시험편 매질의 입자크기 및 절리분포 양상에 따른 동적물성 특성에 관한 연구

황희영¹⁾ · 최성웅^{1)*}

A Study on the Dynamic Properties of Specimen with Different Particle Size and Joint Distribution Patterns

Hee-Yeong Hwang and Sung-Oong Choi*

Abstract : The Free-Free Resonant Test (FFRT) has been conducted to analyze the dynamic properties of each specimen with variation of material properties, such as particle size or joint pattern. Three types of mortar specimens have been made with different particle size, the artificial joint specimens have been made with different joint number, and the anhydrite specimens have been made with different joint thickness. From the results, it is shown that dynamic Young's modulus and dynamic shear modulus increase with particle size of sand in mortar specimen. These dynamic moduli show decreasing, however, with number of joint in artificial joint specimen. And also it is revealed that the dynamic moduli and joint thickness are inversely related.

Key words : Resonant frequency, Free-Free Resonant Test, Dynamic properties, Artificial joint

요 약 : 본 연구에서는 공진주파수를 이용하여 시험편 매질의 특성에 따른 동적물성 값의 상관관계를 알아보고 자 모르타르 시험편과 인공절리 시험편을 제작하고, 양단자유 공진주 시험을 수행하였다. 이를 통해 모래입자의 크기를 고려한 모르타르 시험편과 절리의 개수와 각도, 충전물의 두께를 고려한 시험편의 동탄성계수와 동전단 계수 그리고 감쇠비와 동포아송비 등을 산정하고 각각의 동적물성 특성을 비교 분석하였다. 분석결과 모르타르 시험편의 입자크기가 작을수록, 인공절리의 개수 및 충전물질량의 양이 많아질수록 동탄성계수와 동전단계수는 감소하는 것으로 나타났다.

주요어 : 공진주파수, 양단자유 공진주 시험, 동적물성, 인공절리

서 론

최근 중국의 쓰촨성 지진, 아이티 지진, 일본 동북부 지진 등 리히터 규모 7.0~9.0의 강진으로 인한 막대한 인명피해 및 재산피해가 발생한 바 있다. 특히 잦은 지진으로 내진설계 강국으로 인정받던 일본의 경우, 설계치를 초과한 지진으로 인한 원전시설의 파괴와 이로 인한 2차 피해로 더욱 큰 피해를 입었다. 이러한 사례들의 영향으로 내진설계는 필요에 의해서가 아닌 필수적으로 적

용되어야 할 요소로 재인식되고 있으나, 국내의 경우 내진설계의 기준을 설립한 1988년 이후 현재까지, 일부 주요 시설에만 적용하고 있는 실정이다.

내진설계를 위해서는 지진파의 거동에 대한 예측을 통해 적절한 설계치를 적용해야 하지만 현실적으로는 지진을 정확하게 예측하는 것은 불가능하다. 지진파는 진원지로부터 지구의 내부나 표면을 따라 전달되는 충격파로서, 진원지에서의 단층이나 암반의 특성에 의해 달라지며 진원지에서 관측점까지 전파경로에 의한 영향, 관측점 하부 지반의 증폭특성 등에 영향을 받는다. 특히 표층지반의 영향은 진동수 특성에 상당한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Jun and Kang, 2008). 지진의 발생으로 인해 지반이 진동하게 되고 이 진동의 주파수가 구조물의 공진주파수와 일치하게 되면 진동의 증폭이 발생한다. 이러한 진동의 증폭은 구조물의 불안전성을 초래하게 되므로 구조물 하부 암반의 충격과 거동에 대한 특성

2012년 12월 13일 접수, 2013년 1월 18일 심사완료

2013년 2월 14일 게재확정

1) 강원대학교 에너지·자원공학과

*Corresponding Author(최성웅)

E-mail: choiso@kangwon.ac.kr

Address: Department of Energy & Resources Engineering,
Kangwon National University, Chuncheon, Gangwon-do
200-701, Korea

을 파악하는 것은 매우 중요하다.

암반은 일반적으로 절리, 층리, 단층 등과 같은 다양한 불연속면을 포함하고 있으며, 때로는 연약대와 파쇄대를 포함하는 경우도 빈번하다(Kim *et al.*, 2006). 또한 불연속면을 다수 포함하는 암반구조물은 구조물 주변의 불연속면 분포로 인해 구조물의 동적 및 정적 거동특성과 파괴양상이 크게 달라지므로, 구조물의 안전설계를 위해서는 불연속면에 대한 고려가 중요하다(Ha and Yang, 2006). 국내에서도 최근 공진주파수를 활용한 암석의 동적물성 특성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으나 콘크리트 구조물이나 암중에 따른 동적물성 특성에 대한 연구들이 대부분이며, 불연속면에 대한 연구는 많지 않은 실정이다.

본 연구에서는 공진주파수를 이용하여 시험편의 동적물성 특성을 분석해 보고자 시험편을 제작하고 양단자유 공진주 시험을 수행하였다. 특히 암반을 구성하는 매질 특성에 따른 동적물성 특성을 고려하기 위하여 매질의 입자크기가 서로 다른 경우와 절리를 포함하고 있는 시험편을 가정하여 모르타르 시험편과 인공절리 시험편을 제작하였다. 또한 불연속면 사이에 충전물질을 포함하고 있는 경우, 충전물질이 동적물성 특성에 미치는 영향에 대한 분석도 함께 검토되었다.

시험방법 및 시험편제작

양단자유 공진주 시험

양단자유 공진주 시험을 통해 측정된 공진주파수는 미

소변형률 영역에서의 탄성계수, 전단계수, 감쇠비를 결정하는데 사용되며 본 연구에서는 공진주파수 측정을 위해 Fig. 1과 같은 양단자유 공진주 시험장비를 구축하였다. 양단자유 공진주 시험장치는 기본 프레임과 충격파를 발생시키는 장치인 충격해머(impact hammer), 수신장치인 가속도계(accelerometer)로 구성되어 있으며 수신 장치에서 받아들인 파형을 디지털 신호로 변환해주는 Dynamic analyzer를 통하여 파형의 변환과 분석이 가능하다. 양단자유 공진주 시험법에서는 시험편에 부착되는 가속도계의 위치와 충격해머의 타격점에 따라 종파 모드(Longitudinal mode)와 비틀림파 모드(Torsional mode)의 공진주파수를 측정할 수 있다. 본 연구에서 사용된 충격해머와 가속도계의 제원은 Tabel 1과 같으며, ASTM C 215 에서 제시하고 있는 시험법에 따라 양단자유 공진주 시험을 수행하였다.

결과처리

충격해머를 통해 발생한 응력파가 매질, 즉 시험편을 통과하여 가속도계에 감지된 진폭을 FFT(Fast Fourier Transform)변환을 통해 주파수 영역으로 표현하면 Fig. 2와 같은 결과를 얻을 수 있다. 이 주파수 영역 중 가장 큰 진폭을 가질 때의 주파수를 공진주파수라 한다.

종파 모드에서 획득된 공진주파수는 식 (1)을 통하여 동탄성계수를 산정할 수 있다.

$$E_d = DM(f_L)^2 \quad (1)$$

Fig. 1. Schematic diagram of free-free resonant column testing system.

Table 1. The specifications of accelerometer and impact hammer

Accelerometer		Impact hammer	
Measurement range (m/s^2)	$\pm 4,905$	Measurement range (N)	222
Frequency range (Hz)	5 ~ 60,000	Resonant frequency (kHz)	≥ 100
Broadband resolution (m/s^2_{rms})	0.02	Hammer mass (gm)	4.8
Resonant frequency (kHz)	≥ 95

Fig. 2. Resonant frequency from free-free resonant column test.

여기서, E_d 는 동탄성계수(GPa), D 는 $5.093 \times L/d^2$, L 은 시험편의 길이(m), d 는 시험편의 직경(m), M 은 시험편의 무게(kg), f_L 는 종파의 공진주파수(Hz)이다.

또한 비틀림파 모드에서 획득한 공진주파수는 식 (2)를 이용하여 동전단계수를 산정할 수 있다.

$$G_d = BM(f_T)^2 \quad (2)$$

여기서, G_d 는 동전단계수(GPa), B 는 $(4 \times L \times R)/A$, L 는 시험편의 길이(m), R 은 시험편의 형상계수로써, 원형일 경우 1이다. 또한 A 는 시험편의 단면적(m²), M 은 시험편의 무게(kg), f_T 는 비틀림파의 공진주파수(Hz)이다.

종파 모드와 비틀림파 모드에서의 감쇠비인 D_L 과 D_T 는 주파수 영역 그래프에서 Half power band width 방법에 따라 최대 진폭의 0.707배에 해당하는 두 지점의 주파수 f_{L1} 과 f_{L2} 및 f_{T1} 과 f_{T2} 로부터 식 (3)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} D_L &= (f_{L2} - f_{L1})/2f_L \\ D_T &= (f_{T2} - f_{T1})/2f_T \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, D_L 는 종파 모드에서의 감쇠비, D_T 는 비틀림파 모드에서의 감쇠비, f_{L1} , f_{L2} 는 종파의 진폭의 0.707배에 해당하는 두 지점에서의 주파수(Hz), f_{T1} , f_{T2} 는 비틀림파의 진폭의 0.707배에 해당하는 두지점에서의 주파수(Hz)이다.

동포아송비 ν_d 는 종파 모드와 비틀림파 모드에서 산정된 동탄성계수와 동전단계수를 이용하여 식 (4)와 같이 산정한다.

$$\nu_d = (E_d/2G_d) - 1 \quad (4)$$

여기서, ν_d 는 동포아송비, E_d 는 동탄성계수(GPa), G_d 는 동전단계수(GPa)이다.

모래입자 크기에 따른 모르타르 시험편

본 연구에서는 동일한 성분을 갖는 매질의 입자 크기에 따른 동적물성 특성을 분석해 보고자 시멘트와 모래를 이용하여 모르타르 시험편을 제작하였다. 시험편제작 시 다른 요인에 의한 영향을 배제하기 위해 모래입자 크기를 제외한 다른 조건은 모두 동일한 조건으로 유지하고, 체진동기를 이용하여 분류할 수 있는 모래입자 중에서 입자간의 크기차이가 명확하게 나타나는 3개의 범위를 선정하여 NX코어 크기로 시험편을 제작하였다.

각각의 모래입자 크기는 표준체규격에 따라 MS-A(0.25~0.425 mm), MS-B(0.50~0.85 mm), MS-C(1.19~2.00 mm)로 분류하였으며 모래와 시멘트 질량비 및 물의 비는 1:1:0.4로 하였다. 시험편 제작에 사용된 시멘트는 비중 3.15의 일반 포틀랜드 시멘트이다. 또한 시험편 제작 시 발생할 수 있는 시험편 내부의 공극을 최대한 줄이고자 바이브레이터를 이용하여 충분한 다짐을 수행하였으며, KS F 2827(온수 양생법)규정에 준하여 7일간 수중 양생을 수행하였다. 위와 같은 방법에 따라 제작된 모르타르 시험편은 Fig. 3과 같다.

(a)

(b)

(c)

Fig. 3. Mortar specimens with different size of sand particle; (a) particle size of sand = 0.25~0.425 mm, (b) particle size of sand = 0.50~0.85 mm, (c) particle size of sand = 1.19~2.00 mm.

절리의 개수와 각도를 고려한 인공절리 시험편

Kim 등(2004)에 의하면 절리에서 충전물질의 존재 유무는 암반구조물의 안정성에 매우 큰 영향을 미치는 요소로 분류하고 있다. 일반적으로 암석에 존재하는 절리는 불규칙적이고 시추 방향 및 암석코어 채취 시 작업환경에 의한 영향을 많이 받으므로 실내시험에 적합한 형태의 절리 시험편을 얻기가 쉽지 않다. 또한 절리의 분포

Fig. 4. Gypsum mold for producing artificial joints in rock specimen.

양상은 매우 다양하여 각각의 절리에 대한 결과분석을 통해 해당지역의 절리군에 대한 대푯값을 선정하기는 쉽지 않다. 따라서 절리의 분포특성 및 절리 내 충전물질의 분포특성에 따른 암석의 동적거동특성을 살펴보기 위하여 본 연구에서는 암석시험편을 대상으로 인공절리를 성형하고, 절리의 양단면 사이에 충전물질이 존재하는 경우를 가정하여 절리의 형태를 단순화시킨 시험편을 제작하였다. 시험편 제작에 사용된 충전물질은 일반주입용 A 급 석고로, 표준 혼수량 75%, 경화 팽창률 0.12%, 압축강도 14.7 MPa인 제품을 사용하였으며, 표준 혼수량에 맞춰 석고와 물의 비를 1:0.75로 성형하였다.

시험편은 절리의 개수와 각도에 따른 절리 분포형태를 고려하기 위하여 인공절리의 각도가 각각 0°, 30°, 60°, 90°인 4가지의 경우를 가정하였으며 각각의 각도별로 7개의 시험편이 1개의 set가 되도록 시험편을 제작하였다. 또한 각 set마다 시험편의 절리 개수를 1, 2, 3개로 증가시키면서 절리의 개수가 증가할 때 마다 양단자유 공진주 시험을 수행하였다. 인공절리 제작에 사용된 시험편은 총 28개의 화강암질 편마암 시험편을 대상으로 하였으며, 역학적 물성 중 매질의 특성과 관련된 탄성과 속도를 기준으로 각 set의 탄성과 속도의 평균값이 비슷한 값을 갖도록 시험편을 분류하였다. 각각의 절리간격은 수직거리가 동일하도록 등간격으로 제작하였으며, 충전에 따른 길이 및 형상 변화를 최소화 하고자 Fig. 4와 같이 성형틀을 제작하여 사용하였다. Fig. 5는 인공절리의 개수와 각도를 달리하여 제작된 시험편의 모습이다.

충전물의 두께와 각도를 고려한 인공절리 시험편

암석을 이용한 인공절리 시험편은 절리를 성형하는데 제한요소가 많기 때문에 다양한 형태의 절리를 묘사하기

(a) Single artificial joint

(b) Double artificial joint

(c) Triple artificial joint

Fig. 5. Rock specimens with artificial joint (joint angle : 30°).

어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 암석시험편의 시험편 성형에 대한 제한을 극복하고 절리의 각도 및 충전물의 두께에 따른 동적물성 변화를 분석해 보고자 암석과 유사한 성질을 갖는 경석고와 일반석고를 이용하여 NX코어 크기로 시험편을 제작하였다. 경석고는 미립의 분말로 시험편을 성형하였을 때, 매질이 매우 균질하고 암석에 비해 시험편을 성형하기 쉬우며 우수한 강도를 갖는다. ISRM(1978)에서 규정하고 있는 충전물은 불연속면에서 인접한 암석 벽면을 분리시키는 물질로, 보통 모암보다 강도가 약한 경우가 대부분이다. 따라서 자연 상태에 존재하고 있는 모암과 충전물질의 관계를 고려하여 경석고를 모암으로, 일반석고를 충전물질로 가정하여 경석고 사이에 일반석고를 충전하는 형태로 시험편을 제작하였다. 시험편 제작에 사용된 경석고는 표준 혼수량 21%, 경화팽창률 0.09%, 압축강도 92 MPa인 제품을 사용하였다.

Fig. 6. Comparison of each volume by standard joint and inclined joint.

석고절리 시험편을 제작할 때 충전물의 두께는 1, 2, 3 cm로 가정하였으며, 시험편이 갖는 인공절리의 각도는 0°, 15°, 30°, 45°, 60°가 되도록 하였다.

충전물질의 양을 고려한 치환절리 시험편

Fig. 6에서 나타낸바와 같이, 충전물질을 포함하고 있는 시험편은 절리의 경사각에 따라, 동일한 부피를 갖는 시험편 내에서도 충전물질의 양이 달라지며, 이러한 차이는 시험편의 매질특성 및 비중의 차이로 나타나게 된다. 따라서 Fig. 6과 같은 개념을 도입하여 시험편의 각도가 변화함에 따라 달라지는 충전물질의 양을 부피로 환산하여 비교 하였다. 충전물질의 두께를 h 라 할 때, 절리의 각도(θ)가 다르더라도 h 의 값은 서로 동일하다. 하지만 절리의 각도에 따른 충전물과 경석고의 접촉면적은 서로 다르다. 이러한 차이로 인해 충전물질이 차지하는 부피 차이는 $h(A_i - A_s)$ 로 표현할 수 있으며, 충전물질의 양의 차이는 결국 시험편 내부를 통과하는 충격파의 이동속도 차이로 나타나게 된다. 이러한 개념을 통해 동일한 양의 충전물을 갖는 0° 각도의 치환절리 시험편을 제작하였으며, 각도를 갖는 인공절리 시험편과의 비교를 통해 충전물질의 각도가 동탄성계수와 동전단계수에 미치는 영향을 분석해보고자 하였다.

시험 결과

모래입자 크기에 따른 모르타르 시험편의 기본물성 및 동적물성 특성

본 연구에서 제작된 모르타르 시험편의 동적물성값을

Table 2. Physical properties of mortar specimens with different sand particle size

Specimen groups*	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			
MS-A	19.11	14.09	2,770	1,600	29.7	14.1	0.22
MS-B	18.47	13.70	3,140	1,810	32.7	17.5	0.22
MS-C	18.01	11.27	3,270	1,890	36.8	18.8	0.21

*MS-A ; 0.250~0.425 mm, MS-B ; 0.500~0.850 mm, MS-C ; 1.190~2.000 mm.

Fig. 7. Elastic wave velocity with different sand particle size of mortar specimens.

Fig. 8. Absorption with different sand particle size of mortar specimens.

측정하기에 앞서서 물리적, 역학적 특성을 파악하기 위한 물성시험을 수행하였다. Table 2는 모르타르 시험편의 기본물성시험 결과이다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 모래입자의 크기가 커질수록 탄성과 속도는 증가하는 양상을 보이고 있다. 반면 흡수율은 모래입자의 크기가 증가할수록 작아지는 것으로 나타났다(Fig. 8). 일축압축강도와 탄성계수는 모래입자의 크기가 커짐에 따라 함께 증가하는 결과를 나타내었으며, 전체적인 모르타르 시험편의 물성값은 모래입자의 크기에 비례하여 증가하는 것으로 나타났다(Table 2).

모르타르 시험편에 대한 양단자유 공진주 시험의 결과는 Table 3에 정리한 바와 같다. 모르타르 시험편의 동탄성계수는 모래입자의 크기가 클수록 증가하는 것으로 나타났다. 이는 동탄성계수가 탄성과 속도 및 탄성계수 값과 비례하여 증가하는 것으로 나타났던 선행 연구결과와 부합되는 결과이다(Min *et al.*, 2011). 또한 동전단계수 역시 모래입자의 크기가 커질수록 점차 증가하는 경향이 나타났다. 그러나 Fig. 9에서 확인할 수 있듯이 동

탄성계수의 증가율은 동전단계수의 증가율보다 높게 나타난다. 이러한 결과는 동탄성계수와 동전단계수의 값을 통해 산정할 수 있는 동포아송비에 반영되어 나타나게 되며, 동포아송비는 모래입자의 크기가 커질수록 증가하는 경향을 보인다(Fig. 10).

모르타르 시험편의 감쇠비는 종파모드의 경우 모래입자의 크기가 작아질수록 0.51, 0.53, 0.58로 증가하는 것으로 나타났다. 또한 비틀림파 모드에서의 감쇠비는 MS-A에서 1.23, MS-B의 경우 0.69, MS-C의 결과에서 0.83으로 나타나 특별한 경향을 확인하기 어려웠다. 하지만 이러한 결과는 평균값을 통해 나타난 결과로서, MS-C-4 시험편에 대한 비틀림파 모드의 감쇠비가 다른 시험편의 결과값보다 2배 이상 높은 값이 나타나 전체 결과에 큰 영향을 주었기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 MS-C-4 시험편을 제외한 시험편들의 감쇠비를 분석해 보면 MS-C의 경우 감쇠비는 0.68로 간주할 수 있다. 따라서 Fig. 11에서 보는 바와 같이 모래입자의 크기가 작아질수록 감쇠비가 점차 증가하는 결과를 확인할 수 있었다.

Table 3. Dynamic properties of mortar specimens with different sand particle size

Specimen groups		Longitudinal mode				Torsional mode				ν_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)	
MS-A (0.25 ~ 0.425 mm)	1	2,800	14,250	0.53	14.6	1,850	9,400	1.33	6.3	0.15
	2	2,820	14,300	0.61	14.1	1,830	9,287	1.21	5.9	0.19
	3	2,760	14,290	0.48	13.9	1,840	9,488	1.32	6.1	0.13
	4	2,810	14,430	0.69	14.3	1,830	9,412	1.06	6.1	0.18
	5	2,750	14,000	0.58	13.8	1,820	9,263	1.21	6.0	0.14
	Ave.	2,790	14,254	0.58	14.1	1,830	9,370	1.23	6.1	0.16
MS-B (0.500 ~ 0.85 mm)	1	3,070	15,460	0.52	17.8	2,000	10,060	0.87	7.5	0.18
	2	3,000	15,150	0.53	16.9	1,960	9,925	0.76	7.2	0.17
	3	3,060	15,540	0.60	18.1	1,990	10,110	0.74	7.6	0.18
	4	3,040	15,430	0.44	17.0	2,010	10,190	0.61	7.4	0.15
	5	3,030	15,530	0.56	17.0	1,990	10,190	0.49	7.3	0.16
	Ave.	3,040	15,422	0.53	17.3	1,990	10,095	0.69	7.4	0.17
MS-C (1.190 ~ 2.00 mm)	1	3,120	15,780	0.55	19.0	2,010	10,160	0.80	7.9	0.21
	2	3,180	16,280	0.42	19.8	2,060	10,540	0.71	8.3	0.19
	3	3,080	15,390	0.41	18.4	2,020	10,100	0.62	7.9	0.16
	4	3,160	15,990	0.63	20.0	2,040	10,300	1.46	8.3	0.21
	5	3,200	16,430	0.53	20.2	2,060	10,580	0.59	8.4	0.21
	Ave.	3,150	15,974	0.51	19.5	2,040	10,336	0.83	8.2	0.19

* V_L : velocity of longitudinal wave, F_L : resonant frequency in longitudinal mode, D_L : damping ratio in longitudinal mode, E_d : dynamic Young's modulus, ν_d : dynamic Poisson's ratio. V_T : velocity of torsional wave, F_T : resonant frequency in torsional mode, D_T : damping ratio in torsional mode, G_d : dynamic shear modulus, **Fig. 9.** Relationship between sand particle size and dynamic moduli in Young's and shear. **Fig. 10.** Relationship between sand particle size and dynamic Poisson's ratio.

Jung 등(2010)에 의하면 시험편의 강도 및 강성도(공진주파수)가 증가할수록 감쇠비는 대체로 작게 결정되는

Fig. 11. Relationship between sand particle size and damping ratio.

경향을 보인다. 모르타르 시험편의 시험결과를 분석해 보면 모래입자의 크기가 커질수록 시험편 내부의 매질의 결합력은 치밀하고 단단한 것으로 판단된다. 이는 시멘트가 약 $50 \mu\text{m}$ 정도의 크기를 갖는 미립자로 모래입자 사이의 틈을 채우는 충전작용을 하기 때문인 것으로 사료된다. 그 결과 시험편 내부에 입자간의 결합력 차이가 나타나게 되고, 이러한 차이에 의해 기본물성 및 동적물성이 각각 다른 양상을 나타내는 것으로 판단할 수 있다.

절리의 개수와 각도에 따른 시험편의 동적물성 특성

인공절리의 개수와 각도를 고려하여 제작된 암석 인공절리 시험편의 양단자유 공진주 시험의 결과는 Table 4 와 같다. 암석시험편의 인공절리에 의한 영향을 고려하기 위해 무결암 상태의 시험편을 대상으로 양단자유 공진주 시험을 수행하였으며, 인공절리의 개수를 증가시키면서 양단자유 공진주 시험을 수행하여 각각의 동탄성계수와 동전단계수 그리고 감쇠비를 구하였다.

암석 인공절리 시험편의 양단자유 공진주 시험 결과는 절리의 개수가 증가할수록 동탄성계수는 점차 감소하는

Table 4. Dynamic properties of artificial joint specimens with different joint angle

Joint angle (°)	Joint number	Longitudinal mode				Torsional mode				ν_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)	
0	0	4,330	19,254	0.58	51.4	2,850	12,684	0.34	22.3	0.15
	1	3,520	15,587	1.26	33.5	2,310	10,236	0.74	14.5	0.16
	2	3,330	14,754	1.06	29.8	2,160	9,580	0.64	12.6	0.19
	3	3,120	13,809	1.06	25.8	1,910	8,457	1.19	9.7	0.36
30	0	4,320	19,224	0.75	51.0	2,880	12,810	0.31	22.6	0.13
	1	3,480	15,491	0.89	32.7	2,450	10,884	0.52	16.1	2.00
	2	3,210	14,319	0.86	27.5	2,310	10,284	0.69	14.2	-0.03
	3	3,070	13,696	0.93	24.9	1,850	8,261	0.76	9.1	0.38
60	0	4,340	19,440	0.69	51.5	2,880	12,893	0.36	22.6	0.14
	1	3,780	16,926	0.92	38.2	2,480	11,076	0.62	16.3	0.19
	2	3,560	15,923	1.27	33.3	2,210	9,876	0.70	12.8	0.31
	3	3,340	14,976	1.54	29.1	2,100	9,425	0.62	11.5	0.28
90	0	4,430	19,719	0.60	54.0	2,890	12,893	0.39	23.1	0.17
	1	4,290	19,090	0.97	49.8	2,390	10,617	0.88	15.4	0.62
	2	4,310	19,133	1.67	48.0	2,230	9,928	0.60	12.9	0.86
	3	4,260	18,959	1.88	44.9	2,080	9,234	1.48	10.6	1.11

* V_L : velocity of longitudinal wave,

F_L : resonant frequency in longitudinal mode,

D_L : damping ratio in longitudinal mode,

E_d : dynamic Young's modulus,

ν_d : dynamic Poisson's ratio.

V_T : velocity of torsional wave,

F_T : resonant frequency in torsional mode,

D_T : damping ratio in torsional mode,

G_d : dynamic shear modulus,

경향을 나타낸다(Fig. 12). 특히 절리의 개수가 1개인 경우 동탄성계수의 감소가 가장 크게 나타났으며, 절리의 개수가 2개와 3개인 경우 동탄성계수는 절리의 개수가 증가할 때마다 일정한 수준으로 감소한 것으로 나타났다.

절리의 각도가 90° 인 시험편에서는 절리의 개수에 따른 동탄성계수의 감소가 30° , 60° 인 시험편에 비해 작게 나타났다. 이러한 결과는 절리의 각도가 90° 인 시험편의 충전물질이 종파의 진행방향과 평행인 위치에 존재하여 다른 각도의 시험편에 비해 충전물질이 충격파의 진행에 미치는 영향이 가장 적기 때문인 것으로 판단된다. 동전 단계수의 값은 Fig. 13과 같이 각도에 따른 영향은 거의 나타나지 않고 절리의 개수가 증가할수록 비슷한 수준으

로 감소하는 경향만 확인할 수 있었다.

종파모드와 비틀림파 모드의 감쇠비는 일부 구간에서 확인한 차이가 나타난다. 그러나 절리의 각도가 0° 및 30° 인 시험편처럼 시험편 간의 감쇠비 차이가 거의 없는 경우도 나타나고 있다(Fig. 14 and 15). 따라서 각도에 따른 감쇠비의 경향 분석은 어려우나 절리의 개수가 증가함에 따라 전체적인 감쇠비가 증가하는 경향은 확인할 수 있다. Jung 등(2010)에 의하면 공진주파수의 감쇠비는 시험의 조건에 따라 불규칙적으로 저주파 영역에서 과대한 에너지를 갖는 경우, 저주파 영역과 고주파 영역 모두에서 과대한 신호를 갖는 경우 등 매우 다양한 양상의 오류가 포함된 신호를 획득하는 경우가 발생하는 것

Fig. 12. Relationship between dynamic Young's modulus and number of artificial joints.

Fig. 13. Relationship between dynamic shear modulus and number of artificial joints.

Fig. 14. Damping ratio distribution in longitudinal mode with the number of artificial joints.

Fig. 15. Damping ratio distribution in torsional mode with the number of artificial joints.

으로 보고하고 있다. 그러나 이러한 실험적 오류의 원인은 현재까지 명확하게 설명되지 못하고 있으며 일반적으로 가속도계와 시험편의 불완전한 접촉, 충격하중 재하시 입력신호의 불규칙한 오류, 시험 시스템의 전기적인 잡음, 연속적인 충격 하중으로 인한 시험편의 미세한 운

동 등이 복합적으로 작용하여 감쇠비 산정에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

충전물의 두께와 각도에 따른 시험편의 동적물성 특성

충전물의 두께와 각도에 따른 석고시험편의 양단자유

Table 5. Dynamic properties of artificial joint specimen and conversion specimen

Joint angle (°)	Thickness of joint (cm)	Longitudinal mode				Torsional mode				ν_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)	
0	1	2,630	12,890	0.68	13.7	1,710	8,387	0.74	5.8	0.18
	2	2,140	10,600	0.71	8.8	1,420	7,025	1.19	3.9	0.14
	3	1,880	9,325	3.16	6.6	1,300	6,425	1.44	3.1	0.05
15	1	2,570	12,500	2.85	13.5	1,690	8,213	0.54	5.8	0.16
	2	2,070	9,875	0.51	8.4	1,360	6,500	0.67	3.7	0.15
	3	1,910	9,363	0.53	6.9	1,300	6,375	1.08	3.2	0.08
conversion	1	2,520	12,710	1.33	12.7	1,650	8,313	0.83	5.4	0.17
	2	2,020	9,838	0.57	7.8	1,330	6,500	0.58	3.4	0.15
	3	1,890	9,138	0.61	6.8	1,260	6,112	0.71	3.0	0.12
30	1	2,440	12,030	0.62	11.3	1,710	8,412	0.77	5.5	0.02
	2	2,050	10,130	0.80	7.8	1,480	7,325	0.46	4.1	-0.04
	3	1,870	9,200	0.82	6.2	1,330	6,525	0.49	3.1	-0.01
conversion	1	2,460	12,230	0.67	12.0	1,640	8,125	0.60	5.3	0.13
	2	2,100	10,390	1.03	8.3	1,390	6,875	0.80	3.7	0.14
	3	1,910	9,488	3.22	6.7	1,290	6,400	1.75	3.0	0.10
45	1	2,350	11,390	1.43	11.1	1,750	8,463	0.44	6.1	-0.09
	2	1,980	9,525	2.10	7.5	1,370	6,600	0.57	3.6	0.04
	3	1,860	8,662	1.52	6.2	1,260	5,875	1.06	2.9	0.09
conversion	1	2,220	10,860	0.46	9.6	1,460	7,125	0.79	4.1	0.16
	2	1,950	9,563	0.59	7.2	1,290	6,325	0.79	3.1	0.14
	3	1,790	8,638	0.87	5.8	1,220	5,900	2.02	2.7	0.07
60	1	2,290	11,510	0.82	9.8	1,680	8,475	1.62	5.3	-0.08
	2	2,150	10,880	0.51	8.3	1,540	7,800	0.39	4.3	-0.03
	3	2,050	10,090	0.93	7.0	1,400	6,900	1.45	3.3	0.07
conversion	1	2,160	10,590	0.77	8.7	1,480	7,263	0.42	4.1	0.06
	2	1,860	9,213	1.16	6.1	1,280	6,362	0.89	2.9	0.05
	3	1,760	8,700	0.51	5.1	1,190	5,888	0.85	2.3	0.09
Standard specimen	Anhydrite	3,340	16,880	0.48	23.1	2,130	10,760	0.64	9.4	0.23
	Gypsum	2,070	10,390	0.90	6.6	1,340	6,710	0.75	2.7	0.20

* V_L : velocity of longitudinal wave,

F_L : resonant frequency in longitudinal mode,

D_L : damping ratio in longitudinal mode,

E_d : dynamic Young's modulus,

ν_d : dynamic Poisson's ratio.

V_T : velocity of torsional wave,

F_T : resonant frequency in torsional mode,

D_T : damping ratio in torsional mode,

G_d : dynamic shear modulus,

공진주 시험 결과는 Table 5에 나타난 바와 같다. 동탄성계수와 동전단계수는 충전물의 두께가 두꺼워 질수록 감소하는 경향이 나타났다(Fig. 16 and 17). 특히 충전물 질의 두께가 1 cm인 시험편의 동탄성계수는 인공절리의 각도가 0°일 때 가장 큰 값을 나타냈고 15°, 30°, 45°, 60°순으로 절리의 각도가 커질수록 동탄성계수 값이 점차 작아지는 것으로 나타났다. 하지만 충전물 질의 두께가 2 cm 이상으로 두꺼워 지게 되면 각도에 따른 동탄성계수 값의 차이는 뚜렷한 경향을 보이지 않고 불규칙적으로 나타나며, 인공절리의 각도가 클수록 충전물 질의 두께와 동탄성계수 감소율 사이의 상관관계가 줄어드는

경향이 나타났다.

동전단계수의 경우 Fig. 17에서 보는 바와 같이 절리의 각도에 의한 영향이 뚜렷하게 나타나지 않고, 충전물 질의 두께가 두꺼워 질수록 점차 감소하는 경향을 나타내었다. 충전물 질의 두께가 3 cm일 때 각 시험편사이의 동전단계수 값이 2.9~3.3 GPa의 범위에서 불규칙적인 값으로 나타나며, 시험편의 인공절리 각도에 따른 결과값의 범위가 가장 작은 것으로 나타났다.

치환절리 시험편과 경사각을 갖는 시험편의 동탄성계수를 비교 분석해본 결과 인공절리의 각도가 15°, 45°, 60°인 시험편에서는 치환절리 시험편의 동탄성계수가 경사각을 갖는 절리를 포함한 시험편보다 더 작은 값을 갖는 것으로 나타났으나 절리의 각도가 30°인 시험편에서는 치환절리의 동탄성계수가 경사각을 갖는 시험편보다 큰 값을 갖는 것으로 나타났다. 또한 절리의 각도가 증가할수록 각도를 갖는 인공절리 시험편과 치환절리 시험편의 동탄성계수 편차가 더욱 크게 나타났다(Fig. 18). 치환절리 시험편과 경사각을 갖는 시험편의 동전단계수의 결과는 Fig. 19에서 보는 바와 같이 각도를 갖는 인공절리 시험편의 동전단계수가 동일한 양의 충전물 질을 갖는 치환절리 시험편보다 큰 값을 나타내었으며 인공절리의 각도가 클수록 두 시험편간의 동전단계수 편차가 커지는 것으로 나타났다.

인공절리 시험편에서 동포아송비는 Table 5에서 보는 바와 같이 시험편의 인공절리 각도가 30°, 45°, 60°인 일부 시험편에서 음수값으로 나타난다. 이는 암석을 이용한 인공절리 시험편에서도 나타나는 결과로, Min 등(2011)은 충남 연기군 지역의 화강암 시험편의 동적물성 특성을 분석한 연구를 통해 동탄성계수가 동포아송비의 두 배가 되는 지점 즉, 탄성과 속도가 2,254 m/s가 되는 지점에서 동포아송비의 값이 0이 되는 것으로 추정한다. 이러한 결과는 추세선식을 이용한 제한된 지역의 화강암 시험편에 대한 시험결과이지만 매질의 특성에 따라 동포아송비가 음수값을 갖는 경우가 나타날 수 있다는 것을 의미한다. 인공절리를 포함하는 시험편에서는 동탄성계수의 값이 동전단계수 값보다 상대적으로 낮게 측정되는 경우가 나타나는데 이러한 경우 기준에 제안된 식을 적용하여 동포아송비를 산정할 경우 음수값을 갖는 경우가 나타났다. 따라서 시험편 매질이 절리를 포함하거나 풍화 등에 의한 영향을 받은 경우 적용할 수 있도록 동포아송비의 계산식에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

토의 및 고찰

최근 몇 년간 공진주 시험을 통한 암석 및 모르타르

Fig. 16. Relationship between dynamic Young's modulus and joint thickness.

Fig. 17. Relationship between dynamic shear modulus and joint thickness.

Fig. 18. Dynamic Young's modulus of artificial specimen ; (a) conversion angle = 15°, (b) conversion angle = 30°, (c) conversion angle = 45°, (d) conversion angle = 60°.

시험편의 동적특성에 대한 연구는 Mok(1999), Cho 등 (2007), Lee(2011), Min 등(2011)에 의해 수행된바 있다. 하지만 기존의 연구들은 콘크리트 구조물 및 암종별 동적물성 특성에 관한 연구나, 동적물성을 산정하는 방법에 대한 기초연구를 중심으로 진행되어, 절리나 파쇄대, 이방성 등 불연속면을 포함하고 있는 지질조건에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 따라서 앞서 수행된 선행 연구의 결과만으로 동적물성 값을 추정하기에는 어려움이 있으며, 불연속면이나 풍화조건 등에 따른 추가적인 연구의 필요성이 높아지고 있다. 따라서 본 연구에서는 선행 연구들의 시험방법 및 연구결과를 기초로 하여 시험편의 동적물성 특성에 영향을 미칠 수 있는 요소들

고려하고, 이러한 요소들이 시험편의 동적물성에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 특히 매질을 이루는 입자의 크기변화와 암반 내에 존재하는 불연속면의 형태가 동적물성 특성에 미치는 영향을 분석하고자 암석과 시멘트, 석고를 이용하여 시험편을 제작하고 각각의 시험편에 대한 양단자유 공진주 시험을 수행하였다.

앞서 수행된 시험의 결과를 토대로 시험편의 동적물성 특성에 대해 정리해 보면 시험편의 매질의 결합상태가 좋을수록 높은 정적 및 동적물성 값을 나타내고, 절리를 포함한 시험편의 경우 절리의 개수, 충전물질의 두께가 동적물성을 감소시키는 역할을 하며, 각도에 따라 충격파의 거동특성이 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다. 이

Fig. 19. Dynamic shear modulus of artificial specimen; (a) conversion angle = 15°, (b) conversion angle = 30°, (c) conversion angle = 45°, (d) conversion angle = 60°.

러한 결과는 매질의 결합상태와 파동의 특성으로 인한 반사 및 굴절현상으로 설명할 수 있다. 본 연구에서 수행된 인공절리 시험편의 양단자유 공진주 시험에서, 절리를 포함하고 있는 시험편은 충전물질로 인해 서로 다른 매질로 구성되어 있는 것으로 간주할 수 있으며, 이로 인해 충전물질과 모암의 경계면에서 반사 및 굴절현상을 유발하게 된다. 절리의 개수가 증가하거나 충전물의 두께가 두꺼워지면 파동의 감쇠와 반사, 굴절현상이 활발하게 나타나고, 이에 따른 충격파의 감쇠현상으로 인해 공진주파수가 감소하게 되며, 이는 곧 동적물성 값의 감소로 나타나게 된다. 또한 인공절리의 각도에 따라 충격파의 굴절 및 반사의 정도가 각각 다르기 때문에, 절리의

각도에 따라 동일한 양의 충전물을 갖는 시험편 사이에서도 동적물성 값의 차이가 나타나는 것으로 설명할 수 있다.

결론

본 연구에서는 공진주파수를 이용하여 시험편 매질 특성에 따른 동적물성 값의 변화양상을 알아보고자 모르타르 시험편과 암석 및 석고를 이용한 인공절리 시험편을 제작하여 양단자유 공진주 시험을 수행하였다. 이를 통해 시험편의 동탄성계수와 동전단계수, 그리고 감쇠비 및 포아송비 등을 산정하고, 각각의 동적물성 특성을 비

고 분석하였다. 또한 각도에 따라 달라지는 충전물질의 양을 계산하여 0°의 각도로 환산한 치환절리 시험편을 제작하였으며 각도를 갖는 인공절리 시험편과 비교 분석하였다. 각각의 시험편에 대한 양단자유 공진주 시험 결과를 통해 분석된 동적물성의 특성은 다음과 같다.

1. 모르타르 시험편에 대한 양단자유 공진주 시험의 결과, 시험편의 동탄성계수와 동전단계수는 모래의 입자크기가 커질수록 증가하였다. 동포아송비는 동탄성계수와 동전단계수의 값을 통해 계산되는 값으로 모래입자의 크기가 커짐에 따라 증가하는 경향이 나타났다. 또한 모르타르 시험편의 감쇠비는 종파모드와 비틀림과 모드에서 모래입자의 크기가 작을수록 높은 감쇠비를 갖는 것으로 나타났다.
2. 인공절리를 포함하는 암석 시험편에 대한 시험 결과에서는 절리의 개수가 증가할수록 동탄성계수와 동전단계수 값은 점차 감소하였다. 또한 절리의 각도가 90°인 시험편에서 절리의 개수에 따른 동탄성계수의 감소가, 절리의 각도가 0°, 30°, 60°인 시험편에 비해 작은 것으로 나타났다. 종파 모드와 비틀림과 모드의 감쇠비는 일부구간에서는 감쇠비의 차이가 확실하게 나타나지만 감쇠비의 차이가 거의 없는 경우도 나타나기 때문에 각도에 따른 비교분석은 어려우나 절리의 개수가 증가할수록 전체적으로 감쇠비 값이 증가하는 경향은 확인할 수 있었다.
3. 경사각을 갖는 절리를 포함한 석고시험편의 동적물성을 측정된 결과 동탄성계수와 동전단계수는 충전물의 두께가 두꺼워질수록 감소하는 경향이 나타났다. 또한 인공절리의 각도가 클수록 충전물질의 두께와 동탄성계수 감소율 사이의 상관관계가 줄어드는 경향을 나타냈다. 동전단계수의 경우 절리의 각도에 의한 영향은 뚜렷하게 나타나지 않았으며, 충전물의 두께가 두꺼워 질수록 점차 감소하는 경향을 나타내었다.
4. 치환절리 시험편과 경사각을 갖는 절리를 포함한 시험편의 동탄성계수를 비교 분석해 보면 15°, 45°, 60°인 시험편에서 각도를 포함하고 있는 시험편의 동탄성계수가 치환절리 시험편보다 큰 것으로 나타났으며, 절리의 각도가 증가 할수록 두 시험편간의 동탄성계수의 편차가 큰 것으로 나타났다. 동전단계수의 경우 각도를 갖는 인공절리를 포함한 시험편의 동전단계수 값이 치환절리 시험편보다 큰 값을 나타내었으며 동탄성계수의 결과와 마찬가지로 각도가 증가할수록 두 시험편 간의 값의 편차가 큰 것으로 나타났다.

본 연구에서 수행된 암석 및 인공시험편의 매질상태

및 절리 분포양상에 따른 양단자유 공진주 시험의 결과는 충전물질의 다양성 및 지하수 조건 등 실제 암반과 동일한 절리 조건에 대한 시험은 아니며 단순화된 절리를 대상으로 일부 조건만 고려한 시험 결과이다. 따라서 본 연구의 결과를 기준으로 하여 실제 암반 절리의 동적물성 특성을 명확하게 정의할 수는 없으나 향후 다양한 형태의 절리를 포함하는 암석 시험편에 대한 추가시험을 통해 절리특성에 따른 동적물성 값의 상관관계를 이해하는데 있어 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- ASTM C 215-02, 2003, Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of concrete Specimens.
- Cho, J.W., Lim, B.S., Cho, H.B., Jeon, S.W. and Ha, H.S., 2007, "Investigation on Impact-Echo Testing Method for Rock Specimens," *Tunnel & Underground Space*, Vol. 12, No. 2, pp. 83-89.
- Ha, T.W. and Yang, H.S., 2006, "A Numerical Analysis of Dynamic Behavior of Rock Mass with Intense Discontinuities," *Tunnel & Underground Space*, Vol. 16, No. 5, pp. 394-404.
- ISRM, 1978, "Suggested Methods for Quantitative Description of Discontinuities in Rock Mass," *International Society for Rock Mechanics Commission on Standardization of Laboratory and Field Test*, Vol. 15, pp. 320-368.
- Jun, D.H. and Kang, H.G., 2008, "Seismic Response of R/C Structures Subjected to Artificial Ground Motions Compatible with Design Spectrum," *Journal of the earthquake engineering society of Korea*, Vol. 12, No. 1, pp. 1-9.
- Jung, B.S., Lee, J.H. and Kweon, G.C., 2010, "Application of Impact Resonance Test to the Determination of Elastic Modulus and Damping Ratio of Concrete," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 22, No. 5, pp. 625-632.
- Kim C.Y., Kim, K.Y., Baek, S.H., Moon, H.K. and Lee, S.D., 2006, "Numerical Analysis on the Effect of Fractured Zone on the Displacement Behavior of Tunnel," *Tunnel & Underground Space*, Vol. 16, No. 3, pp. 218-231.
- Kim, Y.J., Lee, Y.H. and Do, S.K., 2004, "Basic Study on Shear Characteristics of Filled Rock Joint," *Tunnel & Underground Space*, Vol. 14, No. 5, pp. 318-326.
- KS F 2827:2011, Standard Test Method for Production Control of Concrete Method of Rapid for Compressive Strength of Concrete(Warm Water Curing Method), *Korean Industrial Standards*.

Lee, O.T., 2011, Measurement Method of Elastic Constants of Transversely Isotropic Rocks Using the Banded Gneiss Distributed in Onyang Region, MS Thesis, Kangwon National University, pp. 61-64.

Min, J.H., Lee, S.J. and Choi, S.O., 2011, "Characteristics of Dynamic Properties of Granite Specimen Chungnam

Yeongi Area," *Tunnel & Underground Space*, Vol. 21, No. 6, pp. 480-493.

Mok, Y.J., 1999, "Measurement of Elastic Moduli of Rock Cores Using Free-Free Resonance Tests," *Journal of the earthquake engineering society of Korea*, Vol. 3, No. 4, pp. 95-100.

황 희 영

2011년 강원대학교 공과대학 에너지·자원 공학과, 공학사

현재 강원대학교 공과대학 에너지·자원공학과 석사과정
(E-mail: hhy0923@kangwon.ac.kr)

최 성 웅

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

현재 강원대학교 공과대학 에너지·자원공학과 교수
(E-mail: choiso@kangwon.ac.kr)