

## Ultrasonic flushing 기법에 의한 유류오염토양의 복원에 관한 실험연구

정하익, 오인규\*, 김상근\*, 이용수\*\*, 유준\*

한국건설기술연구원 토목연구부 수석연구원

\*한국건설기술연구원 토목연구부 연구원

\*\*한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원

*hichung@kict.re.kr*

Ultrasonic waves have several mechanical, chemical, and biological effects on a saturated soil medium. Their mechanical effects, popularly known as cavitation. Cavitation is the rapid and repeated formation, and resulting implosion, of microbubbles in a liquid, resulting in the propagation of microscopic shock waves. In a soil-liquid system, their mechanical effects generate high differential fluid-particle velocities and microscopic shock waves. The velocity perturbations are capable of dislodging oil in the system by overcoming the forces binding oil to sand particles.

In this study, a series of laboratory experiments involving the simple flushing and ultrasonic flushing were carried out. An increase in permeability and oil removal rate were observed in ultrasonic flushing tests. Some practical implications of these results are discussed in terms of technical feasibility of in situ implementation of ultrasonics.

**key word** : ultrasonic, cavitation, permeability, oil removal

### 1. 서론

본 연구에서는 초음파 작용의 결과로 모래의 투수계수를 변화시켜 오염물질을 신속하게 제거하는 일련의 실내실험을 수행하였다. Rudolph Koenig에 의해 1800년대 후반 발견 이후 물질의 특성을 변화시키는데 초음파 에너지를 적용하는 방법은 현대 산업에서 거의 모든 단위공정에 응용되고 있다. 초음파는 포화된 흙에 역학적, 화학적, 생물학적 영향 등을 발생시킨다. 역학적 효과는 잘 알려진 대로 공동현상(cavitation)이다. 공동현상은 액체 안에서 대단히 빠르면서 반복적으로 형성되는 미세한 공기방울로 충격파를 전달시킨다. 액체-흙 시스템에서 공동현상은 미소유체에 매우 높은 속도를 발생시킨다. 이러한 충격파는 디젤유를 모래 입자에서 제거할 수 있다.<sup>2), 3)</sup>

실내실험은 봉 형태의 초음파발생장치를 사용하여 수행하였다. 본 연구에 사용된 초음파발생장치는 변압기에서 50~60Hz의 일반적인 전류를 20kHz의 전기에너지로 변환시키며 소모되는 전력량은 200Watt이다. 초음파 발생 봉은 티타늄 합금으로 만들어 저 높은 주파수의 전기에너지를 역학적이 에너지인 음파로 변환시켜 공동을 발생하게 한다.<sup>1)</sup> 시료는 주문진 표준사를 사용하였고 오염물질은 차량용 디젤유를 사용하였다. 시료셀은 높이 30cm, 직경 10cm의 원통형이며 물은 하부에서 유입되어 원통 벽면 25cm 높이의 배출구를 통해 나간다. 시료내의 동수경사는 마리오바틀을 이용하여 유지하였다.

본 연구에서는 지반에 초음파를 발생시켜 모래의 투수계수를 증가시키고 오염물질은 신속하게 제거할 수 있는 타당성을 보여주기 위하여 일련의 실내실험을 실시하였다.

## 2. 본론

### 1) 실험방법 및 시료조성

실험장비는 크게 초음파 발생장치, 시료셀, 마리오바틀로 이루어진다. 초음파는 200Watt에 주파수 28KHz를 발생시키며, 시료셀은 직경 10cm, 높이 30cm로 시료는 23cm를 채워서 실험하였다. 마리오바틀은 시료에 공급되는 물의 수두를 일정하게 유지시켜주는 장비로 동수경사는 0.5를 유지시켰다. 시료의 다짐도는 본 시료의 가장 느슨한 상태인 1.40 g/cm<sup>3</sup>이며, 간극비는 0.747로 시료 전체의 간극인 1 pore volume은 770ml이다. 전체 실험장치는 그림 1과 같이 배치하였으며, 시료에 초음파 발생은 그림 2와 같이 하였다.

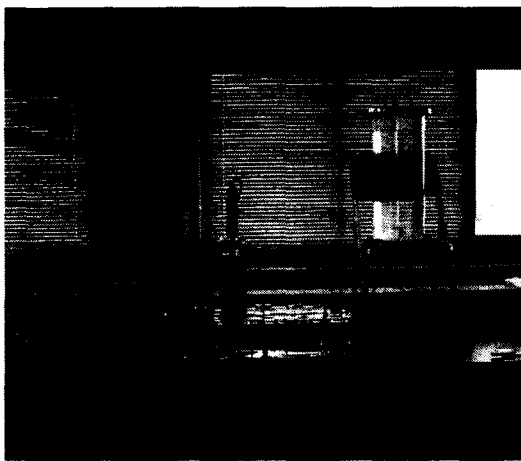


그림 1. 실험장치 배치

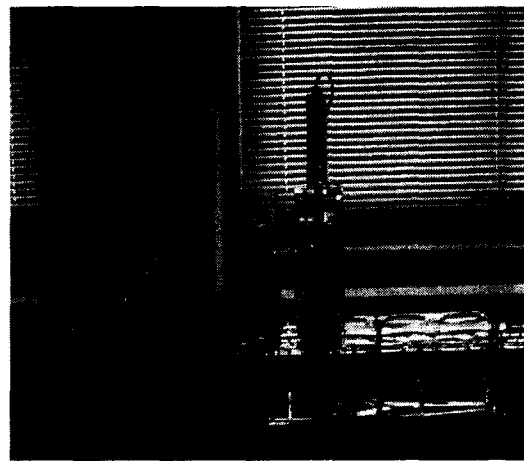


그림 2. 초음파 발생장면

### 2) 시료의 기본물성

시료는 주문진표준사를 사용하였으며, 오염물질은 디젤유를 사용하였다. 모래의 비중은 2.62이며, 최대건조밀도는 1.60 g/cm<sup>3</sup>이며, 최소건조밀도는 1.40 g/cm<sup>3</sup>이다. 디젤유의 비중은 0.80이며, 동점도는 2.564이다. 물에 대한 용해도는 실온에서 0.075~31.3 ppm 정도이다. 다음 표에 기본물성을 정리하였다.

표 1. 시료의 기본물성

| 모래   |                                |                                | 디젤유  |                   |                       |
|------|--------------------------------|--------------------------------|------|-------------------|-----------------------|
| 비중   | 최대건조밀도<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 최소건조밀도<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 비중   | 물에 대한<br>용해도(ppm) | 동점도<br>(cSt, 37.8 °C) |
| 2.62 | 1.60                           | 1.40                           | 0.80 | 0.075~31.3        | 2.564                 |

### 3) 비오염토 실험

비오염토를 가지고 단순 세척기법인 simple flushing과 초음파 세척기법인 ultrasonic flushing을 실시하여 투수계수를 비교하였다. 그림 2와 같이 2개의 셀에 주문진 표준사를 간

극비 0.747로 똑같이 채우고 셀 하부에서 물을 주입하여 시료를 포화시켰다. 실험 중에 일정한 간격으로 유출수의 부피를 재어 투수계수를 측정하였다. 수두는 0.5를 유지시켰고 배출수는 셀 상부 옆면의 밸브로 배출되었다. 시간에 따른 배출수량을 그림 3에 나타내었다. 수두만 작용시킨 simple flushing 보다 수두와 초음파를 함께 작용시킨 ultrasonic flushing이 많은 수량이 배출되었다. 그림 4를 보면 시간에 따른 투수계수를 나타내었다. 측정시간 동안 투수계수 평균값을 구하여 보면 simple flushing, ultrasonic flushing이 각각  $4.34E-03$  cm/sec와  $9.51E-03$  cm/sec 였다. 초음파를 작용시켜 비오염토 시료의 투수계수가 약 2.2배 정도 증가하였다.

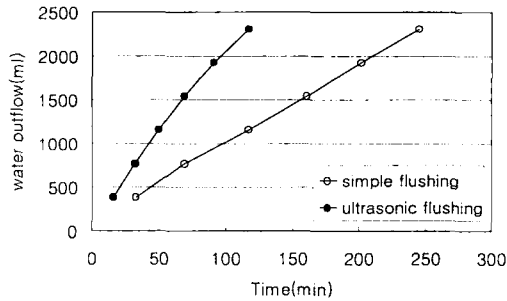


그림 3. 시간에 따른 배출수량 변화

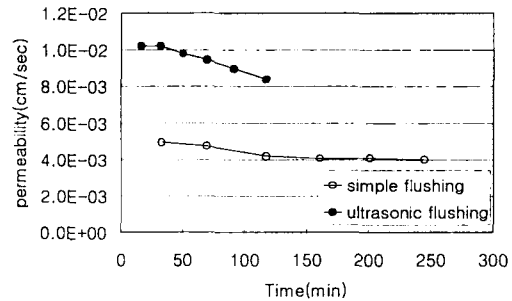


그림 4. 시간에 따른 투수계수 변화

#### 4) 오염토 실험

유류로 오염시킨 오염토에 대하여 비오염토 실험과 같이 simple flushing과 ultrasonic flushing을 실시하여 투수계수와 오염물 제거량을 비교하였다. 셀에 주문진 표준사를 간극비 0.747로 채우고 디젤유를 시료의 1 pore volume에 해당하는 770ml를 붓고 완전히 스며들게 하였다. 셀 하부의 밸브를 열어 수두 및 초음파를 가하면서 유출수의 부피를 재어 투수계수를 측정하였다. 수두는 0.5를 유지시켰고 배출수는 셀 상부 옆면의 밸브로 배출되었다. 시간에 따른 배출량을 측정하여 그림 5에 나타내었다. 수두만 작용시킨 simple flushing 보다 수두와 초음파를 함께 작용시킨 ultrasonic flushing의 경우가 많은 양이 배출되었다. 그림 6에 시간에 따른 투수계수를 나타내었다. 측정시간 동안 투수계수 평균값을 구하여 보면 simple flushing, ultrasonic flushing이 각각  $2.93E-03$  cm/sec와  $4.59E-03$  cm/sec 였다. 초음파를 작용시켜 오염토 시료의 투수계수가 약 1.6배 정도 증가하였다. 그림 7에서는 시간에 따른 디젤유 배출량을 나타내었다. ultrasonic flushing이 simple flushing에 비해 동일 시간에 많은 디젤유를 배출하였다. 그림 8에 시간에 따른 오염물질 제거율을 나타내었다. 시료에 포함된 오염물질의 약 80%를 제거하는데 소요되는 시간은 simple flushing, ultrasonic flushing이 각각 87분, 58분이었다. 이와같이 오염된 지반에 초음파를 가하여 오염물질의 배출속도가 증가되었다.

그림 9에서는 비오염토와 오염토 실험에서 측정한 투수계수를 상대비교 하였다. 투수계수는 디젤유 오염토 보다 비오염토가 크게 나타났다. 디젤유가 비중은 작지만 점성이 크고 토립자 주변에 흡착되어 토사의 간극을 메우게 되어 투수계수가 작게 나타난 것으로 생각된다. 동일한 매질에 대한 투수계수를 비교하면 초음파를 발생시킨 실험이 그렇지 않은 실험에서 보다 투수계수가 크게 나타났다.

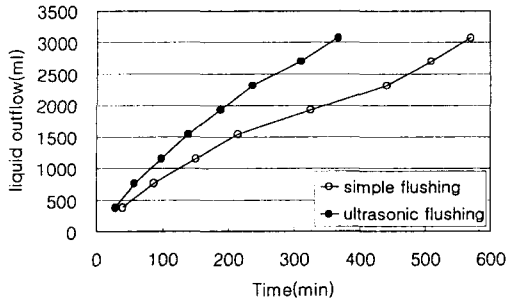


그림 5. 시간에 따른 배출량 변화

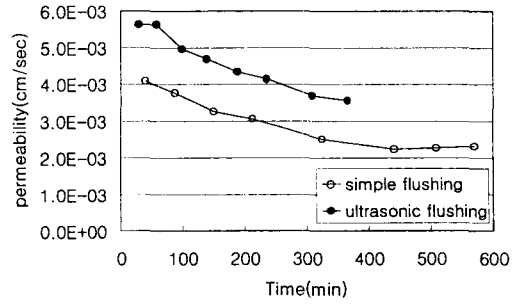


그림 6. 시간에 따른 투수계수 변화

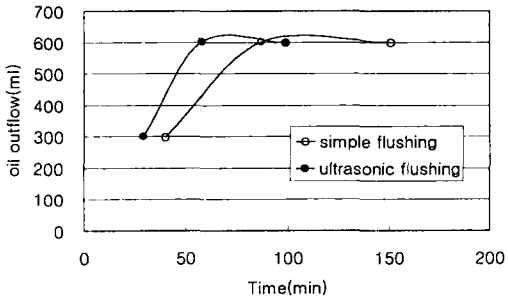


그림 7. 시간에 따른 오염물질 제거량

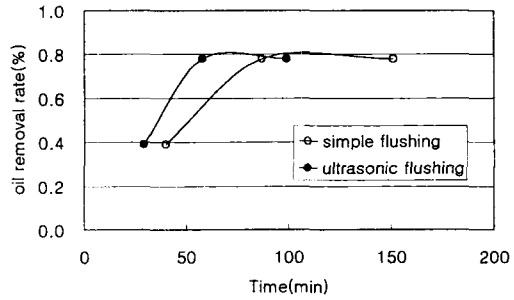


그림 8. 시간에 따른 오염물질 제거율

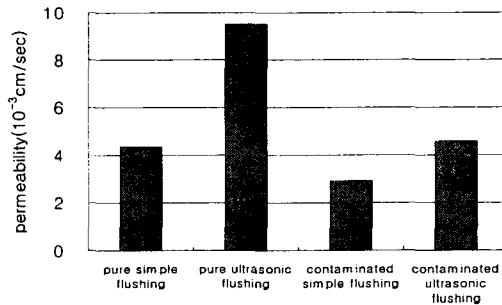


그림 9. 오염토 및 비오염토 실험의 투수계수 비교

### 3. 결론

유류로 오염된 오염토에 초음파를 작용시켜 투수계수를 증가시키고 오염물질은 신속하게 제거할 수 있는 타당성을 보여주기 위한 일련의 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 비오염토와 오염토 실험에서 투수계수는 simple flushing에 비해 ultrasonic flushing이 각각 약 2.2배, 약 1.6배 정도 증가되어, 지반에 초음파를 가하면 투수계수가 증가하는 것으로 나타났다.

2) 시료에 포함된 오염물질의 약 80%를 제거하는데 소요되는 시간은 simple flushing, ultrasonic flushing이 각각 87분, 58분으로, 오염된 지반에 초음파를 가하면 투수계수가 증가하여 오염물질의 배출속도가 증가하는 것으로 나타났다.

#### 4. 참고문헌

- 1) Young Uk Kim, "Effect of sonication on removal of petroleum hydrocarbon from contaminated soils by soil flushing method", Department of Civil and Environmental Engineering, The Pennsylvania State University, Ph. D Thesis, 2000.
- 2) Lakshmi N. Reddi and K. Y. Lee, "Feasibility of ultrasonic enhancement of flow in clayey sands", J. of Environmental Engineering, Vol. 119, No. 4, pp. 1993.
- 3) 오철, 김병일, 김영옥, "초미립자 탈수성 증대를 위한 초음파 활용에 관한 연구", 한국지반공학회 2002 봄학술발표회, pp. 313~320.