

## 절리면의 응력확대계수가 파괴인성보다 작은 암반사면의 진행성 파괴

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

### Progressive Failure of a Rock Slope by the Subcritical Crack Growth of Asperities Along Joints

Kim Cheehwan, John Kemeny

**Abstract** Numerical analysis of the progressive failure of a rock slope was conducted using a 3-D rock joint element considering fracture mechanics and subcritical crack growth of asperities in the rock joints. Even though the stress state in the rock slope is not changing, the elapse of time causes subcritical crack growth to break asperities in the joints. The increase of broken asperities causes failure of joints in the rock slope and the increase of failed joints results in failure of a jointed rock slope. As a result, the progressive failure of a jointed rock slope due to the gradual breaking of small asperities along joints generated by subcritical crack growth occurs at a lower stress than if rock failure occurred by exceeding the static strength or fracture toughness.

**Key words** Rock slope, Rock fracture mechanics, Progressive failure, Subcritical crack growth, Time-dependent cohesion

**초 록** 암석파괴역학과 파괴인성 이하의 응력상태에서 균열이 발생하고 성장하는 특성을 고려하여 암반사면의 진행성 파괴를 검토하였다. 굴착이 종료된 암반사면은 응력이 거의 변하지 않은 조건이지만, 시간이 경과함에 따라 절리면 내 미소한 접점에서 파괴가 발생하고 파괴된 접점의 수효가 증가함에 따라 절리면이 파괴되고, 파괴된 절리면이 많아져 사면이 파괴되는 진행성파괴 현상을 수치해석적으로 확인하였다. 따라서 암반사면의 진행성 파괴는 파괴인성보다 낮은 응력상태에 있는 암반 절리면 내 미소한 접점에서 시간의 경과에 따라 발생한 균열이 성장하여 사면을 파괴시키는 것으로 분석되었다.

**핵심어** 암반사면, 진행성파괴, 암석파괴역학, 시간경과와 균열성장, 절리강도의 시간의존성

## 1. 서 론

암반 사면을 역학적으로 안정되도록 굴착하더라도 시간이 경과하면 암반사면이 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 약화되므로 대규모 사면을 장기간 안정되게 유지하기 위해서는 시간경과에 따른 암반의 특성 변화를 감안하여 설계와 시공을 하는 것이 중요하다. 그런데 암반사면의 파괴 사례 중 많은 경우에 있어서 암반 내에 분포한 절

리에서 파괴가 시작되는데, 대부분은 암반 사면 내에 작용하는 응력이 절리면의 파괴강도보다 낮은 상태에서 암반 절리면이 파괴된 예들을 볼 수 있다. 즉 파괴응력보다 낮은 응력을 받고 있는 절리면이지만 시간의 경과에 따라 암반 절리면의 강도가 약화되어 파괴가 발생한 것이다. 암반 절리면의 강도가 약화되는 것은 절리면 내에 있는 여러 접점(asperities of joint)의 강도가 약화된 결과이다. 이를 암석파괴역학의 관점에서 보면, 무결암인 절리면 간의 접점에서 시간의 경과에 따라 미소균열이 발생하고 성장하여 절리면 간 접점을 파괴시키는 현상으로 이해할 수 있다(Kilburn et al., 2008; Crosta et al., 2003; Petley et al., 2003; Eberhardt et al., 2004). 이 때 절리면 간 접점의 크기와 강도에 따라 절리면 간 접점 들은 파괴되는 시점이 다르므로 결과적으로 절리면의 강도가 시간의 경과에 따라 점진적으로 약화되는 것으로 나타난다.

<sup>1)</sup> 우석대학교 토목공학과

<sup>2)</sup> 미국 아리조나 주립대학 자원지질공학과 교수

\* 교신저자 : kimcheen@korea.com

접수일 : 2009년 2월 2일

심사 완료일 : 2009년 2월 23일

게재 확정일 : 2009년 3월 9일

암반 내 절리는 한 쌍의 마주보는 절리면으로 이루어져 있다. 마주 보는 두 절리면은 불규칙한 요철면이므로, 두 절리면 사이는 완전히 분리되어 하나의 공극을 형성한 것이 아니라, 두 절리면이 서로 접촉하고 있는 부분과 두 절리면이 서로 분리된 공극으로 이루어져 있다. 두 절리면 사이의 접촉부의 위치와 개수는 절리면의 크기와 절리면의 요철 정도에 따라 달라진다. 이와 같이 절리면 사이가 서로 연결된 부분을 절리면 간 접점이라고 한다. 절리면이 응력을 받을 때 저항하는 정도는 절리면 간 접점의 강도에 따라 결정된다. 절리면이 작용하는 응력에 대하여 저항하는 강도를 지니고 있다면 절리면 간 접점은 소규모의 무결암으로 가정할 수 있고, 따라서 절리를 형성하는 한 쌍의 절리면은 무결암의 여러 접점을 통해서 서로 밀착되어 있는 것으로 모델링 할 수 있다. 절리면이 응력을 받아 파괴되었다면, 이는 절리면 간 접점의 무결암이 점진적으로 파괴되면서 절리면의 강도가 상실되고 이 과정이 지속되어 절리면도 파괴된 것이다. 즉 절리면을 진단시키면 절리면의 표면이 돌출된 곳에서 응력이 집중되고, 응력집중에 의해 미세균열이 발생하기 시작하고, 시간이 지나면서 성장하고, 서로 연결되어 절리면이 진단되면서 매끄러운 표면으로 바뀌게 되는 것이다(Sjoberg, 1996).

암반 절리면 내 무결암의 접점에서 균열이 성장하는 조건을 암석파괴역학 관점에서 정하면, 균열 끝 단에서의 응력확대계수(stress intensity factor)가 암석의 파괴인성(fracture toughness of rock) 보다 큰 경우이다. 그러나 비록 응력확대계수가 암석의 파괴인성보다 작지만, 시간의 경과와 함께 암석 내에서 균열이 발생하여 성장할 수 있고 이를 파괴인성 이하에서의 균열성장(subcritical crack growth)이라고 할 수 있다. 암석에서 파괴인성 이하의 응력상태임에도 불구하고 균열이 성장하는 것은 균열주변의 여러 환경화학적 요인에 의해 주로 발생하는데, 그 중에서 응력의 침식(stress corrosion)에 의한 영향이 가장 큰 것으로 알려져 있다(Atkinson, 1984). 또 많은 실험연구에서 시간이 경과 함에 따른 암석의 파괴는, 암석 내에서 성장하는 균열이 주 원인으로 보고되어 있다(Atkinson, 1984, 1987; Ojala, 2003). 이와 같이 암석이 파괴인성 이하의 응력에서 시간의 경과에 따라 균열이 성장하는 현상을 응력확대계수를 이용하여 균열의 성장속도로 표시할 수 있는데, Charles (1958)의 멱함수식이 암석에 가장 적합한 것으로 보고되어 있다(Atkinson, 1984).

따라서 이번 연구에서는 절리면에서의 시간의존적 강도변화를 고려한 3차원 절리면 요소를 이용하여 암반사면의 진행성 파괴를 수치해석적으로 검토하였다. 절리

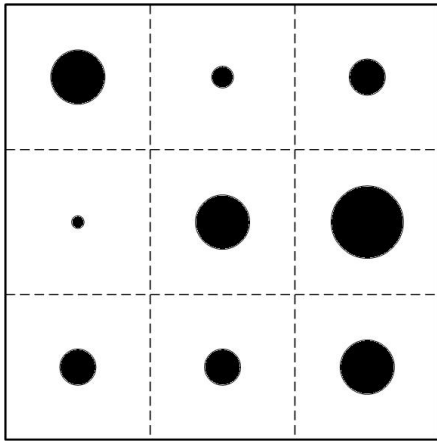
면의 강도변화는 절리의 거동을 나타내는 구성방정식에 절리면의 마찰각을 변화시킴으로 수치모델링하는 방법도 있으나(Barton, 1973; Barton et al., 1990), 이번 연구에서는 절리면 내 접점의 강도변화 효과를 점착력의 변화로 고려하였다(Sjoberg, 1996; Eberhardt, 2002; Kemeny, 2003). 다시 말하면 절리면 내 접점의 크기가 시간의 변화에 따라 서서히 파괴되면서 감소하는 현상을 반영하여 절리면 내 접점의 점착력도 시간의 변화에 따라 감소하도록 하였다. 해석 방법으로 암반사면을 굴착한 후 시간의 경과에 따라 암반 절리면 내 접점의 파괴를 확인하면서 사면에서 파괴가 나타날 때까지 수치해석을 수행하고 그 결과를 검토하였다. 해석의 결과로 절리면 내 접점의 파괴에 따른 절리면 내 점착력의 분포와 사면의 변위 및 변위속도, 시간의 경과에 따라 파괴가 발생한 절리면 내 접점의 수효변화를 알 수 있다. 이를 통하여 절리면 내 미소한 접점의 파괴가 암반사면 구조물의 파괴를 일으키게 되는 진행성 파괴과정을 시간의 경과와 함께 검토한다. 여기서는 절리면 내 접점들이 파괴되어 점착력이 없어지면 그 절리면은 파괴된 것으로 가정하였다.

한편 검토 대상으로 선정된 암반사면은 높이가 40 m, 사면의 경사가 76°이고, 암반사면 내 절리는 사면의 경사와 평행한 절리 4개와 거의 수평인 절리 2개 및 사면 표면의 일부가 한 면이 되면서 썩기암괴를 형성한 2개의 절리로 구성되어 있다.

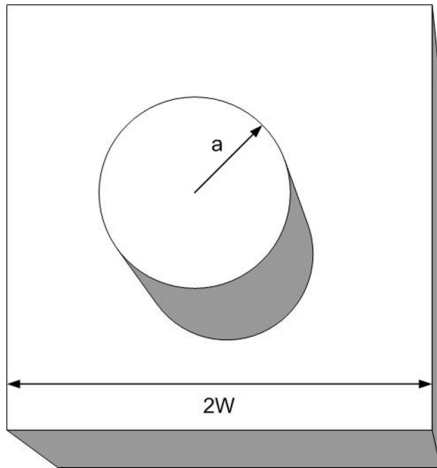
## 2. 파괴역학과 시간의존적 3차원 절리면 요소

이번 연구는 이미 수행한 Kemeny (2003, 2005) 연구를 3차원으로 확장하여 암반사면의 역학적 안정성 평가에 적용한 것이다. Kemeny (2003)는 절리면 내 접점에서 발생하는 시간의존적인 파괴를 2차원에서 암석파괴역학적으로 모델링하였다. 이를 기초로 확장한 3차원 절리요소는 Fig. 1(b)와 같이 절리면을 폭이 2w인 정사각형의 요소로 분할하였을 때, 이 요소면 상에 지름 2a 인 원형의 절리면 내 접점이 붙어 있는 것으로 가정하였으며 또 수직응력과 전단응력이 작용하는 것으로 가정하였다. Fig. 1(a)은 절리면 전체에 크기가 다른 여러 접점이 있는 것을 보인 모식도이고, Fig. 1(b)는 Fig. 1(a) 중 하나의 접점을 확대한 것으로 절리면 내 균열부분과 절리면 내 접점으로 구성된 3차원 절리면 요소를 보인 것이다.

암석 절리면의 균열과 접점 모형이 Fig. 1(b)와 같을 때, 암석파괴역학 중 모드 II 파괴의 응력확대계수  $K_{II}$ 는 다음 식 (1)과 같다(Kemeny et al., 2002).



(a) Concept of asperities between joint surfaces



(b) Model of an asperity and fracture in joint

**Fig. 1.** Concept and model of asperities between joint surfaces.

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

여기서  $\sigma_n$ 는 수직응력,  $\tau$ 는 전단응력이고  $\phi$ 는 절리면에서의 마찰각이다. 식(1)을 보면 응력확대계수  $K_{II}$ 는 절리면 사이의 전단응력에 비례하여 증가하지만 절리면 내 접점의 반지름에 따라 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 전단응력은 절리면 상에서 최대이므로 균열은 절리면을 따라서 성장하는 것으로 가정한다. 위의 식(1)로부터 전단응력  $\tau$ 를 다음 식(2)과 같이 표시할 수 있다.

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

식(2)는 절리면의 파괴기준이고 점착력과 마찰력의 항으로 구성되어 있다. 식(2)에서 첫 번째에 있는 점착력의 항은 절리면 사이의 접점에 의한 점착력  $C$ 로 다음 식(3)과 같다.

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

식(3)을 보면 절리면 사이의 점착력은 전단에 의한 암석파괴인성, 절리면 내 접점의 크기, 절리면 내 접점 주변의 균열 크기에 의해서 결정된다. 시간의 경과와 응력의 증가에 따라 파괴응력 이하에서 균열이 발생하면, 절리면 내 접점의 크기는 감소하고, 절리면 내 접점의 크기가 감소하면, 점착력도 식(3)에서 보듯이 감소하게 된다.

시간이 경과하고 응력이 증가함에 따라 절리면 내 접점의 크기가 감소하는 현상을 파괴인성 이하에서 균열의 성장을 표시하는 식으로 나타낼 수 있다. 균열이 있는 암석시편을 가지고 유사정적(quasi static) 하중조건 또는 크리프(creep)조건에서 시험한 결과, 균열의 성장은 응력확대계수로 표시한 멱함수에 따르는 것으로 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 속도를 나타내고  $A$ 와  $n$ 은 암석특성에 따른 상수이다. 이 Charles식은 암석파괴 모드 중 모드 I과 모드 II에 공히 적용할 수 있다(Kemeny, 2003). 그러므로 전단응력으로 표시한 식(1)을 이용하여 식(4)를 다음 식(5)와 같이 다시 표시할 수 있다.

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

대부분의 경우 시간의 변화와 함께 절리면에 작용하는 응력도 변한다. 또 암반 내에 분포한 절리에서 응력

은 절리마다 다르고 동일한 절리면이라도 절리면 내 위치에 따라 응력의 크기가 다르다. 따라서 식(5)을 여러 절리가 있을 때 각각의 절리면에 대해서 또 동일한 절리면이라도 절리면 내 서로 다른 지점에서 사용할 수 있도록 하려면 적절하게 수치해석식을 활용하여 시간 증분을 선택하고 응력변화와 함께 균열의 길이를 구하여야 한다. 그러나 암반사면과 같이 굴착 후 응력의 변화가 거의 없고, 3차원 암반사면과 같이 많은 절리면을 모델에 포함하고, 각각의 절리면 내에 접점의 수효가 많아지면 시간증분이 작은 수치해석으로 계산하는 경우에는 계산시간이 길어져 실용성이 감소한다. 따라서 만약 응력이 일정하고 단지 절리면 내 접점의 반지름이 시간의 경과에 따라 변한다면 식(5)를 적분해서 시간의 경과와 절리면 내 접점의 반지름이 변하는 관계와 같은 과정으로 표시할 수 있다. 즉 식(5)의 미분방정식을 풀어 완전해를 구한 후 절리면 내 모든 접점 중 한 접점의 반지름이 영(0)이 되도록 균열이 성장한 것으로 가정하면 이 때 필요한 시간증분  $\Delta t$ 는 다음 식(6)과 같다.

$$\Delta t = \frac{a^{\left(\frac{3n}{2}+1\right)}}{\left(\frac{3n}{2}+1\right)A \left( \frac{2w^2(\tau - \sigma_n \tan \phi)}{K_{IIC}\sqrt{\pi}} \right)^n} \quad (6)$$

따라서 식(6)의 시간증분을 대입하여 절리면 내 모든 접점의 반지름을 계산하면 절리면 내 접점 중 한 개는 파괴된 것이고 나머지 절리면 내 접점들은 균열의 길이가 변하여 절리면 내 접점의 크기가 감소된다. 이 때 시간이 증가하여 남아 있는 반지름의 크기  $a(t + \Delta t)$ 는 다음 식(7)과 같다.

$$a(t + \Delta t) = \left[ a(t)^{\left(\frac{3n}{2}+1\right)} - \left(\frac{3n}{2}+1\right)A \left( \frac{2w^2(\tau - \sigma_n \tan \phi)}{K_{IIC}\sqrt{\pi}} \right)^n \Delta t \right]^{\frac{2}{(3n+2)}} \quad (7)$$

또 감소한 접점의 반지름인 식(7)을 식(3)에 대입하면 시간과 접점의 반지름에 따라 변화한 점착력을 구할 수 있다.

이번 연구는 3차원 절리면을 고려하여야 하므로 개별 요소법인 3-DEC을 3차원 절리면 요소와 함께 이용하였다(Itasca, 2007). 각각의 계산단계마다 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 한 개의 접점이 파괴되는 최소시간증분을 구한다. 최소시간증분에 따라 절리면 내 접점의 반지름과 점착력을 다시 계산하여 절리면 내 접점의 파괴 기준을 변경한다. 다시 절리면에서의 수직응력과 전단응력을 재계산하여 위의 과정을 절리면 내 접점이 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 전단응력  $\tau - \sigma_n \tan \phi$ 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. 또 절리면의 수직강성과 전단강성도 인장강도와 같은 방법으로 감소하도록 하였다.

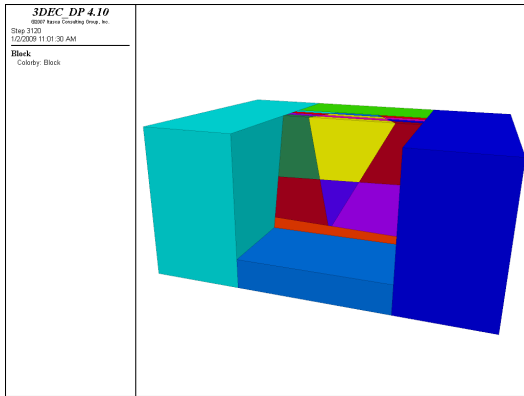
### 3. 파괴역학에 의한 암반사면의 수치모델

이번 연구를 위해 이용한 암반 사면은 아래의 Fig. 2와 같다. Fig. 2(a)에서 사면의 높이는 약 40 m, 사면의 경사는 수평으로부터 약 76°이다. 암반사면 내에는 서로 다른 네 방향의 절리가 있다. 첫 번째 절리는 암반사면과 평행하게 경사 76°이고 사면의 상단 끝에서 4 m의 간격으로 4조가 있다. 두 번째 절리면은 거의 수평인 경사 2.5°, 경사방향은 각각 235°, 315°인 두 개의 절리면이다. 세 번째와 네 번째 절리면은 암반사면에 쐐기 모양의 암괴를 형성한 것으로 각각의 경사 방향과 경사는 200/70, 330/60이고, 쐐기암괴의 하단 끝은 거의 수평인 절리면과 사면의 표면에서 만나고 있다.

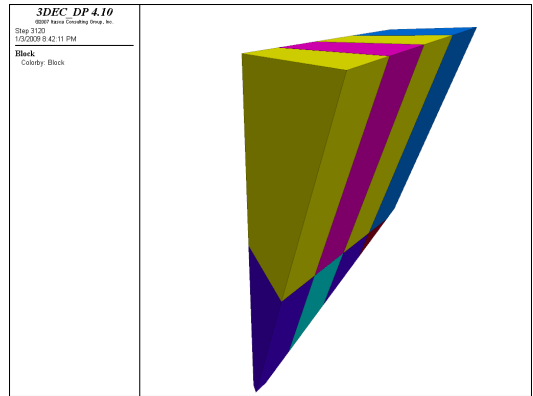
수치해석을 위한 모델의 크기는 사면의 경사방향인 x 방향으로 80 m, 사면의 길이 방향인 y 방향으로 110 m이고 높이는 50 m로 하였다. 사면의 길이방향 양쪽 끝 단의 경계조건은 별도의 암반블럭을 Fig. 2(a)와 같이 두어 해석영역의 사면에서 사면방향으로 자유로운 변형이 가능하도록 하였다. 암반사면 모델의 밑면은 어느 방향으로도 이동할 수 없도록 고정하였다. 사면경사와 평행한 첫 번째 균의 절리가 없는 암반블럭 즉 사면의 상부 끝 단에서 x 방향으로 55 m 이상 떨어진 곳은 어느 방향으로든 이동이 없도록 고정하였다. 암반사면내의 초기응력은 단위중량과 심도에 따라 계산되도록 하였

다. 그 결과 암반사면의 거동 중 첫 번째 절리 군과 썩기암괴를 형성한 세 번째와 네 번째의 절리들에서 발생하는 현상을 주로 분석하게 된다. Fig. 2(b)는 암반사면에서 썩기암괴가 없는 상태이고 Fig. 2(c)는 분리된 썩기암괴를 보인 것이다. Fig. 2(d)는 암반사면 내 암반블

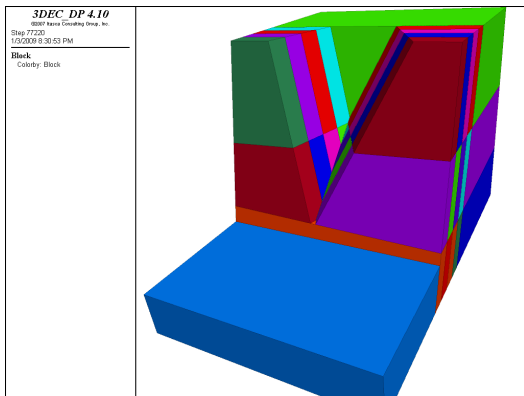
록을 한 변의 길이를 약 3m로 분할한 사면체 모양의 요소망이다. 이와 같은 요소망이 생성되면서 절리면도 절점을 지닌 작은 요소로 Fig. 2(c)와 같이 분할 생성되었는데, 절리면 상의 절점은 절리면 내 접점으로 마주 보는 절리면이 서로 연결된 곳이다. 따라서 절리면에 발



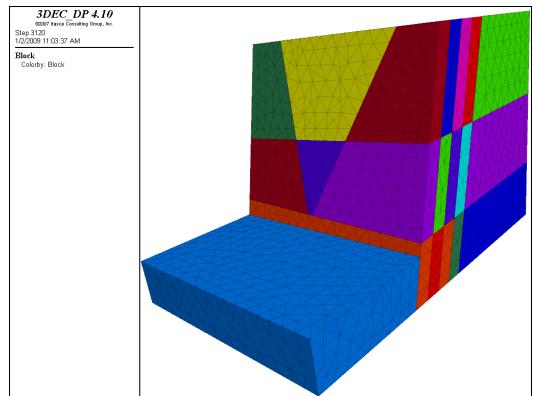
(a) Rock slope with joints and side boundary blocks



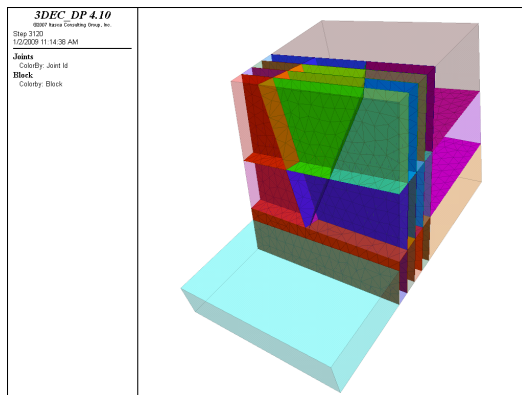
(c) Rock wedge detached from the rock slope



(b) Rock slope without V-shaped wedge



(d) Rock slope with joints and zones



(e) Rock slope asperities along joints

Fig. 2. Model of a 3-D rock slope with joints.

**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 of 1 <sup>st</sup> and 2 <sup>nd</sup> joint set (MPa)	0.1
Discontinuity cohesion of 3 <sup>rd</sup> and 4 <sup>th</sup> joint set (MPa)	0.3
Discontinuity tensile strength of 1 <sup>st</sup> and 2 <sup>nd</sup> joint set (MPa)	0.12
Discontinuity tensile strength of 3 <sup>rd</sup> and 4 <sup>th</sup> joint set (MPa)	0.04
Discontinuity normal stiffness (MN/m)	1000
Discontinuity shear stiffness (MN/m)	1000
Subcritical parameter in mode I, $A_i$ (m/s)	0.5
Subcritical parameter in mode II, $A$ (m/s)	0.25
Subcritical parameter in mode I, $n_i$	15
Subcritical parameter in mode II, $n$	15
Fracture toughness in mode I, $K_{Ic}$ (MPam)	0.06
Fracture toughness in mode II, $K_{IIc}$ (MPam)	0.15
Slope of stress intensity factor depend on stress level	0.5

생하는 응력, 점착력과 인장강도의 변화와 균열의 발생에 따라 변하는 연결부분의 크기는 절리면 내 접점 즉 절점에서 나타나게 된다. 절리면 내 접점의 초기 반지름은 입력한 최대점착력을 평균으로 간주한 통계적 균등분포에 따라 점착력을 난수로 발생시켰고, 점착력의 크기에 따라 절리면 내 접점의 반지름이 계산되도록 하였다.

또 Table 1은 파괴역학과 시간의존성을 고려한 암반사면의 수치모델에 이용된 입력값이다. 절리면 중 암반사면과 평행한 첫 번째 절리균의 점착력은 썩기암괴를 형성한 세 번째와 네 번째 절리의 점착력 보다 3배 큰 것으로 가정하였다. 또 응력의 수준에 따라 파괴인성이 일정한 기울기로 증가하도록 하였다.

#### 4. 해석결과와 검토

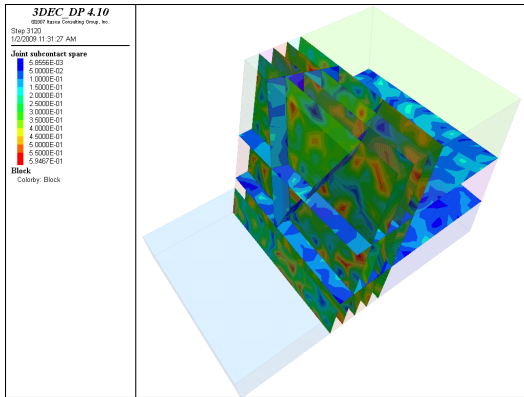
암반사면이 역학적으로 안정된 상태로 굴착되고 암반사면 내 응력이 변하지 않았음에도 불구하고 시간이 경과함에 따라 절리면 내 접점의 강도가 약화되는 현상, 즉 파괴인성 이하에서 발생하는 절리면의 파괴현상을 암석파괴역학의 모드 I과 모드 II를 고려한 수치해석방법으로 계산한 결과, 1) 시간의 증가에 따라 절리면 내 접점이 점진적으로 파괴되는 현상과, 2) 시간의 경과에 따라 변하는 사면의 변위 및 변위속도, 3) 시간의 경과

에 따라 파괴되는 절리면 내 접점의 수효 증가 및 절리면 내 접점의 파괴에 필요한 경과시간의 변화를 구할 수 있었다.

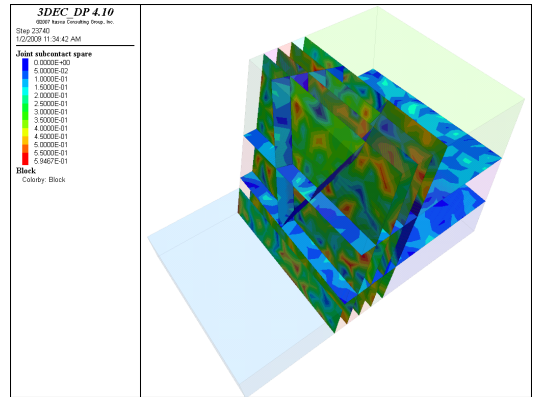
해석결과에 의하면 암반사면이 파괴되기까지는 약 299년의 경과시간이 필요하였고, 그 동안 약 1855개의 절리면 내 접점이 파괴되었다. 이와 같이 오랜 시간 동안 많은 접점이 파괴되었다. 절리면 내 접점이 파괴될 때마다 모든 계산결과를 여기에 보일 수 없으므로 주요 시간 별로 결과를 요약하여 검토하였다.

Fig. 3은 암반사면을 굴착 한 직후로 절리면 내 접점의 점착력과 암반사면의 변위 및 변위속도를 보인 것이다. Fig. 3(a)에서는 첫 번째 절리균으로 암반사면과 평행한 절리면 내 접점의 강도는 썩기암괴를 형성한 절리나 수평경사의 절리 내 접점보다 점착력이 큰 것을 보이고 있다. 초기 조건으로 난수 발생에 의해 절리면 내 접점에 점착력을 입력한 결과 1865개의 절리면 내 접점에서의 점착력이 영(0)으로 입력된 상태이다. 점착력이 작은 부분은 파랑색으로 나타나고 있다. Fig. 3(b)는 암반사면의 변위로 굴착 직 후에는 거의 변형되지 않은 상태를 보이고 있고, Fig. 3(c)는 변위속도를 보인 것으로 변위가 발생하지 않은 상태로 나타나고 있다.

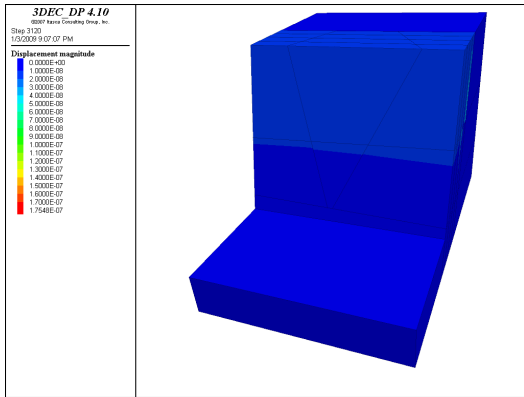
Fig. 4는 암반사면을 굴착 한 후 약 23.4초 경과한 후 발생한 절리면 내 접점의 점착력 감소와 암반사면의 변위 및 변위속도를 보인 것이다. Fig. 4(a)를 보면 암반사



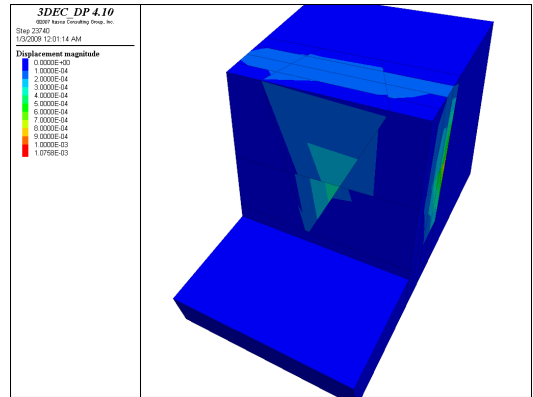
(a) Cohesion of asperities along rock joints



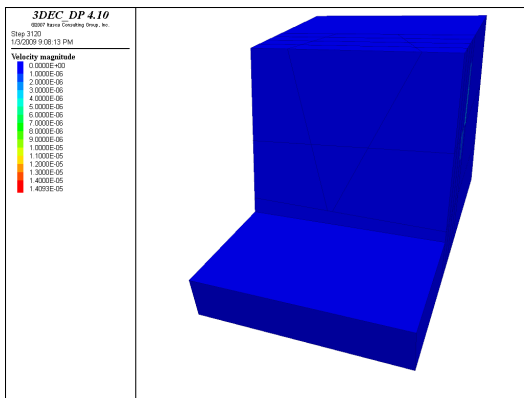
(a) Cohesion of asperities along rock joints



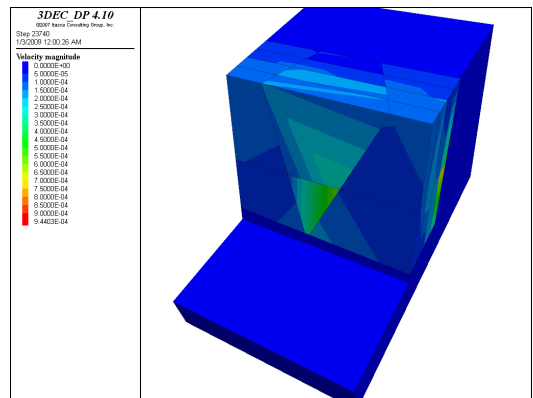
(b) Displacement of rock slope



(b) Displacement of rock slope



(c) Velocity of displacement of rock slope



(c) Velocity of displacement of rock slope

**Fig. 3.** Behavior of the rock slope at the time of 0.0 second after excavation

**Fig. 4.** Behavior of the rock slope at the time of 23.4 second after excavation

면과 평행한 절리 중 사면의 표면으로부터 거리가 가장 먼 4번째 절리에서 점점의 파괴가 많고, 썩기암괴를 형성하고 있는 절리에서도 점점의 파괴가 발생하였다. 사면과 평행한 절리의 점착력이 썩기를 형성한 절리의 점

착력보다 상대적으로 크기 때문에, 사면과 평행한 절리로 분리된 암석들은 아직 한 덩어리로 움직이나 썩기암괴 부분에서 약간 큰 운동력이 나타나기 시작하였다. Fig. 4(a)는 암반사면 굴착 후 시간 경과에 따라 추가로 파괴

된 절리면 내 접점의 수 약 835를 포함하여 총 2700개의 절리면 내 접점이 파괴된 상태를 보인 것이다. Fig. 4(b)는 암반사면의 변위로 사면에 평행한 절리와 썩기 암괴에서의 변위가 큰 차이가 없으나 수평에 가까운 절리에 의해 분리된 부분 중 썩기하단에서 약간 큰 변위가 발생하고 있다. Fig. 4(c)는 변위속도를 보인 것으로 변위가 발생한 현상과 유사하게 나타나고 있다.

Fig. 5는 암반사면을 굴착 한 후 약 19분 경과 후 발생한 절리면 내 접점의 점착력 감소를 보인 것이다. Fig. 5를 보면 암반사면 중 썩기암괴를 형성한 절리에서 접점의 파괴가 많이 발생하고 있다. 사면과 평행한 절리의 점착력이 썩기를 형성한 절리의 점착력보다 상대적으로 크기 때문에, 사면과 평행한 절리로 분리된 암석들은 한 덩어리로 서로 붙어 있으나, 썩기암괴의 절리는 점착력이 작기 때문에 많은 접점에서 파괴가 발생하였다. 암괴가 미끄러져 내려가려는 운동력이 나타나고 있다. Fig. 5는 암반사면 굴착 후 추가로 파괴된 절리면 내 접점의 수 약 1255개를 포함하여 총 3120개의 절리면 내 접점이 파괴된 상태를 보인 것이다.

Fig. 6은 암반사면을 굴착 한 후 약 1일 경과한 후 발생한 절리면 내 접점의 점착력 감소를 보인 것이다. Fig. 6을 보면 암반사면 중 썩기암괴를 형성한 절리에서 접점의 파괴가 많이 발생하는 추세가 계속되고 사면과 평행한 절리 중 썩기의 경계를 이루는, 즉 사면표면의 끝 단에서 가장 먼 곳에 있는 절리 중 썩기암괴의 경계선 부분으로 접점의 파괴 위치가 옮겨가고 있다. 사면과 평행한 절리 중 썩기암괴를 형성한 곳을 제외한 부분에서는 절리의 점착력이 상대적으로 크기 때문에 파괴된 접점이 많지 않다. Fig. 6에서 암반사면 굴착 후 추가로 파괴된 절리면 내 접점의 수는 약 1435개 이고 총 3300개의 절리면 내 접점이 파괴된 상태를 보이고 있다.

Fig. 7은 암반사면을 굴착 한 후 약 9.8일 경과한 후 발생한 절리면 내 접점의 점착력 감소를 보인 것이다. Fig. 7(a)를 보면 암반사면 중 썩기암괴를 형성한 절리에서 접점의 파괴가 많이 발생하는 추세가 계속되고 사면과 평행한 절리 중 썩기의 경계를 이루는, 즉 사면표면의 끝 단에서 가장 먼 곳에 있는 절리 중 썩기암괴의 경계선 부분으로 접점의 파괴 위치가 옮겨갔다. 썩기암괴를 형성한 절리를 제외한 부분에서는 절리의 점착력이 상대적으로 크기 때문에 접점에서의 파괴가 많이 발생하지 않았다. Fig. 7(b)는 사면의 변위를 보이는 것으로 썩기암괴에서 발생하는 변위가 사면의 다른 부분보다 크다. 마찬가지로 Fig. 7(c)의 변위속도 또한 썩기암괴에서 빠른 것을 보이고 있다. Fig. 7에서 암반사면 굴

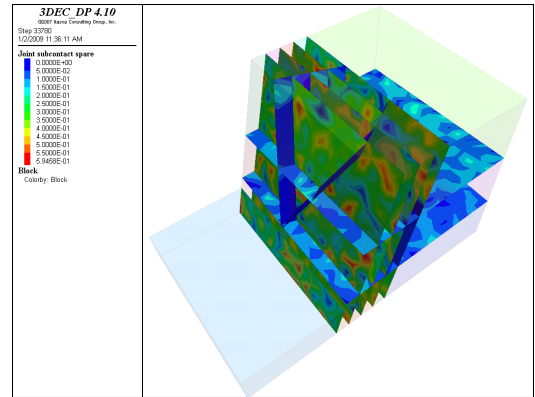


Fig. 5. Cohesion of asperities along joints in rock slope at the time of 19 minute after excavation

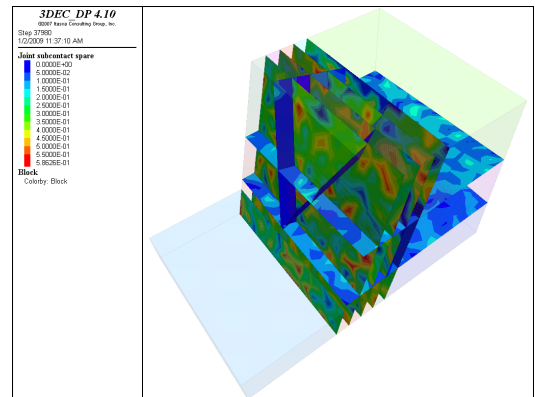


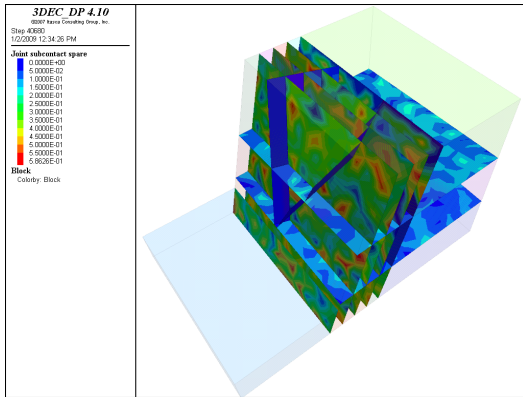
Fig. 6. Cohesion of asperities along joints of rock slope at the time of 1 day after excavation

착 후 추가로 파괴된 절리면 내 접점의 수는 약 1555개 이고, 파괴된 총 접점은 3420개이다.

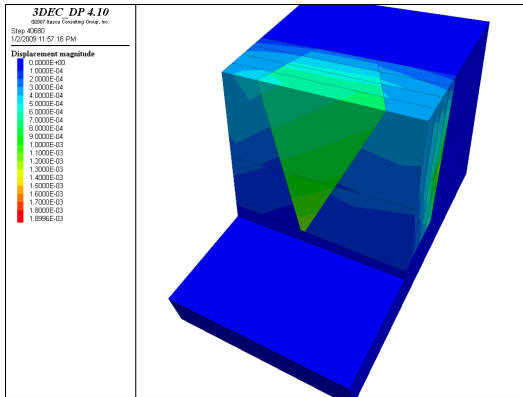
Fig. 8은 암반사면을 굴착 한 후 약 3년 경과한 후 발생한 절리면 내 접점의 점착력 감소를 보인 것이다. Fig. 8을 보면 암반사면 중 썩기암괴를 형성한 절리 중 일부분을 제외한 대부분의 접점이 파괴되었고 사면과 평행한 절리 중 썩기의 경계를 이루는 절리 내 접점의 파괴가 많이 발생하고 있다. Fig. 8에서 암반사면 굴착 후 추가로 파괴된 절리면 내 접점의 수는 약 1735개이고, 파괴된 접점이 총 3600개인 절리면 내 상태를 보이고 있다.

Fig. 9는 암반사면을 굴착 한 후 약 43년 경과한 후 발생한 절리면 내 접점의 점착력 감소를 보인 것이다. Fig. 9를 보면 암반사면 중 썩기암괴를 형성한 절리에서 파괴가 진행되어 극히 작은 부분을 제외한 대부분의 접점이 파괴되었다. Fig. 9에서 암반사면 굴착 후 추가

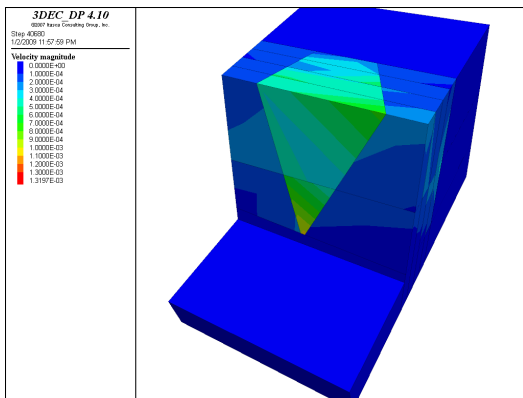




(a) Cohesion of asperities along rock joints



(b) Displacement of rock slope

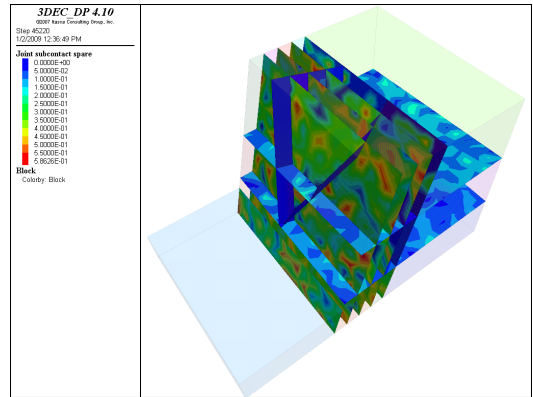


(c) Velocity of displacement of rock slope

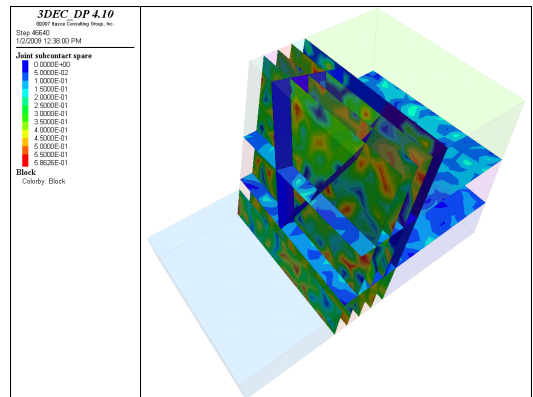
**Fig. 7.** Behavior of the rock slope at the time of 9.8 day after excavation

로 파괴된 절리면 내 접점의 수는 약 1795개이고, 파괴된 절리면 내 접점이 총 3660개인 상태를 보이고 있다.

Fig. 10은 암반사면을 굴착 한 후 약 299년 경과한 후 발생한 절리면 내 접점의 점착력 감소를 보인 것이



**Fig. 8.** Cohesion of asperities along joints of rock slope at the time of about 3 years after excavation

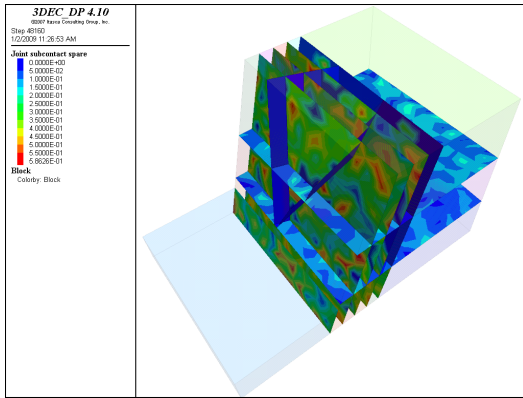


**Fig. 9.** Cohesion of asperities along joints of rock slope at the time of about 43 years after excavation

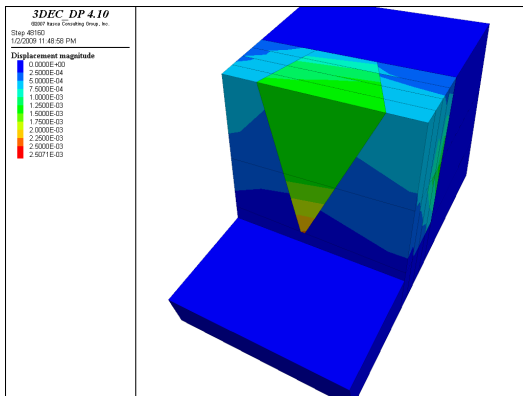
다. Fig. 10(a)을 보면 암반사면 중 썩기암괴를 형성한 절리의 모든 접점이 파괴되고 사면과 평행한 절리 중 썩기의 경계를 이루는, 즉 사면표면의 끝 단에서 가장 먼 곳에 있는 절리 중 썩기암괴의 경계선 부분의 접점도 모두 파괴되어 썩기암괴가 점착력에 의해서 역학적 안정성을 유지하는 것이 아니라 절리면의 마찰력만으로 썩기암괴의 활동력에 저항하고 있는 상태이다. Fig. 10(b)는 사면의 변위를 보이는 것으로 썩기암괴에서 발생하는 변위가 사면의 다른 부분과 뚜렷하게 구별되고 있다. 마찬가지로 Fig. 10(c)의 변위속도 또한 썩기암괴에서 큰 것을 보이고 있다. Fig. 10에서 암반사면 굴착 후 추가로 파괴된 절리면 내 접점의 수는 약 1855개이고, 총 3720개의 절리면 내 접점이 파괴된 상태를 보이고 있다.

이와 같이 암반사면을 굴착 직 후부터 시간의 경과에 따른 사면의 역학적 안정성을 검토한 결과, 절리면 내

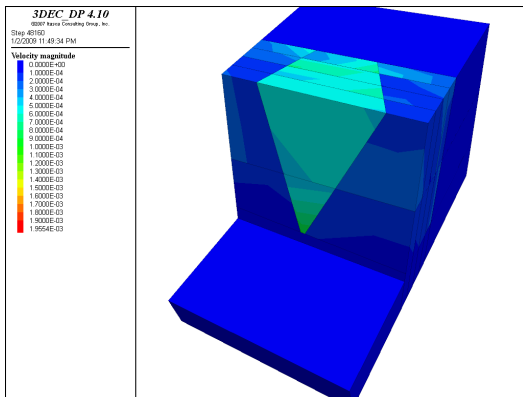
접점에서 점진적으로 파괴가 발생하고 이에 따라 사면의 역학적 안정성도 점진적으로 약화되는 것을 암석 파괴역학과 암석파괴인성 이하에서 발생하고 성장하는 균열 특성을 이용하여 해석할 수 있었다.



(a) Cohesion of asperities along rock joints



(b) Displacement of rock slope



(c) Velocity of displacement of rock slope

Fig. 10. Behavior of the rock slope at the time of about 299 years after excavation

Fig. 11은 절리면 내 접점이 파괴되기 위하여 필요한 시간증분과 각각의 접점이 파괴될 때의 시간을 누적한 것이다. Fig. 11에서 오른쪽 하단의 막대그래프는 시간증분을 표시한 것이고 왼쪽 하단에서 오른쪽 상단으로 향하는 곡선이 접점이 파괴될 때까지의 총시간을 표시한 것이다. 절리면 내 접점이 파괴되기 위한 시간 증분을 보면 파괴된 접점의 수효가 증가할수록 다음 접점이 파괴되기 위해 필요한 시간증분도 커지고 있다. 이는 사면 굴착 후 초기에는 점착력이 작은 절리면 내 접점은 접점의 크기가 작기 때문에 파괴에 필요한 균열의 성장길이도 작으므로 파괴에 필요한 시간증분도 작다. 그러나 남아있는 절리면 내 접점의 크기가 커지면 균열의 성장에 필요한 시간증분도 길어지게 된다. 절리면 내 접점의 파괴에 필요한 시간증분이 커지면서 사면의 파괴에 필요한 총 누적시간도 증가하게 된다.

이와 같이 절리면의 점착력을 감소시키는 절리면 내 접점의 파괴현상을 시간의 경과에 따라 파괴된 절리면

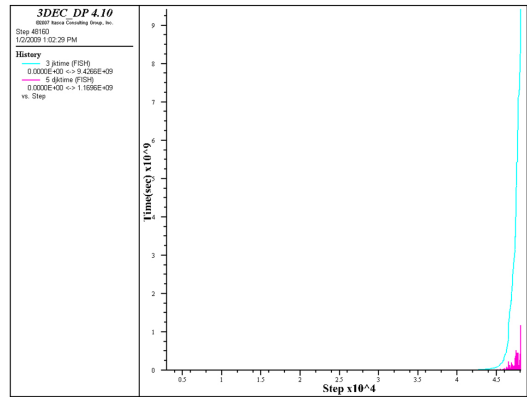


Fig. 11. Incremental(right corner) and total time(curved line) for failing of asperities

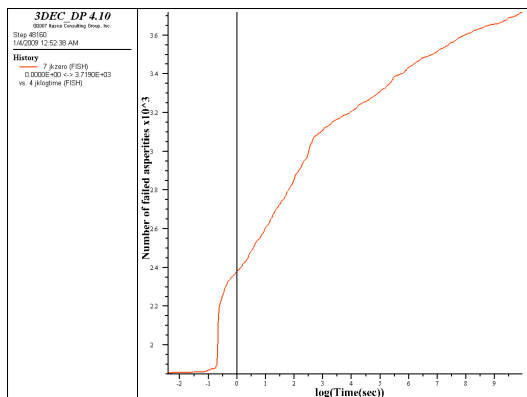


Fig. 12. Number of failed asperities with passing of time

내 점점의 개수로 표시하면 Fig. 12와 같다. 암반사면 굴착 후 초기에 많은 절리면 내 점점이 파괴되나 시간이 경과함에 따라 파괴되는 점점의 증가율은 작아지고 있다.

## 5. 결론

암석파괴역학의 파괴모드 I과 II 및 응력의 증가와 시간의 경과에 따라 파괴인성 이하에서도 균열이 성장함으로써 인해 절리면이 점진적으로 파괴되는 현상을 고려하여 암반사면의 역학적 안정성을 시간의 경과에 따라 검토하였다. 이를 위하여 암석의 절리면 사이가 절리면 내 점점에 의해 서로 연결된 것으로 가정하고, 각각의 절리면 내 점점에는 점착력과 내부마찰각 등 강도를 지닌 무결암이지만 시간의 경과에 따라 강도가 변하는 것으로 가정한 3차원 절리면 요소를 개별요소법과 함께 이용하였다.

이번 연구 대상 암반사면은 높이가 약 40 m이고, 사면의 경사는 76°이다. 암반사면에는 사면의 경사와 평행한 절리가 4개, 거의 수평인 절리가 2개 있으며, 또 다른 2개의 절리는 사면의 표면과 교차하여 썩기암괴를 형성하고 있다. 이 썩기를 형성한 절리와 거의 수평인 절리의 점착력은 사면과 평행한 절리가 지닌 점착력의 1/3로 가정하였다.

시간의 경과에 따라 암반사면 내의 절리면에서 발생한 점점의 파괴를 검토한 결과, 사면 굴착 후 경과시간이 작을 때에는 사면에 평행한 절리와 썩기암괴의 절리 중 어느 부분이 많이 파괴되는지 구별할 수 없었으나, 시간이 더 지남에 따라 주로 썩기암괴의 절리에서 많은 파괴가 발생한 결과 썩기암괴가 사면으로부터 분리되는 썩기파괴가 발생하였다.

절리면 내 점점의 점진적인 파괴에서 점점이 파괴될 때까지 필요한 경과시간의 증가량은 굴착 직후에는 작았으나, 파괴된 점점의 수효가 많아지면서 점점이 추가로 파괴되는데 필요한 경과시간의 증가량이 점점 길어진 결과, 절리면 내 점점들의 점착력이 없어진 상태를 절리면의 파괴로 가정할 때, 사면파괴가 발생하기까지 소요된 시간은 사면 굴착 후 약 299년이었다.

암반사면 굴착 후 시간의 경과하고 절리면 내 점점의 파괴가 진행됨에 따라 암반사면에서 발생한 변위를 분석하면, 사면에 평행한 절리보다 썩기암괴에서 크게 나타나 썩기암괴가 사면에서 분리되는 거동을 확인 할 수 있었고, 변위속도 또한 같은 경향을 보였다.

따라서 암반사면의 절리면 내 점점에서 발생하는 미세한 파괴로부터 암반사면이 파괴될 때까지의 과정을 암석 파괴역학과 파괴인성보다 낮은 응력확대계수에서

시간의 경과에 따라 균열이 성장하는 현상에 의해 분석할 수 있었고 암반사면의 진행성 파괴도 모사할 수 있었다.

## 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. Crosta, G. B., Agliardi, F., 2003, Failure forecast for large rock slides by surface displacement measurements. *Can. Geotech. J.* 40, 176-191.:
7. Eberhardt E, Stead D., Cogan J. S., 2004, Numerical analysis of initiation and progressive failure in natural rock slopes-the 1991 Randa rockslide. *Int J Rock Mech Min Sci.* 41, 69-87.:
8. 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.:
9. Itasca, 2007, 3-dimensional distinct element code (3DEC). ver.4.1. Minneapolis: Itasca Consulting Group, Inc.:
10. Kemeny J. M., Hagaman R. M., 2002, An asperity model to simulate rupture along heterogeneous fault surfaces. *Pageoph.*, Vol. 138, No. 4, 549-567.:
11. Kemeny J., 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.:
12. Kemeny J., 2005, Time-dependent drift degradation due to progressive failure of rock bridges along discontinuities. *Int J Rock Mech Min Sci.*:42: 35-46.:
13. Kilburn, Christopher R. J., Petley David N., 2003, Forecasting giant, catastrophic slope collapse lessons from Vajont, Northern Italy. *Geomorphology* 54, 21-32.:
14. 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.:
15. Petley, David N., Bulmer, Mark H., Willaim Murphy, 2002, Patterns of movement in rotational and translational landslides. *Geology*, Aug., V.30, 719-722.:
  16. Rooke D, Cartwright D., 1976, *Compendium of stress intensity factors*. London HMSO. 330.:
  17. 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 Cali-  
fornia, Berkeley  
1986년 Ph.D. Materials Science and  
Mineral Engineering, University of Cali-  
fornia, Berkeley  
Tel: 1-520-621-4448

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