

익산 쥐라기 화강암의 정 및 동탄성학적 특성

강동호 · 정태종 · 이정모

경북대학교 지질학과

요 약

전북 익산시의 쥐라기 화강암은 육안 식별이 가능한 단열이 비교적 적게 발달하고 균질하여 대형 석구조물 및 건축 재료로서 많이 사용되고 있다. 익산 쥐라기 화강암에 물리적인 힘을 가하면 어느 한 방향으로 잘 쪼개지는 결이 존재하는 것이 석공들에게 잘 알려져 있다. 이들 결은 서로 직교하며 취약한 순서에 따라 일결, 이결, 삼결이라 한다. 따라서, 익산 화강암의 물성은 사방정계적 대칭으로 표현될 수 있다. 사방정계의 탄성특성은 9 개의 독립된 탄성강성계수(C_{1111} , C_{2222} , C_{3333} , C_{2323} , C_{1313} , C_{1212} , C_{1122} , C_{2233} , C_{1133})로 기술된다. 익산 쥐라기 화강암의 정 및 동탄성학적 특성을 구명하기 위하여 화강암괴로부터 여섯방향의 시추공 시료를 제작하여 정탄성 실험과 동탄성 실험을 수행하였다. 정탄성 실험에서는 각 시료의 일축압축에 따른 세방향(축방향과 두 횡방향)의 변형을 측정하였고, 동탄성 실험에서는 각 시료 방향으로 진행되는 종파와 2 개의 수직방향으로 진동하는 횡파의 속도를 측정하였다. 일반 이방성 탄성지배공식으로부터 사방정계 경우를 유도한 결과를 이용하여, 실험 결과와 별도로 측정된 밀도를 사용하여 정탄성계수와 동탄성계수를 구하였다. 정탄성계수는 축응력이 증가함에 따라 탄성계수도 증가하며, 이들 중 24.5 MPa 의 축응력에 대한 정탄성계수가 상압 하에서 동탄성계수와 유사한 것으로 나타났다. 현미경관찰에서 일결, 이결, 삼결과 평행 또는 아평행한 균열들이 미세균열의 주종을 이루고 있는 것이 밝혀졌으며, 익산 쥐라기 화강암이 이방성 탄성특성을 가지는 주된 원인은 이들 미세균열로 사료된다. 이들 결과는 익산 화강암의 석재 이용 효율성을 증가시키는 데 이용되며, 석구조물의 비파괴 안전진단에 이용될 수 있다.

주요어: 익산 화강암, 이방성 탄성, 정탄성계수, 동탄성계수, 미세균열

Dong Hyo Kang, Jung Tae Jong and Jung Mo Lee, 2000, Static and dynamic elastic properties of the Iksan Jurassic Granite, Korea. Journal of the Korean Geophysical Society, v. 3, n. 2, p. 99-112

ABSTRACT: The Iksan Jurassic Granite shows relatively less fractures and homogeneous rock fabrics, and is one of the most popular stone materials for architectures and sculptures. Almost mutually perpendicular rift, grain, and hardway in the Iksan Jurassic Granite are well known to quarrymen based on its splitting directions, and therefore it should exhibit orthorhombic symmetry. Theoretically, there are 9 independent elastic stiffness coefficients (C_{1111} , C_{2222} , C_{3333} , C_{2323} , C_{1313} , C_{1212} , C_{1122} , C_{2233} , and C_{1133}) for orthorhombic anisotropy. In order to characterize the static and dynamic elastic properties of the Iksan Jurassic Granite, triaxial strains under uniaxial compressive stresses and ultrasonic velocities of elastic waves in three different polarizations are measured. Both experiments are carried out with six directional core samples from massive rock body. Using the results of experiments and the densities measured independently, the static and dynamic elastic coefficients are computed by simple mathematical manipulation derived from the governing equations for general anisotropic media. The static elastic coefficients increase as uniaxial compressive stress rises. Among those, the static elastic coefficients at uniaxial compressive stress of a 24.5 MPa appear to be similar to the dynamic elastic coefficients under ambient condition. Although some deviations are observed, the preferred orientations of microcracks appear to be parallel or subparallel to the rift, the grain, and the hardway from microscopic observation of thin sections. This indicates that the preferred orientations of microcracks cause the elastic anisotropy of the Iksan Jurassic Granite. The results are to be applied to the effective use of the Iksan Jurassic Granite as stone materials, and can be used for the non-destructive safety test.

Key words: Iksan Jurassic Granite, Elastic anisotropy, static elastic coefficient, dynamic elastic coefficient, microcrack

(Dong Hyo Kang, PMRD, KIGAM, Yoosung P. O. Box 111, Taejon, 305-350 Korea; Tae Jong Jung, Jungoh Building, Wooman-dong, Paldal-gu, Suwon, Kyunggi-do, 442-190 Korea; Jung Mo Lee, Department of Geology, Kyungpook National University, Taegu, 702-701 Korea, jung@knu.ac.kr)

1. 서 론

화강암은 다른 종류의 암석에 비하여 비교적 균질하고 일반적으로 등방성인 것으로 알려져 있으나, 이방성 탄성특성을 보이는 경우가 많이 보고되고있다(Lo, *et al.*, 1986). 이방성의 원인은 구성 광물의 입자 배열의 방향성(Brace, 1965; Crosson, 1971), 미세층리(Postma, 1955; Backus, 1962) 및 미세균열의 방향성(Anderson, *et al.*, 1974; Crampin, *et al.*, 1980; Hudson, 1980, 1981) 등과 또는 이들의 조합에 의한 것으로 일반적으로 구분된다. 화강암은 지하 심부에서 생성되므로 지상에 노출된 화강암에는 응력 해방에 의한 미세균열이 존재한다. 이러한 미세균열은 해방되기 전의 응력에 대한 정보를 제공할 수 있다(Nur, and Simmons, 1969). 또한 주어진 응력에 대하여 미세균열들이 방향성을 가지고 생성되기도 한다.

화강암에 물리적인 힘을 가할 시 어느 한 방향으로 잘 쪼개지는 경향이 있는 것이 석공들에게 알려져 있다. 일반적으로 이를 일결(rift), 이결(grain), 삼결(hardway)이라 한다. Rodrigues(1966), Douglass and Voight(1969), Tremmel and Widmann(1970) 등은 방향별 영률(Young's modulus)을 비교하여 일결, 이결, 삼결이 상호 사방정계적 대칭성을 가짐을 밝혔다. Duvall (1965), Thill *et al.*(1969), Bur and Hjelmstad(1970), Thill *et al.*(1973) 등은 탄성과 속도를 이용하여 일결, 이결, 삼결의 이방성을 밝혔고 상호 사방정계적 대칭성을 가짐을 설명하였다. 완전한 탄성체에서는 정탄성학적 특성과 동탄성학적 특성이 일치하나, 암체에서는 회복 불가능한 비탄성적인 영향에 의하여 정확히 일치하지는 않는다. 따라서, 이들의 상관관계 규명과 그 원인을 연구하는 것이 암석물리학의 기본 과제이다. 또한, 지구물리 탐사방법을 이용하여 원격 파악이 가능한 동탄성학적 특성을 공학에서 많이 쓰이는 정탄성학적 특성에 적용하기 위하여 이들에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다.

본 연구는 익산 유라기 화강암을 대상으로 정탄

성학적 특성과 동탄성학적 특성의 상관관계 규명이라는 암석물리학의 기본과제를 밝히고, 공학에서 사용되는 정탄성학적 특성을 지구물리학적 방법으로부터 유추하는데 필요한 정보와 과정을 밝히는데 목적이 있다. 전북 익산시에 부존하는 화강암은 육안 식별이 가능한 단열이 비교적 적게 발달하고 균질하여 대형 석구조물 및 건축 재료로서 많이 사용되고 있다. 화강암은 위에서 기술한 바와 같이 일반적으로 사방정계적 대칭성을 보이므로, 익산 유라기 화강암을 본 연구에서는 사방정계적 이방성 매질로 가정하였다. 이방성 매질에서의 탄성학적 특성은 탄성계수로 표현되므로, 일반 이방체의 응력-변형 관계식으로부터 사방정계에 대한 응력-변형 관계식과 전파방향 및 편극방향에 따른 평면파의 속도방정식을 유도하였다. 이들 수식을 이용할 수 있도록 정탄성 및 동탄성 실험을 수행하고 그 결과를 이용하여 정탄성계수와 동탄성계수를 구하였다. 정탄성계수와 동탄성계수를 비교 검토하여 상관관계를 밝히고, 이와 더불어 미세균열의 방향과 광물입자의 방향성을 현미경 하에서 관찰하여 이방성 탄성의 기작을 유추하였다.

2. 연구방법 및 이론

2.1. 암석기재

한국자원연구소의 강경도폭(이대성외, 1980)과 함열도폭(정창희 · 고양주, 1963)에 따르면 익산 화강암은 옥천층군의 문주리층을 관입한 유라기 화강암이다. 따라서 본 연구에서는 이를 익산 유라기 화강암으로 명명하였다. 익산 지역에는 여러 개의 화강암 석산이 존재하며 그 중 큰 석산으로 유한석산과 내산석산이 있다. 이들 석산에서 산출되는 화강암이 본 연구에서 선택되었다. 암석시료는 각 석산에서 채취된 암괴 중 발파 등의 영향을 비교적 적게 받은 부위로 사료되는 부분을 선택하였으며, 각각의 결 방향으로 약 50 cm 정육면체로 절개하여 사용하였다.

지질도에 의하면 유한석산의 화강암은 흑운모 화강섬록암에 해당되며, 내산석산의 화강암은 백운모 화강섬록암에 해당된다. 이를 확인하기 위하여 석산별로 결방향으로 1 개씩 총 6 개의 박편을 제작하여 현미경 관찰을 통한 모드분석(modal analysis)을 수행하였다. QAP 도표(Streckeisen, 1976)에 도시한 모드분석 결과를 Fig. 1에 제시하였다. Fig. 1에 보여진 바와 같이 두 석산의 암석 모두가 화강암과 화강섬록암 경계부위에 위치한다.

2.2. 사방정계 매질에서의 탄성이론

일반적인 후크의 법칙(generalized Hook's law)은

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} e_{kl} \tag{1}$$

로 기술되며, 여기서 σ_{ij} 는 응력, C_{ijkl} 은 탄성계수, e_{kl} 은 변형을 의미하며 반복되는 첨자에 대해서는 내부합산법칙(intrinsic summation rule)을 따른다. 사방정계매질의 대칭축을 식(1)의 좌표축과 같은 방향으로 할 때(Nye, 1985),

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ C_{1122} & C_{2222} & C_{2233} & 0 & 0 & 0 \\ C_{1133} & C_{2233} & C_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{2323} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{1313} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{1212} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{11} \\ e_{22} \\ e_{33} \\ 2e_{23} \\ 2e_{13} \\ 2e_{12} \end{bmatrix} \tag{2}$$

이 된다. 정탄성 특성을 구명하기 위한 실험은 일축압축실험으로, 주어진 수직응력(normal stress, σ_{ii})에 따른 선택된 방향의 수직변형(normal strain, ϵ_{jj})을 측정하는 실험이다. x_1 -방향의 일축압축 실험은 $\sigma_{22} = \sigma_{33} = \sigma_{12} = \sigma_{23} = \sigma_{31} = 0$ 으로 고정시킨 후 σ_{11} 에 따른 세축 방향의 변형 (e_{11} , e_{22} , e_{33})을 측정하는 것이다. 이 경우, 식 (1)은

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= C_{1111} e_{11} + C_{1122} e_{22} + C_{1133} e_{33} \\ 0 &= C_{1122} e_{11} + C_{2222} e_{22} + C_{2233} e_{33} \\ 0 &= C_{1133} e_{11} + C_{2233} e_{22} + C_{3333} e_{33} \end{aligned} \tag{3}$$

으로 된다. 또한 x_2 -방향과 x_3 -방향의 일축압축 실험의 경우에 대하여 각각,

$$\begin{aligned} 0 &= C_{1111} e_{11} + C_{1122} e_{22} + C_{1133} e_{33} \\ \sigma_{22} &= C_{1122} e_{11} + C_{2222} e_{22} + C_{2233} e_{33}, \\ 0 &= C_{1133} e_{11} + C_{2233} e_{22} + C_{3333} e_{33} \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} 0 &= C_{1111} e_{11} + C_{1122} e_{22} + C_{1133} e_{33} \\ 0 &= C_{1122} e_{11} + C_{2222} e_{22} + C_{2233} e_{33} \\ \sigma_{33} &= C_{1133} e_{11} + C_{2233} e_{22} + C_{3333} e_{33} \end{aligned} \tag{5}$$

이 된다. 식 (3), (4), (5)를 연립하여 풀면 C_{1111} , C_{2222} , C_{3333} , C_{1122} , C_{2233} , C_{1133} 을 구할 수 있다. C_{1212} , C_{2323} , C_{1313} 을 구하기 위해서는, $\sigma_{12} \neq 0$, $\sigma_{23} \neq 0$, $\sigma_{13} \neq 0$ 인 경우를 고려하여야 한다. 실험실에서는 전단응력(shear stress)을 가하기가 쉽지 않고 전단변형(shear strain)을 측정하기가 어려우므로, 회전변환(rotation transform)을 이용하는 것이 용이하다. 응력과 변형은 2급텐서(second-rank tensor)이므로,

$$\sigma_{ij} = A_{ik} \sigma'_{kl} A_{ij}, \tag{6}$$

$$e_{ij} = A_{ik} e'_{kl} A_{ij} \tag{7}$$

가 된다. 여기서 A_{ij} 는 회전변환행렬의 성분이다. x_1 , x_2 , x_3 -축을 중심으로 각각 45° 회전(대칭으

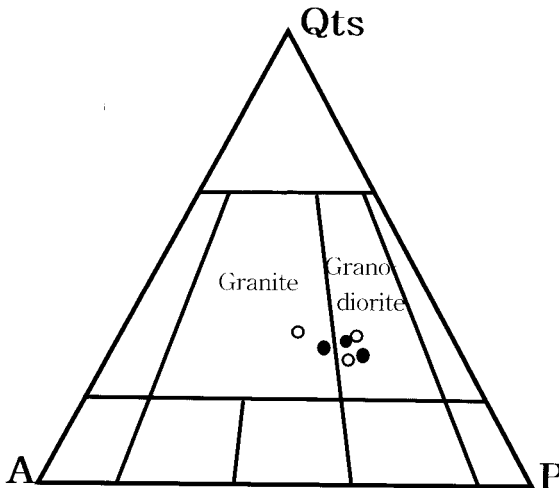


Fig. 1. Triangular diagram of modal composition for the Iksan Granites: Open circles denote the rock sample from the Ryuhan Quarry, while solid circles denote the rock sample from the Naesan Quarry.

로 인하여 가장 간단한 수식이 유도 됨)하였을 경우의 회전변환행렬은

$$\begin{bmatrix} 1, & 0, & 0 \\ 0, & 1/\sqrt{2}, & 1/\sqrt{2} \\ 0, & -1/\sqrt{2}, & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2}, & 0, & -1/\sqrt{2} \\ 0, & 1, & 0 \\ 1/\sqrt{2}, & 0, & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2}, & 1/\sqrt{2}, & 0 \\ -1/\sqrt{2}, & 1/\sqrt{2}, & 0 \\ 0, & 0, & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

가 된다. x_1 -축과 x_2 -축 사이 45° 방향을 III, x_2 -축과 x_3 -축 사이 45° 방향을 I, x_3 -축과 x_1 -축 사이 45° 방향을 II로 표기하고, 각 방향으로 행한 일축압축 실험의 응력을 σ''' , σ' , σ'' 로 각각 표기하여 식 (6)과 (8)을 이용하여 원래 좌표계의 응력 성분으로 기술하면,

	σ_{11}	σ_{22}	σ_{33}	σ_{12}	σ_{23}	σ_{31}
I	0	$\frac{\sigma'}{2}$	$\frac{\sigma'}{2}$	0	$\frac{\sigma'}{2}$	0
II	$\frac{\sigma''}{2}$	0	$\frac{\sigma''}{2}$	0	0	$\frac{\sigma''}{2}$
III	$\frac{\sigma'''}{2}$	$\frac{\sigma'''}{2}$	0	$\frac{\sigma'''}{2}$	0	0

이 된다. 또한 각 방향의 일축압축실험에서 발생한 변형성분을 각각 e'''_{ij} , e'_{ij} , e''_{ij} 로 표기하고, 식 (7)과 (8)을 이용하여 원래 좌표계의 변형성분을 기술하면,

	I	II	III
e_{11}	e'''_{11}	$\frac{e'''_{11} - 2e'''_{13} + e'''_{33}}{2}$	$\frac{e'_{11} + 2e'_{12} + e'_{22}}{2}$
e_{22}	$\frac{e'''_{22} + 2e'''_{23} + e'''_{33}}{2}$	e''_{22}	$\frac{e'_{11} - 2e'_{12} + e'_{22}}{2}$
e_{33}	$\frac{e'''_{22} - 2e'''_{23} + e'''_{33}}{2}$	$\frac{e''_{11} + 2e''_{13} + e''_{33}}{2}$	e'_{33}
e_{12}	$\frac{e'''_{12} + e'''_{13}}{\sqrt{2}}$	$\frac{e''_{12} - e''_{23}}{\sqrt{2}}$	$\frac{e'_{22} - e'_{11}}{2}$
e_{23}	$\frac{e'''_{33} - e'''_{22}}{2}$	$\frac{e''_{12} + e''_{23}}{\sqrt{2}}$	$\frac{e'_{23} - e'_{13}}{\sqrt{2}}$
e_{31}	$\frac{e'''_{13} - e'''_{12}}{\sqrt{2}}$	$\frac{e''_{11} - e''_{33}}{2}$	$\frac{e'_{23} + e'_{13}}{\sqrt{2}}$

이 된다. 상기 응력과 변형성분들을 식 (2)에 대입하여 C_{1212} , C_{2323} , C_{1313} 을 구하는 식들을 선택하면,

$$\begin{aligned} \frac{\sigma'}{2} &= 2C_{2323} \frac{e'_{33} - e'_{22}}{2} \\ \frac{\sigma''}{2} &= 2C_{1313} \frac{e''_{11} - e''_{33}}{2} \\ \frac{\sigma'''}{2} &= 2C_{1212} \frac{e'''_{22} - e'''_{11}}{2} \end{aligned} \quad (9)$$

이 된다. 식 (9)는 실험에서 주어진 수직응력이 측정된 수직변형의 조합으로 이루어져 있어 실험결과를 바로 이용할 수 있는 장점이 있다.

일반적인 이방성매질에서 탄성과 전파 특성 방정식(characteristic equation)은 Lee and Alexander (1995)에 의하면,

$$|\delta_{im} - \frac{C_{iklm}}{\rho} p_k p_l| = 0 \quad (10)$$

여기서 δ_{im} 은 크로니커 델타(Kronecker delta)이며, ρ 는 매질의 밀도, p_k 는 파선매개변수(ray parameter)의 성분을 각각 의미한다. 식 (10)에 v^2 (위상속도의 제곱)을 곱하면,

$$|v^2 \delta_{im} - \frac{C_{iklm}}{\rho} n_k n_l| = 0 \quad (11)$$

이 되며, 여기서 n_k 는 방향코사인(direction cosine)의 성분이다. 식 (11)의 물리적 해석은 밀도 ρ 와 탄성계수 C_{iklm} 인 이방성 매질에서 \hat{n} 방향으로 전파하는 평면파(plane wave)의 위상속도와 편극(polarization)방향은 $C_{iklm} n_k n_l / \rho$ (2급텐서)의 고유값(eigen value)과 고유벡터(eigen vector)이다. x_1 , x_2 , x_3 -축을 대칭축으로 하는 사방정계 매질에서 식 (11)은

$$\begin{vmatrix} C_{1111}n_1^2 + C_{1212}n_2^2 + C_{1313}n_3^2 - \rho v^2, & (C_{112} + C_{121})n_1n_2, \\ (C_{112} + C_{121})n_1n_2, & C_{1212}n_1^2 + C_{222}n_2^2 + C_{2323}n_3^2 - \rho v^2, \\ (C_{133} + C_{113})n_1n_3, & (C_{233} + C_{231})n_2n_3, \end{vmatrix} = 0 \quad (12)$$

$$\begin{vmatrix} (C_{133} + C_{131})n_1n_3 \\ (C_{233} + C_{231})n_2n_3 \\ C_{1313}n_1^2 + C_{2323}n_2^2 + C_{3333}n_3^2 - \rho v^2 \end{vmatrix} = 0 \quad (12)$$

으로 된다. 실제로 중복되지 않고 독립적인 9개의 연립방정식을 조성할 수 있는 적합한 \hat{n} 을 선택하여 식 (12)에 대입한 후 해를 구함으로써

Table 1. Propagation directions, velocities, and polarization direction of plane waves.

Propagation direction (n_1, n_2, n_3)	Velocity	Polarization direction (u_1, u_2, u_3)
(1, 0, 0)	$\sqrt{C_{1111}}/\rho$	(1, 0, 0)
	$\sqrt{C_{1212}}/\rho$	(0, 1, 0)
	$\sqrt{C_{1313}}/\rho$	(0, 0, 1)
(0, 1, 0)	$\sqrt{C_{1212}}/\rho$	(1, 0, 0)
	$\sqrt{C_{2222}}/\rho$	(0, 1, 0)
	$\sqrt{C_{2323}}/\rho$	(0, 0, 1)
(0, 0, 1)	$\sqrt{C_{1313}}/\rho$	(1, 0, 0)
	$\sqrt{C_{2323}}/\rho$	(0, 1, 0)
	$\sqrt{C_{3333}}/\rho$	(0, 0, 1)
(1/√2, 1/√2, 0)	$\sqrt{(C_{1313} + C_{2323})/2\rho}$	(0, 0, 1)
	$[\{(C_{1111} + C_{2222} + 2C_{1212})/2 - \sqrt{(C_{1111} - C_{2222})^2/4 + (C_{1122} + C_{1212})^2}\}/2\rho]^{1/2}$	(≠0, ≠0, 0)
	$[\{(C_{1111} + C_{2222} + 2C_{1212})/2 + \sqrt{(C_{1111} - C_{2222})^2/4 + (C_{1122} + C_{1212})^2}\}/2\rho]^{1/2}$	(≠0, ≠0, 0)
(1/√2, 0, 1/√2)	$\sqrt{(C_{1212} + C_{2323})/2\rho}$	(0, 1, 0)
	$[\{(C_{1111} + C_{3333} + 2C_{1313})/2 - \sqrt{(C_{1111} - C_{3333})^2/4 + (C_{1133} + C_{1313})^2}\}/2\rho]^{1/2}$	(≠0, 0, ≠0)
	$[\{(C_{1111} + C_{3333} + 2C_{1313})/2 + \sqrt{(C_{1111} - C_{3333})^2/4 + (C_{1133} + C_{1313})^2}\}/2\rho]^{1/2}$	(≠0, 0, ≠0)
(0, 1/√2, 1/√2)	$\sqrt{(C_{1212} + C_{1313})/2\rho}$	(1, 0, 0)
	$[\{(C_{2222} + C_{3333} + 2C_{2323})/2 - \sqrt{(C_{2222} - C_{3333})^2/4 + (C_{2233} + C_{2323})^2}\}/2\rho]^{1/2}$	(0, ≠0, ≠0)
	$[\{(C_{2222} + C_{3333} + 2C_{2323})/2 + \sqrt{(C_{2222} - C_{3333})^2/4 + (C_{2233} + C_{2323})^2}\}/2\rho]^{1/2}$	(0, ≠0, ≠0)

동탄성계수를 구할 수 있다. 본 연구에서는 대칭성으로 그 결과가 간결할 것으로 사료되는 (1, 0, 0), (0, 1, 0), (0, 0, 1), (1/√2, 1/√2, 0), (1/√2, 0, 1/√2), 및 (0, 1/√2, 1/√2) 방향을 선택하였다. 이들을 식 (12)에 대입하여 위상속도와 대응되는 편극방향을 구하고, 결과를 Table. 1에 제시하였다.

Table. 1에서 축에서 45° 방향으로 진행하는 파의 편극성분중 ≠0은 0 이 아닌 값을 의미하나, 진행방향과 평행하거나 직교하지는 않는다. 이들은 같은 평면에서 편극되며 속도로서 구별될 수 있다. C_{iklm} 은 양수이므로 제곱근 앞에 + 부호를 갖는 파의 속도가 - 부호를 갖는 파의 속도보다 빠르다.

정탄성계수는 일축압축실험을 행한 결과를 식 (3), (4), (5)와 (9)를 적용시켜 구할 수 있고, 동탄성계수는 초음파속도측정실험을 하여 Table. 1에 제시된 식을 적용시켜 구할 수 있다. 정탄성실험에서 주의하여야 할 사항은 변형계(strain gauge)의 부착 방향이며, 동탄성실험에서 주의하여야 할 사항은 초음파 송수신기(transducer)의 진동방향을 원하는 파의 편극 방향과 일치시켜야 하는 것이다.

2.3. 시료제작 및 실험방법

일반적으로 일축압축 실험과 초음파 속도측정실험에 사용되는 시료는 원주형 시료이다. 본 연구에서는 광물입자의 크기를 고려하여 원주형 시료의 직경은 5.5 cm 로 결정하고, 시추기를 이용하여

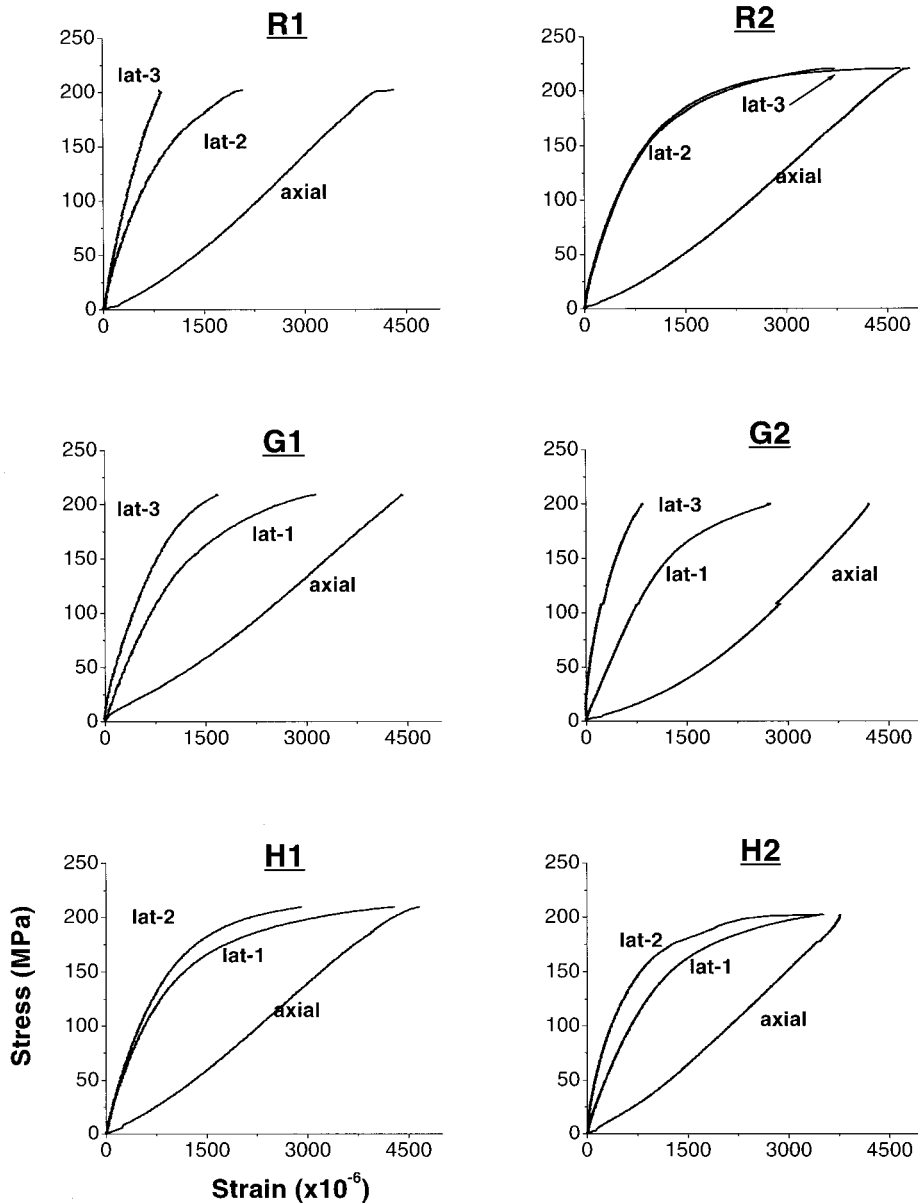


Fig. 2. Example stress-strain curves under uniaxial compressive stress; From top to bottom, the stress-strain curves of the core samples of the massive granite body sampled in the Naesan quarry in the direction normal to the rift, grain, and hardway plane (the x_1 -, x_2 -, and x_3 -axis directions in mathematical representation). For example, the top 2 plots are stress-strain curves of a pair of core samples normal to the rift plane. "axial", "lat-2", and "lat-3" indicate the measured normal strains normal to the rift, grain, and hardway plane, respectively. The other 4 plots use the same notation. Note that the similarity of each pair, which indicates repeatability of experiments.

시료를 제작하였다. 완벽한 세트의 사방정계적 대칭성을 가지는 매질의 정탄성계수와 동탄성계수를 구하려면 앞에서 기술한 6 방향으로 일축압축 실험과 초음파속도측정실험을 하여야 하므로, 각 방향으로 길이 약 25 cm 의 원주형 기본시료를 2 개씩 제작하였다. 정탄성 실험에서 변형계의 부착과 동탄성 실험에서 초음파 송수신기의 밀착을 앞에서 서술한 바와 같이하려면 시료의 축방향 뿐만 아니라, 축을 중심으로 한 회전각의 정보 역시 필수적이다. 기본시료 제작 시 마모되지 않는 부위에 원래 좌표축방향을 표시하고, 시료제작 후 다시 표시하여 시료의 삼차원 방향에 대한 정보를 유실하지 않도록 하였다.

일축압축실험에서 시료는 길이 대 직경의 비가 최소한 2:1 이 되어야 하므로 길이를 11 cm로 하였다. 초음파 속도측정 실험에서는 파의 전파시간을 시료의 길이로 나누어 그 속도를 계산한다. 그러므로, 전파시간 측정오차가 같다고 가정할 때, 시료길이가 길수록 속도오차가 작다. 그러나, 실험에서는 평면과 형태를 유지하여야 하므로 초음파 송수신기의 크기를 고려하여 5 cm 길이를 선택하였다. 기본시료에서 눈으로 인지되는 균열의 위치를 피하여 정탄성 실험용 시료와 동탄성 실험용 시료를 두벌씩 제작하였다. 실험용 시료의 양끝면은 표면연삭기(KSA500HA)로 편평도의 오차가 0.02 mm 이하가 되도록 연마하였다. 시료는 105°C 에서 24 시간이상 건조한 뒤 실험을 수행하였다.

기본시료에서 남은 부분을 이용하여 미세균열 배향관찰용 박편을 제작하였다. 박편의 두께는 미세균열의 배향측정을 용이하게 하기 위해 보통 박편의 두께인 0.03 mm 보다 조금 두껍게 하였고, 박편면은 각 좌표축에 수직을 택하였다. 그리고, 미세균열의 삼차원적 방향을 관찰하기 위하여 박편면에 포함되는 두 축의 방향을 보존하며 제작하였다.

일축압축 실험에서는 광물입자 크기와 실험시료 측면의 곡률을 고려하여 10 mm 변형계(Kyowa, KFG-10-120-C1-16)를 선택하였다. 앞서 서술한 방향으로 각 시료에 대하여 하나의 축변형과 두 개의 횡변형을 측정하였다. 영점조정과 하중속도의 조절이 가능한 서보제어기(servo controller)가 부착된 용량 100 ton 압축기시험기(KDC model 9409-20)로 하중 속도는 0.5 MPa/sec를 선택하였다(Brown, 1981). 기압 하중과 변형계로 측정된 축방향과 횡방향의 변형을 자료기록장치(data logger)

를 통하여 디지털 신호로 변환한 후 컴퓨터에 저장하였다. 예로서, 내산석산 시료의 일축압축실험 결과자료를 Fig. 2에 제시하였다.

초음파측정실험은 두 가지 장비(Oyo, Sonicviewer 170, model-5228 및 Panametrics, model 5072 PR)를 사용하여 수행하였다. 두 장비 모두 파형을 디지털 자료로 저장하나, 특성은 서로 다르다. Sonicviewer의 종파 초음파송수신기의 고유주파수는 500 kHz, 횡파는 100 kHz이며, Panametrics은 모두 1 MHz이다. 예상되는 횡파의 속도를 4 km/s로 가정할 때 100 kHz 주파수에 해당하는 파장은 4 cm로 거의 시료 길이에 근접하므로 좋은 실험 결과를 기대할 수 없다. 더구나, Sonicviewer의 횡파 초음파송수신기는 특정한 편극방향이 없는 회전형이므로 이방성 매질의 특성을 연구하는데 필요한 편극에 따른 속도차이를 측정하기가 어렵다. 본 연구에서는 1 MHz 중심주파수 파속도에 따른 동탄성 특성에 대한 고찰을 중심으로 500 kHz 중심주파수 종파속도와 비교 검토하여 주파수에 따른 속도 변화현상까지 고찰하였다. 시료와 초음파 송수신기 사이의 밀착효과를 높이기 위하여 결합제(oil grease)를 사용하였다. 앞에서 기술한 6 방향으로 3 가지 편극방향의 초음파속도를 측정하기 위하여 편극방향 또는 가장 유사한 방향으로 초음파 송수신기를 밀착시키고 진동가속도의 벡터성분을 시간의 함수로 측정 기록하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 정탄성계수

단일결정(single crystal)이나, 균질하고 결정성이 없는 금속시료로 일축압축 실험을 수행하면 항복점(yielding point)에 이르기까지 변형-응력 곡선은 거의 일직선을 보이나, 압석의 경우는 다르다. 우선 내재하는 미세균열이 닫히는 동안 같은 응력에서 상대적으로 큰 변형을 보일 것이며, 또한 전반적인 파괴 이전에 압축강도가 낮은 광물들의 부분 파괴가 일어날 것이다. 부분파괴가 일어난 것들은 응력을 더 이상 지탱할 수 없으므로 부분적인 해입(stress relaxation)이 일어나게 된다. 실제로 압석의 변형-응력 곡선은 전반적으로 휘어지면서 톱날 같이 들쭉날쭉한 곡선을 이루는 것은 잘 알려진 사실이다(정태중, 1996 등). 탄성을 중 가장 간단한 영률(σ_{ii}/e_{ii})이 변형-응력 곡선의 기울기인 것처럼, 응력의 각 성분은 변형 성분에 탄성계수를 곱

Table 2. Static elastic coefficients of the Naesan and the Ryuhan samples at 9.8, 24.5, and 98.0 MPa axial stresses.

	Naesan sample (GPa)			Ryuhan sample (GPa)		
	at 9.8 MPa	at 24.5 MPa	at 98.0 MPa	at 9.8 MPa	at 24.5 MPa	at 98.0 MPa
C ₁₁₁₁	28.52	39.01	112.94	30.87	48.44	132.53
C ₂₂₂₂	27.12	31.99	99.94	42.91	53.51	114.27
C ₃₃₃₃	33.56	39.98	101.29	26.61	32.63	128.28
C ₂₃₂₃	13.47	14.85	20.50	12.06	16.01	20.59
C ₁₃₁₃	11.07	14.54	19.76	14.57	15.31	19.60
C ₁₂₁₂	10.68	14.54	18.49	18.40	20.68	24.50
C ₁₁₂₂	3.40	6.74	68.95	4.65	9.88	77.53
C ₂₂₃₃	1.54	4.81	60.43	3.43	7.34	76.50
C ₁₁₃₃	3.22	7.20	68.23	3.02	8.28	90.11

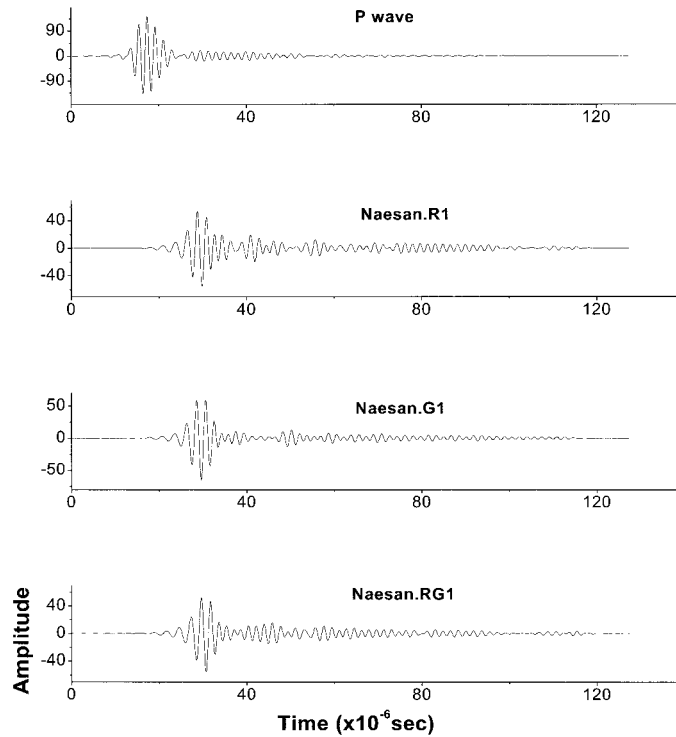


Fig. 3. Example band-pass (350-720 kHz) filtered P-wave signals using 500 kHz transducers. The top one is the signal recorded without a sample in order to use as the zero time reference. The second one is the record of P-wave propagation normal to the rift (along χ_1 -axis). The third one is the record of P-wave propagating normal to the grain (along χ_2 -axis). The fourth one is the record of P-wave propagating normal to the plane bisecting the angle between the rift plane and the grain plane. Note that forms of the wave train in each trace are similar to each other with different delay times.

한 것들의 선형 조합이므로 정탄성계수 변형-응력 곡선 기술기의 선형 조합으로 나타난다(식 (3), (4), (5), (9) 참조). 따라서, 변형-응력 곡선을 어떻게 부드럽게(smoothing) 하는가는 일축압축 실험 결과를 이용하여 정탄성계수를 구하는데 있어서 중요한 변수역할을 한다. 일반적인 방법으로 다중평균법(moving average)과 다항식을 이용한 곡선맞춤법(curve fitting)이 있다. 곡선맞춤법은 자료에 가장 적합한 주어진 차수의 다항식을 구하는 것으로 강제로 일가함수(single-valued function)를 만드는 결과가 되어, 본 연구에서는 다중평균법을 선택하였다. 다중평균법에서는 윈도우크기(window size)가 곡선의 부드러움에 영향을 미친다. 여러 가지 크기의 윈도우를 시험한 결과 본 연구에서는 축방향 응력-변형자료에는 5 자료점(data point), 횡방향 자료에는 9 자료점의 윈도우를 선택하였다.

일차로 다중평균법으로 부드럽게한 자료에서 9.8 MPa, 24.5 MPa, 및 98 MPa에서 접선의 기울기를 구하였다. 일축압축 실험에서 파괴가 평균 196 MPa에서 파괴되었으므로, 암석역학에서 일반적으로 탄성을 기술하는 강도의 1/2이 되는 지점이 98 MPa이고, 이의 1/4, 1/10이 되는 지점이 각각 24.5 MPa와 9.8 MPa에 해당한다. 기울기(해당하는 방향의 접선영률)를 구할 때 목표점을 중심으로 10 MPa에 해당하는 변형의 변화량을 이용하였다. 독립적인 2 회의 실험에서 각 방향별로 평균값을 각 시료를 대표하는 것으로 선택하였다. 이 결과를 식 (3), (4), (5)와 (9)에 대입하여 정탄성계수를 계산하고 Table. 2에 제시하였다. 계산결과 중 중복되어 나타나는 탄성계수들은 평균값을 취하였다.

3.2. 동탄성계수

속도를 계산하기 위해서는 시료길이와 지연시간(delay time; 파가 시료를 통과하는 데 걸린 시간)을 알아야 한다. 시료길이는 마이크로미터(micrometer)를 이용하여 측정하였고, 지연시간은 파의 초음파 송수신기를 시료 없이 밀착시켜 기록한 파형과 비교하여 구하였다. 본 연구에서는 상호상관방법(cross-correlation method)과 파형의 첫 정점(peak)의 시간차를 이용하는 방법을 이용하여 지연시간을 구하였다.

상호상관방법은 파다발(wave packet)의 지연시간을 구하는데 좋은 것으로 검증된 방법이나, 파형이 유사하여야 신뢰도가 높다. 500 kHz 종파 초

음파송수신기를 이용하여 측정된 파형은 유사한 모습을 보이거나, 1 MHz 초음파 송수신기를 이용한 결과는 파형의 유사성이 빈약하였다. 이는 고주파 산란현상(scattering)에 의한 것으로 사료된다. 실험을 반복 수행한 결과 500 kHz 자료는 상호상관방법을 이용한 결과가 첫 정점(peak)을 이용한 결과보다 일관성 있었으나, 1 MHz 자료의 경우는 역 현상이 일어났다. 상호상관방법을 이용한 결과의 신뢰도를 증가시키기 위하여 500 kHz 자료에 350-720 kHz 대역필터를 적용하여 신호대잡음비(signal-to-noise ratio)를 증가시킨 자료를 이용하였다. 예로서, 500 kHz 종파 초음파 송수신기를 이용하여 기록하고, 대역필터를 적용시킨 내산석산 시료 자료를 Fig. 3에 제시하였다. 시료의 유무와 방향에 따라 지연시간은 변화를 보이거나, 파형은 매우 유사한 것을 Fig. 3에서 관찰할 수 있다.

앞에서 기술한 바와 같이 반복실험에서 1 MHz 초음파 송수신기를 이용하여 기록한 자료에서 첫 정점의 지연시간이 일관성 있는 결과를 보였으나, 이것이 파다발의 지연시간을 대표할 수 있는지는 확실하지 않다. 이를 검토하기 위하여 두 가지 결과를 비교하였다. 두 가지 방법으로 구한 내산석산과 유한석산의 시료 각 방향의 상대속도차이 백분율을

$$\frac{V_p^{1M} - V_p^{500k}}{(V_p^{1M} + V_p^{500k})/2} \times 100 \tag{13}$$

에 의하여 구했다. 식 (13)에서 위 첨자는 사용한 초음파송수신기의 주파수를 의미한다. 총 14 개의 내산석산 시료자료의 평균값은 5.4 %이며, 표준편차는 1.3 %이다. 또한, 유한석산 시료자료의 평균값은 4.2 %이며, 표준편차는 2.1 %이다. 표준편차의 값을 고려할 때 평균값들은 충분한 의미가 있는 것으로 사료되며, 이는 탄성과 전파에서 잘 알려진 분산현상(dispersion)으로 해석할 수 있다. 즉, 첫 정점을 이용하여 구한 지연시간은 파다발의 지연시간으로 사용될 수 있으며, 익산 주라기 화강암은 분산매질(dispersive medium)로서 주파수가 500 kHz에서 1 MHz로 증가하면 속도가 4.8 % 증가한다.

독립된 두 개의 각 방향별 원주형 시료에서 구한 편극별 평면파 속도를 평균하여 각 시료를 대표하는 것으로 선택하였다. 이 결과를 Table. 1에 주어진 식들에 대입하여 동탄성계수를 계산하여 Table. 3에 제시하였다. 계산결과 중 중복되어 나

Table 3. Dynamic elastic coefficients of the Naesan and the Ryuhan samples.

	Naesan sample (GPa)	Ryuhan sample (GPa)
C ₁₁₁₁	41.77	52.23
C ₂₂₂₂	38.67	56.10
C ₃₃₃₃	47.87	36.70
C ₂₃₂₃	17.38	18.96
C ₁₃₁₃	17.17	17.69
C ₁₂₁₂	16.37	21.63
C ₁₁₂₂	5.19	8.60
C ₂₂₃₃	6.06	6.09
C ₁₁₃₃	7.79	8.93

타나는 탄성계수들은 평균값을 취하였다. 여기에 이용된 내산시료의 밀도는 2.65 g/cc이고 유한 시료의 밀도는 2.71 g/cc며, 이들은 측정치의 평균값이다.

3.3. 정탄성계수와 동탄성계수 비교

Table. 2와 3에 제시된 결과를 체계적으로 고찰하기 위하여 도표를 작성하여 Fig. 4에 제시하였다. 우선 정탄성계수는 축응력이 증가함에 따라 그 값도 커짐을 한눈에 볼 수 있다. 또 하나 괄목할만한 현상은 전단강성률(shear rigidity; σ_{ij}/e_{ij} , $i \neq j$)에 해당하는 C₁₂₁₂, C₂₃₂₃, C₁₃₁₃은 축응력이 증가함에 따라 다른 탄성계수들처럼 빨리 증가하지 않는다는 점이다.

내산시료의 정탄성계수 중 C₁₁₁₁, C₂₂₂₂, C₃₃₃₃를 비교해보면 축응력이 9.8 MPa, 24.5 MPa에서는 C₂₂₂₂, C₁₁₁₁, C₃₃₃₃ 순으로 감소하고, 축응력이 98 MPa에서는 C₂₂₂₂, C₃₃₃₃, C₁₁₁₁ 순으로 감소한다. 이는 미세균열이 닫히는 과정에서 구한 정탄성계수와 미세균열이 닫히고 난 뒤의 정탄성계수가 다르게 나타나는 것으로 사료되며, 축응력에 따라 정탄성계수의 크기 양상도 달라지고 있음을 볼 수 있다. 동탄성계수는 C₂₂₂₂, C₁₁₁₁, C₃₃₃₃ 순으로 감소하며 축응력이 24.5 MPa인 곳에서의 정탄성계수와 매우 유사한 양상을 보인다.

유한시료에서의 정탄성계수의 값들 중 C₁₁₁₁, C₂₂₂₂, C₃₃₃₃를 비교해 보면 축응력이 9.8 MPa, 24.5 MPa에서는 서는 C₃₃₃₃, C₁₁₁₁, C₂₂₂₂ 순으로

감소하고 축응력이 98 MPa에서는 C₂₂₂₂, C₃₃₃₃, C₁₁₁₁ 순으로 감소한다. 이는 내산시료에서와 마찬가지로 축응력이 증가함에 따라 미세균열의 폐합 및 상호작용이 정탄성계수의 값들에 영향을 미친 것으로 사료된다. 동탄성계수의 값은 C₃₃₃₃, C₁₁₁₁, C₂₂₂₂ 순으로 감소하며 그 값은 축응력이 24.5 MPa에서의 정탄성계수와 유사한 양상을 보인다.

이와 같은 양상을 비교해 볼 때 미세균열의 폐합 및 상호작용이 탄성에 중요한 영향을 미치는 것이 확실하다. 그러나 그 기작을 고찰하기 위하여 여서는 삼축압축 실험이 요구된다. 또한 동전단강성률(dynamic shear rigidity)도 일축압축 하에서 정전단강성률(static shear rigidity)과 동일한 경향을 보이는지 고찰하기 위하여 일축압축 하에서의 동탄성실험이 필요하다.

3.4. 미세균열 배향

제작된 박편을 만능 회전대(universal stage)를 이용하여 미세균열의 배향을 측정하였다. 내산 시료와 유한 시료의 구성광물중 주로 석영에서 미세균열이 발달하고 있으며, 결 방향과 평행 또는 아평행한 배향을 가지고 미세균열이 많이 관찰되었다. 내산 시료와 유한 시료의 미세균열을 장미그림(rose diaram)에 도시하였다. 장미그림 중 각 결에 해당하는 것을 하나씩 선택하여 Fig. 5에 제시하였다. 좌측하부의 숫자는 관찰된 미세균열의 개수이며, 미세균열이 결 방향과 아평행하게 잘 발달해 있음을 볼 수 있다. 내산 시료 삼결면 장미그림에서 나타나듯이 서로 90°를 이루는 두 개의 미세균열조가 일결과 이결의 방향과 아평행하게 발달되어 있음을 볼 수 있다. 유한 시료도 내산 시료와 마찬가지로 미세균열이 결 방향과 아평행하게 잘 발달해 있음을 볼 수 있다. 특히 유한 시료 삼결면 박편에서는 사교하는 두 개의 절리조가 뚜렷이 잘 관찰되었으며 그 개수도 많이 나타났다.

이상과 같이 내산 시료와 유한 시료에서 미세균열이 특정 방향으로 관찰되었으며 일결, 이결, 삼결 모두에서 미세균열이 보이나 특히 일결, 이결에서 그 수가 삼결보다 많이 관찰되었다. 광물 입자의 배열의 방향성이나 광축의 방향성이 잘 관찰되지 않은 것으로 보아 이러한 미세균열이 정탄성계수와 동탄성계수의 이방성에 영향을 준 것으로 사료된다.

3.5. 영률

앞에서 서술한 바와 같이 영률은 일축압축 실험에서 축방향의 변형-응력곡선의 기울기(접선영률; tangential Young's modulus)로 가장 간단하게 구할 수 있는 탄성률 중 하나이다. 또한 탄성계수로부터 정의에 의하여 계산할 수 있다. 각 축방향의 영률을 E_1 , E_2 , 및 E_3 로 표시하고 식 (3), (4), 및 (5)을 이용하면 사방정계적 대칭매질에서 축방향의 영률은,

$$E_1 = \frac{\sigma_{11}}{e_{11}} = \frac{C_{1111}C_{2222}C_{3333} + 2C_{1122}C_{2233}C_{1133}}{C_{2222}C_{3333} - C_{2233}^2}$$

$$E_2 = \frac{\sigma_{22}}{e_{22}} = \frac{C_{1111}C_{2222}C_{3333} + 2C_{1122}C_{2233}C_{1133}}{C_{3333}C_{1111} - C_{1133}^2} - \frac{C_{2222}C_{1133}^2 - C_{3333}C_{1122}^2}{C_{3333}C_{1111} - C_{1133}^2}$$

$$E_3 = \frac{\sigma_{33}}{e_{33}} = \frac{C_{1111}C_{2222}C_{3333} + 2C_{1122}C_{2233}C_{1133}}{C_{2222}C_{1111} - C_{1122}^2} - \frac{C_{1111}C_{2233}^2 - C_{2222}C_{1133}^2 - C_{3333}C_{1122}^2}{C_{2222}C_{1111} - C_{1122}^2}$$

이 된다. 이들 식에 앞서 구한 정탄성계수를 대입

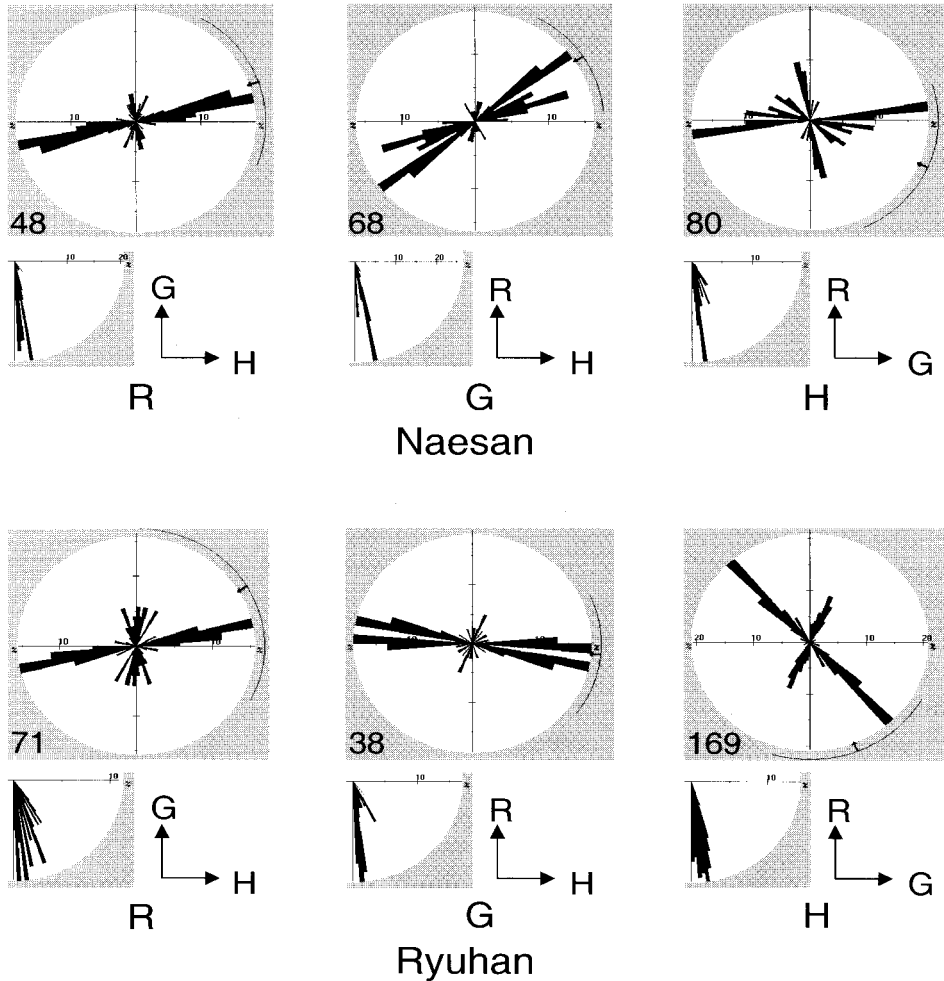


Fig. 4. Rose diagrams showing the orientation of microcracks observed in the Naesan and Ryuhan samples. R, G, and H represent orientation normal to the rift, grain, and hardway plane, respectively.

Table 4. Static and dynamic Young’s moduli (GPa) of the Iksan Granite. Tangential Young’s moduli are obtained the slope of the tangential line at the given uniaxial stress while static and dynamic Young’s moduli are computed from static and dynamic elastic constants, respectively.

	Naesan sample			Ryuhan sample		
	E_1	E_2	E_3	E_1	E_2	E_3
Tangential at 98.0 MPa	54.20	53.14	55.12	60.39	61.72	58.20
Static at 98.0 MPa	54.49	51.98	53.98	60.99	60.47	58.80
Tangential at 24.5 MPa	36.96	30.25	38.38	45.42	49.80	30.23
Static at 24.5 MPa	36.61	30.50	38.24	45.10	50.47	30.59
Dynamic	40.04	37.47	45.74	49.14	54.08	34.78

Table 5. Uniaxial compressive strength (MPa) of the Naesan and Ryuhan samples in six direction. ^ notes direction bisecting the angle between two axes.

Direction	x_1	x_2	x_3	$x_1^{\wedge}x_2$	$x_2^{\wedge}x_3$	$x_3^{\wedge}x_4$	Average
Naesan	207	201	203	207	201	212	205
Ryuhan	181	188	201	183	181	191	188

하면 정영률(static Young’s modulus)을 구할 수 있고, 동탄성계수를 대입하면 동영률(dynamic Young’s modulus)을 구할 수 있다. 이들을 비교 검토하면 실험 및 분석방법의 정성적인 정밀도를 알 수 있다. 축응력이 24.5 MPa, 그리고 98 MPa인 지점에서 일축압축 실험 결과로부터 구한 접선영률과, 정탄성계수와 동탄성계수를 이용하여 구한 정영률과 동영률을 Table. 4에 제시하였다.

계산된 정영률의 값은 대응되는 접선영률의 값과 거의 일치함을 보인다. 내산 시료에서의 접선영률과 정영률 상대오차 평균값은 24.5 MPa 축응력에서는 0.2 %, 98.0 MPa에서는 1.3 %이다. 유한 시료의 상대오차 평균값은 24.5 MPa 에서는 0.6 %, 98.0 MPa에서는 0.01 %이다. 이러한 사실로부터 구해진 정탄성계수의 값이 올바르게 구해졌음을 알 수 있다.

축응력을 주지 않고 구하여진 동영률의 값은 24.5 MPa에서 구한 정영률보다 조금 큰 값을 나타내고 있다. 일반적으로 동영률이 정영률에 비해서 0-300 % 크다고 보고되었다. 이들의 정영률은 매우 낮은 일축압축 하에서 반복하중을 이용하여 등방성을 가정하고 분석한 결과들이다. 본 연구에서는 동탄성시험시 일축압축을 행하지 않고 시행

하였으며 그 결과 동탄성계수로부터 구한 동영률이 일반적인 파괴강도의 50 % 지점인 98.0 MPa에서 구한 정영률보다 작으며, 상대오차는 내산시료가 26 %, 유한시료가 28 %이다. 정영률과 동영률의 정량적으로 비교 검토하기 위해서는 더 많은 반복실험이 필요하며 축응력 하에서 초음파속도 측정실험이 필요하다.

3.6. 일축압축강도

공학적 목적으로 많이 쓰이는 암석역학의 자료 중 하나가 일축압축강도(uniaxial compressive strength)이다. 본 연구에서는 시료가 파괴될 때까지 일축압축을 증가시키며 변형을 측정하였으므로 일축압축강도시험을 포함한 것이다. 각 방향별 두 시료의 파괴응력의 평균값을 일축강도로 선택하고, 결과를 Table. 5에 제시하였다. Table. 5에서 보이는 것처럼 각 방향으로 약간의 편차를 보이나, 내산 시료의 평균일축강도는 205 MPa이고 유한 시료의 평균일축강도는 188 MPa이다. 내산 시료의 일축압축강도가 유한시료의 일축압축강도보다 크며 전체 평균은 196 MPa이다. 이는 석공소에서 일반적으로 언급되는 “내산석산 암석이 유한석산 암석보다 단단하다”는 것과 일치한다.

4. 결 론

일반적인 이방성 탄성매체에서 탄성지배방정식을 사방정계적 대칭매질에 대하여 전개하여 방향별 변형-응력 관계식을 유도하였다. 이들 중 실험실에서 행하여 질 수 있는 수직변형과 수직응력으로 조합된 6 개 방향을 선정하여 사방정계 탄성계수를 모두 표현함으로써 정탄성 실험결과분석을 용이하게 하고, 도표화하여 쉽게 이용할 수 있도록 했다. 또한, 사방정계적 대칭매질에서 분산방정식을 전개하여 9 개의 탄성계수를 계산할 수 있는 6 개 방향의 평면방향에 대한 편극방향과 속도를 제시하여 동탄성 실험 결과분석을 용이하게 하고 도표화하여 쉽게 이용하도록 하였다.

익산 주라기 화강암을 대상으로 일축압축 실험과 초음파 속도측정 실험을 실시하여 정탄성계수와 동탄성계수를 구하고 비교하였다. 정탄성계수는 축응력이 증가함에 따라 값이 증가하며 9.8 MPa, 24.5 MPa, 98 MPa의 값들 중 24.5 MPa에서 동탄성계수의 값과 유사하였다. 탄성계수를 C_{1111} ,

C_{2222} , C_{3333} , C_{2323} , C_{1313} , C_{1212} , C_{1122} , C_{2233} , C_{1133} 순으로 기술하면, 내산 시료의 24.5 MPa에서 정탄성계수는 39.01, 31.99, 39.98, 14.85, 14.54, 14.54, 6.74, 4.81, 7.20 GPa이며 동탄성계수는 41.77, 38.67, 47.87, 17.38, 17.17, 16.37, 5.19, 6.06, 및 7.79 GPa이다. 유한 시료의 경우, 정탄성계수는 48.44, 53.51, 32.63, 16.01, 15.31, 20.68, 9.88, 7.34, 8.28 GPa이며 동탄성계수는 52.23, 56.10, 36.70, 18.96, 17.69, 21.63, 8.60, 6.09, 8.93 GPa이다. 탄성구간 내에서 정탄성계수의 크기 순서와 동탄성계수의 크기 순서는 일치하며 이는 정 및 동탄성 실험 과정에서 축변형 크기순서와 종파속도 순위로 예견되었다. 집선영률, 정영률, 동영률을 비교 검토하고, 결과가 중복되어 나타나는 탄성계수들을 비교검토한 결과 이들 정탄성계수와 동탄성계수는 충분한 정밀도를 가지는 것으로 밝혀졌다.

현미경관찰결과 광물입자의 특별한 배열경향은 발견되지 않았으며, 미세균열은 일결, 이결, 삼결과 평행 또는 아평행하게 관찰되어 미세균열이 화강암의 이방성을 띠는 주된 원인으로 사료된다.

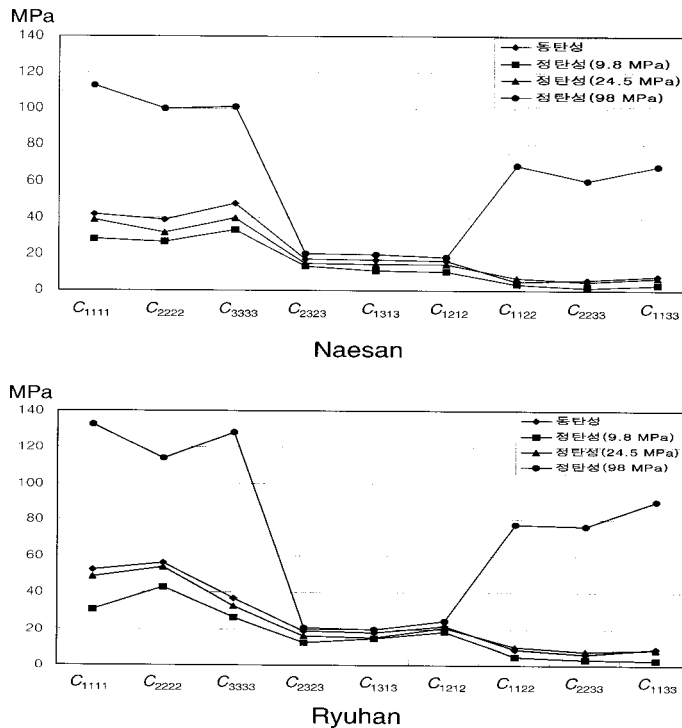


Fig. 5. Comparison of static and dynamic elastic stiffness coefficients of the Naesan sample and Ryuhan sample.

정탄성, 동탄성, 미세균열 배향으로부터 고찰해 볼 때 익산 유라기 화강암은 이방성을 가지며, 유한 석산 시료가 내산석산 시료보다 높은 이방성을 띠고 있다. 축방향 변형이 미세균열의 닫히는 과정에서 크게 영향을 받는다면 탄성계수 크기 순서와 방향별 미세균열의 개수 순서는 잘 일치하지 않는 것처럼 보인다. 이는 현미경 관찰 시 미세균열의 개폐 여부 구분이 쉽지 않아 직접적인 연관성 구명이 어려우며, 열린 미세균열과 닫힌 미세균열의 관계, 미세균열들간의 연속성, 미세균열의 방향 등이 복합적으로 탄성계수에 영향을 미치는 것으로 사료된다.

본 연구에서 밝혀진 것들 중 기대하지 않았던 것은 익산 유라기 화강암이 분산매질이라는 사실과, 전단강성률에 해당하는 C_{1212} , C_{2323} , C_{1313} 은 다른 탄성계수들 보다 축응력의 영향을 적게 받는다는 점이다. 이들에 대한 체계적인 결론과 원인을 규명하고 익산 유라기 화강암의 이방성에 대한 기작을 이해하기 위해서는 삼축압축 실험, 정압과 일축압축 하에서 동탄성 실험 등의 추가연구와 다른 종류의 암석시료와 비교검토하는 추가연구가 필요하다.

사 사

본 연구는 한국과학재단에서 지원한 목적기초연구 981-0403-010-2 지원으로 수행되었다.

참고문헌

이대성의, 1980, 강경도폭 지질보고서(1:50,000), 국립 지질 조사소, 36 pp.
 정창희 · 고양주, 1963, 함열도폭 지질보고서(1:50,000), 국립 지질 조사소, 29 pp.
 정태종, 1996, 역학실험에 의한 백악기 사암의 영률 변화 특성, 한국지구과학회지, 17, 287-293.
 Anderson, D. L., B. Minster and D. Bamford, 1980, Estimating crack parameter from observations of P-wave velocity anisotropy, Geophysics, 45, 345-360.
 Backus, G. E., 1962, Long-wave elastic anisotropy produced by horizontal layering, J. Geophys. Res., 67, 4427-4440.
 Brace, w. F., 1965, Relation of elastic properties of rocks to fabric, J. Geophys. Res., 70, 5657-5667.
 Brown E. T., 1981, Rock characterization testing and monitoring: ISRM suggested methods. Pergamon Press, 211 pp.
 Bur, T. R. and Hjelmstad, K. E., 1969, Elastic and

attenuation symmetries of simulated lunar rocks, Icarus 13, 44.
 Crampin, S., R. McGonigle, and D. Bamford, 1980, Estimating crack parameters from observations of P-wave velocity anisotropy, Geophysics, 45, 345-360.
 Crosson, R. S. and J-W Lin, 1971, Voight and Reuss prediction of anisotropic elasticity of dunite, J. Geophys. Res., 76, 570-578.
 Douglass, P. M. and Voight, B., 1969, Anisotropy of granites: A reflection of microscopic fabric, Geotechnique, 19, 376-398.
 Duvall, W. I., 1965, The effect of anisotropy on the determination of dynamic elastic constants of rock, Trans. Soc. Min. Eng. AIME., 232, 309-316.
 Hudson, J. A., 1980, Overall properties of a cracked solid, Math. Proc. Camb. Phil. Soc., 88, 371-384.
 Hudson, J. A., 1981, Wave speeds and attenuation of elastic waves in material containing cracks, Geophys. J. R. astr. Soc., 64, 133-150.
 Lee, J. M. and Alexander, S. S., 1995, Seismic anisotropy caused by rock fabric, Geophys. J. Int., 122, 705-718.
 Lo, T-W., K. B. Coyner and M. N. Toksoz, 1986, Experimental determination of elastic anisotropy of Berea Sandstone, Chicopee Shale, and Chelmsford Granite, Geophysics, 51, 164-171.
 Nur, A., and G. Simmons, 1969, Stress-induced velocity anisotropy in rock: an experimental study, J. Geophys. Res., 74, 6667-6674.
 Nye, J. F., 1985, Physical properties of crystals, Clarendon Press, Oxford, 329 pp.
 Postma G. W., 1955, Wave propagation in a stratified medium, Geophysics, 20, 780-806.
 Rodrigues, F. P., 1966, A anisotropy of granites. Proc. 1st. Soc. Rock Mech., Lisbon, 1, 721-731.
 Streckeisen, A. L., 1976, To each plutonic rocks and its proper name, Earth Sci. Rev., 12, 1-33.
 Thill, T. E., Bur, T. R. and Steckley, R. C., 1973, Velocity anisotropy in dry and saturated rock spheres and its relation to rock fabric, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 10, 535-557.
 Thill, R. E., Williard, R. J. and Bur, T. R., 1969, Correlation of longitudinal velocity variation with rock fabric, J. Geophys. Res., 74, 4897-4909.
 Tremmel, E. and Widmann, R., 1970, Deformation properties of gneiss, Proc. 2nd Cong. Int. Soc. Rock Mech., Belgrade, 1, 567-575.

2000년 2월 21일 원고접수
 2000년 6월 20일 원고채택