

단일절리에서 모세관압을 고려하지 않은
불혼합성 물과 가스의 동시거동 해석

한 일 영* · 서 일 원**

*SK건설주식회사 연구소 · **서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부

**Numerical Simulation of Immiscible Water-Gas Simultaneous Flow
in the absence of Capillary Force in a Single Fracture**

Han, Il Yeong* · Seo, Il Won**

*R&D Center, SK Engineering & Construction Ltd.,

**School of Civil, Urban & Geosystems Engineering, Seoul National University.

ABSTRACT

The constitutive relation among capillary pressure, saturation and relative permeability should be predetermined in order to simulate immiscible water-gas flow in porous media. The relation between saturation and relative permeability becomes more important when the capillary force can be disregarded and viscous friction force governs the flow. In this study, a 2-dimensional finite difference numerical model was developed, in which the variation of viscosity with pressure and that of relative permeability with water saturation can be treated. Seven cases of parallel plate tests were performed in order to obtain the characteristic equation of relative permeability which would be used in the developed numerical model. It was not possible, however, to match the curves of relative permeability from the plate tests with the existing emperical models. Consequently a logistic equation was proposed as a new emperical model. As this model was composed of the parameter involving aperture size, any aperture size of fracture can be applied to the model. For the purpose of verification, the characteristic equation of relative permeability was applied to the developed numerical model and the computed results were compared with those of plate test. As a result of application of numerical model, in order to check the field applicability, to single fracture surrounding an underground storage cavern, the simultaneous flow of water and propane gas was able to be simulated properly by the model.

Key words : capillary pressure, saturation, relative permeability, logistic equation

요약문

매질에서 불혼합성인 물과 가스의 동시거동 해석을 위해서는 모세관압, 포화도, 상대투과계수의 구성관계가 선결되어야 한다. 그러나 모세관력이 무시될 수 있는 흐름에서는 점성마찰력이 흐름을 지배하게 되고 포화도와 상대투과계수의 구성관계가 상대적으로 중요하게 된다. 본 연구에서는 압력에 따른 점성의 변화와 포화도에 따른 상대투과계수의 변화를 절리간극의 크기별로 고려할 수 있는 2차원 유한차분 수치모형을 개발하였다. 수치모형에 이용할 상대투과계수 특성식은 일곱가지의 간극크기별 평판모형실험으로부터 구하였다. 실험으로부터 도출된 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. 수치모형의 검증을 위해서 상대투과계수 특성식을 수치모형에 적용하여 가스의 이동을 해석한 후, 모형실험 결과와 비교하였다. 수치모형의 현장적용성을 검토하기 위하여 지하 LPG 저장공동에 인접한 단일절리에 적용한 결과, 지하수와 프로판가스의 동시거동을 적절히 모사할 수 있었다.

주제어 : 모세관압력, 포화도, 상대투과계수, 로지스틱방정식

1. 서 론

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 적용하는 데 매우 중요하다. 이는 또한 중저준위 방사성폐기물 처분시설, 석유류 저장시설, 압축공기 저장발전시설 등에서 가스유출시 가스-물의 2상유체(two-phase fluid) 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 관계 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

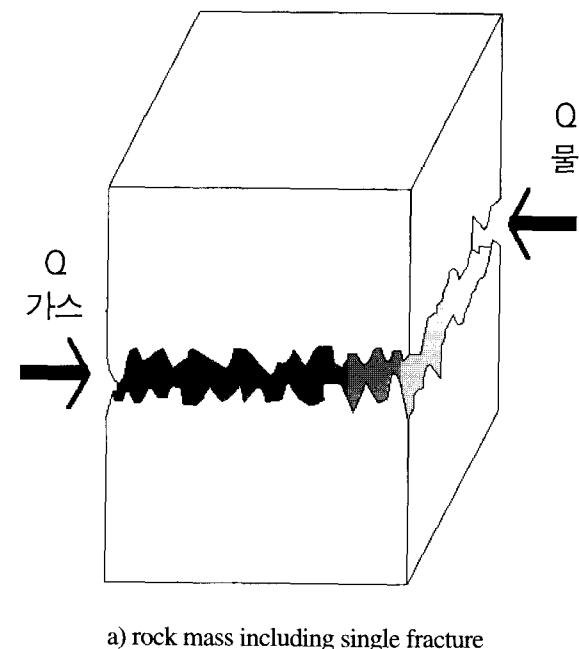
내에 2개 이상의 상이 존재하게 되면 각 상은 상호간의 흐름을 간섭하게 된다. 또한 절리간극의 크기에 따라 간섭의 정도가 달라진다(Dana 등, 1999). 상대투과계수는 2상유체가 매질의 간극 내를 동시에 흐를 때의 각 상의 간섭정도와 이동능력을 나타내며, 포화도의 함수로 표현한다.

본 연구에서는 모세관압력이 무시될 수 있는 환경에서, 단일절리에서의 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 상대투과계수 특성식은 모형실험으로부터 구하였다. 도출된 특성곡선은 수치모형에 적용하고 해석결과는 모형실험 관찰치와 비교하였다. 수치모형은 다시 현장에 적용할 수 있는지를 검토하기 위하여 운영 중인 지하LPG저장기지에 적용하였다.

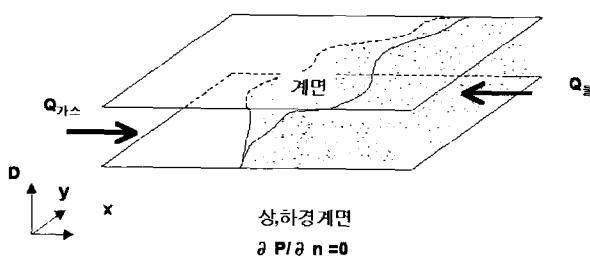
2. 수치모형의 개발

2.1 개념적 모형

거칠은 단일절리면을 갖는 암반은 Fig. 1(a)와 같이 개념화할 수 있으며, 단일절리 간극에서의 유체의 흐름은 Fig. 1(b)와 같이 평행한 두 판에서의 흐름으로 간주될 수 있다. xy축으로 구성되는 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 형성



a) rock mass including single fracture



b) two-phase fluid flow in two parallel plates

Fig. 1. Conceptual model of two-phase fluids flow in a single fracture

하면서 흐르며, 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 물과 가스의 운동방정식은 각각 식 1(a)와 1(b)가 된다.

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

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

여기서 v_w , v_g 는 각각 물, 가스의 속도이며, e 는 절리간극의 크기, k_{rw} , k_{rg} 는 물, 가스의 상대투과계수로서 포화도와 간극크기의 함수이며, μ_w , μ_g 는 물, 가스의 점성계수로서 상온에서 압력의 함수이다. ρ_w , ρ_g 는 물과 가스의 밀도이다. D 는 기준면으로부터 유체의 높이이다. f 는 Gale 등(1985)이 제안한 마찰저항계수(fiction resistance factor)로서 식 (2)와 같다.

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

여기서 c 는 1보다 큰 상수이며, R_r (relative roughness coefficient)은 상대조도(粗度)계수, η 은 1보다 큰 지수이다. Louis(1974)는 절리면을 매끈한 면과 거칠은 면으로 구분하여 층류와 난류의 범위를 설정하고 층류의 경우, $c=8.8$, $0.033 \leq rm R_r \leq 2.0$, $\eta=1.5$ 임을 제안하였다. 본 연구에서는 식 (1)의 마찰저항계수는 Louis(1974)가 제안한 범위를 적용하였다.

미소체적에서 유입량과 유출량사이에서 누적된 각상의 질량은 미소체적, 간극율, 유체의 밀도, 포화도의 곱이므로 물과 가스의 연속방정식은 각각 식 3(a), 3(b)와 같다.

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

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

여기서 α 는 흐름장의 공간적 차원을 결정짓는 상수, ϕ 는 간극율, Q_w , Q_g 는 각각 물과 가스의 유입(sink)/유원(source), S_w , S_g 는 각각 물과 가스의 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 간극율, ϕ 와 유체의 밀도, ρ 는 일정하므로, 유입/유원이 없는 물과 가스의 흐름 지배방정식은 각각 식 4(a), 4(b)와 같다.

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

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

물과 가스의 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 상대투과계수 특성식 도출

흙이나 다공성암석에서의 상대투과계수 특성식은 Brooks와 Corey (1964), Hirasaki 등 (1970), van Genuchten (1980)에 의해서 제안된 준경험적 모형이 널리 사용되고 있다. 그러나 암반절리에서의 상대투과계수의 거동은 절리면의 거칠기, 간극크기 등의 절리특성에 의해 영향을 받기 때문에 흙이나 다공성암석과는 다르다. 절리를 대상으로 한 상대투과계수 특성식은 Romm(1966)에 의해서 최초로 제안되었다. 그는 평판의 간극크기 65~125 μm 에서의 물과 Kerosine의 2상유체 모형실험을 수행하여 간극크기에 관계없이 각

상의 상대투과계수는 각 상의 포화도와 같으며 ($k_{rw}=S_w$, $k_{rg}=S_g$) 임의의 포화도에서 두 유체의 상대투과계수의 합은 1.0이라고 하여 포화도와 상대투과계수의 선형적인 비례관계를 제안한 바 있다. 이것은 각 상은 서로의 유동을 간섭하지 않음을 의미한다. 이후 Merrill(1975), Schrauf 등(1986), Pruess 등(1990), Pyrak 등(1992), Fourer 등(1993), Persoff 등(1995)은 2상유체 실험을 통하여 간극 내에 2개 이상의 상이 존재하게 되면 상호 심하게 간섭하게 되고 유동구조는 간극크기에 영향을 받는다고 하여 Romm(1966)의 연구결과를 반박하였다. 그러나 그들은 간극크기에 따른 포화도와 상대투과계수의 구성관계식 도출에는 실패하였다. 이원석 등(2000)은 간극의 크기가 36.2 μm , 44.6 μm , 60.6 μm , 75.5 μm , 80.0 μm , 93.2 μm , 126.5 μm 인 매끈한 유리로 된 평행평판에 일정압력의 물과 질소가스를 동시에 주입하여 물과 질소가스의 유동 중 상호간섭 정도를 관찰하는 실험적 연구를 수행하여, Fig. 2(a), 2(b)와 같은 간극크기별 포화도와 상대투과계수 관계곡선을 구하고, 이로 부터 선형의 상대투과계수 특성식을 제안하였다. 이 선형식은 평판간극의 크기에 따라 유체간의 간섭정도를 나타내는 기울기와 평판의 표면특성에 따라 나타나는 한계포화도인 x축의 절편으로 구성되었다.

본 연구에서는 이원석 등(2000)의 상대투과계수 실험의 곡선맞춤 적합도를 높여 새로운 경험식으로 물과 가스에 대한 상대투과계수 특성식으로 식 7(a)와 7(b)와 같은 로지스틱 방정식을 도출하였다.

$$k_{rw} = \frac{\alpha}{1 + \beta \exp(-0.000012S_w)} \quad 7(a)$$

$$k_{rg} = \alpha - \frac{\alpha}{1 + \beta \exp(-0.000012S_w)} \quad 7(b)$$

여기서 α , β 는 각각 곡선의 진폭크기와 기울기를 결정짓는 곡선맞춤 매개변수로서, Table 1과 같이 절리 간극크기에 따라 다른 값을 갖는다. 식 7(a)와 7(b)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

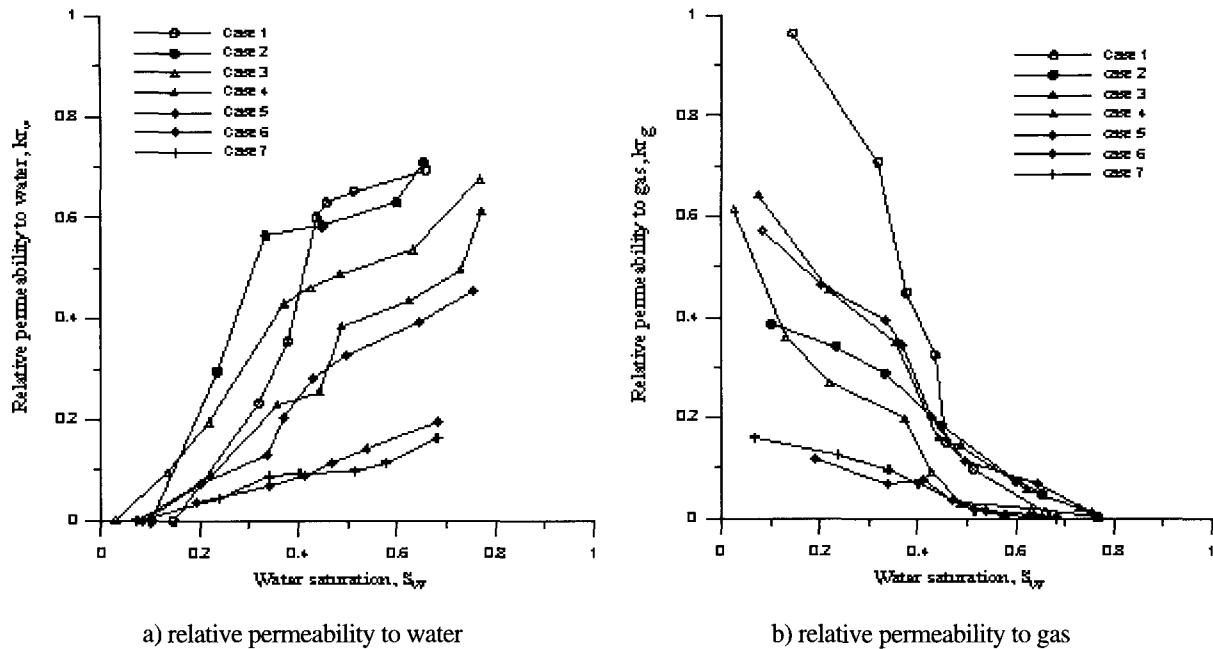


Fig. 2. Relationship curves between saturation and relative permeability from plate tests

Table 1. the procedure of parameter determination and comparisons with plate test data

Aperture size (μm)	Curve matched parameter (μm)		rms error		parameters involving aperture size (μm)		rms error	
	α	β	water	gas	$\bar{\alpha}_e$	$\bar{\beta}_e$	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	0.15	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
$\bar{\alpha}$	34.0							
$\bar{\beta}$		2600.0						

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{N} (\sum_{i=1}^N e \cdot \alpha), \quad \bar{\beta} = \frac{1}{N} (\sum_{i=1}^N e \cdot \beta), \quad \bar{\alpha}_e = \frac{\bar{\alpha}}{e}, \quad \bar{\beta}_e = \frac{\bar{\beta}}{e}$$

적용하면 식 8(a)와 8(b)와 같다.

$$k_{rg} = 0.000034 \times e^{-1}$$

$$k_{rw} = [\alpha \frac{0.000034 \times e^{-1}}{1 + 0.0026 \times e^{-1} \times \exp(-0.000012S_w)}] \quad 8(a)$$

$$- \frac{0.000034 \times e^{-1}}{1 + 0.0026 \times e^{-1} \times \exp(-0.000012S_w)} \quad 8(b)$$

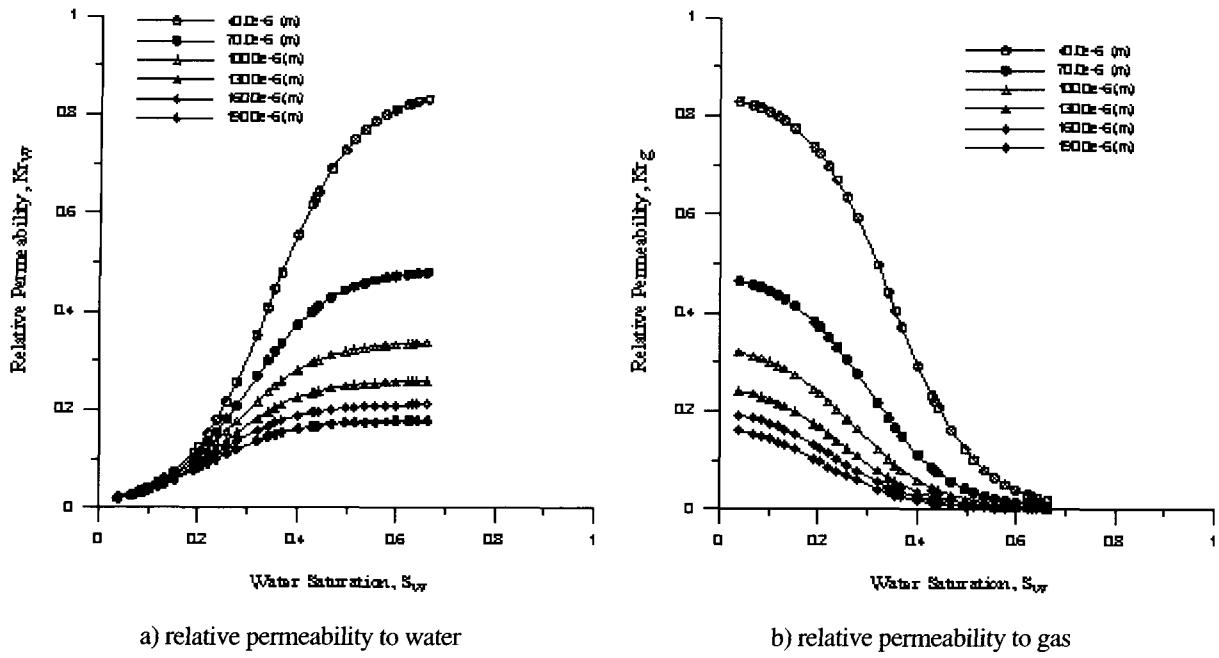


Fig. 3. Characteristic curves of relative permeability

여기서 물의 포화도, S_w 는 매끈한 면에서의 실험시, 0.08~0.66의 값을 갖는다. 식 (8)은 임의의 간극크기의 적용이 가능한 일반화된 식이며 이 식을 적용하여 구한 상대투과계수 값들은 실험치와 비교하였을 때 0.02~0.242의 오차를 보였다. Table 1은 매개변수 도출과정 및 실험치와의 제곱근 평균오차(root mean square error)를 수록한 것이다. Fig. 3(a)와 3(b)는 식 (8)를 이용하여 작도한 간극크기/rm 40.0 TIMES $10^6 \text{m} \sim 190.0 \times 10^6 \text{m}$ 의 상대투과계수 특성곡선이다.

2.4 수치해법

가스와 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, S 항을 제거하여 종속변수를 압력, p 항만으로 구성된 방정식으로 만들고, 압력에 관한 해를 음해적으로 구한 후, 각 요소의 포화도를 양해적으로 계산하는 방법이다. 식 4(a)에서 포화도에 관한 도함수항을 제

거하여 물의 압력, p_w 에 관한 방정식으로 만들기 위해 식 4(b)와 더하고, 식 (5)와 식 (6)을 적용하면 물의 압력에 관한 식 (9)가 유도된다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{Ae^2 k_{rg}}{12\mu_g} \left(\frac{\partial p_w}{\partial x} \rho_g g + \frac{\partial D}{\partial x} \right) \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{Ae^2 k_{rg}}{12\mu_g} \left(\frac{\partial p_w}{\partial y} \rho_g g + \frac{\partial D}{\partial y} \right) \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{Ae^2 k_{rw}}{12\mu_w} \left(\frac{\partial p_w}{\partial x} \rho_w g + \frac{\partial D}{\partial x} \right) \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{Ae^2 k_{rw}}{12\mu_w} \left(\frac{\partial p_w}{\partial y} \rho_w g + \frac{\partial D}{\partial y} \right) \right\} = 0 \quad (9) \end{aligned}$$

식 (9)에서 점성계수는 상온에서 압력의 함수, $\mu_g(\rho_g)$, $\mu_w(\rho_w)$ 이므로 압력의 변화가 크게 되면 비선형방정식이 된다. 비선형방정식의 해법으로 식 (10)과 같은 Newton-Raphson 반복법을 사용하였다.

$$\{\delta p_w^{k+1}\} = [J]^{-1} \{-F\} \quad (10)$$

여기서 $\{\delta p_w^{k+1}\}$ 은 $k+1$ 반복단계에서의 압력변화량,

$p_w^{k+1} - p^k$ 이며, $\{-F^k\}$ 와 $[J^k]$ 는 각각 k 반복단계에서의 식 (9)의 Taylor 급수 1차항과 쟈코비안 행렬, $F^k \left[\frac{\partial F}{\partial p^k} \right]$ 이다. 식 (10)은 쟈코비안 행렬식이 0이 아

닐 경우, 해가 존재하는 선형연립방정식을 나타낸다. 행렬식은 가우스 소거법을 이용하였으며 D4 재배열기법으로 부터 0이 아닌 행렬요소만을 대상으로 계산을 수행하였다. 식 (10)으로 부터 물의 압력, p_w^{k+1} 이 구해

지면 물에 관한 지배방정식, 식 4(a)를 이용하여 물의 포화도, S_w 를 구하게 된다. 이상과 같은 수치모형의 처리흐름을 도식화하면 Fig. 4와 같다.

3. 수치모형의 검증

3.1 수치모의 입력자료

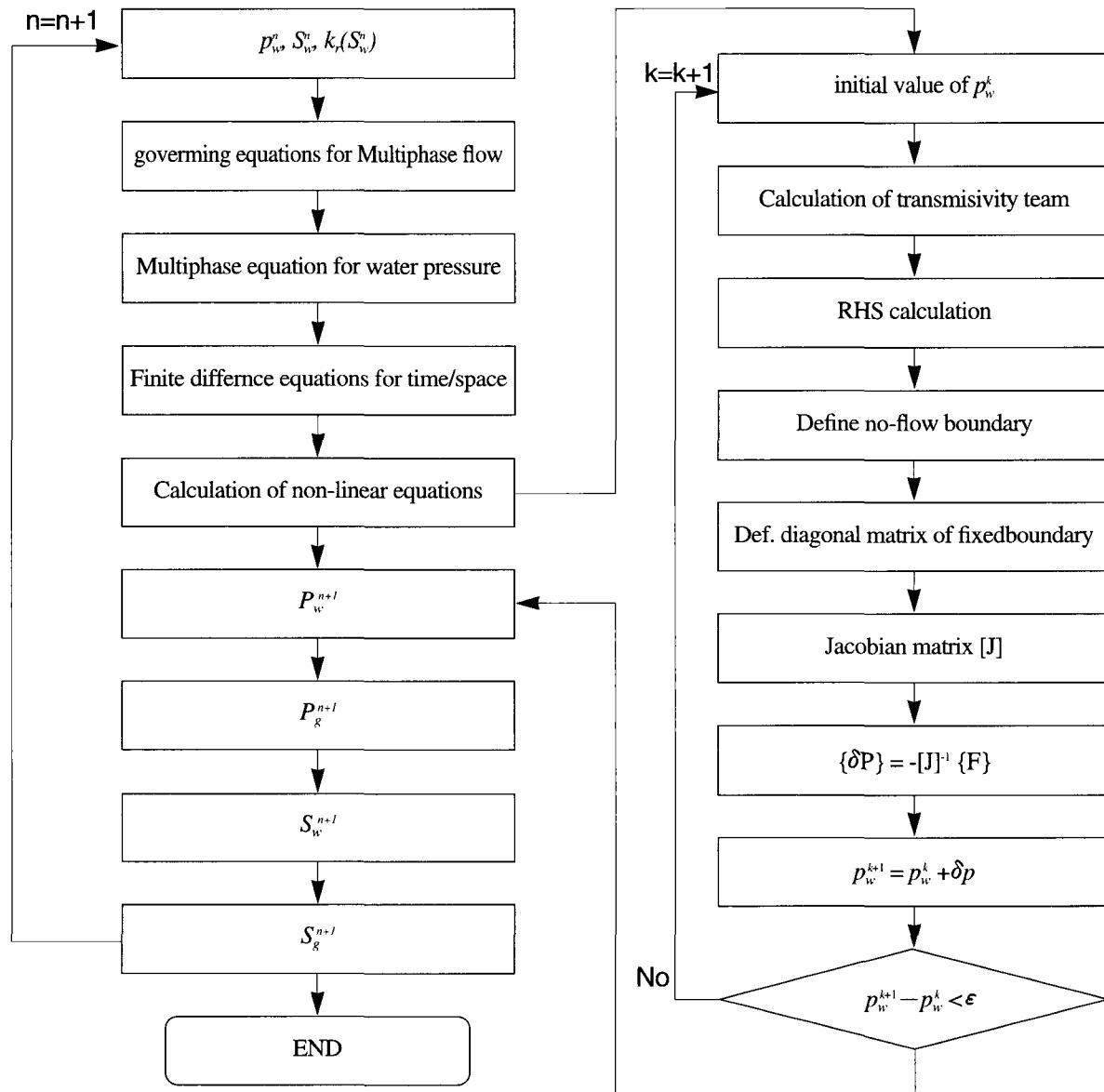
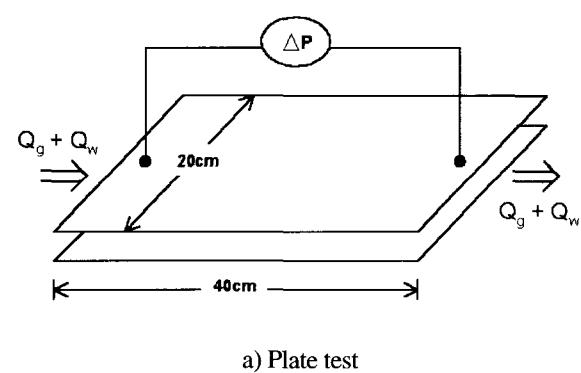


Fig. 4. The flow chart of numerical model

수치모형의 검증은 Fig. 5a와 같이 평판모형 실험 조건(이원석 등, 2000) 및 결과를 이용하였다. 수치모의를 위한 해석영역은 실험시 사용한 평판의 크기인 $0.4m \times 0.2m$ 이며, 격자의 크기는 주입구와 배출구의 격자크기 $0.0015m$ 를 제외한 나머지 격자 Δx 와 Δy 는 각각 $0.04m$, $0.033m$ 이며, 총 격자의 수는 14×9 개이다. Fig. 5b와 같이 영역의 외곽은 불유동경계조건을 적용하며 주입구와 배출구는 고정압력과 고정포화도 경계조건을 적용하였다. 주입압력, 포화도 역시 모형실험 조건과 동일하게 적용하였다. 상대투과계수 특성식은 식 (8)을 이용하였다. 압력에 따른 질소가스와 물의 점성계수의 변화는 상용프로그램인 HYSYS 2.1(Hyprotech, 1999)를 이용하여 구하였다. 모형실험의 모든 경우에서 300초 내에 정상상태에 도달하였으므로 300초까지의 해석을 실시하였다.

3.2 검증결과



b) Grid construction and boundary condition of numerical model

Fig. 5. Conceptual figure of plate test and numerical model

수치모의 결과는 y 축 구간의 포화도의 평균값을 x 거리별로 구하여 모형실험치와의 평균 제곱근 백분율 오차(root mean square percent error)를 구한 결과, $8.2 \sim 28.4\%$ 의 오차를 보였다. 오차가 나타나는 이유는 모형실험시 디지털카메라로 촬영된 평판을 흑과 백으로 변환하면서 1과 0의 수치로 대입되는 과정에서 정밀한 포화도가 산출되지 못하는 데 기인하는 것으로 보인다. Fig. 6은 300초 이후의 모형실험과 수치모의 포화도 결과를 비교한 그림으로서 간극크기 $36.2\mu\text{m}$ 인 경우, 수치모의 포화도는 0.571, 모형실험시는 0.659이며, 간극크기 $126.5\mu\text{m}$ 인 경우, 수치모의 시 0.083, 모형실험시 0.069로서 모의결과가 모형실험결과와 비교적 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다.

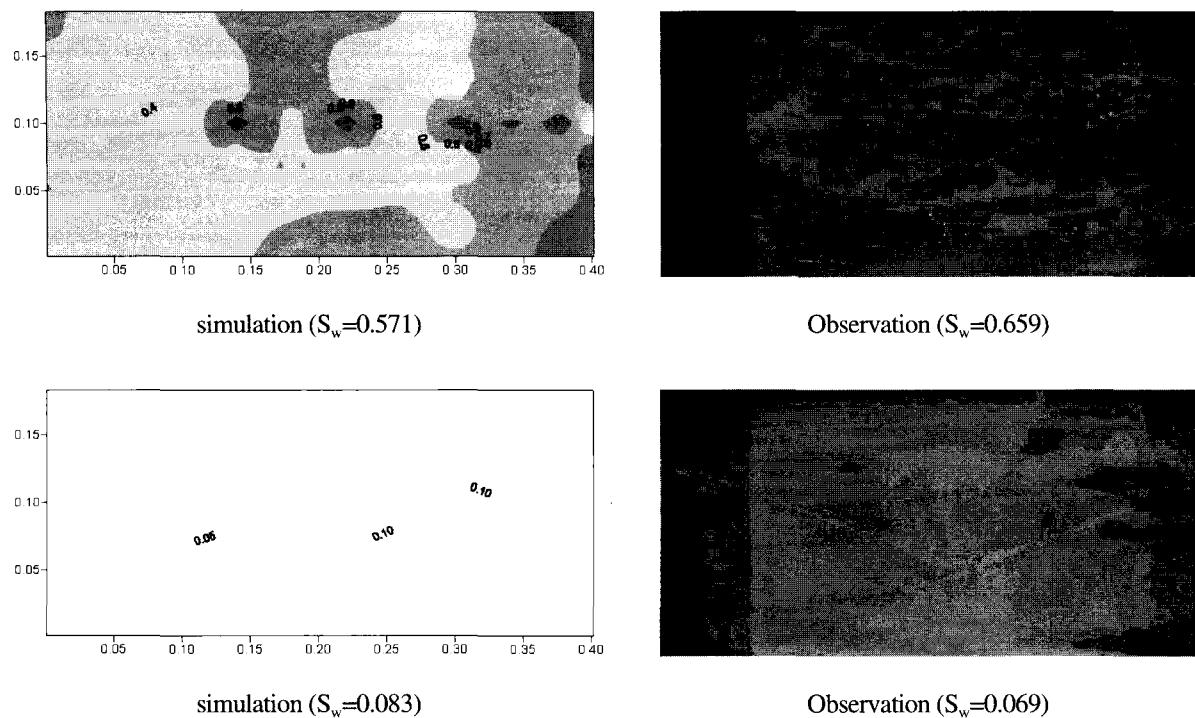
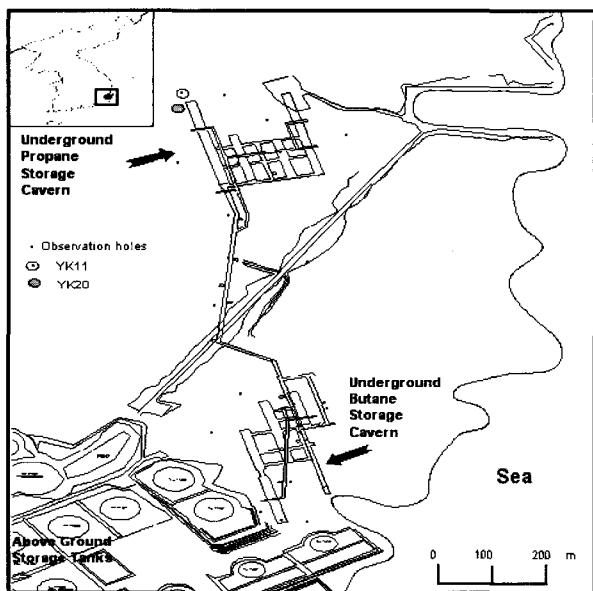
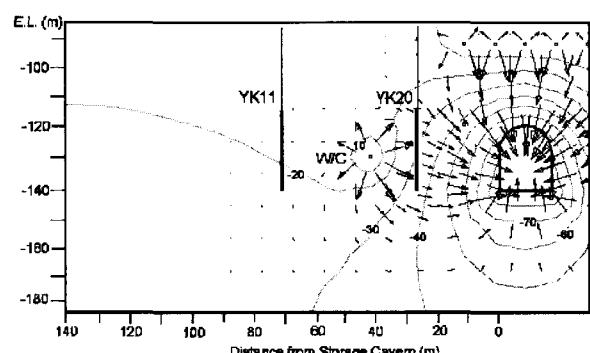
4. 현장적용성 검토

4.1 현장개요

수치모형은 Fig. 7의 SK가스주식회사의 울산 LPG 저장기지를 대상으로 현장적용성을 검토하였다. 울산 LPG기지는 그림과 같이 프로판과 부탄이 각각 지하 약 EL. -120.0m와 EL. -60.0m에 설치된 넓이 21.0m, 폭 19.0m 규모의 무복공식 공동에 저장되어 있고, 공동 주변에는 지하수위를 관찰하기 위한 관측공들이 수개소에 설치되어 있다.

해석대상은 그림 7에서 프로판 저장공동의 북측과 좌측에 위치한 관측공 YK11과 YK20 구간이다. 이 구간은 세일-사암교호층으로서 1999년부터 2001년 2월 현재까지 수벽시설로 부터의 물 공급이 세일층에서 차단되어 그림 8과 같이 관측공 설치 당시의 수두 0.0m 보다 하부 사암층에서 YK11은 약 -20.0m, YK20은 약 -30.0m의 지하수두 강하가 발생하고 있다.

이 구간내 절리의 방향성은 다양하며, 절리간극의 크기는 대수정규분포를 가정하였을 때, $0.00001\text{m} \sim 0.03\text{m}$ 로 분포하는 것으로 분석되었다. 절리의 거칠기는 매끄러움과 상당히 거칠은 면까지 다양한 값을 가진다 (Han 등, 2001).

**Fig. 6.** Water saturation with time (after 300 sec)**Fig. 7.** Site location map**Fig. 8.** Flow pattern and distribution of groundwater around YK11 and YK20

4.2 수치모의 조건

수치모의는 하부 사암층에서 지하수압이 가스운영압 이하로 강하될 경우를 가정하여 수평 절리간극에서의

가스와 지하수의 동시거동 모의를 네가지 경우에 대해서 실시하였다. Case 1은 공동 가스압이 최대인 840 kPa로 운영 중, 공동으로부터 130m 외곽부의 지하수압이 800kPa까지 강하하였을 때, 거칠은 절리 ($R_r=2.0$)에서의 2상유체의 거동을 모의하였다. Case 2는 Case 1의 조건에서 매끈한 절리면 ($R_r=0.0$)에서의 2상유체의 거동을 모의하였다. Case 3과 Case 4는 가스의 누출 및 거동을 제어하기 위한 지하수의 적정 주입시기를 간극크기별로 알아 보기 위해서 실시하였다. Case 3은 Case 2의 조건에서 공동으로부터 30m 떨어진 곳에 위치한 YK20에 1200kPa의 물을 운영과 동시에 압력주입할 경우이며, Case 4는 Case 2의 조건을 24시간 운영한 이후에 YK20에 1200kPa의 물을 압력주입할 경우이다. Fig. 9는 수치모의를 위한 2차원 격자구성과 경계조건이다.

해석영역은 저장공동과 관측지점이 포함되는 130m × 70m이며, 격자크기는 공동주변은 5.0m, 수벽공은 0.1m, 우측외곽경계 일부는 50.0m로 하였다. 총 격자의 수는 21×16 개이다. 경계조건은 영역의 외곽은 불유동경계를 적용하며 저장공동, 수벽공, 우측외곽은 고정압력과 고정포화조건을 적용하였다. 절리간극의 크기는 0.00001m, 0.001m, 0.01m이며, 상대조도계수 R_r 는 0.0 ~ 2.0(마찰요소 25.88)을 적용하였다. 모의는 모든 경우에 24시간 동안의 해석을 실시하였다.

■ No flow boundary
■ Fixed pressure/saturation

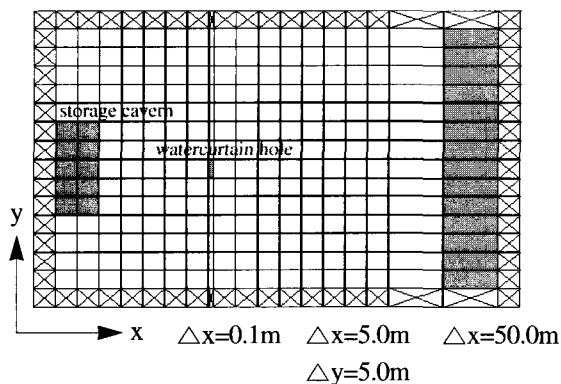


Fig. 9. Grid construction and boundary conditions

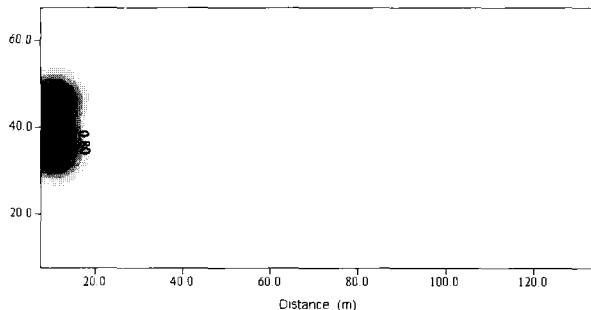
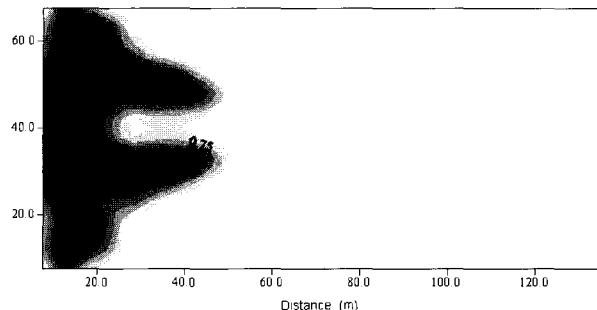
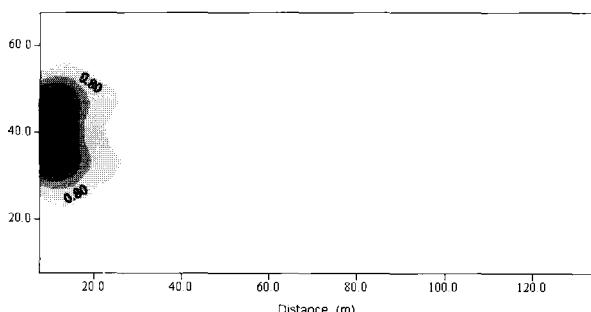
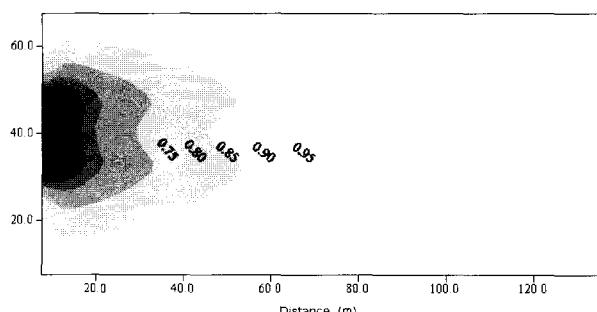
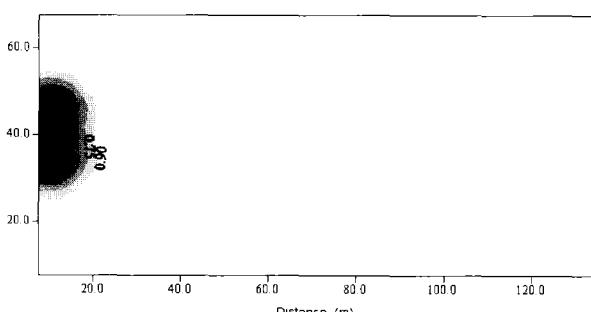
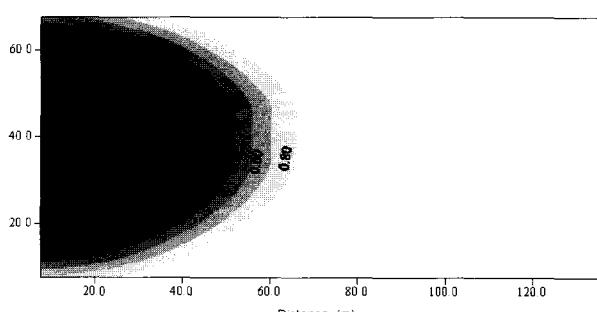
4.3 수치모의 결과

수치모의 결과는 Fig. 10~Fig. 13에 나타내었다. 그림에서 숫자는 수포화도를 나타내며, 숫자가 작고 색이 검을수록 가스포화도가 큰 경우이다. Case 1의 경우, 모든 간극크기에서 가스는 저장공동으로부터 최대 30m까지 가스포화도 0.2 이내에서 미미하게 분포하였다(Fig. 10). Case 2의 경우, 가스의 이동속도는 간극의 크기 0.01m에서 가장 빠른 속도를 보이나 2번 째로 간극이 큰 0.001m에서는 가장 작은 0.00001m 보다도 느린 속도를 보이면서 65m 지점까지 고른 가스분포를 나타내었다(Fig. 11). Case 3의 경우, 간극크기 0.00001m에서는 수벽공 주입으로 인한 압력이 재분배되기 전에 공동으로부터 가스가 누출되어 수벽공 지점을 벗어난 외곽까지 이동하게 된다. 그러나 간극크기 0.00001m를 제외한 나머지 간극에서는 24시간 내에 가스의 누출을 사전제어할 수 있음을 알 수 있다(Fig. 12). Case 4의 경우, 모든 간극에서 가스는 수벽공 위치를 훨씬 벗어나게 되고 물 주입으로 인한 영향으로 전 유역으로 빠르게 확산되었다. 간극크기가 클수록 수벽공으로 인한 지하수압의 재분배가 빠르게 진행되어 희석된 가스가 더욱 넓은 범위로 확산되는 결과가 나타났다(Fig. 13).

5. 결 론

포화도와 상대투과계수의 구성관계가 상대적으로 중요시되는 불혼합성 물과 가스의 동시흐름에서의 유한차분 수치모형을 개발하였다. 개발된 수치모형은 절리간극의 크기를 공간적으로 고려할 수 있을 뿐 아니라, 압력에 따른 유체의 점성계수의 변화와 포화도에 따른 상대투과계수의 변화를 절리간극의 크기별로 고려할 수 있다.

모형실험으로부터 상대투과계수 특성곡선의 새로운 경험식으로 로지스틱 방정식을 제시하였다. 이 특성식은 간극의 크기가 포함된 매개변수를 사용하였기 때문에 임의의 절리간극크기의 적용이 가능한 형태이다. 특성식이 적용된 수치모형의 포화도 계산치를 모형실험 관찰치와 비교한 결과, 8.2~28.4%의 오차를

a) $e=0.00001\text{m}$ a) $e=0.00001\text{m}$ b) $e=0.001\text{m}$ b) $e=0.001\text{m}$ c) $e=0.01\text{m}$ c) $e=0.01\text{m}$ **Fig. 10. Propane gas flow at Case 1**

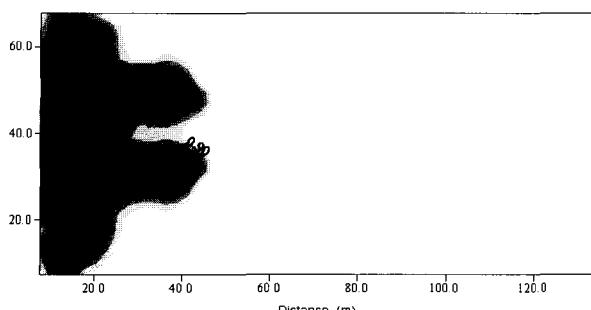
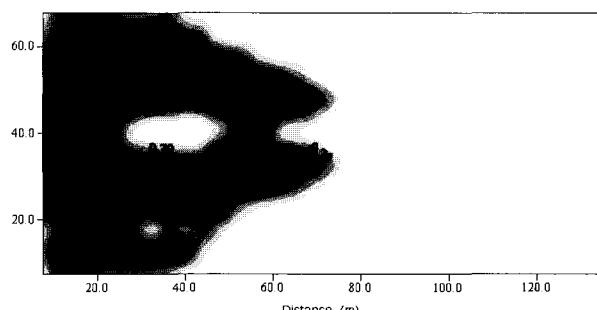
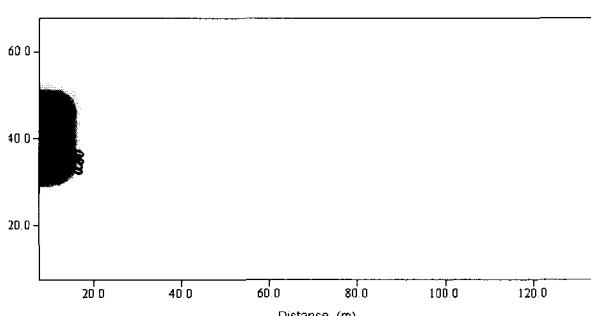
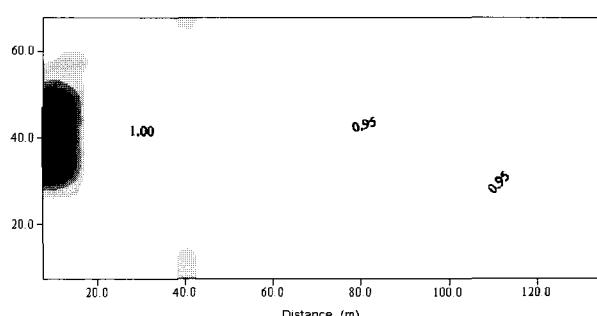
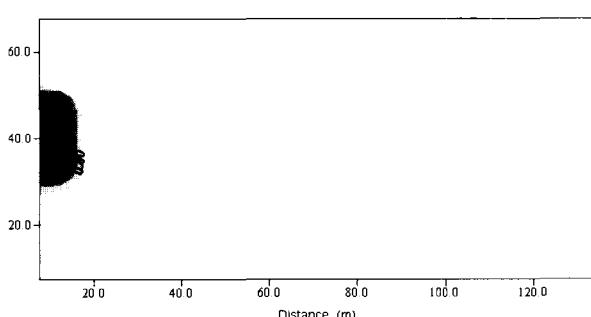
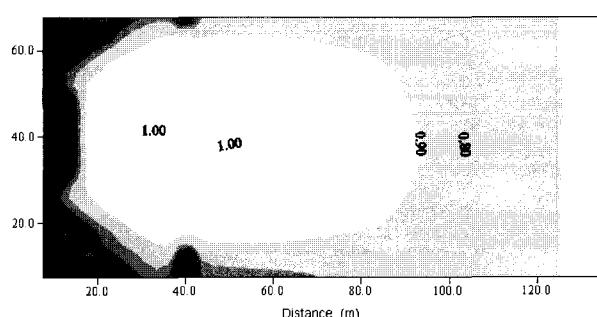
보였다.

수치모형을 이용하여 지하 LPG 저장기지에서의 가스이동을 모사한 결과, 가스의 이동속도는 절리면의 거칠기에 선형으로 반비례하였으나, 간극크기에 비례하는 양상은 보이지 않았다. 절리면이 거칠은 경우, 모든 간극크기에서 운영압의 조절만으로도 가스의 이

Fig. 11. Propane gas flow at Case 2

동제어가 가능하였으나, 절리면이 매끈한 경우, 간극이 작아질수록 운영압 조절만으로는 가스의 이동제어가 불가능한 것으로 나타났다.

본 연구에서는 각 상의 흐름 간섭특성, 즉 상대투과계수는 간극크기에 좌우되며, 절리면의 조도는 습윤도(wettability), 즉 임계포화도에만 영향을 미친다고 가

a) $\epsilon=0.00001\text{m}$ a) $\epsilon=0.00001\text{m}$ b) $\epsilon=0.001\text{m}$ b) $\epsilon=0.001\text{m}$ c) $\epsilon=0.01\text{m}$ c) $\epsilon=0.01\text{m}$ **Fig. 12. Propane gas flow at Case 3**

정하여 상대투과계수 실험시 평판의 조도를 고려하지 않았다. 조도계수가 상대투과계수에 미치는 정도를 확인하기 위해서는 추가적인 실험이 이루어져야 할 것이다.

Fig. 13. Propane gas flow at Case 4

6. 참 고 문 헌

1. 이원석, 성원모, 한일영. “단일균열평판모델에서 가스-물 균열 상대투과도 측정에 관한 실험적 연구,” 한국지반공학회논문집. 제16권 제1호 pp. 221-

- 226 (2000). 이원석, 성원모, 한일영. "단일균열
2. Brooks, R.H. and Corey, A.T., Hydraulic properties of
porous media, Colorado State University Hydrology
paper No. 3, March (1964).
3. Dana, E., and Skoczylas, F. "Gas relative permeability
and pore structure of sandstones." *Int. J. of Rock mech.
and Mining Sci*, pp. 613-625 (1999).
4. Fourer, M., and Bories, S. "Two-Phase Flow in Smooth
and Rough Fractures: Measurement and Correlation by
Porous-Medium and Pipe Flow Models." *Water
Resource Research*, Vol. 29, No. 11, Nov. pp. 3699-
3708 (1993).
5. Gale, J.E., Rouleau, A., and Atkinson, L.C. "Hydraulic
properties of fractures. Memories. Hydrogeology of
rocks of low permeability." *:International Association
of Hydrogeologists (Tucson, Ariz.)* pp. 1-11 (1985).
6. Han, I.Y., Seo, I.W., Chung, I.M., and Lee, J.E. "An
Abrupt Drawdown Observed in Sandstone-Shale
Interbedded Layers Surrounding An Underground LPG
Cavern." *Journal of Hydrologic Engineering,
American Society of Civil Engineering* (2001). (in
press)
7. Hirasaki, G.J. and O' Dell, P.M. "Representation of
reservoir geometry for numerical simulation." Trans.
SPE of AIME, 249, pp393-404 (SPEJ)(1970).
8. Hyprotech Ltd. "HYSYSPLANT Ver. 2.0." (1998).
9. Louis, C. "Introduction of hydraulics of rock." *Bull.
Rock. Geol. Min. Ser. 2, Sec 3, No. 4* (1974).
10. Marle C.M., Multiphase flow in porous media, Gulf
publishing company (1981).
11. Merrill, L.S., Two phase flow in fractures, Ph. D.
dissertation. Univ. of Denver, Denver, Colo. (1975).
12. Persoff, P., and Pruess, K. "Two phase flow
visualization and relative permeability measurement in
natural rough-walled rock fractures." *Water Resources
Research*, vol 31, No. 5, pp. 1175-1186 (1995).
13. Pruess, K., and Tsang, Y.W. "On Two-Phase Relative
Permeability and Capillary Pressure Rough-Walled
Rock Fracture." *Water Resource Research*, Vol.26,
No. 9. (1990).
14. Pyrak-Nolte, L.J., Helgeson, D., Haley, G.M., and
Morris, J.W. "Immiscible fluid flow in a fracture."
*Proceedings of the 33rd U.S.Rock Mechanics
Symposium, Balkema. Rotterdam. Netherlands*, pp.
571-578 (1992).
15. Romm, E.S. "Fluid Flow in Fractured Rocks." Nedra
Publishing House, Moscow, Translated from Russian
by W.R. Blake. (1966).
16. Schrauf, T.W. and Evans, D.D. "Laboratory studies of
gas flow through a single natural fracture." *Water
Resource Research*, Vol. 29, No. 11, Nov. pp. 3699-
3708 (1986).
17. Sheldon, J.W., Zondek, B., and Cardwell, W.T. "One-
dimensional, incompressible, non-capillary, two-phase
fluid flow in a porous medium." Trans. *SPE of AIME*,
216, 290-6 (1959).
18. van Genutchen, M.T. "A closed Form Equation for
predicting the hydraulic conductivity of unsaturated
soils." *Sci. Soc. Am. J.* 44, pp. 892-898(1980).