

## 개별요소해석에서 절리강성이 블록 거동에 미치는 영향

류창하<sup>1)</sup>\*, 최병희<sup>1)</sup>

### Effect of Joint Stiffness on the Rock Block Behavior in the Distinct Element Analysis

Chang-Ha Ryu, Byung-Hee Choi

**Abstract** Distinct element method is a powerful numerical tool for modelling the jointed rock masses. It is also a useful tool for modelling of later stage of blasting requiring large displacement. The distinct element method utilizes a rigid block idea in which the interacting force between distinct elements is calculated from contact displacement as elements penetrate slightly. The properties of joints defined as the boundaries of distinct elements are critical parameters to determine the block behavior, and affect the deformation and failure mode. However, regardless of real joint properties, joint stiffnesses have sometimes been selected without special concern just to prevent elements from penetrating too far into each other in some quasi-static problems. Depending on whether the main interest in the analysis is the prediction of the deformation with high precision, or the prediction of the block behaviour after failure, the input data such as joint stiffness may or may not have a significant effect on the results. The purpose of this study is to provide a sound understanding of the effect of the joint stiffness on the distinct element analysis results, and to help guide the selection of input data.

**Key words** Numerical analysis, Distinct element method, Hertzian contact model, Joint stiffness ratio

**초 록** 개별요소법은 절리가 발달한 불연속 암반의 모델링에 매우 유력한 수치해석적 방법이다. 또한 발파 후 큰 변위가 일어나는 단계에서의 모델링에도 효과적이다. 개별요소법에서 각 요소는 강체로 가정하고, 요소 간 약간의 중첩을 허용하여 접촉 변위로부터 상호 작용력을 계산한다. 개별요소의 경계로 정의되는 절리의 강성은 블록 요소 상호 간의 거동을 결정하는 중요한 변수로서 변형의 크기와 파괴 양상에 영향을 준다. 그러나 요소 간 과도한 중첩으로 인한 수치해석적 불안정성을 방지하기 위해서 어떤 준정적인 문제에 있어서는 실제 절리 물성과 관계없이 임의로 선정된 절리 강성 값이 사용되기도 한다. 해석의 주된 관심사가 정밀도 높은 변형의 크기 예측이나, 불연속체의 파괴 양상이나 파괴 후 파괴된 블록들의 거동 예측이나에 따라, 절리 강성에 대한 입력 자료 값은 결과에 큰 영향을 주지 않을 수도 있고, 심각한 예측 오류를 가져올 수도 있다. 본 연구는 개별요소법을 이용한 수치해석 모델링에서 절리 강성 값이 해석 결과에 미치는 영향을 이해하고 입력자료 선정 지침에 도움을 주고자 수행되었다.

**핵심어** 수치해석, 개별요소법, Hertz 접촉 모델, 절리 강성비

## 1. 서론

개별요소법은 불연속체를 효과적으로 모델링하기 위해 개발된 수치해석방법이다. 유한요소법에서는 연속체를 절점으로 연결되는 가상의 유한한 요소들의 집합체로 가정하는데 절리와 같은 불연속면을 모델링하려면 절리 특성을 반영할 수 있는 별도의 절리 요

1) 한국지질자원연구원 책임연구원

\* 교신저자 cryu@kigan.re.kr

접수일 : 2019년 6월 19일

심사 완료일 : 2019년 6월 24일

게재 승인일 : 2019년 6월 27일

소가 도입된다. 이러한 방법은 절리가 많이 발달되어 있는 불연속체를 모델링하기에는 비효율적일 뿐만 아니라, 일반적인 유한요소법에서는 절점의 분리가 허용되지 않으므로 절리면에서 큰 변위가 예상되는 경우에는 부적절하다. 또한 절리면의 파괴 후 미끄럼이나 이격 등의 역학적 거동을 모델링할 수 없으므로 이를 위해서는 특별한 형태의 기법이 사용되어야 한다. 반면에 Cundall이 제안한 개별요소 알고리즘은 불연속체를 강체(rigid body) 블록들의 집합체로 모델링하고, 각 블록의 접촉에 의해 발생하는 접촉력으로부터 블록 간 상호 반응을 계산함으로써 전체 불연속체의 거동을 모델링할 수 있다(Cundall, 1971, 1974). 이러한 방법은 일반 유한요소법에서는 모델링하기 어려운 큰 변위는 물론, 미끄럼, 이격, 회전 등의 거동을 효과적으로 모델링할 수 있는 장점이 있다. 깊은 심도의 높은 응력 하에 있는 불연속체의 경우, 블록 자체의 변형을 무시할 수 없으므로 각 블록을 강체가 아니라 변형이 가능한 요소로 모델링을 해야 하지만, 터널 주벽과 같이 응력이 개방된 공간이나, 낮은 심도의 낮은 응력 하에 있는 불연속 암반 구조물을 모델링하는 경우에는 강체 모델이 간편하면서도 매우 유력한 모델이 될 수 있다. 특히 사면의 파괴 양상이나 발파와 관련하여 비산과 같은 파괴 후 거동을 모델링하는데 매우 효과적인 수치해석적 방법이다.

강체 모델에서는 블록 자체의 변형은 고려되지 않으나, 절리 강성(joint stiffness)이라는 물성이 사용되는데 절리강성은 절리면에 대한 실험실 실험을 통해 구할 수 있다. 그러나 절리에 대한 역학적 실험이 번거롭고, 실험값의 오차가 클 뿐만 아니라 불연속체 암반을 대표할 수 있는 절리 물성을 결정하는 것도 쉬운 일이 아니다. 또한 실제 실험실에서 구한 절리 강성 값이라고 하더라도, 응력장 조건이나 계산 시간 간격에 따라서 과도한 중첩으로 인해 접촉 상태를 찾지 못하고 수치해석적인 불안정성(numerical instability)을 가져오는 경우도 발생한다. 그리고 해석의 주된 관심사가 정밀도 높은 변형의 크기 예측이 아니라 불연속체의 파괴 양상이나 파괴 후 파괴된 블록들의 거동 예측이라면, 절리 강성과 같은 입력자료가 결과에 어느 정도의 영향을 미치는 지에 대한 이해도 결과 해석에 매우 중요한 문제로 요구된다. 본 연구는 해석적 방법(analytic method)과 수치해석적 방법을 이

용한 충돌 현상의 비교해석을 통해 절리 강성이 해석 결과에 미치는 영향을 정량적으로 파악하고, 불연속체를 수치해석적으로 모델링할 때 입력 자료로서 절리 강성 값을 선정하는 지침을 얻고자 하는 목적으로 수행되었다. 해석적 방법으로는 Hertz 접촉 모델(Hertzian contact model)이 사용되었고(Hertz, 1881), 수치해석적 방법에는 explicit type의 개별요소 모델이 사용되었다.

## 2. 개별요소 해석 프로그램과 해석 모델

### 2.1 개별요소 해석 프로그램

불연속체를 이루는 각 블록들을 강체로 가정하는 개별요소법에서 블록 요소의 경계는 절리와 같은 불연속면을 형성한다. 각 블록 요소는 강체로 가정함으로써 개별 요소의 변형이 고려되지 않고, 요소들이 접촉할 때 경계 부근에서 요소 사이에 약간의 수치해석적인 중첩을 허용한다. 개별 요소 자체는 강체이지만 주어진 응력장 하에서 블록 간에 접촉이 발생할 때, 수치적인 중첩을 허용함으로써 형성된 블록의 경계면과 모서리 간의 접촉 변위(중첩된 크기)로부터 블록 상호 간에 작용하는 힘, 접촉력을 계산한다. 접촉력으로부터 질량 중심에서의 물체력 변화를 계산하고, 뉴턴의 운동 방정식으로부터 블록 운동의 가속도를 계산하고, 수치 적분을 통해 속도 및 변위를 계산하여 이에 따라 블록의 새로운 위치가 결정된다. 블록의 접촉에 따른 접촉력 및 변위의 계산에는 절리면의 절리 강성(joint stiffness) 값과 Mohr-Coulomb 마찰식 등이 적용된다. 본 해석에는 이와 같이 개별요소 알고리즘에 기초하여 개발된 CBLOCK 프로그램이 사용되었다(Ryu & Pariseau, 1986; Ryu, 2000). CBLOCK 프로그램에는 절리의 파괴와 함께 블록 요소 자체가 파괴될 수 있는 알고리즘이 도입되어 있지만 본 해석에서 블록 요소의 파괴는 고려되지 않았다.

### 2.2 해석 모델

본 연구의 충돌 해석에 사용된 모델은 사각형 블록과 디스크 형태의 블록이 사용되었는데 Fig. 1은 디스크 형태의 해석 모델을 보여준다. 사각형 블록과 디스크 형태의 블록을 사용하여 여러 절리 강성 조건 하에서 두 블록의 충돌 시험을 통해 절리 강성의 영향을 고찰하였다.

CBLOCK에 도입된 블록 요소는 PFC(Particle Flow Code) 모델과 같은 디스크나 구의 형태가 아니라 다각형 요소이므로 본 연구에서의 디스크 형태 블록은 80개의 변을 가진 다각형으로 제작되었다.

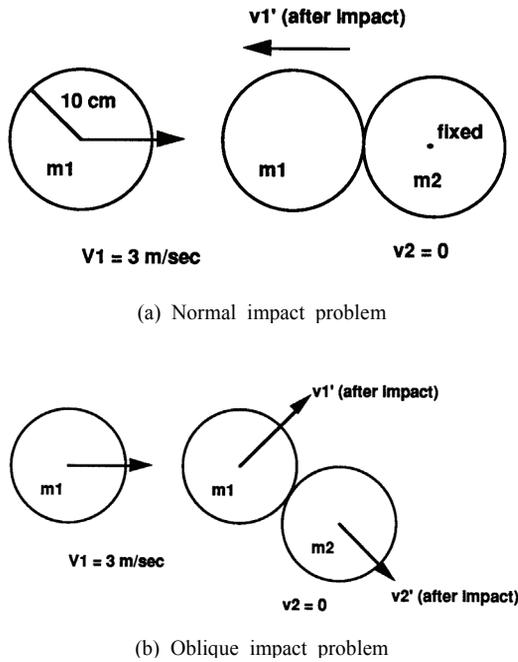


Fig. 1. Simulation of two block impact.

Table 1. Results of CBLOCK Calculations (No Mass or Stiffness Damping)

Joint stiffness, MPa/cm	Block shape	Velocity after collision, cm/s
7.5	80 sided polygon	300.039
10	80 sided polygon	300.039
50	80 sided polygon	300.039
100	80 sided polygon	300.039
22	Square	300.004
150	Square	300.004

Table 2. CBLOCK calculations of two-block impact (no mass or stiffness damping,  $\mu = 0$ )

Joint normal stiffness (Kn)	Joint shear stiffness (Ks)	Velocity after collision, m1			Velocity after collision, m2		
		Vx1'	Vy1'	Vt1'	Vx2'	Vy2'	Vt2'
GPa/cm	GPa/cm	cm/s	cm/s	rad/s	cm/s	cm/s	rad/s
10	10	162.14	149.12	1.54	137.86	-149.12	1.56
10	1	162.14	149.12	1.54	137.86	-149.12	1.56
10	0.1	162.14	149.12	1.54	137.86	-149.12	1.56
1	0.1	162.11	149.15	1.42	137.88	-149.12	1.56

### 3. 해석 및 결과 고찰

#### 3.1 기초 시험

개별요소 프로그램의 모델링 특성에 대한 기초 시험으로서 한 블록(m2)을 고정시키고 다른 한 블록(m1)을 300 cm/s의 속도로 충돌시킨 후 충돌 전후 기본 물리법칙을 만족시키지는지를 확인하였다. Table 1은 개별요소 프로그램으로 계산한 충돌 후 블록 m1의 속도이다. 탄성 충돌을 가정하여 댐핑(damping)은 고려하지 않았다. Table 1의 결과에서 보는 바와 같이 여러 절리 강성 값의 블록들에 대해 CBLOCK 프로그램으로 계산한 결과는 0.0013 % 이내의 차이를 보여 기본 법칙대로 모델링 되고 있는 것으로 나타났다. Table 2는 두 블록을 모두 고정하지 않고 45도 각도로 비스듬한 충돌을 시킨 후 충돌 전후의 속도를 계산한 결과이다. 아래 첨자 x, y와 t는 x, y 방향 및 각속도 방향을 의미한다. Table 3은 Table 2의 결과로부터 충돌 전후 선형 운동량(linear momentum)과 운동에너지(kinetic energy)의 변화를 계산한 결과이다. 절리 강성과 관계없이 운동 에너지도 그대로 유지되었고, 운동량 보존 법칙을 만족하고 있음을 보여준다.

**Table 3.** Linear momentum and kinetic energy (No mass or stiffness damping,  $\mu = 0$ )

Kn, GPa/cm	Ks, GPa/cm	$(\sum mv' - \sum mv) / \sum mv \times 100$ (%)	$\Delta E_k / E_k \times 100$ (%)*
10	10	0.00	0.0085
10	1	0.00	0.0085
10	0.1	0.00	0.0085
1	0.1	0.00	0.0085

\*/  $E_k$  = kinetic energy before collision;  $\Delta E_k$  = change of kinetic energy after collision

### 3.2 Hertz 접촉 모델(Hertzian contact model)과의 비교해석

두 물체가 접촉하게 되면 물체의 접촉면과 그 내부에 응력이 발생하게 되며 이 응력을 접촉응력(contact stress)이라고 부른다. Hertz는 두 탄성체가 접촉할 때 발생하는 변형과 접촉 응력을 해석적으로 계산할 수 있는 이론을 제시하였다(Hertz, 1881). 두 물체의 충돌 거동에 대한 문제를 개별요소법을 이용한 수치해석 결과와 Hertz 접촉 모델을 이용한 해석적 계산 결과를 비교하여 보았다. Hertz 접촉 모델에서 두 물체의 충돌에 관한 지배 방정식은 다음과 같이 표시된다.  $m_1$ ,  $m_2$ 는 두 블록의 질량이며,  $R_1$ ,  $R_2$ 는 각 블록의 곡률 반경이고  $\nu_1$ ,  $\nu_2$ 는 Poisson 비,  $E_1$ ,  $E_2$ 는 Young's modulus이다.

$$\ddot{U} - a U^{3/2} = 0 \quad (1)$$

$$a = n \cdot R^{1/2} \cdot 4 / (3K_s)$$

$$n = -(m_1 + m_2) / (m_1 \cdot m_2)$$

$$R = (R_1 \cdot R_2) / (R_1 + R_2)$$

$$K_s = (1 - \nu_1^2) / E_1 + (1 - \nu_2^2) / E_2$$

$U$  = distance of approach of the centers of mass

식 (1)에서 에너지 손실 항을 도입하면 다음과 같이 표현된다.

$$\ddot{U} - b U' - a U^{3/2} = 0 \quad (2)$$

$$b = n \cdot K_d$$

$$K_d = -K_{dn} \cdot (m_1 + m_2) / (m_1 \cdot m_2)$$

$K_{dn}$  = parameter related to energy loss

$U'$  = rate of approach

식 (1)과 (2)는 Glauz and Adams 적분방법에 따라 수치해석적 방법으로 해를 구할 수 있다(Glauz, 1970). 계산에 사용된 두 가지 예제(Ex1 및 Ex2)의 물성은 Table 4와 같다.

**Table 4.** Input parameters for analytic contact model

Mass (m)	628.32 g
Young's modulus (E)	(Ex1) 10 MPa (Ex2) 100 MPa
Poisson's ratio ( $\nu$ )	0.25
Radius of curvature (R)	10.0 cm
Velocity at impact ( $V_0$ )	300 cm/s
Energy loss parameter ( $K_{dn}$ )	0.0

접촉이 발생할 때의 식 (1)으로부터 접촉 시간( $t_d$ )과 최대 변위( $U_{max}$ )와의 관계를 해석적으로 구하면 다음과 같다.

$$t_d = 2.94 U_{max} / V_0;$$

$$U_{max} = R \cdot [5 \sqrt{2\pi\rho(1-\nu^2)} V_0^2 / (4E)]^{2/5} \quad (3)$$

$$V_0 = \text{relative velocity at contact} = U'(0)$$

식 (3)의 해석적 결과에 의하면, Ex1의 경우 접촉 후 2.685 ms에서 0.548 cm의 최대 변위(maximum diametral displacement)가 발생하는 것으로 계산되었고 Ex2의 경우에는 접촉 후 1.069 ms에서 0.218 cm의 최대 변위가 발생하는 것으로 계산되었다.

Table 5는 Ex2에 대해 Glauz-Adams 적분방법(GAIM)으로 컴퓨터를 이용하여 접촉 시간에 따라 변화하는 변위, 접촉력, 속도를 수치해석적으로 계산한 결과의 예를 보여준다. 수치해석적 계산 결과는 접촉 후 1.055 ms와 1.075 ms에서 0.21838 cm와 0.21843

cm의 범위의 최대 변위가 일어남으로써 해석적 방법과의 오차가 거의 없는 것으로 계산되었다.

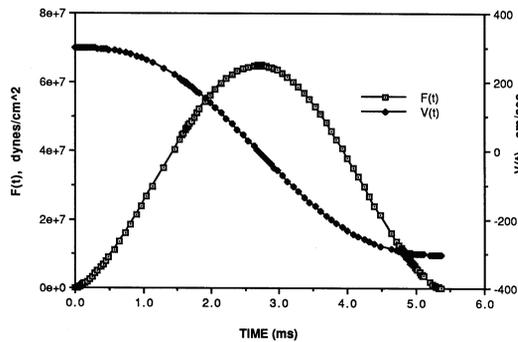
**Table 5.** Numerical solution by Glauz-Adams integration method (Ex2)

Time, ms	F(t), dynes/cm <sup>2</sup>	U(t), cm	V(t), cm/s
0.0175	0.604869E+06	0.00525	300.0
.....	.....		
1.0152	0.161462E+09	0.217653	28.3625
1.0552	0.162267E+09	0.218376	7.7436
1.0752	0.162324E+09	0.218427	-2.5897
1.0852	0.162253E+09	0.218364	-7.7559

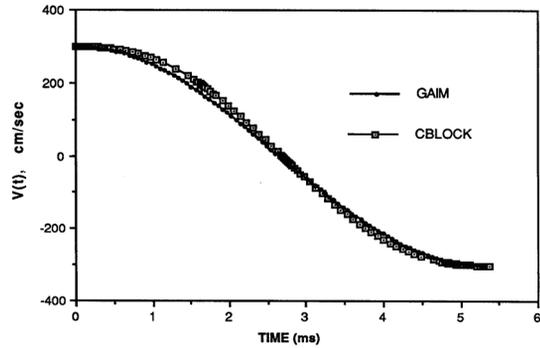
개별요소해석에서는 80개의 변을 가진 다각형으로 디스크 형태의 블록을 제작하여 해석 모델에 대응하는 모델로 사용하였으며, 절리 전단 강성과 절리 수직 강성이 같은 경우 해석적 모델에 대응하는 개별요소 모델의 절리강성 계산 결과는 Table 6과 같다. Fig. 2는 Ex1에 대해 개별요소 프로그램으로 계산한 접촉 후 시간에 따른 충돌 속도와 접촉력을 보여 준다. Fig. 3은 충돌속도에 대한 개별요소 모델과 해석 모델 결과와의 비교로서 유사한 계산결과를 보여 준다.

**Table 6.** CBLOCK model corresponding to analytic model

Analytic model	Distinct element model	
Young's modulus*	Joint stiffness	
Ex1 (10 <sup>7</sup> Pa)	80 sided polygon	7.5 MPa/cm
Ex2 (10 <sup>8</sup> Pa)	80 sided polygon	50 MPa/cm

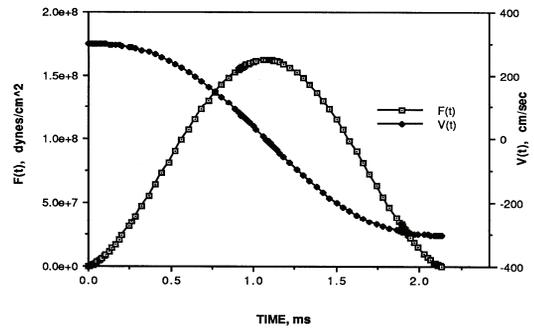


**Fig. 2.** Impact history (Ex1).



**Fig. 3.** Impact velocity histories calculated by analytic model (GAIM) and DEM model.

Fig. 4는 Ex2에 대해 개별요소모델로 계산한 접촉 후 시간에 따른 충돌 속도와 접촉력을 보여 준다. 최대 접촉 변위는 접촉 후 1.07 ms에서 발생하였다.



**Fig. 4.** Impact history (Ex2).

Fig. 5는 Ex2에 대해 Glauz and Adams 적분방법 (GAIM)과 개별요소 방법으로 계산된 시간에 따른 변위 발생 양상을 보여준다. GAIM으로 계산된 직경방향의 최대변위는, Ex1의 경우 0.54 cm, Ex2의 경우 0.21 cm이었다. 이에 대응하는 CBLOCK 계산 결과는 Ex1의 경우 0.48~0.51 cm 범위로서 해석적 계산과는 5.6~11.1% 차이를 보였다. Ex2의 경우 직경방향의 최대변위가 0.19 cm로서 해석적 계산과는 9.5% 차이를 보였다. 이러한 결과로부터 개별요소법에 의한 결과와 해석적 접촉모델 결과와 비교적 잘 일치한다고 볼 수 있으며, 따라서 개별요소 모델 작성 시 절리 강성에 대한 입력 자료 값들은 탄성체의 충돌 해석과

이에 대응하는 개별요소 모델의 절리 강성 값으로부터 선정하는 방법도 유효하다고 할 수 있다.

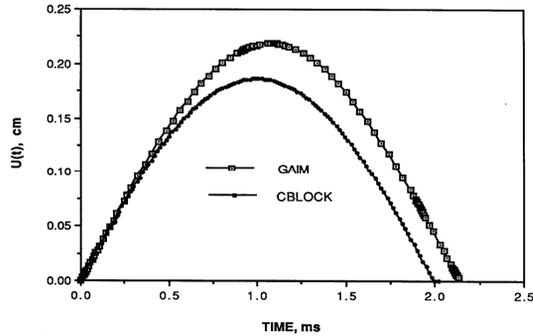


Fig. 5. Displacement histories calculated by GAIM and DEM model.

### 3.3 절리강성과 마찰

수직 충돌과 같이, 전단방향으로의 마찰력을 고려하지 않아도 되는 충돌 문제에서 충돌 후 블록의 거동은 절리 강성 값에 따른 영향의 차이가 없는 것으로 나타났지만, 절리면에서의 마찰력이 고려된다면, 마찰 감쇠(frictional damping)로 인해 물체의 거동이 달라질 수 있다. 블록 m2에 블록 m1이 45° 각도의 경사로 충돌한다고 가정하여 계산을 해 보았다. Table 7은 마찰계수가 0.85일 때 충돌 후 블록의 속도를 계

산한 결과이다. 아래첨자 x, y, t 는 각각 x, y 방향 및 각속도 방향을 의미한다. 계산 결과는 충돌 후 블록의 속도는 절리 강성 값에 따라 달라지고 있음을 보여준다. 그러나 절리 수직 강성에 대한 전단 강성의 비를 나타내는 절리 강성비(joint stiffness ratio, JSR)로 비교해 보면 절리 강성비가 같은 경우 충돌 후 블록의 거동은 거의 같은 것으로 나타남을 볼 수 있다.

Table 8은 충돌 전 후 선형 운동량(linear momentum)과 운동에너지(kinetic energy)의 계산 결과이다. 선형 운동량은 보존되나, 운동 에너지는 마찰 감쇠로 인해 절리 강성에 따라 2.7~10.7% 범위의 에너지 손실이 발생하는 것으로 나타났다. 이를 절리 강성비에 대해 해석할 경우, 절리 강성비가 같은 경우 충돌 후 운동 에너지 손실의 크기는 거의 같은 것으로 계산되었다. 이러한 결과로부터 충돌 후 블록 거동은 절리면의 절리 강성비에 따라 영향이 달라진다고 표현할 수 있다.

### 3.4 절리 강성비와 불연속체 구조물의 안정성

충돌 해석에 있어서 충돌 후 거동은 절리 강성 값보다는 절리 강성비에 따라 영향 정도가 달라짐을 볼 수 있었다. 절리 강성비가 불연속체 암반 구조물의 안정성에 미치는 영향을 살펴보기 위해 Fig. 6과 같은 예제를 사용하였다(Beletchyko et al., 1984).

Table 7. CBLOCK calculations of two-block impact (no mass or stiffness damping,  $\mu = 0.85$ )

Joint normal stiffness (Kn)	Joint shear stiffness (Ks)	Velocity after collision, m1			Velocity after collision, m2		
		Vx1'	Vy1'	Vt1'	Vx2'	Vy2'	Vt2'
GPa/cm	GPa/cm	cm/s	cm/s	rad/s	cm/s	cm/s	rad/s
10	10	127.06	127.73	-6.45	172.94	-127.73	-6.42
10	1	129.93	122.38	-6.80	170.07	-122.38	-6.78
10	0.1	157.97	145.60	0.45	142.03	-145.60	0.48
1	0.1	130.01	122.37	-6.88	169.99	-122.37	-6.78

Table 8. Linear momentum and kinetic energy (no mass or stiffness damping,  $\mu = 0.85$ )

Kn, GPa/cm	JSR*	$(\sum mv' - \sum mv) / \sum mv \times 100$ (%)	$\Delta E_K / E_K \times 100$ (%)
10	1	0.00	10.25
10	1/10	0.00	10.71
10	1/100	0.00	2.73
1	1/10	0.00	10.66

\*/ Joint stiffness Ratio (= joint shear stiffness/joint normal stiffness)

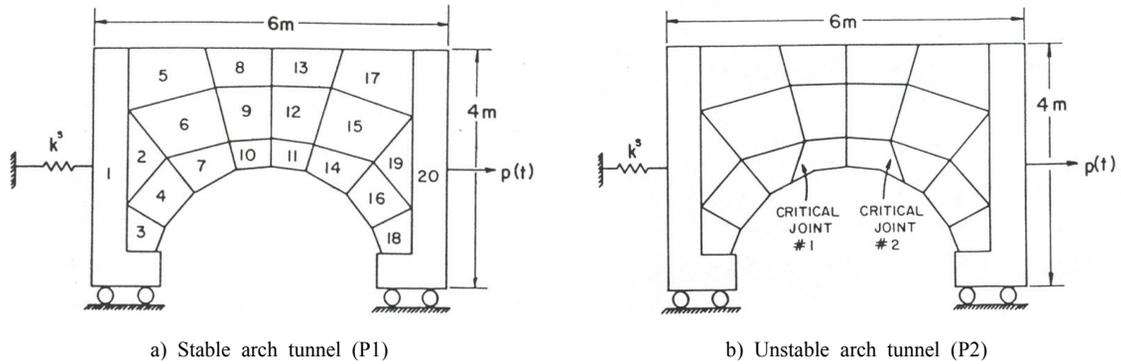


Fig. 6. Examples of arch tunnel.

Table 9. Model parameters

Common parameters	Density ( $\rho$ ) = 2.0 g/cm <sup>3</sup> ; Friction coefficient( $\mu$ ) = 0.5; Gravity (Gy)= 1,000 cm/s <sup>2</sup>
Joint properties	Case J1: $K_n / K_s = 320$ Normal stiffness ( $K_n$ )= 32 GPa/cm; Shear stiffness ( $K_s$ )= 0.1 GPa/cm
	Case J2: $K_n / K_s = 320$ Normal stiffness ( $K_n$ ) = 320 MPa/cm; Shear stiffness ( $K_s$ ) = 1.0 MPa/cm
	Case J3: $K_n / K_s = 1$ Normal stiffness ( $K_n$ ) = 32 GPa/cm; Shear stiffness ( $K_s$ ) =32 GPa/cm
	Case J4: $K_n / K_s = 1$ Normal stiffness ( $K_n$ ) = 320 MPa/cm; Shear stiffness ( $K_s$ ) = 320 MPa/cm
Loading condition	Case L1: Two abutments are fixed in all direction
	Case L2: Left abutment is fixed and load is applied to the other: $F_x = 1.6$ Gdynes

Table 10. Effects of joint properties

Loading condition & joint configuration		L1 & P2		L1 & P1	
Joint property		J1	J2	J3	J4
Explicit calculation	Sliding	No sliding	No sliding	Sliding	Sliding
	Tension	No tensile failure	No tensile failure	Local tensile failure	Local tensile failure
Implicit calculation	Sliding	No sliding(2.88)*	No sliding(2.88)	Sliding(0.01)	Sliding(0.01)
	Tension	Local tensile failure	Local tensile failure	Local tensile failure	Local tensile failure

\* The number indicates factor of safety defined as the ratio of given friction coefficient to calculated friction coefficient to prevent sliding.

Table 9와 10은 사용된 입력변수와 계산 결과를 보여준다. Table 10의 결과에서 볼 수 있듯이 하중 조건 및 절리 패턴과 함께 절리 강성은 불연속체 암반 구조물의 안정성에 영향을 미치는 매우 중요한 변수임을 확인할 수 있다. 또한 낮은 절리 강성비일수록 불안정함을 보이고 있으며, 각 절리 강성 값보다는 절리 강성비의 값이 안정성 평가 지수로 사용될 수 있는 것으로 나타났다.

#### 4. 결론

개별요소 해석에서 절리 강성은 블록 요소 상호 간의 거동을 결정하는 중요한 변수로서 변형의 크기와 파괴 양상에 영향을 주며, 계산 시간 간격의 결정과 함께 요소 중첩으로 인해 발생할 수 있는 수치해석적 불안정성에도 영향을 주는 변수이다. 개별요소법을 이용한 블록 간 충돌 현상의 모델링에 있어서

운동 에너지 손실과 충돌 후 블록의 거동은 절리 강성비와 마찰계수에 따라 영향을 받는 것으로 나타났다. 또한, 절리 강성비는 불연속체 암반 구조물의 안정성에도 영향을 미치는 중요 변수로 나타났다. 그리고 절리 수직 강성이나 전단 강성의 개별적인 값보다는 절리 수직 강성에 대한 전단 강성의 비로 표현되는 절리 강성비의 값이 중요한 평가 지수로 사용될 수 있음을 보여주었다. 따라서 해석의 주관심사가 변형의 크기보다 파괴 양상이나 파괴 후 거동 예측이라면, 입력 자료로서의 절리 강성 값은 실제 실험값과는 다소 차이가 있더라도 수치해석적 안정성을 확보할 수 있는 값의 선정이 가능하지만, 절리 강성비는 그대로 유지하여야 할 필요가 있다. Hertz 접촉모델과의 비교 해석 결과는 절리 강성 값에 따라 접촉력이 형성되는 접촉 시간의 차이를 가져오므로, 그 차이의 누적에 따라 시간적 오차가 커질 수 있는 문제도 고려되어야 함을 보여주었다.

### 감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원의 주요사업(과제코드 GP2017-016)의 지원을 받아 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. Belytschko, T., M. Plesha and C. H. Dowding, 1984, A Computer Method for Stability Analysis of Caverns in Jointed Rock, Int. J. Numer. Anal. Methods in Geomech., Vol. 18, pp. 473-492.
2. Cundall, P. A., 1971, A Computer Model for Simulating Progressive Large Scale Movements in Blocky Rock Systems, Proc. Int. Symp. Rock Fracture, Nancy, France, Paper II-8.
3. Cundall, P. A., 1974, Computerized Design of Rock Slope Using Interactive Graphics for the Input and Output of Geometrical Data, Proc. 16th Symp. Rock Mech., pp. 5-14.
4. Glauz, R. D., 1970, Adams Method of Integration of Differential Equations, Computing Services Report, n.13.
5. Hertz, H., 1881, Über die Brührung fester elastischer Körper, v.92, Jour. für Math., 156p.
6. Ryu, C. H. and W. G. Pariseau, 1986, Numerical Simulation of Fragmentation During the Throw Stage of Blasting, presented at 12th Symp. Soc. Explosive Engineer.
7. Ryu, C. H., 2000, Comparison of Modeling Characteristics of Distinct Element Analysis Based on Implicit and Explicit Algorithm, Tunnel and Underground Space, Vol. 10, No. 3, pp. 410-417.



**류 창 하**  
한국지질자원연구원 책임연구원

Tel: 042-868-3236  
E-mail: cryu@kigam.re.kr



**최 병 희**  
한국지질자원연구원 책임연구원

Tel: 042-868-3237  
E-mail: bhchoi@kigam.re.kr