

## 단열체계 및 수리전도도의 해석신뢰도 향상을 위한 평가방법 연구

조성일<sup>1)</sup> · 김천수<sup>1)</sup> · 배대석<sup>1)</sup> · 김경수<sup>1)</sup> · 송무영<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>한국원자력연구소 방사성폐기물처분연구부, <sup>2)</sup>충남대학교 지질환경과학과

## The Study on the Confidence Building for Evaluation Methods of a Fracture System and Its Hydraulic Conductivity

Sung-Il Cho<sup>\*1)</sup> · Chun-Soo Kim<sup>1)</sup> · Dae-Seok Bae<sup>1)</sup> · Kyung-Su Kim<sup>1)</sup> · Moo-Young Song<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Radwaste Disposal Research Team, Korea Atomic Energy Research Institute,

<sup>2)</sup>Dept. of Geology and Earth and Environmental Sciences

본 연구는 지하시험시설을 이용한 수리지질환경연구의 대안으로, 지하유류저장시설 건설과정 중 조사된 자료를 이용하여 지표조사단계에서 예측된 자료와 저장공동 굴착 시 확인된 자료의 대비를 통해 불확실성이 높은 단열 및 수리인자의 지하분포특성을 해석하여 조사방법의 문제점을 도출하고 보완방안을 모색해 보고자 하였다. 지표조사단계에서 예측된 6개 단열대 중 지하공동 심도에서 그 위치와 방향이 비교적 일치하는 단열대는 NE-1 단 하나로 예측신뢰도는 매우 낮다. 본 연구에서는 지하공동 내 NE-1 단열대의 분포특성을 토대로 지표조사단계에서 BHTV 이미지를 이용한 정량적인 분류기준을 제시하였다. 암반단열은 심도가 깊어짐에 따라 단열의 주 방향이 바뀌고 길이 및 빈도는 감소하는 경향을 보이고 있다. 조사대상의 경사변화와 조사방향 및 조사규모 등에 따라 오차가 발생할 수 있으므로 조사에 따른 편의(investigation bias)를 가능한 한 최소화하여야 할 것이다. 지표조사단계에서 수리적 연결성에 대한 해석은 시추공 내에서 주입이나 양수를 통한 지하수체의 교환 시 구간에 따른 수리지질학적 특성파악이 가능한 이중수위측정시설이나 다중패커시스템을 통하여 수위변화 및 지하수의 지화학특성에 대한 구간별 정밀계측이 요구된다. 수직 및 수평수벽공에 의해 계측된 공동 주변 수리전도도의 기하평균은 지표조사 시 지표부 파쇄대 및 풍화대 영역을 제외한 평균값보다 약 2~3배 작은 값을 나타내며, 수평수벽공의 기하평균 역시 수직수벽공보다 약 6배정도 작게 나타났다. 수리전도도 역시 신뢰도 향상을 위해서는 시험공의 경사방향이 편중되지 않도록 조사편의를 최소화하고, 매질의 특성 및 시험목적을 고려하여 시험방법 및 해석식이 적용되어야 할 것으로 판단된다.

**주요어 :** 단열체계, 수리전도도, 지하유류저장시설, BHTV, 다중패커시스템

This study aims to assess the problems with investigation method and to suggest the complementary solutions by comparing the predicted data from surface investigation with the outcome data from underground cavern. In the study area, one(NE-1) of 6 fracture zones predicted during the surface investigation was only confirmed in underground caverns. Therefore, it is necessary to improve the confidence level for prediction. In this study, the fracture classification criteria was quantitatively suggested on the basis of the BHTV images of NE-1 fracture zone. The major orientation of background fractures in rock mass was changed at the depth of the storage cavern, the length and intensity were decreased. These characteristics result in the deviation of pre-

\* Corresponding author : chosi@kaeri.re.kr

dicted predicted fracture properties and generate the investigation bias depending on the bore hole directions and investigated scales. The evaluation of hydraulic connectivity in the surface investigation stage needs to be analyzed by the groundwater pressures and hydrochemical properties from the monitoring bore hole(s) equipped with a double completion or multi-packer system during the test bore hole is pumping or injecting. The hydraulic conductivities in geometric mean measured in the underground caverns are 2-3 times lower than those from the surface and furthermore the horizontal hydraulic conductivity in geometric mean is six times lower than the vertical one. To improve confidence level of the hydraulic conductivity, the orientation of test hole should be considered during the analysis of the hydraulic conductivity and the methodology of hydro-testing and interpretation should be based on the characteristics of rock mass and investigation purposes.

**Key words:** fracture, hydraulic conductivity, underground oil storage facility, BHITV, multi-packer system

## 서론

결정질암반 내의 단열체계는 지구조운동에 의해 매우 복잡하고 불규칙한 분포특성을 보이며, 지하수체계는 암반 내 투수성 단열의 기하학적인 분포특성에 의해 일차적으로 지배를 받게 된다. 따라서 지하암반 내 분포하는 단열체계, 암반의 투수성 및 수리적 연결성을 정확히 해석하는 것은 지하에 건설되는 다양한 시설의 구조적 안정성과 성능을 확보하고 지하수에 의한 피해를 최소화함에 있어 반드시 요구되는 과정 중에 하나이다.

단열체계 및 수리인자의 해석신뢰도를 향상시키기 위한 노력은 최근 국내·외적으로 많은 연구가 진행 중에 있으며, 국외의 경우 방사성폐기물처분과 관련하여 지하시험시설을 이용한 연구를 통해 지질 및 구조분야, 수리지질학, 암반역학, 지구화학, 지열, 용질이동, 생태화학분야로 세분화하여 각 분야별 해석신뢰도와 이해도를 한단계 높이는 계기를 마련하였다 (Andersson et al., 2002). 또한 지하시험시설 건설 전 지표조사 시 예측된 자료와 건설 후 확인된 자료와의 대비를 통해 조사의 문제점을 도출하고 이를 보완하여 조사 및 해석방법에도 많은 발전을 기여하였다.

국내의 경우 지하시험시설을 이용한 연구는 현재 초기단계에 있으며, 지하저장시설 건설과정 중 지표조사단계에서 예측한 자료에 대한 확인이나 문제점을 보완하는 연구는 현장여건 상 매우 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구는 지하시험시설을 이용한 지하지질 환경연구의 대안으로 지하유류저장시설 건설과정 중 도출된 자료를 통해 지표조사단계에서 예측된 자료와 저장공동 굴착 시 확인된 자료와 대비해 봄으로써 불확실성이 높은 단열 및 수리인자의 지하분포특성을

해석하고, 조사방법의 문제점을 도출하여 보완방안을 모색해 보고자 하였다.

## 지질 및 현황

연구지역의 지질은 Fig. 1과 같이 백악기 말 유천층군의 화산암류 및 이를 관입한 불국사 화성암류의 알칼리장석화강암과 맥암으로 구성되어 있다. 유천층군은 하위로부터 화산각력암과 집괴암을 포함하는 응방산층, 응회암질 역암과 녹색사암이 주류를 이루는 신성리층, 봉화산용결응회암, 월래리안산암 순으로 구성되며 각 층은 정합적으로 놓인다. 이들 화산암류의 형성 이후 백악기 후기에 소위 마산암이라 일컫는 알

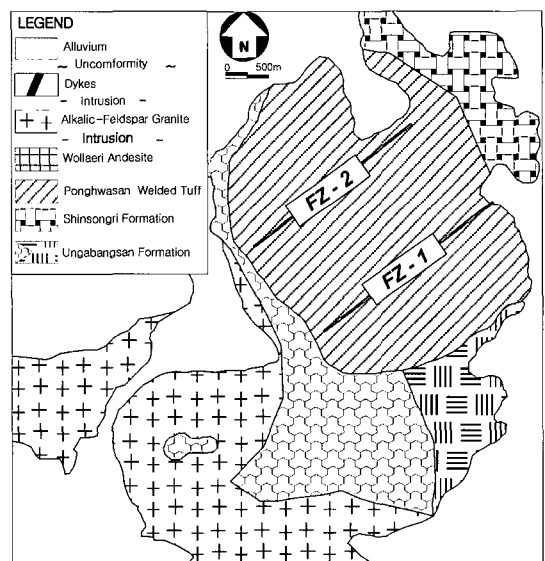


Fig. 1. Geologic map of the study area.

칼리장석화강암이 관입하였다. 이 지역의 화산암류는 북측 일부에 분포하는 화산쇄설성퇴적암인 신성리층을 제외하고 구성광물과 이에 포함되어 있는 암편의 크기와 종류가 다양하고 점이적으로 변화하고 있어 그 경계가 명확하지 않다(박희인 외, 1989).

본 연구지역에는 현재 건설이 완료되어 운영 중에 있는 유류 및 가스 지하저장공동이 위치하고 있으며, 추가저장시설의 건설을 위해 조사·설계가 완료되어 현재 저장공동이 굴착 중에 있다. 추가저장시설은 18 m (폭) × 30 m (높이) 규모로 지표로부터 약 최대 370 m, 최소 140 m의 심도에 위치하며, 공동 상부 26 m 지점에 수평수벽공 95개와 수직수벽공 63개가 설치되어 있고(Fig. 2b), 대우엔지니어링에서 공동벽면에서의 단열조사와 수벽공 입구부에 단일패커를 설치하여 정압주입/수위강하시험을 수행하였다(대우엔지니어링, 2003a, 2003b).

추가저장시설의 기본설계조사 단계에서 수행된 지하지질 조사는 지표조사로 이루어지며, 이는 지표 지구물리탐사 및 시추조사, BHTV 검층, 시추공의 구간(6~9 m)별 Lugeon 시험을 포함한다(엘지엔지니어링(주)SK 건설(주), 1999; 한국석유공사-한국원자력연구소, 1999; 김경수, 2000). 추가저장시설 북서쪽과 남동방향에는 국지주단열대(local major fracture zone) 규모의 FZ-1과 FZ-2 구조대가 선구조분석에 의해 예측

되고 시추조사에 의해 일부 확인되었다(Fig. 2a).

## 단열체계

### 단열대

지표조사과정 중 선구조에서 관찰되는 규모가 큰 광역단열대(regional fracture zone)나 국지주단열대(local major fracture zone) 규모의 방향성과 그 중요성은 알 수 있으나, 단열대 규모가 작을수록 불규칙한 연장과 방향성에 의해 지하매질에서 발달된 단열의 위치, 폭, 방향성을 정확히 예측하는 것은 매우 어려운 것으로 기존 연구에 의하여 보고 되었다(Rhén et al., 1997).

지표조사단계에서 위성영상분석, 지구물리탐사, 시추조사에 의해 예측된 국지규모의 단열대는 N50 ~ 60°E계열(F-1)과 N20 ~ 40°W계열(F-2), EW계열(F3-1 ~ 3), N30°E계열(F4)의 총 6개(Fig. 3a)로, 지하공동조사에서 확인된 단열대 중 그 위치 및 방향이 비교적 일치하는 것은 NE-1에 해당하는 F-1 구조대 하나로(Fig. 3b), 예측신뢰도는 매우 낮은 것으로 확인되었다. 또한 NE-1 단열대는 지하공동 조사 시 C1에서 C3 공동으로 갈수록 분기되는 특성을 보이며, 지표조사 시 조사된 BHTV 이미지(엘지엔지니어링(주)SK 건설(주), 1999)

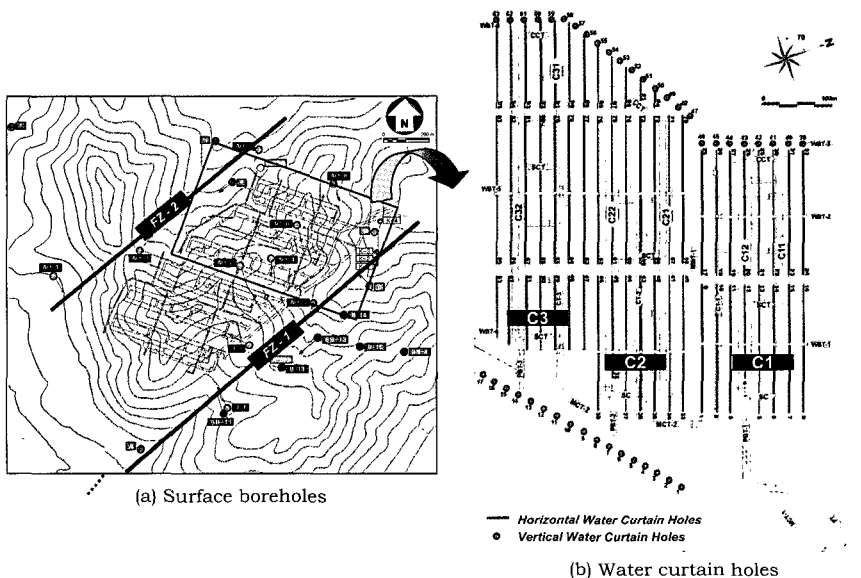


Fig. 2. Location of the surface boreholes and distribution of the water curtain holes

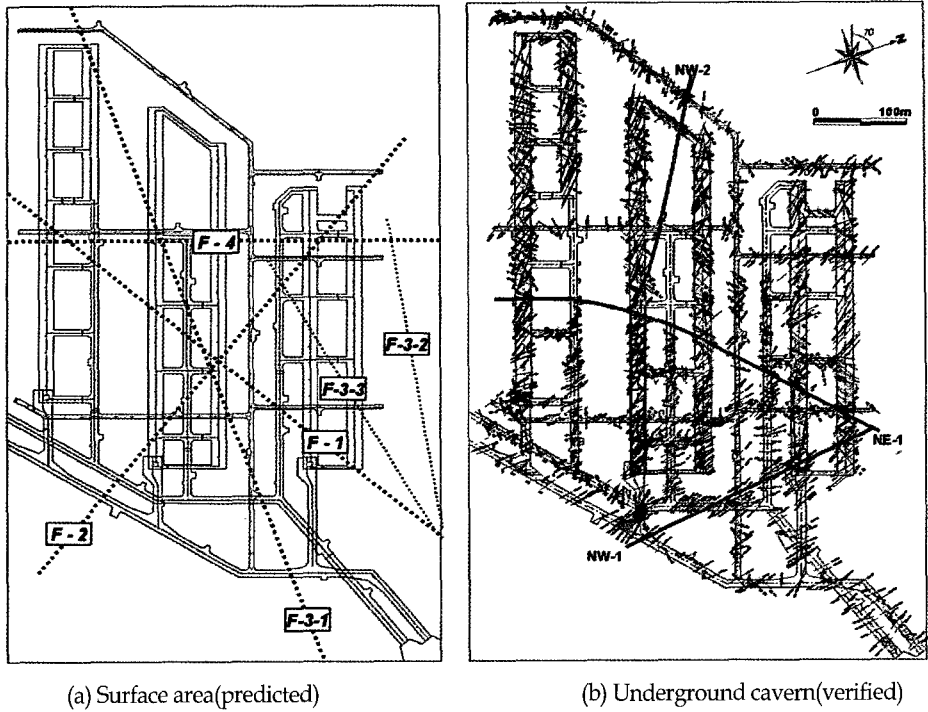


Fig. 3. The predicted and verified fracture zones around underground cavern.

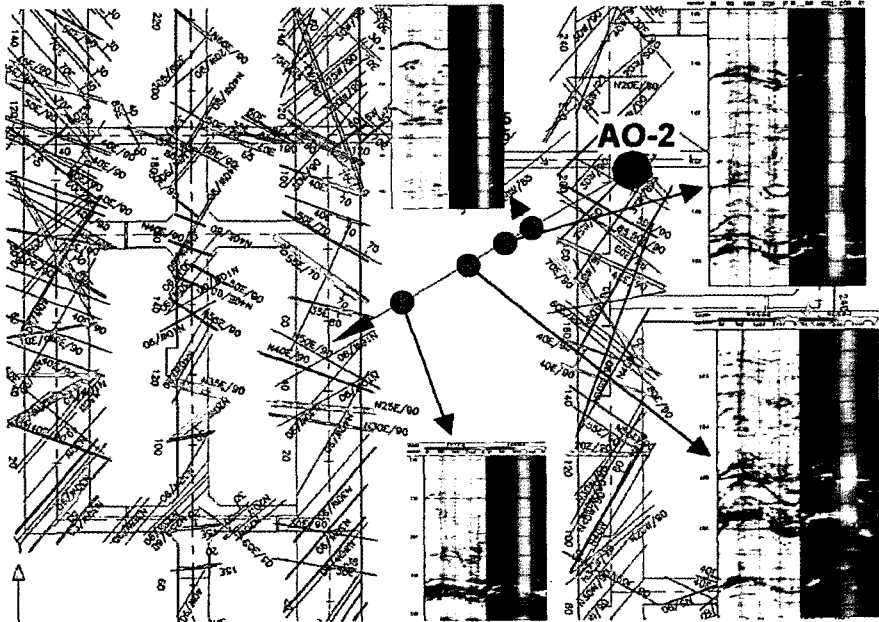


Fig. 4. The BHTV images of fractures in the AO-2 borehole.

에서도 AO-8번공에서는 비교적 NE-1 단열의 분포특성이 정확히 확인된 반면 AO-2번공에서는 단열대의 분기되는 특성에 의해 단열대의 정확한 규모와 특성을 예측하기에는 많은 어려움이 있었다(Fig. 4, 5). 이처럼 지표노두와 시추공에서 조사된 단열대의 낮은 예측신뢰도는 1차적으로 연구지역의 고유특성에 의해 심도가 깊어짐에 따라 단열대 자체의 위치 및 폭, 방향의 다양한 특성에 의한 원인으로 판단할 수 있으며, 2차적으로 조사방법 및 해석의 오차에 의한 결과로 유추할 수 있다.

Rhén et al.(1997)은 지표조사단계에서의 단열대에 대한 예측신뢰도는 다음과 같은 요인에 의해 좌우되는 것으로 보고하였다.

- 단열대와 교차되는 하나 이상의 시추공 여부
- 단열대와 비교적 직교하는 방향으로의 시추조사 여부
- 조사심도
- 지구물리탐사에서 나타나는 이상대와 단열대와 의 상관관계

이러한 요건들은 경제적인 여건이 충분히 뒷받침된다면 어느 정도 신뢰도의 향상은 기대할 수 있다. 그러나 현실적으로 제한된 시추공 수와 위치에서 조사가 이루어지기 때문에 조사된 자료의 해석신뢰도를 높일 수 있는 방안이 요구되며, 국외의 경우 정량적인 분류기준을 통해 예측신뢰도를 향상시키는 계기를 마련하였다. Munier and Stanfors(2003)은 취성변형

(brittle deformation)에 의해 형성된 단열빈도(fracture frequency)에 의하여 단열체계의 분류기준을 제시하였으며, 단층비지(fault gouge)를 포함하는 단층핵(fault core)은 9 개/m 이상, 전이대(transition zone)의 경우 4~5 개/m, 암반 내 단위 m당 단열의 수는 4개 미만을 포함하는 것으로 정의하였고, Palmqvist(1990)는 단열대는 단열밀도가 주변 암반보다 상대적으로 높은 구간으로 정의하고, 단열대의 정량적 범위는 폭 1m 이상, 단열빈도 5 개/m 이상 구간으로 기준을 정하였다.

본 연구에서는 단열빈도, 틈의 크기, 상대강도지수, 개구성 여부 등에 대한 비교적 정량적 해석이 가능한 BHTV(BoreHole TeleViewer)의 검층결과를 이용하여 좀 더 정량적인 분류를 할 수 있는 기준을 제시하였고, 단층핵과 전이대는 각각 파쇄대(crushed zone)와 손상대(damaged zone)로 명칭을 바꾸어서 사용하였다. 분류기준은 국외 분류기준을 참고로 하였다.

본 연구지역의 NE-1 단열대는 지하공동에서 확인된 가장 큰 규모의 단열대로 폭이 10 ~ 15 m이고 연장 길이는 1 km 이상으로 추적되며 단열대 내에 협재된 방해석은 지하수에 의한 풍화가 심하고 단층조선이 나타나고 있다(Fig. 5). 반면 NW-1과 NW-2 단열대는 폭의 크기는 1 ~ 3 m로 최소 300 m 이상의 연장길이를 갖는 것으로 관찰되며 단층점도가 약 0.2 m정도 협재되어 있다. NE-1 단열대의 공동 내 분포양상과 지표조사공에서 조사된 BHTV에 나타나는 진폭 및 주시이미지를 대비하여 설정하였다. NW-1과 NW-2 단열대는 지표조사 시 단열대를 관통하는 시추공 설치가 이루어

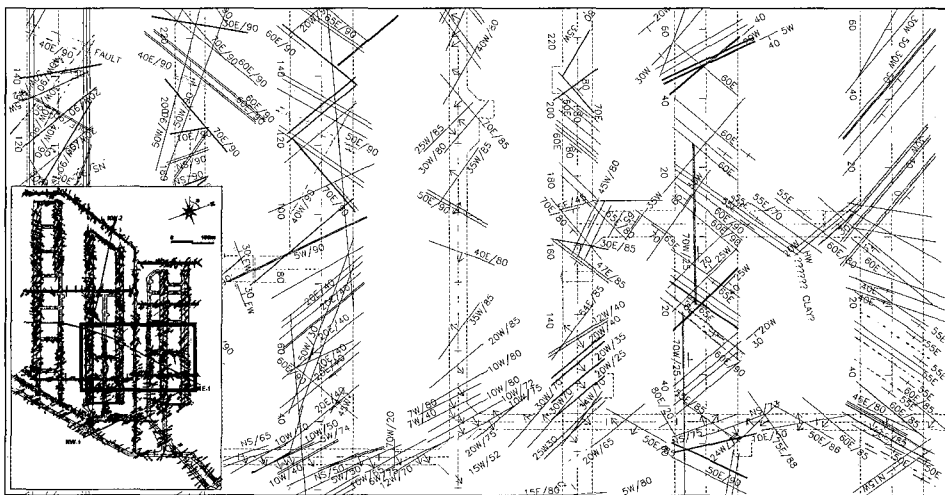


Fig. 5. Fracture map of the NE-1 fracture zone in the caverns.

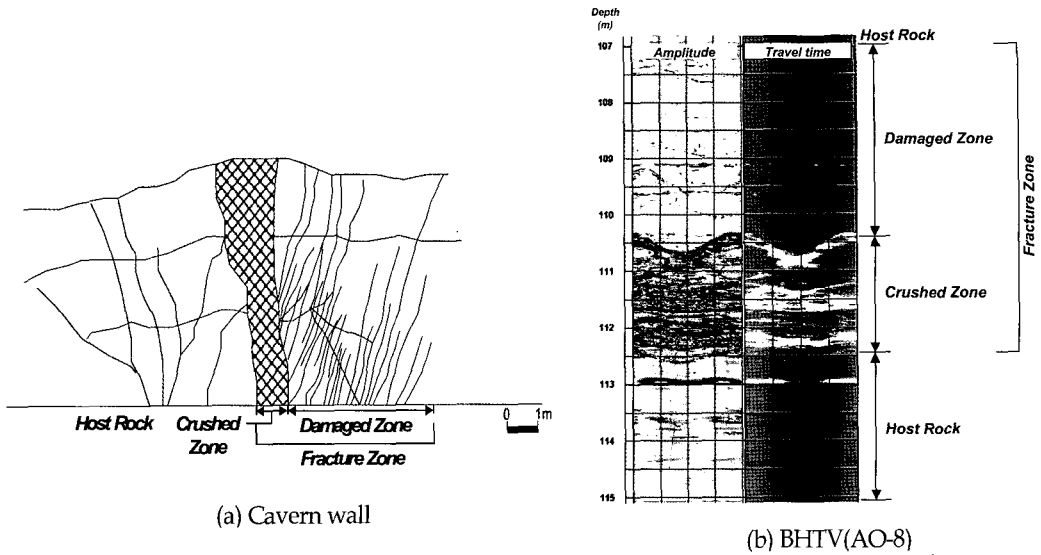


Fig. 6. NE-1 fracture zone in the cavern and the BHTV image.

어지지 않았기 때문에 BHTV 자료와 대비가 불가능하여 본 연구에서는 AO-8번공에서 확인된 NE-1 단열대만을 비교대상으로 선정하였다.

AO-8번공의 시추조사 시 코야로깅에 의해 확인된 NE-1 단열대의 특성은 RQD 값이 11~79 % (GL. -107.2 ~ -118.2 m)로 부분적으로 단층조선이 관찰되며 절리면에 방해석이 충전되어 있다. 특히 파쇄가 심한 GL. -111 ~ -113 m 구간에는 단층조선이 많고 단층점토가 관찰되었다. BHTV에 인지된 NE-1 단열대 내 파쇄대의 폭은 약 1m이며 공동에서는 1 ~ 1.5m로 비교적 크기가 비슷하며, 손상대의 폭 역시 BHTV의 경우 3.5 m, 공동 내에서 약 4 ~ 4.5 m로 유사한 크기를 갖는 것으로 나타났다(Fig. 6).

손상대의 단위 m당 단열의 수는 BHTV의 경우 8개, 공동 내에서는 9개로, 손상대로 분류될 수 있는 단열의 수는 단위 m 당 8개 이상을 포함함을 알 수 있다.

따라서 본 연구지역에서 단열대로 간주할 수 있는 단열폭의 규모는 국지단열대(local fracture zone)로 분류할 수 있는 최소크기인 1m로 하였으며, 분류기준은 다음과 같다(Fig. 7).

- 단열대(fracture zone) : 파쇄대(crushed zone)를 포함하며 파쇄대 주변에 손상대(damaged zone)가 분포하고 폭의 크기는 1m 이상이다.

- 파쇄대(crushed zone) : 단열의 빈도가 단위 m당 10개 이상이거나, 단열을 셀 수 없을 만큼 매우 불규칙

적으로 파쇄된 구간으로 단층비지나 단열충전물(infilling material)을 다량 포함하며 폭 0.3 m 이상의 규모에 해당한다. BHTV 이미지에서 진폭값과 상대강도지수가 상대적으로 매우 낮고(< 50%), 주시(travel time)가 상대적으로 매우 길다.

- 손상대(damaged zone) : 파쇄대 주변에 분포하는 폭 1m 이상의 구간으로, 손상대 내의 단열의 빈도는 단위 m 당 6 ~ 9개이고 부분개구성 단열 및 개구성 단열을 다량 포함한다.

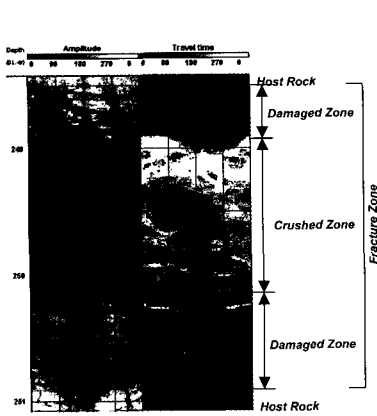
- 단열군(fracture cluster) : 단열의 빈도가 단위 m 당 6 ~ 9개로, 부분개구성 단열 및 개구성 단열을 다량 포함하여 상대강도지수가 상대적으로 낮은 영역에 해당한다.

- 큰 폭의 개구성 단열(wide open fractures) : 단열 폭은 0.02 ~ 0.3 m이며 경사각이 45° 이하이고, 진폭 및 주시이미지에 뚜렷한 연장성을 보이며 상대강도지수가 50% 미만인 개구성 단열이다.

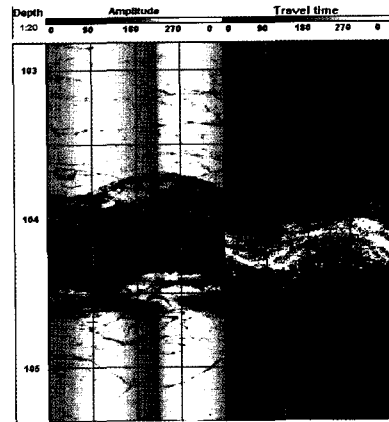
- 개구성 단열(open fractures) : 틈의 크기가 0.02 m 이하로 진폭 및 주시이미지에서 연장성이 뚜렷하게 나타나며 상대강도지수가 50% 미만이다.

- 부분개구성 단열(partly open fractures) : 진폭 및 상대강도지수가 모암에 비해 비교적 낮고, 부분적으로 주시이미지에 나타나는 개구성 단열에 해당한다.

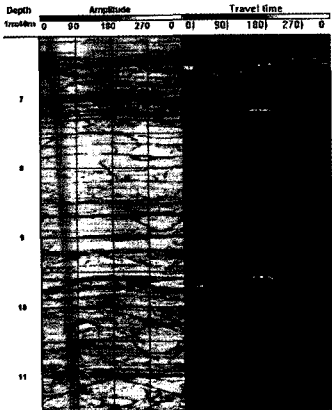
- 닫힌 단열(tight fractures) : 진폭이미지에만 나타나며 진폭 및 상대강도지수가 모암과 비교적 유사한



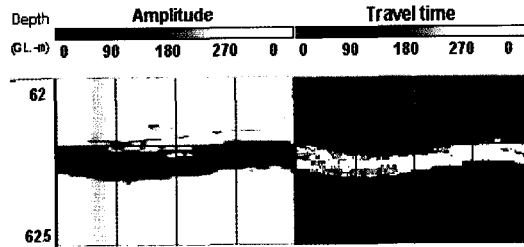
(a) Fracture zone



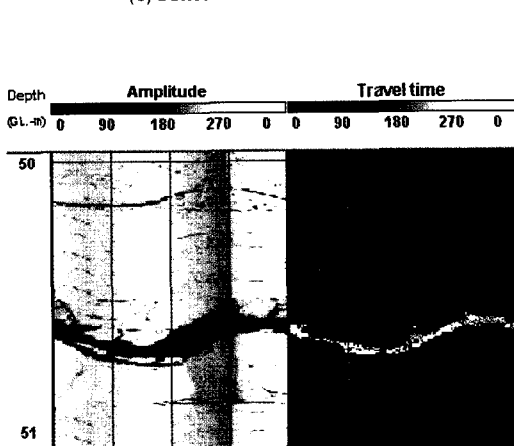
(b) Crushed zone



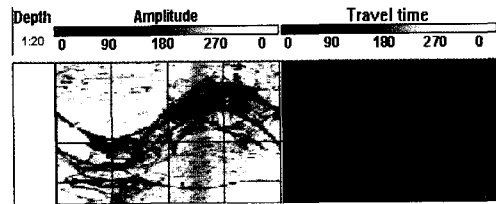
(c) Fracture cluster



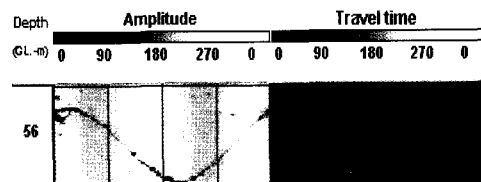
(d) Wide open fractures



(e) Open fractures



(f) Partly open fractures



(g) Tight fractures

Fig. 7. Fracture classification on the BHTV images.

단열이다.

본 분류기준은 본 연구지역의 암종에 해당하는 화산암과 비교적 취성변형이 발생되는 영역에서의 NE-1 단열대만을 고려하여 분류기준을 제시하였으므로, 추후 다양한 암종과 암반특성에 적용하여 수정·보완되어야 할 것이다.

**암반단열**

**방향성**

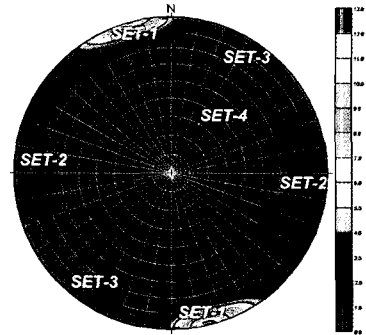
지표노두 30개 지점에서 측선법에 의해 조사된 총 935개 단열의 주 방향 Set 1은 N70°E/75°(NW/SE)이고, 지표조사공의 BHTV 자료에 의해 조사된 총 4062개 단열의 주 방향 역시 N65°E/88°(NW/SE)로 비교적 유사한 경향을 보여주었다(김경수, 2000). 그러나 지하공동 내 벽면에서 측선법에 의한 단열의 주 방향은 N10 ~ 20°W/80°(NE/SW)로 지표노두 및 시추공에서 Set 2로 분류된 단열조와 유사한 방향성을 나타내었다(Fig. 8).

또한 단열조 분포를 보면 지표노두조사 결과에서는 저경사의 단열들은 거의 분포하지 않으나 지표시추공 및 지하공동 조사결과에는 저경사 단열들이 하나의 단열조를 형성하고 있으며, 특히 지표시추공에서는 단열조가 5개로 다양한 방향의 단열이 분포하는 것으로 해석되었다. 지표와 지하의 주 방향성이 다르고 단열조의 분포특성이 다른 이유는 1차적으로 단열생성 시 파괴응력 방향이 위치에 따라 다르게 작용하였을 가능성과, 지표부의 암반하중의 감소로 천부에 저경사를 갖는 층상 절리(sheeting joint)의 중복적인 발달에 따른 결과로 유추할 수 있다. 2차적으로 조사의 제한성으로 인해 조사 대상에 따라 인지될 수 있는 단열이 어느 한 방향으로 편중된 결과로 판단할 수 있다.

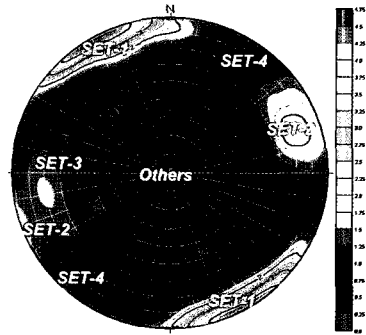
따라서 조사대상의 경사각 및 경사방향, 조사방향에 따라 어느 한 단열조의 단열이 배제되거나 과도하게 조사될 수 있기 때문에 조사편의(Investigation bias)에 의한 오차를 최소화할 수 있도록 조사대상과 조사방향이 선정된다면 비교적 높은 신뢰도를 기대할 수 있을 것이다.

**크기**

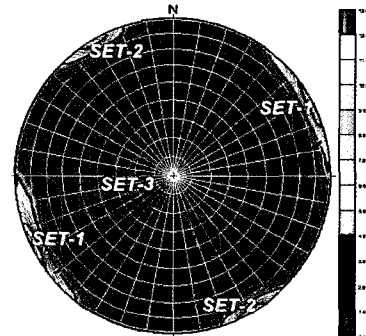
단열크기의 경우 산술평균값과 확률밀도분포에 따른 순산모델링 기법을 이용한 결과를 보면 고경사를 갖는 Set 1과 Set 2 단열조의 경우 지표보다 지하에서 약 0.6 ~ 0.7배 작게 계산되었다. 이는 지하공동 내 조



(a) Outcrops



(b) Boreholes



(c) Caverns

**Fig. 8.** Orientation characteristics of the background fractures along the investigating location.

사대상이 최대 20 m(가로) × 5 m(세로)인 수직인 면으로 고경사 단열의 최대길이가 5 m로 제한되었기 때문인 것으로 사료된다. 반면, 조사 대상의 규모가 유사한 저경사 단열의 경우에는 매우 유사한 값을 보인다(Table 1). 단열의 크기 역시 조사대상의 규모에 따라



크기의 편차가 매우 크기 때문에, 조사대상은 가능한 최대한 크고 가로와 세로의 차이는 크지 않도록 선정되어야 할 것으로 판단된다.

**빈도**

Stanfors et al.,(1997)의 연구결과에 의하면 화강암 지역에서 단열의 빈도는 지표보다 지하에서 약 1.7배 정도 적게 분포하며, 섬록암 지역에서도 2배정도 작은 것으로 보고하였다. 본 연구지역에서는 고경사 단열 조의 경우 지표노두나 시추공 조사자료보다 지하

공동에서 조사된 단열의 빈도가 약 1.4 ~ 3.8배 작게 분포하며, 저경사 단열조의 경우에는 유사하거나 오히려 1.2배정도 큰 것으로 조사되었다(Table 2). 저경사 단열조의 빈도가 지하공동에서 증가한 원인 역시

조사대상의 가로와 세로의 조사면적 크기비율에 의한 것으로 판단된다.

영국 Sellafield 지역의 Borrowdale 화산암층군에서 수리시험결과 투수성 단열은 개구성 단열 중에서도 3%만이 뚜렷한 유동현상을 갖는 것으로 확인되었다 (Armitage et al., 1996). 본 연구지역의 지표조사 시 시추공의 BHTV에서 개구성 및 반개구성 단열로 분류된 결과(박병운, 2000)와 비교하여 보면, 지하에서 5 ~ 16 배정도 빈도가 적은 것으로 나타났다(Table 3). 투수성 단열의 빈도는 지표조사 시 정확히 예측하기는 어려우나 BHTV의 개구성이나 반개구성 단열을 모두 투수성 단열로 간주함은 과대평가가 우려되며, 투수성 단열의 특성은 단열들의 연결성과도 밀접한 관계가 있으므로 flow logging test를 통해 개개 단열에 대한 수리특성 조사가 수반되어야 할 것이다.

**Table 1** Statistics of the fracture trace lengths.

Set		N20°W/ 70 ~ 90°	N50°E/ 70 ~ 90°	N50°W/ 70 ~ 90°	Low dip angle
Outcrop	Arithmetic mean(m)	3.65	3.12	3.52	2.89
	Simulated fracture radius under lognormal distribution(m)	3.14	2.74	2.91	2.45
Cavern	Arithmetic mean(m)	2.13	2.18	1.96	2.82
	Simulated fracture radius under lognormal distribution(m)	1.91	2.16	1.81	2.28

**Table 2.** Results of the fracture frequency(number/m).

	N20°W/70 ~ 90°	N50°E/70 ~ 90°	Low dip angle
Outcrop	0.77	1.01	0.38
Boreholes	0.95	1.19	0.49
Cavern	0.54	0.31	0.47

Table 3. Results of th fracture frequency(number/m<sup>3</sup>).

	N20°W/70 ~ 90°	N50°E/70 ~ 90°	Low dip angle
Boreholes	0.126	0.048	0.027
Cavern	0.026	0.019	0.0017

### 수리특성

#### 수리적 연결성

본 연구지역 내 FZ-1과 FZ-2 구조대 주변의 수리특성은 상·하부지하수대의 수리적 연결성에 따라 서로 다른 지하수특성을 나타내고 있는 것으로 해석되었다(조성일, 2005). 특히 FZ-1 구조대 주변은 공동굴착 전 이중수위측정시설(double completion)에 의해 계측된 상·하부의 수위차는 최대 약 120 m에 이르는 것으로 나타났으며, 공동굴착 중 FZ-1과 인접한 K-1공에 설치된 다중패커시스템(Table 4)에 의해 계측된 수위변화를 보면 상부 2 구간(Zone 1, 2)은 공동굴착에 따른 수위변화가 크지 않고 지하저장공동의 상부(Gallery)와 하부(Bench-1)구간을 굴착하는 시기에 따라 수위강하시기도 다르게 나타났다(Fig. 9). 따라서 지표조사단계에서 이러한 특성을 예측하기 위해서는 수리지질학적 특성이 다른 구간과의 격리를 통한 계측이 반드시 요구되며, 주입이나 양수에 의한 지하수체의 교환에 따른 구간별 지하수위 및 지하화학특성을 계측하는 것이 필수적인 것으로 사료된다.

#### 수리전도도

수직 및 수평수벽공에 의해 계산된 공동주변의 기하평균은  $2 \times 10^{-9}$  m/sec로 지표조사 시 지표관측공에서 계측된 풍화대 영역(GL. 0 ~ 40 m)을 제외한 영역의 수리전도도 기하평균인  $5 \times 10^{-9}$  m/sec(김경수, 2000)보다 약 2.3배 작은 값을 나타내었다. 심도 및 시추공의 경사에 따른 지하매질의 수리특성은 크게 두 가지로 설명될 수 있다.

첫째, 심도의 증가에 따라 단열빈도는 감소하고

틈의 크기 및 길이는 작아지기 때문에 수리적 연결성이 양호하지 못한 결과로 유추할 수 있다. 실제로 스웨덴의 Finnsjön site의 연구결과에 의하면 지표면으로부터 약 500 m 하부는 최상부보다 약 10배정도 작은 특성을 나타냈으며(Andersson et al., 1991), Tammemagei and Cheislar (1996)는 다음과 같은 경험식에 의하여 심도가 증가함에 따라 수리전도도가 감소한다고 보고 하였다.

$$\log(K) = -1.65\log(z) - 4.5 \tag{1}$$

$$K = 10-(7 + z/250) \tag{2}$$

여기서, K = 수리전도도  
z = 심도

둘째, 수리시험 방법 및 해석모델의 적용에 따른 차이로 해석가능하다. 수리시험은 지하매질과 지하수체계 특성에 따라 그 시험방법과 해석모델을 달리 적용할 수 있으므로 계산된 수리전도도도 역시 다소 차이를 나타내게 된다. Andersson and Persson(1985)은 straddle 패커시험에서 일반적으로 정상류 분석방법에 의한 수리전도도 값이 부정류 해석에 의한 경우보다 적게는 2 ~ 3배, 경우에 따라서는 10 ~ 20배 가량 더 큰 것으로 보고하였다. 본 연구에서는 수평수벽공 자료를 이용해 계산된 정상류 분석이 부정류에 의해 해석된 값보다 산술평균의 경우 약 1.75, 기하평균은 1.18 배정도 높게 나타났다.

또한 수평수벽공에서 계산된 수리전도도의 기하평균은  $1 \times 10^{-9}$  m/sec로 수직수벽공의 기하평균  $8 \times 10^{-9}$  m/sec보다 약 6배정도 작게 계산되었는데, 이는 조사공의 경사에 따른 투수성 단열과의 교차확률에 따라

Table 4. Location of the straddle packer in K-1 borehole.

Domain	Elevation of the zone(m)	
	Top	Bottom
Zone-1	61	41
Zone-2	39.5	27.5
Zone-3	26	-2.5
Zone-4	-4	-16
Zone-5	-17.5	-76
Zone-6	-77.5	-113.5
Zone-7	-115	-133.6

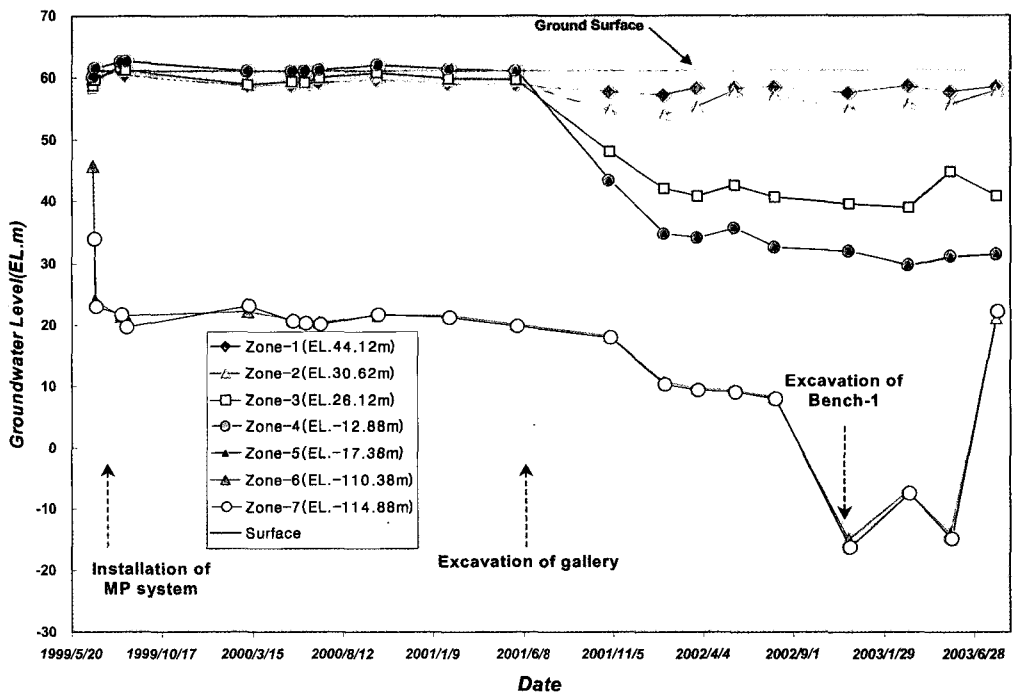
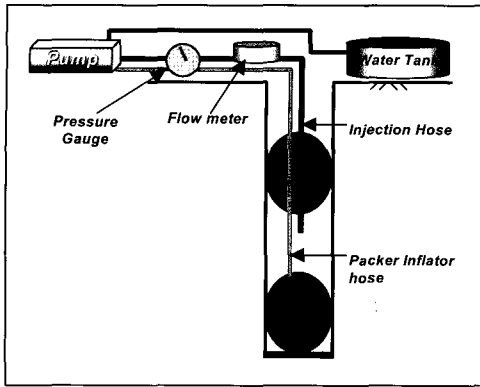
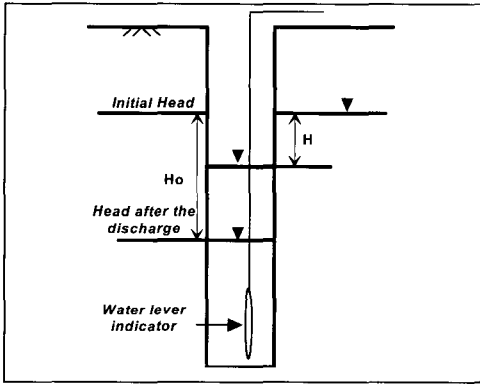


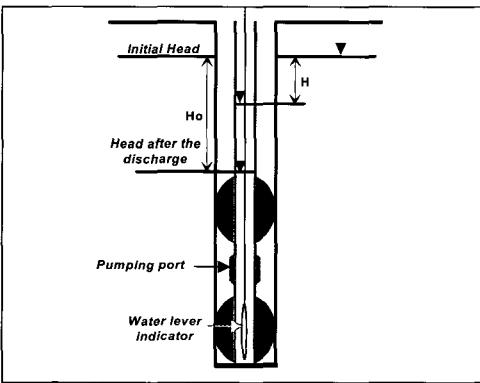
Fig. 9. Evolution of the groundwater levels in the multi-packer system.



(a) Injection/fall-off test



(b) Slug test



(c) Pulse test

Fig. 10. Schematic diagram for various hydraulic tests.

수리전도도 값이 과대 혹은 과소평가 될 수 있음을 시사한다.

김경수(2002)는 단일공 내에서 다양한 수리시험을 통해 천부의 지표풍화대에 대한 수리특성은 전공순간충격시험이나 양수시험이 효과적이며, 심부의 수리특성은 정압주입/수위강하 시험이나 펄스시험이 타당한 것으로 보고하였다. 따라서 본 연구에서는 K-1공을 대상으로 다중패커시스템을 설치하기 전 이중패커를 이용한 정압주입/수위강하 시험(Fig. 10a)과 전공 순간충격 시험(Fig. 10b)을 수행하였고, 다중패커시스템을 설치한 후 구간별 펄스시험(Fig. 10c)을 실시하여 시험방법 및 해석식의 차이에 의해 도출된 수리전도도를 비교해 보고자 하였다.

정압주입/수위강하시험에 의한 K-1공의 기하평균(정상류)은  $8 \times 10^{-9}$  m/sec로 전공 순간충격시험에 의한  $3 \times 10^{-9}$  m/sec(Bouwer and Rice, 1976)보다 약 4배 정도 낮게 계산되었다(Fig. 11). 전공 순간충격시험은 시추공 전구간 중 투수성이 가장 높은 구간의 수리특성을 대변하는 것으로 보고(함세영 외, 2001)된 바와 같이, 본 연구결과에서도 천부 풍화·파쇄대의 영향으로 비교적 높게 계산된 것으로 판단된다. 수벽공에서 단일패커에 의한 전공주입/수위강하시험 결과도 전공 순간충격시험과 같이 투수성이 높은 단일의 수리특성이 반영된 점을 고려하면, 수리전도도가 과대평가 되었을 것으로 예상되나, 수평수벽공의 기하평균 값이 낮게 평가된 것을 보면 수평수벽공에 교차빈도가 높은 고경사 단열은 비교적 낮은 투수성을 갖는 것으로 유추할 수 있다.

다중패커시스템의 2, 4, 6구간의 펄스시험 결과와 동일한 구간에 해당하는 주입/수위강하 시험결과를 비교하여 보면, 낮은 수리전도도를 나타내는 6구간에서는 펄스시험이 좀 더 낮게 계산되었고, 비교적 높은 값을 갖는 2, 4구간에서는 펄스시험이 좀 더 높게 계산되었다. 이러한 결과는 정압주입시험이 주입시험기기의 호스와 주입수 자체의 압축성, 그리고 공내저류효과에 의한 영향으로 펄스시험에 비하여 민감하지 못하기 때문으로 판단되며, 김경수(2002)에 의해서도 유사한 연구결과가 도출되었다.

이러한 관점에서 단일암반의 투수성을 평가하기 위한 수리시험을 계획할 경우, 전공 순간충격시험 혹은 단일패커에 의한 주입/수위강하 시험은 천부의 풍화대를 포함하는 파쇄구간이나 주 투수성 구조에 대한 수리특성을 해석할 때 적합하며, 심도에 따른 구간별 수리특성을 해석하는 경우에는 이중패커를 이용한 일정구간 정압주입/수위강하시험 또는 다중패커시스템 내에서의

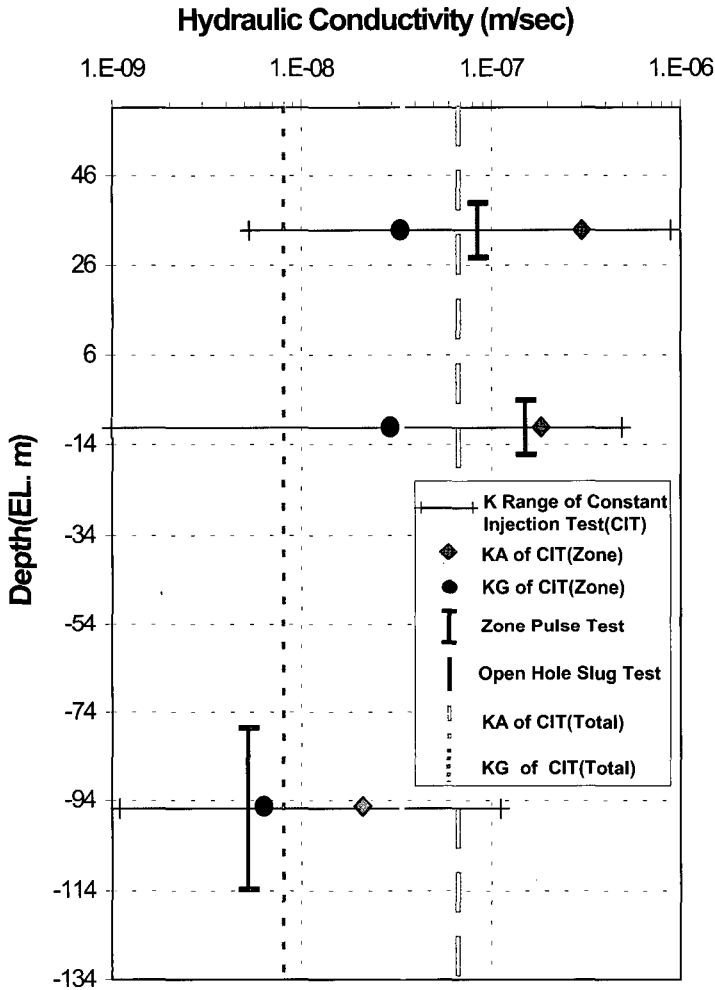


Fig. 11. Ranges of the hydraulic conductivities measured from the various hydraulic tests.

펄스시험이 고려될 수 있으나, 펄스시험이 좀 더 높은 신뢰도를 기대할 수 있을 것이다.

### 결론

지하유류저장시설 건설 시 지표조사단계에서 예측되고 지하공동 굴착 시 확인된 단열체계 및 수리인자의 특성과 지표조사방법의 문제점 및 보완방안은 다음과 같다.

1. 지표조사단계에서 위성영상 및 DEM, 지구물리탐사, 시추조사, BHTV 등에 의해 예측된 6개 단열대 중 지하공동에서 확인된 단열대와 비교적 방향성과 위치가 유사한 단열대는 NE-1 단열대 하나로 매우 낮은 예측신뢰도를 나타내었다.

2. 지표조사 시 최소한의 조사를 통해 단열대의 예측신뢰도를 향상시킬 수 있는 방안으로 BHTV 조사결과를 이용한 정량적 분류기준을 제시하였으나, 향후 다양한 암종과 암반특성을 갖는 지역에서 적용하여 수정·보완되어져야 할 것이다.

3. 본 연구지역 내 암반단열은 심도가 깊어짐에 따라 주 방향성이 변하며, 크기와 빈도는 고경사 단열조의 경우 각각 0.6~0.7배, 1.4~3.8배정도 작게 분포하고, 저경사 단열조는 유사하거나 오히려 약 1.2배정도 큰 것으로 조사되었다. 이는 조사대상의 방향 및 조사 방향, 조사규모 등에 따른 조사편의(investigation bias)에 의한 것으로 사료되며, 조사 시 조사편의를 최소화해야 할 것이다.

4. 지하공동에서 조사된 투수성 단열의 빈도는 지표 조사 시 BHTV에 의해 투수성 단열로 예측한 개구성 및 반개구성 단열의 밀도보다 약 5~16배정도 작게 나타났다. 따라서 BHTV에 의해 해석된 개구성 및 반개구성 단열을 모두 투수성 단열로 간주함은 과대평가가 우려되며, flow logging test를 통해 개개 단열에 대한 수리특성 조사가 수반되어야 할 것이다.

5. 지표조사단계에서 심도 및 수평방향으로의 수리적 연결성을 예측하기 위해서는 이중수위측정시설이나 다중패커시스템에 의해 수리지질학적 특성이 다른 영역을 격리시킨 후 양수나 주입에 의한 지하수의 교환에 따른 구간별 지하수위 및 지화학특성에 대한 측정이 요구된다.

6. 수리전도도는 시험공의 방향, 조사범위, 시험방법에 따라 해석하고자 하는 영역의 투수성이 과소 혹은 과대평가될 수 있으므로 조사편의를 최소화하고 연구목적에 맞는 시험방법이 선택되어야 할 것이다.

## 사 사

본 연구는 한국석유공사와 한국원자력연구소에서 공동으로 시행하는 연구개발사업에 의하여 수행되었다. 현장조사에 협조를 아끼지 않으신 한국석유공사 및 대우엔지니어링 관계자 여러분께 깊은 감사를 드린다.

## 참고문헌

김경수, 2000, 수치모델링을 이용한 지하원유비축시설의 수리지질학적 안정성 연구, 박사학위논문, 충남대학교 대학원, 212p.  
 김경수, 2002, 등연속체매질로서의 화강암지역의 유효 수리전도도 산출, 대한지질공학회지, Vol. 12, No. 3, pp.319-332.  
 대우엔지니어링(주) 시공감리단, OO 추가비축기지공

사 공사평가보고서 제3권, 2003a.  
 대우엔지니어링(주) 시공감리단, 수벽공 장기수리시험 종합보고서, 2003b.  
 박병윤, 2000, 화산암질 암반에서의 공동굴착에 따른 지하수체계 변화에 대한 3차원 수치모델 해석, 박사학위논문, 서울대학교 대학원, 250p.  
 박희인, 박용안, 정지곤, 1989, 광양도폭 지질보고서, 한국동력자원연구소  
 엘지엔지니어링(주), SK 건설(주), 1999, U-1 추가비축기지 조사설계 용역 지질조사보고서.  
 조성일, 2005, 지하유류저장공동 건설을 위한 단열암반의 지하수체계 평가방법 연구, 박사학위논문, 충남대학교 대학원, 208p.  
 한국석유공사-한국원자력연구소, 1999, 암반지하수체계특성 연구, 91p.  
 함세영, 김문수, 성익환, 이병대, 김광성, 2001, 순간충격시험에 의한 화강암지역의 수리적 매개변수 산출, 대한지질공학회지, Vol. 11, No. 1, p.63-79.  
 Andersson, J. E. and Persson, O., 1985, Evaluation of single-hole hydraulic tests in fractured crystalline rock by steady-state and transient methods, SKB Technical Report 85-19, Stockholm.  
 Andersson, J., Nordqvist, R., Nyberg, G., 1991, Hydrogeological conditions in the Finnsjön area, SKB Technical Report 91-24, stockholm.  
 Armitage, P. Holton, D., Jefferies, N.L., Myatt, B.J. and Wilcock, P.M. 1996, Groundwater flow through fractured rock at Sellafield, European Commission Report EUR 16870 EL.  
 Bouwer, H. and Rice, R. C., 1976, A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells, Water Resour. Res., 12(2), p.423-428.  
 Munier, R., Stanfors, R., 2003, Geological site descriptive model, A strategy for the model development during site investigation, R-03-07, SKB, Stockholm.  
 Rhén, I.(ed), Bäckblom, G.(ed), Gustafson, G., Stanfors, R., Wikberg, P., 1997, ÄSPÖ HRL-Geoscientific evaluation 1997/2 : Results from pre-investigations and detailed site characterization, SKB TR 97-03, 240p.  
 Palmqvist, K., 1990, Groundwater in crystalline bedrock, SKB TR 90-41. SKB, Stockholm.  
 Stanfors, R., Olsson, P., Stille, H., 1997, ÄSPÖ HRL - Geoscientific evaluation 1997/3. Results from pre-investigations and detailed site characterization.

Comparison of predictions and observations.  
 Geology and Mechanical stability. SKB TR 97-04.  
 Tammemagi, H. Y. and Cheislar, J. D., 1996, Interim  
 rock mass properties and conditions for analysis of  
 a repository in crystalline rock, United States  
 Department of Energy, BMI/ORCD-18.

투 고 일	2005년 4월 11일
심 사 일	2005년 4월 12일
심사완료일	2005년 6월 15일

배대석  
 한국원자력연구소 방사성폐기물처분연구부  
 305-353 대전광역시 유성구 덕진동 150번지  
 Tel : 042-868-2030  
 E-mail : ndsbae@kaeri.re.kr

김경수  
 한국원자력연구소 방사성폐기물처분연구부  
 305-353 대전광역시 유성구 덕진동 150번지  
 Tel : 042-868-2365  
 E-mail : kskim@kaeri.re.kr

---

조성일  
 한국원자력연구소 방사성폐기물처분연구부  
 305-353 대전광역시 유성구 덕진동 150번지  
 Tel : 042-868-2064  
 E-mail : chosi@kaeri.re.kr

송무영  
 충남대학교 자연과학대학 지질환경과학과  
 305-764 대전광역시 유성구 궁동 220번지  
 Tel : 042-821-6423  
 E-mail : mysong@cnu.ac.kr

김천수  
 한국원자력연구소 방사성폐기물처분연구부  
 305-353 대전광역시 유성구 덕진동 150번지  
 Tel : 042-868-2063  
 E-mail : cskim@kaeri.re.kr