

單一節理에서의 모세관압을 고려하지 않은 二狀流體 거동해석

한일영¹, 서일원²

I. 서론

다양한 매질의 간극에서 비포화 흐름이나 다상유체(multi-phase fluid) 흐름 특성을 이해하는 것은 강우-유출모형 해석이나 비수용성 액체(nonaqueous phase liquid)로 오염된 지반을 정화하기 위한 공기주입 정화공법(air surging remediation method)을 적용하는데 매우 중요하다. 이는 또한 중저준위 방사성폐기물 처분시설, 석유류 저장시설, 압축공기 저장발전시설 등에서 가스유출시가스-물의 2상유체 흐름해석에 있어서도 매우 중요하다. 이러한 시설에서 가스가 누출될 경우, 물의 흐름은 절리에 잔류되어 있거나 이동 중인 가스에 의해 저항을 받게 되므로 누출된 가스와 지하수의 동시거동을 해석하기 위해서는 2상유체 흐름해석이 필요하다. 2상유체 흐름해석을 위해서는 모세관압력, 포화도, 상대투과계수(relative permeability)의 관계의 규명이 선결되어야 한다. 그러나 점성유체 흐름의 경우 유속과 점성마찰력은 비례관계에 있는 반면, 모세관력은 유속과 무관하므로 유속이 증가하는 흐름에서는 상대적으로 모세관력의 영향을 무시할 수 있다(Marle, 1981). 매질 내에 2개 이상의 상이 존재하게 되면 각 상은 상호간의 흐름을 간섭하게 된다. 또한 절리간극의 크기에 따라 간섭의 정도가 달라진다. 상대투과계수는 2상유체가 매질의 간극 내를 동시에 흐를 때의 각 상의 간섭정도와 이동능력을 나타내며, 포화도의 함수로 표현한다.

본 연구에서는 지하유류저장시설에서 공동내의 고압의 저장가스 누출 시, 절리간극에서의 가스와 지하수의 동시거동을 해석하기 위하여 압력에 따른 점성마찰력의 변화와 포화도에 따른 상대투과계수의 변화를 간극의 크기별로 고려할 수 있는 2차원 유한차분 수치모형을 개발하였다. 수치모형에 이용할 절리간극크기별 상대투과계수의 특성곡선은 모형실험으로부터 도출하였다. 도출된 특성곡선은 수치모형에 적용하고 해석결과는 모형실험 관찰치와 비교하였다. 수치모형은 다시 현장적용의 가능성을 검토하기 위하여 운영 중인 지하액화프로판가스 저장기지에 적용하였다.

1. SK건설주식회사 연구소 수석연구원

Principal Research Engineer, R&D Center, SK Engineering and Construction Ltd.
(E-mail : iyhan@skec.co.kr)

2. 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 부교수

Associate Professor, School of Civil, Urban & Geosystems Engineering,
Seoul National University.
(E-mail : seoilwon@plaza.snu.ac.kr)

2. 수치모형의 개발

2.1 개념적 모형

암반 매질내에서의 흐름을 해석하기 위하여 본 연구에서는 Bear 등(1987)이 제안한 바와 같이 저장공동에 아주 인접한 영역에서의 흐름을 취급하므로 단일절리 모형을 선정하였다. 단일절리내 흐름은 간극이 평행한 두 판에서의 흐름으로 간주될 수 있으며, xy축으로 구성되는 xy 방향의 2차원 평면 흐름장을 고려할 때, 다음과 같은 조건을 가정하였다. 간극은 판상형으로 압력의 변화에 따른 간극크기는 일정하다. 간극에서의 흐름장은 질량보존의 법칙과 삼승의 법칙을 만족한다. 열동력학적 제 1법칙에 따라 상온에서 유체의 점성계수는 압력에 따라 변화한다. 두 유체는 비압축성이며, 서로 불혼합성으로 계면을 형성하면서 흐르며, 유속은 모세관압력을 무시할 정도이다. 각 상에 대한 상대투과계수는 포화도와 간극크기의 함수이며, 두 유체의 포화도의 합은 항상 1.0이다.

2.2 수학적모형

본 연구에서 개발한 수치모형은 가스와 물의 거동을 표현하는 지배방정식과 보조방정식으로 구성되었다. 2상유체가 동시에 흐를 때 유체는 서로의 흐름을 간섭하므로 운동방정식에서 절대투과계수 대신 상대투과계수를 사용하고 연속방정식과 결합하면 점성을 갖는 비압축성 2상유체가 매질의 간극을 동시에 흐를 때의 지배방정식은 식 (1)과 같다.

$$\nabla \cdot [\alpha \frac{e^2 k_{rg}}{12f\mu_g} (\nabla p_g - \rho_g g \nabla D)] = \alpha \phi \frac{\partial S_g}{\partial t} \quad (1a)$$

$$\nabla \cdot [\alpha \frac{e^2 k_{rw}}{12f\mu_w} (\nabla p_w - \rho_w g \nabla D)] = \alpha \phi \frac{\partial S_w}{\partial t} \quad (1b)$$

여기서 α 는 흐름장의 공간적 차원을 결정짓는 상수, e 는 절리간극의 크기, k_{rg} , k_{rw} 는 가스와 물의 상대투과계수로서 포화도와 간극크기의 함수, μ_g , μ_w 는 가스, 물의 점성계수로서 상온에서 압력의 함수, ρ_g , ρ_w 는 가스와 물의 밀도, ϕ 는 간극율, S_g , S_w 는 가스와 물의 포화도, t 는 시간, f 는 마찰저항계수 (friction resistance factor)로서 식 (2)와 같다.

$$f = 1 + \bar{c}(R_r)^{\eta} \quad (2)$$

여기서 \bar{c} 는 1보다 큰 상수이며, R_r (relative roughness coefficient)은 상대거칠기계수, η 은 1보다 큰 지수이다. Louis(1974)는 절리면을 매끈한 면과 거칠은 면으로 구분하여 층류와 난류의 범위를 설정하고 층류의 경우, $\bar{c} = 8.8$, $0.033 \leq R_r \leq 2.0$, $\eta = 1.5$ 임을 제안하였다. 본 연구에서는 식 (1)에 Louis(1974)가 제안한 범위에서의 상대거칠기계수를 적용하였다. 물과 가스의 구성관계를 표현하는 보조방정식은 식 (3), 식 (4)와 같다.

$$S_w + S_g = 1 \quad (3)$$

$$\frac{\partial S_w}{\partial t} + \frac{\partial S_g}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

2.3 수치기법

지배방정식 (1)의 해를 구하기 위한 수치기법은 IMPES (implicit pressure-explicit saturation)해법(Sheldon 등, 1959)을 사용하였다. IMPES해법은 식 (1)에서 포화도, S항을 제거하여 종속변수를 압력, p항만으로 구성된 방정식으로 만들고, 압력에 관한 해를 음해적으로 구한 후, 각 요소의 포화도를 양해적으로 계산하는 방법이다. 지배방정식의 공간적 차분화는 2차미분항을 이용하였고, 시간적 차분화는 음해법을 이용하였다. 비선형방정식의 해법으로는 Newton-Raphson 반복법을 사용하였고, 행렬식의 계산은 D4 재배열기법을 사용하여 물과 가스의 압력변화량과 포화도를 차례로 구하였다.

3. 모형실험

본 연구에서 수행한 모형실험은 Fig. 1과 같이 유리평판, 물과 질소가스 주입장치, 압력 및 유량측정장치, 포화도 촬영장치로 구성되었으며, 실험방법은 평판의 간극을 조절한 후 주입구에 일정압력의 물과 가스를 동시에 주입하여 유체가 평판 내에서 유동하게 되면 평판의 양단에서 압력차를 측정하고 배출된 유체는 물과 가스로 분리하여 각각의 유량을 측정하였다. 사용된 평판의 간극은 $36.2 \mu\text{m}$, $44.6 \mu\text{m}$, $60.6 \mu\text{m}$, $75.5 \mu\text{m}$, $80.0 \mu\text{m}$, $93.2 \mu\text{m}$, $126.5 \mu\text{m}$ 이며, 주입압은 $6100 \text{ Pa} \sim 42400 \text{ Pa}$ 이고, 가스와 물의 유량은 각각 $1.0 \times 10^{-8} \sim 1.0 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{sec}$, $1.6 \times 10^{-8} \sim 8.3 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{sec}$ 으로 측정되었다. 포화도는 정상상태에 도달한 유리평판의 물과 가스를 디지털카메라로 촬영하고 화소(pixel) 단위의 백색과 흑색으로 나타나는 수을 계산하여 평균포화도를 계산하였다. 평판간극크기별 물의 포화도는 최소 0.028에서 최대 0.772로 측정되었다. 상대투과계수는 각 상의 유효투과계수(effective permeability)를 계산한 후, 유효투과계수와 절대투과계수(absolute permeability)의 비로 부터 상대투과계수를 산출하였다.

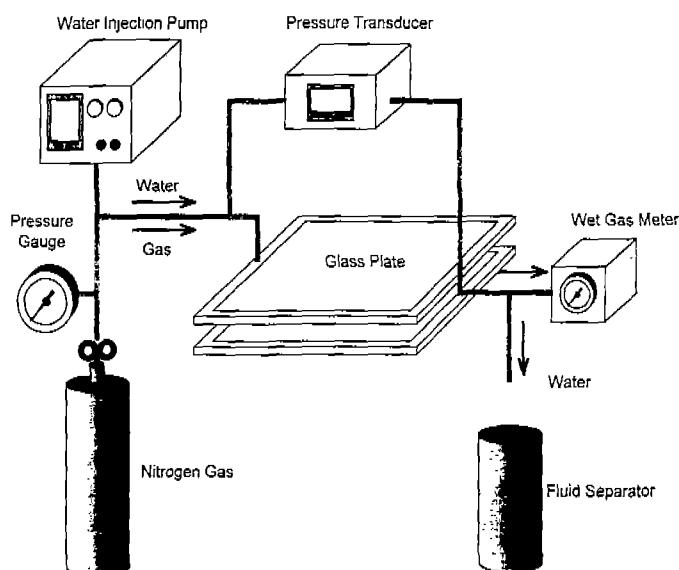


Fig. 1 실험시스템 전체개요도

모형실험 결과는 다음과 같다. 우선, 질소가스와 물의 2상유체 유동형태는 유체의 유속 뿐만 아니라 간극의 크기에 영향을 받는 것으로 밝혀졌다. 포화도와 상대투과계수 관계곡선을 작도하여 간극의 크기별로 비교한 결과, Fig. 2와 같이 간극의 크기가 커질수록 각 상의 상대투과계수의 합은 1보다 작은 범위에서 더욱 작아지므로 두 상간의 간섭이 현격히 증가하는 것으로 밝혀졌다. 또한 기존에 제안된 Romm(1966), Brooks와 Corey(1964), Hirasaki 등 (1970), van Genuchten (1980)의 경험식들은 본 실험에서 도출된 Fig. 3의 상대투과계수 특성곡선을 적합하게 묘사하지 못함이 밝혀졌으며, 따라서 본 연구에서는 새로운 경험식으로 로지스틱 경험식을 제시하였다. 이 방정식은 간극의 크기가 포함된 매개변수를 사용하여 특성식에 임의의 절리 간극크기가 적용가능한 형태이다.

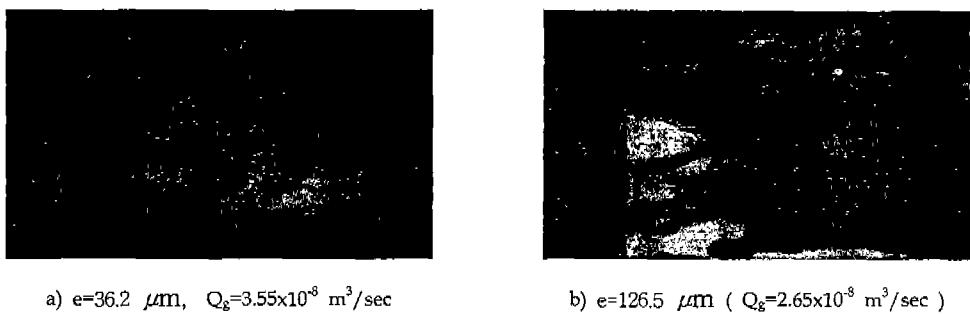


Fig 2. 평판내 가스와 물의 유동

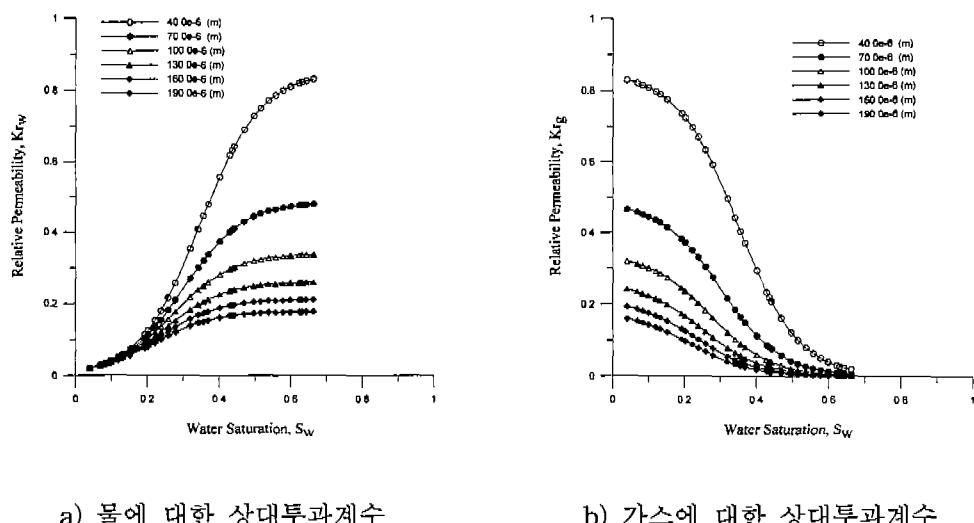


Fig 3. 상대투과계수 특성곡선

4. 수치모형의 검증

상대투과계수 특성곡선을 수치모형에 적용하여 모형실험치와 비교한 결과, 8.2~28.4 %의 평균 제곱근 백분율오차(root mean square percent error)를 보였다. 간극크기가 동일한 절리에서는 거칠기가 클수록 가스의 이동속도는 현격하게 감소되었으나, 매끈한 절리에서는 간극이 작더라도 시간이 경과할수록 간극이 큰 절리보다 가스의 이동속도가 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 절리간극의 크기가 클수록 절대투과계수가 크지만 수포화도 증가에 따른 물과의 간섭정도도 증가하여 가스는 물의 저항을 심하게 받게 되어 단상유체의 흐름에서와 같이 간극이 커지는데 따른 이동속도의 증가효과는 상쇄되거나 때문인 것으로 판단된다.

5. 현장적용성 검토

수치모형의 현장적용성을 검토하기 위해서 지하프로판저장공동 구역에 수치모형을 적용한 결과는 다음과 같다. 운영압의 동적변동에 따른 저장공동 인접의 수평절리 구역에서의 지하수와 프로판가스의 동시 거동을 해석한 결과, Fig. 4와 같이 절리면이 거칠은 경우에는 운영압의 조절만으로도 가스의 이동에 대한 제어가 용이하였으나, 절리면이 매끈하고 간극이 아주 작은 경우에는 지하수압 조절이 곤란한 반면, 가스이동에 대한 물의 저항은 간극이 큰 경우보다 상대적으로 작아서 가스의 이동제어가 불가능한 것으로 분석되었다.

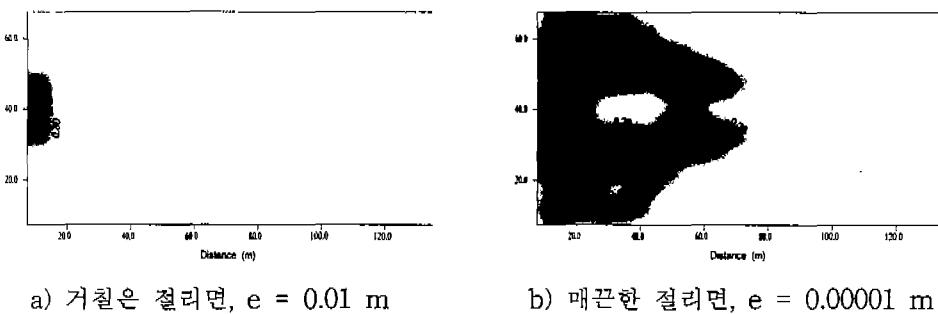


Fig. 4. 절리면과 간극크기에 따른 가스의 유동

6. 결론

포화도와 상대투과계수의 구성관계가 상대적으로 중요시되는 2상유체 흐름에서의 유한차분 수치모형을 개발하였다. 수치모형은 절리간극의 크기를 공간적으로 고려할 수 있을 뿐 아니라, 유동계수 항에서 압력에 따른 유체의 점성계수의 변화와 포화도에 따른 상대투과계수의 변화를 절리간극의 크기별로 고려할 수 있다. 본 연구를 통하여 얻어진 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 평판모형실험으로 부터 매끈한 면에서의 물과 가스의 동시 유동을 관찰한 결과, 2상유체 유동형태는 유체의 유속 뿐만 아니라 간극의 크기에 영향을 받는 것을 알 수 있

었으며, 간극의 크기가 커질수록 두 상간의 간섭이 현격히 증가함을 확인할 수 있었다.

2) 작도된 포화도와 상대투과계수 관계곡선은 기존의 경험식으로는 표현되기 어려웠으며, 따라서 새로운 경험식으로 로지스틱 방정식을 제시하였다. 이 방정식은 간극의 크기가 포함된 매개변수를 사용하였기 때문에 임의의 절리 간극크기의 적용이 가능한 형태이다.

3) 수치모형을 이용하여 절리간극의 크기와 거칠기 정도에 따른 민감도분석을 실시한 결과, 가스의 이동속도는 절리면의 거칠기와 반비례하며, 간극의 크기와는 단상유체의 흐름에서와 같은 간극크기의 제곱에 비례하지 않는 것으로 나타났다.

4) 수치모형을 지하 LPG 저장기지에 적용한 결과, 절리면이 거칠은 경우, 모든 간극 크기에서 운영압의 조절만으로도 가스의 이동제어가 가능하였으나, 절리면이 매끈한 경우, 간극이 작아질수록 운영압과 지하수압의 조절만으로는 가스의 이동제어가 불가능한 것으로 나타났다. 지하수압 조절을 위한 수벽공 설치는 공동내 저압을 유지하여 압력경사가 공동으로 충분히 형성된 이 후에 설치하는 것이 더욱 효과적인 것으로 분석되었다.

7. 참고문헌

- Bear, J. and Berkowitz, B. (1987). "Groundwater flow and pollution in fractured rock aquifers." in *Developments in Hydraulic Engineering*, P. Novak (ed.), Elsevier Appl. Science Publ., 4, 175-238.
- Brooks, R.H. and Corey, A.T. (1964). "Hydraulic properties of porous media." *Colorado State University Hydrology paper No. 3*, March.
- Hirasaki, G.J. and O'Dell, P.M. (1970). "Representation of reservoir geometry for numerical simulation." *Trans. SPE of AIME*, 249, 393-404 (SPEJ).
- Louis, C. (1974). "Introduction of hydraulics of rock." *Bull. Rock. Geol. Min. Ser. 2*, Sec 3, No. 4.
- Marle C.M. (1981). "Multiphase flow in porous media." Gulf publishing company.
- Romm, E.S. (1966). "Fluid Flow in Fractured Rocks." Nedra Publishing House, Moscow, Translated from Russian by W.R. Blake.
- Sheldon, J.W., Zondek, B., and Cardwell, W.T. (1959). "One-dimensional, incompressible, non-capillary, two-phase fluid flow in a porous medium." *Trans. SPE of AIME*, 216, 290-6.
- van Genutchen, M.T. (1980). "A closed Form Equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils." *Sci. Soc. Am. J.* 44, 892-898.