

## 자유단 공진 시험을 이용한 암시편의 동적 물성치 측정

### Measurements of Dynamic Properties of Rock Cores Using Free-Free Resonance Tests.

목영진<sup>1)</sup>  
Mok, Young Jin

백영식<sup>2)</sup>  
Paik, Young Shik

이유근<sup>3)</sup>  
Lee, Yuo Keun

#### ABSTRACT

Dynamic measurements are used rather sparingly to determine the elastic moduli of rock cores and modulus values are not much utilized in design practices. 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. One of the findings is that both moduli determined by statically and dynamically on a solid rock core agrees well at the same small-strain. At different strain levels, the ratio between dynamic and static moduli widely varies depending upon micro-cracks and discontinuities of rock cores.

#### 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 사용감지기 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 차별화하여 부르고, 정탄성계수(압축시험)의 약 10배 내외로 큰 것으로 인식되고 있다. 이러한 사실은 암시편의 변형특성은 비선형이고 두 방법이 각각 서로 다른 변형도 범위에서 측정되었기 때문인 것으로 판단된다.

본 논문에서는 변형도를 고려하여 동탄성계수와 정탄성계수를 비교 검토하였다.

#### 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 횡방향이 구속된 상태에서 전파되는 압축파( $V_p$ 로 표기)를

1) 경희대학교 부교수, 정회원

2) 경희대학교 교수

3) 진주산업대학교 교수

이용하고, 압축파 속도(또는 P-파속도)는 구속탄성계수(M)에 의해 좌우되고 있다. 한편 공진(resonance)측정에서는 횡방향이 구속되지 않은 상태에 전파되는 압축파(종파와 차별화하여  $V_c$ 로 표기)를 이용하며 종파속도는 영탄성계수(E)와 직접적인 관계가 있다.

## 2.1 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  $\rho$ 는 암시편의 단위질량이다.

이 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.

## 2.2 공진 측정

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.

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

여기서  $\lambda_N$ 은 N차 모드의 파장이고, L은 암시편의 길이이고 N은 모드수(1,2,3,...)이다. 종파속도( $V_c$ )는 각 모드의 공진주파수( $f_N$ )와 파장( $\lambda_N$ )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  $\rho$ 는 암시편의 단위질량이다.

P-파 측정과 같은 충격해머, 가속도 감지기, 파형 분석기를 사용하였다. 가속도 감지기를 한 끝면에 에폭시(epoxy)로 고정하고 같은 면에서 충격해머로 종파를 발생시킨다. 종파는 구속되지 않은(unconstrained) 암시편의 길이방향을 따라 양쪽 끝단에 반사되어 왕복운동을 하게된다. 충격하중에 대한 가속도의 비인 전이함수(transfer function)를 파형 분석기를 이용하여 계산한다. 그림 1은 최소 5회 이상 반복 측정하여 평균한 전이함수이다. 보통 1차모드의 공진주파수를 이용하여 상기식으로부터 탄성계수를 계산한다.

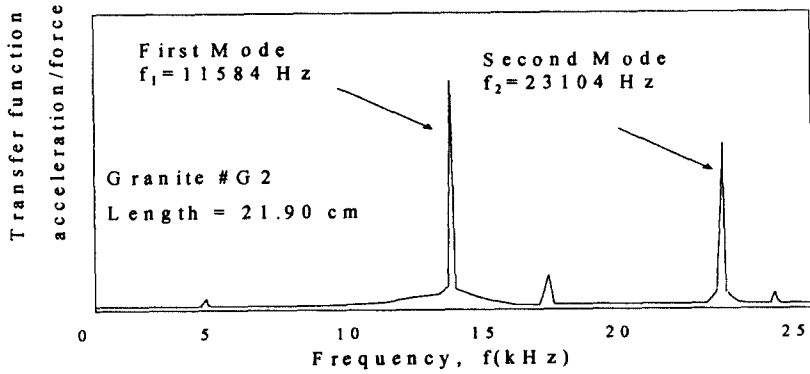


그림 1. 종파 공진 측정에 얻어진 전이함수

### 2.3 포아손 비

P-파 속도( $V_P$ )와 종파속도( $V_C$ )가 산정되면, 영탄성계수( $E$ )와 구속탄성계수( $M$ )와의 관계로부터 포아손 비( $\nu$ )를 계산할 수 있다.

$$M = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (5)$$

여기서 알 수 있듯이 탄성과 시험은 정적시험에 비해 매우 쉽게 포아손 비를 구할 수 있다.

### 3. 일축압축시험

본 연구에서는 일반적으로 수행하는 일축압축시험과 같이 다이알게이지를 이용하여 변형도를 측정하였다. 화강암시편 1개에 대해서는, 미소변형 측정을 위해 스트레인게이지(kyowa, B-FAE-S-12)를 부착하여 일축압축시험을 수행하였다.

화강암 시편의 미소변형범위에서 응력-변형도 곡선은 그림 2와 같다.

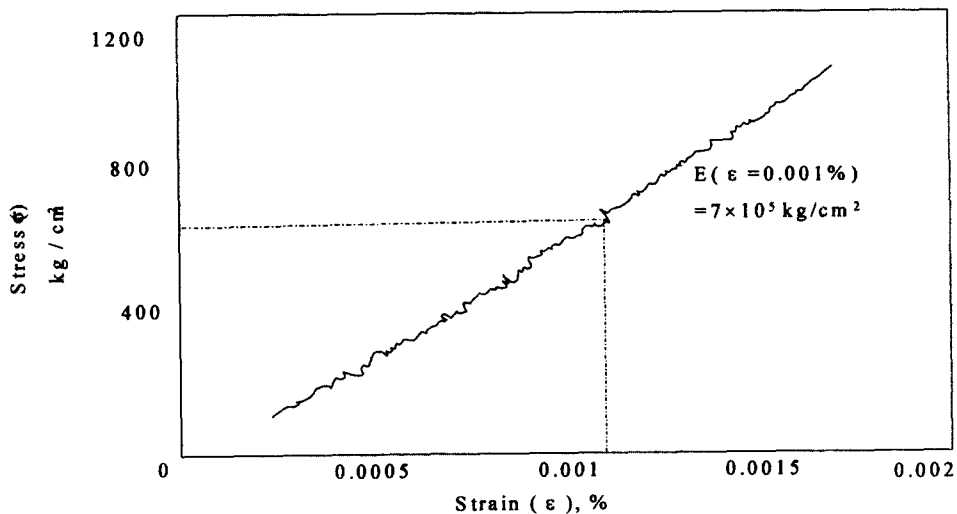


그림 2. 미소변형범위에서 응력-변형도곡선 (화강암, G2)

#### 4. 시험결과 및 분석

본 연구에 사용한 화강암시편은 경상남도 진주시 부근 남강댐 현장 부근에서 채취한 것이다. 매우 치밀한 구조를 보이고 미세 균열이 없는 것으로 보인다. 이 화강암 시편은 미세 균열이 응력-변형도 곡선에 미치는 영향이 적은 것으로 판단하여 미소변형도에서 정적압축시험을 수행하였다. 석회암 암시편도 충청북도 단양군 중앙고속도로현장에서 채취한 것으로 미소변형도에서 정적압축시험을 수행할 기회가 없어 일반적인 압축시험 결과와 탄성파시험 결과를 변형도를 고려해 비교해 보았다.

##### 4.1 미소변형의 탄성계수

그림 1과 그림 2는 동일한 암시편의 시험결과이다. 공진시험에서 구한 영탄성계수는  $\epsilon = 0.001\%$  이내에서  $7.6 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 이고 정적압축시험에서 구한 값은  $\epsilon = 0.001\%$  이내에서  $7 \sim 8 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 이었다. 화강암시편은 상대적으로 견고하고 결점이 없어 변형도 이외의 타 요인에 의한 탄성계수가 감소되지 않는 것으로 판단된다. 동적하중이나 정적하중 구별 없이 같은 변형도에서는 동일한 탄성계수가 얻어진다는 것을 알 수 있다. 물론 추후 암석종류별, 층리나 엽리, 미세 균열에 의한 동탄성계수와 정탄성계수의 관계가 밝혀져야 하나, 그 동안 두 탄성계수가 별개의 물성이라는 인식을 불식시키는 계기가 되었다.

##### 4.2 변형도를 고려한 탄성계수 비교

표 1. 암시편의 탄성계수

코아번호	동적탄성계수		정적탄성계수		$E_d/E_s$
	$E_d$ $\text{kg/cm}^2 \times 10^5$	변형도 %	$E_s$ $\text{kg/cm}^2 \times 10^5$	변형도 $\epsilon_{50}$	
1	8.4	$\leq 10^{-3}$	0.40	0.20	21
2	8.4	$\leq 10^{-3}$	1.40	0.30	6
3	1.94	$\leq 10^{-3}$	1.11	0.45	1.7
4	1.94	$\leq 10^{-3}$	1.54	0.30	1.3
5	7.94	$\leq 10^{-3}$	1.68	0.44	4.7
6	7.60	$\leq 10^{-3}$	1.18	0.27	6.4
7	7.83	$\leq 10^{-3}$	1.93	0.33	4.0
8	6.40	$\leq 10^{-3}$	1.41	0.30	4.5
9	6.44	$\leq 10^{-3}$	0.98	0.40	6.6
10	7.23	$\leq 10^{-3}$	0.87	0.22	8.3
11	8.67	$\leq 10^{-3}$	0.86	0.24	10.0
12	3.42	$\leq 10^{-3}$	1.08	0.40	3.2
13	8.39	$\leq 10^{-3}$	1.33	0.38	6.3
14	0.20	$\leq 10^{-3}$	0.21	0.20	1.0
15	2.12	$\leq 10^{-3}$	0.72	0.20	2.9
16	7.82	$\leq 10^{-3}$	1.21	0.22	6.5
17	4.56	$\leq 10^{-3}$	0.43	0.20	10.0
18	6.60	$\leq 10^{-3}$	0.77	0.25	8.6
19	4.56	$\leq 10^{-3}$	0.44	0.60	10.0

표 1은 석회암시편의 동탄성계수( $E_d$ )와 정탄성계수( $E_s$ )를 비교한 것이다. 동탄성계수가 측정된 변형도 범위는  $10^{-3}\%$ 이내이고 압축시험을 통한 정탄성계수는 변형도 0.2~0.4%범위에서 얻어진 것이다. 비교적 신선한 암시편인 경우 (코아 번호 3, 4, 14, 15를 제외한), 동탄성계수가 정탄성계수를 3~10배 상회한 것으로 나타났다. 특이한 사항은 불연속면이 사방향으로 심하게 발달한 경우 (코아 번호 14)는 동탄성계수가 정탄성계수와 거의 같았다. 수직절리가 발달한 시편(코아번호 3~4)도 거의 동일한 동탄성계수가 얻어졌고, 코아번호 14보다 덜 심한 사방향 절리를 포함한 암시편(코아 번호 15)도 동탄계수와 정탄성계수는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

### 4.3 포아슨 비 계산

석회암 시편에 P-파 도달시간과 종파공진을 측정하여 포아슨 비를 표 2.와 같이 산정하였다. 절리가 많은 암시편의 포아슨 비가 대체로 크게 나타났다.

표 2. 암시편의 탄성과 속도 및 포아슨 비

코아 #	직경 (cm)	단위중량 (g/cm <sup>3</sup> )	V <sub>P</sub> (km/s)	V <sub>C</sub> (km/s)	$\nu$	비고
1	5.04	2.86	5.70	5.36	0.21	
2	5.49	2.73	5.50	5.50	0.37	
3	5.18	2.71	4.14	2.65	0.34	축방향 불연속면
4	5.17	2.70	4.90	2.65	0.38	축방향 불연속면
5	5.22	2.67	6.24	5.40	0.30	
6	5.21	2.68	6.13	5.27	0.30	
7	5.48	2.69	5.90	5.34	0.26	
8	5.45	2.72	5.03	4.80	0.19	
9	5.19	2.74	5.55	4.80	0.23	
10	5.46	2.78	5.72	5.05	0.21	
11	5.46	2.79	6.00	5.52	0.18	
12	5.48	2.72	5.00	3.51	0.40	
13	5.47	2.82	5.90	5.40	0.25	
14	5.48	2.64	1.30	0.85	0.34	사방향 불연속면
15	5.48	2.58	3.70	2.84	0.29	사방향 불연속면
16	5.20	2.73	5.80	5.30	0.25	
17	5.21	2.66	5.45	4.10	0.30	
18	5.13	2.72	5.43	4.88	0.27	
19	5.17	2.66	4.83	4.10	0.24	

## 5. 결론

본 논문에서는 동탄성계수와 정탄성계수를 측정 변형도 관점에서 고찰하여 보았다. 한정된 시험 결과로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 결함이 없는 암시편에서는, 공진측정으로 구한 탄성계수와 정적압축시험 결과는 미세 변형도에서 동일하다.
2. 미세균열이나 불연속면이 있는 시편일 경우 응력-변형도 곡선이 매우 불규칙한 비선형을 보여 동탄성계수( $\epsilon \leq 10^{-3}$  %)와 정탄성계수( $\epsilon_{50}=0.2\sim 0.4$  %)의 비는 3~10배인 것으로 나타났다.

## 참고문헌

1. 이유근(1996) “탄성과 기법을 이용한 암시편의 탄성 및 감쇠특성에 관한 연구” 경희대학교, 박사학위논문
2. 목영진(1997) “불연속면이 있는 암시편의 탄성 및 감쇠특성”, 경희대학교, 신입교원 과제 보고서
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 신입교원 지원과제(2U0196061)의 일부 지원에 의해 이루어진 것으로 이에 깊은 감사를 드린다.