

## 도수로터널 주변 지역의 지하수 유동성 단열 규명

이병대<sup>1\*</sup> · 이인호<sup>1</sup> · 추창오<sup>2</sup> · 함세영<sup>3</sup> · 성익환<sup>1</sup> · 황세호<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원, <sup>2</sup>경북대학교 지질학과 · <sup>3</sup>부산대학교 지질학과

### Identification of the Transmissive Fractures in the Vicinity of Waterway Tunnel

Byeong-Dae Lee<sup>1\*</sup> · In-Ho Lee<sup>1</sup> · Chang-O Chou<sup>2</sup> · Se-Yeong Hamm<sup>3</sup> · Ig-Hwang Sung<sup>1</sup> · Se-Ho Hwang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

<sup>2</sup>Dept. of Geology, Kyungbook National University

<sup>3</sup>Dept. of Geology, Pusan National University

### ABSTRACT

A field technique for assessing the transmissive fractures in an aquifer was applied to a fractured rock formation in Youngchun area, Korea. Geological mapping and detailed acoustic borehole televew(BHTV) logging were performed to obtain information about the fractures. The study area consists predominantly of two types of fractures. The fracture sets of low angle partings such as bedding and sheeting plains have strike N70-80°W, 25°-30°SW and N35°W, 12°NE, respectively. In areas of high fractures, on the other hand, the major fracture sets show strike N80°W and dip 70°-85°SW, N10°E · 85°SE in sedimentary rocks, N40-50°E · 85°SE/85°NE, N70°E · 80°SE, and N70-75°W · 80°SW in granites and volcanic rocks. Injection tests have been performed to identify discrete production zones and quantify the vertical distribution of hydraulic conductivity. The calculated hydraulic conductivities range from 3.363E-10 to 2.731E-6, showing that the difference between maximum and minimum value is four order of magnitude. Dominant section in hydraulic conductivity is extensively fractured. Geophysical logging was carried out to clarify characterization of the distribution of fracture zones. Transmissive

\* Corresponding author : blee@kigam.re.kr

원고접수일 : 2002. 7. 4 게재승인일 : 2002. 9. 2

fractures were evaluated through the comparison of the results obtained by each method. The temperature logs appeared to be a good indicator that can distinguish a high transmissive fractures from a common fractures in hydraulic conductivity. In numerous cases, evidence of fluid movement was amplified in the temperature gradient log. The fracture sets of N70-80°W · 60-85°NE/SW, N75-80°W · 25-30°SW, N50-64°W · 60-85°NE, N35-45°E · 65-75°SE, and N65-72°E · 80°SE/60°NW were identified as a distinct transmissive fractures through the results of each tests.

**Key Words :** Transmissive fracture, BHTV logging, Injection test, Hydraulic conductivity, Geophysical logging

## 요 약 문

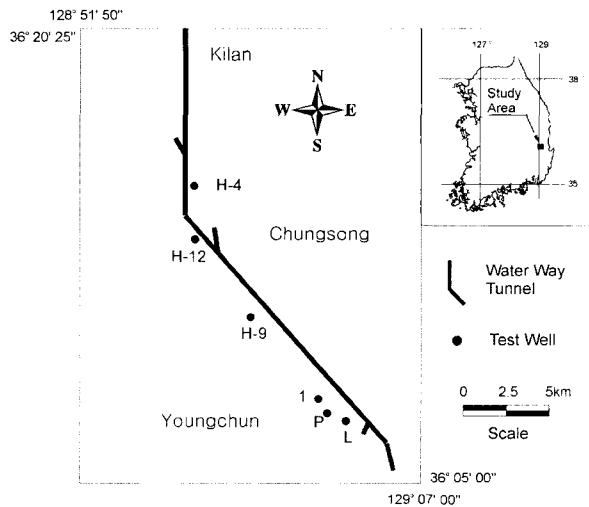
도수로터널 주변 지역의 대수층에 대한 유동성 단열을 규명하기 위하여 야외시험이 실시되었다. 단열들에 대한 정보를 얻기 위하여 지표 지질조사, 지질구조조사 및 초음파주사검층을 실시하였다. 지표에서의 단열발달은 퇴적암의 층리면과 층리절리 및 화강암류의 판상절리와 같은 저각의 경사를 가지는 부분과 75° 이상의 고각의 경사를 가지는 부분의 두 개의 뚜렷한 단열군으로 형성되어 있다. 층리절리와 판상절리의 평균 주향과 경사는 각각 N70-80°W · 25°SW, N35°W · 12°NE이다. 고각의 절리들은 퇴적암 지역에서는 N80°W · 70-85°SW와 N10°E · 85°SE 두 방향의 단열조가 우세하며, 화산암 및 화강암 지역은 N40-50°E · 85°SE/85°NE, N70°E · 80°SE, 그리고 N70-75°W · 80°SW 방향의 단열조가 우세하게 발달한다. 초음파주사검층에 의하여 얻어진 시추공내의 단열들은 N60-80°W · 20-45°SW, N10-35°E · 64-83°SE, N40-65°E · 60-85°SE, N70°E · 80°SE, N60-80°W · 45-85°SE/SW의 단열군들이 우세하다. 공내 수리전도도의 수직적인 분포를 파악하기 위하여 정압주입시험을 실시하였다. 계산된 수리전도도는 3.363E-10 m/sec에서 2.731E-6 m/sec의 범위로서 최대값과 최소값은 4 차수(four order)의 차이를 보였다. 단열대의 분포 특성을 파악하기 위하여 지구물리검층을 실시하였고, 각 시험에 의해 획득된 결과들과의 비교를 통하여 유동성이 높은 단열들이 규명되었다. 온도검층은 유동성 단열과 일반적인 단열들을 구별하는 좋은 지시자로 나타났다. 그 결과, N70-80°W · 60-85°NE/SW, N75-80°W · 25-30°SW, N50-64°W · 60-85°NE, N35-45°E · 65-75°SE, 그리고 N65-72°E · 80°SE/60°NW의 단열들이 연구지역의 지하수 흐름을 지배하는 뚜렷한 유동성 단열로 규명되었다.

**주제어 :** 유동성 단열, 초음파주사검층, 정압주입시험, 수리전도도, 지구물리 검층

## 1. 서 론

암반내에 발달하는 단열의 수리적, 역학적 특성은 각종 토목 구조물의 건설 및 설계에 있어서 매우 중요한 역할을 하며, 또한 최근 주요 연구대상이 되고 있는 결정질 암반내의 지하수 유동을 지배하는 중요한 요소이다. Long et al.(1982)은 분리단열모델을 열극 매질에서 유체 유동을 해석하는 도구로 이용하였으며<sup>1</sup>.

이 모델의 분석을 위해 단열 길이, 단열의 연결성, 단열의 방향성, 단열 틈새간격, 그리고 단열 빈도 등을 이용하였다. Ramirez et al.(1982)은 단열 암반내의 지하수 유동 통로를 규명하기 위하여 시추공에서의 전자파 지오토모그래피를 이용하여 소금물 주입에 의한 기법을 제시하였으며<sup>2</sup>, Davison et al.(1982)은 단열 발달 특성을 파악하기 위하여 공내 물리검층을 이용하였다<sup>3</sup>.



**Fig. 1. Location of the study area and test wells.**

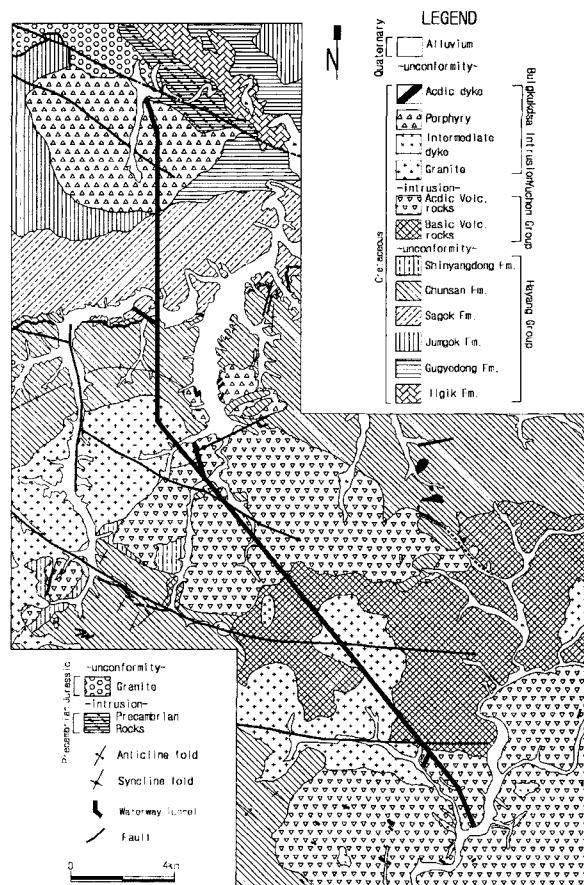
현재 국내에서 지하수의 유동성 단열과 관련한 연구는 아주 미진한 편이며, 채병곤 등(1998)에 의하여 단열 암반내의 지하수 유동 통로를 파악하기 위하여 암반내 단열들의 특성 규명이 시도되었다<sup>4)</sup>.

연구지역은 영천댐 도수로터널 구간중, 청송군 안덕면과 현서면, 그리고 영천시 자양면 일대이다(Fig. 1). 본 연구는 도수로터널 주변 지역의 단열분포와 수리적 특성 및 도수로터널 굴착으로 인한 터널내로의 지하수 유출과 관련된 유동성 단열을 규명하기 위한 것으로, 이를 위하여 야외지질조사 및 지질구조조사, 정압주입시험, 각종 물리검증을 실시하였고, 터널내 유출지점의 단열구조 및 유출량을 측정하였다. 이 논문에서는 단열의 여러 가지 특성을 중, 연구지역의 지하수 흐름을 지배하는 유동성 단열들의 방향성(orientation) 및 그 단열들의 특성을 파악하는데 주안점을 두어 연구하였다.

## 2. 수리지질 및 단열구조

연구지역은 경상퇴적분지 하양층군의 퇴적암류와 유천층군의 화산암류 및 이를 관입한 불국사 관입암류들이 분포한다(Fig. 2).

퇴적암류는 사암과 세일의 호층이며 접촉변성작용을 받아 대부분이 호온펠스화 되어 있다. 층리는 EW 내



**Fig. 2. Geologic map of the study area.**

지 WNW 방향의 주향에 15°에서 25°의 경사각을 가지며, 완만한 습곡의 익간경사각(Interlimb)이 큰 향사형의 개방습곡을 이루고 있다. 층리발달이 아주 양호하며, 부분적으로 파쇄된 사암층은 이 지역의 주 대수층을 형성하고 있으며, 층리면은 지하수의 주요 통로 역할을 하고 있다.

유천층군의 산성 화산암류는 주로 유문암질 응회암으로 화산력(lapilli)을 함유하는 화산력 응회암이 대부분이다.

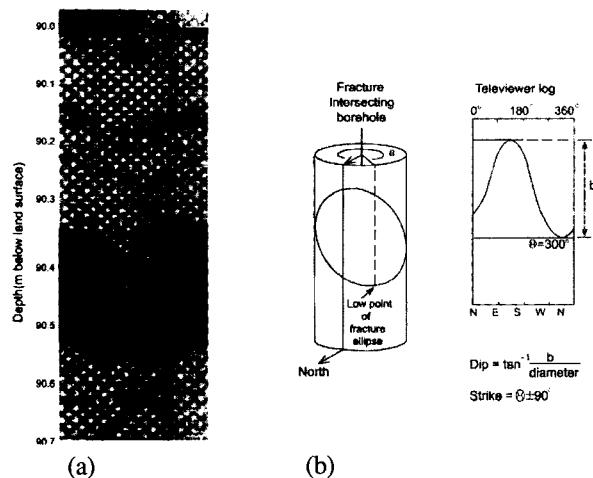
불국사 관입암류들의 주된 암석은 화강암류로 본 암류는 입도가 거의 전역에 걸쳐 균등하나 암체의 주변부는 비등립질인 반암으로 산출된다.

연구지역을 지배하는 지질구조는 퇴적암의 층리 변화에 의한 습곡구조와 암반의 취성변형 작용에 의해 변형된 단층 및 절리들이다. 단층구조는 서북서 방향

의 좌수향 주향이동 단층이 지배적이며 금천단층과 가음단층이 있다. 연구지역의 단열구조들은 이들 두 단층과 관련되어 동서 혹은 서북서 방향의 단열들이 많이 발달되어 있다.

연구지역내 단열조는 퇴적암의 층리면, 층리면과 아평행한 층리절리 및 화강암류의 판상절리와 같은 저각의 경사를 가지는 부분과 75° 이상의 고각의 경사를 가지는 부분의 두 개의 뚜렷한 단열군으로 형성되어 있다. 퇴적암 지역내에는 층리절리가 가장 많이 발달되어 있으며 평균 주향과 경사는 N70~80°W · 25°SW이다. 화강암의 판상절리는 N35°W · 12°NE의 배향을 가진다. 고각의 절리들은 퇴적암 지역에서는 N80°W · 85°SW와 N10°E · 85°SE 두 방향의 절리조가 우세하며 이들은 서로 직교하는 신장성의 규칙절리들이 대부분이다. 화산암 및 화강암 지역은 N40~50°E · 85°SE/85°NE, N70°E · 80°SE, 그리고 N70~75°W · 80°SW 방향의 절리조가 우세하게 발달한다.

### 3. 시추공내 단열해석



**Fig. 3. (a) Magnetically oriented acoustic-amplitude image of borehole wall generated from BHTV in Well H-9(depth interval: 90.0-90.7m). (b) Fracture strike and dip are determined from depth and magnetic orientation.**

#### 3.1 초음파주사검층

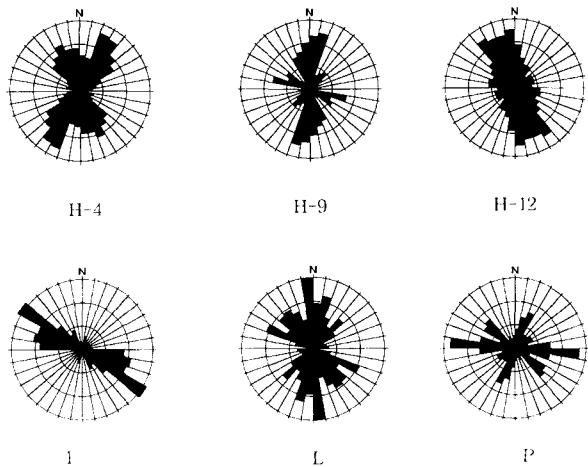
시추공을 가로지르는 단열분포 특성을 효과적으로 파악하기 위해서는 초음파주사검층을 이용함으로써 가능하다<sup>5)</sup>.

Fig. 3은 시추공벽에서 반사된 초음파의 진폭치로부터 얻은 텔레뷰어 이미지 검층의 한 예로서 H-9 공의 90.0m~90.7m 구간의 이미지이다. 이 그림에서 검은색 부분은 단열을 나타내는 것으로, 초음파 범이 단열에 입사되면 산란현상에 의해 초음파는 상당한 에너지를 잃게되며 단열이 있는 부분은 검은색으로 나타난다. Fig. 3(b)는 시추공을 가로지르는 각 단열들의 주향과 경사를 계산하기 위하여 이용된 단순한 기하학적인 원리를 도시한 것이다.

초음파주사검층에 의하여 파악된 단열들은 진폭 및 주시 자료를 근거로 4개의 등급(code)으로 구분하였다. code 1은 주시이미지에서 싸인 커브(sine curve)의 형태가 인식되는 경우로 완전히 열려진 상태의 단열로 대부분 신장성의 단열이며, code 2는 열려진 부분과 닫혀진 부분이 동시에 인지되는 단열, code 3은 텔레뷰어의 분해능으로 인하여 주시이미지에서 뚜렷하게 인지되지 않으나 시추코아와 비교해보면 단열로서 확인되는 경우(acceptable fracture), 그리고 code 4는 단층이다. Gale(1990)은 단열간극이 넓고 다른 광물의 충전이 없는 열린 단열이고 단열면이 거칠지 않은 경우, 그렇지 않은 단열의 조건보다 단열 투수성이 더 크다고 하였다<sup>6)</sup>. Gale(1990)에 의하면 본 연구에서도 code 1과 2의 비율이 높은 단열군 및 code 4의 단열중 파쇄가 심한 단층대의 단열군은 상대적으로 투수성이 크며, 연구지역의 주된 지하수 유동 경로가 될 것으로 판단된다.

#### 3.2 초음파주사검층에 의한 공내 단열분포 해석

공내에 발달하고 있는 단열들의 분포를 파악하기 위하여 H-4, H-9, H-12, 1, L, P 등의 6개 공에 대하여 초음파주사검층을 수행하였으며(Fig. 1), 검층 자료를 이용하여 단열의 방향성 및 특성을 분석하였다(Fig. 4).



**Fig. 4. Rosette diagrams of fracture orientations from six wells.**

H-4공의 단열분포는 크게 3개 방향으로 나타난다 (Table 1). N60~70°W · 45°SW 단열군이 가장 우세하게 발달되어 있으며, 이 단열군에는 층리면이 많이 포함되어 있으리라 고려되는데, 단열등급 code를 통해서도 이런 추측을 뒷받침할 수 있다. 즉 code 3에 해당하는 절리가 전체의 91%를 차지하고 있는데, 초음파주사검증의 특성상 code 3인 acceptable fracture 와 층리면의 구분이 모호함을 고려하면, 이 단열군에 층리면이 포함되었을 것으로 판단하는데 무리가 없다. 그 다음은 N40~70°W, >45°NE 단열군으로 code 1과 2에 해당하는 절리가 9.2%이다. N40~70°E · 55~85°SE 방향의 단열군에는 단열등급 code 1과 2에 해당하는 단열의 비율이 14.3%로서, 이 방향의 단열은 다른 방향의 단열군에 비해 열린 상태이거나 절리 틈 간격이 넓은 편이다.

H-9공의 단열분포는 N10~35°E · 64~83°SE의 단열이 가장 우세한 분포를 보이고 있다. 그 다음 우세한 방향은 N5~25°W 방향인데, 이 방향의 단열을 45°의 경사각을 기준으로 구분하면, N5~25°W/>45° 단열군은 code 1과 2에 해당하는 단열 비율이 17%에 이르며, N5~25°W/<45° 단열군은 code 1과 2에 해당하는 단열 비율이 무려 63%에 이른다. 이 중에는 단층으로 인지된 불연속면들도 포함되는데, 이를 통해 이 방향의 단열군이 광역적인 응력에 의한 변형산물로 형

성되었음을 추측할 수 있다.

H-12공의 단열분포는 크게 3개 방향으로 구분된다. 본 시추공에서 단열의 가장 집중적인 방향은 N70~90°E이며, 이중 N70~90°E/>45°SE 단열군은 code 1과 2에 해당하는 단열의 비율이 단층으로 인지된 불연속면을 포함해 20.3%에 이르러 상당히 높은 값을 가진다. N70~90°E/<45°SE 단열군은 code 1과 2의 비율이 14.8%로서 비교적 틈 간격이 넓고 열린 상태의 단열들이다. N40~65°E 방향의 단열들은 20~40°SE의 층리절리 같은 저각의 경사를 가지는 부분과, 60~85°SE의 고각의 경사를 가지는 부분의 두 개의 뚜렷한 단열 군으로 형성되어 있다. 단열등급은 1과 2에 해당하는 단열의 비율이 13.9~14.2%이다. N0~20°W · 50~80°NE 방향의 단열군은 단열등급 1과 2에 해당하는 단열의 비율이 11.3%로 낮은 것으로 보아 다른 방향의 단열군에 비해 단열의 열린 상태가 미약하다고 할 수 있다.

1호공의 단열분포는 크게 3개 방향으로 나타난다. 가장 우세한 단열군은 N60~90°W · 45~85°SW 방향으로 단열등급도 1과 2가 전체의 62.5%로서 매우 높으며 열린 단열들이 대부분이고 단층들도 많이 인지되고 있다. 그 다음은 N10~50°E · 60~85°SE의 고각의 경사를 가지는 단열군으로서 code 1과 2에 해당하는 비율이 48.8%로 매우 높은 비율을 차지하고 있어, 이 방향의 단열들은 대부분 열린 상태이며 단열틈이 넓고 다른 광물로 충전되지 않은 단열이 많이 발달되어 있는 것으로 파악된다. N0~40°E · 55~85°NW 단열군의 등급은 전자의 단열군과 마찬가지로 1과 2에 해당하는 단열이 55%로서 매우 크다.

L공의 단열분포는 N60~80°E와 N20~50°W의 2개 방향으로 구분할 수 있다. 전자의 단열군은 대부분이 열린 단열들로서 단층(code 4)도 많이 포함되어 있으며, 이러한 단층은 터널내의 단열구조에서도 많이 확인되고 있다. N20~50°W · 55~85°NE의 단열등급은 1과 2에 해당하는 단열의 비율이 97.3%이며, 등급 3에 해당하는 단열은 2.7%에 불과하다. 단열등급으로 보아 이 방향의 단열군들은 대부분 단열틈이 방해석이나 다른 광물들로 충전되지 않은 열린 상태의 파쇄된 부

**Table 1. Fracture groups analysed from televiwer log data. Code means fracture type; code 1: Clear fracture, code 2: normal fracture, code 3 : acceptable fracture**

Hole No	Fracture Direction	Dip Angle	Mean Spacing (cm)	Code 1 & 2(%)
				Code 3(%)
H-4	N60-80W	$\leq 45\text{SW}$	35	9.0 91.0
	N40-70W	$>45\text{NE}$	165	9.2 90.8
	N40-70E	58-87SE	119	14.3 85.7
	N30-40W	55-75SW	177	21.7 78.3
H-9	N10-35E	64-83SE	324	63.0
	N5-20W	21-44SW		37.0
	N5-20W	51-82SW	292	17.0 83.0
H-12	N40-65E	20-40SE	17	13.9 86.1
	N40-65E	60-85SE	15	14.2 85.8
	N70-90E	$\leq 45\text{SE}$	55	14.8 85.2
	N70-90E	$>45\text{SE}$	114	20.3 79.7
	N0-20W	50-80NE	24	11.3 88.7
1	N60-90W	40-85SW	16	62.5 37.5
	N10-50E	60-88SW	100	48.8 51.2
	N0-40E	55-85NW	45	55.0 45.0
P	N20-30E	15-35SW	82	81.8 18.2
	N60-90W	55-85SW	24	76.2 23.8
L	N60-80E	70-80SE	54	89.4 10.6
	N20-50W	55-85NE	18	97.3 2.7

분이 많이 발달되어 있음을 의미한다.

P공의 단열분포는 크게 N20~30°E와 N60~90°W의 2개 방향으로 구분할 수 있다. 단열군의 특징은 단열 경사각을 고려할 경우 전자는 35° 이하의 저각의 경사를 가지며, 후자는 55° 이상의 고각의 경사를 가지는 두 개의 뚜렷한 단열군으로 구분된다. 단열등급 역시 code 1과 2에 해당하는 단열의 비율이 76.2~81.8%로서 열린 단열들이 많이 발달되어 있다.

#### 4. 지표 단열과 시추공내 단열 비교

지표 단열과 시추공에서 확인된 단열들을 서로 비교한 결과, 크게 네 개의 단열군으로 구분된다. 지표에서 관찰된 가장 우세한 단열군인 GSet 1은 N75~80°W · 25~30°SW 방향의 단열군과 N70~80°W · 60~85°NE/SW 단열군으로서 서북서 방향의 단열군이 가장 우세한 분포를 보이고 있다. 시추공내에서 확인된 N60~70°W · ≤45SW 단열군은 전자와 서로 대비되며, 이 단열군은 지질조사시 확인된 층리면 및 층리절리에 해당된다. N60~90°W · 45~85°SW 방향의 단열은 후자와 대비된다. 이 단열은 연구지역 일대에 발달해 있는 서북서방향의 금천단층 및 가음단층과 관련된 광역적 응력작용에 기인한 단열로 해석 할 수 있다.

GSet 2는 지표에서 확인된 N40~50°E · 85°SE/85°NW 방향의 단층군과 이와 저각으로 사교하는 N20~30°E · 50~85°SE의 절리로서, 이 절리들은 N40~50°E · 85°SE/85°NW의 단층운동과 관련되는 절리로 해석된다. 시추공내에서 확인된 단열은 N40~65°E · 60~85°SE의 단열군들이 이에 대비된다.

GSet 3은 N10°E · 85°SE 방향의 단열군으로서 이 단열군에는 단층 및 신장성 절리들이 포함된다. 시추공에서 확인된 N10~35°E · 64~83°SE 방향의 단열군에 해당되는 것으로 고려된다. 이는 시추공내에서 이 단열군은 단열등급 code 1과 code 3이 차지하는 비율이 각각 63%와 37%로서 열린 단열과 단층이 고르게 분포되어 있는 것으로 판단할 수 있다.

GSet 4는 N70~80°E · 60~80°SE/70~80°NW 방향의 단열군으로서 금천단층 및 가음단층과 관련된 단열

들로 추정된다. 이 방향의 단열군과 대비되는 시추공 내의 단열은 N70°E · 80°SE로서, 이 시추공은 L공으로서 금천단층의 연장부에 위치한 공이다. 그러므로 이 방향의 단열들이 금천단층 및 가음단층과 관련된 단열들로 추정하는데 무리가 없는 것으로 판단된다.

#### 5. 물리검증

도수로터널 주변 지역의 지하수 유동과 관련된 유동성 단열을 규명하기 위하여 1, L, P 공의 3개 공에 대하여 전통적인 물리검증이 수행되었다. 수행된 물리검증은 공경, 자연감마선, 전기, 온도, 전기전도도검증 등이다. 또한 이 3개 공은 주입시험 및 초음파주사검증 등을 포함한 모든 검증을 동시에 수행하였다.

공경검증은 시추공의 직경을 측정하여 단열대 구간 및 공벽의 조개짐, 연약대 등을 파악하는데 이용되는 검증으로, 시추공의 공경변화에 따라 달라지게 된다. 1호공의 경우 지표하 20m 부근에서 단열대가 존재하며, 지표하 49m 부근에서 공경변화가 확인되었다 (Fig. 5). L공은 29.26m, 32.05m, 44.89m, 46.56m~47.23m, 49.83m, 56.52m, 61.96m 구간에서 단열대가 발달하며 (Fig. 6), P공은 21.19m~21.35m 구간, 22.93m~23.32m, 36.53m 구간에서 단열대가 분포하고 있다(Fig. 7).

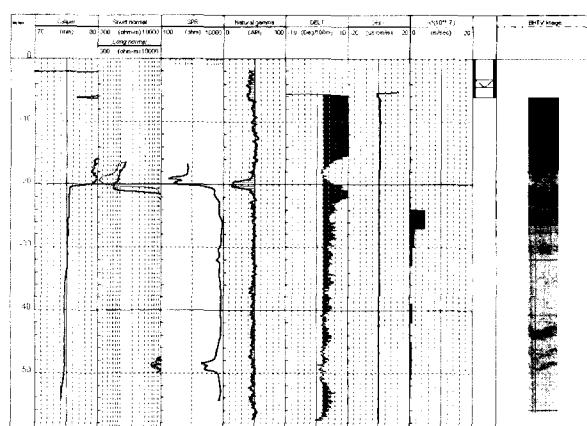
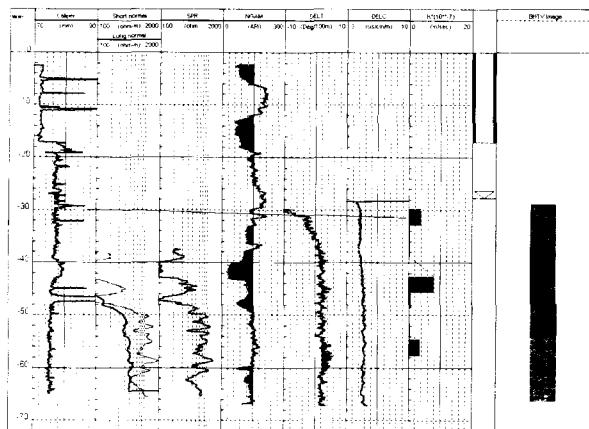


Fig. 5. The result of geophysical logs including BHTV and injection test from Well 1.

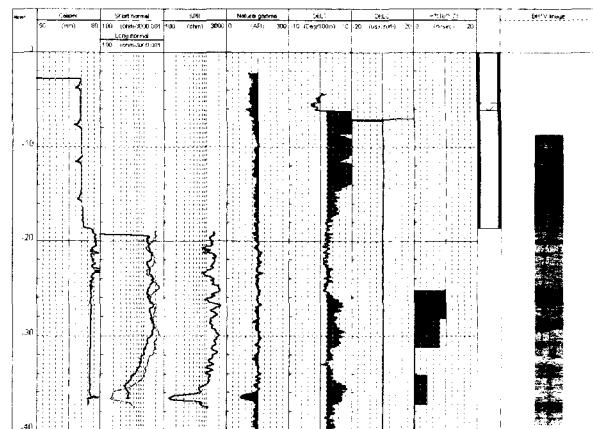


**Fig. 6. The result of geophysical logs including BHTV and injection test from Well L.**

자연감마선과 전기검층은 구성암석의 훌륭한 지시자로 역할을 하며, 또한 파쇄대 지시자나 시추공들간의 상호 층서대비에 효과적으로 이용될 수 있다. 1호공의 경우, 전기비저항검층에서 31m 구간을 기준으로 하부는 매우 치밀하고 신선한 화강암이며 상부 구간은 많은 단열들이 발달하며, 49m 구간은 풍화대와 단열대가 많이 발달하고 있다. L공의 전기비저항 값은 전반적으로 풍화나 파쇄 등으로 매우 작게 나타나며, 특히 48m 상부의 장노말검층 비저항 값은 약 60 ohm-m 정도로 매우 작다. 자연감마선검층은 화강암과 화산암의 지층 대비를 잘 보여주고 있으며, 약 60API를 이 지역 화산암의 자연감마선으로 설정하여 해석하였다. P공의 경우, 공경검층에 의한 단열대 구간은 단극저항 검층에서 낮은 저항을 보이는 구간과 잘 일치한다.

온도와 전기전도도검층은 수질에 관한 정보를 제공하며 시추공과 주변 암층간에 유체의 유입이나 유출 등의 이동을 지시한다. 대부분의 경우에서, 유체 이동의 증거는 온도검층에서 유체가 이동하는 구간에서 온도 경사가 변화된다<sup>7,8)</sup>.

Fig. 5, Fig. 6, 그리고 Fig. 7에서 1호공의 22m~23m, 28m 지점, P공의 27m, 30m, 36m 지점, L공의 45m, 58m 지점과 같은 유체 성질의 변화는 공내에서 그 지점, 혹은 그 구간과 주위 대수층간에 유체의 흐름을 지시하며, 결과적으로 그 구간의 단



**Fig. 7. The result of geophysical logs including BHTV and injection test from Well P.**

열들이 수리전도성이 좋은 단열들임을 지시한다.

## 6. 수리전도도 분포

시추공 내의 투수성과 관련된 단열 구간과 지하수 수리전도도의 수직적인 분포를 평가하기 위하여 H-4, H-9, H-12, 1, L, P의 6개 공에서 정압주입시험을 수행하였다. 주입시험시 정확한 심도 구간은 다양한 단면적에 의해 야기되는 수리전도도 값의 오차를 피하고, 가능한 구경을 일정하게 일치시키기 위하여 공경 검층 후에 결정하였다. 주입시험 및 해석법은 Doe & Geier(1990), 김천수 등(1993)의 시험방법을 사용하였다<sup>9,10)</sup>.

주입시험에 의해 계산된 연구지역 수리전도도 값의 범위는 Table 2와 같다. Table 2에서 연구지역의 수리전도도는 3.363E-10 m/sec에서 2.731E-6 m/sec의 범위로서 최대값과 최소값은 4 차수(four order)의 차이를 보이고 있다. 수리전도도에서 높은 값을 보이는 구간은 단층 혹은 단층파쇄대 등의 단열구간이고, 또한 시추공 굴착시 굴착 속도가 큰 구간과 일치한다.

H-4공은 주입시험 및 초음파주사검층만 실시하였고, 물리검층은 수행하지 않았다. 이 공은 59m~62m, 73m~76m, 107m~110m 구간에서 각

**Table 2. Hydraulic conductivities of the observation wells**

Well	Test section(m)	K(m/sec)	Well	Test section(m)	K(m/sec)	
H-4	9-12	5.126E-08		1	57.0 - 60.0	1.623E-08
	22-25	7.639E-08		54.0 - 57.0	5.125E-09	
	34-37	7.293E-08		51.0 - 54.0	1.383E-08	
	46-49	4.660E-09		48.0 - 51.0	4.756E-08	
	59-62	1.364E-06		45.0 - 48.0	7.824E-08	
	73-76	2.664E-07		42.0 - 45.0	6.846E-09	
	83-86	7.736E-09		39.0 - 42.0	8.078E-08	
	97-100	2.426E-09		36.0 - 39.0	4.894E-09	
	107-110	1.652E-07		33.0 - 36.0	1.563E-09	
				30.0 - 33.0	6.856E-08	
				27.0 - 30.0	1.478E-07	
				24.0 - 27.0	4.768E-07	
				21.0 - 24.0	1.380E-08	
				18.0 - 21.0	1.689E-09	
H-9	56-59	2.731E-06	L	54.6 - 57.6	3.363E-07	
	91-94	2.335E-06		51.6 - 54.6	1.420E-08	
	114-117	2.138E-06		48.6 - 51.6	3.483E-09	
				45.6 - 48.6	5.365E-08	
				42.6 - 45.6	7.818E-07	
				35.8 - 38.8	1.674E-08	
				32.8 - 35.8	1.081E-08	
				29.8 - 32.8	3.892E-07	
H-12	9-12	5.126E-08	P	37.2 - 40.2	1.181E-08	
	23-26	1.023E-07		34.2 - 37.2	4.073E-07	
	35-38	1.244E-07		31.2 - 34.2	1.666E-08	
	47-50	1.597E-07		28.2 - 31.2	7.923E-07	
	59-62	5.588E-08		25.2 - 28.2	9.945E-07	
	71-74	7.279E-08		29.8 - 32.8	3.892E-07	
	83-86	1.026E-07				
	93-96	9.244E-09				
	103-106	2.253E-08				
	113-116	2.040E-07				
	123-126	5.756E-08				

각 1.364E-06 m/sec, 2.664E-07 m/sec, 1.652E-07 m/sec로서 수리전도도 값이 큰 이상치가 나타났다. 물리검증을 실시하지 않은 관계로 온도경사가 증폭되는 구간은 정확하게 파악할 수 없었다.

H-9공 역시, 물리검증은 실시하지 않았으며, 시험

구간은 56m~59m, 91m~94m, 114m~117m의 3개 구간으로 수리전도도의 범위는 2.138E-06~2.731E-06 m/sec이다. 이 세 구간의 물의 주입량은 24.30 l/min~28.434 l/min으로 아주 많다.

H-12공의 수리전도도 범위는 93m~96m 구간의

9.244E-09 m/sec를 제외한 나머지 구간은 2.253E-08~2.040E-07 m/sec로서 전구간에 걸쳐서 전반적으로 양호한 값을 나타내고 있다.

1호공에서는 주입시험 및 물리검증, 초음파주사검증을 동시에 실시하였다. 이 공은 24.0m~27.0m, 27.0m~30.0m 두 구간에서 4.768E-07 m/sec과 1.478E-07 m/sec의 수리전도도의 이상치가 나타났다.

L공에서 수리전도도의 이상치를 보이는 구간은 29.8m~32.8m, 42.6m~45.6m, 54.6m~57.6m의 3개 구간으로, 수리전도도의 범위는 3.363E-07~7.818E-07 m/sec이다.

P공 역시, 주입시험 및 물리검증, 초음파주사검증을 동시에 실시한 공이다. 이 공은 25.2m~28.2m, 28.2m~31.2m, 34.2m~37.2m 구간에서 각각 9.945E-07 m/sec, 7.923E-07 m/sec, 4.073E-07 m/sec의 높은 수리전도도 값을 나타내고 있으며, 물의 주입량도 각각 10.31ℓ/min, 8.25ℓ/min, 4.24ℓ/min으로 많다.

## 7. 토의 및 결론

본 연구는 단열암반 대수층의 지하수 조사에 있어서 주입시험 및 지구물리검증의 과학적이고 실질적인 적용을 증명하고 있다. 대부분의 투수성이 양호한 단열들은 주입시험 결과와 물리검증, 특히 온도검증에서 온도 경사가 증폭되는 구간의 단열과 비교함으로써 일반적인 단열들과 구분된다. 주입시험에서 물 주입량이 많은 구간에 대해서는 그 구간의 단열밸달 상태를 파악하기 위하여 성익환 등(2000)에 의한 시추코아 검증 자료를 비교함으로써 단열의 특성을 파악하였다<sup>10)</sup>. 또한 그 구간에 해당되는 단열의 방향성을 규명하기 위하여 초음파주사검증 자료를 분석하였다. 이 구간에서 많은 단열들이 발달된 경우에는 그 단열 그룹내에서 유동성이 높은 단열들을 따로 분리시켜 규명하기 위하여, 온도검증 및 전기전도도검증 자료를 이용하여 온도 경사 및 전기전도도 경사가 갑작스럽게 증폭되는 구간의 단열들을 전체 단열 그룹과 분리하여 분석함으

로써 지하수의 유동성 단열을 규명하고자 시도하였다.

이 연구에서는 주입시험, 물리검증, 그리고 초음파주사검증을 동시에 실시한 1, L, P의 3개 공에 대해서 유동성 단열을 규명하였고, H-4, H-9, H-12의 3개 공에 대해서는 전자의 자료를 이용하여 유동성 단열을 추정하였다. 1, L, P 3개 공의 경우, 수리전도도 값에서 이상치를 보이고 물 주입량이 많은 투수성이 높은 116개의 단열들이 확인되었다. 이는 1, L, P의 3개 공 총 단열수의 25%이다. 이들 116개의 단열들 중, 온도검증에서 온도 경사가 갑작스럽게 증폭되어 시추공내로의 유체의 유입이나 유출 등을 반영하는 구간의 단열들을 추출한 후, 초음파주사검증 자료에서 유동성 단열의 방향성을 파악하였다.

1호공은 24.0m~27.0m, 27.0m~30.0m 두 구간에서 높은 수리전도도 값을 나타내었다. 이 구간은 온도검증에서도 22m~23m, 28m 지점에서 온도 구배의 이상치를 보임으로서 이 지점에서의 유체의 이동이 확인되었다. 초음파주사검증에서 확인된 이 지점의 단열의 방향은 N70-80°W · 80-85°SW의 단열로서 유동성 단열 역할을 하고 있는 것으로 해석되며, 지표 단열과 초음파주사검증에 의한 단열의 비교시 GSet 1에 해당하는 단열들이다. N16°E · 46°NW 방향의 단열 역시, 우세 단열군에는 포함되어 있지 않지만 투수성이 좋은 단열군으로 역할을 하고 있으며, 초음파주사검증에서 틈새간격이 양호한 절리로 확인되었다.

L공에서 수리전도도의 이상치를 보이는 구간은 29.8m~32.8m, 42.6m~45.6m, 54.6m~57.6m 구간이다. 온도검증에서 온도경사가 증폭되어 유체의 이동이 확인된 구간은 45m와 58m 부근의 두 지점이다. 29.8m~32.8m 구간은 온도검증에서 이상대 구간이 인지되지 않았는데, 이는 물리검증시 지하수위의 분포로 인해 온도검증이 지표하 30m 이하부터 시작되었기 때문이다. 후자의 두 구간에서는 N50-60°W · 80-85°NE와 N70°E · 80°SE 방향의 단열들이 유동성 단열 역할을 하고 있으며, 각각 GSet 1과 GSet 4의 단열군들이다. 이 두 구간중, 시추코아 조사에서 42.6m ~45.6m 구간은 단층파쇄대이고, 54.6m~57.6m 구간은 파쇄대는 발달하지 않았지만 단열면에서 광물충

전이 없고, 단열면이 명확하게 발달되어 있고, 단열틈새가 큰 것으로 보아 연장성이 좋은 단일 절리가 주변의 단열들과 수리학적으로 연결되어 수리전도성이 좋은 유동성 단열 역할을 하고 있는 것으로 해석된다.

P공은 25.2m~28.2m, 28.2m~31.2m, 34.2m~37.2m 구간에서 높은 수리전도도 값을 나타내고 있으며, 또한 온도검증에서도 27m, 30m, 36m 지점에서 큰 이상치가 나타났다. 34.2m~37.2m 구간에서 확인된 유동성 단열은 N35°E·65°SE의 단열군으로 Gset 2와 Gset 3에 해당된다. 25.2m~28.2m 구간에서는 N70-72°W·80-85°SW의 단열군이 유동성이 양호한 단열로 해석되며 Gset 1에 해당된다. 28.2m~31.2m 구간에서는 N2-6°W·50-60°SW, N61-64°W·60-66°NE 방향의 단열들이 투수성이 높은 단열군으로 확인되었다.

그러나 위에서 유동성 단열로 해석된 방향의 단열 모두에서 주입시험 및 온도검증에서 이상치를 나타내는 것은 아니다. 1호공에서는 35.2m 지점과 44.5m 지점에 Gset 1의 방향에 해당되는 N82°W·84°SW의 고화된 단층대가 존재하지만 물 주입량은 극소량이다. L공에서는 51.4m 지점에 Gset 2의 단열군인 N72°E·82°SE 방향의 단층대가 존재하지만 물 주입량은 0.035 l/min으로 아주 작다. 또한 이를 지점에서는 공내검증에서도 아무런 이상치가 나타나지 않았다. 이는 단층대의 특성에 기인하는 것으로 해석된다. 단층핵 부분에 존재하는 단층비지는 함수성이 강한 점토광물로 구성되어 있는데, 이러한 점토광물은 함수율이 높아지면 팽창하게 되고 이로 인해 단층핵 부분의 투수율이 감소하게 된다<sup>12)</sup>. 즉 유동성 단열 역할을 하고 있는 1호공의 N70-80°W·80-85°SW 방향의 단열과 L공의 N70°E·80°SE의 방향의 단열들 중에서 단층대 내에 발달하는 단층비지와 팽창성 점토로 인하여 상대적으로 지하수 유동이 원활하게 일어나지 않는 단열이 있음을 알 수 있다. 이와같이 연구지역 내의 단층대는 지하수 흐름의 통로가 되는 동시에 지하수 흐름의 장벽 역할도 하고 있다.

현장시험에서 파악된 이 유동성 단열들이 실제 연구 지역의 지하수 흐름을 지배하는 유동성 단열 역할을

하고 있는지를 규명하기 위하여, 실제 터널내에서 대규모의 초기유출이 발생한 지점 및 구간의 단열들과 비교하였다. 터널 굴착으로 인하여 N75-85°W 방향의 단열대에서 약 70,000m<sup>3</sup>/day의 지하수가 터널내로 초기에 유출되었다. 그 다음은 N40-50°E 방향에서 17,100m<sup>3</sup>/day, N60-70°W 방향의 단열을 따라서 8,700m<sup>3</sup>/day의 지하수가 유출되었고, 이외에도 각각 N5-10°E, N70-80°E, N30°W, EW 방향의 순으로 지하수가 유출되었다.

상기한 1, L, P의 3개공에서 파악된 유동성 단열군들중 터널내에서 확인된 유동성 단열과 비교한 결과, GSet 1에 해당하는 N70-80°W·60-85°NE/SW, N75-80°W·25-30°SW, N50-64°W·60-85°NE, GSet 2와 3에 포함되는 N35-45°E·65-75°SE, 그리고 GSet 4에 해당되는 N65-72°E·80°SE/60°NW의 단열들이 현장시험에 의한 유동성 단열로 파악되었다.

그리고 물리검증을 수행하지 않은 H-4, H-9, H-12공에서 수리전도도에서 이상치를 보이는 구간과 초음파주사검증 자료, 그리고 터널내에서 지하수 유출이 심한 구간의 단열 자료와 비교하여 추정된 유동성 단열은 N70-80°W·20-30°SW, N40-65°E·60-80°SE, N10-30°E·64-83°SE 방향의 단열군들이다.

본 연구를 통하여 지하수 조사에서 유동성 단열을 평가할 경우, 주입시험과 온도검증, 전기전도도검증 및 유속검증 등의 각종 야외시험을 통하여 관심 지역 지하수의 유동성단열을 규명하는 것이 가능하다.

## 참 고 문 헌

- Long, J. C. S., J. S. Remer, C. R. Wilson, and P. A. Witherspoon, "Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures", *Water Resources Research*, 18(3), pp645-658(1982).
- Ramirez, A. L., F. J. Deadrick, and R. J. Lytle, "Cross-borehole fracture mapping using electromanetic geotomography", Lawrence Livermore Laboratory, UCRL-53255(1982).
- Davison, C. C., W. S. Keys, and F. L. Paillet, "Use of

- borehole geophysical logs and hydraulic tests to characterize crystalline rock for nuclear-waste storage”, Whiteshell Nuclear Research Establishment, Manitoba, and Chalk River Nuclear Laboratory, Ontario, Canada, ONW1-418(1982).
4. 채병곤, 채영섭, 이대하, 김원영, 이승구, 김중렬, 유동성 단열 파악을 위한 암반 내 단열특성 규명, 대한지하수환경학회지, 4(2), pp88-99(1998).
  5. Zemanek, Joseph, E. E. Glenn, L. J. Norton, and R. L. Caldwell, Formation evaluation by inspection with the borehole televiwer”, *Geophysics*, 35(2), pp 254-269(1970).
  6. Gale, H., “Hydraulic behaviour of rock joints”, *Rocks Joints*(Proceedings of the Int. Symposium on Rock Joints, Loen, Norway), pp351-362(1990).
  7. Morin, R. H., Carleton, G. B., and Poirier, S., “Fractured-aquifer hydrogeology from geophysical logs; The Passaic formation, New Jersey”, *Ground-Water*, 35(2), pp328-338(1997).
  8. Drury, M. J., “Borehole temperature logging for the detection of water flow” : *Geoexploration*, 22, pp231-243(1984).
  9. Doe, T. W., and J. E. Geier, Interpretation of fracture system geometry using well test data, *Stripa Project 91-03*, SKB, Stockholm(1990).
  10. 김천수, 이은용, 배대석, 김경수, 정압주입시험을 이용한 지하수유동차원 해석, 대한지질공학회지, 2(2), pp149-165(1993).
  11. 성익환, 이병태, 조병욱, 김경수, 류충렬, 이춘오, 황세호, 김유성, 이병태, 이봉주, 김중렬, 현혜자, 이상규, 황학수, 박인화, 임현철, 김용재, 이대하, 김형찬, 채병곤, 이한영, 이종철, 영천시 자양면 보현리 용수고갈 원인조사, 한국자원연구소, 441p(2000).
  12. Chester, F. M., J. P. Evans, and R. D. Biegel, “Internal structure and weakening mechanism of the San Andreas Fault”, *Jour. of Geophys. Research*, 98(B1), pp771-786(1993).