

## 화강암의 손상과정에 따른 투수계수 특성 연구

### Permeability Characteristics related with Damage Process in Granites

---

정 교 철 (Gyo-Cheol JEONG)	안동대학교 지구환경과학과
채 병 곤 (Byung-Gon CHAE)	한국지질자원연구원 환경지질연구부
김 만 일 (Man-Il KIM)	Dept. of Civil Engineering Okayama University
서 용 석 (Yong Seok SEO)	한국건설기술연구원 토목연구부

---

#### 요약 / ABSTRACT

암석 내 응력에 의한 손상 진행과정을 관찰하고, 손상 정도에 따른 투수특성을 파악하기 위한 일련의 실험을 실시하였다. 백악기 중립질 화강암으로 제작한 암석공시체는 일축압축시험을 통해 압축강도의 65~95% 범위의 손상응력(damage stress)을 받았으며, 이 공시체의 손상상태를 측정하고자 탄성과 속도시험을 실시했다. 또한, 손상된 공시체에 대한 실내 투수시험을 통해 손상 정도에 따른 투수성의 변화를 관찰하였다. 시험결과에 따르면, 암석 손상은 일축압축강도의 80%에 해당하는 응력이 가해질 때부터 암석 전체에 걸쳐 전반적으로 발달하고, 이에 따라 탄성과 속도가 감소한다. 80%수준 이상의 손상응력을 받은 암석공시체들은 0.6이상의 균열밀도를 나타내며, 균열의 인장과 상호연결성이 좋은 것으로 관찰되었다. 또한, 이 공시체들은 균열밀도 0.6미만의 공시체들보다 상대적으로 높은 투수계수를 보였다. 이상의 내용을 통해 본 연구에 사용된 암석 공시체들은 주로 압축강도의 80% 이상의 응력단계에서부터 공시체 전반에 걸쳐 본격적인 손상이 진행되어 다수의 균열이 발생하고, 이들이 성장함에 따라 균열 상호간의 연결도가 높아져 비교적 원활한 물의 유동경로가 확보되므로 높은 투수계수를 갖는 것으로 생각할 수 있다.

주요어 : 손상과정, 화강암, 손상응력, 균열밀도, 투수계수

A series of laboratory tests was conducted to observe damage process by stress and to understand characteristics of permeability related with rock damage. Rock specimens which were composed of the Cretaceous medium grained granites were experienced of damage stress between 65% and 95% of the compressive strength. Rock deformation by damage process was identified with

the elastic wave velocity test. Relationship between rock damage and permeability change was also analyzed by water injection test in the laboratory. According to the results of the tests, damage tends to be occurred from stress level of 80% of the compressive strength and it reduces elastic wave velocity. The damaged specimens with stress more than 80% of the compressive strength showed crack density more than 0.6 and persistent length with good connectivity of cracks. They also have higher permeability than that of specimens with crack density less than 0.6. Considered with the above results, the rock specimens used in this study were fully damaged from stress level of 80% of the compressive strength. Crack initiation and propagation by damage caused good connectivity of cracks through rock specimen. These damage process, therefore, brought high permeability coefficient through water flow conduit in the rock specimen.

Key Words : damage process, granite, damage stress, crack density, permeability coefficient

## 서 언

터널이나 방사성 폐기물 지층처분시설 등과 같은 대규모 지하구조물을 건설하기 위해서는 암반의 역학적·수리지질학적 성질을 파악하는 것이 매우 중요하다. 대부분의 암반은 균질하고 등방성을 띠는 경우보다 균열(crack), 엽리(foliation), 층리(bedding), 절리(joint) 등의 미시적 내지 거시적인 불연속면(mechanical discontinuity)을 포함하고 있다. 암반 내 불연속면은 지하수 유동경로 역할을 하고 있으며, 암반의 응력해방 등으로 인해 발생하는 암반손상(rock damage)과 변형(deformation)은 원암에 대한 지하수 흐름을 주변 암반 내로 확대시키는 등의 영향을 가져온다.

특히, 암반 내 지하수 유동은 불연속면의 길이, 간극(aperture), 밀도, 연결성 등 분포상태와 기하양상에 대한 정확한 해석을 토대로 가능하다. 불연속면의 수리특성 규명은 많은 연구에 의해 시도되었다. 불연속 암반 내 지하수 유동특성을 규명하기 위한 노력은 1960년대 중반 Snow에 의해 본격적으로 시작되었다. 그는 평행판 모델을 이용해 불연속면의 투수계수와 간극과의 관계를 설명하였으며(Snow, 1968), Gale(1982)은 불연속면 간극, 방향, 연결도 등이 암반의 투수성에 영향을 미치는 것으로 해석하였다. Long et al.(1982)은 불연속면 체계가 불연속면의 밀도, 간극, 방향 그리고 시료 크기 등에 의존한 등다공성 거동(equivalent porous behaviour)을 보인다고 주장했다. 등다공성 매질

개념을 이용한 지하수유동 수치모의는 일반적인 다공질 매질에서의 수치모의와 차이가 없으며, 파쇄 암반의 수리적 특성을 내변하는 다공질 매질의 수리상수로 대체하기 위한 방향으로 진행되었다. 이러한 수치적 접근법은 단열암반의 크기가 커질수록 유체유동양상이 다공질 매질과 같아진다는 해석결과를 근거로 한 것이다.

그 후, 수리전도도가 매우 낮은 결정질 암반에서 불연속면을 통한 지하수 유동을 좀더 정확히 구현하고자 분리단열망(discrete fracture network; DFN) 모델이 개발되었다(Long et al., 1985; Geier and Axelsson, 1991; Dershowitz et al., 1995). 특히, Geier and Axelsson(1991)은 분리단열망 모델을 이용한 모사에서 그 한계점을 극복하고자 통계적 연속체(stochastic continuum) 모델과 채널망(channel network) 모델을 동시에 고려하였다.

암석역학적 측면에서도 암반에 가해지는 응력과 수리전도도와와의 관계를 규명하기 위한 실내시험이 보고된 바가 있다(Brace et al., 1968; Kranz et al., 1979; King et al., 1995; Jouniaux & Pozzi, 1995; Skoczylas & Henry, 1995). 이 연구들은 응력에 따른 불연속면 틈의 열림현상을 수리전도도의 변화와 관련시켜 설명하였는데, 대부분 이미 파괴가 발생한 시료의 거시적 불연속면을 대상으로 실내시험을 실시하였다.

한편, 본 연구에서는 암석의 손상과정을 파악하고 이에 따른 암석 내 수리전도도 변화양상을 밝히기 위해, 정상복도 청송군 일대에 분포하고 있는

백악기 화강암을 이용하였다. 시험에 사용되는 암석 공시체 중 대표 시료를 선정하여 압축강도 (compressive strength)를 측정된 후, 각 암석 공시체에 응력에 의한 손상정도를 단계별로 나누어 일축압축시험을 실시하였다. 그리고, 암석 공시체의 탄성과 전파속도 및 현미경 관찰 등을 통하여 암석 공시체 내 불연속면 발달양상을 규명하였다. 이러한 시험을 통해 변위가 발생된 암석 공시체를 대상으로 실내투수시험을 실시하여 투수계수를 측정하였다.

### 암석 손상 시험방법

#### 암석 공시체 제작

본 연구에 사용된 청송 화강암은 지표에서 심도 120m의 NX 구경 시추공에서 채취하였다. 채취한 코어를 심도별로 구분하여 기존에 발달하는 균열, 백(vein) 등이 없는 신선한 코어를 선정한 후, 치수 효과를 고려하여 직경  $48 \pm 0.5\text{mm}$ , 길이  $100 \pm 0.5\text{mm}$ 로 제작하였다. 절단된 각각의 암석 공시체들은 300, 600메쉬의 카보런덤(carborundum) 분말을 사용하여 암석 공시체의 양 단면의 오차가 0.5mm 내외가 되도록 연마하였다.

#### 시험장비 및 방법

본 연구에서는 암석 공시체를 대상으로 함수시험, 탄성과 전파속도시험, 단계별 손상을 위한 일축압축시험 및 투수시험 등을 순차적으로 실시하였다. 암석 공시체를 자연함수상태, 완전건조상태, 완전함수상태 등으로 구분하여 일정시간 경과 후 함수시험과 탄성과 전파속도시험을 병행하여 실시하였다. 그리고, 공시체들 중 대표 공시체를 선정한 후 일축압축시험을 실시하여 압축강도를 구하고, 이 일축압축강도에 대해 65%, 70%, 75%, 80%, 85%, 90%, 95%의 응력을 가해 단계별 손상을 위한 일축압축시험을 실시하였다. 이 시험 후 다시 공시체를 완전히 함수 시킨 후 탄성과 전파속도시험을 실시하여 공시체 내부의 손상발생 여부를 일축압축시험 이전 자료와 비교·진토하였다. 변위가 발생한 암석 공시체에 대해 투수시험을 실시하여

투수계수를 산출한 후 공시체 양 단면에서 관찰되는 균열의 밀도와 투수성과의 관계를 규명하였다. 본 연구에서 균열밀도는 균열길이의 합을 면적으로 나누어 계산하였다.

#### 일축압축시험

일축압축시험을 위해 시추코어 중 지표하 19~30m 구간과 60~110m 구간에서 각각 암석공시체를 채취하였다. 시료 채취심도를 구분한 이유는 공시체의 정확한 일축압축강도를 심도에 따라 구분하기 위함이다. 두 심도구간에서 각각 대표시료를 3개씩 선별하여 이들에 대한 일축압축강도를 측정하고 그 산출평균을 대표시료 S-1(얕은 심도), S-2(깊은 심도)의 강도로 결정하였다. S-1, S-2의 강도값은 각각 104.48MPa과 166.16MPa 이었다. 이를 토대로 시험대상 공시체에 대해 일축압축강도의 65~95% 범위 내에서 5%씩 일축압축강도에 대한 손상응력을 증가시켰다. 시험을 실시한 7개 시료 중 No. 1~3은 대표시료 S-1의 일축압축강도에 대해 65~75%의 손상응력을 가했고, No. 4~7은 S-2 시료 일축압축강도의 80~95%에 달하는 손상응력으로 압력을 주었다.

일축압축시험에 사용된 기기는 ELE-Hook Cell ADR 2000 Compression Machine(ELE International)로써 최대 2000KN까지 가압할 수 있다. 한편, 암석 공시체에 응력이 가해지는 상태에서 변형정도를 측정하기 위해 재하하중의 수평방향으로 변형률 게이지(게이지 길이: 20mm, gauge factor :  $2.13 \pm 1\%$ , gauge resistance :  $119.8 \pm 0.5\Omega$ , Tokyo Sokki Kenkyujo Co., LTD)를 부착하여 축 변형률(axial strain)을 측정하였다.

#### 탄성과 속도 측정

암석 공시체에 대한 자연함수상태와 완전건조상태 그리고 완전함수상태에서의 탄성과 전파속도를 측정·비교하기 위해 탄성과 전파속도 측정기기(PUNDIT, Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicating Tester, C.N.S Electronics LTD.)를 사용하였다. 송수신부(transducer heads)는 종파(P-wave)만 측정 가능한 것을 사용하였으며 횡파(S-wave)는 계산식을 이용하여 산출하였다. 탄성과 속도측정기의 탄성과 통과시간(elastic

wave transit time,  $\mu s$ )을 보정하기 위해 기준막대(reference bar,  $25.7\mu s$ )를 이용하여 진파속도를  $0.1\mu s$  단위로 보정하였다. 이때 송수신부와 기준막대의 접촉면을 통과하는 단상파의 진파를 원활히 하기 위해 접촉면에 그리스를 바른 후 시험을 실시하였다.

실내 투수시험

투수시험에 사용된 장비는 크게 네 부분으로 나누어지는데, 암석 공시체에 투수압과 봉압을 가압할 수 있는 base cell assembly와 이와 연결되어 투수압을 일정하게 가압하는 투수시험기인 pressure test 3500 (EL 70-5130 series, ELE Int'l), 가압되는 투수압을 측정하는 pressure gauge (EL70-5135 3500KPa, ELE Int'l) 및 base cell assembly로 일정한 봉압을 가압하는 constant pressure test unit (ELE Int'l) 등으로 구성되어 있다(Fig. 1). Base cell assembly의 내부에 장착되는 우레탄 고무 자켓은 NX 구경으로 내경이 54.74mm이며 허용오차는  $\pm 0.75mm$ , 길이는 130mm이다.

투수시험의 과정을 간략히 설명하면 암석 공시체를 base cell assembly에 고정시키기 위해 두께 3mm의 고정고무(reclaimed rubber)를 암석 공시체 둘레의 크기로 잘라 실리콘 접착제를 사용하여 접착시키고 밴드로 고정시킨 후, 접착면이 충분히 접착되도록 15일 동안 상온에서 보관하였으며 투수시험을 실시하기 전에 7일 동안 함수시켰다. 암석 공시체에 대한 물의 주입은 base cell assembly에 암석 공시체를 장착시키고 하부 permeability end cap으로 연결된 나일론 투명 튜브와 뷰렛 내부의 공기를 제거한 후, 상부 permeability end cap을 달고 투수압이 전달되는 나일론 투명 튜브를 투수시험기인 pressure test 3500에 연결한다. 그리고, constant pressure test unit에서 서서히 봉압을 증가시키면서 동시에 투수압도 함께 증가시킨다. 여기서 사용되는 연결튜브인 나일론 투명 튜브는 외경이 6mm, 내경이 4mm로 pressure test 3500에서 전달되는 투수압을 최대 3500KPa 까지 견딜 수 있다. 투수되어 나온 물의 유출량을 뷰렛(직경 10mm, 길이 120mm)을 통해 확인하면서 시험에 적용되는 일정한 봉압 및 투수압까지 상승시킨다. 마지막으로 시험자가 물의 투수유량을 원활히 측정

하기 위해 뷰렛의 볼을 조절한 후 시간에 따른 투수유량을 지속적으로 측정한다.

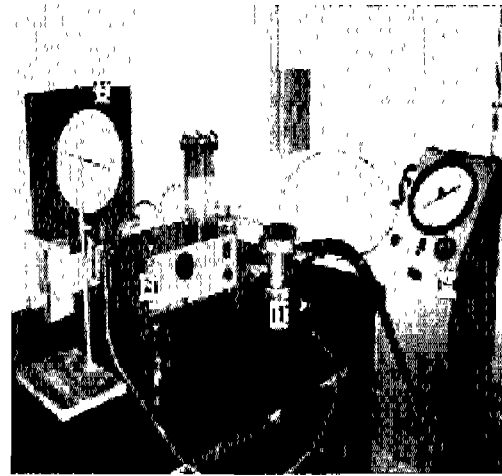


Fig. 1. Apparatus of the permeability test. (1)base cell assembly; (2)pressure test 3500; (3)pressure gauge; (4)constant pressure test unit.

시험결과 및 토의

일축압축시험에 의한 손상변화

심도별로 제작된 암석 공시체들 중 대표 암석 공시체를 선정하여 20일간 자연상태에 보관한 후 일축압축시험을 실시하였으며, 각 대표 암석 공시체의 압축강도에 대해 아래의 식을 적용하여 압축강도를 계산하였다.

$$S_c = \frac{P}{A} = \frac{P}{\pi D^2/4}$$

여기서,  $S_c$  : 압축강도, MPa

$P$  : 최대압축하중, kN

$A$  : 암석 공시체 단면적,  $cm^2$

$D$  : 암석 공시체 단면 직경, cm

대표 암석 공시체 S-1과 S-2의 압축강도를 결정한 후, 시험 대상시료 No. 1~3은 S-1의 압축강도에 대한 응력을 가하고, No. 4~7은 S-2의 압축강

도에 대한 단계별 손상응력을 가해 일축압축시험을 실시하였다(Table 1).

이 시험에서 얻어진 응력-변형률곡선 상에서 ISRM이 제안한 종 탄성계수(modulus of elasticity) 측정방법을 참고하여 최대 응력에 대해 50% 부분에서 접선 종 탄성계수(tangent modulus of elasticity)인  $E_{t50}$  값을 다음과 같이 계산하였다.

$$E_{t50} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$$

여기서,  $E_{t50}$  : 접선 종 탄성계수

$\Delta\sigma$  : 미소 축차응력 증분

$\Delta\varepsilon$  : 미소 축변형률 증분

Table 1 Results of the uniaxial compressive tests for each rock specimen.

Rock specimen No.	Depth (m)	Applied Stress (MPa)	Stress level (%)	Maximum strain ( $\times 10^{-6}$ )	Tangent Modulus of elasticity ( $\times 104\text{MPa}$ )
1	19.00	68.5	65.6	1097.3	5.86
2	24.90	73.5	70.4	1533.6	5.49
3	29.10	78.9	75.5	2198.7	2.95
4	63.40	133.8	80.5	2378.7	6.68
5	72.40	141.8	85.3	1699.7	8.34
6	94.90	149.3	86.6	3006.9	5.53
7	109.00	159.9	96.2	2548.4	5.33

암석손상에 따른 탄성과 전파속도 변화

탄성과 전파속도시험은 암석 공시체에 대한 일축 압축시험 전과 후, 그리고 함수 시킨 후 얻어진 탄성과 전파속도를 비교하여 암석 공시체 내의 변위 발생여부를 측정하기 위해 실시했다. 즉, 암석내 불연속면의 변위가 발생되면 탄성과 전파속도가 변위 발생 전보다 느려지게 되므로 암석 공시체 내 변위 발생 여부를 인지할 수 있다.

각각의 암석 공시체에서 측정된 도달시간은 아래의 식에 의해 탄성과 전파속도가 계산되어지며 암

석 공시체 길이와 도달시간 의해 계산된 값들은 약  $\pm 1\%$  내외에서 탄성파시험기 오차범위 내의 정확성을 갖는다.

$$Pulse\ velocity = \frac{Path\ length}{Transit\ time} \quad (m/s)$$

여기서, *Path length* : 암석 공시체 길이, mm

*Transit time* : 탄성파 도달시간,  $\mu s$

*Pulse velocity* : 탄성파의 속도, m/s

측정된 탄성과 속도는 P파인 종파의 전파속도이며 종파에 대한 횡파의 속도는 횡파가 종파보다  $\sqrt{3}$  배정도 낮게 도달한다는 것으로부터 계산에 의해서 횡파의 속도를 산출하였다.

일축압축 시험 전 상태에서 각 암석 공시체에 대한 탄성과 전파속도는 대략 종파가 4902.91 ~ 5489.13 m/s, 횡파는 2830.70 ~ 3169.15 m/s의 범위에서 속하며, 종파와 횡파의 속도비( $V_p/V_s$ )는 약 1.73으로 종파가 횡파보다 1.73배 가량 높은 전달속도를 나타내고 있다(Fig. 2). 그리고, 암석 공시체들의 평균 탄성과 전파속도를 살펴보면 종파는 5159.33 m/s, 횡파는 2978.74 m/s로 일반적인 경암에 속하는 탄성과 전파속도로 나타난다. 일축압축 시험 후의 암석 공시체에 대한 탄성과 속도측정 결과는 종파가 4832.54 ~ 5459.46 m/s, 횡파가 2790.07 ~ 3152.02 m/s의 범위를 보였으며, 이들의 평균 전파속도는 종파의 경우 5130.87 m/s, 횡파는 2962.31 m/s에 이른다. 즉, 손상응력을 받은 후 측정된 탄성과 속도가 응력을 받기 전 공시체의 속도보다 0.5 ~ 3.8% 가량 전달속도가 감소하였다.

단계별 손상응력을 가한 암석 공시체를 7일 동안

물에 담귀 완전 함수시킨 후 탄성과 속도시험을 실시하였다. 이는 응력에 의해 손상이 발생한 공시체가 완전함수 될 경우 탄성과 속도변화를 관찰하기 위한 것이다. 함수 후 각각의 암석 공시체들에 대한 탄성과 전파속도는 종파가 5222.80 ~ 5640.45 m/s, 횡파는 3015.38 ~ 3256.52 m/s로 나타나고, 평균 탄성과 전파속도는 종파가 5433.78 m/s, 횡파는 3137.19 m/s이다. 이는 손상이전 상태의 탄성과 전파속도보다 평균적으로 종파와 횡파가 각각 약 5.1% 가량 증가하였으며, 단계별 일축압축시험에서의 탄성과 전파속도보다는 종파와 횡파 모두 약 7% 정도 증가한 것이다.

일반적으로 탄성과 속도는 손상이 크게 발생하여 균열이 심하게 발달한 암반보다 신선하고 균열 밀도가 낮은 암반에서 더 빠른 것으로 보고되어 있다. 그러나, 본 연구에서는 더 높은 손상응력이 가해진 깊은 침도(deep depth) 공시체들이 상대적으로 약한 응력을 받은 얕은 침도(shallow depth) 공시체들 보다 탄성과 속도 분포가 더 빠르게 나타났다. 이러한 현상은 응력에 의한 손상이 속도분포에 영향을 미친 것 보다 얕은 침도 공시체에 내부적으로 발달한 풍화영향으로 생각된다.

한편, 일축압축강도의 80% 이상의 손상응력을 받은 깊은 침도 공시체들(No. 4~7) 가해진 손상 응력과 탄성과 속도가 반비례하는 경향을 보인다 (Fig. 2). Jeong & Ichikawa(1994)는 화강암 내 손

상은 일축압축강도의 80% 수준에 달하는 응력이 가해질 때부터 급격히 발달함을 현미경 관찰을 통해 밝혔다. 이를 감안하면, 본 연구의 공시체 중 No. 4~7은 공시체 전반에 걸쳐 본격적으로 손상이 발달된 상태이고, 이로 인해 탄성과 전파속도가 점차 감소하는 것으로 생각할 수 있다. 그리고, 손상된 암석 공시체가 완전함수되면 손상으로 인해 발달한 암석 내 균열에 물이 채워지므로, 자연상태의 손상된 공시체 경우보다 탄성과 전파속도가 훨씬 증가하게 된다.

암석손상진행에 따른 투수특성

본 연구에 사용되는 암석 공시체는 앞서 시험한 탄성과 전파속도시험, 단계별 손상을 위한 일축압축시험 등을 거쳐 이미 암석 공시체 내부에 미세적 내지 거시적인 균열들이 형성되어 있다. 이 시험은 암석 내 균열의 진행 및 분포상태에 따른 투수성의 차이를 밝히고, 이를 토대로 실제 자연상태의 암반에서 지하수 유동특성을 예측하기 위한 기초를 마련할 수 있음에 그 의미를 둔다.

투수시험에서 투수계수를 구하기 위해서 실내투수시험 중 정수위 투수시험을 적용하여 시험을 실시하였고, 투수계수는 아래의 식을 이용하여 산출하였다.

$$k = \frac{QL}{Aht}$$

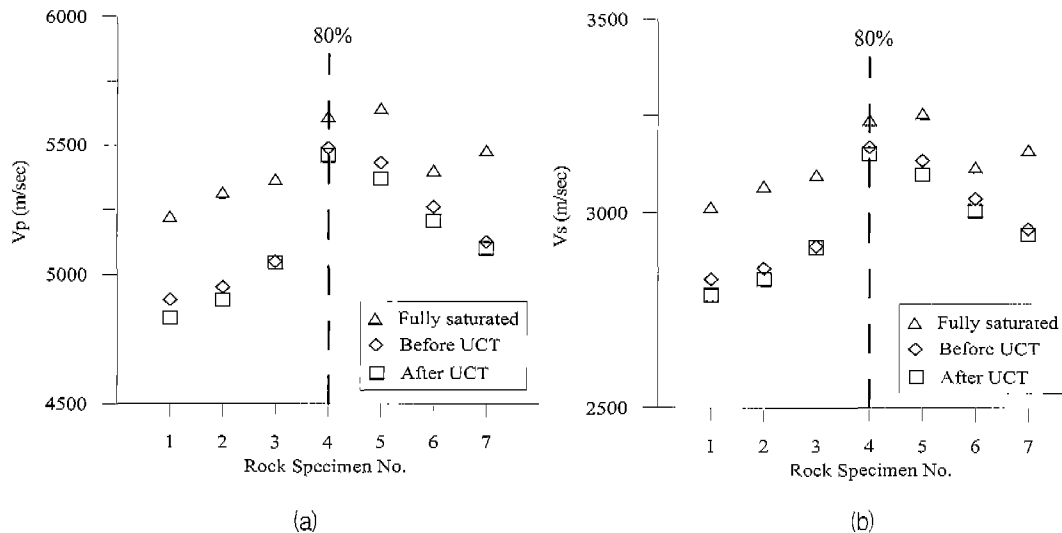


Fig. 2 Elastic wave velocities of the rock specimens. (a)P-wave velocities; (b)S-wave velocities.

여기서, Q: 뷰렛의 측정지점에서 상승한 물의 투수 유량

- L: 암석 공시체의 길이
- A: 암석 공시체의 단면적
- t: 유출시간
- h: 수두차

h는 암석 공시체에 물이 투수될 수 있도록 가압하는 투수압을 길이 단위로 환산한 후 본 식에 적용하여 계산하였다.

투수시험을 실시한 암석 공시체에 대한 손상응력과 투수계수의 관계는 Fig. 3와 같다. 이 중, 일축 압축강도의 85%의 응력을 받은 암석 공시체 No. 5는  $1.11 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 의 투수계수를 보여 시험 공시체중 가장 높은 값을 나타낸다. 이 공시체는 시료 상부에서 하부까지 연속적으로 발달한 균열이 존재하며(Fig. 4), 이 균열이 물의 투수경로 역할을 한 것으로 판단된다. 85% 이상의 손상응력을 받은 공시체들은 그 이하의 손상응력을 받은 시료들보다 높은 투수계수 값을 보인다. 한편, 암석 공시체 No. 4의 경우는 비교적 높은 손상응력을 받았지만, 공시체 내에 발달하는 균열의 길이가 짧아 이들이 서로 연결되지 않았으며, 일부 균열은 압축시험 시 부서진 미세 광물입자로 틈이 충전되어 있다(Fig. 5). 균열 틈 사이의 충전현상은 불연속면을 통한 투수성을 저하시키는 주요한 원인으로 작용하게되므로 (Chester et al., 1993) 투수계수가 낮게 측정된다.

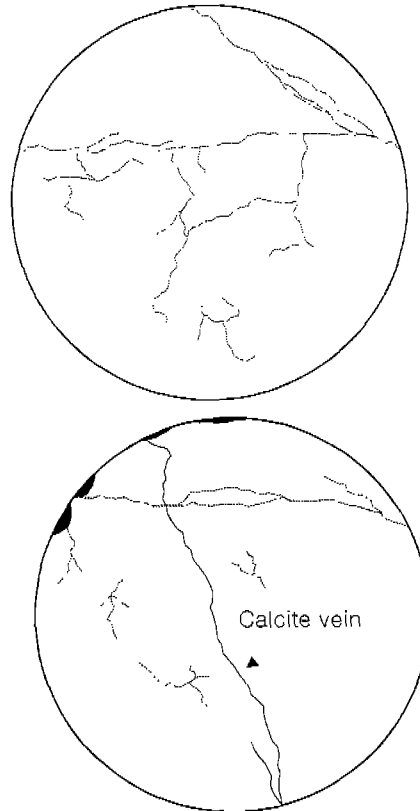


Fig. 4. Sections of rock specimen No. 5. Left is lower part and right is upper part of specimen.

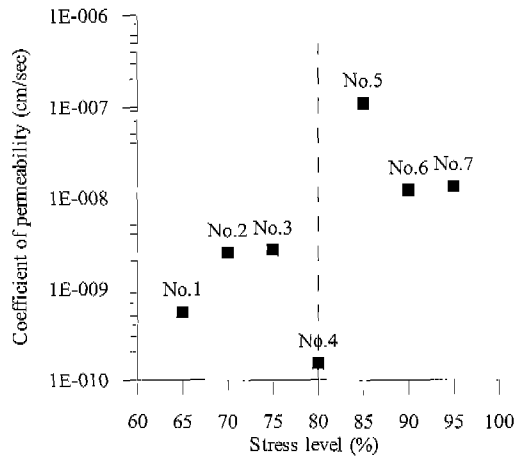
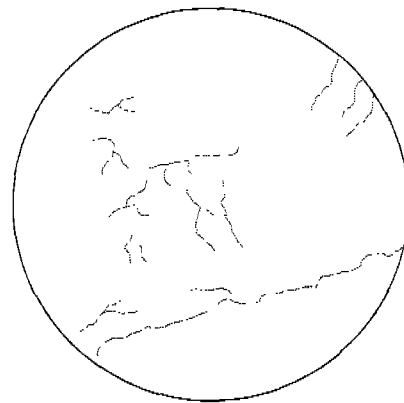


Fig. 3. Permeability coefficient of the damaged specimens under different stress level.



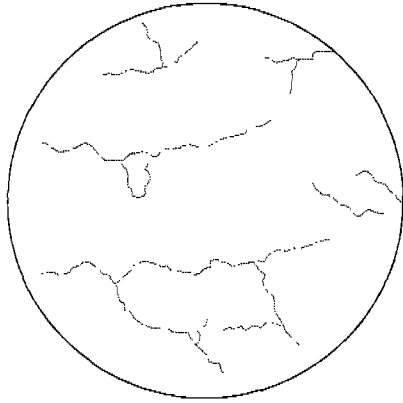


Fig. 5. Sections of rock specimen No. 4. Left is lower part and right is upper part of specimen.

암석 공시체 상부와 하부단면에 발생된 방해석 맥을 제외한 균열의 길이와 암석 공시체 상부와 하부의 단면적을 이용하여 균열밀도를 구하여 밀도와 투수계수의 상관관계를 비교하였다(Table 2 & Fig. 6). 상대적으로 높은 투수계수를 갖는 암석 공시체 No. 5, 6 그리고 7은 공시체 양단면의 균열밀도가 0.6 이상을 나타내고, 이는 80% 미만의 손상 응력을 받은 암석 공시체의 밀도 값보다 높은 것이다. 이처럼 상대적으로 균열 밀도가 높은 공시체의 경우 손상이 증가되면서 다수의 균열이 발생하고, 이들이 암석 공시체 내부로 성장함에 따라 균열 상호간의 연결도가 높아져 비교적 원활한 물의 유동 경로 역할을 하게 되므로 높은 투수계수를 나타내는 것으로 생각할 수 있다. 실제로 이와 같은 공시체들은 균열을 따른 투수의 흔적이 뚜렷이 나타나고 있음이 관찰된다(Fig. 7). 그러나, 암석 공시체 No. 4는 균열밀도는 높게 나타나지만, 전술한 바와 같이 균열의 길이가 짧아 균열간의 연결도가 낮으므로, 투수계수는 매우 낮게 측정된 것이다. 그러므로, 이 시험결과는 암석 내 균열밀도와 연결도가 투수성과 밀접한 관계를 가짐을 설명할 수 있는 좋은 증거가 된다.

암석 공시체 No. 1~3의 경우는 균열밀도도 상대적으로 낮을 뿐만 아니라, 균열의 분포양상이 공시체 전반에 골고루 분포하지 않고, 한쪽 부분에만 집중되는 양상을 보인다. 또한, 상부와 하부의 단면에 크랙이 다수 존재하더라도 이들이 암석 공시체

내부를 통해 연결되지 않고 고립되어 분포하기 때문에 물의 투수를 원활히 할 수 없는 것으로 설명할 수 있다. 이를 통해 전술한 바와 같이 균열밀도와 연결도가 투수성 측면에서 중요하게 작용함을 알 수 있다.

Table 2. Crack density of rock specimens.

No.	Part	Crack length (cm)	Crack density ( $\frac{\text{length}}{\text{area}}$ , cm <sup>-1</sup> )	Density difference $\left  \frac{\text{upper}}{\text{lower}} \right $
1	upper	7.78	0.43	0.14
	lower	10.38	0.57	
2	upper	1.62	0.09	0.38
	lower	8.43	0.47	
3	upper	3.24	0.18	0.09
	lower	4.86	0.27	
4	upper	17.51	0.97	0.16
	lower	14.59	0.81	
5	upper	11.03	0.61	0.57
	lower	21.41	1.18	
6	upper	26.59	1.47	0.5
	lower	17.51	0.97	
7	upper	12.65	0.70	0.2
	lower	16.22	0.90	

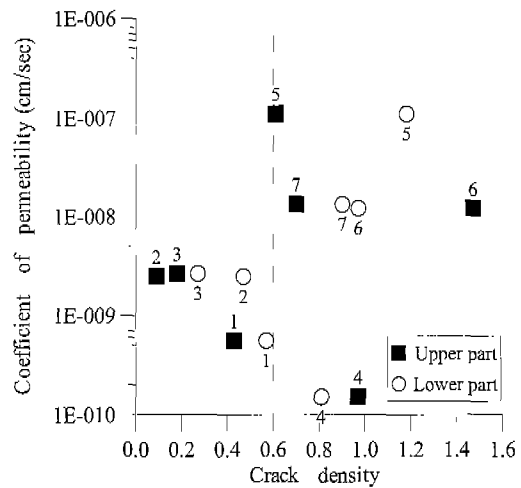


Fig. 6. Relationship of crack density with coefficient of permeability.





Fig. 7. Sections of rock specimen No. 6 after water injection test. They show clear trace of water flow along fractures.

한편, 손상-응력 80% 이상의 암석 공시체들은 모두 0.6이상의 균열밀도를 보여 80% 미만의 손상-응력을 받은 암석 공시체와 구분된다. 이는 본 연구에 사용된 암석 공시체들은 주로 80% 이상의 응력 단계에서부터 공시체 전반에 걸쳐 본격적으로 손상이 진행됨을 시사한다. 즉, 낮은 응력 단계에서는 암석 내 손상이 매우 미약하게 발달하지만, 80%

이상의 응력단계부터는 활발하게 손상이 진행되어 공시체 전체에서 균열이 발달됨을 알 수 있으며, 이 양상은 Jcong & Ichikawa(1994)의 관찰결과와도 잘 일치한다. 그리고, 이와 같은 손상정도에 기인해 암석 공시체내 투수계수도 증가하게 되는 것이다.

## 결 언

백악기의 화강암으로 제작된 암석 공시체를 대상으로 대표암석 공시체 S-1과 S-2의 압축강도를 측정하고, 이 압축강도에 대해 65~95%의 범위에서 각 단계별로 5%씩 손상-응력을 증가시키며 일축압축시험을 실시하였다. 또한, 일축압축시험에 의한 암석 내 손상정도의 변화를 파악하기 위해 일축압축시험 전·후에 암석 공시체의 탄성과 전파속도 시험을 실시하였다. 한편, 손상진행 정도에 따라 암석 공시체의 투수성 변화를 관찰하기 위해 손상이 진행된 공시체를 대상으로 실내투수시험을 실시하였다.

탄성과 전파속도시험은 일축압축 시험 전, 응력 단계별 일축압축시험 후 그리고 손상된 공시체를 완전함수 시킨 후 상태로 나누어 시험을 실시하였다. 시험결과에 따르면, 일축압축 시험에 의해 손상이 진행된 시료의 탄성과 전파속도가 손상이전 상태보다 0.5 ~ 3.8% 가량 전달속도가 감소하였다. 그리고, 단계별 손상-응력을 가한 암석 공시체를 7일 동안 물에 담귀 완전 함수시킨 후 탄성과 속도 시험을 실시한 결과, 손상이전 상태의 탄성과 전파속도보다 평균적으로 종파와 횡파가 각각 약 5.1% 가량 증가하였으며, 단계별 일축압축시험 후의 탄성과 전파속도보다는 종파와 횡파 모두 약 7% 정도 증가하였다.

일축압축강도의 80% 이상의 손상-응력을 받은 깊은 침도 공시체들은(No. 4~7) 가해진 손상-응력과 탄성과 속도가 반비례하는 경향을 보여, 손상이 많이 진행될수록 탄성과 전파속도가 감소함을 뚜렷이 나타내고 있다. 즉, 공시체 전반에 걸쳐 본격적으로 손상이 진행되면, 이로 인해 탄성과 전파속도가 점차 감소하는 것으로 생각할 수 있다. 그러나, 손상된 암석 공시체가 완전함수되면 손상으로 인해

발달한 암석 내 균열에 물이 채워지므로, 자연상태의 손상된 공시체 경우보다 탄성과 전파속도가 훨씬 증가하게 된다.

암석 내 균열의 진행 및 분포상태에 따른 투수성의 차이를 밝히고자 실시한 투수시험에서는 85% 이상의 손상응력을 받은 공시체들이 그 이하의 손상응력을 받은 시료들보다 높은 투수계수 값을 보였다. 이 공시체들은 시료 상부에서 하부까지 연속적으로 발달한 균열이 존재하네, 이 균열을 따른 물의 투수흐름을 뚜렷이 관찰할 수 있었다. 또한, 균열의 길이와 암석 공시체 상부와 하부의 단면적을 이용하여 균열밀도를 구해 밀도와 투수계수의 상관관계를 비교한 결과, 상대적으로 높은 투수계수를 갖는 공시체들은 모두 0.6이상의 균열밀도를 보였다. 이러한 균열밀도는 손상응력 80% 이상의 공시체들에서만 나타나고, 이 공시체들은 대부분 균열상호간의 연결성이 좋은 것으로 관찰되었다. 이와 같은 양상을 토대로, 상대적으로 균열 밀도가 높은 공시체의 경우 손상이 증가되면서 다수의 균열이 발생하고, 이들이 암석 공시체 내부로 성장함에 따라 균열 상호간의 연결도가 높아져 비교적 원활한 물의 유동경로 역할을 하게 되므로 높은 투수계수를 갖는 것으로 생각할 수 있다.

전술한 내용을 통해 본 연구에 사용된 암석 공시체들은 주로 80% 이상의 응력 단계에서부터 공시체 전반에 걸쳐 본격적으로 손상이 진행됨을 알 수 있다. 즉, 낮은 응력 단계에서는 암석 내 손상이 매우 미약하게 발달하지만, 80% 이상의 응력단계부터는 활발하게 손상이 진행되어 공시체 전체에서 균열이 발달되고, 이와 같은 손상정도에 기인해 암석 공시체내 균열이 성장하고 이들이 서로 연결되면서 투수계수도 증가하게 되는 것이다.

## 사 사

이 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호: R02-2000-00080)의 지원으로 수행된 결과이며 이에 감사한다.

## 참 고 문 헌

- Brace, W., Walsh, J. and Frangos, W., 1968, Permeability of granite under high pressure, *Jour. Geophysics Research*, 73, 2225-2236.
- Chester, F. M., Evans, J. P., and Biegel, R. D., 1993, Internal Structure and Weakening Mechanisms of the San Andreas Fault. *Jour. Geophy, Research*, 98, 771-786.
- Dershowitz W., Lee, G., Geier, J., Foxford, T., La Pointe, P. and Thomas, A., 1995, FracMan; interactive discrete feature data analysis, geometric modeling, and exploration simulation, User document Version 2.5. Golder Associates Inc., 185p.
- Gale, J., 1982, Assessing the permeability characteristics of fractured rock, G.S.A. Special Paper 189, 163-181.
- Geier, J. and Axelsson, C., 1991, Discrete fracture modelling of the Finnsjon rock mass, Phase 1: Feasibility study, SKB Technical Report, TR 91-13, 157p.
- Jeong, G. and Ichikawa, Y., 1994, An experimental study on damage propagation of intact granite, *J. Soc. Material Sci. Japan*, 43, 317-323.
- Jouniaux, L. and Pozzi, J., 1995, Streaming potential and permeability of saturated sandstones under triaxial stress: consequence for electrotelluric anomalies prior to earthquakes, *Jour. Geophysical Research*, 100, 197-209.
- King, M., Chaudhry, N. and Shakeel, A., 1995, Experimental ultrasonic velocities and permeability for sandstone with aligned cracks, *Int. Jour. Rock Mech. Mining Sci.*, 32, 155-163.
- Kranz, R., Frankel, A., Engelder. T. and Scholz, C., 1979, The permeability of whole and jointed barre granite, *Int. Jour. Rock Mech. Mining Sci.*, 16, 225-234.
- Long, J., Gilmour, P. and Witherspoon, P., 1985, A model for steady-fluid flow in random three-dimensional networks of disc-shaped fracture, *Water Resources Research*, 21,

- 1105-1115.
- Long, J., Remer, J., Wilson, C. and Witherspoon, P., 1982, Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures, *Water Resources Research*, 18, 645-658.
- Segall, P., 1984, Formation and growth of extensional fracture sets, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 95, 454-462.
- Skoczylas, F. and Henry, J., 1995, A study of the intrinsic permeability of granite to gas, *Int. Jour. Rock Mech. Mining Sci.*, 32, 171-179.
- Snow, D., 1968, Rock fracture spacings, openings and porosities, *Jour. Soil Mech. and Foundation Division, Proceedings, ASCE*, 94(SMI), 73-91.
- 서용석  
건설기술연구원 토목연구부  
411-712, 경기도 고양시 일산구 대화동 2311  
TEL : 031-910-0225  
FAX : 031-910-0111  
e-mail : ysseo@kict.re.kr

---

정교철  
안동대학교 자연대 지구환경과학과  
760-749 경북 안동시 송천동 388  
TEL : 054-820-5753  
FAX : 054-823-1627  
e-mail : jeong@andong.ac.kr  
Dept. of Earth and Environmental Sciences  
Andong National University  
760-749, Korea

채병근  
한국지질자원연구원 환경지질연구부  
305-350, 대전광역시 유성구 가정동 30  
TEL : 042-868-3052  
FAX : 042-861-9723  
e-mail : bgchae@kigam.re.kr

김만일  
Dept. of Environmental Design and Civil  
Engineering, Okayama University  
Okayama, 700-8530, Japan  
TEL : +81-86-251-8164  
FAX : +81-86-251-8257  
e-mail : manikim@hotmail.com