

암석 절리면의 기본마찰각 결정을 위한 실험적 고찰

장현식¹ · 정종택² · 장보안^{1*}

¹강원대학교 지질 · 지구물리학과, ²한국건설기술연구원 지반연구소

Experimental Study for determining the Basic Friction Angle of the Rock Joint

Hyun-Sic Jang¹, Jong-Taek Jeong², and Bo-An Jang^{1*}

¹Department of Geophysics, Kangwon National University

²Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

Received 14 October 2016; received in revised form 30 November 2016; accepted 3 December 2016

이 연구에서는 직접적으로 기본마찰각을 측정할 수 있는 직접전단시험과 삼축압축시험, 간접적으로 측정할 수 있는 기울임 시험을 이용하여 톱 절단면, #100 연마면, #600 연마면 등 총 3종류의 면을 갖는 황등 화강암과 Berea 사암의 기본마찰각을 측정하고 시험 결과들을 서로 비교하였다. 직접전단시험과 삼축압축시험에서 측정된 기본마찰각은 대체로 정확하지만 면의 상태에 따라서는 매우 차이가 나는 값이 측정되기도 한다. 기울임 시험은 모든 압중에서, 모든 면의 상태에서 유사한 결과를 산출하여 기본마찰각의 측정에 유용하게 사용될 수 있음을 보여주지만, 오차의 범위는 직접적인 시험에 비하여 비교적 넓은 범위를 보인다. 안정된 기본마찰각을 측정하기 위해서는 톱 절단면 보다는 전단면을 항상 일정하게 유지시킬 수 있는 연마면을 사용하는 것이 유리하며, 연마면 중에서도 #600 연마면 같이 매우 매끄러운 면 보다는 #100 연마면 같은 부드러운 수준의 면에서 보다 안정된 결과를 얻을 수 있다. 그러므로 #100 연마면 시료에서 직접전단시험이나 삼축압축시험으로 측정된 기본마찰각이 가장 신뢰성이 높을 것으로 예상되며, #100 연마면 시료에 대한 기울임 시험도 기본마찰각을 측정하는데 있어서 충분한 신뢰성을 갖는 것으로 판단된다.

주요어: 기본마찰각, 직접전단시험, 삼축압축시험, 기울임 시험, 황등 화강암, Berea 사암

Samples of Hangdeung granite and Berea sandstone containing sliding planes were prepared by saw-cutting and polishing using #100 or #600 grinding powders. Their basic friction angles were then measured directly in direct shear tests and triaxial compression tests, and also in tilt tests, which measure the angles indirectly. Although the angles measured by the direct methods were generally accurate, those measured along certain planes were greatly different from the others depending on the condition of the plane. The tilt tests yielded similar angles regardless of the sliding plane condition or the rock type; however, the error range was relatively wide. Sliding planes polished by the grinding powders yielded more accurate results than those cut by the saw and tested without polishing, as polishing ensured consistent conditions among all the planes. Sliding planes polished using #100 grinding powder yielded better results than polishing with #600 grinding powder. Therefore, the basic friction angles measured along the sliding planes polished using #100 grinding powder, as obtained in direct shear and triaxial compression tests, were the most reliable. The angle could also be measured satisfactorily by tilt testing along sliding planes polished with #100 grinding powder.

Key words: Basic friction angle, direct shear test, triaxial compression test, tilt test, Hangdeung granite, Berea sandstone.

*Corresponding author: bajang@kangwon.ac.kr

© 2016, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

암반의 공학적 특성은 절리면과 같은 불연속면의 전단거동 특성에 의해 크게 좌우되는데, 이는 무결암의 전단강도에 비해 절리면의 전단강도가 매우 낮기 때문이다. 절리면의 전단강도에 영향을 주는 요인은 매우 다양하여, 충전물이 없는 절리면에서는 암석의 종류, 절리면에 작용하는 수직응력의 크기, 절리면의 거칠기, 절리면의 크기, 풍화 정도, 절리면의 강도, 습기, 간극 수압 등이 주요 영향 요인이고, 충전물이 있는 절리면에서는 충전물의 역학적 특성이 절리면의 전단특성을 지배하게 된다(Kulatilake et al., 1995). 일반적으로 자연 절리면은 매우 다양하고 복잡한 형태를 가지고 있어서 절리면의 전단강도 기준을 이론적으로 정립하는 것은 매우 어렵다. 이런 이유 때문에 많은 선행 연구자들은 이론적 방법보다는 실험적, 경험적 방법으로 절리면에 대한 다양한 전단강도 기준들을 제시해 왔다(Patton, 1966; Goldstein et al., 1966; Ladanyi and Archambault, 1969; Barton and Choubey, 1977; Maksimovic, 1992; Kulatilake, 1995; Papaliangas et al., 1995; Grasselli and Egger, 2003; Jang and Jang, 2015). 절리면 전단강도에 대한 초기 연구에서는 모어-쿨롱 파괴기준(Mohr-Coulomb failure criterion: $\tau = c + \sigma_n \tan \phi$)을 응용하여 유효수직응력 σ_n 과 전단강도 τ 를 직선의 관계로 설명하였다. 이때, 마찰각 ϕ 는 절리면 거칠기에 의해 결정되는 팽창각(i)과 평탄한 면에서 측정되는 기본마찰각(ϕ_b)의 합이고, 낮은 수직응력에서는 전단강도가 점착력이 없이 마찰각에만 영향을 받는 반면에, 높은 수직응력에서는 돌기들이 파괴되면서 전단강도는 잔류마찰각(ϕ_r)과 걸보기 점착력(S_j)으로 표현되었다(Newland and Allely, 1957). 또한 넓은 범위의 수직응력 조건에서는 전단강도와 수직응력의 관계가 돌기가 파괴되기 시작하는 수직응력을 기점으로 파괴포락선의 기울기가 바뀌는 이중 직선의 관계로 설명되었다(Patton, 1966; Goldstein et al., 1966).

그러나 이러한 선형관계의 전단강도 기준이 제안되기 이전에도 많은 연구자들은 전단과정에서 발생하는 돌기들의 파괴 때문에 수직응력과 전단강도의 관계가 직선의 관계가 아닌 곡선의 관계를 갖는다는 것을 알고 있었다(Jaeger, 1959; Krsmanovic and Langof, 1964; Lane and Heck, 1964; Patton, 1966; Byerlee, 1967; Ladanyi and Archambault, 1969; Barton, 1973). 현재까지 가장 잘 알려진 비선형 전단강도 관계식은 Barton (1973)과 Barton and Choubey (1977)의 연구에서 제안된 경험식으로, 이 식들은 절리면의 '전체 마찰각(total friction angle)'의 개념을 기본마찰각(ϕ_b), 돌기들의 거칠기와 관련된 팽창요소(d_n) 그리고 돌기들의 파괴와 관련된 전단요소(s_n)의 합이라고 가정하였다. Barton (1973)은 인장 절리를 이용한 전단강도 연구로부터 ' $d_n + s_n$ '을 절리 거칠기 계수 JRC , 절리면의 압축강도 JCS 그리고

수직응력 σ_n 의 함수로 수정한 전단강도 경험식, $\tau = \sigma_n \tan [JRC \log (JCS/\sigma_n) + \phi_b]$ 를 제안하였고, Barton and Choubey (1977)는 풍화되거나 변질된 절리면에서는 잔류마찰각(ϕ_r)이 최저 전단강도를 대표한다고 가정하였다. Barton and Choubey (1977)의 경험식이 제안된 후 많은 연구자들은 절리면의 거칠기를 나타내는 경험적인 계수인 JRC 에 주목하여 JRC 를 정량적으로 측정하기 위한 연구들을 활발히 진행하였고, 이러한 연구를 바탕으로 수정된 JRC 를 Barton and Choubey (1977)의 경험식에 적용한 수정된 경험식들이 제안되었다(Reeves, 1985; Kulatilake, 1995; Grasselli and Egger, 2003; Jang et al., 2010). 근래에 들어와서는 절리면의 형상을 정밀하게 수치화할 수 있는 기술의 발달로 정밀한 삼차원 거칠기 분석이 가능해져서 새로운 형태의 절리면 전단강도 관계식들이 제안되기도 하였다(Belem et al., 2000; Yang and Chiang, 2000; Grasselli et al., 2002; Park and Song, 2013, Jang and Jang, 2015). 그러나 주목할 점은 지금까지 제안되었던 대부분의 절리면 전단강도 관계식들에는 공통적으로 절리면의 거칠기 요소와 기본마찰각이 포함되어 있다는 것이다. 이러한 사실은 두 요소가 전단강도에 아주 중요한 역할을 한다는 것을 증명해 주는 것이며, 절리면의 전단강도를 정확히 측정하거나 예측하기 위해서는 이 두 요소를 정확히 측정해야한다는 것을 의미한다. 많은 연구자들이 불규칙하면서도 복잡한 형상을 갖는 절리면의 거칠기를 정량화하기 위하여 현재까지 많은 노력을 기울여 왔으나, 단순한 개념을 갖는 기본마찰각은 비교적 간단한 시험으로도 측정할 수 있다는 생각 때문에 거칠기의 연구에 비해서 충분한 연구가 진행되지 못하였다.

현재까지 일부 연구자들에 의해 기본마찰각에 대한 연구가 진행되어 왔으나, 대부분의 연구는 기울임 시험(tilt test)을 사용하였다(Horn and Deere, 1962; Stimpson, 1981; Cruden and Hu, 1988; Bruce et al., 1989; Wines and Lilly, 2003; Alejano et al., 2012; Ruiz and Li, 2014; González et al., 2014). 이 연구들에서는 반복적인 기울임 시험으로 측정된 기울임 각을 통계적으로 분석하여 결과를 도출하였으나, 정확한 기본마찰각 측정을 위해서는 보다 세밀하고 체계적인 추가 연구가 필요하다고 언급하고 있다. 또한 암석에 대한 국제적인 표준시험법을 제시하고 있는 국제암반역학회(International Society of Rock Mechanics, ISRM)에서도 아직까지 기본마찰각 측정을 위한 표준시험법을 제시하고 있지 않고 있다. 따라서 이 연구에서는 기본마찰각 측정이 가능한 것으로 알려진 직접전단시험, 삼축압축 시험 그리고 기울임 시험을 사용하여 다양한 조건 아래에서 암석의 기본마찰각을 측정하고, 그 결과를 비교하여 정확한 기본마찰각을 측정할 수 있는 최적의 시험방법을 제시하고자 한다.

이론적 배경

기본마찰각은 풍화되지 않은 편평한 면에서 측정된 마찰각으로 물질의 성분과 조성에 따라 결정되는 암석의 고유한 성질이다(Patton, 1966; Barton, 1973). Barton (1973, 1976)은 60, 70년대에 다양한 암종에서 측정된 기본마찰각을 값을 수집하여 정리하였다. 수집된 마찰각의 범위는 최소 21°에서 최대 38°이었으며, 건조한 면보다는 젖은 면의 기본마찰각이 더 작은 것으로 나타났다. 퇴적암은 25°~30°의 범위를 보이고, 화성암과 변성암은 30°~35°의 범위를 보여 퇴적암이 다른 종류의 암석들보다 상대적으로 낮은 기본마찰각을 갖는 것으로 보고되었다(Alejano et al., 2012).

현재까지도 기본마찰각 측정을 위한 표준시험법은 마련되어 있지 않으나, 일반적으로 편평한 면으로 분리된 시료를 대상으로 직접전단시험을 실시하여 측정하는 것이 가장 정밀한 방법으로 알려져 있다. 이외에도 경사진 분리면을 갖는 시료를 이용한 삼축압축시험과 기울임 시험으로도 그 값을 구할 수 있다. 직접전단시험과 삼축압축시험은 수직응력에 따른 전단강도를 측정하여 직접적이고 비교적 정확한 시험결과를 도출할 가능성이 높은 시험이나 기울임 시험에 비해 상대적으로 어렵다. 반면에 기울임 시험법은 시료를 기울여 미끄러질 때의 각도를 측정해 기본마찰각을 간접적으로 유추하는 시험으로서 측정방법이 간단하고 쉬워서 기본마찰각 측정에 가장 많이 이용되고 있다.

기본마찰각 측정에는 대부분 톱으로 절단된(saw-cut) 면이나 샌드블라스트된(sand-blasted) 면이 사용되었으며, 지나치게 미끄러운 면을 사용할 경우에는 스틱슬립(stick-slip) 현상이나 전단변위가 증가함에 따라 마찰 저항도 함께 증가되는 전단응력 강화(hardening) 현상이 발생되어 정확한 값을 얻기 어렵다는 보고도 있다(Barton, 1973; Stimpson, 1981). 또한 일부 연구자들은 직접전단시험으로 측정된 기본마찰각과 기울임 시험으로 측정된 기본마찰각을 비교하였을 때, 직접전단시험이 진행되는 동안 수직응력으로 인한 시료의 소규모 돌기들이 마모되어 기울임 시험을 통해 측정된 기본마찰각 값보다 작게 측정되는 현상을 발견하고, 신뢰할 수 있는 기본마찰각 값을 얻기 위해서는 전단면을 완전히 연마할 것을 제안하기도 하였다(Coulson, 1970; Wines and Lilly, 2003; Ruiz and Li, 2014).

근래에는 기본마찰각 측정에 기울임 시험법이 주로 사용되고 있으며, 이 시험법은 1960년대부터 Fig. 1과 같이 다양한 형태의 시료를 대상으로 여러 연구에서 소개되고 사용되어 왔다(Horn and Deere, 1962; Stimpson, 1981; Cruden and Hu, 1988; Bruce et al., 1989; Wines and Lilly, 2003; Alejano et al., 2012; Ruiz and Li, 2014; González et al., 2014). 기울임 시험법에 대한 구체적인 연구는 Stimpson (1981)에 의해 처음으로 수행되었으며, 그는

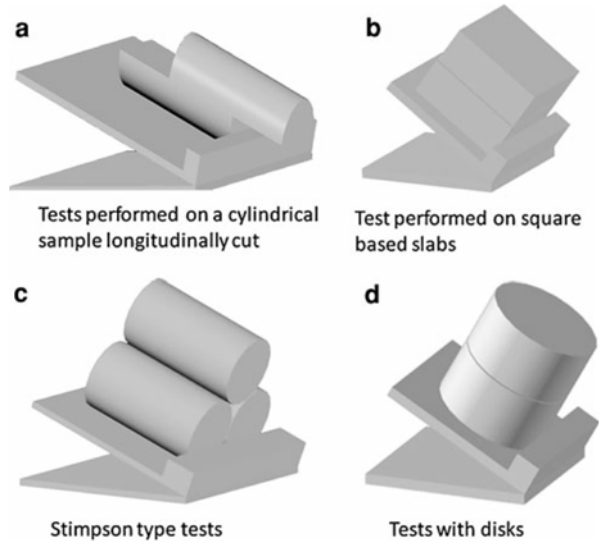


Fig. 1. Different set-ups for tilt tests performed in the experimental study (Alejano et al., 2012).

Fig. 1(c)와 같이 나란히 놓인 2개의 코어 시료위에 1개의 코어 시료를 올려놓고 기울여 미끄러지는 경사(β)를 측정 한 후, 한계평형이론으로 부터 도출된 식 (1)로 기본마찰각을 계산하는 방법을 제안하였다.

$$\phi_b = \tan^{-1}(1.155 \tan \beta) \quad (1)$$

그러나 Stimpson (1981)의 방법으로 구한 기본마찰각들은 Barton (1973, 1976)에 의해 수집된 문헌자료와 비교하였을 때 다소 높은 값을 보이는 경향이 있다(Alejano et al. 2012). Alejano et al. (2012)은 신뢰성 있는 기본마찰각을 구할 수 있는 적절한 방법을 찾기 위해 Fig. 1의 4가지 형태의 시료들을 대상으로 기울임 시험을 실시하여 그 결과들을 비교하였고, 기울임 시험에 사용되는 시료의 형상에 따라 미끄럼 면상에 발생하는 수직응력의 크기를 다음과 같이 계산하고 정상적인 미끄러짐이 발생할 수 있는 유효한 시료 형태를 제안하였다. 먼저 무게 W , 길이 l , 폭 w , 높이 h 인 직육면체 블록이 β 각도만큼 기울어져 있다고 가정할 때, 블록 바닥의 아래쪽 모서리와 위쪽 모서리에는 아래와 같은 수직응력이 작용한다(Muralha, 1995).

$$\sigma_{\max} = \frac{W}{wl} \cos \beta \left(1 + \frac{3h}{l} \tan \beta \right) \quad \text{: 아래쪽 모서리} \quad (2)$$

$$\sigma_{\min} = \frac{W}{wl} \cos \beta \left(1 - \frac{3h}{l} \tan \beta \right) \quad \text{: 위쪽 모서리} \quad (3)$$

이때, $l/h < 3 \tan \beta$ 조건이 되면 σ_{\min} 은 음(-)의 값이 되어 위쪽 모서리 접촉면에는 인장응력이 작용하고 블록은 전도 된다. 그러므로 블록이 정상적으로 미끄러지기 위해서는 l/h 가 $3 \tan \beta$ 보다 커야 한다.

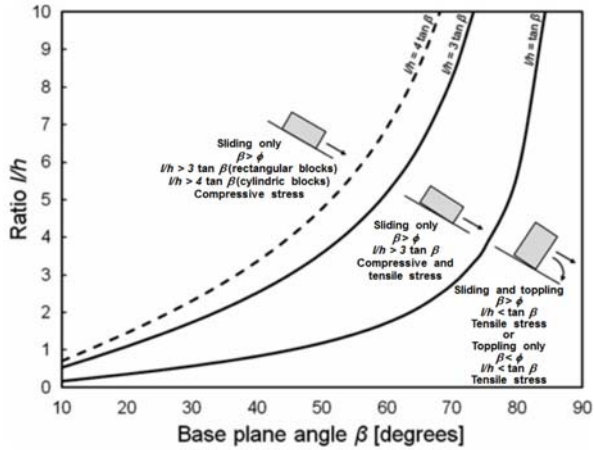


Fig. 2. Theoretical conditions ensuring full stress compressive contact between the sliding plane and the sliding slab (Alejano et al., 2012).

또한 β 가 커지면 위쪽 모서리 접촉면에는 인장응력이 생성되므로, 압축의 수직응력이 작용하는 면의 길이 l' 는 식 (4)와 같이 보다 작아지게 된다.

$$l' = \frac{3}{2}l \left(1 - \frac{h}{l} \tan \beta \right) \quad (4)$$

식 (4)에서 만약 $l/h = 3 \tan \beta$ 이면, $l' = l$ 이 되고 $l/h < 3 \tan \beta$ 이면, $l' < l$ 이 된다. 또한 식 (4)를 식 (2)에 적용하면 σ_{max} 는 식 (5)가 된다.

$$\sigma_{max} = \frac{4W \cos \beta}{3w(l' - h \tan \beta)} \quad (5)$$

이때, l/h 가 $\tan \beta$ 와 비슷해져 l 가 최소로 줄어들면 수직 응력은 모서리 끝에서 거의 선응력으로 존재하게 되어 한계 평형 조건에 따라 블록은 미끄러짐이 아닌 전도가 발생하게 된다(Hoek and Bray, 1981; Sagaseta, 1986). Alejano et al. (2012)은 이러한 l/h 과 $\tan \beta$ 의 관계를 Fig. 2와 같이 나타내고, Fig. 1(b)와 같은 직육면체 모양의 블록시료를 사용할 경우에는 $l/h \geq 3 \tan \beta$ 조건을, Fig. 1(d)와 같이 두께가 h 이고 직경이 l 인 디스크(disc) 모양의 시료를 사용할 경우에는 $l/h \geq 4 \tan \beta$ 조건을 만족해야 미끄러짐에 의한 정상적인 기울임 시험이 가능함을 밝혔다.

그러나 Stimpson (1981)과 Alejano et al. (2012)을 포함한 대부분의 연구결과에서 기울임 시험으로 측정된 기본마찰각은 같은 종류의 암석이라도 측정값들의 분산이 크거나 확률분포 특성도 정규분포가 아닌 경우가 많았다. 이러한 결과의 불확실성은 시료 표면의 편평도 및 연마 상태, 기울임 속도의 불규칙성, 접촉면상에서 발생하는 진공흡착(vacuum adsorption) 및 정전기(static) 효과 등, 아직 기존 연구에서 고려되지 못한 다양한 요인들 때문에 발생한 것으로 판단된

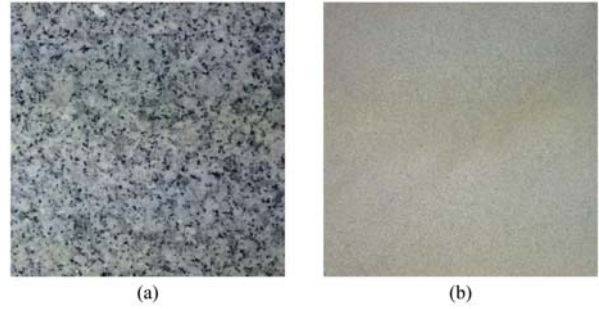


Fig. 3. Samples used for tilt tests and direct shear tests: (a) Hwangdeung granite, (b) Berea sandstone.

다. 그러므로 기울임 시험 등을 이용하면 기본마찰각을 손쉽게 측정할 수 있다는 기존의 인식에서 벗어나 시험의 불확실성을 줄이고 신뢰성 있는 결과를 얻기 위한 보다 면밀한 연구가 필요하다.

시료 제작

이 연구에서는 전라북도 황등 지역에서 산출되는 황등 화강암과 미국 Ohio주의 Berea 사암을 시료로 사용하였다(Fig. 3). 황등 화강암은 입자의 크기가 약 0.6~2.0 mm 정도인 세립질 화강암으로 석영, 사장석, K-장석 및 흑운모로 구성되어 있으며, Berea 사암은 입자 크기가 0.1~0.8 mm 정도이며 주구성광물은 석영, 미사장석, 카올린 및 조장석이다(Dehler and Labuz, 2007). 황등 화강암과 Berea 사암의 물리적, 역학적 특성으로 밀도, 공극률, 일축압축강도, P파 속도, 영률, 포아송 비를 국제암반역학회(ISRM)에서 제안한 시험법을 사용하여 측정하였다(Table 1). 황등 화강암은 밀도 2.63 g/cm³, 공극률 0.52%, 일축압축강도 183.86 MPa, 영률 57.48 GPa로 공극이 적고 강도가 큰 취성 암석의 범주에 속하였고, Berea 사암은 밀도 2.20 g/cm³, 공극률 14.77%, 일축압축강도 79.2 MPa, 영률 20.49 GPa로 화강암에 비해 30배 이상의 큰 공극률과 절반 이하의 강도와 영률을 보이는 상대적으로 연성인 암석의 범주에 속하였다.

시료들은 시험 용도에 따라 2가지 형태로 제작되었다. 기울임 시험과 직접전단시험에 사용된 시료들은 Fig. 2의 형태에 따른 미끄러짐 조건을 고려하여 길이(l) 10 cm, 폭(w) 10 cm, 두께(h) 2 cm인 판상의 직육면체로 제작되었다(Fig. 4a). 이렇게 제작된 시료는 l/h 비가 5로써 기울임 각(β)이 59° 이하인 조건에서 정상적인 미끄러짐 조건인 $l/h \geq 3 \tan \beta$ 의 조건을 충족시킨다(Alejano et al., 2012). 삼축압축시험에는 중간부위에 경사진 절단면이 있는 지름 약 5.4 cm, 높이 약 11 cm의 코어 시료를 사용하였으며, 절단면의 각(α)은 수평방향에서 위로 40°, 50°, 60°가 되도록 제작되었다(Fig 4b).

미끄러짐 면의 상태에 따른 기본마찰각의 변화를 검토하

Table 1. Physical properties of the granite and sandstone.

Sample	Density (g/cm ³)	Porosity (%)	UCS (MPa)	V _p (m/s)	Young's Modulus (GPa)	Poissons' ratio
Granite	2.63	0.52	183.9	3957	57.48	0.28
Sandstone	2.20	14.77	79.2	2650	20.49	0.33

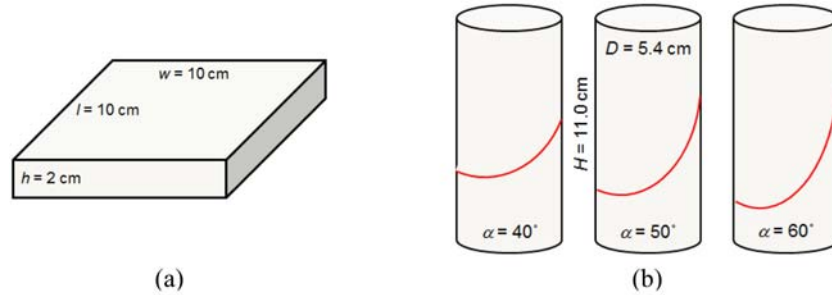


Fig. 4. Shapes of samples used for (a) tilt testing and direct shear testing, and (b) triaxial compression testing. D and H are the diameter and height of the core samples, respectively. α is the angle of the pre-cut plane measured upward from the horizontal plane.

기 위하여 3종류의 미끄러짐 면을 준비하였다. 첫 번째 면은 다이아몬드 톱으로 절단된 면(이하 톱 절단면)으로서 이러한 면은 선행연구들에서 가장 많이 사용되었다(Horn and Deere 1962; Stimposn, 1981; Cruden and Hu, 1988; Bruce et al., 1989; Grasselli and Egger, 2003; Alejano and Conzalez, 2012). 톱 절단면은 톱날에 의한 미세한 계단형의 절삭 흔적이 국부적으로 보이기도 하지만 거의 편평하며 표면은 고속으로 회전하는 톱날에 잘 연마되어 매끄럽다. 두 번째와 세 번째 면은 톱으로 절단된 면을 100번 연마사와 600번 연마사로 연마한 면으로, 100번 연마사로 연마된 면(이하 #100 연마면)은 거의 편평하며 표면이 매끄럽지는 않지만 부드러운 질감을 갖고, 600번 연마사로 연마된 면(이하 #600 연마면)은 거의 편평하고 표면이 톱으로 절단된 면보다 매끄러우나 거울처럼 광택이 나지는 않는다. 전반적으로 표면의 매끄러움 정도는 #600 연마면, 톱 절단면, #100 연마면 순이며, 편평도는 #600 연마면과 #100 연마면이 톱 절단면 보다 약간 더 우수하다. 또한 연마면들의 표면 상태는 거의 동일하지만 톱 절단면 시료들의 표면에는 절삭 흔적의 크기와 위치가 시료에 따라 약간씩 다르다.

최종적으로 직접전단시험과 기울임 시험에서는 2종류의 암석(황등 화강암, Berea 사암)과 3가지의 표면상태(톱 절단면, #100 연마면, #600 연마면)를 갖는 총 6종류의 시료가 준비되었고, 삼축압축시험에는 2종류의 암석, 3가지 표면상태 그리고 3가지의 미끄러짐 면 경사(40°, 50°, 60°)를 갖는 총 18종류의 시료가 준비되었다.

시험 결과

직접전단시험

직접전단시험은 미국 SBEL사에서 제작된 'RM 102

Direct Shear Machine'을 사용하여 국제암반역학회(ISRM)가 제시한 표준시험법으로 실시되었다. 이 시험기는 수동 유압 펌프에 의하여 수직응력과 전단응력을 가하도록 제작되었으나, 이 후에 전기적인 유압펌프와 피스톤 유압 펌프(piston oil pump), 사각기둥 하중프레임, 응력을 일정하게 유지할 수 있는 유압조절장치, 유압센서, 변위계를 추가로 설치하여 전단력, 수직력, 전단변위, 수직변위를 정밀하게 조절하고 측정할 수 있게 변경되었다. 전단시험 시 스틱슬립(stick-slip)이 발생되지 않도록 전단변위 속도를 0.1 mm/min의 느린 속도로 설정하였으며, 1조(set)의 전단시험에 0.5 MPa부터 4.0 MPa까지 6 단계의 수직응력을 적용하였다. 전단면이 연마된 시료들은 단계별로 전단시험이 종료될 때마다 동일한 조건의 표면 상태를 유지할 수 있도록 시료의 표면을 재연마하였으나, 톱 절단면은 재연마가 불가능하기 때문에 마른 천과 공기압축기를 사용하여 전단면의 불순물을 제거한 후 다음 단계의 전단시험을 진행하였다.

모든 시료에서 전단변위가 증가함에 따라 전단응력이 선형적으로 증가하였으며, 일정 변위 이상부터는 전단응력의 증가폭이 점점 줄어들어 최대전단강도(peak shear stress)를 보이지 않고 잔류응력으로 일정해지는 양상을 보인다(Fig. 5). 이렇게 최대전단강도를 보이지 않는 것은 시료의 표면이 톱으로 절단되었거나 연마된 매끈한 면이기 때문으로 판단된다. #600으로 연마된 시료에서는 전단시험의 초기에는 선형적인 전단강도의 증가양상을 보이나, 선형구간 이후에는 전단응력이 증가하다가 갑자기 크게 감소하는 스틱슬립 거동을 보인다(Fig. 5b). 이러한 스틱슬립 거동은 매끄러운 접촉면에서 미끄러짐이 발생할 때 주로 나타나는 현상으로서, 전단변위가 발생하는 동안 전단력의 일부가 접촉면에 변형에너지로 축적되어 있다가 순간적으로 방출되어 나타나게 된다(Bridgman, 1936; Brace and Byerlee, 1966). 시험

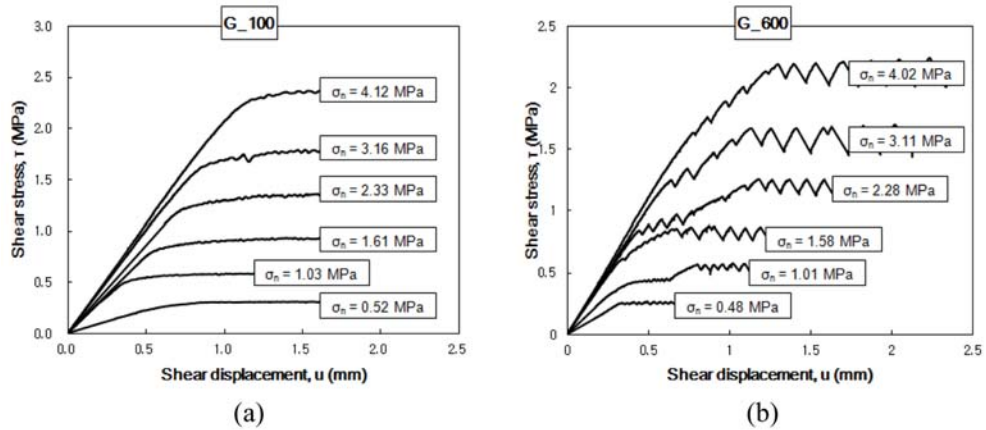


Fig. 5. Shear stresses measured during direct shear tests for granite samples polished using (a) #100 and (b) #600 grinding powder.

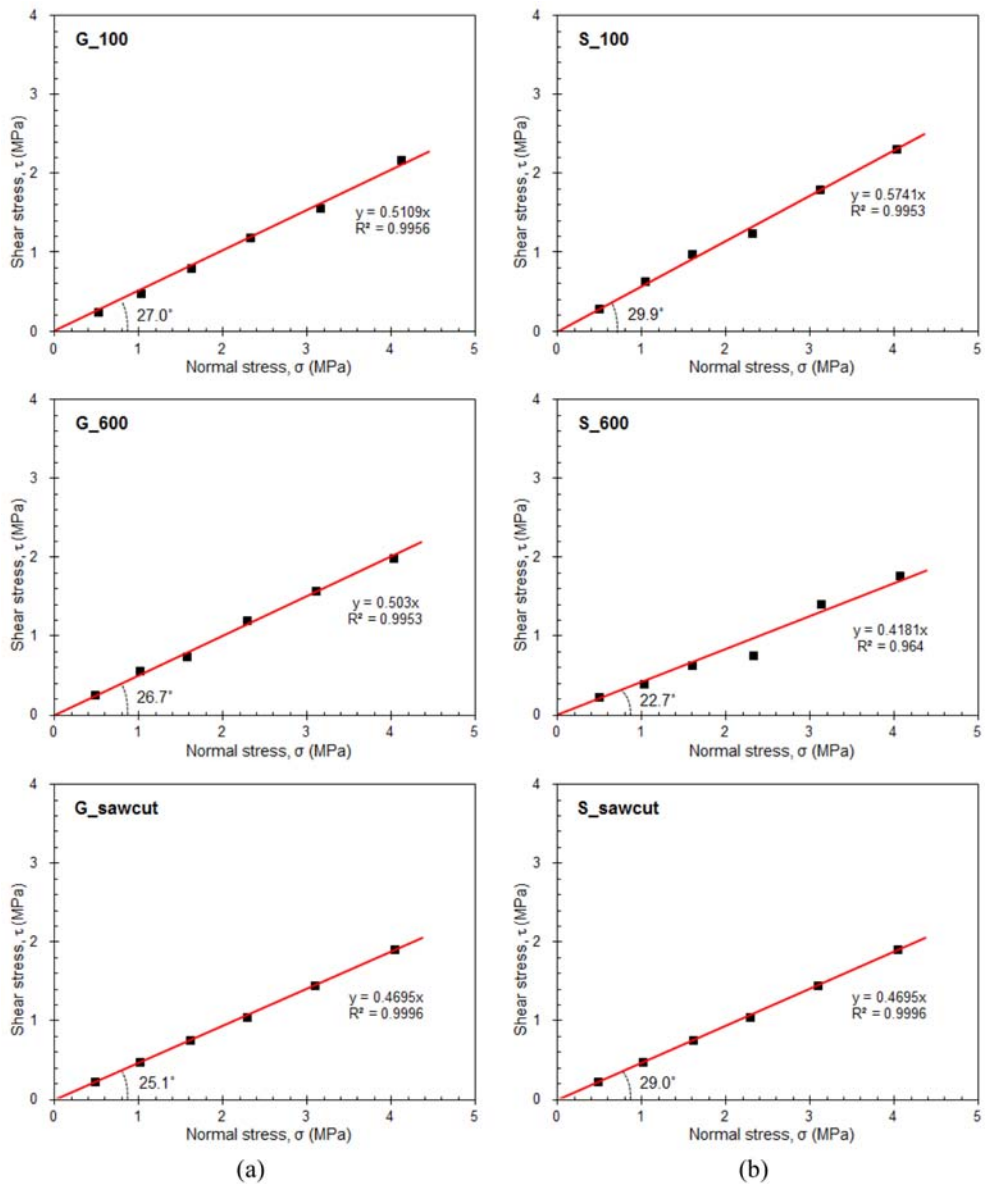


Fig. 6. Peak shear strengths with respect to normal stresses measured by direct shear tests for (a) granite and (b) sandstone shear planes (labeled G and S, respectively) polished using #100 and #600 grinding powders (labeled 100 and 600, respectively).

초기의 전단응력과 전단변위의 선형적 관계는 전단면의 전단에 의한 변위가 아니라 암석자체의 압축변형 또는 전단면 주변에서의 전단변형에 의한 결과이며, 실제 전단면의 전단변위가 시작되는 것은 전단응력과 전단변위가 선형적 관계를 끝내고 곡선의 기울기가 감소하기 시작하는 지점이다 (Lee and Chang, 2015). 그러므로 이 연구에서는 전단응력-전단변위 곡선 상에서 곡선의 기울기가 직선에서 벗어나는 지점의 전단응력을 실질적인 전단면의 전단강도로 결정하였다.

모든 시료에서 수직응력이 증가함에 따라 전단강도가 선형적으로 증가하는 경향을 보였다(Fig. 6). 이러한 경향은 거칠기를 가진 자연 절리면에서 나타나는 수직응력과 최대 전단강도의 비선형적 관계와는 다른 형태이며, 비교적 선형적 관계를 보이는 수직응력과 잔류전단강도의 관계와 유사하다. 기본마찰각은 직선의 기울기 각으로부터 구하였다. 황등 화강암의 기본마찰각은 25.1°~27.0°로 면의 상태에 따라 최대 1.9° 정도의 편차를 보이며, #100 연마면에서 측정된 기본마찰각이 가장 크고 톱 절단면의 값이 가장 작게 측정되었다. Berea 사암의 기본마찰각은 #100 연마면과 톱 절단면에서 29.9°와 29.0°로 서로 유사하게 측정되었으나 #600 연마면에서는 22.7°로 다른 두 종류의 면에 비해 약 7° 정도 낮게 측정되어 사암 시료들이 화강암 시료보다 면의 상태에 따라 더 많은 편차를 보였다. 모든 화강암과 사암 시료의 #100 연마면에서 가장 큰 기본마찰각이 측정되었으며, 같은 종류의 암석이라도 면의 상태에 따라 서로 다른 기본마찰각이 측정될 수 있음을 확인할 수 있다.

삼축압축시험

삼축압축시험은 (주)에이스원(AceOne)에서 제작하였으며 하중 및 변위제어가 가능한 서보제어시스템이 장착된 196 kN 용량의 압축시험기를 사용하였다. 시료는 NX 크기의 코어이고, 미리 계획된 전단면을 따라 파괴가 발생하도록 삼축압축시험 전에 시료에 경사진 면을 미리 절단하였다. Fig. 7과 같이 수평면에서 α 만큼 기울어진 전단면이 있는 시료에 축응력(σ₁)과 구속압(σ₃)이 작용하면 전단면에는 면에 수

직한 방향의 수직응력(σ_n)과 면과 평행한 전단응력(τ)이 발생하게 되며, 이 두 응력은 식 (6)과 (7)로 구할 수 있다.

$$\sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha \tag{6}$$

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha \tag{7}$$

1조의 삼축압축시험에는 약 0.5 MPa부터 약 5 MPa까지 5 단계의 구속압을 적용하여 파괴 시의 최대 축응력을 측정하였다. 축응력은 전단변위가 일정하게 증가될 수 있도록 변위제어로 가압(loading)하였으며, 가압 속도는 스틱슬립이 발생되지 않도록 0.1 mm/min의 느린 속도로 설정하였다. 삼축압축시험에서도 단계별로 시험이 종료될 때마다 동일한 조건의 표면 상태를 유지할 수 있도록 #100 연마면과 #600 연마면 시료의 표면을 재연마하였고, 톱으로 절단된 면은 마른 천과 공기압축기를 사용하여 전단면의 불순물을 제거하였다.

각각의 구속압에서 2회씩 측정된 축응력으로 부터 전단면에 작용되는 수직응력과 전단응력을 계산하였고, Fig. 8은 α가 60°인 화강암과 사암 시료에서 측정된 전단면의 수

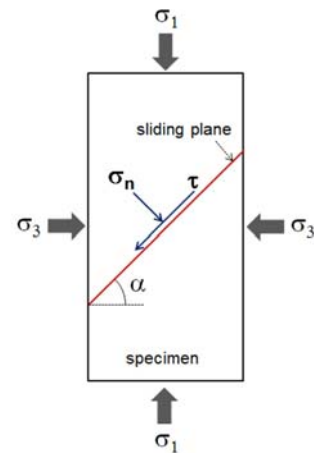


Fig. 7. Stress state on the sliding plane during triaxial compression testing.

Table 2. Basic friction angles determined by triaxial compression testing.

Rock type	Angle of sliding plane	Type of plane		
		polished by #100	polished by #600	Saw-cut
Granite	40°	28.1°	25.2°	26.3°
	50°	28.1°	28.8°	22.9°
	60°	27.5°	26.2°	22.4°
	Average	27.9°	26.7°	23.9°
Sandstone	40°	-	-	-
	50°	30.9°	27.2°	29.9°
	60°	29.9°	22.7°	29.0°
	Average	30.4°	25.0°	29.5°

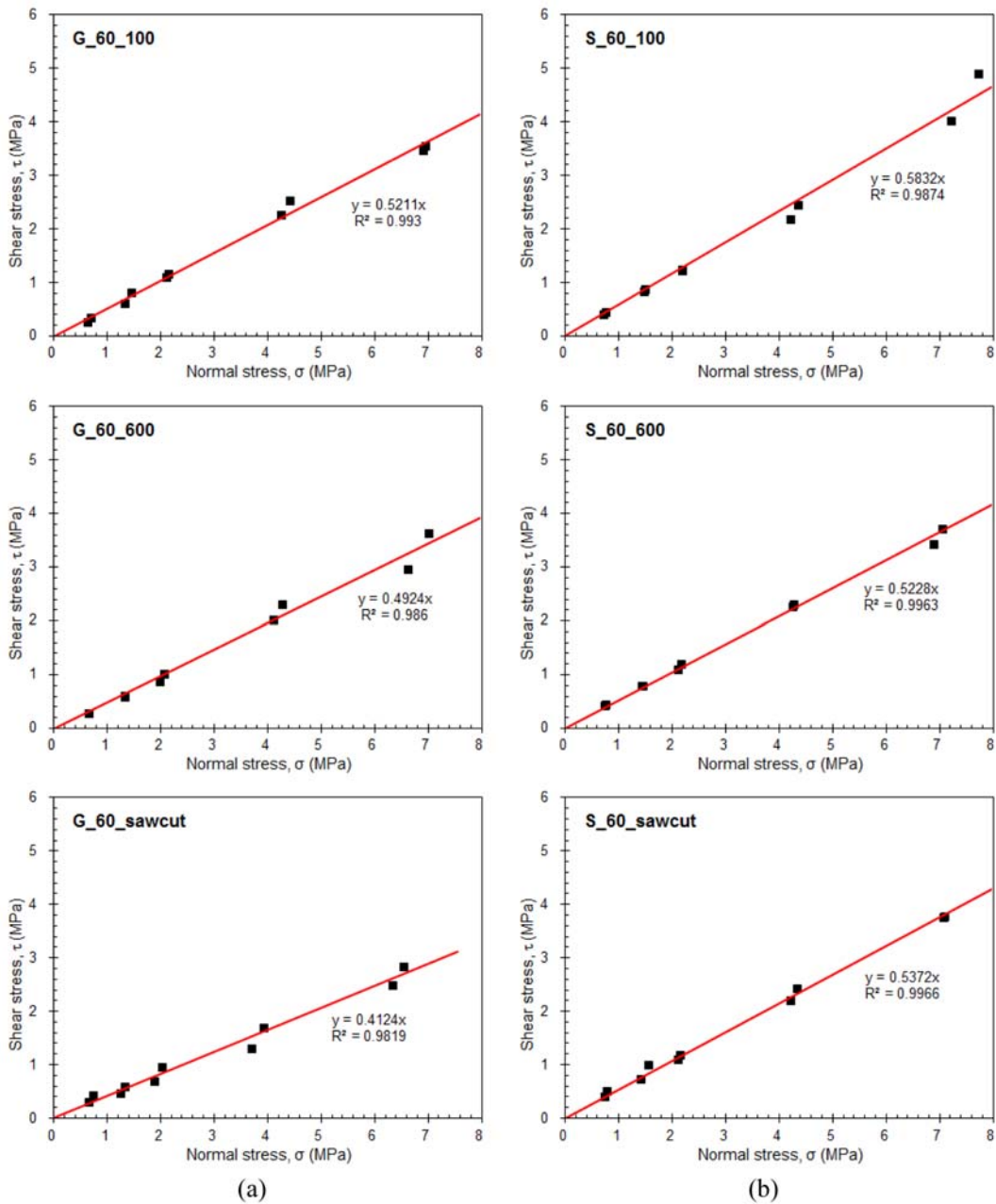


Fig. 8. Shear strengths with respect to normal stresses measured by triaxial compression tests for (a) granite and (b) sandstone (labeled G and S, respectively). The angle of the pre-cut plane measured upward from horizontal plane was 60°. The labels 100 and 600 denote planes polished using #100 and #600 grinding powders, respectively.

직응력과 전단응력을 보여준다. 수직응력이 증가하면 전단 응력도 증가하고 있으며, 모든 시료에서 결정계수(R^2)가 0.98 이상인 매우 좋은 선형적 상관관계를 보이고 있다. 이 회귀직선들의 기울기 각이 시료의 기본마찰각이다(Table 2). 황등 화강암의 기본마찰각은 #100 연마면 시료에서 27.5°~28.1°(평균 27.9°), #600 연마면 시료에서는 25.2°~28.8°(평균 26.7°), 톱 절단면 시료에서는 22.4°~26.3°(평균 23.9°)로 측정되었다. #100 연마면 시료에서는 α 에 따라 0.6° 이하의 작은 편차를 보이고 있는 반면에, 톱 절단면 시료에서는

3.9°의 비교적 큰 편차를 보이고 있다. 화강암 시료들의 평균 기본마찰각들은 비록 톱 절단면에서의 측정값이 약간 낮지만 전반적으로 직접전단시험 결과와 매우 유사하다.

Berea 사암의 α 가 40°인 시료에서는 암석의 마찰각에 비해 절단면의 각도가 너무 낮기 때문에 삼축압축시험 시에 축응력의 지속적인 강화현상(hardening)이 발생하여 최대 축응력을 결정할 수가 없었다. 따라서 α 가 50°, 60°인 시료들에서 측정된 값으로 기본마찰각을 산출하였다. 사암시료들의 기본마찰각은 #100 연마면 시료에서 29.9°~30.9°(평균

30.4°), #600 연마면 시료에서는 22.7°~27.2°(평균 25.0°), 톱 절단면 시료에서는 29.0°~29.9°(평균 29.5°)로 측정되었다. 사암의 #100 연마면과 톱 절단면에서 측정된 기본마찰각은 α 에 따라 1° 이하의 작은 편차를 보이며 직접전단시험에 측정된 값과 거의 유사하다. 그러나 #600 연마면 시료는 α 에 따라 최대 4.5°의 비교적 큰 편차를 보이며 직접전단시험 결과와도 약 2.3°정도 차이를 보인다.

위의 결과는 화강암과 사암의 #100 연마면 시료에서는 마찰각들의 편차가 1° 이하로 매우 안정된 시험결과를 보이고 직접전단시험 결과와도 매우 유사하지만, #600 연마면 시료에서는 측정된 마찰각들의 편차가 3.6° 이상 발생하였음을 보여준다. 화강암의 #600 연마면 시료에서 측정된 기본마찰각은 직접전단시험에서 측정된 값과 거의 같았으나, 사암은 약간의 차이를 보였다. #600 연마면 시료와 반대로 사암의 톱 절단면 시료에서 측정된 기본마찰각은 직접전단 시험 결과와 매우 유사하였으나, 화강암에서는 약간 차이를 보였다.

기울임 시험(Tilt test)

기울임 시험은 Fig. 1과 같이 시료를 기울여 미끄러질 때의 각도로부터 기본마찰각을 추정하는 쉽고 단순한 시험으로서 선행 연구들에서 기본마찰각 측정에 가장 많이 사용되었다(Horn and Deere 1962; Stimposn, 1981; Cruden and Hu, 1988; Bruce et al., 1989; Alejano and Conzalez, 2012, Jang and Jang, 2015). 그러나 국내외적으로 아직까지 표준화된 시험법이 제시되어 있지 않은 상태에서 이 연구에서는 가장 최근에 수행된 Alejano et al. (2012)의 연구 방법을 참고하여 Fig. 4a의 판상의 시료를 이용한 기울임 시험을 수행하였다. 기울임 시험에 사용되는 시험기는 대부분 수동으로 조작되는 단순한 형태의 장비로서 이러한 시험

기는 기울임 속도를 일정하게 유지할 수 없고, 상부 시료가 미끄러지는 순간에 정확히 정지시킬 수 없다는 단점이 있다. 이 같은 문제를 해결하고자 최근 일부 연구들에서는 전동모터를 이용한 자동화된 시험기들을 제작하여 사용하였으며(Alejano et al., 2012; Lee et al., 2014), 이 연구에서도 (주)에이스원(AceOne)에서 제작된 자동 기울임 시험기를 사용하였다(Fig. 9). 이 시험기는 가로 20 cm, 세로 20 cm 크기의 기울임 판을 가지고 있으며, 초당 0.1°부터 2°까지 기울임 속도를 조절할 수 있는 전동 모터 시스템과 시료가 미끄러지는 순간을 감지하고 시험기를 자동으로 정지시킬 수 있는 레이저 동작 감지기가 장착되어 있다. 또한 기울임 각을 0.1° 정밀도로 측정할 수 있는 디지털 경사계(Disi-Pas DWL 80E)와 보조 측정기인 아날로그식 경사계도 장착되어 있다.

이 연구에서는 장비의 기울임 속도가 상부시료의 미끄러짐에 영향을 주지 않도록 초당 약 0.4°의 기울임 속도를 설정하고(Alejano et al., 2012), 상부시료가 10 mm 이상 미



Fig. 9. Photograph of the tilt test machine used in the present study.

Table 3. Basic friction angles measured by tilt testing with a range of normal stresses.

Rock type	Type of plane		Normal stress, σ_n				
			0.50 kPa	0.75 kPa	1.00 kPa	1.25 kPa	1.50 kPa
Granite	polished by #100	Mean	28.2°	28.1°	28.9°	29.1°	29.1°
		σ	1.68°	1.54°	1.55°	1.89°	1.89°
	polished by #600	Mean	30.7°	29.9°	29.5°	29.2°	29.2°
		σ	2.29°	1.90°	1.44°	2.08°	2.08°
	Saw-cut	Mean	26.9°	32.4°	32.6°	30.1°	30.1°
		σ	2.82°	2.15°	1.27°	1.90°	1.90°
Sandstone	polished by #100	Mean	28.9°	28.0°	28.1°	28.1°	28.1°
		σ	1.35°	1.20°	1.84°	1.82°	1.82°
	polished by #600	Mean	28.1°	29.3°	29.0°	30.3°	30.3°
		σ	1.89°	1.96°	1.52°	2.44°	2.44°
	Saw-cut	Mean	25.2°	25.0°	25.8°	27.8°	27.8°
		σ	0.99°	1.22°	1.30°	1.13°	1.13°

σ : standard deviation

끄러질 경우 자동으로 정지되도록 하였다. 또한 미끄러짐 면에 작용하는 수직응력이 기울임 시험에 미치는 영향을 확인하기 위하여 1조의 기울임 시험에서 얇은 납판을 이용하여 약 0.5 kPa부터 1.5 kPa까지 총 5가지의 수직응력이 작용하도록 하였으며, 자료의 신뢰성을 확보하기 위하여 각 수직응력 단계별로 100회씩 총 500회의 기울임 시험을 실시하고 측정값의 평균을 기본마찰각으로 결정하였다. 기울임 시험은 하나의 시료로 100회 이상의 반복시험을 해야 하므로 전단면이 마모될 수밖에 없다. 그러므로 전단면을 일정한 상태로 유지시켜주기 위하여 #100 및 #600 연마면에서는 기울임 시험이 10회 종료될 때마다 재연마를 하였고, 톱 절단면의 경우에는 마른 천과 공기압축기를 사용하여 표면의 불순물을 제거하였다.

Table 3은 각각 다른 수직응력 상태에서 측정된 황등 화강암과 Berea 사암의 기본마찰각을 보여준다. #100으로 연마된 화강암의 기본마찰각은 28.1°~29.1°로 수직응력 조건과 상관없이 유사한 값으로 측정되고, #600 연마면의 기본마찰각도 29.2°~30.7°로 수직응력에 따른 측정값의 차이가

크지 않았다. #100과 #600로 연마된 사암의 기본마찰각도 28.0°~28.9°와 28.1°~30.3°로 화강암과 동일하게 수직응력이 달라져도 기본마찰각이 유사하게 측정되었다. 반면에 톱으로 절단된 화강암의 기본마찰각은 수직응력에 따라 26.9°에서 32.6°까지 약 5.7°의 비교적 큰 차이를 보였으며, 사암의 톱 절단면에서 측정된 기본마찰각도 25.0°부터 27.8°까지 약 2.8°의 차이를 보였다. #100과 #600 연마면 시료에서는 주기적으로 전단면을 재연마하여 100회의 반복 시험에도 전단면의 상태가 일정하게 유지될 수 있었던 반면에, 톱 절단면 시료에서는 반복 시험동안에 전단면의 마모를 방지하지 못한 채 마른 천과 공기압축기를 이용한 불순물 제거 정도만이 수행되었기 때문인 것으로 판단된다.

시료에 다양한 수직응력이 가해졌으나 측정된 기본마찰각의 평균은 큰 차이를 보이지 않으므로(Table 3), 각각의 시료에서 5 가지 수직응력 조건의 기울임 시험으로 측정된 500개의 기본마찰각을 취합하여 히스토그램으로 나타내었다(Fig. 10). 기본마찰각은 황등 화강암의 톱 절단면에서 19.5°~38°까지 분포하여 약 18° 범위에서 가장 넓은 분산을

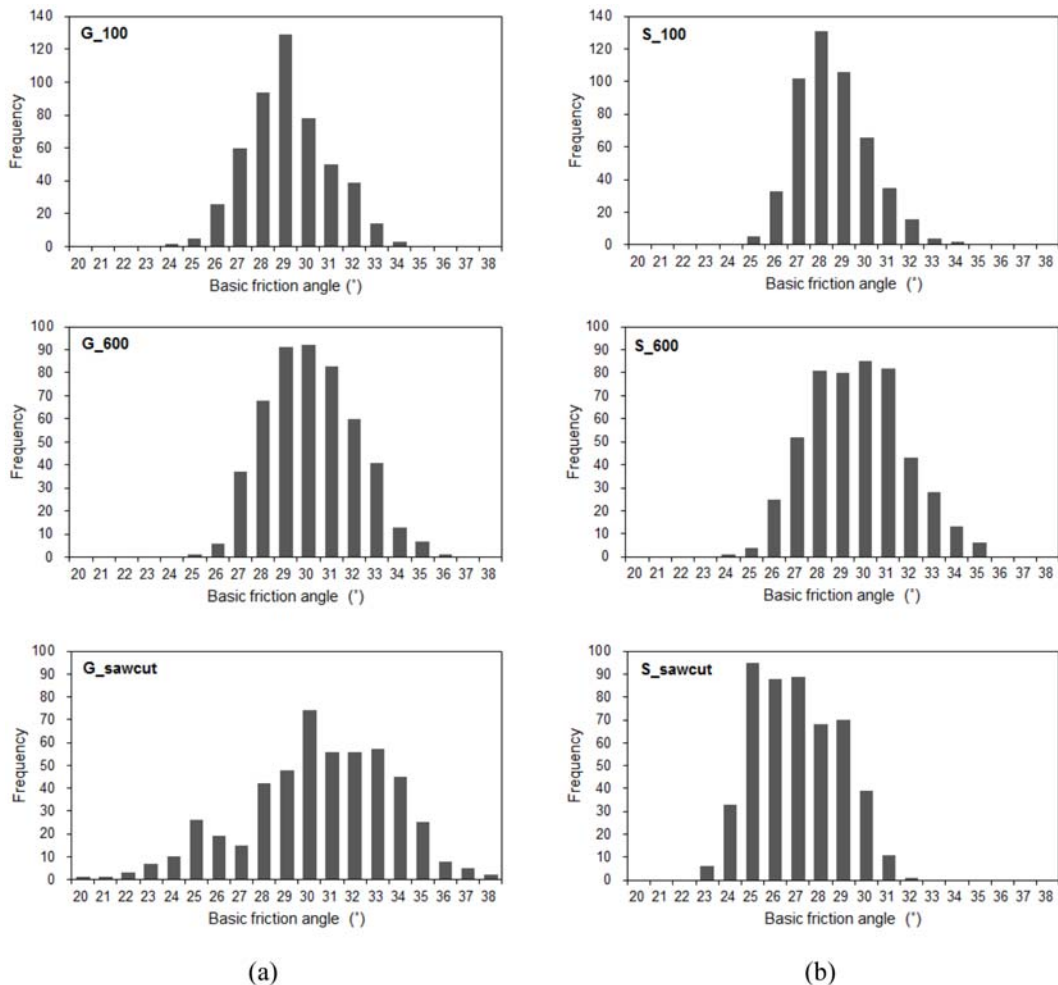


Fig. 10. Histograms of basic friction angles measured by tilt tests for (a) Hwangdeung granite and (b) Berea sandstone.

Table 4. Basic friction angles determined by tilt testing.

Rock type		Type of plane		
		polished by #100	polished by #600	saw-cut
Granite	Mean	28.6°	29.7°	30.0°
	σ	1.63°	1.87°	3.20°
Sandstone	Mean	28.1°	29.2°	26.5°
	σ	1.56°	2.07°	1.86°

σ : standard deviation

보이는 반면에, 다른 시료에서는 23°~35° 사이에서 약 8°~10°의 일정한 범위로 분산되어 분포하고 있다. 톱 절단면에서 측정된 기본마찰각이 정규분포 형태에서 약간 벗어난 형태를 보이는 하지만 전반적으로 모든 시료에서 정규분포에 가까운 분포특성을 보이고 있어서 기본마찰각은 정확하게 측정된 것으로 판단되며, 약 10° 범위의 측정값 분산은 기울임 시험의 특성에서 기인한 것으로 이미 발표된 다른 연구에서도 비슷한 분산 범위를 보이고 있다(Crudén and Hu, 1988; Bruce et al., 1989; Alejano and Conzalez, 2012, González et al., 2014; Jang and Jang, 2015).

기울임 시험으로 측정된 황등 화강암과 Berea 사암의 기본마찰각들은 #600 연마면의 기본마찰각이 #100 연마면보다 약 1° 정도 크게 측정되었으나, 연마된 면들에서는 암종에 관계없이 거의 유사하였다(Table 4). 화강암의 톱 절단면은 연마면들 보다 약간 더 큰 값을 나타내었으나, 사암의 톱 절단면은 이와 반대로 가장 낮은 값으로 측정되었다(Table 4). #100 연마면에서 기울임 시험에 의하여 측정된 기본마찰각은 2° 이하의 작은 차이로 직접전단시험 및 삼축압축시험에서 측정된 값과 유사하였으나, #600 연마면과 톱 절단면에서 기울임 시험에 의하여 측정된 기본마찰각은 직접전단시험 및 삼축압축시험에서 측정된 값과 최소 2° 이상의 차이를 보이고, 암종 및 연마면에 따른 측정값의 경향성도 서로 반대이거나 유사성을 찾기가 어려웠다.

고찰

시험 방법 및 전단면의 상태에 따른 황등 화강암과 Berea 사암의 기본마찰각을 비교하기 위하여 직접전단시험, 삼축압축시험, 기울임 시험에서 측정된 기본마찰각을 암종별로 동시에 나타내었다(Fig. 11). 전단면은 #100 연마면이 상대적으로 가장 거칠고 톱 절단면, #600 연마면 순서로 매끈하다. 직접전단시험과 삼축압축시험에서는 거칠기가 큰 전단면에서 기본마찰각이 크게 측정되는 경향을 보이기도 하였으나, 전반적으로 시험의 종류나 전단면의 거칠기 상태에 따른 뚜렷한 규칙성을 보이지는 않았다. 다만 #100 연마면의 기본마찰각들은 시험방법에 따라 큰 차이가 없이 비교적 유사한 값으로 측정되었다.

황등 화강암에서 기울임 시험으로 측정된 기본마찰각은

모든 전단면에서 다른 방법으로 측정된 기본마찰각보다 크다(Fig. 11a). 톱 절단면과 #600 연마면에서 측정된 기본마찰각이 상대적으로 크고 #100 연마면에서는 낮으나 그 차이는 약 1.4°로, 측정된 값들은 상당히 일치한다. 직접전단 시험과 삼축압축시험으로 측정된 기본마찰각은 #100 연마면에서 크고 톱 절단면과 #600 연마면에서 낮은 반대의 현상을 보이고 있다. 3 가지의 시험 방법으로 측정된 기본마찰각은 #100 연마면에서 27.0°~28.6°로 가장 좁은 범위에 분포하고 있으나, #600 연마면은 26.7°~29.7°의 범위에서, 톱 절단면은 23.9°~30.0°의 가장 넓은 범위를 보여, 화강암의 기본 마찰각은 #100 연마면을 이용할 때 3가지의 시험 방법 중에서 어떠한 방법을 사용하더라도 비교적 정확한 값을 측정할 수 있을 것으로 판단된다. 반면에 톱 절단면을 사용하면 비교적 정확한 방법으로 알려진 직접전단시험과 삼축압축시험에서 낮은 값을, 기울임 시험을 이용하면 비교적 큰 값을 측정할 수도 있을 것으로 판단된다.

Berea 사암 또한 전단면의 거칠기에 따라 어떤 규칙성을 보이지는 않는다. #600 연마면에서 측정된 기본 마찰각은 직접전단시험과 삼축압축시험에서 매우 낮은 값을 보여 신뢰할만한 측정값으로 보이지 않으나, 기울임 시험에서 측정된 기본 마찰각은 다른 측정값과 유사하다(Fig. 11b). 톱 절단면과 #100 연마면에서 직접전단시험과 삼축압축시험을 이용하여 측정된 기본 마찰각은 거의 일치하여 비교적 정확한 값으로 판단된다. 기본마찰각은 #100 연마면에서 28.1°~30.4°의 가장 좁은 범위를 보이고, 톱 절단면에서 26.5°~29.5°의 범위를, #600 연마면에서는 22.7°~29.2°의 가장 넓은 범위를 보여, 사암의 기본마찰각은 #100 연마면을 이용할 때 비교적 정확하게 측정할 수 있을 것으로 판단되며, 톱 절단면 또한 우수한 결과를 보일 것으로 판단된다. 그러나 #600으로 연마한 사암 시료에서 기본마찰각을 측정하면 매우 분산된 결과를 얻을 수 있음을 지시한다.

황등화강암의 기본마찰각은 기울임 시험에서 다른 시험보다 크게 측정되는 반면에, Berea 사암의 기본마찰각은 직접전단시험과 삼축압축시험에서 비교적 크게 측정된다. 또한 황등화강암의 톱 절단면에 대하여 시행된 직접전단시험과 삼축압축시험에서 측정된 기본마찰각은 다른 면에서 측정된 기본마찰각과 매우 큰 차이를 보이는 반면에, Berea 사암에

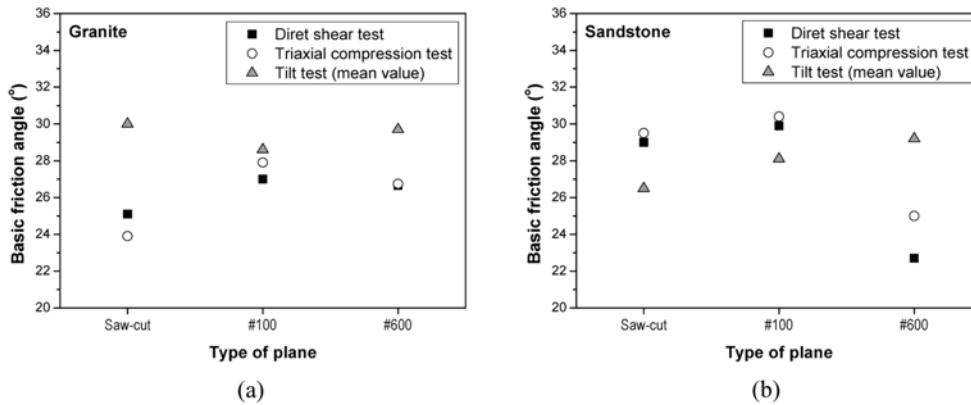


Fig. 11. Basic friction angles determined using three different plane types and test methods for (a) Hwangdeung Granite and (b) Berea Sandstone.

Table 5. Comparison of basic friction angles of granite and sandstone from previous studies and this study.

Rock type	Basic friction angles	Reference
Granite	31.0° - 35.0°	Coulson (1972)
	26.2° - 39.6°	Alejano et al. (2012)
	26.0° - 32.0°	González et al. (2014)
	27.0° - 28.6°	This study
Sandstone	26.0° - 35.0°	Patton (1966)
	31.0° - 33.0°	Krsmanovic (1967)
	32.0° - 34.0°	Coulson (1972)
	28.6° - 30.4°	This study

서는 #600 연마면에서 측정된 기본마찰각이 매우 낮다. 이러한 차이는 암석의 물리적, 역학적 특성 차이로 판단되나, 암석의 물리적, 역학적 특성과 기본마찰각의 관계는 앞으로 더욱 연구되어야 할 것으로 판단된다.

위의 결과는 기본마찰각은 측정되는 절리면의 상태에 따라 차이가 있고, 또한 측정 방법에 따라서도 차이가 남을 지시한다. 기울임 시험에서 측정된 기본마찰각은 면의 상태에 따라 약간의 차이가 나기는 하지만 전반적으로 유사한 값을 보이는 반면에, 직접전단시험과 삼축압축시험에서 측정된 기본마찰각은 동일한 전단면에서는 매우 일치하는 값이 측정되지만, 전단면의 상태에 따라서 매우 다른 값이 나타나기도 한다. 특히 황등화강암의 톱 절단면과 Berea 사암의 #600 연마면에서 측정된 기본마찰각은 다른 전단면에서 측정된 기본마찰각과 큰 차이가 나며, 두 방법에서 측정된 기본마찰각 또한 차이가 나서 이러한 면에 대해서는 직접전단시험이나 삼축압축시험으로 기본마찰각을 측정하지 않아야 함을 지시한다. 황등화강암과 Berea 사암의 #100번 연마면은 모든 시험법에서 유사한 기본마찰각이 측정되므로, 기본마찰각은 #100 연마면을 사용하여 측정되어야 할 것으로 판단된다.

이 연구의 정확성을 검증하기 위하여 선행 연구들에서 측정된 화강암과 사암의 기본마찰각을 비교하였다(Table 5).

Coulson (1972)과 Krsmanovic (1967)의 측정결과는 4° 이내의 비교적 좁은 범위를 보이고 있으나, Alejano et al. (2012), González et al. (2014), Patton (1966)의 측정결과는 최소 6° 이상의 넓은 범위를 보이고 있어서 이 연구의 결과와 유사하다. 또한 이 연구에서 측정된 화강암의 기본마찰각은 Coulson (1972)의 연구결과보다는 다소 낮으나, 최근 수행된 Alejano et al. (2012)와 González et al. (2014)의 연구에서 측정된 기본마찰각의 범위는 유사하다. 사암의 기본마찰각은 Patton (1966)의 연구에서 측정된 값들과 유사한 범위를 보이는 반면에, 다른 연구들의 측정값보다는 다소 낮았다.

결론

이 연구에서는 직접적으로 기본마찰각을 측정할 수 있는 직접전단시험과 삼축압축시험, 간접적으로 측정할 수 있는 기울임 시험을 이용하여 톱 절단면, #100 연마면, #600 연마면 등 총 3종류의 면을 갖는 황등 화강암과 Berea 사암의 기본마찰각을 측정하고 시험결과들을 서로 비교하였다. 직접적인 시험방법인 직접전단시험과 삼축압축시험으로 측정된 황등 화강암의 기본마찰각은 면의 상태에 따라 23.9°~25.1°(톱 절단면), 27.0°~27.9°(#100 연마면), 26.7°

(#600 연마면)이며, 사암은 29.0~29.5°(톱 절단면), 29.9~30.4°(#100 연마면), 22.7~25.0°(#600 연마면)으로 측정되었다. 간접적인 시험법인 기울임 시험으로 측정된 평균 기본마찰각은 황등 화강암에서 30.0°(톱 절단면), 28.6°(#100 연마면), 29.7°(#600 연마면)이며, 사암은 26.5°(톱 절단면), 28.1°(#100 연마면), 29.2°(#600 연마면)로 나타났다.

위의 결과는 직접전단시험과 삼축압축시험에서 측정된 기본마찰각은 암종에 따라, 면의 연마 상태에 따라 영향을 받음을 보여준다. 황등화강암의 #100 연마면과 #600 연마면에서 측정된 기본마찰각은 거의 일치하는 반면에, 톱 절단면에서 측정된 기본마찰각은 다른 연마면에서 측정된 기본마찰각과 차이가 날 뿐만 아니라, 각각의 방법으로 측정된 기본마찰각도 차이가 난다. 반면에 사암에서는 #600 연마면에서 위와 거의 유사한 현상이 발생하였다. 이와 같은 결과는 직접전단시험과 삼축압축시험을 이용하여 기본마찰각을 측정하면 정확한 값을 측정할 수 있을 것으로 판단되지만, 경우에 따라서는 매우 부정확한 결과가 도출될 수도 있음을 지시하고, 이는 암석의 물리적, 역학적 차이에 의한 결과로 판단되어 더욱 상세한 특성은 추가적인 연구를 필요로 한다. 기울임 시험은 모든 암종과 면의 상태에서 비교적 유사한 결과를 산출하여 기본마찰각의 측정에 유용하게 사용될 수 있음을 보여주지만, 오차의 범위는 직접적인 시험에 비하여 비교적 넓은 범위를 보인다. 또한 위의 결과는 안정된 기본마찰각을 구하기 위해서는 톱 절단면 보다는 전단면을 항상 일정하게 표준화시킬 수 있는 연마면을 사용하는 것이 유리하며, 연마면 중에서도 #600 연마면 같이 매우 매끄러운 면 보다는 #100 연마면 같은 부드러운 수준의 면에서 보다 안정된 결과를 얻을 수 있다는 것을 보여준다. 그러므로 #100 연마면 시료에서 직접전단이나 삼축압축시험으로 측정된 기본마찰각이 가장 신뢰성이 높을 것으로 예상되며, #100 연마면 시료에 대한 기울임 시험도 기본마찰각을 측정하는데 있어서 충분한 신뢰성을 갖는 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2015R1D1A1A01056665).

References

Alejano, L. R., González, J. and Muralha, J., 2012, Comparison of different techniques of tilt testing and basic friction angle variability assessment, *Rock Mech. Rock Eng.*, 45(6), 1023-1035.
 Barton, N., 1973, Review of a new shear strength criterion for

rock joints, *Eng. Geol.*, 7, 287-332.
 Barton, N., 1976, The shear strength of rock and rock joints, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abs.*, 13, 255-279.
 Barton, N. and Choubey, V., 1977, The shear strength of rock joints in theory and practice, *Rock Mech.*, 10(1-2), 1-54.
 Belem, T., Homana-Etienne, F. and Souley, M., 2000, Quantitative parameters for rock joint surface roughness, *Rock Mech. Rock Eng.*, 33(4), 217-242.
 Brace, W. F. and Byerlee, J. D., 1966, Stick-slip as a mechanism for earthquakes, *Sci.*, 153, 990-992.
 Bridgman, P. W., 1936, Shearing phenomena at high pressure of possible importance to geology, *J. Geol.*, 44, 653-669.
 Bruce, I. G., Cruden, D. M. and Eaton, T. M., 1989, Use of a tilting table to determine the basic friction angle of hard rock samples. *Can. Geotech. J.*, 26, 474-479.
 Byerlee, J. D., 1967, Frictional characteristics of granite under high confining pressure, *J. Geophys. Res.*, 72(14), 3639-3648.
 Coulson, J. H., 1970, The effects of surface roughness on the shear strengths of joints in rock, Ph. D. Thesis, University of Illinois, 239p.
 Coulson, J. H., 1972, Shear strength of flat surfaces in rock, In: Cording, E. J. (Ed.), 13th Symp. Rock Mech., Am. Soc. Civil Eng., Urbana, 77-105.
 Cruden, D. M. and Hu, X. Q., 1988, Basic friction angles of carbonate rocks from Kananaskis county, Canada, *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.*, 38(1), 55-59.
 Dehler, W. and Labuz, J. F., 2007, Stress path testing of an anisotropic sandstone, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 133(1), 157-164.
 Grasselli, G. and Egger, P., 2003, Constitutive law for the shear strength of rock joints based on three-dimensional surface parameters, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 40(1), 25-40.
 Grasselli, G., Wirth, J. and Egger, P., 2002, Quantitative three-dimensional description of a rough surface and parameter evolution with shearing, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 39(6), 789-800.
 Goldstein, M., Goosev, B., Pyrogovsky, N., Tulinov, R. and Turovskaya, A., 1966, Investigation of mechanical properties of cracked rock. *Proc. of 1st ISRM Congress, Lisbon*, 521-524.
 González, J., González-Pastoriza, N., Castro, U., Alejano, L. R., and Muralha, J., 2014, Considerations on the laboratory estimate of the basic friction angle of rock joints, In: Alejano, R., Perucho, A., Olalla, C. and Jimenez, R. (Eds.), *Rock Eng. and Rock Mech. : Structures in and on Rock Masses (EUROCK 2014)*, ISRM Eu. Reg. Symp., Vigo, 199-204.
 Hoek, E. and Bray, J., 1981, *Rock slope engineering*, The Institution of Mining and Metallurgy, London, 358p.
 Horn, H. M. and Deere, D. U., 1962, Frictional characteristics

- of minerals., *Geotech.*, 12, 319-335.
- Jaeger, J. C., 1959, The frictional properties of joints in rock, *Geofisica pura e applicata*, 43(1), 148-158.
- Jang, H. S. and Jang, B. A., 2015, New method for shear strength determination of unfilled, unweathered rock joint, *Rock Mech. Rock Eng.*, 48(4), 1515-1534.
- Jang, B. A., Kim, T. H. and Jang, H. S., 2010, Characterization of the three dimensional roughness of rock joints and proposal of a modified shear strength criterion, *J. Eng. Geol.*, 20(3), 319-327. (in Korean with English abstract)
- Krsmanovic, D. and Langof, Z., 1964, Large scale laboratory tests of the shear strength of rocky material, In *Grundfragen auf dem Gebiete der Geomechanik/Principles in the Field of Geomechanics*, Springer Berlin Heidelberg, 20-30
- Krsmanovic, D., 1967, Initial and residual shear strength of hard rock, *Geotech.*, 17(2), 145-160.
- Kulatilake, P. H. S. W., Shou, G., Huang, T. H. and Morgan, R. M., 1995, New peak shear strength criteria for anisotropic rock joints, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abs.*, 32(7), 673-697
- Ladanyi, B. and Archambault, G., 1969, Simulation of shear behaviour of a jointed rock mass, *Proc. 11th U.S. Symp. on Rock Mech.*, Berkeley, ARMA-69-0105.
- Lane, K. S. and Heck, W. J., 1964, Triaxial testing for strength of rock joints, *Proc. 6th U.S. Symp. on Rock Mech.*, Rolla, ARMA-64-098.
- Lee, S. B. and Chang, C. D., 2015, Laboratory experimental study on fracture shear-activation induced by carbon dioxide injection, *J. Geol. Soc.*, 51(3), 281-288 (in Korean with English abstract)
- Lee, B. H., Lee, S. J. and Choi, S. O., 2014, A study on relationship between basic frictional angle and mineral composition for granite sample, *Tunn. & Under. Space*, 24(1), 32-45. (in Korean with English abstract)
- Maksimovic, M., 1992, New description of shear strength for rock joints. *Rock Mech. Rock Eng.*, 25(4), 275-284.
- Muralha, J., 1995, Probabilistic approach of the mechanical behaviour of rock discontinuities, PhD thesis, Instituto Superior Técnico, Lisbon (in Portuguese).
- Newland, P. L. and Allely, B. H., 1957, Volume changes in drained triaxial tests on granular materials, *Geotech.*, 7(1), 17-34.
- Papaliangas, T. T., Hencher, S. R. and Lumsden, A. C., 1995, A comprehensive peak shear strength criterion for rock joints. *Proc. 18th Int. Cong. Rock Mech.*, Tokyo, Japan, 1:359-366
- Park, J. W. and Song, J. J., 2013, Numerical method for the determination of contact areas of a rock joint under normal and shear loads, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 58:8-22
- Patton, F. D., 1966, Multiple modes of shear failure in rock and related material, Ph. D. Thesis, University of Illinois, 282p.
- Reeves, M. J., 1985, Rock surface roughness and frictional strength, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 22(6), 429-442
- Ruiz, J. and Li, C., 2014, Measurement of the basic friction angle of rock by three different tilt test methods, In: Alejano, R., Perucho, A., Olalla, C. and Jimenez, R. (Eds.), *Rock Eng. and Rock Mech. : Structures in and on Rock Masses (EUROCK 2014)*, ISRM Eu. Reg. Symp., Vigo, 261-266
- Sagaseta, C., 1986, On the modes of instability of a rigid block on an inclined plane, *Rock Mech. Rock Eng.*, 19(4), 261-266.
- Stimpson, B., 1981, A suggested technique for determining the basic friction angle of rock surface using core, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abst.*, 18(1), 63-65.
- Wines, D. R. and Lilly, P. A., 2003, Estimates of rock joint shear strength in part of the Fimiston open pit operation in Western Australia, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 40(6), 929-937
- Yang, Z. Y. and Chiang, D. Y., 2000, An experimental study on the progressive shear behavior of rock joints with tooth-shaped asperities, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 37(8), 1247-1259.

장현식

강원대학교 지구물리학과
24341 강원도 춘천시 강원대학길 1
Tel: 070-7843-3329
Fax: 033-244-9276
Email: whitennull@kangwon.ac.kr

정종택

한국건설기술연구원 지반연구소
10223 경기도 고양시 일산서구 고양대로 283
Tel: 010-6783-0321
E-mail: newestjeong@nate.com

장보안

강원대학교 지구물리학과
24341 강원도 춘천시 강원대학길 1
Tel: 033-250-8583
Fax: 033-244-9276
E-mail: bajang@kangwon.ac.kr