

응력하에서의 암반손상 발달특성 연구

A study on characteristics of damage propagation in rocks under stress

박 혁
정 교 철
채 병 곤
서 용 석

안 동 대 학 교
안 동 대 학 교
한국지질자원연구원
한국건설기술연구원

1. 서언

한반도는 국토의 반 이상이 화강암과 화강편마암으로 되어 있다는 지질환경으로인해 화강암을 대상으로 한 구조물 설계는 필연적이라 하겠다. 이미 국내에서도 지반을 대상으로 하는 지하구조물의 크기와 종류가 확대되는 경향이며, 이러한 시대적 조류 가운데 방사성 폐기물 지하동굴처분시설의 안정성에 관한 관심이 증가하고 있다. 공학에서는 화강암을 거의 등방성 암석으로 취급하는 것이 일반적이나 이미 여러 연구에서 화강암 역시 역학적으로 이방성을 보임을 밝혔다.

본 연구에서는 국내에 분포하는 조립, 중립, 세립 화강암을 대상으로 이들의 일축압축강도를 구하고, 시료에 각기 다른 손상하중을 가한 다음 각 공시체에 대하여 탄성파속도, 투수성, 손상후 단면에서의 크랙의 조밀성을 관찰·비교하였다.

2. 암석공시체 및 시험

국내에 분포하는 조립(경기도 포천군 관인면 초과리일대, 각섬석-흑운모화강암, 10.63m ~ 12.77m 구간), 중립(경남 거창군 웅양면 산포리일대, 흑운모화강암, 23.54m ~ 25.27m 구간), 세립(경북 상주군 공성면 영오리일대, 흑운모화강암, 10.46m ~ 13.31m 구간) 화강암을 대상으로 평균길이 약 11.03cm, 평균지름 약 5.48cm의 코어형으로 각각 7개씩 시료를 제작하였으며, 모든 시료는 육안관찰 조건에서의 결함(맥, 절리, 풍화)이 없고, 지표로부터 10m 이상의 깊이에 해당되는 구간이면서 1.5m 구간 내에서 선택되었다. 시추당시의 시료가 놓인 방향을 그대로 유지하는 것이 불가능하여 시추시료를 일렬로 배열함으로써 시료들의 방향을 통일시켜주고, 사용될 시료간의 방향을 일치시키기 위해서 시험자 주관으로 기준선을 그어주었다. 손상하중을 가하기 전에 탄성파속도시험을 실시하여 입도별 평균탄성파속도를 구하고, 7개 시료중 2개씩 이용하여 일축압축강도를 구하여 각 입도별 시료의 일축압축강도로 취하였다. 남은 5개의 시료에 각기 다른 손상하중(일축압축강도의 75, 85, 95, 96~98%에 해당하는 하중)을 가하고 각각의 탄성파속도, 투수성, 손상후 단면에서의 크랙의 조밀성을

관찰 · 비교하였다(Figure 1).

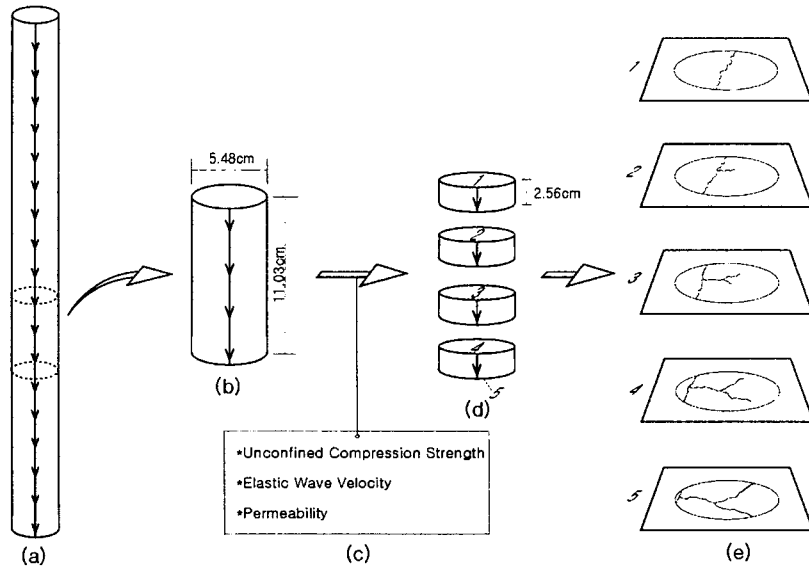


Figure 1. Summary of tests

- (a) Core sample and standard line
- (b) Specimen
- (c) Tests for Unconfined compression strength, Elastic wave velocity and Permeability
- (d) Cutting
- (e) Acetate film duplication of cross section

일축압축시험을 위해서는 영국 ELE사의 Hook Cell ADR 2000 Compression Machine이 사용되었고, 하중속도는 0.4MPa/sec로 하였으나 하중전달방식이 유압식이므로 초기 가압 상황이 일정하지 않다는 결함이 있고, 수동제하 되므로 목적하는 손상하중에 완벽하게 일치하도록 장비를 제어하기에는 다소 어려움이 있었다. 탄성과속도측정시험에는 PUNDIT (Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicating Tester)가 사용되었으며 오차범위는 $\pm 0.1\mu s$ 이고 P파와 S파를 동시에 측정하였다. 시료에 가해진 초기 하중은 1ton으로 하였다. 투수시험에는 Pressure Test 3500 unit가 사용되었다. 본 투수시험에 적용된 투수압과 봉압은 각각 2250kPa, 4.5MN/m²으로 모든시료에 동일하게 적용되었다. 시료단면크랙 관찰을 위해서는 셀룰로오즈 아세테이트(Cellulose acetate)필름 복제법을 사용하였으며, 아세테이트 필름은 0.003" 두께의 무색 필름을 사용하였고, 용식용액은 아세톤을 사용하였으며, 시료단면은 100->400->800 mesh 순으로 연마하여 사용하였다. 복제 필름을 사진으로 나타내기 위해 암시야 조명법(Dark-field illumination)을 이용한 근접 사진 기법이 사용되었다(Figure 6,7). 또한 크랙의 스케치는 그래픽프로그램(Photoshop 5.02k)을 이용하여 8배 확대된 상태에서 컴퓨터를 이용하여 진행되었다.

3. 시험결과

일축압축강도는 조립화강암이 1828.27 kgf/cm², 중립화강암이 1659.61 kgf/cm², 세립화강암이 2634.24 kgf/cm²의 압축강도를 보여, 세립-조립-중립 순으로 일축압축강도가 작아짐을 볼 수 있다(Figure 2).

단계별 손상을 가하기 전에 각 입도별 시료의 탄성파속도를 측정하고 그 평균치를 서로 비교해본 결과, P파의 경우 조립화강암이 3.64 km/sec, 중립화강암이 3.60 km/sec, 세립화강암이 4.18 km/sec로, S파의 경우 조립화강암이 3.38 km/sec, 중립화강암이 3.32 km/sec, 세립화강암이 4.07 km/sec로 세립-조립-중립의 순서로 탄성파 속도가 느려지는 경향을 보였다(Figure 3).

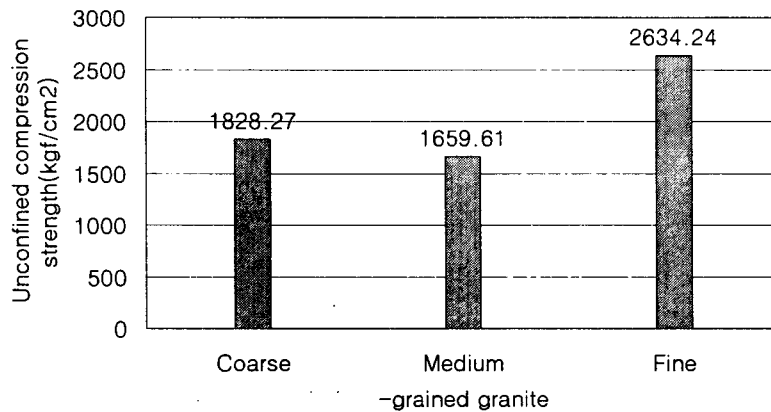


Figure 2. Comparison of unconfined compression strength

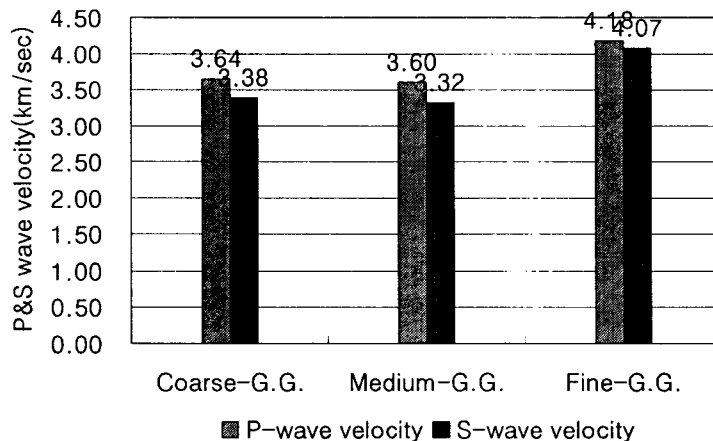
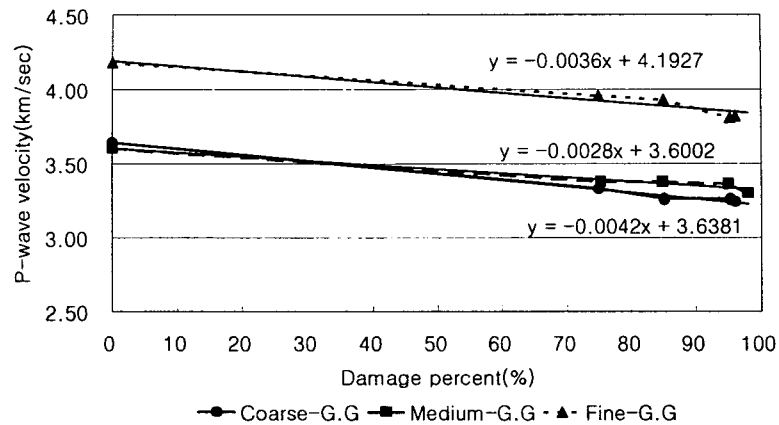


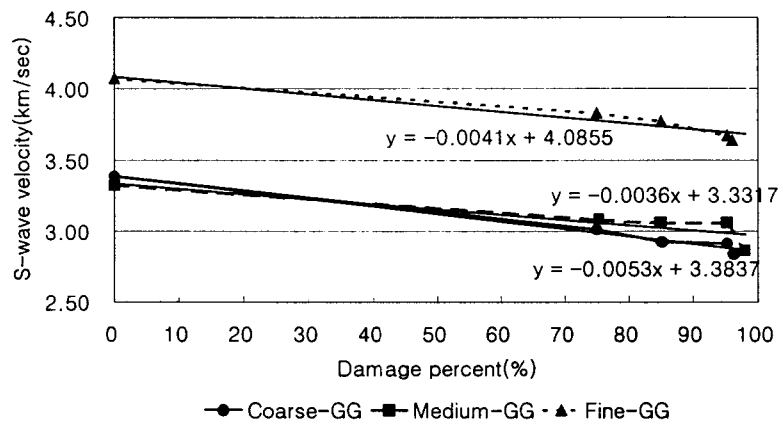
Figure 3. Comparison of P&S-wave velocity among different grain-size granites before loading

초기에 구한 일축압축강도값의 약 75, 85, 95, 96~98%의 손상을 인공적으로 가해주고 각각의 탄성파속도를 관찰해 본 결과, 공통적으로 손상의 정도가 커질수록 탄성파의 속도는 느려지고, 입도가 큰 시료에서 손상에 따른 탄성파속도의 감소비율이 커짐을 알 수 있었다

(Figure 4).



(a)



(b)

Figure 4. Comparison of elastic wave velocities with grain sizes of granites. Velocities of both P-wave(a) and S-wave(b) were decreased. Coarse granite has the highest decreasing rate of elastic wave velocity.

손상정도에 따른 투수성의 변화경향은 조립화강암의 경우 75.00% 손상시료와 96.17%의 손상시료를 비교하면 약 8.2배의 증가를 보이고, 중립화강암의 경우 75.33%와 98.00%의 손상시료를 비교하면 약 3.0배의 증가를 보이며, 세립화강암의 경우 75.00%와 95.98%의 손상시료를 비교하면 약 2.9배의 증가를 보였다. 이를 근거하여 볼 때, 입도가 큰 화강암일수록 손상이 진행됨에 따른 투수성의 증가도 커지는 것을 알 수 있다(Figure 5).

손상이 가해진 조립·중립 화강암에서의 크랙의 조밀성을 관찰하기 위해 각각 96.17%와 98.00%의 손상이 가해진 시료를 축에 수직된 방향으로 절단하여 1개 시료에서 5개의 절단면을 정밀 관찰한 결과, 조립화강암의 경우 1차원절리밀도가 상단면부터 하단면까지 4.93, 5.02, 7.57, 7.66, 4.84 순으로 나타났으며, 중립화강암의 경우에는 4.20, 5.66, 7.30, 6.84, 1.73

으로 나타났다. 이는 시료의 중간부분에서 상대적으로 높은 1차원절리밀도 값을 보이는 공통점이 있으나 각 단면을 위치별로 비교해보면 조립화강암의 1차원절리밀도가 각기 대응되는 중립화강암의 1차원절리밀도에 비해 높은 값을 가진다(Figure 1, 8, 9).

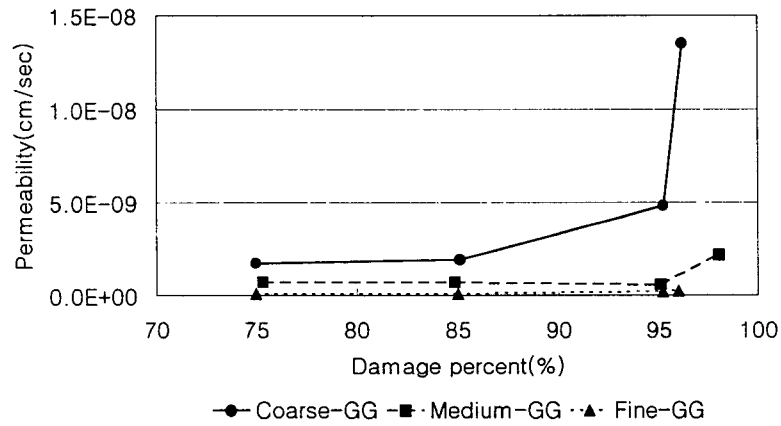


Figure 5. Comparison of coefficient of permeability on damage

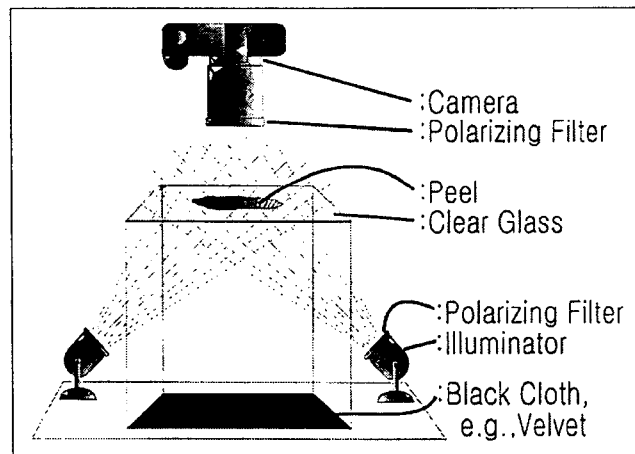


Figure 6. Photographing equipment by dark-field illumination

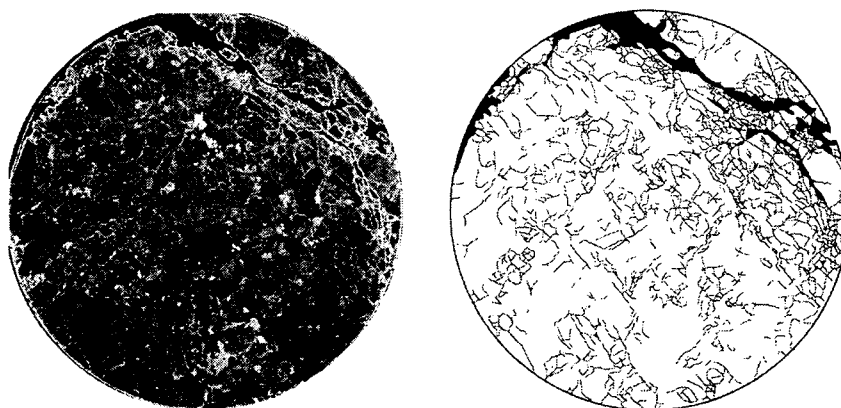


Figure 7. Photograph(left) and traces(right) of cracks acquired from acetate film copy method and dark field illumination method

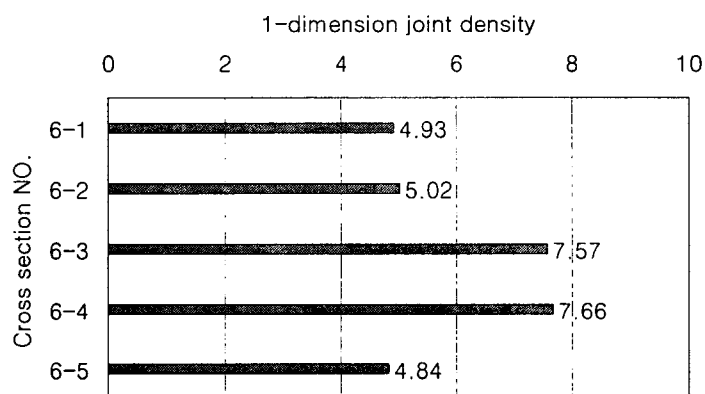


Figure 8. Scanlines and 1-dimension joint density (Coarse-grained granite, 96.17% damage)

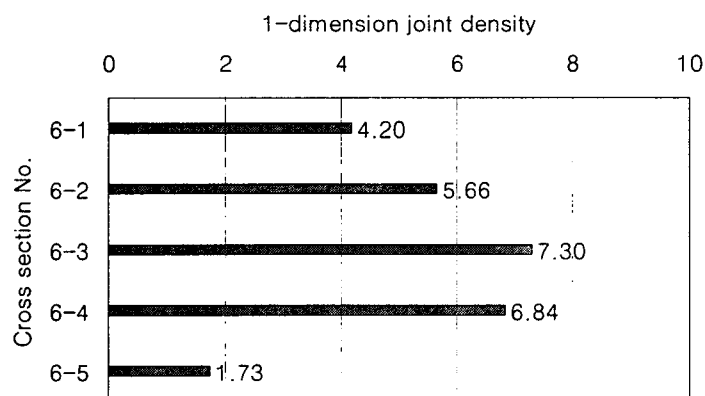


Figure 9. Scanlines and 1-dimension joint density (Medium-grained granite, 98.00% damage)

4. 결 언

일축압축시험시 시료의 파괴형상, 손상발달에 따른 탄성파속도의 변화, 투수성의 변화, 크랙의 1차원절리밀도 등을 고려해 본 결과, 조·중립 화강암에 비해 세립화강암이 더 양호함을 알 수 있다. 또한 조·중립 화강암은 손상이 진행될수록 크랙의 발달과 집중이 세립화강암에 비해 더 크며, 나아가 전단면을 형성이 더 용이함을 알 수 있다. 세립화강암의 경우 높은 파괴강도 값을 가지면서 손상의 증가에 따른 크랙의 성장이 양호하지 않다는 것은 파괴 직전까지 크랙성장이 거의 발생하지 않고 파괴시점에서 파괴면이 불규칙하게 발생함을 생각할 수 있다. 이는 지하수 유동과 안정성을 중요시하는 지하구조물설계에 있어서 그 대상 지반을 화강암으로 할 때, 세립질 화강암이 조립·중립질 화강암에 비해 더 양호한 조건을 가지고 있음을 의미한다.

참고문헌

- 김만일, 1999 암반손상에 따른 투수성 변화에 대한 연구, pp.16-17.
- 박덕원, 서용석, 정교철, 김영기, 2001, 주라기 화강암에 발달하는 결의 현미경학적분석, 지질공학, 11, 51-62.
- Mandado, J.A. and J.M. Tena. 1986, A peel technique for sulfate (and carbonate) rocks. *Journal of Sedimentary Petrology* 33:228-230
- Osborne F., 1935, Rift grain and hardway in some Pre-cambrian granites, Quebec., *Economic Geology* 30, 540-551.
- Plumb R., Engelder, T. and Yale, D., 1984. Near-surface in situ stress : 3. Correlation with microcrack fabric within the New Hampshire Granites. *J. Geophys. Res.*, 89, 9350-9364.
- Sorauf J.E. and D.W. Tuttle. 1988. Dark-field illumination in photography of acetate peels. *Journal of Paleontology* 62: 153-156.
- Wilson, M.A. and J.T. Palmer. 1989. Preparation of acetate peels. pp.142-145 in R.M. Feldmann, R.E. Chapman and J.T. Hannibal (eds.) *Paleotechniques*. The Paleontological Society Special Publication No. 4.