

압축피로에 의한 포천화강암의 P파속도 변화 특성

김영화* · 장보안* · 김재동** · 이찬구*** · 문병관*

P wave Velocity Variation of the Pochon Granite due to the Cyclic Loadings

Yeong Hwa Kim*, Bo-An Jang*, Jae Dong Kim**, Chan Goo Rhee*** and Byeung Kwan Moon*

ABSTRACT : The behavior of rocks and microcrack development due to fatigue stresses are investigated using cyclic loading tests and ultrasonic velocity measurements. Twenty six medium-grained granite samples from the Pochon area are selected for measurements. Ultrasonic velocities are measured for samples before fatigue test to characterize the pre-existing microcracks. Then, thirteen different cycles of loadings with 70% and 80% dynamic strength are applied to the samples. The ultrasonic velocities are measured again to compare velocities after applications of fatigue stress with those before applications of fatigue stress. The results show that most microcracks are developed along the direction parallel to the axis of loading and that the amount of microcracks increases, as loading levels and numbers of cycle increase.

서 론

파괴하중보다 낮은 수준의 응력이 반복적으로 가해지는 현상을 반복피로(fatigue)라 하며 반복피로는 미세균열 발생의 원인이 된다. 암반 중에서는 발파나 천공 작업, 또는 지진에 의한 진동 등과 연관된 피로현상으로 미세균열이 많이 유발된다. 미세균열의 존재는 더 큰 규모의 불연속면 생성의 원인(Kranz, 1979)이 되며 물성적으로 암석의 전기비저항(Brace, 1977), 탄성파속도 및 탄성계수(Walsh, 1965; Anderson *et al.*, 1974; O'Connell, Budiansky, 1974), 강도(강문구 등, 1990) 특성에 큰 영향을 미친다는 점에서 중요한 연구 대상이되고 있다.

암석에 발달한 미세균열의 특성 연구는 초음파속도 측정 방법을 비롯하여 차분변형율 분석, 현미경에 의한 직접관찰 방법 등이 주로 이용되고 있다. 그 중에서 초음파속도 측정은 미세균열의 영향을 잘 반영할 뿐만 아니라

비파괴 측정방법이기 때문에 동일시료에 대해서 미세균열의 발생을 전후한 두 시점에서 측정하여 균열 발생 정도에 대한 비교가 가능하다는 점에서 큰 이점이 있다. 따라서 암석의 물성에 미치는 균열의 영향이나 하중 재하에 의한 균열 발생 및 성장 특성을 초음파 속도 측정을 이용하여 연구한 결과들이 보고되어 있다(Brace *et al.*, 1966; Walsh, 1973; Simmons, Richter, 1976; Crampin *et al.*, 1980; Kranz, 1983; Plumb *et al.*, 1984). 그러나 이 분야에 대한 국내에서의 연구는 초기단계라고 할 수 있다(Kim, 1983; 박형동, 1995).

본 연구에서는 피로하중에 의해 생성되는 미세균열의 발달 특성을 규명하기 위한 새로운 시도로써 26개의 화강암 석재시료를 선택하여 단계적인 압축피로시험과 초음파속도 측정을 실시하였다. 초음파속도 측정은 피로하중이 가해지기 전 상태에서의 초음파 속도와 피로하중 후의 초음파속도 측정으로 구분된다. 먼저 초음파 속도측정을 통하여 초기 시료에 내재한 미세균열의 발달상태를 파악한 후 동일한 시료에 대하여 파괴강도의 70%와 80% 수준의 피로하중을 가하고 다시 초음파 속도측정을 함으로써 피로하중에 의한 미세균열의 발달 상태를 추적하였다. 또한 동일한 피로하중 수준에서 피로 횟수를 달리하므로써 하중수준과 피로횟수에 따른 초음파속도 변화 특성을 분석하고, 이로부터 석재가 일정 수준의 동하중을 반복하

* 강원대학교 지구물리학과 (Department of Geophysics, Kangwon National University, Chunchon, Kangwondo 200-701)

** 강원대학교 자원공학과 (Department of Resources Engineering, Kangwon National University, Chunchon, Kangwondo 200-701)

*** 원자력환경기술원 (Nuclear Environment Technology Institute, Taejon 305-353, Korea)

여 받은 경우 나타나는 피로 균열의 발달 상태를 정량적으로 규명하고자 하였다.

시험시료의 암석학적 특성

본 연구에 이용된 시료는 경기도 포천에서 석재로 생산되어 소위 포천석으로 알려져 있는 중생대 화강암이다. 시료의 육안적 특성은 중립 내지 조립질로 유색광물의 양이 적은 우백질화강암 (leucocratic granite)에 해당된다. 현미경 관찰 결과 석영, 사장석, 흑운모 및 알칼리 장석류가 주구성 광물로 나타나며 부구성 광물로 전기석, 백운모, 녹나석, 인회석, 저어콘 등이 소량 관찰된다. 석영은 봉암상 구조를 보이고 파동 소광을 나타내며 사장석은 알바이트 쌍정, 칼스바드-알바이트 쌍정을 이루고 누대구조 (zonal structure)가 관찰되기도 한다. 알칼리 장석류는 미사장석과 페사이트, 정장석으로 구성되며 페어사이트 반정 내에는 사장석, 석영, 흑운모 등이 포획되어 있는 경우가 많다. 석영, 사장석, K-장석이 공생으로 정출되며 흑운모는 타형으로 이들 광물 사이에서 관찰된다. 10개의 시료에 대한 모드분석 (modal analysis)을 실시하여 Streckeisen (1976)의 modal Quartz-K-Feldspar-Plagioclase (QAP) 삼각 diagram에 도시한 결과 석영이 34~46%, 사장석이 4~29%, K-장석이 33~49%로서 모두 화강암 영역에 도시되었다 (Fig. 1).

연구방법

시편성형 및 물성측정

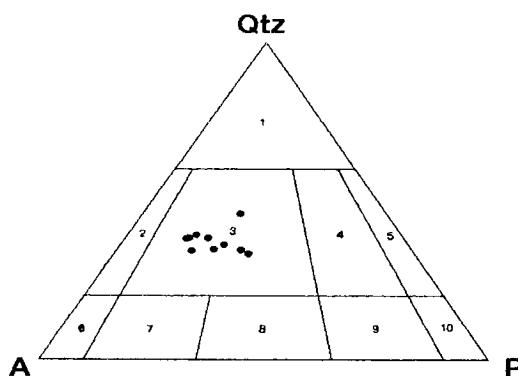


Fig. 1. Triangular diagram of modal composition for the Po-chon granite (Quartz-Alkali feldspar-Plagioclase/The IUGS classification). 1; Quartz-rich Granitoid, 2; Alkali feldspar granite, 3; Granite, 4; Granodiorite, 5; Tonalite, 6; Alkali feldspar syenite, 7; Syenite, 8; Monzonite, 9; Monzodiorite, 10; Diorite.

피로시험과 피로하중 재하를 전후한 초음파속도 측정을 위하여 석산 현장에서 채취된 한번 길이 약 30 cm 입방체의 암석 블록으로부터 암석코어를 얻고, 암석코어를 다시 12각주로 성형하여 시험편을 얻었다. 암석 코어는 현장 석재 기술자에 의하여 판별된 주결 (rift plane)에 대하여 수직한 방향으로 코어링하여 얻어졌으며 시험편의 지름은 43 mm이고 길이는 지름의 약 2배가 되도록 성형하였다. 최종적인 12각주 시험편은 시험편의 원주를 12등분한 후 표면연삭기로 연마하여 만들어졌다. 12각주의 마주보는 양단면의 평평도는 0.02 mm 이내로 유지하였으며 발진자와 수진자가 평행하고 그 연결선이 원주의 중심을 통과할 수 있도록 하였다. 길이의 측정은 캘리퍼를 사용하여 0.01 mm 단위까지 읽었다. 물성측정은 국제 암반역학회 (International Society for Rock Mechanics)의 시험기준에 따라 일축압축강도, 압렬인장강도, 쇼어경도 등이 측정되었으며, 초음파속도 측정에 이용된 각각의 시료에 대하여는 비중과 공극율 측정이 이루어졌다. 시료 번호는 피로시험에서의 하중수준과 피로횟수를 사용하였다. 예를 들면 70% 하중수준에서 600회의 피로하중이 가해질 시료의 경우 70~600으로 표시하였다.

압축피로시험

포천화강암 시료의 일반적인 피로특성을 규명하기 위하여 응력속도제어 일축압축 피로시험이 시행되었으며 동하중강도, 피로곡선 및 S-N 곡선을 획득하고 이 결과로부터 초음파속도 측정시료에 대한 압축피로하중이 가해졌다. 피로시험에서 채택된 응력파형 (loading waveform)은 Haversine이며 응력속도는 100MPa/sec, 응력진폭은 103 MPa이다. 피로하중시험에 있어서 하중수준은 얻어진 S-N 곡선을 감안하여 동하중강도의 70%와 80%를 기준으로 삼았고 각기 피로파괴 횟수를 13단계로 구분하여 시험하였다 (Table 1).

사용된 시험기는 최대 가압용량 140톤인 미국 SBEL (Structural Behaviour Engineering Laboratories)사의 암석 일축압축시험용 서보시스템 (Servo Dynamic Test

Table 1. Loading levels and numbers of loading cycles applied to the samples for velocity measurements

Loading Level	Number of Loading Cycles						
70% dynamic loading	2	4	8	16	32	200	400
	600	800	1000	2521	2930	3116	
80% dynamic loading	2	4	8	16	20	32	40
	60	80	100	110	121	134	

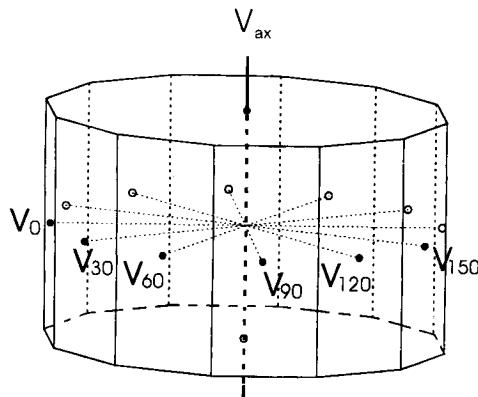


Fig. 2. Outline of sample preparation for ultrasonic measurement.

System, SBEL, Model 547)으로 가압용 프레임, 조정부 (Control Panel), 유압펌프로 구성된다. 피로시험시 하중 파형, 주파수, 응력 진폭 등 시험조건을 설정하는 서보프로그램 (Servo Controller Software)과 이들을 입력신호로 만드는 함수발생기 (Function Generator)는 16비트 개인용 컴퓨터에 별도로 내장되어 있다. 피로횟수의 측정은 조정부에 탑재된 계수기를 이용하였다.

초음파 속도측정

초음파속도 측정은 전조 상태에서의 P파속도를 대상으로 하였으며 26개의 12각주 시료를 사용하여 피로하중 재하를 전후한 2단계로 구분 측정되었다. 먼저 암석의 초기 상태를 알기 위하여 피로하중이 가해지기 전의 신선한 시료 (이하 초기시료)를 대상으로 P파속도를 측정하고 피로하중이 가해진 후의 시료 (이하 하중시료)에 대하여 다시 P파 속도를 측정함으로써 피로하중에 의한 미세균열

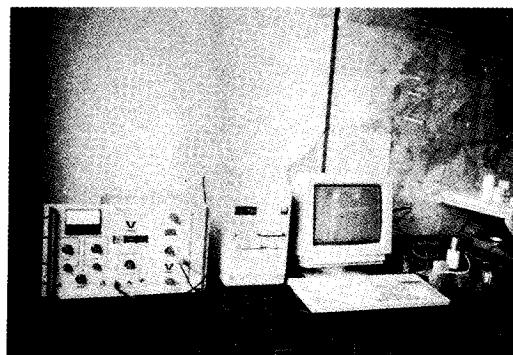


Fig. 3. Ultrasonic velocity measurement system used in the study.

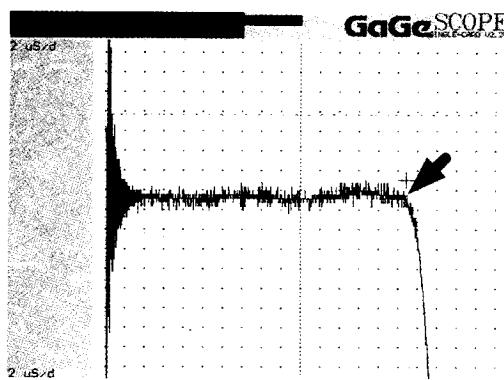


Fig. 4. An ultrasonic wave form obtained from the Pochon granite.

의 발달 상태를 추적하는 방법을 사용하였다. 초음파속도 측정은 축방향의 한 성분과 30도 간격으로 얻어진 횡방향의 6성분으로 합계 7방향에 대하여 이루어졌다 (Fig. 2).

속도측정을 위하여 압전소자 (crystal transducer)를 사용하여 제작된 접촉형 트랜스듀서 (end-cap transducer)와 고압신호발생기 및 board-on 오실로스코프가 사용되었다 (Fig. 3). 암석 시편과 송, 수진자 사이의 결합재 (couplant)로는 글리세린을 사용하였다. 속도측정은 신호 발생기-발진자-암석시료-수진자를 거쳐 오실로스코프 상에 나타난 초음파 파형의 초동 값 (Fig. 4)을 읽고 결정된 주시에서 트랜스듀서의 지연 시간을 보정한 후 시료의 초음파속도 값을 유도하는 과정을 거쳤다.

지연 시간 보정 실험에서는 균질하고 가공이 편리한 폴리에틸렌 (Poly-Ethylene) 재질로서 직경 41 mm의 원주체가 사용되었다. Fig. 5는 길이 31.1 mm 1개, 40 mm

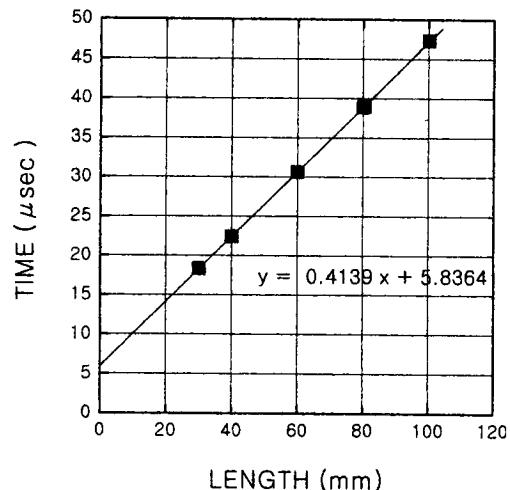


Fig. 5. Result of calibration test for the end-cap transducer.

Table 2. Physical properties of the samples.

Sample	Density (g/cm ³)	Porosity (%)	Sample	Density (g/cm ³)	Porosity (%)
70-2	2.604	1.09	80-2	2.596	1.06
70-4	2.598	1.06	80-4	2.594	1.04
70-8	2.598	1.05	80-8	2.594	1.09
70-16	2.598	1.02	80-16	2.593	1.09
70-32	2.593	1.08	80-20	2.619	0.90
70-200	2.621	0.86	80-32	2.598	1.07
70-400	2.623	0.91	80-40	2.618	0.95
70-600	2.621	0.90	80-80	2.631	0.90
70-800	2.620	0.85	80-100	2.623	0.88
70-1000	2.621	0.93	80-110	2.598	1.04
70-2520	2.597	0.97	80-111	2.595	1.02
70-2930	2.596	0.97	80-121	2.594	1.07
70-3116	2.597	1.03	80-134	2.597	1.04

2개, 60 mm 2개, 80.05 mm 2개, 100.15 mm 1개 등 길이를 달리하는 8개의 표준 공시체(供試體)를 이용한 초음파속도 측정과 분석 결과로서 P파 속도값 4139 m/s와 자연시간 5.8364 μsec가 얻어졌다.

물성 및 재하 응력수준 결정

초음파속도 측정시료를 대상으로 얻어진 건조단위중량과 공극률 값이 Table 2에 제시되어 있다. 건조단위중량의 분포는 2.59~2.63 g/cm³의 범위로써 평균 2.605 g/cm³의 값을 보이며 공극률은 0.86~1.09%로써 평균 1.03%의 값을 보이고 있다. 초음파속도측정 시료와 동일한 석재 블록에서 측정된 암석의 공학적 상수는 일축압축강도와 인장강도가 각각 188±3 MPa와 6.44±4 MPa이며 영율은 48 GPa, 포아송비는 0.24 및 쇼어경도는 65±3으로 나타났다. 전반적으로 실험에 사용된 시료가 풍화의 영향이 적고 물성적으로 비교적 균질한 상태에 있음을 보인다.

아울러 피로응력수준의 결정을 위한 동하중강도시험에서 응력속도 100 MPa/sec 상태에서 동하중강도 206 MPa, 동탄성계수 52.59 GPa, 동포아송비 0.153이 얻어졌다. 피로하중 수준에 따른 피로회수 한계를 나타내는 S-N선도를 얻기 위한 피로파괴시험에서는 동하중강도를 기준으로 60%에서 90%까지 5%간격으로 나누어 응력수준을 설정하였으며, 상한 응력수준과 하한 응력수준의 차이인 응력진폭은 동하중강도의 50%로 설정되었다. Fig. 6은 동하중강도 (206 MPa)의 80% 응력수준에서 얻은 피로곡선으로 시험편 파단시까지의 총 변형률 및 각 피로회수당 변형률의 증가량이 축방향보다는 횡방향에서 두드러짐을 보인다. Fig. 6에서 나타난 피로곡선의 특성은 횡방

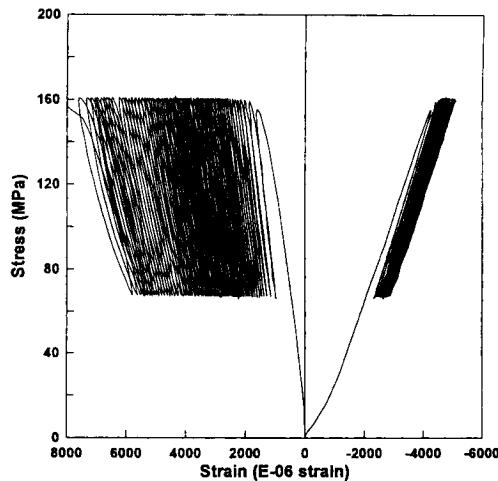


Fig. 6. A typical stress-strain curve for the Pochon granite under uniaxial cyclic compression.

향과 축방향으로 구분하여 영구변형율의 변화를 피로반복 횟수에 대하여 도시한 Fig. 7에서 더욱 잘 설명된다. Fig. 7은 축방향에서의 영구변형률이 10회 이내의 횟수에서 거의 일정한 값으로 안정되고 있음에 비하여 횡방향에서는 횟수 증가에 따라 현저한 영구변형율 증가 경향을 보이고 있다. 초음파속도 측정을 위한 피로하중의 수준은 포천화강암 21개 시험편에 대한 피로시험결과로부터 얻어진 S-N 곡선의 특성 (김재동 등, 1996)을 감안하여 70%와 80%로 결정되었다.

초기시료의 P파속도

피로하중을 가하기 전인 초기시료에 대한 건조 P파속

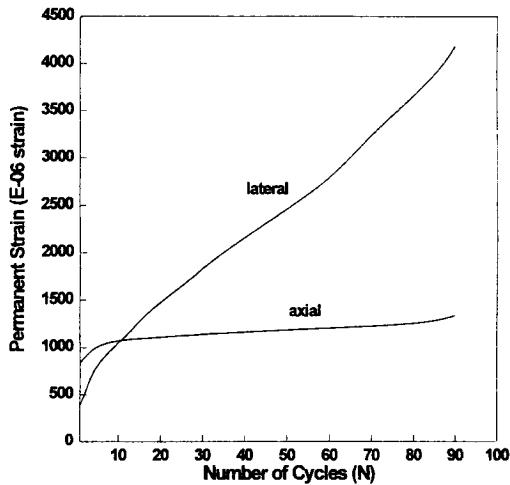


Fig. 7. Permanent strain versus numbers of cyclic loading for the Pochon granite.

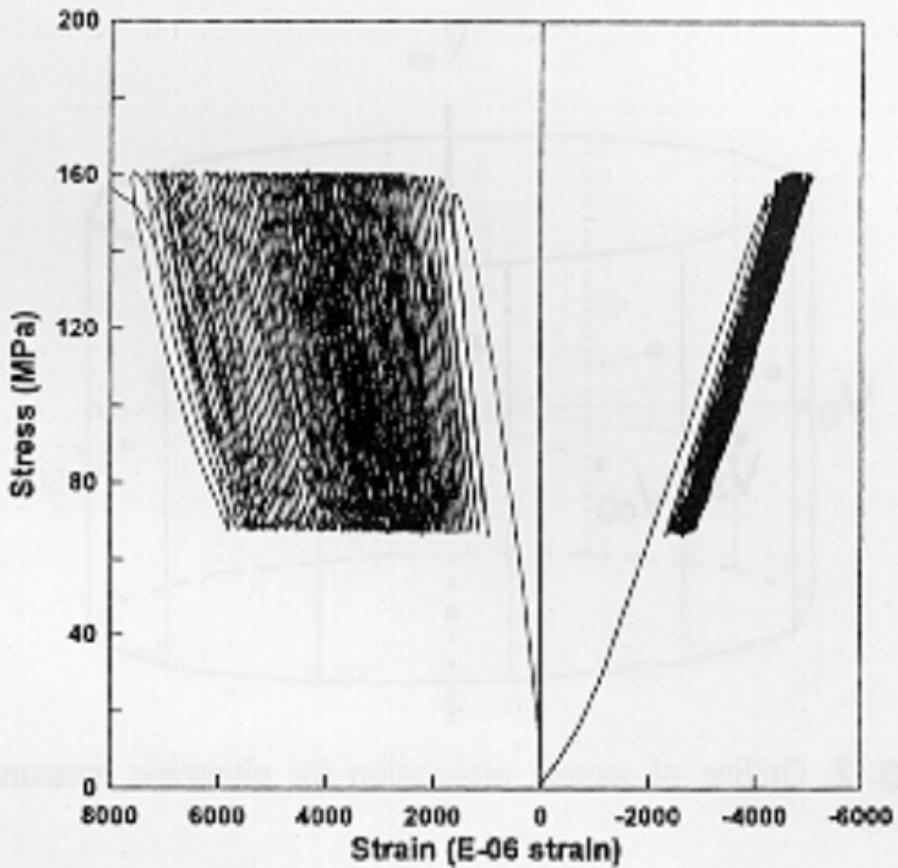
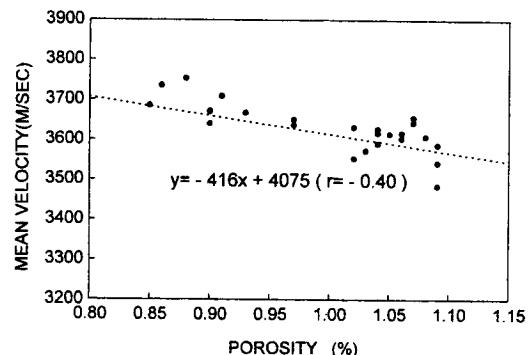


Fig. 6. A typical stress-strain curve for the Pochon granite under uniaxial cyclic compression.

Table 3. Velocities measured from samples before application of fatigue stress.

Sample	V_0	V_{30}	V_{60}	V_{90}	V_{120}	V_{150}	V_{ax}
70-2	3442	3662	3730	3775	3739	3567	3322
70-4	3538	3720	3850	3839	3735	3611	3380
70-8	3688	3591	3585	3814	3859	3849	3383
70-16	3845	3586	3591	3603	3833	3921	3435
70-32	3948	3783	3630	3496	3607	3869	3379
70-200	3897	3951	3866	3785	3735	3729	3555
70-400	3825	3887	3935	3890	3722	3677	3482
70-600	3709	3760	3935	3828	3762	3641	3473
70-800	3600	3838	4000	3964	3803	3644	3443
70-1000	3667	3987	3957	3767	3570	3583	3495
70-2520	3799	3731	3630	3762	3927	3957	3309
70-2930	3923	3879	3649	3626	3578	3868	3446
70-3116	3931	3731	3567	3462	3610	3912	3314
80-2	4014	3867	3731	3661	3604	3822	3284
80-4	3870	3868	3672	3605	3600	3810	3406
80-8	3491	3563	3718	3696	3558	3515	3273
80-16	3585	3514	3593	3798	3841	3741	3404
80-20	3868	3572	3645	3789	3821	3890	3484
80-32	3827	3738	3613	3651	3831	3961	3391
80-40	3292	3006	3043	3318	3477	3466	3244
80-80	3634	3776	3941	3830	3630	3535	3472
80-100	3798	3674	3774	3810	4001	3989	3580
80-110	3619	3846	3855	3764	3714	3534	3406
80-111	3470	3564	3762	3831	3808	3555	3328
80-121	3807	3948	3926	3701	3557	3593	3458
80-134	3573	3621	3830	3940	3798	3592	3318

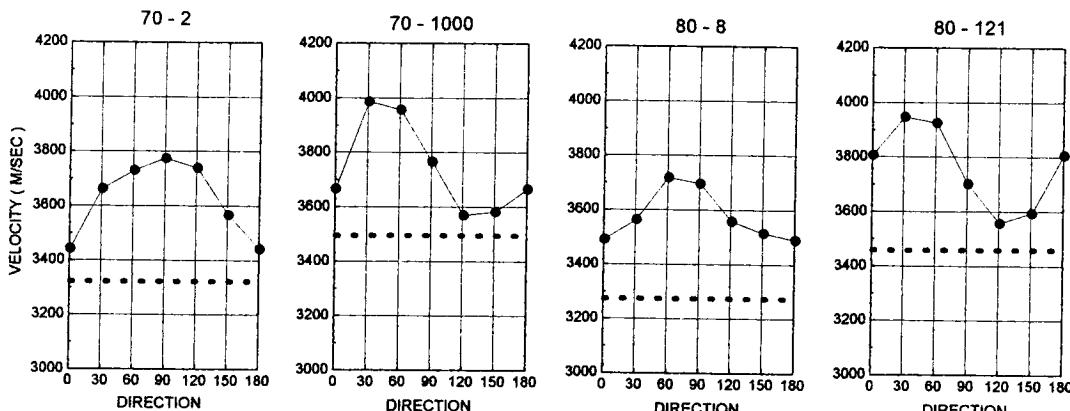
도는 Table. 3에서와 같이 측정되었다. Table 3에서 아래 첨자로 표시된 0, 30, 60, 90, 120, 150의 값은 코어 수평 단면상에서 임의의 기준선과 이루는 회전 각도로서 Fig. 2에서 도시된 바와같이 V_0 , V_{30} , V_{60} , V_{90} , V_{120} , V_{150} 은 각 방향에서 원주의 중심을 통과하는 횡방향 속도 (radial velocity)를 가르키며 V_{ax} 는 축방향 속도를 나타낸다.

**Fig. 8.** Dry P wave mean velocity versus porosity for the Pochon granite.

초기시료의 건조 P파 속도는 시료와 측정방향에 따라 다양한 속도분포를 보이고 있으며 80~40시료의 V_{30} 에서 최저값인 3006 m/s을 보이고 80-20시료의 V_0 에서 최대값인 4014 m/s를 보이고 있다. 물론 제시된 초기시료의 명칭은 하중시료 측정 결과와의 비교를 위해 하중시료와 동일하게 부여된 것으로 하중수준과 재하횟수의 의미는 없다. 각 시료에서의 건조 P파 속도는 속도 측정 방향에 따라 크게 달리 나타나고 있으므로 각 시료별 초음파속도의 특성이나 기초 물성과의 상관성을 확인하기에 어려움이 있다. 따라서 Fig. 8은 측정방향에 따른 속도 변화 효과를 제거하기 위하여 평균속도를 구하고 이를 공극율에 대하여 도시한 것이다. 그 결과 공극률의 증가에 따른 평균속도의 감소 경향이 인지되고 있으나 상관성이 크지는 못하다. 평균속도는 다음과 같은 식으로 구해졌다.

$$3V_{\text{mean}} = (V_0 + V_{30} + V_{60} + V_{90} + V_{120} + V_{150}) / 3 + V_{ax}$$

시료 내에서 방향에 따른 속도값의 변화로는 우선 축방

**Fig. 9.** Dry P wave velocity before the application of the cyclic loading (circle; lateral, dotted; axial).

향과 횡방향 간에 현저한 차이가 주목된다. 축방향속도 (V_{ax})가 3244~3580 m/s의 범위임에 비하여 횡방향 속도 ($V_0 \sim V_{150}$)는 예외적으로 나타나는 하나의 시료를 제외한다면 3442~4014 m/s의 범위로써 축방향속도 보다 상대적으로 높은 값을 보인다. 축방향의 평균속도가 3402 m/s이며 횡방향의 평균속도가 3717 m/s로 나타나고 있으므로 축방향의 속도는 횡방향의 속도에 비하여 약 8.5% 낮은 값을 보인다고 할 수 있다. Fig. 9는 26개의 속도측정 시료 중에서 4개의 측정결과를 도시한 것으로 축방향과 횡방향 속도의 분포특징을 보여주고 있다. 어느 시료에서나 공통적으로 축방향속도가 횡방향속도 보다 낮은 값을 보이는 현상이 뚜렷하다. 이는 시험편 제작에서 축방향이 주결의 방향에 수직으로 결정되었음과 연관되는 것으로 주목된다. 화강암의 주결은 미세균열이 가장 우세하게 발달한 방향과 일치하며 (Plumb *et al.*, 1984), 따라서 축방향을 따라 가장 낮은 초음파속도를 보임은 초음파속도 측정이 미세균열의 발달상태를 매우 잘 나타내 주고 있음을 지시한다. 횡방향에 있어서의 속도변화의 양상은 시료에 따라 진폭과 과형에 있어서 차이가 있으나 대체로 주기가 180°인 싸인 곡선의 형태를 가지고 최대 속도 방향과 최소 속도 방향이 약 90° 떨어져 나타나는 특징을 보인다.

하중시료의 P파속도

피로하중을 가한 후에 측정된 초음파속도는 Table 4에서 제시된 바와같이 건조 P파속도가 최소값 2404 m/s에서 최대값 3620 m/s의 분포를 보인다. 축방향과 횡방향의 속도로 구분하여 보면 축방향에서의 속도분포가 3074~3338 m/s의 범위로 평균 속도 3225 m/s를 보이는 반면에 횡방향으로의 속도 값은 2404~3620 m/s의 값으로 3130

Table 4. Velocities measured from samples after application of fatigue stress.

Sample	V_0	V_{30}	V_{60}	V_{90}	V_{120}	V_{150}	V_{ax}
70-2	3316	3508	3508	3580	3530	3304	3239
70-4	3126	3264	3362	3515	3528	3309	3323
70-8	3447	3366	3389	3516	3620	3475	3171
70-16	3511	3322	3268	3466	3554	3581	3211
70-32	3422	3415	3247	3202	3208	3421	3303
70-200	3422	3502	3414	3309	3197	3200	3338
70-400	3105	3165	3195	3004	3041	3047	3115
70-600	2678	2738	2783	2733	2560	2592	3178
70-800	2911	3041	3486	3255	2866	2767	3188
70-1000	3090	3296	3111	2805	2778	2824	3165
70-2520	3239	2981	3091	3052	3327	3380	3260
70-2930	3328	3295	3080	3040	3075	3389	3314
70-3116	2904	2625	2404	2435	2583	2841	3119
80-2	3499	3407	3328	3288	3281	3478	3197
80-4	3558	3508	3383	3346	3338	3517	3213
80-8	3018	3265	3340	3270	3181	3038	3074
80-16	3256	3095	3269	3463	3483	3353	3258
80-20	3507	3214	3106	3386	3447	3461	3330
80-32	3185	2870	2728	3043	3191	3364	3223
80-40	2851	2564	2524	2918	2980	2904	3188
80-80	2824	3041	3240	2830	2793	2635	3285
80-100	2894	2851	2733	2726	2986	3260	3287
80-110	2827	2996	2968	2799	2768	2777	3195
80-111	2644	2845	3016	3131	2984	2801	3105
80-121	2898	3041	2989	2815	2699	2851	3322
80-134	2824	2991	3114	3239	3052	2796	3239

m/s의 평균속도를 보이고 있다.

초기시료에서와 동일하게 축방향과 횡방향을 비교하기 위해 각 속도의 평균값을 비교하면, 축방향의 속도는 횡방향의 속도에 비하여 약 3% 높은 값을 보이고 있어 초기시료에서의 8.5% 낮은 값을 대조를 이룬다. 피로하중시료에서 축방향의 속도가 오히려 횡방향속도 보다 크게 나타

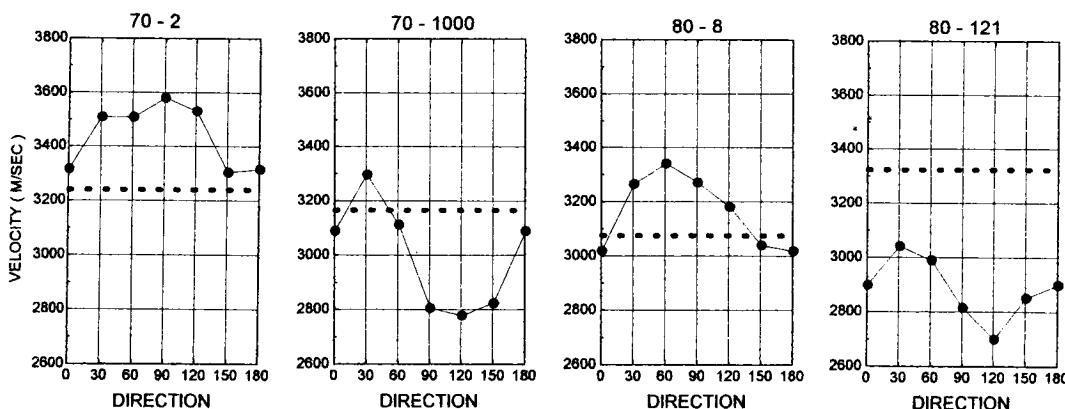


Fig. 10. Dry P wave velocity after the application of the cyclic loading (circle; lateral, dotted; axial).

나는 속도 역전 현상은 피로하중 시료에서의 횡방향 속도가 크게 감소했음에 기인하고 있다. Fig. 10은 하중 수준과 재하 횟수의 증가에 따라 횡방향 속도가 축방향 속도값보다도 작아지는 경향을 보여주고 있다. 하중수준 70%, 재하회수 2회인 70-2 시료의 경우 횡방향속도는 대체로 3300~3600 m/s의 속도 분포로 6 방향 모두가 축방향속도인 3239 m/s 보다 큰 값을 보이는 반면에 80-8시료의 경우에는 일부 횡방향 속도가 축방향 속도값 이하로 나타나기 시작한다. 횡방향 속도가 축방향 속도보다 낮게 나타나는 현상은 70-1000 시료에서 더욱 “심화되며 80-121시료에서는 모든 횡방향 속도가 축방향속도보다 훨씬 작은 값을 보여주고 있다. 수평면 내에서 방향에 따른 속도 분포는 초기시료에서의 변화 양상과 마찬가지로 주기가 180° 인 심신 곡선의 형태를 가지고 최대 속도 방향과 최소 속도방향이 약 90° 떨어져 나타나고 있다.

피로하중에 의한 P파속도의 변화특성

앞에서 제시된 바와 같이 피로하중을 가한 후의 전조 P파속도는 2404~3620 m/s의 분포로서 초기시료에서의 3006~4014 m/s의 속도 분포와 비교할 때 매우 큰 규모의 속도 감소를 나타낸다. 피로에 의한 속도 감소는 시료 내에 생성된 미세균열의 존재에 기인하는 것으로 속도감소

의 경향은 바로 생성된 미세균열의 특성과 연관된다.

속도 변화의 가장 큰 특징은 축방향과 횡방향에 있어서 속도감소의 경향이 크게 다르게 나타난 점이다. 축방향에 있어서는 초기시료의 전조 P파속도가 3244~3580 m/s의 범위로 평균 3402 m/s의 값을 보인 반면에 하중 시료는 3105~3338 m/s의 범위에 평균 3225 m/s의 값을 보이고 있어 피로에 의하여 평균 177m/s의 속도감소가 일어났음을 의미한다. 이에 비하여 횡방향에 있어서는 초기시료에서 3442~4014 m/s의 속도범위를 보이던 것이 하중 시료에서는 2404~3620 m/s의 속도범위로 평균 587 m/s의 속도감소를 보이고 있다. 결국 횡방향에서 피로에 따른 속도감소의 정도는 평균 18.8%에 이르고 있어 약 5.5%감소를 보인 축방향에 비하여 무려 3배에 해당되는 큰 값을 기록하고 있다. 피로하중을 받은 경우 축방향과 횡방향에서 달리 일어나고 있는 속도감소의 경향은 Fig. 9와 10에서 제시된 동일시료 측정결과와 비교함으로써 보다 확실히 알 수 있다. Fig. 11은 이러한 관점에서 8개 시료에서의 초기속도와 피로하중 속도 차 (ΔV)를 도시한 것으로 축방향에서의 작은 속도차와 횡방향에서의 큰 속도차가 좋은 대조를 이루고 있다.

아울러 Fig. 11은 횡방향의 P파속도가 피로하중의 수준과 피로반복 횟수에 크게 영향을 받고 있음을 보인다. 위쪽의 4개가 70% 하중시료의 것이며 아래쪽 4개가 80%

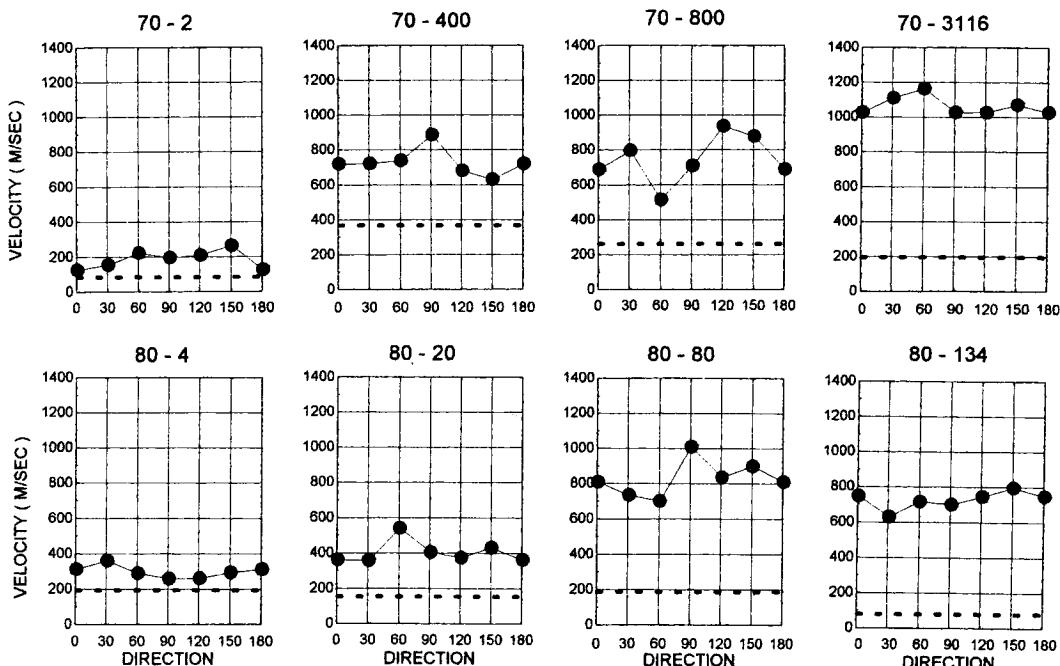


Fig. 11. P wave velocity difference between before and after the cyclic loading (circle; lateral, dotted; axial).

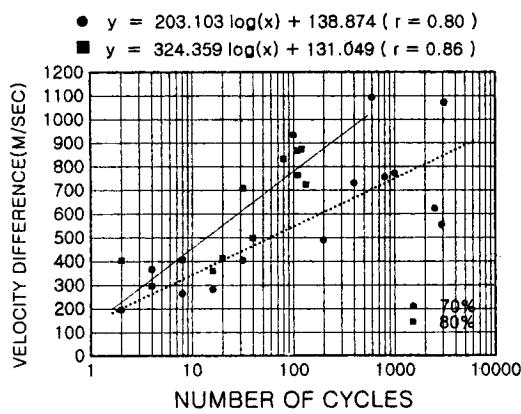


Fig. 12. P wave velocity differences between before and after the cyclic loading versus number of cyclic loading.

하중시료의 것으로 반복 횟수의 증가에 따라 속도 차이가 커지는 경향이 뚜렷하다. 80% 하중시료가 70% 하중시료에 비하여 낮은 피로횟수임에도 불구하고 큰 속도차이를 보이고 있어 80% 하중의 경우가 70% 하중에 비하여 큰 속도 변화를 유발한 것으로 나타난다. 이것은 측정된 모든 시료에서 공통적인 현상으로 하중 수준별로 구분하여 하중재하를 전후한 속도차의 평균값을 구했을 때, 피로횟수가 2회에서 3116회에 이르는 70% 하중에서의 값이 피로횟수가 2회에서 134회인 80% 하중시료의 값과 거의 동

일하게 나타났음으로부터 잘 알 수 있다. 이에 비하여 축 방향에서는 피로횟수나 하중 수준과의 상관 관계가 거의 나타나지 아니하여 횡방향의 속도차 증가 경향과는 대조적이다.

Fig. 12는 하중수준과 피로횟수의 영향을 보다 구체적으로 나타내기 위하여 횡방향에 있어서 각 시료별 속도차의 평균값 (ΔV_{Lmean})을 구하고 이를 피로횟수에 대하여 도시한 것으로 피로횟수 증가에 비례하여 P파속도 감쇄의 폭이 커지며 하중수준은 70% 하중수준에 비하여 80%의 경우가 더욱 큰 속도변화를 야기시키고 있음을 정량적으로 나타내고 있다. 이러한 결과들은 P파속도의 감쇄가 주로 균열의 발달방향에 수직한 방향에서 일어난다고 전제할 때 피로에 의한 균열의 발생이 하중의 축 방향에 평행하게 일어나고 있음을 의미한다.

한편 피로에 의하여 상대적으로 큰 속도감소가 발생된 횡방향 내에 있어서의 속도 분포는 초기시료의 속도분포와 거의 동일한 유형을 보이고 있다. 즉 초기시료와 하중시료 모두 주기가 180° 인 싸인곡선의 형태를 보이고 최대 속도방향과 최저 속도 방향이 거의 비슷하게 나타나고 있다. 이와 같은 속도변화 양상은 초기시료와 피로하중시료의 횡방향 속도를 함께 비교함으로써 쉽게 알 수 있으며 (Fig. 13) 큰 속도감소는 주로 초기시료에서 저속도로 나타난 방향을 중심으로 일어났음을 알 수 있다. 이는 하

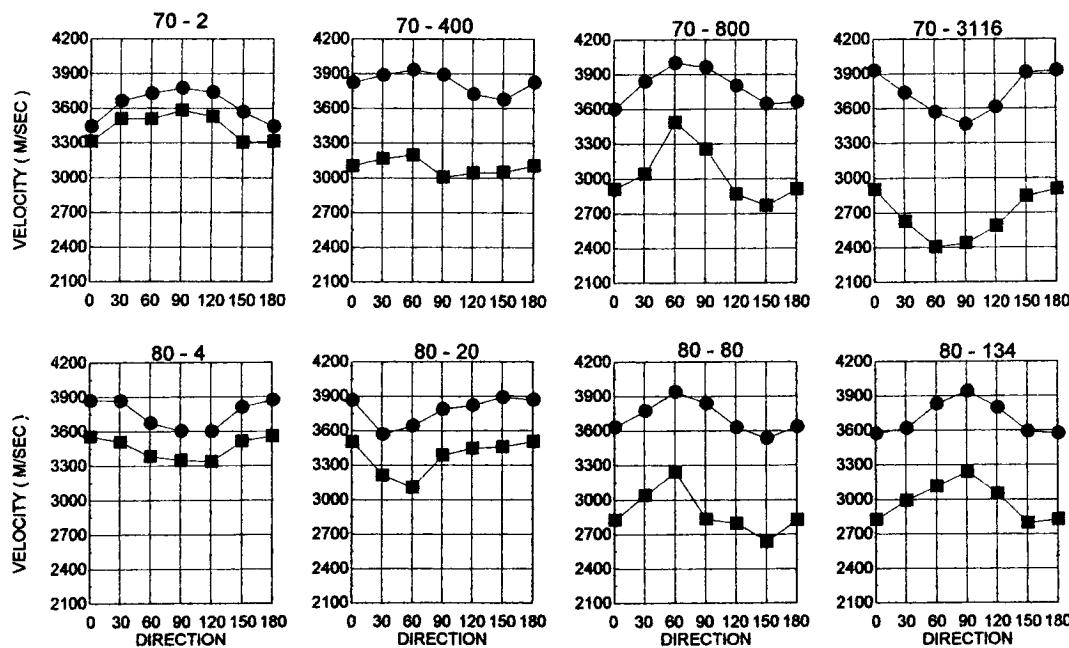


Fig. 13. Dry P wave lateral velocity variation before (circle) and after (square) the cyclic loading.

중 재하에 의한 균열의 생성이 축방향에 평행한 기존의 미세균열을 중심으로 발생하였음을 지시하고 있다.

토 의

본 연구에서 사용된 P파용 transducer의 주파수 범위가 1 MHz이고 P파의 속도가 3400 m/s 내외이므로 예상되는 파장의 크기는 대부분 측정에 사용된 화강암 시료의 입자 크기 이상이며 파의 최소 전달거리 4.2 cm 또한 평균 입자 크기의 10배를 넘는 크기이다. 따라서 최소한의 초음파속도 측정 조건(박형동, 1995)이 충족된 상태에서 초동값이 얻어졌으며 측정오차는 3% 이하로 예상하고 있다. 본 연구에 이용된 시료는 암석학적으로나 물성적으로 비교적 균질한 상태임을 보였다. 석재시료는 모두 동일 석산의 암괴로부터 육안적으로 거의 동일하게 판정된 것으로 10개 시료의 모드분석 결과 또한 모두 화강암 영역에 속함을 보였다. 전조단위중량이 2.59~2.62 g/cm³의 범위이며 공극률이 0.86~1.09%로써 물리적 성질 또한 비교적 일정하게 나타난다. 일축압축강도와 쇼어경도 측정에서 나타난 측정치의 편차 또한 크지 않은 것으로 나타났다.

이에 비하여 초기시료에 대한 건조P파의 속도 측정 결과는 3006에서 4014 m/s에 이르는 속도값의 변화를 보여 시료에 따른 속도편차가 최저속도의 35%에 이르는 큰 값으로 나타나고 있다. 이와 같은 초음파속도 측정의 결과는 P파속도가 화강암에 있어서 가장 예민한 물리상수임을 지시하고 있다. 그러나 축방향의 속도만으로 한정하는 경우 시료간의 속도 편차는 10%로 이하로 감소하여 편차가 주로 속도이방성에서 기인되고 있음을 보이고 있으며 화강암 시료에서의 이방성은 주로 일정한 방향성을 가진 균열의 존재에 기인한 것으로 나타났다.

일정한 방향성을 가진 균열의 존재에 의한 초음파속도 특성은 이 연구의 측정 대상인 포천 화강암 석재에서 초기시료의 경우 모두 축방향에서 최저속도 값을 보인 반면에 피로하중 시료의 경우 축방향에 수직인 횡방향으로의 속도 값이 최저값으로 나타난 것으로 요약된다. 즉 초음파 속도 측정에서의 축방향이 석재의 주결에 수직한 방향에 해당됨을 감안한다면 초기 시료로부터 얻어진 초음파 속도가 축방향에서 최저값을 보인다는 사실은 초기시료에는 미세균열이 주로 축방향에 수직한 횡방향, 즉 압축피로하중에 직각인 방향으로 발달하고 있음을 시사하고 있으며 피로하중을 받고 난 시료에서 횡방향의 속도값이 최저값으로 나타남은 횡방향의 속도감쇄를 유발하는 미세균열, 즉 축 방향에 평행한 방향으로의 균열발생을 지시하고 있다.

단 여기에서 축방향과 횡방향 모두 속도감쇄 현상을 보이고 있으며 속도감쇄의 폭이 각기 평균 177 m/s와 587 m/s로 상대적으로 작은 값이나 축방향에도 속도 감쇄가 나타났음을 주목된다. 일반적으로 석공들은 석영과 장석 속의 입자내균열 방향을 화강암의 주결로 판단하고 있다. 따라서 압축파로하중의 축방향에 대하여 수직으로 분포하는 기존의 입자내균열이 압축하중에 의하여 폐합되는 상태를 예상할 수 있으며 균열의 폐합은 오히려 약간의 속도 증가를 시사하고 있어 축방향에서의 속도감소 현상과 배치되고 있다. 물론 축방향의 속도 감쇄는 축방향으로 생성된 절리의 영향으로 설명될 가능성도 있으나 일반적으로 예상될 수 있는 균열밀도 (crack density)나 아스펙트 비 (aspect ratio)의 범위 내에서는 축방향에 평행하는 절리의 생성에 의한 축방향속도의 감쇄효과가 미약함 (Kim et al., 1996)을 감안한다면 최소한 177 m/s 내외의 속도 감소의 원인은 다른 곳에서 찾아져야 할 것으로 판단된다.

Brace et al. (1966)은 화강암에 압축하중이 가해질 때 파괴강도의 50% 하중수준에서 미세균열의 발생이 시작되며, 미세균열의 생성 메카니즘은 압축응력에 경사진 입자의 경계에서 발생한 전단변형에 의하여 입자내에 압축응력의 방향과 평행한 미세균열이 생성될 것으로 보고하였다. 장보안 등 (1994)은 화강암에 피로하중을 가한 후 미세균열의 발달상태를 관찰하여, 대부분의 입자경계에서 입자경계 균열이 발달하고 있음을 보고하였다. 이상의 결과들을 감안한다면 축방향에서 나타난 속도 감쇄는 압축파로하중의 축과 경사진 방향의 입자경계 균열의 존재에 기인될 가능성이 가장 크다. 결국 횡방향에서의 큰 속도 감쇄는 응력 축과 평행한 입자내 균열 및 입자관통 균열의 영향이 입자경계균열의 영향과 종합되어 나타난 결과로 보아야 할 것이다.

결 언

경기도 포천 지역에 분포하는 화강암에 대한 초기시료의 건조 P파 속도측정, 피로하중시험, 피로하중을 받은 시료를 대상으로 건조 P파속도 측정을 실시하고 분석한 결과는 다음과 같이 요약된다. (1) 초기시료에서 축방향에서의 속도값이 현저히 낮게 나타나 석재의 주결의 존재와 좋은 상관을 보였으며, 이 결과는 초음파속도 측정결과가 현장석재 기술자들이 가지는 결의 개념과 잘 일치함을 보이고 있다. (2) 피로하중 시료에서는 횡방향에서 큰 속도 감소가 발생하였고 영구변형률의 변화 또한 횡방향에서 두드러진 변화를 보였다. 이 결과는 균열발생이 속도감소

의 원인이 되며 균열이 주로 압축하중의 축방향과 평행한 방향으로 발생하고 있음을 보인다. (3) 괴로시험에서의 응력 수준 및 괴로반복 횟수는 괴로를 전후한 속도 감쇄 특성을 결정하는 중요 요인으로 속도감쇄와 괴로횟수 사이에 비례관계가 얻어졌다.

사 사

이 연구는 한국원자력연구소 부설 원자력환경관리센터의 지원으로 이루어진 “방사성 폐기물 지하처분장의 Fracture System 변화의 예측모델 개발을 위한 연구” 과제의 일부이다. 실험과 자료정리 과정에서 도와준 강원대학교 자원공학과 정윤영 석사와 지구물리학과 최예권학사, 지질학과 김용운 학사에게 감사한다.

참고문헌

- 강문구, 김재동, 임한욱 (1990) 하중속도가 암석의 강도 및 변형특성에 미치는 영향에 관한 연구. 강원대학교 산업기술연구소 논문집, 10집 p. 57-67.
- 김재동, 정윤영, 장보안 (1996) 국내 화강석재의 괴로변형거동에 관한 연구. 터널과지하공간, 한국암반공학회지, 6권, p. 144-156.
- 박형동 (1995) 암석의 공학적 이방성 측정을 위한 실험실내 P과 속도 측정기법에 대한 연구. 지질공학, 5권, p. 237-247.
- 장보안, 최인선, 김재동 (1994) 괴로하중에 의한 화강암류 암석의 미세균열 발달특성. 지질학회지, 30권, p. 613-631.
- Anderson, D.L., Minster, B. and Cole, D. (1974) The effect of oriented cracks on seismic velocity. Jour. Geophys. Res., v. 79, p. 4011-4015.
- Brace, W.F. (1977) Permeability from resistivity and pore shape. Jour. Geophys. Res., v. 82, p. 3343-3349.
- Brace, W.F., Paulding, B.W. and Scholz, C. (1966) Delatancy in the fracture of crystalline rocks. Jour. Geophys. Res. v. 71, p. 3939-3953.
- Crampin, S., McGonigle, R. and Bamford, D. (1980) Estimating crack parameters from observations of P-wave velocity anisotropy. Geophysics, v. 45, p. 345-360.
- Kim, K.Y., Hong, J.K and Lee, K. (1996) Determination of fracture parameters from surface seismic data. Jour. Geol. Soc. Kor. v. 32, p. 459-466.
- Kim, Y. (1983) An experimental investigation of geological factors affecting seismic wave velocity. Jour. Geol. Soc. Korea, v. 19, p. 136-144.
- Kranz, R.L. (1979) Crack growth and development during creep of Barre granite, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr. v. 16, p. 23-35.
- Kranz, R.L. (1983) Microcracks in rocks, Tectonophysics, v. 100, p. 449-480.
- Nur, A., and Simmons, G. (1969) The effect of saturation on velocity in low porosity rocks. Earth and Planetary Science Letters v. 7, p. 183-193.
- O'Connell, R.J. and Budiansky, B. (1974) Seismic velocities in dry and saturated cracked solids. Jour. Geophys. Res., v. 79, p. 5412-5426.
- Plumb, R., Engelder, E. and Yale, D. (1984) Near surface in situ stress 3. Correlation with microcrack fabric within the New Hampshire granites. Jour. Geophys. Res., v. 89, p. 9350-9364.
- Simmons, G. and Richter, D. (1976) Microcracks in rocks, in Physics and Chemistry of Minerals and Rocks: R.G.J. Sterns, Ed., New York, John Wiley and Sons, p. 105-137.
- Streckeisen, A.L. (1976) Classification and nomenclature of igneous rocks. Neues Jahrbuch für Mineralogie Abhandlungen, v. 107, p. 144-240.
- Walsh, J.B. (1965) The effect of cracks on the compressibility of rocks. Jour. Geophys. Res., v. 70, p. 381-399.

1997년 5월 6일 원고접수