

일축압축하에서 포천화강암의 역학적 이방성

박 덕 원*

한국지질자원연구원 지하수지열연구부

Mechanical Anisotropy of Pocheon Granite under Uniaxial Compression

Deok-Won Park

Groundwater & Geothermal Resources Division

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 30 Gajeongdong, Yuseonggu, Daejeon 305-350, Korea

포천 지역에 분포하는 쥐라기 화강암을 대상으로 미세균열 분포특성이 화강암의 역학적 성질에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 3 종의 방향성 시편을 대상으로 일축압축시험이 실시되었으며, 각 시편은 R(rift plane), G(grain plane) 및 H(hardway plane) 축에 각각 직각이다. 다양한 탄성상수 중, 3 방향에 따른 포아송비의 변화가 검토되었다. 파괴강도 비-포아송 비의 관계도에서 포아송 비의 범위는 H-시편에서 가장 높은 분포양상을 보이며 G-시편, R-시편의 순으로 감소한다. 분포곡선은 I~III 단계에서는 거의 선형이며, IV-3 단계에서는 기울기의 급격한 증가를 보인다. 관계도에서 보는바와 같이 파괴강도비 0.92~0.96에서 변곡점이 형성된다. IV-3 단계는 탄성 영역의 밖에 속한다. 4 단계의 파괴단계에서의 거동은 응력-체적변형을 곡선에서 분석되었다. 암석의 거동을 지배하는 응력증분-체적변형을 방정식에서 특징적인 재료상수인 a , n , Q , m 및 ϵ_v^{mcf} 가 결정되었다. 이들 상수 중에서 미세균열의 폐합영역(1 단계)에서 고유의 미세균열의 공극률(a , 10^{-3}) 그리고 압축지수(n)는 각각 $a^R(3.82) > a^G(3.38) > a^H(2.32)$ 그리고 $n^R(3.69) > n^G(2.79) > n^H(1.99)$ 의 순서로 나타난다. 특히 IV 단계의 미세균열의 임계체적변형률(ϵ_v^{mcf})은 3번 면에 수직인 H-시편에서 가장 높게 나타난다. 이러한 결과에서 포아송비 및 재료상수와 같은 역학적 성질은 2 조의 미세균열과 밀접한 관계를 보이고 있다. 강도 이방성과 미세균열의 방향성과의 상관성은 암석의 파괴 연구에 주요하게 적용될 수 있다.

주요어: 화강암, 미세균열, 포아송비, 재료상수, 역학적 이방성

Jurassic granite from Pocheon area were tested to investigate the effect of microcracks on mechanical properties of the granite. Three oriented core specimens were used for uniaxial compressive tests and each core specimen are perpendicular to the axes 'R'(rift plane), 'G'(grain plane) and 'H'(hardway plane), respectively. Among various elastic constants, the variation of Poisson's ratio as function of the directions was examined. From the related chart between ratio of failure strength and Poisson's ratio, H-specimen shows the highest range in Poisson's ratio and Poisson's ratio decreases in the order of G-specimen and R-specimen. The curve pattern is nearly linear in stage I~III but the slope increases abruptly in stage IV-3. As shown in the related chart, diverging point of a curve is formed when ratio of failure strength is 0.92~0.96. Stage IV-3 is out of elastic region. The behaviour of rock in the four fracturing stages was analyzed in term of the stress-volumetric strain curve. From the stress increment-volumetric strain equations governing the behaviour of rock, characteristic material constants, a , n , Q , m and ϵ_v^{mcf} , were determined. Among these, inherent microcrack porosity(a , 10^{-3}) and compaction exponent(n) in the microcrack closure region(stage I) show an order of $a^R(3.82) > a^G(3.38) > a^H(2.32)$ and $n^R(3.69) > n^G(2.79) > n^H(1.99)$, respectively. Especially, critical volumetric microcrack strain(ϵ_v^{mcf}) in the stage IV is highest in the H-specimen, normal to the hardway plane.

* Corresponding author: pdw@kigam.re.kr

These results indicate a strong correlation between two major sets of microcracks and mechanical properties such as Poisson's ratio and material constants. Correlation of strength anisotropy with microcrack orientation can have important application in rock fracture studies.

Key words : granite, microcrack, Poisson's ratio, material constant, mechanical anisotropy

서 론

암석의 내부에는 미세균열 또는 공극 등의 결함이 내재함으로 단순히 개개 광물성분의 거동만을 고려하여서는 외부의 힘에 대한 암석의 반응을 예견할 수 없다. 공극이나 공동(cavity)이 역학적 성질에 상당한 영향을 미친다는 사실은 쉽게 예견할 수가 있으나, 미세균열은 공극이 낮고 폭이 좁으며 그 형태 등을 정확히 평가하기가 힘들기 때문에 암석의 역학적 성질에 대한 영향을 예견하기가 용이하지 않다. 그러나 암석의 부피에 대한 미세균열의 부피를 고려해 볼 때, 미세균열이 낮은 응력하에서 암석의 역학적 성질이나 거동에 대해 상당히 큰 영향을 미친다는 사실이 알려져 있다(Walsh, 1965; Walsh and Brace, 1966; Lama et al., 1978).

암석은 내부구조나 불연속면의 배열성으로 인하여 전형적으로 이방성을 나타내는 특성이 있다. 층리 및 엽리 등을 포함하는 구조적인 이방성은 개략적인 조사를 통하여 분명할 수가 있으나, 구성광물과 미세결함(microscopic defect)의 분포성은 모호하며 정밀한 측정이 없으면 확인하기 어렵다.

암석에 외부 응력이 가해지면 암석내부에 존재하는 미세결구(microfabric)의 배열성에 좌우되어 암석의 역학적 거동에 이방성(anisotropy)이 야기된다. 암석의 역학적 성질에 있어 이러한 배열성과 관련된 관찰은 이방성에 대한 개념이 간과되거나 무시하면 응력하에서 암석의 이방적인 거동을 정확히 예견할 수가 없을 것이다. 이러한 견지에서 역학적 성질의 이방성을 파악하여 방향별로 비교 분석하였으며, 다양한 미세결구 중에서도 특히, 미세균열의 분포상과의 상관성을 규명하여 화강암의 역학적 성질에 미치는 영향과 관련시켜 서술하고자 한다. 연구대상 암석은 채석작업 시 이용되는 결의 발달이 양호한 포천화강암으로 하였다.

한편 화강암은 많은 경우 암석시험 시 등방성 재료로 취급되었으나, 국내외의 많은 화강암질 암석의 채석장에서는 역학적 이방성을 인식하여 이를 이용하고 있다. 특히 화강암의 역학적 이방성을 초래하는 미세균열

과 관련된 최근의 국내 연구는 장보안과 김재동(1995), 백환조 등(1998), 이병대 등(1999), 이상은 등(1999),徐庸碩 등(1999), 장보안과 오선환(2001) 및 Lee et al.(2001) 등에서 볼 수가 있다. 이외에 화강암의 역학적 이방성과 관련된 기존의 논문을 분류한 자료(박덕원 등, 2001)에서는 연구사례별로 상세히 기재하였다.

한편 암석역학 분야에서 응력-변형을 곡선을 대상으로 한 연구사례 중, 본 연구와 비교적 관련성이 있는 국내 연구사례는 김재국(1971), 이정인(1974), 최병렬(1981), 김기주 등(1985) 및 정태종(1996) 그리고 국외 연구사례는 Wawersik and Fairhurst(1970), Peng and Johnson(1972), Tapponnier and Brace(1976) 및 Martin and Chandler(1994) 등에서 볼 수가 있다.

시편 및 시험

이 연구의 대상이 되는 포천화강암의 암석학적 특징, 미세균열의 분석방법 및 제 특성(박덕원 등, 2001) 그리고 방향별 시편 제작과정 및 일반적인 물성(서용석과 박덕원, 2003)은 이미 상세히 기술된 바가 있으며, 결과 밀접한 상관성을 갖는 미세균열의 분포상 및 각종 물리량에 대한 분석결과를 요약하여 본문에 제시하였다. 여기서는 3 방향별 시편의 명명 및 사용기기 등에 대하여 기재코자 한다.

일반적으로 채석장에서는 거의 수직을 형성하는 3 방향의 채석면이 형성되어 있으며, 각 채석면은 상대적인 분리의 용이도에 따라 1번 면(rift plane) > 2번 면(grain plane) > 3번 면(hardway plane)의 순서로 호칭되고 있다. 일축압축시험을 위한 NX 코어(직경 5.4cm x 길이 10.8cm)는 상기한 1번 면, 2번 면 및 3번 면에 각각 수직되게 제작하였으며, R, G 및 H 시편으로 각각 명명하였다. 여기서 R은 1번 면, G는 2번 면 그리고 H는 3번 면에 수직인 축을 각각 의미한다.

강도 및 변형률 측정에 사용된 압축강도기는 미국 MTS사의 압축력 160톤, 인장력 80톤의 용량을 갖고 있는 서보발브형 자동제어 시스템이다. 본 시험에서는 변위를 제어해야 하는데, 압력을 가하게 되는 변위

의 상향 속도를 0.1mm/min으로 결정하였다. 일축압축강도 및 변형율(ϵ_a , ϵ_1 및 ϵ_v)의 측정에는 20mm용 Displacement transducer(KYOWA, DF20D), Extensometer (MTS, Model 1632. 12c), Dynamic strain amplifier (KYOWA, DMP-G) 및 X-Y₁Y₂ recorder(WATANABE, WX4302) 등이 사용되었다. 상기한 실험 내시험은 모두 한국지질자원연구원에서 실시되었다.

시험결과 및 토의

미세균열의 관찰

화강암의 미세균열과 관련된 역학적 거동을 밝히기 위하여 박편관찰을 통한 미세균열의 분포상 및 물리량을 파악하였다. 모든 암체는 미세균열의 방향에 따라 잠재적 결함(미세균열)을 내포하여 강도 이방성의 특성을 갖는다. 강도 이방성은 미세균열의 분포밀도에 따르며, 밀도(ρ)는 시료의 단면적(A), 균열길이의 1/2 (half-length) 및 균열의 수(N)를 이용하여 다음식(Segall, 1984)으로 구할 수 있다.

$$\rho = \frac{1}{A} \cdot N \cdot \sum_{i=1}^N C_i^2 \quad (1)$$

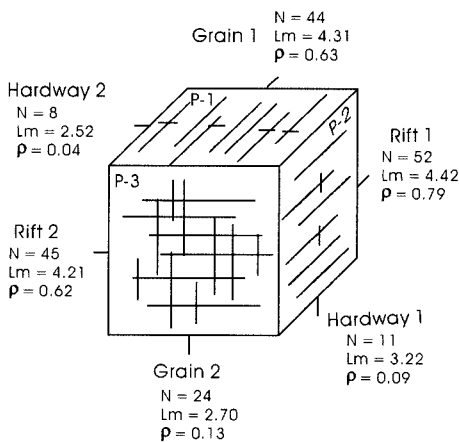


Fig. 1. Number(N), mean length(L_m) and density(ρ) of microcrack traced from photomicrograph. The unit of L_m is mm.

화강암에서는 세 방향의 박편 상에서 상호 직교하는 두 종류의 미세균열을 측정할 수 있다. 모식도에서 P-1 박편에서는 그레인 1 (grain 1)과 하드웨이 2 (hardway 2), P-2 박편에서는 하드웨이 1 (hardway 1)과 리프트 1 (rift 1) 그리고 P-3 박편에서는 그레인 2 (grain 2) 및 리프트 2 (rift 2)가 각각 측정된다 (Fig. 1). 6개 방향별 미세균열의 각종 물리량을 종합해 보면 균열의 발생빈도 (N), 평균길이 (L_m) 및 밀도 (ρ)는 동일하게 리프트 > 그레인 > 하드웨이의 순을 보이고 있음이 주목된다.

응력-변형을 곡선

일축압축시험을 통하여 재하 축변형율(axial strain, ϵ_a) 및 재하축과 직교방향의 횡변형율 (lateral strain, ϵ_l)이 측정되었으며, 체적변형율(volumetric strain)은 $\epsilon_v = \epsilon_a + 2\epsilon_l$ 식에 의해 산정하였다.

Brace and Paulding(1966), Bieniawski(1969), Brady(1970), Bordia(1972), 이정인(1974), 최병렬(1981) 등은 압축에 의해 간극이 밀폐되는 구간(I 단

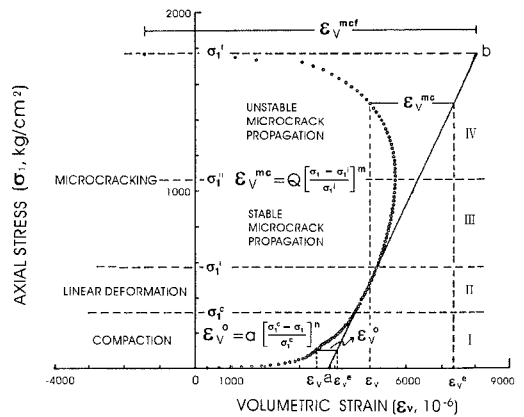


Fig. 2. Typical axial stress vs volumetric strain curve showing fracturing processes under uniaxial compression of granite(S.N. R).

- σ_1^c : stress at the upper boundary of compaction stage
- σ_1^i : stress at the stable microcrack initiation point
- σ_1^{ii} : stress at the unstable microcrack initiation point
- σ_1^f : failure strength
- ϵ_v^0 : volumetric compacting strain (inherent microcrack porosity)
- ϵ_v^{mc} : volumetric microcrack strain,
- ϵ_v^{mcf} : critical volumetric microcrack strain.

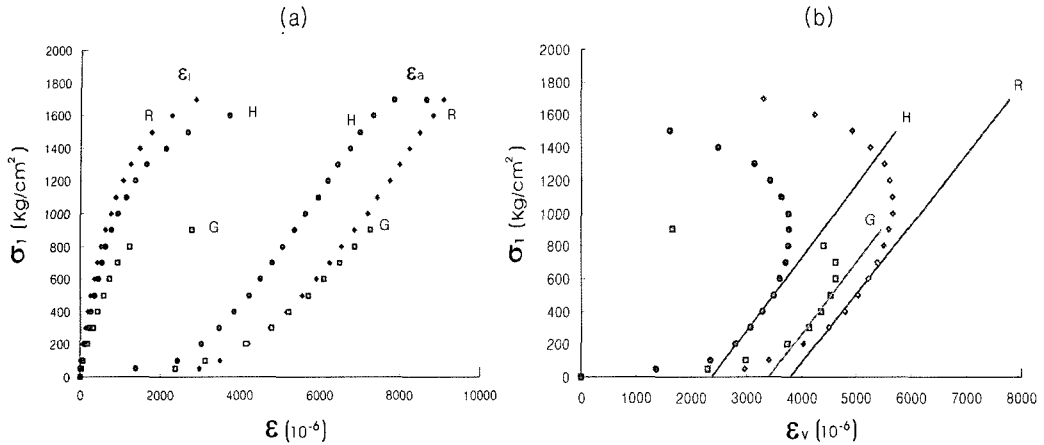


Fig. 3. Axial stress vs axial, lateral and volumetric strain curves of R, G and H specimens.

계), 탄성적 성질을 갖는 구간(II 단계) 및 하중증가에 따른 간극이 발생하여 개구되나 안정 상태에 있는 구간(III 단계), 더욱 증가된 하중에 의해 불안정한 균열이 전파되어 파괴될 때까지의 구간(IV 단계)으로 구분하고 있어서, 이에 따라 구분하였다(Fig. 2).

응력-축변형 및 횡변형율은 점이적인 변화를 하여 4 단계의 구분이 용이치 않으나 응력-체적변형을 곡선에서는 각 단계별로 파괴진행 과정이 보다 명확하게 구분되고 있다. 응력-체적변형을 곡선상에서 4 단계로 구분한 기준은 다음과 같다. 거의 일정한 증가율을 보이는 선형 구간(II 단계), 변곡점이 형성되어 곡선이 반전하여 급격한 체적팽창 현상이 일어나 파괴에 이르는 구간(IV 단계)을 경계로 하여 II 단계 하부구간은 I 단계, II 단계와 IV 단계 사이는 III 단계로 각각 설정하였다(Fig. 2). 포천화강암의 R, G 및 H 시편에 대한 응력-변형을 곡선은 다음과 같다(Fig. 2 및 3).

즉 I 단계($0 \leq \sigma \leq \sigma_1^c$, σ_1^c :이하 강도 I)는 암석이 갖고 있는 간극의 체적변형률(ϵ_v)을 나타내는 구간이 되고, II 단계($\sigma_1^c \leq \sigma \leq \sigma_1^i$, σ_1^i :이하 강도 II)는 탄성적 성질의 구간이기 때문에 $\sigma = k \cdot \epsilon$ (k :체적탄성율)의 관계가 성립되는 구간이라 할 수가 있다. III 단계($\sigma_1^i \leq \sigma \leq \sigma_1^{ii}$, σ_1^{ii} :이하 강도 III)는 균열이 개구되어지는 구간으로서, 인장응력에 의한 파단이 일어나는 구간이 되고, IV 단계($\sigma_1^{ii} \leq \sigma \leq \sigma_1^f$, σ_1^f :이하 강도 IV(파괴강도))는 전단파괴가 일어나는 구간이라 할 수 있다(Fig. 2).

강도

각 단계별 강도(σ_1^c , σ_1^i , σ_1^{ii} 및 σ_1^f)를 살펴보면 다음과 같다(Table 1). R 및 H 시편에서는 압축강도가 높을수록 보다 높은 응력에서 압축이 끝나고 암석내부에서 균열전파가 시작되는 일관성 있는 특성을 나타내고 있다. 각 단계별 강도 중에서 강도 I(σ_1^c) 및 강도 II(σ_1^i)는 각 시편의 방향성에 따라 $R > G > H$ 시편의 순으로 되고, 응력수준이 높아짐에 따라 강도 III(σ_1^{ii}) 및 강도 IV(σ_1^f)에서는 G 시편의 경우와 같이 불규칙한 잠재결합의 가속화로 인하여 이러한 경향성은 절여된다. G 시편의 압축강도는 R 및 H 시편의 압축강도에 비하여 많은 차이를 보인다. 이러한 강도 저하의 원인은 채석장에서 결의 방향으로 채석하는 과정에서 발생한 미세균열이 내재할 가능성이 있다. 이런 유형의 미세균열은 육안 또는 박편상에서도 확인이 용이하지 않다.

한편 포천화강암(장보안과 오선환, 2001) 그리고 거창 및 합천화강암(서용석과 박덕원, 2003)의 연구사례에서 압축강도(강도 IV)는 $R > G > H$ 시편의 순으로 되어 경향성이 뚜렷하다. R 시편에서는 2번 및 3번 면, G 시편에서는 1번 및 3번 면 그리고 H 시편에서는 1번 및 2번 면이 하중 축과 각각 평행하게 배열하여, 수직결(미세균열)의 밀도와 압축강도는 반비례한다. 이러한 경향은 편리가 발달한 암석의 강도특성(Donath, 1964)과 매우 비슷하다.

각 단계별 강도(σ_1^c , σ_1^i 및 σ_1^{ii})와 강도 IV(파괴강도)의 비를 각각 의미하는 K_0 , K_1 및 K_2 값은 시편 별로 다음과 같다(Table 2). 잠재결합에 의한 G 시편을 제외한 R 및 H 시편에서 K_0 , K_1 및 K_2 의 값은 $R > H$ 시편의 순으로 되어, 상기한 각 단계별 강도의 경향성과 유사하다.

Table 1. Strength by each stage.

Sample No.	σ_1^c (I)	σ_1^i (II)	σ_1^{ii} (III)	σ_1^f (IV)
R	320	590	1057	1768
G	280	530	667	938
H	220	510	838	1703
MEAN	273	543	854	1469

* Symbols of strength are as same in Fig. 2.

Table 2. Values of K_0 , K_1 and K_2 .

Sample No.	$K_0(\%)$ σ_1^c / σ_1^f	$K_1(\%)$ σ_1^i / σ_1^f	$K_2(\%)$ $\sigma_1^{ii} / \sigma_1^f$
R	18.0	33.3	59.7
G	29.8	56.5	71.1
H	12.9	29.9	49.2
MEAN	20.2	39.9	60.0

변형을

각 단계별 강도(Fig. 2)에서 측정된 종축의 수축변형율, 횡축의 팽창변형율 및 체적변형율의 자료(Table 3)를 근거로, 축변형율-횡변형율 및 축변형율-체적변형율 관계도(Fig. 4 및 5)를 작성하였다. 각 단계별로 시편 간의 변형율의 변화와 규칙성을 살펴보면 다음과 같다.

축변형율은 강도 I~III($\sigma_1^c \sim \sigma_1^{ii}$)에서 공히 $R > G > H$ 시편의 순으로 증가하며, 이중 강도 IV(파괴강도)에서 R 시편이 0.95(%)로 가장 크게 나타난다. 이는 시편 내에서 하중 축에 수직배열하는 선재균열의 파괴차이에 기인한다. 횡변형율(%)은 강도 I~III에서 축변형율의 경우와 같은 규칙성이 없으나 강도 IV에서 급격히 증가한다. H 시편에서는 1번 및 2번 편이 공히 압축하중과 평행배열하여 횡변형율(1.09%)이 가장 크고, 특히 IV 단계에서는 하중방향과 평행한 방향으로 기존 미세균열의 급격한 성장 및 전파(propagation)의 가속화로 인하여 R 및 G 시편에 비하여 상대적으로 낮은 압축강도의 특성과 상관성이 있다. 체적변형율은 축변

형율의 거동과 유사하여 강도 I~III에서 공히 $R > G > H$ 시편의 순으로 증가하며, 강도 IV에서 급격한 체적 팽창을 보인다. 이중 H 시편의 체적변형율이 1.39(%)로 가장 크게 나타나고, 횡변형율의 경우와 유사하다(Table 3).

축변형율-횡변형율 및 축변형율-체적변형율 관계도(Fig. 4 및 5)에서 시편별로 고유의 영역을 차지하며, 순차적인 배열성을 보인다. 특히 IV 단계에서는 H 시편의 변화폭이 급증한다. 이와같은 경향성은 밀도가 상이한 2조의 미세균열의 배열성에 기인하는 것으로 해석할 수가 있다. 즉, 축변형율은 수평배열하는 미세균열의 밀도차에 의하여 $R > G > H$ 시편의 순으로 나타난다. 횡변형율은 압축에 의하여 하중축과 평행한 방향으로 새로이 생성 또는 성장하는 미세균열을 지시하며, 이러한 미세균열의 상대적인 밀도 차이가 $H > G > R$ 시편의 순으로 나타난다. 특히 2조의 미세균열이 수직배열하는 H 시편에서 횡변형율의 변화폭이 가장 큰 분포특성이 나타난다. 그리고 체적변형율은 이러한 수평 및 수직결의 상대적인 밀도를 반영하고 있으며, 횡변형율의 분포특성과 매우 유사하다. 방향별

Table 3. Axial, lateral and volumetric strain by each stage.

Sample No.	Axial strain(%)				Lateral strain(%)				Volumetric strain(%)			
	σ_1^c	σ_1^i	σ_1^{ii}	σ_1^f	σ_1^c	σ_1^i	σ_1^{ii}	σ_1^f	σ_1^c	σ_1^i	σ_1^{ii}	σ_1^f
R	0.48	0.59	0.73	0.95	0.01	0.03	0.08	0.55	0.45	0.52	0.56	+0.15
G	0.46	0.58	0.63	0.73	0.02	0.06	0.08	0.43	0.42	0.45	0.46	+0.14
H	0.31	0.42	0.51	0.79	0.01	0.03	0.07	1.09	0.28	0.35	0.37	+1.39
MEAN	0.41	0.53	0.62	0.82	0.01	0.04	0.07	0.69	0.38	0.44	0.46	+0.56
An(%)	41.4	32.0	35.4	26.8	100	75.0	14.2	95.6	44.7	38.6	41.3	223.2

* An(Anisotropy coefficient):Max - Min / Mean, Axial strain:(-), Lateral strain:(+), Volumetric strain:(-), +: dilation.

미세균열의 밀도(ρ)는 리프트 1(0.79) > 그레이 1(0.63) > 하드웨이 1(0.09)의 순서로 된다(Fig. 1). 상기한 축변형율-횡변형율 관계도에서 할선 및 접선 포아송비를 구할 수가 있으나 할선 포아송비의 산출이 용이하다. 포아송비에 대한 분석 결과는 다음 란에서 기술코저 한다.

한편 포천화강암의 축변형율, 횡변형율 및 체적변형율에 대한 4 단계별 강도수준에서의 이방성 계수(Anisotropy coefficient : Max - Min / Mean)를 구하고(Table 3), 그 변화 양상을 단계별로 도시하였다(Fig. 6). 축변형율에서는 선재균열 압축구간인 I 단계에서 급격한 증가 추세, II 단계에서는 감소 추세, III 단계에서는 증가 추세, IV 단계에서 다시 미약한 감소 추세가 나타난다. 횡변형율에서는 I 단계에서는 급격한 증가 추세, II~III 단계에서는 급격한 감소 추세, IV 단계에서 다시 급격한 증가 추세에 있다. 체적변형율에서는 I~III 단계의 변화양상이 축변형율의 경우와 유사하나, 불안정 균열전과구간인 IV 단계에서 급격한 증가 추세를 보여 축변형율 및 횡변형율의 경우보다 변화폭이 가장 큰 분포특성을 나타내고 있다.

포아송비의 변화

결의 변형은 암체가 갖는 결함(microcrack)의 변형(deformation)을 말한다. 암체에 응력이 증가하면 결의 면단(microcrack plane-tip)에서는 축방향(σ_v)에 대한 축방향(σ_h)으로 인장응력이 발생하여 횡변형율(ϵ_l)은 증가한다(Gramberg, 1965; Tapponier and Brace, 1976). 특히 결의 변형에 대한 크기(magnitude)는 하중에 따른 포아송비(Poisson's ratio)를 도출함으

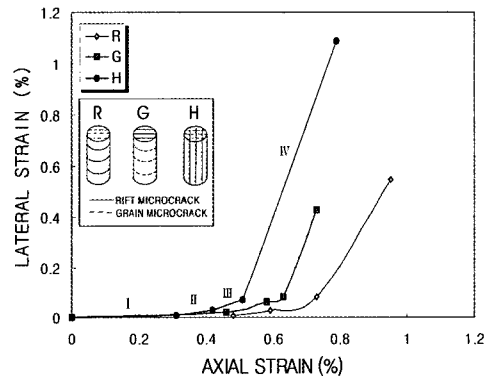


Fig. 4. Axial strain vs lateral strain curves and orientation of rift and grain microcracks in R, G and H specimens(stage I ~ IV).

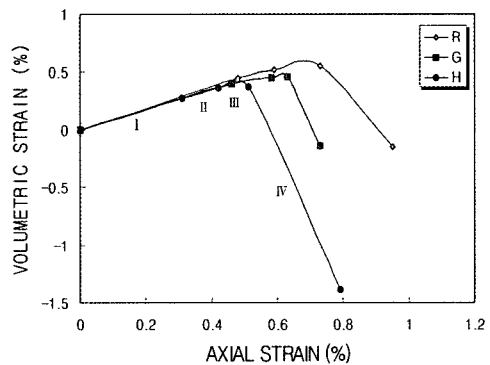


Fig. 5. Axial strain vs volumetric strain curves (stage I ~ IV).

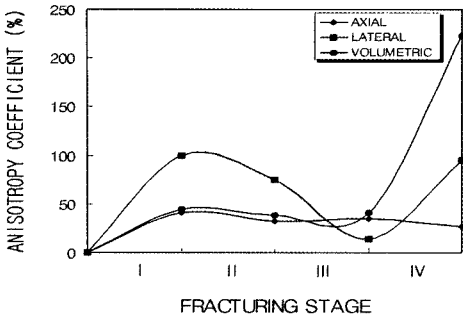


Fig. 6. Variation of anisotropy coefficient of axial, lateral and volumetric strain(%).

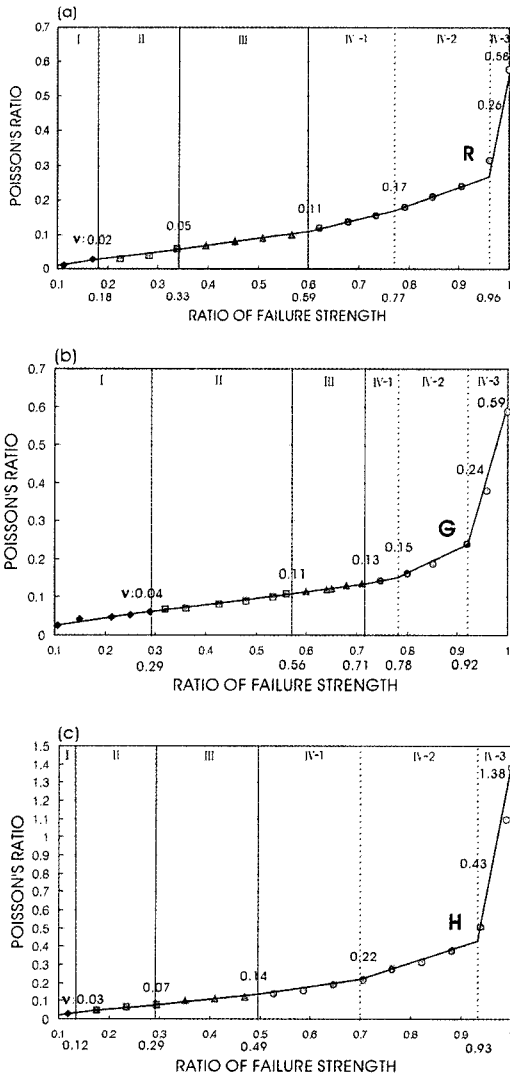


Fig. 7. Poisson's ratio (ν) for R, G and H specimens under uniaxial compression(stage I ~ IV).

로서 가능하다.

R, G 및 H 시편에 하중이 가해진 후부터 파괴시점까지의 포아송비의 변화를 도시하였다. 횡축은 파괴강도비(ratio of failure strength), 종축은 각 하중단계에서의 포아송비이다(Fig. 7). 포아송비의 변화도에서 I ~ IV 단계(Fig. 2, Table 2)로 구분하였으며, 특히 IV 단계에서는 기울기가 변화하는 변곡점(diverging point)을 기준으로 하여 IV-1, IV-2 및 IV-3 단계로 세분하였다. R, G 및 H 시편의 각 단계별 파괴강도비를 살펴 보면 IV-1 단계는 0.70~0.77, IV-2 단계는 0.92~0.96로 각각 나타난다. Fig. 7에 제시한 관계도의 전체적인 형태를 살펴 보면, I ~ III 단계에서는 거의 직선에 유사한 형태를 취하며, IV-1 및 IV-2 단계에서 기울기가 점차 증가하여 최종 단계인 IV-3 단계에서 급격한 기울기의 변화를 나타내고 있다. 이러한 기울기의 변화 양상은 R, G 및 H 시편에서 거의 유사하다.

R, G 및 H 시편의 단계별 포아송비는 I 단계(σ_1^I)에서 0.02~0.04, II 단계(σ_1^{II})에서 0.05~0.10의 범위이다. 그러나 III 단계(σ_1^{III})에서는 H(0.14) > G(0.13) > R(0.11) 시편의 순으로 되며 포아송비는 단계별로 점차 증가한다. 한편 IV 단계에서 세분한 IV-1, IV-2 및 IV-3 단계에서의 포아송비는 R 및 G 시편에 비하여 H 시편에서 가장 높게 나타나고, 특히 IV-3 단계에서는 0.5를 초과하여 비탄성 구간으로 분명히 구분되고 있다. IV-2 단계 내에서의 포아송비의 변화폭은 H(0.21) > R 및 G(0.09), 특히 IV-3 단계에서 가장 뚜렷한 차이를 보이고 있다.

R, G 및 H 시편의 관계도(Fig. 7)를 동일한 횡축 및 종축에 표시하여 분포양상을 상호 비교하였다(Fig. 8). H 시편은 R 및 G 시편에 비하여 하중증가에 따라 포아송비가 크게 증가한 형태를 보인다. G 시편은 전반적으로 R 시편에 비하여 하중증가에 따라 포아송비가 다소 증가한다. 파괴강도비 약 0.6에서 변곡점을 형성하여 R 시편에 비하여 다소 감소 추세이나, 파괴강도비 약 0.93에서 다시 증가한다. 따라서 전체적인 포아송비의 증가추세는 H > G > R 시편의 순으로 나타난다. 미세균열이 하중방향과 평행하게 배열하면 미세균열의 틈은 열려서 보다 높은 횡변형율과 포아송비를 보이며, 이러한 이유로 응력이 높아질수록 포아송비도 증가한다(Lama and Vutukuri, 1978). 비등방 불균일 암석은 포아송비가 하나의 값이 아닌 압력에 따라 다양하게 변하는 압력의 함수관계에 있다(정태중, 1996). 그러나 포아송비가 거의 선형으로 완만히 증가하는 탄성 구간과 다차 함수형으로 급격히 증가하는 비탄성 구간으로 구분되며, 이러한 비탄성 구간의 값

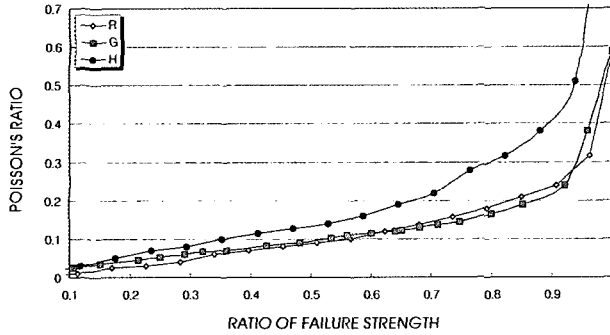


Fig. 8. Relationship between ratio of failure strength and Poisson's ratio.

은 포아송비로서의 가치가 없음을 알 수 있다(Fig. 8).

이러한 시편별 포아송비의 변화 차이는 압축하중과 평행하게 배열하는 미세균열의 밀도차(Fig. 1)에 의한 횡방향으로의 상대적인 쪼개짐, 즉 파열성을 지시한다. R 시편에서는 그레인 2($\rho:0.13$), G 시편에서는 리프트 2($\rho:0.62$), H 시편에서는 리프트 1($\rho:0.79$) 및 그레인 1($\rho:0.63$)이 각각 압축하중과 평행하게 배열하며, 상대적으로 밀도가 클수록 포아송비의 변화가 크게 나타난다.

한편 일축압축 하에서 새로이 발생하는 미세균열은 하중 축의 방향과 10° 이내에서 배열하며(Kranz, 1983), 특히 IV-3 단계에서는 이러한 미세균열의 발생과 더불어 기존 미세균열의 성장이 급속히 진행되어 암석의 파열성을 가속화시키는 역할을 한다.

응력-체적변형을 방정식

사암의 응력-체적변형을 곡선에서 각 단계별로 방정식을 도출, 파괴과정을 정량화한 사례(Bordia, 1972)가 있으며, 본 연구에서도 이와 같은 방법론을 적용하여 포천화강암의 시험결과에 대한 분석을 시도하였다.

응력-체적변형을 곡선(Fig. 2)에서 선형 체적변형을 직선(linear volumetric strain line)인 ab를 체적변형을 축과 연결시킬 때 oa의 길이는 암석내부 선재균열의 공극률(Brace and Paulding, 1966)이며, I 단계에서

$$\epsilon_v = \epsilon_v^e - \epsilon_v^o \tag{2}$$

여기서 ϵ_v^e 는 선형 체적변형을(linear volumetric strain), ϵ_v^o 는 축응력($0 \leq \sigma_1 \leq \sigma_1^c$)의 증가와 비례하

여 선재균열이 압축되어 감소하는 체적의 압축변형을(volumetric compacting strain)이다. 선형 체적변형을 ϵ_v^o 는

$$\epsilon_v^o = (\sigma_1 / K) + a \tag{3}$$

여기서 K는 선형 변형선(linear deformation line) ab의 기울기이다(Bordia, 1972). I 단계에서 임의의 축 응력을 σ_1 이라고 할 때, 소위 응력증분(stress increment, $(\sigma_1^c - \sigma_1) / \sigma_1^c$)과 ϵ_v^o 사이에는 지수함수로 표시될 수 있다.

$$\epsilon_v^o = a [(\sigma_1^c - \sigma_1) / \sigma_1^c]^n \tag{4}$$

여기서 $\sigma_1 = 0$ 일때, $\epsilon_v^o = a$ 이므로 a는 선재균열의 공극률, n은 압축지수(compaction exponent)로 사용될 수 있다(Bordia, 1972).

식 (3)과 (4)을 식(2)에 대입하면 구역 I에서의 체적 변형을 방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$\epsilon_v = [(\sigma_1 / K) + a] - a [(\sigma_1^c - \sigma_1) / \sigma_1^c]^n \tag{5}$$

$(0 \leq \sigma_1 \leq \sigma_1^c)$

II 단계에서의 $\epsilon_v^o = 0$ 이므로 체적변형을 방정식은 다음과 같이 간단히 표시된다.

$$\epsilon_v = \epsilon_v^e = (\sigma_1 / K) + a \quad (\sigma_1^c \leq \sigma_1 \leq \sigma_1^b) \tag{6}$$

III 및 IV 단계에서의 체적변형을 방정식은 다음과 같다.

$$\epsilon_v = \epsilon_v^e - \epsilon_v^{mc} \quad (7)$$

여기서 ϵ_v^{mc} 는 미세균열에 의한 체적변형율(volumetric microcrack strain)이다.

III 및 IV 단계에서 응력증분($(\sigma_1 - \sigma_1^i) / \sigma_1^i$)에 대한 균열전파에 의한 체적변형율 방정식은 다음과 같다(Brady, 1970).

$$\epsilon_v^{mc} = Q [(\sigma_1 - \sigma_1^i) / \sigma_1^i]^m \quad (8)$$

여기서 Q는 미세균열작용(microcracking) 또는 체적팽창(dilatancy) 상수, m은 미세균열의 부피변형율 경화지수(volumetric microcrack strain hardening exponent)로 각각 정의(Brady, 1970)된다. III 및 IV 단계에서의 체적변형율의 방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$\epsilon_v = [(\sigma_1 / K) + a] - Q [(\sigma_1 - \sigma_1^i) / \sigma_1^i]^m \quad (9)$$

$(\sigma_1^i \leq \sigma_1 \leq \sigma_1^f)$

한편 I 단계의 방정식 (4) 그리고 III 및 IV 단계의 방정식 (8)에서는 a 및 n 그리고 Q 및 m의 상수 및 지수가 각각 존재한다. 이 연구에서는 특히 부피변형율-응력증분 상관도(Fig. 9)에서 이들 상수 및 지수의 값(Table 4)을 도출, 미세균열과 관련된 단계별 변형과정의 정량화를 통하여 각 시편별 변형특성을 상호 비교하였다.

I 단계의 선재균열의 공극률($a, 10^{-3}$)은 압축변형율(ϵ_v^{max})을 의미하며(Fig. 2), 화강암 내부에 발달하는 결의 부피를 대변한다. 선재균열의 공극률은 시험(2.32~3.82, 10^{-3}) 및 상관식(1.78~2.58, 10^{-3})에서 구한 값이 모두 $R > G > H$ 시편의 순으로 되며, rift microcrack 및 grain microcrack 간의 상대적인 부피차이를 보여주는 지시자로 나타난다. 시편간의 산정된 이방성 계수는 35.2~47.3%에 이른다(Table 4).

한편 선재균열의 공극률은 선재균열 압축구간(I 단계)에서 응력 증가와 함께 감소하며, 특히 응력의 초기단계에서 변곡점(diverging point)을 형성하여 기울기가 급격히 감소하는 특성이 나타난다. 3개 곡선의 전체적인 기울기는 상호 유사하다(Fig.10). 이와 같은 암석의 선재균열의 양과 관련된 국내의 연구사례(Walsh, 1965; Walsh and Brace, 1966; 김영기 등, 1992)를 많이 볼 수가 있다.

I 단계의 압축지수(n)는 선재균열의 공극률(a)과 동일하게 $R > G > H$ 시편의 순으로 되며, 압축지수가

크다는 것은 I 단계에서 응력증분($(\sigma_1^e - \sigma_1) / \sigma_1^e$)-체적의 압축변형율(ϵ_v^e) 곡선의 구배가 크고 응력증분에 대한 압축이 상대적으로 많이 되었음을 의미한다. 압축지수는 1.99~3.69의 범위이며, 산정된 이방성 계수는 60.2%에 이른다(Table 4). 압축지수는 선재균열의 공극률과 함께 시편 내부에 발달하는 결의 상대적인 차이를 잘 반영하고 있다.

체적팽창 상수(Q, 10^{-3})는 선재균열의 공극률과 개념상 상반되는 상수이다. 체적팽창 상수는 III 단계에서는 선재균열의 공극률과 동일하게 $R(2.50) > G(1.20) > H(0.63)$ 시편의 순서를 보인다. 그러나 IV 단계에서는 급변하여 $G(3564.3) > H(551.4) > R(378.1)$ 의 순으로 되며, 특히 불규칙한 잠재결합에 의한 G 시편이 가장 높다. 산정된 이방성 계수는 III 단계(129.8%) < IV 단계(212.7%)로 되어 선재균열의 공극률의 이방성 계수(35.2%)보다 크게 나타난다(Table 4).

미세균열의 부피변형율 경화지수(이하 경화지수, m)는 압축지수와 개념상 상반되는 상수로서, 경화지수가 클수록 응력증분($(\sigma_1 - \sigma_1^i) / \sigma_1^i$)-체적변형율(ϵ_v^{mc})의 곡선구배가 크고 응력증분에 대한 체적팽창이 상대적으로 큼을 의미한다. 경화지수는 III 단계에서는 $R(1.86) > G(0.94) > H(0.75)$ 시편의 순서를 보이나, IV 단계에서는 압축하중에 평행 배열하는 2조의 미세균열이 발달하는 H 시편(10.74)이 가장 높다. 경화지수의 이방성 계수(32.5~94.0%)는 I 단계의 압축지수

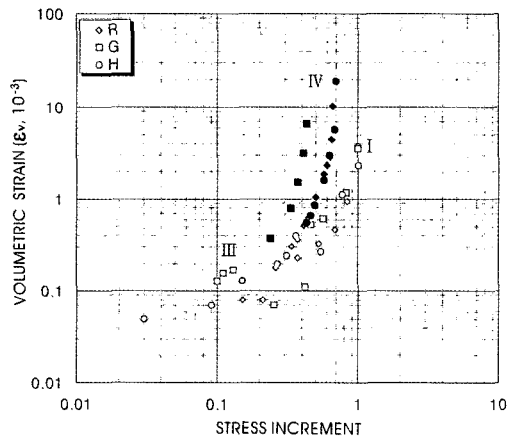
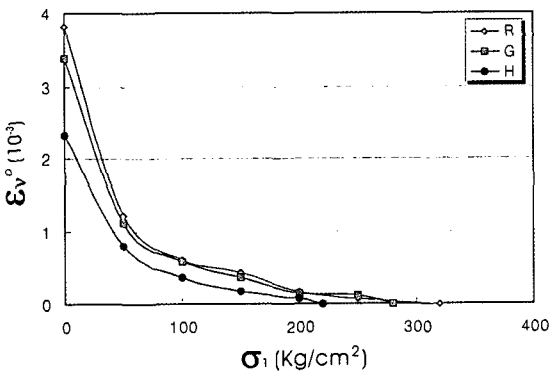


Fig. 9. Variation of volumetric strain and stress increment. Stage I: $\epsilon_v^e - (\sigma_1^e - \sigma_1) / \sigma_1^e$, Stage III and IV: $\epsilon_v^{mc} - (\sigma_1 - \sigma_1^i) / \sigma_1^i$, Symbols of strength and volumetric strain are as same in Fig. 2.

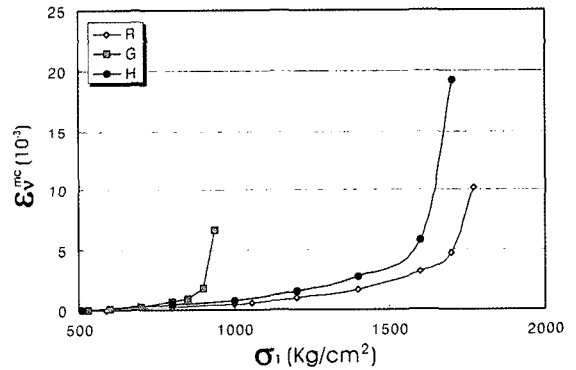
Table 4. Characteristic values of stress increment-volumetric strain equation.

Stage	I				III			IV				
	$\epsilon_v^o = a[(\sigma_1^c - \sigma_1)/\sigma_1]^n$				$\epsilon_v^{mc} = Q[(\sigma_1 - \sigma_1^i)/\sigma_1]^m$							
Value	a [*] (10 ⁻³)	a (10 ⁻³)	n	r	Q (10 ⁻³)	m	r	Q (10 ⁻³)	m	ϵ_v^{mcf} (10 ⁻³)	r	ϵ_v^{mcf} (10 ⁻³)
R	3.82	2.58	3.69	0.89	2.50	1.86	0.98	378.1	9.81	6.41	0.87	10.25
G	3.38	2.46	2.79	0.99	1.20	0.94	0.89	3564.3	7.68	5.45	0.97	6.68
H	2.32	1.78	1.99	0.99	0.63	0.75	0.95	551.4	10.74	11.96	0.92	19.24
MEAN	3.17	2.27	2.82	0.95	1.44	1.18	0.94	1497.9	9.41	7.94	0.92	12.0
An(%)	47.3	35.2	60.2	10.5	129.8	94.0	9.5	212.7	32.5	69.8	10.8	104.6

*: Measured value, r: Coefficient of correlation, R, G and H: Sample No., Symbols of value and An are as same in Fig. 2 and Table 3, respectively.



R : $\epsilon_v^o = 3.54e^{-0.018\sigma_1}$ r=0.99
 G : $\epsilon_v^o = 3.12e^{-0.017\sigma_1}$ r=0.98
 H : $\epsilon_v^o = 2.21e^{-0.018\sigma_1}$ r=0.99



R : $\epsilon_v^{mc} = 0.009e^{0.004\sigma_1}$ r=0.99
 G : $\epsilon_v^{mc} = 0.0001e^{0.011\sigma_1}$ r=0.95
 H : $\epsilon_v^{mc} = 0.01e^{0.004\sigma_1}$ r=0.99

Fig. 10. Relationship between volumetric compacting strain(ϵ_v^o) and axial stress(σ_1) in microcrack closure region(stage I).

Fig. 11. Relationship between volumetric microcrack strain(ϵ_v^{mc}) and axial stress(σ_1) in stable and unstable microcrack propagation region(stage III~IV).

(60.2%)보다 높다(Table 4).

과괴강도(σ_1^c)때의 미세균열의 임계 체적변형률 (critical volumetric microcrack strain, ϵ_v^{mcf} , 10⁻³)은 H 시편(19.24)에서 가장 높게 나타나며, 시편 내부에 발달하는 2종의 rift microcrack 및 grain microcrack이

압축응력과 평행배열하여 R 및 G 시편에 비하여 상대적으로 급격한 체적팽창을 하였음을 의미한다. 이와 같은 현상은 IV 단계의 경화지수의 경우와 동일하다 (Table 4).

한편 팽창된 체적변형율(ϵ_v^{inc})은 안정~불안정 균열전과구간(Ⅲ 및 Ⅳ 단계)에서 응력 증가와 함께 증가하며, 특히 불안정 균열 전과구간(Ⅳ 단계)의 후기단계에서 변곡점을 형성하여 기울기가 급격히 증가하는 특성이 나타난다(Fig. 11).

결 론

이 연구에서는 화강암의 잠재결함인 미세한 틈, 즉 암석이 갖는 고유의 결에 대한 역학적 특성을 규명하기 위한 것이다. 국내에서 결의 발달이 양호한 포천화강암을 대상으로 하여 미세균열의 분포성과 관련된 4 단계(I~Ⅳ)별 강도특성 및 변형성에 관하여 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

단계별 강도특성을 보면, $R > G > H$ 시편 순의 경향성을 보여 수직배열하는 미세균열의 발달정도에 영향을 받고, 일부는 Ⅲ~Ⅳ 단계에서 잠재결함의 성장 및 가속화로 인하여 이러한 규칙성이 결여된다.

축변형률 및 체적변형율은 I~Ⅲ 단계에서는 $R > G > H$ 시편의 순으로 되며, Ⅳ 단계에서는 H 시편에서 횡변형률 및 체적변형률의 급격한 변화가 나타난다. 이중 부피변형률의 이방성의 변화 폭이 가장 크다. 특히 축변형률-횡변형률 및 체적변형률 관계도에서 시편별로 순차적인 배열을 하여, 수직 및 수평배열하는 미세균열의 밀도와 상관성이 있음을 보여 주고 있다.

파괴강도비-포아송비의 관계도에서 H 시편의 포아송비가 가장 높은 분포특성을 보이며 G 시편, R 시편의 순으로 감소한다. 한편 분포곡선은 I~Ⅲ 단계에서 거의 선형이며, 특히 Ⅳ-3 단계 초기에 급격한 변화를 보여 포아송비의 변화폭은 $H > G > R$ 시편의 순으로 일관성있게 감소한다.

응력증분-체적방정식에서 구한 상수 및 지수는 미세균열의 상대적인 발달정도와 배열성을 잘 반영하여 I 단계에서는 수평 결의 압축성, Ⅲ~Ⅳ 단계에서는 수직 결의 성장 및 가속화를 정량적으로 잘 대변하고 있다.

사 사

이 연구는 한국지질자원연구원 지하수지열연구부에서 수행한 기본사업 지열자원 부존특성규명 및 활용기술연구와 관련하여 수행되었습니다.

참고문헌

- 김기주, 이정인, 김재극, 1985, 삼축압축하에서 암석의 연약면이 파괴강도에 미치는 영향, 대한광산학회지, Vol. 22, 90-97.
- 김재극, 1971, 단축압축하에서 이방성암석의 미세균열 발달과 강도에 미치는 영향, 대한광산학회지, Vol. 8, 151-170.
- 김영기, 고인석, 정태중, 이용태, 1992, 왜관부근 백악기 사암의 결구 및 역학적 특성, 대한지질공학회, Vol. 1, 27-30.
- 박덕원, 서용석, 정교철, 김영기, 2001, 주라기 화강암에 발달하는 결의 현미경학적 분석, 지질공학, 11, 51-62.
- 백환조, 김덕현, 최성범, 1998, 암석의 미세균열의 발달과 분포의 예측방법에 관한 연구, 터널과 지하공간, 8, 226-233.
- 서용석, 박덕원, 2003, 국내 주라기 화강암의 역학적 이방성, 지질공학, 13, 2, 257-266.
- 徐庸碩, 清水隆文, 市川康明, 1999, 마이크로クラックの發生・進展に起因した結晶質岩の應力緩和現象に關する水浸一軸試驗, 材料, 48, 1255-1262.
- 이병대, 장보안, 윤현수, 이한영, 진명식, 1999, 문경지역에 분포하는 화강암의 미세균열 발달특성, 암석학회지, 8, 1, 24-33.
- 이상은, 조상호, 양형식, 박홍민, 1999, 조사선을 이용한 화강암의 미세 불연속면 분포성상 평가, 터널과 지하공간, 9, 364-372.
- 이정인, 1974, 삼축압축하에서 암석의 체적변형도 곡선에 의한 변형거동에 관하여, 대한광산학회지, Vol. 11, 122-137.
- 장보안, 김재동, 1995, 압축피로하중에 의한 반려암, 사암 및 대리암에서의 미세균열 발달, 터널과 지하공간, 5, 240-250.
- 장보안, 오선환, 2001, 포천화강암내에 발달한 결의 역학적 이방성과 미세균열의 상관성, 지질공학, 11, 2, 191-203.
- 정태중, 1996, 백악기 사암과 셰일에 대한 포아송비의 변화, 지질공학, 6, 2, 103-110.
- 최병렬, 1981, 등방성 응회암질 사암의 비선형적 변형, 지질학회지, Vol. 17, 250-256.
- Bieniawski, Z. T., 1968, Mechanism of brittle fracture of rock, Part 1-Part 3., Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol 4, 395-430.

- Bordia, S. K., 1972, Complete stress-volumetric strain equation for brittle rock up to strength failure, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol 9, 17-24.
- Brace W. F. and Paulding B. W., 1966, Dilatancy in the fracture of crystalline rocks, *J. Geophys. Res.*, 66, 3939-3953.
- Brady, B. T., 1970, A mechanical equation of state for brittle rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol 9, 385-421.
- Donath, F. A., 1964, Strength variation and deformational behavior in anisotropic rock, In: *State of Stress in the earth's crust*, Judd, W. R.(ed.), New York: American Elsevier, 281-297.
- Gramberg, J., 1965, Axial cleavage fracture, *Eng. Geol.*, 1(1), 31-72.
- Kranz, R. L., 1983, Microcrack in rocks: a review, *Tectonophysics*, 100:449-480.
- Lama, R. M. and Vutukuri, V. S., 1978, *Handbook on mechanical properties of rocks*, Vol II, Trans Tech publications, 117-148.
- Lee, S. E., S. H. Cho, Y. S. Seo, H. S. Yang, H. M. Park, 2001, The effect of microcracks on the mechanical anisotropy of granite, *Materials Science Research International*, 7, 7-13.
- Martin, C. and Chandler, N., 1994, The progressive fracture of Lac du Bonnet granite, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 31, 643-659.
- 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.
- Segall, P., 1984, Formation and growth of extensional fracture sets, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 95, 454-462.
- Tapponnier, P. and Brace, W., 1976, Development of stress-induced microcracks in Westerly granite, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 13, 103-112.
- Walsh, J. B., 1965, The effect of cracks on the uniaxial elastic compression of rocks, *J. Geophys. Res.*, Vol. 70, 319-411.
- Walsh, J. B., and Brace W. F., 1966, Elasticity of rock: A review of some recent theoretical studies, *Rock Mech. Eng. Geol.* 4, 283-296.
- Wawersik, W. and Fairhurst, C., 1970, A study of brittle rock fracture in laboratory compression experiments, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 7, 561-575.

투 고 일	2005년 7월 29일
심 사 일	2005년 7월 30일
심사완료일	2005년 9월 5일

박덕원
 한국지질자원연구원 지하수지열연구부
 305-350, 대전시 유성구 가정동 30
 Tel: 042-868-3123
 Fax: 042-864-9404
 E-mail: pdw@kigam.re.kr