

포천화강암내에 발달한 결의 역학적 이방성과 미세균열의 상관성

Mechanical Anisotropy Dependent on the Rock Fabric in the Pocheon Granite and its Relationship With Microcracks

장 보 안 (Bo-An Jang)

강원대학교 지구과학부

오 선 환 (Seon-Hwan Oh)

공주대학교 문화재 비파괴 진단연구실

요약 / ABSTRACT

포천 화강암에 대하여 결의 방향성에 따른 역학적 이방성 및 미세균열의 발달관계를 규명하였다. 일축압 축강도는 177MPa~212MPa의 범위를, 탄성계수는 48GPa~62GPa, 인장강도는 6.9MPa~8.5MPa, 탄성과 속도는 3,200m/sec~3,700m/sec의 범위를 보인다. 이방성 비는 역학적 특성에 따라 최소 14%에서 최대 24%이며 1결에 의한 영향이 가장 크게 나타난다. 미세균열의 방향성은 결의 방향성과 상당한 연관성을 가진다. 그러나 장석 내에는 결정의 방향에 따라 미세균열들이 발달해 있어서 결의 방향과는 상당한 차이를 보이나, 석영 내에는 연장성이 매우 좋고 결의 방향과 거의 평행한 방향으로 많은 미세균열들이 발달해 있어서 석영 내에 발달한 미세균열의 방향성이 결의 방향을 지배하는 것으로 사료된다. 차분 변형률 분석과 현미경 관찰에 의한 미세균열의 방향성은 대체로 결의 방향과 상당히 유사하나, 각각의 측정 방법에 따라 약간의 차이를 보인다. 이러한 결과는 차분변형률이 미세균열의 폭을 측정하는 반면에 현미경 관찰은 길이나 개수를 측정하기 때문인 것으로 사료된다.

주요어 : 결, 이방성, 화강암, 역학적 특성, 미세균열

We investigate mechanical anisotropy dependent of rock fabric and its relationship with microcracks in the Pocheon Granite. Uniaxial compressive strengths range from 177MPa to 212MPa and the elastic constants are 48GPa~62GPa. The tensile strengths are 6.9MPa~8.5MPa and ultrasonic wave velocities range between 3,200m/sec and 3,700m/sec, indicating that mechanical anisotropy is strongly dependent of rock fabric. The minimum anisotropy ratio is 14% and the maximum is 24%, depend on the mechanical properties. The preferred orientations of microcracks are closely related with the directions of rock fabric. The preferred orientations of microcracks in feldspar are governed by the direction of mineralogical axis and are different from the directions of rock fabric. However, microcracks in quartz

grains are very long and parallel to the directions of rock fabric, indicating that directions of rock fabric may be governed by the preferred orientations of microcracks in quartz grains. The preferred orientations of microcracks measured by differential strain analysis and microscopic observation are slightly different. That may be caused by different methodology. Lengths and numbers of microcrack are measured by microscopic observation. However, differential strain analysis measures the widths of microcracks.

Key Words : rock fabric, anisotropy, pocheon granite, mechanical property, microcracks

서 론

화강암은 어느 한 방향으로 쪼개지는 성질이 다른 방향보다 상대적으로 크게 나타나는 것이 일반적이다. 이미 옛날부터 석공들은 이러한 방향성을 '결'이라고 표현하였으며, 가장 잘 쪼개지는 방향성을 1결(rift plane), 다음으로 잘 쪼개지는 방향성을 2결(grain plane), 쪼개지는 정도가 가장 미약한 방향성을 3결(hardway plane)이라 한다. 대부분의 석산에서 결들은 서로 직각의 관계를 보이고 있으며, 결의 방향성은 화강암이 냉각될 때 생성되는 미세균열의 방향성 혹은 상부에 분포하던 상재하중(overburden)의 침식으로 인하여 화강암체내에 작용하던 응력이 해방될 때 생성되는 미세균열의 방향성과 상당한 연관이 있음이 보고되었다(Dale, 1923; Plumb, et al., 1984).

화강암 내에 결이 존재하고 있으므로 화강암은 역학적으로 이방성을 보이고 있다. Osborne(1935)은 결의 방향에 따라 압축강도가 이방성을 보임을 보고하였고, Douglas and Voight(1969)는 결의 방향에 따라 일축압축강도와 영률이 이방성을 보이며, 결들은 서로 직각을 이루고 있음을 발표하였다. Peng and Johnson(1972)은 결의 방향성과 일축압축강도와 영률 및 포아송 비의 이방성이 일치함을 보였고, Plumb et al.(1984)은 결의 방향이 지하 응력의 방향성을 지시함을 발표하였다. Thill et al.(1969, 1973)은 탄성과 속도를 이용하여 결의 이방성을 보고하였고, 이상은(1999)과 박덕원 외(2001)는 현미경 관찰에 의하여 결의 방향을 제시하였으며, 이병대 외(1999)는 차분변형을 분석을 통하여 미세균열의 발달정도를 규명하였다.

공학적으로 화강암은 거의 등방성의 암석으로 간주되는 것이 일반적이나, 위의 여러 연구에서 밝혀졌듯이 화강암도 역학적으로 이방성을 보이고 있

다. 최근 들어서 터널과 같은 공학적 구조물의 설계에 컴퓨터를 이용한 정밀한 설계가 실시되고 있으며, 암석의 이방성을 설계자료로 이용하고 있다. 그러므로 국내의 화강암에 대해서도 역학적 이방성의 정도를 파악하는 것이 필요하다고 하겠다. 본 연구에서는 경기도 포천군 일대에 분포하는 중생대 유라기 화강암을 대상으로 일축압축강도, 탄성계수, 포아송 비, 인장강도 및 초음파 P파 속도 측정을 통하여 결의 방향성에 따른 포천 화강암의 역학적 이방성을 규명하였고, 차분 변형을 분석 및 염색된 박편의 현미경 관찰을 통하여 결의 방향성과 미세균열의 발달관계를 규명하였다.

암 석 기 재

포천 화강암은 선캠브리아기의 변성암류 암체인 경기육괴를 관입한 유라기 대보 화강암으로 경기도 포천에서 석재로 생산되고 있으며 포천석으로 불리고 있다(조동룡과 권성택, 1994). 이 암석은 분류상 흑운모 화강암이고, 석영과 장석의 입자 크기는 3~9mm로 피상의 중립 내지 조립질의 암석이며, K-장석의 영향으로 담홍색을 띠고 있다. 주 구성광물은 석영, 사장석, 미사장석, 정장석, 흑운모등이고 부 구성광물로는 전기석, 녹니석, 자철석, 저어콘, 인회석 백운모 등이 관찰되나 그 양은 미미하다.

시 험 방 법

시료채취

경기도 포천군에 위치한 (주)삼지석재공업에서 운영하는 채석장에서 30cm×30cm×30cm 크기로, 각 면이 화강암의 결과 평행한 정육면체의 블록시료를 채취하였다. 채취된 블록시료에서 1결에 수직인 방향(이하 R시료), 2결에 수직인 방향(이하 G

시료) 및 3결에 수직한 방향(이하 H시료)으로 NX 크기의 코아를 채취하였다.

일축압축시험

일축압축시험은 R 시료 6개, G 시료 6개 및 H 시료 6개 등 합계 18개의 시료에 대하여 실시되었으며, ISRM(1984)에서 제안한 방법에 의거하여 시료를 성형하였다. 시험기는 하중속도 제어가 가능한 서보조정기(servo controller)가 부착된 (주)경도정밀에서 제작한 압축시험기(KDC 9409-20, 최대용량 100ton)를 사용하였으며, 하중속도는 0.63~0.64 MPa/sec로 실시하였다. 하중을 가할 때 시료에 발생하는 축 방향 및 횡 방향의 변형률은 길이 5mm의 일축 변형률 게이지(NMB사 제품)를 사용하여 측정하였으며, 일본 Kyowa사 제품의 데이터 로그(data logger)를 이용하여 디지털 신호로 개인용 컴퓨터에 자동 기록하였다.

각각의 코아 시료에는 축 방향과 평행하게 2개의 결이 분포하고 있다. 예를 들면 R시료에는 2결 및 3결이 코아 시료의 축 방향과 평행하게 분포하고 있으므로, 일축압축시험시 각각의 시료에는 2결과 일치하는 면 및 3결과 일치하는 면에 축 방향과

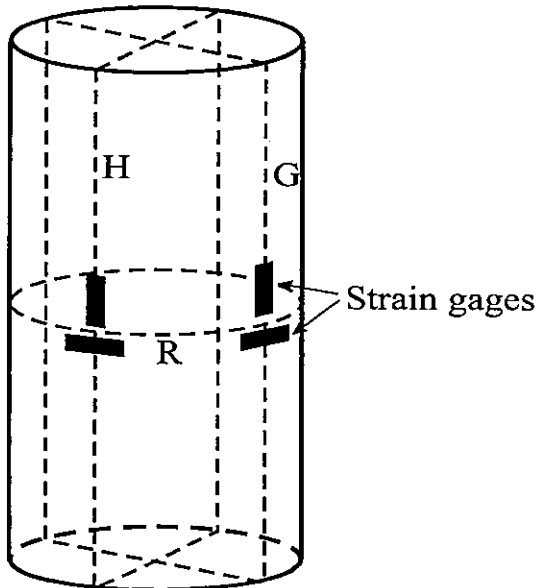


Fig. 1. Shape of specimen and locations of strain gauges

횡 방향으로 각각 2개씩의 변형률 게이지를 부착하여 결에 따른 변형률의 변화를 추적하였다(그림 1).

인장시험

인장강도는 간접인장시험의 일종인 압열인장시험(Brazilian Test)을 이용하여 구하였으며, 하중 축이 1결, 2결 및 3결과 평행한 시료 6개씩, 합계 18개의 시료에 대하여 시험을 실시하였다. 인장시험은 ISRM(1984)에서 제안한 방법에 따라 실시되었다.

초음파 속도 측정

1결, 2결 및 3결에 수직인 방향으로 3개씩, 합계 9개의 코아를 시추한 후, 길이/직경이 2가 되도록 절단하였다. 이 후 시료의 옆면을 연마하여 12각주 형태로 시료를 성형하여, 코아 축 방향의 P파 속도 및 코아 축에 수직한 면에서 6방향의 P파의 속도를 측정하였다(그림 2).

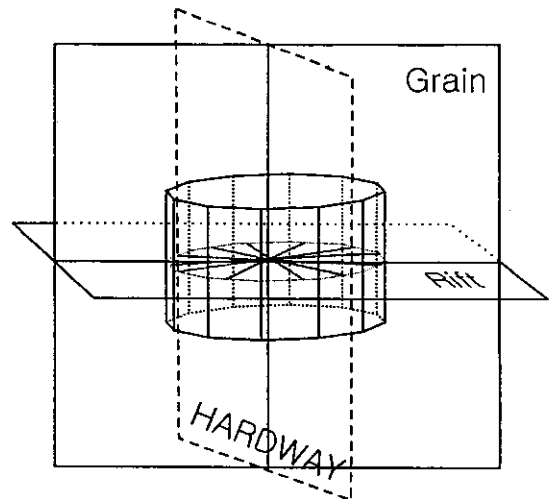


Fig. 2. Shape of sample prepared for the ultrasonic velocity measurement

차분 변형률 분석

차분 변형률 분석은 암석 시료와 실리카 큐브(reference silica cube)에 변형률 게이지를 부착한 후 정수압 하에서 변형률을 측정하여 암석내에 발달한 미세균열의 발달 정도, 방향 및 특성을 정밀

하게 측정할 수 있는 방법이다(Simmons et al., 1974; Siegfried and Simmons, 1978). 차분변형률 분석은 각 결에 수직한 방향으로 시추된 직경 2.54cm, 길이 2.54cm의 시료를 사용하였으며, 변형률 게이지는 길이가 10mm인 일본의 교화(Kyowa)사 제품을 사용하였다. 차분 변형률 분석의 시료 준비법, 시험방법 및 해석에 관한 자세한 사항은 장보안 외(1994)에 기재되어 있다.

미세균열 염색

미세균열의 염색은 미국 Terra Tek사에 의뢰하여 실시하였으며, 각각의 결에 평행한 방향으로 준비된 3개의 시료에 대하여 형광 염료를 미세균열의 틈 내로 주입하였다. 염색된 시료에서 박편을 제작한 후, 자외선 반사 현미경하에서 박편의 대표적인 부분을 사진으로 촬영하여 미세균열의 방향, 길이 등을 측정하였다. 미세균열의 관찰은 먼저 2mm 간격의 격자망을 설정한 후, 축선과 교차하는 길이 1mm 이상의 모든 미세균열의 길이와 방향성을 기재하였다.

결과 및 토의

일축압축시험

일축압축강도는 158.6MPa~236.3MPa의 범위를 보인다(표 1). R 시료는 192.6MPa~236.3MPa의 일축압축강도를 보이고, 평균은 212.7MPa로 가장 큰 일축압축강도를 보인다. G 시료는 169.5MPa~198.3MPa의 일축압축강도의 범위를 가지며 평균은 182.5MPa인 반면에, H 시료의 일축압축강도는 158.6MPa~196.3MPa 범위이고 평균은 177.2MPa로 가장 낮은 값을 보인다.

일축압축시험시 시료 내에는 하중 축과 평행한 방향으로 미세균열이 발달하게 되며, 이 미세균열들이 연결되어 시료의 파괴가 발생한다(Brace et al., 1966; Jaeger and Cook, 1979). H 시료에서는 1결 및 2결이 하중 축과 평행한 방향을 이루고 있기 때문에 압축하중이 가해질 때 미세균열이 잘 발달하여 낮은 일축압축강도를 가지는 반면에, R 시료에서는 2결과 3결이 하중 축과 평행하고 1결은 하중 축과 직각을 이루고 있으므로 가장 큰 일축압축

강도를 가지는 것으로 판단되며, 1결이 가장 쪼개지기 쉽다는 기존의 결과와 일치한다(Twidale, 1982).

Table 1. Uniaxial compressive strengths

	R Sample	G sample	H sample
Uniaxial Compressive Strength (MPa)	192.6	171.0	171.5
	226.0	186.8	193.7
	196.3	169.5	196.3
	236.3	192.9	174.6
	217.5	176.3	168.4
	207.5	198.3	158.6
Average	212.7	182.5	177.2

일축압축시험시 측정된 응력-변형률 곡선은 그림 3에서 보여진다. 각각의 시료에는 축 방향을 따라 2개의 변형률 게이지와 횡 방향을 따라 2의 변형률 게이지를 사용하여 4개의 응력-변형률 곡선이 측정되었다. R 시료에서 G는 2결에 평행 및 수직 방향으로 부착된 변형률이고, H는 3결에 평행 및 수직 방향으로 부착된 변형률이다(그림 1 참조). 축 방향 변형률은 초기에 위로 오목한 곡선의 형태를 보이다가 하중이 증가함에 따라 거의 직선에 가까운 형태를 가지고, 횡 방향의 변형률은 초기에는 거의 직선의 형태를 보이다가 하중이 증가함에 따라 점차 위로 볼록한 형태를 가져 일반적인 화강암의 응력-변형률 곡선과 거의 유사하다.

축 방향에서 측정된 응력-변형률 곡선의 기울기는 탄성계수(Young's modulus)이며 각 시료에서 측정된 탄성계수는 표 2에 나타나 있다. R 시료의 탄성계수는 51GPa~73GPa 범위이며, 2결과 평행한 방향의 평균 탄성계수는 약 59GPa이고 3결과 평행한 방향의 평균 탄성계수는 약 62GPa로 2결에서 측정된 탄성계수가 약간 낮은 값을 보인다. G 시료에서는 45GPa~71GPa의 범위를 보이며, 1결과 평행한 방향에서 측정된 탄성계수의 평균은 약 53GPa인 반면에 3결과 평행한 방향은 약 60GPa로 큰 차이를 보인다. H 시료의 탄성계수는 40GPa~59GPa로 측정되었고 1결 및 2결의 탄성계수 평균은 약 49GPa로 거의 동일하다.

위의 결과는 1결(rift plane), 2결(grain plane) 혹은

포천화강암내에 발달한 결의 역학적 이방성과 미세균열의 상관성

Table 2. Young's moduli and Poisson's ratios. G and H indicate that strains were measured at grain plane and hardway plane, respectively (cf, Fig. 1). * indicates that Poisson's ratio is higher than 0.5

	R Sample		G Sample		H Sample	
	G	H	R	H	R	G
Young's modulus (GPa)	65.6	59.5	51.2	57.5	58.8	54.7
	66.2	51.0	55.9	58.1	44.5	48.2
	45.5	60.5	54.8	71.1	47.9	47.1
	61.9	73.0	57.0	57.8	52.9	53.4
	52.9	67.0	45.7	55.4	51.1	46.1
	64.8	63.2	52.8	63.4	40.0	41.7
Average	59.5	62.4	53.1	60.5	49.2	48.5
Poisson's Ratio	0.14	*	0.24	0.29	*	0.30
	0.27	0.14	0.38	*	0.25	0.21
	0.25	0.27	0.28	0.37	*	0.19
	0.23	0.30	0.22	0.21	*	0.28
	0.26	0.24	0.15	0.28	0.27	0.33
	0.29	0.28	0.24	0.32	0.36	0.36

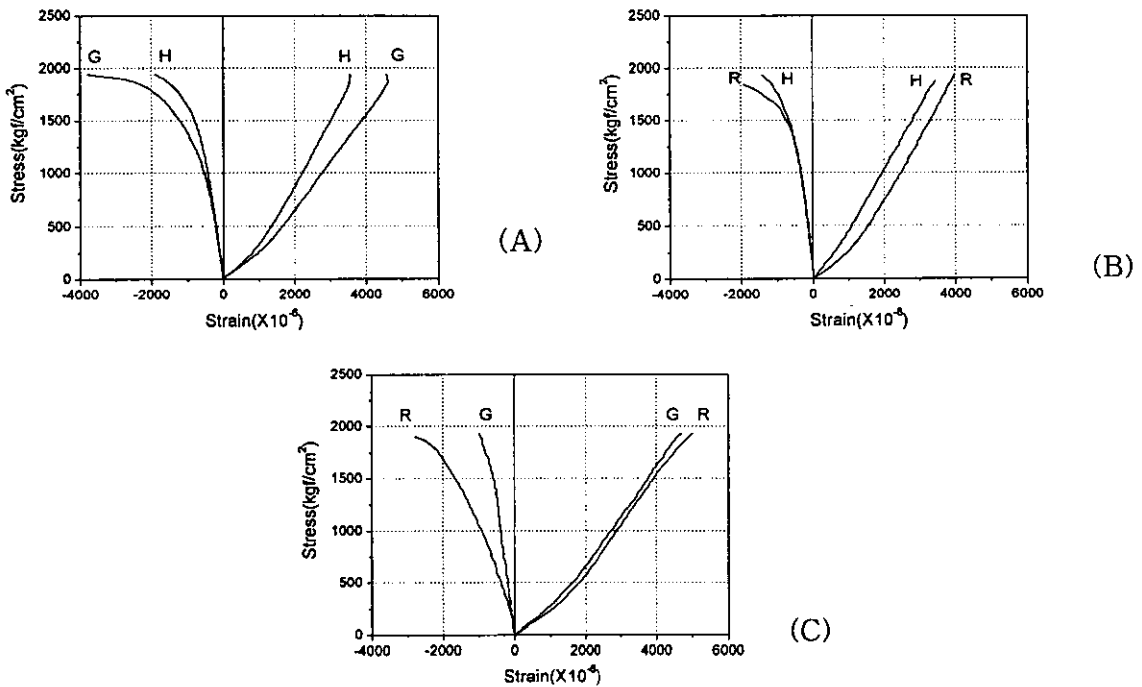


Fig. 3. Stress-strain curves measured from uniaxial compression test. (A) R sample (B) G sample (C) H sample.

은 1결과 2결에 동시에 평행한 방향으로 하중이 가해졌을 경우가 3결(hardway plane)에 평행한 방향으로 하중이 가해진 경우보다 큰 변형률이 발생한다는 것을 지시한다. 만약 하중이 가해졌을 때 하중 축과 평행한 방향으로만 미세균열이 생성되어 변형률이 발생한다면 하중 축과 평행한 방향으로 부착된 변형률 게이지에는 미세균열의 생성에 의한 변형률이 나타나지 않는다. 그러나 미세균열이 하중 축과 경사지게 생성된다면 암석 시료 내에서 발생하는 변형률은 하중 축과 평행한 방향으로 부착된 변형률 게이지에도 반영될 것이고, 이러한 미세균열의 생성 메카니즘은 Brace et al.(1966)에 의하여 제시된 균열 모델을 잘 반영한다(그림 4). Brace et al.(1966)은 하중이 시료에 가해질 때 하중 축에 경사진 미세균열이나 입자의 경계면을 따라 전단변형이 발생하고, 그 결과 하중 축과 평행한 미세균열이 생성되는 것으로 설명하였다. 그러므로 하중 축에 경사진 방향으로 발생된 전단변형은 하중 축과 평행한 방향으로 부착된 변형률 게이지에 압축 변형률로 나타나게 되어 H 시료에서 가장 낮은 탄성계수를 보이고, R 시료에서는 2결에 평행하게, G

시료에서는 1결에 평행하게 측정된 탄성계수가 3결에 평행하게 측정된 탄성계수보다 낮은 값을 가지는 것으로 판단된다.

포아송 비는 대부분 암석의 일반적인 범위에 해당하는 0.2~0.3 사이에 분포하며, 특별한 이방성을 보이지 않는다(표 2). 하중 축이 2결 및 3결과 평행한 시료인 R 시료에서는 대부분 0.2~0.3 사이의 포아송 비를 보이지만, 1결과 3결이 하중 축과 평행한 G 시료 및 1결과 2결이 하중 축과 평행한 H 시료에서는 많은 시료에서 0.3 이상의 포아송 비를 나타내어, 하중이 가해진 초기 단계부터 미세균열이 발생하는 소성 변형을 보인다. 특히 몇 개의 시료에서는 1결 혹은 2결에 수직방향으로 측정된 포아송 비는 0.5를 초과하여 포아송 비의 측정이 불가능하다. 이러한 사실은 1결과 2결이 가장 잘 쪼개지는 방향임을 지시한다.

인장강도

하중 축이 1결과 평행한 시료에서는 6.2MPa~7.1MPa의 범위를 보이고 평균값은 6.9MPa이다. 2결과 평행하게 하중이 가해진 시료에서는 7.1MPa~9.4MPa의 인장강도를 보이고 평균은 8.0MPa 인 반면에, 3결에 평행한 시료에서 측정된 인장강도는 7.5MPa~10.2MPa 범위이고 평균은 8.5MPa이다(표 3). 인장강도 시험에서는 인장용력이 결의 방향에 직각으로 작용하므로, 1결에서 가장 낮은 인장강도를 보이는 것은 1결이 가장 쉽게 쪼개진다는 기존의 사실과 일치한다.

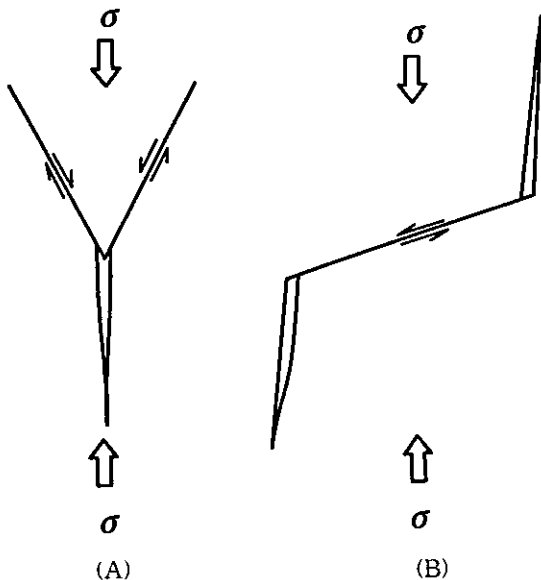


Fig. 4. schematic diagram of crack propagation under compression. Figure was taken from Brace et al.(1965)

Table 3. Tensile strengths measured by Brazilian test. R, G and H indicate that loading axis are parallel to the rift, grain and hardway planes, respectively.

	R	G	H
Tensile Strength (MPa)	6.2	7.1	7.5
	7.6	7.8	8.5
	6.9	7.3	7.7
	7.1	7.4	7.9
	6.5	9.5	10.3
	7.1	9.1	9.3
Average	6.9	8.0	8.5

포천화강암내에 발달한 결의 역학적 이방성과 미세균열의 상관성

초음파 P파 속도

축 방향의 P파 속도 또한 위에서의 결과와 유사 하여, R 시료에서는 3,242m/sec, G 시료에서는 3,350m/sec, H 시료에서는 3,678m/sec를 보인다(표 4). P파 속도는 1결에 수직인 방향으로 측정된 R 시료에서 가장 낮은 값을 보이고, 3결에 수직인 방향으로 측정된 H 시료에서 가장 높은 값을 보여서, 1결에 평행한 방향으로 미세균열이 가장 많이 발달해 있음을 지시한다. 그러나 R 시료와 G 시료의 속도 차이는 단지 108m/sec인 반면에, G시료와 H 시료와의 속도 차이는 328m/sec나 되어서 3결은 1결이나 2결과 다른 미세균열의 발달 형태를 가지고 있음을 지시한다.

30° 간격으로 6방향에서 측정된 횡 방향의 속도는 표 4에 제시되어 있다. R 시료에서는 3,448m/sec~3,774m/sec의 가장 높은 속도 분포를 보이고, G 시료에서는 3,208m/sec~3,640m/sec를, H 시료에

서는 3,235m/sec~3,417m/sec의 가장 낮은 속도 분포를 보인다. 각각의 시료에서 최대 속도 및 최소 속도는 0° 혹은 90°의 방향에서 나타나 결의 방향과 거의 일치하며, 미세균열의 발달방향이 결의 방향과 일치함을 지시한다. 각 방향에서 측정된 P파 속도는 주기가 180°인 사인 파(sine wave)의 형태를 보이고 있으며, 그림 5는 각 시료에서 측정된 P파 속도의 평균값을 최대 속도 및 최소 속도가 일치하도록 수평 이동한 속도분포를 보여준다. 각 방향의 속도를 사인 함수에 회귀 분석한 결과

$$V_R = 174 \times \sin(2\theta - \frac{90}{180} \pi) + 3597,$$

$$V_G = 222 \times \sin(2\theta - \frac{89}{180} \pi) + 3437$$

$$V_H = 99 \times \sin(2\theta - \frac{85}{180} \pi) + 3331$$

로 나타난다. 1결에 수직인 방향으로 측정된 P파

Table 4. Ultrasonic velocities measured along axial and lateral directions of core samples(cf, Fig. 2).

	V ₀	V ₃₀	V ₆₀	V ₉₀	V ₁₂₀	V ₁₅₀	V _{axial}
R sample	3377	3577	3709	3826	3432	3418	3049
	3421	3490	3687	3717	3487	3380	3066
	3523	3454	3678	3807	3814	3458	3338
	3439	3597	3647	3863	3905	3386	3330
	3559	3553	3745	3709	3741	3638	3375
	3466	3593	3799	3720	3530	3408	3293
average	3464	3544	3711	3774	3652	3448	3242
G sample	3590	3567	3252	3127	3244	3456	3250
	3546	3519	3414	3127	3284	3463	3270
	3637	3594	3279	3213	3376	3627	3409
	3678	3589	3262	3213	3341	3445	3409
	3756	3664	3435	3386	3349	3671	3359
	3630	3613	3336	3180	3427	3522	3400
average	3640	3591	3330	3208	3337	3531	3350
H sample	3345	3173	3163	3167	3321	3433	3526
	3221	3252	3215	3309	3365	3465	3508
	3610	3532	3533	3208	3348	3215	3753
	3466	3431	3431	3090	3216	3175	3802
	3522	3399	3177	3509	3536	3631	3736
	3333	3247	3072	3125	3499	3523	3741
average	3416	3339	3265	3235	3381	3407	3678

속도인 G시료와 H 시료의 최소 값은 3,215m/sec와 3,232m/sec, 2결에 수직인 방향으로 측정된 P과 속도인 R시료의 최소 값과 H 시료의 최대값은 3,423 m/sec와 3,430m/sec로 거의 일치하며, 3결에 수직인 방향으로 측정된 P과 속도인 R 시료 및 G 시료의 최대 값은 3,771m/sec와 3,659m/sec로 비교적 일치하는 속도 분포를 보인다.

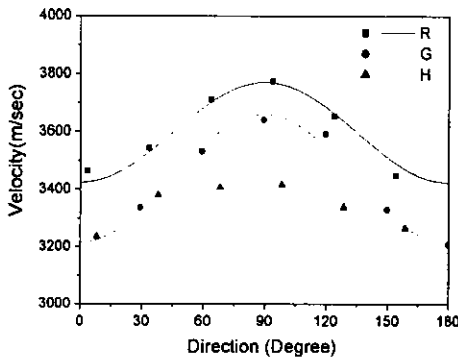


Fig. 5. Ultrasonic velocities measured along lateral directions. R, G and H represent R sample, G sample and H sample, respectively.

차분변형률 분석

차분 변형률 분석은 1개씩의 R 시료, G 시료 및 H 시료에 대하여 실시되었고, 그림 6은 R 시료에 대하여 실시된 차분 변형률(differential strain), 누적 균열 변형률(cumulative crack strain) 및 균열 압축률(crack compressibility)을 보여준다. 그림 6에서 Ch 1은 1결에 수직인 방향에서 측정된 균열 변형률(crack strain : 미세균열이 단히면서 발생하는 변형률)이고 Ch 2~Ch 4는 2결과 3결이 이루는 평면에 로켓 변형률 게이지에서 측정된 변형률이다. 누적 균열 변형률 곡선에서 Ch 1이 최대 균열 변형률을 보여 1결을 따라 가장 많은 미세균열이 발달하여 있음을 지시하고, 균열 압축율은 약 30 MPa에서 최대치를 보여 대부분의 미세균열들은 매우 낮은 종횡비(aspect ratio)를 가지고 있음을 보여준다.

로켓 변형률 게이지에서 측정된 균열 변형률에서 주 균열 변형률(principal crack strain)을 계산할 수 있고 그림 7은 주 균열 변형률의 방향을 보여준

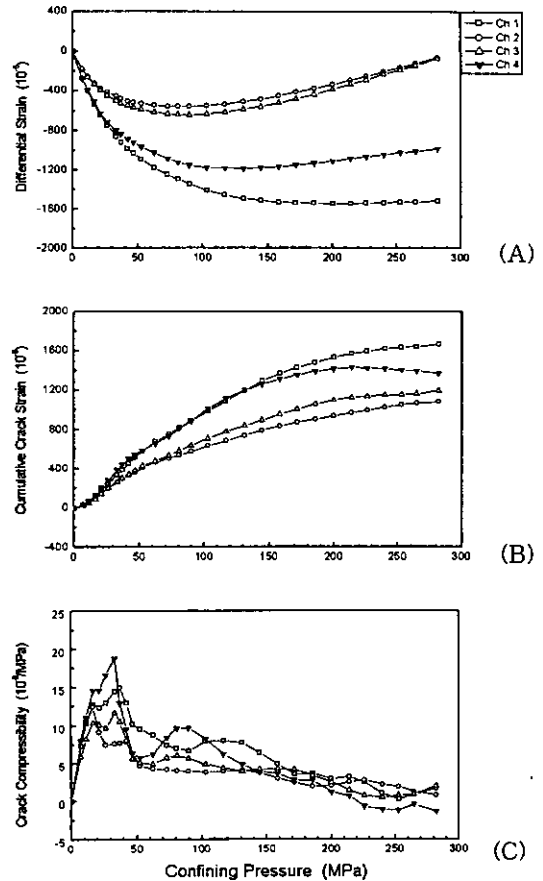


Fig. 6. The result of differential strain analysis. (A) differential strains, (B) cumulative crack strains and (C) crack compressibility

다. 1결과 3결이 만드는 평면에서는 3결에 직각방향으로 주 균열 변형률이 분포한다(그림 7B). 그러나 2결 및 3결이 이루는 평면에서 주 균열 변형률은 2결에서 70°~80° 경사진 방향으로 분포하고 있으며(그림 7A), 1결과 2결이 이루는 평면에서는 1결과 50°~60° 방향으로 분포하고 있어서 정확하게 직각을 이루지는 않는다(그림 7C). 균열 변형률은 미세균열의 방향과 직각을 이루며 발생하므로(장보안 외, 1994), 1결과 3결이 이루는 평면에서는 대부분의 미세균열들이 1결에 직각인 방향으로 분포하고 있음을 지시하나, 1결과 2결이 이루는 평면에서는 1결과 30°~40°, 2결과 3결이 만드는 평면에서는 2결에 10°~20° 경사진 방향으로 대부분의 미세균

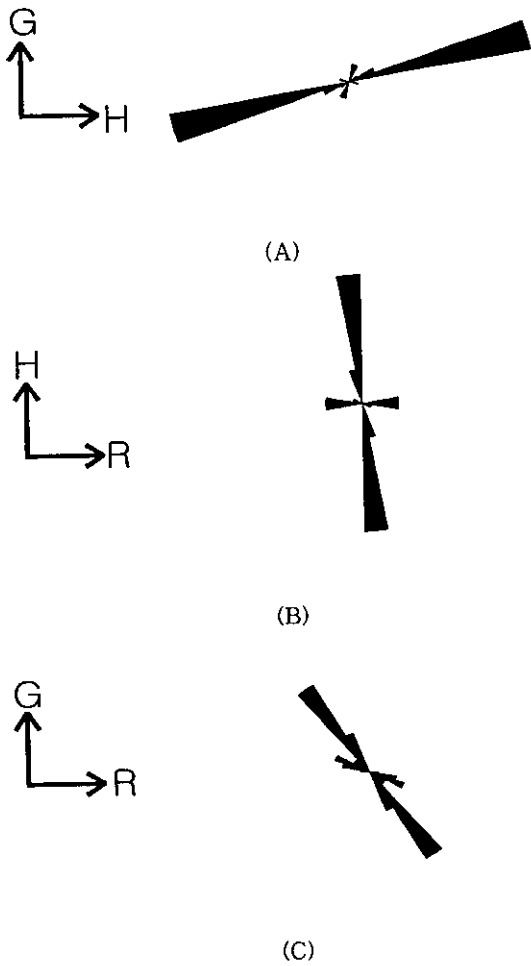


Fig. 7. Directions of the principal crack strains. The preferred orientations of microcracks are perpendicular to the directions of the principal crack strains. (A) R sample, (B) G sample and (C) H sample

열들이 발달해 있음을 보인다. 이러한 현상은 일축 압축시험 결과에서도 관찰되었으며 뒤에서 설명할 미세균열의 염색에 의한 현미경 관찰에서도 나타난다.

염색에 의한 미세균열의 관찰

암석내에 발달한 미세균열을 직접 관찰하기 위하여 각 결에 평행한 시료 3개에 대하여 미세균열의 틈 내에 형광염료를 주입하여 염색을 실시하였

다. 염색된 시료로부터 박편을 제작하여 자외선 반사 현미경하에서 대표적인 부분을 사진으로 촬영한 후, 미세균열의 특성, 방향 및 길이를 측정하여 결과의 관계를 연구하였다.

대부분의 입자 경계에는 입자경계균열(grain boundary crack)이 발달해 있으며, 석영 입자 내에는 입자내균열(intragranular crack) 및 입자관통균열(intergranular crack)들이, 장석에서는 쌍정에 의한 등 간격의 입자내균열이 주로 발달해 있다(그림 8). 장석 내에 발달한 미세균열들은 길이가 비교적 짧고 결정의 방향에 지배를 받아서 결의 방향과는 거의 일치하지 않는다. 그러나 석영 내에 발달한 미세균열들은 길이가 매우 길며 1결 혹은 2결과 거의 평행한 방향을 보이고 있어서, 결의 방향은 석영내에 발달한 미세균열의 방향성에 상당한 지배를 받는 것으로 사료된다.

그림 8A는 1결에 평행한 시료의 박편 사진으로 미세균열은 규칙적인 방향성이 보이지 않는다. 그러나 2결에 평행한 시료인 그림 8B에서는 1결과 평행하며 연장성이 좋은 미세균열들이 석영 입자 내에서 관찰되고 있으며, 이러한 미세균열들이 1결의 방향성과 상당한 관련이 있는 것으로 판단된다. 3결과 평행한 시료인 그림 8C에서는 연장성이 매우 좋은 미세균열들이 많이 관찰되며, 특히 1결과 경사진 방향으로 연장성이 매우 좋은 미세균열들이 발달해 있다.

각각의 사진에서 폭이 2mm가 되게 격자망을 형성한 후 축선과 교차하고 길이가 1mm 이상인 미세균열의 갯수와 누적 길이를 10° 간격으로 나타내었다(그림 9). 미세균열의 갯수와 누적길이는 거의 유사한 형태를 보이고 있으나, 1결이 분포하는 박편에서 높은 값을 보여, 1결 방향으로 미세균열이 가장 잘 발달되어 있음을 보여준다. 그러나 2결과 3결이 이루는 평면에서 관찰된 미세균열의 방향성은 2결과 약 45°의 경사를 보이는 반면에, 1결과 3결이 만드는 평면 및 1결과 2결이 이루는 평면에서는 1결과 약 15° 정도 경사진 방향으로 미세균열이 가장 많이 발달해 있다. 위의 결과는 차분변형을 분석에 의한 미세균열의 방향성과는 약간의 차이를 나타낸다. 차분변형을 분석에서는 1결과 2결이 이루는 평면에서는 1결과 30°~40° 방향으로, 2결과 3결이 이루는 평면에서는 2결에 10°~20°에 방향으

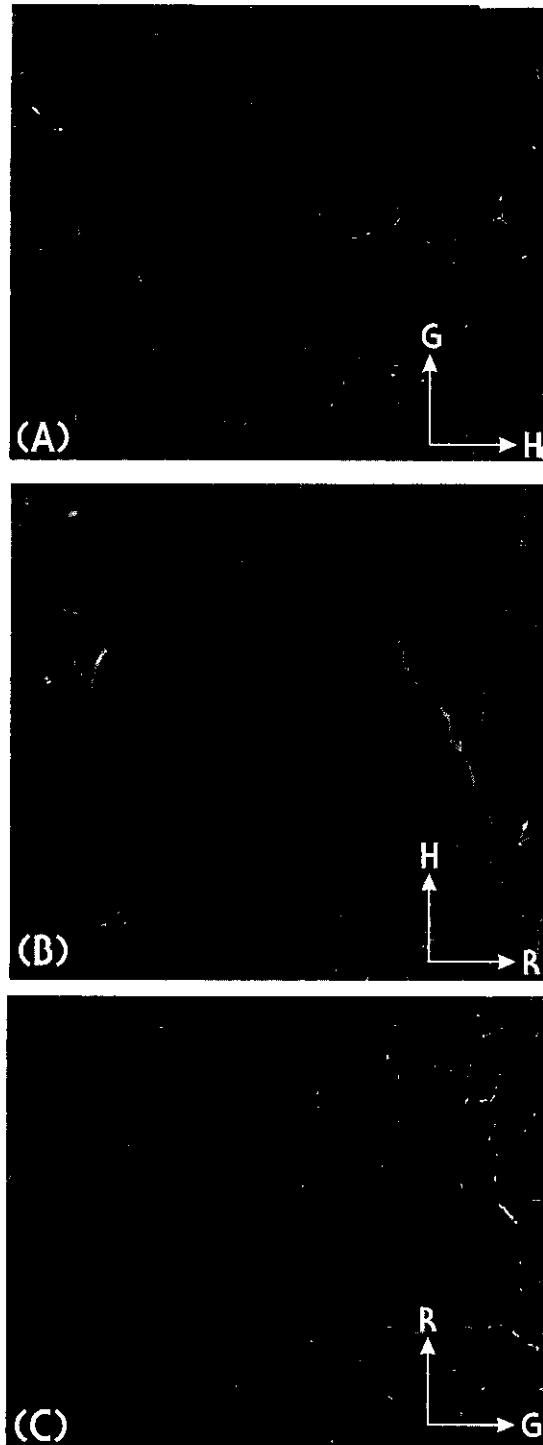


Fig. 8. Photograph of microcracks taken from dyed thin sections. (A) R sample, (B) G sample and (C) H sample

포천화강암내에 발달한 결의 역학적 이방성과 미세균열의 상관성

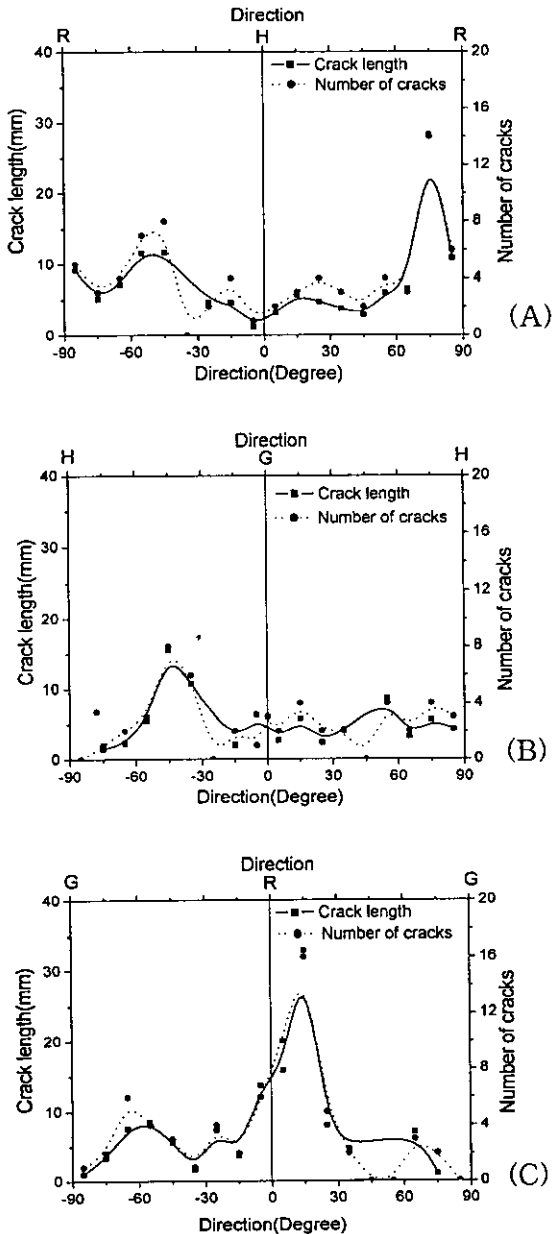


Fig. 9. Crack lengths and number of cracks measured from photograph of microcracks taken from dyed thin sections. (A) R sample, (B) G sample and (C) H sample

로 미세균열이 발달해 있다. 차분변형을 분석은 미세균열이 닫히면서 발생하는 균열 변형률을 측정하므로 주로 미세균열의 폭(width)과 관계가 있는 반면에, 현미경에 의한 미세균열의 관찰은 길이나 개수를 측정하기 때문에 방향성에서 약간의 차이가 발생하는 것으로 사료된다.

역학적 이방성

일축압축강도, 인장강도, 탄성계수 및 초음파 속도는 결의 방향에 따라 측정되었기 때문에 결에 따른 이방성을 계산할 수 있으며, 각각의 이방성 계수는 표 5에 수록되어 있다. 인장강도는 하중 축이 1결과 평행할 때 가장 낮은 값을 보이며 이방성 계수는 1:1.16:1.24로 가장 큰 이방성을 보인다. 일축압축강도는 하중 축이 3결과 수직인 방향으로 성형된 시료에서 가장 낮은 강도를 가지며 이방성 계수는 1.2:1.03:1로써 인장강도 다음으로 큰 이방성을 가진다. 탄성계수 또한 1결에 수직 방향으로 측정되었을 때 가장 큰 값을 보이며 이방성 계수는 1:1.09:1.14이며, 탄성과 속도는 1결에 수직 방향으로 측정되었을 때 가장 낮으며 이방성 계수는 1:1.06:1.09로 탄성계수와 이방성 계수가 유사하다.

Table 5. The ratios of anisotropy for mechanical properties

	R Sample	G Sample	H Sample
Tensile Strength	1	1.16	1.24
UCS	1.20	1.03	1
Young's modulus	1	1.09	1.14
Ultrasonic Velocity	1	1.06	1.15

포천 화강암은 1결이 거의 수평을 이루고 있으므로 일반적인 시추 방법인 수직으로 시추한 코아에서는 일축압축강도 측정시 2결과 3결이 하중 축과 평행하게되어 (표 5의 R 시료에 해당) 일축압축강도와 탄성계수는 최대 값이 측정된다. 그러나 압력인장시험에 의한 인장강도 측정 시, 시료에는 2결 혹은 3결이 하중 축과 평행하게되어 (표 5의 G 시료 혹은 H 시료에 해당) 인장강도는 중간 값 ~ 최대 값이 측정된다. 또한 일반적인 초음파 속도 측정은 코아의 축 방향을 따라서 실시되므로 (표 5의 R 시료에 해당), 초음파 속도는 최소 값이 측정

된다. 그러나 수평으로 시추된 코어는 G 시료 혹은 H 시료에 해당되어 일축압축강도와 탄성계수에서는 최소 값~중간 값이, 초음파 속도 측정에서는 중간 값~최대 값이 측정된다. 그러나 인장강도에서는 시추 방향에 따라 모든 결이 하중 축과 평행하게 될 수 있으므로, 시료의 성형 방향에 따라 최대 24%의 측정 값 차이가 발생할 수 있다.

결 론

포천 화강암에 대하여 결의 방향에 따라 일축압축시험, 인장강도 시험, 초음파 속도 측정, 차분 변형률 분석 및 염색에 의한 미세균열 관찰을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 포천 화강암의 일축압축강도는 177MPa~212MPa의 범위를, 탄성계수는 48GPa~62GPa, 인장강도는 69MPa~85MPa, 탄성과 속도는 3,200m/sec~3,700m/sec의 범위를 보인다.

2. 포천 화강암은 결의 방향에 따라 역학적 이방성을 보이고 있으며, 인장강도에서 최대인 24%의 이방성을 보이며, 탄성계수에서 가장 낮은 14%의 이방성을 나타낸다. 또한 모든 역학 시험에서 1결에 의한 영향이 가장 크게 나타난다.

3. 미세균열의 방향성은 결의 방향성과 상당한 연관성을 보인다. 그러나 장석에서는 결정의 방향에 따라 발달된 미세균열이 주로 분포하여 결의 방향성과 거의 무관하나, 석영 내에서는 결의 방향성과 거의 유사한 방향으로 연장성이 매우 좋은 미세균열이 발달해 있어서, 결의 방향성은 석영 내에 발달한 미세균열의 방향성에 지배를 받는 것으로 사료된다.

4. 차분 변형률 분석에 의하면 대부분의 미세균열은 1결과 30°~40° 방향성의 차이를 보이나, 현미경 관찰에 의하면 1결과 약 15° 방향성의 차이를 보인다. 이러한 결과는 차분변형률이 미세균열의 폭을 측정하는 반면에 현미경 관찰은 길이나 개수를 측정하기 때문인 것으로 사료된다.

사 사

이 연구는 강원대학교 부설 자원개발연구소의 지원으로 이루어졌다.

참 고 문 헌

- 박덕원, 서용석, 정교철, 김영기, 2001, 주라기 화강암에 발달하는 결의 현미경학적 분석, 지질공학, 11, 51~62.
- 이병대, 장보안, 윤현수, 이한영, 진명식, 1999, 문경 지역에 분포하는 화강암의 미세균열 발달특성, 암석학회지, 8, 24~33.
- 이상은, 조상호, 양형식, 박홍민, 1999, 조사선을 이용한 화강암의 미세 불연속면 분포성상 평가, 터널과 지하공간, 9, 364~372.
- 장보안, 최인선, 김재동, 1994, 피로하중에 의한 화강암류 암석의 미세균열 발달 특성, 지질학회지, 30, 613~631.
- 조동룡, 권성택, 1994, 남한의 중생대 화강암에 대한 각섬석 지암계와 지각 두께의 진화, 지질학회지, 30, 41~61.
- Brace, W., Paulding, B. and Scholz, C., 1966, Dilatancy in the fracture of crystalline rocks, J. Geophy. Res., 71, 3939-3953.
- ISRM, 1981, Rock characterization testing and monitoring, Brown, E. eds., Pergamon Press, Oxford, 211 p.
- Dale T., 1923, The commercial granites of New England. Bull. U. S. Geol. Surv. 738, 23-103.
- Douglass, P. and Voight, B., 1969, Anisotropy of granites : A reflection of microscopic fabric, Geotechnique, 19, 376-398.
- Jaeger, J. and Cook, N.G.W., 1979, Fundamentals of Rock Mechanics, Chapman & Hall, London, 593 p.
- Osborne F., 1935, Rift grain and hardway in some Pre-cambrian granites, Quebec., Economic Geology 30, 540-551.
- Peng S. and Johnson A., 1972, Crack growth and faulting in cylindrical specimens of Chelmsford Granite, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 9, 37-86.
- Plumb R., Engelder, T. and Yale, D., 1984, Near-surface in situ stress : 3. Correlation with microcrack fabric within the New Hampshire Granites, J. Geophy. Res., 89,

9350-9364.

- Siegfried R. and Simmons G., 1978, Characterization of oriented cracks with DSA, J. Geophy. Res., 83, 1269-1278.
- Simmons G., Siegfried, R. and Feves, M., 1974, Differential strain analysis : A new method for examining cracks in rocks, J. Geophy. Res., 79, 4383-4385.
- Thill, T., Williard R. and Bur, T., 1969, Correlation of longitudinal velocity variation with rock fabric, J. Geophy. Res., 74, 4898-4909.
- Thill, T., Bur, T. and Steckley, R., 1973, Velocity anisotropy in dry and saturated rock sphere and its relation to rock fabric, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Rock Mech. Abstr. 10, 535-557.
- Twidale, C., 1982, Granite landforms, Elsevier Scientific, 46-86.

장보안

강원대학교 지구과학부
200-701 강원도 춘천시 효자동 192
Tel : 033-250-8583
Fax : 033-244-8580
E-mail : bajang@kangwon.ac.kr

오선환

공주대학교 문화재 비과과 진단연구실
314-701 충남 공주시 신관동 182
Tel : 041-850-8728
Fax : 041-855-1975
E-mail : seonano@kongju.ac.kr