터널과 지하공간, 한국암반공학회지
제21권 제6호, 2011년 12월, pp. 480~493

TUNNEL & UNDERGROUND SPACE, Vol. 21, No. 6, 2011, pp. 480-493
Journal of Korean Society for Rock Mechanics

충남 연기군 지역 화강암 시험편의 동적물성 특성에 관한 연구

민준현[1], 이승중[2], 최성웅[3]*

Characteristics of Dynamic Properties of Granite Specimen from Chungnam Yeongi Area

June Hyun Min, Seung-Joong Lee, Sung O. Choi

Abstract Dynamic rock property is one of most important parameters in design of earthquake-resistant structures. In this study, free-free resonant column test has been conducted to obtain dynamic Young's modulus, dynamic shear modulus, and damping ratio among dynamic properties with granite specimen of Chungnam Yeongi area. The dynamic properties obtained from this test were compared with the physical properties from static rock tests, and their relationship has been analyzed. From our study, it has been concluded that the dynamic Young's modulus and the dynamic shear modulus are linearly proportional to the elastic wave velocity. And also the damping ratio has been identified to be in non-linear inverse proportion to the elastic wave velocity.

Key words Dynamic property, Resonant frequency, Free-free resonant column test

초 록 암석의 동적물성은 내진설계의 동적해석에 필요한 물성이다. 본 연구에서는 충남 연기군 지역의 화강암 시험편을 대상으로 양단자유 공진주시험을 실시하여 동적물성인 동탄성계수, 동전단계수, 감쇠비 등의 특성을 분석하고, 역학적 물성과의 상관관계를 분석하였다. 탄성파속도를 기준으로 동적물성을 분석한 결과, 탄성파속도가 빠를수록 동탄성계수와 동전단계수는 선형적으로 증가하는 경향을 보였으며, 감쇠비는 비선형적으로 감소되는 것으로 조사되었다. 논문은 사인형태의 입사파에 대한 장점을 설명하고 또한 동하중에 대한 암석의 크기효과를 설명하고 있다.

핵심어 동적물성, 공진주파수, 양단자유 공진주시험

1. 서 론

최근 일본에서는 대규모의 지진에 의해 원자력 발전소, 교량 등이 붕괴되었고, 이에 따른 인명 및 재산피해로 큰 어려움을 겪고 있다. 전 세계적으로 지진발생 빈도가 점차 증가되고 있으며 국내의 경우, 1990년에는 15회에 불과했던 지진발생 빈도가 2010년에는 42회로 관측되는 등, 점차 증가되고 있는 추세이다(정길호, 2011).

그동안 우리나라의 내진설계는 원자력 발전소, 핵폐기물처리장, 고속철도 등 주요 시설물에만 국한되어 적용되어 왔지만, 최근 지진발생의 증가로 인해 내진설계의 적용범위를 확대시키기 위한 검토가 이루어지고 있다. 그러나 아직까지 내진설계를 위한 기초자료의 대부분을 미국이나 일본 등의 외국자료에 의존하고 있는 실정이어서, 지질구조나 지반특성이 동일하지 않는 우리나라의 경우에 그대로 적용하기에는 많은 문제점이 존재하는 것으로 알려지고 있다.

따라서 우리나라 지반 실정에 맞는 동적물성에 관한 연구가 필요한 실정이며, 이에 대한 DB화 구축을 통해 내진설계에 반영할 필요성이 있다.

양단자유 공진주시험은 충격반향기법을 이용한 실내시험으로서, 내진설계에 필요한 동적물성 중 공진주파수, 동탄성계수, 동전단계수, 감쇠비 등을 구할 수 있는 장점이 있다.

선행 연구에서는 우리나라 대표 암석에 대한 양단자유 공진주 시험을 수행하고 동적물성을 분석하였다(조

[1] 강원대학교 공과대학 에너지·자원공학과 석사과정
[2] 강원대학교 공과대학 에너지·자원공학과 박사과정
[3] 강원대학교 공과대학 에너지·자원공학과 교수
* 교신저자 : choiso@kangwon.ac.kr
접수일 : 2011년 10월 25일
심사 완료일 : 2011년 11월 14일
게재 확정일 : 2011년 11월 30일

정우 외, 2007). 하지만, 소수의 시험편에 대한 결과로서 각 암종의 대표성을 나타내기 부족하다고 판단되는 바, 본 연구에서는 특정 지역의 단일 암종에 대한 다수의 시험편을 대상으로 양단자유 공진주 시험을 통해 동적물성을 체계적으로 분석하고자 하였다.

본 연구에서는 미국재료시험협회규격(ASTM)에서 제안하는 양단자유 공진주시험법(ASTM C215)에 의거하여 양단자유 공진주시험을 위한 프레임, 충격원, 수신기 등의 시스템을 구축하였으며, 모르타르 시험편과 화강암 시험편에 대한 동적물성을 구하였다. 매질의 특성에 따른 동적물성치의 변화를 분석하고자 수행된 예비시험에서는, 시멘트와 모래의 무게배합비를 1:0.5, 1:1, 1:1.5로 변화시켜 모르타르 시험편을 제작하였으며, 3가지 매질에 대한 양단자유 공진주시험을 수행하였다. 또한, 충남 연기군 지역 화강암 시험편의 동적물성 특성을 분석하기 위해 38개 시험편에 대한 탄성파속도와 동적물성 간의 상관관계를 분석하였다.

2. 양단자유 공진주 시험

2.1 시험 방법

시험편에 대한 양단자유 공진주시험의 구성장비는 시험편을 양단자유조건이 되도록 거치할 수 있는 기본 프레임과 충격원으로 응력파를 발생시킬 수 있는 충격해머(impact hammer), 그리고 수신 장치로서 가속도계(accelerometer)를 사용하였으며, 수신 장치에서 받아들인 파형을 디지털신호로 변환해주는 FFT(Fast Fourier Transform) 기능이 내장된 Data Physic사의 SignalCalc-ACE 장비를 사용하였다. 충격해머 및 가속도계의 기본 제원은 Table 1에 정리한 바와 같다.

각 시험편의 종파와 비틀림파의 공진주파수를 취득하기 위하여 Fig. 1(a) 및 (b)와 같이 각각 충격해머와 수신 장치의 위치를 달리하여 시험을 실시하였다. 즉, 종파의 경우, Fig. 1(a)와 같이 수신 장치는 시험편의 한쪽 횡단면 중앙에 부착시키고, 반대편 횡단면에 타격지점이 일직선상에 오도록 위치시킨 후 충격해머로 충격을 가한다. 또한 비틀림파의 경우, Fig. 1(b)와 같이 수신 장치의 부착위치를 시험편의 한쪽 끝에서 시험편 길이의 0.224배 길이만큼 길이 방향으로 위치시킨 후, 금속탭(metal tab)을 이용하여 종단면방향으로 부착시킨다. 충격해머의 타격지점은 수신 장치의 부착위치의 반대편에 위치하게 되며 시험편 길이의 0.132±0.01배 길이만큼 길이방향으로 설정한다. 이때 타격지점과 수신 장치의 위치는 횡단면상의 90°가 되도록 해야 한다(ASTM / C215).

충격해머로 타격지점을 타격할 때, 시험편의 타격면과 수직에 가깝게 타격해야 하는데, 타격 위치, 타격 각도 그리고 수신 장치로 전달되는 충격파가 일정하지 않으면 같은 매질이라도 파형은 다양하고 복잡하게 중첩되는 형상을 나타내기 때문이다. 따라서 시험자의 숙련

Table 1. The specifications of accelerometer and impact hammer

Accelerometer		Impact hammer	
Measurement range(m/s^2)	± 4,905	Measurement range(N)	222
Frequency range(Hz)	5～60,000	Resonant frequency(kHz)	≥ 100
Resonant frequency(kHz)	≥ 95		

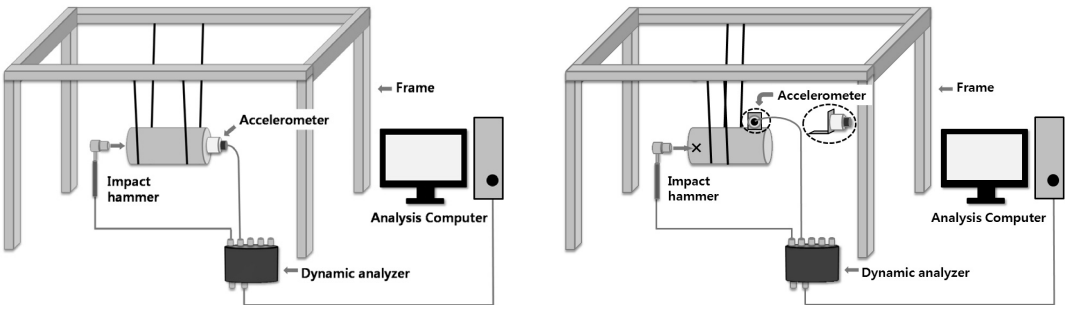


Fig. 1. Schematic diagram of free-free resonant column testing system (Min *et al.*, 2011); (a) longitudinal mode, (b) torsional mode

도에 따라 개인차가 발생하기 때문에 일정한 힘과 속도로 정확히 타격하는 것이 중요하다.

2.2 결과 처리

Fig. 2는 충격해머를 통해 발생한 응력파가 암석의 매질을 통과하면서 가속도계에 감지된 진폭을 FFT 변환을 거쳐 획득한 주파수영역이다. Fig. 2(a)와 (b)에서 가장 큰 진폭을 나타낼 때의 주파수를 종파 및 비틀림파의 공진주파수(f_L, f_T)라 하며, 각 모드에서의 동적물성치는 식 (1)~(5)를 통하여 산정하게 된다(ASTM / C215). 종파모드에서 획득된 공진주파수는 식 (1)을 통하여 동탄성계수(E_d)를 산정하는데 이용한다. 종파모드에서의 감쇠비(D_L)는 Fig. 2의 주파수영역 그래프에서 half-power band width 방법을 이용하여, 최대 진폭의 0.707배에 해당하는 두 지점의 주파수(f_{L1}, f_{L2})를 찾아 식 (2)로부터 구할 수 있다.

$$E_d = DM(f_L)^2 \tag{1}$$

$$D_L = (f_{L2} - f_{L1})/2f_L \tag{2}$$

여기서, E_d는 동탄성계수(GPa), D는 $5.093\times L/d^2$, L은 시험편의 길이(m), d는 시험편의 직경(m), M은 시험편의 무게(kg), D_L은 종파모드에서의 감쇠비, f_{L1}, f_{L2}은 진폭의 0.707에 해당하는 두 지점에서의 주파수(Hz), f_L은 종파의 공진주파수(Hz)이다.

또한, 비틀림파 모드에서 획득된 공진주파수(f_T)는 동전단계수(G_d)를 산정하는데 이용하고(식 (3)), 비틀림파 모드에서의 감쇠비(D_T)는 종파모드와 같은 half-power band width 방법을 이용한다(식 (4)).

$$G_d = BM(f_T)^2 \tag{3}$$

$$D_T = (f_{T2} - f_{T1})/2f_T \tag{4}$$

여기서, G_d는 동전단계수(GPa), B는 $(4\times L\times R)/A$, L은 시험편의 길이(m), R은 시험편의 형상계수로써 원형일 경우 1, A는 시험편의 단면적(m^2), M은 시험편의 무게(kg), D_T는 비틀림파 모드에서의 감쇠비, f_{T1}, f_{T2}는 진폭의 0.707에 해당하는 두 지점에서의 주파수(Hz), f_T는 비틀림파의 공진주파수(Hz)이다.

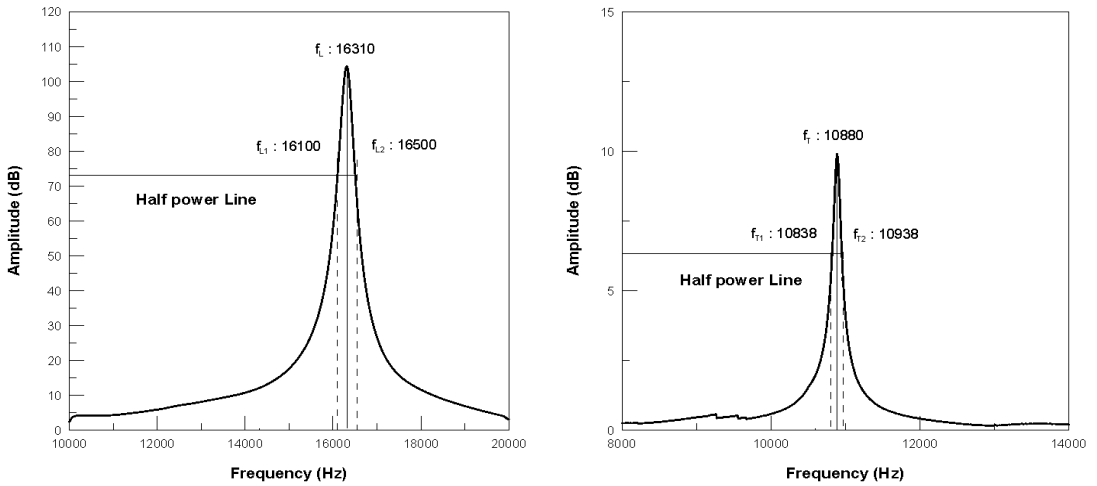
동포아송비(ν_d)는 종파와 비틀림파 모드에서 산정된 동탄성계수(E_d)와 동전단계수(G_d)와의 관계식을 통하여 구한다(식 (5)).

$$\nu_d = (E_d/2G_d) - 1 \tag{5}$$

여기서, ν_d는 동포아송비, E_d는 동탄성계수(GPa), G_d는 동전단계수(GPa)이다.

3. 인공 시험편의 동적 물성 분석

화강암 시험편에 대한 동적 물성 분석에 앞서, 본 연구에서 구성한 시험장비의 주파수 응답특성 등 장비의 신뢰도를 확인하기 위하여 모르타르로 제작된 인공 시험편에 대하여 예비시험을 먼저 실시하였다.



(a) (b)

Fig. 2. Resonant frequency obtained from free-free resonant column test; (a) longitudinal mode (b) torsional mode

인공 시험편에 대해서는 시멘트와 모래의 혼합 비율을 다르게 적용함으로써 서로 다른 정적 물성값을 나타내도록 제작하였으며, 각각에 대한 동적물성시험을 별도로 수행하여 인공 시험편에 대한 정적 물성값과 동적 물성값의 상관관계를 검토하였다.

3.1 모르타르 시험편 성형 및 역학적 물성시험

모르타르 시험편은 시멘트와 모래의 배합비의 변화에 따라 탄성파속도, 탄성계수, 강도 등 역학적 물성이 변화한다. 본 연구에서는 이러한 배합비의 변화에 따른 동적물성치의 특성을 분석하고자, 시멘트와 모래의 배합비를 1:0.5, 1:1, 1:1.5로 각각 달리하여 set 당 6개의 NX코어 형태의 시험편을 제작하였다(Fig. 3).

모르타르 시험편 성형과정에서 발생할 수 있는 기포로 인한 공극의 형성을 방지하고자, 바이브레이터를 이용하여 공극을 최소화하였다. 시멘트는 비중 3.15의 일반 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 유동성을 높이기 위해 물과 시멘트의 비는 50%로 하여 바이브레이터를 이용한 다짐효과를 증대시켰다. 양생 방법은 KS F 2827 규정에 준하여 시험편을 성형하였다.

Table 2는 역학적 물성시험의 결과값을 각 배합비 별로 평균하여 정리한 것이다(단, 여기서 압축강도시험은 파괴시험이기 때문에 양단자유 공진주시험 이후에 수행되었음을 밝혀둔다). 문태철 외(2009)의 연구결과에 의하면, 모르타르 시험편은 시멘트보다 모래의 배합비가 많을 때 강도가 높게 나오는 경향이 있으며, 일축압축강도가 증가할수록 탄성계수가 증가되는 것으로 보고한 바 있다. 본 시험에서도 이와 동일하게 시멘트에 대한 모래비가 1:0.5에서 1:1.5로 증가할수록 일축압축강도가 높게 나타났으며, 탄성계수 역시 일축압축강도가 높아질수록 높게 나타나는 경향을 확인할 수 있었다(Table 2).

3.2 모르타르 시험편의 동적물성 특성

모르타르 시험편의 배합비 변화에 따른 양단자유 공진주시험의 결과를 Table 3과 같이 각 배합비 별 평균값으로 정리하였다.

양단자유 공진주시험을 통해 얻어진 공진주파수는 동적물성 즉, 동탄성계수, 동전단계수, 감쇠비, 동포아송비를 산정하는 기초 자료로 활용된다. 모르타르 시험편에서 공진주파수는 모래의 비율이 증가할수록 증가되는 경향을 나타낸다(Table 3). 이는 역학적 물성시험에서 분석된 바와 같이, 모르타르 시험편의 매질이 1:1.5의 비율에 가까울수록 시멘트와 모래 입자들이 점점 치밀해지고, 결합력이 단단해졌기 때문에 나타난 것으로 분석된다.

Fig. 4는 배합비에 따른 탄성파속도와 공진주파수와의 관계를 나타낸 그래프이다. 탄성파속도와 공진주파수는 매질의 특성에 따라 좌우되는 물성으로서, Fig. 4에 나타낸 것처럼 선형적인 비례관계를 갖는다. 앞서

(a) (b) (c)

Fig. 3. Mortar specimens; (a) cement:sand = 1:0.5, (b) cement:sand = 1:1.0, (c) cement:sand = 1:1.5

Table 2. Physical properties of mortar specimen according to each mix ratio

Mix proportion (cement : sand)		Apparent density (kN/m^3)	Absorption (%)	Elastic wave velocity(m/s)		Uniaxial compressive strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio
				P wave	S wave			
Ave.	1 : 0.5	16.41	19.64	2,973	1,719	32.71	12.13	0.23
	1 : 1.0	17.93	14.97	3,172	1,833	34.86	16.23	0.22
	1 : 1.5	18.82	12.76	3,297	1,905	35.22	18.53	0.21

Table 3. Dynamic properties of mortar specimen according to each mix ratio

Mix proportion (Cement : Sand) Ave.		Longitudinal mode				Torsional mode				υ_d
		V_L (m/s)	F_L (Hz)	D_L (%)	E_d (GPa)	V_T (m/s)	F_T (Hz)	D_T (%)	G_d (GPa)	
Ave.	1 : 0.5	2,958	15,035	0.43	27.75	1,903	9,671	1.34	11.61	0.20
	1 : 1.0	3,205	16,063	0.38	32.24	2,070	10,373	1.03	13.45	0.19
	1 : 1.5	3,335	16,550	0.44	34.73	2,157	10,702	0.75	14.41	0.19

*V_L : velocity of longitudinal wave
F_L : resonant frequency of longitudinal mode
D_L : damping ratio of longitudinal mode
E_d : dynamic Young's modulus
V_T : velocity of torsional wave
F_T : resonant frequency of torsional mode
D_T : damping ratio of torsional mode
G_d : dynamic shear modulus
υ_d : dynamic Poisson's ratio

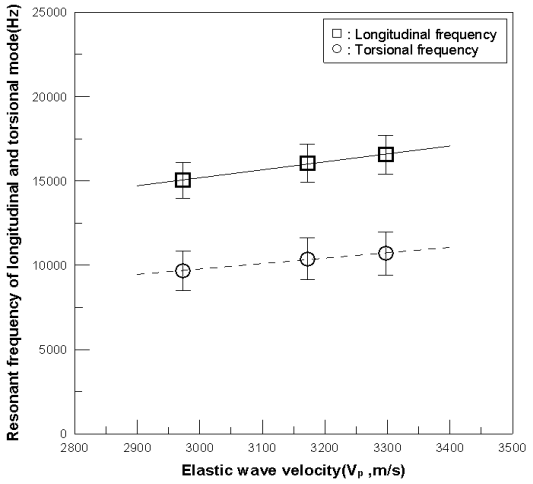


Fig. 4. Relationship between elastic wave velocity and resonant frequency in longitudinal and torsional mode, respectively (for Mortar specimen)

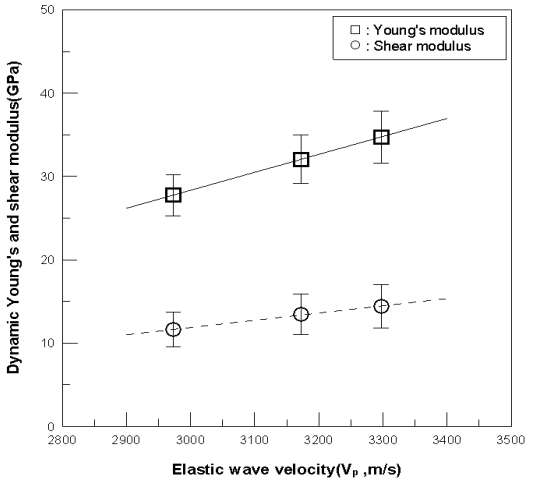


Fig. 5. Relationship between elastic wave velocity and dynamic modulus in compression and shear, respectively (for Mortar specimen)

언급한 바와 같이 동적물성값들은 공진주파수에 의해 결정되기 때문에, 역학적 물성으로서 매질의 특성을 반영할 수 있는 탄성파속도를 기준으로 동적물성값들을 비교분석해 보았다.

모르타르 시험편의 동탄성계수와 동전단계수는 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 탄성파속도가 증가할수록 점차 증가하는 경향을 보였다. 감쇠비는 비틀림파의 경우 탄성파속도가 증가할수록 작아지는 경향을 나타냈으나, 종파의 경우 탄성파속도의 변화와 무관하게 0.4정도로 일정한 값을 나타냈다(Fig. 6). 감쇠비는 최대 진폭시의 공진 주파수와 최대 진폭의 0.707배에 해당하는 두 주파수와 관계를 통해 계산되는 동적물성으로서, 0.707배에 해당하는 두 주파수의 차이가 좁을수록 작은 값을 나타낸다(Fig. 2 및 식 (2), (4)). 최대 진폭의 크기가 클수록 즉, 시료가 균질하고 치밀할수록, 가속도계의 접촉상태가 좋을수록 그리고 충격해머 타격시 외부 진동이 적을수록 두 주파수의 차이는 작게 나타나는 경향이 있다. 시험편의 상태와 시험환경에 따라 그 값이 달라지는 물성이기 때문에, 시험편의 개수를 증가시켜 반복된 시험을 통해 시험 결과의 신뢰성을 높여야 한다.

Fig. 7과 Fig. 8은 정탄성계수와 동탄성계수, 정포아송비와 동포아송비의 상관관계를 각각 비교하여 나타

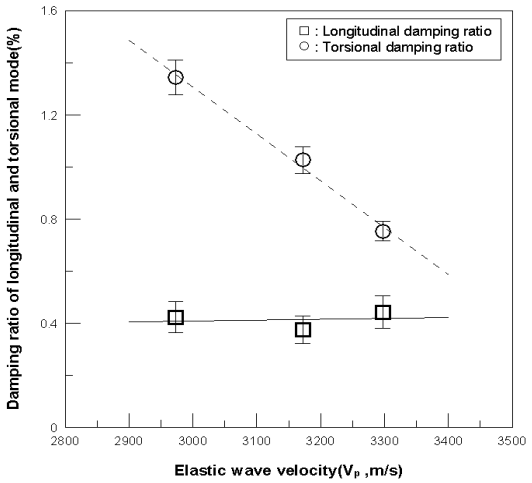


Fig. 6. Relationship between elastic wave velocity and damping ratio in longitudinal and torsional mode, respectively (for Mortar specimen)

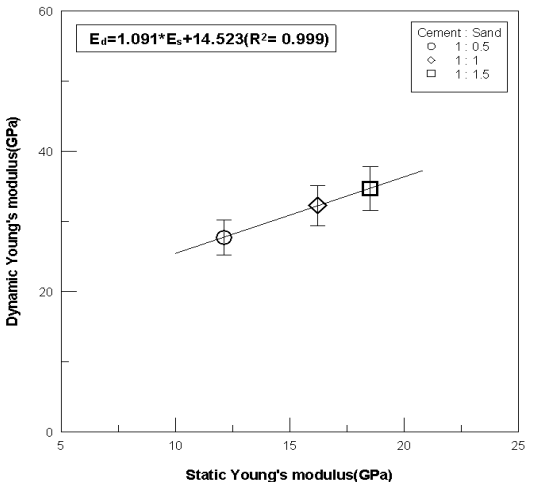


Fig. 7. Relationship between dynamic Young's modulus and static Young's modulus (for Mortar specimen)

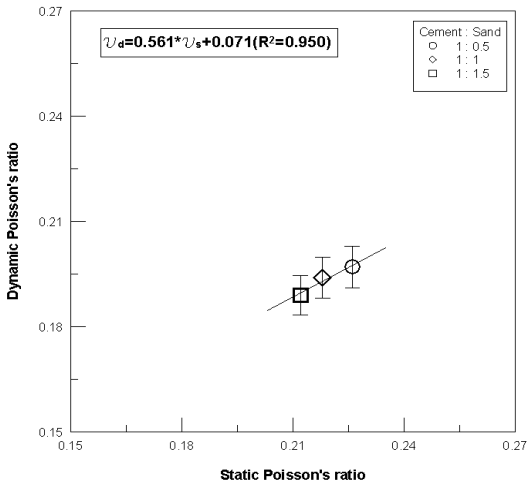


Fig. 8. Relationship between dynamic Poisson's ratio and static Poisson's ratio (for Mortar specimen)

Fig. 9. Granite specimens collected from Chungnam Yeongi area

낸 그래프이다. 동탄성계수는 일반적으로 정탄성계수보다 상대적으로 높은 값을 나타내는 경우가 많은 것으로 알려져 있다(목영진, 1999). 본 연구에서는 두 탄성계수의 차이가 크게 나타나진 않았지만, 배합비가 다른 3가지 조건에서 동탄성계수가 정탄성계수보다 약 1.9～2.3배 정도 큰 것으로 분석되었다(Fig. 7). 동포아송비와 정포아송비의 관계는 시험편의 모래의 배합비가 낮을수록 즉, 탄성파 속도가 낮을수록 두 물성값은 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 8).

모르타르를 이용한 인공 시험편에 대한 역학적 물성 시험 및 양단자유 공진주시험을 수행한 결과, 시멘트와 모래의 배합비의 변화, 즉 인공 시험편의 정적 물성의 변화에 따라 동적 물성의 변화도 함께 수반됨을 확인하였으며, 이들 간의 상관관계는 선행 연구결과와 잘 부합하고 있음을 알 수 있다.

4. 화강암 시험편의 동적 물성 분석

인공 시험편을 이용한 실내시험으로부터 시험편의 공진주파수는 시험편의 물리적 특성에 영향을 받음을 알 수 있었다. 본 연구에서는 충남 연기군 지역에서 채취한 화강암 시험편의 정적 물성의 변화에 따른 동적 물성의 변화 양상을 분석하고자 38개 시험편에 대한 역학적 물성시험과 양단자유 공진주시험을 실시하였다(Fig. 9). 동일 지역에서 채취된 화강암이라 하더라도 심도나 풍화정도에 따라 시험편의 물리적 특성이 다르게 나타

날 수 있으므로, 이에 대한 공진주파수의 변화와 그에 따른 동적물성을 분석하고자 하였다.

4.1 화강암 시험편의 역학적 물성시험과 탄성파속도에 따른 시험편의 분류

앞서 수행된 인공 시험편에 대한 물리적 특성 분석 시험에서는 시험 대상 시험편의 특성을 변화시켜 살펴보기 위해 시멘트와 모래의 배합 비율을 인위적으로 조정하여 시험을 수행하였으나, 화강암 시험편에 대한 시험에서는 이러한 조건을 인위적으로 부여하기 어렵기 때문에, 시험편의 역학적 물성 중 매질의 특성과 관련된 탄성파속도에 따라 시험편을 분류하였으며, 탄성파속도를 기준으로 타 물성과의 관계를 비교하였다.

38개 화강암 시험편의 탄성파속도와 각 역학적 물성과의 관계는 Fig. 10～Fig. 12와 같이 선형적인 관계를 갖는 것으로 분석되었다. 단, 회귀분석을 통하여 나타낸 각 물성과의 관계식은 탄성파속도 1,770～4,500 m/s 정도의 범위에서만 적용됨을 밝힌다.

탄성파속도는 일반적으로 암석이 균질한 무결암 조건하에서 압축강도가 높을수록 높게 나타나는 것으로 알

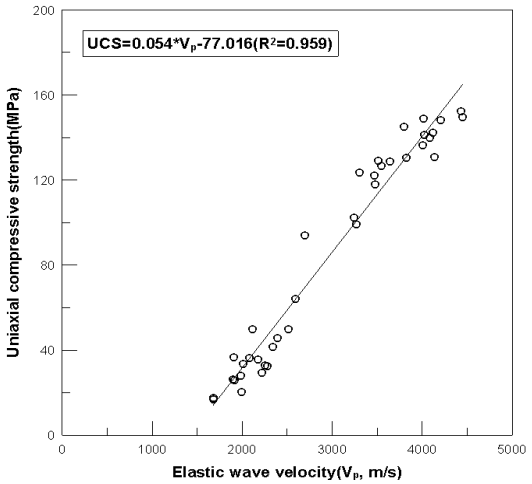


Fig. 10. Comparison of uniaxial compressive strength with elastic wave velocity (for Granite specimen)

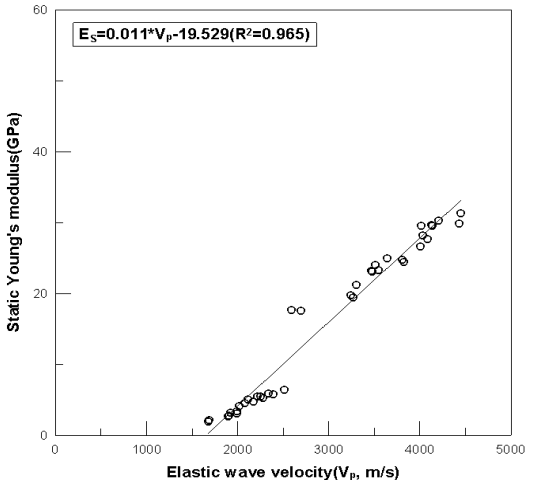


Fig. 11. Comparison of static Young's modulus with elastic wa velocity (for Granite specimen)

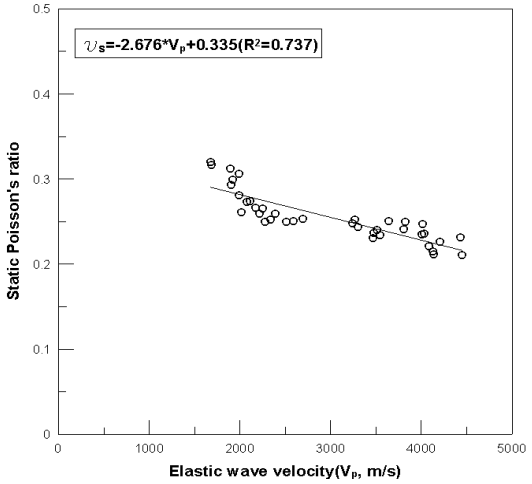


Fig. 12. Comparison of Poisson's ratio with elastic wave velocity (for Granite specimen)

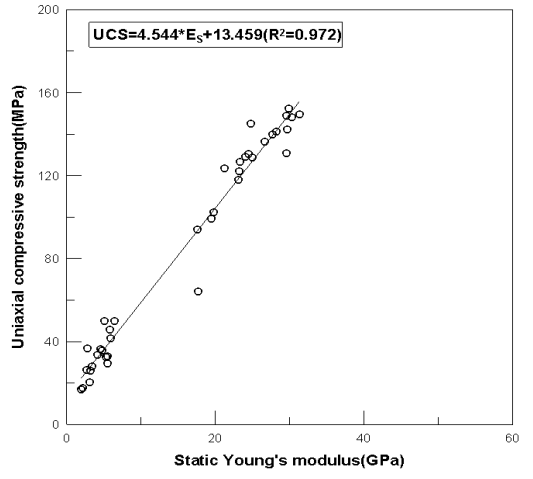


Fig. 13. Relationship between uniaxial compressive strength and static Young's modulus (for Granite specimen)

Table 4. Physical properties of granite specimens

Specimen ID.	Apparent density (kN/m^3)	Absorption (%)	Elastic wave velocity(m/s)		Uniaxial compressive strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio
			P wave	S wave			
Granite - 1	25.80	0.32	4,449	2,572	149.56	31.31	0.21
Granite - 2	25.70	0.43	4,430	2,561	152.37	29.91	0.23
Granite - 3	25.66	0.48	4,207	2,432	148.18	30.31	0.23
Granite - 4	25.70	0.48	4,138	2,392	130.89	29.58	0.21
Granite - 5	25.57	0.54	4,123	2,383	142.27	29.63	0.22
Granite - 6	25.80	0.38	4,083	2,360	140.05	27.73	0.22
Granite - 7	25.71	0.45	4,027	2,328	141.27	28.25	0.24
Granite - 8	25.78	0.42	4,012	2,319	148.90	29.55	0.25
Granite - 9	25.68	0.37	4,008	2,317	136.25	26.69	0.24
Granite - 10	25.75	0.48	3,820	2,208	130.62	24.43	0.25
Granite - 11	25.83	0.36	3,801	2,197	145.26	24.76	0.24
Granite - 12	25.76	0.43	3,640	2,104	128.82	24.95	0.25
Granite - 13	25.84	0.37	3,548	2,051	126.59	23.35	0.23
Granite - 14	25.55	0.39	3,510	2,029	128.97	24.02	0.24
Granite - 15	25.69	0.70	3,479	2,011	117.89	23.07	0.24
Granite - 16	25.62	0.62	3,467	2,004	122.27	23.17	0.23
Granite - 17	25.59	0.49	3,300	1,908	123.53	21.23	0.24
Granite - 18	25.78	0.47	3,269	1,890	99.09	19.44	0.25
Granite - 19	44.53	0.52	3,242	1,874	102.25	19.80	0.25
Granite - 20	25.43	0.80	2,694	1,557	93.92	17.58	0.25
Granite - 21	25.88	0.69	2,591	1,498	64.04	17.73	0.25
Granite - 22	25.27	1.17	2,515	1,454	50.04	6.39	0.25
Granite - 23	23.80	1.07	2,390	1,382	45.66	5.84	0.26
Granite - 24	24.62	0.90	2,340	1,353	41.65	5.90	0.25
Granite - 25	25.17	1.20	2,277	1,316	32.49	5.33	0.25
Granite - 26	25.06	0.97	2,249	1,300	32.93	5.51	0.27
Granite - 27	24.29	1.21	2,214	1,280	29.44	5.47	0.26
Granite - 28	25.12	1.03	2,175	1,257	35.82	4.72	0.27
Granite - 29	25.29	1.03	2,111	1,220	49.84	5.08	0.27
Granite - 30	25.41	1.04	2,077	1,201	36.21	4.59	0.27
Granite - 31	25.41	1.04	2,012	1,163	33.72	4.18	0.26
Granite - 32	24.59	1.38	1,992	1,151	20.52	3.12	0.31
Granite - 33	24.40	1.07	1,986	1,148	28.11	3.45	0.28
Granite - 34	24.79	1.29	1,918	1,109	25.91	3.24	0.30
Granite - 35	25.30	1.09	1,906	1,102	36.77	2.78	0.29
Granite - 36	24.88	1.28	1,893	1,094	26.20	2.69	0.31
Granite - 37	24.84	1.54	1,683	973	17.63	2.11	0.32
Granite - 38	24.61	1.44	1,676	969	17.07	1.97	0.32

Table 5. Dynamic properties of granite specimens

Specimen ID.	Longitudinal mode				Torsional mode				υ_d
	V_L (m/s)	F_L (Hz)	D_L (%)	E_d (GPa)	V_T (m/s)	F_T (Hz)	D_T (%)	G_d (GPa)	
Granite - 1	4,169	19,850	0.44	45.46	2,891	13,763	0.41	21.85	0.04
Granite - 2	4,339	21,300	0.50	48.79	2,531	12,425	0.70	16.60	0.47
Granite - 3	3,919	19,250	0.84	39.79	2,313	11,363	0.61	13.86	0.44
Granite - 4	4,051	20,400	0.64	42.63	2,388	12,025	0.78	14.81	0.44
Granite - 5	3,726	17,925	1.15	36.02	2,351	11,313	1.16	14.35	0.26
Granite - 6	3,758	19,013	0.79	36.65	2,115	10,700	1.05	11.61	0.58
Granite - 7	3,680	17,838	0.60	35.35	2,186	10,599	1.11	12.48	0.42
Granite - 8	3,799	18,638	0.50	37.80	2,190	10,742	0.76	12.56	0.51
Granite - 9	3,833	18,675	0.50	38.53	2,268	11,047	0.46	13.48	0.43
Granite - 10	3,636	17,500	0.64	34.53	2,143	10,314	0.79	12.00	0.44
Granite - 11	3,722	17,750	0.56	36.32	2,165	10,324	0.54	12.29	0.48
Granite - 12	3,258	16,100	0.54	27.76	1,978	9,774	0.68	10.23	0.36
Granite - 13	3,251	15,800	0.67	27.71	1,971	9,581	0.32	10.19	0.36
Granite - 14	3,147	15,150	0.78	25.90	1,967	9,469	0.75	10.12	0.28
Granite - 15	3,221	15,963	0.71	27.06	1,968	9,754	1.04	10.10	0.34
Granite - 16	3,245	15,600	0.68	27.32	1,964	9,438	0.76	10.00	0.37
Granite - 17	3,064	14,975	0.84	24.38	1,919	9,377	0.71	9.56	0.28
Granite - 18	2,987	14,450	0.78	23.26	1,894	9,163	0.67	9.35	0.24
Granite - 19	3,176	15,025	2.25	26.25	1,885	8,919	0.63	9.25	0.42
Granite - 20	2,301	11,175	1.12	13.58	1,496	7,264	1.00	5.74	0.18
Granite - 21	2,687	13,013	0.77	18.99	1,784	8,638	0.87	8.37	0.14
Granite - 22	1,911	9,513	2.03	9.51	1,175	5,852	1.07	3.60	0.32
Granite - 23	1,921	9,550	1.83	9.57	1,183	5,881	1.56	3.63	0.32
Granite - 24	1,594	7,750	3.23	6.48	1,057	5,138	1.70	2.85	0.14
Granite - 25	1,936	9,738	4.17	9.65	1,127	5,668	2.13	3.27	0.48
Granite - 26	1,816	9,325	2.08	8.46	1,271	6,525	3.07	4.14	0.02
Granite - 27	1,800	8,925	1.75	8.40	1,068	5,293	0.87	2.95	0.42
Granite - 28	1,772	8,500	1.25	8.05	1,097	5,263	1.55	3.09	0.30
Granite - 29	1,737	8,938	1.75	7.80	1,004	5,164	2.14	2.61	0.50
Granite - 30	1,615	8,188	2.21	6.74	970	4,916	1.68	2.43	0.39
Granite - 31	1,598	8,088	2.24	6.56	921	4,659	2.26	2.18	0.51
Granite - 32	1,652	8,150	2.30	7.05	998	4,925	2.34	2.58	0.37
Granite - 33	1,430	7,250	2.59	5.26	875	4,438	2.67	1.97	0.33
Granite - 34	1,440	7,375	2.79	5.35	921	4,714	2.25	2.19	0.22
Granite - 35	1,450	7,338	2.13	5.31	837	4,236	2.71	1.77	0.50
Granite - 36	1,242	6,088	3.60	3.51	744	3,648	2.77	1.26	0.39
Granite - 37	1,270	6,125	4.08	4.07	769	3,712	2.11	1.50	0.36
Granite - 38	1,209	6,088	3.29	3.70	724	3,648	2.52	1.33	0.39

*V_L : velocity of longitudinal wave
F_L : resonant frequency of longitudinal mode
D_L : damping ratio of longitudinal mode
E_d : dynamic Young's modulus
V_T : velocity of torsional wave
F_T : resonant frequency of torsional mode
D_T : damping ratio of torsional mode
G_d : dynamic shear modulus
υ_d : dynamic Poisson's ratio

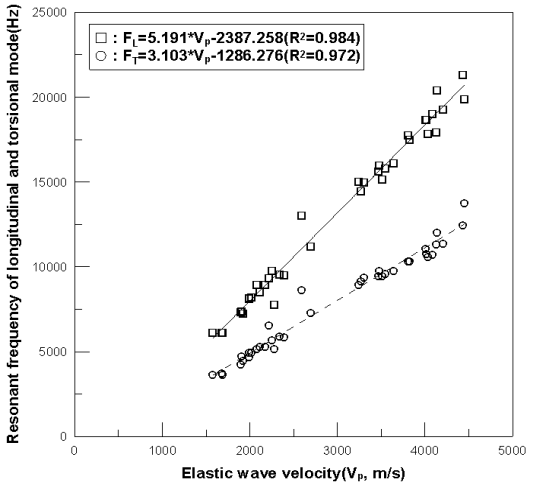


Fig. 14. Relationship between elastic wave velocity and resonant frequency in longitudinal and torsional mode, respectively (for Granite specimen)

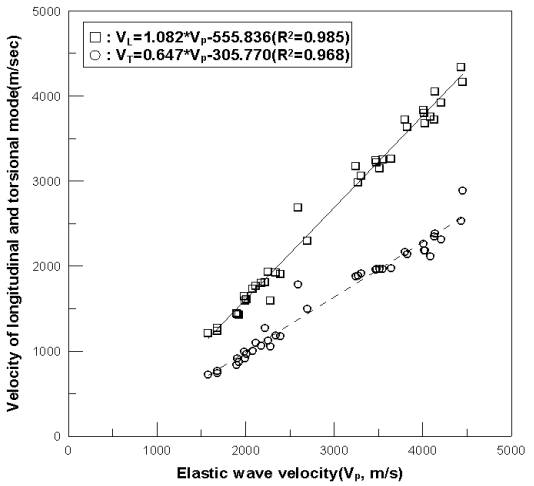


Fig. 15. Relationship between elastic wave velocity and velocity in longitudinal and torsional mode, respectively (for Granite specimen)

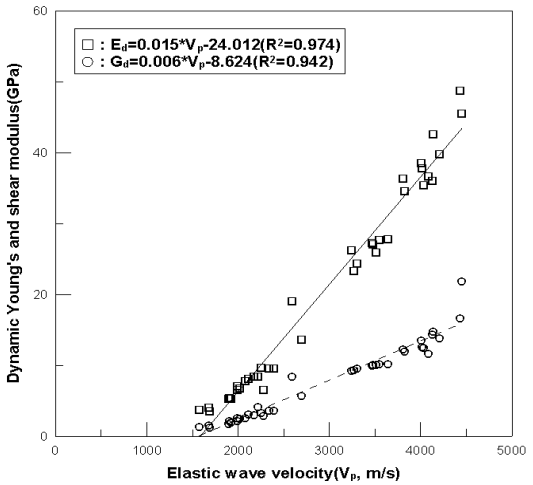


Fig. 16. Relationship between elastic wave velocity and dynamic modulus in compression and shear, respectively (for Granite specimen)

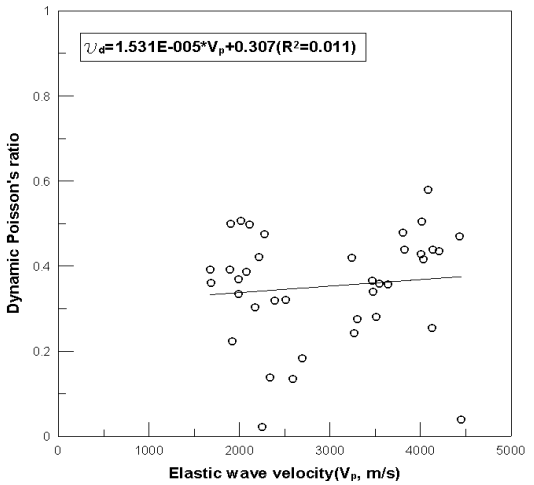


Fig. 17. Comparison of Dynamic Poisson's ratio with elastic wave velocity (for Granite specimen)

려져 있다. 본 연구에서도 Table 4와 Fig. 10에 나타낸 바와 같이 탄성파속도가 높을수록 화강암 시험편의 압축강도가 증가하는 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 또한 탄성파 속도는 일축압축강도 뿐만 아니라 탄성계수 및 포아송비와도 밀접한 관계에 있음을 알 수 있는데, Fig. 11 및 Fig. 12에서 보는 바와 같이 탄성파 속도와 탄성계수는 선형적으로 비례하는 양상을 보여주고 있으며 탄성파 속도와 포아송비의 관계는 선형 반비례의 양상을 보여주고 있다.

천대성 외(2008)의 연구결과에 의하면, 일축압축강도와 탄성계수는 이론적으로 상관성은 없으나, 암석역학 분야의 시험결과나 경험에 따라 선형관계를 나타내는 것으로 보고한 바 있다. 본 연구의 시험결과에서도 일축압축강도와 탄성계수가 Fig. 13과 같이 선형적인 관계를 보였다.

4.2 화강암 시험편의 동적물성 특성

탄성파속도에 따라 분류된 총 38개의 화강암 시험편

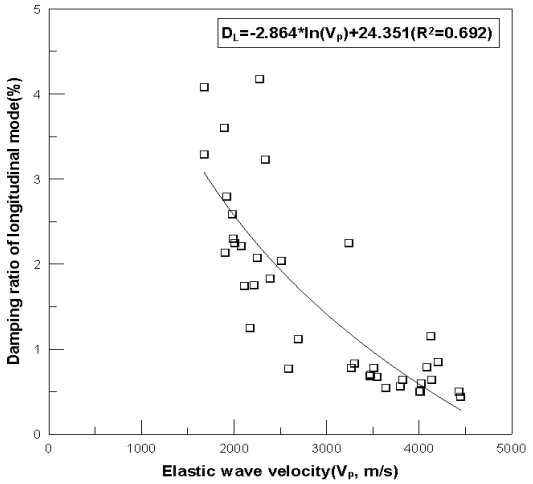


Fig. 18. Comparison of damping ratio in longitudinal with elastic wave velocity (for Granite specimen)

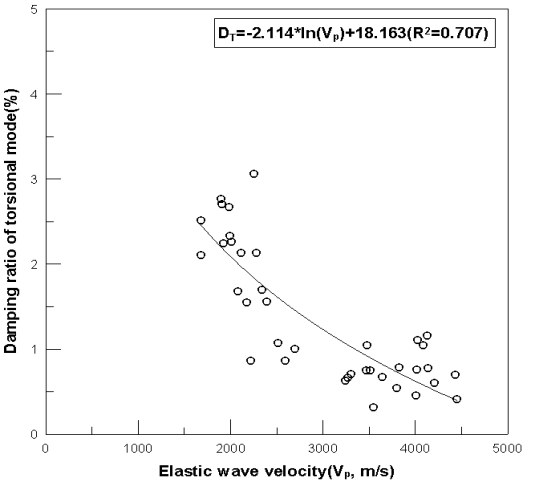


Fig. 19. Comparison of damping ratio in torsional with elastic wave velocity (for Granite specimen)

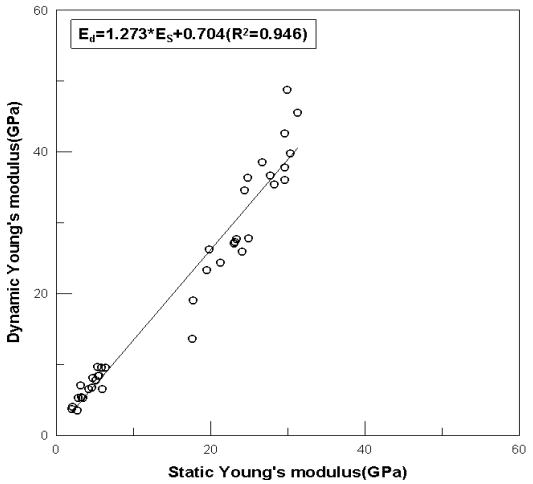


Fig. 20. Relationship between dynamic Young's modulus and static Young's modulus (for Granite specimen)

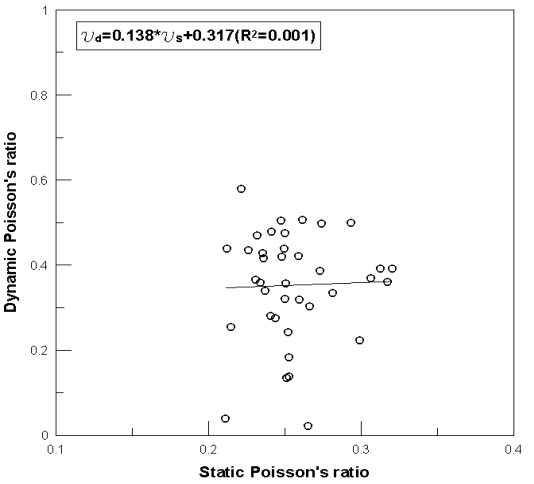


Fig. 21. Relationship between dynamic Poisson's ratio and static Poisson's ratio (for Granite specimen)

에 대한 양단자유 공진주시험의 결과는 Table 5에 정리하여 나타낸 바와 같다.

Fig. 14～19는 공진주시험을 통해 얻어진 동적물성들을 탄성파속도와 비교분석하여 나타낸 그래프이며, 탄성파속도에 대한 각 동적물성의 회귀 분석식은 본 화강암 시험편의 탄성파속도의 범위인 약 1,500～4,500 m/s에 제한되는 관계식이다. Fig. 14는 탄성파속도와 공진주파수와의 관계를 나타낸 것으로, 종파의 공진주파수가 비틀림파의 공진주파수보다 높게 나타나는 경향은 모르타르 시험편의 경우와 유사하며, 공진주파수의 영향으로 기타 동적물성 또한 모르타르 시험편과 유사한 양상을 나타내었다.

Fig. 15는 종파와 비틀림파의 전파속도를 그래프로 나타낸 것으로서, 탄성파속도가 증가할수록 종파속도와 비틀림파속도는 선형적으로 비례하며, 탄성파속도와 공진주시험의 종파의 전파속도는 탄성파속도가 약 1.02～1.43배 정도 큰 것으로 분석되었다.

동탄성계수와 동전단계수는 탄성파속도가 증가할수록 선형적으로 증가하는 경향을 나타냈으며, Fig. 16에서 탄성파속도에 따른 동탄성계수와 동전단계수의 관

Table 6. Range of dynamic properties determined by elastic wave velocity

Mode	Properties	Elastic wave velocity(m/s)		
		1,500～2,500	2,500～3,500	3,500～4,500
Longitudinal	F_L(Hz)	5,399～10,590	10,590～15,781	15,781～20,972
	V_L(m/s)	1,067～2,149	2,149～3,231	3,231～4,313
	E_d(GPa)	0.00～13.49	13.49～28.49	28.49～43.49
	D_L(%)	1.94～3.41	0.98～1.94	0.26～0.98
Torsional	F_T(Hz)	3,368～6,471	6,471～9,574	9,574～12,677
	V_T(m/s)	665～1,312	1,312～1,959	1,959～2,606
	G_d(GPa)	0.38～6.38	6.38～12.38	12.38～18.38
	D_T(%)	1.62～2.70	0.91～1.62	0.38～0.91

*F_L : resonant frequency of longitudinal mode
V_L : velocity of longitudinal wave
E_d : dynamic Young's modulus
D_L : damping ratio of longitudinal mode
F_T : resonant frequency of torsional mode
V_T : velocity of torsional wave
G_d : dynamic shear modulus
D_T : damping ratio of torsional mode

계를 추세선을 통해 분석해본 결과, 탄성파속도가 증가할수록 두 물성값의 차이가 점차 증대되는 경향을 보이는 반면, 탄성파속도가 감소하게 되면 차이가 점차 감소되고, 1,709 m/s 지점에서 교차되어 두 물성값은 같은 값을 갖게 된다.

또한 동포아송비는 두 물성 간의 관계를 통하여 계산되어지며(식 (5)), 추세선 식으로만 분석했을 때 동탄성계수가 동전단계수의 두 배가 되는 지점 즉, 탄성파속도가 2,254 m/s가 되는 지점에서 동포아송비 값이 0이 되는 것을 추정할 수 있다.

화강암 시험편의 동포아송비는 탄성파속도 1,500～4,500 m/s의 범위 내에서 0.04～0.579사이의 값을 보이며 일정한 경향 없이 분산형태를 나타냈다(Fig. 17).

Fig. 18과 Fig. 19는 종파와 비틀림파의 감쇠비를 탄성파속도와 비교분석한 결과이다. 모르타르 시험편에서는 소수의 시험편의 평균값으로 인해 종파 감쇠비의 감소특성을 분석할 수 없었지만, 화강암 시험편에서는 38개의 시험편에 대한 반복된 시험을 통해 시험편의 수만큼 데이터값을 산출할 수 있었으며, 산출된 데이터의 분포양상을 통해 탄성파속도가 증가함에 따라 감쇠비가 로그 함수적으로 감소되는 것을 확인할 수 있었다.

탄성계수와 포아송비의 동적물성과 정적물성을 비교한 결과, 탄성계수의 경우 동탄성계수가 정탄성계수보다 약 1.07～2.26배 정도 높은 것으로 분석되었으며, 목영진(1999)의 연구 결과의 10배보다 작은 차이를 나타냈지만, 분석된 경향은 유사하다(Fig. 20). 동포아송비와 정포아송비를 비교 했을 때, 각각의 범위는 0.04～0.579, 0.211～0.32를 가지며, 두 포아송비의 관계는 Fig. 21과 같이 특별한 경향이 없는 분산형태를 나타냈다.

본 시험에서 분석된 동적물성들은 탄성파속도를 기준으로 비교 분석되었으며, 38개 시험편에 대한 각 물성들의 데이터 값들로부터 탄성파속도와의 관계식을 그래프로부터 도출해 냈다. Table 6은 탄성파속도에 따른 충남 연기군 지역 화강암 시험편의 동적물성들의 범위를 관계식으로부터 정리한 것이다. 각각의 범위는 상관식에 의해 계산된 범위이며, 실험적 오차는 고려되지 않았다. 암석은 공극 및 균열 등의 불균질성을 내포하고 있기 때문에, 물성값을 명확한 수치로 표현한다는 것은 어려운 일이다. Table 6은 어디까지나 본 시험에서 사용된 충남 연기군 지역 화강암 시험편의 동적물성의 분류표이며, 향후 참고자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결 론

본 연구에서는 충남 연기군 지역 화강암 시험편의 동적물성 특성을 분석하기 위하여 양단자유 공진주시험을 실시하였다. 예비시험으로서 매질의 특성 변화에 따른 동적물성의 변화를 분석 하고자, 모르타르 시험편의 배합비를 달리한 인위적인 조건으로 모르타르 시험편을 성형하여 시험을 수행하였다. 또한 38개 화강암 시험편을 대상으로 매질의 특성과 관련된 역학적 물성인 탄성

파속도를 기준으로 시험편을 분류하여 동적물성 특성을 분석하였다. 이상의 연구결과를 종합하면 다음과 같다.

1. 예비시험으로서 수행된 모르타르 시험편에 대한 시험결과, 시멘트와 모래의 배합비가 1:0.5에서 1:1.5로 변화할수록 구성입자들 간의 결합력이 높아져 탄성파속도, 일축압축강도, 탄성계수 값이 점차 크게 나타내는 것으로 분석되었다. 양단자유 공진주시험은 매질의 특성에 영향을 받기 때문에, 매질의 특성과 관련된 탄성파 속도를 기준으로 모르타르 시험편에 대한 결과값들을 비교분석하였다. 모르타르 시험편은 탄성파속도가 빠를수록 종파와 비틀림파의 공진주파수는 높게 나타나기 때문에, 공진주파수에 의해 결정되는 동탄성계수와 동전단계수 또한 점차 증가되는 양상을 나타냈다. 모르타르 시험편의 감쇠비는 비틀림파 모드에서만 탄성파속도가 증가할수록 감소되는 양상을 나타냈으며, 종파 모드에서는 특별한 경향 없이 약 0.4정도로 일정한 값을 나타냈다. 정적물성과 동적물성의 비교에서는 동탄성계수가 정탄성계수보다 약 1.9～2.3배정도 큰 것으로 분석되었다.
2. 화강암 시험편 38개에 대한 동적물성 특성을 분석한 결과, 탄성파속도가 빠를수록 동탄성계수와 동전단계수는 예비시험과 동일하게 증가하는 경향을 보였다. 감쇠비는 예비시험과 달리, 탄성파속도가 빨라질수록 로그함수의 관계를 보이며 감소하는 특성을 나타냈다. 예비시험에서는 매질의 특성을 3가지 배합비로 제한되었으며, 시험결과를 평균으로 산정하였기 때문에 종파모드의 감소특성이 분석되지 못했던 것으로 판단된다. 시험결과로부터 분석할 수 있듯이 감쇠비는 공진주파수의 진폭과 관련된 물성으로서, 다수의 시험편과 반복된 실험을 통해 평균적인 결과값으로 평가되어야 할 필요성이 있다. 화강암 시험편의 정적물성과 동적물성을 비교분석한 결과, 동탄성계수는 선행 연구결과와 유사하게 정탄성계수보다 약 1.07～2.26배 정도 높게 나타났다. 동포아송비와 정포아송비의 경우, 동포아송비는 0.04～0.579, 정포아송비는 0.211～0.32의 범위를 각각 나타냈으며, 전체적으로 동포아송비가 높게 나타남을 확인할 수 있었다. 하지만 두 물성의 상관성은 결과값의 분산도가 각 범위 내에서 고루 분포되어 일정한 경향을 분석할 수 없었다.
3. 충남 연기군 지역의 화강암 시험편의 동적물성은 탄성파속도를 기준으로 Table 6과 같이 정리하였다. Table 6에서 분류 기준은 각 동적물성의 38개 결과값과 탄성파속도와의 관계로부터 산출된 관계식을 이용하였으며, 실험값의 오차는 고려되지 않았다. 일반적으로 암석은 다양한 종류와 크기의 입자로 구성되어 있으며, 공극 및 균열을 내포하고 있기 때문에 균질하지 못하다. 또한 각 지역마다 암석의 성인과 지질학적 특성에 따라 각기 다른 성질을 나타내므로, Table 6은 우리나라 모든 화강암의 대표적 물성이 아닌 충남 연기군 지역 화강암의 일부에 국한된 동적물성의 분류표임을 밝힌다.

참고문헌

1. 목영진, 1999, 자유단 공진시험을 이용한 암석의 탄성계수 측정, 한국지진공학회 논문집, 제3권 제4호, pp. 95-100.
2. 민준현, 이승중, 최성웅, 2011, 콘크리트 시험편의 공진주파수 특성에 관한 연구, 한국암반공학회 춘계 총회 및 학술발표회 논문집, pp. 119-122.
3. 문태철, 강추원, 이효, 2009, 그라우트 모르타르 배합조건에 따른 물리적 성질의 특성, 화약·발파(대한화약발파공학회지), 제27권 제1호, pp. 32-37.
4. 정길호, 2011, 우리나라 지진현황 및 지진방재종합대책, 도시문제(대한지방행정공제회), 제46권 제509호, pp. 28-33.
5. 조정우, 임보성, 조호범, 전석원, 하희상, 2007, 암석 시편의 충격반향(공진주) 시험에 관한 고찰, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), 제17권 제2호, pp. 83-89.
6. 천대성, 박의섭, 박철환, 박찬, 2008, 국내암석의 역학적 특성 분석과 DB구축을 위한 기본 연구, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), 제18권 제5호, pp. 317-327.
7. ASTM / C215-02, 2003, Standard test method for Fundamental transverse, longitudinal, and torsional resonant frequencies of concrete specimens, designation.
8. KS F 2827, 2006, 콘크리트 생산 공정 관리용 시험 방법 - 콘크리트 압축 강도의 조기 판정 시험 방법(온수 양생법), 한국산업규격.

민 준 현

2009년 강원대학교 공과대학 지구시스템공학과 공학사

Tel: 033-255-6253
E-mail: mjhangel22@kangwon.ac.kr
현재 강원대학교 공과대학 에너지·자원공학과 석사과정

최 성 웅

1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1989년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1994년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사

Tel: 033-250-6253
E-mail: choiso@kangwon.ac.kr
현재 강원대학교 공과대학 에너지·자원공학과 교수

이 승 중

2007년 강원대학교 공과대학 지구시스템공학과 공학사
2009년 강원대학교 공과대학 지구시스템공학과 공학석사

Tel: 033-255-6253
E-mail: lhj3601@kangwon.ac.kr
현재 강원대학교 공과대학 에너지·자원공학과 박사과정