

## 암석 브리지에 의한 불연속면 점착강도의 시간의존성에 관한 연구

박철환<sup>1)\*</sup>, 전석원<sup>2)</sup>

### Time-dependent Reduction of Sliding Cohesion due to Rock Bridges along Discontinuities

Chulwhan Park and Seokwon Jeon

**Abstract** This paper is to introduce an article published in Rock Mechanics and Rock Engineering, 2003. In this research, a fracture mechanics model is developed to illustrate the importance of time-dependence for brittle fractured rock. In particular a model is developed for the time-dependent degradation of rock joint cohesion. Degradation of joint cohesion is modeled as the time-dependent breaking of intact patches or rock bridges along the joint surface. A fracture mechanics model is developed utilizing subcritical crack growth, which results in a closed-form solution for joint cohesion as a function of time. As an example, a rock block containing rock bridges subjected to plane sliding is analyzed. The cohesion is found to continually decrease, at first slowly and then more rapidly. At a particular value of time the cohesion reduces to value that results in slope instability. A second example is given where variations in some of the material parameters are assumed. A probabilistic slope analysis is conducted, and the probability of failure as a function of time is predicted. The probability of failure is found to increase with time, from an initial value of 5% to a value at 100 years of over 40%. These examples show the importance of being able to predict the time-dependent behavior of a rock mass containing discontinuities, even for relatively short-term rock structures.

**KeyWords** Rock fracture mechanics, Time dependent, Subcritical crack growth, Slope stability, Rock fracture, Joint cohesion, Friction angle, Rock bridge

**초 록** 본보는 2003년도에 국제 학술지에 수록된 논문을 국내의 전문가들에게 소개하는 기술보고서이다. 본 연구에서 취성파괴를 보이는 암석에 대하여 시간의존성의 중요성을 설명하는 파괴역학적 모델이 개발되었다. 균열면을 따라 형성된 신선한 구간인 암석 브리지의 파괴규정으로 불연속면의 점착강도가 감소하는 모델이 설정되었다. 특히 임계조건 이전에 발생하는 균열성장을 사용하여 파괴역학적 모델을 개발하였는데, 이로부터 시간과 점착강도의 관계를 독립된 수식으로 표현하였다. 예로서 평면파괴가 예상되는 암석 블록에 대한 분석이 이루어졌다. 절리면의 점착강도는 연속적으로 감소하는 것으로 밝혀졌는데, 초기에는 아주 점진적이며 그 후에는 급격하다. 그러다가 어느 시점에서는 감소된 점착강도는 사면의 불안정과 붕괴를 야기한다. 두번째 예에서는 몇몇 물질 상수들이 분산을 가진다고 가정하였다. 여기에서는 확률론적으로 사면의 안정성이 분석되었는데 사면의 파괴확률을 시간의 함수로 예견할 수 있다. 시간이 경과함에 따라 사면의 파괴확률은 점점 증가하여 초기에 5% 수준에서 100년 후에는 40% 이상으로 증가한다. 이러한 예제들은 지하구조물이 비록 비교적 단기목적이라 하더라도 불연속면을 갖는 암반의 시간의존성 거동을 예측할 수 있음을 보여 주었다.

**핵심어** 파괴역학, 시간의존성, 임계조건 이전의 균열성장, 사면의 안정성, 균열, 점착강도, 마찰각, 암석 브리지

## 1. 서 론

### 1.1 원문 소개

본 보고서는 2003년도 애리조나 주립대학의 John

Kemeny 교수가 국제적 학술지인 Rock Mechanics & Rock Engineering에 발표한 연구논문을 번역한 것이다. 저자인 Kemeny교수는 故 N.G.W. Cook교수와 공동으로 암석의 파괴 및 변형거동을 모사하는 미세균열모형을 개발하고 이에 대한 연구를 꾸준히 수행하고 있다.

이 논문은 불연속면들이 연결되지 않고 암석 브리지(Rock-Bridge)를 갖고 있는 암반에 대한 점착강도를 암석의 파괴역학적 관점에서 분석한 것이다. 특히 이러한 불연속면 암반의 점착강도를 시간의존 함수로 분

<sup>1)</sup> 한국지질자원연구원 탐사개발연구부 책임연구원

<sup>2)</sup> 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 조교수

\*교신저자(Corresponding Author): cwpark@kigam.re.kr

접수일: 2004년 4월 21일

심사 완료일: 2004년 5월 28일

석하였다. 한편 본 학회지에 파괴인성을 연구한 논문은 다수이나 브리지를 언급하거나 균열전파, 파괴확률을 다루고 있는 논문은 다음의 네 편 정도이다.

- \* rock bridges를 고려한 수직 해석적 수압파쇄 균열 거동 연구(최성용, 2000)
- \* 단축압축 하에서 대리석의 균열전파 및 결합 (박남수와 전석원, 2001)
- \* 점추정법을 이용한 평면파괴의 파괴확률 산정 (박혁진, 2002)
- \* 암석의 전단 파괴인성 측정에 관한 실험적 연구 (윤정석과 전석원, 2003)

이와 같이 국내에서는 크립과 같은 시간의존 파괴강도 연구와 브리지 암반에 대한 연구가 미미하므로 이 원전의 연구내용은 국내 연구자에게 시사하는 바가 크다고 생각되어 본 보고서를 통하여 소개하고자 한다. (譯者 註)

## 1.2 과거의 문헌연구

암석역학 분야에서 가장 중요한 문제들은 암석에 내재되어 있는 균열에 관한 것들이라 할 수 있다. 그리고 이들 균열은 외력을 받거나 변형이 일어나면 개방되기도 하고, 폐쇄되기도 하며 균열성장이나 미끄러짐 파괴 현상으로 연결된다. 이러한 분야에서 시간의존성은 일견 다루지 않고 있다. 일례로 암염의 정적 크립은 파괴역학적이거나 보다는 연성으로 설명되고 있음은 잘 알려져 있다.

그러나 취성 암석에서는 시간의존성 거동과 파괴현상은 서로 매우 밀접하다는 연구가 많다. 예를 들어 취성 암석에서 수행한 크립시험은 파괴음의 방출과 P파 속도의 감소가 서로 밀접하게 관련되어 있고, 균열성장의 강력한 징후와 균열의 미끄러짐이 서로 밀접하게 연관되어 있다(Sano et al., 1982). 시간의존성 미세균열의 성장을 이용한 파괴역학 모델에서는 취성 암석의 크립에서 파괴현상의 중요성을 뒷받침하고 있다. 예를 들어 1979년 Jaeger & Cook에 의한 많은 경험적 모델들에 의하여 예측된 형태의 자세한 수식으로 표현한 연구로서 2차 크립에서의 변형률의 크기는 시간의 로그값에 비례함수로 표현된다(Kemeny, 1991). 여기에서는 臨界條件 以前에 일어날 수 있는 균열성장을 이용하였다. (subcritical crack growth에서 sub-critical은 임계치 이전이라는 뜻이다. 즉, 시간에 의존하는 균열의 발생이나 성장은 응력확대계수가 그 임계조건 값인 파괴인성보다 작은 크기에서도 일어난다. 따라서 본 보고서에서는 이를 임계조건 이전으로 해석한다. 譯者 註) 또한 이 문헌에서 언급한 모델에서 균열의 상호작용과 폐쇄에 의

하여 발생하는 크립의 마지막 단계인 3차크립이나 크립 파괴도 예측가능하다.

취성 암석의 시간의존적 특성은 암반 구조물의 설계에서 종종 무시된다. 왜냐하면 이런 구조물의 사용수명 기간동안에 발생하는 시간의존적 변형은 매우 작기 때문이다. 그러나 방사성폐기물 처분장과 같이 매우 장기간동안 개방되어 있어야 하는 구조물의 굴착설계에서 이러한 특성은 반드시 고려되어야 한다(Kemeny and Cook, 1991; Kicker et al., 2000). 또한 이러한 특성의 근본을 이해하여, 비록 수명이 짧은 암반구조물이라도 시간의존성을 고려해야만 하는 상황에서의 모델이 개발될 수 있다. 일례로 본보에서는 비교적 단기적 수명의 구조물에서 시간의존성을 고려해 볼 때, 수명기간 동안에 파괴가 일어날 확률이 시간의존성을 고려하지 않은 경우에 비하여 상당히 증가함을 보여주고 있다.

암반의 시간의존적 거동은 불연속면을 따라 발생하는 시간의존성 확장이나 미끄러짐에 의하여 좌우된다고 가정하는 것이 타당하다. 이러한 대규모의 불연속면에는 단층이나 절리, 층리, 그리고 여러 형태의 균열들이 포함된다. 예로서, 지하구조물이 굴착될 때 천정부나 상부에 있는 썩기모양의 암석을 가정해 보자. 이는 여러 개의 불연속면이 교차하면서 만들어진다. 많은 경우에는 이러한 암석블록이 운동학적이거나 동역학적인 요구조건이 충족되면 움직이지만, 굴착 직후에 보통은 붕락하지 않는다. 이러한 암석블록은 일정 기간이 지나면 붕락하거나 또는 영구히 안정된 채로 남아있게 된다.

그렇다면 이러한 썩기형 암석이 시간의존적으로 안정한 것이냐의 여부를 설명할 수 있는 믿음만한 역학체계는 무엇인가라는 의문이 남는다. 많은 경우에 암반블럭 거동의 시간의존적 안정성은 불연속면에 존재하는 신선한 또는 연결되지 않는 부분에 의하여 좌우된다. 이를 그림 1에서 제시한 것과 같이 암석 브리지(rock bridge)라 하며, 이것에 의하여 인장이나 전단에서의 전체 불연속면의 점착강도가 결정된다. 이러한 불연속면의 점착강도는 작용하는 응력에 의존하면서 시간이 경과함에 따라 약화되며 결과적으로 시간의존성 파괴로 귀착된다. 이러한 역학적 과정을 이해함으로써, 시간의존성 암석의 붕락이나 미끄러짐은 예측가능해지고, 지하구조물의 안정성은 개선될 수 있다. 현재까지는 이러한 붕락이나 미끄러짐 현상은 경험적인 접근으로만 예측이 가능하다(Kaiser et al., 1992; Hedley, 1992; Mojtabei and Beattie, 1996).

## 1.3 연구의 개요

본 연구는 불연속면의 시간의존성 거동과 점착강도에

주안점을 두고 있으며, 여기에서 다음 두 가지를 가정한다. 불연속면을 따라 존재하는 브리지는 동일 평면상에 있는 두개의 균열 사이에 patch(신선하게 접착되어 있는 接觸部)로 존재하는 모델로 가정한다(그림 1 참고). 또한 하중의 작용에 의하여 이 접촉부의 시간의존성 전단거동은 궁극적으로 불연속면의 시간의존적 변형과 미끄러짐에 직접적으로 영향을 미친다고 가정한다.

여기서 브리지의 시간의존성 전단현상은 Atkinson의 1984년 및 1987년의 연구에 의하면 임계조건 이전에 발생하는 균열성장에 의한 것으로 가정된다. 비록 인장 파괴가 직접적으로 첨가될 수 있다하더라도, 이 경우에는 전단파괴만을 고려하기로 한다. 본 연구의 첫 번째 예로서 브리지를 갖는 암석블록의 전단면파괴에 대한 분석이 이루어졌다. 브리지에서 전단변형이 점진적으로 발생함으로써 접착강도가 계속하여 감소하는 것이 발견되었다. 두 번째 예는 물리적 요소들이 서로 다른 브리지가 여러개 존재하는 경우이다. 확률론적인 사면안정성 분석이 수행되었으며, 파괴확률이 시간의 함수로 예견되었다. 여기에서 사면의 파괴확률은 시간이 경과함에 따라 증가하는데, 초기에는 5% 수준이었다가 100년 뒤에는 40% 이상이 되는 것으로 나타났다. 이러한 예제들의 분석을 통하여 비교적 단기로 활용되는 지하구조물에서도 불연속면을 포함한 암반의 시간의존성 거동을 예측 가능한 것은 매우 중요하다는 것을 알 수 있다.

본 연구의 제 2 절에서는 불연속면의 시간의존성 접착 강도에 대한 파괴역학적 모델을 제시하였다. 그리고 제 3 절에서는 이 모델의 간단한 예제들을 언급하였으며, 제 4 절에서는 이의 결과의 검토로서 모델의 적용 한계성과 다른 문제점들을 토의하였다.

## 2. 파괴역학적 모델

암석 브리지에 관한 간단한 파괴역학적 모델은 그림 1과 같다. 브리지 그 자체는 두개의 평면적 균열 사이에 있는 신선한 암석 구간인 접촉부로 모델화된다. 전체 모델구간은 폭이  $2w$ 인 암반 내부에 폭  $2a$ 의 암석브리지가 포함된 것으로 가정하며, 전단응력과 법선응력을 받고 있다. 이 문제에서 Mode II 응력확대계수의 크기는, 1976년 Rooke and Cartwright의 연구에 의하면  $a$ 가  $w$ 에 비하여 아주 작은 값일 때, 다음 식 1과 같다.

$$K_{II} = \frac{\tau \cdot 2w}{\sqrt{\pi a}} \quad (1)$$

이 해는 균열 표면을 따라 발생할 수 있는 마찰력을 없는 것으로 가정한 것이다. 그러나 만약 마찰력이 존

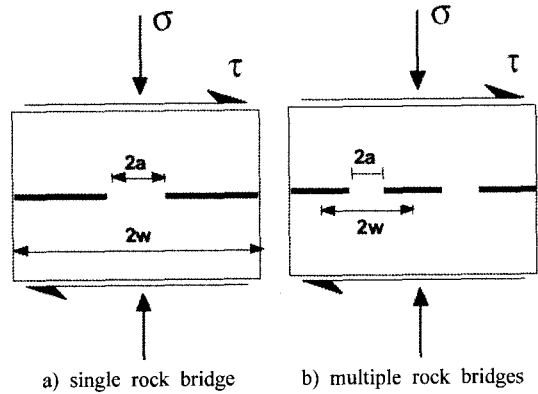


Fig. 1. Fracture mechanics models under far-field normal and shear stresses

재한다면, 중첩원리에 의하여 식 1에 있는 전단응력은 법선응력에 의한 또 다른 전단저항을 고려한 유효 전단응력으로 대체하여 Mode II 응력확대계수의 크기는, 식 2와 같이 표현된다.

$$K_{II} = \frac{(\tau - \sigma_n \tan \phi) 2w}{\sqrt{\pi a}} \quad (2)$$

여기서  $\phi$ 는 양쪽의 브리지에서 발생하는 균열 표면에 서의 마찰각을 뜻한다. 또한 이 해석은 아주 작은  $a/w$ 의 값에 대한 가정된 것이므로, 이는 그림 1의 b)와 같이 여러개의 브리지를 갖는 모델에서도 동등하게 적용된다.

Mode II 응력조건에서 Mode II 응력확대계수인  $K_{II}$ 의 크기가 응력확대계수의 임계값인 파괴인성 ( $K_{IIC}$ )에 도달하면 전단균열의 성장이 발생한다고 가정하자. 이 때 전단균열의 성장은 브리지의 크기를 감소시키는 영향을 초래한다. 또한 전단균열의 성장은 균열선단에 작용하는 최대 전단응력의 방향인 균열들의 평면상에 발생한다고 가정한다. 비록 초기 균열은 최대 Hoop-Tension 방향으로 성장이 시작되지만, 실험을 통하여 전단에서의 브리지는 궁극적으로 최대 전단응력의 방향으로 파괴되는 것이 확인되었다(Bobet and Einstein, 1998; Rao et al., 1999). 실험으로 결정되는  $K_{IIC}$ 의 크기는 초기의 인장균열의 성장과 연속되는 전단파괴 등의 두 가지 모두에 대한 에너지를 고려한 것이다. 이로서 식 (2)를 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\tau = \frac{K_{IIC} \sqrt{\pi a}}{2w} + \sigma_n \tan \phi \quad (3)$$

이러한 식 (3)은 불연속면의 파괴조건이며, 접착력과 마찰력을 설명하는 두개의 항목으로 구성되어 있다. 우

변의 첫 번째 항은 브리지에 의한 균열의 점착강도를 뜻한다.

$$C_0 = \frac{K_{IC}\sqrt{\pi a}}{2\omega} \quad (4)$$

식 (4)는 점착강도의 크기는 Mode II 파괴인성 및 브리지의 크기, 브리지의 양쪽에 있는 두개의 균열들의 크기의 합수로 정의되고 있음을 보여주고 있다. 이러한 크기의 점착강도는 하중이 작용하자마자 즉시 발생되는 초기의 점착강도이다. 그러나 시간이나 재하가 진행되는 시간에 따라 임계이전 균열의 성장이 유도되므로 브리지의 크기는 줄어들게 된다. 이로서 시간에 따라 식 (4)의 점착강도가 줄어드는 결과를 초래한다.

시간과 하중에 의한 브리지 크기의 변화에 대한 수식화는 임계이전 균열의 성장을 이용하여 전개된다. 준정적 하중이나 크립하중이 작용하는 암석의 파괴시험을 통하여 균열의 전파속도는 응력확대계수에 대한 멱함수로 표현되고 있음을 알 수 있다. 1958년 Charles에 의하여 개발된 멱함수법칙 (Charles power law)은 잘 알려진 수식이다. Charles의 멱함수 항목 가운데 브리지 문제는 다음의 식 (5)로 표현된다. (Charles는 1958년 피로파괴에 관한 연구를 발표하였는데, 이때 균열의 전파속도의 수식을 정립할때 물질의 화학방정식으로부터 출발하였다. 그리고 3000개의 수산화나트륨이 함유된 유리시료에 대한 시험을 수행하여 균열의 전파속도를 응력의 멱함수로 정의하였다. 여기서 균열의 전파속도는 양의 크기이며, 따라서 브리지 폭의 증감속도는 균열전파속도와 같지만 부호는 음이 된다. 譯者 註)

$$a'(t) = -A \left( \frac{K_I}{K_{IC}} \right)^n \quad (5)$$

여기에서  $a'(t)$ 는 브리지 폭의 시간의존성 감소를 뜻하여 음의 값으로 표현되며, A와 n은 물질 상수들이다. 비록 이러한 Charles의 수식은 Mode I 문제에 주로 사용되는 것이지만, Mode II에 적용하여 검토한 주요 연구는 1984년 Atkison이나 1993년 Kemeny에 의하여 다루어졌다. 식 (2)를 사용하여 식 (5)는 다음 식 (6)과 같이 표현되는데, 여기에서 t=0인 초기 조건을 적용하면 a는  $a_0$ 가 된다. 따라서 식 (6)은 식 (7)과 같이 표현된다. 여기에서 t는 초 단위의 시간을 뜻한다. 이 결과를 식 (4)에 적용하면 시간의존성 점착강도는 식 (8)과 같다.

$$a'(t) = -A \left[ \frac{2\omega(\tau - \sigma_n \tan \phi)}{K_{IC}\sqrt{\pi a(t)}} \right]^n \quad (6)$$

$$a = \left[ a_0^{1+n/2} - \left(1 + \frac{n}{2}\right) A t \left[ \frac{2\omega(\tau - \sigma_n \tan \phi)}{K_{IC}\sqrt{\pi}} \right]^n \right]^{1/(1+n/2)} \quad (7)$$

$$C_0 = \frac{\sqrt{\pi} \left[ a_0^{1+n/2} - \left(1 + \frac{n}{2}\right) A t \left[ \frac{2\omega(\tau - \sigma_n \tan \phi)}{K_{IC}\sqrt{\pi}} \right]^n \right]^{1/(2+n)}}{2\omega} \cdot K_{IC} \quad (8)$$

이상의 수식전개에서 도출된 결론적인 식 (8)의 유용성은 다음의 예에서 확인된다.

### 3. 평면파괴에 적용

#### 3.1 단순 사면해석

식 (8)을 적용하기 위한 대표적 예제는 그림 2와 같은 단순한 평면파괴 (사면의 미끄러짐)가 될 수 있다. 불연속면 상부에 남아있는 암반 블록의 무게를 W라 하고 이때의 사면각과 표면적을 각각  $\theta$ 와  $A_s$ 라 하자. 이러한 사면의 안정성 문제에서 불연속면의 전단강도와 안전율은 각각 다음의 식 (9) 및 식 (10)과 같다.

$$\tau = C_0 + \sigma_n \tan \phi \quad (9)$$

$$FS = \frac{C_0 + \frac{W}{A_s} \cos \theta \tan \phi}{\frac{W}{A_s} \sin \theta} \quad (10)$$

이들 두 수식에 정적인 점착강도 대신에 식 (8)에서 표현한 시간의존성 점착강도를 적용하면, 시간의존성 사면 안정성을 해석할 수 있다. 이 때 사면각  $\theta$ 가 불연속면의 마찰각  $\phi$ 보다 클 때, 사면의 안정성은 점착강도에 의존하며, 점착강도가 감소하여 사면의 안전율이 1보다 작아지면 곧바로 블록의 미끄러짐이 발생한다.

이러한 간단한 사면해석에서 표 1과 같이 제시된 물성들을 경우를 가정하여 문제를 풀어 보자. 이 경우는 마찰각이 25°로 사면각인 35°보다 작고, 사면의 파괴는 시간이 경과함에 따라 임계조건 이전의 균열성장과 함

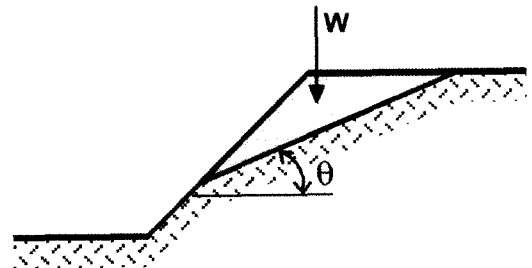


Fig. 2. Rock block on a slope subjected only to gravitational factors

계 점착강도가 감소하면서 발생하는 것으로 가정한다. 이때 임계이전의 균열성장을 모사하는 물성값을 1996년 미국 전력연구소(EPRI)의 Yucca Mountain의 응회암에서 터널을 굴착할 때의 열역학적 연구의 내용에서 인용하였다. 또한 브리지의 크기와 간격은 2000년 Kicker 등이 발표한 논문에서 인용하였으며, 균열의 초기 점착강도는 0.1 MPa이 되도록 설정하였는데 이는 Yucca Mountain의 응회암반의 절리에 대하여 타당성 있는 값이다.

표 1의 값들로부터 해석한 점착강도와 안전율의 시간적 변화는 그림 3과 같다. 그림 3a는 시간에 따른 점착강도의 변화를 보여 주는 것이다. 여기에서 첫 250년 동안 점착강도는 초기 값인 0.1 MPa에서 0.095 MPa로 서서히 감소하고 있다. 그리고 250년이 지나면 이 값의 감소는 매우 급격히 일어난다. 여기에서 안전율이 1에 도달하기 위하여 점착강도는 0.048 MPa까지 감소하여야 한다. 그림 3b는 시간에 따른 안전율의 변화를 보여 주는 것이다. 이러한 특정한 예에서 안전율은 1.36에서 시작하여 264.8년이 지나면 1에 도달한다.

**3.2 사면파괴의 확률론적 해석**

그림 3에서 알 수 있듯이 주어진 요소에서 임계이전의 균열성장 모델은 사면파괴가 언제 일어날지를 정량적으로 예측하였다. 이러한 붕락 시간은 물성이나 사면들의 요소에 따라 변화할 것이다. 이러한 요소들은 정확하게 알려져 있지 않고 또한 장소에 따라 변화하므로, 사면안정성에 대한 확률론적 분석으로 특정한 지역의 문제를 해결할 수 있다.

앞의 예에서 사용하였던 물성들의 각 값을 평균으로 하는 사면을 가정한다. 이러한 사면의 거동에 영향을 미칠 수 있는 요소는 여러 개가 될 수 있지만, 암석 브리지의 초기폭과 마찰각 두개의 변화만을 고려하여 해

석을 수행하였다. 이들 요소의 표준편차를 각각 0.0011 m 및 7°를 갖는 것으로 가정하며 이들 값의 분산은 정상분포를 보인다고 가정한다.

안전율에 대한 막대그래프를 얻기 위하여 몬테카를로 방법을 이용하여 40회 반복 계산이 수행되었다. 초기시간 즉, t=0에서의 초기의 안전율에 대한 막대그래프는 그림 4와 같다. 여기서 초기 안전율의 산술평균은 1.4로 예상되는데, 이는 앞에서 얻은 정적 해석의 결과와 일치하는 크기이다. 그림 4에서 알 수 있듯이 초기 안전율은 0.9에서 2.0까지 분포하고 있는데, 초기에 파괴될 확률은 5% 정도로 이 사면은 안정적이라 할 수 있다(여기서 39개의 암석 브리지에서 2개가 안전율이 1 이하이며 이는 약 5.3%이다. 譯者 註). 시간의존성을 고려하지 않은 해석에서는 이러한 결과를 최종적으로 제시하게 된다.

시간이 경과함에 따라 안전율은 감소하고, 따라서 파괴확률은 점점 커진다. 특정한 시간에서 사면의 안전율

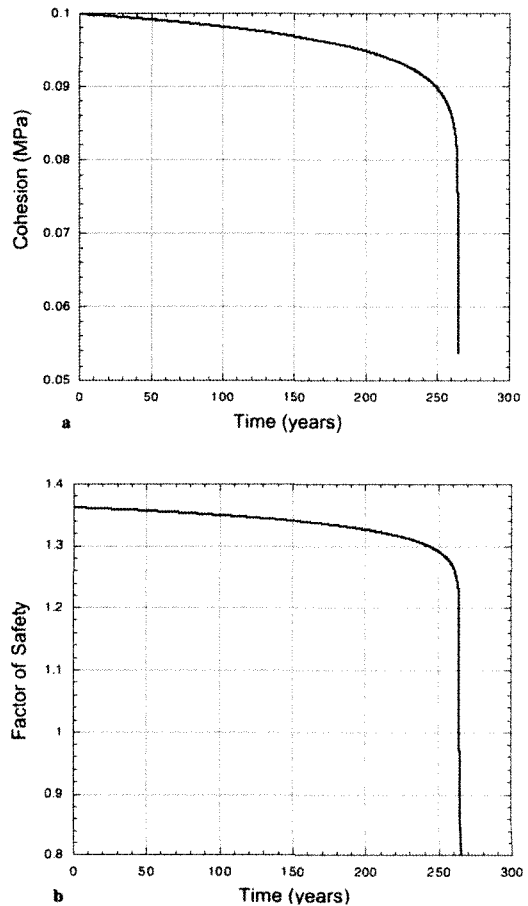


Fig. 3. Cohesion and safety factor as a function of time

Table 1. Parameters for material and slope

Discontinuity slope angle, $\theta$	35°
Discontinuity friction angle, $\phi$	25°
Block weight, $W$	25 MN
Discontinuity surface area	100 m <sup>2</sup>
Subcritical parameter $A$	10 <sup>-5</sup> m/s
Subcritical parameter $n$	25
Shear fracture toughness, $K_{IIc}$	0.5 MPa $\sqrt{m}$
Initial rock bridge half-width, $a_0$	0.0127 m
Rock bridge spacing, $2w$	1 m

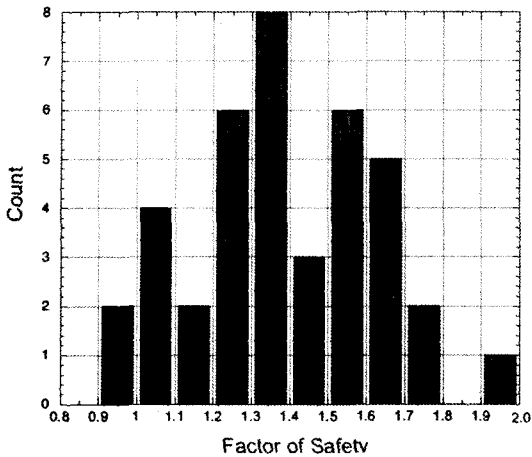


Fig. 4. Histogram of safety factor at  $t = 0$

이 각각 계산되었는데 그 결과는 시간과 파괴확률간의 관계로 도시한 그림 5와 같다. 이 결과 그림은 많은 흥밋거리를 보여주고 있는데, 무엇보다도 파괴확률은 100년이 지나면 42%로 증가하고, 1000년이 지나면 55%로 증가한다. 이것 자체로도 훌륭한 결과이며, 안전한 사면도 시간이 경과함에 불안정하게 됨을 보여준다. 둘째 관점은 시간과 파괴확률은 Log-Log 스케일로 선형적인 관계를 보이는 것이다. 이의 관계를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\text{Probability of failure} = B t^a \quad (11)$$

여기서 B와 a는 상수이다. 이의 결과인 그림 5에서 t가 년 단위이면  $B = 28.5$ 이며,  $a = 0.104$ 로 계산되었다. 이러한 관계식이 다른 경우에서도 적용되는지의 여부를 알기 위해서는 앞으로 많은 연구가 필요할 것이다.

#### 4. 검 토

이 연구보고서에서는 취성의 균열암석에 대한 시간의존성의 중요성을 설명하기 위하여 간단한 모델이 개발되었다. 모델에 대한 해석결과는 비교적 단기 수명의 구조물의 설계라 하더라도 시간의존성의 중요성을 잘 보여 주었다. 이는 도로나 철도터널, 암반사면, 그리고 토목이나 광산의 암반굴착에서 아주 중요한 암시를 하고 있다. 이러한 구조물의 대부분은 적어도 100년 이상은 안전하게 유지되어야 한다.

구조물의 시간의존성 특성은 현재 무시되고 있거나 또는 경험적 방법으로 분석되고 있다. 비록 복잡한 수치해석 모델이 사용되고 있지만, 시간의존성 특성은 불

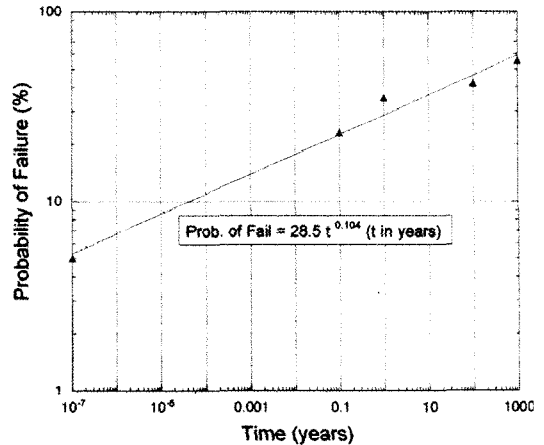


Fig. 5. Probability of failure vs. time using the parameters given in Table 2

분명하고 결정하기 어려운 것이다. 취성 암반의 시간의존성 특성이나 균열의 시간의존성 거동에 대한 보다 역학적 기초를 개발하는 것이 바람직하다. 그리고 이렇게 개발된 모델은 FEM 또는 DEM에서 쉽게 적용될 수 있는 것이다. 본 연구에서 개발된 모델은, 비록 간단한 것이지만 사면문제에 대한 시간에 따른 파괴확률의 변화를 예측할 수 있게 하였다. 특히, 정적 상태에서 파괴확률이 5%로 안정해 보이는 사면모델일지라도 10년이 지나면 30%, 그리고 100년이 지나면 40% 이상의 파괴확률을 갖는 것으로 분석되었다. 토목이나 광업 분야의 중요한 현장의 실례를 포함하는 발전된 연구가 계속 수행되어야 할 것이다. 그리고 이러한 문제에는 본 연구에서 유추한 관계식을 증명할 수 있는 시간의존성 실험이 수행되어야 할 것이다.

본 연구에서 사용된 기법을 현장에 적용하기 위해서는 관련되는 물성들의 결정이 요구된다. A와 n과 같은 임계이전의 균열성장 요소는, 비록 이것이 현재 표준시험법이 아니라 하더라도 실험실 시험으로부터 결정될 수 있다(Atkinson, 1984). 임계이전의 균열성장 요소를 결정하는 또 다른 접근법으로는 여러 하중속도로 수행되는 전단시험이 있다. 왜냐하면 하중속도의 영향과 시간의존성 특성은 서로 같은 요소들에 의하여 통제되기 때문이다(Kemeny, 1991). 결정되어야 할 다른 요소들은 절리면에 존재하는 암석 브리지의 분포이다. 이런 것들은 현재의 현장조사기법으로나 브리지에 초점을 둔 새로운 기법을 개발하여 결정할 수 있다. 암석 브리지에 대한 정보는 시료를 현장에서 얻을 수만 있다면 실험실 전단시험을 수행하고 식 (4)를 이용하면 결정할 수 있다.

본 연구에서 언급한 모델은 매우 단순하며 이상적인 것이다. 여기에는 불연속면의 거칠기를 고려하지 않았을 뿐만 아니라 암석 브리지와 양쪽에 있는 균열이 동일면에 있다고 가정하였다. 실제에서는 이들이 종종 계단상으로 존재하여 동일면에 있지 않다. 따라서 암석 브리지는 전단응력의 방향과 일치하지 않는 방향으로 인장 또는 전단으로 파괴될 수 있을 것이다. 불연속면과 브리지가 동일면에 존재한다고 가정하면 엄밀해(closed-form)로 해석이 가능하다는 장점을 갖는다. 거칠기를 갖고 동일한 평면상에 놓이지 않는 균열과 암석 브리지를 갖는 현실성있는 모델에서는 수치해석적 접근이 필수적이다. 이러한 연구는 자연스럽게 다음의 과제가 된다. 본 연구의 모델이 단순화되었기 때문에 이 모델이 현장의 공학적 설계에 그대로 사용될 수 있을지 여부는 확실하지 않지만, 가까운 장래에 지하 또는 지상의 여러 사례연구에 기초로 사용될 것이다. 그리고 이러한 실용적 연구의 결과는 공학적 설계의 모델로서 유용하게 활용될 것으로 기대한다.

## 5. 결 론

암석 불연속면의 점착강도가 시간에 의존하여 감소하는 모델이 본 연구에서 개발되었다. 균열면을 따라 형성된 신선한 구간인 암석 브리지의 시간의존성 파괴로 인한 점착강도 감소모델이 설정되었다. 파괴역학적 모델에는 임계조건 이전에 발생하는 균열성장을 설명하는 모델이 사용되었는데, 이는 시간과 점착강도의 관계가 다른 수식으로부터 독립된 수식으로 표현되는 것을 가능하게 하였다.

예로서 평면파괴가 예상되는 암석 블록에 대한 분석이 이루어졌다. 절리면의 점착강도는 연속적으로 감소하는 것으로 밝혀졌는데 초기에는 아주 점진적으로 감소하다가 어느 시점 이후에는 급격하게 감소하여 사면의 불안정과 붕괴로 이어진다. 두번째 예에서는 몇몇 물질 상수들이 분산을 가진 불연속면을 가정하였다. 여기에서는 확률론적으로 사면의 안정성이 분석되었는데 사면의 파괴확률을 시간의 함수로 예측할 수 있다. 시간이 경과함에 따라 사면의 파괴확률은 점점 증가하여 초기에 5% 수준에서 100년 후에는 40% 이상으로 증가한다. 이러한 예제들은 지하구조물이 비록 비교적 단기 목적이라 하더라도 불연속면을 갖는 암반의 시간의존성 거동을 예측할 수 있음이 얼마나 중요한 의미를 갖는지를 보여준다. 앞으로 실제 현장감 있는 사례연구가 수행된다면 이러한 모델의 유용성이 평가될 수 있을 것이다.

## 참고문헌

1. 박남수, 전석원, 2001, 단축압축 하에서 대리석의 균열전파 및 결합, 터널과 지하공간 11.3, 217-224.
2. 박혁진, 2002, 점추정법을 이용한 평면파괴의 파괴확률 산정, 터널과 지하공간 12.3, 189-197.
3. 윤정석, 전석원, 2003, 암석의 전단 파괴인성 측정에 관한 실험적 연구, 터널과 지하공간 13.1, 64-75.
4. 최성용, 2000, Rock bridges를 고려한 수치 해석적 수압과쇄 균열 거동 연구, 터널과 지하공간 10.3, 447-456.
5. Atkinson, B. K., 1984, Subcritical crack growth in geological materials. *J. Geophys. Res.* 89 (B6), 4077- 4114.
6. Atkinson, B. K., 1987, Fracture coalescence in rock-type materials under uniaxial and biaxial compression. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 35(7).
7. Charles, R. J., 1958, Static fatigue of glass. *J. Appl. Phys.* 29, 1549-1560.
8. EPRI, 1996, Yucca Mountain Total system Performance Assessment, Phase 3. Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, Document EPRI TR-107191.
9. Jaeger, J. C., Cook, N. G. W., 1979, Fundamentals of rock mechanics, 3rd edn. Chapman and Hall, London.
10. Hedley, D. G. F., 1992, Rockburst handbook for Ontario hardrock mines. Canmet.
11. Kaiser, P. K., Tannant, D. D., McCreath, D. R. and Jesenak, P., 1992, Rockburst damage assessment procedure. In: Kaiser, P. K., McCreath, D. R. (eds.), Rock support in mining and underground construction. Balkema, Rotterdam.
12. Kemeny, J. M., 1991, A model for non-linear rock deformation under compression due to sub-critical crack growth. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 28(6), 459-467.
13. Kemeny, J. M., 1993, The micromechanics of deformation and failure in rocks. In: Proc., Int. Symposium on Assessment and Prevention of Failure Phenomena in Rock Engineering, Istanbul, Turkey. A.A. Balkema, Rotterdam, 23-33.
14. Kemeny, J. M., and Cook, N. G. W., 1991, Time-dependent borehole stability under mechanical and thermal stresses: application to underground nuclear waste storage. In: Proc., 32nd U.S. Rock Mechanics Symposium, University of Oklahoma, 977-986.
15. Kicker, D. C., Lin, M., Kemeny, J. M., and Stone, C. A., 2000, Probabilistic key block analysis at Yucca Mountain. In: Proc., 4th North American Rock Mechanics Symposium, Seattle. A.A. Balkema, 1249-1256.
16. Mojtabai, N. and Beattie, S. G., 1996, Empirical approach to prediction of damage in bench blasting. *Trans. Inst. Min. Metall.* 105, A75-A80.
17. Rao, Q., Li, C., Stillborg, B. and Sun, Z., 1999, Size effect of the mode II fracture toughness of rock. In: Amadei, B., Kranz, R. L., Scott, G. A., Smeallie, P. H. (eds.), Rock mechanics and industry. Proc., 37th U.S. Rock Mechanics Symposium, Vail, Colorado. A.A. Balkema, Rotterdam.
18. Rooke, D. and Cartwright, D., 1976, Compendium of stress intensity factors. H.M.S.O., London, 330 pp.
19. Sano, O., Terada, M. and Ehara, S., 1982, A study of time-dependent microfracturing and strength of Oshima granite. *Tectonophysics* 84, 343-362.



### 박철환

1979년 서울대학교 공과대학 자원공학과  
공학사

1981년 서울대학교 대학원 자원공학과  
공학석사

1987년 서울대학교 대학원 자원공학과  
공학박사

Tel: 042-868-3244

E-mail: cwpark@kigam.re.kr

현재 한국지질자원연구원  
탐사개발연구부 책임연구원



### 전석원

1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과  
공학사

1989년 서울대학교 대학원 자원공학과  
공학석사

1996년 미국 아리조나 주립대학  
공학박사

Tel: 02-880-8807

E-mail: sjeon@snu.ac.kr

현재 서울대학교 지구환경시스템공학부  
교수