

비포화대 오염정화 설계를 위한 공압파쇄 모사 해석

권미선¹ · 박은규^{1*} · 이철호² · 김용성³ · 김남진^{1,3}

¹경북대학교 지질학과, ²(주)오이코스, ³(주)유신

A Numerical Analysis on Pneumatic Fracturing for *in-situ* Remediation

Miseon Kwon¹ · Eungyu Park^{1*} · Cheolhyo Lee² · Yongseong Kim³ · Namjin Kim^{1,3}

¹Dept. of Geology, Kyungpook National University

²OIKOS Co., Ltd

³Yooshin Engineering Corporation

ABSTRACT

Pneumatic fracturing is an emerging tool to enhance the remediation efficiency of contaminated unsaturated zones by injecting high pressure air and inducing artificial fracture networks. Pneumatic fracturing is reported to be well suited for the cases where the contaminated unsaturated zone thickness is less than 5 m as many contaminated domestic sites in Korea. Nevertheless, there have been almost no studies carried out on the site-specific efficiency and the optimized design of pneumatic fracturing considering the unsaturated zone characteristics of Korea. In this study, we employ numerical simulations to compare the efficiency of pneumatic fracturing on the aspect of the site remediation and the porosity improvement at several hypothetic unsaturated zones composed of four typical soil types. According to the simulation results, it is found that the zone with fine grains soil such as clay and silt shows better efficiency than the zone composed of coarse grains in terms of air flow and porosity enhancements. The results imply that pneumatic fracturing may improve the efficiency of site reclamation by jointly or independently applied to the many contaminated sites in Korea.

Key words : Pneumatic fracturing, Multiphase flow simulation, Unsaturated zone, Porosity improvement

1. 서 론

협소한 국토 면적을 지닌 국내에서는 군부대 또는 밀집된 형태로 조성된 중화학 산업단지를 비롯한 다수의 부지에서 토양 및 대수층 오염이 빈번히 발생해 왔으며 이러한 양상은 향후 지속될 것으로 예상된다(Lee, 2001). 일반적으로 다양한 시설로부터 누출된 액상의 오염물질은 토양을 침투하여 토양 오염을 발생시키며 중력흐름에 의해 하향 이동하여 모관대에 도달하고 일정 모세관압력이 발생할 경우 대수층 내로 유입된다. 대수층 내의 오염물질은 오염원을 형성하여 지하수의 유동에 따라 오염운을 형성하여 광범위한 오염을 발생시키기도 한다.

오염확산을 사전에 대처하기 위한 방편으로 효과적인 오염 부지 복원기술의 개발은 매우 중요하다. 현재, 부지

를 정화하기 위한 가용한 복원기술의 종류는 매우 다양하며 이들은 기 오염된 토양 또는 지하수의 처리 위치에 따라 크게 원위치(*in-situ*)와 비원위치(*ex-situ*) 정화기술로 분류된다. 비원위치 정화기술은 오염 부지를 굴착하여 지상의 처리시설로 운반하여 정화하는 기술로 제반 공정의 관리 및 효율 평가가 용이하나, 굴착과 이동에 많은 비용이 소요되며 굴착과정에서 지반환경 교란시킬 가능성을 내재하여 추가적인 오염 확산을 유발할 가능성이 있다. 이에 비해 최근 부지평가 및 모니터링 기술이 발달과 더불어 관심이 고조되고 있는 원위치 정화기술은 처리기간 중에도 부지이용이 가능하고 굴착 및 운반 과정이 배제되어 처리 비용을 절감할 수 있으며 주변 환경으로의 오염물질 확산 가능성이 상대적으로 낮기 때문에 선호되는 추세이다. 원위치 지중정화 효율을 최대화하기 위해서는 지하 매

*Corresponding author : egpark@knu.ac.kr

원고접수일 : 2010. 8. 31 심사일 : 2010. 9. 9 게재승인일 : 2010. 10. 12
질의 및 토의 : 2011. 2. 28 까지

질의 공극 간 연결성을 높여 토양 및 암석의 투수성을 일정한 값 이상으로 확보할 필요가 있는데 이를 목적으로 지중파쇄방법이 활용될 수 있다. 이는 목표하는 위치로의 정화제 이동 및 정화제와의 반응 면적을 극대화하기 위한 기법으로 대표적으로 비포화대 매질을 주요 대상으로 하는 공압파쇄(pneumatic fracturing)와 포화대에 대하여 실시하는 수압파쇄(hydraulic fracturing) 기법이 있다. 공압파쇄 기법은 고압의 공기를 주입유체로 이용한다는 점이 물을 이용하는 수압파쇄 기법과 대별되며, 상대적으로 적용가능 심도는 알지만 영향반경이 크고 부수적으로 오염물질의 산화를 유도할 수 있기 때문에 효과적이라 할 수 있다. 또한 공압파쇄 기법을 통한 압축공기 주입은 지중내 기존에 존재하는 균열을 확장시키거나 새로운 1 mm 이하의 수많은 미세 균열을 유도하여 유체흐름망(channel network)을 형성시키고 휘발성 오염물질을 제거한다(Suthersan, 1999). 이 때 형성된 유체흐름망은 기체 및 정화제로 이용되는 액체의 투수성을 증가시켜 여타 지중정화 기술의 동시 혹은 사후적용 시 오염물 처리 및 반응효율을 증대시킬 수 있다(USEPA, 1992, 1993).

공압파쇄 기법의 효율에 영향을 주는 인자는 오염물질이 분포되어있는 깊이, 부지면적, 오염농도, 및 토양의 조직과 성분(구조, 유기물 함량, 구성, 투수성, 수분 함유능력, 그리고 수분함량) 등이다. 또한 공압파쇄 기법은 포화대가 비교적 천부에 존재하고 오염범위가 10 m 이내인 오염부지 상황에 효과적인 것으로 알려져 있어(Schuring, 1994) 대수층이 지표로부터 3 m 전후에 존재하고 오염범위가 5 m 이내인 국내의 오염부지 상황에 부합되는 지중정화 방법이라 할 수 있다. 그러나 국내에는 비포화대를 구성하는 토양군 별 공압파쇄 효율성 내지 설계 가이드라인에 관한 자료가 전무하거나 매우 미비한 실정이며 이에 대한 많은 연구가 요구된다.

공압파쇄에 따른 유체의 흐름 및 비포화대 물성 변화는 일반적으로 현장에서의 직접 측정이 용이하지 않고 많은 비용이 소요되며 실험실 조건 하에서의 실험은 정확한 현장 상황을 반영할 수 없다는 제한점이 있다. 따라서 다양한 현장조건 하에서 실용적 결과를 도출하기 위한 연구는 제한적일 수밖에 없다. 이에 대한 대안으로 실제 현장상황을 반영한 수치모사 연구를 통하여 다양한 오염부지 상황 및 설계에 따른 결과예측 효율성을 검토하는 것이 보다 효율적이라 할 수 있으며 이에 는 궁극적으로 현장 검증이 요구된다.

따라서 본 연구의 목표는 국내의 다양한 오염부지 상황에 적합한 비포화대에서의 고효율 원위치 지중정화기술

적용에 기반이 될 수 있는 고압공기 주입 및 비포화대 물성 변화에 대한 수치모사의 실시와 그 결과에 대한 해석이다. 수치모의를 통하여 국내 대표적인 토양군으로 이루어진 비포화대에서 공압파쇄에 의하여 나타나는 물성 변화와 이에 따른 유체이동 특성에 대한 해석을 실시하였다. 이를 위하여 비포화대를 구성하는 매질은 다공성임을 가정하였으며 대표적 토양 군으로 모래, 미사토, 점토, 양토의 4가지 등방 매질로 균질하게 구성되었음을 가정하였다.

2. 고압 기체주입 모델링

본 연구는 공압파쇄에 의한 비포화대 물성 변화와 주입공기의 흐름을 주요 연구 대상으로 하였다. 따라서 토양내 잔류 수분과 주입공기의 이상류(two-phase flow)에 대한 해석이 필수적이며 상대적으로 낮은 농도로 분포하거나 공기 주입에 의한 비포화대 물성 변화에 개입될 가능성이 낮은 오염물질의 흐름은 고려하지 않았다. 본 연구에서 다중상 흐름의 각 유체 흐름은 독립적인 Darcy 방정식으로 해석하였다. 비포화대 내의 다상흐름은 다양한 독립변수들로 인하여 큰 복잡성을 가지며 각 유체의 압력과 포화 정도 등을 포함한 다양한 수리 특성에 의해 민감한 영향을 받는다(Burdine, 1953; Brooks and Corey, 1964; Mualem, 1976; van Genuchten, 1980). 본 연구에서는 이러한 복잡성을 단순화하기 위한 방법으로 van Genuchten(1980)이 제시한 모델과 비포화 수리파라미터를 적용하여 각 유체의 흐름을 해석하였다. 또한 비포화대의 물성 변화를 규명하기 위하여 Biot(1941, 1955)의 다공탄성체(poroelastic) 모델을 적용하였으며, 비포화대 지중파쇄를 효과 및 범위를 해석하기 위하여 변형률-공극률 변환을 실시하였다.

2.1. 지배방정식

본 연구에서는 고압 기체주입 모델링을 수행하기 위해서 유한요소법 모델링 소프트웨어인 COMSOL Multiphysics(2005ab)를 이용하여 보다 다양한 수리-물리적 상황을 모사하였다. 이중상 흐름의 모사를 위하여 van Genuchten(1980)에 의해 제안된 비포화대 수분 거동 모델이 사용되었으며 모사 유체는 기체와 액체로 설정하여 2개의 Darcy 흐름 방정식을 사용하였다. 모사 도메인의 입력 변화에 따른 변형에는 Biot 방정식(1941, 1955)을 사용하였다.

2.1.1. 이상류 흐름 방정식

본 연구에서 두 가지 서로 다른 유체상이 동시에 비포

화대에서 유동하는 현상을 모델화하기위하여 물은 wetting phase(w) 그리고 공기는 non-wetting phase(nw)에 해당하는 것으로 가정하였다. 유체흐름은 물과 공기로 독립적 방정식으로 표현될 수 있으며 이는 아래의 식과 같다.

$$\Phi_i \frac{\partial S_{e_w}}{\partial t} + \nabla \cdot \left[-\frac{\kappa k_{r,w}}{\eta_w} (\nabla p_w + \rho_w g \nabla D) \right] = 0 \quad (1)$$

$$\Phi_i \frac{\partial S_{e_{nw}}}{\partial t} + \nabla \cdot \left[-\frac{\kappa k_{r,nw}}{\eta_{nw}} (\nabla p_{nw} + \rho_{nw} g \nabla D) \right] = 0 \quad (2)$$

식 (1) 및 (2)에서, 아래첨자 w과 nw는 각각 wetting 과 non-wetting 유체를 의미하며, Φ_i 는 총 공극률, S_e 는 유효 포화도 함수, κ 는 매질의 고유투수계수(m²), k_r 은 상대 투수함수, η 는 점성도(kg/(m·s)), p 는 압력(kg/(m·s²)), t 는 시간(s), ρ 는 밀도(kg/m³), g 는 중력기속도(9.82m/s²), 그리고 D 는 위치수두(m)이다.

모세관압(capillary pressure)은 두 개 혹은 그 이상의 혼합되지 않는 유체가 하나의 시스템에 존재할 때 이들 유체 사이의 계면장력(interfacial tension)에 의해 발생한다. 이들 유체는 흙 전체 부피에 대한 수분과 공기의 부피비율을 나타내는 θ_w , θ_{nw} 로 각각 토양에 분포하며, 그 합은 공극률과 같고 θ_w 와 θ_{nw} 의 범위는 잔류함수비(θ_r)에서 총 공극률(θ_s) 사이이다. 각 유체의 유효 포화도, S_e 는 해당유체가 공극내 차지하고 있는 부피의 상대적인 비에 비례하는 정규화함수로 나타내었으며 그 범위는 0에서 1 사이이다. θ 와 S_e 는 각 유체들의 압력에 종속되는 함수이다. 모세관압은 다음의 식으로 주어진다.

$$p_c = p_{nw} - p_w \quad (3)$$

본 연구에서 다공질 매질의 공극은 물과 공기로만 채워져 있음을 가정하였으며 이에 따라 두 유체의 유효포화도 합은

$$S_{e_w} + S_{e_{nw}} = 1 \quad (4)$$

와 같이 주어진다. 따라서 모세관압변화에 따른 유효포화도의 변화는 다음과 같다.

$$C_{p,w} = C_{p,nw} = \theta_s \frac{\partial S_{e_w}}{\partial p_c} \quad (5)$$

여기에서, C 는 specific capacity이다.

식 (1-2)에 식 (3-5)를 대입하면 식 (6) 및 (7)을 얻을 수 있으며 두 식의 연쇄 연산을 통하여 각각 물과 공기의 압력인 p_w 와 p_{nw} 를 동시에 해석할 수 있다.

$$C_{p,w} \frac{\partial}{\partial t} (p_{nw} - p_w) + \nabla \cdot \left[-\frac{\kappa k_{r,w}}{\eta_w} (\nabla p_w + \rho_w g \nabla D) \right] = 0 \quad (6)$$

$$-C_{p,nw} \frac{\partial}{\partial t} (p_{nw} - p_w) + \nabla \cdot \left[-\frac{\kappa k_{r,w}}{\eta_{nw}} (\nabla p_{nw} + \rho_{nw} g \nabla D) \right] = 0 \quad (7)$$

비포화대 함수 모델인 Mualem-van Genuchten 모델 (van Genuchten, 1980)은 압력수두(H_p)를 주요 매개변수로 하며, 물에 대한 식은 다음과 같다.

$$\theta_w = \begin{cases} \theta_{r,w} + S_{e_w} (\theta_{s,w} - \theta_{r,w}) & H_p > 0 \\ \theta_{s,w} & H_p \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$S_{e_w} = \begin{cases} \frac{1}{[1 + |\alpha H_p|^n]^m} & H_p > 0 \\ 1 & H_p \leq 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$C_w = \begin{cases} \frac{\alpha m}{1-m} (\theta_{s,w} - \theta_{r,w}) S_{e_w}^m \left(1 - S_{e_w}^m \right)^{m-1} & H_p > 0 \\ H_p \leq 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$k_{r,w} = \begin{cases} S_{e_w}^L \left[1 - \left(1 - S_{e_w}^m \right)^{\frac{1}{m}} \right]^{m-2} & H_p > 0 \\ 1 & H_p \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

여기에서, θ 는 토양함수율, θ_r 은 잔류 함수율, θ_s 는 포화 함수율, C 는 specific capacity(1/Pa), $m = 1 - 1/n$, α (1/cm), n , 그리고 L 은 토양 특성을 나타내는 van Genuchten 상수이다.

공기에 대한 표현은 물에 대한 정의로부터 다음과 같이 표현된다.

$$\theta_{n,w} = \theta_{s,w} - \theta_w \quad (12)$$

$$S_{e_{nw}} = 1 - S_{e_w} \quad (13)$$

$$C_{nw} = -C_w \quad (14)$$

$$k_{r,nw} = (1 - S_{e_w})^L \left(1 - S_{e_w}^m \right)^{\frac{1}{m} - 2} \quad (15)$$

Mualem-van Genuchten 모델은 토양 매질의 물리적 특성에 따라 지하수면으로부터 간극수압 변화에 따른 대수층 시스템 내에서의 토양함수비 변화 예측에 적용될 수 있으며 위 식은 함수비와 토양 매질의 물리적 특성 값 사이의 관계를 나타낸다(van Genuchten, 1980). 모델링을 실시한 각 토양군은 비포화 상태를 가정하였으며, 적용된

Table 1. Intrinsic permeability and Van Genuchten parameters for given soil types (van Genuchten, 1980)

Soil type	Intrinsic permeability(m ²)	Van Genuchten parameter				
		θ_r	θ_s	α (1/cm)	n	L
Sand	2.0×10^{-12}	0.052	0.396	0.0263	2.23	0.5
Silt	5.8×10^{-13}	0.031	0.428	0.0120	1.38	0.5
Clay	2.4×10^{-13}	0.098	0.512	0.0178	1.30	0.5
Loam	1.2×10^{-12}	0.056	0.512	0.0407	1.19	0.5

각 비포화 수리 파라미터들과 고유 투수도는 Table 1과 같다(van Genuchten, 1980).

2.1.2. 다공탄성체

다공탄성체(poroelastic) 모델은 다공질 매질에서의 유체와 변형사이에 연관된 작용을 묘사하는 이론으로 유체로 포화된 다공질 매질의 탄성거동을 설명한다. 이 개념은 Terzaghi(1943)에 의해 최초 제안되었고 Biot(1955)에 의해 구체화 되었다. 본 연구에서는 Biot 모델(Biot, 1955)을 사용하여 유체의 압력과 변형사이에 연관관계를 표현하였으며 이는 아래의 식과 같다.

$$\frac{E}{2(1+\nu)} \nabla^2 u + \frac{E}{2(1+\nu)(1-2\nu)} \nabla \cdot (\nabla u) = \alpha_b \rho_f g \nabla H \quad (16)$$

여기에서 E 는 영률(kg/(m · d²)), ν 는 프와송비, u 는 변위 벡터(m), α_b 는 Biot상수($\alpha_b = 1$)이며, 우변의 $\alpha_b \rho_f g \nabla H$ 은 유체 압력의 변화도(N/m³)이다. 따라서 위의 식(16)과 식(6-7)의 연립을 통하여 시간에 따른 비포화대 변형을 얻을 수 있다.

비포화 지질 매질의 지하수 흐름과 지반 변형을 설명하는 다공탄성체 지배 방정식은 이미 많은 학자들에 의해 고안된 적이 있다(Biot, 1941; Lewis Thigpen, 1985). 이들 연구에 의하면 비포화대의 공극은 물과 공기의 두 가지 상으로 이루어져있으므로 비포화 수리 특성을 고려한 표현을 사용한다. 그러나 본 모델링에서는 물에 의한 영향이 전반적인 유체압 형성에 큰 영향을 미치지 않으며 압력의 변화가 주로 non-wetting 유체 압력에 의존하므로 공기에 의한 영향만이 비포화대 변형을 유도한다는 가정하에 연구를 진행하였다.

2.1.3. 공극률 변화

본 연구에서는 고압의 기체상 주입에 따른 비포화대 매질의 체적변화를 통하여 매질의 공극률 변화를 구하고자 하였으며 이를 위하여 다공탄성체 모델을 채택하였다. 변형률이란 원래의 길이와 힘을 받아서 길이가 늘어나거나

형태가 변화된 양의 비로 무차원 형식으로 표시된다. 특히 구체적과 변화된 체적량의 비를 체적 변형률(volumetric strain, ϵ_v)이라한다.

$$\epsilon_v = \frac{(\text{변화된 체적})}{(\text{구체적})} = \frac{\Delta V}{V} \quad (17)$$

식 (17)의 분자에 표기된 변화된 체적(ΔV)은 공기주입으로 늘어난 부피로 공기 주입에 의하여 발생하는 늘어난 부피로 입자의 변형이 없다고 가정하였을 경우 공극의 부피 변화량(ΔV_v)이 된다.

$$\Delta V = \Delta V_v \quad (18)$$

일반적으로 공극률(ϕ)은 암석 전체 체적(V)에 대한 암석 내 공극의 부피(V_v)의 비로 정의된다.

$$\phi = \frac{V_v}{V} \quad (19)$$

식 (18-19)를 이용하여 식 (17)을 재해석하면 공극률 변화량($\Delta \phi$)에 관한 식을 유도할 수 있으며 이는 아래와 같다.

$$\epsilon_v = \frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta V_v}{V} = \frac{\Delta V_v + V_v}{V} - \frac{V_v}{V} = \phi_f - \phi_i = \Delta \phi \quad (20)$$

여기에서 ϕ_f 는 공기주입후 공극률을 의미하고, ϕ_i 는 공기 주입전의 공극률을 의미하며, 따라서 $\Delta \phi$ 는 공기 주입 후 나타나는 공극률의 변화량이다. 식 (20)을 근거로 하여 체적변형률과 공극률의 변화량은 같음을 알 수 있으며, 따라서 Biot모델을 통해 결정된 매질의 체적변화를 이용하여 공극률의 변화정도를 도출하였다.

본 연구에서는 비포화대 고유 투수계수가 일정함을 가정하고 지반 부피변형에 따른 공극률 변화만 고려하여 수치모사를 진행하였다. 실제 정확한 비포화대 변형 및 유체흐름을 예측하기 위해서는 고유 투수계수의 변화를 고려하여야 하며, 현재 공극률 변화에 따른 투수계수 변화를 고려한 수치모사에 관한 연구가 진행 중에 있다.

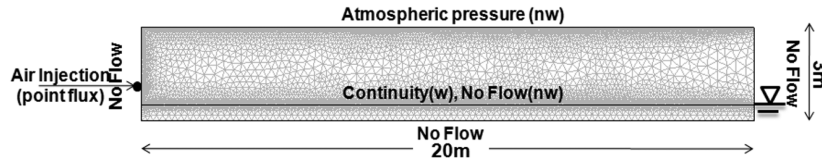


Fig. 1. Schematic cross section used for the simulations. A fine mesh was used upper surface, the water table (2.5 m below surface) and well boundary. All boundaries are no-flow boundaries, except the top boundary.

2.2. 모델의 경계조건과 매질의 물성

단일 공기 주입공으로 실시된 기존의 현장 시험 자료들에 따르면 파쇄진행(fracture propagation)이 예상되는 한계 면적은 약 370 m²(4000 ft²)이며, 이 구역에서 공기 주입으로 인한 균열생성과 함께 지표면이 부푸는 미세한 변형이 발생하는 것으로 보고하였다. 이를 지표에서 관찰하여 변형정도가 비슷한 지점을 따라 표시하면 주입정을 중심으로 원형 내지 타원형의 등고선을 그릴 수 있다.

본 수치모의에서는 지하수면을 경계로 상부의 비포화대와 하부의 포화대의 두 개 구간으로 전체 도메인을 분리하였으며 유체의 거동이 발생하는 주요 도메인은 상부인 비포화대로 설정하여 모사를 실시하였다. 모사 영역은 수평 x-방향으로 20 m 및 수직 z-방향으로 3 m인 2차원 직사각형 영역이며, 지하수면은 상부에서 2.5 m 아래에 위치하도록 설정하였다.

모사에 이용된 격자는 총 2,337개의 삼각요소를 가지도록 설정하였으며(Fig. 1), 도메인의 각 경계에서는 작은 격자(0.2 m)를 사용하여 수치적 오차가 최소화되도록 설계하였다. 특히 고압의 공기가 주입되는 도메인의 좌측 중단의 경계에는 0.1 m의 매우 작은 격자를 적용하였는데 이는 이 경계 주변부에서 가장 큰 수치 오차가 예상되기 때문이다.

모델 영역 내에서의 지하수 유동은 압력수두 차에 의해서만 일어나도록 경계조건을 설정하였으며 모사 기간 동안 강우나 증발산에 의한 유체의 유출입은 없는 것으로 가정하였다. Wetting phase인 물에 대한 경계조건은 모델 영역의 최상부와 좌·우측면에서는 물의 흐름이 없는 무흐름(no flow) 경계로 설정하고 최하부의 경계를 대기압

Table 2. Physical properties of fluid

Property	Expression
Fluid density, water (kg/m ³)	1000
Fluid density, air (kg/m ³)	1.28
Acceleration due to gravity (m/s ²)	9.82
Dynamic viscosity, water (Pas)	1.00 × 10 ⁻³
Dynamic viscosity, air (Pas)	1.81 × 10 ⁻⁵
Compressibility, water (Pa ⁻¹)	4.60 × 10 ⁻¹⁰
Compressibility, air (Pa ⁻¹)	1.00 × 10 ⁻⁵

과 평형을 이루는 자유면 경계로 설정하였으며 상부 도메인과 하부 도메인 사이의 내부 경계는 연속 경계로 설정하여 압력과 흐름 모두 이 경계를 따라 연속되도록 설정하였다. 공기에 대해서는 최상부 경계에 대기압인 101.3 kPa이 모델링 기간 동안 일정하게 지속되도록 고정 압력 경계로 설정하였고 좌우측면과 최하부에서는 공기의 흐름이 없는 무흐름 경계로 설정하였으며, 두 도메인의 경계에는 기체의 흐름이 포화대로 유입되지 않도록 무흐름 경계를 설정하였다. 그리고 좌측 경계 중 공기 주입정의 노즐이 위치하는 지점에 점 요소를 두어 공기의 주입 기간 중 일정한 공기 유입량이 지속되도록 설정하였다(Fig. 1).

모의에 사용된 유체에 관한 상수는 Table 2와 같다.

본 연구의 목적은 국내의 다양한 지질환경에 적합한 비포화대에서의 고효율 원위치 지중정화기술 개발에 적용할 수 있도록 하는데 있으며, 수치모의를 실시한 매질은 비포화대를 구성하는 대표적 토양 군 즉, 모래, 미사토, 점토, 양토로 각 토양군의 공학적 물성은 다음의 Table 3과

Table 3. Typical values of Porosity, density, compressibility, Young's modulus and Poisson's ratio for given soil types (Lambe and Whitman, 1979)

Property	Soil Type			
	Sand	Silt	Clay	Loam
Porosity	0.43	0.45	0.45	0.3
Density of solid (kg/m ³)	1610	2034	1298	2371
Compressibility of solid (Pa ⁻¹)	5.2 × 10 ⁻⁸	1.0 × 10 ⁻⁸	2.6 × 10 ⁻⁷	1.0 × 10 ⁻⁸
Young's modulus (MPa)	19.61	10.79	5.88	7.85
Poisson's ratio	0.27	0.33	0.45	0.25

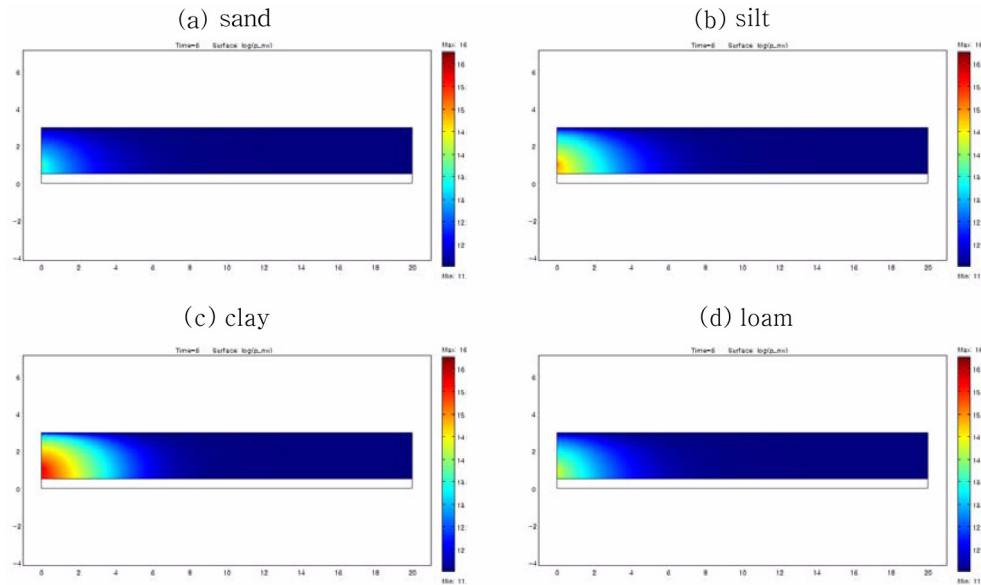


Fig. 2. Nonwetting phase pressure distributions(log scale surface plot) for given soil types and the time after air injection. The maximum pressure of each soils is as follows: sand of 1.162×10^6 Pa, silt of 4.699×10^6 Pa, clay of 1.152×10^7 Pa and loam of 2.532×10^6 Pa.

같다. 지반의 탄성과 관련된 상수는 토양의 압밀 정도에 따라 다양한 범위의 값을 가지게 되며, Table 3의 상수들은 일반적으로 관측되는 값들의 평균치이다.

3. 모델링 결과 및 토의

위에서 언급한 모델 및 상수를 활용하여 비포화대를 구성하는 4가지 대표적 토양 군에 대한 각 매질별 비포화대 내 공압파쇄에 의한 유체 거동 수치모사를 실시하였다. 각 토양군의 수리적 및 공학적 물성은 등방-균질함을 가정하였으며 앞서 제시된 Table 3의 값을 모사 입력 파라미터로 적용하였다. 공기주입은 각 매질 모두 일정하게 지하수면 상부 0.5 m 지점인 지표 아래 2 m에서 유량 $0.05 \text{ m}^2/\text{s}$ 로 20초간 동일하게 주입되는 것으로 설정하였다. 본 연구에서는 2차원 접근법을 사용하였으므로 실제 3차원 실험의 한 단면으로 표현하기 위해서 전체 유량을 주입정의 외경으로 나누었으며 따라서 유량의 단위는 m^3/s 가 아닌 m^2/s 를 가진다. 주입정의 외경은 1992년 미국 환경청에서 수행된 현장실험과 동일한 0.280m 로 가정하였다. 본 연구의 최종 목적은 공압파쇄 모사를 통해 주입정의 최적 조건 설계에 있다. 단일 주입정의 경우 원통 좌표계의 축대칭 조건으로 도메인을 표현하는 것이 보다 타당하나 다수의 주입정을 이용할 경우 3차원 직교 좌표계로 도메인을 표현하는 것이 가장 바람직하다고 할 수 있다. 본 연구는 이를 위한 초기 모델의 구성이라고 할 수 있으며

이를 위하여 2차원 직교 좌표계로 도메인을 구성하였다.

Fig. 2는 동일한 조건의 공기압을 적용 시 공기주입 직후 서로 다른 4 가지 비포화대 매질의 주입기체 압력분포 양상을 보여준다. 모든 모사 결과에서 가장 큰 공기 압력이 나타난 지점은 주입정 인근이며 모래가 약 $1.162 \times 10^6 \text{ Pa}$ 로 가장 낮았고 점토가 약 $1.152 \times 10^7 \text{ Pa}$ 로 가장 높았다. 이는 매질의 투수성이 높을 경우 기체의 이동 및 대기중으로 유실이 원활하여 낮은 압력을 형성하고 투수성이 낮을 경우 비포화대를 빠져나가지 못한 공기가 압력 상승을 유도한다는 직관과 일치하는 결과이다. 공기 압력 분포 영역도 마찬가지로 압력의 최대 상승치에 비례하는 경향을 보이며, 모래의 경우 압력누출이 쉽게 발생하므로 높은 압력발달이 어려워 분포정도도 상대적으로 미약하게 나타나는 것으로 모사되었다.

실제 현장 실증 실험연구에 따르면 균열을 일으킬 수 있는 최소압력, 즉 파쇄압력은 공기주입후 2-3초 후에 다르게 되며, 공기 주입 깊이와 유속을 초기상태와 동일하게 했을 경우, 토양의 경우 파쇄압력은 $1.379 \times 10^5 \sim 3.447 \times 10^5 \text{ Pa}$ 의 범위를 가진다고 알려져 있다(Schuring, 1994). 이러한 파쇄압력은 주입정의 심도, 주입된 공기의 유량 그리고 토양 특성 등 다양한 요인에 영향을 받는다. Fig. 3은 공기주입 2초 후 해당 압력 범위의 영역을 도시한 것으로 주입정의 심도와 주입된 공기의 유량 등 제반 입력인자는 이전과 동일하다. 그림에서 볼 수 있듯이 4가지 매질에서 모두 파쇄압력이 분포하는

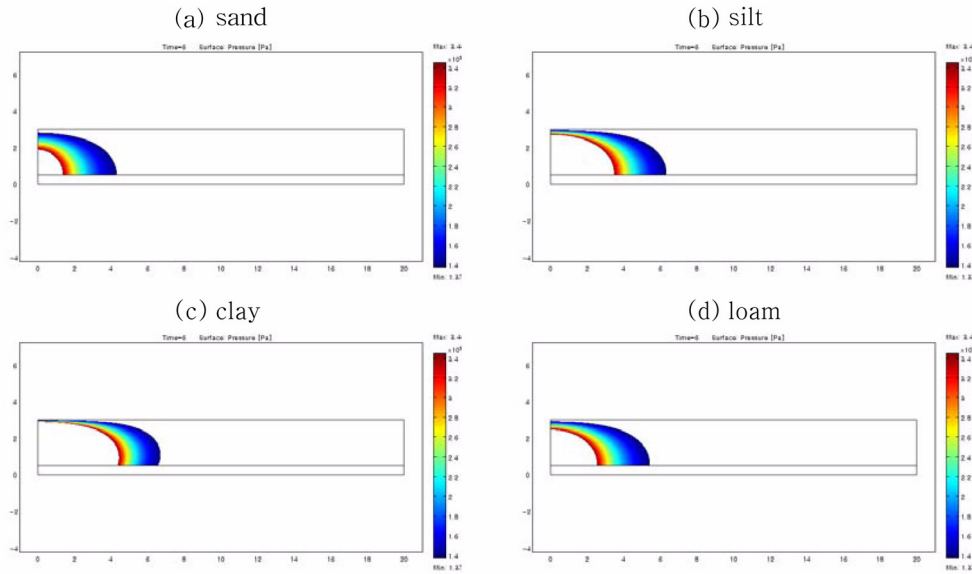


Fig. 3. Distribution of nonwetting phase pressure range for given soil types and the range is between 1.379×10^5 and 3.447×10^5 Pa. The measure time is after the air injection 2 seconds when the fracturing is expected. The area of each soils is as follows: sand of 8.090, silt of 13.329, clay of 15.023 and loam of 10.982 m^2 . Scale bars are in Pa for pressure.

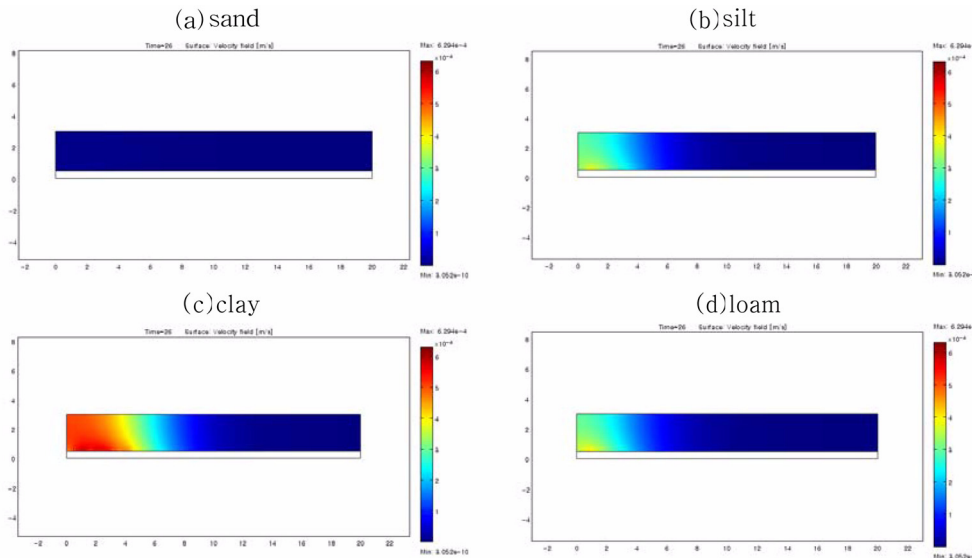


Fig. 4. Distribution of nonwetting phase velocity for given each soils after air injection. Scale bars in m/s for velocity.

양상은 유사하게 나타났다. 파쇄압력 최적구간의 면적은 모래가 8.090 m^2 로 가장 작고 점토의 영향범위가 15.023 m^2 로 가장 넓음을 확인 할 수 있었으며, 이에 따라 파쇄 발달영역이 차이가 나게 되어 공극률 개선 범위에 영향을 미치게 된다.

상기의 분석은 투수율과 공극률이 큰 모래에서보다는 미세토가 풍부한 지반에서 변형이 크게 나타나 공극률이 변화하는 영역이 넓음을 의미하며 공기 주입의 효율성 측

면에서 세립질 토양으로 구성된 비포화대가 보다 우수함을 의미한다. 또한 이와 같은 결과는 본 연구에서는 직접적으로 다루지는 않았으나 비포화대 내에 불균질성이 존재하여 주입된 공기가 빠르게 대기중으로 누출되었을 경우 기법 적용의 효율성이 저감될 수 있음을 의미한다.

원위치 정화에서 파쇄기법은 유해성 유기오염물질의 제거와 처리효율을 향상시키기 위해 투수성을 증가시켜 공기와 물의 흐름을 증진시킨다. 증가된 공기흐름은 휘발성

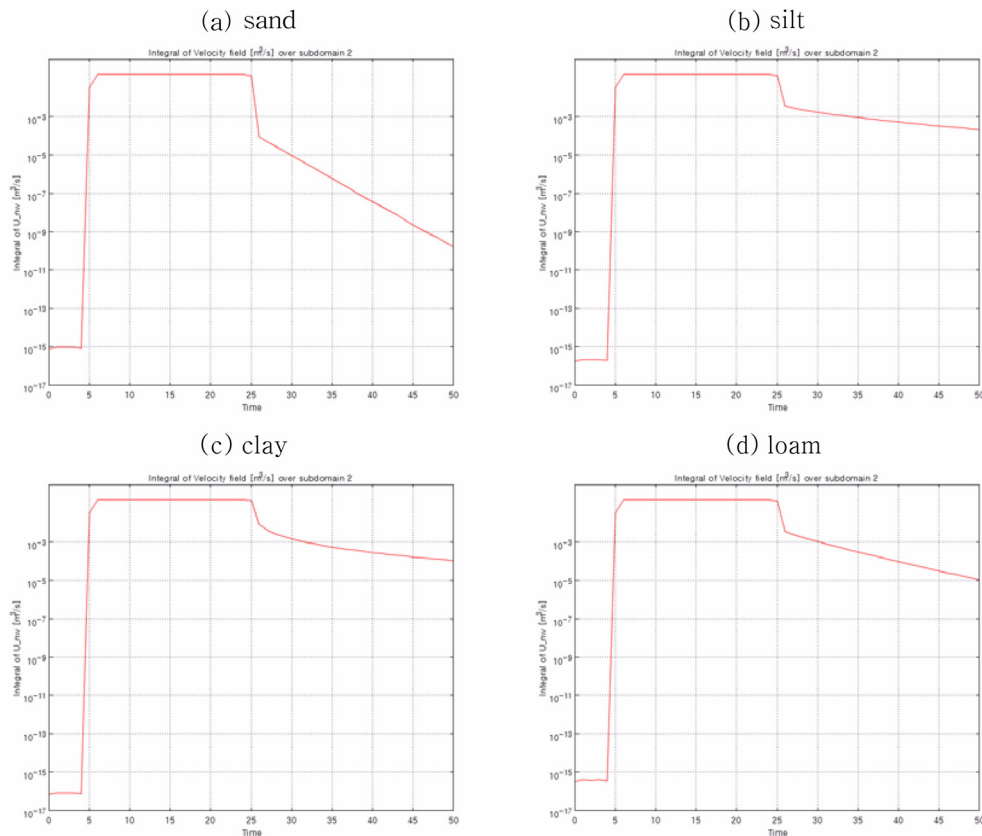


Fig. 5. Integral of air flow rate during fracturing period for given each soils. After fracturing, all air flow rates are increased in the vadose zone.

오염 물질 제거 효율을 향상시킨다(USEPA, 1993). Fig. 4는 공기주입 후 비포화대 매질에 대한 공기유속변화양상에 대한 수치모사 결과이다. 모든 매질에서 공기 유속이 급격하게 증가하였음을 확인 할 수 있으며, 각 매질별 공기 주입 전의 공기 유속과 공기주입 직후의 공기유속 최대치를 각각 비교해보면, 모래는 9.952×10^{-17} 에서 9.388×10^{-6} m/s로, 미사토는 2.265×10^{-17} 에서 4.095×10^{-4} m/s로, 점토는 1.018×10^{-17} 에서 6.294×10^{-4} m/s로, 그리고 양토는 4.301×10^{-17} 에서 4.421×10^{-4} m/s로 상승이 이루어졌다. 상대적으로 점토의 경우가 공기유속 변화가 가장 큰 것으로 나타났으며 모래의 경우가 가장 작았다. 그러나 각 매질의 유속 변화 분석에서 공극률 증가로 인하여 나타나는 투수성 증가는 반영하지 않았으며 이를 고려하였을 경우 점토의 공기 유속 증가량은 다소 감소할 것으로 예상된다. 위 결과는 조립토에 비해 공기 투과가 어려워 원위치 정화기술의 경제성이 떨어지는 세립질 매질이 고압의 공기 주입으로 인하여 보다 큰 정화효율을 기대할 수 있음을 의미한다.

Fig. 5는 각 매질 별로 나타나는 공기유속을 도메인 전

체에 대하여 적분하여 시간에 따른 변화를 도시한 것이다. 모든 매질에서 공기주입 시작 이전 공기흐름이 0에 가까운 값을 보이나 공기 주입 직후 최대치로 급격하게 증가하였다. 공기 주입이 끝난 후 기존 유속까지 급격히 떨어지지 않고 서서히 감소하였으며 주입전보다 공기 흐름이 증가된 상태임을 확인 할 수 있다. 이는 비포화대의 낮은 투수성으로 인하여 공극내 공기의 압력이 대기보다 높은 상태로 상당 시간 유지될 수 있음을 의미하며 그 유지 정도는 매질의 고유 투수성에 반비례하는 양상을 보인다. 활용적인 측면에서 이러한 결과가 의미하는 바는 특정 투수성 이하의 비포화대에서 단속적인 공기 주입을 통하여 상대적으로 낮은 에너지로 목적하는 정화 효율을 기대할 수 있음을 의미한다.

모래의 경우 공기 유속의 원상태 회복이 가장 빠르기 때문에 증가된 공기유속 지속시간이 짧아 단속적인 공기 주입을 통한 정화를 기대하기 어렵지만 미사토와 점토는 $1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-4}$ m³/s의 범위로 증가된 공기 유속을 유지하여 주기적인 공기 주입에 의한 비포화대 정화를 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 전반적으로 세립의 토양이 조

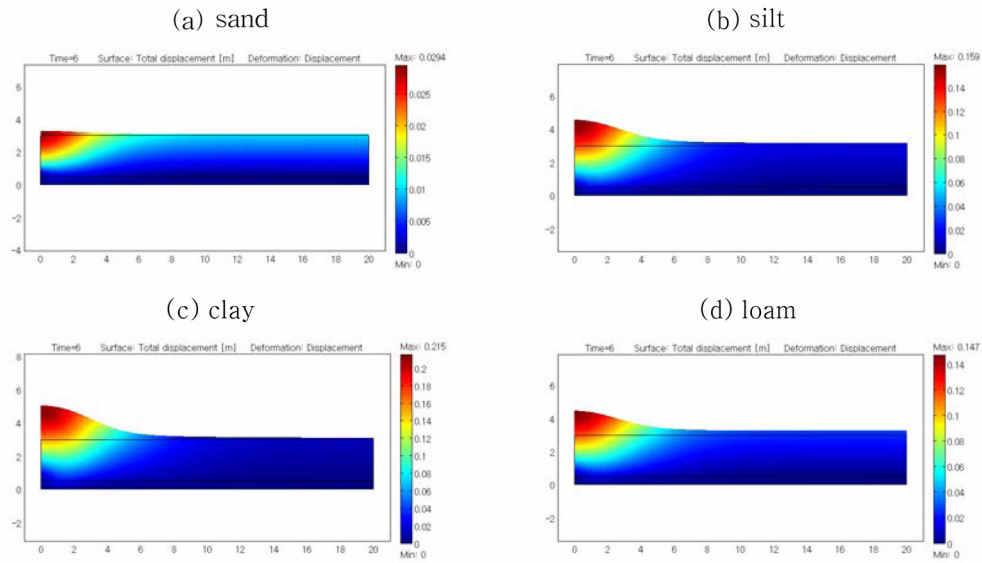


Fig. 6. Distribution of deformation due to air injection. Domains are scaled up to show clearly. Scale bars are in m for displacement.

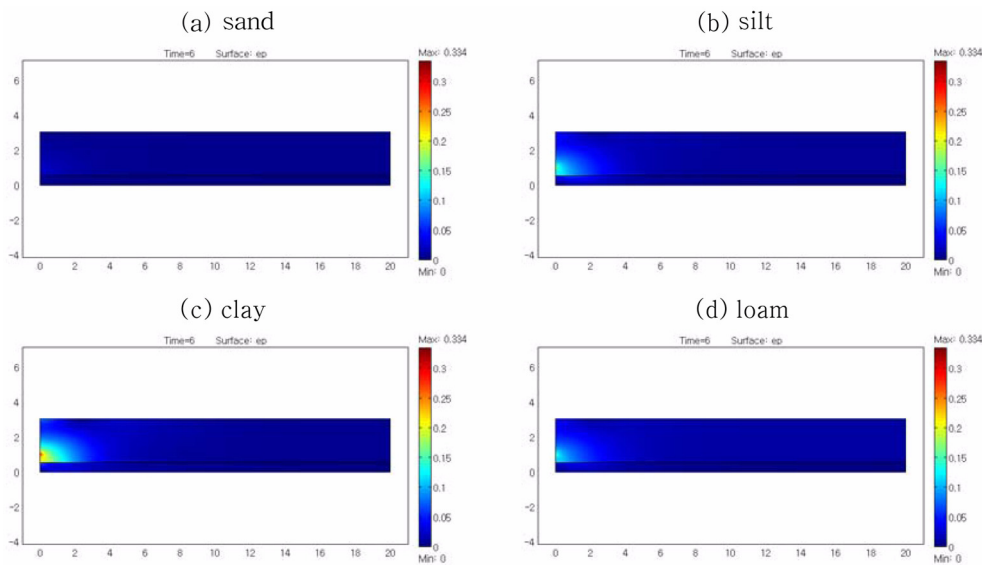


Fig. 7. The ratio of porosity change for given each soils. The measured time is a after the air injection 2 seconds. Each scale bars have different maximum value.

립 토양에 비하여 흐름 지속시간이 높으며 단속적인 공기 주입에 의한 비포화대 정화에는 초기 투수성이 낮은 부지가 보다 적합하다고 할 수 있다.

공압파쇄 시 공기가 주입되는 동안에 주입점을 중심으로 지표가 약간 부풀어 오르는 변형이 발생하게 되는데 일반적으로 공기주입이 끝나게 되더라도 최대 변형치의 10~20% 정도는 잔류하게 되는 것으로 보고된 바 있다 (Suthersan, 1999). Fig. 6은 공기주입시 발생하는 도메인

의 변형을 나타낸 것으로 그 정도가 분명하게 보일 수 있도록 수직 스케일을 왜곡하였다. 모든 케이스에서 공기를 주입하는 지점이 위치하는 곳이 가장 큰 매질 팽창을 보였으며, 주입점을 중심으로 멀어질수록 그 효과는 비선형적으로 감소함을 알 수 있다. 공기 주입 직후의 최대 변형치는 점토(2.15×10^{-3} m), 미사토(1.59×10^{-3} m), 양토(1.47×10^{-3} m), 그리고 모래(2.94×10^{-4} m)의 순서로 나타났다. 이러한 지중 매질의 팽창은 기존 지중 내에 존재하

는 균열의 확장과 새로운 유체 흐름망의 형성을 의미하며 이들의 진존은 투수성 증가에 영향을 줄 수 있다(USEPA, 1992, 1993). 모래의 최대변형치가 낮은 것으로 보아 공압파쇄 이후 잔류하게 되는 변형정도 역시 가장 작을 것으로 판단되며 변형의 정도는 토양의 입자가 세립화 될수록 더욱 커짐을 확인할 수 있다. 따라서 공압파쇄에 의한 투수성의 개선 정도는 세립질 토양일수록 더욱 크게 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

공압파쇄와 관련된 균열발생은 공극률 증가로 인한 투수도 증가를 유도하게 되어 원위치 지중 정화 효율에 기여하게 된다. 매질의 변형은 매질 입자의 형태의 변화라기보다는 균열발생으로 인한 공극 형태의 변화라고 볼 수 있기 때문에 공극률 변화량과 직접적으로 연관된다. Fig. 7은 식(20)을 이용하여 각 토양 균의 공극률 변화정도를 초기 공극률에 대한 상대값으로 표현한 것이다. 각 토양의 최대 공극률 변화는 모래, 미사토, 점토, 및 양토에서 각각 3.2, 20.8, 33.3 및 17.7%로 나타났으며 세립질 토양에서 변화정도가 더 크게 나타나는 것으로 조사되었다. 이는 세립질 토양으로 이루어진 비포화대가 고압의 공기 주입으로 인하여 더 많은 균열 내지 유체 흐름망의 발달이 유도되는 것을 의미한다.

4. 결 론

공압파쇄기법은 지중내의 균열을 형성하여 공극률 및 투수도 증가와 함께 유체흐름을 향상하여 정화효율을 향상시킨다. 성공적인 공압파쇄의 적용을 위해서는 다양한 부지 물성 파악과 함께 주입심도, 주입량, 주입 간격 등 주요 설계인자에 대한 최적화가 이루어져야 하며 일반적으로 이를 현장 내지 실내 조건에서 시험하기 어렵기 때문에 수치적인 접근법이 매우 유용한 대안이 될 수 있다. 본 연구에서는 4가지 상호 다른 매질로 이루어진 비포화대에서 이상 유체 흐름 및 매질 변형 모사를 실시하였으며 그 결과를 해석하였다.

모사 결과 분석을 통하여, 4가지 비포화대 매질의 주입 기체 압력분포 양상은 공통적으로 주입정 인근에서 최대치를 보임을 확인하였으며, 그 값은 모래가 가장 작았고 점토에서 가장 높은 특성을 보였다. 공기 압력분포 영역도 압력의 최대 상승치에 비례하는 경향을 보이는 것으로 나타났으며 이는 조립질 매질의 경우 투수성이 높아 상대적으로 낮은 압력을 형성한다는 직관과 일치한다. 파쇄 발달영역의 범위 및 정도는 공압파쇄를 통한 공극률 개선에 있어 가장 주요한 지표이며 그 발달 양상은 파쇄압력에

영향을 받는다. 4가지 매질에서 파쇄압력이 분포하는 양상은 상호 유사하게 나타났지만 이에 따른 파쇄 발달영역의 범위는 모래가 가장 작고 점토의 영향범위가 가장 넓게 나타나 공극률 개선 범위에 매질의 특성이 매우 중요한 영향을 미칠 것으로 판단된다. 고압공기의 주입에 의한 공극 내 공기 유속의 변화는 점토의 경우가 가장 컸으며 모래의 경우가 가장 작은 것으로 나타났다. 이러한 모사결과는 일반적으로 원위치 정화기술의 효율성이 낮은 세립질 매질에 공압파쇄 기법을 적용하였을 경우 조립질 매질에 비하여 상대적으로 높은 정화효율의 향상을 기대할 수 있음을 의미한다. 그러나 각 매질의 모사에서 공극률 증가로 인하여 발생하는 투수성 증가를 반영하지 않아 모사 결과의 적용에 다소간 한계가 있을 것으로 판단된다. 미사토와 점토의 경우 일시 주입된 고압공기에 의해 증가된 공기 유속 지속시간이 모래보다 긴 것으로 분석되었으며 이러한 결과는 세립질로 이루어진 비포화대 매질에서 단속적인 공기 주입에 의한 부지 정화가 가능함을 의미한다.

공압파쇄 시 공기가 주입되는 동안에 주입정을 중심으로 지표가 약간 부풀어 오르는 변형이 발생하며, 그 정도는 점토, 미사토, 양토, 그리고 모래의 순으로 나타났다. 이러한 비포화대 매질의 팽창은 기존 균열의 확장과 새로 형성된 균열을 의미하며 토양의 입자가 세립화 될수록 공압파쇄에 의한 투수성 개선 효율이 클 것으로 기대된다. 매질의 변형은 균열발생으로 인한 공극 형태의 변화라고 볼 수 있으며 공극률 변화량과 직접적으로 연관이 된다. 모사결과 일반적으로 세립질의 비포화대 토양에서 공극률 변화 정도가 큰 것으로 조사되었으며, 실제 부지의 경우 더 많은 균열 내지 유체 흐름망의 발달이 유도될 것으로 판단된다.

본 연구에서는 수치모사를 이용하여 공압파쇄모델을 구성하고 이를 해석하여 다중 유체 거동을 파악하였고 파쇄에 의한 결과를 해석하였다. 본 모사 연구를 통하여 충분한 주입 시간과 압력이 가해질 경우 비포화대를 구성하는 대부분의 매질에서 균열이 발생하고 공기유속이 증가됨을 확인할 수 있었으나, 다양한 요인을 고려해 보았을 때 초기 투수도가 높은 모래에서보다 미사토나 점토 등 투수성이 낮은 미세토로 이루어진 비포화대가 상대적으로 높은 공극률 개선 효과를 기대할 수 있는 것으로 분석되었다.

사 사

본 연구는 환경부 “토양·지하수오염방지기술개발사업 (G11017003000810000000000000)”으로 지원받은 과제임.

참 고 문 헌

- Brooks, R.H. and Corey, A.T., 1964, Hydraulic properties of porous media: Hydrology Papers, Colorado State University, p. 24.
- Burdine, N.T., 1953, Relative permeability calculation from pore size distribution data, *Trans. Am. Inst. Min. Eng.*, **198**, 71-78.
- COMSOL AB, COMSOL Multiphysics Earth Science Module User's Guide (Version 3.2), 120 p (2005a).
- COMSOL AB, COMSOL Multiphysics Modeling Guide (Version 3.2), 336p (2005b).
- King, T.C., Mechanism of Pneumatic Fracturing, M. S. thesis, Department
- Lambe T.W. and Whitman R.V., 1979, Soil Mechanics, Wiley, New York, p. 533.
- Lee, C.-H., "Status and Prosect of Soil Remediation Industry", Konetic report, <http://www.konetic.or.kr/>, 2001.
- Biot, M.A. 1941, General Theory of Three-Dimensional Consolidation, *Journal of Applied Physics*, **12**, 155-164.
- Biot, M.A., 1955, Theory of Elasticity and Consolidation for a Porous Anisotropic Solid, *Journal of Applied Physics*, **26**, 182-185.
- Lewis Thigpen and James G. Berryman, 1985, Mechanics of porous elastic materials containing multiphase fluid, *International Journal of Engineering Science*, Volume **23**(11), 1203-1214.
- M. Th. van Genuchten, 1980, A closed-form equation for predicting the hydraulic of conductivity of unsaturated soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **44**, 892-898.
- Mualem, Y., 1976, A new model for predicting the hydraulic permeability of unsaturated porous media, *Water Res. Research*, **12**, 513-522.
- Schuring, J.R., 1994, Pneumatic Fracturing to remove soil contaminants, NJIT Res., 2, Spring 1994.
- Suthersan, S. Suthersan., 1999, Remediation Engineering: Design Concepts, CRC Press LLC, Boca Raton, p. 237.
- Terzaghi, K., Theoretical Soil Mechanics, 1943, John Wiley and Sons, New York, p. 510.
- USEPA (U.S. Environmental Protection Agency), 1992, A Technology Assesment of Soil Vapor Extraction and Air Sparging. Office of Research and Development, Washington, DC 20460, EPA/600/R-92/173.
- USEPA (U.S. Environmental Protection Agency), 1993, Accutech pneumatic fracturing extraction and hot gas injection, phase I, Office of Research and Development, Cincinnati, OH 45268, EPA/540/AR-93/509.