온양지역에 분포하는 호상편마암을 이용한 평면 이방성 암석의 탄성상수 측정방법

장현식¹ · 이옥탑² · 장보안^{1*}

¹강원대학교 지구물리학과, ²(주)오양엔지니어링

Method of Elastic Constant Measurement for Transversely Isotropic Rocks: Application to Banded Gneiss of the Onyang Region

Hyun-Sic Jang¹, Ok-Top Lee², and Bo-An Jang^{1*}

¹Department of Geophysics, Kangwon National University

²Pentaocean Engineering Co. LTD.

충청남도 온양지역에서 채취한 호상편마암으로부터 0° 시료 9개, 15°, 30°, 45° 시료 각 10개, 60°, 75° 시료 각 11개, 90° 시료 9개를 획득하여 총 70개의 시료를 이용해 이방성 탄성상수를 측정하였다. 이방성 각 0°, 90° 시료에서 측정된 탄성상수(E_1 , E_2 , ν_{12} , ν_{21})를 기준으로 설정하고 Jang et al. (2001)과 Park et al. (2008)에 의해 제안된 방법을 이용하여 15°, 30°, 45°, 60°, 75° 시료의 탄성계수(E_1 , E_2)를 계산한 후 기준값과 비교하였다. Jang et al. (2001)의 제안법을 사용할 경우 60°, 75°와 같은 고각의 이방성 시료에서는 E_1 이 비교적 정확하게 계산되고 15°, 30°와 같은 저각의 이방성 시료에서는 E_2 가 비교적 정확하게 계산되었다. Park et al. (2008)의 제안법의 경우 E_1 은 45°와 60°시료에서만 비교적 정확한 값을 계산해냈고 E_2 는 15°, 30°, 60° 시료에서 비교적 정확하게 계산되었다. 유효성 검토 결과 두 제안법 모두 총 20개의 유효성 판단구간에서 ‘유효함(Effective)’ 7개(35%), ‘가능함(Possible)’ 5개(25%), ‘유효하지 않음(Ineffective)’ 8개(40%)로 분석되어 두 제안법의 유효성은 같은 수준이었다. 다만 Jang et al. (2001)의 제안법은 E_1 을, Park et al. (2008)의 제안법은 E_2 를 계산하는데 상대적으로 더 유효한 것으로 분석되었다.

주요어 : 이방성, 탄성계수, 호상편마암, 유효성

Elastic constants were measured for 70 samples of transversely isotropic banded gneiss from the Onyang region. Anisotropic angles of samples are 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° and 90°. Exact values of E_2 and ν_{21} can be measured from samples with anisotropic angles of 0° and those of E_1 and ν_{12} from samples with anisotropic angles of 90°. These values are set as reference values. Elastic constants measured from samples with anisotropic angles of 15°, 30°, 45°, 60°, and 75°, using the methods proposed by Jang et al. (2001) and Park et al. (2008), are compared with the reference values to examine the effectiveness of the two methods. E_1 were measured correctly from samples with anisotropic angles of 60° and 75°, and E_2 from samples with anisotropic angles of 15° and 30°, when using the method suggested by Jang et al. (2001). E_1 were measured correctly from samples with anisotropic angles of 45° and 60°, and E_2 from samples with anisotropic angles of 15°, 30°, and 60°, when using the method proposed by Park et al. (2008). The effectiveness of the two methods was determined by error rates between exact values and measured values. The effectiveness of the two methods was similar. However, the method suggested by Jang et al. (2001) may be more effective in measuring E_1 , while the method suggested by Park et al. (2008) may be more effective in measuring E_2 .

Key words : Anisotropy, Elastic Constants, Banded Gneiss, Effectiveness

*Corresponding author: bajang@kangwon.ac.kr

서 론

암석의 이방성은 방향에 따라 역학적 특성이 다른 것을 의미한다. 이방성을 나타내는 원인으로는 암석을 이루는 광물입자의 배열 및 결합 형태에 의한 광물학적 요인과, 벽개면, 쌍정면, 미세균열 등 조직결합의 배열 및 간극의 특성에 의한 암석학적 요인, 그리고 층리, 편리, 엽리, 박리 및 벽개 등과 같은 면구조에 의한 구조적 요인이 있다(Postma, 1955; Backus, 1962; Brace, 1965). 암반을 공학적으로 평가할 때 광물학적 요인과 암석학적 요인은 그 규모가 매우 작아 고려할 필요가 없지만, 편리나 엽리와 같은 면구조에 의한 구조적 이방성은 공학적 평가와 밀접하게 관련이 있다.

암석의 이방성에 대한 연구는 주로 탄성과 속도를 이용하거나 평면 이방성 암석에서의 강도 변화에 대한 연구 등이 주로 수행되었다(Bae et al., 1991; Choi, 2001). 그러나 최근에는 이방성면의 방향에 따른 탄성계수의 변화에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. Talesnick et al. (1995)은 화강암의 결에 따른 특성 변화를 평면 이방성으로 간주하고 속이 빈 관형시료(hollow cylinder)에 대하여 일축압축과 측압을 가하여 탄성상수를 구하고, 등방성 물질과 이방성 물질에 일축압축시험, 간접인장시험, 삼축압축시험, 관형압축시험을 통해 구한 탄성상수와의 상관성과 유효성을 비교하였다. 국내에서도 포천 화강암을 대상으로 화강암의 결에 따른 역학적 이방성을 강도와 탄성계수의 변화를 통해 규명하는 연구가 수행되었다(Jang and Oh, 2001; Park, 2005). Amadei (1996)는 일축압축시험 및 간접인장시험, 관형시료 압축시험 등을 종합해 2개 이상의 시료를 이용하여 5개 이상의 수식을 구하고 최소자승법으로 탄성계수를 결정하는 방법을 제안하였다. 이외에도 이방성 면에 수직과 수평하게 시추된 시료를 이용하여 응력벡터를 고려한 간접인장시험을 통하여 탄성상수를 결정하고, 일축압축시험을 통해 측정된 탄성상수와 비교하는 연구들이 수행되었다(Chen et al., 1998). 위 연구들은 탄성상수를 결정하는데 있어서 모두 이방성 면에 대하여 수평과 수직하게 시추된 시료와 함께 다수의 시료를 필요로 한다. 그러나 일반적으로 현장에서 획득되는 시료는 시추 시 임의의 이방성 각이 정해지기 때문에 이방성 각과 시료개수의 제한을 받게 되므로 위에서 언급한 연구결과들을 적용하는 것은 현실적으로 어려운 경우가 많다. 따라서 현장에서 획득된 임의의 이방성 각을 갖는 원통형 시료로부터 일회성의 일축압축시험을 통해 탄성상수를 구

하고자 하는 연구가 요구되어졌다.

Kim (1995)은 평면이방성 암석에 대하여 NX 크기의 시추코어를 사용해 한 번의 일축압축시험만으로 이방성 탄성계수를 실험적으로 결정하기 위한 방법으로 논의하고 평균 포아송비를 이용하여 5개의 독립상수 가운데 2개의 값을 가정하고, 3개의 수식만을 제안하는 비교적 간단한 수식을 제안하였다. 그러나 임의의 이방성시추코어에서 획득된 임의의 이방성 방향을 갖는 하나의 시료에 대하여 시험이 실시된다면 평균 포아송비를 구할 수 없게 되므로 평균 포아송비 역시 가정해야 하는 문제가 있다. 또한 Kim (1995)의 주장과는 달리 약간의 포아송비의 차이가 이방성 탄성계수에서는 큰 차이로 나타나며, 특정구간에서는 탄성계수를 구할 수 없다는 것이 확인되었다(Jang et al., 2001). Jang et al. (2001)은 평면 이방성 암석에 적용되는 $\nu_{12}/E_1 = \nu_{21}/E_2$ 의 관계로부터 ν_{12} , ν_{21} 을 사용하는 비교적 간단한 새로운 탄성계수 계산식을 제안하였다. 이방성 탄성계수에 대한 연구는 대부분 실제 평면이방성을 갖는 암석들을 이용하여 실험적인 방법으로 수행되었으나 최근에는 수치 모델링을 이용한 연구도 수행되고 있다. Park et al. (2008)은 이방성 수치모델을 설정하여 일축압축시험에서 측정되는 겉보기 탄성계수(E_a)와 겉보기 포아송비(ν_a)를 사용하는 새로운 3개의 수식을 가정하였고, 겉보기 포아송비와 이방성 각에 따른 적절한 수식을 제시하는 표를 제안하였다. 그러나 이러한 수치 모델링 방법은 실내 시험에 의한 방법과 변형률을 획득하는 방법이나 기본적인 가정식이 서로 다르기 때문에 적용성에 대한 고찰이 필요하였다. 따라서 이 연구는 다양한 방향의 평면 이방성을 갖는 동일한 조건의 자연암석 시료를 이용하여 Jang et al. (2001)과 Park et al. (2008)이 각각 제안한 시험법과 제안식들의 신뢰성과 유효성을 연구하였다.

평면 이방성 암석의 탄성상수

일축압축시험에서 하중 조건과 로켓 변형률 게이지에 측정되는 변형률로부터 평면 이방성 매질에 대한 축 변형공식 및 후크(Hooke)의 법칙으로부터 탄성상수를 결정하는 식을 유도 할 수 있다. 대부분의 암반은 3차원 층리나 절리를 갖기 때문에 이론적으로나 실제적으로 3차원 전방향(orthotropic)으로 이방성이 나타나는 경우가 보통이지만, 이를 규명하는 것은 상당히 어렵다. 따라서 이방성 암석을 하나의 편리(schistosity)나 층리면(bedding plane)을 갖고 다른 두 방향으로는 동일한 역학적 특성

을 갖는 평면 이방성 물질로 가정하여 분석하는 것이 일반적이다(Wittke, 1990).

평면 이방성 물질로부터 일축압축시험용 시료로 가공된 코어시료의 좌표체계는 하중방향을 기준으로 시료의 축 방향을 y축, 축에 수직인 방향을 x-z축이라하고, 평면 이방성 면을 기준으로 경사와 주향방향을 1축과 3축, 이에 수직인 방향을 2축, 이방성 각은 θ 로 표현된다(Fig. 1(a)). 이때 평면 이방성 물질의 평면 구조는 등방면(1-3면)이 되고 이에 수직하는 방향은 이방성 대칭축(2축)이라 정의되며, 후크의 법칙에서 1-2축의 평면은 2차원으로 해석되며, 응력-변형률 관계는 식 (1)과 같다.

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & 0 \\ -\frac{\nu_{21}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{pmatrix} \quad (1)$$

식 (1)에서 탄성상수는 평면 이방성 면에 수평하게 응력이 작용될 때의 탄성계수(E_1)와 포아송비(ν_{12}), 평면 이방성면에 수직으로 응력이 작용될 때의 탄성계수(E_2)와 포아송비(ν_{21}), 그리고 평면 이방성 면에서의 전단계수(G_{12})로 정의된다. 한편, 일축압축 응력상태에서는 이방성 각이 θ 인 시료의 축 방향으로 일축압축응력(σ_y)만이 작용하게 되는데, 가해지는 응력(σ_y)에 따라 Fig. 1(b)와 같이 이방성면에 평행한 방향으로 σ_1 , 이방성면에 수직인 방향으로 σ_2 및 τ_{12} 가 작용하며, 이때 각각의 응력의 관계는 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_y \sin^2 \theta \\ \sigma_2 &= \sigma_y \cos^2 \theta \\ \tau_{12} &= \sigma_y \sin \theta \cos \theta \end{aligned} \quad (2)$$

일반적으로 평면 이방성 암석의 탄성상수는 Fig. 1(c)와 같이 이방성 각이 0° 와 90° 인 시료에서 일축압축시험을 통해 결정할 수 있다. 이때, 식 (3)과 같이 이방성 각이 0° 인 시료에서 측정된 축 방향과 횡 방향의 변형률을 이용해 E_2 , ν_{21} 을 계산해 내고, 이방성 각이 90° 인 시료에서 측정된 변형률을 이용해 E_1 , ν_{12} 를 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} E_2 &= \frac{\sigma_y(0^\circ)}{\varepsilon_y(0^\circ)}, \quad \nu_{21} = \frac{\varepsilon_x(0^\circ)}{\varepsilon_y(0^\circ)} \\ E_1 &= \frac{\sigma_y(90^\circ)}{\varepsilon_y(90^\circ)}, \quad \nu_{12} = \frac{\varepsilon_x(90^\circ)}{\varepsilon_y(90^\circ)} \end{aligned} \quad (3)$$

그러나 현장에서 획득되는 대부분의 시료는 임의의 이방성 각을 가지며, 시료의 크기와 양이 한정되어 재성형을 하거나 여러 개의 시료를 만들기 어려운 경우가 많아 임의의 이방성 각을 갖는 시료를 이용해 1회의 압축시험만으로 탄성상수를 결정할 수 있어야 한다.

Fig. 2(a)와 같이 시료의 중심부와 이방성 면이 교차하는 점을 중심으로 하여 이방성 각에 상관없이 시료의 y, x 방향에 평행하도록 45° 로트 변형률 게이지를 부착하고, 90° 측면에 z 방향과 평행하게 일축게이지를 부착하여 변형률(ε_x , ε_{45} , ε_y , ε_z)을 측정한다면, 축 변환공식을 이용해 이방성 면에서의 변형률(ε_1 , ε_2 , ε_3 , γ_{12})

Fig. 1. Definition of coordinates, elastic constants, and stress. (a) Definition of 1, 2, 3 and x, y, z coordinates, (b) Definition of σ_1 and σ_2 when σ_y is acting, (c) Definition of elastic constants for transversely isotropic rock.

Fig. 2. Axis of coordinates and arrangements of strain gages. (a) Arrangement of strain gages with the Y-axis parallel to the loading direction, (b) Arrangement of strain gages with the B-axis parallel to the 2-direction.

로 계산할 수 있고 시료에 작용한 응력(σ_y)과 계산된 변형률($\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \gamma_{12}$)을 이용하여 식 (1)과 (2)는 식 (4)와 같이 전개된다.

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{E_1} \sin^2 \theta + \frac{-\nu_2}{E_2} \cos^2 \theta & C &= \frac{1}{G_2} \sin \theta \cos \theta \\ B &= -\frac{\nu_2}{E_2} \sin^2 \theta + \frac{1}{E_2} \cos^2 \theta & D &= -\frac{\nu_1}{E_1} \sin^2 \theta - \frac{\nu_2}{E_2} \cos^2 \theta \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{여기서, } A = \frac{\epsilon_1}{\sigma_y}, B = \frac{\epsilon_2}{\sigma_y}, C = \frac{\gamma_{12}}{\sigma_y}, D = \frac{\epsilon_3}{\sigma_y}$$

위의 식 (4)에서 방정식은 네 개이지만, 식들은 5개의 탄성상수를 포함하고 있어서 그 값을 얻을 수 없게 되므로, 5개의 탄성상수를 구하기 위해서는 하나의 값은 가정하여야 한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 Lekhnitskii (1963)는 많은 자료와 시험으로 얻어진 결과로부터 식 (1)의 G_{12} 에 대한 가정식을 제안하였다. 그러나 이 제안식은 역학적 이론전개와 실제 값에 오차를 가지며, 이방성 각도가 작은 경우에는 포아송비가 0.5를 넘거나 심지어 음수로 해석되는 경우도 많다는 것이 이방성 모델 설정을 통해 확인되었다(Park, 2001). 따라서 Park et al. (2008)은 수치모델 분석을 통하여 이방성 각과 포아송비에 따라 일축압축시험에서 측정되는 겉보기 탄성계수($E_a = \sigma_y / \epsilon_y$)와 겉보기 포아송비($\nu_a = -0.5(\epsilon_x + \epsilon_z) / \epsilon_y$)를 사용하는 3개의 가정식을 아래와 같이 제안하였다.

$$\frac{1}{E_a} = \frac{1}{E_1} \sin^2 \theta + \frac{1}{E_2} \cos^2 \theta \quad (5)$$

$$\nu_a = 0.5(\nu_{12} + \nu_{21}) \sin^2 \theta + \nu_2 \cos^2 \theta \quad (6)$$

$$\nu_a = 0.5(\nu_{12} + \nu_{21}) \frac{2\theta}{\pi} + \nu_2 \frac{\pi - 2\theta}{\pi} \quad (7)$$

이때, 평면 이방성 조건에서 G_2 는 G_{12} 와 같고 식 (6)과 (7)에서 사용된 ν_{12} 와 ν_{21} 는 각각 $\nu_{21} = \nu_2, \nu_{12} = \nu_2(E_1 / E_2)$ 로 정의된다. 또한 Park et al. (2008)은 식 (5)의 경우 Lekhnitskii (1963)의 제안식과 같은 결과를 얻기 때문에, 서로 다른 방향에서 제안된 이 두 가정식은 같은 수식이라고 언급하였다.

국내에서는 Kim (1995)에 의해 평면 이방성 압축의 탄성상수를 결정하는 연구가 처음으로 진행되었다. Kim (1995)은 포아송비의 이방성 정도가 크지 않으므로 $\nu_1 = \nu_2$ 를 가정하고, 시추코어로부터 회수된 임의의 이방성 각을 갖는 1개의 NX 크기 시료를 이용해 1회의 일축압축시험만으로 이방성 탄성계수를 구하는 방법을 제안하였다. Fig. 2(b)와 같이 시료의 중심부와 이방성 면이 교차하는 점을 중심점으로 하여 이방성 면과 평행한 1축에 대하여 각각 45° 씩의 각도를 이루도록 A-B-C 방향으로 45° 로켓 변형률 게이지를 부착하면, 변형률 게이지의 B 방향이 이방성의 대칭축과 일치하게 된다. 시료에 일축압축응력(σ_y)을 가하여 A-B-C 방향에서 측정된 수직변형률($\epsilon_A, \epsilon_B, \epsilon_C$)과 시료에 가해진 응력의 관계를 이용하여 탄성계수를 결정하는 식 (8)을 제안하였다.

$$\begin{aligned} E_1 &= \frac{\sin^2 \theta (\cos^2 \theta - \nu_{21} \sin^2 \theta)}{(y_A + y_C)(\cos^2 \theta - \nu_{21} \sin^2 \theta) - y_B (\cos^2 \theta - \nu_{21})} \\ E_2 &= \frac{\cos^2 \theta - \nu_{21} \sin^2 \theta}{y_B} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, y_A, y_B, y_C 는 A-B-C 방향의 변형률과 응력의 관계로 식 (9)와 같이 정의된다.

$$\begin{pmatrix} y_A \\ y_B \\ y_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\varepsilon_A}{\sigma_y} \\ \frac{\varepsilon_B}{\sigma_y} \\ \frac{\varepsilon_C}{\sigma_y} \end{pmatrix} \quad (9)$$

식 (8)에서 미지수는 E_1, E_2, ν_{21} 세 개인 반면, 식은 두 개이므로 해를 구할 수 없지만, 포아송비의 이방성 정도가 탄성계수에 비해 크지 않으며, 응력 분포에 미치는 영향도 크지 않아 평균 포아송비를 이용해 그 해를 구하였다(Kim, 1995). 그러나 임의의 이방성 각을 갖는 시료에 대해 1회의 일축압축시험이 실시된다면, 평균 포아송비를 구할 수 없다. 또한 Kim (1995)의 주장과는 다르게 식 (8)은 약간의 포아송비 차이가 이방성 탄성계수에서는 큰 차이로 나타나며, 특정구간에서는 탄성계수를 구할 수 없는 것으로 확인되었다(Jang et al., 2001).

Jang et al. (2001)은 평면이방성 암석에서 $\nu_{21}/E_2 = \nu_{12}/E_1$ 의 관계를 이용해 Kim (1995)에 의해 제안된 측정방법과 제안식에서 파생된 수식을 제안하였다. 먼저 식 (2)에서 ν_{21}/E_2 대신에 ν_{12}/E_1 를 대입하면 식 (10)이 되고,

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{pmatrix} \quad (10)$$

식 (2)에서 ν_{12}/E_1 대신에 ν_{21}/E_2 를 대입하면 식 (11)이 된다.

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & 0 \\ -\frac{\nu_{21}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{pmatrix} \quad (11)$$

45° 로젯 변형률 게이지의 A, B, C 방향에서 측정되는 변형률($\varepsilon_A, \varepsilon_B, \varepsilon_C$)은 축 변환공식을 이용하여 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \gamma_{12}$ 로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \varepsilon_A &= \varepsilon_1 \cos^2 45^\circ + \varepsilon_2 \sin^2 45^\circ + \frac{1}{2} \gamma_{12} \sin 90^\circ \\ \varepsilon_B &= \varepsilon_2 \\ \varepsilon_C &= \varepsilon_1 \cos^2 135^\circ + \varepsilon_2 \sin^2 135^\circ + \frac{1}{2} \gamma_{12} \sin 270^\circ \end{aligned} \quad (12)$$

식 (2), (9), (10)과 (12)를 이용해 이방성 탄성계수 관계식을 전개하면 식 (13)과 같고

$$\begin{aligned} E_1 &= \frac{\sin^2 \theta - \nu_{12} \cos^2 \theta}{y_A - y_B + y_C} \\ E_2 &= \frac{\cos^2 \theta (\sin^2 \theta - \nu_{12} \cos^2 \theta)}{y_B (\sin^2 \theta - \nu_{12}) + \nu_{12} \sin^2 \theta (y_A + y_C)} \\ G_{12} &= \frac{\sin \theta \cos \theta}{y_A - y_C} \end{aligned} \quad (13)$$

식 (2), (9), (11)과 (12)를 이용해 이방성 탄성계수 관계식을 전개하면 식 (14)와 같이 된다.

$$\begin{aligned} E_1 &= \frac{\sin^2 \theta (\cos^2 \theta - \nu_{21} \sin^2 \theta)}{(y_A + y_C)(\cos^2 \theta - \nu_{21} \sin^2 \theta) - y_B (\cos^2 \theta - \nu_{21})} \\ E_2 &= \frac{\cos^2 \theta - \nu_{21} \sin^2 \theta}{y_B} \\ G_{12} &= \frac{\sin 2\theta}{2(y_A - y_C)} = \frac{\sin \theta \cos \theta}{y_A - y_C} \end{aligned} \quad (14)$$

시료의 제작

이 연구에서는 충청남도 아산시 온양지역에 분포하는 선 캄브리아기 경기편마암복합체의 호상편마암을 이용하여 이방성 탄성계수를 분석하였다. 호상편마암은 우리나라에 비교적 넓게 분포하며, 주로 석영과 정장석으로 이루어져 있고, 흑운모가 방향성을 보이며 배열되어 있는 엽리에 의한 구조적 평면 이방성의 특성을 잘 나타낸다(Fig. 3).

실내시험을 통해 강도나 탄성계수 등과 같은 암석의 역학적 특성을 정확히 구하기 위해서는 여러 개의 시료가 필요하고, 각 시료들은 균질성 확보를 위해 하나의 블록으로부터 제작되어야 한다. 이 연구에서는 온양지역

Fig. 3. Photomicrographs of the Onyang banded gneiss. (a) PPL, (b) XPL (Q: Quartz, Bi: Biotite, Af: Alkali feldspar).

Fig. 4. Photographs of core specimens. (a) $\theta = 0^\circ$, (b) $\theta = 45^\circ$.

의 석산에서 채취된 하나의 큰 블록 시료($80 \times 150 \times 60$ cm)를 석재 가공소로 운반한 후 평면 이방성 각이 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° , 90° 인 7종류의 블록으로 재가공하였다. 이렇게 가공된 블록들을 실내시추기를 이용해 NX 크기로 시추한 후 길이 대 직경의 비가 2:1 이상 되도록 절단하고 양끝 면을 표면 연삭기를 이용해 편평도의 오차가 0.02 mm 이하가 되도록 성형하였다. 최종적으로 평면이방성 면이 0° 인 시료 9개, 15° , 30° , 45° 인 시료 각 10개, 60° , 75° 인 시료 각 11개, 90° 인 시료 9개 등 총 70개의 원통형 시료를 준비하였다 (Fig. 4).

이방성 암석의 탄성상수 측정 방법

암석의 탄성상수들은 일축압축시험 과정에서 응력에 따른 시료의 축방향 및 횡방향 변형률 측정을 통해 구할 수 있다. 이 연구에서는 국제암반역학회(ISRM, 1978)에서 제안한 시험법으로 일축압축시험을 실시하였으며, 980 kN의 하중을 가할 수 있으며 서보 조정기

Fig. 5. Photograph of experimental equipment.

(servo-controller)가 장착된 압축시험기(모델명 : KDC9409-20)를 사용하였다. 또한 축 방향과 횡 방향 변형률은 5 mm 변형률 게이지를 사용하였고, 시험과정에서 측정되는 하중과 변형률은 자료수집기(data logger, UCAM-20PC)를 이용하여 컴퓨터에 실시간으로 기록하였다(Fig. 5). 시험은 이방성 각에 따라 두 개의 그룹으로 나누어 실시되었는데, 첫 번째 그룹은 이방성 각이 0° 와 90° 인

Fig. 6. Locations and orientations of strain gages.

시료로써 각 9개의 시료를 이용하여 탄성계수 E_1 과 E_2 , 포아송비 ν_{12} 와 ν_{21} 을 측정하여 분석의 기준값으로 사용하였다. 두 번째 그룹은 이방성 각이 15°, 30°, 45°, 60°, 75°인 시료들로 Jang et al. (2001)과 Park et al. (2008)이 제안한 방법으로 탄성계수를 계산하였다.

Jang et al. (2001)은 임의의 이방성 각을 갖는 시료에 대하여 시료의 중심부와 이방성 면이 교차하는 점을 중심선으로 위쪽에 이방성 면을 기준으로 45° 로젯 변형률 게이지를 부착하였다(Fig. 6(a)). 이렇게 평면 구조의 수직인 축(2축)에 평행하도록 45° 로젯 변형률 게이지를 부착하면 이방성 면으로부터 45°(A방향), 90°(B방향), 135°(C방향) 차이가 나며, ϵ_B 는 ϵ_2 와 같게 된다(Fig. 6(b)). Jang et al. (2001)은 이방성 암석의 탄성계수를 계산하기 위하여 앞서 설명한 식 (13)과 (14)를 제안하였다. 또한 편마암시료를 이용한 일축압축시험과 포아송비 변화에 따른 식 (13)과 (14)의 민감도 분석을 통해 이방성 각이 45°보다 클 때는 ν_{12} 을 사용하는 식 (13)이, 45°보다 작을 때는 ν_{21} 을 사용하는 식 (14)가 각각 더 좋은 값을 계산해 낸다고 하였다. 그러나 식 (13)과 (14)는 일반적인 암석의 포아송비에 해당하는 0.2~0.3의 범위에서 매우 일정한 탄성계수를 계산해내기 때문에 ν_{12} 와 ν_{21} 을 가정하여 사용해도 문제가 없다고 보고하였다.

Park et al. (2008)은 임의의 이방성 각을 갖는 시료에 대하여 시료의 중심부와 이방성 면이 교차하는 점을 중심선으로 아래쪽에 하중 방향을 기준으로 45° 로젯 변형률 게이지를 부착하고, 45° 로젯 변형률 게이지로부터 90° 측면에 일축 변형률 게이지를 부착하여 변형률을 측정하였다(Fig. 6(a)). 45° 로젯 변형률 게이지는 이방성 면에 관계없이 하중 방향을 기준으로 부착된 것으

로 y-45°-x 방향의 변형률을 측정하며(Fig. 6(c)), 일축 변형률 게이지는 z 방향(3축) 변형률을 측정한다(Fig. 6(d)). 이렇게 측정된 변형률을 이용하여 Park et al. (2008)은 식 (4)와 겉보기 포아송비(ν_0)를 사용한 제안식인 식 (6), (7)을 이용하여 이방성 암석의 탄성계수를 계산하였다.

이방성 각 0°, 90° 시료의 탄성계수

이방성 각이 수직(90°)인 시료에 대하여 일축압축응력 상태에서 측정된 하중 축 방향의 변형률과 하중 축에 수직인 횡방향의 변형률을 이용하여 E_1 과 ν_{12} 를 결정하였고, 이방성 각이 수평(0°)인 시료에 대하여 측정된 변형률을 이용해 E_2 와 ν_{21} 를 결정하였다. 시료의 변형률들은 서로 마주하는 시료의 중간부 두 곳에 Fig. 1(c)와 같이 수직(y축)과 수평(x축) 변형률을 측정할 수 있는 2축 변형률 게이지를 부착하여 측정하였고 탄성계수와 포아송비는 응력-변형률 곡선에서 가장 선형적인 탄성구간을 선택하여 평균탄성계수(average modulus) 방법을 이용하여 한 시료에서 각각 2개의 값을 결정하였다. 이방성 각이 90°인 시료에서 측정된 E_1 은 49.47~67.80 GPa의 범위를 가지며, 평균 59.18 GPa(표준편차 4.69 GPa)로 평균값 근처에서 최대 빈도를 보이는 정규분포 특성을 보였다(Fig. 7(a)). ν_{12} 는 0.257~0.361의 범위를 가지며, 평균 0.298(표준편차 0.039)로 균등분포 형태에 가까운 분포특성을 보였다(Fig. 7(b)). 이방성 각이 0°인 시료에서 결정된 E_2 는 44.18~58.64 GPa의 범위를 가지며, 평균 52.23 GPa(표준편차 4.15 GPa) 정도로 E_1 보다 약간 작고 평균값에 근사한 값들이 고르게 분포하는 특성을 보였다(Fig. 8(a)). ν_{21} 의 경우는 0.188~0.310의 범

Fig. 7. Distributions of E_1 and ν_{12} measured from samples with $\theta = 90^\circ$.

Fig. 8. Distributions of E_2 and ν_{21} measured from samples with $\theta = 0^\circ$.

위를 가지며 평균 0.238(표준편차 0.032)로 탄성계수보다는 비교적 분산된 정규분포 특성을 보였다(Fig. 8(b)). 전반적으로 탄성계수보다 포아송비가 분산정도가 더 크게 계산되었으며 탄성계수의 이방성 비(E_1/E_2)는 약 1.13으로 분석되었다.

임의의 이방성 각을 갖는 시료의 탄성계수

이론적으로 이방성 각이 0° 와 90° 인 시료에서 결정된 탄성계수들(E_1 , E_2)과 이방성 각 15° , 30° , 45° , 60° , 75° 인 시료에서 결정된 탄성계수들(E_1 , E_2)은 같아야 한다. 따라서 이방성 각이 0° 와 90° 인 시료에서 결정된 탄성계수들을 기준값으로 정의하고 이방성 각이 15° , 30° , 45° , 60° , 75° 인 시료들을 대상으로 Jang et al. (2001)과 Park et al. (2008)에 의해 제안된 분석법으로 계산된 탄성계수들을 기준값들과 비교한다면 제안법들의 유

효성(또는 신뢰성)을 판단할 수 있다. Park et al. (2008)은 제안식의 유효성 판단을 위하여 오차율의 개념을 사용하였다. 오차율은 기준값과 계산된 값의 차이를 기준값으로 나눈 비를 백분율로 나타낸 것으로, 계산된 값이 기준값에 가까울수록 오차율은 0%에 가까워지고 계산된 값과 기준값의 차이가 커질수록 오차율은 증가하게 된다. 평균 오차율은 각 시료의 오차율을 평균한 것이고, 최대 오차율은 오차가 가장 많이 발생한 시료에서의 오차율이다. Park et al. (2008)은 계산된 값의 평균 오차율이 15% 이하이고 최대 오차율이 25% 이하인 경우에 제안식이 유효하다고 정의하였다. 그러나 Park et al. (2008)이 제시한 유효성 판단 기준은 관련 근거도 명확하지 않으며, 다소 크게 설정된 경향이 있어 이 연구에서는 0° 와 90° 인 시료에서 계산된 E_1 과 E_2 들의 통계특성을 유효성 판단 기준으로 활용하였다. 앞서 설명된 0° 와 90° 인 시료에서 측정된 E_1 과 E_2 의 표준편차는 각각

의 평균값에 대해 약 8%의 편차를 갖고 있다. 따라서 이 연구에서는 표준편차범위에 해당하는 8%를 평균 오차율의 기준으로, 표준편차범위의 두 배에 해당하는 16%를 최대 오차율의 기준으로 설정하여 각 제안법들에 대한 유효성을 판단하였다.

Jang et al. (2001)의 제안법을 이용한 탄성계수 결정

Jang et al. (2001)에 의해 제안된 식 (13)과 (14)를 이용하여 다양한 이방성 각을 갖는 시료에 대한 E_1 과 E_2 를 계산하였다. 이때 Jang et al. (2001)의 제안대로 이방성 각이 45°보다 작은 15°와 30° 시료는 식 (14)를 사용하였고 45°보다 큰 60°와 75° 시료는 식 (13)을 사용하였으며 45° 시료의 경우에는 식 (13)과 (14)를 모두 사용하였다. 또한 식 (13)과 (14)에 사용되는 포아송비는 이방성 각 0°와 90° 시료에서 측정된 ν_{12} , ν_{21} 뿐만 아니라 임의의 이방성 각을 갖는 시료에서 측정된 겉보기 포아송비, ν_d 도 사용하여 단일시편을 이용한 분석법의 효용성도 판단하였다. ν_d 는 Fig. 6과 같이 시료에 부착된 변형률 게이지로부터 측방향 변형률(ϵ_y)과 두 종류의 횡방향 변형률(ϵ_x , ϵ_z)을 측정하여 평균값으로 결정하였다.

Fig. 9는 식 (13)과 (14)를 이용하여 결정된 각 시료들의 E_1 과 E_2 를 나타낸 그래프이다. 그래프에서 검은 사각점으로 표시된 값들은 ν_{12} 과 ν_{21} 을 사용하여 구한 E_1 , E_2 의 평균값이며, 흰 사각점으로 표시된 값들은 ν_d 를 사용하여 구한 E_1 , E_2 의 평균값들이다. 사각점들의 위와 아래에 그려진 직선들은 계산된 E_1 , E_2 의 최소 및 최대 값의 범위를 표시한 것이다. 그리고 수평으로 그려진 검은 직선은 0°와 90° 시료에서 측정된 E_1 , E_2 의 기준값(평균값)을 표시한 기준선이며, 기준선 위아래의 점선들은 계산결과의 유효성을 판단하기 위해 설정한 $\pm 8\%$, $\pm 16\%$ 오차범위를 나타낸 것이다.

먼저 Fig. 9(a)의 ν_{12} , ν_{21} 을 사용하여 계산한 E_1 을 보면, 30°와 60°시료들의 경우 평균값이 각각 59.71 GPa(평균오차율 0.9%)과 55.99 GPa(평균오차율 5.4%)로 기준값 59.18 GPa와 8% 이하의 오차율을 갖는 것으로 분석되었으며, 최대 오차율을 보이는 값도 오차범위 16% 이내에 위치해 있어 계산된 값이 기준값과 매우 유사함을 알 수 있다. 45° 시료의 경우 평균값이 53.93 GPa(평균오차율 8.9%)로 8%보다 약간 더 큰 오차율을 보였으며, 최대 오차율도 16% 보다 약간 더 크게 나타났다. 75° 시료의 경우 평균값은 52.42 GPa(평균오차율 11.4%)로 오차율이 8% 보다 약간 크게 분석되었으나

(a) E_1

(b) E_2

Fig. 9. E_1 and E_2 measured from samples with various anisotropic angles, using eq. 13 and eq. 14.

다른 각도들에 비해 분산이 적고 최대 오차율도 16% 이하인 것으로 분석되었다. 그러나 15° 시료에서 계산된 E_1 의 범위는 -136.08 GPa부터 139.73 GPa까지로 비정상적인 값들이 많이 포함되어 있으며, 평균값도 43.72 GPa(평균오차율 26.1%)로 평균 오차율과 최대 오차율 모두 16% 이상인 것으로 분석되었다.

ν_d 를 사용하여 계산한 E_1 을 보면, 15° 시료의 경우 ν_{21} 을 사용하여 구한 결과와 유사하게 비정상적인 값들이 많이 포함되어 있고 매우 큰 오차율을 나타냈다. 30°, 45°, 60°, 75° 시료의 경우 ν_{12} , ν_{21} 을 사용해 계산한 값들에 비해 약간 더 분산된 형태를 보이고 30°와 45° 시료의 최대 오차율이 16%를 약간 넘고 있지만 평균값들은 각각 62.52 GPa(평균오차율 5.6%), 58.43 GPa(평균오차율 1.3%), 57.50 GPa(평균오차율 2.8%)로 기준값과 오차율 8% 이하의 매우 유사한 값으로 분석되었

다. 75° 시료의 경우 평균값이 52.55 GPa(평균오차율 11.2%)로 ν_{12} 를 사용하여 구한 값들과 거의 같은 분포를 보이고 있다.

Fig. 9(b)의 ν_{12} , ν_{21} 을 사용하여 계산한 E_2 을 보면, 15°와 30° 시료에서 계산된 평균값이 각각 50.11 GPa(평균오차율 4.1%), 53.86 GPa(평균오차율 3.1%)로 기준값 52.23 GPa와 오차율 8% 이하의 매우 유사한 값으로 분석되었고 최대 오차율도 16% 이하로 분석되었다. 45°, 60°, 75° 시료의 평균값의 경우 42.28 GPa(평균오차율 19.1%), 45.59 GPa(평균오차율 12.7%), 40.19 GPa(평균오차율 23.1%)로 기준값과 오차율 8% 이상의 다소 작은 값으로 분석되었고 최대 오차율도 16% 이상으로 분석되었다. 특히 75° 시료에서 계산된 E_2 의 경우 다른 각도의 시료들보다 상대적으로 크게 분산되어 있고 평균 오차율과 최대 오차율 모두 16% 이상의 큰 오차를 보였다.

ν_a 을 사용하여 계산한 E_2 을 보면, 15°시료의 경우 평균값이 50.24 GPa(평균오차율 3.8%)로 ν_{12} 을 사용하여 구한 값들과 거의 같은 분포를 보이고 있으며, 기준값과도 매우 유사하게 분석되었다. 30°, 45°시료의 경우 ν_{12} , ν_{21} 을 사용해 계산된 값들과 거의 유사한 평균값과 분산 정도를 보였다. 60° 시료의 경우 ν_{12} 을 사용해 계산된 평균값은 기준값보다 약 6.64 GPa 정도 작았지만, ν_a 을 사용하였을 때는 평균값이 56.75 GPa(평균오차율 8.7%)로 기준값보다 오히려 약 4.52 GPa 정도 크게 계산되었고 값들의 분산정도도 2배 이상 크게 나타났다. 75° 시료의 경우 ν_{12} 을 사용해 계산된 결과와 마찬가지로 매우 분산된 형태를 보이고 있으나 평균값이 53.53 GPa(평균오차율 2.5%)로 기준값과 매우 유사하게 분석되었다.

이상의 분석결과를 전반적으로 검토해 볼 때, Jang et al. (2001)의 제안법을 사용할 경우 60°, 75°와 같은 고각의 이방성 시료에서는 E_1 이 비교적 정확하게 계산되고 15°, 30°와 같은 저각의 이방성 시료에서는 E_2 가 비교적 정확하게 계산되는 것을 확인 할 수 있다. 그러나 이를 반대로 설명하면 30° 이하나 60° 이상의 이방성 각을 갖는 시료의 경우 신뢰성 있는 E_1 나 E_2 을 계산하기 어렵다는 것을 알 수 있다. 또한 식 (13)과 (14)에 ν_{12} , ν_{21} 대신 결보기 포아송비, ν_a 를 사용하여 E_1 , E_2 를 계산해본 결과 두 방법은 서로 비슷한 결과를 도출하고 있으며 의미 있는 차이는 확인되지 않았다. 따라서 임의의 이방성 각을 갖는 시료에 대하여 1회의 압축시험을 실시하여 E_1 , E_2 을 분석하고자할 경우 식 (13)과 (14)에 ν_a 를 사용하여도 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.

Fig. 10. E_1 and E_2 measured from samples with various anisotropic angles, using eq. 4, eq. 6, and eq. 7.

Park et al. (2008)의 제안법을 이용한 탄성계수 결정

식 (4)와 Park et al. (2008)에 의해 제안된 식 (6), (7)을 이용하여 다양한 이방성 각을 갖는 시료에 대한 E_1 과 E_2 을 계산하였고, 0°와 90° 시료에서 측정된 E_1 , E_2 기준값과 비교하였다.

Fig. 10은 식 (4)에 Park et al. (2008)의 제안식인 식 (6)과 식 (7)을 이용하여 계산된 각 시료별 E_1 과 E_2 를 나타낸 그래프이다. 그래프에서 검은 사각점으로 표시된 값들은 식 (4)에 식 (6)을 적용하여 계산한 E_1 과 E_2 의 평균값이며, 흰 사각점으로 표시된 값들은 식 (4)에 식 (7)을 적용하여 계산한 E_1 과 E_2 의 평균값들이다. Fig. 10에서 평균값 외의 기타 다른 표시방법들은 Fig. 9와 동일하다.

먼저 Fig. 10(a)를 보면 식 (4)에 식 (6)과 식 (7)을

각각 적용한 결과, 서로 유사한 E_1 을 계산해내는 것을 알 수 있다. 특히 45°와 60° 시료들의 경우 식 (6)과 식 (7)을 적용한 결과가 거의 같았으며, 평균값이 약 57 GPa(평균오차율 3.2%), 약 60 GPa(평균오차율 1.6%)로 기준값과 매우 유사하고 최대 오차율도 16% 이내로 계산되었다. 75° 시료의 경우도 식 (6)과 식 (7)을 적용한 결과가 거의 같았으나 평균값이 약 50.8 GPa(평균오차율 14.1%)로 기준값과는 다소 차이가 있었다. 15°와 30° 시료의 경우는 식 (6)과 식 (7)에 의해 계산된 결과가 약간의 차이가 있으며, 계산된 값들의 분산정도도 45° 이상의 시료들과 달리 매우 크게 나타났다. 또한 두 식 모두 최대오차율이 최소 30.4%부터 최대 73.8% 정도로 기준값과 비교적 큰 차이가 있는 것으로 분석되었다.

식 (6)과 식 (7)을 적용하여 계산한 E_2 역시 E_1 과 마찬가지로 대부분의 이방성 각에서 서로 유사하게 분석되었다(Fig. 10(b)). 특히 15°, 45°, 60° 시료는 두 식을 사용한 결과가 거의 같고 30°와 75°의 경우도 작은 차이만이 확인되었다. 또한 15°, 30°, 60° 시료에서 계산된 평균값은 최소 48.84 GPa(평균오차율 6.8%)부터 최대 55.81 GPa(평균오차율 6.8%) 정도로 8% 이내의 평균오차율을 갖는 것으로 분석되었으며, 이중 식 (6)을 이용한 결과들의 경우 최대 오차율도 16% 이내로 분석되었다. 그러나 45° 시료의 경우 평균값이 44.95 GPa(평균오차율 13.9%)로 기준값과 다소 큰 차이를 보였으며, 75° 시료의 경우 식 (7)을 적용한 결과는 다소 분산되어 있지만 평균값이 54.92 GPa(평균오차율 5.2%)로 기준값과 유사하나 식 (6)을 적용한 결과의 경우에는 평균값이 60.58 GPa(평균오차율 16.0%)로 비교적 큰 차이를 보이는 것으로 분석되었다.

Park et al. (2008)의 제안법으로 계산된 E_1 과 E_2 를 전반적으로 검토해 보면 E_1 의 경우 45°와 60° 시료에서만 비교적 정확한 값을 계산해냈고 E_2 의 경우는 15°, 30°, 60° 시료에서 비교적 정확하게 계산되는 것으로 분석되었다. 또한 E_2 의 경우 15°, 30°와 같은 저각의 시료에서 분산과 오차가 크게 발생하였고 E_2 의 경우에는 이와 반대로 75°와 같은 고각의 시료에서 큰 오차가 발생하였다. 이는 앞서 분석된 Jang et al. (2001)의 제안법과 유사한 결과다. 식 (6)과 식 (7)의 적용 결과를 비교해 보면 E_1 의 경우 식 (6)이 조금 더 좋은 결과를 보는 것으로 분석되었고 E_2 의 경우는 식 (7)이 전체적으로 조금 더 작은 오차를 보이지만 두 식의 차이는 미미한 것으로 판단된다.

제안법들의 유효성 검토

Jang et al. (2001)과 Park et al. (2008)에 의해 제안된 방법들로 이방성 각이 15°, 30°, 45°, 60°, 75°인 시료에 대하여 E_1 , E_2 를 계산하고 0°와 90°인 시료에서 측정된 E_1 , E_2 기준값과 비교하여 제안된 방법들의 유효성을 판단하였다. 유효성의 판단은 앞서 설명하였듯이 기준값에 대한 계산값의 오차율을 사용하였으며, 평균 오차율의 기준(8%)과 최대 오차율의 기준(16%)을 모두 만족할 경우 ‘유효함(Effective)’으로, 평균 오차율이나 최대 오차율 기준중 하나만 만족할 경우에는 ‘가능함(Possible)’으로, 두 기준을 모두 만족시키지 못할 경우에는 ‘유효하지 않음(Ineffective)’으로 구분하였다(Table 1).

먼저 Jang et al. (2001)의 제안법으로 계산된 결과들을 보면(Table 1), E_1 의 경우 이방성 각이 30°와 60°일 때 비교적 유효한 것으로 분석되었으며, 45°와 75°의 경우 유효한 결과를 도출하지는 못했지만 여러 시료를 이용한 통계적인 분석을 사용할 경우 적용이 가능한 것으로 분석되었다. 그러나 15°와 같은 저각의 경우에는 복수의 시료를 이용한 통계적 분석으로도 유효한 결과를 도출하기 어려울 것으로 판단된다. E_2 의 경우에는 15°, 30°와 같은 저각의 이방성에서 매우 유효한 것으로 분석되었지만 45° 이상의 고각의 이방성 시료에서는 유효한 결과를 도출하기 어려운 것으로 분석되었다.

Park et al. (2008)의 제안법으로 계산된 결과들을 보면(Table 1), E_1 의 경우 이방성 각이 30°와 45°일 때 매우 유효한 결과가 도출되었지만 이외의 이방성 각에서는 유효하지 않은 것으로 분석되었다. E_2 의 경우에는 Jang et al. (2001)의 제안법과 마찬가지로 15°, 30°와 같은 저각의 이방성에서 유효한 것으로 분석되었고 60°나 70°에서는 복수의 시료를 이용한 통계적 분석을 사용할 경우 적용이 가능한 것으로 분석되었다. 그러나 45°의 경우에는 유효한 결과를 도출하지 못하는 것으로 분석되었다.

전반적으로 볼 때 두 연구자의 제안법 모두 총 20개의 유효성 판단구간에서 ‘유효함(Effective)’ 7개(35%), ‘가능함(Possible)’ 5개(25%), ‘유효하지 않음(Ineffective)’ 8개(40%)로 분석되어 두 제안법의 유효성은 유사한 수준인 것으로 판단된다. 또한 두 제안법 모두 저각에서는 E_2 를 유효하게 계산해 내지만 E_1 은 유효한 값을 얻지 못하는 것으로 분석되었다. 다만 Jang et al. (2001)의 제안법은 E_1 을, Park et al. (2008)의 제안법은 E_2 를 계산하는데 상대적으로 더 유효한 것처럼 보이나 뚜렷한 특성으로 이해하기는 어려울 것으로 판단된다. 또한 다

Table 1. Error rates of elastic modulus measured using the methods proposed by Jang et al. (2001) and Park et al. (2008).

Anisotropic angle		Method suggested by Jang et al. (2001) (eq.13&14)				Method suggested by Park et al. (2008) (eq.4 with eq.6 or eq.7.)			
		E_1		E_2		E_1		E_2	
		ν_{12}/ν_{21}	ν_a	ν_{12}/ν_{21}	ν_a	eq.6	eq.7	eq.6	eq.7
15°	Ave. ER (Max. ER)	26.1% (329.9%)	272.4% (482.1%)	4.1% (8.0%)	3.8% (7.7%)	6.2% (30.4%)	12.1% (46.5%)	6.8% (13.5%)	6.8% (13.5%)
30°	Ave. ER (Max. ER)	0.9% (11.6%)	5.6% (20.6%)	3.1% (11.2%)	3.9% (12.5%)	20.3% (48.4%)	29.4% (73.8%)	0.6% (10.8%)	6.5% (25.7%)
45°	Ave. ER (Max. ER)	8.9% (20.9%)	1.3% (24.4%)	19.1% (26.1%)	12.9% (28.9%)	3.2% (10.0%)	3.2% (10.0%)	13.9% (25.4%)	13.9% (25.4%)
60°	Ave. ER (Max. ER)	5.4% (11.5%)	2.8% (11.5%)	12.7% (21.2%)	8.7% (21.0%)	1.6% (11.9%)	1.5% (11.5%)	2.6% (16.3%)	3.3% (17.8%)
75°	Ave. ER (Max. ER)	11.4% (14.4%)	11.2% (14.4%)	23.1% (57.8%)	2.5% (39.6%)	14.1% (20.9%)	14.1% (20.9%)	16.0% (39.5%)	5.2% (24.2%)

Ave. ER : Average Error Rate

Max. ER : Maximum Error Rate

■ : Effective (Ave. ER ≤ 8% and Max. ER ≤ 16%)

▒ : Possible (Ave. ER ≤ 8% or Max. ER ≤ 16%)

□ : Ineffective (Ave. ER > 8% and Max. ER > 16%)

수의 시료를 사용하여 통계적 분석을 사용할 경우 두 제안법의 유효성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

결론 및 고찰

이방성 각이 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°가 되도록 성형한 온양지역의 호상편마암 시료를 이용하여 일축압축시험을 수행하였고, 이방성 각이 0°와 90°인 시료에서 측정된 탄성상수(E_1 , E_2 , ν_{12} , ν_{21})를 기준값으로 설정하였다. 기준값으로 설정된 탄성계수는 $E_1 = 59.18$ GPa, $E_2 = 52.23$ GPa이고 포아송비는 $\nu_{12} = 0.298$, $\nu_{21} = 0.238$ 이다. 이방성 각이 15°, 30°, 45°, 60°, 75°인 시료에 대하여 Jang et al. (2001)의 제안법과 Park et al. (2008)의 제안법을 이용하여 E_1 과 E_2 를 계산하고 기준값들과 비교하여 각 제안법들의 유효성을 판단하였다.

Jang et al. (2001)의 제안법을 사용할 경우 60°, 75°와 같은 고각의 이방성 시료에서는 E_1 이 비교적 정확하게 계산되고 15°, 30°와 같은 저각의 이방성 시료에서는 E_2 가 비교적 정확하게 계산되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 식 (13)과 (14)에 ν_{12} , ν_{21} 대신 겉보기 포아송비, ν_a 를 사용하여 E_1 , E_2 를 계산하여도 두 방법은 서로 비슷한 결과를 도출하여, 식 (13)과 (14)에 ν_a 를 사용하여도 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.

Park et al. (2008)의 제안법으로 계산된 E_1 과 E_2 를 검토해 보면, E_1 의 경우 45°와 60° 시료에서만 비교적 정확한 값을 계산해냈고 E_2 의 경우는 15°, 30°, 60° 시료에서 비교적 정확하게 계산되는 것으로 분석되었다. 또한 식 (4)에 식 (6)과 식 (7)의 적용 결과를 비교해 보면, E_1 의 경우 식 (6)이 조금 더 좋은 결과를 보는 것으로 분석되었고 E_2 의 경우는 식 (7)이 전체적으로 조금 더 작은 오차를 보이지만 두 식의 차이는 크지 않았다.

Jang et al. (2001)의 제안법과 Park et al. (2008)의 제안법에 대한 유효성 검토 결과 두 연구자의 제안법 모두 총 20개의 유효성 판단구간에서 ‘유효함(Effective)’ 7개(35%), ‘가능함(Possible)’ 5개(25%), ‘유효하지 않음(Ineffective)’ 8개(40%)로 분석되어 두 제안법의 유효성은 같은 수준이었다. 다만 Jang et al. (2001)의 제안법은 E_1 을, Park et al. (2008)의 제안법은 E_2 를 계산하는데 상대적으로 더 유효한 것처럼 보이나 뚜렷한 특성으로 이해하기는 어려울 것으로 판단된다. 또한 시험결과와 탄성계수 분석결과를 종합적으로 고찰해 보면 편마암 시료들의 불균질성과 시험방법 및 기기에 의한 불확실성들로 인해 자료들의 분산정도가 비교적 크게 나타났다. 따라서 3개 이상의 시료를 이용한 통계적 분석을 실시할 경우 두 제안법의 유효성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

References

- Amadei, B., 1996, Importance of anisotropy when estimating and measuring in-situ stresses in rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 33, 293-325.
- Backus, G. E., 1962, Long-wave elastic anisotropy produced by horizontal layering, *J. Geophys. Res.*, 67, 4427-4440.
- Bae, D., Song, M. and Kim, K., 1991, The anisotropic mechanical characteristics of the metamorphic rocks distributed in the Samkwang-mine area, Cheongyang, Chungnam, *The J. of Eng. Geol.*, 1, 54-68.
- Brace, W. F., 1965, Relation of elastic properties of rock to fabric, *J. Geophys. Res.*, 70, 5657-5667.
- Chen, C. S., Pan, E. and Amadei, B., 1998, Determination of deformability and tensile strength of anisotropic rock using brazilian tests, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 35, 43-61.
- Choi, B., 2001, A seismic study for anisotropy and engineering property of rocks at Boeun area, *The J. of Eng. Geol.*, 11, 215-227.
- ISRM, 1978, Suggested method for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 16, 135-140.
- Jang, B., Nah, K. and Jang, M., 2001, Determination of elastic constants of transversely isotropic rocks from a single test specimen, *Tunnel & Underground*, 11, 72-78.
- Jang, B. and Oh, S., 2001, Mechanical anisotropy dependent on the rock fabric in the Pocheon granite and its relationship with microcracks, *The J. of Eng. Geol.*, 11, 191-203.
- Kim, H., 1995, Determination of elastic constants of transversely isotropic rocks, *Tunnel & Underground*, 5, 318-322.
- Lekhnitskii, S. G., 1963, *Theory of elasticity of an anisotropic elastic body*, San Francisco, Holden-Day Inc., 404p.
- Park, C., 2001, Analysis of elastic constants of an anisotropic rock, *Tunnel & Underground*, 11, 59-63.
- Park, C., Park, E. and Park, C., 2008, A model study on deformability of a transversely isotropic rock, *Tunnel & Underground*, 18, 252-262.
- Park, D., 2005, Mechanical anisotropy of Pocheon granite under uniaxial compression, *The J. of Eng. Geol.*, 15, 337-348.
- Postma, G. W., 1955, Wave propagation in a stratified medium, *Geophy.*, 20, 780-806.
- Talesnick, M. L., Lee, M. Y. and Haimson, B. C., 1995, On the determination of elastic material parameters of transverse isotropic rocks from a single test specimen, *Rock Mech. Rock Eng.*, 28, 17-35.
- Wittke, W., 1990, *Rock mechanics - Theory and applications with case histories*, Springer-Verlag, 1075p.

원고접수일 : 2012년 9월 7일

수정본채택 : 2012년 9월 20일

게재확정일 : 2012년 9월 21일

장현식

강원대학교 지구물리학과

200-701 강원도 춘천시 효자동 192

Tel : 033-244-9275

Email: whitenull@kangwon.ac.kr

이옥탑

(주)오양엔지니어링

137-875 서울특별시 서초구 서초3동 1577-7 서운빌

딩 201호

Tel: 02-876-5850

Email: oktop1213@nate.com

장보안

강원대학교 지구물리학과

200-701 강원도 춘천시 효자동 192

Tel : 033-250-8583

Email: bajang@kangwon.ac.kr