지하저장공동 주변 불연속 암반에서의 가스-물 천이유동해석을 위한 개별균열 유동모델의 개발 및 응용

Development and Its Application of a Discrete Fracture Flow Model for the Analysis of Gas-Water Transient Flow in Fractured Rock Masses Around Storage Cavern

나승훈[1], Seung-Hoon Ra, 성원모[2], Won-Mo Sung

1) LG건설 기술연구소 연구개발팀 선임연구원, Senior Research Engineer, Research & development team, LG Construction Technology Institute.
2) 한양대학교 공과대학 자원공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Mineral & Petroleum Eng., Hanyang Univ.

Synopsis : The fluid generally flows through fractures in crystalline rocks where most of underground storage facilities are constructed because of their low hydraulic conductivities. The fractured rock is better to be conceptualized with a discrete fracture concept, rather continuum approach. In the aspect of fluid flow in underground, the simultaneous flow of groundwater and gas should be considered in the cases of generation and leakage of gas in nuclear waste disposal facilities, air sparging process and soil vapor extraction for eliminating contaminants in soil or rock pore, and pneumatic fracturing for the improvement of permeability of rock mass. For the purpose of appropriate analysis of groundwater-gas flow, this study presents an unsteady-state multi-phase FEM fracture network simulator. Numerical simulation has been also conducted to investigate the hydraulic head distribution and air tightness around Ulsan LPG storage cavern. The recorded hydraulic head at the observation well Y was -5 to -10 m. From the results obtained by the developed model, it shows that the discrete fracture model yielded hydraulic head of -10 m, whereas great discrepancy with the field data was observed in the case of equivalent continuum modeling. The air tightness of individual fractures around cavern was examined according to two different operating pressures and as a result, only several numbers of fractures neighboring the cavern did not satisfy the criteria of air tightness at 882 kPa of cavern pressure. In the meantime, when operating pressure is 710.5 kPa, the most areas did not satisfy air tightness criteria. Finally, in the case of gas leaking from cavern to the surrounding rocks, the resulted hydraulic head and flowing pattern was changed and, therefore, gas was leaked out from the cavern ceiling and groundwater was flowed into the cavern through the walls.

Key words: discrete fracture network, gas-water transient flow, storage cavern, air tightness, gas leaking

1. 서론

지하에 방사성 폐기물이나 유류 등을 저장하는 방식은 지하암반이 단열성, 방사능 차단성, 방폭성, 기밀성 등이 뛰어나고 지상공간과도 동시에 개발할 수 있다는 장점 때문에 지상저장 방식에 비해 선호되어왔다. 이러한 시설의 저장방식은 온도와 압력에 따라 상압저온 방식과 상온고압 저장방식으로 구분된다. 상압저온식은 온도를 충분히 낮추어 주므로서 가스의 증기압을 낮추어 비교적 천부에 저장하는 방식이고, 상온고압식은 심부에 저장하여 가스의 증기압보다 더 높은 지하수압을 이용하여 상온에

저장하는 방식이다. 후자의 방법으로 대규모의 LPG 또는 LNG를 저장할 때 수력학적 저장원리에 의해 지하수위를 일정하게 하여 인위적으로 수압을 유지시켜 주는 수장막 기법이 가장 흔히 적용되는 방법이다(Söder, 1994).

최근까지 수행되어 왔던 지하의 암반 내에서 지하수 유동해석은 암반을 연속체 개념으로 해석하는 방법, 이원공극균열계 개념을 이용하는 방법 및 개별분리균열망 개념을 도입하는 방법 등으로 수행되어 왔다. 대부분의 지하저장시설이 건설되는 신선암의 경우 수리전도도는 매우 낮고 유체는 절리를 통해 유동하기 때문에 절리를 개별적으로 분석하는 방법이 타당하다. Sweden의 Stripa test에서는 현장시험을 통해 암반에서의 유체흐름은 공간적으로 매우 불균등하며 공동내 전체 유입량의 90 % 이상이 수 개의 주요 균열로 침투됨이 밝혀졌다(Olsson, 1992). 개별분리균열망 개념을 이용하는 경우 균열의 밀도, 방향성, 길이, 균열간극의 크기, 균열면의 거칠기 등의 기초자료를 통계처리 하는 과정이 필수적으로 요구된다.

지하암반내의 유체유동에 있어서도 천부에 설치된 중저준위 핵폐기물 시설에서는 구조물 부식과 생화학적 작용으로 인한 가스생성과 이의 누출, 토양이나 암석 공극내의 오염물질을 제거하기 위한 air sparging process, soil vapor extraction, 암반의 국부적인 투수성 개선을 위한 pneumatic fracturing 등의 해석을 위해서 지층수와 가스의 동시 흐름을 고려해야 한다(Unger 등, 1995; Neretnieks 등, 1985). 이때 물과 가스의 상대유체투과도는 2상 유체 흐름거동에 가장 큰 영향을 미치는 요인으로서 개별분리균열망에서 물과 가스의 상대유체투과도는 포화도 뿐만 아니라 균열간극의 크기와 균열의 공간적 분포형태에 좌우된다(Pruess and Tsang, 1990).

이와 같은 지하유체 흐름의 적절한 해석을 위해서 본 연구에서는 물과 가스의 개별분리균열망내 동시흐름을 고려한 비정상 fracture network FEM 해석모델을 개발하였으며 이를 이미 기존의 상업용 모델과 검증된 3-phase, 3차원 FDM 모델과 비교 분석하였다. 여기서 개발된 모델을 울산 LPG 비축기지 주변의 수리역학적 거동을 분석하기 위하여 적용하였다.

2. Discrete Fracture에서의 2상 천이유동 모델의 개발

지하암반에서의 2상 유동을 해석하기 위한 지배방정식은 각 상의 확산방정식을 모세관압에 의해 결합시켜 구성한다. 식(1)은 다공성 매질에서 물과 가스 2상의 유동방정식이다.

$$A\frac{\partial p_w}{\partial t} - \nabla[Bp_w - Cp_w - D]\triangle - Q - E = 0 \qquad (1)$$

$$A = \phi V_b\left(\frac{B_g S_w}{B_w^2}\frac{\partial R_{sw}}{\partial p_w} - \frac{S_w}{B_w^2}\frac{\partial B_w}{\partial p_w} - \frac{S_g}{B_w B_g}\frac{\partial B_g}{\partial p_g}\right)$$

$$B = \left(\frac{B_g}{B_w}\right)\frac{aKK_{rg}}{\mu_g B_g} + \frac{aKK_{rw}}{\mu_w B_w}$$

$$C = \left(\frac{B_g}{B_w}\right)\frac{aKK_{rg}}{\mu_g B_g} g\frac{M}{zRT}\nabla d$$

$$D = \left[\left(\frac{B_g}{B_w}\right)\frac{aKK_{rg}}{\mu_g B_g} g\frac{M}{zRT}\nabla d\right]p_{cgw} + \frac{aKK_{rw}}{\mu_w B_w}\rho_w g\nabla d - \left(\frac{B_g}{B_w}\right)\frac{aKK_{rg}}{\mu_g B_g}\nabla p_{cgw}$$

$$Q = \frac{B_g}{B_w}(R_{sw}q_w + q_g) + q_w$$

$$E = \phi V_b\frac{S_g}{B_w B_g}\frac{\partial B_g}{\partial p_g}\frac{\partial p_{cgw}}{\partial t}$$

여기서 첨자 g는 가스를 의미하며, 첨자 w는 물을 의미한다. 기호 a는 유동단면적, K는 절대유체투과도, K_r은 상대유체투과도, μ는 점성도, B는 formation volume factor, Φ는 포텐셜, q는 유입 및 유출량, ϕ는 공극율, S는 포화도, R_{sw}는 물에서의 가스용해도를 나타낸다. 또한 p는 압력, p_{cgw}는 가스와 물간의 모세관압, M은 가스의 분자량, z는 가스의 압축지수, R은 기체상수, T는 절대온도, g는 중력가속도, d는 심도를 나타낸다. 식(1)로부터 FEM Galerkin's method를 이용하여 구한 최종가중잔차방정식은 식(2)와 같다.

$$A^K \frac{\triangle p_w^J}{\triangle t} \int_R \Psi^K \Psi^J \Psi^I \, dR + \triangle \Big[B^K p_w^J \int_R \Psi^K \nabla \Psi^J \nabla \Psi^I \, dR - C^K p_w^J \int_R \Psi^K \Psi^J \nabla \Psi^I \, dR - D^K \int_R \Psi^K \nabla \Psi^I \, dR \Big] - Q^K \int_R \Psi^K \Psi^I \, dR - E^K \int_R \Psi^K \Psi^I \, dR = 0 \quad (2)$$

식(2)로부터 임의의 N개 요소에 대하여 유한요소방정식을 산출한 후 FEM의 중첩이론에 의해 합성하면 다음과 같은 Matrix 형태의 전체방정식을 얻을 수 있다.

$$[A]_{N\times N} \{p\}_{N\times 1} = \{B\}_{N\times 1} \quad (3)$$

여기서 [A]는 p_w의 계수행렬이며 {B}는 기지의 상수항을 나타내는 벡터이다.

3. 모델의 검증

개발된 모델의 타당성을 검증하기 위해 이미 발표된 논문(박용찬, 1995)에서 검증된 FDM 모델(HYBOS)과 비교하였다. 이를 위해 Table 1의 자료를 이용하여 수평 단일균열에서 물과 메탄가스의 2상 흐름을 해석하였다. 모델수행 결과 메탄가스가 인입되는 cell에서 시간에 따른 압력 및 포화도 변화는 Fig. 1에 나타난 바와 같다. 총 86,400 sec에 걸쳐 공극 부피 3 m^3인 균열로 유입되는 가스의 총량은 8.64 m^3이다. 이로 인해 가스가 인입되는 cell의 경우 초기압 20.0 MPa로 부터 본 모델의 경우 0.404 MPa, HYBOS의 경우 0.412 MPa만큼 상승하였다. 두 값의 상대오차는 약 1.9 %로서 두 모델의 결과가 양호한 일치를 보이고 있음을 알 수 있다. 또한 물의 포화도 역시 86,400 sec 경과후 본 모델이 0.673, HYBOS가 0.660으로 나타나 비교적 양호한 일치를 보였다.

4. 울산 LPG 저장공동 수장막 체계의 기밀성 분석

개발된 모델을 이용하여 울산 LPG 저장공동 주위 관심영역에 대한 수두분포와 기밀성을 평가하였다. 해석대상 영역은 울산에 있는 LPG 저장공동 북부에 위치하고 있으며 Fig. 2에서 보는 바와 같은 관측공 Y와 Y'를 포함하는 A-A'의 2차원 평면이다. 해석영역 A-A'의 수직단면도는 Fig. 3과 같다. 저장공동은 심도 125에서 140 m에 위치하며 공동을 중심으로 50 m 떨어진 공동상부와 측면부에 882 kPa의 정수압을 유지시켜 주는 수벽공들이 설치되어 있다. 공동주위에는 수장막 체계의 안정성 여부를 모니터링하기 위한 관측공 Y와 Y'가 설치되어 있다. 특히 관측공 Y는 저장공동과 28 m의 이격거리를 두고 설치되어 있으며 표고 -115.8 m와 -140.1 m 사이 구간의 지하수두가 측정되었다. 관측공 Y는 1995년 10월에 수두를 기록하기 시작한 이래 비록 LPG의 입출하에 따라 약간의 변동은 있었으나 1997년 12월까지 -5에서 -10 m의 수두를 보이고 있다.

저장공동 주위에서 AQUA3D 모델(Vatnaskill consult engineers, 1990)을 이용하여 등방 균질 연속체 개념의 수치모델링을 수행하였다. 해석영역은 등가의 물성을 가지는 등방연속체로서 상하로 표고 0 m에서 -230 m, 저장공동을 중심으로 좌우 150 m씩 300 m의 구역으로 설정하였다. 외부경계조건으로 해

석영역의 상부경계조건은 0 kPa로 유지되는 일정수두조건, 하부와 좌우측 경계조건으로 비유동경계를 설정하였다. 수벽공에서는 각 위치별로 일정 정수압이 유지되는 일정수두조건을 설정하였는데, 표고 -90 m에 위치한 수벽공의 경우 882 kPa의 정수압으로 유지된다. 내부경계조건으로 저장공동에서는 평균운영압을 기준으로 -53.38 m (정수압 702 kPa)의 일정수두조건으로 설정하였다. 연속체 개념 모델링 결과, 관측공 Y의 수두는 -20.57 m로 산정되었다(Fig. 4). 이 수치는 현장 실측치와는 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 현장의 암반이 비교적 치밀하여 수리유동성이 낮은 반면 균열이 발달되어 있으므로 개별균열망 해석을 다음 절에서 시도하였다.

4.1 균열망의 구성과 해석영역 설정

저장공동 주위의 불연속 암반 시스템내 유체유동모델링을 위해 균열망을 구성하였다. 균열망 구성에 사용된 균열특성(방향성, 크기, 밀도 등)은 저장 공동 시공 중 작성된 균열조사 자료(SK건설연구소, 1994)를 활용하였다. 균열특성들은 추계론적 모형기법을 사용하여 분석하였으며, 분석된 균열특성을 토대로 해석영역내 균열망을 구성하였다. 균열특성 자료들은 주로 tunnel mapping 기술에 의해 얻어졌다. 균열군은 4개군으로 나뉘며, 균열의 방향성은 Fisher 분포, 균열의 크기분포는 로그정상 분포로 가정하였으며, 균열의 밀도는 단위체적당 균열의 면적(P_{32})으로 정의하였다. 수집된 균열특성 자료를 정리하면 Table 2와 같다.

개별균열망 해석을 위해 본 연구에서는 저장공동으로부터 상부와 좌우로 50 m 떨어진 지점에 수벽공들이 설치되어 있으므로 이를 기준으로 일정수두 경계조건으로 설정하였다. 하부경계는 Fig. 4의 연속체개념 해석의 결과에 근거하여 저장공동 하단부의 하부 10 m 지점을 비유동경계의 하부경계조건으로 설정하였다. 이상과 같이 개별균열망 해석을 시행할 해석영역은 Fig. 5와 같이 저장공동을 중심으로 좌우 50 m씩 100 m, 상하로 60 m에 이르는 영역이다. 이 영역의 경계조건은 상부와 좌우측은 일정수두 경계로 하부는 비유동경계로 하였으며, 내부경계조건으로는 연속체개념 해석 시와 마찬가지로 -53.38 m의 일정수두 경계조건으로 설정하였다. Table 2에 정리된 균열특성 자료를 이용하여 이 영역에 FracMan 모델(Golder associates, 1994)을 이용하여 균열망을 형성시켰다.

4.2 저장공동 주위 수두분포 해석

균열망은 추계론적 확률이론에 따라 형성되므로 매번의 시행에 따라 균열망 체계가 달라지며 이에 따라 관측공 Y의 수두가 달리 산정될 수 있으므로 같은 자료를 이용하여 균열망을 여러번 발생시켜 평균적인 수두분포 양상을 파악하였다. 모델링 결과에서 나타난 대표적인 정상상태 수두분포와 균열망 형상은 Fig. 6과 같다. Fig. 6의 (B)에서 실선은 수직수리경사가 1.0 이상인 균열이며 점선은 수직수리경사가 1.0 미만인 균열을 나타낸다. 관측공 Y의 지하수두는 -10 m로 계산되어 연속체개념 모델링 결과와 달리 현장실측치와 거의 유사하게 나타남을 알 수 있다. 연속체개념 모델링 결과와 달리 계산되는 이유는 다음과 같이 분석된다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 균열망 체계를 살펴보면 해석영역은 수평방향 균열에 비해 수직방향 균열이 훨씬 많음을 알 수 있다. 균열망 유동에서 합류현상은 압력강하를 완만하게 하며 분기현상은 압력강하를 급격하게 한다. 이것에 기초하여 볼 때, 모든 균열에서 지하수는 저장공동 방향으로 유동하려는 현상때문에 하나의 수평방향 균열은 많은 수의 수직방향 균열과 만나 합류현상을 일으키고 이에 의해 압력이 완만히 강하하다가 공동근처에서 급격히 하락한다. 이에 반해 수직방향 균열은 합류되는 수평방향 균열의 수가 적으므로 공간에 따른 압력강하량이 거의 일정하다. 이 때문에 관측공 Y의 위치에서 지하수두가 단순한 등방연속체 개념 모델링 결과보다 높게 산정된 것으로 분석된다.

4.3 저장공동 운영압 변화에 따른 기밀성 분석

저장공동 상부에 위치한 수벽공의 압력은 882 kPa로서 이 때 공동의 운영압에 의해 공동 상부와 수벽공 사이의 수직수리경사가 결정되며 이에 따라 저장공동 주변의 지하수 유동과 압력분포가 변화된다. 저장공동 운영압에 따라 변화하는 수직수리경사에 의한 수두분포 양상과 기밀성 유지여부를 분석하였다. 수직수리경사가 1.0인 경우 공동 주변의 수리적 안정성은 Fig. 7과 같다. 이 경우 공동의 최근접 균열에서도 기밀성 조건을 충족시키지 못하는 균열이 발견되며 상부경계쪽은 거의 모든 수직방향 균열이

기밀성 조건을 충족시키지 못한다. 수직수리경사가 0.5인 경우 저장공동 상부와 수벽공 사이의 모든 수직방향 균열은 기밀성 조건을 충족시키지 못하고 일부의 수평방향 균열만 기밀성 조건을 만족시켜 사실상 수장막 체계는 그 기능을 수행하지 못하는 상태가 된다(Fig. 8).

4.4 가스누출시 압력거동과 유체유동에 관한 정성적 분석

공동내 압력 증가로 가스가 공동에서 암반의 균열로 누출되는 경우에 대해 압력거동과 유체유동을 고찰하였다. 정량적 분석을 위해서는 절대투과도, 가스-물 2상 상대투과도 등의 자료가 필요하나 신뢰도 있는 자료가 없기 때문에 이들 자료를 가정하여 단지 정성적 경향 분석만을 시행하였다. 절대투과도는 간극의 크기를 이용하여 산정하였다. 균열에서 상대투과도는 수포화도와 선형비례한다는 이론(Rossen and Kumar, 1992)에 근거하여 가스와 물의 상대투과도를 가정하였다. 초기조건으로는 전 해석영역의 수두를 0 m로, 수포화도를 1.0으로 설정하였다. 외부경계조건은 앞 절과 같이 상부와 좌우측은 일정수두 경계조건으로, 하부는 비유동 경계조건으로 설정하였다. 저장공동 압력은 공동 내 가스가 암반균열로 누출되는 경우를 묘사하기 위해 1226 kPa로 일정하게 유지되는 것으로 설정하였다.

해석결과 전체 시스템의 정상상태 수두분포는 Fig. 9와 같다. Fig. 9의 Node 1과 Node 2는 가장 수두변화가 심한 대표적인 두 지점으로서 이 위치에서 시간에 따른 수두의 변화양상은 Fig. 10에 나타난 바와 같으며 본 시스템의 경우에는 불과 수십 초 이내의 짧은 시간 동안에 정상상태에 도달하는 것을 알 수 있다. 수두분포는 Fig. 9와 같이 공동내 압력증가로 공동천장부에서는 주위 암반보다 높고 공동 좌우 측면부에서는 주위 암반보다 낮게 형성됨을 알 수 있다. 이로 인해 가스는 공동 천장부를 통해 균열로 누출되며 공동 벽면에서는 계속 지하수가 공동으로 유입된다. 정성적 경향 분석의 관점에서, 공동천장부로부터 누출된 가스는 해석영역에 주로 발달한 수직방향 균열을 통해 상부로 이동하고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

대부분의 대규모 지하저장 및 처리시설은 결정질암의 심부에 건설되므로 저장공동 주위 수리적 거동양상을 모사하기 위해서는 지하매질의 특성을 가장 잘 대표하는 개별분리 균열망 해석이 필요하다. 또한 균열망에서 물과 가스의 동시 유동을 고려해야할 경우도 있다. 본 연구에서는 개별분리 균열망에서 물과 가스 2상 유체의 비정상상태 유동해석을 위한 수치전산모델을 구축하였으며, 모의된 자료를 이용하여 저장공동 주변의 지하수 유동해석에 개발된 모델을 적용하였다.

1. 모델의 타당성 검증을 위해 3차원, 3-phase FDM 모델(HYBOS)과 비교하였다. 단일 균열내부로 일정한 양의 가스가 인입될 경우에 대해 압력과 포화도의 변화를 비교한 결과 양호한 일치를 보였다.
2. 울산 LPG 저장기지에 위치한 관측공 Y의 현장 관측수두는 -5에서 -10 m로서, 균열암반매질에 대한 등방연속체개념 해석 결과에서는 좌우측 경계가 비유동 경계인 경우 정상상태 수두가 -20.57 m, 일정수두 경계인 경우 -19.26 m로 나타났으나, 개별균열망개념 해석 결과는 -10 m로 실측치와 보다 근접하게 산정되었다. 본 해석영역에는 수직방향 균열이 수평방향 균열보다 훨씬 많이 분포하기 때문에 수평균열의 경우 합류되는 지점이 많이 존재하여 유동의 합류현상이 발생한다. 이 합류의 효과로 관측공 Y의 위치에서 개별균열망 모델링에 의한 지하수두는 전체 해석영역에 등가의 물성을 부여하는 등방연속체개념 해석 결과보다 높게 계산되고 현장 실측치와 보다 근접한 결과가 산정된 것으로 분석된다.
3. 저장공동 운영압의 변화에 따른 개개 균열의 기밀성 분석 결과, 본 연구에서 시행한 시스템에서는 공동의 운영압이 높아질수록 공동과 수벽공 사이의 일부 균열에서 기밀성 조건이 충족되지 못한 것으로 나타나므로 수장막 체계의 안정성을 위협함을 알 수 있었다.
4. 저장공동 내 압력 증가로 가스가 공동에서 암반의 균열로 누출되는 경우에 대한 가스와 물의 유동모델링 결과에서는 주변암반보다 수두가 더 높은 공동 상부로부터 가스가 유출되고 공동 측면부를 통해서는 지하수가 계속 유입됨을 알 수 있었다.

참고문헌

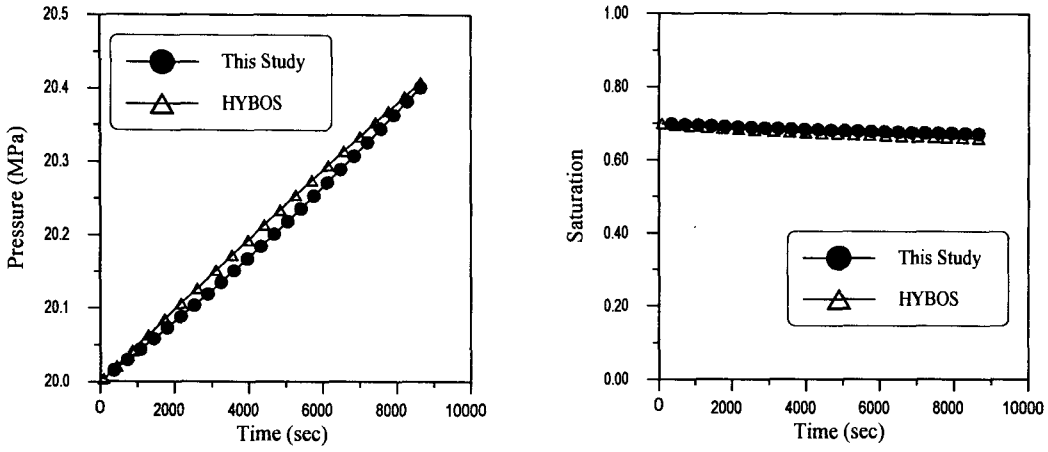
1. 박용찬, 1995, "지역적 격자 세분화 기법이 적용된 HYBOS 모델을 활용한 와다구조의 최적생산방안 도출에 관한 연구", 한양대학교 석사학위논문
2. SK건설연구소, 1994, "(주)유공가스 울산 LPG기지 기밀성평가 시스템 구축 1차 보고서", SK건설주식회사.
3. Golder Associates, 1994, FracMan: Discrete Fracture Data Analysis Geometric Modeling, Exploration Simulation, and Flow and Transport Modeling, Golder Associates Inc.
4. Neretnieks, I., Abelin, H., Birgersson, L., Moreno, L., Rasmuson, A. and Skagius, K., 1985, "Chemical Transport in Fractured Rock, Advances in Transport Phenomena," Paper presented at NATO advanced study institute, Newark, Del.
5. Olsson, O., 1992, "Site Characterization and Validation-Final Report", Stripa Project, Technical Report 92-22, Stripa Project, Uppsala, Sweden
6. Pruess, K. and Tsang, Y. W., 1990, "On Two-Phase Permeability and Capillary Pressure of Rough-Walled Rock Fracture," *Water Resource Research*, Vol. 26, No. 9, pp 1915-1926
7. Rossen, W. R. and Kumar, A. T. A., 1992, "Single- and Two-Phase Flow in Natural Fractures", paper SPE-24195 presented at the 67th Annual Technical Conference of the Society of Petroleum Engineers, Washington D. C., Oct. 4-7.
8. Söder, C. O., 1994, *"Water Curtains in Gas Storage"*, PH. D. Dissertation, Chalmers Univ. of Technology, Göteborg, Sweden
9. Unger, A. J. A., Sudicky, E. A. and Forsyth, P. A., 1995, "Mechanism Controlling Vacuum Extraction Coupled with Air Sparging for Remediation of Heterogeneous Formations Contaminated by Dense Nonaqueous Phase Liquid," *Water Resource Research*, Vol. 31, No. 8, pp 1931-1925.
10. Vatnaskill consulting engineers, 1990, AQUA3D: Ground Water Flow and Contaminant Transport Model, Vatnaskill consulting engineers.

Table 1. Input data for validation

Parameter	Value
Hydraulic Conductivity [m/sec]	7.5×10^{-5}
Gas Flux [m^3/sec]	1.0×10^{-4}
Initial Water Pressure [MPa]	20.0
Initial Water Saturation	0.7
Porosity	0.2
Temperature [K]	283.16

Table 2. Fracture data around storage cavern.

		Set 1	Set 2	Set 3	Set 4
Fracture orientation	Trend [deg.]	160.0	220.0	126.4	2.8
	Plunge [deg.]	20.0	82.1	70.6	81.7
	Fisher K	50.0	50.0	50.0	50.0
Fracture size	Equivalent radius [m]	19.8	18.8	17.9	17.5
	Standard deviation [m]	3.90	5.85	7.22	4.52
	Distribution type	Log-Normal	Log-Normal	Log-Normal	Log-Normal
Fracture intensity	P_{32} [area/vol.]	19.8	18.8	17.9	17.5
	Distribution type	Uniform	Uniform	Uniform	Uniform



(A) (B)

Fig. 1. Validation of the developed model on (A) pressure and (B) saturation variations with time.

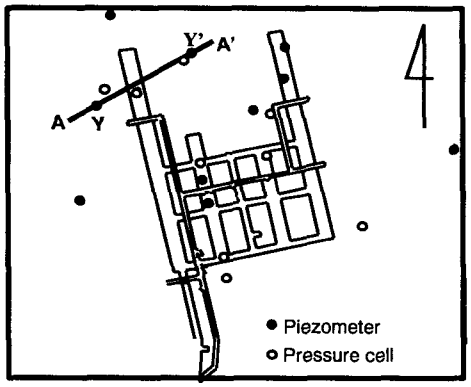


Fig. 2. Location of LPG storage cavern and observation well Y.

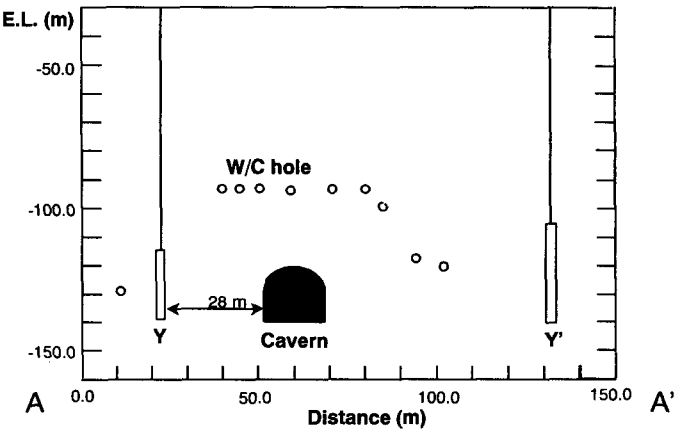


Fig. 3. Observation well Y and storage cavern in cross-section, AA'.

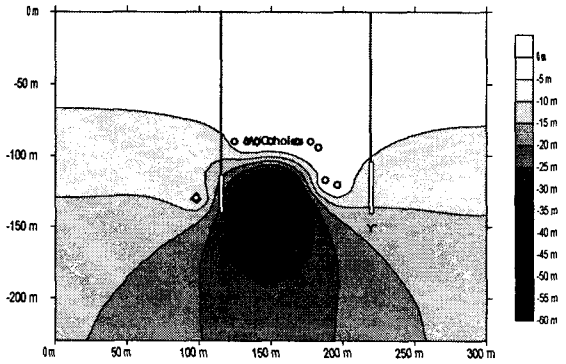


Fig. 4. Hydraulic head distribution by modeling of continuum concept

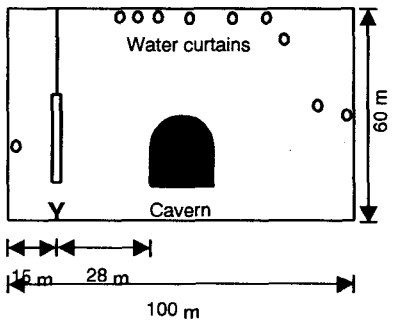
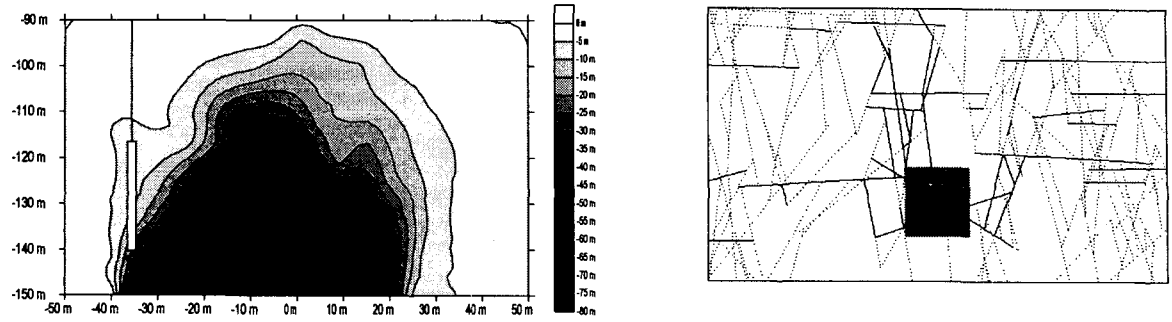


Fig. 5. The simulated system using discrete fracture flow concept.



(A) (B)

Fig. 6. Modeling results of discrete fracture concept (A) hydraulic head distribution (B) discrete fractures satisfying criterion of air tightness.

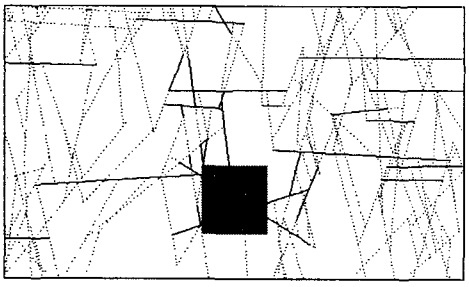


Fig. 7 Air tightness for I_v of modeling area of 1.0

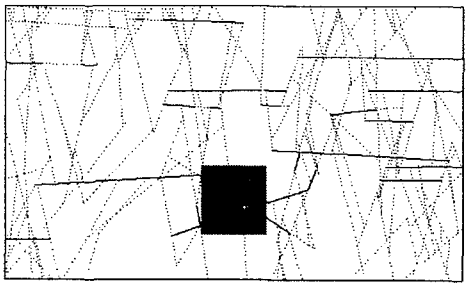


Fig. 8 Air tightness for I_v of modeling area of 0.5

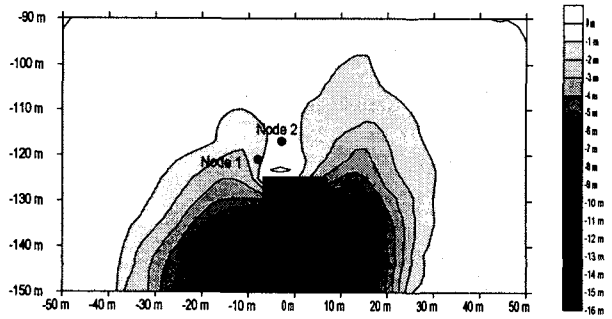


Fig. 9. Hydraulic head distribution in case of gas intrusion

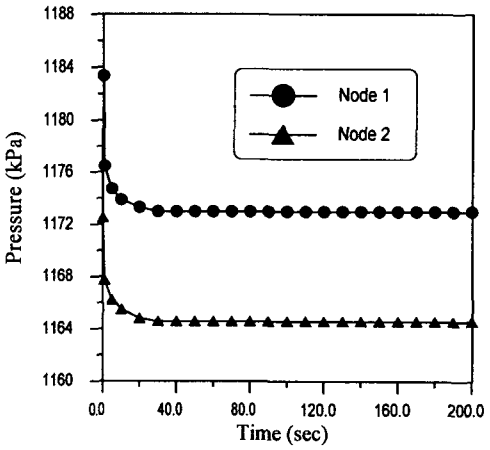


Fig. 10. Hydraulic head variations with time