

## 토목기술자를 위한 암반공학(III)

장 보 안\*<sup>1</sup>  
조 인 기\*<sup>2</sup>

### 3. 암반조사 및 시험-암석의 실내시험

#### 3.1 서 언

암석의 시험은 암반과 관련된 구조물의 공사에 있어서 건설하고자 하는 지역의 암석·암반의 공학적 특성을 명확히 규명하여 구조물의 안정성과 시공법을 검토하고, 구조물의 형태나 크기, 배치 등을 결정하는데 필요한 정보를 얻기 위하여 실시하게 된다. 암석의 시험은 비중, 단위중량, 공극률, 흡수율 등의 물리적 특성을 규명하는 시험과 전단강도, 압축강도, 인장강도, 변형성(deformability), 탄성계수 등의 역학적 특성을 규명하는 시험으로 분류된다. 또한 현장에서 원위치 암반을 대상으로 실시하는 현장시험과 현장에서 채취한 시료에 대한 실내 시험으로 분류된다. 현장시험은 큰 부피의 암반에 대하여 실시되기 때문에 암반내에 분포하는 절리에 의한 영향과 현장에서의 암반 상태를 잘 반영할 수 있다는 장점이 있으나, 규모가 크기 때문에 많은 비용이 소요된다. 반면에 실내시험은 저렴한 비용으로 실시할 수 있으나 작은 시편에 대하여 시험이 실시되므로 현장의 상태를 정확하게 반영하지 못하고 전체 암반의 일부분만 대표한다는 단점이 있다.

암석의 실내시험은 물리적 특성 시험과 역학적 특성 시험의 두가지 형태로 이루어지며,

대부분의 경우 시추 조사시 얻어지는 코아를 대상으로 실시되나 부분적으로 노두시료나 발파된 암편을 대상으로 이루어지기도 한다. 현재 대부분의 토목 및 건축현장에서 시추조사시 채취된 코아에 대하여 암석의 물리적·역학적 특성 시험을 외부에 의뢰하여 자료를 얻고 있으나, 시험의 방법이나 과정, 시료의 상태에 대한 정보 및 각각의 시험에 필요한 시료의 양 등을 정확히 파악하지 못하여 시험이 정확하게 이루어지지 않는 경우가 발생하게 된다. 따라서 이 장에서는 암석의 물리적 특성 시험 및 역학적 특성시험에 대하여 시험방법, 소요되는 시료의 양, 결과의 해석 및 이용에 대하여 소개하고자 한다.

#### 3.2. 암석의 물리적 특성시험

암석의 물리적 특성에는 밀도, 비중, 공극률, 흡수율, 탄성과 속도, 쇼어 경도, Schmidt 경도 및 슬레이크 내구성(Slake durability) 등을 들 수 있으며 각각의 시험에 대한 사항은 다음과 같다.

##### 3.2.1. 비중(Specific Gravity), 공극률(Porosity), 흡수율(Absorption)

비중은 시료의 질량과 같은 부피의 물의 질량의 비율로써 정의된다. 만약 암석내에 공극

\*1 정희원, 강원대학교 자연과학대학 지구물리학과 부교수

\*2 자연과학대학 지구물리학과 조교수

이나 균열이 거의 분포하고 있지 않으면 암석의 부피를 정확히 측정할 수 있으므로 참된 비중을 구할 수 있다. 그러나 암석내에는 많은 공극이나 균열이 존재하고 있으므로 참된 비중을 구하기는 매우 어렵다. 따라서 일반적으로 견보기 부피에 의하여 얻어진 비중을 구하는 것이 통상적이다.

공극률은 시료 전체의 부피에 대한 공극 부피의 비율로 일반적으로 %로 표시한다. 암석내의 공극은 다른 공극과 연결되어 물이나 공기가 유동될 수 있는 공극뿐만 아니라 다른 공극과 연결되지 않아서 물이나 공기가 유동되지 않는 공극도 존재하기 때문에 참된 공극률의 측정엔 거의 불가능하다. 따라서 공극률 측정시 시료의 표면과 연결된 공극의 부피만 측정되며, 이렇게 측정된 공극률을 유효 공극률이라 한다. 통상적으로 실시되는 암석의 공극률 측정은 유효 공극률의 측정에 해당한다.

흡수율은 암석내의 유효 공극률의 정도를 나타내는 물리적 특성으로 암석 시료가 흡수할 수 있는 최대의 물의 질량과 시료의 질량의 비로써 정의되며 %로 표시한다.

- 1) 시료: 50g 이상의 임의의 형태를 가진 암석 10덩어리.
- 2) 방법: 진공 챔버(chamber)에 물을 1/2 정도 채운 후 시료를 물속에 넣고 진공 펌프를 이용하여 6torr 이하의 기압으로 1시간을 유지하여 시료 내의 공극이나 균열을 물로 포화시킨다. 이 시료에 대하여 수중중량( $M_{sub}$ )을 측정한 후 시료를 꺼내어 표면의 물을 축축한 수건으로 닦은 후 저울에서 물로 포화된 시료의 중량( $M_{sat}$ )을 측정한다. 시료를 105°C의 오븐에서 12시간 이상 완전 건조시킨 후 시료의 건조중량( $M_{dry}$ )을 측정한다. 중량 측정은 0.1g까지 측정한다. 측정된 시료의 중량을 이용하여 비중, 공극률 및 흡수율을 다음의 식으로 계산한다.

$$\text{비중} = \frac{M_{dry}}{M_{sat} - M_{sub}}$$

$$\text{공극률} = \frac{M_{sat} - M_{dry}}{M_{sat} - M_{sub}}$$

$$\text{흡수율} = \frac{M_{sat} - M_{dry}}{M_{dry}} \times 100$$

경암의 흡수율은 수 % 정도이며 치밀한 암석에서는 1% 미만인 경우가 많다. 암석이 풍화되면 흡수율은 증가하여 연암이나 풍화암에서는 수 %부터 수십 %에 이르기도 한다. 흡수율과 일축압축강도는 그림 1과 같이 비교적 좋은 관계를 보인다. 일반적으로 흡수율이 5% 이상이면 강도는 낮고 10% 이상이 되면 강도는 극단적으로 낮다.

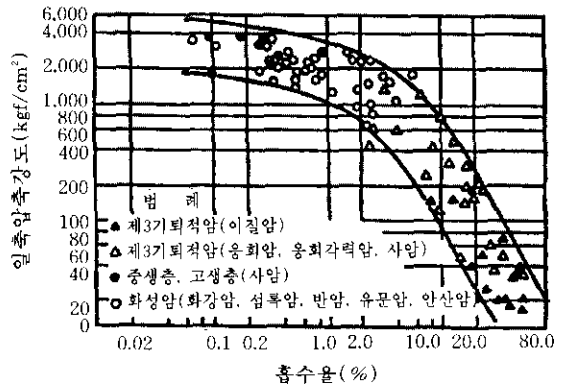


그림 1. 흡수율과 일축압축강도와의 관계

### 3.2.2. 밀도 (Bulk Density)

밀도는 단위 체적당 질량으로 정의된다. 암석내의 공극이 물로 포화된 상태이면 포화밀도라하고 공극이 완전히 건조된 상태인 경우에는 건조밀도라 한다. 통상적인 암석의 물성시험에서는 건조밀도가 주로 측정되며 단위 중량이라고도 한다.

- 1) 시료: 부피를 정확하게 계산해야 하므로 일반적으로 잘 시추된 코어를 이용한다.
- 2) 방법: 시추 코어를 일정한 길이로 절단한 후 양 단면을 정밀하게 연마한다. 시료를

진공 챔버에 넣고 비중 측정 시와 동일하게 강제 수침시킨다. 표면의 물을 축축한 수건으로 닦은 후 포화 중량( $M_{sat}$ )을 측정한다. 시료를 105°C의 오븐에서 12시간 이상 완전히 건조시킨 후 코아의 길이 및 직경을 0.01mm 까지 정밀하게 측정하여 부피( $V$ )를 계산한다. 시료의 건조 중량( $M_{dry}$ )을 측정한다.

$$\text{포화밀도} = \frac{M_{sat}}{V}$$

$$\text{건조밀도} = \frac{M_{dry}}{V}$$

밀도에 있어서 구성 광물의 성분이 가장 중요한 요소이지만 내부의 공극의 양 또한 밀도에 영향을 미친다. 밀도는 암석의 물리적 특성을 알기 위한 중요한 기본 물성이며 건설공사에 있어서도 빠뜨릴 수 없는 정보이다. 또한 지하의 수직응력은  $\sigma_v = \rho gh$  ( $\rho$ :밀도,  $g$ :중력가속도,  $h$ :깊이)로 계산되므로 지반의 응력 계산에 중요한 지표가 된다. 밀도는 암석의 압축강도와 상당한 상관관계를 보여, 동일암종의 암석에서 밀도가 낮으면 암석내에 미세균열이나 공극이 많이 내재되어 있거나 혹은 암석의 풍화가 상당히 진전되었음을 의미하고, 이러한 암석의 압축강도는 상당히 낮은 값을 보인다. 퇴적암은 일반적으로 낮은 밀도를 보이나 변성작용을 받았거나 고결이 잘된 퇴적암의 경우 상당히 높은 밀도 값을 보이며, 이러한 암석은 상당히 치밀하며 강도 또한 매우 높은 값을 보인다.

### 3.2.3. 탄성파 속도(Ultrasonic Velocity)

시료에 P파나 S파를 통과시켜 속도를 측정하는 시험으로, 탄성파 속도는 암석의 탄성계수, 전단상수, 포아송비 및 밀도에 따라 결정된다. 그러나 탄성파 속도는 암석내의 빈 공간에 따라 상당히 달라지므로, 동일암종에서의 탄성파 속도는 암석의 풍화 정도나 균열의 발달 정도를 지시할 수 있다.

1) 시료:일반적으로 시추된 코아 시료를 이

용한다.

2) 방법:시료를 일정한 길이로 절단한 후 양 단면을 정밀하게 연마한다. 시료를 105°C의 오븐에서 12시간 이상 완전 건조시킨 후 시료의 길이를 0.01mm 까지 정확히 측정한다( $L$ :mm). 시료를 넣지 않고 수신자 및 발진자(piezoelectric transducer)만 접촉시켜 탄성파의 도달시간을 측정하여 초기 지연 시간을 (Initial Delay Time: $T_1$ ,  $\mu\text{sec}$ ) 결정한 후, 수신자와 발진자 사이에 시료를 넣고 시료의 측 방향으로 P파 및 S파의 도달시간을 측정한다 ( $T_2$ ,  $\mu\text{sec}$ ). 탄성파가 시료를 통과하는데 걸리는 시간,  $T = T_2 - T_1$  이다.

$$\text{탄성파 속도} = \frac{L}{T} \times 1000 \text{ (mm}/\mu\text{sec)} : (\text{m}/\text{sec})$$

탄성파 속도는 암석의 풍화 정도, 균열의 발달 정도를 나타내 주며, 암석의 rippability를 추정할 수 있다. 밀도를 알고 있을 경우 암석의 탄성계수 및 포아송 비를 다음과 같이 구할 수 있으나, 탄성파 속도에서 구한 탄성계수는 일축압축시험에 의해 구한 탄성계수보다 큰 값을 보이는 것이 일반적이고 동탄성계수라고 한다. 만약 종파(P 파)와 횡파(S 파)의 속도를  $V_p$ 와  $V_s$ 라 할 때 영률  $E$ 와 전단상수  $G$ 는 다음과 같다.

$$E = V_p^2 \rho \quad G = V_s^2 \rho$$

단  $\rho$ =밀도이다. 전단상수  $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$  이므로

포아송 비  $\nu$ 는

$$\nu = \frac{1}{2} \left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1 \text{로 구할 수 있다.}$$

### 3.2.4. Shore 경도 (Shore Hardness)

금강석의 무게 4g의 추를 25cm높이에서 평탄한 면에 자유낙하시켜 튀어 올라오는 높이로 경도를 나타내는 반발경도시험이다. 시험기의 눈금 단위는 0~120이며, 일반적으로 한 시료에 대한 시험은 20회 이상 실시하여 최대값 및

최소값을 버린 후 평균값으로 경도를 표시한다.

- 1) 시료: 일반적으로 코아가 이용되며 길이가 3cm 이상이 필요하다.
- 2) 방법: 코아의 길이가 직경의 1/2 정도되게 절단한 후 양 단면을 편평도 < 0.25mm 되게 연마한다. Shore 경도계에 설치한 후 측정 위치를 옮기며 20회 이상 측정한다.

Shore 경도는 일축압축강도와 상당히 좋은 관계를 보여주며, Szlavín(1974)에 의한 실험적인 관계식은 다음과 같다.

$$C_0 = 3.54(H - 12)$$

단, 단위는 MPa이며 (1MPa = 10kg/cm<sup>2</sup>) 이며, C<sub>0</sub>는 일축압축강도이고 H는 shore 경도이다. Deere and Miller(1966)은 shore 경도를 이용하여 일축압축강도의 구하는 관계를 구하였고 그림 2와 같다.

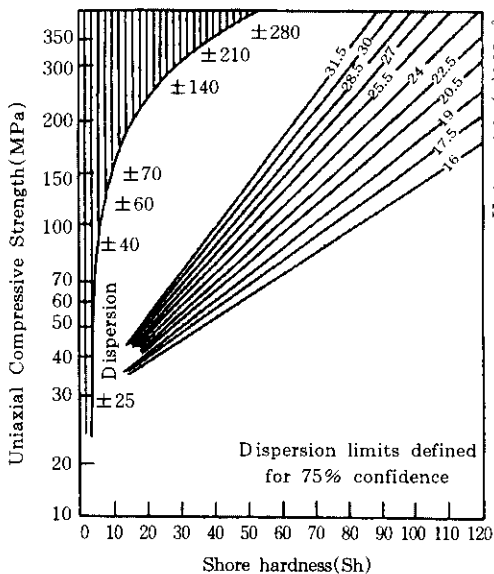


그림 2. Shore경도와 일축압축강도와의 관계

### 3.2.5. Schmidt 경도

Schmidt hammer는 콘크리트의 강도를 측정하기 위하여 개발되었으나 암석의 경도 측정에도 이용되고 있다.

- 1) 시료: 시험면이 편평하고 시험면 아래 균열이 없는 시료.
- 2) 방법: 충격에너지가 0.74Nm인 L type의 hammer를 이용하며, 시험면과 Schmidt hammer를 직각으로 20회 이상을 측정한 후 평균값을 취한다.

Schmidt 경도는 암석의 일축압축강도와 상당히 좋은 관계를 보여주어 일축압축시험이 불가능한 시료에 대해서는 일축압축강도의 추정이 가능하다 (그림 3). 그러나 그림 3에서 보여지듯이 오차가 매우 크므로 shore 경도와 같이 개략적인 범위만 추정이 가능하고, 또한 매우 연약하거나 매우 강한 암석에서는 잘 맞지 않는다.

대부분의 암석에 대한 강도의 평균 분산(MPa)

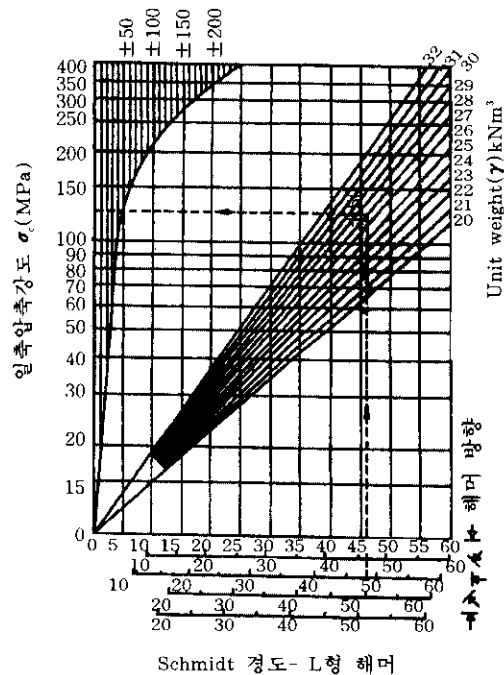


그림 3. Schmidt 경도와 일축압축강도와의 관계

### 3.2.6. 슬레이크 내구성 (Slake Durability)

점토질 퇴적암이나 화산암이 지표면에 노출 되면 암석의 질이 급격히 저하되는 경우가 종종 발생하며, 변질은 대부분의 경우 노출된 표면에 국한되어 수년에서 수십년에 걸쳐서 발생한다. Franklin and Chandra(1972)에 의하여 제안된 슬레이크 내구성은 이러한 암석의 변질에 대한 내구성의 상대적 등급을 나타내준다.

- 1) 시료: 40-60g의 구 형태의 시료 약 10 덩어리.
- 2) 방법: 40-60g의 구 형태의 시료 약 10 덩어리를 준비한 후 105°C의 오븐에서 2-6시간 동안 건조시킨다. 시료의 무게를 0.1g 까지 측정 한 후(A), 슬레이크 내구성 시험기의(그림 4) 드럼에 시료를 넣은 후 10분 동안 200회전을 시킨다. 시료를 105°C의 오븐에서 2-6시간 동안 건조시킨 후, 다시 드럼에 시료를 넣어 10분 동안 200회전을 시킨다. 시료를 완전 건조시킨 후 시료의 무게를 0.1g 까지 측정한다 (B)

Slake 내구성 지수,  $I_{dz} = B/A \times 100\%$

Franklin and Chandra(1972)는 200회전 후의 건조중량의 비를 계산하였으나 Gamble (1971)은 2회의 200회전 후의 건조중량 비를

슬레이크 내구성 지수로 사용할 것을 제안하였고, ISRM에서는 Gamble(1971)의 제안을 채택하였다. 슬레이크 내구성 지수는 매우 다양하여 암석에 따라 0-100%의 범위를 보이며, 암석의 지질학적인 연대와는 뚜렷한 관계를 보이지 않으나 밀도와는 비례의 관계를, 자연 함수비와는 반비례의 관계를 보인다. 몇 종의 암석에 대한 반복횟수에 따른 슬레이크 내구성 지수는 그림 5와 같다.

### 3.3. 암석의 역학적 특성 시험

암석의 역학적 특성 시험은 암석의 강도 시험으로 인장파괴를 일으키는 점재하시험, Braziliain test와 전단파괴를 일으키는 일축압축강도 시험, 삼축압축강도 시험 및 직접전단 시험 등이 있다. 또한 산사면의 안정이나 터널에서의 블록의 이동 등을 파악하기 위해서 절리면에 대한 전단시험도 있다. 각각의 시험에 대한 기술은 아래와 같다.

#### 3.3.1. 점재하시험 (Point Load Test)

점재하시험은 시료에 점 상의 압축응력을 가하여 인장파괴시키는 시험으로, 시료의 성형이 필요없고, 시험기구가 간단하여 현장에서 실시할 수 있는 시험이다. 점재하 시험에 의하

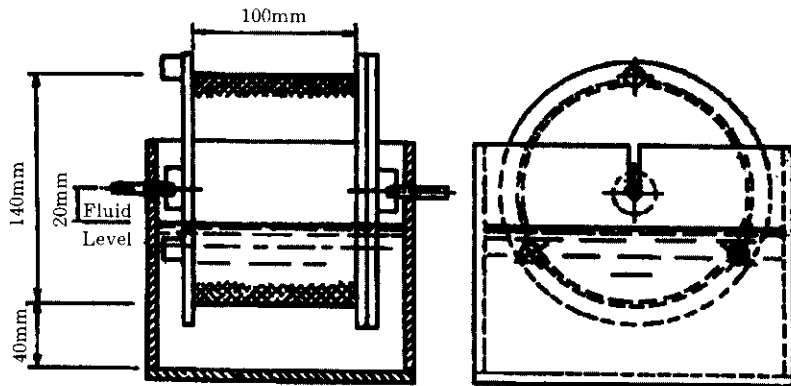


그림 4. Slake 내구성 시험기 모식도

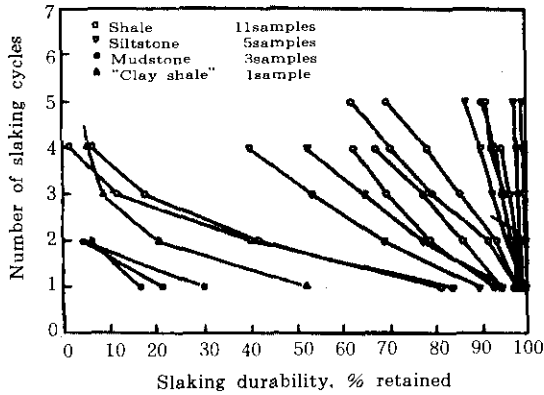


그림 5. Slaking 횟수에 따른 slaking 내구성의 변화

여 측정된 점재하 강도는 일축압축강도와 좋은 상관관계를 보인다.

- 1) 시료: 일반적으로 NX 코아시료가 적당하나, BX 코아시료나 임의의 형태의 덩어리 시료도 가능하다 (그림 6).
- 2) 방법: 코아시료의 경우 직경을, 다른 시료

의 경우 점간의 거리를 측정 한 후 ( $D$ :cm) 점재하 시험기에 시료를 설치하여 하중을 가할 때 파괴시의 하중을 측정한다 ( $P$ :kg)

$$\text{점재하 강도 } I_s = P / D^2(\text{kg/cm}^2)$$

점재하 강도는 동일한 시료의 경우에도 상당한 편차를 보이기 때문에 10회 정도의 시험을 실시하여 평균값을 취하도록 한다. 점재하 강도는 일축압축강도와 상관관계를 보이고 있는데, 직경 50mm의 코아에서 측정 한 점재하 강도는 ( $I_{s(50)}$ ) 일축압축강도와 ( $q_u$ )  $q_u = 16 \sim 24 I_{s(50)}$ 의 상관관계를 보이지만, 대부분의 경우  $q_u = 22 I_{s(50)}$  (Brook, 1971) 혹은  $q_u = 24 I_{s(50)}$  (Goodman, 1989; Bell, 1992)(그림 7)의 관계식을 제시하고 있다. 만약 코아 시료의 직경이 50 mm 보다 크거나 작으면 위의 식을 이용하지 못하며 이 때에는 Broch and Franklin (1972)이 제시한 크기 효과 보정 그림을 이용하여 수정된 점재하 강도를 구하여 사용한다 (그림 8)

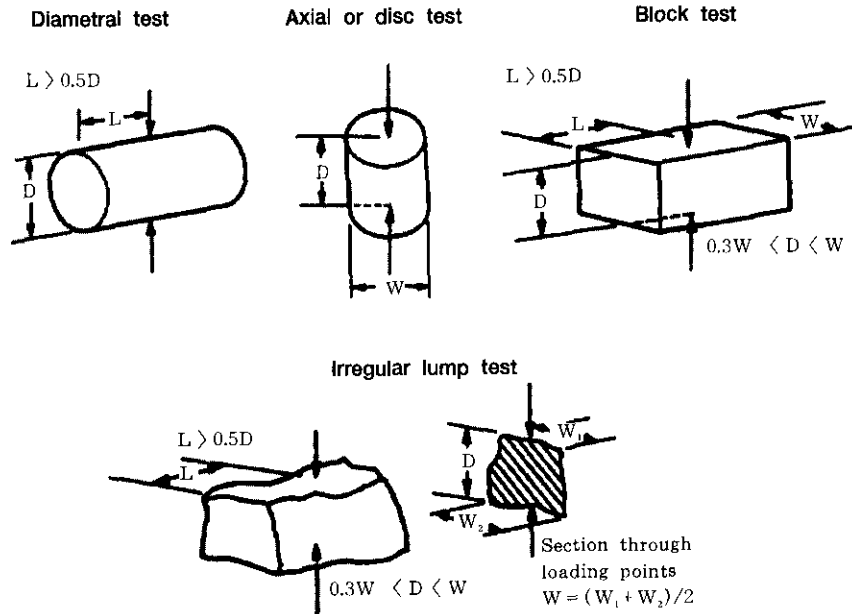


그림 6. 점재하시험의 시료형태 및 크기 조건

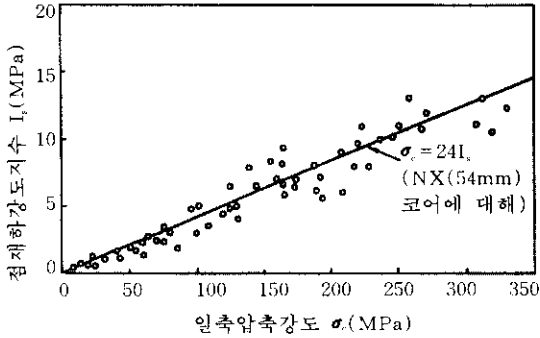


그림 7. 점재하강도지수와 일축압축강도와의 관계

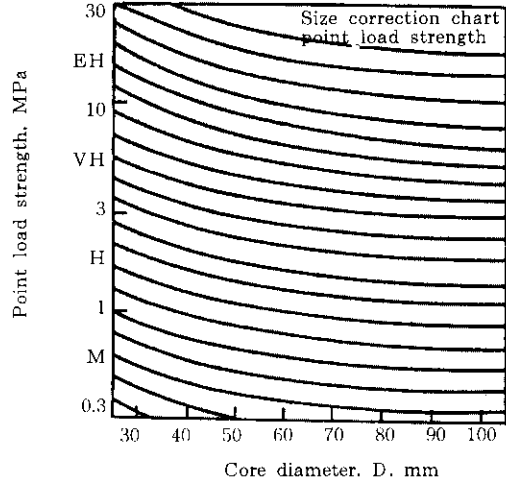


그림 8. 시료의 크기에 따른 점재하강도의 보정표

### 3.3.2. 인장시험 (Tension Test)

암석의 인장시험에는 직접 인장시험(direct tension test)과 간접 인장시험(Brazilian test)이 있다. 직접인장시험은 시료의 성형 및 시험이 어렵기 때문에 대부분의 경우 간접인장시험으로 실시된다. Brazilian test는 원판형의 암석 시료에 압축응력을 가할 때 유발되는 인장응력에 의해 시료를 인장 파괴시키는 시험으로, 이 시험에서 측정된 강도를 인장강도로 사용한다.

- 1) 시료: 일반적으로 NX 코아(직경 52mm)를 원칙으로하나 BX 코아도 가능하다. NX 코아 시료의 경우 길이가 3cm 이상인 코아시료가 필요하다.
- 2) 방법: 코아의 길이가 직경의 1/2 정도 되게 절단한 후 단면을 편평도 < 0.25mm, 직각도 < 0.25° 되게 연마한다. 105°C의 오븐에서 12시간 이상 완전 건조시킨 다음, 코아의 직경(D:cm)과 길이(t:cm)를 0.01mm 까지 측정한다. 코아의 원주를 따라 masking tape로 한바퀴 감은 후 Brazilian Test 시험기에(그림 9) 설치하여 하중 속도 20kg/sec로 하중을 가할 때 파괴시의 하중을 측정한다 (P:kg)

$$\text{인장강도} = 0.636P/Dt \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

Brazilian test시 시료내에는 하중이 가해지는 방향과 평행하게  $3 \times \frac{0.636P}{Dt}$ 의 압축응력이 발생하고 하중축과 직각방향으로  $\frac{0.636P}{Dt}$ 의 인장응력이 발생한다(그림 10). 따라서 압축강도가 인장강도의 3배 이하인 시료에서는 Brazilian test가 불가능하지만, 이론적인 압축강도는 인장강도의 8배이고, 실험에 의하면 압축강도는 인장강도의 10배 이상이다. Mellor and Hawkes (1971)는 취성(brittle)인 암석에서의 Brazilian test는 매우 유용하지만 그렇지 않은 암종에서는 틀린 결과가 나올수 있다고 보고한 바 있고, Fairhurst(1964)는 압축강도/인장강도의 비가 낮은 암석에서는 인장강도가 낮게 측정된다고 보고하였다.

그림 9, 그림 10

### 3.3.3. 일축압축시험 (Uniaxial compression Test)

암석의 역학 시험중 가장 대표적인 시험으로 시료에 한 방향의 압축응력을 가하여 암석

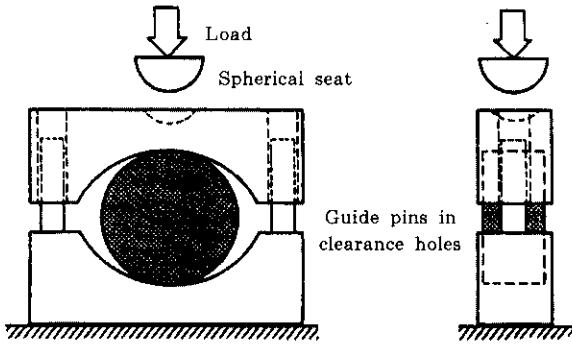


그림 9. Brazilian 시험기 모식도

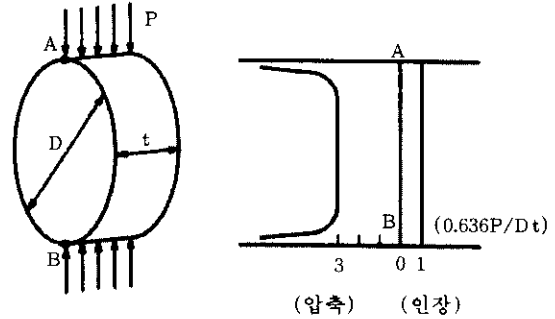


그림 10. Brazilian 시험 시료내의 응력분포 상태

이 파괴될 때의 강도를 측정하는 시험이며 시료가 지탱할 수 있는 최대 하중을 나타낸다.

시료에 암석의 변형을 측정할 수 있는 변형률 게이지를 부착하여 하중에 따른 변형률을 측정하면 탄성계수 (Young' modulus, E) 및 포아송 비 (Poisson's ratio,  $\nu$ )를 구할 수 있다.

- 1) 시료: 일반적으로 NX 코아(직경 52 mm)를 원칙으로 하나 BX 코아도 가능하다. NX 코아 시료의 경우 길이가 13cm 이상의 코아시료가 필요하다.
- 2) 방법: 코아의 길이를 직경의 2.5배 이상 되게 절단한 후 표면연삭기를 이용하여 양 단면을 편평도 < 0.02mm, 직각도 < 0.001 라디안 되게 연마한다. 105°C의 오븐에서 12시간 이상 완전 건조시킨 후, 직경을 0.01mm 까지 정밀하게 측정한다 (D:cm). 시료에 층리나 편리가 발달한 경우 층리나 편리의 경사를 기재한다. 축 방향의 중간부분에 축 방향 및 횡 방향으로 변형률 게이지를 부착하여 일축압축 시험기에서 5kg/cm<sup>2</sup>의 하중속도로 하중을 가한다. 하중에 따른 축방향의 변형률 및 횡방향의 변형률을 기록하며 파괴될 때의 파괴하중을 기록한다 (P:kg).

응력-변형률 곡선을 그려서 탄성계수 및 포아송 비를, 파괴하중에서 일축압축강도를 다음의 방법으로 계산한다.

$$\begin{aligned} \text{탄성계수} &= \text{응력} - \text{축 변형률 곡선의 기울기} \\ \text{포아송 비} &= (\text{응력} - \text{축 변형률 곡선의 기울기}) / (\text{응력} - \text{횡변형률 곡선의 기울기}) \end{aligned}$$

$$\text{일축압축강도} = 4P / \pi D^2 (\text{kg/cm}^2)$$

시료의 직경에 대한 길이의 비는 ISRM (International Society for Rock Mechanics)에서 2.5-3으로 규정하고 있다. 이 비의 변화에 따른 일축압축강도의 변화는 그림 11에서 보여지며, 비가 2.5 이하가 되면 강도가 증가한다.

암석에 대하여 시행된 일축압축시험결과 얻어진 응력-변형률 곡선은 일반적으로 직선의 관계를 보이지 아니한다. 따라서 응력-축변형률 곡선의 기울기로 정의되는 탄성계수는 구하는 방법 및 지점에 따라 차이가 난다. 탄성계수를 구하는 방법은 아래와 같이 3가지가 있으나 주로 접선 탄성계수를 이용하여 구한다 (그림 12).

- i) 접선탄성계수 (tangent modulus) : 응력 -



축변형률 곡선에서 파괴응력의 50% 지점의 접선의 기울기.

ii) 평균탄성계수 (average modulus) : 응력-축변형률 곡선에서 직선 부분의 평균 기울기.

iii) 할선탄성계수 (secant modulus) : 응력-축변형률 곡선에서 원점과 파괴응력의 50% 지점간의 기울기.

일축압축강도는 동일암종의 암석인 경우에도 시료의 상태에 따라 매우 큰 차이를 보인다. 일축압축 강도에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 절리로, 시료내에 절리가 내재되어 있으면 강도가 현저히 저하한다.

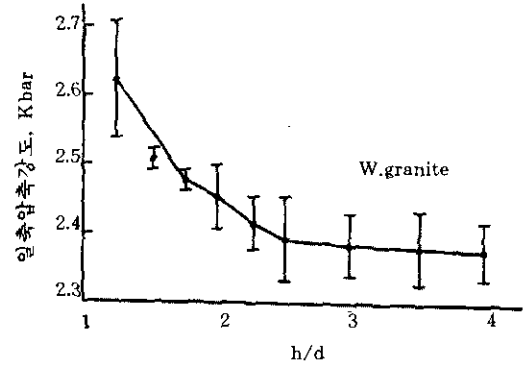


그림 11. 미국 Westerly 화강암 시료에서 측정된(시료길이, h)/(직경, d)의 비와 일축압축강도의 관계

### 3.3.4. 삼축압축시험 (Triaxial Compression Test)

원주압 (confining pressure)를 가한 상태에서 축하중을 가하여 파괴를 발생시키는 시험으로 원주압이 증가하면 축하중이 매우 크게 증가한다. 원주압을 달리한 2회~5회의 시험을 실시하여 Mohr Circle을 그린 후 Mohr-Coulomb 파괴포락선을 그리면 암석의 내부마찰각  $\phi$ 와 점착력  $c$ 를 구할 수 있다.

- 1) 시료: 일반적으로 NX 코아(직경 52 mm)를 원칙으로 하나 BX 코아도 가능하다. NX 코아 시료의 경우 길이가 10cm 이상인 2~5개의 코아시료가 필요하다.
- 2) 방법: 시료를 일축압축시험의 경우와 동일하게 준비한다. 시료를 삼축 셀에 고정 한 후 유압유가 시료내에 스며들지 않도록 밀봉한 후 원하는 원주압까지 원주압

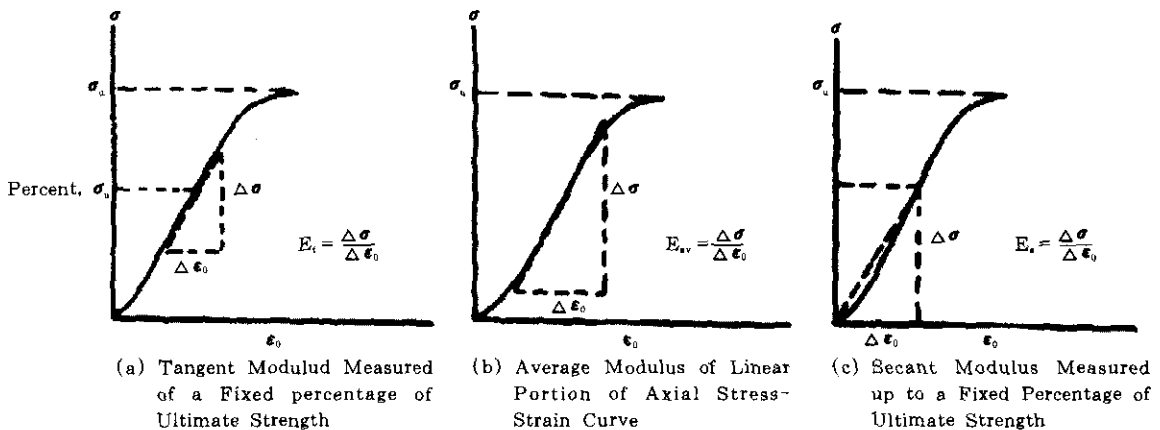


그림 12. 축응력-변형률 곡선에서 탄성계수를 구하는 방법 (a) 접선탄성계수, (b) 평균탄성계수, (c) 할선탄성계수

과 축하중을 동시에 가한다. 원주압을 고정시킨 후 5kg/cm<sup>2</sup> 의 하중속도로 축하중을 가하여 시료가 파괴될 때의 파괴하중을 기록한다 (P:kg).

$$\text{삼축압축강도} = 4P/3.14D^2 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

서로 다른 원주압하에서 실시된 삼축압축시험, 인장시험 및 일축압축시험을 Mohr Circle로 그린 후, 모든 Mohr Circle에 가장 잘 맞는 공동접선을 그려서 Mohr-Coulomb 파괴포락선을 구하면 암석의 점착력 (cohesion)  $c$ 와 내부마찰각 (angle of internal friction)  $\phi$ 를 구할 수 있다. 점착력  $c$ 는 수직축인 전단응력축의 절편에 해당하고 내부마찰각  $\phi$ 를 구할 수 있다. 점착력  $c$ 는 공동접선의 기울기 각이다(그림 13).

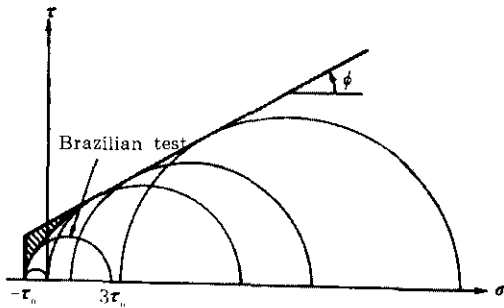


그림 13. 삼축압축시험에서 구한 Mohr-Coulomb 파괴포락선

### 3.3.5. 직접전단 시험 (Direct Shear Test)

시료에 수직응력을 가하면서 전단응력을 가하여 암석을 파괴하여 수직응력에 따른 전단강도를 측정하는 시험이다. 수직응력을 변화시키며 직접전단시험을 5회 이상 실시한 후 전단응력에 대한 수직응력을 도시하면 암석의 내부마찰각  $\phi$ 와 점착력  $c$ 를 구할 수 있다.

- 1) 시료:일반적으로 NX 코아(직경 52 mm)를 원칙으로 하나 BX 코아도 가능하다.

NX 코아 시료의 경우 길이가 8cm 이상인 5개 이상의 코아시료가 필요하다.

- 2) 방법:시료의 길이를 약 8cm 되게 절단한 후 일축압축시험의 경우와 동일하게 시료를 준비한다. 전단면의 면적(A)을 측정 후 시료를 직접전단시험기에 고정하여 수직응력을 가한다. 직접전단 시험기를 압축시험기에 설치한 후 전단응력을 가하여 파괴시의 전단하중을 기록한다 (P:kg). 수직응력을 증가시켜 위의 과정을 반복한다

$$\text{전단강도} = P/A \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

직접전단시험을 실시하면 일정한 수직응력 하에서의 전단응력, 전단변위 및 수직응력에 대한 측정자료를 얻게된다. 전단변위에 따른 전단응력을 도시하면 그림 14와 같으며 전단응력은 최대 값을 보인 후 일정한 값을 유지하게 된다. 이 때 최대 전단응력을 최대 전단강도라 하며 일정한 전단응력을 잔여 전단강도라 한다. 수직응력을 증가시켜 전단시험을 다시 실시하면 최대전단강도 및 잔여전단강도가 증가하게 되고, 수직응력을 달리하여 5회 이상 실시된 직접전단시험 결과를 이용하여 세로축을 전단응력으로, 가로축을 수직응력으로 한 후 i) 수직응력-최대전단강도의 관계와 ii) 수직응력-잔여전단강도의 관계를 도시하면 그림 15와 같은 2개의 곡선을 얻게된다. 최대전단강도를 이용한 곡선과 잔여전단강도를 이용한 곡선에서는 점착력을 구할 수 있다.

### 3.3.6. 절리면 전단시험 (Direct Shear Test for Joint)

절리면은 거칠기에 따라 마찰각이 다르고, 절리면의 마찰각은 산사면의 안정이나 터널의 낙반 해석에 중요한 요소이다. 절리면 전단시험은 절리면에 일정한 수직응력을 가한 후 전단응력을 가하여 절리를 따라 미끄러지게 하는 시험이다.

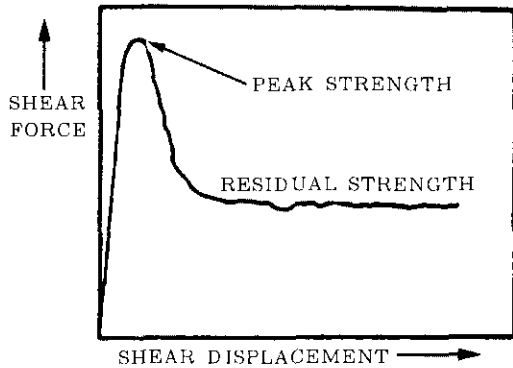


그림 14. 직접전단시험시 전단변위에 따른 전단력의 형태

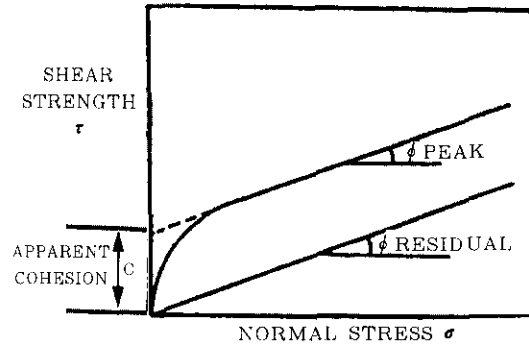


그림 15. 직접전단시험에서 수직응력과 전단응력의 관계

- 1) 시료: 절리면이 포함된 암석으로 코아형 태나 사각형 형태의 시료.
- 2) 방법: 임의의 형태의 시료의 경우 절리면이 사각형이 되도록 절단하고 코아 시료의 경우 절리면이 전단상자의 크기에 맞게 절단한 후, 절리면의 면적을 측정한다. 하반부를 전단상자에 설치한 후 시멘트로 고정한다. 상반부를 하반부와 절리면이 일치되게 놓은 후 전단상자에 설치하고 모래를 약 2cm 두께로 깎는다. 상반부의 전단상자에 시멘트를 부어 시료를 고정한다. 모래를 제거하고 직접전단시험기에 시료를 설치하여 일정한 수직응력을 가한다. 전단응력을 가하면서 변위에 따른 전단응력을 기록한다. 절리면을 원위치로 환원시킨 후 수직응력을 증가시킨다. 전단응력을 가하면서 변위에 따른 전단응력을 기록한다.

절리면의 전단시험 결과는 직접전단시험의 결과와 동일하며 최대전단강도 및 잔여전단강도를 이용한 전단응력 - 수직응력을 그려서 점착력과  $(c)$  마찰각을  $(\phi)$  측정한다.

## 참 고 문 헌

1. 윤지선, (1991), 암석·암반의 조사와 시험, 구미서관, p. 671.
2. Bell, F.G., (1980), Engineering geology and geotechnics, Newnes-Butterworths, p. 497.
3. Bell, F.G., (1992), Engineering in Rock Masses, Butterworth Heinemann, p. 580.
4. Broch, E. and Franklin, J.A., (1972), "The point load strength test", Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 9, pp. 669-697.
5. Brooks, W.F., (1971), "A method overcoming both shape and size effects in point load testing", Proc. Conf. Rock Eng., Newcastle University, Vol. I, pp. 53-70.
6. Fairhurst, C., (1964) "On the validity of the Brazilian test for brittle materials", Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 1., pp. 535-546.
7. Franklin, J.A. and Chandra, R., (1972) "The slake durability test" Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 9, pp. 325-341.
8. Franklin J.A. and Dusseault, M.B., (1989), Rock engineering, McGraw-Hill Publishing Company, P. 600.
9. Gamble, J.C., (1971), Durability-plasticity

- classification of shales and other argillaceous rocks, Ph.D. thesis, University of Illinois.
10. Goodman, R.E., (1989). Introduction to rock mechanics, John Wiley & Sons, p. 562.
  11. Hoek, E. and Brown, J.W., (1981). Rock slope engineering, The Institution of Mining and Metallurgy, London, p. 358.
  12. Hudson, J.A., (1993). Comprehensive rock engineering, Vol. 3-1, Pergamon Press, p. 496.
  13. ISRM, (1981). Rock characterization testing & monitoring (ISRM suggested method), E.T. Brown ed., Pergamon Press, p. 211.
  14. Mellor, M. and Hawkes, I., (1971). "Measurement of tensile strength by diametral compression of discs and annuli", Eng. Geol., Vol. 5, 173-225.
  15. Szlavin, J., (1974). "Relationship between some physical properties of rock determined by laboratory tests", Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 11, pp. 57-66.
  16. Vutukuri, V.S., Lama, R.D. and Saluja, S.S., (1974). Handbook on mechanical properties of rocks, Vol. 1, Trans Tech Publications, p. 280.