

균질화법을 이용한 화강암의 대표요소체적 산정에 관한 연구

서용석¹⁾ · 도미란²⁾ · 오대열³⁾ · 홍성완⁴⁾ · 배규진⁵⁾ · 김교원⁶⁾

Determination of the Representative Elementary Volume of Granite by Using Homogenization Theory

Yong-Seok Seo, Mi-Ran Do, Dae-Youl Oh, Sung-Wan Hong, Gyu-Jin Bae and Gyo-Won Kim

ABSTRACT For proper sampling of a rock and preparation of specimens, the representative elementary volume (REV) should be determined in rock mechanical test and numerical analysis. Mechanical properties of a rock, in general, would be strongly affected by mineral composition. In this reason REV of Youngju granite is determined by using stereoscopic microscope observation and homogenization numerical analysis. As the area of analysis model exceeds approximately 702 mm^2 (900 elements), the change of the mineral composition is not observed. The calculated results indicate that Young's modulus is fluctuated with increase of the number of elements in homogenization numerical analysis mesh. However, as the number of elements exceeds 1156 (area of about 900 mm^2), Young's modulus does not change apparently.

Key words : granite, mineral composition, Young's modulus, REV

초 록 : 암반이나 암석의 역학적 거동을 파악하기 위하여 각종 시험 및 수치해석을 수행할 때 대표요소체적(REV)의 크기를 객관적으로 결정할 필요가 있다. 본 연구에서는 영주화강암을 대상으로 암석의 역학적 거동에 영향을 미치는 여러 가지 요소 중 조암광물의 함유율에 주목하여 해석모델의 크기변화에 따른 조암광물의 비율과 탄성계수의 변화를 검토하여 REV를 산정하였다. 조암광물의 분포는 해석모델의 면적이 약 702 mm^2 (900 요소)을 초과하면서부터 일정해 지고 있으며, 탄성계수는 해석모델의 면적이 약 900 mm^2 (1156요소)을 초과하면서부터 일정치를 보여준다.

핵심어 : 화강암, 광물조성, 탄성계수, 대표요소체적

1. 서 론

일반적으로 암석은 불균질하고 암반의 일부분으로부터 채취된 공시체의 역학적 성질은 채취장소와 시료의 크기에 따라서 달라지는 것으로 알려져 있다.¹⁻³⁾ 그러므로 암석역학시험이나 해석에 이용되는 시료는 모암을 대표할 수 있는 대표요소체적(Representative Elementary Volume, REV) 이상으로 제작되어 시험에 이용된다.

Hoek 와 Brown¹⁾의 연구결과에 따르면 공시체의 크기가 약 20 cm 범위 내에서 일축압축강도는 $d^{0.18}$ 에 비례한다. 여기서 d 는 공시체의 직경(cm)이다. Bieniawski 등²⁾은 실내시험과 현장시험을 함께 실시하여 좀 더 큰 시료를 대상으로 치수효과를 밝혔다. 이 시험 결과에 의하면 공시체의 치수가 약 1.5 m를 넘으면 일축압축강도가 거의 일정하게 되며 그 강도는 실험실 치수 강도의 약

14%에서 17%정도를 보인다.

Bear 등³⁾은 암반의 체적 U 에 대한 간극의 체적 U_v 의 비, 즉 간극률(U_v/U)의 체적에 따른 변화를 이용하여 대표체적요소(REV)를 결정하고 있다(Fig. 1). U 가 U_{\min} 보다 작을 경우, 선택된 체적에 포함되는 공극이나 기질의 분포변화가 심하기 때문에 U_v/U 의 진폭이 크게 나타나고 있다. 그러나 U_{\min} 를 지나면서 진폭이 작아지면서 거의 일정하게 된다. 한편 U_{\max} 를 지나면 U_v/U 의 값은 2종류

1)정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원

2)학생회원, 경북대학교 지질학과, 석사과정

3)경북대학교 지질학과, 박사과정

4)정회원, 한국건설기술연구원, 연구위원

5)정회원, 한국건설기술연구원, 수석연구원

6)정회원, 경북대학교 교수

접수일 : 2000년 8월 3일

심사 완료일 : 2000년 8월 19일

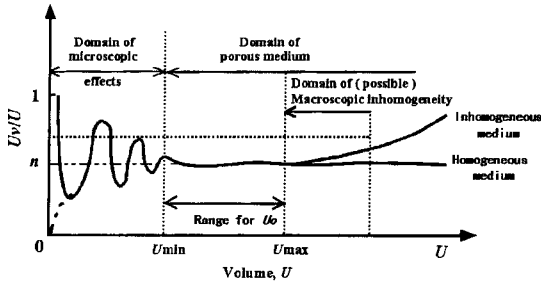


Fig. 1. Definition of porosity and Representative Elementary Volume³⁾

로 나누어지는데 그 이유는 암반의 불균질성, 즉 거시적인 불연속면이 관찰영역 속에 포함되기 때문이다. 따라서 REV는 U_{min} 과 U_{max} 사이로 결정되며 이 값이 연속체 암반에서 전 영역을 대표하는 값이 된다.

본 연구에서는 영주지역에 분포하는 화강암을 대상으로 암석의 역학적 거동에 영향을 미치는 여러 가지 요소 중 조암광물의 함유율에 주목하여 균질화법을 이용한 수치해석을 수행하여 탄성계수를 산정하였다. 해석결과에 의해 해석모델의 크기에 따른 조암광물의 비율과 탄성계수의 변화를 검토하였으며, 이들 물성치의 변화를 이용한 REV 결정방법의 유효성에 관하여 검토하였다.

2. 수치해석

2.1 균질화법에서의 탄성해석

균질화법(Homogenization Method)은 미시적인 구조 특성을 반영할 수 있는 해석기법의 일종으로서, 미시적으로 비균질한 구조가 주기적 또는 규칙적으로 반복되는 물체에 대하여 그 구조를 반영한 평균적 개념의 거시적 재료정수를 구할 수 있는 해석법이다. 이러한 연구는 1970년대부터 Lions를 중심으로한 프랑스의 연구그룹⁴⁾과 Bakhvalov를 중심으로 하는 구소련의 연구그룹⁵⁾에 의해 급속하게 발전하였다. 국내에서는 정교철⁶⁾에 의해서 석

영·장석모델에서의 미세균열의 진전과 응력집중에 관한 연구논문이 소개된 바 있다.

Fig. 2와 같이 두 개의 대표적 스케일로 표현되는 미시적 주기구조를 가진 복합재료로 구성되어 있는 2차원의 물체 Ω 를 생각하자. 여기서 재료의 거시적 구조를 기술하기 위한 좌표를 x_i 라고 하고, 미시적 구조를 기술하기 위한 좌표로서 $y_i = x_i/\epsilon$ 를 도입한다. 그리고 스케일이 ϵy 인 기본구조를 단위 셀(unit cell)이라 한다. ϵ 은 단위 셀의 크기를 규정하는 임의의 상수이다. 여기서 탄성 계수텐서를 $E^\epsilon(x)$, 물체력을 $f^\epsilon(x)$, 표면력을 t_i , 그리고 변위텐서를 $u_i^\epsilon(x)$ 라 하면 평형방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\int_{\Omega} E_{ijkl}^\epsilon(x) \frac{\partial u_k^\epsilon(x)}{\partial x_j} \frac{\partial v_i^\epsilon(x)}{\partial x_l} dx = \int_{\Omega} f_i^\epsilon(x) v_i^\epsilon(x) dx + \int_{\partial\Omega} t_i(x) v_i^\epsilon(x) dx \quad (1)$$

여기서 $v(x)$ 는 $\partial\Omega_\epsilon$ 상에서 0으로 주어지는 임의의 변위를 나타내며, 위 첨자 ϵ 은 미시적 구조의 지배를 받는 것을 의미한다. 물체에 힘과 경계조건이 주어지면, 미시적 구조를 가지는 단위 셀이 반복구조를 가지고 있으므로 각 점에서의 응력과 변형률이 변화하게 된다. 이들 변화량은 거시적 구조에서는 x , 미시적 구조에서는 y 를 변수로 가지게 된다. 따라서 다음과 같이 두 개의 변수를 가지는 함수로 표현된다.

$$\begin{aligned} E_{ijkl}^\epsilon(x) &= E_{ijkl}\left(x, \frac{x}{\epsilon}\right) = E_{ijkl}(x, y) \\ f_i^\epsilon(x) &= f_i\left(x, \frac{x}{\epsilon}\right) = f_i(x, y) \\ u_i^\epsilon(x) &= u_i\left(x, \frac{x}{\epsilon}\right) = u_i(x, y) \end{aligned} \quad (2)$$

이 함수들은 $y \in Y$ 인 Y 반복함수이며, 다음 식과 같

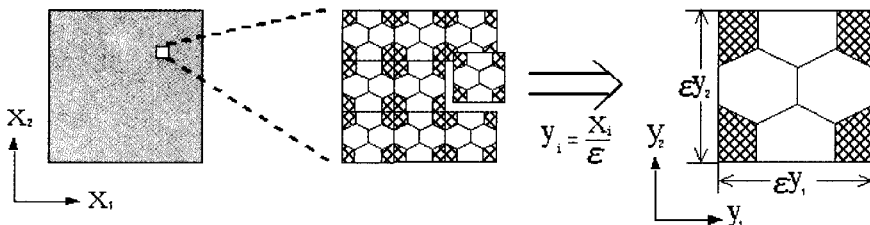


Fig. 2. Material body with a periodic microstructure and unit cell

이 미분된다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \rightarrow \frac{\partial}{\partial x_j} + \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial}{\partial y_j} \quad (3)$$

그리고 식(1)의 경계조건으로부터 $u_i^\varepsilon(x)$ 는 다음과 같은 점근식으로 표현된다.

$$u_i^\varepsilon(x) = u_i(x, y) = u_i^0(x) + \varepsilon u_i^1(x, y) + \varepsilon^2 u_i^2(x, y) + \dots \quad (4)$$

$$v_i(x) = v_i(x, y) = v_i^0(x) + \varepsilon v_i^1(x, y) + \varepsilon^2 v_i^2(x, y) + \dots \quad (5)$$

위 식에서 첫 번째 항 $u_i^0(x)$ 는 거시적 좌표계 x 에만 의존한다. 즉 u^0 항은 거시적 거동을 나타내며, u^1, u^2, \dots 는 미시적 거동을 나타낸다.

식 (2), (3), (4), (5)를 식 (1)에 대입하고 극한 $\varepsilon \rightarrow 0$ 를 취하여 풀면

$$u_i^1(x, y) = -\chi_i^{kl}(y) \frac{\partial u_k^0}{\partial x_l} + C_i(x) \quad (6)$$

가 얻어진다. 여기서 $C_i(x)$ 는 임의의 상수, χ_i^{kl} 은 대칭이며, 다음의 식을 만족하는 특성방정식이 된다.

$$\begin{aligned} \int_Y E_{ijkl}(x, y) \frac{\partial X_p^{kl}(x, y)}{\partial y_q} \frac{\partial v_i}{\partial y_j} dy \\ = \int_Y E_{ijkl}(x, y) \frac{\partial v_i}{\partial y_j} dy \end{aligned} \quad (7)$$

거시적 구조에서 u^0 는 다음과 같은 거시적 평형방정식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} E_{ijkl}^H(x) \frac{\partial u_k^0(x)}{\partial x_l} \frac{\partial v_i^0(x)}{\partial x_j} dx \\ = \int_{\Omega} f_i^H(x) v_i(x) dx + \int_{\partial\Omega_t} t_i(x) v_i(x) dx \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 균질화 탄성계수 E_{ijkl}^H 와 균질화 물체력 f_i^H 는 다음과 같다.

$$E_{ijkl}^H(x) = \frac{1}{|Y|} \int_Y \left(E_{ijkl}^\varepsilon(x) + E_{ijpq}^\varepsilon(x, y) \frac{\partial \chi_p^{kl}(x, y)}{\partial y_q} \right) dy \quad (9)$$

$$f_i^H(x) = \frac{1}{|Y|} \int_Y f_i^\varepsilon(x, y) dy \quad (10)$$

식 (9)에서 χ^{kl} 은 미시적 반복구조에 의해 정의되는 벡터함수이며, 특성화 변형함수이다. 그리고 식 (9)와 식

(10)을 이용하면 식(8)에서 나타나는 u^0 의 평균을 계산할 수 있다.

각 점에서의 응력은 다음의 구성방정식에 의하여 계산되어진다.

$$\sigma_{ij}^\varepsilon = E_{ijkl}^\varepsilon \frac{\partial u_k^\varepsilon(x)}{\partial x_l} \equiv \sigma_{ij}^\varepsilon(x, y) + \varepsilon \sigma_{ij}^1(x, y) + \dots \quad (11)$$

여기서 $u^\varepsilon = u^0 + \varepsilon u^1$ 을 식 (11)에 도입하면 미시적 단위 셀에서의 각 지점의 응력은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\sigma_{ij}(x, y) = \left(E_{ijkl}(x, y) + E_{ijpq}^\varepsilon(x, y) \frac{\partial \chi_p^{kl}(x, y)}{\partial y_q} \right) \frac{\partial u_k^0(x)}{\partial x_l} \quad (12)$$

그리고 단위 셀 내에서의 평균응력은 식 (13)과 같이 표현된다.

$$\sigma_{ij}^0(x) = \frac{1}{|Y|} \int_Y \sigma_{ij}^0(x, y) dy \quad (13)$$

따라서 평형방정식 식(1)은 다음과 같이 정의 될 수 있다.

$$\int_{\Omega} \hat{\sigma}_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} dx = \int_{\Omega} f_i^H v_i dx + \int_{\partial\Omega_t} \hat{t}_i v_i dx \quad (14)$$

2.2 공시체와 해석모델

본 연구에 사용된 암석은 영주화강암이며 채석장에서 채취한 시료를 사용하였다. 본 화강암의 조암광물을 분석하기 위하여 암석관찰용 박편 3개를 제작하여 편광현미경으로 포인트 카운팅을 실시하였다. 그 결과는 Table 1과 같다.

Table 1. Modal composition and physical properties of Youngju granite

Minerals & appearances	Composition & description
Quartz	35.7 %
Orthoclase	48.4 %
Plagioclase	12.3 %
Mica	3.5 %
others	0.1 %
Color	Greyish white
Texture	Equigranular
Grain size of Q and F	3-8 mm

Table 2. Young's modulus and Poisson's ratio of minerals⁸⁾

Minerals	E (GPa)	ν
Quartz	95.6	0.079
Feldspar	69.7	0.301
Mica	88.1	0.248

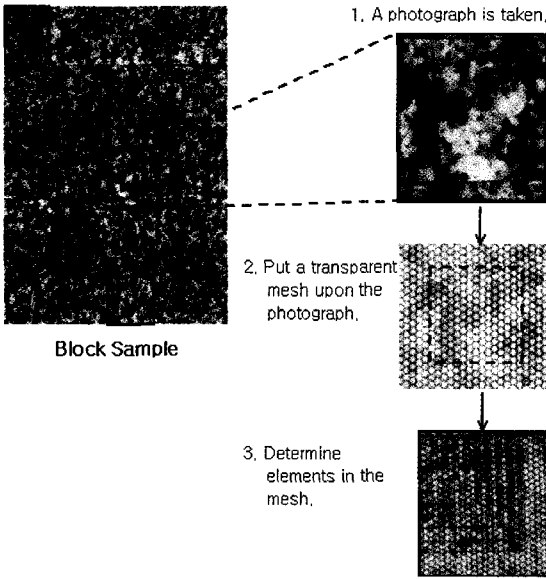


Fig. 3. Technical procedure to make a mesh for numerical analysis

Table 1에서 보는 바와 같이 화강암은 크게 석영, 정장석, 사장석, 운모류로 구성되어 있다. 본 해석에서는 화강암을 구성하는 요소로 석영, 장석, 운모 등 3종류의 광물만을 고려하였으며, 각 광물의 재료정수는 문헌으로부터 Table 2⁷⁾와 같다.

해석모델은 Fig. 3에 모식적으로 나타낸 것과 같은 방법으로 작성되었다. 먼저 채취한 암석의 표면을 확대렌즈를 이용하여 사진을 찍고, 사진위 임의의 위치에 투명한 용지에 그려진 원하는 크기의 정방형 메쉬를 겹친다. 각 요소에 포함되는 광물을 육안으로 판단하면서 암석구조의 모델을 작성한다. 영주화강암은 평균입경이 약 3-8 mm 이므로, 하나의 요소가 한 광물안에 완전히 포함이 되도록 요소의 한변을 1.1 mm 이하로 작성하였으며, 요소의 형태는 입자경계의 곡선을 비교적 잘 표현할 수 있도록 마름모꼴로 정하였다. 사진상에 나타난 숫자는 메쉬작성을 위하여 선택된 임의의 지점을 의미한다.

해석모델은 단계적으로 크게 요소수 36, 100, 196, 324, 484, 676, 900, 1156, 1444개를 가지는 9종류로

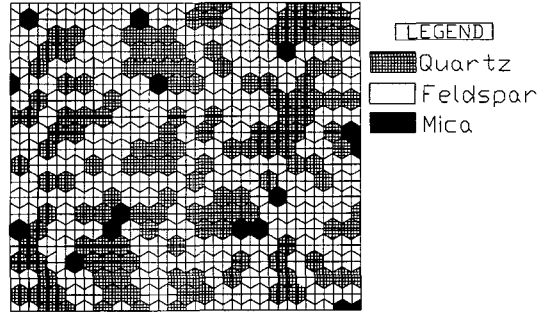


Fig. 4. A mesh for the homogenization analysis in 1444 elements model

작성되었으며, 484 요소모델까지는 모두 5개소에서, 676 요소모델부터는 각 2개소에서 모델을 작성하여 광물분포의 분석 및 해석을 실시하였다. 그리고 입자경계 및 미세균열 등의 분포는 무시하였고, 단지 조암광물의 배치만을 고려하였다.

해석의 조건으로는 일축압축에 의한 이차원 평면변형을 가정하고, 한쪽 가압면에 강제변위 0.2%를 가하여 응력을 측정하였다. Fig. 4는 1444개의 요소수를 가지는 해석모델 중하나를 나타낸 것이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 모델크기에 따른 조암광물의 비율

암석의 물리적 특성은 암석을 구성하는 광물들의 분포비율에 영향을 받는다. 따라서 해석모델의 크기에 따라서 변화하는 각 광물들의 분포비율과 그 분산정도를 고찰함으로써 해석대상암석의 REV를 산정할 수 있다.

각 요소수에 따른 조암광물의 분포비율을 Fig. 5에 나타낸다. 그림중의 점선은 Table 1에서 나타낸 편광현미경 관찰에 의한 각 조암광물의 평균 분포비율이다. 세

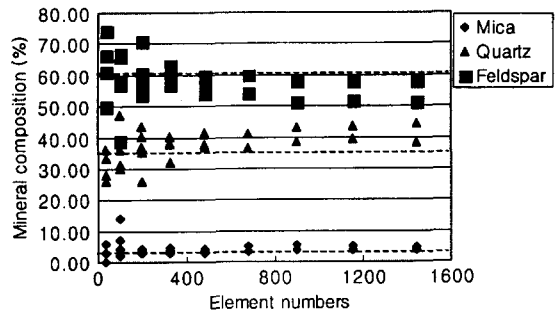


Fig. 5. Variation of mineral composition according to element numbers

개의 광물 모두 요소수가 증가함에 따라서 비율의 변동이 작아지면서 일정치를 향해 집중되어 가는 것을 볼 수 있다. 다만 석영의 경우 현미경 관찰 결과 보다 분포비율이 조금 높게 나오고 있고, 장석의 경우는 그 반대이다.

이것은 현미경관찰 면적보다 메쉬 작성에 이용된 육안 관찰 면적이 월등히 크기 때문에 화강암의 불균질성에 영향을 받은 것으로 사료된다. 또한 한 요소의 면적이 약 0.78 mm²의 마름모꼴로 이루어져 있어서 두 개의 광물이 포함되는 경우에는 많은 부분을 차지한 광물을 선택하였기 때문에 분포 오차의 원인이 되었을 것으로 사료된다. 절대적인 양이 적은 운모의 경우 현미경 관찰치보다 육안 관찰에서 조금 큰 비율을 보이고 있으나 비교적 잘 일치하고 있다.

Fig. 5를 살펴보면 900요소(면적 702 mm²)모델에서부터 요소수가 많아져도 광물조성의 비율에 큰 변화 없이 비교적 분포가 일정해지는 것을 알 수 있다.

3.2 모델크기에 따른 평균탄성계수

해석모델의 크기에 따른 평균탄성계수의 변화를 파악하고, 이 탄성계수를 지표로 이용하여 대표요소크기를 결정하는 방법의 유효성을 살펴보기 위하여 균질화법을 이용한 수치해석을 실시하였으며 그 결과를 Fig. 6에 나타낸다.

해석결과에 따르면 해석모델이 484 요소 보다 작은 경우에는 동일한 모델 크기간에도 탄성계수의 분산이 큰 것을 알 수 있다. 이는 조암광물의 분포에서 확인된 것과 같이 조암광물 조성비의 차이에 기인한 것으로 사료된다. 그리고 동일 크기의 모델에서 반복하여 계산된 탄성계수는 900 요소(면적 702 mm²)를 지나면서 일정치가 가까워지며, 1156 요소(면적 901.7 mm²)부터는 탄성계수가 약 94 GPa로 일정해 지고 있다.

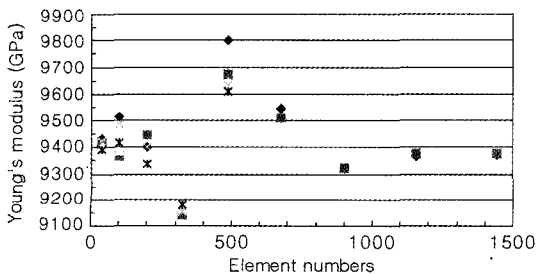


Fig. 6. Variation of Young's modulus according to element numbers in mesh

3.3 실험 결과와의 비교 및 금후의 과제

해석결과를 실험결과와 비교해 보기 위하여 서용석 등^{8,9)}에 의해 보고된 시험기를 이용하여 일축압축시험을 실시한 결과, 영주화강암의 탄성계수는 약 74 GPa로 나타났다. 실험과 해석에 의해 구해진 탄성계수는 약 20 GPa의 차이를 보이고 있다. 이는 많은 연구논문⁹⁻¹¹⁾에서 밝혀졌듯이 화강암에 분포하고 있는 미세결합의 영향으로 판단된다. 본 논문에서 수행한 균질화법 수치해석은 조암광물의 형태만을 고려했을 뿐 입계나 미세결합에 의한 영향을 고려하지 않았다. 앞으로 화강암에 분포하고 있는 미세균열 및 입자경계를 고려한 모델의 작성과 그에 따른 해석이 필요하다고 생각한다.

현미경 관찰 및 균질화법 해석에 의해 구해진 요소크기에 따른 광물 및 탄성계수의 분포로부터 영주화강암의 REV는 858 mm² (1100 요소×0.78 mm²) 이상인 것으로 판단된다. 이러한 결과로 미루어 볼 때 암석시험의 공식체 크기에 있어서 통상 사용되고 있는 직경 5.4 cm의 NX size 코어시료를 사용하는 것은 적당하다는 것을 알 수 있다.

본 해석에서 사용된 해석모델에서는 한 요소에 두 개의 광물이 공존하는 경우에는 요소를 접하는 광물을 판단하는 것이 쉽지 않다. 그리고 이러한 문제점은 해석결과와 정밀도에 영향을 미친다. 한편, 요소수를 계속 증가시켜 해석모델을 작성할 경우 해석에 필요한 시간과 노력도 비례하여 증가된다. 실제 대표요소의 결정은 암석시험의 경우에 비유하면 본 시험을 수행하기 위한 초기작업에 해당하므로, 이러한 작업에 시간과 노력을 많이 투자한다는 것은 바람직하지 못하며 자동화에 의한 해석모델의 제작이 필요하다고 사료된다.

4. 결 론

계산모델에서 요소의 수를 변화시키면서 암석의 조암광물 함유량을 측정하면 약 702 mm²의 면적을 가지는 모델에서부터 일정치에 다다른다. 그리고 무작위로 선택한 장소에서 작성된 같은 면적을 가지는 모델간의 오차도 요소의 면적이 증가함에 따라 줄어드는 것을 알 수 있다.

균질화법에 의한 수치해석으로 구해진 탄성계수는 면적 901.7 mm²의 계산모델부터 일정치를 보이고 있으며, 그 값은 약 94 GPa이다. 이는 일축압축시험 결과로부터 계산된 탄성계수와 비교해보면 약 20 GPa 높은 값에 해당

한다. 그 이유로는 화강암에 분포하고 있는 미세균열 및 입자경계에 의한 영향을 고려하지 않은 결과로 사료된다.

현미경관찰에 의해 측정된 조암광물의 함유량과 균질 화법에 의한 수치해석의 결과로부터 영주화강암의 REV를 산정한 결과 858 mm^2 ($1100 \text{ 요소} \times 0.78 \text{ mm}^2$) 이상인 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 1999년도 과학기술부 국가지정연구실 사업의 연구비에 의해 이루어진 연구결과로서 관련자 여러분께 깊은 감사의 뜻을 전합니다.

참 고 문 헌

1. Hoek, E and E. T. Brown, 1980, Underground excavations in rock, Institution of Mining and Metallurgy, London, 156.
2. Bieniawski, Z. T. and W. L. van Heerden, 1975, The significance of in situ tests on large rock specimens, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 12, 101-113.
3. Bear, J. and A. Verruijt, 1987, Modeling groundwater flow and pollution, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, 20.
4. Sanchez-Palencia, E., 1980, Non-homogeneous media and vibration theory, Lecture Notes in Physics, 127, Springer-Verlag, Paris.
5. Bakhvalov, N. and G. Panasenko, 1989, Homogenization: Averaging Processes in periodic media -Mathematical Problems in the Mechanics of Composite Materials, Kluwer Academic Pub., Dordrecht.
6. 정교철, 1994, Analysis of Micro- to Macro-Mechanics in Granitic Rock: Experimental Observation and Theoretical Consideration, 자원환경지질학회지, 27.5, 499-505.
7. Bass, J. D., 1995, Mineral Physics and Crystallography, vol. 2 (ed. T. J. Ahrens), AGU, Washington.
8. 徐庸碩, 清木隆文, 市川康明, 1999, 마이크로クラックの發生・進展に起因した結晶質岩の應力緩和現象に関する水浸一軸試験, 日本材料學會誌, 48.11, 1255-1262.
9. 서용석, 정교철, 1999, Micro-damage process in granite under the state of water-saturated triaxial compression, 대한지질공학회지, 9.3, 243-251.
10. Peng, S. and A. Johnson, 1972, Crack growth and faulting in cylindrical specimens of Chelmsford granite, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 9, 37-86.
11. Wong, T. F., 1982, Micromechanics of faulting in Westerly granite, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 19, 49-64.



서용석

1991년 경북대학교 자연과학대학
지질학과, 이학사
1993년 경북대학교 대학원 지질학
과, 이학석사
1999년 일본 名古屋大學 大學院 地
球環境工學科, 공학박사

Tel : 031-9100-225

E-mail : ysseo@kict.re.kr

현재 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원



도미란

1999년 경북대학교 자연과학대학
지질학과, 이학사

Tel : 053-754-7472

E-mail : whiteirish@hanmail.net

현재 경북대학교 대학원 지질학과 석사과정



오대열

1988년 경북대학교 자연과학대학
지질학과, 이학사
1990년 경북대학교 대학원 지질학
과, 이학석사

Tel : 053-950-6344

E-mail : dslcye@thru.net.com

현재 경북대학교 대학원 지질학과 박사과정



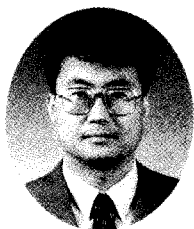
홍성원

1966년 서울대학교 토목공학과, 공
학사
1976년 Illinois 대학 지반공학 석사
1999년 Illinois 대학 지반공학 박사

Tel : 031-9100-485

E-mail : swhong@kict.re.kr

현재 한국건설기술연구원 토목연구부 지하구조물그룹
연구위원



배규진

1980년 경북대학교 농공학과, 공학
사
1982년 연세대학교 대학원 토목공
학과, 공학석사
1990년 연세대학교 대학원 토목공
학과, 공학박사

Tel : 031-910-0093

E-mail : gjbae@kict.re.kr

현재 한국건설기술연구원 수석연구원



김교원

1976년 경북대학교 자연과학대학
지질학과, 이학사
1982년 태국 Asian Institute of
Technology 지반공학과,
공학석사
1989년 미국 Northwestern Univ.
토목공학과, 공학박사

Tel : 053-950-5357

E-mail : kyokim@kyungbook.ac.kr

현재 경북대학교 지질학과, 조교수