

## 최적의 기본마찰각 측정법에 관한 실험적 연구

이국현<sup>1</sup> · 장현식<sup>2</sup> · 장보안<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>강원대학교 지질·지구물리학과 석사과정, <sup>2</sup>강원대학교 지질·지구물리학과 연구원,  
<sup>3</sup>강원대학교 지질·지구물리학과 교수

## Experimental Study for Optimal Method in Measuring the Basic Friction Angle of Rock

Kook-Hyun Lee<sup>1</sup> · Hyun-Sic Jang<sup>2</sup> · Bo-An Jang<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Master Student, Department of Geophysics, Kangwon National University  
<sup>2</sup>Researcher, Department of Geophysics, Kangwon National University  
<sup>3</sup>Professor, Department of Geophysics, Kangwon National University

### Abstract

Basic friction angles of Hwangdeung granite, Berea sandstone, Jeongsun marble, Hongcheon gneiss, Pungam shale and Eumseong sandy shale were measured by direct shear test, tilt test and pull test. Characteristics of basic friction angle and the accuracy of test methods were compared and the optimal method in measuring basic friction angle was suggested. Although basic friction angles might be measured accurately by direct shear test, the test apparatus is expensive and procedures are complicated. Tilt tests which is the suggested method for measuring basic friction angle by International Association for Rock Mechanics also provided similar basic friction angles measured by direct shear test. However, the error measured for the same rock type is higher than 7° and values by repeated measurements in one sample show different trends, such as increasing or decreasing or almost constant as measurements continued. The difference measured in one gneiss sample is higher 12°, indicating that tilt test may be not a reliable method for measuring basic friction angle. Not only pull test provided accurate and consistent results under low normal stresses, but also test apparatus is simple and inexpensive and procedure is not complicated, indicating that pull test may be the optimal method for measuring basic friction angle.

**Keywords:** basic friction angle, direct shear test, tilt test, pull test, the optimal test method

### OPEN ACCESS

\*Corresponding author: Bo-An Jang  
E-mail: bajang@kangwon.ac.kr

Received: 16 December, 2019  
Accepted: 23 December, 2019

© 2019 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/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

### 초 록

황등 화강암, Berea 사암, 정선 대리암, 홍천 편마암, 풍암 셰일 및 음성 사질 셰일의 여섯 종류의 암석에 대하여 직접전단시험, 기울임시험 그리고 당김시험을 이용하여 기본마찰각을 측정하고, 암종에 따른 기본마찰각의 특성, 시험방법의 정확성을 비교, 검토하여 기본마찰각 측정에 가장 정확하고 효율적인 시험방법을 제시하였다. 기본마찰각은 직접전단시험을 이용하면 정확하게 측정되지만, 비싼 장비와 복잡한 시험절차가 필요하다. 국제암반역학회에서 표준시험법으로 제안한 기울임시험은 직접전단시험에서 측정된 기본마찰각과 유사한 값을 제시하나, 동일한 암석으로 제작된 3개의 시료에서 측정된 기본마찰각은 최대 7° 이상의 오차를 보이고, 1개의 시료에서 5회 측정된 미끄러짐 각 또한 시료에 따라서 증가하거나, 감소하거나, 유사한 값을 보이는 등 일정한 패턴을 보이지 않고 변할 뿐만 아니라, 편마암에서는 최대 12°의 오차를 보여 시험의 신뢰성에 상당한 의문이 든다. 간단한 시험장비와 비교적 낮은 수직응력하

에서 실시되는 당김시험은 직접전단시험에서 구한 기본마찰각과 매우 유사한 값을 제공하고, 측정된 값들이 일관성을 보이고 시험절차 또한 매우 간단하여 기본마찰각 측정에 가장 유용한 시험 방법으로 판단된다.

**주요어:** 기본마찰각, 직접전단시험, 기울임시험, 당김시험, 최적 시험법

## 서론

절리면의 전단강도는 무결암의 전단강도보다 매우 낮기 때문에, 터널 혹은 사면과 같은 구조물에서의 암반 거동은 절리면의 전단강도에 따라 크게 좌우된다. 절리면의 전단강도는 암석의 종류, 절리면에 작용하는 수직응력, 절리면의 크기, 충전물 등과 같은 다양한 요인에 의하여 영향을 받으므로, 연구자들은 절리면의 전단강도 기준을 이론적인 식보다는 실험식 혹은 경험식으로 제안하였다(Patton, 1966; Barton and Choubey, 1977, Kulatilake et al., 1995). 절리면 전단강도 기준은 초기에 마찰계수( $\mu$ )를 이용하여 전단응력과 수직응력의 관계를 선형으로 표현하였으나, 이후 마찰계수를 마찰각( $\phi$ )으로 표현하는 모어-쿨롱 파괴기준( $\tau = c + \sigma_n \tan \phi$ )이 널리 사용되었다(Paul, 1961; Jaeger and Cook, 1979). 그러나 높은 수직응력에서는 절리면 내에 존재하는 돌기들이 파괴되며 마찰각이 감소하는 현상이 관찰되어, 파괴기준선의 기울기가 바뀌는 이중선형관계식( $\tau = \sigma_n \tan(\phi_b + i)$ )이 제안되기도 하였다(Patton, 1966). 수직응력이 점차 커지면 돌기의 파괴도 점차 증가하여 마찰각이 계속 감소하게 되고, 전단강도가 수직응력에 대하여 선형의 관계를 보이지 않게 된다. 이에 따라 Barton(1973)은 절리면의 거칠기 계수(JRC)와 절리면의 벽면강도(JCS)와 같은 파라미터들을 추가하여 비선형 관계식( $\tau = \sigma_n \tan [JRC \log (JCS/\sigma_n) + \phi_b]$ )을 제안하였고, 이러한 비선형 관계식이 더욱 정확한 절리면의 전단강도를 표현하는 것으로 인식되고 있다.

Patton의 이중선형관계식이나 Barton의 비선형 관계식에서는 절리면의 거칠기에 따라 결정되는 거칠기 요소(팽창각  $i$ , 거칠기 계수 JRC)와 평편한 면에서 측정되는 기본마찰각( $\phi_b$ )이 공통으로 사용되고 있다. 복잡하고 불규칙한 형상을 갖는 절리면의 거칠기를 정확하게 측정하는 것은 매우 어려우므로, 연구자들은 디지털 프로파일 게이지 또는 레이저 스캐너를 이용하여 거칠기 단면을 측정하고, 수치화된 거칠기 자료를 이용하여 통계적 방법 또는 프랙탈 방법 등을 통한 절리면의 거칠기를 분석하는 연구를 많이 진행하였다(Tse and Cruden, 1979; Grasselli and Egger, 2003; Jang et al., 2014). 이와 같이 절리면의 거칠기를 정확하게 측정하기 위한 연구는 많이 진행되었으나, 기본마찰각은 간단한 시험을 통하여 정량적인 값이 측정될 수 있다는 인식 때문에 충분한 연구가 진행되지 못하였다. 그러나 절리면의 전단강도를 정확하게 예측하기 위해서는 절리면의 거칠기 뿐만 아니라 암석의 기본마찰각도 정확하게 측정하여야 한다.

기본마찰각은 암석의 고유한 특성이며(Barton, 1973), 암석 내의 풍화되지 않은 평편한 면, 즉 거칠기가 없는 시료에서 측정될 수 있다(Fig. 1). 톱으로 절단된(Saw-cut) 면이나 샌드블라스트된(Sand-blasted) 면이 기본마찰각 측정에 사용되었으며, 일부 연구자들은 연마사로 표면을 연마하여 사용하였다(Ruiz and Li, 2014; Jang et al., 2018). 기본마찰각은 직접전단시험(Direct shear test)이나 기울임시험(Tilt test) 등으로 측정할 수 있으나, 국제암반역학회(International Society of Rock Mechanics, ISRM)는 기울임시험을 기본마찰각 측정의 표준시험방법으로 제안하였다(Alejano et al., 2018). 기울임시험은 상부 시료와 하부 시료를 맞물려 놓은 후 서서히 시료들을 기울여 상부 시료가 하부 시료로부터 미끄러지기 시작할 때의 각도를 측정하며, 이때 측정된 기울기 각이 암석의 기본마찰각이다. 기울임시험은 마찰각을 쉽게 측정할 수 있을 뿐만 아니라, 얇은 판의 형태나 코어 등의 다양한 형태의 시료들을 시험에 사용할 수 있는 장점이 있다(Cawsey and Farrar, 1976). 직접전단시험은 수직응력에 따른 전단강도를 측정하고, 전단강도와 수직응력의 관계를 이용하여 마찰각을 측정하기 때문에 마찰각을 비교적 정확하게 측정할 수 있는 시험방법으로 알려져 있다.

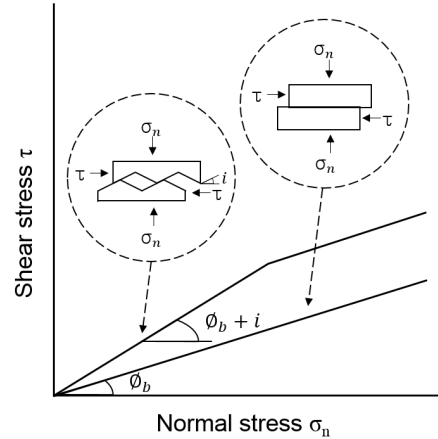


Fig. 1. Basic friction angle  $\phi_b$  and effect of surface roughness with saw-tooth asperity of inclination  $i$  on friction angle measurement [redrawn from Patton(1966)].

기본마찰각 측정에는 직접전단시험, 기울임시험뿐만 아니라 당김시험(Pull test)도 사용될 수 있다. 당김시험은 절리면의 하부를 고정하고 상부시료를 당기며 전단강도를 측정하는 시험으로, 직접전단시험과 유사한 원리를 가지고 있으나 직접전단시험에 비하여 시험기구가 간단하고 낮은 수직응력 상태에서 전단강도를 측정할 수 있는 시험방법이다. González et al.(2014)은 상부 시료에 연결된 줄에 양동이를 매달은 후, 양동이에 모래를 넣어 전단력을 조절하는 방식의 당김시험방법을 사용하여 기본마찰각을 측정하였다. 그들은 상부 시료가 하부 시료로부터 미끄러질 때까지 양동이에 모래를 넣고, 미끄러질 때의 모래의 무게를 이용하여 전단응력( $\tau$ )을 계산하였고 상부 시료의 무게로 수직응력( $\sigma_n$ )을 계산하여  $\phi_b = \tan^{-1}(\tau/\sigma_n)$  관계식으로 기본마찰각을 결정하였다. 당김시험으로 측정된 기본마찰각은 기울임시험으로 측정된 기본마찰각보다 비교적 낮은 분산을 보였으나(González et al., 2014), 양동이에 모래를 넣을 때 충격이나 진동이 발생하여 마찰각의 정확한 측정에 영향을 미치는 등의 문제점도 노출되었다.

이 연구에서는 여섯 종류의 암석에 대하여 직접전단시험, 기울임시험 그리고 당김시험을 이용하여 기본마찰각을 측정하였다. 직접전단시험과 기울임시험은 국제암반역학회에서 제안한 표준시험법을 사용하였고, 당김시험은 González et al.(2014)의 당김시험 장치보다 시료에 비교적 높은 수직응력을 줄 수 있는 무게추와 정밀하게 전단력을 측정할 수 있는 로드셀이 탑재된 당김시험기를 제작하여 사용하였다. 여섯 종류의 암석에 대하여 각각의 시험방법으로 측정된 기본마찰각을 비교하여 암종에 따른 기본마찰각 측정의 특성을 파악하였고, 시험방법의 정확성을 비교, 검토하여 기본마찰각 측정에 가장 정확하고 효율적인 시험방법을 제시하고자 하였다.

## 시료 제작

전라북도 황등 지역의 황등 화강암, 미국 Ohio 주 Berea 지역의 Berea 사암, 강원도 정선 지역의 정선 대리암 및 홍천 지역의 홍천 편마암, 강원도 홍천 풍암 분지와 충청북도 음성 지역에서 채취한 세일들을 시료로 제작하였다(Fig. 2). 황등 화강암은 약 0.6~2.0 mm의 입자 크기를 가진 석영, 사장석, K-장석 및 흑운모로 구성되어 있으며, Berea 사암의 입자 크기는 약 0.1~0.8 mm이고 석영, 조장석, 미사장석 및 카올린이 주 구성 광물이다(Dehler and Labuz, 2007). 정선 대리암은 세립질의 방해석이 주를 이루며 이 외에 석영 및 백운모 등이 미량으로 함유되어 있고 홍천 편마암은 약 2.0 mm 이하의 입자 크기를 가진 석영, 사장석, 흑운모, 각섬석 등으로 이루어져 있다(Cho and Kim, 1993). 풍암 세일은 주로 석영, 점토광물, 방

해석, 사장석 및 백운모 등이 미립 및 세립질 형태로 구성되어 있으며, 음성 셰일은 세립질의 석영 및 사장석이 주를 이루고 있는 사질 셰일이다. 각 시료의 물리적, 역학적 특성은 국제암석역학회(ISRM)에서 제안한 시험방법을 통해 측정되었다(Table 1). 비중은 대리암이  $2.7 \text{ g/cm}^3$ 로 가장 높으며 Berea 사암은  $2.2 \text{ g/cm}^3$ 로 가장 낮다. 모든 시료의 공극율은 1% 이하이나 Berea 사암의 공극율은 약 15%로 매우 높다. 일축압축강도 또한 Berea 사암이 가장 낮은 약 80 MPa이고 음성 사질셰일이 194 MPa로 가장 강하다. 탄성계수와 일축압축강도를 Deere and Miller(1966)의 공학적 분류법으로 분류하면 화강암, 편마암 및 사질 셰일은 강도가 큰 중간 탄성의 암석, 사암은 탄성과 강도가 모두 중간 정도인 암석, 대리암은 중간 정도의 강도를 가진 높은 탄성 암석, 풍암 셰일은 강도와 탄성이 모두 높은 암석이다.

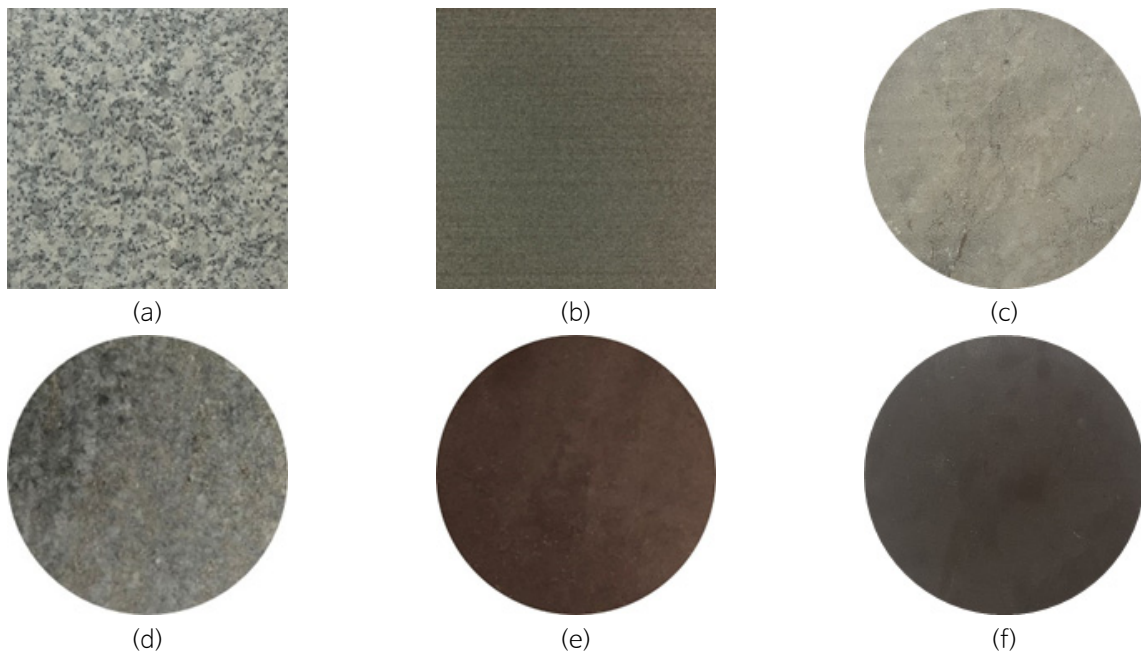


Fig. 2. Samples used for direct shear test, tilt test and pull test: (a) Hwangdeung granite, (b) Berea sandstone, (c) Jeongseon marble, (d) Hongcheon gneiss, (e) Pungam shale and (f) Eumseong sandy shale.

Table 1. Physical and mechanical properties of samples

Sample	Density ( $\text{g/cm}^3$ )	Porosity (%)	$V_p$ (m/s)	UCS (MPa)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio
Granite	2.63	0.52	3,957	183.86	57.48	0.28
Sandstone	2.20	14.77	2,650	79.17	20.49	0.33
Marble	2.74	0.19	5,259	101.06	63.52	0.30
Gneiss	2.70	0.26	4,741	154.97	60.84	0.18
Shale	2.72	0.68	5,775	114.80	71.92	0.22
Sandy shale	2.69	0.26	5,481	194.35	56.34	0.20

황등 화강암과 Berea 사암의 시료는 길이(l) 10 cm, 폭(w) 10 cm, 두께(h) 2 cm인 사각 판상형으로 제작되었으며, 정선 대리암, 홍천 편마암, 풍암 셰일과 음성 사질 셰일 시료는 직경(l) 10 cm, 두께(h) 2 cm인 원판형 형태로 제작되었다. 기울임시험에서 시료의 형태 및 크기에 따라 시료는 미끄러지거나 전도되기도 한다. 사각 판상형 시료는 길이에 대한 높이의

비가  $l/h > 3 \tan \beta$  조건일 때, 원판형 시료에서는  $l/h > 4 \tan \beta$  조건을 충족할 때 시료는 미끄러지기만 한다(Alejano et al., 2012a). 사각 판상형 및 원판형 시료들은 시료의  $l/h$  비가 5로 제작되었으므로, 사각 판상형 시료에서는 미끄러짐 각 ( $\beta$ )이  $59^\circ$  이하일 때, 원판형 시료에서는 미끄러짐 각이  $51^\circ$  이하일 때 미끄러짐만 발생하므로 시료의 기본마찰각이  $51^\circ$  이하이면 이 시료들의 형태는 기울임시험에 사용될 수 있다.

모든 시료는 표면이 균일한 상태를 유지할 수 있도록 톱으로 절단된 후 연마사로 연마되었다. 선행연구들에서는 100번, 200번, 600번 등의 연마사로 연마된 면이 자주 사용되어왔으나(Crudon and Hu, 1988; Mehrishal et al., 2016; Jang et al., 2018), 연마된 면이 지나치게 매끄러우면 스틱슬립(Stick-slip) 현상이나 표면이 흡착되는 현상이 발생할 수 있으므로 정확한 기본마찰각이 측정되기 어려울 수 있다(Li et al., 2019). Jang et al.(2018)의 연구에서 600번으로 연마된 면보다는 100번으로 연마된 면을 사용하는 것이 시험조건 및 방법에 상관없이 유사한 기본마찰각을 측정할 수 있다고 보고된 바 있으므로, 이 연구에서는 모든 시료를 100번 연마사로 연마하여 제작하였다. 6종류의 암석을 3쌍 제작하여 18쌍의 시료를 준비였고, 기울임시험, 당김시험과 직접전단시험에서 시험이 끝난 시료들은 연마사로 재연마되어 다른 시험에 사용되었다.

## 결과

### 직접전단시험

직접전단시험은 정밀하게 조정이 가능한 유압 펌프에 의하여 수직응력과 전단응력을 가할 수 있는 직접전단시험기로 수행되었으며(Fig. 3), 국제암반역학회(ISRM)에서 제안한 표준시험방법에 따라 수직응력을 일정하게 주고 0.1~0.5 mm/min의 전단속도로 시료 길이의 최대 10%까지 전단하여 전단강도를 측정하였다(Muralha et al., 2013). 수직응력은 약 0.3 MPa부터 2.5 MPa까지 6단계로 적용하였으며, 각 수직응력의 단계에서 시험이 종료되면 전단작용에 의하여 전단면에 생성된 암석가루나 불순물을 마른 솔로 제거하였다. 전단면이 청소된 후에는 시료를 제작리로 재배치시켜 이전보다 높은 수직응력으로 전단시험을 실시하였다.

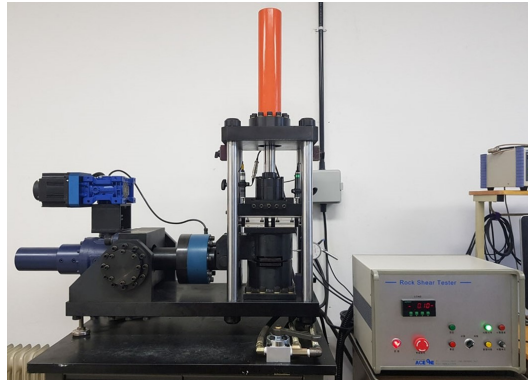


Fig. 3. Direct shear test apparatus.

전단변위가 증가함에 따라 전단응력은 약 0.2 mm까지 일정한 기울기의 선형으로 증가한다. 그러나 전단변위가 0.2 mm 이상에서는 전단응력 - 전단변위 곡선의 기울기가 점차 감소하여, 최대전단응력을 보이지 않고 전단변위가 0.5 mm 이상부터 전단응력은 거의 일정하게 된다(Fig. 4). 암석의 자연 절리면은 거칠기를 가지고 있으므로 전단응력은 최대전단응력을 보인 후 감소하여 일정한 잔류전단응력을 보이는 것이 일반적이지만, 이 연구에서는 최대전단응력을 보이지 않고

변위가 증가함에 따라 전단응력이 계속 증가하다가 일정한 잔류전단응력을 나타낸다. 이는 시료의 표면이 연마되어 거칠기가 전혀 없기 때문에 판단되며, 전단응력이 일정하게 되는 지점의 전단응력을 전단강도로 결정하였다.

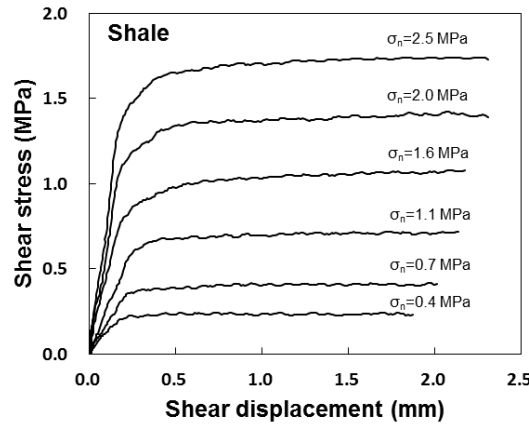


Fig. 4. Shear stresses plotted against shear displacements for shale sample.

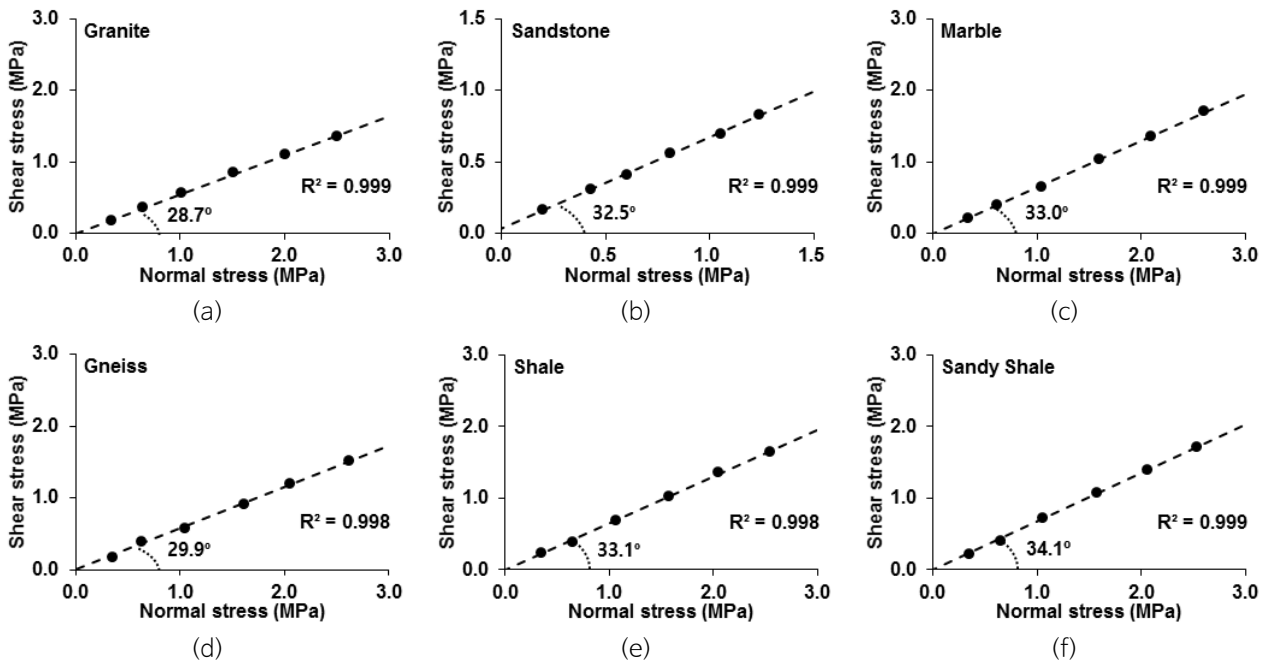


Fig. 5. Shear stresses plotted against normal stresses measured by direct shear tests for (a) granite, (b) sandstone, (c) marble, (d) gneiss, (e) shale and (f) sandy shale.

각 수직응력 단계에서 측정된 전단강도를 수직응력에 대한 전단강도 그래프로 도시하면, 사암을 제외한 모든 시료에서 전단강도는 수직응력에 대하여 결정계수( $R^2$ )가 0.99 이상이고 원점을 통과하는 직선으로 나타난다(Fig. 5). 이 직선의 기울기가 기본마찰각이며, 화강암의 기본마찰각은 28.7°, 대리암은 33.0°, 편마암은 29.8°, 셰일은 33.1° 그리고 사질 셰일의 기본마찰각은 34.1°이다. 사암의 경우에 수직응력을 다른 시료와 동일하게 2.5 MPa까지 적용하면 기본마찰각은 36.9°로 매우 높게 측정되었으므로, 수직응력을 1.2 MPa까지 적용하여 직접전단시험을 수행하였다. 이때 0.5 MPa 이하의 수

직응력에서 측정된 전단강도는 비교적 높은 값을 보여 전단응력-수직응력 관계를 나타내는 회귀선은 원점을 지나지 않고 약간의 점착력을 나타내고 있으며, 회귀선에서 측정된 마찰각은  $32.5^\circ$ , 점착력은  $0.035 \text{ MPa}$ 이다. 사암은 공극율이 크고 강도와 탄성계수가 비교적 낮아서 높은 수직응력에서는 점착력이 발생하고, 이러한 점착력으로 인하여 높은 전단강도가 측정되는 것으로 판단된다. 전체적으로, 화강암 및 편암과 같이 광물의 입자크기가 비교적 큰 암석의 기본마찰각은 약  $30^\circ$  이하가 측정된 반면에, 사암, 셰일, 사질 셰일, 대리암과 같이 광물의 입자크기가 비교적 작은 암석의 기본마찰각은 약  $30^\circ$  이상이 측정되는 경향을 보인다.

## 기울임시험

기울임시험은 시료를 일정한 속도로 기울일 수 있으며, 시료의 움직임을 감지하는 레이저 동작 감지기, 디지털 경사계 및 아날로그 경사계가 설치된 자동 기울임시험기를 사용하여 실시되었다(Fig. 6). 디지털 경사계와 아날로그 경사계는 시료의 경사각을  $\pm 0.1^\circ$  오차로 정밀하게 측정할 수 있으며, 레이저 감지기는 상부 시료가  $10 \text{ mm}$  이상 미끄러지면 시료의 움직임을 감지하여 시험기를 정지시키므로, 상부 시료가 미끄러질 때의 정확한 기울어짐 각도를 측정할 수 있다. 국제암반 역학회(ISRM)에서 제안한 표준시험방법에 따라 기울임시험은  $18^\circ/\text{min}$ 의 속도로 5회 반복하여 실시되었으며, 측정된 미끄러짐 각들의 중간값을 기본마찰각으로 결정하였다. 국제암반역학회에서는 1개의 시료에 대한 5회의 반복시험으로 기본마찰각을 측정하도록 규정되어 있으나 이 연구에서는 측정의 정확성을 위하여 3개의 시료에 대하여 실시되었다. 기울임시험이 실시된 후에는 전단면 위에 존재하는 암석가루 및 불순물을 부드러운 붓(Soft brush)으로 청소하고, 다음 기울임 시험을 실시하였다.



Fig. 6. Tilt test apparatus.

각 암종에 대하여 3개의 서로 다른 시료를 5회 반복하여 측정한 미끄러짐 각의 분포는 Fig. 7과 같다. 화강암의 미끄러짐 각은 최대  $34^\circ$ 에서 최소  $24^\circ$  사이의 분포를 보인다(Fig. 7a), 1개의 시료에서는 기울어짐 각이  $31^\circ$ 에서  $24^\circ$ 까지 지속적으로 감소하고, 다른 시료는 거의  $30\sim 33^\circ$  범위에서 거의 유사한 각을, 다른 시료는 3회 반복까지 증가하다가 다시 감소하는 경향을 보여, 동일한 화강암이라도 시료의 상태에 따라 매우 다른 기울어짐 각이 측정되었다. 3개 시료의 기울어짐 각의 중간값으로부터 결정된 기본마찰각은  $28.0\sim 30.8^\circ$ 의 분포를 보여  $3^\circ$  이내의 오차로 유사하다(Table 2). 사암의 미끄러짐 각은  $37^\circ$ 에서  $31^\circ$  사이로 분포하고 있으며, 2개의 시료에서는 기울어짐 각이 4회까지 거의 일정하다가 5회 시험에서는 갑자기 증가하는 양상을 보이는 반면에, 하나의 시료에서는 기울어짐 각이 감소하다가 증가한 후 다시 감소하는 경향을 보인다(Fig. 7b). 사암 시료의 중간값은  $31.4^\circ$ ,  $33.3^\circ$ 와  $36.4^\circ$ 를 보여  $5^\circ$  정도의 오차를 보이며 시료의 상태에 따라 다른 결

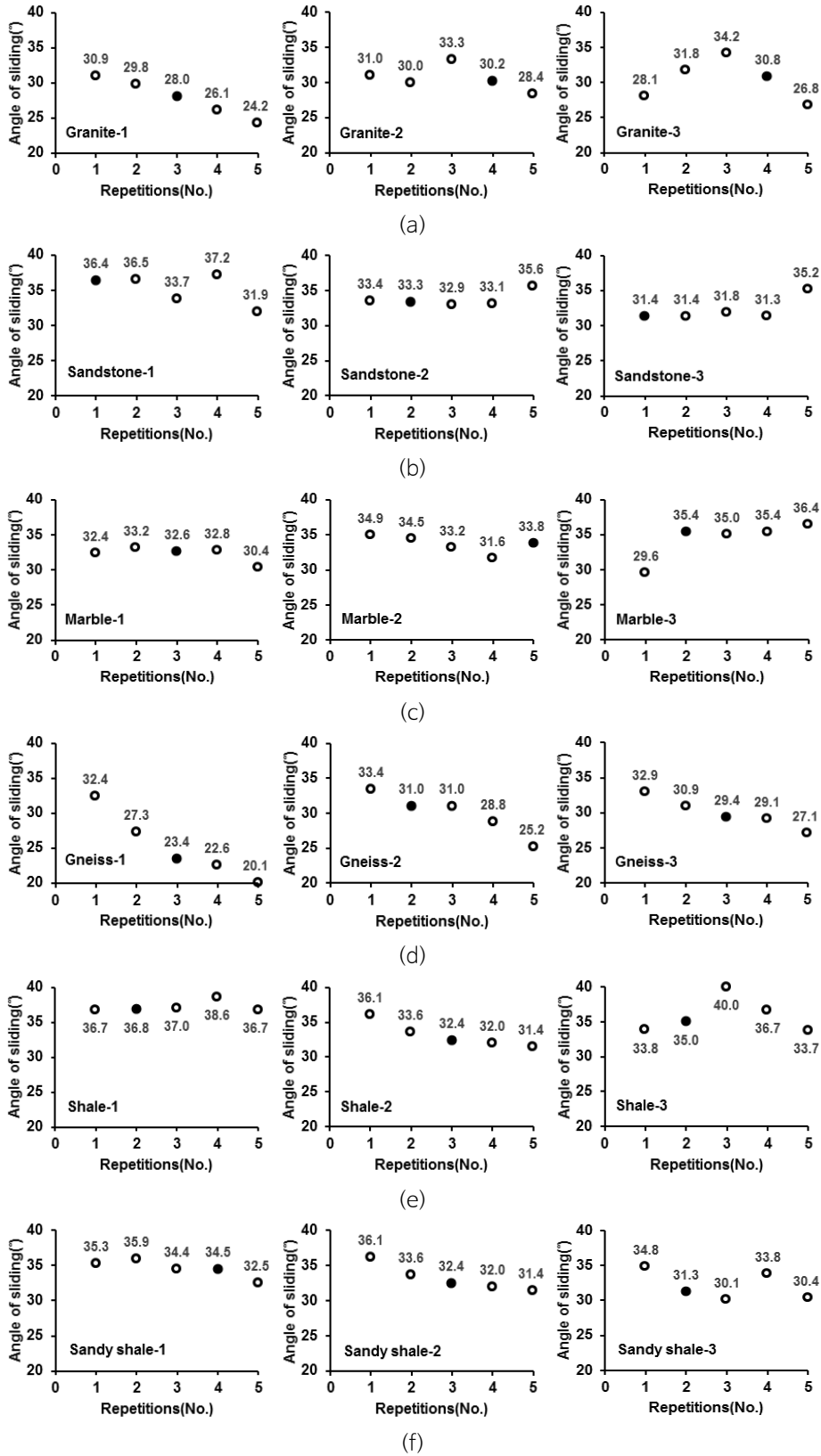


Fig. 7. Sliding angles measured by tilt tests repeated 5 times for three samples of (a) granite, (b) sandstone, (c) marble, (d) gneiss, (e) shale and (f) sandy shale. Solid circle represents the median value among 5 measurements.



**Table 2.** Basic friction angles determined by tilt tests

Rock type	Basic friction angle (°)			Average
Granite	28.0	30.2	30.8	29.7
Sandstone	36.4	33.3	31.4	33.7
Marble	32.6	33.8	35.4	33.9
Gneiss	23.4	31.0	29.4	27.9
Shale	36.8	33.5	35.0	35.1
Sandy shale	34.5	32.4	31.3	32.7

과를 보여 신뢰성은 매우 낮다. 대리암의 미끄러짐 각은 4회까지는 일정하다가 5회에서 매우 낮은 기울어짐 각을 보이는 시료, 4회까지는 기울어짐 각이 지속적으로 감소하다가 5회에 높아지는 시료, 1회에 매우 낮은 값을 보이다가 이후 4회는 매우 일정한 기울어짐 각을 보이는 시료 등, 다양한 형태를 보인다(Fig. 7c). 기울기 각의 중간값은 32.6°, 33.8° 및 35.4°로 3° 이내의 오차를 보인다. 편마암은 모든 시료에서 1회 때 가장 높은 미끄러짐 각을 보인 후 지속적으로 감소하는 경향을 보인다(Fig. 7d). 중간값은 23.4°, 31.0° 및 29.4°를 보여 7° 이상의 큰 차이를 보인다. 셰일의 미끄러짐 각은 1개의 시료에서 거의 일정한 값을, 1개의 시료에서는 지속적으로 감소하는 경향을, 나머지 1개의 시료에서는 증가하다가 다시 감소하는 경향을 보여 시료의 상태에 따라 아주 다른 분포를 보인다(Fig. 7e). 중간값은 32.4°, 35.0° 및 36.8°를 보여 4° 정도의 오차를 보인다. 사질 셰일은 모든 시료에서 시험이 계속됨에 따라 감소하는 경향을 보인다(Fig. 7f). 중간값은 31.3~34.5° 범위를 보여 3° 이내의 범위에서 비교적 일정한 값을 보인다.

전체적으로 화강암, 편마암, 사질 셰일의 미끄러짐 각은 반복횟수가 많아짐에 따라 비교적 감소하는 경향이 보이는 반면에, 사암, 대리암, 셰일의 미끄러짐 각은 반복횟수에 뚜렷한 증가경향이나 감소경향이 보이지 않는다. 이러한 경향은 반복시험이 많아질수록 전단면이 마모되는 정도가 암석마다 다르게 나타나며, 미끄러짐 각의 감소 경향이 뚜렷하게 나타나지 않은 사암, 대리암, 셰일은 전단면의 마모영향보다 각 시료의 연마 상태에 따른 영향이 더 크게 지배하는 것으로 판단된다. 특히 화강암, 편마암, 사질 셰일과 같이 장석이 비교적 많이 함유된 암석일수록 반복횟수가 많아짐에 따라 미끄러짐의 각이 비교적 감소하는 경향을 보이며, 이러한 경향은 암석을 이루고 있는 광물의 물리적 및 역학적 특성에 따라 반복시험으로 인한 전단면의 마모의 형태와 정도가 달라지기 때문에 나타나는 것으로 판단된다.

## 당김시험

당김시험은 직접전단시험과 유사한 원리로 실시되는 시험으로, 시료를 시료 상자에 고정할 필요가 없어서 시험이 간편하다는 장점이 있는 반면에 시료에 작용하는 수직응력은 직접전단시험에 비하여 매우 낮다. González et al.(2014)은 양동이에 모래를 채워 전단력을 전달하는 방법으로 당김시험을 실시하였으나 전단력이 일정하게 증가시키지 못하였고 양동이에 모래를 채우는 순간에 발생하는 진동이 고려되지 않았기 때문에 시험 결과가 다소 분산되었다. 이 연구에서는 정속모터를 사용하여 일정한 속도로 시료를 전단하고, 무게추를 사용하여 여러 단계의 수직응력을 가할 수 있는 당김시험기가 사용되었다(Fig. 8). 로드셀, 다이얼 게이지 형태의 변위계와 자료수집 장치(data logger)를 이용하여 전단력과 전단변위를 실시간으로 기록하였다. 상부 시료를 0.1 mm/s의 일정한 전단속도로 시료 길이의 최대 10%(10 mm)까지 전단하였으며, 한 수직응력의 단계에서 시험이 완료되면, 전단면을 붓으로 청소하고 상부 시료를 원래 위치로 재배치한 후 다음 단계의 수직응력에서 당김시험을 수행하였다. 수직응력은 4 kg의 철제 무게추 1개와 8 kg의 철제 무게추 2개를 이용하여 약 2~28 kPa의 6단계로 시료에 적용되었다.

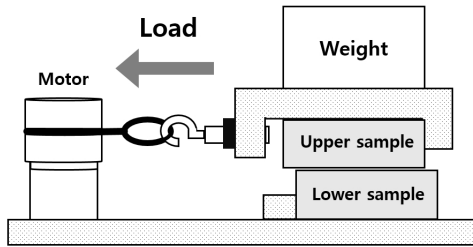


Fig. 8. Schematic diagram and photograph of pull test apparatus.

직접전단시험 결과와 유사하게 전단변위가 증가함에 따라 전단응력이 선형으로 증가하다가, 약 0.1~0.2 mm 정도의 변위에서부터 기울기가 완만해진 후 일정한 잔류전단응력을 보인다(Fig. 9). 최대전단응력을 보이지 않으므로 잔류전단응력이 수직응력 단계에서의 전단강도로 결정하였고, 수직응력이 증가함에 따라 전단강도도 증가한다. 각 수직응력 단계에서 측정된 전단강도를 전단응력 - 수직응력 그래프에 도시하였다(Fig. 10). 전단응력은 수직응력에 대하여 결정계수가 0.99 이상인 직선의 관계를 보이고, 회귀선의 기울기 각이 기본마찰각이다. 3개의 시료에서 측정된 화강암의 기본마찰각은 28.0°~31.4°, 사암은 30.0°~30.2°, 대리암은 34.3°~35.0°, 편마암은 27.5°~29.7°, 셰일은 32.8°~34.9° 그리고 사질 셰일의 기본마찰각은 33.5°~33.6°이다. 사암, 대리암 그리고 사질 셰일은 모든 시료에서 1° 이내의 오차를 보여 당김시험은 이들 시료에 대한 기본마찰각 측정에서 매우 유용함을 보이는 반면에, 화강암, 편마암 그리고 셰일은 약 2°~3°의 오차를 보인다. González et al.(2014)은 하나의 시료에 대하여 약 1.0 kPa과 약 2.2 kPa의 수직 응력을 주고 여러 번의 당김시험을 실시하였고, 측정된 전단강도는 분산이 심하여 전단강도-수직응력의 관계가 결정계수가 0.82인 선형관계 보였다. 그들의 연구에서는 앞에서 설명한 바와 같이 전단응력이 일정하게 증가하지 못하였고, 전단응력을 증가시킬 때 진동이 발생하였으며, 수직응력이 매우 낮은 단계에서 실시하였기 때문에 분산된 결과를 보인 것으로 판단된다. 그러나 이 연구에서는 정밀하게 전단응력을 증가시킬 수 있었을 뿐만 아니라 약 2~28 kPa의 비교적 넓은 범위의 수직응력을 적용하였기 때문에 매우 정확한 전단강도 - 수직응력의 관계와 기본마찰각이 측정될 수 있었다.

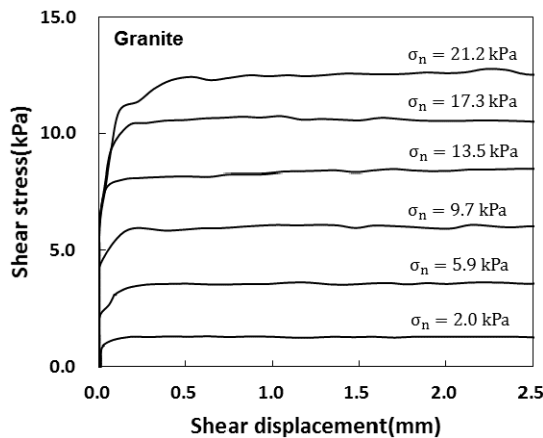


Fig. 9. Shear stresses against shear displacements for granite sample by pull test.

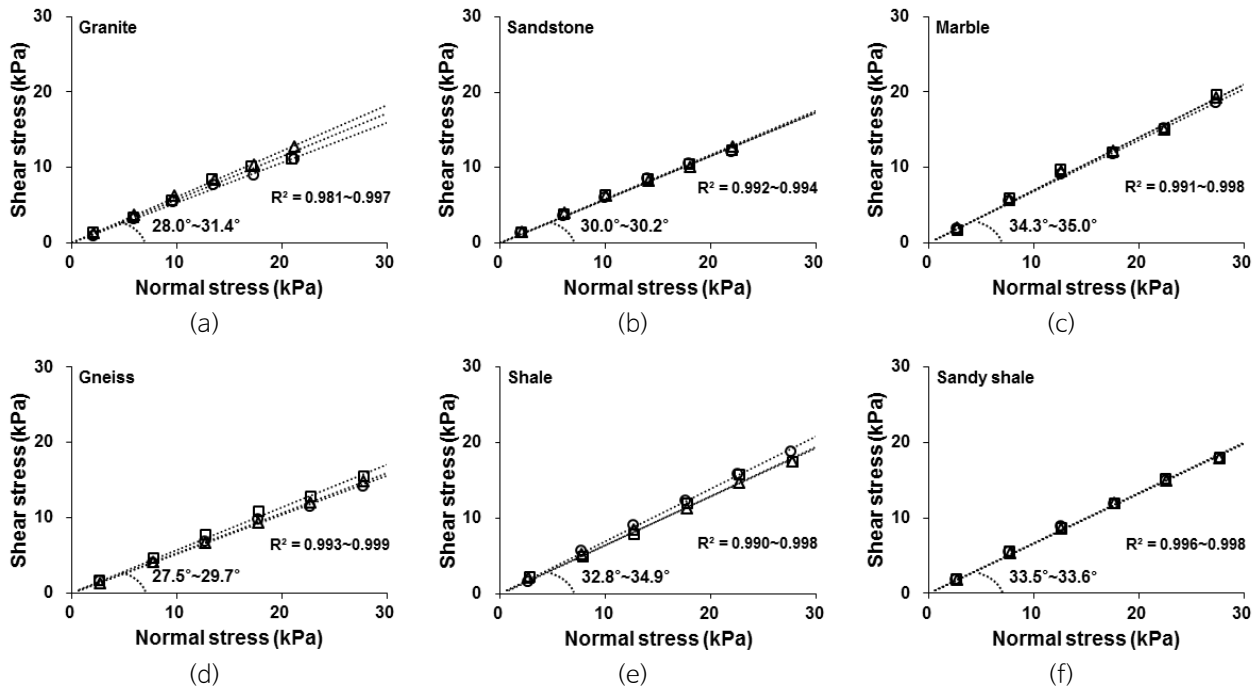


Fig. 10. Shear stresses plotted against normal stresses measured by the pull test for (a) granite, (b) sandstone, (c) marble, (d) gneiss, (e) shale and (f) sandy shale. Pull tests were carried out three times with three different samples and each test was represented by circle, rectangle and triangle.

## 고찰

직접전단시험, 기울임시험 그리고 당김시험으로 암석의 기본마찰각을 측정하였고, 각 시험법에 의하여 측정된 기본마찰각의 정확성, 시험 방법의 정확성 및 장·단점을 서로 비교하였다. Table 3은 세 가지 시험법에 의하여 각 암종에서 측정된 기본마찰각을 보여준다. 사암을 제외한 모든 시료에서 세 가지 방법에 의하여 측정된 기본마찰각은  $2^\circ$  이내의 오차로 유사하나, 사암의 기본마찰각은 약  $4^\circ$  정도의 오차를 보인다. 6개의 암종 중에서 사암을 제외한 5개의 암종은 매우 치밀하여 공극율이 0.7% 이하이고, 일축압축강도는 100 MPa 이상, 탄성계수는 56 GPa 이상으로 강도가 높으며 탄성계수가 높은 암석인 반면에, 사암의 공극률은 14.77%로 매우 크고 일축압축강도는 약 80 MPa, 탄성계수는 약 20 GPa로 낮다. 또한 사암에서는 다른 암종의 연마된 면에서는 나타나지 않는 점착력을 보이고 있어서, 낮은 강도 및 강성, 점착력으로 인하여 시험방법에 따라 기본마찰각 차이가 나는 것으로 판단된다.

전단면에 비교적 높은 수직응력이 가해지는 직접전단시험에서 측정된 전단강도는 수직응력과 매우 높은 결정계수를 보이는 직선의 관계를 보여, 이 직선의 기울기로 측정된 기본마찰각은 상당히 정확한 것으로 판단된다. 그러나 사암과 같이 강도와 강성이 낮고 공극율이 큰 암석에 높은 수직응력을 가하면 전단면상의 미세 돌기들이 서로 맞닿은 면 내부로 침범하여 전단면에 맞물림(interlocking) 현상이 발생하게 되므로 전단면상에 마찰각 외에 추가적인 점착력이 발생하여 정확한 마찰각을 측정하기 어렵다(Berea 사암의 경우에는 1.5 MPa 이상의 수직응력에서는 점착력이 발생하여 마찰각이 크게 측정되었다). 그러므로 이러한 암석에 대하여 직접전단시험을 실시할 때에는 비교적 낮은 수직응력을 적용하여야 한다. 기울임시험으로 측정된 기본마찰각 또한 직접전단시험에서 측정된 기본마찰각과 비교적 유사하다. 국제암반역학회가 제안한 표준시험법에서는 1개의 시료에 대하여 5회의 시험을 하도록 규정하고 있으나(Alejano et al., 2018), 이 연구에

서는 3개의 시료에서 5회 측정하여 결정된 마찰각의 평균값을 사용하였다. 그러나 표준시험법과 같이 1개의 시료에서만 기울임시험을 실시하여 기본마찰각을 측정하였다면, 사암의 기본마찰각은 사용된 시료에 따라 31.4°로 혹은 36.4로 결정될 수도 있어서 시료에 따른 기본마찰각 측정오차가 5°를 보이고, 편마암에서는 7° 이상의 오차를 보일 수도 있다(Table 2 참조). 또한, 1개의 시료에서 5회 측정된 미끄러짐 각도 시료에 따라서 증가하거나, 감소하거나, 유사한 값을 보이는 등 일정한 패턴을 보이지 않고 변할 뿐만 아니라, 편마암에서는 최대 12°의 오차를 보여 시험의 신뢰성에 상당한 의문이 든다(Fig. 7 참조). 기울임시험에서 수직응력은 단지 상부 시료의 무게에 의하여 가해지므로 1 kPa 이하로 매우 낮다. 이러한 낮은 수직응력 조건 때문에 전단면의 마모 및 전단면에 남아있는 불순물 등 미끄러짐 면 상태의 작은 차이도 큰 미끄러짐 각도의 차이를 보이는 것으로 판단된다(González et al., 2014). 당김시험은 2~28 kPa의 비교적 낮은 수직응력하에서 실시되었으나, 3개의 시료에서 비교적 일정한 기본마찰각이 측정되었고, 측정된 기본마찰각 또한 직접전단시험에서 측정된 값과 유사하다. Alejano et al.(2012b)은 약 10 kPa 정도의 수직응력 하에서 시험이 수행된다면 기본마찰각이 전단면의 마모 및 불순물 등의 영향을 비교적 적게 받을 수 있다고 기술하였고, 이 연구에서 적용된 2~28 kPa의 수직응력 수준은 전단면의 상태에 따른 영향을 배제할 정도로 충분한 수직응력으로 판단된다.

**Table 3.** Basic friction angles determined by three test methods

Rock type	Basic friction angle(°)		
	Direct shear test	Tilt test	Pull test
Granite	28.7	29.7	29.7
Sandstone	32.5	33.7	30.1
Marble	33.0	33.9	34.7
Gneiss	29.9	27.9	28.4
Shale	33.1	35.1	33.6
Sandy shale	34.1	32.7	33.5

## 결론

황등 화강암, Berea 사암, 정선 대리암, 홍천 편마암, 풍암 셰일 및 음성 사질셰일 등 6종류 암석의 기본마찰각을 직접전단시험, 기울임시험 그리고 당김시험으로 측정하였다.

직접전단시험 시 모든 시료에서 전단강도-수직응력의 관계는 결정계수가 0.99 이상인 매우 좋은 선형관계를 보였으며, 화강암은 28.7°, 사암은 32.5°, 대리암은 33.0°, 편마암은 29.9°, 셰일은 33.1°, 사질셰일은 34.1°의 기본마찰각이 측정되었다. 그러나 연성 암석인 Berea 사암의 경우에는 수직응력을 1.5 MPa 이상 적용하면 마찰각 외에 추가적인 점착력 요인이 발생되어 정확한 기본마찰각을 측정하기 어렵다는 것을 확인하였다. 기울임 시험에서는 화강암은 28.0°, 사암은 33.7°, 대리암은 33.9°, 편마암은 27.9°, 셰일은 35.1°, 사질셰일은 32.7°의 평균 기본마찰각이 측정되었다. 기울임 시험은 같은 암종이라도 시료에 따라 측정값이 작게는 3°부터 크게는 약 7°의 편차를 보였다. 또한, 1개의 시료에서 5회 반복측정하는 동안에도 측정값이 증가하거나, 감소하거나 또는 유사한 값을 보이는 등 일정한 경향을 보이지 않았을 뿐만 아니라 또한 편마암의 경우에는 한 시료에서 최대 12°의 오차를 보여 시험의 신뢰성에 상당한 의문이 들었다. 기울임 시험에서 이러한 불안정한 결과가 도출되는 것은 시험 시 시료에 작용되는 수직응력이 1 kPa 이하로 매우 작기 때문에 마모 및 전단면 상의 불순물 등 전단면 상태의 작은 차이도 결과에 많은 영향을 미치기 때문인 것으로 판단된다. 당김 시험에서는 화강암은

29.7°, 사암은 30.1°, 대리암은 34.7°, 편마암은 28.4°, 셰일은 33.6°, 사질셰일은 33.5°의 평균 기본마찰각이 측정되었다. 당김시험도 직접전단시험과 마찬가지로 모든 시료에서 전단강도-수직응력 관계가 결정계수 0.99 이상의 매우 좋은 선형 관계를 보였다. 또한, 같은 종류의 암석의 경우에 시료에 따라 1°에서 3° 정도의 적은 오차만을 보였다.

이 연구에서 기본마찰각 측정을 위해 사용된 세 가지 시험방법은 각각 서로 다른 장단점을 갖고 있다. 직접전단시험은 고가의 시험기를 이용하여 다소 복잡한 방법을 동원해야 하는 단점이 있는 반면에 시험 결과의 신뢰성이 높다는 장점이 있다. 최근에 기본마찰각 측정을 위한 표준시험법으로 제시된 기울임 시험은 간단한 장비와 방법으로 시험을 수행할 수 있는 장점이 있으나 측정결과의 불확실성이 높다는 문제가 발견되었다. 당김시험은 원리적으로 직접전단시험과 매우 유사하고 간단한 장비와 방법으로 수행할 수 있는 장점이 있으며, 시험결과도 신뢰도가 높다는 것을 확인하였다. 따라서 기본마찰각 측정에 기울임 시험보다는 당김 시험을 사용하는 것이 더 타당할 것으로 판단된다. 그러나 당김 시험은 기울임 시험에 비해 상대적으로 연구사례가 부족하므로 이 연구에서 사용된 방법 외에도 다양한 방법과 조건이 반영된 추가적인 연구가 요구된다.

## 사사

이 논문은 2015년도와 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2015R1D1A1A01056665, NRF-2018R1A2B6004886).

## References

- Alejano, L.R., González, J., Muralha, J., 2012a, Comparison of different techniques of tilt testing and basic friction angle variability assessment, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45(6), 1023-1035.
- Alejano, L.R., González, J., Muralha, J., 2012b, Response by the authors to S.R. Hencher's discussion of the paper "Comparison of different techniques of tilt testing and basic friction angle variability assessment, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45(6), 1141-1143.
- Alejano, L.R., Muralha, J., Ulusay, R., Li, C.C., Pérez-Rey, I., Karakul, H., Chryssanthakis, P., Aydan, Ö., 2018, ISRM suggested method for determining the basic friction angle of planar rock surfaces by means of tilt tests, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51(9), 3853-3859.
- Barton, N., Choubey, V., 1977, The shear strength of rock joints in theory and practice, *Rock Mechanics*, 10(1-2), 1-54.
- Barton, N., 1973, Review of a new shear strength criterion for rock joints, *Engineering Geology*, 7(4), 287-332.
- Cawsey, D.C., Farrar, N.S., 1976, A simple sliding apparatus for the measurement of rock joint friction, *Géotechnique*, 26(2), 382-386.
- Cho, M.S., Kim, J.W., 1993, Occurrence of kyanite in the Yougduri gneiss complex of the Chuncheon-Hongcheon area: its tectonometamorphic implication, *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 2(1), 1-8 (in Korean with English abstract).
- Cruden, D.M., Hu, X.Q., 1988, Basic friction angles of carbonate rocks from Kananaskis county, Canada, *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 38(1), 55-59.
- Deere, D.U., Miller, R.P., 1966, Engineering classification and index properties for intact rock, Air Force Weapons Laboratory, New Mexico, AFNL-TR-65-116.
- Dehler, W., Labuz, J.F., 2007, Stress path testing of an anisotropic sandstone, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(1), 157-164.

- González, J., González-Pastoriza, N., Castro, U., Alejano, L.R., Muralha, J., 2014, Considerations on the laboratory estimate of the basic friction angle of rock joints, In: Alejano, R., Perucho, A., Olalla, C., Jimenez, R. (Eds.), *Rock Engineering and Rock Mechanics: Structures in and on Rock Masses (EUROCK 2014)*, ISRM European Regional Symposium, Vigo, 199-204.
- Grasselli, G., Egger, P., 2003, Constitutive law for the shear strength of rock joints based on three-dimensional surface parameters, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(1), 25-40.
- Jaeger, J.C., Cook, N.G.W., 1979, *Fundamentals of rock mechanics*, 3rd edition, Chapman & Hall, London.
- Jang, H.S., Kang, S.S., Jang, B.A., 2014, Determination of joint roughness coefficients using roughness parameters, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47(6), 2061-2073.
- Jang, H.S., Zhang, Q.Z., Kang, S.S., Jang, B.A., 2018, Determination of the basic friction angle of rock surfaces by tilt tests, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51(4), 989-1004.
- Kulatilake, P.H.S.W., Shou, G., Huang, T.H., Morgan, R.M., 1995, New peak shear strength criteria for anisotropic rock joints, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 32(7), 673-697.
- Li, C.C., Zhang, N., Ruiz, J., 2019, Measurement of the basic friction angle of planar rock discontinuities with three rock cores, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(2), 847-856.
- Mehrishal, S., Sharifzadeh, M., Shahriar, K., Song, J.J., 2016, An experimental study on normal stress and shear rate dependency of basic friction coefficient in dry and wet limestone joints, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(12), 4607-4629.
- Muralha, J., Grasselli, G., Tatone, B., Blumel, M., Chryssanthakis, P., Jiang, Y.-J., 2013, ISRM suggested method for laboratory determination of the shear strength of rock joints: revised version, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47(1), 291-302.
- Patton, F.D., 1966, Multiple modes of shear failure in rock and related material, Ph.D. Thesis, University of Illinois, 282p.
- Paul, B., 1961, Modification of the Coulomb-Mohr theory of fracture, *Journal of Applied Mechanics*, 28(2), 259-268.
- Ruiz, J., Li, C., 2014, Measurement of the basic friction angle of rock by three different tilt test methods, In: Alejano, R., Perucho, A., Olalla, C., Jimenez, R. (Eds.), *Rock Engineering and Rock Mechanics: Structures in and on Rock Masses (EUROCK 2014)*, ISRM European Regional Symposium, Vigo, 261-266.
- Tse, R., Cruden, D.M., 1979, Estimating joint roughness coefficients, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 16(5), 303-307.