

입체사진측량기법의 암반절리조사에 대한 적용성 연구

한정훈¹⁾, 송재준²⁾*

Study on Applicability of Stereophotogrammetry to Rock Joint Survey

Jeong-Hun Han and Jae-Joon Song

Abstract Stereophotogrammetry is a method to extract information of an interested area by constructing a stereo-image from two or more photos. In this study, the stereophotogrammetry was adopted to obtain the joint orientation and trace length from a sampling window and its measurements were compared with the result by a clinocompass and measuring tape to evaluate the applicability of the stereophotogrammetry to rock joint survey. A commercial stereophotogrammetry program, ShapeMetriX 3D, was used for this purpose. Firstly, the accuracy of the measuring method using ShpaeMetrix 3D was evaluated by a model test. Secondly, joint orientations on a rock slope and tunnel were obtained by using ShapeMetriX 3D and compared with the measurement by a clinocompass. Finally, the effect of base-depth ratio in photographing was evaluated by comparing images with various base-depth ratios, and the usefulness of closed-up photographing on a rock exposure to increase the measurement accuracy was tested. The dip and dip direction of each model plane obtained by ShapeMetriX 3D showed an error ranged between -5° and 5° on the basis of the results by the measuring tape. Base-depth ratio proved not to influence the analysis result by ShapeMetriX 3D if all the images were taken without any hidden area. The close-up photographing turned out useful to obtain the detailed images and therefore precise result when ShapeMetriX 3D was adopted.

Key words Stereophotogrammetry, Rock joint survey, Base-depth ratio, Close-up photographing

초 록 입체사진측량기법이란 대상면에 대하여 두 장 이상의 스테레오 영상을 취득하고 이 영상을 해석함으로써 대상면에 대한 정보를 추출하는 방법이다. 본 연구에서는 기존의 수작업에 의한 암반절리조사 방법에 대한 대안으로서, 입체사진측량기법을 암반절리조사에 적용하여 절리 정보를 추출하였고 그 결과를 비교, 분석함으로써 암반절리조사에의 적용성을 평가하였다. 검증은 실내 모형 시험을 통한 검증과 실제 암반에 대한 검증을 통하여 수행되었다. 현장 적용시 기선거리비가 해석 결과에 미치는 영향을 평가하기 위한 촬영 및 분석을 수행하였고, 해석 자료의 정확도를 향상시키기 위하여 절리 대상면을 분할 확대 촬영하였다. ShapeMetriX 3D 프로그램을 이용한 실내 모형 시험 결과, 3차원 공간 좌표의 실측치를 이용한 결과와 비교하여 경사각 및 경사방향에 대하여 모두 $\pm 5^\circ$ 이내의 편차를 보임을 확인하였다. 또한 영상 취득시 폐색 구간이 발생하지 않도록 촬영한다면, 기선거리비가 해석 결과에 미치는 영향이 크지 않음을 알 수 있었다. 따라서 분할 확대 촬영을 통한 취득 자료의 분석은 효율적인 방법으로 판단된다.

핵심어 입체사진측량, 암반절리조사, 기선거리비, 분할 확대 촬영

1. 서 론

암반이란 수많은 불연속면을 포함하고 있는 불연속체

로서 암반 전체의 거동은 이러한 불연속면이 가지는 물리적, 기하학적 특성에 의해 크게 영향을 받는다. 절리의 기하 특성이란 암반내 존재하는 절리의 방향성 및 크기 등을 이르는 것으로서, 지금까지 절리의 방향과 길이를 모두 측정하기 위해서는 주로 노두에서의 수작업에 의한 조사를 수행하여 왔으나, 조사시간의 비효율성, 조사자의 숙련도에 따른 조사결과의 상이성 등의 문제가 꾸준히 제기되어 왔다.

¹⁾ 서울대학교 지구환경시스템공학부 석사

²⁾ 서울대학교 에너지시스템공학부 교수

* 교신저자 : songjj@snu.ac.kr

접수일 : 2007년 4월 9일

심사 완료일 : 2007년 4월 23일

한편, 1800년대 Dapuerre와 Niepce에 의해 사진술이 개발된 이후 20세기에 이르러 사진을 수학적 해석하는 해석적 사진측량기법에 대한 연구가 본격적으로 이루어지기 시작하였다. 암반 절리 조사에 있어서도 종래의 수작업에 의한 조사법을 대신하기 위하여 사진측량을 이용한 절리 조사법이 연구되기 시작하였는데, Hagan(1980)은 입체사진측량기법을 이용한 절리조사의 적용성을 연구하였고, Franklin(1988), Tsoutrelis(1990) 등은 타블렛(tablet)을 이용한 영상 수치화 과정을 통해 절리 분석을 연구하였으며, Reid(2000) 등은 화상처리 기법(image processing)을 이용하여 joint trace를 추출하는 기법을 제시하였다. 국내의 경우, 유복모(1983) 등이 평행입체사진측량 기법을 통한 사면의 경사 및 경사 방향 분석 원리에 대하여 연구한 바 있고, 류동우, 이유리(2000)는 화상처리기법(image processing)과 직각수평촬영기법을 이용한 절리 조사 기법을 개발하였으며, 김종훈(2002)은 수렴다중촬영기법을 이용한 절리 분석 시스템을 개발하였다. 이러한 지상사진측량 기법은 측량의 한 분야로서 최근 정확도 및 적용성을 높이기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으나, 아직까지 암반 절리 조사 분야에서의 활용도는 낮은 실정이다.

본 연구에서는 최근 관심이 모아지고 있는 비측정용 카메라를 이용한 암반 절리 조사에 있어서 지상사진측량 기법의 적용 및 활용 가능성을 평가하였다. 이를 위해 3GSM社에서 절리 분석을 위해 개발한 ShapeMetricX 3D system을 이용하였다. 이는 카메라를 통해 취득된 좌우 스테레오 영상을 이용하여 정합과정을 거쳐 점군(point cloud)에 기초한 3차원 영상을 생성하고 후에 작업자가 분석을 실시하는 프로그램이며, 관심 대상체를 3차원 영상으로 생성하여 절리면을 직접 확인하며 분석을 할 수 있다는 장점이 있다.

2. ShapeMetricX 3D system의 구성 및 원리

본 연구에서는 3GSM社에서 개발한 ShapeMetricX 3D system을 이용하여 영상 취득 및 분석을 실시하였다. 이 시스템은 크게 Camera, Lens, Range Pole, Analysis program으로 구성되어 있다. Fig. 1은 ShapeMetricX 3D system의 구성을 나타낸다.

대상지가 선정되면 촬영대상 한 쪽에 range pole을 설치하고, 촬영 대상에 대하여 좌우 스테레오 영상을 취득한다. 지상 기준점을 필요로 하지 않으나, 필요에 따라 지상 기준점을 설치 후 촬영할 수도 있다. 또한 영상 취득시 촬영기선(base)을 따로 필요로 하지 않으며 자유롭게 촬영 가능하다. Range pole은 scale bar의 역할

을 하게 되는데, 각 원형판의 중심 거리를 정의해주면 이를 기준으로 대상면의 길이를 계산하게 된다.

카메라는 Nikon D200, 렌즈는 Nikon AF-S DX 18-70 mm f/3.5-4.5G IF-ED을 사용하였다. 3GSM社에서 카메라 및 렌즈에 대하여 검정 과정을 수행한 후 분석 정보를 제공하였는데, 여기에는 본 연구에 사용된 카메라와 렌즈의 모든 줌 및 초점 거리 등에 대한 보정 정보가 포함되어 있으며, 이 정보를 분석 프로그램에서 불러들여 사용할 경우 자동으로 렌즈 왜곡에 대한 좌표 보정이 이루어진다.

Table 1, Table 2는 각각 카메라 및 렌즈의 제원을 나타낸다. 본 연구에 사용된 Nikon D200 카메라는 약 천



Fig. 1. ShapeMetricX 3D system 구성

Table 1. Specification of Nikon D200

| | |
|---------------------|--|
| Type of Camera | Single-lens reflex digital camera |
| Effective Pixels | 10.2 million |
| Image Sensor | RGB CCD, 23.6×15.8 mm, total pixels: 10.92 million |
| Image Size (pixels) | 3,872×2,592[L], 2,896×1,944 [M], 1,936×1,296 [S] |
| Shutter Speed | 30 to 1/8,000 sec. in steps of 1/3, 1/2 |
| Picture Angle | The equivalent in 35 mm format is approx. 1.5 times lens focal length. |

Table 2. Specification of Nikon AF-S DX 18-70 mm (f/3.5-4.5G IF-ED)

| | |
|----------------------------|--|
| Focal Length | 18-70 mm |
| F-Number | 3.5-4.5 |
| Maximum Aperture | f/3.5-4.5 |
| Minimum Aperture | f/22-36 |
| Picture Angle | 76°-22°50' |
| Minimum Focus Range | 0.38 m |
| Maximum Reproduction Ratio | 1/6.2 (0.16) |
| Filter Attachment Size | 67 mm |
| Lens Construction | <ul style="list-style-type: none"> • 15 elements in 13 groups • Three ED glass elements • One aspherical lens element |

만 화소수를 가지는 디지털 방식의 일안반사식 카메라이며, 연구에는 최대 크기(L)의 영상을 이용하였다. 렌즈는 일반적으로 사용되는 표준 줌렌즈로서 초점거리 18~70 mm, 화각 76°~22°50'의 범위를 가진다.

3. 실험실 모형을 이용한 적용성 평가

본 연구에 사용된 ShapeMetriX 3D system을 현장에 적용하기에 앞서, 실내 모형을 대상으로 적용성을 평가하였다. 실내 모형 시험에 사용된 대상은 Fig. 2와 같이 방향이 서로 다른 7개의 면으로 이루어져 있다. 각 면에는 레이저 조각기를 이용하여 격자망이 새겨 놓았으므로, 이를 통해 임의점의 좌표를 읽을 수 있다.

실내 모형 시험에서는 클리노콤파스를 이용한 측정 결과와 3차원 공간 좌표를 이용하여 계산한 결과, 그리고 ShapeMetriX 3D를 통한 모델링 결과를 비교 검토하였다.

3.1 클리노콤파스를 이용한 측정

클리노콤파스를 이용하여 각 면에 대하여 총 10회 측정한 후 평균을 구하였으며 결과를 Table 3에 나타내었다.

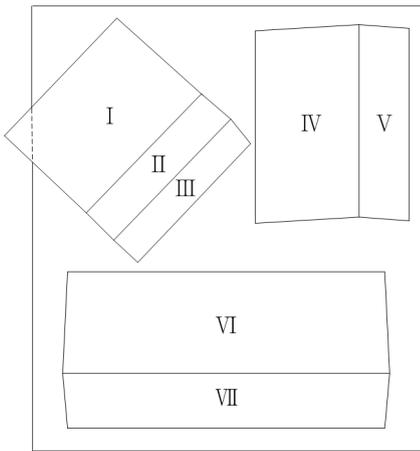
3.2 3D 좌표를 이용한 측정

다음으로 각 면에 대하여 8점의 좌표값을 얻은 후,

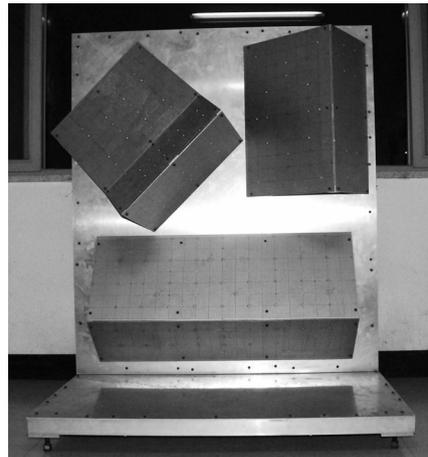
행렬식을 이용한 최소제곱법에 의해 각 면의 경사방향 및 경사를 계산하였다. 각 점의 좌표는 직접 측정에 의한 방법과 EOS 社의 PhotoModeler Pro 5.0을 이용한 방법 각각을 통하여 좌표를 추출하였다. 두 방법 모두 실험실 모형의 좌측 하단을 원점으로 적용하였다. PhotoModeler Pro 5.0 이용시, 카메라는 ShapeMetriX 3D system에 사용되는 Nikon D200을 이용하였으며, 검정판을 이용하여 카메라 검정 과정을 수행한 후, 실험실 모형을 모델링한 결과에서 실험실 모형의 좌측 하단을 원점으로 하여 각 점의 좌표를 추출하였다.

3차원 공간 좌표를 이용한 해석 단계는 다음과 같다.

- Step 1. $Ax_i + By_i + Cz_i = D$ 의 관측방정식 수립
- Step 2. 식의 양변을 D 로 나누어 $A'x_i + B'y_i + C'z_i = 1$ 로 변환
- Step 3. 측정된 8개의 (x_i, y_i, z_i) 의 값을 이용하여 (A', B', C') 의 값 계산
- Step 4. (A', B', C') 을 정규화하여 각 축에 대한 방향 코사인 계산
- Step 5. 계산된 평면의 법선벡터를 이용하여 경사방향, 경사 계산
- Step 6. 오차 분석을 통한 정확도 검증



(a) A sketch of test model



(b) A photo of test model

Fig. 2. Front view of the test model

Table 3. Dip and dip direction of the model planes measured by using a clinocompass (mean value of 10 measurements)

| No. of Plane | I | II | III | IV | V | VI | VII |
|-------------------|-----|-----|-----|-----|----|----|-----|
| Dip Direction (°) | 111 | 128 | 205 | 132 | 32 | 92 | 271 |
| Dip (°) | 71 | 58 | 51 | 90 | 90 | 58 | 45 |

결과는 Table 4, Table 5와 같다. 실내 모형의 가로축이 자북과 평행하도록 하였는데 이를 통하여 Table 4와 Table 5의 결과에서 보듯이, IV번, V번 면에 대하여 경사각이 90° 근처의 값을 보임을 알 수 있으며, VI번, VII번 면에 대하여 경사방향이 각각 90°, 270° 근처의 값을 보임을 쉽게 알 수 있다. 최소제곱 수행 후 정확도 분석을 위하여 잔차항 V 를 이용하여 잔차 분석을 수행하였다. 오차의 제곱이 최소가 된다는 최소제곱법을 잔차를 이용하여 행렬식으로 표현하면 $V^T V$ 로 표현되며 표준편차 S 는 다음 식으로 계산된다.

$$S = \sqrt{\frac{V^T V}{r}}$$

여기서 r 은 자유도를 나타내며, Table 4와 Table 5에서의 표준편차는 각 면이 해당 경사방향과 경사각을 가지는 면에 대하여 해당 표준편차 범위 내에 존재함을 의미한다.

3.3 ShapeMetriX 3D system을 이용한 측정

카메라 노출점으로부터 대상체까지의 거리는 3.0 m

Table 4. Dip and dip direction of the model planes determined from 3D coordinates by manual survey

| No. of Plane | Dip Direction (°) | Dip (°) | Standard Deviation |
|--------------|-------------------|---------|----------------------------|
| I | 109.8 | 71.3 | $\pm 3.14 \times 10^{-08}$ |
| II | 127.1 | 58.9 | $\pm 6.25 \times 10^{-08}$ |
| III | 203.3 | 47.5 | $\pm 3.62 \times 10^{-06}$ |
| IV | 130 | 89.9 | $\pm 7.87 \times 10^{-07}$ |
| V | 30 | 89.9 | $\pm 4.68 \times 10^{-07}$ |
| VI | 89.9 | 59.9 | $\pm 3.22 \times 10^{-08}$ |
| VII | 269.9 | 44.9 | $\pm 4.71 \times 10^{-06}$ |

Table 5. Dip and dip direction of the model planes determined from 3D coordinates by PhotoModeler Pro 5.0

| No. of Plane | Dip irection (°) | Dip (°) | Standard Deviation |
|--------------|------------------|---------|----------------------------|
| I | 110.5 | 71.8 | $\pm 8.40 \times 10^{-04}$ |
| II | 127.1 | 59.6 | $\pm 5.46 \times 10^{-04}$ |
| III | 204.0 | 47.9 | $\pm 2.05 \times 10^{-03}$ |
| IV | 131.5 | 89.8 | $\pm 6.79 \times 10^{-04}$ |
| V | 32.5 | 89.7 | $\pm 5.58 \times 10^{-04}$ |
| VI | 90.3 | 59.6 | $\pm 1.83 \times 10^{-03}$ |
| VII | 271.3 | 44.5 | $\pm 8.94 \times 10^{-03}$ |

를 유지하였으며, 기선거리비는 0.15로 하였다. 결과는 Table 6과 같다.

3.4 결과 분석

출자와 각도기를 이용하여 실험실 모형의 각 면에 대하여 8개의 점을 실측하였다. 이 실측치를 이용하여 최소제곱 수행을 통하여 각 면 정보를 유도하였으며, 이를 기준으로 하여 각 방법에 의한 측정치를 비교하였다. Table 7과 Table 8은 각 방법을 통해 얻어진 결과와 실측치를 통하여 유도된 정보를 기준으로 하여 각 방법에 대한 자료의 상대 오차를 나타낸 것이다. PhotoModeler를 통하여 추출된 자료는 경사방향의 경우 최대 $\pm 2^\circ$ 내외, 경사의 경우 $\pm 1^\circ$ 내외의 편차를 보였으며, 클리노콤파스를 이용하여 측정된 자료는 경사방향의 경우 최대

Table 6. Dip and dip direction of the model planes determined by ShapeMetriX 3D

| No. of Plane | I | II | III | IV | V | VI | VII |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|
| Dip Direction (°) | 109.5 | 131.7 | 200.3 | 130.9 | 26.1 | 88.6 | 268.2 |
| Dip (°) | 69.2 | 53.8 | 47.3 | 85.2 | 85.2 | 55.4 | 44.9 |

Table 7. Comparison of dip direction determined by 4 kinds of methods (unit: degree)

| Measurement/relative error (based on mesuring tape) | | | |
|---|--------------|--------------|------------|
| Measuring tape | PhotoModeler | Clinocompass | SMX |
| 109.8/0 | 110.5/-0.7 | 111/-1.2 | 109.5/0.3 |
| 127.1/0 | 127.1/0 | 128/-0.9 | 131.7/-4.6 |
| 203.3/0 | 204.0/-0.7 | 205/-1.7 | 200.3/3 |
| 130/0 | 131.5/-1.5 | 132/-2 | 130.9/-0.9 |
| 30/0 | 32.5/-2.5 | 32/-2 | 26.1/3.9 |
| 89.9/0 | 90.3/-0.4 | 92/-2.1 | 88.6/1.3 |
| 269.9/0 | 271.3/-1.4 | 271/-1.1 | 268.2/1.7 |

Table 8. Comparison of dip determined by 4 kinds of methods (unit: degree)

| Measurement/relative error (based on mesuring tape) | | | |
|---|--------------|--------------|----------|
| Measuring tape | PhotoModeler | Clinocompass | SMX |
| 71.3/0 | 71.8/-0.5 | 71/0.3 | 69.2/2.1 |
| 58.9/0 | 59.6/-0.7 | 58/0.9 | 53.8/5.1 |
| 47.5/0 | 47.9/-0.4 | 51/-3.5 | 47.3/0.2 |
| 89.9/0 | 89.8/0.1 | 90/-0.1 | 85.2/4.7 |
| 89.9/0 | 89.7/0.2 | 90/-0.1 | 85.2/4.7 |
| 59.9/0 | 59.6/0.3 | 58/1.9 | 55.4/4.5 |
| 44.9/0 | 44.5/0.4 | 45/-0.1 | 44.9/0 |

$\pm 2^\circ$ 내외, 경사의 경우 $\pm 3^\circ$ 내외의 편차를 보였다. 본 연구에 사용된 ShapeMetriX 3D 프로그램의 경우 경사 방향 최대 $\pm 4^\circ$ 내외, 경사 $\pm 5^\circ$ 내외의 편차를 보였다. PhotoModeler를 이용하는 경우, 대상면에 대하여 사용자가 동일점을 인식시킴으로써 3차원 영상을 생성하게 되며 이 영상으로부터 3차원 공간 좌표를 추출하게 된다. 그러나 ShapeMetriX 3D 프로그램의 경우, 사용자가 취득된 두 영상에 대하여 기본적으로 동일 영역을 지정하여 주면 이로부터 영역기반 정합법에 기초하여 정합을 실시하게 된다. 따라서 사용자가 동일 영역을 지정하여 주는 과정이나 실제 정합이 이루어지는 과정에서 이미 약간의 오차를 포함하고 있다고 할 수 있다. 따라서 Table 7과 Table 8의 결과에서 볼 수 있듯이 ShapeMetriX 3D를 이용한 해석 자료의 결과가 PhotoModeler를 이용하여 얻어진 해석 자료에 비하여 오차가 다소 크게 나타나는 것으로 판단된다.

본 연구에서는 실내 모형 시험 부분에 사용한 Eos 社의 소프트웨어인 PhotoModeler Pro 5.0에 대하여 Fig. 3과 같은 검정판을 이용하여 자가 검정을 수행하였다.

광축(optical axis)이란 영상 취득시 대상에서 반사된 빛이 카메라를 통하여 입사되는 직선을 말한다. ShapeMetriX 3D를 이용하여 실내 모형 시험을 수행함에 있어 좌우 두 개의 영상을 취득하였는데, 좌영상의 광축과 우영상의 광축이 이루는 각, 즉 광축의 수렴각이 큰 경우 영상 정합이 불가능한 경우가 발생하였다. 물체는 바라보는 방향에 따라서 그 형상이 조금씩 다르게 보이게 되는데, 이러한 이유로 광축의 수렴각이 매우 큰 경우 영상 정합 과정에서 좌우 스테레오 영상에 나타나는 대상체의 시각적인 차이로 인하여 공역점을 찾지 못하게 된 것으로

판단된다. Fig. 4에 이러한 경우에 대한 예시를 보였다.

4. 암반 노출면에서의 적용성 평가

이 장에서는 ShapeMetriX 3D system을 이용하여 현장 절리 조사를 수행한 결과와 클리노콤포스를 이용한 일반적인 조사창 조사의 결과를 비교함으로써 ShapeMetriX 3D system의 실제 암반 절리 조사에 대한 적용성을 고찰해 보았다. 대상지는 대전 한국원자력연구소 내 방사성 폐기물 처분 실증 시험 터널과 서울대학교 내 순환도로변 노출사면의 두 곳을 선정하였다. 실내 모형 시험을 통하여 대상체에 대한 카메라 광축의 수렴각이 큰 경우 정합이 불가능한 경우가 발생함을 확인하였다. 따라서 이러한 현상을 피하기 위하여, 영상 정합시 중복 영역이 확대될 수 있도록 대상 절리면에 대하여 대표 방향을 정하고 이에 대하여 카메라 광축이 수평이 되도록 촬영하였다.

4.1 기선거리비(base-depth ratio) 영향 평가

기선거리비가 영상 해석에 미치는 영향을 평가하기 위하여 Fig. 5와 같이 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3으로 기선거리비를 변화시켜가며 영상을 취득하였다. 기선(base)은 좌우 스테레오 영상 취득시 카메라의 수평 거리이며, 거리(depth)는 카메라 노출점으로부터 대상면까지의 평균 거리를 의미한다.

Fig. 6은 프로그램을 통해 생성된 3차원 영상을 보여 주는데, 영상 정합이 얼마나 잘 이루어졌는지 알아보기 위하여 점군(point cloud)으로 표현하였다. 영상은 대전 한국원자력연구소 내 방사성 폐기물 처분 실증 시험 터

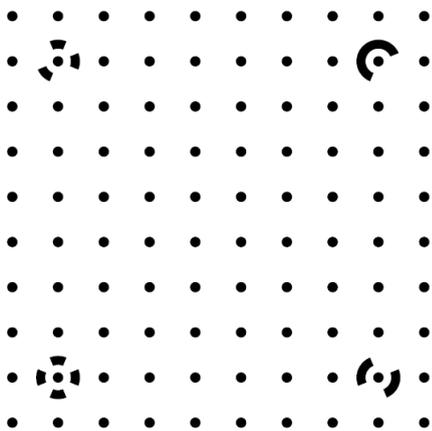


Fig. 3. Camera calibration grid

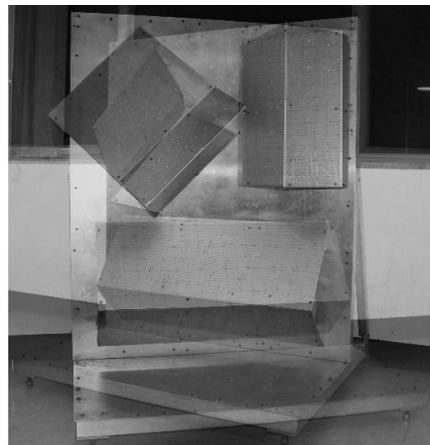


Fig. 4. Case of failed matching

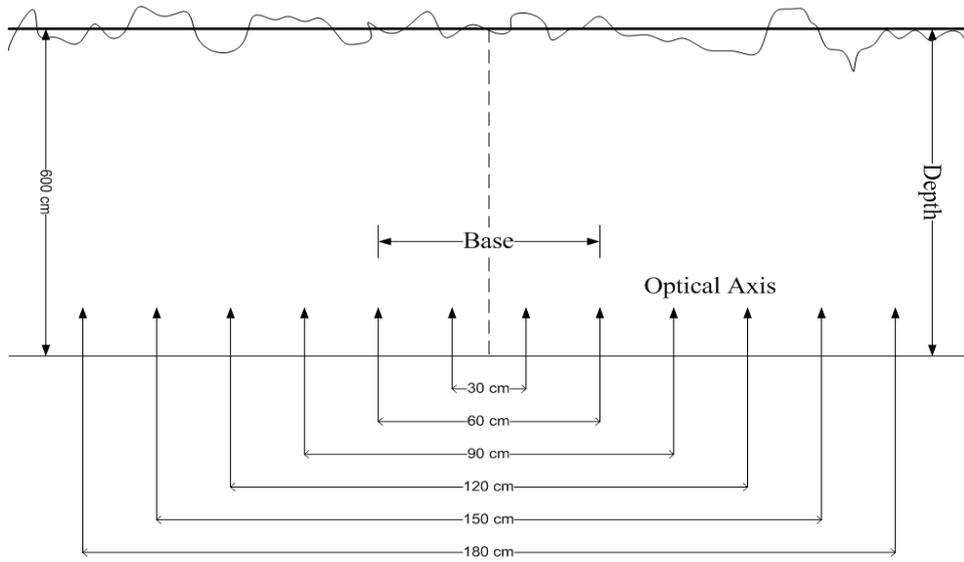


Fig. 5. Stereophotographing conditions with various base-depth ratios

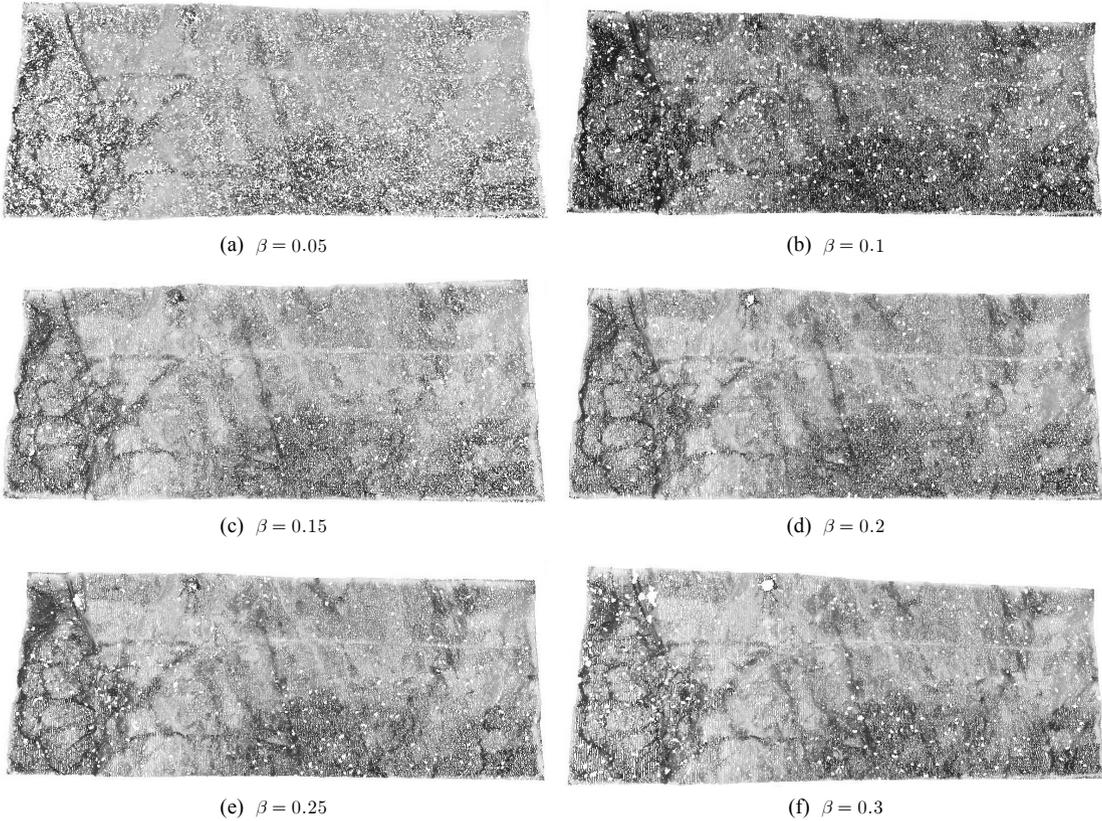


Fig. 6. Point cloud image

널 영상이며, 기선거리비를 β 로 표시하였다.

Fig. 6에서 보듯이 기선거리비와 무관하게 모든 영상에 대하여 전반적으로 점군이 고르게 생성되었음을 알 수 있는데, 이는 평행 촬영으로 인해 영상 정합 중복 영역이 확대되어 대부분의 영상에서 비슷한 양상을 보인 것으로 판단된다.

Fig. 7과 Fig. 8은 경사방향과 경사에 대하여, 각 기선거리비에 따른 실측치와 ShapeMetriX 3D를 통해 분석된 자료의 상대 오차를 나타내는데, Fig. 7을 보면 경사 방향에 대하여 최대 $\pm 35^\circ$ 정도의 편차를 보였으며, 대다수 절리의 경사방향에 대하여 상대오차가 $\pm 10^\circ \sim 20^\circ$ 사이에 편중되어 있음을 알 수 있다.

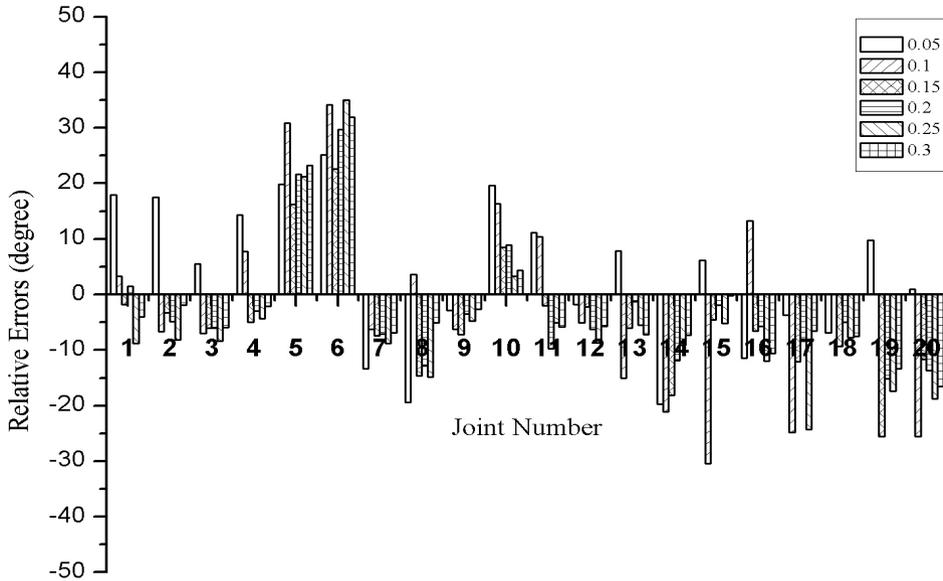


Fig. 7. Relative errors of dip direction with various base-depth ratios

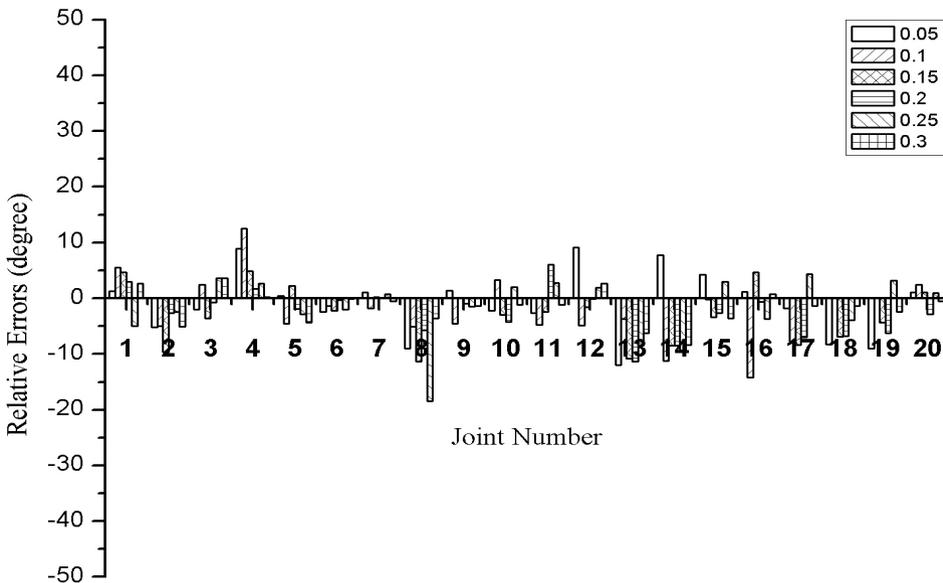


Fig. 8. Relative errors of dip with various base-depth ratios

Fig. 8의 경사의 경우, 최대 $\pm 20^\circ$ 정도의 편차를 보였고, 대부분 $\pm 5^\circ \sim 8^\circ$ 사이에 편중되는 결과를 보였다. Fig. 7과 Fig. 8을 살펴보면, 동일 절리에 대하여는 기선거리비와 상관없이 편차가 비슷한 양상을 보임을 알 수 있다. 다시 말해서 편차가 크게 관측된 절리에 대하여는 기선거리비 변화에 무관하게 전반적으로 큰 편차를 보였으며, 반대로 작은 편차의 절리에 대하여도 기선거리비 변화에 상관없이 전반적으로 작은 편차를 가짐을 알 수 있다. 이로 미루어 볼 때, ShapeMetriX 3D를 통한 영상 해석 결과에 기선거리비의 변화가 미치는 영향은 적은 것으로 판단된다.

영상 취득시 카메라의 촬영 위치로 인해 대상체의 일정 부분이 보이지 않는 경우가 발생하게 되는데, 이러한 부분을 폐색 영역(hidden area)이라 한다. Fig. 8의 (e)와 (f) 영상의 좌측 상단을 보면 영상 정합이 이루어지지 않은 부분이 존재함을 확인할 수 있는데, 이는 원 영상 분석 결과, 너무 큰 기선거리비로 인하여 좌측 영상에서는 보이는 부분이 우측 영상에서는 폐색 구간으로 발생함으로써, 영상 정합시 한 쪽만을 기반으로 하여 정합이 이루어졌기 때문에 불완전한 정합이 이루어지기 때문이다. 이렇게 두 영상 모두에서 혹은 어느 한 쪽 영상에서 폐색이 발생하는 경우, 영상 정합 과정 중 불완전한 정합이 이루어지는 것으로 판단된다. 본 기선거리비 평가를 위한 시험에서 이렇게 부분적으로 폐색 구간이 발생한 경우 상호 자료 간 큰 편차를 보였는데, 이는 위에서 언급한 불완전한 정합 때문이다. 또한 작은 절리의 경우 판별이 어려운 경우가 발생하였다. 따라서 대상 절리를 분할 확대 촬영하여 해석한 결과와

대상 절리 전체를 촬영하여 해석한 결과를 비교함으로써, 폐색 구간과 작은 절리에 대한 판별 가능성을 알아 보았다.

4.2 분할 확대 촬영 및 결과 분석

분할 확대 영상 및 전체 영상에 대하여, 기선거리비는 지상사진측량에서 주로 이용하게 되는 0.15~0.2가 되도록 촬영하였고, 절리면에 대한 카메라 광축 수평 조건을 동일하게 적용하여 촬영하였으며, 렌즈의 화각은 70° 내외가 되도록 촬영하였다.

대상지에 대하여 $5\text{ m} \times 2\text{ m}$ 의 조사창을 설치하고 Fig. 9와 같은 조건으로 촬영 후, 중복 구간을 포함하여 $1\text{ m} \times 2\text{ m}$ 의 4개의 영역으로 나누어 분석을 실시하였다.

정합 및 표정에 소요되는 시간은 10분 내외이며, 생성된 영상에서 관심 영역 이외의 부분을 제거한 후, 절리 방향 및 길이를 추출하였다.

터널의 경우 발파로 인한 균열이 존재하게 되며, 일반적으로 이러한 균열은 작업자의 경험 혹은 육안 판단에 근거하여 판단하게 된다. 그러나 본 프로그램 이용시 생성되는 3차원 영상만으로는 이러한 균열과 실제 절리를 구분하기 어려웠으며, 절리면 면적이 작거나 길이가 짧은 소절리 또한 구분하기 어렵다는 단점이 있었다. 따라서 현장에서 조사 대상지를 촬영하고, 휴대용 프린터를 이용하여 인쇄한 후 그 위에 기본적인 매핑을 실시하였고, 후에 이 자료를 기반으로 ShapeMetriX 3D에서 생성된 영상에서 절리를 찾아 분석하였다.

대전 한국원자력연구소 내 방사성 폐기물 처분 실증 시험 터널을 Case 1, 서울대학교 내 순환도로변 노출사

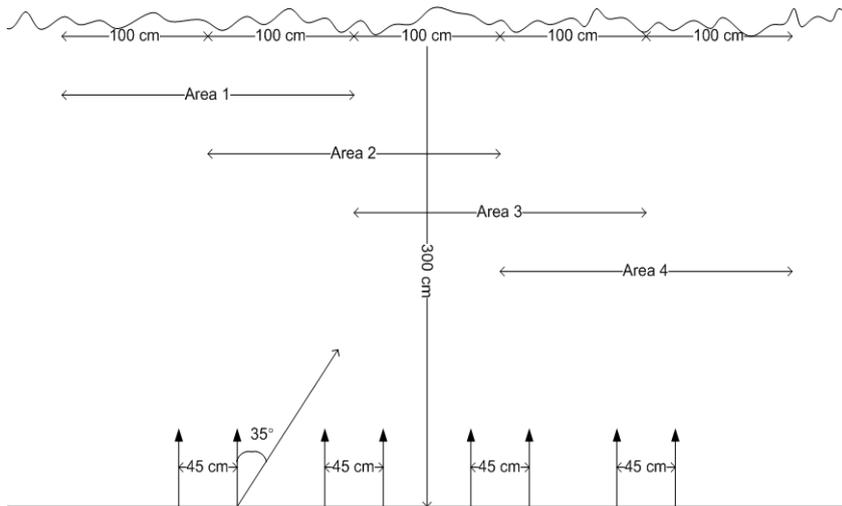


Fig. 9. Close-up photographing

면을 Case 2로 구분하였다. Fig. 10과 Fig. 12에서, 화살표는 관심 절리에 대하여 영역을 설정하여 주었을 때 영역에 대한 법선벡터를 나타내는 것으로서 이 법선벡터를 통하여 프로그램에서 경사방향 및 경사 정보를 제공하는 것이고, 면으로 표시된 부분은 관심 절리면이 잘 보이지 않을 때 절리선을 통하여 절리를 지정하여 주면 프로그램에서 해당 절리선과 주변 영역이 포함되는 면을 표시하여 주며, 이 면 정보를 통하여 절리면의 경사방향 및 경사 정보를 제공하는 것이다.

Fig. 10은 Case 1의 ShapeMetriX 3D 해석 영상을 나타낸다.

Fig. 11은 Case 1에서 경사방향 및 경사에 대하여 조사창 조사로 얻어진 자료와 ShapeMetriX 3D에서 생성된 영상에서 추출한 정보의 상대 오차를 나타낸다. 수평축을 기준으로 하여 상부는 경사방향, 하부는 경사각으로 나타내었다. Fig. 12는 Case 1에서 절리 길이에 대하여 조사창 조사로 얻어진 자료와 ShapeMetriX 3D에서

생성된 영상에서 추출한 정보의 상대 오차를 나타낸다.

Fig. 11을 보면 경사방향에 대하여 5~6개의 절리에서 이상값을 보임을 알 수 있는데, 이는 영상 분석 결과, 사진 촬영 위치에 대하여 발생된 폐색 구간에 대한 자료였다. 영상에 대하여 횡방향(좌우, 가로)으로는 폐색이 발생하지 않았으나 카메라 높이로 인해 종방향(상하, 세로)으로 폐색이 발생하였다. 4.1절의 기선거리비 변화에 따른 영상 해석 결과도 클리노콤파스의 경우와 비교하여 큰 편차를 보인 점으로 미루어 볼 때, 폐색 구간에 대해서는 다소 이상값을 보이는 것으로 판단된다. 경사방향에 대하여 이상값을 보인 5~6개의 절리를 제외한 나머지 절리들이 $\pm 10^\circ$ 내외의 편차를 보였으며, 이상값을 제외한 대수적 평균 오차는 $\pm 6.2^\circ$ 로 분석되었다. 또한 Fig. 11을 통해 경사의 경우 최대 $\pm 10^\circ$ 내외의 편차를 보였으나 대부분의 절리들이 $\pm 5^\circ$ 정도의 편차를 보임을 알 수 있으며, 평균 오차 또한 $\pm 3.4^\circ$ 로 분석되었다. Fig. 12의 절리 길이에 대하여는 최대 ± 15 cm 정도의 오차

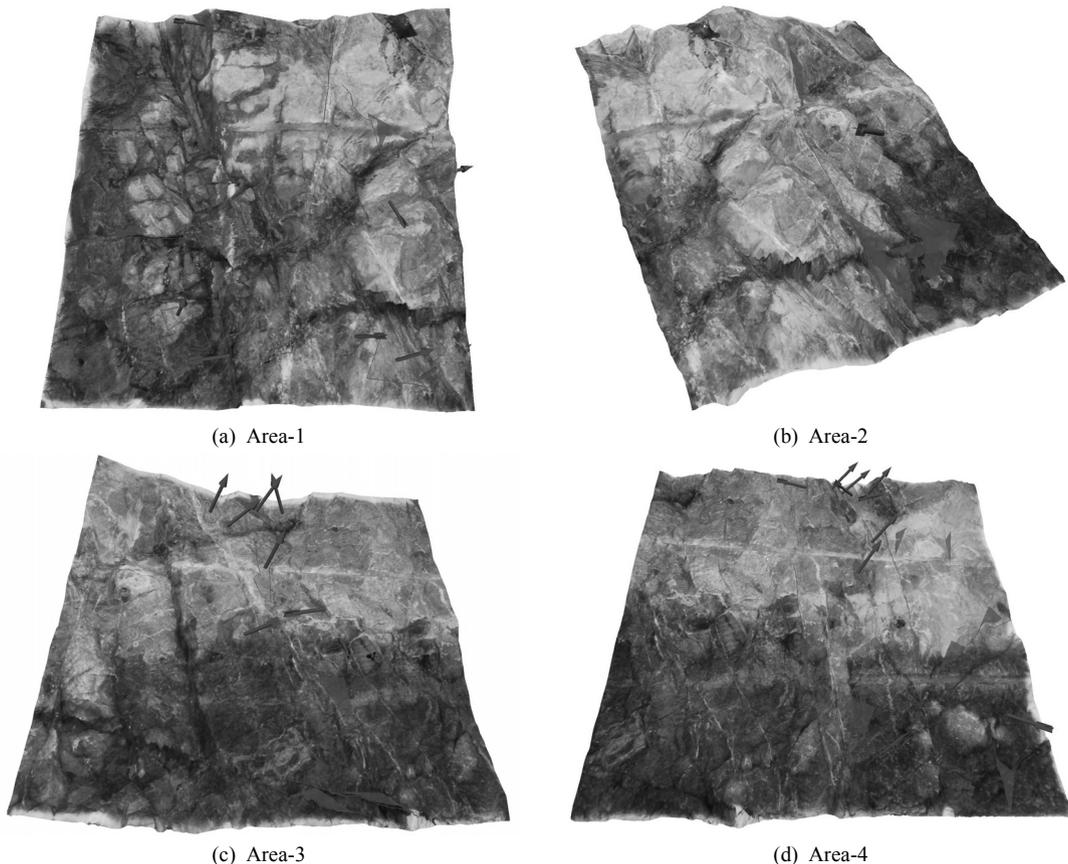


Fig. 10. 3D image analyzed by ShapeMetriX 3D - Case 1 (The image size is approximately 2 m×2 m)

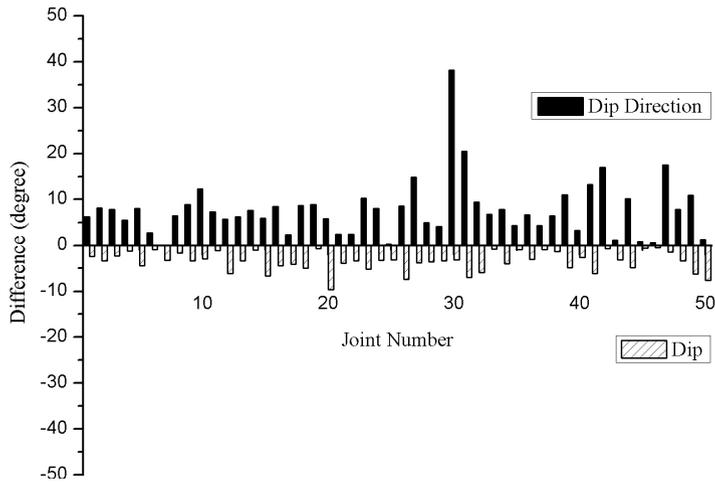


Fig. 11. Absolute value of difference between measurements of measuring tape and SMX for dip direction and dip - Case 1

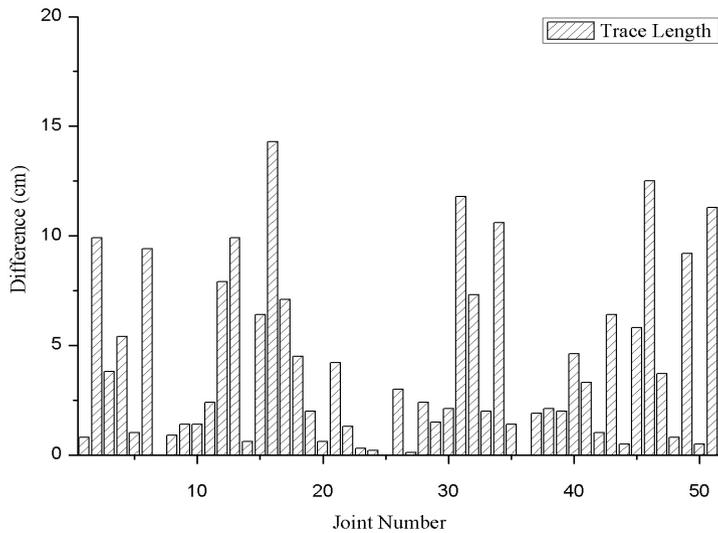


Fig. 12. Absolute value of difference between measurements of measuring tape and SMX for trace length - Case 1

를 보이나, 전반적으로 ± 10 cm 내외의 편차를 보였으며, 대수적 평균 오차는 ± 4 cm로 분석되었다.

Fig. 13은 Case 2의 ShapeMetriX 3D 해석 영상을 나타낸다.

Fig. 14는 Case 2에서, 경사방향 및 경사에 대하여 조사창 조사로 얻어진 자료와 ShapeMetriX 3D에서 생성된 영상에서 추출한 정보의 상대 오차를 나타낸다. 수평축을 기준으로 하여 상부는 경사방향, 하부는 경사각으로 나타내었다. Fig. 15는 Case 1에서 절리 길이에 대하여 조사창 조사로 얻어진 자료와 ShapeMetriX 3D에서 생성된 영상에서 추출한 정보의 상대 오차를 나타낸다.

Case 2의 경우, 대상 절리면에 수직 절리가 주로 발달하였기 때문에 카메라 높이로 인한 폐색 구간이 발생하지 않았다. 분석 결과, 경사방향에 대하여 최대 $\pm 15^\circ$ 내외, 경사에 대하여 최대 $\pm 10^\circ$ 내외, 절리 길이에 대하여 최대 15 cm 정도의 편차를 보였으나, 해석 결과 전반적으로 과도한 이상값 없이, 경사방향, 경사 및 절리 길이에 대하여 평균적으로 각각 $\pm 5.7^\circ$, $\pm 1.8^\circ$, ± 5.0 cm의 편차를 가지는 것으로 분석되어, 실측치와 대부분 비슷한 결과를 얻을 수 있었다. Case 2 노출사면의 경우 굴곡이 적고 편평한 절리가 많았는데, 이러한 이유로 해석 결과가 클리노콤포스와 비교하여 적은 편차를

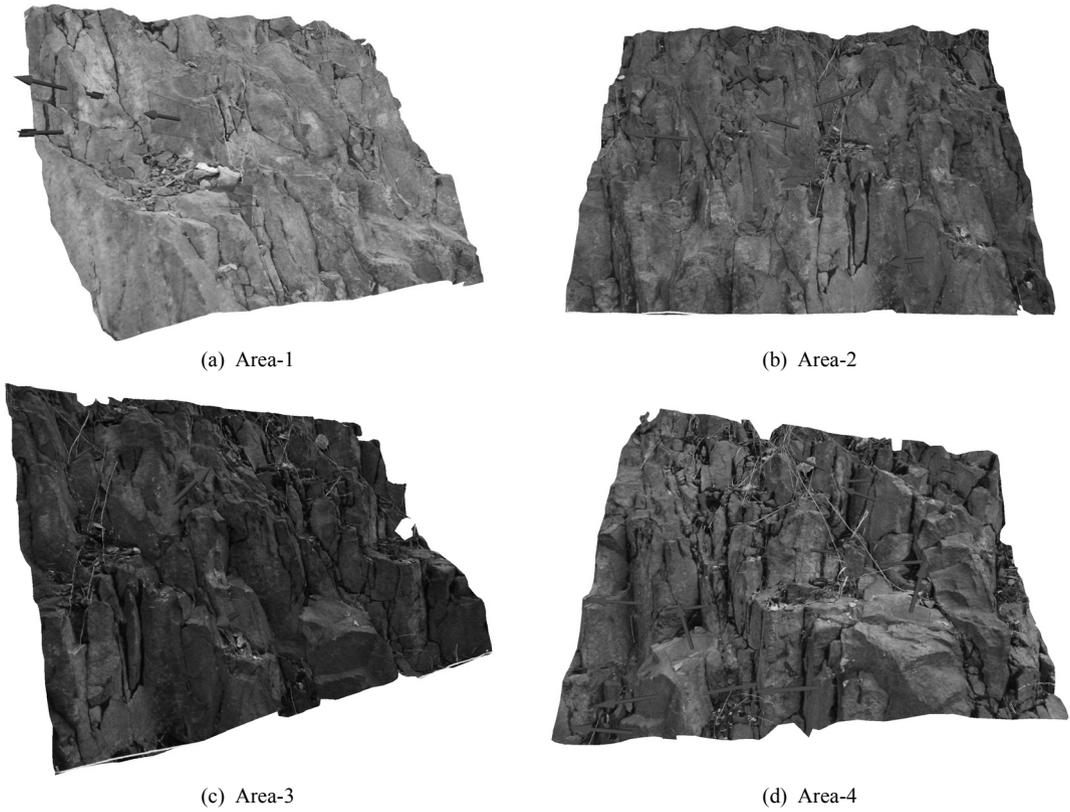


Fig. 13. 3D image analyzed by ShapeMetriX 3D - Case 2 (The image size is approximately 2 m×2 m)

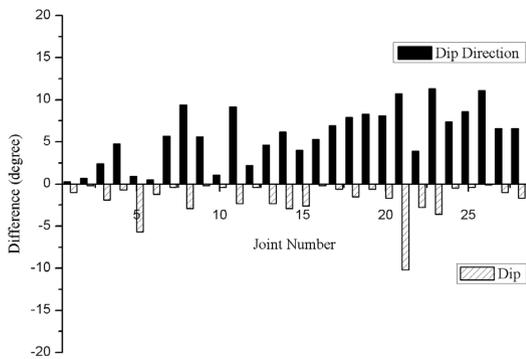


Fig. 14. Absolute value of difference between measurements of measuring tape and SMX for dip direction and dip - Case 2

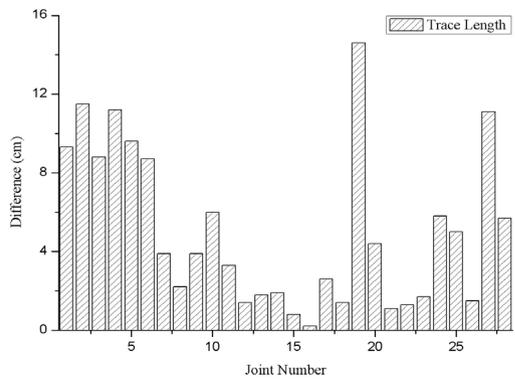


Fig. 15. Absolute value of difference between measurements of measuring tape and SMX for trace length - Case 2

보인 것으로 판단된다. 따라서 3장의 시험실 모형을 통한 시험에서와 유사하게 대상면이 굴곡이 적은 편평한 면으로 이루어진 경우 향상된 정확도를 가지는 결과를 제공하는 것으로 판단된다. Case 1의 절리면의 경우 Case 2의 절리면에 비하여 다소 굴곡이 있는 절리면이

었다. ShapeMetriX 3D 프로그램은 어떤 절리에 대하여 사용자가 영역을 인식시킬 경우, 동일 절리로 인식된 부분에 대하여 평균적인 경사각 및 경사방향 정보를 제공하게 된다. 만약 심한 굴곡이 포함된 절리면에 대하여 영역을 절리 전체에 대하여 설정한다면 다소 왜곡

된 결과를 보일 수 있으며, 절리면의 굴곡이 다소 완만한 경우에는 절리면에 대하여 영역을 전체적으로 설정하더라도 실측치에 가까운 결과를 얻을 수 있다. 따라서 ShapeMetriX 3D 프로그램을 이용함에 있어 절리면의 굴곡이 심한 경우, 동일 절리면에 대하여 굴곡이 심한 부분을 피하여 영역을 설정해 준다면, 다시 말해 동일 절리에 대하여 편평한 면으로 절리 영역을 설정하여 준다면 해석 자료의 오차를 줄일 수 있는 것으로 판단된다.

기술한 바와 같이 ShapeMetriX 3D 프로그램은 정합 과정을 거쳐 3차원 영상을 생성하게 되는데, 작은 절리 판별 가능성은 얼마나 정합이 우수하게 이루어졌는가에 따라 좌우된다고 할 수 있다. 본 연구의 분할 확대 촬영의 경우에는 촬영 화각을 70° 내외, 노출점으로 부터 대상지까지의 거리, 즉 depth를 3 m를 유지하며 영상을 취득하였는데, 만약 depth를 더 작게 촬영한다면 절리 단면적이 매우 작은 경우에도 분석이 용이할 것이다. 그러나 이러한 경우 취득 영상 수 및 절리 정합 과정의 경우의 수가 증가하여 시간적으로 더 비효율적인 결과를 내게 될 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 ShapeMetriX 3D system을 이용하여 입체사진측량 기법의 암반 절리 조사에 대한 적용성을 알아보았다. 실내 모형 시험을 통해 ShapeMetriX 3D system을 검증하였으며, 현장 적용을 통하여 실제 사면에 대한 적용성을 판단하였다. 본 연구를 통해서 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 실내 모형 시험 과정에서, 광축의 수렴각이 지나치게 큰 경우 영상 정합이 불가능한 경우가 발생하였다. 따라서 영상 정합 시, 중복 영역을 넓히기 위하여 평행 촬영을 수행하였다.
- 2) 실험실 모형을 통한 ShapeMetriX 3D 검증 결과, 실측 자료와 비교하여 경사방향 및 경사 모두 $\pm 5^\circ$ 정도의 편차를 보였는데, 이는 대상면의 편평도가 크고, 확대 촬영된 영상을 해석했기 때문인 것으로 판단된다.
- 3) 본 연구에서 사용된 ShapeMetriX 3D에서 생성된 3차원 영상만으로는 발파 등으로 인한 인공 균열의 구분에 다소 어려움이 있었다. 또한 절리면 면적이 작거나 길이가 짧은 소절리의 경우도 영상 해석에 어려움이 있었다. 이러한 경우 현장에서

대상지를 촬영한 후 휴대용 프린터를 이용하여 인쇄하고 그 위에 기본적인 Mapping을 실시하여 ShapeMetriX 3D를 이용한 분석시 이 자료를 활용하거나 대상면의 분할 확대 촬영 및 분석을 실시하는 것이 효과적인 것으로 판단된다.

- 4) 기선거리비가 해석 결과에 미치는 영향을 평가하기 위한 시험 결과, 기선거리비는 해석 결과에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 그러나 영상 취득시 카메라 위치에 의해 발생하게 되는 폐색 구간은 영상 정합이 이루어지지 않았으며, 5 m × 2 m의 조사장 전체 영역에 대한 영상 정합 및 분석 결과, 실측 자료와 비교하여 경사방향 $\pm 20^\circ$, 경사 $\pm 10^\circ$ 이상의 편차를 가지는 절리가 다수 관측되었다. 따라서 대상지 촬영시 영상에 폐색 구간이 생기지 않도록 기선거리비를 결정하고, 영상 정합 중복도를 높이기 위한 평행 촬영을 수행하는 것이 좋을 것이라 판단된다.
- 5) 현장에 설치된 조사창 전체 영역에 대하여 영상 취득하여, 정합 및 분석을 실시하였으나, ShapeMetriX 3D에서 생성된 영상에서는 클리노콤파스를 이용한 실측치와 비교하여 전반적으로 큰 편차를 보였다. 따라서 대상지를 분할확대촬영하여 영역별 부분분석을 수행하였으며, 분석결과 경사방향 $\pm 10^\circ$, 경사 $\pm 5^\circ$ 내외의 편차가 존재함을 확인하였다. 조사자에 따른 경사방향 $\pm 10^\circ$, 경사 $\pm 5^\circ$ 내외의 측정오차[Ewan, 1981], 1°~2°의 측정기 기계오차를 고려한다면, 분할확대촬영된 영상을 통해 제시되는 결과는 신뢰할만한 수준의 자료로 판단된다.
- 6) 실험실 모형과 같이 대상지가 편평한 절리로 이루어진 경우, 경사방향 및 경사에 대하여 각각 $\pm 5^\circ$, $\pm 2^\circ$ 내외의 편차를 가지는 것으로 분석되었으며, 이를 토대로 볼 때 절리면의 굴곡이 적고 편평하다면 해석 자료의 정확도가 향상되는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2006년도 건설핵심기술연구개발사업(04핵심기술C01)의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Hagan, T.O., 1980, A case for terrestrial photogrammetry in deep-mine rock structure studies, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics, Vol. 17, pp. 191-198.
2. Franklin, J.A., Maertz, N.H., Bennett, C.P., 1988, Rock mass characterization using photoanalysis, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics, Vol. 6, No. 2, pp. 97-112.
3. Tsoutrelis, C.E., Exadactylos, G.E., Kapenis, A.P., 1990, Study of the rock mass discontinuity system using photoanalysis, Mechanics of Jointed and Faulted Rock, pp. 103-112.
4. Reid, T.R., Harrison, J.P., 2000, A semi-automated methodology for discontinuity trace detection in digital images of rock mass exposures, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 37, No. 7, pp. 1073-1089.
5. 유복모, 박운용, 양인태, 1983, 사진측정기법을 이용한 사면의 경사와 주향결정에 관한 이론적 고찰, 대한토목학회 논문집, 제 3권 3호, pp. 129-135.
6. 류동우, 이유리, 장운섭, 이희근, 박형동, 2000, 화상처리 및 입체사진측량학을 이용한 암반 절리 조사 시스템, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, 제 10권 3호, pp. 329-343.
7. 김종훈, 2002, 암반 절리의 기하학적 특성 분석을 위한 디지털 사진측량기법의 개발, 강원대학교 대학원 공학박사 학위논문.
8. Ewan, V J, West, G, 1981, Reproducibility of joint orientation measurements in rock, Transport and Road Research Laboratory supplementary report 702, 18P, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, Vol. 19, Issue 4, August 1982, Page 94

한정훈



2005년 성균관대학교 공과대학 토목공학과
공학사
2007년 서울대학교 대학원 지구환경시스템
공학부 공학석사

Tel: 02-880-7234

E-mail: appetite97@rockeng.snu.ac.kr
현재 서울대학교 지구환경시스템공학부
석사과정

송재준



1993년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1995년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
2000년 서울대학교 대학원 지구환경시
스템공학부 공학박사
Tel: 02-880-9043

E-mail: songjj@snu.ac.kr

현재 서울대학교 에너지시스템공학부
교수