

지하 LPG 저장공동에 인접한 單一節理에서의 二狀流體거동

해석 : I. 수치모형의 개발 및 모형실험

Simulation of Two-Phase Fluid Flow in a Single Fracture

Surrounding an Underground LPG Storage Cavern :

I. Numerical Model Development and Parallel Plate Test

한 일 영* / 서 일 원**

Han, Il Yeong / Seo, Il Won

Abstract

A two-dimensional finite difference numerical model was developed in order to simulate two phase fluid flow in a single fracture. In the model, variation of viscosity with pressure and that of relative permeability with water saturation can be treated. For the numerical solution, IMPES method was used, from which the pressure and the saturation of water and gas were computed one by one. Seven cases of model test using parallel plates for a single fracture were performed in order to obtain the characteristic equation of relative permeability which would be used in the numerical model. It was difficult to match the characteristic curves of relative permeability from the model tests with the existing empirical equations, consequently a logistic equation was proposed. As the equation is composed of the parameters involving aperture size, it can be applied to any fracture.

keywords : two-phase fluid flow, saturation, relative permeability, IMPES, parallel plate test, logistic equation

요 지

본 연구에서는 단일절리에서 2상유체 동시거동을 해석하기 위해서 2차원 유한차분 수치모형을 개발하였다. 개발된 모형은 압력에 따른 점성의 변화와 포화도에 따른 상대투과계수의 변화를 절리간극의 크기별로 고려할 수 있다. 수치기법으로는 IMPES해법을 적용하여 불과 가스의 압력변화량과 포화도를 차례로 구하였다. 개발된 수치모형에 이용할 상대투과계수의 특성식 도출을 위해서 일곱가지 경우의 평판모형실험을 실시하였다. 실험으로부터 도출된 상대투과계수 특성곡선은 기존의 경험식으로는 표현되기 어려웠으며, 따라서 새로운 경험식으로 로지스틱 방정식을 제시하였다. 이 방정식은 간극의 크기가 포함된 매개변수를 사용하였기 때문에 임의의 절리 간극크기의 적용이 가능한 형태이다.

핵심용어 : 2상유체, 포화도, 상대투과계수, IMPES, 평판모형실험, 로지스틱방정식

* SK건설주식회사 연구소 수석연구원
Principal research engineer, R&D Center, SK Engineering & Construction Ltd., Seoul 110 300, Korea
(E-mail: iyhan@skec.co.kr)

** 서울대학교 지구환경시스템공학부 부교수
Associate Professor, School of Civil, Urban & Geosystems Engineering, Seoul National University, Kwanak-Gu,
Seoul 151 742, Korea (E-mail: seoilwon@plaza.snu.ac.kr)

1. 서론

매질의 간극에서의 비포화 흐름특성이나 다상유체(multi-phase fluid) 흐름특성을 이해하는 것은 강우-유출모형 해석이나 비수용성 액체로 오염된 지반을 정화하기 위한 공기주입정화공법, 증저준위 방사성폐기물 처분시설, 석유류저장시설, 그리고 압축공기저장발전시설 등에서의 흐름해석에 매우 중요하다. 석유류저장시설과 같은 고압가스저장시설에서는 무복공식 암반공동내에 저장된 상온고압의 가스가 새어나오지 못하도록 그림 1과 같이 공동주변에 저장압력보다 더 높은 지하수압을 작용시키는데, 물의 흐름은 절리에 잔류되어 있거나 이동 중에 있는 압력을 가지는 가스에 의해 저항을 받게 되므로 저장공동 주변 절리간극에서의 가스와 지하수의 동시거동 해석을 위해서는 2상유체 흐름해석이 필요하다.

2상유체 흐름해석을 위해서는 모세관압력, 포화도, 상대투과계수(relative permeability)의 구성관계가 선결되어야 한다. 모세관압력이란 고체면에 대해 습윤성 유체인 물과 비습윤성 유체인 가스의 압력차를 말하며, 비습윤성 유체의 매질내 보유능력을 의미하기도 한다. 모세관압력은 표면장력과 가스와 물이 형성하는 계면이 절리벽면과 이루는 접촉각에 의해 결정되나 동적상태에서의 접촉각은 정적상태나 평형상태와는 다르며(Merrill, 1975), 접촉각은 유체가 흐르면서 계속 변하기 때문에 실제 모세관압력을 구하기는 매우 어렵다

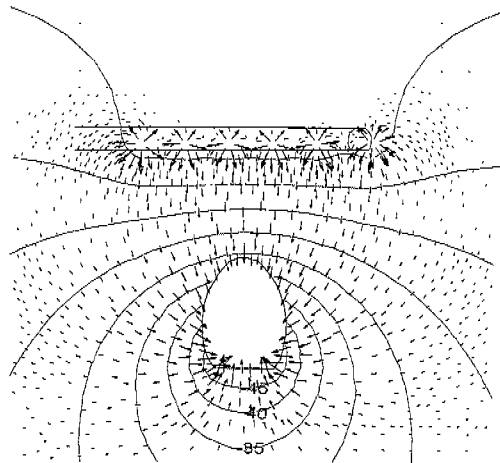
(Marle, 1981). 또한 점성유체의 흐름에서 유속과 점성마찰력은 비례관계에 있는 반면, 모세관력은 유속과 무관하므로 가스저장시설의 운영단계에서처럼 유속의 변동이 심한 흐름에서는 상대적으로 모세관력의 영향을 무시할 수 있다. 매질의 간극에 2개 이상의 상이 존재하게 되면 각 상은 상호간의 흐름을 간섭하게 된다. 또한 간극의 크기에 따라 간섭의 정도가 달라진다(Dana 등, 1999). 상대투과계수는 2상유체가 매질의 간극을 동시에 흐를 때 각 상의 간섭정도과 이동능력을 나타낸다. 포화도란 전체 간극체적에 대한 각 상이 차지하고 있는 간극체적의 비를 말하며, 상대투과계수는 포화도의 함수로 표현된다.

본 연구의 목적은 지하공동에 저장된 고압가스의 누출 시, 절리간극에서 가스와 지하수의 동시거동을 해석하기 위하여 압력에 따른 점성마찰력의 변화를 표현할 수 있고, 절리간극 크기별로 포화도에 따른 상대투과계수의 거동을 고려할 수 있는 수치모형을 개발하는데 있다. 본 논문의 제1편에서는 수치모형의 개발과 실험실 모형실험 결과를 기술하고, 제2편에서는 수치모형의 검증 및 적용 결과를 제시하였다.

2. 수치모형

2.1 개념적모형

암반 매질내에서의 흐름을 해석하기 위하여 Bear 등(1987)은 양수정이나 저장공동으로 부터 아주 인접



저장공동 주변 지하수두 \geq 저장공동내 수두 + 여유수두

그림 1. 무복공식 고압가스저장시설의 가스저장 원리

한 영역은 단일절리 모형이 적합하다고 제시한 바 있다. 본 연구에서는 저장공동에 아주 인접한 영역에서의 흐름을 취급하므로 단일절리 모형을 선정하였다. 단일절리내 흐름은 그림 2와 같이 간극이 평행한 두 판에서의 흐름으로 간주될 수 있으며, xy축으로 구성되는 2차원 평면 흐름장을 고려할 때, 해석을 위한 기본가정은 다음과 같다. 흐름은 xy 방향만 존재하고, z방향은 간극의 크기와 간극에서의 유체의 높이를 의미한다. 간극은 판상형으로 압력의 변화에 따른 간극크기는 일정하다. 간극에서의 흐름장은 질량보존의 법칙과 삼승의 법칙을 만족한다. 열동력학적 제1법칙에 따라 상온에서 유체의 점성계수는 압력에 따라 변화한다. 두 유체는 비압축성이며, 서로 불혼합성으로 계면을 형성하면서 흐름장을 형성하며, 유속은 모세관압력을 무시할 정도이다. 각 상에 대한 상대투과계수는 포화도와 간극크기의 함수이며, 두 유체의 포화도의 합은 항상 1.0이다.

2.2 수학적모형

유체가 단일절리 간극을 흐를 때 절대투과계수는 3승의 법칙(Romm, 1966)을 적용하고, 2상유체가 동시에 흐를 때 유체간의 간섭정도를 표현하기 위해서 절대투과계수에 무차원값인 상대투과계수를 곱하여 일반화된 Darcy의 방정식 형태로 표현하면 점성마찰력과

중력의 지배를 받는 가스와 물의 운동방정식은 각각 식 (1a), (1b)가 된다.

$$v_g = -\frac{e^2 k_{rg}}{12f\mu_g} (\nabla p_g - \rho_g g \nabla D) \quad (1a)$$

$$v_w = -\frac{e^2 k_{rw}}{12f\mu_w} (\nabla p_w - \rho_w g \nabla D) \quad (1b)$$

여기서 v_g , v_w 는 각각 가스, 물의 속도이며, e 는 절리간극의 크기, k_{rg} , k_{rw} 는 가스와 물의 상대투과계수로서 포화도와 간극크기의 함수이며, μ_g , μ_w 는 가스, 물의 점성계수로서 상온에서 압력의 함수이다. ρ_g , ρ_w 는 가스와 물의 밀도이다. D 는 유체의 기준면으로 부터의 높이이다. f 는 Gale 등(1985)이 제안한 마찰저항계수로서 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 는 1보다 큰 지수이다. Louis(1974)는 절리면을 매끈한 면과 거칠은 면으로 구분하여 층류와 난류의 범위를 설정하

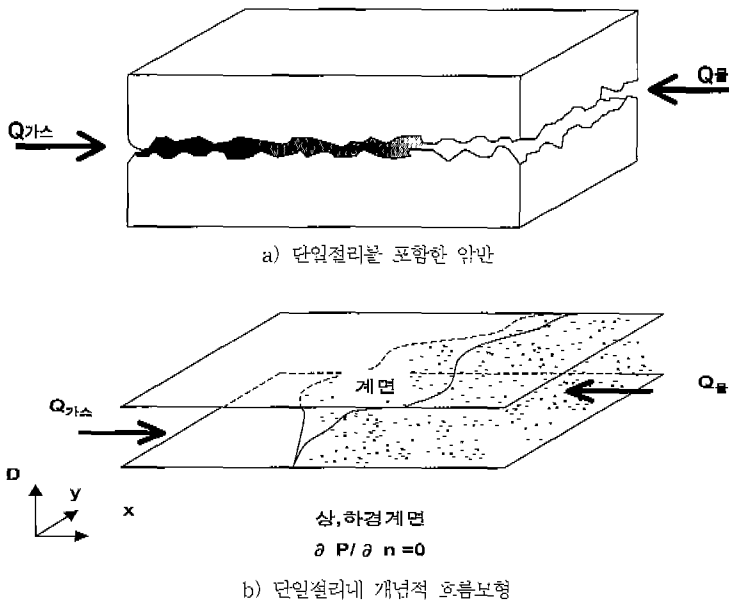


그림 2. 단일절리 간극에서의 2상유체 흐름 개념모형

고 층류의 경우, $c = 8.8$, $0.033 \leq R_r \leq 2.0$, $\eta = 1.5$ 임을 제안하였다. 본 연구에서는 식 (1a)와 (1b)에 Louis(1974)가 제안한 범위에서의 상대저윌계수를 적용하였다.

미소체적에서 유입량과 유출량사이에서 누적된 각 상의 질량은 미소체적, 간극을, 유체의 밀도, 포화도의 곱이므로 gas와 물의 연속방정식은 각각 식 3(a), 3(b)와 같다.

$$-\nabla \cdot (\alpha \rho_g v_g) + Q_g = \alpha \frac{\partial(\phi \rho_g S_g)}{\partial t} \quad (3a)$$

$$-\nabla \cdot (\alpha \rho_w v_w) + Q_w = \alpha \frac{\partial(\phi \rho_w S_w)}{\partial t} \quad (3b)$$

여기서 α 는 흐름장의 공간적 차원을 결정짓는 상수, ϕ 는 간극율, Q_g , Q_w 는 각각 gas와 물의 유입/유출, S_g , S_w 는 각각 gas와 물의 포화도이다.

식 (1)과 식 (3)을 결합하면 단일절리 간극에서 점성을 갖는 비압축성 2상유체가 동시에 흐를 때의 지배방정식을 구할 수 있다. 간극과 유체의 압축성을 고려하지 않으면 압력의 변화에 따른 간극을, ϕ 와 유체의 밀도, ρ 는 일정하므로, 유입/유출이 없는 gas와 물의 흐름 지배방정식은 식 4(a), 4(b)와 같다.

$$\nabla \cdot \left[\alpha \frac{e^2 k_{rg}}{12f\mu_g} (\nabla p_g - \rho_g g \nabla D) \right] = \alpha \phi \frac{\partial S_g}{\partial t} \quad (4a)$$

$$\nabla \cdot \left[\alpha \frac{e^2 k_{rw}}{12f\mu_w} (\nabla p_w - \rho_w g \nabla D) \right] = \alpha \phi \frac{\partial S_w}{\partial t} \quad (4b)$$

물과 gas의 포화도관계를 표현하는 보조방정식은 식 (5), 식 (6)과 같다.

$$S_w + S_g = 1 \quad (5)$$

$$\frac{\partial S_w}{\partial t} + \frac{\partial S_g}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

2.3 수치해법

gas와 물이 형성하는 계면에서의 두 유체의 유속은 같으며, 경계조건은 Dirichlet 형과 Neumann 형을

적용하고 식 (4)의 해를 구하기 위해서 IMPES (implicit pressure-explicit saturation)해법 (Sheldon 등, 1959)을 적용하였다. IMPES해법은 포화도, S항을 제거하여 종속변수를 압력, p항만으로 구성된 방정식으로 만들고, 압력에 관한 해를 음해적으로 구한 후, 각 요소의 포화도를 양해적으로 계산하는 방법이다. 식 (4a)에서 포화도에 관한 도함수항을 제거하여 물의 압력, p_w 에 관한 방정식으로 만들기 위해 식 (4b)와 더하고, 식 (5)와 식 (6)을 적용하면 물의 압력에 관한 식 (7)이 유도된다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{Ae_x^2 k_{rx}}{12\mu_g} \left(\frac{\partial p_w}{\partial x} - \rho_g g \frac{\partial D}{\partial x} \right) \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{Ae_y^2 k_{ry}}{12\mu_g} \left(\frac{\partial p_w}{\partial y} - \rho_g g \frac{\partial D}{\partial y} \right) \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{Ae_x^2 k_{rw}}{12\mu_w} \left(\frac{\partial p_w}{\partial x} - \rho_w g \frac{\partial D}{\partial x} \right) \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{Ae_y^2 k_{ry}}{12\mu_w} \left(\frac{\partial p_w}{\partial y} - \rho_w g \frac{\partial D}{\partial y} \right) \right\} \\ & = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)에서 점성계수는 상온에서 압력의 함수, $\mu_g(p_g)$, $\mu_w(p_w)$ 이므로 압력의 변화가 크게 되면 비선형방정식이 된다. 비선형방정식의 해법으로 식 (8)과 같은 Newton-Raphson 반복법을 사용하였다.

$$\{\delta p_w^{k+1}\} = [J^k]^{-1} \{-F^k\} \quad (8)$$

여기서 $\{\delta p_w^{k+1}\}$ 은 k+1 반복단계에서의 압력변화량, $p_w^{k+1} - p_w^k$ 이며, $\{-F^k\}$ 와 $[J^k]$ 는 각각 k 반복단계에서의 식 (9)의 Taylor 급수 1차항과 자코비안 행렬,

$$\left[\frac{\partial F^k}{\partial p^k} \right]$$

이다. 식 (8)은 자코비안 행렬식이 0이 아닐 경우, 해가 존재하는 선형연립방정식을 나타낸다. 행렬식은 가우스 소거법을 이용하였으며 D4 체배열기법 (Aziz and Settari, 1979)으로 부터 0이 아닌 행렬요소만을 대상으로 계산을 수행하였다. 식 (8)로 부터 물의 압력, p_w^{k+1} 이 구해지면 물에 관한 지배방정식, 식 (4a)를 이용하여 물의 포화도, S_w 를 구하게 된다. 이상과 같은 수치모형의 처리흐름을 도식화하면 그림 3과 같다.

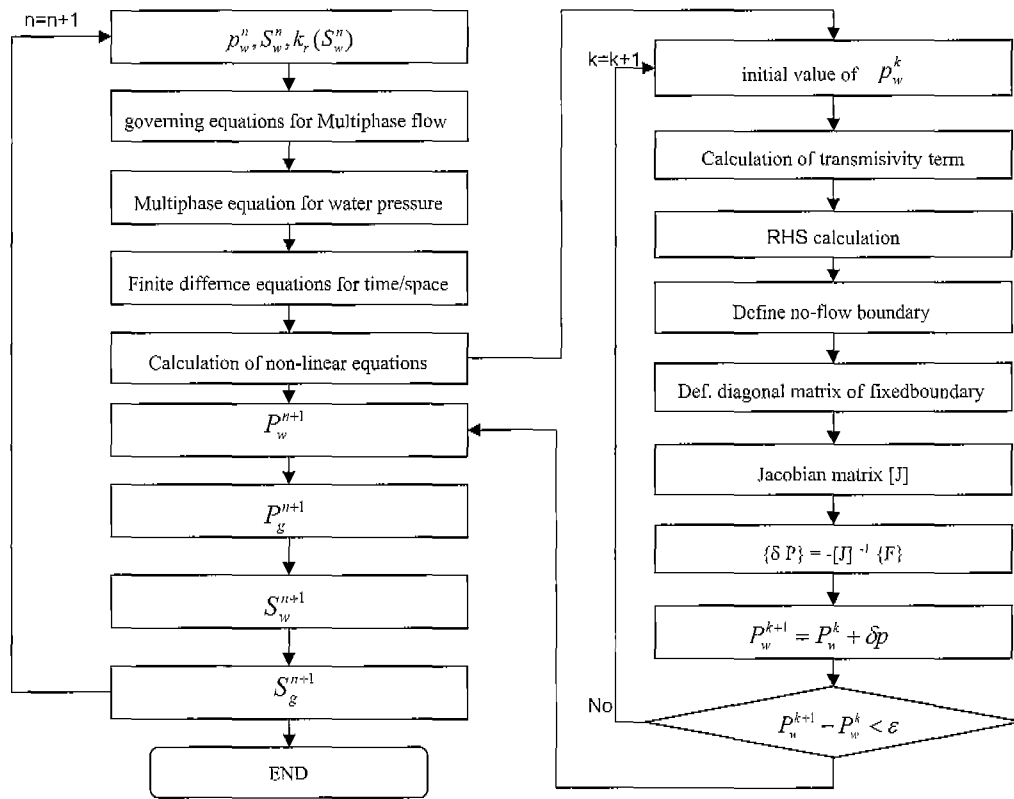


그림 3. 수치모형의 흐름도

3. 모형실험

3.1 실험장치 및 조건

실험은 유리평판, 물과 질소가스 주입장치, 압력 및 유량측정장치, 포화도촬영장치로 구성되었으며, 실험장치의 개요도는 그림 4와 같다. 실험방법은 평판의 간극을 조절한 후 그림에서 왼쪽의 주입구에 일정압력의 물과 가스를 동시에 주입하여 유체가 평판 내에서 유동하게 되면 평판의 양단에서 압력차를 측정하고 배출된 유체는 물과 가스로 분리하여 각각의 유량을 측정하였다. 실험에 사용된 평판의 간극크기는 유량, 양단의 압력차, 점성도, 평판의 길이, 평판의 넓이를 측정하여 평행평판 층류에서의 압력강하식 (Volko 등, 1986)으로 계산한 결과, 36.2 μm , 44.6 μm , 60.6 μm , 75.5 μm , 80.0 μm , 93.2 μm , 126.5 μm 이며, 다양한 범위의 포화도를 산출하기 위해서 간극크기 별로 5~7회에 걸쳐 6100 Pa~42400 Pa의 주입압을

적용하였으며, 물과 가스의 주입량은 각각 $1.0 \times 10^{-8} \sim 1.0 \times 10^{-5} \text{m}^3/\text{sec}$, $1.6 \times 10^{-8} \sim 8.3 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{sec}$ 로 측정되었다.

3.2 실험결과

그림 5는 간극크기별로 관찰된 평판 내 물과 가스의 유동형태를 도시한 것이다. 이 그림들에서 가스와 물은 왼쪽에서 오른쪽으로 이동하며, 흐린부분이 가스이며 진한부분이 물을 나타낸다. 간극의 크기가 증가하면 가스 기포의 크기가 증가하며 낮은 유속에서도 일정 유동로가 존재하지 않는 복합유동과 유사한 형태를 보이는 것으로 관찰되어 간극에서의 물과 가스의 유동은 유속뿐 아니라 간극의 크기에 영향을 받을 수 있다. 포화도는 정상상태에 도달한 물과 가스를 디지털 카메라로 촬영하고 화소(pixel) 단위의 백색과 흑색으로 나타나는 수량을 계산하여 전체 평판 포화도를 계산하고, 격자망을 구성하여 y구간의 평균 포화도를 x 방향에 따라 구할 수 있도록 하였다. 물의 포화도는

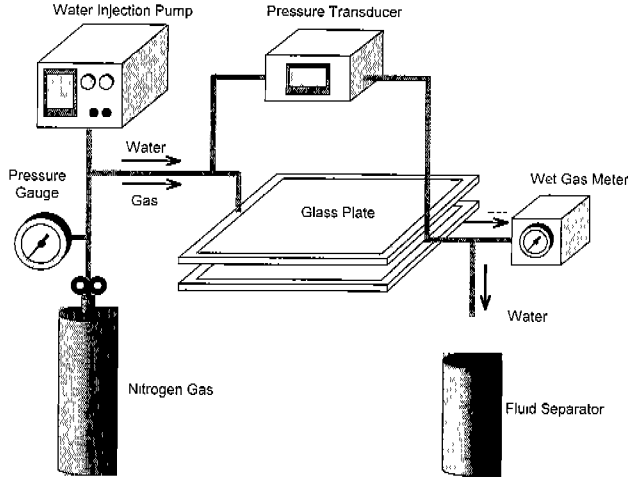


그림 4. 실험시스템 전체개요도

최소 0.028에서 최대 0.772로 측정되었다. 최대 포화도와 최소 포화도는 case마다 큰 차이는 관찰되지 않았으며 이는 간극크기가 잔류 포화도에 큰 영향을 미치지 않음을 보여주는 것이다. 상대투과계수는 식 9(a)와 9(b)에 의해 유효투과계수를 계산한 후, 유효투과계수를 절대투과계수로 나누어 산출하였다.

$$k_{eg} = \frac{Q_g \mu_g}{A} \frac{dl}{dp_g} \quad (9a)$$

$$k_{ew} = \frac{Q_w \mu_w}{A} \frac{dl}{dp_w} \quad (9b)$$

여기서 k_{eg} , k_{ew} 는 각각 기스와 물의 유효투과계수 (m/sec), Q_g , Q_w 는 각각 기스와 물의 유량 (m^3/sec), μ_g , μ_w 는 각각 기스와 물의 점성도, $\frac{dl}{dp_g}$, $\frac{dl}{dp_w}$ 는 압력경사의 역, A 는 흐름단면적(m^2)이다. 간극크기별 포화도와 상대투과계수 관계곡선의 가장 특징적인 양상은 간극크기의 증가에 따른 기울기의 감소현상이다. 이것은 물과 기스의 경우 동일한 현상을 보이는데 이는 간극크기가 증가함에 따라 두 상간의 간섭이 더욱 커지기 때문이다. 이 결과는 지금까지 사용되고 있는 Romm(1966)의 절리암반의 상대투과도 실험과는 다른 결과를 보여주는 것이다. 물과 기스의 한계 포화도를 나타내는 x절편 값은 각각 0.08, 0.66의 평균값을 나타내었으며 간극크기와는 무관한

양상을 나타내었다.

3.3 상대투과계수 특성식 도출

상대투과계수 실험결과를 기존의 경험식 (Brooks and Corey, 1964 ; Hirasaki 등 1970 ; van Genuchten, 1980)에 적용해 보았으나 매개변수를 조정하여도 실험결과를 적절하게 표현할 수 없었다. 따라서 식 (10a)와 (10b)와 같은 로지스틱방정식을 제시하였다.

$$k_{rw} = \frac{\alpha}{1 + \beta \exp(-0.000012S_w)} \quad (10a)$$

$$k_{rg} = \alpha - \frac{\alpha}{1 + \beta \exp(-0.000012S_w)} \quad (10b)$$

여기서 α , β 는 각각 곡선의 진폭크기와 기울기를 결정짓는 곡선맞춤 매개변수로서, 표 2에서와 같이 절리 간극크기에 따라 다른 값을 갖는다. 식 (10a)와 (10b)를 임의의 절리 간극크기가 적용가능한 형태로 만들기 위해서 간극크기별 α , β 에 간극크기, e 를 곱한 후 평균값을 구하고 다시 간극크기, e 로 나눈 값을 적용하면 식 (11a)와 (11b)와 같다.

$$k_{rw} = \frac{0.000034 \times e^{-1}}{1 + 0.0026 \times e^{-1} \times \exp(-0.000012S_w)} \quad (11a)$$

표 1. 실험조건

Series	Case	간극크기 (μm)	주입압 (Pa)	유 량	
				Q_w (m^3/sec)	Q_g (m^3/sec)
1	101	36.2	30500	4.16×10^{-5}	3.55×10^{-6}
	102		32400	4.16×10^{-5}	3.92×10^{-7}
	103		33600	4.16×10^{-5}	6.27×10^{-7}
	104		35200	4.16×10^{-5}	1.41×10^{-6}
	105		35700	2.5×10^{-5}	1.97×10^{-6}
	106		36300	1.66×10^{-5}	3.16×10^{-6}
	107		26300	0.0	3.12×10^{-6}
2	201	44.6	19100	5.0×10^{-5}	2.0×10^{-7}
	202		21500	5.0×10^{-5}	3.69×10^{-7}
	203		23200	5.0×10^{-5}	9.84×10^{-7}
	204		24000	5.0×10^{-5}	1.60×10^{-6}
	205		22900	2.5×10^{-5}	1.80×10^{-6}
	206		21500	0.0	1.91×10^{-6}
3	301	60.6	13300	8.33×10^{-5}	4.57×10^{-6}
	302		16800	8.33×10^{-5}	3.66×10^{-7}
	303		18400	8.33×10^{-5}	7.10×10^{-7}
	304		19500	8.33×10^{-5}	2.07×10^{-6}
	305		20900	8.33×10^{-5}	4.82×10^{-6}
	306		18400	3.33×10^{-5}	5.73×10^{-6}
	307		18800	1.66×10^{-5}	7.87×10^{-6}
	308		16400	0.0	8.53×10^{-6}
4	401	75.5	7600	8.33×10^{-5}	4.01×10^{-6}
	402		9400	8.33×10^{-5}	2.19×10^{-7}
	403		10700	8.33×10^{-5}	6.74×10^{-7}
	404		12100	8.33×10^{-5}	1.91×10^{-6}
	405		11100	5.00×10^{-5}	1.98×10^{-6}
	406		12100	5.00×10^{-5}	4.71×10^{-6}
	407		10500	1.66×10^{-5}	5.30×10^{-6}
	408		8600	0.0	6.16×10^{-6}
	5		501	80.0	8600
502		10000	8.33×10^{-5}		9.16×10^{-7}
503		11900	8.33×10^{-5}		1.83×10^{-6}
504		13900	8.33×10^{-5}		3.74×10^{-6}
505		13500	5.83×10^{-5}		6.19×10^{-6}
506		12100	3.33×10^{-5}		6.34×10^{-6}
507		10900	1.66×10^{-5}		6.76×10^{-6}
508		9400	0.0		7.14×10^{-6}
6	601	93.2	12600	8.33×10^{-5}	3.93×10^{-6}
	602		17600	8.33×10^{-5}	5.19×10^{-7}
	603		22100	8.33×10^{-5}	1.58×10^{-6}
	604		27800	8.33×10^{-5}	4.42×10^{-6}
	605		35200	8.33×10^{-5}	5.20×10^{-6}
	606		42400	8.33×10^{-5}	1.04×10^{-5}
7	701	126.5	6100	8.33×10^{-5}	2.65×10^{-6}
	702		8600	8.33×10^{-5}	2.42×10^{-7}
	703		10000	8.33×10^{-5}	7.50×10^{-7}
	704		10700	8.33×10^{-5}	3.97×10^{-6}
	705		11300	8.33×10^{-5}	5.73×10^{-6}
	706		13500	5.0×10^{-5}	9.04×10^{-6}
	707		12300	0.0	1.04×10^{-5}

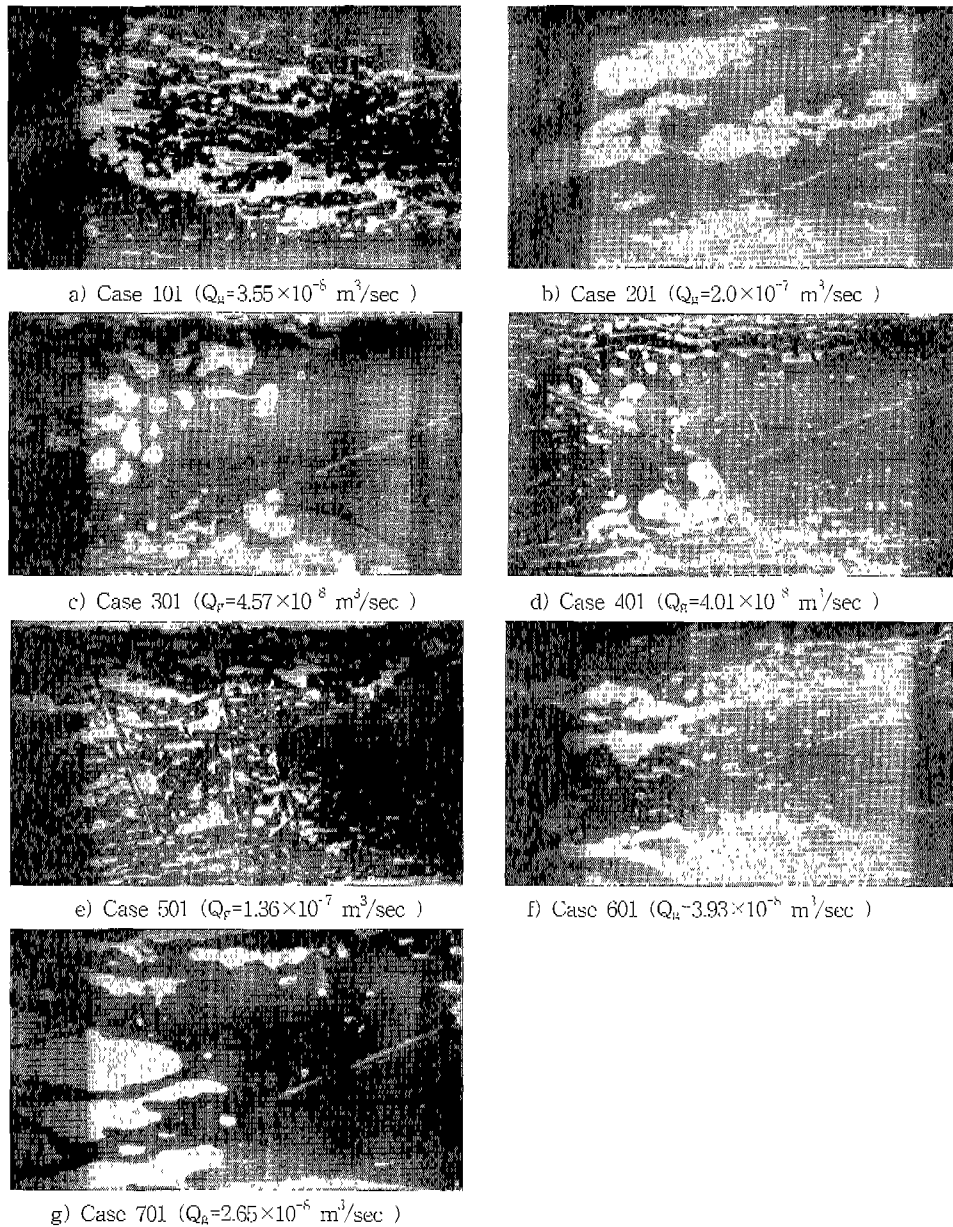


그림 5. 평판 내 물과 가스의 유동형태

$$k_{rg} = 0.000034 \times e^{-1} \frac{0.000034 \times e^{-1}}{1 + 0.0026 \times e^{-1} \times \exp(-0.000012 S_w)} \quad (11b)$$

이거서 물의 포화도, S_w 는 매끈한 면에서의 실험치, 0.08~0.66의 값을 갖는다. 식 (11)은 임의의 간극크기의 적용이 가능한 일반화된 식이며, 이 식을 적용하여 구한 상대투과계수 값들은 실험치와 비교하였을 때 0.02~0.242의 오차를 보였다. 표 2는 매개변수 도출 과정 및 실험치와의 제곱근 평균오차(root mean

표 2. 매개변수 도출과정 및 실험치와의 오차

간극 크기 (μm)	곡선맞춤 매개변수 (μm)		rms 오차		$\overline{\alpha_e}$ (μm)	$\overline{\beta_e}$ (μm)	rms 오차	
	α	β	water	gas			water	gas
36.2	0.7	150.0	0.043	0.239	0.956	71.890	0.226	0.166
44.6	0.65	50.0	0.059	0.030	0.775	58.318	0.090	0.078
60.6	0.65	45.0	0.043	0.027	0.570	42.920	0.067	0.029
75.5	0.6	40.0	0.042	0.040	0.458	34.441	0.073	0.081
80.0	0.55	35.0	0.022	0.039	0.432	32.516	0.039	0.080
93.2	0.3	10.0	0.015	0.011	0.371	27.910	0.036	0.062
126.5	0.25	8.5	0.018	0.018	0.273	20.567	0.020	0.021
$\overline{\alpha}$	34.0							
$\overline{\beta}$		2600.0						

$$(*) \quad \overline{\alpha} = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N e \cdot \alpha \right), \quad \overline{\beta} = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N e \cdot \beta \right), \quad \overline{\alpha_e} = \frac{\overline{\alpha}}{e}, \quad \overline{\beta_e} = \frac{\overline{\beta}}{e}$$

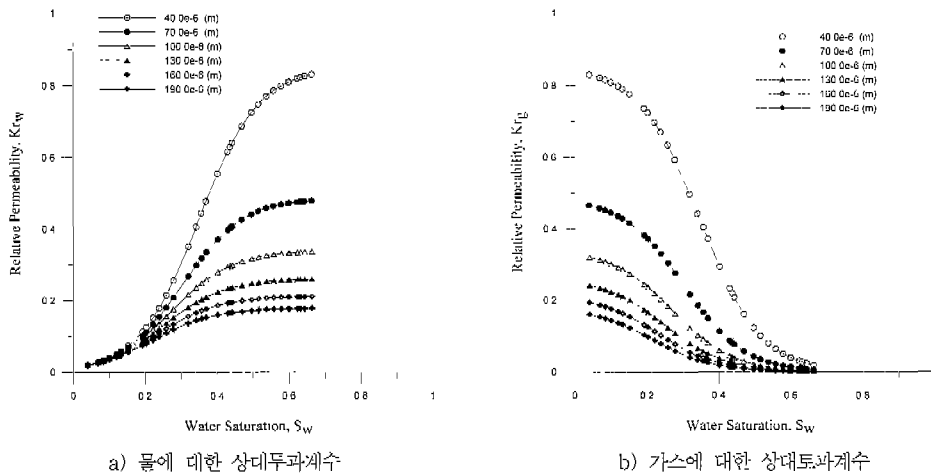


그림 6. 물과 가스의 상대투과계수 특성곡선

square error)를 수록한 것이다. 그림 6a와 6b는 식 (11)을 이용하여 작도한 간극크기 $40 \times 10^{-6}\text{m} \sim 190.0 \times 10^{-6}\text{m}$ 의 상대투과계수 특성곡선이다.

4. 결 론

본 연구에서는 포화도와 상대투과계수의 구성관계가 상대적으로 중요시되는 2상유체 흐름에서의 유한차분 수치모형을 개발하였다. 제안된 수치모형은 절리간극의 크기를 공간적으로 고려할 수 있을 뿐 아니라, 유동계

수 향에서 압력에 따른 유체의 점성계수의 변화와 포화도에 따른 상대투과계수의 변화를 절리간극의 크기 별로 고려할 수 있다.

평판모형실험으로 부터 배관한 면에서의 물과 가스의 동시 유동을 관찰한 결과, 간극의 크기가 커질수록 기포의 크기가 커지며 낮은 유속에서도 복합유동 현상을 보여 2상유체 유동형태는 유체의 유속 뿐만 아니라 간극의 크기에 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 포화도와 상대투과계수 관계곡선을 작도하여 간극의 크기

별로 비교한 결과, 간극의 크기가 커질수록 각 상의 상대투과계수의 합은 1보다 작은 범위에서 더욱 작아 지므로 두 상간의 간섭이 현격히 증가함을 확인할 수 있었다. 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.

다상유체 흐름해석을 위해서 상대투과계수, 포화도, 모세관압의 구성관계에 대한 많은 경험식이 제안되어 왔다. 본 연구에서 도출된 상대투과계수 특성식은 복잡한 절리망 모형에도 적용이 가능할 것이다. 그러나 평판모형실험에서 배관한 평판을 사용하였기 때문에 기질은 절리면에서의 적용에는 제한적일 것으로 보인다. 또한 모세관력이 중요시되는 NAPL 지반오염정화공법, 방사성폐기물처분시설 등에서의 흐름해석을 위해서는 절리특성에 따른 모세관압, 포화도, 상대투과계수의 특성식을 도출하기 위한 실험적 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구의 일부는 서울대학교 공학연구소의 지원에 의해 이루어졌으며, 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

Aziz, K. and Settari, A. (1979). *Petroleum reservoir simulation*. Applied science publishers Ltd. pp. 257~259.

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, pp. 175~238.

Brooks, R.H. and Corey, A.T. (1964). *Hydraulic properties of porous media*. Colorado State University Hydrology paper No. 3, March.

Dana, E., and Skoczylas, F. (1999). "Gas

relative permeability and pore structure of sandstones." *Int. J. of Rock mech and Mining Sci*, pp. 613~625.

Gale, J.E., Rouleau, A. and Atkinson, L.C. (1985). "Hydraulic properties of fractures. Memories. Hydrogeology of rocks of low permeability." : *International Association of Hydrogeologists* (Tucson, Ariz.) pp. 1~11.

Hirasaki, G.J. and O'Dell, P.M. (1970). "Representation of reservoir geometry for numerical simulation." *Trans. SPE of AIME*, Vol. 249, pp. 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.

Merrill, L.S. (1975). *Two phase flow in fractures*. Ph. D. dissertation. Univ. of Denver, Denver, Colo.

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*, Vol. 216, pp. 290~296.

van Genuchten, M.T. (1980). "A closed Form Equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils." *Sci. Soc. Am. J.* Vol. 44, pp. 892~898.

Volko P. and Economides, M.J. (1986). *Hydraulic fracture mechanics*. John Wiley & Sons.

(논문번호:01-036/접수:2001.04.16/심사완료:2001.06.29)