

도로사면의 모니터링을 위한 근거리 디지털 영상의 활용

Utilizing Digital Close-Range Images for Road Slope Monitoring

이진덕*, 연상호**, 이호찬***

금오공과대학교 교수*, 세명대학교 교수**,
금오공과대학교 측량·지형정보연구실***

Lee Hin-duk*, Yeon Snng-ho**, Lee Ho-chan***

Kumoh Natatiol of Technology*, Semyung
Univ.**, Kumoh Nat'l Inst. of Tech.***

요약

본 연구에서는 근거리 디지털 사진측량기법을 적용하여 도로 사면의 3차원 변형측정 및 사면의 시각화를 구현하고자 하였다. 디지털 영상을 매개로 광속조정법(bundle adjustment)에 근거한 사진삼각측량 방법에 의하여 사면의 3차원 변형량을 도출하였고, 디지털사진측량 워크스테이션을 사용하여 사면의 수치고도모형(digital elevation models)과 수치정사영상 및 3D 경관도를 생성하였다. 또한 데스크톱 GIS를 활용하여 사면의 경사도를 분석하는 등 위험 사면의 모니터링과 사면 관리를 위한 자료를 제시하고자 하였다.

Abstract

This research addresses the experimental application of the digital close-range photogrammetric technique for 3D deformation measurement and visualization of road slope. The 3D displacements were extracted by the photo-triangulation based on the bundle adjustment method using the digital imagery. In addition, we produced the digital elevation models, the digital orthorectified images and the 3D perspective view images of the slope employing a digital photogrammetric workstation. Also the inclination map of the slope was generated as the data for monitoring and managing dangerous slopes.

I. 서 론

산지가 국토의 70%를 차지하는 협소한 공간에서 사회기반시설을 확충하기 위한 개발사업이 활발히 이루어지는 반면, 하절기 집중호우와 관리 미흡으로 발생하는 산사태 및 사면 붕괴사고로 인하여 많은 인명과 경제적 손실을 초래하고 있어 지속적인 변형 및 거동 모니터링이 요구되고 있다.

효율적인 도로 유지관리를 위하여 수치사진측량의 결과물을 기본자료로 활용하여 사면의 형태와 특성을 쉽게 파악하고 분석하여 관련정보를 추출함은 물론 사면의 모니터링을 위한 지리정보시스템(GIS;

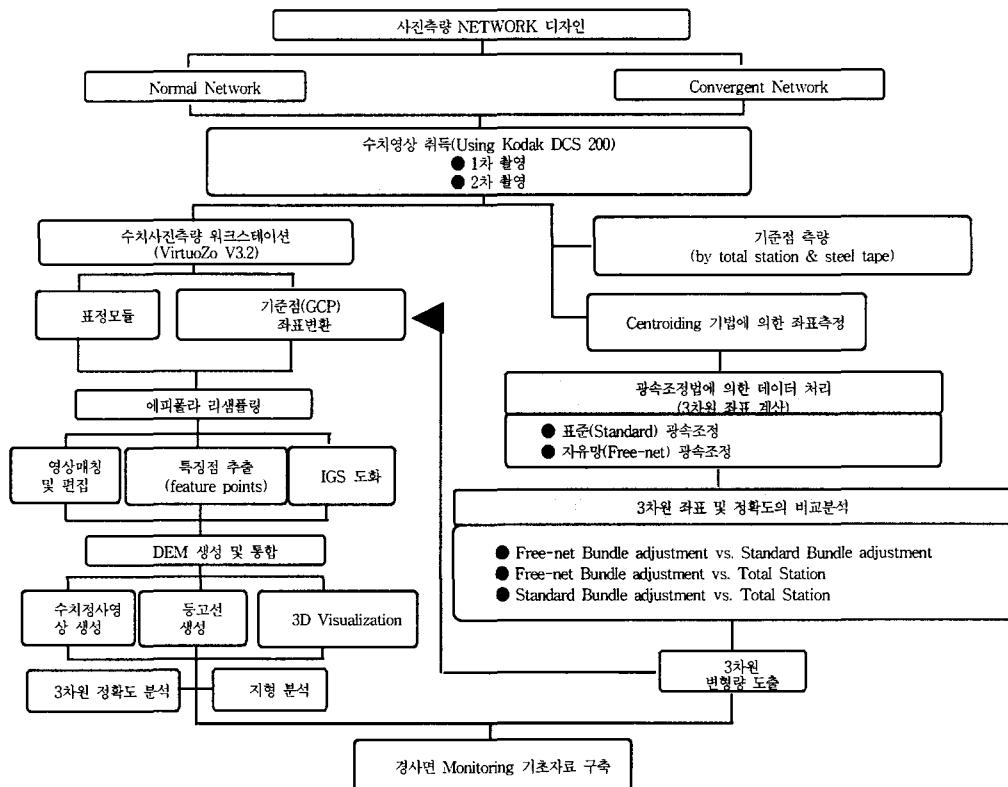
geographic information system)의 framework 데이터의 수집에 활용하고자 하는 연구가 진행되어 왔다.

수치사진측량은 대상물에 대해 소수의 기준점을 이용하여 짧은 시간에 다수의 측정점에 대한 3차원 위치를 획득할 수 있다는 장점이 있으나 이러한 장점에도 불구하고 대부분의 현장에서는 기존의 계측 방법에 의존하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 근거리 수치사진측량 기법을 사면의 3차원 변형측정에 적용하여 정확하고 효율적인 변형 모니터링을 시도하고자 하였다. 그리고 수치사

진측량 워크스테이션을 이용하여 사면의 수치고도 모형 및 수치정사사진을 생성하고, 3차원 모델링 등 사면의 형태를 시각화하고자 하였다. 이러한 연구 성과를 바탕으로 사면의 진단을 위한 객관적이며 과

학적인 자료로서 활용하고자 하며, 나아가 해석결과를 데이터베이스화 함으로써 체계적인 사면의 유지 관리를 위한 GIS의 기초자료로서 활용하고자 한다.



▶▶ Fig. 1 Study flow diagram

II. 사면의 변형측정을 위한 실험

스틸비디오 카메라(Kodak DCS200)와 수치사진측량시스템을 3차원 변위 측정이 요구되는 국도 신설 구간의 절개사면(33m(L)×6m(H))에 적용하였다. 대상 절개사면에 대하여 사진측량 네트워크를 구성하고 일정한 주기로 수치사진을 획득하고 처리함으로써 변위를 도출하고자 하였다. 또한 동일한 대상점들에 대하여 자유망(free-net) 광속조정기법을 적용하여 시진삼각측량 계산을 행하고, 토플스테이션에

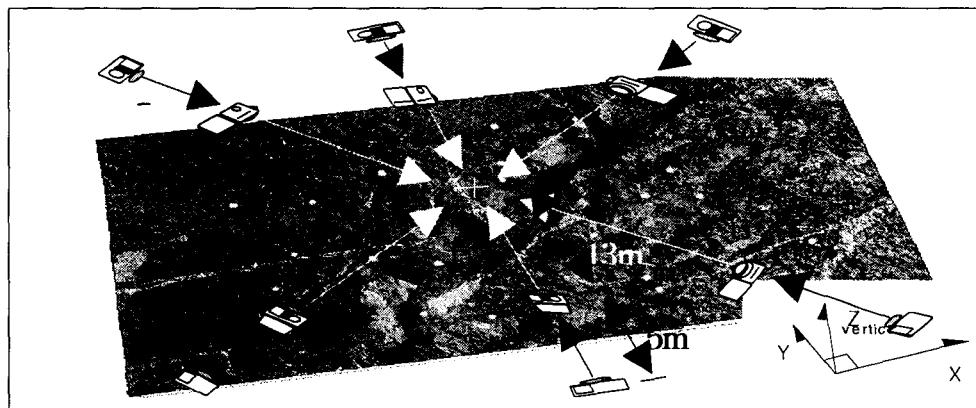
의해 취득되어진 3차원 좌표를 동일한 좌표계상에서 비교함으로써 수치사진측량 시스템의 정밀측정 수행성을 평가하고 효율적인 네트워크 디자인을 검토하고자 하였다.

1. 네트워크 디자인 및 수치사진 획득

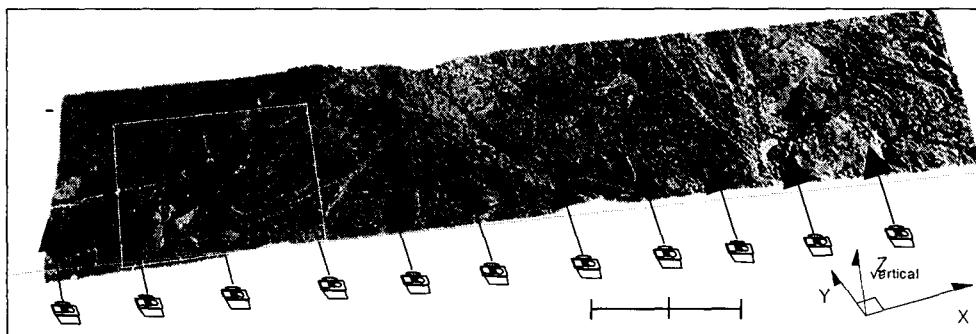
암반사면의 변형이 예상되는 부분에 정확한 모니터링을 위하여 수렴촬영 네트워크(convergent network)를 계획하였고, DEM 및 수치정사사진 생성을 위해 전체 사면을 폐복하도록 직각수평촬영 네트워크(normal network)를 계획하였다.

시간의 경과에 따른 사면의 변위를 측정하기 위한 목적으로 모니터링 대상지역에 대하여 높은 기하학적 강도 및 많은 잉여 관측수를 얻을 수 있도록 경사수렴촬영 네트워크를 계획하였다. 촬영거리 13m에서 roll 회전이 00인 표준상태로 하였고, 카메라축을 기준으로 -90o roll 회전시켜 촬영하는 경우에는 대상 물이 화면 내에 충분히 포함될 수 있도록 촬영거리를 5m정도 후퇴하여 18m의 거리에서 Fig. 2에 나타난 바와 같이 6개의 방향에서 2매씩 모두 12매의 수치사진을 step 1과 step 2의 두 시기에 각각 획득하였다.

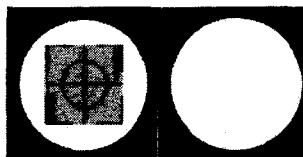
직각수평촬영 네트워크에 의해 전체대상지역을 꾸복하기 위하여 적절한 중복도, 입체모형수 및 해상도 등을 고려하여 촬영거리 13m에서 Fig. 3과 같이 12개의 촬영지점을 선정하였다. 카메라의 roll 회전이 00인 표준상태에서 지면으로부터 카메라 높이 2.5m에서 인접사진간의 중복도 70%를 유지하도록 촬영하였다. DEM 및 정사사진의 생성시 신뢰도에 절대적 영향을 미칠 수 있는 기준점의 정확한 위치를 사진상에 나타내기 위하여 Nikon SB-26 후레쉬를 사용하여 수동모드에서 최적 촬영조건을 결정한 후 총 12매의 수치사진을 취득하였다.



▶▶ Fig. 2 Convergent network design



▶▶ Fig. 3 Normal network design



▶ Fig. 4 Target shape

사진측량과 토털스테이션에 의하여 각각 타겟의 3차원 측정을 행할 수 있도록 원형타겟 내부 중앙에 토털스테이션 전용 반사타겟을 부착하여 타겟점등을 제작하였다. 또한 대상사면 구간에 총 80여개의 타겟을 전면에 고르게 배치하여 직각수평촬영 네트워크 상에서 한 입체모형당 최소 9점 이상의 대점들이 나타나도록 종횡비를 고려하여 분포시켰다. 이 중 절리와 기복이 심한 모니터링 대상지역에는 변형측정을 목적으로 밀도있게 타겟을 배치하였다. 사면으로부터 20m 후방에 사면과 대략 평행한 기선을 설치하고 기선의 좌측단을 원점으로 하여 기선방향을 X축, 대상물측 방향을 Y축, 연직방향을 Z축으로 하는 3차원 직각좌표계를 설정하였다. 기선양단에 설치한 토털스테이션 및 정밀레벨을 사용하여 3차원 좌표를 측정하였다.

대상지역에 대하여 변화가 없는 네 점(No.11, No.22, No.23, No.27)은 변형과 무관한 고정된 점들로 간주하여 사진삼각측량(광속조정법)을 위한 기준점으로 선정하였다.

2. 광속조정법에 의한 3차원 좌표계산

수치사진의 모든 타겟이미지 측정은 강도경중률

(intensity weights)을 고려한 Centroiding기법에 근거하는 digital mono-comparator 프로그램을 이용하여 자동측정하였다. 수치영상에서 타겟이미지를 7~15화소의 크기로 얻도록 촬영하였기 때문에 기준영역의 크기를 16×16화소로 설정하여 상좌표를 측정하였다.

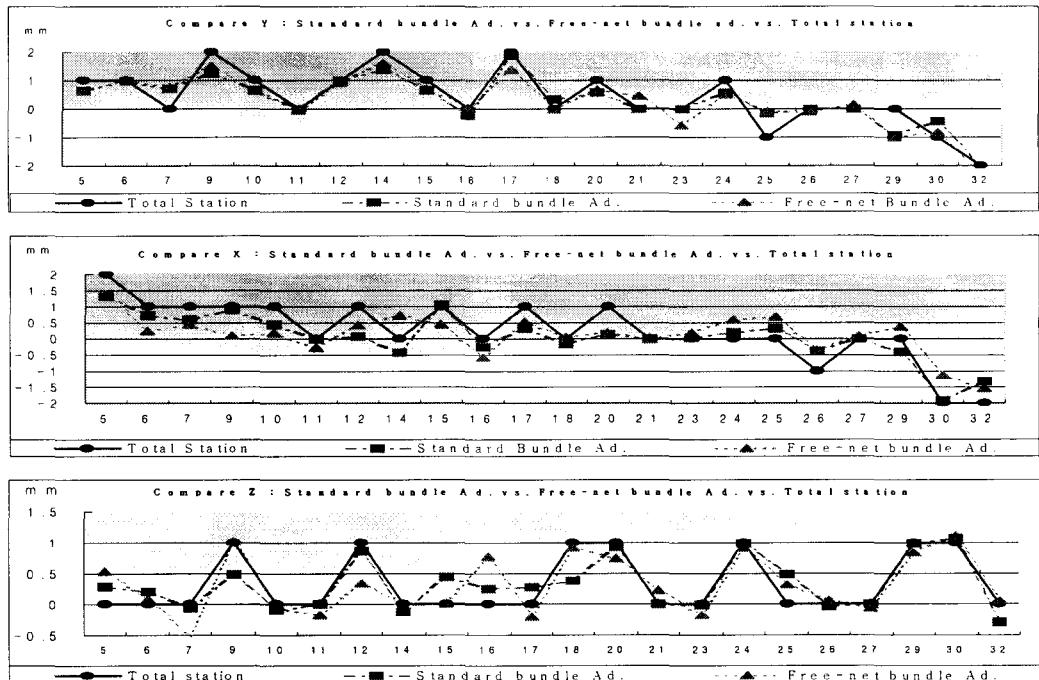
Step 1과 Step 2의 자료로부터 자유망 광속조정으로 각각 처리하여 취득한 3차원 좌표의 결과를 상호 비교함으로써 변위량을 도출해 내고자 하였다. Step 1과 Step 2의 관측데이터에 대하여 스틸레이프로 타겟간의 거리를 각각 2 set씩 측정하여 자유망(free-net) 광속조정의 축척결정을 위한 자료로 입력하였다. 아울러 토털스테이션에 의한 측량결과와 비교를 통하여 광속조정의 정확도와 효용성을 확인하고자 하였다. 자유망 광속조정의 결과를 표준 광속조정의 결과와 동일한 좌표계상에서 비교하기 위하여 25개 대상점들의 3차원 좌표를 기준점을 이용하여 좌표변환을 행하였다. Table 1에서 볼 수 있듯이 광속조정에 의해 처리된 타겟들의 평균제곱근오차(RMSE)는 0.21~0.47mm의 범위에서 나타나고 있음을 볼 수 있다.

그리고 광속조정의 공간정확도(space accuracy)를 확인하기 위하여 Step 1 및 Step 2에서 표준 광속조정과 자유망 광속조정에 의해 취득한 X, Y, Z 방향들의 표준오차 평균($(\Delta X + \Delta Y + \Delta Z)/3$)을 22개의 대상점들 중 거리가 가장 멀리 떨어져 있는 두 대상점간의 길이로 나누어 계산하였으며 22점의 평균 공간정확도는 약 1/35,000 전후로 나타났다. (Table 1)

[Table 1] Comparison of results processed with free-net bundle adjustment

Step	Step 1(25th of May)			Step 2(27th of June)			
	Direction	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)
Average	-0.011	-0.003	0.038	0.153	-0.079	0.007	
RMSE	0.342	0.210	0.128	0.378	0.228	0.470	
Object Space Accuracy	1 : 34,993			1 : 35,583			

Step 1과 step 2 각각에서 토텔스테이션과 표준 광속조정 및 자유망 광속조정으로 취득한 타겟들의 X, Y, Z 좌표들로부터 변형량을 도출하였다.(Fig. 5)



▶▶ Fig. 5 The displacements in X, Y and Z direction

III. 수치고도모형 및 수치정사사진 생성

스틸비디오 카메라(Kodak DCS200)를 사용하여 획득한 수치사진에 대하여 수치사진측량 워크스테이션(DPW; digital photogrammetric workstation) 상에서 일련의 영상처리 및 사진측량 작업과정을 거쳐 수치고도모형(DEM)과 수치정사사진을 작성하였다.

1. 기준점 좌표 변환

직각수평촬영 네트워크의 수치사진으로부터 78점의 타겟등에 대하여 표준광속조정법을 이용하여 3차원 좌표를 취득하였다. 광속조정법을 위한 기준점은 앞서 수렴촬영 네트워크상에서 토텔스테이션으로 취

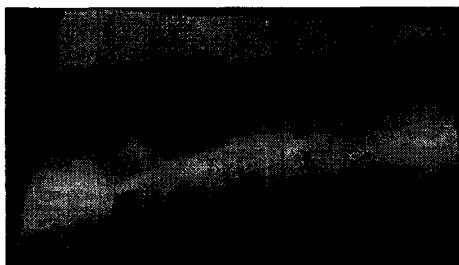
득한 26점의 타겟좌표를 이용하였다. 이렇게 취득된 78개의 타겟좌표를 수치사진측량 워크스테이션상에서 DEM과 수치정사사진을 생성하기 위한 기준점(GCP)으로 입력하였다.

78개의 기준점(GCP)좌표를 수치사진측량 워크스테이션에 적합한 좌표계로 설정하기 위하여 좌표 변환하여 사용하였다. 마이너스 좌표가 발생하지 않도록 E 좌표는 측정되어진 Y값과 동일하게 사용하고, N 좌표는 측정되어진 Z값에 (-)50m를 취하여 얻었으며, H 좌표는 150m에서 측정되어진 Y값을 (-)로 입력하여 취득하였다.

2. DEM과 수치정사사진의 생성

수치고도자료의 유형으로는 지형을 일정 크기의 격

자로 나누어 높이값을 기록하는 DEM이 가장 많이 알려져 있으며, 본 연구에서는 지형의 기복변위와 형태를 잘 나타낼 수 있는 불규칙삼각망(TIN)에 의한 방식을 채택하였다. 지형기복의 시각적 분석 및 모델링의 효율성의 고려하여 획득된 수치사진은 영상의 크기($403.2\text{mm} \times 267.7\text{mm}$), 화소수($1524 \times 1012 \text{ pixel}$) 및 활영거리(13m)를 고려하여 계산된 화소의 크기는 0.256mm , 이에 대응하는 공간해상도(GSD)는 약 5.77mm 이다. 이를 바탕으로 각 모델별로 DEM을 생성하였으며, 이 때 DEM 간격은 처리데이터의 용량과 처리시간 등을 고려하여 공간해상도 5.77mm 보다 큰 값인 10mm 로 처리하였다. 불연속적인 점들과 실제지형에 맞도록 적당한 점들을 추가하여 세밀하고 정밀한 DEM을 추출하였다. 표정작업 에피폴라 영상재배열, 영상정합 과정을 거쳐 11개의 입체모형에 대하여 각각 DEM을 생성하였다. 동시에곡선과 정합점을 바탕으로 수정작업을 거친 후 편집 모듈을 이용하여 각각의 입체모형당 TIN을 재구성하고 수정된 DEM을 생성하게 된다. 편집과정 후 동일한 모듈에서 대칭점을 찾아내고 이를 추가하여 다시 TIN을 구성하여 수치고도모형(DEM)을 재생성하였다. 생성된 DEM을 바탕으로 Fig. 6 및 Fig. 7과 같이 높이값의 변화를 알 수 있는 위색칼라와 와이어프레임 이미지를 생성하였다.



▶▶ Fig. 7 DEM wire frame image



▶▶ Fig. 6 DEM pseudo color image

중심투영 원리로 촬영되어진 사진에는 카메라의 자세와 지형 기복으로 인한 대상물의 변위가 포함되어 있는데 이를 제거하여 정사투영 영상을 제작하는 과정을 미분편위수정이라 하며, 이 과정에 있어 수치고도모형(DEM)의 정확도는 정사사진의 정확도에 매우 큰 영향을 미치는 중요한 요소가 된다. 수치고도모형(DEM)과 미분편위수정 과정을 통하여 정사사진을 생성하였으며, 축척 1/22, 지상해상도 5.77mm 로 제작되었다.

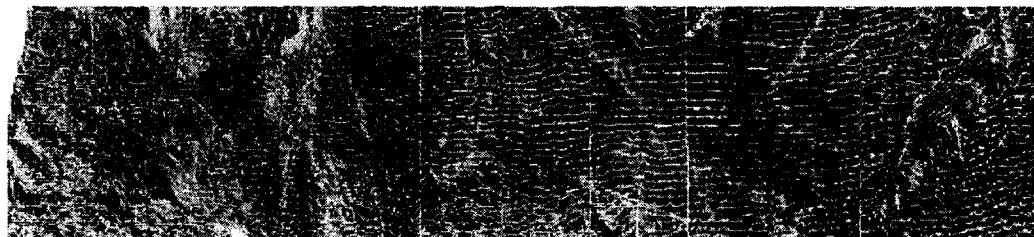
3. DEM과 수치정사사진 모자이크 및 정확도 분석

각각의 입체모형마다 추출된 DEM들을 합성하여 전체대상지역에 대한 하나의 DEM으로 접합하였다. 정사사진 모자이크 작업은 넓은 지역의 연속적 자료를 만들기 위하여 필요한 작업이며, 인접 사진과 70% 정도의 중복도를 갖도록 촬영되었기 때문에 모자이크 작업시 사진의 중심부분으로 작업하는 것이 효율적이라 할 수 있다. 그러나 실제 중복도만을 고려하여 모자이크 작업을 수행하면 사진경계부의 상이 잘 맞지 않게 되는 경우가 발생하기 때문에 최소 중복되는 부분을 기준으로 하기 위해 사진상 음영이 대조되는 부분이나 기복이 심하지 않은 부분이 기준이 되도록 하는 것이 바람직하다. 생성된 전체 지역의 DEM 및 표정요소와 기준점(GCP)을 이용하여 수치정사사진을 모자이크하였으며, 전체 연구지역에 대한 수치정사사진의 축척은 1/22, 공간해상도(GSD)는 5.77mm 로 앞서 제시한 각각의 입체모형에 대한 요소들과 동일하다. 지형의 기복과 형태를 잘 묘사하기 위하여

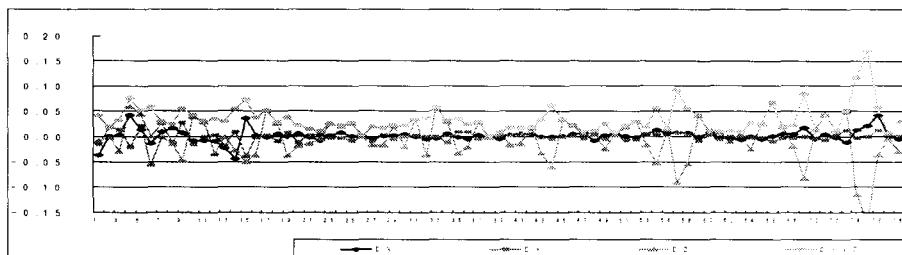
0.1m 간격의 등고선을 생성하여 수치정사사진 위에 중첩 표현하였다.(Fig. 8)

Fig. 9와 Fig. 10은 정사사진의 정확도를 검증하기 위하여 기준점(GCP)으로 입력된 78개의 타겟점들을 검사점으로 정사사진에서 취득한 X, Y 좌표와 수치 사진측량 워크스테이션(VirtuZo)의 IGS Digitize 모듈에서 취득한 Z 좌표를 입력된 기준점(GCP)과 비교하여 각각의 편차를 나타낸 것이다. 대상점 No. 15, 57, 68, 74, 75를 제외한 기준점(GCP)들은 모두

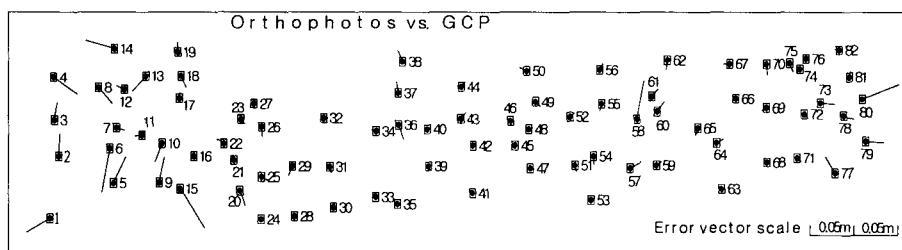
0.05m 이내의 오차를 보였으며, 전 대상점들에 대한 RMSE는 $\Delta X=0.012m$, $\Delta Y=0.013m$, $\Delta Z=0.039m$ 으로 나타났다. 정사사진에서 추출한 X, Y 좌표는 30mm 이내의 오차를 보이는데 반해 Z값은 150mm 까지의 차이를 나타내었다.(Fig. 10) 이는 수치사진 취득시 사진의 왜곡, 그리고 DEM 접합시 경계의 불일치 및 고저차의 표현에서 중첩되는 부분의 오차에 기인하는 것으로 추정된다.



▶▶ Fig. 8 Contours overlaid on the mosaicked digital orthorectified image



▶▶ Fig. 9 The accuracy of the digital orthorectified image



▶▶ Fig. 10 The plane accuracy of the digital orthorectified image

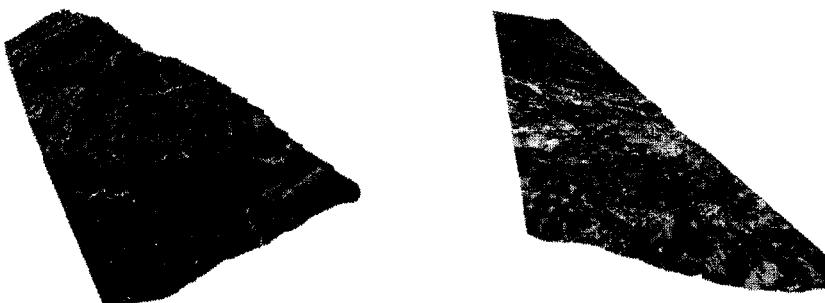
4. 3차원 시각화 및 경사도 분석

수치정사사진은 2차원이므로 지형의 기복형태나

굴곡 등 다양한 요구에 대한 표현이 어려운 단점이 있다. 이에 수치정사사진을 수치고도모형(DEM)에

재배열하여 실제 지형에 대하여 다양한 시점에서의 표현이 가능한 3차원 모형을 생성하였다. Fig. 12는 대상지역 전체의 3차원 모형으로서 방향이나 고도를 달리한 다양한 시점(view point)에 의한 표현이 가능하며, 이러한 기능은 사면의 유지관리, 설계, 개발 등

을 수행함에 매우 유용한 자료로 활용될 수 있을 것이다. 또한 정사사진에서 보여주지 못하는 지형의 기복을 표현할 수 있어 대상지역의 형태를 쉽게 알아볼 수 있다.



▶▶ Fig. 11 3D visualization of the road shape

GIS를 통한 지도모델(cartographic model)의 생성과 지형분석은 공간문제의 해결을 위하여 관련 주제도와 연산명령어들을 논리적으로 배열시킨 공간분석의 한 기법이라 할 수 있다. 지형을 분석하는데 있어서 주변의 고도값을 이용하여 계산하는 가장 보편화된 변수는 경사(slope)와 방향(aspect)이다. 사면의 형태와 봉괴 및 낙석 등의 위험요소들은 지형, 암질, 토질, 지질구조, 지하수 등과 같은 자연환경적 요인과 절토, 성토 등의 인위적 요인으로 들 수 있다. 지형요인 중 사면의 경사는 일정거리에 대한 두 지점간의 고저차를 나타내는 것으로서 지형의 특성을

나타내는 중요한 지표로 사용되며, 사면에서 물질의 추진력(driving force)에 크게 영향을 미친다. 그러므로 다른 조건보다 경사가 급한 지역의 위험률이 높다고 할 수 있다.

본 연구에서는 수치사전측량 워크스테이션의 작업과정에서 생성된 0.1m간격의 등고선 자료를 이용하여 Arc/View 3.2 GIS 프로그램에서 경사도 분석을 행하였다. 경사도 분석은 총 9개의 등급으로 구분하여 각각의 빈도와 면적 및 발생율을 Table 2와 같이 나타내었다.



▶▶ Fig. 12 The Inclination map

IV. 결 론

스틸비디오 카메라로 취득된 수치사진을 이용하여 도로 절개사면에 대한 3차원 변위해석을 시도하고,

수치사진측량 워크스테이션을 이용하여 DEM, 수치정사사진 및 3차원 시각화이미지를 생성한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

[Table 2] Inclination analysis

Table	경사도(%)	발생율(%)	빈도 (0.01×0.01m)	면적(m ²)
	0-10	22.12	371,164	37.12
	10-20	2.13	35,740	3.57
	20-30	22.57	378,860	37.89
	30-40	11.00	184,756	18.48
	40-50	38.22	641,580	64.16
	50-60	7.2	121,044	12.10
	60-70	1.99	33,336	3.33
	70-80	1.58	26,648	2.66
	80-100	0.38	6,412	0.64
합계			1,799,540	179.95

- 1) 사진삼각측량의 자료처리 과정에서 자유망(free-net) 광속조정법을 적용함으로써 기준점측량의 어려움과 신뢰성 문제를 벗어나 효율적인 결과를 취득하였으며, 산업현장의 변형측정에 효율적으로 적용될 수 있을 것이다.
- 2) 암반 사면의 기하학적 수치자료를 얻기 위하여 수치사진측량과 3차원 좌표변환 시스템으로 취득한 78점의 기준점(GCP) 좌표들을 수치사진측량 워크스테이션(DPW)에서 생성된 수치정사사진과 비교한 결과, $\Delta X=0.012m$, $\Delta Y=0.011m$ 의 RMS를 보였으며, 수치사진측량 워크스테이션의 도화작업에서 얻어진 Z값과 비교한 결과 $\Delta Z=0.040m$ 로 나타났다.
- 3) 수치고도모형 및 수치정사사진을 이용하여 대상 지역의 등고선을 추출하고, 다양한 시점으로부터 실제적인 사면의 형태와 기복표현이 가능한 고해상도의 3차원 모델링을 구현할 수 있었다.
- 4) 수치사진측량에 의해 획득한 공간영상 데이터 및 3차원 위치 데이터들은 절개사면의 체계적 관리를 위한 GIS시스템의 framework 데이터

로 활용될 수 있음은 물론, 사면의 안정성 확보와 효율적인 관리에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

■ 참고문헌 ■

- [1] Fraser, C.S. and Shortis, M.R., "Metric Exploitation of Still Video Image-ry", Photogrammetric Record, 15(85), pp.107~128, 1995.
- [2] Markus, M., Mass, Hans-Gred, "Automatic Deformation Mesurement with a Digital Still Videl Camera", Institute of Geodesy and Photo-grammetry" Swiss Federal Insitute of Technology ETH Hoenggerberg Ch-8093, 1998.
- [3] 이진덕, "고해상도의 스틸비디오 카메라를 이용한 수치근접사진측량 시스템의 실용성 평가", 대한 토목학회 논문집, Vol. 18, No.III-2, pp.183~193, 1998.
- [4] Kersten, T.P. and Mass., "Digital High-Resolution Still Video Camera versus Film Based Camera in photogrammetric Industrial Metrology", photogrammetric& Remote Sensing, Vol30, No1, pp. 114~121, 1995.
- [5] 이사로, 김윤종, 민경덕, "산사태 공간 정보시스템 개발 및 산사태 공간정보의 활용", Vol. 8, No.1, pp.141~

- 153, 2000.
- [6] Jin-Duk Lee. "The Generation of Digital Orthorectified Imagery and 3D Building Models from Aerial Photographs", The 4th International Seminar on GIS between Korea and Japan, Vol. 11, pp.53~61, 2002.