

화강암의 이방성에 따른 물리적 특성 연구

박 윤석¹⁾, 강 추원¹⁾

Study on the Physical Properties according to the Anisotropy of Granite

Yun-Seok Park and Choo-Won Kang

ABSTRACT. This study is to clarify the comparative relationship and a mechanical anisotropy of rock on the subject of granite distributed in the Namwon area. Uniaxial compressive and Brazilian strengths with respect to the horizontal and vertical axes of granite are shown the linear relation. In the case of the result of the p-wave velocity measurement, it is represented that the velocity of vertical direction is faster about 10 to 15% than other two horizontal directions. The difference between velocities is caused by a developmental pattern of microcracks distributed in rock. Moreover, this result is very consistent with the result investigated through thin sections. The proportion of uniaxial compression strength to Index of point load strength ($Is_{(50)}$) is 18~20 times in case of granite. Uniaxial compressive strength is relatively good relationship with point load strength, Schmidt hammer rebound value, and tensile strength. Point load strength of them is the best comparative relationship. It is indicated that point load test is the most useful tool to estimate uniaxial compressive strength, comparing with other experimental methods.

Key words : correlation, anisotropy, microcracks, $Is_{(50)}$

초 록. 본 연구에서는 남원지역 화강암을 대상으로 각 방향에 따른 물성간의 상관관계와 역학적 이방성을 규명하고자 하였다. 화강암의 수평, 수직축의 방향별 물성치는 일축압축강도 및 압열인장강도와 선형관계를 나타내었으며, 초음파 속도 측정 결과 수직방향은 나머지 두 수평방향 보다 약 10~15% 정도 빠르게 나타났다. 이러한 속도 차이의 원인은 주로 암석 내에 존재하는 미세균열의 발달형태에 따르는 것으로 판단되며, 이는 현미경관찰 결과와 매우 일치함을 알 수 있었다. 점하중시험에 의한 점하중강도지수($Is_{(50)}$) 측정결과, 화강암의 경우 일축압축강도와 점하중강도지수의 비는 18~20에 해당하는 것으로 나타났다. 일축압축강도와 점하중강도지수, 슈미트해머 반발치, 압열인장강도와 좋은 상관관계를 나타내었으며, 이 중 점하중강도지수가 가장 높은 상관관계를 보였다. 이로부터 알 수 있듯이 점하중강도지수가 일축압축강도를 추정하는데 가장 유효한 도구임을 확인할 수 있었다.

핵심어 : 상관관계, 이방성, 미세균열, 점하중강도지수

1. 서 론

화강암은 거시적으로 등방균질 재료로 취급되고 있으나, 어느 한 방향으로 쪼개지는 성질이 다른 방향보다 상대적으로 크게 나타나는 것이 일반적인 특성이다.

이러한 화강암의 방향에 따른 물리적, 역학적 특성을 해석하려는 연구들은 다음과 같다. Osborne¹⁾은 강도 측면에서 화강암을 이방성으로 취급하였

으며, 압축강도의 이방성은 선재균열의 선택적 배향에 기인한다고 설명하였다.

McWilliams²⁾는 측정 각도를 변화시키면서 탄성과 속도시험과 압열인장시험을 행하였으며, 이들이 최대치를 나타내는 면에 대해서 점하중시험(point load test)을 실시할 경우, 선택적인 파괴면이 형성된다고 보고하였다.

그 밖에 Douglass 등³⁾은 미소균열이 탁월하게 배향된 면을 고려해서 화강암의 압축하중하의 변형거동을 고찰하였으며, Peng 등⁴⁾은 미소균열의 선택적 배향면에 기초를 두고 압열인장시험을 실시하여 비교적 조밀한 간격으로 화강암의 인장강

1) 조선대학교 자원공학과

접수일 : 2003년 12월 2일

도를 측정하였으며, 이들 자료의 해석으로부터 화강암 인장강도의 방향 의존성을 설명하였다. 또 일정한 방향으로 배향된 균열을 가진 시편내에서 탄성과 전파속도의 이방성에 관한 이론적 연구도 있다⁵⁾.

따라서, 본 연구에서는 암석조직 관찰, 초음파 속도, 일축압축시험, 삼축압축시험, 점하중시험, 슈미트해머 시험 및 압열인장시험 등의 다각적인 실내 물성실험들을 통하여 화강암의 이방성에 따른 물리적 특성과 이들 물성 상호간의 상관관계를 파악해 보고자 하였다.

2. 지질 및 시료의 특성

2.1 연구지역의 지질

본 연구지역에 분포하는 남원화강암은 주라기 대보화강암류에 속하며 심장모양으로 분포하는 약 530㎢ 면적의 저반이다. 이 지역의 화강암은 지리산편마암복합체를 기반으로 하며 시대미상의 변성 퇴적암류를 관입한다. 남원화강암은 광물조성과 조직 등을 기초로 하여 각섬석-흑운모 토날라이트-화강섬록암, 반상각섬석-흑운모 화강섬록암, 흑운모화강암과 복운모화강암으로 구분된다. 본 연구지역의 지질도는 Fig. 1과 같다. 본 연구에 사용된 시료는 남원화강암의 대부분을 차지하면서 담회색을 띠는 중립 내지 조립질 화강암인 흑운모화강암에 해당된다⁶⁾.

2.2 시료의 암석학적 특성

본 연구대상 시료의 암석학적 특성을 파악하기 위해 일본 Rigaku사의 Model No : RIX-2000, XRF(X-ray Fluorescence Spectrometer)를 사용하여 X-선 형광분석(X-ray Fluorescence analysis)을 실시하였으며, XRF에 의한 화학성분조성 분석 결과, 주 구성광물은 SiO₂가 69.010%, Al₂O₃가 16.905%로 나타났다(Table 1).

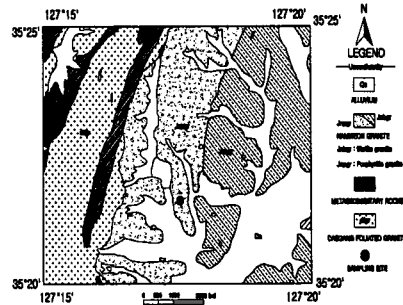


Fig. 1 Geological map of study area

또한, 동사의 Model No : D/MAX-3C, XRD(X-ray Diffractometer)를 사용하여 X-선 회절 분석(X-ray diffraction analysis)을 실시하였으며, XRD에 의한 분석에서는 주로 Quartz와 Albite가 peak를 보이고 있어 전형적인 화강암의 특징을 보여주고 있다(Fig. 2).

Table 1. Chemical composition of granite

Major elements	Composition (Wt. %)
SiO ₂	69.010
TiO ₂	0.462
Al ₂ O ₃	16.905
Fe ₂ O ₃	2.023
MnO	0.058
MgO	0.523
CaO	2.615
Na ₂ O	4.135
K ₂ O	3.925
P ₂ O ₅	0.084
Total	99.740

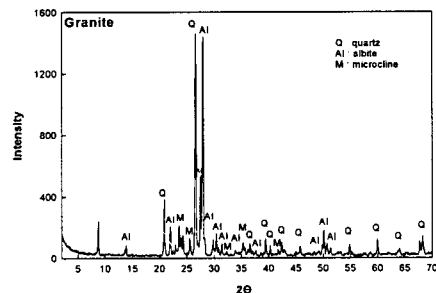


Fig. 2 X-ray diffraction analysis of granite

시험대상 시험편의 공학적 특성을 파악하기 위하여 30×30×30cm의 정방형 블록 상태의 암석으로부터(Fig. 3) 초음파 속도 순으로 Z, X, Y의 세 축을 정하여 이에 대해 평행한 방향으로 시추한 다음 길이 30cm와 직경 5.4cm의 NX core 시험편을 회수하였다. 회수된 시험편으로부터 다각적인 실험을 위해 각각 ISRM⁷⁾ 규정에 맞도록 절단 및 연마하여 초음파속도, 일축압축, 압열인장, 삼축압축, 접착중, 슈미트해머 시험 등을 실시하였다. 각 시험으로부터 얻은 물성치는 방향별로 3~10회씩 측정된 평균이다.

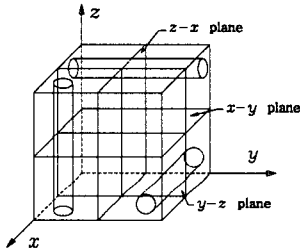


Fig. 3 Three mutually perpendicular core sample

3.1 초음파 속도

초음파 속도는 방향별 속도차를 평가하기 위해 자연건조 30×30×30cm의 크기를 갖는 자연건조 상태의 정방형 암석 시료를 이용하여 X축, Y축 및 Z축에 평행하게 각각 10회씩 측정하였고 (Fig. 4), 시료 면적의 70% 구역내에서 대각선으로 10곳을 분할하여 측정, 평균값을 사용하였다. 초음파 속도 측정에 사용된 기기는 영국 CNS FARNELL사의 PUNDIT 장비를 사용하였으며, 주파수는 200KHz이다.

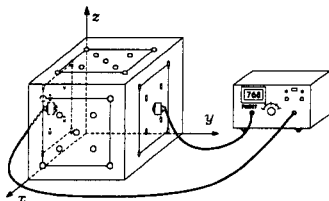


Fig. 4 Schematic diagram of the ultrasonic wave velocity measurement system

3.2 현미경 관찰

편마암이나 석회암의 경우 육안으로 관찰되는 편리, 엽리 및 층리 등에 의해 강도 이방성이 나타나는데 반해, 화강암의 경우는 육안으로 관찰되지 않는 입자내의 미세균열에 의한 강도 이방성이 발생한다. 따라서 화강암내의 미세균열의 방향성과 분포상태를 관찰하기 위해서, 화강암 block 시료로부터 X-Y, Y-Z, Z-X면에 대하여 Fig. 5와 같이 가로×세로가 25×30mm 인 3개의 직사각형 박편을 절단하여 1면을 정형하고 슬라이드 글라스에 접착시킨 후 5 μ m까지 연마하였다. 연마한 박편은 편광 현미경을 이용하여 관찰하였다.

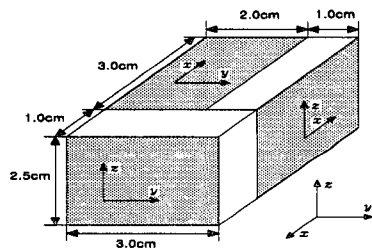


Fig. 5 Preparation of specimen for thin section

3.3 일축압축시험

압축시험기는 영점조정과 하중속도의 조절이 가능한 국내산 Model No. : HST-100T, 용량 100ton의 시험기를 이용하였고, 하중속도는 5kgf/cm²/sec로 가압하였다(Fig. 6). 변형률은 미국 VISHAY사의 Model No. P-3500 변형률 지시자를 사용하여 기록하였다.

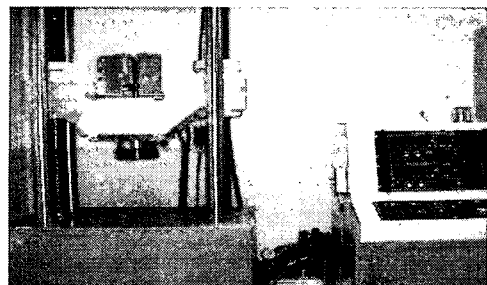


Fig. 6 Photograph of system for compressive test

또한 영률과 포아송비를 구하기 위하여 각각의 시료에 축의 방향을 표시한 후, 국내 CAS사의 Model No. AE-11-TS50N-120-EC, 저항 120Ω, 길이 10mm인 변형률 게이지(strain gauge)를 Z-X축, Y-Z축, X-Y축의 코아 시료의 표면에 평행한 방향으로 부착하였다(Fig. 7). 이때 두 값은 강도의 50% 지점의 접선으로부터 구하는 접선영률법(tangent modulus method)을 이용하여 구하였다.

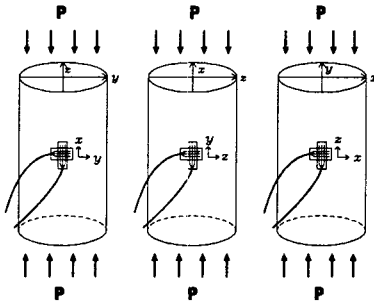


Fig. 7 Specimen appearance and strain gauge attachment method

3.4 압열인장시험(Brazilian test)

실험방법은 일축압축시험과 같은 방법으로 각각의 축에 대해 3개씩 총 9개의 시료를 준비하여 축의 방향을 표시하고, 원판형의 암석 시료에 압열인장응력을 가한 후 파괴강도를 측정하였다(Fig. 8).

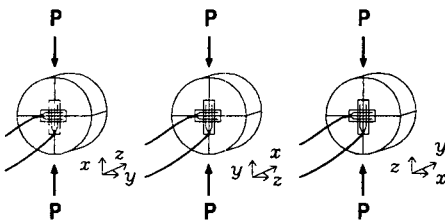


Fig. 8 Specimen appearance and strain gauge attachment method

또한 일축압축시험에서와 같은 방법으로 각각의 시료에 대하여 Z-X, Y-Z, X-Z 축상에 평행하게 변

형률 게이지를 부착하여 각각의 변형률을 측정하였다.

3.5 삼축압축시험

일축압축시험과 동일한 장비를 사용하였으며, 축압의 재하는 응력 제어에 의한 재하방식을 이용하여 실시하였다. 하중속도는 5kgf/cm²/sec로 하였으며, 구속압은 유압 펌프를 사용하여 X축, Y축, Z축 시료에 대해 구속압이 50, 100, 150(kgf/cm²)일 때, 각각의 삼축압축강도를 측정하였다. 각각의 구속압에 따른 삼축압축강도를 이용한 파괴 포락선의 해석에는 Canada Rocscience사의 Rocdata Ver. 2.37을 이용하였다. 삼축압축시험은 X축 방향 3개, Y축 방향 3개, Z축 방향 3개 등 각 방향별로 3개의 시험편을 이용하여 실시하였다.

3.6 점하중 시험

본 연구에 사용된 기기는 미국 ENERPAC사의 Model No. P-80, 최대하중 10,000psi인 핸드펌프와 Model No. RC-254, 용량 25ton의 실린더 및 20ton의 하중을 견딜 수 있는 프레임으로 제작된 시험기로 간접인장시험을 병행할 수 있는 점하중 시험기를 사용하였다(Fig. 9).

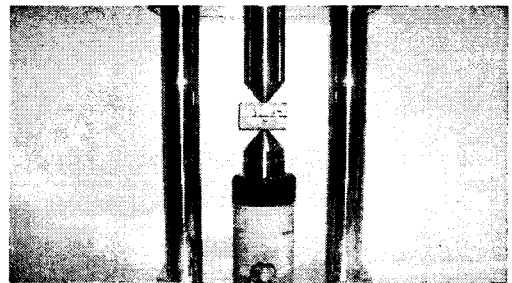


Fig. 9 Photograph of the point load testing device

재하방향은 각각 X축, Y축, Z축에 평행하게 실시하였다. 점하중 시험을 위하여 끝이 둥근 두 쌍의 원추형 재하판 사이에 암석시료를 넣고, 시료가 10~60초 이내에 파괴되도록 점하중을 서서히 가하였으며, 시료가 파괴될 때의 점하중 수치와 시료의 최소폭 및 두께를 기록하였다.

3.7 슈미트해머 시험

슈미트해머 반발치는 SANYO TEST MACHINE사의 N-type 자동기록식 Model No. GSR을 사용하였으며, V-block을 이용하여 시료를 고정시킨 후, 반발치를 측정하였다(Fig. 10). 각 암석표면에서 20회의 슈미트해머 반발치를 구하였고, 20회의 반발치중에서 높은 수치 10개의 평균 반발치를 타격한 암석의 대표적인 슈미트해머 반발치로서 고려하였다. 그 밖의 일반적인 슈미트해머 실험방법은 ISRM⁷⁾의 기준을 따랐다.

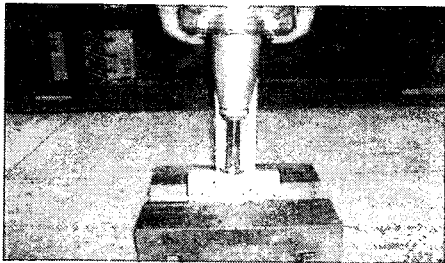


Fig. 10 Photograph of the Schmidt hammer test

4. 실험결과 및 분석

4.1 초음파속도

각 방향에서 측정된 P-파 속도의 결과를 Table 2에 정리하였다. Table 2의 각 방향 평균속도를 비교할 때 최대 속도를 나타내는 Z축 방향은 나머지 두 방향 X축, Y축 방향보다 약 10~15% 정도 빠름을 알 수 있다. 이러한 속도의 차이가 나타나는 원인으로는 광물의 배열상태나 공극의 모양 등과 같은 여러 가지 요인들을 들 수 있지만, 특히 암석 내에 존재하는 미세균열들의 발달형태가 큰 영향을 미친다.

Table 2의 결과만을 고려한다면 미세균열들의 분포가 주로 Z축과 평행하거나 거의 평행한 상태로 발달해 있음을 알 수 있다. 이와 더불어 X축 방향으로도 미세균열 분포가 어느 정도 존재하고 있음을 시사한다 하겠다.

Table 2. P-wave velocities for granite measured in three perpendicular directions

Rock type	P-wave velocity(m/sec)		
	Direction		
	Z ↓	Y ↓	X ↓
Granite	3,796	3,158	3,378
	3,822	3,222	3,436
	3,817	3,181	3,464
	3,841	3,264	3,375
	3,764	3,181	3,315
	3,788	3,158	3,344
	3,906	3,181	3,436
	3,831	3,222	3,456
	3,812	3,226	3,436
	3,807	3,099	3,322
Average	3,818	3,189	3,396.20

4.2 현미경 관찰 결과

화강암내의 미세균열들의 방향성과 분포상태를 관찰하기 위해 화강암 블록시료로부터 각각 Z-X, Y-Z, X-Y면에 대하여 가로×세로가 25×30mm인 3개의 박편을 제작하였다. 이들 박편으로부터 화강암의 주 구성 광물인 석영내의 미세균열들을 관찰한 결과, 입자간 경계부 또는 석영 입자를 관통하여 발달하고 있는 뚜렷한 미세균열이 다수 관찰되었다. 이중 미세균열들의 방향성을 대표할 수 있는 가장 뚜렷한 방향성을 보이는 현미경 박편 사진들을 Fig. 11에 나타냈다.

Fig. 11(a)는 Z-X평면상에서 관찰한 미세균열들의 방향을 나타낸 것으로서 일반적으로 X축과 급한 경사를 보이는 미세균열들이 주로 관찰된다. 이 결과는 Y축에 평행하게 측정된 속도결과와 매우 일치한다. Fig. 11(b)는 Y-Z평면상에서 관찰한 미세균열들의 방향을 나타낸 것으로서 그림으로부터 알 수 있듯이 미세균열들의 방향이 Z축 방향과 거의 평행하게 배열되어 발달하고 있음을 알 수 있다. 이 결과는 X축 방향과 평행하게 측정된 속도 결과와 매우 잘 일치한다. Fig. 11(c)는 X-Y평면상에서 관찰한 미세균열의 방향을 나타낸 것으로서 X-Y평면상에서는 Y축 방향과 급한 경사를 보이는 미세균열들이 주로 발달해 있음을 알 수 있다. 이의 결과는 Z축 방향의 속도측정 결과와 매우 일치한다.

이상의 결과로부터 미세균열의 방향성과 초음파 속도 측정결과의 상관성을 파악할 수 있었다. 그러나 현미경 관찰의 특성상 대상암석이 갖는 미세균열의 방향을 정성적, 정량적으로 나타내는 데는 많은 자료와 시간이 필요하다. 따라서 본 연구에서 수행된 현미경 관찰 결과는 정량적인 결과로서의 의미는 갖지 못한다. 그러므로 이들 현미경 관찰 결과는 초음파 속도 및 일축압축시험 등의 역학적 물성과의 비교자료로서 그 의미를 두고자 한다.

4.3 일축압축강도

화강암에 대한 세 방향의 암석코아 시료를 대상으로 일축압축강도시험을 실시하여 얻은 결과를 Table 3에 정리하였다. 각 방향의 일축압축강도가 다르게 나타남을 알 수 있는데, 이는 Table 2의 속도측정 결과에 매우 일치하고 있음을 보여준다. 즉, 미세균열들이 주로 속도가 빠르게 나타나는 Z축과 X축 방향으로 분포하고 있어 일축압축강도가 작게 나오는 반면, 상대적으로 이들 두 방향에 거의 수직으로 미세균열들이 분포하고 있는 Y방향의 일축압축강도는 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

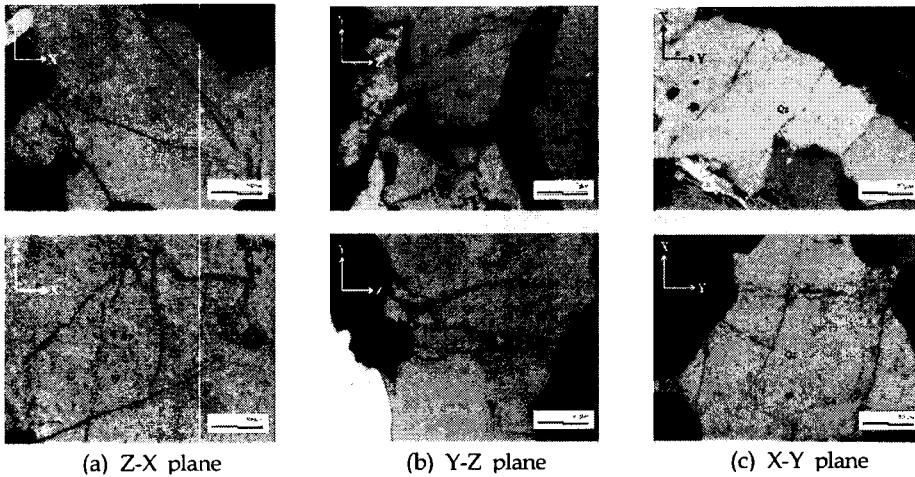


Fig. 11 Microphotograph of granite sample; Qz(Quartz)

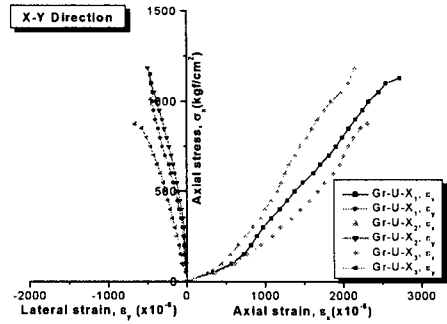
Table 3. Uniaxial compressive strength for granite measured in three perpendicular directions

Rock type	Specimer. ID.	Uni. Comp. Strength (UCS : kgf/cm ²)	Young's Modulus (×105kgf/cm ²)	Poisson's Ratio	Direction
Granite	Gr-U-Z1	1,334	5.412	0.222	Z ↓
	Gr-U-Z2	1,237	4.810	0.215	
	Gr-U-Z3	1,017	3.240	0.224	
	Average	857.00	4.487	0.220	
	Gr-U-Y1	1,463	4.932	0.173	Y ↓
	Gr-U-Y2	1,571	5.544	0.211	
	Gr-U-Y3	1,374	4.468	0.208	
	Average	1,469	4.981	0.197	
	Gr-U-X1	1,130	3.748	0.298	X ↓
	Gr-U-X2	1,184	5.199	0.236	
	Gr-U-X3	874	2.878	0.289	
	Average	1,063	3.941	0.274	

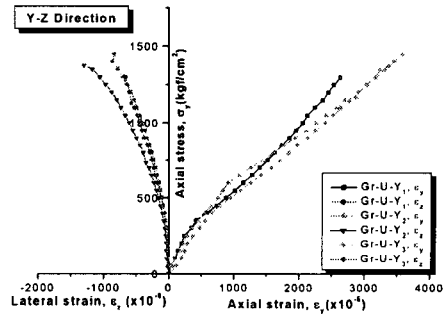
이들 일축압축강도와 변형특성 사이의 관계를 알아보기 위해 일축압축시험에 의한 각 방향별 응력-변형률 곡선을 Fig. 12에 도시하였다. Fig. 12(a)는 하중방향이 Z축일 때, Z축 방향에서의 축방향 변형률과 X축 방향에서 횡방향 변형률을 나타내며, Fig. 12(b)는 하중방향이 Y축일 때, Y축 방향에서 축방향 변형률과 Z축 방향에서 횡방향 변형률을 나타낸다. Fig. 12(c)는 하중방향이 X축일 때, X축 방향에서의 축변형률과 Z축 방향에서의 횡방향 변형률을 나타낸다. 이들 응력-변형률 곡선을 살펴보면 전체적으로 Z축 방향과 X축 방향에서 변형률의 분산이 심하며, 이들 방향은 주로 미세균열이 발달한 방향임을 알 수 있다. 또한, 횡변형률은 대부분의 시료에서 선형탄성 거동을 보이며, 그 분산이 심하지 않음을 알 수 있다.

Fig. 12(d)에는 각 방향별로 3회씩 측정된 응력-변형률 곡선의 평균을 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 축방향 변형률은 X축 방향이 가장 크며, Y축 방향이 가장 작음을 알 수 있다. 이는 동일한 응력수준에서 X축 방향이 가장 변형이 크다는 것을 의미하며, 이로 인해 탄성계수가 상대적으로 작아짐을 의미한다. Y축 방향의 경우는 동일한 응력수준에서 가장 변형이 작음을 보여준다. 이는 상대적으로 Y축 방향의 탄성계수가 커짐을 의미한다.

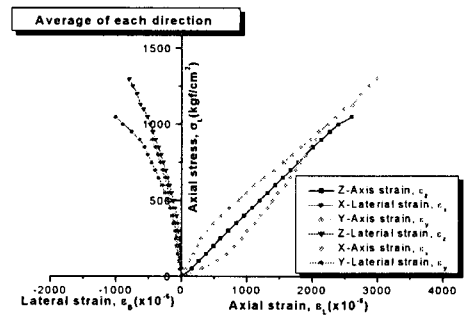
이러한 변형이방성은 전 응력수준을 통해 나타나고 있으며, 주요한 원인은 초음파 속도 측정과 현미경 관찰 결과와 같이 미세균열의 방향성과 분포에 기인하는 것으로 판단된다.



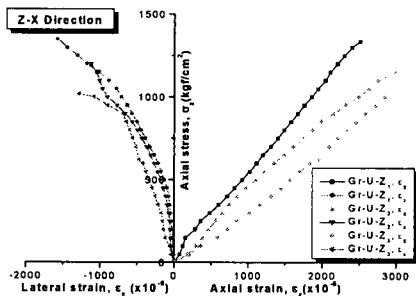
(b) X-Y direction



(c) Y-Z direction



(d) average stress-strain curves



(a) Z-X direction

Fig. 12 Stress-Strain curves from uniaxial compression test

4.4 압열인장강도

각 방향에 따른 화강암에 대한 압열인장강도시험의 결과를 Table 4에 정리하였다. 화강암 시편의 각 방향으로부터 계산한 결과를 일축압축강도와 비교하면 아래와 같다.

(1) Z 방향 : $UCS \cong 14.3 \times BTS$

(2) Y 방향 : $UCS \cong 16.3 \times BTS$

(3) X 방향 : $UCS \cong 13.1 \times BTS$

여기서, UCS : Uniaxial Compressive Strength
 BTS : Brazilian Tensile Strength

Table 4. Brazilian tensile strength for granite measured in three perpendicular directions

Specimen ID.	Brazilian Tensile Strength (BTS : kgf/cm ²)	Direction
Gr-B-Z1	86	Z ↓
Gr-B-Z2	83	
Gr-B-Z3	82	
Average	83.67	
Gr-B-Y1	90	Y ↓
Gr-B-Y2	94	
Gr-B-Y3	85	
Average	89.67	
Gr-B-X1	84	X ↓
Gr-B-X2	83	
Gr-B-X3	76	
Average	81.00	

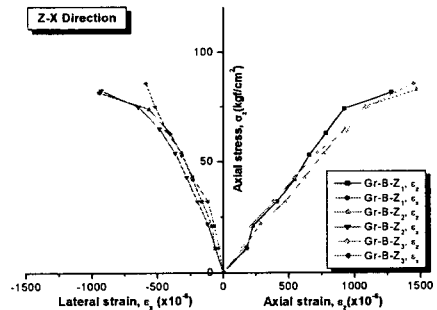
본 연구에서 남원화강암의 경우 일축압축강도와 압열인장강도의 비가 방향별로 약 13~16배 정도의 관계를 갖는 것으로 나타났으며, 압열인장강도와 압열하중시의 변형특성을 알아보기 위해 각 방향별 응력-변형률 곡선을 Fig. 13에 나타내었다.

Fig. 13(a)는 하중방향이 Z축일 때, Z축 방향에서의 축방향 변형률과 X축 방향에서 횡방향 변형률을 나타내며, Fig. 13(b)는 하중방향이 Y축일 때, Y축 방향에서 축방향 변형률과 Z축 방향에서 횡방향 변형률을 나타낸다. Fig. 13(c)는 하중방향이 X축일 때, X축 방향에서의 축변형률과 Z축 방향에서 획득한 횡방향 변형률을 나타낸다. Fig. 13(d)에

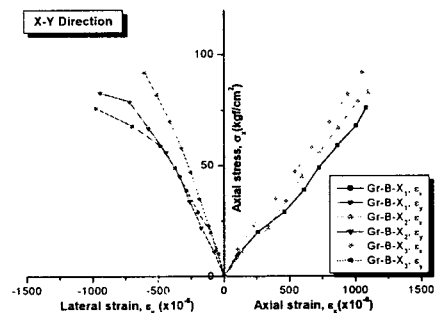
는 각 방향별로 3회씩 측정된 응력-변형률 곡선의 평균을 나타내었다.

그림에서와 같이 압열인장시험에 의한 축방향 변형률은 일축압축시험과 같이 큰 차이는 보이지 않는다. 그러나 압열인장강도는 일축압축강도와 선형의 비례관계가 있지만, 축방향 변형률에는 차이가 있다. 일축압축시험시 X축 방향의 축방향 변형률이 가장 큰 점에 비해 그 차이는 미미하나, 압열인장시험에서는 Y축 방향의 축방향 변형률이 가장 크다는 점이다.

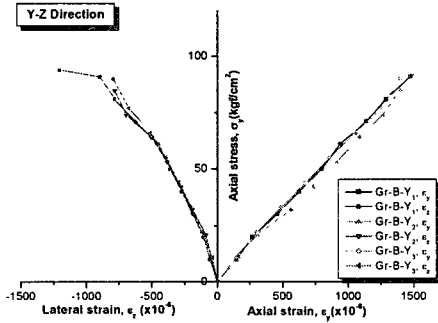
이러한 원인은 압열인장시험시는 압축과 인장이 동시에 존재하며, Y축 방향으로 압축시 다른 두 방향으로 수직 또는 거의 수직한 미세균열들이 압축보다 인장에 먼저 관여하기 때문인 것으로 판단된다.



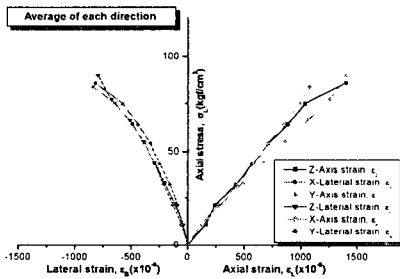
(a) Z-X direction



(b) X-Y direction



(c) Y-Z direction



(d) average stress-strain curves

Fig. 13 Stress-Strain curves under Brazilian test

4.5 점하중강도

일축압축강도와도 밀접한 상관성을 보이는 화강암에 대한 점하중시험의 결과를 Table 5에 정리하였다.

Table 5로부터 알 수 있듯이 일축압축강도가 가장 큰 Y 방향에서 점하중강도가 가장 크고 다음으로 Z축 방향, X축 방향이 가장 작은 값을 보임을 알 수 있다.

이 결과는 속도 측정 결과뿐만 아니라 일축압축강도, 삼축압축강도의 결과와 매우 잘 일치한다. 각 방향별로 일축압축강도와 비교해 보면 다음과 같다.

(1) Z 방향 : $UCS \cong 18 \times I_{s(50)}$

(2) Y 방향 : $UCS \cong 20 \times I_{s(50)}$

(3) X 방향 : $UCS \cong 18 \times I_{s(50)}$

여기서, UCS : Uniaxial Compressive Strength
 $I_{s(50)}$: Point Load Strength Index

Table 5. Point load strength index ($I_{s(50)}$) for granite measured in three perpendicular directions

Specimen ID.	Load (kgf)	Point load strength index ($I_{s(50)}$: kgf/cm^2)	Direction
Gr-P-Z1	1895.36	69	Z ↓
Gr-P-Z2	1862.68	66	
Gr-P-Z3	1780.99	63	
Average		66	
Gr-P-Y1	2026.08	73	Y ↓
Gr-P-Y2	2173.13	76	
Gr-P-Y3	2009.74	73	
Average		74	
Gr-P-X1	1601.26	58	X ↓
Gr-P-X2	1617.60	61	
Gr-P-X3	1519.56	55	
Average		58	

4.6 삼축압축강도

Table 6은 삼축압축시험으로부터 얻은 결과를 정리한 것이다. 위 결과들은 초음파속도 측정 결과 뿐 만 아니라 일축압축시험의 결과와도 잘 일치하고 있음을 보여준다.

c와 μ 값은 Mohr-Coulomb 파괴기준에 의해 도출하여 얻은 값으로서 암석의 강도와 밀접한 관계가 있는데, 즉, intact rock과 같이 강도가 높으면 이들 값도 증가하는 경향이 있다. 이들의 관계도 방향성을 고려하여 시험을 실시하였을 경우 좋은 상관관계를 보여주고 있음을 알 수 있다.

4.7 슈미트해머 반발치

점하중강도와 함께 자주 쓰이는 시험방법인 슈미트해머 반발계수의 화강암에 대한 결과를 Table 7에 정리하였다. 본 연구에서 방향별 일축압축강도와 슈미트해머 반발치 간의 상관관계는 다음과 같은 식으로 나타났다.

Table 6. Triaxial compressive strength for granite measured in three perpendicular directions

Rock type	Specimer. ID.	Triaxial Compressive Test		c (kgf/cm ²)	ψ (°)	r ²	Direction
		Con. Pres. (kgf/cm ²)	Max. Stress (kgf/cm ²)				
Granite	Gr-T-Z1	50	1,758	181.11	54.56	0.976	Z ↓
	Gr-T-Z2	100	2,163				
	Gr-T-Z3	150	2,419				
	Gr-T-Y1	50	2,020	202.75	56.35	0.979	Y ↓
	Gr-T-Y2	100	2,320				
	Gr-T-Y3	150	2,855				
	Gr-T-X1	50	1,654	168.01	54.78	0.986	X ↓
	Gr-T-X2	100	1,980				
	Gr-T-X3	150	2,547				

$$\log UCS = 1.6739 + 0.0051R_{SHV}, r = 0.937$$

여기서, UCS : Uniaxial Compressive Strength

R_{SHV} : Schmidt Hammer Rebound Value

Table 7. Schmidt hammer rebound value for granite measured in three perpendicular directions

Specimen ID.	Schmidt hammer rebound value	Conversion of compressive strength (kgf/cm ²)	Direction
Gr-S-Z1	52	1,154	Z ↓
Gr-S-Z2	51	1,079	
Gr-S-Z3	47	825	
Average	50	1,019	
Gr-S-Y1	53	1,234	Y ↓
Gr-S-Y2	57	1,615	
Gr-S-Y3	50	1,009	
Average	53	1,286	
Gr-S-X1	45	721	X ↓
Gr-S-X2	48	882	
Gr-S-X3	41	551	
Average	45	718	

5. 방향별 물성치간의 상관관계

화강암의 일축압축강도와 방향별 물성치간의 상관관계는 Fig. 14에 도시하였다. 그림에서 일축압축강도의 범위는 약 900~1,600 (kgf/cm²), 탄성계수는 약 2.9~5.4 (×10⁵kgf/cm²)로 나타나 방향에 따라 그 차이가 크게 나타났다. 비교적 등방성으로 간주되는 화강암일지라도 미세균열의 분포상태와 방향에 따라 탄성계수와 일축압축강도는 상이하게 나타나며, 포아송비의 경우는 일축압축강도가 낮을수록 분산된 형태를 보이며, 음의 상관관계가 있는 것으로 나타난다.

점하중강도와 슈미트해머 반발치 및 압열인장강도의 경우 일축압축강도에 비례하여 증가함을 알 수 있으며, 강도가 낮은 단계에서는 분산정도가 크지만 강도가 클수록 좋은 상관관계를 보이고 있음을 알 수 있다. 특히, 방향에 따라 분산정도가 다름을 알 수 있는데, 값이 작은 X축 방향에서의 분산정도가 비교적 큰 반면, Y축 방향에서는 거의 일치함을 보인다.

또한 압열인장강도와 이들 물성치간의 상관관계는 일축압축강도와 마찬가지로 점하중강도 및 슈미트해머 반발치와 매우 좋은 상관성을 나타내고 있다.

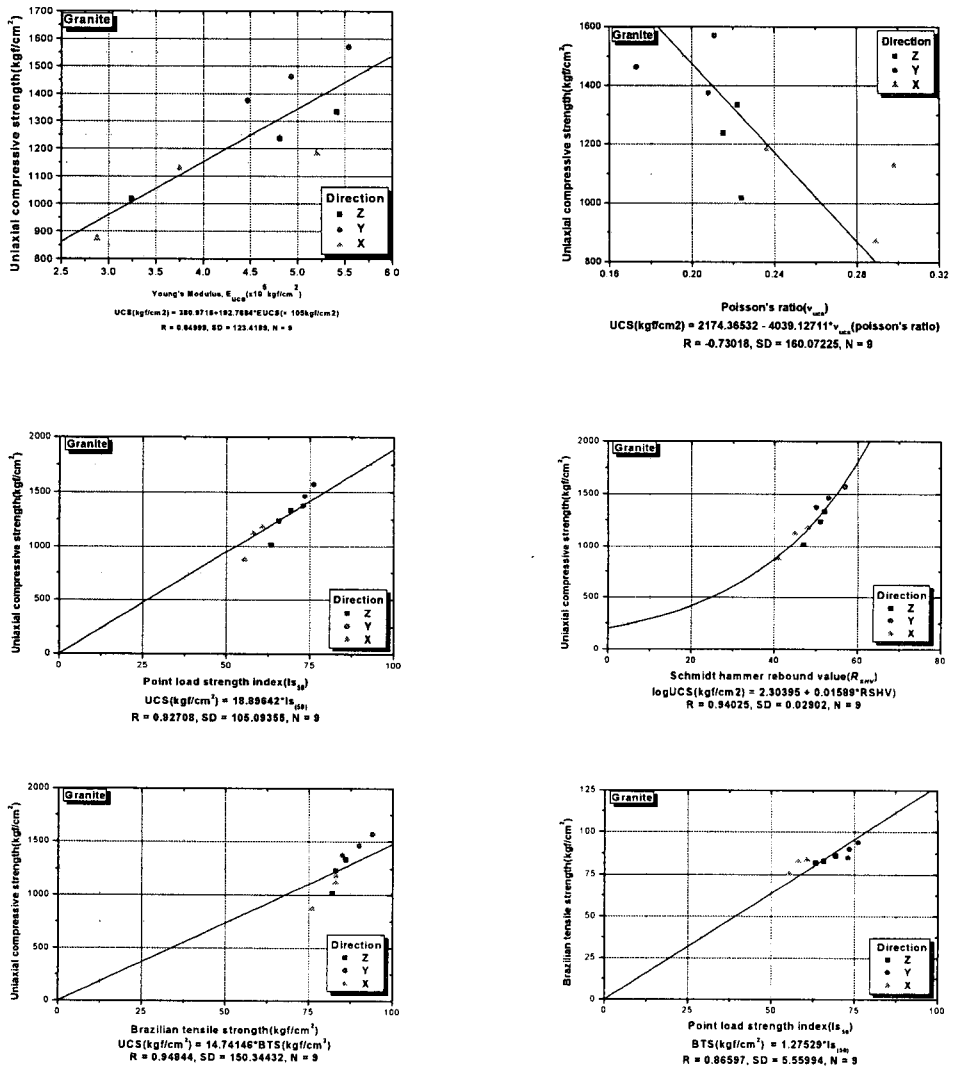


Fig. 14 Comparative relationship of physical rock properties according to three perpendicular directions

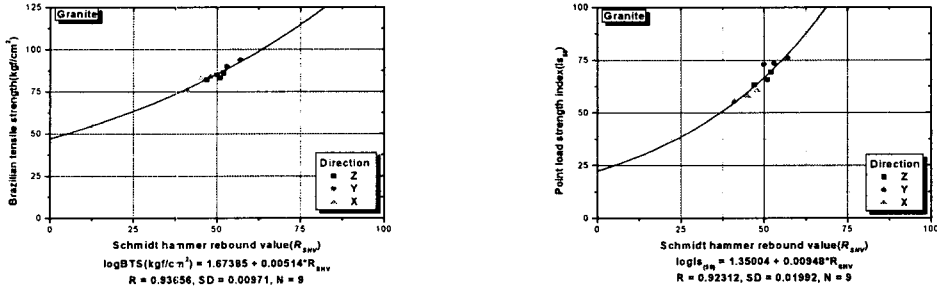


Fig. 14 Continued

점하중강도와 슈미트해커 반발치와의 상관성은 어느 정도 좋은 관계를 보인다. 다만, 방향에 따른 상관성이 다르게 나타날 것으로 판단되며, 이에 대한 적절한 보정이 필요하다고 사료된다.

본 연구에서 얻은 세 방향에서의 화강암에 대한 일축압축강도와 물성치간의 상관관계를 정리하면 아래와 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$UCS(kgf/cm^2) = 18.90 \times I_{s(50)}, \quad r = 0.927$$

$$\log UCS(kgf/cm^2) = 2.3040 + 0.0159 \times R_{SHV} \\ r = 0.940$$

$$UCS(kgf/cm^2) = 14.74 \times BTS, \quad r = 0.948$$

$$BTS(kgf/cm^2) = 1.27529 \times I_{s(50)}, \quad r = 0.866$$

$$\log BTS(kgf/cm^2) = 1.6739 + 0.0051 \times R_{SHV} \\ r = 0.937$$

$$I_{s(50)} = 1.3500 + 0.0095 \times R_{SHV}, \quad r = 0.923$$

여기서, $I_{s(50)}$: Point Load Strength Index
 R_{SHV} : Schmidt Hammer Rebound Value
 BTS : Brazilian Tensile Strength
 UCS : Uniaxial Compressive Strength

6. 결론

본 연구는 남원지역 화강암을 대상으로 각 방향별 역학적 특성과 이들 물성치들 간의 상관관계를 규명하고자 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 초음파속도 측정 결과 Z축 방향은 나머지 두 방향 보다 약 10~15% 정도 빠르게 나타났다. 이러한 속도 차이의 원인은 주로 암석내에 존재하는 미세균열의 발달 형태에 따르는 것으로 판단되며, 이는 현미경 관찰결과와 일치함을 알 수 있었다.

2) 화강암의 Z축, Y축 및 X축에 따른 방향별 물성들을 측정, 분석한 결과 대부분의 물성치들은 일축압축강도 및 압열인장강도와 선형의 상관관계를 나타내었으며, 일축압축강도와 압열인장강도의 비가 약 13~16배정도의 관계를 가지는 것으로 확인되었다.

3) 일축압축시험과 점하중시험으로부터 얻을 수 있는 물성치의 경우 방향에 따라 21~28%의 높은 강도의 차이를 보이고 있으며, 점하중강도지수 ($I_{s(50)}$) 측정결과, 남원 화강암의 경우 일축압축강도와의 비는 18~20에 해당하는 것으로 분석되어, 일반적으로 널리 사용되고 있는 24보다는 낮게 나타났다.

4) 본 연구는 남원 화강암을 대상으로 실시하였으며, 실제 다른 지역의 화강암의 경우 다른 결과를 나타낼 수도 있다. 그러므로 국지적인 자료만으로 관계식들의 직접 사용에는 무리가 있으나, 이들 간의 상관관계가 일관성이 있으므로, 향후 더 많은 자료를 보완하여 적용성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Osborne F.F., 1965, Rift, grain and hardway in some Rre-Cambrian granites, Quebec, Econ. Geol., Vol 30, 540-551.
2. McWilliams J.R., 1966, The role of microstructure in the physical properties of rock, In : Testing techniques for rock mechanics, Am. Soc, Test Mat., STP 402, 175-189.
3. Douglass P.M. and Voigt B., 1969, Anisotropy of granites, A reflection of microscopic fabric, Geotechnique, 19, 376-389.
4. Peng S.S. and Johnson A.M., 1972, Crack growth and faulting in cylindrical specimens of Celmsford granite, Int. Jour. Rock Mech. and Min. Sci., 9, 37-86.
5. 박형동, 1995, 암석의 공학적 이방성 측정을 위한 실험실내 P파 속도 측정기법에 대한 연구, 지질공학회지, Vol. 5, 237-247.
6. 이병주, 김정찬, 김유봉, 조동룡, 최현일, 전희영, 김복철, 1997, 광주 지질도폭설명서(1:250,000), 한국지질자원연구원, 22-26.
7. ISRM(International Society for Rock Mechanics), 1981, Rock characterization testing and monitoring : ISRM Suggested Method(ed. Brown E. T.), Pergamon Press.