

## 암석파괴역학에 의한 3차원 절리면의 진행성 파괴 모델

김치환<sup>1)\*</sup>, John Kemeny<sup>2)</sup>

### A Three-Dimensional Progressive Failure Model for Joints Considering Fracture Mechanics and Subcritical Crack Growth in Rock

Kim Cheehwan, John Kemeny

**Abstract** A three dimensional rock joint element was developed considering fracture mechanics and subcritical crack growth to simulate non-linear behavior and the progressive failure of rock joints. Using this 3-D joint element, joint shear tests of rock discontinuities were simulated by a numerical method. The asperities on the joint surface began to fail at stress levels lower than the rock fracture toughness and continued progressively due to subcritical crack growth. As a result of progressive failing in each and every asperity, the joint showed non-linear stress-time behavior including stress hardening/softening and the reaching of a residual stress.

**Key words** rock fracture mechanics, progressive failure, subcritical crack growth, time-dependent cohesion

**초 록** 암석파괴역학과 파괴인성(rock fracture toughness) 이하의 응력확대계수(stress intensity factor)에서 균열이 성장하는 현상을 이용하여 암석 절리면의 비선형 강도특성과, 시간의 경과에 따라 파괴가 진행되는 특성을 고려한 수치해석용 3차원 절리면 요소를 개발하였다. 이 절리면 요소를 사용하여 암석 절리면 전단시험을 수치해석으로 모사한 결과, 전단응력이 증가하고 시간이 경과함에 따라 절리면 사이에 연결된 절리면 내 접점(asperity in joint)에서 암석의 파괴인성보다 응력확대계수가 작음에도 불구하고 균열이 발생하였고 시간이 경과하면서 균열이 성장, 절리면 내 접점이 파괴되었다. 이와 같이 각각의 절리면 내 접점의 파괴에 따라 절리면의 강도는 감소하고, 절리면의 전단응력은 응력경화와 응력연화 후 잔류응력에 도달하는 비선형거동을 보이면서 시간의 경과에 따라 점진적으로 파괴되었다.

**핵심어** 암석파괴역학, 진행성파괴, 파괴인성 이하에서의 균열성장, 시간의존성 점착력

## 1. 서 론

암반 사면이나 터널 등 암반 구조물을 역학적으로 안정되도록 굴착하더라도 시간이 경과하면 여러 가지 원인에 의해 암반의 강도가 약화되고, 이로 인하여 때로는 암반 구조물이 파괴되기도 한다. 또 오랜 시간 동안 안전한 상태에 있던 자연사면에서 낙석이 발생하거나 사면이 파괴되는 예도 종종 있다. 이와 같은 현상에서 보듯이 암반의 강도는 시간이 지남에 따라 낮아지므로, 지하 핵 폐기물 저장 공동, 지하유류저장 공동, 지하 천

연가스저장공동, 지하발전소, 대규모 사면 등 암반 구조물을 장기간 안정되게 유지하기 위해서는 시간경과에 따른 암반의 특성 변화를 감안하여 설계와 시공을 하는 것이 중요하다.

암반은 무결암과 이를 분리한 절리로 구성되어 있다. 무결암의 강도는 절리의 강도에 비하여 상당히 크므로 응력이 작용할 때 나타나는 암반의 강도특성은 주로 절리면의 강도특성에 따라 결정된다. 따라서 암반 구조물의 역학적 안정성은 암반 내 절리의 강도특성에 따라 좌우된다. 그러므로 암반 구조물의 시간경과에 따른 역학적 안정성을 파악하기 위해서는 절리면의 시간 경과에 따른 강도특성을 분석하여야 한다.

암반 내 절리는 한 쌍의 마주보는 절리면들로 이루어져 있다. 마주 보는 두 절리면은 불규칙한 요철면이므로, 두 절리면 사이는 완전히 분리된 상태가 아니라, 두 절리면이 서로 붙어있는 부분과 공극으로 이루어져 있

<sup>1)</sup> 우석대학교 토목공학과

<sup>2)</sup> 미국 아리조나 주립대학 자원지질공학과 교수

\* 교신저자 : kimcheen@korea.com

접수일 : 2009년 1월 20일

심사 완료일 : 2009년 2월 11일

게재 확정일 : 2009년 2월 13일

다. 두 절리면 사이가 연결된 위치와 수효는 절리면의 크기와 절리면의 요철 정도에 따라 달라진다. 이와 같이 절리면 사이에서 서로 연결된 부분을 절리면 간 접점(asperity of joint)이라고 한다. 절리면이 응력을 받을 때 저항하는 정도는 절리면 간 접점의 강도에 따라 결정된다. 절리면이 작용하는 응력에 대하여 저항하는 강도를 지니고 있는 경우 절리면 간 접점은 소규모의 무결암으로 가정할 수 있고, 절리를 형성하는 한 쌍의 절리면은 무결암의 여러 접점을 통해서 서로 붙어있는 것으로 모델링 할 수 있다. 따라서 절리면이 응력을 받아 파괴되었다면, 이는 절리면 간 접점의 무결암이 점진적으로 파괴되면서 절리면의 강도가 상실되고 이 과정이 지속되어 절리면도 파괴된 것이다. 즉 절리면에 전단응력을 가하면 절리면 내 접점에서 응력이 집중되고, 응력집중에 의해 미세균열이 발생하기 시작하고, 시간이 지나면서 균열이 성장하고 서로 연결되어 절리면이 전단파괴되면서 매끄러운 면으로 바뀌게 된다(Sjoberg, 1996).

또한 절리면 파괴강도 이하의 응력상태에서도 암반 절리면이 파괴될 수 있다. 예를 들면 시공 중에는 역학적으로 안정되었던 암반 사면에서 굴착이 끝나고 수 개월 혹은 수 년이 지난 후에 절리면의 파괴에 따라 평면 또는 썩기모양으로 암괴가 미끄러져 떨어지는 사고로 피해가 발생하기도 한다. 즉 파괴응력보다 작은 응력을 받고 있던 절리면에서 시간의 경과에 따라 암반 절리면의 강도가 약화되어 파괴가 발생한 것이다. 암반 절리면의 강도가 감소되는 것은 절리면 간에 있는 여러 접점에서 강도의 약화가 발생한 결과이다. 이를 암석파괴역학의 관점에서 보면, 절리면 간의 무결암 접점에서 시간의 경과에 따라 미소균열이 발생하고 성장하여 절리면 간 접점을 파괴시키는 현상으로 이해할 수 있다. 이 때 절리면 간 접점의 크기와 강도에 따라 절리면 간 접점들이 차례차례 파괴되므로 절리면의 강도가 시간의 경과에 따라 점진적으로 약화되는 것이다.

암석파괴역학에서 균열이 성장하는 조건은 균열 선단에서의 응력확대계수(stress intensity factor)가 암석파괴인성(rock fracture toughness) 보다 큰 경우이다. 그러나 비록 응력확대계수가 파괴인성보다 작지만, 시간의 경과와 함께 암석 내에서 균열이 발생하여 성장할 수 있고 이를 파괴인성 이하의 응력확대계수에서 발생하는 균열성장(subcritical crack growth)이라고 할 수 있다. 암석파괴인성 이하에서의 균열성장은 균열주변의 여러 환경화학적 요인에 의해 주로 발생한다. 그 중 몇 가지 요인으로 암석 절리 내 간극수의 화학적 효과로 나타나는 응력침식(stress corrosion), 용해(dissolution),

확산(diffusion), 이온교환(ion exchange), 미세소성(microplasticity)들이 있고, 그 중에서 응력침식의 영향이 가장 크다(Atkinson, 1984). 암석 균열에서의 응력침식은 응력에 의해 변형상태에 있는 균열 끝에서 암석조성 광물 사이의 결합력이 간극수의 화학적 작용에 의해 약화되는 현상이다. 이는 암석이 응력을 받아 변형되면 암석조성광물의 결합으로 서로 겹쳐져 있던 광물입자의 원자궤도들이 느슨해진 결과 간극수가 광물입자 사이로 침입하기 쉬워진다. 침입한 간극수는 광물입자와 화학적으로 반응하여 결합력을 약화시키기 때문에 암석의 파괴응력보다 낮은 응력에서도 암석이 파괴될 수 있다(Michalske, et al., 1982). 암석 절리면이 응력을 받게 되면 절리면 내 접점에 응력이 집중되고 접점의 면적이 작을수록 응력집중이 더 커지므로 작은 접점부터 파괴되기 시작할 것이고, 파괴된 접점 수가 많을수록 남아있는 접점에 응력이 집중되어 절리면의 파괴는 가속될 것이다. 많은 실험연구에서 시간이 경과 함에 따른 암석의 파괴는 암석 내에서 성장하는 균열이 주 원인으로 보고하고 있다(Atkinson, 1984, 1987; Ojala, 2003). 이와 같이 암석이 파괴인성 이하의 응력에서 시간의 경과에 따라 균열이 성장하는 현상을 파괴역학의 응력확대계수를 이용하여 여러 가지 균열성장 속도식으로 표시할 수 있는데, 암석과 같은 재질에서는 응력확대계수의 멱함수로 나타내는 것이 가장 적절한 것으로 보고되어 있다. 또 응력확대계수의 멱함수로 표시한 균열 성장속도 중 Charles(1958)가 제안한 식이 가장 일반적이다(Atkinson, 1984).

이번 연구에서는 절리면에서의 시간 의존적 강도특성을 분석하기 위하여 절리면 간 접점이 시간이 지남에 따라 파괴되는 것을 3차원 절리요소를 이용하여 수치해석적으로 모사하였다. 절리면의 강도특성은 절리의 거동을 나타내는 구성방정식에 절리면의 마찰각을 증가 시킴으로 강도효과가 포함되도록 수치모델링하는 것이 일반적이다(Barton, 1973; Barton et al., 1990). 이번 연구에서는 이와 유사한 개념으로 절리면 내 접점의 강도 효과를 절리의 거동을 표시하는 방정식에서 점착력의 변화로 표현하였다(Sjoberg, 1996; Eberhardt et al., 2002; Kemeny, 2003). 다시 말하면 절리면의 크기에 비하여 절리면 내 접점의 크기가 작은 것으로 가정하여 절리면과 접점을 하나의 요소로 간주하되 접점에는 점착력이 있는 것으로 모델링하였다. 이 때 점착력은 절리면 내 접점의 형상과 특성을 고려하여 결정하였다. 또한 절리면 내 접점의 크기가 시간의 변화에 따라 서서히 파괴되며 감소하는 현상을 반영하여 절리면 내 접점의 점착력도 시간의 변화에 따라 변할 수 있도록 하였다. 이러

한 시간의존성을 지닌 점착력을 수치해석을 위한 3차원 절리요소에 반영하였고 이를 이용하여 절리면 전단시험을 모사한 수치해석으로 그 적정성을 확인하였다.

**2. 파괴역학과 시간 의존적 3차원 절리요소**

이번 연구는 이미 수행한 Kemeny (2003, 2005) 연구를 3차원으로 확장한 것이다. Kemeny (2005)는 절리면 내 접점에서 발생하는 시간의존적인 파괴를 2차원에서 암석파괴역학적으로 모델링하였다. 이를 기초로 확장한 3차원 절리요소는 Fig. 1처럼 절리면을 폭이 2w인 정사각형의 요소로 분할하였을 때, 이 요소면 상에 지름 2a인 원형의 접점이 붙어 있으며 수직응력과 전단응력이 작용하는 것으로 가정하였다. Fig. 1(a)는 절리면 전체에 여러 접점이 있는 것을 보이는 모식도이고, Fig. 1(b)는 절리면과 절리면 내 접점으로 구성된 3차원 절리요소를 보인 것이다.

암석 절리면 내 접점과 균열 모형이 Fig. 1(b)와 같을 때, 전단응력에 의한 모드 II 파괴의 응력확대계수  $K_{II}$ 는 다음 식 (1)과 같다(Kemeny et al., 1992).

$$K_{II} = \frac{2(\tau - \sigma_n \tan \phi)w^2}{\sqrt{\pi a^{3/2}}} \tag{1}$$

여기서  $\sigma_n$ 은 수직응력,  $\tau$ 는 전단응력이고  $\phi$ 는 절리면에서의 마찰각이다. 식 (1)을 보면 응력확대계수  $K_{II}$ 는 절리면 사이의 전단응력에 비례하여 증가하나 절리면 내 접점의 반지름에 의해서 감소하는 것을 알 수 있다. 응력확대계수  $K_{II}$ 가 증가하여 전단파괴인성(critical fracture toughness in shear)  $K_{IIC}$ 에 도달하면 균열이 성장하며

절리면 내 접점의 반지름은 감소하게 된다. 이때 전단응력이 절리면과 평행한 방향에서 최대이므로 균열은 절리면을 따라서 발생하는 것으로 가정한다. 위의 식 (1)으로부터 전단응력  $\tau$ 를 다음 식 (2)와 같이 표시할 수 있다.

$$\tau = \frac{K_{IIC}\sqrt{\pi a^{3/2}}}{2w^2} + \sigma_n \tan \phi \tag{2}$$

식 (2)는 절리면의 파괴기준이 되고 점착력의 항과 마찰력의 항으로 구성되어 있다. 식 (2)에서 첫 번째 항인 점착력 항은 절리면 내 접점의 점착력 C로 다음 식 (3)과 같다.

$$C = \frac{K_{IIC}\sqrt{\pi a^{3/2}}}{2w^2} \tag{3}$$

식 (3)을 보면 절리면 사이의 점착력은 전단응력에 대한 암석의 모드 II 파괴인성, 절리면 내 접점의 크기, 절리면 내 접점 주변의 균열 크기에 의해서 결정된다. 시간의 경과와 응력의 증가에 따라 파괴응력 이하에서 균열이 발생하면서 절리면 내 접점의 크기는 감소하고, 절리면 내 접점의 크기가 감소하므로 점착력도 식 (3)에서 보듯이 감소하게 된다.

시간이 경과하고 응력이 증가함에 따라 절리면 내 접점의 크기가 감소하는 현상을 파괴인성 이하에서 균열의 성장을 표시하는 식을 이용하여 나타낼 수 있다. 균열이 있는 암석시편을 가지고 유사정적(quasi static) 하중조건 또는 크리프(creep)조건에서 시험한 결과, 균열의 성장은 응력확대계수로 표시한 멱함수에 따르는 것

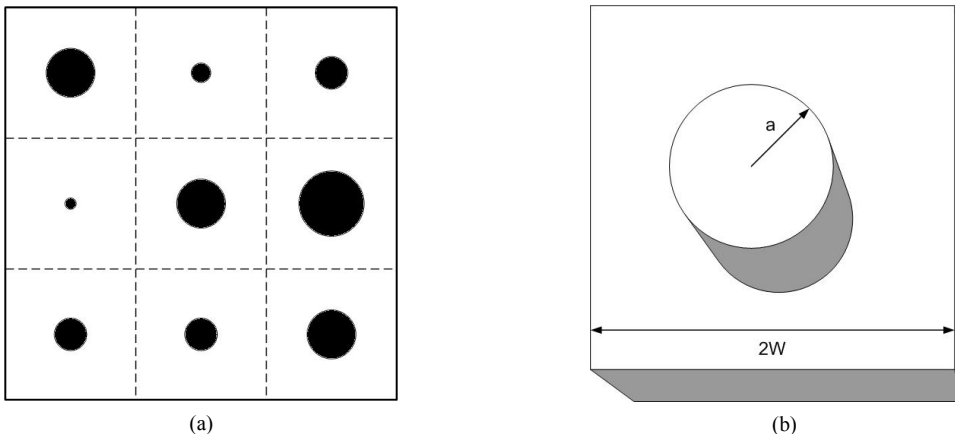


Fig. 1. (a) Concept of asperities between joint surfaces (b) Model of an asperity and fracture in joint

으로 보고되어 있다. 암석 균열 성장을 표시한 멱함수 중 가장 일반적인 식은 Charles (1958)가 제안한 것이고 인장응력이 작용할 때의 응력확대계수를 이용하여 표시하면 다음 식 (4)와 같다.

$$a(t)' = \frac{da}{dt} = -A \left( \frac{K_I}{K_{IC}} \right)^n \quad (4)$$

식 (4)에서  $a(t)$ 는 절리면 내 접점의 반지름이 시간이 지남에 따라 감소하는 것을 나타내고  $A$ 와  $n$ 은 암석특성에 따른 상수이다. 이 Charles식은 암석파괴 모드 중 모드 I과 모드 II에 공히 적용할 수 있다(Kemeny, 2003). 그러므로 식 (1)을 이용하여 식 (4)를 다음 전단응력 조건에서 식 (5)와 같이 표시할 수 있다.

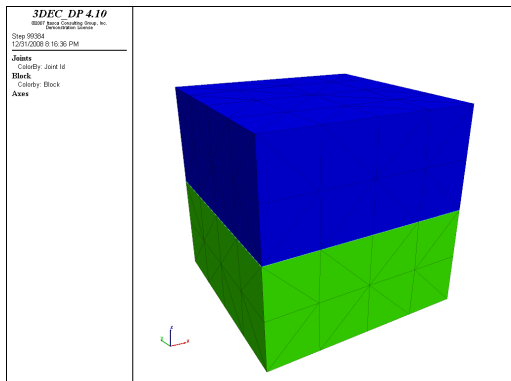
$$\frac{da}{dt} = -A \left( \frac{2w^2 (\tau - \sigma_n \tan \phi)}{K_{IIC} \sqrt{\pi a}^{3/2}} \right)^n \quad (5)$$

만약 응력이 일정하고 단지 절리면 내 접점의 반지름이 시간이 지남에 따라 변한다면 식 (5)를 적분해서 시간의 경과와 절리면 내 접점의 반지름 사이의 관계를 완전한 해로 표시할 수 있다. 그러나 대부분의 경우 시간에 변화와 함께 절리면에 작용하는 응력도 변한다. 또 암반 내에 분포한 절리에서 응력은 절리마다 다르고 동일한 절리면이라도 절리면 내 위치에 따라 응력의 크기가 다르다. 따라서 식 (5)를 절리가 다수 있을 때 각각의 절리면에 대해서 또 동일한 절리면이라도 절리면 내 서로 다른 지점에서 사용할 수 있도록 하려면 적절하게 수치해석방법을 활용하여야 한다. 이를 위해서 이번 연구에서는 개별요소법인 3-DEC의 수치해석 기능

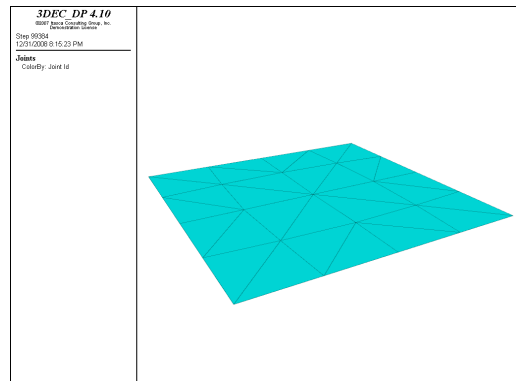
을 이용하였다. 3-DEC에서는 수치해석법 중 명시적 유한차분법을 이용하여 개별요소법의 지배방정식을 풀고 있다(Itasca, 2007). 이와 같은 명시적 유한차분법은 식 (5)를 풀기에도 적절하다. 특히 명시적 유한차분법으로 지배방정식을 푸는 과정에서 시간증분을 적절하게 선택하여야 하는데 3-DEC에서 시간증분의 선택과 해의 안정성을 관리한다. 각각의 시간단계마다 각각의 절리면 요소에서의 점착력을 계산하는 과정은 다음과 같고 이 과정은 3-DEC에 내장된 언어인 FISH를 사용하여 구현하였다. 계산과정은 먼저 각각의 절리면 요소에 작용하는 수직응력과 전단응력을 계산하고, 이에 따라 각 절리면 내 접점에서 성장한 균열의 길이를 계산하여 무결암으로 남아 있는 절리면 내 접점의 반지름을 구한 후, 절리면 내 접점의 반지름에 따라 점착력을 다시 계산하여 파괴기준을 변경한다. 다시 절리면에서의 수직응력과 전단응력을 계산하여 위의 과정을 절리면 내 접점이 모두 파괴되고 절리면이 파괴될 때까지 반복한다. 응력의 수준에 따라 절리면 내 접점의 반지름이 감소하면 점착력이 감소됨과 동시에 인장강도 또한 같은 비율로 감소되도록 하였다. 이는 암석파괴역학에서 인장응력에 의한 모드 I 응력확대계수는 모드 II의 응력확대계수식에서 전단응력인  $\tau - \sigma_n \tan \phi$  항 대신에 인장응력으로 바꾸면 되기 때문이다(Rooke, 1976). 따라서 절리면 내 접점의 인장강도는 초기에 입력한 점착력을 기준으로, 계산 중 감소한 점착력의 비율과 같은 비율로 감소되도록 하였다.

### 3. 파괴역학에 의한 절리면 전단시험의 수치모델

이번 연구에 이용한 암석 절리면 모델은 아래의 Fig. 2와 같다. Fig. 2(a)는 3차원 절리면으로 상하 두 개의



(a)



(b)

Fig. 2. (a) Model of a 3-D rock joint and blocks (b) Joint between rock blocks

**Table 1.** Material parameters used in simulation

Intact rock shear modulus (MPa)	3000
Intact rock bulk modulus (MPa)	4000
Intact rock density (kg/m <sup>3</sup> )	2600
Discontinuity friction angle (°)	30
Discontinuity cohesion (MPa)	0.1
Discontinuity tensile strength (MPa)	0.05
Discontinuity normal stiffness (MN/m)	40000
Discontinuity shear stiffness (MN/m)	40000
Subcritical parameter A (m/s)	0.02
Subcritical parameter n	25
Fracture toughness in mode II, K <sub>IIc</sub> (MPam)	1.5
Slope of stress intensity factor	0.5

암괴가 한 쌍으로 이루어져 있다. 절리면의 가로와 세로 길이는 각각 0.2 m이고 각 암괴의 높이는 0.1 m이다. Fig. 2(b)는 상하부 암괴 사이에 있는 절리면과 절점을 보인 것이다. 두 개의 상하 암괴 사이에 있는 절리면 Fig. 2(b)는 한 번의 길이 약 0.05 m로 분할한 사각형을 두 개의 삼각형 모양으로 다시 나눈 것이다. 이와 같이 절리면이 작은 요소로 분할되면서 50개의 절점이 생성되었고 이 절점을 절리면 내 접점으로 가정하였다. 따라서 절리면에 발생하는 응력변화, 점착력과 인장강도의 변화는 절리면 내 접점 즉 절점에서 나타나게 된다.

절리면 내 접점의 초기크기는 입력한 점착력을 평균으로 간주한 통계적 균등분포에 따라 점착력을 난수로 발생시켰고, 점착력에 따라 절리면 내 접점의 반지름을 계산하였다.

경계조건으로 상하부 암괴 중 하부암괴는 어느 방향으로든 움직이지 않도록 고정하고 상부 암괴는 수평방향 중 x 방향으로만 움직일 수 있도록 허용하였다. 하중 조건은 상부의 암괴에 연직하향의 방향으로 10 MPa의 수직응력을 가하였다. 또 절리면에 전단응력을 가하기 위하여 상부암괴를 0.001 m/sec의 속도로, +x 방향으로 이동하도록 하였다. 또 Table 1은 파괴역학과 시간의존성을 고려한 절리면 직접 전단시험의 수치모델에 이용한 입력값이다.

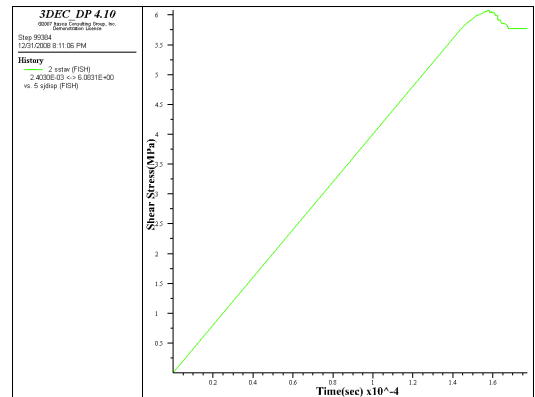
#### 4. 해석결과의 검토

파괴인성 이하에서 발생하는 절리면의 파괴현상을 암석파괴역학의 모드 I과 모드 II를 고려한 수치해석방법으로 절리면 전단시험 모델에 대하여 계산한 결과, 절리면 전단응력과 시간의 관계와, 시간의 증가에 따라 절리면 내 접점이 하나씩 점차적으로 파괴되는 현상과,

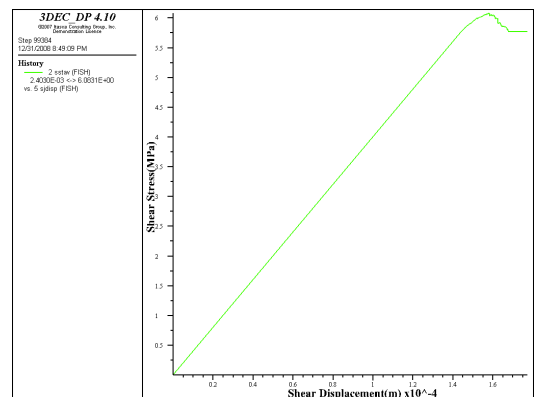
시간의 증가에 따라 파괴되는 절리면 내 접점의 수효 및 시간의 경과에 따른 절리면의 점착력 변화를 구할 수 있었다.

Fig. 3은 시간의 경과에 따라 변하는 절리면에서의 전단응력을 보인 것이다. Fig. 3에서 절리면의 전단강도는 약 6 MPa이고 시간의 증가에 따라 전단응력이 선형으로 증가하다가 약 5.77 MPa부터 비선형으로 변하고 있다. 최대 응력인 전단강도에 도달하기 전에는 응력경화 현상을 보이거나 최대응력을 지나 시간이 더 경과하면서 응력연화현상을 보인 후 잔류강도로 감소하는 모습을 나타내고 있다. 만약 절리면에서 시간의 경과에 따른 강도, 즉 점착력의 감소가 없었다면 위의 전단응력곡선은 최대응력까지 선형으로 증가한 후 즉시 잔류강도로 변하는 형상이 되므로 응력경화와 응력연화 현상이 나타나지 않을 것이다. Fig. 4는 절리면 전단응력과 전단 변위의 관계로 보인 것이다.

이와 같이 Fig. 3처럼 전단응력과 시간의 관계가 비선



**Fig. 3.** Shear stress-time relation in the joint



**Fig. 4.** Shear stress-shear displacement relation in the joint

행관계로 나타나는 원인을 Fig. 5에서 알 수 있다. Fig. 5는 시간의 경과에 따라 절리면에 있는 50개 접점에서 발생한 전단응력과 시간경과의 관계 중 10개 접점에서의 결과를 보인 것이다. 절리면 내 접점 각각은 취성과 파괴처럼 선형으로 응력이 증가하다 파괴강도에 이르면 잔류강도로 즉시 감소하나 접점에서의 강도가 서로 다르므로 절리면 내 접점은 하나씩 점진적으로 파괴되는 것으로 보인다. 시간이 경과하고 전단응력이 증가함에 따라 여러 절리면 내 접점 중 가장 약한 것이 먼저 파괴되기 시작하고 있다. 각각의 절리면 내 접점이 파괴되는 시점이 서로 다르고, 각각의 절리면 내 접점 강도 또한 5.77 MPa에서 6.6 MPa의 범위에서 다르게 분포되어 있다. 그러므로 절리면의 전단강도는 각각의 절리면 내 접점의 응력을 함께 고려하면, Fig. 3과 같은 비선형 전단강도-시간의 관계로 나타나게 된다(Kemeny, 1991). 따라서 절리면의 파괴는 한 순간에 발생하는 것이 아니라 시간의 흐름과 함께 순차적으로 발생하는 것을 알 수 있다. Fig. 5 중 선형이 아닌 응력곡선은 Fig. 3과 동일한 곡선이고 절리면 내 50개 접점의 응력변화를 모두 반영할 때 나타난 것이다.

이와 같이 각각의 절리면 내 접점이 파괴되는 것은 응력이 증가하고 시간이 경과함에 따라 절리면 내 접점의 크기가 감소하고, 절리면 내 접점의 크기가 감소하면 동시에 점착력도 감소하기 때문이다. Fig. 6은 응력의 증가와 시간의 경과에 따라 절리면 내 접점의 반지름이 감소하는 것을 보인 것이다. 절리면 내 접점의 반지름은 초기에는 균열의 성장속도가 느리기 때문에 감소하지 않는 것처럼 보이나, 시간이 지나면서 응력도 점차 증가함에 따라 응력확대계수가 파괴인성에 근접하면 균열의 성장속도가 급속히 빨라지므로 절리면 내 접점의 반지름도 급속히 감소하였다.

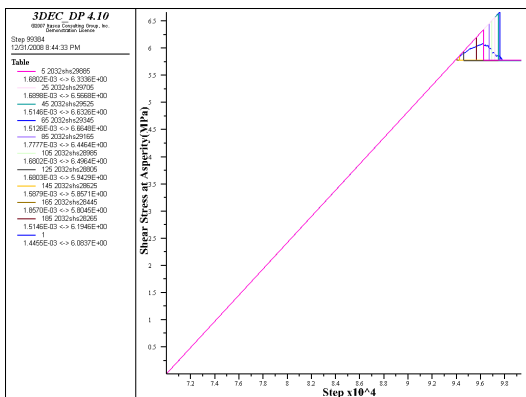


Fig. 5. Shear stress-time step relation in asperities

Fig. 7은 각각의 절리면 내 접점에서 점착력이 시간의 증가와 함께 감소하는 것을 보인 것이다. 경과 시간이 작을 때에는 절리면 내 접점의 점착력이 감소되는 폭이 작으나 일정시간이 지나면 점착력이 급격히 감소하고 있다. 즉 절리면 내 접점의 강도는 일정한 속도로 감소하는 것이 아니라 비선형적으로 감소하되 파괴될 시간에 근접할수록 빠른 속도로 감소한다. 또 각각의 절리면 내 접점의 점착력은 절리면 내 접점의 크기와 위치 등에 따라 각각 다른 시간에 소멸되고 있다. Fig. 7에서 가운데 부분의 곡선으로 계산 단계에 따라 서서히 감소하고 있는 점착력 곡선은 Fig. 8과 같은 절리면의 평균 점착력을 함께 나타낸 것이다.

Fig. 8은 절리면의 평균점착력을 시간의 변화에 따라 보인 것이다. 절리면의 여러 절리면 내 접점에서 점착력이 시간에 따라 변하므로 절리면의 점착력도 시간의 경과에 따라 변하고 있다. 절리면 내 접점 중 첫 번째 접점이 파괴되면서 점착력이 소멸될 때까지는 비교적

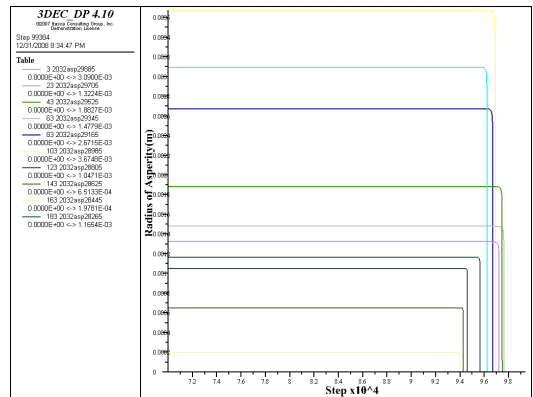


Fig. 6. Change of radius of asperity-time step relation

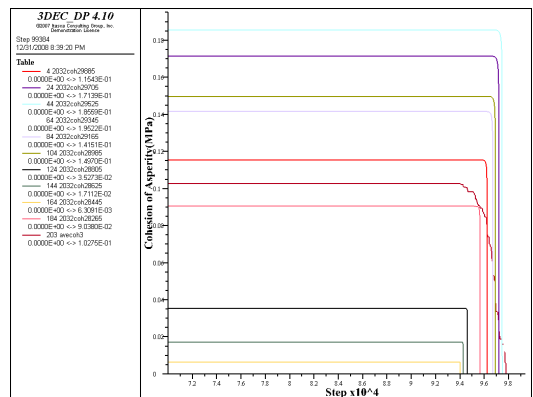


Fig. 7. Change of cohesion in asperity-time step relation

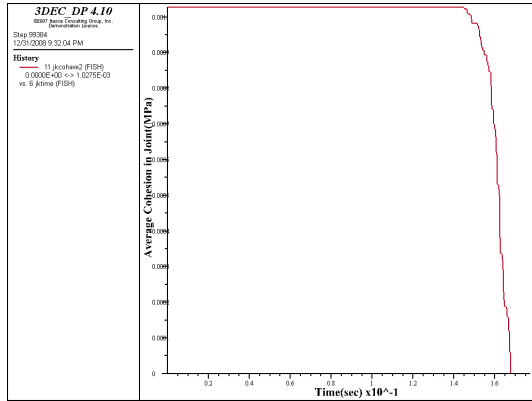
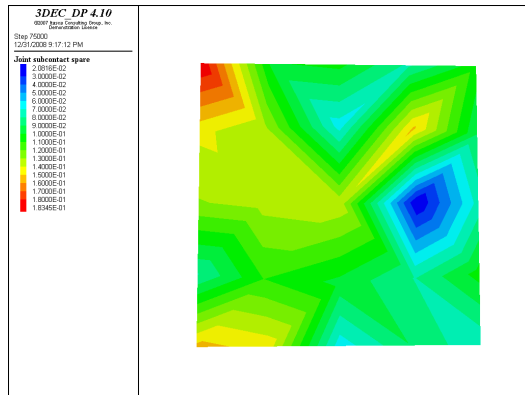


Fig. 8. Change of cohesion in joint with passing of time

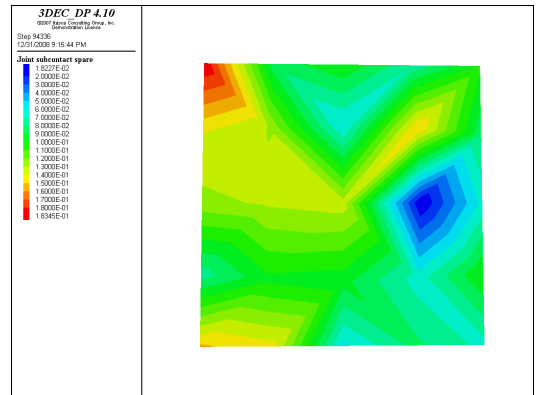
긴 시간이 필요하나 이 후 이어지는 점착력의 감소속도는 빨라지고 있다.

Fig. 9는 전단변위에 의해 절리면 내 접점이 단계적으

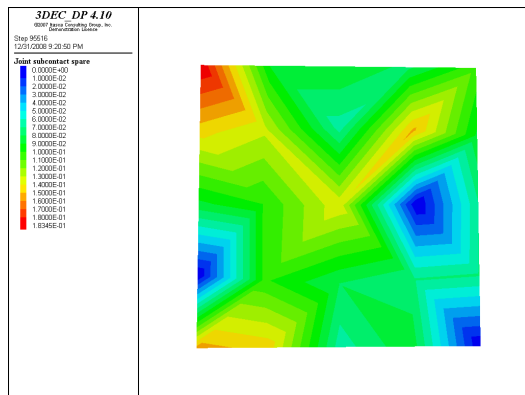
로 파괴되면서 점착력이 감소되는 현상을 절리면 상에 보인 것이다. 전단변위는 상부 블록이 왼쪽에서 오른쪽 방향으로 발생하였다. 절리면에는 50개의 절리면 내 접점이 있으나, 절리면 내 접점이 10개 파괴될 때마다 나타난 절리면 상의 점착력 분포인데, 빨간색 부분은 절리면 내 접점의 점착력이 큰 부분이고 파란색 부분은 절리면 내 접점이 파괴되어 점착력이 소멸된 부분을 표시하고 있다. 시간이 많이 경과하지 않은 초기단계에는 절리면 상의 절리면 내 접점이 Fig. 9(a) 파괴면과 같이 큰 점착력을 유지하여 빨간색 부분이 비교적 많으나 시간에 지남에 따라 절리면 내 접점이 하나씩 파괴되면서 종국에는 Fig. 9(h) 파괴면과 같이 점착력이 전부 소멸된 결과, 절리면 전체가 파란색으로 변하였다. 이 과정에서 절리면 상의 균열로 표시되는 파란색 부분이 초기에는 서로 고립된 상태에 있었으나 응력이 증가하고 시간이 지남에 따라 균열이 확장되면서 인접한 균열과 서로 연결되는 현상(coalescence of fracture)이 나타났다.



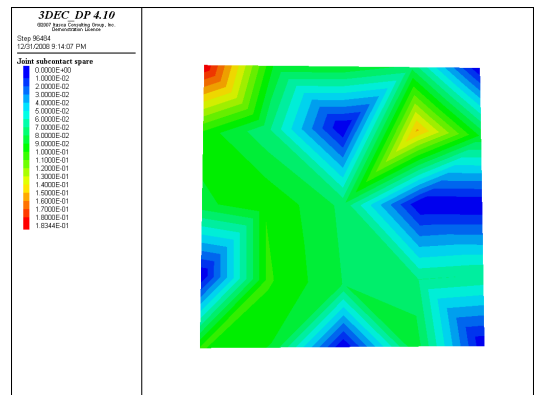
(a) Initial cohesion distribution at time 0.0 sec



(b) 10 asperities are failed at time 0.146886 sec

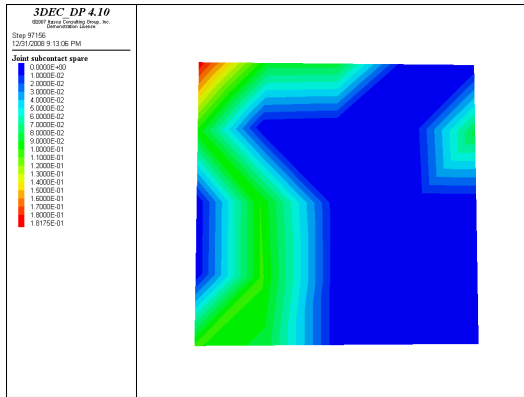


(c) 20 asperities are failed at time 0.154008 sec

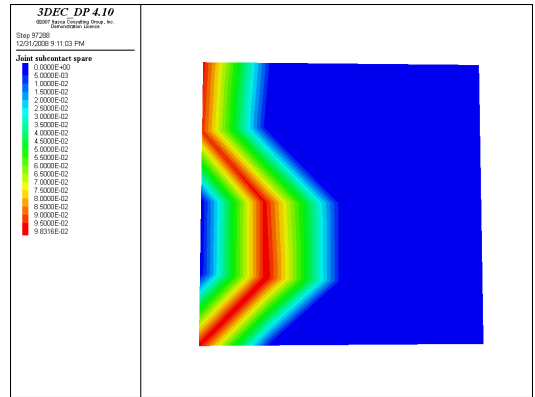


(d) 30 asperities are failed at time 0.159851 sec

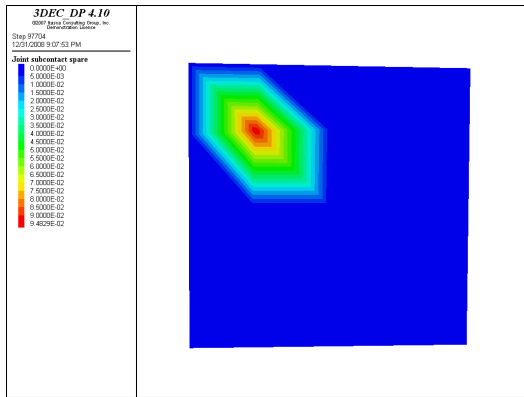
Fig. 9. Reduction and distribution of cohesion on joint surface with passing of time, shearing of the upper block to the right direction



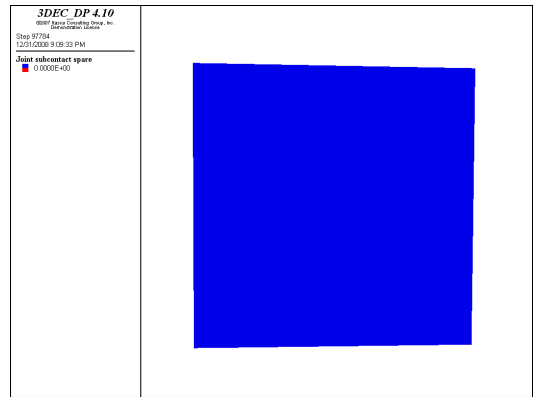
(e) 40 asperities are failed at time 0.163907 sec



(f) 45 asperities are failed at time 0.164704 sec

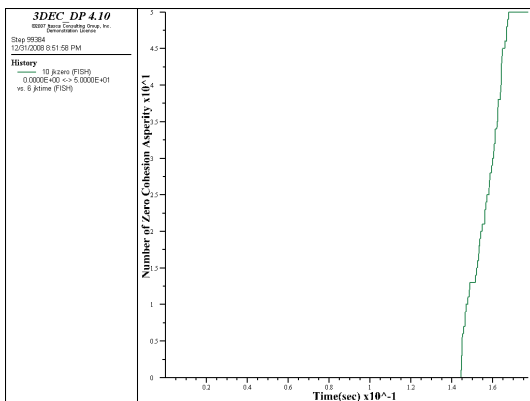


(g) 49 asperities are failed at time 0.167216 sec



(h) All 50 asperities are failed at time 0.167697 sec

**Fig. 9.** Reduction and distribution of cohesion on joint surface with passing of time, shearing of the upper block to the right direction (continued)



**Fig. 10.** Number of failed asperities with passing of time

이와 같이 절리면의 점착력을 감소시키는 절리면 내 점점의 파괴현상을 시간의 경과에 따라 파괴된 절리면 내 점점의 개수로 표시하면 Fig. 10과 같다. 역시 첫 번째 절리면 내 점점이 파괴될 때까지는 많은 시간이 필

요하나 이후 파괴되는 절리면 내 점점의 수효는 빠르게 증가하는 것을 알 수 있다.

### 5. 결론

이번 연구에서는 응력의 증가와 시간의 경과에 따라 파괴인성 이하에서 균열이 성장하여 절리면이 점진적으로 파괴되는 현상을 3차원 절리면 요소를 이용하여 수치해석적 방법으로 분석하였다.

암석의 절리면 사이가 절리면 내 점점에 의해 서로 연결된 것으로 가정하고, 각각의 절리면 내 점점에는 점착력과 내부마찰각 등 강도를 지닌 것으로 가정하여 3차원 절리면 요소를 개발하였고 이를 이용하여 절리면 전단시험을 수치해석으로 모사하였다. 이 절리면에 일정한 수직응력을 가한 상태에서 시간의 증가와 함께 전단응력을 가하여 절리면 내 점점 및 절리면에서 나타나는 전단응력과 점착력의 변화 등을 분석하였다.

각각의 절리면 내 점점에서 균열이 발생 성장하고 강



도가 감소되는 현상을 시간경과에 따라 분석할 때 경과 시간이 작은 초기단계에서는 균열 성장속도가 느리나 일정시간이 지나면서 균열의 성장속도가 빨라지고 동시에 점착력은 급격히 감소되면서 절리면 내 접점 들이 점진적으로 파괴되었다. 절리면 사이를 연결한 절리면 내 접점이 점진적으로 파괴됨에 따라 절리면에서 균열 부분이 확장되고 연결되면서, 절리면에 발생한 전단응력은 응력경화를 거쳐 응력연화 후 잔류응력에 도달하는 비선형을 보였고 절리면의 점착력도 시간의 경과에 따라 점진적으로 감소되면서 결국 소멸되었다. 따라서 암석의 파괴역학과 파괴인성 이하의 응력에서 발생하는 균열성장 현상에 의해 암반 절리면의 비선형변형 특성과 진행성 파괴를 감안한 3차원 수치해석용 절리면 요소의 적정성을 확인하였다.

## 감사의 글

이 연구는 우석대학교 안식년 연구 지원과 다음과 같은 지원으로 수행되었음. This work was supported by National Science Foundation Grant CMMI 0653942 (USA).

## 참고문헌

1. Atkinson BK., 1984, Subcritical crack growth in geological materials. *J Geophys Res*;89(B6): 4077-4114.:
2. Atkinson BK., 1987, *Fracture mechanics of rock*. London :Acedemic Press.:
3. Barton N., 1973, Review of a new shear strength criterion for rock joints. *Engr Geol.*;7: 287-332.:
4. Barton N, Bandis S., 1990, Review of predictive

capabilities of JRC-JCS model in engineering practice. In: Barton N, Stephanson O, editors, *Rock Joints*, proceeding of the International symposium on rock joints, Loen, Norway, Rotterdam: Balkema; 603-610.:

5. Charles R.J., 1958, Static fatigue of glass. *J.Appl phys.*: 29: 1549-1560.:
6. Eberhardt E, Stead D., Cogan J, Willenberg H., 2002, An integrated numerical analysis approach to the Randa rockslide. First European conference on landslides, 24-26 June, Prague, Czech Republic; 255-262.:
7. Itasca, 2007, 3-dimensional distinct element code (3DEC) ver.4.1. Minneapolis:Itasca Consulting Group, Inc.:
8. J. M. Kemeny, R. M. Hagaman, 2002, An asperity model to simulate rupture along heterogeneous fault surfaces, *Pageoph.*, Vol. 138, No. 4, 549-567.:
9. J. Kemeny, 2003, The time-dependent reduction of sliding cohesion due to rock bridges along discontinuities: A fracture mechanics approach, *Rock mechanics Rock engng.*:36/1: 27-38.:
10. J. Kemeny, 2005, Time-dependent drift degradation due to progressive failure of rock bridges along discontinuities *Int J Rock Mech Min Sci.*:42: 35-46.:
11. Kemeny JM., 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.:
12. Michalske, T. A., S.W. Freiman, 1982, A molecular interpretation of stress corrosion in silica, *Nature*, 295, 511-512.:
13. Ojala IO, Ngwenya BT, Main IG, Elphick SC., 2003, Correlation of microseismic and chemical properties of brittle deformation in Locharbriggs sandstone. *J Geophys Res*;108(B5):2268 doi:10.1029/2002JB002277.:
14. Rooke D, Cartwright D., 1976, *Compendium of stress intensity factors*. London HMSO. 330.:
15. Sjoberg J., 1996, Large scale slope stability in open pit mining-a review Technical Report 1996.10T, Lulea University of Technology, Division of Rock Mechanics, Lulea, Sweden; 229.:

### 김치환



1983년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
1985년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사  
1990년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사

Tel: 063-290-1468  
E-mail: kimcheen@korea.com  
현재 우석대학교 토목공학과 교수

### John Kemeny



1977 B.A. Geology and Mathematics, University of California, Santa Barbara  
1984년 M.Eng. Materials Science and Mineral Engineering, University of California, Berkeley

1986년 Ph.D. Materials Science and Mineral Engineering, University of California, Berkeley  
Tel: 1-520-621-4448

E-mail: kemeny@email.arizona.edu  
현재 미국 아리조나 주립대학 자원지질공학과 교수