

암석의 종류와 방향에 따른 물리적 특성과 상호관계

원연호^{1)*}, 강추원²⁾, 김종인²⁾, 박현식²⁾

Characteristics of Physical Properties of Rocks and Their Mutual Relations

Yeon-Ho Won, Choo-Won Kang, Jong-In Kim and Hyeon-Sik Park

Abstract The main objectives of this study are to investigate the anisotropic characteristics of rocks and to evaluate the the relationships between physical properties. A series of experiments were performed in three mutually perpendicular directions for three rock types, which are granite, granitic gneiss and limestone. The relationships of measured physical properties were evaluated. The results of ultrasonic wave velocity measurement show that granite of three rock types gives the largest directional difference, and that the wave velocity in a plane parallel to a transversely isotropic one is dominantly faster than that in a subvertical or vertical plane. It implies that ultrasonic wave velocity for rock could be used as a useful tool for estimating the degree of anisotropy. The ratio of uniaxial compressive strength to Brazilian tensile strength ranges approximately from 13 to 16 for granite, from 8 to 9 for granite gneiss, and from 9 to 18 for limestone. The directional differences for granite and granitic gneiss are very small, and on the other hand, is relatively large for limestone. It is suggested that strength of rock makes quite difference depending on the rock types and loading directions, especially for the anisotropic rocks such as transversely isotropic or orthotropic rocks. The ratio of uniaxial compressive strength to point load strength index ranges from 18 to 20 for granite, from 17 to 19 for granitic gneiss, and from 21 to 24 for limestone. These results show that point load strength index makes also a difference depending on rock types and directions. Therefore, it should be noted that the ratio of uniaxial compressive strength to point load strength index could be applied to all rock types. Uniaxial compressive strength shows relatively good relationship with point load strength index, Schmidt hammer rebound value, and tensile strength. In particular, point load strength index is shown to be the best comparative relationship. It is indicated that point load test is the most useful tool to estimate an uniaxial compressive strength indirectly.

KeyWords Ultrasonic wave velocity, Uniaxial compressive strength, Brazilian tensile strength, Point load strength index, Schmidt hammer rebound value

1. 서 론

국토의 대부분이 산악지대로 이루어진 우리나라의 경우 최근 국토의 효율적인 이용을 고려한 지하생활공간, 지하철, 원유 및 액화가스 지하저장시설, 지하발전소, 핵폐기물 지하처리장 등과 같은 중요 기간 시설물들의 개발 필요성이 대두되고 있다. 지반을 구성하고 있는 흙과 같은 연약층에서부터 단단한 암반층을 포함한 대형토목건설이 빈번하게 수행되고 있다. 하지만, 이러한 대형 구조물들을 안전하게 설계하고 시공하기 위해서는 구조물의 안정성을 정확하게 평가하는 것이

요구된다. 특히, 지하공동에 대한 안정성을 평가하기 위해서는 지하공동을 이루고 있는 대상암반의 응력상태 뿐만 아니라 물리적·역학적 거동을 규명하는 것이 매우 중요하다.

일반적으로, 암석은 종류나 방향에 따라 물리적 성질과 역학적 성질이 다르게 나타난다. 이러한 성질은 광물학적, 암석학적, 구조적 요인 등으로 세분할 수 있다. 광물학적 요인에는 암석을 구성하는 광물입자들의 배열, 결합형태 그리고 입자들의 모양 등을 들 수 있다. 암석학적 요인에는 특정 광물입자 내에서 나타나는 쌍정면과 미세균열들의 발달형태 등을 들 수 있다. 구조적 요인의 예로는 퇴적 당시에 쌓인 층이나 온도나 열로 인한 변성에 의하여 암석 원래의 구조가 재배열된 상태, 즉, 일정한 방향성을 갖게 되는 편리나 엽리 구조 등을 들 수 있다. 암석의 역학적 성질의 이방성은

¹⁾ 원앤비 기술사사무소 대표이사

²⁾ 조선대학교

*교신저자(Corresponding Author): won1407@korea.com

접수일: 2004년 7월 2일

심사 완료일: 2004년 8월 20일

이상의 세가지 요인에 의하여 발생하는 것으로 알려져 있다(Postma, 1955; Brace, 1965).

암석의 역학적 이방성을 추정하는 방법으로는 암석을 파괴하지 않고 물성에 대한 정보를 보다 간편하고 쉽게 얻을 수 있는 초음파 속도를 이용한 연구가 널리 사용된다(송무영과 황인선, 1993; 박형동, 1995; 김영환과 이승석, 1997). 그리고 층리나 엽리가 발달한 암석에서 이방성 특성에 대한 연구는 Crampin et al.(1980), Anderson et al.(1980), Ramamurthy et al.(1993), King and Chaudhry(1995) 등에 의해서 수행된 바 있다. 특히, 편마암과 편암은 Deklotz(1966), McCabe and Koerner(1975) 등에 의한 연구결과가 보고 되었다. 화강암의 경우는 거시적으로 균질하고 연속적이며 등방성을 갖는 것으로 취급되고 있으나, Birch (1960, 1961); Osborne(1965); McWilliams(1966), Douglass and Voigt(1969), Peng(1972), Soga et al.(1978), Anderson et al.(1980), Teufel(1989)등의 연구에 의하면, 암석 내부에 발달해 있는 미세균열의 방향성 등에 의하여 암석의 강도나 탄성파속도가 다르게 나타나는 것으로 보고하였다. 이와 같이 복잡, 다양한 상태로 존재하는 암석의 특성을 나타내는 물리적·역학적 성질에는 암석의 비중, 공극율, 함수율, 초음파속도, 강도, 탄성계수, 포아송비, 점착력, 내부마찰각 등을 들 수 있다. 이들 물성 사이에서 보여지는 일반적인 상관관계는 직선관계, 곡선관계 및 Zone 형태 등으로 분류된다(Judd and Huber, 1961).

본 연구에서는 첫째, 화강암, 화강편마암, 석회암 등 세 종류의 암석이 방향에 따라 어떤 물리적·역학적 성질의 차이를 보이는지를 알아보고, 둘째, 암석의 종류와 각 방향에 따른 물리적·역학적 성질의 상호관계를 비교·검토하고자 한다.

2. 시 료

실내시험을 위하여 사용된 암석은 화성암의 경우 국내에 비교적 넓게 분포하고 건축물의 내외장용으로 널리 사용되는 남원지역에 분포하는 화강암을 대상으로 시료를 채취하였다. 퇴적암의 경우는 강원도와 충청북도 지역에 전체 분포 면적의 95%이상을 차지하면서 주로 시멘트와 제철용으로 사용되는 석회암을 이용하였으며, 영월지역에 분포하는 석회암 시료를 대상으로 하였다. 변성암은 편리와 엽리구조가 비교적 잘 관찰되는 장성지역에 분포하는 화강편마암을 사용하였다. Fig. 1에는 각 암석의 구조적 특징을 나타내었다.

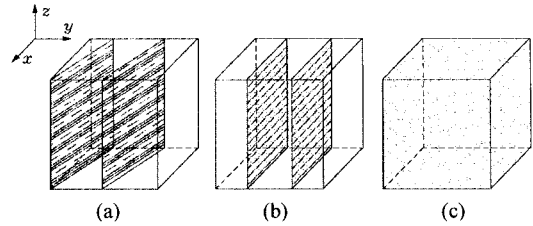


Fig. 1. Schematic diagram of three kinds of rock block samples; (a) granitic gneiss, (b) limestone, (c) granite. The hatched planes represent a transversely isotropic plane

3. 실내 시험 방법

3.1 초음파 속도

정방향 암석시편의 좌표축 x , y , z 를 결정하기 위하여 초음파속도 측정을 실시하여 속도가 가장 빠른 방향을 z 축, 중간속도를 x 축, 가장 느린 방향을 y 축으로 정하였다. 각 암종의 방향에 따른 초음파 속도 차이를 평가하기 위하여 $30\text{ cm} \times 30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ 크기의 자연건조 상태의 정방향 암석 시료를 이용하여 Fig. 2와 같은 방법으로 x , y , z 축에 평행하게 각각 10회씩 초음파 속도 측정을 수행하였다. 가압면은 연마제를 이용하여 가공하였으며, 또한 암석의 이방성을 다양하게 측정하기 위하여 시료 면적의 70% 구역내에서 각각 대각선으로 9개소를 정하여 측정, 평균값을 사용하였다. 초음파 속도 측정에 사용된 기기는 영국 CNS FARNELL사의 PUNDIT 장비를 사용하였으며, 사용 주파수는 200 KHz다.

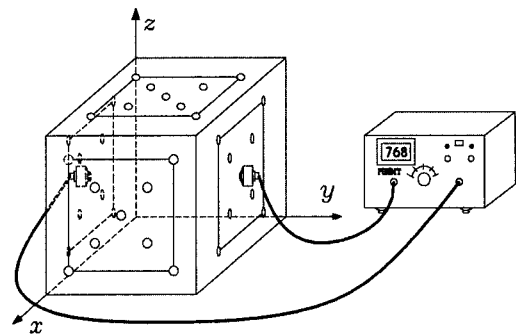


Fig. 2. Schematic diagram for measuring the ultrasonic wave velocity

3.2 일축압축 시험

한 변의 길이가 약 30 cm인 정방형 입방체 암석에 대해, 다이아몬드 코아 시추기를 이용하여 Fig. 3와 같이 x, y, z 등 세 축에 평행한 방향에서 각각 4개씩 총 12개의 NX core ($\phi 54$ mm)를 채취하였다. 시료는 ISRM (1981)의 제작 기준에 따라 성형하였다. 압축시험은 x, y, z축 각 방향별로 3개의 시험편을 이용하여 실시하였다.

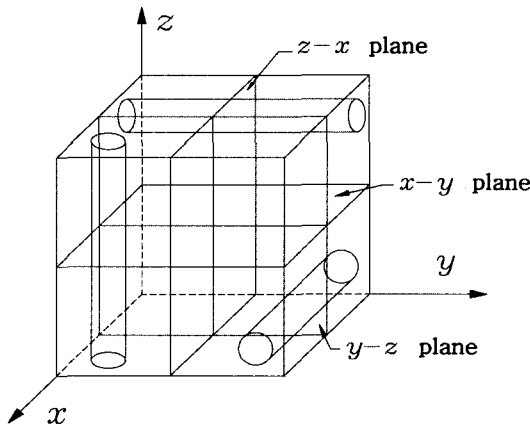


Fig. 3. Three mutually perpendicular core sample

3.3 점하중 시험

간접적인 인장강도 시험법으로서 시료의 양쪽에 수직으로 점하중을 가하여 수평으로 인장응력을 일으킴으로써 하중방향과 같은 방향으로 파괴면을 발생시켜 암석을 파괴시키는 방법이다. 일반적으로 암석의 인장강도는 압축강도의 1/10~1/20 수준이며, 점하중강도와 일축압축강도와는 비교적 좋은 직선의 상관관계가 있는 것으로 알려져 있다(Broch and Franklin, 1972; ISRM, 1985).

3.4 압열인장 시험

일축압축시험과 같은 방법으로 각 축에 대해 3개씩 총 9개의 시료를 이용하여 ISRM(1981)의 기준에 따라 수행하였다.

3.5 슈미트해머 시험

2.21 Nm의 타격 에너지를 갖는 N-type의 슈미트해머를 이용하여 각 암석표면에서 20회의 슈미트해머 반발치를 구하였고 그 중에서 높은 수치 10개의 평균 반발치를 대표값으로 고려하였다. 시험방법은 ISRM(1987)의 기준을 따랐다.

4. 결과 및 해석

4.1 초음파 속도

Table 1은 각 압축의 방향에 따른 초음파 속도 측정 결과를 정리한 것이다. 각 방향 평균속도를 비교할 때 최대 속도를 나타내는 z축 방향이 x나 y축 방향보다 약 10~15% 정도 빨랐다. 특히, 화강암이 화강편마암과 석회암보다 속도차가 크게 나타났다.

Table 1. Result of P-wave velocity measurement according to directions

rock type	direction	P-wave velocity (m/sec)		
		z	y	x
granite		3818	3189	3396
granitic gneiss		5665	5113	5387
limestone		6458	5825	6292

4.2 일축압축 시험

세 방향의 암석 코아 시료를 대상으로 일축압축강도 시험을 실시하여 얻은 결과를 Table 2에 정리하였다. 화강암의 경우 일축압축강도의 크기는 $y > z > x$ 순이며, 화강편마암의 경우 $z > y > x$, 석회암의 경우 $y > z > x$ 순으로 나타났다.

화강편마암의 경우 편리의 방향이 90°일때 가장 큰 탄성과 속도와 강도 값을 나타내었으나, 화강암의 경우는 미세균열의 방향성이 z축 방향에 평행하게 우세하여 나타난 결과로 보여지며, 석회암의 경우는 층리면을 따라 z축방향 즉, 90°일때 층리면을 따라 파괴가 이루어졌기 때문에 판단된다.

Table 2. Result of the uniaxial compressive test according to directions(UCS: uniaxial compressive strength, kgf/cm²; E: Young's modulus, $\times 10^5$ kgf/cm²; ν : Poisson's ratio)

rock type	direction	z	y	x
	granite	UCS	1196	1469
E		4.487	4.981	3.941
ν		0.220	0.197	0.274
granitic gneiss	UCS	1435	1205	1113
	E	7.725	7.206	4.503
	ν	0.203	0.187	0.148
limestone	UCS	801	1241	660
	E	5.414	6.650	3.562
	ν	0.274	0.265	0.223

즉, 일반적으로 일축압축강도와 초음파 속도는 비례하는 것으로 알려져 있으나, 동일한 암종이라도 구조적 결함에 의해 다른 양상을 나타낼 수 있음을 시사한다. 또한 화강암에서의 이러한 현상을 보다 정확하게 이해하기 위해서는 암석 내부에 존재하는 미세구조를 관찰하는 것 또한 중요한 방법이라 사료된다. 이것은 토의 부분에 설명하기로 하겠다.

일축압축강도와 변형특성 사이의 관계를 알아보기 위해 각 방향별 3회씩 측정된 응력-변형률 곡선의 평균을 Fig. 3(a), (b), (c)에 각각 도시하였다.

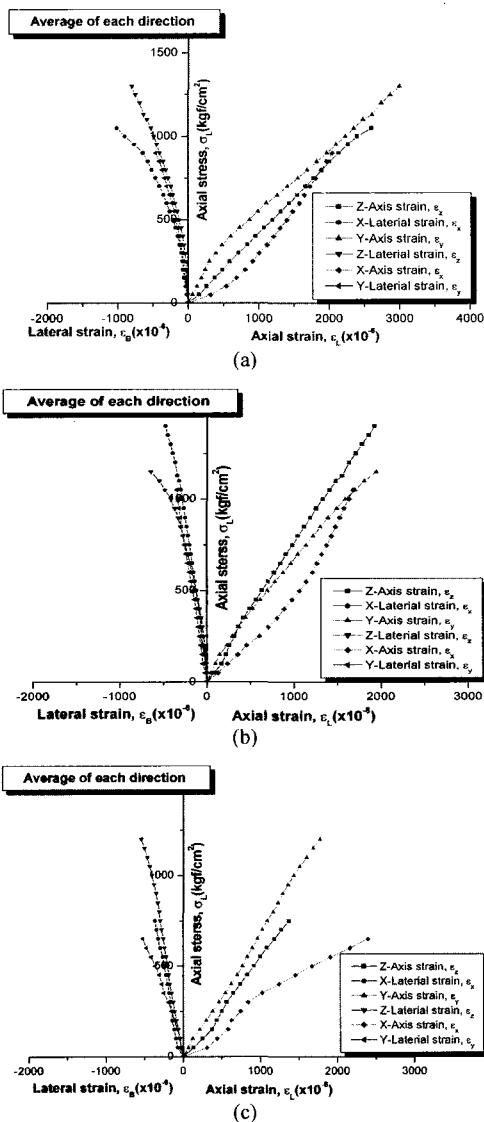


Fig. 4. Stress-strain curves for (a) granite, (b) granitic gneiss, (c) limestone under the uniaxial compressive test

화강암의 경우(Fig. 4(a)) 축방향 변형율은 x축 방향이 가장 큰 반면, y축 방향이 가장 작게 나타났다. 이는 동일한 응력수준에서 x축 방향의 변형이 가장 크게 나타나 상대적으로 탄성계수가 작아짐을 의미한다. y축 방향의 경우는 동일한 응력수준에서 변형이 가장 작으며, 이는 y축 방향의 탄성계수가 상대적으로 커짐을 의미한다. 화강편마암의 경우(Fig. 4(b)), 축방향 변형율은 x축 방향이 가장 크며, z축 방향이 가장 작게 나타났다. 이는 동일한 응력수준에서도 변형율의 측정방향과 편마구조의 방향에 따라 큰 영향을 받는 것으로 판단되며, 이로 인해 x축 방향에서의 탄성계수가 상대적으로 작은 값을 보임을 알 수 있다. 석회암의 경우(Fig. 4(c)), 축방향 변형율은 x축 방향이 가장 크며, y축 방향이 가장 작게 나타났다. 이는 층리면과 하중방향이 90° 즉, 층리면의 경사가 0°일때 일축압축강도와 탄성계수가 가장 높은 값을 보임을 알 수 있다.

4.3 점하중 시험

일축압축강도와 밀접한 상관성을 보이는 점하중 시험 결과를 Table 3에 정리하였다.

Table 3. Result of point load test measured in three mutually perpendicular directions (unit: kgf/cm²)

rock type	direction		
	z	y	x
granite	66	74	58
granitic gneiss	76	71	67
limestone	35	54	32

Table 3으로부터 화강암의 경우 일축압축강도가 가장 큰 y축 방향에서 점하중강도가 가장 크고 다음으로 z축, x축 방향 순으로 작은 값을 보인다. 반면, 화강편마암의 경우 일축압축강도가 가장 큰 z축 방향에서 점하중강도가 가장 크고 다음으로 y축, x축 방향이 작은 값을 나타낸다. 가장 낮은 값을 보이는 석회암의 경우 일축압축강도가 가장 큰 y축 방향에서 점하중강도가 가장 크고 z축, x축 방향이 작은 값을 보임을 알 수 있다.

4.4 압열인장 시험

Table 4는 압열인장강도의 시험 결과를 나타낸다.

Table 4. Result of Brazilian tensile test measured in three mutually perpendicular directions (unit: kgf/cm²)

rock type	direction		
	z	y	x
granite	84	90	81
granitic gneiss	177	153	118
limestone	85	111	36

화강암의 경우 일축압축강도와 압열인장강도의 비가 약 13~16배 정도의 관계를 가지며, 이 결과는 기존에 보고된 결과와 일치한다(Kahraman, 2001). 화강편마암의 경우 일축압축강도와 압열인장강도의 비가 약 8~9배의 관계를 보이며, 이는 일반적인 일축압축강도와 압열인장강도의 비가 약 10~20배 정도임을 감안하면 상대적으로 압열인장강도가 크게 나타남을 알 수 있다. 석회암에 있어서 일축압축강도와 압열인장강도의 비는 약 9~18배 정도의 관계를 보여 다른 두 암종에 비해 편차가 크게 나타났다. x축 방향에서의 비가 약 18배인 것을 감안하면 일축압축강도가 높을수록 그 비가 낮으며, 일축압축강도가 낮을수록 그 비가 높아짐을 확인할 수 있다.

4.5 슈미트해머 시험

일축압축강도를 추정할 수 있는 방법으로서 점하중강도와 함께 자주 쓰이는 슈미트해머 반발계수의 시험결과를 Table 5에 나타냈다. Table 5로부터 알 수 있듯이 방향에 따른 반발계수의 값이 차이가 있음을 알 수 있다.

Table 5. Result of Schmidt hammer rebound test measured in three mutually perpendicular directions

direction rock type	Schmidt hammer rebound value, R (kgf/cm ²)		
	z	y	x
granite	50	53	45
granitic gneiss	48	54	54
limestone	53	53	16

5. 고찰

화강암, 화강편마암 및 석회암 시료의 방향별 P-파 속도의 측정결과를 Fig. 5에 도시하였다.

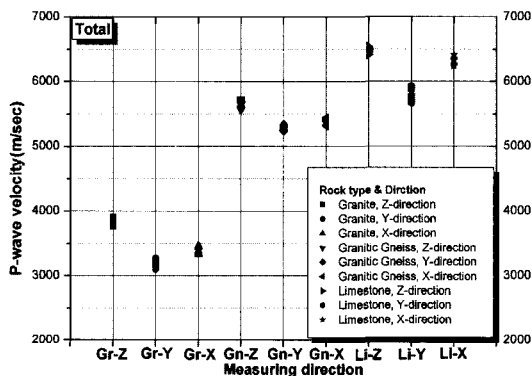


Fig. 5. P-wave velocity according to measuring direction of three rock types

전체적으로 석회암에서 P-파 속도가 가장 높게 나타났으며 다음으로 화강편마암, 화강암 순이었다. 또한 측정 방향에 따라서도 차이가 크게 나타나는데, 이러한 원인은 석회암의 층리구조나 화강편마암의 엽리, 편리 구조 그리고 화강암 시편내에 존재하는 미세균열의 발달 형태에 기인하는 것으로 사료된다.

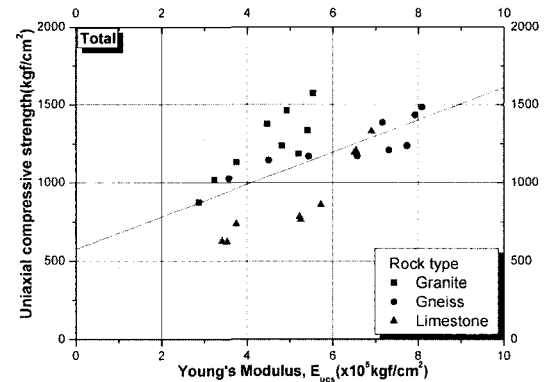


Fig. 6. Relationship between Young's modulus and uniaxial compressive strength of three rock types

세 암종에 대한 일축압축강도와 탄성계수의 관계를 Fig. 6에 나타내었다. 화강암의 경우 일축압축강도는 약 900~1,600(kgf/cm²), 탄성계수는 약 2.9~5.4(×10⁵ kgf/cm²)의 범위를 보여, 방향에 따라 차이가 크게 나타났다. 비교적 등방성으로 간주되는 화강암일지라도 미세균열의 분포상태와 방향에 따라 탄성계수와 강도는 상이하게 나타나며, 석회암의 경우 방향에 따라 일정한 군의 형태를 나타내고 있다.

$$UCS(kgf/cm^2) = 574.803 + 103.4 \times E_{UCS} \tag{1}$$

$$r = 0.595$$

이들 간의 상관관계를 살펴보면 상관계수는 0.595로 낮게 나타났다. 그러나 일축압축강도와 탄성계수는 조암광물의 입자분포와 결합력, 암석의 미세균열, 절리 등의 유무뿐만 아니라 함수상태, 하중속도 등에 크게 영향을 받기 때문에 암석의 종류와 실험상태에 따라 달라지지만 그 관계는 어떤 축에서도 직선관계가 있는 것으로 알려져 있어 Deere and Miller(1966)의 연구결과와 일관성이 있는 것으로 나타났다.

일축압축강도와 점하중강도지수 사이의 상관관계를 Fig. 7에 나타내었다. 이들 결과에 의하면 점하중강도지수와 일축압축강도 사이의 관계가 화강암의 경우 18~20배에 해당하며, 화강편마암은 17~19, 석회암은 21~

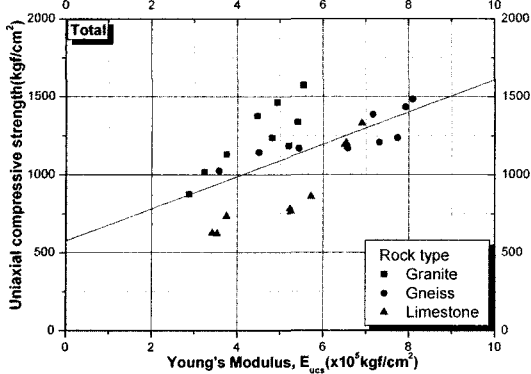


Fig. 7. Relationship between point load strength index ($I_{s(50)}$) and uniaxial compressive strength of three rock types

23배의 범위에 속하는 것으로 나타났다. 석회암을 제외한 두 암종의 점하중강도지수는 Broch & Franklin (1972)과 Bieniawski(1975)가 제시하여 현재 일반적으로 널리 사용되고 있는 24보다 낮음을 알 수 있었다. 하지만, 이 값은 암종이나 암석의 풍화도에 따라 다양하게 나타날 수 있음이 보고되었다(Kahraman, 2001).

또한 서로 다른 암석일지라도 일정한 선형관계를 보임으로 좀 더 많은 자료를 수집하여 보완한다면 국내산 암석에 대해서 점하중강도로부터 일축압축강도를 간접적으로 구하는 경험식을 얻을 수 있을 것으로 사료된다. 아래의 식은 Fig. 7로부터 구한 경험식이다.

$$UCS(kgf/cm^2) = 243.942 + 14.928 \times I_{s(50)}, \quad (2)$$

$$r = 0.897$$

일축압축강도와 슈미트해머 반발치와의 관계를 도식하면 Fig. 8과 같다.

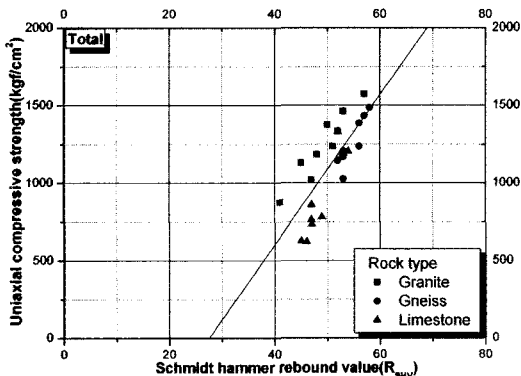


Fig. 8. Relationship between Schmidt hammer rebound value and uniaxial compressive strength of three rock types

Fig. 8에서 보이는 것처럼 화강암과 화강편마암의 경우 슈미트해머 반발치가 석회암에 비해 비교적 높게 나타났다. 이는 암석의 상대적 경도(hardness)를 나타내는 슈미트해머의 경우 일반적으로 암석입자 사이의 결합력이나, 광물입자들의 경도와 관계되기 때문으로 판단되며, 화강암과 화강편마암의 경우 주로 석영이 대부분을 차지하는 점에 기인하는 것으로 사료된다. 이들 사이의 상관관계는 슈미트해머 반발치가 40 이상일때 다음식과 같이 나타낼수 있다.

$$UCS(kgf/cm^2) = -1329.612 + 48.327 \times R, \quad (3)$$

$$r = 0.777$$

Fig. 9는 세 암종에 대한 일축압축강도와 압열인장강도의 관계를 나타낸다. 화강편마암과 석회암의 경우 기울기가 화강암에 비해 낮고, 화강암의 경우 압열인장강도의 분포 범위가 매우 좁게 나타났다. 화강편마암과 석회암의 경우는 편리구조나 층리구조에 의해 뚜렷한 이방성을 나타내기 때문에 그 범위가 넓게 나타나는 것으로 판단되며, 화강암의 경우 일축압축강도에 비해 상대적으로 압열인장강도의 이방성이 크지 않은 것으로 사료된다.

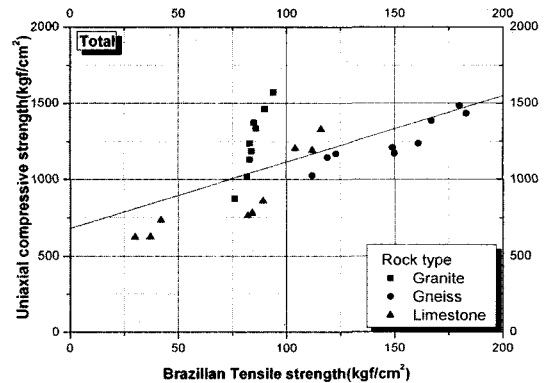


Fig. 9. Relationship between Brazilian tensile strength and uniaxial compressive strength of three rock types

아래식은 세 암종의 상관관계를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$UCS(kgf/cm^2) = 680.460 + 4.345 \times BTS, \quad (4)$$

$$r = 0.658$$

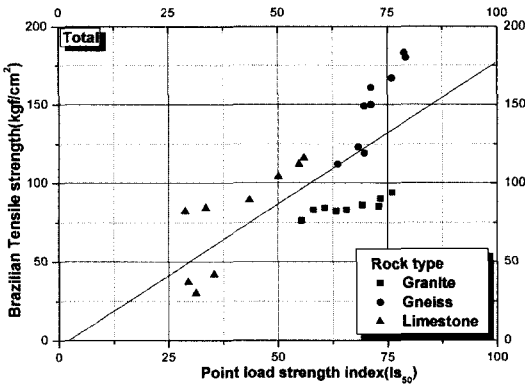


Fig. 10. Relationship between point load strength index and Brazilian tensile strength of three rock types

세암종에 대한 방향별 점하중 강도와 압열인장강도를 Fig. 10에 나타냈다. 화강암과 화강편마암은 비교적 좋은 선형관계를 보이고 있으나, 석회암의 경우 그 분포의 범위가 넓고 낮은 강도 수준에 분포한다. 또한 이들 사이의 관계식은 비교적 높은 상관관계를 나타내고 있어 점하중강도를 이용한 압열인장강도의 추정 가능성이 높으므로 사료되며, 이들 사이의 관계식은 다음과 같다.

$$BTS(kgf/cm^2) = -3.816 + 1.810 \times I_{s(50)}, \quad (5)$$

$$r = 0.718$$

6. 결 론

본 연구는 국내에 분포하는 화강암, 화강편마암, 석회암의 세 암종을 대상으로 암석의 방향에 따른 물리적·역학적 성질의 차이를 살펴보고, 또한 암석의 종류와 각 방향에 따른 물리적·역학적 성질의 상호관계를 비교·검토하기 위하여 초음파 속도, 일축압축, 점하중, 슈미트해머, 압열인장 시험 등 다양한 실내실험을 수행하였다. 연구 결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 세 종류의 정방형 암석에 대해 Z축, Y축 및 X축에 따른 방향별 물성들을 측정, 분석한 결과 대부분의 물성치들은 암종과 방향에 따라 일축압축강도 및 압열인장강도와 선형의 상관관계를 나타내었다. 이러한 사실은 이들 암석이 역학적으로 일정한 방향성 성질을 가지고 있음을 의미한다.
- 2) 초음파속도 측정 결과 세 종류의 암석에서 측정 방향에 따라 초음파 속도가 다르게 나타나는 것을 알 수 있었다. 이러한 원인은 화강편마암과 석회암의 경우 편리 및 층리구조로 인한 이방성을 나타내는 것으로 판단되며, 화강암은 미세균열들의 발달 형태가 영향을 미친 것으로 판단된다. 따라서 초음파속

도 측정방법은 쉽고 간단한 실내 실험방법으로서 암석의 이방성 성질을 규명하는데 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

- 3) 점하중시험에 의한 점하중강도지수($I_{s(50)}$)의 측정결과, 화강암의 경우 일축압축강도와 점하중강도지수의 비는 18~20, 화강편마암은 17~19, 석회암은 21~24배에 해당하는 것으로 나타났다. 이 시험결과는 암석의 종류와 방향에 따라서 점하중강도지수가 다르게 나타남을 의미한다. 따라서 일반적으로 사용되고 있는 일축압축강도와 점하중강도지수의 비 24를 국내산 암종 전체를 대표해서 사용하는 것은 무리가 있다고 사료된다.
- 4) 일축압축강도와 압열인장강도의 비는 화강암이 13~16, 화강편마암은 8~9, 석회암이 9~18배의 관계를 보였다. 방향별로는 화강암과 화강편마암은 그 차이가 작은 반면, 석회암의 경우는 최대/최소비가 거의 2배 정도로 방향에 따라 다른 강도비를 보였다. 특히, 일축압축강도와 압열인장강도 사이의 관계에서도 알 수 있듯이 비교적 등방성을 갖는 화강암의 경우 방향에 따른 강도비의 차이가 작은 반면, 뚜렷한 이방성을 보이는 석회암의 경우 그 차이가 대체로 크게 나타나는 것으로 판단된다.
- 5) 일축압축강도와 각 물성치간의 상관관계는 대부분 양의 선형적 상관관계를 나타냈다. 또한, 점하중강도, 슈미트해머 반발치, 압열인장강도와와의 상관관계는 비교적 높게 나타났으며, 이중 점하중강도가 가장 높은 상관관계를 보였다. 본 실험의 결과 및 분석을 통하여 점하중강도는 일축압축강도를 추정하기 위한 유효한 강도값이 될 수 있다고 판단된다.

참고문헌

1. Postma, G.W., 1955, Wave propagation in a stratified medium, *Geophysics*, Vol. 20, 780-806.
2. Brace, W.F., 1965, Relation of elastic properties of rocks to fabric, *Geophys. Res.*, Vol. 70, pp. 5657-5667.
3. 송무영, 황인선, 1993, 한반도 중부권 지각물질의 구조와 물성연구 (2) : 퇴적암류 코아시료의 탄성파 속도와 점재하강도 비교, Vol. 3, 21-37.
4. 박형동, 1995, 암석의 공학적 이방성 측정을 위한 실험실내 P파 속도 측정기법에 대한 연구, *지질공학회지*, Vol. 5, 237-247.
5. 김영환, 이승석, 1997, 이방성 재료에서의 탄성파 전파 과정에 대한 시뮬레이션, Vol. 17, 227-236.
6. Crampin, S., R. Mcgonigle and D. Bamford, 1980, Estimating crack parameters from observations of P-wave velocity anisotropy, *Geophysics*, Vol. 45, 345-360.
7. Anderson, D.L., B. Minster and D. Bamford, 1980, Estimating crack parameter from observations of P-wave velocity anisotropy, *Geophysics*, Vol. 45, 345-360.

8. Ramamurthy, T., Rao G. Venkatappa and J. Singh, 1993, Engineering behaviour of phyllites, Engin. Geol., Vol. 33, 209-225.
9. King, M.S., N.A. Chaudhry, A. Shakeel, 1995, Experimental ultrasonic velocities and permeability for sandstones with aligned cracks, Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 32.2, 155-163.
10. Deklotz, E.Z., J.W. Brown and O.A. Stemler, 1966, Anisotropic of a schistose gneiss, Proc. 1st Congr. Int. Soc. Rock Mech., Lisbon, Vol. 1. 465-470.
11. McCabe, W.M. and R.M. Koermer, 1975, High Pressure shear strength of anisotropic micaschist rock, Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 12, 219-228.
12. Birch, F., 1961, The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars, Part 2, Journal of Geophysical Res., Vol. 66, 2199-2224
13. Osborne, F.F., 1965, Rift, grain and hardway in some Re-Cambrian granites, Quebec, Econ. Geol., 30, 540-551.
14. 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.
15. Douglass, P.M. and B. Voigt, 1969, Anisotropy of granites, A reflection of microscopic fabric, Geotechnique, 19, 376-389.
16. Peng, S.S., 1976, Stress analysis of cylindrical rock discs subjected th axial double point-load, Int. Jour Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstra. Vol. 13, 97-101.
17. Soga, N., H. Mizutani, H. Spetzler, R. Martin, 1978, The effect of dilatancy on velocity anisotropy in Westerly granite, J. Geophy. Res., 83, pp. 4451-4458.
18. Teufel, L.W., 1989, Acoustic Emissions during Anelastic Strain Recovery of Cores Form Deep Boreholes, Proceedings, 30th U.S. Symp. on Rock Mech., Morgantown, WV, 269-276.
19. Judd, W. and C. Huber, 1961, Correlation of rock properties by statistical method, Int. Symp. Mining Res., Missouri Sch. Mines, Rolla, Mo.
20. ISRM, 1981, Suggested method for rock characterization testing and monitoring, Pergamon Press.
21. Broch, E. and J.A. Franklin, 1972, The point-load strength test, Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Anstr., Vol. 9, 669-697.
22. ISRM, 1985, Suggested methods for determining point load strength: Revised version, Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci. & Geomechanics Abstracts, Vol. 22, 51-60.
23. ISRM, 1987, Suggested methods for determining hardness of rocks, Int. Jour. of Rock Mech. and Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 15, 89-97.
24. Kahraman, S., 2001, Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock, Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 38. 981-994.
25. Deere, D. U. and R. P. Miller, 1966, Engineering classification and index properties for intact rock, Air Force Weapons Laboratory Technical Report, AFWL-TR-65-116, Kirtland Base, new Mexico, pp.300.

원연호



1973년 조선대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1996년 강원대학교 산업대학원
자원공학과 공학석사
2003년 조선대학교 대학원 자원공학과
공학박사
Tel: 02-887-8166
E-mail: won1407@korea.com
현재 원앤비 기술사사무소 대표이사

강추원



1973년 조선대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1981년 조선대학교 공과대학 자원공학과
공학석사
1999년 강원대학교 대학원 자원공학과
공학박사
Tel: 062-230-7117
E-mail: cwkwang@mail.chosun.ac.kr
현재 조선대학교 자원공학과 교수

김종인



1994년 조선대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1996년 조선대학교 대학원 자원공학과
공학석사
Tel: 062-230-7876
E-mail: thuth@shinbiro.com
현재 조선대학교 자원공학과 박사과정

박현식



1997년 조선대학교 공과대학
자원공학과 공학사
2000년 조선대학교 대학원 자원공학과
공학석사
Tel: 062-230-7876
E-mail: phs821@shinbiro.com
현재 조선대학교 자원공학과 박사과정