

# 방사성 폐기물 처분부지의 안정성 평가검증을 위한 균열암반 특성화 연구

## Characterization of Fracture System for Comprehensive Safety Evaluation of Radioactive Waste Disposal Site in Subsurface Rockmass

이영훈(Young-Hoon Lee)\* · 신현준(Hyun-Jun Shin)\* · 김기인(Ki-In Kim)\*\* ·  
심택모(Taek-Mo Sim)\*\*

**요 약 :** 본 연구는 방사성 폐기물 처분부지의 안정성 평가검증을 위한 균열 암반내 지하수리시스템 특성연구의 일환으로 균열암반모사 및 균열망 특성을 규명하는 것으로 지하 심부에 위치하게 되는 방사성폐기물 처분부지와 입지조건이 유사한 LPG 지하비축기지를 대상으로 균열 및 수리지질특성의 규명과 연속체 모델과 불연속체 모델의 적용을 통한 지하수 유동로 해석을 실시하였다. 불연속체 모델을 통한 지하수 유동 및 용질 이동의 모사에는 균열의 방향성과 균열의 공간적 밀도가 가장 중요한 요소인 것으로 나타났다. 본 연구지역에서는 3조의 균열군이 조사되었으며 균열의 공간적 밀도( $P_{32}$ )는  $0.85 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 으로 나타났다. 프로판 공동주변의 모사영역( $200 \times 200 \times 200 \text{ m}$ )에 대하여 실제로 지하수의 유동에 관여하는 투수성 균열의 밀도( $P_{32c}$ )를 모사한 결과는  $0.536 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 로 나타났으며, 저투수성인 균열을 제거함으로써  $0.26 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 의 균열밀도( $T-P_{32c}$ )를 갖는 모델을 재구성하여 수압타널로부터 PC 2, PC 3의 프로판 주공동으로의 유동로 분석을 실시하였다.

**Abstract :** The purpose of this study is the simulation of discontinuous rockmass and identification of characteristics of discontinuity network as a branch of the study on characteristics of groundwater system in discontinuous rockmass for evaluation of safety on disposal site of radioactive waste. In this study the site for LPG underground storage was selected for the similarities of the conditions which were required for disposal site of radioactive waste. Through the identification of hydraulic properties, characteristics of discontinuities and selection of discontinuity model around LPG underground storage facility, the applications of discrete fracture network model were evaluated for the analysis of pathway. The orientation and spatial density of discontinuities are primarily important elements for the simulation of groundwater and solute transportation in discrete fracture network model. In this study three fracture sets identified and the spatial intensity ( $P_{32}$ ) of discontinuities is revealed as  $0.85 \text{ m}^2/\text{m}^3$ . The conductive fracture intensity ( $P_{32c}$ ) estimated for the simulation area around propane cavern ( $200 \times 200 \times 200$ ) is  $0.536 \text{ m}^2/\text{m}^3$ . Truncated conductive fracture intensity ( $T-P_{32c}$ ) is calculated as  $0.26 \text{ m}^2/\text{m}^3$  by eliminating the fracture with the lowest transmissivity and based on this value the pathway from the water curtain to PC 2, PC 3 analyzed.

### 서 언

방사성 폐기물을 처리하는 목적은 생물권을 방사성 물질의 해로운 영향으로부터 차단, 보호하는 것이다. 이러한 과제를 해결하기 위해서 방사성 폐기물을 지하 암반에 저장하는 방법이 주로 사용되고 있는데, 이는 지하 암반이 해로운 방사성 물질이 인간의 환경 속으로 유출되는 것을 막아 주거나 최소화 할 수 있기 때문이다. 방사성 폐기물 처분장을 구성하는 암반은 지구조 운동, 굴착 등에 의한 노출, 풍화 등에 의해서 발달된 균열들을 포함하게 된다. 특히 대부분의 결정질 암반 내에서

지하수 유동은 암반 내에 존재하는 균열의 간극을 통하여 이루어지고 있다. 따라서 암반 내 지하 수리 시스템의 특성은, 암석 매질 자체보다는 주로 암반 내 존재하는 균열의 수리 공학적 및 지질 구조적 특성에 의해 좌우된다. 지하 수리시스템에서의 유동과 핵종이동은 암반 내 균열망의 기하학적 위치, 수리전도도, 연결성, 용력에 의한 영향 등에 의해서 결정된다(이영남, 1992).

지하 수리시스템의 전통적인 분석 방법은 현장시험에 의해서 결정된 투수율을 균열을 포함한 암반에서의 평균 또는 대표치로 가정하는 연속체 개념을 적용하는 것이다. 연속체 개념은 투수성이 낮은 암석 내의 유체 유동을 예측하는데 널리 이용되는 것으로 암석 내의 유체 유동이 다공질 매체 내의 유동과 유사한 것으로 가정한다(Neuman, 1987; De Marsily, 1985). 최근에 개발 발전된 분석 방법으로는 균열의 공간적인 분포와

\* 연세대학교 지구시스템과학과(Department of Earth System Sciences, Yonsei Univ., Seoul 120-749, Korea)

\*\* 한국 원자력안전기술원(Korea Institute of Nuclear Safety, Daejeon, 305-338, Korea)

이를 통한 지하수 유동 특성을 접합시킨 분리균열망 모델이 있다. 이 방법은 해석 영역이 크지 않고 절리간의 연결성이 낮으며 절리의 밀착도가 높은 경우 개개의 절리를 독립적으로 취급하는 방식이다. 이 경우 절리는 일정한 간격을 가진 평행한 평판으로 가정되며 절리의 길이와 간격, 절리간의 거리, 절리의 방향 등을 통계적 방법으로 처리하여 지하수의 유동을 분석한다(Andersson, 1987; Oda, 1985).

단층, 절리, 층리면, 편리면, 연약대 등의 균열은 결정질 암반을 통과하는 지하수 유동 또는 핵종이동 문제를 밝힐 수 있는 주요 요소이며 지하수 유동의 기본적인 통로로 작용한다. 결정질 암석에서의 수리시스템의 특성을 알기 위해서는 복잡한 균열망과 이를 통한 유동 특성을 이해하여야만 된다. 본 연구는 방사성 폐기물 처분장 부지의 안정성 검증을 위한 기초연구로서 핵종이동의 주요 역할을 하는 지하 수리시스템의 기본 골격이라 할 수 있는 암반 균열망의 특성을 분석하는 것이다. 이에 따라 연구지역에 암반 균열망 조사를 통한 암반 균열망 특성에 대한 모사실험을 수행함으로써 암반 균열망의 기하학적 분포특성을 규명하고 대상지역의 수리지질학적 특성을 반영하는 균열망 모델을 통한 유동로 분석을 실시하였다.

### 지형 및 지질

#### 대상지역 개요

본 조사지역은 행정구역상으로 경상남도 울산시 남구 장생포동(용잠동), 용연동 및 고사동 일원에 소재하고, 조사지역내에는 (주)유공의 프로판 및 부탄가스 비축공동기지가 포함된다. LPG의 지하저장은 공동을 지하 일정 깊이에 굴착하여 그 주변에 작용하는 지하수의 정수압을 공동내 LPG의 증기압보다 항상 높게 유지함으로써 저장된 LPG가 밖으로 새어 나가는 대신 지하수가 공동 내로 스며들어 유실이 방지되는 원리를 이용한 것으로 특히 균열, 지하수의 상태 등이 시설의 안전성 및 경제성에 중요한 역할을 한다(정순착, 1988). 방사성 폐기물의 지하 처분을 위한 처분장 부지의 선정에 있어서도 처분지 인근의 암반 균열을 통한 지하수 유동특성과 처분지로부터 유출 가능한 방사성 핵종의 이동경로 파악은 매우 중요한 인자가 된다. 또한 본 지역은 지하 수리시스템 특성화를 위한 기초 자료가 풍부하여 가능한 수리시스템 인자의 적용이 용이할 뿐만 아니라 현재 지하 수리시스템 특성화 연구가 계속적으로 수행되고 있는 지역으로 타 연구자료와 비교·검토가 가능하여 연구 대상 지역으로 선정하였다.

본 지역의 산계는 조사지역 남쪽에 소재한 봉대산(해발 132 m)을 기점으로 북 및 N30°W 방향의 구룡성 산지가 발달되어 있으며, LPG기지과 신설 폐기물 매립 예정지 북측에는 N60°W 방향의 소구룡으로 이루어진 분수령이 발달되어 있다. 전형적인 소구룡성 산세 사이에는 제 4기의 소규모 층적층이 분포되어 있다. 수계의 발달은 전반적으로 매우 미약하나 전술한 N30°W의 방향과 N60°W 방향의 분수령 사이에 무명천이 LPG기지를 따라 남동향으로 흘러 한천 연수원 앞에서 바다로 유입된다. 수계의 유로연장은 3 km 이내이다(Figure 1 참조).

### GEOLOGIC MAP

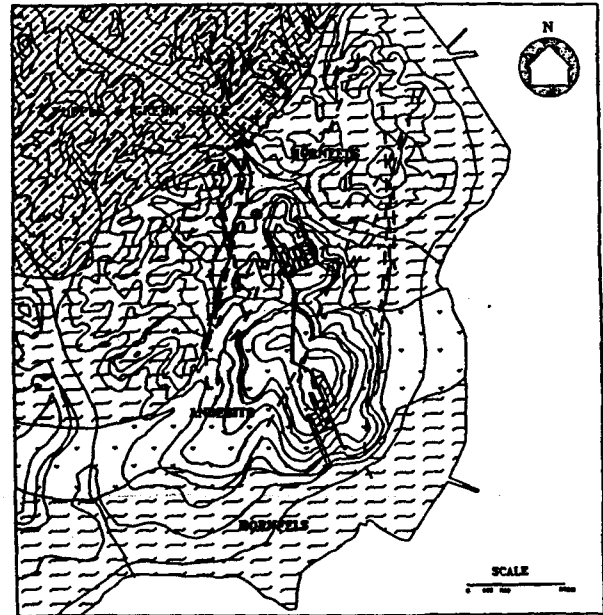


Figure 1. Geological map of studied area.

#### 광역지질

울산 지역은 우리나라 백악기 경상분지에 해당되는 퇴적암, 안산암과 이를 관입하는 화강암으로 주로 구성되어 있다. 대상 지역 주변은 셰일과 실트스톤이 주된 암석으로 구성되어 있으며, 이들 암석은 남쪽부에서 산성 마그마 혹은 유체의 관입에 의해 규화된 혼펠스로 변해 있다(Figure 1 참조). 혼펠스의 퇴적면은 Figure 1의 ①지역(YK-2 지하수위 관측공의 인근노두)에서만 관찰되었는데, N30°E, 20°SE의 주향과 경사를 가진다. 약 10 cm 폭의 단층면은 남부의 혼펠스 지역에서 확인되었는데, N30°E, 64°NW의 주향과 경사를 가지며, 이 면은 석영과

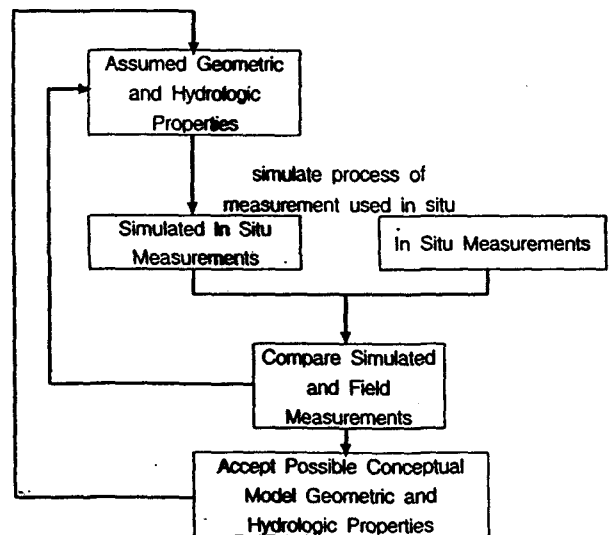


Figure 2. Modeling process with FracMan.

Table 1. Overview of LPG underground storage facility

Facility	Size	Propane		Butane	
		main connection cavern	main connection tunnel	main connection cavern	main connection tunnel
Cavern	• WidthHeight(m)	17×21	8×7	19×21	8×7
	• Cross-sectional area(m <sup>2</sup> )	308.5	45.1	342.5	45.1
	• Length(m)	857	48.6	634	374
	• Depth to crown(m)	(-)119		(-)63	
Water curtain	• Storage capacity(m <sup>3</sup> )	275,000		225,000	
	• Common interval(WH)	44.5		44.5	
	• Expanded interval(WH)	64.5		64.5	
	• Length(m)	731		399	
	• Depth(m)	(-)94		(-)38	
	• Horizontal hole(no.)	89		77	

녹렴석 세맥으로 충전되어 있다. 절리면은 크게 4방향으로 구분될 수 있는데, 이들의 평균 방향은 각각 N34°E/90°, N68°E/79°NW, N49°W/87°NE, N76°E/19°SE이다. 절리 사이의 간격은 약 2~5 cm, 10~15 cm, 10~50 cm, 30~70 cm이며, 절리의 연장성은 대략 5~15 m 정도이다(백낙진, 1989). 조사지역의 NE 방향의 균열은 경상분지 남동부의 양산단층, 동래단층의 주향방향과 유사한 것으로 미루어 이들 단층 운동과 관련되어 형성되었을 가능성이 있다.

대상지역의 시설개요

(주)유공가스에서 제공한 LPG 지하 저장기지 및 시설에 대한 제반 자료를 분석 검토한 결과, 프로판과 부탄 저장을 위한 주 공동과 이들 공동을 연결하는 터널 및 수막터널로 이루어진 지하 저장기지의 시설 개요는 Table 1과 같다(이병로, 1988).

불연속체 모델 해석

프로그램 개요

불연속 암반에서의 지하수 유동을 평가하기 위해서는 현장 상태를 대표할 수 있는 3차원 불연속체 모델(Discrete Fracture Model) 구성이 요구된다. 그러나 현지 암반 균열체계의 복잡성을 완전하게 그대로 모사하는 것은 불가능하기 때문에 Monte Carlo 모사 기법을 이용한 추계론적인 모델이 이용되고 있다.

추계론적 모델 구성을 위해서 선행되어야 할 작업은 균열자료 및 특성의 통계학적인 처리이며, 균열의 방향성, 균 분류, 크기, 밀도, 간극(Aperture) 분석 등이 포함된다. 두 번째 작업은 사각판(Plates)이나 원판(Disc) 또는 혼합형을 이용한 불연속체 유형의 선정이다. 세 번째로 각 균열의 지하수 유동통로에서의 기하학적 특성 및 수리특성의 부여이다. 마지막 작업은 구성된 모델에서의 지하수 유동 수치모사를 위한 지배 방정식의 유도 과정이라 할 수 있다. 본 연구에서는 불연속체 모델 구성을 위해 미국의 Golder Associates Inc.(Dershowitz et al.)가 개발한 FracMan/Mafic을 사용하였다. FracMan을 이용한 전체적인 불연속체 모델 모사 과정은 Figure 2와 같다.

해석영역 및 입력자료

본 연구를 위해 선정된 FracMan 프로그램은 암반 균열망의 방향성, 크기, 기하특성, 수리특성 등을 기초로 국부적인 모사 영역(적정모사영역 : 200 m×200 m×200 m)내에서 암반 균열망의 특성에 대한 인자별 세부 분석이 가능한 장점을 지니고 있다. 이에 따라 해석영역으로 프로판 주공동이 포함되는 200 m×200m×20m의 영역을 설정하였다(Figure 3 참조).

FracMan을 이용한 암반 균열망 모사를 위해 총 연장길이 857 m의 4개의 프로판 주공동에서의 측면과 천단부의 균열 조사자료에 대해 노출암면 조사방법인 선형조사방법(scanline survey)을 공동 천단부에 수행하여 균열의 분포 특성인자인 균열의 위치, 방향성, 선형 밀도의 기초자료를 구하였고 이와 더불어 창형조사방법(window sampling method)을 이용하여 노출 균열의 교차양상(T형교차:Ts, X형교차:Xs)과 면적비를 구하였으며, 수직 조사면의 조합에 의해 체적밀도를 유추하였다. 상기 방법에 의해 조사된 프로판 주공동의 각 영역과 조사된 균열은 Table 2와 같다.

균열특성 분석

균열의 방향성 - 균열은 비록 일정하지는 않더라도 단순 무작위 방향성을 갖지는 않는다. 예를 들면 지각변동시 형성된 일련의 방향성을 갖는 균열은 이후의 풍화작용 및 지각변동시 다시 영향을 받아 2차 방향성을 갖는 균열이 형성되므로 방향성에 따라 몇 개의 군으로 분류될 수 있으며, 군별로 다른 특성을 가질 수 있다. 따라서 균열 자료 및 특성의 통계학적 처리 과정에서 가장 먼저 이루어져야 하는 작업은 균열군을 분류하는 것이다. 본 연구에서는 방향성 자료의 평사투영 및 통계 분석 프로그램인 DIPS와 FracMan의 모듈인 ISIS를 사용하여 각 프로판 주공동에서 조사된 균열의 방향성 분포를 파악

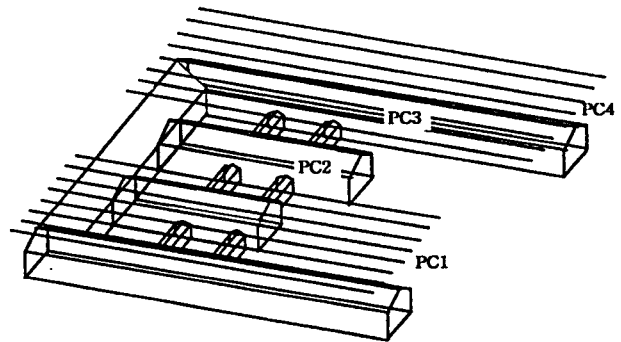


Figure 3. Schematic of propane cavern.

Table 2. Survey area of propane cavern

Main cavern	Total survey area (LW)	No. of fracture included	No. of fracture intersected by scanline
PC 1	271×17	263	134
PC 2	132×17	92	72
PC 3	165×17	135	54
PC 4	289×17	348	164
Total	857×68	838	424

하고 균열군 분류를 실시하였다. 극점의 하반투영점을 등각투영법으로 투영하였고 균열의 영향정도는 공간상에 정규 분포하는 피셔분포(Fisher Distribution)를 가정하여 균열군 분석을 실시하였다. 균열 자료의 방향성 분석은 4개의 프로판 주 공동에 대하여 개별적으로 구분 시행한 후, 이들 자료들의 전체적인 관계를 판단하기 위해 조사된 자료를 통합하여 전 프로판 공동 영역에 대한 분석을 재실시하였다.

DIPS를 이용한 균열군 분석 결과 프로판 공동 가장 동쪽에 위치하는 PC 1은 3조, PC 2는 3조, PC 3은 2조, PC 4는 3조의 균열군이 우세한 것으로 나타났으며, 조사된 균열의 스테레오 투영 및 균열군 분석 결과는 Figure 4와 같다. 또한 주 공동의 모든 자료를 통합하여 분석한 결과(PC-T)에서는 각각 391/19, 45/2, 340/72(Trend/Plunge)의 3조의 우세 균열군이 나타났다. 한편 FracMan에서는 조사된 일련의 균열 중 지질학적, 수리적 특성이 유사한 균열을 통계적으로 균질한 동일 군으로 구분한다. 균열군의 분류를 위하여 야외조사시 요구되는 균열 특성은 압중, 균열의 종류, 균열 표면의 거칠기 및 굴곡도, 풍화도, 종식 양상, 충전물, 균열의 위치, 방향성 등이 있다. 각각의 주 공동에서 선형조사방법으로 조사된 균열의 방향성 자료를 토대로 균열군 분류모사를 실시하였으며 그 결과는 Table 3과 같다.

균열의 크기 - 2차원 조사면에서 측정된 균열의 크기(trace length)자료를 이용하여 3차원 상에서 가장 잘 일치하는 균열

Table 3. Results of set identification using FracMan

SET_ID	No. of fracture	Orientation (trend/plunge)	Dispersion	T-length (m)
Set 1	211	319.4/15.8	13.57	13.95±6.76
Set 2	121	42.8/00.8	15.98	13.73±7.68
Set 3	110	355.7/76.2	6.64	13.58±6.59

반경의 분포를 결정하는 것으로 균열군 할당에 의해 생성된 자료를 이용하여 특정한 반경 분포 함수를 지니도록 균열을 발생시키고 관찰 자료와 모사 자료를 비교 분석하는 과정이다. 상기 과정에서 크기 자료에 대한 확률 밀도 함수를 구하기 위해서 균열의 크기는 등면적인 원의 반경으로 정의된다. FracMan을 이용한 암반 균열망 모사를 위해 총 연장길이 857 m의 4개의 프로판 공동 천단부에서 선형조사방법(scanline survey)을 사용하여 균열의 기초자료를 작성하였다. 또한 선형조사에 더하여 각각의 프로판 저장 공동에서 얻어낸 균열 조사도를 디지털 타이핑하여 균열 크기 및 밀도 분석을 위한 FracMan의 입력 자료로 구축하였다. 이로부터 각각의 주공동에서 창형조사방법을 통하여 조사된 균열의 개수와 평균 trace의 길이, T/X형 교차 균열의 개수를 얻어내었다. 위와 같은 영역에서 선형조사를 통해 얻어진 균열 자료를 이용한 각 균열군 균열 크기에 대한 모사결과는 Table 4와 같다. 또한 각 공동별 불연속선(Trace) 길이에 대한 분석 결과는 Table 5와 같다.

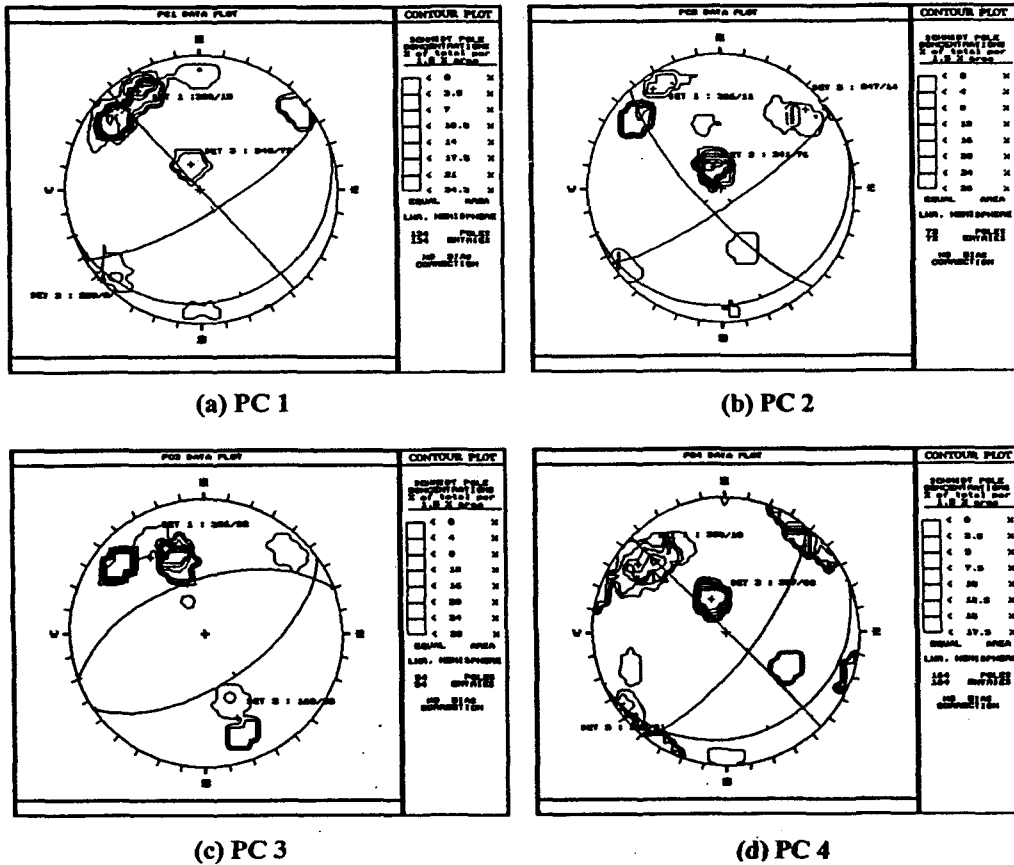


Figure 4. Stereographic projections of discontinuity data of each cavern.

Table 4. Result of effective radius analysis for each set

SET_ID	Arith. (mean,dev)		Error Check	
	Mean	Dev.	Chi-sqr	%Signif
Set 1	14	2.62	16.8	91.4
Set 2	15.7	8.03	17	80.8
Set 3	13.4	2.93	19.3	56.3

Table 5. Result of fracture size analysis of each cavern

Cavern	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4
No. of Trace	263	92	135	348
Total trace length (m)	3524	1525	1925	4561
Mean (m)	13.4	16.58	14.26	13.11
S.T.D (m)	6.958	5.675	6.868	7.678
Area (m <sup>2</sup> )	271×17	132×17	165×17	289×17
Xs	573	202	261	953
Ts	105	7	12	170
P[T/I] (%)	15.49	3.349	4.396	15.14
T (%)	19.96	3.804	4.444	24.43

<P[T/I]: Termination probability-The probability that a fracture will terminate at a preexisting fracture, given that it intersects a fracture, T (%): Termination percentage-The percentage of fracture terminates on the trace plane which are termination at intersections with other fractures>

**균열 수리특성** - 본 연구 지역의 유공가스 비축공동 인근의 15개 조사공의 수압시험 자료를 기초로 고투수구간과 저투수구간을 구분하였다(한정상, 한규상, 1989). 대상지역의 조사공으로부터 얻어진 심도에 따른 투수성 분포는 Table 6과 같다. 투수량 계수의 분포와 투수성 균열의 빈도수를 결정하기 위해

Table 6. Hydraulic conductivity and depth to K-contrast layer

Propane			Butane		
Hole no.	Boundary	K	Hole no.	Boundary	K
YK-2	EL-138	15±13 1	YK-1	EL-79	4.5±1.5 1
YK-3	EL-62.4	10.5±2.5 21	YK-7	EL+16	18.5±13.5 1
YK-4	EL-36.4	21 2.5±1.5	YK-8	EL-30	2.5±0.5 7
YK-5	EL-30	25±17 2	YK-9	EL+28.23 EL-53.77	18±3 4.5 32.5±17.5
YK-6	EL-10	18.5±14.5 2	YK-10	EL+23.5	98±91 2.5
YK-16	EL+7	0.55±0.45	YK-18	EL-65	0.175±0.165 3.2
YK-17	EL+24	0.72±0.48			
YK-19	EL+43	0.34±0.33			
YK-20	EL-20	3±0.8 -0.76			

K(Unit)=10<sup>-8</sup>m/s=8.64×10<sup>-4</sup>m/day

서는 고정구간 투수량계수를 가정하여야 한다. 각 구간의 투수량계수가 구해지면 이를 투수량계수에 대한 확률 밀도 함수와 누적 분포 함수를 구하여 통계치로 정량화가 이루어져야 한다. 상기 방식으로 구해진 수리 특성에 대하여 현장자료와 모사자료의 비교를 통해 일정 신뢰도 이상의 발생 가능성을 지니는 모사자료에 대하여 타당한 통계치로 인정한다(Dershowitz, W. et al., 1992).

암반 자체의 저류계수가 낮고 균열의 투수성이 높은 암반의 경우, 지하수 유동은 주로 균열을 따라 이루어지므로 균열 각각의 수리특성 모사가 요구된다. 이를 위해 본 연구 지역의 주 공동 주변에서 주입시험을 통해 측정된 수리전도도로부터 투수량계수 분포유형 및 모사 투수량계수를 이용하여 각 균열에 해당하는 수리특성을 산출하였다. 수리특성 모사를 위해 연구 지역에서 수리전도도가 측정된 총 시험구간은 164개로 설정되었고 산출된 구간 평균 투수량계수(mean packer interval transmissivity)는 1.14e-7 m<sup>2</sup>/sec로 분석되었다. 현장자료에 근거한 모사에 영향을 미치는 변수로는 단위 길이당 투수성 균열의 수와 각 균열의 투수량계수이며 이들을 변화시키면서 현장자료와 가장 잘 일치하는 조건을 찾아 수리특성을 모사하였으며 그 결과는 Table 7과 같다.

**균열 밀도** - 야외조사를 통해서 얻을 수 있는 균열의 밀도는 단위길이에 대한 조사된 균열의 수, 또는 단위면적에 대한 조사된 균열의 수와 같은 1차원, 2차원 자료이다. FracMan에서는 다음의 Table 8과 같이 균열 밀도를 정의하여 조사된 균열 밀도로부터 선정된 불연속체 모델에 따른 적절한 3차원 균열 밀도를 구하게 된다. 각각의 프로판 저장 공동에서 얻어낸 균열 조사도면을 디지털화하여 균열밀도 분석을 위한 입력 자료로 구축하였다. 각각의 공동에 대한 균열 조사도는 Figure 5와 같다. FracMan을 이용한 균열 조사도에 대한 통계분석 결과는 Table 9와 같다

상기한 바와 같이 얻어낸 균열 밀도(P<sub>22</sub>)는 “단위면적당 균열 길이의 합”으로 정의되는 2차원 조사면에 대한 균열의 밀도이므로 이로부터 3차원 불연속체 모델에서의 균열 밀도를 구하여야 한다. 따라서 모든 균열에 대한 밀도는 각 균열 균열의 총면적 비율에 따라 균별 P<sub>32</sub>(Area/Volume)를 구하여 산출한다. 산출과정은 균별 균열의 크기(평균유효반경)를 각 균열에 대한

Table 7. Result of fracture transmissivity simulation

Fracture freq. (#/m)	Field data (m <sup>2</sup> /sec)		Best Fitted (m <sup>2</sup> /sec)		Simulation (m <sup>2</sup> /sec)	
	mean	S.T.D	mean	S.T.D	mean	S.T.D
0.287	1.14e-7	2.87e-7	0.83e-7	5.22e-7	1.52e-7	5.08e-7

\*μ: mean, σ: standard deviation

Table 8. Fracture intensity

Intensity	Definition	Remarks
P <sub>21</sub>	The no. of fractures per unit area of trace plane	no./m <sup>2</sup>
P <sub>22</sub>	The total length of fractures per unit area of trace plane	m/m <sup>2</sup>
P <sub>32</sub>	The sum of fracture area per unit volume	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
P <sub>33</sub>	The sum of fracture volume per unit volume	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>

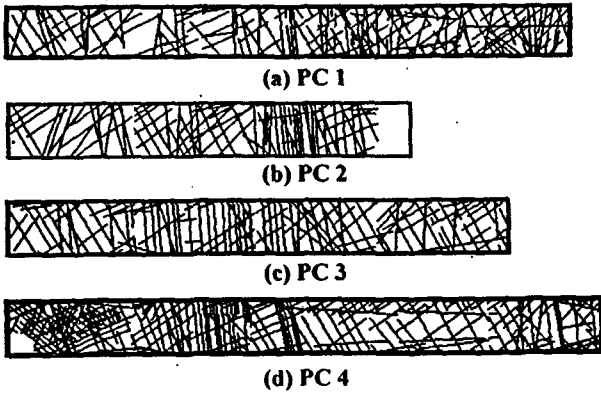


Figure 5. Trace map of each cavern.

Table 9. Result of trace map analysis

	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4
No. of Trace	263	92	135	348
Survey area(m <sup>2</sup> )	27117	13217	16517	28917
P <sub>22</sub>	0.6503	0.5778	0.5834	0.7891
P <sub>21</sub>	0.04852	0.03485	0.04091	0.06021

면적으로 환산한 후, 균열 균열 수를 곱하여 균열 총면적을 계산한다. 계산된 총면적을 균열 비율에 따라 나눈 후 기준 균의 P<sub>32</sub>(입력값)를 초기값으로 설정하여 각 균의 면적비에 따라 P<sub>32</sub>를 계산한다. 기준균의 초기값으로 설정된 P<sub>32</sub>는 균열의 방향성 분포와 조사면의 방향, 모사영역의 형태에 따라 변화하는 면적밀도(Areal Intensity)로서 균열 조사도의 분석을 통해 얻어낸 조사면상의 균열밀도인 P<sub>22</sub>에 균열의 방향성 분포에 따른 비례상수인 C<sub>32</sub>를 곱하여 구할 수 있으며, C<sub>32</sub>는 대부분의 균열 양상에 대해 1~3의 값을 갖는다(Dershowitz, 1985). 본 연구에서는 절리의 방향성이 균열분포(Uniform distribution)을 이룰 때 적용되는 값인 1.3을 적용하여(Dershowitz, 1985) 초기 P<sub>32</sub>값으로 0.85를 설정하였으며 이로부터 현장자료에 가장 잘 부합되는 모델(모델 A)을 구성하였다(Table 10).

**투수성 균열 밀도(P<sub>32c</sub>)** - 불연속체 모델을 통한 지하수 유동 및 용질이동 모사를 위해서는 실제로 지하수의 유동에 관여하는 투수성 균열만을 고려하는 것이 효율적이다. 따라서 투수성 균열 밀도(P<sub>32c</sub>)는 균열 밀도를 토대로 구성된 불연속체 모델에 가상의 시추공으로부터 균열 분석을 실시하여 균열 빈도(λ)와 환산계수 C<sub>31</sub>, 균열 수리특성 모사로부터 구한 투수성 균열 밀도 λ<sub>c</sub>와의 관계로부터 산출한다. 이로부터 투수성 균열

Table 10. Model A, based on areal fracture intensity

set orient.	# of fracture	Effective radius	Re <sup>2</sup>	Total area	Area ratio	P <sub>32</sub>
1 319/19	211	14	615.44	129,857	0.45	0.38
2 45/2	121	15.7	773.98	93,651	0.33	0.28
3 340/72	110	13.4	563.82	62,020	0.22	0.19
	Sum			285,528	1	0.85

밀도를 고려한 모델 B를 구성하였다.

$$\begin{aligned}
 P_{32c} &= C_{31} \times \lambda_c \quad (C_{31} = P_{32}/\lambda) \\
 &= [0.85/0.455] \times 0.287 \\
 &= 0.536
 \end{aligned}$$

**Truncation에 의한 투수성 균열 밀도** - FracMan에서 균열의 기하와 경계조건에 대해 몬테카를로 모사를 통해 운영 가능한 균열의 수는 대략 20,000개로 제한된다. 따라서 작고 저투수성인 균열을 제거시킴으로서 투수성 균열 밀도를 감소시켜 모사 영역내의 발생 균열 수를 제한하게 된다. 이와 같이 투수성 균열으로 구성된 불연속체 모델을 허용범위 내에서 균열 밀도를 감소시켜 지하수 유동 수치모사용 모델로 재구성하게 된다. 본 연구에서는 일정 범위를 벗어나는 균열의 크기와 투수량계수를 투수성 균열 밀도에서 제외시킨 균열 밀도(Truncated Conductive Fracture Intensity, T-P<sub>32c</sub> = 0.26)를 재계산한 뒤, 이로부터 모델을 재구성하였다(모델 C).

**불연속체 분포모델**

암반 지하수유동 해석을 위한 3차원 불연속체 모델은 현지와 가능한 한 유사한 특성을 갖는 모델을 구성하는데 그 목적이 있으므로, 균열의 방향, 밀도, 크기, 투수량계수 등의 특성이 종합적으로 고려된 모델이어야 한다. 따라서 앞서 언급한 바와 같이 본 연구지역 내 주공동에서의 선형조사자료를 바탕으로 불연속선(Trace)의 평균길이, 표준편차, 총길이, 교차양상, 균열 밀도 등의 통계자료를 구하고 이를 바탕으로 현장자료의 지질구조에 가장 잘 부합되는 모델을 선정하여야 한다. FracMan에서는 평면의 다각형으로 구성된 모델이 사용되며, 균열의 불균질 분포 및 종식유형특성 등이 고려된 다양한 형태의 개념모델의 구성이 가능하다. FracMan에서 제공하는 개념모델은 개량형 Enhanced Baecher, Nearest Neighbor, Levy-Lee Fractal, War Zone, Poisson Rectangle 모델 등이 있으며, 각 모델은 균열의 공간분포 유형과 균열의 크기 및 위치 등의 상호관계에 그 차이가 있다(Dershowitz, W. et al., 1992).

**개념모델의 선정** - 4개의 프로판 주공동에 대한 균열 조사도 분석을 실시한 후 각 모델의 적합성 판단시 War Zone 모델과 Nearest Neighbor 모델은 본 연구 지역에서 조사된 주요 지질 구조가 없고, 균열 조사도에서도 뚜렷한 군집을 나타내지 않으므로 적용 대상에서 제외되었다. 또한 Levy-Lee 모델은 광범위하게 분산되어 있는 큰 규모의 균열 주위에 작은 균열이 군집된 경우에 적용 가능하고 프랙탈 차원(Fractal Dimension)의 계산시 해석영역의 일부분만을 원형으로 설정하여야 하므로 설정구간에 따른 많은 변화된 결과를 산출하므로 적용가능한 적절한 프랙탈 차원의 선정이 어려웠다. 따라서 본 연구에서는 개량형 베커(Enhanced Baecher) 모델의 적용이 가장 타당하다고 판단되었다.

개량형 베커 모델에 따른 분석 결과는 다음의 Table 11과 같다. 각 공동에서 얻어진 격자형 프랙탈 차원(Box-Fractal Dimension)은 균열의 양상에 대한 척도로서 1에 가까운 차원은 강한 군집, 또는 불균질한 양상을 나타내고 반면에 2에 가까운 차원은 더욱 균질한 분포를 나타낸다. 격자형 프랙탈 차원

Table 11. Result of Baecher analysis

Cavern	grid interval	Region		Chi-sqr	Conf. Level	Box Dimension	Correlation
		Upper-left	Lower-right				
PC 1	2			601.5	<1.0%	1.91	1
	5	(0,20)	(271,0)	35.68	<1.0%	1.979	1
	10			1.56	15.65%	2	1
PC 2	2			380.2	<1.0%	1.881	1
	5	(0,20)	(132,0)	53.94	<1.0%	1.897	0.9999
	10			26.53	<1.0%	1.926	0.9999
PC 3	2			916.5	<1.0%	1.903	1
	5	(0,20)	(165,0)	3.966	98.4%	1.979	1
	10			13.28	10.27%	2	1
PC 4	2			144.2	<1.0%	1.94	1
	5	(0,20)	(289,0)	21.6	2.762%	1.995	1
	10			9.146	51.83%	2	1

은 격자크기에 대한(조사면상의 모든 균열을 포함하기 위해 필요한) 격자 수의 log-log plot의 경사로서 구해지며 큰 프랙탈 차원은 모델이 개량형 베커 모델에 적합하다는 것을, 또한 작은 프랙탈 차원은 Bart, Nearest Neighbor, War Zone 또는 Levy-Lee Fractal Model과 같은 군집형 모델이 적합하다는 것을 의미한다(Dershowitz, 1985).

**불연속체모델 모사**

전술한 바와 같은 균열특성 모사를 통해 얻어낸 결과로부터 모델유형, 균열의 방향성, 크기, 밀도, 투수량계수 등의 특성이 종합적으로 고려된 현장자료에 가장 잘 부합되는 3차원 불연속체 모델을 구성하고 이에 대한 검증 실시하였다.

불연속체 모델구성을 위해 200×200×20 m의 영역을 설정하였으며 균열 밀도( $P_{32}$ ), 투수성 균열 밀도( $P_{32c}$ ), Truncation에 의한 투수성 균열 밀도에 따른 모델을 각각 모델 A, 모델 B, 모델 C로 구성하였다. 또한 이에 대한 현장 조사자료와의 비교를 위해 각 공동의 길이를 200m로 제한하여 균열 조사도면 분석을 실시하였으며 그 결과는 Table 12와 같다.

최초로 얻어진 모델 A는 조사, 분석된 균열 특성을 반영하여 모사영역 200×200×20(m)에서 1396개의 균열을 발생시켰

Table 12. Result of in-situ trace analysis

	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4
No of Trace	180	89	131	226
Total T-length(m)	2074	1327	1677	2662
Mean T-length(m)	11.52	14.91	12.8	11.78
S.T.D (m)	6.625	6.356	6.063	7.017
Area (m <sup>2</sup> )	200×17	132×17	165×17	200×17
No. of Xs	306	173	224	560
No. of Ts	49	10	11	74
P[T/l] (%)	13.8	5.464	4.681	11.67
T (%)	13.61	5.618	4.198	16.37
$P_{22}$	0.6099	0.5912	0.5977	0.7820
$P_{21}$	0.05294	0.03966	0.0467	0.06647

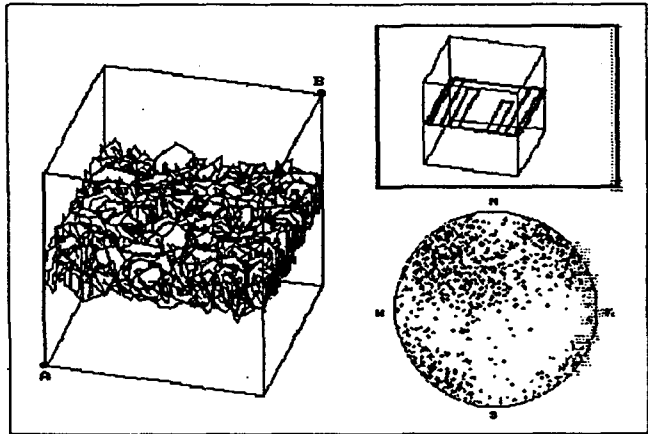


Figure 6. Fracture generation region (Model A).

으며(Figure 6 참조) 이에 대해 각 프로판 주공동을 모두 포함하는 200×200(m) 영역 및 각 주공동에 대한 재추출을 실시하여 조사자료와 대비하였다(Table 13 참조). 모델 A는 현장에서 조사된 균열을 가장 잘 반영하는 모델로서 현장의 각 주공동 영역(11849 m<sup>2</sup>)에서 조사된 총 626개의 균열에 대해 606개의 균열이 발생되었으며, 단위면적당 균열의 개수( $P_{21}$ )는 0.522이고, 단위면적당 균열길이의 합은 0.573로 분석되었다. 전술한 바와 같이 조사된 균열밀도  $P_{32}$ 와 OxFilet 모사를 통한 투수성 균열밀도( $\lambda_c$ )로부터 투수성 균열밀도  $P_{32c}$ 를 이용하여 지하수의 유동에 영향을 미치는 균열만을 고려한 모델(모델 B)을 구성하였으며 이 때의 모사영역은 200×200×200(m)로 투수성 균열밀도( $P_{32c}$ )는 0.536을 적용하여 전체 모델영역에 대하여 균열을 재현하였다. 이 모델에 대한 재추출을 실시한 결과, 주공동 영역에서 발생된 균열의 수는 448개이고,  $P_{21}$ 은 0.03806(#/m<sup>2</sup>),  $P_{22}$ 는 0.4197(m/m<sup>2</sup>)로 분석되었다. 모델 C는 Truncation을 실시하여 얻어낸 균열 밀도( $T-P_{32c}$ )를 이용하여 얻어낸 모델로 200×200×200(m)의 영역에서 총 1622개의 균열과 0.26의 균열 밀도를 갖는다. 모델 C에 대한 재추출을 실시한 결과, 주공동 영역에서 평균 균열의 길이 12.16 m를 갖는 총 225개의 균

Table 13. Result of resampling about Model A

	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4	PC-T
No. of trace	162	148	134	162	1029
Mean length(m)	10.43	10.83	11.58	11.13	20.21
Total length(m)	1690	1602	1551	1803	2.08e4
Area(m <sup>2</sup> )	200×17	132×17	165×17	200×17	200×200
No. of Xs	233	299	211	253	2969
No. of Ts	71	60	46	60	824
P[T/l] (%)	23.36	16.71	17.9	19.17	21.72
T (%)	21.91	20.27	17.16	18.52	40.04
$P_{22}$ (m/sq.m)	0.497	0.7141	0.553	0.5304	0.52
$P_{21}$ (#/sq.m)	0.04765	0.06595	0.04777	0.04765	0.02573
No. of fractures in system : 1396 / $P_{32}$ : 0.85					

열이 발생되었으며,  $P_{21}$ 은  $0.0177(\#/m^2)$ ,  $P_{22}$ 는  $0.2174(m/m^2)$ 로 분석되었다. 현장 조사자료와 균열모형간의 비교를 위해 모사 영역 경계에서의 경계효과가 적은 PC 3에서의 통계분석값을 제시하였으며(Table 14), 현장과 각 모델에서의 균열 조사도는 Figure 7과 같다.

**유동로 분석** - 불연속 암반 내의 각기 다른 위치간의 지하수 유동로의 파악은 지하수를 따른 용질이동 및 분산의 모사에 중요한 역할을 한다. 또한 폐기물 매립지, 또는 지하구조물의 건설 및 운용시에도 침출수의 이동시간, 농도변화의 예측 및 제어에도 이러한 지하수의 유동로 분석은 필수적이다. FracMan 을 이용한 지하수 유동로 분석에서 요구되는 자료에는 유동로의 시작점(source)과 종말점(sink), 전체 불연속망의 구조(geometry), 균열간의 상호 연결도 등이 있으며 수리 전도도(conductance), 투수량계수(transmissivity), 저유계수(storativity) 등의 유동로를 따른 수리특성값이 요구된다. 지하수 유동을 지배하는 수리전도도의 최소값은 다음과 같이 설정한다.

$$C_p = \min [T_r \times W_r] \quad (i=1, n_r)$$

Table 14. Result of resampling about PC 3 of Model A, B, C

	In-Situ	Model A	Model B	Model C	
No. of trace	131	134	132	61	
Mean T-length(m)	12.8	11.58	11.85	14.14	
Total T-length(m)	1677	1551	1564	848.5	
Area(m <sup>2</sup> )	165×17	165×17	165×17	165×17	
No. of Xs	224	211	313	60	
No. of Ts	11	46	20	1	
P[T/l] (%)	4.681	17.9	6.01	1.639	
T (%)	4.198	17.16	7.58	1.695	
Fracture Intensity	$P_{22}$	0.5977	0.553	0.558	0.274
	$P_{21}$	0.0467	0.0477	0.0471	0.0194
	$P_{32}$	0.85	0.536( $P_{32c}$ )	0.26( $T-P_{32c}$ )	

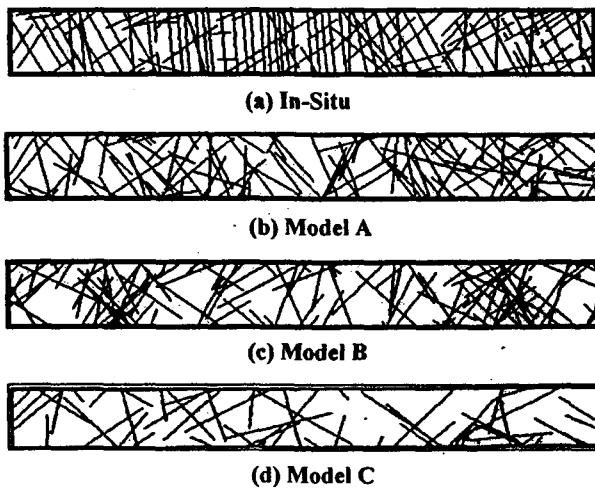


Figure 7. Trace map of PC 3.

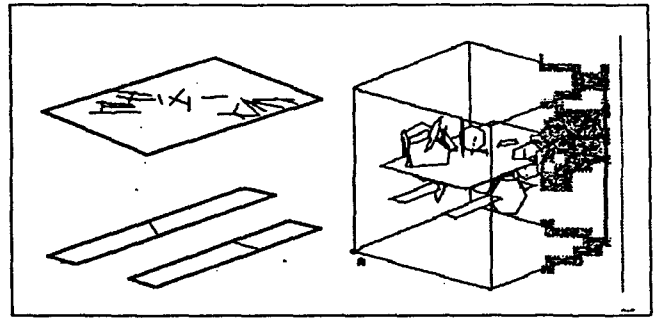


Figure 8. Pathways between PC 2, PC 3 and water curtain.

Table 15. Result of pathway analysis

model region	# of fracture	# of networks	source	sink	
10018040	636	49	w/c	pc-2, pc-3	
w/c	T_min [m <sup>2</sup> /s]	Storativity [m <sup>2</sup> ]	Conductance [m <sup>3</sup> /s]	# of frac. in pathway	path area
→	1.86e-09	3.03e+01	7.30e-09	38	3.02e+04
pc-2	pathway composed of frac. set 1 (# 19), set 2 (# 15), set 3 (# 4)				
w/c	T_min [m <sup>2</sup> /s]	Storativity [m <sup>2</sup> ]	Conductance [m <sup>3</sup> /s]	# of frac. in pathway	path area
→	4.84e-09	7.38e+00	6.54e-09	8	7.28e+03
pc-3	pathway composed of frac. set 1 (# 4), set 2 (# 4)				

where  $T_r$ ,  $W_r$ : transmissivity & width perpendicular to flow of the fractures within network

$n_r$ : no. of fractures in the network

본 연구에서는 프로판 주공동 상부의 수막터널을 판형으로 가정하고 PC 2, PC 3 공동의 천정과의 유동로를 분석하였다. 분석시 모델 C를 이용하였으며 PC 2, PC 3 상부의 수막터널은  $100\text{ m} \times 180\text{ m}$  규모로 가정하였다 분석 결과 수막터널로부터 PC 2와 PC 3로 연결된 유동로는 각각 3개와 2개로 분석되었으며(Figure 8 참조) 분석에 이용된 수리특성값과 분석 결과는 Table 15과 같다.

### 결론 및 토의

본 연구는 방사성폐기물 처분부지의 안정성평가를 위한 균열암반 특성화기술 개발의 일환으로 울산지역의 LPG 지하비축기지의 프로판 저장공동을 대상으로 조사된 균열자료를 토대로 균열의 투수성을 고려한 균열밀도에 따른 불연속체 모델을 구성하고 유동로 분석을 실시하였다.

(1) 본 연구지역의 4개의 프로판 주 공동영역에서 조사된 균열은 경사방향 및 경사가 각각  $319.4/15.8$ ,  $42.8/0.8$ ,  $355.7/76.2$  을 갖는 3개조로 분류되며 크기는 각각 14 m, 15.7 m, 13.4 m 로 분석되었다.

(2) 불연속체 모델의 구성 및 암반 지하수 유동 모사에 있어서 가장 큰 영향을 미치는 요소는 투수량 계수와 균열의 방향



참고문헌

성 분포, 공간적 밀도( $P_{32}$ )를 고려한 위치분포모델의 선정인 것으로 분석되었다.

(3) 본 연구지역의 균열의 분포특성을 가장 잘 나타내는 모델은 개량형 베코모델로 분석되었으며 균열의 공간적 밀도( $P_{32}$ )는  $0.85 \text{ m}^2/\text{m}^3$  (모델A), 투수성 균열의 공간적 밀도는  $0.536 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 로 분석되었다(모델B).

(4) 컴퓨터 계산의 효율성과 프로그램의 한계를 고려하여, 투수량 계수에 대한 Truncation 기법을 적용하여 저투수성 균열을 제외시킨 균열 밀도( $T-P_{32}$ )는  $0.26 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 으로 나타났으며, 이로부터 불연속체 모델 C를 구성하고 모사영역내  $100 \times 180 \times 40 \text{ m}$  구간에 대해 유동로 분석을 실시하였다.

본 연구에서는 제한된 2차원 조사영역에서 측정된 균열의 방향성 및 크기자료에 근거한 불연속체 모델을 제시하였다. 따라서 대상지역 주변의 시추코아 자료분석 등을 통한 체계적인 3차원 균열영상에 대한 검증이 요구된다. 분석된 지하수 유동로는 균열의 기하적인 연결도에 크게 의존하는 것으로 모사결과와 신뢰도 확보를 위해서는 균열의 충전물, 간극 등의 요소가 고려되어야 한다. 또한 분리균열암반모사 프로그램인 FracMan이 가지는 모사영역 및 발생균열의 수에 대한 제한점으로 프로판 공동 PC 1, PC 4의 영역에 대한 전체적인 모사가 불가능하였다. 따라서 실제 방사성폐기물 처분장 부지로부터의 방사성 핵종의 유동분석시에는 부지의 크기를 고려하여 보다 광역적인 지역에서의 지하수 유동 및 오염물 거동에 대한 모사가 가능한 연속체 모델을 이용한 개괄적인 모사를 수행하여 전체적인 지하수 유동영상 및 오염이동경로를 파악한 후 세부적인 지역에서 불연속체 모델을 이용한 모사가 요구된다. 불연속암반을 대상으로하는 방사성폐기물 처분부지의 안정성 평가에는 본 연구에서 예시한 유동로 분석이외에도 이중공극체 개념을 이용한 정류상태, 부정류상태의 지하수유동 모사와 용질의 특성을 고려한 용질이동 분석 등의 연구가 요구된다.

사 사

본 연구는 한국 원자력안전기술원의 원자력 연구개발 중·장기 계획에 의해 수행되었음을 밝히며, 이에 감사드립니다.

박홍석, 민덕기, 1995, 울산환경개발(주) 매립시설 안정성 검토연구, 울산대학교, 건설기술 연구소.  
 백낙진, 1989, (주)유공 GAS 울산기지 임야 부지활용 가능지역 지반지질 조사보고서. (주)도화지질  
 유공 LPG 기지건설 지하시설 공사감리용역 공사감리 보고서. 제 22, 23, 24호. (주)유공, (주)삼림컨설턴트.  
 이병로, 1988, (주)울산 LPG 기지 사업보고서. (주)유공가스  
 이상필, 1990, 불연속 암반내 공동 주위의 용력 및 변형거동에 관한 수치해석. 한국자원공학회지, 27, p. 268-282.  
 이영남, 1992, 방사성 폐기물의 지하저장과 지반공학. 한국지반공학회지, 8, p. 128-141.  
 정순창, 1994, (주)유공 GAS 울산 LPG 기지. (주)유공가스.  
 지하 LPG 저장공동 Water Curtain 세정시스템 최적 운영기법 연구 (1996) 선경건설(주) 연구소.  
 한정상, 한규상, 1989, Report on site definition of groundwater assessment and monitoring. Hans Engineering Co. Ltd.  
 Andersson, J. and Dverstorp, B., 1987, Conditional simulations of fluid flow in three-dimensional networks of discrete fractures. Water Resources Res., 23, p. 1876-1886.  
 De Marsily, G., 1985, Flow and transport in fractured rock : connectivity and scale effect. Proc. International Association of Hydrologists, 17, p. 267-278  
 Dershowitz, W.S., 1985, Rock joint systems. Ph.D dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, USA.  
 Dershowitz, W., Lee, G., Geier, J., Hitchcock, S. and LaPointe, P., 1992, Interactive discrete feature data analysis, geometric modeling, and exploration simulation. FracMan User Documentation. Golder Associates INC  
 Geier, J., Dershowitz, W. and Sharp, G., 1990, Prediction of inflow into the D-holes at the stripa mine. Technical report, p. 90-144.  
 Lee, Y., Carr, J., Barr, C. and Hass C., 1990, The fractal dimension as a measure of the roughness of rock discontinuity profiles. Int. J. Rock Mech. & Mining Sci., V.27, p. 453-464  
 Neuman, S.P., 1987, Stochastic continuum representation of fractured rock permeability as an alternative to REV and fracture network concepts. Proc. 28th US Symmp. on Rock Mechanics, Tucson, Arizona, p. 533-561  
 Oda, M., 1985, Permeability tensor for discontinuous rock masses. Geotechnique, 35, p. 483-495