

## 절리면 실측데이터의 통계처리와 블록이론을 이용한 터널안정해석 사례연구 Statistical Analysis of Observed Discontinuity Data and Case Study of Tunnel Stability using Block Theory

이인모<sup>1)</sup>, In-Mo Lee, 박준경<sup>2)</sup>, Jun-Kyung Park, 송승원<sup>3)</sup>, Seung-Won Song

<sup>1)</sup> 고려대학교 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engrg., Korea Univ.

<sup>2)</sup> 고려대학교 토목환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Korea Univ.

<sup>3)</sup> (주) 청석엔지니어링 지반공학부 이사, Manager, Geotechnical Dept., Chung-Suk Eng. Co., Ltd.

**SYNOPSIS** : A case study of applying the block theory to an actual tunnel was presented in this paper. The effect of discontinuity orientation variability on assessing the existence of a keyblock and its size and shape is studied and compared with observed field data. Unrolled trace map was drawn based on the face mapping performed in-situ, and a statistical analysis is performed to quantify the discontinuity orientation variability. It was found that the keyblock shape and size obtained from the block analysis with the consideration of the discontinuity orientation variability showed better agreement with field overbreak shape and size than that based on the mean value of discontinuity orientation.

**Key words** : discontinuity, block theory, unrolled trace map, keyblock, rock excavation

### 1. 서론

많은 불연속면을 가진 암반내에 터널, 지하공동등의 구조물을 건설하게 되는 경우 불연속면들과 굴착으로 인해 생성되는 자유면에 의해 다양한 기하학적 형상을 가지는 블록들이 발생하게 된다. 암 자체의 강도는 일반적으로 파괴가 발생하지 않을 정도의 충분한 강도를 가지고 있으므로 불연속면을 따라 발생하는 미끄러짐(sliding)파괴나 천정부로부터의 붕락(fall)등이 주된 파괴유형이 된다.

전통적으로 위와 같은 종류의 파괴유형에 대하여 평사투영법을 이용하여 안전성을 평가하는 방법이 많이 사용되어 왔으나 이 방법은 정량적인 안정성 평가를 해줄 수 없다는 단점을 내포하고 있다. 최근에 블록이론(Goodman and Shi, 1985)에 의해 이러한 문제를 해결하려는 시도가 이루어지고 있다. 그러나 블록이론에서는 현장에서 조사된 불연속면의 방향을 특정적인 값으로 고정시켜서 해석을 실시하므로 불연속면군(discontinuity set)의 방향성이 같은 평균값을 갖는다 하더라도 분산정도가 다른 경우에는 현장에서 나타나는 존재양상이나 이것들의 조합으로 이루어지는 블록의 크기와 형상은 서로 차이를 보이게 된다.

최근의 연구결과 및 현장조사성과에 의하면 터널 등의 지하구조물에서 가장 많이 생성되는 키블록은 3개의 불연속면에 의해 생성되는 쉐기형상의 사면체블록인 것으로 알려져 있다(Kuszmaw, 1993). 실제

로 이번의 연구대상인 통신구 터널의 실측결과에서도 이와 같은 경향이 나타났다. 본 논문에서는 실제로 설계시공이 완료된 통신구터널의 천정부 및 측벽부로부터 실측된 불연속면의 분포양상을 통계처리를 이용하여 대표절리군을 산정하고, 각 절리군의 분산정도를 합리적으로 고려하여 최대키블록을 산정하여 현장 실측데이터와 비교하여 블록이론의 현장적용성 여부를 연구하였다.

## 2. 사례터널의 개요

이번 연구에 이용된 ○○통신구터널은 연장이 922m, 직경 3.5m로 단면이 일정하고, 심도는 대략 지표로부터 30~35m 정도의 깊이에 위치하고 있다. 예비조사단계에서 16개소에 대해 시추조사(boring)를 실시하였으며 표준관입시험, 현장양수시험등의 원위치시험과 실내시험, 암석코어의 일축압축강도시험, 삼축압축강도시험, 탄성과속도측정시험등을 실시하였다. 연구대상 지역의 지질상태는 경기편마암 복합체대의 일부로서 주로 흑운모화강편마암과 화성암류 및 층적층등으로 구성되어 있다. 공학적으로는 터널이 위치하게 되는 깊이에 경암에서 풍화암까지 다양한 암종이 분포하고 있음을 조사결과로부터 알 수 있었다. 터널의 천정부 및 측벽부로부터 실측한 단층(fault), 절리(joint), 엽리면(foliation)등의 불연속면 정보를 이용하여 터널의 종단면 및 횡단면에 따른 지층분포와 터널의 표준단면을 그림 1.에 표시하였다.

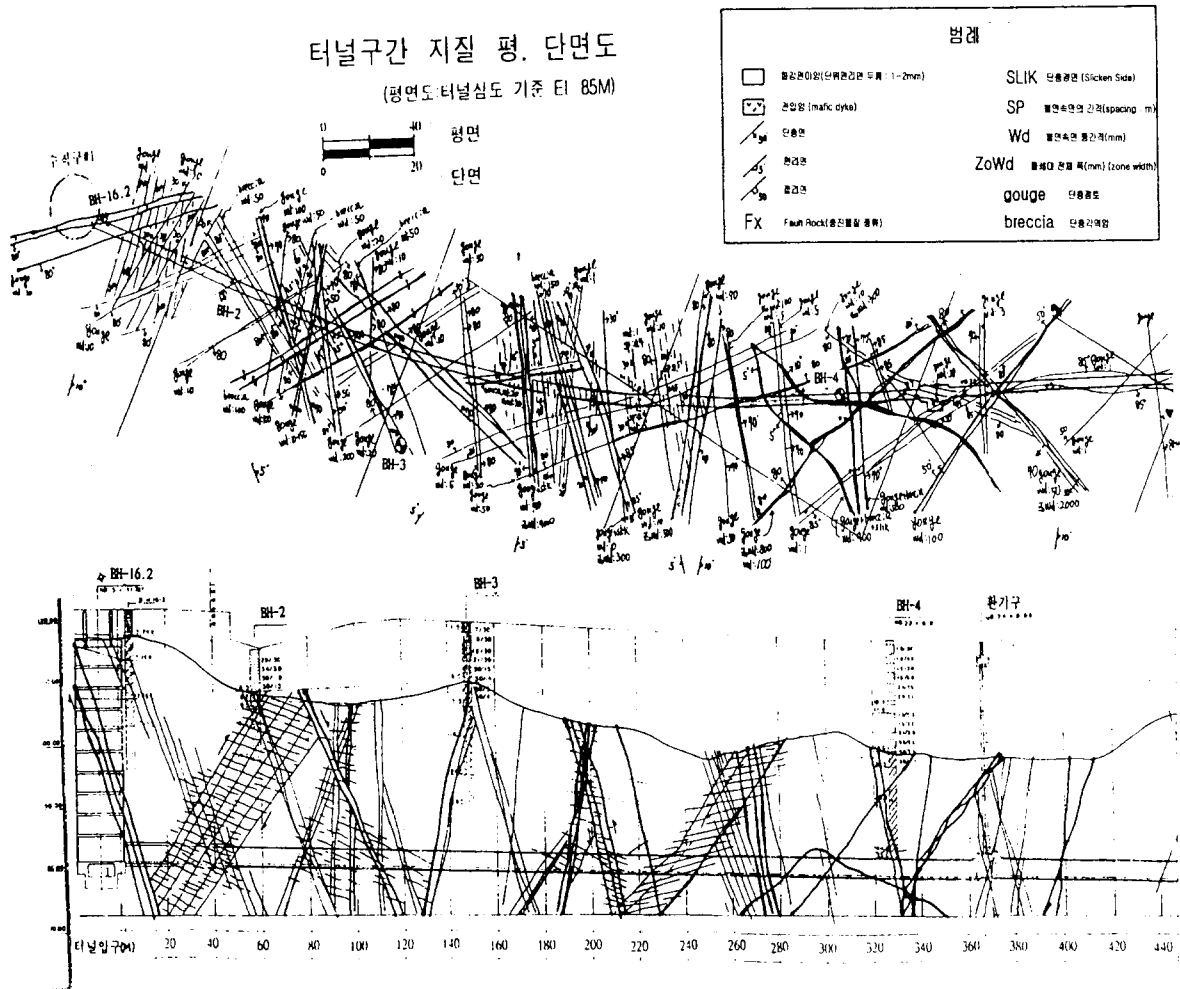
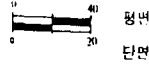


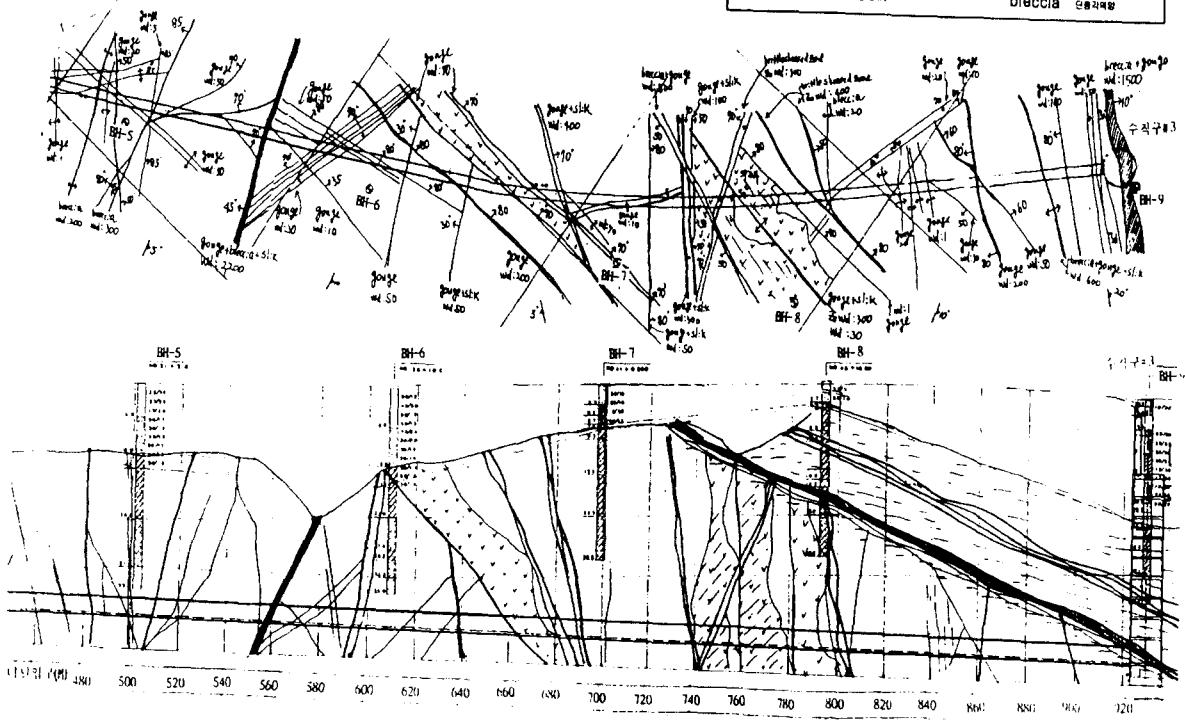
그림 1. 터널의 종방향, 횡방향 지질분포도와 표준단면도(계속)

# 터널구간 지질 평.단면도

(평면도 터널삼도 기준 타 85M)



범례	
	SLIK 단층정면 (Slicken Side)
	SP 불연속면 간격 (spacing: m)
	Wd 불연속면 폭 (mm)
	ZoWd 불연속면 폭 (zone width)
	gouge 응축물
	breccia 단층지역상
	FX Fault Rock(불연속면 폭상)



## 표준 단면

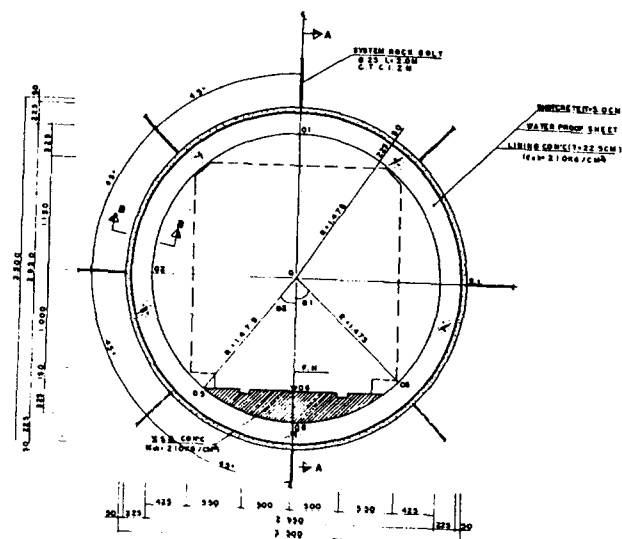


그림 1. 터널의 종방향, 횡방향 지질분포도와 표준단면도

현장에서의 실측한 자료로부터 지질조사도(unrolled trace map)를 작성하였으며, 이로부터 파악된 불연속면들의 전체적인 경향은 그림 2.에서 보는 바와 같이 어떤 일정한 경향성을 갖지 않는 것으로 나타났다. 그림 3.에는 터널의 내부에서 관측한 지질조사도(unrolled trace map) 결과의 일부를 낙반현상이 발생한 구간을 중심으로 수록하였고, 그림 4.에는 지질조사도를 이용하여 작성한 지질구조 개념도를 수록하였다.

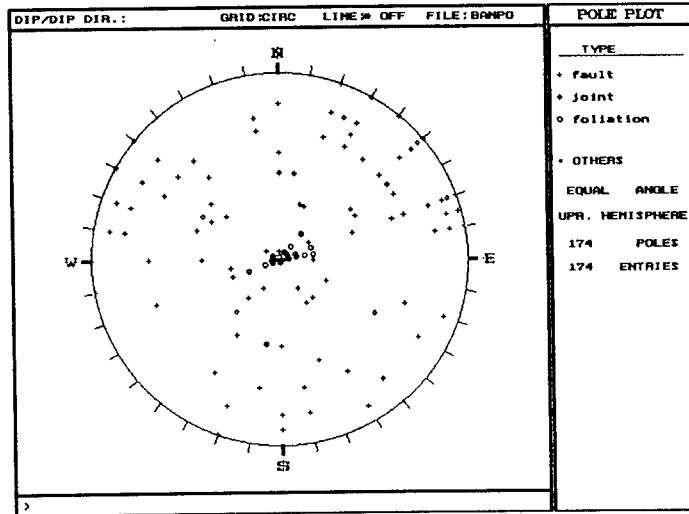
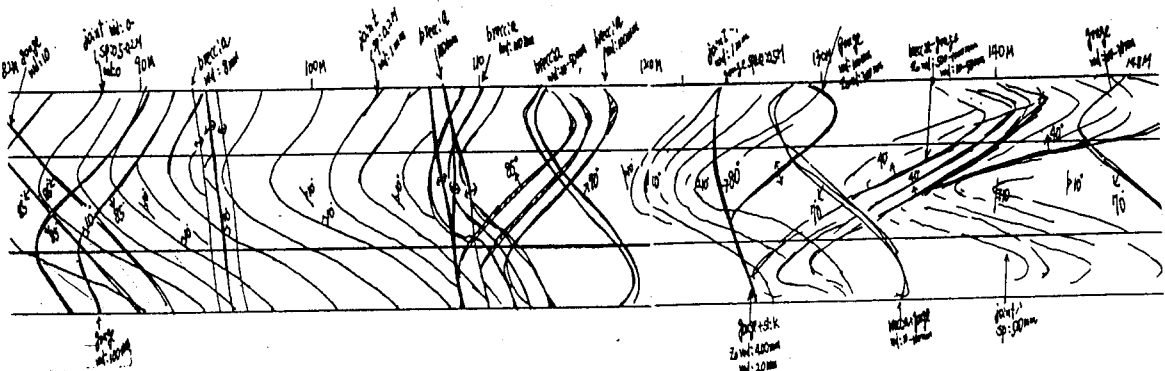
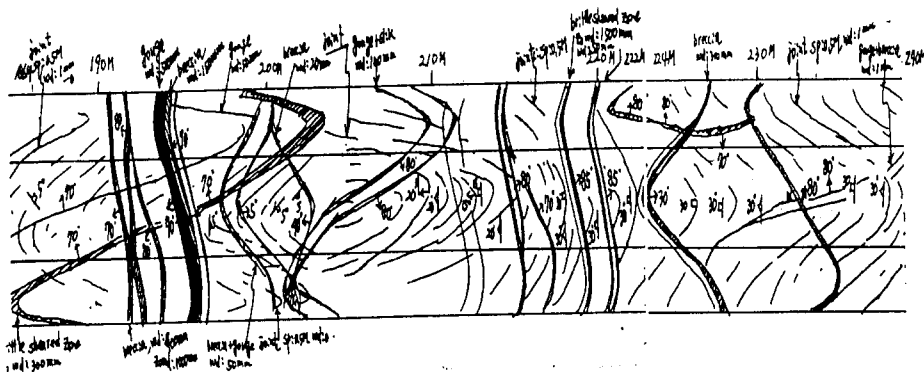


그림 2. 터널전구간의 불연속면 실측데이터

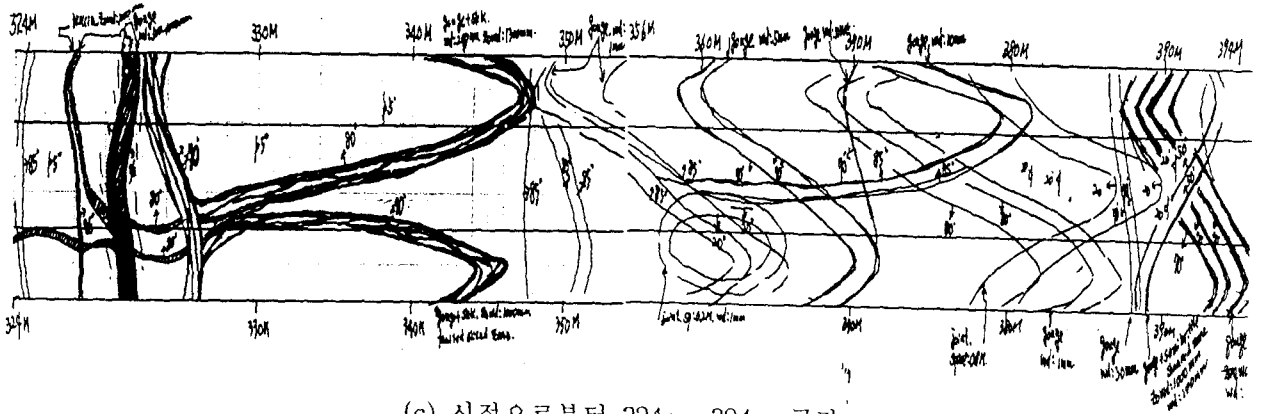


(a) 시점으로부터 82m~150m 구간

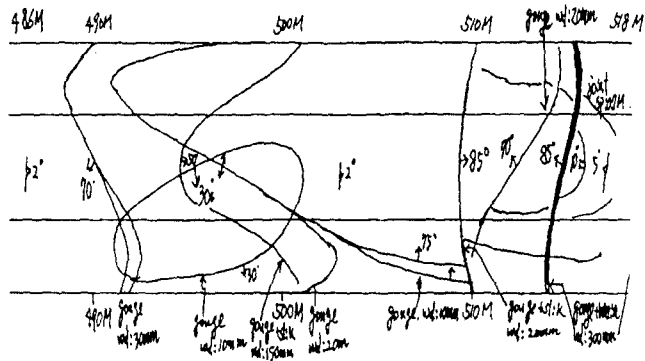


(b) 시점으로부터 184m~240m 구간

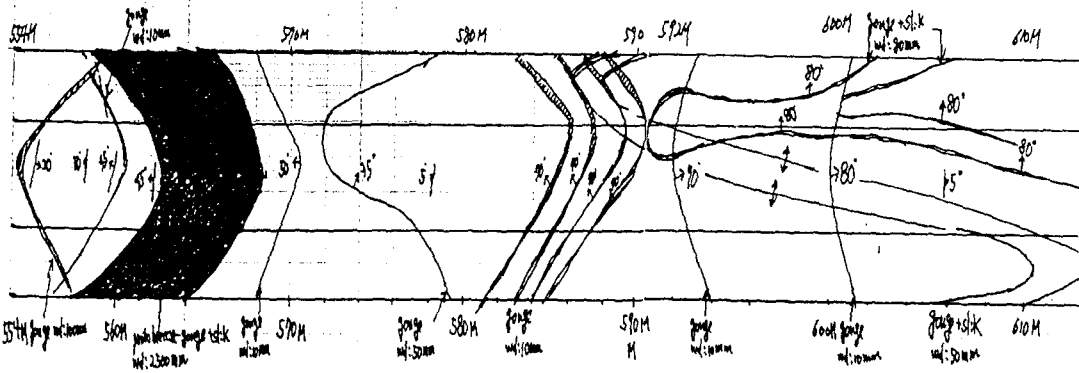
그림 3. 터널내부에서 관측한 지질조사도(unrolled trace map)(계속)



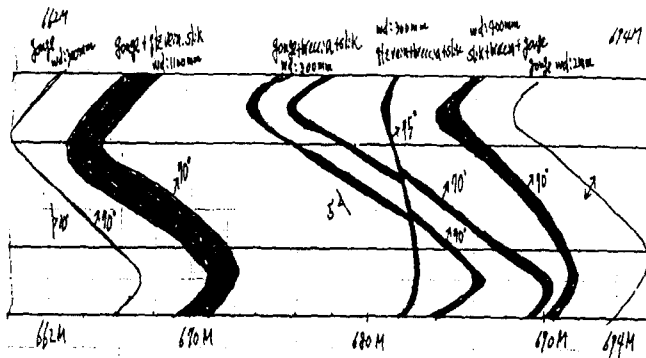
(c) 시점으로부터 324m~394m 구간



(d) 시점으로부터 484m~518m 구간



(e) 시점으로부터 554m~615m 구간



(f) 시점으로부터 660m~695m 구간

그림 3. 터널내부에서 관측한 지질조사도(unrolled trace map)

# 티널구간 지질구조 개념도

(free scale)

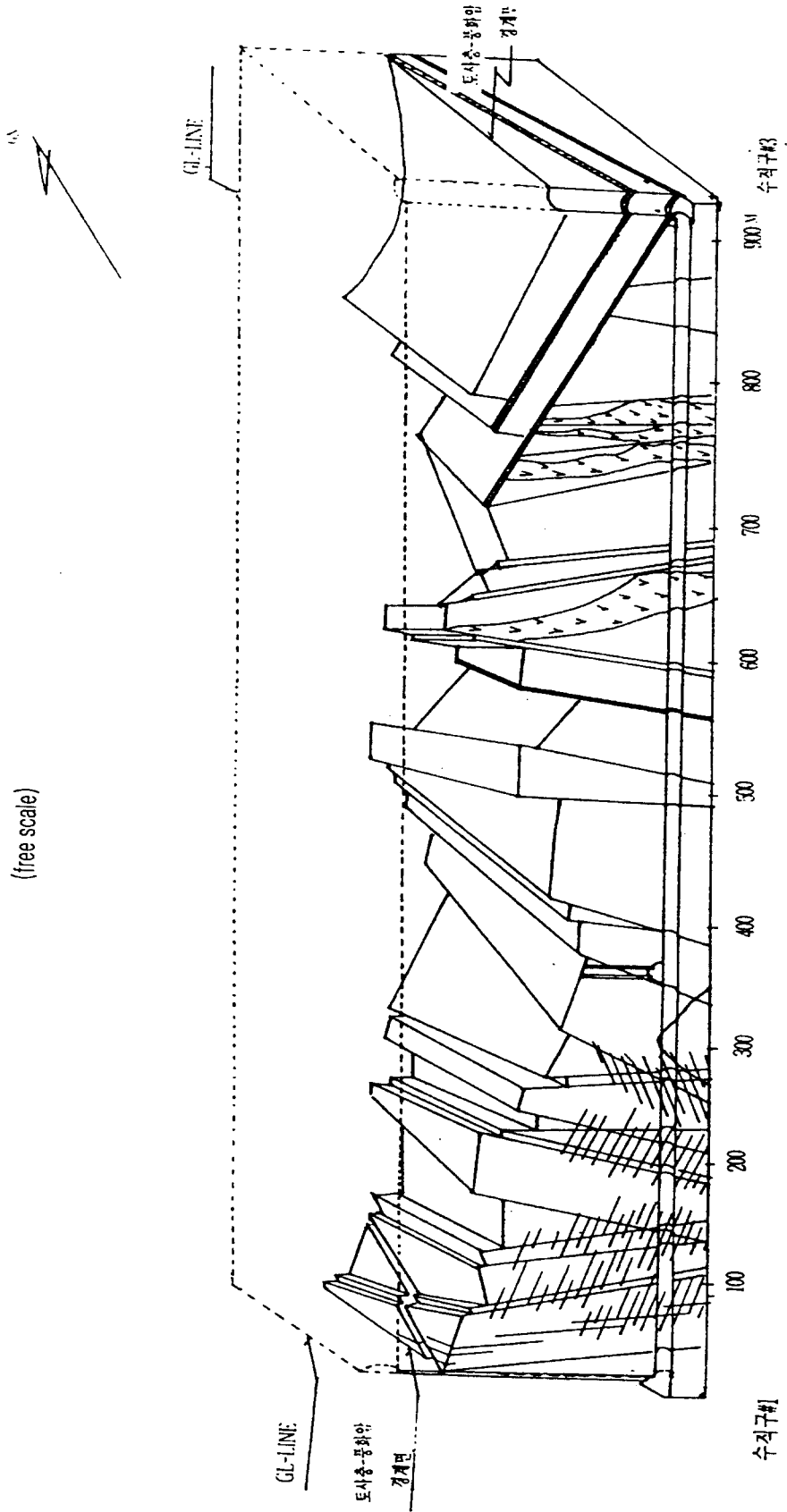
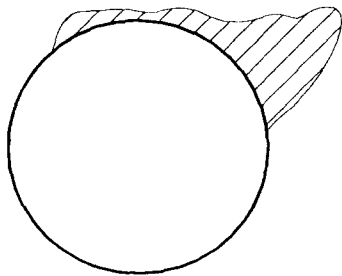


그림 4. 지질구조 개념도

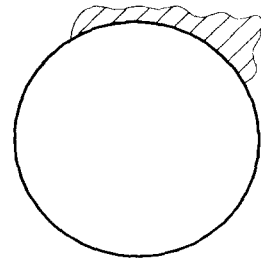
### 3. 현장낙반사고 발생추이

현장에서는 여러 차례에 걸쳐 낙반사고가 발생하였으며, 이것의 원인으로서는 이 지역에 광범위하게 분포하는 절리 틈새가 3~4mm로부터 2.2m에 이르는 다양한 크기의 절리 및 단층파쇄대의 존재와 충전물질(gouge)로 이루어진 불연속면들의 상호간의 조합등임을 현장실측결과로부터 알 수 있었다. 구체적인 낙반구간 및 실측결과로부터 계산된 여굴량을 표 1.에 수록하였으며, 단층파쇄대에서의 여굴발생현황 및 각 구간에서의 대략적인 파괴형상을 그림 5.에 수록하였다.

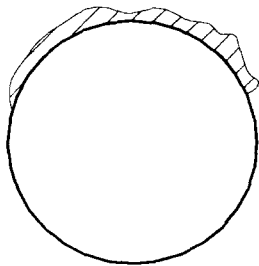
특기할 만한 사항은 대규모의 단층파쇄대가 존재하는 구간에서는 다른 불연속면에 의한 영향없이 파괴가 발생하고 있었다는 것이다. 그리고 이 현장에서의 대부분의 낙반현상은 터널의 천정부와 측벽부에서의 썸기파괴(wedge failure)로 일어나고 있음을 알 수 있다.



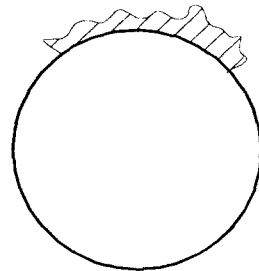
(a) 소구간 2



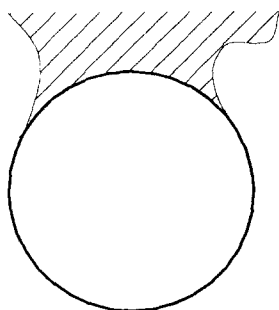
(b) 소구간 3



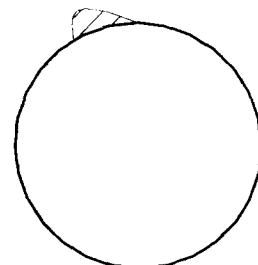
(c) 소구간 5



(d) 소구간 7



(e) 소구간 12 (단층파쇄대 존재)



(f) 소구간 13

그림 5. 각 구간에서의 대략적인 파괴형상 및 단층파쇄대에서의 여굴발생평면도

표 1. 여굴발생량 실측데이터

소구간번호	거리(m) <sup>1)</sup>	여굴면적(m <sup>2</sup> ) 및 발생위치 <sup>1)</sup> (m)
2	82.8~94.0	0.00[82.8], 0.33[83.0], 0.69[86.0], 1.82[89.0], 1.09[92.0], 0.01[94.0]
2, 3	98.0~114.0	0.00[98.0], 0.27[101.0], 0.48[104.0], 0.40[107.0], 0.54[110.0], 0.62[113.0], 0.00[114.0]
3	124.5~128.4	0.00[124.5], 0.27[125.0], 0.00[128.4]
	131.7~140.7	0.00[131.7], 0.27[134.0], 0.31[137.0], 0.24[140.0], 0.00[140.7]
	143.9~145.2	0.00[143.9], 0.10[145.0], 0.00[145.2]
4	185.0~197.5	0.00[185.0], 0.86[188.0], 0.56[191.0], 1.60[194.0], 0.15[197.0], 0.00[197.5]
5	203.0~209.0	0.00[203.0], 0.50[206.0], 0.00[209.0]
	213.7~221.3	0.00[213.7], 0.07[215.0], 0.41[218.0], 0.00[221.3]
	222.3~226.2	0.00[222.3], 1.11[224.0], 0.00[226.2]
	231.7~239.5	0.00[231.7], 1.35[233.0], 0.47[236.0], 1.49[239.0], 0.00[239.5]
7,8	324.8~369.2	0.00[324.8], 0.28[325.0], 0.27[328.0], 1.12[331.0], 0.53[334.0], 0.47[337.0], 0.32[341.0], 0.62[344.0], 0.27[347.0], 0.25[350.0], 0.20[353.0], 0.20[356.0], 0.21[359.0], 0.19[362.0], 0.26[365.0], 0.52[367.0], 0.00[369.2]
8	370.5~377.6	0.00[370.5], 0.15[371.0], 0.10[374.0], 0.25[376.0], 0.24[377.0], 0.00[377.6]
	379.2~383.8	0.00[379.2], 0.27[380.2], 0.00[383.8]
	384.4~392.8	0.00[384.4], 0.26[385.0], 0.53[386.0], 1.33[389.0], 0.60[390.0], 0.20[391.5], 0.00[392.8]
10, 11	486.2~516.2	0.00[486.2], 0.13[490.0], 0.17[496.0], 0.06[498.5], 0.22[500.0], 0.19[509.0], 0.22[511.0], 0.22[512.7], 0.69[513.0], 0.20[513.2], 0.09[514.0], 0.00[516.2]
12	557.2~568.2	0.00[557.2], 0.26[559.0], 0.56[560.0], 0.87[561.0], 1.05[562.0], 1.88[563.0], 6.11[564.0], 8.20[565.0], 8.10[566.0], 8.20[567.0], 12.30[568.0], 0.00[568.2]
12,13	584.2~605.2	0.00[584.2], 0.23[588.0], 0.39[592.0], 0.88[595.0], 1.72[596.0], 0.56[601.0], 0.18[603.0], 1.22[604.0], 1.46[605.0], 0.00[605.2]
14	663.2~691.2	0.00[663.2], 1.40[663.5], 2.03[666.0], 1.03[668.0], 1.11[669.5], 0.64[672.0], 0.35[675.0], 0.83[678.0], 0.80[681.0], 0.43[684.0], 0.62[687.0], 0.42[690.0], 0.00[691.2]
15	734.7~736.8	0.00[734.7], 1.40[735.0], 2.03[736.2], 1.03[736.8]
15, 16	746.8~755.2	0.00[746.8], 2.35[747.0], 2.35[750.0], 2.45[752.0], 2.42[754.0], 0.10[755.2]

주. 1) 여기에서의 거리와 여굴발생위치는 터널시점부로부터의 거리를 나타낸다.

#### 4. 블록이론을 이용한 터널의 안정성해석

##### 4.1 블록이론의 기본

블록이론은 암반내에 존재하는 불연속면(discontinuity)에 의해 형성된 블록이 굴착으로 인하여 파괴를 야기할 수 있는 비교적 견고한 암반에서의 거동해석법이다. 블록이론은 굴착된 암반에서 불연속면의 교차에 의해 이루어진 위험한 블록을 산정하는 것으로 해석의 단순화를 위한 일반적인 가정은 다음과 같다.

- 모든 불연속면들은 평면으로 이루어진다. 실제의 암반에는 습곡등과 같이 곡면으로 이루어진 불연속면들도 존재하지만, 절리의 방향을 하나의 법선벡터로 나타내어 선형벡터해법을 이용하기 위하여 위와 같이 가정한다.
- 불연속면은 연속성의 특성을 지니며 기존의 절리들의 조합에 의하여 블록이 생성된다. 불연속면으로



구성된 키블록 안에서 Cracking등으로 인해 새로운 불연속면이 생성되어 발생하는 다른 종류의 파괴는 고려하지 않는다는 가정이다.

- 불연속면에 의하여 생성되는 블록들은 모두 강제로 가정한다. 암반내에 존재하는 응력등에 의한 블록의 변형(deformation) 이나 비틀림(distortion) 등으로 인한 파괴는 고려하지 않는다.
- 각 절리군을 대표하는 방향들을 입력매개변수로 이용한다. 불연속면방향이 어떤 중심 경향에서 분산되어 있을 때 불연속면의 통계처리를 실시하여 불연속면의 평균(mean)치를 입력매개변수로 선택한다.

블록이론은 구조지질학에서 유래된 기하학과 정역학을 이용한 힘의 평형으로부터 유도되며 연속체역학은 키블록(key block)의 계산과 작도에 비해 두번째라고 가정한다. 다른 파괴형태는 고려하지 않고 오직 블록의 이동형태만을 고려한다. 블록이론의 목적은 굴착면 주위에 있는 가장 위험한 블록을 구하는데 있으며 여러 절리군(joint sets)이 교차하게 되면 암반내에 불규칙한 크기와 형상을 가진 블록이 형성된다. 굴착을 하면 추가된 자유면으로 새로운 블록이 형성되는데 이 블록중 몇 개는 그들의 형상, 크기, 방향 또는 다른 블록에 의해 이동이 저지되기 때문에 굴착 자유공간 내부로 움직일 수 없다. 하지만 어떤 블록은 즉시 움직일 수 있는 위치에 있어서 이 블록들이 움직이면 먼저 지지되었던 다른 블록이 해방되게 되며, 이런 위치에 있는 블록을 키블록(key block)이라 한다. 그림 6.에는 원형석교, 터널, 암반사면등에서의 키블록을 나타내었다.

본 연구에서의 주안점은 위에서 제시한 마지막 가정이다. 즉, 일반적으로 불연속면이 어떤 중심경향에서 분산되어 있을 때 불연속면의 평균치를 입력매개변수로 선택한다고 했는데, 본 연구에서는 사례터널의 실측결과를 분석해 볼 때 단순히 평균치만을 입력변수로 보게 되면 실제로 키블록을 구할 수 없는 경우도 있게 되며, 이의 보완을 위하여는 분산정도에 따라 가능한 모든 불연속면을 모두 적용시켜 키블록을 구하는 것이 더 합리적인 것으로 판명되었다. 따라서 이러한 각도에서 심도있는 분석을 실시하였다.

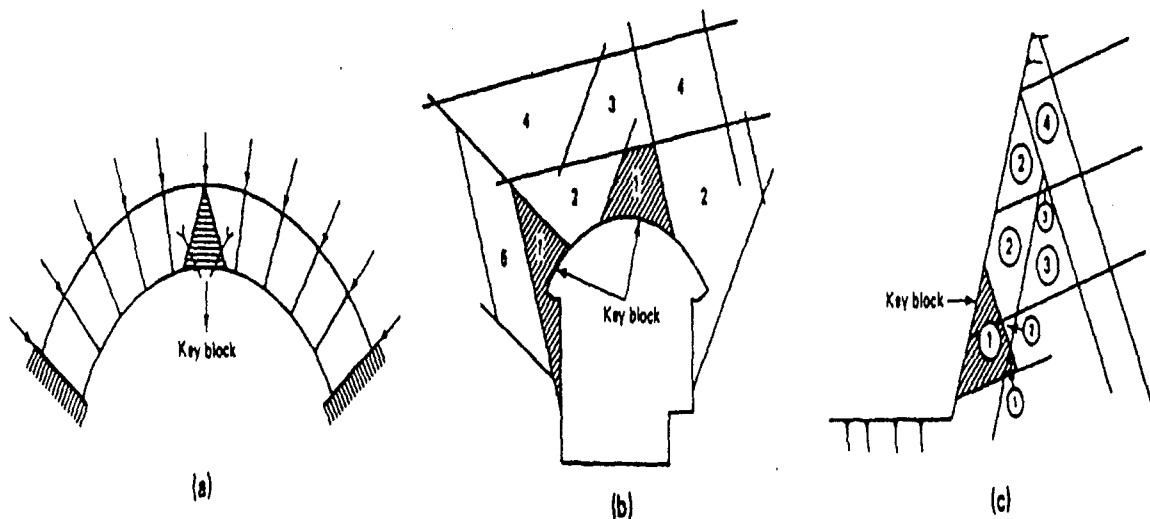


그림 6. 키블록(key block)

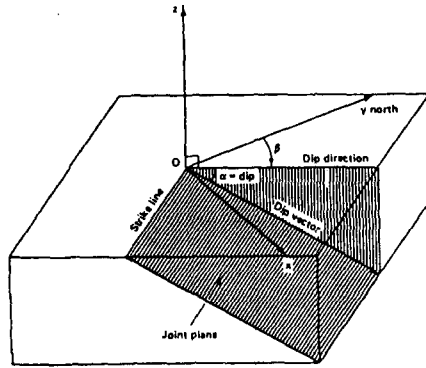


그림 7. 불연속면의 경사, 주향 및 경사방향

#### 4.1.1 벡터해법의 기본이론

불연속면의 경사(dip,  $\alpha$ )와 경사방향(dip direction,  $\beta$ )은 그림 7.에 나타난 바와 같이 정의되며 불연속면의 법선단위벡터  $\hat{n}$ 는 아래의 식으로 정의된다.

$$\hat{n} = (\sin \alpha \sin \beta, \sin \alpha \cos \beta, \cos \alpha) \quad (1)$$

두면의 교차선은 각 면의 법선단위벡터의 벡터곱(cross product)으로 나타내며 아래 식으로 표현된다.

$$\vec{I}_{12} = \hat{n}_1 \times \hat{n}_2 \quad (2)$$

반무한공간(halfspace)은 평면 P에 수직인 법선단위벡터  $\hat{n}_p$  (A, B, C)와 한점  $\vec{x} = (X, Y, Z)$ 의 스칼라곱(dot product)으로 나타낸다.

$$AX + BY + CZ = D \quad (3)$$

블록은 각 불연속면의 상부반무한공간(upper-halfspace) 혹은 하부반무한공간(lower-halfspace)의 교집합으로 형성되며, 서로 평행하지 않은 n개의 서로 다른 면으로 이루어진 블록을 BP(block pyramid)라고 한다. 또, BP를 결정하는 반무한공간내 불연속면의 부분집합을 JP(joint pyramid)라고 하며 굴착면을 중심으로 굴착후 잔존하게 되는 공간을 EP(excavation pyramid), 굴착후 제거되는 공간을 SP(space pyramid)라 한다.

#### 4.1.2 블록의 이동성

그림 8.에 나타난 것처럼 블록의 형태는 5가지로 분류된다. 이동이 불가능한 무한블록(infinite block : Type V)과 유한블록(finite block)으로 나누어, 유한블록은 이동이 불가능한 테이퍼드블록(tapered block : Type IV), 이동이 가능한 Type III, II와 I으로 분류한다. Type III은 불연속면의 마찰력없이 안정하고, Type II는 잠재적인 키블록, Type I은 키블록이다. 키블록은 "유한(finite), 이동가능(removable)하고 불안정(potentially unstable)"한 것이다.

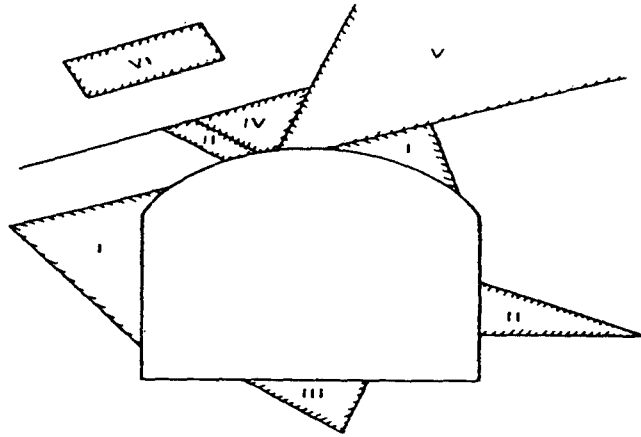


그림 8. 블록의 형태

#### 4.2 터널에 대한 블록이론의 적용

일반적으로 기하학적 해석(kinematic analysis)과 안정해석(stability analysis)을 이용하여 터널의 안정성을 개략적으로 평가할 수 있다. 기하학적 해석은 불연속면과 터널굴착면의 경사방향과 경사각의 상대적인 분포경향에 따라 안정성을 검토하는 방법이다. 이 방법은 하중조건을 전혀 고려할 수 없다는 단점으로 인해 실제 설계시 적용성에 제약이 따른다. 안정해석은 이동가능으로 판별된 블록들에 대해 절리면의 방향정보와 블록에 작용하는 합력의 방향정보, 절리면의 마찰각을 입력매개변수로 하여 벡터계산을 통해 실시하게 된다. 안정해석에 대한 상세한 내용은 4.4절에서 상세히 다루고 있다.

터널에서는 굴착면이 사면에서와는 달리 거의 오목한(concave) 형태의 자유면이 형성되므로 일반적으로 사면에서의 경우보다 작은 크기의 SP(space pyramid)와 적은 양의 키블록이 발생하게 된다. 또 터널에서는 자유면이 일정한 하나의 평면이 아닌 터널 축방향을 중심으로  $0^\circ \sim 360^\circ$  방향 모두에 자유면이 존재한다. 따라서 블록의 유한성(finiteness)과 거동성(removability)을 평가하는데 JP에 터널의 축 벡터를 포함하고 있지 않으면 그 블록은 거동가능블록이 된다는 터널축 정리(tunnel axis theorem)를 이용한다. 터널에서 생성되는 거동가능블록의 경우 평사투영도상에 자유면의 방향이 주어지지 않으므로 주어진 블록의 자유면 형상은 터널의 형상과 불연속면들의 방향관계에 의해 결정된다. 여기에는 터널축과 불연속면의 법선벡터들을 이용한 계산과정이 필요한데 이러한 계산결과, 불연속면들이 만나서 이루어지는 교선들 중 터널축에 수직한 평면상에 투영했을 때 나타나는 최외곽교선(limiting edges)들이 결정된다. 이 최외곽 교선들을 터널의 형상에 따라 평행이동하여 터널 경계부에 접하게 하여 해당 블록이 만들 수 있는 최대크기의 2차원 단면(maximum removable area)을 제시하게 된다.

#### 4.3 실측데이터의 통계처리

암반내에 존재하는 불연속면들은 자연적인 특성상 그 모양(attitude)에 분산이 존재하게 되고, 그것의 정량적인 평가를 위해 여러 가지 통계적 기법이 제안되어 왔다. 그 중에서도 이번 연구에서는 Fisher distribution을 이용하여 불연속면 데이터의 분산정도를 고려하였다.

Fisher는 불연속면 방향의 통계학적 분석을 위해 어떤 원추(cone)속에 밀집된 한무리의 단위벡터(불연속면의 법선)의 평균적인 방향(orientation)은 그 원추내의 모든 단위벡터의 합력(resultant),  $\vec{R}$  방향에 의해 결정된다고 하였다. 만약 모든 불연속면의 법선(normal)이 완전히 평행할 때의  $\vec{R}$ 의 크기는 집합 N내의 법선의 총 갯수와 같을 것이다. 그러나 불연속면의 방향은 분산되어 있으므로  $\vec{R}$ 의 길이는 N보다 짧아진다. 그러므로 N을 불연속면 법선의 총 갯수라 하면 방위의 분산도를 나타내는 지표로서 다음과

같이 정의되는 "Fisher 상수(K)"를 이용한다.

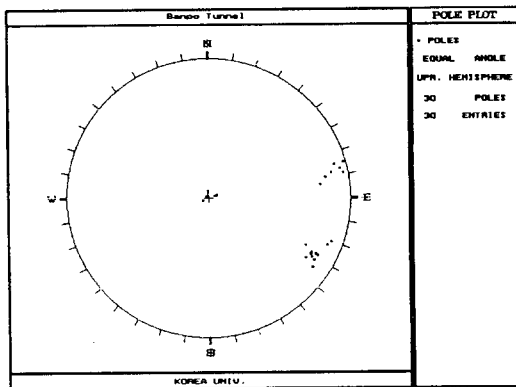
$$K = \frac{N}{N - |\bar{R}|} \quad (4)$$

K는 불연속면 방향의 분산(dispersion)이 커지면 작아지게 된다. 또, 불연속면의 법선이 평균방위(mean orientation)와  $\psi$  각도 이내에 있을 확률(P)과 이 분포의 표준편차 ( $SD(\psi)$ )는 다음 식으로 나타내진다.

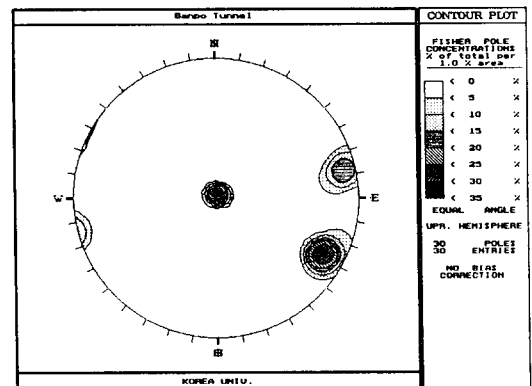
$$\cos \psi = 1 + \frac{1}{K} \ln(1 - P), \quad SD(\psi) = \frac{1}{\sqrt{K}} \quad (5)$$

이번 연구에서는 블록이론의 적용을 위해 터널을 18개의 소구간으로 나누고, 각 소구간에서 몇 개의 평균불연속면의 방향(mean orientation)을 산정하였다. 통계처리과정을 이용하여 각각의 소구간에서 주요 불연속면을 산정한 결과를 표 2.에 정리하였다. 현장에서의 대부분의 파괴는 불연속면 3개에 의한 사면체형상의 썩기파괴로 관측되었으므로 각각의 소구간에서 3개의 평균불연속면을 산정하였다.

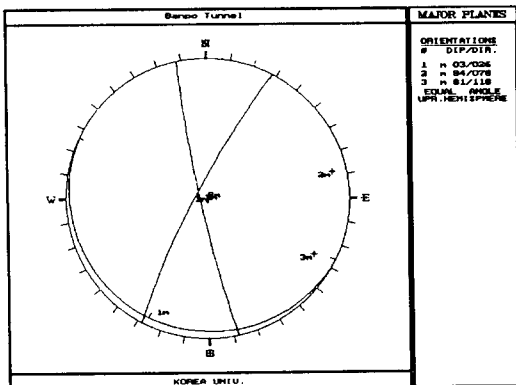
대표적으로 시점으로부터 50m~100m의 구간에 대해서 통계처리를 실시하여 대표불연속면(major plane)을 산정하는 과정을 그림 9.에 나타내었다. 그림 9.에서와 같이 각각의 불연속면의 가변성(variability)을 고려하여 최대키블록(maximum keyblock)의 크기 및 형상을 산정할 수 있다. 또 터널의 실측데이터로부터 파괴가 일어난 불연속면의 위치를 알 수 있으므로 이것들의 상호간의 조합과 가변성을 고려한다면 좀 더 신뢰성있는 결과를 얻을 수 있을 것이다.



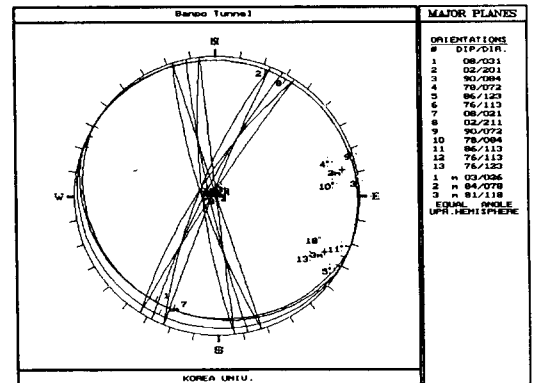
(a) 불연속면의 극점(pole)



(b) 불연속면군의 등밀도선(contour plot)



(c) 평균치를 사용한 불연속면의 대원



(d) 가변성을 고려한 불연속면의 대원

그림 9. 2번 소구간에서의 불연속면 통계처리 결과, 대표불연속면 산정 및 대표불연속면의 가변성

표 2. 각 소구간에서의 대표불연속면의 방향과 분산정도

소구간 번호	거리(m)	대표불연속면의 경사(°), 경사방향(°) 및 Fisher 상수	쇄기파괴 발생한 불연속면
1	0~50	① 60/119 (90) ② 41/220 (440) ③ 80/25 (850)	①,②,③
2	50~100	① 3/26 (360) ② 84/78 (240) ③ 81/118 (260)	②,③,5/70
3	100~150	① 8/73 (270) ② 83/303 (140) ③ 85/70 (220) ④ 75/51(190)	④,79/169,40/311
4	150~200	① 4/80 (140) ② 84/49 (470) ③ 70/250 (690) ④ 71/318(720)	①,②,③,79/131
5	200~250	① 28/250 (280) ② 71/64 (110) ③ 81/138 (530)	①,②,③,70/150,30/115
6	250~300	① 29/231 (96) ② 70/210 (690) ③ 67/71 (480)	-
7	300~350	① 84/299 (69) ② 83/71 (250) ③ 17/61 (170) ④ 7/253 (500)	①,②,17/61
8	350~400	① 83/50 (740) ② 78/178 (180) ③ 89/139 (61)	①,②,③,70/200,20/270
9	400~450	① 49/297 (280) ② 86/136 (97)	-
10	450~500	① 2/360 (150) ② 85/110 (820) ③ 86/81 (220)	③,87/50,70/190
11	500~550	① 2/300 (150) ② 74/295 (60)	②,85/80,50/60
12	550~600	① 6/80 (59)	20/90,5/250,45/270
13	600~650	① 79/24 (340) ② 30/144 (820) ③ 2/24 (210)	①,70/50,70/300
14	650~700	① 1/331 (90) ② 50/190 (920) ③ 30/144 (840)	②,③,70/350
15	700~750	① 2/228 (65) ② 73/57 (100)	①,②,5/300
16	750~800	① 9/223 (73) ② 84/270 (71) ③ 82/1 (150) ④ 50/5 (220) ⑤ 50/200 (56)	-
17	800~850	① 2/219 (890) ② 90/28 (93)	-
18	850~922	① 10/42 (71) ② 83/200 (200) ③ 50/185 (220)	-

#### 4.4 블록이론에 의한 안정성해석(stability analysis)

##### 4.4.1 기본이론

불연속면과 굴착면이 교집합인 BP(block pyramid)가 유한하고 Nontapered이면 블록은 이동가능하다. 그러나, 이동가능한 블록은 그림 8.에 나타낸 3가지 형태(Type I, II, III)로 나눌 수 있으며 안정해석을 통하여 실제로 위험한 키블록을 찾는다.

경사면에 놓인 블록 B에 작용하는 힘들을 그림 10.에 도시하였다.

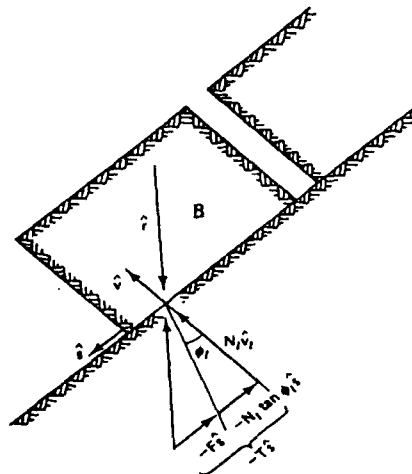


그림 10. 마찰력과 활동방향벡터

활동면의 반력의 법선성분(N)은  $\hat{v}_l$ 을 면  $l$ 의 블록 B로 향한 법선단위벡터라 하면

$$N = \sum N_l \hat{v}_l, \quad N_l \geq 0 \quad (6)$$

접선마찰력의 성분(T)은 F를 지보력,  $\phi_l$ 은 면  $l$ 의 표면마찰각,  $\hat{s}$ 은 활동방향 단위벡터( $\hat{s} \subset JP$ )라면

$$T_l = -N_l \tan \phi_l \hat{s}, \quad T = \sum N_l \tan \phi_l + F \quad (7)$$

힘의 평형을 고려하여 벡터로 표현하면,  $\vec{r}$ 를 블록 B에 작용하는 하중이라 할 때

$$\vec{r} + \sum N_l \hat{v}_l - T \hat{s} = 0 \quad (8)$$

활동형태에 따른 JP(joint pyramid) 산정은 봉락(lifting), 평면활동(single face sliding), 췌기활동(double face sliding)으로 나누어 다음과 같이 해석할 수 있다.

봉락은 키블록이 접촉면이 없이 자유롭게 이동하는 형태로서 이때 활동방향 단위벡터 ( $\hat{s}$ ) 및 지보력 (F)은 아래의 식(9)로 산정한다.

$$\hat{s} = \hat{r}, \quad F = |\vec{r}| \quad (9)$$

이때 봉락가능한 블록은 아래의 식(10)으로 산정한다.

$$\hat{v}_l = \text{sign}(\hat{s} \cdot \hat{n}_l) \hat{n}_l \quad \text{for all } l \quad (10)$$

평면활동에 대해서는 블록 B가 한면  $i$ 에 평행한 방향으로 활동하는 것이며, 이 때 활동방향 단위벡터와 지보력은 아래의 식(11), (12)로 구한다.

$$\hat{s} = \hat{s}_i = \frac{(\hat{n}_i \times \vec{r}) \times \hat{n}_i}{|\hat{n}_i \times \vec{r}|} \quad (11)$$

$$F = |\hat{n}_i \times \vec{r}| - |\hat{n}_i \cdot \vec{r}| \tan \phi_i \quad (12)$$

평면활동이 가능한 블록은 아래의 식(13), (14)로 산정한다.

$$\hat{v}_l = \text{sign}(\hat{s} \cdot \hat{n}_l) \hat{n}_l \quad \text{for } l \neq i \quad (13)$$

$$\hat{v}_i = -\text{sign}(\vec{r} \cdot \hat{n}_i) \hat{n}_i \quad (14)$$

블록 B가  $i$  면과  $j$  면의 교차선을 따라 활동하는 것을 췌기활동이라 한다. 이 때 활동방향 단위벡터와 지보력은 아래 식(15), (16)으로 산정한다.

$$\hat{s} = \hat{s}_{ij} = \frac{\hat{n}_i \times \hat{n}_j}{|\hat{n}_i \times \hat{n}_j|} \text{sign}((\hat{n}_i \times \hat{n}_j) \cdot \vec{r}) \quad (15)$$

$$F = \frac{1}{|\hat{n}_i \times \hat{n}_j|^2} [ |\vec{r} \cdot (\hat{n}_i \times \hat{n}_j)| |\hat{n}_i \times \hat{n}_j| - |(\vec{r} \times \hat{n}_j) \cdot (\hat{n}_i \times \hat{n}_j)| \tan \phi_i - |(\vec{r} \times \hat{n}_i) \cdot (\hat{n}_i \times \hat{n}_j)| \tan \phi_j ] \quad (16)$$

쇄기활동이 가능한 블록은 아래 식(17), (18)로 산정한다.

$$\hat{v}_l = \text{sign}(\hat{s}_{ij} \cdot \hat{n}_l) \hat{n}_l \quad \text{for } l \neq i \text{ or } j \quad (17)$$

$$\hat{v}_i = -\text{sign}(\hat{s}_j \cdot \hat{n}_i) \hat{n}_i \quad (18)$$

$$\hat{v}_j = -\text{sign}(\hat{s}_i \cdot \hat{n}_j) \hat{n}_j$$

#### 4.4.2 예제구간에 대한 해석결과

블록이론은 일반적으로 불연속면이 뚜렷이 구별되지 않는 풍화암보다는 경암등에 적용된다. 그러나 최근의 연구결과에 의하면 풍화암지역이라 하여도 BIP(borehole image processor)등의 정밀한 조사방법을 이용하여 불연속면의 위치에 관한 정확한 정보를 얻을 수 있다면 Shi와 Goodman에 의해서 제안된 최대키블록개념(maximum keyblock concept)이 적용될 수 있음이 증명되었다(Nishigaki등, 1992). 이번 연구에서는 통계처리를 통해 얻어진 불연속면들에 관한 정보를 바탕으로 Shi와 Goodman이 개발한 "BLOCK" 프로그램을 이용하여 터널에서 발생할 수 있는 썩기형태의 사면체 블록들에 대한 안정해석(stability analysis)을 실시하였다. 대표 불연속면이 3개 이상이 되는 구간에서는 불연속면들의 모든 조합을 고려하여 계산하고, 터널에서의 실측결과와 비교해 보았다. 물론 불연속면은 완전히 평면형태(planar)가 아니고 또, 연장(extent)에 제한이 있다는 점과 간격(spacing) 역시 일정한 상수값으로 완전하게 표현할 수 없다는 제약이 있기는 하지만 여기에서는 불연속의 방향과 경사의 가변성(variability)만을 고려하여 2차원적으로 발생가능한 최대키블록에 대해 해석하였다. 해석시 필요한 물성치는 단위중량 2.7t/m<sup>3</sup>, 불연속면의 내부마찰각 30°, 점착력 0t/m<sup>2</sup>으로 가정하였다. 해석방법을 14번 소구간(650m~700m)의 해석결과를 이용하여 설명하면 다음과 같다.

우선 불연속면의 통계처리를 이용하여 얻어진 대표불연속면에 대하여 기하학적 해석(kinematic analysis)을 실시하여 생성 가능한 최대키블록의 대략적인 형상과 위치를 구한다(그림 11. 참조). 운동학적 해석으로부터 파괴가능한 키블록에 모양과 실제의 파괴형태와의 비교를 그림 12.에 나타냈다. 이것은 소구간 2에서의 실측결과와 키블록의 크기가 정확히 일치하는 것은 아니지만 기본적인 형상과 생성위치는 상당히 유사한 결과를 보임을 알 수 있었다. 위에서 구해진 불연속면의 방향(dip direction)과 경사(dip)자료가 가지는 가변성(variability)을 고려하기 위해 그림 9(d).에서와 같은 방법으로 불연속면의 가변성을 고려한 자료를 이용하여 조합 가능한 여러 경우에 대하여 해석을 실시하였다. 해석결과 그림 13.처럼 평균불연속면만으로 해석하는 경우에 나타나지 않는 다른 운동학적 파괴가 발생할 가능성을 있음을 나타내었다.

RESULTANT  
 Q. 000-000 0 000-000 ~ 100-01  
 QIP 2 010-10  
 P.O. 200 0  
 W.A.O. 700 0  
 S.L.O. 1000 0  
 FIELD  
 Q.O. Q.O. 1.0  
 TURNAL AXES  
 91.0 0.0

111

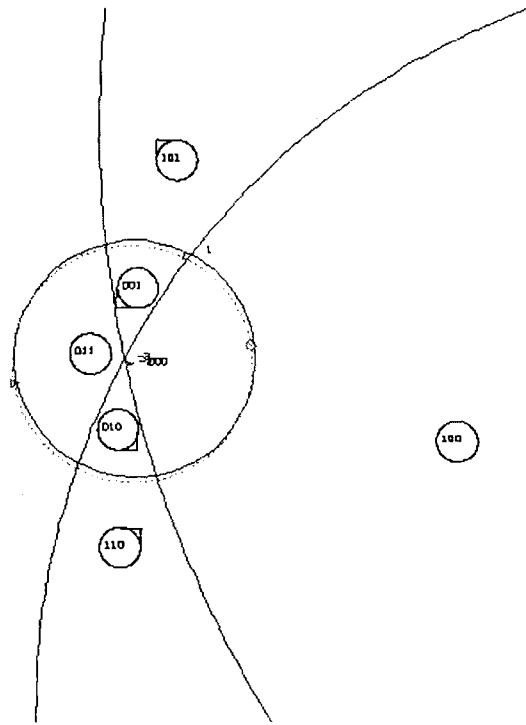


그림 11. 소구간 2에서 평균불연속면에 의한 기하학적 해석결과

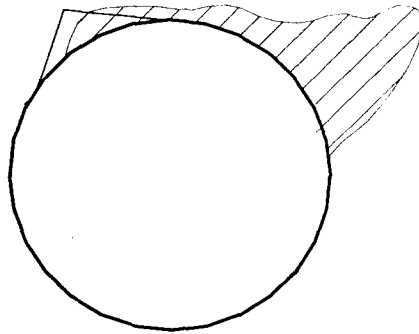


그림 12. 대표불연속면에 대한 운동학적 해석결과와 실제파괴형태의 비교(소구간 2)

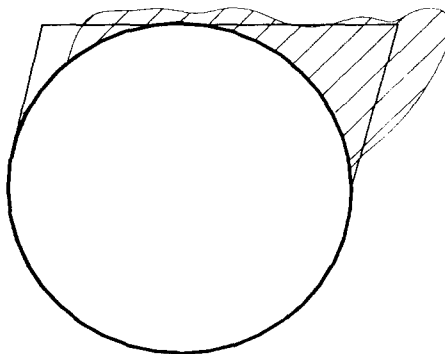


그림 13. 가변성을 고려하는 경우의 운동학적 해석결과와 실제파괴형태의 비교(소구간 2)



## 5. 블록이론에 의한 해석의 결과분석과 현장실측데이터의 비교·검토

터널의 18개 소구간 중 파괴가 발생한 구간에 대해 평균불연속면을 이용하여 산정한 최대키블록과 실측불연속면의 분산성을 고려하여 산정한 최대키블록의 해석결과를 정리하면 다음의 그림 14와 같다.

대부분의 구간에서 실측결과와 키블록의 생성위치와 기본적인 형상이 상당히 일치함을 알 수 있다. 또, 어떤 구간에서는 불연속면의 가변성을 고려하는 것이 조금 더 실측치에 가까운 결과를 주는 것을 알 수 있다(소구간 3, 5, 7). 특징적인 것은 통계처리결과 주요 불연속면으로 산정되지 않은 불연속면으로의 파괴가 광범위하게 소구간 10에서 발생하였고, 소구간 12에서는 대규모의 단층파쇄대가 존재하여 천정부로부터 대규모의 붕락이 발생하였다. 이러한 곳에서는 블록이론의 적용에 어려움이 따르므로 터널시공시 지속적인 막장관찰결과등을 이용하여 안정성을 평가할 수 있을 것이다. 또는 최근에 적용되기 시작한 광파기를 이용한 3차원 계측결과를 분석하여 막장전방변화의 예측을 하는 기법등이 종합적으로 이용되어야 할 것이다.

소구간 6, 18의 경우에는 대표불연속면의 경우와 불연속면의 가변성을 고려하는 경우에 모두 최대키블록의 크기가 상당히 작았고, 실측결과 역시 이러한 소구간에서는 낙반현상이 발생하지 않은 것으로 나타났다.

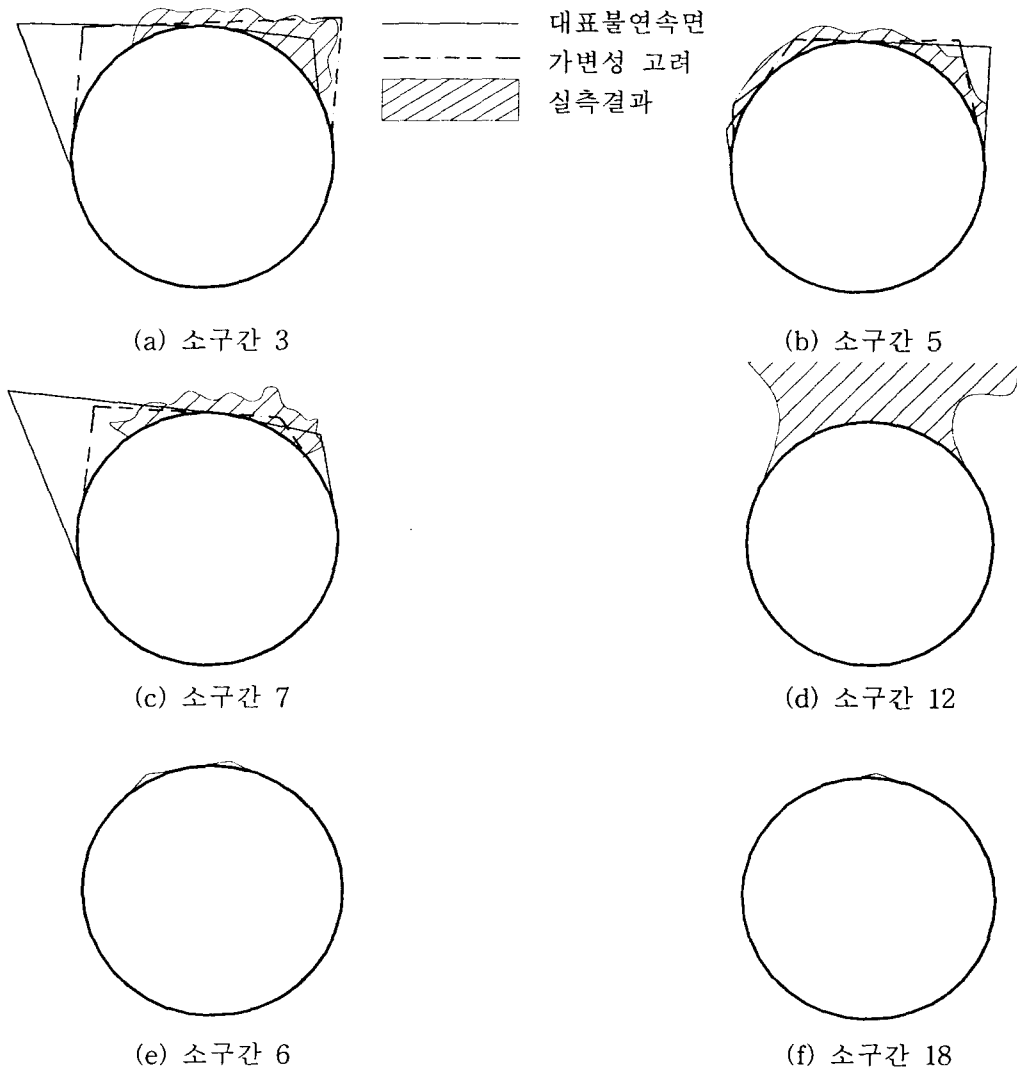


그림 14. 실측결과와 해석결과의 비교

## 6. 결론

불연속면의 실측데이터 통계처리와 그것의 가변성을 총체적으로 고려해서 블록이론을 이용하여 터널의 안정해석을 실시한 결과로부터 다음과 같은 종합적인 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 파괴가 발생한 대부분의 지질구조에는 충전물질(gouge)이 포함되는 경우와 불연속면의 경사방향이 터널의 굴진방향과 반대방향으로(against dip)으로 되는 경우가 상당히 많았으며, 이것은 터널시공시 현장불연속면 조사를 통해 이러한 지질구조가 파악되는 경우에는 낙반사고에 특별히 유의하여야 함을 알려준다.
- 2) 기존에는 불연속면의 정보를 통계처리를 통하여 구해진 주요 불연속면 값으로 해석을 실시하였지만 불연속면은 많은 가변성(variability)을 가지고 있으므로 이것을 고려하여 해석하는 것이 좀 더 신뢰성 있는 결과를 주는 것으로 검증되었다.
- 3) 흑운모 화강암질 편마암으로 주로 구성되는 연구대상 터널구간중 지질구조운동의 영향을 크게 받은 부분에서는 엽리면을 따라 절리면, 단층면등이 발생되고 있으나 대부분의 구간에서는 엽리면이 불연속면으로 나타나지 않고 있다.
- 4) 단층파쇄대가 존재하는 구간에서는 블록이론을 이용해서는 파괴를 예측할 수 없음이 실증되었다. 그러므로 이러한 구간에 대해서는 터널시공시 막장전방을 예측할 수 있는 3차원 계측방법등을 이용하는 것이 좋을 것으로 사료된다.
- 5) 통계처리에 의해 주요 불연속면으로 산정되지 않는 절리면에 의한 파괴빈도가 상당하였다. 이것으로부터 현장지질상태에 의해 크게 영향을 받는 터널의 경우 예비설계에서 조사된 지질구조만을 맹신하지 말고 터널시공단계에서도 파괴를 유발할 수 있는 불연속면의 지속적인 조사가 상당히 중요하다는 것을 알 수 있다.

## 참고문헌

1. Goodman, R. E., and Shi, G. (1985), "Block theory and it's application to rock engineering", Prentice-Hall.
2. Kuszmaul, J. S. (1993), "A probabilistic method to estimate keyblock sizes in underground excavations", Ph. D. Dissertation, Univ. of California at Berkeley. pp.20.
3. Leung, C. F. and Quek, S. T. (1995), "Probabilistic stability analysis of excavations in jointed rock", Can. Geotech. J., Vol. 32, pp.397~407.
4. Leung, C. F. (1990), "Computer aided design of underground excavations in jointed rock", Rock Mech. and Rock Eng., Vol. 23, pp.71~89.
5. Mauldon, M. (1993), "Variation of joint orientation in block theory analysis", Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 17, pp.1585~1590.
6. Nishigaki, Y., and Miki, S. (1992), "Application of block theory in weathered rock", Proc. ISRM Conf. on Fractured and Jointed Rock Masses, Lake Tahoe, Calif., Berkeley, pp.753~758.
7. Priest, S. D. (1993), "Discontinuity analysis for rock engineering", Chapman & Hall.