

## 다양한 시험법으로 규명된 암반 탄성계수 비교

유근환 · 장찬동\*  
충남대학교 지질환경과학과

### Comparison of Rock Young's Moduli Determined from Various Measurement Methods

Kuen-Hwan Ryu · Chandong Chang\*  
Department of Geology, Chungnam National University

국내의 대표적 암종이라 할 수 있는 화강암체와 편마암체에 대해 탄성계수 측정 방법으로 자주 이용되고 있는 Goodman jack시험, PS검층, 초음파 속도측정, 일축압축 변형시험을 실시하여 각 탄성계수를 측정하고 그 특징을 알아 보았다. 실내에서 측정된 동·정탄성계수는 측정시 가해진 응력의 크기, 측정시 이용된 주파수의 범위, 가압/감압 등의 측정 조건에 따라 상당히 다른 결과를 보였다. 실내 측정조건이 현장조건에 가까워질수록 현장암반의 탄성계수와 비슷한 값으로 측정되는데 이는 실내시험시 현장 상태를 구현하는 것이 중요하다는 점을 시사한다. 동탄성계수는 정탄성계수에 비해 대체로 높게 측정되었으며 그 원인으로는 (미세)균열의 응력에 따른 거동양상, 측정시 이용한 주파수의 범위 차이, 그리고 변형진폭의 차이 등의 효과로 설명할 수 있다. 다양한 방법으로 측정된 각 탄성계수 상호간의 관계 및 특징은 현장 암반 탄성계수의 적절한 판단을 위해 도움이 될 것으로 기대된다.

주요어 : 탄성계수, Goodman jack시험, PS 검층, 초음파 속도측정, 일축압축변형시험

Various measurements were carried out to estimate the modulus of deformation in two dominant rock types in Korea: granite and gneiss. Four most commonly used methods were utilized: Goodman jack tests, PS well logging, laboratory ultrasonic tests and laboratory uniaxial loading tests. Laboratory static and dynamic Young's moduli depend on the magnitude of the applied axial stress, range of frequency used for measurement and the loading/unloading condition. As the laboratory measurement condition approaches to that in situ, the resultant moduli also appear to be comparable to that in situ. This suggests that the simulation of in situ stress condition is important when the modulus of rock is determined in the laboratory. Dynamic Young's modulus is generally higher than static Young's modulus because of (micro)crack behavior in response to the stress, different range of frequency used for measurements, and the effect of the amplitude of deformation. Understanding of the relations in moduli from different measurement methods will help estimate appropriate in situ values.

**Key words :** Young's modulus, Goodman jack test, PS well logging, ultrasonic velocity measurement, uniaxial loading test

\* Corresponding author : cchang@cnu.ac.kr

## 서 언

암반의 변형 특성은 터널이나 사면 등의 토목시설물과 대규모 건축물 등 지반 및 암반에서의 구조물의 안정성 및 완성도를 보장하기 위하여 설계 및 시공 단계에서 반드시 밝혀야 할 암반 특성 중 하나이다. 주어진 응력 조건에서 구조물의 건설 및 설비로 인한 지반의 변형 정도는 그 구조물의 안정성을 평가하는 가장 기본적인 판단기준이 된다. 이러한 암반 변형 특성을 기술할 수 있는 대표적인 물성은 작용하는 응력에 대한 변형 정도로 정의되는 탄성계수이다.

탄성계수의 측정 방법 중에는 현장의 암석시편을 이용하여 실내에서 암석 변형 실험을 수행하거나 현장에 시추공을 굴착하여 직접 암반 변형을 측정하는 방법이 있다. 전자의 측정방법은 측정대상이 전체 시추공중 일부이고 대부분의 경우 무결암을 대상으로 하며 암석시편의 한정된 크기 때문에 전체 현장 암반의 특성을 대표할 수 있는가에 대한 신뢰성에 문제가 있으며, 후자의 경우는 현장암반의 특성에 근접하게 측정할 수 있다는 장점이 있지만 상대적으로 많은 비용과 시간이 필요하다는 단점이 있다(송무영외, 2002). 또한 탄성파의 속도를 이용하는 방법이 있는데 지표에서 직접 측정할 수 있으며 저 변형률 범위에서 지반의 동적 물성을 측정하며 비교적 신속하고 저렴하게 탄성계수 측정이 가능하므로 많은 경우에 사용되고 있다(박충하외, 2002).

정하중에 의해 측정된 정탄성계수( $E_s$ )는 탄성파의 속도(즉, 동하중)를 이용하여 측정된 동탄성계수( $E_d$ )보다 비교적 낮게 나타나는 경향이 있다(오선환외, 2000; 장현식외, 2005; Simmons and Brace, 1965; Cheng and Johnston, 1981; King, 1983; Eissa and Kazi, 1988; Plona and Cook, 1995; Göbel and Ranft, 2001; Ciccotti and Mulargia, 2004). 이러한 동탄성계수와 정탄성계수의 차이는 암석 내에 존재하는 미세균열과 공극이 동적 시험보다는 정적인 시험에서 더 큰 영향을 미친다는데 기인한다고 알려져 있으며 압력에 의해 미세균열이 닫히거나 초기 미세균열의 수가 적을 경우 두 탄성계수 간의 차이는 줄어드는 것으로 나타났다 (Walsh, 1965; Lama and Vutukuri, 1978; Cheng and Johnston, 1981; King, 1983; Plona and Cook, 1995). 대체로 지질공학 차원에서는 정하중에 의한 암반 변형을 알기 위해 탄성계수를 요구하므로 우리가 얻고자 하는 값은 주로 정탄성계수

이다. 그럼에도 불구하고 넓은 범위에 걸쳐 비교적 신속하게 수행할 수 있는 동탄성계수 측정의 장점 때문에 탄성파를 이용한 동적인 측정방법이 자주 사용되고 있다.

본 연구에서는 국내의 대표적 암종이라 할 수 있는 화강암체와 편마암체에 대하여 탄성계수 측정 방법으로 자주 이용되고 있는 네 가지 방법을 이용하여 탄성계수를 측정하였다. 이용된 방법은 시추공에서 직접 수행할 수 있는 대표적인 정탄성 측정 방법인 Goodman jack 시험법과 동탄성 측정 방법인 PS검층법으로, 각 방법을 통해 현장의 정탄성계수와 동탄성계수를 측정하였으며, 또한 해당위치의 시추코어에 대한 실내 초음파 속도를 측정하여 동탄성계수를, 그리고 직접적인 하중으로 응력-변형률을 측정하여 정탄성계수를 각각 측정하였다. 이들 방법으로 측정된 탄성계수를 비교 고찰하여 각 탄성계수의 특징을 알아보고, 각 실험 방법의 문제점과 그에 대한 해결법에 대해 살펴보았다.

## 연구지역 및 시추공의 위치

본 연구에서는 대전시 유성구 한국원자력연구소 부지 내에 위치한 시추공(이하 유성 시추공)과 공주시 신관동 공주대학교 내의 시추공(이하 공주 시추공)에서 현장의 동·정탄성계수 측정을 수행하였으며 동일 시추공에서 획득한 시추코어를 이용하여 실내실험을 통해 동·정탄성계수의 측정을 병행하였다. 유성시추공(심도 200m, 지하수위 3.2m, 시추공경 75mm)은 전 구간에 걸쳐 화강암으로 이루어져 있으며 간헐적으로 aplite 암맥이 관입하였다. 본 연구의 측정 구간은 깊이 20-50m이며 RQD 값이 84-100으로 대체로 균열이 없는 신선한 화강암체로 이루어져 있다. 깊이 27-30m 구간과 깊이 36-48m 구간에 aplite 암맥이 간헐적으로 관찰되며 이 구간을 경계로 상부는 하부에 비해 상대적으로 흑운모의 함량이 높은 회색의 화강암으로, 하부는 상대적으로 장석의 함량이 높은 분홍빛을 띠는 밝은 회색의 화강암으로 구성되어 있다(Fig. 1 (a)). 공주시추공(심도 50.7m, 지하수위 10.3m, 시추공경 75mm)은 전 구간에 걸쳐 편마암으로 이루어져 있으며 본 연구의 측정구간은 깊이 9-39m이다. 27m의 심도를 경계로 상부의 암석은 심한 풍화(RQD: 10-68)를 받았고 하부의 암석은 상대적으로 신선한(RQD: 77-100) 상태이다(Fig.1 (b)).

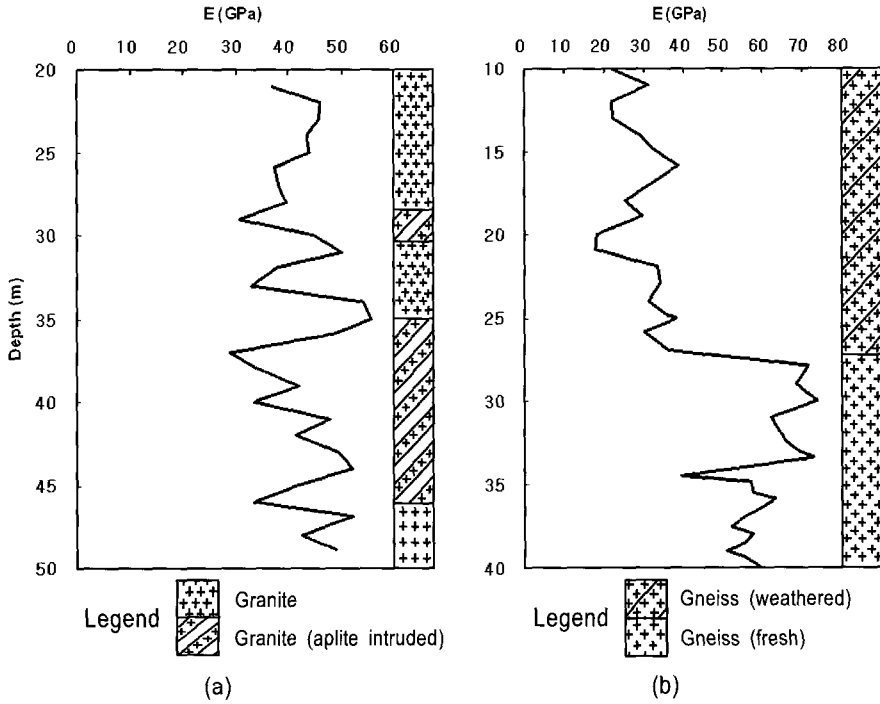


Fig. 1. Dynamic Young's moduli determined from PS well logging and columnar section of the study area: (a) Yuseong and (b) Gongju.

### 실험방법

현장암반의 동탄성계수를 측정하기 위한 PS검층은 Oyo사의 Geologger-3 Suspension PS Log (주파수: 5-4,600Hz)를 이용하였다. 유성 시추공의 경우 깊이 20-50m 구간에 대해, 공주 시추공의 경우 깊이 9-39m 구간에 대해 매 1m 간격으로 측정하였다. 동탄성계수를 측정하기 위한 PS검층의 원리는 시추공 내에 하나의 음원과 2개의 수신기가 장착된 sonde를 삽입하여 시추공 주변 암반을 전파하는 파동을 수신기에 기록되는 파형으로 측정하고 속도 분석과정을 통하여 암반의 탄성과 속도를 추정한다. 탄성과속도를 이용한 동탄성계수의 계산식은

$$E_d = \rho V_s^2 \left( \frac{3V_s^2 - 4V_p^2}{V_s^2 - V_p^2} \right) \quad (1)$$

이다. 여기서  $V_p$  [m/s]와  $V_s$  [m/s]는 각각 P파와 S파의 속도,  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]는 밀도 그리고  $E_d$  [Pa]는 동탄성계수이다.

현장암반의 정탄성계수를 측정하기 위한 Goodman jack시험의 원리는 시추공 내의 서로 마주보는 45° 범위에 유압으로 활성화되는 유압판으로 측압을 가하여 변화하는 공경을 LVDT로 측정한다. Goodman jack 시험 자료에서 탄성계수는

$$E_s = 0.8D(\Delta Q_h / \Delta D) T^* \quad (2)$$

이다(Heuze, 1984). 여기서  $E_s$  [MPa]는 정탄성계수,  $D$  [mm]는 초기공경,  $\Delta Q_h$  [MPa]는 가해진 유압의 변화량,  $\Delta D$  [mm]는 유압에 따른 공경의 변화량, Jack 상수  $T^*$ 는 포아송비에 따라 주어지는 상수로서 본 연구에서 이용된 값은 1.366-1.438 범위의 값이다. 단, 식

(2)에서 구해진 탄성계수  $E_s$ 가 7GPa를 초과할 경우의 탄성계수는 경험식

$$E_s = 8.14 \times 10^{-20} E_{calc}^4 + (-3.25 \times 10^{-13} E_{calc}^3) + 9.11 \times 10^{-7} E_{calc}^2 + 0.53 E_{calc} \quad (3)$$

을 이용하여 구한다(Heuze, 1984). 여기서  $E_{calc}$  [GPa]는 식 (2)에서 계산된 7GPa를 초과하는  $E_s$ 이다. Goodman jack시험은 유성시추공의 경우 48m와 23m에서 공주시추공의 경우 33m와 15m에서 각각 측정하였다. 측정의 정확성을 향상시키기 위하여 경암용 Goodman jack을 사용하여 각 심도에서 서로 직각되는 두 방향으로 각각 측정하였으며 측정시 압력을 증가시키며 세 번의 가압(loading)과 감압(unloading)을 반복하였다. 현장의 정탄성계수는 가압(loading)과 감압(unloading)부분으로 나누어 계산하였다.

동탄성계수와 정탄성계수의 실내측정은 Goodman jack시험이 수행된 심도의 암석코어를 이용하여 실시하였다. 유성시추공 코어시편(평균지름 47mm, 평균길이 86mm)은 깊이 23m 지점에서 화강암 시편 6개, 48m 지점에서 9개(화강암 시편 6개, aplite dike 시편 3개)를 제작하였다. 공주시추공 코어시편(평균지름 52mm, 평균길이 84mm)은 15m 지점과 33m 지점에서 각각 3개씩 제작하였다. 15m 지점의 경우 시편을 제작할 수 없을 정도로 심하게 풍화되어 있어 에폭시를 이용하여 시추코어의 외관부분을 고정시켜 시편을 성형하였다. 모든 시료는 오븐에서 24시간동안 건조시킨 후 시험하였다. 각 암석별 기본 물성을 Table 1에 요약하였다.

동탄성계수를 계산하기 위한 탄성과 속도 측정에 사용된 장비는 일본 Oyo사의 SONICVIEWER model-5217A이다. 발신기에서 발생된 P파(주파수 63kHz, 500kHz) 혹은 S파(주파수 33kHz, 100kHz)를 시편의 길이 방향으로 통과 시킨 후 수신기를 통해 감지함으로써 통과시간을 측정하고 이를 시편의 길이로 나누어 속도를 측정한다. 현장 시추공 상태에서 암반에 지중 응력이 작용한다는 점 때문에 본 실험에서는 측 방향응력을 최대 11MPa까지 증가 시키며 속도를 측정하였다. 측정된 속도를 식 (1)에 대입하여 동탄성계수를 계산하였다. 단 예외적으로 공주시추공의 깊이 15m 지점의 시편의 경우 심한 풍화로 인하여 측 방향응력을 약 1.7MPa까지만 올리며 시험하였다.

실내 정탄성계수의 측정은 미국 MTS사의 일축압축 시험기(MTS 815 160 ton)를 사용하였다. 현장의 정탄성계수와 용이한 비교를 위해 현장 시험과 비슷한 응력으로 가압과 감압을 반복하여 시편의 변형률을 측정하였다. 단 공주시추공 깊이 15m 지점 시편의 경우 실내 정탄성계수의 측정에 이용 가능한 코어가 없어 실내 정탄성계수는 측정하지 않았다. 측정된 응력-변형률의 관계를 이용하여 가압 및 감압단계의 탄성계수를 계산하였다.

## 실험결과

### 동탄성계수

현장의 PS검층 결과 유성 화강암체에서 P파 속도의 경우 최소 3,846m/s, 최대 5,556m/s, 평균속도는 5,020m/s로 측정되었으며 S파 속도의 경우 최소 1,982m/s, 최대 2,941m/s, 평균속도는 2,433m/s로 측정

Table 1. Basic physical properties of the specimens used in the experiment.

Location	Depth (m)	Rock type	Wet unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	Dry unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	Porosity (%)
Yuseong	23	Granite	26.09±0.04	26.04±0.04	0.50±0.03
	48	Granite	25.62±0.09	25.54±0.10	0.83±0.11
	48	Aplite-dike	26.58±0.13	26.25±0.12	3.35±0.09
Gongju	15	Gneiss	25.20±2.98	24.75±2.77	4.55±2.29
	33	Gneiss	25.92±0.03	25.89±0.03	0.29±0.06

되었다. 이를 통해 계산된 탄성계수는 최소 28.9GPa에서 최대 55.7GPa의 범위로 나타나며(Fig. 1) 평균 42.0GPa, 표준편차는 8.0GPa로 다소 그 폭이 크게 나타났다. 특히 암상의 경계구간(27-30m, 36m, 45m 등)에서 큰 편차를 나타내는 점으로 볼 때 측정 구간 사이에 간헐적으로 관입한 aplite 암맥의 영향이 큰 편차를 보이는 주된 요인 중의 하나로 생각된다(Fig. 1(a)).

공주 편마암체에서 P파의 평균속도는 깊이 27m를 경계로 상부는 4,111m/s, 하부는 5,328m/s, S파의 경우는 각각 1,997m/s, 2,950m/s 그리고 탄성계수는 각각 29.3GPa, 60.8GPa로 큰 차이를 보이고 있다. 이는 시추 코어에서 확인된 암반의 풍화정도와 일관된 결과이다. 풍화정도가 상대적으로 큰 심도 27m 상부의 암반에서는 낮은 값의 속도 및 탄성계수를 보여주며 깊이 27m 하부의 상대적으로 신선한 암석에서는 비교적 높은 속도

및 탄성계수를 보인다(Fig. 1(b)).

전체적인 PS검층 결과를 종합해보면 현장암반의 탄성계수에 대한 대표성은 좋으나 부분적으로 측정 위치에 따른 암석 이외의 요소, 즉 균열, (암)맥 등에 의해 값이 크게 달라지므로 큰 편차를 나타낸다. 따라서 PS검층을 통해 측정암반자체의 대표적인 탄성계수를 정하는 것은 쉽지 않더라도 암종의 변화, 풍화정도, 불연속면의 위치를 대략적으로 신속히 알 수 있다는 장점이 있다.

실내에서 초음파속도로 측정된 탄성파의 속도를 Fig. 2(화강암)와 Fig. 3(편마암)에 도시하였다. 유성시추공의 깊이 48m 지점의 경우 화강암과 aplite dike가 혼재하고 있어 정확성을 향상시키기 위해 두 암석 모두 시편을 제작하여 속도를 측정하였다. P파 속도의 측정 결과 심도에 관계없이 화강암시편의 속도는 유사한데 반해 aplite dike 시편의 경우 화강암의 P파 속도보다 약 1,000m/s

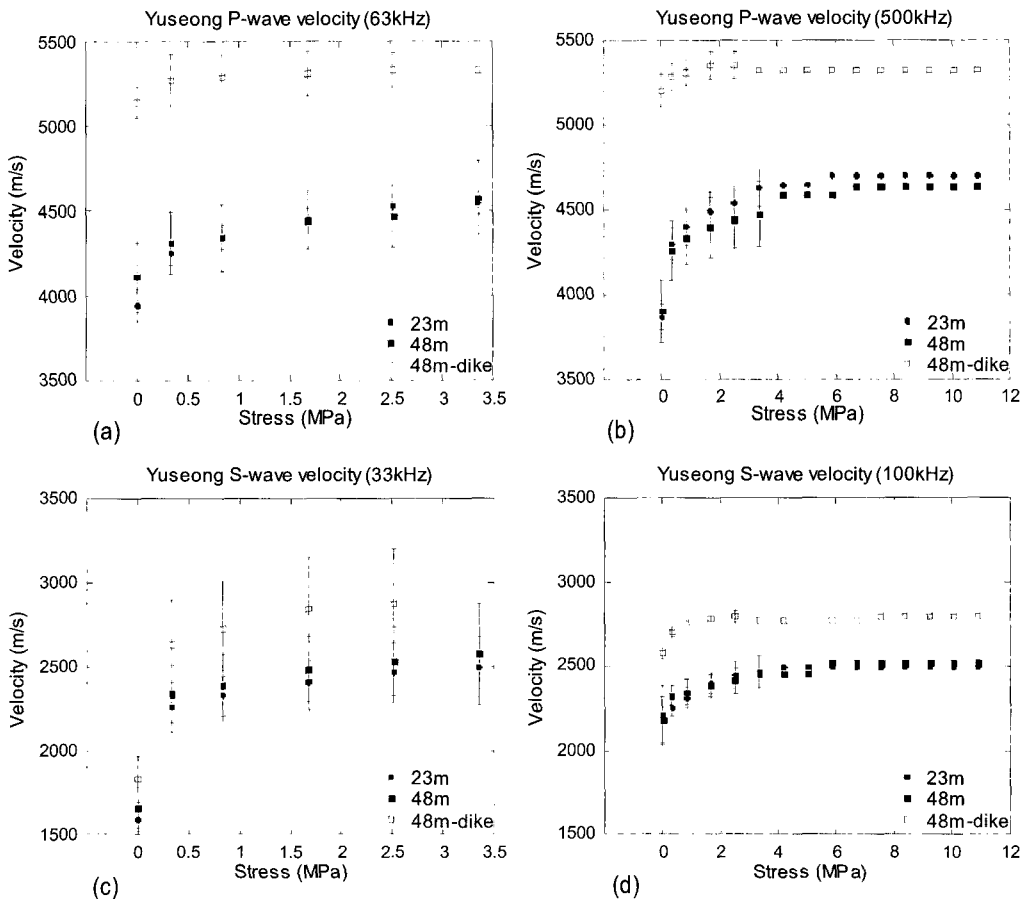


Fig. 2. Laboratory P and S wave velocities of Yuseong granite as a function of axial stress applied.

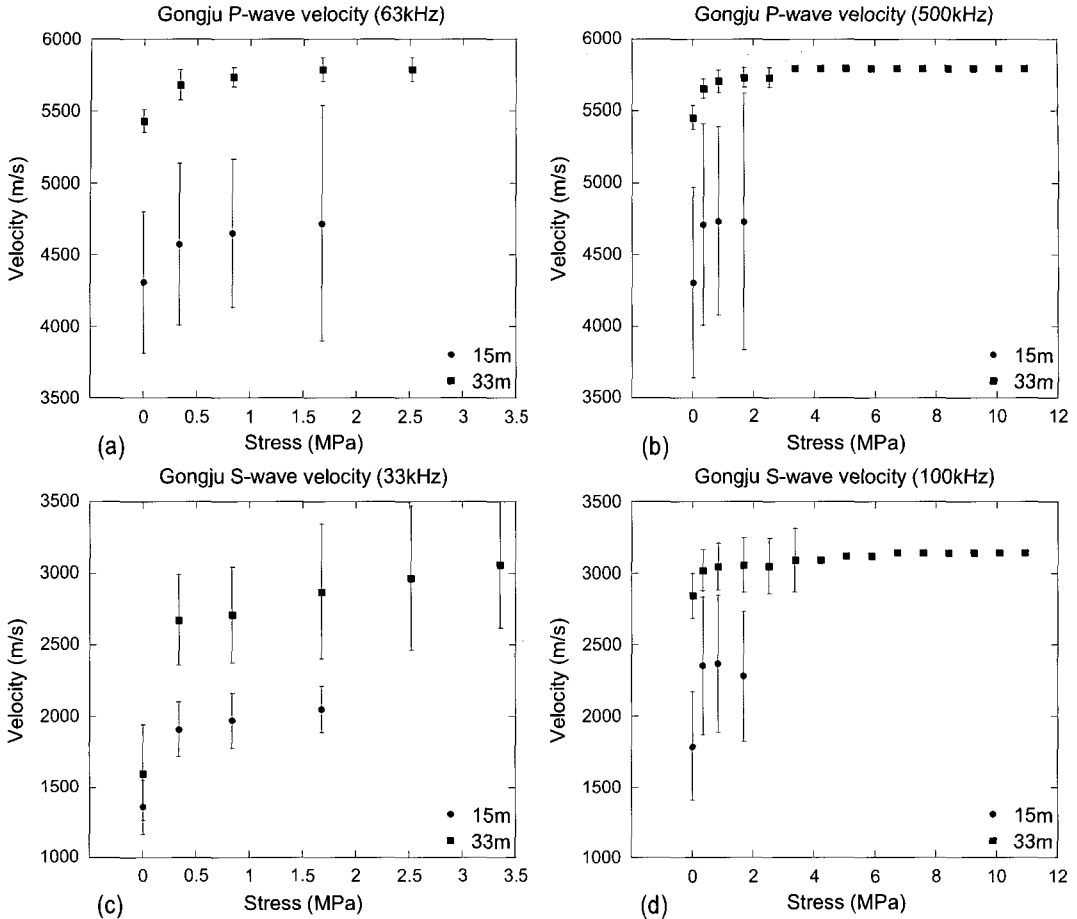


Fig. 3. Laboratory P and S wave velocities of Gongju gneiss as a function of axial stress applied.

정도 빠른 속도를 보이고 있다. (Fig. 2(a), (b)). S파 속도 역시 화강암시편의 경우 서로 유사한 반면 aplite dike 시편의 속도는 250-500m/s 정도 빠르게 측정되었다 (Fig. 2(c), (d)).

화강암의 경우에는 약 1MPa까지 P, S파 속도가 급격하게 증가하며 그 이상의 응력에서는 응력이 높아짐에 따라 점차 완만하게 증가하거나 거의 일정하게 유지되었다(Fig. 2). 그러나 aplite dike 시편의 경우에는 P파 속도가 약 0.5MPa 이상에서 거의 일정하게 유지되었다. 이렇게 응력이 증가함에 따라 탄성파 속도가 점차 완만해지거나 일정하게 유지되는 이유는 미세균열과 공극이 응력이 증가함에 따라 점차 닫히고 일정 응력 이상에서는 그러한 정도가 현저히 줄어들기 때문이다(Johnston and Toksöz, 1980; King, 1983; Plona and Cook, 1995; Mashinski, 2004). 이 현상은 이후에 정탄성계수 측정을

위해 이용한 응력-변형률의 관계에서 보다 자세히 설명할 것이다.

공주편마암의 경우 풍화정도가 높은 깊이 15m 지점 시편은 그 속도에 있어 현저히 큰 편차를 보이며, 대체로 깊이 33m 지점 시편은 그 편차가 깊이 15m 지점 시편보다 상대적으로 작게 측정되었다. 이는 15m 지점 시편의 경우 외관 부분만을 고정했기 때문에 발생한 편차가 크기 때문으로 보여진다. 예외로 Fig. 3(c)에서 관찰되는 33m 심도 시편의 큰 편차는 다른 측정 주파수에 비해 상대적으로 낮은 주파수인 33kHz를 이용하여 측정하여 발생한 것으로 생각되며 이러한 큰 편차는 유성지역 시편의 시험결과에서도 관찰된다(Fig. 2(c)).

공주 편마암의 응력 증가에 따른 속도변화는 유성 화강암의 경우와 정성적으로 유사하여 1MPa까지 P, S파 속도가 급격히 증가하며 그 이상의 응력에서는 점차 완

만하게 증가하거나 거의 일정하게 유지된다(Fig. 3). 깊이 33m 지점 시편의 P파 속도는 측정 주파수에 상관없이 무응력 상태에서 약 5,400m/s를 보이고 있고 응력이 증가함에 따라 그 속도가 점차 증가하였다(Fig. 3(a), (b)). 응력이 10MPa 증가함에 따라 약 6% 정도의 P파 속도 증가를 보였다. S파의 경우에는 무응력 상태에서 주파수 33kHz를 사용한 속도가 약 1,600m/s로 주파수 100kHz를 사용한 속도 약 2,850m/s에 비해 현저히 낮은 속도를 보이고 있으나 응력이 점차 증가함에 따라 이러한 두 주파수 간의 속도 차이가 급격히 감소함을 볼 수 있다(Fig. 3(c), (d)).

탄성파속도에 대한 주파수의 영향을 고려할 때 동일한 주파수 조의 P파와 S파의 속도를 이용해야 좀 더 정확한 탄성계수를 얻을 수 있으나 보유 장비의 한계로 인해 본 연구에서는 상대적인 고주파와 저주파로 나누어 동탄성계수를 계산하였다. 저주파 탄성계수는 63kHz의

P파 속도와 33kHz의 S파 속도를 이용하여 계산하고 고주파 탄성계수는 500kHz의 P파와 100kHz의 S파 속도를 이용하여 계산하였으며 그 결과를 Fig. 4에 도시하였다.

유성 23m 심도의 화강암 시편에서는 무응력 상태에서 고주파 탄성계수(32.5GPa)가 저주파 탄성계수(19.0GPa)에 비해 약 13.5GPa 크게 관찰되나 이후 응력이 증가함에 따라 주파수의 영향이 관찰되지 않는다. 이러한 현상은 유성 48m 심도의 화강암 시편에서도 나타나 무응력 상태에서 고주파 탄성계수가 저주파 탄성계수에 비해 약 11GPa 크게 관찰되고 응력이 증가함에 따라 그 차이가 감소하며 심지어는 오히려 저주파 탄성계수가 1-3GPa 정도 더 크게 나타나는 양상도 관찰되었다.

공주 편마암 시편의 탄성계수에 대한 주파수의 영향은 유성지역의 시편의 경우에 비해 훨씬 더 명확히 나타

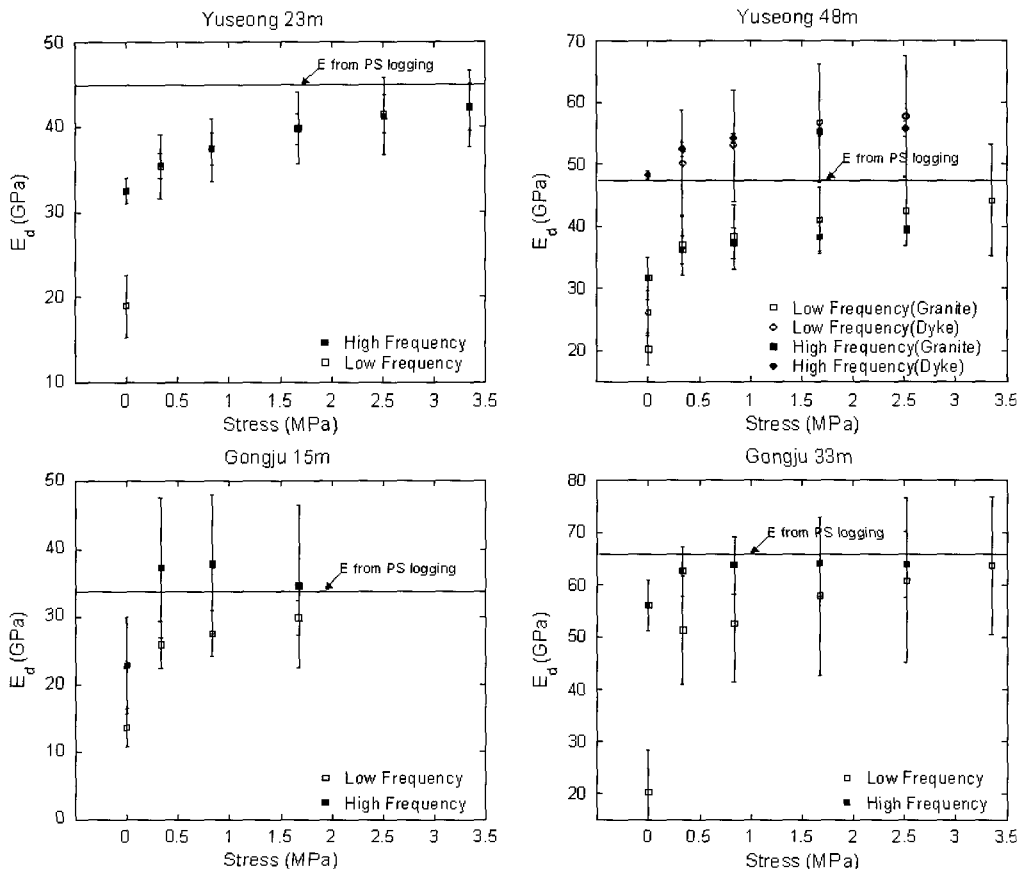


Fig. 4. Laboratory dynamic Young's moduli ( $E_d$ ) determined from ultrasonic velocity measurements as a function of axial stress applied. In situ Young's moduli determined from PS well logging are indicated by horizontal solid lines.

Table 2. In situ static Young's moduli determined from Goodman jack tests.

Loading/unloading condition		Young's modulus (GPa)			
		Yuseong granite		Gongju gneiss	
		23m	48m	15m	33m
1st	loading	6.0	6.8	1.3	6.7
	unloading	21.3	12.6	4.4	9.9
2nd	loading	12.4	12.2	2.5	15.0
	unloading	24.1	46.8	3.4	27.1
3rd	loading	21.2	30.7	2.9	22.0
	unloading	19.5	35.2	2.8	26.7
Average	loading	13.2±7.6	16.6±12.5	2.2±0.8	14.6±7.7
	unloading	21.6±2.3	31.5±17.4	3.5±0.8	21.2±9.8

난다. 공주 15 m 심도의 편마암 시편은 고주파수 탄성계수가 저주파수 탄성계수에 비해 응력의 크기에 상관없이 5-11GPa 정도 크게 관찰되었다. 33 m 심도의 편마암 시편에서는 무응력 상태에서 고주파수 탄성계수가 저주파수 탄성계수에 비해 약 36GPa의 큰 차이를 보이고 있으며 약간의 응력의 작용에 의해서도 그 차이는 현저히 감소함을 보였다. 이후 2.5MPa의 축응력에서는 약 3.1GPa로 그 차이가 점차 줄어드는 경향이 관찰되었다. 응력에 대한 탄성계수의 변화는 탄성파속도의 그것과 비슷한 경향을 보여서 주파수에 관계없이 1MPa의 응력까지 탄성계수의 증가율이 높지만 이후 응력이 증가함에 따라 점차 완만해지거나 일정하게 유지된다.

현장 및 실내에서 측정된 동탄성계수를 비교하기 위해 암석코어 시편의 위치에서 상·하 1m(총 2m 구간)의 범위에 해당하는 현장 동탄성계수 값을 Fig. 4에 도시하였다. 실내에서 측정된 동탄성계수는 유성화강암지역의 48m 심도를 제외하고 응력을 증가시키기에 따라 현장의 그것과 비슷해져가는 경향을 보이고 있다. 유성화강암 지역의 48m 심도 화강암시편의 탄성계수는 동일 심도의 현장 동탄성계수에 비해 상대적으로 작고 aplite dike 시편의 경우에는 그와 반대로 현장 동탄성계수에 비해 상대적으로 크다는 점을 고려하면 48m 심도의 경우와 다른 심도에서와 유사한 경향을 가질 것으로 예상된다.

### 정탄성계수

현장의 정탄성계수를 측정하기 위한 Goodman jack 시험 결과를 Fig. 5에 도시하였으며 이를 통해 구해진 탄

성계수를 Table 2에 요약하였다. 현장에서 측정된 정탄성계수는 각각의 심도에서 총 세 번의 가압과 감압을 통해 측정되었다. Fig. 5에 보이는 기울기, 즉 유압의 변화율에 대한 공경의 변화율은 탄성계수와 비례한다(식(2) 참조). 전체적으로 가압단계의 탄성계수가 감압단계의 탄성계수보다 낮게 측정되는데 이는 균열(절리, 공극, 미세크랙 등)에 의하여 암반거동이 연직 탄성을 벗어나 강한 hysteresis를 보이기 때문이다(Plona and Cook, 1995, Mashinskii, 2004). 압력-공경 기울기의 변화를 통해 탄성계수는 압력이 증가함에 따라 커지는 경향을 관찰할 수 있는데 특히 이러한 경향은 가압단계에서 두드러지게 나타났다. 예를 들어 유성 48m 심도의 결과의 경우(Fig. 5(b)), 최초 가압시(5-25MPa) 평균 탄성계수는 약 6.8GPa이며 두 번째 가압시(5-35MPa) 탄성계수는 이보다 약 1.8배 상승한 12.2GPa, 세 번째 가압시(5-45MPa) 탄성계수는 두 번째 가압시 측정된 탄성계수에 비해 약 2.5배 크게 측정된 30.7GPa를 보였다. 이러한 압력변화에 따른 탄성계수의 증가 이유는 앞서 설명한 압력에 따른 균열의 거동변화에 의한 것으로 유압이 증가함에 따라 이전에 존재하는 균열들이 닫히고 지속적으로 유압이 증가함에 따라 그 수가 현저히 감소하기 때문에 발생하게 된다. 압력증가에 따라 가압시 탄성계수는 점차적으로 감압단계의 그것에 접근하는 경향을 보인다. 유성 상부와 하부에서의 평균 탄성계수는 최대 10GPa의 차이를 보이는데 모암 자체의 차이와 함께 48m 심도에 관입한 aplite의 영향이 감압단계의 탄성계수에 반영된 것으로 생각된다.

이 같은 현장조건의 반영은 균열정도가 매우 큰 공주



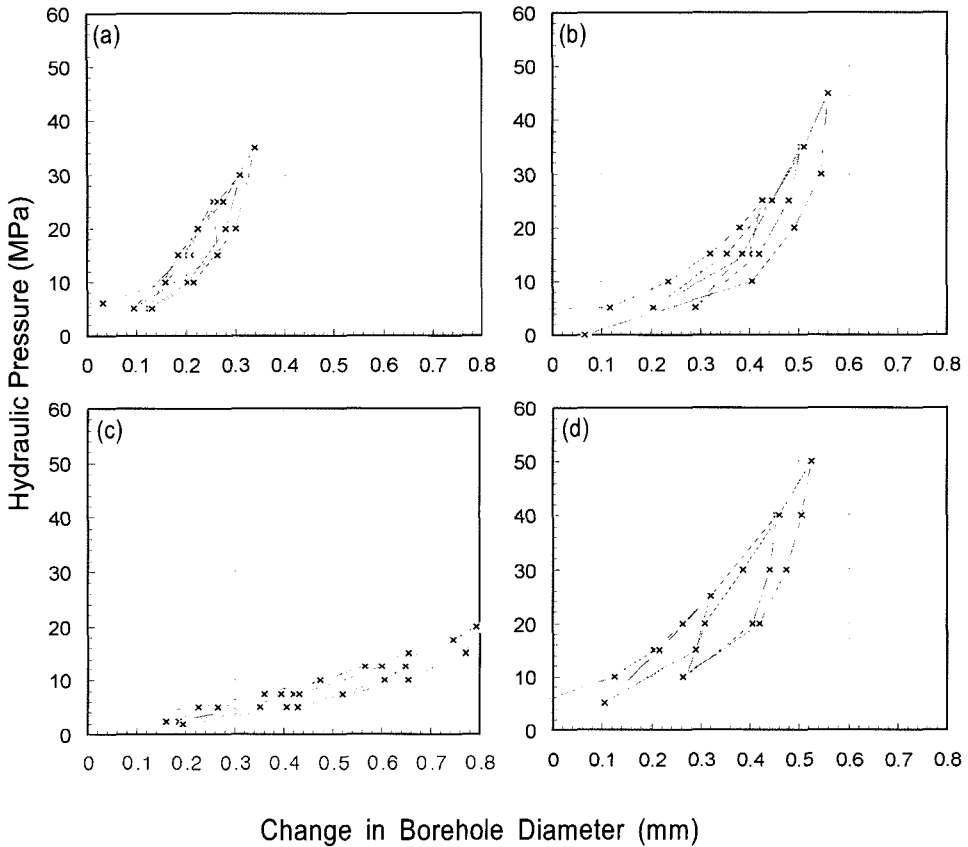


Fig. 5. Relation between the change in hole diameter and hydraulic pressure during Goodman jack test in situ. Results at a depth of 23 m (a) and 48 m (b) in Yuseong, and at a depth of 15 m (c) and 33 m (d) in Gongju.

편마암체의 15m 심도와 상대적으로 신선한 33m 심도의 비교에서 보다 명확히 관찰되는데 특히 15m 심도 풍화 편마암의 경우는 낮은 유압에도 불구하고 장비의 공경 측정범위 한계로 인해 더 높은 유압(다른 위치와 비교하여 30 MPa 이상)을 가하지 못하였기 때문에 상대적으로 낮은 유압 하에서 시험이 수행된 경우이다. 이렇게 상대적으로 낮은 유압 하에서 측정하게 되면 탄성계수에 대한 균열의 영향이 매우 크게 나타나 더욱 낮은 탄성계수 측정치를 얻게 된다.

실내에서 정탄성계수를 측정하기 위해 수행한 일축 압축변형시험의 결과를 Fig. 6에 도시하고 Table 3에 요약하였다. 공주 15m 심도의 편마암 시험은 일축압축변형시험이 불가능할 정도로 심하게 풍화되어 있어 측정을 하지 않았다. 일반적으로 실내 실험에서의 암석 변형계수는 암석강도의 50% 수준의 응력에서의 점선탄성계

수를 의미하지만(한국암반공학회, 2005) 본 연구에서는 현장 Goodman jack시험 결과와의 비교를 위하여 매 10-20MPa 간격으로 가압과 감압을 반복하여 각 cycle별로 측정을 수행하였다.

응력-변형을 관계는 Goodman jack시험에서 압력-공경변화관계와 유사한 경향을 보여 응력이 증가함에 따라 급격한 탄성계수의 증가를 관찰할 수 있다(Fig. 6). 모든 시험에서 감압과 재가압 단계에서 구해진 탄성계수에 있어 큰 차이를 보이지 않는 가운데 초기 가압 상태에서 구해진 탄성계수는 감압 탄성계수에 비해 항상 낮은 값을 보인다. 암석의 종류에 상관없이 가압/감압 탄성계수비는 약 0.7-0.9를 유지하며 응력이 높아짐에 따라 다소 그 비율이 커짐을 관찰하였다. 이러한 현상은 앞서 설명한 바와 같이 응력 증가에 따른 미세균열의 닫힘 현상이 초기 가압 단계에서만 집중적으로 발생하여(Brace, 1965)

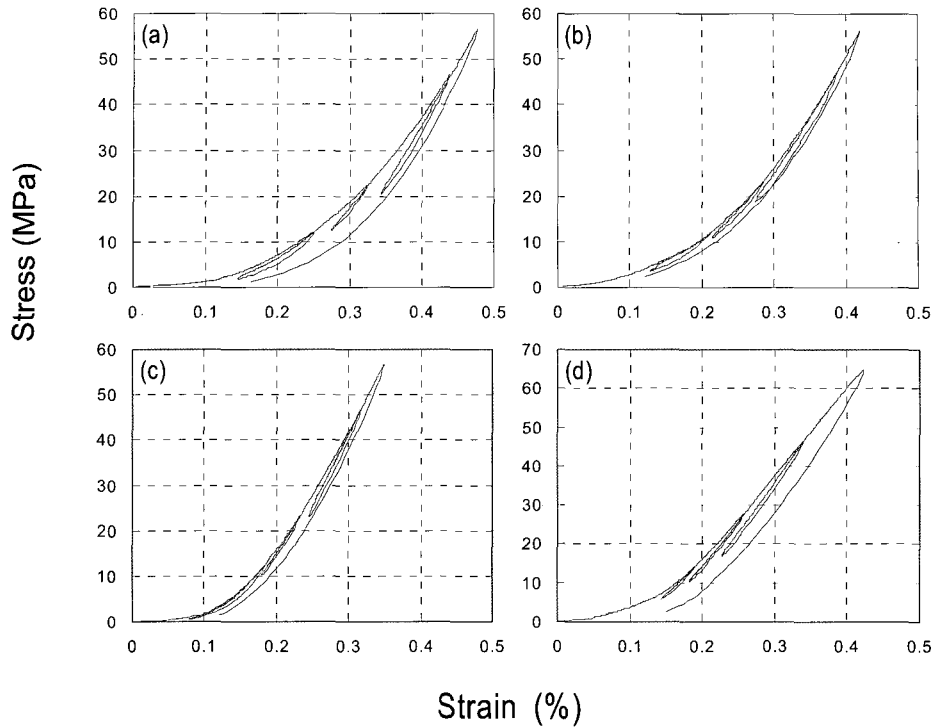


Fig. 6. Stress-strain relations determined from laboratory uniaxial compression tests: (a) granite specimen at a depth of 23 m in Yuseong, (b) granite specimen at a depth of 48 m in Yuseong, (c) aplite dike specimen at a depth of 48 m in Yuseong, (d) gneiss specimen at depth 33 m in Gongju

Table 3. Laboratory static Young's moduli determined from uniaxial loading tests.

Loading/unloading condition		Young's modulus (GPa)		
		Yuseong		Gongju
		Granite 23m	Granite 48m (aplite)	Gneiss 32m
1st cycle	loading	7.4	7.8 (12.9)	8.6
	unloading	9.5	10.0 (16.3)	19.1
	reloading	9.4	9.7 (12.7)	17.5
2nd cycle	loading	15.5	14.1 (22.7)	20.6
	unloading	20.6	17.2 (25.2)	22.7
	reloading	19.4	17.2 (24.2)	22.6
3rd cycle	loading	23.7	21.3 (28.1)	23.1
	unloading	26.8	24.7 (32.2)	25.9
	reloading	26.4	24.7 (31.9)	25.8
4th cycle	loading	28.1	27.2 (30.5)	22.3
	unloading	33.0	35.3 (36.6)	32.9
	reloading	-	-	-
loading (average)		24.0±3.5	26.2±4.7	23.5±1.6
unloading (average)		27.0±7.9	27.9±7.2	27.1±5.3

응력 증가에 따라 가압 변형계수가 고체암석의 탄성계수인 감압 탄성계수에 점차적으로 접근함을 의미한다.

일반적으로 일정한 연직탄성을 지시하는 응력-변형률의 기울기에 도달하기 전의 초기의 기울기, 즉 상대적으로 낮은 탄성계수를 지시하는 구간은 시편 내에 이미 존재하는 미세균열이 응력에 의해 닫히는 구간으로 알려져 있다(Brace, 1965). Aplite dike 시편의 결과를 관찰하면 다른 시편에 비해 상대적으로 낮은 응력 하에서 미세균열이 닫히는, 즉 연직탄성구간이 다른 시편에 비해 낮은 축응력에서 시작되는 것을 볼 수 있다(Fig. 6). 이러한 특징은 실내에서 측정된 초음파 속도측정의 결과에서 aplite 시편이 다른 시편에 비해 낮은 0.5MPa의 축응력에서 속도가 일정해 지는 현상과 부합한다.

### 토의

#### 동-정탄성계수의 관계

일반적으로 지질공학적 목적을 위해 사용되는 탄성계수는 현장암반의 정탄성계수이다. 그럼에도 불구하고 비교적 넓은 범위를 신속하게 측정할 수 있다는 장점 때문에 동적인 방법이 흔히 사용되고 있다. 또한 실내 비파괴 시험의 목적으로 초음파 속도 혹은 여타 다른 방법의 동적인 방법을 이용하게 된다. 따라서 동탄성계수로부터 정탄성계수를 유추할 수 있는 일련의 상관관계를 밝히는 것은 지질공학적으로 매우 중요하다.

지금까지 현장 및 실내에서 규명된 일련의 탄성계수

를 종합하여 정리하면 Table 4와 같다. 이미 알려진 바와 같이 전체적으로 동탄성계수가 정탄성계수에 비해 크게 측정되었다. 측정 방법이나 조건에 따라 동탄성계수가 정탄성계수에 비해 1.5-4.6배 크게 측정되었으며 풍화정도가 큰 천부 공주 편마암의 경우에는 8.5배에서 최대 17배까지도 그 차이가 매우 크게 나타났다. 이 현상은 균열의 영향이 동탄성계수보다 정탄성계수에서 더 크게 나타난다는 점을 시사하며 이전의 연구 결과들과 일치한다(Lama and Vutukuri, 1978; Cheng and Johnston, 1981; King, 1983). 또한 실내에서 초음파속도로 측정된 동탄성계수가 1MPa 이상의 응력에서 그 값이 대체적으로 일정한 것에 비해 일축압축변형으로 측정된 정탄성계수는 10MPa 이상의 응력에서도 그 값이 상당히 증가하는 경향을 보이는 것과도 의미상으로 부합된다(Fig. 4와 Fig. 6).

암종별 동탄성계수/정탄성계수의 비는 aplite 시편에서 1.8-2, 화강암에서 1.5 -3.4, 편마암에서 2.4-4.6으로 편마암에서 다소 큰 것으로 나타났다(Table 4). 편리와 호상구조 등의 이방성을 갖는 편마암의 경우 측정 방향에 따라 동·정탄성계수 모두에서 현저한 편차를 띠게 되는데(박형동, 1995; 김영화외, 1997; 강동효외, 2000) 이러한 이방성의 영향이 편마암에서의 상대적으로 큰 동/정탄성계수 비와 관계있는지는 확실하지 않다.

동탄성계수와 정탄성계수의 차이를 좀 더 체계적으로 설명하기 위하여 측정시 이용한 주파수대의 영향을 고려할 수 있다. 탄성계수에 대한 측정 주파수의 영향은 암석 내에 존재하는 공극유체의 변형 주파수에 따른 차

Table 4. Summary of test results.

Location and/or depth	Static Young's modulus (GPa)		Dynamic Young's modulus (GPa)		
	Goodman jack, unloading (loading)	Uniaxial test <sup>1</sup> unloading/loading)	PS well logging	Ultrasonic velocity <sup>2</sup>	
Yuseong	23m	21.6 (13.2)	27.0 (24.0)	45.1	42.3
	48m	31.5 (16.6)	27.9 (26.2)	47.8	41.8
	48m-aplite		30.9 (29.0)		56.7
Gongju	15m	3.5 (2.2)	-	33.4	32.2
	33m	21.2 (14.6)	27.1 (23.5)	66.4	63.9

<sup>1</sup> Data from 1st cycle excluded

<sup>2</sup> Moduli determined under stress larger than 3 MPa

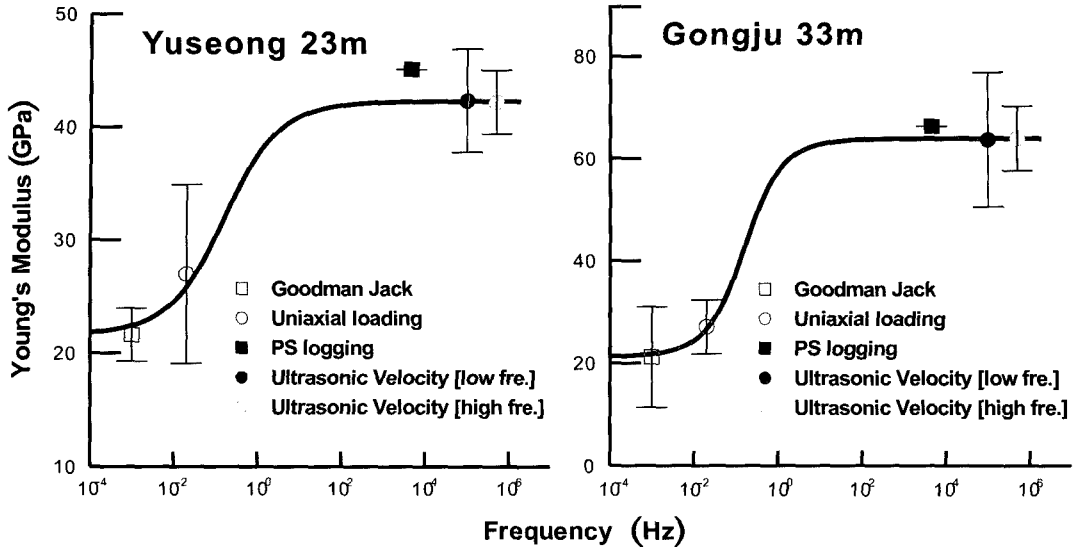


Fig. 7. Young's Moduli as a function of frequency, overlapped with the theoretical modulus-frequency relation suggested by Spencer (1981).

이(Spencer, 1981, Dvorkin et al., 1995, Batzle et al., 2001)나 변형의 진폭에 따른 차이(Mashinskii, 2003; 2004) 등으로 설명된다. 이러한 이론적 틀에 대한 검증은 본 연구의 취지 밖의 범위이나 탄성계수에 대한 주파수의 현상적인 효과를 검토하기 위하여 Spencer(1981)가 제안한 방법을 이용하여 본 연구에서 규명된 결과를 도시하였다(Fig. 7). Goodman jack 시험과 일축압축 시험에서 측정된 정탄성계수의 측정 주파수는 한 번의 감압과 가압을 1회의 주기로 계산하였으며 PS 검층과 실내 초음파 속도측정은 각각의 중심 주파수를 기준으로 도시하였다. Fig. 7에 보이듯이 PS 검층으로 측정된 현장압반의 동탄성계수가 실내 동탄성계수에 비해 다소 높게 측정되었으나 대체적으로 이론에 의해 제시된 바와 잘 부합한다. 그러나 실내에서 측정된 탄성계수는 건조된 시편을 이용하여 얻어졌으므로 Spencer(1981)가 제안한 이론으로 원론적인 주파수 영향을 설명할 수는 없다.

Mashinskii(2003; 2004)는 암석의 점탄성(viscoelastic) 변형에 의해 측정 주파수의 증가가 탄성계수의 증가를 유발한다고 보았으며 미소성(microplastic)이 변형의 진폭과 관계있다고 보고한 바 있다. 변형이나 응력의 변화가 없으면 미소성이 발생하지 않으므로 변형의 진폭이 작을수록 탄성계수가 증가하는 현상이 초래된다. 본 연구에서 수행된 실내 탄성계수 측정이 건조 시편에 대해 이루어졌음에도 상당한 주파수에 따른 탄

성계수 분산효과를 보이는 이유는 잠정적으로 이러한 변형 진폭의 효과일 가능성으로 생각된다.

### 실내측정과 현장측정의 관계

현장에서 탄성계수의 직접적인 측정이 불가능하거나 수행하기 힘들 경우, 현장압반의 시편을 사용한 실내 시험으로 동·정탄성계수를 측정하게 된다. 하지만 일반적으로 현장압반은 지중응력을 받고 있으며 큰 규모의 균열들을 포함할 가능성이 큰 반면, 실내에서 이용하는 시편은 현장압반의 극히 일부분, 그중에서도 주로 무결압인 경우가 대부분이므로 그에 따른 탄성계수의 차이가 발생할 수 있다.

현장압반이 지중응력을 받고 있음으로 발생하는 차이는 실내 초음파 속도도 계산된 동탄성계수에서 잘 나타난다. 측정시 이용한 주파수의 범위에 관계없이 응력이 증가함에 따라 초음파속도는 증가하며 점차로 현장에서 PS 검층으로 측정된 탄성계수에 접근하는 경향을 보인다(Fig. 4). 즉 지반공학적인 측면에서 볼 때 현장압반이 지중 응력을 받고 있는 상태라는 점을 고려하여 시편을 이용한 실내 측정의 경우 최대한 현장의 응력상태를 반영한 상태의 조건에서 측정하는 것이 유리하다.

현장압반의 일부분만을 실내시험 시편으로 이용할 때 발생하는 문제는 본 연구에서 화강암과 aplite dike가

혼재하고 있는 유성 화강암 48m 심도의 경우에 잘 나타난다. 화강암시편의 실내 동·정탄성계수는 모두 현장 값보다 약 6GPa 정도 작게 측정되었으며 aplite 시편의 탄성계수는 현장 값보다 9GPa 크거나 거의 비슷하게 측정되었다(Table 2, Table 3과 Fig. 4(b)). 즉, 현장에서 측정된 탄성계수는 혼재된 두 암석의 영향을 모두 받은 것으로서 이러한 오차를 줄이기 위해서는 측정시편의 수를 늘려 암종별 시험을 수행하는 것이 유리하다.

현장에서 Goodman jack 시험을 통해 측정된 현장 정탄성계수는 현장 PS검층과 마찬가지로 현장 자체의 특징을 포함하여 측정되고 시편을 이용하여 일축압축변형을 통해 측정된 실내 정탄성계수는 암석학적인 특징을 포함하고 있다. 하지만 시편을 이용한 측정의 경우 시편 제작이 불가능할 경우 측정 자체가 불가능하므로 풍화 지역이나 균열이 심한지역의 실내 시험은 매우 어렵거나 연속적인 측정과 이론적인 식을 바탕으로 측정 자체의 신뢰도는 매우 높다. 현장에서 Goodman jack 시험을 통해 측정된 정탄성계수는 이론식(식 (2)) 뿐 만 아니라 경험식(식 (3))을 이용하여 계산되는 점 때문에 오차가 발생할 수 있으며 시추공 내의 정해진 구간이 아닌 특정 위치를 측정하게 되므로 암석이외의 균열, 암맥 등의 분포에 따라 그 값이 달라질 수 있다. 이러한 문제점으로 발생하는 오차를 줄이기 위해서는 측정 전에 Goodman jack 시험의 정확한 측정 및 보정 방법, 주상도 등의 정보를 사전에 파악하는 것이 중요하다.

## 결 론

본 연구에서는 국내의 대표적 암종이라 할 수 있는 대전시 유성구에 분포하는 화강암체와 충남 공주시에 분포하는 편마암체에 대하여 현장 및 실내에서 탄성계수의 측정에 널리 쓰이는 네 가지 대표적인 방법을 선별하여 탄성계수를 측정하고 비교 고찰 하였다. 본 연구에서 검토한 각 방법별 탄성계수의 차이는 크게 다음의 두 가지로 요약된다.

(1) 측정시 이용된 응력의 변화에 따른 차이: 응력 증가에 따른 미세균열의 닫힘 현상에 의해 탄성계수가 증가하며 특히 정탄성계수에 대한 영향이 크다. 특히 가압시에 발생하는 미세균열의 닫힘이나 전단 현상에 의해 탄성계수가 증가하며 감압시에 비복원 변형에 의해 가압/감압 탄성계수의 차이가 크게 발생하게 된다.

(2) 측정시 이용한 주파수대에 의한 차이: 궁극적으로 각 탄성계수 측정법은 고유한 측정 주파수대에 따라 분

류할 수 있으며 대체로 주파수대가 높아질수록 탄성계수는 커지게 된다. 이러한 주파수에 따른 탄성계수의 분산효과는 정탄성계수와 동탄성계수의 차이를 설명할 수 있으며 화강암이나 편마암 같은 경암의 경우에는 변형의 진폭 효과가 그 주된 메커니즘으로 작용한 것으로 보여진다.

현실적으로 산업계에서 암반의 변형특성의 측정은 비용 및 시간문제로 인해 다양한 측정방법을 이용하기 보다는 제한된 종류의 방법을 선별하여 측정하고 있는 실정이다. 국내에는 아직 각 방법별 탄성계수 간의 상호관계를 검증하는 연구가 미흡해왔다는 점에서 본 연구가 최소한의 도움이 될 것으로 기대한다.

## 사 사

본 연구를 하는데 여러 기기를 사용하게 해주신 지오틱컨설턴트 원경식 사장님과 윤건신 박사님, 수자원연구원 김형수 박사님, 지질자원연구원 박찬 박사님께 감사드립니다. 이 논문은 2004년도 충남대학교 자체 연구비의 지원에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

강동효, 정태중, 이정모, 2000, 익산 유라기 화강암의 정 및 동탄성학적 특성, 지구물리, 3(2), 99-112.  
 김영화, 장보안, 김재동, 이찬구, 문병관, 1997, 압축로에 의한 포천화강암의 P파속도 변화 특성, Econ. Environ. Geol., 30(3), 231-240.  
 박형동, 1995, 암석의 공학적 이방성 측정을 위한 실험실내 P파속도 측정기법에 대한 연구, The Journal of Engineering Geology, 5(3), 237-247.  
 박충화, 박종오, 송무영, 2002, 시추공 물리탐사를 이용한 동탄성계수와 암상과의 상관성 분석, 한국지구과학회지, 23(6), 127-135.  
 송무영, 김환석, 박종오, 2002, 시추공 물리탐사를 통한 지반물성과 암상과의 상관성 분석, 대한지질공학회지, 12(2), 127-135.  
 오선환, 김형수, 장보안, 서만철, 2000, 시멘트 모르타르 재료의 동탄성계수와 정탄성계수 비교 연구, 지구물리, 3(2), 127-138.  
 장현식, 장보안, 한원준, 2005, 화성암 및 변성암의 물리적·역학적 특성 연구, 대한지질공학회 학술발표회지, 37-49.  
 한국암반공학회, 2005, 암석의 탄성상수 측정 표준시험법, 한국암반공학회지, 15(6), 387-390.

- Batzle, M., Hofmann, R., Han, D., Castagna, J., 2001, Fluids and frequency dependent seismic velocity of rocks, *The Leading Edge*, 20(2), 168-171.
- Brace, W. F., 1965, Some new measurement of linear compressibility of rocks, *Journal of Geophysical Research*, 70(2), 391-398.
- Cheng, C.H., Johnston, D.H., 1981, Dynamic and static moduli, *Geophysical Research Letters*, 8(1), 39-42.
- Ciccotti, M., Mulargia, F., 2004, Differences between static and dynamic elastic moduli of a typical seismogenic rock, *Geophys. J. Int.*, 157, 474-477.
- Dvorkin, J., Mavko, G., Nur, A., 1995, Squirt flow in fully saturates rocks, *Geophysics*, 60(1), 97-107.
- Eissa, E.A., Kazi, A., 1988, Relation between static and dynamic Young's moduli of rocks, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 25(6), 479-482.
- Göbel, I.R., Ranft, M., 2001, The ratio of dynamic and static Young's moduli - measurements in distributed rock in the laboratory and in situ, *Elsworth, Tinucci & Heasley (eds), Proceedings of the 38th U.S. Rock Mechanics Symposium*, 1245-1248.
- Heuze, F.E., 1984, Suggested method for estimating the in situ modulus of deformation of rock using the NX-borehole jack, *Geotechnical Testing Journal*, 7(4), 205-210.
- Johnston, D.H., Toksöz M.N., 1980, Ultrasonic P and S wave attenuation in dry and saturated rocks under pressure, *J. Geophys. Res.*, 85(B2), 925-936.
- King, M.S., 1983, Static and dynamic elastic properties of rocks from the Canadian Shield, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 20(5), 237-241.
- Lama, R.D., Vutukuri, V.S., 1978 *Hand Book on Mechanical Properties of Rocks: vol. 2*, Trans Tech Publications, 236-307.
- Mashinskii, E.I., 2004, Variants of the strain-amplitude dependence of elastic wave velocities in rocks under pressure, *Journal of Geophysics and Engineering*, 1(4), 295-306.
- Plona, T.J., Cook, J.M., 1995, Effects of stress cycle on static and dynamic Young's moduli in Castlegate sandstone, *Rock Mechanics, Daemen & Schultz(eds)*, 155-160.
- Simmons, G., Brace, W.F., 1965, Comparison of static and dynamic measurements of compressibility of rocks, *J. Geophys. Res.*, 70(22), 5649-5656.
- Spencer, J.W., 1981, Stress relaxations at low frequency in fluids-saturated rocks: attenuation and modulus dispersion, *J. Geophys. Res.*, 86(B3), 1803-1812.
- Walsh, J.B., 1965, The effects of cracks on the compressibility of rock, *J. Geophys. Res.*, 70(2), 381-389.

투 고 일	2006년	1월	10일
심 사 일	2006년	1월	11일
심사완료일	2006년	3월	3일

---

유근환

한국수자원연구원 댐기술연구소  
305-730 대전광역시 유성구 전민동 462-1  
Tel : 042-860-0332  
Fax : 042-860-0592  
E-mail : s9801005@cnu.ac.kr

장찬동

충남대학교 지구환경과학부  
305-764 대전광역시 유성구 궁동 220  
Tel : 042-821-6430  
Fax : 042-823-5636  
E-mail : cchang@cnu.ac.kr