

## 블록理論에 의한 不連續性 岩盤內 터널의 安定性 解析

양 형 식<sup>1)</sup>

### Stability Analysis of Discontinuous Rock by the Block Theory

Hyung Sik Yang

#### ABSTRACT

The block theory with stereographic projection was applied and analyzed on the tunnel section of Samcheok Coal Mine.

The results were as follows :

- 1) Prevail orientations of discontinuity of sandstone around the main driftway of Samcheok Coal Mine were  $(327^\circ, 44^\circ)$ ,  $(13^\circ, 24^\circ)$ ,  $(204^\circ, 65^\circ)$  and  $(225^\circ, 77^\circ)$  in dip and dip direction, respectively.
- 2) Movable blocks of the site were 0110, 0111, 1110(roof), 0100, 0110, 1110(right wall) and 0001, 1001, 1011(left wall). Because of the direction of tunnel, blocks of the left wall was safe. Thus key blocks were those of the roof and the right wall. Maximum height of key block was larger than the width of the tunnel but 2m of the yielded zone is expected in general for 5m width tunnel.
- 3) It is shown that block theory is applicable to large cavern in hard rock analysis.

#### 1. 서 론

岩盤內 공동의 안정설계를 위한 여러가지 방법들이 시도되거나 사용되고 있다. 岩石의 정적 및 유동적 舉動에 주안점을 둔 탄소성 또는

점탄성 유한요소해석법(FEM)이 대표적인 것으로 여러가지 計測技術의 뒷받침으로 그 信賴度を 높여가고 있다. 그러나 岩盤의 거동 특성이 균질하고 변형이 위주가 되는 연약 암반의 경우에는 이런 기법들이 유용하지만 不連續面

\* 1991년 5월 접수.

1) 정회원, 전남대학교 공과대학 조교수.

을 포함하는 강한 암반의 경우에는 암반이 강체적으로 거동하고 변위가 주가 되므로 탄소성 또는 점탄성 유한요소해석을 적용하는 것이 어려울 것으로 보인다. 실제로 資源開發을 목적으로 하지 않는 경우 불연속면을 포함하는 강한 암반 내에 지하공간을 굴착하는 일이 흔하다. 이런 점에서 不連續面의 舉動을 나타내기 위해 既存의 유한요소해석에 절리요소를 고려하는 方法이 시도되었으나 3次元의 절리면을 2차원으로 단순화하여 解析하고 있기 때문에 現場問題의 해석에는 여러가지 제약이 있다. 또 不連續面들로 구획되는 블록을 개개의 요소로 생각하여 해석하는 DEM(Distinct Element Method)도 시도되고 있으나 다양한 節理面에 의해 무작위로 형성되는 블록을 표현하는 것이 불가능하기 때문에 사실상 이차원적이거나 규칙적인 블록으로 가정해야 하는 등 適用의 제한점이 있다. 블록理論은 不連續面들의 관계를 幾何的으로 해석하여 자중 등에 의해 불안정해질 수 있는 블록을 가려내고 이를 지지하는데 필요한 支持力 등을 계산하는 이론이다. 비교적 이론이 간단하고 入力資料도 단순하여 강한 岩盤의 解析에 크게 유용할 것으로 보인다.

본 연구에서는 블록理論<sup>1)</sup>을 간략히 소개하고 적용하였다. 국내에서는 블록이론을 斜面問題<sup>2)</sup>와 峯도 落盤問題<sup>3)</sup>에 적용한 예가 있다. 여기서는 블록이론을 평사투영법으로 도해하고 계산하며 핵블록을 채굴면과 터널 축 단면에 투영하는 프로그램들을 제작하여 그 적용을 시도하였다. 입력자료는 국내 대공동 斷面에 대한 절리 조사자료를 구할 수 없어서 삼척탄좌정암광업소의 運搬峯에 대한 動力資源研究所의 기발표 資料<sup>4)</sup>를 사용하였다.

## 2. 기 초 이 론

### 2.1 블록의 有限性 및 舉動可能性

절리면에 의해 구획되는 암체를 블록이라 한다. 블록은 절리면의 交叉 狀態에 따라 무한한 크기를 갖는 無限블록과 有限한 크기의 유한블록으로 나뉜다. 터널이 굴착되면 블록이 굴착면에 露出되는 상태에 따라 거동가능한 블록과 갇힌 블록(포획블록)으로 나뉜다.

안정에 영향을 미치는 블록은 舉動可能블록으로 거동가능성은 평면의 교점을 한 점에 모은 절리와 블록피라미드의 허실(虛實)에 따라 결정한다.

Fig. 1은 A, B, C, D, E 블록의 유한성과 거동가능성을 설명하는 예시이다. 평면의 번호를 1, 2, 3, 4로 하고 평면상부를 0, 하부를 1. 平行面 사이를 3, 面이 없는 경우를 2로 표시하면 절리블록 A는 001로 쓸 수 있고, (a) 그림에서 보는 바와 같이 무한하다. 이 경우 (b) 그림에서 절리평면을 이동하여 圓點을 공유하도록 만든 절리피라미드 A는 공유영역이 있는 실체(實體,  $JP_A \neq \phi$ )이다. 그러나 채굴면이 만들어지면 A블록은 0011이 되어 (a) 그림에서 보는 것처럼 舉動可能 블록이 되고 이때 블록피라미드는 공유점이 원점뿐인 허체(虛體,  $BP_A = \phi$ )이다.

B즉 010은 허체 피라미드이고( $JP = \phi$ ) 채굴 후 0101로 되어도 여전히 허체( $BP = \phi$ )이다. 이런 블록을 포획블록이라 하며 원래 유한한 절리블록이 채굴면에 노출될 때 생긴다. C는 002로 표기되며 무한블록이고( $JP \neq \phi$ ) 채굴후에도 무한하다( $BP \neq \phi$ ). D는 032로서 무한하나( $JP = \phi$ ) 채굴후에는 거동가능하다( $BP = \phi$ ). E는 B와는 달리 유한블록( $JP = \phi$ )이면서 채굴후에는 거동가능하게 된( $BP = \phi$ ) 예인데 채굴에

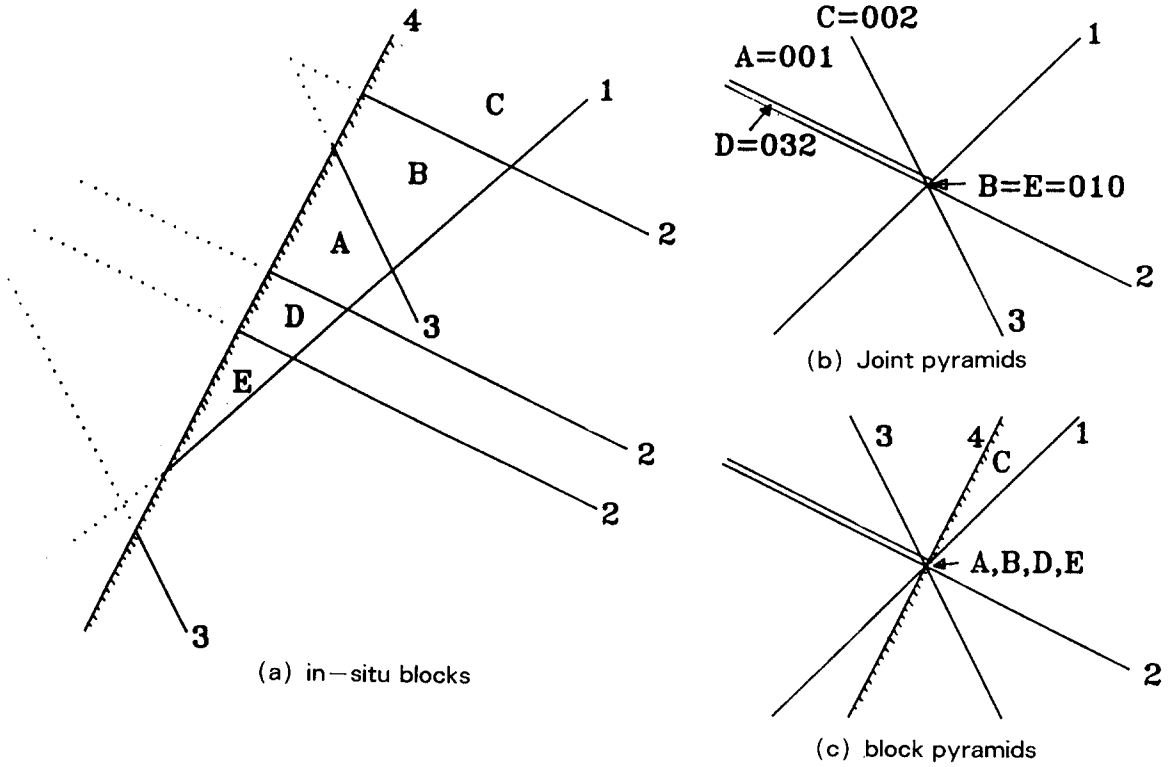


Fig. 1 Finiteness and removability

의해 3번 平面이 결하게 된 것이며 원 블록을 012로 간주할 수 있고 이때  $JP \neq \emptyset$ 이다. E는 자중에 의해 이동할 수 있고 연쇄적인 붕괴를 초래하기 때문에 특히 핵블록(key block)이라 한다.

Table 1에 Fig. 1의 블록들을 요약하였다.

Table 1 Summary description of blocks in Fig. 1.

|   | JP                                        | BP                    | description    |
|---|-------------------------------------------|-----------------------|----------------|
| A | $001 \neq \emptyset$                      | $0011 = \emptyset$    | removable      |
| B | $010 = \emptyset$                         | $0101 = \emptyset$    | tapered        |
| C | $002 \neq \emptyset$                      | $0021 \neq \emptyset$ | infinite       |
| D | $032 \neq \emptyset$                      | $0321 = \emptyset$    | removable      |
| E | $010 = \emptyset$<br>$012 \neq \emptyset$ | $0121 = \emptyset$    | removable, key |

이상에서 보는 바와 같이 채굴후 블록의 舉動可能性은

$$JP \neq \emptyset \tag{1}$$

$$BP = JP \cap EP = \emptyset \tag{2}$$

또는

$$JP \subset SP \tag{2}$$

로 표시된다. 여기서 JP는 절리 피라미드, BP는 블록 피라미드이며 EP와 SP는 각각 채굴과 공간피라미드로서

$$SP = \sim EP \tag{3}$$

이다.

3차원에서 平面과 블록은 평사투영도상에 대

원과 평면영역으로 표시되므로 채굴평면과의 公有關係로부터 유한성을 判斷할 수 있다.<sup>1)4)</sup> 여기서서는 대원의 작도나 평사투영법에 관한 이론은 생략한다.<sup>4)</sup>

터널의 경우는 터널 축 벡터

$$\pm \bar{a} \in JP \tag{4}$$

가 舉動可能블록일 필요충분 조건이다.<sup>1)</sup>

### 2.2 채굴면에 대한 平面의 軌跡

입의 평면이 채굴면에 그리는 軌跡은 채굴면과 평면의 交線 벡터로 표현할 수 있다.

$$I_{ik} = \bar{n}_i \times \bar{n}_k \tag{5}$$

여기서  $\bar{n}_i$ 와  $\bar{n}_k$ 는 平面과 채굴면의 法線벡터이며  $-$ 는 單位벡터를 뜻한다. 수평천정을 제외한 터널의 모든 壁面에서 채굴면과 수평면의 交線 벡터

$$h_r = \bar{n}_k \times \bar{z} \tag{6}$$

를 기준으로 하면 수평면에 대한 交線의 傾斜角은

$$\delta = \cos^{-1}(\bar{I}_{ik} \cdot \bar{h}_r) \tag{7}$$

으로 표시된다.(Fig. 2 (a)).

한편 수평천정에서는 모든 交線이 수평면상에 존재하므로 새로운 기준 벡터인 북향 단위 벡터  $\bar{y}$ 와 交線의 경사각

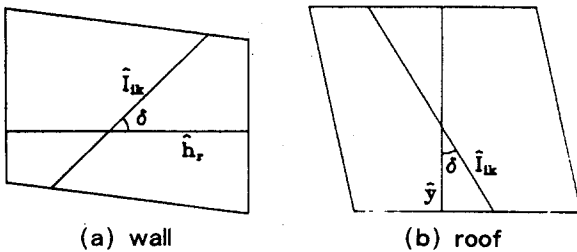


Fig. 2 Trace vectors on the wall and roof

$$\delta = \cos^{-1}(\bar{I}_{ik} \cdot \bar{y}) \tag{8}$$

으로 표시할 수 있다(Fig. 2 (b)).

### 2.3 舉動可能 블록의 투영

터널의 축방향 벡터를  $\bar{a}$ 라 하고 그 향을 진행방향의 반대방향으로 하면 斷面의 좌표벡터는

$$\begin{aligned} x_o &= \bar{z} \times \bar{a} \\ y_o &= \bar{a} \times x_o = \bar{a} \times (\bar{z} \times \bar{a}) \end{aligned} \tag{9}$$

로 된다. 여기서  $\bar{z}$ 는 수평면의 法線 單位벡터이다.

舉動可能블록의 최대크기와 모양은 터널斷面に 블록을 투영시켜 구할 수 있다. 터널블록의 舉動可能性은 舉動可能性 정리<sup>1)</sup>

$$\begin{aligned} JP &\neq \phi \\ EP \cap JP &= \phi \\ EP &= U(n(\theta_1)) \cup U(\bar{n}(\theta_m)) \\ \theta_m - \theta_1 &\leq 180^\circ \end{aligned} \tag{10}$$

로부터 구할 수 있다. 여기서  $U(\bar{n}(\theta_m))$ 는 斷面의  $y_o$ 로부터 시계방향으로  $\theta$ 방향인 法線 벡터로 표시되는 면이다.

斷面に 표시되는 블록모서리의 투영은  $\bar{a}$ 가 단면의 法線벡터와 같으므로

$$\begin{aligned} I_{ij}^1 \times \bar{a} &= \pm \bar{n}(\eta_1) \\ I_{ij}^2 \times \bar{a} &= \pm \bar{n}(\eta_1) \end{aligned} \tag{11}$$

과 같이 되므로 이들로부터 터널 채굴면에 나타나는 舉動可能 블록의 최대크기를 그릴 수 있다(Fig. 3).

### 3. 適用 및 檢討

삼척탄좌 정암광업소의 갱도 周邊 地質은 사동층, 장성층 및 금천층의 협탄층세일들과 세립

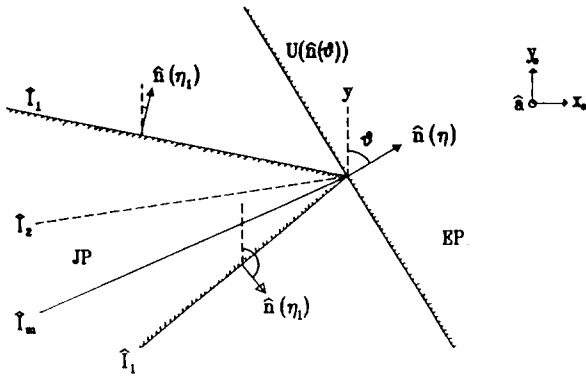


Fig. 3 Projection of a JP in the tunnel section

에서 조립에 이르는 암회색 사암들이 교차해 있고 그 위를 고방산통의 담회색 조립사암이 덮고 있다.

전체적으로 향사구조여서 개발은 상반인 고방산통의 사암층에 수갱을 굴하하고 이로부터 運搬갱, 좌우상반갱을 거쳐 크로스로 사동통 岩盤을 관통하여 탄층에 接近하는 방식으로 되어 있다. 본 연구에서는 주운반 갱도가 위치하는 고방산통의 사암에 대한 地質調査 결과로부터 방향성 해석을 수행하고 이를 600mL의 동부 운반갱도에 적용하였다. 갱도의 형태는 D형으로서 편의상 천정은 수평하고 암벽면 자체는 적절한 것으로 가정하여 처리하고 축단면 해석에서는 D형과 장방형 두가지로 하여 적용하였다.

Fig. 4는 조사대상지역 사암의 不連續面 분포도이다. 이로부터 구한 사암의 우세한 節理方向은 Table 2와 같다.

최빈절리는 傾斜方向 327°, 傾斜 44° 와 傾斜方向 13°, 傾斜 24° 의 범위에 있으며 그 외는 빈도수가 뚜렷한 절리의 경향이 보이지 않았으나 5% 빈도의 소절리군을 택하여 해석에 사용하였다.

Table 2 Joint origin of sandstone of Samchok Coal Mine.

| Rock       | Sandstone |               |           |
|------------|-----------|---------------|-----------|
| Prevalence | Dip       | Dip direction | Frequency |
| 1          | 44°       | 327°          | 11        |
| 2          | 24°       | 13°           | 10        |
| 3          | 65°       | 204°          | 5         |
| 4          | 77°       | 225°          | 5         |

해석갱도는 고방산통의 조립사암만을 지나는 것으로 하였다. 갱도 전반부의 주향은 N36~44°W, 후반부는 N79~84°W 및 N 5~8°E로 되어 있다. 여기서는 600mL의 전반부 운반갱도를 모델로 하여 N44°W(傾斜方向 46°)를 택하였고 경사는 0°로 하였다.

Fig. 5는 고방산통 사암 내에 존재할 수 있는 일반적인 절리피라미드를 나타낸다. 포획블록은 0101 및 1010블록이다. 便宜上 둘 이상의 블록이 합성되어 나타나는 즉, 平面의 일부가

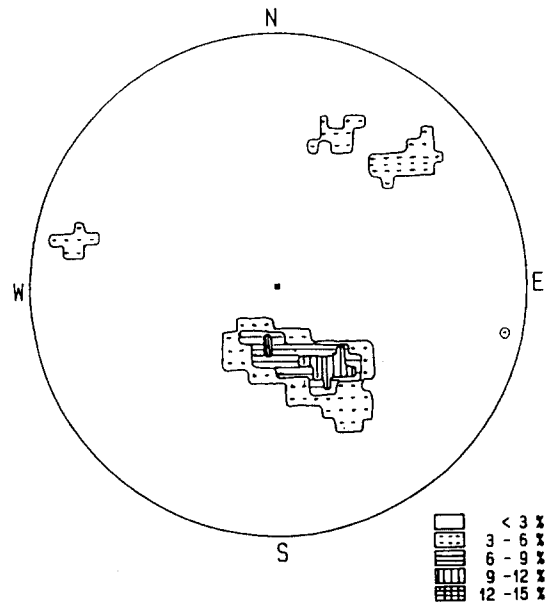


Fig. 4 Pi diagram of Samcheek sandstone

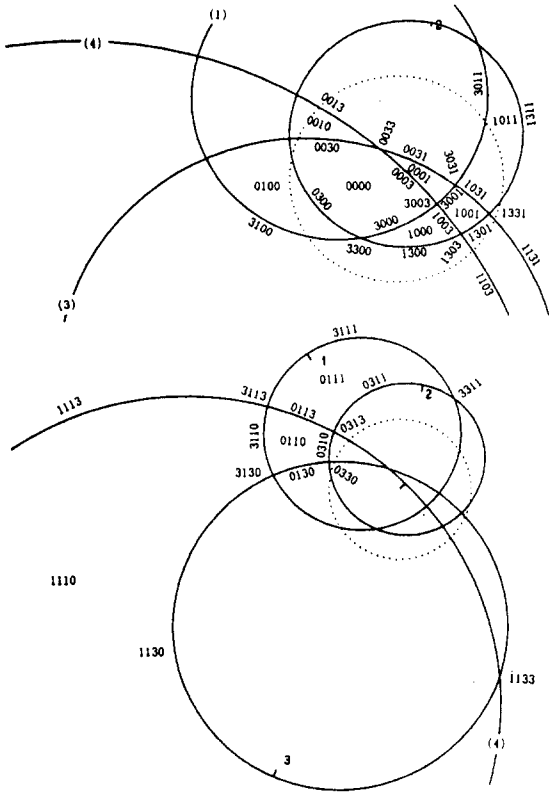


Fig. 5 Joint blocks of sandstone layer

결여되어 생성되는 블록들은 표시를 생략하였다.

천정부부분의 블록은 천정이 수평하므로 採掘平面은 기준원과 일치한다. 따라서 0110, 0111, 1110 등의 블록과 한 平面이 반복출현하는 3110, 3111, 0310, 0311, 0130, 1130 및 0113, 1113 들이 거동가능블록이다. 이들은 모두 자중에 의하여 낙하가능한 블록으로서 그 최대크기는 굴착면의 폭에 좌우된다. 平面이 둘 중복되는 블록은 3311, 3130, 3113, 0330, 0313, 1133 등이 있으나 舉動의 방향이 고정되어 비교적 안정하거나 중복이 없는 블록의 부분으로서 거동한다.

좌우벽면에 나타나는 블록은 막장으로 진행하는 방향으로 보아 오른쪽 벽면에는 0100,

0110, 1110이 (Fig. 6), 왼쪽벽면에는 0001, 1001, 1011 등의 블록이 거동가능한 것으로 나타났으나(Fig. 7) 중력의 작용방향과 터널의 방향에 따라 왼쪽 벽면의 블록은 전부 안전하다(Fig. 9 참조). 또 오른쪽 벽면에서 한 平面이 反復出現하는 3100, 3110, 0300, 0310, 0130, 1130과 0113, 1113도 출현가능성이 많은 것으로 보인다. 거동가능블록을 Table 3에 정리하였다.

Fig. 8은 천정과 벽에 나타나는 거동가능 블록들의 상대적 규모를 터널 斷面에 투영시켜 나타낸 것이다. 5m 폭의 運搬坑도의 경우 천정부의 최대블록의 높이는 1110으로서 터널 폭보다 높은 블록이 예상되나 실제 크기는 같은 형태의 더 작은 낙반블록이 예상된다. 그 외는 0110, 0111 등에서는 2m 이하의 블록이

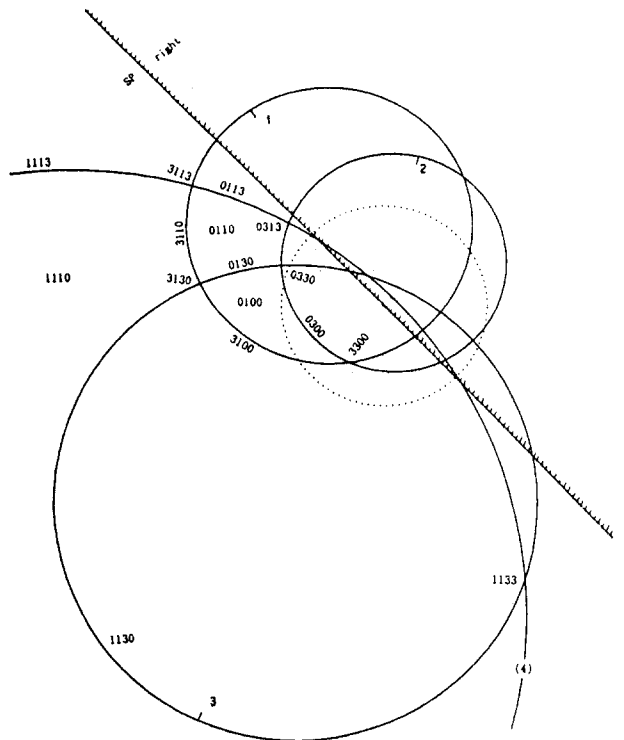
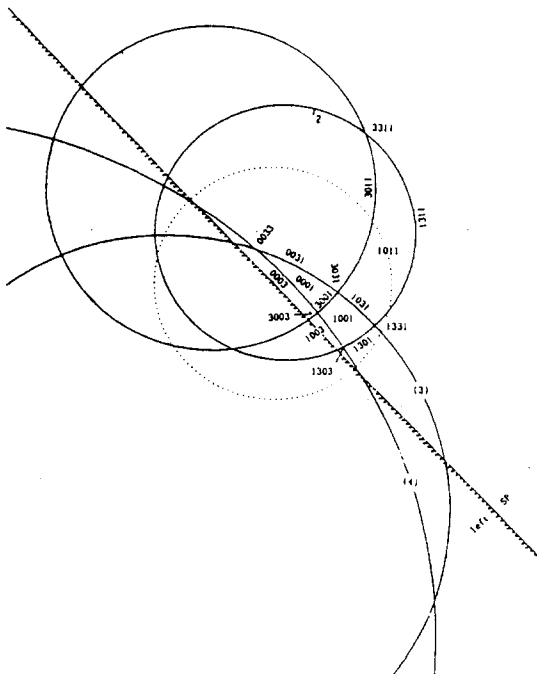


Fig. 6 Movable blocks on the right wall

**Table 3 Movable and tapered blocks of the site:**

|                | Location                 | Block code               |
|----------------|--------------------------|--------------------------|
| Movable Blocks | Roof                     | 0110 0111 1110 0113 0130 |
|                |                          | 0310 0311 1113 1130 3110 |
|                |                          | 3111 0313 0330 1133 3113 |
|                |                          | 3130 3311                |
|                | Right wall               | 0100 0110 1110 0113 0130 |
|                |                          | 0300 0313 1113 1130 3100 |
|                |                          | 3110 0313 0330 1133 3113 |
|                |                          | 3130 3300                |
|                | Left wall                | 0001 1001 1011 0003 0031 |
|                |                          | 1003 1031 1301 1311 3001 |
|                |                          | 3011 0033 1303 1331 3003 |
|                |                          | 3031 3311                |
| Tapered Blocks | 0101 0103 0131 0133 0301 |                          |
|                | 0303 0331 1010 1013 1030 |                          |
|                | 1033 1310 1313 1330 3010 |                          |
|                | 3013 3030 3101 3103 3131 |                          |
|                | 3301 3310                |                          |



**Fig. 7 Movable blocks on the left wall**

豫檢된다. 1111블록은 장방형 단면에서는 출현하지 않으나 천정이 曲面인 경우에만 나타나는 것으로 크기는 작다.

Fig. 9는 採掘面에 나타나는 이들 블록의 형태와 출현가능한 궤적을 보인 것이다. 블록의 모양은 平面들의 間隔에 따라 달라질 수 있으나 實測資料가 없어 여기서는 가능한 모양 중의 한가지 만을 나타낸다.

이상의 적용례는 블록理論이 포함하는 다양한 機能中의 한가지를 보인 것이다. 不連續面의 출현(궤적)을 體系的으로 조사하면 임의 벽면에 나타날 수 있는 궤적을 再構成할 수 있으며 핵블록을 극소화하는 터널의 方向을 選擇할 수 있고 핵블록을 지지하는데 필요한 지보량이나 支持力을 산출할 수도 있다.

본 연구에서도 간단한 節理平面 資料만으로 핵블록의 형태와 크기를 구할 수 있어 既存의 數値解析과 병용하면 지하구조물의 안정해석에 유용하리라 생각된다. 따라서 추후의 대공동 斷面의 設計를 위해서는 절리면의 조사가 필수적임은 물론 파일로트 터널 굴착시에 體系的으로 不連續面을 조사하여 본 단면의 지보시공의 자료로 확보해야 할 것으로 본다.<sup>5)</sup>

#### 4. 결 론

블록이론을 이용해 강제거동을 하는 압반내 터널의 舉動可能性을 解析하고 안정에 큰 影響을 미치는 핵블록을 투영하는 방법에 대하여 연구한 결과 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 삼척탄좌 주운반갱도 周邊 사암층의 不連續面 傾斜方向과 경사는(327°, 44°), (13°, 24°), (204°, 65°) 및 (225°, 77°) 등이다.
- 2) 삼척탄좌 주운반갱도의 舉動可能 블록은 천정의 0110, 0111, 1110, 오른쪽 벽의

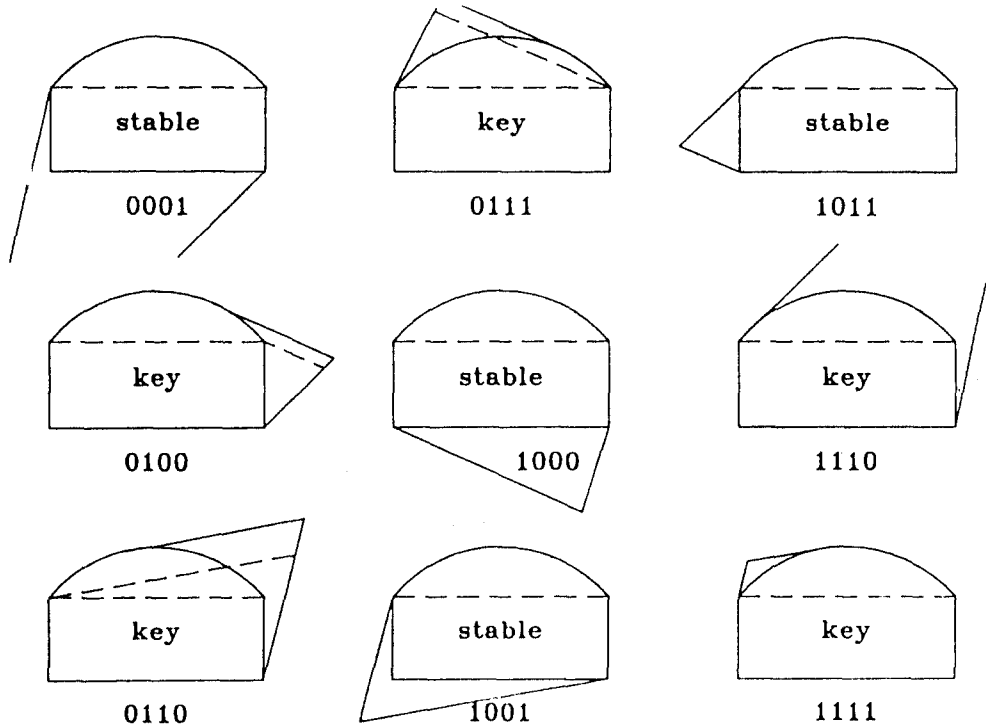


Fig. 8 Projection of key blocks on tunnel section.

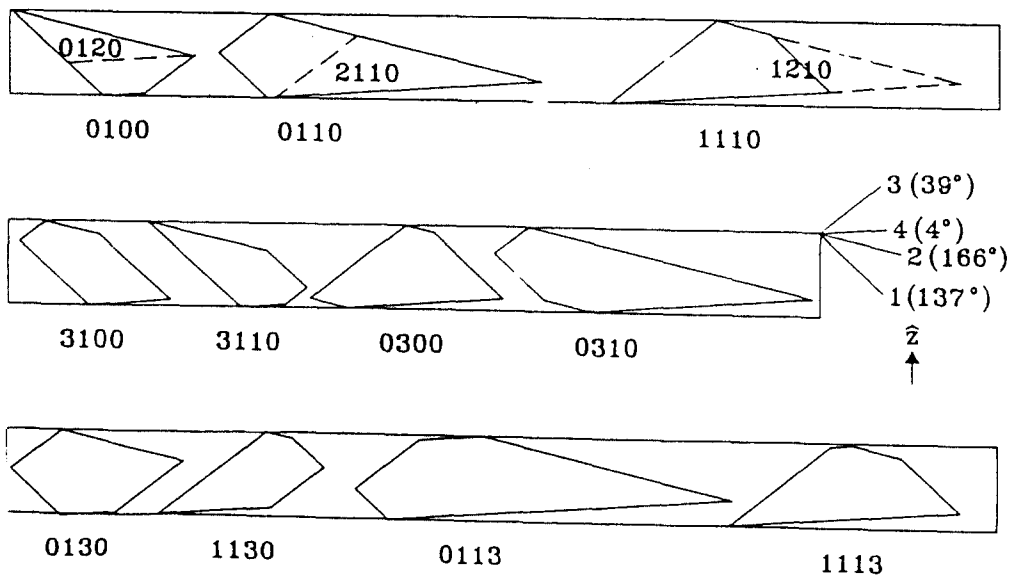


Fig. 9 Typical traces of movable blocks on the right wall



0100, 0110, 1110 및 왼쪽벽의 0001, 1001, 1011 등이나 터널의 방향에 따라 핵블록은 천정과 오른쪽 벽에만 나타난다. 최대 핵블록의 높이는 터널폭 보다도 높을 것이나 실제 이완영역은 2m정도로 예상된다.

- 3) 터널의 벽면과 천정에 나타나는 평면의 궤적과 핵블록의 모양이 효과적으로 표현되어 대형 지하공간에서의適用可能性이 높을 것으로 기대된다.

#### 參 考 文 獻

- 1) Goodman, R.E. & G. Shi, 1985, Block Theory and Its Application to Rock Engineering, Prentice Hall, p. 338.
- 2) 張根茂, 1989, Block Theory를 이용한 岩盤斜面の 安定性 解析, 서울大學校 大學院 석사학위 논문.
- 3) 양형식, 이희근, 1991, 블록이론을 이용한 낙반해석, 韓國資源工學會紙, 26.
- 4) 韓國動力資源研究所 광산공학연구실, 1986, 深部 大斷面 施設 坑道에 對한 新支保法 (NATM) 設計, 한국동력자원연구소, 서울, p. 94.
- 5) Hoek, E. & E. T. Brown, 1980, Underground Excavations in Rock, Inst. Min. Metall., London, 191—197 of p. 527.