

화강암 내 투수성 단열의 방향성에 대한 암석역학적 고찰

김대석^{1)*} · 장찬동¹⁾ · 원경식²⁾

1. 서 론

암반에 분포하는 절리, 단층과 같은 다양한 규모의 단열들은 암반 내 지하수의 유동 통로를 제공함으로써 암반의 투수성과 밀접한 관련을 가지고 있다. 결정질 암반의 지하수는 암반에 존재하는 일부 투수성이 높은 단열을 따라 대부분 유동하며, 일정 지역에서 제한된 방향성을 가지는 것으로 알려져 있다. 이러한 단열암반의 지하수 유동 특성은 단열의 길이(length), 간격(spacing), 틈(aperture), 충전물질(infilling materials), 단열의 상호 연결성(connectivity)과 같은 단열 자체 특성과 응력상태, 온도와 같은 단열 외적 요인 의 복합적인 영향으로 결정된다. 그 중 단열면의 응력상태는 주어진 초기응력장에서 단열의 방향성에 따라 극명하게 변화하는 역학적 물성이다. 이에 착안하여 본 연구에서는 투수성 단열에 작용하는 응력상태와 그 투수성과의 관계를 알아보려고 한다.

화강암반에 굴착된 시추공(경상남도 양산시 소재, 연직 300m)에서 초음파 주사 영상검층 및 전기비저항 검층을 수행하여 시추공 내 단열의 방향성과 투수성을 분석하였고, 수압파쇄 응력 측정시험 통해 각 단열면에 작용하는 응력상태를 규명하였다. 분석 결과들을 바탕으로 단열암반의 수리적 특성과 초기응력 사이의 관계에 대해 알아보았다.

2. 본 론

2-1. 단열 투수성 분석

시추공을 교차하는 단열의 투수성은 암반의 수리정수를 산출하는 수리시험, flowmeter를 이용한 시추공 내 유량-유속 측정, 온도·전기비저항·시추공 영상자료 등의 검층을 통해 평가된다. 본 연구에서는 연구 시추공 내 초음파 주사 영상검층(BHTV)을 통해 감지된 총 141개의 단열에 대해 영상검층자료와 전기비저항검층 자료를 복합적으로 이용하여 투수 여부를 분석하였다. 먼저 BHTV의 진폭영상과 주시영상의 비교를 통한 단열의 틈(aperture)을 기준으로 전체 단열을 개구성(open), 준개구성(partly open), 폐쇄성(closed) 단열로 구분하고, 그 후 단열의 빈도를 고려한 전기비저항 이상치(anomaly) 분석을 통한 일정 임계 값을 기준으로 잠재투수성/잠재불투수성 단열로 구분하였다. 이들 중 개구성/준개구성인 동시에 잠재투수성으로 분류된 단열들을 최종적으로 투수성 단열로 판단하였다. 분석 결과 투수성 단열은 총 141개 단열 중 16%에 해당하는 23개로 나타났다. 이러한 투수성 단열 중에는 시추 과정에서 단열 누수(Leak-off)로 인한 시추공 이수 압력의 급격한 감소를 초래한 단열들도 일부 포함하고 있다.

2-2. 연구지역 암반 초기응력 상태

동일 시추공에서 수압파쇄시험을 통해 암반 초기응력 상태(최대수평주응력(S_{Hmax}), 최소수평주응력(S_{Hmin}), 연직응력(S_v))의 크기와 방향)를 측정하였다. 수압파쇄시험은 100 m, 148 m, 183 m, 249 m의 네 심도에서 수행되었다. Impression packer를 통해 규명된 S_{Hmax} 의 방향은 평균

주요어 : 단열암반, 단열 방향성, 투수성 단열, 초기응력, τ/σ 비

1) 충남대학교 지질환경과학과 (rlaotjr@cnu.ac.kr)

2) 지오텍 컨설팅(주) (geoinfo@geoinfo.co.kr)

N79°±7°E이며, 모든 심도에서 세 주응력의 상대적 크기는 $S_{Hmax} > S_{Hmin} > S_v$ 로서 thrust fault stress regime을 보인다. 양산 지역 초기응력은 심도(z)가 증가할수록 선형 증가하는 경향을 보이며, 각 주응력의 심도에 대한 일차식은 다음과 같다.

$$S_{Hmax} \text{ (MPa)} = 0.0595 \text{ (MPa/m)} \times z \text{ (m)}$$

$$S_{Hmin} \text{ (MPa)} = 0.0407 \text{ (MPa/m)} \times z \text{ (m)}$$

$$S_v \text{ (MPa)} = 0.0265 \text{ (MPa/m)} \times z \text{ (m)}$$

2-3. 투수성 단열의 방향성

시추공 내 불투수성 단열과 투수성 단열의 방향성을 비교하기 위해 스테레오넷에 모든 단열의 pole을 그 수리특성에 따라 다른 기호로 표시하여 투영하였다(Figure 1a). 전체적인 단열의 주향은 NE와 NNW의 두 방향으로 우세하였으며 경사는 0-87°의 다양한 값을 갖는 것으로 나타났다. 이들 중 투수성 단열은 주향 NW-SE (Figure 1b), 38±22° 경사의 비교적 제한된 방향성을 갖는 것으로 나타났다. 이는 암반단열을 통한 지하수 유동이 제한된 방향성을 갖는 일부 단열들에 의해 이루어지고 있음을 보여준다.

주목할 점은 제한된 방향성을 갖는 투수성 단열의 주향은 이 지역 최대수평주응력(S_{Hmax}) 방향과 거의 직교하며 따라서 경사방향은 준평행한 방향적 특징을 갖는다는 것이다. 주어진 응력장 안에서 단열의 방향성에 따라 단열에 작용하는 역학적 상태가 변화함을 고려하면 투수성 단열은 일정정도 제한된 방향성을 나타내므로 불투수성 단열과는 다른 역학적 특성을 가지고 있음을 지시한다.

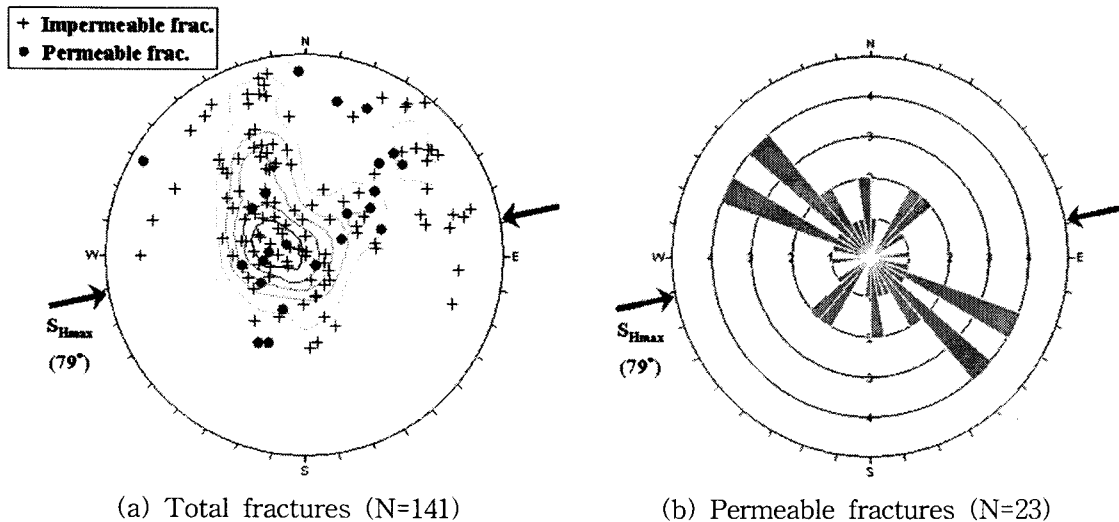


Figure 1. Stereographic diagram of total fractures (lower hemisphere, equal area; (a)) and rosette diagram of permeable fractures (b). N denotes the number of fractures.

2-4. 투수성 단열의 응력상태

측정된 초기응력장을 이용하여 각 단열면에 작용하는 수직응력(σ)과 전단응력(τ)을 규명하였다. 각 단열면에 작용하는 σ 와 τ 는 주어진 지역적 응력장 하에서 단열의 경사와 경사방향에 따라 변화하며, 이러한 양상은 Mohr diagram에 용이하게 표시될 수 있다. Figure 2는 단열면에 작용하는 전단응력(τ)과 정수압의 공극압을 고려한 유효수직응력(σ')을 Mohr diagram에 나타낸 것이다. 심도에 따른 응력 증가 효과를 배제하기 위해 연직응력(S_v)으로 normalize하여 표시하였다. 투수성 단열은 주어진 유효수직응력에서 불투수성 단열보다 비교적 높은 전단응력을 받고 있는 것으로 나타났다. 투수성 단열에 작용하는 τ/σ' 비의 평균값은 0.41±0.13으로

나타났으며 불투수성 단열에서는 0.33 ± 0.14 의 값을 보였다. 이러한 경향은 τ/σ' 값의 histogram 분포에서도 뚜렷이 나타난다(Figure 2의 inset 참조).

Figure 2에서 보듯이 τ/σ' 값에 따라 단열의 방향도 제한을 받는다. 예를 들어 $\tau/\sigma' > 0.41$ 인 단열은 경사방향 $079^\circ \pm 60^\circ$ 이며 경사는 $20-50^\circ$ 범위를 갖는다. 특히 주목할 사항은 현장 시추 과정에서 투수성이 확실히 확인된 단열의 경우 대부분 그 방향이 위의 범위 안에 들고 그 τ/σ' 값의 평균도 0.39로 높게 나타났다는 점이다. 따라서 이러한 투수성 단열의 역학적 특성은 주어진 초기응력장 하에 제한된 방향성에서 기인한 것으로 단열의 방향성에 의해 단열의 수리·역학적 특성이 상당히 좌우되고 있음을 보여준다.

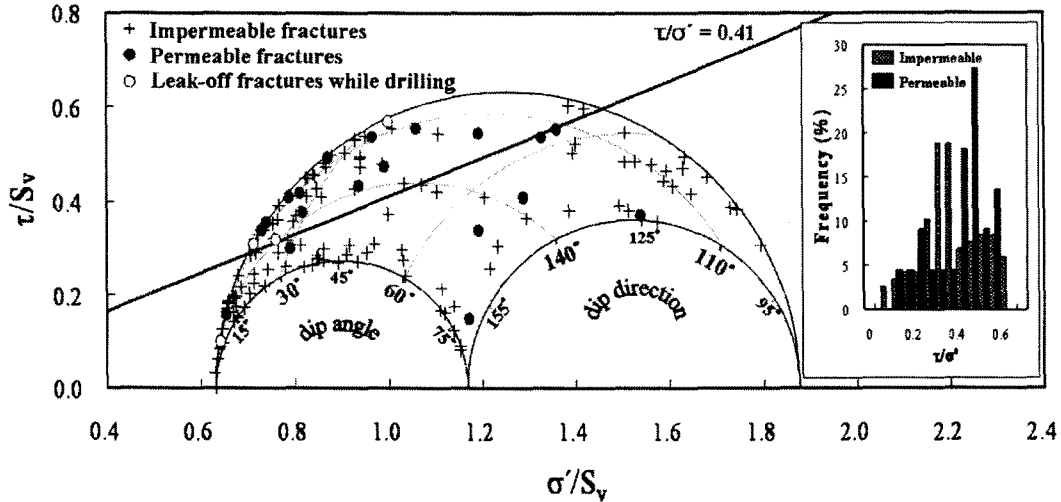


Figure 2. Normalized shear and effective normal stress acting on fracture plane. Thin curved gray lines within the largest Mohr circle are grids indicating dip angles and dip directions of fracture planes.

3. 결 론

양산 지역 화강암 내 단열의 방향성에 따른 암반의 수리·역학적 특성에 대한 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 화강암반 내 굴착된 시추공에서의 다양한 물리검층 결과 규명된 총 141개의 단열 중 전기비저항 값과 단열 틈(aperture), 그리고 시추과정 leak-off 여부 등을 기준으로 23개의 투수성 단열을 파악하였다.

2) 투수성 단열은 암반에 작용하는 최대주응력인 S_{Hmax} 의 방향($N79^\circ \pm 7^\circ E$)과 거의 평행한 경사방향과 제한된 범위의 경사각을 갖는 경향을 보였다.

3) 투수성 단열면에 작용하는 전단응력/유효수직응력(τ/σ')의 비는 평균 0.41 ± 0.13 으로 나타났으며 불투수성 단열면의 그것(0.33 ± 0.14)보다 상대적으로 높은 값을 보였다. 이러한 연구결과는 화강암반에 작용하는 초기응력이 단열 투수성에 상당한 영향을 미치고 있음을 시사한다.