

다중시험편 시험에 의한 평면이방성 암석의 탄성상수 분석연구 제 1 보 - 자료해석을 중심으로

박철환¹⁾, 박 찬¹⁾, 신중호¹⁾, 정용복^{1)*}

Experimental Study on the Elastic Constants of A Transversely Isotropic Rock by Multi-Specimen Compression Tests Report 1 - Focus on Data Analysis

Chulwhan Park, Chan Park, Joong-Ho Synn, Yong-Bok Jung

Abstract The variations of the uniaxial compressive strength, the strains and the elastic constants with respect to the angle of anisotropy are analyzed in order to investigate the characteristics of a transversely isotropic rock experimentally. Total 35 specimens of 7 different angles from a large block of rhyolite presenting the flow structure obviously are used in tests. This study is composed of two reports; the elastic constants are mainly analyzed for the every individual angle in the report No. 1 and they will be discussed synthetically in the report No. 2. From the specimens of 0 and 90 degree, 4 independent elastic constants which can directly be obtained without the help of any other suggested equations, may be referred to the true values. Data variation in the strain measurements differs on the angle is analyzed. That of small angle specimens tends higher than that of large angle specimens. The relation of apparent Young's modulus and angle is found to be M- or U-shaped. For small angle specimens, Saint-Venant approximation cannot be applied successfully on account of showing the non-monotonous increase, and E_1 is analyzed out of the true value range. In the specimen of $\phi = 75$, the deviation of strain measurement and strength are smallest and 4 all constants are analyzed in the true value range. Therefore, specimen of the angle of around 75 may become preferable if only one specimen should be used in test of a transversely isotropic rock.

Key words Transversely isotropic rock, Apparent Young's modulus, Shear modulus, Saint-Venant approximation, Multi-specimen test

초 록 평면이방성 암석의 특성을 실험적으로 규명하기 위하여 이방성각도에 따른 일축압축강도 및 변형률, 탄성상수의 변화를 분석하였다. 실험에는 유사구조가 뚜렷한 유문암의 7개의 서로 다른 각도를 갖는 총 35개 시험편을 사용하였다. 본 연구의 제 1보에서는 시험자료의 각도에 따라 개별적인 분석을 주로 논의하였으며, 제 2보에서는 이들 자료를 종합적으로 검토할 것이다. 수평 및 수직시료에서는 가정식을 적용하지 않고 4개의 탄성상수를 얻을 수 있기 때문에 이들의 크기는 참값이라 결정할 수 있다. 변형률 측정에서 각도에 따라 자료의 분산 정도가 달라지는데, 작은 각도에서는 큰 각도보다 분산이 크게 나타났다. 겉보기 탄성계수의 변화는 각도에 따라 M자 또는 U자 형태로 측정되었다. 낮은 각도에서는 겉보기 탄성계수의 변화가 단조증가의 경향을 보이지 않으므로 Saint-Venant 식을 적용될 수 없으며, E_1 의 크기는 참값범위에 포함되는 값을 얻을 수 없다. 75도 각도의 시료는 변형률과 강도의 측정 편차가 가장 작게 나타났으며, 해석된 4개의 모든 탄성상수가 참값의 범위에 포함되었다. 따라서 만약 한 개의 시험편에서 평면이방성의 탄성상수를 얻고자하는 경우에, 이방성각도가 75도 근처의 시험편을 선정하는 것이 바람직하다.

핵심어 평면이방성 암석, 겉보기 탄성계수, 전단계수, Saint-Venant 근사식, 다중시험편 시험

¹⁾ 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원

* 교신저자 : ybjung@kigam.re.kr

접수일 : 2010년 12월 10일

심사 완료일 : 2010년 12월 21일

게재 확정일 : 2010년 12월 23일

1. 서 론

암석의 이방성 특성은 암반구조물의 안정성 설계에 요구되는 암석 및 암반의 역학적 특성 중의 중요한 요

소이다. 삼차원 전방향 이방성(orthotropy)은 독립적 탄성상수가 9개이고, 이를 측정하기 위하여 많은 실험을 수행하여야 하므로 시험이 매우 복잡하다. 이러한 어려움과 함께 이방성 암석은 공학적으로 독립적 탄성상수의 수가 5개인 평면이방성(transverse isotropy)으로 평가되는 경우가 많다. 평면이방성 암석에서 이방성각도가 서로 다른 2~3개의 시험편으로부터 이들 탄성상수를 측정할 수 있다.

그러나 평면이방성 암석에서도 이들을 실험적으로 측정하는 것이 용이하지 않을 뿐만 아니라 균질한 특성을 갖고 각도가 서로 다른 다수의 시험편을 얻는 것도 현실적으로 어렵다. 여러 가지 이유로 인하여 한 개의 압축강도시험편에 대하여 5개의 독립적 탄성상수를 구하여야 하는 경우도 있으며, 이러한 연구는 많이 발표되었으며(Talesnick et al., 1995; Liao et al., 1997; Tien & Tsao, 2000; Gonzaga et al., 2008), 국내에서도 여러 연구(김호영, 1995; 박철환, 2001; 박철환 외, 2008)가 발표된 바 있다.

본 연구는 방향성이 뚜렷한 평면이방성 암석의 탄성상수를 실험적으로 결정하는 목적을 갖고 있다. 실험에는 유상구조를 갖는 유문암이 사용되었으며 시험편의 각도에 따른 일축압축강도 및 탄성상수의 변화를 분석하였다. 많은 시험편을 제작하여 시험을 수행하였으므로 본 연구는 2개의 연구논문으로 나누어 보고될 것이다. 지금의 제 1보에서는 시험자료의 분석을 논의하는데, 각 각도의 시료에 대하여 개별적인 분석을 수행하였다. 이러한 각 시험편의 개별적 분석에서는 Saint-Venant가 제안한 근사식을 포함한 여러 가정식의 적용이 필요하다. 제 2보에서는 이들 자료를 종합적으로 검토하여 본 연구에 사용된 시료의 참값을 얻고 이에 대한 평가를 수행할 것이다. 이러한 연구를 통하여 다수의 시험편을 확보하기 어려워 한 개의 시험편에 대하여 시험을 수행하여야 하는 경우에도 5개의 독립적 탄성상수를 결정할 수 있는 방안을 제시하고자 하며, 얻어지는 값들에 대한 특성을 알 수 있게 될 것이다.

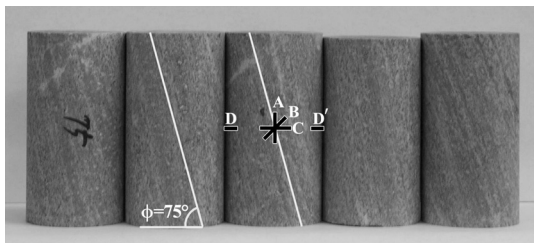


Fig. 1. Test specimens of Haenam rhyolite presenting flow structure

2. 시험방법 및 해석방법

2.1 시료 및 시험

본 연구에 사용된 암석시료는 전라남도 해남군의 도로터널에서 채취한 유문암이다. 현장의 암반은 육안으로도 뚜렷하게 확인할 수 있는 유상구조를 갖는 유문암이 기반을 이루고 있다. 시료의 동질성을 확보하기 위하여 1 m³ 이상의 대형 블록을 채취하여 실험실에서 각도에 맞게 코어링하여 시험편을 제작하였다. 시험편의 각도는 유상구조의 방향, 즉 등방면이 수평(0도) 및 15도, 30도, 45도, 60도, 75도, 수직(90도)되게 제작하였다. Fig. 1과 같이 각 각도마다 5개의 시험편을 제작하여 Fig. 2와 같이 시험편의 수직방향으로 일축압축시험을 수행하였다.

변형률 측정은 스트레인게이지를 사용하였는데, 이의 방향은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 시험편의 중앙에 45도 Strain Rosette를 수직-45도-수평되게 부착하여 각각

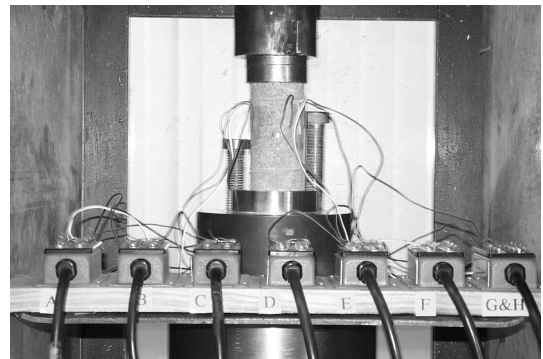


Fig. 2. Uniaxial compression test with 8 strain gauges

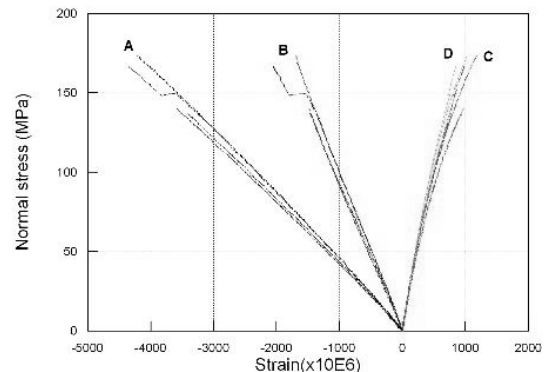


Fig. 3. Stress-strain curves by strain measurements from 4 specimens of $\phi = 60$ (plus values mean tension in strain and compression in stress)

A-B-C라 하였다. 그리고 이의 90도 측면에는 수평의 게이지를 부착하였는데 이는 z방향이며 동시에 3방향의 변형률이다. 이를 변형률 D라 하였으며, 자료의 신뢰도를 높이기 위하여 시료측점의 맞은편 지점에 같은 방향의 게이지를 사용하여 A'-B'-C'-D' 변형률을 측정하였다. 이렇게 얻어진 8개의 변형률을 각각 평균하여 이들을 다시 변형률 A-B-C-D라 하였으며, 이를 탄성상수의 해석에 사용하였다. Fig. 3은 이방성각도가 60도인 4개의 시험편들에서 변형률 측정을 통하여 얻어진 응력-변형률 곡선들을 한 그림으로 도시한 것이다. 이러한 4개방향의 변형률 측정은 모두 독립적이며 한 개의 시험편에서 얻을 수 있는 최대 수이며, 측정방향은 측정오차를 최소화할 수 있는 방법이다(박철환, 2001).

2.2 평면이방성 해석방법

평면이방성에서 응력과 변형률의 관계는 식 (1)과 같이 정의되며, Fig. 2와 같이 시험에서 얻어지는 응력과 변형률의 방향은 y-45도-x 방향의 값이므로 이를 directional cosine을 사용하여 1-2-3 방향의 값을 얻어 6개의 식을 구성할 수 있다. 그러나 이 식은 6개의 수식으로 구성되어 있지만, 5번째와 6번째의 식은 독립적인 식이 아니다. 따라서 5개의 독립적 탄성상수를 얻기는 이론적으로 불가능하므로, 다른 각도의 시험편에서 측정할 자료가 필요하다. 만약 3개의 서로 다른 각도의 시험편으로부터 응력과 변형률을 측정하면 12개의 수식을 얻을 수 있으며, 최소자승법에 의하여 각 수식의 오차를 최소화하는 최적의 값을 얻을 수 있다. 따라서 모든 탄성상수를 얻기 위한 시험편의 최소수량은 2개이다.

한편 단일시험편에서 5개의 독립적 탄성상수를 얻기 위하여 제 5의 가정된 수식이 필요하다. Saint-Venant는 변형률 에너지에 의거하여 식 (2)와 같은 근사식을 1863년에 발표하였으며, 평면이방성체에 적용하면 식 (3)과 같다(Wittke, 1990; Amadei, 1996). 등방성면에 작용하는 전단계수인 G_1 은 탄성이론에 의하여 식 (4)와 같이 정의될 수 있는 종속적 탄성상수이다.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \nu_{23} \\ \nu_{31} \\ \nu_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{12}/E_2 & -\nu_{13}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_2 & 1/E_2 & -\nu_{23}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_3 & -\nu_{23}/E_3 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\frac{1}{G_{ij}} = \frac{1}{E_{ii}} + \frac{1+2\nu_{ji}}{E_{jj}} \quad (2)$$

$$G_2 = \frac{E_1 E_2}{E_1(1+2\nu_2) + E_2} \quad (3)$$

$$G_1 = \frac{E_1}{2(1+\nu_1)} \quad (4)$$

Saint-Venant의 근사식은 G_2 가 다른 3개의 탄성상수에 의하여 결정되므로 독립적이지 않는 것으로 표현되어 있다. 따라서 G_1 은 종속적이지만 G_2 는 독립적이라는 탄성이론에 배치되므로 이론적으로 한계를 갖고 있다. 또한 단일시험편의 해석에서 저자들은 일련의 연구를 통하여 Saint-Venant의 근사식을 적용하는데 한계가 있다고 보고한 바 있다(박철환, 2001; 박철환과 박찬, 2002). 이에 따라 아래 식 (5)와 같은 3개의 수식을 제안하였으며, 모델연구(박철환 등, 2008)와 실제 시험분석(박철환 등, 2010)을 통하여 이들 수식의 적합성을 분석하였다. 여기서 식 (5-a)는 Saint-Venant의 근사식인 식 (3)과 같은 수식이며, 각 수식은 시험편의 형상에 따라 적용성이 변한다는 것이 밝혀졌다. 또한 각도가 큰 경우에는 3개의 수식이 거의 동일한 결과를 유도한다는 것도 밝혀졌다.

따라서 각 시험편에 대한 탄성상수의 분석은 이들 수식에서 가장 적합한 수식을 사용한 결과를 언급하였다.

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

$$\nu_a = 0.5(\nu_{12} + \nu_{21}) \sin^2\phi + \nu_{21} \cos^2\phi \quad (5-b)$$

$$\nu_a = 0.5(\nu_{12} + \nu_{21}) \frac{2\phi}{\pi} + \nu_{21} \frac{(\pi - 2\phi)}{\pi} \quad (5-c)$$

3. 일축압축강도 결과분석

각도에 따른 일축압축강도의 변화와 각 시료의 측정편차는 Fig. 4와 같다. 일축압축강도는 전체적 경향은 U 형태를 보이고 있는데, 수평 및 15도 시료에서는 219 MPa로 같은 크기로 측정되었으며, 30도에서 약간 증가하여 231 MPa로 측정되었다. 그리고 각도가 증가하면서 강도저하가 발생하였으며 60도 시료에서 가장 작은 값으로 나타났다. 다시 증가하면서 수직시료에서 가장 큰 값인 250 MPa로 측정되었다. 7종류의 35개 시험편 전체의 평균크기는 207 MPa이며, 표준편차는 33.3 MPa로서 상대표준편차는 16.1%로 분석되었다. 60도 및 수직시료에서 최소 및 최대 크기로 측정되었으며 이들은 표준편차의 범위를 벗어난 크기이다. 이들 최소 및 최대 강도의 편차크기는 약 100 MPa이다.

각도별 시료에서 편차는 Fig. 4에서 알 수 있듯이 다양하게 나타났다. 즉, 30도, 45도, 75도 및 수직시료에서 상대표준편차가 3.0~6.0%로 작게 분석되어 일정한 강도가 측정되었음을 알 수 있다. 그 외의 시료에서는 9.5~12.7%의 크기로 나타났다.

일축압축강도의 U 형태의 전체적 경향은 과거의 많은 연구를 통하여 일반적으로 널리 알려진 형태이다. 그리고 이론적으로도 60도 근처에서 최소값을 보이는 것으로 알려져 있으며 이에 잘 부합되고 있다. 많은 시험에서 각도가 작은 경우의 강도가 각도가 큰 시료의 강도와 비슷하거나 큰 것으로 나타난 반면, 본 연구에 사용된 유문암에서는 각도가 큰 90도에서 높은 강도를 보이고 있다. 이 경향에서 수평시료에 비하여 30도의 시료의 강도가 측정편차의 수준 내에서 약간 증가하는 것으로 나타난 것은 이론이나 과거의 경향과 다른 점이다. 그러나 과거의 일부 문헌에서 이러한 경향을 보이고 있어 측정의 문제점이라고 할 수 없다.

Fig. 5는 인공적으로 만들어진 암석시험에서 일축 및 삼축압축시험에서 얻어진 결과이며(Tien & Tsao, 2000),

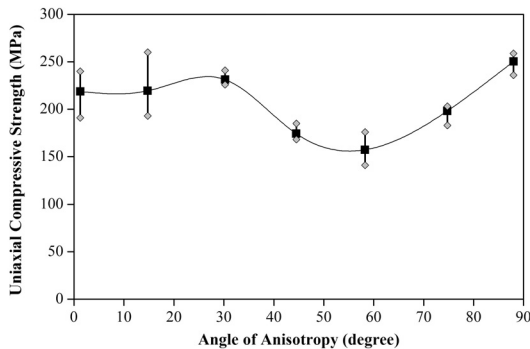


Fig. 4. Uniaxial compressive strength vs the angle of anisotropy

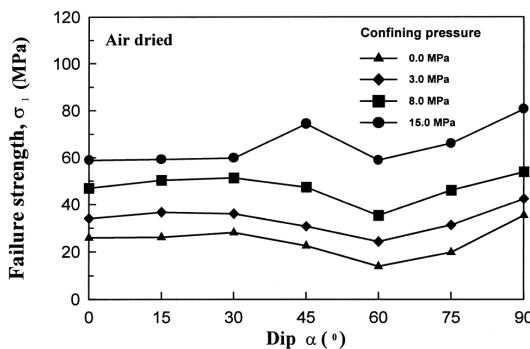


Fig. 5. Uniaxial compressive strength vs angle of artificial rock (after Tien & Tsao, 2000)

최근들어 편마암에서 유사한 시험을 통하여 Fig. 6과 같은 강도변화를 발표하였는데(Hakala 등, 2007) 이들의 결과는 본 연구에서 얻어진 경향과 아주 흡사한 경우이다. 즉 전반적으로 U 형태를 보이며, 60도 근처에서 최소값으로 측정되었으며, 큰 각도에서 약간 더 높은 측정값을 보이고 있다. 또한 약 30도 근처에서 높은 강도를 보이고 있다. 이런 연구들을 미루어보아 30도 근처의 시료에서 측정오차 정도의 강도상승이 있는 것으로 판단된다. 또한 Fig. 6에서 알 수 있듯이 강도의 편차는 12~24%로 나타났는데 이는 본 연구의 결과보다 더 큰 편차이다. 또한 20도 각도에서 가장 작은 편차를 보이고 있는 점은 Fig. 4와 다른 결과이다. 따라서 각도에 따른 편차의 정도는 어떤 결론에도 접근할 수 없음을 알 수 있다.

4. 탄성상수 해석

4.1 변형률 자료분석

각 시험편에서 측정된 4개 방향의 변형률의 각도에 따른 평균크기는 Table 1과 같다. 변형률의 크기는 응

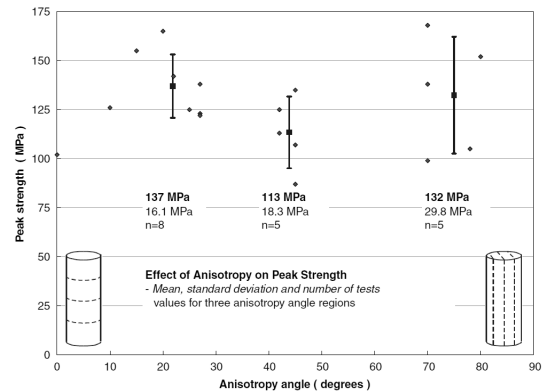
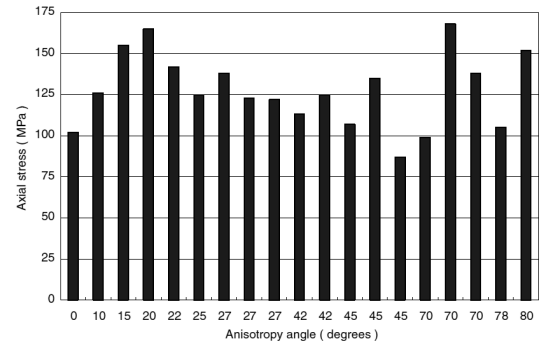


Fig. 6. Uniaxial compressive strength vs angle of mica gneiss (after Hakala, 2007)

Table 1. Average values of 4 strains (unit: $\mu\epsilon/\text{MPa}$)

angle	strain A	strain B	strain C	strain D	E-app	PR-app
1	-25.01	-9.66	4.90	4.76	40.1 GPa	0.194
14.8	-24.52	-8.93	4.80	4.48	40.8 GPa	0.189
30.3	-25.17	-10.64	4.91	4.76	39.8 GPa	0.192
44.5	-25.49	-10.44	4.92	4.77	39.3 GPa	0.190
58.3	-25.57	-10.42	5.23	4.88	39.1 GPa	0.198
74.8	-21.72	-8.84	4.51	4.22	46.1 GPa	0.201
88	-21.89	-8.22	4.33	4.14	45.7 GPa	0.194
mean	-24.19	-9.59	4.80	4.57	41.6 GPa	0.194

력-변형률 관계곡선에서 파괴강도의 약 50%의 응력수준에서 얻어진 접선 또는 평균기울기로서 $\mu\epsilon/\text{MPa}$ 의 단위를 갖고 있으므로 단위응력에서 발생하는 변형률을 뜻한다. 여기에서 - 값은 압축변형이며 + 값은 인장변형을 의미한다. 각각의 각도마다 5개의 시험편을 사용하였는데 그 중에 가장 편차가 큰 시험편의 자료는 제외하고 4개의 시험편에서 얻어진 평균크기이다.

Table 1에 분석된 E-app는 겉보기 탄성계수로서 시험편의 수직방향의 탄성계수이며, 변형률 A의 역수로부터 얻어지는 값으로 GPa 단위이다. 그리고 PR-app는 겉보기 포아송비로서 2개의 수평방향 변형률(C 및 D)와 수직방향의 변형률로부터 얻어진 것이다.

변형률 4개의 전체 시험편에 대한 평균크기는 -24.19 및 -9.59, 4.80, 4.63 $\mu\epsilon/\text{MPa}$ 로 분석되어 겉보기 크기는 41.6 GPa 및 0.194로 나타났다. 이러한 평균들은 물리적으로 의미를 갖지 않지만, 시험 시료의 전체적 경향을 알 수 있는 값이다.

각 각도의 시료에서 얻어진 각각의 변형률의 상대표준편차의 합은 Fig. 7에서 보는 바와 같이 10~25% 수준이다. 즉, A 및 B, C, D 변형률은 개별적으로 2~11%의 상대표준편차로 분석되어 변형률 측정은 일관성이 있다고 판단된다. 각도별 분산정도는 75도 시료에서 9.4%의 크기로 가장 작게 나타났으며, 0도 및 45도 시료에서 비교적 큰 것으로 분석되었다. 분산의 전반적 경향은 작은 각도의 시료에서 크게 나타나며, 큰 각도에서 작게 나타나는데 15도 시료에서는 비교적 작은 14.0%로 나타났다. 이러한 분산의 경향은 큰 의미를 갖는다고 판단되지 않지만 실험자료로서의 의미는 있다고 판단된다. 그러므로 각도가 큰 시험편에서 분산이 작은 자료를 획득할 가능성이 있다고 할 수 있다.

각도에 따른 겉보기 탄성계수의 크기변화를 Fig. 7에 함께 도시하였는데, 75도 및 수직시료에서 큰 값을 보이며, 60도에서 가장 작은 값으로 나타났다. 작은 각도

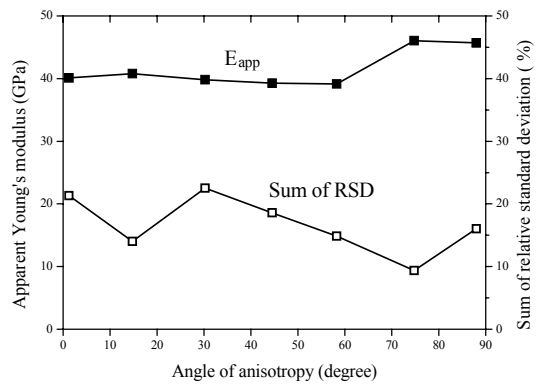


Fig. 7. Sum of relative standard deviation (%) & apparent Young's modulus (GPa)

에서는 15도에서 가장 크게 나타났지만 60도까지의 크기들은 오차범위 내에서 39~41 GPa 정도로 거의 같은 값이라고 할 수 있다.

이와 같이 각도에 따라 변화하는 겉보기 탄성계수는 15도 및 60도, 75도에서 극점을 기록하며 M자 형태를 띄고 있다고 할 수 있다. 또한 15도 및 75도에서 기록한 최고점을 무시한다 하더라도, 일축압축강도의 변화처럼 60도에서 최저점을 보이며 U자 형태를 보이고 있어 단조증가의 경향을 갖지 않는다. 따라서 겉보기 탄성계수가 각도에 따라 단조함수로 나타나는 특성(박철환 외, 2010)을 갖는 Saint-Venant의 근사식은 시험편의 탄성상수 해석에서 모두 적용될 수 없다고 판단된다.

이와 같이 단조증가를 보이지 않는 다른 시험결과는 Fig. 8과 같은 히말라야지역의 편암에서 발견된다. 여기에 표현된 β 는 본 연구의 ϕ 와 보각의 관계에 있는데, 두 개의 시료에서 $\phi = 60$ 도에서 최소값을 보이며 U자 경향으로 나타났다. 이 중에서 녹니석 편암의 측압이 작을 때에는 $\phi = 15$ 도에서 극점을 보이면서 본 연구의 실

험결과와 아주 비슷한 M자 형태를 띠고 있다. Fig. 7이나 Fig. 8과 같이 15도에서 극점을 나타내면서 낮은 각도에서는 단조감소함수를 보이기 때문에, 단조증가의 특성을 갖는 Saint-Venant의 근사식은 낮은 각도의 시험편 해석에서 적용될 수 없다. 이는 모델연구의 결과를 뒷받침하는 증거가 될 수 있다.

각도에 따른 이러한 변화양상은 일축압축강도에서의 경향과 비슷하며, 60도에서 최소값으로 분석되고 낮은 각도에서 약간 증가하는 것이 그 특성이라 할 수 있다. 그러나 일축압축강도와 겉보기 탄성계수의 크기는 서로 상관관계가 크지 않아 직접적인 영향요소라고 판단할 수 없다.

4.2 수평 및 수직시료의 탄성상수

이방성각도가 0도에 가까운 수평시료의 strain rosette에서 측정된 변형률의 y-45도-x 방향은 2-(45도)-1의 방향과 동일하므로 겉보기 탄성계수는 제 2방향의 탄성계수이다. 이의 크기는 37~43 GPa로 분석되며 평균 40.10 GPa(상대표준편차는 6.1%)이다. 또한 두 개의 수평방향의 변형률에 의하여 v_2 의 크기는 0.18~0.22이며, 평균 0.1936(상대표준편차는 7.2%)으로 나타났다.

이방성각도가 90도에 가까운 수직시료에서는 y-45도

-x 방향은 1-(45도)-2의 방향과 동일하므로 겉보기 탄성계수는 제 1방향의 탄성계수이다. 이의 크기는 44~47 GPa로 분석되며 평균 45.71 GPa이다. 또한 제 3방향의 변형률에 의하여 v_1 의 크기는 0.18~0.20이며, 평균 0.1891로 나타났다. 상대표준편차는 각각 2.5% 및 3.5%로 측정오차가 매우 작은 값들이다. 이에 비하면 수평시료에서 얻어진 E_2 및 v_2 의 편차는 큰 것으로 평가된다.

이상으로 수평 및 수직시료에서 측정된 4개의 탄성상수 값은 다른 복잡한 해석을 하지 않고 직접 얻을 수 있는 값으로 본 시험에 사용된 유문암의 참값이라고 할 수 있으며 평균값은 이를 대표할 수 있는 크기이다. 이러한 값들은 Table 2에 수록되어 있다. 따라서 다른 각도에서 해석된 탄성상수의 크기가 이들 최소 및 최대값의 범위에 있다면, 해석에 사용된 제 5의 가정식은 수용 가능한 것으로 판단될 수 있다. Saint-Venant의 근사식은 이렇게 직접 얻어진 탄성상수들로부터 실험으로 쉽게 얻을 수 없는 G_2 의 크기를 결정할 수 있기 때문에 유용하게 적용되어 왔다고 판단된다. Saint-Venant의 근사식인 식 (3)을 적용하면 G_2 의 크기는 17.71 GPa가 된다.

그러나 모델연구나 실제실험을 통하여 밝혀졌듯이, 특히 각도가 작은 경우에서 Saint-Venant 근사식이 적용될 수 없으므로 G_2 를 구하기 위하여 일정각도를 갖는

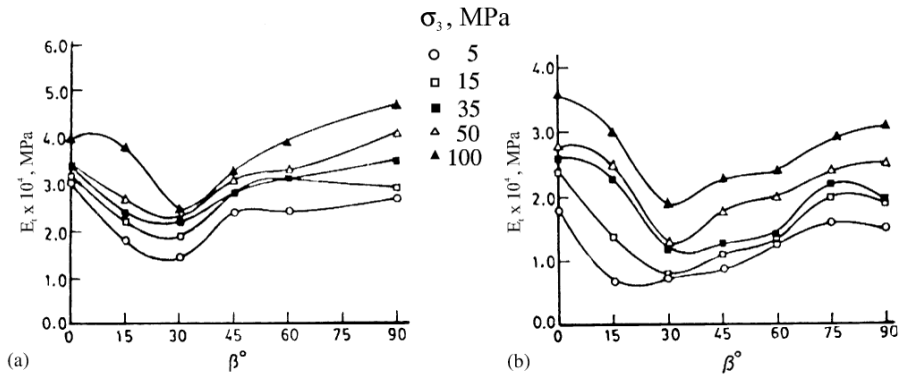


Fig. 8. Variation of relations of E_a - β for for Himalayan schists (after Nasser et al., 2003, (a) Quartzitic schist, (b) Chlorite schist)

Table 2. Elastic constants from specimens of $\phi = 0$ and 90

constant	average	minimum	maximum	st. dev.	Relative SD
E_1 , GPa	45.71	44.4	47.2	1.152	2.52%
E_2 , GPa	40.10	37.0	42.8	2.444	6.09%
v_1	0.1891	0.182	0.196	0.0067	3.54%
v_2	0.1936	0.180	0.215	0.0144	7.44%
G_2	17.71 GPa, calculated by eq. (3)				

시험편이 필요하며, 다른 가정식이 필요한 것이다. 따라서 여러 개의 시험편이 시험된다면 수직 및 수평시료에 의하여 4개의 탄성상수를 결정하고, 적정 각도를 갖는 시험편의 자료로부터 G_2 를 구하는 것이 가장 바람직하다고 할 수 있다.

4.3 15도 각도의 시료

15도 각도를 갖는 시험편에서 시험한 결과, 이들의 일축압축강도 및 겉보기 탄성상수의 평균크기는 전체 시료의 평균값과 거의 같은 크기로 나타났다. 이들 시험편에서 얻어진 변형률 크기로부터 탄성상수를 해석하는데 있어서 제 5의 가정식은 필수적이다. 이때 식 (5)에서 정의된 3개의 수식을 각각 적용한 결과는 Table 3과 같다.

이 해석결과에서 알 수 있듯이 E_2 와 ν_2 의 크기는 수식에 관계없이 일정한 값을 보이며 쉽게 결정될 수 있다. 이들은 Table 2에 언급된 참값 범위에 포함되어 있을 뿐 만 아니라 평균값에 매우 가까운 크기이다. 그러나 E_1 및 ν_1 의 크기는 수식에 따라 큰 차이를 보이고 있으며, 모든 값들이 수직시험편에서 얻어진 측정범위를 크게 벗어나 정당한 결과로 받아들일 수 없는 값으로 평가된다. 이는 작은 각도의 시험편은 큰 오차를 보이므로 시험편으로 적절하지 않다는 모델연구에서 얻어진 결론(박철환 외, 2008)과 일치한다. 다만 이 시험편에서 결정해야 한다면 식 (5-c)에 의한 결과가 참값에 근접되어 있으며, 이는 모델연구에서 얻은 결과와도 일치한다.

한편, 제 5의 가정식과 관계없이 식 (1)의 넷째 식으로 결정되는 G_2 의 크기는 13.8~16.3 GPa로 측정되었다. 이들의 평균크기는 15.37 GPa이며 표준편차는 1.18 GPa 및 7.7%로 분석되었다.

4.4 30도 각도의 시료

15도 시험편과 같이 30도 각도 시험편에서 평균적 일

축압축강도 및 겉보기 탄성상수의 크기는 전체 시료의 평균값과 거의 같은 크기로 나타났다. 시험편에서 얻어진 변형률 크기로부터 탄성상수를 해석하는데 있어서 3개의 가정식을 각각 적용한 결과는 Table 4와 같다.

여기에서 알 수 있듯이 4개의 탄성상수는 적용된 수식에 관계없이 각각 비슷한 크기로 해석되었을 뿐 만 아니라, 수평 및 수직 시험편에서 얻어진 결과와도 크게 상이하지 않아 모든 식들이 잘 적용될 수 있다는 것을 알 수 있다. 각 식에 의한 E_1 의 크기는 수직시험편 결과보다 5~7% 작은 값이며, 또한 최소 측정값보다 작은 크기이다. 이는 실험이나 해석의 오류라기보다는 이방성시험 자체가 갖는 특성이나 한계라고 판단된다. E_2 의 크기는 수평시험편 결과보다 작은 값이지만, 측정 범위에 포함되어 있다.

이러한 한계와는 별도로 둘째 식에 의한 결과는 Table 2의 탄성상수와 평균 3.1%의 오차로 가장 잘 일치하여, 이 시험편에서는 식 (5-b)가 가장 적합한 가정식이라 할 수 있다. 이는 모델분석에서 얻어진 결과와 잘 일치하고 있어, 실험과 모델연구가 잘 수행되었음을 서로 증명하고 있다고 할 수 있다. 식 (5-b)에 의한 해석결과에서 E_1 을 제외한 3개의 탄성상수는 참값에 포함되는 크기이다.

4.5 큰 각도의 시료

모델연구를 통하여 이방성각도가 큰 경우에는 3개의 가정식에 의하여 거의 동일한 결과를 유도하는 것이 밝혀졌으며, 본 실험에서도 유효수자 3자리까지 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 45도 이상의 시료에서 얻어진 변형률로부터 탄성상수를 해석한 각각의 결과는 Table 5와 같다. 표의 맨 밑에는 이들의 평균값을 표시하였는데, 수평 및 수직시료를 포함한 7개의 전체 시료에서 얻어진 값의 산술평균이다.

Table 3. Elastic constants in $\phi = 15$ specimens with each suggested equation

applied equation	E_1 , GPa	E_2 , GPa	ν_1	ν_2	G_2 , GPa
eq. (3) or (4-a)	31.90	41.64	-0.0056	0.1998	15.37
eq. (4-b)	33.58	41.65	0.0473	0.1952	
eq. (4-c)	42.00	41.69	0.3121	0.1787	

Table 4. Elastic constants in $\phi = 30$ specimens with each suggested equation

applied equation	E_1 , GPa	E_2 , GPa	ν_1	ν_2	G_2 , GPa
eq. (3) or (4-a)	42.69	38.95	0.1848	0.1906	16.98
eq. (4-b)	42.75	38.95	0.1866	0.1902	
eq. (4-c)	43.44	39.02	0.2057	0.1855	

Table 5. Elastic constants in specimens of large angle

angle	UCS, MPa	E_1 , GPa	E_2 , GPa	ν_1	ν_2	G_2 , GPa
45	174	39.81	38.84	0.1834	0.1907	16.46
60	157	39.66	38.00	0.1885	0.1985	16.13
75	198	46.34	42.58	0.1946	0.1919	18.49
average	207	42.70	40.03	0.1881	0.1907	17.16

여기에서 알 수 있듯이 45도 및 60도 시료에서는 강도와 함께 탄성계수가 작은 크기로 나타났다. 이는 탄성계수가 강도의 크기에 어느 정도 비례하는 것을 보여주는 결과이다. 즉, 탄성상수를 결정하는 응력수준이 강도의 50% 정도이므로, 다른 시료에서는 105~110 MPa 인데 반하여 두 시료에서는 이보다 낮은 80~86 MPa 이기 때문인 것으로 판단된다. 이에 대한 정량적 분석은 제 2보에서 자세히 언급될 예정이다.

E_1 의 크기는 참값의 최소치보다 작기 때문에 정당한 결과로 받아들일 수 없지만, E_2 의 크기는 평균값보다 작은 크기이지만 참값의 범위에 포함되어 있다. 그러나 포아송비는 이의 영향을 받지 않고 다른 시료에서 나타난 결과와 비슷한 크기로 나타났으며, 참값의 범위에 포함되어 있다.

이로서 45도 및 60도 시료에서는 30도 시료와 같이 E_1 을 제외한 3개의 탄성상수는 참값에 가까운 결과를 얻을 수 있다.

75도 시료의 일축압축강도는 전체 평균과 비슷한 크기인 198 MPa로 측정되었다. 여기에서 E_1 의 크기는 46.34 GPa로 해석되었는데, 이는 수직시료에서 얻어진 평균값보다 약간 큰 값으로 나타났지만 측정범위에 포함된다. 이에 반하여 15도부터 60도까지 시료의 해석자료는 39.7~42.8 GPa로 평가되어 수직시료에서 측정된 범위인 44.4~47.2 GPa에 포함되지 않는다. 따라서 E_1 의 크기를 잘 해석할 수 있는 시험편의 각도는 75도 정도인 것으로 판단된다. ν_2 는 0.1919로 해석되어 수평시료에서 얻어진 평균값과 유사한 크기이다. 한편 E_2 와 ν_1 의 크기는 각각 42.58 GPa 및 0.1946으로 수평 및 수직시료의 평균값보다 크게 해석되었지만, 최대 측정값과 거의 같기 때문에 참값에 가까운 크기라고 할 수 있다.

다른 각도의 자료는 1~3개만 이를 만족하고 있는 것으로 평가되는데 반하여, 75도 시료에서 얻어진 4개의 모든 탄성상수는 참값으로 평가되는 수평 및 수직시료에서 측정된 범위의 값이다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 75도 시료는 변형률의 측정오차도 가장 작은 크기로 나타났으므로, 평면이방성 시험에 가장 적합한 시료라고 판단된다.

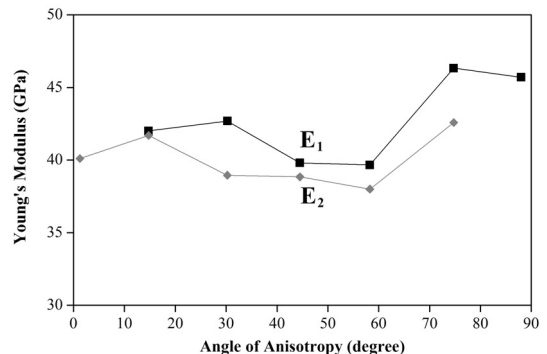
4.6 탄성상수의 종합적 평가

각도가 서로 다른 7종류의 시료에서 측정된 응력과 변형률로부터 식 (1)과 제 5의 가정식을 이용하여 각각의 탄성상수를 해석한 결과는 Fig. 9와 같다. 이 그림에서 나타난 각도에 따른 탄성계수의 변화양상은 강도의 변화양상과 대체로 일치한다. 즉, 강도가 작게 평가된 45도 및 60도의 시료에서 겉보기 탄성계수와 E_1 , E_2 의 크기도 최소값을 보이고 있다.

수평 및 수직시료에서는 가정식을 적용하지 않고 4개의 탄성상수를 얻을 수 있기 때문에 이들의 측정값은 참값의 범위라고 할 수 있다. 즉, 수직시험편으로부터 편차가 작은 E_1 및 ν_1 을 결정할 수 있으며, 수평시험편에서는 편차가 약간 큰 E_2 및 ν_2 를 결정할 수 있다.

Fig. 9나 앞의 표들에서 알 수 있듯이 E_1 의 평균크기는 42.7 GPa로서 수직시료에서 얻어진 참값인 45.7 GPa보다 약간 작은 값으로 평가된다. 특히 15도부터 60도까지의 시료에서는 39.7~42.8 GPa로 해석되었는데 이는 참값의 범위인 44.4~47.2 GPa에 포함되지 않아 비록 작은 차이이지만 해석에 한계를 갖는 것으로 판단된다. 따라서 E_1 을 정확히 평가할 수 있는 시료의 이방성 각도는 대략 75도 이상이라고 판단된다.

한편 E_2 의 평균크기는 40.0 GPa로 수평시료에서 얻어진 평균값인 40.1 GPa와 잘 일치하며, 모든 각도의 시료에서의 평균값은 측정범위에 포함되는 것으로 평가된

**Fig. 9.** Two Young's moduli as a result of analysis

다. 따라서 본 연구에 사용된 유문암 시료에서는 제 5의 가정식은 E_2 의 값은 참값에 근접되게 평가하는데 반하여 E_1 의 값은 60도 또는 더 작은 각도의 시료에서는 참값보다 9~13% 작은 값을 유도한다고 할 수 있다.

이런 결과로부터 평면이방성 시험과 해석에서 E_2 의 값은 쉽게 결정되는데 반하여 E_1 의 값은 시료에 따라 많은 편차를 보이고 있다. 따라서 한 개의 시험편을 사용하여 평면이방성의 탄성상수를 결정하여야 한다면 E_1 의 값을 잘 표현할 수 있는 큰 각도의 시료가 적합하다고 할 수 있다.

또한 75도 시료는, 일축압축강도는 Fig. 4와 같이 전체평균의 96%로 평가되었고, 변형률의 측정오차도 가장 작은 크기로 나타났으므로, 대표적인 시료가 되기에 충분하다고 결론지을 수 있다. 또한 모델연구에서도 각도가 큰 시료일 때 Saint-Venant 근접식이 잘 적용된다는 결론도 이 시료의 적합성을 뒷받침하고 있다. 이 시료에서 얻어진 v_2 의 크기도 대푯값에 가까운 해석을 유도하고 있지만, E_2 및 v_1 의 크기는 참값의 최대값에 가깝게 해석되며 G_2 의 크기도 대체로 크게 해석되었다.

각도가 작은 시료는 Saint-Venant 근접식이 적용되지 않을 뿐 만 아니라 Table 2 및 Table 3과 같이 다른 가정식도 오차를 갖는 결과를 유도하므로 적절하지 않다. Fig. 7이나 Fig. 8과 같이 낮은 각도에서 겉보기 탄성계수가 각도에 따라 단조증가현상이 전혀 나타나지 않으므로 Saint-Venant 근접식이 적용될 수 없는 것은 당연하다고 할 수 있다. 그러나 30도의 시료에서는 다른 제안식인 식 (5-b)로 해석이 가능하다. 즉, 15도 시료와 달리 식 (5-b)에 의하여 4개의 탄성상수가 참값에 잘 접근하고 있으므로 평면이방성 해석이 불가능한 것은 아니라고 평가된다. 그리고 45도 및 60도의 시료는 측정오차가 작고 Saint-Venant 근접식은 잘 적용되어 평면이방성 해석이 가능하지만, 강도와 함께 탄성계수의 크기, 특히 E_1 이 작게 해석되는 경향이 있다.

5. 결론 및 고찰

평면이방성 암석의 탄성상수를 실험적으로 결정하는 것을 목적으로 해남에서 채취된 유상구조를 갖는 유문암을 사용하여 이방성각도에 따른 일축압축강도 및 탄성상수의 변화를 분석하였다. 수평 및 수직시료에서는 가정식을 적용하지 않고 4개의 탄성상수를 얻을 수 있기 때문에 이들의 크기는 참값이라 결정할 수 있다. 이방성면에 작용하는 전단계수는 실험적으로 어렵기 때문에 이렇게 결정된 탄성상수로부터 얻을 수 있는 Saint-Venant 근사식이 유용한 것으로 판단된다. 그러나 이 식의 특

성 때문에 많은 경우에 적용하는데 한계가 있기 때문에 다른 각을 갖는 시험편에서 결정되어야 한다. 따라서 일정 각도를 갖는 다른 5종류의 각도를 갖는 시료마다 얻어진 변형률로부터 탄성상수를 해석하여 평균값을 유도하여 참값의 크기와 비교분석하였다. 제 2보에서는 여러 각도의 시험에서 얻어진 변형률로부터 종합적으로 탄성상수를 결정하는 방안에 연구가 발표될 것이다.

변형률 측정에서 각도에 따라 자료분산의 크기가 달라지는데, 작은 각도에서는 큰 각도보다 표준편차가 2배 이상으로 분산이 크게 나타났다. 따라서 각도마다 결정되는 탄성상수의 분산도 작은 각도의 시료에서 크게 나타나는 것으로 평가되었다.

겉보기 탄성계수의 변화는 각도에 따라 M자 또는 U자 형태로 측정되었다. 특히, 낮은 각도에서는 겉보기 탄성계수의 변화가 단조증가와 반대되는 경향을 보이지 않아 Saint-Venant 식을 적용될 수 없을 뿐 만 아니라, E_1 의 크기는 참값의 범위에 포함되는 값을 얻을 수 없다. 45도 및 60도 각도를 갖는 시험편에서는 Saint-Venant 식이 잘 적용되지만 강도와 함께 낮은 크기의 탄성계수를 유도하였다. 75도 각도의 시료에서는 v_2 의 크기가 약간 크게 나타나지만 해석된 모든 탄성상수가 참값의 범위에 포함되므로, 평면이방성 시험의 대표적인 시험편이 될 수 있다. 또한 변형률과 강도의 평균값에서도 가장 작은 크기의 측정오차를 보이고 있어 신뢰성이 높은 측정자료를 제공하고 있다. 따라서 만약 한 개의 시험편에서 평면이방성의 탄성상수를 얻고자하는 경우에, 이방성각도가 75도 근처의 시험편에서 시험하는 것이 참값에 가까운 값을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원의 기본사업인 '지하복공식 에너지저장시스템 개발'의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 김호영, 1995, 이방성 암석에 대한 탄성계수의 실험적 결정, 터널과 지하공간, 5.4, 318-322.
2. 박철환, 2001, 이방성 암석의 탄성상수 분석연구, 터널과 지하공간, 11.1, 59-63.
3. 박철환, 박찬, 2002, 평면이방성 암석의 특성 시험법 제안, 한국암반공학회 시험분과위원회 기술세미나 논문집, 68-82.
4. 박철환, 박의섭, 박찬, 2008, 평면이방성 암석의 변형특성 모델연구, 터널과 지하공간, 18.4, 252-262.
5. 박철환, 박찬, 정용복, 박의섭, 2010, 평면이방성 암석의 단일시험편에서 탄성상수 결정에 제안된 수식들의 적용연구,

- 터널과 지하공간, 20.3, 153-168.
6. Amadei, B., 1996, Importance of anisotropy when estimating and measuring in situ stresses in rock, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 33.3, 293-325.
 7. Gonzaga, G.G., M.H. Leite and R. Corthesy, 2008, Determination of anisotropic deformability parameters from a single standard rock specimen, International Journal of Rock Mechanics & Mining Science 45.6, 1420-1438.
 8. Hakala, M, H. Kuula, and J.A. Hudson, 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, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 44.1, 14-46.
 9. Nasser, M.H.B., K.S. Rao and T. Ramamurthy, 2003, Anisotropic strength and deformational behavior of Himalayan schists, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 40.1, 3-23.
 10. Talesnick, M.L., M.Y. Lee and B.C. Haimson, 1995, On the determination of elastic material parameters of transverse isotropic rocks from a single test specimen, Rock Mechanics and Rock Engineering, 28.1, 17-35.
 11. Tien, Y.M. and P.F. Tsao, 2000, Preparation and mechanical properties of artificial transversely isotropic rock, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 37.4, 1001-1012.
 12. Wittke, W., 1990, Rock mechanics - Theory and applications with case histories, Springer-Verlag.

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 지구환경연구본부 책임연구원

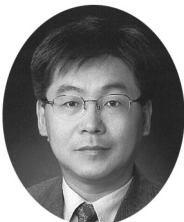
박찬



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 지구환경연구본부 책임연구원

신중호



1983년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1985년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학석사
1990년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학박사

Tel: 042-868-3242
E-mail: jhsynn@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원

정용복



1994년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1996년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
2000년 서울대학교 대학원 지구환경시스템 공학부 공학박사

Tel: 042-868-3097
E-mail: ybjung@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 선임연구원