

손상 진행에 따른 석모도 암석 시험편의 탄성파속도 변화

이상규 · 최지향 · 천대성 · 이태종*

한국지질자원연구원

Seismic Velocity Change Due to Micro-crack Accumulation of Rock Samples from Seokmo Island, Korea

Sang Kyu Lee, Jihyang Choi, Dae-Sung Cheon, and Tae Jong Lee*

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM)

요 약: 석모도에서 산출되는 암석시료를 이용하여 파괴강도를 5단계로 나누고 하중을 증가시키면서 손상 진행에 따른 P-, S-파 속도의 변화 특성을 고찰하였다. 재하 전 상태에서부터 일축압축강도의 95%까지 하중을 받은 9개의 수포화 시험편들이 1시간 동안 상온에서 건조되어 가는 동안 탄성과 속도는 암종별로 변화폭이 상이하였으며, P-파의 경우 0.9~18.3%, S-파 속도는 2.8~14.8% 로 큰 차이를 보였다. 하중에 의해 건조한 암석에 미세균열이 발생하면 P-파 속도가 일률적으로 감소하는 현상과는 달리, 수포화 암석의 경우는 균열생성에 의한 속도 감소 요인과 수포화에 의한 속도 상승요인의 상호작용에 의해 속도 증감 양상이 매우 복잡하게 나타나지만 대부분의 경우에서 전반적으로 재하 초기단계에서는 속도가 증가하다가 나중에는 감소하는 경향을 보였다. 감소가 시작되는 시점도 암종별로 1~4단계로 다양하다. 파괴 후에도 형태를 보존한 25h-2와 29-2 시료에 대해서 파괴후의 속도를 측정된 결과는 현저한 공극율의 상승과 함께 탄성과 속도도 현저히 감소하였다. 조암광물별로 보면 석영 함량이 증가하면 탄성계수가 커지며 총상구조형 규산염광물이 증가하면 탄성계수는 작아지는 경향을 보였다.

주요어: 재하시험, 미세균열, 손상 진행, 탄성과 속도, 탄성계수

Abstract: Seismic wave velocity change has been monitored due to the accumulation of micro-cracks by uniaxial loads on the rock samples from Seokmo Island with stepwise increase in 5 stages. After the load was applied up to 95% of UCS, P- and S-wave velocities varied in ranges of 0.9~18.3% and 2.8~14.8% of fresh rock sample velocities, respectively. Unlike seismic velocity of the dry rock samples that showed overall decreases after the loading, velocity changes of saturated rock samples were much more complicated. These seemed to be due to the mixture of two contradictory mechanisms; i.e. accumulation of micro-crack causes an increase in porosity and a decrease in wave velocity, while saturation causes an increase in wave velocity. Most of tested rocks showed a trend of velocity increase with low axial load and then velocity decrease at later stages. Starting stage of velocity decrease differs from samples to samples. After the failure of rock occurred, noticeable increases of porosity and decreases of wave velocity have been observed. It showed overall trend that the more the quartz contents and the lower the silicate, the higher the Young's modulus.

Key words: compression test, micro-crack, accumulation of micro-cracks, seismic velocity, Young's modulus

서 론

지하에 부존하는 자원이나 에너지 개발의 극대화를 위해서는 저류층의 투수율 향상을 위한 수압자극(hydraulic stimulation) 기술이 활용된다. 유전개발 분야에서는 석유증진회수 기술(enhanced oil recovery)로 잘 알려진 이 기술은 투수율이

낮은 심부 암반에 일정한 수압을 가하여 인위적인 균열 혹은 파쇄대를 형성하거나 닫힌 절리를 열리도록 하는 기술이다. 주로 퇴적층에서 활용되던 이 기술은 지열에너지 개발 분야에 도입되어 EGS (Enhanced Geothermal System; Tester *et al.*, 2006)에 의한 지열발전 기술의 핵심을 이루고 있다.

EGS는 과거 심부 고온 암체(HDR; hot dry rock)의 개념을 확장한 것으로 지하 심부에 온도는 매우 높으나 지열 저류층이 발달하지 않은 경우에 수압자극을 통해 인공적으로 파쇄대를 형성하여 지열 저류층을 생성하고, 이 저류층에 물을 주입하고 저류층을 통과하면서 온도가 높아진 물을 반대쪽 생산정을 통해 지상으로 끌어올려 발전에 활용하는 것이다. 이 경우

2011년 11월 1일 접수; 2011년 11월 15일 수정; 2011년 11월 21일 채택;
*Corresponding author

E-mail: megi@kigam.re.kr

Address: KIGAM, 92 Gwahang-no, Yuseong-gu,
Daejeon 305-350, Korea

대상 암체는 화강암이 되며 1974년 미국 Fenton Hill에서 처음 시작된 이래 영국의 Rosemanowes, 일본의 Hijiori 및 Ogachi, 그리고 프랑스의 Soultz 등에서 지속적으로 연구되었다. 최근에는 프랑스 Soultz (Nami *et al.*, 2008), 호주의 Cooper basin, 독일의 Landau 등에서 성공적으로 적용되어 전기생산으로 이어지고 있다.

이러한 수압자극에서 가장 중요한 것이 수압자극에 의해 파쇄대가 전파되어 가는 정확한 방향과 위치의 파악이다. 수압자극에 의해 파쇄대가 형성된 범위와 심도에 대한 정확한 정보에 의해 생산정의 굴착위치를 정하게 되므로 개발의 성공을 좌우하는 매우 중요한 요소가 된다. 수압자극에 의해 파쇄대가 전파되는 범위와 위치의 파악은 주로 수압자극 시 발생하는 미소진동을 지상에서 계측하여 실시간으로 발생하는 진원의 위치로부터 절리의 발달 방향 및 위치를 파악하는 간접적인 방식이 이용된다(Asanuma *et al.*, 2005). 이때 탄성파의 전파 속도 모델이 위치 파악의 정확도를 좌우하게 되며, 수압파쇄가 진행됨에 따라 절리의 발달에 의해 속도 모델도 변하게 되므로 이에 따라 속도구조 모델을 유기적으로 바꿔줘야 한다(Asanuma *et al.*, 2005).

우리나라에서도 2010년 EGS에 의한 지열발전 프로젝트가 시작되었으며(윤운상 등, 2011), 향후 수압자극의 영향 평가를 위해서는 국내 화강암의 미세균열 발생에 의한 탄성파속도 변화 특성의 파악이 필수적이다. 우리나라에서의 관련 연구로는 국내 화강암 건조암석에서 압축에 의한 미세균열의 발생이 P-파 속도 감소의 주요 원인임을 밝힌 연구(김영화 등, 1997)가 있다. EGS 지열개발이 이루어지는 5 km 내외의 심부에서는 대부분의 암석이 포화된 상태이므로 포화된 상태에서의 미세균열의 발생이 탄성파속도에 미치는 영향을 고찰할 필요가 있다.

본 연구에서는 포화된 암석에서 미세균열의 발생이 탄성파속도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 석모도 지표 노두에서

채취된 암석시료에 대해 5단계의 압축단계별로 반복 재하시험을 실시하고 그에 따른 탄성파 속도를 측정하여 그 특성을 분석하였다.

시험편과 시험 장치

시험편

이 연구에서는 Fig. 1과 같이 동일한 암체에서 3개의 코어시료를 코어성형하여 만든 시험편을 사용하였다. 암체는 인천

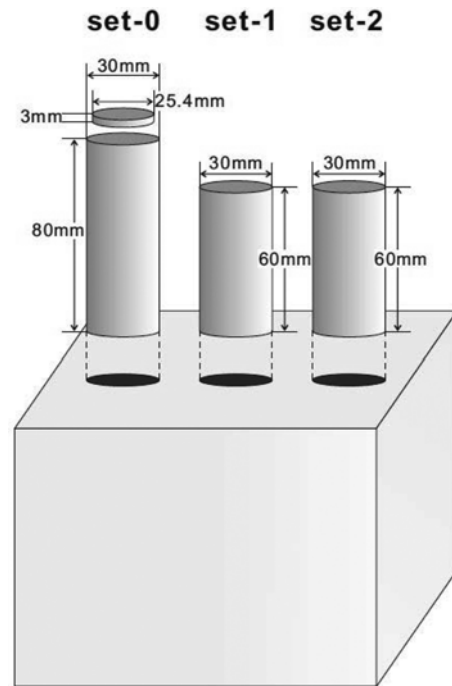


Fig. 1. Preparation of core samples for different uses. Set-0 is used for thermal conductivity, seismic velocity, and XRD analysis (Lee *et al.*, 2010). Set-1 is for uniaxial compress test and set-2 is for seismic velocity measurement with stepwise loading applied.

Table 1. Basic properties of rock samples (set-0) from Seokmo Island (Lee *et al.*, 2010)

Sample ID	Rock type	Thermal Conductivity (W/mK)	Modal analysis (Weight %)*
sm-11	granite porphyry	3.00	40.1 qu; 34.2 al; 20.8 or; 3.1 bio; 1.7 chl (35.9 qu; 35.8 al; 23.1 or; 3.6 bio; 1.6 chl) ¹⁾
sm-15	granite gneiss	3.09	35.8 qu; 32.6 al; 25.9 mic; 3.1 chl; 2.6 bio (38.3 qu; 28.7 al; 27.8 mic; 3.0 chl; 2.3 bio)
sm-25h	mica schist	3.40	36.7 qu; 31.2 mus; 20.9 bio; 6.6 chl; 4.6 al (28.2 qu; 34.1 mus; 8.4 bio; 14.3 chl; 15.0 al)
sm-25v		3.85	41.4 qu; 30.1 mus; 17.5 bio; 4.4 chl; 6.6 al (40.2 qu; 31.3 mus; 15.8 bio; 3.7 chl; 8.9 al)
sm-29	biotite gneiss	2.64	60.6 qu; 14.7 bio; 13.1 or; 6.9 al; 4.7 kao (32.3 qu; 24.3 bio; 27.9 or; 6.8 al; 8.2 kao)
sm-32	hornblende biotite granite	2.22	38.5 al; 26.8 qu; 13.9 mic; 10.6 bio; 9.1 hor; 1.2 chl (41.1 al; 22.0 qu; 21.0 mic; 8.2 bio; 7.7 hor)
sm-34	biotite granite	2.54	37.9 al; 31.2 qu; 23.7 mic; 7.2 bio (36.7 al; 32.5 qu; 24.9 mic; 5.8 bio)
sm-38	porphyry granite	2.67	36.9 qu; 34.2 mic; 25.3 al; 2.0 bio; 1.6 chl (32.3 qu; 45.5 mic; 19.7 al; 2.4 chl)
sm-60	fine-grained biotite granite	2.77	38.7 qu; 31.6 al; 25.6 mic; 2.1 bio; 2.0 chl (31.0 qu; 35.9 al; 28.7 mic; 2.1 bio; 2.3 chl)

*qu: quartz; al: albite; or: orthoclase; bio: biotite; chl: chlorite; mic: microcline; mus: muscovite; kao: Kaolin; hor: hornblende

¹⁾Numbers in () are from the disc specimen for thermal conductivity measurement, otherwise from rock core for seismic velocity measurement.

광역시 강화군 삼산면 석모도 전역에 분포하는 노두에서 채취하였고(Lee *et al.*, 2010), 동일한 암체에서 성형한 3개의 코어 시료에 대해서는 물성이 유사하다고 가정하였다. 이렇게 성형된 코어 시료 중 set-0으로는 X선 회절분석(XRD), 열전도도 측정, 탄성파속도 측정이 이루어졌다. XRD 분석결과는 이상규 등(2010)의 Table 1에 서술되어 있으나 편의를 위해 다음의 Table 1에 다시 정리하였다.

재하 시험을 위해서 set-1과 set-2 시료는 직경 약 30 mm의 원주형 코어로 성형한 후 다이아몬드 톱으로 길이가 직경의 2배가 되도록 절단하고 상·하 절단면은 100~400 mesh의 금강사(carborundum)로 연마하여 편평도가 5/1000를 넘지 않도록 성형하였다. 이 중 set-1으로 일축압축강도시험을 수행하여 일축압축강도(unconfined compression strength, UCS)와 탄성계수(Young's modulus, E)를 산정하였고, 구간경계응력(Eberhardt, 1998; 장수호, 2002)을 토대로 set-2에 대한 단계별 하중 수준을 결정하는데 사용하였다. 결정된 하중 수준에 따라 set-2의 시험편으로 재하시험을 수행하면서 손상 진행에 따른 P-, S-파 속도를 측정하였다.

시험 장치 및 측정방법

시험장치는 크게 하중 재하장치와 밀도 및 공극률 측정장치, 탄성과 속도 측정 장치로 구분된다. 이 중, 일축압축강도시험과 단계별 재하시험에서 사용한 가압 장치는 최대 가압 용량이 160 ton인 미국 MTS (Material Test System)사의 암석시험용 압축기(MTS 315)로서, 유압을 시험 조건에 맞게 자동 조절하는 자동 서보장치(automatic servo-control system)에 의하여 전 과정이 제어되는 폐쇄유압형(closed loop type) 장비이다. 재하시험 시 종 변위(stroke)를 제어변수로 선택하였고 가압 속도는 5.5×10^{-3} mm/s로 하였다. 일축압축강도시험은 ASTM/D2938, 탄성계수 측정은 ASTM/D3148에 따라 시험편의 축방향으로 압축력을 가한 후 파괴될 때의 하중을 측정하였다. 일축압축강도시험에서 압축응력에 대한 변형특성을 조사하기 위

하여 종 방향은 다이알게이지 형태의 변위변환기(digital gage type displacement transducer)를 사용하여 변형률을 측정하였고 이로부터 탄성계수를 산정하였다.

코어의 밀도 및 공극률 측정에는 순수제조장치(영린기기, aquaMAX 361), 진공건조기(Vacuum oven, Jeiotech, OV-11)와 무게 모니터링 시스템(이상규, 이태중, 2011a)을 사용하였다. 암석코어를 순수제조장치로 제조한 여과수(약 $7.6 \mu\text{S}/\text{cm}$) 속 에서 24시간 이상 보관한 후, 다음날 8시부터 16시까지 진공 건조기에서 총 8시간 수침진공 하였으며 이때 6 torr 이하의 상태를 1시간 이상 지속되도록 하였다. 수침진공 후 16시간 동안 여과수에 보관하였다. 이렇게 얻은 표면건조수포화 암석코어를 무게 모니터링 시스템(이상규, 이태중, 2011a)으로 24시간 동안 변화하는 무게를 모니터링 하고 곡선회귀로 고체무게를 얻은 후 수포화밀도, 건조밀도, 공극률을 산출하였다

한편, 탄성과 속도 측정을 위해서는 시험편을 통과한 P-, S-파 초동의 주행시간을 자동으로 연속하여 발체하고 기록할 수 있는 기존의 시험장치를 사용하였다(이상규, 이태중, 2011b).

암석 손상 유발을 위한 단계 설계와 단계별 재하시험

본 연구에서는 동일한 암체에서 성형한 코어시료 중 set-1에 대하여 일축압축강도시험을 수행하여 일축압축강도와 탄성계수를 산정하였다. 동일한 암체에서 성형한 코어시료의 압축강도는 유사할 것이라는 가정 하에 set-1의 압축강도를 기준으로 set-2에 대한 단계별 재하시험을 설계하였다.

암석의 전형적인 응력-변형률 곡선에서 암석은 크게 균열단 힘구간, 균열개시구간, 균열성장구간, 균열결합구간 등으로 구분하며, 각 구간 사이의 경계는 균열개시응력, 균열결합응력, 균열손상응력 등으로 표현된다(Eberhardt *et al.*, 1998; 장수호, 2002). 이 연구에서는 구간 간 경계응력을 토대로 단계별 하중 수준을 결정하였는데 우선, 각 시험편의 응력-변형률 곡선으로

Table 2. Unconfined compressional strength (UCS) of set-1 and the design of loading stage for set-2 according to the UCS of set-1

sample ID	UCS of set-1		(Loading stress) _{set-2} /UCS _{set-1} (%)						
	UCS (MPa)	E (GPa)	stage 0	stage 1	stage 2	stage 3	stage 4	stage 5	stage 6
11-1	472	52.8	0	25	52.5	80	90	95(88)	
15-1	188	39.5	0	40	60	80	90	95	(106)
25h-1	155	34.6	0	25	52.5	80	90(75)		
25v-1	191	43.9	0	35	57.5	80(69)			
29-1	63	7.9	0	32	56	80	90(89.5)		
32-1	166	33.4	0	45	62.5	80	90	95(82.5)	
34-1	213	37.6	0	42	61	80	90	95(90)	
38-1	230	43.6	0	38	59	80	90	95	(115)
60-1	340	47.9	0	40	60	80	90	95(84.5)	

※numbers in () indicates measured % ratio between UCS_{set-2}/UCS_{set-1}.

부터 균열개시응력을 결정한 후 이것을 단계별 재하시험의 1 단계 하중으로 정하였다. 3단계와 4단계 재하응력은 균열결합 응력 또는 균열손상응력에 해당하는 하중으로서, Eberhardt *et al.* (1998)과 장수호(2002)의 제안대로 일축압축강도의 80%와 90%로 설정하였으며, 3단계와 균열개시응력(1단계 하중)의 중간값을 2단계 재하응력으로 하였다. 5단계는 set-1 암석코어 일축압축강도의 95%로 하였고, 6단계에서는 set-2의 암석코어가 파괴될 때까지 하중을 가하였다. 하중을 가하지 않은 상태를 0단계라고 칭하였다.

set-1에 대한 일축압축강도시험 결과와 set-2의 단계별 하중 설계 값을 Table 2에 정리하였다. 단계별 재하시험은 일축압축 강도시험과 동일한 시험절차를 따라서 이미 정해진 수준까지 하중을 가했다가 하중을 제거하는 방법을 반복적으로 수행하였다. Table 2의 괄호 안에는 set-2의 반복 재하시험에 의한 압축강도를 나타내었는데, 15-2 시료와 38-2 시료를 제외한 set-2의 다른 시료들은 모두 set-1에 비해 일축압축강도가 작게 나타났다.

Fig. 2는 set-1의 일축압축강도와 탄성계수, set-2의 단계별 재하시험에서 시료의 파괴 시의 얻은 응력과 탄성계수의 관계를 보인 것이다. set-1과 set-2에서 공통적으로 일축압축강도 또는 재하 응력이 증가할수록 탄성계수가 증가하는 경향을 볼 수 있으며, 시험편 11-1과 60-1은 국내 암석의 일반적인 강도(천대성 등, 2008) 보다도 높은 값을 나타냈다.

set-2의 경우 단계별 재하시험에 의해 반복적인 재하로 인하여 대체로 강도 저하가 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 균열 손상응력에 해당하는 3단계 재하시험 이후에 암석코어의 내부에 영구적인 손상이 일어나서 야기된 것으로 생각할 수 있다.

그러나 15-2, 38-2에서와 같이 단계별 재하시험에 의한 파괴응력이 15-1과 38-1의 일축압축강도보다 큰 경우도 있었는데 이 경우는 2, 3단계가 균열개시응력 이전의 응력 단계로서 암석 코어 내부에 손상이 일어나지 않은 것으로 추정된다. 단계별 재하에 따른 탄성계수의 변화 양상(Fig. 3)을 보면, 반복적인 재하에 따라서 강도가 낮아진 11-2, 25h-2, 32-2, 60-2의 경우 재하단계가 증가할수록 탄성계수가 감소하는 것을 볼 수 있으나, 15-2와 38-2는 재하단계가 증가함에 따라서 탄성계수가 감소하기보다는 같거나 오히려 증가하는 추세를 보였다. 25v-2는 암석코어 내부에 절리가 존재하여 25v-1의 일축압축강도보다 낮은 하중에서 파괴가 발생하였고 29-2는 예외적으로 강도와 탄성계수 변화 양상이 일치하지 않았다.

단계별 재하시험에 따른 밀도와 공극률 그리고 탄성과 속도 변화

단계별 재하시험에서 set-2 시험편의 밀도와 공극률은 Table 2의 0, 3, 4단계의 재하시험이 완료된 직후에 산출하였다 (Table 3). 이때, 3단계에서 파괴된 25v-2의 3단계 밀도와 공극률은 산출할 수 없었으며 4단계에서 파괴된 29-2와 25h-2는 형태가 보존되어 4단계의 밀도와 공극률을 산출할 수 있었다. Table 3에서 수포화밀도는 set-1 UCS의 80%인 3 단계 하중을 가한 후에도 유의할만한 변화를 보이지 않는다. 다만, 4단계 (set-1 UCS의 90%)에서 파괴된 25h-2의 수포화밀도는 다소 감소하였다. Fig. 4의 단계별 공극률을 보면 3단계 하중을 가한 후에도 대부분의 시료에서 거의 변화가 없었으나 29-2와 25h-2는 4단계(90%)에서 파괴된 이후에 공극률 증가를 보이는

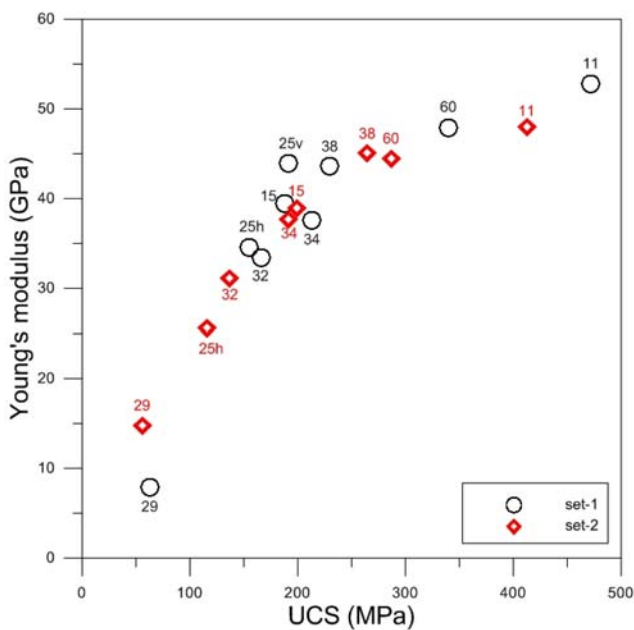


Fig. 2. Relations between UCS and Young's modulus for set-1 and set-2 samples.

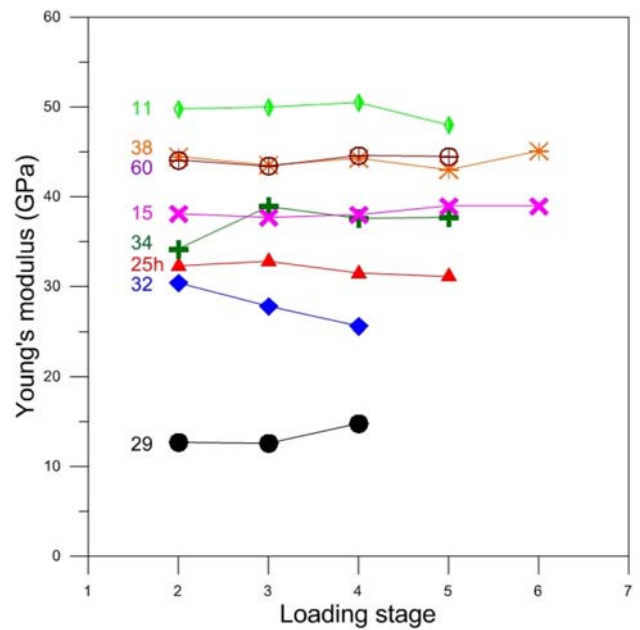


Fig. 3. Young's modulus variation at each compression stage for set-2.

Table 3. Density and porosity at each stage of set-2 samples

sample ID	comp. stage	saturated bulk density (g/cm ³)	dry bulk density (g/cm ³)	porosity (%)	remarks
29-2	0	2.67	2.64	3.34	
	3	2.67	2.63	3.44	
	4	2.67	2.63	3.79	shape preserved after failure
34-2	0	2.61	2.60	1.19	
	3	2.61	2.60	1.21	
32-2	0	2.69	2.68	0.97	
	3	2.69	2.68	0.94	
11-2	0	2.63	2.63	0.31	
	3	2.63	2.63	0.33	
15-2	0	2.60	2.59	1.01	
	3	2.60	2.59	1.02	
60-2	0	2.61	2.60	0.84	
	3	2.61	2.60	0.83	
38-2	0	2.60	2.59	0.77	
	3	2.60	2.59	0.82	
25h-2	0	2.91	2.80	0.33	
	3	2.81	2.80	0.28	
	4	2.81	2.80	0.82	shape preserved after failure
25v-2	0	2.81	2.80	0.24	
	4				shape lost after failure

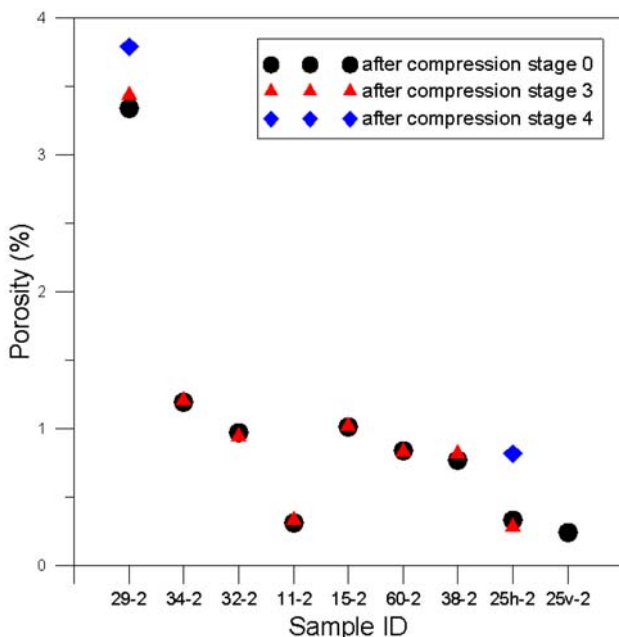


Fig. 4. Porosity change at the loading stages. Note porosity increase after compression stage 4 of 29-2 and 25h-2, which showed rock failure at stage 4 while remaining the shape of core.

것을 확인하였다.

암석코어의 손상 진행에 따른 각 단계별로 표면건조수포화 시험편을 사용하여 P-, S-과 속도를 반복하여 측정하였다. 속도 측정은 0, 3, 4단계에서는 재하시험에 이어 밀도와 공극률 산출이 완료된 후에, 1, 2, 5단계에서는 재하시험이 완료된 후에 수행되었다. 트랜스듀서와 시료를 밀착시키기 위해 탄성과 속도 측정 시 40 kg의 연직하중을 유지하였다.

Fig. 5는 9개 set-2 암석코어의 수포화 후 t = 3600초 경과까지의 P-과 속도 변화를 단계별로 나타낸 것이다. 우선 포화도에 따른 P-과 속도의 변화를 살펴보면, 상온상태에서 약 1시간동안 건조되면서 암종별로 정도의 차이는 있으나 속도의 감소를 보였다. 이들 중 특히 32-2, 34-2 시료에서 시간경과에 따른 감쇠가 가장 크게 나타났으며 이는 set-0를 이용하여 동일한 모니터링을 수행한 이상규 등(2010, Fig. 5)과 같은 결과이다.

재하단계별 속도변화를 살펴보면 재하단계가 진행될수록 시료내의 미세균열의 발달로 인하여 측정되는 속도가 단조 감소할 것이라는 일반적인 예측과는 달리 대부분의 시료에서 처음에는 속도가 증가하다가 감소하는 경향을 보였다. 속도의 감소가 시작되는 단계는 시료에 따라서 1단계에서 4단계까지 다양하였다. 25v-2, 25h-2, 11-2, 60-2, 34-2 시료에서는 재하단계 진행에 따른 탄성과 속도의 변화가 작게, 29-2, 32-2, 15-2, 38-2 등의 시료에서는 크게 나타났다. 파괴 후 형태를 보존한 25h-2 와 29-2 시료에 대해서 파괴후의 속도를 측정된 결과는 현저한 공극률의 상승(Table 3)과 동반하여 속도도 현저히 감소하였다. 재하단계별 속도변화가 큰 29-2와 15-2 시료에서 볼 수 있듯이 포화상태로부터 시간이 경과할수록 재하단계별 속도변화 폭이 더 커지는 양상을 보였다.

Fig. 6은 S-과의 속도 변화를 보인 것이다. P-과와 달리 S-과의 경우는 시간 경과 의한 변화 폭이 상대적으로 작았지만 시험편의 파괴가 일어난 경우 S-과 속도(25h-2, 29-2)는 현저히 감소한다. 재하단계에 따른 영향이 크게 나타난 25h-2, 11-2, 60-2 시료에서는 P-과와 마찬가지로 대부분 재하 초기단계에는 S-과 속도가 증가하다가 단계가 진행될수록 다시 감소하는 경향을 보였다. 11-2, 60-2 시료에서는 1단계 후, 25h-2 시료에서는 2단계 후에 S-과의 속도가 감소하기 시작하였다.

Table 4과 5는 Fig. 5과 Fig. 6의 측정결과에서 t = 480 (8분), t = 3600 (1시간) 때의 재하단계 및 시간흐름에 따른 P-, S- 과 속도의 증감 상태를 나타낸 것이다. 재하 전 상태에서부터 일축압축강도의 95%까지 응력을 받은 9개의 수포화 시험편들이 상온에서 1시간 건조되어 가는 동안 P-과 속도의 변화 폭은 최소 0.9% (25h-2: schist)에서부터 최대 18.3% (32-2: homblende biotite granite)까지, S-과 속도는 최소 2.8% (29-2: biotite gneiss)에서부터 최대 14.8% (11-2: granite porphyry)까지 큰 차이를 보이고 있다. 특히, 11-2, 60-2 시료의 경우 수포화에 의한 영향은 매우 작으나 재하단계가 진행됨에 따라 S-과 속

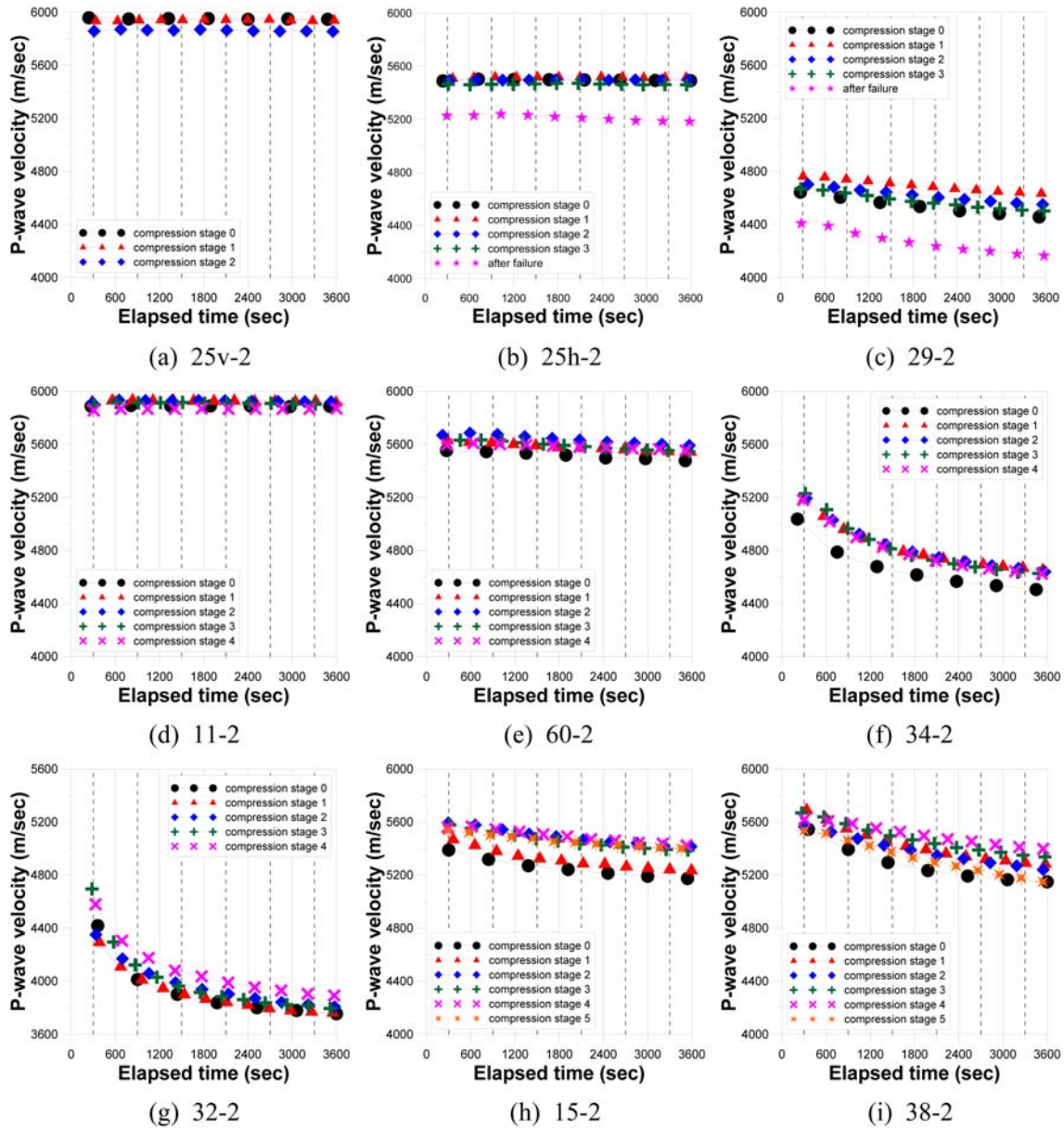


Fig. 5. P-wave velocity change with respect to the compression stage and elapsed time from surface dry saturated condition.

도변화가 크게 나타나 손상진행에 따른 S-파의 속도 변화가 명확하게 나타난다. 그러나 이들 두 시료의 P-파 속도는 재하 단계가 진행되어도 큰 변화를 보이지 않는데, 이는 포화된 시료의 P-파 속도는 손상이 진행됨에 따른 속도 감소요인과 균열을 채운 물에 의한 속도 증가요인의 복잡한 상호작용에 의해 좌우되기 때문으로 풀이된다.

수포화 후 1시간 동안 상온에서 건조될 때 변화한 탄성파 속도 차이를 백분율로 나타낸 $W_{surface}$ 는 암석코어 표면부의 수분 증발로 인한 속도 변화를 대변하는데(이상규 등, 2010),

$$W_{surface} = \frac{V_{t=480} - V_{t=3600}}{V_{t=3600}} \times 100 \quad (1)$$

여기서 $V_{t=480}$ 은 시간 $t = 480$ 에서의 탄성파 속도, $V_{t=3600}$ 은 시간 $t = 3600$ 에서의 탄성파 속도이다. 단계별 재하시험 이전인 0단계에서의 P-파 속도를 보면 25v-2, 25h-2, 11-2에서는 변화가 거의 없었으나 60-2, 15-2, 29-2, 38-2, 34-2, 32-2 시험편에서는 수포화 때의 속도가 각각 1.2, 3.6, 3.8, 6.9, 8.8, 13.0% 증가했다. 재하단계가 진척되면 각각 0.9~1.6, 2.5~3.9, 2.9~3.7, 4.1~7.3, 9.7~12.0, 12.0~16.1% 범위로 수포화 때의 속도가 커졌지만 재하단계 진척에 따른 규칙성을 찾기는 어려웠다. 0단계에서의 S-파 속도는 25v-2, 25h-2, 29-2, 11-2, 60-2에서는 변화가 거의 없었고 34-2, 38-2, 32-2 시험편에서는 수포화 때의 속도가 각각 1.8, 2.5, 4.0% 증가했다. 재하단계가 진척되면 각각 3.1, 2.2, 5.6%까지 수포화 때의 속도가 커

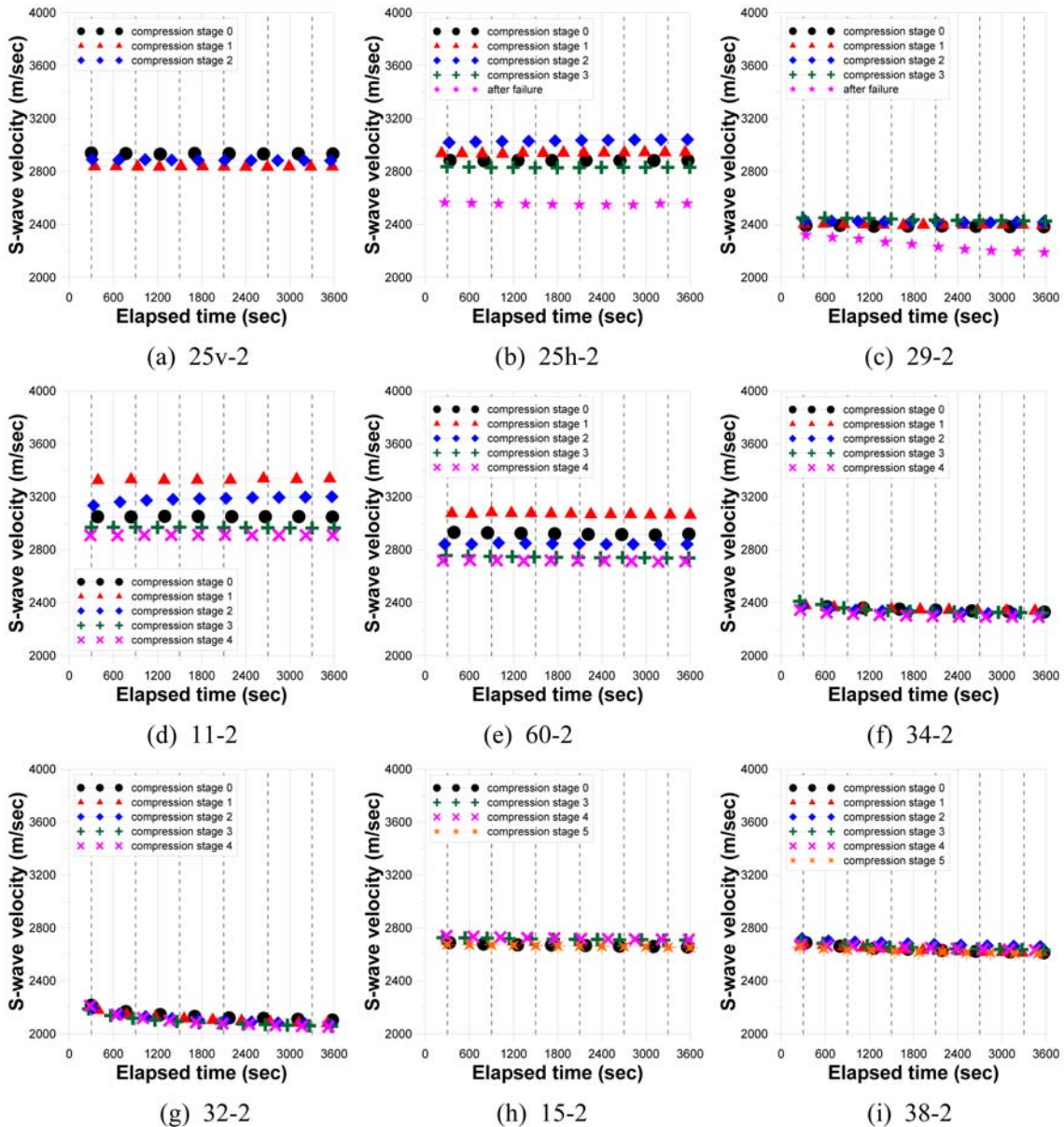


Fig. 6. S-wave velocity change with respect to the compression stage and elapsed time from surface dry saturated condition.

졌지만 역시 단계 진척에 따른 규칙성을 찾는 것은 어려웠다. 15-2 시험편에서도 0단계에서 1.0% 정도, 2단계에서 2.2% 정도 수포화 때의 S-파 속도가 빠르지만 이것이 유의할 만한 값 인지는 확실하지 않다.

건조한 암석이 반복재하에 의해 미세균열이 발생하면 손상이 누적됨에 따라서 P-파 속도가 일률적으로 감소하는(김영화 등, 1997) 것과 달리, 수포화 암석이 상온에서 1시간 동안 건조될 때는 재하단계에 따라서 P-, S-파 모두 속도의 증감 양상이 매우 복잡하게 나타난다. 이것은 속도의 감소 요인(균열)과 증가 요인(균열 속 물)의 상호작용이 시간이 흐름에 따라서 달라지기 때문인 것으로 판단된다. 재하단계에 따른 P-파 속도의 변화는 단조 감소하는 경우(25v-2), 증가하다가 감소하는 경우

(25h-2, 29-2, 11-2, 60-2, 34-2), 증가→감소→증가하는 경우(32-2), 증가→감소→증가→감소하는 경우(15-2, 38-2)가 있으며, S-파의 속도 변화는 감소하다가 증가하는 경우(25v-2), 증가하다가 감소하는 경우(25h-2, 29-2, 11-2, 60-2), 증가→감소→증가→감소하는 경우(34-2, 15-2), 감소하다가 증가하는 경우(32-2) 등이 있다. 그러나, 비록 일부 암석의 경우 예외는 있으나 대부분의 경우에서 재하 초기단계에서는 속도가 증가하다가 감소하는 경향을 보인다. 4단계에서 파괴된 후에 측정 한 25h-2와 29-2를 보면 P-파 속도는 재하 전에 비해 $t = 480$ 에서 4.9, 4.7%, $t = 3600$ 에서 6.0, 6.5% 감소하였고, S-파 속도는 $t = 480$ 에서 11.0, 3.2%, $t = 3600$ 에서는 11.4, 8.3% 역시 감소했다. 또한 수포화 직후($t = 480$) 보다 상온에서 1시간

Table 4. P-wave velocity change with respect to time elapsed and compression stage

Sample ID	Comp. stage	Vp_sat @ t=480				Vp_wet @ t=3600			W _{surface} ¹⁾ (%)
		velocity (m/sec)	difference (%)		velocity (m/sec)	difference (%)			
			from stage 0	from previous stage		from stage 0	from previous stage		
25v-2 mica schist	0	5959	–	–	5945	–	–	0.2	
	1	5933	–0.4	–0.4	5943	–0.0	–0.0	–0.2	
	2	5868	–1.5	–1.1	5854	–1.5	–1.5	0.2	
25h-2 mica schist	0	5498	–	–	5493	–	–	0.1	
	1	5511	0.2	0.2	5513	0.4	0.4	–0.0	
	2	5496	–0.0	–0.3	5501	0.2	–0.2	–0.1	
	3	5468	–0.6	–0.5	5465	–0.5	–0.7	0.1	
	4	5231	–4.9	–4.3	5185	–6.0	–5.1	0.9	
29-2 biotite gneiss	0	4628	–	–	4459	–	–	3.8	
	1	4764	2.9	2.9	4631	3.9	3.9	2.9	
	2	4697	1.5	–1.4	4553	2.1	–1.7	3.2	
	3	4671	0.9	–0.6	4504	1.0	–1.1	3.7	
	4	4412	–4.7	–5.5	4169	–6.5	–7.4	5.8	
11-2 granite porphyry	0	5892	–	–	5886	–	–	0.1	
	1	5932	0.7	0.7	5920	0.6	0.6	0.2	
	2	5926	0.6	–0.1	5923	0.6	0.1	0.1	
	3	5915	0.4	–0.2	5903	0.3	–0.3	0.2	
	4	5863	–0.5	–0.9	5872	–0.2	–0.5	–0.2	
60-2 biotite granite	0	5542	–	–	5479	–	–	1.2	
	1	5627	1.5	1.5	5545	1.2	1.2	1.5	
	2	5686	2.6	1.1	5594	2.1	0.9	1.6	
	3	5636	1.7	–0.9	5546	1.2	–0.9	1.6	
	4	5608	1.2	–0.5	5557	1.4	0.2	0.9	
34-2 biotite granite	0	4900	–	–	4503	–	–	8.8	
	1	5103	4.1	4.1	4651	3.3	3.3	9.7	
	2	5117	4.4	0.3	4640	3.0	–0.2	10.3	
	3	5173	5.6	1.1	4620	2.6	–0.4	12.0	
	4	5099	4.1	–1.4	4621	2.6	0.0	10.3	
32-2 biotite granite	0	4244	–	–	3756	–	–	13.0	
	1	4219	–0.6	–0.6	3760	0.1	0.1	12.2	
	2	4264	0.5	1.1	3807	1.4	1.3	12.0	
	3	4406	3.8	3.3	3795	1.0	–0.3	16.1	
	4	4442	4.7	0.8	3891	3.6	2.5	14.2	
15-2 granite gneiss	0	5366	–	–	5178	–	–	3.6	
	1	5441	1.4	1.4	5238	1.2	1.2	3.9	
	2	5592	4.2	2.8	5414	4.6	3.4	3.3	
	3	5566	3.7	–0.5	5389	4.1	–0.5	3.3	
	4	5568	3.8	0.0	5430	4.9	0.8	2.5	
	5	5537	3.2	–0.6	5400	4.3	–0.6	2.5	
38-2 porphyry granite	0	5508	–	–	5151	–	–	6.9	
	1	5657	2.7	2.7	5284	2.6	2.6	7.1	
	2	5549	0.7	–1.9	5237	1.7	–0.9	6.0	
	3	5655	2.7	1.9	5339	3.7	2.0	5.9	
	4	5611	1.9	–0.8	5392	4.7	1.0	4.1	
	5	5522	0.3	–1.6	5145	–0.1	–4.6	7.3	

¹⁾W_{surface} = (V_{t=480} – V_{t=3600})/V_{t=3600} × 100(%)

Table 5. S-wave velocity change with respect to time elapsed and compression stage

Sample ID	Comp. stage	Vs_sat @ t=480			Vs_wet @ t=3600			W _{surface} ¹⁾ (%)
		velocity (m/sec)	difference (%)		velocity (m/sec)	difference (%)		
			from stage 0	from previous stage		from stage 0	from previous stage	
25v-2 mica schist	0	2935	–	–	2937	–	–	–0.1
	1	2840	–3.2	–3.2	2837	–3.4	–3.4	0.1
	2	2890	–1.5	1.8	2885	–1.8	1.7	0.2
25h-2 mica schist	0	2885	–	–	2887	–	–	–0.1
	1	2938	1.8	1.8	2948	2.1	2.1	–0.3
	2	3025	4.9	3.0	3042	5.4	3.2	–0.6
	3	2834	–1.8	–6.3	2832	–1.9	–6.9	0.1
	4	2568	–11.0	–9.4	2558	–11.4	–9.7	0.4
29-2 biotite gneiss	0	2393	–	–	2386	–	–	0.3
	1	2403	0.4	0.4	2399	0.5	0.5	0.2
	2	2429	1.5	1.1	2418	1.3	0.8	0.5
	3	2452	2.5	1.0	2425	1.6	0.3	1.1
	4	2316	–3.2	–5.6	2188	–8.3	–9.8	5.9
11-2 granite porphyry	0	3051	–	–	3050	–	–	0.0
	1	3326	9.0	9.0	3339	9.5	9.5	–0.4
	2	3152	3.3	–5.2	3204	5.1	–4.0	–1.6
	3	2972	–2.6	–5.7	2966	–2.8	–7.4	0.2
	4	2909	–4.7	–2.1	2909	–4.6	–1.9	0.0
60-2 biotite granite	0	2932	–	–	2919	–	–	0.5
	1	3072	4.8	4.8	3065	5.0	5.0	0.2
	2	2844	–3.0	–7.4	2842	–2.6	–7.3	0.1
	3	2755	–6.0	–3.1	2740	–6.1	–3.6	0.6
	4	2724	–7.1	–1.1	2711	–7.1	–1.1	0.5
34-2 biotite granite	0	2372*	–	–	2331	–	–	1.8
	1	2374	0.1	0.1	2339	0.3	0.3	1.5
	2	2364	–0.3	–0.4	2315	–0.7	–1.0	2.1
	3	2398	1.1	1.4	2326	–0.2	0.5	3.1
	4	2332	–1.7	–2.8	2293	–1.6	–1.4	1.7
32-2 biotite granite	0	2190	–	–	2106	–	–	4.0
	1	2170	–0.9	–0.9	2086	–1.0	–1.0	4.0
	2	2170	–0.9	0	2076	–1.4	–0.5	4.5
	3	2150	–1.8	–0.9	2059	–2.2	–0.8	4.4
	4	2167	–1.1	0.8	2053	–2.5	–0.3	5.6
15-2 granite gneiss	0	2685	–	–	2658	–	–	1.0
	1	–	46.1	46.1	–	44.3	44.3	2.2
	2	–	12.3	–23.2	–	10.9	–23.2	2.2
	3	2727	1.6	–9.5	2709	1.9	–8.1	0.7
	4	2738	2.0	0.4	2713	2.1	0.2	0.9
	5	2674	–0.4	–2.3	2654	–0.2	–2.2	0.8
38-2 porphyry granite	0	2679	–	–	2615	–	–	2.5
	1	2673	–0.2	–0.2	2617	0.1	0.1	2.1
	2	2710	1.2	1.4	2661	1.8	1.7	1.8
	3	2692	0.5	–0.7	2634	0.7	–1.0	2.2
	4	2672	–0.3	–0.7	2634	0.7	0	1.4
	5	2649	–1.1	–0.9	2606	–0.3	–1.1	1.7

*using first arrival at t = 624 sec

$$^1)W_{\text{surface}} = (V_{t=480} - V_{t=3600})/V_{t=3600} \times 100(\%)$$

($t = 3600$) 정도 건조되었을 때 P-, S-파 속도의 감소율이 커지는 것을 알 수 있으며 따라서 완전건조 상태에서는 감소폭이 훨씬 커질 것이 확실하다. 이것은 파괴에 의해 발생한 균열 내의 수분이 감소할수록 수분에 의한 영향보다 균열에 의한 속도 감소 영향이 우세해 짐에 기인하는 것으로 보인다.

토 의

Fig. 7은 set-1 시험편의 탄성계수와 set-0 시험편의 X선 회절분석(XRD) 결과(이상규 등, 2010) 간 상관관계를 나타낸 그래프이다. 자료 개수가 많지 않지만 시료 29를 제외한 결과를 살펴보면 석영(quartz)의 함량이 증가할수록 탄성계수가 커지

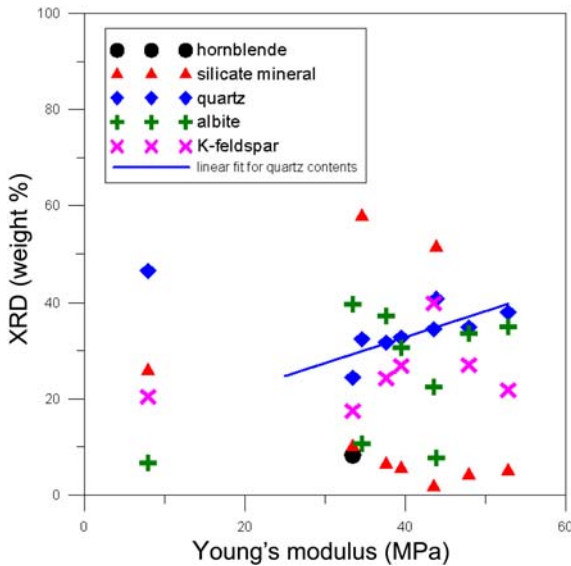


Fig. 7. Relation between mineral composition and Young's modulus for the rock samples.

며, 소위 층상구조형 규산염광물(손치무, 윤석규, 1978)인 녹니석(chlorite), 흑운모(biotite), 백운모(muscovite), 고령토(kaolin) 함량의 함이 증가할수록 탄성계수가 작아지는 경향을 볼 수 있었다.

Fig. 8은 $t = 480$ 초와 $t = 3600$ 초 때 set-2 시험편의 단계별 탄성계수와 탄성과속도의 상관관계를 보인 것이다. 그림에서 실선은 각 암석의 수포화밀도(set-2, Table 3), $t=480$ 에서 측정된 P-파와 S-파의 속도로부터 계산된 포아송비로부터 계산된 이론적인 상관관계 곡선이다. 속도비로부터 계산된 포아송비는 0.31~0.35로 계산되어 일반적인 포아송비의 값보다 큰 값을 보였다. 전체적으로 P-, S-파 속도가 이론곡선에 비해 속도가 높게 측정된 것을 볼 수 있으나 전체적으로는 탄성과속도가 탄성계수의 제곱근에 비례하는 경향을 잘 보이고 있다. 특이한 것은 화성암류(32, 34, 38, 60, 11)를 잇는 경향과 엽리구조를 갖는 변성암들(29, 25h)을 잇는 두 개의 경향으로 분리되어 나타나는 것으로, 이 결과가 이방성과도 연관되었음을 시사한다. 29, 25h는 각각 set-1 UCS의 69, 75%의 하중에서 파괴된 시험편들로서(Table 2) 엽리구조를 따라서 set-1으로 평가한 UCS 보다 먼저 파괴된 것으로 보인다.

결 론

수포화나 부분 포화 암석의 손상 진행에 따른 P-, S-파 속도의 변화 특성을 파악하기 위하여 석모도에서 산출되는 9개의 암석 시험편을 이용하여 공극율, 밀도 등 물성 측정과 함께, 재하하중을 증가하면서 5단계의 반복적 재하시험을 수행하고 각 단계별 탄성과 속도 변화를 관찰하였다.

재하 전 상태에서부터 일축압축강도의 95%까지 응력을 받은 수포화 시험편들이 1시간 동안 상온에서 건조되는 동안 P-

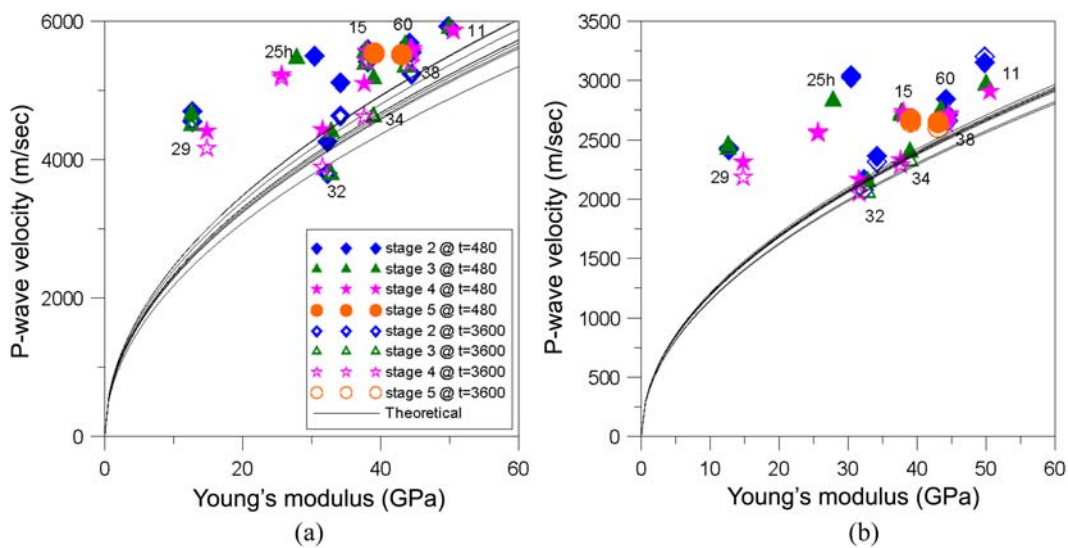


Fig. 8. Relations between wave velocity and Young's modulus with respect to the compression stage.

파 속도와 S-파 속도에서 수포화에 의한 영향은 시료에 따라 다르게 나타나나 P-파의 경우 16.1%, S-파의 경우 5.6% 이내로 나타났다. 재하 단계가 진행됨에 따라서 수포화 정도가 탄성파 속도에 미치는 영향에서는 특별한 규칙성을 발견하지 못하였다.

하중재하에 의해 건조한 암석에 균열이 발생하면 P-파 속도가 일률적으로 감소하는 이전 연구와는 달리, 수포화 암석의 경우는 균열생성에 의한 속도 감소 요인과 수포화에 의한 속도 상승요인의 상호작용에 의해 속도 증감 양상이 매우 복잡하게 나타난다. 즉, 재하단계에 따른 P-파 속도의 변화는 단조 감소하는 경우(25v-2), 증가하다가 감소하는 경우(25h-2, 29-2, 11-2, 60-2, 34-2), 증가→감소→증가하는 경우(32-2), 증가→감소→증가→감소하는 경우(15-2, 38-2)가 있으며, S-파의 속도 변화는 감소하다가 증가하는 경우(25v-2), 증가하다가 감소하는 경우(25h-2, 29-2, 11-2, 60-2), 증가→감소→증가→감소하는 경우(34-2, 15-2), 감소하다가 증가하는 경우(32-2) 등이 있다. 그러나, 제한된 재하단계와 재하실험 및 측정의 오차 등을 감안하여 전반적인 경향을 유추하면 대부분의 경우에서 재하 초기단계에서는 속도가 증가하다가 후기 단계에서 감소하는 경향을 보인다. 다만, 감소가 시작되는 단계는 시료별로 1단계에서 4단계까지 다양하게 나타났다. 이는 S-파에서도 유사하게 나타나는데, 재하단계별 속도변화가 크게 나타난 11-2, 60-2 시료의 경우 이러한 경향을 뚜렷이 보여주었다. 파괴 후 형태를 보존한 25h-2 와 29-2 시료에 대해서 파괴후의 속도를 측정된 결과는 현저한 공극율의 상승과 동반하여 속도도 현저히 감소하였다. 조암광물별로 보면 석영 함량이 증가하면 탄성계수가 커지며 층상구조형 규산염광물이 증가하면 탄성계수는 작아지는 경향을 보였다.

감사의 글

이 연구는 2010년 지식경제부 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 신재생에너지 기술개발사업 연구과제(No. 2010T100200494)의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 김영화, 장보안, 문병관, 김재동, 이찬구, 1997, 화강암 석재시료에서의 압축피로하중시험과 P파 속도의 변화 특성, 1997 대한 지질공학회 학술발표회, 17-23.
- 손치무, 윤석규, 1978, 광물학 개론, 박영사, 302.
- 윤운상, 송윤호, 이태종, 김광염, 민기복, 조용희, 전종욱, 2011, MW급 EGS 지열발전 사용화 기술개발사업의 추진 배경 및 계획, 터널과지하공간, **21**(1), 11-19.
- 이상규, 이태종, 성낙훈, 2010, “자동·연속 측정장치를 이용한 석모도 지표 암석의 탄성과 속도 특성 분석”, 한국지구시스템 공학회지, **47**(5), 756-770.
- 이상규, 이태종, 2011a, 시편의 중량 측정이 가능한 건조장치 및 이를 이용한 공극률 측정방법, 대한민국특허 제10-1057142호.
- 이상규, 이태종, 2011b, 아크릴 및 스테인리스강 시험편의 P-, S-파 속도 산출에 미친 영향 요인 고찰, 지구물리와 물리탐사, **14**(4), 305-315.
- 장수호, 2002, 응력수준에 따른 암석의 손상특성과 심부터널 주변 암반 손상영역의 해석, 공학박사학위논문, 서울대학교.
- 천대성, 박의섭, 박철환, 박찬, 2008, 국내 암석의 역학적 특성 분석과 DB구축을 위한 기본연구, 터널과 지하공간, **18**(5), 317-327.
- Asanuma, H., Nozaki, H., Niitsuma, H., and Wyborn, D., 2005, Interpretation of microseismic events with larger magnitude collected at cooper basin, Australia, *GRC Trans.*, **29**, 87-91.
- ASTM/D 2938, 1986, Standard test method for unconfined compressive strength of intact rock core specimens.
- ASTM/D 3148, 1986, Standard test method for elastic moduli of rock core specimen in uniaxial compression.
- Eberhardt, E., Stead, D., Stimpson, B., and Read, R. S., 1998, Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock, *Can. Geotech. J.*, **35**, 222-233.
- Nami, P., Schellschmidt, R., Schindler, M., and Tischner, T., 2008, Chemical stimulation operations for reservoir development of the deep crystalline HDR/EGS system at Soultz-sous-Forêts (France), *Proceedings of Thirty-Third Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford Univ., Jan. 28-30, SGP-TR-185.
- Tester et al., 2006, *The future of geothermal energy - Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st century*, Massachusetts Institute of Technology, http://www1.eere.energy.gov/geothermal/future_geothermal.html (Nov. 10, 2011).