한국지반공학회논문집 제16권 제4호 2000년 8월 PP. 63 ~ 70

균질화 이론에 근거한 불연속성 암반의 탄성계수에 영향을 미치는 불연속면의 조사 인자에 관한 연구

Parameter Effect on Elastic Modulus of Discontinuity Rock-mass Based on Homogenization Method

백 용* Baek, Yong

Abstract

The quantitative analyses and the mechanical interpretation of discontinuity planes are the most important factor for the study of strength and deformation properties of rock masses containing discontinuity planes. However, the relationship between the factors investigated in the field and the actual mechanical properties of discontinuity planes is not fully understood. The main purpose of this study is to investigate the effects of density, length, and spacing of joints on elastic modulus of rock masses as these values vary. A new parameter which has a direct relation with the elastic modulus of discontinuity planes is also proposed in this study. The combination of finite element methods and homogenization methods has been used for the numerical analyses of a uintcell with discontinuity planes, which is generated using random-number generation methods. The elastic modulus of the discontinuity plane is found from the numerical analyses. The final results propose not only the relation between the investigation parameters of discontinuity planes and the elastic modulus of rock masses but also a new parameter, an effect area ratio having a linear relation with the elastic modulus of rock masses.

요 지

불연속성 암반의 강도특성이나 변형특성에 대한 해석 중 가장 중요한 점은 불연속면의 정량적인 파악과 조사방법에 있다. 그러나, 실질적으로 불연속면의 조사 인자들이 암반의 역학적인 특성과의 관계에 대하여는 분명한 해답을 내릴 수 없는 단계에 있다. 본 연구에서는 첫째로 불연속면의 현장 조사 항목 중 절리밀도, 절리길이, 절리간격을 변화시켜면서 암반의 탄성계수와의 상호관계를 밝히고 둘째로, 불연속성 암반의 탄성계수에 직접적인 관계를 가지며 불연속성 암반의 탄성계수를 정리할 수 있는 새로운 인자를 제안하는 것이 목적이다. 해석방법으로는 불연속성 암반의 기본모델로써 난수발생법에 의하여 불연속면을 발생시킨 기본단위구조를 가정하고 이를 균질화법과 유한요소법을 이용한다. 이들 방법을 통한 수치해석으로 불연속성 암반의 탄성계수를 구한다. 그 결과 불연속면의 조사항목과 탄성계수와의 상호관계성 뿐만아니라 불연속성 암반의 탄성계수와 선형적인 관계를 가지는 새로운 파라메타로써 영향면적률을 제안한다.

Keywords : Discontinuity rockmass, Elastic modulus, Unit cell, Homogenization method, Finite element method, Effect area

* 정회원, 한국건설기술연구원 토공구조물 및 시민조사그룹 선임연구원

1. 서 론

인공 구조물, 즉 도로나 터널을 건설할 경우에 암반에 대한 정성적이며 정량적인 평가가 선행된다. 그러나, 암반의 강도특성이나 변형특성에 대한 정확한 파악은 매우 어려운 과제 중의 하나이다. 그 원인으로는 첫째로 자연계에 분포하고 있는 암반은 여러 종류의 암석으로 구성되어 있으며 이들 구성암석의 구조적인 양상이 복잡한 경우가 대부분이다. 둘째로 암반을 구성하는 암석이 단일종류일지라도 암반 내에는 크고 작은 불연속면이 공히 존재하며 특히 이들 불연속면이 암반의 특성에 매우 큰 영향을 미치고 있기 때문이다. 그러나 이들 불연속면의 특성에 대하여 정확히 파악하기는 매우 어려운 실정이다.

기존의 불연속면에 대한 연구로는 현장의 자료분석에 의한 연구와 불연속면을 하나의 역학적인 관점에서 해석하려고 하는 측면으로 주로 연구되어 졌다. 야외에서 불연속면의 조사기법의 대표적인 방법으로는 Priest가 제안한 측선법이 널리 이용되고 있다.(Priest and Hudson, 1976, 1983) 또한, 최근에는 원형의 셈플망을 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 실질적으로 불연속면의 조사 인자들이 암반의 역학적인 특성에 어느 정도의 영향을 미칠지는 아직도 명쾌한 해답을 내리지는 못하고 있다.그래서, 본 연구에서는 현장에서 불연속면을 조사할 때 정성적인 평가를 위해 조사하는 기본적인 인자들, 예를 들면 암반내에 존재하는 불연속면의 길이, 단위면적당 불연속면의 밀도, 불연속면 사이의 간격등의 상관관계를 밝히고, 불연속성 암반에 영향을 미치는 인자로써는 정성적인 불연속면 측정자료를 사용하여 불연속성 암반의 탄성계수와 선형의 관계를 갖는 새로운 인자를 제안하는 것이 목적이다.

2. 실험 방법

2.1 균질화이론에 근거한 불연속성 암반의 탄성계수 산정 방법

균질화법은 섭동법(singular perturbation)을 기초로 한 다변수 전개법(multi-scale expansion)을 이용한 수학적인 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 나타나는 주기적인 구조를 가진 물체로 가정하여 생각한다.

이 개념을 그림 1로 나타내어 생각해 볼 수 있다. 외부로부터 일정한 하중(t_i^0)을 받는 암반(Ω)은 어느 일정한 부분을 확대해 볼 때 불연속면과 기질(matrix) 부분이 미시적으로 반복되어 나타나는 주기적인 성질을 가진 물체로 생각할 수 있다. 결국, 이들 미시적 구조(Y)의 개개의 탄성계수를 구하고 이들을 확대 해석함으로써 전체 암반의 거시적 탄성계수를 구할 수 있다.

미시적 주기구조를 가지는 불연속성 암반의 탄성계수를 구하는 방법은 다음과 같다. 우선, 암반을 완전탄소성체의 물체로 생각을 하면 암반은 그림 1과 같이 역학적으로 힘이 평형 상태를 이루는 형태로 존재한다고 생각 할 수 있다. 이것을 수식으로 나타내면 3차원의 경우, 다음 식 1과 같은 지배방정식으로 표현이 가능하며 이때의 경계조건은 식2, 3으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + f_i = 0 \tag{1}$$

$$u_i = u_i^0 \qquad on \qquad s_u \tag{2}$$

$$\sigma_{ij} n_j = t_i^0 \qquad on \qquad s_t \tag{3}$$

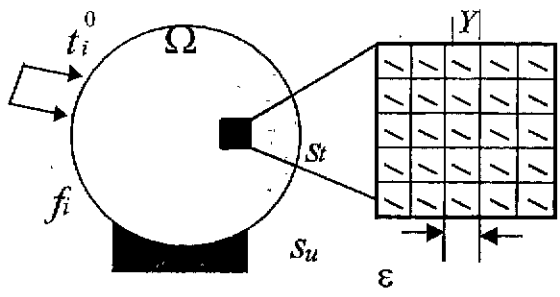

그림 1. 미시적인 주기구조를 가지는 불연속성 암반의 모식도

여기서 σ_{ij}는 암반에 작용하는 응력, f_i는 암반의 물체력, s_t는 정적 허용경계조건(statically admissible boundary condition), s_u는 운동학적 허용경계조건(kinematically admissible boundary condition)이다.

이들의 가상일평형식과 경계조건식을 약형식으로 표현하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\int_{\Omega} E_{ijkl} \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} d\Omega = \int_{s_t} t_i^0 v_i ds_t + \int_{\Omega} f_i v_i d\Omega \quad (4)$$

여기서, 식4의 좌변의 항은 암반 내부가 작용하는 일에 해당되며 우변의 항은 암반 외부에서 가해지는 일에 해당된다.

전술한 바와 같이 암반을 암석과 불연속면으로 반복 구성된 물체로 생각할 경우 암석과 불연속면을 두 개의 변수로 생각하여 반복 구조를 가지는 2변수의 형태로 고치고 u와 v에 대하여 각각 점진전개를 행한다. 그 결과 각각의 변수에 대하여 평균변화나 미시적주기구조에 영향을 나타내는 식으로 표현하고 이들의 식을 변형하여 기본단위구조의 특성변위함수를 구한다. 결국, 구하고자 하는 균질화 탄성계수는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$E^H_{ijkl} = \frac{1}{|Y|} \int_Y \left(E_{ijkl}(y) - \frac{E_{ijkl}(y) \partial \chi_p^{kl}(y)}{\partial y_q} \right) dY \quad (5)$$

여기서 E_{ijkl}는 암석의 탄성계수에 해당이 되며 χ_p^{kl}은 암석과 불연속면으로 구성된 기본단위구조에 있어서의 특성함수가 된다. 이 특성함수의 값은 다음의 식6에 의하여 구할 수 있다.

$$\int_Y E_{ijpq}(y) - \frac{\partial \chi_p^{kl}(y)}{\partial y_q} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} dY = \int_Y E_{ijkl}(y) \frac{\partial v_i}{\partial x_j} dY \quad (6)$$

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

이렇게 하여 식5를 통하여 불연속면이 포함된 암반의 탄성계수 값을 구한다.

2.2 기본단위구조 모델의 작성

자연계의 암반에는 크고 작은 불연속면이 많이 분포하고 있다. 이들 불연속성 암반의 강도를 측정할 경우 불연속면이 포함된 암반의 강도를 측정하지 않으면 안 된다. 그러나, 불연속면이 포함된 암반을 실내에서 직접 실험하는 것은 실질적으로 거의 불가능한 상태다. 그래서 본 연구에서는 불연속면이 포함된 암반의 탄성계수를 파악하기 위하여 불연속면을 포함한 기본 모델을 설정하여 이 모델을 해석함으로써 자연계에 근접한 상태의 불연속성 암반의 탄성계수를 해석해 보고자 한다.

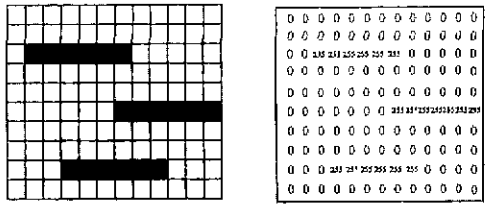

그림 2. 기본단위구조 모델의 한 예

불연속성 암반의 기본 모델에서 불연속면은 다음과 같은 전제하에 해석하였다. 불연속면의 분포가 난수성을 가진다고 가정하고 불연속면을 난수발생법에 의거하여 난수를 발생시킨다. 난수의 발생과 난수를 불연속면으로 인식하는 과정은 다음과 같다. 본 연구에서 사용한 방법은 난수발생법 중 승산형합동법을 이용하였다(彩江日出燈 외 3, 1986). 발생된 난수는 난수의 기본적 성질에 입각하여 난수열의 등확률성과 무규칙성에 대하여 검정할 필요가 있다. 그래서 본 연구에서 사용한 검정법은 χ^2(카이)검정법에 의하여 검정을 실시하였다.

승산형 합동법에 의하여 발생된 난수는 불연속면의 중심좌표로 지정이 된다. 즉, 불연속면의 중심을 x좌표와 y좌표로 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 디지탈 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.

절리의 길이 L, 절리의 두께 T(요소 1개분), 절리의 밀도 V_f, 기본단위구조의 크기는 N_x, N_y, x방향의 절

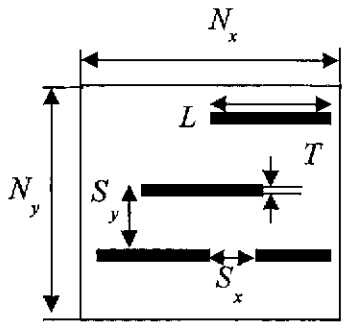

그림 3. 기본단위구조 모델에 사용된 불연속면을 나타내는 지표

리간격에 대하여 S_x, y방향의 절리간격에 대하여는 S_y, 그리고 기본단위구조의 크기 N_x, N_y로 나눈 평균절리 간격을 $\overline{S_x}$, $\overline{S_y}$로 한다. 여기에서 사용되는 단위는 유한 요소 1개 요소를 기본단위로 하는 정수값으로 생각한다. 이들 기본단위구조의 탄성계수의 해를 구하는 것은 균질화 이론에서 설명한 것과 같이 무한히 반복되는 물체의 평균탄성계수를 구하는 것을 의미한다. 예를 들면 기본단위구조의 반복은 절리의 반복패턴의 현상과 같은 의미를 가진다.

2.3 유한요소해석방법과 해석조건

균질화 해석에 있어서 기질부의 탄성계수는 2.6×10^4MPa로 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.

균질화 탄성계수와 불연속면 분포의 관계를 정리하기 위하여 그림 3과 같이 x축, y축을 취하고 이들의 방향에 대한 탄성계수를 x방향탄성계수 E_x, y 방향탄성계수 E_y로 한다. 또 기질부의 탄성계수의 초기치에 대하여 정규화한 값들을 정규화 x방향탄성계수, 정규화 y방향의 탄성계수로 표시하였다.

3. 실험결과

3.1 절리길이와 균질화탄성계수의 관계

앞에서 설명한 난수발생법에 의하여 만들어진 기본단위구조를 이용하여 절리밀도를 일정하게 하고 절리의 길이를 변화시키면서 균질화 탄성계수의 변화 양상을 살펴보았다. 그림 4는 수치해석에 사용된 기본단위구조 모델의 한 예이다. 이 기본단위구조 모델은 x방향과 y방향의 크기가 200 ×200요소로 구성되어 있다. 절리의 두께 $T=1$, 절리밀도를 $V_f=0.1$의 일정한 값을 놓고 절리의 길이 L을 변화시켜 가면서 y방향의 탄성계수 E_y에 미치는 영향에 대하여 조사하였다. 그림 5는 절리의 길이와 정규화 y방향탄성계수와의 관계를 보여준다. 즉, 절리의 길이가 길어질수록 탄성계수가 낮게 되는 경향을 보여주고 있으며 이들의 관계를 식7과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 E_y^N은 정규화 y방향 탄성계수이며 L은 절리의 길이이다.

$$E_y^N = 19.984 \times L^{-2.048} \tag{7}$$

그림 4. 한 방향으로 발달하는 불연속면을 가지는 기본단위구조 모델의 예

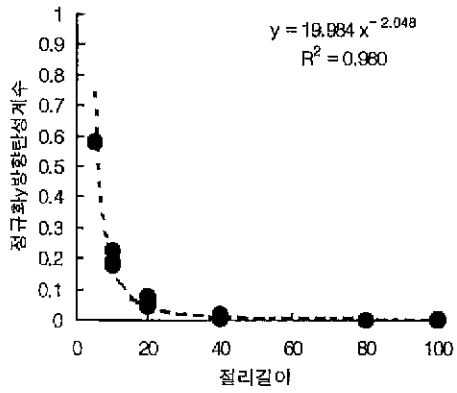

그림 5. 동일한 밀도하에 절리의 길이와 정규화y방향의 탄성계수와의 관계

3.2 절리밀도와 균질화탄성계수와의 관계

일반적으로 불연속성암반의 탄성계수는 절리밀도와 관계가 있다고 생각하고 이에 따라 절리 밀도 V_f로 정리하려고 하는 경향이 많다. 그러나 절리밀도로써 자연계의 다양한 불연속면의 양상과 암반의 탄성계수와의 관계를 명확하게 추정 가능한지에 대하여는 의문이 발생한다.

200 ×200요소의 기본단위구조 모델에서 절리 두께 $T=1$, 절리의 길이 $L=10, 20, 40$의 3가지의 경우에 대하여 절리밀도 V_f를 변화해 가면서 정규화 y방향탄성계수의 변화양상을 조사하였다(그림 6). 그림 6의 결과를 보면, 절리의 두께와 절리길이가 일정할 때 절리밀도가 커질수록 정규화 y방향탄성계수는 점점 낮은 값을 보여준다.

또한 절리길이가 다른 경우도 탄성계수가 감소되는 경향을 보여준다. 그러나 탄성계수의 감소되는 양상은 절리의 길이에 따라 다른 형태를 보여주며 주로 절리의 밀도가 작을 경우에 감소의 변화량이 크게 나타난다. 절리밀도가 0.1을 초과한 후에는 탄성계수의 변화률은 급격히 감소하는 양상을 보여준다.

3.3 절리간격과 절리밀도와의 관계

절리의 두께와 절리길이가 일정한 모델의 경우에 절리밀도와 y 방향의 간격과는 어떤 관계가 있는지 살펴보았다. 그림 7에서 보는 바와 같이 절리의 두께와 절리의 길이가 일정할 경우 절리의 밀도가 높아짐에 따라 절리의 간격은 좁아지는 경향을 보여주고 있다. 특히 절리의 길이가 10, 20, 40의 어느 경우에서도 마찬가지로 동일한 밀도의 경우 y 방향의 절리간격도 동일한 값을 취하는 결과를 보여주고 있다.

4. 토 의

4.1 절리의 밀도와 균질화탄성계수와의 관계

지금까지 살펴본 결과 암반의 탄성계수에 영향을 미치는 인자로써 절리의 밀도, 길이, 간격등의 인자들로 탄성계수와의 관계를 살펴보았다. 앞의 결과에서와 같이 탄성계수에 미치는 불연속면의 조사인자 중에 어느 한가지만으로는 명확한 관계로 정리할 수 없다는 것을 알았다. 그래서 이들 인자들의 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. 절리밀도는 암반의 단위면적을 포함하는 절리의 면적이다. 이것을 식으로 표시하여 보면 다음과 같은 관계를 보여준다.

$$V_f = \frac{L}{L+\overline{S_x}}$$

$$V_f = \frac{T}{T+\overline{S_y}} \qquad (8)$$

$$V_f = \sqrt{\frac{L}{L+\overline{S_x}} \times \frac{T}{T+\overline{S_y}}}$$

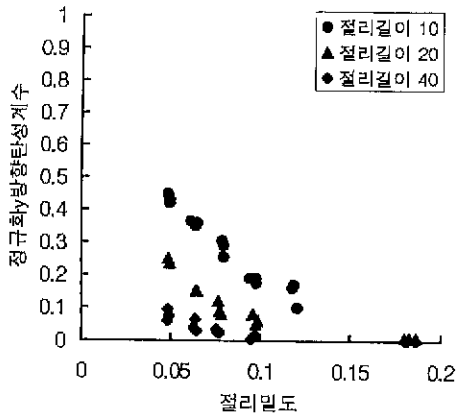

그림 6. 절리밀도와 정규화y방향의 탄성계수와의 관계

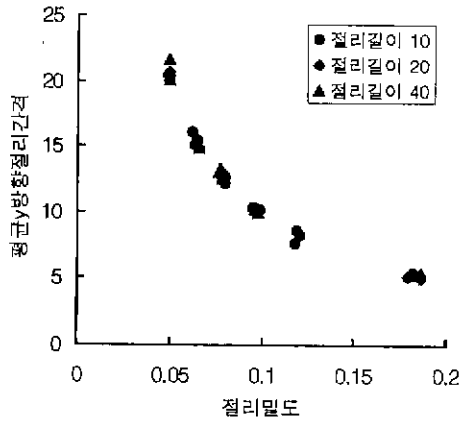

그림 7. 절리밀도와 평균y방향의 절리간격과의 관계

식 8에서 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.

특히, 이들의 변수는 길이의 차원을 가지지만 여기서는 기본단위구조의 크기를 동일한 요소의 크기를 이용하였으므로 얻어진 결과들은 차원에는 영향을 미치지 않은 것으로 생각해도 무방하다.

4.2 암반의 탄성계수와 밀접한 관계를 가지는 지표로써 절리의 영향면적제안

지금까지는 절리의 두께가 고정된 상황에서 절리의 밀도와 절리의 길이를 변화시켜 가면서 기본단위구조의 탄성계수를 해석하였다. 즉, 제한된 조건하에서 y 방향탄성계수가 어느 정도 변화하는가를 조사하였다.

암반공학의 실무에는 암반의 특성들을 밝히기 위하여 표면 관찰로부터 절리의 평균 길이와 절리두께, 절리간격의 히스토그램분포나 절리의 밀도 등의 조사가 행하여지고 있지만 이들의 데이터를 사용하여 암반의 평균탄성계수를 추정할 수 있는 파라메타를 결정할 수 있다면 실무에 큰 역할을 할 수 있으리라 믿어 의심치 않는다.

불연속성 암반의 탄성계수는 절리밀도만으로는 정리가 되지 않으며, 특히 절리의 길이에 매우 큰 영향을 받는 것을 알았다. 여기서 절리분포를 나타내는 기하학적인 파라메타를 변화시키면서 해석을 행한 결과 절리의 길이가 일정하다는 조건하에 기본단위구조의 탄성계수 값은 절리밀도와 좋은 상관관계가 보임을 암시하였다. 절리밀도는 무차원이지만 이들은 절리길리의 1승에 비례하는 형태로 표시되었다. 그러나, 이 절리밀도가 절리길이를 일정하게 한 조건하에서 균질화 탄성계수와는 좋은 상관관계를 보여주는 결과로부터 기본단위구조의 탄성계수는 절리길이의 제곱승에 관계한 량에 정리가 되지 않을까 생각해 보았다. 여기서 Kaneko와 Shiba(1990)의 체적결손법과 같은 연구방법을 응용하여 절리 주변의 일정 범위가 절리의 영향을 받는다고 생각하고 탄성계수와 절리의 간격의 관계를 조사해 보았다.

우선 한 개의 절리에 대하여 그 영향면적이 어느 정도인가를 조사하기 위하여 사각형의 영역을 가정하였다. 여기서 영향면적은 폭이 L, y 방향에는 kL로 한다. 절리의 영향면적을 그림 8과 같이 중첩시켜 가면서 전체 영역에서 해당 영역의 부분을 절리에 의한 영향면적 A_e라 한다. 그림 8과 같이 기본단위구조 모델을 사용하여 y방향에 영향을 미치는 계수 k를 조사하였다. 모델은 절리의 길이가 $L=5, 10, 20$의 3종류로 각각의 밀도 V_f를 일정하게 하고 그림 8과 같이 절리간격 S을 작게 하면서 탄성계수의 변화를 살펴보았다. 만약, 이 같은 영향면적의 생각이 타당하다면 어느 정도까지는 탄성계수는 변화하지 않고 두 개의 절리의 영향면적이 중첩되는 간격이 되는 시점에서 탄성계수는 변화가 생길 것이다. 그 결과 그림 9와 같이 절리의 간격 S를 절리의 길이 L로 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.

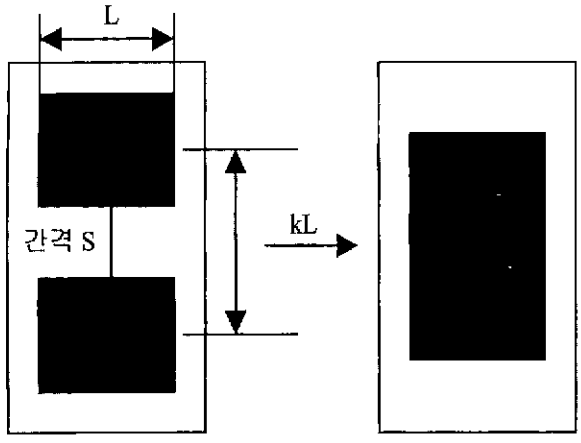

그림 8. 기본단위구조 모델을 이용하여 영향면적을 결정하는 개념도

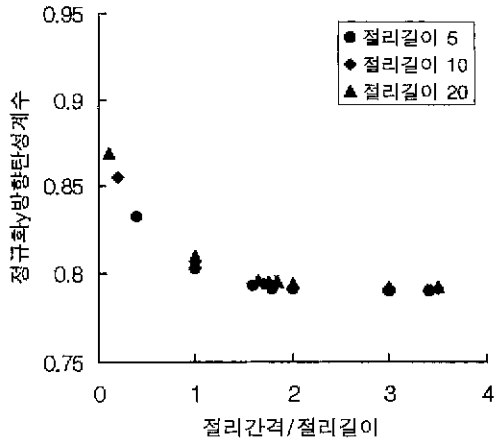

그림 9. 절리간격과 정규화y방향의 탄성계수와의 관계

또 이것은 절리의 길이가 5, 10, 20의 어느 경우에서도 결과가 동일하게 나타난다. 이것에 의하여 영향면적에 영향을 주는 k는 1.75로 해도 상관이 없을 것으로 생각이 된다. 즉 영향면적의 y방향의 크기는 절리의 길이에 관계없이 $1.75L$로 결정을 하여도 좋다고 생각된다. 그러나, 이 모델의 절리 방향은 수평방향만 고려한 매우 특수한 모델로 생각하였으므로 앞으로는 많은 변수를 적용하면서 충분한 해석을 행할 필요성이 있다고 생각이 된다.

이렇게 하여 한 개 절리의 영향면적의 크기를 결정할 수가 있었으며 기본단위구조의 전체영향면적 A_e는 구체적으로 이하의 방법에 의해 결정하였다, 절리 각각의 영향면적이 중첩되지 않을 경우, 하나의 절리당 영향면적은 $1.75L \times L$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 y방향의 절리간격 S_y의 히스토그램을 이용하기로 한다. 그림 10과 같이 절리 한 개당 중첩되는 면적은 $(1.75L - S_w) \times L$이다. 여기서 중첩되는 면적을 w라고 하면, w는 기본단위구조 전체에 대하여 생각할 때 절리 간격의 존재비율 $f(S_{yi})$를 사용하여 다음과 같은 식9와 같이 표현할 수 있다.

$$w = \sum_{i=1}^{N_y} (1.75L - S_{yi})L \times nf(S_{yi}) \qquad (9)$$

(단, $1.75L \geq S_{yi}$일 경우)

또한, 식9를 이용하여 기본단위구조중의 절리의 영향면적 A_e는 식10과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$A_e = (1.75\ L_2 \times n) - w \qquad (10)$$

여기서 여러 가지의 패턴의 기본단위구조에 대하여 이렇게 하여 구한 영향면적과 정규화 y 방향의 탄성계수의 관계를 정리하였다. 그림 11은 영향면적률로 정리한 결과를 나타내고 있다. 여기서 영향면적률은 영향면적에 대한 기본단위구조의 면적에 대한 상호비이다.

이 결과에서 보듯이 절리밀도와 절리길이를 변화시키면서 계산한 전 모델의 영향면적률값은 거의 일직선상에 나열되고 있다. 즉, 영향면적률이 클수록 정규화 y 방향의 탄성계수는 선형적으로 낮아지는 경향을 보여주고 있다. 이 결과로부터 기본단위구조의 전체면적에 대하여 영향면적의 비인 영향면적률에 의하여 정규화 y 방향탄성계수의 관계가 정리 가능하다고 사료된다.

5. 결 론

암반의 불연속면 분포에 따른 탄성계수의 관계를 살펴보기 위하여 난수발생법에 의하여 불연속면을 발생시킨 후 이들의 기본단위구조 모델을 대상으로 균질화법을 이용하여 수치해석을 행하였다.

이하에는 본 연구에서 얻은 주된 결과이다. 불연속면의 길이와 균질화 탄성계수와의 관계를 살펴보기 위하여 불연속면의 두께와 밀도를 고정시킨 상태에서 불연속면의 길이를 변화시키면서 해석한 결과 불연속면의 길이가 길어질수록 균질화 탄성계수값이 낮게 나타나는 경향을 보

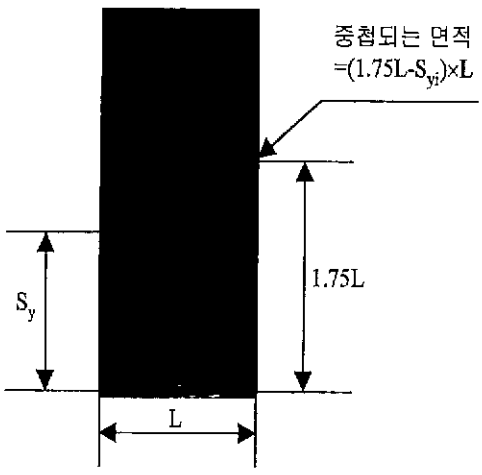

그림 10. 인접한 절리가 존재하는 경우 중첩되는 영향면적률

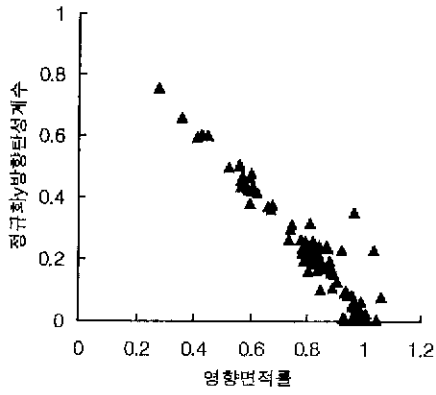

그림 11. 영향면적률과 정규화y방향의 탄성계수와의 관계

여주었다. 이들의 관계를 식으로 나타내 보면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

불연속면의 밀도와 균질화 탄성계수와의 관계를 살펴보기 위하여 절리의 두께와 절리의 길이를 고정시킨 후 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.

같은 모델에서 절리의 간격과 균질화 탄성계수와의 관계를 살펴본 결과 절리의 밀도가 증가함에 따라 절리의 간격은 지수분포적인 감소 경향을 보여주고 있었다. 또한 이런 결과들은 절리의 길이가 10, 20, 40의 어느 경우에서도 마찬가지로 동일한 밀도의 경우 y방향의 절리간격도 동일한 값을 취하는 결과를 보여주고 있다.

불연속성 암반에 있어서 탄성계수는 불연속면을 조사하는 인자 중 절리밀도, 절리길이, 절리간격 등과 서로 밀접한 관계를 보여주고 있는 것을 알았다. 또한, 불연속면의 분포를 정량적으로 표시할 수 있는 새로운 파라메타를 고안한 결과 절리의 길이와 균질화 탄성계수는 상당한 관련이 있다는 사실을 발견하고 불연속면의 길이에 대한 영향면적을 제안하였다. 절리길이가 L인 절리에 대하여 $1.75L \times L$의 크기의 영향범위가 있는 것을 알았다. 또, 이 결과를 이용하여 영향면적률과 균질화 탄성계수가 선형적인 관계를 나타냄을 밝힘으로써 균질화 탄성계수를 영향면적률로써 정리가 가능하게 되었다.

본 연구에는 가장 간단한 기본단위구조의 모델로 해석을 행하였지만 이후의 과제에 대하여는 실제 암반과 흡사한 모델을 대상으로 절리의 방향이나 절리의 특성을 고려한 상태에서 해석을 행함으로써 불연속성 암반의 역학 특성을 평가하는데 한층 나은 도움이 될 것으로 생각된다. 또한, 본 해석에서 취한 문제는 2차원적인 문제로 실제의 문제에는 영향면적이 아니라 영향체적의 문제를 생각해 볼 필요가 있다고 생각이 되므로 앞으로 많은 모델을 통한 연구가 요구된다.

감사의 글

본 연구의 수행에 있어서 지도편달을 해주신 일본 동북대학 岸野佑次선생님과 이론부터 응용까지 연구의 전반에 대하여 지도해주신 京谷孝史선생님에게 감사의 뜻을 전합니다. 비슷한 연구테마를 가지고 많은 시행착오와 의견을 교환하면서 같이 고민하며 연구활동을 해주신 石倉大士君에게도 심심한 감사의 謝意를 보냅니다. 이 논문을 성심껏 읽어 주시고 수정해주신 대전대학교 지질공학과 김학준 교수님에게도 아울러 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

1. 彩江日出燈, 岡崎明彦, 安達義則, 尾崎正弘, (1986), FORTRAN77에 의한 數値計算法, 培風館, p. 199, (日本語版).
2. 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.
3. 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
4. K. Kaneko and T Shiba, (1990), Numerical Method for Rock Deformation Analysis Based in Equivalent Volume Defect, Mining and Materials Processing Inst. of Japan, Vol. 106, pp 121-138.
5. Mauge, C. and Kachanov, M., (1994), Effective Elastic Properties of an Anisotropic Material with Arbitrarily Oriented Interacting Cracks, J. Mech. Phys. Solids, Vol. 42, pp561-584.
6. Mauldon, M., (1998), Estimating Mean Fracture Trace Length and Density from Observations in Convex Windows, Rock Mech. & Rock Engng Vol 29, pp. 203-216.
7. Priest, S. D. and Hudson, J. A., (1976), Discontinuity Spacings in Rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 13, pp. 135-148.
8 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.
9. Zhang Xing, (1989), A Two-Dimensional Model of En-Echelon Jointed Rock Masses with Multi-Discontinuity Geometry Parameters, Rock Mech. & Rock Engng. Vol. 22, pp. 231-242.
10. Zhang, L. and Einstein, H. H., (1998), Estimating the Mean Trace Length of Rock Discontinuities, Rock Mech. & Rock Engng. Vol. 29, pp. 217-235.

(접수일자 2000 1. 31)