

유동성 단열 파악을 위한 암반 내 단열특성 규명

Identification of Conductive Fractures in Crystalline Rocks

채병곤(Byung - Gon Chae)* · 최영섭(Young - Sup Choi)** · 이대하(Dae - Ha Lee)* ·
김원영(Won - Young Kim)* · 이승구(Seung - Gu Lee)* · 김종렬(Jung - Yul Kim)***

요 약 : 결정질 암반내에 발달하는 단열은 지하수 유동의 주요 경로가 되므로, 유동성 단열의 특성 규명은 유동체계를 해석하는데 매우 중요하다. 암반 내 단열 중 유동성 단열을 추출하기 위해 편마암 지역내 폐광산을 대상으로 단열특성을 파악했다. 연구지역내 지표 노두와 항내에 발달하는 단열 중, 단층은 방향성, 단층폭, 연장성, 운동감각, 충전물질, 절리의 경우는 방향성, 길이, 간격, 틈(aperture), 충전물질, 조도(roughness), 타 절리들과의 교차 및 연결성을 조사했다. 한편, 지표 하에 발달하는 단열특성 파악을 위해 연구지역내 5개 지점에 시추를 실시하여 이를 통해 회수된 코아시료를 정밀 로깅했다. 그 중, 3개 시추공을 대상으로 초음파주사검층을 실시하여 단열의 방향성과 단열종류를 구분하고 획득한 자료를 처리·분석하였다. 조사결과에 따르면 지표상에 발달하는 대표 단열군은 GSet 1: N50-82°E/55-90°SE, GSet 2: N2-8°E/56-86°SE, GSet 3: N46-72°W/60-85°NE, GSet 4: N12-38°W/15-40°SW 단열군으로 나타났다. 이에 대응되는 지표하 단열군은 HSet 1: N50-90°E/55-90°SE, HSet 2: N10-30°E/50-70°SE, HSet 3: N20-60°W/50-80°NE, HSet 4: N10-50°E/≤40°NW로 분류되었다. 이 단열군들 중 GSet 1 및 GSet 3, 그리고 HSet 1 및 HSet 3은 연구지역내 가장 우세하게 발달하는 단열군이다. HSet 1은 평균 단열간격이 30~47 cm이며, 이 단열 중 등급(code) 1 단열(단층, 열린단열) 등이 21.0~42.9%를 구성한다. HSet 3은 55~57 cm의 평균 단열간격을 보이고, 등급 1 단열이 15.4~26.9%를 차지한다. HSet 4는 239 cm의 평균 단열간격을 보여 연구지역내 우세 단열군 중 가장 넓은 단열간격을 가지나, 등급 1 단열의 비율이 54.5%에 이른다. 등급 1 단열과 유사한 특성을 갖는 단층이나 열린단열은 다른 성질의 단열에 비해 상대적으로 수리전도성이 큰 것으로 알려져 있음을 통해, N55-85°E/50-80°SE 단열군과 N20-60°W/50-75°NE 단열군, 그리고 N10-30°E/≤30°NW 단열군이 연구지역 내에서 지하수 유동성이 가장 높은 단열군으로 추정된다. 이러한 사실은 3개 시추공을 대상으로 실시한 시추공 내 물리검층과 정압주입시험에서도 확인된다.

Abstract : Since fractures may serve as major conduits of groundwater flow in crystalline rocks, characterization of conductive fractures is especially important for interpretation of flow system. In this study, characterization of fractures to investigate hydraulically conductive fractures in gneisses at an abandoned mine area was performed. The orientation, width, length, movement sense, infilling materials, spacing, aperture, roughness of both joints and faults and intersection and connectivity to other joints were measured on outcrops. In addition, characteristics of subsurface fractures were examined by core logging in five boreholes, of which the orientations were acquired by acoustic televiewer logging from three boreholes. The dominant fracture sets were grouped from outcrops; GSet 1: N50-82°E/55-90°SE, GSet 2: N2-8°E/56-86°SE, GSet 3: N46-72°W/60-85°NE, GSet 4: N12-38°W/15-40°SW and from subsurface; HSet 1: N50-90°E/55-90°SE, HSet 2: N10-30°E/50-70°SE, HSet 3: N20-60°W/50-80°NE, HSet 4: N10-50°E/≤40°NW. Among them, GSet 1, GSet 3 and HSet 1, HSet 3 are the most intensely developed fracture sets in the study area. The mean fracture spacings of HSet 1 are 30-47cm and code 1 fractures, such as faults and open fractures, comprise 21.0-42.9 percent of the whole fractures in each borehole. HSet 3 shows the mean fracture spacings of 55-57cm and the ratio of code 1 fractures is 15.4-26.9 percent. In spite of the mean fracture spacing of 239cm, code 1 fractures of HSet 4 have the highest ratio of 54.5 percent. From the fact that faults or open fractures have high hydraulic conductivity, it can be inferred that the three fracture sets of N55-85°E/50-80°SE, N20-60°W/50-75°NE and N10-30°E/≤30°NW form a fracture system of relatively high conductivity. It is indirectly verified with geophysical loggings and constant injection tests performed in the boreholes.

*한국자원연구소 환경지질연구부(Environmental Geology Division, Korea Institute of Geology, Mining and Materials, 30, Kajungdong, Yusunggu, Taejon, 305-350, Korea)

**한국자원연구소 지질연구부(Geology Division, Korea Institute of Geology, Mining and Materials, 30, Kajungdong, Yusunggu, Taejon, 305-350, Korea)

***한국자원연구소 자원탐사연구부(Resources Exploration Division, Korea Institute of Geology, Mining and Materials, 30, Kajungdong, Yusunggu, Taejon, 305-350, Korea)

서 론

암반에 발달하는 단열의 조사는 각종 토목공사를 위한 기초 지반의 안정성 및 특성파악과 설계자료 산출은 물론, 최근 연구의 주요 대상이 되고 있는 결정질 암반내의 지하수 유동특성을 규명하는데 있어 그 의미는 매우 중요하다. 지표와 지하공동에 나타나는 암석 단열을 조사하는 방법연구는 과거부터 여러 학자들에 의해 진행되어 왔다. Hancock(1985)은 단열에 대한 정성적 연구를 통해 단열형태를 분류하고, 그 형태를 기준으로 단열형성 기구(mechanism)를 밝혔으며, Priest & Hudson(1981)은 축선법을 이용하여 불연속면의 간격과 길이를 조사하는 방법을 설명했다.

이와 유사한 연구로써 Pahl(1981)은 불연속면의 평균길이를 측정하는 방법을 제시하고, 측정 및 처리과정에서 발생하는 여러 오차를 보정하려는 노력을 기울였다. 이외에도 불연속면의 길이나 밀도, 크기 등의 조사에서 여러 오차를 줄이고 정확성을 높이기 위한 시도가 많았는데(Sen & Kazi, 1984; La Pointe & Hudson, 1985; Huang & Angelier, 1989), 그 중 La Pointe *et al.*(1993)은 simulated sampling을 통해 단열크기를 확률적으로 측정하는 방법을 제안했다.

한편, 암반의 공학적 등급분류 기준설정(Barton and Lunde, 1974; Bieniawski, 1989; Grimstad & Barton, 1993)은 터널설계를 위한 목적으로 많이 이용되고 있으나, 다양한 구조적 특성을 갖는 넓은 지역에서 수리 및 지화학적 거동특성 등 다양한 분류를 위해서는 개선의 여지가 많다. 방사성폐기물의 심부 지하 처분 연구와 관련해서 Pusch(1994)는 단열체계를 7등급 분류기준(7th order classification)으로 구분했고, Black *et al.*(1994)은 스웨덴의 지질특성을 고려하여 4단계 분류법(4 Tier System)으로 단열을 구분했다(한국자원연구소, 1996).

그러나, 지하수 유동을 고려한 지질구조 요소 및 단열의 분류 기준에 대한 연구는 상기한 연구들과는 기본가정 및 매질의 특성을 다르게 고려해야 한다. 지하수의 광역적 유동매체가 되는 지하매질은 균질 등방성이 아니고, 특히 암반을 매질로 할 경우 암반 내 분포하는 단열이 지하수 유동특성에 큰 영향을 준다. 따라서, 지질특성에 따른 차이와 관계없이 매질에 대한 특성을 일률적으로 구분하여 적용할 수 없다. 이러한 측면에서 단열특성과 수리특성을 연관시킨 연구는 현재까지 소수에 불과하며(배대석, 1996), 앞으로도 계속 진행되어야 할 것이다.

본 연구는 심부지층에서의 지하수 유동은 대부분 암반 내 발달하는 지질구조에 지배됨을 토대로, 어떠한 지질구조 요소들이 지하수 유동을 원활히 하는지를 밝히는데 그 목적이 있다. 특히, 단열요소를 중점적으로 관찰해 단열 발달특성과 지하수 유동과의 관계를 파악하는데 주력하였다. 본 연구는 현재는 시작에 불과하지만 향후에도 이에 대한 연구를 지속하여, 여러 가지 단열요소의 특성들을 계속 밝혀 낼 것이다.

연구방법

지표 및 항내 단열조사

전술한 바와 같이 결정질 암반 내에서 지하수 유동은 단층이

나 절리 등 단열특성에 크게 좌우된다. 특히 지하수 유동은 단열의 특성 중, 길이(length), 간격(spacing), 틈(aperture), 단열 틈을 채우는 충전물질(infilling materials), 단열의 상호 연결성(connectivity) 등에 많이 규제된다.

지표와 항내에서의 단열조사는 광역적 지질구조 조사와 더불어 노두 규모에서는 축선법을 이용하여 상기한 단열특성 파악에 중점을 두고 실시했다. 축선법을 이용한 단열조사에서 축선은 단열 조에 수직방향으로 설치함이 가장 적절한 것으로 알려져 있다. 즉, 축선과 단열의 수선방향이 평행할 때 실제 단열 방향, 간격, 틈 등을 정확히 측정할 수 있으며, 한 노두에서 여러 방향의 단열 조가 발달할 경우는 모든 방향의 단열들을 최대로 포함할 수 있는 하나의 축선을 설치함이 타당하다고 한다(Hudson & Priest, 1983). 이러한 점을 고려하여 노두에서 축선 방향 결정에 신중을 기하였다. 단층의 경우에는 주향/경사, 단층폭, 연장성, 운동감각(movement sense), 충전물질, 단층에 수반된 절리 등을 조사했고, 절리에 대해서는 주향/경사, 길이, 간격, 틈, 충전물, 조도(roughness), 다른 절리들과의 교차 및 연결성 등을 기재했다.

획득한 단열자료는 방향성을 고려하여 유사한 방향 및 성격을 갖는 것끼리 군집화 하였고, 그 중 가장 우세한 방향의 자료를 추출하여 대표 단열군으로 나타내었다. 또한, 단열자료를 시추조사 및 초음파주사검층(acoustic televiewer) 결과와 비교 분석하였으며, 시추공 내에서 실시한 온도검층, 전기전도도검층, 유속검층과 정압주입시험(FIL test)결과를 고려하여 수리전도성이 높은 단열군을 추정했다.

지표하 단열조사

지하암반에 발달하는 단열의 특성파악을 위해 조사지역 내에서 회전유압식 시추기를 이용, 총 5개 공을 굴진하여 시추조사를 실시하였다. 시추코아는 더블코아매설(double core barrel)을 사용하여 NX 크기로 굴진·인양하였으며, 채취된 시추코아를 대상으로 정밀로깅을 실시했다. 각 시추공의 제원은 Table 1과 같다. 코아조사는 암종구분, 색깔, 풍화도, 단열정도 및 단열면 상태를 정밀 관찰하여 기록하였다(한국자원연구소, 1996). 암종구분과 색깔은 암석의 야외명과 일반적인 색상명을 사용하였다. 풍화도와 단열정도의 구분은 여러 기준이 제시되어 있으나(Deere *et al.*, 1977; ISRM, 1978), 이러한 기준들을 응용하여 이번 조사목적에 맞도록 수정하여 사용하였다(Table 2 & 3). 특히, 단열면에 대한 조사는 Deere *et al.*(1977)이 제시한 방법에 의거하여 단열면 심도, 종류, 경사각, 충전물질 등을 기재했다. 단층면에 대하여는 단층조선의 면선각(rake) 측정, 운동방

Table 1. Specifications of borehole in the study area

Hole No.	Size	Depth (m)	Azimuth (°)	Distance (m)	Elevation (m)	Casing	
						4"	3"
B-1	NX	80.30			195.212	2.70	2.92
B-2	NX	80.10	N 136	4.95	195.205	2.10	2.90
B-3	NX	80.10	N 158	9.47	195.210	-	3.10
B-4	NX	80.20	N 185	6.85	195.051	-	5.90
B-5	NX	23.00	N 165	19.35	195.236	-	1.10

Table 2. Classification for fracture spacing on core sample. The criteria for classification is referred to Geologic Logging and Sampling of Rock Core for Engineering Purposes by Deere *et al.* (1977)

Grade	Description
SOLID	Fracture spacing greater than 20 cm
SF	Slightly Fractured; fracture spacing 10 cm~20 cm
MF	Moderately Fractured; fracture spacing 5 cm~10 cm
HF	Highly Fractured; fracture spacing less than 5 cm

Table 3. Classification criteria for weathering. The criteria for classification is referred to Geologic Logging and Sampling of Rock Core for Engineering Purposes by Deere *et al.* (1977)

Grade	Description
F	Fresh; no visible sign of weathering
SW	Slightly Weathered; penetrative weathering developed on open discontinuity surfaces but only slight weathering of rock material.
MW	Moderately Weathered; weathering extends throughout the rock mass but the rock material is not friable.
HW	Highly Weathered; rock is wholly decomposed and in a friable condition but the rock texture and structure are preserved.

향 결정, 충전물질, 단층각력의 발달범위 등이 상세히 기재되었다. 특히, 단층을 수반하는 연약대는 단층비지(fault gouge) 및 단층각력(fault breccia)이 미고결상태로 남아 있는 것과 고결상태인 것으로 구분되고 있다.

시추종료 후 3개 시추공(B-1, B-2, B-3)에 대한 초음파주사검층을 실시하였다. 초음파주사검층은 초음파 빔이 수직 시추공벽에 직교방향으로 주사될 때 반사에너지의 진폭 및 파장을 분석하므로써 암반에 발달하는 단열의 주향/경사, 암석물성 및 역학적 특성을 규명할 수 있다. 이번 연구에서 사용한 기기는 독일의 기 개발된 DMT FACSIMILE(Focused Acoustic System to Image the Inside of boreholes and pipes)을 국내 현장에 적합하도록 보완 및 개선한 시스템(김중렬 외, 1993)으로서, 초음파는 1초에 10회 회전하며 1회전시 1.4 MHz의 빔이 128번 입사된다. 반사파의 해상도는 4단계로 구분된 이득조정(gain control)에 의해 조정된다. 검층속도는 1 m/3 min이며, 깊이에 따른 변화를 매 1 cm마다 기록한다. 진폭자료와 주시시간 자료가 도출되며, 이 기록지에 나타난 주시곡선에 의해서 단열에 대한 자료가 표현된다.

상기한 바와 같이 시추코아 로깅, 초음파주사검층을 통해 얻은 자료들을 비교하여 두 조사간의 차이점을 검토한 후, 시추공내 단열의 방향성, 크기, 발달상태 등 단열분포 특성파악에 주력하는 한편, 지하수 유동경로가 될 가능성이 큰 단열을 추정하였다.

지 질

연구지역은 차령산맥의 서남측 연장단에 위치한 충청남도 청양군 운곡면 신대리 삼광광산 일대이다. 연구지역의 광역지질은 선캠브리아기의 다양한 변성암류와 시대미상의 변성퇴적암, 유라기 운곡리층 및 옹회암, 백악기의 석영맥 및 염기성 암맥,

그리고 이들을 부정합으로 피복하는 제4기 미고결 충적층 등이 분포하고 있다(Figure 1a).

세부조사지역인 삼광광산 일대는 선캠브리아기의 운모편암, 규암, 호상편마암과 백악기의 염기성 암맥, 석영맥등의 맥암류로 구성되어 있으며, 이들은 제4기의 미고결 퇴적층으로 피복되어 있다. 흑운모편마암과 호상편마암은 같은 암상이나 야외에서 흑운모의 산상에 따른 구조적 차이에 의해 구분된다.

선캠브리아기의 변성암류 중에는 흑운모가 우세한 옹회대와 장석이 우세한 우백대가 호층을 이루고 있는 호상편마암이 가장 우세하며, 이에 흑운모, 백운모, 견운모, 장석, 석영 등으로 이루어진 운모편암 및 규암이 협재되어 있다. 이들에 발달하고 있는 엽리는 N45-82°E/55-85°SE 또는 NW 방향을 가진다. 화강암질 편마암은 국사봉을 중심으로 서측에서 다른 변성암류를 관입하여 분포하고 있다. 암상은 대체로 괴상이며 흑운모가 미약한 방향성을 가지고 있어 희미한 엽리가 관찰된다. 한편, 이들 편마암류의 정확한 경계의 연장은 지표에서 확인되지 않았다.

삼광광산 입구 계곡에서 주로 관찰되는 시대미상의 변성퇴적암류는 NE-SW 방향으로 대상분포하고 있으며, 구성암석은 변성사질암 및 견운모편암이 주를 이루는데, 사질암 내에는 부분적으로 조립질의 담회색 규암이 협재되어 분포한다.

운곡리층은 변성사질암을 최하부로 하여 역암, 역질사암, 암회색 또는 담회색 사암 및 흑색 셰일이 호층을 이루며, 탄질 셰일 및 탄층을 협재한다. 기반암인 선캠브리아의 편마암과는 경계부에서 편마암 역들이 주를 이루나, 일부에서는 옹회암 기질을 포함한 역질 사암이 협재하기도 한다.

연구지역 중부에서 NNE-SSW 방향으로 대상분포하는 옹회암층은 라필리옹회암, 결정질 옹회암, 용결옹회암 등으로 구성된다. 옹회암류는 대체로 용결조직이 잘 발달하고 있으며, 라필리옹회암의 경우 평균 0.5 cm 크기의 암편이 다량 함유되어 있음이 특징이다.

광산주변에 분포되어 있는 관입암은 페그마타이트, 석영맥, 염기성 암맥으로 분류된다. 거정질의 화강암질 페그마타이트의 위치는 지질도 상에 정확하게 도시할 수는 없으나, 방향성은 NW 방향(N30-50°W/50-70°NE)이며, 염기성 암맥은 석영맥과 서로 단절되는 양상을 보인다. 석영맥은 NE(N40-60°E/45-70°SE) 및 NW(N30-50°W/60-70°SW)의 두 방향이 서로 직교 방향에 가까운 형태의 구조를 이루고 있으며, 금, 은 등의 광체를 포함하고 있다. 염기성 암맥은 S₈ 위치(Figure 2)에서 관찰된 바에 의하면, 호상편마암을 관입하고 있으며, 관입방향은 N 24°E/80°NW이다. 이 암맥은 계곡방향으로 발달하는 주단층과 부수단층들에 의하여 절단되고 있다.

단열발달상태

지표 및 항내 단열발달 상태

항공사진 판독결과에 따르면, 삼광광산을 중심으로 반경 5 km 이내에서 신대리 배미실 마을을 기준으로 하여 이의 서측에서는 NNE-SSW 및 WNW-ESE 방향, 동측에서는 ENE-WSW 및 NW-SE 방향의 선구조들이 우세하게 발달하여 있다(Figure 3). NNE-SSW 방향의 선구조선은 청양-신양을 연결하는 621번

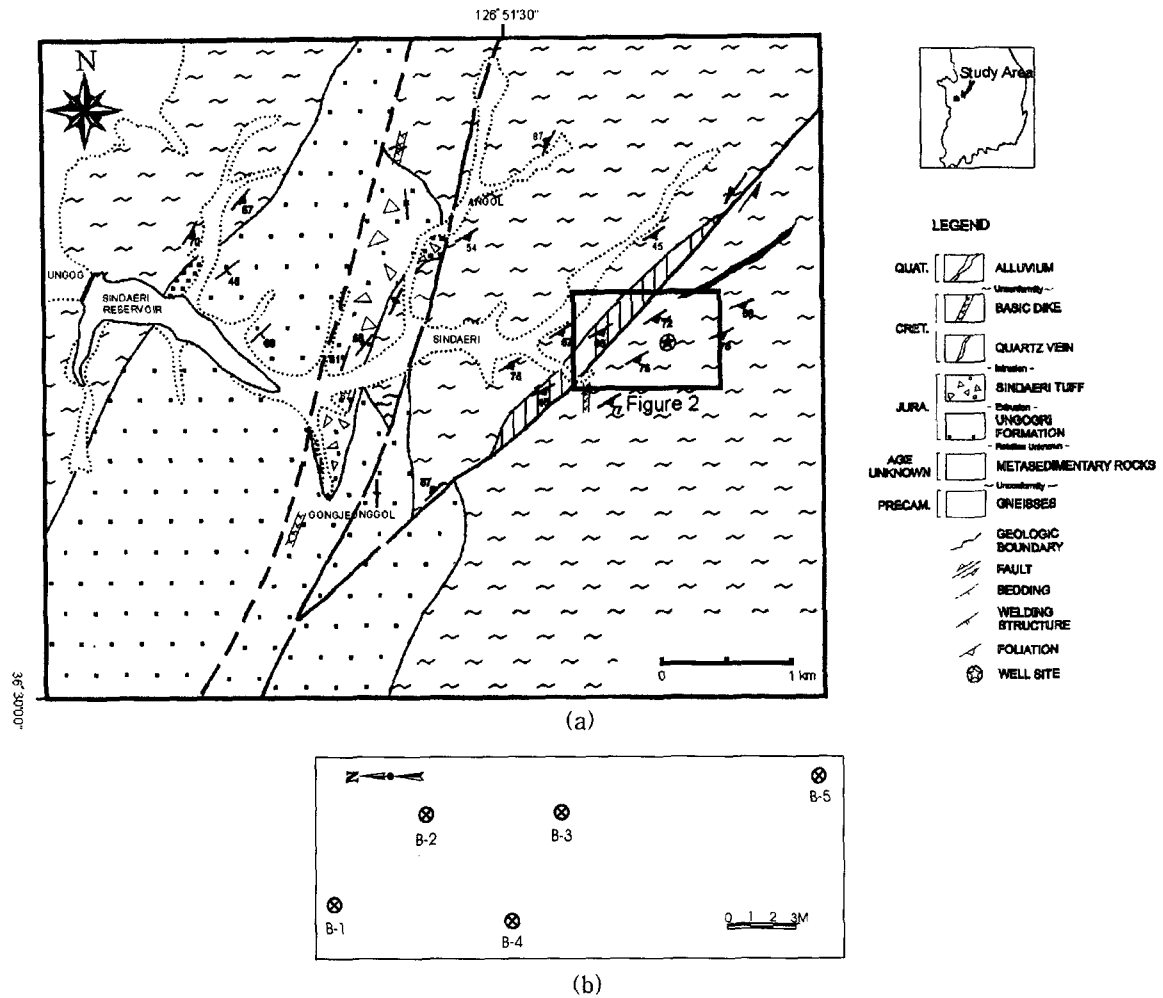


Figure 1. (a) Geologic map of the study area (after Cho, 1998). (b) Location map of boreholes in the study area.

지방도를 따라 발달하고 있으며, 이의 동측으로는 신대리 중뚝 마을 부근에 이와 평행한 선구조선이 3조 발달하고 있다. WNW-ESE 방향의 선구조선은 신대리수지를 지나는 것을 비롯하여 이의 북측에 3조가 더 발달하고 있다. ENE-WSW 방향의

선구조선은 삼광광산이 위치하고 있는 계곡을 통과하는 것 외에 3-4조 발달하고 있다. 그리고, NW-SE 방향의 선구조선은 국사봉의 북측에 위치하는 야광고개를 지나는 것을 비롯하여 3-4조 더 발달하여 있다.

단층 분포양상 : 지표 및 항내에는 여러 방향의 단열이 발달하고 있으며, 그 중 우세하게 관찰되고 있는 단층구조는 ① N 50-80°E/65-90°SE, ② N12-22°W/38-40°SW, ③ N70-80°W/30-44° NE, ④ N46-60°W/72-80°NE, ⑤ N2-8°E/58-72°SE 등이 있다(Figure 4a). 이 중에서 N50-80°E/65-90°SE, N 66°W/18°NE, N80°W/72°SW는 지표에서, 기타 단층 중 N 22°E/41°SE, N52°E/48°SE는 항내에서 관찰된 것이며, 나머지 ②, ③, ④, ⑤는 지표와 항내 모두에서 관찰되고 있다.

① N50-80°E/65-90°SE 방향의 단층들은 대체로 17° 내외로 서측으로 선경사(plunge) 하는 단층구조를 가지며, 좌수향의 운동감각을 보이고 있는 주향이동 단층들이다. 이들은 삼광광산 계곡을 지나는 N65-75°E 방향의 좌수향 운동감각을 갖는 주단층과 평행하거나 저각으로 사교하고 있는 단층들인데, 저각으로 사교하고 있는 단층들은 주단층에 대한 Riedel shear일 가능성이 있다. 또한, 이 방향의 단열들은 코야조사 및 초음파 주사

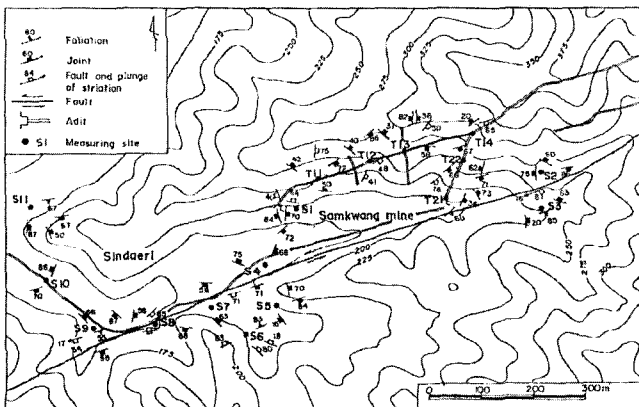


Figure 2. Structural geologic map showing the orientations of faults and joints in the study area.

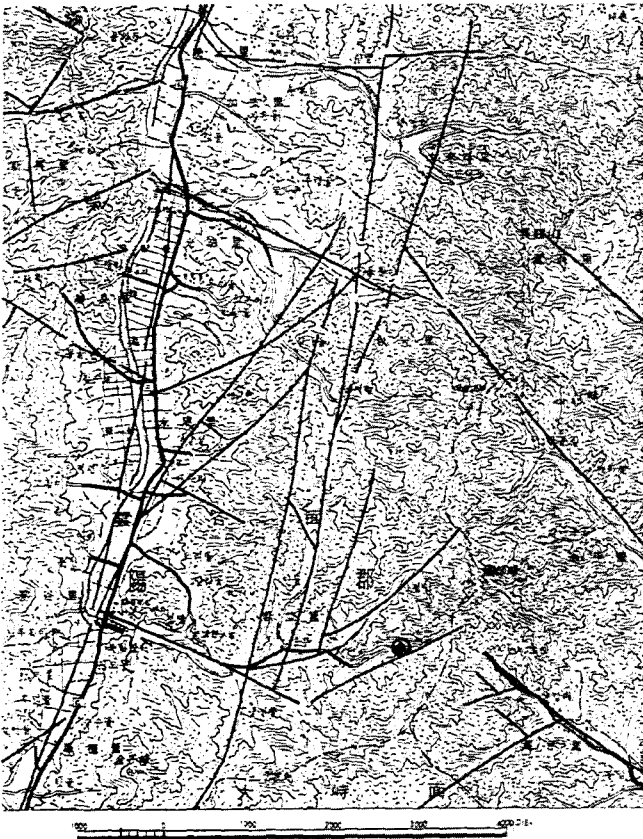


Figure 3. Lineament map interpreted from acrophotos of the study area. NNE direction lineaments are the most dominant and ENE set is the second dominant lineaments. Dot is well site.

검층에서도 가장 우세하게 나타나고 있다.

② N12-22°W/38-40°SW 방향의 것은 지표 및 항내에서는 정단층으로 관찰되고 있으나, 코아조사 및 초음파 주사검층에서는 관찰되지 않는다.

③ N70-80°W/30-44°NE 방향의 것은 지표 및 항내와 코아조사 및 초음파 주사검층에서 모두 정단층으로 관찰되고 있는 것이다.

④ N46-60°W/72-80°NE는 지표와 코아조사 및 초음파 주사검층에서 주향이동단층 또는 정단층으로 관찰되고 있으며, 코아조사 결과에 따르면 주향이동단층은 좌수향 운동감각을 보이고 있다.

⑤ N2-8°E/58-72°SE 방향의 것은 지표 및 항내와 코아조사 및 초음파 주사검층에서 모두 관찰되고 있으며, 우수향 주향이동운동 또는 정단층 운동을 한 것으로 보인다. 이는 주단층에 대한 R'-shear로 해석된다.

N22°E/41°SE, N52°E/48°SE 방향의 것은 항내에서와 코아조사 및 초음파 주사검층에서 관찰되고 있으며, 코아조사 결과에 따르면 대부분 정단층 운동을 하고 있으나 일부에서는 좌수향 주향이동운동을 한 것으로 관찰되고 있다. N66°W/18°NE 방향은 지표(S₆)에서만 관찰되고 있으며, N46°-60°W/72-80°NE 방향의 단층들을 절단하고 있다. N80°W/72°SW 방향

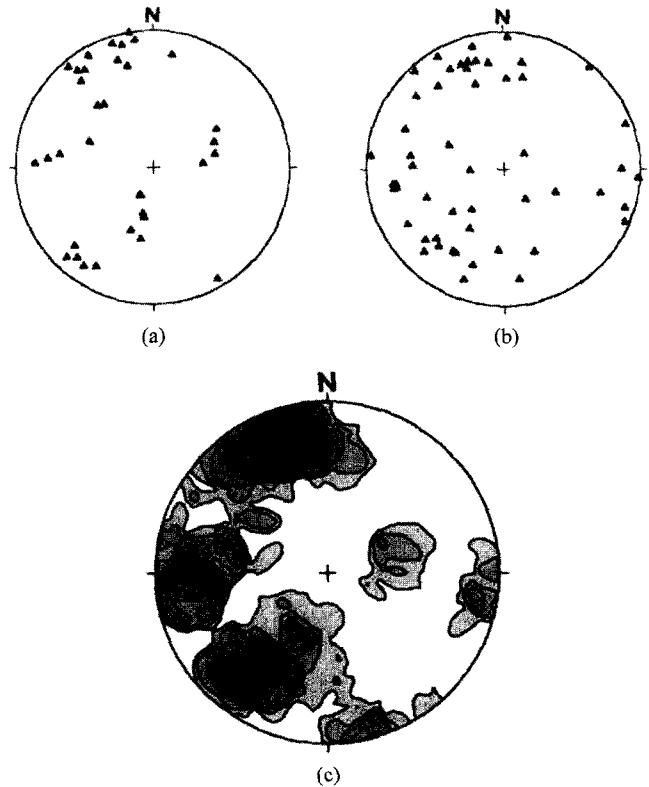


Figure 4. Equal area projections of poles to fractures on the ground surface in the study area. (a) faults data, (b) joints data. (c) contour diagram for fractures in combination of (a) with (b), showing four sets of fracture groups. Low hemisphere projection.

은 지표와 코아조사 및 초음파 주사검층에서 관찰되고 있으며, 코아조사 결과에 따르면, 좌수향의 경사이동단층 운동을 하였던 것으로 관찰되고 있다. 따라서, 이는 주단층에 대한 P-shear 일 것으로 해석된다.

절리분포 양상 : 지표 및 항내에서 관찰되고 있는 절리는 방향성이 매우 다양하여 큰 집중성을 보이지 않는다. 그러나, 이 중 N60-82°E/55-84°SE 방향의 절리군과 N0-24°E/62-88°NW 절리군, N50-80°W/60-75°NE 절리군은 다른 방향에 비해 비교적 일관된 집중성을 보인다(Figure 4b). 그 외에도 단독으로 관찰되고 있는 절리는 N22°E/66°SE, N24°E/34°NW, N3°W/20°NE, N50°W/87°SW, N86°W/50°NE 등이 있다.

가장 우세한 절리군인 N60-82°E/55-84°SE는 전단단열(shear fractures)로 관찰되고 있으며, 절리간격은 5-25.7 cm(평균 14.0 cm)이다. 이에 포함되는 절리계들은 가장 우세한 단층군인 N50-80°E/65-90°SE 단층군과 평행하게 형성되어 있는 전단절리이다. N0-24°E/62-88°NW 절리군은 절리간격이 9.87~75 cm로서 그 범위가 매우 넓다. 절리간격이 9.87 cm, 11.2 cm 및 13.8 cm로 관찰되는 절리계는 전단절리로 생각된다. N50-80°W/60-75°NE 절리군은 전단절리로서 관찰되고 있으며, 절리간격은 8.12-40.5cm(평균 18.1 cm)이다. 이 절리군은 네 번째 단층군(N46-60°W/72-80°NE)과 관련이 있는 것으로 보인다.

지표 및 항내의 단열분포 해석 : 지표 및 항내에서 관찰된

단열들을 검토한 결과, 다음과 같은 단열군으로 묶을 수 있다 (Figure 4c).

- GSet 1: N50-82°E/55-90°SE 및 N78-88°W/56-86°SW 단열군

이 단열군은 ① N50-80°E/65-90°SE 및 N80°W/72°SW 단층군과 N60-82°E/55-84°SE 절리군을 통합한 것으로서, 이는 N65-75°E 방향의 주단층에 대한 R-shear와 P-shear로 생각되는 단열군이다. 이 단열군에 속하는 단층 및 절리들은 이 지역에서 가장 우세하게 나타나고 있으며, 좁은 단열간격을 가지고 있다. 이 단열군에 속하는 단열들은 시추코아 조사 및 초음파주사검층 결과에서도 가장 우세하게 나타나고 있다.

- GSet 2: N2-8°E/56-86°SE 및 N0-24°E/62-88°NW 단열군
여기에는 ⑤ N2-8°E/58-72°SE 단층군과 N2-8°E/56-87°SE 및 N0-24°E/62-88°NW 절리군이 포함되어 있다. N2-8°E/56-87°SE 단열군에 속하는 단열들은 주단층에 대하여 R'-shear 일 것으로 생각된다. 그러나, N0-24°E/62-88°NW의 절리군이 주단층의 R'-shear인지는 확실치 않으나, 방향이 비슷하고 그 중 일부는 전단절리로 관찰되고 있으므로 같은 단열군에 포함시켰다. 그리고, N22°E/66°SE 방향의 절리제도 같은 범주에 속하는 것으로 볼 수 있다.

- GSet 3: N46-72°W/60-85°NE 단열군
이에는 ④ N46-60°W/72-80°NE 단층군 및 N50-80°W/60-75°NE 절리군이 포함되며, 서로 관련이 있는 것으로 해석된다. 그리고, N42-46°W/60-73°NE 방향의 절리계들은 절리간격이 다소 넓게 관찰되고 있으나, 발달방향으로 보아 이 단열군에 포함될 것으로 보인다.

- GSet 4: N12-38°W/15-40°SW 단열군
이에는 ② N12-22°W/38-40°SW 정단층군과 N38°W/15°SW 절리계가 포함되어 있으며, 양자간의 관계는 불확실하나 방향성 및 전단절리 성격을 보이는 점 등을 고려하여 하나의 단열군으로 구분했다.

시추공내 단열발달 상태

코아조사 결과 : 연구지역에서 실시한 시추작업(Figure 1b)을 통해 회수한 코아를 대상으로 정밀로깅을 실시한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- B-1공(Table 4) : 본 시추공은 지표에서 2.5 m까지는 매립층이고 그 하부는 전체적으로 호상편마암으로 구성되어 있다. 풍화정도는 3 m 구간까지는 HW(Highly Weathered), 3~6 m 까지 MW(Moderately Weathered) 내지 SW(Slightly Weath-

Table 4. Simplified core log sheet of B-1.

Hole No.	Depth	Rock Type	Weath-ering	RQD (%)	Frac-turing	Remarks	
B-1	10.0	Fill	HW	0	HF-MF	Consolidatd fault zone (fault gouge) Highly Fract. zone	
			MW-SW	72-86			
	20.0	Banded Gneiss	Fresh	90-100	SF-Solid		
	30.0			32.3	0		HF
	40.0			90-100	Solid		
	50.0			46.1	0		HF
	60.0			89-100	Solid		
	70.0				MF-SF		
	80.3				Solid		

Table 5. Simplified core log sheet of B-2

Hole No.	Depth	Rock Type	Weath-ering	RQD (%)	Frac-turing	Remarks		
B-2	10.0	Fill	SW	0		Consolidatd fault zone (fault gouge & breccia) Consolidatd fault zone Core loss Highly Fract. zone Consolidated fault zone (fault gouge & breccia) Highly Fract. zone		
			SW-Fresh					
	20.0	Banded Gneiss	Fresh	87-100	MF-Solid			
	30.0			21.1-27.0	13-67		HF-SF	
	40.0			71-100	SF-Solid			
	50.0			42.3-47.0	17-47		47.0-49.6	HF-SF
	60.0			0	HF			
	70.0			88-100	Solid			
	80.1			61.5-71.6	30-60		HF-SF	
	70.0			SW-Fresh	71.6-73.3		0	HF
					28-79		HF-SF	

ered)이며, 그 이후 시추공 바닥까지는 신선하다. 각 구간별 암질지수(RQD)는 지표에서 6 m까지 72~74%이고, 그 하부는 84~100%로서 상당히 높은 암질지수를 가지고, 단열간격이 20 cm 이상으로서 단열발달 등급 중 Solid에 해당된다. 그러나, 단열이 심하게 발달하는 구간들은 암질지수가 10% 미만의 고파쇄대(Highly Fractured Zone)를 이루고 있다.

시추공 상부구간(0~12 m)의 단열면은 산화철로 풍화되어 있으며, 공 전체에 걸쳐 단열면에 방해석이 피복되거나 미세한 맥으로 충전되어 있다. 32.3~33.6 m 구간은 암질지수가 0%인 고파쇄대로서 고화된 단층대(consolidated fault zone)를 이루고 있고, 단층비지도 일부 산출된다. 46.1~47.4 m 구간 역시 심하게 파쇄되어 있으나, 32.3~33.6 m 구간과는 달리 고화되어 있지 않고 점성이 없는 물질로 파쇄대가 구성된다. 초음파주사검층에 의하면, 이 지점에 발달하는 주단층의 방향은 N68°E/56°SE이다.

• B-2공(Table 5) : 이 공은 지표에서 2.6 m까지 매립층으로 이루어져 있고, 그 하부는 B-1공과 마찬가지로 호상편마암으로 구성되어 있다. 시추코아의 풍화정도는 2.6~4.8 m까지는 SW에 해당되며 그 하부는 대체로 신선하다. 구간별 암질지수는 시추공 전체에 걸쳐 87~100%이나, 21.1~27.0 m 구간은 13~

67%로 낮게 나타나며, 47.0~49.6 m 구간은 0%의 고파쇄대를 이룬다. 암질지수 0%의 고파쇄대는 71.6~73.3 m 구간에도 나타난다. 이처럼 암질지수가 0%인 구간을 중심으로 상하부에서 암질지수의 양호/불량 구간이 대칭적으로 나타난다.

시추공 상부구간(0~6.9 m)의 단열면은 모두 산화철로 풍화되어 있으며, B-1공과 같이 방해석으로 충전 또는 피복되어 있는 것도 있다. 상기한 고파쇄대 구간 중 21.1~27.0 m 구간은 단층비지를 포함하는 단층대로 나타나고, 47.0~49.6 m 구간은 코아회수가 전혀 안된 코아손실(core loss) 구간이다. 그 상하부는 단열간격 5 cm 미만의 HF(Highly Fractured) 등급에 해당되며, 부분적으로 단층비지를 포함하는 고화된 단층대도 있으나, 전체적으로는 점성이 없는 고파쇄대로 나타난다. 이러한 양상은 71.6~73.3 m 구간에도 나타나고 있고, 그 외에도 소규모의 고화된 단층대나 비점성 고파쇄대가 수군데 산재해 있다. 초음파주사검층을 통해 이 지점의 주단층은 N60°E/62°SE임을 알 수 있었다.

• B-3공(Table 6) : 본 시추공 역시 지표에서 3.0 m 구간은 매립층이고, 그 하부 전체는 흑운모 호상편마암으로 구성된다. 이 시추공에서는 심도 약 13.0 m까지 SW의 풍화정도를 나타내고, 그 하부는 신선하다. 그러나, 49.3~51.1 m 구간은 고파쇄대

Table 6. Simplified core log sheet of B-3

Hole No.	Depth	Rock Type	Weathering	RQD (%)	Fracturing	Remarks	
B-3	10.0	Fill	SW-MW	0		Core loss Highly Fract. zone Consolidated fault zone	
				53-74	MF-Solid		
	20.0	Banded Gneiss	SW				
			SW-Fresh				
	30.0			88-100	MF-Solid		
	40.0		Fresh				
	50.0			49.3-51.1			
	60.0		SW-Fresh	0	HF		
				17-42	HF-SF		
	70.0			57.4			
80.1		Fresh	83-99	SF-Solid			

Table 7. Simplified core log sheet of B-4

Hole No.	Depth	Rock Type	Weathering	RQD (%)	Fracturing	Remarks	
B-4	10.0		Fill			Consolidated fault zone Core loss Consolidated fault zone (gouge & breccia) Core loss Consolidated fault zone	
			MW	0	HF-MF		
	20.0	Banded Gneiss	SW		29-67 12.7-13.9		HF-Solid
					0		HF
					12-73 21.0-30.5		HF-Solid
	30.0			0	HF-MF		
	40.0			24-67	MF-Solid		
	50.0			79-95	SF-Solid		
	60.0		Fresh		48.0-55.5		
					52		HF-SF
70.0			87-100	Solid			
80.2							

구간으로서 SW의 풍화정도를 나타낸다. 이러한 양상은 72.5~73.2 m 구간에도 나타난다. 암질지수는 0~7.0 m까지 53~74%로 낮게 나타나고, 그 하부는 대체로 90% 이상의 암질지수를 보인다. 그러나, 49.3~51.1 m까지는 암질지수가 0%이고, 코아손실이 발생한 고파쇄대 구간으로서, 이 지점의 주단층 방향은 N 65°E/50°SE로 파악되었다.

시추코아의 파쇄정도는 전반적으로 SF내지 Solid에 해당되나, 부분적으로 MF인 곳도 있다. 그러나, 상기한 49.3~51.1 m 구간은 단열간격이 5 cm 미만의 HF구간이다. 지표에서 19.0 m 구간까지에 분포하는 단열면은 모두 방해석으로 피복 또는 충전되어 있고, 그 중 대부분이 산화철로 풍화되어 있다. 그 하부구간도 거의 대부분의 단열이 방해석으로 피복되어 있어, 다른 시추공에 비해 단열면의 방해석 피복율이 더 많다.

• B-4공(Table 7) : 본 시추공은 0~3.30 m 구간의 매립층과 그 하부의 흑운모 호상편마암으로 이루어져 있다. 3.3~9.7 m 구간은 MW내지 SW의 풍화도를 가지고 있으며, 그 하부는 시추공 지저부인 80.2 m까지 대체로 신선하다. B-1공에서 B-3공은 암질지수가 대부분 85% 이상 100%에 이르지만, 본 시추공의 암질지수는 주로 65-85%에 해당되는 구간이 많다. 특히, 12.7~13.9 m와 21.0~30.5 m 구간은 암질지수가 0%이고, 절리간격이 5 cm 미만인 HF구간이다. 이 구간은 모두 단층비지로 구성된 고파쇄된 단층대이고, 일부 구간에서는 코아손실이 발생한다. 이 공의 단열은 대체로 미세 방해석막으로 충전되어 있다.

• B-5공(Table 8) : 본 시추공은 0~1.0 m 구간까지 매립층으로 구성되어 있어 다른 공에 비해 기반암 심도가 얇은 편이다. 1.0 m 이하의 시추공 바닥까지 흑운모 호상편마암으로 구성된다. 1.0~10.0 m까지는 MW내지 SW의 풍화도를 가지며, 단열면이 풍화되어 산화철이 나타난다. 이 공은 1.0~3.9 m까지의

Table 8. Simplified core log sheet of B-5.

Hole No.	Depth	Rock Type	Weathering	RQD (%)	Fracturing	Remarks
B-5	10.0	Fill	MW-SW	0	HF-MF	
		Banded Gneiss		0-50		
	20.0		SW	94-100	SF-Solid	
		23.0				

암질지수가 50% 이하로 낮게 나타나고, 절리간격은 10 cm 미만인 MF 상태이다. 그러나, 3.9 m에서 시추공 바닥인 23.0 m까지는 대부분 100%의 암질지수를 가지며, 절리간격은 20 cm 이상의 Solid한 상태이다.

시추공 B-1, B-2, B-3에서 실시한 초음파주사검층 자료를 처리하여, 각 시추공에 대한 진폭이미지, 주시이미지, 암석강도, 그리고 단열 경사 및 방향으로 나타내었고(Figure 5a~c), 이 자료들을 입체투영이나 등고선 그림으로 표현하여 지표하 단열에 대한 전반적인 경향을 판단하였다(Figure 6).

시추공내 단열분포 해석 : 시추코아와 초음파주사검층 결과를 상호 비교하여 지표 하에 발달하는 단열의 방향성 및 특성을 분석해 보았다(Figure 6, Table 9). 여러 방향으로 발달하는 단열이 있을 때 동일 생성기구(mechanism)에 따른 단열들끼리 구분할 필요가 있다. 그 중, 주향이 같더라도 경사각이 확연히 차이나고 단열면 상태가 다른 두 개의 단열이 있을 경우, 이 단열

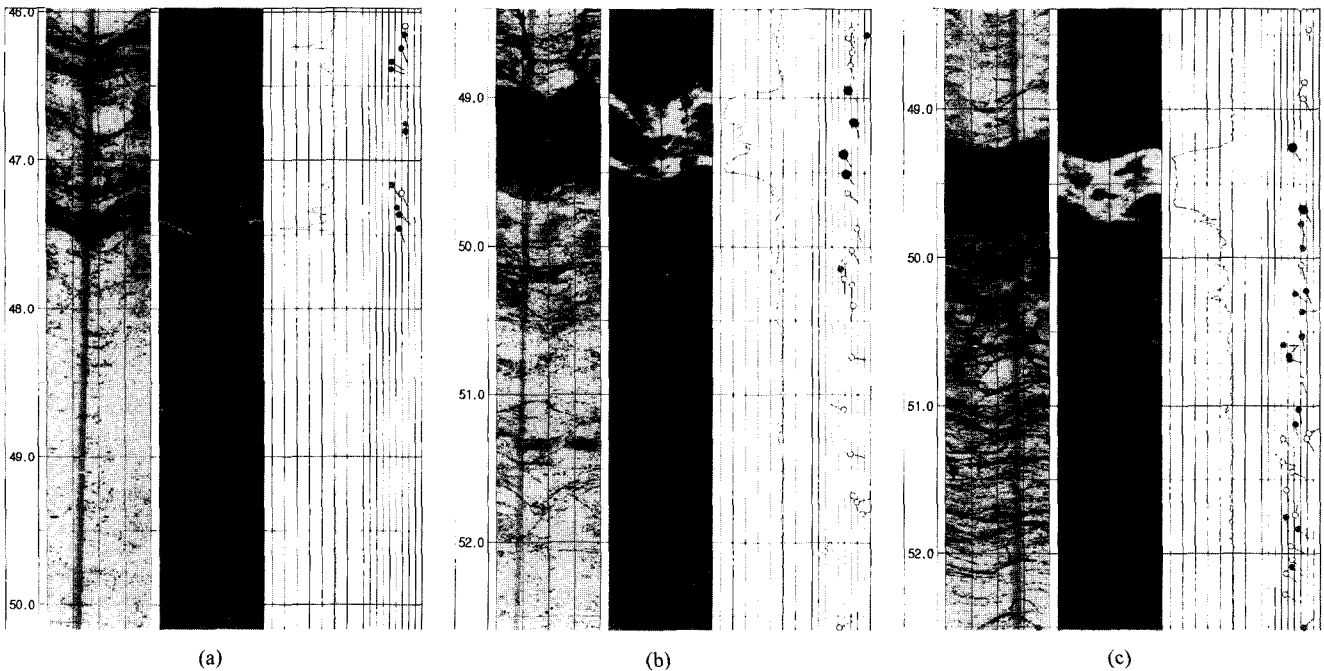


Figure 5. Acoustic televiewer image logs. (a) B-1 at depth 45.9~50.2 m. (b) B-2 at depth 48.4~52.6 m. (c) B-3 at depth 48.3~52.5 m.

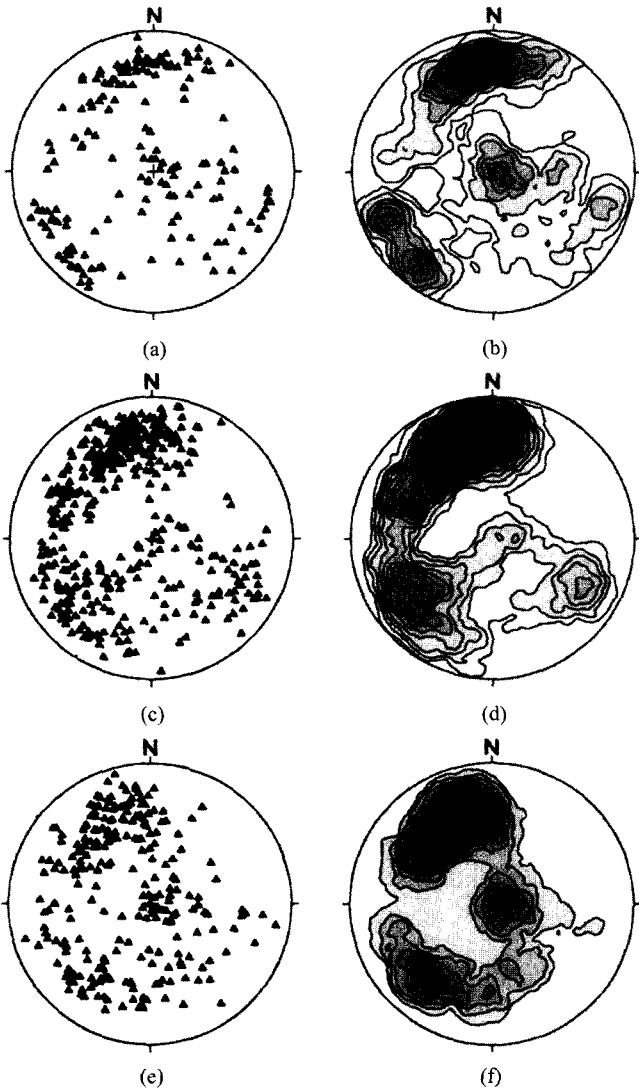


Figure 6. Equal area projections of poles to fractures, showing orientations of fractures in the three boreholes. (a) & (b) B-1, (c) & (d) B-2, (e) & (f) B-3. Low hemisphere projection.

들의 생성기구나 응력방향, 또는 응력상태가 서로 다르게 작용했음을 나타낸다(Engelder, 1985). 또한, 동일한 응력하에서 발생한 단열이라도 응력이 작용하는 방향과 단열의 생성방향에 따라 단열면의 상태, 즉 틈간격이나 조도가 달라지게 되고, 이에 따라 이 단열들이 지하수 유동에 있어 다른 경로가 될 수 있으므로, 이들을 서로 다른 단열군으로 구분하는 것이 바람직할 것이다.

• B-1공 : 본 시추공의 단열분포는 Table 9와 같이 크게 2개 방향으로 나타난다. 이 중 N60-90°E/≥60°SE 방향의 단열군은 연구지역내 주 구조선의 방향인 GSet 1(N50-82°E/55-90°SE)과 일치하고, N20-60°W/≥60°NE 방향은 지표 및 향내 자료를 분석한 GSet 3(N46-72°W/60-85°NE) 단열군에 해당된다. N60-90°E/≥60°SE 방향 단열군은 평균 단열간격이 35 cm로서 지표 하에서 조밀한 간격으로 발달해 있고, N20-60°

Table 9. Fracture groups analysed from televiwer log data. Code means fracture type; code 1:clear fracture, code 2:normal fracture, code 3:acceptabe fracture.

Hole No.	Fracture Direction	Dip Angle	Mean Spacing (cm)	Code 1 & 2 (%)	
				Code 1 (%)	Code 2 (%)
B-1	N60-90°E	≥60SE	35	42.9	57.1
	N20-60°W	≥60NS	57	26.9	73.1
B-2	N50-90°E	55-85SE	47	21.0	79.0
	N20-50°W	50-80NE	56	15.4	84.6
	N10-30°E	50-70SE	127	13.0	77.0
	N10-50°E	40-80NW	141	4.0	96.0
B-3	N40-90°E	50-80SE	30	24.6	75.4
	N40-60°W	50-80NE	55	21.1	78.9
	N10-50°E	≤40NW	239	54.5	45.5

W/≥60°NE 방향의 단열군도 57 cm의 평균 단열간격을 가져, 전자보다는 단열간격이 넓지만 비교적 양호한 단열발달상태를 보인다.

한편, 이 두 방향에 속하는 단열들을 대상으로 초음파주사검층 결과의 단열 등급(code)을 분석해 본 결과, N60-90°E 방향은 등급 1 & 2가 전체의 42.9%를 차지한 반면, N20-60°W 방향은 등급 1&2가 26.9%를 차지하여 N60-90°E 방향의 단열들이 가장 명확하고 강하게 발달됨을 알 수 있다. 즉, N60-90°E 방향의 단열들이 틈간격은 넓고 다른 방향의 단열에 비해 단열 틈이 방해석이나 기타 광물들로 충전되지 않은 단열이 훨씬 많은 것으로 생각된다.

• B-2공 : 본 시추공의 단열분포는 단열 경사방향을 고려할 경우 크게 4개 방향으로 구분할 수 있다.

N50-90°E/55-85°SE 방향은 B-1공과 마찬가지로 GSet 1 단열군, N20-50°W/50-80°NE 방향은 지표 및 향내의 GSet 3 단열군, N10-30°E/50-70°SE 방향은 GSet 2(N2-8°E/56-86°SE) 단열군과 유사한 방향을 가져 각각 이 군집에 포함시킬 수 있다. 이들 중, N50-90°E/≥55-85°SE 단열군은 평균 단열간격이 47 cm로서 B-2공에서 가장 좁은 평균 단열간격을 가진다. N20-50°W/50-80°NE 단열군은 56 cm의 평균 단열간격을 나타내 B-1공의 이 방향 단열군과 거의 비슷하며, B-1공에서는 큰 집중성을 보이지 않았던 N10-30°E/50-70°SE 단열군은 127 cm의 비교적 넓은 평균 단열간격을 가진다.

이 단열군들에 대한 단열 등급을 보면, N50-90°E/55-85°SE 방향에서 등급 1 & 2가 21.0%를 차지하고 있어, 비교적 틈간격이 크고 뚜렷한 단열들이 발달하고 있다. 이 중에는 지표 하에서 발달하는 단층도 상당수 포함되어 있어, 이 방향으로 집중적

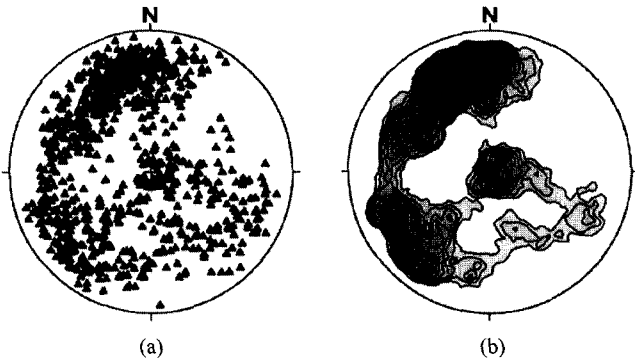


Figure 7. Equal area projections of poles to all fractures from the three boreholes. The dominant fracture sets are similar to those of outcrops in Figure 4. Low hemisphere projection.

인 단열작용이 일어난 것으로 추측된다. 한편, N20-50°W/50-80°NE 방향과 N10-30°E/50-70°SE 방향의 경우, 등급 1&2가 각각 15.4%, 13.0%로써, 단열의 대부분이 등급 3에 해당되어 이 방향 단열은 대체로 닫힌단열(closed fractures) 내지 아문단열(healed crack) 상태로 존재함을 알 수 있다. Figure 6 c, d를 보면, N10-50°E/40-80°NW 방향에 또 다른 단열군이 집중되는 양상을 보인다. 이 단열군의 평균 단열간격은 141 cm로서 전술한 3개 단열군보다 넓은 단열간격을 가진다. 그리고, 이 단열군은 단열등급 1 & 2에 해당하는 단열이 불과 4%를 차지해, 대부분의 단열이 광물로 충전되었거나 틈간격이 매우 좁은 상태로 존재한다.

• B-3공 : 본 시추공 역시 단열 자세(attitude)를 고려하여 3개 방향으로 구분할 수 있다. N40-90°E/50-80°SE 방향은 지표 및 항내의 GSet 1 단열군, N40-60°W/50-80°NE 방향은 GSet 3 단열군에 속한다.

N40-90°E/50-80°SE 방향은 평균 단열간격이 30 cm로서 3개 시추공 중 가장 좁은 단열간격을 가진다. N40-60°W/50-80°NE 방향은 55cm의 평균 단열간격을 보여 전술한 2개 시추공의 유사방향 단열군과 비슷하다.

단열 등급을 분석하면, N40-90°E/50-80°SE 방향 단열군 중 등급 1&2가 24.6%인데, 이 중에는 단층(등급 9)도 포함되어 있다. 연구대상 3개 시추공에서 N40-90°E 방향 단열들은 공통적으로 좁은 단열간격으로 발달하며, 그 가운데는 단층도 상당수 포함되어 있다. N40-60°/50-80°NE 방향 단열군은 21.1%의 등급 1&2에 해당하는 단열을 가지고 있다.

한편, N10-50°E/≤40°NW 방향은 본 시추공내에서 차지하는 비율은 4.2%로 낮지만, 등급 1 & 2에 해당하는 단열의 비율이 무려 54.5%가 되어, 이 방향의 단열 중 단열틈이 넓고 다른 광물로 충전되지 않은 단열이 상대적으로 많음을 짐작할 수 있다. 이처럼 단열간격이 넓고 다른 광물의 충전이 없는 열린(open) 상태이며, 단열면이 거칠지 않은 경우, 그렇지 않은 조건 외 단열보다 단열 투수성이 더 큰 것으로 알려져 있다(Gale, 1990). 이를 토대로, 본 조사에서 나타난 것처럼 등급 1 & 2의 비율이 높은 단열군은 상대적으로 투수성이 크며, 주요 지하수 유동 경로가 될 것으로 생각된다.

이상의 결과를 정리하면, N50-90°E/55-90°SE 단열군(HSet 1)이 단열방향의 집중성, 빈도수, 단열면 간격, 단열 등급에서 가장 우세한 양상을 보이고 있고, 이는 지표 및 항내에서 분석한 GSet 1(N50-82°E/55-90°SE) 단열군에 대응된다(Figure 7). 이를 통해 HSet 1은 삼광광산 지역의 주단층에 많은 영향을 받았음을 알 수 있다. 이 영향은 단열 등급분류에서 단층 내지 열린단열의 비율이 다른 방향에 비해 높게 차지함을 통해서도 입증된다.

N10-30°E/50-70°SE 단열군(HSet 2)은 지표 및 항내의 GSet 2(N2-8°E/56-86°SE) 단열군에 해당되는데, 이는 주로 단열틈이 매우 좁거나 방해석과 같은 광물이 단열틈을 충전해 있는 상태의 단열들이다.

N20-60°W/50-80°NE 단열군(HSet 3)은 지표 및 항내의 GSet 3(N46-72°W/60-85°NE) 단열군에 해당되며, 지표하에서 두 번째로 우세하게 발달하는 단열군이다.

N10-50°E/≤40°NW 단열군(HSet 4)은 지표 및 항내에서는 N24°E/34°NW 절리계에 대비될 뿐 우세하게 관찰되지 않으나, 단열 등급의 구성비율에서 단층 또는 열린단열이 54.5%를 차지해 지표 하에서 주요한 단열군으로 작용할 것으로 생각되며, 이 단열군은 주목할 필요가 있다. 또 상기한 3개 단열군(HSet 1, HSet 3, HSet 4)은 연구지역 내에서 단열투수성이 비교적 큰 군집으로 추정된다.

기타 단열군으로 N10-50°E/40-80°NW 단열군이 있으며, 이는 평균간격이 비교적 넓게 나타나고 단열 등급 중 1&2에 해당하는 비율이 4%로서 매우 낮다.

토 의

코아 로깅 및 초음파 주사검층 자료 비교

코아 로깅 자료에서는 단열면들의 주향과 경사를 알 수 없는 단점이 있으나, 이는 초음파 주사검층으로서 대치할 수가 있다. 초음파 주사검층 자료에서의 주향과 경사는 코아의 연결성이 좋은 부분에서 검증한 결과 매우 만족스러운 것으로 나타났다.

그러나, 코아 로깅 자료와 초음파 주사검층 자료간에 가장 많은 차이를 보이는 부분은 닫힌단열에 대한 인지정도가 서로 다르다는 것이다. 즉, 코아 로깅 기록에서는 분명한 불연속면으로 기재된 절리면을 초음파주사검층 자료에서는 인지하지 못하였거나 또는 그 반대의 경우가 나타난다. 이들 두 경우 상호간에 누락시키는 정도는 닫힌단열 전체에 대하여 약 20% 내외이다.

초음파주사검층 자료에서는 암석강도가 약한 부분에 대하여 단열의 발달정도를 약간 과장하는 경향이 있는 것으로 나타난다. 초음파 주사검층 자료에서 단열의 발달정도에 따라 등급 번호를 강한 것부터 1, 2, 3의 순으로 정하고 있다. 그런데, 시추 코아에서는 비슷한 정도로 발달하여 있는 단열이더라도 초음파 주사검층 자료에서는 등급 번호가 서로 다르게 나타나는 경우가 흔하다. 이는 비슷한 정도로 발달한 단열의 경우라도 시추공 벽의 손상여부에 따라서 초음파주사검층에서 등급 번호가 결정되기 때문으로 생각된다. 즉, 등급 3으로 기록될 닫힌단열의 경우라도 절리내에 충전되어 있던 방해석이나 다른 물질들이 떨어져 나올 경우나, 주변 공벽상태가 거친 경우에는 등급 2로 기

록한 것으로 추측된다.

이러한 예는 단층의 영향으로 파쇄되었던 부분이 다시 고결 상태로 보존되어 있는 경우에서도 나타나고 있다. 즉, 이와 같은 고화된 전단대에서 상하부의 단층면을 제외하고 중간 부분에 단열면의 발달이 없더라도, 중간부분은 연약한 곳이므로 시추작업 시에 손상을 입게 되어 시추공 벽은 매끄럽지 못하게 된다. 이러한 부분에서의 단열단열은 초음파 주사검층 결과에서 대부분 등급 2로 기록되고 있다. 그리고, 고화된 단층대라 하더라도 이의 폭이 좁아 공벽의 손상이 거의 없는 경우에는 전혀 인지하지 못하는 경우도 나타나고 있다.

결론적으로 초음파주사검층 자료는 시추코아 로깅자료에 비하여 단열면의 방향결정에 있어서는 매우 우수하나, 단열면의 인지 정도는 약간 불량하며 임의성이 강한 것으로 판단된다.

단열분석과 시추공내 지하수 현장시험 결과의 관계

앞에서 분석한 단열계와 각 시추공에서 진행중인 현장시험 중간결과를 결부시켜 지하수 유동의 주요경로가 되는 단열군을 추정해 보았다. 연구지역에서 실시한 현장시험은 온도검층, 전기전도도검층, 유속검층(flow velocity test), 정압주입시험(FIT test) 등이다. 이 시험결과는 아직 완벽하게 해석되지는 않았으나, 그 중 이상치(anomalies)가 나타난 구간을 선별하여, 그 지점의 단열방향과 단열발달상태를 비교했다.

B-1공에서는 21~22 m와 46~48 m, B-2공에서는 49~50 m, B-3공에서는 21~22 m와 49~50 m에서 각각 이상치가 나타났다. B-1공의 21~22 m 구간에서는 온도와 유속검층에서 이상치가 나타났다. 이 구간의 단열방향은 주로 N84~E/62~SE이며, 코아조사에서 단열틈에 팽물충전이 없고, 명확하게 단열이 발달한 상태이다.

한편, 46~48 m 구간은 고파쇄대로서 코아손실이 발생했던 구간이다. 여기서도 온도와 유속검층에 이상치가 나타났다. 이 구간에서 단층대의 주 방향은 N68°E/56°SE 방향으로 발달되어 있는데, 정압주입시험에서는 0.142 l/min의 주입량을 보인 바 있다.

그 외에도 N45-47°W 방향의 단열에서 미약한 이상치가 나타남을 토대로, B-1공에서는 주로 N45-47°W 방향의 단열과 N60-90°E 방향의 단열이 상대적으로 지하수 유동성이 높을 가능성이 있다.

B-2공의 49~50 m 구간은 코아손실이 발생한 단층대로서, 이 단층대의 주 방향은 N48°E/56°SE이다. 이 구간은 유속검층에서 큰 이상치가 나타났지만, 정압주입시험에서는 0.0075 l/min의 극소량의 물만 주입되어 코아상태나 다른 현장시험에서 나타난 결과와 상반된다. 이와 같은 현상은 여러 가지 원인이 있을 수 있지만, 시추공내 순환세척(surging)이 완벽히 이루어지지 않아 시추 중 발생한 암석의 미세파편(slime)이 공 내부에 잔존해, 단열틈 내부로 물이 주입되는 것을 방해하는데 기인한 것일 수도 있다.

B-2공도 B-1공과 유사하게 대체로 N35-57°W 방향과 N48-88°E 방향의 단열들이 발달하는 지점에서 단층 또는 단층대가 기재되며, 공내검층 이상치가 나타나는 것으로 보아 이들이 투수성이 좋은 주요 단열군인 것으로 생각된다.

B-3공은 21~22 m 구간에서 상기한 모든 공내검층에서 이상치가 나타나며, 물의 주입량도 3.75 l/min로 많다. 그런데, 특이한 것은 이 구간의 주 단열방향이 N41°E/16°NW이다. 이는 시추공내 단열분포 해석에서 HSet 4(N10°-50°E/≤40°NW)에 해당되는 것으로서, 등급 1에 해당하는 단열이 54.5%를 차지했던 균집임을 상기할 필요가 있다. 이 방향 단열 중에서 이와 같은 이상치가 분명히 나타남으로 보아 시추코아를 이용한 단열 특성 분석으로 수리전도성이 높은 단열군을 예상한 것에 큰 오류가 없었음이 증명된다.

49~50 m 구간에서는 N59°E/65°SE 방향의 파쇄가 심한 단층대가 나타난다. 이를 중심으로 48.2~52.1 m 구간이 단층대로 나타나며, 이 중 49.2~49.8 m 구간은 더욱 파쇄가 심해 코아손실이 발생했고, 이는 B-3공 중 가장 파쇄가 심한 구간이다. 이 지점에서도 모든 공내검층 항목에서 이상치가 나타났다.

이상과 같은 단열발달상태와 공내검층 결과를 통해, 연구지역 내에서 지하수의 투수성이 높은 단열군은 N55-85°E/55-80°SE 단열군, N20-60°W/50-75°NE 단열군이며, N10-30°E/≤30°NW 단열군도 주목할 만한 것으로 생각된다.

지표 및 항내 단열분석과 시추공내 단열분석에서는 연구지역 주 단층 및 주 구조선과 유사한 방향인 N50-90°E 방향과 N20-60°W 방향이 가장 많은 단열 빈도수와 좁은 단열간격을 가지며 우세하게 분포함을 알 수 있었다. 또한, 공내검층 결과 대부분의 이상치가 이 두 방향의 단열이 발달하는 곳에서 나타났다. 그러나, 이 두 방향의 단열 모두에서 이상치가 나타나며, 물의 주입량이 많은 것은 아니다. 코아조사에서 이 두 방향 단열 중에는 고파쇄대 또는 고화된 단층대로 나타나는 부분이 많으며, 이들 중 일부는 상기한 바와 같은 이상치를 나타내지만, 그렇지 않은 부분도 있다. B-1공에서는 69.0 m 지점의 N61°W/84°NE 방향의 고화된 단층대가 존재하며, 극소량의 물 주입량을 가진다. B-2공에서는 42.4 m, 44.0 m와 77.7 m 지점에서 각각 N27°W/63°NE, N67°E/55°SE, N36°E/67°SE 방향의 단층대가 발달하지만 물 주입량은 0.102 l/min와 0.097 l/min에 그친다. 이러한 양상은 B-3공에서도 50.2 m와 42.6 m 지점에서 볼 수 있다. 50.2 m 지점에서는 N68°E/69°SE 방향의 단층대가 발달하고, 42.6 m 지점에서는 N46°W/57°NE 방향의 단층대가 발달하나, 물 주입량은 불과 0.035 l/min와 0.172 l/min이다. 또한, 이 부분들은 공내검층에서도 아무런 이상치가 나타나지 않았다.

그러면, 이러한 차이는 무엇에 기인한 것인가? 일반적으로 단층대는 극세립으로 분쇄된 중앙부의 비지대(gouge zone), 점성이 있는 단층각력 또는 비지로 이루어진 파쇄대(cataclastic zone), 그리고 불연속적인 단열이 발달하는 손상대(damaged zone)로 구분할 수 있다. 이 중 비지대와 파쇄대를 단층핵(fault core)이라고 일컫는다. 단층핵 부분에 존재하는 단층비지는 주로 함수성이 강한 점토광물로 구성되어 있는데, 이러한 점토광물은 함수율이 높아지면 팽창하게 되고, 이로 인해 단층핵 부분의 투수율이 감소하게 된다(Chester *et al.*, 1993). 즉, N50-90°E와 N20-60°W 방향 단열 중에서 단층내에 발달하는 단층비지와 팽창성 점토(water swelling clay) 때문에 상대적으로 지하수 유동이 원활하게 일어나지 않는 단열이 있음을 생각할 수

있다. 또한, 이 중에는 방해석 맥이 많이 발달하는 단열이 있는데, 단열면 틈에 이와 같은 광물충전으로 인해 단열 공극률(fracture porosity)이 감소하게 되며, 이 또한 지하수의 원활한 흐름을 방해할 수 있다(Forster & Evans, 1991). 이러한 이유로 인해 동일 방향이더라도 수리전도성이 극히 불량하여 지하수 유동경로 역할을 원활히 할 수 없는 단열이 존재할 수 있다.

시추공내 단열분포 해석결과 중 지표에서는 큰 집중성을 보이지 않았던 N10~50°E/≤40°NW 방향의 단열군이 있었다. 이 단열군에는 등급 1 & 2에 해당하는 단열이 54.5%를 차지해 다른 단열군과 차이를 보였다. 이를 통해 N10-50°E/≤40°NW 방향 단열군이 지하수 투수성이 좋은 단열로 추측되는데, 이는 공내검층 결과를 통해서도 추측 가능하다. B-3공에서 전술한 대로, 21~22 m 구간은 N41°E/16°NW 단열이 발달하는 곳으로써 공내에서 실시한 모든 검층에서 이상치가 나타났으며, 물의 주입량은 3.75 l/min로 상당히 많았다. 또한, 25~26 m(N24°E/10°NW) 지점에서도 이 방향의 단열이 발달하여 5.0 l/min의 주입량을 가진다. 이러한 사실은 이 방향 단열을 따라 지하수가 유동한다는 강력한 증거이다.

상기한 결과를 토대로 본 연구지역에서는 N55-85°E/50-80°SE 단열군과 N20-60°W/50-75°NE 단열군이 지하수 유동성이 가장 좋은 단열군이며, 그 외에도 N10-30°E/≤30°NW 단열군도 수리전도성이 양호한 단열군으로써 주목할 만한 하다.

결 론

연구지역의 지질 및 단열구조의 발달상태에 대한 세부조사 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

연구 지역인 삼광광산 일대의 지질은 선캠브리아기의 다양한 변성암류와 시대미상의 변성퇴적암, 주라기 운곡리층 및 옹회암, 백악기의 석영맥 및 염기성 암맥, 그리고 이들을 부정합으로 피복하는 제4기 미고결 충적층 등이 분포하고 있다.

삼광광산을 중심으로 반경 5 km 이내에서 서측에서는 NNE-SSW 및 WNW-ESE 방향, 동측에서는 ENE-WSW 및 NW-SE 방향의 선구조들이 우세하게 발달한다.

지표 및 향내에서 관찰된 단열들에 대한 해석을 종합적으로 검토한 결과, GSet 1: N50-82°E/55-90°SE, GSet 2: N2-8°E/56-86°SE, GSet 3: N46-72°W/60-85°NE, GSet 4: N12-38°W/15-40°SW 단열군으로 구분되며, 이 중 GSet 1과 GSet 3가 가장 우세한 단열군이다.

시추공내에 발달하는 주 단열군은 HSet 1: N50-90°E/55-90°SE, HSet 2: N10-30°E/50-70°SE, HSet 3: N20-60°W/50-80°NE, HSet 4: N10-50°E/≤40°NW 단열군이다. HSet 1은 GSet 1에, HSet 2는 GSet 2에, HSet 3은 GSet 3에 각각 대응된다. HSet 4는 지표 및 향내에서는 집중성은 작지만, 단층과 열린단열(open fractures)이 많은 비율을 차지한다. 이 단열군 중 HSet 1과 HSet 3이 지표하에서 가장 우세한 단열군이다.

단열군 발달상태와 시추공내 물리검층 결과를 통해, N55-35°E/50-80°SE 단열군과 N20-60°W/50-75°NE 단열군이 연구지역 내에서 지하수 유동성이 가장 좋은 단열군이며, N10-30°E/≤30°NW 단열군도 단열 투수성이 양호한 단열군으로 주

목할 만한 하다.

사 사

이 연구는 과학기술부에서 시행한 기본연구개발사업('96-97)의 연구결과 중 일부이다. 연구수행은 과학기술부의 지원을 받아 이루어 졌으며 이에 감사드린다.

참고문헌

- 김중열 외, 1993, Geotomography에 의한 암반구조연구(III): 과학기술처.
- 배대석, 1996, 편마암지역 지하공동주변 단열암반의 지하수유동특성 연구, 박사학위 논문, 충남대 학교.
- 한국자원연구소, 1996, 균열암반내 지하수 유동 및 흡착특성 연구(I), KR-96(B)-7, 360p.
- Barton, N. R., and Lunde, J., 1974, Engineering Classification in Rock Masses for the Design of Tunnel Support, Rock Mech., 6(4), p. 189-236.
- Bieniawski, Z. T., 1989. Engineering Rock Mass Classifications-A Complete Manual Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering, John Wiley & Sons, 251p.
- Black, J. W., Dershowitz K-L., Axelsson, T. Doe and Been, K., 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, PR 44-94-001.
- Chester, F. M., Evans, J. P., and Biegel, R. D., 1993, Internal Structure and Weakening Mechanisms of the San Andreas Fault, Jour. of Geophy, Research, 98(B1), p. 771-786.
- Cho, M. J., 1998, Groundwater Flow Analysis in Fractured Rock using Borehole Logging Data, PhD thesis, Cheonbuk National Univ., 168p.
- Deere, D. U., Dunn, J. R., Fickies, R. H. and Proctor R. J., 1977, Geologic Logging and Sampling of Rock Core for Engineering Purposes(Tentative), American Institute of Professional Geologists, 43p.
- Engelder, T., 1985, Loading Paths to Joint Propagations during a Tectonic Cycle: an Example from the Appalachian Plateau, U.S. A., Jour. of Structural Geol., 7(3/4), p. 459-476.
- Forster, C.B., and Evans, J.P., 1991, Fluid Flow in Thrust Faults and Crystalline Thrust Sheets; Results of Combined Field and Modeling Studies, Geophys. Res. Lett., 18, p. 979-982.
- Gale, H., 1990, Hydraulic behaviour of rock joints, Rock Joints (Proceedings of the Int. Symposium on Rock Joints, Loen, Norway), p. 351-362.
- Grimstad, E. and Barton, N., 1993, Uptdating of the Q-System for NMT, Norwegina Geotechnical Institute, p. 1-21.
- Hancock, P.L., 1985, Brittle microtectonics: principles and practice, Jour. of Structural Geology, 7(3/4), p. 437-457.
- Huang, Q. and Angelier, J., 1989, Fracture spacing and as relation to bed thickness, Geol. Magazaine, 26(4), p. 355-362.
- Hudson, J. A., and Priest, S. D., 1983, Discontinuity frequency

- in rock mass, *Int. J. of Rock Mech., Mining Sci. & Geomech. Abstracts*, 20, p. 73-89.
- ISRM, 1978, International Society for Rock Mechanics Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests, *Int. J. of Rock Mech., Mining Sci. & Geomech. Abstracts*, 15, p. 319-368.
- La Pointe, P. R., Wallman, P. C., and Dershowitz, W. S., 1993, Stochastic estimation of fracture size from simulated sampling, *Int. J. of Rock Mech., Mining Sci. & Geomech. Abstracts. Special Issue: Proc. of 34th U.S. Symp. on Rock Mech., Madison, WI*.
- La Pointe, P. R. and Hudson, J. A., 1985, Characterization and interpretation of rocks mass joint patterns, *G.S.A. Special paper* 199, p. 1-37.
- Pahl, P. J., 1981. Estimating the mean length of discontinuity traces, *Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstracts*, 18, p. 221-228.
- Priest, S. D. and Hudson, J. A., 1981. Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys", *Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 18, p. 183-197.
- Pusch, R., 1994. *Waste Disposal in Rock, Development in Geotechnical Engineering*, 76. Elsevier, 490p.
- Sen Z., and Kazi, A., 1984, Discontinuity spacing and RQD estimates from finite length scanlines, *Int. Jour. Rock Mech. Mining Sci. & Geomech. Abs.*, 21, p.203-212.