

# 3차원 레이저 스캐닝 시스템을 이용한 불연속면의 방향성 측정과 터널 변위 모니터링

손호웅\* · 오석훈\*\* · 김영경\*\*\*

\*배재대학교 건설환경철도공학과 지반조사공학연구소

\*\*강원대학교 지구시스템공학과

\*\*\*수자원연구원 댐안전연구소

## Measurement of Joint-Orientation and Monitoring of Displacement in Tunnel using 3D Laser Scanning System

Howoong Shon\* · Seokhoon Oh\*\* · Young-Kyung Kim\*\*\*

*\*Dept. of Civil, Env. and Railroad Eng., Paichai University*

*\*\*Dept. of Geosystem Eng., Kangwon National University*

*\*\*Dam Eng. Research Center, Korea Institute of Water and Environment, KOWACO*

**요 약**

국내 지형의 약 70%는 산악지역이며, 도로, 철도 및 터널 등에는 무수한 암반 불연속면이 존재한다. 이러한 암반 불연속면의 조사, 안정성 분석 및 합리적인 안정화 대책공법 등의 시스템 구축이 시급한 실정이다. 기존의 암반 불연속면 조사방법은 인력, 시간 및 현장 접근성 등의 여러 한계점을 가지고 있다. 본 논문에서는 이러한 단점을 보완하기 위한 방법으로 현재 정밀한 3차원 공간정보군(群)을 얻을 수 있는 지상 레이저 스캐닝 시스템을 활용한 방법을 제안하였다. 지상 레이저 스캐닝 시스템을 이용한 방법은 측정시간이 짧고, 대절토사면 및 접근이 불가능한 지역에서도 측량이 가능한 장점을 가지고 있다. 본 연구에서는 암반사면의 안정성 분석, 댐체 및 터널내부의 변위특성을 지상 레이저 스캐닝 시스템을 이용하여 3차원 공간정보(좌표)를 갖는 측정점(測點雲: point-cloud)을 측정함으로써 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다. 암반사면의 경우, 실제 암반사면의 3D 모델링 결과로부터 불연속면의 방향성 추출, 파괴형태 분석, 절리면의 거칠기 정량화 및 붕괴체적 등을 구할 수 있었다. 댐체 및 터널과 같은 구조물의 경우에는 역설계를 수행하여, 설계도면과의 오차 확인 및 구조물의 변위측정 등 안전진단에 활용할 수 있었다.

**주요어**

지상 레이저 스캐닝 시스템, 암반불연속면, 방향성, 거칠기, 측정점, 변위, 역설계, 댐체, 터널, 사면

**ABSTRACT**

More than 70% of Korean Peninsula is consisted of mountains, so that lots of roads, rail-roads and tunnel, which play a pivotal role in the industry activity, are existed along the rock-slope and in the rock-mass. Thus, it is urgent that integration of management system through the optimum survey and design of rock-slope excavation, proper stabilization method and database of rock-slope. However, conventional methods have shortcoming with the economy of survey time and human resources, and the overcome of difficulties of approach to the in-situ rock-slope. To overcome the limitation of conventional method, this paper proposed the development of remote measurement system using Terrestrial Laser Scanning System. The method using Terrestrial 3D Laser Scanning System, which can get 3D spatial information on the rock-slope and 2) Dept. Geosystem Engineering, Kangwon National University, Korea tunnel, has an advantage of reduction of measurement time and the overcome of difficulties of approach to the in-situ rock-slope/dam/tunnel. In the case of rock-slope, through the analysis of 3D modeling of point-cloud by Terrestrial Laser Scanning System, orientation of discontinuity, roughness of joint surface, failure shape and volume were successively achieved. in the case of tunnel face, through reverse-engineering, monitoring of displacement was possible.

**Key words**

Terrestrial Laser Scanning System, Discontinuity in rock-mass, orientation, roughness, point-cloud, displacement, reverse design, dam, tunnel, slope

Corresponding Author : 손호웅(hshon@pcu.ac.kr)

원고접수일 : 2006년 1월 17일      게재승인일 : 2006년 2월 19일

## 1. 서론

국내 지형의 약 70%는 산악지역이어서 국가 산업 활동의 대동맥 역할을 수행하는 기존의 도로, 철도 및 터널 등에는 무수한 암반사면이 존재하며, 이러한 암반사면에서의 낙석, 붕괴 및 산사태는 우리나라에서 발생하고 있는 지질재해중의 하나로 매년 심각한 피해를 유발하고 있다. 특히 산악지역의 도로 및 철도변에 개설되는 암반을 절취하여 건설되는 경우가 많으므로 이런 재해 위험에 노출되어 있으며 이로 인한 재산 및 인명 피해의 가능성이 높다. 그러므로 암반사면에 대한 안전도 평가를 위한 효율적이고 체계적인 방법의 개발과 시스템 구축이 요구되고 있다.

또한, 댐, 터널과 같은 구조물은 기존 측정방법으로 설계도면과 맞게 건설됐는지 정확히 측량할 효율적인 방법이 거의 없고, 장기간에 걸친 풍화 및 기타 자연적, 인위적 요인에 의해 생기는 변형을 전체적으로 확인할 방법이 없는 현실이다.

따라서 암반사면, 댐 및 터널과 같은 구조물의 적절한 조사와 설계, 합리적인 안정화 대책공법, 측정 자료의 데이터베이스화 등을 통한 통합관리시스템의 구축이 시급한 실정이며, 이를 근간으로 절취사면 유지관리 편람의 작성 및 보급을 통한 해당 관리주체의 효율적이고도 합리적인 유지관리제도의 정착이 시급하다.

암반사면에 대한 최적 설계안을 수립하기 위하여 현장 암반에 발달된 불연속면의 분포특성을 조사하고, 이에 따른 암반구조 분석결과에 의거하여 개착사면의 거동양상을 예측하는 일련의 해석방법이 활용되고 있다. 그러나 현장 암반에 자연적으로 생성된 불연속면들은 지역적으로 분포양상이 크게 변화되기 때문에 기존에 정립된 조사 창 또는 조사 선 방법을 활용한 특정구역에서의 분석결과는 전체 영역의 암반구조를 표현하기에는 부족한 점이 있다. 또한, 평사투영이론에 근거한 사면 안정성 해석은 불연속면의 방향성만을 고려하고 사면에서의 위치 및 연장성 등을 고찰하지 못하기 때문에 실제 불연속면의 분포 특성에 의거한 최적 사면설계 및 보강 계획에 한계가 있는 실정이다.

현재까지 암반사면에 적용된 안정성 해석 방법은 국지적 영역에서 측정된 불연속면의 방향성에만 의거하였으며, 실제 불연속면의 분포양상이 고려되지 못한 사면 개착 및 보강설계에 따라 현실적인 사면 안정성에 기인

된 국가 경제적 손실이 발생하기도 하였다. 이와 같은 문제점은 사면안정 해석법 자체에도 요인이 있으나 현장 불연속면 조사의 한계성에 의거하여 유발된다. 현재까지 관례적으로 책정되는 조사예산 및 인력과 현장 접근성을 고려할 때 불연속면 조사는 극히 한계적으로 수행될 수밖에 없으며, 결과적으로 도출되는 사면해석 결과는 실제 암반구조의 특성이 제한적으로 적용되어 비현실적인 경우가 발생하게 된다. 암반사면의 조사 및 구조물에서 현장 접근성, 측정시간 및 조사 인력 등의 한계성을 극복하기 위한 방법으로 본 연구에서는 현재 가장 정밀한 3차원 측정 자료를 도출하는 지상 레이저 스캐닝 시스템을 활용한 원격 측정방법을 소개하고자 한다.

지상 레이저 스캐닝 시스템 기술은 레이저 스캐너를 이용하여 대상체, 즉 암반사면에서 멀리 떨어진 위치에서 레이저를 투사하여 대상체 표면상의 수많은 측정점의 3차원 공간좌표를 연속적으로 얻는 방법으로서, 장비특성에 따라 차이는 있지만 측정점간의 간격은 최소 1-3mm 정도까지 측정 할 수 있기 때문에 암반사면의 절리면에 대한 정밀한 3차원 정보를 충분히 취득할 수 있는 방법이다. 지상 레이저 스캐닝 시스템을 이용한 방법은 측정시간이 비교적 짧으며, 대절토 사면 및 접근이 불가능한 지역에서도 측량이 가능한 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 지상 레이저 스캐닝 시스템을 이용하여 다음과 같은 연구를 수행하였다.

첫째, 현장접근이 어려운 암반사면에 분포된 불연속면의 방향성, 거칠기 등을 전체사면에 대해 자동적으로 측정하여 측정 자료의 정확성과 기존 측정방법의 단점을 보완한 새로운 방법을 연구 하고자 하였다. 둘째, 암반사면의 보강 구조물을 레이저 스캐너로 측정하여 일정시간동안의 변형을 측정하고자 하였다. 셋째, 준공이 완료된 댐을 레이저 스캐닝 하여, 이로부터 취득된 측정운(測點雲: point-cloud)로부터 역설계 도면을 만들어 기존 설계도면과 비교하고자 하였다.

## 2. 내 용

### 2.1 3D Scanning 기술

주어진 실물모형을 정밀하게 복제, 재현하여 이로부터 대상체의 공간상에서의 다양한 정보를 분석 및 해석하는 것을 형상 역공학(shape reverse engineering) 또는

역공학(reverse engineering) 이라고 부르는데, 전통적으로는 항공기 및 자동차 제작과정 등에서 카피 밀링(copy milling)등 정밀 기계공학 분야에서 널리 사용되어 왔다 (Lee, 1997)

효과적인 역공학을 위해서는 대상 물체의 기하학적 공간정보를 추출, 구현할 수 있는 3차원 형상측정 기술이 요구된다. 이를 위해 현재 다양한 접촉식, 비접촉식 측정기술이 개발되어 실용화 되고 있다. 현재 접촉식 측정기술은 정밀도 면에서는 우수하나, 장시간의 측정시간 및 측정점 밀도가 낮은 단점이 있다. 반면, 비접촉식 측정기술은 고속의 측정이 가능하며 최근의 급속한 기술 발전에 따라 측정점 밀도가 매우 높아 거의 모든 분야에서 활용되고 있다.

역공학은 형상을 재현하는 기술로서, 실물을 측정하고, 측정데이터를 구조화된 점집합(point-cloud)으로 변환하고, 점집합으로부터 3D CAD 모델이나 texture를 가지는 3차원 형상을 구성하는 단계로 이루어진다. 전통적인 공학이 개념(도면)으로부터 실물을 만드는 과정(순공학)이라 한다면, 역공학은 실물로부터 개념(도면)을 얻는 과정이라고 할 수 있다. 특히, 실물의 형상을 측정하고 측정데이터를 기반으로 형상 모델링 과정을 거쳐, 동일 형상의 실물이나 컴퓨터상의 디지털 모델로 만드는 것을 형상 역공학이라 한다. 역공학은 여러 학문이 접목된 분야로서, 광학에서 CAD/CAM 에 이르는 다양한 기술에 바탕을 두고 있다(Lee, 1997).

역공학은 실물로부터 신속하고 정확하게 3차원 모델을 제작하고자 하는 자동차, 항공, 가전 등 제조업 분야 뿐 아니라, 현실감 있는 3차원 모델을 얻고자 하는 광고, 영화 등 문화산업에 이르기까지 산업 전반에서 수요가 급증하고 있다. 그리고 역공학은 종래의 제품을 만들기까지의 생산 양식을 개선한 방법으로, 개발 단계에서의 개발 기간 단축 및 제품의 정밀도 향상을 주목적으로 두고 있다.

지상 레이저 스캐너(Terrestrial Laser Scanner)는 상대적으로 짧은 시간 안에 대상물체 표면의 수많은 측정점(point-cloud)의 3차원 공간 좌표를 기록한다. 이를 완성하기 위해서는 물체 표면위에 laser beam을 투사해야 한다. 이러한 scanning은 일정량 굴절각의 증분을 위하여 하나 또는 두 개의 mirror를 사용하여 수행된다. 또한, 물체의 완전한 3차원 형체 측량을 위해서 회전하기도 한다. 물체에 투사된 레이저 빔(point)의 위치

를 결정하는 것은 거리와 각이므로 각 측정의 높은 정밀도는 매우 중요하다(Blais et al., 2000).

레이저 스캐닝의 주요 측정 방법으로는 Time-of-Flight (TOF) 방식(Fig. 1)과 광삼각법(triangulation) 방식(Fig. 2)이 있다(Boehler et al., 2002).

Time-Of-Flight(TOF) 또는 ranging으로 불리는 방식의 스캐너(Fig. 1)는 대상체에 레이저 빔을 보내는 레이저 diode가 장착되어 있다. 레이저 광은 표면에서 반사/산란되어 일부가 receiver로 되돌아온다. 이 방법은 광삼각법 보다 먼 거리를 측정할 수 있다. 정확도는 수 mm에서 2~3cm이며 대상물체와 스캐너 사이의 거리에 의존한다. 대부분의 레이저 스캐너가 이 방법을 사용하고 있으며, 시간차를 사용하므로 측정시간도 상당히 단축되는 장점이 있다(Blais et al., 2000; Boehler et al., 2002).

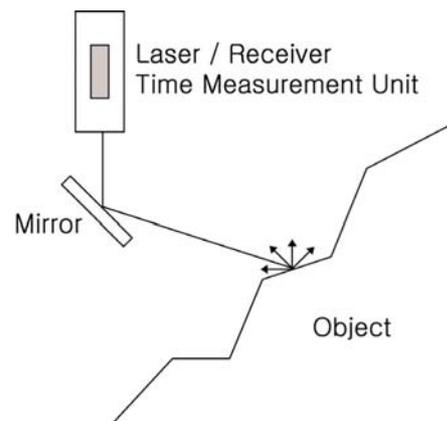


Fig. 1 Time-Of-Flight Method.

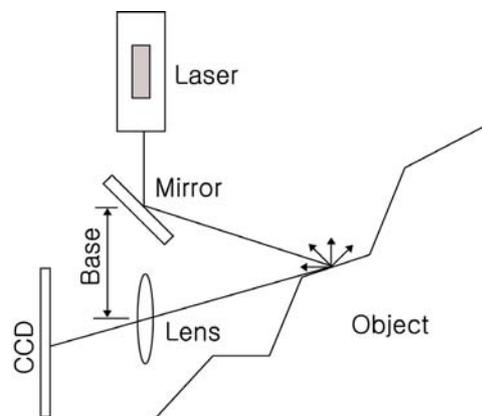


Fig. 2 Triangulation Method.

광삼각법(triangulation)의 원리를 이용한 스캐너는 Fig. 2와 같이 레이저가 점이나 선으로 대상체 표면에 투영된 것을 하나 또는 그 이상의 CCD 카메라로 측정의 위치를 기록한다. 레이저 빔 주사(scanning) 각도와 CCD 카메라의 각도는 스캐너가 내부적으로 측정하고, 고정된 Base 길이(레이저 투사기와 CCD 카메라 사이의 거리)로부터 기하학적으로 대상 물체와 장비의 거리를 결정하는 방법이다. 정확도는 Base 길이와 물체의 거리에 의존한다(Blais *et al.*, 2000; Boehler *et al.*, 2002).

## 2.2 암반사면 불연속면의 방향성 조사 및 분석

불연속 암반의 특성연구를 수행하기 위한 현장 암반의 불연속면/선의 자료획득을 위해서는 조사선법(scanline method), 또는 조사창법(window method)을 선택, 적용해야 하며 기존방법은 컴퍼스(compass)와 줄자를 사용한 조사자의 수작업에 주로 의존해 왔다. 이로 인하여, 양질의 조사자료를 얻기 위해서는 고도로 숙련된 인력과 상당기간의 현장 조사업무가 요구되어 왔다. 특히, 조사창은 조사선에 비하여 신뢰도 높은 데이터를 획득할 있으나, 측정에 막대한 시간이 요구되는 단점이 있다.

한편, 대부분의 조사지역에 있어서, 야외 현장특성상 높은 지점에 위치하는 불연속면에 대한 조사는 현실적으로 접근하기 어려운 점이 있다. 이와 같은 야외 조사의 단점을 보완하기 위하여 디지털 사진측량법을 이용한 불연속면 조사가 시도 된 바 있으나, 왜곡 및 분해능 등의 한계에 부딪치면서 실용화에는 한계가 있다.

앞서 언급한 바와 같이 시간, 경제성 및 접근성을 고려하여 현장 암반사면 조사에서는 주로 조사선법이 적용되고 있으며, 따라서 암반사면의 안정성 해석도 국지적 영역에서 측정된 불연속면의 방향성에만 의존하게 되므로 실제 암반사면 전체의 불연속면의 분포양상이 고려되지 못한 사면 개착 및 보강설계에 따라 현실적인 사면 안정성에 기인된 국가 경제적 손실이 발생하기도 하였다.

이와 같은 문제점은 사면안정 해석법 자체에도 요인이 있으나, 현장 암반사면의 불연속면 조사의 한계성에 의해 유발된다. 또한, 관례적으로 책정되는 조사예산 및 인력과 현장 접근성을 고려할 때 불연속면 조사는 극히 한계적으로 수행될 수밖에 없으며, 결과적으로 도출되는 사면해석 결과는 실제 암반구조의 특성이 충분히 반

영되지 못하는 비현실적인 경우가 발생하게 된다.

본 연구에서는 지상 레이저 스캐닝 시스템을 이용하여 전체 사면에 분포된 불연속면의 발달 양상을 자동적으로 측정하여 시간절감 및 경제성 향상뿐만 아니라, 현장 접근성의 확보 및 측정 자료의 정확성을 향상시킬 수 있었다. 향후 이 방법으로 불연속면의 방향, 위치, 연장성이 고려된 사면해석을 수행하여 효율적인 유지관리 시스템을 정립시킬 수 있으며, 사면 안정성이 확보되어 원활한 국가 산업 활동에 따른 경제적 이익을 도모할 수 있을 것으로 판단된다.

### (1) 모델 좌표변환

레이저 스캐너를 이용하여 얻은 측점은 공간좌표(x, y, z) 정보를 갖게 되며, 이 들 좌표는 장비가 임의로 읽은 기계좌표이다. 그러나 스캐닝에 의한 측정의 기계좌표는 좌표변환으로 실좌표체계 (절대좌표)를 갖는 측정으로 변환이 가능하다.

암반사면에 있어서 토목/지질 기술자들의 가장 큰 관심사는 절리면 들의 방향성이다. 절리면 들의 방향성 추출을 위해서는 먼저 진북을 결정해야 한다. 현장에서의 진북과 좌표변환 공간상에서의 북쪽방향을 일치 시켜야만 원하는 정보를 추출할 수 있으므로, 좌표변환 방법은 매우 중요한 과정중의 하나이다.

### ● Box Coordinate를 이용한 변환

대부분의 대상 사면의 측정점들의 기계좌표 정보들은 좌표변환에 의해 단순이동과 회전을 하여 절대공간좌표값을 갖거나 상대적인 좌표값을 갖게 된다. 여기서 남북과 동서방향을 가리키는 법선벡터 두 개만 있다면, 3차원 상대 공간좌표 기준계를 쉽게 생성할 수 있다.

아래 그림의 Box(Fig. 3a)는 수평 기준대 위에 세 면을 갖는 Box를 올려 놓고 수평을 맞춘 후, 나침반으로 Box의 두 면 중 긴 면이 남북방향, 짧은 면이 동서방향을 향하도록 설치한다.

사면 스캐닝시, Box도 함께 스캐닝 하여(Fig. 3b) 하나의 모델로 만들어 좌표변환시 Box를 이용한다.

Box의 수직인 세면은 수많은 점으로 이루어지며 각각의 최적 평면방정식을 산출하며, 그 결과 세 개의 법선벡터가 추출된다. 여기서, 세 개의 벡터는 직각좌표 개념상 각각 수직을 이루어야 한다. 그러나 작업자 혹은 모델상의 오차가 발생할 수 있다. 모델상의 오차는 오차



Fig. 3 The modeling procedure of standard box, (a)Coordinate transformation box (b)scanning box.

조정(adjustment)으로 제거 할 수 있으므로 거의 정확한 좌표변환이 가능하다. 평면 방정식으로 부터의 법선벡터 추출 알고리즘은 다음과 같다.

$$z = ax + by + c \Rightarrow f(x, y) \quad (1)$$

n 개의 측정운(point-cloud)은

$$\{x_i, y_i, z_i\}_{i=1}^n \quad (2)$$

으로 이루어져 있으며, 최소자승법 개념으로 최소한의 오차를 갖는 평면방정식을 유도하기 위하여

$$\min \sum_{i=1}^n (f(x_i, y_i) - z_i)^2 \quad (3)$$

을 만족하기 위해서는

$$\frac{\partial f}{\partial a} = 0, \quad \frac{\partial f}{\partial b} = 0, \quad \frac{\partial f}{\partial c} = 0 \quad (4)$$

의 조건을 만족해야 한다.

본 연구를 위해 개발한 FracShaper(배재대학교 지반조사공학연구소에서 개발된 Rock Slope Analsys 프로그램)에 의한 Box 좌표변환은 먼저 세 개의 수직면을 선택함으로써, NS 방향의 면과 EW 방향의 면이 만나는 공간상의 교선의 방정식을 구하여, 이 교선과 나머지 한 면이 만나는 교점을 구하여 그 교점을 중심으로 앞서 언급한 수식에 의해 사면의 측정운(point-cloud)을 이동하고 회전한다.

$$a_1x + b_1y + c_1z + d_1 = 0 \quad (5)$$

$$a_2x + b_2y + c_2z + d_2 = 0 \quad (6)$$

식(4-6) 과 (4-7)의 평면이 만나는 교선의 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{x-x_1}{l_1} = \frac{y-y_2}{l_2} = z=t \quad (7)$$

을 구한다.

그리고 나머지 수평을 나타내는 평면,

$$a_3x + b_3y + c_3z + d_3 = 0 \quad (8)$$

과 식 (7)의 교선의 방식이 만나는 교점을 구한다. 이렇게 구한 교점이 좌표의 (0, 0, 0)이 되고, XYZ 직각좌표축이 생성된다. 다음의 Fig. 4는 본 연구에서 개발한 프로그램 FracShaper를 활용한 Box 좌표변환 전후결과이다.

불연속면을 전산화를 위한 기본조건은 불연속면을 벡터로 표시하는 것이다. Fig. 5에서 보여주는 바와 같이, Cartesian 좌표계의 원점을 통과하는 단위벡터를  $v$  라 하면, x, y, z 성분은 다음과 같이 표시된다.

$$v = (l, m, n) \quad (9)$$

이 벡터의 크기는,

$$|v| = \sqrt{l^2 + m^2 + n^2} = 1 \quad (10)$$

$v$ 는 단위벡터이며,  $l, m, n$ 은 component 또는 direction

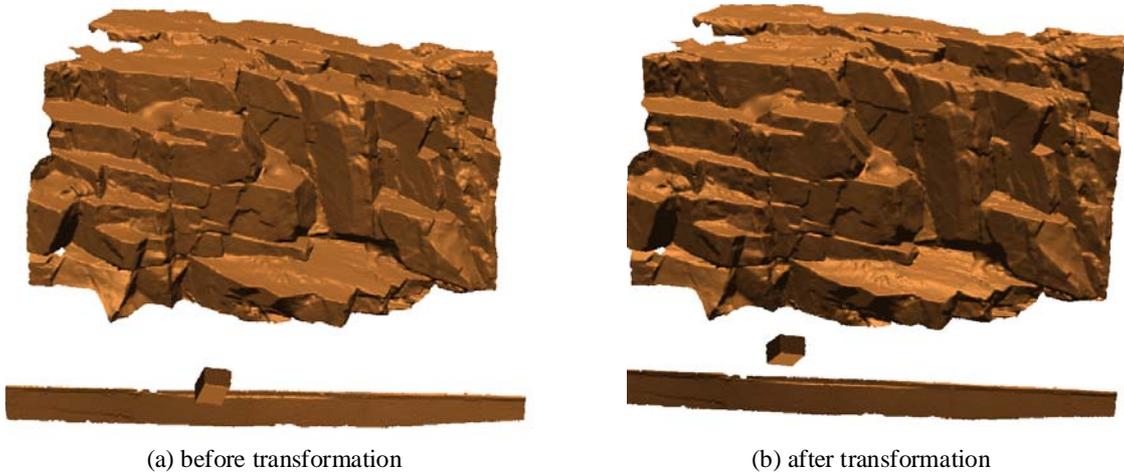


Fig. 4 Orientation alignment by box-reference system.

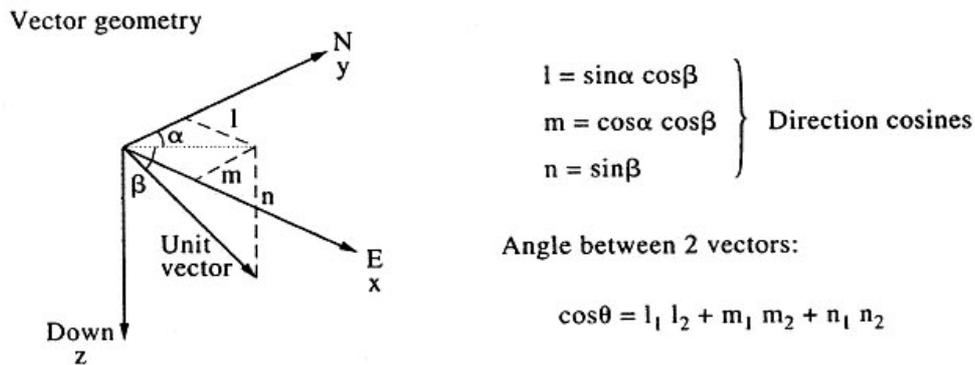


Fig. 5 The extraction of directional cosine from normal unit vector.

cosine이라 한다.

스캐닝한 사면으로부터 모델링하여 완성된 사면은 실제 사면과 거의 동일한 컴퓨터상의 복제임을 앞서 살펴 보았다. 이제 여기서 사면의 방향성을 추출하기 위하여 앞서 기술한 좌표변환을 수행한 사면을 가지고 측정하고자 한다.

법선 벡터  $n = (n_x, n_y, n_z)$ 로부터 절리면의 방향성을 구하는 방법은 다음과 같다. 우선,  $n_z$ 가 음수값을 가질 경우에는 양수로 수정한다. 이는 사면의 방향성이 내부로 향하는 것이 아니라 외부로 노출된 면의 방향성이기 때문이다. 아래의 식과 같이  $n$  벡터로부터 정규화(normalize)한  $a, b, c$ 를 구하여  $\beta$ 와  $\theta (= 90 - \alpha)$ 의 값을 구한다.

$$\begin{aligned} a &= \frac{n_1}{\sqrt{n_1^2 + n_2^2 + n_3^2}} = \cos(90 - \beta) \cdot \cos\theta \\ b &= \frac{n_2}{\sqrt{n_1^2 + n_2^2 + n_3^2}} = \cos(90 - \beta) \cdot \sin\theta \\ c &= \frac{n_3}{\sqrt{n_1^2 + n_2^2 + n_3^2}} = \sin(90 - \beta) \end{aligned} \quad (11)$$

$\theta$ 가 음수이면 360도를 더하고,  $\alpha$ 가 음수이면, 역시 360°를 더한 값을 사용한다. 여기서,  $\alpha$ 는 경사방향(dip-direction)이고,  $\beta$ 는 경사(dip)이다(Giani, 1992).

연구사면 현장에서 클리노미터에 의한 기존의 측정 방법으로 얻은 결과값과 3차원 레이저 스캐닝 시스템에 의한 결과와 비교하여 보았다. 클리노미터를 이용한 방

**Table 1** The measurement comparison by clino-compass and laser scanning.

Number	Clino-compass		Laser Scanner System		Difference	
	Dip	Dip-dir	Dip	Dip-dir	Dip	Dip-dir
1	80	178	82	175	-2	3
2	85	205	85	204	0	1
3	89	190	84	192	5	-2
4	85	172	85	175	0	-3
5	82	180	87	177	-5	3
6	84	212	85	207	-1	5
7	85	172	85	173	0	-1
8	85	180	81	180	4	0
10	85	180	83	175	2	5
11	20	125	18	120	2	5
12	20	160	19	155	1	5
14	62	164	62	162	0	2
15	80	110	83	108	-3	2
16	6	85	59	80	1	5
17	55	82	57	81	-2	1
18	85	195	84	194	1	1
19	87	205	86	204	1	1
20	85	205	86	206	-1	-1
21	80	185	78	182	2	3
22	85	180	83	176	2	4
24	85	105	80	107	5	-2
25	85	200	84	200	1	0
26	85	180	86	179	-1	1
27	85	176	87	177	-2	-1
28	60	155	64	152	-4	3
Mean					1.7	2.1

향성 측정의 정확성은 대상면의 접근성, 노출면의 면적 정도, 평면의 평탄한 정도, 때때로 발생하는 자력 이상, 사용상의 오차 등의 몇 가지 인자에 의존한다. 본 연구 결과 현장에서 얻은 데이터와 3차원 레이저 스캐닝 시스템의 데이터와 비교한 결과 경사는 1.7°, 경사방향은 2.1° 정도의 오차 범위 내에 존재하였다(Table 1).

### 2.3 레이저 스캐닝을 이용한 불연속면 방향성 조사 및 분석사례

#### (1) 대상사면

대상사면은 굴포천 확장공사 구간으로서 공사과정에서 발생한 절취사면이다. 이 사면은 대규모 단층과 절리면이 발달해 있어서 향후 양 사면을 계속해서 넓혀가는

과정에서 문제를 발생할 우려가 있다(박성욱 등, 2004). 이러한 문제점을 조사하기 위해 지상 레이저 스캐닝을 이용하여 조사하였다(Fig. 6).

#### (2) 대상사면 특성

붕괴 사면이 위치하는 대상사면은 선캠브리아기 경기 변성암 복합체가 분포하는 지역으로서 대부분 호상편마암이 분포하며, 이 외에 석회규산염암 및 편암과 후기 이를 관입한 유문암질 암석이 분포한다. 이들 암석내에는 서북서 방향의 대규모 좌수향 주향이동단층계가 발달하며, 전반적인 단층의 발달은 Fig. 7과 같다. 또한 서북서 방향의 주향이동 단층에서 분기되어 말꼬리 구조를 보이는 동-서 또는 동북동 방향의 주향이동단층이 발달한다. 이 외에도 북북서 방향의 단층이 발달하여 있

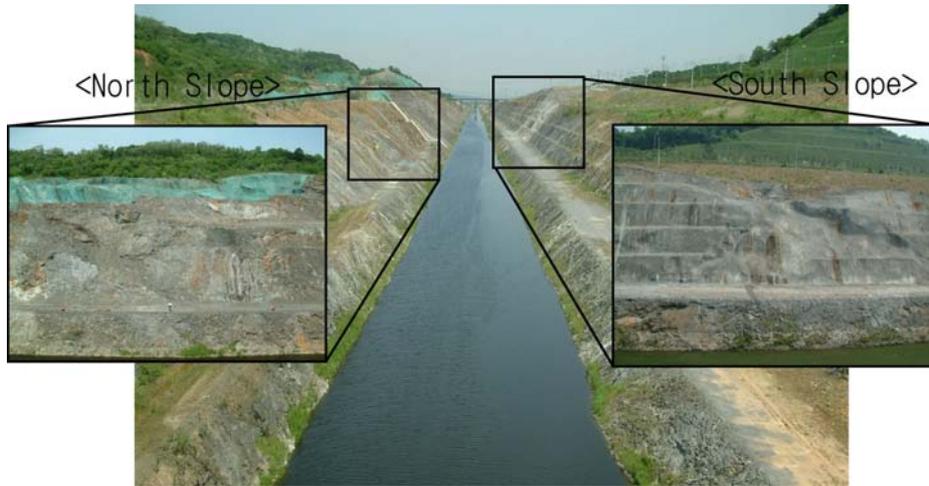


Fig. 6 The study area.

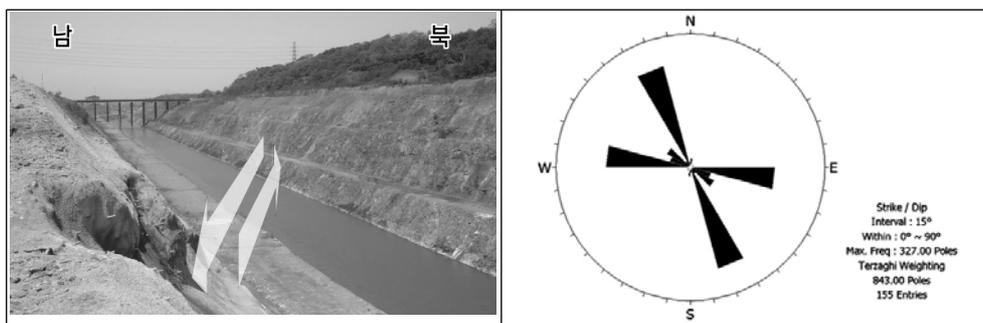


Fig. 7 The direction of main faults.

다. 서북서 방향의 주 단층 중 단층1 과 단층2에서 사면 붕괴가 발생하였다(Fig. 8의 ○표시 지점).

단층1 및 단층2는 주로 점토 물질과 단층 각력으로 구성된 최대 10 m 폭의 단층대(fault zone)를 가지는 대규모 주향이동 단층으로서 좌수향의 운동 감각을 보인다(Fig. 7-8). 남측 사면에서 단층1은 단층대내 연약대의 원호 파괴로 인한 붕괴를 발생시키며, 북측 사면에서 단층1은 단층2의 두꺼운 연약대와 단층2에서 분기된 단층면이 복합적으로 작용한 붕괴를 발생시켰다(박성욱 등, 2004).

(3) 3차원 레이저 스캐닝 모델링 결과

Fig. 9는 북측사면을 모델링한 결과이며, 단층면과 파괴면의 형상을 잘 보여주고 있으며, 3D 모델링 결과물은 3차원 공간 좌표(x, y, z) 및 색채정보를 갖으며, 대규모 대상체를 한 번의 스캐닝으로 획득할 수 있다.

(4) 대상사면 분석 및 모델링 분석결과

클리노미터로 직접 측정한 ‘단층2’는 그 방향이 N82W/80NE이며, N87E/52SE의 방향성을 갖는 사면과 거의 평행한 주향을 가지나, 경사방향이 그 반대 방향을 갖게 되므로 ‘단층2’는 활동파괴가 발생할 수 없으며, 두껍게 발달하는 연약한 단층대 내에 단층 물질이 관통하는 활동면을 형성한다.

레이저 스캐닝에 의한 모델링 분석결과(Fig. 10-11), 분기 단층면의 방향은 N88W/55SW로서 사면과 동일한 경사 방향을 가지며, 거의 평행하게 발달하여 평면파괴의 가능성이 높으나, 경사가 약간 고각을 이루어 단일면으로서 평면파괴가 발생할 가능성이 희박하다. 이러한 방향 특성은 이 사면의 파괴면이 상부는 분기 단층면, 하부는 단층2 물질의 전단면으로 구성되는 것과 깊은 관련이 있다.

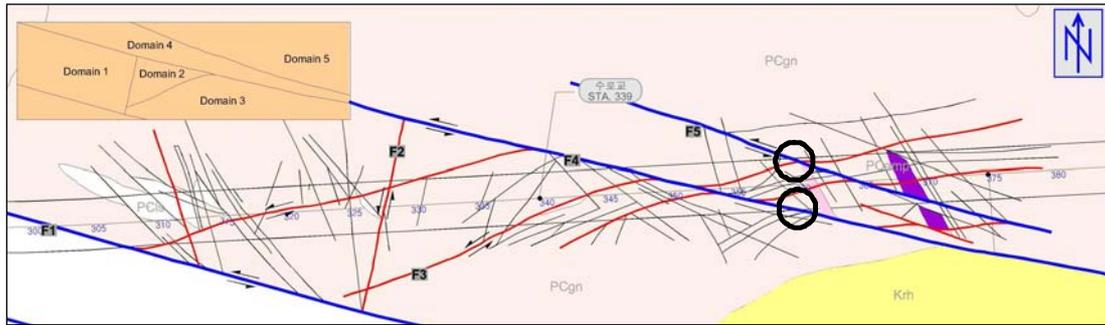


Fig. 8 The investigation of faults' direction on the study area.

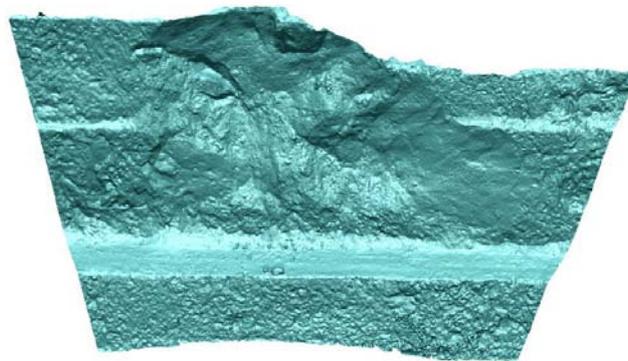


Fig. 9 The results of 3D modeling.

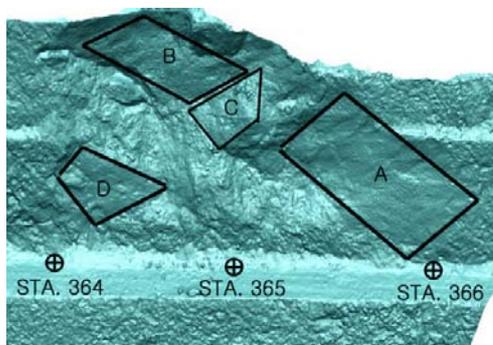


Fig. 10 The classification of divergent fault at the fault2.

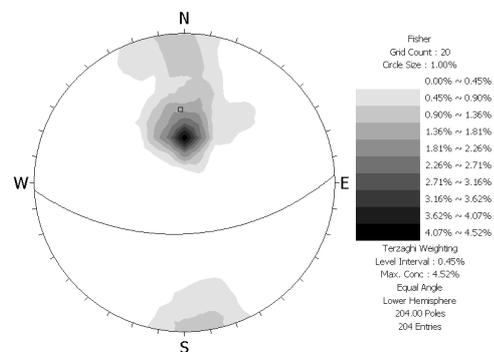


Fig. 11 The results of measurement on direction at the fault2.

#### 2.4 레이저 스캐닝을 이용한 절리면 거칠기 정량적 분석

암반의 거동을 이해하는데 어려움을 주는 항목 중의 하나가 암반절리에 대한 구성모델(constitutive model)의 불확실성이다. 즉, 거칠기의 특성화, 전단시 생성되는 암석 부스러기의 영향, 틈새변화의 예측 및 균열의 수리적 유동특성도 절리면의 거칠기에 지배를 받게 된

다. 따라서 단일 암반절리의 수리-역학적 상호작용을 파악하기 위해서는 절리면의 거칠기를 정량화 하여야 보다 정확한 해석이 가능하다. 암반 절리의 거칠기는 보통 절리면 거칠기 계수(Joint Roughness Coefficient : JRC)로 정량화 시킬 수 있다. 많은 전문가들은 통계적인 방법으로 암반 절리면의 거칠기와 마찰거동 간의 상관관계를 알아내려고 노력하여 왔다. 프랙탈(fractal)을 이용

하여 절리면 거칠기를 정량화 하려는 시도도 보고되고 있다. 거칠기에 대한 정성·정량화 작업은 많은 연구자에 의하여 수행(박병운 등, 2000; 인인모 등, 2002; 천병식 등, 2001; Goodman, 1970; Tse and Cruden, 1979)되었고, 각각의 연구 목적에 맞게 사용되어 왔다. 그러나 현재까지 측정자 오차를 완전히 배제할 수 있는 정량화된 측정방법 및 절리면 거칠기 계수가 제시되지 못하고 있고, 일반적으로 많은 문제점이 제시됨에도 불구하고 Barton(1976)이 제안한 절리거칠기계수(Joint Roughness Coefficient)를 사용하여 절리면 거칠기 정도를 표현하고 이를 절리면 전단강도의 산정에 사용하여 오고 있다. 자연계에서 대상암반(현지 암반)은 균질한 무결암반이 거의 존재하지 않으며, 지구조운동 및 암반내부의 응력, 온도 등에 의해 내부에 미시적, 거시적 균열, 절리, 단층 등의 역학적 불연속면을 갖게 된다. 이러한 불연속면은 당연히 암반의 변형거동에 큰 영향을 미치게 되므로, 절리면과 관련하여 절리면 상태, 하중조건, 거칠기 등에 따른 암석의 전단강도 및 변형거동 등에 대한 연구, 조사가 필요하게 된다. 절리면의 전단강도를 표현하는 간단한 식으로는 다음과 같은 식(Patton, 1966)이 있다.

$$\tau = \sigma_n \tan(\phi_u + i) \tag{12}$$

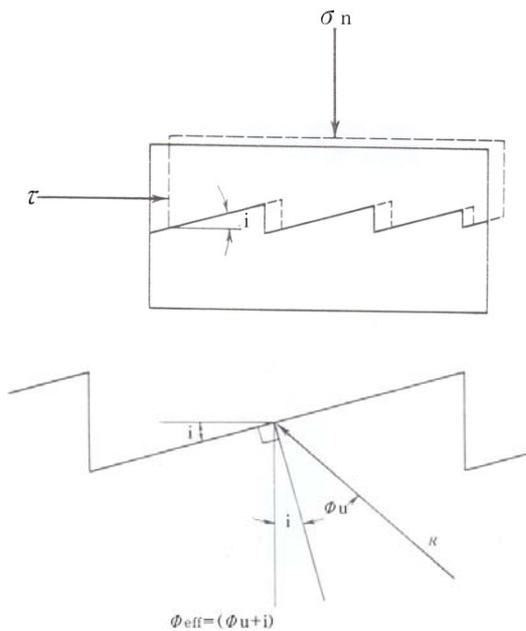


Fig. 12 Patton's law for joint shear strength.

여기서,  $\tau$ : 전단강도,  $\sigma_n$ : 수직응력,  $\phi_u$ : 마찰각,  $i$ : 거칠기 각이다.

따라서 전단강도에 영향을 미치는 중요한 요인 중의 하나는 절리면 표면의 거칠기 상태임을 알 수 있다.

수직응력-전단강도 관계가 선형보다는 곡선 형태라는 사실을 반영한 상기 식보다 현실적인 경험식들이 많이 제시되었으며, 그 중 다음의 식(Barton, 1973)이 가장 잘 알려져 있다.

$$\tau = \sigma_n \tan(JRC \log \frac{JCS}{\sigma_n} + \phi_b) \tag{13}$$

여기서,  $\tau$ : 전단강도,  $\sigma_n$ : 수직응력,  $JRC$ : 거칠기 계수,  $JCS$ : 절리면 압축강도,  $\phi_b$ : 기본마찰각이다.

이 식에서도 절리면 표면의 거칠기 상태가 중요한 변수이며, Barton에 의해 제시된 10개의 기준 형상과 profile-gauge에 의해 현장에서 측정된 절리면 형상을 비교하여 거칠기 계수를 결정하게 된다. 공학적으로 널리 사용되는 거칠기 계수는 Barton에 의해 제안된 거칠기 계수이다. Barton과 Choubey(1997)는 거칠기에 따라 10개의 대표적인 단면곡선 균을 만들고 거칠어질수록 0에서 20까지의 계수를 할당하였다. 단면선은 약 100mm 길이의 시료로부터 얻은 것이다. 시료는 가장 완만한 곡선에서 가장 거친 곡선까지 0-2, 2-4, ..., 18-20 등 10개의 범주로 나누었다.

Barton이 제시한 JRC는 0~20 범위의 값을 가지는 거칠기의 미끄러짐 규모이다(Barton and Choubey, 1977). 하지만 JRC는 2차원적인 프로파일만을 표현할 수 있고 정성적이므로 주관적으로 그 값을 판단할 수밖에 없는 데, 판단하는 사람의 기술적 숙련도 및 경험에 따라서 값의 차이가 클 수 있다. 또한, 굴곡도와 작은 거칠기(Roughness)와의 차이를 구분하지 못하는 문제점을 가지고 있다. 이러한 JRC의 문제점은 거칠기의 미끄러짐 정도를 수치적으로 표현하는 것에 대한 것이 아니라 JRC를 얻는 과정에 관한 것이라고 볼 수 있다는 단점을 가지고 있다(이인모 등, 2002). 일반적으로 거칠기를 분석하기 위해 사용하는 Barton and Choubey(1982)이 제시한 거칠기 계수는 앞서 언급한바와 같이 주관적 요소가 개입하는 한계를 가진다. Barton and Bandis(1982)는 10 cm 길이의 단면형상으로 JRC를 실제 절리의 길이(예를 들어 3 m 이상)에 대응하는 JRC와의 크기 효과에

따른 환산식을 제안한 바 있으며, 여러 연구자들 역시 작은 길이에서 측정한 JRC와 실제 적용대상인 공학적으로 유효한 크기를 가지는 절리의 JRC와의 관계를 다각도로 연구한 바 있다. Tse and Cruden(1979)은 경사파라미터(1차미분의 제곱평균자승근의 값)  $Z_2$ 와 구조함수(structure function) SF를 포함하여 총 8개의 거칠기 계수를 사용하여 Barton(1976)이 제시한 10개의 거칠기 계수 대상으로 거칠기 값을 산정하였다. 연구결과  $Z_2$ 와 SF가 JRC와 비교적 상관성이 높으며, 따라서 JRC의 정성적인 오차를 없애기 위하여 다음과 같은 관계식을 제안하였다.

Meyers(1990)는 표면거칠기를 특성화하기 위해 RMS와 함께 단면선 1차 미분의 RMS,  $Z_2$ , 2차미분의 RMS,  $Z_3$ , 그리고 기울기가 양(+)인 단면선을 따라 측정된 거리가 기울기가 음(-)인 단면선의 거리보다 초과한 양의 전체 길이에 대한 백분율,  $Z_4$ 를 사용할 것을 제안하였다. 이들 계수는 다음과 같이 정의된다.

$$Z_2 = \sqrt{\frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} \left(\frac{dy}{dx}\right)^2 dx} \quad (14)$$

$$Z_3 = \sqrt{\frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} \left(\frac{d^2y}{dx^2}\right)^2 dx}$$

$$Z_4 = \frac{\sum(X_i)_{positive} - \sum(X_i)_{negative}}{L}$$

본 연구에서는 레이저 스캐너를 이용하여 형상화 한 절리면 모델로부터 Meyers(1990)의 RMS 1차 미분값인  $Z_2$ 와 Tse and Cruden(1979)이 제안한 식을 이용하여 JRC를 도출하였다. 레이저 스캐닝을 이용하면 일반적으로 10cm 길이 JRC 또는 시추 코어 JRC에서 행하여지는 JRC 측정이 아닌 실제 크기의 절리 또는 단층의 표면 형상을 스캐닝 함으로써 실제의 현장의 JRC를 구할 수 있는 장점을 갖고 있다.

Fig. 13은 3D 모델링 형상에서 거칠기를 추출하는 원리를 나타내는 그림이며, 여기서  $\Delta x$ 는 Table 2의 step을 결정하는 계수이다.

(1) 거칠기의 이방성 측정

활동면의 방향성에 따른 거칠기 이방성 분석을 위해(Fardin et al., 2000), 거칠기 측선을 Fig. 14b와 같이 각 방향별로 3 m 길이의 6개의 프로파일을 설정하여 측정하였다.

Table 2 Correlation between JRC vs  $Z_2$ .

step(cm)	JRC 값
0.01	JRC=24.58+35.41×log $Z_2$
0.07	JRC=25.75+25.04×log $Z_2$
0.14	JRC=26.50+21.20×log $Z_2$
0.21	JRC=27.45+21.60×log $Z_2$
0.3	JRC=25.10+19.36×log $Z_2$
0.6	JRC=29.18+20.67×log $Z_2$
1.8	JRC=28.00+16.31×log $Z_2$
3.6	JRC=35.80+18.23×log $Z_2$
5	JRC=22.71+8.850×log $Z_2$

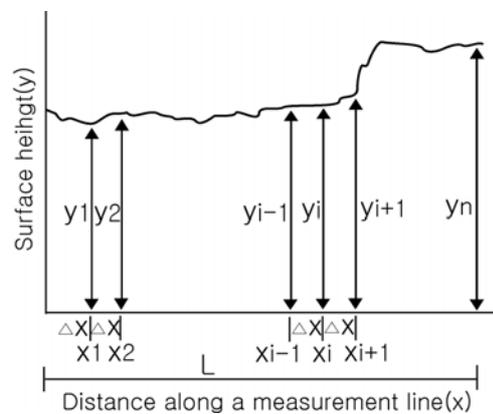


Fig. 13 The diagram used to define statistical parameters for a joint surface profile.

(2) 거칠기 추출

거칠기 계수 추출을 위해서는 절리면에 대해 레이저 스캐닝하여 형상화한 3D 모델링으로부터 DEM을 구하여 일정간격으로 구한 높이 값을 얻는다. Tse and Cruden(1979)이 제안한 식 중에서 측정간격(x-step)을 3.6 cm로 설정하고 측선길이는 3m로 설정하였다. 측정된 거칠기는 측선간격에 따른 단면도와 x-step에 대한 y값들은 AutoCAD에서 실제 스케일의 profile을 생성할 수 있다. Fig. 15는 거칠기를 측정과정을 나타낸 것이다.

(3) 이방성 측정 결과

Table 3에서 측정된 y값을 Meyers의  $Z_2 = \sqrt{\frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} \left(\frac{dy}{dx}\right)^2 dx}$  식과 Table 2에서의 JRC=35.80+18.23×log $Z_2$  식을 이용하여 계산한 결과  $Z_2=0.027376442$ , JRC=8.88078645 값이 나왔다. 이와 같은 방법으로 나머지 측선들도 거칠기 값을 측정하고, 아

래의 표와 같은 거칠기 profile 및 정량적인 측정값을 얻을 수 있다.

측정값을 분석한 결과, JRC 최대값은 경사방향에서 7.3으로 가장 거칠었고, 최소값은 경사방향에서 반시계 방향으로 30°인 곳에서 3.0으로 가장 낮은 거칠기를 보였다. JRC의 평균은 5.8이었고 표준편차는 1.5이었다.

### 2.5 사면 파괴 형상 및 규모

#### (1) 파괴형상 분석

사면의 파괴형상을 분석하기 위해서 Fig. 17과 같이 사면의 DEM을 이용하여 4개의 단면을 설정하여, 붕괴 이전과 붕괴 이후의 형상을 분석하였다.

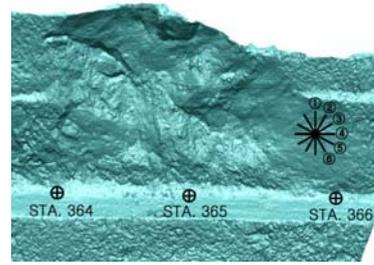
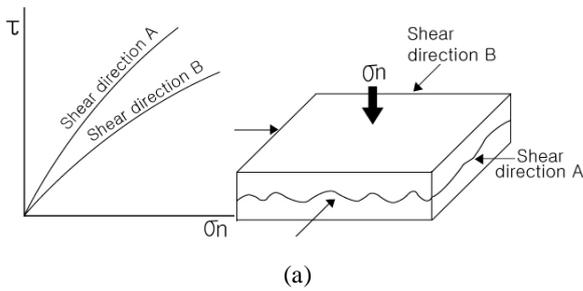


Fig. 14 The heterogeneous measurement of roughness (a) and survey line (b).

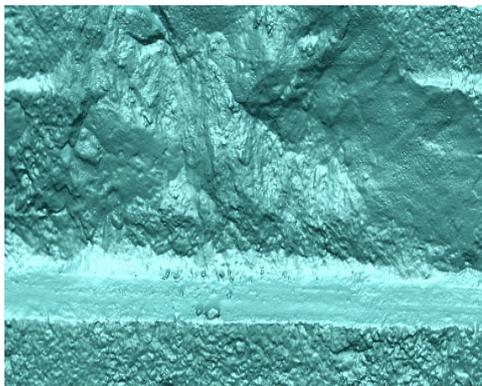


Fig. 15 The measurement of roughness.

Table 3 The results of heterogeneous measurement of roughness.

측선	거칠기 profile	측정값
1		Z <sub>2</sub> = 0.027 JRC = 7.3
2		Z <sub>2</sub> = 0.026 JRC = 6.8
3		Z <sub>2</sub> = 0.025 JRC = 6.6
4		Z <sub>2</sub> = 0.020 JRC = 4.9
5		Z <sub>2</sub> = 0.022 JRC = 5.7
6		Z <sub>2</sub> = 0.016 JRC = 3.0

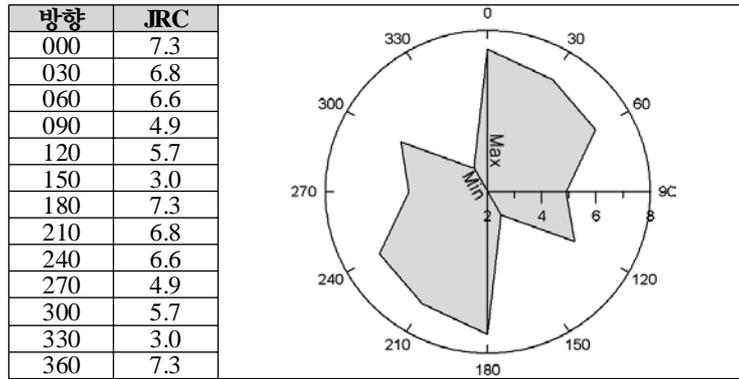


Fig. 16 The heterogeneous analysis of roughness.

(2) 단면형상 분석결과

Fig. 18은 DEM으로부터 추출한 사면의 단면형상이다.

단면 중 파괴가 발생하지 않은 단면과 파괴가 발생한 단면을 비교해 본 결과, 파괴깊이는 약 2.3 m이고 ‘단층 1’은 사면과 반대 경사를 가지는 고각의 단층대로서 붕괴 구간의 하부에 절단된 상태로 발달하며, 그 하부에는 ‘단층2’로부터 분기된 단층면이 사면과 같은 경사방향으로 발달하며, 상부 활동면을 형성하고 있다.

(3) 사면붕괴 규모

단면형상 분석과 함께 붕괴된 사면을 붕괴이전 사면으로 복원하여 사면의 붕괴 규모를 추출하였다. 이것은 레이저 스캐닝을 이용하여 측정된 모델은 3차원 좌표를 모두 가지고 있는 점을 이용하여 붕괴된 사면에 임의의 plane을 생성하여 생성된 평면과 붕괴사면을 일치시켜 plane과 붕괴사면의 빈 공간을 계산하여 체적을 구할 수 있다. Fig. 20은 붕괴 이전의 모습으로 복원시킨 그림이다.

이러한 방법으로 붕괴체적을 구한 결과, 붕괴체적이 575.1 m<sup>3</sup>이므로 단위중량은 2.6 ton/m<sup>3</sup>, 붕괴 중량은 1495.2 ton으로 계산되었다. 이와 같은 방법을 이용하면

절토량, 침하량, 붕괴중량 등 시간에 따른 변화량을 정확히 측정할 수 있는 장점을 가지고 있어 여러 분야에 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

2.6 3차원 변위측정

터널 시공 중, 터널자체의 안정성 확보와 주변지반 및 인접 구조물의 안정성 확보를 위한 체계화된 계측관리는 매우 중요한 사항이라고 할 수 있는데, 지반 조건이

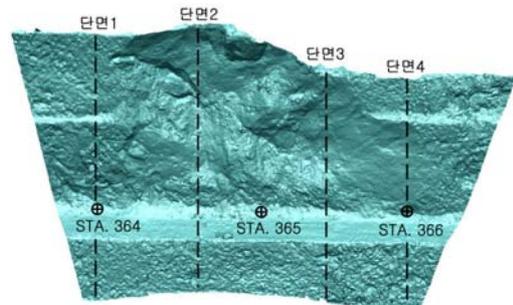


Fig. 17 The cross-section lines in the rock-slope.

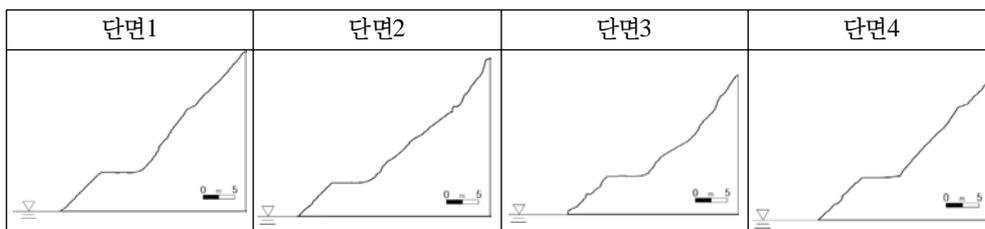


Fig. 18 The cross-sections of rock-slope.

불리한 도심지 터널공사나 지반조건이 급격하고 빈번하게 변화하는 경우에 있어서는 그 중요성이 더욱 증대되는 것이 사실이며, 암반공학의 중요한 분야인 터널의 운동학적 평가를 통해 시공 중 터널 막장의 안정성 판단을 함으로써 작업의 능률을 향상시키고자 한다(한국건설기술연구원, 2004).

본 연구에서는 3차원 레이저 스캐닝을 이용하여 터널의 변위가 가장 심한 막장에서 시간의 흐름에 따른 실제적인 3차원 변위를 측정해 보았다. 연구지역은 충북 괴산군 소재 장연터널이다(Fig. 21).

(1) 터널 막장의 시간에 따른 3차원 변위 측정

연구지역은 장연터널의 막장 부분으로 Fig. 21에서 보는 바와 같다. 발파 후 스캐닝을 하였으나, 왼쪽에 쌓여 있는 부분은 폭파가 안 된 부분이다. 터널현장의 공사 여건상 3번의 스캐닝을 할 수 있었으며, 첫 번째는 00

시20분에서 02시 05분까지 측량하였다. 두 번째는 02시 10분부터 04시 정각까지 측량하였고, 마지막으로 04시 30분부터 05시30분까지 측량을 마칠 수 있었다. 세 번의 스캐닝 결과는 다음과 같다.

세 번째 스캐닝은 현장의 시간여건상 중심부분만 스캐닝 하였다. 육안으로는 변위의 여부를 판단하기가 불가능하다. 레이저 스캐너 장비를 한 곳에만 고정시켜 놓고 측량을 하지 않았기에 처음 데이터를 불러 들였을 때 같은 데이터이지만 위치가 다른 문제가 발생하였다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 앞에서 간단히 설명한 모델 병합 알고리즘을 활용하여 같은 위치에 해당하는 데이터를 찾아가는 즉, 매칭 알고리즘으로 두 모델의 위치를 거의 정확하게 맞춘 후, 모델간의 3차원 변위를 측정 하도록 하였다(Sloan *et al.*, 1984; Vollmer *et al.*, 1992).

막장의 왼쪽 하단부의 변위가 많은 곳은 버력의 움직임

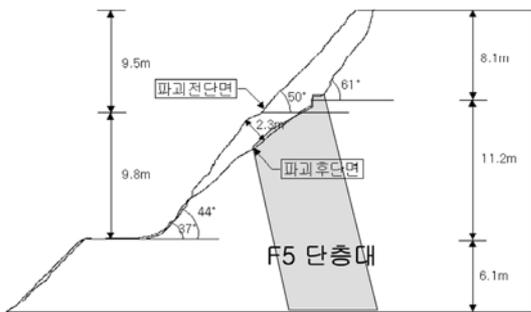


Fig. 19 The analysis of destruction surface.

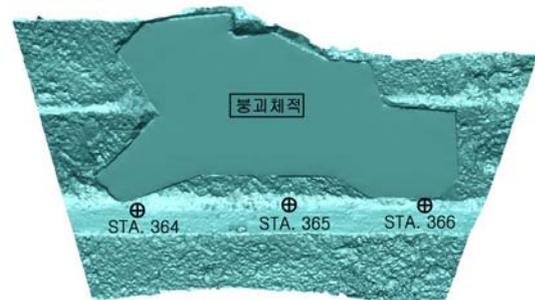


Fig. 20 Restoration of failure-slope.

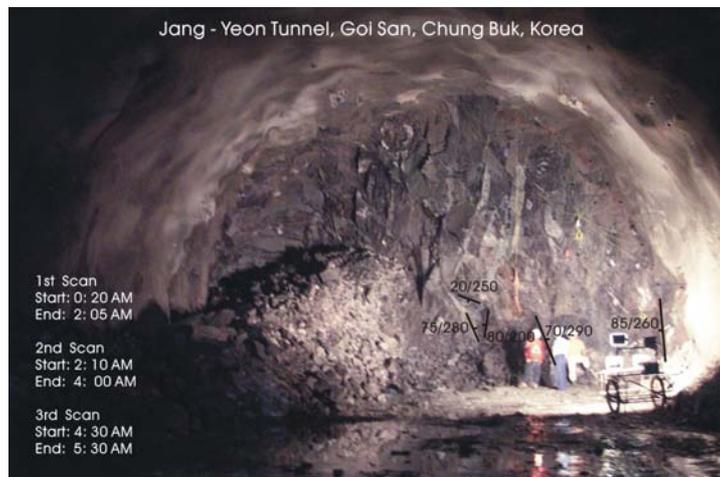


Fig. 21 Picture of Study Area.

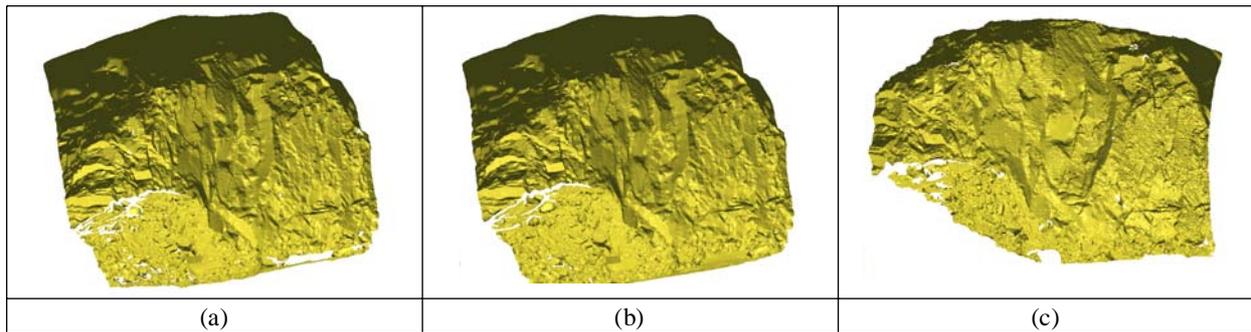


Fig. 22 Consecutive scanings: (a) 1st scanning, (b) 2nd scanning, (c) 3rd scanning.

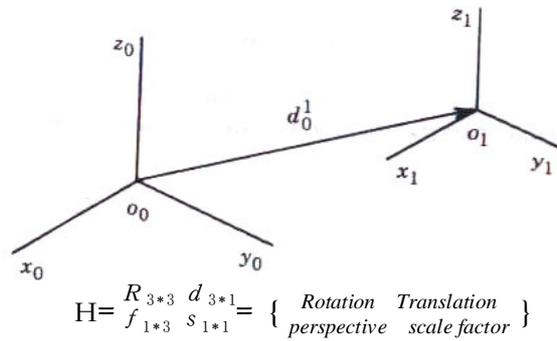


Fig. 23 Matching Algorithm.

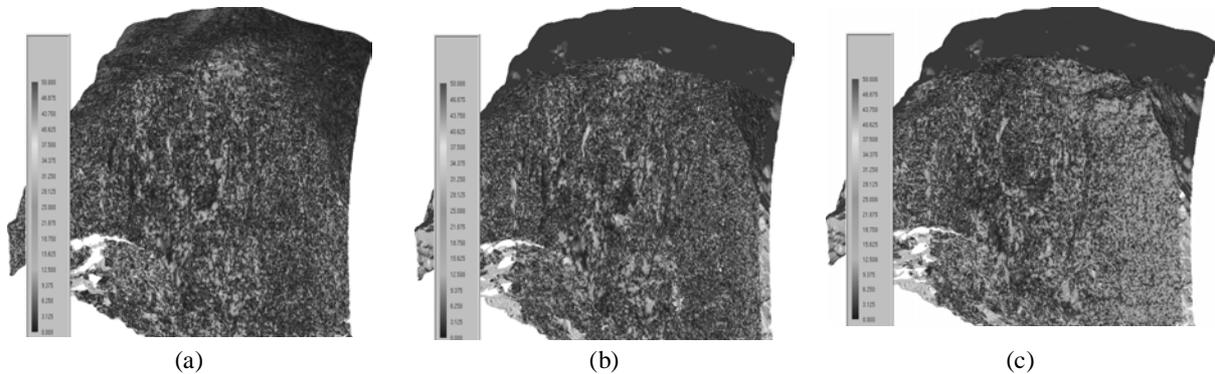


Fig. 24 Displacement between scanings : (a) 1st scanning (00:20~02:05), (b) 2nd scanning (02:10~04:00), (c) 3rd scanning (04:30~05:30).

임으로서 분석에서는 제외한다. 그림을 보면 알 수 있듯이, 1st scanning과 2nd scanning간의 변위가 제일 적었으며, 2nd scanning와 3rd scanning 사이의 변위가 조금 많았고, 1st scanning과 3rd scanning간의 변위가 가장 크게 나타났다.

### 3. 결론

국가 산업 활동을 수행하는 데 있어 새로운 사면 개착

의 계획은 모든 토목 기술자에 최대의 관심사가 아닐 수 없다. 절취사면의 적절한 조사와 설계, 합리적인 안정화 대책공법, 절취사면의 데이터베이스화 등을 통한 절취사면 통합관리시스템의 구축이 더욱 시급한 실정이며, 이를 근간으로 절취사면 유지관리 편람의 작성 및 보급을 통한 해당 관리주체의 효율적이고도 합리적인 절취사면 유지관리제도의 정착이 시급하다.

현장 암반 사면의 불연속면을 조사하고, 이에 따른 암반구조 분석 결과에 의거하여 거동을 예측하는 일련의

해석방법은 전 세계적으로 활용되고 있으나, 기존의 Clinometer, 조사선 또는 조사창에 의한 방법은 특정 구역에서의 분석으로 전체 암반 구조를 대표 하기엔 부족하다. 또한, 사면안정해석에 불연속면의 방향성만을 고려한 분석은 사면에서의 위치 및 연장성 등을 고찰하지 못하기 때문에 실제 최적의 사면 설계 및 보강 계획이 수립되지 못하고 있는 실정이다. 또한, 전체 사면 개착 영역에서의 불연속면 측정이 불가능하고, 조사 인력 및 시간의 낭비, 현장 접근성의 난이도에 따른 문제점들이 제기되고 있다.

따라서, 이러한 문제점을 보완하고 기술자들의 욕구를 충족 시켜줄 수 있는 신기술인 지상 레이저 스캐닝 시스템이 도입되었다. 암반사면 대상체에 멀리 떨어진 위치에서 레이저를 투사하여 대상체 표면상의 수많은 3차원 공간좌표를 연속적으로 얻는 방법으로 실 대상체 암반사면과 같은 정밀한 데이터를 취득할 수 있다. 이것은 3차원 공간상의 모델링이 형성되고, 이 데이터로부터 암반 불연속면의 방향성 측정과, 거리, 면적 측정, 거칠기 등 사면에 대한 각종 정보를 얻을 수 있다. 또한, 파괴 가능성이 있는 절리면의 연장성으로 파괴 규모를 미리 예측하여 보강 계획수립에 도움이 될 것으로 보인다. 이 과정을 이용하면 암반사면이나, 구조물 같은 대용량을 요구하는 대상체를 간단하게 모델링하여 역설계 등 여러 분야에 이용할 수 있다. 또한, 암반 절리면의 거칠기를 정량화시키는 기술을 개발하여, 암석의 크기에 관계없이 절리면의 거칠기를 구할 수 있었다. 그리고 단면도를 설정하여 설계도면의 경사도를 유지하도록 설계되었는지 판명하였고, 실제 파괴면적과 경사를 설계안과 비교한 결과 설계 안전율이 다소 작은 결과를 얻을 수 있었다. 한편, 붕괴면의 체적 또한 구할 수도 있었는데, 이 방법을 이용하면 침하량, 토공량, 붕괴체적 등 여러 분야에 이용할 수 있을 것이라 판단된다.

결론적으로 3차원 공간정보의 가공처리기술, 사면조사 및 최적설계 기술과 효율적 사면유지관리 기술이 총체적으로 종합된 시스템의 형성은 21세기를 선도하는 산업정보화 기술의 한 축을 담당할 것으로 예상되며, 이에 따른 실용화된 기술개발로 이어져야 할 것이라 판단된다.

### 감사의 글

본 연구결과에는 많은 분들의 도움이 이었습니다. 특

히, 한진정보통신의 김은영의 헌신적인 참여로 이루어졌으며, 굴포천 지질조사는 넥스지오의 윤운상 박사와 박성욱 차장의 도움으로 이루어졌음을 밝힙니다.

### 참고문헌

박성욱, 윤운상, 노남균, 손호웅, 김영경, 최성순, 김성구, 정찬균, 2004, 레이저스캐너와 BB-Model을 이용한 확률론적 암반사면 안정 해석 사례 연구, 대한지질학회 계학술발표회 초록집, 22-23.

박병윤, 권상기, 2000, 암반 절리 거칠기의 정량화에 대한 연구현황 분석, 한국암반공학회.

이인모, 홍은수, 배석일, 이석원, 2002, 암석의 절리면 거칠기 정량화 기법 개발을 통한 절리면 전단강도 특성 분석, 한국지반공학회 논문집 제 18권 4호.

천병식, 김대영, 2001, 암석 절리면 거칠기의 정량화에 대한 수치적 연구, 한국지반공학회 논문집 제 17권 제 1호.

한국건설기술연구원, 2004, 시간 열화 특성을 고려한 터널갱구사면 안정성 기법 및 상시 계측 시스템 개발, 89p.

Barton, N. R. and Choubey, V., 1977, The shear strength of Rock joints in the theory and practice, Rock Mechanics, 1, 54.

Barton, N. R., 1976, The shear strength of rock and rock joints. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 13, pp. 255-279.

Barton, N. R., 1973, Review of a new shear strength criterion for rock joints. Engineering Geology, 7, 287-332.

Boehler, W., Heinz, G. and Marbs, A., 2002, The potential of non-contact close range laser scanners for cultural heritage recording, Surveying, 28, 289-295.

Blais, F., Beraldin, J. A. and El-Hakim, S.F., 2000, Range Error Analysis of an Integrated Time-of-Flight, Triangulation, and Photogrammetry 3D Laser Scanning System.

Fardin, N., Jing, L. and Stephansson, O., 2000, Heterogeneity and anisotropy of roughness of rock joint.

Giani, G. P., 1992, Rock Slope Stability Analysis, A.A.Balkema, p.361.

Goodman, R. E., 1970, The deformability of joints, ASTM Spec. Tech. Publ. 477, pp. 174~196.

Lee, K., 1999, Principles of CAD/CAM/CAE systems, Addison Wesley Longman, Inc., 445p.

Petrie, G. and Kennie, T. J. M., 1987, Terrain modeling in Survey and Civil Engineering Computer Aided Design, Volume 19, number 4.

Patton, F. D., 1996, Multiple modes of shear failure in rock, Proc. 1st Cong. ISRM(Lisbon), Vol. 1, pp. 509~513.

Sloan, S. W. and Houlsby, G. T., 1984, An Implementation of Watson's Algorithm for Constructing Triangulated Irregular Networks, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol 2, No 3.

TSE, R. and Cruden, D., 1979, Estimating Joint Roughness Coefficients, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., V. 16, 303-307.

Vollmer, J., Mencl, R. and Muller, H., 1992, Improved laplacian smoothing of noisy surface meshes, In Computer Graphics Forum (Proc. Eurographics), Vol. 26, pp. 55-64.