

디젤 오염토 수세시 초음파가 세척률 증가에 미치는 영향에 관한 연구 Enhancement of Soil Flushing Method by Ultrasonic Radiation on Diesel Contaminated Soils

김영욱¹⁾, Young-Uk Kim, 김지형²⁾, Jeehyeong Khim, 이인모³⁾, In-Mo Lee

- ¹⁾ 고려대학교 토목공학과 박사후 연구과정, Post Doctoral Research Fellow, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Korea Univ.
²⁾ 고려대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Korea Univ.
³⁾ 고려대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Korea Univ.

SYNOPSIS: Spilling of petroleum hydrocarbons such as gasoline, motor oils, and diesel fuel from underground storage tanks (USTs) is a major source of contamination to ground water and soils. In response to the need of developing an effective and economical cleanup technique, this study investigates the effectiveness of using sonication to enhance the soil flushing method. The study involves laboratory testing, and the testing was conducted using a specially designed and fabricated device to determine the effect of sonication on contaminant removal. The sonication was applied at 20 kHz frequency under different power levels. Test soil was Joomoonjin Sand, and diesel fuel was used as a contaminant of soil flushing test. The results of the investigation show that sonication enhanced the contaminant removal from soils significantly, and the degree of enhancement varied with power levels of sonication. Based on the results of the study, it is concluded that the flushing method with sonication has a great potential to become an effective method for removing petroleum hydrocarbons from the contaminated ground.

Keywords: Sonication, Ultrasound, Soil Flushing Method, Diesel, Hydrocarbon, NAPL, Ground Contamination

1. 서론

산업의 발달로 인하여 석유 탄화수소(petroleum hydrocarbons)의 사용량이 기하급수적으로 증가하여 이로 인한 환경오염의 문제가 심각하여지고있다. 탄화수소류의 오염물질은 주로 가솔린, 모터 오일, 그리고 디젤류로 나누어 질 수 있는데 이들은 주로 지하저장고(underground storage tank, UST)에 보관되어 있다. 이들 지하저장고는 지하에 묻혀있는 관계로 유지 및 보수에 그만큼 어려움이 따라 누출사고의 위험이 높다. 일단 지하저장고로부터 누출사고가 일어나면 주위 지반 및 지하수의 오염을 일으켜 위생 및 건강에 큰 위협이 될 수 있다. 오염된 지반 및 지하수의 정화 및 복원에 관한 연구가 최근 활

발히 진행되고 있는데 개발된 복원법으로는 replacement, pump-and-treat, vapor extraction, 그리고 soil flushing method 등이 있다. 그러나 보다 광범위한 현장조건에 적용 할 수 있는 복원법의 개발이 아직 요구되고 있어 이에 대한 보다 깊은 연구가 요구되어지고 있다.

최근 토양오염 복원법 중 토양수세법(soil flushing method)의 효율을 높이기 위한 연구가 활발한데 특히 초음파의 적용가능성에 대하여 몇몇에 의해 제시되었다. 그러나 그들의 연구는 아직 시작단계이며 실험의 결과도 아직 미흡한 편이다. 본 연구에서는 토양수세법에서 초음파의 영향에 관하여 보다 깊은 연구를 실내 실험을 통하여 알아보았으며 보다 광범위한 실험 조건하에서 초음파를 이용한 토양수세법의 거동에 대하여서도 조사하였다.

2. 기존의 연구 동향

NAPL (non-aqueous phase liquid) 상태의 오염물 제거에 초음파가 미치는 영향에 관한 연구는 극히 제한적이며 미비한 실정이다. 1989년에 Pogosyan 등은 초음파를 물과 탄화수소로 포화되어 있는 시료에 가함으로 물과 탄화수소의 phase separation이 순수 중력에 의한 분리보다 굉장히 크게 증가되었음을 보였으며 같은 해에 Nikolayevskiy는 다공매질(porous media) 속에 분산되어있는 기름 입자가 초음파에 의해 서로 모여 흐름을 형성한다고 발표하였다.

1993년에 Cleveland와 Garg는 오염된 점토시료에 초음파를 가함으로 점토입자에 흡착되어 있는 오염 물질을 점토입자와 함께 제거 할 수 있음을 시험을 통하여 보였고 Reddi와 Challa(1994) 및 Reddi와 Wu(1996)는 초음파가 다공매질속의 NAPL의 흐름을 용이하게 할뿐 아니라 간극비도 증가시킴을 보였다. 1995년에 Ellen등은 초음파를 오염토에 가함으로 가하지 않았을 경우보다 약 30%에의 오염물 세척율이 증가됨을 보고하였고 Iovenitti 등은 오염된 모래시료에 초음파를 가함으로 작게는 6%에서 크게는 26%까지의 오염물 제거율이 증가되었음을 보였다.

위의 연구들의 결과를 종합해 보면 초음파가 다공매질에 대한 영향에 관하여서는 크게 두 가지로 나누어짐을 알 수 있다. 초음파에 의한 진동에 의해 입자의 재배열 및 순간적인 간극비의 증가로 인한 투수성의 증가를 들 수 있고 초음파 에너지에 의해 간극액(pore liquids)의 점도(viscosity) 감소와 간극압(pore pressure)의 증가로 인하여 간극액 흐름이 더욱 용이하여 짐을 들 수 있겠다. 그러나 초음파에 의한 오염토 복원에 있어서 복원율은 여러 인자 즉 시료의 종류, 유출수의 속도 및 온도, 주파수 및 음파의 강도등에 따라 달라질텐데 위의 연구들은 그에 대한 고찰이 부족한 편이었다. 2000년 Kim등에 의해 보다 전반적인 고찰이 행하여 졌으나 대체오염물로 식물성 기름을 사용하여 실제의 오염물의 거동에 관한 고찰이 요구되어졌다. 본 연구는 그들의 지속적인 연구의 일환으로 실제의 오염물(디젤)을 사용하여 초음파에 의해 변화되는 토양수세법의 거동에 관하여 조사하였다.

3. 실내 시험

3.1 시험 장치

실내시험은 특별히 제작되어 조립된 실험기구를 통하여 행하여졌는데 시험기구의 개략적 설명은 그림 1에 나타나있다. 그림에 나타나 있듯이 시험기구는 크게 두 가지 즉 초음파 프로세서와 시료를 담을 수 있는 챔버로 나누어져 있다.

챔버는 원통형 Plexiglas로 만들어 졌으며 내경은 4.8cm이고 실린더의 높이는 50cm로 제작되었다. 실린더의 아래 부분에 유입구를 두어 시험 중에 세척수를 시료 속으로 흘려 보낼 수 있도록 하였으며 실린더 윗부분에는 유출구를 두어 시료를 통과한 세척수를 메스실린더에 모을 수 있도록 제작되었다.

초음파 프로세서는 발전기, 변환기, 그리고 음향기로 이루어져 있다. 발전기(power supply)는 일반적인 120V의 60Hz AC를 약 1,000V의 20kHz 전기 에너지로 바꾸는데 사용되며 이 전기 에너지는 변환기에 의해 기계적 진동으로 바뀐다. 기계적 진동이 음향기에 의해 시험 중 시료에 가하여지게 되어있다.

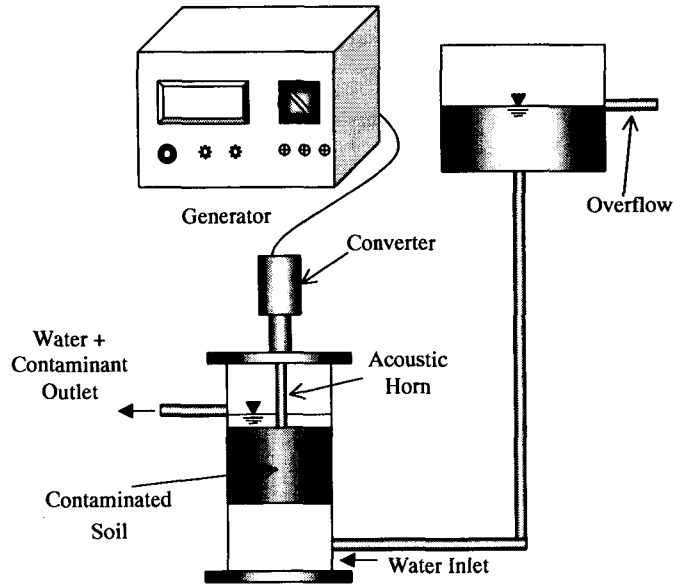


그림 1 실내 시험 개략도

3.2 시험 시료 및 오염물질

시험 시료로는 표준사인 주문진사가 사용되었으며 그에 대한 기본 물성치는 표 1에 정리하였다. 오염물질로는 디젤이 사용되었고 밀도는 0.85 g/ml 이었으며 점도는 상온에서 28.6 cP 이었다.

표 1 주문진사의 기본 물성치

C_u	C_c	$\gamma_d(\text{max})$	$\gamma_d(\text{min})$	e_{max}	e_{min}	G_s
1.19	1.01	1.682 g/cm ³	1.384 g/cm ³	0.877	0.546	2.6

3.3 시험 방법

토양수세 실내 시험은 두 가지의 조건 즉 초음파를 가하였을 경우와 가하지 않았을 경우에서 수행되었다. 시험시료는 오븐에 의해 24시간 이상 건조되었으며 128g의 시료와 20ml의 오염물을 섞은 다음 챔버에 조심스럽게 다짐으로써 시료 준비를 완료하였다. 준비된 시료의 지름은 4.8cm이며 높이는 4.5cm 이었다. 시료의 양끝에 #100 스크린을 두어서 시험 중 시료가 유실되는 것을 막았다. 시험준비가 완료된 후 세척수와 초음파를 동시에 가하여 줌으로써 시험을 시작하였는데 세척되어져 나오는 유출수는 500ml 메스실린더에 모아져서 제거되어지는 오염물의 양을 측정하였다. 메스실린더에 모아진 유출수는 오염물과 물의 완전분리를 위하여 24시간 방치하였으며 분리된 오염물의 양을 메스실린더를 이용하여 측정하였다.

4. 시험 결과 및 고찰

초음파를 가하지 않은 상태에서 세척수의 온도가 오염물 제거율 즉 수세율에 미치는 영향에 관하여

그림 1의 시험 기구를 사용하여 조사하였다. 시험은 0.67의 간극비를 가지고 있는 주문진사를 사용하였으며 그림 2는 5 간극 부피(5 pore volumes, PV)에 해당하는 세척수를 시료에 흘려 보냈을 때의 결과를 온도의 변화에 따라 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 온도의 변화에 따른 세척율의 차이가 크게 나타나고 있지 않으며 이는 Miller와 Ramey(1985)의 결과와도 잘 일치하고 있다. 그림의 결과에서 알 수 있듯이 세척수의 온도의 변화는 세척률에 영향을 미치지 않음을 알 수가 있다.

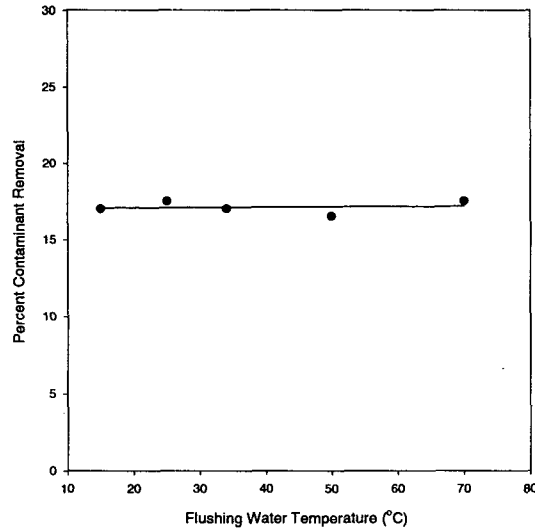


그림 2 세척수 온도의 영향

그림 3은 같은 시료에 초음파를 가하였을 때와 가하지 않았을 때의 오염물 제거량을 유입된 세척수의 양에 따라 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 오염물 제거율은 유입된 세척수의 양이 증가 할수록 증가하며 점점 증가율이 감소하다가 유입된 세척수가 약 15 PV 이상이 되면 일정하게 됨을 알 수가 있고 초음파에 의해 세척률이 크게 증가됨을 나타내고 있다.

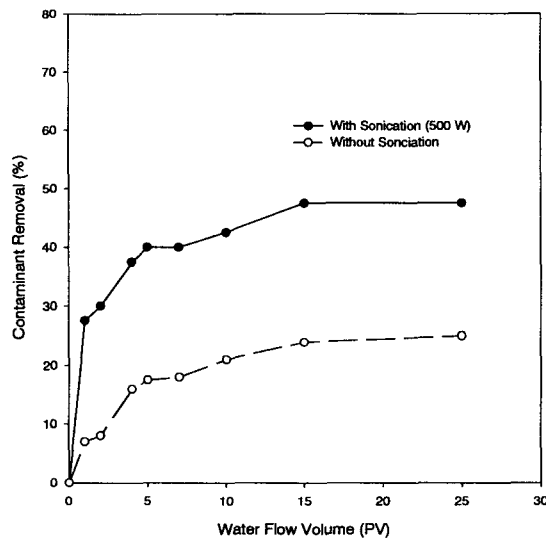


그림 3 초음파에 의한 오염물 제거량의 변화

그림 3에 의하면 초음파를 가하지 않고 25 PV의 세척수를 흘려 보냈을 경우 원래 흙 속에 있던 오염물의 25%정도가 제거되었으며 초음파를 가하였을 경우 약 45%로 크게 증가됨을 볼 수가 있다. 이 시료에 가해진 초음파의 강도는 500W이었다.

그림 4는 오염물 제거에 초음파의 강도(ultrasonic power)가 미치는 영향에 관하여 나타내었는데 그림에서 알 수 있듯이 초음파의 강도를 높이면 오염물의 제거율도 같이 증가함을 알 수 있다. 이 시험을 같은 조건을 가지고 있는 시료에 시행되었으며 오염물 제거량의 측정은 5PV의 세척수를 흘려 보냈을 때의 제거량으로 하였다. 그림에서 보면 500W 근처에서 오염물 제거량이 서서히 감소하는 것을 알 수가 있는데 이는 초음파에 의해 시료내에 생성된 cavitation에 의한 것으로 판단된다. Cavitation 발생은 시료속으로 전달되는 에너지의 양을 감소시키는데 이로 인하여 오염물 제거량이 감소되는 것이다.

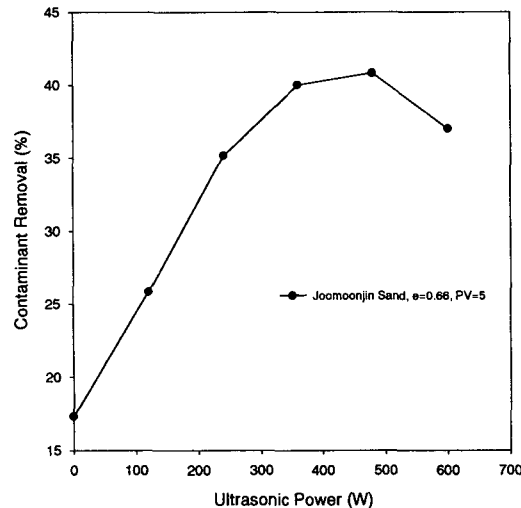


그림 4 에너지 강도의 효과

5. 결론

본 연구는 토양수세(soil flushing method)의 효율을 높이기 위하여 초음파의 사용가능성에 대해 고찰하였다. 초음파를 토양수세시 시료에 가 할 수 있도록 시험기구를 특별히 제작 조립하여 시행하였으며 표준사인 주문진사를 시료로, 디젤을 오염원으로 사용되었다. 세척수의 온도, 초음파의 유무, 그리고 초음파의 강도에 따른 세척율의 변화에 대해 고찰하였으며, 이로부터 도출된 결론은 다음과 같이 요약 할 수 있다.

1. 초음파를 가하지 않고 세척수의 온도를 변화시키며 시험을 시행하였는데 온도에 따른 세척율의 변화가 거의 없었다. 이로 인하여 세척수 온도는 오염물 세척율에 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.
2. 오염물 세척율의 증가율은 세척수의 양이 증가할수록 점점 감소하다가 약 10PV이 넘어가면 거의 일정하게 되었다. 초음파를 가하였을 때와 가하지 않았을 때의 오염물 제거량은 크게 차이가 났다.
3. 초음파를 가 할 경우 세척율이 증가하였는데 초음파의 강도를 증가할수록 오염물 제거율도 같이 증가하였다. 그러나 초음파의 강도가 500W가 넘어가기 시작하면 오염물 제거량은 감소하기 시작하였다.

6. 감사의 글

본 연구는 교육부의 BK'21 프로그램에 의해 지원되었으므로 이에 감사드린다.

7. 참고 문헌

1. Cleveland, T. G., and Garg, Sanjay, (1993), *Field demonstration of acoustically enhanced soil washing system for in-situ treatment of low-permeability soils*, Waste Management Proceedings of the Gulf Coast Hazardous Substance Research Centers Symposium on Emerging Technologies: Metals, Oxidation, and Separation, Vol. 13, No 5-7, pp. 519-520, Belmont, TX.
2. Iovenitti, J. L., Rynne, T. M., and Spencer, J. W., Jr., (1995), *Acoustically enhanced remediation of contaminated soil and ground water*, Proceeding of opportunity 95-environmental technology through small business, Morgantown, West Virginia, November.
3. Kim, Y., Khim, J., and Lee, I. (2000), *Sonication Effect on NAPL Extraction from Soils*, Journal of Korean Geotechnical Society, Vol. 16, No. 2, pp. 25-28.
4. Miller, M. A. and Ramey, Jr., H. J., (1985), *Effect of Temperature on Oil/Water Relative permeabilities of Unconsolidated Sands*, Petroleum Transactions, AIME, Vol.279, pp.945.
5. Nikolayevskiy, V. N., (1989), *Mechanism and dominant frequencies of vibrational enhancement of yield of oil pools*, Transactions (Doklady) of the USSR Academy of Science: Earth Science Sections Vol. 307, No. 4, pp. 40-44.
6. Reddi, L. N. and Challa, S., (1994), *Vibratory mobilization of immiscible liquid ganglia in sands*, Journal of Environmental Engineering, Vol. 120, No. 5, pp. 1170-1190.
7. Reddi, L. N. and Wu, H., (1995), *Mechanisms involved in vibratory destabilization of NAPL ganglia in sands*, Journal of Environmental Engineering, Vol. 122, No. 12, pp. 1115-1119.