

디지털 사진측량의 철도 암사면 조사시스템 적용에 관한 연구

A Study of the Application of Digital Photogrammetry to Railroad Rock Slope Investigation System

안태봉[†]

Tae-Bong Ahn

Abstract In order to evaluate applicability of rock cut-slope investigation system, typical clinometer and photogrammetry investigation system were used for rock slopes; first for 7 discontinuities, and secondly, 10 discontinuities, and the results were compared. The first verification was performed depending on discontinuity joint shapes and slope angles, and the second verification was performed depending on shot time and shot locations. The results showed that differences of dip direction $1^{\circ}\sim 4^{\circ}$, dip $0^{\circ}\sim 4^{\circ}$. In the second verification test, the differences of dip direction was $0^{\circ}\sim 6^{\circ}$, and dip $0^{\circ}\sim 6^{\circ}$. The photogrammetry method for rock slope survey system is quite reliable when clinometer generally shows $\pm 10^{\circ}$ errors due to surface roughness and investigator.

Keywords : photogrammetry, rock slope, survey system, discontinuities

요 지 암반절취사면의 지질구조를 측정하기 위하여 개발된 조사시스템의 현장 적용성을 검토하기 위하여 절취사면에 대해 클리노 컴퍼스와 조사시스템을 이용하여 암반 불연속면을 1차 7개, 2차 10개를 측정하여 그 결과를 비교하였다. 1차 시험은 불연속면의 절리형태와 경사각에 따른 측정 결과 값의 차이를 비교하였고, 2차 시험은 촬영 시간과 촬영위치를 달리하여 비교분석하였다. 비교 결과 1차 시험은 클리노 컴퍼스로 측정한 값과 경사방향 $1^{\circ}\sim 4^{\circ}$, 경사각 $0^{\circ}\sim 4^{\circ}$ 의 차이를 보였고, 2차 시험은 경사방향 $0^{\circ}\sim 6^{\circ}$, 경사각 $0^{\circ}\sim 6^{\circ}$ 의 차이를 보였다. 일반적으로 클리노 컴퍼스를 활용한 암반 불연속면 조사시 표면상태가 고르지 않고 측정위치에 따른 경사방향과 경사각의 차이가 $\pm 10^{\circ}$ 정도 나타날 수 있다는 점과 측정자의 숙련도에 따른 오차를 감안할 때 본 조사시스템의 정확성에 대한 신뢰도는 비교적 높은 것으로 나타났다.

주 요 어 : 사진측량, 암사면, 조사시스템, 불연속면

1. 서 론

철도나 도로 건설공사에서 지반조사는 필수적으로 행해지고 있지만 절취 사면의 경우 암반 내 불연속면의 배열상태에 따라 낙석 및 붕괴사고가 발생하기 때문에 시추조사를 통한 암선 추정만으로는 정확한 안정성 평가가 어렵다. 절취된 사면에 대해 클리노 컴퍼스를 이용한 수작업으로 노출된 암반의 절리방향(주향/경사)을 측정하여 안정성 평가를 수행하지만 현장 여건상 사면높이가 높은 경우 측정이 곤란한 곳이 많아 클리노 컴퍼스를 이용한 기존 수작업 방식으로는 지질구조를 효율적으로 측정할 수 없어 조사의

신뢰도가 떨어진다. 따라서 수작업 측정이 곤란한 대형 암반 사면의 노출된 불연속면 구조를 원격으로 측정하고자 하는 시도가 다양하게 이루어지고 있다. 이런 시도들은 기존의 연구자들이 크게 사진측량을 이용하는 방법[2,3,7,8]과 레이저 스캐너를 이용하는 방법[1]으로 진행되고 있다. 두 기법 모두 대상의 3차원 모델을 구현하여 불연속면의 방향을 측정할 수 있다. 레이저 스캐너의 경우 정밀한 3차원 모델을 구현할 수 있으며 국내에서도 널리 사용되는 기법이긴하나 워낙 장비가 고가이고 면구조의 방향성 분석을 수행하는 과정이 간단하지 않아 특별한 목적을 위한 정밀한 조사에만 활용되고 있는 실정이다. 사진측량 방법 중 고밀도 필름의 입체사진을 도화기를 이용하여 좌표화하는 방식이 있는데 이 경우 매우 정밀한 3차원 영상을 얻을 수 있으나 모든 공정이 수작업으로 이루어지므로 많은 작업시

[†] 정회원, 우송대학교 철도건설환경공학과 교수
E-mail: tbahn@wsu.ac.kr
TEL: (042)629-6716 FAX: (042)629-6709

간이 요구되어 실용성이 떨어진다.

최근에 디지털카메라를 이용해 영상을 획득하고 이를 전산으로 자동분석 할 수 있는 기술의 발달로 사진측량을 암반 절취면의 불연속면 측정에 실용적으로 적용할 수 있는 시스템이 국내에서 개발[4]되었다.

본 연구에서는 디지털사진측량의 이론을 고찰하고 암반 사면 조사시스템을 이용하여 현재 시공 중인 절취 사면을 대상으로 지표지질조사를 수행한 후 정확성과 실용성을 검증하여 클리노컴퍼스를 사용하는 기존의 수작업과 비교하여 그 활용방안을 제시하였다.

2. 암사면 조사방법과 특징

현재까지 암반 절취면내 불연속면의 방향성 측정은 그림 1과 같이 클리노 컴퍼스를 이용한 수작업에 의존하는 것이 일반적인 방법이다. 이 방법은 접근성이 용이한 자연 사면이나 높이가 낮은 절취사면에서 실용성은 높지만 암반 절취사면의 경우 높이가 높고 급경사로 형성되어 있으므로 접근성이 불량하여 측정이 불가능한 경우가 대부분이다. 이런 제약으로 인하여 현장 기술자의 접근이 용이치 않은 절취면 중·상단부는 사람의 눈으로 불연속면의 방향을 추정하여 기록하는 경우가 빈번하여 측정값의 정확성이 떨어지고 있다. 사면의 붕괴가 하단부 보다는 중·상단부에서 많이 발생하는 현실에 비추면 중상단부의 사면조사가 더욱 정밀히 이루어져야한다. 크레인 등을 동원하여 수작업으로 측정하는 경우가 있는데 장비의 이동 및 거치로 많은 시간이 소요되며, 현장 여건에 따라 장비 이동이 불가능한 지역이 있어 실효성이 떨어진다. 또한 불연속면 측정 시 추락위험이 있어 현장 안전에 문제가 있으며, 장비 임대비용 발생으로 경제성도 떨어지는 실정이다.

또한 공용중인 기 절취사면에 붕괴가 발생할 시 추가 붕괴에 대한 우려와 접근이 어려워 붕괴원인에 대한 정확한 조사가 이루어지지 못해 보강대책 수립에 어려움을 겪기도 한다. 레이저스캐너는 매우 정밀한 3차원 영상을 획득할 수 있으므로 사면의 외적 형상을 정확히 모델링 하는데 큰 장점이 있다.

그러므로 붕괴된 사면의 보강 체적을 정확히 구하거나 절취 후 사면의 경사각을 측정하는 등의 목적으로 매우 유용하게 활용될 수 있다.

그러나 측정 기구의 가격이 매우 고가이며, 재질에 따라 레이저의 반사 정도가 다르기 때문에 모든 암사면에 적용되고 있지는 않다. 레이저 스캐너는 기계설치 위치에 대한 측정점의 상대좌표를 구하는 방식으로서 방위각에 대한 측정점의 절대좌표를 구하기 위해서는 별도의 측량을 통하여 좌표를 수정해주어야 하는 어려움이 있다.

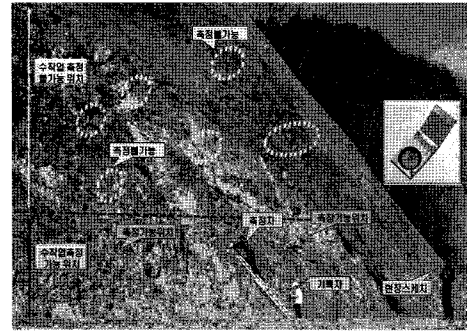


Fig. 1. 높은 암반 절취면 조사의 어려움

또한 레이저 스캐너의 경우 온도에 민감하여 추운 날씨에는 적용이 어려우며, 사면내 분포하는 불연속면의 방향성을 측정하기 위해서는 별도의 과정을 수행하여야 한다. 3차원 모델과 연계된 사진을 획득하기 어려워 제작된 3차원 형상의 모델이 분석에 활용되기 어려운 문제를 갖고 있다. 이러한 이유로 문화재나 건물 등과 같이 3차원 형상이 단독적으로 모델 되는 경우는 많이 응용되었으나 암반사면과 같은 경우에 응용된 사례가 많지 않다.

반면 사진측량기법을 이용한 암반절취면 조사시스템은 입체사진으로 3차원 영상을 획득할 수 있으며 사진에서 불연속면을 직접 확인하면서 방향성을 측정할 수 있어 기존 조사방법을 개선할 수 있다.

절리구조의 원격측정이 가능하여 측정인의 접근이 불가능한 지역의 조사가 가능하며, 장비 구동 및 설치가 간단하여 조사에서 안정성 평가까지의 작업속도를 향상시킬 수 있으며 타 장비에 비해 가격이 저렴하여 경제성에서 우위를 가진다. 현재 국내에서 사용되고 있는 암반 절취면 불연속면 방향성 측정방법과 장단점은 Table 1과 같다.

Table 1. 불연속면의 방향성 측정 장비

구분	원격 측정 방법		수작업 측정 방법
	사진측량	레이저 스캐너	클리노 컴퍼스
개요	원격 사진 측량을 이용한 지질구조 측정 시스템	스캐닝 방식의 3차원 좌표 관측 장비	주향과 경사를 측정하는 휴대용기구
장비 사진			
특징	<ul style="list-style-type: none"> 레이저 스캐너의 1/7 정도 가격 전체 불연속면 측정 가능 전 과정을 사진위치와 연계하여 Data Base 가능 부분적 필요부분 선택측정가능 	<ul style="list-style-type: none"> 정밀한 3차원 영상 획득 고가임(2억원) 날씨의 영향 많이 받음 불연속면 측정이까다로움 암반사면 적용 사례 적음 	<ul style="list-style-type: none"> 가장 가격이 저렴 절리 측정의 가장 확실한 방법이며 보편적 사용 별도의 기록 필요 접근이 용이한 분만 측정이 가능함.

3. 디지털 사진측량의 이론

3.1 수렴다중촬영기법

사진측량은 중심투영이론에 기반을 두고 있으므로, 대상물의 한 점과 사진기의 투영중심 그리고 영상면에 투영된 대상물의 점들을 연결한 직선의 기하학적 특성을 나타내는 공선조건식(collinearity condition equation)에 의해 설명될 수 있다. Fig. 2에서 투영중심 P , 영상점 a , 물체의 임의의 점 A 는 중심투영(perspective projection or central projection)에 의해 공간상의 동일 직선에 존재하며 이러한 조건을 공선조건(collinearity condition)이라고 한다. 이때 투영중심 P 부터 영상점 a 까지의 벡터 a 와 P 부터 물체의 임의의 점 A 까지의 벡터 A 의 표현이 가능하다.

공간좌표계와 사진기좌표계가 서로 평행하다면 중심투영 관계에서 두 벡터는 식 (1)과 같이 한쪽이 다른 한쪽에 대해 스칼라적(scalar multiple)이다. 이를 사진측량에서는 공선(collinear)이라고도 한다.

$$A = kA \tag{1}$$

여기서, k 벡터 A 와 벡터 a 의 길이의 비이다. 각 벡터의 성분은 식 (2)와 식 (3)으로 나타낼 수 있다. 사진기좌표계에서 벡터 a 의 성분은,

$$a = \begin{bmatrix} x_a - x_0 \\ y_a - y_0 \\ -f \end{bmatrix} \tag{2}$$

공간좌표계에서 벡터 A 의 성분은,

$$A = \begin{bmatrix} X_A - X_P \\ Y_A - Y_P \\ Z_A - Z_P \end{bmatrix} \tag{3}$$

이다. Fig. 2와 같이 공간좌표계와 사진기좌표계 사이의 회

전이 발생하면 식 (1)은 회전행렬(rotation matrix) R 을 도입하여 식 (4) 또는 식 (5)와 같이 쓸 수 있다[9].

$$a = kRA \tag{4}$$

또는

$$\begin{bmatrix} x_a - x_0 \\ y_a - y_0 \\ -f \end{bmatrix} = kR \begin{bmatrix} X_A - X_P \\ Y_A - Y_P \\ Z_A - Z_P \end{bmatrix} \tag{5}$$

식 (4)와 식 (5)의 R 은 직교행렬이므로 식 (6) 또는 식 (7)로 변환할 수 있다.

$$A = \frac{1}{k} R^T a \tag{6}$$

$$\begin{bmatrix} X_A - X_P \\ Y_A - Y_P \\ Z_A - Z_P \end{bmatrix} = \frac{1}{k} R^T \begin{bmatrix} x_a - x_0 \\ y_a - y_0 \\ -f \end{bmatrix} \tag{7}$$

식 (6)은 중심투영에 의해 일직선상에 있는 투영중심, 영상점, 물체점의 공선조건을 표현한 것이다. 이 식은 사진기의 내부 매개변수 (x_0, y_0, f)와 외부 매개변수 ($X_P, Y_P, Z_P, \omega, \phi, \kappa$)를 포함하고 있다. 사진영상은 일반적으로 3차원 공간의 대상물을 2차원적으로 표현한 것이다. 물체의 각 점이 2차원 영상으로 투영될 때 식 (6)의 k 값은 서로 대응하는 점에 따라 다른 값을 가진다. 이는 Fig. 1에서 점 A 와 a 및 점 B 와 b 처럼 투영중심 P 를 중심으로 서로 대응하는 점들 사이의 벡터의 크기가 다르기 때문이다. 따라서 k 를 각각 구하여 계산하기는 곤란하므로 다음의 과정에 의해 제거한다. 영상점 a 와 대상점 A 로 표현한 부분을 영상면 상의 모든 점과 이에 대응하는 대상점으로 확장하여, x_a, y_a 를 x 와 y 로 표시하고, X_A, Y_A, Z_A 를 X, Y, Z 로 표시한 후 회전 행렬 R 에 대한 식을 식 (5)에 대입하여 정리하면 식 (8)과 같다.

$$\begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -f \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_P \\ Y - Y_P \\ Z - Z_P \end{bmatrix} \tag{8}$$

이를 연립방정식으로 풀면,

$$\begin{aligned} x - x_0 &= k[r_{11}(X - X_P) + r_{12}(Y - Y_P) + r_{13}(Z - Z_P)] \\ y - y_0 &= k[r_{21}(X - X_P) + r_{22}(Y - Y_P) + r_{23}(Z - Z_P)] \\ -f &= k[r_{31}(X - X_P) + r_{32}(Y - Y_P) + r_{33}(Z - Z_P)] \end{aligned} \tag{9}$$

식 (9)에서 k 를 소거하면,

$$\begin{aligned} x - x_0 &= -f \frac{[r_{11}(X - X_P) + r_{12}(Y - Y_P) + r_{13}(Z - Z_P)]}{[r_{31}(X - X_P) + r_{32}(Y - Y_P) + r_{33}(Z - Z_P)]} \\ y - y_0 &= -f \frac{[r_{21}(X - X_P) + r_{22}(Y - Y_P) + r_{23}(Z - Z_P)]}{[r_{31}(X - X_P) + r_{32}(Y - Y_P) + r_{33}(Z - Z_P)]} \end{aligned} \tag{10}$$

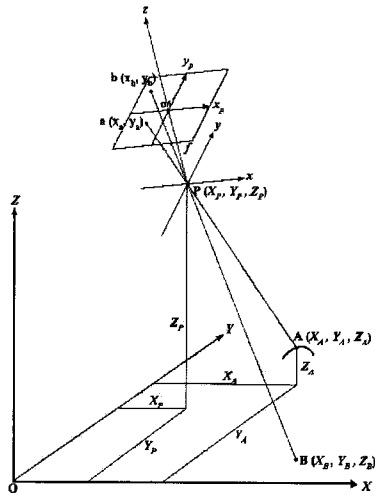


Fig. 2. 중심투영의 개념

식 (10)을 공간좌표에 대해 표현하면 식 (11)과 같이 된다.

$$X - X_p = (Z - Z_p) \frac{[r_{11}(x - x_o) + r_{21}(y - y_o) + r_{31}(-f)]}{[r_{13}(x - x_o) + r_{23}(y - y_o) + r_{33}(-f)]}$$

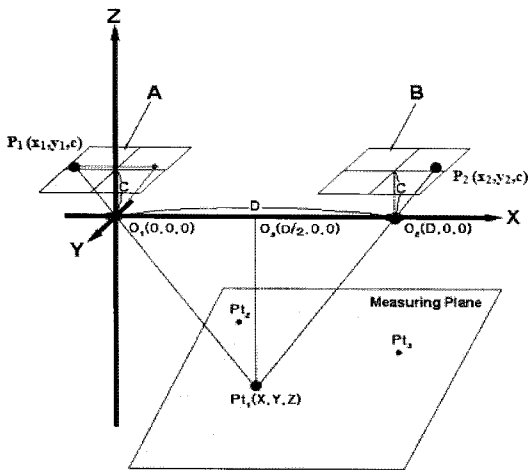
$$Y - Y_p = (Z - Z_p) \frac{[r_{12}(x - x_o) + r_{22}(y - y_o) + r_{32}(-f)]}{[r_{13}(x - x_o) + r_{23}(y - y_o) + r_{33}(-f)]}$$

(11)

사진기의 내부 매개변수인 영상주점좌표(x_o, y_o)와 사진기의 초점거리 f , 외부매개변수인 사진기좌표계의 원점인 투영중심의 공간좌표(X_p, Y_p, Z_p), 각 축의 회전 각도를 나타내는 회전 행렬 R 등이 사진 촬영시의 조건으로부터 결정되면, 식 (11)에 의해 영상좌표 (x, y)는 공간좌표(X, Y, Z)로 변환될 수 있다. 그러나 이 연립방정식은 2개로 구성되어 있어 3개의 공간좌표를 계산할 수는 없으므로 2개 이상의 영상이 필요하다.

3.2 원격조사시스템분석방법

본 연구에서 사용한 원격조사시스템의 기본 원리는 3.1 절의 근거리 사진측량 이론을 바탕으로 획득된 입체영상의 자동매칭 기법을 활용하여 불연속면상의 정합점(matching point)을 찾고, Fig. 3과 같이 정합점의 3차원 좌표를 계산한다. 계산된 불연속면상의 3개 이상의 3차원 좌표를 보간하여 평면의 방정식을 유도하고, 면의 수직벡터를 경사방향과 경사각으로 변환한다(황상기, 2001).



$$X = \frac{x_1}{x_1 - x_2} D,$$

$$Y = \frac{y_1}{x_1 - x_2} D = \frac{y_2}{x_1 - x_2} D,$$

$$Z = \frac{C}{(x_1 - x_2) \times k} D$$

Fig. 3. 사진측량의 기본 이론 모식도(황상기, 2001)

3.3 임반절취면 조사시스템 Surface Mapper

암반 절취면 조사 시스템은 사진 촬영을 통하여 절취면 암반 불연속면의 경사방향/경사를 측정하기 위한 카메라 시스템과 소프트웨어로 구성된다. 입체사진을 이용하여 암반 절취면의 지질구조를 측정하기 위한 영상획득 장치와 영상을 분석하기 위해 제작된 전산 프로그램으로 구성되어 있다(Fig. 4).

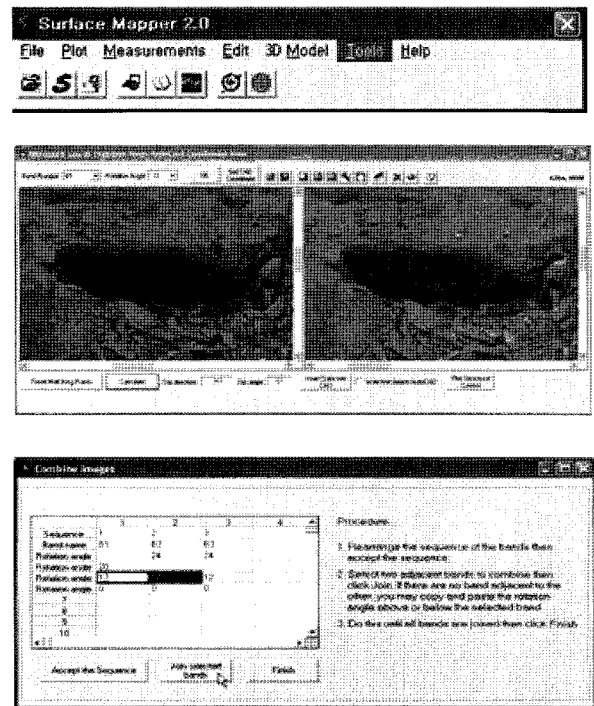


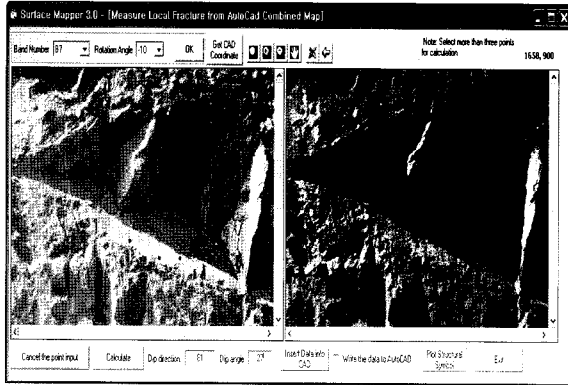
Fig. 4. Surface Mapper 분석 프로그램

기본 원리는 근거리 사진측량 이론을 바탕으로 획득된 입체영상의 자동매칭 기법을 활용하여 불연속면상의 정합점(matching point)을 찾고 정합점의 3차원 좌표를 계산한다. 계산된 불연속면상의 3개 이상의 3차원 좌표를 보간하여 평면의 방정식을 유도하고, 면의 수직벡터를 경사방향과 경사각으로 변환한다. Surface Mapper는 절리구조를 원격으로 측정하여 접근 불가능 지역의 절리 측정이 가능하고 실제지형에 맞는 단면도를 작성할 수 있으며, 원하는 위치와 구조구 별로 다수의 데이터를 확보할 수 있다. 측정된 자료를 AutoCAD 환경에서 도면화 함으로, 2D 및 3D 모델링 결과를 작도할 수 있다. 사진촬영을 통해 획득된 입체사진을 프로그램에서 불러들여 측정하고자 하는 불연속면의 경사/경사방향을 측정한다(Fig. 5(a)).

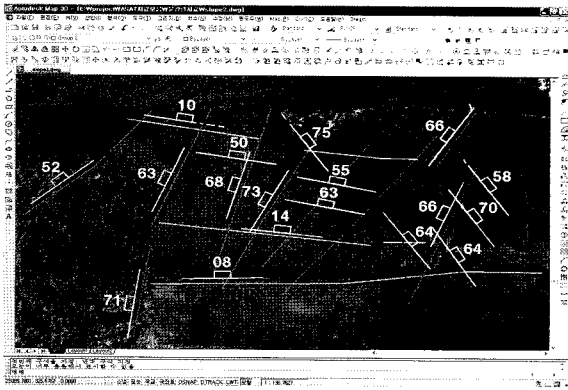
프로그램을 이용하여 측정한 경사/경사방향을 AutoCad와 연계하여 Data Base화가 가능하여 AutoCad에 저장된 불연속면의 정보를 이용하여 해석하고자 하는 절리군의 평

사투영법을 이용한 암반 사면의 안정성 해석이 가능하다 (Fig. 5(b)). 측정된 데이터 값을 별도의 처리과정 없이 AutoCad에 Data Base화 되어 있는 데이터를 선택함으로써 평사투영법에 의한 안정성 평가를 수행할 수 있다(Fig. 5(c)).

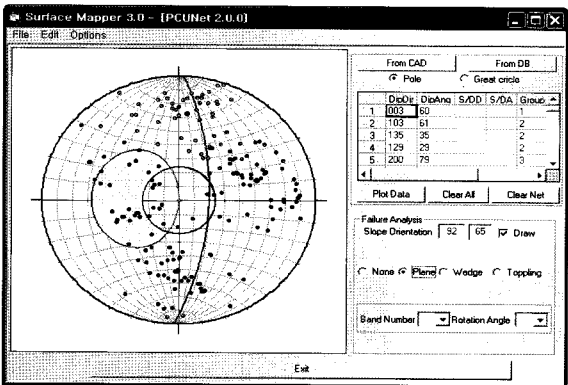
필요한 위치의 비탈면 횡단을 2차원 단면으로 표현할 수 있고 국부적인 영역의 3차원 형상을 모델하고 이를 그래픽으로 표현한다 (Fig. 5(d)).



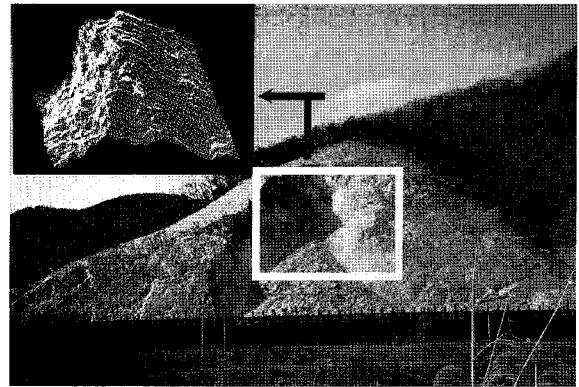
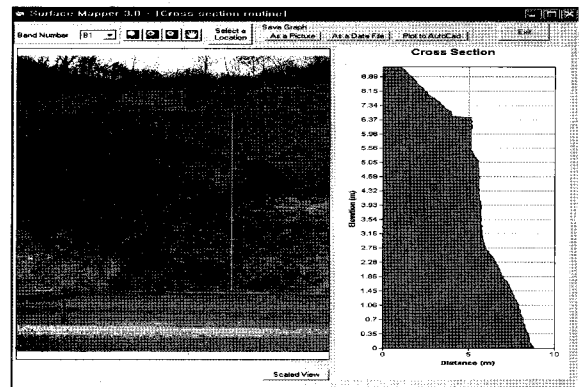
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 5. Surface Mapper: (a) 경사/경사방향 측정, (b) AutoCad를 이용한 측정값 저장, (c) 안정성 평가, (d) 2D 단면 및 3D 형상 모델화

암반 절취면 조사 시스템의 Surface Mapper 프로그램 처리 과정은 크게 3단계로 구분되는데 1단계로는 현장에서 두 대의 장비로 전체 사면을 이동하면서 촬영한 후 2단계로는 현장에서 촬영한 이미지를 프로그램을 사용하여 렌즈의 왜곡보정 및 RGB 영상값을 선처리하고, 이미지의 자동 매칭 기법을 활용하여 불연속면상의 정합점을 찾아내고, 점들의 3차원 공간좌표를 생성한다. 3차원의 좌표를 이용하여 불연속면의 방향성을 측정하여 AutoCAD에 그린다. 마지막 3단계에서는 2단계에서 AutoCAD의 데이터로 프로그램이 제공하는 투영망 분석기능을 사용하여 절취사면의 안정성을 평가한다.

4. 암사면 조사시스템의 현장실험

4.1 적용현장개요

디지털카메라를 이용한 암반절취면 조사시스템을 절취사면(연장 240.0m, 높이 34.0m, 소단 3단)을 대상으로 현장 실험을 실시하였다. 실험은 두 차례에 걸쳐 총 17개소(1차 7개소, 2차 10개소)의 불연속면을 대상으로 실시하였다.

Fig. 6은 현장전경을 나타낸 것으로 높이 34m, 폭 240m의

Fig. 5. Surface Mapper: (a) 경사/경사방향 측정, (b) AutoCad를 이용한 측정값 저장, (c) 안정성 평가, (d) 2D 단면 및 3D 형상 모델화(계속)

대절토 사면으로써 편마암과 화강암이 주암종을 이루고 있다. 높이 20m에 위치하고 있는 폭 3m 소단 아래부터 지반선까지 불연속면이 비교적 선명하게 나타나므로 불연속면의 경사 및 경사방향 측정 및 사진촬영에 의한 확인이 용이하다.

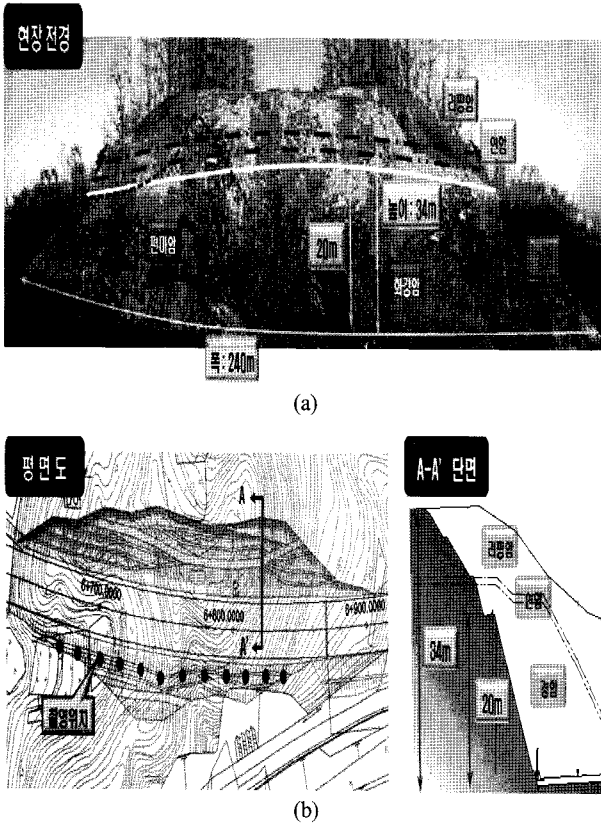


Fig. 6. 실험현장 전경 및 단면도: (a) 실험현장 전경, (b) 평면도 및 단면도

카메라는 측정거리나 사면의 크기를 고려하여 Full Frame의 DSLR로 렌즈왜곡이 적은 고배율렌즈를 사용하면 좋으나 너무 높은 화소로 인하여 이미지처리고정에 너무 많은 시간이 걸리므로 화소수는 1500 미만의 일반 카메라면 충분히 영상의 해상도 및 픽셀의 분해능을 갖을 수 있다.

4.2 임반절취사면 조사시스템 실험방법

조사 시스템의 실험은 두 차례에 걸쳐 총 17개소(1차 7개소, 2차 10개소)의 불연속면을 대상으로 실시하였다.

1차 실험은 조사시스템의 정확도를 검증하기 위하여 각기 다른 절리형태(선과 면)와 경사각(저각, 중각, 고각)을 갖는 불연속면을 대상으로 클리노 컴퍼스와 조사시스템의 측정 결과 값 차이를 비교하였다(Fig. 7).

2차 실험은 10개소의 불연속면을 대상으로 실시하였으며 불연속면은 사면 전체에 고르게 분포하도록 선정하였고, 높은 곳에 위치하여 인력 접근이 어려운 측정점의 경우

클리노컴퍼스를 사용하는 수작업은 크레인을 이용하여 조사를 수행하였다. 사진측량 특성상 빛의 영향과 촬영 각도 및 위치에 따른 영상의 왜곡 현상으로 측정값의 차이를 보일 수 있는바, 촬영 시간(순광, 역광)과 촬영위치(소단 1단, 2단, 3단)를 달리하여 조사시스템으로 측정된 결과 값을 비교하였다(Fig. 8).

암반 불연속면은 표면상태가 고르지 않아 측정 위치에 따라 방향성의 차이가 나타날 수 있으므로 클리노 컴퍼스와 Surface Mapper 모두 대상 불연속면에 위치를 달리하여 20회 이상 반복 측정을 하였다. 또한 기술자 숙련도에 따른 측정값의 오차가 발생할 수 있으므로 동일 위치를 3인이상이 측정하여 측정된 결과 값은 통계처리 프로그램(MINITAB)을 이용하여 클리노컴퍼스 측정값과 비교할 측정값을 도출하였다.

촬영된 영상이미지는 모델과 밴드라는 개념을 갖고 한 개의 모델은 왼쪽사진과 오른쪽사진으로 이루어지는데 이 두사진의 중첩률은 70~80%를 이루고 이 때 정합점은 matching point라는 개념으로 수동 혹은 자동으로 수행할 수 있다. 여러개의 모델을 이어 붙여 한 개의사면의 모델을 이루고 밴드와 밴드의 중첩률은 10~20%가 되고 밴드간의 정합과정은 모델과 모델은 서로 독립적으로 이루어진 것으로 보기 때문에 따로 이루어지지 않는다.

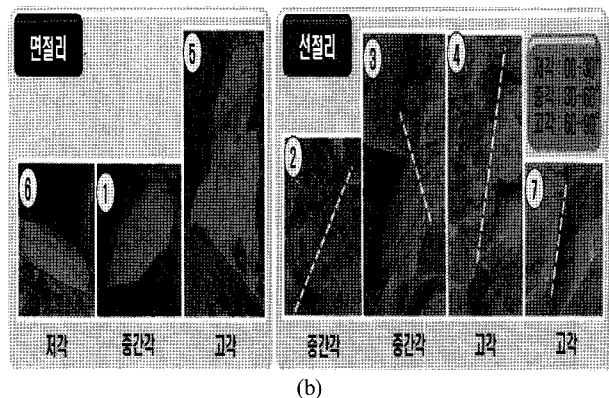
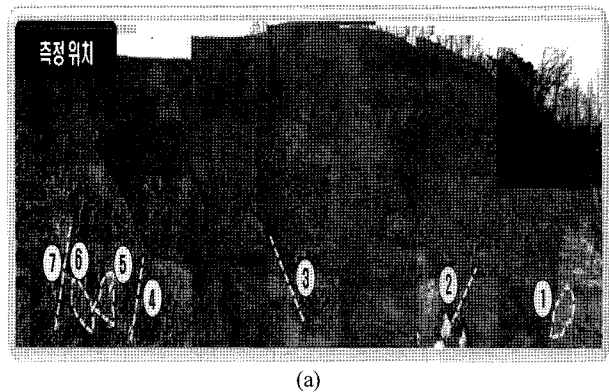
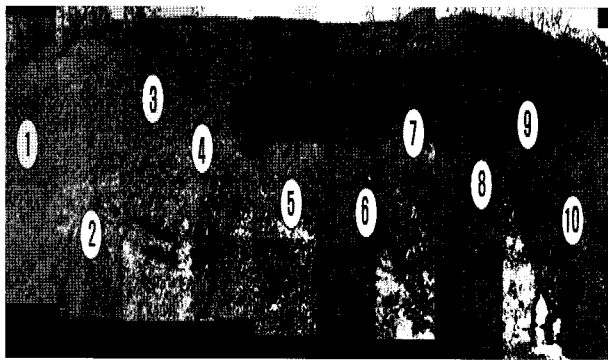
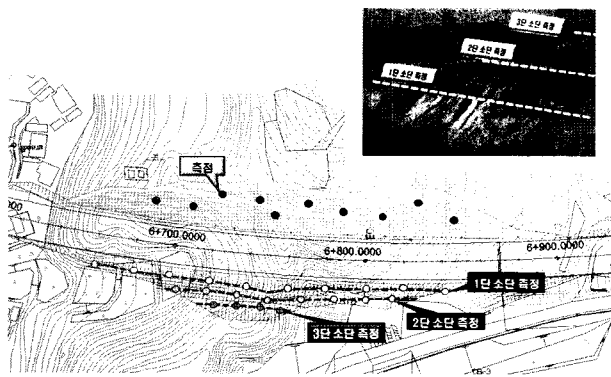


Fig. 7. 1차 실험: (a) 측정위치, (b) 면절리와 선절리



(a)



(b)

Fig. 8. 2차 실험: (a) 측정위치, (b) 촬영 위치

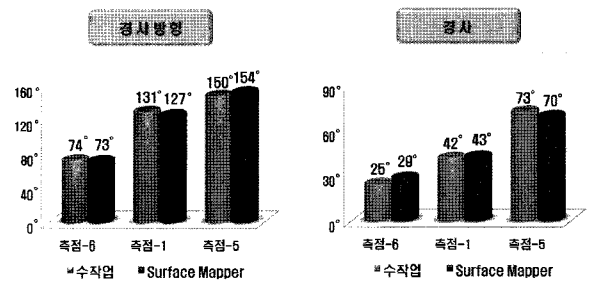
5. 암시면 조사시스템의 실험결과

5.1 클리노 컴퍼스 결과와의 비교

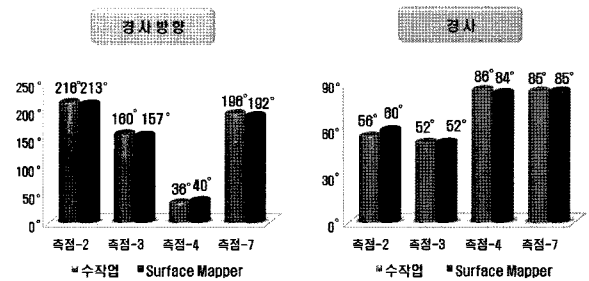
1차 실험의 각 측정점별 클리노 컴퍼스와 조사시스템의 측정 결과값을 정리하면 Table 2와 Fig. 9와 같다. 7개의 불연속면을 대상으로 1차 검증은 수행한 결과 클리노 컴퍼스와 조사시스템인 Surface Mapper 측정 결과 값 차이는 경사방향은 1°~4°, 경사각은 0°~4°로 나타났는데 이는 클리노 컴퍼스 조사 시 암반 불연속면 표면상태가 고르지 않아 측정 위치에 따른 경사방향과 경사각의 차이가 ±10° 정도 나타날 수 있다는 점을 감안할 때 본 조사시스템은 면·선구조와 경사각 고·저에 관계없이 정확성에 대한 신뢰도는 높은 것으로 나타났다.

Table 2. 1차 실험결과

측점	경사방향			경사			
	클리노 컴퍼스	Surface Mapper	측정값 차이	클리노 컴퍼스	Surface Mapper	차이	
면 절 리	6	74°	73°	1°	25°	29°	4°
	1	131°	127°	4°	42°	43°	1°
	5	150°	154°	4°	73°	70°	3°
선 절 리	2	216°	213°	3°	56°	60°	4°
	3	160°	157°	3°	52°	52°	0°
	4	36°	40°	4°	86°	84°	2°
	7	196°	192°	4°	85°	85°	0°



(a)



(b)

Fig. 9. 클리노 컴퍼스와 Surface Mapper의 비교: (a) 면절리, (b) 선절리

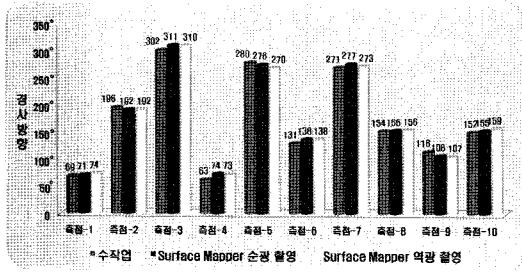
5.2 영향요소평가

5.2.1 빛의 영향검토

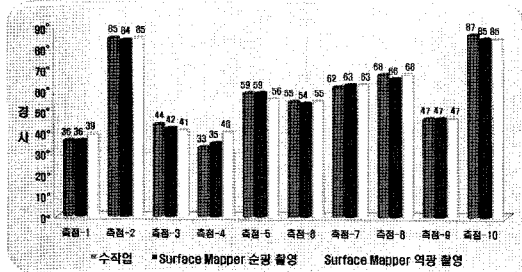
사진측량 특성상 빛의 음영에 따른 측정값의 차이를 보일 수 있기 때문에 이에 대한 검토를 하기위하여 촬영 시간(순광, 역광)을 달리하여 사진촬영을 해 보았다. 각 측정점별로 클리노 컴퍼스와 빛에 영향을 고려한 조사시스템의 측정 결과값을 스테레오네트상에 평사투영법으로 비교한 결과를 정리하면 Table 3과 Fig. 10과 같다. 10개의 불연속면을 대상으로 빛의 영향을 고려한 2차 실험을 수행한 결과 순광 촬영과 역광 촬영 측정 결과 값 차이는 경사방향은 0°~6°, 경사각은 0°~5°로 나타났다. 이는 1차 검증 시 제시된 오차범위 ±10° 이내의 값으로 빛의 강약 차이로 인한 Surface Mapper 측정값 차이가 없으며 이로 인해 현장 적용에 영향을 미치지 않음을 보여준다.

Table 3. 2차실험시 빛의 영향을 고려한 순광/역광 검증 결과

측점	경사방향				경사각			
	수직업	S/M 순광	S/M 역광	순광/역광 차이	수직업	S/M 순광	S/M 역광	순광/역광 차이
1	69°	71°	74°	3°	36°	36°	39°	3°
2	196°	192°	192°	0°	85°	84°	85°	1°
3	302°	311°	310°	1°	44°	42°	41°	1°
4	63°	74°	73°	1°	33°	35°	40°	5°
5	280°	276°	270°	6°	59°	59°	56°	3°
6	131°	138°	138°	0°	55°	54°	55°	1°
7	271°	277°	273°	4°	62°	63°	63°	0°
8	154°	155°	156°	1°	68°	66°	68°	2°
9	116°	108°	107°	1°	47°	47°	47°	0°
10	152°	155°	159°	4°	87°	85°	85°	0°



(a)



(b)

Fig. 10. 빛의 영향을 고려한 경사방향 및 경사각 비교: (a) 경사방향, (b) 경사

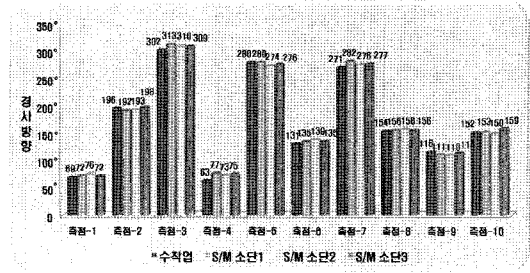
5.2.2 촬영 높이에 따른 영향검토

현장 여건상 촬영위치에 제약이 따를 경우 촬영위치에 따라 영상의 왜곡이 달라질 수 있으므로 이에 따른 측정값의 변화를 검토하였다. 이를 위해 반대편 비탈면 소단에서 촬영 위치(소단 1단, 2단, 3단)를 달리하여 측정한 후 그 값을 비교 검토하였다. 각 측정별로 촬영위치를 달리했을 때 조사시스템의 측정 결과 값을 정리하면 Table 4와 Fig. 11과 같다.

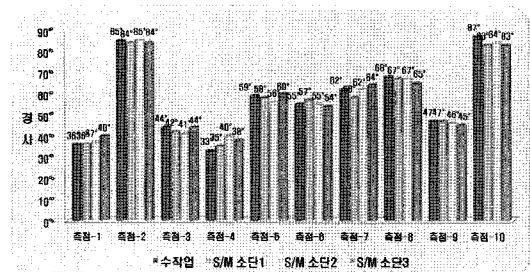
Surface Mapper는 사진 측량 시 장비 내 카메라의 회전 메커니즘을 이용하여 정면, 하부, 상부의 대상 불연속면을 촬영하도록 제작되어 있다. 촬영위치에 따라 동일 불연속면의 촬영 각도가 달라질 수 있는데 2차실험에서 촬영 각도가 다를 때 동일 불연속면의 측정값에 일관성이 있는가 하는 것을 파악하였다.

Table 4. 촬영위치에 따른 검증결과

측점	경사방향				경사각			
	수작업	S/M1 단	S/M2 단	S/M 3단	수작업	S/M1 단	S/M2 단	S/M3 단
1	69°	72°	76°	72°	36°	36°	37°	40°
2	196°	192°	193°	198°	85°	84°	85°	84°
3	302°	313°	310°	309°	44°	42°	41°	44°
4	63°	77°	73°	75°	33°	35°	40°	38°
5	280°	280°	274°	276°	59°	58°	56°	60°
6	131°	135°	139°	135°	55°	57°	55°	54°
7	271°	282°	276°	277°	62°	58°	62°	64°
8	154°	156°	158°	156°	68°	67°	67°	65°
9	116°	111°	110°	114°	47°	47°	46°	45°
10	152°	153°	150°	159°	87°	83°	84°	83°



(a)



(b)

Fig. 11. 촬영위치를 고려한 경사방향 및 경사각 비교 (a) 경사방향 (b) 경사각

이 문제를 검증하기 위하여 촬영 위치를 달리하여 10개의 대상 불연속면에 2차 검증을 수행한 결과 1단, 2단, 3단 촬영 위치별 차이는 경사방향은 4°~6°, 경사각은 1°~6°로 나타났다. 이는 1차 검증 시와 제시된 오차범위 ±10° 이내의 값으로 사진측량 시 나타날 수 있는 왜곡현상을 Surface Mapper의 알고리즘이 보정을 통해 충분히 해결하고 있음을 보여준다.

6. 결론

디지털카메라를 이용한 사진측량 기술로 암반 절취면의 불연속면을 효율적으로 측정하기 위해 개발된 시스템인 Surface Mapper를 이용하여 암절취사면에서 측정 결과값의 현장 검증을 실시한 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 7개의 불연속면을 대상으로 검증을 실시한 결과 클리노 컴퍼스와 조사시스템간에 경사방향은 1°~4°, 경사각은 0°~4°의 측정값의 차이를 보였다.
- (2) 10개의 불연속면을 대상으로 검증을 실시한 결과 빛의 영향을 고려하여 촬영 시간을 달리했을 때 경사방향은 0°~6°, 경사각은 0°~5°의 차이를, 촬영 위치를 달리했을 때 경사방향은 4°~6°, 경사각은 1°~6° 정도의 조사시스템의 측정값 차이를 보였다. 이는 클리노 컴퍼스를 활용한 암반 불연속면 조사시 절리면 상태가 고르지 않아 측정위치에 따른 경사방향과 경사각의 차이가 ±10° 정도 나타날 수 있다는 점을 감안할 때 본 조사시스템

의 정확도에 대한 신뢰도는 높은 것으로 나타났다.

- (3) 본 조사시스템은 불연속면의 면·선구조와 경사각 고·저에 관계없이 정확성에 대한 신뢰도는 높은 것으로 나타났다. 또한 빛의 강약 차이로 인한 Surface Mapper 측정값 차이가 없으며, 사진측량시 나타날 수 있는 카메라 렌즈의 왜곡현상을 Surface Mapper의 알고리즘이 보정을 통해 충분히 해결하고 있음을 보여준다.
- (4) 접근이 용이하지 않아 수작업으로 측정이 불가능한 대형 절취 사면의 지질구조 측정시 Surface Mapper를 효율적으로 활용할 수 있다. 또한 Surface Mapper 활용시 조사에서 안정성 평가까지 일괄작업 수행이 가능하므로 조사된 자료로 체계적인 암반 비탈면 관리가 가능하도록 데이터베이스를 구축할 수 있으며, 비탈면 붕괴시 신속하고 정확한 대책을 강구할 수 있을 것으로 판단된다.
- (5) 굴착에 의하여 생성된 사면에서는 3차원 상태로 절리가 숨어있는 경우는 흔하지 않고 고각의 경사각이나 역방향절리의 경우에는 장비와 소프트웨어의 개선으로 문제가 없다. 그러나 사면녹화나 낙석방지망 등이 설치되어 있는 경우에는 절리추출과정에서 사면이 아닌 사진의 다른 사물의 위치정보를 이용하기 때문에 정확도가 떨어질 수 있으므로 명암조절 등 다른 사물은 피하는 것이 좋다.

참고문헌

1. 이승호(2005), "3차원 영상처리를 이용한 암반사면 절리 측정 연구," 대한토목학회 논문집, 제25권, 제2호, pp. 79-84.
2. 황상기, 박석록(2000), "암반의 불연속면 배열을 측량하는 원격 영상측량기," 한국지반공학회 2000 가을학술발표회논문집, pp. 697-704.
3. 황상기(2001), "암반 불연속면의 원격 영상측량 기법," 대한지질공학회지, 제11권, 2호, pp. 205-214.
4. 황상기, Jason, C.G., Nguyen, Q. P. 윤경렬(2006), "암반 절취면 조사를 위한 원격 지질구조 측정기 Surface Mapper와 PDA 자료 입력 시스템 FieldNote와 지질정보시스템 Fieldmate," 한국지반공학회, 사면안정 학술발표회 논문집, pp. 119-126.
5. Gaich, A., Ptsch, M., Fasching, A., and Schubert, W.(2004), "Contact-free measurement of rock mass structures using the JointMetriX3D system," International Journal of RockMechanics and Mining Sciences 41, p. 414.
6. Hwang, S. G.(2001), "Photogramtric Measurement of the Attitude of Planar and Linear Features," Mathematical Geology Conference (IAMG2001), proceedings CD.
7. Kemeny, J. and Post, R.(2003), "Estimating three-dimensional rock discontinuity orientation from digital images of fracture traces," Computers & Geosciences, Vol. 29(1), pp. 65-77.
8. Manh, N. V. and Hwang, S. G.(2004), "Image processing for the strike and dip measurement for the excavated rock surface," Annual Meeting of the Korean Society of Economic and Environmental Geology, pp. 87-91.
9. Moffitt, F.H.(1961), "Photogrammetry," International Textbook Company, pp. 455

접수일(2009년 4월 16일), 수정일(2009년 5월 12일),
게재확정일(2009년 8월 6일)