

## 암반의 불연속면 배열을 측량하는 원격 영상측량기

### A Survey Tool for the Measurements of the Rock Parting Surfaces

황상기<sup>1)</sup>, Sangki Hwang, 임유진<sup>2)</sup>, Yujin Lim

1) 배재대학교 토목환경공학과 조교수, Assistant Professor, Department of Civil and Geotechnical Engineering

2) 배재대학교 토목환경공학과 전임강사, Full-time Lecturer, Department of Civil and Geotechnical Engineering

**SYNOPSIS** : This study presents methodology and tools for remote measurement of the orientation of the rock parting surfaces. Two close circuit video camera capture the pictures of a rock excavation surface while a laser beam scans the surface. Positions of the laser beams in the two digital images are recognized by image processing. Using the stereoscopic concept, three dimensional coordinations of the rock surface and the orientation of the rock parting planes are calculated. Point, cross and line type laser beams are tested for better image processing results and measurement accuracy of the coordinates. According to a simple accuracy test, cross beam show better results than the point beam. However, line beam show more promising results for the measurement of the rock parting surfaces.

**주요어(Key words)**: 영상측량, 약선면, 원격측량, 지질구조측정기, 암반절취면

## 1. 서론

암반의 내부에 발달된 불연속면의 배열은 사면절토 및 터널굴착 등과 같은 최근의 토목공사의 설계와 시공에 있어 중요한 기초자료 임에도 불구하고 이들의 분포를 신속하고 정확하게 측정할 수 있는 방안이 없어 종래의 Mapping 방법이 사용되고 있으나 공사의 대형화 추세에 따라 이를 대체할 수 있는 자동화된 측량방법이 요구되고 있다.

유복모 외(1983)는 측량된 3차원 좌표를 이용하여 암반 불연속면의 주향과 경사를 원격으로 측정하는데 필요한 기초적인 원리를 제시하였다. 한편 Garde(1992)는 연속사진의 측점을 디지털화하여 연결함으로써 약선면의 3차원 배열을 측량한 결과를 제시한 바 있다. 그러나 전자의 경우는 측량결과에의 계산 방법을 제시한 것이고 후자의 경우는 측량에 소요되는 시간이 너무 오래 걸려 모두 현장에 활용할 수 있는 효과적인 방법을 제시하고 있지는 않다.

최근 디지털 이미지를 활용한 근거리 사진측량 기법에 관한 다양한 연구결과(한승희 외, ; 한승희, ; Mikhail et al, 1984; 유한희 외, ; 이재기 외, ; 조규전, 심중현, ; 강준목 외, ; 안기원 외)들이 발표되고 있어서 원격 사진측량에 의한 3차원 형상의 재현이 가능해 지고 있다. 이러한 연구의 발전은 암반의 불연속면을 원격으로 측정하는 도구의 개발을 가능하게 하여주고 있다.

본 연구에서는 레이저빔을 주사한 암반사면의 영상을 두 대의 폐쇄회로 카메라(CCTV)로 획득하여 영상처리과정을 통해 레이저빔의 위치를 판독함으로써 사면에서의 동일 위치를 두 영상의 픽셀좌표로

획득하고, 입체시의 원리를 적용해 사면의 3차원 형상을 재현하는 기법을 제시하고자 한다. 구축된 3차원 형상을 이용해 약선면의 주향과 경사를 측정하는 방안도 함께 제시한다.

## 2. 영상처리 장치

암반사면의 표면에 관측점을 형성시키기 위하여 레이저빔을 주사하는데, 주사된 빔을 표면에 체계적으로 이동시키기 위하여 주사장치를 제작하였다. 주사장치는 그림1과 같이 수평과 수직으로 움직이는 모터에 의해 레이저빔의 주사체가 움직이도록 제작되었으며 모터는 컴퓨터에 의해 제어된다. 모터의 제어를 위하여 80C196KC의 중앙처리장치(CPU), 8254 시간제어 장치(timmer), DAC(Digital to Analog Converter)가 장착된 기판이 컴퓨터에 장착되었다. 모터는 S/W의 명령이 직렬포트(Serial Port)를 통하여 전달되어 움직이므로 정확한 시점에 일정거리의 움직임을 유도할 수 있도록 제작되어 있다. 한편 주사장치의 상단에는 흡통을 제작하여 점, 십자, 선형의 레이저빔 주사체, 혹은 레이저 거리측정기를 장착하도록 제작되었다.

사면의 영상을 획득하기 위해서 두 대의 폐쇄회로 카메라를 카메라의 광축에 수직으로 이동하도록 장착할 수 있는 그림2와 같은 알루미늄 판을 제작하였다. 폐쇄회로 카메라는 삼성이 제작한 것으로 영상이 맺히는 소자의 크기는  $4.88 \times 3.66$  mm이며 이 영역은  $640 \times 480$ 개의 소자로 나뉘어져 있다. 카메라의 영상은 영상처리 보드(Matrox Meteor-II Standard 보드)를 통하여 실시간으로 영상화 되도록 설계되어 있으며 이 영상화의 과정 역시 S/W에 의해 제어되도록 설계되어 있다. 즉 레이저 주사장치에 의해 주사점이 확보되면 카메라의 영상이 획득되고 주사장치가 이동되어 새로운 주사점 혹은 주사선이 확보되면 다시 새로운 영상이 획득되는 과정이 S/W에 의해 단계적으로 제어되도록 제작되어 있다.

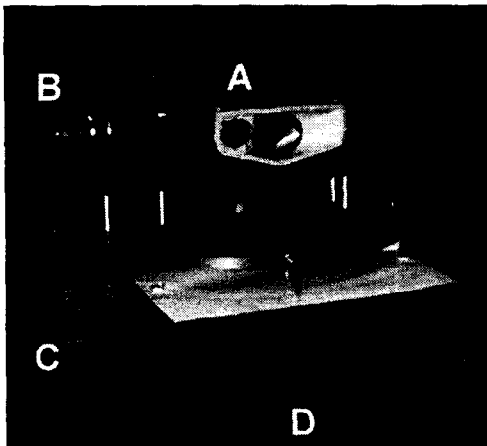


그림 1 . 레이저빔 주사장치

- A. 레이저 주사기 장착부분. 사진의 주사장치는 점형의 빔을 주사하는 거리측정 장치로서 라이카사의 Disto이다.
- B. 수직방향의 회전을 제어하는 모터.
- C. 수평방향의 회전을 제어하는 모터.
- D. 삼각대.

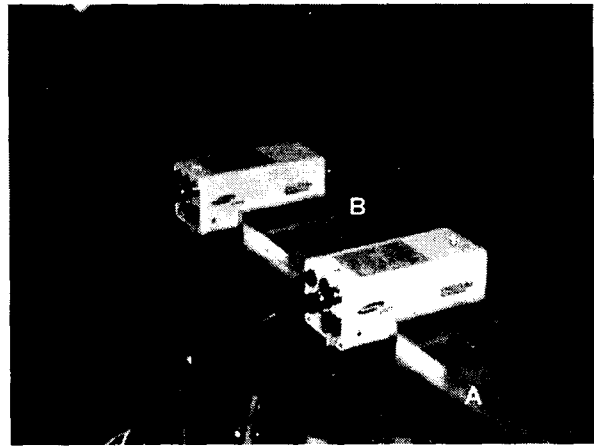


그림 2 . 카메라 장착장치

- A. 카메라를 수평으로 이동하도록 제작된 알루미늄 판.
- B. 카메라의 광축이 알루미늄 판과 수직이 되도록 제작된 카메라 받침.

## 3. 측정원리

암반에는 약선면이 존재하므로 절취면의 표면은 약선면의 일부가 노출되어 있다. 또한 약선면과 절취

면의 교선이 3차원으로 굴곡을 이루는 절취면의 표면에 굴곡선의 형태로 노출된다. 이러한 굴곡지점의 좌표를 이용하면 노출되지 않은 약선면의 배열 역시 측정할 수 있다. 그러므로 절취면의 3차원 형상을 정확히 모델화 할 수 있다면 이로부터 면의 배열을 추정할 수 있다. 그러므로 불연속면의 영상측량은 영상을 이용한 절취면의 3차원 형상의 구축과 구축된 3차원 형상을 지구좌표계로 변환한 과정을 거쳐 이뤄진다.

### 3-1. 영상측량

영상을 이용한 거리측량 방법은 기존의 사진측량 분야에서 활용되어온 아래와 같은 기본 원리를 활용하였다.

$$X = \frac{x_1}{x_1 - x_2} B, \quad Y = \frac{y_1}{x_1 - x_2} B = \frac{y_2}{x_1 - x_2} B, \quad Z = \frac{f}{(x_1 - x_2) \times k} B \quad \text{----- ①}$$

$x_1$  = 왼쪽이미지에서의 x좌표값,  $x_2$  = 오른쪽이미지에서의 x좌표값

$y_1$  = 왼쪽이미지에서의 y좌표값,  $y_2$  = 오른쪽이미지에서의 y좌표값

$B$  = 두사진 사이의 거리,  $f$  = 초점거리

$k$  = 영상의 크기와 소자의 크기를 비교하여 측정된 보정계수

### 3-2. 면의 배열측정

사진측량에 의해 획득된 좌표계는 기선의 방향에 따라 임의로 설정된 좌표계이다. 그러므로 면들의 주향과 경사를 구하기 위해서는 측량된 좌표계를 지구좌표계로 변환하는 과정이 필요하다. 그러나 본 연구에서 추구하는 것이 정확한 지구좌표계의 모델이 아니고 약선면의 배열을 지구좌표계로 측정하는 것임을 고려하면 측량좌표계를 모두 지구좌표계로 변환할 필요는 없다. 그러므로 임의의 좌표계에서 측정된 면의 배열(주향과 경사)을 지구좌표계의 배열로 변환하는 방법을 아래와 같이 제시하는 바이다.

면의 배열변화를 위해서는 임의의 좌표계로 측량된 3차원 모델에서 하나의 기준면과 하나의 기준선에 대한 주향과 경사를 측정하고, 암반의 절취면에서 이에 대응하는 면과 선의 주향과 경사를 측정하여야 한다. 측정된 기준면과 기준선이 서로 평행한 관계를 갖도록 회전하는 회전수식을 적용한 후, 이 수식에 의해 모델공간에서 측정된 모든 면의 배열을 면의 중심을 기점으로 회전시켜 지구좌표계에서의 주향과 경사를 획득하는 것이다. 모델공간의 주향과 경사를 지구좌표계의 배열과 일치시키는 행렬은 아래의 4단계를 통해 이뤄진다.

① 모델과 지형 기준면의 주향을 일치시킨다.

회전에 사용되는 방법은 특정 축을 기준으로 회전하는데 효율적인 Quaternion Representation을 사용하며, 회전형렬은 아래와 같다.

$$Q(\theta) = \begin{bmatrix} 1 - 2m^2 - 2n^2 & 2lm - 2sn & 2ln + 2sm \\ 2lm + 2sn & 1 - 2l^2 - 2n^2 & 2mn - 2sl \\ 2ln - 2sm & 2mn + 2sl & 1 - 2l^2 - 2m^2 \end{bmatrix} \quad \text{----- ②}$$

위에서  $\theta$ 는 회전각이며  $(l, m, n)$ 은 회전축이며  $s$ 는 회전각( $\theta_1$ )에 의해 계산되는 상수이다.

첫 번째의 회전은 지형공간과 모델공간의 기준면의 주향값을 위의 회전공식에 의해 회전하는 과정이다. 회전축은 기준면의 수직벡터이다.

② 기준면의 경사값을 일치시킨다.

두 번째 회전은 1차 회전에 의해 회전된 모델공간의 기준면의 경사값과 지형공간 기준면의 경사값의 차이( $\theta_2$ )만큼 주향방향의 벡터를 기준축으로 하여 회전하여 두 기준면의 주향과 경사를 일치시키는 과정이다.

③ 기준면의 배열을 지형공간의 배열로 일치시킨다.

위의 회전에 의해 모델의 기준면은 지형공간의 기준면과 평행을 이루게 되었다. 그러나 면이 평행함으로 3차원 공간의 배열이 일치하는 것은 아니다. 세 번째 회전은 두 공간의 기준선을 이용하여 기준면에 수직인 벡터를 축으로 하여 회전함으로써 3차원 공간 배열의 일치를 도모하는 것이다. 이를 위하여 기준선의 벡터들을 기준면으로 투영하여 회전각( $\theta_3$ )을 구하고 이를 기준하여 3차 회전을 수행하게 된다. 기준면으로 투영하는 과정은 기준선의 측량오차를 감하는 절차이다.

④ 모델 데이터를 위와 동일한 회전과정으로 모두 회전시켜 지형공간과 일치 시킨다.

세 단계의 회전을 종합한 회전 행렬은 아래와 같이 구할 수 있다.

$$Q = Q(\theta_1) * Q(\theta_2) * Q(\theta_3) \text{ ----- } \textcircled{3}$$

⑤ 마지막 과정은 위의 회전형렬을 이용하여 모델에서 측정된 모든 면구조의 주향과 경사를 실 지구 좌표계의 주향과 경사로 회전하는 과정이 되겠다.

## 4. 영상처리

영상처리는 레이저빔이 조사된 영상을 빔이 조사되기 전의 영상과 비교하여 조사빔의 위치를 파악하는 과정에서 시작된다. 본 연구에서는 적색의 레이저빔을 사용하므로 8비트 영상의 적색밴드 화소값을 계산에 활용하였다. 빔이 조사된 후의 픽셀값에서 조사전의 픽셀값을 뺀 수치로 새로운 영상을 제작한다. 이 영상에 적절한 임계치(Threshold)를 기준으로 필터를 적용한 후 임계값 이상의 픽셀만 선택한 이진영상이 제작되었다.

본 연구에서는 점, 십자, 선형의 레이저빔이 시험되었는데 이들의 좌표를 추출하는 방법은 아래와 같다.

### 4-1. 점형 레이저빔

점타겟의 일반적인 좌표추출 방법은 Wong and Wei-Hsin(1986)이 제시한 일반적인 평균치 방법을 채택하였다.

$$x = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m j \cdot g_{ij} \quad y = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m i \cdot g_{ij} \quad M = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m g_{ij} \text{ ----- } \textcircled{4}$$

위의 수식에서  $x$ 와  $y$ 는 화소좌표로 표시된 타겟의 중심이며  $g_{ij}$ 는  $i$ 행과  $j$ 열의 화소값으로 이진화 일에서는 0 혹은 1의 숫자를 의미한다.

### 4-2. 십자형 레이저빔

십자형 레이저빔의 중심을 추출하는 방법은 빔이 조사된 첫 번째 영상에서 십자빔의 중심을 입력하는 과정에서 시작된다. 좌우측 영상에 시작점이 입력되면 30x30 화소로 형성된 화소창(window)의 중심을 입력된 십자빔의 중심에 설정하고 창 내부 화소값을 횡과 열로 나누어 아래의 계산을 수행한다.

$$x = \sum_{i=1}^{30} g_{ij} \quad , \quad y = \sum_{j=1}^{30} g_{ij} \text{ ----- } \textcircled{5}$$

계산치의 결과가 일정 임계치(본 연구에서는 20을 임계치로 설정하였음) 이상일 경우는 그 행이나 열의 화소값을 선택하여(그림3 A, B), (그림3 C, D)와 같이 좌우측 영상이 다시 설정되었다. 이 과정에서 열과 횡선분의 중심을 취하여 중심 화소값을 설정하였다. 첫 번째의 중심 화소값이 계산되면 레이저 주사장치의 이동방향으로 창을 이동시켜 위의 과정을 반복하며 두 번째 중심좌표를 계산하는데 이 계산결과에 의해 창의 다음 이동방향이 설정된다.

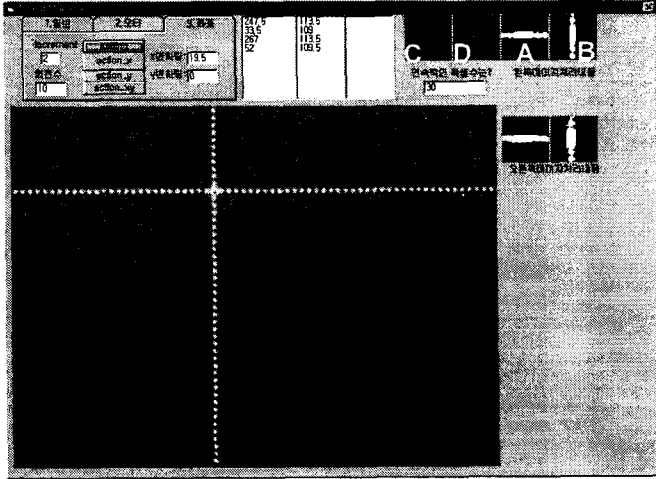


그림3. 십자형 레이저빔의 중심좌표 추출과정. 사진의 좌측하단부 이미지창은 평면의 모눈종이에 주사된 십자형 레이저빔의 형상이다. 우측 상단의 작은 이미지 창들은 영상처리에 의해 십자형빔의 중심을 찾는 과정을 표현한다.

- A. 임계값 이상의 횡방향 픽셀값
- B. 임계값 이상의 종방향 픽셀값
- C. 좌측영상의 십자중심
- D. 우측영상의 십자중심

### 4-3. 선형 레이저빔

선형레이저빔이 면의 형상을 갖는 물체에 주사되었을 때는 그림4와 같이 선형의 굴곡을 보이게 된다. 이러한 굴곡점을 찾는 것이 영상처리의 목적이다. 선의 형태를 이진영상으로 단순화 하는 과정은 위에서와 동일하다. 이러한 과정으로 그림4B와 같은 선분이 선택되면 영상에서 표현된 선의 두께를 단일화소로 변경하는 박선과정(Thinning)을 수행한다. 다양한 박선방법이 연구되어 있으나 계산시간을 효율적으로 하기 위하여 박선과정은 단순히 열방향 화소값 중 일정영역의 두께를 갖는 부분을 선택한 후, 이 영역의 중심을 취하는 방법을 선택하였다. 박선화된 영상(그림4C)에서 선분의 굴곡점을 찾는 방법은 아래와 같은 과정으로 수행된다.

1. 화소값이 존재하는 위치를 중심으로 5x5 화소창을 설정한다.
2. 창내부에 위치하면서 선의 일부를 나타내는(화소의 값이 1인) 화소좌표를 취하여 최소자승법으로 선분의 기울기를 구하여 창의 중심화소값을 대치한다.
3. 기울기값으로 치환된 선분의 형태에서 기울기값이 갑자기 변화된 위치를 찾는다.
4. 기울기의 변화가 인지된 위치로부터 적절한 간격을 두고 선분의 화소좌표들을 선택하여 다시 최소자승법으로 분절된 선분의 방정식을 구한다.
5. 구해진 선분방정식의 교점을 계산한다.

이렇게 계산된 교점의 위치들은 불연속면의 경계부로서 좌우 영상에서 계산된 각 교점의 3차원 좌표가 3개 이상일 경우, 최소자승법 계산식(Koike et al, 1998)과 벡터를 주향과 경사로 변환하는 수식(Priest, 1987)을 이용하여 면의 배열을 계산하게 된다.

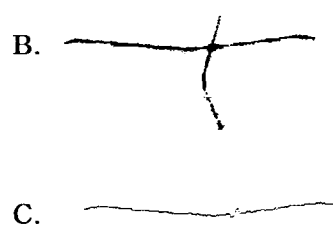
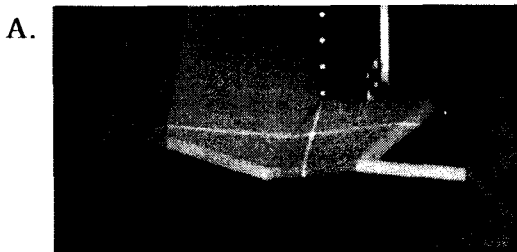


그림4. 선형레이저빔을 이용한 측량.

- A. 측량시험을 위해 제작된 모형                      B. 영상처리에 의해 인식된 레이저빔의 궤적  
 C. 수평방향의 빔의 궤적을 박선화 한 결과

### 5. 오차

본 연구에서 활용한 폐쇄회로 카메라와 레이저빔에 의한 측량의 오차를 시험하기 위하여 그림3과 같이 십자형 빔을 평면에 주사하고 모터를 이용하여 수평으로 30개의 점을 5선에 걸쳐 이동하면서 측정의 좌표를 측량하였다. 측량에 활용된 카메라의 초점거리는 16mm 이며 카메라 사이의 기선거리는 200mm 이며 측량거리는 170cm 이다. 측량의 결과는 그림5와 같다.

측량에 의해 계산된 거리는  $178.9 \pm 0.7\text{mm}$ 로서 실 거리와는 약 8.9cm의 차이를 보였다. 이는 카메라 CCD 영역의 크기(4.88 x 3.66 mm)나 기선거리의 미세한 오차로서 수식①의 보정계수  $k$ 에 의해 보정될 수 있는 오차이다. 그러나 약 7mm의 오차는 영상처리과정에서 좌우 영상의 정확한 픽셀좌표를 판독하지 못하여 발생하는 측량오차이다. 시험에 사용된 소자는 640x480개의 화소를 갖고 있으며 소자영역의 크기는 4.88 x 3.66 mm이므로, 수식①에 의한 계산결과, 실험환경에서 1화소의 측량오차는 약 6.5mm의 거리측량오차를 유발시킨다. 그러므로 영상처리과정에서 적어도 1픽셀 정도의 측량오차를 유발시킨다는 것이 조사되었다. 한편 그림5B-C에서와 같이 수평과 수직방향의 좌표(x,y좌표)는 상대적으로 미세한 오차를 보이고 있다.

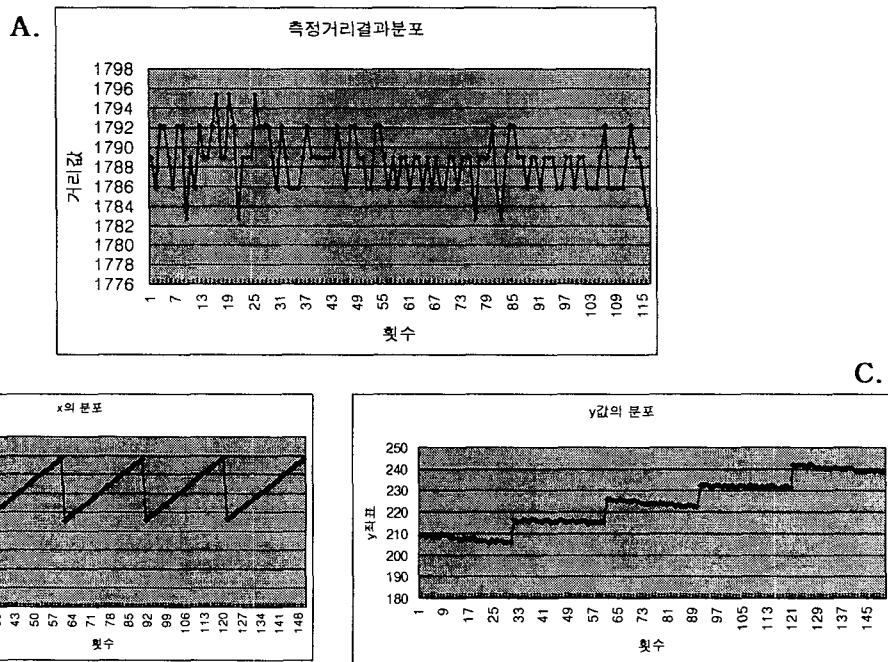


그림5. 측량오차의 실험을 위한 십자타겟의 거리측량 결과. 원문의 내용을 참고.

- A. 거리의 측량결과.                      B. x좌표의 측량결과.                      C. y좌표의 측량결과.

### 5. 현장적용

고안된 장치와 앞에서 정리한 원리를 응용하여 불연속면의 배열을 측량하기 위하여 배재대학교에 위치한 사면의 일부(그림6)를 대상으로 3차원 모델형상을 구현하였다. 이 실험에서는 레이저빔의 종류에 따른 분석결과를 비교하기 위하여 각기 레이저 거리측정기(DISTO), 점, 십자형의 빔을 타겟으로 실험

하였다. 선형의 빔은 현장적용 이전에 선분의 분절과 교차점의 위치가 파악되는지를 시험하기 위하여 그림4A와 같은 모형을 제작하여 빔을 주사한 후 빔의 위치와 교차점 파악을 수행하였다. 점과 십자형 타겟을 이용한 실험결과와 레이저 거리측정기를 이용한 실험결과는 그림7에 요약되어 있다.

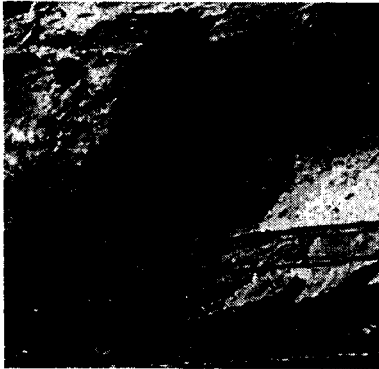


그림6. 시험에 활용된 사면

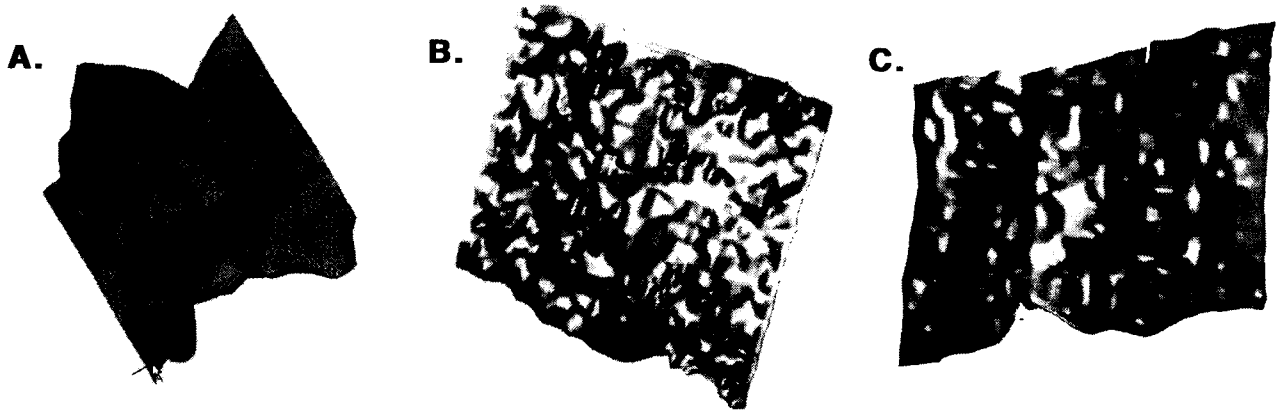


그림7. 측량결과. A: 레이저 거리측정기 B: 점타겟 C: 십자타겟

## 6. 토의 및 결론

빔의 종류에 따라서 모델형상의 결과는 큰 차이를 보였다. 그러나 대부분의 결과가 사면의 개략적인 형태를 반영하고 있어서 영상처리에 의한 사면형상의 복원은 가능한 것으로 연구되었다. 점의 타겟에 의해 측량된 사면의 형상은 매우 큰 오차를 보이고 있으며, 십자타겟에 의해 형성된 모델형상이 실물에 더 가까운 결과를 얻었다. 이는 기존의 연구결과에서 지적되었듯이 원형타겟의 중심좌표를 정확히 획득하는 과정에 많은 문제를 갖고 있음으로 사료된다(Trinder, 1989). 한편 레이저 거리측정기에 의한 모델의 결과 역시 실물에 비교적 가까운 형태로 측량되었다. 그러나 거리측정기를 실시간으로 가동하는데는 지나치게 많은 시간이 소요되어 (위의 예제를 측량하는데 최소 16시간 소요), 현실성 있는 방안이 되지 못하였다. 한편 점이나 십자형 타겟에 의한 측량은 거리측정기에 비해 적은 시간이 소요되었으나 (위의 예제 측량에 최소 5시간 소요), 이 역시 실시간 측량의 효율성을 갖지 못하였다.

선형의 빔에 의한 측량의 방법은 실 사면의 모델에 적용되지는 못하였다. 그러나 선분의 궤적을 추적하는 과정에서 다양한 영상처리 기법을 시험할 수 있는 계기를 마련하여 주었으며 선분의 교점에 의한 면의 주향과 경사를 측정하는 방법은 처리시간을 획기적으로 단축시켜 줄 뿐더러 선분의 교점을 구하는 픽셀좌표 추출법이 단순 점이나 십자형의 타겟을 이용할 때 보다 효율적이라는 결론을 얻었다.

실용화에 이를 수 있는 만족한 오차한계의 실험결과는 유추하지 못하였다. 그러므로 모형의 주향과 경사를 지구좌표계로 변환하는 과정이 적용된 최종 결과를 현 실험단계에서는 유도하지 못하였다. 전

기된 변환과정은 CAD로 작성한 가상의 면구조를 임의로 회전하여 회전된 면구조에서 원래의 면구조를 복원하는 시험으로 그 정당성을 시험하였다. 이 실험결과는 본 논문의 범위 밖의 내용으로 자세한 기재를 생략하였다.

오차의 문제성은 현존하나, 모든 방법에서 실물의 윤곽을 모델화 하는데는 문제가 없어서 측량 방법의 적합성은 충분히 인정되었다. 기존의 사진측량에서는 수 $\mu$ m의 정확도를 감안한 모델결과를 도출해내고 있다. 이에 반해 영상측량에서는 측량의 최소오차가 화소의 크기에 좌우되는 관계로 상대적으로 오차를 많이 발생시키며 영상처리방법에 따른 측정결과에도 큰 차이를 보이고 있으며 실시간 측량을 위한 다양한 노력을 필요로 하고있다. 그러나 최근에 화상도가 높은 카메라들이 개발되고 있으며 레이저빔 역시 선명도가 높은 제품들이 개발되고 있으므로 이들을 활용하고 영상처리 기법을 최적화 할 경우 측량의 오차와 소요시간을 획기적으로 줄일 수 있어 실용성 있는 측정기를 개발할 수 있음을 확인하여 주었다.

## 참고문헌

1. 유복모, 박운영, 양인태(1983), "사진측정기법을 이용한 사면의 경사와 주향결정에 관한 이론적 고찰", 대한토목학회논문집, 제 3권, 제 3호, pp.129~135.
2. 한승희, 강준목(1995). "3차원 측량을 위한 Digital Image의 영상좌표 획득에 관한 연구", 대한토목학회논문집, 제 15권, 제 6호, pp.1721~1730.
3. 강준목, 오원진, 배연성, 주영은(1997), "인체형상 모니터링을 위한 수치근접사진측량의 정확도 분석", 1997년도 대한토목학회 학술발표회 논문집(III), pp.135~138.
4. 한승희(1999), "디지털 타겟의 중심측정을 위한 도심측정방법과 외곽선 추출·타원 피팅방법의 정확도 분석", 대한토목학회논문집, 제 19권, 제 III-3호, pp.433-444.
5. 유환희, 조해용, 김성우(1997), "지상기준점 자료가 필요없는 Camera-Theodolite 기법", 1997년도 대한토목학회 학술발표회 논문집(III), pp.23~26.
6. 이재기, 이현직, 이재동, 박경식(1997), "색상분리기법을 이용한 영상의 공액점 추출", 1997년도 대한토목학회 학술발표회 논문집(III), pp.77~80.
7. 조규진, 심중헌(1997), "근접사진측량에 의한 교각변형측정에 관한 연구", 1997년도 대한토목학회 학술발표회 논문집(III), pp.127~130.
8. 안기원, 이효성, 서두천, 신석효(1997), "수치영상처리기법에 의한 비측정용 디지털 카메라의 3차원 측정정확도 파악" 1997년도 대한토목학회 학술발표회 논문집(III), pp.167~170
9. Grade, A.A.(1992), "Close-range geological photogrammetry studies: field and laboratory procedures with examples from prograde granulite facies", Rapp. Gr ø nlands geol.Unders. 156, 5 3~62
10. Mikhail, E. M., M. L., Akey and O. R., Mitchell(1984), Detection and Sub-pixel Location of Photogrammetric Target in Digital Image Photogrammetria, Vol. 39, pp. 63~83.
11. Kam W.Wong. Wei-Hsin Ho.(1986), "Close-Range Mapping with a Solid State Camera", P.E. & R.S. pp. 67~74.
12. Trinder, J. C.(1989), "Precision of digital target location", P.E. & R.S. Vol. 55, No. 6, pp. 67~74.
13. Trinder J. C.. J. Jansa. Y.huang.(1995), "An Assessment of the Precision and Accuracy of Methods of Digital Target Location", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 20, No. 2, pp. 12~20.
14. Stephen D. Priest(1993), Discontinuity Analysis for Rock Engineering