

## 수렴다중촬영기법에 의한 암반사면 절리구조 조사 기법 개발에 관한 연구

김종훈, 김기석 ((주)희송지오택)

김재동 (강원대학교)

### 1. 서론

사면안정해석 뿐만 아니라 암반의 안정성에 큰 영향을 미치는 절리의 기하학적 특성은 조사선 조사, 조사창 조사와 같이 사면에 접촉하여 절리조사를 수행한 후 통계분석을 거쳐 도출해왔다. 사면의 규모가 크거나 불안정한 경우 사람에 의한 접촉식 조사는 불가능한 경우가 빈번하여 대체수단으로서 입체사진측량법과 레이저 스캐닝법 등 비접촉식 조사 방법이 적용되어지고 있다. 각각의 방법은 분석하고자 하는 목적 및 사면의 상태에 따라 서로의 장점을 최대한 활용하여 적용되어지고 있다. 특히 이러한 방식들은 사면의 유지관리 차원에서 현장조사결과에 의한 통합관리센터에서의 DB 구축 및 예·경보 환경 구축[이승호, 2006]에 필요한 자료획득의 효율성 제고 측면에서 훌륭한 도구로서 적용이 가능한 장점이 있다. 그러나 평행입체사진측량(parallax)법은 촬영방향 설정과 한 쌍의 사진영상 사이의 중첩영역의 한계가 존재하며, 레이저 스캐닝법은 레이저의 산란 영향과 고가의 장비도입 비용 및 영상의 인위적인 재구성이 필요한 점 등 제한적인 운영 특성이 있다.

이 연구에서는 이러한 기존 방식의 단점을 보완하고 효율적인 조사기법의 필요성에 따라 디지털 수렴다중촬영기법에 의한 절리구조 조사 기법을 개발하였다. 개발한 기법과 이를 구현한 시작품은 유기적인 유지관리시스템 안에서 실시간 영상정보를 수집하기 위한 현장정보 수집차량[김용수, 2007]에 탑재할 예정이다. 개발한 기법의 알고리즘과 타당성은 실내 검증 및 현장 적용을 통해 차량탑재전 독립적인 장치로 구성하여 지상에서 확인하였다.

### 2. 수렴다중촬영에 의한 절리구조 조사 기법

수렴다중촬영은 평행스테레오사진촬영에 비해 좌, 우 사진에서 중첩되는 영역이 상대적으로 크기 때문에 분석영역이 넓고, 촬영방향의 제약이 상대적으로 적기 때문에 영상에 의한 암반사면의 절리구조 조사에 있어 효율성이 더 크다고 할 수 있다. 일반적으로 3차원 공간 좌표와 2차원 영상좌표사이의 관계는 공선조건식에 의해 정의할 수 있으며, 수렴다중촬영배열에서 공선조건식을 구성하는 회전행렬과 전이벡터 성분은 그림 1과 같이 지상보조점(G)과 지상조절점( $C_1, C_2, C_3$ )를 도입하고  $C_2, G, P$ 를 공간상에 직선(I)상에 위치시킴으로써 유도할 수 있다[김종훈, 2002; 김재동, 2003].

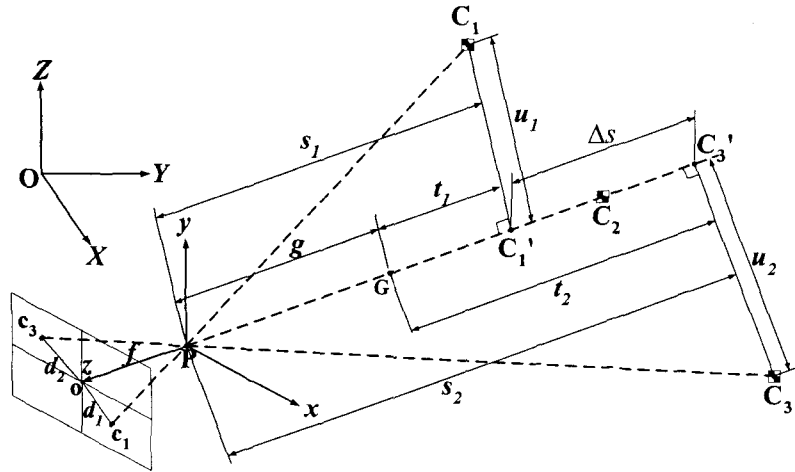


그림 1. 조절점과 보조점의 도입에 따른 공간좌표와 영상좌표 사이의 기하학적 표현

그림 1에서 초점거리(f)와 중심투영점(P)는 식(1)과 식(2)에 의해 유도할 수 있다.

$$f = (s_1 - s_2) \left( \frac{d_1 d_2}{u_1 d_2 - u_2 d_1} \right) \quad (1)$$

$$P_x = G_x - gl, \quad P_y = G_y - gm, \quad P_z = G_z - gn \quad (2)$$

식(1)에서  $l, m, n$ 는  $C_2, G, P$ 가 공간상의 함께 위치하는 직선의 방향코사인이다. 사진기의 촬영방향을 결정하는 회전형렬은  $C_2, G, P$ 의 공선인 사진기 광축의 방향코사인과 사진기좌표축과 공간좌표축사이의 회전을 정의하는 회전각으로 구성할 수 있다. 회전형렬 구성식은 식(3), (4)와 같다. 식(3)과 (4)의 두 가지 회전형렬사이의 관계를 이용하여 식(5)와 같이 광축의 방향코사인으로부터 회전각 가운데  $\omega, \phi$ 를 유도하고, 조절점  $C_1, C_3$ 가 영상에 나타난  $c_1, c_3$ 사이의 각도차로부터  $\kappa$ 를 구한다.

$$R = \begin{bmatrix} \cos(x, X) & \cos(x, Y) & \cos(x, Z) \\ \cos(y, X) & \cos(y, Y) & \cos(y, Z) \\ \cos(z, X) & \cos(z, Y) & \cos(z, Z) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$R_{\omega\phi\kappa} = R_\kappa R_\phi R_\omega = \begin{bmatrix} \cos\phi \cos\kappa & \sin\omega \sin\phi \cos\kappa + \cos\omega \sin\kappa & -\cos\omega \sin\phi \cos\kappa + \sin\omega \sin\kappa \\ -\cos\phi \sin\kappa & -\sin\omega \sin\phi \sin\kappa + \cos\omega \cos\kappa & \cos\omega \sin\phi \sin\kappa + \sin\omega \cos\kappa \\ \sin\phi & -\sin\omega \cos\phi & \cos\omega \cos\phi \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$= \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \phi &= \sin^{-1}(l) \\ \omega &= \tan^{-1}(-m/n) \\ \kappa &= \cos^{-1}\left(\frac{xx' + yy'}{\sqrt{x^2 + y^2}\sqrt{x'^2 + y'^2}}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

좌, 우 사진기의 초점거리, 회전행렬, 전이벡터 성분을 결정하면, 각각의 공선조건식을 구성할 수 있으며 두 공선조건식을 조합하여 풀면 영상좌표쌍을 이용하여 공간상의 임의지점의 공간좌표를 유도할 수 있다.

좌우 영상에서 대응하는 일치점의 한 쌍으로부터 유도된 공간좌표들은 수작업에 의한 조사선 조사나 조사창 조사를 영상분석을 통해 가능하게 해준다. 특히 절리면의 경사방향과 경사는 절리면을 구성하는 임의 사각형을 예상하고 그 사각형의 꼭지점의 공간좌표로부터 구성된 절리면 법선벡터로부터 유도할 수 있다[김재동, 2003].

### 3. 촬영영향요소 분석

개발한 분석 기법의 현장 적용성을 검토하기 전에, 최적 촬영배열을 설계하기 위하여 실내모델시험을 통해 예상 오차와 촬영영향요소들을 분석하였다.

2차원 영상으로부터 3차원 공간좌표 유도를 위한 광학시스템의 정확도는 측정 해상도와 시준표에서 교차하는 광선의 기하학적 배열의 함수이므로 촬영배열 설계시 해석에 적용한 사진기의 측정해상도가 최우선적으로 고려되어야 한다. Mason[1995]과 Fraser[1996]는 일반적인 수렴다중 촬영시스템에서 최적의 사진측량작업을 설계하기 위해서 많은 요소들을 도입하였다. 이러한 촬영배열의 구속조건은 영상축척, 해상도, 촬영위치, 피사계 심도, 입사각, 조절점의 수 및 분포, 촬영횟수, 촬영범위, 가시성 등이다. 이중 상기 알고리즘을 기반으로 촬영배열을 설계할 때, 가장 큰 영향을 미치는 것은 식(6)과 같이 영상축척에 따른 촬영거리, 해상도 및 사진기의 광축들의 입사각이라 할 수 있다. 일반적으로 디지털 사진기의 해상도는 고정되어 있으므로 이에 따라 촬영거리와 입사각을 결정할 수 있으며, 최종 결과로 얻어지는 절리면의 방향과 이를 결정하기 위해 필요한 공간좌표의 계산 오차를 예상함으로써 이러한 구속조건들은 정량화 할 수 있다.

$$d_{\max} = \frac{\bar{\sigma}_c f \sqrt{k}}{q\sigma} \quad (6)$$

여기서,  $d_{\max}$ 는 최대촬영거리,  $f$ 는 사진기의 초점거리,  $\bar{\sigma}_c$  : 공간좌표 표준오차들의 R.M.S.,  $\sigma$ 는 영상좌표 측정 표준오차,  $q$ 는 설계지수(design factor),  $k$ 는 각각의 촬영지점에서의 평균촬영횟수이다.

이와 함께 디지털 영상을 이용하는 경우, 분석대상의 임의 지점을 마킹하는 정밀도가 중요한 요인의 하나로 작용한다. 에지 검출에서 정의하는 바와 같이 중심점은 진 모서리 중심(true edge center)을 갖는 픽셀로 정의한다. 실제로 중심점은 픽셀내의 어디든 존재할 수 있으므로 평균정확도는 0.5픽셀이다. 정밀도면에서 0.5픽셀은 mm 단위에서는 허용할 수 없는 많은 양의 오차에 대응한다[Trucco, 1998]. 일반적으로 측정자는 대상점을 마킹하기 위해 영상을 확대하고 대상점의 위치를 탐색한다. 이러한 작업에는 상당한 부정확성이 존재한다.

아무리 고대비 인공 시준표를 사용한다고 할지라도 측정자는 1~3픽셀 정도의 정확도를 유지할 수밖에 없다. 또한 다른 각도에서 촬영한 영상들에서 동일한 점들은 서로 다르게 보일 수 있으므로 정확도는 영상스케일에서 일반적으로 3~10픽셀 정도까지 확대될 수 있다. 왜냐하면 디지털 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 해석대상지점의 중심점은 픽셀 경계에 위치하거나, 두 개 이상 픽셀에 위치하거나, blurring에 의해 중심선의 경계는 모호하게 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.

이러한 디지털 영상좌표의 측정환경에 따라 구속조건을 결정하기 위해 허용오차를 예상하고 그에 따른 촬영 배열을 구성하였다. 절리면의 방향 계산 허용오차는 이상적인 사각형면을 가정하고 면을 구성하는 꼭지점의 공간좌표를 변화시켜 예상하였다. 절리면 방향이 공간좌표를 연결한 벡터 성분에 의해 결정될 때, 절리면을 구성하는 꼭지점의 성분변화에 따라 경사방향은 좌우 양단의 X와 Y성분 변화에 영향을 받고, 경사각은 상하 양단의 Y, Z성분 변화에 영향을 받는다. 가상 절리면을 구성한 후, 각각의 구성 꼭지점에 X, Y, Z성분 변화에 따른 방향 계산 결과를 비교하여, 방향 계산에서 허용할 만한 공간좌표 계산 오차량을 예상하였다. 방향 계산 허용 오차는 클리노미터 기계오차가  $\pm 2^\circ$ 인 점을 감안하고, 일반적인 픽셀 측정 오차를 3~5픽셀로 가정하면, 공간좌표의 오차가 약  $\pm 10\text{mm}$ 인 경우로 예상할 수 있다. 이러한 오차분포에서 각각의 좌표 성분별 오차의 R.M.S.는 10mm 수준이었다. 따라서 최대촬영거리는 절리방향 측정시 허용오차  $\pm 2^\circ$ 와 공간좌표 오차의 R.M.S.를 10mm로 고려하여 예상하였다. 식(6)에 의해 픽셀 측정오차가 3픽셀일 때인 경우는 8.730m이고, 5픽셀일 경우는 5.238m로 나타났다. 이때, 초점거리  $f$ 는 11mm, 설계지수  $q$ 는 일반적인 사진기 배열에 적용하는 값인 0.7로 하였으며[Fraser, 1984], 촬영횟수는 각 촬영위치에서 1회로 가정하였다. 따라서 알고리즘을 검증하기 위한 실내 검증 촬영 배열의 구성에 있어서 촬영거리는 5.238~8.730m임을 예상할 수 있었다. 허용 오차에 따른 최대 촬영거리의 분석 결과는 표 1과 같다.

표 1. 허용오차를 고려한 예상 최대 촬영거리

초점거리=11mm, 설계지수=0.7, 촬영횟수=1, CCD 해상도=0.006mm/pixel			
허용오차			최대촬영거리 (m)
공간좌표(mm)	방향성( $^\circ$ )	영상좌표(픽셀)	
±5	경사방향 ±1.2, 경사각 ±1.2	3	4.365
		5	2.619
±10	경사방향 ±2.4, 경사각 ±2.4	3	8.730
		5	5.238

촬영 입사각은 영상에서 해석대상의 임의 점의 마킹 정확도에 영향을 미치고 이로 인해 픽셀 좌표 측정에 오차를 발생시킨다. 입사각은 반사형 시준표를 사용할 경우에 30°이상부터, 일반 시준표를 사용하였을 경우 20°이상부터 중심점 마킹에 오차가 포함될 수 있으므로 이론적인 수렴각의 범위는 반사용 시준표를 사용할 경우 최대 60°이고, 일반 시준표를 사용할 경우 최대 40°정도로 예상할 수 있다[김중훈, 2002]. 촬영배열 설계에는 입사각의 영향을 고려하여 시준표들의 분포와 분석범위에 따른 촬영 방향과 위치가 포함되어야 한다.

### 3.1 촬영영향요소 분석 모델 및 촬영 조건

실내모델은 그림 2와 같이 벽면에 절리면들을 구성할 꼭지점들을 분포시켜 구성하였으며, 촬영조건은 크게 좌우 사진기의 촬영거리 변화, 촬영방향 수렴각 변화, 촬영 고도 변화의 세 가지로 구성하였다. 최대 촬영거리(D)는 앞서 허용오차 분석 통해 예상한 범위를 참고하여 5.5m를 적용하였으며 이때 위치는 Line 3이다. Line 3에서 각각의 사진촬영지점 사이의 간격은 0.46m이고 Line 1에서의 간격은 1m이다. Line 1은 Line 3에 비해 촬영거리가 50% 감소됨으로 인해 영상 측정해상도가 증가한 위치가 된다. 수렴각의 변화는 Arc 1을 따라 좌우 사진촬영지점을 5°씩 증가시켜 매회 10°씩 증가토록 하여 10~150°까지 수렴각을 변화시켰다. 촬영고도 변화는 좌우 사진기의 촬영위치를 높이거나 낮추어 상향촬영, 하향촬영이 서로 쌍을 이루도록 적용하였다.

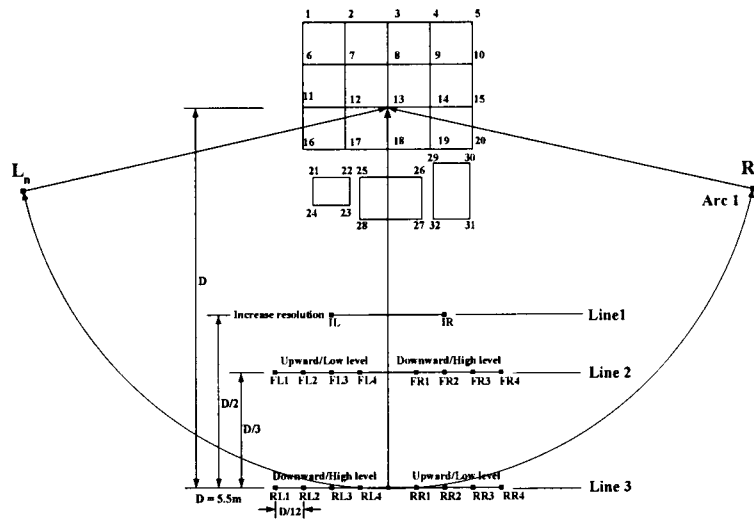


그림 2. 실내 모델 및 촬영 조건

### 3.2 결과 및 오차 분석

촬영거리가 변화함으로써 발생하는 공간좌표 유도 결과는 그림 3과 같이 나타났으며, 이때 R.M.S는 표 2와 같다. 공간좌표 사이의 차이는 좌표측정기에 의한 측정값과 영상분석으로부터 얻어진 유도값 사이의 절대값 차이를 나타낸 것이다.

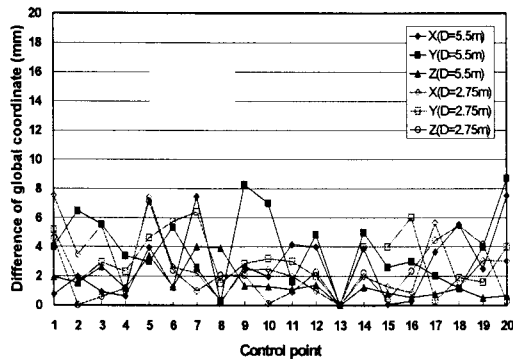


그림 3. 촬영거리 변화에 따른 공간좌표 유도 결과의 차이

표 2. 촬영거리 변화에 따른 공간좌표 R.M.S

촬영거리(m) \ 차이(mm)	X			Y			Z		
	MIN	MAX	R.M.S.	MIN	MAX	R.M.S.	MIN	MAX	R.M.S.
2.750	0.001	7.545	3.430	0.000	6.410	3.583	0.000	7.163	2.886
5.500	0.011	7.529	3.259	0.000	8.716	4.158	0.001	6.410	2.225

최대 촬영거리로부터 거리의 감소는 영상좌표 측정 해상도를 증가시키는 결과를 얻을 수 있다. 영상측정 정확도가 증가하여 공간좌표 분석 결과의 정확도 역시 증가할 것으로 예상할 수 있으나 실제 검증과정에서 정확도 향상은 뚜렷하게 나타나지 않았다. 이는 허용오차를 고려하여 수립한 최대 촬영거리에서는 이론적으로는 영상측정 해상도가 증가할지라도 육안에 의한 영상좌표 마킹의 부적확성이 여전히 허용오차 수준으로 존재하기 때문으로 보인다. 그림 4는 좌표측정기에 의한 실측정 공간좌표와 영상측정 공간좌표들로부터 구성된 절리면 방향 산출 결과 차이를 나타낸 것이다.

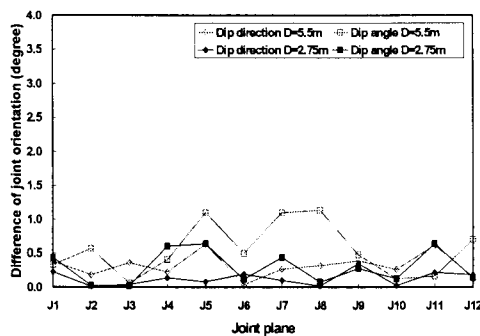


그림 4. 촬영거리 변화에 따른 절리면 방향 유도 결과의 차이

촬영거리가 2.75m일 때 공간좌표 산출값 차이가 작아서 절리 방향 유도값 사이의 차이도 다소 작게 나타났다. 그러나 최대촬영거리 5.5m에서의 방향유도 결과도 허용오차 수준 이내의 양호한 결과를 보여주었다.

그림 2의 Arc 1을 따라 수렴각 확장에 따른 공간좌표 계산값은 수렴각의 변화정도에 많은 영향을 받는 것으로 나타났다. 전체 수렴각 범위에 걸쳐 좌표값  $X = 0.000 \sim 16.001\text{mm}$ ,  $Y = 0.000 \sim 37.854\text{mm}$ ,  $Z = 0.000 \sim 23.936\text{mm}$ 의 차이가 나타났으며, 수렴각이  $25^\circ$  이상부터는

좌표값  $X = 0.000 \sim 11.000\text{mm}$ ,  $Y = 0.000 \sim 15.554\text{mm}$ ,  $Z = 0.000 \sim 8.611\text{mm}$ 의 오차분포를 보이며 예상 허용오차 범위내에 분포하는 것으로 나타났다. 이는 두 사진기 사이에 어느 정도 시각차가 발생해야만 영상에 의한 공간좌표 추출이 가능함을 보여주는 것이다. 그림 5는 영상측정 공간좌표에 의해 유도한 절리면 방향과 좌표측정기로부터 측정한 공간좌표에 의해 유도한 절리면 방향 사이의 R.M.S. 분포를 나타낸 것이다.

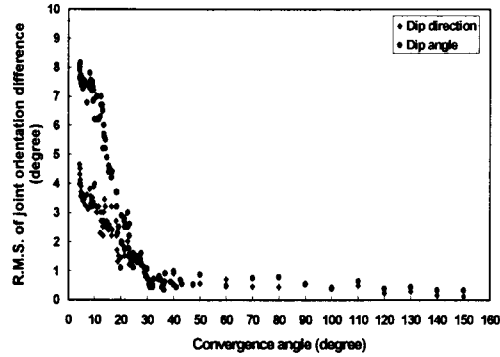


그림 5. 수렴각 변화에 따른 절리면 방향 산정 결과의 차이

그림 2의 실내모델 및 촬영조건에서 촬영고도의 변화는 최소 0.115mm, 최대 436.082mm의 변화를 갖는다. 이는 촬영거리 5.5m 유지하면서 조절점을 모두 포함하기 위해 결정된 변화폭이다. 촬영고도변화에 따라 계산한 공간좌표의 오차분포는 좌우 사진기의 고도차에 의해 발생하는 수렴각의 변화에 따른 오차분포 양상과 유사한 것으로 나타났다.

디지털 사진기의 해상도를 고려하고 다양한 촬영조건을 통해 촬영거리, 수렴각에 대한 이상과 같은 실내모델 검증과정을 거친 결과, 본 연구에서 개발한 알고리즘과 측정장치를 암반사면 절리에 적용할 경우 그림 6과 같은 최적 촬영배열을 결정할 수 있다. 그림 6에서 CD는 사진기 사이의 거리이고,  $\theta$ 는 사진기 광축사이의 수렴각, SD는 촬영거리이다. 일반적으로 2×2m 이상 정도의 조사창을 구성하고 화각 50°, 초점거리 11mm 및 해상도 2M픽셀급 (1600×1200픽셀 크기, 유효픽셀크기 0.006mm/pixel)의 디지털 사진기를 적용하였을 때, 허용오차를 고려하면 촬영거리 D는 대상 사면의 주향에 평행하게 설정하여 평균 2.5~5.5m가 된다. 이때 수렴각  $\theta$ 는 25~150° 범위에 있어야 한다. 이러한 조건은 그림 6에서 좌우측 음영부분이 각각의 사진기의 최적 촬영위치가 된다.

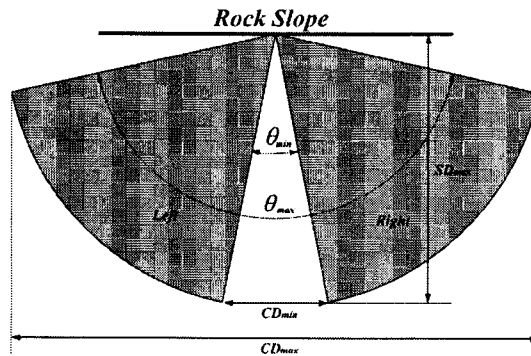


그림 6. 현장적용 최적 촬영 배열

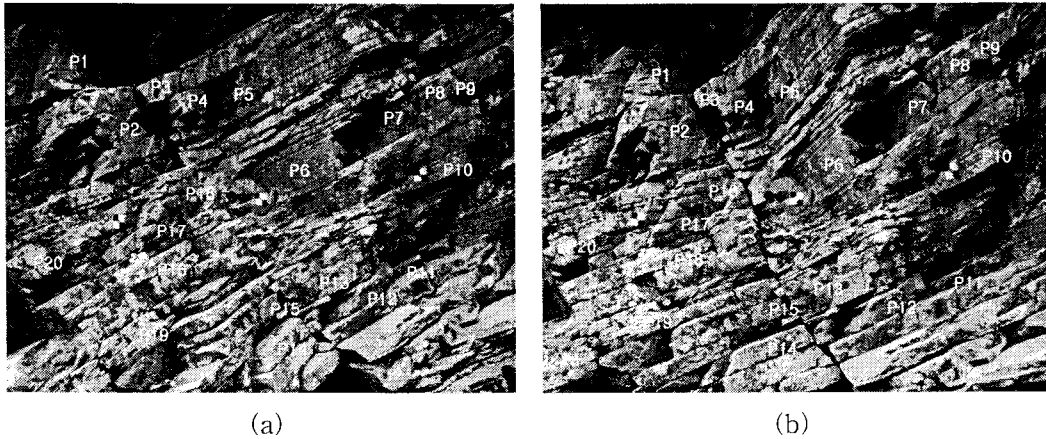
## 4. 암반사면 현장 적용

### 4.1 현장촬영조건

새로운 분석 기법의 현장 적용성은 실제 암반사면 절리에 대해 검토하였다. 그림 7과 같이 현장 암반 사면에 존재하는 특정 절리면 20개를 기준면으로 설정하여 클리노미터에 의한 측정값과 영상측정값의 비교를 통해 영상측정기법의 타당성을 확인하고자 하였다. 클리노미터 측정값은 기준면을 5회 측정하여 평균값을 적용하였다. 이때 촬영거리 SD는 3m로 설정하였으며, 수렴각이 25° 이상이 되도록 사진기 사이의 거리 CD는 약 2.5m 이상으로 설정하였다.

### 4.2 절리방향 분석결과 및 오차 분석

영상측정 공간좌표의 오차정도는 지상조절점의 측량 공간좌표와 비교하였으며, 절리 방향은 기준면의 클리노미터 측정값과 영상측정값을 비교하여 분석하였다.



(a) (b)  
그림 7. 암반사면 촬영 사진 (a) 좌측영상, (b) 우측영상

공간좌표 유도 결과의 차이는 표 3과 같이 계산되었으며, 실내 모델 검증에서의 결과와 유사한 10mm 이하의 매우 양호한 정도를 보였다.

표 3. 지상조절점 공간좌표의 측량값과 영상측정값 사이의 차이

조절점	C <sub>1</sub>			C <sub>3</sub>		
	X	Y	Z	X	Y	Z
차이(mm)	0.425	5.359	0.480	1.044	0.689	0.450

기준면으로 설정한 20개 특정 절리면의 영상좌표를 이용하여 영상측정 절리면 방향을 계산하였다. 클리노미터 측정 결과와 영상 측정 결과의 차이는 그림 8과 같다. 비교 결과 경사 방향의 경우 0~9°, 경사각의 경우 0~5° 정도의 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 일반적



으로 조사자에 따라 동일한 절리면에 대한 클리노미터 측정 오차는 경사방향의 경우  $\pm 10^\circ$ , 경사각의 경우  $\pm 5^\circ$  정도가 나타나며[Ewan, 1981], 클리노미터 기계오차가  $\pm 2^\circ$ 를 포함하고 있으므로 영상측정에 의한 절리면 방향 산정 결과는 타당한 수준으로 판단되었다.

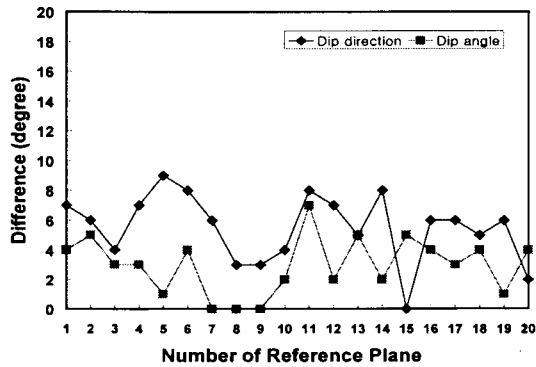


그림 8. 기준 절리면 방향의 클리노미터 측정값과 영상측정값 사이의 차이

#### 4.3 절리 구조의 기하학적 특성 조사 및 분석 결과

새로운 분석 기법에 의한 암반사면 절리의 기하학적 특성 조사는 촬영한 암반사면 영상에 조사선을 설정하거나 조사창을 설정하여 기존의 조사선 조사법이나 조사창 조사를 그대로 수행함으로써 가능하다. 그림 9는 촬영한 암반사면 좌, 우 영상에 조사선과 조사창을 설정한 것이다. 영상에 조사선을 설정하는 것은 실제 현장에서의 조사선 조사 작업과는 달리 임의의 방향으로 임의의 수만큼 마음대로 설정할 수 있는 장점이 있다.

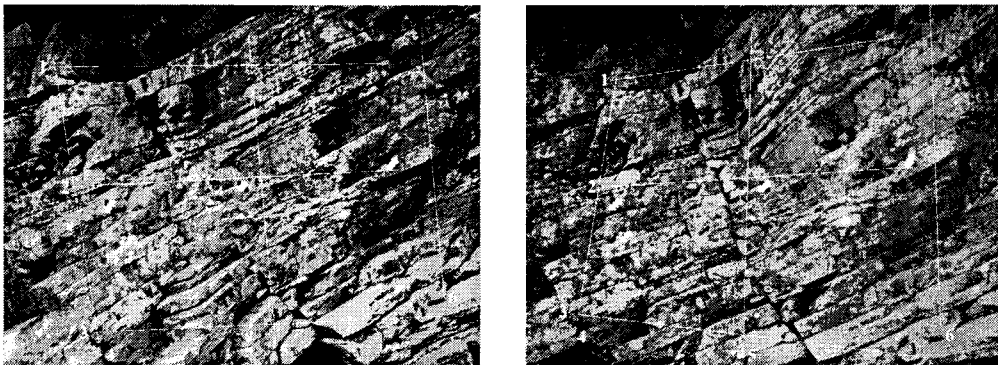


그림 9. 암반사면 영상에 조사선과 조사창의 설정

현장 암반사면의 절리구조의 기하학적 분포 특성은 기존의 통계적 분석방법에 영상측정으로 부터 얻어진 입력자료들을 이용하여 분석하였다. 분석한 절리구조의 기하학적 특성은 방향, 밀도, 길이이다. 절리 방향은 조사선이나 조사창에 분포하는 전체 절리들의 방향을 조사하여 자료로 활용하였다. 절리 방향은 그림 10과 같이 180/72, 107/82, 208/34의 세 개 절리군이 우세하게 나타났다.

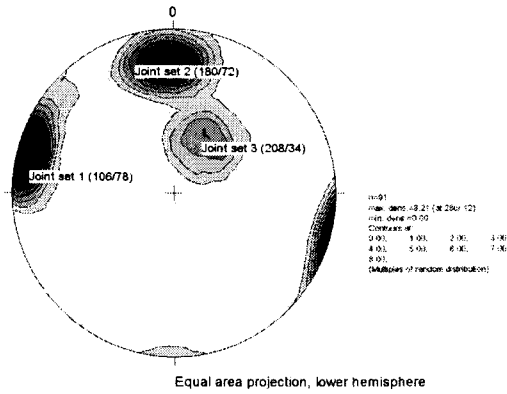


그림 10. 영상측정에 의한 절리군 분석 결과

절리밀도는 선형, 평면, 체적으로 정의할 수 있으며 절리의 입체적 모델링을 위해서는 궁극적으로 체적밀도를 결정하여야 한다. 체적밀도를 계산하는 방법은 크게 선형밀도를 이용하는 것과 평면밀도를 이용하는 것의 두 가지로 나누어 볼 수 있다. 전자는 선형밀도와 함께 절리선의 평균길이 및 절리의 평균 직경을 함께 이용하며, 후자는 평면밀도와 함께 평균 직경을 필요로 한다. 본 연구에서는 평면밀도를 이용한 체적밀도 계산법을 적용하였다.

절리의 평면밀도는 식(7)을 적용하였다. 식(7)에서 W, H는 직사각형 조사창의 폭과 높이이고, N은 절리선의 총 개수,  $N_T$ 는 양끝 외포선의 개수,  $N_C$ 는 양끝 내포선의 개수이다 [Mauldon, 1998]. 영상에 조사창을 설정하고 그에 따른 평면밀도를 산정한 결과는 표 4와 같다.

$$\rho_A = \frac{N - N_T + N_C}{2WH} \quad (7)$$

표 4. 영상측정 조사창 조사 결과에 의한 평면밀도 산정 결과(W×H(m) : 3×2)

절리군	절리개수	외포	내포	평면밀도 (/m <sup>2</sup> )
1	152	5	107	21.17
2	116	0	73	15.75
3	128	0	82	8.58

절리의 체적밀도는 식(8)을 적용하였다. 식(8)에서  $\mu_s$ 는 절리의 평균직경이며  $\phi$ 는 조사창의 법선벡터와 절리면의 법선벡터가 이루는 예각이다 [Warburton, 1980]. 절리의 평균직경은 조사선 조사 결과에 의해 수치적 방법을 사용하여 추정해야 하나, 본 연구에서는 절리의 평균길이를 평균직경으로 적용하였다. 영상측정에 의한 절리 조사 결과에 의해 산정한 절리의 체적밀도는 표 5와 같다.

$$\rho_v = \frac{\rho_A}{\sin\phi\mu_s} \quad (8)$$

표 5. 영상측정 조사창 조사 결과에 의한 체적밀도 산정 결과(W×H(m) : 3×2)

절리군	평면밀도 (/m <sup>2</sup> )	조사창 법선벡터 성분 (A)	절리군 법선벡터 성분 (B)	A와 B 사잇각 (°)	평균절리 길이 (m)	체적밀도 (/m <sup>3</sup> )
1	21.27	(-0.294, -0.920, 0.131)	(-0.456, 0.178, -0.030)	50	0.15	185.11
2	15.75	(-0.294, -0.920, 0.131)	(0.715, 0.611, 0.338)	42	0.55	42.80
3	8.58	(-0.294, -0.920, 0.131)	(0.535, 0.164, 0.829)	78	0.98	8.95

## 5. 결론

본 연구에서는 절리의 기하학적 특성의 조사중 기존의 수작업 조사 작업에서 나타나는 문제점들인 조사 범위의 한정과 난접근에 따른 측정이 불가능한 점 및 측정 작업의 효율성이 떨어지는 문제점들을 극복하기 위해 절리 암반 영상을 이용한 절리의 기하학적 특성 분석기법을 개발하였다. 이상의 연구에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 촬영 방향의 제약을 최소화하고 해석범위를 최대한 확보할 수 있는 수렴다중촬영기법을 기반으로 지상조절점 3점과 지상보조점 1점을 새로이 도입하여 절리면의 방향을 유도하는 기법을 개발하였다. 절리면 방향은 유도한 절리면 구성 꼭지점의 공간좌표로부터 구성된 절리면의 법선 벡터에 의해 해석하였다.

2. 절리 방향 측정시 허용오차를  $\pm 2^\circ$ 로 할 때, 본 연구에서와 같이 해상도 1600×1200 픽셀의 디지털 사진기를 사용할 경우 영상좌표 인식 오차를 5 픽셀로 두면, 절리 방향 유도에 있어서 공간좌표의 오차 범위는 약 10mm 이내가 되는 것으로 나타났으며 허용오차를 만족하는 최대촬영거리는 약 5.5m가 적당한 것으로 나타났다.

3. 현장 촬영조건을 고려한 촬영영향요소 분석 결과, 촬영고도 변화는 수렴각 변화와 동일한 성격의 영향요소임을 확인하였다. 수렴각은 공간좌표 유도와 절리 방향 산정 결과에 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다. 수렴각이 작아질수록 두 영상에서의 시각차가 작아지므로 오차가 커지는 경향을 보였으며, 수렴각이 커질수록 영상좌표의 중심점 인식 오차가 증가하여 공간좌표의 오차가 증가하였다.

4. 현장 적용 결과, 공간좌표의 경우 10mm 이내의 오차를 보였으며, 절리 방향의 오차는 클리노미터를 이용한 수작업 측정시 발생할 수 있는 조사자의 일반적인 오차수준 범위 내에 포함되었다. 또한 수작업에 의한 조사선 및 조사창 조사를 디지털 영상을 통해 수행하여 절리모델링에 필요한 절리의 기하학적 파라미터를 산출하였다.

본 연구를 통해 얻어진 결과 및 조사 시스템은 향후 사면의 유지관리용 차량에 탑재하여 효율적이고 객관적인 사면관련 자료들을 수집하는데 활용할 예정이다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부 지역기술혁신사업(강원권역)의 일환인 '낙석 및 산사태 방지를 위한 차세대 신기술 개발(05지역혁신 B02-01)'의 연구비로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. 김종훈, 2002, 암반절리의 기하학적 특성 분석을 위한 디지털 사진측량기법의 개발, 강원대학교 공학박사 학위논문, 176p.
2. 김재동, 김종훈 2003, 수렴다중촬영기법을 이용한 새로운 절리방향 해석방법, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), 17.3, 486-493
3. 이승호, 황영철, 심석래, 정태영, 2005, 3차원 영상처리를 이용한 암반 사면의 절리 측정에 관한 연구, 2005년도 지반공학회 춘계학술발표회 논문집, 854-851.
4. 이승호, 2006, 낙석 및 산사태 방지를 위한 차세대 신기술 개발, 2005년도 강원권 지역 특성화연구개발사업 제1차년도 중간보고서, 653p.
5. 김용수, 양상호, 정수정, 2007, 낙석재해 방지를 위한 현장정보 수집차량 개발방안에 관한 연구, 2007년도 지반공학회 춘계학술발표회 논문집, 1249-1258.
6. 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
7. Booche, F. and Heinz, G., 1996, Generation and use of digital surface models for volumetric objects, IAPRS, Vol., 31, Part B3, Commission III, pp.70-76.
8. DCS, Inc. 1998, Sub-pixel target accuracy study, DCS, Inc.
9. Ewan, V.J. and West, G., 1981, Reproducibility of joint orientation measurements in rock, TRRL report SR702, Transport and road research laboratory, Crowthorne.
10. Fraser, C.S., 1996, Network Design, K.B., Atkinson, Edited, Close range photogrammetry and machine vision, Whittles Publishing, pp.256-281
11. Gruen A., 1996, Least Squares Matching: A fundamental Measurement Algorithm, from Atkinson: Close Range Photogrammetry and Machine Vision , Whittles Publ., pp.217-255.
12. Mason, S., 1995, Conceptual model of the convergent multi-station network configuration task, Photogrammetric Record, Vol. 15, No. 86, pp.277-299.
13. Mauldon, M., 1998, Estimating mean fracture trace length and density from observation in convex windows, Rock Mechanics and Rock Engineering Vol 31, pp.201-216.
14. Trucco, E., and Verri, A., 1998, Introductory techniques for 3-D computer vision, Prentice-Hall, pp.28-3, pp.150-171.
15. Warbuton, P.M., 1980, A stereological interpretation of joint trace data, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol 17, pp.181-190.