

편평한 암석절리면의 속도 의존적 전단거동 특성

박병기¹, 이창수², 전석원^{3*}

Characteristics of velocity-dependent shear behavior of saw-cut rock joints at different shear velocities

Byung-Ki Park, Chang-Soo Lee, Seokwon Jeon

Abstract Recently, the probability of rock joints being exposed to free faces is getting higher for the scale of rock mass structures gets larger. Also, the frequency of occurring dynamic events such as earthquakes and blasting has been increasing. Thus, the shear behavior of rock joints under different conditions needs to be investigated. In this study, a series of direct shear tests were carried out under various conditions to examine the velocity-dependent shear behavior of saw-cut rock joints. Two types of direct shear test were carried out. The first was to examine the velocity-dependent shear behavior of saw-cut rock joints at seven different shear velocities, each with three different normal stresses. The second was to examine the shear behavior of saw-cut rock joints when three different instantaneous shear velocities changed. As a result, the coefficient of friction was affected by normal stress. The breakpoint velocity, the point when the change of shear velocity starts to affect the frictional behavior, became lower as normal stress increased. Also, as the shear velocity became lower, the degree of stress-drop on stick-slip behavior became larger. As a result of examining the changes of friction coefficient, velocity weakening (decrease of friction coefficient) was observed. The decrement of friction coefficient due to the changes of shear velocity under slow shear velocity was larger than that under fast shear velocity.

Keywords: Rock joints, shear velocity, shear behavior, coefficient of friction

요 지 최근 암반구조물의 규모가 점차 대형·대단면화됨에 따라 암반 절리면이 자유면에 노출되는 경우가 빈번하게 발생할 수 있으며 지진, 발파와 같은 외부 동적 하중의 영향을 받을 가능성이 커지고 있으므로 다양한 동적 하중조건 하에서 암반 불연속면의 거동 특성 파악을 위한 연구의 필요성이 증대되고 있다. 본 연구에서는 전단속도의 변화에 따른 편평한 화강암 전단면의 마찰특성 변화를 알아보고자 다양한 조건하에서 직접전단시험을 수행하였다. 수행한 직접전단시험은 크게 두 가지로 나눌 수 있는데 첫 번째 시험에서는 시험이 수행되는 동안 각각 7가지의 일정한 전단속도로 전단변위가 발생되도록 하여 전단속도에 따른 마찰계수의 변화를 살펴보았으며, 두 번째 시험에서는 전단변위가 발생하는 중간에 3가지 형태의 순간적인 전단속도 변화가 마찰특성에 미치는 영향을 살펴보았다. 수직응력과 전단속도의 변화에 따른 편평한 화강암의 마찰계수 변화는 가해진 수직응력 수준에 영향을 받는 것으로 나타났으며, 전단속도의 변화가 마찰거동에 영향을 미치기 시작하는 전이속도는 수직응력이 증가함에 따라 낮아지는 것으로 나타났다. 또한 전단속도가 느릴수록 stick-slip 거동에서의 응력 저하 폭이 커지는 경향을 보였다. 순간적인 전단속도 변화에 따른 정상 상태에서의 마찰계수 변화를 살펴본 결과 순간적인 속도의 증가에 따라 마찰계수가 감소하는 속도 연화 현상이 나타났으며, 느린 전단속도에서 전단속도의 변화에 따른 마찰계수의 감소폭이 빠른 전단속도에서의 변화에 따른 감소폭보다 더 큰 경향을 보였다.

주요어: 암석 절리, 전단속도, 전단거동, 마찰계수

1. 서 론

최근 암반구조물의 규모가 점차 대형·대단면화됨에 따라 암반이 자유면에 노출되는 경우가 빈번하게 발생하고 있다. 또한 지진의 발생빈도 증대, 고속철도의 운행 그리고 발파 등과 같은 외부 동적 하중의 영향을 받을

가능성이 커지고 있으므로 다양한 동적 하중조건 하에서 암반 불연속면의 거동 특성 파악을 위한 연구의 필요성이 증대되고 있다(Park et al., 2006).

현재까지 절리의 동적 마찰거동 특성을 파악하기 위한 연구는 크게 두 갈래의 학문적 측면에서 발전되어 왔는데 그 하나는 단층 역학 혹은 지진 역학 분야이고 또 하나는 암석 역학 분야이다. 전자의 경우가 단층 활동이나 지진의 발생 메커니즘을 이해하고 이를 설명하기 위한 물리적 법칙의 개발에 초점이 맞추어져 있다면

¹산업자원부 에너지자원개발본부 광물자원팀 사무관

²서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정

³서울대학교 지구환경시스템공학부 부교수

*교신저자: 전석원 (sjeon@snu.ac.kr)

후자의 경우는 암반 및 불연속면의 거동 특성 파악과 이의 수치적 모델링 기법 개발이 주된 관심사라 할 수 있을 것이다.

단층 및 지진 역학적 관점에서는 Bridgman(1936)이 높은 응력상태에서 암석에 전단이 일어날 때 발생하는 단속적인 거동과 갑작스런 응력 저하가 지진을 일으킬 수 있는 메커니즘이 될 수 있다고 제안한 이래 암석의 stick-slip 거동에 대한 많은 연구가 수행되었다(Brace & Byerlee, 1966; Dieterich, 1972; Dieterich, 1979a; Ruina, 1983). 이들의 연구결과는 주로 3개의 암석 시료를 이용하는 샌드위치 타입의 이중 전단시험을 통해 얻어졌으며 비슷한 실험 방법을 통해 온도나 습도 등 외부조건에 영향을 고려한 실험적 연구와 지진의 메커니즘을 규명한 연구들이 지속적으로 수행되어오고 있다(Dieterich, 1979b; Dieterich & Conrad, 1984; Solberg & Byerlee, 1984; Tse & Rice, 1986; Kilgore et al., 1993; Marone, 1998).

암석역학적인 관점에서 암석 절리면의 동적 전단 거동에 대한 연구는 Crawford & Curran(1981)의 연구에 의해 본격화되었다. 그들은 전단응력이 속도의존적인 특성을 보이며 이러한 특성은 재료의 경도와 수직응력 수준에 따라 달라진다고 보고하였다. 그러나 Gould(1982)는 전단응력이 속도의존적인 경향을 보이지만 수직응력에는 독립적이라고 보고하였다. 그 뒤 거친 암석 절리면에 대한 동적 전단 시험이 일부 수행되었으나(Gillette et al., 1983; Bakhtar & Barton, 1984; Jafari et al., 2003), 실험에 이용된 시료와 시험장비 등에 따라 전단속도에 따른 동적 영향이 서로 일관되지 못하였다.

이상에서 살펴본 바와 같이 각 연구에서 사용된 대상 시료나, 시험방법에 따라 서로 다른 결과를 보이고 있어 속도 의존적인 특성을 일반화시킬만한 뚜렷한 효과나 이론이 정립되어 있지 않는 실정이다. 이에 본 연구에서는 전단속도 변화에 따른 편평한 화강암 전단면의 마찰 특성 변화를 알아보기 위해 일련의 직접 전단시험을 수행하였다. 전단속도의 변화조건은 크게 두 가지로 대별되는데, 첫 번째 시험은 시험동안 일정한 전단속도가 유지되는 조건에서 수행되었으며 이 경우 시험 전단속도는 7단계로 하였다. 두 번째 시험의 경우 전단변위가 발생하는 중간에 순간적으로 전단속도를 변화시켰으며 3가지의 서로 다른 초기 전단속도조건에서 시험을 수행

하였다. 천부 구조물일수록 동적하중의 영향을 많이 받게 되므로 절리면에 가해지는 수직응력 조건은 1 MPa 이내에서 3단계로 변화시켰다.

2. 기초 이론 및 연구동향

2.1 단층 및 지진역학 분야의 연구

단층 활동이나 지진의 발생 메커니즘을 이해하고 이를 설명하기 위한 물리적 법칙을 개발하기 위해 다수의 연구들이 수행되어 왔다.

먼저 Bridgman(1936)은 높은 응력상태에서 암석에 전단이 일어날 때 발생하는 단속적인 거동과 갑작스런 응력 저하가 지진을 일으킬 수 있는 메커니즘이 될 수 있다고 하였다. 그 뒤 암석에서의 stick-slip 거동은 널리 알려지게 되었고 여러 연구자들에 의해서 이 현상이 언급되었다. Brace & Byerlee(1966)는 Bridgman의 제안을 다듬어 이미 존재하는 단층면을 따라 발생하는 stick-slip 거동이 천부 지진을 일으키는 중요한 메커니즘이 될 수 있다고 설명하였으며 slip은 지진이 발생됨을 의미하고, stick은 탄성 변형률이 축적되는 지진이 일어나는 사이 기간을 의미한다고 하였다. 특히 그들은 stick-slip 거동에서의 응력 저하 현상이 암반 파괴(fracturing) 시의 응력 저하에 비해 천부 지진이 일어날 때의 비교적 작은 응력 저하 현상과 비슷하다고 하였다. 그러나 실험실 시험에서 stick-slip에 의한 응력 저하는 비록 암반 파괴 시의 그것에 비해 작긴 하지만 천부 지진 시 발생하는 응력 저하에 비해서 여전히 10배 정도 범위의 차이를 보인다고 보고하였다.

Dieterich(1972)는 여러 종류의 암석을 이용한 편평한 전단면의 마찰실험을 통해 정적 마찰계수는 마찰면이 접촉하고 있는 시간에 대수적으로 비례함을 관찰하였다. 또한 Dieterich(1979a)는 화강섬록암에 대하여 전단속도를 순간적으로 변화시켜가며 마찰 실험을 수행하였고 이에 기초하여 절리면 사이의 접촉점 집합(population of points of contacts)의 강도가 마찰강도를 결정하고, 전단변위가 증가함에 따라 접촉점 집합은 연속적으로 변한다고 하였다. 한편 전단속도가 순간적으로 증가할 때 마찰 저항은 순간적으로 증가하였다가 특성 변위(characteristic displacement, D_c)라 불리는 일정한 변위가 지난 뒤 이전보다 낮은 값으로 감소하여 일정해지는 경향을 보이

며 전단속도가 순간적으로 감소할 때는 반대의 경향을 보임을 관찰하였다.

Ruina(1983)는 Dieterich와 그 외 여러 연구자들에 의한 실험 결과를 종합한 결과 일반적인 마찰 법칙이 상태 변수(state variables)를 이용하여 표현될 수 있음을 제안하였으며, 그 기본적인 특징으로 특정 전단속도가 지속될 때 정상상태의 마찰 응력이 유지되고, 전단속도가 증가할 때 순간적으로 저항이 증가하고 속도가 감소할 때 순간적으로 저항이 감소한다고 보고하였다. 또한 속도 증가 이후 일정 기간 뒤에는 마찰 응력이 감소하는 속도 연화 현상이 나타난다고 하였다(Fig. 1).

이러한 마찰 거동 특징을 바탕으로 그는 전단 응력을 수직응력과 전단속도 및 상태에 의존하는 함수로 표현하였다. Dieterich-Ruina 법칙, 혹은 ‘slowness’ 법칙으로 알려진 이 구성법칙은 다음과 같이 표현된다(Scholz, 1998).

$$\tau = \left[\mu_0 + a \ln\left(\frac{V}{V_0}\right) + b \ln\left(\frac{V_0 \theta}{D_c}\right) \right] \bar{\sigma} \quad (1)$$

여기서, τ 는 전단응력, $\bar{\sigma}$ 는 유효 수직응력, V 는 전단속도, V_0 는 기준이 되는 전단속도, μ_0 는 $V = V_0$ 일 때의 정상 상태의 마찰계수, a 와 b 는 재료에 따른 상수, 그리고 D_c 는 특성 변위이다. 상태 변수 θ 는 다음의 식 (2)에 의해 구해지며, 정상 상태의 전단응력은 식 (3)과 같다.

$$\frac{d\theta}{dt} = 1 - \frac{\theta V}{D_c} \quad (2)$$

$$\tau = [\mu_0 + (a-b) \ln(V/V_0)] \bar{\sigma} \quad (3)$$

식 (1)에 표현된 상태변수 θ 의 예로써, Dieterich (1979a)가 제안한 평균 접촉시간이나, Rabinowicz(1958)가 언급한 평균 전단 속도를 들 수 있다.

Kilgore et al.(1993)은 전단속도 $10^{-4} \sim 10^3 \mu\text{m/s}$, 수직응력 $5 \sim 150 \text{ MPa}$ 범위에서의 시험을 통해 $1 \mu\text{m/s}$ 의 전단속도까지는 모든 수직응력에서 속도의 증가에 따라 마찰계수가 감소하는 속도 연화 현상을 관찰하였으며, 이러한 현상은 낮은 속도 수준에서 현저해지는 결과를 얻었다. $10^2 \mu\text{m/s}$ 의 전단속도 이상에서는 수직응력이 30 MPa 이상에서만 속도 연화 현상이 나타나고, 수직응력이 5 MPa 에서는 오히려 속도가 증가할수록 마찰계수가 증가하는 속도 경화(velocity strengthening) 현상이 관찰되었다. 속도 경화 현상은 일반적으로 충전물의 존재나 전단동안의 온도 증가 현상으로 설명될 수 있으나 (Lockner et al., 1986), 실험한 장비나 조건에 따라 편차가 심하며 이를 일으키는 메커니즘에 대한 이해가 부족한 편이다(Marone, 1998).

이 외에도 비슷한 실험 방법을 통해 온도나 습도 등 다양한 외부조건에 영향을 고려한 실험적 연구와 지진의 메커니즘을 규명한 연구들이 지속적으로 수행되어오고 있다(Dieterich & Conrad, 1984; Solberg & Byerlee, 1984; Tse & Rice, 1986; Scholz, 1998).

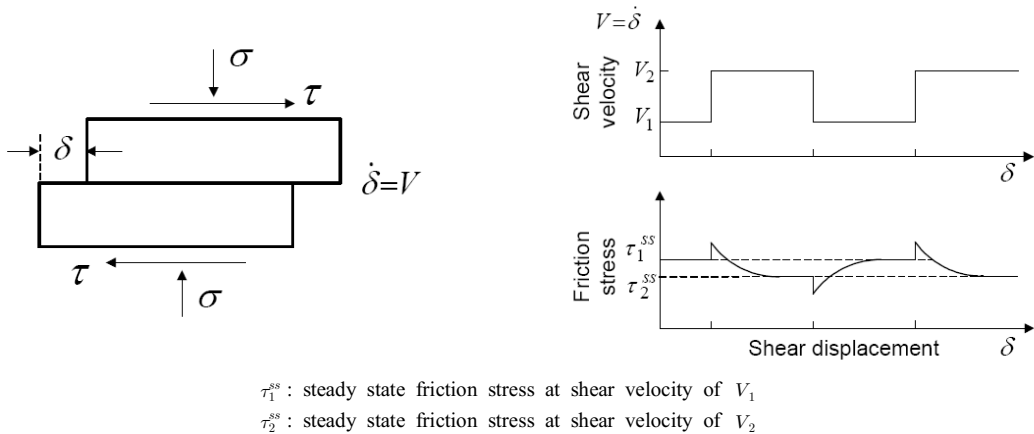


Fig. 1. Idealized evolution of friction stress(τ) at constant normal stress(σ) when shear velocity($\dot{\delta} = V$) is changed (after Ruina, 1983).

2.2 암석역학 분야의 연구

Crawford & Curran(1981)는 서보제어가 가능한 동적 전단 시험기를 개발하여 상대 전단속도가 암석 절리면의 전단저항에 미치는 영향을 연구하였다. 화강암, 사암, 섬장암, 백운암 등 4가지 암종의 건조된 편평한 전단면 시료를 대상으로 전단속도가 0.05~50 mm/sec이고 수직응력의 범위가 0.6~2.8 MPa인 일련의 실험을 통해 경도가 큰 암석의 경우 낮은 전단속도에서는 전단저항이 일정하다가 전단속도의 변화가 마찰거동에 영향을 미치기 시작하는 전이속도(breakpoint velocity) 이후에 전단저항이 감소하는 경향을 보이고, 약한 경도의 암석은 전단속도가 증가함에 따라 전단저항이 증가하다가 일정한 속도 이상에서 일정해지는 경향을 보인다고 하였다. 즉 그들은 전단속도에 의존적인 마찰거동 특성이 암석의 물성이나 광물 조성보다는 암석의 경도와 관련을 가진다고 보고하였으며, 이러한 속도의존적 전단저항 거동은 가해진 수직응력 수준에 영향을 받는다고 하였다. Fig. 2에 그들이 제시한 전단속도에 따른 마찰 저항의 변화 모델을 나타내었다.

한편, Gould(1982)는 Crawford & Curran(1981)의 실험 결과와 비슷한 속도 의존적 전단저항 거동을 관찰하였으나 전단속도의 변화 효과가 수직응력에 독립적이라고 보고하였다.

Bakhtar & Barton(1984)은 입방체 시료를 두 개의 삼각기둥 형태로 분리한 뒤 이축압축 틀에 넣고 가스압에

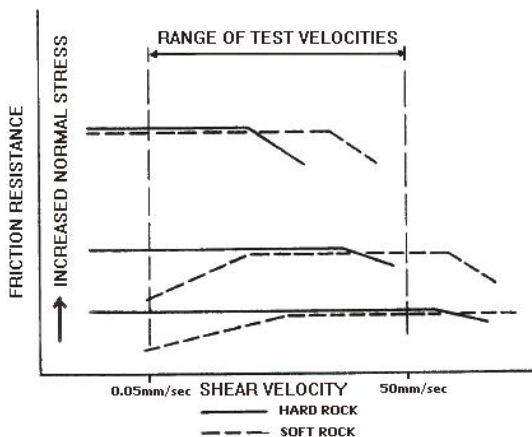


Fig. 2. Model for shear rate-dependent friction resistance (after Crawford & Curran, 1981).

의해 가압하는 방식으로 전단시험을 수행하여 전단속도가 400 mm/sec에서 4,000 mm/sec로 증가함에 따라 전단저항이 5% 정도 증가함을 확인하였다. 그러나 Jafari et al.(2003)은 60° 각도의 톱니모양 전단면을 가지는 원통형 시험편을 제작하고 삼축 압축하중 하에서 작은 스케일의 주기시험을 수행하였는데, 전단속도가 0.05 mm/sec에서 0.4 mm/sec로 증가할수록 오히려 전단강도가 낮아지는 결과를 얻었다.

3. 시료 및 전단시험기

본 연구에 이용된 암석 시료는 포천화강암이며, 대상 암석시료의 기본적인 물성결과는 박병기와 전석원(2006)에 제시되어 있다. 직접 전단시험에 사용되는 편평한 시료는 상하부 블록의 크기를 동일하게 제작하였고, 길이×폭×높이는 각각 149 mm × 118 mm × 65 mm이다.

사용된 서보제어 직접 전단 시험기는 서울대학교 암반공학연구소에서 설계하고 (주)연엔지니어링에서 제작한 것으로 일정 수직하중 및 일정 수직강성 조건에서의 전단시험이 가능하다(임홍래, 2004).

그러나 기존의 전단시험 제어 프로그램에서는 하나의 전단속도로 고정된 상태에서 시험이 수행되도록 설계되어 있어 전단변위가 발생하는 동안 전단속도의 순간적인 변화에 따른 전단력의 변화를 관찰할 수가 없게 된다. 따라서 본 연구에서는 사용자 임의로 작성된 함수대로 전단변위를 제어 할 수 있도록 수정·보완된 프로그램(박병기, 2005)을 적용하였다.

4. 직접 전단시험 결과

전단속도의 변화에 따른 편평한 화강암 전단면의 마찰 특성을 알아보기 위해 크게 두 가지의 시험을 수행하였다. 첫 번째 시험은 시험이 수행되는 동안 계속해서 일정한 전단속도로 전단변위가 발생하는 경우이고, 두 번째는 전단변위가 발생하는 중간에 전단속도가 변하는 경우이다.

시험에 사용된 시료인 포천 화강암의 기본 마찰각은 32.1°로 나타났으며, 걸보기 점착력은 0.4 KPa로 나타났다.

4.1 전단속도의 영향

전단속도의 변화에 따른 마찰 특성 변화를 알아보기 위해 전단속도를 0.1, 0.5, 1, 5, 10, 50, 100 mm/min 등 7단계로 변화시켰다. 각각의 전단속도에 대해서 가해

진 수직응력은 0.2, 0.5, 1.0 MPa의 세 단계로 하였고, 동일한 시험 조건에서 3회씩 시험을 수행하였다. 시료의 번호는 S1~S9로 구분하였고 가해진 수직응력에 대한 정보를 추가하여 S1 시료에 대해 수직응력이 0.2 MPa인 경우 S1_n02로 표기하였다. Fig. 3에 전단속도의 변화에 따른 마찰계수의 변화 양상을 수직응력별로 도시하였다. 편평한 전단면의 경우 점착력이 거의 없으므로 마찰계수에 아크탄젠트를 취하면 전단면의 마찰각에 해당된다.

수직응력이 0.2 MPa인 경우 마찰계수는 시험 전단속도 구간에서 특징적인 경향 없이 대체로 분산되어 나타나는 결과를 보인다. 수직응력이 0.5 MPa일 경우 10 mm/min 이상의 전단속도에서 속도가 증가함에 따라 마찰계수가 감소하는 경향을 보인다. 수직응력이 1.0 MPa일 경우에도 같은 경향을 보이며, 10 mm/min 정도에서부터 전단속도의 증가에 따라 마찰계수가 감소하는 경향을 보인다. 이상의 결과에서 속도 의존적인 마찰저항은 가해진 수직응력 수준에 영향을 받는 것으로 보이며, 수직응력이 증가할수록 마찰저항의 동적 효과는 낮은 전단속도에서부터 나타나는 것으로 판단된다. 다시 말해, 전단속도의 변화가 마찰거동에 영향을 미치기 시작하는 전이 속도는 수직응력이 증가함에 따라 낮아지는 것으로 보인다. 이러한 결과는 Crawford & Curran(1981)이 경암에 대해 실험한 결과와 그 경향이 일치한다.

한편, Fig. 4에 제시한 바와 같이, 수직응력이 0.5 MPa이고, 전단속도가 낮은 (0.1, 0.5 mm/min) 실험에서 stick-slip 거동이 관찰되었다. 이는 전단속도가 느릴수록 일정한 전단변위를 일으키는데 많은 시간이 소요되게 되고 그 시간만큼 많은 변형에너지를 축적하고 있다가 전단변위가 발생하는 순간 방출되기 때문으로 추정된다. 속도가 느릴수록 stick-slip 거동에서의 응력 저하 폭이 커지는 경향을 보였다.

Stick-slip 거동은 마찰이 작용하는 면에 놓인 물체를 스프링으로 끝 때 발생하는 현상으로 모델링될 수 있는데 Stick-slip 거동에 의한 응력 저하의 폭은 재료의 물성과 표면 상태, 가해진 수직하중 수준, 마찰각, 전단 속도, 그리고 시험기의 강성에 좌우된다(Bro, 1992). 안정적인 슬라이딩 상태에서 stick-slip 거동으로의 변화는 Dieterich(1972)가 제시한 시간의존적인 마찰법칙으로 설명될 수 있다. 즉, 시간 및 속도의존적인 마찰 특성으

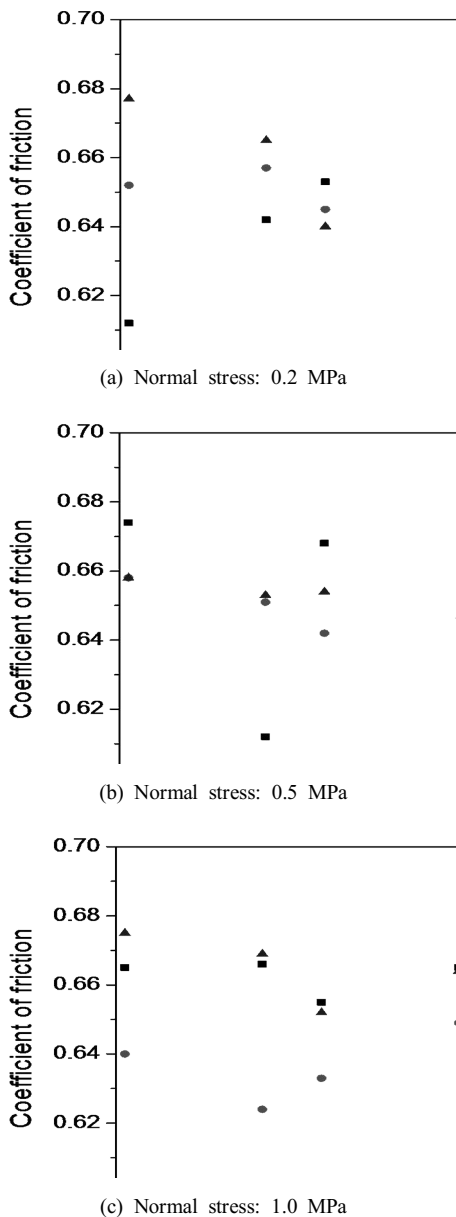


Fig. 3. Variation of coefficient of friction at different shear velocities.

로 인해 stick-slip이 개시되는 임계속도가 존재하게 되며 이러한 임계속도는 시험기의 강성이 증가할수록, 그리고 수직응력이 감소할수록 감소한다(Teufel, 1983). 일단 stick-slip 상태에 도달하면 변위속도가 줄어들수록 응력 저하의 폭이 커지며, 이러한 경향은 본 연구에서도

확인되었다.

수직응력이 1.0 MPa인 경우 1 mm/min의 전단속도에 서도 약간의 stick-slip 현상이 발생하였으며 수직응력이 0.5 MPa인 경우에서와 마찬가지로 전단속도가 감소할 수록 응력 저하 폭이 커지는 경향을 보였다.

4.2 순간적인 전단속도 변화의 영향

앞선 4.1절에서 수행된 실험에서는 정해진 특정 전단 속도에 대해 전단시험을 실시하고 정상 상태에서의 마찰계수를 구하여 이를 각각의 전단속도에 대해 도시함으로써 전단속도에 따른 정상 상태의 마찰계수를 관찰 하였다. 그러나 시험기의 조건이나 온도, 습도 등의 외부 환경조건이 매 실험마다 완전히 같을 수는 없고 실험 시료간의 편차 역시 미세한 마찰계수의 변화를 관찰 함에 있어 상당한 영향요인이 될 수 있다. 따라서 본 실험에서는 일정한 초기 전단속도로 전단변위가 발생 되는 도중에 전단속도를 변화시키는 실험을 수행하여 그 영향을 알아보려 하였다. 이러한 조건의 실험은 앞서 언급한 바와 같이 단층역학 및 지진역학 분야에서 주로 이중 전단시험 장비를 이용하여 수행하여 왔는데, 이는 전단속도의 순간적인 변화에 따른 마찰계수의 변화, 다시 말해 stick-slip으로 표현되는 현상이 지진과 단층활동의 주요한 메커니즘으로 인식되고 있기 때문이다.

마찰계수 변화는 전단속도에 대수적으로 비례한다고 알려져 있으므로(Ruina, 1983), 본 실험에서는 속도변화를 0.1~1, 1~10, 10~100 mm/min 등 세 가지 패턴으로 변화시켰으며, 수직응력은 0.2, 0.5, 1.0 MPa의 세 가지 조건으로 실험하였다. 전단속도의 변화는 계단식으로 이루어졌으며, 전단속도의 순간적인 변화에 따른 마찰계수의 변화 양상을 수직응력 수준별로 구분하여 Fig. 5~7에 제시하였다. 각각의 그래프의 하단에는 전단변위에 따른 전단속도가 제시되어 있고, 상단에는 전단속도의 변화에 따른 마찰계수의 변화 양상과 그 변화량을 표시하였다.

시험한 모든 조건에서, 속도가 증가할 때 정상 상태에서의 마찰계수가 감소하는 속도 연화 현상이 나타났다. 그러나 많은 연구자들(Dieterich, 1978; Ruina, 1983; Tse & Rice, 1986; Kilgore et al., 1993; Marone, 1998)에 의해 언급된 바 있는 속도가 변화할 때 발생하

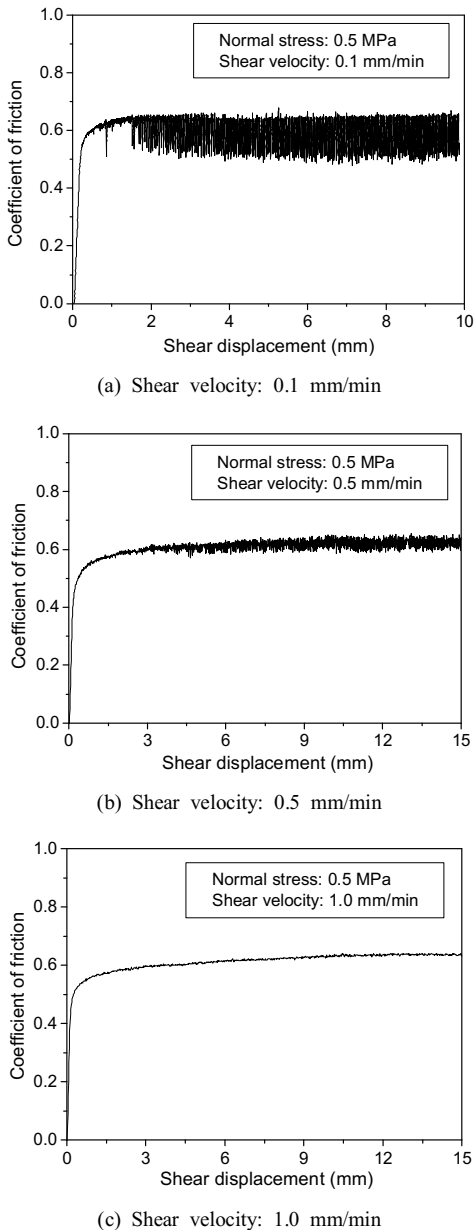


Fig. 4. Stick-slip behavior at different shear velocities.

는 순간적인 마찰계수의 변화(Fig. 1 참조)는 본 실험에서 거의 관찰이 되지 않았는데, 이는 실험에 사용된 시험기의 특성과 전단응력이 가해지는 방식이 상이하고, 또한 가해진 수직응력 수준이 다르기 때문으로 판단된다.

전단속도 변화에 따른 정상 상태에서의 마찰계수 변

화($\Delta\mu$)를 각 시험 조건에 따라 정리하여 Table 1에 제시하였고, 이를 각각의 수직응력에 대하여 박스차트의 형태로 나타내어 Fig. 8에 제시하였다.

수직응력이 0.2 MPa일 때에는 전단속도의 크기와는 무관한 것으로 보이나(Fig. 8(a)), 수직응력이 0.5 및 1.0 MPa인 경우에는 느린 전단속도에서 전단속도의 변화

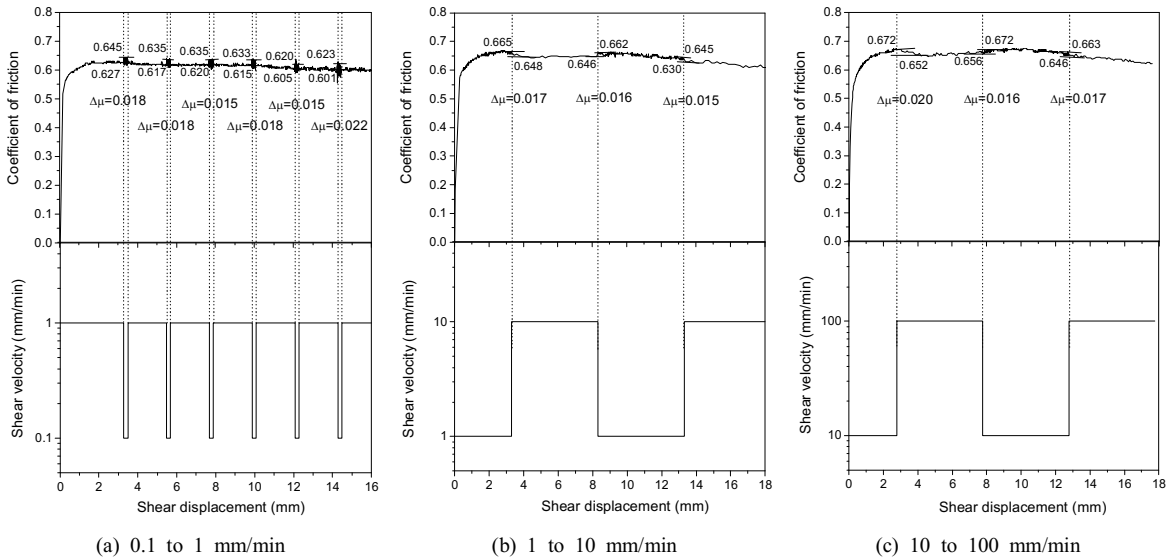


Fig. 5. Steady-state changes of friction ($\Delta\mu$) for step changes of shear velocity at normal stress of 0.2 MPa.

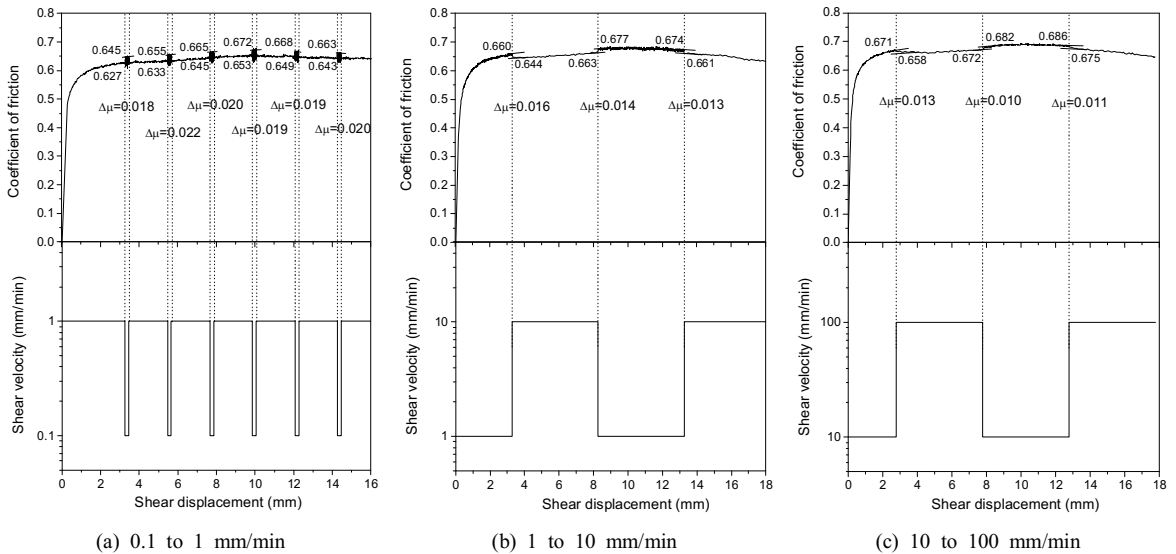


Fig. 6. Steady-state changes of friction ($\Delta\mu$) for step changes of shear velocity at normal stress of 0.5 MPa.

(Δv_1)에 따른 마찰계수의 감소폭이 빠른 전단속도에서의 변화(Δv_3)에 따른 감소폭보다 더 큰 경향을 보였다. 이러한 결과는 Kilgore et al.(1993)이 전단속도 수준이 낮을 때 속도 변화 현상이 더 크게 발생한다고 보고한 내용과 일치하는 것으로 볼 수 있다.

전단속도의 변화에 따른 정상 상태에서의 마찰계수의 감소는 다음의 식과 같이 나타낼 수 있다(Kilgore et al., 1993; Scholz, 1998).

$$\Delta\mu_{ss} = (A - B)\ln(V_1/V_2) \quad (4)$$

여기서, $\Delta\mu_{ss}$ 는 정상 상태의 마찰계수의 변화량, A와

B는 재료에 따른 상수, V_1/V_2 는 전단속도 변화의 비이다. 식 (4)에서 속도변화에 따른 정상 상태에서의 마찰계수 변화는 상수 A-B에 의존한다고 볼 수 있다. 또한 $V_1 < V_2$ 일 때, $(A-B) > 0$ 이면 속도 경화가 일어나 안정적인 전단이 발생하는 상태이고, $(A-B) < 0$ 이면 속도 연화현상에 의해 불안정한 미끄러짐이 발생하는 상태이다 (Kilgore et al., 1993). 본 실험에서 구한 $(A-B)$ 는 Table 1에 나타나듯이 모두 음의 값을 가지므로 불안정한 미끄러짐이 일어난다고 볼 수 있으며, 그 경향은 낮은 전단속도 수준에서 현저하다.

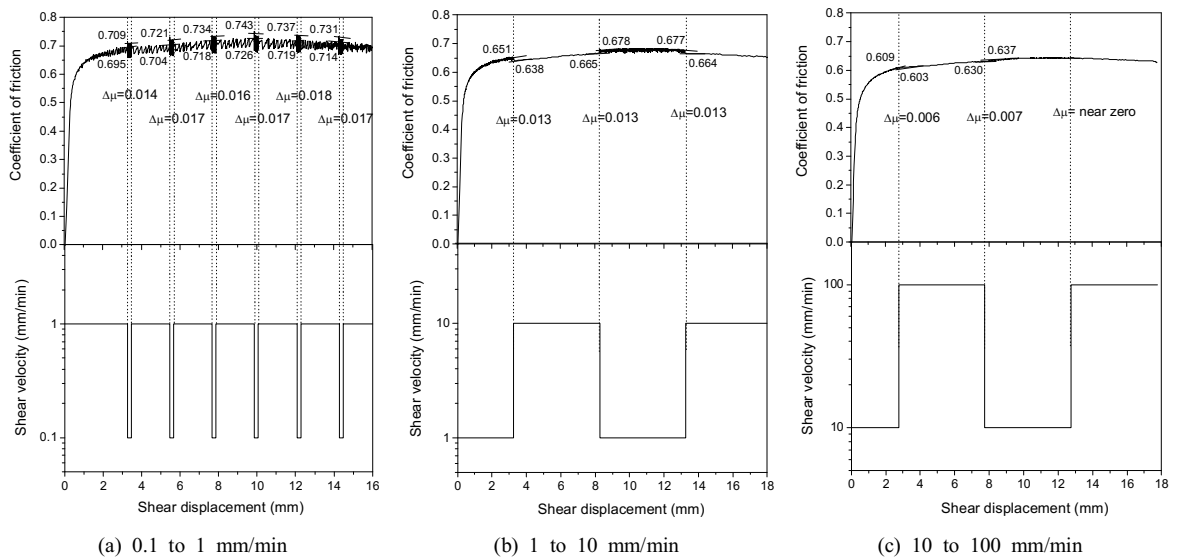


Fig. 7. Steady-state changes of friction ($\Delta\mu$) for step changes of shear velocity at normal stress of 1.0 MPa.

Table 1. Change in coefficient of friction ($\Delta\mu$) at sudden change in shear velocity.

Normal stress	Velocity change	Range of $\Delta\mu$	A-B ($\times 10^{-3}$)
0.2 MPa	0.1 \leftrightarrow 1 mm/min (Δv_1)	0.015 ~ 0.022	-(6.51 ~ 9.55)
	1 \leftrightarrow 10 mm/min (Δv_2)	0.015 ~ 0.017	-(6.51 ~ 7.38)
	10 \leftrightarrow 100 mm/min (Δv_3)	0.016 ~ 0.020	-(6.95 ~ 8.69)
0.5 MPa	0.1 \leftrightarrow 1 mm/min (Δv_1)	0.018 ~ 0.022	-(7.82 ~ 9.55)
	1 \leftrightarrow 10 mm/min (Δv_2)	0.013 ~ 0.016	-(5.65 ~ 6.95)
	10 \leftrightarrow 100 mm/min (Δv_3)	0.010 ~ 0.013	-(4.34 ~ 5.65)
1.0 MPa	0.1 \leftrightarrow 1 mm/min (Δv_1)	0.014 ~ 0.018	-(6.08 ~ 7.82)
	1 \leftrightarrow 10 mm/min (Δv_2)	0.013 ~ 0.013	-(5.65 ~ 5.65)
	10 \leftrightarrow 100 mm/min (Δv_3)	0.0 ~ 0.007	-(3.04 ~ 0)

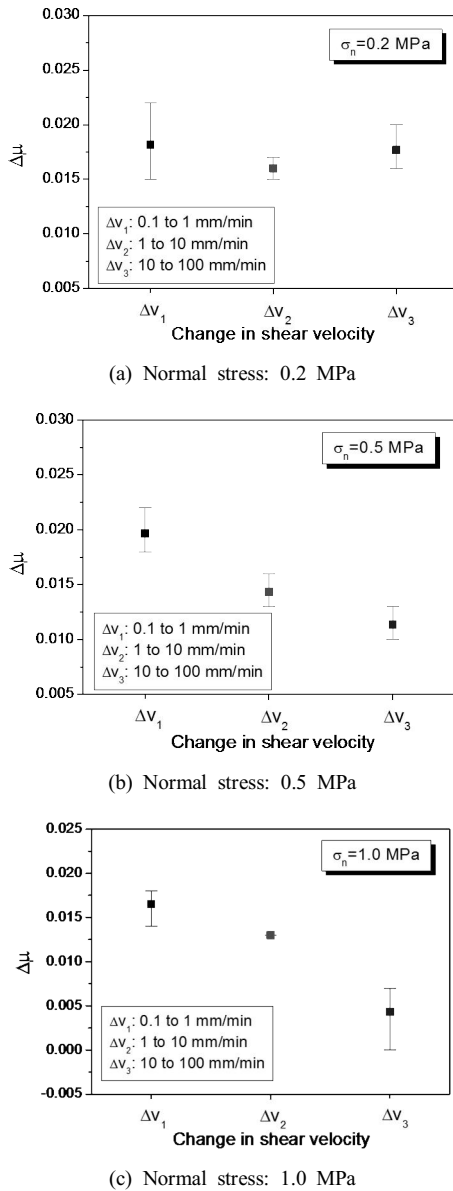


Fig. 8. Change in coefficient of friction versus change in shear velocity at different normal stresses.

5. 결 론

전단속도 변화에 따른 편평한 화강암 전단면의 마찰 특성을 알아보기 위해 시험이 수행되는 동안 일정한 전단속도가 유지되는 경우와 전단변위가 발생하는 중간에

전단속도가 변하는 경우 두 가지에 대해 시험을 수행하였다. 본 연구에서 얻어진 주요한 결론은 다음과 같이 요약된다.

1. 수직응력과 전단속도의 변화에 따른 편평한 화강암의 마찰계수 변화를 살펴본 결과, 10 mm/min 정도의 전단 속도에서 속도가 증가함에 따라 마찰계수는 감소하는 경향을 보이며, 속도 의존적인 마찰저항은 가해진 수직응력 수준에 영향을 받는 것으로 보인다. 또한 전단속도의 변화가 마찰거동에 영향을 미치기 시작하는 전이속도는 수직응력이 증가함에 따라 낮아지는 것으로 보인다.
2. Stick-slip 거동은 낮은 전단속도(0.1, 0.5 mm/min)에서 관찰되었는데 이는 전단속도가 느릴수록 일정한 전단변위를 일으키는데 많은 시간이 소요되게 되고 그 시간만큼 많은 변형에너지를 축적하고 있다가 전단변위가 발생하는 순간 방출되기 때문에 추정된다. 또한 전단속도가 느릴수록 stick-slip 거동에서의 응력 저하 폭이 커지는 경향을 보였다.
3. 순간적인 전단속도 변화에 따른 정상 상태에서의 마찰계수 변화를 살펴본 결과, 순간적으로 속도가 증가함에 따라 정상상태의 마찰계수가 감소하는 속도 연화 현상이 나타났으며 느린 전단속도에서 전단속도의 변화에 따른 마찰계수의 감소폭이 빠른 전단속도에서의 변화에 따른 감소폭보다 더 큰 경향을 보였다. 하지만 속도가 변화할 때 발생하는 순간적인 마찰계수의 변화는 본 실험에서 거의 관찰이 되지 않았다. 이는 실험에 사용된 시험기의 특성과 전단응력이 가해지는 방식이 상이하고, 또한 가해진 수직응력 수준이 다르기 때문으로 판단된다.

사 사

본 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2007년도 건설핵심기술연구개발사업 04핵심기술C01의 지원으로 이루어졌습니다.

1. 박병기 (2005), 암석 절리면의 동적 마찰거동 특성, 공학 박사학위논문, 서울대학교.
2. 박병기, 전석원 (2006), 진동대 시험에 의한 편평한 암석 절리면의 동적 마찰거동 특성, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), Vol. 16, No. 1, 58-72.
3. 임홍래 (2004), 암반 절리의 일정 수직 강성 조건하의 전단 거동에 관한 실험적 연구, 공학석사학위논문, 서울대학교.
4. Bakhtar, K., Barton, N. (1984), "Large scale static and dynamic friction experiments", Proceedings of the 25th Symposium on Rock Mechanics, Evanston, Illinois, June 25-27, pp. 457-466.
5. Brace, W.F., Byerlee, J.D. (1966), "Stick-slip as a mechanism for earthquakes", Science, Vol. 153, pp. 990-992.
6. Bridgman, P.W. (1936), "Shearing phenomena at high pressure of possible importance to geology", Journal of Geology, Vol. 44, 653-669.
7. Bro, A. (1992), "Stick-slip behaviour of smooth joints", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 29, pp. 171-177.
8. Crawford, A.M., Curran, J.H. (1981), "The influence of shear velocity on the frictional resistance of rock discontinuities", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 18, pp. 505-515.
9. Dieterich, J.H. (1972), "Time-dependent friction in rocks", Journal of Geophysical Research, Vol. 77, pp. 3690-3697.
10. Dieterich, J.H. (1979a), "Experimental results and constitutive equations", Journal of Geophysical Research, Vol. 84, pp. 2161-2168.
11. Dieterich, J.H. (1979b), "Simulation of preseismic slip", Journal of Geophysical Research, Vol. 84, pp. 2169-2175.
12. Dieterich, J.H., Conrad, G. (1984), "Effect of humidity on time- and velocity- dependent friction in rocks", Journal of Geophysical Research, Vol. 89, pp. 4196-4202.
13. Gillette, D.R., Sture, S., Ko, H.Y., Gould, M.C., Scott, G.A. (1983), "Dynamic behavior of rock joints", Proceedings of the 24th U.S. Symposium on Rock Mechanics, Texas A&M University, pp. 163-179.
14. Gould, M.C. (1982), "Development of a high capacity dynamic direct shear apparatus and its application to testing of sandstone rock joints", M.S. Thesis, University of Colorado, Boulder.
15. Jafari, M.K., Hosseini, K.A., Pellet, F., Boulon, M., Buzzi, O. (2003), "Evaluation of shear strength of rock joints subjected to cyclic loading", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 23, pp. 619-630.
16. Kilgore, B.D., Blanpied, M.L., Dieterich, J.H. (1993), "Velocity dependent friction of granite over a wide range of conditions", Geophysical Research Letters, Vol. 20, pp. 903-906.
17. Lockner, D.A., Summers, R., Byerlee, J.D. (1986), "Effects of temperature and sliding rate on frictional strength of granite", Pure and Applied Geophysics, Vol. 124, pp. 445-469.
18. Marone, C. (1998), "Laboratory-derived friction laws and their application to seismic faulting", Annual Review of Earth and Planetary Science, Vol. 26, pp. 643-696.
19. Rabinowicz, E. (1958), "The intrinsic variables affecting the stick-slip process", Proceedings of Physical Society of London, Vol. 71, pp. 668-675.
20. Ruina, A. (1983), "Slip instability and state variable friction laws", Journal of Geophysical Research, Vol. 88, pp. 10359-10370.
21. Park, B. K., Jeon, S., Lee, C. S. (2006), "Evaluation of dynamic frictional behavior of rock joints through shaking table test", Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 21, pp. 427.
22. Scholz, C.H. (1998), "Earthquakes and friction laws", Nature, Vol. 391, pp. 37-42.
23. Solberg, P., Byerlee, J.D., 1984, "A note on the rate sensitivity of frictional sliding of Westerly granite", Journal of Geophysical Research, Vol. 89, pp. 4203-4205.
24. Teufel, L.W. (1983), "Frictional instabilities in rock", Proceedings of the 24th U.S. Symposium on Rock Mechanics, pp. 479-480.
25. Tse, S.T., Rice, J.R. (1986), "Crustal earthquake instability in relation to the depth variation of frictional slip properties", Journal of Geophysical Research, Vol. 91, pp. 9452-9472.



박 병 기

산업자원부 에너지자원개발본부
광물자원팀
사무관
E-mail: bkpark@mocie.go.kr



이 창 수

서울대학교
지구환경시스템공학부
박사과정
E-mail: kidgang@rockeng.snu.ac.kr



전 석 원

서울대학교
지구환경시스템공학부
부교수
E-mail: sjeon@snu.ac.kr
