

지하 LPG 저장공동에 인접한 單一節理에서의 二狀流體거동 해석 : II. 수치모형의 검증 및 적용

Simulation of Two-Phase Fluid Flow in a Single Fracture Surrounding an Underground LPG Storage Cavern : II. Verification of Numerical Model and Field Application

한 일 영* / 서 일 원**

Han, Il Yeong / Seo, Il Won

Abstract

In order to verify the numerical model, which was developed to simulate the behavior of the two-phase fluid flow in a single fracture, the characteristic equation of relative permeability was incorporated into the developed numerical model, and the computed results were compared with the experimental results of the model test. As results of the sensitivity analysis on the roughness and the aperture size of fracture, the gas velocity was inversely proportional to the fracture roughness, and not proportional to the square of aperture size which is usually observed in single phase flow in a single fracture. The numerical model was applied to the underground LPG storage terminal in order to check the field applicability. The simultaneous flow of water and gas in accordance with the operation pressures in a single fracture near cavern was simulated by the model. It was shown that the leaked gas was able to be controlled in a single fracture neither by the pressure of operation nor by that of groundwater in case the fracture became smoother in roughness and smaller in aperture size.

keywords : sensitivity analysis, fracture roughness, aperture size, underground LPG storage terminal

요 지

단일절리에서 2상유체의 거동을 모의하기 위해 개발된 수치모형의 검증을 위해서 상대투과계수 특성식을 수치모형에 적용하여 가스와 물의 동시거동을 해석한 후, 수치모의 결과를 모형실험결과와 비교하였다. 절리면의 거칠기와 간극의 크기에 대한 민감도 분석을 실시한 결과, 가스의 이동속도는 절리면의 거칠기와 반비례하였으며, 절리간극의 크기와는 상대투과계수 특성식의 영향으로 단상유체의 흐름에서와 같은 간극크기의 제곱에 비례하는 양상은 보이지 않았다. 수치모형의 현장적용성을 검토하기 위해서 지하 LPG 저장기지에 모형을 적용한 결과, 저장공동에 인접한 단일절리에서의 운영압의 동적변동에 따른 지하수와 프로판가스의 동시거동을 모사할 수 있었다. 절리면이 매끈하고 간극이 작아질수록 운영압과 지하수압의 조절로는 누출된 가스의 이동제어가 불가능해지는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 민감도분석, 절리면 거칠기, 간극의 크기, 지하 LPG 저장기지

* 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

본 논문의 제1편(한일영과 서일원, 2001)에서는 난 일절리에서 2상유체의 거동을 해석하기 위한 2차원 수치모형을 개발하였다. 제안된 모형은 압력에 따른 전성의 변화와 포화도에 따른 상대투과계수의 변화를 절리 간극의 크기별로 고려할 수 있는 모형으로서, 지배방정식은 물과 가스의 운동방정식 및 연속방정식을 이용하여 유도하였으며, 보조방정식으로 물과 가스의 포화도 관계식을 적용하였다. 수치기법으로는 IMPES 해법을 적용하여 물과 가스의 압력변화량과 포화도를 차례로 구할 수 있도록 하였다.

기존의 상대투과계수 특성식으로는 Corey(1954), Pirson(1958), Wyllie(1962) 등이 흡이나 다공성암석에서의 포화도와 상대투과계수 관계에 대한 경험적 모형을 제시한 바 있으며, Brooks와 Corey (1964), Hirasaki 등 (1970), van Genuchten (1980) 등은 기존의 포화도와 모세관압 경험식(Burdine, 1953 ; Mualem, 1976)에 투수계수모형을 적용하여 준경험적 투과계수 모형을 제안한 바 있다. 그러나 절리간극에서의 포화도에 따른 상대투과계수의 거동은 절리면의 거칠기, 간극크기 등의 절리특성에 지배를 받기 때문에 흡이나 다공성암석과는 매우 상이하다. 절리를 대상으로한 상대투과계수 특성식은 Romm(1966)에 의해서 최초로 제안된 바 있다. 그는 모형실험결과 절리의 간극크기에 관계없이 각 상의 상대투과계수는 각 상의 포화도와 같으며, 임의의 포화도에서 두 유체의 상대투과계수의 합은 1.0이라고 하여 포화도와 상대투과계수의 선형적인 비례관계를 제안한 바 있다. 이것은 각 상은 서로의 유동을 간섭하지 않음을 의미한다. 그러나 Merrill(1975)은 평판과 다공성암석을 대상으로 한 2상유체 실험결과 습윤유체와 비습윤유체의 상대투과계수의 합이 1.0보다 작다는 것을 확인한 바 있으며, Schrauf 등(1986)은 간극 크기가 200~600 μm 인 평판을 이용한 모형실험을 통하여 절리에서의 상대투과계수는 간극크기와 절리면 거칠기의 함수라고 발표하였다. Pruess 등(1990), Pyrak 등(1992), Fourer 등(1993), Persoff 등(1995)은 각 상은 다른 상의 유동을 심하게 간섭하고 따라서 각 상의 상대투과계수의 합은 1.0보다 작다고 하고, 거칠은 절리에서는 물과 가스의 상대투과계수는 1.0보다 훨씬 작아서 두 유체가 동시에 흐를 수 없다고 주장하였다. 이와 같이 간극 내에 2개 이상의 상이 존재하게 되면 상호 심하게 간

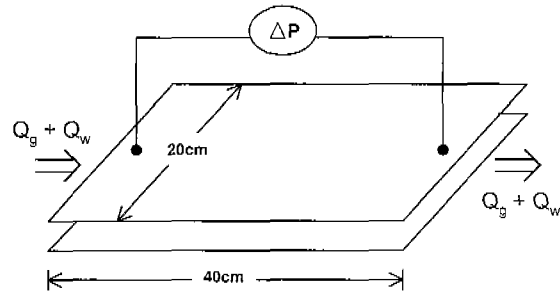
섭하게 되고 유동구조는 간극크기에 영향을 받는 것이 많은 연구에 의하여 관찰되었으나 간극크기에 따른 포화도와 상대투과계수의 정량적 구성관계식 도출에는 실패하였다. 따라서 본 논문의 제1편(한일영과 서일원, 2001)에서는 모형실험을 수행하여 절리의 간극크기별로 상대투과계수 특성식을 도출하였다.

본 논문의 제2편에서는 절리간극의 크기별로 제안된 상대투과계수 특성식을 수치모형에 결합하여 2상유체의 거동을 모의하였다. 1편에서 수행한 모형실험과 동일한 영역에 수치모형을 적용하여 모의결과를 실험결과와 비교함으로써 수치모형의 검증용 실험을 수행하였다. 또한 절리특성 중 2상유체 흐름에 큰 영향을 미치는 것으로 알려진 절리면의 거칠기와 간극의 크기에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 본 논문에서 개발한 수치모형이 실제 암반절리에서의 2상유체의 거동을 제대로 모의할 수 있는지를 검토하기 위해서 지하 LPG 저장 공동에 수치모형을 적용하였다.

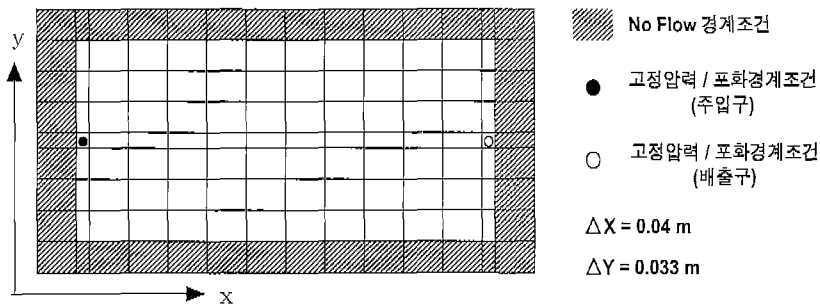
2. 수치모형의 검증

수치모형의 검증은 평판모형 실험조건 및 결과를 이용하였다. 그림 (1a)는 모형실험 모식도이며, 그림 (1b)는 수치모의를 위한 2차원 격자구성과 경계조건이다. 해석영역은 실험시 사용한 평판의 크기인 0.4 m \times 0.2 m이며, 격자의 크기는 주입구와 배출구의 격자 크기 0.0015 m를 제외한 나머지 격자 Δx 와 Δy 는 각각 0.04 m, 0.033 m 이며, 총 격자의 수는 14 \times 9개이다. 영역의 외곽은 불유동경계조건을 적용하며 실험시의 주입구와 배출구는 고정압력과 고정포화도 경계조건을 적용하였으며, 주입압력, 포화도 역시 모형실험과 동일하게 적용하였다. 상대투과계수 특성식은 본 논문 제1편의 식 (11a)와 (11b)를 이용하였다. 모형실험에서 사용한 범위의 압력에 따른 질소기스와 물의 전성계수의 변화는 화학공정모사 상용프로그램인 HYSYS 2.1(Hyprotech, 1998)를 이용하여 구하였다. 모형실험의 모든 Case에서 300초 내에 정상상태에 도달하였으므로 300초까지의 해석을 실시하였다.

수치모의 결과는 y축 구간의 수포화도의 평균값을 x 방향거리별로 구하여 모형실험치와의 평균 제곱근 백분율오차(root mean square percent error)를 구한 결과, 8.2 ~ 28.4 %의 오차를 보였다. 오차가 나타나는 이유는 모형실험시 디지털카메라로 촬영된 평판을 흑과 백으로 변환하면서 1과 0의 수치로 대입되는 과



a) 모형실험 모식도



b) 수치모의를 위한 2차원 격자망과 강제조건

그림 1. 모형실험 모식도와 수치모의 격자망

표 1. 모형실험치와 수치모의결과와의 비교

Case	항목	x방향 거리 (m)										rmspe (%)
		0.04	0.08	0.12	0.16	0.20	0.24	0.28	0.32	0.36	0.40	
101	실험치	0.156	0.291	0.368	0.609	0.618	0.644	0.562	0.645	0.514	0.548	17.3
	계산치	0.120	0.240	0.320	0.650	0.550	0.700	0.600	0.640	0.670	0.700	
202	실험치	0.549	0.461	0.570	0.505	0.129	0.491	0.530	0.525	0.539	0.622	11.7
	계산치	0.470	0.430	0.435	0.440	0.470	0.510	0.570	0.550	0.590	0.650	
308	실험치	0.012	0.002	0.001	0.021	0.030	0.000	0.032	0.052	0.078	0.054	20.8
	계산치	0.007	0.002	0.001	0.018	0.027	0.001	0.025	0.047	0.058	0.063	
401	실험치	0.781	0.731	0.682	0.675	0.697	0.775	0.803	0.819	0.874	0.808	8.2
	계산치	0.680	0.650	0.670	0.680	0.660	0.690	0.720	0.850	0.880	0.890	
507	실험치	0.091	0.098	0.114	0.155	0.244	0.227	0.227	0.295	0.293	0.264	26.9
	계산치	0.040	0.050	0.090	0.150	0.190	0.210	0.240	0.280	0.310	0.330	
606	실험치	0.156	0.179	0.191	0.207	0.197	0.272	0.215	0.143	0.146	0.201	26.9
	계산치	0.120	0.140	0.180	0.200	0.210	0.240	0.250	0.180	0.160	0.220	
707	실험치	0.021	0.021	0.010	0.021	0.005	0.001	0.015	0.086	0.235	0.263	28.2
	계산치	0.016	0.019	0.012	0.022	0.008	0.001	0.013	0.067	0.237	0.293	

정에서 정밀한 포화도가 산출되지 못하는 데 기인하는 것으로 보인다. 표 1에 수치모의 결과와 모형실험치의

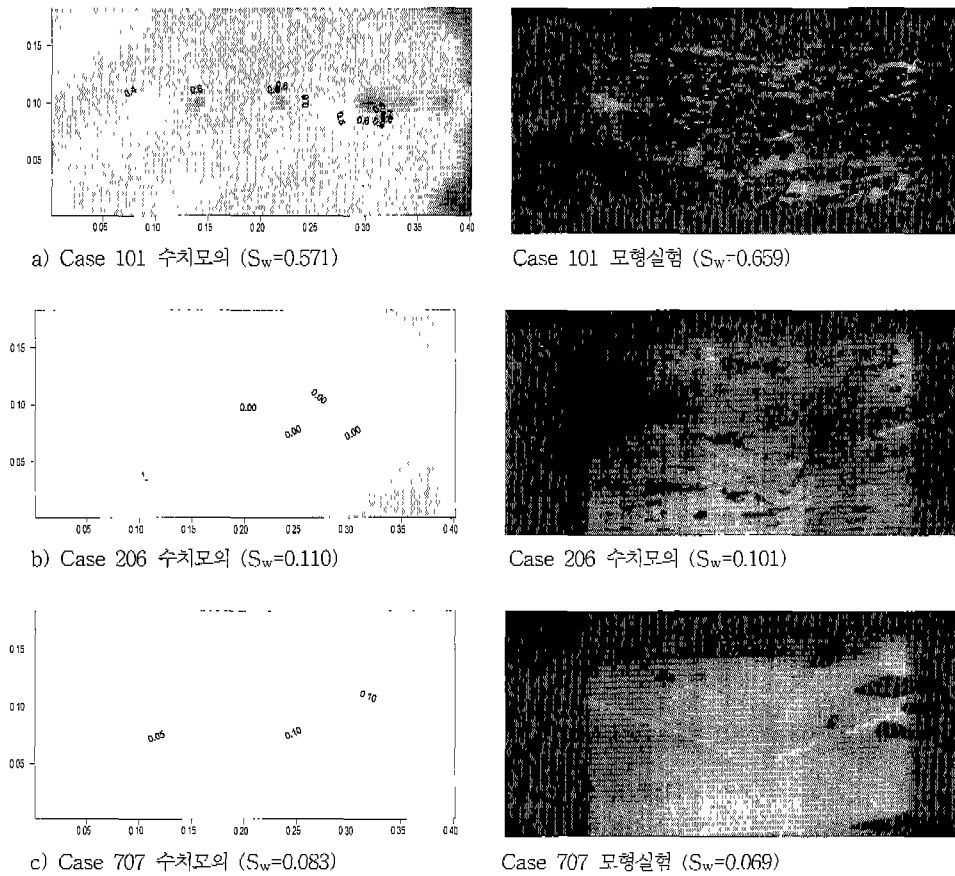


그림 2. 경과시간별 포화도 ($t=300$ sec 이후)

평균제곱근 백분율오차를 수록하였으며, 그림 2에 Case 101, Case 206, Case 707에 대한 수치모의 결과와 모형실험치를 비교하여 도시하였다.

3. 민감도 분석

3.1 절리간극의 크기

절리특성 중 유체흐름에 가장 영향을 미치는 간극의 크기와 절리면의 기철기 정도가 물과 가스의 동시거동 특성에 미치는 영향을 고찰하기 위해서 민감도분석을 실시하였다. 수치모의 조건은 그림 1과 같이 수치모형의 검증과정과 동일하나 가스의 주입압은 10 kPa로 변경하였다.

절리간극의 크기는 0.0001 m를 기준으로 상대기철 계수, $R_r=0$ 인 경우, 간극크기 ± 0.00003 m, \pm

0.00006 m를 대상으로 민감도 분석을 수행하였다. 분석결과, 간극크기가 클수록 초기에는 가스이동이 빠르나 거리가 증가할수록 이동속도는 감소하는 것으로 나타났다. 간극이 작을수록 초기에는 가스이동이 느리나 배출구에 다다를수록 가스의 이동속도가 증가함을 알 수 있었다. 이러한 결과는 절리간극이 큰 경우, 물과 가스의 상호간섭이 간극이 작은 절리보다 더 커져서 이동속도가 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 그림 3은 간극크기 0.0001 m를 기준으로 간극크기 ± 0.00003 m, ± 0.00006 m에서의 수 포화도의 민감도를 거리별로 도시한 것이다. 그림에서 x축은 간극크기 0.0001 m를 기준으로 했을 때의 간극크기 차이이며 y축은 수포화도 차이이다. 간극의 크기가 0.0001 m 보다 작은 절리들이 큰 절리들보다 거리의 증가에 따른 수 포화도의 변화율이 커지므로 간극크기가 커질수록 물과 가스

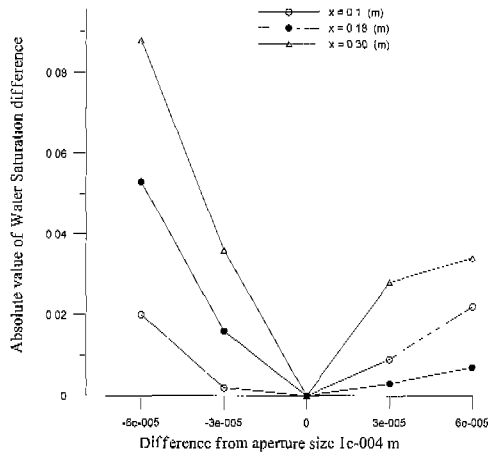


그림 3. 절리간극크기에 따른 민감도 분석 ($R_r=0$)

의 상호간섭이 증가함을 알 수 있다.

3.2 거칠기특성

절리면의 거칠기는 간극크기 0.0001 m에서 Louis (1974)가 제안한 증류범위의 상대거칠기계수, $R_r=1.26$ 을 적용하였을 때 마찰요소 $f=13.4$ 를 기준으로 마찰요소가 ± 4.1 , ± 8.2 , ± 12.3 인 절리를 대상으로 민감도 분석을 수행하였다. 분석결과, 모든 구간에서 거칠기가 커질수록 수 포화도는 증가하며 따라서 가스의 이동속도는 감소한다. 또한 거칠기가 커질수록 거리에 따른 이동속도 감소율도 증가한다. 이러한 결과는 간극크기가 일정한 절리에서는 거칠기가 증가하면 절대투과계수가 감소하기 때문이다. 그림 4는 상대거칠기계수 $R_r=1.26$ 를 기준으로 하였을 때 300초 경과 후 포화도의 민감도이다. 모든 구간에서 가스의 이동속도는 거칠기에 선형으로 비례하는 양상을 보이며, 상대거칠기계수 $R_r=1.26$ 보다 작은 절리들에서의 수 포화도 변화율은 큰 절리들보다 상대적으로 크게 나타나므로 상대거칠기계수가 커질수록 물과 가스의 이동속도가 감소함을 알 수 있다.

4. 현장적용성 검토

4.1 현장개요

수치모형의 현장적용성을 검토하기 위하여 울산에 위치한 SK가스주식회사의 LPG 저장기지(그림 5)를 대상으로 하였다. 해식대상은 그림에서 좌측에 위치한

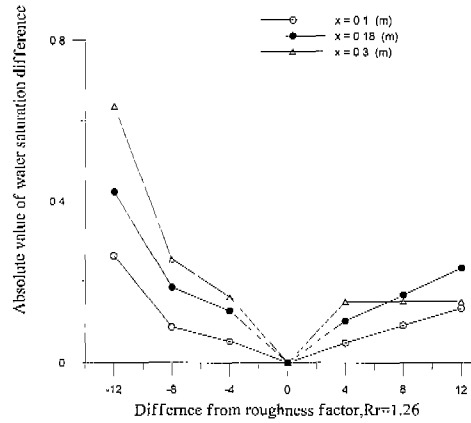


그림 4. 거칠기에 따른 민감도분석 ($e=0.0001$ m)

프로판 저장공동의 북측과 관측공 YK11과 YK20 구간이다. 이 구간은 세월-사암교호층으로서 1999년부터 2001년 2월 현재까지 수벽시설로부터의 물 공급이 세월층에서 차단되어 관측공 설치 당시의 수두 0.0 m

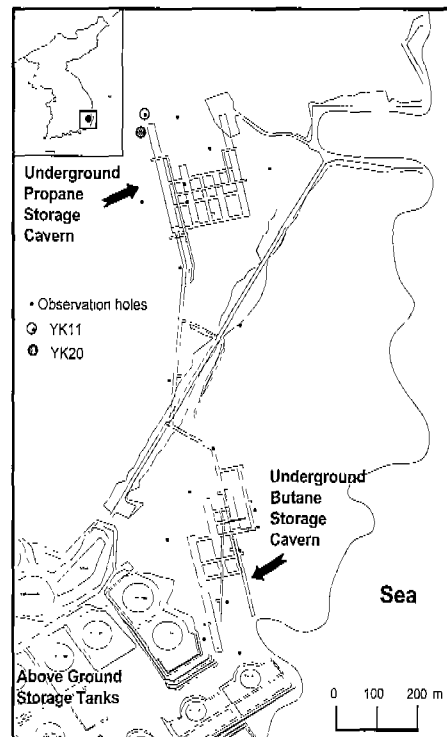


그림 5. 현장위치도

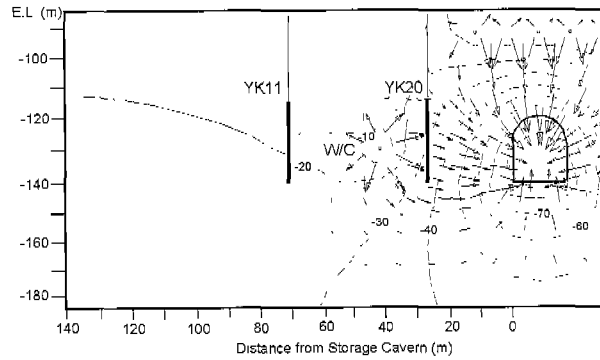


그림 6. YK11, YK20 주변의 지하수두 분포 및 유동양상

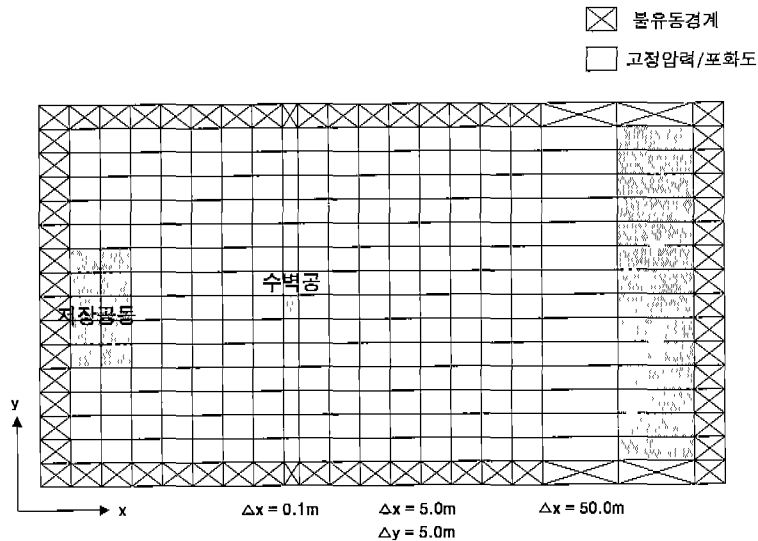


그림 7. 격자망 구성 및 경계조건

보다 하부 사암층에서 YK11은 약 -20.0 m, YK20은 약 -30.0 m의 지하수두 강하가 발생하고 있다(그림 6). 이 구간 내 절리의 방향성은 다양하며, 절리크기는 대수정규분포를 가정하였을 때, 0.00001 m~0.03 m로 분포하는 것으로 분석되었다. 절리의 거칠기는 메끄리움과 상당히 거칠은 면까지 다양한 값을 가진다(Han 등, 2001).

4.2 수치모의 조건

수치모의는 하부 사암층에서 지하수압이 가스운영압 이하로 강하될 경우와 저장공동 운영압의 동적변동($\Delta 100$ kPa/일)의 여섯가지 경우에 대해서 실시하여 수평 절리간극에서의 gas와 지하수의 흐름 특성을 비교

하였다. Case P1은 공동 가스압이 최대 허용치인 840 kPa로 운영 중, 공동으로 부터 130 m 외곽부의 지하수압이 800 kPa까지 강하하였을 때, 거칠은 절리($R_f=2.0$)에서의 거동을 모의한 것이며, Case P2는 Case P1의 조건에서 메끄리한 절리($R_f=0.0$)에서의 동시거동을 모의한 것이다. Case P3은 운영압을 750 kPa로 낮출 경우이며, Case P4는 운영압을 다시 840 kPa로 높일 경우이다. Case P5는 840 kPa 운영 중이 공동으로 부터 30 m 떨어진 곳에 위치한 YK20에 물을 1200 kPa로 압력주입(수벽공으로 기능 전환)할 경우이며, Case P6은 840 kPa로 24시간 운영한 이후에 1200 kPa로 압력주입할 경우이다.

그림 7은 수치모의를 위한 2차원 격자구성과 경계조

건이다. 해석영역은 저장공동과 관측지점이 포함되는 $130\text{ m} \times 70\text{ m}$ 이며, 격자크기는 공동주변은 5.0 m , 수벽공은 0.1 m , 우측외곽경계 일부는 50.0 m 로 하였다. 총 격자의 수는 21×16 개이다. 경계조건은 영역의 외곽은 불유동경계를 적용하며 저장공동, 수벽공, 우측외곽은 고정압력과 고정포화조건을 적용하였다. 변동영역의 초기조건은 지하수압 800 kPa , 포화도 1.0 을 적용하였다. 절리간극의 크기는 0.00001 m , 0.001 m , 0.01 m 이며, 상대거칠기계수 R_r 는 $0.0 \sim 2.0$ (마찰요소 25.88)을 적용하였다. 모의시간은 운영압 변화율이 100 kPa/일 이하인 점을 고려하여 24시간 동안의 해석을 실시하였다.

4.3 수치모의 결과

수치모의 결과는 그림 8~13에 나타내었다. 그림에서 숫자는 수 포화도를 나타내며, 숫자가 작고 색이 검을수록 가스포화도가 큰 경우이다. Case P1의 경우, 가스는 저장공동으로부터 최대 30 m 까지 가스포화도 0.2 이내에서 미미하게 분포하였다(그림 8). Case P2의 경우, 거리에 따른 간극의 크기별 가스의 이동속도는 간극의 크기 0.01 m 에서 가장 빠른 속도를 보이나 2번째로 간극이 큰 0.001 m 에서는 가장 작은 0.00001 m 보다 느린 속도를 보였고, 0.001 m 에서는 가장 완만한 속도변화를 보이면서 65 m 지점까지 고른 가스 분포를 나타내었다(그림 9). Case P3의 경우, 간극 0.00001 m 에서는 공동 내 가스의 압력강하로 인한 절

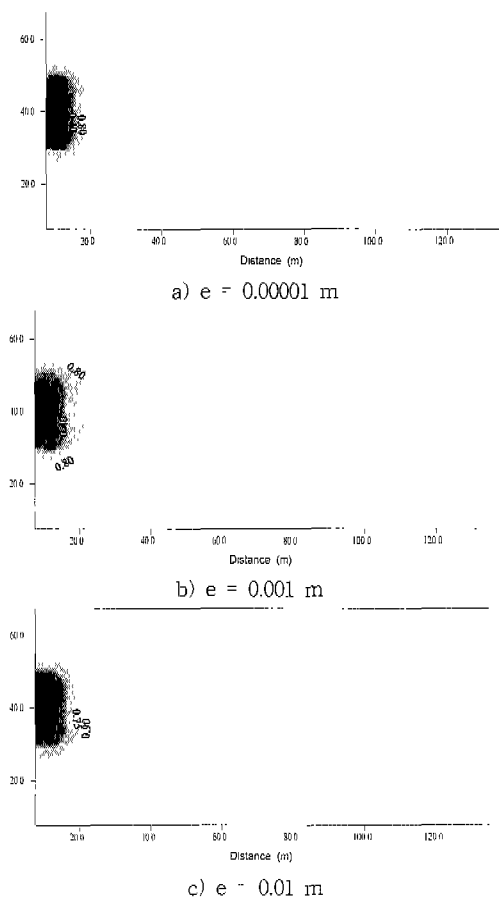


그림 8. 지하수압강하에 따른 Case P1의 가스유동 변화

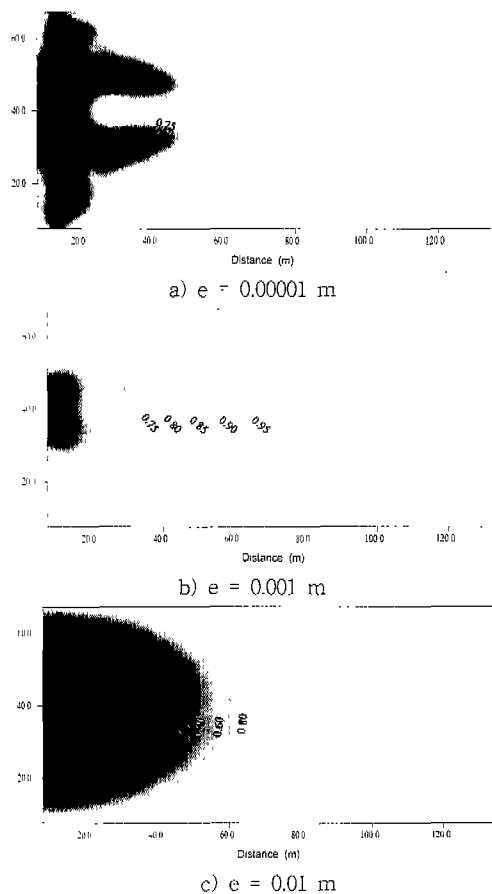


그림 9. 지하수압강하에 따른 Case P2의 가스유동 변화

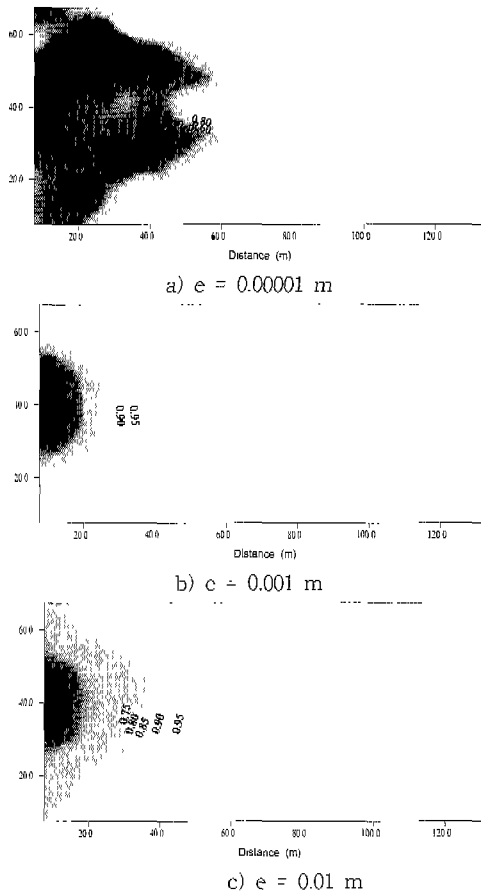


그림 10. 운영압변화에 따른 Case P3의 가스유동 변화

리간극에서의 지하수압의 재분배보다 가스 이동이 더 빠르게 진행되었다. 간극 0.00001 m를 제외한 나머지 간극에서 수 포화도는 24시간 동안 0.7까지 회복된다(그림 10). Case P4의 경우, 압력경사의 방향은 다시 역전되어 가스의 누출이 시작되고 가스이동 양상은 최초의 840 kPa과 같게 되나 전 구간에서 높은 가스포화도를 나타내었다. 이는 750 kPa을 24시간동안 운영하는 동안 지하수가 완전히 회복되지 못한 상태에서 최대 가스압 840 kPa을 운영한 때문이다(그림 11). Case P5의 경우, 간극크기 0.00001 m에서는 수벽공으로 인한 압력이 재분배되기 전에 공동으로 부터 가스가 누출되어 수벽공 지점을 벗어난 외곽까지 이동하게 된다. 그러나 간극크기 0.00001 m를 제외한 나머지 간극에서는 24 시간 내에 가스의 누출을 방지할 수

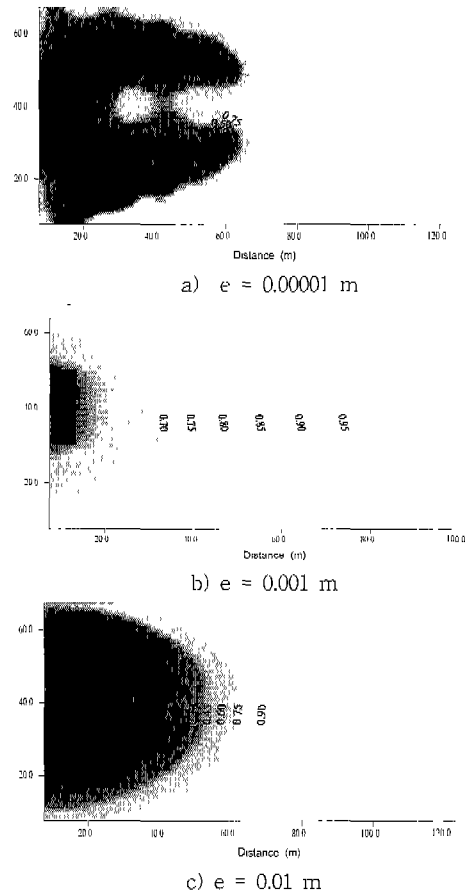


그림 11. 운영압변화에 따른 Case P4의 가스유동 변화

있음을 알 수 있다(그림 12). Case P6의 경우, 모든 간극에서 가스는 수벽공 위치를 훨씬 벗어나게 되고 수벽공의 영향으로 전 유역으로 빠르게 확산되었다. 간극크기가 불수록 수벽공으로 인한 지하수압의 재분배가 빠르게 진행되어 회석된 가스가 더욱 넓은 범위로 확산되는 결과가 나타났다(그림 13).

5. 결 론

본 연구에서는 제1편에서 개발한 수치모형의 검증과 민감도 분석을 실시하였다. 검증을 위하여 모형실험과 동일한 조건에서 계산된 평균 수포화도를 모형실험치와 비교한 결과, 8.2~28.4 %의 오차를 보였다. 수치모형을 이용하여 절리간극의 크기와 거칠기 정도에 따른 민감도분석을 실시한 결과, 상대거칠기계수, $R_f=0$

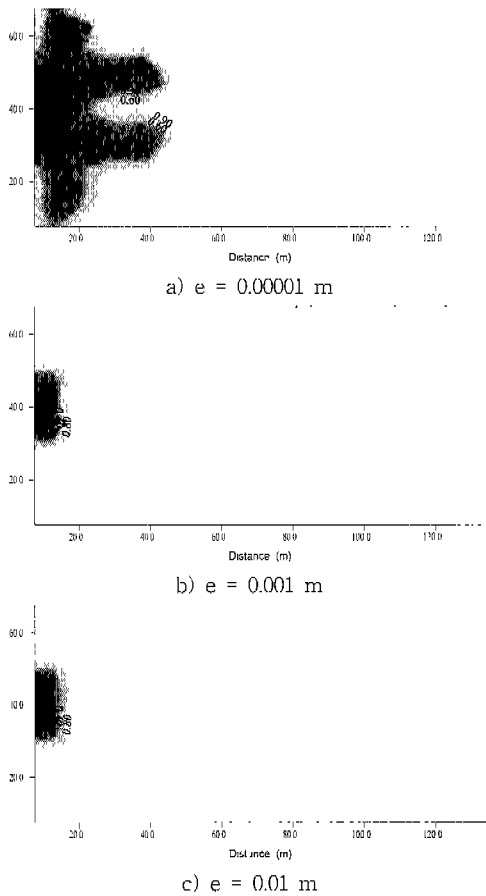


그림 12. 운영압변화에 따른 Case P5의 가스유동 변화

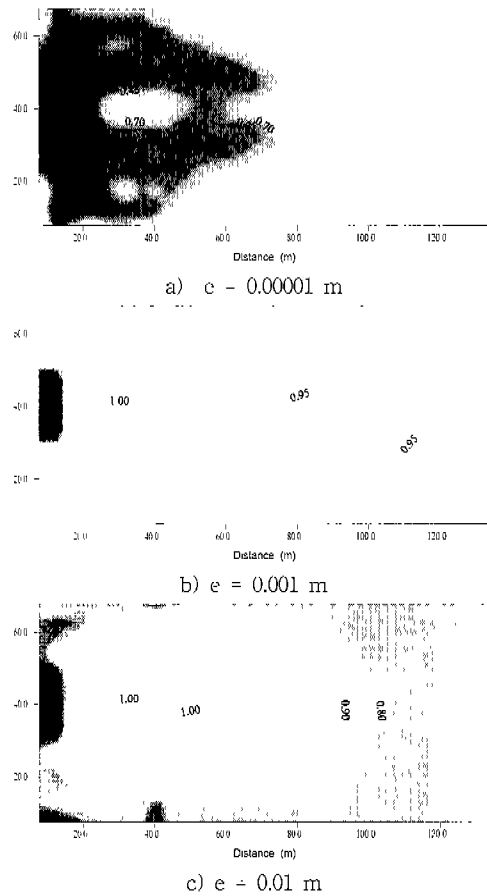


그림 13. 운영압변화에 따른 Case P6의 가스유동 변화

인 매끈한 질리에서는 간극의 크기가 커질수록 물과 가스의 상호간섭은 증가하였다. 간극크기가 동일한 질리에서는 상대거칠기계수가 커질수록 가스의 이동속도는 현격하게 감소되었다.

수치모형을 지하 LPG 저장기지에 적용한 결과, 질리면이 거칠은 경우, 모든 간극크기에서 운영압의 조절만으로도 가스의 이동제어가 가능하였으나, 질리면이 매끈한 경우, 간극이 작아질수록 절대투과계수는 감소하는 반면 간극이 큰 질리보다 가스의 이동속도는 상대적으로 증가하여 운영압과 지하수압의 조절만으로는 가스의 이동제어가 불가능한 것으로 나타났다. 지하수압 조절을 위한 수벽공 설치는 공동 내 저압을 유지하여 압력경사가 공동으로 충분히 형성된 이후에 설치하는 것이 더욱 효과적인 것으로 분석되었다.

감사의 글

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

참고 문헌

- 한일영, 서일원 (2001). “지하 LPG 저장공동에 인접한 單一節理에서의 二狀流体거동 해석 : I. 수치모형의 개발 및 모형실험.” 한국수자원학회지, 한국수자원학회, pp. 425~434.
- Brooks, R.H. and Corey, A.T. (1964). *Hydraulic properties of porous media*. Colorado State University Hydrology paper No. 3, March.
- Burdine, N.T. (1953). “Relative permeability

- calculations from pore size distribution data." *Trans. AIME*. Vol. 198, pp. 71~78.
- Corey, A.T. (1954). "The interrelation between gas and oil relative permeabilities." *Producer's Monthly*, Vol. XIX, No.1, pp. 38~44.
- Fourer, M., and Bories, S. (1993). "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.
- Han, I.Y., Seo, I.W., Chung, I.M., and Lee, J.E. (2001). "An Abrupt Drawdown Observed in Sandstone-Shale Interbedded Layers Surrounding An Underground LPG Cavern." *Journal of Hydrologic Engineering, American Society of Civil Engineering*. (in press)
- 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).
- Hyprotech Ltd. (1998). *HYSYSPLANT* Ver. 2.0.
- Louis, C. (1974). "Introduction of hydraulics of rock." *Bull. Rock Geol. Min. Ser. 2, Sec 3, No. 4*.
- Muallem, Y. (1976). "A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media." *Water Resources Research*, Vol. 12, pp. 513~522.
- Merrill, L.S. (1975). Two phase flow in fractures. Ph. D. dissertation. Univ. of Denver, Denver, Colo.
- Persoff, P., and Pruess, K. (1995). "Two phase flow visualization and relative permeability measurement in natural rough-walled rock fractures." *Water Resources Research*, Vol 31, No. 5, pp. 1175~1186.
- Pirson, S. J. (1958). *Oil reservoir engineering. McGraw Hill. New York*.
- Pruess, K., and Tsang, Y.W. (1990). "On Two-Phase Relative Permeability and Capillary Pressure Rough-Walled Rock Fracture." *Water Resource Research*, Vol. 26, No. 9. pp. 1915~1926.
- Pyrak-Nolte, L.J., Helgeson, D., Haley, G.M. and Morris, J.W. (1992). "Immiscible fluid flow in a fracture." *Proceedings of the 33rd U.S. Rock Mechanics Symposium*, Balkema. Rotterdam. Netherlands, pp. 571~578.
- Romm, E.S. (1966). *Fluid Flow in Fractured Rocks*. Nedra Publishing House, Moscow, Translated from Russian by W.R. Blake.
- Schrauf, T.W. and Evans, D.D. (1986). "Laboratory studies of gas flow through a single natural fracture." *Water Resource Research*, Vol. 29, No. 11, Nov. pp. 3699~3708.
- van Genuchten, M.T. (1980). "A closed Form Equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils." *Sci. Soc. Am. J.* 44, pp. 892-898.
- Wyllie, M.R.J. (1962). "Relative permeability, in Petroleum Production handbook." *Reservoir engineering, Soc. of Pet. Eng. Richardson, Texas*, Vol 2, pp. 1~14.

(논문번호:01-037/접수:2001.04.27/심사완료:2001.07.06)