

평면이방성 분석에서 Saint-Venant 근사식의 수학적 해석

박철환, 박 찬, 박정욱, 정용복*

Mathematical Understanding of the Saint-Venant Approximation
in Analysis of a Transverse Isotropy

Chulwhan Park, Chan Park, Jung-Wook Park, Yong-Bok Jung*

Abstract All five independent elastic constants of a transversely isotropic rock sometimes need to be determined from a single specimen. Saint-Venant approximation has been widely used for a long time in the analysis of single specimen test. This paper has proven how this empirical equation can be mathematically transformed into a form of the apparent Young's modulus based on theory of elasticity. The transformed equation is a monotonous function on anisotropic angle and can be useful in the analysis of the in-situ stress measurement in an anisotropic rock mass. The estimations of data in literatures have shown that the measured values of G_2 are uniform on anisotropic angles and smaller than that of Saint-Venant's case. This decrement may be caused by sliding of the interface of strata and the decrement rate is inferred to relate well with the combination of bonding condition of strata and strength of rock material. Accumulation of these kinds of studies in the future enables to define the decrement and to determine elastic constants of a transversely isotropic rock from a single specimen from modifying Saint-Venant approximation.

Key words Transversely isotropic, Independent elastic constants, Saint-Venant approximation, Apparent Young's modulus, Bonding condition of strata

초 록 여러 가지 이유로 단일시험편에서 평면이방성 암석의 5개의 독립적 탄성상수를 결정해야 할 경우, Saint-Venant 근사식은 오랫동안 매우 유용하게 사용되어 왔다. 본 논문은 이 경험적 수식이 겉보기 탄성계수로 표현되는 수식으로 전환될 수 있음을 탄성이론에 근거한 수학적 전개를 통하여 밝히고 있다. 이렇게 전환된 수식은 이방성 각도에 단조증가하는 특성을 갖고 있으며, 이방성 암반의 초기응력측정에 유용하게 사용될 것이다. 문헌의 자료를 분석한 결과, G_2 의 측정값은 각도와 관계없이 일정한 크기이며, Saint-Venant 근사식에 의하여 유도된 값보다 작은 것으로 분석되었다. 이러한 감분은 층상의 경계면에서 미끄러짐에 의하여 발생하는 것으로 판단되며, 미끄러짐에 의한 감소비율은 층상의 결합상태와 암석의 강도에 따라 유추될 수 있다. 이러한 분석들이 향후에 계속되어 자료가 누적된다면 감소비율을 규정할 수 있고, Saint-Venant 근사식의 수정을 통하여 단일시험편으로부터 탄성상수를 결정할 수 있을 것이다.

핵심어 평면이방성, 독립적 탄성상수, Saint-Venant 근사식, 겉보기 탄성계수, 층상 결합상태

1. Introduction

경제적인 에너지 확보 등의 사회적 요구로 인하여 방사성폐기물 처분장이나 에너지 저장시설 등의 건설 필요성이 지속적으로 제기되고 있다. 이러한 지하구조물이나 터널의 공사에는 지하암반의 안정적인 굴착기술과 지보설계가 요구된다. 암반구조물의 안정성 설계는 암반 내에 존재하는 절리의 특성이나 지하수의 유동에 크게 좌

Received: Aug. 22, 2016

Revised: Sep. 13, 2016

Accepted: Sep. 26, 2016

***Corresponding Author:** Yong-Bok Jung

(Tel) +82428683097, (Fax) +82428683797

E-Mail) ybjung@kigam.re.kr

KIGAM, 124 Gwahang-no, Yuseong-gu, Daejeon, 34132, Korea

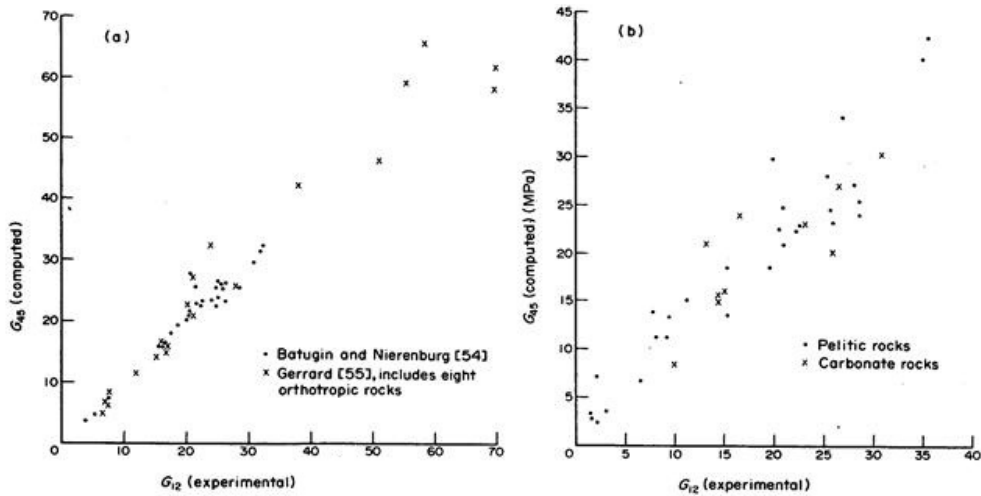


Fig. 1. Computed shear modulus plotted against the experimentally determined shear modulus (a) quartzfeldspathic and basic/lithic rocks, (b) polytic and carbonate rocks (after Worotnicki, 1993)

우되는데, 암석의 이방적 특성도 이의 한 요소로 작용한다. 이방성 암반에서 굴착에 따른 변형이나 파괴는 등방성 암반에서와는 달리 매우 복잡하고 비대칭 양상을 보이므로, 이를 명확하게 규명하는 것은 안정성 설계에서 있어 매우 중요한 기술요소이다. 또한 공벽변형법이나 공저변형법과 같이 암반의 변형을 이용하여 초기응력을 측정할 때, 이방성을 고려하지 않아 해석에서 엉뚱한 결과값을 초래하는 경우도 발생한다. Amadei(1996)는 이방성 정도가 1.5이면 해석결과에서 초기응력의 크기는 약 33%의 오차를 갖는다고 언급하였다.

이방성은 엽리 또는 층리를 갖는 암반에서 나타나며, 심지어 눈에 보이지 않는 결을 갖고 있는 화성암에서도 나타나는 특성이다. 이방성의 중요성을 설명하고 이를 실험적으로 해석하는 연구는 국내외적으로 많이 발표되고 있다.

암석이나 암반은 실제로 직교 이방성(orthotropy)으로 나타나는 경우가 보통이지만, 9개에 이르는 독립적 탄성상수를 실험적으로 얻기는 매우 어렵다. 따라서 대부분의 경우에 등방성이거나 한 개의 면을 등방성으로 가정한 평면이방성(또는 횡등방성, transverse isotropy)으로 해석된다. 평면이방성에서는 독립적 탄성상수의 수가 줄어들어 5개가 되며, 여러 개의 시험편으로부터 5개 이상의 서로 독립된 변형률을 측정하면 얻을 수 있다. Amadei는 이방성 각도가 서로 다른 3개의 시험편으로부터 이들을 얻을 수 있다고 설명하고 있지만, 2개의 시험편에서 이론적으로 그리고 실제로 얻을 수 있다(Cho et al., 2012). 왜냐하면 단일시험편에서 얻을 수

있는 독립적 변형률은 4개이기 때문에(Park et al., 2001), 8개의 측정값으로 5개의 독립적 탄성상수를 결정할 수 있다.

그러나 현실적으로 다량의 시험편이 제공되기 어렵거나, 제공된다 하더라도 암석이 갖고 있는 자연적인 불균질성이나 비선형성으로 인하여 탄성상수를 결정하기가 매우 어렵기(Gonzaga et al., 2008, Tien and Tsao, 2000) 때문에, 단일시험편에서 이들을 결정해야 하는 경우가 많다. 이때 다른 하나의 가정식이 필요하게 되는데, 식 (1)은 Saint-Venant에 의하여 제안된 근사식(이하 SV식으로 표현)으로 이러한 조건에 적합한 수식이다.

$$\frac{1}{G_2} = \frac{1}{E_1} + \frac{1+2\nu_2}{E_2} \quad (1)$$

여기서 E_1 과 E_2 는 등방성면과 이방성면에서의 탄성계수, G_2 와 ν_2 는 이방성면에서의 전단계수와 포아송비이다. 이 식은 이론적으로 한계를 갖고 있지만 오랫동안 널리 사용되어 왔다.

단일시험편이나 다중시험편의 시험을 통하여 이 식의 유효성을 입증하는 연구들이 많이 발표되었다. Worotnicki(1993)는 여러 보고자료에서 200개 이상의 자료를 인용하여 비록 예외가 있지만 이 식이 유효하다고 설명하였다. Worotnicki는 광물학적 분류에 따른 4가지 암석군을 2가지씩 묶어 두 개의 그룹으로 분류하고, G_2 의 측정값과 SV식에 의한 근사값을 Fig. 1과 같이 제시하였다.

Fig. 1(a)는 quartzfeldspathic rocks (화강암, 편마암, 석영질 사암 등)과 basic/lithic rocks (현무암, 염기성 사암 등)의 해석결과이며, Fig. 1(b)는 pelithic and pelitic rocks (clay 및 mica를 뜻함, 이암, 편암, 점판암 등)과 석회질 암석군에 대한 해석결과를 보여준다. 전자의 경우, 측정에 의한 G_2 (이하 G_{m} 으로 표현)의 크기는 SV식에 의하여 계산된 G_2 (이하 G_{2-SV} 로 표현)의 크기와 거의 같다고 보고하였으며, 후자의 경우에는 G_m/G_{2-SV} 의 비가 0.85~0.90 범위로 1보다 작다고 결론지었다. 또한, 세 번째 암석군인 basic/lithic 암석에서는 탄성계수의 크기가 5 GPa 이하로 작은 경우가 많고, 이방성 정도 (E_1/E_2)가 2 이상으로 크게 나타나는 경우도 많아 자료의 편차가 심하다고 부연하였다. 그리고 이런 자료를 종합하여 G_1 과 G_2 의 비가 이방성 정도와 비슷하다는 결론을 얻었다. 이상의 결론들을 각각의 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$G_m \approx G_{2-SV} \quad (2-1)$$

$$G_m \approx (0.85 \sim 0.90) \cdot G_{2-SV} \quad (2-2)$$

$$G_2 = G_1 \cdot E_2/E_1 \quad (2-3)$$

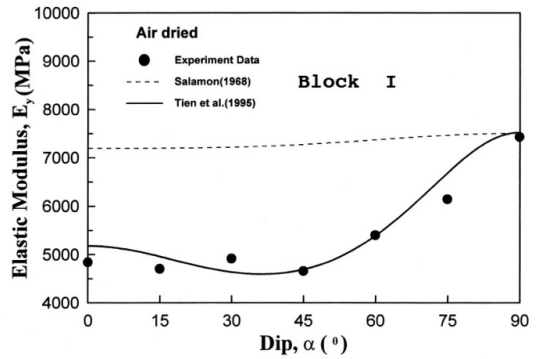
식 (2-1)과 식 (2-2)를 하나의 수식으로 표현하면 다음 식 (2-4)와 같다. 여기에서 정의된 K_G 는 G_m 과 G_{2-SV} 사이의 상대적 감분비율(decrement of shear modulus on anisotropic plane)로서 0에 가까운 크기가 된다. 앞의 식이나 Fig. 1에서 보듯이 K_G 값이 0~0.15 정도의 크기인데, 이는 다른 요인에 의하여 전단변형률이 증가하여 실험에서의 강성계수가 감소함을 의미한다. 시험에 의하여 K_G 값이 0이면, 이 물체는 SV식에 따라 변형함을 뜻한다.

$$G_m = (1 - K_G) \cdot G_{2-SV} \quad (2-4)$$

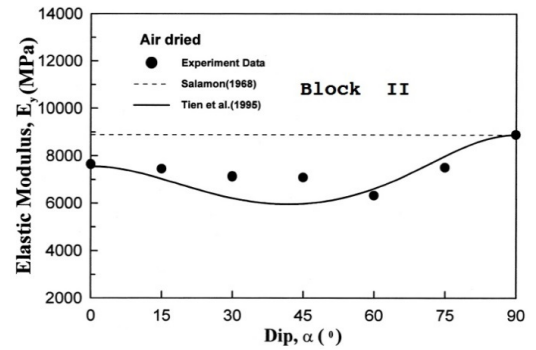
Talesnick and Ringel(1999)은 hollow 형태의 시험편을 대상으로 시험하여 탄성상수를 결정하여, Worotnicki의 분석에 반대하는 결과를 발표하였다. 실험에 의한 G_m 의 크기는 G_{2-SV} 보다 큰 크기로 나타나므로 다음 식 (2-5)와 같은 수정식을 제안하였다.

$$G_m = G_{2-SV} \cdot (2E_1 - E_2) / E_1 \quad (2-5)$$

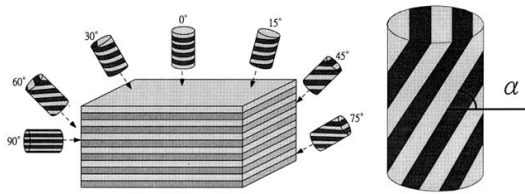
한편, 5개의 독립적 탄성상수를 구하려는 같은 목적으로 다중시험편 실험을 통하여 겹보기 탄성계수(apparent Young's modulus, 이하 E_{app} 로 표현)에 대한 연구도 수



(a) apparent Young's modulus for Block I



(b) apparent Young's modulus for Block II



(c) drilling directions for specimens

Fig. 2. Test of the artificial transversely isotropic rock (after Tien and Tsao, 2000)

행되어 많이 보고되고 있다(Park et al., 2010, Cho et al., Tien and Tsao). 특히 Tien and Tsao는 시멘트와 모래를 사용한 인공시료를 층상으로 결합시켜, Fig. 2와 같이 여러 방향의 평면이방성체를 제작하고, G_2 의 측정값과 이론적 추정치를 비교하였다. 이 연구에서는 자연상태의 평면이방성체 암반을 구현하기 위하여 시험편 제작 시 층상 간의 경계를 완전히 결합하지 않았다. 단, 불완전하게 결합된 연속체의 G_2 를 계산하기 위하여 시험편의 전단변형률이 재료 자체의 전단변형과 경계면의 미끄러짐에 의한 전단변형률의 합인 것으로 가정하였다. 이때 층상 간 경계면의 전단강성은 직접전단시험을 통

하여 측정하였다. 이러한 설명을 수식으로 표현하면 식 (3-1)과 같으며, 전단계수로 표현하면 식 (3-2)와 같다.

$$\text{Shear strain} = \text{Shear strain sum of each material} + \text{Shear strain due to Sliding} \quad (3-1)$$

$$1/G_2 = 1/G_{2\text{-MATERIAL}} + 1/G_{2\text{-SLIDING}} \quad (3-2)$$

이때 암석시료의 전단변형률은 실험에서 얻어지는 값이며, 각 층상물체의 G_2 를 고려한 암반 전체의 이상적 전단변형률은 Salamon 모델로 설명되는데 이는 SV식과 유사한 결과를 얻는다. 따라서 이는 식 (3-3)과 같이 표현할 수 있으며 실험자료를 해석하는 데 유용하다.

$$1/G_m = 1/G_{2\text{-SV}} + 1/G_{2\text{-SLIDING}} \quad (3-3)$$

이 식은 식 (2-4)에서 언급한 K_G 를 적용하여 일반화된 수식으로도 나타낼 수 있는데, 다음 식 (3-4)와 같다. 이를 다시 식 (3-5)와 같이 전단변형률로 표현할 수 있다. 여기에서 언급한 γ_m 및 γ_{SV} 는 각각 이방성면에서 측정된, 그리고 이상적인 전단변형률을 뜻한다. 또한 K_e 는 전단변형률의 증분비율(increment of shear strain on anisotropic plane)을 뜻하는데, 이방성면에서 발생하는 미끄러짐이 주요 요인이다. K_e 의 크기가 아주 작을 경우에 앞에서 언급한 K_G 와 같은 크기가 될 것이다.

$$1/G_m = 1/(1 - K_G) \cdot G_{2\text{-SV}} \quad (3-4)$$

$$\gamma_m = \gamma_{SV} / (1 - K_G) = (1 + K_e) \cdot \gamma_{SV} \quad (3-5)$$

한편 식 (3-2)는 Goodman(1980)이 균열면이 존재하는 재료의 전단계수를 구하기 위하여 경계면의 전단강성(k_s)과 균열간격(s)을 이용하여 제시한 다음 식 (3-6)과 동일한 의미를 갖는다.

$$1/G_2 = 1/G_1 + 1/(k_s \cdot s) \quad (3-6)$$

실험결과인 Fig. 2의 (a)와 (b)에서 보는 바와 같이, E_{app} 는 이방성 각도가 45도 또는 60도에서 최솟값을 보이며 측정값들은 대체로 유도식의 값들과 잘 일치하고 있다. 따라서 이 연구에서 얻어진 G_2 및 E_{app} 의 유도식은 불완전하게 결합된 층상암반(Imperfect Bonded Interface Stratified Rock)에서 매우 유용한 것으로 결론짓고 있다. 그리고, 층상사이가 잘 결합된(Perfect or Well Bonded Interface) 암반에서의 E_{app} 의 크기는 경

계면에서의 전단변형이 극히 작아, SV식과 유사한 Salamon 제안식(Fig.에서 점선)을 따르는 것으로 평가하였다.

이 외에도 간접인장시험이나 삼축압축시험을 통하여 G_2 의 값을 얻고 $G_{2\text{-SV}}$ 의 크기와 비교하는 연구들이 다수 보고되었으며 실험을 통하여 G_2 의 값을 측정하는 동시에 SV식의 유효성을 검토하였다(Gonzaga et al., Exadaktylos and Kaklis, 2001, Loureiro-Pinto, 1979). 하지만, 많은 연구에서 E_{app} 를 분석하고 있음에도 불구하고, SV식과 E_{app} 의 연관성에 대하여서 언급하지는 않았다. 본 연구에서는 이들 두 요소가 서로 밀접하게 연관되어 있어, SV식이 수학적으로 E_{app} 의 수식으로 전환될 수 있음을 밝힌다. 그리고 문헌에서 언급된 몇 가지 시험자료의 분석을 통하여 이들 두 개의 수식이 어떻게 표현될 수 있는지를 제시하고자 한다.

2. Theory

2.1 Constitutive equation

선형 탄성체는 4차 텐서로 표시되는 탄성상수를 포함하는 Hooke의 법칙을 따른다. 다행히 이들은 단순한 표현인 2차 텐서로 전환될 수 있어, 평면이방성체에서 Hooke의 법칙은 식 (4)와 같이 간단히 표시될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_2/E_2 & -\nu_1/E_1 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_2/E_2 & 1/E_2 & -\nu_2/E_2 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_1/E_1 & -\nu_2/E_2 & 1/E_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기에서 표현된 (1, 2, 3) 좌표계와 실험에서 사용되는 (x, y, z) 좌표계는 Fig. 3에서 보는 바와 같다. 그림에서 1축과 3축으로 이루어진 면이 횡등방성면이며, 3과 z는 동일한 방향으로 설정한다. 그리고 각 ϕ 는 x방향에서 1방향으로 이루는 각도를 의미하는데 Fig. 2에 표시된 α 와 같은 크기이다. 수식에서 E_1 과 E_2 는 각각 2차 텐서인 E_{11} 및 E_{22} 를 뜻하며, ν_1 과 ν_2 , G_2 또한 또한 ν_{13} 및 ν_{21} 의 G_{12} 단순표현이다. G_1 은 G_{13} 로서 등방성면에서의 전단계수를 의미하며, 이는 식 (5)와 같이 E_1 과 ν_1 으로부터 얻을 수 있는 값이다. 그리고 식 (4)에는 행렬의 대칭에 의한 식 (6)이 포함되어 있다.

$$G_1 = E_1 / 2(1 + \nu_1) \quad (5)$$

$$\nu_{ij}/E_i = \nu_{ji}/E_j \quad (6)$$

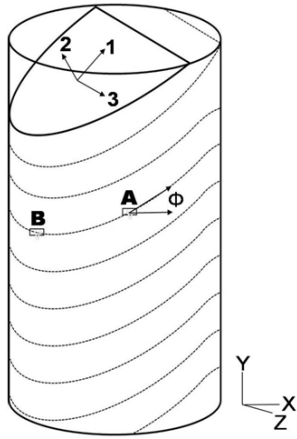


Fig. 3. Reference axes of a transverse isotropy

2.2 Strain measurement

단일시험편의 일축압축시험에서 독립적 변형률은 최대 4개이다. 이는 Fig. 3과 4에서 보는 바와 같이 미소 평면 A에서 측정가능한 3개 방향의 변형률과 B에서 횡 방향 변형률이다. 점 A는 시험편의 진경사를 나타내는 부분으로 1 및 2, x 방향을 동시에 표현할 수 있는 미소 평면이다. 점 B는 점 A의 직각방향에 위치하며 이의 가로방향은 3 및 z 방향과 일치하는 미소평면이다. 그 외 모든 지점 및 모든 방향의 변형률은 이들 4개의 변형률로부터 유도할 수 있어 독립적이지 않다. 변형률 측정에서 이러한 방향으로 측정하는 장점은 이미 보고된 바 있다 (Park et al., 2001). St-Marc 석회암 limestone(Gonzaga et al.) 및 Olkiluoto 편마암(Hakala et al., 2007), 그리고 미세입자 점판암(Homand et al., 1993)에 대한 시험을 수행한 3개의 문헌에서 이러한 변형률을 측정한 보고서가 있으며, 다른 실험자료에서는 점 A에서 중간방향의 변형률을 측정하지 않은 것이 대부분이다.

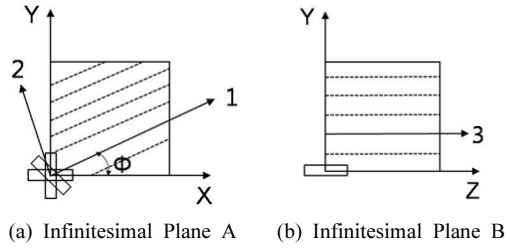


Fig. 4. Strain measurement in compression test

Table 1. The angles from (1, 2, 3) coordinate to (x, y, z) coordinate

axis	1	2	3
x	$-\phi$	$-(90+\phi)$	90
y	$90-\phi$	$-\phi$	90
z	90	90	0

2.3 Coordinate transformation and mathematical procedure

식 (4)는 (1, 2, 3) 좌표계로 표현되어 있으며, 시험에서 변형률은 (x, y, z) 좌표계에서 측정되기 때문에 좌표전환이 필요하다. 두 좌표계에서 축들 간의 각도와 변환계수는 각각 Table 1과 Table 2에서 보는 바와 같다. Fig. 4의 시험편에 종방향으로 힘이 가해지는 일축압축시험에서, 좌표전환과 수식전개는 다음과 같은 순차로 이루어진다. 첫째, 힘을 가하는 축방향의 응력(σ_y)은 식 (7)을 이용하여 (1, 2, 3) 좌표계에서의 응력($[\sigma]_{1-6}$)으로 전환한다. 둘째, 응력 $[\sigma]_{1-6}$ 은 식 (4)에 의하여 변형률 $[\epsilon]_{1-6}$ 을 발생한다. 셋째, 변형률 $[\epsilon]_{1-6}$ 은 식 (x, y, z) 좌표계의 변형률인 $[\epsilon]_{1-6}$ 으로 전환한다.

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_y \sin^2 \phi, \\ \sigma_2 &= \sigma_y \cos^2 \phi, \\ \tau_{xy} &= -\sigma_y \cos \phi \sin \phi, \text{ and } \sigma_3 = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

Table 2. Transformation coefficients from (1, 2, 3) coordinate to (x, y, z) coordinate

axis	1	2	3	4	5	6
x			0	0	0	
y			0	0	0	
z	0	0	1	0	0	0
yz	0	0	0			0
zx	0	0	0			0
xy			0	0	0	

$$\begin{aligned}
\varepsilon_1 &= \frac{\sigma_y}{E_1} \sin^2 \phi - \frac{V_2 \sigma_y}{E_2} \cos^2 \phi \\
\varepsilon_2 &= -\frac{V_2 \sigma_y}{E_2} \sin^2 \phi + \frac{\sigma_y}{E_2} \cos^2 \phi \\
\varepsilon_3 &= -\frac{V_1 \sigma_y}{E_1} \sin^2 \phi - \frac{V_2 \sigma_y}{E_2} \cos^2 \phi \\
\gamma_{12} &= -\frac{\sigma_y \sin \phi \cos \phi}{G_2}, \text{ and } \gamma_{23} = \gamma_{31} = 0
\end{aligned} \quad (8)$$

일축압축시험에서는 식 (7)에서 보는 바와 같이 τ_{yz} 및 τ_{zx} 의 두 항목이 0이 되므로, 식 (4)는 6개의 선형식은 식 (8)과 같이 독립적 수식은 4개만으로 정의된다. 따라서 단일시험편의 일축압축시험에서 5개의 독립적 탄성상수를 얻기 위하여서는 한 개 이상의 관계식이나 상숫값이 별도로 정의되거나 제공되어야 한다. SV식은 이의 유효성 논란과 관계없이 이러한 요구에 가장 적합한 수식으로 알려져 있으며 현재까지 널리 사용되고 있다. 이렇게 유도된 4개의 변형률 수식에서 항목 $1/E_1$ 과 $1/E_2$, v_2/E_2 을 각각 F_1 및 F_2 , F_{nu} 으로 바꾸고, 단위응력에 대한 변형률, 즉 ε_i / σ_y 를 $\bar{\varepsilon}_i$ 으로 간단하게 표시하면 이는 식 (9)와 같다. 여기서 γ_{23} 및 γ_{31} 의 크기는 0이므로 $\bar{\gamma}_{23} = \bar{\gamma}_{31} = 0$ 이 된다.

$$\begin{aligned}
\bar{\varepsilon}_1 &= F_1 \sin^2 \phi - F_{nu} \cos^2 \phi \\
\bar{\varepsilon}_2 &= -F_{nu} \sin^2 \phi + F_2 \cos^2 \phi \\
\bar{\varepsilon}_3 &= -v_1 F_1 \sin^2 \phi - F_{nu} \cos^2 \phi \\
\bar{\gamma}_{12} &= -\frac{\sin \phi \cos \phi}{G_2}
\end{aligned} \quad (9)$$

최종적으로 이들 식에서 표 2의 변환계수를 사용하여 (x, y, z) 좌표계로 표시하면 4개의 단위변형률은 식 (10)과 같다.

$$\begin{aligned}
\bar{\varepsilon}_x &= \bar{\varepsilon}_1 \cos^2 \phi + \bar{\varepsilon}_2 \sin^2 \phi + (2 \cos \phi \sin \phi) \bar{\gamma}_{12} / 2 \\
&= (F_1 \sin^2 \phi - F_{nu} \cos^2 \phi) \cos^2 \phi + (-F_{nu} \sin^2 \phi + F_2 \cos^2 \phi) \sin^2 \phi + (\cos \phi \sin \phi) \frac{-\sin \phi \cos \phi}{G_2} \\
&= (F_1 + F_2 - \frac{1}{G_2}) \cos^2 \phi \sin^2 \phi - F_{nu} (\cos^4 \phi + \sin^4 \phi)
\end{aligned} \quad (10-1)$$

$$\begin{aligned}
\bar{\varepsilon}_y &= \bar{\varepsilon}_1 \sin^2 \phi + \bar{\varepsilon}_2 \cos^2 \phi - (2 \cos \phi \sin \phi) \bar{\gamma}_{12} / 2 \\
&= (F_1 \sin^2 \phi - F_{nu} \cos^2 \phi) \sin^2 \phi + (-F_{nu} \sin^2 \phi + F_2 \cos^2 \phi) \cos^2 \phi - (\cos \phi \sin \phi) \frac{-\sin \phi \cos \phi}{G_2} \\
&= F_1 \sin^4 \phi + F_2 \cos^4 \phi + (\frac{1}{G_2} - 2F_{nu}) \cos^2 \phi \sin^2 \phi
\end{aligned} \quad (10-2)$$

$$\bar{\varepsilon}_z = \bar{\varepsilon}_3 = -v_1 F_1 \sin^2 \phi - F_{nu} \cos^2 \phi \quad (10-3)$$

$$\begin{aligned}
\bar{\gamma}_{yz} / 2 &= \bar{\varepsilon}_1 (-\cos \phi \sin \phi) + \bar{\varepsilon}_2 (\cos \phi \sin \phi) + (\cos^2 \phi - \sin^2 \phi) \bar{\gamma}_{12} / 2 \\
&= (F_1 \sin^2 \phi - F_{nu} \cos^2 \phi) (-\cos \phi \sin \phi) + (-F_{nu} \sin^2 \phi + F_2 \cos^2 \phi) (\cos \phi \sin \phi) + (\cos^2 \phi - \sin^2 \phi) \frac{-\sin \phi \cos \phi}{2G_2} \\
&= -F_1 \cos \phi \sin^3 \phi + F_2 \cos^3 \phi \sin \phi + (F_{nu} - \frac{1}{2G_2}) \cos \phi \sin \phi (\cos^2 \phi - \sin^2 \phi)
\end{aligned} \quad (10-4)$$

식 (10)의 4개 수식을 살펴보면, 각각의 변형률은 5개의 독립적 탄성상수 중에서 4개로 정의되어 있다. 셋째 식인 z방향 변형률은 G_2 에 독립적 수식이며, 다른 3개의 수식은 v_1 에 독립적 수식으로 표현되어 있다.

실험에서 Fig. 4와 같은 변형률을 얻는다면, 식 (10)을 이용하여 4개의 독립적 수식을 얻을 수 있다. 서론에서 언급한 바와 같이 각도가 다른 2개의 시험편으로부터 8개의 식을 만들 수 있어, 최소자승법을 사용하여 5개의 독립적 탄성상수는 결정될 수 있을 것이다.

2.4 Transformation into the form of apparent Young's modulus

평면이방성 암석이 균질한 탄성체로서 식 (1)의 SV식에 따라 변형을 일으킨다면, G_2 는 더 이상 독립적 상수가 아니고 앞의 식 (10)에 포함된 항은 제거될 수 있다. SV식을 식 (10-2)에 대입하면 이는 식 (11)과 같이 변환된다.

$$\begin{aligned}
\bar{\varepsilon}_y &= F_1 \sin^4 \phi + F_2 \cos^4 \phi - 2F_{nu} \cos^2 \phi \sin^2 \phi + \cos^2 \phi \sin^2 \phi (F_1 + F_2 + 2F_{nu}) \\
&= F_1 \sin^2 \phi (\sin^2 \phi + \cos^2 \phi) + F_2 \cos^2 \phi (\cos^2 \phi + \sin^2 \phi) - 2F_{nu} \cos^2 \phi \sin^2 \phi + 2F_{nu} \cos^2 \phi \sin^2 \phi \\
&= F_1 \sin^2 \phi + F_2 \cos^2 \phi
\end{aligned} \quad (11)$$

여기에서 좌항의 $\bar{\varepsilon}_y$ 는 앞의 정의에 의하여 ε_y / σ_y 이므로 이는 y 방향의 단위변형률이다. 또한 이는 y 방향의 겉보기 탄성계수의 역수이므로, 이 식은 다음 식 (12)로 표현될 수 있다.

$$\frac{1}{E_{app}} = \frac{1}{E_1} \sin^2 \phi + \frac{1}{E_2} \cos^2 \phi \quad (12)$$

식 (12)는 E_{app} 는 E_1 및 E_2 를 변수로 두고, 이방성 각도에 따라 변화하는 함수로 정의될 수 있음을 보여준다. 여러 문헌에서 식 (4)로부터 식 (10)을 전개한 수식들을 소개하고 있다(Exadaktylos, 2001, Exadaktylos and Kaklis, Homand, Lekhnitskii, 1963). 이들의 연구에서는 SV식을 언급하였으나, 이를 적용하여 식 (12)로 발전시키지 못하였다.

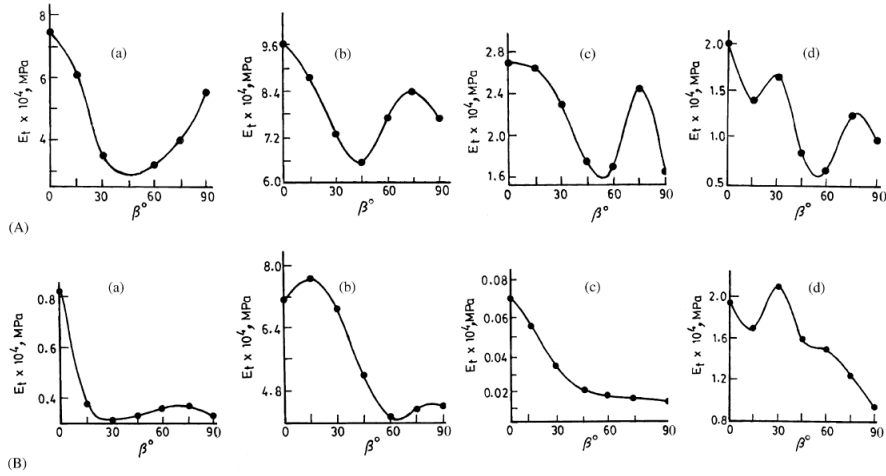


Fig. 5. Two categories of $E_{app} - \beta$ relations, (A) U-shaped variation and (B) monotonous variation (after Nasserri et al., 2003)

3. Characteristics and application of apparent Young's modulus

3.1 Characteristics of apparent Young's modulus

수학적 전개를 통하여, 식 (1)로 표현되는 SV식이 식 (12)로 표현되는 E_{app} 식과 동일한 수식임을 밝혔다. 즉, 평면이방성체에서 SV식이 유효하다면, E_{app} 는 E_1 및 E_2 그리고 ϕ 로 표현될 수 있음을 제시하였으며, E_{app} 수식의 특성은 SV식의 특성과 결국 동일하다고 할 수 있다.

식 (12)에서 알 수 있듯이 E_{app} 의 크기는 두 개의 탄성계수에 대략적으로 비례하고, 두 개의 포아송비와는 무관한 특성을 갖고 있다. 식 (1)이 탄성이론에 맞지 않기 때문에, 이 식 또한 탄성이론에 맞지 않는 수식이다. 하지만, 몇몇 특수한 경우에는 탄성론과 잘 일치하고 있다. 즉, 각도가 0도일 때와 90도일 때 E_{app} 는 각각 E_2 및 E_1 이 되며, 이는 Fig. 3에서 표현한 방향성의 정의와 일치한다.

E_{app} 수식을 ϕ 로 편미분하면 이의 또 다른 특성을 발견할 수 있다. 이 미분함수는 식 (13)과 같은데, 수식의 우항에서 ($E_1 - E_2$) 앞의 삼각함수로 이루어진 항목은, ϕ 의 크기가 0도에서 90도 사이로 정의되므로 양의 값이 된다. 즉, 대부분의 경우 $E_1 > E_2$ 이므로 미분값의 크기는 항상 양의 값이다. 즉, E_{app} 는 단조증가함수이다. 가끔 $E_1 < E_2$ 인 경우가 있는데, 이 때에는 단조감소함수가 된다.

$$\frac{\partial}{\partial \phi} E_{app} = \frac{2E_1E_2 \cos \phi \sin \phi}{(E_1 \cos^2 \phi + E_2 \sin^2 \phi)^2} (E_1 - E_2) \quad (13)$$

3.2 Variation of apparent Young's modulus

다중시험편을 이용한 연구들에서는 겉보기 탄성계수가 각도에 따라 다양하게 변화하는 결과를 보고하였다. Nasserri 등(2003)은 이전 연구에서 수집한 자료와 히말라야 편암에 대하여 직접 시험을 수행한 결과를 바탕으로 이들의 상관관계를 설명하고 있다. 즉, $E_{app} - \beta$ (β 는 수식의 Fig. 3의 ϕ 와 반대방향)의 상관관계는 Fig. 5와 같이 'U-shaped' 및 'decreasing shaped' 등의 두 가지 형태로 나타난다고 결론짓고 있다.

또한 여러 종류의 편암에 대하여 일축압축시험을 수행하여 Fig. 6과 같은 $E_{app} - \beta$ 의 상관관계를 얻었다. 여

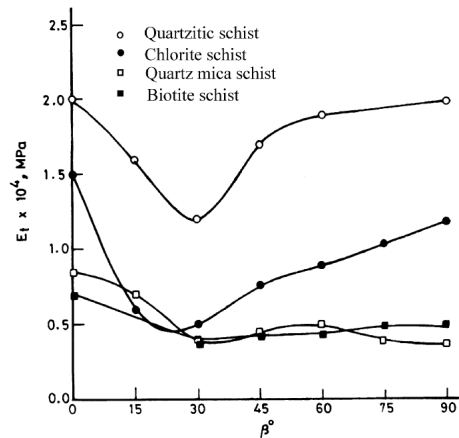


Fig. 6. $E_{app} - \beta$ relations for Himalayan schists (after Nasserri et al., 2003)

기에서 quartz mica schist 및 biotite schist 자료에서는 단조감소의 현상이 나타난다고 볼 수 있다. 그러나 quartzitic schist와 chlorite schist에서는 $\beta = 30$ 일 때 최솟값을 보이고 있어 단조현상을 볼 수 없다.

이로써 암석특성에 의하여 E_{app} 는 이방성 각도에 따라 단조현상을 보이기도 하고 그렇지 않기도 하다는 것을 알 수 있다. 단조현상을 보이는 암석은 식 (12)의 관계가 대체로 유효하다고 할 수 있으며, 따라서 SV식이 대체로 유효하다는 것을 알 수 있다. 물론 단조현상을 보이지 않는 암석은 식 (12)의 관계가 유효하지 않으므로 SV식이 적용될 수 없다.

이와 같이 $E_{app} - \phi$ 의 상관관계가 다양한 형태로 나타나는 것은 암석이 본질적으로 불균질하기 때문에 당연한 결과라고 할 수 있다. 더욱이 SV식이 이론적으로 얻은 관계식이 아니고 근사식이며, G_2 가 독립적이지 않고 다른 4개의 탄성상수에 의하여 결정된다는 모순을 가지고 있기 때문이다. 또한, 삼방향 이방성체를 평면이방성체로 가정한 것도 그 이유가 될 수 있다.

3.3 Rocks showing monotonous tendency

Nasseri 등이 언급하였듯이 E_{app} 가 이방성 각도에 따라 단조감소를 보이는 시험자료는 매우 한정적이다. Fig. 2에서 언급한 두 가지 인공시료는 단조경향을 띠고 있다. 두 시료에서 E_{app} 는 최솟값을 보이는 것이 명확하지만 단조증가경향에 크게 벗어나지 않는다고 할 수 있다. 두 시료에서 E_{app} 는 낮은 각도에서는 큰 차이를 보이지 않고 E_2 의 크기와 비슷한 크기로 일정하며, 45도 또는 60도 이후에서는 단조증가하고 있다.

Amadei의 연구에 언급된 두 가지 암석은 단조관계를 잘 나타내 보이는 자료이다. 그 가운데 Alliro and Boehler(1979)에 의하여 수행된 규조암에 대한 실험자료는 Fig. 5의 (B-c)에도 인용된 바 있는데, 이를 재구성하면 Fig. 7과 같다. 여기에서 E_1 과 E_2 의 크기는 각각 0.76 GPa 및 0.20 GPa로 측정되었는데, ν_2 의 값은 알려져 있지 않다. 만약 이 규조암이 SV식에 따라 변형한다면, E_{app} 는 ν_2 의 크기와 관계없이 Fig. 7의 위쪽 곡선을 따라 변화할 것이다. 이 곡선은 그림에서 볼 수 있듯이 실험자료의 E_{app} 값들보다 약간 큰 크기들이다.

여기서 규조암의 ν_2 의 값을 0.25로 가정하면, G_{2-SV} 의 크기는 그림과 같이 0.114 GPa이 된다. 실험에서 얻어진 G_2 의 크기들은 오차가 거의 없이 0.097 GPa로 해석되며, 이를 식 (10-2)에 대입하면 그림의 아래 곡선으로 나타나는데 실험자료와 아주 잘 일치하고 있다. 이렇게 해석되는 두 값의 차이는 0.017 GPa이며, 상대적 차이는 15.2%로 분석된다. Tien and Tsao에 의한 분석의

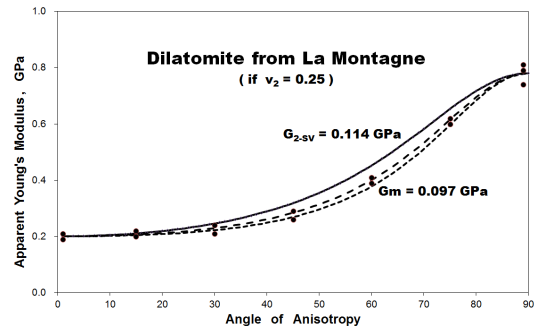


Fig. 7. Revised graph for monotonous $E_{app} - \phi$ relation for diatomite (after Alliro and Boehler, 1979)

관점에서 볼 때, 이는 식 (2)와 식 (3)에서 언급한 전단계수의 감분(K_G) 및 전단변형률의 증분(K_ϵ)이 각각 0.15 및 0.17이 되는 것을 의미한다. K_ϵ 의 값이 0.17을 달리 표현하면, 전체 전단변형률은 G_{2-SV} 에 의하여 83%가 발생하며 층상경계면의 미끄러짐에 의하여 17%가 발생함을 뜻한다. K_G 의 값이 0.15이면, Fig. 1-(b)에서 언급한 실험값은 G_{2-SV} 의 0.85~0.90배 정도라는 Worotnicki의 연구결과의 하한경계에 있다고 볼 수 있다.

한편 규조암은 다공질이며 석회암을 대표로 하는 유기적 퇴적암류로서 광물학적으로 네 번째 분류인 석회질 암석군이라 볼 수 있으므로 Fig. 1-(b)에 포함될 수 있다. 문헌의 사진에서 보이는 외형적 및 유안적 시료의 형태는 점판암과 같이 층상의 폭이 수 mm 정도이며, Tien and Tsao이 표현한 'perfect' 또는 'well' 결합된 층상이라 할 수 없으며 미끄러짐이 잘 일어날 수 있는 형상이다. 그리고 일축압축강도의 최대치는 75 MPa이며 탄성계수의 크기로 판단할 때, 강도와 강성이 약한 연암으로 평가할 수 있다.

Fig. 8에서 볼 수 있는 Olkiluoto 단지의 운모편마암에 대한 자료도 단조현상을 보이는 좋은 자료이다. 그림의 (a)는 모든 시험편의 자료를 도시한 원본이며, (b)는 21도 및 27도, 42도, 45도, 70도, 79도의 6가지 시료에서 본래 자료의 크기들을 평균하여 재구성하여 점으로 표시한 그림이다. 각 시료에 대한 G_2 의 크기는 21~27 GPa로 해석되며, 이들을 최소자승법으로 해석한 G_2 의 평균 측정값은 24.0 GPa로 분석된다. Fig. 8의 (b)는 이렇게 분석된 G_2 의 평균값과 최댓값, 최솟값을 이용하여 E_{app} 의 변화를 그림으로 도시한 것이다.

한편, 이 편마암이 SV식이 유효한 암석이라면 G_{2-SV} 의 크기는 26.3 GPa으로 측정의 최댓값과 유사하여, E_{app} 는 Fig. 8 (b)의 위쪽 곡선으로 표현될 것이다. 따라

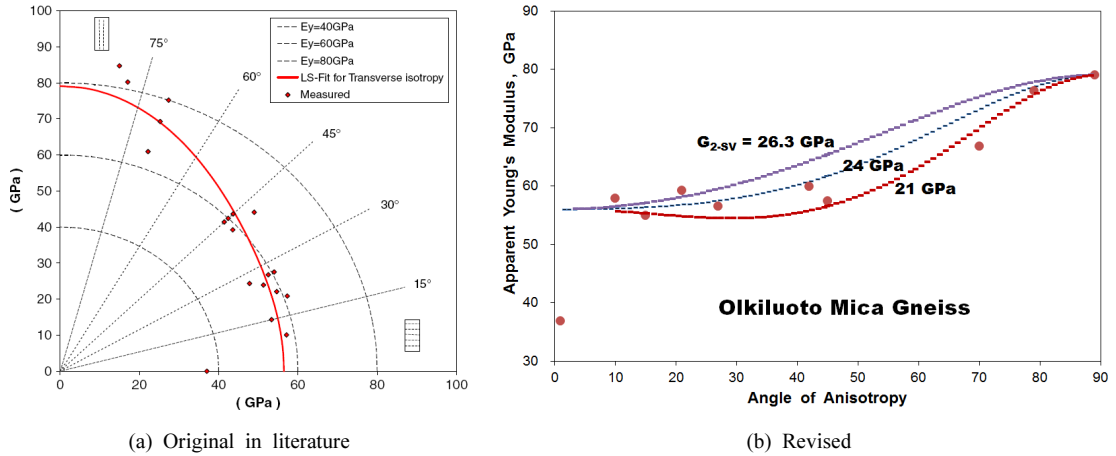


Fig. 8. $E_{app}-\phi$ relation for mica gneiss (after Hakala et al., 2007)

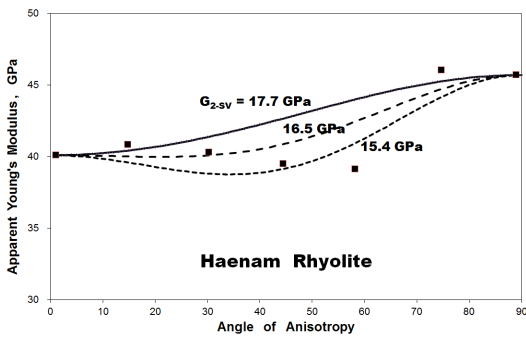


Fig. 9. $E_{app}-\phi$ relation for rhyolite (after Park et al., 2010)

서 시험에서 분석된 평균크기와 2.3 GPa (약 9%, $K_G=0.09$, $K_e=0.10$) 정도의 차이를 보인다.

여기에 사용된 갈색을 띤 운모편마암은 광물학적으로 운모질이기 때문에 셋째 분류의 암석이라기 보다는, 첫째 분류인 quartzfeldspathic 암석군의 대표적 암종이므로 Fig. 1의 (a)에 포함된다. 그러나 미끄러짐에 의하여 10% 정도의 전단변형의 증분이 발생하므로 Worotnicki의 연구결과인 Fig. 1(b)의 상한경계에 있다고 볼 수 있다. 또한 문헌의 시료사진으로 볼 때 편마암 시험편은 ‘perfect’는 아니지만 잘 결합된 층상으로 미끄러짐이 잘 일어날 수 없는 형상이다. 그리고 일축압축강도의 최대 및 최소치는 각각 90 MPa 및 170 MPa이므로 경암 또는 중경암인데, 탄성계수의 크기로 미루어 볼 때 경암으로 분류할 수 있다.

Fig. 9는 해남지역의 터널설계에서 시험된 유문암에 대한 평면이방성 시험자료(Park et al., 2010)로서, 점으

로 표시된 7개의 각 측정자료는 각각 4~5개의 시험편 으로부터 얻어진 E_{app} 시험결과의 평균값이다. Fig. 2(b)와 같이 E_{app} 가 60도 시료에서 최소값을 갖는 시험결과로 단조현상을 보이지는 않는다. 실험결과로 G_2 의 크기는 15.4~18.5 GPa 범위로 편차는 편차가 크지 않았으며, 회귀분석에 의한 평균크기는 16.5 GPa로 나타났다. 한편 0도 및 90도 시료에서 얻어진 다른 4개의 탄성상수로부터 SV식으로 얻어진 크기는 17.7 GPa이다. 시험에 의한 G_m 의 크기는 75도일 때의 결과를 제외하면 G_{2-sv} 의 87~96% 수준으로 나타났으며, 평균값은 93% ($K_G=0.07$, $K_e=0.07$)정도로 분석되었다. 한편 75도 시료에서 G_m 은 G_{2-sv} 의 크기보다 5% 정도 크게 나타나, K_G 와 K_e 값이 음의 값으로 분석된다. 이는 시험편 상하면의 구속에 의하여 미끄러짐이 제약되는 시험조건 때문인 것으로 판단된다.

여기에 사용된 회색을 띤 유문암은 석영질 분출암으로 광물학적으로 첫째 분류인 quartzfeldspathic 암석군이므로 Fig. 1(a)에 포함된다. 그러나 미끄러짐에 의하여 평균 7.3% 정도의 전단변형이 발생하므로 Worotnicki의 두개의 그림의 중간에 있다고 볼 수 있다. 또한 시료는 유상구조이지만 엽리와 같이 간극이 있는 것을 고려할 때, Fig. 7의 구조암과 같이 perfect 또는 well 결합된 층상이라 할 수 없으며 미끄러짐이 잘 일어날 수 있는 형상이다. 그리고 일축압축강도 (150~250 MPa) 및 탄성계수의 크기를 평가하면 경암으로 분류된다.

이상의 시험자료들에서 이방성 각도에 따른 E_{app} 의 변화를 살펴보면, 구조암은 뚜렷한 단조증가현상을 보이고 있지만, 유문암 자료는 60도 시료에서 최소치를 보이고 있다. 이렇게 다양한 변화양상을 갖는 E_{app} 와는 달

리, 측정된 G_2 의 크기는 일관성을 보이고 있다. 즉, 이방성 각도와 관계없이 Worotnicki의 종합적 수식인 식 (2-4)의 K_G 값이 일정한 크기를 갖는다. 앞의 세 그림의 7의 구조도 및 운모 편암, 유문암의 K_G 값은 각각 0.14 및 0.09, 0.07로 평가되었다. 이는 전체 전단변형률에서 미끄러짐에 의한 영향(K_c)이 각각 17% 및 10%, 7.3%임을 의미한다.

따라서 Tien and Tsao가 언급한 층상이나 엇리 등의 결합의 상태(perfect/ well/ moderate)에 따라, 그리고 시험결과로 나타나는 강도와 탄성계수를 고려하면 식 (2-4)에서 언급한 K_G 값의 유추할 수 있다. 식 (2)에서 평가된 0~0.15의 크기와 시험자료를 분석한 0.07~0.15의 크기는 K_G 값을 유추하는 데 하나의 지표가 될 수 있다. 이로써, 측정된 G_2 및 유추된 K_G 로부터 SV식의 수정식을 얻을 수 있으며, 단일시험편 시험에서 5개의 탄성상수를 추정할 수 있게 된다.

그러나, 층상의 결합이 ‘poor’하거나 ‘loose’하여 미끄러짐이 쉽게 발생하는 시료에서는 이러한 시험과 분석은 무의미하다고 할 수 있다. 특히 Fig. 5에서 언급한 U-shaped 경향을 보이는 암석이 이러한 결합상태의 암석일 것으로 판단된다. Fig. 6에서 언급한 편암은 부스러지기 쉽고 층상평면이 미끄러지기 쉬운 대표적인 암종으로 알려져 있어 이러한 식들을 적용할 수 없을 것으로 판단된다.

3.4 Application of apparent Young's modulus

Saint-Venant이 식 (1)을 제안한 당시에는 G_2 값을 실험적으로 측정하기가 매우 어려웠을 것으로 추정된다. 지금은 Fig. 4에서 언급한 측정방법과 식 (10)을 통하여 얻을 수 있다. 그러나 여러 개의 시험편을 사용할 수 없는 경우, 식 (1)은 매우 유용하며 지금까지 많이 사용되어 왔다. 본 연구에서 제시한 식 (12)의 E_{app} 수식은 이방성 특성을 시험적으로 해석하는 데 매우 유용하게 활용될 수 있다. 단일시험편에서 해석할 경우, SV식을 대신하여 E_{app} 수식을 사용하면, E_1 및 E_2 의 범위를 즉각적으로 판단할 수 있게 된다. 다중시험편 시험에서는 Fig. 2 및 Figs. 7~9에서와 같이 E_{app} 의 변화와 G_m 의 크기를 분석하는 데 사용될 수 있다.

암반의 변형을 이용하여 초기응력을 측정할 때, 변형률의 측정방향은 매우 다양하다. Fig. 3과 Fig. 4에서 언급한 평면들에서 어떠한 방향이 되더라도 식 (12)를 사용하면 측정방향의 겹보기 탄성계수 및 법선변형률을 알 수 있다. 이 식을 더욱 발전시키면 앞에서 언급한 평면 A가 아닌 모든 방향의 평면에서의 겹보기 값들을 쉽게 유도할 수 있다.

변형을 이용한 초기응력측정에서 탄성계수뿐만 아니라 포아송비의 겹보기 크기도 필요하다. 암반의 변형이 SV식에 따른다면 모든 방향의 E_{app} 는 식 (12)로 얻을 수 있듯이, 겹보기 포아송비를 뜻하는 ν_{app} 는 이 식을 응용하여 식 (14)로 제안할 수 있다.

$$\nu_{app} = \nu_1 \sin^2 \phi + \nu_2 \cos^2 \phi \quad (14)$$

각도에 따라 실제 ν_{app} 값의 변화양상은 다양하지만, 이를 추정하는 수식이 없다면 식 (14)는 유용하다고 판단된다. 각도가 0도 및 90도일 때는 그 크기는 방향의 정의와 일치한다. 식 (12)에 의하면 E_{app} 가 E_1 및 E_2 의 중간 크기이듯이, ν_{app} 는 역시 식 (14)에 의하여 ν_1 및 ν_2 의 중간 크기로 규정된다. 따라서 실험에 의한 ν_{app} 는 식 (14)로부터 유추된 크기로부터 큰 차이를 보이지 않을 것으로 판단된다.

4. Conclusional Discussion

본 연구에서 이방성 암석의 해석에 사용되는 Saint-Venant 근사식이 탄성이론에 근거한 수학적 전개를 통하여 겹보기 탄성계수로 전환될 수 있음을 밝혔다. 즉, 탄성상수들의 관계를 표현한 식 (1)과 $E_{app}-\phi$ 관계를 설명하는 식 (12)가 서로 다른 형태로 구성되어 있지만 탄성학적으로 동일한 의미를 갖는다. 암석의 변형이 SV식을 따른다면, 평면 A의 모든 방향의 E_{app} 는 식 (12)를 통하여 알 수 있으며, 이는 이방성 각도에 따라 단조증가하는 특성을 갖는다. 따라서 E_{app} 의 크기는 두 개의 독립적 탄성계수인 E_1 및 E_2 의 중간 크기이다. 단일시험편을 사용하여 탄성상수를 해석하는 경우에 SV식은 매우 유용하며 지금까지 많이 사용되어 왔으며, 동일한 수식인 E_{app} 수식을 사용하면 편리한 경우가 있다. 암반의 변형을 이용하여 초기응력을 측정할 때, 다양한 방향으로 측정된 변형률을 해석해야 하는데, 식 (12)의 E_{app} 수식은 매우 유용하게 사용될 수 있다.

문헌들의 자료를 분석한 결과, $E_{app}-\phi$ 관계는 매우 다양하다. 약한 암석이거나, 층상의 결합이 느슨하여 미끄러짐이 많은 경우에 발생하는 전단변형률은 SV식을 적용했을 때의 값보다 매우 크기 때문에 $E_{app}-\phi$ 관계는 단조현상을 보이지 않는다. 편암이 이의 대표적인 암석인데 $E_{app}-\phi$ 관계가 “U-shaped”되므로, 단조특성을 갖는 SV식이나 E_{app} 수식은 적용될 수 없다. 층상의 결합이 완벽하여 미끄러짐이 일어나지 않는다면 SV식은 잘 적용될 것이다.

실험결과로 나타나는 암석의 일축압축강도 및 탄성계수의 크기와 결합상태를 고려하여 식 (2-4)에서 언급한 K_G 값을 유추할 수 있을 것으로 판단한다. 그리고 K_G 값에 따라 G_2 의 측정값이 감소되는 것을 식 (1)에 적용하면 새로운 SV 근사식을 완성할 수 있을 것으로 판단한다. 문헌자료에서 G_2 의 측정값은 큰 편차를 갖지 않고, 시료에 따라 K_G 값은 0.07~0.15의 크기로 분석되었다. 이러한 크기들은 K_G 값을 유추하는 데 하나의 지표가 될 수 있다.

이런 관점에서 향후 다중시험편 연구에서 G_2 및 감소 비율의 다양한 자료가 많이 제시된다면, 단일시험편의 해석에서 신뢰성 있는 K_G 값의 규정이 가능할 것이다. 따라서 Saint-Venant 근사식에 K_G 값을 고려하는 수정된 수식을 통하여 단일시험편으로부터 5개의 독립적 탄성상수를 추정할 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원의 주요사업인 ‘심부 지오시스템 특성 평가기술 개발’(과제코드GP2016-014)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Amadei B., 1996, Importance of anisotropy when estimating and measuring in situ stresses in rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 33(3), pp. 293-325.
- Cho J-W., Kim H., Jeon S., Min K-B., 2012, Deformation and strength anisotropy of Asan gneiss, Boryeong shale, and Yeoncheon schist, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 50, pp. 158-169.
- Exadaktylos G.E., 2001, On the constraints and relations of elastic constants of transversely isotropic geomaterials, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 38(7), pp. 941-956.
- Exadaktylos G.E., Kaklis K.N., 2001, Applications of an explicit solution for the transversely isotropic circular disc compressed diametrically. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 38(2): 227-243.
- Gonzaga G.G., Leite M.H., Corthesy R., 2008, Determination of anisotropic deformability parameters from a single standard rock specimen, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 45(6), pp. 1420-1438.
- Goodman R.E., 1980, *Introduction to rock mechanics*, John Wiley & Sons
- Hakala M., Kuula H., Hudson J.A., 2007, Estimating the transversely isotropic elastic intact rock properties for in situ stress measurement data reduction: A case study of the Olkiluoto mica gneiss, Finland, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 44(1), pp. 14-46.
- Homand F., Morel E., Henry J-P., Cuxac P., Hammade E., 1993, Characterization of the moduli of elasticity of an anisotropic rock using dynamic and static methods, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 30(3), pp. 527-535.
- Lekhnitskii S.G., 1963, *Theory of elasticity of an isotropic elastic body*, Holden-Day, Inc.
- Nasser M.H.B., Rao K.S., Ramamurthy T., 2003, Anisotropic strength and deformational behavior of Himalayan schists, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 40(1), pp. 3-23.
- Park C., 2001, Analysis of elastic constants of an anisotropic rock, *Tunnel and Underground Space*, Vol. 11, pp. 59-63.
- Park C., Park C., Synn J-H., Jung Y-B., 2010, Experimental study on the elastic constants of a transversely isotropic rock by multi-specimen compression test, *Tunnel and Underground Space*, Vol. 20, pp. 455-464.
- Talesnick M.L., Ringel M., 1999, Completing the hollow cylinder methodology for testing of anisotropic rocks: torsion tests, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 36(5), pp. 627-639.
- Tien Y.M., Tsao P.F., 2000, Preparation and mechanical properties of artificial transversely isotropic rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 37(4), pp. 1001-1012.
- Worotnicki G., 1993 *CSIRO triaxial stress measurement cell*, Chapter 13 in *Comprehensive Rock Engineering*, Edited by Hudson J.A., p.329-394.



박철환

1979년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1981년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
1987년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학박사

Tel: 042-868-3244

E-mail: cwpark@kigam.re.kr

현재 한국지질자원연구원 지구환경연구
본부 책임연구원



박찬

1988년 한양대학교 공과대학 자원공학과
공학사
2000년 수원대학교 공과대학 토목공학과
공학석사
2006년 충남대학교 공과대학 토목공학과
공학박사

Tel: 042-868-3245

E-mail: chan@kigam.re.kr

현재 한국지질자원연구원 지구환경연구
본부 책임연구원



박정욱

2003년 서울대학교 공과대학 지구환경
시스템공학부 공학사
2006년 서울대학교 대학원 지구환경시
스템공학부 공학석사
2011년 서울대학교 대학원 에너지시스
템공학부 공학박사

Tel: 042-868-3246

E-mail: jwpark@kigam.re.kr

현재 한국지질자원연구원 지구환경연구
본부 선임연구원



정용복

1994년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1996년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학석사
2000년 서울대학교 공과대학 지구환경
시스템공학부 박사

Tel: 042-868-3097

E-mail: ybjung@kigam.re.kr

현재 한국지질자원연구원 지구환경연구
본부 책임연구원