

포항 심부 시추공 유문암의 진삼축 변형과 파쇄

장찬동

충남대학교 지질환경과학과

1. 서 론

지반 응력에 기인한 시추공벽 암석 파쇄는 공의 굴착 및 유지 관리 등 시추공의 완성도에 있어서 심각한 영향을 미치므로 석유나 지하수, 지열을 위한 심부 시추공 굴착에 있어서 신중하게 분석되어야 할 사항이다. 다른 한편으로는 이러한 공내 암석 파쇄 양상 및 강도를 이용하여 지반의 응력장을 규명하는데 이용되기도 한다(Zoback et al., 1985, Haimson and Chang, 2002).

일반적으로 시추공벽 압축 파쇄의 유형은 여러 가지의 형태로 나타나는 것으로 알려져 있다. 화강암 등의 경암에서는 인장파쇄가 우세한 암석의 파쇄가 주로 관찰되고(Økland and Cook, 1998), 사암등의 연약질 암반에서는 전단 파쇄 위주의 암석 균열이 우세하며(Syarifuddin and Busono, 1999), 극히 다공질의 사암에서는 파쇄면 같이 길게 발달한 형태(Haimson, 2001)가 나타나기도 한다. 그 유형이 어떻든 간에 중요한 점은 이러한 압축 파쇄의 발달 방향이 시추공 내에서 압축 응력이 최대로 집중되는 지반 최소 수평 주응력 방향으로 발생한다는 점이다. 또한 압축 파쇄대의 폭이 지반 응력장의 크기에 따라 다르기 때문에 그 크기를 통해 지반 응력장의 크기를 역 추적할 수도 있다. 따라서 시추공내 압축 파쇄의 방향과 규모는 지반 응력장의 방향과 크기와 직 접적으로 관련되어 있다(예, Haimson and Chang, 2002).

상기한 방법으로의 분석에 있어서 가장 중요한 암석 물성 중에 하나는 암석 강도이다. 암석의 강도 거동을 밝히기 위해 주로 이용되는 실험은 삼축 압축 실험으로 전조 상태의 원주형 시편에 동일한 크기의 최소(σ_3) 및 중간 주응력(σ_2)으로 작용하는 상수 봉압(confining pressure)을 가한 상태에서 축 방향 응력(σ_1)을 증가시키는 실험이다. 그러나 세 방향으로 모두 다른 주응력을 가하는 여러 진삼축 압축 실험 연구에서 기존의 삼축 압축 실험은 암석 파쇄 거동을 지나치게 단순화 시켜 실제 현장의 응력 하에서 나타날 수 있는 여러 현상들을 간과할 수 있다는 사실을 보여주었다(Mogi, 1971; Takahashi and Koide, 1989; Chang and Haimson, 2000). 특히 시추공벽과 같이 세 방향의 주응력들 간의 차이가 크기도 하고 동시에 암석이 공내수에 직접 노출되어 있는 상태에서의 암석의 변형과 파쇄 메커니즘을 밝히기 위해서는 기존의 삼축 압축 실험으로는 한계가 있고 좀 더 진보된 방식의 암석 실험을 수행해야 한다.

본 연구에서는 포항 심부 시추공(포항시 흥해읍에 위치한 깊이 1.1 km의 지열 연구용 시추공) 코아 중 주요 암종인 유문암에 대해 일반적인 삼축 압축 실험과 더불어 진삼축 압축 실험을 수행하였다. 본 연구의 목적은 실제 시추공내 상태에서의 암석의 변형과 파쇄 거동을 관찰하여 시추공 벽의 암석의 파쇄 메커니즘을 실험적으로 규명하기 위함이다.

2. 암석 시편과 실험 방법

2004년 완공된 포항 심부 시추공에서는 지표에서 최종 심도 1100 m까지 전 구간에 걸쳐 코아 링이 진행되었으며 유문암은 537-821m 구간에 걸쳐 분포하는 주 암종이다(한국지질자원연구원,

Table 1. Physical/mechanical properties of Pohang rhyolite

| Property | Average |
|---------------------|--|
| Density | 2552 kg/m ³ |
| Porosity | 0.76 % |
| Young's modulus | 55 GPa |
| Poisson's ratio | 0.22 |
| Radial permeability | 2.4×10 ⁻²⁰ m ² , |

2004). 본 실험 연구에서 이용된 유문암은 심도 818-821m에서 채취되었으며 그 성분은 석영 50-60%, 사장석 20-30%로 구성되어 있다. 석영은 거의 등방형로서 평균 입자 크기는 약 70-90μm의 세립질이다. 측정된 기본적인 물성은 Table 1에 나타내었다.

일축압축과 삼축압축 실험은 원주형 시편(지름 25.4mm, 길이 약 50mm, 또는 지름 47mm, 길이 약 100mm)을 이용하여 수행되었다. 삼축압축 실험은 크게 두 가지의 다른 실험 구성 방법으로 수행하였다. 하나는 건조 시편을 고무 자켓으로 감싸서 봉압(confining pressure)을 가하는 유체가 암석 시편에 직접 닿지 않게 하는 보통의 삼축압축 실험이고 다른 하나는 시편을 봉압 유체에 그대로 노출시켜 수행한 무자켓 삼축 압축 실험이다. 전자의 실험은 건조 상태 암석의 기본적인 변형과 파쇄를 조사하기 위함이며 후자의 실험은 시추공벽 암석이 공내수에 노출된 상태를 삼축압축 상태에서 관찰하기 위함이다.

진삼축 압축 실험에서는 19×19×38 mm의 직육면체 시편을 이용하였다. 진삼축 압축 실험에 이용된 기기에 대해서는 Chang and Haimson(2000)의 논문에서 찾아볼 수 있다. 세 방향의 응력에서 최대(σ_1), 중간(σ_2) 주응력을 이용해 가하며, 최소 주응력(σ_3)은 유압을 이용해 가한다. 진삼축 압축 실험은 크게 두 가지 유형의 실험을 수행하였다. 하나는 최소 주응력이 가해지는 시편의 건조 상태 표면을 polyurethane 자켓으로 감싼 후 수행된 실험이고, 다른 하나는 그 면을 유압에 그대로 노출시켜 수행한 실험이다. 첫 번째 유형의 실험은 진삼축 압축 상태에서의 암석의 파쇄와 변형을 관찰하기 위한 실험이고, 두 번째 유형의 실험은 시추공벽 암석의 상태를 재현하여 시추공 상태에서의 암석 파쇄를 관찰하기 위한 실험이다.

3. 실험 결과

3.1. 유문암의 파쇄 및 강도 특성

일축압축 실험과 삼축압축 실험 결과는 Figure 1에 나타내었다. 건조 유문암의 경우 일축압축 실험에서 얻어진 강도는 392 MPa로서 매우 강한 암석이었으며, 봉압이 증가함에 따라 암석 강도는 거의 직선적으로 증가하여 0-30 MPa 봉압 구간에서 얻어진 모아-쿨롱 파쇄 기준식은

$$\sigma_1 = 395 + 4.56\sigma_3 \quad (1)$$

의 형태로 구해졌다. 이를 통해 구한 내부 마찰 계수는 0.83이다. 주목할 사항은 시편에 자켓을 씌우지 않은 시편의 강도는 주어진 봉압 상태에서 건조 상태 암석 강도보다 매우 낮게 나왔다는 점이다. 유문암의 극히 낮은 투수율을 고려할 때 이 결과는 매우 특이한 결과이다. 한정된 개수의 무자켓 삼축압축 실험 결과로 파쇄 기준식을 구성하기는 부족하지만 주어진 봉압 하에서 건조 시편의 강도의 약 50-70% 정도로 나타났다.

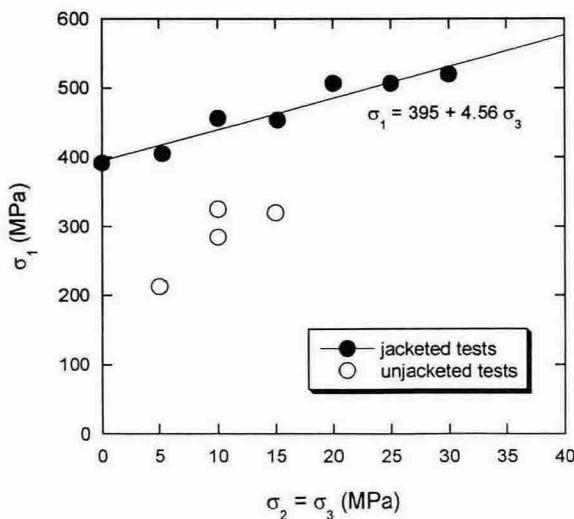
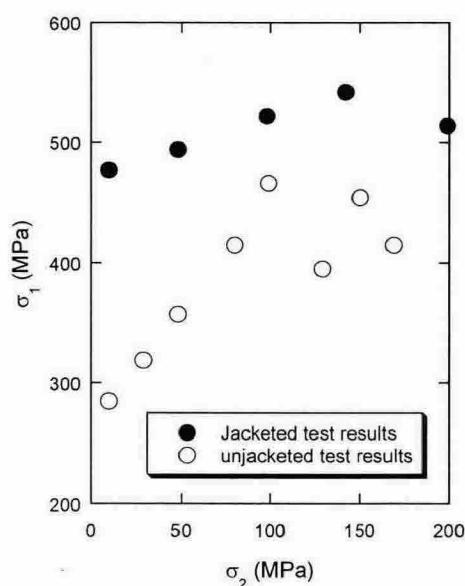


Figure 1. Conventional triaxial test results in Pohang rhyolite.

수행된 진삼축 압축 실험 결과는 Figure 2에 암석 파쇄시의 최대 주응력(σ_1), 즉 암석 강도를 중간 주응력(σ_2)의 함수로 나타내었다. 건조 시편에 자켓을 한 실험의 경우(검은 기호) 암석 강도는 주어진 최소 주응력(10MPa) 하에서 중간 주응력의 크기가 증가함에 따라 대체로 증가하는 것으로 나타났다. 보통의 삼축 압축 강도에 비해 진삼축압축 강도는 최대 14% 증가하였다. 진삼축 압축 강도가 일반 삼축 압축 강도에 비해 높다는 사실은 이전에 수행된 여타 다른 암석들 (Mogi(1971)의 석회암, Chang and Haimson(2002)의 조립질 결정질 암석들)의 결과와 일치한다. 그러나 이들 기존의 암석들에서는 중간 주응력이 증가함에 따라 암석 강도가 최대 두 배로 증가하는 큰 효과를 보여주었으나 세립질의 유문암의 경우에는 그 효과가 상대적으로 그리 크지 않은

Figure 2. Strengths of jacketed (dark symbols) and unjacketed (open symbols) rhyolite specimens under true triaxial compression as a function of σ_2 .

것으로 나타났다.

중간 주응력의 효과는 무자켓 실험 결과에서 크게 나타났다. 같은 최소 주응력(10MPa)이 가해진 상태에서 중간 주응력의 크기가 높아짐에 따라 암석 강도는 최대 64%까지 증가하였다. 특히 중간 주응력이 10MPa에서 100MPa까지 증가함에 따라 강도는 급격히 증가하며 100MPa 이상에서는 거의 일관된 강도를 유지하는 것으로 나타났다. 이 결과는 시추공벽의 암석처럼 암석이 최소 주응력을 가하는 공내수압에 그대로 노출되어 있을 경우 암석 강도는 중간 주응력에 크게 영향을 받는 것을 의미한다.

삼축압축 실험 결과와 마찬가지로 건조 상태 암석에 비해 봉압이 시편에 직접 당은 경우에 암석 강도가 현저히 낮게 나왔다. 자켓 실험 결과와 무자켓 실험 결과가 가장 크게 차이가 나는 응력 상태는 중간 주응력이 최소 주응력과 같은 크기인 보통의 삼축 압축 상태이고 이 때는 수압에 노출된 암석 강도가 건조 암석의 강도의 60%에 머무르고 점차 증가하여 건조 상태 암석의 80% 정도까지 증가하는 것으로 나타났다.

3.2. 유문암의 변형 특성

시험 시편에 직접 부착한 스트레인게이지를 이용하여 응력이 가해지는 동안 연속적으로 세 주응력 방향으로의 변형률을 측정하였으며 이를 통해 암석의 체적 변형률을 산정하였다. Figure 3은 다른 크기의 중간 주응력을 가한 건조 암석에 대한 실험에서 체적 변형률을 차응력(differential stress, $\sigma_1 - \sigma_3$)의 함수로 나타낸 것이다. 응력-체적변형률 곡선은 유문암의 탄성적인 특성을 잘 보여준다. 주어진 최소, 중간 주응력 하에서 최대 주응력이 증가함에 따라 유문암은 거의 연직 탄성적으로 압축된다. 각 응력-변형 곡선에서 응력이 어느 레벨 이상으로 증가하면 응력-체적변형 관계가 연직 탄성에서 벗어나 팽창 방향으로 비연직 거동을 보이는데 이는 암석에 응력에 기인한 미세 균열들이 그 응력 레벨에서 생성되기 때문이다(Brace et al., 1966). 이를 체적팽창이라 하며 작용함에 따라 체적팽창이 시작되는 응력, 즉 onset of dilatancy가 높아짐을 볼 수 있다. 기존의

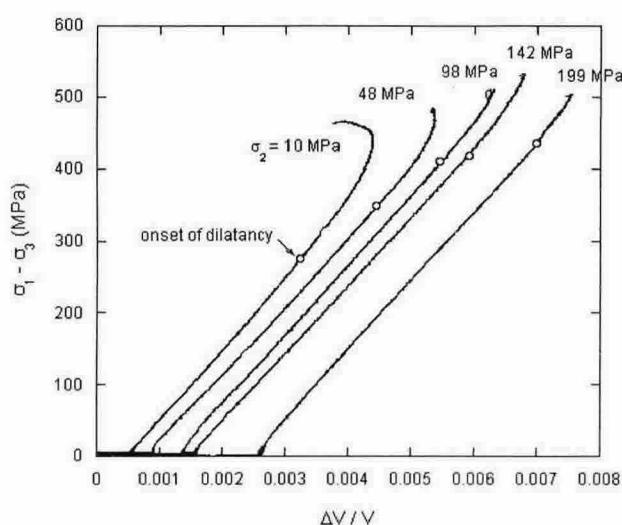


Figure 3. stress-volumetric strain curves measured from tests, in which different magnitudes of intermediate principal stress (10, 48, 98, 142 and 199MPa) were applied for the same least principal stress (10MPa).

거의 모든 암석에서 관찰되는 현상이다(Paterson, 1978). Figure 3에서 보듯이 높은 중간 주응력이 많은 실험 연구들에서 암석의 압축 파쇄는 체적팽창을 유발하는 미세 균열들이 형성되고, 점차 국지화되며 궁극적으로 하나 또는 두 파쇄면으로 병합되는 현상으로 밝혀졌기 때문에 중간 주응력의 크기에 따라 체적팽창 시작점이 높아진다는 사실은 그만큼 암석의 파쇄과정이 지연된다는 것을 의미한다.

유문암의 미세균열 발생으로 인해 원래는 거의 불투수성인 암석이 점차 공극률의 증가와 투수율의 증가를 초래할 수 있다. 따라서 수압에 직접 노출된 시편의 경우 체적 팽창 이후에 수압이 암석 내부로 침투하기 쉬우며 암석에 작용하는 외부 응력장에 공극수압이 겹쳐져 유효응력의 감소를 초래하므로 응력장이 급격히 변할 수 있다.

이러한 가능성은 건조 시편의 진 삼축 압축 실험에서 구한 체적팽창 시작점과 무자켓 시편의 파쇄 강도와 비교함으로서 명확해진다. Figure 4는 건조 시편의 체적팽창 시작점(검은 기호)과 무자켓 시편의 파쇄 강도(흰 기호)를 비교한 것이다. 주어진 중간, 최소 주응력 하에서 두 자료간의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 무자켓 시편의 파쇄는 암석의 체적팽창과 함께 최소 주응력을 가하는 유체의 암석 내로의 침투로 인해 발생한 것이라는 것을 잠정적으로 지시한다. 이는 유문암과 같은 불투수성 암석의 경우 시추공에서 발생할 수 있는 파쇄는 응력이 증가함에 따라 나타나는 미세균열들의 생성과 이에 의한 유체의 암석 내로의 침투로 발생한다는 것을 의미한다. 따라서 이 단계에서의 암석 파쇄는 인장 미세균열들이 상호 연결되어 하나의 전단 파쇄면으로 병합되기 전에 발생하므로 파쇄 메커니즘은 인장 파쇄가 우세한 것으로 사료된다.

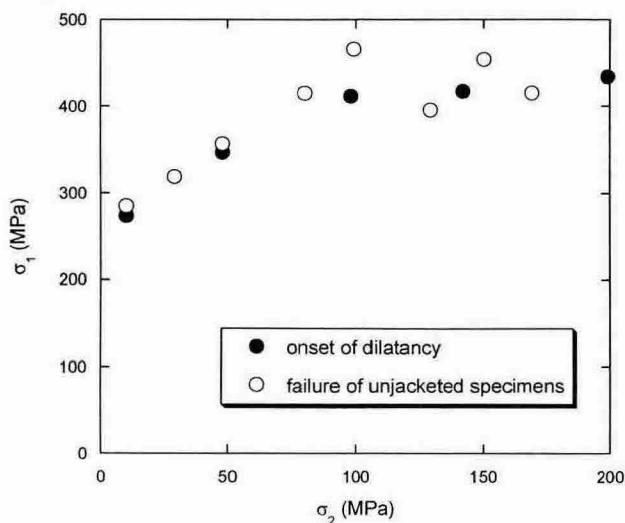


Figure 4. Strength of unjacketed specimens and onset of dilatancy determined from jacketed tests.

4. 결 론

유문암과 같은 불투수성 암석을 관통하는 시추공 내에서 발생할 수 있는 암석의 압축 파쇄는 공벽의 암석에 작용하는 실제 진삼축 압축 상태에서 중간 주응력의 크기에 따라 현저하게 달라지는 것으로 나타났다. 암석의 파쇄가 나타나는 최대 주응력은 주어진 최소 주응력(공내수압)의 상

태에서 작용하는 중간 주응력의 크기가 커짐에 따라 현저하게 증가하는 것으로 나타났다. 이는 공벽 암석이 공내수압에 완전히 노출되어 있기 때문에 암석에 미세균열이 발생하는 체적팽창 응력 점에서 공내수압이 균열 내로 침투함에 따라 급격한 신장 파쇄를 유발하는 것을 암시한다. 이러한 파쇄 메커니즘은 경암에서 주로 관찰되는 기존의 시추공내 신장 파쇄 유형과 유사하다.

감사의 글

암석 코아를 이용하게 해주신 한국지질자원연구원 심부 지열에너지 개발 사업팀의 송윤호 박사에게 감사드린다. 이 연구는 2004년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음. (KRF-2004-003-C00194)

참고문헌

- 한국지질자원연구원, 심부 지열에너지 개발 사업, 일반-04(연차)-01, 2004.
- Brace, W.F., Pauling, B.W. and Scholz, C.H., 1966, Dilatancy in the fracture of crystalline rocks, *Journal of Geophysical Research*, 71, 3939-3953.
- Chang, C. and Haimson, B., 2000, True triaxial strength and deformability of the German Continental Deep Drilling Program (KTB) deep hole amphibolite, *Journal of Geophysical Research*, 105, 18999-19013.
- Haimson, B.C., 2001, Fracture-like borehole breakouts in high-porosity sandstone: are they caused by compaction bands?, *Physics and Chemistry of the Earth*, 26, 15-20.
- Haimson, B. and Chang, C., 2002, True triaxial strength of the KTB amphibolite under borehole wall conditions and its use to estimate the maximum horizontal in situ stress, *Journal of Geophysical Research*, 107, ETG15-1 to 14.
- Mogi, K., 1971, Fracture and flow of rocks under high triaxial compression, *Journal of Geophysical Research*, 76, 1255-1269.
- Økland, D. and Cook, J.M., 1998, Bedding-related instability in high-angle wells, In: SPE/ISRM Eurock'98, 413-422.
- Paterson, M.S., 1978, Experimental Rock Deformation-The Brittle Field, Springer-Verlag, New York, 254 p.
- Syarifuddin, N. and Busono, I., 1999, Regional stress alignments in the Kutai Basin, East Kalimantan, Indonesia: a contribution from a borehole breakout study, *Journal of Asian Earth Sciences*, 17, 123-135.
- Takahashi, M. and Koide, H., 1989, Effect of the intermediate principal stress on strength and deformation behavior of sedimentary rocks at the depth shallower than 2000m, *Rock at Great Depth*, A.A. Balkema, Netherland, 19-26.
- Zoback, M.D., Moos, D., Mastin, L. and Anderson, 1985, R.N., Wellbore breakouts and in situ stress, *Journal of Geophysical Research*, 90, 5523-5530.