

초음파에 의한 오염토의 상대투수계수의 변화

김 영 육

명지대학교 토목환경공학과

Sonication Effect on the Relative Permeability of Contaminated Soil

Young-Uk Kim

Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University

ABSTRACT

This study investigated the effectiveness of ultrasonic waves on the relative permeability under a range of soil type, flushing rate, and sonication power. This study was conducted in the laboratory using a specially designed and fabricated equipment, and the laboratory study was simulated by ECLIPSE 100 which is a commercial black oil simulator.

The test results indicated the sonication increased contaminant extraction significantly. From analytical standpoint, sonication caused a change in the relative permeability of the test samples; a reduction in residual oil saturation and an increase in both irreducible water saturation and wettability. These three parameters are highly related with $(D_{10})^2$. The computer software ECLIPSE 100 can be used to analyze the change of the relative permeability due to sonication in two phase immiscible flow.

Key words : Contaminated Soil, Multiphase flow, Relative permeability, Ultrasound

요약문

토양 및 지하수의 오염문제가 심각해짐에 따라 오염물의 토양 및 지하수 내에서의 이동 특성에 관한 관심이

커지고 있다. 본 연구에서는 비용해성 흐름의 특성 및 그의 특성을 결정짓는 상대투수에 관한 기본적인 이해와 초음파가 상대투수에 미치는 영향에 관하여서도 고찰하였다.

실험 및 역해석의 결과로는 초음파가 오염물의 제거에 상당히 큰 영향을 끼치는 것으로 나타났으며 상대투수의 특성도 크게 변화되는 것으로 나타났다. 변화량은 $(D_{10})^2$ 의 함수로 나타낼 수 있었으며 ECLIPSE 100을 사용하여 초음파가 오염 복원 및 상대투수의 변화에 관한 연구에 활용 될 수 있음이 고찰되었다.

주제어 : 복원, 비용해성 흐름, 토양오염, 초음파

1. 서 론

급속한 경제 발전과 차량의 증가에 따른 유류의 수요 급증으로 인하여 지하저유시설(UST)의 수가 날로 증가하고 있다. 지하저유시설은 지하에 묻혀 있는 관계로 관리 및 보수가 쉽지 않고 또 이로 인하여 누출 사고의 위험이 굉장히 큰 실정이다. 일단 누출사고가 일어나면 오염물에 의한 지하수 및 토양오염의 문제가 심각한데 토양 및 지하수의 오염 문제를 해결하기 위하여서는 우선 토양 및 지하수에서의 오염물의 이동 특성에 관한 연구가 선행되어져야 한다.

오염물의 이동 특성은 크게 비용해성 흐름(immiscible flow)과 용해성 흐름(miscible flow)으로 나눌 수 있다. Beckley and Leverett(1942)¹⁾에 의해 다공매질(porous media) 속으로의 이상 비용해성 흐름(two phase immiscible flow)에 관한 이론이 처음 정립되었다. 그 이후 원유관련 사업 분야에서 이 이론을 기본으로 하여 이상 비용해성 흐름에 관한 연구가 많이 진행되어 왔다. 이들의 연구 결과가 최근 환경공학 분야에서도 활용되고 있는데 극히 작은 용해도를 가지고 있는 오염물, 즉 디이젤이나 병커 C유에 의한 통야 및 지하수 오염문제 고려시 비용해성 흐름 이론이 사용되어 지고 있다.

비용해성 흐름은 상대투수계수에 의해 크게 지배를 받는다. 상대투수계수에 대한 자세한 설명은 흐름의 이론적 고찰부분에서 자세히 다루어질 것이다. 지반의 상대투수계수에 따라 원유의 생산량이 결정되기도 하여 원유 관련 사업분야에서는 지반의 상대투수계수를 변화시키는 여러 영향인자에 관한 연구가 진행되어져

왔다. Miler와 Ramey²⁾는 온도가 상대투수계수에 미치는 영향에 관하여 연구하였으며 최근에는 초음파가 상대투수계수에 미치는 영향에 관한 관심이 증가되고 있으나 그에 대한 연구가 아직 미비하고 시작단계에 불과하다.

본 연구는 초음파가 비용해성 흐름에 미치는 영향에 관하여 실내 시험을 통하여 수행되었으며 ECLIPSE 100이라는 상용프로그램을 이용하여 실내시험을 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션과 역해석을 실시하여 초음파가 상대투수계수에 미치는 영향에 관하여서도 아울러 고찰하였다.

2. 비용해성 흐름의 이론

다공재료(porous media) 속으로의 비용해성 흐름의 지배방정식은 연속방정식에 근거한다. 다공재료 속에서의 3차원 연속방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$-\nabla \cdot (\rho_f v_f A) \Delta + Q_f = \frac{\partial}{\partial t} (V_b \phi S_f \rho_f) \quad (1)$$

A = 면적

\dot{Q}_f = external source or sink term

S_f = 간극액의 포화도

V_b = 전체 체적

ϕ = 간극비

ρ_f = 간극액의 밀도

또한 비용해성 흐름에서 Darcy's의 법칙은 유효하며 다음과 같다

$$V_f = - \frac{kk_f}{\mu_f} \nabla \phi_f \quad (2)$$

여기서 k = 절대 투수계수
 k_f = 간극액의 상대투수
 μ_f = 간극액의 점도
 ϕ_f = 간극액의 위치에너지

다공재료 속으로 이상 비용해성 흐름에서 다공재료가 가지고 있는 투수계수를 각각의 액체가 나누어 가지게 되는데 대상 간극액의 상대투수계수 및 위치에너지는 다음 식과 같다. 상대투수계수는 대상액의 포화도에 따라 다르게 나타나고 있는데 Fig. 1은 포화도에 따른 일반적인 상대투수계수의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 기름 및 물의 상대투수계수는 각각에 대한 포화도가 감소됨에 따라 같이 감소됨을 알 수 있다. 포화도가 0이 되기 훨씬 이전에 상대투수계수가 0이 되어버리는 것을 알 수 있는데 이는 기름이나 물이 그때의 포화도 이하가 되면 더 이상 흐르지 못하게 됨을 나타내고 있다. 그때의 포화도를 기름일 때는 residual oil saturation이라고 하고 물인 경우는 irreducible water saturation이라 한다. Residual oil saturation을 감소하는 원유의 생산량과 직결되는 문제이므로 residual oil saturation을 감소시키기 위한 연구가 원유 산업분야에서 많이 시행되어 왔다. Wettability는 상대투수곡선에서 물의 상대투수 곡선과 기름의 상대투수 곡선이 만나는 점에서의 물의 포화도로 정의가 되는데 이는 기름과 물의 동시 흐름의 특성에 지대한 영향을 미치는 인자이다.

$$k_{ro} = \frac{kk_o}{k} \quad (3)$$

$$k_{rw} = \frac{k_w}{k} \quad (4)$$

$$\phi_f = P_f - \frac{g}{g_c} \rho_f G \quad (5)$$

여기서 o = 기름 (oil)
 w = 물 (water)

p_f = 간극액의 압력
 g = 중력상수
 g_c = 적도에서의 중력상수
 G = 깊이

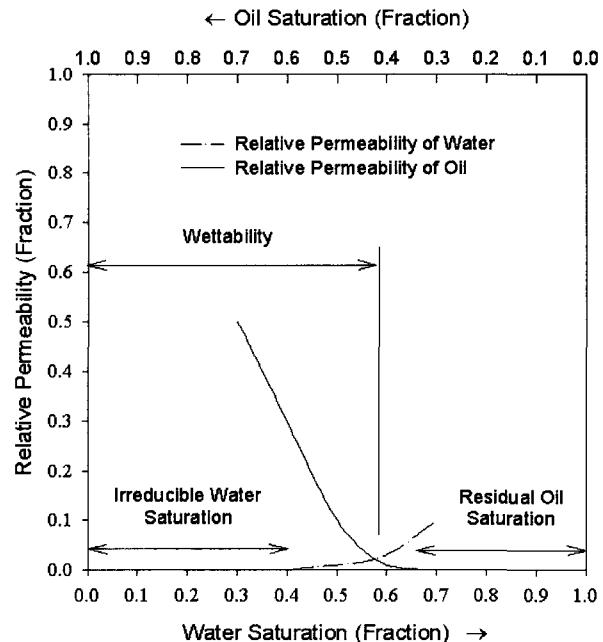


Fig. 1. General Trend of Relative Permeability of Oil and Water

식 (1), (2), (3), (4) 그리고 (5)를 결합하여 다시 정렬하면 다공재료 속으로 흐르는 물과 기름의 흐름방정식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\nabla \cdot \left[\frac{Akk_{ro}}{\mu_o B_o} \left(\nabla P_o - \frac{g}{g_c} \rho_o \nabla G \right) \right] + q_o = V_b \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi S_o}{B_c} \right) \quad (6)$$

$$\nabla \cdot \left[\frac{Akk_{rw}}{\mu_w B_w} \left(\nabla P_w - \frac{g}{g_c} \rho_w \nabla G \right) \right] + q_w = V_b \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi S_w}{B_w} \right) \quad (7)$$

여기서 B = 표준상태 (14.7 psi, 60°F) 와의 밀도 비

본 연구에서는 흐름 방정식 (6)과 (7)을 원유 관련 사업분야에서 많이 사용되고 있는 상용 프로그램인

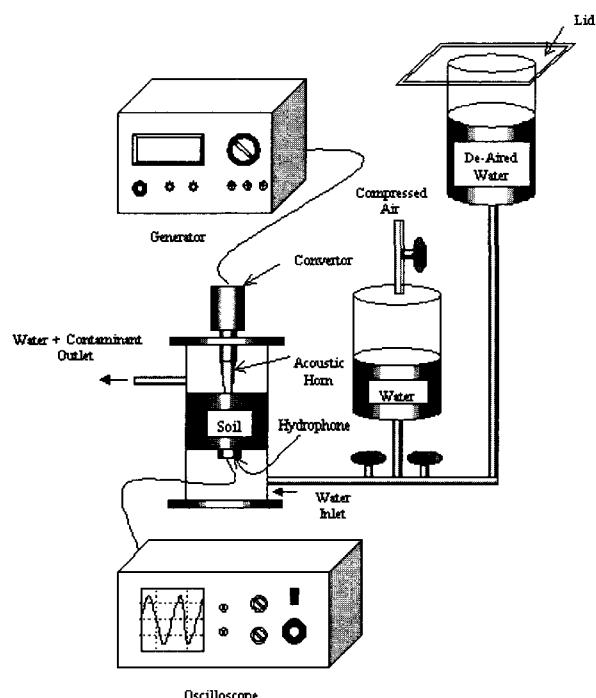
Table 3.1 Physical Properties of Test Soils

Parameter	Ottawa Sand	Fine Aggregate	Natural Soil
Cu (Uniformity Coefficient)	1.85	3.21	12.9
D ¹⁰ (Effective Grain Size), mm	0.27	0.54	0.25
e _{min} (Min. Void Ratio)	0.46	0.46	0.59
e _{max} (Max. Void Ratio)	0.67	0.80	0.90
G _s (Specific Gravity)	2.65	2.69	2.69
Unified Classification	SP	SP	SW

ECLIPSE 100을 사용하여 풀었다. ECLIPSE 100은 fully implicit, 삼상(three phase), 삼차원 모델이 가능하며 FORTRAN 77로 짜여져 있으며 UNIX system에서 운용되고 있다. ECLIPSE 100을 사용하여 실내 실험을 시뮬레이션 하였으며 역해석법을 이용하여 초음파에 의한 상대투수계수의 변화를 고찰하였다.

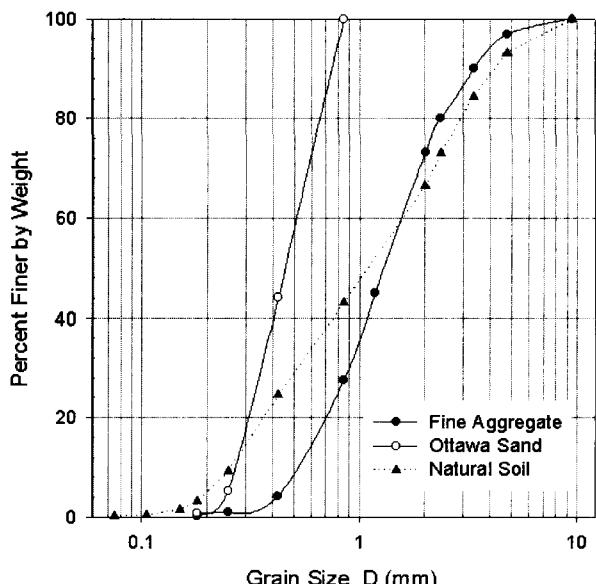
3. 실내 실험

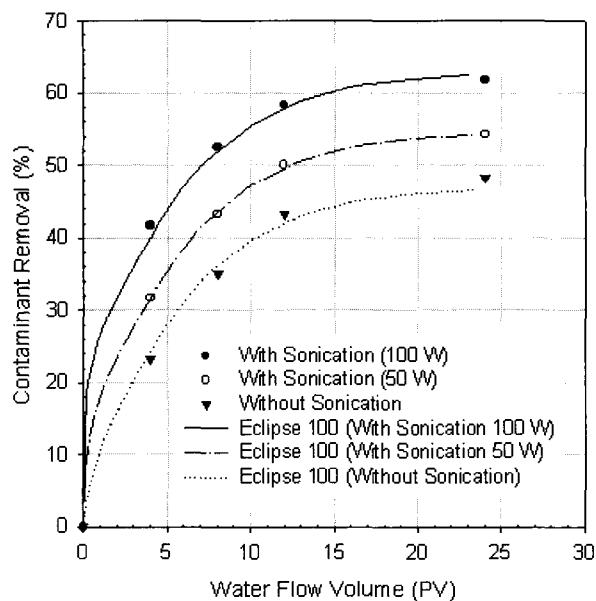
초음파가 상대투수계수에 미치는 영향에 관한 연구

**Fig. 2. Schematic of Test Setup**

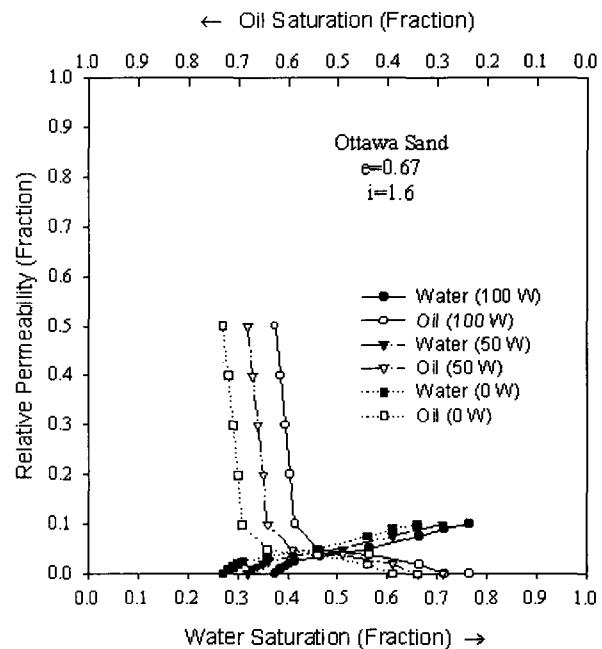
는 특별히 제작된 실험기구를 사용하여 수행되었는데 실험기구에 대한 자세한 설명은 Fig. 2에 나타나 있다. 실험기구는 크게 두 부분으로 이루어져 있다. 시료를 넣을 수 있는 원통형 테스트 챔버와 초음파를 시험시 시료에 가할 수 있도록 되어있는 프로세서(processor)로 이루어져 있다. 테스트 챔버에는 일정한 압력 하에서 세척수의 유입속도를 조절할 수 있도록 고안된 장치가 연결되어있다.

사용된 시료로는 Ottawa Sand, 잔골재, 그리고 입도분포가 비교적 좋은 모래가 사용되었으며 입도 분포 곡선은 Fig. 3에 나타나 있으며 각각의 물성치는 Table 1에 정리하였다. 대체오염물로는 식물성기름(Crisco 사)이 사용되었다. 시험방법으로는 자연 건조

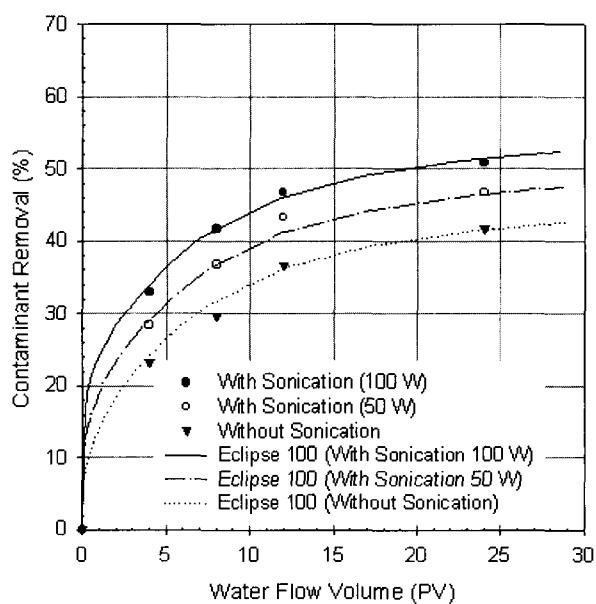
**Fig. 3. Particle Size Distribution of Test Soils**



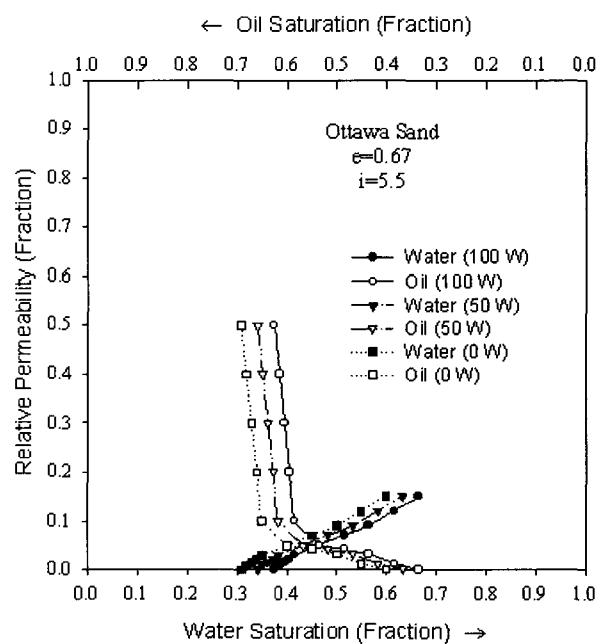
**Fig. 4. (a) Oil Production vs. Water Flow Volume
(Ottawa Sand)**



**Fig. 4. (b) Relative Permeabilities of Oil and Water
($e=0.67$, $i=1.6$)**



**Fig. 5. (a) Oil Production vs. Water Flow Volume
(Ottawa Sand)**



**Fig. 5. (b) Relative Permeabilities of Oil and Water
($e=0.67$, $i=5.5$)**

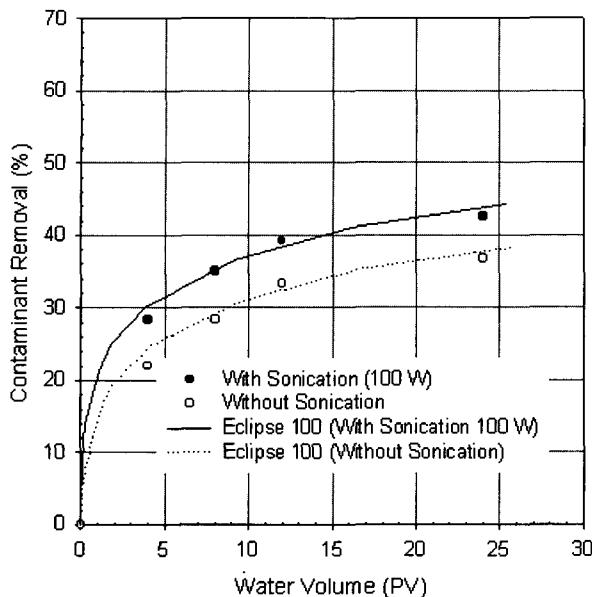


Fig. 6. (a) Oil Production vs. Water Flow Volume (Ottawa Sand)

된 일정량의 모래와 대체오염물을 혼합한 뒤 테스트 챔버에 조심스럽게 다져서 준비한 후 초음파와 세척수를 동시에 가하여 유출수를 실린더에 모은 다음 기름과 물의 완전 분리를 기다린 후에 기름과 물의 비를 구하여 세척되어져 나온 기름의 양을 측정하였다. 전체 실험기간동안 세 가지의 수두 ($i=1.6, 5.5, 13$) 및 두 가지의 초음파 에너지 (0W, 100W)를 사용하였으며 그에 따른 실험결과를 역해석에 사용하였다.

4. 실험 및 역해석 결과

역해석 방법으로는 우선 상대투수계수를 입력자료로 사용하여 시뮬레이션에서 산출되어지는 기름의 양과 실제 시험결과를 비교하였다. 두 개의 결과가 비교적 잘 일치 할 때까지 상대투수계수를 변화시키며 프로그램을 반복 실행하였으며 시뮬레이션과 시험결과와의 비교 및 그에 따른 상대투수의 변화를 Fig. 4, 5, 6에 나타내었다.

Fig. 4(a)는 0.67의 간극비를 가지는 Ottawa Sand에 1.6의 수두를 가하였을 때 시험결과와 그에

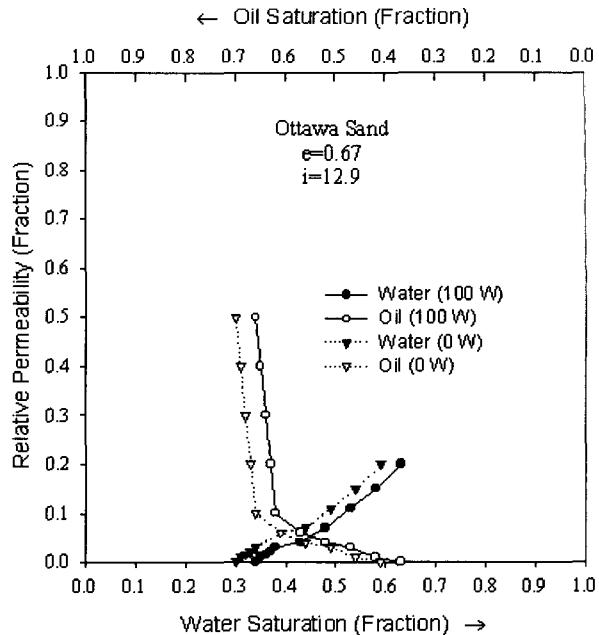


Fig. 6. (b) Relative Permeabilities of Oil and Water ($e=0.67, i=12.9$)

따른 시뮬레이션의 결과를 비교하여 나타내고 있다. 시험결과와 시뮬레이션의 결과가 잘 일치하고 있음을 그림에서 알 수 있다. 일정량의 세척수(PV, pore volume)를 시료 속으로 흘려보낼 때 세척되어져 나오는 오염물의 양 즉 산출되어져 나오는 기름의 양을 유입된 세척수의 양에 관하여 나타내고 있다. 초음파를 가하였을 때와 가하지 않았을 때의 세척량에 큰 차이를 보이고 있으며, Fig. 4(b)에서는 그때의 상대투수계수의 변화를 나타내고 있다. Fig. 5(a)와 6(a)는 같은 시료에 대하여 수두를 변화시켰을 때의 오염물 제거량에 대한 실험 및 시뮬레이션을 비교한 그림들이며 Fig. 5(b)와 6(b)는 그에 따른 상대투수의 변화를 나타내고 있다. 초음파에 의해 변화되는 양상이 비슷하게 나타나고 있으며 단지 제거되어지는 오염물의 양의 차이가 수두 즉 세척수의 유입속도에 따라 큰 차이를 보이고 있다.

Fig. 4(b), 5(b), 6(b)에서 보여지는 바와 같이 상대투수 곡선이 초음파에 의해 보다 높은 포화도 쪽으로 변이가 되었으며 이는 Nikolayevskiy et al. (1996)³⁾의 결과와도 일치하고 있고 Simkin과

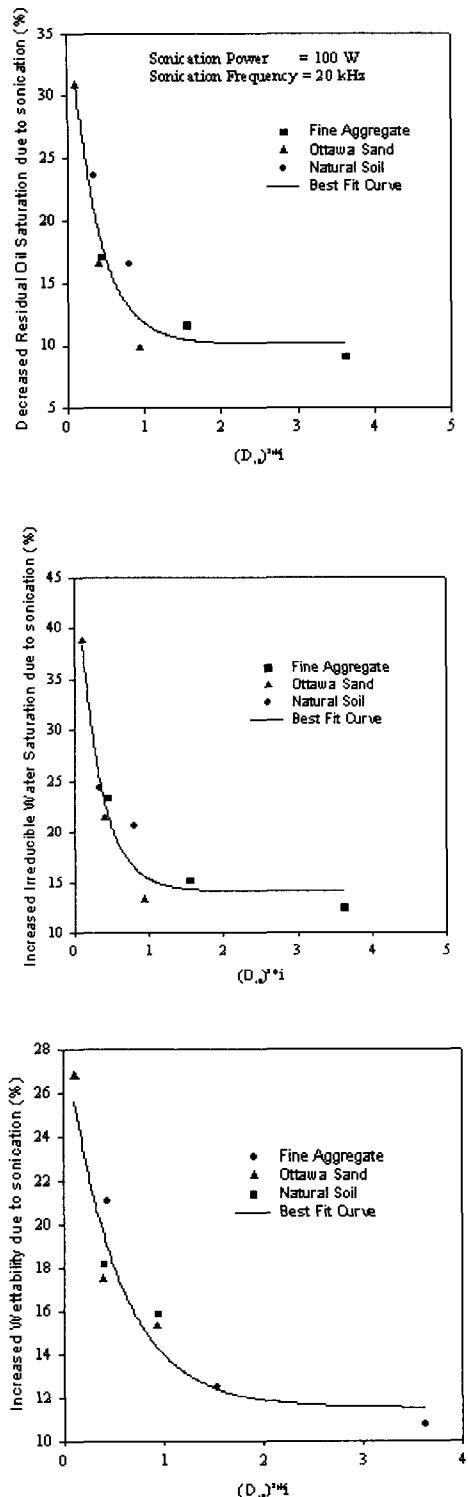


Fig. 7. Residual Oil Saturation, Irreducible Water Saturation, Wettability vs. $(D_{10})^{2*i}$

Verbitskaya (1989)⁴ 또한 초음파에 의해 상대투수가 변화됨을 보였다. 그러나 초음파가 상대투수에 미치는 영향에 관한 연구는 아직 시작 단계이며 그에 대한 연구가 체계적이지 않은 실정이다.

본 연구에서는 상대투수 곡선의 특성을 결정짓는 3 가지의 영향인자 즉 residual oil saturation, irreducible water saturation, 그리고 wettability의 초음파에 의한 변화를 고찰하였고 각 시료의 특성 및 유출수의 속도 즉 $(D_{10})^{2*i}$ 와의 연관성에 관하여서도 알아보았다. Fig. 4(b), 5(b), 6(b)에서 보는 바와 같이 기름 및 물의 상대투수는 각각에 대한 포화도가 감소됨에 따라 같이 감소됨을 알 수 있다. Fig. 7은 각각 초음파에 의해 감소된 residual oil saturation과 증가된 irreducible water saturation 및 wettability를 $(D_{10})^{2*i}$ 와 연관지어 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 초음파에 의해 앞의 세 가지 인자가 크게 변하였으며 그에 따른 정도는 시료의 종류 및 유출수의 속도에 따라 다르게 나타났다. 상대투수곡선에서 irreducible water saturation과 wettability가 초음파에 의해 증가되었다는 것은 물의 흡입자에 대한 상대 흡착도가 기름에 비해 증가되었음을 나타내며 그에 따른 결과로 기름의 산출량이 증가됨을 알 수 있다.

5. 결 론

토양 및 지하수 오염에 관심이 집중됨에 따라 오염물의 지반내 이동특성에 관한 연구가 필요시 되고 있다. 본 연구는 오염물의 지반내 이동 현상 중 비용해서 흐름의 특성에 관하여 알아보았으며 초음파가 흐름에 미치는 영향에 관하여서도 고찰하였다. 실내실험 및 상용 프로그램인 ECLIPSE 100을 사용한 역해석을 통해 연구사 수행되었으며 초음파에 의한 상대투수의 변화에 관하여 중점적으로 고찰하였다.

본 연구의 결과로 초음파가 상대투수의 변화에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며 특히 초음파는 residual oil saturation, irreducible water saturation, 그리고 wettability의 변화에 큰 영향을

미치는 것으로 나타났다. 변화의 정도는 시료의 종류 및 유출수의 흐름 속도에 따라 다르게 나타남을 보였다.

본 연구를 통해 초음파가 토양 및 지하수 오염 복원에 있어 상대투수를 변화시킴으로 오염물 세척률의 향상을 기대할 수 있음을 알 수 있었고 초음파의 현장적용 가능성에 대해 확인하였다.

참 고 문 헌

- 1) Buckley, S. E. and Leverett (1941). Mechanism of Fluid Displacement in Sands, *Petroleum Transactions, AIME*, Vol. 146, pp. 107
- 2) 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
- 3) Nikolayevskiy, V. N., Lopukhov, G. P., Liao, Yizhu, and Economides, M. J., (1996). Residual oil reservoir recovery with seismic vibrations, *SPE Production & Facilities*, Vol.11, No. 2, pp. 89-94
- 4) Simkin, E. M. and Verbitskaya, T. V., (1989). Gravity segregation in a homogeneous waterflooded stratum in a seismoacoustic field, *Journal of Engineering Physics*, Vol.55, pp. 1118-1122