

## 고압공기분사를 이용한 유류오염토양 세척기법의 적용성 연구

최상일 · 김강홍\*  
광운대학교 환경공학과

### Applicability of Washing Techniques Coupled with High-Pressure Air Jet for Petroleum-contaminated Soils

Sang Il Choi · Kang Hong Kim\*  
Department of Environmental Engineering, Kwangwoon University

#### ABSTRACT

Soil washing techniques coupled with high pressure air jet were applied for diesel-contaminated soils sampled by an underground oil reservoir of which the initial total petroleum hydrocarbon (TPH) ( $2,828 \pm 206$  mg/kg) exceeded 5 times of current standard level (500 mg/kg) regulated by the Soil-Environment Conservation Law. Through several tests, we found that the position of impeller has a critical impact for washing efficiencies. The highest washing efficiency was obtained at an oblique angle (30 degree) for the impeller and optimized mixing speed (300 rpm) that could have high shearing forces. Considered economical and feasible aspects, the optimum mixing time was 10 min. Rate constants of TPH removal derived from the first-order equation were not linearly increased as mixing speed increased, indicating that mechanical mixing has some limits to enhance the washing efficiencies. Application of high-pressure air jet in washing process increased the washing efficiency. This increase might be caused by the fact that the surface of micro-air bubbles strongly attached hydrophobic matters of soil particles. As the pressure of air jet increased, the separation efficiencies of TPH-contaminated soil particles increased. In the combined process of high-pressure air jet and mixing by impeller, the optimum mixing speed and air flow-rate were determined to be 60 rpm and  $2 \text{ kg/cm}^2$ , respectively. Consequently, the washing technique coupled with high-pressure air jet could be considered as a feasible application for remediating petroleum-contaminated soils.

**Key words :** Petroleum-contaminated soil, High-pressure air jet, Soil washing, Physical-desorption, Air bubble

#### 요 약 문

유류오염토양에 대한 고압공기분사를 이용한 세척기법의 적용성 연구를 위하여 저유소 주변의 실제 디젤오염토양을 사용하였으며 초기 오염농도는  $2,828 \pm 206 \text{ mg/kg}$ 으로 토양환경보전법상 가지역 우려기준 농도를 5배 이상 초과하였다. 세척공정의 기본 운전인자들에 대한 조건별 효율성 평가 및 최적조건 도출실험을 수행한 결과 효율적인 세척을 위하여 impeller는 편심 및 기울어진 중심에 위치하는 것이 가장 유리하였으며 교반속도는 높은 전단력(shear force)이 발생하는 고속교반조건(300 rpm)에서 세척효율이 가장 우수하였다. 교반시간은 10분이 효율성 및 경제성이 우수한 조건으로 판단되었으며 1차 반응속도식에서 도출된 교반속도별 속도상수들간 증가율 감소를 확인하여, 저속 교반조건(30, 60 rpm)에서도 추가적인 물리적 탈착력이 더해진다면 고속교반조건에서와 같은 제거효율을 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 고압공기 분사에 따른 세척효율은 소수성(hydrophobic)의 토양표면 유류물질이 수중의 공기방울 표면에 강하게 부착(attracting)되어 제거됨을 확인하였고 공기압이 높아질수록 반응기내 공기유량이 증가되면서 오염물질의 부착율이 향상되었다. Impeller에 의한 교반과 고압공기 분사 혼합공정에서는 60 rpm,  $2 \text{ kg/cm}^2$  조건이 가장

\*Corresponding author : kim216500@kw.ac.kr

원고접수일 : 2006. 9. 19    게재승인일 : 2006. 12. 15  
질의 및 토의 : 2007. 2. 28 까지

효율적으로 판단되었다. 따라서 고압공기분사를 통한 토양세척기법은 유류오염토양 정화에 효율적 적용이 가능할 것으로 사료된다.

**주제어** : 유류오염토양, 고압공기분사, 토양세척기법, 물리적 탈착, 기포

## 1. 서 론

최근 국내에서는 2만여개에 이르는 유류저장시설에서의 누출 및 크고 작은 군부대내 유류오염 사고와 군부대 이전 후 실시된 토양환경평가에 따른 오염현황 등이 보고되면서 유류오염토양 정화에 대한 관심이 증대되고 있다(환경부, 2005a).

이러한 상황에 맞추어 오염원인시설에 대한 보다 정밀한 조사의 필요성이 지적되면서 일부 토양환경보전법시행규칙이 개정되어 지난 2005년 7월부터 시행됨에 따라 유류오염토양 정화에 있어서 이전보다 강화된 법적규제를 받게 되었다(환경부, 2005b).

국내 유류오염토양 정화에 일반적으로 적용되고 있는 공법은 토양증기추출법(soil vapor extraction) 기술이 대표적이며 그 외에도 생물학적통풍(bioventing), 토양경작법(landfarming), 열탈착(thermal desorption) 그리고 토양세척(soil washing) 등의 기술이 적용되고 있다. 그러나 토양증기추출법, 생물학적 통풍, 토양경작법과 같은 기술들은 고농도 오염일 경우 정화기간이 길어지고 효율이 낮아져 적용이 제한된다. 또한 열탈착법은 다른 기술에 비하여 높은 처리효율성과 짧은 정화기간의 장점을 가지지만 과도한 정화비용의 소요로 경제성이 낮고 실제 적용된 사례도 제한적이며 일반적으로 적용되고 있는 토양세척기술은 농도에 큰 영향을 받지 않고 짧은 기간에 정화가 가능하지만 계면활성제(surfactant)를 사용하기 때문에 2차 오염을 유발하는 단점이 있다.

이에 따라 토양환경보전법상 강화된 TPH(total petroleum hydrocarbon) 기준을 맞출 수 있고 짧은 정화기간 및 경제적인 비용으로 적용이 가능하며 2차 오염을 줄일 수 있는 기술의 개발이 필수적이다.

본 연구에서는 토양세척기술과 결합된 고압공기 분사를 통한 오염토양과 물의 강한 물리적 교반을 유도하여 유류를 분리·제거하고 세척제로 물만을 사용하므로 2차 오염을 획기적으로 줄일 수 있는 세척기법에 대한 적용성을 평가하기 위하여 pilot 규모 현장실험에 대한 예비실험으

로 회분식 실험을 통하여 기본적인 운전조건에 대한 최적화에 목적을 두었다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1. 대상시료 및 분석

본 연구에서 사용한 토양은 J도 K시에 위치한 저유소(약 30년간 사용 후 폐쇄되었으며 정화 후 다른 용도로 이용) 주변 디젤(diesel) 오염토로 세척실험을 수행하기 전 기본적인 물리·화학적 특성을 파악하고자 함수율, pH, 유기물 함량, 비중 등의 항목(Table 1)과 세척효율에 가장 큰 영향을 미치는 입경분포를 분석하였으며 초기오염농도 및 입경별 오염부하량을 분석하였다.

pH는 토양오염공정시험법(환경부, 2002)에 따라 전처리하여 측정된 결과 pH 9.51로 알칼리성을 나타내었다. 직접회화법(direct ashing method)으로 측정된 유기물 함량은 0.94%로 우리나라 토양의 평균값(논 2.20%, 밭 1.90%)보다 낮은 것으로 나타났다(한국유기농협회, 2004). SOM(Soil Organic Matter) 함량은 유류와 같은 유기오염물질과 토양입자 사이의 흡착에 가장 큰 영향을 미치는 인자이며(Gschwend and Wu, 1985; Lee et al., 1990; Rutherford et al., 1992; Weber et al., 1992), pH가 높을수록 SOM의 구조가 팽창 또는 확장되어 유기오염물질의 탈착이 용이함(Bhandari et al., 2000)을 근거로 본 대상토양의 pH와 유기물함량은 세척효율 저감인자로 작용하지 않을 것으로 판단되었다.

입경분포 분석결과(Fig. 1) 세척이 어려운 silt, clay와 같은 #200 이하(0.075 mm 이하)의 fine fraction 비율이 6.5%, sandy fraction은 62.9%로 비교적 세척이 용이할 것으로 판단되었으며(William and Anderson, 1993) 입경분포곡선을 이용하여 파악한 균등계수( $C_u$ )는 10으로 입도분포가 양호(조태룡, 2005)하여 세척기법의 적용성에 문제가 없을 것으로 판단되었다.

토양오염공정시험법에 따라 전처리를 한 후 GC-FID (Agilent 6890N, USA)를 이용하여 분석한 결과 초기

**Table 1.** Physical and chemical characteristic of soil tested

Water Content(%)	pH	Organic content(%)	Particle density	Bulk density
2.8	9.51	0.94	2.46	1.69

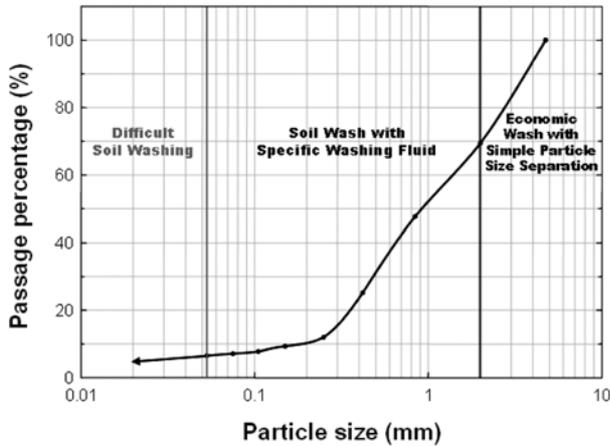


Fig. 1. Particle size distribution curve.

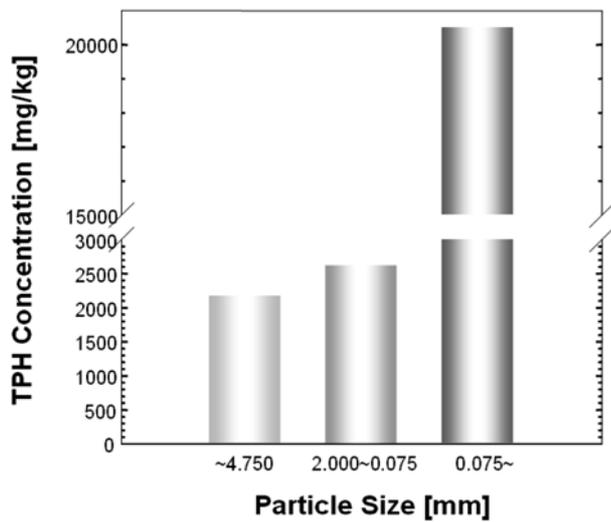


Fig. 2. Particle size vs. TPH concentration.

TPH 농도는  $2,828 \pm 206$  mg/kg으로 토양환경보전법상 가지역 우려기준 농도(500 mg/kg)를 5배 이상 초과하였으며, 입경별 TPH 부하량은 Fig. 2와 같다.

**2.2. Impeller 교반에 따른 세척 효율 평가 실험**

Impeller의 교반위치, 교반속도, 교반시간의 세척효율에 대한 영향을 파악하고 최적조건의 도출을 위하여 각 조건별 회분식 세척실험을 수행하였으며 실험조건은 Table 2와 같다.

교반위치에 따른 실험은 impeller의 위치를 중심, 편심, 기울어진 중심회전으로 나누어 실험하였으며 교반속도 실험에서는 최적 impeller 위치에서 저속(30, 60 rpm), 중속(90, 150 rpm), 고속(300 rpm) 교반 조건으로 나누어 효율성을 비교·평가하였다. 또한 교반시간에 따른 실험

**Table 2.** Impeller mixing condition

	Impeller Position	Mixing Rate	Mixing Time
Cut-off size (mm)		2.000 ~ 0.075	
Mixing Ratio (g-soil : ml-sol.)	1 : 2 (500 g-soil : 1000 mL-sol.)		
Mixing Time (min)		10	5, 10, 15, 20
Mixing Rate (rpm)	300	30, 60, 90, 150, 300	30, 60, 300
Temp. (°C)	20 ± 0.5		

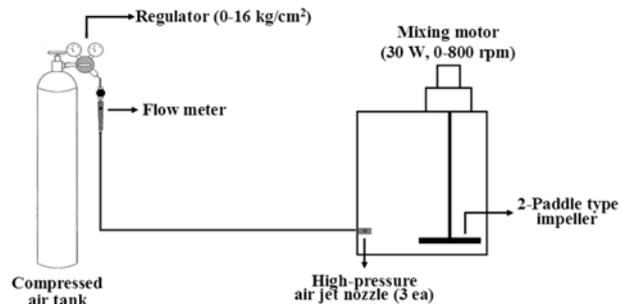


Fig. 3. Schematic diagram of the soil washing system combined with high-pressure air jet system.

에서는 위 실험들의 결과를 바탕으로 저속 및 고속 교반 조건별 탈착의 거동특성을 비교·평가하고 최적 교반시간조건을 도출하기 위하여 세척시간을 5, 10, 15, 20 min으로 구분하여 수행하였다.

모든 실험에서 단순한 교반으로는 큰 세척효율을 얻을 수 없는 미세토양과 균일한 대상토양을 얻기 위하여 cut-off size를 2.000-0.075 mm로 하였으며, 공정의 경제성을 고려하여 토양(g)과 세척용액-물(mL)의 진탕비를 1 : 2(토양 : 세척용액)로 고정하였다.

**2.3. 고압공기 분사에 따른 세척 효율 평가 실험**

본 실험을 수행하기 위하여 고압공기 분사노즐을 장착한 open system의 반응기(Fig. 3)를 제작하였다. 2 L 용량의 반응기로 일정한 유량의 고압공기를 반응기내에 주입하기 위하여 압축공기를 사용하였으며 regulator (pressure range 0-16 bar)를 이용하여 공기압의 조절이 가능하였다.

고압공기 분사에 따른 세척효율성을 평가하기 위하여 cut-off size, 온도, 진탕비는 section 2.2의 실험 조건과 동일하게 하였으며, 공기 주입시간은 10분으로 고정하였고 공기압을 2, 4, 6 kg/cm<sup>2</sup>으로 변화시켜 실험을 수행하였다.

**2.4. Impeller 교반과 고압공기 분사에 따른 세척 효율 평가 실험**

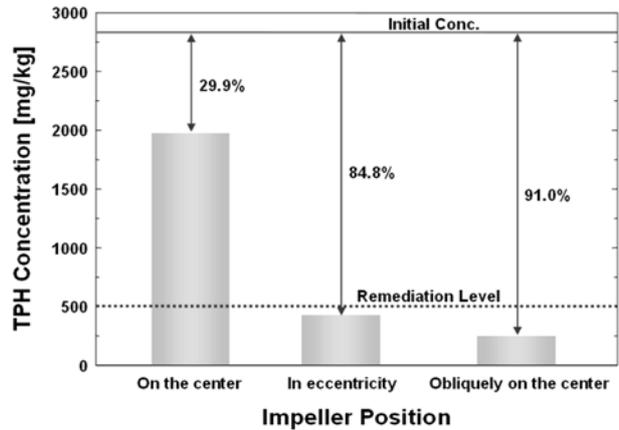
세척의 효율성 향상을 위하여 impeller와 고압공기 분사에 따른 물리적 교반력과 미세공기의 유류오염물질 부착력을 동시에 적용한 실험으로 효율을 이전 실험결과와 비교 분석하였다. 이때 적용된 cut-off size는 2.000 mm 이하이고 분사되는 공기압은 가장 높은 효율성을 보였으나 실험과정에서 반응용기와 토양 및 세척용액의 부피대 비 큰 압력으로 경제적이지 못하였던 6 kg/cm<sup>2</sup> 조건을 제외하고 1, 2, 4 kg/cm<sup>2</sup>을 공기압 조건으로 선정하여 수행하였다.

**3. 결과 및 고찰**

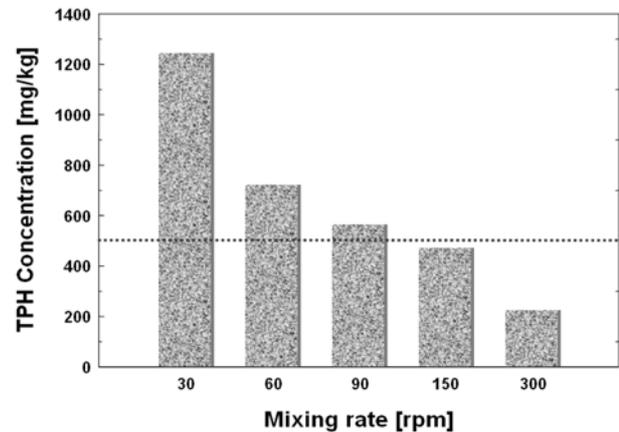
**3.1. Impeller 교반에 따른 효율성 평가**

Impeller의 교반위치에 따른 세척실험 결과(Fig. 4. (a)) 중심회전의 경우 세척 후 잔류 TPH 농도가 1983.5 mg/kg(제거율 30%)으로 세척효율이 낮았으나, 편심회전과 기울어진 중심회전의 경우 잔류 TPH 농도가 각각 428.7 (85%), 253.2(91%) mg/kg으로 높은 세척효율을 보였으며 특히 기울어진 중심회전은 토양환경보전법상 가지역 우려 기준 농도를 만족하는 결과를 보였다. Impeller에 의한 세척용액과 토양입자의 교반에 관여하는 유동으로는 교반축에 직각으로 흐르는 접선류(tangential flow), 교반축과 평행으로 작용하는 축류(axial flow), 교반축과 동심원을 이루는 회전류(rotational flow)가 작용(Bogazici Univ., 2003)하게 되는데 impeller가 반응기의 중심에 위치할 경우 축과 동일하게 회전하는 concentric-vortex flow 현상(강한 회전류로 인함)이 발생하여 각 층간 속도구배(velocity gradient, G)가 매우 작고 이로 인하여 세척용액과 토양입자 또는 토양입자간 충돌이 일어나지 않아 세척효율의 향상을 기대할 수 없다. 그러나 impeller가 반응기의 편심에 위치하거나 기울어진 중심회전의 경우 concentric-vortex flow 현상이 감소되고 상·하 대류에 의한 난류(turbulent flow) 현상이 발생하여 세척용액과 토양입자 또는 토양입자간 충돌빈도가 높아지므로 높은 세척효율을 얻을 수 있고(HANMIX, 2004), 본 연구에서는 실험진행의 용이성 등을 고려하여 최적 impeller의 위치를 편심으로 결정하였다.

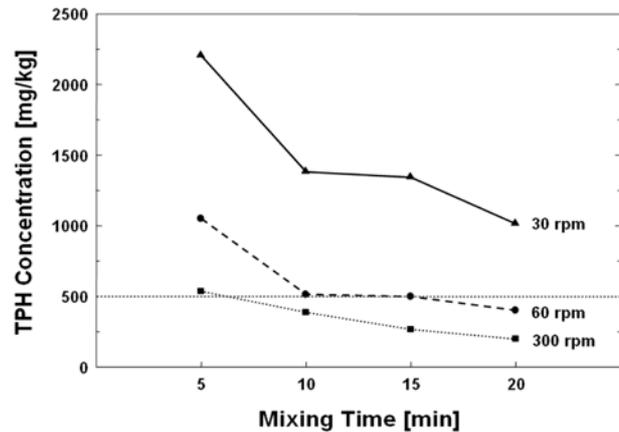
교반속도에 따른 효율성(Fig. 4. (b))은 저속 교반조건인 30, 60 rpm 조건에서 잔류 TPH 농도가 각각 1246.9 (56%), 724.3(74%) mg/kg이었으며 중속 교반조건인 90, 150 rpm 조건에서는 567.6(80%), 473.4(83%) mg/kg, 고속 교반조건인 300 rpm 조건에서는 227.1(92%) mg/kg



(a)



(b)



(c)

Fig. 4. The efficiency evaluation of impeller mixing.

을 나타내었다. 이처럼 고속 교반조건에서 TPH 제거효율이 높은 것은 교반속도가 빨라질수록 유체의 흐름에 대한 속도구배가 증가되고 이에 따라 입자간 충돌횟수의 증가로 인한 높은 전단력(shear force)이 발생하기 때문이다.

교반시간에 따른 세척효율성 평가 실험 결과(Fig. 4.

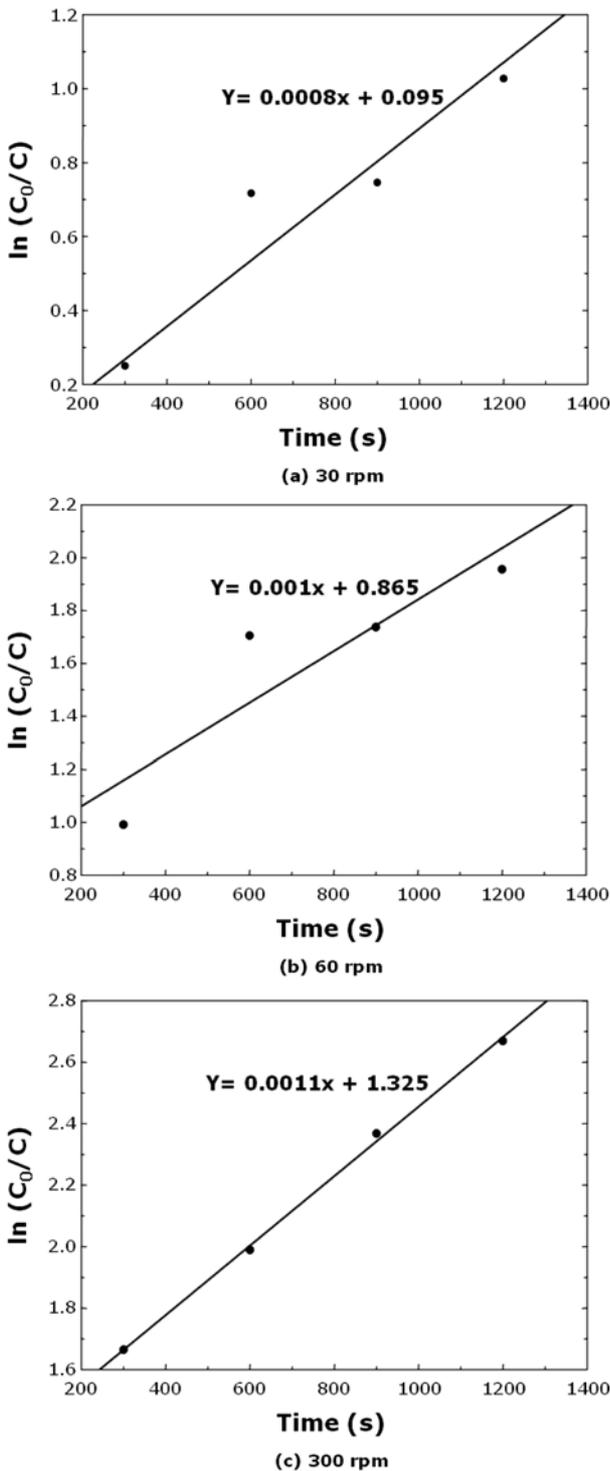


Fig. 5. 1st ordered reaction rate for various rotation speeds.

(c), 30 rpm 조건에서 5-10분 사이에 2203.5(22%) mg/kg에서 1380.7(51%) mg/kg으로 TPH 농도가 2배 가까이 감소하였으며 10분 이후에는 1341.7(53%), 1012.9(64%) mg/kg으로 제거율에 큰 차이가 없음을 알 수 있었다. 또

한, 60 rpm 조건에서도 5-10분 사이에 비교적 큰 TPH 농도의 감소율을 나타내었으며 10분 이후에 평행에 가까운 제거율을 보였다. 300 rpm 조건에서는 5-20분 사이의 농도가 각각 535.8, 387.1, 265.9, 196.9 mg/kg으로 교반시간에 따라 계속적으로 감소되는 경향을 보였다. 따라서 효율성과 경제성을 함께 고려할 때 최적 교반시간은 10분으로 판단되었다.

또한 시간에 따른 TPH 농도 변화를 아래의 1차 반응 속도식(Octave, 1998)에 적용하여 속도상수를 결정하였다. 결정된 속도상수는 오염물의 종류와 상태, 토양표면의 성질, 세척용액의 종류와 농도, 반응온도, 기계적 작용 등의 차이를 알아볼 수 있는 인자이며 본 실험에서는 기계적 작용을 제외한 모든 조건이 동일하므로 각 조건별 속도상수 k를 통하여 기계적 작용에서의 차이를 알아보고자 하였다.

$$\ln\left(\frac{C_0}{C}\right) = k\Delta t$$

여기서,  $C_0$  = 초기오염물의 농도 (mg/kg)

$C$  = t 시간 후 오염물의 농도 (mg/kg)

t = 시간 (s)

k = 속도상수

1차 반응속도식에 적용한 결과(Fig. 5) 30, 60, 300 rpm의 속도상수 k는 각각 0.0008, 0.001, 0.0011 s<sup>-1</sup>로 교반속도가 증가함에 따라 속도상수도 증가하였다. 따라서 교반속도가 증가할수록 기계적 작용으로 인한 물리적 탈착력이 커지지만 그 폭은 감소함을 알 수 있었으며, 저속교반조건(30, 60 rpm)에서도 추가적인 물리적 탈착력이 더해진다면 고속교반조건에서와 같은 제거효율을 얻을 수 있을 것으로 판단되었다.

### 3.2. 고압공기 분사에 따른 세척 효율 평가

분사되는 공기압이 2, 4, 6 kg/cm<sup>2</sup>로 높아질수록 잔류 TPH 농도(Fig. 6)는 각각 787.9, 743.1, 609.5 mg/kg을 나타내어 공기분사에 의한 탈착 효율성 및 공기압 증가에 따른 효율성 증가 효과를 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 토양표면 유류물질이 소수성(hydrophobic)을 가져 수중의 공기방울 표면에 강하게 부착(attracting)되는 특성으로 나타나는 현상(Urum et al., 2005)과 공기압이 높아질수록 반응기내 공기유량이 증가되고 이에 따른 부착을 향상 때문으로 판단된다.

비록 모든 조건에서 토양환경보전법상 기준농도를 만족

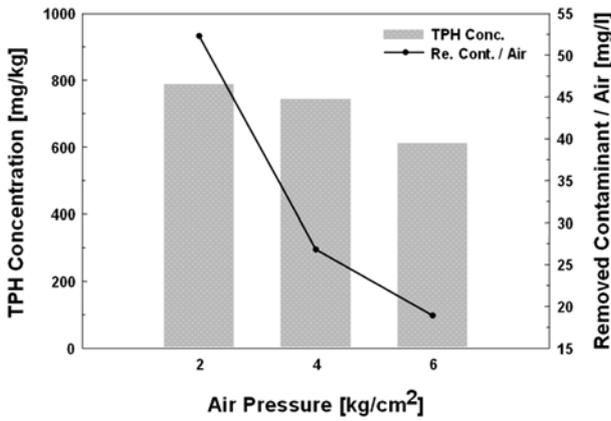
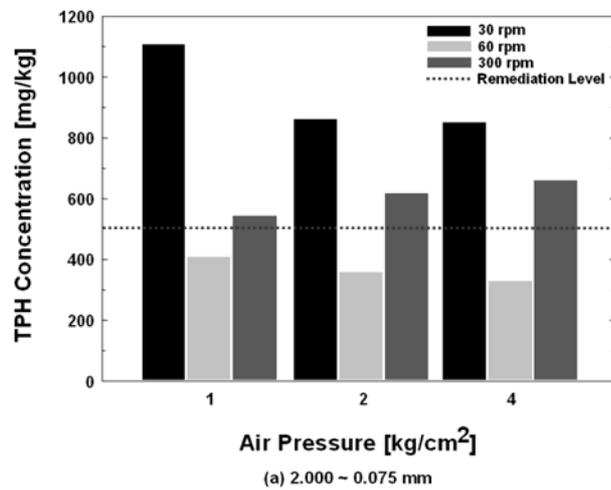
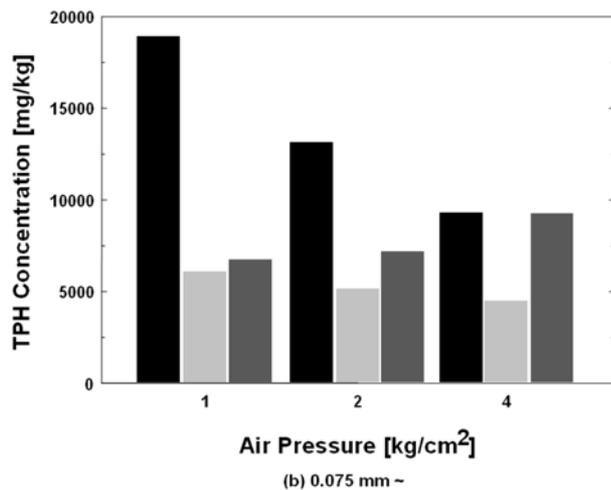


Fig. 6. The efficiency of high pressure air jet on the TPH removal from contaminated soil.



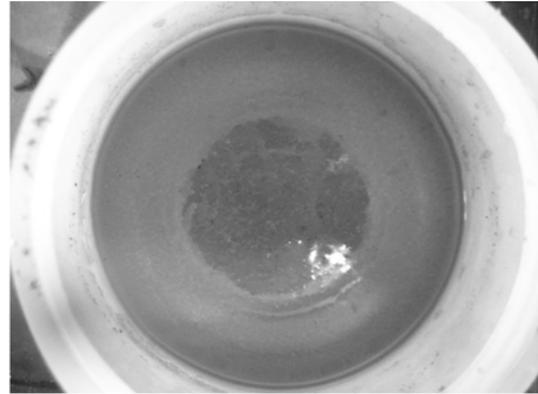
(a) 2.000 ~ 0.075 mm



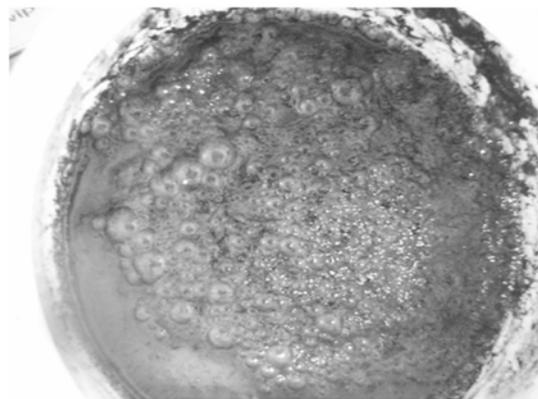
(b) 0.075 mm ~

Fig. 7. The efficiency of combined process of impeller mixing and high pressure air jet.

하지 못하는 제거효율(70, 72, 77%)을 나타내었으나 이것은 실험시 장치내 공기분사 노즐이 설치되어 있는 반대편



(a) Only impeller mixing



(b) Impeller mixing + high pressure air jet

Fig. 8. Washing effluent.

에 사각지대(dead-zone)의 발생으로 인한 효율성 감소 때문이며 homogeneous mixing effect를 위한 impeller 교반공정이 추가된다면 단일 공정에 비하여 더욱 큰 효율성 향상 효과가 기대되었으며 특히 저속교반조건에 대한 물리적 탈착력 증대를 통한 고속교반조건에서와 같은 제거 효율을 기대할 수 있을 것으로 판단되었다.

### 3.3. Impeller 교반과 고압공기 분사에 따른 효율성 평가

2.000-0.075 mm 입경범위의 토양에 대한 효율성(Fig. 7. (a))은 30, 60 rpm 조건에서 공기압을 증가시켰을 때 각각 1105.6, 861.3, 848.5 mg/kg과 406.1, 355.9, 328.3 mg/kg으로 잔류 TPH 농도가 감소하는 경향을 보였으나 30 rpm, 1-2 kg/cm<sup>2</sup> 사이의 농도변화를 제외하고 비교적 큰 변화를 보이지 않았다. 그러나 300 rpm 조건에서는 공기압을 증가시킬수록 농도가 541.1, 615.5, 659.3 mg/kg으로 증가되어 오히려 세척효율이 감소되는 결과를 보였다. Fig. 8은 10분 동안 교반(a)과 교반 + 공기분사(b)에 의하여 세척한 후의 모습으로 세척효율의 차

이를 쉽게 확인할 수 있다.

Impeller에 의한 교반과 고압공기 분사공정이 더해지면 공기분사 공정에서 발생하는 사각지대 현상이 방지되고 공기와 토양간 접촉율을 높여 세척효율을 향상시킬 수 있다. 그러나 30 rpm 조건에서는 앞서 수행한 실험에서도 확인된 바와 같이 물리적 교반력 및 기타 기계적인 작용 능력이 약해 큰 세척효율을 기대하기 어렵기 때문에 공기압을 높여주어도 공기분사에 따른 효과 이외에는 큰 세척효율을 얻기 힘들다. 반면 60 rpm 조건에서는 반응속도 상수에서 나타난 것처럼 300 rpm 조건과 큰 차이를 보이지 않아 공기분사 효과에 교반효과가 더해져 높은 세척효율을 얻을 수 있었다. 특히 수중에 분사된 공기가 impeller 회전에 의한 전단력으로 보다 미세한 기포로 되면서 더욱 큰 효율성 향상 효과를 가져 온 것으로 판단되었다. 특이한 사항으로 300 rpm 조건에서는 다른 두 조건과 상이한 결과를 나타내었는데 두 입경범위 조건에서 같은 결과도 출되었기 때문에 실험상 오차로 여겨지지 않으며 정확한 원인규명을 위한 추가적인 연구가 수행되어야 할 것으로 판단되었다.

위와 같은 결과로 본 연구에서 사용한 디젤 오염토양에 대하여 공기 분사시 고속교반(300 rpm)보다는 저속교반조건(60 rpm)이 유리하며 공기압은 2 kg/cm<sup>2</sup>(약 39 mL-air/g-soil) 조건이 최적으로 판단되었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 주변 환경인자에 대한 영향이 적고 자체적인 조건조절이 가능한 폐쇄형 공정으로 단시간에 오염물질의 양과 오염된 토양의 부피를 감소시킬 수 있는 고효율의 토양세척기술(West and Harwell, 1992)을 바탕으로 고압공기분사를 통한 오염토양과 물의 강한 물리적 교반을 유도하여 유류를 분리·제거하고 물만을 사용하여 계면활성제에 의한 2차 오염을 획기적으로 줄일 수 있는 세척기법에 대한 적용성을 평가하기 위하여 pilot 규모 현장실험에 대한 예비실험으로 회분식 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 유류오염토양의 효율적인 세척을 위하여 impeller는 Concentric-Vortex Flow 현상이 감소되고 상·하 대류에 의한 난류(turbulent flow)현상이 발생하여 세척용액과 토양입자 또는 토양입자간 충돌빈도가 높은 편심 및 기울어진 중심에 위치하여야 하며 교반속도의 경우 고속교반조건에서 유체의 흐름에 대한 속도구배가 증가되고 이에 따라 입자간 충돌횟수의 증가로 인한 높은 전단력(shear

force)이 발생하여 높은 세척효율을 나타내었다. 교반시간은 효율성과 경제성을 고려할 때 10분 동안의 교반이 최적조건으로 판단되었으며 반응속도식을 적용한 결과 교반속도가 증가할수록 기계적 작용으로 인한 물리적 탈착력이 커지지만 그 폭은 감소함을 알 수 있었으며, 저속교반조건(30, 60 rpm)에서도 추가적인 물리적 탈착력이 더해진다면 고속교반조건에서와 같은 제거효율을 얻을 수 있을 것으로 판단되었다.

2. 고압의 공기를 분사함에 따라 소수성(hydrophobic)을 가지는 토양표면 유류물질이 수중의 공기방울 표면에 강하게 부착(attracting)되면서 제거됨을 확인하였으며 공기압이 높아질수록 반응기내 공기유량이 증가되어 부착율이 향상됨을 알 수 있었다. 그러나 공기분사 노즐이 설치되어 있는 반대편에 사각지대(dead-zone)의 발생으로 효율성이 저감되기 때문에 impeller에 의한 교반공정이 추가되어야 할 것으로 판단되었다.

3. Impeller에 의한 교반과 고압공기 분사공정이 더해지면 공기분사 공정에서 발생하는 사각지대 현상이 방지되고 공기와 토양간 접촉율을 높여 세척효율이 향상되었으며 특히 혼합공정에서는 고속교반조건(300 rpm)보다 저속교반조건(60 rpm)이 효율성 향상에 유리함을 알 수 있었다.

#### 사 사

본 연구는 2006년도 광운대학교 교내 학술연구비 지원에 의해 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- 조태룡, 2005, 토질역학, 일진사.
- 한국유기농협회, 2004, 친환경농업-유기농업(1).
- 환경부, 2002, 토양오염공정시험법.
- 환경부, 2005a, 특정토양오염관리대상시설 설치신고 및 검사결과 현황.
- 환경부, 2005b, 토양환경보전법 시행령·시행규칙 개정.
- Bhandari1, A., J.T. Novak2, and D.C. Dove, 2000, Effect of soil washing on Petroleum hydrocarbon distribution on sand surfaces, *Journal of Hazardous Substance Research*, 2, 7.1-7.13
- Bogazici Univ. (Turkey), 2003, Chemical Engineering Laboratory I, Chap. 11 Mixing Efficiency in a Stirred Tank.
- Gschwend, P.M. and S.C. Wu, 1985, On the constancy of sediment-water partition coefficients of hydrophobic organic pollutants, *Environ. Sci. Technol.* 19(1), 90-96.

HANMIX (Korea), 2004, Technology Report.

Lee, L.S., P.S.C. Rao, P. Nkedi-Kizza, and J.J. Delfino, 1990, Influence of solvent and sorbent characteristics on distribution of pentachlorophenol in octanol-water and soil-water systems, *Environ. Sci. Technol.* **24**(5), 654-661.

Octave, I., 1998, *Chemical Reaction Engineering*: 3rd ed., Wiley.

Rutherford, D.W., C.T. Chiou, and D.E. Kile, 1992, Influence of soil organic matter composition on the partition of organic compounds, *Environ. Sci. Technol.* **26**(2), 366-340.

Urum, K., Turgay, P., David, R., and Steve, G., 2005, Crude oil contaminated soil washing in air sparging assisted stirred tank

reactor using biosurfactants, *Chemosphere*, **60**, 334-343.

Weber, W.J., J.P.M. McGinley, and L.E. Katz, 1992, A distributed reactivity model for sorption by soils and sediments. 1. Conceptual basis and equilibrium assessments, *Environ. Sci. Technol.* **26**(10), 1955-1962.

William C. and Anderson, P.E., 1993, Innovative site remediation technology soil washing/soil flushing, *American Academy of Environmental Engineers*, **3**, 4.3.