

# 불연속성 암반의 탄성계수와 불연속면 조사 인자간의 상관관계에 관한 연구

백 용 (한국건설기술연구원)

## 1. 서 론

현장에서 불연속성 암반의 특성을 평가하기 위하여 불연속면에 대한 자료를 수집하게 된다. 일반적으로 불연속면의 길이, 간격, 밀도 등을 측정하여 불연속면의 자료를 분석하게 되고 불연속면이 존재하지 않는 부분을 채취하여 실내실험에 의하여 강도특성이나 변형특성을 밝히는 경우가 많다. 야외에서 불연속면 조사기법의 대표적인 방법으로는 Priest가 제안한 축선법이 널리 이용되고 있다(Priest and Hudson, 1983). 또한, 최근에는 원형의 샘플망을 통하여 불연속면의 길이나 밀도를 추적하는 새로운 통계학적 방법이 제안되고 있다(Zhang and Einstein, 1998; Mauldon, 1998). 역학적인 관점에서는 불연속면이 포함된 암반을 간단한 모델로 취급하고 불연속면의 기하학적인 형태에 따른 해석을 행하는 연구가 이루어지고 있다(Zhang, 1989; Mauge and Kachanov, 1994; Dershowitz and Einstein, 1988).

그러나, 이런 많은 연구들에도 불구하고 불연속면의 조사 인자들과 불연속성 암반의 탄성계수와의 관계에 대하여는 간단히 해답을 내리지 못하는 실정이다. 본 연구에서는 현장에서 불연속면을 조사할 때 정성적인 평가를 위해 조사하는 기본적인 인자들, 즉 불연속면의 길이, 밀도 등의 상관관계와 암반의 탄성계수와 선형의 관계를 가지는 새로운 인자를 제안하는 것을 목적이다.

## 2. 연구방법

### 2.1 균질화 이론에 근거한 불연속성 암반의 탄성계수 선정 방법

균질화법은 섭동법(singular perturbation)을 기초로 한 다변수 전개법(multi-scale expansion)을 이용한 수학적 전개법에 의해 미시적인 주기 구조를 가지는 물체의 거시적 규모의 성질을 평가 할 수 있는 방법이다(Guedes and Kikuchi, 1990). 이 이론을 암반역학에 적용을 하면 다음과 같이 생각할 수 있다. 암반은 암석과 불연속면의 두 부분으로 구성되어 있다. 그래서, 이 암반을 암석과 불연속면의 두 가지의 역학적 성질이 반복하여 나타나

는 주기적인 구조를 가진 물체로 가정하여 생각한다. 외부로부터 일정한 하중(  $t_i^0$  )을 받는 암반(  $\Omega$  )은 어느 일정한 부분을 확대해 볼 때 불연속면과 기질(matrix) 부분이 미시적으로 반복되어 나타나는 주기적인 성질을 가진 물체로 생각할 수 있다(그림 1). 결국, 이들 미시적 구조(  $Y$  )의 개개의 탄성계수를 구하고 이들을 확대 해석함으로써 전체 암반의 거시적 탄성계수를 구할 수 있다. 실제의 거시적 규모의 암반크기에 적용을 하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\int_{\Omega} E_{ijkl} \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \frac{\partial v_l}{\partial x_j} d\Omega = \int_{\Omega} t_i^0 v_i ds_i + \int_{\Omega} f_i v_i d\Omega \quad \text{식1}$$

여기서, 식1의 좌변의 항은 암반 내부가 작용하는 일에 해당되며 우변의 항은 암반 외부에서 가해지는 일에 해당된다. 암반을 암석과 불연속면으로 반복 구성된 물체로 생각할 경우 암석과 불연속면을 두 개의 변수로 생각하여 반복 구조를 가지는 2변수의 형태로 고치고  $u$  와  $v$  에 대하여 점진전개를 행하면 다음과 같은 식으로 표현이 가능하게 된다.

$$E_{ijkl}^H = \frac{1}{|Y|} \int_Y \left( E_{ijkl}(\mathbf{y}) - E_{ijpq}(\mathbf{y}) \frac{\partial \chi_p^H(\mathbf{y})}{\partial y_q} \right) dY \quad \text{식2}$$

여기서  $E_{ijkl}$ 는 암석의 탄성계수에 해당이 되며  $\chi_p^H$ 은 암석과 불연속면으로 구성된 기본단위구조에 있어서의 특성함수가 된다. 이 특성함수의 값은 다음의 식3에 의하여 구할 수 있다.

$$\int_Y E_{ijpq}(\mathbf{y}) \frac{\partial \chi_p^H(\mathbf{y})}{\partial y_q} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} dY = \int_Y E_{ijkl}(\mathbf{y}) \frac{\partial v_i}{\partial x_j} dY \quad \text{식3}$$

$$\text{for } \forall v_i \in H_0^1(Y)$$

이렇게 하여 식2를 통하여 불연속면이 포함된 암반의 탄성계수 값을 구한다.

## 2.2 기본단위구조 모델의 작성

불연속면의 분포가 난수성을 가진다고 가정하고 불연속면을 난수발생법에 의거하여 난수를 발생시킨다. 본 연구에서 사용한 방법은 난수발생법 중 승산형합동법을 이용하였다. 승산형합동법에 의하여 발생된 난수는 불연속면의 중심좌표로 지정이 된다. 즉, 불연속면의 중심을  $x$  좌표와  $y$  좌표로 가정하고 발생시킨 난수에 대응을 하게 한다. 이에 따라 발생된 난수들은 불연속면의 위치에 해당이 되는 것을 의미하게 된다. 불연속면의 위치가 결정이 되면 불연속면의 길이와 밀도를 설정하여 기본단위 구조모델을 작성한다. 이렇게 발생한 불연속면이 포함된 기본단위 구조모델은 그림 2와 같은 형태가 된다. 그림 2에서 보여주는 것과

같이 1요소를 1정사각형의 요소로 정하는 유한 요소 모델로 생각하고 불연속면은 아주 얇은 약층의 요소로 생각한다. 즉, 불연속면에 해당되는 부분은 255의 정수 형태의 디지털 자료(digital data)로 환산하고 암반의 기질부분에 해당되는 부분은 0의 정수로 취급하여 유한 요소 해석을 행한다. 작성한 모델에 있어서 불연속면 분포(이하 불연속면을 절리로 취급한다.)를 표시하는 지표로 그림 3과 같이 표현한다.

### 2.3 유한요소해석방법과 해석조건

기본단위구조모델에서 기질부의 탄성계수는  $2.6 \times 10^4 \text{MPa}$ 로 하고, 불연속면의 부분 즉 절리에 해당되는 요소는 1요소분의 두께만을 생각하였으며 탄성계수치를 0.1MPa로 하였다. 모델화한 기본단위구조의 화상 자료는 디지털 데이터로 취급하고 1화상 요소를 유한요소해석시 한개의 요소로 대응하도록 하였다. 이런 가정 하에서 모델화한 기본단위구조를 이용하여 균질화 탄성계수를 구하였다.

## 3. 실험결과

### 3.1 절리길이와 균질화탄성계수의 관계

기본단위구조를 이용하여 절리밀도를 일정하게 하고 절리의 길이를 변화시키면서 균질화 탄성계수의 변화 양상을 살펴보았다. 절리의 두께  $T=1$ , 절리밀도를  $V_f=0.1$ 의 일정한 값을 놓고 절리의 길이  $L$ 을 변화시켜 가면서  $y$ 방향의 탄성계수  $E_y$ 에 미치는 영향에 대하여 조사하였다(그림 4). 그 결과, 절리의 길이가 길어질수록 탄성계수가 낮게 되는 경향을 보여주고 있으며 이들의 관계를 식4과 같이 나타낼 수 있다. 여기서  $E_y^N$ 은 정규화  $y$ 방향 탄성계수이며  $L$ 은 절리의 길이이다.

$$E_y^N = 19.984 \times L^{-2.048} \quad \text{식4}$$

### 3.2 절리밀도와 균질화탄성계수와의 관계

200 × 200요소의 기본단위구조 모델에서 절리 두께  $T=1$ , 절리의 길이  $L = 10, 20, 40$ 의 3가지의 경우에 대하여 절리밀도  $V_f$ 를 변화해 가면서 정규화  $y$ 방향탄성계수의 변화양상을 조사하였다(그림 5). 그림 5의 결과를 보면, 절리의 두께와 절리길이가 일정할 때 절리밀도가 커질수록 정규화  $y$ 방향탄성계수는 점점 낮은 값을 보여준다.

## 4. 토 의

### 4.1 절리 밀도와 균질화탄성계수와의 관계

불연속면의 조사인자들의 상호관계에 대하여 살펴보면 다음과 같은 관계를 도출해 낼 수가 있다. 불연속면 분포를 표시하는 기하학적인 요소, 즉, 절리밀도  $V_f$ , 절리길이  $L$ , 절리의 두께  $T$ , 평균절리간격  $\overline{S_x}$ ,  $\overline{S_y}$ 는 독립적인 변수가 아니라 상호관계를 보여주고 있는 것을 알 수 있다.

$$V_f = \frac{L}{L + \overline{S_x}}, \quad V_f = \frac{T}{T + \overline{S_y}}, \quad V_f = \sqrt{\frac{L}{L + \overline{S_x}} \times \frac{T}{T + \overline{S_y}}} \quad \text{식4}$$

식 4에서 보는 바와 같이 절리밀도와 절리길이 사이에는 상호 긴밀한 관계가 있음을 알 수 있듯이 암반의 탄성계수에 영향을 미치는 인자 중 어느 한가지의 인자로써는 불연속성 암반의 탄성계수를 정리 할 수 없다는 사실을 뒷받침한다.

### 4.2 암반의 탄성계수와 밀접한 관계를 가지는 지표로써 절리의 영향면적제안

절리밀도가 절리길이를 일정하게 한 조건하에서 균질화 탄성계수와의 좋은 상관관계를 보여주는 결과로부터 기본단위구조의 탄성계수는 절리길이의 제곱승에 관계한 량으로 정리를 시도하였다. 우선 한 개의 절리에 대하여 그 영향면적이 어느 정도인가를 조사하기 위하여 사각형의 영역을 가정하였다. 여기서 영향면적은 폭이  $L$ ,  $y$ 방향에는  $kL$ 로 한다. 절리의 영향면적을 그림 6과 같이 중첩시켜 가면서 전체 영역에서 해당 영역의 부분을 절리에 의한 영향면적  $A_e$ 라 한다. 그림 6과 같이 유닛트셀 모델을 사용하여  $y$ 방향에 영향을 미치는 계수  $k$ 를 조사하였다. 모델은 절리의 길이가  $L = 5, 10, 20$ 의 3종류로 각각의 밀도  $V_f$ 를 일정하게 하고 그림 6과 같이 절리간격  $S$ 을 작게 하면서 탄성계수의 변화를 살펴보았다. 그

결과 그림 7와 같이 절리의 간격  $S$ 를 절리의 길이  $L$ 로 나눈  $\frac{S}{L}$  과 탄성계수의 관계에서 간격을 작게 해 갈수록  $\frac{S}{L} = 1.75$  이상에서는 탄성계수가 거의 일정하지만  $\frac{S}{L} = 1.75$ 보다 작을 경우는 탄성계수가 증가되어 가는 것을 볼 수 있다. 또 이것은 절리의 길이가 5, 10, 20의 어느 경우에서도 결과가 동일하게 나타난다. 이것에 의하여 영향 면적에 영향을 주는  $k$ 는 1.75로 해도 상관없이 없을 것으로 생각이 된다. 이렇게 하여 한 개 절리의 영향면적의 크기를 결정할 수가 있었으며 기본단위구조의 전체영향면적  $A_e$ 는 구체적으로 이하의 방법에 의해 결정하였다. 절리 각각의 영향면적이 중첩되지 않을 경우, 하나의 절리당 영향면적

은  $1.75L \times L$ 이므로 여기에 절리수  $n$  을 곱한  $1.75 L^2 \times n$ 이 기본단위구조내의 전체영향면적이 된다. 그러나 영향면적이 중첩이 되는 경우는 중첩이 되는 부분을 고려하지 않으면 안된다. 그래서 중첩이 되는 부분의 면적을 구하는 방법은 실제의 암반 절리조사에 있어서 입수 가능한  $y$ 방향의 절리간격  $S_y$ 의 히스토그램을 이용하기로 한다. 그림 8과 같이 절리 한 개당 중첩되는 면적은  $(1.75L - S_{yi}) \times L$ 이다. 여기서 중첩되는 면적을  $w$ 라고 하면,  $w$ 는 기본단위구조 전체에 대하여 생각할 때 절리 간격의 존재비율  $f(S_{yi})$ 를 사용하여 다음과 같은 식5와 같이 표현할 수 있다.

$$w = \sum_{i=1}^{N_y} (1.75L - S_{yi})L \times n f(S_{yi}) \quad (\text{단, } 1.75L \geq S_{yi} \text{일 경우}) \quad \text{식5}$$

또한, 식5를 이용하여 기본단위구조중의 절리의 영향면적  $A_e$ 는 식6과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$A_e = (1.75 L_2 \times n) - w \quad \text{식6}$$

여기서 여러 가지의 패턴의 기본단위구조에 대하여 이렇게 하여 구한 영향면적과 정규화  $y$  방향의 탄성계수의 관계를 정리하였다. 그림 9은 영향면적률로 정리한 결과를 나타내고 있다. 여기서 영향면적률은 영향면적에 대한 기본단위구조의 면적에 대한 상호비이다. 이 결과에서 보듯이 기본단위구조의 전체면적에 대하여 영향면적의 비인 영향면적률에 의하여 정규화  $y$ 방향탄성계수의 관계가 정리 가능하다고 사료된다.

## 5. 결 론

본 연구에서 얻은 주된 결과이다. 불연속면의 길이가 길어질수록 균질화 탄성계수값이 낮게 나타나는 경향을 보여주었다. 이들의 관계를 식으로 나타내 보면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_y^N = 19.984 \times L^{-2.048}$$

절리의 밀도를 변화시키면서 균질화 탄성계수와의 관계를 살펴본 결과 절리밀도가 높을수록 균질화 탄성계수는 점점 적게 되고, 절리밀도가 0.1을 초과함에 따라 균질화 탄성계수값의 변화가 거의 없었다.

불연속면의 분포를 정량적으로 표시할 수 있는 새로운 파라메타를 고안한 결과 절리의 길이와 균질화 탄성계수는 상당한 관련이 있다는 사실을 발견하고 불연속면의 길이에 대한 영향면적을 제안하였다. 이 결과를 이용하여 영향면적률과 균질화 탄성계수가 선형적인 관계를 나타냄을 밝힘으로써 균질화 탄성계수를 영향면적률로써 정리가 가능하게 되었다.

## 참 고 문 헌

1. Priest, S. D. and Hudson, J. A., (1983), Estimation of Discontinuity Spacing and Trace Length Using Scanline Surveys, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 18, pp. 183-197
2. Zhang, L. and Einstein, H. H., (1998), Estimating the Mean Trace Length of Rock Discontinuities, *Rock Mech. & Rock Engng.* Vol. 29, pp. 217-235
3. Mauldon, M., (1998), Estimating Mean Fracture Trace Length and Density from Observations in Convex Windows, *Rock Mech. & Rock Engng.* Vol. 29, pp. 203-216
4. Mauge, C. and Kachanov, M., (1994), Effective Elastic Properties of an Anisotropic Material with Arbitrarily Oriented Interacting Cracks, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 42, pp.561-584
5. Dershowitz, W. S. and Einstein, H. H., (1988), Characterizing Rock Joint Geometry with Joint System Models, *Rock Mech. & Rock Engng.*, Vol. 21, pp. 21-51
6. Guedes, J. M. and Kikuchi, N., (1990), Preprocessing and postprocessing for materials based on the homogenization method with adaptive finite element methods, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 83, pp. 143-198

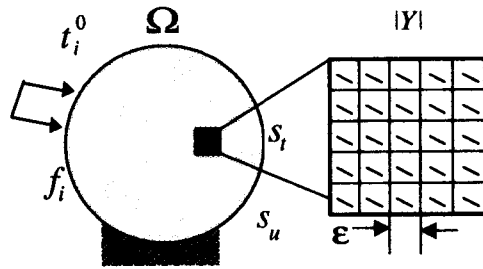


그림 1. 미시적인 주기구조를 가지는 불연속성 압반의 모식도

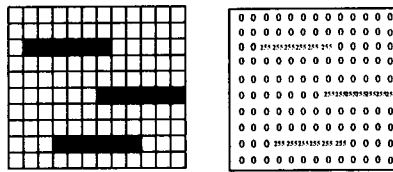


그림 2. 기본단위구조 모델의 한 예

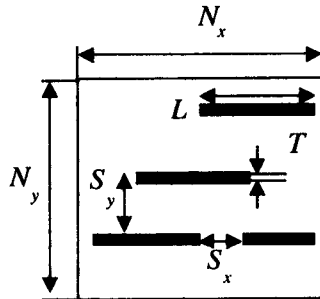


그림 3. 기본단위구조 모델에 사용된 불연속면을 나타내는 지표

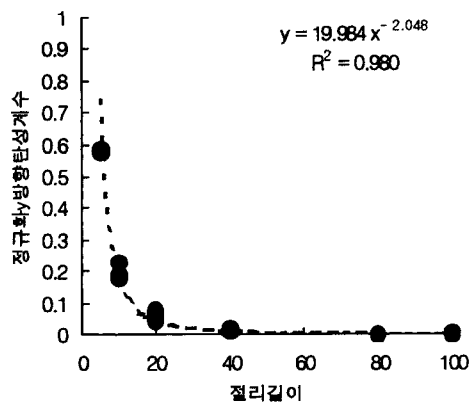


그림 4. 동일한 밀도하에 절리의 길이와 정규화방향의 탄성계수와의 관계

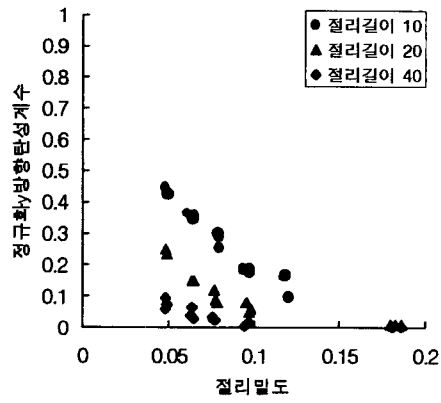


그림 5. 절리밀도와 정규화y방향의 탄성계수와의 관계

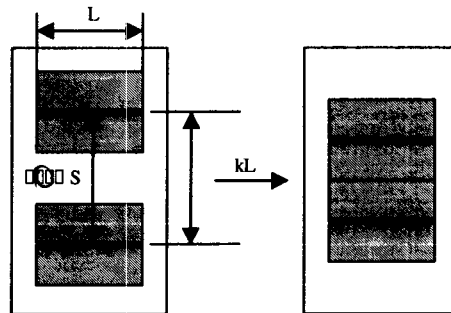


그림 6. 기본단위구조 모델을 이용하여 영향면적을 결정하는 개념도

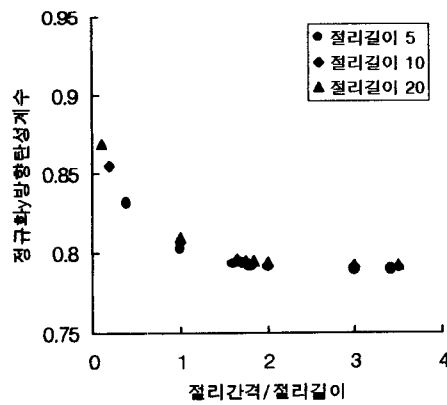


그림 7. 절리간격과 정규화y방향의 탄성계수와의 관계



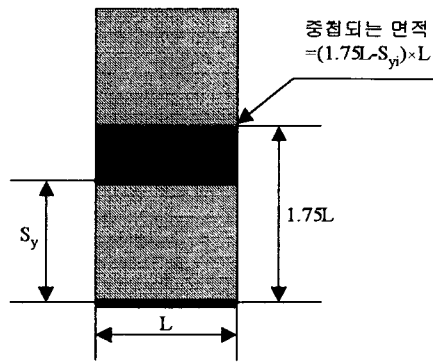


그림 8. 인접한 절리가 존재하는 경우 중첩되는 영향면적률

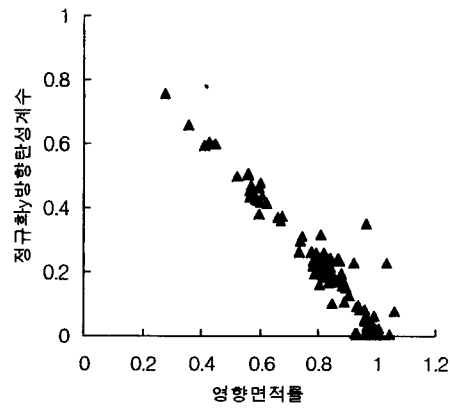


그림 9. 영향면적률과 정규화y방향의 탄성계수와의 관계