 정화사례인 부산 문현동 부지정화에 토양 내 존재하는 윤활유의 제거를 목적으로 국내 최초로 이동식 열탈착시스템이 도입되었다. 이때 열탈착 장비는 캐나다의 Enviro-Klean Technologies INC.에서 제작한 장비로서 처리용량은 시간당 7~27톤이었고 모든 설비가 트레일러에 장착되어 이동과 설치가 용이하도록 제작되었다. 열탈착 온도는 최대 650°C로 조절하여 오염농도 3,000~7,000 mg TPH/kg의 토양을 800 mg TPH/kg 이하로 정화하였다(강미정, 2003). 그러나, 부산 문현지구에 투입된 열탈착 설비는 외국에서 완제품으로 수입, 적용되어 장치의 특성에 따른 적합한 현장운전 조건 유지 기술 등 열탈착 기술에 대한 기술적인 경험부족 등으로 인하여 정화진행 중에 저온 열탈착처리에서 고온 열탈착처리로 설비 변경 등 여러 가지 문제점들이 도출되었다. 설비 변경 원인은 대상지역의 유류오염 형태가 resin 과 asphaltene로 구성된 asphalt 류가 50% 이상 존재하는 고농도의 heavy oil로 저온열탈착(LTTD)의 적용에 한계를 나타냈기 때문이다. 그 밖에도 처리장치에서 과다한 열에너지 발생과 고온의 배출 가스 활용설비의 부재 등으로 인하여 2차적인 문제점들이 나타나 열탈착 공법의 자체기술 확보와 현장 적용 기술 축적이 시급한 것으로 나타났다.

앞서 언급한 바와 같이 열탈착, 특히 본 연구를 통하여 개발하고자 하는 유류오염 토양의 정화를 위한 저온 열탈착 시스템의 설계 및 제작 기술은 해외 선진국에서는 장치 대부분이 상용화되어 활발히 적용되고 있으나 국내 저온 열탈착 기술 적용은 시작단계에 머무르고 있다(강지순 등, 2002).

따라서 본 연구에서는 국내기술 확보를 위해 현장 적용이 용이하도록 저온 열탈착 장비를 이동식으로 자체 개발하였으며, 기술의 처리성능을 알아보기 위해 유류오염 토양을 대상으로 여러 가지 조건에서 개발 장치의 현장시험을 수행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 토양 TPH 농도 및 이화학적 분석

오염토양의 TPH 분석은 국내 토양오염공정시험법에 의하여 분석하였으며, 토양수분함량 분석은 토양시료 10g을 105°C 건조기에서 항량이 되도록 건조하여 건조전과 후의 무게 차이를 계산하여 수분함량을 분석하였다. 토양 특성 분석으로는 입도 및 액소성한계시험을 실시하였으며,

Table 1. Advantage and disadvantage of soil remediation with LTTD

Advantage	Disadvantage
<ul style="list-style-type: none"> • Both applicability of onsite and offsite treatment • High performance rate (25 ton/hr over) • Economical cost (770 m³ over: \$30~70/ton) • Efficient treatment of "hot spot" • Linkage of other soil and groundwater treatment • Reuse of treated soil • High treatment efficiency (TPH 10 ppm, BTEX 100 ppb below) 	<ul style="list-style-type: none"> • Additional cost for soil dig out • Additional requirement of site for facility for onsite treatment • Transfer cost for offsite treatment • Drying process requirement for high moisture content soil

Table 2. Limit values of liquidity and plasticity of test soil

Specimen	Cu	Cg	U.S.C.S	LL	PL
D-1	5.50	0.73	SP	25.30	N.P
D-3	9.00	0.44	SP	25.47	N.P
D-5	7.31	0.73	SP	24.58	N.P
D-7	6.79	0.82	SP	26.78	N.P
G-3	5.24	0.69	SP	26.22	N.P
G-5	7.14	0.69	SP	24.13	N.P
G-8	7.14	0.64	SP	25.34	N.P
G-21	5.86	0.73	SP	23.22	N.P
D-23	13.46	1.10	SW	26.41	N.P
G-25	6.30	0.57	SP	25.33	N.P
G-28	6.92	0.58	SP	25.61	N.P
G-36	10.00	0.87	SP	25.23	N.P
G-46	7.00	0.89	SP	21.53	N.P
G-50	6.33	0.86	SP	22.34	N.P
G-70	10.00	1.30	SW	25.45	N.P
G-73	5.00	0.56	SP	26.40	N.P
G-74	8.50	0.68	SP	24.55	N.P
G-76	6.79	0.70	SP	24.32	N.P
G-108	9.00	1.00	SW	25.01	N.P
T-8	7.06	1.23	SW	25.32	N.P
T-15	6.15	0.68	SP	25.44	N.P
T-27	6.43	0.97	SP	25.87	N.P
T-28	6.67	0.87	SP	26.24	N.P
T-31	6.00	0.86	SP	24.98	N.P

주) U.S.C.S = Sample name according to standard classification, LL = liquidity limit, PL = plasticity limit, N.P = Non plasticity

입도분석은 KSF2302법으로, 액소성한계시험은 Atterberg 한계시험법을 적용하였다.

2.2. 오염 현장 및 대상 토양

연구대상 현장은 1950년대부터 유류를 저장하던 시설로 오랜 기간에 걸쳐 다양한 유류를 취급하고 관리해오던 지역으로 오랜 기간 동안 다양한 성상의 유류성분으로 오염되어 오염특성이 다양하고 난분해성 물질의 축적이 진행된 지역이다. 또한 기계유, 윤활유 성분의 heavy oil 등

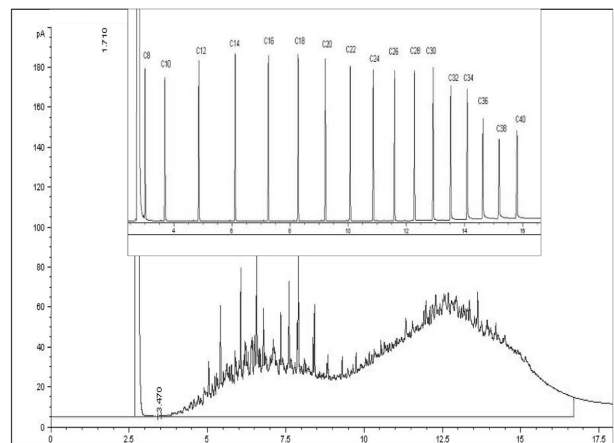


Fig. 1. Gas chromatograph of test soil.

이 국지적으로 분포되어 있었다. 토양의 입도를 KSF2302 법으로 분석한 결과 0.075 mm 이하의 미세토 함량은 35% 이내로 실트질 토사와 점토질 토사가 혼합되었고, 액소성한계시험에서는 균등계수는 4~5 이상, 곡률계수(Cg)는 1~3이하로 입도 분포가 불균질한 모래 또는 자갈질 모래(SP)로 구성되어 열탈착과 토양세척 등의 물리화학적 공법 적용이 양호한 토질로 확인되었다(Table 2).

연구대상 오염토양은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 C₃₀ 이상의 heavy oil이 다량 혼합된 것으로 확인되었고, 평균 오염 농도는 TPH 2,690 mg/kg으로 비교적 높은 오염농도는 아니지만 heavy oil의 함유율이 높아 토양경작법과 같은 생물학적 공법 적용이 어려우며 토양 중 미세토 함량이 높아 토양세척 공법과 같은 기계적 마찰분리기술 적용은 한계가 있는 것으로 나타났다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 장치 설계 및 제작

3.1.1. 열탈착 가열 온도 적용성 평가

열탈착 장치의 설계를 위하여 본 연구의 지원기관인 환경부(2007)의 Pilot 장치를 이용하여 가열된 열이 토양으

Table 3. TPH removal at different temperature and residence time (initial TPH: 4,080 mg/kg)

Temperature	Residence time	10min.	20min.	30min.	40min.
		TPH (mg/kg)			
300°C	Initial	1,513	1,320	1,241	1,196
	Middle	1,321	1,162	1,154	1,094
	Final	1,116	1,086	1,044	1,014
400°C	Initial	1,324	1,196	1,165	1,144
	Middle	1,234	1,160	1,018	995
	Final	1,041	964	1,003	890
500°C	Initial	1,203	1,064	1,014	984
	Middle	1,037	1,024	1,002	970
	Final	1,024	992	934	876

Table 4. Heat transfer test of soil using electrical furnace (soil mass : 30 kg)

Heating temp.	Heating time				
	5 min.	10 min.	15 min.	20 min.	25 min.
300°C	218°C	253°C	262°C	268°C	268°C
400°C	216°C	289°C	317°C	343°C	349°C
500°C	301°C	339°C	390°C	408°C	424°C

로 전달되는 효율실험 결과를 분석하였다. 오염토양 30 kg 을 실험 장치에 투입하여 가열한 결과 체류시간이 10분인 경우 온도를 300~500°C까지 상승시켜도 TPH의 제거효율은 낮은 것으로 나타났으며 체류시간이 40분인 경우에 오염물질의 농도가 감소되는 경향을 보이나 그 정도가 크지 않다는 것을 알 수 있었다(Table 3). 이때의 가열온도와 토양의 온도를 측정한 결과 25분의 체류시간에서도 90% 이상의 열전달 효과를 얻을 수 없었다. 이는 연속적으로 고속으로 주입되는 토양에 높은 열량을 효과적으로 전달 하기 위해서는 열전달 효율을 높이기 위한 실규모 열탈착 장치의 내부구조 개선이 요구됨을 확인 할 수 있었다 (Table 4). 또한 pilot 규모의 실험결과를 바탕으로 실규모 열탈착장치의 열전달 효율을 감안할 때 실규모의 장치에서는 열원(RTO)의 온도를 pilot 장치의 가열 온도보다 높게 유지해야할 필요가 있는 것으로 나타났다.

3.1.2. 장치 공정

Fig. 2에서와 같이 열탈착 장치의 내부이동시스템은 크게 토양 이동 부분과 VOCs를 포함한 배가스 이동 부분으로 구분할 수 있다. 저장 호퍼에서 선별기를 거쳐 50 mm 이하로 선별된 토양은 이송컨베이어를 통하여 열

탈착(로터리킬런)장치로 이송되어 최고 600°C의 열풍에 의해 VOCs 성분은 탈착되고 정화된 토양은 외부로 배출된다(Table 5). 로터리킬런 장치에서 탈착된 VOCs는 장치의 교반과 열풍에 의해 발생된 분진을 포함하므로 사이클론과 백필터를 거쳐 분진을 제거한 후 열교환기에서 외부공기(산소)와 혼합되어 열산화기(RTO)로 유입되어 최고 750°C의 온도에서 산화 분해된다. 이때 본 개발장치에서는 산화분해된 배가스는 에너지 효율을 고려하여 다시 로터리킬런 장치로 순환되는 공정으로 이루어지도록 설계하였다(Table 6).

3.1.3. 저온 열탈착장치

일반적으로 저온열탈착을 구분할 때 온도에 따라 HTTD(High Temperature Thermal Desorption)와 LTTD (Low Temperature Thermal Desorption)로 구분하고 있으나 High와 Low의 기준이 되는 온도는 가열 방식의 차이에서 오는 열원의 온도구분이 아닌 토양의 온도에 의하여 구분되어진다(유동준 등, 2001).

본 연구에서는 오염토양의 원래성질을 최대한 유지하고자 간접가열 방식을 채택하였다. 간접가열 방식에서는 실제 오염토양 입자에 도달하는 온도는 가열온도와는 큰 차이를 나타낼 수 있다.

간접가열 방식의 저온열탈착 처리는 직접가열 방식보다 연료비의 절감, 대기오염물질 발생량 저감에 따른 2차 처리 비용 절감 등 경제적 장점을 가지고 있는 반면에, 공기 등의 유체를 거쳐 열이 전달되는 과정에서 대상 물질(유류 오염토양)로의 열전달 한계에 따른 열탈착의 효과가 감소되는 문제점을 가지고 있다(장주호 등, 2004). 따라서 경제적인 운전조건에서 유류 오염물질의 정화 효율을 향상시키기 위한 간접가열 방식의 저온 열탈착 기술개발에

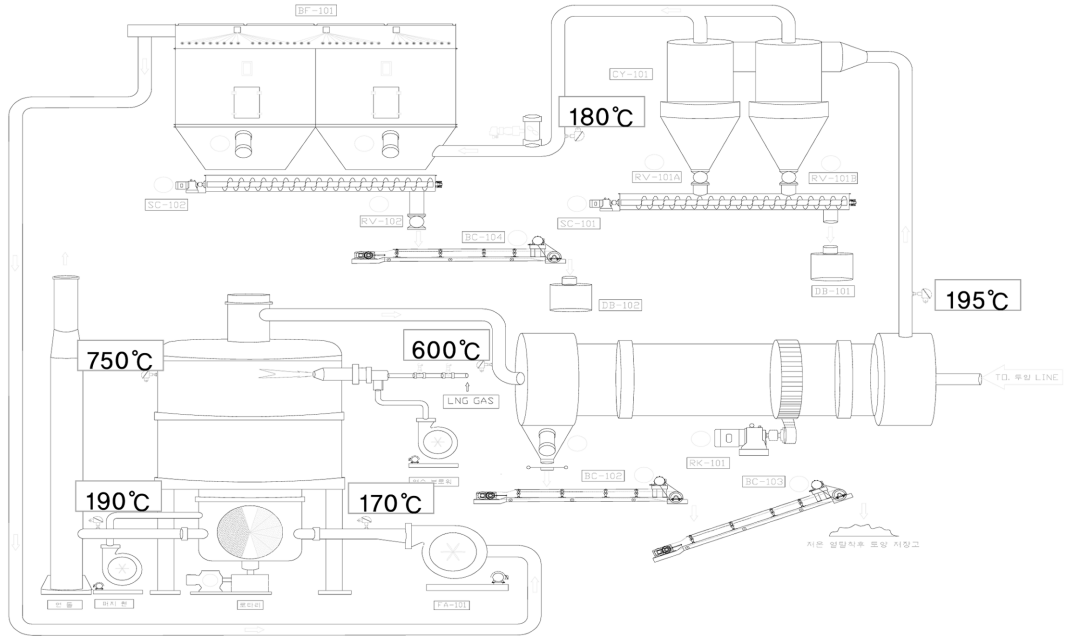


Fig. 2. Thermal desorption process.

Table 5. Main processes and design parameters of LTTD

Process	Parameter	Content	Units
Storage hopper ↓	Capacity water content	For water content below 30%	Hopper
Classifier ↓	Feed method cutting size, water content	Classification below 50mm	Classifier feeding unit
Thermal desorption ↓	Capacity calorie	Operation below 600°C rotary kiln type (indirect heating)	Storage tank feed part thermal desorption furnace, discharge part
Discharge	Discharge conc.	Conveyer filing	Transfer unit

Table 6. Design parameters for oxidation process of thermal desorption gas and heat reuse

Process	Design parameter	Content	Necessary facility
Thermal desorption ↓	Capacity calorie	Operation below 600°C rotary kiln type (indirect heating)	Storage tank feeding part thermal desorption furnace, discharge part
Cyclone/bag filter ↓	Soil size dust amount	Dust removal	Bag filter
Heat exchanger ↓	Gas temperature ambient temperature	Recycle of mixture of waste gas and fresh air	Heat exchanger
RTO	Initial conc. residence time temperature	Oxidation of VOCs	Combustion part

있어서 핵심 부분은 열전달 효율의 개선이라 할 수 있다. 본 연구에서는 이동형 저온열탈착 장치의 간접가열의 열전달 효율을 개선하기 위한 방안으로 2중 원통형 구조를 선택하였으며 열 손실을 최대한 방지하고 오염도양으로의 전달 효율을 향상시키고자 추가적으로 로의 내부 몸체 부분에 이송날개를 부착하여 로터리킬런이 회전하면서 오염

토양을 상부로 이송시켜 떨어뜨리는 cascade 방식으로 설계하였다(Fig. 3).

3.1.4. 열산화기(Thermal Oxidizer)

본 연구에서는 열탈착공정에서 발생되는 배가스를 처리하기 위하여 산화(연소)방식을 채택하였으며 내부에는 완

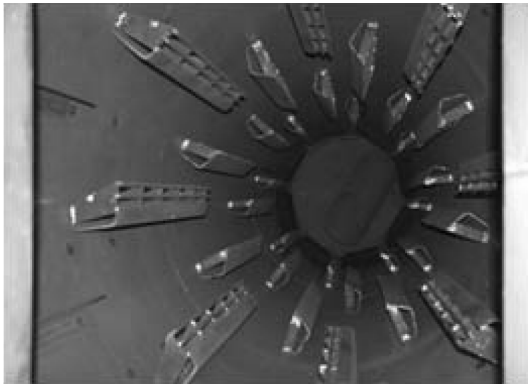


Fig. 3. Cascade configuration of rotary kiln.

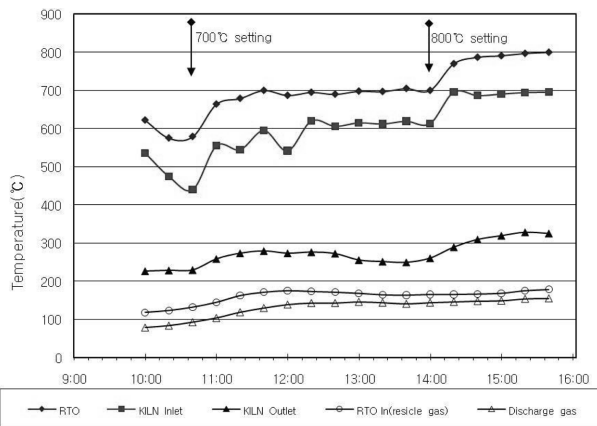


Fig. 4. Temperature monitoring of LTTD.

전한 산화반응을 위하여 층이 형성되는 것을 방지하기 위한 turbulator(난류 발생장치)를 설치하였다. 본 기술의 비교경쟁 제품인 ENVIRO- KLEAN사의 열탈착장치를 분석한 결과, 열산화기의 경우 760°C의 온도조건에서 0.6~1초의 체류시간으로 98%의 배가스 정화효율을 얻도록 설계하였다. 이에 본 연구에서도 처리토양의 평균오염농도를 20,000 ppm 기준으로 배가스의 처리효율이 98%를 나타낼 수 있도록 열산화기를 설계하였다.

3.2. 오염토양 정화

3.2.1. 오염토양 열탈착 적용

제작한 열탈착장치의 유류오염토양의 유류제거효율을 알아보고자 일차 선별기에서 50 mm 이하로 채 분리된 오염토양을 로터리킬런에서의 체류시간을 15분으로 조절한 7 m³/hr 속도로 열탈착장치에 투입하였다. 이때 오염토양의 수분함량은 평균 11.2%이고 오염토양의 농도는 2,690 mgTPH/kg이었다. 초기 RTO의 온도를 700°C로 설정하여 운전한 결과를 Fig. 4와 5에 나타내었다.

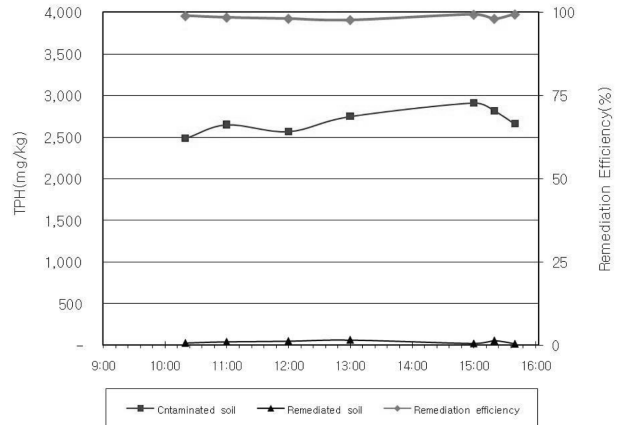


Fig. 5. Remediation efficiency of hydrocarbon-contaminated soil by LTTD.



Fig. 6. Field application of LTTD for hydrocarbon-contaminated soil.

운전기간동안 로터리킬런의 온도는 평균 567°C로 유지되었으며, 배출 정화토양의 평균온도는 156°C이었다. 이 때 배출 정화토양의 잔류 TPH 농도는 평균 46mg/kg으로 약 98.3%의 높은 TPH 제거효율을 나타내었다.

온도상승에 따른 정화 효율의 변화를 알아보기 위하여 RTO의 온도를 800°C로 상승시켜 운전한 결과, 로터리킬런의 온도는 평균 692°C를 나타내었으며, 배출되는 토양의 잔류 TPH농도는 32 mg/kg으로 98.9%의 TPH 제거효율을 보여주었다. 이때 온도 상승에 따른 제거효율증가는 약 0.6%로 큰 차이는 없는 것으로 나타났다.

본 연구에서 수행한 실험결과를 분석한 결과, 본 연구에서 개발한 LTTD 장치를 적용하여 연구대상의 토양특성과 유사한 조건의 오염토양을 처리할 경우에 “가 지역”의 TPH 정화기준인 500 mg/kg을 만족할 수 있는 오염토양의 초기오염농도는 최대 30,000 mgTPH/kg까지 정화처리가 가능할 것으로 평가되었다. 또한 오염토양을 정화하기 위해서는 정화목표와 유종과 오염지역의 토성에 따라 열탈

착 온도와 처리시간 등의 운전조건을 평가함으로써 다양한 조건의 유류오염토양에 적용할 수 있음을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 일반적인 생물학적 공법이나 물리적 공법 적용에 한계가 있는 유류 오염토양 처리의 효과적인 처리방안으로서 열탈착 공법을 제안하였으며, 국내 현장에 적합한 이동이 용이하고 에너지 효율이 경제적인 간접식 저온열탈착 장치를 개발하고자 하였다.

관련 외국선진기술의 기술 분석과 pilot 규모의 실험 자료 분석 등을 통하여 토양 이송 장치, 로터리킬른, RTO, 사이클론 및 백필터 등으로 구성된 50 m³/일 처리용량의 이동이 가능한 열탈착 장치를 자체적으로 설계/제작하였으며(Fig. 6), 경유와 C₃₀ 이상의 heavy oil이 함유된 초기 평균 2,690 mg TPH/kg의 현장 오염토양을 처리한 결과, 잔류 오염농도는 평균 32 mg/kg으로 외국 유사기술의 처리효율과 비교하여 큰 차이가 없는 높은 처리성능 결과를 얻을 수 있었다.

사 사

본 연구는 환경부의 “토양·지하수정화관리 환경기술교육 혁신지원사업단”의 지원과 “토양·지하수오염방지기술개발사업”의 지원을 받은 과제입니다.

참 고 문 헌

강미정, 2003, 열탈착공법을 이용한 유류오염토양의 정화에 관한 연구, 부산대학교 환경공학과 석사논문.

강지순, 송주석, 박창웅, 오광중, 2002, 유류오염토양의 열탈착 전처리 효율에 관한 연구, 대한환경공학회 춘계학술연구발표회 논문집(II), p. 239-240.

유동준, 김영웅, 박용규, 오방일, 구자공, 2001, 유류오염토양의 정화를 위한 열탈착 저리기술, 한국지하수토양환경학회 추계학술대회, p. 111-114.

장주호, 동종인, 엄권욱, 2004, 로터리킬른 및 열적 2차 처리를 이용한 유류오염토양의 고효율처리 특성연구, 한국지하수토양환경학회 춘계학술발표회, p. 52-53.

환경부, 2007, 유류오염 토양·지하수의 저온열처리 및 생물학적 정화기술을 연계한 동시 복원기술 개발, 1차년도 연차실적 및 2차년도 협약 계획서.

Advanced Environmental Systems (www.aesinc.com).

Astec Industries, INC (www.astecinc.com).

Bucala, V., Saito, H., Howard, J.H., and Peters, W.A., 1994, Thermal treatment of fuel oil contaminated soil under rapid heating condition, *Environ. Sci. Tech.*, **28**(11), 1801-1807.

Domenic Grasso, 1993, Hazardous waste site remediation source control, Lewis Publishers, USA.

ECC INC. (www.ecc.net).

ENVIRO-KLEAN REMEDIATION GROUP (www.enviroklean.com).

Envirosoil Limited (www.envirosoil.com).

EPA, 1992, On-site engineering report for the low-temperature thermal desorption pilot scale test on contaminated soil, EPA/600/SR-92/142, Risk reduction engineering laboratory, Cincinnati, OH.

EPA, 1994, Low-Temperature Thermal Desorption October.

MEL Environmental Solution (www.melltd.com).

Midwest Soil Remediation, INC. (www.midwestsoil.com).

Remtech INC. (www.remtech.com).

TARMAC International, INC. (www.tarmacinc.com).