

Implicit 및 explicit 알고리즘에 기초한 개별요소 수치해석 방법의 모델링 특성 비교 연구

류 창 하

Comparison of Modelling Characteristics of Distinct Element Analysis Based on Implicit and Explicit Algorithm

Chang-Ha Ryu

ABSTRACT The distinct element method has been effectively applied to the analysis of stability and behavior of jointed rock masses. In this paper the modelling characteristics of different types of distinct element model were investigated. Arch tunnel examples were chosen to compare the calculation results of two computer codes, NURBM and CBLOCK, where the former is based on implicit algorithm, and the other on explicit one. CBLOCK calculations show that joint properties are very important parameters in the stability analysis and that the joint stiffness ratio associated with joint configuration could be used as an indicator, whereas NURBM differ from that. Some other disagreements were also identified.

Key Words : Jointed Rock Mass, Distinct Element Method, Numerical Modelling, CBLOCK, NURBM

초 록 절리가 발달한 암반의 거동 특성을 효율적으로 모델링 할 수 있는 수치해석 방법으로서 널리 알려진 개별요소법은 서로 다른 알고리즘에 기초하여 개발된 두 가지 형태의 수치해석 방법으로 발전해 왔다. 본 논문에서는 Plesha 등에 의해 개발된 implicit 알고리즘에 기초한 NURBM과 저자에 의해 개발된 explicit 알고리즘에 기초한 CBLOCK을 이용하여 불연속체 암반의 기초적인 거동 특성을 수치해석적으로 고찰하고 모델링상의 문제점들을 비교 분석하였다. CBLOCK 계산 결과에 의하면 절리의 수직 및 접선 강성비는 절리 분포에 따라 불연속체 암반의 안정성을 좌우하는 중요한 지수로서 사용될 수 있는 것으로 나타나고 있으나 NURBM 계산은 상이한 결과를 보였다. 또한 구조물의 안정성과 국부적인 파괴 거동의 해석에서 두 방법이 상이한 결과를 가져올 수 있는 것으로 나타났고 이는 수치해석적 모델링의 제약적 요소로 작용할 수 있음을 보여주었다.

핵심어 : 절리 암반, 개별요소법, 수치모델링, CBLOCK, NURBM

1. 서 론

현지암반은 절리, 층리, 단층, 틈 등 구조적인 불연속면을 포함하고 있다. 절리와 같은 불연속면이 발달하여 있는 암반의 역학적 거동은 암석 자체의 역학적 특성보다는 불연속면의 역학적 특성에 의해 더 많은 영향을 받으며, 암반에 관련된 공학적 문제들을 처리하는데 있어서 이러한 불연속면들을 이해하고 해석하는 문제는 매우 중요하다.

불연속암반의 역학적 거동해석을 위하여 slide line을 사용하는 유한차분 해석방법이나, 절리요소나 절리의 영향이 고려된 요소를 사용하는 유한요소 해석방법 등이 사용되어 왔다. 그러나 이들 방법은 연속체역학의 범주

내에서 문제를 다루므로 불연속면으로 인한 큰 변위가 예측되는 문제들에 적용하기에는 어려운 점이 있다. 한편 강성 블록 개념에 기초한 개별요소법(Distinct Element Method)은 심도가 깊지 않거나 자유면 부근의 절리가 매우 발달한 불연속체의 모델링 경우 매우 능률적이어서 불연속 암반을 위한 새로운 수치해석 방법으로 정착되어 가고 있다.

개별요소법은 서로 다른 알고리즘에 기초하여 개발된 두 가지 형태의 수치해석 방법으로 발전해 왔다. 하나는 유한요소법과 같이 강성매트릭스를 구성하여 implicit 알

정희원, 한국자원연구소 탐사개발연구부 책임연구원
원고 접수일 : 2000년 8월 2일
원고 심사 완료일 : 2000년 8월 21일

고리즘을 이용하여 해를 구하는 방법을 채택하고 있고 다른 하나는 시간 적분에 의한 explicit 알고리즘으로 해를 구하는 방법을 채택하고 있다. 강성 매트릭스를 형성하여 처리하는 implicit type에 의한 접근 방법은 Belytschko, Plesha 등에 의해 절리 압반의 안정성 해석이나 균열문제에 적용된 바 있으며, explicit type 해석 방법은 Cundall 에 의해 개념이 정립되어 개발 초기 속도가 느리고 용량이 크지 못한 컴퓨터에서의 처리를 위해 기계를 사용하여 첫 소프트웨어가 발표된 이후 UDEC에 이르기까지 개선이 이루어져 왔다.¹⁻⁶⁾ 이와 같은 강성 블록 개념에 기초를 둔 접근방법은 관련 분야에 이용되기 시작하여 BLOCK, DBMS, CBLOCK 등 여러 컴퓨터 모델이 개발되었다.

본 연구에서는 두 가지 해석 방법의 모델링 특성을 고찰하기 위하여 Plesha 등에 의해 개발된 implicit 알고리즘에 기초한 NURBM과 저자에 의해 개발된 explicit 알고리즘에 기초한 CBLOCK을 이용하여 불연속체 압반의 기초적인 거동 특성을 수치해석적으로 고찰하고 모델링상의 문제점들을 비교 분석하였다.

2. 이론적 배경

개별요소법에 의한 수치해석에 있어서 절리 압반은 절리면에 의해 구별되는 요소(distinct element)의 집합체로 모델링 된다. 각 요소는 강성체로 간주되나 인접한 요소들 사이의 겹침(overlap)으로 인한 수치적 접촉을 허용한다. 본 논문에 사용된 수치해석 프로그램은 NURBM과 CBLOCK으로서 각각 implicit 및 explicit 알고리즘에 기초하고 있으며, 각 해석방법의 특성은 다음과 같다.

2.1 Implicit 알고리즘에 기초한 NURBM

NURBM에서 블록과 블록 사이의 상호 작용은 edge-to-edge 접촉에 의해 형성되는 것으로 가정한다. 접촉면상의 수직 및 접선방향의 변위 g_n, g_t 는 Fig. 1에서 slave node의 변위를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$g = B \hat{u} \quad (1)$$

여기서,

$$g^T = [g_n(\hat{x}), g_t(\hat{x})] \quad (2)$$

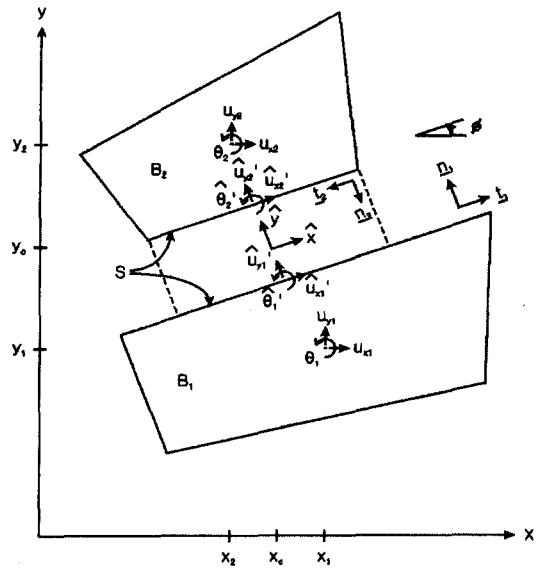


Fig. 1. Edge-to-edge contact.

$$\hat{u}^T = [\hat{u}_{x1}, \hat{u}_{y1}, \hat{\theta}_1, \hat{u}_{x2}, \hat{u}_{y2}, \hat{\theta}_2] \quad (3)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & -1 & -\hat{x} & 0 & 1 & \hat{x} \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

표면력을 절리 강성으로 표시하면,

$$\sigma = k B \hat{u} \quad (5)$$

여기서,

$$\sigma^T = [\sigma_n, \sigma_t] \quad (6)$$

$$k = \begin{pmatrix} k_n & 0 \\ 0 & k_s \end{pmatrix} \quad (7)$$

S 상의 표면력 분포는 다음 식과 같이 slave node에서의 등가 절점력으로 변환할 수 있다.

$$\int_{l_s} B^T \sigma dx = \hat{f} \quad (8)$$

여기서,

$$\hat{f}^T = [\hat{f}_{x1}, \hat{f}_{y1}, \hat{m}_1, \hat{f}_{x2}, \hat{f}_{y2}, \hat{m}_2] \quad (9)$$

(8)식을 절점 변위로 표현하면,

$$\hat{k} \hat{u} = \hat{f} \quad (10)$$

여기서,

$$\hat{k} = \begin{bmatrix} k_s & 0 & 0 & -k_s & 0 & 0 \\ & k_n & 0 & 0 & k_n & 0 \\ & & \frac{k_n l^2}{12} & 0 & 0 & -\frac{k_n l^2}{12} \\ & & & k_s & 0 & 0 \\ \text{symmetric} & & & & k_n & 0 \\ & & & & & \frac{k_n l^2}{12} \end{bmatrix} \quad (11)$$

(10)식을 master node 변위로 표현하면,

$$(\underline{T}^T \hat{k} \underline{T}) \underline{u} = \underline{f} \quad (12)$$

$$\underline{u}^T = [u_{x1}, u_{y1}, \theta_1, u_{x2}, u_{y2}, \theta_2] \quad (13)$$

$$\underline{f}^T = [f_{x1}, f_{y1}, m_1, f_{x2}, f_{y2}, m_2] \quad (14)$$

$$\underline{T} = \begin{bmatrix} C S (-\bar{y}_1 C + \bar{x}_1 S) \\ -S C (\bar{y}_1 C + \bar{x}_1 S) \\ 0 & 0 & 1 & & & \\ & & & C S (-\bar{y}_2 C + \bar{x}_2 S) \\ & & & -S C (\bar{y}_2 C + \bar{x}_2 S) \\ & & & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\bar{x}_1 = x_c - x_1 \quad (16a)$$

$$\bar{y}_1 = y_c - y_1 \quad (16b)$$

$$C = \cos\theta, S = \sin\theta \quad (16c)$$

평형방정식은 다음과 같이 유한요소법과 같은 전형적인 형태로 표시된다.

$$\sum_s (\underline{T}^T \hat{k} \underline{T})^s \underline{u} = \underline{f} \quad (17)$$

각 요소와 전체 시스템의 질점 매트릭스는 질량 m과 모멘트 I로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$M_1 = \begin{bmatrix} m_1 \\ & m_1 \\ & & I_1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\underline{M} = \sum \underline{M}_1 \quad (19)$$

2.2 Explicit 알고리즘에 기초한 CBLOCK

CBLOCK에서 요소간의 접촉은 요소의 절점과 상대 요소의 면과의 상호 위치로부터 고려되며 모든 변형은 절점과 면과의 국부적인 접촉에 의한다고 가정한다. 요소 경계를 이루는 절리면의 stiffness에 의한 변형을 고려한다. 요소간의 상호작용은 절점과 요소면의 접촉조건에 따라 이를 지배하는 구성방정식(friction and stiffness laws)에 의해 결정된다. 구성방정식은 응력과 변형률의 개념보다는 힘과 변위의 개념을 사용하여 요소간의 상호작용을 나타내는 관계로 구성되며 각 요소에 대해 계산된 합력과 모멘트로 부터 요소들의 반응이 계산된다. 이때 각 요소의 정적 및 동적응력 조건에 대한 반응은 시스템을 지배하는 미분방정식의 해를 수치적으로 구함으로써 얻어진다. Fig. 2는 계산과정의 모식도이다.

블록과 블록 사이의 상호 작용은 edge-to-corner 접촉에 의해 형성되는 것으로 가정한다. 접촉력의 계산은 Fig. 3과 같은 접촉 상태에서 다음과 같이 계산된다. 접촉이 발생하면, 접촉점의 주어진 시간 간격에 대한 변위는,

$$\Delta Y_c = \Delta Y_i - \Delta Y_j + \Delta\theta_j(X_c - X_j) - \Delta\theta_i(X_c - X_i) \quad (20)$$

$$\Delta X_c = \Delta X_i - \Delta X_j + \Delta\theta_i(Y_c - Y_j) - \Delta\theta_j(Y_c - Y_i) \quad (21)$$

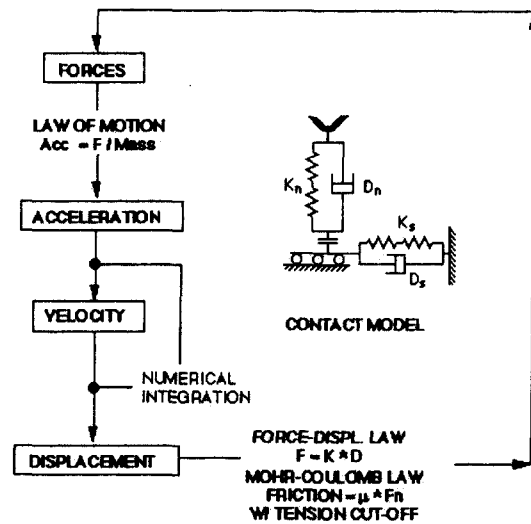


Fig. 2. Calculation cycle of CBLOCK.

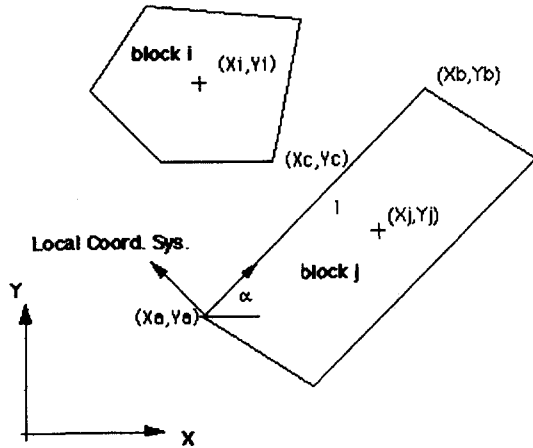


Fig. 3. Corner-to-edge contact.

블록 j의 변에 대한 수직 및 접선 변위는,

$$\Delta s_c = \Delta X_c \cos \alpha + \Delta Y_c \sin \alpha \quad (22)$$

$$\Delta n_c = \Delta Y_c \cos \alpha - \Delta X_c \sin \alpha \quad (23)$$

수직 및 접선력은,

$$F_n = F_n - \Delta n k_n ; D_n = -\Delta n \beta_n \quad (24)$$

$$F_s = F_s + \Delta s k_s ; D_s = -\Delta s \beta_s \quad (25)$$

F = spring for ce; D = dashpot for ce;

k, beta = spring and dashpot constant

한 블록에 대해 각 접촉점에서 발생한 접촉력을 모두 합하고 이로부터 주어진 시간 간격에 대한 블록의 운동이 계산되며 새로운 변위가 발생한 후 변화된 접촉 상태에 따라 계산이 반복된다.

3. 해석에 사용된 예제 및 입력변수

Implicit 및 explicit 알고리즘에 기초한 수치해석모델의 모델링 특성을 비교 분석하기 위하여 사용된 예제는 Belytschko 등이 사용하였던 Fig. 4와 같은 간단한 형상을 가진 두 가지 아치 터널 형태이다.¹⁾

Table 1은 기본 계산에 사용된 입력변수들로서 두 형태의 예제에 공통적으로 적용되었고 Table 2는 동적 경계조건에 대한 입력변수이다.

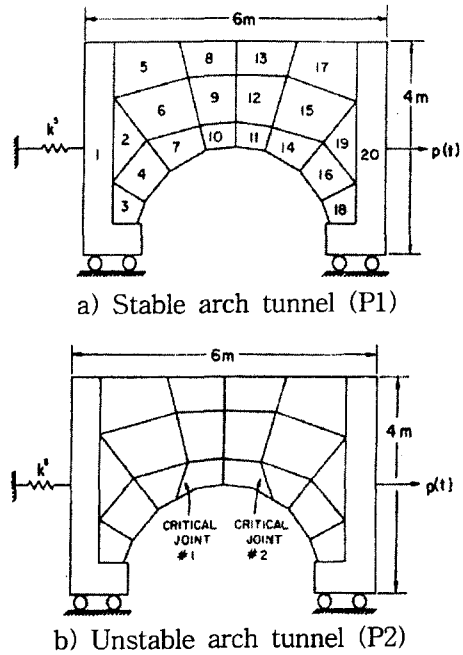


Fig. 4. Examples of arch tunnel.

Table 1. Model parameters.

COMMON PARAMETERS :	
Density (r)	2.0 g/cm ³
Friction Coefficient(μ)	0.5
Gravity (G _y)	1,000 cm/s ²
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 2. Model parameters for transient analysis.

MATERIAL PROPERTIES :	
DENSITY (ρ)	2.0 g/cm ³
GRAVITY (G_y)	1,000 cm/s ²
FRICTION COEFFICIENT (μ)	0.5
FRICTION ANGLE (Φ)	26.6°
NORMAL STIFFNESS (K_n)	3.2 GPa/cm
SHEAR STIFFNESS (K_s)	10 MPa/cm
FOR ABUTMENT:	$K_n = 3.2 \text{ GPa/cm}$
	$K_s = 0, \mu = 0$
LOADING CONDITION :	
$P(t) = -1/2 \rho g d^2 - A \sin \alpha t$	$0 \leq t \leq 2T$
$-1/2 \rho g d^2$	$t \geq 2T$
$1/2 \rho g d^2 = 160 \text{ Mdynes}$	
$A = 80 \text{ Mdynes}$	
$\alpha = 1380 \text{ rad/s}$	
$T = 0.0045 \text{ sec}$	

4. 결과 및 고찰

NURBM의 계산 결과 중에서 P2 절리 모델의 동적 경계조건에 대한 블록 거동은 Fig. 5와 같다. 아치 천장 부분 블록의 속도는 0.03초 후 약 6 cm/s로 계산되었으며, 자유낙하를 가정한다면 30 cm/s에 해당한다. CBLOCK 계산 결과의 예는 Fig. 6 및 Fig. 7과 같다. P1, P2 절리모델에 대해 각각 0.87초 및 0.018초 후의 모습이다.

두 수치해석방법의 계산 결과를 비교하기 위하여 하중 조건과, 절리 분포에 따른 절리의 인장파괴 및 미끄럼 파괴 양상을 Table 3에서 Table 7과 같이 정리하였다. NURBM의 결과는 마찰계수 초기 입력치와 미끄럼이 발생하지 않는 상한치로 계산된 마찰계수의 비로 나타낸 안전계수(Factor of Safety)를 지수로 사용하여 표시하였고, 인장파괴에 대하여는 Table 3의 참고사항에 기재한 바와 같이 4가지 파괴형태로 분류하여 기술하였다.

Table 3, 4, 6 및 7의 결과에서 보는 바와 같이 CBLOCK 계산 결과는 절리 강성과 같은 절리의 특성은 절리압반에 구축된 구조물의 안정성에 중요한 변수가 되며 수직절리강성과 전단절리강성의 비는 안정성을 판단하는 척도로서 사용될 수 있음을 나타내고 있다.

수직절리강성과 전단절리강성의 비를 강성비(stiffness ratio)로 표시할 때 주어진 예제와 같은 구조물의 경우

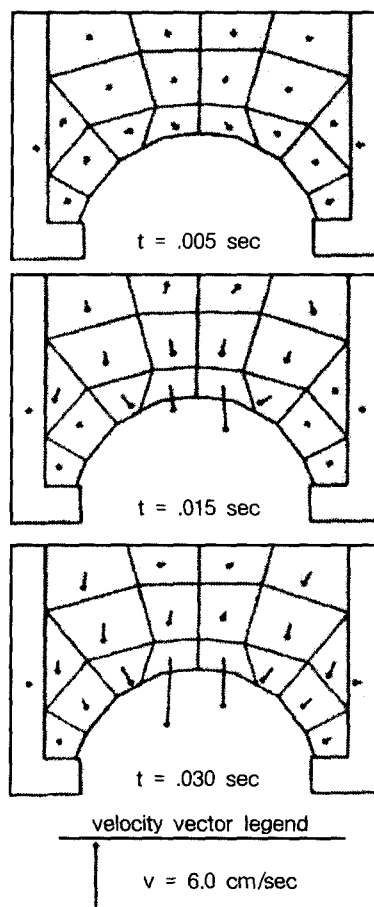


Fig. 5. Results of NURBM calculation for transient boundary condition.

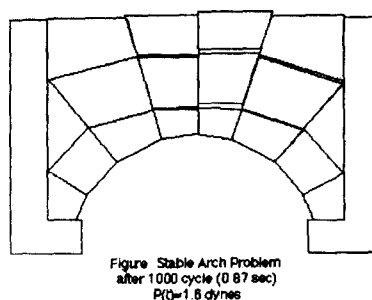


Fig. 6. Result of CBLOCK calculation for P1.

낮은 강성비는 구조물의 불안정한 상태를 심화시키는 것으로 계산되었다. 이와 같은 계산 결과는 Belytschko 등이 NURBM을 이용하여 계산한 결과로서 구조물의 안정성 확보를 위한 안전계수의 최소치는 강성비와 관계없는

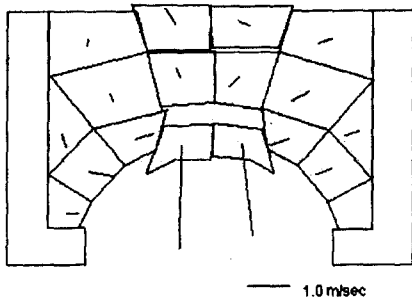


Figure Unstable Arch Problem after 18.2 ms

Fig. 7. Result of CBLOCK calculation for P2.

Table 3. Effects of joint configuration(Joint property : J1)

LOADING CONDITION	L1		L2	
JOINT CONFIGURATION	P1	P2	P1	P2
CBLOCK				
SLIDING ¹⁾	NO	NO	NO	NO
TENSION	NO	NO	NO	NO
NURBM				
SLIDING	NO (2.75) ²⁾	NO (2.36)	NO (1.78)	NO (1.55)
TENSION	YES (T1) ³⁾	YES (T2)	YES (T1)	YES (T2)

- 1)Sliding means that shear failure of joint occurs.
- 2)The number indicates factor of safety defined as the ratio of given friction coefficient to calculated friction coefficient to prevent sliding.
- 3)The notation means following conditions ;
 T1: local tensile failure zone<half length of joint
 T2: local tensile failure zone>half length of joint
 T3: complete joint separation but no roof fall
 T4: complete joint separation and roof fall

것으로 나타난 결과와 비교할 때 매우 흥미있는 사실을 보여준다. (Fig. 8 참조)

Fig. 9는 CBLOCK 계산의 타당성을 살펴보기 위하여 사면상 블록 구조의 미끄럼, 전도 등 기본적인 거동을 해석적 방법인 limit equilibrium 해와 비교한 것으로서 잘 일치하고 있다.

강성비가 같을 때 NURBM의 계산 결과는 Table 7에서 보는 바와 같이 차이가 없으나 CBLOCK의 계산 결과는 파괴 패턴에서 약간의 차이를 보이고 있다. Implicit 알고리즘에서는 초기에 설정된 블록과 블록 경

Table 4. Effects of joint configuration(Joint property : J3)

LOADING CONDITION	L1		L2	
JOINT CONFIGURATION	P1	P2	P1	P2
CBLOCK				
SLIDING	YES	YES	YES	YES
TENSION	YES (T3)	YES (T3)	YES (T3)	YES (T4)
NURBM				
SLIDING	YES (0.01)	YES (0.05)	YES (0.05)	YES (0.07)
TENSION	YES (T3)	YES (T3)	YES (T2)	YES (T2)

Table 5. Effects of loading condition

JOINT CONFIGURATION	P1		P2	
JOINT PROPERTY	J1	J3	J1	J3
CBLOCK				
SLIDING	L1: NO	YES	NO	YES
	L2: NO	YES	NO	YES
TENSION	L1: NO (T3)	YES	NO (T3)	YES
	L2: NO (T3)	YES	NO (T4)	YES
NURBM				
SLIDING	L1: NO (2.75)	YES (0.01)	NO (2.36)	YES (0.05)
	L2: NO (1.78)	YES (0.05)	NO (1.55)	YES (0.07)
TENSION	L1: YES (T1)	YES (T3)	YES (T2)	YES (T3)
	L2: YES (T1)	YES (T2)	YES (T2)	YES (T2)

계의 절리면들을 통하여 상호작용이 발생하며 타 절리와 의 새로운 접촉을 허용하지 않는다. 따라서 절리의 매우 작은 상대 변위가 나타나는 경우에 적용 가능하며 블록 의 거동에 따라 새로운 접촉이 형성될 수 있는 경우에는 수치적인 불안정성을 초래할 수 있다.

하중조건 역시 안정성 해석에 영향을 주는 중요한 변

Table 6. Effects of joint properties.

LOADING CONDITION		L1		L2	
JOINT CONFIGURATION		P1	P2	P1	P2
CBLOCK					
SLIDING	J1 :	NO	NO	NO	NO
	J3 :	YES	YES	YES	YES
TENSION	J1 :	NO	NO	NO	NO
	J3 :	YES	YES	YES	YES
		(T3)	(T3)	(T3)	(T4)
NURBM					
SLIDING	J1 :	NO	NO	NO	NO
		(2.75)	(2.36)	(1.78)	(1.55)
	J3 :	YES	YES	YES	YES
		(0.01)	(0.05)	(0.05)	(0.07)
TENSION	J1 :	YES	YES	YES	YES
		(T1)	(T2)	(T1)	(T2)
	L2 :	YES	YES	YES	YES
		(T3)	(T3)	(T2)	(T2)

Table 7. Effects of joint properties.

LOADING COND.	L1 & P2		L1 & P1	
JOINT CONFIG.	J1	J2	J3	J4
CBLOCK				
SLIDING	NO	NO	YES	YES
TENSION	NO	NO	YES	YES
			(T3)	(T3)
NURBM				
SLIDING	NO	NO	YES	YES
	(2.88)	(2.88)	(0.01)	(0.01)
TENSION	YES	YES	YES	YES
	(T2)	(T2)	(T3)	(T3)

수이며, 이는 절리의 기하학적 분포 특성과 함께 고려되어야 한다. 암반 구조물의 안정성과 거동 특성은 Table 5에서 볼 수 있듯이 절리군의 분포에 좌우된다. 절리암반에서의 지보 조건을 연구한 결과도 연구 대상 암반에 존재하고 있는 특정한 절리 분포 조건에 적용될 수 있으며 절리의 분포 양상이 약간만 변화여도 그 결과는 전혀 다른 양상을 보일 수 있다.⁷⁾

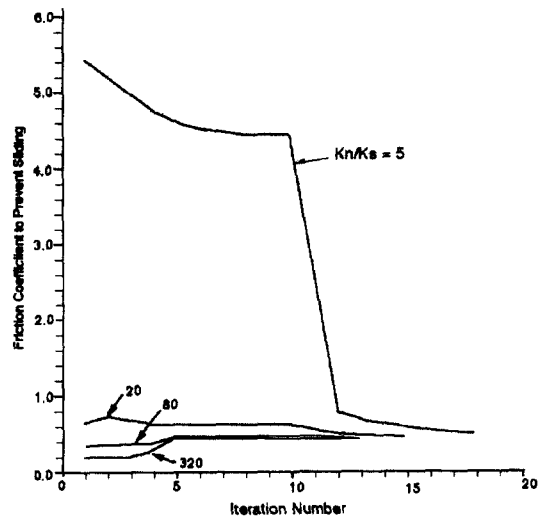


Fig. 8. Analysis of limiting friction state for the unstable arch mesh.

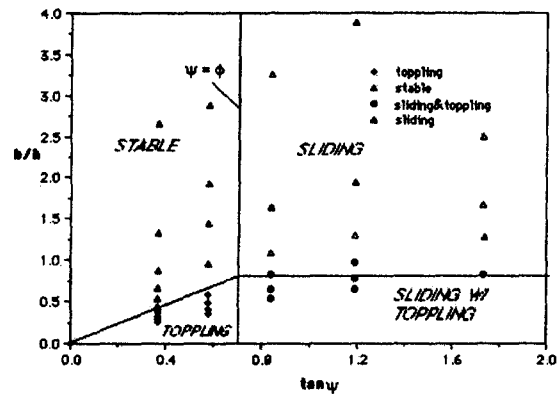


Fig. 9. CBLOCK calculations vs. limit equilibrium solutions ($\phi = 35^\circ$).

또 하나 지적되어야 할 사항은 절리 암반의 안정성과 국부적인 파괴와의 관계이다. NURBM에 의해 계산된 상한치는 절리의 국부적인 파괴에 기초하나 국부적인 파괴가 천반의 붕락과 같은 구조적인 불안정성으로 항상 연결되는 것은 아니라는 사실이다. CBLOCK 모델은 구조물이 불안정한 상태가 될 경우 안정성 또는 불안정성 여부를 판별이 가능하도록 화면상에서 광역적인 파괴양상을 육안으로 관찰할 수 있다는 장점이 있다.

5. 결 론

개별요소법으로서 implicit 알고리즘에 기초한 NURBM

과 explicit 알고리즘에 기초한 CBLOCK의 모델링 특성을 고찰하기 위하여 절리암반내 아치 터널 예제를 대상으로 수치해석적으로 실시하였다. NURBM은 절리 구조계의 안정성을 확보할 수 있는 상한치의 계산이 용이한 반면 절리의 과도한 변형이 예상되는 경우 수치적 불안정성을 초래할 수 있다. CBLOCK은 절리 구조계의 평형상태 판별이 어렵고 계산 시간이 많이 걸리는 반면, 블록의 미끄럼, 회전 등 큰 변형의 처리가 가능한 이점이 있다. CBLOCK 계산 결과에 의하면 절리의 수직 및 접선 강성비는 절리 분포에 따라 불연속체 암반의 안정성을 판단하는 중요한 지수로서 사용될 수 있는 것으로 나타나고 있으나 NURBM 계산은 상이한 결과를 보였다. 또한 구조물의 안정성과 국부적인 파괴 거동의 해석에서 두 방법이 상이한 결과를 가져올 수 있는 것으로 나타났다. 이는 수치해석적 모델링의 제약적 요소로 작용할 수 있음을 보여주었다.

참 고 문 헌

1. Belytschko, T., Plesha, M. & Dowding, C. H., 1984, A Computer Method for Stability Analysis of Caverns in Jointed Rock, *Int. J. Numer. Anal. Methods in Geomech.*, 18, 473-492.
2. Cundall, P., 1971, A Computer Model for Simulation Progressive Large Scale Movements in Blocky Rock System, *Proc. Int. Symp. Rock Fracture*, Nancy, France, Paper II 2-8.
3. Cundall, P., 1974, Computerized Design of Rock Slope Using Interactive Graphics for the Input and Output of Geometrical Data, *Proc. 16th Symp. Rock Mech.*, 5-14.
4. Cundall, P., 1980, UDEC - A Generalized Distinct Element Program for Modelling Jointed Rock, U. S. Army European Research Office and Defence Nuclear Agency, Contract DATA 37-39-C-0548.
5. Plesha, M. E., 1984, A Method for the Transient Analysis of Jointed Media, *Dept. Eng. Mech., Univ. of Wisconsin*, 37.
6. Plesha, M. E. & Aifantis, E. C., 1983, On the Modeling of Rocks with Microstructures, *24th Symp. Rock Mech.*, 27-35.
7. Voegelé, M. D. & Fairhurst, C., 1982, A Numerical Study of Excavation Support Loads in Jointed Rock Masses, *Proc. 23rd Symp. Rock Mech.*, 675-683.

1. Belytschko, T., Plesha, M. & Dowding, C. H., 1984,

류 창 하



1976년 서울대학교 공과대학 자원공학
학과, 공학사
1979년 서울대학교 대학원 자원공학
과, 공학석사
1989년 University of Utah(USA),
공학박사

Tel : 042-868-3236

E-mail : cryu@kigam.re.kr

현재 한국자원연구소 탐사개발연구부 책임연구원