

낮은 수직응력 하에서 인공 절리면의 전단 이방성에 관한 연구 곽정열¹⁾, 이상은²⁾, 임한욱³⁾

Anisotropic Shear Strength of Artificially Fractured Rock Joints Under Low Normal Stress

Jung-Yeol Kwag, Sang-Eun Lee and Han-Uk Lim

Abstract. Anisotropic shear strength of rock joints is studied based on the artificially fractured specimens using experimental and analytical methods. Series of direct shear tests are performed to obtain the strength, stiffness and friction angle of joints under various low normal stresses and shearing directions. The results of shear strength and stiffness show anisotropic value according to shearing direction under low normal stress specially less than 2.45 MPa. But, the effect of joint roughness on strength decreases with increasing normal stress. To estimate more effectively the peak shear strength under low normal stress, the modified Barton's equation is suggested.

KeyWords: Anisotropic shear strength, Artificially fractured joint, Low normal stress, Modified Barton's equation

초 록. 암석의 절리면 전단강도의 이방성을 연구하기 위하여 인공절리면을 형성한 시편에 대한 실험을 실시하고 그 결과를 분석하였다. 즉 낮은 수직응력 상태에서 전단 방향에 따른 전단강도, 전단강성 및 마찰각을 구하기 위한 실험을 실시하였다 그 결과 낮은 수직응력하에서 전단 강도 및 강성은 전단 방향에 따라 이방성을 보이며, 특히 수직응력 2.45 MPa미만에서 뚜렷하였다. 그리고 수직응력이 증가할수록 절리면의 이방성 효과는 감소하였다. 따라서 낮은 수직응력 하에서 전단강도 및 강성값을 보다 정확히 구하기 위해서 Barton의 식에 전단방향을 고려한 보정함수 $F(a)$ 를 반영하여 새로이 수정식을 제안한다.

핵심어: 전단강도의 이방성, 인공절리, 낮은 수직응력, Barton의 수정식

1. 서 론

암반사면이나 터널 등 지하구조물을 건설할 때 암반 내 각종 지질요소, 구조물의 기하학적 형태, 지하수 및 발파등이 사면안정에 미치는 영향에 대하여 광범위하게 검토되고 있다. 이 가운데 지질적인 요소중 습곡, 단층, 절리, 층리, 엽리, 편리 등 그 성인에 관계없이 암반 내에 자연적으로 형성된 균열이나 일종의 틈을 총칭하여 불연속면(discontinuity)이라 하는데 이 불연속면의 공학적 특성은 암반내에 설치되는 각종 구조물의 안정성에 중요한 영향을 미친다.

암반내에는 다양한 불연속면이 분포하고 있으나 그

중에서도 암반 구조물의 안정성 해석에 큰 영향을 미치고, 또한 많이 분포하고 있는 것이 절리(joint)라 할 수 있다. 이와 같은 절리면의 역학적 특성은 여러 가지 요인에 따라 서로 다른 값을 보이지만 동일한 실험조건에서도 절리면의 거칠계수와 가압방향에 따라 차이를 보인다. 즉 편평한 절리면은 모든 전단방향에 대하여 거의 동일한 역학적 특성을 보이는데 비하여 거친 절리는 절리면의 방향과 전단(가압)방향에 따라 역학적 물성의 차이를 보이는데 이와 같은 특성을 절리의 이방성(anisotropy of rock joint)이라 한다. 또한 이 이방성은 수직응력의 크기에 따라 차이를 보이는 것으로 잘 알려져 있다^{1,2,3)}.

이와 같은 중요성에 비추어 최근 절리의 역학적 특성에 관한 연구가 국내외에서 비교적 활발히 수행, 보고 되고 있다^{4,5)}. 그러나 전단 이방성에 관한 연구는 그렇지 못한 것으로 보인다. 즉 P파와 S파의 전파속도와 암석의 이방성, 탄성계수의 이방성, 일축 및 삼축압

¹⁾(주)태조엔지니어링 지반/터널부
²⁾만영엔지니어링 부장
³⁾강원대 지구·환경공학부 교수
접수일: 2002년 12월 13일
심사 완료일: 2003년 6월 17일

축실험에 의한 강도의 이방성 등은 보고 되고 있으나 절리의 이방성에 관한 연구는 아주 제한적이다.

지금까지 수행된 연구결과에 대한 몇가지 예를 들면 모르타르 또는 석고 등을 대상으로 한 모델 절리의 전단 이방성 연구¹⁻⁴⁾, 거칠각의 평방근 평균값 산정을 통한 연구⁵⁾ 등을 들 수 있다. 이와 같이 절리의 이방성에 관한 연구, 보고가 상대적으로 부족한 것은 암석 절리는 동일한 절리 거칠계수를 갖는 경우가 드물고, 또한 그와 같이 인공적으로 제작하기도 어렵기 때문인 것으로 생각된다.

한편 절리의 전단 특성을 파악하기 위하여 실험실내 실험방법으로 최대전단강도/최대마찰각, 잔류전단강도/잔류마찰각, 전단변형곡선/전단강성, 수직변형곡선/팽창각, 수직강성, 절리면 거칠계수, 절리면 압축강도 등을 구하는 실험이 필요에 따라 실시되고 있다.

본 연구에서는 국내산 암석중 균질성을 나타내는 포천 화강암과 정선 대리석 그리고 특수 모르타르 시료에 대하여 인공절리를 제작하고 거의 비슷한 절리 거칠계수를 갖는 시료를 대상으로, 비교적 낮은 수직응력 하에서 절리면 거칠방향에 따른 전단강도, 전단강성 및 마찰각의 변화를 구하고 이들 값을 상호, 비교하여 절

리면의 이방성을 검토하였다.

2. 시료, 실험장치 및 실험 방법

2.1 시편 제작 및 물리적 특성

본 연구에서는 조립질 포천 화강암, 정선 대리석 및 특수 모르타르를 이용하여 시편을 제작하였다.

일반 모르타르는 강도가 20 MPa정도로 암석 시편의 강도에 비하여 값이 낮기 때문에 이것보다 강도가 약 2 배 이상 큰 특수모르타르를 사용하였다. 즉 실리콘 고무를 이용하여 특수모르타르 회사에서 제시한 방법으로 배합하고 7일 동안 양생하여 총 36개의 시편을 제작하였으며, 포천 화강암과 정선 대리석은 실험실에서 코어링하여 120개를 제작하였다. 모르타르, 화강암 및 대리석의 기본 물성은 Table 1과 같다.

결합이 없는 암괴를 Fig. 1의 (a)와 같이 결 방향에 수평이 되도록 30×30×25(cm)로 절단한 다음 탄성과 전파속도를 측정하여 그 값이 가장 빠른 방향을 기준 축 0°로 정한 후 결방향에 수직이 되도록 코어링하였다. 다음에 그림 (b)와 같이 인공절리를 제작하였으며, 그 후 전단상자의 시험 보조장치에 알맞도록 시편을 절삭,

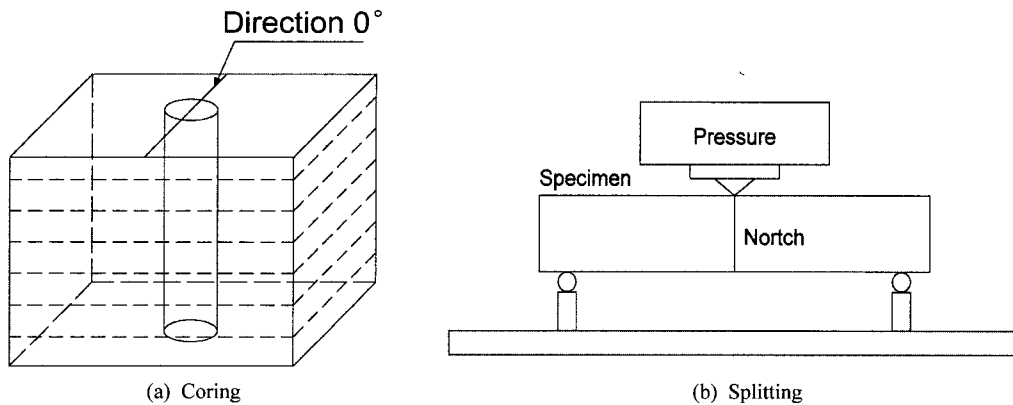


Fig. 1. Sampling and splitting for specimen.

Table 1. Physical properties of samples.

Physical properties	Mortar	Pocheon Granite	Jungsun Marble
Density (kN/m ³)	21.43	26.8	26.1
Porosity (%)	12.010	1.009	1.110
Longitudinal elastic wave velocity (m/sec)	3000 ± 100	4300 ± 100	4100 ± 100
Uniaxial compressive strength (MPa)	41 ± 2 (curing for 7 days)	199 ± 5	133 ± 4
Young's modulus (GPa)	29.8 ± 1	59.87 ± 2	55.45 ± 3
Poisson's ratio	0.28 ± 0.02	0.22 ± 0.01	0.25 ± 0.01

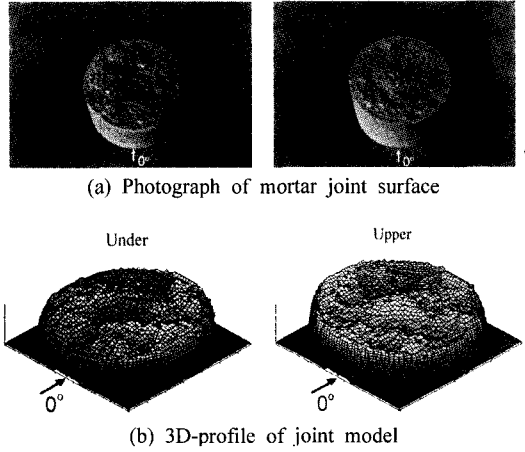


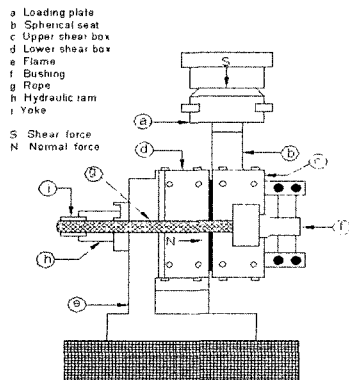
Fig. 2. An example of photograph and 3D-profile of mortar specimen.

연마하였다.

또한 절리면의 이방성을 검토하는데 보조적으로 사용하기 위하여 압열인장시편을 제작하였다. 이들 시편은 모래, 시멘트, 후라이 애쉬 및 기타를 각각 중량비 51.5:40:(2.5~3):(5.5~6.0)의 비율로 배합하여 제작하였으며, 시편의 직경은 약 68 mm이다. 제작된 시편과 모르타르 모형 절리에 대한 3차원 프로파일의 예를 들면 Fig. 2와 같다.

2.2 실험장치

직접 전단시험을 할 수 있도록 Fig. 3의 (a)와 같이 제작된 전단상자를 미국 United사의 SFM모델의 시험기에 설치하여 실험을 실시하였다. 전단상자에 작용하는 수직응력은 유압챔, 요크, 로우프를 통하여 가해지며



(a) Schematic diagram of shear test apparatus

유압램은 수동펌프로 작동시킨다. SFM시험기는 그림 (b)와 같이 실제 시험이 수행되는 본체와 시험과정을 제어하고 모든 시험자료를 처리할 수 있는 컴퓨터를 포함한 제어반으로 구성되어 있다 이 장비의 최대 가압 하중은 20톤이며 압축 및 인장시험이 모두 가능하다. 그리고 변위는 분당 0.005 mm에서 500 mm까지 다양하게 제어할 수 있다.

2.3 실험방법

본 연구를 위한 절리면 거칠계수 측정 및 전단시험은 다음과 같다.

절리면 거칠계수의 측정

Tse & Cruden은⁶⁾ 절리면 거칠계수 측정에 대한 여러 변수들과 이들의 상관관계를 연구한 결과 Z₂ 변수가 가장 효과적인 것으로 발표한 바 있다. 즉 Z₂ 값을 구하는 식 (1)과 이로부터 절리 거칠계수 (JRC)를 구하는 식 (2)를 제안하였다

$$RMS = \left[\frac{1}{M} \int_{x=0}^{x=M} y^2 dx \right]^{1/2}$$

$$Z_2 = \left[\frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 dx \right]^{1/2} \tag{1}$$

$$= \left[\frac{1}{L} \sum_{i=0}^{N-1} \left(\frac{Y_{i+1} - Y_i}{X_{i+1} - X_i} \right)^2 \right]^{1/2}$$

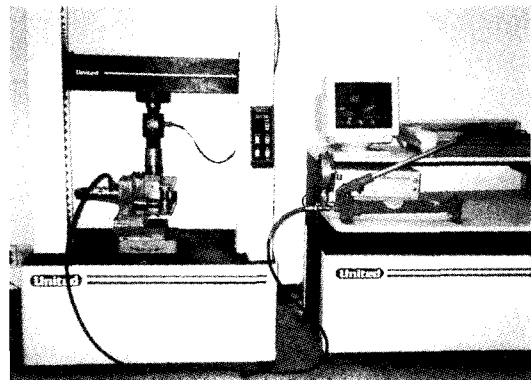
$$JRC = 32.20 + 32.47 \log(Z_2) \tag{2}$$

Z₂ : 절리면 형상의 평균기울기

L : 수평면에 투영된 절리면의 직선길이

dx, dy : 각각 수평 및 수직 방향의 미소증분

본 연구에서는 절리거칠계수 측정용 다이알 게이지를 이용한 변위측정장치로 절리 표면 돌출부 X, Y의 미소



(b) Photograph of direct shear test system

Fig. 3. General view of direct shear test apparatus & system.

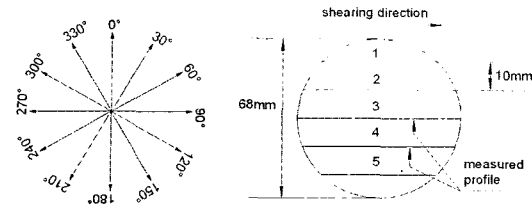


Fig. 4. Schematic diagrams of shearing directions and profile measurements on the joint surface.

증분값을 측정하고 이를 식 (1) 및 식 (2)에 대입하여 각각 Z_2 값 및 절리 거칠계수를 산출하였는데 이때 절리표면의 측정 간격은 Tse 등이 제안한 1.27 mm로 하였다.

제작된 인공절리의 JRC를 보다 정확히 구하기 위하여 Fig. 4와 같이 0°에서 330°까지 30°간격으로, 한 방향당 5회씩 측정하여 산술평균값을 구하고 그 값을 대표값으로 정하였다.

절리면 거칠계수 측정용 다이알 게이지는 기복차 20 mm 까지 측정이 가능하며, 이때 오차범위는 0.02 mm 이내이다. 그리고 데이터로거(data logger, UCAN-20PC)는 채널당 80 ms간격으로 1개의 자료를 읽을 수 있으며 이 데이터를 디지털 신호로 변환하여 개인용 컴퓨터에 ASC II 파일로 저장된다.

절리거칠계수를 측정한 결과 모르타르는 12.1~12.5로 비교적 유사한 값을 보였으나 화강암과 대리석은 그 값이 Fig. 5와 같이 6에서 19까지 매우 다양하게 분포하였다. 본 연구에서는 절리 거칠계수가 동일하거나 아주 유사한 절리가 요구되므로 화강암 및 대리석의 경우 1tonf/분의 속도로 일정하게 가압하여 인공 절리 시편을 제작하였다. 그림의 분포도에서 가장 많은 분포대인 12.1~12.5 및 11.1~11.5사이의 값을 선택하여 최종 시료로 결정하였다.

한편 최종적으로 결정된 시료는 5개를 한조로 12개의 그룹으로 나누어 실험을 수행하였다.

절리면 직접전단시험

직접전단시험의 방법 및 순서는 국제암반역학회(ISRM)의 시험규정에 의해 실시하였다. 먼저 절리면의 전단면적을 구하고, 설정한 수직응력으로부터 필요한 수직하중을 결정하였다. 여기서 수직응력은 예비실험결과 단축압축강도의 0.1~4% 수준내에서 3단계 또는 5단계로 설정하였는데, 모르타르는 3단계의 수직응력을, 화강암과 대리석은 5단계의 수직응력을 가하였다.

또한 전단하중을 가하는 동안 전단하중의 가압속도는 0.5mm/min, 수직하중은 실험조건 2%이내 범위로 일

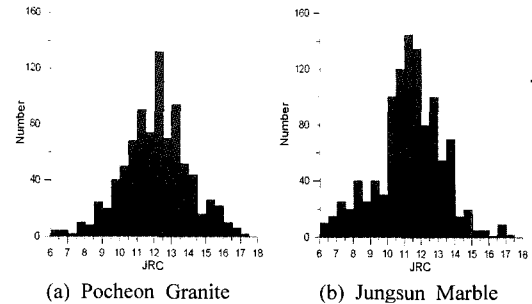


Fig. 5. Diagram of JRC distribution for Granite and Marble specimens.

정하게 유지하였다. 전단하중이 최대치를 지나 전단변위에 따른 하중의 변화가 5%미만일 때 잔류강도가 나타나는 것으로 간주하고 가압을 중지하였다. 한편 보조 수단으로 실시한 압열인장시험 역시 국제암반역학회의 규정에 따라 실시하였으며, 0°에서 330°까지 12방향으로, 한 방향당 5개씩 총 60회의 실험을 실시하였다.

3. 실험결과의 해석 및 고찰

절리면의 거칠계수와 전단방향에 따른 전단강도, 전단강성 및 마찰각 등에 대한 이방성을 구명하기 위하여 모르타르, 화강암 및 대리석 시편에 대하여 직접전단시험을 실시하였다. 이때 수직응력이 낮을수록 절리면과 전단방향에 따른 이방성이 뚜렷해지는 예비 실험결과에 따라 수직응력은 가능한 낮은 응력으로 설정하였는데 대체로 단축압축강도의 4%미만에서 단계별로 변화시키면서 실시하였다.

즉 수직응력은 모르타르의 경우 단축압축강도 41 MPa의 0.7%에서 3.6%에 해당하는 0.29, 0.59 및 1.47 MPa의 3단계로, 화강암 및 대리석은 0.29, 0.59, 0.88, 1.47 및 2.45MPa의 5단계로 가압하였는데 이들 값은 화강암 및 대리석 단축압축강도의 1.24% 및 1.88%에 해당된다.

시험결과치는 모르타르는 36개, 화강암 및 대리석은 각각 60개씩인데, 이 가운데 화강암의 시험결과를 예시하면 Table 2와 같다.

표에서 β 는 Fig. 4와 같이 탄성파 전파속도가 가장 빠른 방향을 기준, 즉 0°로 하고 이것과 이루는 각을 의미한다. 그리고 각각의 수직응력의 크기에 따른 최대전단강도, 잔류전단강도 및 전단강성을 표시한 것이다.

3.1 전단방향에 따른 전단강도의 비교 실험결과치의 비교

Table 2. Results of direct shear test for Pocheon Granite.

Sample No.	$\beta(^{\circ})$	Normal stress (MPa)	Peak shear strength (MPa)	Residual shear strength (MPa)	Shear stiffness (GPa/m)
G1~G5	0	0.29~2.45	0.70~3.58	0.26~1.61	0.25~3.27
G6~G10	30	∥	0.80~3.72	0.20~1.73	0.33~3.40
G11~G15	60	∥	0.97~3.81	0.24~1.62	0.66~3.53
G16~G20	90	∥	0.72~3.59	0.24~1.62	0.34~3.04
G21~G25	120	∥	0.80~3.46	0.17~1.54	0.86~2.98
G26~G30	150	∥	0.67~3.48	0.14~1.57	0.28~2.84
G31~G35	180	∥	0.84~3.41	0.10~1.55	0.24~3.19
G36~G40	210	∥	0.55~3.39	0.28~1.61	0.42~3.43
G41~G45	240	∥	0.87~3.57	0.22~1.65	0.74~3.49
G46~G50	270	∥	0.82~3.28	0.22~1.54	0.44~2.93
G51~G55	300	∥	0.57~3.22	0.19~1.55	0.39~3.08
G56~G60	330	∥	0.51~3.10	0.14~1.45	0.49~3.15

Table 3. Anisotropic shear strength under various normal stresses for Mortar, Pocheon Granite and Jungsun Marble specimens.

Shear stress		Peak (MPa)					Residual (MPa)				
Normal stress		0.29	0.59	0.88	1.47	2.45	0.29	0.59	0.88	1.47	2.45
Mortar	Ref. value	0.28	0.46	.	0.97	.	0.17	0.33	.	0.58	.
	Range	0.21~0.38	0.41~0.62	.	0.97~1.03	.	0.11~0.27	0.26~0.38	.	0.57~0.60	.
	Max.diff.(%)	36	34	.	6	.	58	21	.	3	.
Pocheon Granite	Ref. value	0.70	0.93	1.61	2.56	3.58	0.26	0.52	0.62	1.14	1.61
	Range	0.51~0.97	0.90~1.38	1.26~1.92	2.26~2.88	3.10~3.81	0.10~0.28	0.28~0.55	0.55~0.77	0.94~1.26	1.45~1.73
	Max.diff.(%)	38	48	21	13	13	61	46	24	17	10
Jungsun Marble	Ref. value	0.43	0.69	1.12	1.64	2.65	0.14	0.35	0.59	0.83	1.29
	Range	0.34~0.52	0.66~0.89	1.01~1.35	1.62~1.99	2.62~3.01	0.11~0.23	0.30~0.40	0.53~0.65	0.79~0.99	1.18~1.46
	Max.diff.(%)	33	25	22	14	11	52	23	18	16	18

* Ref. value : reference peak shear stress for 0° shearing direction
 Max. diff. : percentage of maximum difference between peak shear stresses for shearing directions, respectively

구체적인 화강암의 실험 결과치는 Table 2에 표시한 바와 같으며 모르타르와 대리석의 구체적인 결과치는 생략하였다.

모르타르, 화강암 및 대리석의 실험결과 즉 최대전단강도 및 잔류전단강도의 값을 각각의 수직응력의 크기 별로 구분하여 표시하면 Table 3과 같다.

Table 3의 값들은 Table 2로부터 다음과 같이 구해진 것이다. 즉 화강암의 예를 들면 Table 2에서 수직응력

의 크기가 0.29 MPa일때 $\beta=0^{\circ}$ 에서 최대전단강도의 크기는 0.70 MPa이다. 그리고 β 방향이 30°, 60° 330°로 변화함에 따라 최대전단강도는 각각 0.80, 0.97, 0.72, 0.80, 0.67, 0.84, 0.55, 0.87, 0.82, 0.57, 0.51로 변화함으로 그 값의 범위는 0.51~0.97 MPa이다. 따라서 기준치 0.70과 가장 차이가 큰 0.97 MPa과의 차이는 38%가 된다. 한편 Table 3의 값을 알기 쉽도록 도시하면 Fig. 6과 같다.

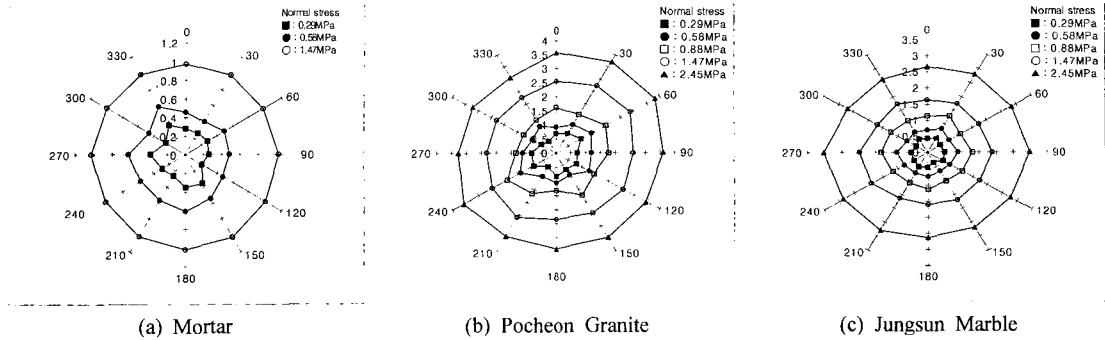


Fig. 6. Polar diagrams of peak shear strength(unit, MPa) for Mortar, Granite & Marble specimens.

Table 3과 Fig. 6에서 보면 화강암의 경우 수직응력이 각각 0.29에서 2.45 MPa로 단계적으로 증가함에 따라 최대 전단강도 및 잔류 전단 강도의 크기도 점진적으로 증가한다. 그러나 동일한 수직응력에서 탄성속도가 가장 빠른 $\beta=0^\circ$ 와 $30^\circ, 60^\circ \dots 330^\circ$ 로 그 방향이 변화하면서 얻어진 최대 전단강도의 차이는 38%에 달한다. 그러나 수직응력이 0.29 MPa에서 1.47 MPa로 증가함에 따라 전단강도 차이는 38%에서 13%로 감소하여 전단강도에 대한 이방성의 영향이 줄어드는 것을 알 수 있다. 잔류전단강도 역시 수직응력이 0.29 MPa일때는 최대 61%의 차이를 보이나 수직응력이 1.47 MPa 이상되면 17%로 감소됨을 보인다. 한편 수직응력이 증가함에 따라 최대전단강도는 주방향과 60° 및 240° 기울어진 방향으로 장축을 형성하며 타원형의 형태를 이룬다. 이와 같은 이유는 수직응력이 낮을 때는 절리 돌출부의 영향이 크며, 또한 균열의 분포와 형태의 영향(crack anisotropy)을 받는데 비하여, 수직응력이 상대적으로 증가하면 위에 예시한 영향외에도 광물의 결정질 배열 및 방향성 등 광물 조직상(textural anisotropy)의 영향을 받기 때문인 것으로 생각된다⁷⁾. 한편 대리석의 경우도 화강암과 유사한 경향을 보인다. 즉 수직응력이 0.29 MPa일때 최대전단강도는 최대 33%, 잔류전단강도는 52%의 차이를 보이지만 응력수준이 증가함에 따라 그 변화율이 점차 감소하는 경향을 보인다. 그리하여 수직응력 수준이 1.47 MPa 이상이 되면 강도차이는 두가지 모두 20% 미만을 나타낸다. 대리석의 경우 90° 및 270° 기울어진 방향으로 장축을 형성하며 타원형 형태를 이룬다. 그 이유는 화강암의 경우와 같은 것으로 생각된다⁷⁾. 모르타르의 경우도 암석과 같이 수직응력이 낮은 경우에는 높은 이방성을 나타내지만 수직응력이 1.47 MPa이 되면 암석에 비하여 이방성이 대단히 낮아진다. 이러한 이유는 모르타르의 단축압축강도의 크기가 암석의 경우보다 낮기 때문이다.

Barton의 제안식과 비교

절리면 전단강도의 크기에 관하여 Patton (1966), Lacanyi & Archambault(1970), Schneider(1976), Maksimovic (1992) 등이 제안한 식들이 보고되고 있으나, 본고에서는 비교적 널리 이용되고 있는 Barton의 경험식⁸⁾을 인용하여 서로 비교하였다. 즉 Barton은 절리면의 거칠계수(JRC), 절리면의 압축강도(JCS), 기본마찰각(ϕ_b) 및 유효수직응력(σ_n)의 관계로부터 절리면의 전단강도(τ)를 구하는 식 (3)을 제안하였다.

$$\tau = \sigma_n \tan \left[JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_b \right] \quad (3)$$

본 실험결과를 식 (3)으로 구한 값과 대비하기 위하여 Table 1에 제시된 일축압축강도값을 절리면 압축강도로 인용하였는데, 모르타르, 화강암 및 대리석의 경우 각각 41, 199 및 133 MPa이다. 그리고 각 방향에 따른 절리면 거칠계수는 Fig. 5에 제시된 값으로, 기본마찰각은 시료를 암석 절단기로 절단한 다음 직접전단시험을 통하여 구하였는데, 모르타르, 화강암 및 대리석의 경우 각각 $15.4^\circ, 30.5^\circ$ 및 28.5° 이다.

이들 값들을 식 (3)에 대입하여 구한 값과 본 실험에서 얻어진 결과를 그림으로 표시하면 Fig. 7과 같다. 그림에서 Barton이 제안한 식 (3)으로부터 구한 값은 절리면 거칠계수값에 따라 약간의 차이를 보이지만 방향 (β 값)에 관계없이 거의 같은 값을 보이는데 대하여 실험결과 얻어진 자료는 방향에 따라 상당한 차이를 보인다. 즉 모르타르 시료는 수직응력이 1.47 MPa의 경우 거의 차이가 없는데 0.29 및 0.58 MPa로 상대적으로 낮을때는 차이가 크게 나타난다. 그리고 화강암 및 대리석 시료 역시 유사한 현상을 보이는데 수직응력이 2.45 MPa때 그 차이가 13% 이내로 감소함을 알 수 있다. 즉 Barton의 제안식은 방향에 관계없이 모든 방향

Table 4. The constants for correction of Barton equation.

	Mortar	Pocheon Granite	Jungsun Marble
A	0.0344 ln(σ_n) + 1.0098	-0.0944 ln(σ_n) + 1.1031	0.0699 ln(σ_n) + 0.7766
B	0.0494 ln(σ_n) + 0.0595	0.0939 ln(σ_n) - 0.0250	0.1510 ln(σ_n) - 0.1947
C	shear direction	shear direction +30	shear direction

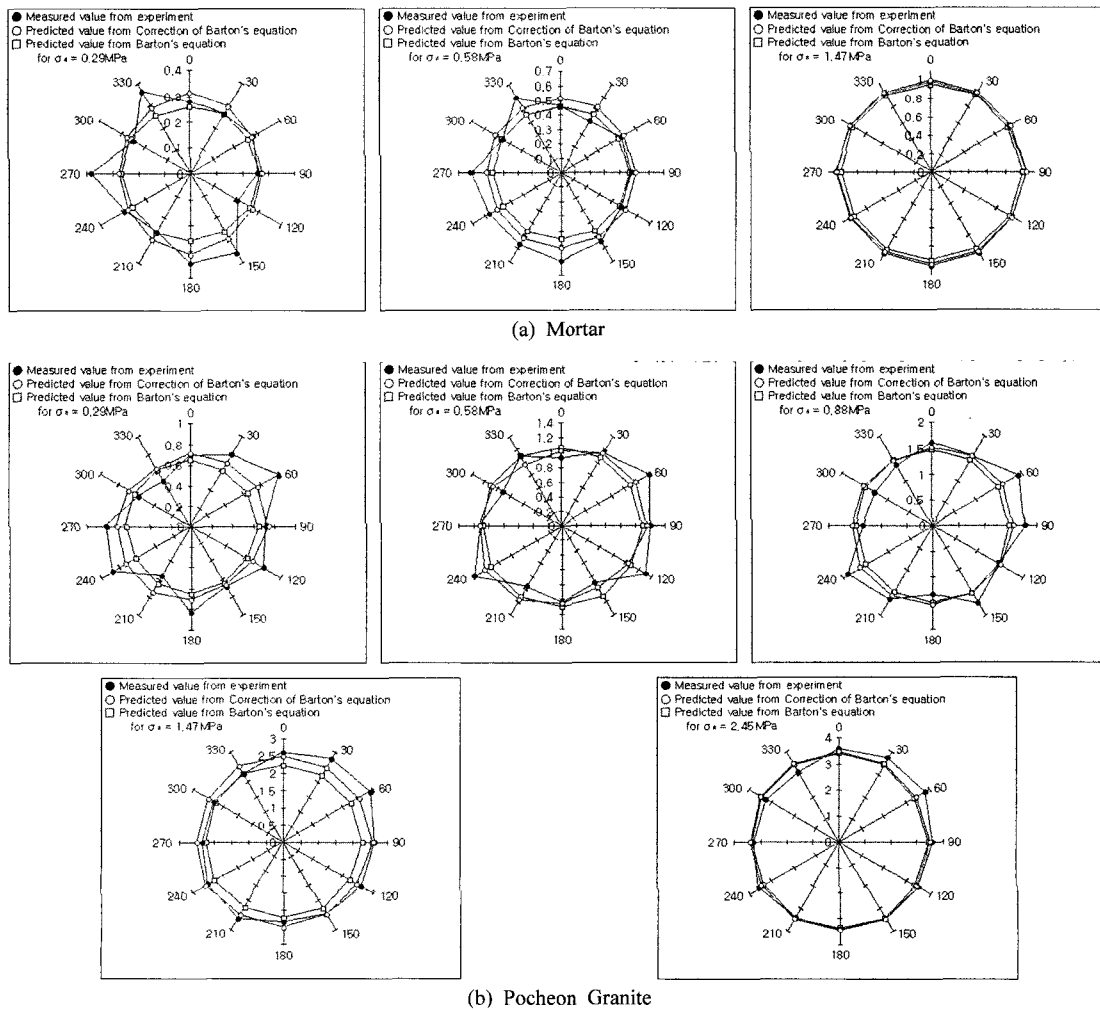
에 대해 일정하게 나타나기 때문에 본 실험 결과와는 부분적으로 차이를 보인다. 따라서 본고에서는 방향성을 고려하여 Barton의 제안식을 보정한 새로운 경험식을 식 (4)와 같이 제안한다.

$$\tau = \sigma_n \tan \left[JRC \cdot F(a) \cdot \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \psi_b \right] \quad (4)$$

$$F(a) = A \cdot e^{B|\sin c|}$$

즉 식 (4)는 식 (3)의 절리 거칠개수에 F(a)의 함수로 보정한 것으로 A, B는 실험값을 회귀분석하여 얻은 로그함수이며, C는 전단방향에 대한 보정이다. 급변 실시한 시편의 경우 실험상수는 Table 4와 같다.

식 (4)에 의해 보정한 값과 다른 값과의 비교는 Fig. 7에 도시한 바와 같으며 급변 얻어진 실험결과와 비교적 일치함을 알 수 있다. 한편 Barton식에 의한 전단강도 추정값과 실험값의 차이에 대한 평균값과 표준편차는 0.192, 0.138 MPa이고, 본 연구에서 제안한 보정값과 실험값과의 차이에 대한 평균값과 표준편차는 각각 0.143, 0.099 MPa로서 보정식에 의한 전단강도 값이



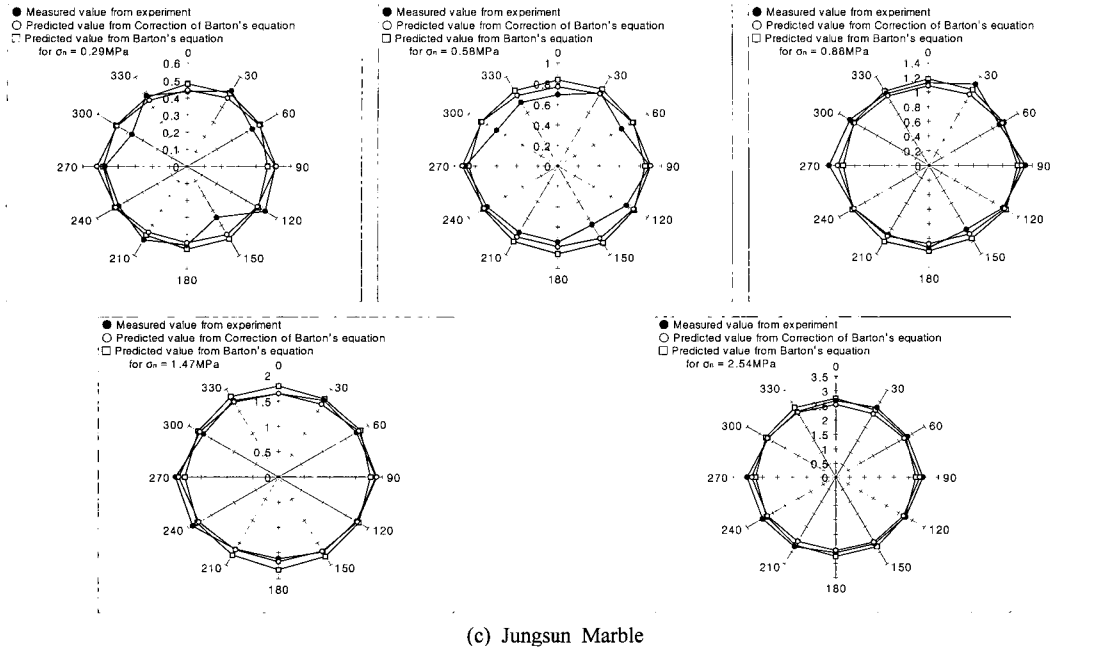


Fig. 7. Comparisons between peak shear stress(unit, MPa) obtained by Barton's equation, modified Barton's equation, and experiments.

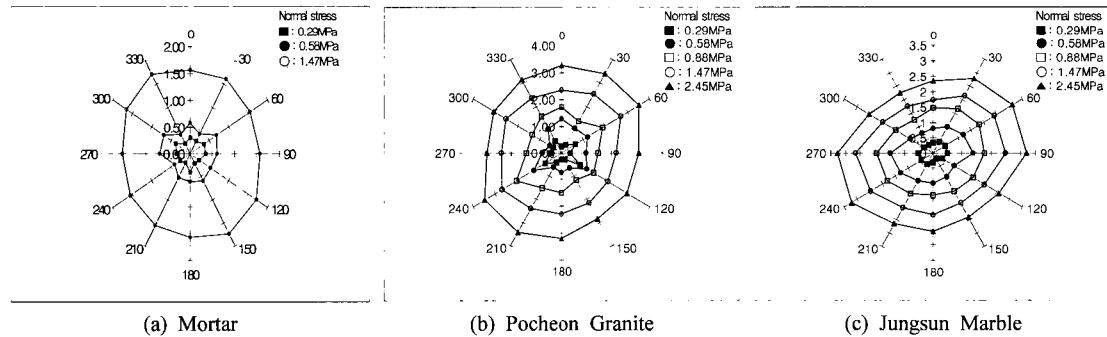


Fig. 8. Polar diagrams of shear stiffness (unit, MPa/mm).

Barton식에 의한 값보다 실험값에 근접함을 보여준다.

3.2 전단방향에 따른 전단강성의 비교

전단강성은 직접 전단시험에서 전단응력과 전단변위와의 곡선에서 최대전단강도 이전의 50~75% 직선부분의 기울기로 구하였다. 각각의 시료에 대한 전단방향별로 구한 전단강성을 도시하면 Fig. 8과 같다. 그림에서 수직응력이 상대적으로 낮을 때는 방향별로 규칙성을 찾기 어려우나 수직응력이 상대적으로 증가할수록 한 방향으로 치우치는 경향을 보인다. 즉 최대전단강도의 크기와 같이 모르타르, 화강암 및 대리석의 경우 각각 150° 및 330°, 60° 및 240°, 90° 및 270° 방향으로

큰 값을 보이나, 등방체인 모르타르 시편보다는 화강암 및 대리석 시편이 큰 강성값의 변화를 보이고 있다. 이와 같은 이유는 모르타르와 같이 단축압축강도가 낮을 때는 균열이방성 때문에, 화강암 및 대리석과 같이 강도가 클 때는 균열이방성 외에 조직 이방성에 기인하는 것으로 생각된다. 여기서 균열이방성이란 절리의 돌출 부위에 기존 균열의 방향성에 따른 이방성을, 조직이방성이란 광물조성 입자의 배열 및 형상에 따른 이방성으로 정의하기로 한다.

3.3 전단방향에 따른 마찰각의 비교

3개 시편에 대한 마찰각의 변화는 Fig. 9와 같다. 모

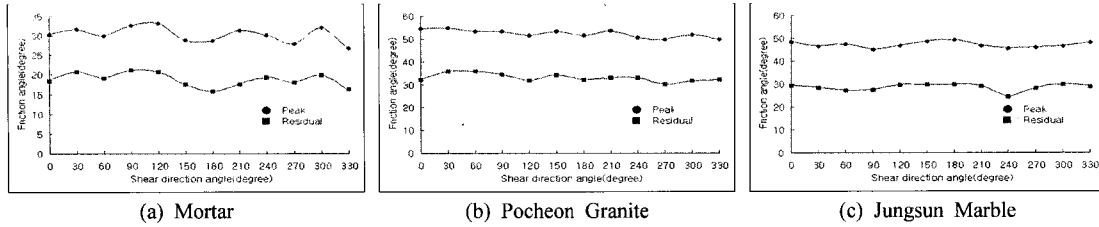


Fig. 9. Variation of friction angle for shear direction angle.

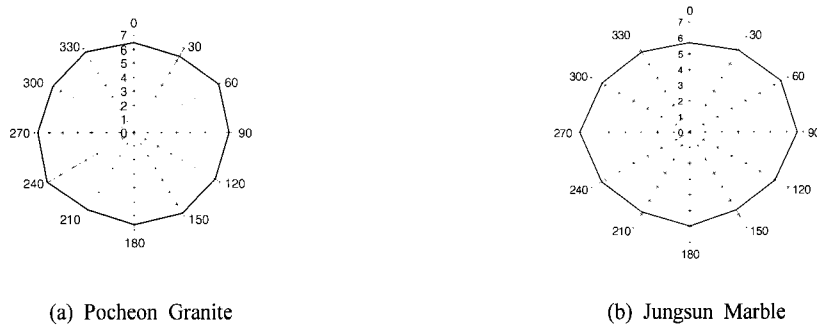


Fig. 10. Tensile strength(unit, MPa) obtained by Brazilian's test for various directions.

르타르의 경우 마찰각은 26.8°~33.1°이고 잔류마찰각은 16.4°~21.2°, 화강암은 49.7~54.6°, 30.0~35.8°, 대리석은 45.0°~49.3°, 22.8~30.0°사이로 전단방향에 따라 다양한 값을 보이고 있으나 어떤 특성이나 규칙을 찾기는 어려웠다.

Barton이 제안한 방법으로 측정한 화강암 및 대리석의 기본마찰각은 각각 30.5° 및 28.5°로서 잔류마찰각과 유사한 값을 보이고 있으나 약간 작은 값을 보였다. 그 주된 이유는 잔류전단변형에서도 거칠기의 영향이 남아 팽창이 계속되고, 또 거칠면에서 일부 파쇄된 쇄설물이 절리 사이에 끼어 전단저항력을 유발시키기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 이와같은 파쇄된 쇄설물의 전단 저항력은 일축압축강도가 큰 화강암이 강도가 낮은 대리석보다 크게 나타남을 알 수 있다.

3.4 방향에 따른 인장강도의 변화

본 실험에서 일축압축강도가 높은 화강암 및 대리석의 경우 특정방향으로 이방성을 보이는 현상을 확인하였는데 그 주된 요인을 조직의 이방성으로 추정할 수 있다. 이와 같은 사실을 보다 상세히 확인하기 위하여 전단강도 실험과 같은 요령으로 인장시편을 제작하고 압열인장강도 시험을 실시하였는데 그 결과는 Fig. 10과 같다. 화강암 및 대리석의 압열인장강도는 각각 6.39~7.05 및 5.67~6.75 MPa의 범위이다. 그러나 화강

암의 경우 60°와 240°, 대리석은 90°와 270°방향에서 보다 큰 값을 보여 이방성이 뚜렷함을 알 수 있는데 이러한 현상은 전단방향에 따른 전단강도 및 전단강성에서 나타난 현상과 동일하다. 따라서 조직의 이방성에 관한 보다 구체적인 연구가 요구된다고 하겠다.

4. 결 론

암석의 절리면 전단강도 실험에서 절리방향에 따른 이방성을 검토하기 위하여 모르타르, 포천화강암 및 정선 대리석을 대상으로 실험을 실시하고, 그 결과를 검토, 분석하였다 즉 전단실험에서 수직응력 수준을 단축압축강도의 4%미만에서 몇 단계로 나누었다. 그리고 전단 방향은 탄성과 전파속도를 고려하여 0°에서 330°까지 12방향으로 구분하였으며 수직응력의 크기에 따른 전단방향별로 전단강도 및 마찰각의 크기를 구한 다음 이로부터 이방성을 검토하였는데 주요 결과는 다음과 같다.

- 1) 수직응력의 크기가 작을수록 전단방향에 따른 전단 강도의 크기에 이방성이 뚜렷하게 나타난다. 즉 모르타르는 수직응력의 크기가 0.29 및 0.58 MPa에서, 화강암 및 대리석은 그 크기가 0.29~0.88 MPa에서 이방성이 비교적 뚜렷하다. 이와

같은 현상은 절리돌출부의 형태와 그 분포상태에 따른 균열 이방성(crack anisotropy)에 기인하는 것으로 생각된다.

- 2) 전단강도 및 강성 역시 낮은 수직응력 수준에서 이방성을 보인다. 그러나 수직응력수준이 아주 낮을 때는 규칙성을 찾기 어려우나, 모르타르는 1.47 MPa, 화강암 및 대리석은 2.45 MPa에서 어떤 특정방향에 이방성이 뚜렷하게 나타난다. 즉 모르타르, 화강암 및 대리석은 각각 기준 방향과 150° 및 330°, 60° 및 240°, 90° 및 270°되는 면에서 큰 값을 보인다. 위 현상을 실험적으로 확인하기 위하여 압열인장 실험을 실시한 결과 전단강성에 나타나는 방향성의 결과와 유사함을 확인하였다. 이와 같은 이유는 수직응력수준의 크기에 따라 균열 이방성외에 조직 이방성(texture anisotropy)의 영향을 받기 때문인 것으로 생각된다. 전단방향에 따른 마찰각의 크기는 대체로 5°내외의 차이를 보이거나 어떤 특징을 찾기 어려웠다.
- 3) 절리면 전단강도를 이론적으로 구할 때 이용되는 Barton의 제안식은 낮은 수직응력수준에서는 이방성이 고려되지 않았기 때문에 부분적으로 방향을 고려한 보정이 필요하다. 이를 위하여 다음과 같은 보정함수 $F(a)$ 을 제시한다.

$$\tau = \sigma_n \tan \left[JRC \cdot F(a) \cdot \log_{10} \left(\frac{ICS}{\sigma_n} \right) + \phi_b \right]$$

$$F(a) = A \cdot e^{B| \sin c |}$$

- 4) 절리방향에 따른 전단이방성은 수직응력의 크기에

크게 좌우됨으로 지하공동과는 달리 비교적 낮은 수직응력상태하에 있는 암반사면의 경우 설계 및 시공시 고려되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Huang, T. H., and Y. S. Doong., 1990, Anisotropic shear strength of rock joints, Proc. of the Int. symp. on rock joints, Loen, Norway, 211-218
2. Kulatilake, P. H., G. Shou., T.H.Huang., and R. M. Morgan., 1995, New peak shear strength criteria for anisotropic rock joints, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., 32, 673-697.
3. Kulatilake, P. H., J. Um., B. Panda., and N. Nghiem., 1998, Development of a new peak shear strength criteria for anisotropic rock joints, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., 35, 4-5
4. 김영근, 1993, 절리 특성이 인공절리를 포함한 불연속 암반의 변형거동에 미치는 영향에 관한 연구, 서울대학교 박사학위논문, 73-118
5. 이상돈, 1996, 절리 형상의 정량적 측정을 통한 각종 거칠기 파라미터의 비교분석 및 전단거동 해석, 서울대학교 박사학위논문, 6-14.
6. Tse, R., and D. M. Cruden., 1979, Estimating joint roughness coefficients, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., 16, 303-307
7. Zang, A., K. Wolter., and H. Berchker., 1989, Strain recovery, microcracks and elastic anisotropy of drill cores from KTP deep well, Scientific Drilling, 1, 115-126.
8. Barton, N., 1976, The shear strength of rock and rock joints, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., 13, 255-279.



곽정열

2000년 강원대학교 자원공학과 공학사
2002년 강원대학교 대학원 지구시스템공학과 공학석사

Tel: 02-418-7624
E-mail: kpassion@mail.kangwon.ac.kr
현재 (주)태조엔지니어링 지반/터널부



이상은

1991년 강원대학교 자원공학과 공학사
1993년 강원대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1999년 강원대학교 대학원 자원공학과 공학박사

Tel: 02-564-6367
E-mail: lee9367@mycon.co.kr
현재 만영엔지니어링 부장



임한욱

1966년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1980년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학석사
1985년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학박사

1996~1998년 강원대학교 공과대학장 겸 동 산업대학원 원장
Tel: 033-250-6253
E-mail: hulim@kangwon.ac.kr
현재 강원대 지구·환경공학부 교수