

## 휴대용 시추공 카메라를 이용한 지하정보의 가시화 기법

정윤영<sup>1)\*</sup>, 松井 紀久男<sup>2)</sup>

### Visual Interpretation about the Underground Information using Borehole Camera

Yun-Young Jeong and Kikuo Matsui

**Abstract** According to the recent development of measurement system utilizing one or a set of boreholes, visualization of the explored underground became to be a major issue. It induced even the introduction of monitoring apparatuses on the borehole wall with multi-function tool, but the usage of these was often limited by where is unfavorable rock condition and a few of engineers can approach. And so, a portable type of borehole camera with only the essential function has been investigated and a few of commercial models about this is recently being applied into the field condition. This paper was based on the monitoring results obtained using a commercial model by Dr. Nakagawa. Discontinuities in rock mass were the topic for the visualization, and it was studied how can visualize their three dimensional distribution and what a numerical formulation is needed and how to understand the visualization result. The numerical formulation was based on the geometric correlation between the dip direction / dip of discontinuous plane and the trend / plunge of borehole, a set of the equation of a plane was induced. As field application of this into two places, it is found that the above visualization methodology will be especially an useful geotechnical tool for analyzing the local distribution of discontinuities.

**KeyWords** a portable borehole camera, orientation of discontinuities, orientation of borehole, equation of a plane, components of vector, visualization

**초 록** 근래에 들어 진행된 시추공을 이용한 각종 측정 장비의 개발에 따라 지하정보의 가시화는 중요한 관심의 초점으로 대두되었다. 이를 위해 시추공벽 영상의 모니터링과 동시에 여러 가지 분석틀을 제공할 수 있는 장비가 개발되고 있으나 불량한 암반조건이나 소수의 엔지니어만이 접근할 수 있는 곳에서는 그 장비의 활용이 극히 제한적이다. 그리하여 최소한의 기능만을 보유하고 휴대가 가능한 시추공 카메라가 개발되어 상용화 되고 있다. 본 연구에서는 휴대용 시추공 카메라를 이용하여 얻은 지하정보를 토대로 암반 내에 발달해있는 불연속면의 분포를 3차원으로 가시화 하는 수리화학적 형식화 과정과 가시화된 이미지의 해석방법을 제시하고 이에 대한 사례연구로서 두 지역에 적용하였다. 형식화 과정은 3차원 공간좌표에서 불연속면의 방향성분(경사각, 경사방향 및 심도)이 지시한 위치관계를 시추공의 선추향(trend)과 주향경사(plunge)의 변화에 기초하여 고찰함을 의미하며, 그 결과 일련의 조건식을 유도한다. 두 지역에 대한 사례연구를 통해, 본 연구에서 제시한 가시화 기법이 국지적인 불연속면의 분포가 중요한 경우 지반공학(geotechnical)으로 유용한 수단이 될 수 있음을 알 수 있다.

**핵심어** 휴대용 시추공카메라, 불연속면의 방향성분, 시추공의 방향성분, 면의 방정식, 벡터성분, 시각화

## 1. 서 론

지하암반의 활용과 관련하여 역학적으로 가장 중요한 변수는 지각활동 등으로 발생된 다양한 형태의 불연속

면임은 주지의 사실이다. 이를 반영하듯 오늘 날까지도 전통적인 물리탐사방법을 이용한 구조 지질학적인 연구(Pirhonen, 1988)는 계속 발전되고 있다. 그 결과 현실에 적용 가능한 광역적인 지하정보를 얻을 수 있게 되었다. 하지만 터널과 사면 등과 같은 지반공학적인 시설물들의 경우, 국부적인 지하정보를 효과적으로 파악하는 것이 시설물의 안정과 유지를 위해서 필수 불가결한 요소이다. 현재 지하심부의 국부적인 지질정보에 대한 직접적인 지시자로서 시추공 코아와 시추공

<sup>1)</sup> 서울대학교 지구환경시스템공학부 BK21사업단 연수연구원

<sup>2)</sup> 일본 九州大學 地球資源システム 教授

\* 교신저자 : jrhope@empal.com

접수일: 2005년 1월 14일

심사 완료일: 2005년 2월 21일

벽의 영상자료가 가장 중요한 수단으로 활용되고 있으며(Schepers et al., 2001), 시추공벽의 영상은 영상처리 분야에서도 주요한 과제이다(Changming and Stefano, 2003).

시추공 벽의 영상자료를 얻기 위해 Borehole Image Processing System (BIPS)와 Televiewer등의 고가장비가 개발되어 현장에 이용되고 있으나, 시추공 내 삽입되는 핵심부품인 탐침자 (probe)가 암반 내에 고착되어 소실되는 사고가 무시할 수 없는 빈도로 발생되었다. 또한 장비의 진입이 곤란한 지역에서 소수의 엔지니어에 의해 시추공 벽의 영상을 얻어야 하는 필요성이 대두되게 되었다. 이러한 문제에 대응하기 위해 시추공벽의 영상과 그 영상 내 불연속면의 방향성은 시추공벽의 모니터링 직후 명확하게 얻을 수 있으나 그 밖의 파라미터들 - spacing, aperture, filling, block size - 에 대해서는 부수적인 작업을 필요로 하는 최소한의 기능만을 갖춘 휴대용 시추공 카메라가 개발되게 되었다.

이상과 같은 시추공 영상장비에 대한 관심과 더불어 지하정보의 3차원 가시화에 대한 연구가 근래에 들어 관심의 초점이 되고 있다. 최근의 연구사례로서 항공사진관독과 Global Positioning System(GPS)를 활용하여 Chimney rock fault를 3차원적으로 이미지화한 연구(Maerten et al., 2001), 노천광산(quarry)을 입체적으로 재현하기 위해 VRML 언어를 사용한 표현방법에 중점을 둔 연구(Pinto et al., 2002)가 있다. 또한 고준위 핵폐기물처리장의 예정지지에 대해 지표지질조사, 탄성파기법(vertical seismic profiling), 시추공레이다를 수행하여 암반 내 불연속면의 방향성 분포를 파악하고 이에 시추공검층 그리고 시추공 및 코어의 형상화(imaging) 결과를 접목시켜 심부 암반의 지질학적 특성을 3차원적으로 파악하고자 한 사례(Tirén et al., 1999)도 발표되었다. 이러한 기술적 발전에도 불구하고, 지표 노동의 상태에 영향을 받지 않고 불연속면의 방향성에 대해 비교적 올바른 정보를 제공할 수 있는 것은 시추공벽의 영상자료임은 주지의 사실이다. 그러나 주로 수직 시추공에서 이루어지는 지구물리학적 조사기법으로 인해 시추공벽에서 발견되는 불연속면이 3차원 공간에서 어떻게 위치하고 있는지에 대한 고찰은 충분히 이루어지지 못했다.

본 연구에서는 휴대용 시추공 카메라의 영상자료를 토대로 분석 가능한 지질학적 특성을 고찰하고, 공학적 이용이나 현장여건에 따라 유발될 수 있는 시추공의 방향성을 고려하여 불연속면을 표현하는 수리학적인 관계식을 고안한다. 그리고 이를 토대로 Matlab 언어에 기초한 코딩작업을 수행함으로써 조사대상 암반 내 불

연속면을 입체적으로 형상화하고 그 분포를 관찰방향을 달리하여 고찰한다. 여기서 관찰방향은 엔지니어가 대상 암반을 바라보는 방향을 의미하며, 노천광산의 경우 노출된 사면에 대한 직접적인 접근은 불허되었지만 개략적인 표면조사는 가능했다. 이러한 가시화 방법의 검증을 위해 노천광산의 일부 지역과 Sakano 산사태 지역의 후배지 내에 한 지점을 선정하여 시추공벽의 모니터링을 수행하였다.

## 2. 현장조사지역과 휴대용 시추공카메라의 재원

시추공벽의 모니터링은 두 개의 장소에서 이루어졌다. 첫 번째 장소는 지질학적인 조성이 자유면에 비교적 명확히 드러난 석회석 노천광산내 두 번째 층의 bench이었다. 조사지역으로 선정된 광산은 일본 내의 석회석 생산량 중 3 번째 규모의 Higashitani 광산으로 일본 후쿠오카(Fukuoka)현 키타큐슈(Kitakyushu)시 코쿠라-미나미(Kokura-minami)구에 위치한다. 광산 내 두 번째 층의 bench는 해발 395 m에 형성되었고, 암석 코어의 회수율 그리고 질산암모늄의 발파공당 주입량 - 풍화지역의 주입량은 비 풍화지역의 주입량에 40% 정도로 작업이 진행됨 - 을 통해 풍화지역과 비 풍화지역으로 구분될 수 있었다. 풍화지역 내에서 시추공벽의 모니터링은 시공된 발파공들 중 동일한 작업라인을 따라 4개를 선정하여 수행하였고 이들 4개의 발파공 부근의 지역을 Location H라 명명하였다. Location H에서 bench 사면은 70°/220의 경사각과 경사방향을 이루며, Fig. 1에 묘사된 바와 같이 풍화의 영향으로 생각되는 토양 상태로의 진전이 명확히 관찰되었고 단층의 발생이 있었을 것으로 유추되는 흔적도 사면관찰을 통해 발견되었다.

두 번째 장소는 일본 나가사키(Nagasaki)현 마츠우라(Matsuura)반도의 북쪽에 위치한 Sakano 산사태 지역의 후배지이었고 location M이라 명명하였다. 시추지점

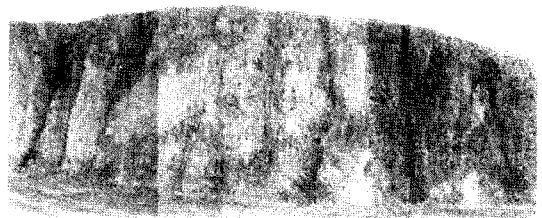


Fig. 1. The front photograph of location H in a weathering zone

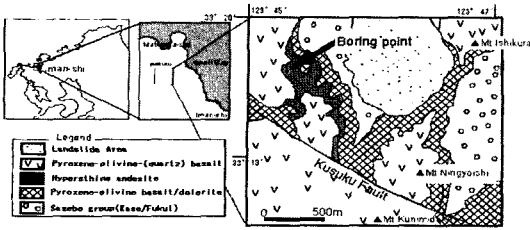


Fig. 2. Geological map of the boring area

은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 해발 300 m에서 북쪽으로부터 남쪽으로 발달된 현무암대에 위치했고 지하 80 m까지 모니터링 되었다. 시추지점의 지질학적인 column은 토양(심도 11.7 m까지), 안산암(심도 47.1 m까지), 현무암(심도 80 m까지)으로 구성되었고 지하수면은 78.4 m의 심도에 존재했다.

본 연구에서 사용된 시추공 카메라는 Nakagawa 박사가 1999년에 개발하여 상용화한 휴대용 시추공 카메라이다. 이 장비는 Fig. 3에서와 같이 하나의 제어박스를 기반으로 카메라 장치, 제어 장치 그리고 전원공급 장치의 세부분으로 엔진이어가 휴대할 수 있도록 제작되

었다. 시추공 벽의 영상은 카메라 장치에 내장된 캠퍼스 유형의 방향 지시자가 가리키는 방위각과 함께 하나의 이미지를 구성하며, 또한 회전이 가능한 38만 화소의 CCD(Charge-Coupled Device)카메라를 탑재하고 있어 불연속면의 주향이 명확히 판별가능하다. 또 하나의 주요한 특징은 전원공급 장치로써 대용량의 특별한 장비를 필요로 하지 않으며, 한 개의 자동차 시동용 배터리로도 충분한 전원을 공급할 수 있다는 점이다. 그 밖의 상세한 장비사양은 Table 1에 기술한 바와 같다.

### 3. 입체적인 가시화

#### 3.1 불연속면의 분류

상기의 휴대용 시추공 카메라로부터 얻어지는 시추공 벽의 영상을 분석함으로써 다음의 변수들-절리틈(aperture)과 그 폭, 충전 물질의 발생과 충전폭, 부조화 접촉(discordant contact)의 존재, 불연속면의 주향 등-이 명확히 발견되었다. Brekke와 Howard(1972)는 암반 내 존재하는 불연속면을 절리틈, 연속성과 발생특성 등에 기초한 스케일로써 특정한 유형의 지질구조로 구분

Table 1. Specification of the portable borehole camera system

Applicable Conditions	
Borehole size	φ 50 mm to 116 mm φ 40 mm compatible is optional
Depth observation	Maximum 180 m
Temperature	0° ~ 40°C
Borehole direction	All directions
Details of Units	
Camera unit	<input type="checkbox"/> CCD camera - Image pick up device 1/2" interline system - Effective pixels 379392 pixels, Horizontal resolution 470 TV lines - Power consumption : 3.5W <input type="checkbox"/> Cable - Outside diameter : φ 11 mm , 9-strand composite cable <input type="checkbox"/> Lens' focal length : 1.2 mm <input type="checkbox"/> Lighting equipment : E-5 bulb, rating 8V
Control unit	<input type="checkbox"/> Video cassette recorder with liquid crystal display - Recording system : Cassette tape of VHS format - Recording time : 9 hours at maximum (when T-180 tape, EP mode) - Liquid crystal panel : 6.5" TFT active matrix system - Power consumption : Approx. 26W <input type="checkbox"/> Video titler <input type="checkbox"/> Microphone amplifier - Rated input power : 5.5 mV (1 kHz with 15V DC) - Gain : 4.0 dB (1 kHz with 15V DC), Frequency : 7.0 Hz ~ 40 Hz
Power supply	<input type="checkbox"/> The battery included in the control unit <input type="checkbox"/> Any of AC power supplies can be used

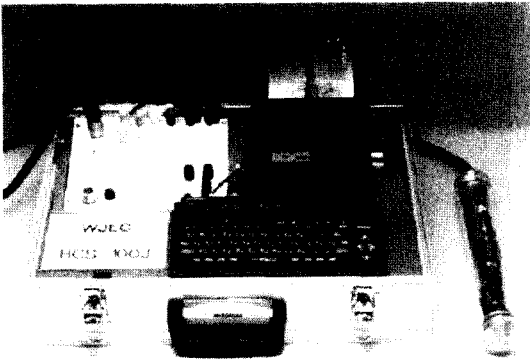


Fig. 3. Portable borehole camera system

하였다. 이들의 제의에 따르면, 지질학적 불연속성의 길이가 0.1 m~100 m일 경우 절리(joint)로 정의될 수 있으며, 10 m~1000 m일 경우 단층(fault)으로 정의될 수 있으며, 0.01 m 보다 작은 경우는 미세열하(microfissure)로 정의될 수 있다. 시추공의 직경이 location H의 경우 0.1 m이고 location M의 경우 0.07 m이었다. 따라서 시추공벽 영상에서 주향이 판별될 수 있도록 sine 곡선의 궤적이 명확히 발견되는 불연속면은 절리나 그 밖의 지질구조의 일부분으로 고려할 수 있었다.

이렇게 발견된 지질구조는 8 가지 유형 - horizontal joints, inclined joints, vertical joints, sub-vertical joints, open joints, filling, dike 그리고 faults - 으로 분류되었다. 본 논문에서 horizontal joint는 10° 이하의 경사각을 갖는 절리로, inclined joint는 10~80° 사이의 경사각을 갖는 절리로 각각 정의하였다. 따라서 vertical joint는 80° 이상의 경사각을 갖는 절리로 정의되었다. 이와 같은 절리들과 달리, 주향을 판별할 수 없도록 시추공벽의 일부분에서만 균열이 수직방향으로 발달한 것을 볼 수 있었고 이를 sub-vertical joint라 명명하였다. 그밖에 location H에서 발견된 정단층의 흔적(trace)은 Fig. 4에 나타난 분명한 지시자의 존재로써 확인될

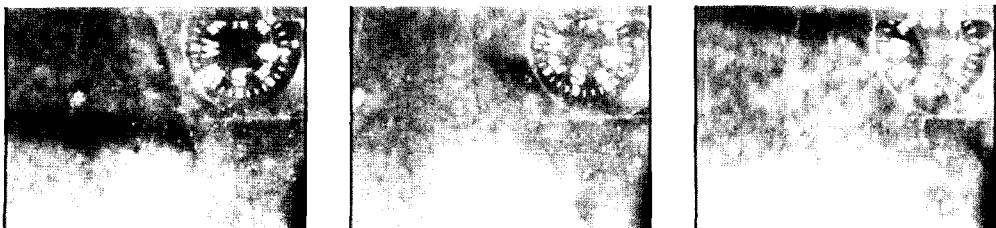


Fig. 4. A trace of fault with indicators in footwall, hanging wall and fracture plane

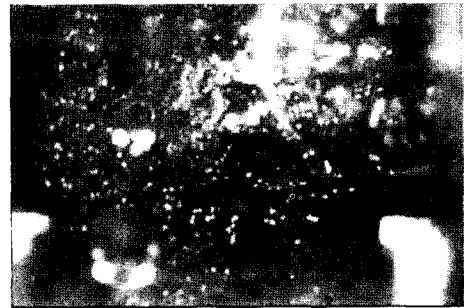


Fig. 5. A trace with a vesicular texture considered as the intrusion of lava

수 있다. 그리고 location M에서 발견된 dike는 Fig. 5에 나타난 바와 같이 용암의 관입으로 판단되는 소포조직(vesicular texture)의 흔적으로 확인되었다.

### 3.2 가시화를 위한 전제조건

위와 같이 암반 내에서 여러 가지 형태의 지질구조로 발생하는 불연속면의 가시화와 관련하여, 절리는 스케일의 크기정도에 따라 평면으로 종종 나타나며 따라서 암반 내의 불연속면은 완전한 프랙탈이 아니다(Brown and Scholz, 1985). 그러므로 시각적인 표현에서는 면의 거칠기는 간과될 수 있다는 것에 주목해야 할 것이다. 결과적으로 불연속면을 면의 방정식으로 묘사하는 수리학적인 형식화가 사용되게 되었다. 더불어 3차원적인 가시화를 위해서는 몇 가지 전제조건에 기초한 전개 과정이 고안되어야 했다.

### 3.3 수리학적인 형식화

형식화의 첫 단계로서 임의의 면에 수직한 법선벡터를 선형대수학의 수학적 공리에 따라 식 (1)과 같이 구한다(Boas, 1983).

$$\vec{N} = ai + bj + ck \tag{1}$$

여기서  $a, b, c$  는 각 좌표축의 방향성분  $i, j, k$  는  $x$  축  $y$  축 그리고  $z$  축 각각의 단위벡터이다.

식 (1)의 법선벡터와 이 법선벡터의 기저를 이루는 면상의 임의의 점은 식 (2)와 같은 관계를 갖는다.

$$a(x - x_0) + b(y - y_0) + c(z - z_0) = 0 \quad (2)$$

여기서  $x, y, z$  는 면상의 임의의 점이 갖는 좌표  $x_0, y_0, z_0$  는 법선벡터의 원점이 갖는 좌표  $a, b, c$  는 식 (1)에서의 정의와 동일하다.

그 다음 단계로써 상기의 전제조건과 불연속면 위치의 세 가지 요소, 즉 경사각, 경사방향 그리고 심도로부터 식 (2)의 변수들을 구한다. 이때 유도되는 방향성분은 다음과 같다.

$$a = g \sin \alpha, \quad b = g \cos \alpha, \quad c = d$$

$$\therefore g = |d| \tan \beta$$

여기서  $\alpha, \beta$  는 불연속면의 경사방향과 경사각  $d$  는 불연속면 심도의 절대값

그 결과 임의의 불연속면의 방정식이 식 (3)과 같이 세 가지 요소에 대한 함수로 얻어지게 된다.

$$\sin \alpha \sin \beta x + \cos \alpha \sin \beta y + \cos \beta z = -d \cos \beta \quad (3)$$

그런데 시추공의 시추방향이 연직방향이 아니고 임의의 방향성을 갖는다면, 시추공 탐사 시에 측정된 불연속면의 심도는 상기의 전제조건에 따라 시추공의 연직방향에서의 심도로 보정되어야 하며 방향성분도 달라지게 된다. 따라서 시추공의 방향성을 선주향(trend)  $\theta$  와 주향경사(plunge)  $\gamma_2$  로 나타낼 경우, 불연속면의 방정식은 네 변수( $\theta, \gamma_2, \alpha, \beta$ )들 간의 상관관계로 표현된다. 그 결과 불연속면의 방정식이 각 조건에 따라 유도되었고,  $(90^\circ - \gamma_2)$ 가 불연속면의 경사각보다 큰 각을 이루는 경우와 그렇지 못한 경우로 구분할 수 있었다.

i)  $(90^\circ - \gamma_2)$ 가 불연속면의 경사각보다 큰 각을 이루는 경우

이 경우는 불연속면의 심도에 대해서 Fig. 8에 도시한 두 가지 예외조건을 가지게 된다.

Fig. 8에서  $L_1$ 과  $L_2$ 는 식 (4), (5)와 같이 정의된다.

$$L_1 = |d|(1 + \tan \gamma_2 \tan \beta) \quad (4)$$

$$L_2 = |d|(1 - \tan \gamma_2 \tan \beta) \quad (5)$$

그러므로 시추공의 선주향과 불연속면의 경사방향

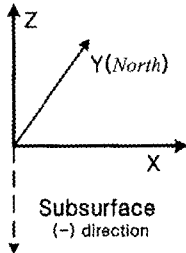


Fig. 6. Suggested coordinate system

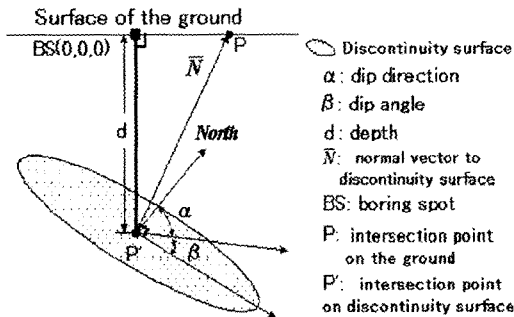


Fig. 7. Summary of the related limitations

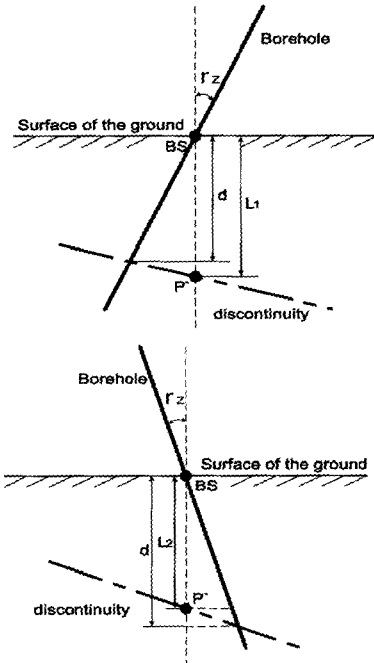


Fig. 8. Two exceptions of the first case

에 따라 불연속면의 심도는 계측된 심도의 절대값  $d$  또는  $L_1$ 과  $L_2$  중 하나의 값을 가지게 된다. 따라서 방향성분은 또한  $x$  축 방향으로  $-L_2 \tan \beta \sin \alpha$ ,  $L_1 \tan \beta \sin \alpha$ ,  $d \tan \beta \sin \alpha$  -,  $y$  축 방향으로  $-L_2 \tan \beta \cos \alpha$ ,  $L_1 \tan \beta \cos \alpha$ ,  $d \tan \beta \cos \alpha$  -,  $z$  축 방향으로  $-d$ ,  $L_1$ ,  $L_2$  - 와 같이 각각 세 가지의 경우를 갖는다. 결국, 불연속면의 방정식에 대해 식(6) ~ (20)과 같은 조건식이 성립한다.

•  $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$  일 때

for  $\alpha = \theta + 90^\circ$  or  $\theta + 270^\circ$  ;  
 $\sin \alpha \sin \beta x + \cos \alpha \sin \beta y + \cos \beta z = -d \cos \beta$  (6)

for  $\theta + 90^\circ < \alpha < \theta + 270^\circ$  ;  
 $\sin \alpha \sin \beta x + \cos \alpha \sin \beta y + \cos \beta z = -L_2 \cos \beta$  (7)

for  $\theta + 270^\circ < \alpha < 360^\circ$  or  $0^\circ \leq \alpha < \theta + 90^\circ$  ;  
 $\sin \alpha \sin \beta x + \cos \alpha \sin \beta y + \cos \beta z = -L_1 \cos \beta$  (8)

•  $\theta = 90^\circ$  일 때

for  $\alpha = \theta - 90^\circ$  or  $\theta + 90^\circ$  ;  
 $\sin \alpha \sin \beta x + \cos \alpha \sin \beta y + \cos \beta z = -d \cos \beta$  (9)

for  $\theta - 90^\circ < \alpha < \theta + 90^\circ$  ;  
 $\sin \alpha \sin \beta x + \cos \alpha \sin \beta y + \cos \beta z = -L_1 \cos \beta$  (10)

for  $\theta + 90^\circ < \alpha < 360^\circ$  ;  
 $\sin \alpha \sin \beta x + \cos \alpha \sin \beta y + \cos \beta z = -L_2 \cos \beta$  (11)

•  $90^\circ < \theta < 270^\circ$  일 때

for  $\alpha = \theta - 90^\circ$  or  $\theta + 90^\circ$  ;  
 $\sin \alpha \sin \beta x + \cos \alpha \sin \beta y + \cos \beta z = -d \cos \beta$  (12)

for  $\theta - 90^\circ < \alpha < \theta + 90^\circ$  ;  
 $\sin \alpha \sin \beta x + \cos \alpha \sin \beta y + \cos \beta z = -L_1 \cos \beta$  (13)

for  $\theta + 90^\circ < \alpha < 360^\circ$  or  $0^\circ \leq \alpha < \theta - 90^\circ$  ;  
 $\sin \alpha \sin \beta x + \cos \alpha \sin \beta y + \cos \beta z = -L_2 \cos \beta$  (14)

•  $\theta = 270^\circ$  일 때

for  $\alpha = 0^\circ$  or  $\theta - 90^\circ$  ;  
 $\sin \alpha \sin \beta x + \cos \alpha \sin \beta y + \cos \beta z = -d \cos \beta$  (15)

for  $0^\circ < \alpha < \theta - 90^\circ$  ;  
 $\sin \alpha \sin \beta x + \cos \alpha \sin \beta y + \cos \beta z = -L_2 \cos \beta$  (16)

for  $\theta - 90^\circ < \alpha < \theta + 90^\circ$  ;  
 $\sin \alpha \sin \beta x + \cos \alpha \sin \beta y + \cos \beta z = -L_1 \cos \beta$  (17)

•  $270^\circ < \theta < 360^\circ$  일 때

for  $\alpha = \theta - 270^\circ$  or  $\theta - 90^\circ$  ;  
 $\sin \alpha \sin \beta x + \cos \alpha \sin \beta y + \cos \beta z = -d \cos \beta$  (18)

for  $\theta - 270^\circ < \alpha < \theta - 90^\circ$  ;  
 $\sin \alpha \sin \beta x + \cos \alpha \sin \beta y + \cos \beta z = -L_2 \cos \beta$  (19)

for  $\theta - 90^\circ < \alpha < 360^\circ$  or  $0^\circ \leq \alpha < \theta - 270^\circ$  ;  
 $\sin \alpha \sin \beta x + \cos \alpha \sin \beta y + \cos \beta z = -L_1 \cos \beta$  (20)

이상과 같이 불연속면은 존재조건에 부합하는 면의 방정식의 형태로 형상화된다. 이를 3차원적으로 이미지화하기 위해서는 형상화된 면이 3차원 공간에서 차지하는 좌표( $x, y, z$ )를 도출해야 한다. 이것은  $x$ 축과  $y$ 축 상의 좌표 값이 불연속면의 지질학적인 연속성과 모델링 영역에 따라 결정될 수 있으므로, 이 두 값을 별도의 수학적 과정 없이 불연속면의 존재조건에 부합하는 방정식(식 (6)~(20))에 대입하여  $z$ 축 상의 좌표 값을 얻음으로써 가능하다.

ii)  $(90^\circ - \gamma_2)$ 가 불연속면의 경사각보다 작거나 같은 각을 이루는 경우

이 경우도 불연속면의 심도에 대해 두 가지 예외조건을 가지며 Fig. 9와 같다.

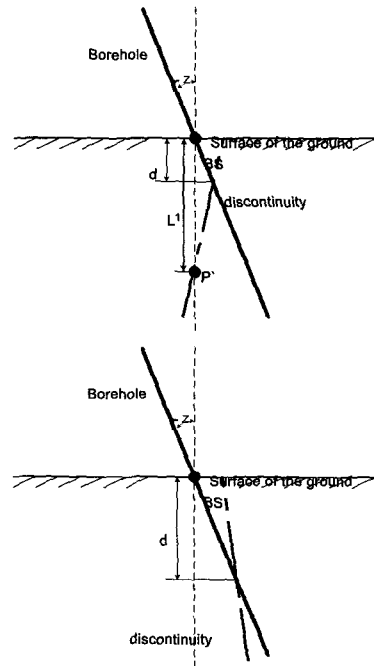


Fig. 9. Two exceptions of the second case

Fig. 9의  $L_1$  조건은 Fig. 7에서 정의한 바와 동일하지만, Fig. 9의 오른쪽에 묘사된 바와 같이 비록 시추공 내에서 발견되었더라도 실제로는 시추공의 연직방향 상에 존재하지 않는 조건도 있음을 알 수 있다. 그리고 이러한 조건에 부합하는 불연속면의 경사방향은 시추공의 선주향과 식 (21)과 같은 관계를 가진다.

$$|(\theta + 90^\circ) - 360^\circ| < \alpha < |(\theta + 270^\circ) - 360^\circ| \quad (21)$$

식 (21)을 만족하는 불연속면은 앞서 언급한 전제조건에 부합하지 않으므로 본 연구에서 고안된 수리학적인 형식화를 적용할 수 없었다. 결국, 두 가지 조건하에서의 불연속면만이 면의 방정식으로 형상화될 수 있다.

$$\text{for } \alpha = |(\theta + 90^\circ) - 360^\circ| \text{ or } |(\theta + 270^\circ) - 360^\circ|$$

$$\sin \alpha \sin \beta x + \cos \alpha \sin \beta y + \cos \beta z = -d \cos \beta \quad (22)$$

$$\text{for the others}$$

$$\sin \alpha \sin \beta x + \cos \alpha \sin \beta y + \cos \beta z = -L_1 \cos \beta \quad (23)$$

이와 같이 형상화된 불연속면에 대해 이들이 3차원 공간상에서 차지하는 좌표(x, y, z)는 앞의 경우에서 언급한 바와 같이 x축, y축의 좌표 값이 기지의 값이므로, 면의 방정식(식 (22), 식 (23))으로부터 z축의 좌표 값이 유도되고 결국 세 방향의 좌표가 구해진다.

#### 4. 시각화 결과

이상과 같이 임의의 불연속면의 3차원적인 가시화를 위해 방법론이 고안되었고 이를 Location H와 Location M에 적용하였다. 가시화된 불연속면의 분포는 Matlab 언어를 이용한 코딩에 의해 관찰방향을 달리하여 표현할 수 있었다. 이러한 방법은 동일한 대상을 관찰방향에 따라 다른 이미지로 보이게 하지만, 그 물체의 공간적인 존재상태를 효과적으로 연상할 수 있게 했다. 관찰방향의 방향설정은 North의 반대방향 으로부터 시계방향을 음의 방향 그리고 반시계방향을 양의 방향으로 정의하였다. 이때 관찰방향( $\eta$ )는 불연속면의 고유 좌표에 영향을 주지 않으며 방위각과 식 (24)의 관계를 갖는다. 여기서 방위각은 가시화된 대상영역에 대한 접근방향(approach azimuth)을 의미한다.

$$\text{Approach azimuth} = 180^\circ - \eta \quad (24)$$

##### 4.1 Location H의 적용결과

Location H는 전술한 바와 같이 bench 높이 15 m,

bench 사면의 경사 70°인 두 번째 bench 내에서 사면표면 상에서도 soil로의 진전이 발견되는 풍화지역이다. 시추공벽의 모니터링은 시추공간의 간격이 각각 8.8 m, 4.2 m, 4.8 m인 4개의 시추공에 걸쳐 수행되었다. 이에 대해 모델링 영역을 길이 27 m, 높이 15 m 그리고 평균 2.4 m의 저항선(burden)을 갖는 bench의 형태로 설정하였다. 모델링 영역에 Location H에 존재하는 불연속면들을 3차원적으로 나타내기에 앞서 bench 사면에 대한 표면조사와 시추공벽의 모니터링 결과를 검토하였다. 사면에서의 표면조사는 조사시간의 제약과 안정상의 이유로 조사선 샘플링과 조사창 샘플링 등의 조사 방법은 배제되었고, 암반상태 및 단층 부정합 등의 대규모 지질구조의 확인을 위주로 진행하였다.

표면조사 결과, Fig. 10에 도시된 바와 같이 21번, 22번 시추공의 부근과 그 밖의 일부 지역에서는 풍화의 정도가 매우 심한 것으로 판단되었다. 그리고 22번, 23번 시추공 부근에서는 비교적 신선한 암반의 존재를 확인할 수 있었고 특히 단층의 흔적으로 보이는 선형구조가 비교적 명확히 발견되었다. 이러한 지질학적 경향은 시추공벽의 모니터링을 통해서 더욱 분명하게 확인되었다. 21번, 24번 시추공의 경우 거의 전 구간이 암반으로 간주할 수 없는 soil과 매우 흡사한 상태이었고, 23번 시추공의 경우도 bench의 상부지역은 풍화의 진전에 의해 soil로 교란된 상태인 것으로 판단되었다. 또한 Fig. 4에 나타낸 바와 같은 정단층에 대한 자취도 22번 시추공에서 확인되었다.

불연속면은 전체 56개 지점에서 발견되었고 표면조사를 통해 예견된 바와 같이 22번, 23번 시추공에서 거의 대부분이 존재했다. 불연속면의 종류에 따라 발생빈도를 살펴보면, inclined joint가 64%로 가장 큰 빈도수를 나타내었고 그 밖의 불연속면은 7% 이하의 매우 낮은 발생빈도를 나타내었다. 특히 sub-horizontal joint의 경우, 동일한 bench의 비 풍화지역에서 계속된 발생빈도 30%에 비해 매우 낮은 수치인 7%의 발생빈도를 보였다. 이러한 현상은 발파의 영향이 신선한 암반에서는 균열형성 등의 에너지방출로 나타나지만, 풍화의 진전

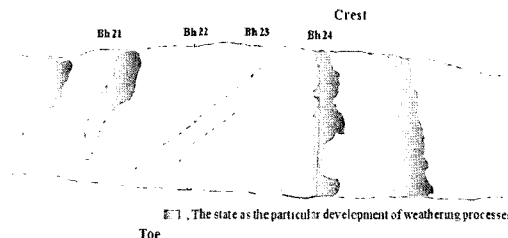


Fig. 10. A simple sketch on Location H

에 의해 soil로 교란된 암반에서는 주로 구성입자간의 이탈현상으로 나타나는 것에 기인한다고 판단된다.

이상과 같은 검토결과를 토대로 3차원 가시화는 가장 높은 발생빈도를 나타낸 inclined joint, 역학적인 연약면으로 작용할 수 있는 filling과 open joint 그리고 sub-vertical joint를 제외한 모든 불연속면에 대해서 각각 독립된 이미지로서 다루어져야 함을 알 수 있다. 3차원으로 이미지화된 모델링의 영역에서 불연속면은 불연속면 간의 명확한 구분과 연속성의 확인을 용이하게 하기 위해 원형으로 묘사되며, 시추공간의 거리를 고려하여 그 원의 직경은 4.2 m로 설정하였다.

먼저, inclined joint의 가시화 결과를 살펴보면, Fig. 11의 왼쪽에서와 같이 풍화의 정도가 심하지 않은 22번, 23번 시추공 부근에서 거의 대부분이 존재했으며 불연속면간의 연속성이 보이지 않는 다극성의 무작위적인 분포를 이루고 있다. 이러한 분포경향은 Fig. 11의 오른쪽에 도시한 슈미트망을 통해서도 확인할 수 있다.

Filling과 open joint에 대해서는 이들 간의 연속성에 관해 보다 명확한 판단을 유도하고자 Fig. 12와 같이 두 가지 관찰방향에서의 이미지를 제시하였다. 제시된 두 방향에서의 이미지를 통해 역학적인 연약면으로 작용할 수 있는 두 가지 불연속면들 간에 연속성을 확인할 수 없으며, bench 사면에 대해서도 특정한 형태의 파괴를 예상할 수 없음을 알 수 있다.

Location H 내의 불연속면들의 전반적인 분포상태와 이에 대해 사면 상의 지질학적 흔적(trace)이 갖는 연관

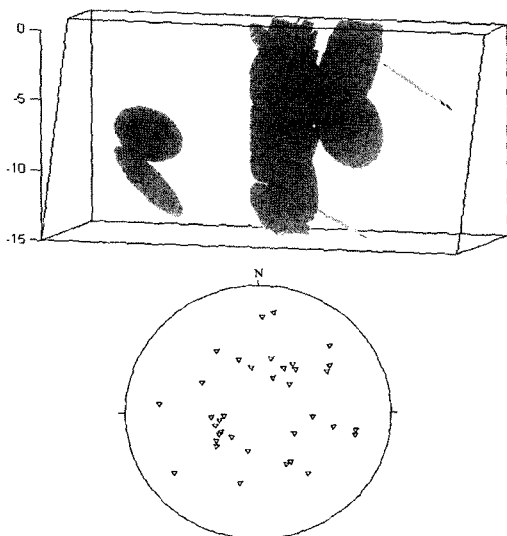


Fig. 11. Three dimensional image on inclined joints in location H and its Schmidt net

성을 분석하고자, sub-vertical joint를 제외한 모든 불연속면을 Fig. 13과 같이 하나의 이미지로 표현하였다.

Fig. 13의 관찰방향은 location H를 촬영한 Fig. 1과 사면표면에 대한 조사결과에 기초해서 작성된 Fig. 10으로부터 연상되는 이미지의 관찰방향과 동일하도록 설정되었다. 또한 다른 종류의 불연속면들 간의 구분을 위해, inclined joint는 회색(gray), open joint는 녹색(green), filling은 적갈색(copper) 그리고 fault는 자홍색(magenta)으로 정의하는 채색방법을 사용되었다.

Fig. 13의 이미지를 Fig. 10과 Fig. 1에 기초해서 고찰하면, 22번과 23번 시추공 부근의 사면에 노출된 단층의 흔적이 자홍색을 띤 fault와 좋은 상관성을 가지는 것으로 생각된다. inclined joints는 사면의 암반부에서 미약한 연속성을 나타냈던 불연속면들의 흔적과 연

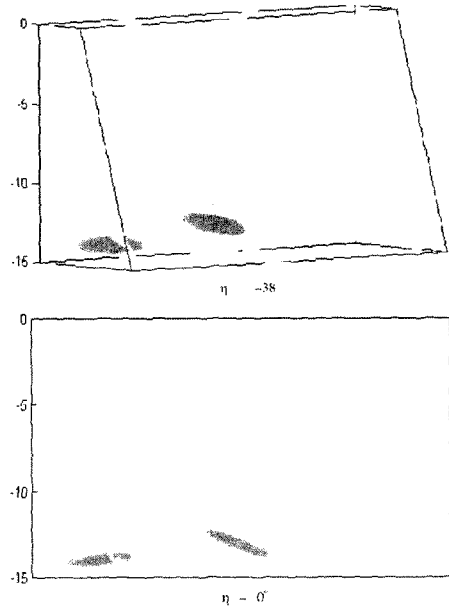


Fig. 12. Three dimensional image on filling and open joints in location H

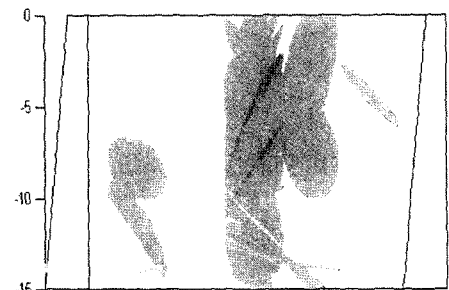


Fig. 13. A general image of location H



관지을 수 있다. 또한, 풍화의 진전을 매우 명확하게 볼 수 있었던 지역에 위치한 24번 시추공의 경우 단 하나의 inclined joint만이 존재했고 그 밖의 어떠한 불연속면도 존재하지 않음을 알 수 있다. 결과적으로 location H 내에 존재하는 불연속면들의 전반적인 분포는 그들 간의 연속성이 미약하고 사면의 sliding을 야기하는 연약면의 형성이 어렵다고 말할 수 있다.

**4.2 Location M의 적용결과**

Location M에서 지질학적인 조사를 위해 하나의 시추공이 시공되었고 심도 80 m까지 모니터링 하였다. 시추공의 직경이 0.07 m이므로 발견된 불연속면은 최소 0.1 m의 연속성을 갖는 절리로 간주할 수 있다는 점과 3.1절에서 언급한 불연속면의 길이에 대한 고찰을 토대로 모니터링을 통해 발견된 불연속면은 5 m의 연속성을 갖는 지질학적 구조로 간주할 수 있었다. 따라서 이 지역의 모델링은 폭 5 m, 길이 5 m 그리고 높이 80 m의 육면체(hexahedron type of solid)로 이루어졌다.

모니터링의 결과, 5종류의 불연속면 - open joint, filling, inclined joint, dike 그리고 horizontal joint - 가 존재했다. 총 35개의 불연속면들 중 이들 간의 발생 빈도를 살펴보면, open joint가 57%, filling이 23%로 대부분을 차지했고 inclined joint는 14% 그리고 dike와 horizontal joint는 각각 3%의 빈도수를 나타내었다. Open joint의 aperture와 filling의 충전폭은 영상처리 프로그램(Image-Pro, ver. 4.2)을 통해 계측되었고 각각 1.69 mm, 1.76 mm의 비교적 큰 수치를 나타냈다. RMR 시스템에 의하면 1~5 mm의 aperture는 공학적 활용에 있어서 불리한 조건(unfavorable condition)이고 또한, filling의 충전폭이 5 mm이하라 하더라도 불리한 조건으로 작용할 수 있으므로(Bieniawski, 1989), 3차원적인 가시화를 통해 filling과 open joint의 분포를 고찰할 필요가 있었다. 그리하여, filling과 dike - 용암의 관입에 의한 filling의 한 형태 - 를 하나의 3차원 이미지로 그리고 open joint를 하나의 이미지로 각각 가시화하였다.

가시화의 형태는 location H에서와 동일한 이유로 원형 평면으로 묘사하였고 모델링 영역의 크기를 고려하여 그 원의 직경은 5 m로 설정하였다. Location M에서 가시화의 결과는 bench사면과 같은 기하학적 요소가 없으므로, 불연속면들의 주향과 관찰방향 - 즉, 암반굴착 시 진행방향 - 과의 관련성을 RMR시스템에서 제시한 기준에 따라 고찰했다.

Filling과 dike는 Fig. 14에서 두 가지 관찰방향 -  $\eta = 1^\circ$ ,  $\eta = 89^\circ$  - 으로 가시화 되었다. 여기서, 관찰 방향  $\eta$  가  $1^\circ$  일 때, 즉  $N 179^\circ E$ 의 접근방향에서 불

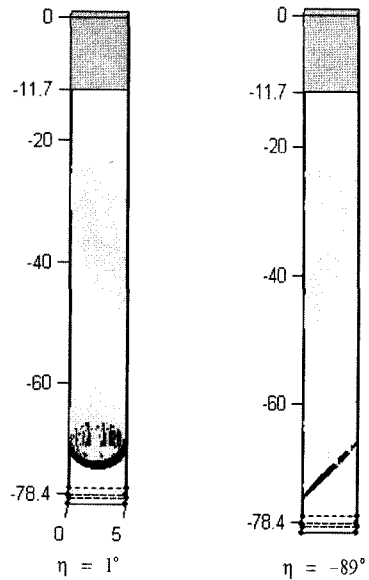


Fig. 14. Three dimensional images on dike and filling in location M

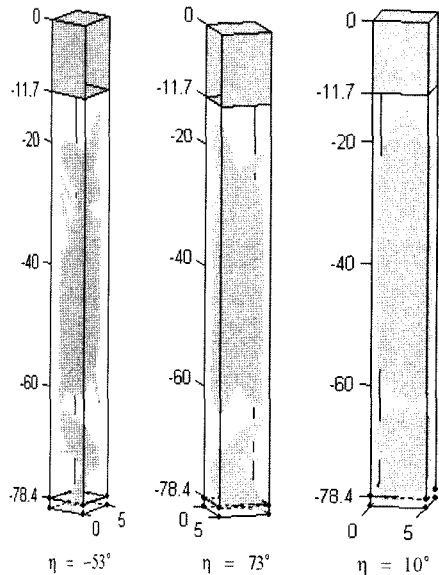


Fig. 15. Three-dimensional images on open joints in location M

연속면의 주향이 이 방향에 수직한 방향으로 발달하며 불연속면의 경사각은 전반적으로  $45^\circ \sim 90^\circ$ 의 범위임을 알 수 있다. 이러한 조건은 암반굴착 시 굴진방향의 변위를 간과할 수 있는 평면변형률 조건에 부합하며, RMR 시스템에서 공학적으로 매우 유리한 조건으로 정의되고 있다.

Open joint는 Fig. 15에서와 같이 세 방향의 관찰방향에서 가시화되었다. 그 결과 location M의 전 구간에 걸쳐 불연속면의 주향이 특별한 형태를 가지지 않는 미약한 연속성을 가지며 여러 방향으로 발달해 있음을 볼 수 있다. 따라서 open joint의 경우는 심도 80 m까지의 구간에서는 역학적으로 유리한 접근방향을 찾을 수 없음을 알 수 있다.

## 5. 결 론

휴대용 시추공 카메라를 이용한 지하정보의 가시화의 수단으로써, 시추공벽의 영상으로부터 발견된 불연속면에 대해 3차원 공간상의 존재상태를 고찰하고 이를 시각적으로 표현하였다. 이를 위한 형식화 과정은 불연속면의 경사방향과 경사각 그리고 시추공의 선주향과 경사간의 상관관계를 분석함으로써 유도된 조건식에 기초했다.

본 연구에서 수행한 방법론은 불연속면의 존재를 조사선 조사나 조사창 조사에 의해 확률론적으로 유추하는 연구들(Billaux et al., 1989; Kulatilake et al., 1990)과는 달리 대상 지역 location H와 location M에 대해 시추공벽의 모니터링을 통해 직접적으로 확인된 불연속면을 3차원적으로 가시화하는 결정론적인 모델링방법이며, 현장에 적용한 사례연구의 결과는 다음과 같다.

- 1) Location H의 모델링 결과 ; 풍화의 진전을 매우 명확하게 볼 수 있었던 지역에서는 단 하나의 inclined joint만이 존재했고 비교적 신선한 암반에서 다수의 불특정한 방향으로 inclined joint가 존재함을 알 수 있다. 또한 사면에 노출된 단층의 흔적과 bench암반 내에서 발견된 정단층의 흔적과 좋은 연관성을 갖는 것으로 판단된다. 가시화를 통해 판단되는 전반적인 불연속면의 분포는 그들 간에 특별한 연속성을 찾을 수 없고 어떠한 형태의 연약면의 형성도 예상되지 않으므로 사면의 sliding이 발생하기 어렵다고 판단된다.
- 2) Location M의 모델링 결과 ; filling과 dike의 경우  $N 179^{\circ} E$ 의 접근방향에서 불연속면의 주향이 이 방향에 수직인 방향으로 발달하며 불연속면의 경사각은 전반적으로  $45^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 의 범위임을 알 수 있다. 이러한 조건은 암반굴착 시 굴진방향의 변위를 간과할 수 있는 평면변형을 조건에 부합하며, RMR시스템의 제안에서와 같이 공학적으로 매우 유리한 방향조건임을 알 수 있다. 반면, location M의 전 구간에서 가장 높은 발생빈도를 나타내고 주목해야할 정도의 개구

폭(aperture)을 지닌 open joint의 경우 심도 80 m까지의 전 구간에서 역학적으로 유리한 접근방향을 찾을 수 없음을 알 수 있다.

두 가지 사례연구를 통하여 얻은 연구결과, 고안된 지하정보의 3차원 가시화 기법은 세 가지 기능 첫째 자유면에 노출된 지질학적인 흔적에 대한 분석, 둘째 대상 지역에 대해 역학적으로 유리한 방향의 인식, 셋째 불연속면의 분포에 대한 입체적인 이해를 가진다고 말할 수 있다. 그리고 이러한 가시화 기법을 활용한 지질공학적인 해석이 휴대용 시추공 카메라를 통해 얻은 정보를 기초해서 가능하다는 것은 엔지니어에게 조사장소의 제약과 조사비용 상에 많은 이점을 제공할 것이다. 특히, 암반상태가 불량하거나 소수의 엔지니어만이 접근이 가능한 지역에서 시설물의 안전과 환경보호를 위해 불연속면의 분포를 가시화 하고자 할 때 그 활용성이 극대화 되리라 생각된다.

## 감사의 글

현장조사의 성공적인 수행과 안전을 위해 함께 참여한 Higashitani 노천광산의 관계자 여러분께 감사드립니다. 또한 휴대용 시추공카메라의 사용과 이를 활용한 조사방법에 대해 많은 도움을 준 Nakagawa 박사에게 심심한 감사의 뜻을 표한다.

## 참고문헌

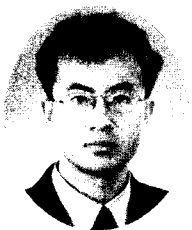
1. Bieniawski Z. T., 1989, Engineering Rock Mass Classifications, John Wiley & Sons, New York, 251 p.
2. Billaux D., J.P. Chiles, K. Hestir and J. Long, 1989, Three dimensional statistical modelling of a fractured rock mass - An example from the Fanay - Augeres mine, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 26, 281-299.
3. Boas Mary L., 1976, Mathematical Methods in the Physical Sciences 2ed., John Wiley & Sons, New York, p. 95-111.
4. Brekke T.L. and T.R. Howard, 1972, Stability problems caused by seams and faults, Proc. the 1st North American Rapid Excavation and Tunneling Conference, Chicago, USA, Vol. 1, 24-41.
5. Brown S.R. and C.H. Scholz, 1985, Broad bandwidth study of the topography of natural rock surfaces, Journal of Geophysical Research, 90.12, 575-582.
6. Changming Sun and Stefano Pallottino, 2003, Circular shortest path in images, Pattern Recognition, Vol. 36, 709-719.
7. Kulatilake P.H.S.W., T.H. Wu and D.N. Wathugala,

- 1990, Probabilistic modelling of joint orientation, Int. J. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 14, 325-350.
8. Maerten Laurent, David D. Pollard and Frantz Maerten, 2001, Digital mapping of three-dimensional structures of the Chimney Rock fault system, central Utah, Journal of Structural Geology, Vol. 23, 585-592.
9. Pinto V., X. Font, M. Salgot, J.C. Tapias and T. Maerten, 2002, Using 3-D structures and their virtual representation as a tool for restoring opencast mines and quarries, Eng. Geol., Vol. 63, 121-129.
10. Pirhonen V.O., 1988, Combined geophysical and hydraulic methods for 3D mapping of fractures and siting rock caverns in granite, Eng. Geol., Vol. 25, 45-68.
11. Schepers R., G. Rafat, C. Gelbke and B. Lehmann, 2001, Application of borehole logging, core imaging and tomography to geotechnical exploration, Int. J. of Rock Mech. & Min. Sci., Vol. 38, 867-876.
12. Tirén S.A., P. Askling and S. Wänstedt, 1999, Geologic site characterization for deep nuclear waste disposal in fractured rock based on 3D data visualization, Eng. Geol., Vol. 52, 319-346.

### 정윤영

1993년 강원대학교 자원공학과 공학사  
 1996년 강원대학교 암석역학 공학석사  
 2004년 일본 구슈대학(九州大學) 지구자원시스템공학 전공 공학박사

Tel: 02-880-7230  
 E-mail: jrhope@empal.com  
 현재 서울대학교 지구환경 시스템 공학부  
 BK사업단 연수연구원



### 松井 紀久男

1975년 구슈대학(九州大學) 공학사  
 1977년 구슈대학(九州大學) 공학석사  
 1983년 구슈대학(九州大學) 공학박사

Tel: +81-92-642-3624  
 E-mail: matsui@mine.kyushu-u.ac.jp  
 현재 일본 구슈대학(九州大學) 지구자원시스템공학 교수, 일본 석탄광업 기술 전문위원

