

## 수렴다중촬영기법을 이용한 새로운 절리방향 해석방법

김재동<sup>1)\*</sup>, 김종훈<sup>2)</sup>

### A New Algorithm for the Interpretation of Joint Orientation Using Multistage Convergent Photographing Technique

Jaedong Kim and Jong-Hoon Kim

**Abstract** When the orientations of joints are measured on a rock exposure, there are frequent cases that are difficult to approach by the surveyor to the target joints or to set up scanlines on the slope. In this study, to complement such limit and weak points, a new algorithm was developed to interpret joint orientation from analyzing the images of rock slope. As a method of arranging the multiple images of a rock slope, the multistage convergent photographing system was introduced to overcome the limitation of photographing direction which existing method such as parallel stereophotogrammetric system has and to cover the range of image measurement, which is the overlapping area between the image pair, to a maximum extent. To determine camera parameters in the perspective projection equation that are the main elements of the analysis method, a new method was developed introducing three ground control points and single ground guide point. This method could be considered to be very simple compared with other existing methods using a number of ground control points and complicated analysis process. So the global coordinates of a specific point on a rock slope could be analyzed with this new method. The orientation of a joint could be calculated using the normal vector of the joint surface which can be derived from the global coordinates of several points on the joint surface analyzed from the images.

**KeyWords** Joint Orientation, Multistage Convergent Photogrammetry, Collinear Equation, Camera Parameter

**초 록** 본 암반사면에서 절리의 방향성을 측정할 때, 조사자가 접근 불가능한 경우나 조사선을 설정하기 어려운 경우가 종종 나타난다. 본 연구에서는 이와 같은 한계성과 단점을 보완하기 위하여 해석 대상 암반사면의 영상으로부터 절리면의 방향성을 유도하는 새로운 알고리즘을 개발하였다. 암반사면 영상을 얻는 방법으로는, 영상 조합상 사이의 중첩구간인 영상측정 범위를 최대한 확보하고, 평행스테레오 사진측량시스템과 같은 기존방법이 갖고 있는 촬영방향의 제한을 극복하기 위해, 수렴 다중 촬영 시스템을 적용하였다. 해석 방법의 주된 요소인 공선조건식의 사진기 요소를 결정하기 위하여, 3점의 지상조절점과 새롭게 1점의 지상보조점을 도입하는 방법을 개발하였다. 이는 수많은 지상조절점과 복잡한 해석과정으로 구성된 기존의 사진기 요소 결정방법에 비해 매우 간편한 방법이라고 할 수 있다. 절리면의 방향성은 절리면 위에 놓인 여러 점들의 공간좌표를 영상좌표로부터 계산한 후, 이로부터 구성된 절리면의 법선 벡터에 의해 유도하였다.

**핵심어** 암반 사면, 절리면 방향성, 수렴다중촬영기법, 공선조건식, 사진기 요소

## 1. 서 론

암반 굴착은 단계적으로 조사, 시험, 안정성 해석, 시공, 변위 계측, 보강 등의 과정으로 이루어지며, 이러한 각각의 단계 가운데 조사와 시험으로부터 설계와 안정성 해석에 중요한 기초 자료를 얻을 수 있다. 기초 자료

에는 특히 암반 내에 발달되어 있는 절리의 분포 구조나 물리역학적 특성 등에 관한 항목들이 대부분을 차지하고 있으며, 이는 암반 구조물의 공학적 안정성 및 시공 경제성이 이와 같은 자료를 정량적이고 구체적으로 파악하는 것에 크게 좌우된다고 할 수 있기 때문이다.

현재 암반의 절리 특성 중 기하학적 특성에 관련된 항목들로는, 방향성, 거칠기, 간격, 틈, 벽면강도, 충전물, 연속성, 블록 수, 블록 크기 등을 들 수 있으며 이를 조사하기 위해서는 지표지질조사, 시추공벽 또는 코어 조사에 의한 방법들이 시행되고 있다. 그러나 현재 시행되고 있는 자료 조사 과정에서 나타나고 있는

<sup>1)</sup> 강원대학교 지구환경공학부 교수

<sup>2)</sup> 강원대학교 대학원 지구시스템공학과(현 (주)희송지오택, 과장)

\*교신저자(Corresponding Author): jdkim@kangwon.ac.kr

접수일: 2003년 11월 24일

심사 완료일: 2003년 12월 19일

문제점(Priest, 1993)으로는 시추 코어나 시추공벽에 대한 조사의 경우 얻을 수 있는 자료의 범위가 제한적이라는 단점이 있고, 지표 노두조사에서의 경우, 기존의 조사선이나 조사창에 의한 방법에서는 조사 범위가 한정되어 자료에 오류가 포함되거나 조사자가 쉽게 접근할 수 없어 측정이 곤란해지는 경우들이 빈번히 발생하고 있다.

이러한 문제점들을 보완하기 위하여 본 연구에서는 암반 구조물의 설계 및 안정성 해석에 필수적인 암반 내 절리 구조의 기하학적 특성 중 방향성에 대한 자료를 영상측정에 의하여 획득할 수 있는 기법을 개발하는 것을 목표로 하였다.

2차원 영상을 이용한 3차원 측정 기술은 사진측량과 컴퓨터 비전 분야에서 발전되어 온 것으로 이미 기초 이론 부분(Atkinson, 1996)은 확립되어 있다고 할 수 있으며, 사진기 요소를 결정하는 방법에 따라 사진 측량에서는 전방 교회법, 후방교회법(Wolf, 1983), DLT 법(Abdel-Aziz and Karara, 1971) 등이, 컴퓨터 비전에서는 Tsai법(Tsai, 1986) 등이 개발되어 적용되고 있다. 그러나 이러한 방법들을 촬영 범위나 해상도, 야외 촬영 조건 등에서 부적합한 부분들이 있어 암반공학에서 적용하기에 적합한 방법을 응용 개발할 필요가 있는 것으로 판단되었다. 본 연구에서는 이러한 전제 하에 촬영 기법 중 하나인 수렴다중촬영기법을 적용하고 촬영된 디지털 영상으로부터 절리면의 방향성을 해석하기 위하여 종래의 방법들과는 달리 필요한 지상조절점의 수를 3점으로 대폭 줄이고 한 점의 지상보조점을 도입한 새로운 해석 방법을 개발하였다.

## 2. 이론적 배경

영상에 의한 공간 대상물의 정량적 특성을 추출하고 해석하는 방법은 사진측량과 컴퓨터 비전 분야에서 시작되었으며, 각 분야는 동일한 이론적 배경 하에서 각각의 공학적 응용 분야에 적합하도록 독자적으로 많은 연구가 진행되어 왔다. 따라서 이 두 분야의 이론 전개에서 사용되는 용어에는 약간의 차이가 있으며, 해석 방법에 있어서도 구하고자 하는 목적, 즉 대상물의 형상에 대한 정확도, 인식도 등에 따라 다소 차이가 있다(Hartley and Mundy, 1993).

공간좌표를 유도하기 위해 기본 식으로 사진측량과 컴퓨터 비전에서는 공통적으로 공선조건식(컴퓨터 비전에서는 중심투영방정식이라고 칭함)을 적용한다.

3차원 공간좌표와 2차원 영상좌표 사이의 관계를 나타내는 공선조건식은 식 (1)과 같이 정의된다. 식 (1)에

서  $a$ 는 영상좌표,  $A$ 는 공간좌표에 해당하는 벡터 표현이며,  $k$ 는 스케일상수,  $R$ 은 회전행렬이다(Moffitt and Mikhail, 1980).

$$a = kR A \tag{1}$$

공선조건식을 구성하기 위해서는 사진기의 내, 외부 요소를 결정하여야 하며, 이 단계를 거쳐 촬영된 공간상의 대상물의 기하학적 특성을 해석할 수 있다. 사진기 요소는 공간좌표계 내에서 사진기의 위치 및 촬영 방향을 나타내며, 사진기의 위치나 촬영 방향이 바뀌면 달라지므로 매번 촬영에서 이를 결정해야만 한다. 식 (1)을 사진기 요소를 포함하여 자세하게 나타내면 식 (2)와 같다.

$$\begin{bmatrix} x_a - x_0 \\ y_a - y_0 \\ -f \end{bmatrix} = kR \begin{bmatrix} X_A - X_P \\ Y_A - Y_P \\ Z_A - Z_P \end{bmatrix} \tag{2}$$

식 (2)에서  $(X_A, Y_A, Z_A)$ 는 대상물의 임의 점 A의 공간좌표이고,  $(x_a, y_a)$ 는 영상면에 투사된 공간좌표 A의 영상좌표이다. 사진기 내부요소는 사진기의 초점거리(focal length,  $f$ )와 사진주점(principal point,  $(x_0, y_0)$ )이며, 사진기 외부요소에는 사진기의 방향을 나타내는 사진기 광축의 회전각(rotation angle,  $(\omega, \phi, \kappa)$ )의 조합인 회전행렬과 사진기의 촬영 위치를 나타내는 전이벡터(translation vector,  $(X_P, Y_P, Z_P)$ )가 있다.

사진기의 촬영 조건으로부터 설정된 사진기 요소의 초기값과 초기입력치로서 이미 알고 있는 다수의 지상조절점들의 공간좌표를 이용하여 공선조건식을 반복계산함으로써 최적화된 사진기의 요소를 결정할 수 있다. 촬영된 영상 내 임의 점의 공간좌표를 해석하기 위해서는 사진기 요소가 결정된 사진기들에 의해, 서로 다른 각도에서 촬영된 한 쌍의 동일 대상물의 영상을 조합함으로써 대상물의 형상을 구성하는 공간좌표들을 구할 수 있다.

촬영 각도에 대한 여러 경우 중에서 가장 단순화된 것은 평행스테레오 사진측량기법(Moffitt and Mikhail, 1980)이라고 할 수 있으며 현재 가장 많이 사용되고 있다고 할 수 있다. 이 방법은 한 쌍의 사진기의 촬영 방향이 평행한 특수한 경우에서의 해석 기법이다. 이 경우에는 사진기의 내, 외부요소를 미리 결정하여 공선조건식을 시각차 공식으로 간단하게 표현할 수 있다. 이는 해석방법이 간단한 장점이 있어 실제 암반사면에 적용된 바 있으나(Hagan, 1980, 류동우 외, 2000), 영상

에 중첩되지 않는 부분이 상당 비율 존재하고 사진기 설치 지점의 조건에 영향을 받을 수 있는 단점이 있다. 그러나 암반을 대상으로 촬영할 경우 사면이나 터널 작업면 등 촬영지역의 조건에 대한 제한이 있을 수 있으며 촬영에 소요되는 시간적 제한 역시 존재할 수 있으므로 초기 입력치인 지상조절점의 수를 최대한 줄이고 중첩된 양 사진기의 촬영범위를 최대화할 수 있는 개선된 방법의 개발이 필요하다고 할 것이다.

3. 해석방법

본 연구에서는 해석 범위를 최대화하기 위하여 근거리 사진측량의 수렴다중촬영기법을 적용하고, 촬영조건에 제약을 두지 않도록 하기 위하여 3차원 공간좌표와 2차원 영상좌표 사이의 관계를 정의하는 공선조건식의 일반식을 적용하였다. 일반식의 적용을 위해서는 지금까지 최소 6개 이상의 지상조절점이 필요하였으나 본 연구에서 개발된 알고리즘에서는 한 개의 지상보조점(ground guide point, G)을 도입함으로써 필요한 지상조절점(ground control point, C)의 수를 3점으로 최소화하여 공선조건식의 구성 요소를 결정하였다.

Fig. 1은 공간좌표계(world coordinate system)와 사진기좌표계(camera coordinate system) 및 영상좌표계(image coordinate system)의 축 설정과 지상조절점과 지상보조점의 기하학적 배열을 나타낸 것이다.

3.1 초점거리와 중심투영점

사진기 요소를 결정하기 위하여 사진기를 지상에 설치하고 촬영 대상면에 지상조절점을 설정하여 촬영 배열을 구성한 이차원 배치도는 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서  $f$ 는 초점거리, P는 중심투영점(perspective center), o

는 사진주점(principal point),  $C_1, C_2, C_3$ 는 지상조절점, G는 지상보조점이다.  $c_1, c_3$ 는 지상조절점  $C_1$ 과  $C_3$ 가 영상면에 투영된 점들이다.  $C_2$ 와 G를 연결한 공간상의 직선을  $I$ 라 하고,  $C_1$ 과  $C_3$ 가 직선  $I$ 에 내린 수선의 길이를  $u_1$ 과  $u_2$ 라고 할 때  $C_1'$ 과  $C_3'$ 은  $C_1$ 과  $C_3$ 가 직선  $I$ 에 내린 수선의 발이 만나는 점이다.  $d_1$ 과  $d_2$ 는 각각 영상에 투영된  $c_1$ 과  $c_3$ 로부터 영상주점까지의 거리이다. 초점거리는 공간상에서의 길이  $u_1, u_2$ 와 영상에서의 길이  $d_1, d_2$ 의 비례관계를 이용하여 식 (3)과 같이 결정할 수 있다.

$$f = (s_1 - s_2) \left( \frac{d_1 d_2}{u_1 d_2 - u_2 d_1} \right) \tag{3}$$

전이벡터 성분인 중심투영점, P의 위치는 Fig. 2에서 지상보조점과 중심투영점사이의 거리를  $g$ 라 할 때, 식

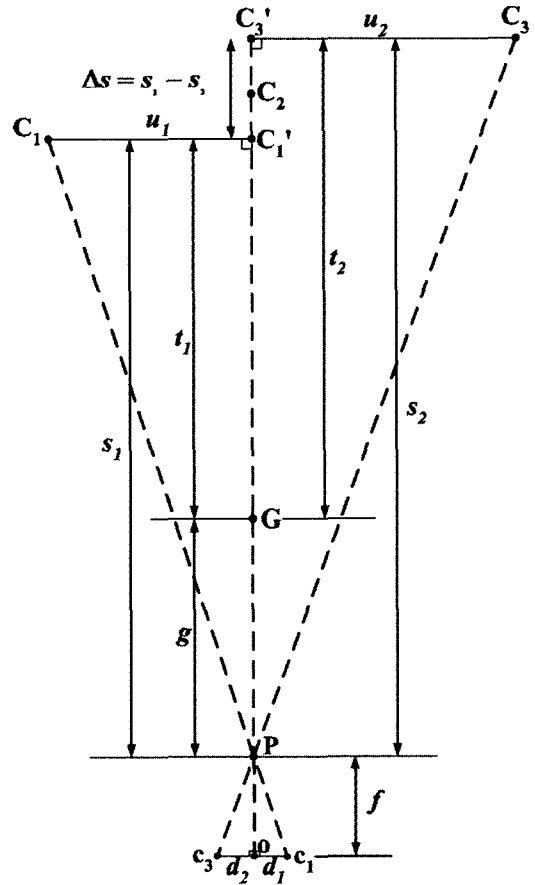


Fig. 2. Two dimensional layout of new algorithm, representing focal length, ground guide point and ground control points

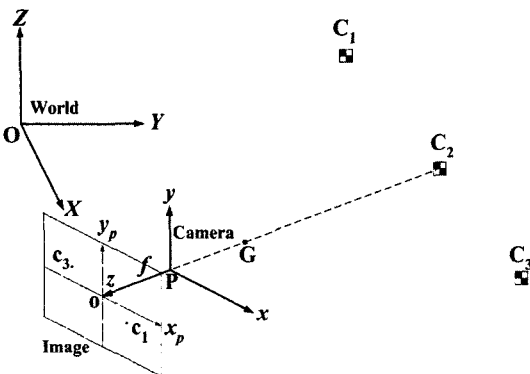


Fig. 1. Geometrical layout of 3 ground control points (C) and a ground guide point (G)

(4)와 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} P_x &= G_x - gl, & P_y &= G_y - gm, \\ P_z &= G_z - gn \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,  $l, m, n$ 는 직선  $I$ 의 방향코사인이다.

### 3.2 회전행렬

사진기의 방향을 결정하는 사진기의 회전행렬은 사진기좌표계의 세 축의 회전 정도를 나타내는 회전각들에 의해 결정된다. 지상조절점과 지상보조점을 적용함으로써 이러한 사진기의 회전각은 사진주점, 지상조절점, 지상보조점을 공간상에서 연결한 공선의 방향코사인을 통해 간단하게 유도할 수 있다.

Fig. 3은 측량원점을 기준으로 설정된 공간좌표계에서 영상의 회전과 공선의 방향코사인과의 관계를 나타낸 것이다. 광축의 직선방정식은 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{x-a}{L} = \frac{y-b}{M} = \frac{z-c}{N} \rightarrow \\ \frac{x-a}{l} = \frac{y-b}{m} = \frac{z-c}{n} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,  $L=kl, M=km, N=kn$ 이다. 방향코사인은 식 (6)과 같이 정의된다.

$$\text{direction cosine; } \cos \alpha = l, \quad \cos \beta = m, \quad \cos \gamma = n \quad (6)$$

방향코사인에 의한 회전행렬의 구성은 식 (7)과 같다.

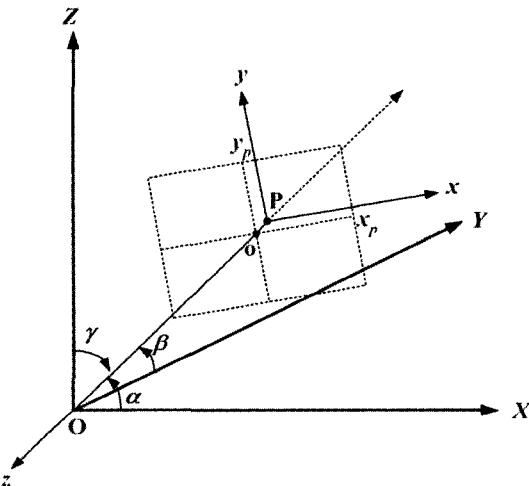


Fig. 3. Construction of rotation matrix by direction cosines

$$R = \begin{bmatrix} \cos(x, X) & \cos(x, Y) & \cos(x, Z) \\ \cos(y, X) & \cos(y, Y) & \cos(y, Z) \\ \cos(z, X) & \cos(z, Y) & \cos(z, Z) \end{bmatrix} \quad (7)$$

회전행렬 구성 요소와 직선의 방향코사인 사이에 일치하는 부분은 식 (8)과 같다.

$$\cos(z, X) = l, \quad \cos(z, Y) = m, \quad \cos(z, Z) = n \quad (8)$$

회전각( $\omega, \phi, x$ )에 의한 회전행렬의 구성은 식 (9)와 같다.

$$\begin{aligned} R_{\omega\phi x} = R_z R_\phi R_\omega = \\ \begin{bmatrix} \cos \phi \cos x & \sin \omega \sin \phi \cos x + \cos \omega \sin x & -\cos \omega \sin \phi \cos x + \sin \omega \sin x \\ -\cos \phi \sin x & -\sin \omega \sin \phi \sin x + \cos \omega \cos x & \cos \omega \sin \phi \sin x + \sin \omega \cos x \\ \sin \phi & -\sin \omega \cos \phi & \cos \omega \cos \phi \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

식 (7), (8) 및 (9)에서  $l = r_{31}, m = r_{32}, n = r_{33}$  이므로,

$l = \sin \phi, m = -\sin \omega \cos \phi, n = \cos \omega \cos \phi$  이 성립한다. 따라서 직선  $I$ 의 방향코사인으로부터 회전각  $\omega, \phi$ 는 식 (10)과 같이 구할 수 있다. 회전각의 부호 역시 방향 코사인으로부터 결정된다.

$$\begin{aligned} \phi &= \sin^{-1}(l), & \omega &= \tan^{-1}(-m/n) \quad (\because \frac{m}{n} = \frac{-\sin \phi \cos \phi}{\cos \omega \cos \phi} = -\tan \omega) \end{aligned} \quad (10)$$

회전각  $x$ 는 지상조절점  $C_1$ 과  $C_3$ 의 공간좌표와 식 (10)으로부터 구한 영상좌표로부터 구할 수 있다. 먼저 식 (10)으로부터 구한 회전각  $\omega, \phi$ 와  $x=0$ 일 때의 회전행렬로부터  $C_1$ 과  $C_3$ 의 영상좌표를 계산하고 실제로 사진에서 측정한  $C_1$ 과  $C_3$ 의 영상좌표를 비교하여  $Z$ 축을 중심으로 회전한 각도  $x$ 의 값을 결정한다.

Fig. 4에서  $(x, y)$ 는 실제로 촬영한  $C_1$  또는  $C_3$ 의 영상좌표,  $(x', y')$ 는 직선  $I$ 에 의해 결정된 회전각  $\omega, \phi$ 와  $x=0$ 으로부터 구성된 회전행렬에 의해 계산된 영상좌표이다. 두 영상좌표가 표현하는 벡터의 사잇각이 사진기의  $Z$ 축에 대한 회전각  $x$ 이다. 스칼라적을 이용하여 사잇각( $x$ )를 계산하면 식 (11)과 같다.

$$\begin{aligned} x &= \cos^{-1} \left( \frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{|\vec{a}| |\vec{b}|} \right) \\ &= \cos^{-1} \left( \frac{xx' + yy'}{\sqrt{x^2 + y^2} \sqrt{x'^2 + y'^2}} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

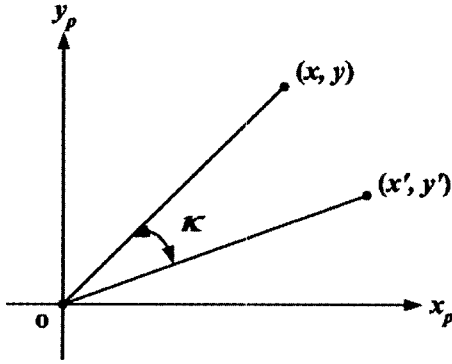


Fig. 4. Determination of  $\kappa$

$\kappa$ 의 부호는 지상조절점  $C_1, C_3$ 가 영상면에 투사된  $c_1, c_3$ 와 식 (10)에서 결정된  $c_1', c_3'$  사이의  $y$ 좌표 사이의 값을 식 (12)와 같이 비교하여 결정할 수 있다.

$$\text{If } c_{3,y} > c_{3,y}' \text{ then } \kappa < 0, \text{ else } \kappa > 0 \quad (12)$$

식 (12)의 부호와 식 (10), (11) 및 (12)에서 유도한 ( $\omega, \phi, \kappa$ )를 이용하면 식 (9)의 완전한 회전행렬을 구성할 수 있다.

### 3.3 공간좌표 계산

공간좌표를 유도하기 위해서는 Fig. 5와 같이 두 대의 사진기에 의한 수렴촬영 배열을 배치한다. 사진기의 내, 외부 요소를 구성요소로 하여 각각의 사진기에서 2차원 영상좌표와 3차원 공간좌표 사이의 관계를 나타내는 공선조건식을 식 (13)과 같이 구성하였다.

$$\begin{aligned} (X - X_{P_L}) &= (Z - Z_{P_L})A, & (Y - Y_{P_L}) &= (Z - Z_{P_L})B, \\ (X - X_{P_R}) &= (Z - Z_{P_R})C, & (Y - Y_{P_R}) &= (Z - Z_{P_R})D \end{aligned} \quad (13)$$

여기서,

$$\begin{aligned} A &= \left[ \frac{r_{L11}(x_L - x_0) + r_{L12}(y_L - y_0) + r_{L13}(-f_L)}{r_{L13}(x_L - x_0) + r_{L15}(y_L - y_0) + r_{L13}(-f_L)} \right] \\ B &= \left[ \frac{r_{L12}(x_L - x_0) + r_{L12}(y_L - y_0) + r_{L12}(-f_L)}{r_{L13}(x_L - x_0) + r_{L15}(y_L - y_0) + r_{L13}(-f_L)} \right] \\ C &= \left[ \frac{r_{R11}(x_R - x_0) + r_{R12}(y_R - y_0) + r_{R13}(-f_R)}{r_{R13}(x_R - x_0) + r_{R15}(y_R - y_0) + r_{R13}(-f_R)} \right] \\ D &= \left[ \frac{r_{R12}(x_R - x_0) + r_{R12}(y_R - y_0) + r_{R12}(-f_R)}{r_{R13}(x_R - x_0) + r_{R15}(y_R - y_0) + r_{R13}(-f_R)} \right] \end{aligned}$$

식 (13)에서 ( $X, Y, Z$ )는 해석하고자 하는 대상점의

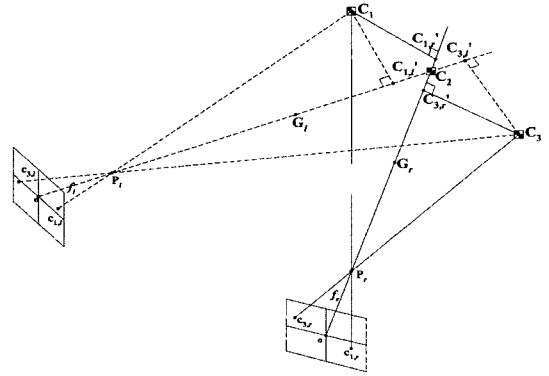


Fig. 5. A layout of multistage convergence photographing system for derivation of global coordinate of vertexes composing joint plane

공간좌표이고,  $(x_L, y_L)$ 과  $(x_R, y_R)$ 는 해석 대상점이 각각 왼쪽 및 오른쪽 사진영상에 투사된 영상좌표이다.  $(X_L, Y_L, Z_L)$ 과  $(X_R, Y_R, Z_R)$ 은 각각 왼쪽 및 오른쪽 사진기의 중심투영점의 공간좌표로서 전이벡터 성분이며  $r_L$ 과  $r_R$ 은 각각 왼쪽 및 오른쪽 사진기의 회전행렬 구성 요소이다. 식 (13)의 공선조건식을 조합하여 풀면 구하고자 하는 해석 대상점의 X좌표를 4개, Y좌표를 4개, 그리고 Z좌표를 2개 얻을 수 있으며, 이로부터 최종적으로 대상점의 공간좌표는 각 좌표값들의 평균값을 구하여 결정할 수 있다.

### 3.4 방향성 결정

절리면의 방향성은 경사방향과 경사(각)으로서 정의된다. 본 연구에서는 먼저 절리면 상에 위치한 여러 점들의 공간좌표를 영상으로부터 구한 후, 이들 점들에 의해 구성된 절리면의 법선 벡터를 유도하여 방향성을 구하였다.

절리면의 법선 벡터는 절리면을 구성하는 꼭지점들의 공간좌표를 연결한 벡터 사이의 벡터적을 이용하여 유도할 수 있다. 절리면을 Fig. 6과 같이 사각형 형태로 가정할 경우, 절리면의 법선 벡터는 4개 꼭지점들의 조합에 의해 유도할 수 있다. 구할 수 있는 면의 법선 벡터는 4개 꼭지점에 대해 각각 3경우씩, 모두 12경우에 의해 유도할 수 있다. 최종적인 면의 법선 벡터는 12개의 법선 벡터를 최적화하여 결정한다. 이 과정은 수학적으로는 동일한 값을 얻게 되므로 의미가 없으나 실제 절리면의 경우에 있어서는 완전한 평면인 경우를 생각할 수 없으므로 대표적인 법선 벡터의 방향을 결정하는 데 필요하다.

경사방향은 Fig. 7과 같이 법선 벡터 N의 x성분(N<sub>x</sub>)

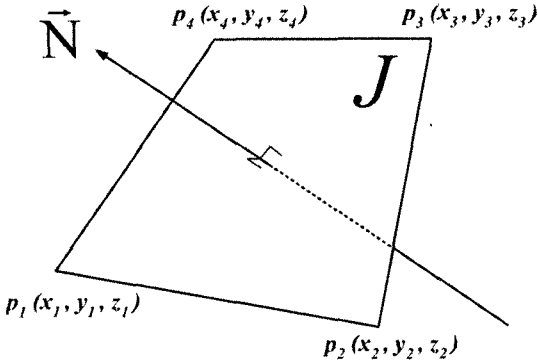


Fig. 6. Joint plane and its normal vector

$$\beta = \cos^{-1} \left( \frac{\mathbf{N} \cdot \mathbf{N}_z}{\|\mathbf{N}\| \|\mathbf{N}_z\|} \right), \quad \text{if } (c > 0) \quad (16)$$

$$\beta = 180^\circ - \cos^{-1} \left( \frac{\mathbf{N} \cdot \mathbf{N}_z}{\|\mathbf{N}\| \|\mathbf{N}_z\|} \right), \quad \text{if } (c < 0) \quad (17)$$

#### 4. 기하학적 검증

본 연구에서 새로이 개발한 수렴다중촬영기법을 이용한 절리 방향성 분석 기법의 타당성을 검증하기 위하여 알고 있는 사진기 매개변수들로부터 구성된 공선조건식과 제안한 알고리즘에 의해 구성된 공선조건식의 비교를 통해 수행하였다.

첫 번째 단계는 고정된 사진기 요소들로부터 유도한 공선조건식에 의해 지상조절점에 대응하는 영상좌표를 각각의 사진기에 대해 유도하는 과정이다. 이때 공선조건식에서 고정된 사진기 요소는 회전각, 투영중심점, 초점거리이다. 좌·우 사진기의 회전각, 투영중심점의 공간좌표, 초점거리를 식 (13)에 대입하여 공선조건식을 구성하고 알고 있는 지상조절점의 좌표를 대입하면 이에 대응하는 영상좌표를 구할 수 있다. 이때, 제안한 알고리즘에서 필요로 하는 지상보조점의 공간좌표는 투영중심점으로부터 일정거리  $g$ 만큼 떨어져 있다고 가정하고, 투영중심점  $P$ 와 지상조절점  $C_2$ 를 연결한 공선의 직선방정식으로부터 유도하였다.

두 번째 단계에서는 제안한 알고리즘에 의해 공선조건식을 구성하는 사진기 요소들을 유도하고 첫 번째 단계에서 유도한 영상좌표로부터 지상조절점의 공간좌표를 유도하는 과정이다. 이때 입력요소는 Fig. 1에서 나

과  $y$  성분( $N_y$ )의 부호 및  $xy$ 면 성분 벡터 ( $N_{xy}$ )와  $y$ 축 성분 벡터 ( $N_y$ )의 스칼라적 관계에 의해 식 (14) 또는 식 (15)와 같이 결정된다.

$$\alpha = \cos^{-1} \left( \frac{N_y}{\|N_{xy}\|} \right), \quad \text{if } (a > 0 \text{ and } b > 0) \text{ or } (a > 0 \text{ and } b < 0) \quad (14)$$

$$\alpha = \cos^{-1} \left( \frac{N_y}{\|N_{xy}\|} \right), \quad \text{if } (a < 0 \text{ and } b < 0) \text{ or } (a < 0 \text{ and } b > 0) \quad (15)$$

절리면의 경사각은 절리면의 법선 벡터  $N$ 의  $z$  성분의 부호에 따라  $N$ 과  $N$ 의  $z$  성분 벡터 ( $N_z$ ) 사이의 스칼라적 관계에 의해 식 (16) 또는 식 (17)과 같이 결정된다.

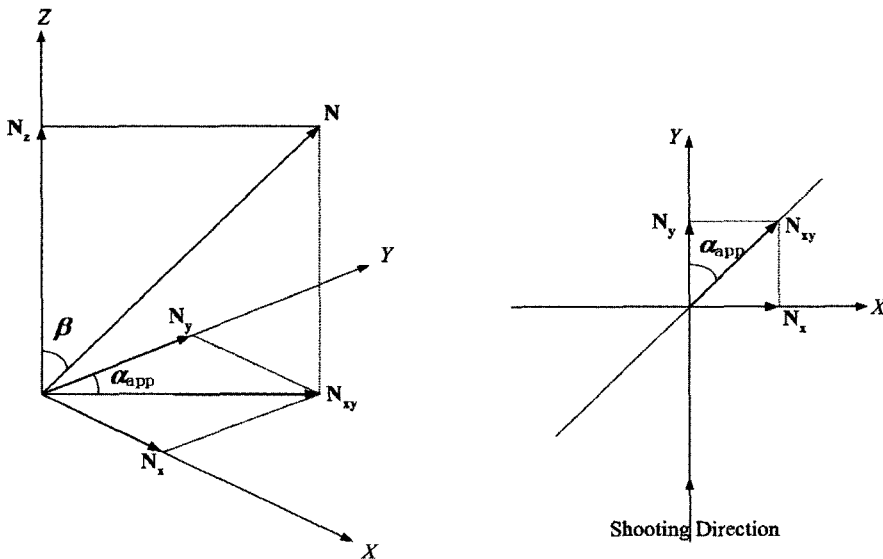


Fig. 7. Calculation of orientation from normal to the joint plane

타낸 것과 같이 지상조절점 C, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>의 공간좌표와 지상보조점 G 및 지상조절점 C<sub>1</sub>, C<sub>3</sub>가 영상에 투영된 영상좌표 c<sub>1</sub>, c<sub>3</sub>이다. Fig. 8은 기하학적 검증을 위해 적용한 초기 기하학적 입력요소들의 배열을 나타낸 것이다.

각 단계에서 구성한 공선조건식의 구성요소들을 비교하고 지상조절점의 공간좌표를 비교함으로써 분석 알고리즘을 검증하였다. Table 1은 각 단계에서의 비교 결과를 나타낸 것이다. 비교결과에서 나타나듯 조절점의 공간좌표의 Y성분이 다른 성분에 비해 다소 큰 오차를 보인다. 이는 지상보조점 G로부터 투영중심점 P사이의 거리인 g의 오차에 의해 결정된 투영중심점의 오차에 영향을 받은 것이다. 이는 계산과정에서 존재하는 오차로 판단된다.

Fig. 9는 개발한 분석 기법에 의해 절리의 공간좌표와 방향을 유도하는 과정을 나타낸 순서도이다. 이와 같은 과정에 의해 영상으로부터 인식된 다수 절리면의 경사방향과 경사각은 절리군집성 분석(joint set analysis)을 위한 입력요소로 이용된다. 일반적으로 절리군집성 분석은 평사투영해석(stereonet analysis)에 의해 절리군의 수 및 절리군의 방향을 결정한다. 또한 절리의 공간

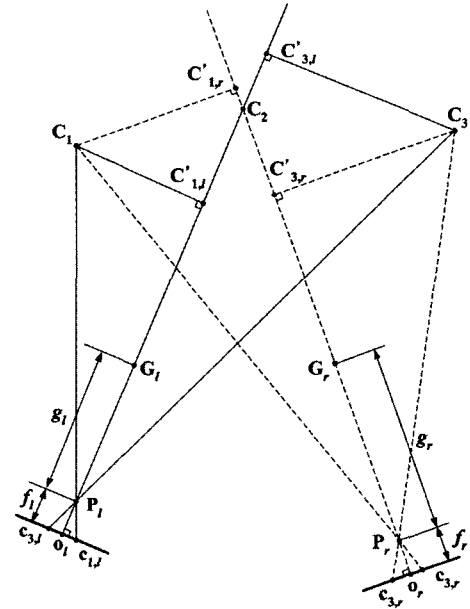


Fig. 8. Layout of geometrical input parameters for geometrical verification

Table 1. Comparison of parameters that used geometrical verification

Parameter		Step 1		Step 2		Difference	
		Left	Right	Left	Right	Left	Right
Control point (mm)	C <sub>1</sub>	-2000, 4500, 1800		-2000.432, 4501.152, 1800.403		0.432, 1.152, 0.403	
	C <sub>2</sub>	100, 5000, 2000		100.000, 4999.998, 1999.993		0.000, 0.002, 0.007	
	C <sub>3</sub>	1800, 4800, 1500		1800.848, 4801.811, 1500.777		0.848, 1.811, 0.777	
Rotation angle (°)	$\omega$	111.595	109.242	111.595	109.242	0.000	0.000
	$\phi$	-22.136	16.848	-22.136	16.848	0.000	0.000
	$\alpha$	0.000	0.000	-0.002	0.005	0.002	0.005
Perspective center (mm)	P	-2000.0, 200.0, 100.0	1800.0, -300.0, 150.0	-2000.281, 199.355, 99.745	1800.521, -301.624, 149.433	0.281 0.645 0.255	0.521 1.624 0.567
	f	11.000	11.000	11.003	11.004	0.003	0.004
	G	.	.	-1057.983, 2353.181, 952.301	930.489, 2410.829, 1096.233	.	.
Length between P and G (mm)	g	2500	3000	2500.748	3001.798	0.748	1.798
image coordinate of control point (mm)	c <sub>1</sub>	-4.475, -0.005	-3.998, -0.044	.	.	.	.
	c <sub>3</sub>	3.865, 0.605	4.914, 0.755	.	.	.	.

좌표는 절리의 길이, 밀도 등과 같은 절리의 기하학적 특성 정량화에 이용된다.

Fig. 9의 순서도에 기반한 프로그램은 FORTRAN으로 작성하였으며 사용한 컴파일러는 F90이다. 프로그램은 JointCaptor Ver. 1.0으로 명명하였다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 암반사면 영상을 이용하여 암반사면에 존재하는 절리의 방향성을 산정하는 새로운 알고리즘을 개발하였다. 개발된 알고리즘에는 수렴 다중 촬영 시스템을 적용하기 위해 공선조건식의 일반식을 적용하였으며, 기존방법의 복잡한 해석과정 및 조절점들을 최소화하기 위하여 3점의 지상조절점과 새롭게 1점의 지상보조점을 도입하였다. 계산과정은 기존의 다른 방

법과 비교해 볼 때 간단하며 절리의 방향성은 공선조건식으로부터 계산한 절리면 상의 여러 점의 공간좌표로부터 구성된 절리면 법선 벡터로부터 유도하였다. 기하학적인 검증을 실시한 결과 최대 오차는 사진 촬영 방향인 Y축 방향으로 2 mm 이하가 발생하였으며 이는 절리의 방향성을 산정하는데 있어 거의 무시할만한 수준으로 판단된다.

### 참고문헌

1. 류동우, 이유리, 장윤섭, 이희근, 박형동, 2000, 화상처리 및 입체사진측량학을 이용한 암반 절리 조사 시스템, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), 10.3, 329-343.
2. Abdel-Aziz, Y.I. and H.M. Karara, 1971, Direct linear transformation from comparator into object space coordinates in close-range photogrammetry, Proceedings of the Symposium on Close-Range Photogrammetry, Fall Church, VA: American Society of Photogrammetry, 1-18.
3. Atkinson, K. B. 1996, Close range photogrammetry and machine vision, Whittles Publishing Services, 9-51.
4. Hagan, T. O., 1980, A case for Terrestrial photogrammetry in deep-mine rock structure studies, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 17, 191-198.
5. Hartley, R.I. and J.L. Mundy, 1993, The relationship between photogrammetry and computer vision, in E.B., Barrett, and D.M., Mckeown, Jr., eds., Integrating Photogrammetric Techniques with Scene Analysis and Machine Vision, Vol. 1944. The International Society for Optical Engineering Proceedings, April 14-15, 1993. Orlando, Florida.
6. Moffitt, F. H. and E. M. Mikhail, 3rd Eds, 1980, Photogrammetry, Happer & Row Publisher, 648p.
7. Priest, S. D., 1993, Discontinuity analysis for rock engineering, Chapman & Hall, 24-62.
8. Tsai, R. Y., 1986, An efficient accurate camera calibration technique for 3D machine vision, Proc. of IEEE Conf. on computer vision and pattern recognition, Miami Beach, FL, 364-374.
9. Wolf, P. R., 1983, Elements of photogrammetry, with air photo interpretation and remote sensing, McGraw-Hill, 75-79.

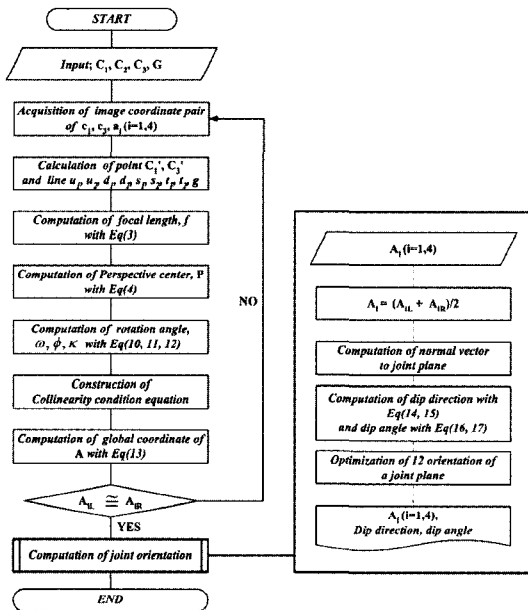


Fig. 9. Flowchart of algorithm for computation of joint orientation and global coordinate of vertices that composed joint plane





### 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



### 김종훈

1995년 강원대학교 공과대학 자원공학과  
공학사  
1997년 강원대학교 대학원 자원공학과  
공학석사  
2002년 강원대학교 대학원 지구시스템  
공학과 공학박사  
Tel: 02-579-5834  
E-mail: rocksen@hsgco.co.kr  
현재 (주)희송지오테크 지반공학2팀 과장