

포천 화강암의 미세균열 분포 이방성이 탄성과 공진특성에 미치는 영향

강태호¹ · 김광염^{1*} · 박덕원² · 신휴성¹

¹한국건설기술연구원, ²한국지질자원연구원

Influence of Anisotropy of Microcrack Distribution in Pocheon Granite Rock on Elastic Resonance Characteristics

Tae-Ho Kang¹, Kwang Yeom Kim^{1*}, Deok-Won Park², and Hyu-Soung Shin¹

¹Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, Korea

²Groundwater & Geothermal Resources Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 30 Gajeongdong, Yuseong, Daejeon 305-350, Korea

Received 1 August 2014; received in revised form 22 August 2014; accepted 26 August 2014

화강암은 미세균열 및 광물입자의 배열형태에 따라 직교하는 세 방향(rift, grain, hardway)의 이방성을 내포한다. 본 연구에서는 포천화강암의 미세균열 분포특성에 따른 이방성이 탄성과에 미치는 영향을 확인하기 위해서 자유단공진시험을 수행하였으며, 비구속압축파, 전단파, 포아송비, 재료 감쇠비등의 공진특성 등을 파악하였다. 결과적으로, 미세균열 분포 특성에 따라 비구속압축파와 전단파가 서로 다른 경향을 보여주고 있음을 확인하였다. 또한, 포아송비와 재료감쇠비도 세 개의 결방향에 따라 이방성 특성이 나타남을 확인하였다.

주요어: 포천화강암, 이방성, 미세균열, 자유단공진시험

Granite rock is reported to have three orthogonal anisotropic planes i.e., rift, grain induced by microcrack characteristics and mineral arrangement. We investigated the influence of thus fabric anisotropy in granite on elastic wave properties using free-free resonance test to obtain unconstrained compression wave velocity, shear velocity, Poisson ratio and damping ratio. As a result, Rod wave velocity is more dependent on anisotropy of granite due to microcrack distribution than shear wave velocity. In addition, anisotropy of Poisson ratio and damping ratio is also observed with respect to three anisotropic planes.

Key words : Pocheon granite, anisotropy, microcrack, free-free resonance tests

서 론

암석은 내부에 미세균열(microcrack)이나 공극(void)을 내포하는 불연속적인 구조를 가지고 있다. 또한, 거시적인 스케일에서 암반의 형성과정에서 생성되는 층리, 엽

리 등과 같은 불연속적면은 암석의 물리, 수리 및 열역학적 이방특성과 밀접하게 관련이 있다(Philips and Philips, 1980). 이러한 암석의 이방특성은 열-수리-역학적 변형거동에서 등방암석과 비교해 상이한 결과를 초래할 수 있기 때문에 이방성을 고려한 암석의 특성화과

*Corresponding author: kimky@kict.re.kr

© 2014, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

정은 매우 중요하다. 이러한 이방특성을 내포하고 있는 다양한 암석 중 화강암은 이방성 방향이 육안으로 잘 관찰되지 않는 대표적인 암종이다. 일반적으로 화강암의 이방성은 형성과정에서 발생하는 미세균열 분포 특성에 기인한다고 알려져 있다(Douglass and Voight, 1969). 이러한 화강암 내부에 발달된 미세균열 분포특성을 결이라고 칭하는데, 미세균열의 분포 밀도에 따라 1결(Rift), 2결(Grain), 3결(Hardway)로 구별된다. 미세균열의 분포가 암석의 역학적 성질과 거동에 많은 영향을 미친다는 연구는 이미 많이 진행되어 왔다(Peng and Jopson, 1972; Schedl et al., 1986; Seo and Jeong, 1999; Park, 2005; Nasser and Mohanty, 2005). 이러한 연구들을 통해 지금까지 화강암내의 미세균열 분포가 물리-역학적 특성(탄성과 속도, 일축압축강도, 인장강도, 파괴인성 등에 영향을 미친다는 것이 알려져 왔다.

본 연구에서는 미세균열 분포 특성에 기인한 화강암의 탄성과 이방특성을 고찰하고자 하였다. 암석의 탄성과 속도는 재료의 밀도, 광물입자의 형상 및 배열, 공극 또는 미세균열의 발달 양상 등에 영향을 받기 때문에 균열밀도가 결방향에 따라 확연히 차이가 나는 화강암의 경우 이러한 탄성과의 이방특성이 나타나게 될 것이기 때문이다. 매질의 탄성과 속도 이방성은 탄성 상수를 계산하는데 있어서 가장 핵심적인 정보이다. 또한, 최근 수리자극과 관련된 에너지 분야 또는 지진연구 등에서 탄성파에 대한 기반암의 공진특성은 진원지 추적(source location) 및 지질구조 파악에 있어서 가장 중요한 정보이기 때문에 암석이 가지고 있는 탄성파의 공진 특성 파악은 매우 중요하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 화강암에의 미세균열 이방성에 따른 공진특성을 평가하기 위하여, 자유단공진시험(Free-free resonance tests)을 수행하였다. 자유단공진시험은 1983년 처음 개발된 비파괴 검사 기법으로, 충격에 의한 탄성파를 외부표면에서 매질 내에 발생시켜 내부균열 및 외부표면에서 반사되어온 파를 감지하고 그 반사파의 공진현상을 이용함으로써 원통형 암석코어나 콘크리트 공시체의 동적특성을 규명하는 기법이다(Sansalone and Streett, 1997). 이러한 동적특성으로는 비구속 압축파와 전단파의 속도, 재료감쇠, 포아송비 등이 있다. 이를 통해, 기존에 알려진 화강암의 미세균열 분포 이방성과 탄성과 공진특성과의 관계를 규명함과 동시에 국내 화강암 이방특성에 대한 핵심적인 정보를 제공하고자 한다.

시료 및 분석 방법

샘플시료

본 연구에서는 국내 화강암 중 이방성 특성이 확연히 나타나는 것으로 알려져 있는 포천지역의 대보화강암(이하 포천화강암)을 대상으로 실험을 수행하였다. 포천 화강암은 선캠브리아기의 편마암류를 관입한 주라기 대보화강암체에 속하며, 주 구성광물은 석영(32.7%), 사장석(29.3%), 정장석(4.8%), 미사장석(15.3%), 페다이트(13.4%), 흑운모(3.1%) 등으로 구성되어 있다. 앞서 언급한 바와 같이 화강암 내부에는 분포하고 있는 미세균열의 특성에 따라 존재하는 “결”을 채석장에서는 확인하고 채석방향 결정에 활용하고 있다. 채석작업이 용이한 방향이 1번 면(rift plane), 그 다음이 2번면(grain plane), 용이도가 가장 낮은 방향이 3번 면(hardway)이다. 이는, 국내 화강암질에서 공통적으로 보이는 현상이다. 일반적으로 미세균열이 분포하고 있는 면은 서로의 면을 직교하고 있다(Park et al., 2004). 이러한 특징은 전 세계 화강암에서 공통적으로 발견되며, 본 대상 시료인 포천화강암에서도 기존 연구결과(Park et al., 2004) 동일한 특징이 나타나는 것이 확인되었다.

미세균열이 탄성파의 공진특성에 미치는 영향을 살펴보기 위해서 미세균열이 분포하고 Rift, Grain, Hardway 면에 대하여 각각 코어링을 통해 시료를 채취하였다. 시료 채취는 각 면에 수직하게 채취하였으며, 코어의 직경은 5 cm, 길이는 20 cm이다. 여기서, Rift는 1면, Grain은 2면, Hardway는 3면에 수직하게 채취된 시료를 칭한다.

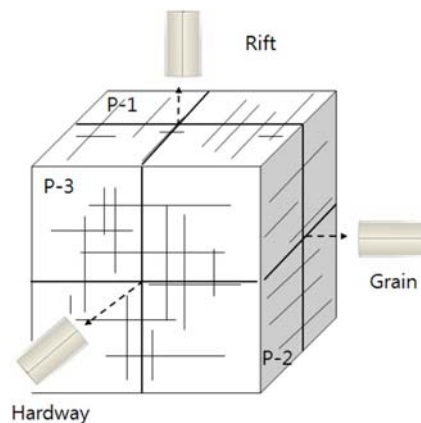


Fig. 1. Schematic of sample coring from Pocheon granite cube block. Three different coring directions are perpendicular to each of known planes (rift, grain, hardway).

실험 장비 및 방법

미세균열의 분포 방향을 확인하고 가공한 포천화강암 시료에 대하여 자유단공진시험법을 이용하여 공진주파수(Resonance frequency)를 측정하였다. 자유단공진시험법의 원리는 시험체 표면의 한점에서 순간응력파(Transient stress pulse)가 기계적 충격에 의해서 생성되면 이 펄스파는 시험체내로 전파되고 경계면에서 반사하게 된다. 이 반사파는 차례로 자유면에서 반사를 반복하게 되고, 따라서 순간 공진 조건이 경계면 사이에서 다중반사에 의해 형성된다. 이 공진주파수와 암석코어의 길이의 관계를 이용하여 속도를 비구속압축파 속도(V_c)와 전단파 속도(V_s)를 구하였다.

실험의 구성으로는 탄성과 감지에 가속도계(Accelerometer, PCB 352C68)를 사용하고, 탄성파를 발생시키기 위한 Source로는 Instrument Hammer (PCB, 086D80)를 사용한다. 여기서 발생하는 탄성파는 National Instruments사의 PCI-4474로 구축된 동적신호 획득 시스템으로 Voltage 신호를 획득하고, 실시간 주파수 영역 해석을 수행한다.

Rod파 속도와 P파 속도의 측정

원주형 시편의 비구속압축파(Rod파)와 전단파(S파)의 속도는 시편에 대한 공진실험(resonance measurements)으로 측정할 수 있다. Rod파는 압축파의 일종으로서 파의 진행방향으로 입자가 압축-수축의 과정을 반복하게 되는데, 이러한 진동 특성은 P파와 동일하다. 그러나 P파와는 파장의 크기에서 차이가 있는데, Rod파는 그 파장이 매우 크고(시편 길이의 2배), P파는 불과 몇 cm에 지나지 않을 정도로 작다. 결과적으로 Rod파가 전파될 때는 시편의 외벽 부분까지 매질의 입자가 진동하게 되어 비구속(unconstrained) 상태가 되고, P파의 경우는 코어 중심 부분에 국한하여 매질의 입자가 진동하므로 구속(constrained) 상태로 된다. 결국 이러한 구속-비구속 상태의 조건 때문에 P파는 Rod파보다 더 빠르게 전파할 수 있다.

먼저 Rod파 속도를 측정하기 위해서는 Fig. 3(a)에 도시된 바처럼 시편의 한쪽 면에 가속도계와 같은 감진기를 수직방향으로 놓고, 바로 그 옆에서 해머와 같은 발진기로 충격을 주어 응력파를 만들어 낸다. 수직방향으로 발생된 응력파는 반대쪽 자유단에 도달하게 되고, 도달한 이 응력파는 반사되어 처음 충격을 주었던 자유단으로 되돌아가게 된다. 이렇게 응력파가 양쪽 단에서의 반사를 반복하게 될 때, 시편 길이 두 배의 파장에 대한 정현파가 가장 지배적인 성분이 되고, 이 성분의 주파수를 파워 스펙트럼(power spectrum)에 의하여 결정 한 후, 다음 식 (1)에 의해 Rod파 속도를 구할 수 있게 되는 것이다.

$$v_c = f \times \lambda = f \times 2l \tag{1}$$

비틀 전단파를 이용한 최적 전단파 공진

휨파공진의 최소화를 이용한 전단파 공진의 최적화는 휨파의 영향이 가장 작은 부분인 두 지점의 파절점(nodal point) 중 한 지점에 가속도계 1개를 부착하고 또 다른 지점에 충격해머로 가격하는 방법이다. 파절점의 위치는 각 세장비에 따라 다르게 되며, 파절점의 위치는 세장비 1:1~8:1의 유한 요소해석 결과로부터 결정하였다(식 (2)). 여기서, d 는 공시체의 한 쪽의 끝단에서 가까운 파절점까지의 거리, D 는 공시체의 직경, n 는 공시체의 세장비(l/D , 공시체 직경에 대한 공시체의 길이의 비)이다(Park et al., 2006).

$$d = 7.5(d_{0.3333} - 2l)(v - 0.2) + d_{0.2} \tag{2}$$

여기서, $d_{0.3333} = 0.2362 \times l - 0.09 \times D$
 포아송비 = 0.3333 인 경우

$$d_{0.2} = 0.2302 \times l - 0.05 \times D$$

포아송비=0.2 인 경우

전단파의 공진을 최적화하기 위한 방법으로 전단파 속도를 측정하기 위한시험 구성은 Fig. 3과 같으며, 측



Fig. 2. Free-Free resonance test system.

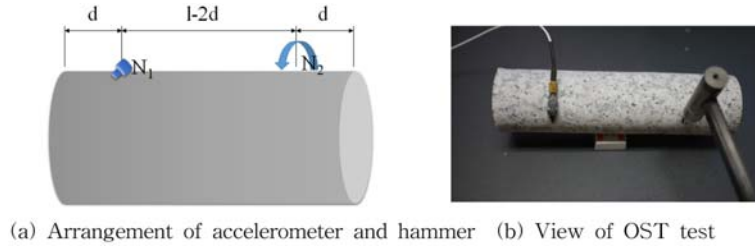


Fig. 3. Schematics of OSR (Optimized shear-wave resonance) measurements (Park et al., 2006).

정 장비는 가속도계 1개, 계측해머 1개, 자료 획득시스템 등이다. 가속도계는 식 (2)로 결정한 위치(N1)에 부착하고, 계측해머도 식 (2)으로 결정한 위치(N2)에서 타격을 한다.

가속계 부착에 있어서 유의할 점은 OSR 기법에서 측정하는 탄성파가 비틀 전단파이므로 가속도계의 설치 위치도 비틀 전단파의 진동방향과 일치시켜야 한다는 점이다. 따라서 Fig. 3에 도시한 바와 같이 가속도계를 수평으로 설치하되 공시체의 길이방향으로 직각을 이루도록 설치하여야 한다. 또한 계측해머의 타격도 비틀전단파를 발생할 수 있도록 비스듬히 하여야 한다.

이렇게 측정하게 되는 S파의 공진 주파수를 이용하여 식 (3)에 의하여 S파 속도를 구할 수 있게 된다.

$$v_s = f \times \lambda = f \times 2l \quad (3)$$

일반적으로 P파를 측정하기 위해서는 일정거리 만큼 떨어져 있는 두 지점에 가속도계를 설치하고 각 가속도계에 도착한 P파의 시간 차이를 구하여, P파의 속도를 구하게 된다. 그러나, P파는 측정매질이 구속된 상태에서 전파되는 압축파이므로, 매질의 구속상태가 완전하지 않은 경우, 측정된 압축파는 P파라기 보다는 Rod파(비구속압축파)에 가까운 속도로 측정된다. 따라서, 이렇게 P파의 발생을 위하여 요구되는 재료의 구속조건 때문에, 암석 코어 및 콘크리트 슬래브의 표면에서 P파를 측정하는 것은 용이한 일이 아니다. 따라서, 본 연구에서는 Rod파와 S파를 측정하여 이로부터 포아송비(Poisson's ratio)를 구한 후에, P파 속도, S파 속도, 포아송비 상호간의 관계식(식 (4))을 이용하여 P 파 속도를 추정하는 방법을 수행하였다.

포아송비의 계산

축응력 σ_1 을 받는 흙의 축변형률 ϵ_1 (압축)에 대한 축방변형률 ϵ_2 (신장)의 비로 정의되어지는 포아송비는, P 파 속도와 S파 속도, 또는 Rod파 속도와 S파 속도의

관계를 이용하여 계산할 수 있다. P파 속도와 S파 속도의 관계, Rod파 속도와 S파 속도의 관계는 다음과 같다.

$$\frac{v_p}{v_s} = \sqrt{\frac{2-2\nu}{1-2\nu}} \quad (4)$$

$$\frac{v_c}{v_s} = \sqrt{2(1+\nu)} \quad (5)$$

이로부터 포아송비에 대한 식은 다음과 같이 표현되어 진다.

$$\nu = \frac{2-\alpha^2}{2(1-\alpha^2)}, \text{ 여기서, } \alpha = \frac{v_p}{v_s} \quad (6)$$

$$\nu = \frac{\beta^2-2}{2}, \text{ 여기서, } \beta = \frac{v_c}{v_s} \quad (7)$$

실험 결과

포천화강암의 Rod파를 측정하기 위해서 시편의 한쪽 면에 가속도계와 같은 감진기를 수직방향으로 놓고, 바로 그 옆에서 해머로 충격을 주어 응력파를 만들어 내었다(Fig. 4(a)). 일반적인 전단파 속도를 구하기 위한 공진 실험은 한쪽 단에서 비틀림 응력파를 발생시키고, 이 비틀림에 의해 비틀 전단파(torsional shear wave)가 발생된다. 이 비틀 전단파의 특정 주파수는 양쪽 단을 오가면서 공진현상을 일으키게 되는데, 바로 이 공진을 일으키는 탁월주파수를 측정함으로써 전단파 속도를 구할 수 있다. Fig. 4(b)는 앞서 설명한 비틀 전단파 측정 방법에 의해 포천화강암 시편에 대한 공진주파수를 측정하고 있는 모습이다.

포천화강암의 결방향별 탄성 상수 측정 결과

포천화강암에 대한 Rod파 속도 측정을 한 결과, Fig.

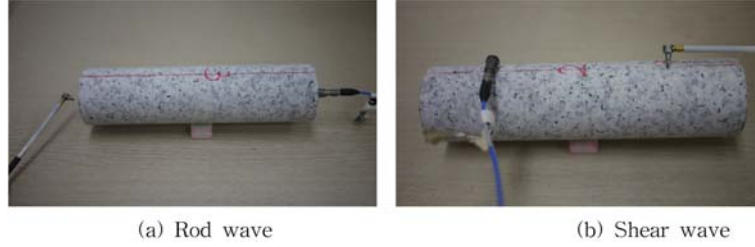


Fig. 4. Views of measuring wave velocities and material damping factors.

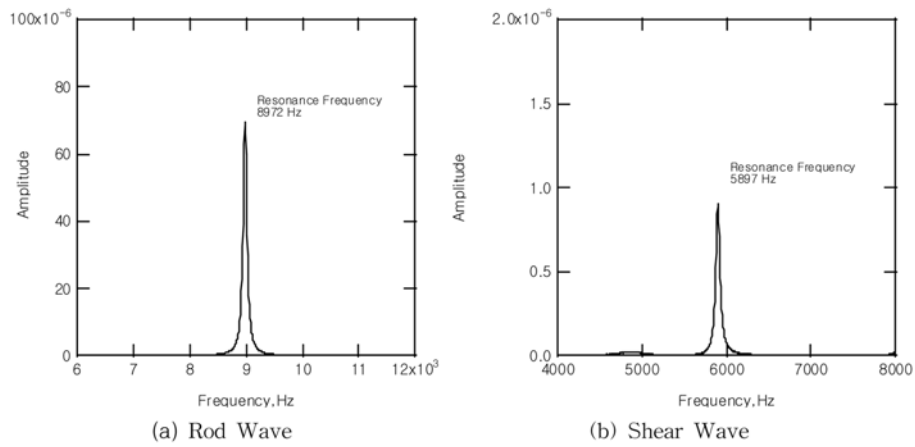


Fig. 5. Response spectrum obtained from free-free resonance testing for Pocheon granite.

5(a)와 같은 파워 스펙트럼(power spectrum)이 측정되었다. 측정된 스펙트럼에 의하면 주파수가 8,972 Hz일 때 가장 큰 진폭을 갖게 되는데, 이는 8,972 Hz의 정현파에 의해 공진현상이 발생함을 의미한다. 공진 주파수 8,972 Hz와 시편 길이 20 cm에 대하여 식 (1)을 적용하여 보면, Rod파 속도는 다음과 같이 계산된다.

$$v_c = f_R \times 2l = 8,972 \text{ Hz} \times 2 \times 0.2 \text{ m} = 3,589 \text{ m/sec} \quad (8)$$

Fig. 5(b)와 같이 전단파에 의한 공진은 주파수 5,897 Hz에서 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서, 식 (3)을 이용하면, S파 속도는 다음과 같이 결정되어진다.

$$v_s = f_S \times 2l = 5,897 \text{ Hz} \times 2 \times 0.2 \text{ m} = 2,359 \text{ m/sec} \quad (9)$$

이와 같은 방법으로 자유단 공진시험에 의해 포천화강암의 동적물성치를 평가하였으며, 그 결과는 Table 1~2에 나타나 있다. Rod파 속도와 S파 속도로부터 P파 속도를 산정하였다. 또한, 이들 탄성과 속도로부터 포아

송비를 계산하였다. 또한, 시편의 단위중량과 탄성과 속도, 포아송비 등을 이용해서 전단탄성계수(G), 탄성계수(E) 등도 평가하였다.

미세균열의 분포에 의한 탄성파속도 및 포아송비 변화

자유단공진시험으로 포천화강암의 측정된 결과(Table 1)를 바탕으로 각 결의 수직방향별 평균 탄성과 속도를 Fig. 6에 도시하였다. Rod파의 경우, 평균속도가 3103.9 (Rift), 3407.9 (Grain), 3583.2 (Hardway) m/s로 차이를 보이는데, Rift 면의 경우 Hardway 면에 비해 속도가 13.4% 감소되고, Grain의 경우 4.9% 감쇄됨을 알 수 있다. 반면에 전단파의 경우 Rift는 2338.8, Grain은 2309.6, Hardway는 2358.3 m/s으로 크게 차이가 없다.

미세균열 분포 이방성이 탄성과 공진특성 규명을 위한 유한요소해석

포천화강암 내부의 미세균열에 따른 탄성파의 공진특성에 대한 실험결과에 대하여 내부 미세균열의 영향을 추가적으로 파악해 보기 위해 자유단 공시체에 대한 3

Table 1. Results of free-free resonance testing: resonance frequency, wave velocity, Poisson ratio.

Sample. ID		Resonance Frequency (Hz)		Wave Velocity (m/s)			Poisson ratio
		ROD	S	ROD	S	P	
1 st plane (Rift)	R-1	7668.5	5762.4	3082.7	2316.5	3119.6	-0.11
	R-2	7778.3	5858.0	3126.9	2354.9	3166.9	-0.12
	R-3	7829.6	5879.7	3147.5	2363.7	3184.5	-0.11
	R-4	7763.7	5862.4	3121.0	2356.7	3164.0	-0.12
	R-5	7565.9	5727.6	3041.5	2302.5	3086.4	-0.13
2 nd plane (Grain)	G-1	8195.8	5575.5	3294.7	2241.4	3318.1	0.08
	G-2	8525.4	5753.7	3410.2	2301.5	3446.9	0.10
	G-3	8569.3	5831.9	3444.9	2344.4	3468.8	0.08
	G-4	8649.9	5845.0	3477.3	2349.7	3512.5	0.10
	G-5	8488.8	5749.4	3412.5	2311.2	3443.3	0.09
3 rd plane (Hardway)	H-1	8920.9	5853.7	3568.4	2341.5	3684.4	0.16
	H-2	8986.8	5918.9	3612.7	2379.4	3716.4	0.15
	H-3	8972.2	5897.1	3588.9	2358.8	3699.3	0.16
	H-4	8869.6	5853.7	3565.6	2353.2	3660.9	0.15
	H-5	8906.3	5866.7	3580.3	2358.4	3682.5	0.15

Table 2. Results of free-free resonance testing: elastic modulus and damping ratio.

Sample. ID		Young's Modulus (E,GPa)	Shear modulus (G,GPa)	Damping ratio	
				ROD	S
1 st plane (Rift)	R-1	24.8	14.0	0.70	0.64
	R-2	25.7	14.6	0.58	0.60
	R-3	25.8	14.5	0.71	0.62
	R-4	25.4	14.5	0.85	0.69
	R-5	24.4	14.0	0.60	0.81
2 nd plane (Grain)	G-1	28.1	13.0	0.57	0.59
	G-2	30.2	13.7	0.53	0.59
	G-3	30.7	14.2	0.57	0.47
	G-4	31.0	14.2	0.38	0.38
	G-5	30.2	13.8	0.50	0.74
3 rd plane (Hardway)	H-1	33.1	14.2	0.43	0.58
	H-2	33.7	14.6	0.48	0.68
	H-3	33.5	14.5	0.45	0.52
	H-4	33.6	14.6	0.58	0.56
	H-5	33.8	14.7	0.55	0.50

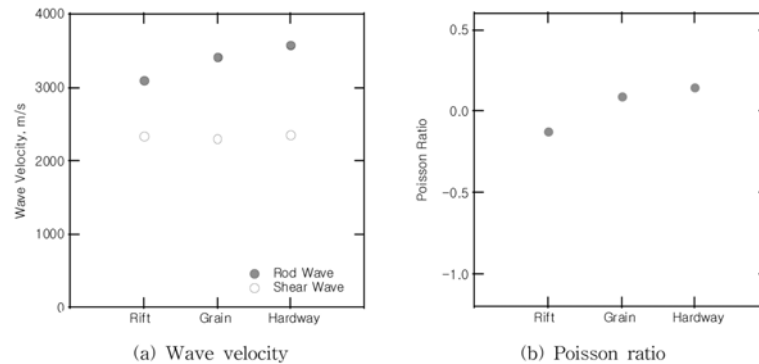
**Fig. 6.** Elastic properties of Pocheon granite rock with regard to anisotropic planes.

Table 3. Material properties for finite element analysis.

Diameter (m) / length (m)	Density (kg/m ³)	Young's Modulus (Pa)	Poisson Ratio
0.05/0.2	2,620	3.51E+10	0.2

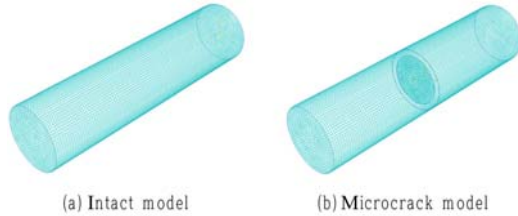


Fig. 7. Material models for finite element analysis.

차원 유한요소 해석을 수행하였다. 유한요소해석 모델은 Fig. 7과 같이 원기둥 모양의 3차원 모델을 적용하였으며, 경계조건은 지지조건 없는 자유단이며, 하중이 없는 고유치(Eigenvalue) 해석을 수행하였다. 자유단 공진시험의 유한요소 해석으로 총 20개의 Mode의 결과를 구하였으며, Fig. 8과 같이 비구속압축 모드, 전단/비틀림 모드의 고유주파수를 구하였다. 해석에 사용된 물성은 Table 3과 같다. 유한요소해석에 사용한 프로그램은 상용프로그램인 ABAQUS이다. 미세균열 밀도 변화는 공극의 면적($t = 0.02 \text{ mm}$)을 변화시키는 방식으로 모사하였다.

Fig. 9는 유한요소해석결과에서 계산된 해석결과를 살펴보면 재료 내부의 균열의 방향과 밀도가 공진 특성에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 재료 내부 균열의 영향은 전단 모드 경우보다 비구속압축 모드에서 크게 나타난다. 비구속압축과 속도는 파의 진행방향에 수직방향으로 배열되어 있는 균열의 밀도(해석상에서는 균열 면적으로 모사)에 밀접한 영향을 받으나, 전단파 속도는

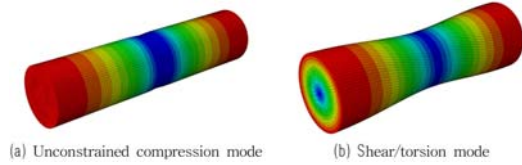


Fig. 8. Modes of vibration eigenvalue.

상대적으로 그 영향을 받지 않는 것으로 확인된다. 따라서, 축방향 변형률과 횡방향 변형률의 비로 표현되는 재료의 포아송비에서 미세균열의 영향을 살펴보면, 미세균열 밀도와 상관없이 일정하게 측정되는 전단파속도와 밀도에 따라 감소하는 압축파속도에 의해서 포아송비는 미세균열 분포에 따라 감소되는 특징이 나타났다. 포천화강암의 포아송비는 3결인 Hardway 면과 수직방향에서 가장 크고, 2결(Grain), 1결(Rift) 순으로 감소하는 경향을 보인다. 특히, 1결의 경우, 다른 두면의 경우에 비하여 감소되는 경향이 뚜렷한 것은 결국 이러한 내부의 미세균열의 밀도가 1결에서 가장 큼을 의미한다.

화강암 미세균열 분포에 따른 역학적 거동에 대한 기존 연구를 살펴보면, 미세균열이 분포하는 암석시료에 대한 일축압축시험의 경우, 미세균열이 하중방향과 평행하게 배열하면 미세균열의 틈이 열려서 횡방향 변형률이 높게 발생하고 포아송비는 증가하는 경향을 보인다(Lama and Vutukuri, 1978). 또한, Park (2005)에 의하면 압축하중 방향과 수직하게 배열되어 있는 미세균열의 밀도가 클수록 포아송비가 변화가 크게 나타나는 것

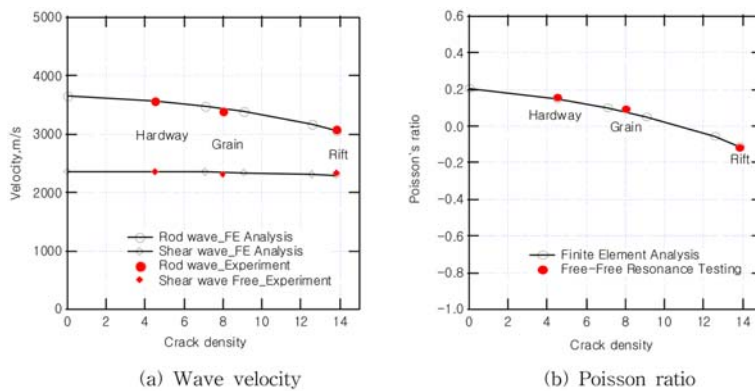


Fig. 9. Comparison of FE and experiment results for Pocheon granite elastic properties.

으로 알려져 있으며, 이러한 경향이 탄성과 공진 특성에 도 반영되고 있다고 볼 수 있다. 본 연구의 자유단 공진시험으로 측정된 포아송비는 저변형율($\epsilon = 1.38E - 05$) 범위에서 측정된 값이다. 따라서, 일축압축시험에서 구한 포아송비와 달리 미세균열의 폐합이 일어나지 않은 조건에서 측정된 결과로써, 미세균열 분포에 더 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

미세균열밀도와 탄성과 속도의 상관관계

Park (2005)이 수행한 포천화강암에 대한 결방향에서의 미세균열의 밀도와 관련된 인자들의 정량적 분석결과를 활용하여, 화강암의 미세균열이 탄성과 공진특성에 미치는 영향을 정량적으로 평가해 보았다. 포천화강암 내의 결에 발달한 미세균열의 발생 빈도(N), 평균길이

(Lm) 및 밀도(ρ)가 Fig. 11에 나타나 있다. 미세균열의 물리적인 분포특성을 살펴보면 1결(rift) > 2결(grain) > 3결(hardway) 순으로 나타난다. 포천화강암에 대한 자유단공진시험에서 결정된 압축파속도와 미세균열 길이와 밀도에 관계를 통해서 미세균열의 분포에 따른 영향을 살펴보았다. 미세균열과 압축파속도(Vp , Vc)는 미세균열의 발달정도(길이, 밀도)가 클수록 선형적으로 감소되는 경향을 보이고 있다.

미세균열을 내포하는 재료의 포아송비

일반적인 등방성 물질(isotropic materials)에서의 포아송비는 -1~0.5에 위치한다. 작은 응력에도 형상 변화를 하는 물과 고무와 같은 물질의 포아송비가 0.5 정도이며, 금속, 고분자, 세라믹과 같은 물질은 0.25~0.35 범위에 존재한다. 유리와 광물과 같은 물질은 포아송비가 0에 가깝고, 기체는 0, 네트워크 구조(network structures)에서 0보다 작은 값을 가질 수 있다. 음의 포아송비를 갖는 경우를 팽창성(auxetic) 물질이라 칭하며, 팽창성 네트워크 구조로 되어 있는 경우 음의 포아송비와 양의 포아송비를 모두 갖는데, 이러한 경우 포아송의 비는 네트워크 구조의 방향에 의해 그 값이 결정된다. 여기서, 포아송비는 구조적인 요소가 패키징되는 방식에 밀접하게 관련이 있다(Greaves, et al., 2011). Fig. 13에서는 재료별 포아송비를 분포를 재료의 벌크 탄성계수와 전단 탄성계수의 비(B/G)에 따라 도시하였고, 포천화강암에 대하여 자유단공진시험으로 구한 포아송비를 같이 도시하여 비교하였다. 미세균열의 밀도가 상대적으로 작은 Grain과 Hardway의 경우보다 밀도가 높은 Rift 면의 경우가 미세균열이 팽창성 구조적 특징이 보이는 것으로 판단된다.

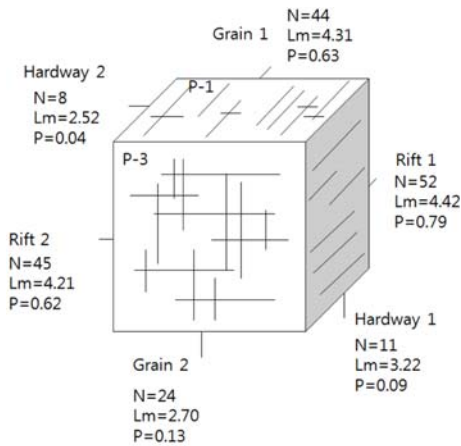


Fig. 11. Number (N), mean length (Lm) and density (ρ) of microcrack traced from photomicrograph. The unit of Lm is mm (Park, 2005).

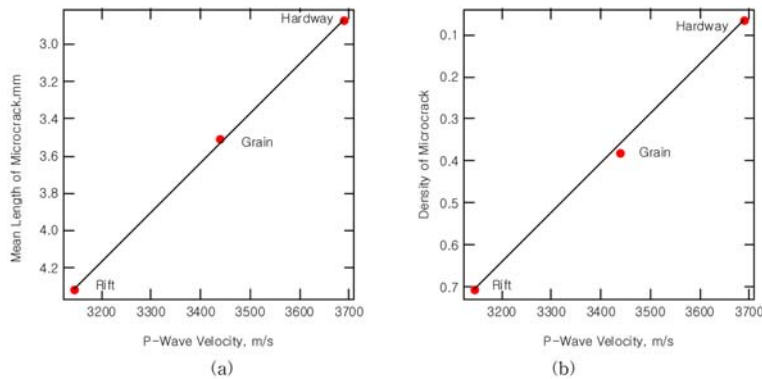


Fig. 12. Relationship between microcrack density and P-wave velocity for three different anisotropic planes of Pocheon granite.

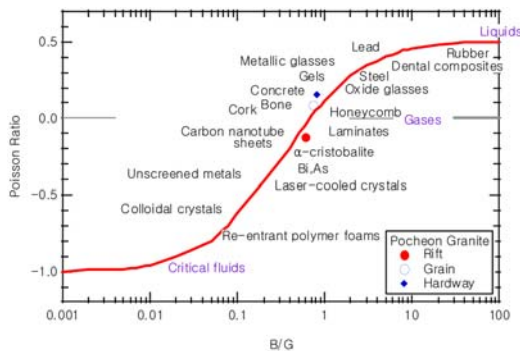


Fig. 13. Poisson ratio of each planes of Pocheon granite compared to other materials (modified after Greaves et al., 2011).

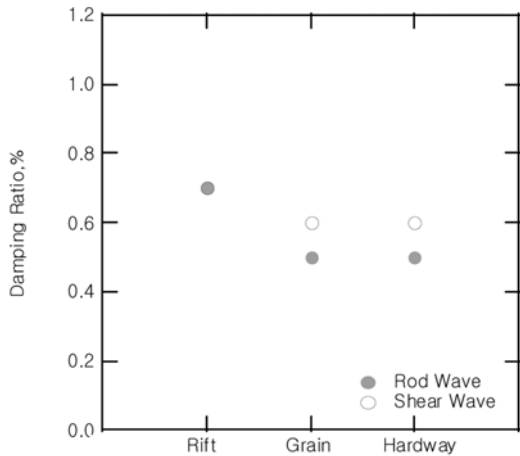


Fig. 13. Damping ratio of Pocheon granite.

결론

본 연구에서는 화강암 내부에 분포하는 미세균열 이방성이 탄성파의 공진특성에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 자유단공진시험과 유한요소해석을 수행하였다. 미세균열의 분포 특징이 명확한 포천지역 화강암을 대상으로 하였으며, 미세균열 이방성 분포와 공진특성 비구속압축파속도, 전단파 속도, 포아송비에 대한 연관성을 살펴보았다.

자유단공진시험에서 구한 비구속압축파 속도는 미세균열의 발달 정도에 따라 Hardway, Grain, Rift 순으로 감소하는 경향을 보이고, 반면에 전단파 속도는 미세균열의 발달정도 상관없이 일정함을 보여주면서, 자유단공진시험으로 측정된 저변형률 조건에서의 포아송비 역시 균열발달 정도 순으로 감소한다. 이러한 경향은 자유단

공진시험을 모사한 유한요소해석에서도 동일하게 확인할 수 있다. 결과적으로, 포천화강암에 대한 미세균열의 분포정도(밀도, 길이)와 탄성파의 압축파속도는 선형적인 관계를 확인할 수 있었다. 재료의 감쇄비를 살펴보면, 미세균열이 상대적으로 발달한 Rift 면에서의 비구속압축파와 전단파의 감쇄비가 다른 미세균열 방향에 비하여 높을 것을 알 수 있다. 이는 전단파의 경우에도 속도에는 직접적으로 영향을 받지 않지만, 미세균열에 대한 영향을 내포하고 있음을 보여준다. 이러한 특징은 화강암 미세균열의 분포와 배열성이 탄성파 공진특성에 밀접한 영향이 있다는 것을 잘 반영한다. 또한, 미세균열의 구조적인 배열이 포아송비에도 밀접한 연관이 있으며, 포천지역 화강암에서도 동일한 특징을 보여주고 있다.

본 연구결과는 자유단 공진시험의 결과로 저변형률에서 측정된 결과이기 때문에 하중재하시 큰 변형률에서 측정결과와는 차이가 발생할 수 있다. 하지만, 현시용력 조건에서 미세균열이 그대로 변형없이 유지되는 상태에서 탄성파의 전달이 이루어지는 경우에는 본 연구결과에서 도출된 결에 따른 이방성 특성을 활용할 수 있을 것이다.

사사

본 연구는 산업통상자원부 지원으로 한국에너지기술평가원에서 주관하는 신재생에너지융합원천기술개발-핵심기술개발사업인 “EGS 인공 지열저류층 생성 시뮬레이터 개발” 과제(과제번호 : 20133030000240)의 일환으로 수행되었습니다. 또한, 본 연구에서 사용된 유한요소해석에 도움을 주신 경희대학교 정영훈 교수님께 감사드립니다.

References

Douglass, P. M. and Voight, B., 1969, Anisotropy of granites - a reflection of microscopic fabric: Geotechnique, 19, 376-379.
 Greaves, G. N., Greer, A. L., Lakes, R. S., and Rouxel, T., 2011, Poisson's ratio and modern materials, Nature Materials, 10, 823-837.
 Lama, R. M. and Vutukuri, V. S., 1978, Handbook on mechanical properties of rocks, Vol. II, Trans Tech. Publication, 117-13.
 Nasser, M. H. B., Mohanty, B., and Robin, P. Y. F., 2005, Characterization of microstructures and fracture toughness in five granitic rocks, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 42, 450-460.

- Park, B. S., Joh, S. H., Lee, S. H., and Kang, T. H., 2006, Resonances of unconstrained compressive, shear and flexural waves in free-free cylinder specimens, Proceedings of Korean Geotechnical Society, 115-123.
- Park, D. W., 2005, Mechanical anisotropy of Pocheon granite under uniaxial compression, The Journal of Engineering Geology, 15(3), 337-348.
- Park, D. W., Kim, H. C., Lee, C. B., Hong, S. S., Chang, S. W., and Lee, C. W., 2004, Characteristics of the rock cleavage in Jurassic granite, Pocheon, 13(3), 133-141.
- Peng, S. and Johnson, A. M., 1972, Crack growth and faulting in cylindrical specimens of chelmsford granite: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 9, 37-86.
- Phillips, W. J. and Phillips, N., 1980, An introduction to mineralogy for geologists: New York, John Wiley & Sons Inc.
- Sansalone, M. J. and Streett, W. B., 1997, Impact-echo - nondestructive evaluation of concrete and masonry, Bullbrier Press.
- Schedl, A., Kronenberg, A. K., and Tullis, J., 1986, Deformation microstructures of Barre granite - an optical, SEM and TEM study: Tectonophysics, 122, 149-164.
- Seo, Y. S. and Jeong, G. C., 1999, Micro-damage process in granite under the state of water-saturated triaxial compression, The Journal of Engineering Geology, 9(3), 243-251.

강태호

한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실
412-712 경기도 고양시 일산서구 고양대로 283
Tel: 031-910-0455
mail: thkang@kict.re.kr

김광엽

한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실
412-712 경기도 고양시 일산서구 고양대로 283
Tel: 031-910-0225
mail: kimky@kict.re.kr

박덕원

한국지질자원연구원 지열자원연구실
305-350 대전광역시 유성구 과학로 92
Tel: 042-868-3123
mail: pdw@kigam.re.kr

신휴성

한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실
412-712 경기도 고양시 일산서구 고양대로 283
Tel: 031-910-0651
mail: hyushin@kict.re.kr