

## 압축피로에 의한 포천화강암의 미세균열 발달과 P파속도 이방성

김영화\* · 장보안\* · 문병관\*\*

### P Wave Velocity Anisotropy and Microcracks of the Pochon Granite Due to Cyclic Loadings

Yeonghwa Kim\*, Bo-An Jang\* and Byeung Kwan Moon\*\*

**ABSTRACT** : P wave velocities of core samples from the Pocheon granite were measured before and after applications of cyclic loading. Then, distribution of the pre-existing microcracks and microcracks developed due to the cyclic loading was investigated by analyzing P wave velocity anisotropies and microscopic observations from thin sections. Anisotropy constants were calculated with three different ways : (1)  $C_A$  between the maximum and the minimum velocities, (2)  $C_{A1}$  between velocities measured along the axial direction and the average of six velocities measured in the planes perpendicular to the loading axis (rift plane) and (3)  $C_{A2}$  between the maximum and the minimum velocities measured in the plane perpendicular to the loading axis. Among anisotropy constants,  $C_{A1}$  was the most effective anisotropy constant to identify the rift plane whose orientation is parallel to the pre-existing microcracks as well as the distribution of stress induced microcracks.  $C_{A1}$  decreased after cyclic loading and the relationship between  $C_{A1}$  and number of cycles shows comparatively coherent negative trends, indicating that stress induced microcracks are aligned perpendicular to the orientation of pre-existing microcracks and that the amounts are proportional to the number of loading cycles. The difference of anisotropy constants before and after cyclic loading was effective in delineating the level of cracks and we called it Induced Crack Index. Velocity measurements and microscopic observations show that anisotropy was caused mainly due to microcracks aligned to a particular direction.

### 서 론

미세균열은 암석 내에 존재하는 작은 틈 (opening)으로서 대체로 길이가 100  $\mu\text{m}$  이하이고 이 보다 더 짧은 다른 두변을 가지는 형태 (Simmons, Richter, 1976), 또는 현미경 상에서 발견될 수 있는 크기로서 Aspect ratio가 0.05이하인 암석 속의 공극 (Kranz, 1979)으로 정의되며 암석에 발달한 미세균열의 양 및 분포특성은 암석의 물리적, 역학적 특성에 중요한 영향을 미친다 (Walsh, 1965; Brace *et al.*, 1965; O'Connell, Budiansky, 1974). 미세균열은 열린미세균열 (open microcrack)과 기존의 열린

틈이 2차적으로 충전되어 있는 아문미세균열 (healed microcrack)로 나누어지며, 특히 열린미세균열은 암석의 지진파속도에 큰 영향을 미치고 있다. 화강암과 같은 결정질 암석에 있어서는 낮은 균열공극률 (crack porosity)에도 불구하고 속도 및 이방성에 큰 영향을 미치는 것으로 (Nur, Simmons, 1969) 알려지고 있다.

이방성은 암석 내에서 입자의 배열이나 미세균열의 방향성 등에 의해 관찰되는 물리적인 특성으로서 일반적으로 화강암은 균열, 퇴적암은 층리, 그리고 변성암은 엽리나 편리 구조에 의해 크게 영향을 받고 있는 것으로 알려지고 있다. 이방성의 관찰은 편광 현미경이나 전자 현미경을 이용한 연구 방법이 가장 잘 알려져 있으나 관찰 범위가 일부에 한정되고 있음이 단점으로 지적된다. 초음파 속도 측정법은 간편한 비파괴 측정방법으로서 미세균열의 생성 전후 측정으로 동일시료에서의 비교 분석이 가능하다는 점과 암석 단위의 평균값 획득이 가능하고 정량적

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

\*\* LG ENC 지반공학부 (LG ENC, Pangbaedong, Seoul 137-060)

인 결과 제곱이 가능하다는 측면에서 암석의 미세균열 및 이방성 연구에 이점을 가지고 있다. 따라서 초음파속도 이방성에 대하여 많은 연구결과가 있으며 특히 화강암은 석영과 장석의 높은 균열공극률과 속도차 (Nur, Simmons, 1969)에 의하여 높은 이방성이 기대될 수 있으므로, 화강암을 대상으로 한 연구가 다수 보고되고 있다 (Plumb *et al.*, 1984; Crampin *et al.*, 1980; Nur, 1971).

김영화 등 (1997)은 포천화강암 석재시료에 대해 압축 피로하중을 가한 후 피로하중에 따른 초음파 속도의 변화, 하중횟수 및 하중수준에 따른 초음파 속도의 변화 양상을 보고하였다. 포천 화강암 석재시료에서의 건조 P파속도의 분포는 축방향 (피로하중을 가한 방향과 평행한 방향)과 횡방향 (피로하중을 가한 방향에 수직인 방향)간에 현저한 속도차이를 보였으며 이러한 경향은 초기시료와 하중시료에서 각기 특징을 달리하며 특히 하중시료의 경우에 하중의 수준이나 하중횟수의 증가에 따른 주목할만한 변화 특징을 보였다. 이 논문에서는 김영화 등 (1997)에서와 동일한 시료를 이용하여 압축피로하중을 받은 포천화강암 석재시료의 초음파속도 분포가 지시하는 이방성의 변화특성을 추적하고, 이 결과를 현미경으로 관찰된 미세균열의 분포특성과 연결시킴으로써 화강암 시료에서의 P파속도 이방성의 본질을 규명하고자 하였다. 건조P파속도 자료가 이용되었으며 3차원적으로 측정된 최대 ( $V_{max}$ )와 최소 ( $V_{min}$ ) 속도 사이에서 구한 일반적인 이방성계수 외에 축방향과 횡방향 사이에서 나타나는 이방성계수 및 횡방향 내에서의 이방성계수가 사용되었다.

## 시료 특성 요약

### 물성 및 암석학적 특성

연구시료는 육안 관찰에서 중립 내지 조립질로 유색광물의 양이 적은 우백질화강암으로 분류되었으며 모드분석 후의 QAP 삼각 diagram에서는 화강암 영역에 속하는 것으로 나타났다. 현미경 관찰 결과 (Fig. 1) 주구성 광물로는 석영, 사장석, 미사장석, 정장석, 흑운모가 나타나며 부구성 광물로 전기석, 백운모, 녹니석, 인회석, 저어콘 등이 소량 관찰된다. 석영은 봉압상 구조를 보이고 파동 소광을 나타내며 사장석은 알바이트 쌍정, 칼스바드-알바이트 쌍정을 이루고 누대구조 (zonal structure)가 관찰되기도 한다. K-장석은 미사장석, 피사이트, 마이크로피사이트와 일부 정장석이 있으며 반정을 이루는 피어사이트 내에는 사장석, 석영, 흑운모 등이 흔히 포획되어 있다. 쌍정과 벽개에서 특정한 방향성이 나타나지 않으며 광물입

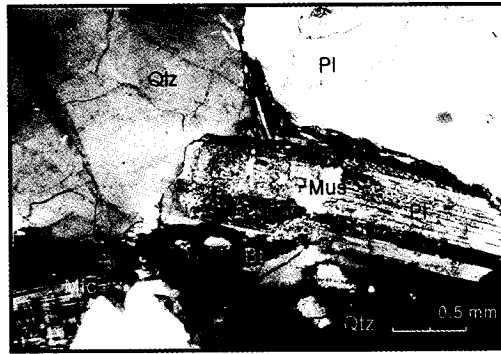


Fig. 1. Photomicrograph of the Pochon granite.

자 형태에 있어서도 이방성의 흔적은 보이지 않는다.

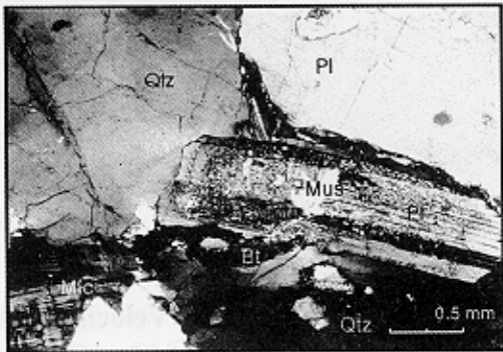
시료의 건조단위중량의 분포는  $2.59\sim 2.63\text{ g/cm}^3$  (평균 2.605)의 범위이며 공극률은  $0.86\sim 1.09\%$  (평균 1.03)의 값을 보이고 있다. 초음파속도측정 시료와 동일한 석재 블록에서 구해진 암석의 공학적 상수는 일축압축강도와 인장강도가 각기 188과 6.44 MPa이며, 영율은 48 GPa, 포아송비는 0.24, 쇼어 강도는 65로 나타나고 있다. 전반적으로 실험에 사용된 시료가 풍화의 영향이 적고 물성적으로 비교적 균질한 상태에 있음을 보인다. 아울러 피로응력수준의 결정을 위하여 행해진 응력속도 100 MPa/sec 상태에서의 동하중강도시험에서는 동하중강도 206 MPa, 동탄성계수 52.59 GPa 및 동포아송비 0.153가 얻어졌다.

### P파 속도 분포

포천 화강암의 P파 속도의 분포 및 특성은 김영화 등 (1997)에 의하여 보고된 바와 같이 초기시료에서 3006 m/sec~4014 m/sec의 범위이며 피로하중을 받은 시료에서는 2404 m/sec~3620 m/sec의 범위를 보인다. 이를 축방향과 횡방향으로 구분하여 살펴보면 Table 1에서와 같이 요약된다. 무엇보다도 초기시료와 하중시료 공통적으

Table 1. The range of P wave velocities measured along the axial and the lateral directions. Velocities were measured before application of the cyclic loading and were measured again after application of the cyclic loading.

P wave velocity (m/sec)		Axial ( $V_{ax}$ )	Lateral ( $V_L$ )
Before loading	Range	3244~3580	3006~4014
	Mean	3402	3717
After loading	Range	3105~3338	2404~3620
	Mean	3224	3130



**Fig. 1.** Photomicrograph of the Pochon granite.

로 축방향과 횡방향 간에 현저한 속도 차이가 있음이 주목된다. 초기시료에서는 축방향 속도에 비하여 횡방향 속도가 상대적으로 높은 값을 보이는데 비하여, 하중시료에서는 하중횟수가 증가함에 따라 횡방향의 속도가 축방향 속도에 근접하거나 축방향 속도보다도 낮은 값을 보이기 시작한다. 이와 같은 속도 역전은 피로하중 시료에서의 횡방향 속도가 축방향에 비하여 현저히 감소했음에 기인하고 있으며 하중 수준과 하중횟수에 영향을 받고 있는 것으로 나타난다.

30° 간격으로 6방향으로 구성되는 횡방향 내에서의 속도변화의 양상은 초기시료와 하중시료 모두 최대속도방향과 최소속도방향의 약 90° 떨어져 나타나는 주기 180° 인 싸인 곡선의 형태를 보인다. 즉 하중에 의한 속도감쇄는 주로 초기시료에서 저속도로 나타난 방향을 중심으로 일어났음을 알 수 있으며, 이는 하중에 의한 균열의 생성이 축방향에 평행한 기존의 미세균열을 중심으로 발생하였음을 지시하고 있다. 따라서 횡방향에서의 P파속도는 피로하중의 수준과 하중횟수에 크게 영향을 받고 있다. 즉, 피로하중의 횟수 증가에 비례하여 감쇄의 폭이 커지며, 70% 하중수준에 비하여 80%의 경우가 더 민감하게 속도변화를 야기시키고 있음을 보인다. 이에 비하여 축방향에서의 속도변화는 약하며 하중횟수나 하중수준과의 상관성이 거의 존재하지 않는다.

### 연구방법

이 연구는 (1) 압축피로하중을 전후하여 시료에서 측정된 건조P파속도로부터 초음파속도 이방성을 구하고 (2) 현미경 관찰을 통하여 미세균열의 분포특성을 확인하고 (3) 이로부터 초음파속도와 미세균열의 관계 및 미세균열의 발생의 양적 특성, 특히 하중수준과 횟수가 미치는 영향을 정량적으로 추적하는 과정으로 구성된다.

이방성계수 (anisotropy coefficient)는 건조P파 속도로부터 구해졌으며 3가지 종류의 이방성계수가 구해졌다. 일반적으로 이방성계수는 3차원적으로 측정된 각 속도성분으로부터 나타난 최대속도 ( $V_{max}$ )와 최소속도 ( $V_{min}$ )로부터  $1-(V_{min}/V_{max})$ 의 형태로 표현된다 (현병구, 1995). 그러나 초음파속도측정 실험과정에서 석재의 주결 (rift plane)에 수직인 방향으로 하중의 축방향에 결정되어 반복 하중이 가해졌으므로 (Fig. 2), 하중을 전후한 이방성을 비교하고 하중에 의한 미세균열의 발생 특성을 효과적으로 표현하기 위해서는 이방성의 방향과 범위를 고려한 이방성계수의 개념이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 최대-최소속도로부터 얻어지는 일반적인 이방성계수 (이하

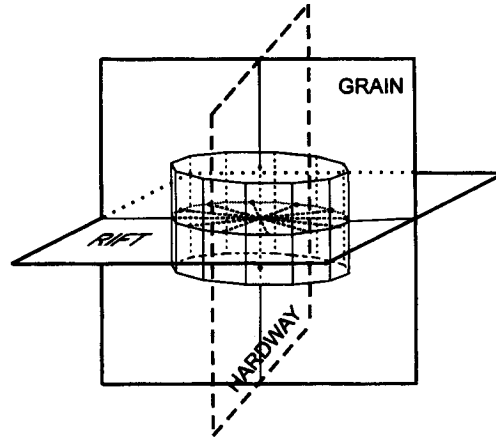


Fig. 2. Sketch of sample preparation showing rift, grain and hardway planes. The line intersecting between grain and hardway planes coincides with loading axis. Dashed lines represent directions of velocity measurement in the plane perpendicular to the loading axis.

$C_A$ )의 개념을 수정하여 축-횡방향 이방성계수 ( $C_{AI}$ ) 및 횡방향 내 이방성계수 ( $C_{AII}$ )로 명명된 2가지 이방성계수의 개념을 도입하였다. 이방성계수  $C_{AI}$ 은 횡방향 6성분의 평균속도 ( $V_{Lmean}$ )와 축방향속도 ( $V_{ax}$ ) 사이에서 구해진 이방성으로, 주결과 축방향 사이의 이방성 표현을 목적으로 하고 있다. 이방성계수  $C_{AII}$ 은 주결에 평행한 평면 내에서 구해진 이방성으로서, 횡방향을 따라 측정된 6개의 속도 성분 중에서 최대속도 ( $V_{Lmax}$ ) 및 최소속도 ( $V_{Lmin}$ )를 구하고 이로부터 유도되었다. 각 이방성계수는 백분율로 표시된 다음의 식으로 표현된다.

$$C_A = [1 - (V_{min}/V_{max})] \times 100 (\%)$$

$$C_{AI} = [1 - (V_{ax}/V_{Lmean})] \times 100 (\%)$$

$$C_{AII} = [1 - (V_{Lmin}/V_{Lmax})] \times 100 (\%)$$

미세균열의 분포특성 확인을 위한 현미경관찰을 위하여 10개 시료로부터 박편을 제작하였다. 박편은 피로하중을 가한 후에 하중방향에 수직인 면을 따라 만들어졌다. 미세균열의 관찰은 열린미세균열 (open microcrack)과 아문미세균열 (healed microcrack)을 함께 관찰하였으며 특히 열린미세균열의 분포특성 파악에 주력하였다. 열린미세균열과 아문미세균열의 구별은 현미경의 직교니콜 (closed nicol)과 개방니콜 (open nicol) 상태에서의 광학적 특성 차 (박상욱, 1994)를 이용하여 행해졌다. 미세균열의 측정 방법은 암석현미경에 mechanical stage를 설치하여 박편에서 0°방향을 북 방향으로 임의로 고정하고 배율 40배 상태에서 0.3 mm 단위로 이동하며 격자망 식으로 사진을 찍어 정량적인 자료 수집을 실시 하였다. 미세

균열의 주방향 통계처리는 아문미세균열의 경우 빈도백분율 (percent in number)로 표시하였으며 열린미세균열의 경우에는 길이 백분율 (percent in length)로 표시하였다. 각 방향에서 측정된 10개 시료는 180°방향에 대한 백분율로 환산하여 평면적인 360°개념에서 방향성 표현이 용이한 rose diagram에 도시하여 아문미세균열과 열린미세균열의 방향성을 도시하였다.

**P파속도 이방성**

초기시료와 하중시료에서 구해진 이방성계수의 분포는 Table 2, 3, 4에 제시되었다. Table 2에 제시된 바와 같이 이방성계수  $C_A$ 는 초기시료에서 6.4~18.2% (평균 12.6%)이며 하중시료에서는 6.0~18.9% (평균 11.9%)로서 전반적인 값의 분포만으로는 초기시료와 하중시료 간의 차이를 발견할 수 없다. 그러나 초기시료에서는 최소속도가 축방향에 일치하고 최대속도가 횡방향 내에 분포하고 있음에 비하여 하중시료의 경우에는 이러한 경향이 사라지

면서 하중횟수의 증가에 따라서 최대값 및 최소값이 거의 모두 횡방향 내로 집중되는 특징을 보인다. 이와 같은 이방성의 변화 경향은 축-횡방향 이방성계수 ( $C_{AI}$ )와 횡방향 내 이방성계수 ( $C_{AII}$ )의 도입으로 효과적으로 설명되어진다.

축-횡방향 간의 이방성계수  $C_{AI}$ 은 초기시료에서 6~15% 범위로 평균 9.5%의 분포를 보이고 있음에 비하여 하중시료에서는 9.4%에서 -15.6%의 범위로써 현저한 차이를 보이고 있다 (Table 3). 이는 9.5% 내외의  $C_{AI}$  값을 보인 초기시료가 하중을 받으면서 하중횟수의 증가에 따라 그 값이 점차 감소하여 음의 값으로 바뀌는 경향을 보이는 것으로 설명된다. 물론 음의 값은 축방향속도 ( $V_{ax}$ )가 횡방향 평균속도 ( $V_{Lmean}$ )보다 커지는 것을 의미하고 있다. 범위를 횡방향 내로 한정하여 구해진 이방성계수  $C_{AII}$ 는 초기시료에서 2.0~13.5% (평균 8.6%) 범위로 나타나며 하중시료에서 6.0~18.9% (평균 11.4%) 범위로 나타난다 (Table. 4). 초기시료에 비하여 하중시료의  $C_{AII}$  이방성계수 증가 경향이 뚜렷하며, 하중 횟수의

**Table 2.** Anisotropy constants,  $C_A$ , calculated from the maximum and the minimum P wave velocities.  $V_{ax}$  represents axial velocity and numbers in subscript represent the lateral directions.

Sample	Before cyclic loading			After cyclic loading		
	$V_{max}$ (m/sec)	$V_{min}$ (m/sec)	$C_A$ (%)	$V_{max}$ (m/sec)	$V_{min}$ (m/sec)	$C_A$ (%)
70-2	3775( $V_{90}$ )	3320( $V_{ax}$ )	12.0	3580( $V_{90}$ )	3239( $V_{ax}$ )	9.5
70-4	3839( $V_{90}$ )	3380( $V_{ax}$ )	12.0	3515( $V_{90}$ )	3126( $V_0$ )	11.1
70-8	3859( $V_{120}$ )	3383( $V_{ax}$ )	12.3	3620( $V_{120}$ )	3171( $V_{ax}$ )	12.4
70-16	3921( $V_{150}$ )	3435( $V_{ax}$ )	12.4	3581( $V_{150}$ )	3211( $V_{ax}$ )	10.3
70-32	3948( $V_0$ )	3379( $V_{ax}$ )	14.4	3422( $V_0$ )	3202( $V_{90}$ )	6.4
70-200	3951( $V_{30}$ )	3555( $V_{ax}$ )	10.0	3502( $V_{30}$ )	3197( $V_{120}$ )	8.7
70-400	3935( $V_{60}$ )	3482( $V_{ax}$ )	11.5	3195( $V_{60}$ )	3047( $V_{150}$ )	4.6
70-600	3935( $V_{60}$ )	3473( $V_{ax}$ )	11.7	3178( $V_{ax}$ )	2560( $V_{120}$ )	18.4
70-800	3964( $V_{90}$ )	3443( $V_{ax}$ )	13.1	3486( $V_{60}$ )	2767( $V_{150}$ )	20.6
70-1000	3987( $V_{30}$ )	3495( $V_{ax}$ )	12.3	3296( $V_{30}$ )	2778( $V_{120}$ )	15.7
70-2520	3957( $V_{150}$ )	3309( $V_{ax}$ )	16.4	3380( $V_{150}$ )	3091( $V_{60}$ )	8.6
70-2930	3923( $V_0$ )	3446( $V_{ax}$ )	12.2	3328( $V_0$ )	3040( $V_{90}$ )	8.7
70-3116	3931( $V_0$ )	3314( $V_{ax}$ )	15.7	2904( $V_0$ )	2435( $V_{90}$ )	16.2
80-2	4014( $V_0$ )	3284( $V_{ax}$ )	18.2	3499( $V_0$ )	3197( $V_{ax}$ )	8.6
80-4	3870( $V_0$ )	3406( $V_{ax}$ )	12.0	3558( $V_0$ )	3213( $V_{ax}$ )	9.7
80-8	3718( $V_{60}$ )	3273( $V_{ax}$ )	12.0	3340( $V_{60}$ )	3038( $V_{150}$ )	7.7
80-16	3841( $V_{120}$ )	3404( $V_{ax}$ )	11.4	3483( $V_{120}$ )	3095( $V_{30}$ )	11.1
80-20	3890( $V_{150}$ )	3484( $V_{ax}$ )	10.4	3461( $V_{150}$ )	3106( $V_{60}$ )	10.3
80-32	3961( $V_{150}$ )	3391( $V_{ax}$ )	14.4	3364( $V_{150}$ )	2728( $V_{60}$ )	18.9
80-40	3477( $V_{120}$ )	3006( $V_{ax}$ )	13.5	2910( $V_{120}$ )	2564( $V_{30}$ )	11.9
80-80	3941( $V_{60}$ )	3472( $V_{ax}$ )	11.9	3240( $V_{60}$ )	2635( $V_{150}$ )	18.7
80-100	4001( $V_{120}$ )	3580( $V_{ax}$ )	10.5	3260( $V_{150}$ )	2733( $V_{60}$ )	16.2
80-110	3855( $V_{60}$ )	3406( $V_{ax}$ )	11.6	3195( $V_{ax}$ )	2768( $V_{120}$ )	13.4
80-111	3831( $V_{90}$ )	3328( $V_{ax}$ )	13.1	3131( $V_{90}$ )	2644( $V_0$ )	15.6
80-121	3948( $V_{30}$ )	3458( $V_{ax}$ )	12.4	3322( $V_{ax}$ )	2699( $V_{120}$ )	18.8
80-134	3940( $V_{90}$ )	3318( $V_{ax}$ )	15.8	3239( $V_{90}$ )	2824( $V_0$ )	12.8

**Table 3.** Anisotropy constants,  $C_{AI}$ , calculated from the axial velocity ( $V_{ax}$ ) and the mean velocity in the plane perpendicular to loading axis ( $V_{Lmean}$ ).

Sample	Before cyclic loading			After cyclic loading		
	$V_{Lmean}$ (m/sec)	$V_{ax}$ (m/sec)	$C_{AI}$ (%)	$V_{Lmean}$ (m/sec)	$V_{ax}$ (m/sec)	$C_{AI}$ (%)
70-2	3653	3322	9.9	3458	3239	6.8
70-4	3823	3482	9.9	3351	3223	4.0
70-8	3731	3383	10.3	3469	3171	9.4
70-16	3730	3435	8.6	3450	3211	7.5
70-32	3722	3379	10.2	3319	3303	0.5
70-200	3827	3555	7.7	3341	3338	0.1
70-400	3823	3482	9.8	3093	3115	-0.7
70-600	3773	3473	8.6	2681	3178	-15.6
70-800	3808	3343	10.6	3054	3181	-4.0
70-1000	3755	3495	7.4	2984	3165	-5.7
70-2520	3801	3309	14.9	3178	3260	-2.5
70-2930	3754	3446	8.9	3201	3314	-3.4
70-3116	3703	3314	11.7	2632	3119	-15.6
80-2	3783	3284	15.2	3380	3197	5.7
80-4	3738	3406	9.7	3442	3213	7.1
80-8	3590	3273	9.7	3185	3074	3.6
80-16	3673	3404	8.1	3320	3258	1.9
80-20	3764	3484	8.0	3354	3330	0.7
80-32	3770	3391	11.2	3064	3223	-4.9
80-40	3267	3244	0.7	2769	3188	3.1
80-80	3726	3472	7.3	2894	3285	-11.9
80-100	3841	3580	7.3	2980	3287	-11.5
80-110	3722	3406	9.3	2856	3195	-10.6
80-111	3665	3328	10.1	2904	3105	-6.5
80-121	3755	3458	8.6	2882	3322	-13.2
80-134	3726	3318	12.3	3003	3239	-7.3

증대에 따라  $C_{AII}$ 이  $C_A$ 와 비슷한 수준까지 증대되기도 한다.

따라서 세 종류의 이방성계수는 초기시료에서  $C_A > C_{AI} > C_{AII}$ 의 관계를 보이던 것이 하중시료에서는  $C_A > C_{AII} > C_{AI}$ 의 순서로 변화한 것으로 나타난다. 정의에 의하여 언제나 가장 큰 값으로 나타나는  $C_A$ 를 제외한다면 위에서의 결과는 초기시료의  $C_{AI} > C_{AII}$ 의 관계가 하중시료에서의  $C_{AII} > C_{AI}$  관계로 변화한 것으로 요약된다. 이러한 변화는 하중이 가해짐에 따라  $C_{AII}$ 가 증가함에 반하여  $C_{AI}$ 이 현저히 감소함에 기인한 것으로 나타난다. Fig. 3은 피로하중시료에서 이방성계수  $C_{AI}$ 을 하중횟수 별로 나타낸 것으로서 하중횟수의 증가에 따라  $C_{AI}$  값이 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이방성계수와 하중횟수의 관계는 하중수준별로 구분할 때 상관성이 더욱 증가하며, 70% 하중시료에 비하여 80% 하중시료의 경우에서 하중횟수에 대한 이방성계수 감소율이 더욱 크게 나타나고 있다.

이러한 경향은 초기시료에서 x축을 하중시료와 동일하게 고정하여  $C_{AI}$ -시료번호의 관계로 도시하여 작성된 Fig. 4와 비교됨으로써 보다 분명해진다. 즉 Fig. 4에서의 이방성계수-하중횟수의 관계는 특별한 상관성이 없는 것으로 나타나며, 하중시료와의 비교를 위하여 굳이 fitting을 한다면 회귀곡선식이  $Y(C_{AI}) \cong 9.5$ 로 평균값에 해당되는 직선이 얻어진다. 이러한 결과는 Fig. 3에서의  $C_{AI}$ 의 감소가 반복하중에 의한 것임을 뒷받침하고 있다. Fig.

**Table 4.** Anisotropy constant,  $C_{AII}$ , calculated from the maximum and the minimum velocities measured in the plane perpendicular to the loading axis.

Sample	Before cyclic loading			After cyclic loading		
	$V_{max}$ (m/sec)	$V_{min}$ (m/sec)	$C_{AII}$ (%)	$V_{max}$ (m/sec)	$V_{min}$ (m/sec)	$C_{AII}$ (%)
70-2	3775( $V_{90}$ )	3442( $V_0$ )	8.8	3580( $V_{90}$ )	3304( $V_{150}$ )	7.7
70-4	3839( $V_{90}$ )	3538( $V_0$ )	7.8	3515( $V_{90}$ )	3126( $V_0$ )	11.1
70-8	3859( $V_{120}$ )	3591( $V_{30}$ )	6.9	3620( $V_{120}$ )	3366( $V_{30}$ )	7.0
70-16	3921( $V_{150}$ )	3591( $V_{60}$ )	8.4	3581( $V_{150}$ )	3268( $V_{60}$ )	8.7
70-32	3948( $V_0$ )	3496( $V_{90}$ )	11.4	3422( $V_0$ )	3202( $V_{90}$ )	6.4
70-200	3951( $V_{30}$ )	3735( $V_{120}$ )	5.5	3502( $V_{30}$ )	3197( $V_{120}$ )	8.7
70-400	3935( $V_{60}$ )	3677( $V_{150}$ )	6.6	3195( $V_{60}$ )	3047( $V_{150}$ )	4.6
70-600	3935( $V_{60}$ )	3641( $V_{150}$ )	7.5	2783( $V_{60}$ )	2592( $V_{150}$ )	6.9
70-800	3964( $V_{90}$ )	3600( $V_0$ )	9.2	3486( $V_{60}$ )	2767( $V_{150}$ )	20.6
70-1000	3987( $V_{30}$ )	3570( $V_{120}$ )	10.5	3296( $V_{30}$ )	2778( $V_{120}$ )	15.7
70-2520	3957( $V_{150}$ )	3630( $V_{60}$ )	8.3	3380( $V_{150}$ )	3091( $V_{60}$ )	8.6
70-2930	3923( $V_0$ )	3626( $V_{90}$ )	7.6	3328( $V_0$ )	3040( $V_{90}$ )	8.7
70-3116	3931( $V_0$ )	3462( $V_{90}$ )	11.9	2904( $V_0$ )	2435( $V_{90}$ )	16.2
80-2	3867( $V_{30}$ )	3604( $V_{120}$ )	6.8	3499( $V_0$ )	3288( $V_{90}$ )	6.0
80-4	3870( $V_0$ )	3605( $V_{90}$ )	6.8	3558( $V_0$ )	3346( $V_{90}$ )	6.0
80-8	3718( $V_{60}$ )	3515( $V_{150}$ )	5.5	3340( $V_{60}$ )	3038( $V_{150}$ )	9.0
80-16	3841( $V_{120}$ )	3514( $V_{30}$ )	8.5	3483( $V_{120}$ )	3095( $V_{30}$ )	11.1

Table 4. Continued.

Sample	Before cyclic loading			After cyclic loading		
	V <sub>max</sub> (m/sec)	V <sub>min</sub> (m/sec)	C <sub>AII</sub> (%)	V <sub>max</sub> (m/sec)	V <sub>max</sub> (m/sec)	C <sub>AII</sub> (%)
80-20	3890(V <sub>150</sub> )	3640(V <sub>60</sub> )	6.4	3461(V <sub>150</sub> )	3106(V <sub>60</sub> )	11.4
80-32	3961(V <sub>150</sub> )	3613(V <sub>60</sub> )	8.8	3364(V <sub>150</sub> )	2728(V <sub>60</sub> )	18.9
80-40	3477(V <sub>120</sub> )	3006(V <sub>30</sub> )	13.5	2910(V <sub>120</sub> )	2564(V <sub>30</sub> )	11.9
80-80	3941(V <sub>60</sub> )	3535(V <sub>150</sub> )	10.3	3240(V <sub>60</sub> )	2635(V <sub>150</sub> )	18.7
80-100	4001(V <sub>120</sub> )	3674(V <sub>30</sub> )	8.2	3260(V <sub>150</sub> )	2733(V <sub>60</sub> )	16.2
80-110	3855(V <sub>60</sub> )	3534(V <sub>150</sub> )	8.3	2996(V <sub>30</sub> )	2768(V <sub>120</sub> )	7.6
80-111	3831(V <sub>90</sub> )	3470(V <sub>0</sub> )	9.4	3131(V <sub>90</sub> )	2644(V <sub>0</sub> )	15.6
80-121	3948(V <sub>30</sub> )	3557(V <sub>120</sub> )	9.9	3041(V <sub>30</sub> )	2699(V <sub>120</sub> )	11.2
80-134	3940(V <sub>90</sub> )	3573(V <sub>0</sub> )	9.3	3239(V <sub>90</sub> )	2824(V <sub>0</sub> )	12.8

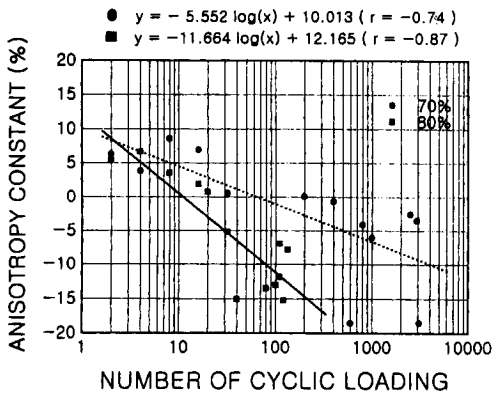


Fig. 3. The relationship between anisotropy constants C<sub>A</sub>I and numbers of loading cycles in samples after applications of cyclic loading. 70% and 80% represent the loading levels of dynamic strength, respectively. Anisotropy constants are generally decreasing with increase of the number of loading cycles.

5와 Fig. 6은 하중방향에 수직한 면 내에서의 이방성 분포를 알기 위하여 Fig. 3과 Fig. 4에서와 동일한 방법으로 C<sub>AII</sub>의 값을 도출한 결과로서 하중수준과 횡수의 증가에 따라 C<sub>AII</sub>가 역시 증가하는 경향을 보여주고 있다. 그러나 Fig. 4에서의 C<sub>A</sub>I의 경우에 비하면 상관의 정도가 크게 떨어지고 있다.

### 미세균열 관찰 결과

미세균열의 발달 방향은 Fig. 7에서 나타난 바와 같이 현미경 상에서 대체로 일정한 방향성을 잘 보이고 있다. 이문 미세균열은 주로 큰 입자의 석영 내에 입자내 균열의 형태로 나타나고 있는 반면에 열린미세균열은 입자 경계를 가로지르는 입자관통균열 (transgranular crack)의 형태 또는 입자의 경계를 따르는 균열 (grain boundary crack)의

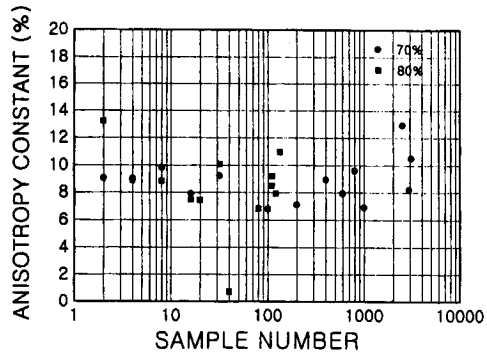


Fig. 4. Anisotropy constants C<sub>A</sub>I calculated from samples before applications of cyclic loading. Numbers in an abscissa indicate the numbers of loading cycles which will be applied to samples later.

형태를 띄고 있다. 동일시료 내에서 아문미세균열은 매우 일관성 있는 방향성을 보이고 있으며 열린미세균열은 아문미세균열에 비해서 방향성의 집중성이 낮게 나타나지만 큰

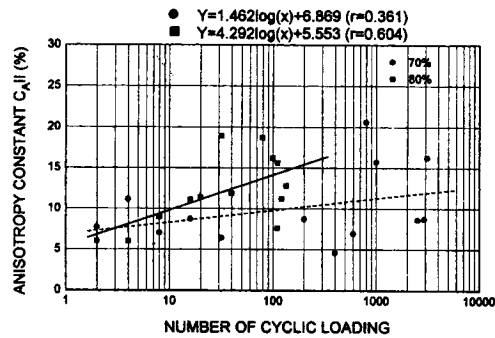
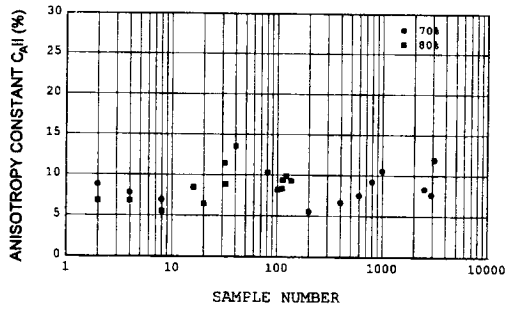


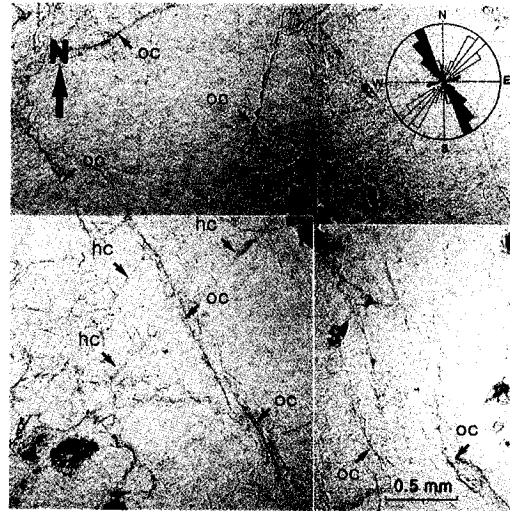
Fig. 5. The relationship between anisotropy constants C<sub>A</sub>II and the numbers of loading cycles in samples after applications of cyclic loading. Anisotropy constants are generally increasing with increase of the number of loading cycles. However, the correlation coefficients are much lower than those in Fig. 3.



**Fig. 6.** Anisotropy constants  $C_{II}$  calculated from samples before applications of cyclic loading. Numbers in an abscissa indicate the numbers of loading cycles which will be applied to the samples later.

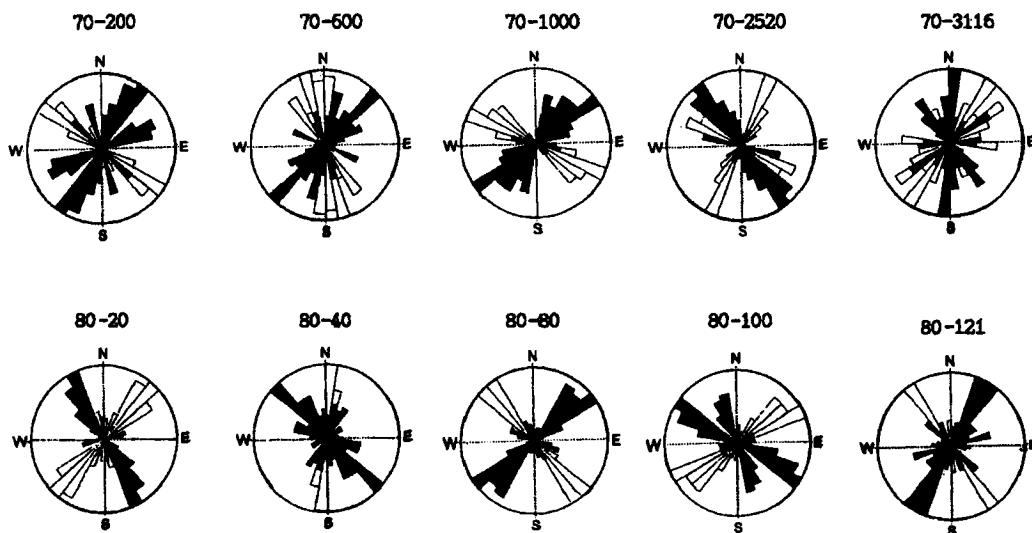
미세균열은 비교적 일관성 있는 방향성을 보이고 있다. Fig. 8에서는 각 시료에서의 측정된 미세균열 방향성을 통계 처리하여 rose diagram으로 제시되었다. 채워진 (solid) 부분은 열린미세균열의 방향을 나타내고 있으며 빈 (open) 부분은 아문미세균열의 방향을 나타내고 있다. 열린미세균열을 길이 백분율로 표시한 결과 대체로 일관성 있는 방향성을 보이며, 대부분의 시료에서 열린미세균열과 아문미세균열의 주방향에 일정한 각도를 이루고 있다.

시료의 횡방향은 코어링 후에 N으로 표시된 기준선이 임의로 설정된 것이다. 따라서 측정된 미세균열 방향은 상대적인 값이며 초음파속도 측정시료와 동일한 기준에서 비교한다는 의미만을 가진다. 그러나 화강암에서 나타나는 아문미세균열은 매우 일정한 방향성을 가지면서 고응력의



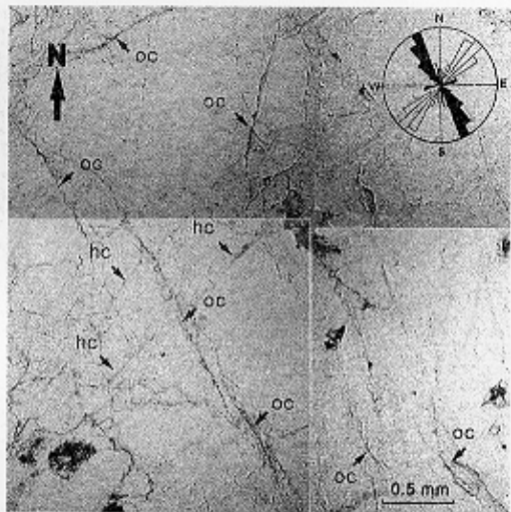
**Fig. 7.** Photomicrograph showing open microcracks (oc) and healed microcracks (hc). The rose diagram shows the preferred orientations of healed microcracks (open) and open microcracks (solid) in this sample.

지시자로서 널리 이용되고 있으므로 (Pécher *et al.*, 1985), 최소한 동일 암체에 있어서는 아문미세균열의 방향을 정향화의 기준으로 활용할 수 있다. 이러한 관점에서 각 시료에서 측정된 아문미세균열의 주 방향을 북쪽 (N)으로 고정시킨 후, 아문미세균열과 열린미세균열을 composite rose diagram으로 작성한 결과 (Fig. 9), 열린미세균열이 일정한 방향에 집중되는 현상을 얻을 수 있었다.

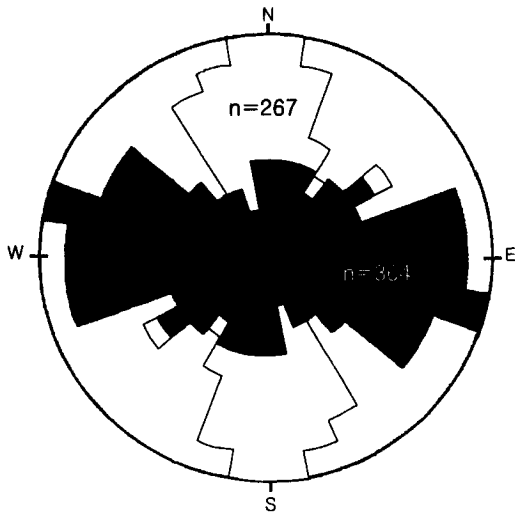


**Fig. 8.** Rose diagrams for preferred orientations of microcracks. Orientations of both the healed microcracks (open) and the open microcracks (solid) have well defined peaks in each sample.





**Fig. 7.** Photomicrograph showing open microcracks (oc) and healed microcracks (hc). The rose diagram shows the preferred orientations of healed microcracks (open) and open microcracks (solid) in this sample.



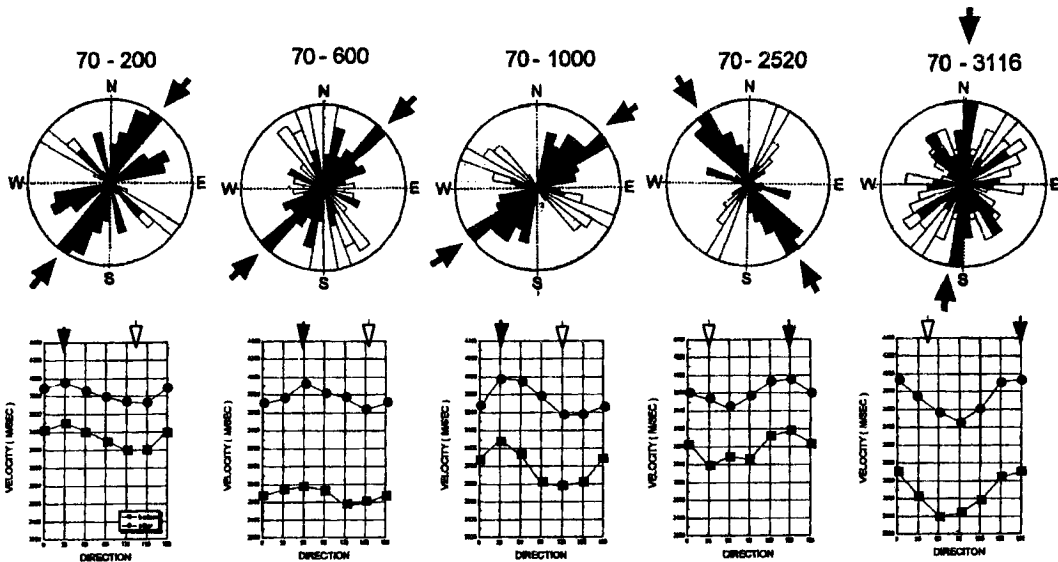
**Fig. 9.** The composite rose diagram for preferred orientations of the open microcracks (solid) and healed microcracks (open). When orientations of healed microcracks were aligned to north, open microcracks, most of which were produced due to cyclic loading, show almost the same direction.

**속도이방성과 미세균열**

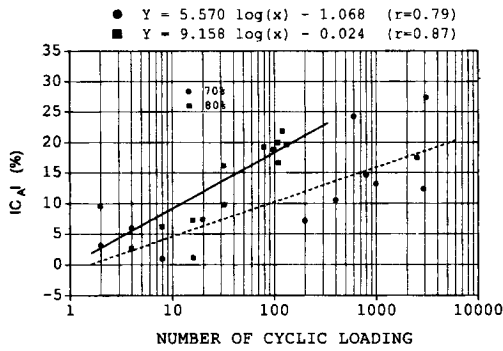
축-횡방향 이방성계수 ( $C_{AI}$ )와 횡방향 내 이방성계수 ( $C_{AII}$ )의 변화특성은 초기시료에서 이방성계수의 값이

$C_{AI} > C_{AII}$ 의 상태이던 것이 하중시료에서는 하중횟수의 증가에 따라  $C_{AII} > C_{AI}$ 의 상태로 변화하는 것으로 요약 된다. 초기시료에서 높은  $C_{AI}$ 값이 얻어진 것은 축방향의 석재 기술자가 판단한 주결에 수직인 방향으로 설정되었음에 기인한다. 피로하중에 의한  $C_{AI}$ 과  $C_{AII}$  값의 역전은 축방향으로 가해진 하중의 횟수가 증가할수록  $C_{AI}$ 이 현저하게 감소한 반면에  $C_{AII}$ 는 약하긴 하지만 증가하는 경향을 보였음에서 그 원인을 찾을 수 있다. 그 중에서도 특히 피로하중이  $C_{AI}$  이방성의 양상을 크게 변화시키고 있음은 하중시료 중에 축방향에 평행한 방향으로 발생한 미세균열이 많이 존재함을 강하게 시사하고 있다. 이러한 관점에서 10개의 하중시료로부터 미세균열의 방향을 관찰하고 이를 횡방향의 P파속도분포와 비교하였으며 Fig. 10에서의 5개의 시료에서와 같이 열린미세균열의 주방향과 최대속도방향이 거의 일치되는 결과를 얻었다. 시료 70-3116에서 방향성이 분산되는 현상이 나타나지만 대부분 하나의 주 방향을 가지고 있으며 속도변화 곡선의 형태 또한 최대값과 최소값이  $90^\circ$  떨어져 나타나는 평행균열의 특징 (Crampin *et al.*, 1980)을 보여 P파속도 이방성이 미세균열의 분포에 기인하고 있음을 보였다.

Fig. 11과 Fig. 12는 반복하중에 의한 영향을 보다 효과적으로 나타내기 위하여 각 시료별로 하중을 전후한 이방성계수의 차를 구하고 이를 하중횟수에 따라 도시한 것이

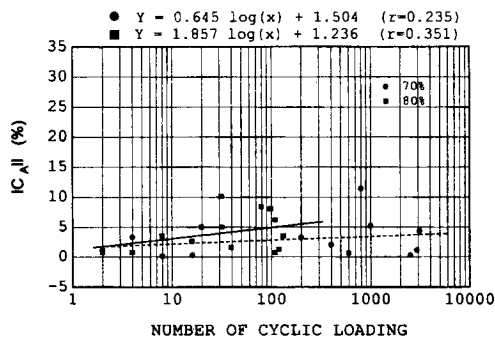


**Fig. 10.** Relation between the preferred orientations of microcracks measured by optical observations (upper) and P wave velocity distributions (lower). Solid and open arrows represent the preferred orientations of open and healed microcracks, respectively. The directions of the maximum velocity are almost identical with the those of open microcracks.



**Fig. 11.** The relationship between induced crack indices calculated from  $C_{AI}$  and the numbers of loading cycles. Induced crack indices are well correlated with the numbers of loading cycles.

다. 즉 초기시료의  $C_{AI}$  값 ( ${}_B C_{AI}$ )에서 하중시료의  $C_{AI}$  값 ( ${}_A C_{AI}$ )을 뺀 값과 초기시료의  $C_{AI}$  값 ( ${}_B C_{AI}$ )에서 하중시료의  $C_{AI}$  값 ( ${}_A C_{AI}$ )을 뺀 값을 각각  $IC_{AI}$ 와  $IC_{AI}$ 로 명명하고 이를 하중횟수에 대하여 도시한 것으로 어느 것이나 하중 수준과 횟수의 증가에 따라 증가하는 경향을 보이고 있다. 특히 Fig. 11의  $IC_{AI}$ 은 횟수에 따른 증가 경향이 매우 뚜렷하고, 하중시료의  $C_{AI}$ 과 횟수를 단순 대비시킨 Fig. 3의 경우에 비하여 상관성이 향상되고 있다. 이러한 현상은  $C_{AI}$ 이  $C_{AI}$ 에 비하여 하중 효과에 민감하다는 점과 초기시료의 영향이 제거되므로써  $C_{AI}$ 의 순 하중효과가 더욱 잘 반영된 것으로 설명될 수 있다. 아울러 Fig. 12에서의  $IC_{AI}$ -하중횟수 관계 또한 주결면 (rift plane) 내에서의 이방성이 약하기는 하지만 여전히 증가경향을 보이고 있다는 점에서 주목된다. 이는 하중과 평행한 방향으로의 균열 발생 및 기존의 균열과 연관된 새로운 균열의 발생을 시사하고 있다.



**Fig. 12.** The relationship between induced crack indices calculated from  $C_{AI}$  and the numbers of loading cycles. Induced crack indices are poorly correlated with the numbers of loading cycles.

### 토의 및 결론

결정질 암석에 있어서의 초음파속도 이방성은 (1) 광물의 또는 결정 단위에서의 이방성의 크기와 구성비 즉 광물성분의 조직 및 (2) 입자의 형태, 결정축과 연관된 입자의 배열, 미세균열 등 암석 조직 (rock fabric)이 가지는 특정 방향성에 영향을 받는다 (Douglas, Voight, 1969; Siegesmund *et al.*, 1991). 그러나 광물조직이 가지는 이방성은 주로 균열이 달히는 200 MPa 이상의 고압 상태에서 그 존재가 보고되고 (Crosson, Lin, 1971) 있으며 그 이하 저압상태에서 나타나는 지진파속도의 증감은 대부분 아스펙트비 (aspect ratio)가 작은 균열의 존재에 기인하는 것으로 보고되고 있다 (Birch, 1960; Nur, Simmons, 1969).

이번 연구를 통하여 하중시료에서의 속도이방성 변화 특성이 미세균열의 발생에 기인하고 있음은 비교적 분명하게 제시되었으며 석재기술자가 판단하는 결의 존재 또한 주로 미세균열에 의한 것으로 판단되었다. 하중횟수가 증가함에 따라 축방향에 대한 횡방향의 속도이방성의 값 ( $C_{AI}$ )이 일률적으로 감소하여 궁극적으로 이방성계수가 역방향으로 증대되는 현상은 축방향에 평행하게 발생되는 미세균열의 존재로 설명될 수 있었다. 현미경 관찰 결과 나타난 열린미세균열의 발달 방향이 초음파속도 측정에서의 최대 수평속도방향과 일치되는 현상 (Fig. 10) 또한 하중 시료에서의 속도이방성의 원인이 전적으로 미세균열의 존재와 연관되어 있음을 분명하게 보여준 것으로 판단된다.

단지 석재기술자가 판단하는 결의 존재에 있어서 미세균열 외의 다른 영향이 어느 정도 포함되어 있는지 결론을 내리기가 애매하지만 초음파속도 측정에 사용된 대상 시료의 육안 및 현미경관찰 결과에서 광물 조성 및 입자의 형태와 연관된 암석학적 이방성의 존재가 인지되지 않았으며 석영의 C축과 연관된 이방성 효과와 연결시킬 상황도 아님을 감안한다면 포천화강암 초기시료에서 나타난 이방성은 주로 미세균열의 존재에 기인한 것으로 판단된다. 이 결과는 최대압축응력 방향과 생성된 균열의 방향 그리고 P파속도의 이방성이 모두 일치하는 결과를 보고한 Plumb *et al.* (1984)의 연구결과와도 일치하고 있다. 금번의 속도측정 결과에서 초기시료에서 전체적으로 높은 값을 보인 횡방향 속도성분이 형성하는 평면이 주결면에 해당되고 횡방향 속도성분 중에서 최대속도방향 즉 현미경관찰에 의한 열린미세균열의 주 발달방향이 제2결 (grain)에 해당되는 것으로 판단되었다. 초음파속도 분포에서 제3결 (hardway)의 존재는 찾을 수가 없으나 대체

로 열린미세균열과 직교하는 아문미세균열의 방향이 제 3결의 방향이 될 가능성이 크다.

한편 하중시료와 초기시료의 이방성계수의 차이 ( $\epsilon_{CAI}$ - $\epsilon_{CAI}$  및  $\epsilon_{CAII}$ - $\epsilon_{CAII}$ )를 이용하여 반복하중의 영향을 보다 효과적으로 나타낼 수 있었음이 주목된다 (Fig. 11과 Fig. 12). P파속도의 변화가 반복하중에 의해 발생된 미세균열 양(量)의 함수라면 하중을 전후한 이방성계수의 차가 바로 발생된 미세균열의 양을 나타낸다고 할 수 있으며 이러한 관점에서 이방성계수의 차를 균열발생지수 (Induced Crack Index)라고 할 수 있다. 일축압축 상태에서는 특히 이방성계수  $C_{II}$ 을 이용한 균열발생지수 (ICA)가 균열발생의 정도를 효과적으로 표현하는 것으로 나타난다. 아울러 초기시료에서의 15%에 달하는 높은 이방성계수의 존재는 초음파속도 측정에 있어서 화강암과 같은 결정질 암석의 경우에도 방향을 고려한 측정이 필요함을 강하게 시사하고 있다.

이상의 연구결과는 다음과 같이 요약된다. (1) 포천화강암은 10% 내외의 높은 속도 이방성을 보이고 있으며 가장 뚜렷한 이방성은 석재의 주결면의 존재와 일치한다. (2) 피로하중을 받은 시료의 이방성은 하중횟수에 따라 현저히 변화하고 있으며, 그 변화양상은 하중의 축에 평행한 방향으로 미세균열이 발생하였음을 지시하고 있다. (3) 하중의 전과 후에 발생된 이방성계수의 차이는 균열발생의 정도를 더욱 효과적으로 나타내고 있으며 이를 균열발생지수 (Induced Crack Index)로 명명하였다. (4) P파속도 이방성은 현미경 관찰 결과 나타난 열린미세균열의 방향성과 좋은 일치를 보여 화강암에서의 초음파속도 변화 특성이 미세균열의 존재에 기인함을 확인하였다.

## 사 사

이 연구는 한국원자력연구소부설 원자력환경관리센터가 지원한 "방사성 폐기물 지하처분장의 Fracture System 변화의 예측모델 개발을 위한 연구"과제의 일부로서 지원에 고마움을 표하며 자료 정리를 도와 준 강원대학교 장승익 학사와 박정빈 군에게도 감사한다.

## 참고문헌

- 김영화, 장보안, 김재동, 이찬구, 문병관 (1997) 압축피로에 의한 포천화강암의 P파속도 변화특성, 자원환경지질, 30권, p. 231-240.
- 박상욱 (1994) 경상분지 남동부의 화강암체내에 발달한 미세균열에 대한 연구. 강원대학교 지질학과 대학원 석사학위논문, 37p.
- 현병구 (1995) 물리탐사 용어사전, 선일문화사, 364p.
- Birch, F. (1960) The velocity of compression waves in rocks to 10 kilobars, I. Jour. Geophys. Res., v. 65, p. 1083-1102.
- Crampin, S., Mcgonigle, R. and Bamford, D. (1980) Estimating crack parameters from observations of P-wave velocity anisotropy. Geophysics, v. 45, p. 345-360.
- Crosson, R.C. and Lin, J.W. (1971) Voigt and Reuss prediction of anisotropic elasticity of olivine. Jour. Geophys. Res., v. 76, 570-578.
- Douglass, P.M. and Voight, B. (1969) Anisotropy of granites: A reflection of microscopic fabric. Geotechnique, v. 19, p. 376-396.
- 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.
- Nur, A., and Simmons, G. (1969) The origin of small cracks in igneous rocks. Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci., v. 7, p. 307-314.
- Nur, A. (1971) Effect of stress on velocity anisotropy in rocks with cracks. Jour. Geophys. Res., v. 76, p. 2022-2034.
- 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.
- Pêcher, A., Lespinasse, M. and Leroy, J. (1985) Relations between fluid inclusion trails and regional stress field: A tool for fluid chronology-an example of an intragranitic uranium ore deposit (northwest Massif Central, France): Lithos, v. 18, p. 229-237.
- Siegesmund, S., Kern, H. and Vollbrecht, A. (1991) The effect of Oriented microcracks on seismic velocities in an ultra-mylonite. Tectonophysics, v. 186, p. 241-251.
- 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.
- Walsh, J.B. (1965) The effect of cracks on the compressibility of rocks. Jour. Geophys. Res., v. 70, p. 381-399.