

## 3D laser scanning 및 수치사진측량을 이용한 암반 사면의 DEM 추출 기법

정창엽<sup>1)</sup>, 박형동<sup>2)</sup>

### DEM generation of Rock Slope using Laser Scanning and Digital Stereo Photogrammetry

Chang-Yub Jeong and Hyeong-Dong Park

**Abstract.** To obtain Digital Elevation Model(DEM) from an exposed rock mass, techniques such as laser scanning and digital stereo photogrammetric technique are recently applied. We have obtained the DEM of the rock slope using above techniques in this study, and examined a suitability and improvement of the photogrammetry for the rock slope by overlapping the DEM. This study can be applied to the measurement of fracture orientations, the prediction of rock joint network, and the analysis on the change of the rock slope.

**KeyWords:** Rock slope, Digital Elevation Model(DEM), Laser scanning, Digital stereo photogrammetry

**초 록.** 암반 사면에 대한 DEM(Digital Elevation Model)을 추출하기 위한 원거리 측정의 일반적인 방법은 laser scanner를 이용하는 방법과 수치사진측량 방법이 있다. 본 연구에서는 두 가지 기법을 적용하여 하나의 사면에 대해 DEM을 추출한 후, 각각의 기법을 통해 얻은 DEM을 중첩시켜 그 차이를 분석함으로써 수치사진측량 기법의 적합성 및 개선점에 대해 살펴보았다. 이는 암반 사면의 절리 방향성을 측정하여 절리 구조를 파악하거나 사면 형상 보존을 위한 DEM 추출하는데 적용할 수 있으며, 사면의 변화양상분석에 사용될 수 있다.

**핵심어:** 암반 사면, DEM, Laser scanning, 수치사진측량

## 1. 서 론

접근이 불가능한 암반사면의 불연속면을 측정하기 위한 비접촉식, 원거리 측정 방식에 대한 개발이 최근 국내외에서 일부 이루어지고 있다. 사면 절리 방향의 비접촉식 측정방식과 관련하여, Feng 등(2001)이 non-reflector total station을 이용하여 사면의 절리 방향을 측정하였다. 이러한 방식은 원거리에서 측정하는 이유로 조사면의 위치에 대한 제약을 극복할 수 있지만, 현장에서 각각의 절리면에 대해 작업을 해주어야 하므로 다수의 면에 대해 작업 시 기존의 클리노미터를 이용하는 방법과 마찬가지로 번거롭고 많은 수작업을 요구하게 된다. 또한 Slob 등(2002)이 laser scanning을 통해

암반의 불연속면을 측정하였으며, 류동우 등(2000)은 입체 사진 측량학을 이용한 model test를 통해 사면의 방향성 추출 실험을 행하였다. 후자의 방법은 사면의 DEM을 추출하여 컴퓨터 상에서 재현된 사면으로부터 방향성을 추출하는 기법으로 최근에 그 응용성에 대한 관심이 높아지고 있다. 이러한 DEM 추출 방식에 관한 연구로는 Baltsavias 등(2001)은 빙하지역의 모니터링을 위해 동일 지역에 대해 laser Scanner 와 수치사진측량 기법을 동시에 적용하여 DEM을 구축하였으며, 이효성 등(2002)이 수치근접사진측량을 통해 실내 환경에서 암석 표면의 거칠기를 측정하여 laser profiler를 통해 얻은 값과 비교하였다.

본 연구에서는 동일 사면에 대해 laser scanning 과 입체 사진 측량을 동시에 적용하여 사면의 절리 방향 분석을 위한 수치사진측량 기법의 적용성을 분석하고자 한다.

<sup>1)</sup>서울대학교 지구환경시스템공학부 석사과정

<sup>2)</sup>서울대학교 지구환경시스템공학부 조교수

접수일: 2003년 3월 20일

심사 완료일: 2003년 6월 12일

## 2. 3차원 위치정보추출

### 2.1 Laser Scanner에 의한 3차원 위치정보 추출

레이저 스캐닝을 통해 3차원 위치정보를 추출하는 방법은 기본적으로 Time-of-Flight 원리를 이용한 방식과 triangulation 방식으로 나눌 수 있다.

Time-of-Flight 방식은 레이저 주사부, 수신부, 시간 측정장치로 구성되며, 레이저를 목표물에 주사하여 반사되어 되돌아오는 레이저를 수신한 후, 시간차를 이용하여 거리를 측정한다. 이는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$R_{TOF} = c \frac{\tau}{2} \quad (1)$$

여기서  $c$ 는 빛의 속도이며,  $\tau$ 는 laser pulse의 위상차이다. 이러한 방식은 5 mm 이상의 오차가 발생하며, 시간차를 이용하는 특성상 가까운 거리에서 정밀도가 더 떨어진다. 그러나 100 m 이상의 먼 거리를 측정할 수 있고 속도가 빠른 장점 때문에 Cyrax, Callidus, GS-100 등의 대부분의 대형 스캐너에서 사용된다.

Triangulation 방식은 레이저를 목표물에 주사한 후 CCD camera를 사용하여 목표물의 레이저점(laser spot)을 기록한다(Fig. 1). 이때 레이저 점의 위치와, 내부적으로 기록된 레이저 빔의 주사각도, 레이저 주사부와 CCD camera간의 거리(Base) 의해 기하학적으로 거리를 측정하며 다음의 식으로 나타낼 수 있다<sup>(6)</sup>.

$$Z = \frac{f_0 \cdot d}{p + f_0 \tan \theta} \quad (2)$$

$$X = Z \tan \theta \quad (3)$$

여기서,  $p$ 는 레이저 점의 영상에서의 위치이며,  $f_0$

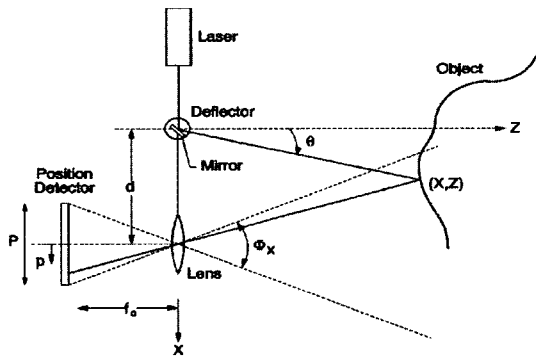


Fig. 1. Triangulation methods for range acquisition (Beraldin, 2000).

는 렌즈의 초점거리이며,  $d$ 는 CCD와 레이저 주사부간의 거리이다. 이 방법은 매우 정밀한 측량이 가능하며, 가까운 거리(약 2 m) 에서도 1 mm 이하의 오차를 가지기 때문에 정밀한 스캐닝을 필요로 하는 대형 스캐닝 작업에 용이하다. 그러나 거리가 멀어질수록 CCD에서 목표물의 레이저 점을 감지해야 하기 때문에 정밀도가 떨어지며, 빛이 강한 환경에서 레이저 점의 대비가 떨어지기 때문에 어두운 환경에서 측정해야 한다.

### 2.2 수치사진측량에 의한 3차원 위치정보 추출

한 쌍의 입체영상으로부터 3차원 위치를 결정하여 DEM을 생성하기 위해서 촬영 당시의 카메라의 위치  $X_0, Y_0, Z_0$  및 자세  $\kappa, \phi, \omega$  즉, 외부표정요소를 구해야 한다. 이를 위해 카메라의 투영 중심과 사진상의 점, 대상점이 일직선상에 있다는 공선조건식을 기본으로 최소제곱법을 이용하여 외부표정요소를 결정하는 번들조정기법을 적용할 수 있다. 공선조건식은 카메라 투영 중심에 대한 3차원 위치와 회전요소, 임의점에 대한 3차원 위치, 이에 대응하는 영상좌표에 대한 관계식으로 표현할 수 있다<sup>(7)</sup>.

$$\begin{aligned} x &= -f \frac{m_{11}(X - X_L) + m_{12}(Y - Y_L) + m_{13}(Z - Z_L)}{m_{31}(X - X_L) + m_{32}(Y - Y_L) + m_{33}(Z - Z_L)} \\ y &= -f \frac{m_{21}(X - X_L) + m_{22}(Y - Y_L) + m_{23}(Z - Z_L)}{m_{31}(X - X_L) + m_{32}(Y - Y_L) + m_{33}(Z - Z_L)} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,  $x, y$ 는 임의점의 영상좌표이며,  $X_L, Y_L, Z_L$ 는 카메라 투영 중심의 3차원 위치이며,  $X, Y, Z$ 는 임의점에 대한 3차원 위치이며,  $f$ 는 초점거리이다. 그리고,  $m_{11} \dots m_{33}$ 는 회전형렬로써,

$$\text{회전형렬} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi \cos x \\ -\cos \phi \sin x \\ \sin \phi \\ \cos \omega \sin x + \sin \omega \sin \phi \cos x & \sin \omega \sin x - \cos \omega \sin \phi \cos x \\ \cos \omega \cos x - \sin \omega \sin \phi \sin x & \sin \omega \cos x + \cos \omega \sin \phi \sin x \\ -\sin \omega \cos \phi & \cos \omega \cos \phi \end{bmatrix}$$

$\omega, \phi, x$ 는 회전요소이다.

대상영역 내의 DEM 추출을 위한 다음 단계로, 수치적 접근방법에 의하여 동일 지점에 대한 영상좌표를 자동으로 찾을 수 있는 자동매칭을 실시하여야만 한다. 두 영상간의 자동매칭에는 여러 가지 기법이 개발되어 있으나 수치표고모델 생성에 있어서는 일반적으로 표

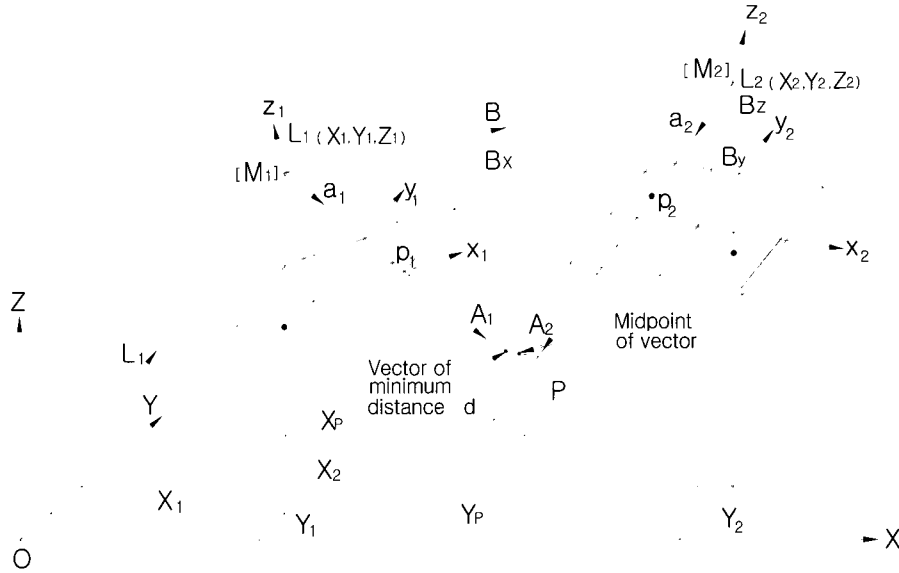


Fig. 2. Analytical space intersection (Moffitt, 1980).

준상관기법(cross correlation method)이 많이 사용되고 있다<sup>(8)</sup>. 이는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$r(m, n) = \frac{\sum \sum \{S(x, y) - \bar{S}(x, y)\} \{W(x, y) - \bar{W}(x, y)\}}{\left[ \sum_{x=m}^{m+M_1-1} \sum_{y=n}^{n+N_1-1} \{S(x, y) - \bar{S}(x, y)\}^2 \sum_{x=1}^{M_2} \sum_{y=1}^{N_2} \{W(x, y) - \bar{W}(x, y)\}^2 \right]^{1/2}} \quad (5)$$

이는 m이 1에서 M<sub>2</sub>-M<sub>1</sub>+1까지, n이 1에서 N<sub>2</sub>-N<sub>1</sub>+1까지 모두(M<sub>2</sub>-M<sub>1</sub>+1)×(N<sub>2</sub>-N<sub>1</sub>+1)회의 r(m, n)값을 계산한 다음 상관계수 r값이 가장 클 때의 위치를 결정하는 방법이다. S(x, y)는 크기 M<sub>2</sub>×N<sub>2</sub> 화소인 검색영역(search size)내의 화소값이며, W(x, y)는 크기 M<sub>1</sub>×N<sub>1</sub> 화소인 기준영역(window size)내의 화소값으로 다음 식 (6), (7)과 같다. 그리고 최대 상관계수의 값을 정확하게 찾기 위하여 식 (8) 과 같은 일원 이차방정식을 적용하였다.

$$\bar{S}(x, y) = \left\{ \sum_{x=m}^{m+M_1-1} \sum_{y=n}^{n+N_1-1} S(x, y) \right\} / (M_1 \times N_1) \quad (6)$$

$$\bar{W}(x, y) = \left\{ \sum_{x=1}^{M_2} \sum_{y=1}^{N_2} W(x, y) \right\} / (M_1 \times N_1) \quad (7)$$

$$r = ax^2 + bx + c \quad (8)$$

결정된 외부표정요소와 자동매칭으로 찾은 좌·우 영상의 동일점을 이용하여 3차원 위치를 계산하기 위해선 공간교차이론을 적용한다. 공간교차이론은 아래의 Fig. 2에서 보는바와 같이 임의의 동일점 p<sub>1</sub>, p<sub>2</sub>를 찾았을 경우, 그때의 투영중심 L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub>에 의하여 두 개의 직선이

형성된다는 원리에 근거한다.

이론적으로는 두 직선이 한 점에서 만나야 하지만, 일반적으로 외부표정요소 결정할 때와 매칭위치 결정에서 피할 수 없는 오차들로 인하여 두 직선은 서로 교차하지 않는다. 따라서 실제에 있어서는 두 직선의 최단거리인 벡터 d를 찾아 이것의 중간점을 교차점으로 간주하여 3차원 위치를 계산한다. 이는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\vec{d} = \vec{a}_1 \times \vec{a}_2 \quad (9)$$

$$\vec{B} = \lambda_1 \vec{a}_1 + k \vec{d} - \lambda_2 \vec{a}_2 \quad (10)$$

식 (10)와 식 (11)에서 λ<sub>1</sub>, k, λ<sub>2</sub>를 구할 수 있으며, 실제로 구하고자 하는 점 P의 3차원 위치(X<sub>P</sub>, Y<sub>P</sub>, Z<sub>P</sub>)는 식 (12)으로 구한다.

$$\vec{P} = \vec{L}_1 + \lambda_1 \vec{a}_1 + \frac{1}{2} k \vec{d} \quad (11)$$

이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} + \lambda_1 \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \end{bmatrix} + \frac{1}{2} k \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서 d는 두 직선에 연직인 벡터이며, λ<sub>1</sub>는 축척요소이며, k는 최단 거리 d에 대한 방향벡터 d의 계수이다. 이 방법은 근사적인 방법이지만 실용적인 면에서

가장 많이 사용된다. 정확한 해를 구하기 위하여 공선 조건식을 이용한 최소제곱법을 사용하기도 하지만, 이것은 계산시간이 많이 소요되며 반복계산을 요구하므로 주로 셋 이상의 직선을 교차시킬 때 사용한다.

### 3. 적용실험 및 결과

#### 3.1 Laser Scanning

본 연구에서는 laser scanner를 통해 얻은 사면의 DEM을 수치사진측량을 통해 추출한 DEM의 정확도 분석을 위한 기준자료로 활용하기 위해 정밀한 스캐닝이 가능한 triangulation 방식으로 3차원 좌표를 얻어내는 MENSİ 사의 S25 laser scanner를 이용하였다. 제원은 Table 1과 같으며, 측정 범위와 측정 Resolution 및 데이터 저장 및 처리 등의 전반적인 작업은 컴퓨터에 의해 제어된다(Fig. 3).

Triangulation 방식의 특성상 햇빛의 양이 많으면 레이저 점을 감지할 수 없게 되므로, 흐리고 햇빛이 없는 날을 선택하여 실험을 행하였으며, 대상영역은 식생분포로 인해 방해받지 않으며, 썩기 파괴의 특징이 뚜렷한 절리면을 포함한 사면을 대상으로 하였다(Fig. 4).

Table 1. Technical specification.

Instrument Type	High Accuracy L.M.S
Scanning Range	0.8 - 10 M / 2.5 - 25 M
Scanning Speed	100 pts/s
Standard Deviation (Accuracy)	0.21 mm / 0.6 mm
Field of View	46°(H), 320°(V)
Spot Size	0.4 mm / 0.7 mm
Metrology Method	Optical Triangulation

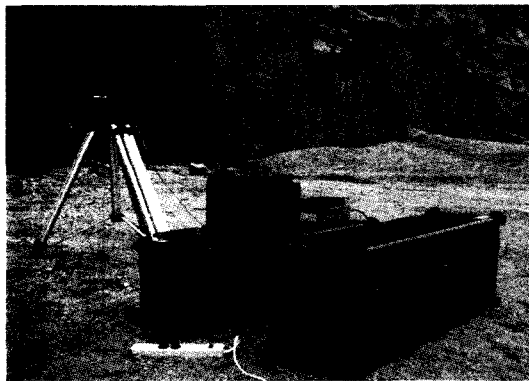


Fig. 3. S25 Laser Scanner system.

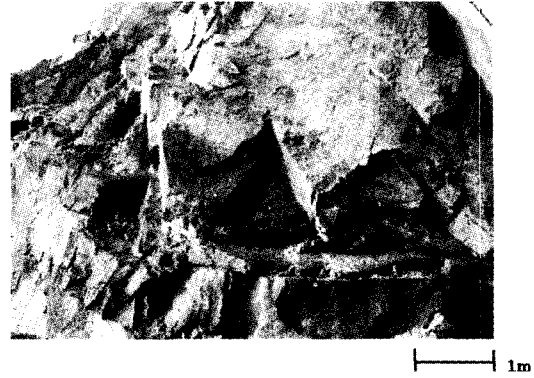


Fig. 4. Image of rock face (white circular marks on the rock surface are targets for control survey).

실험은 laser의 그림자를 최대한 줄이고, 정확도를 높이기 위해 좌,우의 입체에서 0.002 radian의 간격으로 scanning 작업을 실시하였다.

연구에 사용된 system은 scanning을 통한 좌표값은 문서 파일 형태(\*.pts)로 얻을 수 있으며, 획득한 자료는 3D 자료를 다루는 소프트웨어인 Rapidform2002를 이용하여 3차원 좌표값의 시각화 또는 DEM을 생성할 수 있다(Fig. 5).

#### 3.2 수치사진측량

본 연구에서는 수치사진측량으로 획득한 DEM의 측정 정밀도 파악을 위하여 laser scanning을 실시한 동일 사면에 대해 입체 영상을 획득하였다. 이때 렌즈의 중심에서 멀어질 수록 크게 발생하는 방사왜곡을 최소화하기 위해, 최대한 썩기 파괴면이 렌즈의 중심에 들어오도록 촬영하였다. 촬영에 있어서는 CCD 22.7 × 15.1 mm의 Canon EOS D30을 이용하였다. 본 연구에

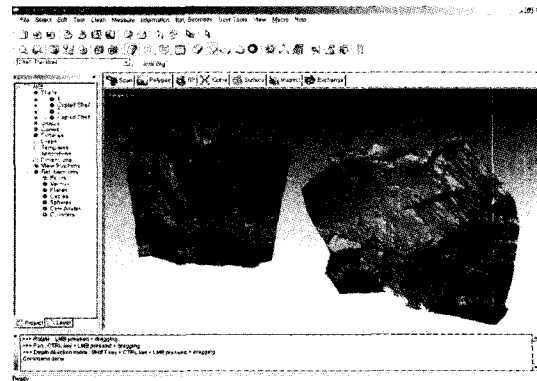


Fig. 5. Screen capture from Rapidform2002 program for building DEM using the data acquired from laser scanner.

서는  $2,160 \times 1,440$  pixel 해상도와 초점거리 28 mm로 설정하여 영상을 획득하였다. 촬영기선은 2.077 m이고, 촬영거리는 약 5.6 m로 하였다. 특히 외부표정요소 초기값으로 사용될 회전요소 중 Z축의 회전요소는 0이 되도록 카메라의 삼각대에 부착된 기포관으로 정준하였으며, X와 Y축의 회전요소는 카메라 중심과 임의 기준점간의 기하학적 관계를 이용하여 구하였다. 또한 썩기 파괴면을 중심으로 직경이 25 mm인 별모양의 15개의 딱지점을 고르게 부착하여 기준점 및 검사점으로

사용하였다. 기준점 및 검사점의 3차원 위치는 5초읽기 테오달라이트(DT5S)를 이용한 삼각측량 원리에 의하여 구하였다(Fig. 6).

획득한 입체 영상으로부터 외부표정요소를 검정하기 위하여 번들조정기법을 적용하였다. 특히, 공간교차이론으로 검사점의 3차원 위치를 구하였으며, 이를 테오달라이트로 실측한 결과값과 비교하였다(Table 3). 본 연구에서 사용한 Canon EOS D30 디지털 카메라는 렌즈 왜곡과 관련된 검정자료가 없기 때문에 번들 조정법의 기본식에 정오차 검정항으로 주점이동량 ( $x_0, y_0$ )과 초점거리 ( $f$ ) 항을 추가하여 조정하는 확장된 번들 조정을 실시하였다. Table 2는 결정된 외부표정 요소와 내부표정요소( $x_0, y_0, f$ )를 나타낸 것이다.

다음 단계인 자동 매칭을 실시하기 전에 사면의 경우 방향에 따라 큰 시차차가 발생할 수 있기 때문에 매칭의 정확도를 높이고 매칭 시간을 줄이기 위해 기하보정을 실시하였다. 영상 획득 위치의 차이에 따른 시차차는 대상물의 3차원 위치를 찾아내는데 필수적인 조건이지만, 너무 큰 시차차는 검색 영역의 크기를 커지게 하여 연산에 필요한 시간이 기하급수적으로 커지게 하는 원인이 된다. 또한, 두 영상간의 이질화 문제로 인해 잘못된 매칭쌍을 찾을 확률도 높아져 영상 전체의 평균 상관계수도 떨어진다. 따라서 본 연구에서는 다루고자 하는 영상 중심의 썩기 파괴면을 중심으로 고르게 15개의 지점을 동일 지점으로 설정하고 좌측영상을 기준 영상으로 설정하고 우측 영상을 보정하는 기하보정을 실시하여 다음과 같은 역변환식을 얻었다.

$$\begin{aligned} X' &= 1.03026 X + 0.172982 Y + 54.8103 \\ Y' &= 0.0862574 X + 1.04515 Y - 79.7225 \end{aligned} \quad (13)$$

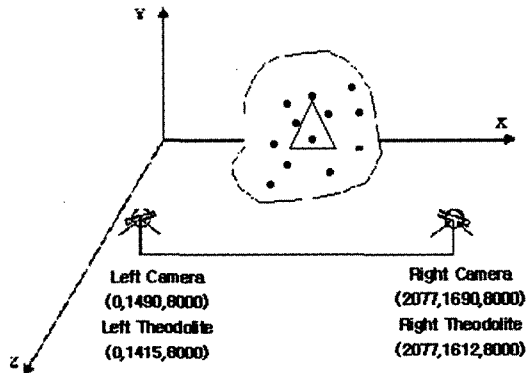


Fig. 6. Three dimensional coordinate system: distributed solid circles represent targets (units are mm).

Table 2. Interior and exterior orientation parameters of reference surface determined by EOS D30 camera (units are radian and mm, respectively).

Camera	Left	Right
$\omega$	0.227811 rad	0.201134 rad
$\phi$	-0.139705 rad	0.205790 rad
$\kappa$	0.040883 rad	-0.052426 rad
$X_0$	-21.581 mm	2068.103 mm
$Y_0$	1497.158 mm	1704.751 mm
$Z_0$	8045.914 mm	8019.272 mm
$x_0$	5.956283 pixel	0.154158 pixel
$y_0$	-2.359040 pixel	-0.895909 pixel
$f$	27.908419 mm	28.15702277 mm

Table 3. RMSE of 3D ground coordinates of the check points in digital image (units are mm).

RMSE	X	Y	Z
Focal length			
28 mm	1.291	1.932	2.468

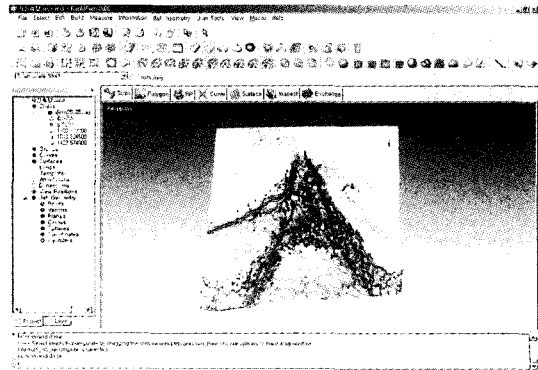


Fig. 7. Screen capture from Rapidform2002 program for building DEM using the data acquired from stereo photogrammetry.

좌측영상과 기하보정된 영상에 대해 앞에서 언급한 표준상관계법을 이용하여 자동매칭을 실시하였다. 이 방법은 보편적으로 많이 사용되는 방법으로, 검색영역 및 탐색영역이 큰 경우 속도가 매우 느린 단점이 있다. 이때 매칭을 실시한 영상은 앞에서 변환식에 의해 보정된 영상이기 때문에 변환식을 통해 보정한 우측 영상 화소의 좌표값은 역변환식을 통해 원래의 좌표값으로 되돌려 주어야 한다.

외부표정요소와 역변환식에 의해 재보정된 매칭쌍을 이용하여 공간교차이론을 통해 3차원 위치 좌표를 구할 수 있다. 이를 Rapidform2002를 이용하여 시각화하였다(Fig. 7).

#### 4. 비교 및 분석

사면을 대상으로한 laser scanning 과 수치사진측량을 통한 DEM 추출 기법은 같은 원거리 측정 방식임에도 실험 과정과 결과에서 차이를 보였다. Fig. 8과 Fig. 9은 각각 laser scanning과 수치사진측량을 통해 획득한 사면의 DEM을 나타낸 것이다.

추출된 결과의 정확도 분석을 위해 측정길이 0.8-10 m의 범위에서 표준편차 0.21 mm의 정밀도를 보장하는 S25 laser scanner를 사용하여 얻은 사면의 DEM을 기준자료로 활용하였다.

Fig. 10은 수치사진측량을 통해 얻은 DEM을 기준 DEM 과 중첩시켜서 그 차이를 분석한 결과이다.

검정색에 가깝게 표시된 지역은 DEM 값의 차이가 범례에서 비교해 보면 알 수 있듯이, 오차가 작음을 의미하며, 흰색으로 표시된 지역은 74.368 mm 이상의 오차를 보이는 지역이다. 이 지역은 영상 매칭 시에 그 정확도를 의미하는 상관계수 값이 낮게 나타난 지역으로 DEM 값이 큰 오차를 내는 것을 알 수 있다.



Fig. 8. DEM extracted from the data acquired from Laser Scanning.



Fig. 9. DEM extracted from the data acquired from Stereo Photogrammetry.

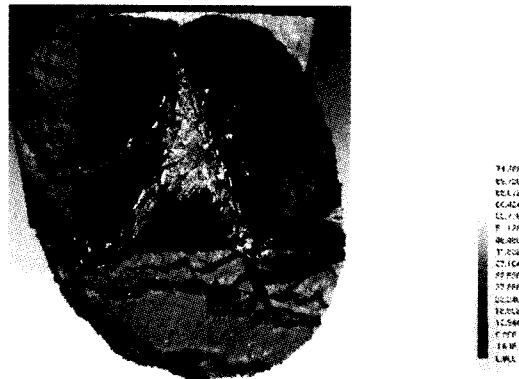


Fig. 10. Height differences between laser scanner DEM and photogrammetry DEM (units are mm).

이렇게 큰 오차가 발생한 지역은 그 원인에 따라 크게 그림자에 의한 영향과 시차에 의한 영향으로 나눌 수 있다(Fig. 11). 그림자에 의한 영향은 좌우 영상을 획득할 당시의 햇빛의 강도와 방향이 달라졌기 때문에 동일지역이라 하더라도 다른 화소값의 분포를 띠게 된다. 이러한 영향으로 인해 그림자의 영향을 받는 영역은 전

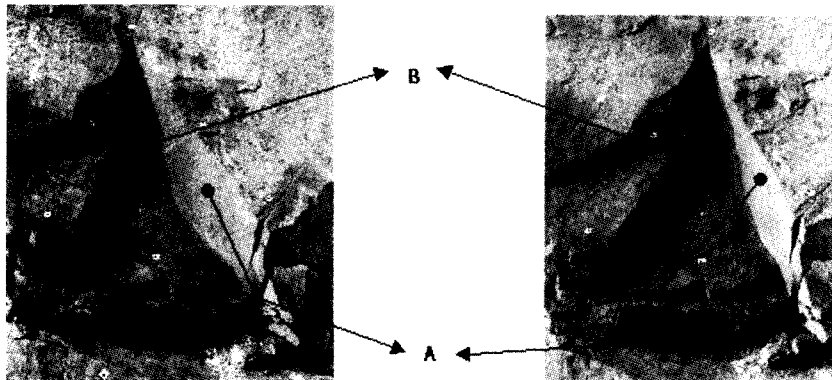


Fig. 11. Target region.

**Table 4.** Difference of correlation coefficient(r).

Image before geometric correction		Image after geometric correction	
min. value	ave. value	min. value	ave. value
-0.29161	0.409	0.16964	0.720

반적으로 오차가 발생하였다. 또, A 지역은 대상지역의 기울기가 심하여 영상을 획득한 위치가 변함에 따라 발생하는 시차차가 특히 크게 발생하여 좌우 영상간의 상관성이 낮아진 것으로 보인다. 시차차의 영향은 기하보정을 실시하기 전과 후의 상관계수를 비교한 Table 3에서도 확인할 수 있다. 기하보정을 통해 시차차가 많이 감소된 영상면과 평행에 가까운 면에 대해서는 정확도가 크게 향상됐으나, 영상면에 수직에 가까운 경사를 보이는 A 와 같이 기하보정 후에도 큰 시차차를 보이는 면에서는 여전히 큰 오차가 발생했음을 알 수 있다. 또한 B 지역의 경우는 안쪽 깊숙이 위치하여 그림자의 영향과 시차차의 영향을 크게 받아 전반적으로 큰 오차를 보였다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 laser scanning 과 수치사진측량을 이용하여 동일 사면에 대해 DEM을 추출한 후, 추출한 DEM을 상호 중첩 시켜서 그 차이를 비교해 보았다. 그 결과 그림자의 영향과 사면의 특성상 발생하는 특정면의 과대 시차차의 영향을 받은 지역을 제외하면 수치사진측량을 통해 획득한 사면의 DEM과 laser scanner 를 이용하여 얻은 DEM이 거의 일치함을 알 수 있었다. 따라서 실외 환경에서 인공조명으로 일정한 빛의 양과 방향을 확보한 후, 그림자의 영향을 없애고, 특정지역에서의 과대시차차를 줄이면 Laser Scanning을 통해 얻은 DEM과 유사한 정밀도를 가진 사면의 DEM을 추출할 수 있을 것으로 판단된다.

수치사진 측량을 통해 획득한 사면의 DEM을 이용하여 자동 및 반자동으로 절리면의 방향성을 분석할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 동일 대상영역에 대해 주

기적으로 DEM을 추출함으로써 얻을 수 있는 시간대별 대상영역의 수치정보를 통해 변화 양상을 파악할 수 있으며, 대상물의 유지 및 보수, 붕괴 예방 등을 위한 관리 시스템을 구축할 수 있다.

## 사 사

본 연구는 과기부 국제공동연구비(과제번호:M6-0105-00-0053, 02-A01-00-043-00)의 지원으로 이루어졌으며, 논문작성은 서울대학교 공학연구소의 지원으로 이루어졌음을 밝힌다.

## 참고문헌

1. Feng, Q., Sjogren, P., Stephansson, O., and Jing, L., 2001, Measuring fracture orientation at exposed rock faces by using a non-reflector total station, *Engineering Geology*, 59(1-2), 133-146.
2. Slob, S., Hack, R., and Turner, A., 2002, An approach to automate discontinuity measurements of rock faces using laser scanning techniques, *EUROCK 2002*, Funchal, Madeira Island, Portugal, 87-94.
3. 류동우, 이유리, 장윤섭, 이희근, 박형동, 2000, 화상처리 및 입체사진측량학을 이용한 암반 절리 조사 시스템, *터널과 지하공간, 한국암반공학회*, 10, 329-343.
4. Baltsavias, E. P., Favey, E., Bauder, A., Bosch, H., and Pateraki, M., 2001, Digital Surface Modeling by Airborne Laser Scanning and Digital Photogrammetry for Glacier Monitoring, *Photogrammetric Record*, 17(98), 243-273.
5. 이효성, 안기원, 신석효, 김용일, 2002, 수치근접사진측량과 레이저 프로파일러를 이용한 암석 절리면의 표면 거칠기 정밀 측정, 2002년도 한국측량학회 추계학술발표 논문집, 93-98.
6. Beraldin, J.-A., Blais, R., Rioux, M., Cournoyer, L., Laurin, D., and MacLean, S. G., 2000, Eye-safe digital 3-D sensing for space applications, *Optical Engineering*, 39(1), 196-211.
7. Moffitt, F. H., and Mikhail, E., 1980, *Photogrammetry*, 3rd ed., Happer & Row Inc., 133-148, 443-445.
8. Toni Schenk, 1999, *Digital Photogrammetry, Volume I*, TerraScience, 252-257.



### 정 창 엽

2002년 한국과학기술원 토목공학과  
공학사

Tel: 02-880-8283

E-mail: arwell@hanmail.net

현재 서울대학교 지구환경시스템공학부  
석사과정



### 박 형 동

1988년 서울대학교 공과대학  
자원공학과 공학사  
1990년 서울대학교 대학원 자원공학과  
공학석사

1994년 Engineering Geology Research  
Group, Imperial College, University of  
London, PhD

Tel: 02-880-8808

E-mail: hpark@snu.ac.kr

현재 서울대학교 공과대학 지구환경시  
스템공학부 조교수