

## 암반사면 절리의 방향성 측정을 위한 수렴다중촬영기법의 현장 적용성 연구

김종훈<sup>1)</sup>, 김재동<sup>2)\*</sup>

### Optimization of Field Application Conditions of the Multistage Convergent Photographing Technique for the Measurement of Joint Orientation on Rock Slope

Jong-Hoon Kim and Jaedong Kim

**Abstract** One set of hardware system of guide point method (GP method), modified from the multistage convergent photographing technique, was developed to interpret the geometrical characteristics of joints photogrammetrically on rock slope. Before the field application of the hardware system, the level of errors and constraints that can be acceptable in the field measurement has been severely investigated in the laboratory and the optimum photographing scheme was analyzed. The range of the most suitable convergence angle between two cameras was  $25^{\circ} \sim 150^{\circ}$  and the photographing distance was about 5.5 m when using a 2 M pixel digital camera. An extended analyzing technique, which was newly developed in this study, was applied to the field measurement to magnify the benefits of GP method. This technique can be applied when survey for the wide range of rock surface is necessary. The global coordinates of ground control points for the neighbor photographing area can be introduced without any preparation from the previous photographed area using this technique. It could reduce photographing time in the field.

**Key words** Joint, Rock Slope, Multistage Convergent Photographing Technique, Photogrammetry, GP method

**초 록** 수렴다중촬영기법을 응용하여 개발된 가이드포인트법(GP법)의 측정 시스템을 개발하였다. GP법은 사진 측량기법의 하나로 본 연구에서는 암반 사면에 노출된 절리의 방향성을 측정하기 위하여 개발된 시스템을 적용하였다. 개발된 기법의 현장 적용에 앞서 오차 수준과 촬영영향요소 분석을 위해 실내검증시험 및 최적촬영배열 설계가 이루어졌다. 실내 검증 결과 적정 수렴각은  $25^{\circ} \sim 150^{\circ}$ 로 나타났으며, 2M 화소의 디지털 사진기를 사용할 경우 측정 오차 한계를 만족하는 최적 촬영거리는 약 5.5 m이었다. 현장 적용에서는 GP법의 효율성을 극대화하기 위하여 본 연구에서 개발된 확장해석 기법이 적용되었다. 확장해석기법은 넓은 지역에 대한 사진측량 조사를 실시할 경우 적용할 수 있는 것으로 최초 촬영면에서 측정된 특정점들의 좌표를 인접한 다음 촬영면에서 조절점으로 사용함으로써 현장에서의 촬영 시간을 단축시킬 수 있는 방법이다.

**핵심어** 절리, 암반 사면, 수렴다중촬영기법, 사진측량, GP법

#### 1. 서 론

암반 절리의 기하학적 특성을 조사하고자 할 때 클리 노컴파스를 이용한 현장 측정 과정은 수작업에 의해 진

행되므로 조사 범위의 한정, 난접근에 따른 측정이 불가능한 점, 측정 작업의 효율성이 떨어지는 등의 문제점들이 있었다. 본 연구에서는 이러한 제약 조건들을 극복하기 위해 개발된 절리 암반 영상을 이용한 절리의 기하학적 특성 분석 알고리즘[김재동, 2003]을 토대로, 이를 현장에 적용하기 위한 장비의 개발과 측정된 자료의 정밀도 분석, 그리고 영상 측정에서 조사창 조사법을 이용한 해석 기법을 개발하는 데 주안점을 두었다.

영상측정 장비는 경제성을 고려하여 상용 디지털 사진기를 적용하였으며, 적용 알고리즘은 기존의 영상에

<sup>1)</sup> (주)희송지오택 기술연구소, 부장

<sup>2)</sup> 강원대학교 지구환경공학부, 교수

\* 교신저자 : jdkim@kangwon.ac.kr

접수일 : 2009년 1월 8일

심사 완료일 : 2009년 2월 2일

제재 확정일 : 2009년 2월 11일

의한 사물의 기하학적 특성 분석 방법에 비해 분석 대상인 암반 절리에 보다 적합하게 개발한 것으로 수렴다중촬영 기법을 기초로 하여 그에 따른 초기 입력요소를 암반에 설정하기 쉽도록 한 것이다. 저자들은 개발된 본 방법을 가이드포인트법(Guide Point Method, 이하 GP 법이라고 칭함)이라고 명명하였다. GP법에서는 초기 입력요소로서 지상조절점 세 점과 지상보조점 한 점을 도입하고 이들의 기하학적 관계로부터 사진기 매개변수들을 결정하는 원리를 이용하고 있으므로 본 연구에서는 조절점과 보조점의 측정을 위한 보조 장치로서 사진기 조절기와 지상보조점 장치를 개발하였다. 이는 수많은 지상조절점과 복잡한 해석과정으로 구성된 기존의 사진기 매개변수 결정방법에 비해 암반사면에 대해 간편하게 적용할 수 있다는 장점이 있다. 절리의 공간좌표는 사진기 매개변수로부터 구성된 공선조건식에 암반사면 영상에서 측정된 절리의 영상좌표를 입력하여 유도된다. 절리의 방향은 절리면 영상에 의해 유도한 절리면 구성 공간좌표로부터 구성된 법선 벡터에 의해 결정할 수 있도록 일련의 알고리즘에 의해 결정될 수 있다[김중훈, 2002].

본 연구에서는 GP법의 현장 적용에 앞서 촬영영향요소 분석을 실내에서 수행하여 최적 현장적용 조건과 측정결과의 정밀도를 분석하였다. 현장적용에서 조사 대상면이 넓은 경우에는 최초 촬영면에서만 조절점의 측량을 실시하고 이후 촬영면에서는 이전 촬영면과 중첩된 영상으로부터 유도한 특정 지점의 공간좌표를 조절점으로 이용하는 확장해석방법을 개발하여 적용함으로써 개발기법의 효용성을 높이고자 하였다.

본 연구의 결과는 절리의 기하학적 특성 조사에서 기존의 수작업에 의한 방법에서 나아가 영상을 통하여 신뢰성 있는 자료를 획득하고 해석할 수 있는 기법을 개발함으로써 현장 측정 작업을 용이하게 하고 절리구조에 대해 신뢰성 있는 자료를 제공하며 앞으로 절리 암반의 안정성 해석에 필요한 입력 자료들을 추출하고 활용하는 데 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

## 2. 촬영 시스템

본 연구에서는 GP법의 알고리즘을 구현하는 촬영 시스템을 개발하였다. 촬영 시스템은 디지털 사진기, 사진기의 촬영방향을 조정하는 사진기 조절장치 및 GP법에서 도입된 지상보조점을 설정하기 위한 지상보조점 장치가 주요 구성 요소이며 초기 입력요소인 세 점의 지상조절점과 지상보조점의 공간좌표를 실측하기 위한 광파기가 추가로 필요하다.

### 2.1 촬영시스템의 개요

GP법에 의해 공선조건식을 구성하기 위해서는 Fig. 1과 같이 지상조절점  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ 와 지상보조점  $G$ 의 공간좌표가 초기입력요소로서 필요하다. 이 점들의 공간좌표는 임의로 설정된 측정 공간좌표계의 원점( $\otimes$ )에 설치되는 광파기로 측정한다. Fig. 1에서 점  $P$ 의 위치는 사진기의 중심투영점이다.

### 2.2 디지털 사진기

본 연구에서 사용된 디지털 사진기는 미국 폴라로이드사의 제품(모델 PDC-2000, Fig. 2)으로 자동 디지털 사진기라는 단점을 가지고는 있지만 매 촬영시마다 정확한 영상을 노트북 컴퓨터에서 곧바로 확인이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 사진기의 A는 스피드라이트, B는 렌즈, C는 파인더렌즈, D는 셔터, E는 액정화면, F는 SCSI 연결단자, G는 뷰파인더이다. 사진기의 제원은 Table 1과 같다.

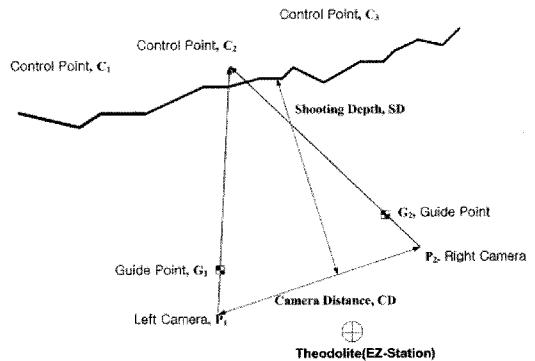


Fig. 1. Photographing layout of GP method

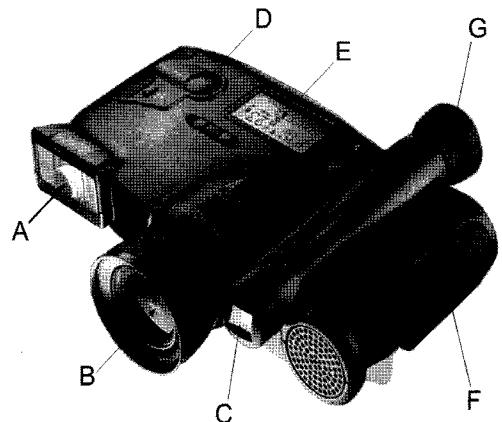


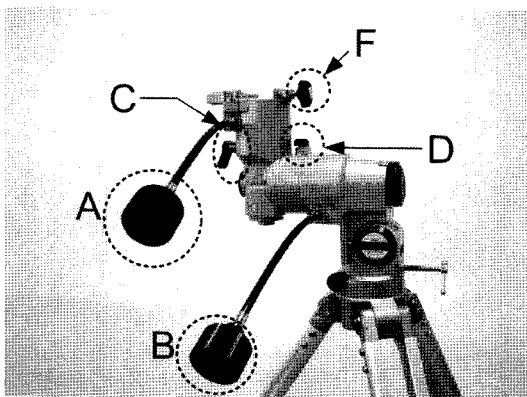
Fig. 2. Polaroid PDC-2000 digital camera

**Table 1.** Specifications of Polaroid PDC-2000 digital camera

Sensor resolution	Polaroid 1 million pixel CCD
resolution	1600×1200 pixel, 24-bit color (16.7 million colors), 5.6 MB file
Computer interface	SCSI-2
Lens	11 mm (equivalent to 38 mm optical lens) f/2.8 glass
Focus range	26 cm to infinity
ISO rating	100
Shutter speed	1/25 to 1/500 second
Aperture	f/2.8 to f/11
Electronic flash	Internal, 4.6 m maximum range
Recycle time	12 second with flash, 7 second without flash

### 2.3 사진기 조절장치

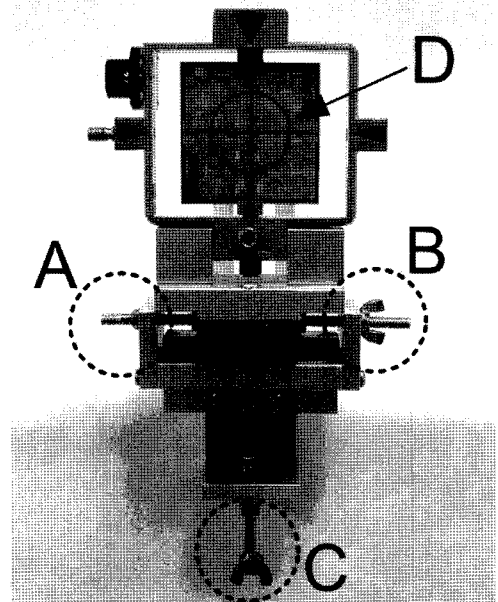
사진기 조절장치는 촬영된 영상의 중심점인 영상주점을 지상조절점  $C_2$ 에 일치시키기 위해 개발된 장치로서 사진기의 좌우 회전과 상하 이동을 통해 사진촬영 방향을 영상주점과 조절점  $C_2$ 와 일치 시킬 수 있게 제작하였다. 본 연구에서는 사진기 조절기를 미세하고 편리하게 움직이기 위하여 사진기를 고정 시킬 수 있는 고정 부분과 사진기 고정부분을 회전을 통해 움직이는 회전 부분으로 구분하여 설계, 제작하였다. 사진기 조절장치의 회전부분은 천체를 관찰할 때 경통을 고정하고 회전 시킬 때 쓰이는 적도의식 가대(일본 Vixen사의 GPE 적도의식 가대)를 응용하였다. Fig. 3과 같이 큰 조정은 적위 클럼프 C, 적경 클럼프 D를 사용하며, 영상주점을 조절점  $C_2$ 에 일치시키기 위해서는 미세한 조정이 필요하므로 적위 클럼프 C, 적경 클럼프 D를 고정한 후 좌우 미세회전은 미동손잡이 A에 의해, 상하 미세회전은 미동손잡이 B에 의해 조정할 수 있도록 하였다. 적도의식 가대의 상부 F 부분에는 사진기 조절장치가 탑재되며

**Fig. 3.** Camera controller mounted on the tripod.

하부는 지상에 설치하기 위한 전용 삼각대(일본 Vixen사의 AL150)에 연결된다.

### 2.4 지상보조점 장치

GP법의 알고리즘에 따르면 사진기 조절장치를 이용하여 영상주점이 지상조절점  $C_2$ 와 일치되면 공간상에 이들 두 점 사이를 연결한 공선에 지상보조점 G가 위치하여야 한다. 본 연구에서는 영상주점과 지상조절점  $C_2$ 를 연결하는 공선 상에 지상보조점을 보다 쉽고 정확하게 위치시키기 위하여 지상보조점 장치를 고안 제작하였다. Fig. 4는 광파기용 반사타겟이 장착된 지상보조점 장치의 모습이다.

**Fig. 4.** Ground guide point device with reflection target

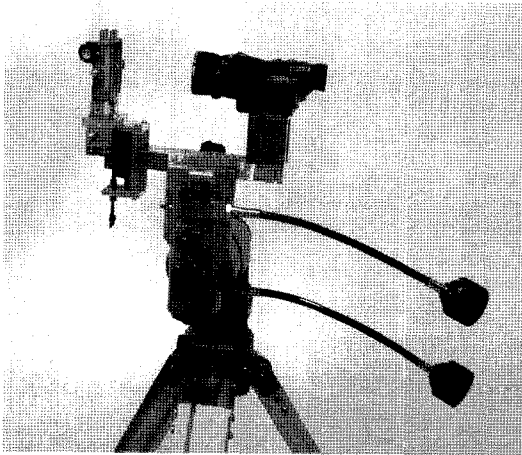


Fig. 5. A view of assembled hardware system mounted on the tripod

반사타깃 D의 시준점이 공선 상에 위치할 수 있도록 좌우 방향(Fig. 4의 A, B)과 상하 방향(Fig. 4의 C)의 미세 조정이 가능하도록 LM 가이드를 채용하였다. 타깃 D가 탑재된 사각 프레임은 360° 회전이 가능하도록 하여 광파기가 어느 방향에 있더라도 G점의 공간좌표 측정이 가능하도록 제작하였다.

이상에서 설명한 사진기 조절장치와 지상보조점 장치를 보다 효율적으로 조절하기 위하여 두 장치를 일체화 시켰다. Fig. 5는 사진기 조절장치와 지상보조점 장치를 일체화 시킨 모습이다. 지상보조점 장치에 의해 사진기가 주시하는 공선 상에 지상보조점이 위치하도록 조정 후 이를 사진기 조절장치에 탑재하여 사진기의 주시 방향을 사진기 조절장치에 의해 조절할 수 있도록 하였다.

## 2.5 광파기

광파기는 GP법에서 초기입력요소로 필요한 세 점의 지상조절점과 한 점의 지상보조점의 공간좌표를 측정하기 위하여 필요하다. 광파기의 위치는 촬영하고자 하는 지역 내에서 임의로 설정할 수 있으며 그 위치가 촬영 지역 공간좌표계의 원점이 된다. 본 연구에서 사용된 광파기는 세오돌라이트(Theodolite, E-Z Station, SOKKIA, 일본) 타입으로 정밀도는 반사타깃 사용 시 측정거리 250 m에서  $\pm(5+10\text{ppm}\times\text{측정거리})$  mm이고 무타깃에서는 백색면에 대하여 30 m에서  $\pm(3+10\text{ppm}\times\text{측정거리})$ 이다.

## 3. 촬영영향요소 분석

GP법의 알고리즘의 현장 적용성을 확인하기 위해, 본 연구에서 개발한 촬영시스템을 현장에 적용할 경우 나

타날 수 있는 영향요소들을 실내 검증을 통해 분석 파악하고자 하였다.

### 3.1 공선조건

영상에 의한 공간 대상물의 정량적 특성을 추출하고 해석하는 방법은 대상물의 3차원 공간좌표를 2차원 영상좌표로부터 유도하여 3차원 공간좌표에 의한 대상물의 표면을 구성하는 것이 일반적이다. 공간좌표를 유도하기 위한 일반적인 가정은 공선조건(colinear condition)이다. 이 가정은 공선조건식(또는 중심투영방정식)에 의해 정의된다[Wolf, 1983]. 저자들은 한 개의 지상보조점을 도입함으로써 공선조건을 구성하는데 필요한 지상조절점의 수를 세 개로 최소화하는 알고리즘을 제안한 바 있으며, 암반 절리의 기하학적 특성을 추출함에 있어 수렴다중촬영기법의 효율성에 대해서도 언급한 바 있다[김재동, 2003].

공선조건은 Fig. 6과 같이 영상주점 o, 중심투영점 P, 지상보조점 G, 지상조절점  $C_2$ 가 공간상의 하나의 직선 상에 위치시킴으로써 구성된다. 또한 공선조건식을 구성하는 사진기 매개변수는 지상조절점  $C_1, C_2, C_3$ 와 공선과의 관계를 통해 결정하게 된다[김종훈, 2002].

본 연구개발 단계에서는 개발 기법의 알고리즘의 현장 적용 타당성과 수반된 오차의 결과에의 영향을 평가하기 위해 촬영영향요소들을 실내모델시험을 통해 평가하고 현장적용시 최적 촬영배열설계를 유도하고자 하였다. Mason[1995]과 Fraser[1996]는 일반적인 수렴다중 촬영시스템에서 최적의 사진측량작업을 설계하기 위해서 많은 요소들을 도입하였다. 이 요소들은 사진촬영위치의 배열 및 구성에 영향을 미치는 조건들로서, 영상축척, 해상도, 촬영위치, 피사계 심도, 입사각, 조절

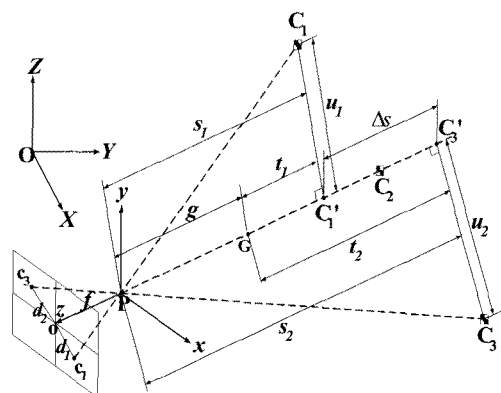


Fig. 6. Geometrical relationship of focal length, one ground guide point and three ground control points in GP method

점의 수 및 분포, 촬영횟수, 촬영범위, 가시성 등으로 구분된다. 이들 가운데 암반 내 절리 구조를 해석대상으로 하여 제안한 알고리즘을 기반으로 촬영배열을 설계할 때 가장 큰 영향을 미치는 것은 식(1)과 같이 영상축척에 따른 촬영거리, 해상도 및 사진기의 광축들의 입사각을 결정하는 촬영 방향이라고 할 수 있다.

$$d_{max} = \frac{\bar{\sigma}_c f \sqrt{k}}{q\sigma} \quad (1)$$

식(1)에서,  $d_{max}$ 는 최대촬영거리,  $f$ 는 사진기의 초점거리,  $\bar{\sigma}_c : X, Y, Z$  공간좌표의 표준오차들의 제곱평균 제곱근(R.M.S.)이며  $\sigma$ 는 영상좌표 측정 표준오차,  $q$ 는 설계지수(design factor),  $k$ 는 각각의 촬영지점에서의 평균촬영횟수이다.

### 3.2 사진기 해상도와 촬영거리

디지털 영상을 이용할 때, 오차에 큰 영향을 미치는 요인은 각도를 달리하여 촬영된 두 장의 영상에서 피사체의 한 지점을 각각 마킹하는 정밀도이다. 영상처리에 사용하는 에지 검출에서 정의하는 바와 같이 중심점은 진 모서리 중심(true edge center)을 갖는 픽셀로 정의된다. 실제로 중심점은 픽셀내의 어디든 존재하고 있다. 따라서 평균정확도는 0.5 픽셀이라 할 수 있다. 정확도 면에서 0.5 픽셀은 mm 단위에서는 허용할 수 없는 큰 오차에 해당한다[Trucco, 1998]. 그러나 일반적인 작업과정에서 측정자는 임의의 지점을 마킹하기 위해 영상을 확대하고 대상 지점의 위치를 탐색한다. 이러한 작업에는 상당한 부정확성이 존재하며 고대비 인공 기준표를 사용한다고 할지라도 1~3 픽셀 정도의 정확도를 유지할 수밖에 없다. 또한 다른 각도에서 촬영한 영상들에서 동일한 점들은 서로 다르게 보일 수 있으므로 동일점을 정의하는 정밀도는 영상스케일에서 일반적으로 3~10 픽셀 정도이다. 영상좌표의 측정 오차는 픽셀이 감광소자로 구성되기 때문에 조명 정도와 광축의 입사각 정도에 따라 영상 구성이 변화하고, 영상을 구성하는 픽셀의 해상도가 정수형으로 표현되기 때문에 해석 대상 지점의 중심점 위치 선정이 모호하기 때문이다. 이러한 문제로 인해 해석대상 지점의 중심점은 픽셀 경계에 위치하거나, 두 개 이상 픽셀에 위치하거나, 블러링(blurring)에 의한 중심선의 경계가 모호한 경우로 흔히 나타나게 된다[DCS Inc., 1998]. 그러므로 이러한 이론적인 측정 정확도인 0.5 픽셀은 매우 엄격한 측정 정확도라 할 수 있다. 사진측량에서는 이러한 수동 측정의 한계를 극복하기 위해 일정한 형태의 표식에 대해

정확하고 일관된 방식의 마킹 알고리즘과 대응에 관한 연구가 수행되고 있다[Boochs, 1996; Gruen, 1996; DCS Inc, 1998; Bae, 2001]. 그러나 이러한 방법은 자연적인 형태와 같이 일관성이 없는 형태에는 적용하기 어려운 실정이므로 암반사면 절리구조에서 영상좌표 측정은 측정자의 육안에 의한 수동 마킹이 불가피할 수밖에 없다.

일반적으로 디지털 사진기의 해상도는 사진기에 따라 정해져 있고 이에 따라 촬영거리와 입사각을 결정할 수 있으며, 최종 결과로 얻어지는 절리면의 방향과 이를 결정하기 위해 필요한 공간좌표의 계산 오차를 예상함으로써 촬영영향요소들은 정량화 할 수 있다. 절리면 방향 계산 허용오차는 사각형 면을 가정하고 그 면을 구성하는 꼭지점의 공간좌표를 변화시킴으로서 예상할 수 있다. 절리면을 구성하는 꼭지점의 성분변화에 따라 Fig. 7에서와 같이 경사방향은 좌우 양단의 X와 Y 성분 변화에 영향을 받고, 경사각은 상하 양단의 Y, Z 성분 변화에 영향을 받는다.

가상 절리면을 구성한 후 절리면의 법선방향에서 영

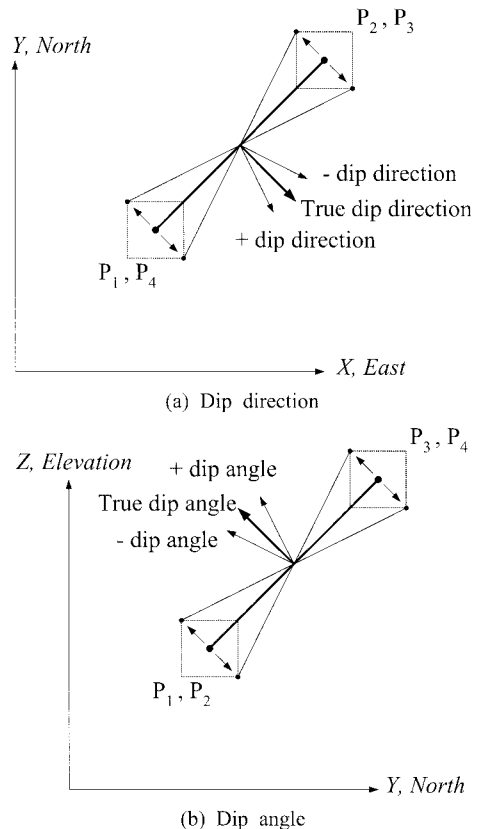


Fig. 7. Joint orientation due to change of joint plane vertexes

**Table 2.** Calculated maximum photographing distance according to the tolerance

f=11mm, q=0.7, k=1, CCD resolution=6 $\mu$ m/pixel			
Tolerance			Maximum photographing distance (m)
Calculation of global coordinate (mm)	Orientation ( $^{\circ}$ )	Measurement of image coordinate (pixel)	
$\pm 5$	dip direction $\pm 1.2$	3	4.365
	dip angle $\pm 1.2$	5	2.619
$\pm 10$	dip direction $\pm 2.2$	3	8.730
	dip angle $\pm 2.4$	5	5.238

상측정을 실시하는 경우를 기준하여 각 성분 변화에 따른 방향계산 결과를 비교 분석하면 방향 계산에서 허용 가능한 공간좌표 오차량을 계산할 수 있다. 클리노컴파스의 기계오차가  $\pm 2^{\circ}$  정도임을 감안하였을 때, 일반적인 픽셀 측정 오차를 3~5 픽셀로 가정하면 공간좌표의 오차는 약  $\pm 10$  mm로 나타났다. 이러한 오차분포에서 좌표 성분별 오차의 R.M.S.는 10 mm 수준이었다. 따라서 최대촬영거리는 방향 계산 허용 오차  $\pm 2^{\circ}$ 와 공간좌표 성분의 오차의 R.M.S.를 10 mm로 고려하여 예상하였다. 식(1)에 의해 최대 촬영거리는 픽셀 측정오차가 3 픽셀일 때인 경우 8.730 m이고, 5 픽셀일 경우는 5.238 m로 나타났다. 이때, 초점거리  $f$ 는 11 mm, 설계치수  $q$ 는 일반적인 사진기 배열에 적용하는 값인 0.7로 하였으며(Fraser, 1984), 촬영횟수는 각 촬영위치에서 1회로 가정하였다. 이로부터 촬영배열의 구성에 있어서 촬영거리는 5.238~8.730 m로 계산된다. 이와 같은 방법으로 허용 오차에 따른 최대 촬영거리의 분석 결과는 Table 2와 같다.

### 3.3 촬영 방향

촬영 입사각은 영상에서 해석대상 내 임의 지점의 마킹 정확도에 영향을 미치고 이로 인해 측정 정밀도가 낮아질 수 있다. 타깃을 촬영한 영상을 분석한 결과 입사각은 반사타깃을 사용할 경우에  $30^{\circ}$  이상부터, 일반 시준표를 사용하였을 경우  $20^{\circ}$  이상부터 중심점 마킹에 오차가 포함될 수 있으므로 이론적인 수렴각의 범위는 반사타깃을 사용할 경우 최대  $60^{\circ}$ 이고 일반 시준표를 사용할 경우 최대  $40^{\circ}$  정도로 예상할 수 있다. 촬영배열 설계에는 입사각의 영향을 고려하여 시준표들의 분포와 분석범위에 따른 촬영 방향과 위치가 포함되어야 한다.

### 3.4 촬영영향요소에 대한 실내 검증

실내 모델의 구성은 영상을 이용하여 암반사면 절리 방향을 해석할 때 영향을 미치는 다양한 조건을 고

려하였으며 촬영 결과의 분석을 통해 최적촬영조건을 도출하고자 하였다. 촬영조건은 촬영거리의 변화, 좌우 사진기 촬영방향의 수렴각 변화, 좌우 사진기의 촬영고도 변화로 크게 3가지 형태로 구분할 수 있으나, 결국 촬영고도의 변화는 수렴각의 변화와 같으므로 실내 모델 분석에서는 촬영거리의 변화와 수렴각의 변화를 파악하고자 하였다. 설정한 실내모델은 Fig. 8과 같다.

Fig. 8에서 절리면의 꼭지점은 벽면에 부착한 반사타깃(일본 SOKKIA사, RS30N)으로 설정하고 타깃들을 이용하여 사각형의 절리면을 구성하였다. Fig. 8의 (a), (b)와 (c), (d)는 각각 두 가지 모델에 대한 수렴 촬영된 영상쌍이며, 수렴각에 있어 (a)와 (b)는  $36^{\circ}$ , (c)와 (d)는  $60^{\circ}$ 인 경우를 대표적으로 나타낸 것이다. 여러 경우의 조합에서 GP법에 의해 해석한 공간좌표 계산 결과는 광파기에 의해 측정된 공간좌표 값과 비교되었다.

촬영거리에 따른 절리면 방향 산정 결과의 차이들은 Fig. 9와 같다. 촬영거리의 변화는 결국 해상도의 차이를 의미한다. 대상물의 임의점이 영상에 투사될 때, 좌우 영상에서의 일치점을 마킹하는 단계에서 촬영거리의 단축은 결국 측정 해상도의 증대로 예상할 수 있기 때문이다. 분석결과에서도 이와 같이 촬영거리 2.75 m에서 5.5 m에 비하여 절리면 방향 산정 결과차이가 다소 작게 나타났으나 전반적으로  $1.2^{\circ}$  이하의 값들로 나타났다. 실내모델을 이용한 촬영거리변화에 따른 촬영영향요소 분석 결과, Table 1에서 예상한 바와 같이 유사하게 나타났다.

수렴각의 변화는 두 광축사이의 사이각으로 나타낼 수 있다. 사이각은 두 사진기가 위치한 중심투영점과 조절점  $C_2$ 를 연결한 벡터사이의 내적관계로부터 결정할 수 있다. 영상쌍의 조합에 따라 수렴각의 변화는  $4.3^{\circ}$ ~ $150^{\circ}$ 에 대해 분석하였다. 이때 촬영거리는 5.5 m이다.

Fig. 10은 영상조합에 따른 두 영상의 수렴각에 따라 영상과 광파기 측정에 의한 공간좌표로부터 구성한 절

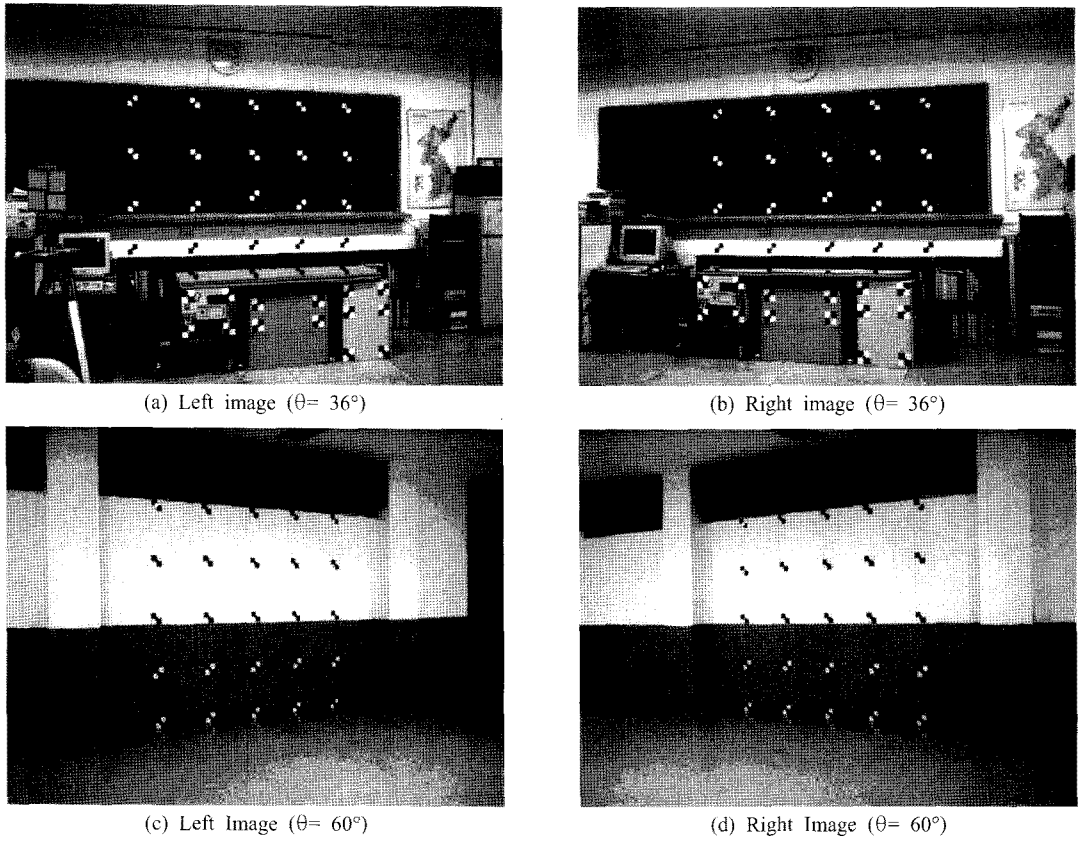


Fig. 8. Image pairs under various convergence angle in laboratory model (1600×1200 pixel, D=5.5 m,  $\theta$  is convergence angle)

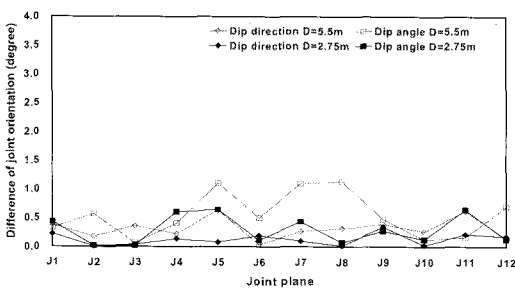


Fig. 9. Differences in joint orientations according to the photographing distance in laboratory model test

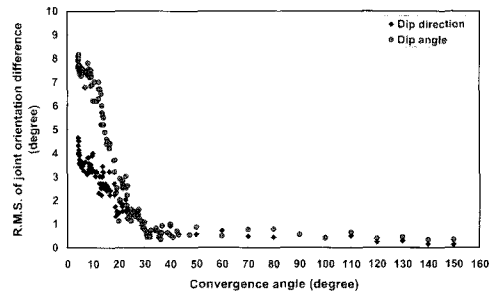


Fig. 10. R.M.S. distribution of joint orientation difference between the values measured by total station and GP method according to the convergence angle.

리면의 방향 산정 결과들의 R.M.S. 차이를 나타낸 것이다. 수렴각이 좁을수록 오차가 많이 발생하고 수렴각 25° 이상부터는 Table 2에서 파악한 방향 측정의 측정 오차 범위인 ±2°의 50% 수준으로 감소하는 것으로 나타났다. 수렴각이 20° 미만에서 오차가 크게 발생하는

원인은 두 영상 사이의 시각차(disparity 또는 parallax)가 일정 수준 이하로 나타나기 때문인 것으로 판단된다. 시각차가 작다는 것은 거의 동일한 영상과 같은 촬영배열을 구성한 것과 같기 때문이다.

디지털 사진기의 해상도를 고려하고 다양한 촬영조건

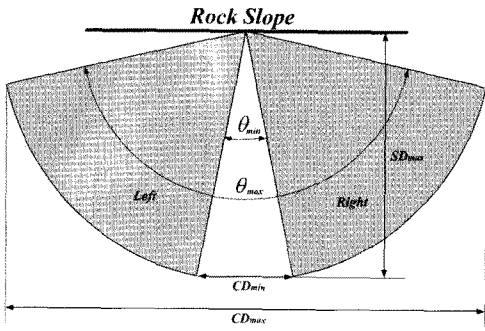


Fig. 11. Optimum photographing condition for field photographing (CCD effective size:  $6 \mu\text{m}/\text{pixel}$ , angle of view:  $50^\circ$ , SD:  $2.5 \sim 5.5 \text{ m}$ ,  $\theta$ :  $25^\circ \sim 150^\circ$ , CD:  $2.5 \sim 10.5 \text{ m}$ )

을 통해 촬영영향요소의 분석결과로부터 도출한 최적 현장 적용 조건은 Fig. 11에 도식화하여 나타내었다. Fig. 11에서 CD는 사진기 사이의 거리이고  $\theta$ 는 사진기 광축 사이의 수렴각, SD는 촬영거리이다. 실 조사 대상면의 크기를  $2 \times 2 \text{ m}$  정도로 하고 화각  $50^\circ$  및 해상도  $1600 \times 1200$  픽셀(유효픽셀크기  $6 \mu\text{m}/\text{pixel}$ )을 갖는 디지털 사진기를 적용할 때 허용오차를 고려하면 촬영거리 SD는 평균  $2.5 \sim 5.5 \text{ m}$ 의 범위가 된다. 이 때 수렴각  $\theta$ 는  $25^\circ \sim 150^\circ$ 의 범위에 있어야 한다. 사진기 수렴각은 사진기 사이의 거리, CD에 의해 쉽게 조정할 수 있으므로 CD를  $2.5 \sim 10.5 \text{ m}$ 로 할 때 최적의 분석결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 이를 예시하면, Fig. 11의 아래 좌·우측 음영 부분이 각각의 사진기의 최적 촬영 위치가 된다.

일반적으로 암반 내 절리면들은 서로 교차하며 존재한다. 이때 교차하는 절리면 사이의 실교각이  $90^\circ$  이하가 되면 좌우 영상 중 어느 한 영상에 나타나지 않는 절리면들이 존재할 수 있다. 또한 교각이  $90^\circ$  이상이라도 광축과 절리면 사이의 입사각에 따른 영상좌표 측정에서 발생하는 오차를 최소화할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 분석기법을 적용할 경우, 좌우 사진기의 수렴각은  $25^\circ \sim 150^\circ$  범위를 유지하며 영상주점과 일치시킨 암반사면 상의 조절점을 중심으로 촬영배열이 회전하거나 촬영 위치를 이동시킴으로서 분석대상 절리면을 영상에 최대한 많이 포함시켜야 할 필요가 있다.

#### 4. 암반사면 현장 적용

실내 검증에서 얻어진 최적 촬영조건을 기준으로 하여 본 연구에서 개발된 촬영시스템의 현장 적용을 실시하였다.

#### 4.1 확장해석기법

암반사면 절리 방향의 영상측정의 효율성을 높이기 위하여 개발 기법의 현장적용 단계에서 확장해석기법을 개발, 적용하였다. 확장해석은 광파기와 같은 공간좌표 측량기를 이용하여 측정해야하는 지상조절점의 수 및 설치를 최소화하기 위해 개발한 것이다. 확장해석의 기본 개념은 이전 촬영면에서 해석된 특정 지점의 좌표들을 인접한 새로운 촬영면에 지상조절점으로 이용하는 것이다. 확장촬영은 사진기의 촬영방향이나 촬영위치의 변화에 의해 가능하며, 이전 촬영면의 지상조절점을 제외한 특정 지점의 공간좌표는 이전 촬영면의 영상쌍으로부터 유도하게 된다. 따라서 본 연구에서 개발된 확장해석을 적용하기 위해서 확장촬영면은 이전 촬영면과 일부분을 중첩시켜 촬영하여야 한다.

확장해석에서 조절점의 설정 및 이동은 Fig. 12와 같다. Fig. 12에서 최초 촬영면인 촬영면 1에서 지상조절점은  $C_1, C_2, C_3$ 이다. 이들의 공간좌표는 광파기를 이용하여 측정한다. 촬영면 2에서 지상조절점은  $C_1', C_2', C_3'$ 이고 촬영면 3에서 지상조절점은  $C_1'', C_2'', C_3''$ 이다. 확장촬영면의 조절점들의 공간좌표는 이전 촬영면에서 적용한 조절점  $C_2$ 가 포함된 중첩된 영상으로부터 유도할 수 있는 모든 특징이 될 수 있다.

Fig. 12와 같이 촬영면 1과 촬영면 2의 중첩영역에는 두 촬영면의 조절점  $C_2$ 가 모두 존재한다. 촬영면 2의  $C_2(=C_2')$ 점을 촬영면 1의 어느 지점에서 선택하더라도 촬영면 1의  $C_2$ 점은 두 촬영면의 중첩영역에 존재하게 된다. 따라서 이전 촬영면의  $C_2$ 점은 새로운 확장 촬영면의 조절점인  $C_1$ 점이나  $C_3$ 점으로 적용할 수도 있으며 이는 본 연구에서 제안한 확장해석 방법의 특수한 경우가 된다. 이와 유사하게 촬영면 3의 경우 촬영면 2의  $C_2(=C_2')$ 점과  $C_3'$  및 촬영면 2에서 유도한 특정 지점을

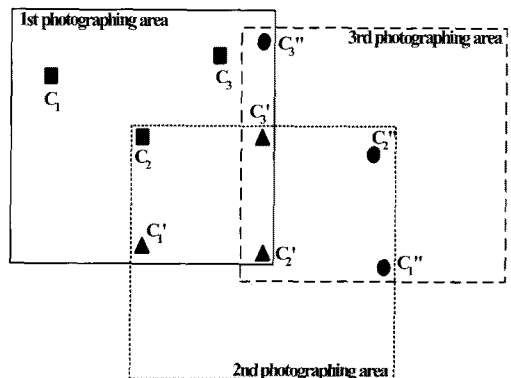


Fig. 12. Installation and moving of control points in extended analysis



조절점으로 적용할 수 있다. 또한 촬영면 1에서 유도한 특정지점 C<sub>3</sub>"를 조절점으로 사용할 수 있다. 이는 분석하고자 하는 대상의 범위 및 영상에 나타나는 특정 지점의 명확성 등에 따라 유연하게 결정할 수 있다.

4.2 현장 적용

GP법의 현장적용성 및 확장해석에 대한 현장 적용은 Fig. 8에서와 같이 오른쪽에서 왼쪽으로 촬영면을 이동 시키며 수행하였다. 확장해석을 위한 최초 촬영면 1에 대해 조절점은 Fig. 13의 C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>이다. 최초 촬영면에 대해 사진촬영 작업이 종료되면 다음 확장해석을 위해 촬영면 2, 촬영면 3으로 사진기의 촬영방향을 변화시켰다.

촬영면 2의 조절점 C<sub>2</sub>'와 C<sub>3</sub>'는 최초 촬영면 1의 조절점 C<sub>1</sub>과 C<sub>2</sub>를 적용하였다. 촬영면 2의 C<sub>1</sub>'점은 사면 내 존재하는 특정 절리면의 꼭지점을 대상으로 좌우 영상에서 모두 확인할 수 있는 지점을 설정하였으며 이는 영상에 표시하여 설정하였다. 다음으로 촬영면 3으로의 확장해석에서는 촬영면 2의 C<sub>1</sub>'점과 C<sub>2</sub>'점을 촬영면 3의 C<sub>2</sub>"점과 C<sub>3</sub>"점으로 설정하였다. 그리고 촬영면 3의 C<sub>1</sub>"점은 촬영면 2에서 특정 절리면의 꼭지점의 영상좌표로부터 계산한 공간좌표를 이용하여 적용하였다.

각각의 사진촬영 단계에서 영상주점이 조절점 C<sub>2</sub>와 일치하는지 여부는 영상분석기에서 매 촬영영상을 확인하여 결정하며, 두 점의 일치성이 확인되면 두 점을 연결한 공선에 지상보조점 장치를 설치하고, 지상보조점이 이 공선 상에 위치하는지 여부 역시 매 촬영영상을 영상분석기에서 확인한다. 영상주점, 지상조절점 및 지상보조점이 공선상에 위치하는 일치성이 확인되면 지상보조점의 상대공간좌표를 측정하였다. 일치성 확인

후 지상보조점 장치를 공선에서 제거한 뒤 재촬영을 통해 사진기의 이동여부를 결정하였다.

현장 적용성을 검토하기 위하여 선정한 지역은 강원도 춘천시 동산면 봉명리 소재 강원대학교 연습림 내 암반사면이다. 해석 대상으로 설정한 암반사면은 폭 3m 가량의 입도 변에 존재하고 있으며, 사면의 전체적인 방향은 090/75, 160/60, 100/70과 같이 크게 세 부분으로 구성되어 있었다. 사진촬영 대상으로 선택한 암반사면의 방향은 090/75이다.

Fig. 14는 각 조사면에 대해 촬영된 좌우 영상이다. 영상측정 공간좌표의 오차정도는 지상조절점 세 점의 광파기 측량 공간좌표와의 비교를 통해 분석하였으며, 절리면 방향은 특정 절리면을 기준면으로 설정하여 클리노컴파스를 이용하여 측정된 값과 영상측정값 사이의 비교를 통해 오차 정도를 분석하였다. 촬영면 1의 경우 조사 대상 절리면은 20개로 설정하였고, 촬영면 2의 경우 촬영면 1에서 촬영되지 않는 절리면을 기준으로 3개를 설정하였으며, 촬영면 3의 경우 촬영면 1과 촬영면 2에서 촬영되지 않는 절리면 4개를 설정하였다.

촬영면 1, 2, 3에서 각각의 조절점의 영상측정 공간좌표의 오차 분석 결과는 Table 3과 같다. 영상측정 공간좌표의 오차수준은 촬영배열 설계에서 예상한 허용오차 이내의 수준으로 실내모델시험에서의 결과와 유사한 10 mm 이하로 매우 양호한 정도를 보였다.

세 개의 촬영면으로부터 모두 27개 절리면에 대한 절리 방향을 해석하였다. 영상측정 결과와의 비교 대상은 클리노컴파스에 의한 측정값이다. 클리노컴파스에 의한 절리면 방향 측정은 1개 절리면에 대해 모서리 부분에서 4회 중앙에서 1회 총 5회에 걸쳐 수행하였으며 최종 측정값은 이들의 평균값을 취하였다. 영상측정 및 클리

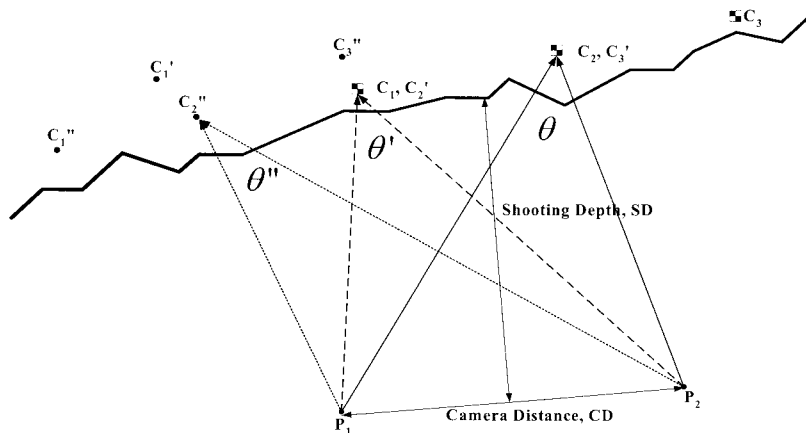
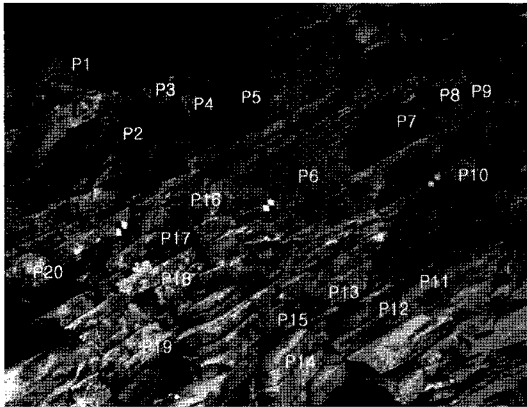
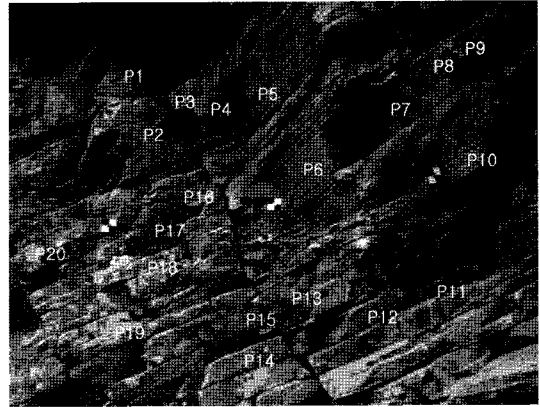


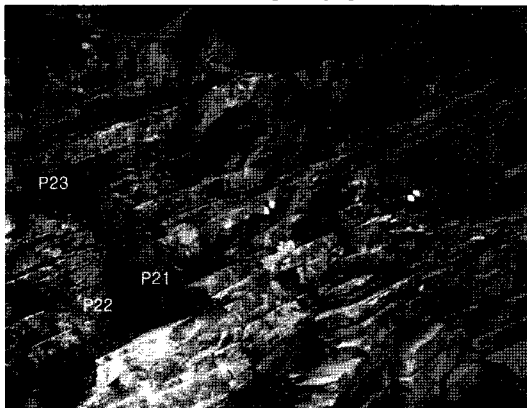
Fig. 13. Photographing layout of field application for extended analysis



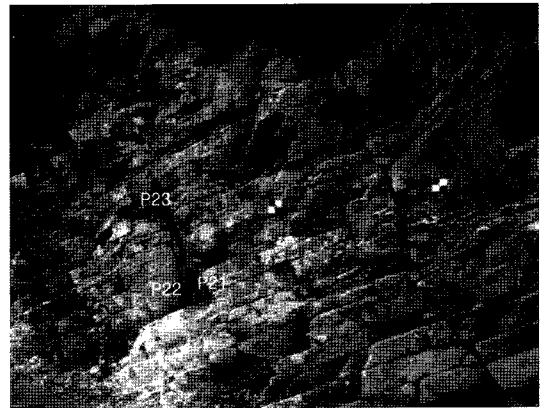
(a) 1st left photograph



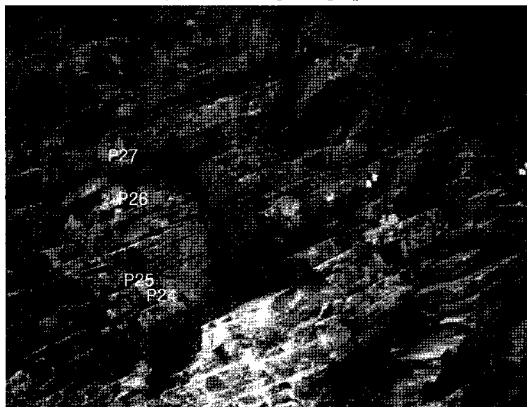
(b) 1st right photograph



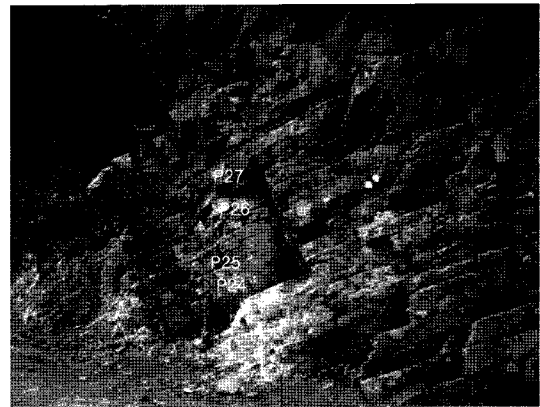
(c) 2nd left photograph



(d) 2nd right photograph



(e) 3rd left photograph



(f) 3rd right photograph

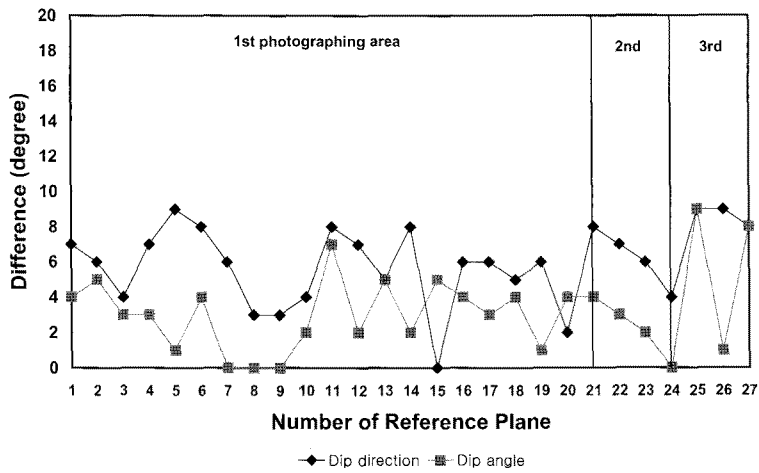
Fig. 14. Three pairs of images of rock slope photographed for extended analysis (SD: over 3 m, 1600×1200 pixel)

노컴파스 측정 결과의 차이 분포는 Fig. 15와 같이 나타났다. 값의 차이는 경사방향의 경우  $0^{\circ} \sim 9^{\circ}$ , 경사각의 경우  $0^{\circ} \sim 5^{\circ}$  정도로 나타났다. 일반적으로 조사자에 따라 동일한 절리면에 대한 클리노컴파스 측정 오차는 경사

방향의 경우  $\pm 10^{\circ}$ , 경사각의 경우  $\pm 5^{\circ}$  정도[Ewan, 1981]로 보고되고 있으며, 클리노컴파스 기계 측정오차 역시  $\pm 2^{\circ}$ 를 보이고 있어 영상측정에 의한 방향 산정 결과는 타당한 수준으로 판단된다.

**Table 3.** Differences obtained according to the measuring methods in the global coordinates of the ground control points, C<sub>1</sub> and C<sub>3</sub> of the 2nd and the 3rd photographing area

1st	Control point	Total station measurement (mm)			Calculation from 1st photographing area (mm)			Difference (mm)		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
	C <sub>1</sub> '	-1,228.0	15,501.0	-1,893.0	-1,228.425	15,506.359	-1,892.520	0.425	5.359	0.480
	C <sub>3</sub> '	1,142.0	15,072.0	-1,536.0	1,140.956	15,507.311	-1,536.450	1.044	0.689	0.450
2nd	Control point	Calculation from 1st photographing area (mm)			Calculation from 2nd photographing area (mm)			Difference (mm)		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
	C <sub>1</sub> '	-10.0	15,472.0	-2,622.0	-6.783	15,477.371	-2,621.489	3.217	5.371	0.511
	C <sub>3</sub> '	0.0	15,752.0	-1,660.0	-3.405	15,751.705	-1,661.820	3.405	0.295	1.820
3rd	Control point	Calculation from 2nd photographing area (mm)			Calculation from 3rd photographing area (mm)			Difference (mm)		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
	C <sub>1</sub> ''	-2,354.0	15,840.0	-2,311.0	-2,355.657	15,847.184	-2,313.869	0.657	7.184	1.869
	C <sub>3</sub> ''	-1,228.0	15,501.0	-1,893.0	-1,231.378	15,509.801	-1,893.693	3.378	8.801	0.693



**Fig. 15.** Differences in the joint orientation by two measuring methods

**5. 결론**

디지털 영상에 의한 암반 내 절리의 기하학적 특성을 해석하기 위해 촬영방향의 제약을 최소화하고 해석범위를 최대한 확보할 있는 GP법의 현장 적용을 위하여 촬영 시스템을 개발, 구성하고 최적촬영조건을 분석하였으며 이를 암반 사면에 적용하여 절리의 방향성 측정 결과를 기존 수작업에 의한 클리노컴파스 측정 결과와 비교 분석하였다. 이상의 연구로부터 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) GP법의 일고리즘을 구현하기 위한 촬영 시스템을

설계 제작하였다. 촬영시스템은 디지털 사진기, 사진기 조절 장치, 지상보조점 장치 및 광파기로 구성되었다.

(2) 본 연구에서와 같이 해상도 2M 픽셀의 디지털 사진을 사용할 경우 영상좌표 인식 오차를 최대 5 픽셀, 절리 방향성 측정 결과에 대한 오차를 ±2° 이내로 설정하면, 영상 측정에서 공간좌표의 오차 범위는 X, Y, Z 성분 공통적으로 약 10 mm 이내가 되는 것으로 나타났다. 이러한 수준의 오차를 만족하는 최대촬영거리는 약 5.5 m가 적절한 것으로 분석되었다.

(3) 촬영영향요소 분석을 실내에서 수행한 결과, 수렴각

이 25° 미만으로 작아질수록 두 영상에서의 시각차가 감소하여 오차가 커지는 경향을 보였다. 촬영시 적절한 수렴각의 범위는 25°~150°인 것으로 분석되었다.

- (4) 최적 현장촬영조건을 적용하여 절리 암반 사면에서 GP법의 현장 적용성을 검토하였다. 현장 적용에는 초기입력요소인 3개의 지상조절점은 최초 촬영면에서만 설정하고 이후 인접한 촬영면에서는 이전 촬영면에서 공간좌표가 얻어진 점들을 지상조절점으로 이용하는 확장해석기법을 개발하여 적용하였다.
- (5) 클리노컴파스에 의한 측정결과와 영상측정에 의한 결과를 비교한 결과, 절리면 경사방향의 경우 0°~9°, 경사각의 경우 0°~5° 정도로 나타났다. 일반적으로 조사자에 따라 동일한 절리면에 대한 클리노컴파스 측정 오차는 경사방향의 경우 ±10°, 경사각의 경우 ±5° 정도[Ewan, 1981]로 보고되고 있으며, 클리노컴파스 기계오차 역시 ±2°를 보이고 있어 영상측정에 의한 방향 산정 결과는 타당한 수준으로 판단된다.

## 참고문헌

- 김재동, 김종훈, 2003, 수렴다중촬영기법을 이용한 새로운 절리방향 해석방법, 티널과 지하공간(한국암반공학회지) 13.6, 486-494.
- 김종훈, 2002, 암반 절리의 기하학적 특성 분석을 위한 디지털 사진측량기법의 개발, 공학박사학위논문, 강원대학교 대학원, 176p.
- Bae, S.H., 2001, The component development of digital close range photogrammetry for the construction structure displacement analysis, New Technology for a New Century, Int. Conf. of FIG Working Week 2001, Seoul, Korea, May, 2001.
- Booche, F. and G. Heinz, 1996, Generation and use of digital surface models for volumetric objects, IAPRS, Vol., 31, Part B3, Commission III, 70-76.
- DCS, Inc. 1998, Sub-pixel target accuracy study, DCS, Inc.
- Ewan, V.J. and G. West, 1981, Reproducibility of joint orientation measurements in rock, TRRL Report SR 702, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne.
- Fraser, C.S., 1984, Network design considerations for non-topographic photogrammetry, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 50, No. 8, 1115-1126.
- Fraser, C.S., 1996, Network Design, K.B., Atkinson, Edited, Close range photogrammetry and machine vision, Whittles Publishing, 256-281.
- Gruen A., 1996, Least Squares Matching: A fundamental Measurement Algorithm, from Atkinson: Close Range Photogrammetry and Machine Vision, Whittles Publ., 217-255.
- Mason, S., 1995, Conceptual model of the convergent multistation network configuration task, Photogrammetric Record, Vol. 15, No. 86, 277-299.
- Trucco, E. and A. Verri, 1998, Introductory techniques for 3-D computer vision, Prentice-Hall, 28-33, 150-171.
- Wolf, P. R., 1983, Elements of photogrammetry, with air photo interpretation and remote sensing, McGraw-Hill, 75-79.



### 김종훈

1995년 강원대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
1997년 강원대학교 대학원 자원공학과 공학석사  
2002년 강원대학교 대학원 지구시스템공학과 공학박사  
Tel: 02-579-5834  
E-mail: rocksen@hsgo.co.kr  
현재 (주)희송지오택 지반공학1부 부장



### 김재동

1981년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
1983년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사  
1988년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사  
Tel: 033-250-6256  
E-mail: jdkim@kangwon.ac.kr  
현재 강원대학교 지구환경공학부 교수