

자유단 공진시험을 이용한 암석의 탄성계수 측정 Measurements of Elastic Moduli of Rock Cores Using Free-Free Resonance Tests

목영진*
Mok, Young Jin

윤지선**
Yoon, Ji Sun

ABSTRACT

Dynamic measurements are used rather sparingly to determine the elastic moduli of rock cores and modulus values are not much utilized in design practice. The reason seems to result from the general perception that values obtained by dynamic measurement are much higher (about 10 times) than those determined statically. This paper presents results from dynamic and static tests on rock cores. The findings are: 1) elastic moduli can be consistently determined by laboratory seismic testing. 2) nonlinear deformation characteristics of rock cores was tentatively proposed with variation in elastic modulus with strain.

1. 서론

암석의 변형 특성은 정적 압축시험을 수행하여 응력-변형도 곡선으로 나타낸다. 일반적으로 응력-변형도 곡선 상에 최대 압축력 50%인 변형도에서 그은 할선(secant)구배를 탄성계수(Young's modulus)로 정하고 있다. 이러한 탄성계수 측정은 시편제작 숙련도와 사용 감지기의 적합성(종류, 설치방법, 보정계수의 정확도)에 따라 좌우되기 때문에 일관성 있는 자료를 얻으려면 많은 시간과 노력이 필요하다. 또한 암시편의 층리와 엽리 등 불연속면이 있을 경우 압축파괴가 조기에 불연속면을 따라 급격히 일어나므로 응력-변형도 곡선 산정에 어려움이 있다.

한편, 탄성파시험으로부터 일관성 있는 (숙련도에 관계없이) 탄성계수를 매우 쉽게 측정할 수 있다. 다만 탄성파시험으로 측정한 탄성계수에 대한 의구심이 때문에 동탄성계수(dynamic Young's modulus)로 차별화 하여 부르고, 정탄성계수(압축시험)의 약 10배 내외로 큰 것으로 인식되고 있다. 이러한 차이의 큰 원인 중의 하나는 암시편의 변형특성은 비선형이고 두 방법이 각각 서로 다른 변형도(Strain) 범위에서 측정되었기 때문인 것으로 판단된다.

이 논문에서는 탄성파 시험을 통하여 여러 가지 탄성계수(영탄성계수, 구속탄성계수, 전단변형계수)와 포아슨비 산출 방법을 소개하고, 변형도를 고려하여 동탄성계수와 정탄성계수를 비교 검토하고자 한다. 이 논문에 사용된 암석 코어는 충청북도 단양군에 소재한 한 건설 현장에서 그라우팅으로 보강된 석회암 기초 지반에서 채취한 것이다.

* 경희대학교 부교수, 정회원

** 인하대학교 교수

2. 실내 탄성파시험

탄성계수 측정에 두 가지 방법이 적용되고 있다. 직접파 도달시간(direct travel time)측정과 공진(resonance)측정이다. 이 두 측정에 사용하는 압축파가 서로 상이한 것에 주목하여야 한다. 직접파 도달시간 측정에는 횡방향의 구속된 상태에서 전파되는 압축파(V_p 로 표기)를 이용하고, 압축파 속도(또는 P-파속도)는 구속탄성계수(M)에 의해 좌우되고 있다. 한편 공진(resonance)측정에서는 횡방향의 구속되지 않은 상태에 전파되는 압축파(종파와 차별화하여 V_c 로 표기)를 이용하며 종파속도는 영탄성계수(E)와 직접적인 관계가 있다(목영진, 1997).

실내 시험에 사용된 충격해머는 PCB사의 모델 086C80으로 무게가 작고 (1.25gr) 끝이 뾰족해 고주파 충격파를 발생시킬 수 있다. PCB사의 가속도감지기(accelerometer)모델 353B11은 무게 (2.1gr)이고 고주파측정에 알맞게 크기와 무게가 작다. 기록장치로는 HP사의 모델 35670 파형분석기 (dynamic spectrum analyzer)를 사용하였다.

2.1 사용 장비

감지기 본 연구에서 사용한 PCB社(piezotronic, Inc.) 가속도 감지기(accelerometer)모델 353B11의 중요 사양은 다음과 같다.

- 감도(voltage sensitivity) : 5mv/g, g = 중력가속도
- 주파수 범위(frequency range) : 1Hz ~ 30KHz
- 공진 주파수(resonant frequency) : 95KHz
- 감지요소(sensing element) : 석영결정(quartz)
- 크기 : 7.9mm ϕ × 10.9mm
- 무게 : 2.0gm

여기서 암시편의 공진 주파수는 수십 KHz이므로 고주파수 감지기를 선택하였으며, 또한 암시편의 응답곡선이 감지기의 응답 특성에 의한 변질을 최소화하기 위해 무게와 크기가 적은 것을 선택하였다.

충격해머 암시편에 고주파의 종파(longitudinal wave)를 발생시키기 위해 PCB社의 충격해머 (impulse force hammer)모델 086C80을 사용하였다. 암시편의 공진 주파수가 수십 KHz이므로 이에 상응하는 주파수의 충격파를 가하여야 한다. 사용된 hammer의 사양은 다음과 같다.

- 주파수 범위 : 15KHz
- 감도 : 22.5mv/N
- 공진주파수 : 100KHz
- 질량 : 1.25 gram
- 두부직경 : 0.63cm
- 끝직경 : 0.25cm
- 길이 : 96.5cm

이 해머는 무게가 작고 해머 끝이 뾰족해 고주파수의 충격파를 발생시킬 수 있다.

기록장치 기록장치는 감지기에서 들어오는 전기적 신호를 anti-aliasing 필터(filter)를 통과시킨 후 디지털타이저(digitizer)로 디지털 신호로 바꿔 플로피 디스켓(floppy diskette)에 저장한다. 이 연구에 사용된 파형 분석기 (dynamic spectrum analyzer)는 HP-35670이다(그림 8 참조). 이 분석기는 시간대역과 주파수 대역 계측이 가능하다. 주요 기능 및 사양은 다음과 같다.

계측범위 : 64 μ Hz ~ 100 KHz

채널수 : 2채널

해상도(resolution) : 1024 시간대역 디지털 데이터

401 주파수대역 디지털 데이터

주요기능 : 시간대역 진동계측, 주파수 대역 진동계측, 파형연산(waveform math), curve fitter, 응답 스펙트럼 합성(frequency spectrum synthesis), 디지털 필터 등

데이터 호환 : 플로피 디스크 드라이브, 플로터(plotter), DOS-파일(PC)

2.2 P-파 도달시간 측정

암시편의 한 끝면에 압축파를 가하여 반대편 단면에 설치한 감지기에 도달하는 가장 빠른 파가 P-파(구속된 압축파)이다. 두 측정 사이의 거리(암시편의 길이)를 P-파가 감지기에 도달하는 시간으로 나누면 P-파속도가 얻어진다. 이 P-파속도(V_p)로부터 구속탄성계수(M)는 다음과 같이 계산된다.

$$M = \rho V_p^2 \quad (1)$$

여기서 ρ 는 암시편의 단위질량이다. 그림 1은 전형적인 P-파 측정 기록이다. "T"로 표시된 시점이 P-파가 한 끝면에서 출발한 시점이고 "P"로 표기된 점이 반대편 단면에 도달한 시점이다.

2.3 공진 측정

종파 속도 양단이 자유단인 棒狀(cylinder)의 암시편에 종파(횡방향 구속이 없는 압축파)를 가하여 공진이 일어나는 주파수를 측정한다. 이때 일차모드(primary) 공진은 파장이 암시편 길이의 2배인 주파수에서 일어난다. 2차 이상 고차모드에서 공진이 일어나는 파장은 다음 식과 같다 (Richart et. al., 1970).

$$\lambda_N = 2L/N \quad (2)$$

여기서 λ_N 은 N차 모드의 파장이고, L은 암시편의 길이이고 N은 모드수(1, 2, 3, ...)이다. 종파속도 (V_c)는 각 모드의 공진주파수(f_N)와 파장(λ_N)은 측정하여 다음 식으로 계산한다.

$$V_c = f_N \lambda_N \quad (3)$$

이 종파속도(V_c)로부터 탄성계수는 아래와 같이 직접 계산할 수 있다.

$$E = \rho V_c^2 \quad (4)$$

여기서 ρ 는 암시편의 단위질량이다.

가속도 감지기를 한 끝면에 에폭시(epoxy)로 고정하고 반대편 단면에서 충격해머로 종파를 발생시킨다. 종파는 구속되지 않은(unconstrained) 암시편의 길이방향을 따라 양 끝단에 반사되어 왕복운동을 하게된다. 충격하중에 대한 가속도의 비(比)인 전이함수(transfer function)를 파형 분석기를 이용하여 계산한다. 그림 2는 최소 5회 이상 반복 측정하여 평균한 전이함수이다. 보통

1차 모드의 공진 주파수를 이용하여 상기 식으로부터 탄성계수를 계산한다.

전단파 속도 종파 측정과 동일한 방법으로 전단파 성분이 풍부하도록 단면에 수평한 충격을 가하여 전단파 공진 주파수를 구한다. 보통 1차 모드의 공진 주파수(f_1)과 1 차 모드의 파장($2L$)으로부터 전단파 속도(V_s)는 다음 식으로 구하여 식 (6)으로부터 전단 변형계수를 구한다.

$$V_s = f_1(2L) \quad (5)$$

$$G = \rho V_s^2 \quad (6)$$

그림 3은 전단파 공진 주파수 측정을 위한 전형적인 전이함수이다.

2.4 포아슨비 계산

P-파 속도(V_p), 종파 속도(V_c) 전단파 속도(V_s)가 산정 되면 다음 관계로부터 포아슨비(ν)를 계산할 수 있다.

$$\left(\frac{V_p}{V_c}\right)^2 = \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (7)$$

$$\nu = 0.5 \left(\frac{V_c}{V_s}\right)^2 - 1 \quad (8)$$

3. 일축압축시험

암시편의 직경 대 길이의 비를 1:2로 하고 편심하중을 방지하고자 시편의 양 단면이 매끄럽도록 연마제를 사용하여 갈아내었다. 단면의 평활도를 5×10^{-3} mm 이내로 유지시켰다. 다이알게이지를 사용하여 변형도를 측정하여 미소변형도에 대한 변형특성은 구할 수 없었다. 응력-변형도 곡선에서 최대압축력 50%인 변형도(ϵ_{50})에서 그른 할선 기울기를 영탄성계수로 취하였다.

4. 결과 및 분석

4.1 실내 탄성파 시험

P-파 도달시간과 종파와 전단파의 공진을 측정하여 P-파속도, 종파속도, 전단파속도를 계산하였다. P-파속도와 종파속도로부터 식(7)을, 종파속도와 전단파속도로부터 식(8)을 각각 사용하여 포아슨 비를 표 1과 같이 산출하였다. 두 포아슨비가 잘 일치한 것으로 미루어 탄성파 시험이 매우 신뢰성이 있는 것으로 판단된다.

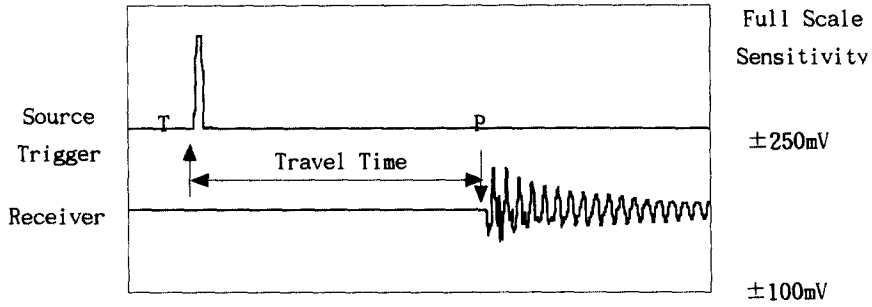


그림 1. P-파 통과시간 측정 (시료 : FBH-4-1)
File No. : 73/74

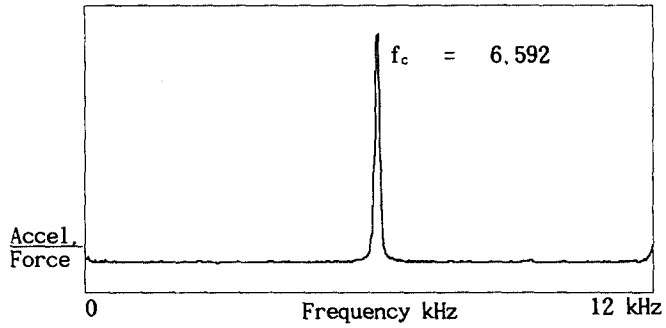


그림 2. 종파 공진주파수 측정 (시료 : FBH-4-1)
File No. : 72

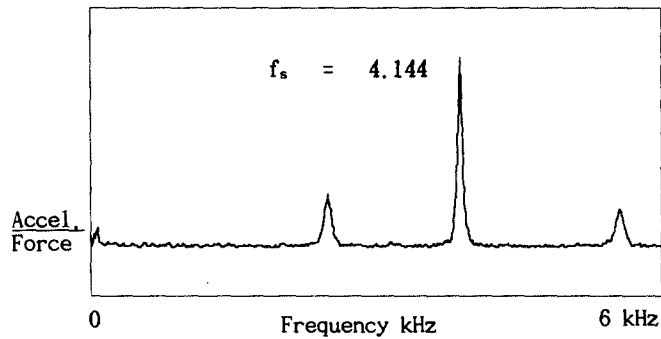


그림 3. S파 공진주파수 측정 (시료 : FBH-4-1)
File No. : 76

표 1. 암시편의 탄성과 속도 및 포아슨 비

코아 #	탄성과 속도 (km/s)			포아슨비		비고
	V _p	V _c	V _s	V _p & V _c	V _c & V _s	
FBH-1-1	2.33	2.11	1.32	0.26	0.27	Grouting Core
FBH-1-3	2.65	2.40	1.55	0.25	0.20	Grouting Core
FBH-2-1	*	5.48	3.43	*	0.27	Lime Stone
FBH-3-1	*	1.78	1.11	*	0.27	Grouting Core
FBH-4-1	2.81	2.55	1.60	0.26	0.26	Grouting Core
FBH-4-2	3.48	3.02	1.89	0.29	0.28	Mixed Grouting & Rock
FBH-5-1	5.42	4.90	3.10	0.26	0.26	Lime Stone
FBH-5-2	5.90	5.58	3.50	0.20	0.27	Lime Stone
FBH-6-1상	2.52	2.32	1.55	0.25	0.13	Mixed Grouting & Rock
FBH-6-1하	5.56	5.16	3.23	0.23	0.27	Lime Stone
FBH-6-2	2.52	2.27	1.44	0.26	0.24	Grouting Core
FBH-7-1	2.15	1.99	1.27	0.24	0.22	Grouting Core
FBH-7-2	2.47	2.29	1.43	0.20	0.29	Grouting Core
FBH-8-1	2.84	2.57	1.49	0.20	0.48	Grouting Core
FBH-8-2	3.27	3.20	2.14	0.14	0.11	Mixed Grouting & Rock

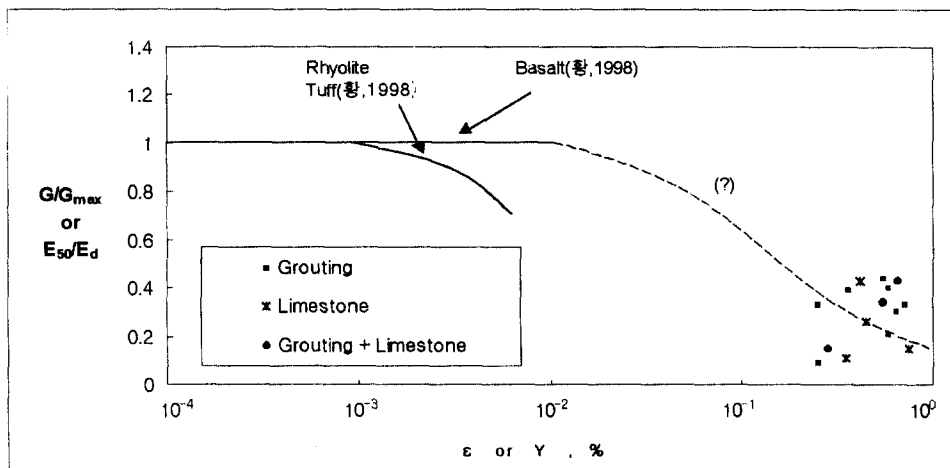
* 시편 길이가 P-파 측정하기에 너무 짧음.

4.2 변형도를 고려한 탄성계수

표 2는 동탄성계수(E_d)와 정탄성계수(E_s)를 비교한 것이다. 동탄성계수가 측정된 변형도 범위는 $10^{-3}\%$ 이내이고 압축시험을 통한 정탄성계수는 변형도 0.25~0.75% 범위에서 얻어진 것이다. 그라우팅 코아의 두 탄성계수비(E_s/E_d)는 비교적 좁은 범위(0.30 ~ 0.44)에 밀집되어 있다. 이는 그라우팅 코아는 인공적 매질로서 코아에 내재된 미세 결리, 열리 및 층리가 비선형 변형특성에 미치는 영향은 작고 주로 변형도의 영향이 큰 것으로 판단된다. 기반암(석회암), 기반암/그라우팅 고결체의 탄성계수비는 비교적 그라우팅 코아보다 넓게 분산되었는데 이는 코아 내의 불연속면이 변형특성에 기여하기 때문이다. 그림 4는 지진공학이나 지반동력학에서 많이 사용하는 지반의 비선형 변형특성 곡선에 본 자료를 그려 넣은 것이다. 일반적으로 토사는 전단변형도가 $10^{-3}\%$ 이내에서는 일정한 전단변형계수를 보이다가 감소한다. 반면, 황선근(1998)이 현무암(basalt) 코아에 공진주 및 비틀전단시험으로 구한 전단변형계수는 전단변형도 $10^{-2}\%$ 까지도 일정한 것으로 나타났다. 이와 같은 연구 결과를 참조하여 암석의 비선형 변형특성을 잠정적으로 그림 4의 점선같이 제안하고자 한다.

표 2. 탄성계수의 비교

코아번호	동적탄성계수		정적탄성계수		E _s /E _d	비고
	E _d kg/cm ² ×10 ⁵	변형도 %	E _s kg/cm ² ×10 ⁵	변형도, ε ₅₀ %		
FBH-1-1	0.73	≤10-3	0.07	0.25	0.09	Grouting Core
FBH-1-3	1.05	≤10-3	0.35	0.25	0.33	Grouting Core
FBH-2-1	8.45	≤10-3	1.31	0.75	0.15	Lime Stone
FBH-3-1	0.55	≤10-3	0.12	0.58	0.21	Grouting Core
FBH-4-1	1.08	≤10-3	0.43	0.58	0.40	Grouting Core
FBH-4-2	1.89	≤10-3	0.81	0.66	0.43	Mixed Grouting & Rock
FBH-5-1	5.57	≤10-3	2.34	0.42	0.43	Lime Stone
FBH-5-2	8.81	≤10-3	2.33	0.45	0.26	Lime Stone
FBH-6-1상	0.99	≤10-3	0.34	0.55	0.34	Mixed Grouting & Rock
FBH-6-1하	7.37	≤10-3	0.79	0.35	0.11	Lime Stone
FBH-6-2	0.98	≤10-3	0.33	0.72	0.33	Grouting Core
FBH-7-1	0.62	≤10-3	0.25	0.36	0.39	Grouting Core
FBH-7-2	0.86	≤10-3	0.25	0.65	0.30	Grouting Core
FBH-8-1	1.08	≤10-3	0.48	0.55	0.44	Grouting Core
FBH-8-2	2.34	≤10-3	0.36	0.28	0.15	Mixed Grouting & Rock



G/G_{max} : 정규화된 전단변형계수

γ : 전단변형도

그림 4. 변형도에 따른 탄성계수

5. 결론

본 논문에서는 동탄성계수와 정탄성계수를 변형도에 따른 비선형 변형특성 관점에서 고찰하여 보았다. 한정된 시험 결과로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 실내 탄성과 시험으로부터 매우 일관성 있는 변형계수를 용이하게 구할 수 있었다.
2. 암석의 비선형 변형특성을 변형도만의 함수로 보아 잠정적으로 제안하였다.

참고문헌

1. 목영진(1997) “불연속면이 있는 암시편의 탄성 및 감쇠특성”, 경희대학교, 신임교원 과제보고서
2. 황선근(1998) “Basalt와 Rhyolite Tuff의 공진주시험과 비틀전단시험 자료”, Unpublished Data.
3. Richart, F. E. Jr., Hall, J. R., and Woods, R. D.(1970), “Vibrations of Soils and Foundations.” Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J.

감사의 글

본 연구는 경희대학교 신임교원 지원과제(2U0196061)의 일부 지원에 의해 이루어진 것으로 이에 깊은 감사를 드린다.