

국내 주라기 화강암의 역학적 이방성

Mechanical Anisotropy of Jurassic Granites in Korea

서 용 석 (Yong-Seok Seo)*

충북대학교 지구환경과학과 · 기초과학연구소

박 덕 원 (Deok-Won Park)

한국지질자원연구원 지하수지열연구부

요약 / ABSTRACT

본 연구에서는 포천, 거창, 합천 지역에 분포하는 주라기 화강암을 대상으로 미세균열 분포특성이 화강암의 물성과 역학적 이방성에 미치는 영향에 대하여 관찰하였다. 15종의 방향성 공시체를 대상으로 한 물성시험결과를 살펴보면 공극률과 흡수율은 대체로 비례하는 것으로 측정되었다. 또한 이들 공시체를 대상으로 한 P파 속도의 분포특성을 살펴보면 hardway에 수직인 H축 방향에서 고속도이고, rift에 수직인 R축 방향에서 저속도를 보인다. 3축에 평행하게 제작된 암석 공시체를 대상으로 압축강도시험을 실시하였으며, 강도는 미세균열들의 방향별 발달정도와 밀접한 관계를 보이고 있다.

주요어 : 화강암, 미세균열, P-파 속도, 역학적 이방성

Jurassic granites of three sites, Pocheon, Geochang and Habcheon, were tested to investigate the effect of microcracks on physical and mechanical properties of the granites. Fifteen oriented core specimens were used for the physical property test. The test result shows that porosity is almost proportioned to water content. P-wave velocity is the highest in the direction of axis 'H', intersection of two major microcrack sets and the lowest in the axis 'R', normal to the rift plane. Compressional strength tests were carried out for each core specimen taken parallel with axes 'R', 'G' and 'H', measuring strains. The results revealed a strong correlation between microcrack orientation and other mechanical properties such as rock strength.

Key Words : granite, microcrack, P-wave velocity, mechanical anisotropy

서 론

암반은 일반적으로 구조물의 기초로 이용되지

만, 비교적 깊은 심도의 지하공간 이용이 활발해지면서 도심 지하상가, 방사성 폐기물 처분장 및 유류/가스저장 공동 등과 같이 그 자체가 구조물

* Corresponding author: ysseo@cbu.ac.kr

로서 이용되는 사례가 증가하고 있다. 이러한 경우 경제적이고 안전한 구조물의 설계를 위해서는 암반은 물론 암반을 구성하고 있는 암석의 역학적 특성을 상세히 파악할 필요가 있다.

화강암은 많은 경우 암석시험 시 등방성 재료로 취급되어 왔다. 그러나 많은 화강암질 암석의 채석장에서는 화강암질 암석의 역학적 이방성을 고려하여 이를 채석에 이용하고 있다. 화강암의 이방성을 결정하는 주요 구조는 암석 내에 선택적으로 배향하고 있는 미세균열들이다(徐庸碩 등, 1999; 백환조 등, 1998; 이상은 등, 1999; Lee et al., 2001). 암석의 이방성을 고려하지 않고 시험이나 해석을 수행할 경우 분산이 큰 결과를 얻게 된다. 그러나 이방성을 고려하면 분산을 감소시키는 것이 가능하게 되어, 암석의 함수나 열에 의한 역학적 특성 변화를 보다 정밀하게 연구할 수 있게 된다. 또한 미세균열과 암반의 거시적인 거동과의 관련성 연구(徐庸碩 등, 1999; 백환조 등; 장보안 등, 1995)도 가능하게 된다. 화강암의 역학적 이방성을 초래하는 미세균열과 이에 관한 많은 연구에 대해서는 본 논문의 시리즈에 해당하는 논문(박덕원 등, 2001)에 상세히 논의하였다.

본 연구에서는 화강암의 역학적 이방성을 밝히기 위하여 화강암의 물성시험, 탄성과 속도 시험 및 일축·삼축·인장 시험을 수행하여 그 결과를 방향별로 비교 분석하였다. 연구대상 암석은 채석작업시 이용되는 결의 발달 정도를 고려하여 포천화강암(결의 발달정도 양호), 거창화강암(결의 발달정도 다소 양호), 합천화강암(결의 발달정도 다소 미약)으로 하였다.

공시체 제작

본 연구의 대상이 되는 화강암체의 암석학적 특징은 전술한 박덕원 등(2001)의 논문에서 상세히 기재하였다. 본 연구의 역학시험을 위하여 3개 채석장에서 방향이 기재된 암석 블록을 채취하여 두 종류의 코어를 제작하였다. 먼저 물성 및 탄성과 속도시험을 위하여 각 결에 평행하게 BX 코어(3cm×6cm)를 제작하였고, 압축시험을 위하여 NX 코어(5.4cm×10.8cm)를 제작하였다. 특히 탄성과

속도시험을 위하여 Fig. 1과 같이 결의 축을 기준으로 30° 간격으로 총 15종류의 코어를 제작하였고, 물성 및 압축시험을 위해서는 결에 평행하게 3종류의 코어(1, 4, 7번 공시체)를 제작하였다. Fig. 1에 사용된 용어를 설명하면, 채석장에서는 결이 우세하게 발달한 순서대로 Rift, Grain, Hardway라고 부르고 있으며 R은 Rift, G는 Grain, H는 Hardway 면에 수직인 축을 각각 나타낸 말이다.

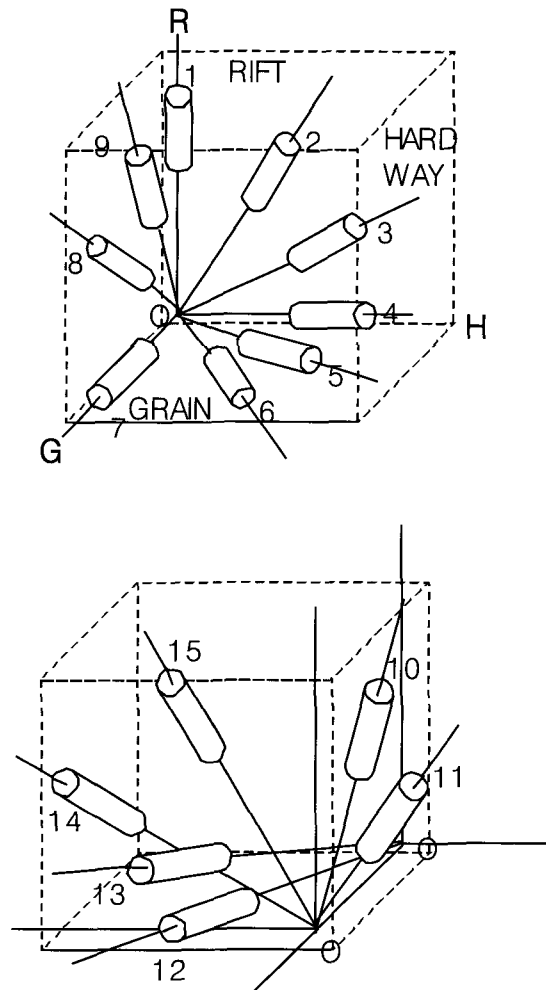


Fig. 1. Reference co-ordinates and specimen orientations. Reference co-ordinates R, G and H coincide with poles to the quarry planes.

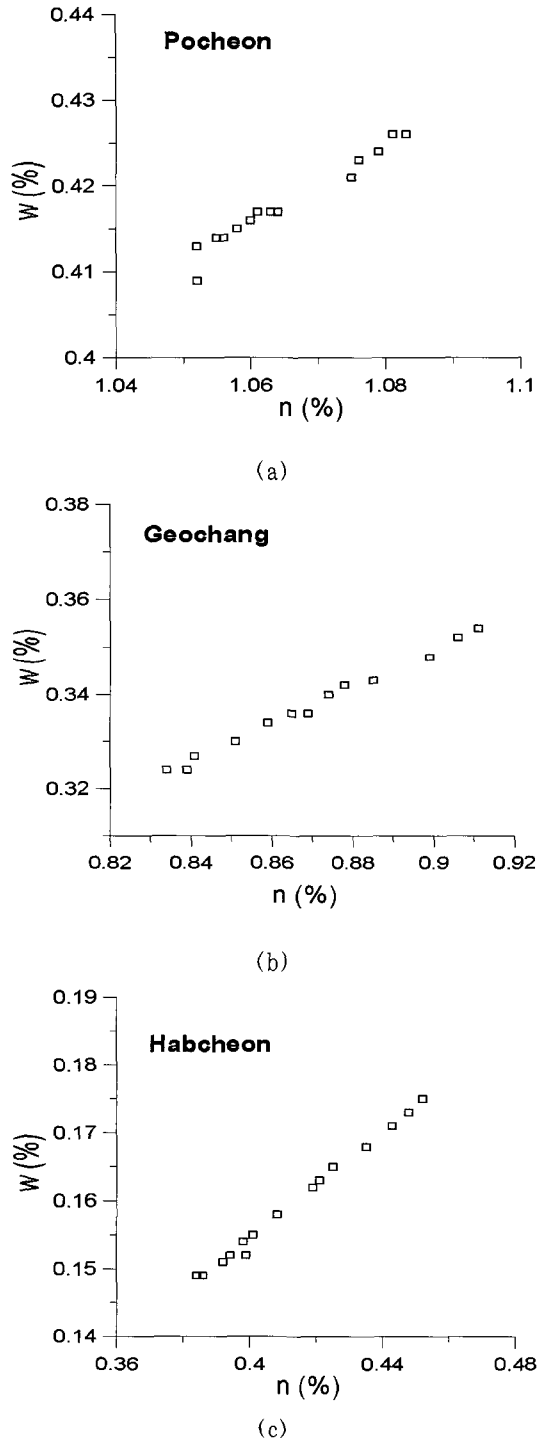


Fig. 2. Relationship between water absorption (w) and porosity (n) of the granites.

시험 결과 및 고찰

물성시험

물성의 측정에서는 단위체적당 중량(ρ), 공극률(n) 및 흡수율(w)을 측정하였고, 측정 공시체는 BX 코어 15개를 사용하였다. 이들의 측정 결과를 Fig. 2에 나타내었다. ρ 는 2.59~2.61 g/cm^3 의 범위에서 분포하며, ρ 의 평균값은 포천 화강암이 2.59 g/cm^3 , 거창화강암이 2.61 g/cm^3 , 합천화강암이 2.61 g/cm^3 이다. 이들 3개 화강암 모두 거의 비슷한 단위체적당 중량을 나타내고 있으나, 미세하게나마 결의 발달정도가 반영된 결과로 보인다. n 은 포천화강암이 1.05~1.08% (평균 1.06%), 거창화강암이 0.83~0.91% (평균 0.87%), 합천화강암이 0.38~0.45% (평균 0.40%)의 범위에 분포하며, w 는 포천화강암이 0.40~0.42% (평균 0.41%), 거창화강암이 0.32~0.42% (평균 0.33%), 합천화강암이 0.14~0.17% (평균 0.16%)의 범위에 분포한다. 이러한 결과는 결의 발달정도가 클수록 공극률과 흡수율이 증가하는 것을 잘 보여주고 있다.

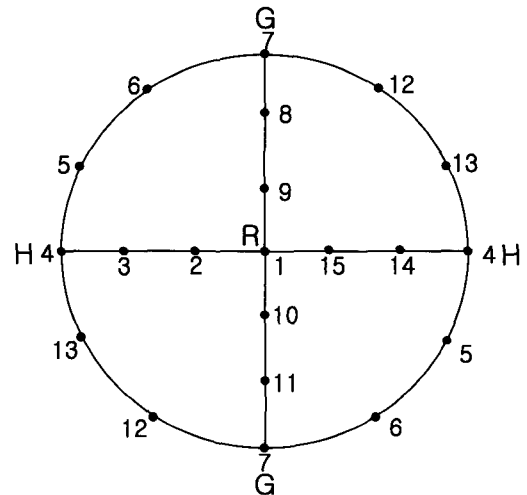


Fig. 3. Schmidt net plots for 15 rock specimen orientations.

탄성과 속도 시험

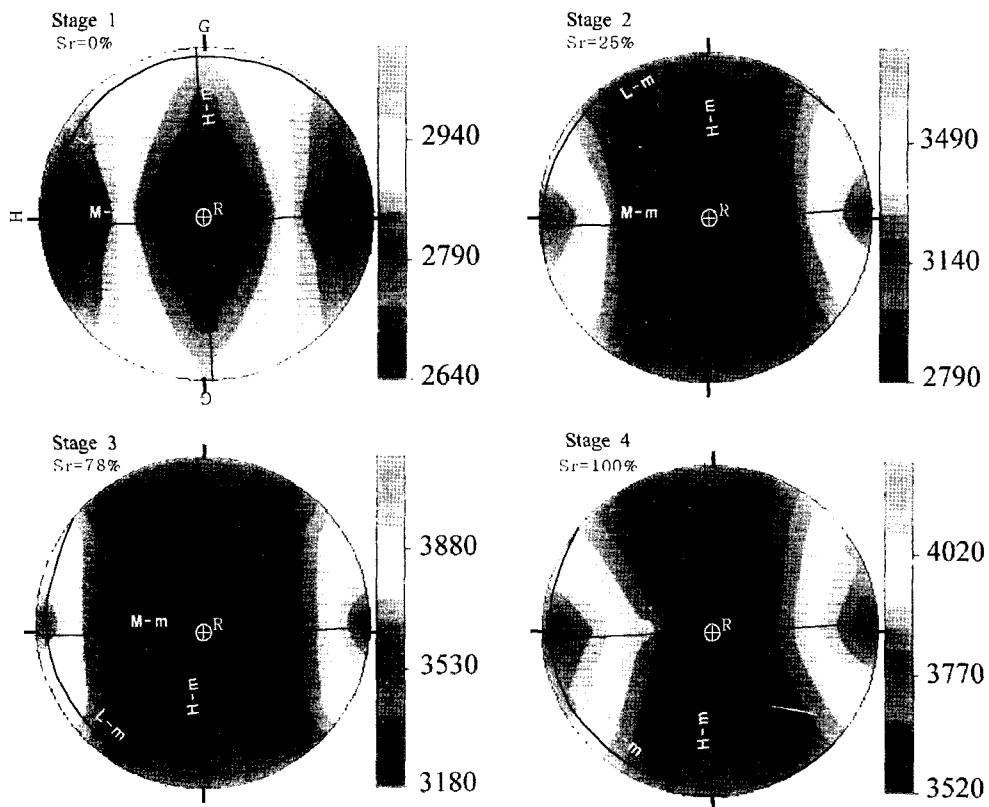
암석의 수분함량은 그 암석 내에 분포하는 균열

의 강도를 크게 다르게 하고, 그 암석의 연경도 (consistency)에 영향을 미친다(Nur et al., 1966, 신희순, 1985). 따라서 방향별 결의 발달정도를 파악하기 위하여 15개 코어(BX)를 방향별로 채취하여 탄성과 시험을 실시하였다. 측정기는 일본 OYO사의 New sonicviewer (Model 15217)를 사용하였다.

각 암석공시체에 대하여 4단계로 함수 상태를 달리 하여 P와 속도를 측정하였다. I 단계는 강제 건조, II 단계는 25~35% 함수, III 단계는 78~89% 함수, IV 단계는 완전 포화 상태의 공시체이다.

결의 분포성을 평가하기 위하여 화강암별로 15

개씩 측정된 V_p 값을 Fig. 3과 같이 슈미트넷 상에 하반기 투영하고, 등속도도를 작도한 것이 Fig. 4, 5, 6이다. 각 단계별 특징을 살펴보면 다음과 같다. I 단계에서는 Rift 면과 Grain 면이 수직 배열하는 H축이 고속도 방향, Rift 면과 Hardway 면이 수직으로 배열하는 G축이 중속도 방향, Hardway 면과 Grain 면이 수직 배열하는 R축이 저속도 방향으로 각각 나타나고, 전체적인 속도분포 형태는 사방대칭을 보인다. 포화도의 증가에 따라 점차 대칭형태는 변화하며, 이는 화강암의 균열내부에 수분이 침투하여 점차 이방성이 결여되어 가는 과정으로 해석된다. 포천화강암의



H-m : Symmetry plane of high velocity direction
 N-m : Symmetry plane of intermediate velocity direction
 L-m : Symmetry plane of low velocity direction

Fig. 4. Contoured equal-area projection of V_p (m/sec) for Pocheon granite.

국내 주라기 화강암의 역학적 이방성

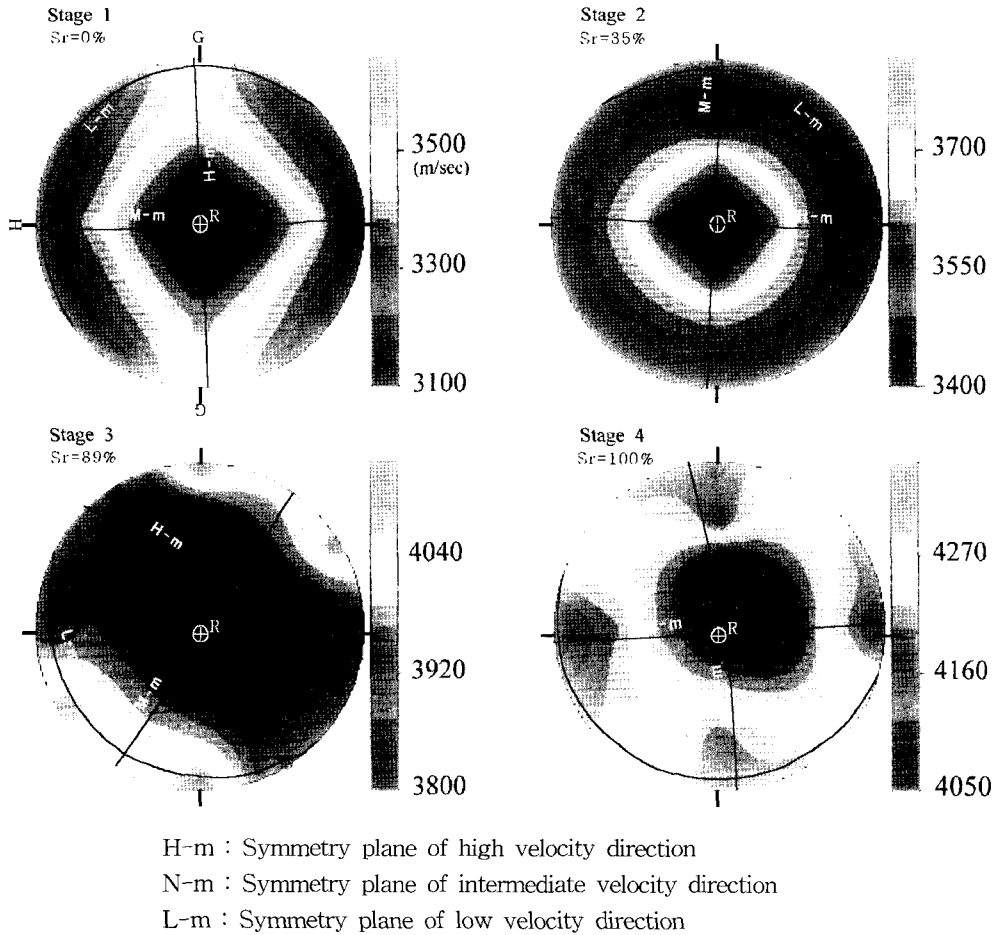
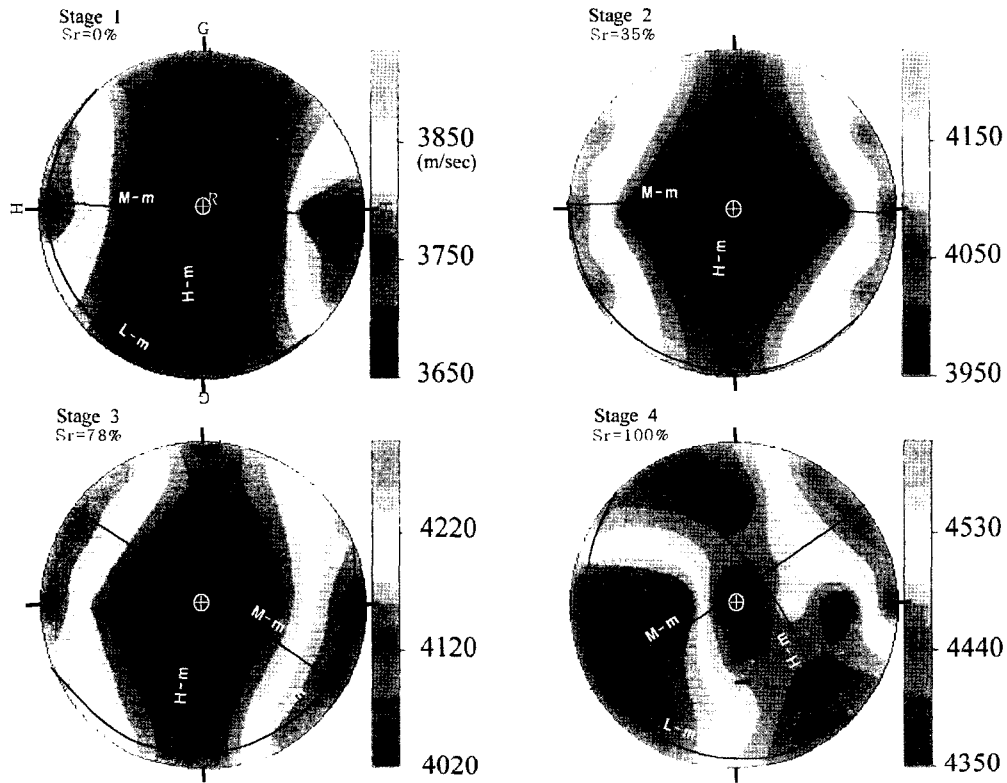


Fig. 5. Contoured equal-area projection of V_p (m/sec) for Geochang granite.

등속도도를 살펴보면, 4단계의 시험과정에서 속도 분포 형태는 모두 사방대칭으로 나타나며, 3개 대칭면 (L-m, M-m, H-m)의 방향성은 거의 변하지 않고 있다. 이와 같은 결과는 거창 및 합천화강암에 비하여 포천화강암 내부의 공극률이 많고, 또한 동일한 침수시간 동안 포화상태가 상대적으로 불량하였음을 지시한다. 거창화강암의 속도분포 형태는 1 및 2 단계에서 사방대칭으로 나타나며, 2 단계에서 저속도방향 대칭면 (L-m)의 위치는 큰 변화가 없으나, 중속도방향 대칭면 (M-m)과 고속도방향 대칭면 (H-m)이 거의 90°회전하며 3단계에서 삼사대칭에 가까운 형태를 보인다. 합천화강

암의 속도분포 형태는 1 및 2단계에서 공허 사방대칭으로 나타나며, 3 및 4단계에서 중속도방향 대칭면과 고속도방향 대칭면 (H-m)이 회전하여 삼사대칭에 가까운 형태를 보인다 (Fig. 4, 5, 6).

각 암석의 균열 분포율 즉, 이방성 계수 (anisotropy coefficient)는 $A_n = (V_{P \text{ Max}} - V_{P \text{ Min}}) / V_{P \text{ Mean}}$ (Thill et al., 1973) 는 Table 1에서 보는 바와 같다. 각 암석에서 1단계에서 4단계로 갈수록 이방성 계수는 점차 감소하는 현상이 나타나며, 균열 분포율 (이방성 계수)을 보면 포천화강암이 26.7%, 거창화강암이 13.2%, 합천화강암이 8.1%로서 포천화강암의 균열 분포성이 크고, 합천



H-m : Symmetry plane of high velocity direction
 N-m : Symmetry plane of intermediate velocity direction
 L-m : Symmetry plane of low velocity direction

Fig. 6. Contoured equal-area projection of V_p (m/sec) for Habcheon granite.

화강암의 균열분포성이 적다는 것을 알 수 있다.

일축·삼축압축시험 및 압열인장시험

강도시험은 3종류의 화강암에 대하여 주축에 평행한 3개의 방향에서 NX 코어를 채취하여 실시하였다. 즉, P-1은 R축, P-7은 G축, P-4는 H축에 각각 평행하게 제작된 포천화강암의 공시체를 뜻한다. 강도시험으로는 일축압축시험, 인장시험 및 삼축압축시험 등이 수행되었으며, 일축압축시험 중 축방향(ϵ_1), 횡방향(ϵ_t)의 변형률이 측정되었으며, 이를 근거로 체적변형률(ϵ_v)이 계산되었다.

Table 2는 각 공시체별 강도시험의 결과를 정리한 것이다. 압축강도를 살펴보면 거창 및 합천

화강암에서 1)7)4 공시체의 순으로 강도가 큰 것으로 나타나 방향별 경향성이 뚜렷한 반면, 포천 화강암의 경우 P-7 공시체가 P-1, P-4 공시체에 비해 낮은 강도값을 보인다. 이는 포천화강암 내에 분포하고 있는 불규칙한 잠재결합의 영향으로 판단된다. 일반적으로 채석장에서는 결이 우세하게 발달한 순서대로 Rift, Grain, Hardway라고 부르고 있으며, 강도가 결의 발달 정도에 영향을 받는 점을 고려하면 거창 및 합천의 경우와 같이 1)7)4 공시체의 순으로 강도가 나타나야 하나, 포천화강암의 경우는 강도분포가 1)4)7)의 순으로 나타나고 있다. 이렇게 채석장에서의 경험적인 결의 발달순서와 강도의 차이가 보이는 예는 徐庸

국내 주라기 화강암의 역학적 이방성

Table 1. Variation of anisotropy coefficients as a function of saturation percentages.

Granite	Stage	Saturation (%)	Velocity data					
			$V_{P \text{ Max}}$ (m/sec)	$V_{P \text{ Min}}$ (m/sec)	$V_{P \text{ Max}} - V_{P \text{ Min}}$ (m/sec)	$V_{P \text{ Mean}}$ (m/sec)	A_n (%)	$A_n \text{ Mean}$ (%)
Pocheon	I	0	3138	2641	497	2898	17.1	26.7
	II	25.4	3949	2788	1161	3160	36.7	
	III	78.2	4292	3183	1109	3524	31.4	
	IV	100.0	4358	3573	785	3840	21.9	
Geochang	I	0	3803	3148	655	3471	18.9	13.2
	II	35.1	3887	3360	527	3723	14.2	
	III	89.1	4203	3783	420	3937	10.7	
	IV	100.0	4410	4007	403	4245	9	
Habcheon	I	0	3971	3618	353	3775	9.4	8.1
	II	35.3	4254	3925	329	4073	8.1	
	III	78.9	4342	4035	307	4161	7.9	
	IV	100.0	4649	4331	318	4511	7.1	

Table 2. Strength test results of core samples.

Granite	Sample No.	Uniaxial compressive strength σ_c (kg/cm ²)	Tensile strength σ_t (kg/cm ²)		Triaxial compressive strength σ_1 (kg/cm ²) (C. P. 200 kg/cm ²)
			($\theta = 90^\circ$)	($\theta = 0^\circ$)	
Pocheon	P-1	1660	67	79	3974
	P-7	885	59	71	4482
	P-4	1680	55	64	4279
	Average	1408	66		4245
Geochang	K-1	2048	96	99	4768
	K-7	1828	87	97	4544
	K-4	1690	83	88	4279
	Average	1855	92		4530
Habcheon	H-1	2260	99	121	5743
	H-7	2213	88	105	4626
	H-4	1968	83	97	5273
	Average	2147	99		5214

碩 등(1999)의 연구에서도 찾아볼 수 있다. 인장 강도는 각 면에서 공히 방향각 0°에서 낮고 방향 각 90°에서 높게 나타나며, 이와 같은 결과는 인장강도치가 결의 발달정도(결의 밀도)를 반영하는 것으로 보인다. P-7공시체는 P-1, P-4 공시체보다 일축압축강도가 낮은 반면, 삼축압축강도는 높게 나타나는데 이는 봉압의 작용에 따라 삼축압축강도에 미치는 결의 영향성이 결여됨을 지시한다. 장보안과 오선환(2001)에 의해 측정된 포천화강암의 일축압축강도를 살펴보면 R-축에 평행한 시료의 경우 평균 2127kg/cm², G-축에 평행한 경우 1825kg/cm², H축에 평행한 경우 1772kg/cm²으로 나타났다. 이는 본연구의 결과와 절대 강도 면에서 상당한 차이를 보이고 있다. 이는 시료의 성형시 발생하는 인위적인 미세균열의 발달과 시험시의 조건차, 그리고 공시체를 제작한 암석의 차이에 기인하는 것으로 판단되며, 특정암체의 역학적 특성을 문헌으로부터 참조할 때에는 대단히 신중해야 함을 잘 보여주는 예라 할 수 있다.

체적변형률

변형시험에서는 축재하 변형률(ϵ_1) 및 축재하와 직교방향의 횡변형률(ϵ_t)을 측정하였으며, 이 측정치로부터 원주형 공시체에서 일반적으로 인정되는 다음 식을 이용하여 체적변형률(ϵ_v)을 산정하였다.

$$\epsilon_v = \epsilon_1 + 2\epsilon_t \tag{1}$$

많은 연구자들(Tapponnier and Brace, 1976; Peng and Johnson, 1972, Wawersik and Fairhurst, 1970; Martin and Chandler, 1994)에 의하면 취성암석의 파괴에서 stress-strain 곡선은 일반적으로 다섯 단계로 나뉜다. 1단계에서는 미세균열의 폐합이 발생하며, 2단계는 탄성변형을 보이며, 3단계에서는 안정적으로 미세균열의 성장이 일어난다. 4단계에서는 불안정한 균열 성장단계이며, 5단계는 post-peak 거동 영역에 속한다.

본 연구에서는 일축압축시험에서 약 1단계 즉, 폐합영역 (crack closure region)까지의 체적변형률을 분석해 봄으로서 미세균열의 폐합과 관련된 결의 발달정도를 비교해 보았다. Figure 7은 폐합

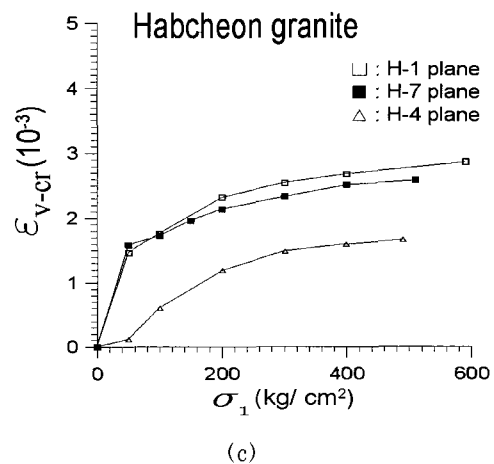
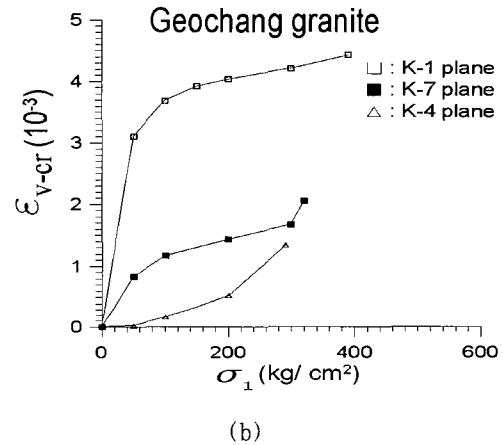
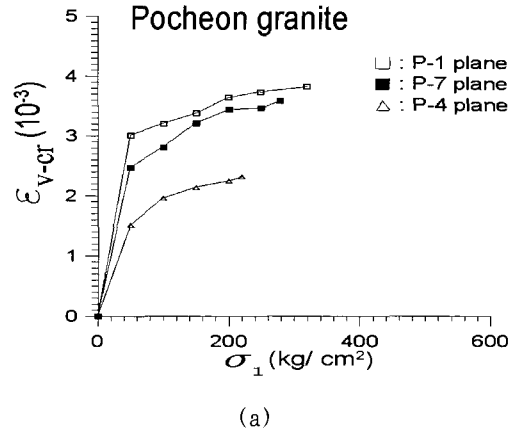


Fig. 7. Relationship between volumetric strain and axial stress in crack closure region.

영역에서 각 공시체에서의 응력에 따른 체적변형율 (ε_{v_cr}) 분포를 나타낸 것이다. 체적변형율은 결의 부피에 해당하는 값으로서 각 암석에서 공히 1) > 7) > 4 공시체의 순으로 크게 나타난다. 3개 방향의 체적변형율 평균치를 보면 결의 발달 정도와 같이 포천화강암 (3.24) > 거창화강암 (2.60) > 합천화강암 (2.37)의 순으로 나타나고 있으며, 또한 포천화강암의 기울기가 크고, 합천화강암의 기울기가 작은 것은 Rift, Grain, Hardway의 상대적인 부피차이를 반영하고 있다.

결 론

본 논문에서는 국내 화강암들 중 결의 발달 정도가 서로 상이한 포천화강암, 거창화강암, 합천화강암을 대상으로 암석의 미세균열 발달 정도와 관련된 암석의 강도특성과 변형성에 관하여 검토를 수행하였다.

함수단계별 탄성파속도 분포를 스테레오넷에 투영한 결과를 보면 대칭형태는 미세균열의 분포상과 일치하고, 두 조의 균열이 교호하는 3번 면의 수직방향으로 탄성파속도가 가장 높고, 1번 면의 수직방향에서 낮은 속도를 나타내고 있어 미세균열이 암석 결의 지배요인으로 작용하고 있음을 시사하고 있다.

각 결의 수직방향에 따른 강도는 포천화강암의 일부 결과를 제외하면 1번결 > 2번결 > 3번결 순으로 높음을 알 수 있고, 이는 인장강도에서 분명하게 나타나고 있다.

탄성변형영역에서 측정된 체적변형율의 변화를 살펴보면 저강도영역 (2단계까지)에서 일어나는 미세균열의 폐압에 영향을 받아 결의 발달 정도가 우세할수록 체적변형율이 크게 나타나고, 변화율을 도 급해짐을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- 박덕원, 서용석, 정교철, 김영기, 2001, 주라기 화강암에 발달하는 결의 현미경학적 분석, 지질공학, 11권, 51-62.
- 백환조, 김덕현, 최성범, 1998, 암석의 미세균열의 발달과 분포의 예측방법에 관한 연구, 터널과 지하공간, 8권, 226-233.
- 신희순, 1985, 암석의 탄성과 전파속도 및 동적 특성에 관한 연구, 서울대학교 박사학위논문, 45-46.
- 이상은, 조상호, 양형식, 박홍민, 1999, 조사선을 이용한 화강암의 미세 불연속면 분포성상 평가, 터널과 지하공간, 9권, 364-372.
- 장보안, 김재동, 1995, 압축피로하중에 의한 반려암, 사암 및 대리암에서의 미세균열 발달, 터널과 지하공간 5권, 240-250.
- 장보안, 오선환, 2001, 포천화강암내에 발달한 결의 역학적 이방성과 미세균열의 상관성, 지질공학, 11권, 2호, 191-203.
- 徐庸碩, 清水降文, 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.
- Lee, S.E., Cho, S.H., Seo, Y.S., Yang, H.S., and Park, H.M., 2001, The effect of microcracks on the mechanical anisotropy of granite, Materials Science Research International, v. 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., v. 31, 643-659.
- Nur, A. and Simmon, G., 1966, The effect of saturation on velocity in low porosity rocks, Earth and Planetary Science Letters, v. 7, 247-248.
- Peng, S. and Johnson, A., 1972, Crack growth and faulting in cylindrical specimens of Chelmsford granite, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., v. 9, 37-86.
- Tapponnier, P. and Brace, W., 1976, Development of stress-induced microcracks in Westerly granite, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., v. 13, 103-112.

서용석, 박덕원

Thill, T.E., Bur, T.R. and Steckley, R.C., 1973,
Velocity anisotropy in dry and saturated rock
spheres and its relation to rock fabric, Int. J.
Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., v.
10, 535-557.

Wawersik, W. and Fairhurst, C., 1970, A study of
brittle rock fracture in laboratory
compression experiments, Int. J. Rock Mech.
Min. Sci. & Geomech. Abstr., v. 7, 561-575.

투 고 일	2003년 4월 15일
심 사 일	2003년 4월 16일
심사완료일	2003년 5월 20일

서용석

충북대학교 지구환경과학과 · 기초과학연구소

361-763 충북 청주시 개신동 산48번지

Tel: 043-261-2765

Fax: 043-276-9645

E-mail: ysseo@cbu.ac.kr

박덕원

한국지질자원연구원 지하수지열연구부

305-350 대전광역시 유성구 가정동 30

유성우체국 사서함 111호

Tel: 042-868-3115