

대표요소체적 산정을 통한 화강암의 해석모델 규모 결정

서용석	충북대학교 지구환경과학과
백 용	한국건설기술연구원 지반연구부
권오일	한국건설기술연구원 지반연구부
박천진	충북대학교 지구환경과학과
김장겸	충북대학교 지구환경과학과

1. 서 론

대부분의 암석은 이질재료로 구성되어 불균질하며, 특히 암반의 일부분으로부터 채취된 공시체의 물리적, 역학적 성질이 채취장소와 시료의 크기에 따라 달라지는 복합체이다.

일반적으로 복합체의 유효 물성치(Effective modulus)를 예측하는 기법은 여러 가지 방법이 있지만 대부분이 그 복합체의 특성을 대표할 수 있다고 할 수 있는 대표요소체적(Representative Elementary Volume)을 설정하고, 이 대표요소에서의 응력과 변형률 관계식으로부터 유효물성치를 구한다(Hashin, 1983). Voigt 근사화법은 대표요소 내에서 변형률이 일정한 조건으로부터, Ruess 근사화법은 대표요소 내에서 응력상태가 일정한 조건으로부터 유효물성치를 추정하는 방법이다(Whitney et al., 1990). 미시역학적 방법(Standard Mechanics Approach)은 대표요소에 특정한 경계 조건을 부가하여 경계치 문제를 해석적 또는 수치적인 방법으로 풀어서 유효물성치를 추정하는 방법이다(Hollister et al., 1992). 유한요소에 의한 수치해석을 그 예로 들 수 있다.

서용석 등(2000)은 영주화강암의 조암광물 함유율을 이용하여 탄성계수 및 대표요소체적(REV)를 결정한 바 있으며, 탄성계수의 측정 및 산정한 실험결과와 해석결과의 차가 약 20Gpa정도로 보고하면서 그 차이의 원인을 미세균열을 고려하지 않은 결과로 판단하였다.

본 연구에서는 일본의 세립질 이나다 화강암을 대상으로 암석의 역학적 거동에 영향을 미치는 여러 가지 요소 중 조암광물의 함유율과, 전술한 서용석 등(2000)의 연구에서 고려하지 못한 화강암에 규칙적으로 분포하는 미세균열에 주목하여 균질화법을 이용한 탄성해석을 실시하였다. 서로 다른 크기의 해석모델에서 해석된 각각의 해석결과는 조암광물의 구성비, 미세절리의 분포비 및 탄성계수의 변화를 검토하여 대표요소체적(REV)을 결정하였으며, 실제 시험 값과 비교함으로서 균질화법과 대표요소체적(REV) 결정방법의 유효성을 검토하였다.

2. 시 험

2.1. 시료 및 시험방법

본 연구에서 사용된 암석은 일본 이바라끼현 쭈꾸바지방에 분포하는 백악기~고제삼기의 세립질 이나다 화강암(Takahashi, 1982)이며, 이 광물조성과 암석학적 특징은 Table 1과 같다.

암석시료는 채석장에서 채취한 암석 블록으로부터 40×20×5mm 규격의 공시체를 제작하였으며, 재하시 휨 등의 발생을 방지하기 위하여 단면의 평형도와 직각도를 4/1000mm 이내로 정밀하게

하였다. 제작된 공시체는 재하 시험기에 설치하여, 공시체의 장축방향으로 0.2MPa/sec의 재하속도로 파괴 시 까지 응력을 작용하였다. 시험 시 탄성계수의 산정을 위하여 재하와 동시에 응력과 변형률을 측정하였다. 본 연구에서는 총 3개의 시료에 대한 일축압축 시험을 수행하여 탄성계수의 산정에 이용하였다.

Table 1. Modal composition and physical properties of Inada fine-grained granite(서용석, 2000).

Components	Properties
Quartz (Q)	25.5 %
Feldspar (F)	66.8%
Mica	7.1%
Others	0.6 %
Color	Greyish white
Texture	Equigranular
Grain size of Q and F	1 ~ 4 mm

2.2. 탄성계수 산정

본 연구에서는 세립질의 이나다 화강암의 일축압축 과정에서의 응력과 변형률 그래프를 이용하여 탄성계수를 산정하였다. 산정방법은 일반적으로 사용되는 최대응력의 50%에서의 접선의 기울기를 적용하는, 50% 접선탄성계수를 이용하였다. 시험 결과 세립질 이나다 화강암의 평균 일축압축강도는 178.4MPa이며, 평균 탄성계수는 101.4GPa로 나타났다.

3. 수치해석

수치해석에는 Seo et al. (2000)에 의하여 제시된 균질화 해석 기법이 사용되었다. 자세한 이론적 내용은 상기 논문을 참조하기 바란다.

3.1. 해석모델

본 연구에 사용된 세립질 이나다 화강암은 Table 1과 같은 광물조성과 암석학적 특성을 가진다. 본 해석에서는 화강암을 구성하는 요소로 석영, 장석, 운모 등 3종류의 광물을 고려하였으며 각 광물의 재료정수는 Table 2와 같다. 또한 화강암에 규칙적으로 분포하는 미세균열이 화강암의 거동에 큰 영향을 미치리라 판단하여 해석모델에 결을 형성하는 미세균열을 적용하였다. Seo et al.(2000)은 화강암의 미세균열을 다음과 같이 4종류로 구분하고 각각의 시간의존성 거동을 실험으로 구하여 제시하였다. 즉, 석영과 석영사이(JQQ), 석영과 장석사이(FQF), 장석과 장석사이(JFF), 운모와 관련된 것(JMQF) 등 4종류로 구분되며 각각의 재료정수는 아래와 같다. 본 연구에서는 화강암의 점탄성적 특성은 무시하고 탄성해석만을 실시하였기 때문에 시간(t)은 0으로 적용하였다. 각 광물의 탄성적 성질은 Bass(1995)에 의해 제시된 값을 적용하였다.

(Joint element 1, JQQ)

$$K(t) = 38.2 + 0.41 \exp(-t/54.7) + 0.21 \exp(-t/1.41) \quad (1)$$

$$G(t) = 32.2 + 0.31 \exp(-t/0.5) + 0.88 \exp(-t/42.7) \quad (2)$$

(Joint element 2, JQF)

$$K(t) = 160.3 - 2.65 \exp(-t/0.55) - 3.15 \exp(-t/9.21) - 5.13 \exp(-t/74.9) \quad (3)$$

$$G(t) = 34.1 + 0.39 \exp(-t/0.5) + 0.69 \exp(-t/33.4) \quad (4)$$

(Joint element 3, JFF)

$$K(t) = 96.7 \quad (5)$$

$$G(t) = 56.8 + 0.17 \exp(-t/0.3) + 0.52 \exp(-t/3.72) + 0.74 \exp(-t/60.0) \quad (6)$$

(Joint element 4, JMQF)

$$K(t) = 10.1 + 3.35 \exp(-t/31.1) \quad (7)$$

$$G(t) = 11.3 + 151.7 \exp(-t/0.3) \quad (8)$$

Table 2. Young's modulus and Poisson's ratio of minerals(Bass, 1995).

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

균질화법 해석모델은 암석시료(2×4cm)의 표면을 확대렌즈를 이용하여 사진을 찍고, 사진위에 사각형의 메쉬를 겹쳐 각 요소에 포함되는 광물을 육안으로 확인하여 암석의 모델을 작성하였다. 이나다 화강암의 미세균열의 평균 길이 및 밀도는 서용석(2000)에 의해 측정된 것을 이용하였다. 본 연구에서는 가장 깨어지기 쉬운 2번결(grain)면에 나타나는 1번결(rift)의 미세균열을 대상으로 밀도를 구한 후 박편사진을 참고하여 가압방향과 평행하게 적용하였다. 또한 요소의 변의 길이를 고려하여 0.5mm 이상의 미세절리만을 고려하였다.

해석모델에서 요소의 크기는 이나다 화강암의 평균 입경이 약 1-4mm이므로, 하나의 요소가 완전히 광물안에 포함되도록 요소의 한 변을 최대 0.6mm 이하로 작성하였으며 요소 한 개의 면적은 약 0.22mm²이다. 요소의 형태는 입자경계의 곡선을 비교적 잘 표현할 수 있도록 마름모꼴로 정하였다. 또한 해석모델은 단계적으로 크게 요소수 36(6×6, 7.9mm²), 100(10×10, 22mm²), 196(14×14, 43.1mm²), 324(18×18, 71.3mm²), 484(22×22, 106.5mm²), 676(26×26, 148.7mm²), 900(30×30, 198mm²), 1156(34×34, 254.3mm²), 1444(38×38, 317.7mm²)개의 9종류로 작성하였으며, 196 요소모델까지는 6개소, 484 요소모델까지는 4개소, 1444 요소모델까지는 2개소에서 모델을 작성하였다. Figure 1은 1444(38×38)개의 요소수를 가지는 해석모델 중 하나를 나타낸 것이다.

해석의 조건은 일축압축에 의한 이차원 평면변형을 가정하고, 한쪽 가압면에 강제변위 0.2%를 가하여 응력을 측정하였다.

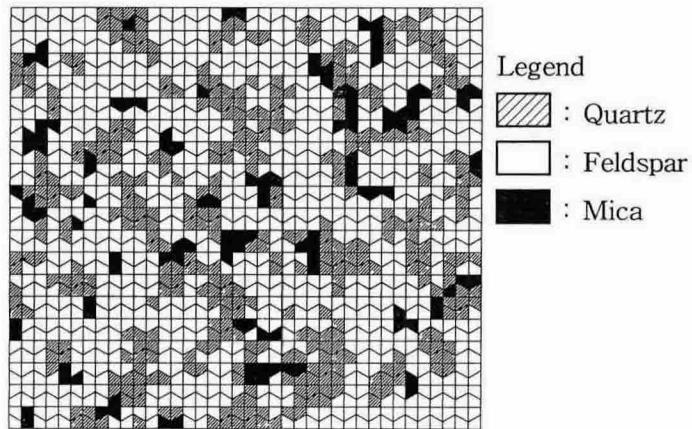


Figure 1. A mesh for the homogenization analysis in 1444 elements model.

4. 해석결과 및 고찰

4.1. 조암광물의 비율

암석의 물리적, 역학적 특성은 암석을 구성하는 광물의 구성비와 분산에 영향을 받는다. 따라서 해석모델 크기의 증가에 따른 각 조암광물 구성비의 수렴 정도를 파악함으로서 대표요소체적(REV)을 산정할 수 있다.

본 연구에서는 단계별 해석모델에서 각 광물이 점유하고 있는 요소 수를 이용하여 조암광물의 구성비를 구하였다. Figure 2는 단계별 해석모델의 조암광물의 구성비, 그리고 그 각각의 구성비와 이나다 화강암의 평균 조암광물의 구성비 사이의 분산을 나타낸 것이다. 단계별 광물 구성비 그래프에서의 실선은 편광현미경 관찰(서용석, 2000)에 의해 관찰된 각 조암광물의 구성비이다 (Table 1).

세 개의 조암광물 모두가 요소수의 증가에 따라 비율 변동이 작아지면서 일정한 값에 대해 수렴하는 것을 알 수 있다. 장석과 석영은 현미경 관찰값과 유사하게 나타나며, 절대적인 양이 적은 운모가 다소 높은 비율을 보이지만 비교적 잘 일치한다고 할 수 있다. 적은 요소수의 해석모델이 서의 큰 분산은 조암광물의 불규칙한 분포를 의미한다, 각 단계별 조암광물 구성비의 분산을 살펴보면 약 740(162.8mm^2)요소의 모델부터 수렴하며, 이는 162.8mm^2 이상의 면적부터는 세립질이나 화강암의 조암광물 구성비가 대체로 일정해 진다는 것을 의미한다.

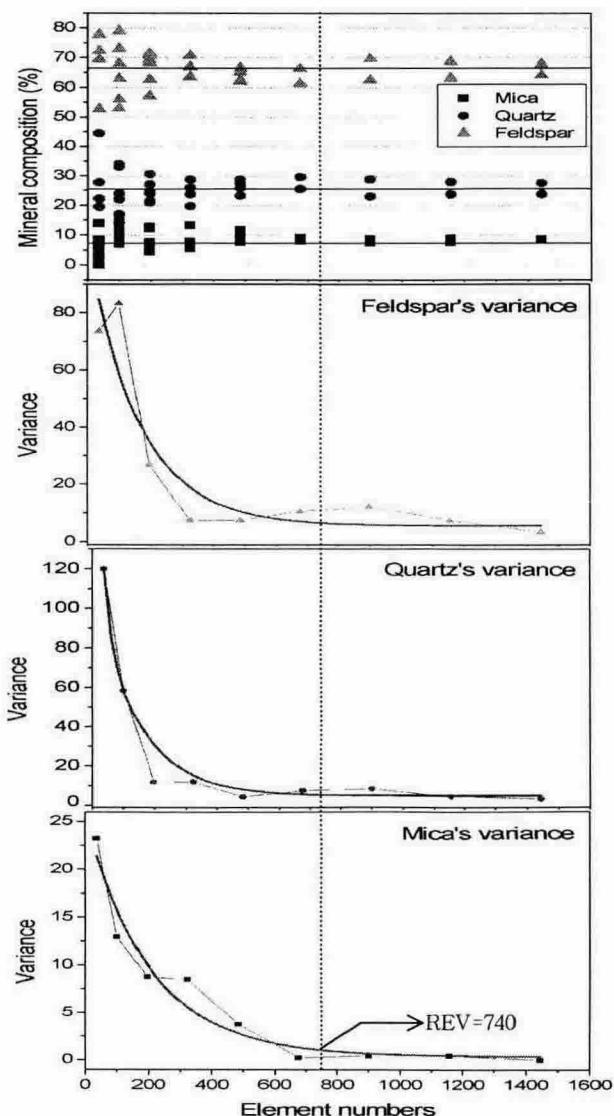


Figure 2. A mesh for the homogenization analysis in 1444 elements model.

4.2. 미세균열의 비율

화강암에 결에 따라 규칙적으로 분포하는 미세균열은 광물의 구성비와 함께 화강암의 물리적, 역학적 특성에 큰 영향을 미친다. 따라서 광물의 조성비와 마찬가지로 해석모델에 따른 미세균열의 분포비 및 분산정도도 대표요소체적(REV)의 산정에 이용될 수 있다.

미세균열의 분포비는 각 단계별 해석모델을 구성하는 요소들의 변 중 가압방향과 평행한 변과 미세균열이 점유하고 있는 변의 비로 구하였다. 해석모델의 단계별 미세균열 분포비, 그리고 그 각각의 분포비와 평균 분포비 사이의 분산을 Figure 3에 나타내었다. 미세균열 분포의 분산 정도는 약 1030요소(226.6mm^2)부터 수렴하기 시작하며 미세균열 분포비가 일정해 진다. 740요소 (162.8mm^2)부터 수렴하는 조암광물의 분포와 비교해 보면, 미세균열이 광물의 분포보다는 더 불규칙하게 분포하며 화강암의 불균질성의 주요한 원인임을 알 수 있다.

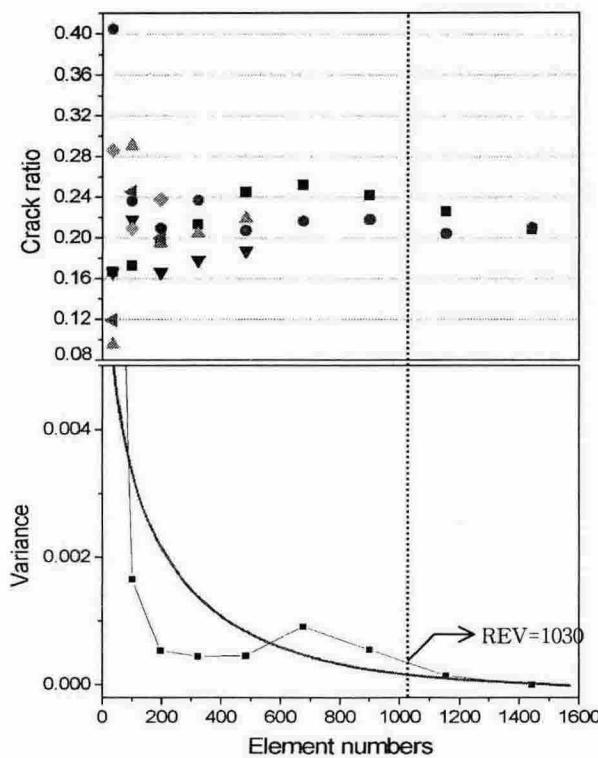


Figure 3. Variance of crack ratio according to element numbers.

4.3. 탄성계수

세 종류의 조암광물과 네 종류의 미세균열이 적용된 각각의 단계별 해석모델을 대상으로 균질화법을 이용한 수치해석을 실시하여 평균탄성계수를 구하였다. 해석모델 크기의 증가에 따른 평균탄성계수의 변화를 이용하여 대표요소체적(REV)을 결정하고, 그 결과를 시험에 의해 구해진 탄성계수와 비교함으로써 대표요소체적의 결정 방법의 유효성을 검증할 수 있다.

각 단계별 수치해석 결과와 그 분산은 Figure 4에 나타내었다. 해석 결과 약 1040요소 (228.8mm^2)의 해석모델부터 단계별 탄성계수와 평균 탄성계수 사이의 분산이 수렴하기 시작하며 탄성계수도 94.1GPa로 일정해 진다. 각 단계별 수치해석 결과 나타나는 탄성계수에 대한 분산의 원인은 불균질하게 적용된 광물의 구성비와 미세균열의 분포에 기인하는 것으로, 광물의 구성비와 미세균열의 분포가 일정해 짐에 따라 탄성계수의 값도 일정해진다.

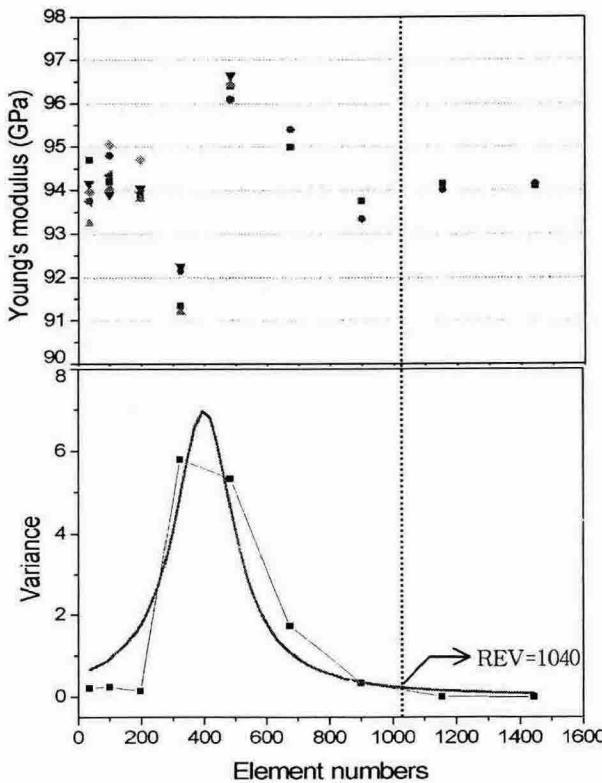


Figure 4. Variance of Young's modulus according to element numbers.

4.4. 해석결과 검토

조암광물의 구성비 및 미세균열의 분포비를 적용하여, 균질화법을 이용한 수치해석 결과 세립질 이나다 화강암의 탄성계수는 약 94.1GPa로 산정되었으며, 이는 시험에 의한 결과인 101.4GPa보다는 다소 낮게 나타난다. 미세균열을 고려하지 않고 단지 조암광물만의 구성비를 적용한 서용석 등(2000)의 연구결과에서 수치해석 결과가 실험치 보다 약 20GPa 높게 나타났으며, 이 차이는 미세균열 및 입자경계를 고려하지 않은 결과임을 제시한 바 있다. 따라서 본 연구에서의 해석치와 실험치 사이의 근접은 화강암의 거동시에 광물의 구성비 뿐만 아니라 미세균열도 중요한 작용을 한다는 것을 의미한다.

서용석(2000)에 의하면 화강암의 일축압축강도는 화강암에 발달하고 있는 결의 영향으로 약간의 이방성을 보인다. 본 연구에서는 해석 시 가장 깨어지기 쉬운 1번결(rift)의 미세균열군을 고려하였으며 실험은 결의 방향을 고려하지 않은 상태의 시료를 사용하였기 때문에 실험값 보다는 해석에 의한 탄성계수가 약 7.3GPa정도 낮은 것으로 추정되며, 앞으로 화강암의 각각의 결을 고려한 모델의 작성과 그 해석 및 실험에 관한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

단계적으로 요소수를 증가시킨 해석모델을 통해 구해진 조암광물, 미세균열의 분포 및 균질화법에 의해 구해진 탄성계수의 분포로부터 세립질 이나다 화강암의 대표요소체적(REV)은 대략 1100요소, 즉 242mm^2 정도의 면적으로 생각된다. 미세균열을 고려하지 않은 조립질 영주화강암의 대표요소체적(REV)을 858mm^2 로 결정한 이전 연구(서용석, 2000)의 결과와는 많은 차이를 보이지만 이는 조립질 화강암과 세립질 화강암의 구성 광물의 입자 크기의 차이에서 오는 결과로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 일본의 세립질 이나다 화강암을 대상으로 암석의 역학적 거동에 영향을 미치는 여러 가지 요소 중 조암광물의 함유율과, 화강암에 규칙적으로 분포하는 미세균열에 주목하여 균질화법을 이용한 탄성해석을 실시하였다. 이상의 연구에서 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 화강암의 해석모델에 대한 응력분석 결과 광물과 미세절리의 분포에 따라 응력의 집중 및 이완이 나타나며, 이 결과 광물과 미세절리가 화강암의 거동에 큰 영향을 미칠 것으로 사료된다.
2. 요소의 수를 변화시킨 각각의 해석모델에서 암석의 조암광물의 구성비는 약 163mm^2 (740요소)의 면적에서부터 일정한 분포를 보이며, 미세균열의 분포비는 약 227mm^2 (1030요소)의 면적에서부터 수렴한다. 또한 해석모델의 요소의 수가 증가함에 따라 단계별 비율과 평균 비율 사이의 분산도 줄어든다.
3. 균질화법에 의한 수치해석으로 구해진 탄성계수는 해석모델의 면적이 약 229mm^2 (1040요소)에서부터 일정해지며, 그 값은 94.1GPa로 실험치에 비해 7.3GPa 정도 낮게 나타난다. 그 원인은 해석시 고려한 화강암의 미세균열군, 즉 결을 실험에서는 고려하지 않은 결과로 사료된다.
4. 따라서 요소수의 증가에 따른 광물, 미세절리의 분포와 균질화법에 의해 구해진 탄성계수의 분포로부터 세립질 이나다 화강암의 대표체적요소(REV)는 약 242mm^2 (1100요소)정도일 것으로 판단된다.

참고문헌

- 서용석, 2000, 화강암의 응력완화현상에 관한 수침삼축시험, 대한지질공학회지, 10, 243-251.
- 서용석, 도미란, 오대열, 홍성완, 배규진, 김교원, 2000, 균질화법을 이용한 화강암의 대표 요소체적 산정에 관한 연구, 터널과 지하공간, 10, 309-314.
- Bass, J. D., 1995, Mineral physics and crystallography, 2, AGU, Washington.
- Hashin, Z., 1983, Analysis of composite materials a survey, ASEM J. Appl. Mech., 50, 481-505.
- Hollister, S. J. and Kikuchi, N., 1992, A comparison of homogenization and standard mechanics analyses for periodic porous composites, Comp. Mech. 10, 73-95.
- Seo, Y. S., Fujii, N., Seiki, T. and Ichikawa, T., 2000, Viscoelastic Behavior of Granite and the Homogenization Analysis, The Scociety of Materials Science, Japan, 6, 3, 203-211.
- Takahashi, Y., 1982, Geology of the granitic rocks in the Tsukuba area, J. Geol. Soc. Japan, 88, 177-184.
- Whitney, J. M. and McCullough, R. L., 1990, Micromechanical Materials Modelling 2, Technomic Publishing Company, Pennsylvania.