

## 진동대 시험에 의한 편평한 암석 절리면의 동적 마찰거동 특성

박병기<sup>1)</sup>, 전석원<sup>2)\*</sup>

### Dynamic Frictional Behavior of Saw-cut Rock Joints Through Shaking Table Test

Byung-Ki Park and Seokwon Jeon

**Abstract** In recent years, not only the occurrences but the magnitude of earthquakes in Korea are on an increasing trend and other sources of dynamic events including large-scale construction, operation of high-speed railway and explosives blasting have been increasing. Besides, the probability of exposure for rock joints to free faces gets higher as the scale of rock mass structures becomes larger. For that reason, the frictional behavior of rock joints under dynamic conditions needs to be investigated. In this study, a shaking table test system was set up and a series of dynamic test was carried out to examine the dynamic frictional behavior of rock joints. In addition, a computer program was developed, which calculated the acceleration and deformation of the sliding block theoretically based on Newmark sliding block procedure. The static friction angle was back-calculated by measuring yield acceleration at the onset of slide. The dynamic friction angle was estimated by closely approximating the experimental results to the program-simulated responses. As a result of dynamic testing, the static friction angle at the onset of slide as well as the dynamic friction angle during sliding were estimated to be significantly lower than tilt angle. The difference between the tilt angle and the static friction angle was  $4.5 \sim 8.2^\circ$  and the difference between the tilt angle and the dynamic friction angle was  $2.0 \sim 7.5^\circ$ . The decreasing trend was influenced by the magnitude of the base acceleration and inclination angle. A DEM program was used to simulate the shaking table test and the result well simulated the experimental behavior. Friction angles obtained by shaking table test were significantly lower than basic friction angle by direct shear test.

**KeyWords** Dynamic frictional behavior, Rock joints, Shaking table test, Friction angle

**초 록** 암반구조물의 규모가 점차 대형화됨에 따라 암반이 자유면에 노출되는 확률이 높아지고 있으며, 최근 들어 지진이나 발파, 고속철도의 운행에 의한 진동 등으로 야기되는 동적 하중의 발생빈도가 증가하는 추세이므로 동적 하중조건 하에서 암반 불연속면의 거동 특성 파악을 위한 연구의 필요성이 증대되고 있다. 본 연구에서는 자유면에 노출된 블록의 동적 거동을 모사할 수 있도록 경사면 진동대 시험장비를 제작하였고, 다양한 동적 하중 조건하에서 편평한 화강암 절리면의 마찰 거동 특성을 분석하였다. 경사시험을 통해서 구한 한계 경사각과 진동하중 하에서의 임계가속도로부터 역산한 정적 마찰각을 비교한 결과 동하중 하에서 정적마찰각이  $4.5 \sim 8.2^\circ$  정도 낮게 산정되는 경향을 보였다. 이론적인 암석 블록의 마찰 거동을 표현하는 블록 거동 프로그램을 작성하고, 진동하중에 의해 미끄러지는 암석 블록의 가속도 및 변위 계측결과를 개발된 프로그램에 의한 결과와 비교하여 암석 절리면의 동적 마찰각을 산정하였는데 동적 마찰각 역시 한계 경사각에 비해  $2.0 \sim 7.5^\circ$  정도 감소하는 결과를 얻었다. 동하중 하에서 측정된 정적 마찰각과 동적 마찰각은 가해진 가속도의 크기나 진폭 등의 하중 특성과 기하조건에 따라 달라지는 경향을 보였다. 개별요소 프로그램을 이용하여 진동대 시험을 모사하였는데, 계측결과 및 개발된 프로그램에 의한 결과와 비교적 잘 일치하였다. 진동대 시험에 의한 동적, 정적 마찰각은 직접전단시험에 의한 기본 마찰각보다 현저히 작게 산정되었다.

**핵심어** 동적 마찰거동, 암석 절리, 진동대 시험, 마찰각

## 1. 서 론

안정성과 경제성을 동시에 충족시키는 암반구조물의

건설을 위해서는 다양한 하중조건과 암반조건 하에서의 정확하고 정밀한 암반의 변형거동 해석이 필수적이며, 이를 위해서는 암반의 변형거동에 증대한 영향을 미치는 절리의 역학적 거동 특성 파악이 선행되어야 한다. 특히 최근에 시공되는 암반구조물은 그 규모가 점차 대형화되는 경향이므로 암반이 자유면에 노출되는 면적과 확률이 높아지게 되고 이에 따라 절리면을 따른 암반 블록의 거동 특성 평가가 더욱 중요성을 지닌다.

<sup>1)</sup> 서울대학교 에너지자원기술연구소 연수연구원

<sup>2)</sup> 서울대학교 지구환경시스템공학부 부교수

\* 교신저자 : sjeon@snu.ac.kr

접수일 : 2005년 11월 14일

심사 완료일 : 2005년 12월 28일

현재까지 절리의 역학적 거동 특성을 파악하기 위한 연구는 일반적으로 직접전단시험과 같은 실내 시험 기법을 통해 많은 연구자들에 의해 수행되어 왔으며, 그러한 연구의 대부분은 정적인 하중 하에서 최대 전단강도와 전단거동의 파악에 주된 초점을 맞추어 진행되어 왔다(Patton, 1966, Jaeger, 1971, Barton, 1973). 그러나 최근 국내외적으로 지진의 발생횟수 뿐만 아니라 지진의 강도 역시 증가하는 경향을 보이고 있으며, 고속철도의 건설과 지하철의 지속적인 증설 및 운행으로 야기되는 기계적 진동, 터널굴착 시 수반되는 발파작업 등으로 인해 암반구조물이 동적 하중 환경에 놓이게 될 가능성이 커지는 추세이므로 다양한 동적 하중조건 하에서 암반 불연속면의 거동 특성 파악을 위한 연구의 필요성이 증대되고 있다.

일반적으로 동적 하중에 대해 지상 구조물은 지중 구조물에 비해 더 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있으며, 따라서 지반공학적인 측면에서 대표적인 지상구조물이라 할 수 있는 댐과 사면에 대한 동적 안정성 평가는 이 분야에서 중요한 연구주제의 하나로 자리 잡고 있다(Kramer, 1996).

Newmark(1965)는 토사로 이루어진 댐이나 사면의 동적 설계에서 안전율보다는 동적하중에 의해 발생하는 변위가 더 중요한 기준이 될 수 있다고 하였으며, 동적 하중의 영향으로 유발되는 사면의 변위를 예측하기 위한 기법을 제안하였다.

Newmark 기법의 타당성을 실험적으로 검증하기 위해 진동대를 이용하여 강체블록의 동적 거동을 파악하고자 한 연구가 일부 있었으나(Yan, 1991, Wartman, 1999), 이러한 실험들은 암석을 대상으로 한 실험이 아니므로 암석 절리면의 마찰 특성을 나타낸다고 보기 어렵다.

이에 본 연구에서는 진동하중을 받는 암석 절리면의 마찰 거동을 파악하기 위하여 경사면 진동대 시험기를 제작하였고, 다양한 동적 하중 조건하에서 암석 블록의 미끄러짐 거동 특성을 분석하였다. 동적시험에 앞서 경사시험을 통해 한계 경사각(tilt angle)을 측정하였으며, 동하중이 가해질 때 암석 블록이 미끄러지기 시작하는 임계가속도로부터 동하중 하에서의 정적 마찰각을 역산하였다. 또한 Newmark 변위법에 기초하여 이론적인 암석 블록의 미끄러짐 거동을 표현하는 블록 거동 프로그램을 개발하고, 진동하중에 의해 미끄러지는 암석 블록의 가속도 및 변위 계측결과를 개발된 프로그램에 의한 결과와 비교하여 암석 절리면의 동적 마찰각을 산정하였다. Newmark 변위법은 원래 동적 하중에 의해 파괴된 매질의 변위를 예측하기 위해 제안되었으나 본 연

구에서는 동적마찰각을 산정하기 위한 해석도구로 이용되었다. 한편 개별요소 프로그램인 UDEC을 이용하여 진동대 시험을 모사하였으며 이를 계측결과 및 개발된 프로그램에 의한 결과와 비교하여 적용성을 검증하였다. 아울러 진동대 시험에서 얻은 마찰각 결과들을 직접전단시험에서 구한 기본마찰각 결과와 비교하여 마찰특성에 미치는 동적인 영향을 파악하고자 하였다.

## 2. 전단면의 동적 안정성 해석 - Newmark 변위법

Newmark(1965)는 외부 동하중에 의한 사면의 기능 수행성이 진동에 의해 발생하는 사면의 영구 변위와 밀접한 관련을 가진다고 하였으며, 동적 하중의 영향으로 유발되는 사면의 변위를 예측하기 위해 간편화된 방법을 제시하였다. 흔히 'Newmark 변위법'이라 불리는 이 기법에서는 임의로 정의된 하나의 파괴면을 따라 미끄러짐이 발생하고, 거동하는 매질은 강체로 가정된다. 또한 미끄러짐 변위는 관성력이 잠재 파괴면의 마찰 저항력보다 클 때 발생하고, 파괴면 상하 매질의 속도가 같아질 때 멈춘다고 하였다.

Newmark는 파괴 후 미끄러지는 매질을 강체로 가정하였기 때문에 사면의 동적 안정성 문제를 경사면에 놓인 강체 블록의 거동과 동일하다고 보았다. 이러한 가정은 미끄러지는 매질이 토사체일 경우 실제적인 거동과 다소 차이를 보이게 되지만(Lin and Whitman, 1983, Gazatas and Uddin, 1994, Kramer and Smith, 1997), 사면에 놓인 암반 블록의 경우 미끄러짐 변위에 비해 블록 자체의 변형은 무시될만하므로 강체 거동을 가정한 결과의 해석에 큰 무리가 없다고 볼 수 있다.

이러한 Newmark 변위법의 개념을 도해적으로 표현하면 Fig. 1과 같다. 미끄러짐 변위는 기저 진동으로 인한 관성력이 파괴면의 임계 저항을 넘어서는 순간( $t_1$ ) 시작되게 되며, 관성력이 임계 저항 이하로 감소하고 기저면과 파괴 블록의 속도가 같아질 때( $t_3$ )까지 계속된다. 관성력이 저항력과 같아져 미끄러짐이 발생하는 순간의 가속도를 임계가속도라고 하는데, 이 임계가속도와 기저 가속도의 시간 이력을 안다면 이중 적분 과정을 통해 영구 변위를 계산할 수 있게 된다.

## 3. 블록의 동적 거동해석

### 3.1 블록의 거동 형태

기저면의 진동에 대해서 경사면에 놓인 블록은 일반적으로 정지(rest), 미끄러짐(slide), 흔들림(rock), 미끄러짐-흔들림(slide-rock), 자유낙하(free fall) 등의 반응

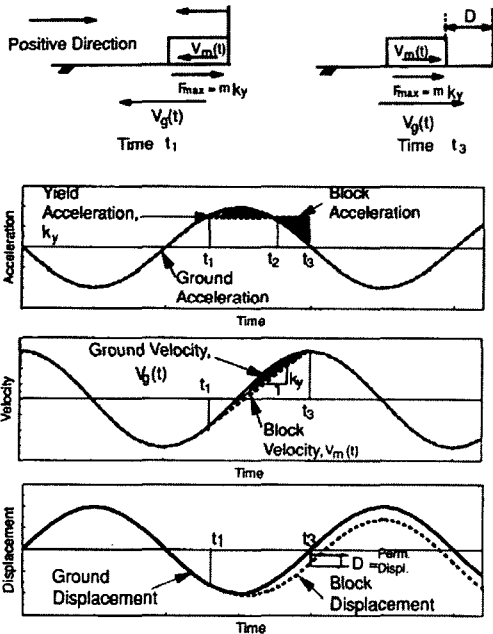


Fig. 1. Illustration of the Newmark sliding block procedure for calculating seismically induced permanent deformations (after Augello, 1997)

거동을 나타낸다.

정지 모드는 기저면과 블록 사이의 상대변위가 없는 상태이고, 미끄러짐 모드는 경사면을 따라서 발생하는 블록의 순수 평행이동을 의미하며, 흔들림 모드는 블록의 한쪽 코너의 대해서 발생하는 블록의 순수 회전을 의미한다. 미끄러짐-흔들림 모드는 미끄러짐과 흔들림 모드가 혼합되어 발생하는 형태이며, 자유낙하 모드는 기저면과 블록 사이의 접촉이 없는 상태를 의미한다.

주어진 환경에서 블록이 어떠한 거동을 나타낼지는 블록과 미끄러짐 면과의 마찰, 형상비와 같은 블록의 치수, 사면의 기하형상, 그리고 가해지는 진동의 크기나 형태 등에 좌우된다. 동적 해석의 목적은 기저면에 작용하는 동적하중에 대해 블록의 운동을 예측하는 것인데, 경사면에 놓인 블록의 경우 그 주된 거동 모드는 정지와 미끄러짐 모드이다. 따라서 본 연구에서는 블록의 거동을 이 두 가지 모드로 제한하여 해석하였다.

미끄러짐 면에서의 마찰은 복잡한 물리적 현상이며 이를 모델화하기 위한 많은 이론이 있으나(Oden and Martins, 1985), 본 연구에서는 수식적 표현이 간단하여 공학적으로 널리 쓰이고 있는 Coulomb 마찰방정식을 사용하였다. 마찰계수는 일반적으로  $\mu$ 로 표현되며, 접촉력이 없는 매질에서 내부 마찰각  $\phi$ 와 다음의 관계

를 가진다.

$$\mu = \tan \phi \tag{1}$$

따라서 정적 마찰계수와 동적 마찰계수는 다음의 식 (2), (3)으로 표현된다.

$$\mu_s = \tan \phi_s \tag{2}$$

$$\mu_d = \tan \phi_d \tag{3}$$

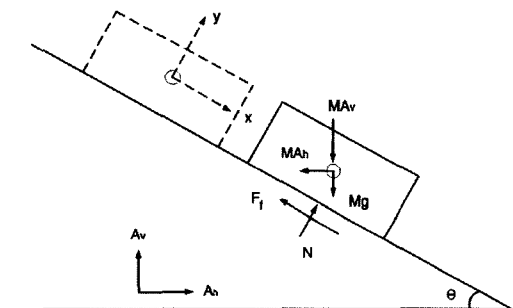
여기서,  $\phi_s$ 와  $\phi_d$ 는 각각 정적 마찰각과 동적 마찰각이다.

### 3.2 블록의 거동 방정식

경사면에 놓인 블록에 작용하는 힘과 좌표계를 Fig. 2에 도식적으로 나타내었다. 수평방향 가속도는 경사 하부방향인 양의 방향이고, 수직방향 가속도는 위쪽이 양의 방향이다. 블록의 상대적인 거동을 표현하기 위해 xy 좌표계를 경사방향으로 설정하였다. 블록의 상대변위는  $x(t)$ ,  $y(t)$ 로 표현되는데,  $x(t)$ 는 경사 하부방향인,  $y(t)$ 는 경사면의 법선벡터 방향인 양의 방향이다.

#### • 미끄러짐의 개시

Fig. 2에서 힘의 합력이 평형을 이루어 정지 상태에



- M : Mass of a block
- N : Normal reaction force
- $F_f$  : Frictional force
- $\theta$  : Inclination angle
- $A_h$  : Horizontal ground acceleration
- $A_v$  : Vertical ground acceleration
- XY coordinate : Global coordinate
- xy coordinate : Local coordinate

Fig. 2. Forces acting on a block on an inclined plane

있는 블록은 식 (6)의 조건을 만족하게 되면 미끄러지기 시작한다. 식 (6)에서 좌변의 마찰력 항이 절대값으로 표현된 것은 미끄러짐이 가속도의 크기에 따라 경사면 하부 혹은 상부로도 발생할 수 있기 때문이다.

$$(-MA_h \cos \theta) + M(A_v + g) \sin \theta = F_f \quad (4)$$

$$M(A_v + g) \cos \theta + MA_h \sin \theta = N \quad (5)$$

$$|F_f| \geq N\mu_s \quad (6)$$

여기서,  $G = A_v + g$  라 두고, 위 식을 정리하면 다음의 식과 같다.

$$|-A_h \cos \theta + G \sin \theta| \geq \mu_s (G \cos \theta + A_h \sin \theta) \quad (7)$$

만약 블록이 경사면 하부로 미끄러지기 시작한다면, 식 (7)은 다음의 식 (8)로 나타낼 수 있고, 이를 정리하면 식 (9)와 같다.

$$-A_h \cos \theta + G \sin \theta \geq \mu_s (G \cos \theta + A_h \sin \theta) \quad (8)$$

$$A_h \leq -G \tan(\phi_s - \theta) \quad (9)$$

따라서 경사 하향의 미끄러짐이 개시될 필요조건은 다음의 식 (10)과 같다.

$$A_{yd} = G \tan(\phi_s - \theta) \quad (10)$$

여기서,  $A_{yd}$ 는 경사 하향의 미끄러짐이 개시되는 임계가속도이다.

만약 블록이 경사면 상부로 미끄러지기 시작한다면, 식 (7)은 아래의 식 (11)과 같이 표현되고, 정리하면 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$-(-A_h \cos \theta + G \sin \theta) \geq \mu_s (G \cos \theta + A_h \sin \theta) \quad (11)$$

$$A_h \geq G \tan(\phi_s + \theta) \quad (12)$$

따라서, 경사 상향의 미끄러짐이 개시되는 조건은 식 (13)으로 표현된다.

$$A_{yu} = -G \tan(\phi_s + \theta) \quad (13)$$

여기서,  $A_{yu}$ 는 경사 상향의 미끄러짐이 개시되는 임계가속도이다.

### • 미끄러짐 모드에서의 거동

일단 블록이 미끄러지기 시작하면, 블록의 동적 운동 방정식은 다음의 식들로 표현된다.

$$-MA_h \cos \theta - F_f + MG \sin \theta = M\ddot{x} \quad (14)$$

$$MG \cos \theta + MA_h \sin \theta = N \quad (15)$$

$$F_f = N\mu_d S(\dot{x}) \quad (16)$$

여기서  $S(\dot{x})$ 는 시그넘(signum) 함수이며, 미끄러짐 속도  $\dot{x}$ 에 대해 다음과 같이 정의된다.

$$S(\dot{x}) = \begin{cases} 1 & ; \dot{x} \geq 0 \\ -1 & ; \dot{x} < 0 \end{cases} \quad (17)$$

식 (14)~(16)을 정리하면 미끄러지는 블록의 가속도는 식 (18)과 같이 표현된다.

$$\ddot{x} = (\cos \theta + \sin \theta \tan \phi_d^*) [-A_h - G \tan(\phi_d^* - \theta)] \quad (18)$$

여기서,  $\phi_d^* = S(\dot{x}) \phi_d$  이다.

### 3.3 블록 거동 프로그램 개발

기저면에 진동이 주어지게 되면 경사면에 놓인 블록은 임계 상태인 식 (10)과 식 (13)을 만족할 때까지 정지 상태를 유지한다. 동적 하중이 발생하는 전 과정이 모니터링되는 가운데 입력되는 가속도가 임계 가속도에 도달하게 되면 블록은 미끄러지고, 식 (18)에 의한 운동을 하게 된다. 블록의 가속도를 나타내는 식 (18)을 적분하면 블록의 속도 방정식이 구해지는데 미끄러짐이 발생하는 동안 기저부의 속도와 블록의 속도를 비교하여 두 물체의 속도가 같아질 때, 즉 상대속도  $\dot{x}$ 가 0이 되게 되면 블록의 운동이 멈추게 된다. 이 때 블록은 일시적으로 기저면에 대해서 상대변위가 없는 정지 모드 상태가 되고, 이후 기저 가속도가 식 (10)과 식 (13)을 만족할 때 다시 미끄러짐이 발생하게 된다. 블록의 변위는 식 (18)을 이중 적분하여 구할 수 있는데 이 방정식을 풀기 위해 4차 Runge-Kutta 순차적 시간 적분 알고리즘을 이용하였다. 이러한 블록의 미끄러짐 거동을 구현하는 프로그램을 Matlab을 이용하여 작성하였으며, 프로그램의 흐름도를 Fig. 3에 도시하였다.

Fig. 4는 작성된 프로그램을 이용하여 블록의 거동 양상을 나타낸 예시이다. 입력 조건으로 기저 가속도는 0.16g, 기저 가속도의 진폭은 4.6 mm, 주파수는 3 Hz로 하였고, 마찰각은 20°로 가정하였다. Fig. 4 (a)는 경

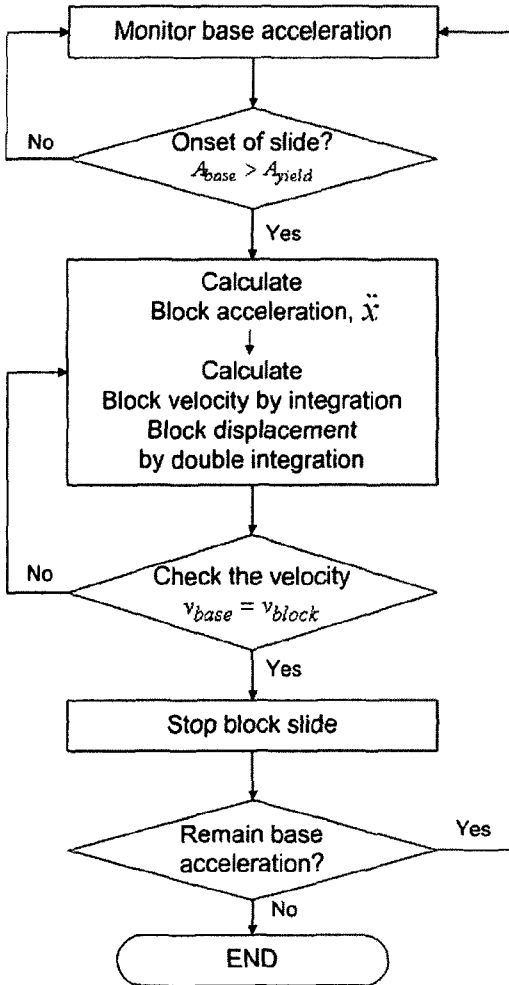


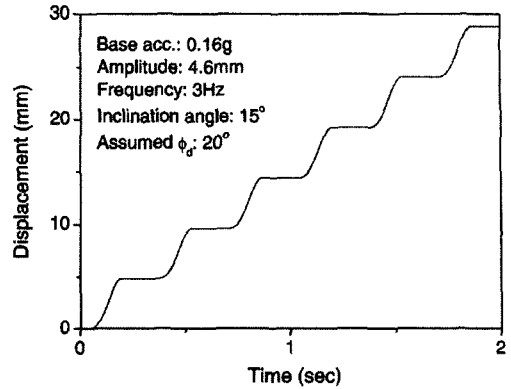
Fig. 3. Flowchart for developed sliding block program

사면에서 미끄러지는 블록의 상대적인 변위를 나타내고, (b)는 블록의 가속도를 절대좌표계로 변환하여 나타낸 그래프이다. 기저 가속도가 임계치를 넘을 때 블록의 변위가 발생하고, 블록의 상대속도가 기저부와 같아질 때 미끄러짐이 멈추어 블록과 기저부가 같이 움직이게 되는 단속적인 거동이 나타남을 알 수 있다.

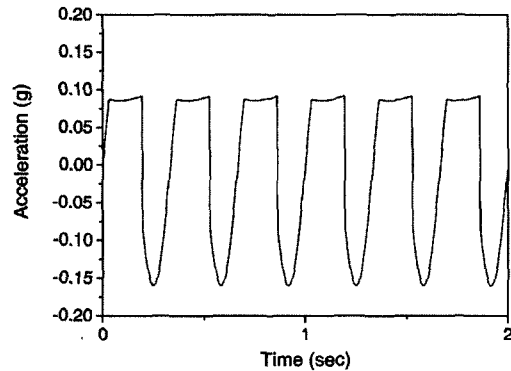
#### 4. 경사면 진동대 시험

##### 4.1 시험 장비 구성

본 연구에서 사용된 경사면 진동대 시험장비는 크게 진동대 시험기, 경사 시험기, 그리고 계측장비 및 자료 취득시스템으로 구성되어 있다.



(a) Sliding displacement



(b) Absolute acceleration

Fig. 4. Dynamic responses of sliding block by developed program

진동대 시험기는 모터와 캠(cam)에 의해 수평방향의 1자유도 진동을 일으킬 수 있으며, 진동 테이블의 규격은 길이가 750 mm, 폭이 400 mm 이다. 작동 제어를 위한 인버터를 통해 0.02 Hz에서 9.0 Hz 까지의 주파수 범위를 재현해낼 수 있으며 최대이동거리는 20 mm 이다.

진동대 시험을 수행하기에 앞서 암석 절리면의 한계 경사각(tilt angle)을 측정하고, 진동이 가해졌을 때 임의의 경사면에서 암석블록의 미끄러짐 거동을 측정하기 위해 경사 시험기를 진동 테이블에 장착하였다. 경사 시험기에는 하부 암석블록을 기준으로 최대 300 mm(길이방향) × 120 mm(폭) 크기의 시료를 장착할 수 있는 박스를 제작하여 부착하였다. 진동시험 시 상부블록의 미끄러짐 방향을 하부블록과 평행하게 유도하기 위하여 박스의 양쪽 옆면에 2 cm 두께의 가이드를 부착하였고, 미끄러짐 발생 시 가이드와 블록 사이의 마

찰을 줄이기 위해 평면 니들 롤러 베어링을 장착하였다. 가이드는 경사 상부 방향으로 길게 연장시켜서 레이저 변위계를 장착할 수 있도록 하였다.

암석블록의 미끄러짐 거동을 계속하고 분석하기 위해 진동대 및 암석블록의 가속도 측정을 위한 가속도계, 암석블록의 미끄러짐 변위 측정을 위한 레이저 변위계, 데이터 증폭을 위한 앰프, 그리고 제어프로그램을 포함한 자료취득시스템 등을 이용하였다.

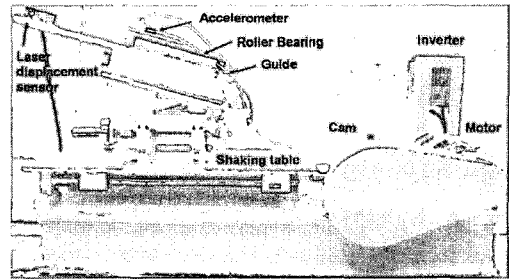
가속도 계측을 위해 설치한 3개의 가속도계는 Kistler사의 모델명 ServoK-Beam 제품으로서  $\pm 2.5g$ 의 측정범위를 가지며 1방향의 가속도 계측이 가능하다. 가속도계는 미끄러짐이 발생하는 상부블록에 미끄러짐 방향 및 절리면에 수직한 방향으로 각각 하나씩 설치하였고, 하부블록이 고정된 박스에도 하나 설치하여 진동파형의 가속도를 계측하였다.

상부 암석블록의 미끄러짐 변위를 계속하기 위해서 Keyence사의 레이저 변위계(모델명: LB-301/1201)를 장착하였다. 변위 측정범위는 300 mm의 기준거리에서  $\pm 100$  mm이며  $50 \mu m$ 의 분해능을 가진다. 비접촉 방식인 레이저 변위계를 사용한 이유는 LVDT와 같은 접촉식 변위계의 경우 상부 블록이 미끄러질 때 내장된 스프링의 강성에 의해 저항이 발생되게 되므로 정확한 마찰 거동 산정이 어렵기 때문이다.

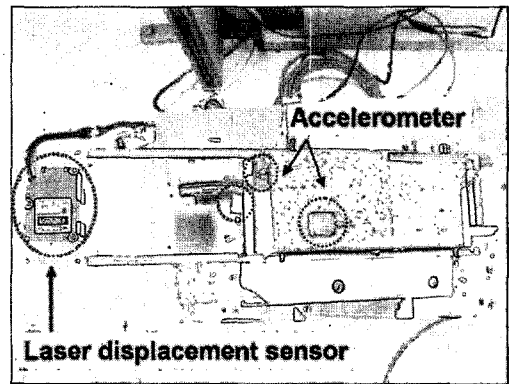
한편 진동대 시험은 임의의 경사면을 유지한 상태에서 이루어지게 되므로, 변위의 측정이 진동이 일어나는 계의 바깥에서 이루어지게 된다면 미끄러지는 상부블록의 상대 변위 측정이 매우 힘들게 된다. 따라서 진동테이블과 같이 움직이며 또한 측정방향이 경사면과 평행한 상태를 유지한 가운데 상부블록의 미끄러짐 변위를 계속하기 위해 경사 시험기의 시료고정 박스에 일체화하여 설치하였다. 경사 시험기가 장착된 진동대 시험기 모습과 계측 장비의 위치를 Fig. 5에 나타내었다.

각 계측기들로부터 나온 전기적 신호를 증폭하고 디지털화하여 자료를 획득하기 위하여 HBM사의 *MGC plus* 자료취득시스템을 사용하였다. 동적응답의 측정에 사용된 가속도계와 레이저 변위계는 응답 신호를 전압의 형태로 출력하게 되므로, 8개의 전압 출력방식 계측신호를 동시에 입력 가능한 다채널 보드인 AP801과 다채널 앰프인 ML801을 장착하여 변위와 가속도를 계측하였다. 또한 *MGC plus* 자료취득시스템을 컴퓨터와 연결하여 계측기의 초기 조건 설정 및 데이터 취득과정을 용이하게 하였으며 컴퓨터상에서의 제어를 위해 HBM사의 *Catman v3.0* 프로그램을 이용하였다.

이상에서 언급한 시험 장비와 계측 장비들을 이용하여 구축한 경사면 진동대 시험 시스템의 모식도를 Fig.



(a) Shaking table test apparatus



(b) Measuring instruments

Fig. 5. Shaking table test system

6에 나타내었다.

## 4.2 시험 시료

본 연구에 이용된 암석 시료는 포천화강암이다. 포천화강암의 주 구성광물은 석영, 사장석, 미사장석, 페다이트, 흑운모, 정장석 등이며 광물의 입자가 비교적 큰 중조립질 암석에 해당한다. 대상 암석시료의 기본적인 물리적, 역학적 특성을 파악하기 위하여 각종 물성시험을 실시하였으며 그 결과를 Table 1에 제시하였다.

진동대 시험에서는 상하부 블록의 크기가 다른 시료를 사용하여야 하므로 하부블록을 상부블록에 비해 길이방향으로 2배 크게 제작하였다. 시료의 규격은 하부블록의 경우 길이 × 폭 × 높이가 각각 298 mm × 118 mm × 65 mm가 되도록 성형하였으며, 상부블록의 경우 길이방향을 반으로 절단하였다. 상하부 블록의 마찰면은 다이아몬드 톱으로 절단한 뒤 연마기로 고르게 연마하였다. 준비된 시험 시료의 규격과 사진이 Fig. 7에 나타나 있다.

4.3 시험 방법 및 마찰각 산정 방법

진동대 시험은 크게 동하중 하에서의 정적 마찰각 측정 시험과 동적 마찰각 측정 시험으로 나누어진다. 동하중 하에서 암석 절리면의 정적 마찰각은 경사면에 놓인 블록이 미끄러지는 임계가속도(yield acceleration,  $A_{yld}$ )를 측정하여 역산을 통해 구할 수 있다. 본 연구에서는 동하중 하에서 포천화강암의 정적 마찰각 측정을

위해 사면각이 10°인 경우와 15°인 경우에 대해 저가속도를 상부블록이 미끄러지지 않는 낮은 값부터 0.001g 간격으로 순차적으로 올라가며 상부블록이 미끄러지기 시작할 때의 임계가속도를 측정하였다. 경사면에 놓인 블록의 한계 평형 상태인 다음의 식 (19)에 의해 동하중이 작용할 때의 절리면의 정적 마찰각을 구할 수 있다.

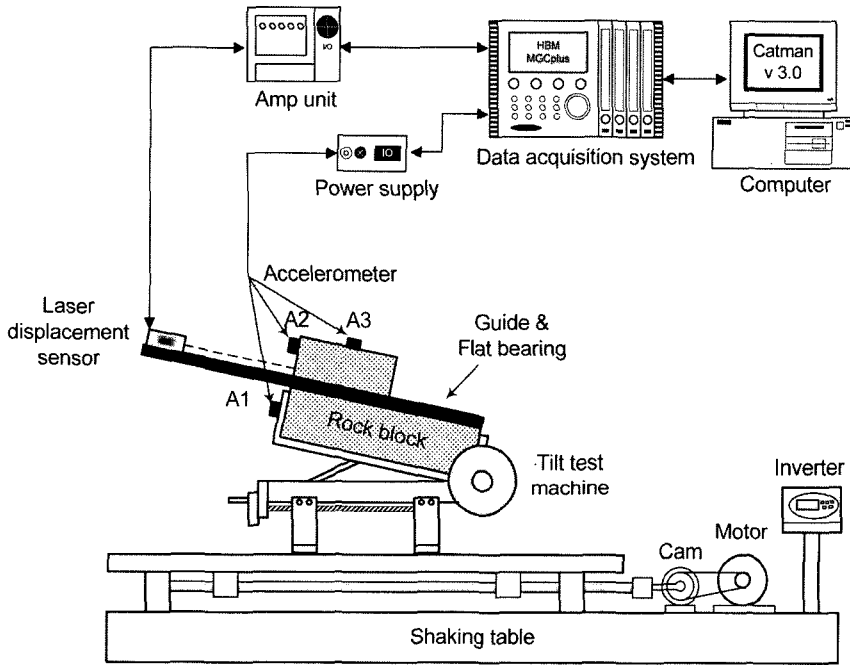


Fig. 6. Schematic diagram of shaking table test system

Table 1. Physical and mechanical properties of Pocheon granite.

Properties	Unit	Pocheon granite
Apparent specific gravity	-	2.63
Apparent porosity	%	1.24
P-wave velocity	m/sec	2,858
S-wave velocity	m/sec	1,710
Uniaxial compressive strength	MPa	144
Young's modulus	GPa	45.2
Poisson's ratio	-	0.22
Brazilian tensile strength	MPa	7.7
Internal friction angle	°	67
Cohesion	MPa	15

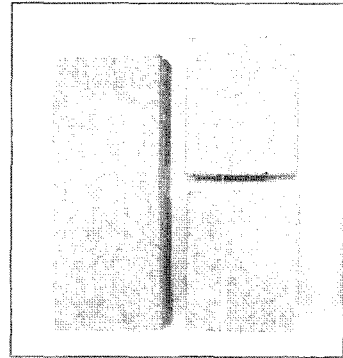
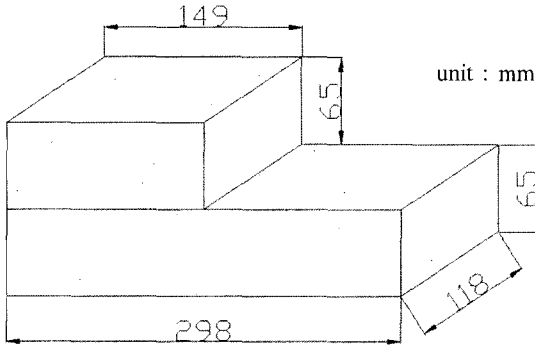


Fig. 7. Dimension and photograph of test specimen

$$\phi_s = \tan^{-1}\left(\frac{A_{gd}}{g}\right) + \theta \quad (19)$$

여기서, g는 중력가속도,  $\theta$ 는 사면각이다.

동하중하에서의 정적 마찰각은 블록이 미끄러지는 순간의 임계가속도를 구함으로써 계산되는 반면, 동적 마찰각은 블록이 움직이는 상태에서의 마찰각이므로 직접적인 측정이 상당히 어렵다. 따라서 본 연구에서는 이론식에 의해 작성된 블록 거동 프로그램 결과와의 비교를 통해 동적 마찰각을 간접적으로 산정하는 방법을 적용하였다. 즉, 실험에서 얻어진 미끄러짐 변위 및 가속도 결과와 프로그램 상에서 임의의 동적 마찰각을 대입했을 경우의 시뮬레이션 결과를 비교한 뒤 두 곡선이 가장 잘 적합할 때의 마찰각을 동적 마찰각으로 산정하였다.

#### 4.4 실험 결과

##### 4.4.1 정적 마찰각 산정

정적 마찰각을 산정하기 위한 시험조건으로 진동대가 움직이는 진폭과 경사면의 각도를 각각 두 가지로 변화시켰다. 매 시험의 시작 전 시료의 한계 경사각을 측정하였는데, 편평하게 연마된 포천화강암의 한계 경사각은 25.5에서 27.0°의 범위를 나타내었다.

Table 2에는 정적 마찰각을 산정하기 위한 16개 시료의 시험 조건과 그 결과를 정리하였다. 미끄러짐이 발생하기 시작하는 임계 가속도에 의해 역산한 정적 마찰각은 전체 시험에 대해 18.0~22.0°의 범위를 나타내었다. 각각의 시험에서 한계 경사각과 정적 마찰각의 차이는 4.5~8.2°의 범위로 나타나, 동적 하중이 주어지는 경우 정적 마찰각은 한계 경사각에 비해 현저히 낮아지

는 경향을 보였다.

Fig. 8은 측정된 한계 경사각과 진동 시험으로부터 역산한 정적 마찰각을 도시한 그림이며, 시험 결과를 시험 조건에 따라 구분하여 나타내었다. 시험변수 각각의 영향을 살펴보면, 경사면의 각도가 15°에서 10°로 낮아지는 경우 한계 경사각과 정적 마찰각간의 감소폭이 4.5~6.4°에서 5.3~8.2°로 더 커지는 경향을 보였다. 한편 진동 테이블의 진폭이 커지는 경우에는 한계 경사각과 정적 마찰각의 감소폭이 5.6~8.2°에서 4.5~7.5°로 작아지는 경향을 보인다.

##### 4.4.2 동적 마찰각 산정

동적 마찰각을 산정하기 위한 실험변수로 진동대의

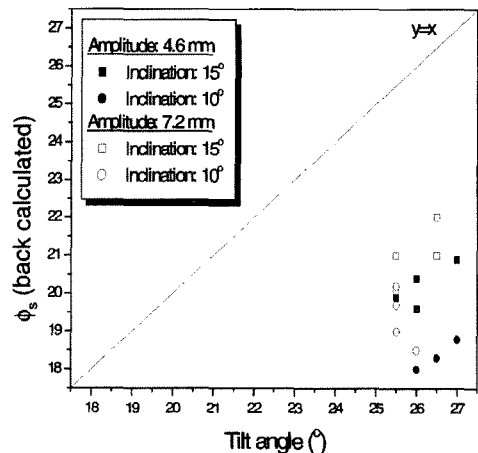


Fig. 8. Effect of amplitude and inclination angle on static friction angle



Table 2. Back-calculated static friction angle under various test conditions.

Test case	Amplitude (mm)	Inclination angle (°)	Tilt angle ( $\phi_{tilt}$ , °)	Yield acceleration (g)	Static friction angle ( $\phi_s$ , °)	$\phi_{tilt} - \phi_s$
S1-15-1	4.60	15	25.5	0.086	19.9	5.6
S1-15-2			26.0	0.080	19.6	6.4
S1-15-3			27.0	0.104	20.9	6.1
S1-15-4			26.0	0.098	20.4	5.6
S1-10-1		10	26.5	0.146	18.3	8.2
S1-10-2			26.0	0.140	18.0	8.0
S1-10-3			26.0	0.140	18.0	8.0
S1-10-4			27.0	0.154	18.8	8.2
S2-15-1	7.20	15	26.5	0.105	21.0	5.5
S2-15-2			25.5	0.090	20.1	5.4
S2-15-3			26.5	0.122	22.0	4.5
S2-15-4			25.5	0.105	21.0	4.5
S2-10-1		10	25.5	0.158	19.0	6.5
S2-10-2			26.0	0.149	18.5	7.5
S2-10-3			25.5	0.170	19.7	5.8
S2-10-4			25.5	0.179	20.2	5.3
Min			25.5	0.080	18.0	4.5
Max			27.0	0.179	22.0	8.2
Average			26.0	0.127	19.7	6.3

진폭, 가속도, 경사면의 각도 등을 변화시켰으며, 특정 조건에서 실험을 4회 이상 반복하였다. 진동대의 진폭은 4.6, 7.2, 9.8 mm의 세 가지 경우로 하였고, 경사면의 각도는 10°와 15°인 경우로 하였으며, 기저 가속도는 0.16~0.40g의 범위에서 실험을 수행하였다. 매 시험 전에 측정된 한계 경사각은 24.5~27.0°의 범위인 것으로 나타났다.

진동하중에 대한 블록의 반응을 나타내는 전형적인 실험결과를 Fig. 9에 제시하였다. 그래프의 상단에는 진동하중에 대한 블록의 미끄러짐 변위가 나타나 있고, 하단에는 상부 블록과 경사면에 부착된 3개의 가속도계로부터 측정된 가속도를 도시하였다. 기저가속도가 임계가속도를 넘어서는 순간 블록의 미끄러짐이 시작되고, 이 때 블록의 가속도는 임계가속도 근처에서 오히려 감소하였다가 다시 증가하는 형태를 보인다. 이후, 블록의 속도와 기저부의 속도가 같아지면 블록의 상대적인 미끄러짐이 일시적으로 멈추게 되고 블록의 가속도는 다시 기저부의 가속도와 동일하게 된다. 이러한 거동양상은 작성된 프로그램에 의해 예측된 블록의 거동양상과 거의 동일하다.

Fig. 10에는 진동대의 진폭이 4.6 mm, 사면각 15°, 기저가속도가 0.16g인 시험조건에서의 실험결과를 프로그램 시뮬레이션에 의한 결과와 함께 도시하였다. 시뮬레이션 결과는 여러 번의 시행착오 과정을 통하여 실험결과 그래프와 가장 비슷한 거동을 보일 때의 결과를 도시하였고, 그 때의 마찰각을 그래프에 표시하였다.

시뮬레이션 결과가 전체적으로 균질하게 나타나는데 비해 실험에 의한 변위결과는 국부적인 변화를 포함하고 있다. 이는 잘 연마된 표면이라 할지라도 암석을 구성하는 광물입자의 불균질성 때문에 표면의 마찰특성이 미끄러짐 동안 미세하게 변하기 때문인 것으로 판단된다. 가속도의 비교에 의한 결과는 변위 비교에 비해 전체적으로 동적 마찰각을 조금 더 높게 평가하는 것으로 나타났는데, 측정된 가속도가 일정한 패턴을 보이지 않고 불규칙한 경향을 보여 시뮬레이션 결과를 실험결과와 정확히 적합시키기가 다소 어렵다. 이러한 경향은 Wartman(1999)이 강철 블록을 대상으로 수행한 실험에서도 동일하게 관찰되었는데, 이는 블록의 단속적인 미끄러짐에 따라 발생하는 순간적인 가속도 변화와 전체 시스템에서의 미세한 동적 반응이 가속도계에 영향

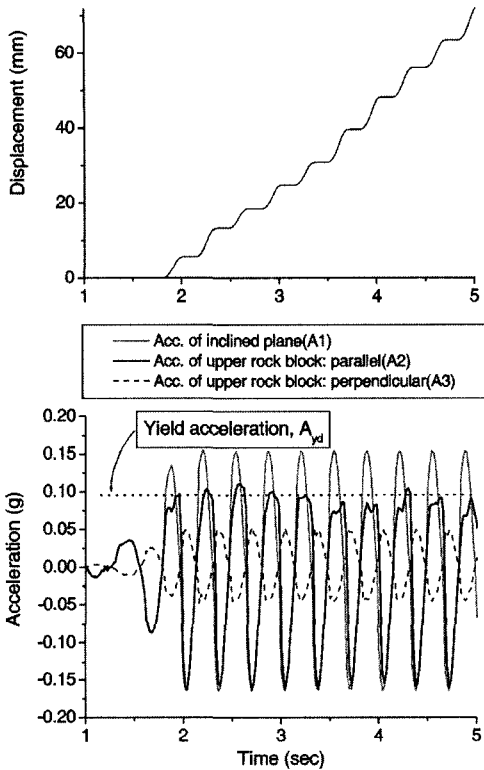
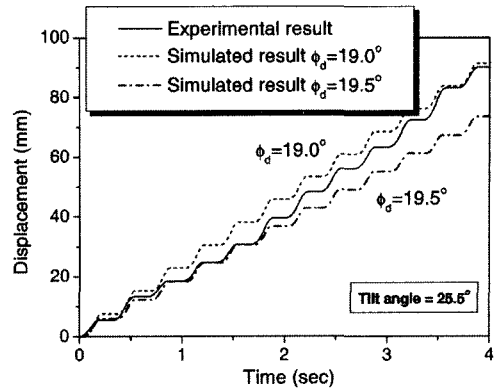


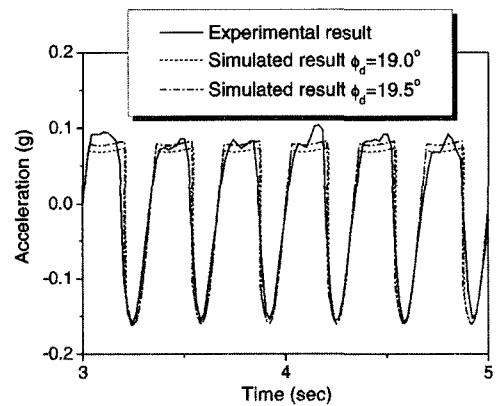
Fig. 9. Typical sliding behavior of saw-cut rock joint

을 미쳤기 때문에 판단된다. 또한 가속도 수준이 높아질수록 그 불규칙한 정도가 증가하고 진동 사이클마다 편차도 심해지는 결과를 보인다. 이에 비해 변위의 경우 기저 가속도 레벨의 높고 낮음에 상관없이 측정 데이터가 안정적이며, 대체로 시뮬레이션 결과와 잘 일치하는 거동을 보이므로 실험과 시뮬레이션 결과의 변위 부합성 여부를 동적마찰각의 산정 기준으로 결정하였다. 대부분의 실험에서 계측된 변위는 임의의 마찰각을 입력한 시뮬레이션 결과의  $0.5^\circ$  범위 내에서 발생하는 경향을 보였다.

동적 시험 전 측정된 시료의 한계 경사각은  $24.5^\circ \sim 27.0^\circ$ 의 범위이며, 산정된 동적 마찰각은  $18.1^\circ \sim 24.1^\circ$ 의 범위를 나타내어 한계 경사각에 비해  $2.0 \sim 7.5^\circ$  낮게 산정되는 결과를 얻었다. 동일한 진동대 진폭과 사면 각도 조건에서 기저 가속도가 증가하는 경우 Fig. 11에 나타난 바와 같이, 한계 경사각에 대한 동적 마찰각의 차이가 점차 줄어들다가 비교적 일정해지는 경향을 보였다. 동일한 가속도 수준에서는 사면각이  $15^\circ$ 인 경우보



(a) Sliding displacement



(b) Acceleration

Fig. 10. Comparison between measured and simulated sliding behavior

다  $10^\circ$ 인 경우에서 그 차이가 더 큰 결과를 나타내었다.

Fig. 12는 동일한 기저 가속도 조건에서 진동 테이블 진폭의 영향을 나타내는 그래프이다. 가속도가 동일한 경우 진동대의 진폭이 증가함에 따라 한계 경사각에 대한 동적 마찰각의 감소폭이 줄어드는 경향을 보였다.

한편 동일한 사면각과 진폭 조건에서 정적 마찰각과 동적 마찰각을 비교한 그래프를 Fig. 13에 나타내었다. 정적 마찰각과 동적 마찰각의 측정 시 가해지는 가속도의 크기가 같지 않기 때문에 동일한 조건에서의 비교는 어렵지만, 미끄러짐이 개시되는 시작하는 임계 가속도 근방의 낮은 가속도 수준에서 측정된 동적 마찰각은 정적 마찰각과 비슷하거나 낮아데 비하여 가속도가 커지는 경우 동적 마찰각이 커지는 경향을 보인다.

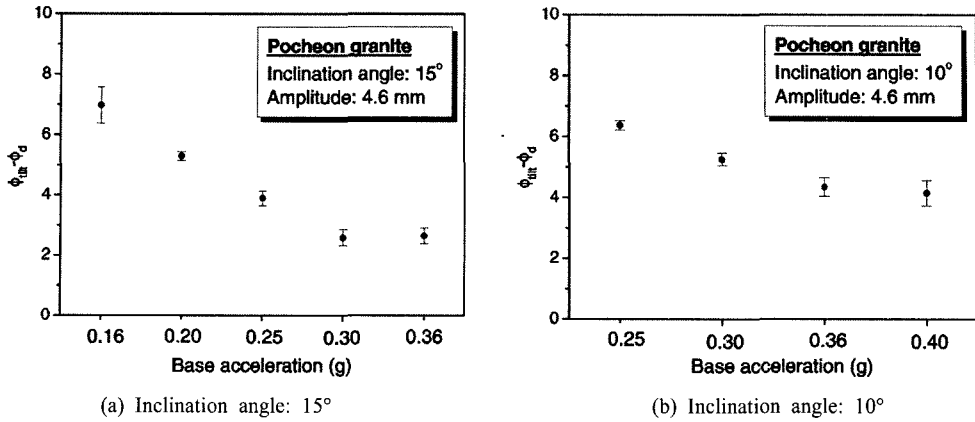


Fig. 11. Effect of base acceleration on dynamic friction angle

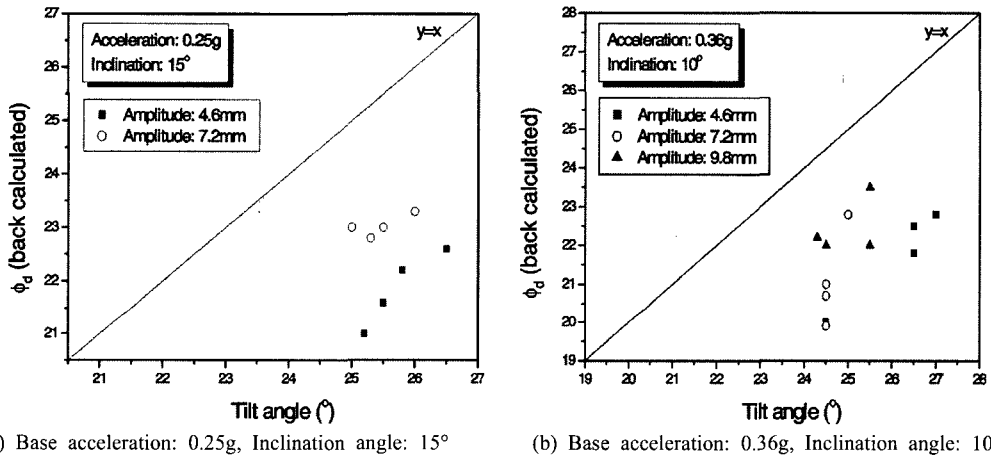


Fig. 12. Effect of amplitude of base motion on dynamic friction angle

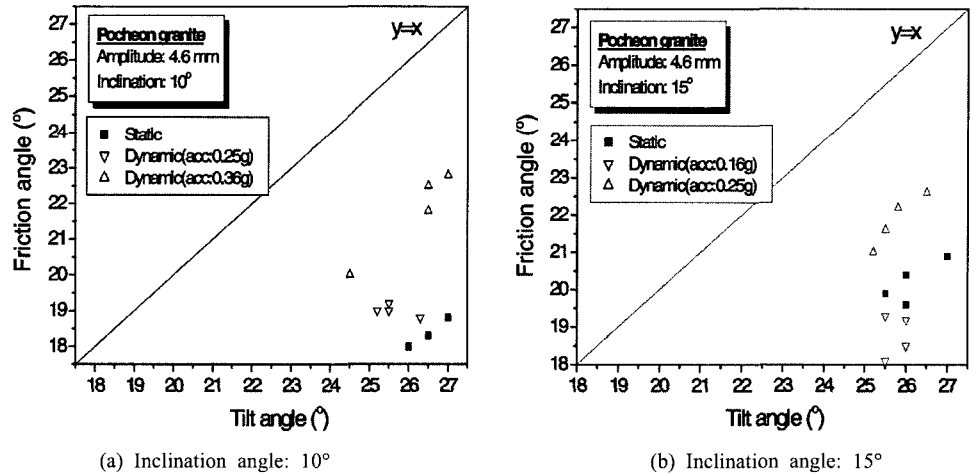


Fig. 13. Comparison between static and dynamic friction angle under same amplitude and inclination

## 5. 개별요소법을 이용한 수치모사

### 5.1 모델 구성 및 입력 변수

개발된 블록거동 프로그램 결과의 신뢰성을 검증하고, 실험 결과와의 비교를 통해 수치해석의 적용성을 검토하기 위해 상용 개별요소해석 프로그램인 UDEC을 이용하여 블록의 미끄러짐 거동을 모사하였다.

UDEC 프로그램에서 절리에 의해 구분된 블록은 변형가능 블록이나 강체 블록으로 대별되는데, 본 수치모사에서는 Newmark 변위법에 의한 가정과 동일하도록 블록을 강체로 가정하였다. 따라서 블록의 변형이 무시되므로 탄성계수나 포아송비 등의 물성은 필요하지 않으며, 단지 블록의 밀도만 입력하면 된다.

수치모사의 대상이 된 실험 케이스는 경사면의 기울기가 15°, 입력 진동파형의 변위 진폭 4.6 mm, 주파수 3 Hz, 입력 가속도가 0.16g인 실험이며, 같은 조건에서의 비교를 위해 해석상의 입력변수들도 동일하게 하였다. 절리면의 거동 모델 역시 개발된 프로그램에서와 동일하게 Coulomb slip 모델을 적용하였고, 절리면의 전단강성과 수직강성은 모두 1 GPa/m로 입력하였다. 기저부의 진동은 가속도를 적분한 속도파형의 형태로 입력되었다. Fig. 14에는 실험과 같은 조건으로 구성된 UDEC 모델과 그 규격을 나타내었다.

### 5.2 수치해석 결과

UDEC 해석 결과, 실험에서와 마찬가지로 기저부가 왼쪽에서 오른쪽으로 이동하다가 거의 오른쪽 끝단에 도달할 무렵부터 상부블록의 미끄러짐이 시작되고 기저부가 다시 왼쪽으로 움직이기 시작한 얼마 후 미끄러짐이 멈추는 거동이 반복되는 양상을 보여 그 경향이

실험결과와 거의 동일함을 확인하였다.

Fig. 15에는 UDEC 해석에 의한 변위 결과를 개발된 프로그램에 의한 시뮬레이션 결과와 함께 나타내었다. 전반적으로 볼 때, 거동이 개시하는 시점과 발생 변위량 등이 이론해에 기반하여 작성된 프로그램 결과와 거의 흡사한 해석 결과를 보인다. 진동이 시작되고 나서 6초 뒤의 변위는 UDEC 해석의 경우 140.5 mm로 나타났고 개발된 프로그램에 의한 변위는 137.2 mm로 나타나 약 2.3%의 오차를 보였는데, 이는 가정된 마찰각 기준으로 0.1~0.2° 정도의 차이에 해당한다. 이러한 미세한 차이는 UDEC 해석에 있어서의 입력 물성중 하나인 수직강성, 전단강성 등에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 16은 UDEC 해석 결과를 실험에서 얻어진 변위 곡선과 함께 도시한 그래프이다. UDEC 시뮬레이션에 의한 거동 또한 실험에 의한 거동을 대체로 잘 모사하는 것으로 보인다. 따라서 입력물성의 산정에만 주의한

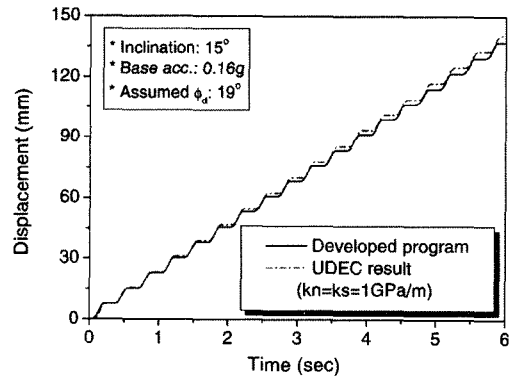
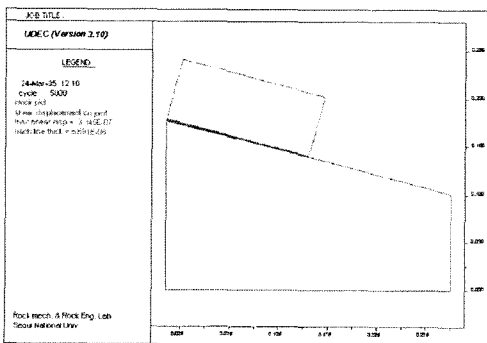
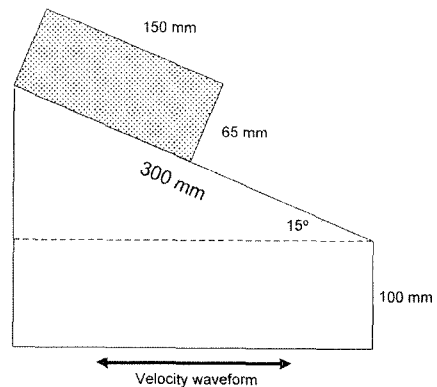


Fig. 15. Comparison between UDEC simulation and developed program



(a) UDEC model



(b) Model dimension

Fig. 14. UDEC model and its dimension

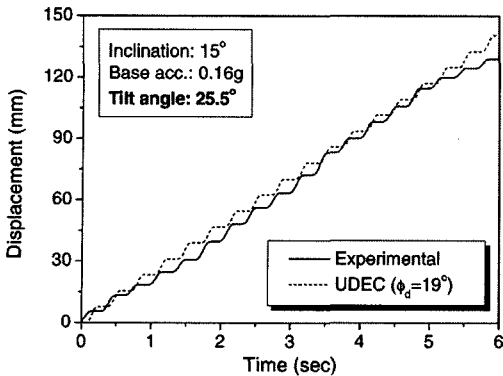


Fig. 16. Displacements by UDEC simulation and experiment

다면 UDEC 해석을 통해서도 미끄러짐 블록의 거동을 예측할 수 있으며 실험결과와의 비교를 통해 동적 마찰각을 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

### 6. 시험방법에 따른 마찰각 결과 비교

시험방법에 따른 영향과 동적 하중에 의한 영향을 알아보기 위하여 진동대 시험을 통해 얻은 정적, 동적 마찰각 결과들을 준정적 상태로 볼 수 있는 경사시험과 직접전단시험을 통해 얻은 마찰각 결과와 비교, 분석하였다.

본 연구에서는 세 가지의 서로 다른 시험방법을 통해 여러 형태의 마찰각이 측정되었는데, 기본적으로 Coulomb slip 모델에 기초하여 산정되었다. 직접 전단시험을 통해서서는 기본 마찰각( $\phi_b$ )이 측정되었으며 경사시험을 통해서서는 한계 경사각( $\phi_{ilt}$ ), 진동대 시험에서는 정적 마찰각( $\phi_s$ )과 동적 마찰각( $\phi_d$ )이 측정되었다. 직접 전단시험의 경우 수직응력을 4단계로 변화시켜가며 최대전단응력을 측정하였고, 이를 수직응력 대 전단응력 그래프 상에서 선형회귀하여 기본 마찰각을 구하였다. 가해진 수직응력은 0.2, 0.5, 1.0, 2.0 MPa이며 4회 실험을 통해 평균한 화강암 절리면의 기본 마찰각은

32.1°로 나타났다. 편평한 화강암 절리면에 대해 다양한 형태로 측정된 마찰각을 정리하여 Table 3과 Fig. 17에 나타내었다. Table 3에 정리된 마찰각 결과들은 각각의 실험에서 측정된 데이터를 평균한 값이며, 괄호 안에 시험한 횟수를 표기하였다. 편평한 절리면 시료에 대한 진동대 시험에서 얻어진 정적, 동적 마찰각 데이터는 동일한 조건에서의 비교를 위해 사면각 15°, 진동대 진폭 4.6 mm 조건에서 구한 결과를 제시하였다.

직접 전단시험에 의한 기본 마찰각이 32.1°로 나타나 세 가지 시험방법에 의한 결과 가운데 가장 큰 값을 보였고, 경사시험에 의한 한계 경사각은 평균 25.4°로 나타나 기본 마찰각과 6° 이상의 차이를 보였다. 경사시험에 의한 한계 경사각은 주위 환경 조건과 표면 상태의 미세한 변화에도 그 값의 변화가 심하기 때문에 이러한 차이가 발생하는 것으로 보인다. 이와는 달리 직접 전단시험에서는 수직응력이 가해지므로 표면의 미세한 변화가 마찰각의 측정에 영향을 줄 가능성이 적어 지게 되며 따라서 재료의 고유한 마찰특성이 나타날 확률이 커진다고 볼 수 있다. 한편 동하중이 작용할 때의 정적 마찰각과 동적 마찰각은 직접 전단시험에 의한 기

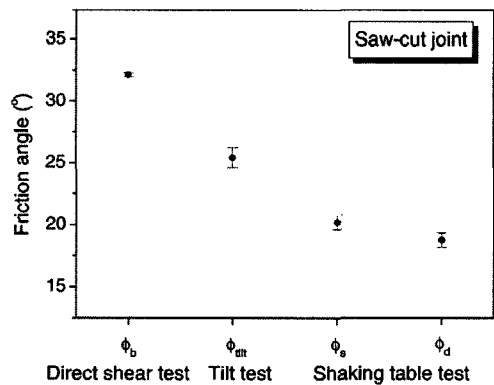


Fig. 17. Variation of friction angles for saw-cut rock joints by different measuring method

Table 3. Summary of measured friction angles for Pocheon granite by different method.

Surface condition	Test method	Friction angle	Average value (°)
Smooth (Saw-cut)	Direct shear test	$\phi_b$	32.1±0.2 (4)
	Tilt test	$\phi_{ilt}$	25.4±0.8 (28)
	Shaking table test	$\phi_s$	20.2±0.6 (4)
		$\phi_d$	18.8±0.6 (4)

본 마찰각은 물론 같은 조건에서의 정적 상태의 실험인 한계 경사각보다 현저히 줄어드는 경향을 보여 동하중 하에서 마찰각이 감소되는 현상을 확인하였다.

## 7. 결론 및 제언

동하중 하에서 편평한 암석 절리면의 마찰 거동 특성을 파악하기 위해 경사면 진동대 시험 시스템을 구축하였고 다양한 조건에서 실험을 수행하였다. 본 연구에서 얻어진 주요한 결론 및 제언은 다음과 같이 요약된다.

- 1) 미끄러짐이 발생하기 시작하는 임계 가속도의 측정을 통해 역산한 정적 마찰각은 한계 경사각에 비해  $4.5 \sim 8.2^\circ$  낮아지는 결과를 보였다. 외부에서 가해지는 동적 하중이 없는 상태에서 경사시험을 통해 측정된 한계 경사각은 거의 정적 마찰각에 해당한다고 볼 수 있으므로, 동적 마찰각이 한계 경사각보다 작을 것이라고는 어느 정도 예측이 되었으나 동적 하중이 가해지는 경우 정적 마찰각도 감소하게 되는 현상은 주목할 만하다. 이는 다시 말해 정지 상태에서 움직이기 시작하는 순간의 최대 정지 마찰력 또한 동적 하중 환경에서 감소한다는 것을 의미한다고 볼 수 있다. 동적 하중 환경에서의 마찰각 감소 현상은 사면의 내진 설계나 동적 영향성 평가의 수행 시 매우 민감한 영향을 미칠 수 있으며, 따라서 이러한 영향은 동적 설계나 해석에서 필히 고려되어야 할 것으로 보인다.
- 2) 다양한 동적 하중 조건하에서 암석 블록의 미끄러짐 거동 예측결과를 Newmark 변위법에 기초하여 개발된 블록 거동 프로그램에 의한 결과와 비교하여 암석 절리면의 동적 마찰각을 산정하였다. 작성된 프로그램에 의한 블록의 거동은 실험 결과와 비교적 잘 일치하는 경향을 보였다. 편평한 절리면에 대해 산정한 동적 마찰각은 한계 경사각에 비해  $2.0 \sim 7.5^\circ$  낮게 산정되는 결과를 얻었으며, 기저 가속도가 증가함에 따라 한계 경사각에 대한 동적 마찰각의 차이가 줄어들다가 일정해지는 경향을 보였다.
- 3) 동일한 사면각과 가속도 조건에서 진동대의 진폭이 커지는 경우 한계 경사각에 대한 정적, 동적 마찰각은 모두 감소폭이 작아지는 경향을 보였다. 이는 가해지는 동적 하중의 진폭이 작아질수록, 바꾸어 말하면 주파수가 커질수록 경사면에 놓인 블록이 미끄러질 확률이 높아짐을 의미한다고 볼 수 있다. 즉, 마찰각은 하나의 고정된 값이 아니며, 암반 구조물에 가해지는 동적 하중의 특성에 따라서

동적 영향이 달라질 수 있음을 유추할 수 있다.

- 4) 개별요소 프로그램인 UDEC을 이용하여 진동대 시험을 모사한 결과, 개발된 프로그램에 의한 결과와 마찰각  $0.1 \sim 0.2^\circ$  범위 내에서 거의 일치하는 거동 양상을 보였으며, 또한 실험결과를 잘 모사하는 것으로 나타나 적용성을 확인할 수 있었다.
- 5) 진동대 시험에 의한 결과와 직접 전단시험에 의한 마찰각을 비교한 결과, 동하중 조건하에서 측정된 동적, 정적 마찰각들이 직접 전단시험에 의한 기본 마찰각보다 현저히 작게 산정되었다. 따라서 실험실 시험 결과를 동적 수치해석의 입력변수로 사용할 때 동적효과와 더불어 시험방법의 영향에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

## 사 사

본 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(04핵심기술C01)의 지원으로 이루어졌습니다.

## 참고문헌

1. Augello, A.J., 1997, Seismic response of solid-waste landfills, Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley, U.S.A.
2. Barton, N., 1973, Review of a new shear strength criterion for rock joints, *Engineering Geology* 7, 287-332.
3. Gazatas, G., Uddin, N., 1994, Permanent deformation on pre-existing sliding surfaces in dams, *Journal of Geotechnical Engineering* 120.11, 2041-2061.
4. Jaeger, J.C., 1971, Friction of rocks and stability of rock slopes, *Geotechnique* 21, 97-134.
5. Kramer, S.L., 1996, *Geotechnical earthquake engineering*, Prentice Hall, New Jersey.
6. Kramer, S.L., Smith, M.W., 1997, Modified Newmark model for seismic displacements of compliant slopes, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 123.7, 635-644.
7. Lin, J.S., Whitman, R.V., 1983, Decoupling approximation to the evaluation of earthquake induced plastic slip in earth dams, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 11, 667-678.
8. Newmark, N.M., 1965, Effects of earthquakes on dams and embankments, *Geotechnique* 15, 139-160.
9. Oden, J.T., Martins, J.A.C., 1985, Models and computational methods for dynamic friction phenomena, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 52, 527-634.
10. Patton, F.D., 1966, Multiple modes of shear failure in rock, *Proceedings of the 1st Congress of the ISRM*,

Lisbon, 509-513.

11. Wartman, J., 1999, Physical model studies of seismically induced deformation in slopes, Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley, U.S.A.
12. Yan, L., 1991, Seismic deformation analyses of earth dams: A simplified method, Soil mechanics laboratory report No. SML 91-01, California Institute of Technology.

### 박 병 기



1998년 서울대학교 공과대학 자원공학과  
공학사  
2000년 서울대학교 대학원 자원공학과  
공학석사  
2005년 서울대학교 대학원 지구환경시스  
템공학부 공학박사  
Tel: 02-880-8713  
E-mail: pbk@rockeng.snu.ac.kr  
현재 서울대학교 에너지자원신기술연구  
소 연수연구원

### 전 석 원



1987년 서울대학교 공과대학 자원공학  
과 공학사  
1989년 서울대학교 대학원 자원공학과  
공학석사  
1996년 미국 아리조나 주립대학 공학박사  
Tel: 02-880-8807  
E-mail: sjeon@snu.ac.kr  
현재 서울대학교 지구환경시스템공학부  
부교수