

사면안정해석을 위한 사진측량을 이용한 사면변위계측시스템

Displacement Measuring System for the Slope Stability Analysis Using the Softcopy Photogrammetry

한 중 근*1 Han, Jung-Geun

송 영 석*2 Song, Young-Suk

Abstract

The displacement measuring systems of slope ground surface are very expensive instruments and have disadvantages concerning installing, maintaining and surveying. The measuring works are very dangerous. Recently, simple systems are required to measure the displacement of slope ground surface in stages of cutting and maintaining slope. In this study, the mechanism of Softcopy Photogrammetry is applied to measure the displacement of slope ground surface. Three dimensional data of the slope ground surface can effectively be obtained in order to analyze slope stability. Computer Program, DIMA (Design IMage Analysis), including the reformation process of a contour line was developed. As a result of this study, countermeasure and instruction standards of the displacement of slope ground surface before and after slope failure are established. Also, disadvantages of the existing system can be complemented.

요 지

사면지반변위를 측정하기 위한 기존의 시스템은 고가의 장비를 사용함에도 불구하고 설치·유지가 힘들고 지반지표의 전반적 계측이 힘들며 계측시 위험을 항상 동반한다. 따라서, 이러한 단점을 극복하고 사면의 변위량을 굴착초기부터 굴착단계별 및 유지관리단계까지 쉽게 미숙련자들도 측정할 수 있는 방법이 필요하며 이를 위하여 사진측량장점을 활용한 소프트카피 사진측량(Softcopy Photogrammetry)의 매카니즘이 사면지반의 변위계측을 위해 적용되었으며 이는 접근하기 어려운 위험 사면의 3차원 지반데이터를 효과적으로 획득·분석할 수 있는 방법으로 제시하였다. 또한, 기존의 지상사진측량결과 분석과는 다른 등고선 재생성과정을 광속조정프로그램인 DIMA (Digital IMage Analysis)를 개발 적용하여 적용성을 높였다. 사면파괴발생현장 사례를 통해 사면파괴 전후의 계측결과에 대한 사면안정체계 및 기존계측시스템의 단점을 해결할 수 있는 기술적 토대를 마련할 수 있었다.

Keywords : Displacement measuring system, Ground surface, Slope stability analysis, Softcopy photogrammetry, Three dimensional data

1. 서 론

최근의 사면에 대한 설계 및 시공은 아주 열악한 환경 즉, 극도로 험난한 산악지대나 도심지에서 벗어나 구릉 지에서의 도로건설 및 주택·공장단지의 조성이 늘어나

고 있다. 이로 인하여 절·성토에 의한 인위적 사면이 늘어나면서 더 많은 위험성이 높아지게 되었다. 그럼에도 불구하고 많은 설계·시공은 사면에 대한 기초적인 조사조차도 부족한 실정에서 수행되고 있는 실정이다. 또한, 시공상황에 맞추어 각종 계측장치를 설치하

*1 정회원, 중앙대학교 공과대학 건설환경공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil & Environ. Engrg., Chung-Ang Univ., jghan@cau.ac.kr)

*2 정회원, 중앙대학교 대학원 토목공학과 박사과정 (Member, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil Engrg., Chung-Ang Univ.)

여 수동적인 계측을 대부분 수행하고 있고, 보다 정확한 계측결과를 획득하기 위하여 계측관리자 및 시공관리자들은 많은 재해의 위험에 빠져 있는 것 또한 사실이다.

특히, 사면의 안정을 평가하거나 관리를 위해서는 평상시와 우기시에 대한 비교평가가 수행되어 우기시 발생하는 사면붕괴의 특성을 지역별, 지반특성에 따라 강우량의 발생패턴을 고려한 사면파괴발생을 예측하는 것은 대단히 중요하다. 따라서, 이에 상응한 계측치를 검측하여 사면의 붕괴가능성을 타진하고 평가하여 경계 또는 대피상황을 인식 발효할 수 있도록 많은 연구들이 수행되어 왔다(홍원표 등 1995, 정삼섭 등, 2001). 그러나, 사면안정을 평가하기 위하여 지반에 설치되는 각종 계측장비는 상당히 고가의 장비들이 설치됨에도 불구하고 사면붕괴에 따른 재해발생의 위험을 안고 실험자 및 계측관리자들은 계측을 수행하고 있다. 그러므로, 계측관리자들의 안전을 확보한 상태에서 지반변형을 보다 정확하게 측정할 수 있는 시스템개발 및 현장적용은 곧 공사현장의 시공성, 경제성, 그리고 안정성의 평가에는 필수 불가결한 사항이 되었다.

본 연구에서는 사진측량 결과를 이용하여 지반지표변위량 뿐 아니라 각종 구조물의 발생변위벡터를 측정할 수 있는 방법을 제시하였다. 특히, 소프트카피(Softcopy Photogrammetry, 컴퓨터내에서 자료를 다루는 사진측량기법) 사진측량기법을 사면의 지표변위측정에 적용함으로써 사람이 접근할 수 없는 위험사면에 대해 보다 정확한 사면의 실시간 지반변위를 계측할 수 있는 방법으로 사면파괴사례에 직접 적용함으로써 그 활용성을 검증하여 보고자 한다. 이를 위하여 광속조정을 위한 프로그램(DIMA, Digital Image Analysis)을 개발하여 사면지반의 전면에 대한 임의 위치의 3차원좌표를 사진영상으로부터 획득하여 그 결과를 조합하고 상용프로그램(Virtuozo, MGE(moduler GIS environment, GIS 지형분석모듈))를 이용한 좌표변환과정에 따라 검증하여 사면안정평가를 위한 기초자료를 얻을 수 있도록 하였다. 또한, 개발된 프로그램을 통한 변환값들을 이용한 사면의 변형상태에 따른 사면안정검토가 가능한가를 확인하여 보고자 한다.

2. 사면 변위계측시스템

2.1 기존의 계측시스템

사면계측시스템은 계측학적방법, 측량학적 방법 등이 적용되고 있으나 이들의 적용방법은 정밀도와 편이

성, 신속성 등 면에서 상호보완적 측면을 만족하지 못하고 독자적으로 적용되고 있는 것이 현실이다. 전자의 방법은 건물기울기, 경사계, 변형률계, 신축계 등의 센서를 이용하여 특정한 위치의 변위를 측정하는 방법으로서 비용이 고가임은 물론, 설치 및 유지가 힘들고 해석대상 표면 전반의 변형측정은 불가능하다(한국지반공학회, 1997, 김성곤, 1998). 또한, 후자의 경우는 정밀도 및 편이성 면에서 지상의 변형상태를 검측하기에는 기술개발 상태보다도 현장적용성이 뒤떨어져 있다.

사면에 대한 기존계측시스템은 토사사면(자연사면, 인공사면(성토 및 굴착사면) 등)과 암반사면에 대하여 각각 계측장비의 사용도가 조금은 차이가 있으나, 기본적으로는 원지반 계측, 시공중 계측에 대하여 각각 지반 및 지중의 변위와 지반내 간극수압의 측정으로 구성된다. 특히, 굴착단계별 형성되는 시공단면 뿐 아니라 굴착가능한 사면 전반에 걸쳐 지중 및 지표에 지중변위계, 지표변위계(신축계 등) 및 지중에 지반의 변형을 감지할 수 있는 간극수압계 등을 설치하여 시공단계별 지반의 변형상태를 계측하고 있다(그림 1참조)(한국지반공학회, 1997)

또한, 이러한 시스템으로 지표면상의 표점 이동변화를 계측한 결과(단양군 휴석동 산사태발생변위 조사결과)를 그림 2에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 지표면의 변위조사를 위하여 지표에 계측대상지점을 선택하고 그 지점에 24개의 표점을 설치, 매주 1회 계측을

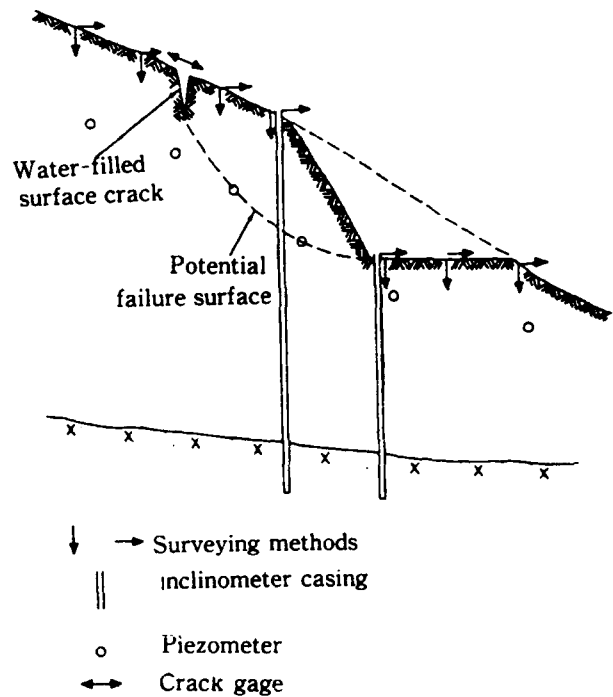


그림 1. 토사사면계측시스템 (한국지반공학회, 1997)

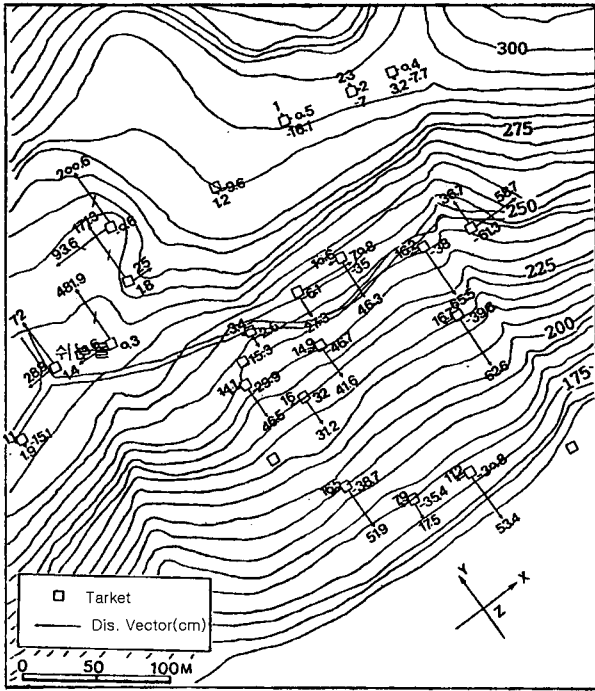


그림 2. 단양 휴석동 사면변위 벡터도 (김교원 등, 1996)

실시하여 각 표주점의 변위를 누적하여 지표면의 활동변위 벡터를 표시할 수 있다. 이러한 방법으로 지표면의 변위를 조사하는 경우 사면이외의 절대점에 대한 변위벡터를 조사하기 위하여는 많은 시간이 필요하게 되고 측정에 따른 많은 오차를 포함하게 된다(김교원 등, 1996).

이와 같이, 기존계측시스템은 예상사면의 규모가 대단위가 되는 경우 근접위치에서도 전체 사면의 거동을 파악하기 어려울 뿐만 아니라, 각종 시방서에서도 1개소 이상으로 그 계측범위를 단순히 권장하는 현실에서 사면붕괴가능성을 사전에 혹은 시공 중 그리고 시공완료 후에도 원활하게 관리할 수 있는 계측체계가 어려워 각종 안전사고를 유발시키게 되며 사면붕괴로 인한 시공중단 등의 커다란 손실을 보이고 있는 현실이다. 지반내 장비를 설치하는 계측시스템은 지중과 지표에 각각 많은 계측시스템을 설치한 후 인위적인 측정을 수행하여야 하며 일시에 많은 계측점을 측정하기 위하여는 막대한 설치비 및 계측비가 소요되고, 각 계측기의 설치위치 및 설치시기에 따라 원하는 계측값의 오차발생 편차는 상당히 크며, 이에 따른 계측자의 안전사고에 대한 위험은 항상 잠재하고 있다. 따라서, 계측점을 근거리 혹은 원거리에서 안전하게 이동량을 측정할 수 있게 하기 위하여 대상물의 유동점의 정확성을 확보하는 것에 한계가 있음에도 불구하고 영상기법을 이용한 계측기법을 활용한다면 이러한 문제점을 극복할 수 있을 것이다.

한편, 사진측량기법을 이용한 사면지반의 변위측정은 영상획득매체와 영상획득방법으로 구분되며, 전자는 아날로그 사진기와 디지털 사진기로 구분한다. 필름을 기초로 한 아날로그 사진기의 영상은 CCD사진기, 디지털 캠코더 또는 디지털 사진기의 영상에 비해 해상도가 좋은 반면, 디지털 영상은 컴퓨터 상에서 실시간 처리가 가능하다는 장점에도 불구하고 실제 현장에서의 활용 측면에서 아직까지 해상도에 따른 해석정확도의 상대적인 저하를 극복하지 못하는 있는 실정이다(강준목, 1992, 홍성완, 1990). 입체사진을 얻기 위한 두 촬영점 사이의 거리를 일정하게 한 고정기선바를 이용한 영상획득방법은 사진기의 위치를 기지점으로 사용하여 공간전방교회법(space intersection)으로 사면지반의 좌표를 결정하는 것이다. 그러나, 이는 고정기선바에 부착한 사진기의 위치와 기선거리를 변경하는데 많은 어려움을 내포할 뿐 아니라 해석 대상면의 크기와 촬영거리에 따라 그 활용이 매우 제한적이다. 또한, 고가의 사진기 두 대를 사용하여야 하며 고정기선바의 검증이 문제가 된다.

그러나, 촬영점의 고정에 따른 영상획득의 어려움과 사진측량과 관련한 해석정확도를 고려하여 자유로운 촬영점에서의 입체영상의 획득이 가능한 영상측정기법을 구축함으로써, 대상사면 전체의 지표변위를 일시에 계측할 수 있는 시스템을 개발하는 것은 대단히 중요할 것이다. 이러한 목적으로 프로그램을 개발하여 대상사면에 측정타켓을 설치하지 않고 가시적인 사면지반의 전체 지표변위를 계측할 수 있게 되었다. 즉, 본 연구에서는 DIMA 프로그램을 통해 사진영상으로부터 임의 점에 대한 3차원좌표를 생성할 수 있게 됨에 따라 사면지반의 변형상태를 굴착단계에 따라 지속관찰을 통해 발생하는 지반의 변위를 측정위치에 따라 관찰할 수 있다. 이와 같은 실시간 사진측량체계를 이용한 지표변형 계측시스템을 현장사례를 통해 실증함으로써 더욱 안정성이 있는 신기술개발의 터전이 될 수 있으리라 생각된다.

2.2 사진측량기법의 활용

우리나라의 경우, 1980년대부터 지상사진측량(Close-Range Photogrammetry)기법이 도입되어 많은 연구성과가 축적되어 왔으며, 특히, 사진측량은 새로운 분야인 수치사진측량법은 컴퓨터 및 영상처리 기술의 발달과 함께 인공위성과 CCD 사진기 등에 의해 대량의 수치영상 데이터를 얻을 수 있게 됨으로써 수치사진측량에 관한 많은

연구가 이루어지고 있다. 따라서, 전통적인 사진측량과 수치사진측량은 초기의 입력데이터에 확연히 구분되며 후자는 수치사진측량은 컴퓨터를 이용하여 영상처리의 완전 자동화가 가능하다(강준목, 1992, 1999, 유복모 등, 1998). 따라서, 본 연구에서 사용되는 사진측량결과를 이용한 3차원 좌표생성 메카니즘을 나타내면 다음과 같다.

2.2.1 기본 방정식

사진측량은 그림 4에서와 같이 2차원 공간상의 점 $p_1(x_1, y_1)$, $p_2(x_2, y_2)$ 로 표현되는 입체사진을 토대로 하여 광학적 또는 수학적 방법으로 p_1, p_2 에 상응하는 3차원공간의 점 $P(X, Y, Z)$ 로 재현하는 방법이며, 2차원 공간에 시간(t)을 추가한 점 $p(x, y, t)$ 로부터 4차원측량으로 $P(X, Y, Z, T)$ 를 구할 수 있는 장점이 있다(Wolf, 2000). 사진실측을 통해 최종적으로 얻어지는 결과물까지 사용되는 알고리즘은 그 단계가 복잡하고 다양하지만 다음과 과정을 통해 가능하게 된다.

피사체의 공간좌표 (X_A, Y_A, Z_A) 를 계산하기 위한 시차방정식은 그림 3의 닦음삼각형꼴에서 삼각형 Lom과 LOM으로 부터 $X_A/Y_A = x_a/f$ 이므로 식 (1)이 된다.

$$X_A = \frac{x_a}{f} Y_A \quad (1)$$

또한, 닦음삼각형 L'o'm'와 L'OM'에서 $(B - X_A)/Y_A = -x'_a/f'$ 이므로 식 (2)가 된다.

$$X_A = B + \frac{x'_a}{f'} Y_A \quad (2)$$

식 (1)과 (2)로부터 시차차이 $p_a = x_a - x'_a$ 를 대입하면(여기서, $f = f'$ 이다.)

$$Y_A = \frac{Bf}{p_a} \quad (3)$$

가 되며 식 (3)을 식 (1)에 대입하면 식 (4)가 된다.

$$X_A = \frac{Bx_a}{p_a} \quad (4)$$

한편, 닦음 삼각형 Lon과 LON으로부터, 식 (5)가 된다.

$$\frac{Z_A}{Y_A} = \frac{y_a}{f} \quad (5)$$

식 (3)을 식 (5)에 대입하면,

$$Z_A = \frac{By_a}{p_a} \quad (6)$$

가 된다. 여기서, 지상사진의 입체상으로부터 측정된 시차(parallax)를 가지고 식 (3), 식 (4) 및 식 (6)으로써 임의의 점들에 대한 피사체 공간좌표 X, Y, Z를 산출할 수 있다.

한편, 해석사진측정은 대상점과 상점, 상점과 노출점, 노출점과 대상점 상호간의 수학적 관계는 식 (7)과 같이 공선조건식(collinearity condition equation)으로 정의하며, 관측값과 미지값사이 공선조건 상관관계를 이용한다. 이는 모든 상점들이 동일평면상에 놓이며 피사체의 한 점(N), 대상물의 상응하는 한 점(n), 그리고 투영 중심(o)이 동일직선상에 존재하는 것으로서, 그림 3의 관계를 수학적으로 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned} x = x_i - x_p &= -f \frac{A(X_N - X_L) + B(Z_N - Z_L) + C(Y_N - Y_L)}{D(X_N - X_L) + E(Z_N - Z_L) + F(Y_N - Y_L)} \\ y = y_i - y_p &= -f \frac{A'(X_N - X_L) + B'(Z_N - Z_L) + C'(Y_N - Y_L)}{D(X_N - X_L) + E(Z_N - Z_L) + F(Y_N - Y_L)} \quad (7) \end{aligned}$$

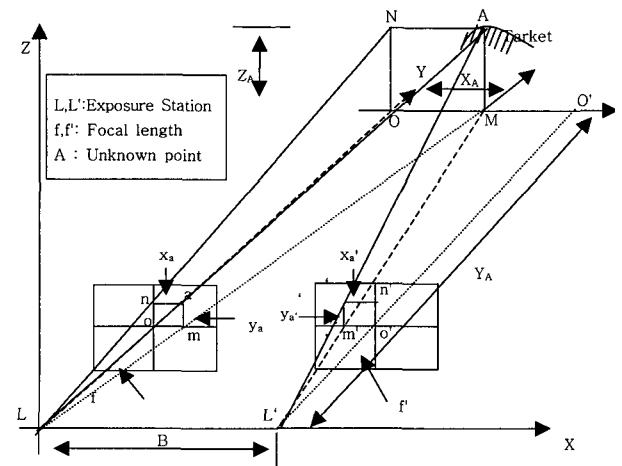


그림 3. 지상사진 사진측량의 기하학적 개념도

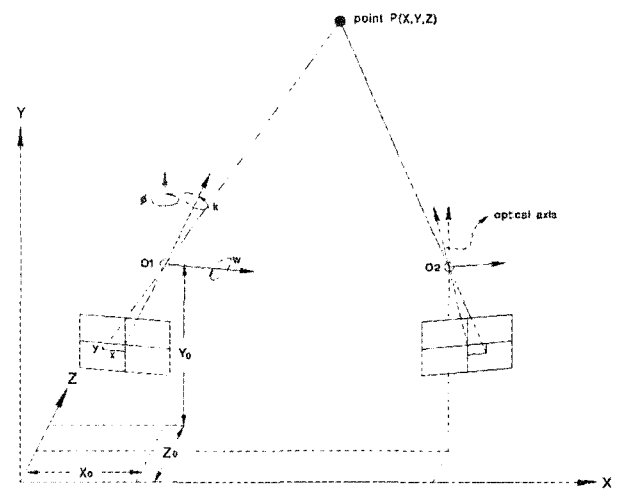


그림 4. 공선조건식의 기하학적 관계

여기서, X_L, Y_L, Z_L : 피사체 공간에서 투영중심의 위치, x_p, y_p, f : 상공간에서 투영 중심의 위치, A, B, C, D, E, F, A', B', C' : 직교행렬 변환의 요소, x_i, y_i : 상좌표, f : 투영중심에서 상면까지의 거리(초점거리), x, y : 사진좌표이다.

A, B, C, A', B', C', D, E 그리고 F의 9개 변환요소는 피사체의 공간좌표에 대한 상-공간 좌표계의 각표정을 규정짓는다. 특히 A, B, C는 x축의 x, y, z 방향 여현을 나타내며, A', B', C'와 D, E, F는 각각 y, z축의 X, Y, Z 방향 여현을 나타낸다. 이들 방향 여현을 이용하여 회전각, 표정점의 좌표, 9개의 미지수를 포함한 비선형방정식을 Taylor 급수 전개하여 선형화하고 선형화된 공선조건식을 이용하여 초기좌표에서 증분변위 수치값을 얻게 된다(Kraus, 1997).

3. 사면지표 변위계측을 위한 사진측량기법의 적용

실시간 온라인 데이터 획득 및 해석이 가능한 CCD 사진기 또는 디지털 사진기를 이용한 연구가 최근 많이 수행되고 있으나, 아직까지 필름을 사용한 일반 사진기의 해상도를 따라오지 못하고 있는 실정이다. 이것이 디지털 사진기의 현장 활용에 절대적인 문제점으로 작용

하고 있다(Kraus, 1997). 따라서, 본 연구에서는 필름을 이용한 3차원 좌표생성을 도모하였으며 이를 위하여 ○○-○○간 도로확장 공사 구간 중 터널갱구부 확보를 위한 석회질의 연약 암반사면 및 붕적퇴적암에 대한 굴착공사 초기단계에 있는 사면활동 발생지역을 해석대상으로 선정하였다. 본 예제현장에 대하여 소프트카피 사진측량기법을 적용하여 사면파괴 발생전의 초기상태와 사면활동 발생후의 지반상태의 변형상태에 대한 측정값을 사진영상 3차원 좌표분석프로그램인 DIMA ver 1.0을 이용하여 얻었고, 지반변형의 전후 각각에 대한 사면안정을 사면안정검토 범용프로그램인 PCSTABL 5M을 이용하여 검토하므로써 사진측량법을 이용한 임의의 사면지반에 대한 실시간 사면안정검토 가능성 및 사면파괴 발생위험의 예측방법을 제시하고자 한다.

3.1 안정평가방법

본 연구대상 지역은 사면활동이 연속적으로 발생하는 대규모사면으로 파괴규모는 그림 7에서 보는 바와 같이 100m×100m 정도이다. 절토면 배면은 석회질의 연약암반사면이 지표에 두드러진 지역으로 사람이 접근할 수 없는 위험지역이며 사면의 붕괴가 계속적으로 일어나고 있

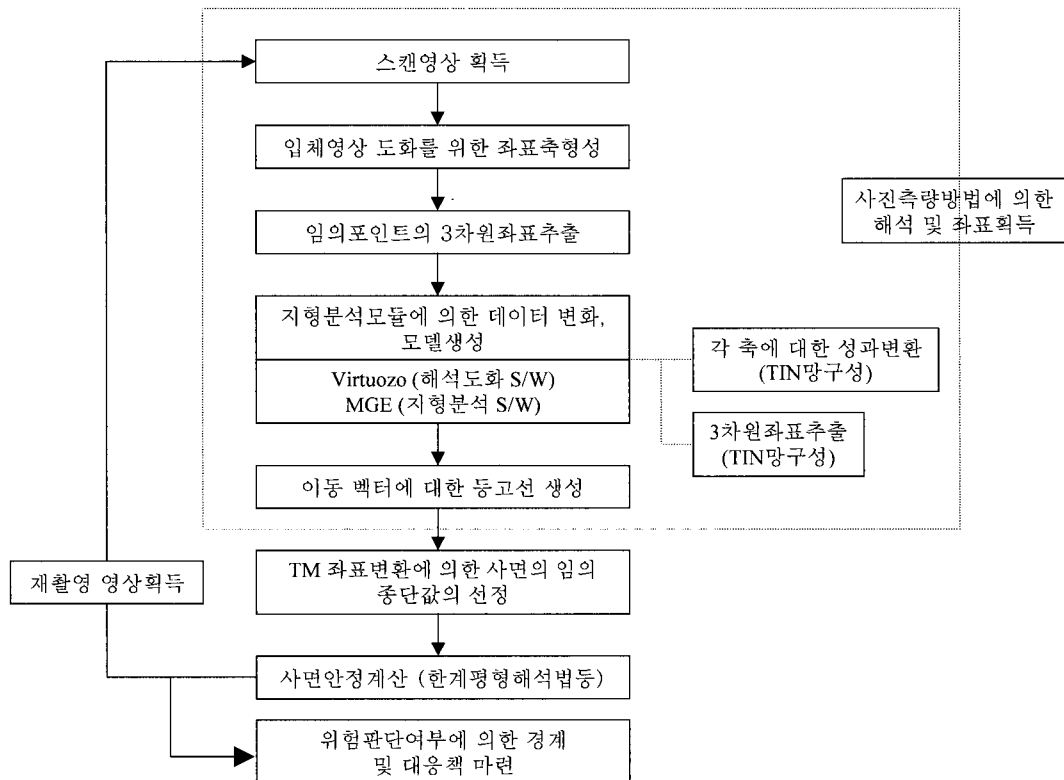


그림 5. 기존연구 시스템 적용시 사진측량기법을 이용한 사면변위측정 및 안정해석적용

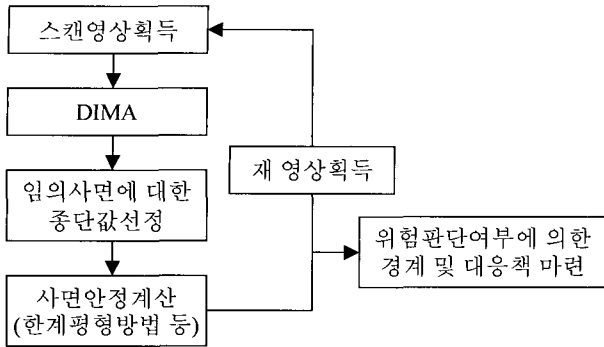


그림 6. 개발된 프로그램을 이용한 사면변위 및 안정해석 흐름도

다. 앞서 전술한 바와 같이 지상사진측량기법을 이용한 사면지표변위의 변위량 측정을 위해 Rollei 6006 측정용 사진기(f:80 mm)의 필름을 해석하여 요구되는 1m 등고선을 생성하였으며, 비 접촉 대상물에 대해 보다 정확한 3차원 사면지반 자료를 획득하고자 무-타겟 자동측정기기를 이용하였다. 이를 위한 기존연구시스템에 의한 사면변위 및 안정해석흐름도와 본 연구수행과정에 의해 간편화된 흐름도를 나타내면 각각 그림 5와 그림 6과 같다.

먼저, 기존의 사진영상을 이용한 사면안정해석을 위한 단계에서는 그림 5의 □표시에 해당하는 측량차원 조사 및 해석이 전제가 되어야 한다. 따라서, 측량학 범주내에서 사진영상을 획득하여 도화기를 이용한 좌표생성과정을 거쳐 임의포인트에 대한 3차원좌표를 추출한다. 이때 지형분석 및 데이터 변환을 위하여 각각 해석도화용 S/W인 Virtuozo와 지형분석 모듈 S/W인 MGE를 사용하여 각 축에 대한 성과물을 TIN망으로 변화시켜 3차원 TIN망을 구성하여 등고선도를 그리게 된다. 이렇게 얻어진 값을 좌표변화에 의해 해석하고자 하는 위치에 대한 중단면을 선정하여 사면지반을 구성하게 된다. 이러한 측량학적 성과를 이용하여 사면지반의 지표변위를 연속적 혹은 임

의적인 계측하여 그 위치에 대한 지반의 안정을 검토하기 위하여 지반공학적 안정해석법을 그림 5와 같이 도입하여 그 결과에 대한 위험성과 안정대책 및 경계요건 등을 마련하게 된다. 이러한 과정을 반복하므로 측량학과 지반공학적 접합과정이 현장에서 실효를 거둘수 있게 되나 그림과 같이 여러단계의 S/W해석단계를 걸치게 되므로 전문가의 해석결과를 바탕으로 하지 않으면 안된다.

따라서 본 연구에서와 같이 측량학적 관점을 대폭 개선하여 지반공학자들의 계측관리측면에 적용할 수 있도록 그림 6과 같이 크게 3단계, 즉, 영상획득단계, 좌표해석단계(DIMA) 및 안정해석단계로 간편화하였다.

이러한 실시간 사면지표지반의 변화에 대한 3차원좌표를 이용하여 새로이 변환된 사면의 3차원좌표를 획득하여 흐름도에 따라 반복하므로써 변환된 사면지반의 안정을 평가할 수 있게 된다. 이와 같이 사진촬영을 수시로 반복하므로써 접근불가능한 지역 혹은 계측장비의 설치가 곤란한 지역에 대한 사면지반의 변환과정을 대상으로 사면의 안정 및 불안정상태를 평가하므로써 궁극적으로는 사면재해에 대한 경계 및 안정대책의 관리체계를 만들 수 있게 된다.

4. 사진영상을 이용한 3차원 사면변위계측

소프트카피 사진측량을 위한 입체영상은 대상 현장의 전면 300m 정도에서 획득하였다. 3차원 영상해석을 위해 필요한 기준점은 무-타겟 측정장비를 사용하여 6점을 취하였다. 그리고, 필름의 크기가 중형(6cm×6cm)이기 때문에 작은 화소 크기로 스캔하면 영상의 용량이 커져 해석하는데 어려움이 있으므로, 영상해석을 위한 적절한 크기인 15μm(40Mb)로 스캔·적용하였다.



그림 7. 좌측영상



그림 8. 우측영상

현장에서 직각수평촬영을 위해 사면 하상 바닥부를 수평선으로 설정하고 대상물의 중복도(80%)를 고려하여 그림 7 및 그림 8과 같은 입체영상을 획득하였다. 이들 영상간의 기선거리는 대략 40m이다.

Rollei 6006 필름을 스캔하여 3차원 좌표획득 프로그램인 DIMA를 이용하여 임의 점에 대한 좌표 및 각 점에 대한 좌표를 등고선으로 도화하였다(본 연구에서는 DIMA의 전개과정중 정확성을 기존 시스템과 함께 고려하기 위해 해석도화 S/W를 사용하여 참고하였다). 이때, 지상사진은 항공사진과 해석 좌표축이 다르므로, 이를 고려하여 좌표축을 변환하였다. 표 1은 지상사진 해석을 위해 평면 위치를 나타내는 TM좌표값(경도와 위도를 나타내는 원점좌표계)과 표고데이터를 수정하여 정리한 것이다.

표 1. 3차원 입체영상 해석을 위한 지상기준점 성과

기준점 No.	획득자료의 변환 기준점 성과(TM좌표성과)		
	X(m)	Y(m)	Z(m)
1	154207.537	247.406	231.365
2	154209.093	197.511	302.185
3	154202.818	198.053	304.565
4	154270.449	209.003	289.203
5	154271.964	212.832	289.656
6	154278.006	237.890	234.045

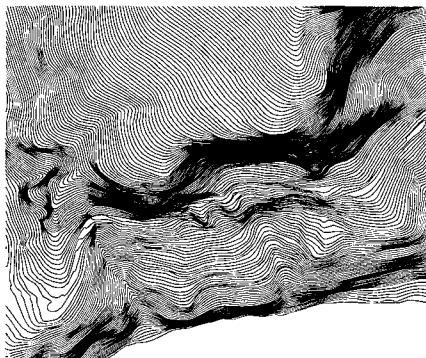


그림 9. 사면지반의 초기 등고선도

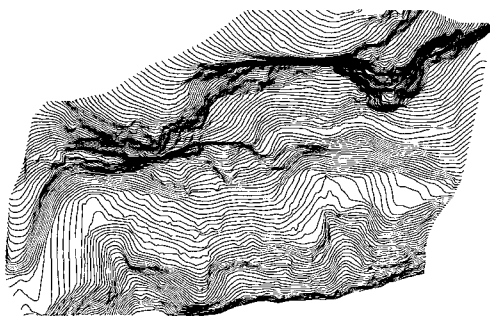


그림 10. 사면지반의 변형후 등고선도

지상사진의 Z축 좌표는 보이는 방향이 (-) 방향이 되므로 임의의 410,000m에서 빼준 성과이다. 한편, 표 1의 값들은 사진측정기의 기준점에 대한 성과를 무타겟 측정기기를 사용하여 획득한 것으로 좌표해석의 정확성을 위하여 성과가 나쁜 No. 4와 No. 5는 해석대상에서 배제하였다.

입체영상 도화는 Virtuozo를 참조하였으며 TIN생성, 등고선 생성, 좌표점 추출, 단면분석 등은 지형분석 프로그램인 MGE(Modular GIS Environment)를 참조하여 조합 단순화시킨 DIMA를 이용하여 원지반상태에서의 등고선도(그림 9) 및 사면붕괴후 현재상태에서의 등고선도(그림 10)를 지상사진체제로 도화한 성과로 나타낸 것이다. 따라서, TM좌표체제의 기존 지형도와 좌표체제가 다르기 때문에 정확히 일치하지는 않는다.

5. 사진계측결과를 이용한 사면안정해석 및 고찰

5.1 절토사면의 사면안정평가자료의 구성

전 절에서와 같이 사면지반에 대한 3차원좌표를 영상을 통해 획득하고 사면의 안정을 검토하기 위하여 좌표 변환을 수행하였으며 TM좌표변환을 통해 사면파괴 발생전후의 사면상태 즉, 그림 9와 그림 10을 복합적으로 그림 11과 같이 나타내었다. 이때 사면안정해석 필요단면을 얻기 위하여 총 10개의 횡단면을 선정하였다. 선정된 단면은 도로의 상행선(그림 10의 No. 8) 및 하행선(그림 10의 No. 6)의 갱구부와 이 부분의 절토를 위한 진입로(그림 10의 No. 2~No. 5)를 고려하여 선정한 것으로 각 횡단에 대한 변화된 좌표를 사면으로 도시하여 나타내면 그림 12에서 보는 바와 같다.

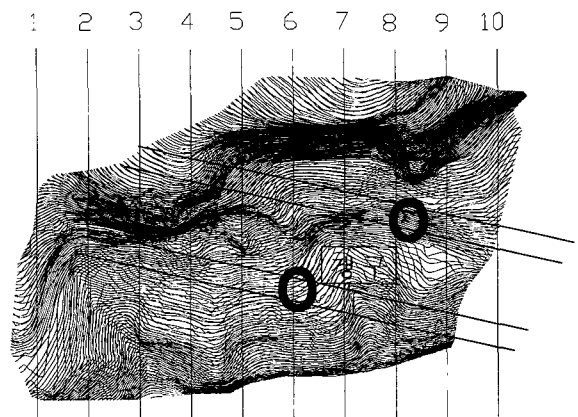


그림 11. 사면지반변위 전후의 등고선도 및 해석대상 횡단위치

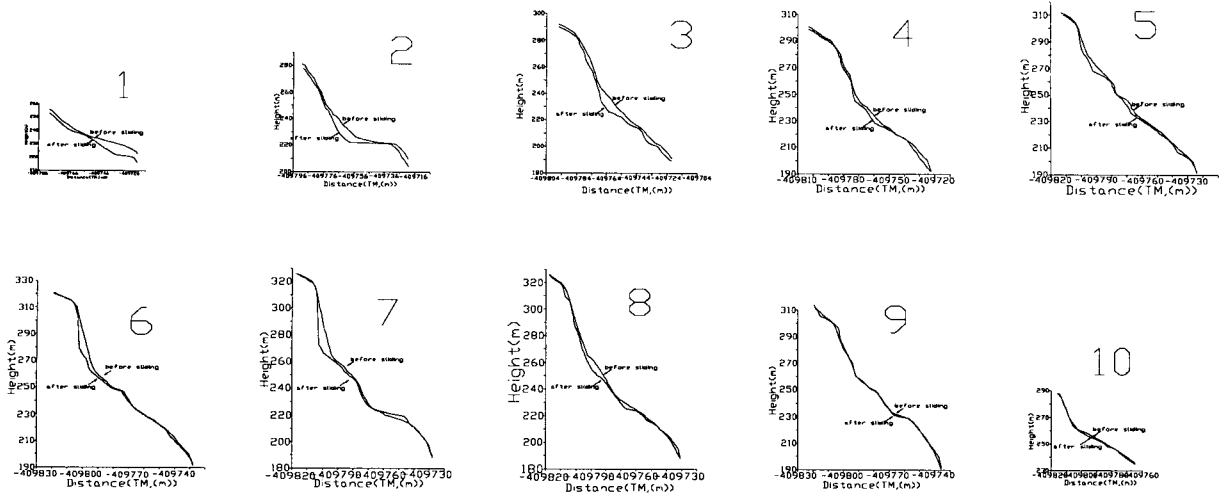


그림 12. 사면지반변위 전후의 위치별 횡단도

5.2 사면변위계측단면의 변화 및 사면안정

본 현장의 사진영상계측결과를 이용한 사면의 실시간 안정해석을 위한 초기단계로 그림 11과 같이 얻어진 횡단면 즉, 도로진입로 초입부분인 그림 12에서 단면 2, 단면 3과 터널갱구부에 해당하는 단면 6(하행선)과 단면 8(상행선)을 대표단면으로 선정하여 사면안정해석을 수행하였다.

본 현장지반이 그림 7에서 보는 바와 같이 연약한 석회질의 붕적퇴적암층이 상당히 깊게 형성되어 있고 특히, 지표면은 부서진 석회질의 붕적퇴적암들이 얇게 분포되어 있으나 본 지역의 경우 지반에 대한 조사자료가 없으므로 도로설계 실무편람(한국도로공사, 1996)과 각종 문헌을 종합하여 점착력을 고려할 수 없는 경우로 판단되어 풍화암의 지반강도정수인 $\gamma_t = 1.8t/m^3$, $\phi = 35^\circ$

를 선정하였다. 특히, 암반의 경우 자연암의 상태에 따른 강도정수를 제시하고 있어 본 연구에 적용하기 어려워 현장조사결과와 같이 암편들로 구성된 지표면의 강도정수는 표 2의 조합에 의하여 채택하였다. 또한, 붕적토 및 붕적퇴적암층에 대하여 사면활동면의 깊이와는 별개로 지반구성 암질에 대하여 재료강도정수를 채택하게 된 것이다.

이와 같이 지반상태를 고려하여 수행된 사면안정검토결과는 표 3에서 보는 바와 같이 사면안전율은 평균 0.48~0.53으로 자립성이 부족한 상태로 존재하고 있어 절토시 항상 사면파괴의 가능성을 갖고 있다 할 수 있다. 또한, 그림 13에서 보는 바와 같이 사면파괴가능면을 고려하여 볼 때 실제 현장에서 발생된 사면파괴면의 모양과 비슷한 단면형상을 보이고 있다. 이와 같이 파괴 발생후의 예상단면을 사면안정해석을 통해 얻으므로써

표 2. 기준별 지반정수

기준	종 류		단위중량 (tf/m ³)	점착력 (tf/m ²)	마찰각 (°)	포아송비
서울시 (1996)	풍화토		1.7-2.0	0.0-1.0	25-30	0.35
	풍화암		2.0-2.2	1.0-3.0	30-35	
기준	종류	재료의 상태	단위중량 (tf/m ³)	점착력 (tf/m ²)	마찰각 (°)	분류기호
도로 공사 (자연 지반, 1996)	자갈	밀실한 것, 입도가 좋은 것	2.0	0	40	GW, GP
		밀실치 않은 것, 입도가 나쁜것	1.8	0	35	
	자갈섞인 모래	밀실한 것	2.1	0	40	GW, GP
		밀실치 않은 것	1.9	0	35	
	모래	밀실한 것, 입도가 좋은 것	2.0	0	35	SW, SP
		밀실치 않은 것, 입도가 나쁜 것	1.8	0	30	
	사질토	밀실한 것	1.9	3이하	30	SM, SC
		밀실치 않은 것	1.7	0	25	

표 3. 대표단면의 사면안전을

구 분	No. 2	No. 3	No. 6	No. 8
굴착초기의 사면안전을	0.48	0.508	0.515	0.525

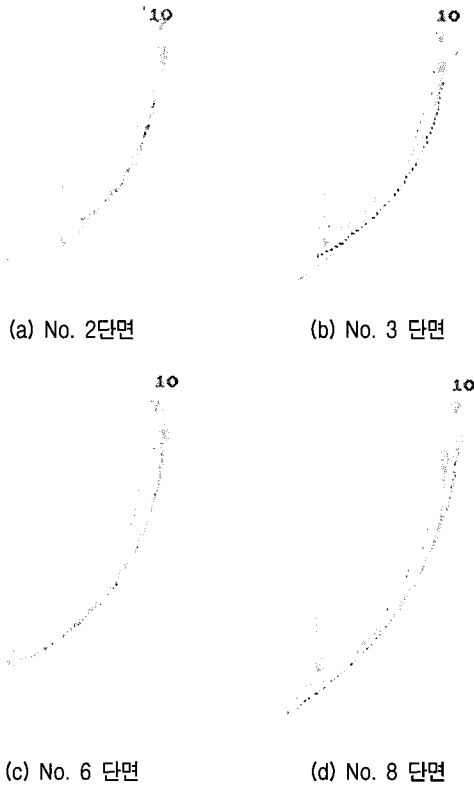


그림 13. 절토사면의 사면변위발생전 사면안정해석

사면파괴발생후의 지반의 영향범위 및 토사유출량등을 유추할 수 있게 된다. 한편, 파괴발생후의 사면에 대한 사진영상을 획득하여 그림 5와 그림 6의 흐름도와 같이 반복된 좌표변환을 통해 그림 12과 같은 새로운 횡단면을 획득하여 사면안정을 수행하므로써 또 다시 발생할 수 있는 사면파괴의 가능성을 판단할 수 있게 된다.

상기와 같은 결과를 통하여, 각 단계별 수행된 과정을 자동화하고 사진영상의 획득과정을 보다 간편하고 정밀화하는 경우 실시간 사면지반의 파괴를 예측할 수 있게 되고, 지반상태에 대한 정확한 정수들을 사전에 획득하는 경우에는 보다 정밀한 사면파괴 가능성을 유추할 수 있게 될 것으로 사료된다.

6. 결 론

본 논문에서는 최근 많이 사용되고 있는 사진측량 및 수치사진측량의 기법을 활용하여 사면지반의 굴착초기

에서부터 굴착단계에 따른 사면지반의 지표변위를 계측하였으며 그 과정을 통해 보다 쉽게 사면지반의 지표변위계측할 수 있도록 소프트카피 사진측량을 이용한 사면지반 변위계측에 적용가능성을 적용사례를 통하여 검토·제시하였다.

- (1) 소프트카피 사진측량 기법을 적용하여 접근하기 어려운 위험 사면의 3차원 지반데이터를 효과적으로 획득·분석할 수 있는 광속조정 프로그램인 DIMA를 개발하였고 그 적용성을 현장사례를 통해 확인할 수 있었다.
- (2) 지상사진측량에 의해 획득한 등고선 성과는 지형도와 그 좌표체계가 다르며, 3차원 벡터 변환모듈을 이용하여서도 기존 지형도와 동일한 좌표체계의 성과로 변환할 수 없다. 따라서, 해석 절점의 3차원 좌표를 추출·변환한 한 후, 이를 이용하여 등고선을 재 생성하므로써 기존 지형도와의 비교·분석이 가능하였다.
- (3) 기존계측시스템을 이용하는 경우 발생하는 각종단점, 지형조건을 고려한 계측장비의 설치, 위험사면에서의 계측원, 감독자들에 의한 계측관리상 안정성 문제를 해결하므로써, 안정성 있는 계측장비의 개발을 위한 기술적 토대를 마련할 수 있었다.
- (4) 소프트카피 사진측량 결과에 의한 원지반 혹은 굴착초기상태의 사면안정을 검토하고 그 위험성을 평가하므로써 대책 및 경고의 기준을 마련할 수 있을 뿐 아니라 연속적인 사진촬영에 의해 변화된 사면의 3차원자료를 획득하므로써 이 과정의 반복에 의한 사면형성에 따른 유지관리측면에서의 실시간 사면안정 검토를 가능케하는 기술적 토대를 마련할 수 있었다.

또한, 이러한 기술은 그림 5와 그림 6에서와 같은 흐름에 의해 자동화된 기술로 발전하는 경우, 비숙련자에 의한 현장에서의 실시간 관리감독이 가능할 것으로 사료되며, 차후의 기술적 발전에 따른 지반계측분야에도 획기적 전기가 마련될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2003년도 중앙대학교 학술연구비 지원에 의한 것입니다. 이에 감사드립니다

참 고 문 헌

1. 한국도로공사(1996), 도로설계요령 제3권, pp.40-42.
2. 한국지반공학회(1997), 사면안정. 지반공학시리즈 5, 구미서관
3. 강준목(1992), 지상사진측량에 의한 구조물 변형의 최적해석에 관한 연구 최종 보고서. 한국과학재단.
4. 강준목, 배상호, 송승호(1999), "윈도우 시스템체계를 이용한 수치사진측량기법 구축", 대한토목학회 논문집, 제19권, 제Ⅲ-2호, pp.325-334.
5. 김교원, 김상규, 우보명(1996), "붕괴도 사면의 포행성 지반활동", 한국지반공학회 96 사면안정학술발표회 논문집-사면안정 조사 및 대책, 한국지반공학회, pp.33-50.
6. 김성곤 (1998), 계측기술의 최근 동향. 대한토목학회지, 제46권, 제11호, pp.14-26.
7. 배상호(2000), 구조물변위 해석을 위한 수치사진측량의 컴포넌트 개발, 충남대학교 박사학위논문.
8. 유복모, 이숙군(1998), "CCD사진기를 이용한 근거리사진측량의 실시간 처리에 관한 연구", 대한토목학회논문집, 제18권, 제Ⅲ-3호, pp.317-327.
9. 정상삼, 원진오, 박중배, 김성열(2001), "역지말뚝 간편설계법 및 적용성 분석", 한국지반공학회논문집, 제17권, 제6호., pp.5-14.
10. 홍성완 (1990), 토질공학 모형실험에 입체사진 측정기법의 활용. 정인준교수 정년퇴임 학술발표회논문집. pp.83-97.
11. 홍원표, 한중근, 이문구(1995), "역지말뚝으로 보강된 절개사면의 거동", 한국지반공학회지, 제11권, 제4호, pp.111-124.
12. 한중근, 배상호, 오다영(2001) "사면의 지표변위계측을 위한 사진측량기법의 적용", 한국환경복원녹화기술학회, 제4권, 제3호, pp.10-18.
13. Karl Kraus(1997), *Photogrammetry*, Vol.1,2. 4th Edition, Dümmler/Bonn.
14. Paul R. Wolf(2000), *Element of Photogrammetry with Application in GIS*. 3rd edition.

(접수일자 2002. 4. 29, 심사완료일 2003. 6. 10)