

## 토양 세척 시 초음파 적용에 따른 유기 오염물 제거 특성 평가

임찬수<sup>1</sup> · 김석구<sup>2</sup> · 김원재<sup>2</sup> · 고석오<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>경희대학교 토목공학과

<sup>2</sup>한국건설기술연구원 수자원 · 환경연구본부

### Removal Characteristics of Organic Contaminants by Ultrasonic Soil Washing

Chan-Soo Lim<sup>1</sup> · Seog-Ku Kim<sup>2</sup> · Weon-Jae Kim<sup>2</sup> · Seok-Oh Ko<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Civil Engineering Department, Kyung Hee University

<sup>2</sup>Environment Engineering Research Div., Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

#### ABSTRACT

Cavitation generated by ultrasonic irradiation can enhance the diffusional transport of organic contaminants from soil surfaces or pores. Therefore, ultrasound soil washing can be an alternative of traditional soil washing process. In this study, soil was artificially contaminated with n-tetradecane, n-hexadecane and phenanthrene. A plate type ultrasonic reactor at 25 kHz frequency and 1000 W power was used for laboratory soil washing experiments. Ultrasonic soil washing efficiency was compared with those of traditional soil washing using mechanical mixing. Various operational parameter such as soil/liquid ratio, irradiation time, particle size, and soil organic matter content was tested to find out the optimum condition. It was found that ultrasonic soil washing demonstrates better performance than mechanical soil washing. Optimum soil:liquid ratio for ultrasonic soil washing was 1 : 5. Desorption of organic contaminants from soils by ultrasonic irradiation was relatively fast and reached equilibrium within 10 minute. However, decrease in the soil particle sizes by ultrasonic irradiation results in re-adsorption of contaminants to soil phase. It was also observed that soil particle size distribution and soil organic matter content have significant effects on the efficiency of ultrasonic soil washing.

**Key words :** Ultrasound, Desorption, Soil Washing, Soil organic matter, Particle size distribution

#### 1. 서 론

토양에 유입된 유류 오염물은 소수성이 강해 토양에 강하게 흡착되어 존재하거나 NAPL(none aqueous phase liquid)의 형태로 존재하게 되어 장시간에 걸쳐 위해성을 유발하고 있다(Feng and Aldrich, 2000). 토양 세척법은 세척액과 토양의 슬러리를 형성하여 토양으로부터 오염물을 분리하는 공법으로서, 고농도로 오염된 토양을 대상으로 하나 미세입도(< 75 μm)의 토양인 경우 세척효율이 낮아 폐기물 처리를 하는 것이 일반적이다.

초음파는 토양 세척 공정에 있어, 기존의 토양 세척 공법의 효율을 증가시킬 수 있는 공법으로서 주목받고 있다

(Feng and Aldrich, 2000; Kim and Wang, 2003; Son et al., 2012). 오염물이 방향족 탄화수소인 경우, 초음파에 의해 발생하는 공동 현상(cavitation)을 통해 산화 또는 열 분해가 가능한 것으로 알려져 있다(Flores et al., 2007; Collings et al., 2007; Shrestha et al., 2009; Thangavadivel et al., 2009). 초음파에 의한 공동 현상은 공동의 형성, 성장 그리고 붕괴의 과정을 거치게 된다. 발생한 공동은 구 형태를 유지하며 성장과 축소를 반복한 후 붕괴하는 것이 일반적이지만, 용액에 고형물이 존재하는 경우 고형물의 표면에서 공동은 돔 형태의 형상을 가지게 되어 고형물의 표면에 강한 충격(jet)을 가한 후 붕괴하는 것이 증명된 바 있다(Coleman and Saumders, 1987). 토양에

\*Corresponding author : soko@khu.ac.kr

Received : 2014. 10. 17 Reviewed : 2014. 10. 30 Accepted : 2014. 11. 1

Discussion until : 2015. 2. 28

강력한 충격이 가해지게 되면, 토양 표면 또는 내부 공극에 강하게 흡착되어 존재하는 물질에 직접적인 에너지를 가하거나 토양의 표면에 균열을 만들어 물질의 움직임을 쉽게 만들 수 있어, 토양 세척 공정에 있어서 토양으로부터의 오염물 분리 또는 탈착 효율에 큰 영향을 줄 수 있다(Mason et al., 2004).

기존 연구에서 초음파를 이용한 토양 세척 시 영향을 줄 수 있는 고액비, 조사 시간, 대상 토양의 입경, 오염 농도, 주파수, 강도, column test 등 다양한 인자에 대해 연구한 바 있다. 그러나, 초음파를 이용한 토양 세척 공정에 대한 연구는 오염물 처리효과는 좋으나 유지관리가 어렵고 매우 작은 부피의 용량을 처리할 수 있어 실질적인 사용이 어려운 직접 조사(horn type) 장치를 사용한 연구가 대부분이다. 본 연구에서 사용한 초음파 장치는 판(plate) 조사(irradiation) 형태로서, 6개의 판이 6각형 반응기를 만들며, 각 판에 진동자가 부착되어 초음파를 조사하는 장치를 사용하였다. 본 연구에서는 초음파를 이용한 토양 세척 시 토양 또는 슬러리의 특성이 세척 효율에 미치는 영향을 확인하기 위하여 슬러리의 고액비, 초음파의 조사 시간, 토양의 입경, 토양 내 유기물질의 존재 형태(Soil organic matter, SOM) 등을 영향인자로 하였으며, 교반에 의한 세척 효율을 함께 제시하여 초음파에 의한 효율 향상 정도를 확인하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 오염토양

본 연구에서는 대표 오염물질로서 휘발성이 낮은 alkane 화합물 중 n-tetradecane (C14)과 n-hexadecane (C16)을 사용하였으며 방향족 탄화수소 중 phenanthrene (PHE)으로 토양을 오염시켜 실험을 수행하였다. 토양의 오염은 C14, C16, PHE를 용해시킨 디클로로메탄 500 mL와 토양을 혼합한 후, 실온에서 18시간 동안 디클로로메탄을 완전히 휘발시켜 인공오염 토양을 제조하였다. 이

때 오염물의 농도는 용해도보다 큰 농도를 사용하였으며 C14, C16, PHE 각각 1,000, 1,000, 100 mg/kg으로 하여 TPH 기준 2,100 mg/kg으로 하였다.

토양은 ○○시 부지에서 채취한 것을 사용하였으며 pH는 토양과 탈이온수의 비율을 1:5로 하여 측정하였으며 약 6.8의 값을 보였다, 유기물 함량은 600°C에서 5시간 동안 소각하여 그 무게차를 유기물 함량으로 하였으며 약 7.12%였다. 토양의 입도 분포는 표준체 No. 35, 50, 100, 140, 200를 사용하여 체 분석을 수행하였다.

2.2. 실험 방법

본 연구에 사용된 초음파 장치는 6각형의 반응기 각 벽면에 진동자를 부착하여 발생하는 초음파를 이용하는 실험 장치로, 판형 조사 방식(plate type)이다. 직접 조사 방식(horn type) 또는 간접 조사 방식(bath type)에 비해 실증적인 모사가 가능하다는 장점이 있다. 초음파의 주파수는 25 kHz, 강도는 1000 W를 적용하였다.

오염물 제거효과 평가를 위하여 조건별로 제조된 오염 토양 슬러리를 함유한 40 mL 배치 반응기를 초음파 장치에 거치하여 정해진 시간동안 초음파를 조사하였다. 고액 분리를 위하여 토양 대부분이 사질토임을 감안하여 반응기를 30분간 거치하여 침전에 의하여 용액상과 고체상을 분리하였다. 기존에 수행된 연구에서는 세척 효율 평가 단계에서 토양과 세척액을 완전히 분리한 후 토양상(phase)에 잔류하는 오염물만을 분석하여 효율을 평가하였다. 그러나 본 연구에서는 초음파 조사 전후의 각 상(phase)에서의 농도변화를 평가하기 위하여 상등액과 반응기에 남아 있는 슬러리에 각각 추출용매를 혼합하여 오염물 분석을 수행함으로써 물질수지를 평가하였다. 슬러리 전체 오염물 농도에서 상등액 농도분석치로부터 구한 슬러리 용액내 농도를 뺀 농도를 토양내 남아있는 오염물 농도로 하였다. 이 때, 토양의 질량은 슬러리를 건조 후 측정하여 적용하였다. 실험방법에 대한 모식도를 Fig. 1에 나타내었으며 반응기의 온도는 수욕조를 이용하여 일정하게 유지하였다.

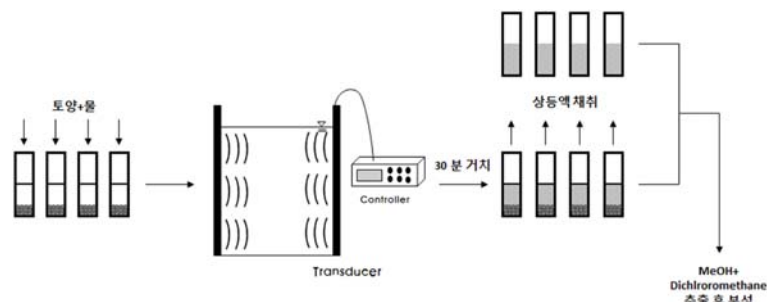


Fig. 1. Laboratory test schematic for ultrasonic soil washing.

본 연구에 사용된 중휘발성 오염물의 경우 토양에 흡착되어 존재하는 경우 휘발이 거의 일어나지 않지만(Watts and Dilly, 1996), 탈착되어 수용액에 용존상태로 있거나 NAPL(Non-aqueous phase liquid)로 존재하는 경우 추가적인 휘발이 발생할 수 있다. 토양내 존재하는 중휘발성 유류오염물의 추가적 휘발현상은 토양에서의 탈착이 반드시 수반되어야 하기 때문에 휘발에 의한 오염물 제거량은 초음파 세척에 의한 제거율에 포함시켰다. 이때 휘발에 의해

발생된 오염물 제거량은 초기 오염물 양(mg)에서 각 상(phase)에서의 오염물 양(mg)을 뺀 값으로 나타내었다.

2.3. 분석 방법

채취한 상등액과 반응기내 슬러리 각각에 메탄올 10 mL와 디클로로메탄 10 mL를 주입하여 30분간 텀블러로 교반(60 rpm)하여 유기오염물을 추출한 후 FID가 장착된 Gas Chromatography(Varian 3800, Varian)을 이용하여 실시하였다. GC 분석 조건 및 사용한 컬럼의 사양을 아래 Table 1에 나타내었다.

Table 1. GC/FID condition for TPHs analysis

Instrument settings			
Injection volume	0.5 µl		
Injection technique	split ratio : setpoint 100		
Injector temp.	260°C		
Detector temp.	260°C		
Carrier gas	N		
Temperature Program			
Temp (°C)	Rate (°C/min)	Hold (min)	Total (min)
50	-	5	5
260	15	1	20
Column			
Material	Fused Silica tubing		
Length	30 m		
Int. Diameter	0.53 mm		

3. 결과 및 고찰

3.1. 고액비 영향

고액비(solid/liquid ratio)가 오염물의 탈착 제거에 미치는 영향 평가를 위하여 초음파의 총 조사 시간은 30분으로 하였으며, 시료의 주입은 물 10 mL에 각 토양 0.5, 0.667, 1.0, 2.0, 3.333, 5.0 g을 주입하여 고액비 조건을 1:20, 1:15, 1:10, 1:5, 1:3, 1:2로 하였다. 또한, 초음파 조사 시 탈착효과는 다른 물리적 교반 (텀블러, 30분)에 의한 효과와 비교 평가하였다.

텀블러 교반 시 고액비 변화에 따른 오염물의 탈착 정도는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 고액비가 감소할수록 오

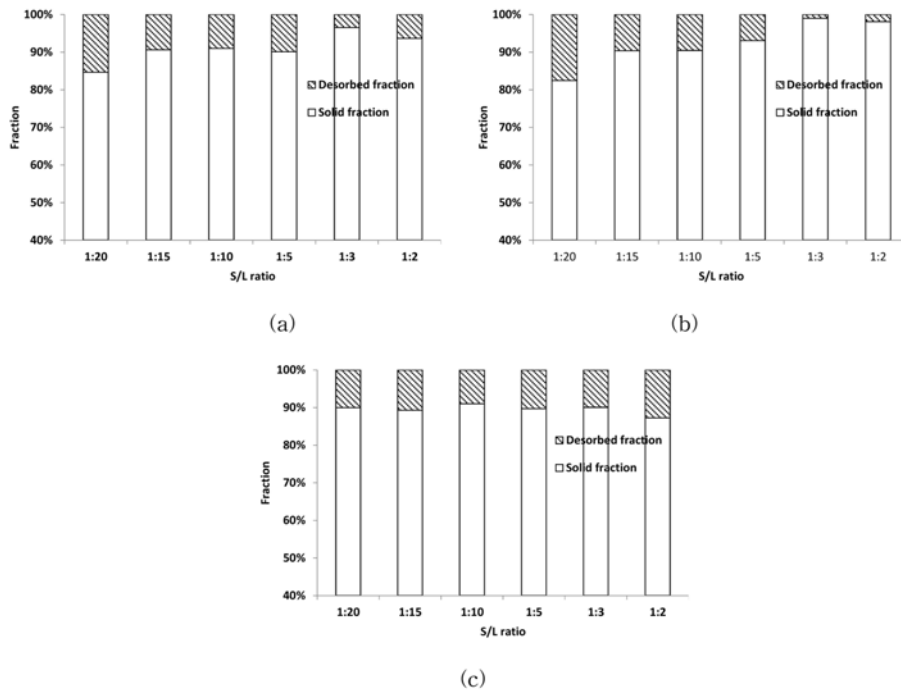


Fig. 2. Distribution of organic contaminants between aqueous and solid phase at different soil/liquid ratio in the case of mechanical mixing (150 rpm, 30 min) (a) C14, (b) C16, (c) PHE.

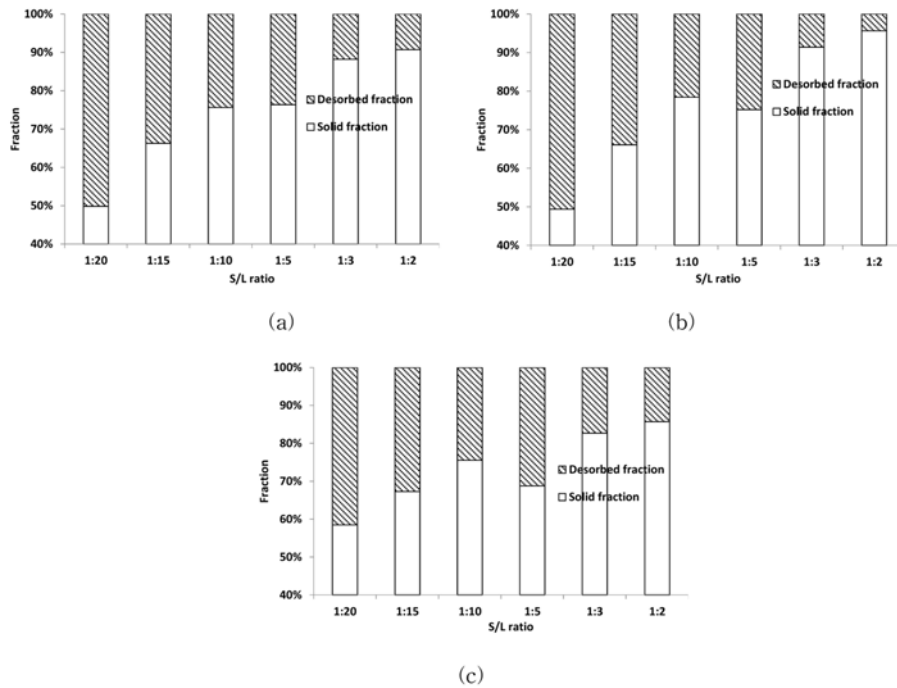


Fig. 3. Distribution of organic contaminants between aqueous and solid phase at different soil/liquid ratio in the case of ultrasonic washing (a) C14, (b) C16, (c) PHE (frequency: 25 kHz, intensity: 1000 W, irradiation time: 30 min).

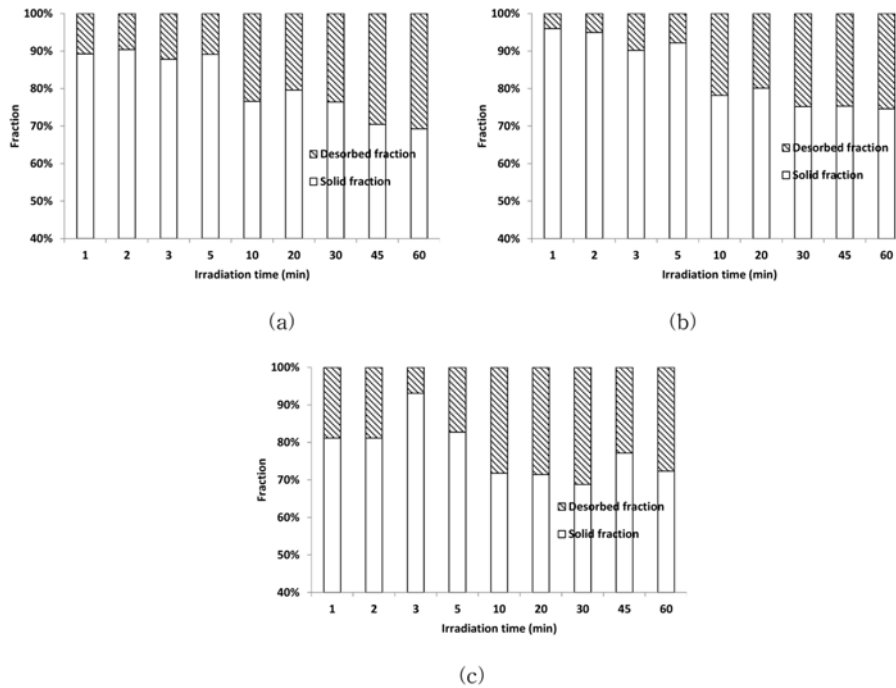
염물의 탈착율은 증가하나 고액비별 차이는 그다지 크지 않음을 나타내고 있다. 특히 phenanthrene(PHE)의 경우 고액비 감소에 따른 탈착효과가 두드러지지 않았다. 이는 용해도 이상의 농도로 오염된 경우 단순 교반에 의한 토양입자와 오염물간의 상호작용에 있어서 고액비별 큰 차이를 보이지 않음에 기인한다고 판단된다.

초음파를 조사하는 경우, 고액비가 낮을수록 초음파에 의한 탈착 효율 향상이 큰 것으로 나타나 고액비 1/20의 조건에서 최대 탈착율을 보였다(Fig. 3). 초음파를 이용한 유기 오염물 탈착 시, 공동의 성장 및 붕괴에 의해 토양의 표면에 전달되는 음파의 강도는 고액비와 매우 밀접하게 관계가 있다. 고액비가 증가할수록 토양에 의한 초음파의 강도 손실이 커지기 때문에 초음파에 의한 오염물 탈착 효율이 감소한다. 하지만, 1/5의 경우 1/10과 비교하였을 때 비슷하거나 높은 비율의 오염물이 탈착되었는데 이는 고액비가 높은 경우, 슬러리의 점성 증가에 의해 초음파의 전달 효율은 감소하는 반면, 초음파에 의해 발생하는 공동의 붕괴 강도가 증가하기 때문이다(Mason and Lorimer, 1988). Feng and Aldrich(2000)의 경우 슬러지 함량 20%의 경우에 비해 슬러지 함량 50%에서의 효율이 더 증가하며, 그보다 높은 65%에서는 다시 효율이 감소한다고 밝힌 바 있으며, 이 때 최대 효율을 보이는 슬러지 함량 50%를 최적점(critical point)라 표현하였다. 고액

비가 크게 증가한 1/2 조건의 경우 초음파 조사와 텀블러 교반에 의한 탈착 효과는 유사한 정도를 보이고 있다. 이는 고액비가 증가하는 경우 슬러리의 점성이 점점 증가하게 되어 음파의 전달 효율이 떨어질 뿐만 아니라, 초음파에 의한 입자의 유동이 어려워짐에 따라 반응기의 외벽 근처에 존재하는 입자에 초음파의 효과가 집중되었기 때문이다(Son et al., 2011). 이론적으로, 초음파는 액상에 존재하는 고형물을 통해 전달될 수 있지만, 액상과 고형물 사이의 경계 변동에 의해 흡음(sound adsorption) 현상이 발생하여 강도의 감쇄가 크게 발생할 수 있다(Blackstock, 2000).

초음파 조사 시 방향족 탄화수소인 PHE의 탈착율의 경우 텀블러 교반에 비하여 고액비의 영향이 보다 크게 나타났다. 이는 기존 연구결과에서 보고된 바와 같이 방향족 탄화수소의 경우 초음파에 의해 발생하는 OH 라디칼 또는 열분해에 의해 추가적으로 오염물 분해반응에 기인한다고 판단된다. PHE를 분해하기 위한 OH 라디칼의 형성은 물의 양이 증가할수록 그 형성 정도가 증가하기 때문에 고액비가 감소할수록 PHE의 분해효율은 증가한다(Shrestha et al., 2009).

위의 실험 결과, 고액비는 초음파를 이용한 오염물 탈착에 있어서 매우 중요한 영향인자이며, 초음파 세척은 일반적으로 토양 세척에 사용되는 물리적 교반에 의한 세척

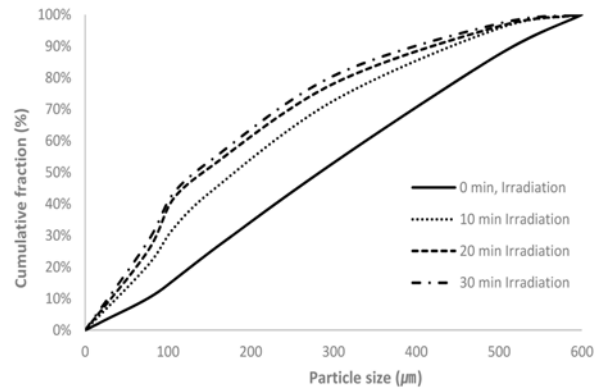


**Fig. 4.** Distribution of organic contaminants between aqueous and solid phase at different irradiation time in the case of ultrasonic washing (a) C14, (b) C16, (c) PHE (soil/liquid ratio: 1/5, frequency: 25 kHz, intensity: 1000 W).

에 비해 오염물의 탈착효과가 높음을 알 수 있다.

**3.2. 초음파 조사 시간**

초음파의 조사 시간을 다르게 하여 유기 오염물질을 탈착하는 경우 Fig. 4에 나타난 바와 같이 10분에 거의 최대치에 도달하였으며 조사 시간을 증가하는 경우에도 효율의 차이가 없는 것으로 나타나 짧은 반응 시간 내에 반응이 종료되는 것을 확인할 수 있었다. 초음파 조사 10분 후에 비해 20분 조사 시 탈착효율이 일부 낮아지는 현상이 발생하는데, 이는 탈착되었던 오염물이 토양에 재흡착됨에 따른 현상으로 판단된다. Feng and Aldrich (2000)은 재흡착 현상의 이유를 액상에서의 오염물의 존재 형태로 설명하였는데, 토양에서 디젤이 탈착되어 액상에 존재하는 경우, 대부분의 디젤은 에멀전을 형성하여 방울형태를 이루어 존재하며, 이 방울형태의 기름성분에 초음파를 조사 하는 경우 방울의 크기가 점점 작아져 토양의 공극으로 재흡착될 수 있다고 주장하였으나 가정에 의한 추정으로 설명하여 이론 또는 실험적 증명을 하지는 않았다. 본 연구에서는 오염물의 재흡착 이유를 설명하기 위하여 실험적으로 증명하기 위하여 토양입도의 변화를 가정하였다. 즉, 초음파를 조사 시 토양의 입도 분포가 변할 것이며, 입도 분포가 변하여 토양의 유효 입경이 작아지는 경우(미세토가 증가하는 경우) 토양의 비표면적이 증



**Fig. 5.** Changes in particle size distribution during ultrasound irradiation.

가에 따른 토양 표면의 공극이 증가하여 작은 방울형태의 디젤 성분이 토양으로 재흡착 될 수 있다고 가정하였다. 따라서 조사 시간 변화에 따른 토양의 입도분포 변화를 분석하였다. 입도 분포의 분석은 체분석을 통해 수행하였으며 표준체 No. 35, 50, 100, 140, 200를 사용하였고, 그 결과를 Fig. 5에 입도 분포 분석 결과를 나타내었다.

입도분포 분석 결과 초음파 조사 시간이 길어질수록 토양의 입경은 더 작아지는 것으로 나타났다(Fig. 5). 이는 초음파 조사 시 발생하는 충격파에 의한 파쇄, 충격파에 의해 유동하는 입자간의 마찰 등에 의한 결과이다(Swamy and Narayana, 2001, Mason et al., 2004). 초음파를 20

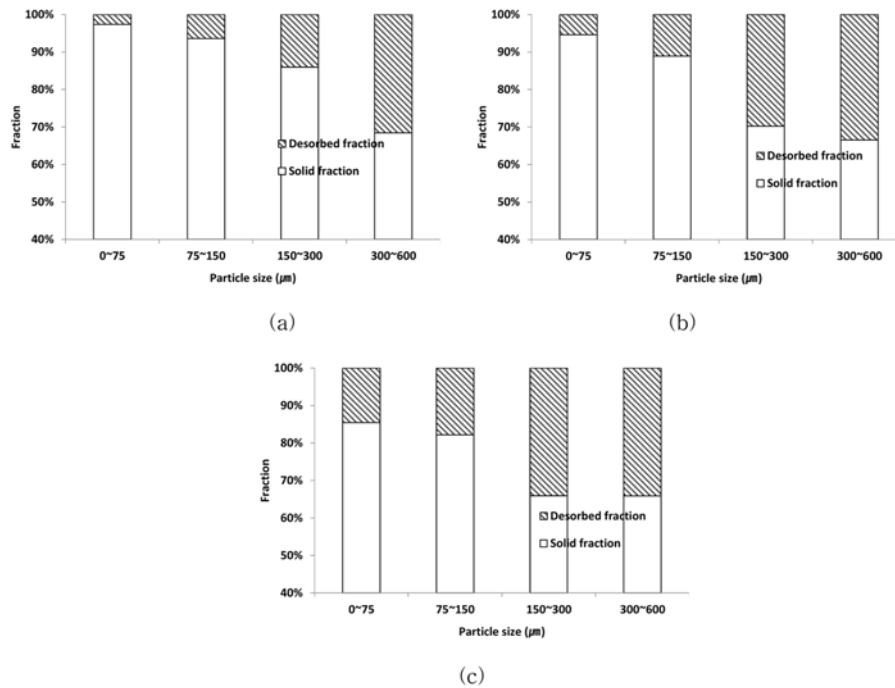


Fig. 6. Distribution of organic contaminants between aqueous and solid phase at different soil particle size in the case of ultrasonic washing (a) C14, (b) C16, (c) PHE (soil liquid ratio: 1/5, irradiation time: 30 min, frequency: 25 kHz, intensity: 1000 W).

본 조사한 토양의 경우 기존의 토양에 비해 입도 분포의 변화가 매우 컸으나, 30분 조사 시에는 입경의 변화의 폭이 크지 않았다. 결과적으로 토양에 초음파를 조사하면 토양 표면에 균열이 발생하며 이 균열로 인해 토양의 비표면적이 넓어지게 된다. 따라서 유기 오염물 탈착 시 초음파를 이용하는 경우, 토양의 비표면적 증가에 의해 유기 오염물 재흡착될 수 있다.

연구 결과, 초음파 조사를 이용한 오염물의 탈착은 10분의 짧은 조사시간 내에 평형에 도달하여 빠른 반응 시간을 가지는 것을 확인하였으며, 토양에 초음파 조사 시 토양의 입도 분포에 큰 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 토양의 입경 변화에 의해 오염물이 재흡착될 수 있음을 확인하였기 때문에 초음파를 이용한 오염물의 탈착은 세척 대상이 되는 토양의 입도 분포가 중요하게 작용할 것으로 보인다.

### 3.4. 대상 토양 입경

초음파를 이용한 오염물 탈착 시 토양의 입경에 따른 탈착 영향을 확인하기 위한 실험을 수행하여 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 토양은 기존의 토양을 표준체 No. 50, 100, 200로 체거름하여 사용하였으며, 이 때 각각의 입도 범위는 0~75, 75~150, 150~300, 300~600 µm이다. 실험 결과 입도가 큰 토양일수록 유기 오염물의 탈착 효

율이 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 6). 작은 입경의 토양은 넓은 비표면적을 가지는 반면에 공극이 가지는 모세관의 크기는 작아지는 특성을 가진다. 또한, 토양의 입경이 작은 미세토가 많이 존재할수록 슬러리의 점성이 증가하는 것으로 알려져 있다. 따라서 슬러리에 초음파를 조사하는 경우 점성이 증가할수록 초음파의 전달 효율이 감소하는 반면에, 초음파에 의해 발생하는 공동의 붕괴 시 발생하는 충격파 또는 열에 의한 효율 등은 증가하기 때문에, 슬러리의 점성은 초음파 조사를 이용한 오염물질의 탈착에 큰 영향을 끼친다(Feng and Aldrich, 2000).

본 연구에서 초음파에 의한 유기 오염물의 탈착 효율은 기존에 발표된 연구에 비해 그 효율이 비교적 낮게 나타났다. 이는, 본 연구에서 대상으로 하는 토양의 입경은 0~600 µm의 입경을 가지며, 비교적 저농도로 오염된(TPH 기준 2,100 mg/kg) 토양이지만, 기존에 발표된 연구의 대부분은 본 연구보다 고농도로 오염된 더 큰 입경을 가지는 토양을 대상으로 연구를 수행하였기 때문인 것으로 보인다(Son et al., 2011, Kim and Wang, 2003, Son et al., 2012). 본 연구 결과에 따르면, 토양의 입경은 초음파를 이용한 토양의 세척 공정에서 매우 큰 영향을 끼친다고 볼 수 있으며, 본 연구에서의 효율이 타 연구에 비해 낮은 이유 중 하나는 대상 토양의 입경 차이인 것으로 보인다.

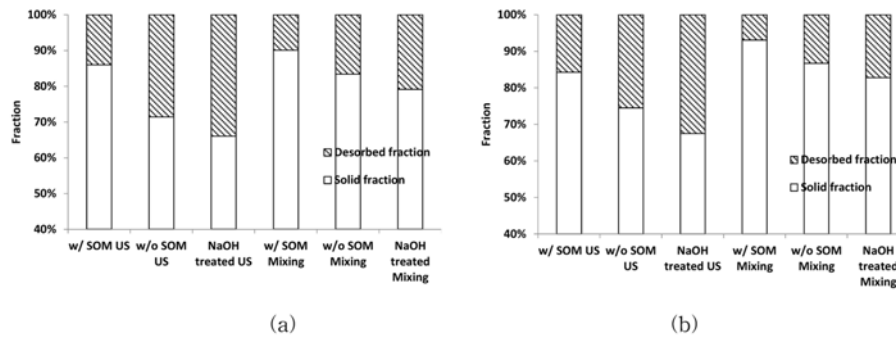


Fig. 7. Distribution of organic contaminants between aqueous and solid phase at different SOM content the case of mechanical or ultrasonic washing (a) C14, (b) C16, (c) PHE (soil/liquid ratio: 1/5, irradiation time: 30 min, frequency: 25 kHz, intensity: 1000 W).

### 3.5. 토양 내 유기물

초음파를 이용한 오염물 탈착 시 토양 내 유기물(soil organic matter, SOM)의 존재 형태가 오염물의 탈착에 끼치는 영향을 확인하기 위한 실험을 수행하였다. 시료를 원래의 토양시료, 600°C에서 토양내 SOM을 6시간 산화시킨 토양과 수산화나트륨 용액으로 SOM을 추출해낸 토양으로 각각 구분하여 실험을 수행하였다. 수산화나트륨으로 SOM을 추출한 토양의 경우, 10 M의 질산 용액을 이용하여 토양의 pH를 조절하였다. 원래의 토양과 수산화나트륨 용액으로 SOM을 추출한 토양의 유기물 함량은 각각 7.12, 1.22%이었다. 대조군으로서 교반에 의한 오염물의 탈착 실험을 수행하였으며 초음파 및 텀블러 교반에 의한 유기 오염물 탈착 실험결과를 Fig. 7에 나타내었다.

중회발성 유류로 오염된 토양의 경우, 대부분의 오염성분은 토양에 존재하는 SOM에 흡착되어 존재한다. 따라서 그림에 나타난 바와 같이 토양의 유기물 함량이 적은 경우 SOM을 제거한 토양의 오염물 탈착 효율이 더 좋은 것을 알 수 있다(Fig. 7). 실험결과 초음파를 조사 또는 텀블러 교반하는 경우 모든 경우에 있어서 오염물의 탈착 효과는 수산화나트륨으로 전처리한 토양, SOM을 제거한 토양, 기존의 토양의 순서로 나타났다. 또한, 모든 실험 조건에 있어서 초음파의 탈착 효율이 2배 이상 좋았다.

수산화나트륨 용액으로 토양을 전처리 하는 경우, OH<sup>-</sup>가 SOM과 결합하여 SOM을 침전시켜 SOM을 추출하게 되는데, 추출되지 않은 유기물 또한 OH<sup>-</sup>와 결합하여 소수성 보다는 친수성에 가까워져 토양과의 결합력이 감소할 수 있다. 따라서 토양과 물을 혼합하여 슬러리를 만드는 경우, SOM이 비교적 쉽게 물에 용해될 수 있다. 대부분의 유기 오염물질은 토양 내 존재하는 유기물과 결합하거나 SOM에 흡착된 상태로 존재하는 경우가 많은데, SOM이 쉽게 물에 용해된다면 유기 오염물질의 탈착 효

율도 증가할 것이다. 따라서 유기 오염물의 탈착에 있어서 SOM은 토양내 함량도 중요하지만 존재 형태 또는 친수성도 큰 영향을 끼친다고 볼 수 있다.

## 4. 결 론

초음파를 이용한 유기 오염물로 오염된 토양의 세척과 관련된 다양한 실험을 수행하였다. 본 연구에서 초음파를 이용한 유기 오염물 탈착 결과에 대해 정리하면 다음과 같다.

1) 고액비가 감소할수록 탈착 효율은 증가한다. 그러나 초음파의 전달 효율과 공동에 의한 효율은 고액비의 변화에 따른 효율 변화 경향이 다르므로, 최적 고액비에 대한 고려가 필요하다. 또한 물리적교반을 이용한 오염물 탈착과 비교하였을 때 고액비가 감소할수록 초음파 조사의 효과가 더 크다는 결과를 얻었다.

2) 초음파를 이용한 유기 오염물의 탈착은 10분 이후 평형에 도달하여 반응 시간이 짧았으며, 초음파 조사 시 토양의 입경이 변화함에 따라 오염물이 재흡착되는 결과를 얻었다.

3) 토양의 입경은 토양의 세척에 큰 영향을 끼치는 것으로 나타났는데, 토양의 입경이 클수록 오염물의 탈착 효율이 크게 증가하는 것으로 나타났다.

4) 토양 내 유기물질은 토양 세척 시 큰 영향을 끼치는 것으로 확인되었다. 유기물 함량이 적은 경우 탈착 효율이 증가하였지만, 그 보다 유기물의 존재 형태, 특성 등이 더 큰 영향을 끼친다.

본 연구에서 초음파를 이용한 유기 오염물 세척의 최적 조건을 제시하지는 못하였지만 기존의 토양 세척공법을 대체할 수 있는 가능성을 가진 것으로 보인다. 특히, 본 연구 결과에서 가장 주목해야할 부분은 다양한 세척 조건

에 따라서 그 효율이 큰 차이를 보인다는 점이다. 본 연구 결과에서 나타나듯이 고액비, 토양의 입경, 토양 내 유기물의 존재 형태 등 다양한 조건에 의해서 초음파에 의한 효율은 크게 변할 수 있으므로, 향후에는 다양한 변수 및 실용화를 위한 경제적 가치평가에 대한 추가 연구가 필요하다고 판단된다.

## 사 사

본 연구는 환경부 토양지하수오염방지사업과 한국건설기술연구원 주요사업(2014-0215)의 연구비지원으로 수행되었습니다.

## References

- Blackstock, D.T., 2000, *Fundamentals of Physical Acoustics*, Willy, Newyork, 560 p.
- Collings, A.F., Gwan, P.B., and Pintos, A.P.S., 2007, Soil Remediation Using High-Power Ultrasonics, *Separ. Sci. Technol.*, **42**, 1565-1574.
- Coleman, A.J. and Saunders, J.E., 1987, Acoustic cavitation generated by an extracorporeal shockwave lithotripter, *Ultrason. Med. Biol.*, **13**, 69-76.
- Feng, D. and Aldrich, C., 2000, Sonichemical treatment of simulated soil contaminated with diesel, *Adv. Environ. Res.*, **4**, 103-122.
- Flores, R., Blass, G., and Dominguez, V., 2007, Soil remediation by an advanced oxidative method assisted with ultrasonic energy, *J. Hazard. Mater.*, **140**, 399-402.
- Kim, Y.U. and Wang, M.C., 2003 Effect of ultrasound on oil removal from soils, *Ultrasonics*, **41**, 539-542.
- Mason T.J. and Lorimer, J.P, *Sonichemistry: Theory, Applications and Uses of Ultrasound in Chemistry*, Willy, Chichester, 252 p.
- Mason, T.J., Colling, A., and Sumel, A., 2004, Sonic and ultrasonic removal of chemical contaminants from soil in the laboratory and on a large scale, *Ultrason. Sonochem.*, **11**, 205-210.
- Shrestha, R.A., Pham, T.D., and Sillanpaa, M., 2009, Effect of ultrasound on removal of persistent organic pollutants (POPs) from different types of soils, *J. Hazard. Mater.*, **170**, 871-875.
- Son, Y., Cha, J., Lim, M., Ashokkumar, M., and Kim, J., 2011, Comparison of Ultrasonic and Conventional Mechanical Soil-Washing Processes for Diesel Contaminated Sand, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **50**, 2400-2407.
- Son, Y., Nam, S., Ashkkumar, M., and Kihm, J., 2012, Comparison of energy consumptions between ultrasonic, mechanical, and combined soil washing processes, *Ultrason. Sonochem.*, **19**, 395-398.
- Swamy, K.M. and Narayana, K.L., 2001, Ultrasonically assisted leaching, in: T.J. Mason, A. Tiehm (Eds.), *Advances in Sonochemistry*, 6, Theme Issue-Ultrasound in Environmental Protection, Elsevier, p. 141-179.
- Thangavadivel, K., Megharaj, M., Smart, R.S.C., Lesniewski, P.J., and Naidu, R., 2009, Application of high frequency ultrasound in the destruction of DDT in contaminated sand and water, *J. Hazard. Mater.*, **168**, 1380-1638.
- Watts, R.J. and Dilly, S.E., 1996, Evaluation of iron catalysts for the Fenton-like remediation of diesel-contaminated soils, *J. Hazard. Mater.*, **51**, 209-224.