

지하 LPG 저장공동의 기밀성평가를 위한  
분리열극개념의 지하수유동 및 용질이동 모형 모의기법 적용  
Application of A Discrete Fracture Flow and  
Mass Transport Simulation Technique Assessing  
Tightness Criteria for Underground LPG Storage Cavern

한 일 영 (Han, Il-Yeong)  
조 성 만 (Cho, Sung-Man)  
정 광 필 (Chung, Kwang-Pil)

선경건설(주) 기술연구소  
선경건설(주) 기술연구소  
(주) 유 공 가 스

요약/Abstract

열극암반내의 지하수유동 및 용질이동 해석을 위해서는 추계론적인(Stochastic) 3차원 불연속체 모형 (Discrete Fracture Model)이 요구된다. Monte Carlo 모의기법(Simulation Technique)에 의해 구성된 추계론적 불연속체모형을 지하 유류저장공동의 기밀성평가를 위한 지하수유동 및 용질이동 모의에 적용하였다. 불연속체모형 구성에 영향을 미치는 열극 특성요소는 방향성 및 크기로 분석되었으며, 구성된 모형(Model)에서의 지하수유동에 영향을 미치는 요소는 투수성 열극밀도로 분석되었다. Particle Tracking 기법을 사용한 불연속체모형의 용질이동 모의에서는 열극의 투수성에 의해 이동경로 및 이동속도에 많은 차이가 관찰되었다. 검증된 추계론적 불연속체모형은 지하 유류저장공동 기밀성평가에 적용이 가능성이 부분적으로 인정되었다.

Fluid flow studies of fractured rocks require three-dimensional modeling of the fracture system. The stochastic discrete fracture models constructed by Monte Carlo simulation technique were applied to the analysis of groundwater flow and mass transport in fractured rock for the assessment of tightness criteria of underground LPG storage cavern. The parameters that most affect the conceptual discrete fracture modeling proved either fracture orientation or size and on the fracture flow interpretation proved conductive fracture intensity. The fracture transmissivity played important role in solute transport in fractured rock simulated by particle tracking approach. It was partly recognized that the calibrated stochastic discrete fracture model can be used for the tightness criteria of underground LPG storage cavern.

## 서 론

열극암반내 지하수유동 및 용질이동을 연구하기 위해서는 3차원 불연속체모형이 요구된다. 그러나 현지암반을 그대로 모의하는 것은 불가능에 가까우므로 Monte Carlo 모의기법을 이용한 추계론적 모형이 동원될 수 있다. 추계론적 불연속체모형은 Monte Carlo 모의기법에 의해 현장자료가 가지는 특성을 모의 발생한다. 모의 발생된 특성이 현장자료의 통계학적 제특성에 부합되는가를 검사하는 과정을 거쳐 만족할만한 결과를 얻을때까지 모형을 개량하게 된다. 모형이 구성되면 지하수유동 및 용질이동의 지배방정식을 유도하여 해석시스템을 구성한 후 조건을 입력하여 출력값을 구하게 된다. 본 연구는 불연속체모형을 이용한 지하수유동 및 용질이동 모의 기법의 지하 유류저장공동 기밀성평가에의 적용성을 검증하고자 실시되었다. 불연속체모형 구성을 위한 열극특성들(방향성, 크기, 밀도, 수리특성 등)은 추계론적 Forward 모형화(Modeling)기법으로 분석하였으며 불연속체모형의 구성요소인 열극자료의 통제 처리기법에 따라 모형이 어떻게 구성되며, 구성된 모형에 의해 모의결과가 어떻게 달라지는지를 고찰하였고, 열극특성 중 지하수유동에 영향을 미치는 요소를 중점적으로 고찰하였으며, 또한 열극 투수성이 용질이동에 미치는 영향을 검토하기 위하여, 모형내에 오염원을 가상 설치하고 수리특성을 달리하는 투수성 Fault와 난투수성 Fault를 모의하여 Particle Tracking 기법을 사용한 용질(오염물)이동 모의를 실시하였다.

연속체모형의 수치모의에 사용된 프로그램은 지하수유동 및 오염물이동 해석용 2D FEM 프로그램인 AQUA<sup>EM</sup> (Vatnaskil Consulting Engineers, 1993)이며, 열극특성 분석과 불연속체모형의 지하수유동 및 오염물이동 수치모의에 사용된 프로그램은 Golder Associates Inc.가 개발한 FracMan/MAFIC (Dershowitz et al., 1994) 이다.

## 검증대상

### 지하 유류저장공동의 기밀성유지 조건

불연속체모형의 모의 대상은 울산시 용잠동에 위치한 (주) 유공가스 지하 LPG저장공동이다. 저장기지 주변의 지형은 낮은 구릉지 및 소규모 총적평야로 형성되어 있으며 남동부는 동해에 접해있다. 지질

은 중생대 백악기의 을산층(Siltstone과 Sandstone), 불국사화강암의 관입으로 접촉 열변질된 변성퇴적암(Hornfels), 분출/관입된 안산암 그리고 이들을 부정합으로 덮고있는 신생대 제4기의 총적층이다. 본 지역 주변에는 지구조적 활동으로 인한 대규모 단층대와 이와 관련된 많은 열극들이 발달되어 있다.

지하 EL. -119.0m(공동천단부)에 위치한 저장공동의 기밀성유지를 위해서는 저장공동 주변암반 및 천단부에 저장 Gas 압력에 상응하는 지하수압(Void Water Pressure)이 유지되어야 하며, 저장공동 운영 단계에서는 공동주변에 설치되어 있는 간극수압계에 의하여 아래의 기밀성유지 조건식을 만족하는지 검토하여 운영관리 계획 및 대책을 수립하게 된다(Fig. 1).

$$\Phi_{\text{Pressure Cell}} - \Phi_{\text{Stor}} \geq S$$

$\Phi_{\text{Pressure Cell}}$  : 간극수압계 수두

$\Phi_{\text{Stor}}$  : 최대운영압시 저장공동내의 수두

S : 수리 안전계수

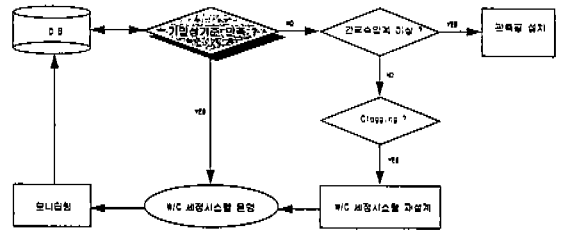


Fig. 1 Hydrogeological management process for storage cavern

## 기밀성평가

운영기지의 지하수 관측자료를 인용하면, 지하수위 및 지하수압은 강우량과 공동운영압에 직접적으로 영향을 받아 저장공동 기밀성평가지 중요한 해석요소가 되고 있다. 프로판공동 지역의 간극수압계 PPC8에서의 기밀성유지를 위한 최소수두는 -32.0m (운영압 6.5 bars, 수벽공 효율 -8.0m)로 설계되어 있으나 1993년 6월 이후, -45.0m~-55.0m의 낮은 값이 지속적으로 관찰되어 이에 대한 원인 규명이 요구되었다(Fig. 2). 이에대한 원인규명을 위하여, 먼저 연속체모형의 지하수유동 수치해석 모의를 통하여 이론적 해(수두분포)를 산출하고, PPC8

지점에 대한 YK17 현장 수압시험으로부터 수리전도도 및 정수압을 산출하여 이론적 해와 대비한 후, 항내조사와 YK17 현장조사 (Core/수압시험)에서 분석된 열극특성을 이용하여 불연속체모형을 구성하고,

지하수유동 및 용질이동 수치해석 모의를 수행하였다. 불연속체모형의 수치모의 결과는 연속체모형 수치모의에 의한 이론해 및 현장측정치와 재 비교하였다.

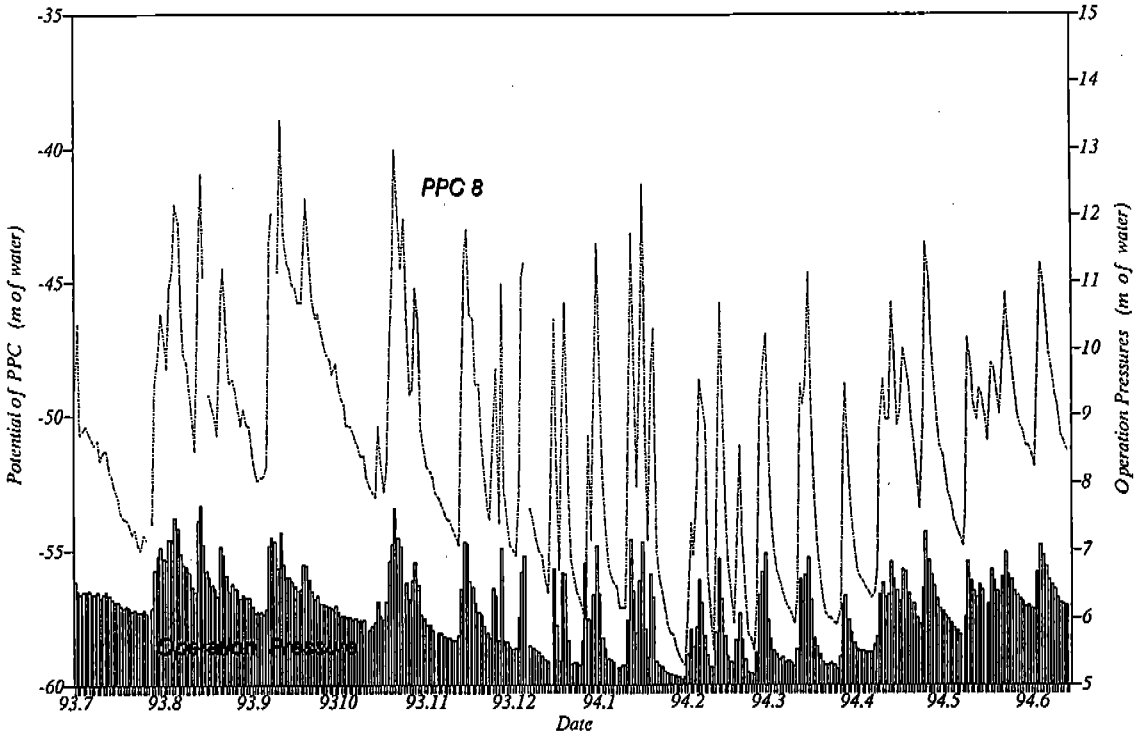


Fig. 2 Pressure variation of PPC8('93. 7~'94. 6)

### 연속체모형 모의

연속체모형의 지하수유동 수치모의를 위한 입력조건 및 해석결과는 Table 1, Fig. 3과 같다.

Table 1. Input Parameters and water balance analysis

구분	단위 Flow (m <sup>2</sup> /sec)	총연장 (m)	총 Flow (m <sup>3</sup> /day)	입력조건
유입	수벽터널	2.2e-7	731.3	13.8(18.2)
	수벽공	1.3e-7	7458.82	83.8(107.1)
	소계			97.6(125.3)
	Water table	1.29e-6	288	30.9(36.7)
	계			128.5(162.0)

공동유역	저장	FC-1	1.38e-6	271	32.4(41.3)	K=8.5e-9 m/sec Water Table 수두 35.0m 수벽공 효율성 5.0~10.0m
	배출	FC-2	7.90e-7	132	9.0(12.3)	
		C/T	3.46e-7	447	13.4(18.2)	
		FC-3	8.00e-7	152.5	10.5(14.3)	
		FC-4	1.38e-6	288	34.3(43.5)	
계				99.6(129.6)		
유입-유출				28.9(32.4)		

\*( ) : 공동운영압이 6.0 bars인 경우

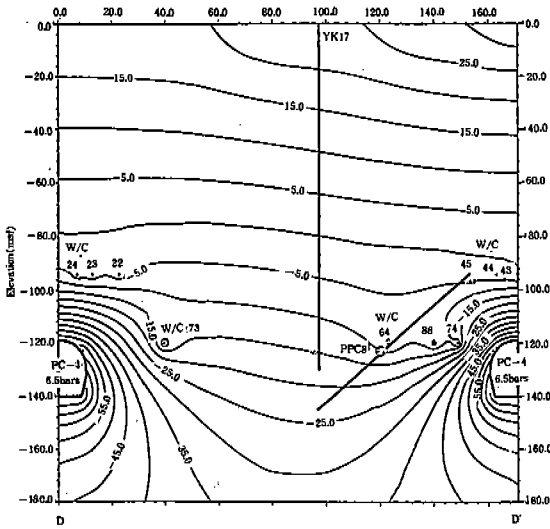


Fig. 3 Distribution of hydraulic potential around YK17 and PC43 cavern (Operation Pressure : 6.5 bars)

### 현장 시추조사

PPC8 지점 직상부에 조사공 (YK17)이 시추되었다. 채취된 암석 Core의 열극분석과 총 18구간의 수압시험을 통하여 수리전도도를 산출하였으며 정수압을 측정하였다(Fig. 11).

### 불연속체모형 모의

#### 열극특성 모의

모형 구성영역은 YK17에 인접한 프로판 저장공동 PC43과 수벽터널 일부를 포함한다(120m × 120m × 120m) (Fig. 4). 열극자료는 시공 중 작성된 향내 열극자료를 토대로 Scan Line Method를 사용하여 수집하였으며, 불연속체모형을 구성하는 열극특성들(방향성, 크기, 밀도, 투수량계수)은 추계론적 Forward 모형화기법을 사용하여 분석하였다.

수집된 자료에 대하여 동일 특성을 갖는 열극 군(Set)으로 분류하기 위한 모의를 실시하였다. 모의 작업은 각 군별 열극특성과 현장자료의 분포특성이 서로 일치할 때까지 반복시행(Iteration)하였다.

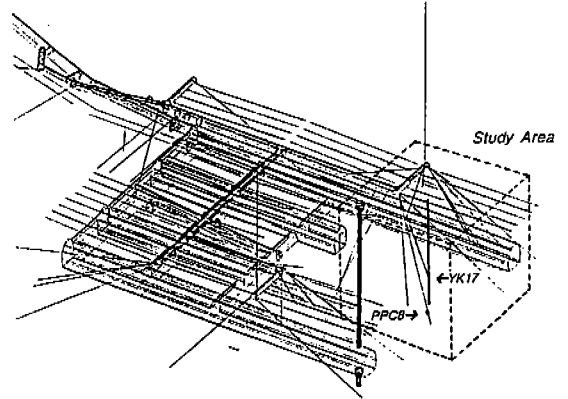


Fig. 4 Overview of propane storage cavern and study area

열극 방향성은 평균방향  $(\bar{\phi}, \bar{\theta})$ 에 대한 변위량  $(\phi', \theta')$ 의 확률밀도함수(Probability Density Function)로 정의되며, 확률밀도함수로부터 산출되는 분포방향  $(\phi, \theta)$ 은  $(\bar{\phi}, \bar{\theta})$ 와  $(\phi', \theta')$ 를 합성한 값이다(Fig. 5).

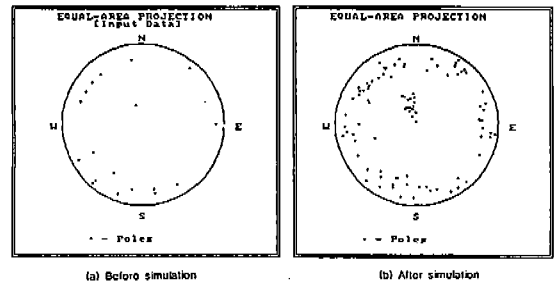


Fig. 5 Stereonet projection of fractures before and after simulation by using Bootstrap method (a) Before simulation (b) After simulation

열극 추적길이(Trace Length)는 추적면(Trace Plane)의 방향성 및 크기에 의해 좌우되며, 또한 자료 수집과정에서 Censoring, 절단(Truncation), 노두크기 등에 의한 오차가 발생하므로, 열극의 실제 크기와는 차이가 있다. 열극의 크기는 열극면의 형상을 고려한,  $A_f(A_f = \pi r_e^2)$ 와 같은 면적을 갖는 반경  $r_e$ (Equivalent Radius)로서 정의될 수 있다. 열극 크기의 값은 추계론적 Forward 모형화 과정을 거쳐 LogNormal 분포유형에 대한 확률밀도함수로

표시하고, 평균값과 표준편차로서 표현하였다(Table 2).

Table 2. Fracture size estimations

구 분	분포 유형	Field Data (m)		Final Fitted(m)		Simulation (m, 100개)		적 합 도	
		$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	K-S	$\chi^2$
열극 군 (모형A)	Set 1	14.5	3.26	14.6	3.88	10.0	2.0	0.413 0.339%	17.6 6.26%
	Set 2	13.6	7.17	12.3	6.71	15.0	6.0	0.24 20.0%	15.7 47.2%
	Set 3	78.6	3.71	9.04	3.19	7.0	2.0	0.187 75.4%	9.84 63.0%
	Set 4	12.2	6.10	12.8	5.79	11.0	6.0	0.197 51.3%	3.93 99.2%
	Set 5	18.1	4.98	18.6	5.2	10.0	2.0	0.206 54.0%	10.5 48.3%

\*  $\mu$  : 평균값,  $\sigma$  : 표준편차

열극 종식유형은 종식확률 PT(Probability of Termination)로 정의된다. PT는 열극과 열극이 교차하여 종식되는 확률이다. 열극의 밀도(Intensity)는 열극의 개수, 면적 및 부피의 상호관계에 따라 계산하였다(Table 3). 특히 투수성 열극(Conductive Fracture)의 밀도는 지하수유동 해석에 있어서 매우 중요하며, 투수성 열극빈도  $\lambda_c$ 와 Conversion 계수  $C_{31}$ 와의 관계식으로 표현된다(Table 4). 투수성 열극밀도는 다시 절단(Truncation) 기법을 사용하여 허용범위내 (10% 이내, W.Dershowitz, 1994)에서 지하수해석용 모형으로 단순화하였다(Table 5).

Table 3. Fracture intensity estimations (Area/Volume)

구 분	입력 열극 수	열극크기 (평균 반경, m)	열극총면적 산출		P <sub>2</sub> 밀도 산출		
			열극면적	총면적	면적 비율	Area/Volume	
열극 군 (모형A)	Set 1	23	10	293	6,739	1	0.06
	Set 2	25	15	669	16,725	2.48	0.1488
(모형A)	Set 3	15	7	153	2,295	0.34	0.0204
	Set 4	21	11	409	8,589	1.27	0.0762
	Set 5	18	10	286	5,202	0.78	0.0468
계	102						0.352

Table 4. Conductive fracture intensity estimations

구 분	$\lambda_c$ (개/m)	$P_{2c}$	$P_{10}$	$C_{31} = P_{3c}/P_{10}$	$P_{2c} = \lambda_c \cdot C_{31}$	비 고
모형C	0.4	0.352	0.325	1.083	0.433	$P_{10}=39$ 개/120m

Table 5. Truncated conductive fracture intensity estimations

모형구분	P <sub>2c</sub>	Truncation			Truncated P <sub>2c</sub>	분포유형
		열극 크기(m)	열극 투수량계수 (m <sup>2</sup> /sec)			
모형 T1	0.433	0~15	26.1%	1e-10~1.0	19.9%	0.257
T2	0.433	0~15	26.1%	1e-11~1.0	3.56%	0.309
T3	0.433	0~25	7.16%	1e-10~1.0	19.9%	0.316
T4	0.433	0~30	3.44%	1e-10~1.0	19.9%	0.336

열극의 틈은 지하수유동 계산에 필수요소이나 현장에서 측정되는 틈은 용력의 이완 등으로 실제와는 많은 차이가 있고, 크기 또한 일정치 않기 때문에 정량적 평가가 매우 어렵다. 본 모형에서는 열극의 수리특성 모의를 통하여 틈을 평가하였다. 열극의 틈(b)과 투수량계수(T)는  $T = [\rho g / \mu] [b^3 / 12] = [\rho g / 12 \mu] b^3$ 가 성립하며(Freeze & Cherry, 1979),  $\rho = 1000 \text{ g/m}^3$ ,  $g = 9.8 \text{ m}^2/\text{sec}$ ,  $\mu = 1.124 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 를 적용하면,  $b = 1.123 \times 10^{-2} T^{1/3}$ 의 관계가 성립한다.

열극의 수리특성 모의

암반 매질의 저류성이 낮고 열극의 투수성이 높은 암반의 경우, 지하수의 유동은 주로 열극을 따라서 이루어지므로 열극 각각의 수리특성 모의가 요구된다. 이를 위해 YK17의 Core 분석 및 현장 수압시험으로부터 투수성 열극의 발생빈도, 시험구간별 투수량계수의 분포유형  $f(T_i)$  및 모의 투수량계수  $f(T_{i,m})$ 를 이용한 Forward 모형화기법으로 각 열극에 해당하는 수리특성을 산출하였다(Table 6). 주어진 구간내 (수압시험 구간)에서 열극의 평균개수는 Poisson 분포계수  $n$ 으로 정의되며, 투수성 열극 개수  $n_i$ 는 Poisson 분포에 의해 정의되는 임의의 수가 된다. 투수성열극의 발생빈도 ( $f_c$ )는  $f_c = n/L_i$  ( $L_i$ : 시험구간의 길이)이며, LogNormal 분포하에서 열극의 투수량계수  $T_{i,m}$ 는 평균값  $\mu$   $\log T$ 와 표준편차  $\sigma$   $\log T$ 를 갖는다.

Table 6. Fracture Transmissivity simulation

공 변	분포 유형	$\lambda c$ (개/m)	Field Data (m <sup>2</sup> /sec)		Final Fitted (m <sup>2</sup> /sec)		Simulation (m <sup>2</sup> /sec, 100개)		적합도	
			$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	K-S	$\chi^2$
YK17	Log-Normal	0.4	6.12e-8	9.3e-8	9.06e-8	1.79e-7	1.07e-8	1.56e-7	0.18 79.2%	8.98 98.9%

\*  $\mu$  : 평균값,  $\sigma$  : 표준편차

모형의 구성 및 검증

모든 열극특성을 종합적으로 고려하여 구성된 여러모형은 저장공동 (PC43) 천단부와 동일지점에서 Trace 분석을 실시하여 현장자료와 비교하였으며 가장 유사한 모형을 선정하였다(모형 A) (Fig. 6). 모형 A에서 분석된 단위면적당 Trace 수는 0.0747개/m<sup>2</sup>(127개/1700m<sup>2</sup>), Trace 길이는 1.0176m<sup>-1</sup>(1730m/1700m<sup>2</sup>)로서 향내 열극자료의 단위면적당 Trace 수 0.0694개/m<sup>2</sup>(136개/1960m<sup>2</sup>), Trace 길이 0.93316 m<sup>-1</sup>(1829m/1960m<sup>2</sup>)와 비교하면 단위면적당 Trace 수 및 Trace 길이에 있어서 각각 7.0%, 8.5%의 오차율로 모형이 구성되었다. 모형 A는 다시 투수성 열극으로 고려된 모형으로 재구성하였

으며(모형 C), 최종적으로, 지하수유동 및 용질이동 수치모의시 컴퓨터 계산용량의 한계를 고려하여, 열극 크기와 투수량계수에 대한 Truncation 기법을 적용한 모형을 구성하여 해석에 이용하였다(모형 T1~T4) (Fig. 7). 각 모형을 구성하는 총 열극 수, 투수량계수, 저류계수 및 평균 열극 틈은 Table 7과 같다.

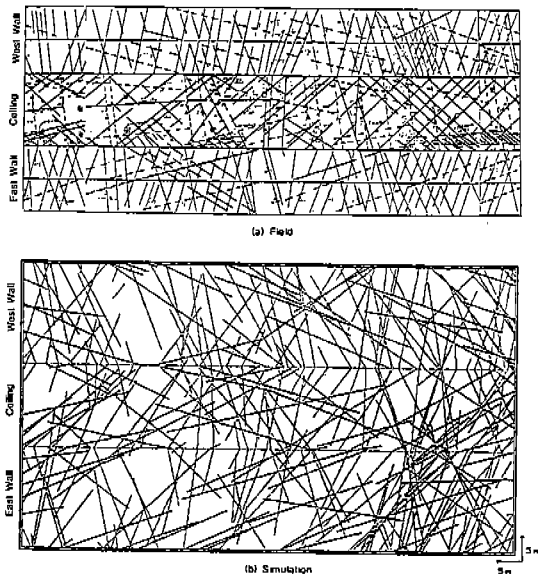


Fig. 6 Comparison of fracture trace distribution between field and simulation  
(a) Field (PC43) (b) Simulation (PC43+WC45+WC46 : Model A)

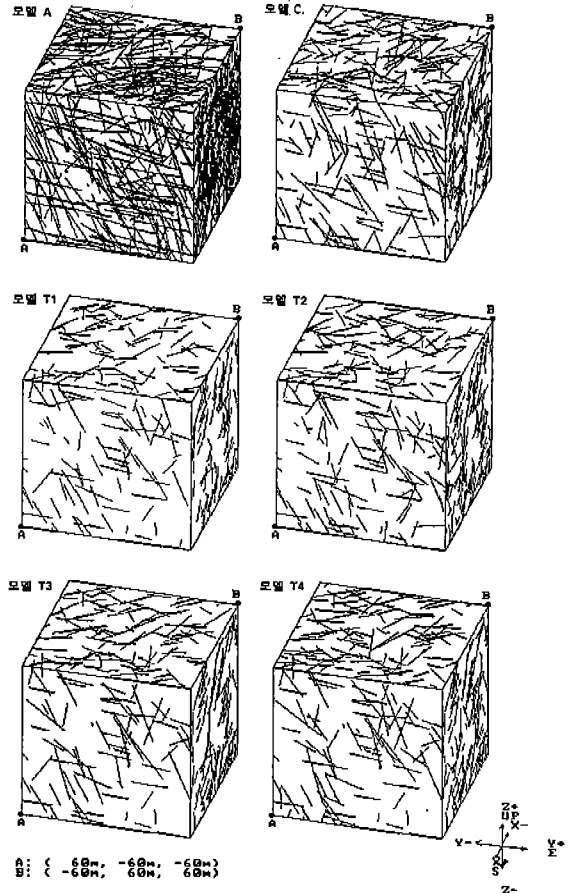


Fig. 7 Three-dimensional discrete fracture models (Model A, C, T1, T2, T3, T4)

지하 LPG 저장공동의 기밀성평가를 위한 분리열극개념의 지하수유동 및 용질이동 모형 모의기법 적용

Table 7. Fracture parameters in discrete fracture models

구분	모형분류					
	모형 A	투수성 열극 모형 모형 C	Truncated 모형			
			모형 T1	모형 T2	모형 T3	모형 T4
열극 수	1,612	1,932	1,601	1,915	1,548	1,585
열극 크기(m <sup>2</sup> )	378±414	388±432	278±156	280±160	353±291	367±334
투수량계수(m <sup>2</sup> /sec)	1.0e-8±5.8-8	1.1e-8±6.1e-8	1.2e-8±5.7e-8	9.8e-9±5.7e-8	1.1e-8±5.8e-8	1.2e-8±4.1e-8
저류계수	1.0e-3±4.2e-6	1.0e-3±5.4e-6	1.0e-3±4.2e-6	1.0e-3±5.4e-6	1.0e-3±3.9e-6	1.0e-3±4.1e-6
열극 틈(m)	1.0e-3±4.2e-6	1.0e-3±5.4e-6	1.0e-3±4.2e-6	1.0e-3±5.4e-6	1.0e-3±3.9e-6	1.0e-3±4.1e-6
열극 밀도	P <sub>32</sub>	0.352				
	P <sub>32C</sub>		0.433	0.258	0.310	0.317

지하수유동 및 용질이동 수치모의

구성된 모형을 대상으로 지하수유동(모형 T1~T4) 및 오염물이동(모형 T4) 수치모의를 실시하였으며, 모의를 위한 입력조건 및 경계조건은 연속체모형과 동일하게 설정하였다(Fig. 8, 9, 10).

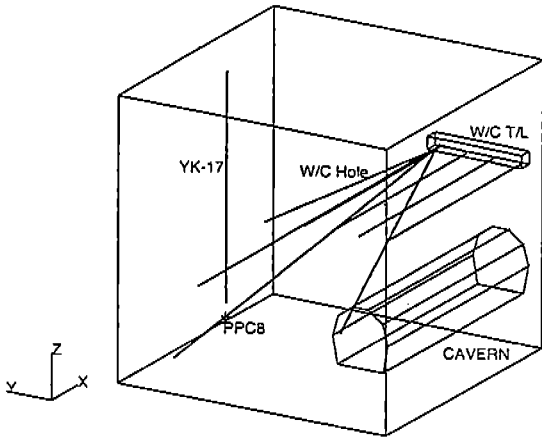


Fig. 8 Model T4 geometry of inner and outer boundary

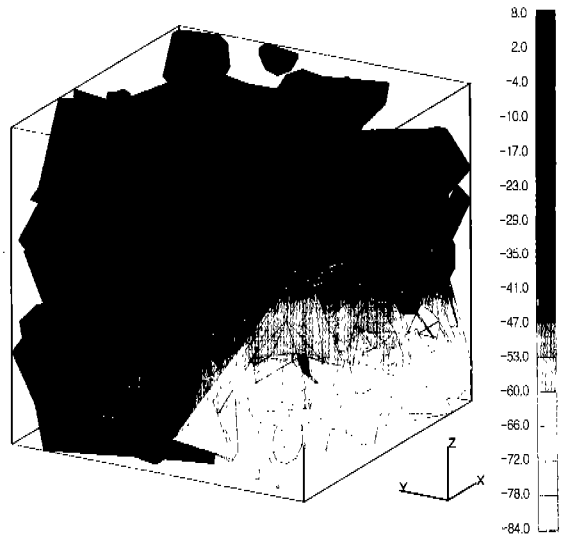


Fig. 9 Distribution of hydraulic potential of 3D discrete fracture model (Model T4)

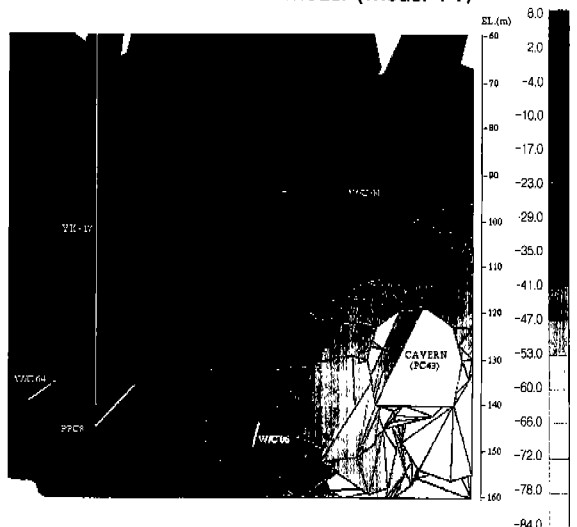


Fig. 10 2D cross-sectional hydraulic potential through the YK17 and PC43 cavern (Model T4)

**결과비교 - 연속체모형, 현장측정치, 불연속체모형**

연속체모형의 지하수유동 수치모의 결과, PPC8 구간의 수두는 -17.0m로 산출되었고, 프로판공동전체의 누수량은 약 100.0m<sup>3</sup>/day 이며, 이는 현장계측치와 상당히 일치하는 값으로서, 공동 주변압반의 전반적인 투수성에 이상이 없음을 지시해 주었다.

YK17 시추조사 결과, PPC8 구간의 시험측정치는 -40.0m로서 PPC8의 계측치 (-45.0~-55.0m)와 비교적 일치하였다. RQD는 85%, 투수계수는 5.0 × 10<sup>-9</sup>m/sec 으로서, 수리전도도 역시 전 구역에 걸쳐 비교적 균질하게 분포하는 것으로 해석되었다.

불연속체모형(모형 T4) 수치모의 결과, 수두분포 및 수리경사 양상은 YK17 시험측정치와 비교적 일치하고 있으며, PPC8 구간의 수두는 YK17 시험측정치 -40.0m 보다 +10.0~+20.0m 이상 높은 -12.0~-20.0m의 범위로 산출되었다(Fig. 11). 열극추적길이 30.0m 이하의 투수성 열극만을 고려했을 때 PC43의 누수량은 약 10.0m<sup>3</sup>/day이 산출되어 연

속체모형 및 현장계측치와 잘 일치하였다. 이때 적용된 투수량계수는 TlogNormal 분포하의 1.0 × 10<sup>-10</sup>m<sup>2</sup>/sec 이상의 값(Table 8)이며, 절단(Truncation) 기법을 쓰지않을 경우, 누수량 값의 증가를 기대할 수 있으며, 누수량 증가는 열극의 지하수유동로 역할의 한계값으로 정의되는 열극투수량계수의 Percolation Threshold 까지가 될 것이다. PPC8 상부구간에 오염원이 발생하면 난투수성 Fault의 경우는 주로 횡적 이동분포를 보이는데 반하여(Fig. 12) 투수성 Fault를 고려할 경우, 동일시간 내에서 오염물은 오염원 하부에 연결된 열극으로부터 주로 Fault 발달방향을 따라 이동하다가 PPC8에 도달하였다(Fig. 13).

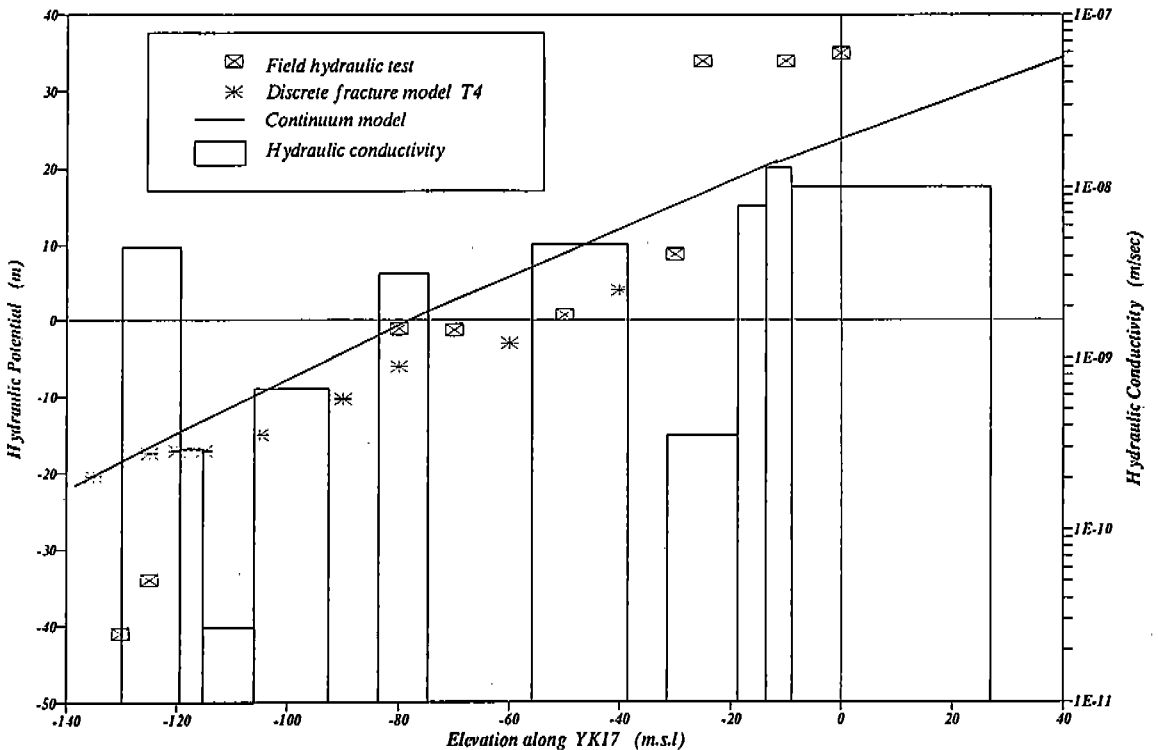


Fig. 11 Continuum model vs. discrete fracture model vs. hydraulic field (YK17) test



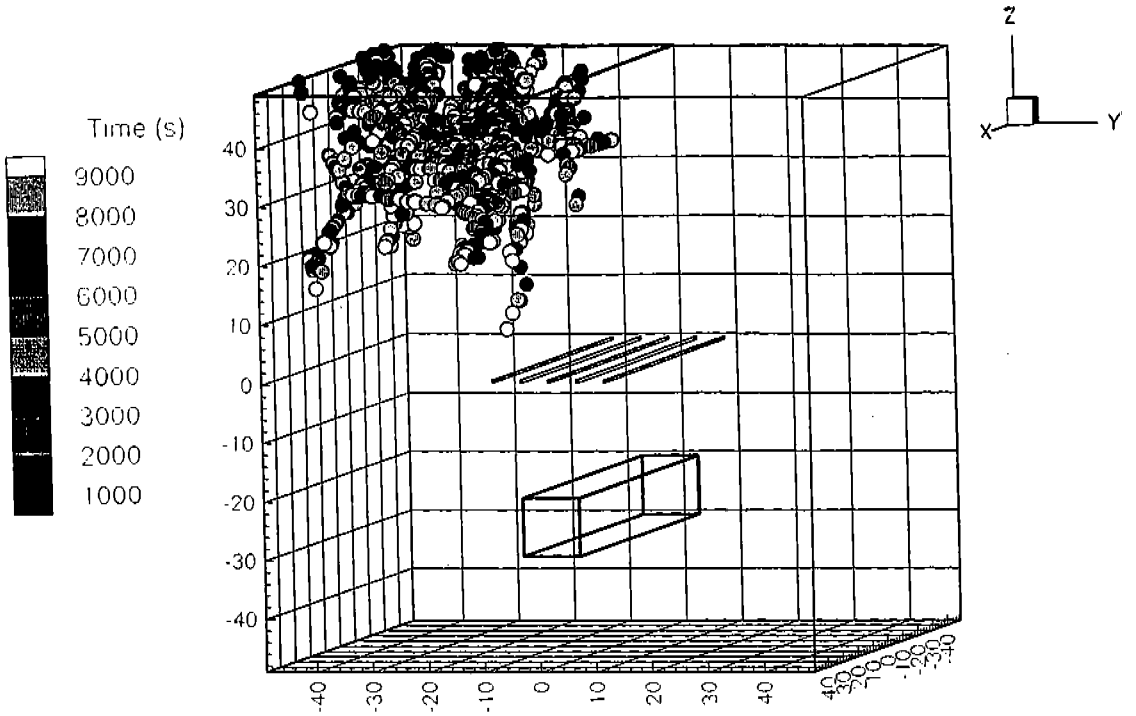


Fig. 12 Solute transport in fractured rock in which non-conductive (Transmissivity :  $1.0e-11m^2/sec$ ) fault is simulated

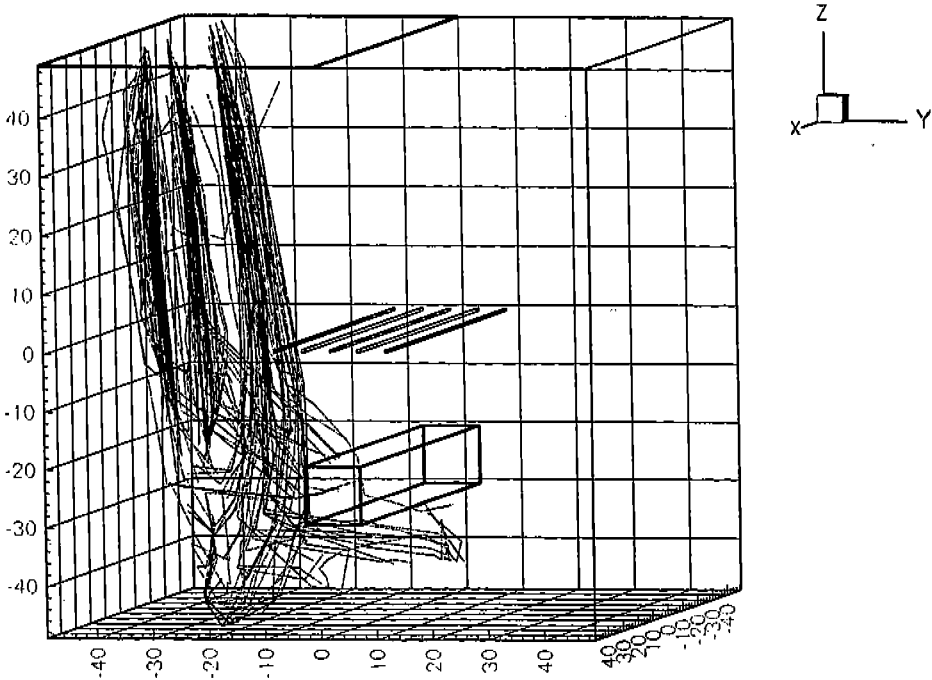


Fig. 13 Solute transport in fractured rock in which conductive (Transmissivity :  $1.0e-6m^2/sec$ ) fault is simulated

Table 8. Water leakage rates in cavern PC43

구 분		모형 T1	모형 T2	모형 T3	모형 T4	연속체모형
Trunca- tion	열극 크기(m)	0~15	0~15	0~25	0~30	
	투수량계수 (m <sup>2</sup> /sec)	1.0e-10	1.0e-11	1.0e-10	1.0e-10	
열극 밀도(P <sub>33</sub> )		0.258	0.310	0.317	0.337	
PC43 누수량(m <sup>3</sup> /day)		0.629	0.461	6.659	9.887	10.0(90m)

결 론

1) 불연속체모형 구성에 영향을 미치는 열극의 요소는 방향성과 크기로 분석되었다.

2) 열극의 방향성은 모형구성 1단계인 열극 군을 분류하는 기준이 되며, 열극의 크기에 따라 열극의 밀도와 투수성 열극의 밀도가 달라진다. 투수성 열극의 밀도가 달라지면 열극의 수리특성에 영향을 미치어 각 열극에 부여되는 투수량계수도 달라진다. 따라서 지하수유동을 좌우하는 요소는 투수성 열극의 밀도이며, 밀도의 변화에 따라 공동누수량 산출에 많은 차이가 관찰되었다. 누수량 변화의 증감정도는 열극의 투수성 밀도와 함께 열극투수량계수의 Percolation Threshold에 의해 좌우되므로 이 관계를 규명하기 위한 보충연구가 요망된다.

3) PPC8의 수압감소 현상은 다음과 같은 요인에 의해 암반 Clogging에 의한 것으로 여겨지며, Clogging 정도는 국소적인 암반 열극에 국한되어 있을 것으로 판단되었다.

- 수압시험 결과, PPC8 구간은 다른 구간에 비해 수리전도성에 큰 차이를 보이지 않는다.
- 이론적 해 (수두)가 현장시험 계측치보다 높다.
- 공동누수량 계측치에 변화가 없다.
- PPC8이 공동운영압 변화에 민감하게 반응한다.

4) Particle Tracking 기법을 사용한 불연속체모형의 용질이동 수치모의에서는 Fault의 투수성에 따라 오염물질의 이동경로 및 이동속도에 현격한 차이가 관찰되었다.

5) FracMan/MAFIC을 사용한 불연속체모형의 지하수유동 및 용질이동 수치모의 결과, 지하 유류 저장공동의 기밀성평가에 적용성이 인정되었으나, 다음과 같은 유형의 문제점이 도출되었다.

- 현장에서 수집된 열극자료는 2D 추적길이에 불과하며, 모형구성 및 지하수유동에 주로 영향을 미치는 3D 열극 크기를 추계 모의하는 데는 검증단계에서 객관성이 부족해질 수 있다.
- 수두 및 오염물농도 산출지점은 지하수유동 및 용질이동로가 되는 열극내의 Nodal point가 되므로 열극 발생밀도 및 발생위치에 따라 특정 위치에 대한 해석에 차이가 발생할 수 있다.
- 프로그램 MAFIC(ver. 1.4)의 계산용량 한계로 인하여 Truncation 기법을 적용하고 있으나 Truncation 범위가 증가할수록 해석의 정확도가 낮아진다.

따라서 분리열극개념 S/W 프로그램의 지속적인 Update가 요구되며, 또한 열극특성의 추계론적인 입력자료를 사용(FracMan)하여 결정론적인(Deterministic) 해석시스템(MAFIC)에서 해석된 결과는 비록 검증된 모형일지라도, 현장자료와 비교되어야 하고, 비교결과는 통계학적개념에 의한 Pattern(경향)과 오차율로 해석되어야 할 것이다.

참고문헌

Bear, J., Tsang, C.F., Marsily, G., 1993, "Flow and Contaminant Transport in Fractured Rock", Academic Press, Inc.

Dershowitz, W., Lee, G., Geier, J., Hitchcock, S., LaPointe, P., 1994, "FracMan Interactive Discrete Fracture Data Analysis, Geometric Modeling, and Exploration Simulation User Documentation Ver 2.4", Golder Associates Inc., Seattle, Washington

Freeze, R.A., Cherry, J.A., 1979, "Groundwater", Prentice-Hall Inc.

Geier, J., Dershowitz, W., Sharp, G., 1990, "Prediction of Inflow into the D-Holes at the Stripa Mine", Technical Report 90-44, Golder Associates Inc., Redmond, Washington

Miller, I., Lee, G., Dershowitz, W., Sharp, G., 1994, "MAFIC Matrix/Fracture Interaction Code with Solute Transport User Documentation Ver. β1.4", Golder Associates Inc., Seattle, Washington

Vatnaskil Consulting Engineers, 1993, "Groundwater Flow and Contaminant

Transport Modeling User Documentation”

- 선경건설(주), 원자력환경관리센터, 1993, “암반의 열극체계내의 지하수유동해석 기술개발”, 선경건설(주), 원자력연구소
- 선경건설(주), 1994, “(주) 유공가스 울산 LPG 운 영기지 기밀성평가 시스템구축 1차”, 선경건설(주)
- 선경건설(주), 1994, “신규 지하수위 관측공 설치공사 준공보고서”, 선경건설(주)

---

한일영, 조성만 :  
선경건설(주) 기술연구소  
서울시 종로구 관훈동 192-18  
T E L : (02) 3700-8652  
F A X : (02) 736-7040  
정광필 :  
(주) 유공가스  
서울시 영등포구 여의도동 60  
T E L : (02) 789-6296  
F A X : (02) 786-1465