

공학석사 학위논문

수치사진측량기법을 이용한 토량환산계수 산정

지도주 | 홍준

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.



2005 년 8 월

부경대학교 산업대학원

토 목 공 학 과

이 상 기

이 논문을 이상기의 공학석사
학위논문으로 인준함

2005년 6월 17일

주 심 공학박사 김 중 수



위 원 공학박사 김 수 용



위 원 공학박사 이 중 출



목 차

List of Tables	i
List of Figures	ii
Notations	iv
Abstract	v
1. 서 론	1
1.1 연구목적	1
1.2 연구동향	2
1.3 연구방법 및 범위	6
2. 수치사진측량 이론	8
2.1 수치영상의 특성	8
2.2 수치영상의 기하학	9
2.2.1 공선조건식	9
2.2.2 자체검정에 의한 광속조정법	10
2.2.3 에피폴러 기하학	12
2.3 다중영상표정	13
2.4 자체검정	16
2.5 수치영상처리 시스템	20

3. 현장시험 및 체적산정	21
3.1 촬영계획	22
3.2 카메라 검정	23
3.3 수치영상획득 및 자료처리	25
3.4 체적산정	30
3.5 비교 및 분석	31
3.5.1 수치사진측량기법에 의한 관측결과	32
3.5.2 3D 레이저 스캐너에 의한 관측결과	34
3.5.3 결과분석	36
4. 토량환산계수 산정	37
4.1 토량환산계수 이론	37
4.2 체적을 이용한 토량환산계수 산정	38
5. 결 론	39
참고문헌	41

List of Tables

Table 3.1	Specifications of Rollei d7 metric ⁵ Camera	22
Table 3.2	Data of Camera Calibration	24
Table 3.3	RMSE by Each Place	29
Table 3.4	Result of Volume Assessment (Cutting Area)	30
Table 3.5	Result of Volume Assessment (Banking Area)	30
Table 3.6	Comparison of Result Value	31
Table 3.7	Result of Volume	33
Table 3.8	Specification of 3D Laser Scanner	35
Table 3.9	Volume by 3D Laser Scanner	35
Table 3.10	Relative Accuracy	36
Table 4.1	Soil Conversion Coefficient(L)	38

List of Figures

Fig. 1.1	The Flow Chart of This Study	6
Fig. 2.1	Discrete Representation of an Image as a Matrix	8
Fig. 2.2	Collinearity Condition	9
Fig. 2.3	Epipolar Geometry of a Stereopair	13
Fig. 2.4	Multi-Image Orientation	14
Fig. 2.5	Space Intersection	15
Fig. 2.6	Space Resection	15
Fig. 2.7	Radial Optical Distortion	16
Fig. 2.8	Radial Distortion of Lens	17
Fig. 2.9	Components of Lens Distortion Errors	18
Fig. 2.10	The Flow Chart of Data Processing	20
Fig. 3.1	Assessment Process of Excavation Volume	21
Fig. 3.2	Rollei d7 metric ⁵ Camera	22
Fig. 3.3	Test Field for Correction of Radial Distortion	23
Fig. 3.4	Profiles for Calibrated Radial Distortion	24
Fig. 3.5	Digital Photogrammetry Diagram	25
Fig. 3.6	Removed Shape of Surface Soil	26
Fig. 3.7	Shape after Excavation	26

Fig. 3.8 Shape of Target Installation 27

Fig. 3.9 Measurement by Total Station 27

Fig. 3.10 Measurement of Image Coordinates 28

Fig. 3.11 3D Observation Area by 3D Laser Scanner 32

Fig. 3.12 Shape of 3D Surface (before Blasting) 33

Fig. 3.13 Shape of 3D Surface (after Blasting) 33

Fig. 3.14 Shape of 3D Laser Scanner 34

Notations

a_{ij}	: 미지값 산출을 위한 편미분 요소
dr	: 방사방향 왜곡수차
f	: 초점거리
R	: 회전형렬
s	: 축척인자
r_{ij}	: 회전형렬인자
x, y	: 영상좌표
x_0, y_0	: 영상 중심 좌표
x_p, y_p	: 영상내 p점의 좌표
X_0, Y_0, Z_0	: 카메라 투영중심의 대상-공간좌표
X_c, Y_c, Z_c	: 촬영점 좌표
X_p, Y_p, Z_p	: p점의 대상-공간좌표
ω, ϕ, κ	: 회전요소
$\omega, \phi, \kappa, X_0, Y_0, Z_0$	: 외부표정요소
v	: 잔차

The Estimation of Soil Conversion Factor Using Digital Photogrammetry

Sang-Gi, Lee

*Department of Civil Engineering, Graduate School of Industry,
Pukyong National University*

ABSTRACT

At the large scale of construction site related with soil larceny, soil conversion factor may give great influence on construction work volume and construction costs. However, there are a great deal of difficulties in the calculation of the exact surplus soil volume and insufficient soil volume by adopting the figures presented on the generally used design specifications which are not the results obtained from the selection tests in calculating the soil volume conversion factor. Therefore, it would be desirable to calculate the soil volume conversion factor by carrying out large-scaled site test adequate for the relevant environment.

In general, there are various survey methods for the survey of terrain such as vertical&cross survey, measuring the level of slant's conversion point by Total Station, and RTK GPS method etc. However, the terrain feature of construction site may be changed irregularly, so digital photogrammetry method would be more suitable

for the accurate volume estimation. Digital photogrammetry have a advantage not only could process and obtain object's digitalized imagery but also handle and print out on personal computer environment.

Therefore, this study aims at calculating the exact soil conversion factor of cutting and banking areas of weathering rocks in large-scaled construction sites using digital photogrammetry.

As a result, soil conversion factor of cutting and banking areas estimated as 1.296. This result of soil conversion factor has just 0.01 difference between the field test which using sand replacement method.

In large-scaled construction site which have irregular terrain shape, digital photogrammetry method would be more efficient for the estimation of precise soil conversion factor.

1. 서 론

사진기의 발명과 함께 발달하기 시작한 사진측량학은 전산기술의 발달과 더불어 수치영상을 이용한 수치사진측량으로 점점 발전되어 나아가고 있다. 수치사진측량은 대상물의 수치화된 영상을 취득하고 이를 처리함으로써 과거 고가 장비에 의해서 처리되던 정보를 PC 환경에서도 처리, 출력할 수 있다는 장점이 있다.

또한, 자료의 취득 및 처리과정의 온라인화와 높은 정확도의 실시간 수치영상 처리기술의 개발로 인해 토목·건축분야에서 구조물의 변형관측은 물론, 고고학 분야에서 부서지거나 훼손되기 쉬운 대상물과 장소에 대한 비접촉기록, 경찰 및 법과학 분야뿐만 아니라 교통사고 조사·분석, 정밀관측을 요하는 분야 등 수치사진측량의 활용이 증대되고 있다.

대규모 토목공사에서는 많은 토량 이동이 수반되고, 이 경우 토량환산계수는 현장실험에 의하여 산출하는 것이 원칙이다. 현장시험의 경우에는 정확한 체적산정이 중요한 내용이며, 종래에는 물치환법을 이용하였으나 오차가 많은 실정이었다.

따라서 본 연구에서는 수치사진측량기법으로 현장의 정확한 체적을 산정하여 정확한 토량환산계수를 산정하고자 한다.

1.1 연구목적

대규모 토량 이동이 있는 토목공사에서 토량환산계수는 공사물량 및 공사비에 미치는 영향이 크므로 합리적인 토량환산계수의 산정이 요구된다. 그러나 일반적으로 현장시험에 의한 결과치가 아닌 통상적으로 사용하고 있는 설계기준서에 제시된 값을 적용함으로써 정확한 잔토 및 부족토량의 산정에 있

어서 많은 어려움이 따르며, 이러한 경우 현장여건에 적합한 대규모 현장시험을 실시하여 토량환산계수를 산정하는 것이 바람직하다.

현장시험의 경우에는 정확한 체적산정이 중요한 내용이며, 자연상태의 체적, 흐트러진상태의 체적, 다져진 상태의 체적이 필요하며, 종래에는 물치환법이 많이 이용되어 왔다.

일반적으로 지형의 상태를 측정하는 방법에는 종횡단측량법, 토탈스테이션에 의한 경사변환점의 표고를 측정하는 방법, RTK GPS에 의한 방법 등이 응용되고 있다. 그러나 현장에서의 굴착부분은 지형이 아주 불규칙하게 변화되어 있는 상태이므로 정확한 체적산정을 위해 경사변환점을 많이 선정하여야 하고 이러한 경우 수치사진측량기법의 활용이 적합한 것으로 판단된다.

따라서, 본 연구에서는 택지조성공사가 실시되고 있는 대규모 현장을 대상으로 대상지 내의 절·성토부 각각 20개소를 굴착하고 굴착 후의 체적을 수치사진측량기법을 이용하여 결정하였으며, 이렇게 결정된 체적을 이용하여 정확한 토량환산계수를 산정함으로써 현장에서의 신뢰성 있는 토량환산계수 산정기법을 제시하고자 한다.

1.2 연구동향

18세기경 테일러(Brook Taylor)와 램버트(J. Lambert)가 선형중심투영의 원리 및 이를 이용한 지도제작의 가능성을 제시함으로써 사진측량의 기초에 대한 이해를 발표하였지만, 실질적인 지형도 제작은 1839년 프랑스인 Louis Daguerre에 의해 사진이 발명된 이후, 1849년 프랑스 공병장교인 Laussedat에 의해 최초로 시도되었다. 그 후 Laussedat는 1859년 광선의 공간적 교차에 의해 한 쌍의 사진으로부터 대상물의 좌표를 결정하는 방법을 소개한 바 있으며, 비슷한 시기에 A. Meydenbauer는 건물에

사진측량학을 적용하는 최초의 성공적인 시도를 하였다.

또한 1892년 독일의 Pulfrich가 부점(floationg mark)의 이론을 바탕으로 사진을 필요한 정확도 이내로 관측 및 도화함으로써 입체사진측량의 기본 이론을 소개하였으며, 이는 1909년에 E.von Ore의 정교한 입체자동도화기의 발명을 위한 발판을 마련하였다.

기계적 사진측량학(analogue photogrammetry)은 양대 세계대전을 전후로 한 항공기 및 전자계산기의 발달과 더불어 그 영역이 크게 확대되었으며, 1957년 8월 캐나다의 Helava 대학의 연구와 해석적 도화기의 개념이 도입되면서 해석적 사진측량학(analytical photogrammetry)으로 발전해 나갔다. 해석적 사진측량학은 1960년대에 연구가 시작되어 1970년대에 이르러 많은 연구가 진행되었으며, 1976년 헬싱키의 ISP(International Society of Photogrammetry)의 해석적 도화기의 소개로 인하여 획기적인 발전을 거두고, 오늘날의 수치사진측량학에 이르게 되었다.

수치사진측량은 1950년대부터 연구가 시작되어 1959년 Hobrough에 의해 연구의 기틀이 마련되었으며, 1970년대 중반부터 그 유용성과 활용성을 제시하기 시작했다. 또한 전산기술의 발달과 더불어 보다 간편하고 경제적인 영상자료의 획득, 처리 및 저장이 가능한 매체로서 CCD의 사용이 거론되면서 그 가능성과 실현성을 넓히고 있으며, 특히 사진측량의 일련의 과정에 대한 자동화를 목적으로 활발한 연구가 진행되고 있다.

1980년대 이후, 스틸 비디오 카메라를 이용한 타겟 포인팅과 이의 알고리즘에 대한 연구가 실시되어 수치영상의 해석 가능성과 문제점이 제시되기 시작하였고, CCD 카메라를 이용한 실시간 영상분석을 위해 영상 분할, 타겟 인식, 모서리 검색, 특성 추출 등의 자동 수행과 수치영상 분석을 통한 사진측량기법의 잠재능력 평가와 이의 실제 적용에 관한 연구가 진행되었다.⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾

1990년대 초, CCD를 이용한 영상분석기법의 효용 가능성이 널리 인지

되면서 다양한 분야에서 비전 측정기법의 활용방안을 제시하기 위한 많은 연구가 수행되었으며, 수치영상을 이용한 높은 정확도의 측정기법 활용연구와 더불어 시스템 오차를 줄이기 위한 많은 노력이 있었다.¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁷⁾¹⁸⁾¹⁹⁾²⁰⁾

한편, 국내에서는 1970년대부터 사진측량이 본격적으로 연구되기 시작하여 1972년 유복모에 의해 항공사진측량과 지상사진측량에 관한 연구가 활발히 진행되어 왔으며, 1983년 박운용에 의해 사진측량에 의한 사면의 경사해석방법이 발표되면서 사면해석의 실용화에 기여하였다.²¹⁾²²⁾

1984년 양인태는 경사사진에 의한 해석적 위치결정에 대해 연구하였고, 1985년 강준묵은 다중 근거리 측량에 의한 피사체의 정밀해석에 대해 연구하였으며, 1986년에는 이재기에 의해 비 측량용 사진기에 의한 좌표해석에 관한 연구가 발표되었다.²³⁾²⁴⁾²⁵⁾ 1986년 강인준은 블록조정기법을 이용한 기준점 설정에 관한 연구를 하였고, 1987년 박홍기는 과대오차제거를 위한 관측값의 조정기법으로서 robust 추정법에 의한 과대오차 제거방법을 제시하여, 과대오차조정을 위한 관측값 조정기법을 확립하였으며, 1988년 유환희는 근거리 사진측량에 의한 3차원 변형해석에 관한 연구를 수행하였다.²⁶⁾²⁷⁾²⁸⁾

1989년 이종출은 근거리 사진측량에 의한 지형의 3차원 위치를 항공사진측량보다 간편하고 경제적으로 해석하고, 그 해석의 정확도를 향상시킴과 동시에 효율성을 높이는 연구를 수행하였고, 1990년 손덕재는 지상사진의 촬영방향과 수렴각 변화에 따른 공간좌표해석으로 이론적 정확도 예측모델을 개발하고 그 유용함을 입증한 바 있으며, 1992년 이진덕은 다중 근접사진측량에 의한 구조물 전면의 3차원 해석으로 비지형 대상물에 대하여 외부전면해석과 내부전면해석의 정확도를 향상시키는 연구를 수행하였다.²⁹⁾³⁰⁾³¹⁾

1990년대에는 기존의 연구를 근간으로 하여 여러 응용분야에서 공간상

에 위치한 대상물의 위치를 결정하기 위해 수치영상이나 수치자료를 이용한 연구가 확대되었다.³²⁾³³⁾³⁴⁾³⁵⁾³⁶⁾³⁷⁾ 1994년과 2000년 배상호는 근접사진측량에 의한 구조물의 변형 및 변위해석을 통해 구조물 모니터링의 해석 가능성을 제시하고 소프트웨어적 처리 방법에 따른 신뢰도를 분석하였고, 1996년 김성민은 수치화상을 이용한 근접사진측량 시스템의 수행성을 평가하였으며, 1997년 박경식은 CCD 카메라를 이용하여 사진측량의 전 과정을 온라인으로 처리하는데 가장 기본이 되는 동적 대상물의 상좌표를 직접 실시간으로 취득할 수 있는 기법을 소개하였다.³⁸⁾³⁹⁾⁴⁰⁾⁴¹⁾

1998년 이석균은 객체지향기법을 이용하여 대상물의 거리에 따라 초점 거리가 변하는 CCD 사진기를 신속하게 검정할 수 있는 3차원 렌즈 검정 모형식을 개발하였고, 2000년 이효성은 고해상력의 디지털 카메라로 취득한 좌·우 중복된 수치화상데이터를 이용하여 3차원 좌표를 획득하고 획득된 좌표를 토대로 대상면의 거칠기를 정밀측정하는 연구를 수행하였으며, 2000년 이철우는 수치사진측량을 이용하여 자동차 Fender를 대상으로 3차원 모형을 생성함으로써 수치영상을 이용한 산업정밀측량 기법을 제시하였다.⁴²⁾⁴³⁾⁴⁴⁾⁴⁵⁾

최근에는 자료의 취득 및 처리과정의 온라인화와 높은 정확도의 실시간 수치영상 처리기술의 개발, 운영 프로그램의 연계 분석이 가능한 통합된 처리체계로의 환경구축에 관한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다.⁵⁾⁸⁾⁹⁾

이상과 같이 국내외 연구동향을 보면, 수치사진측량을 이용한 대상물의 3차원 위치결정은 컴퓨터비전, 컴퓨터그래픽스, 영상처리 등 다양한 학문과 연계되어 있으며, 앞으로 그 활용분야가 더욱 확대될 것으로 기대된다.

1.3 연구방법 및 범위

본 연구에서는 대규모 토량 절취가 있는 토목공사를 대상으로 수치사진 측량기법을 적용하여 정확한 토량환산계수(L)를 산정하고자하며, 이를 설계에 적용할 경우 잔토 및 부족토량을 정확하게 산정할 수 있다. 이를 위해 먼저 Fig. 1.1과 같은 일련의 과정으로 대상 절취구간의 굴착 전·후의 체적을 산정하였다.

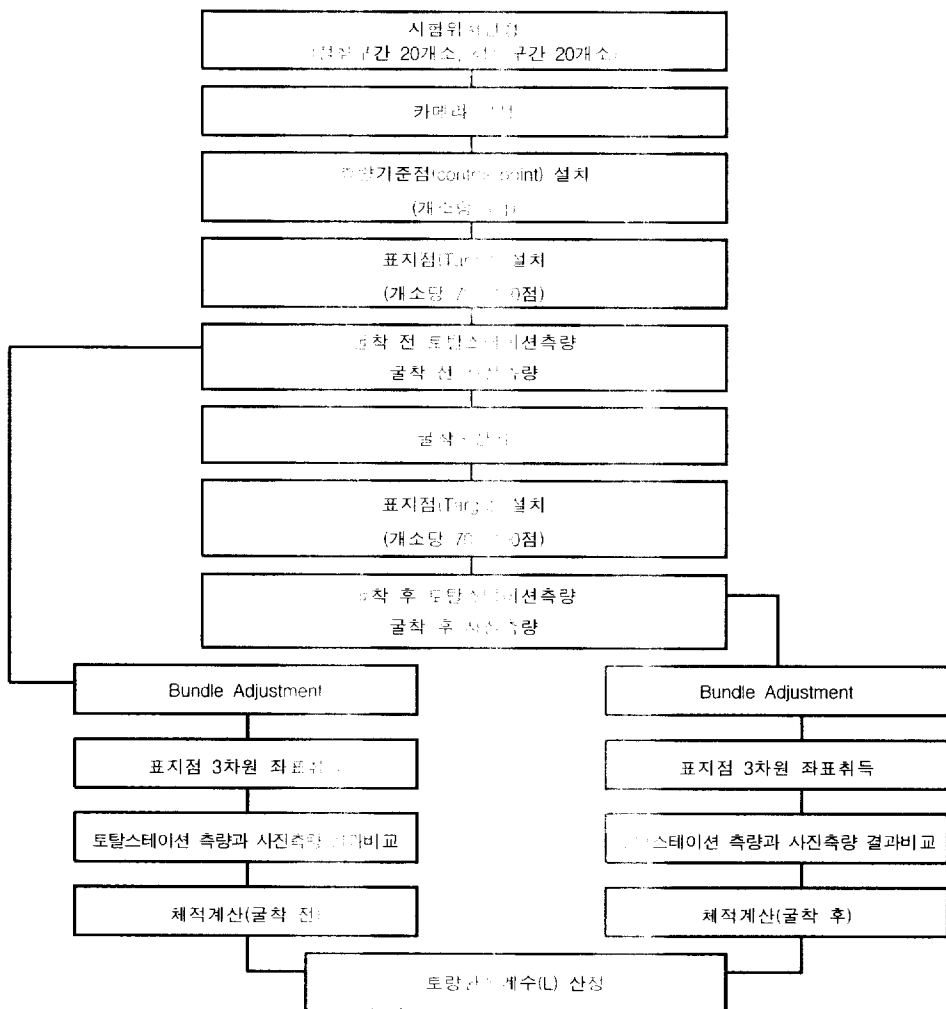


Fig. 1.1 The Flow Chart of This Study

이렇게 산정된 체적을 검증하기 위하여 토탈스테이션에 의한 결과값과 비교·분석하였다. 또한 고밀도의 3차원 수치자료의 획득이 가능하며 정밀한 DEM 및 DSM 제작이 가능한 3D 레이저 스캐너 자료와 상호 검증을 실시하였다.

최종적으로 검증을 거친 대상구간의 체적을 이용하여 토량환산계수를 산정하였으며, 이를 모래치환법에 의한 현장건조단위중량시험 결과와 비교함으로써 현장에서의 신뢰성 있는 토량환산계수 산정방법을 제시하였다.

2. 수치사진측량 이론

2.1 수치영상의 특성

수치영상은 대상물에서 반사된 빛이 렌즈의 중심을 통과하여 CCD(Charge Coupled Device) 센서에 감지되어 수치 정보화된다. Fig. 2.1은 좌표상에 위치한 밝기값을 일정한 범위로 구분하여(0~255) 영상소(pixel) 단위로 나타낸 것으로서 유효 영상폭은 그 크기가 일정하게 규정된 직각 포맷을 이룬다.

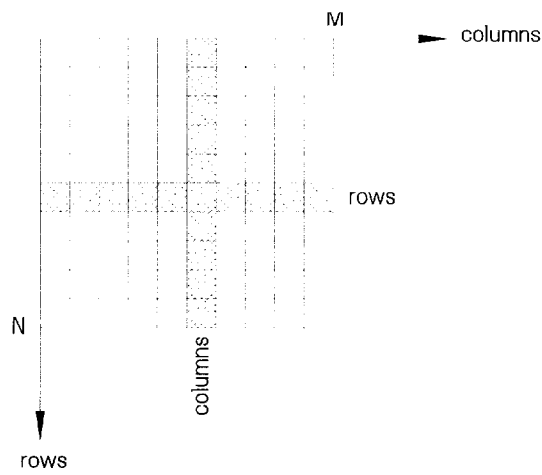


Fig. 2.1 Discrete Representation of an Image as a Matrix⁵⁰⁾⁵¹⁾

이러한 수치영상은 스캐너, CCD(Charge-Coupled Device) 카메라 및 디지털 카메라 등을 이용하여 취득할 수 있으며, 모든 처리가 컴퓨터에 의해 이루어지므로 신속, 정확할 뿐만 아니라 다양한 처리를 실현할 수도 있다.

2.2 수치영상의 기하학

수치사진측량은 사진과 렌즈의 투영중심 그리고 대상물간의 기하학적 관계를 이용하여 대상물이 지니고 있는 특성을 정량·정성적으로 해석하는 학문으로써, 사진의 기하학적인 원리는 중심투영이며, 사진과 대상물간의 상관관계는 공선조건식, 광속조정법, 에피폴러 기하학 등의 이론에 의해 해석된다.

2.2.1 공선조건식

대상 공간상의 임의점(X_p, Y_p, Z_p)과 그에 대응하는 사진상의 점 (x_p, y_p, z_p) 및 사진기의 촬영중심 (X_0, Y_0, Z_0)이 동일직선상에 있어야 하는 조건을 공선조건(Collinearity Condition)이라 하며, Fig. 2.2에서 나타낸 바와 같다.

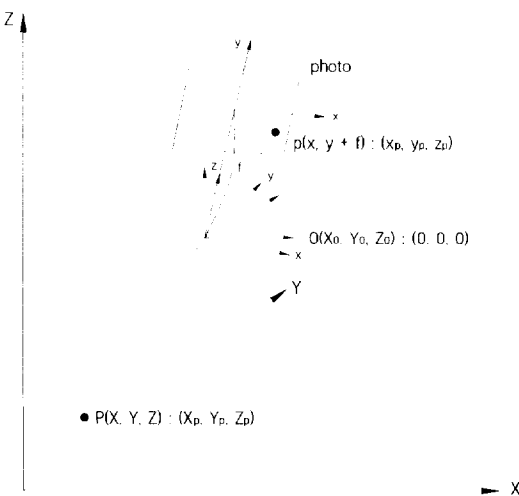


Fig. 2.2 Collinearity Condition⁴⁶⁾⁴⁷⁾⁴⁸⁾⁴⁹⁾

사진기 투영중심과 P의 상점 및 대상물 사이의 관계는 투영변환의 기하학적 관계에 의해 식(2-1)과 같이 표현되어지며, 상호간의 기하학적 위치관계를 이용하여 식(2-2)와 같은 공선조건의 기본식으로 정리할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ -f \end{bmatrix} = s \cdot R \begin{bmatrix} X_p - X_0 \\ Y_p - Y_0 \\ Z_p - Z_0 \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

여기에서

$$\begin{aligned} x - x_p &= -f \frac{r_{11}(X_p - X_0) + r_{12}(Y_p - Y_0) + r_{13}(Z_p - Z_0)}{r_{31}(X_p - X_0) + r_{32}(Y_p - Y_0) + r_{33}(Z_p - Z_0)} \\ y - y_p &= -f \frac{r_{21}(X_p - X_0) + r_{22}(Y_p - Y_0) + r_{23}(Z_p - Z_0)}{r_{31}(X_p - X_0) + r_{32}(Y_p - Y_0) + r_{33}(Z_p - Z_0)} \end{aligned} \quad (2-2)$$

2.2.2 자체검정에 의한 광속조정법

식(2-3)은 최소제곱조정과 Taylor 급수를 사용하여 식(2-2)와 같은 비선형식을 선형화한 것으로, 관측식의 함수(F)와 매개변수값이 0과 같음을 기초로 한다.

$$\begin{aligned} F_1 &= 0 = px + qf \\ F_2 &= 0 = py + rf \end{aligned} \quad (2-3)$$

여기에서,

$$\begin{aligned}
p &= r_{31}(X_p - X_0) + r_{32}(Y_p - Y_0) + r_{33}(Z_p - Z_0) \\
q &= r_{11}(X_p - X_0) + r_{12}(Y_p - Y_0) + r_{13}(Z_p - Z_0) \\
r &= r_{21}(X_p - X_0) + r_{22}(Y_p - Y_0) + r_{23}(Z_p - Z_0)
\end{aligned}$$

선형화 형태로 다항식을 정리함에 있어, 미지값들의 초기값 계산에 대한 함수와 우연오차에 대한 보정값을 요소로 하여 편미분값을 기호화할 수 있다. 그리고, 기지 대상점이 3점 이상인 경우, 외부표정요소를 도출할 수 있으므로, 이를 간단히 행렬 요소로 표현하면 식(2-4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \\ \omega \\ \Delta \\ \phi \\ \Delta \\ \kappa \\ \Delta \\ X_0 \\ \Delta \\ Y_0 \\ \Delta \\ Z_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} = 0 \quad (2-4)$$

이로부터 획득한 외부표정요소는 기지값으로 이용되어 새로운 대상점의 보정값 ($\Delta X_p, \Delta Y_p, \Delta Z_p$)을 계산하게 되며, 대상점 p의 대상물 좌표 X_p, Y_p, Z_p 에 대한 기초 근사값으로 사용되어진다. 이로써 식(2-4)를 다음과 같이 수정·정리할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{24} & a_{25} & a_{26} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_0 \\ \Delta Y_0 \\ \Delta Z_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} = 0 \quad (2-5)$$

미지점의 3차원 좌표는 공선조건식의 외부표정요소와 최소 3점 이상의 잉여 기준점 좌표로부터 계산되어 진다. 이런 비선형화 방정식의 선형화를 통한 자료처리 과정을 공간 후방교회법(Space Resection)이라 하며, 여기서 획득한 수정된 외부표정요소는 공간 전방교회법(Space Intersection)을 통하여 초기값으로 이용되어 미지점의 좌표를 도출하게 된다.

사진측량의 관측값에는 우연오차 뿐만 아니라 정오차도 포함되어 있고 이 정오차는 오차모형에 의해 해결될 수 있으므로 조정계산에서 입체모형의 일부에 이와 같은 오차모형식을 부가하여 정확도를 향상시킬 수 있으며, 이것이 자체검정의 기본목적이다. 초기의 자체검정은 정밀근접사진측량의 정확도 향상을 목적으로 고안된 사진기의 내부표정요소 및 렌즈왜곡의 검정이 주된 것이었으며, 이 후 발전적으로 항공삼각측량에도 도입되어 광속법에 의한 종·횡접합모형(Block Adjustment)에 각종 오차모형이 제안되게 되었다.

이와 같은 방법을 자체검정에 의한 광속조정법(Bundle Adjustment with self calibration), 기내검정 또는 부가매개변수에 의한 조정이라 하며, 이는 광속조정법에서 미지변수로 취급되는 사진의 외부표정요소와 관측점의 지상좌표와 사진좌표에 포함되는 계통적 오차를 나타내는 변수를 미지변량으로 하여 이 미지변수들을 동시에 조정하는 방법이다.

2.2.3 에피폴러 기하학

수치사진측량에서 가장 기본적인 처리과정 중의 하나는 둘 또는 그 이상의 영상에서 공액점(Conjugate Point)을 찾고 관측하는 것이며 영상정합(Image Matching)이라는 처리과정에 의해 자동으로 그 문제를 해결하려고 시도하고 있다. 또한 수치사진측량 기술의 발달과 더불어 입체사진

에서 공액점을 찾는 과정은 점차 자동화되어 가고 있으며, 공액요소 결정에 에피폴러 기하를 이용하고 있다.

Fig. 2.3은 에피폴러 기하(Epipolar Geometry)를 이루고 있는 각각의 투영중심이 C' , C'' 인 입체쌍을 나타내고 있으며, 에피폴러면은 2개의 투영중심과 대상점 P 에 의해 정의된다. 또한, 에피폴러선 e' 와 e'' 는 에피폴러면과 영상면의 교차점으로써, 공액점은 에피폴러선상에 반드시 있어야 하며 이러한 에피폴러선은 탐색공간을 많이 감소시킨다.

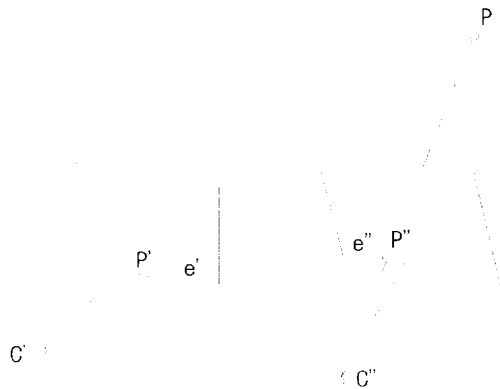


Fig. 2.3 Epipolar Geometry of a Stereopair⁵²⁾

2.3 다중영상표정

다중영상정합의 표정(Orientation)이란 여러 다른 사진들과 대상물에 관련된 각 사진의 카메라 위치(X_c , Y_c , Z_c)와 회전요소(ω , ϕ , κ)에 대한 계산이며, 표정점에 대한 대상물 좌표를 계산하는 것으로서 내부표정과 외부표정으로 구분할 수 있다.

내부표정은 카메라의 내적인 특성을 나타내는 것으로 주점의 위치(X_0 , Y_0)와 주점거리(cK)를 결정하는 것이고, 외부표정은 카메라 시스템과 대

상물 공간사이의 관계를 나타내는 것으로 카메라 외부투영 중심으로 절대 좌표계 X, Y, Z 에 관계되는 촬영점 좌표 X_c, Y_c, Z_c 에 의해 표현되며, 절대좌표에 관계되는 사진좌표축의 각회전 ω, ϕ, κ 를 알아야 한다. 상-대상물 관계를 정의함에 있어서 기본적으로 외부표정요소는 좌표변환이며, 표정각 ω, ϕ, κ 는 사진좌표계와 절대좌표계 사이에서의 회전변환을 말한다.

다중영상접합에서는 표정을 위해 공간 전방교회법(Space Intersection)과 공간 후방교회법(Space Resection)을 동시에 이용하며, 표정점의 사진좌표와 스케치에 의해 입력된 대략의 외부표정요소, 자체검정에 의한 카메라의 내부표정요소와 사진의 정확한 외부표정과 표정점의 대상물 좌표를 계산하기 위한 대상물 좌표체계결정을 이용한다.

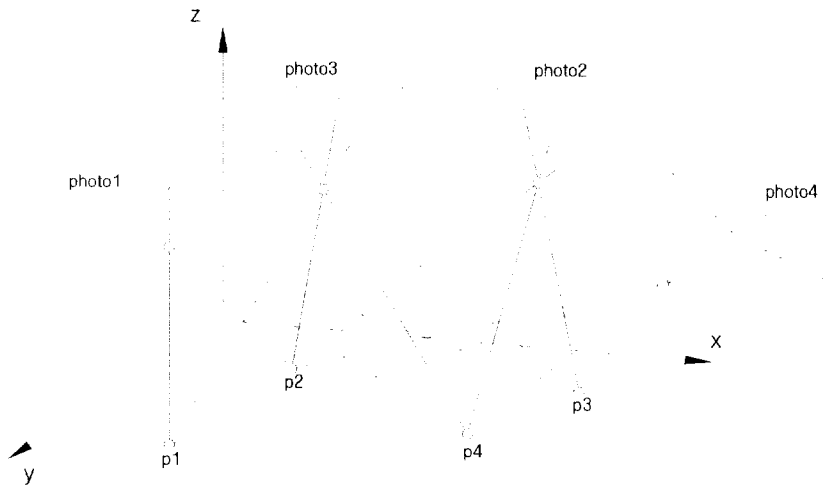


Fig. 2.4 Multi-Image Orientation

공간 전방교회법은 광속이 3차원 공간에서 교차하는 것을 기초로 하는 사진측량학적인 계산방법으로 두 장의 사진에 대한 외부표정과 사진좌표로부터 공통된 대상물의 표정점을 계산하고 이와 관련해서 정확한 외부표정을 결정하는 것이며, 이를 도식화하면 Fig.c 2.5와 같다.

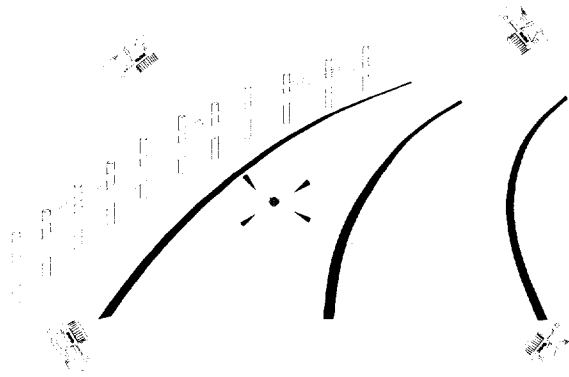


Fig. 2.5 Space Intersection

공간 후방교회법은 이미 알고 있는 위치와 일치하는 지점에서 적어도 3개의 기지방향으로 교차시킴으로써 공간 위치를 결정하는 것이며, 기지의 대상물 좌표와 적어도 3개의 표정점의 사진 좌표로부터 어떤 사진의 외부 표정을 결정하는 방법으로써 이를 도식화하면 Fig. 2.6과 같다.

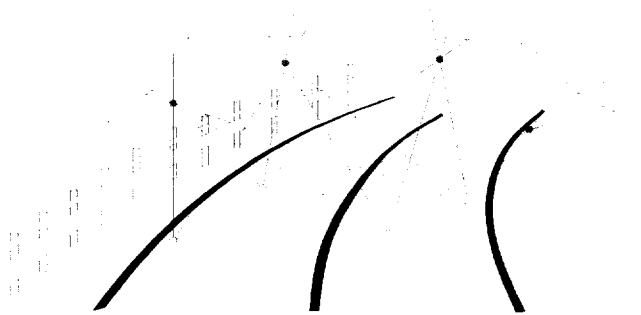


Fig. 2.6 Space Resection

공선조건에 만족하기 위하여 대상물 좌표체계 결정에 이용된 표정점은 표정 순서에서 최소 3장의 사진에 나타나야 하며, 맨 처음 두 장의 사진은 공간 전방교회법으로 모델 좌표를 계산하게 된다. 두 장의 사진방향은

3차원 공간에서 $60\sim90^\circ$ 의 각도가 이루어지도록 하고 대상물 전역에 골고루 분포되어 있는 최소 7개의 표정점을 갖고 있어야 하며, 공간 후방회회법의 계산을 위하여 각 표정 순서에서 이미 알고 있는 3개의 표정점이 적어도 3장의 사진에 나타나야 한다. 그리고 결과값에 대한 정확도를 미리 고려하여 사진의 표정 순서를 결정하여 그에 대한 영향을 최소화해야 한다.

2.4 자체검정

자체검정(Self-Calibration)은 카메라의 초점거리와 주점의 결정, 정오차를 보정하기 위한 부가매개변수의 취득에 이용된다.

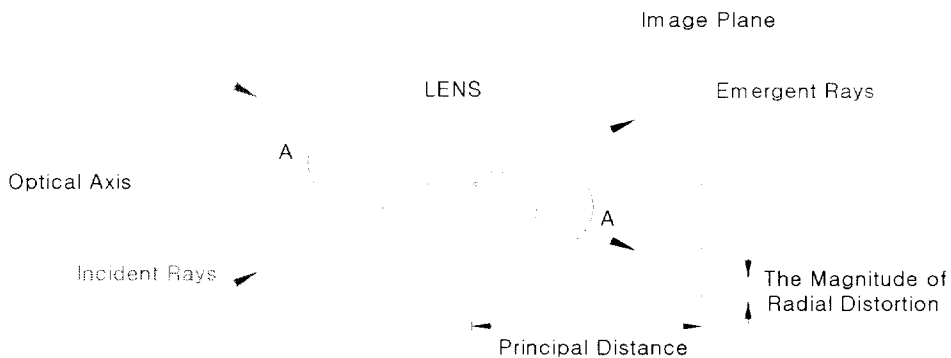


Fig. 2.7 Radial Optical Distortion⁵¹⁾⁵²⁾

이론적으로 이상적인 카메라는 Fig. 2.7에서 나타난 바와 같이, 대상물 공간 속에서 카메라에 입사하는 빛이 렌즈 중심을 통하여 입사각과 같은 각으로 내부에서 직진하지만, 실제 카메라는 이와 같이 작용하지 않고 두 개의 투영중심이 생기는데 이 점들을 내부 및 외부의 투영중심이라 한

다.⁵¹⁾⁵²⁾ 따라서, 이상적인 렌즈의 특성을 갖고 있지 않기 때문에 이에 대한 보정이 필요하며, 이 밖에도 필름의 신축 및 편평도, 대기의 굴절, 지표좌표의 보정, 기타 여러 가지 조건 등이 고려될 수 있다.

렌즈의 특성으로 인하여 대상물 공간상에서 카메라에 들어오는 입사각과 카메라 내부에서 렌즈의 중심을 통해 굴절하는 굴절각이 일치하지 않기 때문에 발생하며 이러한 형태의 왜곡을 방사방향 왜곡수차라고 하며, Fig. 2.8에서 나타난 것과 같다.⁵³⁾

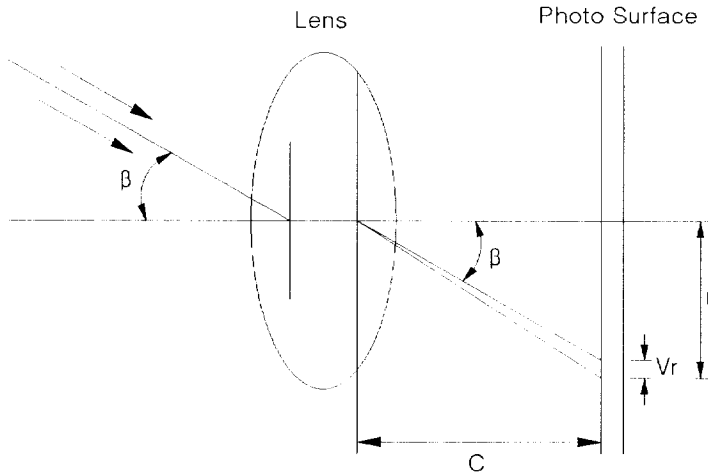


Fig. 2.8 Radial Distortion of Lens

방사방향 왜곡수차는 식(2-6)와 식(2-7)과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta r = k_1 r^3 + k_2 r^5 + k_3 r^7 \dots \quad (2-6)$$

$$r^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 \quad (2-7)$$

여기서,

k_1, k_2, k_3 : 방사왜곡 계수

r : 주점에서부터의 방사거리(radial distance)

x, y : 임의의 점에 대한 사진좌표

x_0, y_0 : 주점의 사진좌표

이다.

렌즈왜곡의 두 번째 성분은 편심왜곡으로서 일반적으로 방사방향 왜곡보다 작은 양이다. 렌즈의 합성과정에서 렌즈 각각의 곡률 중심이 일치하지 않으므로 생기는 비대칭 렌즈왜곡은 주점에 대하여 방사방향왜곡 성분과 접선방향왜곡 성분 모두를 갖기 때문에 주점에 대해 비대칭이므로 비대칭 렌즈왜곡이라고도 하며, Fig. 2.9에서 나타낸 것과 같다.

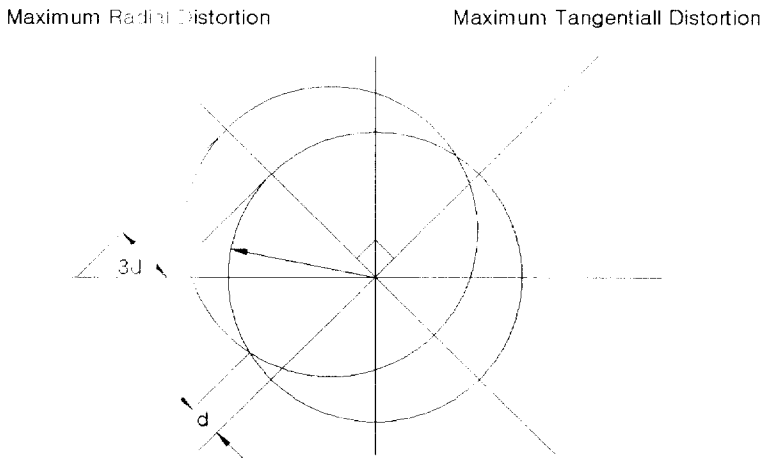


Fig. 2.9 Components of Lens Distortion Errors

x 와 y 방향에 대한 편심방향 왜곡수차는 식(2-8)과 (2-9)와 같다.

$$d_x = \{ P_1(r^2 + 2x^2) + 2P_2xy \} (1 + P_3r^2 + \dots) \quad (2-8)$$

$$d_y = \{2P_1xy + P_2(r^2 + 2y^2)\} (1 + P_3r^2) \quad (2-9)$$

여기서,

P_1, P_2, P_3 : 편심방향왜곡계수

이다.

2.5 수치영상처리 시스템

본 연구에서는 사진측량 S/W 중 다양한 카메라 및 렌즈의 선택과 설치의 편의성이 있고, 특히 자동차, 항공기, 선박 등과 같은 산업분야에서 많이 활용되고 있는 Rollei Metirc CDW(Close-Range Digital Work station)를 이용하여 획득된 대상물의 수치영상에서 각 표정점의 3차원 좌표를 결정하였다.

이러한 Rollei Metirc CDW는 복잡한 수치영상에서 상좌표 취득이 용이할 뿐만 아니라 자료처리의 모든 공정이 자동으로 수행되며, 높은 정확도의 해석이 가능하다. 전반적인 수치영상처리 시스템의 흐름도는 Fig. 2.10과 같다.

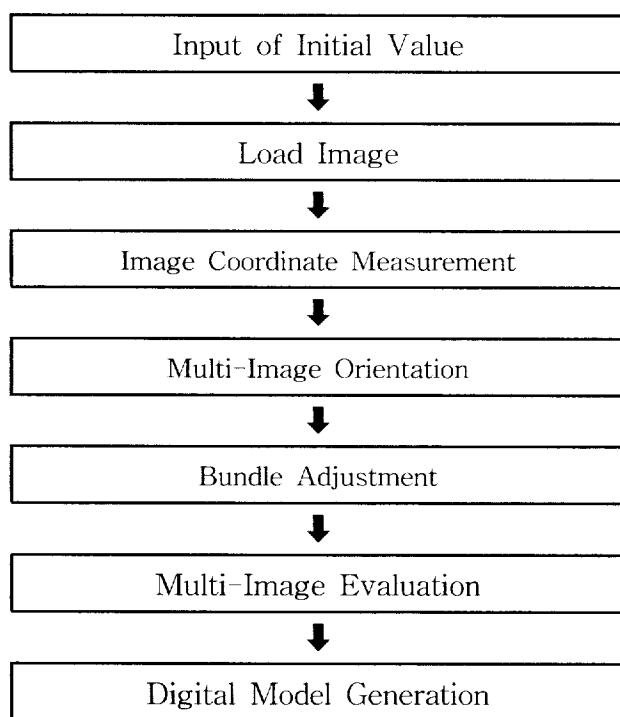


Fig. 2.10 The Flow Chart of Data Processing

3. 현장시험 및 체적산정

본 연구는 경북 구미에 소재한 대규모 토량 절취(약 2,940,000m³)가 있는 택지조성공사현장을 대상으로 선정하였으며, 대상지 내의 절·성토부 각각 20개소를 굴착하고 굴착 후의 체적을 계산하기 위하여 Fig. 3.1과 같은 일련의 과정을 수행하였다.

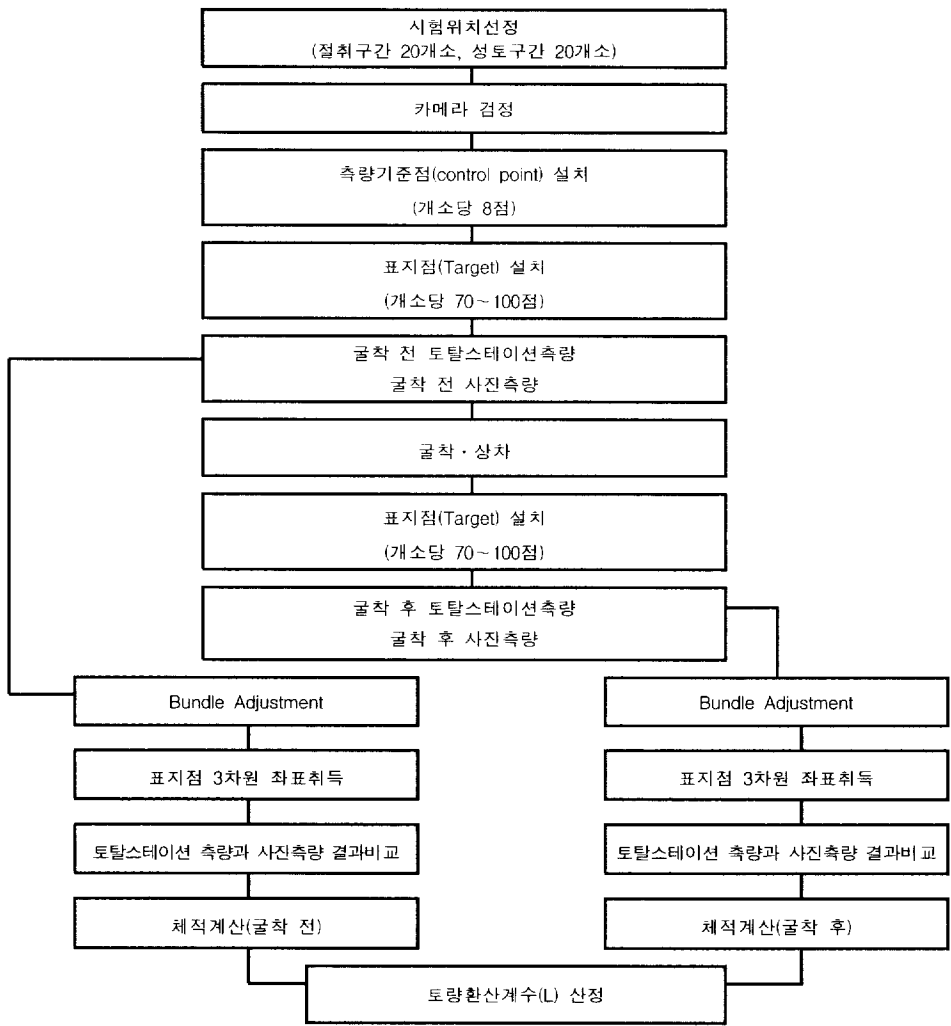


Fig. 3.1 Assessment Process of Soil Conversion Factor

3.1 촬영계획

대상구간에서의 수치영상을 획득하기 위한 장비로는 Rollei사에서 제조한 d7 metric⁵ 카메라를 사용하였으며, 카메라의 형상 및 제원은 Fig. 3.2와 Table 3.1과 같다.



Fig. 3.2 Rollei d7 metric³ Camera

Table 3.1 Specifications of Rollei d7 metric³ Camera

Classification	Rollei d7 metric ⁵
Recording mode	CCD recode
Shutter	1/8,000 sec
Focal Length	7mm
Dimensions	151×102×106 mm
Weight	650g (without batteries)
Pixel in X	2,552
Pixel in Y	1,920
Sensor in X	8.932
Sensor in Y	6.720

3.2 카메라 검정

본 연구에서는 촬영에 사용될 Rollei d7 metric⁵ 카메라의 렌즈를 검정하기 위한 작업을 선행하였다. Fig. 3.3과 같이 약 8m×5m 되는 벽면에 40개의 원형타겟을 부착하고, 중복촬영 및 Swing값을 변화시키면서 12장의 사진을 획득하였다.

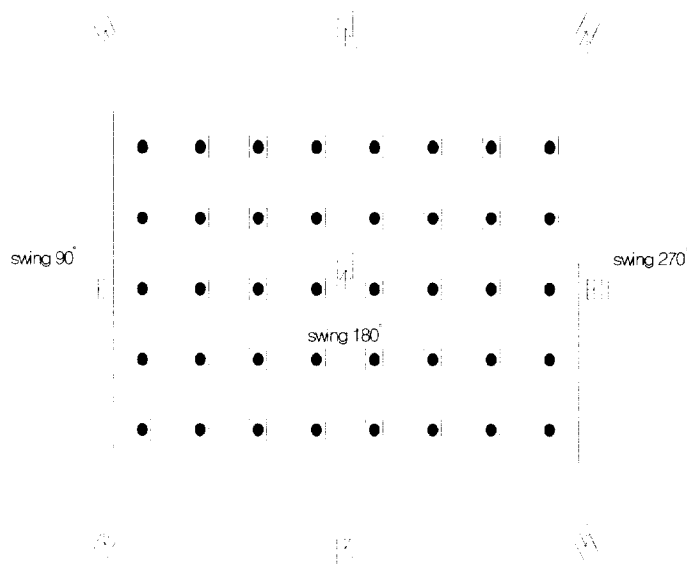


Fig. 3.3 Test Field for Correction of Radial Distortion

방사방향 왜곡 수차와 편심방향 왜곡 수차를 보정해야 하지만, 편심방향 왜곡 수차는 극히 미세하여 특수한 경우를 제외하고는 유사하므로, 본 연구에서는 실험을 되풀이하여 최소제곱법에 의해 구해진 1차 왜곡상수와 2차 왜곡상수를 적용하여 방사방향 왜곡 수차만을 보정해 주었다.

Table 3.2는 카메라 Calibration에 의해 보정된 자료를 나타낸 것이며,

카메라 검정결과 시스템의 왜곡 매개변수들을 도식적으로 나타내면 Fig. 3.4와 같다.

Table 3.2 Data of Camera Calibration

Calibration [Rollei d7 metric ⁵ Camera]		
Interior Orientation	cK	-7.422 mm
	xH	0.6875 mm
	yH	0.0998 mm
	A1	-2.1884e-003
	A2	3.5727e-005
	R0	3.00 mm

- cK : Calibrated Focal Length
- xH, yH : Coordinates of Principal Image Point
- A1, A2 : Parameters of Radial-Symmetric Distortion
- R0 : Radius from Principal Point when Radial Distortion is zero

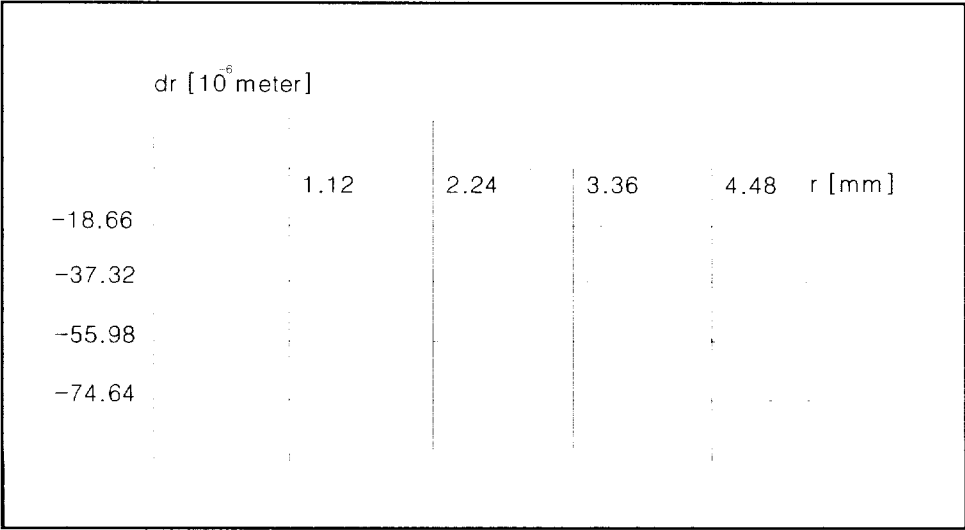


Fig. 3.4 Profiles for Calibrated Radial Distortion

3.3 수치영상획득 및 자료처리

본 연구에서는 굴착부분의 체적산정을 위해 수치사진측량기법과 토탈스테이션 측량을 병행하여 실시하였다. 먼저 정밀한 측정을 위해 굴착부분에 70~100개를 타겟을 설치하고 각 타겟점에 대한 3차원 좌표를 취득하였다. 수치영상의 획득을 위한 관측시스템의 모식도는 Fig. 3.5와 같고, 이러한 일련의 과정들은 Fig. 3.6~Fig. 3.9에 나타난 것과 같다.

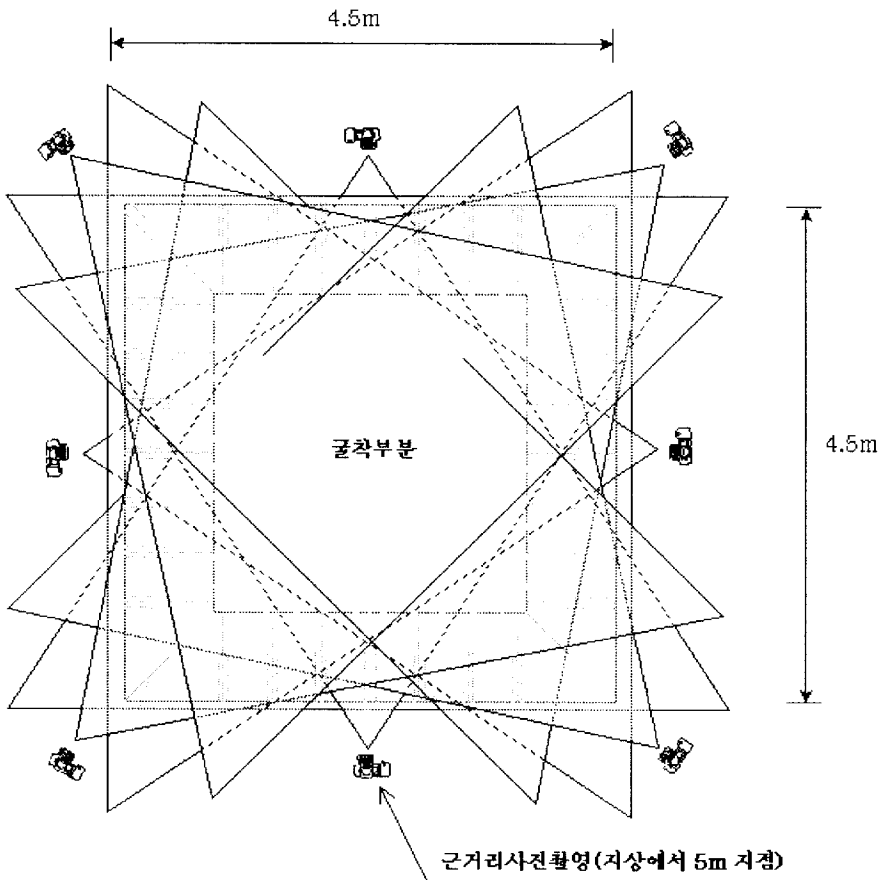


Fig. 3.5 Diagram of Digital Photogrammetry



Fig. 3.6 Removed Shape of Surface Soil

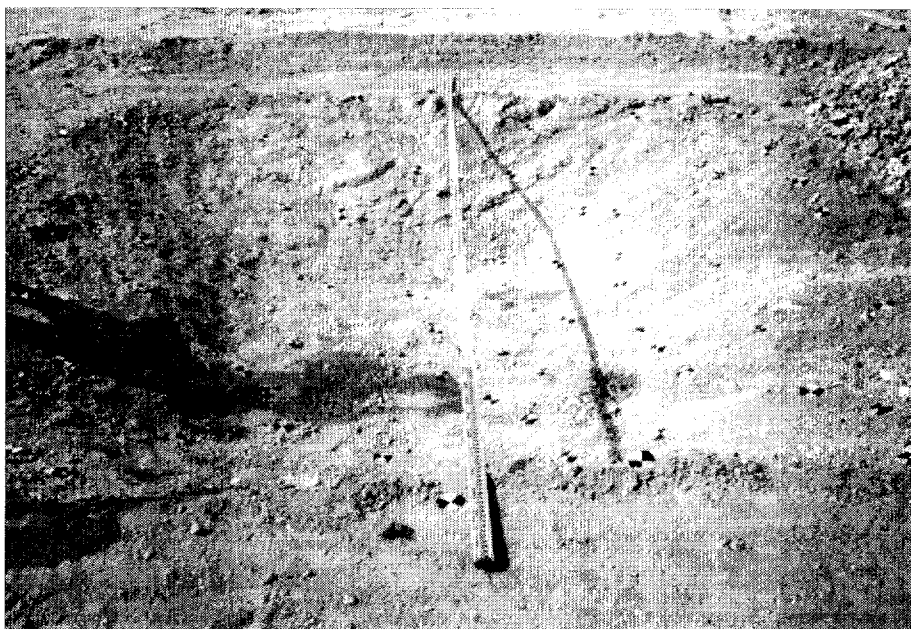


Fig. 3.7 Shape after Excavation

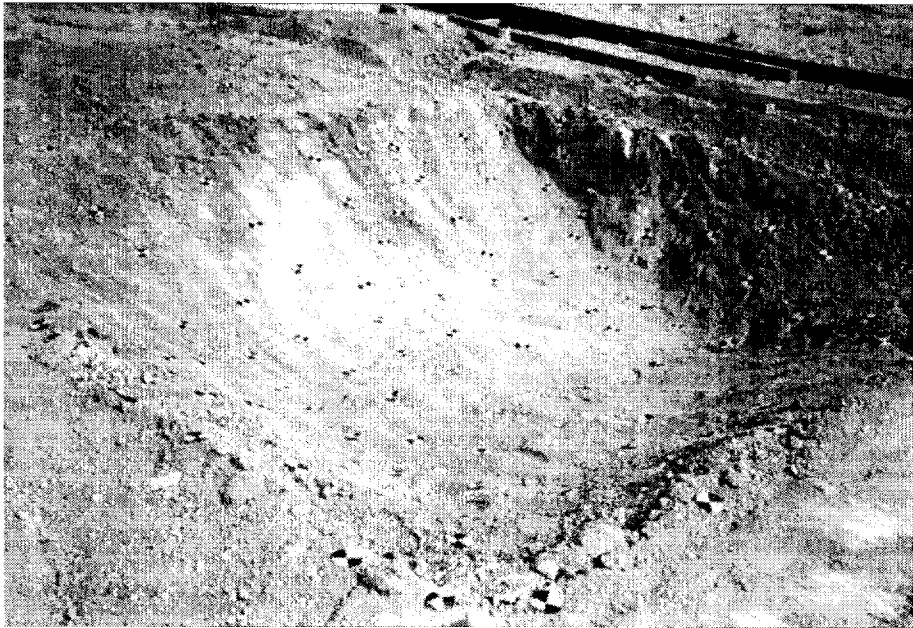


Fig. 3.8 Shape of Target Installation



Fig. 3.9 Measurement by Total Station

또한 자료처리에 있어서는 사진측량 S/W 중 다양한 카메라 및 렌즈의 선택과 설치의 편의성이 있고, 다양한 분야에서 많이 활용되고 있는 Rollei Metirc CDW(Close Range Digital Workstation)를 이용하여 획득된 대상물의 수치영상에서 각 표정점의 3차원 좌표를 광속조정법에 의해 결정하였다. 이러한 RolleiMetirc CDW는 복잡한 수치영상에서 상좌표 취득이 용이할 뿐만 아니라 자료처리의 모든 공정이 자동으로 수행되며, 정확한 표정점의 계산이 가능하다.

먼저, 카메라 검정에 의해 결정된 내부표정요소와 촬영시 대략적으로 메모된 카메라 노출위치를 입력하고 획득된 연속된 영상에 있어서 각 개소당 70~100개의 상좌표를 측정하였으며, 연속된 6장의 영상에 대한 상좌표 측정모습은 Fig. 3.10에 나타난 것과 같다.

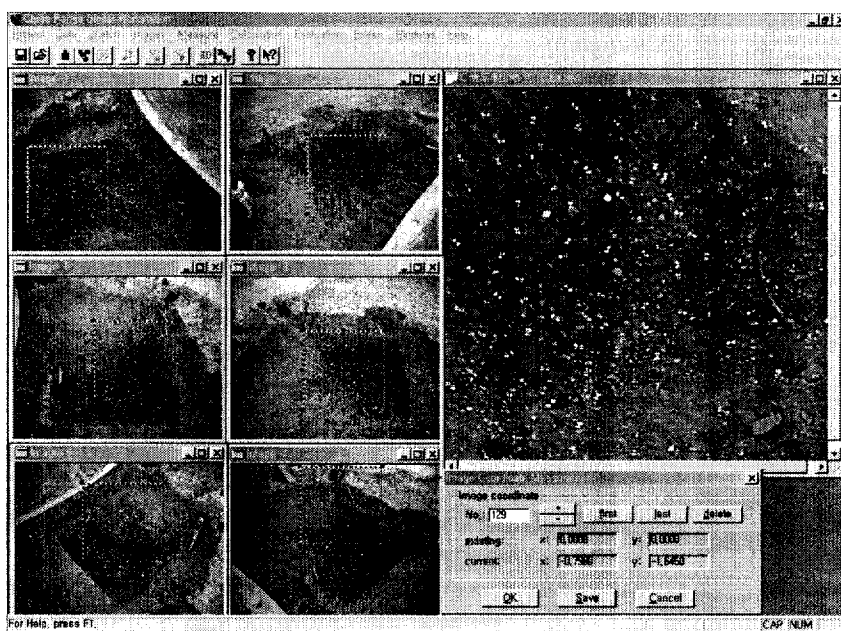


Fig. 3.10 Measurement of Image Coordinates

이렇게 연속된 영상에서 중복 측정된 표정점은 공선조건을 기초로 한

다중영상표정에서 후방교회법과 전방교회법을 동시에 수행하고, 광속조정법에 의해 대상점의 3차원 좌표 및 외부표정 매개변수를 결정하게 된다.

또한, 본 연구에서는 다중영상표정과 광속조정법에 의해 결정된 대상물 3차원 좌표의 정확도를 분석하기 위해 토탈스테이션에 의해 측정된 기준점 좌표성과와의 차이로 비교하였다. 40개소에 있어서 기준점의 잔차에 대한 RMSE를 산정한 결과, Table 3.3과 같이 X방향으로 1.085mm~4.512 mm, Y방향으로 1.058mm~4.440mm, Z방향으로 1.213mm~4.441mm의 RMSE 분포를 나타내었다.

Table 3.3 RMSE by Each Place

Section	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	Section	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)
1	2.516	4.125	4.001	21	2.005	3.164	3.124
2	2.784	4.015	3.587	22	1.963	2.887	3.058
3	3.512	4.003	4.025	23	1.547	2.547	2.956
4	3.333	3.598	3.660	24	1.332	4.440	3.125
5	3.527	3.678	3.128	25	1.113	3.005	2.887
6	3.332	3.885	3.458	26	1.085	2.125	3.666
7	4.412	4.424	3.125	27	0.996	1.058	4.031
8	3.985	4.055	3.664	28	2.421	1.889	4.441
9	4.001	3.631	4.112	29	2.598	1.635	4.226
10	4.512	3.457	2.999	30	3.547	2.488	3.956
11	3.911	3.558	2.775	31	3.215	1.336	3.578
12	3.162	4.021	2.645	32	2.951	2.009	3.100
13	3.032	3.446	3.212	33	2.885	2.012	3.008
14	2.577	3.872	2.657	34	2.645	3.087	3.655
15	2.669	4.123	3.587	35	3.057	2.645	3.258
16	2.535	3.465	2.001	36	3.621	2.453	3.002
17	2.121	3.127	2.018	37	4.013	3.085	2.557
18	1.817	2.884	1.578	38	3.463	2.776	2.613
19	1.906	3.557	2.057	39	3.057	3.425	2.966
20	2.063	3.996	1.213	40	2.559	4.059	3.225

3.4 체적산정

이러한 자료처리방법에 의해 결정된 각 표정점의 3차원 좌표를 입력값으로 하여 40개소의 굴착부분을 규칙적인 간격의 격자로 나타내고 선형보간법 중 불규칙 삼각망을 이용하여 체적을 산정하였으며, Table 3.4와 Table 3.5는 산정된 체적을 절토부와 성토부 풍화암으로 구분하여 나타낸 것이다.

Table 3.4 Result of Volume Assessment (Cutting Area)

Weathered Rock of Cutting Area			
Test Location	Volume (m ³)	Test Location	Volume (m ³)
TP 1	5.782	TP 31	7.766
TP 2	6.906	TP 32	7.223
TP 3	7.611	TP 33	7.737
TP 4	7.249	TP 34	6.910
TP 5	7.217	TP 35	7.895
TP 26	7.062	TP 36	6.726
TP 27	7.950	TP 37	6.121
TP 28	8.311	TP 38	6.962
TP 29	6.909	TP 39	7.052
TP 30	7.195	TP 40	7.152

Table 3.5 Result of Volume Assessment (Banking Area)

Weathered Rock of Banking Area			
Test Location	Volume (m ³)	Test Location	Volume (m ³)
TP 6	8.736	TP 16	7.846
TP 7	9.051	TP 17	9.335
TP 8	9.727	TP 18	8.660
TP 9	9.462	TP 19	8.237
TP 10	8.959	TP 20	8.609
TP 11	6.979	TP 21	9.153
TP 12	8.944	TP 22	8.716
TP 13	8.526	TP 23	8.813
TP 14	8.479	TP 24	8.346
TP 15	7.137	TP 25	7.366

3.5 비교 및 분석

본 연구에서는 이렇게 결정된 체적을 검증하기 위해 먼저 토탈스테이션에 의한 방법과 수치사진측량기법에 의한 결과를 비교하였다. 40개소의 대상구간 중 3개소에 대한 결과값을 상호 검증한 결과, Table 3.6에 나타난 것과 같이 교차에 대한 상대정확도는 평균 0.5%로 산출되었다.

Table 3.6 Comparison of Result Value

Location	Total Station	Digital Photogrammetry	Average (m ³)	Discrepancy (m ³)	Relative Accuracy (%)
TP-21	9.195 m ³	9.153 m ³	9.174	0.042	0.46
TP-22	8.756 m ³	8.716 m ³	8.786	0.040	0.45
TP-23	8.865 m ³	8.813 m ³	8.899	0.052	0.59
Average					0.50

그러나 이렇게 검증된 결과값은 각 개소당 결정된 70~100개의 경사변환점만을 이용하여 결정된 체적을 비교한 값으로써 대상구간의 3차원 형상을 정확히 검증하는데 많은 어려움이 따른다.

따라서, 본 연구에서는 수치사진측량기법에 의해 결정된 체적의 정확도를 분석하기 위하여 최근 활용이 증대되고 있는 3D 레이저 스캐너 자료와 비교·분석하였다. 3D 레이저 스캐너 자료는 고밀도의 3차원 수치자료의 획득이 가능할 뿐만 아니라 정밀한 DEM 및 DSM 제작이 가능한 장점이 있으며, 무수히 많은 경사변환점의 3차원 자료의 취득이 용이하다.

이를 위해 Fig 3.11에 나타난 것과 같이 경사변환점이 상대적으로 많이

분포한 대규모 발파 구간을 대상으로 3D 레이저 스캐너를 이용한 발파 전 지형의 측정을 선행하였으며, 발파 후 발파암 제거부의 지형을 측정하여 발파암 지역에서의 체적을 결정하였다. 또한 이렇게 결정된 체적을 동일한 구간에서 병행하여 실시한 수치사진측량기법에 의한 결과와 비교·분석함으로써, 좀 더 신뢰성 있는 체적산정기법을 제시하고자 한다.

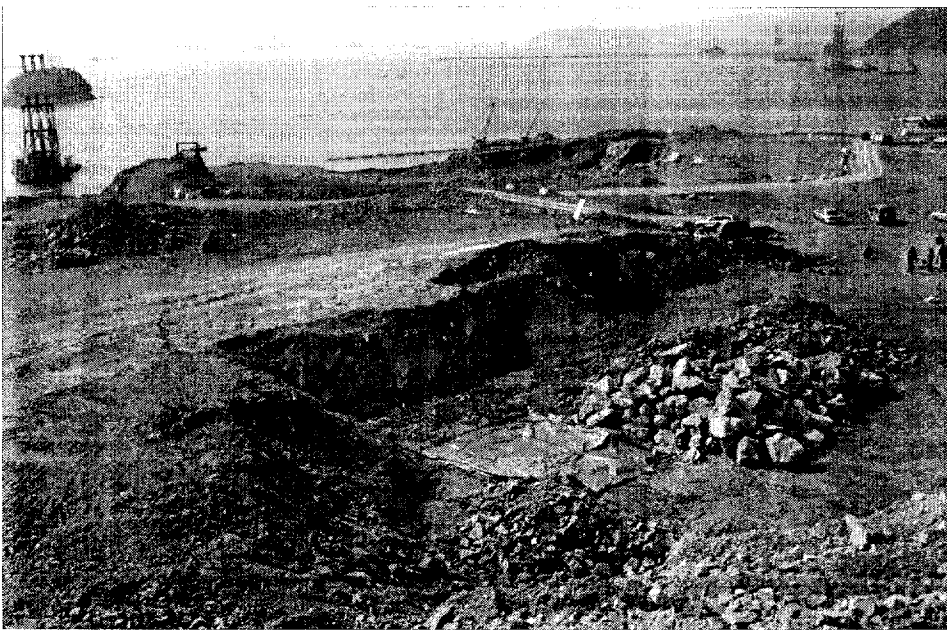


Fig. 3.11 3D Observation Area by 3D Laser Scanner

3.5.1 수치사진측량기법에 의한 관측결과

수치영상처리 단계를 거쳐 취득된 3차원 자료를 이용하여 각 대상지역에 관련한 발파 전·후의 체적 및 자연상태의 발파암 체적에 대한 결과값은 Table 3.7에 나타낸 것과 같다. 또한 6개 구간 중 대표적인 구간에 대한 발파 전·후의 3D surface 형상은 Fig. 12 및 Fig. 13과 같다.

Table 3.7 Result of Volume

Test Area	Before(m ³)	After(m ³)	Volume of natural Conditions(m ³)
A	429.358	416.224	13.134
B	727.449	704.095	23.354
C	416.882	400.176	16.706
D	340.595	324.072	16.532
E	774.704	753.628	21.076
F	1677.725	1652.962	24.763

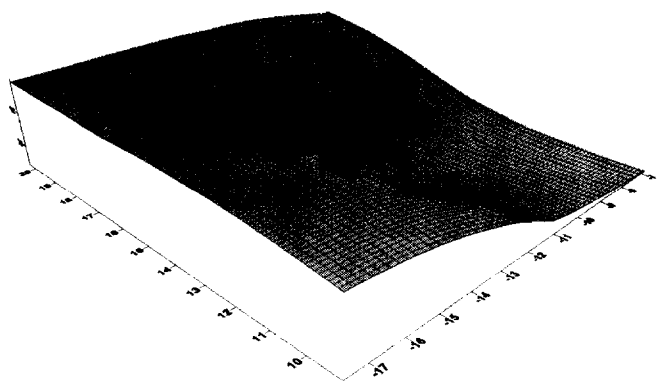


Fig. 3.12 Shape of 3D Surface (before Blasting)

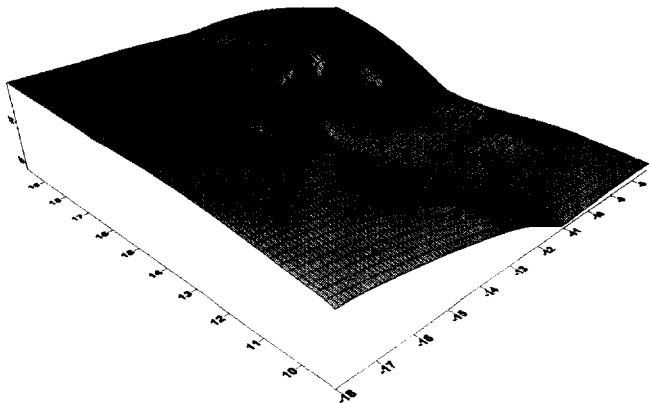


Fig. 3.13 Shape of 3D Surface (after Blasting)

3.5.2 3D 레이저 스캐너에 의한 관측결과

본 연구에서 사용된 3D 레이저 스캐너는 Canada Optech사에서 제조한 ILRIS-3D 모델을 사용하였으며, 3D 레이저 스캐너의 형상 및 제원은 Fig. 3.14 및 Table 3.8에 나타낸 것과 같다. 본 장비의 스캔 범위는 상하 좌우 40°, 최대 스캔 거리는 5% 반사율에서 350m, 20% 반사율에서 800m, 40% 반사율에서 1,200m이며, 측정오차는 최소 3mm이다. 스캔 속도는 초당 2,000 포인트이며, 경량의 배터리를 사용하여 6시간 이상 연속적으로 작업할 수 있고, 표준 측량용 삼각대에 장착하여 작업함으로써 현장에서의 작업성이 매우 우수하다. 스캐너는 PDA를 사용하여 유/무선으로 조절 가능하며, 노트북 컴퓨터를 이용한 유/무선 조절도 가능하다.

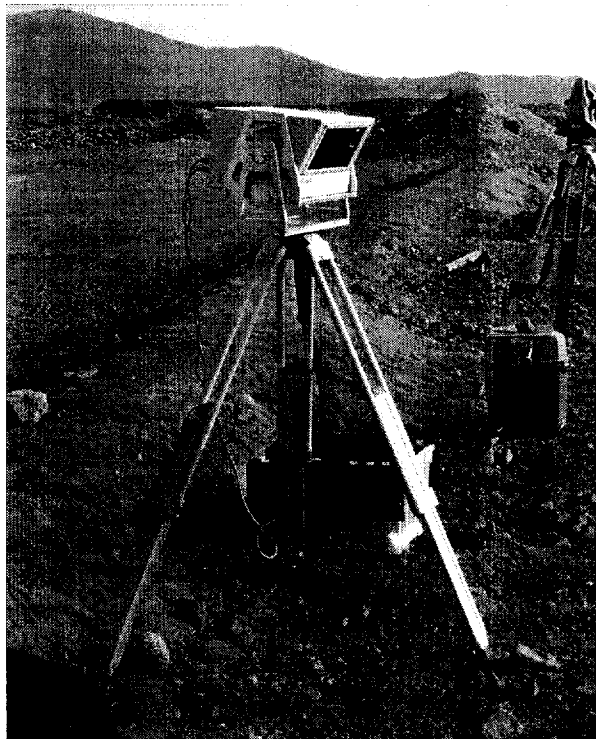


Fig. 3.14 Shape of 3D Laser Scanner

Table 3.8 Specification of 3D Laser Scanner

Instrument Type	Laser + Receiver System	Lidar
Model No.	ILRIS-3D Opetech,Canada	Intelligent Laser Imaging System
Performance Range	350 m	4% target
	800 m	20% target
Data Sample Rate	2,000 point / sec	
Accuracy	Modeling Accuracy 3mm	측정거리 50m 기준이며 측정거리에 비례하여 오차증가
Angular Resolution	0.00115° (4 ")	
Minimum Scan Interval	S = 0.026R	S = 측정간격 R = 측정거리 (m)
Spot Size	D = 0.17R + 12	D = spot 직경 (mm) R = 측정거리 (m)
Metrology Method	Time of Flight	Pulse 방식
Dimension	312×312×205.05 (mm)	
Operating Temperature	0 ~ 40°	

각 대상지역에 있어서 3D 레이저 스캐너에 의해 약 100만개의 경사변환점의 3차원 자료를 취득할 수 있었으며, 이에 따른 발파 전·후의 체적 및 자연 상태의 발파암 체적에 대한 결과값은 Table 3.9에 나타낸 것과 같다.

E지역과 F지역에 비해 A~D지역은 너무 근접한 관계로 3D 레이저 스캐너를 이용한 관측에서는 하나의 구간으로 결합하여 그 체적을 산정하였다.

Table 3.9 Volume by 3D Laser Scanner

Test Area	Before(m ³)	After(m ³)	Volume of natural Conditions(m ³)	Remark
A, B, C, D	103.02	32.78	70.24	지역 전체 스캔
E, F	53.12	6.78	46.34	지역 전체 스캔

3.5.3 결과분석

본 연구에서는 수치사진측량에 의한 방법과 3D 레이저 스캐너에 의한 방법의 결과를 상호검증하기 위해 각 대상구간에 있어서 교차에 대한 상대정확도로 분석하였다. 분석결과, Table 3.10에 나타낸 것과 같이 교차에 대한 상대정확도는 평균 0.92%로 산출되었다.

Table 3.10 Relative Accuracy

Test Area	3D Laser Scanner	Digital Photogrammetry	Average (m ³)	Discrepancy (m ³)	Relative Accuracy (%)
A,B,C,D	70.24m ³	69.726 m ³	69.983	0.514	0.75%
E,F	46.34 m ³	45.839 m ³	46.090	0.501	1.09%
Average					0.92%

이러한 결과는 불규칙하게 변화하는 지형에 있어서 정확한 체적산정을 위한 수치사진측량기법의 활용도를 보여주고 있으며, 향후 3D 레이저 스캐너 등과 같은 최첨단 장비와의 연계를 고려한 연구가 지속될 경우, 토목공사에 있어서 공사물량 산정을 보다 과학적이고 효율적으로 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 토량환산계수 산정

4.1 토량환산계수 이론

대규모 현장시험은 비교적 암질의 상태가 좋고 시험하기에 용이한 곳을 10개소를 선택하였다. 시험개소 10개소 중 경암지역 5개소, 연암지역 5개소를 나누어 시험하였으며, 개소당 발파체적이 약 $22\sim35m^3$ 정도가 될 수 있게 하였다.

그리고 토량환산계수(L)를 산정하는 식은 식(4-1)과 같다.

$$\text{토량환산계수}(L) = \frac{\text{호트러진상태체적}(m^3)}{\text{자연상태체적}(m^3)} \quad (4-1)$$

토량환산계수(L)를 구하기 위하여 식(4-1)에서 보는 바와 같이 호트러진 상태의 체적은 앞 절에서 구한 천막에 야적된 각각의 지역의 체적을 사용하였고, 자연상태의 체적은 발파 전·후의 상태를 정밀 수치사진측량을 하여 구하였다. 본 현장에서는 정밀한 체적측정을 위하여 1개소당 5~10점에 대하여 Total Station으로 지상기준점측량을 실시하고, 최첨단 정밀근접수치사진측량과 레이저스캔을 하는 3D Laser Scanning을 실시하여 첨단기법으로 체적량을 측정하도록 하였다. 수치사진측량을 위해서 1개소당 8장의 중복사진을 측정하였고, 3차원 좌표값을 취득하기 위한 타겟은 30정도를 설치하여 각 타겟점에 대한 3차원 좌표를 취득하였다.

4.2 체적을 이용한 토량환산계수 산정

토량환산계수를 산정하기 위하여 현장에서 발파 전·후 10개 지역 수치 사진측량 한 후 체적을 구하였다. 실험에 의한 토량환산계수(L)은 Table 4.1과 같다.

Table 4.1 Soil Conversion Coefficient(L)

Section	Loosed Condition (m ³)	Natural Condition (m ³)	Soil Conversion Coefficient (L)
A	22.328	13.134	1.70
B	32.142	23.354	1.38
C	28.735	16.706	1.72
D	28.915	16.523	1.75
E	28.580	21.076	1.69
F	35.619	24.763	1.44
G	28.999	21.201	1.37
H	29.306	20.875	1.40
I	31.522	18.220	1.73
J	23.329	16.545	1.41
Average			1.56

5. 결 론

수치사진측량을 이용하여 대상구간을 측량하여 굴착 전·후의 체적을 결정하고 이렇게 결정된 체적을 이용하여 토량환산계수를 산정한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 다중영상표정과 광속조정법에 의해 결정된 대상물 3차원 좌표의 정확도를 분석하기 위해 대상구간 40개소에 있어서 기준점의 잔차에 대한 RMSE를 산정한 결과, X방향으로 1.085mm~4.512 mm, Y방향으로 1.058mm ~4.440mm, Z방향으로 1.213mm~4.441mm의 RMSE 분포를 나타내었다.
2. 이렇게 취득된 3차원 좌표를 이용하여 결정된 체적을 검증하기 위해 토탈스테이션에 의한 방법과 수치사진측량기법에 의한 결과, 교차에 대한 상대정확도는 평균 0.5%로 산출되었다.
3. 수치사진측량을 이용하여 토량환산계수를 구하기 위하여 대규모 현장 시험을 한 결과 암반(보통암)의 토량환산계수(L)는 1.37~1.75 범위로 나타났다.
4. 수치사진측량기법에 의한 결과와 3D 레이저 스캐너에 의한 방법의 결과를 상호검증하기 위해 각 대상구간에 있어서 교차에 대한 상대정확도로 분석하였다. 분석결과, 교차에 대한 상대정확도는 평균 0.92%로 산출되었다. 이러한 결과는 불규칙하게 변화하는 지형에 있어서 정확한 체적산정을 위한 수치사진측량기법의 활용도를 보여주고 있으며, 향후 3D 레이저 스캐너 등과 같은 최첨단 장비와의 연계를 고려한 연

구가 지속될 경우, 토목공사에 있어서 공사물량 산정을 보다 과학적이고 효율적으로 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Clive S. Fraser, "Digital camera self-calibration", ISPRS Journal and Photogrammetry and Remoting, Volume 52, pp.149-159, 1997.
2. Clive S. Fraser, "Automated Processes in Digital Photogrammetric Calibration, Orientation , and Triangulation", DIGITAL SIGNAL PROCESSING 8, pp.277-283, 1998.
3. Clive S. Fraser, "Full Automation of Sensor Calibration, Exterior Orientation and Triangulation in Industrial Vision Metrology", International Workshop on Image analysis and Information Fusion, 1995.
4. Clive S. Fraser, K.L.Edmundson, "The Metric Impact of Reduction Optics in Digital Camera", Photogrammetric Record, 1996.
5. Hans-Gerd Mass, "Concepts of real-time photogrammetry", Human Movement Science, Volume 16, Issues 2-3, pp.189-199, 1997.
6. Steven A. Sader and J. Chris Winne, "Digital Image Analysis Hardware/Software Use at U.S Forestry Schools", PE&RS, Vol. 57, No.2. pp.209-211, 1991.
7. A Stefanidis, P.Agouris, A.F.Schenk, "Evaluation of the Performance of a Digital Camera", Technical papers of 1990 ACSM/ASPRS annual Convention, Vol.5, pp.109-118, 1990.
8. Bahadır Ergün, S tk K l r, "3D Modelling of car surface by means

- of digital photogrammetric methods", Third-Turkish German Joint Geodetic Days, pp.455-460, Istanbul, 1999.
9. Christian Heipke, "Automation of Interior, Relative, and Absolute Orientation", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 52, pp.1-19, 1997.
 10. J.C.Trinder, "Precision of Digital Target Location", PE&RS, Vol.55, No.6, pp.883-886, 1989.
 11. S.F.EL-Hakim, "Real-Time Image Metrology with CCD Cameras", PE &RS, Vol.52, pp.1757-1766, 1986.
 12. S.F.EL-Hakim, Nicolino J. Pizzi, "Multicamera Vision-Based Approach to Flexible Feature Measurement for Inspection and Reverse Engineering", Optical Engineering, Vol.32, No.9, pp.2201 -2215, 1993.
 13. Horst A. Beyer, "Automated dimensional inspection with real-time photogrammetry", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 50, pp.20-26, 1995.
 14. Horst A. Beyer, "Geometric and radiometric Analysis of a CCD Camera Based Photogrammetric Close-Range System", Zurich, 1992.
 15. Klaus Hanke, Mostafa A. Ebrahim, "The Digital Projector Ray-tracing as a tool for close-range photogrammetry", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 54, pp.35-40, 1999.
 16. M. Pollefeys, R. Koch, M.Vergauwen, L. Van Gool, "Automated reconstruction of 3D scenes from sequences of images", ISPRS

Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 55
pp.251-267, 2000.

17. T.A. Clarke, "An analysis of the prospects for digital close-range photogrammetry", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 50, pp.4-7, 1995
18. X.Wang, T.A. Clarke, "Separate adjustment in close-range photogrammetry", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 55, pp.289-298, 2001.
19. Shortis, M.R., Clarke, T.A. and Robson, S, "Practical testing of the Precision and Accuracy of Target Image Centering Algorithms", Videometrics IV, SPIE, Vol.2598, pp.65-76, 1995.
20. S. Robson, T.A. Clarke, and J. chen, "The Suitability of the Pulnix CCD Camera for Photogrammetric Measurement", SPIE Videometrics II, Vol.2067, pp.66-77, 1993.
21. 유복모, "항공삼각측량에 있어서 독립모델의 연구", 대한토목학회 창립20주년 기념논문집, pp.222-229, 1972.
22. 박운용, "사진측량에 의한 사면해석에 관한 연구", 박사학위논문, 동아대학교 대학원, 1982.
23. 양인태, "경사사진에 의한 해석적 위치결정에 관한 연구", 박사학위논문, 연세대학교 대학원, 1984.
24. 강준문, "다중근거리 사진측정에 의한 피사체의 3차원 정밀해석에 관한 연구", 박사학위논문, 연세대학교 대학원, 1985.

25. 이재기, “비측정용사진에 의한 좌표해석”, 박사학위논문, 연세대학교 대학원, 1986.
26. 강인준, “지상사진측량에 있어서 블록조정법을 이용한 기준점 결정에 관한 연구”, 박사학위논문, 연세대학교 대학원, 1986.
27. 박흥기, “사진측량관측값의 과대오차조정에 관한 연구”, 박사학위논문, 연세대학교 대학원, 1987.
28. 유환희, “근거리 사진측량에 의한 변형해석의 연구”, 박사학위논문, 연세대학교 대학원, 1988.
29. 이종출, “근거리 사진측량에 의한 지형의 3차원 위치해석에 관한 연구”, 박사학위논문, 동아대학교 대학원, 1989.
30. 손덕재, “지상사진의 촬영방향과 수렴각 변화에 따른 공간좌표해석”, 박사학위논문, 연세대학교 대학원, 1989.
31. 이진덕, “다중근접사진측량에 의한 구조물 전면의 3차원 해석”, 박사학위논문, 충남대학교 대학원, 1992.
32. 한승희, 강준묵, “3차원 측량을 위한 Digital Image의 영상좌표 획득에 관한 연구”, 대한토목학회 논문집, 제15권 제6호, pp.1721-1730, 1995.
33. 유환희, 김의명, “수치사진측량기법을 이용한 실시간 매핑 S/W 개발”, 대한토목학회 논문집, 제16권 제Ⅲ-1호, pp.37-45. 1996.
34. 신봉호, 엄재구, 양승용, 송왕재, “구조물의 변형측정을 위한 수치영상의 정확도 향상”, 대한토목학회 논문집, 제19권 제Ⅲ-4호, pp.677-685, 1999.

35. 한승희, “구조물 변형측정을 위한 지상사진측량의 기법개발”, 박사학위논문, 충남대학교 대학원, 1993.
36. 유복모, 윤용택, 이현직, “사진측량을 이용한 토공량 결정에 관한 연구”, 한국측량학회, 제8권 제1호, pp.41-50, 1990.
37. 문일석, 전재홍, 조규전, “DTM에서 토공량의 산정방식에 따른 정확도 비교”, 한국측량학회, 제13권 제2호, pp.277-283, 1995.
38. 배상호, “구조물 변위해석을 위한 사진측량의 컴포넌트 개발”, 박사학위논문, 충남대학교 대학원, 2000.
39. 배상호, “근접사진측량에 의한 교량의 변형해석에 관한 연구”, 석사학위논문, 충남대학교 대학원, 1994.
40. 김성민, “수치화상을 이용한 근접사진측량 시스템의 수행성 평가”, 석사학위논문, 금오공과대학교 대학원, 1996.
41. 박경식, “CCD 카메라에 의한 동적 대상물의 상좌표 실시간 취득”, 석사학위논문, 충북대학교 대학원, 1997.
42. 이석균, “CCD 사진기와 객체지향기법을 이용한 근거리 수치사진측량에 관한 연구”, 박사학위논문, 연세대학교 대학원, 1998.
43. 이효성, “수치근접사진측량에 의한 조경석의 표면거칠기 정밀측정”, 박사학위논문, 경상대학교 대학원, 2000.
44. 이칠우, “수치사진측량을 이용한 Fender의 3차원 수치모형생성”, 석사학위논문, 충북대학교 대학원, 2000.
45. 이재원, 홍순현, 김정희, 정공운, “근거리 수치사진측량을 이용한 국부

- 지형모형의 생성” 한국측량학회지, 제21권 제2호, pp.147-154, 2003.
46. 日本測量協會, “現代測量學 VII”, “寫眞測量 II”, 社團法人 日本測量協會, pp.235~301, 1981.
 47. Pratt, W.K., "Digital Image Processing", 2nd ed, Wiley Interscience, pp.477-662, 1991.
 48. H.M. Karara, "Hand Book of Non-Topographic Photogrammetry", A, S, P, pp.29-38, pp.75-96, 1979.
 49. K. B. Atkinson, "Development in Close-Range Photogrammetry-1", Applied Science Publishers LTD, pp.1-13, pp.25-31, pp.63-81, 1980.
 50. 고지훈, 서영찬, “이미지프로세싱을 이용한 도로포장의 균열폭 측정에 관한 연구”, 한국도로포장공학회논문집, 제4권 제2호, pp.33-42, 2002.
 51. 김정용, 조윤희, “이미지프로세싱기법을 이용한 균열인식 알고리즘 및 프로그램 개발”, 대한토목학회논문집, 제22권 제4-D호, pp.639-647, 2002.
 52. 장호식, “무선조정헬리콥터 사진측량시스템을 이용한 문화재관리 정보 시스템 구축”, 박사학위논문, 부경대학교 대학원, 2004.
 53. 材井後治, “寫眞測量 とリモートセソシソグ”, ISP特集號, pp.61~71, 1980.

감사의 글

달려가는 용기와 쫓기는 불안감이 서로 엉켜 늡다하면 늡은 나이에 설레임과 두려움으로 캠퍼스에 들어선지 엇그제 같은데 벌써 2년 6개월이란 세월이 흘러 그간 많은 도움을 받은 분들에게 감사의 뜻을 전하고자하니 맘 한 곳 쨍한 감회가 와 닿습니다.

그간 부족한 저에게 많은 지식과 깊은 학문으로 가르쳐주시고 논문의 완성을 지도해주신 이종출 지도교수님께 머리 숙여 감사드립니다.

또한 바쁘신 중에도 논문의 알찬 결실을 위해 도와주시고 심사해주신 김종수 교수님, 김수용 교수님께도 깊이 감사드립니다.

대학원의 생활과 논문의 준비, 발표요령 등 많은 지혜와 정보, 생활에 불편함이 없도록 도와준 서동주 박사, 노태호 박사, 장호식 박사, 김진수 선생, 강운성 학우 등 실험을 도와준 여러 연구생께도 감사하다는 말 전합니다.

또한 이렇게 대학원을 마감하기까지 많은 용기와 변함없는 사랑으로 인도해 준 차성렬 교수님께도 깊이 감사하다는 말 전해드리며 당신들이 있었기에 함께한 시간들이 즐거웠던 노수상 과장, 김문수 상무, 김동락 이사 같이 고생하며 담소하던 김명준 학우, 배재열 학우에게도 감사하다는 말 잊지 않으며 회사를 잘 이끌어준 배성근 사장께도 감사드립니다.

어느 밤늦은 귀가에 회사·집안일도 벅찬데 학교까지 다니며 바쁘게 생활하는 아들을 보며 눈물을 글썽이고 애태우시던 어머니 정말 고맙습니다.

아울러 회사 학교생활로 가정에 소홀함이 많았던 지난시간 동반자 영미에게 사랑한다는 말 전하며 아들 형정이 건강하게 전역해서 고맙고 딸 유정이 명랑한 성격과 모습이 참 좋으며, 조카 형도도 어른스럽게 성장한 너의 모습이 너무 대견스럽고 고맙다.

끝으로 후배들의 알찬 결실과 인격체로 거듭나게 도와주시는 도우회 김
중원 회장님 외 여러 회원께 감사의 뜻을 전하며 도우회 회원 여러분의
건강과 발전, 즐거운 인생만이 동행하시길 기원합니다.

2005년 7월

이 상 기 올림