

화산암질 암반에서 3차원 균열망 모델을 이용한 지하수 유동경로 및 유동시간 해석

박병윤¹⁾ · 김경수²⁾ · 김천수¹⁾ · 배대석²⁾ · 이희근³⁾

Analysis of the Pathways and Travel Times for Groundwater in Volcanic Rock Using 3D Fracture Network

Byoung-Yoon Park, Kyung-Soo Kim, Chun-Soo Kim, Dae-Suk Bae and Hi-Keun Lee

Abstract. In order to protect the environment from waste disposal activities, the prediction of the flux and flow paths of the contaminants from underground facilities should be assessed as accurately as possible. Especially, the prediction of the pathways and travel times of the nuclides from high level radioactive wastes in a deep repository to biosphere is one of the primary tasks for assessing the ultimate safety and performance of the repository. Since the contaminants are mainly transported with groundwater along the discontinuities developed within rock mass, the characteristics of groundwater flow through discontinuities is important for the prediction of contaminant fates as well as safety assessment of a repository. In this study, the actual fracture network could be effectively generated based on in situ data by separating geometric parameter and hydraulic parameter. The calculated anisotropic hydraulic conductivity was applied to a 3D porous medium model to calculate the path flow and travel time of the large studied area with the consideration of the complex topology in the area. Using the model, the pathways and travel times for groundwater were analyzed. From this study, it was concluded that the suggested techniques and procedures for predicting the pathways and travel times of groundwater from underground facilities to biosphere is acceptable and those can be applied to the safety assessment of a repository for radioactive wastes.

Keywords: 3D fracture network, anisotropic hydraulic conductivity, trace length, aperture, radioactive waste repository, pathway, travel time.

초 록. 지하 공간시설로부터 나오는 오염물질의 유출량이나 유출경로를 예측하려는 일은 인간이 건설한 각종 시설로부터 환경을 보호하려는 노력의 일환이다. 특히 방사성폐기물의 핵종이 심부처분장으로부터 생태계로 도달하기까지의 이동경로 및 소요시간을 예측하는 것은 처분장의 안전성을 평가하는데 기본적인 요소가 된다. 오염물질은 암반 불연속면 내의 지하수를 통하여 이동하게 되므로 지하 암반에서의 불연속면을 통한 지하수의 흐름을 파악하는 것은 처분장의 부지선정이나 안전성을 평가하는데 중요한 요소 중의 하나이다. 본 연구에서는 유류비축기지가 건설될 부지를 연구 대상으로 선정하고 풍부한 현장 조사자료를 근거로 기하학적 및 수리학적으로 일치하는 3차원 균열망 모델을 구축하고 이를 근거로 계산된 이방성 수리전도도를 복잡한 산악지형을 반영한 3차원 다공성 연속체모델에 입력하여 지하수의 유동경로 및 유동시간을 계산하였다. 본 연구를 통한 여러 가지 결과로부터 여기서 제시한 지하시설물로부터 유출된 지하수의 유동경로 및 생태계 도달 소요시간을 예측하는 방법이 보다 합리적이면서 타당하다는 결론을 내릴 수 있었으며, 방사성폐기물 처분장의 안전성을 평가하는데 본 연구에서 제시한 방법과 절차를 적용할 필요가 있다고 판단된다.

핵심어: 3차원 균열망, 이방성수리전도도, 불연속면 길이, 불연속면 틈새, 방사성폐기물처분장, 유동경로, 유동시간

1. 서 론

지하 공간시설로부터 나오는 오염물질의 유출량이나

유출경로를 예측하려는 일은 인간이 건설한 각종 시설로부터 환경을 보호하려는 노력의 일환이다. 특히 방사성폐기물의 핵종이 심부처분장으로부터 생태계로 도달하기까지의 이동경로 및 소요시간을 예측하는 것은 처분장의 안전성을 평가하는데 기본적인 요소가 된다. 오염물질은 암반 불연속면 내의 지하수를 통하여 이동하게 되므로 지하 암반에서의 불연속면을 통한 지하수의 흐름을 파악하는 것은 처분장의 부지선정이나 안전성을

¹⁾정회원, 한국원자력연구소

²⁾한국원자력연구소

³⁾정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수

접수일 : 2000년 6월 5일

심사 완료일 : 2000년 12월 13일

평가하는데 중요한 요소 중의 하나이다.

후보지역이 결정질 암반인 경우 암반 매질은 불투수성으로 간주할 수 있고 지하수 유동은 암반내의 불연속면을 통해서만 흐른다고 가정할 수 있다. 그러므로 지하수 유동 경로 및 유동시간을 예측하기 위해서는 먼저 그 부지의 현장조건에 맞는 균열망을 구축해야 한다.

균열망 내의 각 불연속면 틈새의 불균질한 특성과 암반의 수리적인 불균질한 특성을 반영한 많은 연구가 수행되었다. Long and Witherspoon¹⁾은 불연속면들 간의 교차선의 빈도로부터 불연속면 체계의 투수성에 대한 효과를 시험하였다. 결론 중의 하나는 불연속면체계 내의 교차선의 빈도는 불연속면 밀도나 표본의 수보다는 불연속면 크기와의 상관관계가 더 크다고 했다. 또한 불연속면 밀도와 방향성만으로는 불연속면 체계가 다공성 매질처럼 거동하는지의 여부를 결정하는데 적절하지 않으며, 가장 중요한 인자는 불연속면의 크기라는 것을 밝혔다. Andersson and Thunvik²⁾은 2차원 균열망모델의 연구에서 모델의 수리적 거동에 대하여 불연속면의 방향성은 중요한 인자가 아니라는 것을 밝혔다. Dverstrom and Andersson³⁾은 실제 현장자료에 대한 이산균열망모델의 적용 가능성을 평가한 연구에서 투수성 불연속면의 밀도로 고려되는 투수성 불연속면의 추적길이가 중요한 인자임을 밝혔다. Dershowitz *et al.*⁴⁾은 스트리파 (Stripa) 프로젝트에서 지하공동으로의 유입량을 예측하기 위하여 이산균열망모델을 적용하였다. 모델의 구축을 위한 대표적인 불연속면 인자들을 도출하기 위하여, 시뮬레이션 된 균열망의 확률분포특성과 실제 현장 자료를 비교하는 순산모델링(forward modeling)기법을 이용하였다. 이 기법은 모델이 실제 암반에서의 자료가 허용되는 수준까지 유사해지도록 각종 인자의 값을 변화시키면서 반복되는 과정을 밟는다. 불연속면 암반에서의 지하수유동을 모델링하기 위해서 입력자료가 정상적으로 이루어진 현장조사로부터 취해질 경우, 그들의 접근방법이 타당할 뿐만 아니라 유용한 것이라고 주장하였다.

그러나 이들의 이산균열망모델은 수리학적 일치성만을 고려하였고 기하학적인 일치성은 고려하지 않았다. Carlsson *et al.*⁵⁾은 층상의 매질을 가로지르는 지하수 유동에서 정상류 흐름일 때 수리전도도는 대수정규분포를 하며 유효수리전도도는 조화평균을 취하는 것이 타당하다고 하였다.

본 연구에서는 현장데이터를 균열망의 기하학적 요소와 수리학적 요소로 분리 고려하여 균열망을 구축하는 기법을 제안하였다. 3차원 이산균열망 (DFN:

discrete fracture network) 모델로 지하수 유동경로를 계산하는데는 컴퓨터 용량의 한계 때문에 고려하는 불연속면 체계의 규모에 따라 가능성 여부가 결정된다. 불연속면 밀도가 높은 지역의 절리규모 불연속면을 고려하는 균열망은 극히 한정된 영역에서 수치해석이 가능하다. 그러므로 해석대상 부지를 다공성 매질로 가정된 3차원 연속체 모델을 작성해야 한다.

지하수 유동 경로를 보다 정확히 예측하기 위해서는 부지의 3차원 연속체모델에 이방성 수리전도도가 고려되어야 한다. 그러나 현장 시험으로부터 그 지역을 대표할 수 있는 이방성 수리전도도를 얻어내는 데는 많은 노력과 비용이 소요된다. 본 연구에서는 현장조건에 맞게 구축한 균열망으로부터 이방성 수리전도도를 계산하는 기법을 제안하였다.

현장조건에 맞는 3차원 균열망 모델을 작성하고 이방성 수리전도도를 계산하는데 NAPSAC, NAMMU 및 CONNECTFLOW 코드를 사용하였다. CONNECTFLOW⁶⁾는 다공성 매체와 불연속 균열망을 조합해서 표현할 수 있는 지하수 유동 모델링 소프트웨어 패키지이다. 이 패키지는 영국 AEA Technology에서 개발한 NAMMU 다공질 매체 패키지와 NAPSAC 불연속 균열망 패키지를 통합한 것이다. NAPSAC⁷⁾은 다수의 불연속면 균을 특성화하기 위해 현장으로부터 조사된 불연속면의 주향, 경사 및 길이 등의 기하학적인 통계치로부터 직사각형 평판 균열망을 작성하는 코드이다. 지하수 흐름은 이 균열망 내에서만 이루어지며, 불연속면 사이의 암반 매질은 불투수성이라고 가정한다. NAMMU⁸⁾는 다공성 매질에서 지하수의 흐름과 이동을 모델링하는 코드이다. 이 코드는 불포화된 매질에서의 지하수 유동과 열이나 입자의 이동을 포함한 정상상태 및 시간종속 거동 등을 모델링 할 수 있다. 방사능 물질의 감쇠와 핵종 이동을 시뮬레이션 할 수도 있다. 이 소프트웨어는 복잡한 지층을 모델링 하는데 많은 선택사항을 제공할 수 있는 유한요소법을 근간으로 한다. 이 코드들은 고준위 방사성폐기물 처분연구를 위해 유럽에서 광범위하게 시험되었고 검증되었으며,^{9,10)} 실제 심지층 처분연구를 위한 지하수 유동해석 코드로 유럽 여러 나라에서 채택하고 있다.

2. 연구지역의 수리지질학적 특성

현장조건에 맞는 3차원 균열망을 확보하기 위해서는 대상부지의 지표조사 및 시추조사, 텔레뷰어(televiewer) 검층 등을 통하여 불연속면 자료를 도출하고

통계적으로 해석하는 과정이 필요하다. 균열망 작성을 위해 정의되는 인자로는 불연속면의 방향성, 틈새 크기, 간격 또는 밀도, 크기, 종식형태, 연결성, 충전물질 그리고 거칠기 등을 들 수 있다. 이들 모두 암반의 수리전도도에 영향을 주는 요소이다. 여기서, 시추자료로부터 얻을 수 있는 인자로는 불연속면의 방향성, 틈새 크기, 간격 또는 밀도, 충전물질 등을 들 수 있다. 그러나 불연속면의 크기를 규정하는 길이, 불연속면의 교차성을 규정하는 종식형태 및 연결성 등은 시추자료 만으로는 직접 구할 수 없고, 다만 다양한 방법을 통해서 예측할 수 있을 뿐이다. 특히 수리전도도에 결정적인 영향을 주는 불연속면의 길이는 지표조사 및 공동 내에서

Table 1. Generalized qualitative classification criteria for the fracture system⁹⁾.

Classification	Distribution Characteristics
Order 1	시설이 들어설 암반 블록의 경계역할을 하는 주요 광역 구조선 (major regional structures)
Order 2	단위 지하공동 사이를 통과할 수 있는 주요 균열대 (major fracture zones)
Order 3	지하공동을 통과하는 주요 균열체계 (major fracture system) 및 국지균열대 (local fracture zones)
Order 4	통상 암반에 분포되어 있는 절리 등의 균열체계 (fracture system)

Table 2. Survey results from the scanlines of fracture mapping.

ID No.	Code	Name	Xo	Yo	Zo	Scan trend	Scan plunge	Transverse trend	Transverse plunge	Scan length	Transverse length	No. of fractures
1	S	F101	875	2050	10	26	15	116	15	12	7	31
2	S	F102	925	2100	5	40	10	130	10	10	10	29
3	S	F103	1975	1700	80	90	3	180	3	16	7	28
4	S	F104	1500	1825	5	325	4	55	84	17	3.2	59
5	S	F105	-700	-125	8	298	1	20	6	11	11	34
6	S	F106	100	-300	75	250	5	340	78	24.2	10	46
7	S	F107	-150	-475	17	280	2	1	3	25	20	26
8	S	F108	1450	1900	5	152	5	62	90	6	11	44
9	S	F109	1300	2050	5	160	10	70	15	20	20	33
10	S	F110	175	-125	65	50	10	325	85	20.15	10	25
11	S	F111	1075	2075	5	32	30	122	30	18	20	52
12	S	F112	1175	2050	5	145	20	55	34	12	12	12
13	S	F113	-1750	675	30	23	10	113	10	24	7	42
14	S	F114	-75	1900	5	260	4	170	4	10	6	40
15	S	F115	-1425	825	110	60	5	150	5	7	7	13
16	S	F116	-1000	425	80	82	15	352	15	16	8	23
17	S	F117	1125	600	250	140	0	230	36	12	6	30
18	S	F118	850	675	210	180	8	270	24	12	12	27
19	S	F119	850	950	225	208	15	298	20	9	6	34
20	S	F120	825	1050	225	128	24	218	76	8	5	36
21	S	F201	-2800	1600	3	140	20	230	12	18	10	49
22	S	F202	-2650	1650	3	130	20	220	25	16	8	11
23	S	F203	-2525	1500	3	133	16	223	5	15	8.5	29
24	S	F204	-2350	1500	3	98	13	288	36	16	9	24
25	S	F205	-2075	1400	3	118	12	208	20	22	13	35
26	S	F206	-1875	1675	5	225	16	315	12	14	9	31
27	S	F207	-1675	2025	5	124	0	34	0	21	9.5	19
28	S	F208	-1950	1875	5	110	9	200	0	12.1	5	26
29	S	F209	1050	750	305	340	7	250	30	13	7	28
30	S	F210	-950	225	95	256	14	346	0	10.5	5.8	19
Total										446.95	283	935

※ Massive Andesite : ID No. 14
 Volcanic Breccia & Agglomerate : ID No. 1, 2, 4, 9, 11, 12, 18, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28
 Welded Lapilli Tuff : ID No. 17, 19, 20, 29
 Alkali-feldspar Granite : ID No. 5, 6, 7, 10, 13, 15, 16, 30
 Green Sandstone : ID No. 3
 Acidic Dyke : ID No. 8

얻은 자료에 의해 소구역의 평균 추적길이(trace length)로부터 통계적으로 예측하는 정도이며, 현재의 기술수준에서 불연속면 특성 관련인자 중 가장 불확실성이 높은 요소로 알려져 있다.

2.1 지표조사에 의한 불연속면 분포특성

연구지역은 여수반도의 북측 해안에 위치하며 전남 여수시 낙포동을 중심으로 상암동 일대의 3×5 km 면적을 포함한다. 연구지역 주변에는 유천층군 화산암류와 이를 관입한 화강암으로 구성되어 있다. 이 지역의 지하 EL.-30 m에서 EL.-60 m 사이에 유류비축기지가 건설될 예정이다.

본 연구에서는 고도의 안전성이 요구되는 방사성폐기물처분장 연구를 위해 스웨덴에서 설정한 불연속면체계 분류기준⁵⁾을 적용하였으며 현장 조사자료를 이에 따라 분류하였다. 불연속면체계는 지질조건에 따라 그리고 수치해석에 이용되는 모델의 개념에 따라 분류기준이 달라지지만, 일반적으로 적용될 수 있는 정성적 분류기준은 Table 1과 같다. 본 연구에서는 현장데이터로부터 3차원 균열망을 구성하고 그 균열망으로부터 이방성 수리전도도를 계산한 다음 이를 연속체 모델에 적용하는 것이 목적이므로 불연속면을 다공성 매체로 환산할 수 있는 Order 4에 해당하는 절리규모의 불연속면체계만을 고려하였다. 연구지역 내에 충분히 불연속면조사가 가능한 30개 조사지점에서 스캔라인법(scanline method)에 의한 불연속면조사를 수행하였으며 1 m 이하의 불연속면은 조사대상에서 제외하였다. 각 조사지점별 자료 취득결과는 Table 2에 정리하였다.

2.1.1 균열군

총 30개 지점에서 수행한 균열도 작성으로부터 누적 조사길이 446.95 m에서 935개의 불연속면에 대한 정보를 수집하였다. 노두면에서 스캔라인법으로 얻어지는 불연속면자료는 1개 균열군에 대하여 수선인 방향으로 조사된 것이 아니기 때문에 스캔라인의 설치방향에 따라 실제 수집되는 자료의 수가 적어지게 된다. 이러한 조사방향에 의한 왜곡을 제거하기 위하여 Terzaghi 보정식¹⁶⁾을 이용하였으며, 보정된 불연속면 수는 원 자료 935개에 비해 1,153개로 약 23.3% 증가되었다.

암종 구분없이, 보정되지 않은 조사자료 전체를 수정 Terzaghi 보정을 한 다음, FracMan 코드를 이용하여 4개의 균열군으로 분리하였다. 이 불연속면의 극점들을 스테레오네트에 투영하면 Fig. 1과 같이 된다. 방향성 자료에 대한 확률분포함수는 Fisher 분포¹⁷⁾를 따르는 것으로 해석되었다.

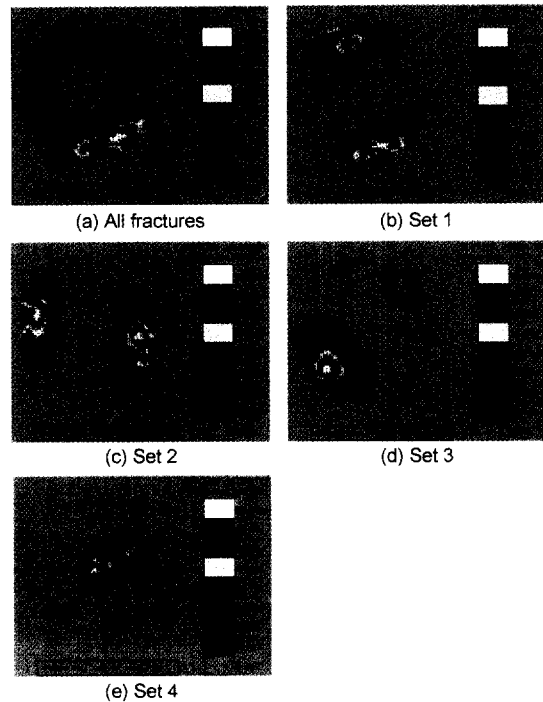


Fig. 1. Identification of the fractures from the field data.

2.1.2 불연속면 추적길이

불연속면크기는 노두탐사로부터 얻은 불연속면 추적길이 데이터로부터 순산모델링(forward modeling)¹⁸⁾ 기법을 이용하여 추정하였다. 불연속면크기는 통상 불연속면과 동일한 면적을 갖는 원의 불연속면 반경으로 가정한다.

연구지역에 분포하는 4개의 균열군 모두의 추적길이는 Fig. 2와 같이 지수(exponential)분포를 하는 것으로 나타났다.

지수분포일 때 시뮬레이션 한 평균 불연속면 반경은 균열군 순서대로 각각 2.74, 3.14, 2.91, 2.45 m인 것으로 분석되었다.

2.2 시추조사에 의한 불연속면 분포특성

불연속면체계의 수직적 분포특성을 조사하기 위해 각종 지질 구조 및 지표면의 불연속면체계 분포특성을 근거로 시추공을 천공할 위치와 천공방향을 결정한 다음 화산암 분포지역을 중심으로 10개의 NX규격 경사 시추공을 천공하였다. 천공한 시추공의 전체 길이는 2,361 m이다. 시추공의 경사각은 65°~70°이고, 시추공 내의 각종 불연속면 데이터를 얻기 위해 텔레뷰어 검층(tele-viewer logging)을 수행한 시작점 표고의 범위는

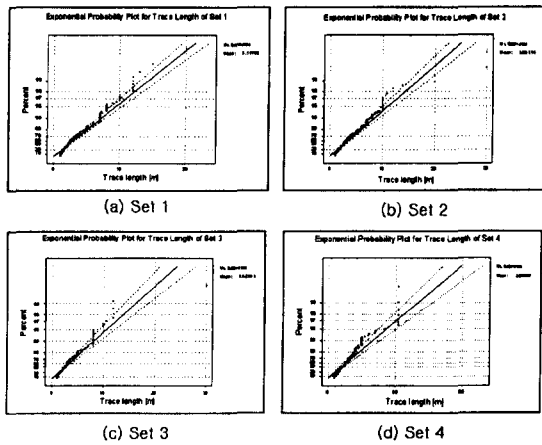


Fig. 2. Trace length distributions of the fracture sets.

EL. 58.3 m~EL.281.7 m이다. 그리고 전체 검층구간을 수직거리로 환산하면 2,078.9 m이다. 10개의 시추공으로부터 포착된 전체 균열 수는 4,609개이다.

2.2.1 불연속면의 방향성

본 연구에서는 암반 속의 지하수 유동 경로를 예측하고자 하는 것이 목적이므로 불연속면을 두 가지 타입으로 분류하였다. 텔레뷰어 검층에 의해 포착된 모든 불연속면에 대하여, 진폭 이미지와 주시 이미지 모두에 포착된 불연속면을 물이 흐를 수 있는 열린 균열 (Type 1: open fracture)로, 진폭 이미지에서만 포착되는 균열을 역학적으로는 불연속면의 역할은 하나 물이 흐르지 못하는 닫힌 균열 (Type 3: closed fracture)로 구분하였다 (Fig. 3).

10개 시추공에서 확인된 불연속면 전체 (Type 1 및 Type 3)에 대하여 균열군의 분포특성을 분석하였다 (Fig. 4). 균열군은 상·하부 구간에서 뚜렷한 차이를 보이지 않는다. 심도별로 큰 차이가 없이 모두 밀집도가 양호하게 분포하는 Set 1 및 Set 2, 그리고 하부 구간으로 갈수록 우세하게 나타나는 Set 3는 비교적 규칙적인 군으로 분류하였고, Set 1과 Set 2 경계부에 분포하는 Set 4와 전 방위에 걸쳐 나타나는 경사각 35°~60° 이하의 저경사 균열군 (Others)은 불규칙적인 군으로 분류하였다. 각 균열군의 우세방향은 148/80, 255/80, 86/65, 28/90, 140/17이다.

2.2.2 불연속면 간격

각 시추공에서 조사된 불연속면의 겹보기 간격은 각각의 시추공의 시추방향과 각 균열군의 수선방향인 이 루는 각도를 이용하여 보정하였다¹⁶⁾. 균열군별 간격의 분포특성은 로그정규분포를 하는 것으로 분석되었다.

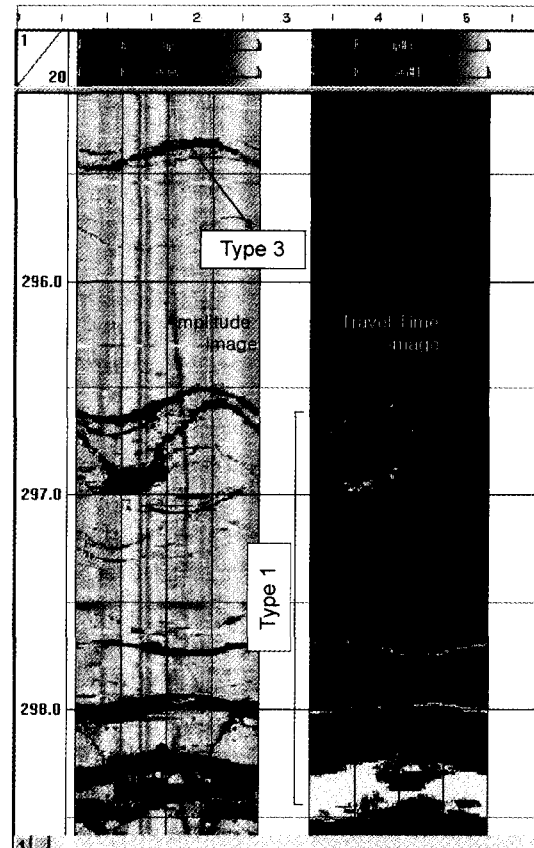


Fig. 3. Televiewer image Type 1 and Type 3.

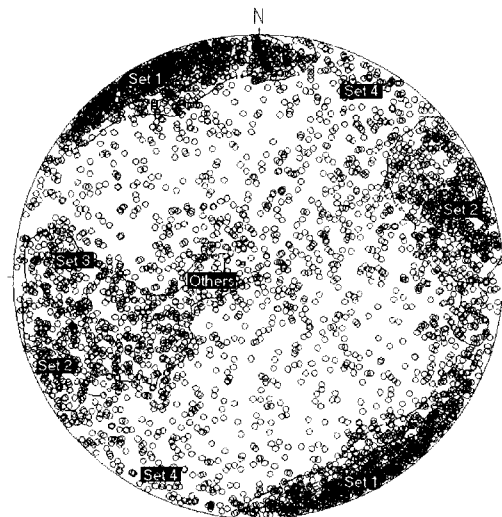


Fig. 4. Stereographic projection of poles for all fractures observed by the televiewer logging in 10 boreholes (4,609 poles).

Table 3. Statistics of the corrected fracture spacing (Type 1 only).

Set	1	2	3	4	Others
Arithmetic Mean ± SD [m]	0.78 ± 2.22	1.21 ± 2.58	2.83 ± 8.36	2.85 ± 5.56	2.77 ± 6.18
Minimum [m]	0.001	0.001	0.002	0.004	0.001
Median [m]	0.13	0.32	0.33	0.86	0.65
Maximum [m]	40.90	22.80	95.70	41.40	89.6
Mean ± SD [m] of Lognormal Distribution	-0.86 ± 0.84	-0.54 ± 0.81	-0.43 ± 0.94	-0.19 ± 0.88	-0.22 ± 0.87

Table 4. Statistics of fracture aperture (Type 1).

Set	1	2	3	4	Others
Arithmetic Mean ± SD [mm]	2.27 ± 2.40	2.81 ± 3.47	2.90 ± 3.45	3.36 ± 4.39	3.66 ± 4.55
Minimum [mm]	0.10	0.19	0.13	0.12	0.12
Median [mm]	1.44	1.65	1.64	1.97	2.43
Maximum [mm]	15.40	25.10	20.30	26.90	35.40
Mean ± SD [mm] of Lognormal Distribution	-2.81 ± 0.38	-2.75 ± 0.40	-2.73 ± 0.38	-2.69 ± 0.47	-2.60 ± 0.35

균열군별 전체 불연속면 간격의 산술평균은 0.40~1.76 m 범위를 가지며, Type 1의 간격은 0.78~2.85 m의 범위를 갖는다(Table 3).

2.2.3 불연속면 틈새 Set

각 시추공에서의 텔레뷰어 이미지를 대상으로 AperSa 프로그램¹⁹⁾을 이용하여 열린 균열(Type 1)과 닫힌 균열(Type 3)의 틈새를 계산하였다. 균열 틈새는 역시 불연속면 간격과 마찬가지로 로그정규분포를 하는 것으로 분석되었다.

Type 1과 3에 대한 산술평균은 균열군별로 2.27~3.66 mm인 것으로 분석된다. Table 4는 Type 1의 균열 틈새에 대한 데이터를 정리한 것이다.

2.3 유효수리전도도

연구지역의 수리지질 특성을 평가하기 위하여 조사 시추공 8개 공에서 총 205회의 수압시험과 양수정 2개 공에서 장기양수시험을 실시하였다. 또한 이들 조사공에서 시추 종료시점인 '98년 7월부터 '99년 3월말까지 9개월에 걸쳐 지하수위를 계측하였다.

수압시험은 이중패커(double packer)에 의한 방법으로, 압력 1 bar에서 7 bar 까지 단계별로 10분간 정압을 유지하는 상태에서 물을 주입하는 방법으로 수행되었다. 패커 간격은 EL. 0 m까지는 9 m로 하였고, 그 아래는 6 m로 하였다.

수리전도도는 Darcy의 법칙을 따르는 시험구간 매질에서의 유동형상계수(flow geometry factor)의 함수로부터 유도되는 공식으로부터 계산되는 Moye가 제안한

수리전도도 산출 공식을 이용하였다.²⁰⁾

$$K = \frac{q}{lH_0} \left[\frac{1}{2\pi} \left(1 + \ln \left(\frac{l}{r_w} \right) \right) \right] \quad (1)$$

q : 주입량 [$m^3 s^{-1}$]

l : 시험구간 길이 [m]

H_0 : 주입압 [m]

r_w : 공경 [m]

각 주입 단계별로 압력을 변화시켜가면서 얻은 주입량 식 (1)에 대해 수리전도도를 계산하였고 측정오차를 최소화하기 위해 계산결과와 최소값과 최대값을 제외한 수리전도도의 평균값을 그 구간에서의 대표 수리전도도 값으로 설정하였다. Fig. 5는 각 시추공에서 측정된 수리전도도를 누적분포곡선으로 나타내고 이를 직선화하는 백분율 y축을 가진 반-대수(semi-log) 좌표계에 그린 것이다. 조사공별 유효수리전도도의 범위는 AO-1번 공의 1.18×10^{-7} m/s로부터 AO-2번 공의 8.95×10^{-10} m/s까지 폭 넓게 분포한다. 각 조사공별 유효수리전도도 값은 상부 구간의 풍화, 파쇄대 구간을 포함하는 것이어서 공동이 위치하게 될 심도에서의 대표값으로 보기에 다소 클 것으로 판단된다. 본 연구에서는 지표로부터 GL.-50 m까지를 상부영역으로 간주하고 이 구간에 해당하는 수리전도도 데이터는 기반암 수리전도도를 계산하는데서 제외하였다. 공동이 들어설 기반암의 유효수리전도도를 보수적인 관점에서 수리적 암반 영역의 수리전도도와 수리적 균열대 영역의 수리

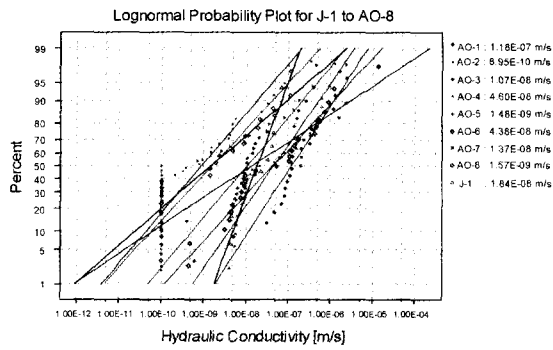


Fig. 5. Lognormal probability plot of the hydraulic conductivities in the boreholes.

전도도를 종합하여 이들의 기하평균을 계산한 결과 5.0485×10^{-9} m/s를 얻었다.

3. 입력데이터 작성

3.1 균열군 분리

불연속면을 고려한 역학적 해석을 목적으로 할 때는 단한 균열도 고려 대상에 포함해야 할 것이다. 그러나 본 연구에서는 지하수 유동체계를 해석하는 것이 목적 이므로 열린 균열만을 대상으로 하였다. Fig. 6의 심도에 따른 시추공과 만나는 불연속면의 교차빈도를 보면, Type 1의 경우 지표로부터 약 40m까지 현저하게 높은 빈도를 보인다. 이는 지표부 풍화대에 의한 영향으로 간주할 수 있으며, 수리전도도 관점에서 설정한 상부영역의 깊이(GL, -50 m)와도 일치하는 경향을 보인다.

실제 공동은 EL. -30 m에서 EL. -60 m사이에 놓이게 될 것이므로 지표부 풍화대의 높은 빈도를 고려한다면 공동이 들어설 암반의 불연속면 밀도는 실제보다 과도하게 책정될 수 있다. 그러므로 여기서는 10개의 시추공에 포착된 모든 Type 1 불연속면에서 지표로부터 GL.-40 m에 있는 불연속면을 제외한 나머지 불연속면으로 균열망을 작성하였다.

10개의 시추공에서 포착된 4,609개의 균열 중 열린 균열은 모두 2197개였으나, 모든 시추공에서 지표로부터 지하 40 m까지에서 포착된 불연속면을 제외하면 1677개로 줄어든다. 지하 40 m 이하의 불연속면에 대한 스테레오네트 투영도는 Fig. 7과 같다(Fig. 4와 비교 참조).

FracMan 코드를 이용하여 3개의 균열군으로 분리하면 Fig. 7(b), (c), (d)와 같이 된다. 방향성 자료에 대한 확률분포함수는 Fisher 분포를 따르는 것으로 해석되었다. 각 균열군별 경사 및 경사방향의 평균값과 Fisher

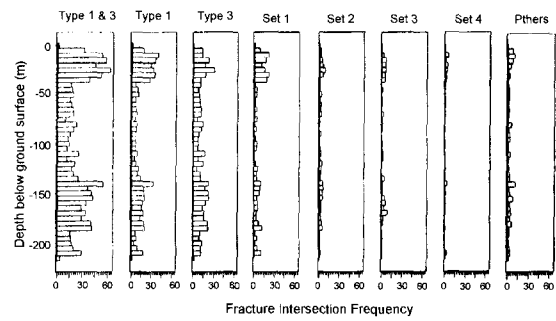


Fig. 6. Variation of the fracture intersection frequency with depth.

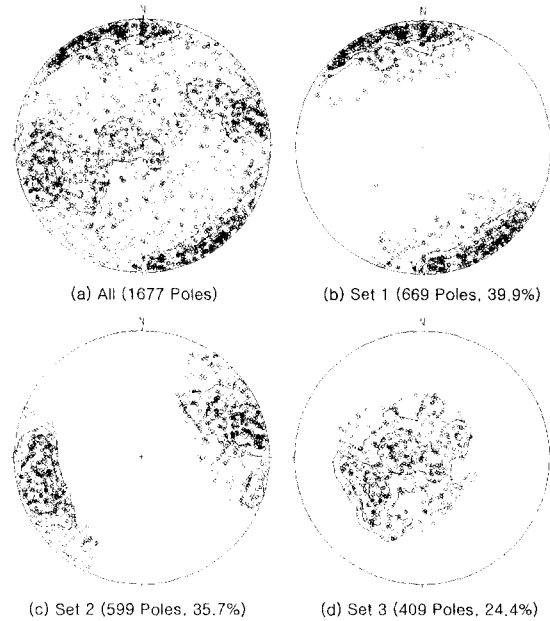


Fig. 7. Stereographic projection of poles for the fractures below GL. 40 m by televiwer logging in 10 boreholes.

Dispersion(K)에 대해서는 Table 5에 정리하였다.

각 균열군의 우세 발달방향은 158.6/89.3, 251.4/87.2, 67.8/15.6이다. Set 1과 Set 2의 불연속면은 90°에 가까운 수직 불연속면들로 구성되어 있고, Set 3은 전 방위에 걸쳐 나타나는 저경사 불연속면들로 구성되어 있다.

3.2 불연속면 추적길이 분포

지하에서 포착된 불연속면의 길이는 시추조사만으로는 알 수 없으므로 2.1항에서 기술하였던 지표조사 데이터를 근거로 시추조사 자료와 비교하여 균열군별로 가장 비슷한 지표조사 균열군과 연계시켜 거기에 해당

Table 5. Mean of orientation and Fisher dispersion of each fracture set.

Item	Unit	Set 1	Set 2	Set 3
mean(Dip Direction)	deg.	158.6	251.4	67.8
mean(Dip Angle)	deg.	89.3	87.2	15.6
Fisher Dispersion(K)		9.95	7.46	7.17

Table 6. C and λ of each fracture set.

	Set 1	Set 2	Set 3
mean(L ²)	16.5	22.97	13.0
L _{max}	20.0	30.0	10.5
L _{min}	1.0	1.0	1.0
λ	2.147	2.164	1.747
C	1.185	1.186	0.903

하는 추적길이를 지하에서 포착된 균열군의 불연속면 길이로 간주한다. Fig. 1과 같이 스캔라인법으로 구한 지표의 불연속면데이터는 4개의 군으로 분리할 수 있는데 그 분포로 보아 시추데이터 Set 1은 지표데이터의 Set 1과 관련지을 수 있고, 시추데이터 Set 2는 지표데이터의 Set 3과, 시추데이터 Set 3은 지표데이터 Set 4와 관련지을 수 있다.

Fig. 2에 의하면 이들은 모두 지수분포를 한다는 것을 알 수 있다. 이 분포함수를 찾기 위해 추적길이 L을 독립변수로 하는 지수분포 식을 설정하고 Fig. 2(a), (c), (d)의 분포곡선에 해당하는 상수 C와 λ 를 결정해야 한다.²¹⁾

$$f(L) = C \cdot L^{-\lambda} \quad (2)$$

본 연구에서는 NAPSAC의 지수분포에 대한 세 가지 옵션 중 Truncated Power-Law Distribution을 적용하였다. 이 분포의 불연속면 추적길이 L과 지수 λ 와의 관계는 다음과 같다.²¹⁾

$$\text{mean}(L^2) = \frac{1-\lambda}{3-\lambda} \cdot \frac{L_{\max}^{3-\lambda} - L_{\min}^{3-\lambda}}{L_{\max}^{1-\lambda} - L_{\min}^{1-\lambda}} \quad (3)$$

여기서, L_{max} = 불연속면 추적길이의 최대값 [m]

L_{min} = 불연속면 추적길이의 최소값 [m]

상수 C는 다음과 같다.

$$C = \frac{1-\lambda}{L_{\max}^{1-\lambda} - L_{\min}^{1-\lambda}} \quad (4)$$

지표조사 자료로부터 계산된 분포함수에 해당하는

상수 C와 λ 는 Table 6과 같이 계산된다.

균열망을 작성하는데 필요한 NAPSAC에 입력할 변수는 최대 및 최소 길이와 그 지수값 λ 이다.

3.3 불연속면 밀도

불연속면 밀도는 보통 얼마나 많은 불연속면들을 생성할 것인가를 결정하는 요소이다. NAPSAC에서 사용한 등가의 접근법은 단위 체적 당 불연속면의 중심점이 몇 개가 있는 가로 정의된다. 불연속면 중심의 좌표에 대한 값을 생성하기 위해 푸아송 프로세스를 이용한다. 이때 해석범위의 외곽에서 불연속면이 생성되지 않아 해석오차가 발행할 수 있는 외곽효과(edge effects)를 피하기 위해 시뮬레이션 할 범위보다 더 큰 영역에서 균열망을 작성한다.

불연속면 밀도는 지표에서 수행한 현장 불연속면 분포조사로부터 스캔라인을 따른 불연속면의 간격이나 시추공에 포착된 불연속면 간격으로부터 구할 수 있다. 주어진 균열군에 대해 불연속면 밀도 ρ 는 직선을 따른 교차점의 평균 간격의 항 \bar{s} 로 주어진다.²²⁾

$$\bar{s} = (\rho\bar{X})^{-1} \quad (5)$$

여기서, \bar{X} 는 스캔라인과 직각을 이루는 평면에 투영된 불연속면들의 평균투영면적이다. 이 값을 구하기 위해서는 불연속면의 길이와 불연속면 간격 그리고 불연속면의 경사각이 함께 고려되어야 한다. 이들이 모두 무작위 적이라면 밀도는 각각의 평균값을 구해 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.²¹⁾

$$\rho = \frac{1}{\text{mean}(s) \cdot \text{mean}(l^2) \cdot \text{mean}(\cos D)} \quad (6)$$

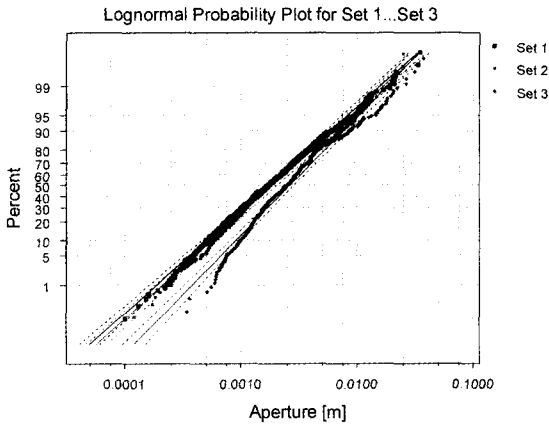
Fig. 7에 해당하는 연구부지 현장 균열망의 불연속면 밀도를 계산한 결과는 Table 7과 같다. 여기서 10개의 시추공 수직거리는 전체 검층구간을 수직거리로 환산한 2,078.9 m에서 상부 40 m 씩을 제외한 값이고, 균열간격이 Table 3의 값에 비해 큰 것은 풍화대인 상부 40 m 균열을 제외하고 계산했기 때문이다.

3.4 불연속면 틈새

2.2.3항에서 기술한 불연속면 틈새 자료 중 지표로부터 GL-40 m 이하의 영역에서 잡힌 불연속면 자료만을 추출해 해석에 이용하였다. Fig. 8은 GL-40 m 이하에서 포착된 Type 1의 불연속면 틈새를 3.1항에서 설정한 Set 별로 분리하고 각각에 대해 누적분포곡선을 그린 다음 이를 직선화하는 백분율 y축을 가진 반-대수 좌표계

Table 7. Fracture density of each fracture set.

Item	Unit	Set 1	Set 2	Set 3
number of fractures		669 (39.9%)	599 (35.7%)	409 (24.4%)
total vertical length of 10 boreholes	m	1678.9	1678.9	1678.9
average fracture spacing (s)	m	2.5096	2.8029	4.1049
average fracture area (l^2)	m ²	16.497	22.970	13.005
average cos(D)		0.1917	0.3262	0.8286
fracture density	개/m ³	0.1260 (64.2%)	0.0476 (24.3%)	0.0226 (11.5%)

**Fig. 8.** Aperture distribution of each fracture set below GL-40 m.

에 비교한 그래프이다.

세 Set 모두 직선에 수렴하므로 로그정규분포를 하고 있음을 알 수 있다. 이들에 대한 통계적 값들을 Table 8에 요약하였다.

4. 3차원 균열망 작성

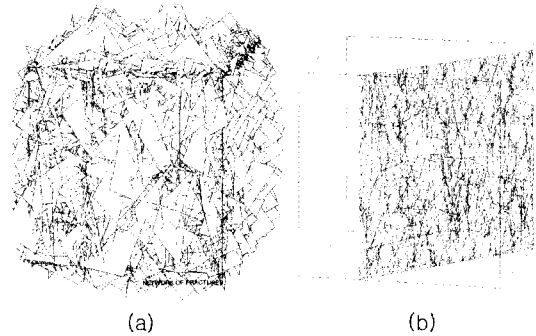
4.1 기하학적으로 일치된 균열망 작성

현장자료(Table 5, 6, 7)를 입력하여 균열망을 구성하면 Fig. 9(a)와 같이 된다. Fig 9(b)는 작성된 균열망에 임의의 수직단면을 넣어 그 면과 교차하는 불연속면의 교차선을 보인 것이다. 이 블록 사이즈는 50 m×50 m×50 m 인데 이보다 큰 체적에서 균열망을 그리면 Dimension Overflow가 되어 계산이 불가능했다.

연구 대상 부지 3.0 km×4.0 km 범위의 NAPSAC 해석 모델은 Order 1에서 Order 3까지의 대규모 불연속면만 시뮬레이션이 가능할 뿐 공동 주위에 직접적으로 분포하는 Order 4규모의 불연속면을 고려한 모델은 계산이 불가능하였다. 그러나 공동 주위의 지하수 유동을

Table 8. Statistics of the fracture aperture of the type 1 fractures below GL-40 m. (unit: m)

	Set 1	Set 2	Set 3
mean(Aperture)	2.7751E-3	3.0066E-3	3.9047E-3
STD(Aperture)	3.4942E-3	3.4895E-3	4.5659E-3
mean(Ln(Aper.))	-6.3620	-6.2716	-5.9412
STD(Ln(Aper.))	0.9553	0.9448	0.8320

**Fig. 9.** (a) 3D fracture network block generated using in-situ data (50 m×50 m×50 m). (b) Intersection of a vertical section and the generated fracture network.

해석하기 위해서는 Order 4를 고려하지 않는 시뮬레이션은 의미가 없으므로 Order 4의 불연속면 특성을 반영한 등가의 3차원 연속체 모델을 작성해야 한다. 공동을 포함한 해석대상 부지 전체를 NAPSAC으로 모델링 할 수는 없지만 대상 부지에 대해 확률적으로 대표할 수 있는 이방성 수리전도도의 6 성분(K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} , K_{xy} , K_{yz} , K_{xz})의 계산 결과를 얻어낼 수 있다. 이 결과를 연속체 모델에 입력하면 이방성이 고려된 부지의 지하수 유동 해석이 가능해진다.

초기균열망을 작성하기 위해서 본 연구에서는 확률적으로 대표성이 검증된²³⁾ 시드번호 307을 이용하여 3항에서 언급한 현장데이터를 그대로 입력해 세 번이 100 m인 정육면체 균열망을 구축하였다. 그 다음 현장

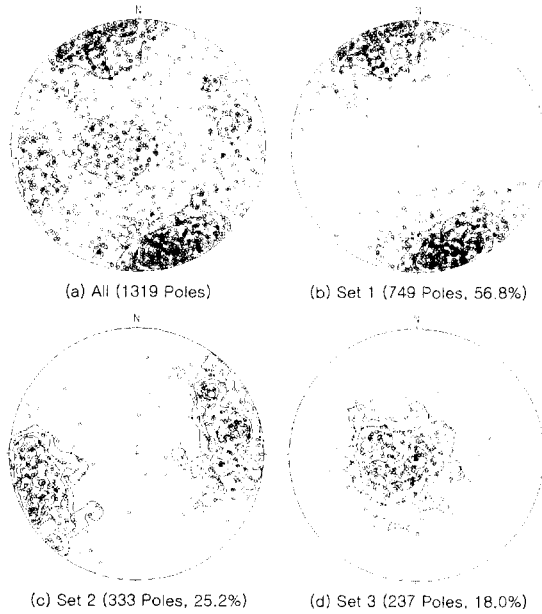


Fig. 10. Stereographic projections of the poles for fractures of the fracture network generated from in-situ data (seed number =307).

시추공과 똑같은 Trend 및 Plunge를 갖는 수직성분 길이가 100 m인 10개의 코어로깅 선을 설정하고 이 선과 형성된 균열망의 불연속면이 교차된 극점을 스테레오네트에 도시하였다(Fig. 10).

코어로깅 선 전체길이의 수직성분에 대한 합계는 1000 m이고 여기에 포착된 스테레오네트에 있는 극점의 수는 1319개로 나타났다. 검증구간 중 계산에 고려한 현장 시추공 길이의 수직성분 합계는 1678.9 m이므로 Fig. 7의 현장 스테레오네트에 포착된 극점의 수가 1677개인 점을 고려하면 1000 m의 코어로깅 선에 의한 극점은 1000개 정도가 적당한데 너무 많은 극점이 포착되었다. 이는 코어로깅 선에 실제보다 더 많은 불연속면과의 교차점이 발생했다는 것을 의미한다.

또한 Fig. 7의 Set 1, Set 2, Set 3의 비율이 각각 39.9%, 35.7%, 24.4%인데 반해 Fig. 9의 비율은 각각 56.8%, 25.2%, 18.0%이다. 이것은 현장데이터를 그대로 반영하여 작성된 균열망의 Set 1 균열과 코어로깅 선의 교차점이 상대적으로 많았고, Set 3의 교차점이 상대적으로 적었다는 것을 의미한다.

균열망을 작성하는데 필요한 변수는 앞에서 언급한 바와 같이 불연속면 틈새, 경사 및 경사방향, 불연속면 간격, 불연속면 길이 등이다. 여기서 불연속면 틈새는 수리전도도와 관련 있는 변수로 균열망의 기하학적 형

태에는 영향을 미치지 않는다. 경사 및 경사방향 그리고 불연속면 간격은 시추공의 텔레뷰어 분석에 의해 얻은 직접적인 데이터이므로 변경의 여지가 없다. 불연속면 밀도가 경사각, 불연속면 간격 및 불연속면 길이에 의해 계산된다는 점(식 6)을 감안하면 결국은 불연속면 길이가 극점의 수를 많게 한 주원인이 된다.

불연속면 길이는 직접 접근해 얻기는 불가능한 데이터이기 때문에 지표조사에 의한 불연속면 추적길이로부터 유추할 수밖에 없다. Table 6의 지수분포를 결정하는 변수 중 불연속면 길이의 최소값 및 최대값은 직접 지표로부터 얻은 데이터이므로 변경 대상에서 제외하면, 지수분포형태를 결정짓는 지수 λ 가 균열망을 변경시킬 수 있는 유일한 변수가 된다. 그러므로 본 연구에서는 λ 를 변경시켜 가면서 균열망을 수정해 나갔다. 지수분포함수 식 (2)의 상수 C도 지수 λ 의 함수이므로(식 (4)) λ 를 조절하면 각 Set마다의 분포형태를 조절할 수 있다.

식 (2)의 특성상 같은 불연속면 밀도 하에서 λ 를 크게 하면 길이가 짧은 불연속면이 길이가 긴 불연속면에 비해 상대적으로 더 많이 생성된다. 전체적으로 극점의 수가 과도하게 포착되었으므로(1000개 요구에 1319개 포착), 생성된 불연속면 수가 같다고 하면 길이가 짧은 불연속면의 수를 많게 하는 것이 코어로깅 선과 불연속면의 교차점을 적게 하는 것이다. 그러므로 각 Set의 λ 값을 늘리되 Fig. 10의 각 Set에 포착된 극점의 수를 고려하여 극점의 수가 상대적으로 많은 Set 1의 λ 를 더 많이, Set 3의 λ 를 조금만 증가시켜 NAPSAC을 다시 실행시킨다. 그 결과 얻은 스테레오네트를 다시 현장 스테레오네트인 Fig. 7과 Set 별로 비교하여 λ 를 다시 수정한다. 이러한 과정을 반복하여 최종적으로 작성된 균열망의 스테레오네트는 Fig. 11과 같이 된다.

Set 별 극점 수의 비율이 같고 전체적으로 Fig. 7과 같은 분포를 보이고 있으므로 생성된 균열망은 연구부지 전체를 기하학적인 측면에서 확률적으로 대표한다고 할 수 있으며, 이 균열망을 생성하는데 사용된 λ 는 Set 1이 2.670, Set 2가 2.112, Set 3는 1.719로 최종 결정되었고 이 값은 수리적으로 일치하는 균열망을 생성하는데 그대로 사용되었다.

4.2. 수리학적으로 일치된 균열망 작성

4.2.1. 경계조건 및 물성치

Fig. 12는 기하학적인 조건에 맞게 생성된 연구부지 균열망 암반블록에 대한 수리전도도를 구하기 위해 설정한 경계조건을 보인 것이다. 균열망의 3면에 임의의 수압(여기서는 400 Pa)을 가하고 점 O에 0 Pa를 유지하

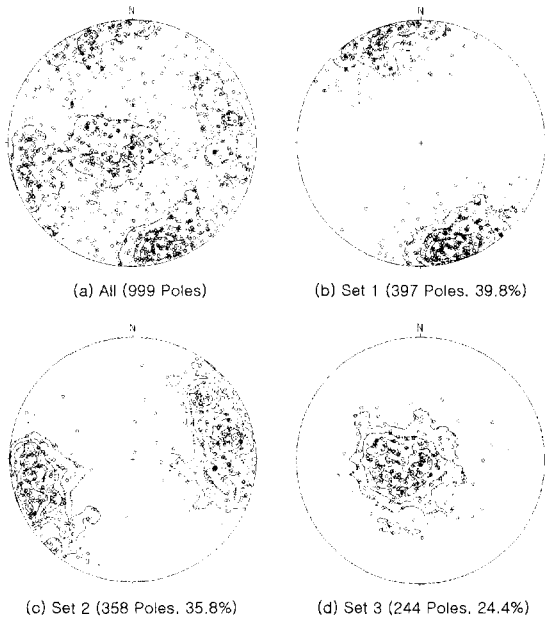


Fig. 11. Stereonets for the final fracture network matched with borehole data geometrically.

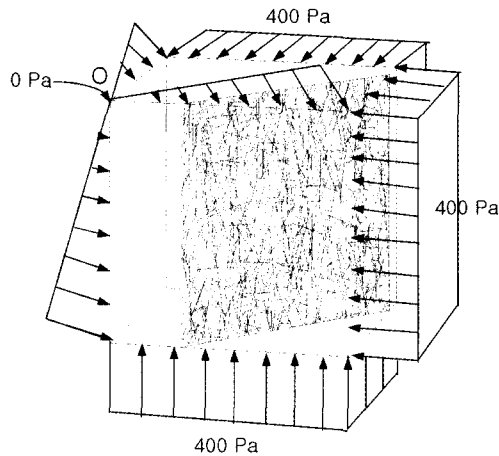


Fig. 12. Boundary conditions to calculate the hydraulic conductivity of the generated 3D fracture network.

면 한 변이 50 m인 균열망 블록을 통하여 O점으로 물이 유입되는 현상이 일어나며 동시에 6성분의 수리전도도 및 고유투수계수(intrinsic permeability)가 계산된다.

4.2.2. 수리전도도와 투수량계수와와의 관계

NAPSAC에서는 수리전도도를 계산하기 위한 변수로 수리틈새(hydraulic aperture)나 투수량계수 중 하나의 값을 사용한다. 3.4항에서 분석한 바와 같이 불연속면

틈새는 로그정규분포를 한다. 그러나 텔레뷰어로 조사된 틈새는 물리적인 틈새(physical aperture)이며 수리적인 틈새로는 직접 적용할 수가 없다. 유효수리전도도는 불연속면의 거칠기, 미세 불연속면에서의 지하수 흐름 과정, 불연속면 내의 충전물, 그리고 지중압 등에 의해 복합적인 영향을 받기 때문에 정확한 해석을 하는데 어려움이 있다.

그러므로 본 연구에서는 물리적인 틈새를 이용해 수리전도도를 구하지 않고 현장에서 측정한 수리전도도를 이용해 투수량계수를 계산한 다음 역으로 물리적인 틈새와 수리적인 틈새의 상관계수를 찾으려고 하였다.

본 연구에서는 유효수리전도도와 투수량계수의 다음과 같은 관계식을 이용하였다. 'Rule of Thumb'라는 간단한 관계식은 다음과 같다.²⁴⁾

$$K_e \cong \frac{T}{s} \tag{7}$$

여기서, K_e = 유효수리전도도 [m/s]

T = 불연속면들에 대한 투수량계수의 기하평균 [m²/s]

s = 물이 흐르는 열린 균열 간격 [m]

유효수리전도도의 기하평균으로부터 투수량계수의 기하평균을 구하려면 로그공간(log space)을 이용해야 한다. 로그공간에서 기하평균과 산술평균값은 같으므로 측정된 수리전도도 데이터에 모두 자연로그를 취하여 산술평균을 구하고 다음 식을 적용하면 투수량계수에 로그를 취한 값의 산술평균을 구할 수 있다.²⁴⁾

$$\ln(T) \cong \ln(K_e) + \ln(s) \tag{8}$$

이 값을 NAPSAC의 입력데이터로 사용했으며, 투수량계수 분포는 로그정규분포 옵션을 택하였다. 표준편차는 $L_n(K_e)$ 의 표준편차를 구해 $\ln(T)$ 의 표준편차로 사용하였다. 그러나 식 (7)은 이중 패커 구간과 불연속면 간격의 크기가 비슷할 때(즉, 1 fracture/interval) 잘 맞는다고 보고되어있다.²⁴⁾

4.2.3 이방성 수리전도도 및 투수계수 계산

연구부지에서 수행한 수압시험은 3.4항에서 언급한 바와 같이 패커 구간을 6 m~9 m로 하였다. 현장 암반의 불연속면 평균 간격은 1 m이므로 구간 당 불연속면이 6~9개 존재할 수 있다. 그러므로 이에 대한 보정이 이루어져야 하는데 이를 위해서 계산 결과를 입력조건으로 하는 피드백(feedback) 계산을 수행하였다.

Table 9는 현장에서 측정한 유효수리전도도와 일치하

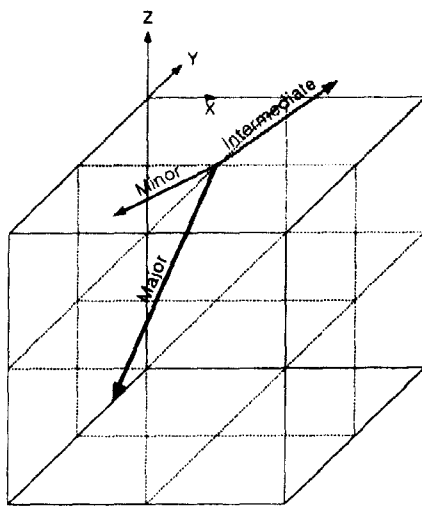
Table 9. Finally modified 6 components of hydraulic conductivity and principal hydraulic conductivities.

	K_{xx}	K_{yy}	K_{zz}	K_{xy}	K_{yz}	K_{zx}
Componets	3.9177E-09	4.7590E-09	7.7854E-09	-1.7449E-10	-1.9403E-10	-1.8320E-09
Major			8.5189E-09			
Intermediate			4.7896E-09			
Minor			3.1536E-09			
Geo. Mean			5.0485E-09			

(unit : m/s)

Table 10. Direction cosine of principal permeabilities.

	$\cos \alpha \cos \beta$	$\sin \alpha \cos \beta$	$-\sin \beta$	Trend(deg)	Plunge(deg)
Major	-3.6873E-01	-3.0831E-02	9.2903E-01	-85.2	-68.3
Intermediate	1.4553E-01	-9.8904E-0	2.4940E-02	8.4	-1.4
Minor	9.1807E-01	1.4440E-01	3.6917E-01	98.9	-21.7

**Fig. 13.** Direction of 3 principal permeabilities.

도록 피드백 계산을 수행하여 구한 최종적인 6성분의 이방성수리전도도를 보인 것이다. 여기서 계산된 수리전도도의 기하평균 5.0485×10^{-9} m/s은 본래 현장에서 측정된 수리전도도의 기하평균값과 같으므로 이 값을 출력하는 수리적 특성을 갖는 균열망은 현장조건과 수리적으로도 일치한다고 할 수 있다.

Table 9의 6성분의 수리전도도를 Fig. 11과 부합하는 균열망에 적용하여 계산된 수리특성을 갖는 균열망은 기하학적 및 수리학적으로 현장조건과 일치한다고 할 수 있으며, 이 균열망으로부터 계산된 성분별 K값 및 주수리전도도는 현장의 수리적 특성치를 대표한다고 할 수 있다.

각 성분별 수리전도도 값에 상온의 지하수 동점성계수(ν) 1.0244×10^{-6} m²/s를 곱해주면 각 성분별 고유투수계수를 구할 수 있으며, 이 값은 NAMMU의 3차원 연속체모델의 입력자료로 사용된다.

계산된 주투수계수에 대한 방향코사인 값은 Table 10과 같으며 이것을 3차원으로 그리면 Fig. 13과 같이 된다.

5. 지하수 유동경로 및 유동시간 산정

여기서는 연구지역의 복잡한 산악지형을 반영한 3차원 연속체모델에 앞에서 작성한 3차원 균열망모델로부터 계산된 이방성 수리전도도를 적용하여 공동으로부터 유출될 지하수의 유동경로 및 생태계로의 도달 소요시간을 계산하였다.

5.1 연속체 모델 개요

Fig 14는 공동이 굴착될 위치와 6.0 km×5.0 km의 점선으로 나타낸 해석영역을 보인 것이다. 경계조건 문제를 해결하기 위해서 바다 쪽으로 5 km, 6 km까지 모델 범위를 확장하였다. Fig. 15는 등수두선을 상부경계로 하여 작성한 유한요소모델을 보인 것이다. 격자망은 ABAQUS Pre Version 5.7로 작성하여 NAMMU Format에 맞게 수정하여 사용하였다.

모델의 신뢰성을 검증하기 위해서는 이미 건설된 인접한 유류비축시설로부터 계속된 지하수 유입량과 해석 모델로부터 계산된 공동으로의 유입량을 비교하여 모델의 신뢰성을 검증하였다.²³⁾ 그러나 본 원고에서는 이에 대한 자세한 사항은 지면관계상 생략하였고 다음 기회

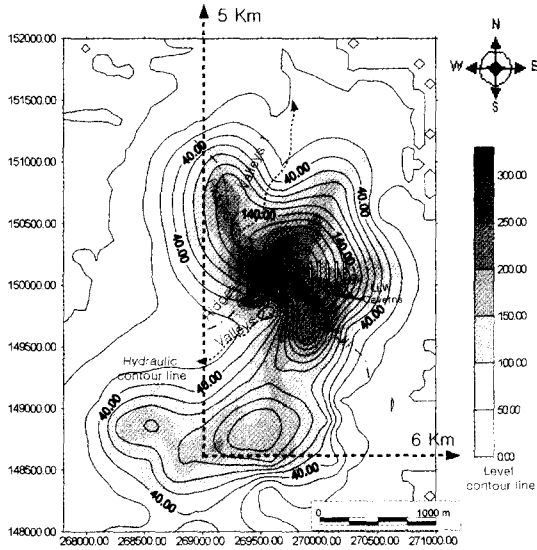


Fig. 14. Area of modeling.

에 발표하고자 한다.

해석모델에는 1개의 중준위(Intermediate Level Waste: ILW) 처분공동과 4개의 저준위(Low Level Waste: LLW) 처분공동을 포함시키고, 중준위 공동의 폭과 높이를 20m로 하였고, 저준위 공동의 폭과 높이는 각각 20 m, 10 m로 하였다. 모든 처분공동의 바닥은 EL.-110 m에 위치하도록 하였다.

5.2 계산 결과

본 연구에서는 EL.-90 m에서 EL.-110 m에 위치하는 5개의 중·저준위 방사성폐기물 처분장이 건설된 것으로 가정하였다. 폐기물 처분이 완료된 후 벤토나이트와 모래 및 자갈이 섞인 되메움재(backfill)로 공동을 모두 메운 뒤 방사성 오염물질이 공동의 바닥을 통하여 어떤 경로로 유출되는지에 대하여 검토하였다. 되메움재의 수리전도도는 통상 중·저준위 방사성폐기물 처분장의 되메움재를 기준으로 $1.0 \times 10^{-11} \text{ m/s}^{25)}$ 를 적용하였으며 등방성이라고 가정하였다.

5개 공동 바닥의 서로 다른 15점에서 출발하여 생태계로 도달하는 유동경로를 따라 이동거리 및 소요시간을 계산하였으며, 생태계 도달 시점은 유동 지하수가 상부 수두면에 도달되는 순간으로 가정하였다.

이방성수리전도도의 영향을 분석하기 위해서 서로 다른 두 모델을 계산에 이용하였다. Fig. 16은 4장에서 구한 이방성 수리전도도를 입력으로 해석한 유동경로를 보인 것이고, Fig. 17은 등방성 수리전도도를 입력으로

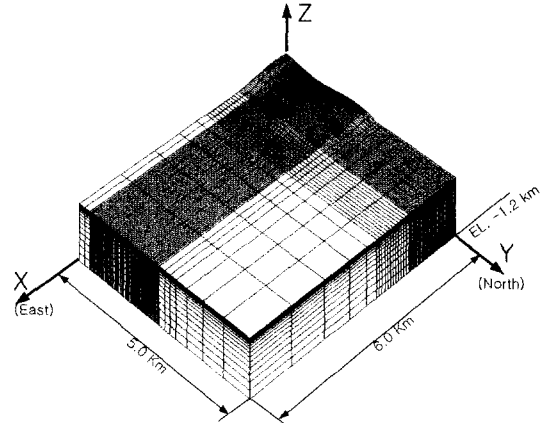


Fig. 15. Finite element model mesh.

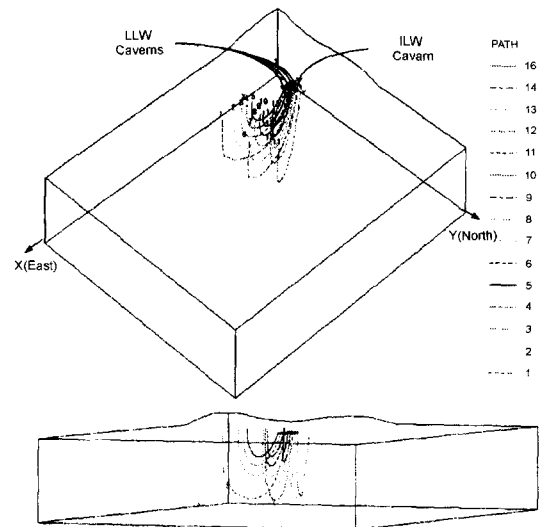


Fig. 16. Pathway using anisotropic hydraulic conductivity.

해석한 유동경로를 보인 것이다. Table 11은 각 Path의 유동 거리 및 소요시간을 요약한 것이다.

Path 6은 전형적인 지하수의 유동경로를 잘 나타내는 것으로 등방성 모델의 계산결과와 이방성 모델의 결과로부터 뚜렷한 차이를 보여준다. 등방성 수리전도도로 계산한 경우 유동경로 거리는 2,467 m로 계산되었고, 소요시간은 5,791년으로 계산되었다. 반면 이방성 수리전도도를 적용한 경우 유동경로는 아주 상이한 양상을 보이며, 유동경로 거리는 3,089 m로 계산되었고, 소요시간은 10,104년으로 계산되었다. 등방성 수리전도도를 적용했을 때보다 소요시간이 두 배 가까이 길어지는 것으로 계산되었다.

Table 11. Travel time and path length for each path.

PATH	Anisotropic K		Isotropic K		Ratio(=Aniso/Iso)	
	TRAVEL TIME (Years)	PATHLENGTH (m)	TRAVEL TIME (Years)	PATHLENGTH (m)	TRAVEL TIME	PATHLENGTH
1	8,506	3,025	5,515	2,473	154%	122%
2	4,437	2,415	3,165	1,956	140%	123%
3	2,633	1,921	1,908	1,542	138%	125%
4	1,610	1,511	1,204	1,213	134%	125%
5	996	1,173	751	951	133%	123%
6	10,104	3,089	5,791	2,467	174%	125%
7	5,272	2,500	3,218	1,952	164%	128%
8	2,792	1,939	1,870	1,521	149%	128%
9	1,643	1,509	1,101	1,169	149%	129%
10	980	1,149	668	902	147%	127%
11	8,541	2,909	4,840	2,302	176%	126%
12	4,480	2,329	2,732	1,804	164%	129%
13	2,431	1,818	1,560	1,388	156%	131%
14	1,320	1,374	873	1,054	151%	130%
15	664	966	536	795	124%	122%
			Average		150%	126%

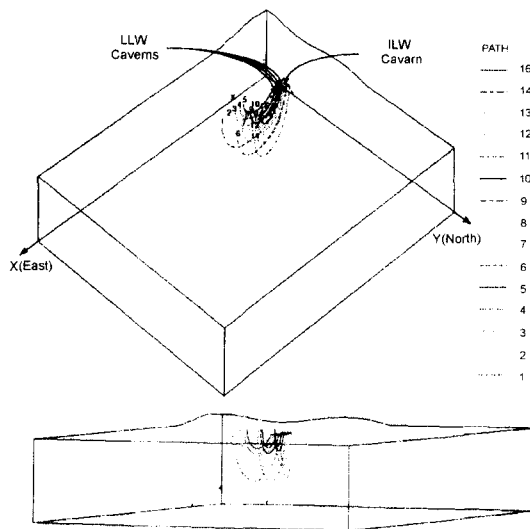


Fig. 17. Pathway using isotropic hydraulic conductivity.

15개 경로에 대한 결과를 평균하여 비교해 보면 이방성 수리전도도를 적용한 경우, 등방성 수리전도도를 적용한 경우에 비해 유동경로는 약 26% 가량 길어지고, 유동시간도 약 50% 정도 길어지는 것으로 계산되었다.

이상의 결과에서 처분시설의 안전성 평가 과정에는 이방성 수리전도도를 반드시 고려해야 한다는 점이 본

연구의 중요한 결과 중의 하나이다.

6. 결 론

방사성폐기물을 인간환경으로부터 격리시키는 처분장의 경우 오염물질이 생태계로 도달하기까지의 이동경로 및 소요되는 시간을 예측하는 것은 처분장의 안전성을 평가하는데 가장 기본적인 요소가 된다. 오염물질은 암반 불연속면 내의 지하수를 통하여 이동하게 되므로 지하 암반에서의 불연속면을 통한 지하수의 흐름을 파악하는 것은 처분장의 부지선정이나 안전성을 평가하는데 중요한 요소가 된다.

본 연구에서는 유류비축기지가 건설될 부지를 연구 대상으로 선정하고 풍부한 현장 조사자료를 근거로 3차원 지하수유동모델을 구축하여 지하수의 유동경로 및 소요시간을 계산하였으며, 이 과정에서 현재까지 연구가 미진하다고 판단되는 다음과 같은 세 가지 기법 및 결과를 본 연구를 통하여 제시하였다.

- 현장데이터를 불연속면의 기하학적 요소와 수리학적 요소로 분리 고려하여 균열망을 구축하는 기법
- 현장조건에 맞게 구축한 균열망으로부터 이방성 수리전도도를 계산하는 기법
- 복잡한 산악지형의 지하수위를 고려한 3차원 연속체모델을 작성하여 지하수가 생태계에 도달하는 이동경

로 및 소요시간을 계산

본 연구에서 얻은 중요한 결론을 요약하면 다음과 같다.

· 현장조건에 맞는 3차원 균열망 구축을 위해서는 지표조사와 시추공 검층에 의해 얻은 불연속면 데이터를 스테레오네트를 이용해 먼저 기하학적으로 일치하는 균열망을 구축하고, 이 균열망을 이용해 현장에서 계측된 수리전도도에 부합하는 투수량계수나 수리투습률을 구하여 수리적으로 일치하는 균열망을 작성하는 2단계 과정을 밟는 것이 합리적이다.

· 고경사 불연속면이 많은 연구부지에서 지하수의 유동경로 및 소요시간을 계산한 결과에 의하면 15개 경로의 평균값은 이방성 수리전도도를 적용한 결과가 등방성 수리전도도를 적용한 결과에 비해 유동거리에서는 약 26% 정도 더 길게 계산되었고 소요시간에서도 50% 가량 많은 시간이 계산되었다. 3차원 모델에서 보이는 경로도 방향이 많이 다른 것으로 나타났다. 결국, 지하수의 유동경로를 해석하려면 현장조건에 맞는 이방성 수리전도도를 구하고 적용해야 하는 것이 필수적이라는 결론을 얻었다.

· 공동의 서로 다른 위치에서 출발한 지하수의 유동경로를 분석해보면 출발점에 따라 상부 지하수면까지의 유출 시간 및 경로거리가 매우 달라지는데 우리나라와 같이 지형의 굴곡이 심한 경우 처분장의 안전성평가를 위해서는 지형에 따른 수두분포의 변화를 고려한 3차원 해석이 필요하다고 판단된다.

본 연구를 통하여 지하공간시설물로부터 지하수의 유출시간이나 유동경로를 보다 합리적으로 예측하는 방법을 제시하였으며, 특히 방사성폐기물을 생태계로부터 격리시키는 심부처분장의 안전성을 평가하는데 본 연구에서 제시한 방법과 절차를 적용하는 것이 타당하다는 것을 입증할 수 있었다. 향후 연구에서 이 방법과 절차를 다른 부지에도 적용하여 보고 그 타당성을 재검증하고 보완하는 과정이 필요하다고 사료된다.

사 사

본 연구는 과학기술부에서 시행한 원자력연구개발사업의 연구비에 의해 이루어진 연구결과로서 관련자 여러분께 깊은 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

1. Long, J.C S., Witherspoon, P. A., 1985, "The Relationship of the Degree of Interconnection to Permeability in Fracture Network", J. of Geophy. Res., 90. B4, 3087-3098.
2. Andersson, J., Thunvik, R., 1986, "Predicting Mass Transport in Discrete Fracture Networks with the Aid of Geometrical Field Data", Water Resources Research, 22. 13, 1941-1950.
3. Dverstrop, B., Andersson, J., "Application of the Discrete Fracture Network Concept with Field Data: Possibilities of Model Calibration and Validation", Water Resources Research, Vol.25, No.3.
4. Dershowitz, W., Wallman, P., Kindred, S., 1991, "Discrete Fracture Modeling for the Stripa Site Characterization and Validation Drift Inflow Predictions", SKB Stripa Report TR 91-16, SKB, Stockholm.
5. Carlsson, A., Gustafson, G., Lindblom, U., Olsson, T., 1990, "Scale Effects in the Determination of Hydraulic Properties of Rock Masses, Proc. ISRM Rock Joint Conf., Scale Effects in Rock Masses, Pinto da Cunha(ed.), Balkema, Rotterdam.
6. Hartley, L.J., 1996, "CONNECTFLOW (Release 1.0) User Guide", AEA Technology, Waste Environmental Group, AEAT-0527.
7. Hartley, L.J., 1996, Herbert, A.W., Wilcock, P.M., "NAPSAC (Release 4.0) Summary Document", AEA Technology, AEA-D&R-027.
8. Hartley, L.J., Jackson, C.P., Watson, S.P., 1996, "NAMMU (Release 6.3) User Guide", AEA Technology, AEA-ES-0138.
9. Atkinson, R., Cherill T.P., Herbert A.W., Hodgkinson D.P., Jackerson C.P., Rae, J. and Robinson, P.C., 1984, "Review of the Groundwater Flow and Radionuclide Transport Modeling in KBS-3", UKAEA Report AERE-R. 11140.
10. Robison, P.C., Jackerson, C.P. Herbert, A.W. and Atkinson, R. 1986, "Review of the Groundwater Modeling of the Swiss Project Gewähr", UKAEA Report AERE-R. 11929.
11. Schwartz, F.W. and Lee, G., 1991, "Cross-verification Testing of Fracture Flow and Mass Transport Codes", Stripa Project Technical Report 91-29, SKB, Stockholm.
12. Jenkins, K., Hock, A.R. and Wei, L., 1995, "Transient Solver Cross-code Comparison between NAPSAC and FRACMAN/MAFIC". Golder Associates Inc.
13. Hartley, L.J., Cliffe, K.A., Herbert, A.W., Shepley, M.G., Wilcock, P.M., 1995, "Groundwater Flow Modeling with a Combined Discrete Fracture Network and Continuum Approach Using the Code 'NAMMU - NAPSAC' DSAT Report DSAT(95)N8".
14. Hartley, L.J., Brear, D.J., Cliffe K.A. and Herbert A.W., 1994, "Integration of Discrete Representation of a Fracture Flow System with Continuum Approximations of Larger Scale Flow Away from the Region of Interest", DSAT(94)N24.
15. Black, J.W. et al., 1994, "Review of SKB framework

- for the geoscientific characterization of sites for deep repositories with emphasis on the Testing and Numerical Representation of Fractured Crystalline Rock", PR44-94-001.
16. Terzaghi, R., 1965, "Source of Error in Joint Surveys, Geotechnique, Vol.15, 287-304.
 17. Priest, S.D., 1993, "Discontinuity Analysis for Rock Engineering", First Edition, Chapman & Hall.
 18. Dershowitz, W.S., 1992, "Interpretation and Synthesis of Discrete Fracture Orientation, Size, Shape, Spatial Structure and Hydrogeological Data by Forward Modeling," Proceedings of Fracture and Jointed Rock Masses, Tahoe, N.V.
 19. KAERI & KIGAM, 1999, "AperSa- Aperture Size Analysis Program".
 20. Moye, D. G., 1967, "Diamond Drilling for Foundation Exploration", Civil Eng. Trans., Institution of Eng., Australia, Vo.CE9, N.1, 95-100.
 21. Hoch, A.R., Hartley, L.J., 1999. "Answer for Distribution Function of Fracture Length", e-mail to B. Y. Park.
 22. Hartley, L.J. 1998, "NAPSAC (Release 4.1) Technical Summary Document", AEA Technology, AEA-D&R-0271.
 23. 박병윤, 2000, "화산암질 암반에서 공동 굴착에 따른 지하수체계 변화에 대한 3차원 수치모델 해석", 공학박사학위논문, 서울대학교.
 24. Hartley, L.J., 1999, "Answer for Determining Aperture Size", e-mail to B. Y. Park.
 25. SKB, 1998, "Review and Comments 85. - KAERI's Concept Study for Spent Fuel Disposal", Submitted by SKB to KAERI under Contract of 1997-10-01.

박 병 윤

1982년 서울대학교 공과대학 원자핵공학과, 공학사
 1985년 서울대학교 대학원 토목공학과, 공학석사
 2000년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학박사
 Tel : 042-868-8376
 E-mail : bypark@kaeri.re.kr
 현재 한국원자력연구소 방사성폐기물처분 연구팀, 선임연구원

김 경 수

1986년 충남대학교 이과대학 지질학과, 이학사
 1989년 충남대학교 대학원 지질학전공, 이학석사
 2000년 충남대학교 대학원 지질학전공, 이학박사
 Tel : 042-868-2365
 E-mail : kskim@kaeri.re.kr
 현재 한국원자력연구소 방사성폐기물처분 연구팀, 책임연구원

김 천 수

1972년 서울대학교 문리과대학 지질학과, 이학사
 1977년 Dept. of Geological Engineering, Univ. of Missouri-Rolla, 석사
 1983년 Dept. of Geological Sciences, McGill, 박사
 Tel : 042-868-2063
 E-mail : ncskim1@kaeri.re.kr
 현재 한국원자력연구소 방사성폐기물처분 연구팀, 책임연구원

배 대 석

1976년 경북대학교 문리과대학 지질학과, 이학사
 1990년 충남대학교 대학원 지질학과 이학석사
 1996년 충남대학교 대학원 지질학과 이학박사
 Tel : 042-868-2030
 E-mail : ndsbae@kaeri.re.kr
 현재 한국원자력연구소 방사성폐기물처분 연구팀, 책임연구원

이 희 근

1970년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학사
 1973년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학석사
 1977년 일본 교오토포대학(京都大學) 대학원 자원공학과, 공학박사
 Tel : 02-880-7222
 E-mail : irram@plaza.snu.ac.kr
 현재 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수