

多重近接寫眞測量에 의한 構造物 内部全面的 3次元 解析 Three Dimensional Analysis of the Whole Interior-Surface of Structures by Multiple Close-Range Photogrammetry

李鎭德* · 姜準默**

Lee Jin-Duk · Kang Joon-Mook

요 지

비지형대상물의 全面解析을 위한 多重地點 寫眞測量網의 設計에는 촬영점의 기하학적 배치, 영상의 기하학적 조건, 기준점 배치 및 조정의 경중률 등 많은 문제들이 복합적으로 포함되어야 하며, 특히 좁고 긴 구조물의 내부를 측량할 경우에는 특수한 사진측량망을 필요로 한다.

본 연구에서는 구조물 내부의 全面解析에 수반되는 주요 難點들의 해결안을 제시하고 결과의 정확도 및 신뢰도의 향상을 기하고자 하였다. 이를 위해 내부의 형상과 크기에 적합한 다중사진측량망을 구성하고 光束調整法에 의하여 3차원 자료를 취득, 網의 구성요소에 따른 정확도에 미치는 영향을 고찰하였다. 아울러 본 연구에서 개발된 過大誤差의 檢出演算法은 사진측량 解의 신뢰도 향상에 그 활용이 기대된다.

ABSTRACT

In analyzing whole surface of non-topographic objects, the design of multi-station photogrammetric network must involve a number of questions such as geometric configuration of exposure stations, imaging geometry, control point configuration or weight allowance of adjustments. Above all, the surveying of the interior of narrow longitudinal structures needs the design of special photogrammetric network.

The main objective of this paper is to suggest the schemes for solving difficult problems attendant upon whole inside-surface analysis of structure and to improve the accuracy and reliability of final measurements. For it, the multi-station exposure network suitable to shape and size of the inside of the structure was designed. Then three dimensional data were acquired by bundle adjustments derived from multi-station photos and the effects of network design factors on accuracy of measurements were contemplated. Also, the algorithm for detection of blunders was developed here is expected to lead to improvement of the reliability of photogrammetric solutions.

1. 序 論

近接寫眞測量은 대상물의 형상해석, 구조물의 변위 및 거동 관찰 등 정밀측정을 요하는 산업 각 분야에 효율적인 기법으로 개발, 이용되어 왔으며 調整理論의 엄밀한 적용으로 像들의 同時標定技法이 발달함에 따라 정확도가 더욱 증가하게 되었다. 해석적 사진측량의 산업에의 적용이 성공적이었던 중요한 이유 중의 하나는 관측자료가 수치적 형태로 처리될 수

있다는 것이며 數值對象模型(DOM : digital object model)형태의 3차원 자료들은 CAD/CAM 체계의 입력을 위해 필요할 것이다. 해석적 사진측량이 실용화되면서 최근에는 근접사진측량의 정밀도와 신뢰도를 향상시키려는 노력이 진행되고 있고 측량용, 준측량용 및 비측량용 사진에 대한 非直結 및 直結 資料算出體系(off-line and on-line data reduction systems)를 향상시키려는 연구 등이 지속적으로 이루어지고 있다.¹⁾

非地形 對象物에 대한 全面解析을 소요 정확도에 따라 경제적으로 수행하려면 우선 대상물의 형상과 크기에 적합한 多重地點 寫眞測量網을 구성하여야

*金鳥工科大學校 土木工學科 助教授

**忠南大學校 工科大學校 土木工學科 教授

한다. 종래의 圖解的 寫眞測量의 경우와 달리 多重地點과 복잡한 幾何學的 映像條件(imaging geometry)을 포함하는 網設計에는 촬영지점, 기준점 배치, 사진매수, 深度, 標識의 크기와 형태 등 많은 문제들이 복합적으로 고려되어야 한다.²⁾ Grafarend가 제안한 사진측량망 설계문제의 4단계 분류안은 널리 인정되고 있으며, 이에 의거하여 Fraser는 非地形 寫眞測量의 最適網 設計理論을 정립하고 simulation을 통하여 각 단계별 최적화를 시도하였다. 비지형 사진측량의 망설계 최적화 과정에서는 실제적인 경우 基準系 設定과 配置 設計의 단계만이 상세히 고려될 필요가 있다.^{1,2)}

구조물의 내부관측시 주요한 문제 중의 하나가 터널, 복도, 아케이드, 지하통로 등과 같이 비교적 폭이 좁고 긴 구간의 측량이다. 한정된 내부공간에서는 직교촬영(normal case)이 이용될 수도 있으나 소요 사진매수가 많아지게 되고 특히 촬영지점간을 잇는 基線이 구조물의 축을 가로지르기에 불충분한 공간인 경우에 一點多方向 攝影網 또는 특수한 平行攝影網을 적용한다면 이러한 문제를 극복할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 근접사진측량에 의한 구조물 내부의 全面解析을 위하여 武寧王陵을 관측대상으로 하여 光束調整法을 이용한 内部全面의 同時解析을 시도하고 網의 구성요소에 따른 정확도 특성을 고찰하고자 한다. 좁고 긴 내부공간에서 수반되는 기준점측량의 난제를 극복하고자 기준점 배치유형 및 기준점수에 따른 해석의 정확도 특성을 究明하고 기준점수 확장의 적용타당성을 검토하고자 한다. 아울러 내부공간의 단면적 및 체적 산정, 벽면의 경사도 해석 등 후속적인 자료처리를 효율적으로 수행하고자 한다.

또한 F 검정과 χ^2 검정에 의한 global test를 실시하여 전체적인 조정결과와 신뢰성을 검정하고 data snooping과 τ 검정에 의한 local test를 통하여 사진좌표에 내포된 過大誤差를 효율적으로 검출하는 演算法(algorithm)을 구성하여 이의 적용타당성을 검토하고자 한다.

2. 過大誤差 檢出을 위한 演算法 定立 및 適用

최소제곱법에 의하여 얻어진 조정값들에 대하여 통상의 有意水準에서 실시하는 F 검정이나 χ^2 검정

만으로는 過大誤差의 존재여부를 명확히 檢出할 수 없으므로 global test의 결과에 관계없이 local test를 실시하여야 한다.⁶⁾ 본 연구에서는 사진좌표 관측자료에 내포된 과대오차를 효율적으로 검출할 수 있는 演算法을 개발하였다. 이를 光束調整法 프로그램에 연계시켜 模擬觀測을 통하여 이의 적용타당성을 검토하고자 하였다.

2.1 過大誤差 檢定技法에 대한 考察

사진좌표 관측자료에 내포된 과대오차의 검출을 위한 검정기법으로는 Baarda에 의해 개발된 data snooping 기법과 Pope에 의해 개발된 τ 검정법, Wilke에 의해 사진측량의 오차검출에 도입된 robust 추정법 등이 있다.

2.1.1 data Snooping 기법

이 기법으로 본질적으로 觀測값의 標準化된 殘差에 대한 統計檢定을 수행하는 것으로서 소요되는 조건은 모든 관측값의 分散을 사전에 알아야만 한다는 것이며 한번에 한 관측값만을 검정한다. 檢定統計量 模型은 다음과 같다.

$$W_i = \frac{V_i}{\hat{\sigma}_0(Q_{vivi})^{1/2}} \quad (1)$$

여기서 V_i : i번째 觀測값의 殘差

$\hat{\sigma}_0$: 事前標準偏差

Q_{vivi} : 殘差의 分散-共分散行列의 i번째 대각선요소

臨界값 W_c 는 (2)식으로부터 결정된다.

$$W_c = \sqrt{F(1-\alpha), 1, \infty} \quad (2)$$

여기서 F는 有意水準 α 에서 F 분포표를 의미하며, Baarda는 α 에 대한 값으로 0.001(이때의 W_c 값은 3.29)을 제안하였다. 즉, 최소제곱법의 조정을 통하여 산출된 事後分散을 事前分散과 비교하고 F 검정에 기초한 한계값 이내로 수렴되지 않는 경우 관측값내에 과대오차가 있다고 간주하여 각각의 관측값에 대한 檢定統計를 W_i 가 3.29를 초과하는 殘差를 나타낸 관측값을 과대오차를 취급한다.

2.1.2 tau 검정법

이 기법은 t 분포표에서 유도된 τ 분포에 기초하고

Table 1. Critical values of Barrda's data snooping vs significance level

α	$1-\alpha$	W_c
0.05	0.95	1.96
0.01	0.99	2.56
0.001	0.999	3.29
0.0001	0.9999	3.88

檢定統計量은 事前分散 대신 事後分散을 이용하며 data snooping 기법과 유사하게 계산한다. 檢定統計量 模型은 다음과 같다.

$$\tau_i = \frac{V_i}{\sigma_o \sqrt{Q_{vivi}}} \quad (3)$$

여기서 V_i : i 번째 관측값의 殘差
 σ_o : 事後標準偏差
 Q_{vivi} : 殘差의 分散-共分散行列의 i 번째 대각선요소

과대오차의 검출은 data snooping 기법과 유사하게 처리되며 Q_v 의 대각선 밖의 요소는 相關性이 높은 殘差를 해석하고 검토하는데 사용될 수 있다.

2.2 統計的 檢定技法의 選定과 演算法

본 연구에서는 光束調整法을 행하여 반복 계산을 통해 산출된 事後分散과 事前分散을 F test로 검정함과 동시에 $\Sigma^T P V$ 와 事前分散으로부터 χ^2 검정을 실시하여 전체적인 조정결과의 신뢰성을 검정한다. 이와같이 global test를 실시한 후 local test를 실시하여 過大誤差를 검출할 수 있도록 演算法을 구성하였으며, 이때 local test로는 Barrda의 data snooping과 Pope의 τ 검정법을 적용하는 이중의 검정체계를 구성하였다.

두가지 檢定模型은 最小제곱법 조정결과인 각 관측값의 殘差 V_i 와 殘差의 標準誤差 σ_v 로 구성되며 臨界값과 비교하여 해당관측값의 棄却與否를 결정하게 된다. data snooping에서 檢定臨界값은 有意水準 α 에 따라 1, 2種 誤差의 採擇 혹은 棄却 確率로부터 결정되며 global test 및 local test를 위하여 본 연구에서 채택한 기준은 Table 1과 같다.

χ^2 검정에 의한 global test의 棄却水準은 有意水準

Table 2. Critical statistics test data obtained by Pope's tau subroutine

sample size (k)	DF=(k-u)	τ_c at significant level below			
		0.05	0.01	0.001	0.0001
204	72	1.4890	1.7038	2.1634	2.7894

*DF : degree of freedom

$\alpha=5\%$ 에서 관측수 204, 미지수의 수 132, 자유도 72인 경우의 χ^2 분포표로부터 $\Sigma^T P V / \sigma_o^2$ 의 臨界값을 $1-\alpha/2=97.5\%$ 일 때 48.7576, $\alpha/2=2.5\%$ 일 때 95.0231으로 설정하였다.

τ 검정의 臨界값은 Pope가 개발한 棄却水準 subroutine을 이용하여 구하였고 입력자료로는 관측값의 총수, 자유도, 선정된 1種 오차의 수준(有意水準)이다. 模擬觀測을 위하여 산출한 입력자료의 임계기준은 Table 2와 같다.

2.3 檢定戰略의 妥當性 檢證

본 演算法의 適用妥當性을 검증하기 위하여 武寧 王陵에서 촬영한 일부 3매의 사진관측자료를 이용하였다.

case I에 도입된 過大誤差의 數는 3개이고 case II는 과대오차가 4개로서 각각 그 크기를 10 v, 20 v, 30 v의 3종류로 나누고 사진좌표관측값의 輕重率($P_i=1/SD^2$; 여기서 SD는 사진좌표관측값의 事前標準偏差)을 변화시켜 가며 해석하였다. 과대오차가 도입된 관측값들에 대한 檢定統計量(V_i/σ_v)을 주시하면서 檢出力과 $\Sigma^T P V \approx 0$ 으로의 收斂過程을 고찰하였다.

또한 검출된 과대오차를 자료화일에서 삭제하지 않은 그대로 조정을 수행하여 事後標準誤差를 1.0에 접근시키는 과정에서 data snooping 및 τ 검정의 有意水準 α 에 대한 제2種 오차(정상적인 관측자료를 과대오차로 오인하는 오차)의 발생여부와 채택한계 등에 대한 고찰도 병행하였다.

case I, II에서 각각 12회씩의 조정을 통해 결과를 산출하였으며 여기서는 case I의 결과 중 그 일부를 Table 4, 5, 6에 제시하였다. 여기서 표본관측값의 수 $\# = 204$, 자유도 $DF = 72$ 이고 유의수준 $\alpha = 0.05$ 으로 하여 계산하였으며 이때의 임계값은 각각 $W_c = 1.96$, $\tau_c = 1.489$ 이다.

Table 3. The size of introduced blunders

photo No.	image pt No. & component	case I (3 pts)			case II (4 pts)		
		10 v	20 v	30 v	10 v	20 v	30 v
# 1	276 P _y	-0.025	-0.050	-0.075	-0.025	-0.050	-0.075
# 2	277 P _y	0.025	0.050	0.075	0.025	0.050	0.075
	283 P _x	-	-	-	0.022	0.044	0.066
# 3	247 P _x	-0.022	-0.044	-0.066	-0.022	-0.044	-0.066

*v: the residual of photocoordinate measurement in which blunders are not included.

Table 4. Output resulted from 10 v of blunder size in case I

photo No.	pt. No. & component	blunder size: 10 v				
		SD	0.0015	0.0020	0.0025	0.0030
1	276	$\frac{V}{\sigma_v}$	2.5608	3.4144	4.2680	5.1216
2	277		3.2981	4.3974	5.4968	6.5961
3	247		1.9765	2.6353	3.2941	3.9530
SEUW			2.1070	1.5800	1.2640	1.0530
ΣV^2PV			319.58	179.76	115.05	79.89

*SD: standard of deviation of photocoordinate measurements

*SEUW: standard error unit weight

Table 5. Output resulted from 20 v of blunder size in case I

photo No.	pt. No. & component	blunder size: 10 v				
		SD	0.0015	0.0035	0.0050	0.006
1	276	$\frac{V}{\sigma_v}$	2.8144	6.5670	9.3814	11.2577
2	277		3.5260	8.2273	11.7433	14.1040
3	247		2.2003	5.1340	7.3343	8.8011
SEUW			4.3430	1.8610	1.3030	1.0860
ΣV^2PV			1357.80	249.39	122.20	84.863

2.3.1 寫眞座標觀測의 輕重率變化에 따른 檢定力考察

사진좌표관측의 事前標準偏差(SD)가 증가함에 따라 單位輕重率 標準誤差 σ_0 는 1.0에 접근되었으며 이때

Table 6. Output resulted from 30 v of blunder size in case I

photo No.	pt. No. & component	blunder size: 10 v				
		SD	0.0015	0.0030	0.0070	0.0095
1	276	$\frac{V}{\sigma_v}$	2.8652	5.7305	13.3711	18.1465
2	277		3.5634	7.1268	16.6291	22.5681
3	247		2.2596	4.5193	10.5450	14.3111
SEUW			6.6390	3.3200	1.4230	1.0480
ΣV^2PV			3173.97	793.49	145.74	79.130

ΣV^2PV 값도 최소제곱법의 기본원리에 따라 점차 최소화되는 경향을 나타내었다. 특히 오차의 크기에 관계없이 0.0015 mm에서 0.003 mm 범위의 事前標準偏差를 적용하였을 경우 제 2종 오차의 발생률이 0%로서 완벽한 검출이 이루어졌다.

2.3.2. 過大誤差의 크기에 따른 檢定力 考察

과대오차의 크기를 10 v, 20 v, 30 v로 점차 증가시키면서 사진좌표관측의 事前標準偏差를 증가시켜 σ_0 의 값을 1.0에 접근시켰을 경우 제 2종 오차의 발생률은 case I, II에서 공히 10 v까지는 없었고 20 v, 30 v에서 점차 증가되었으며, 이는 case I에 비해 과대오차의 수가 많은 case II에서 높게 나타났다.

2.3.3 도입된 過大誤差의 數에 따른 檢定力 考察

檢定統計를 $|V/\sigma_v|$ 의 값은 3개의 과대오차가 도입된 case I보다는 4개의 과대오차가 도입된 case II에서 작게 나타났다. 또한 오차의 크기나 도입갯수에 관계없이 σ_0 가 1.0에 접근되는 경우 global test(χ^2 및 F 검정)에서는 채택되었지만 이때의 輕重率은 매우

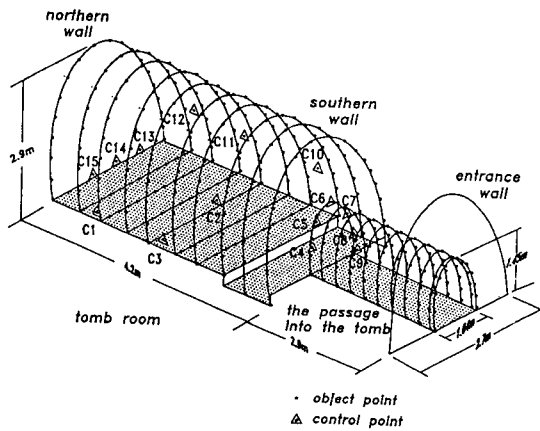


Fig. 1. Target array for analyzing the interior of Mun-yung King's tomb.

낮으며, 특히 본 검정에 이용한 演算法으로 local test를 실시한 결과 다수의 과대오차를 검출할 수 있었고 최소제곱법의 오차분배 효과에 따른 제2종 오차의 발생빈도도 좀더 높아짐을 확인할 수 있었다. 따라서 global test의 채택 여부에 관계없이 반드시 輕重率과의 연관성을 갖고 local test를 실시하여야 함을 확인할 수 있었다.

2.3.4. 有意水準에 따른 檢定力 考察

case I의 경우 10 v까지는 $\alpha=5\%$ 의 有意水準일 때 data snooping과 τ 검정에서 모두 100%의 검출이 이루어졌다. 20 v에서도 data snooping에 의한 검출은 $\alpha=5\%$ 에서 100%로 나타났으나 τ 검정은 제2종 오차의 발생가능성으로 인해 $\alpha=1\%$ 에서 100%의 檢定力을 나타내었다. 그러나 30 v의 경우 data snooping은 1%의 有意水準에서, τ 검정은 0.01%의 有意水準에서 제2종 오차의 발생없이 100% 검출이 가능하였다. case II의 경우도 case I의 경우와 유사한 양상을 나타내었고 각 경우에서 반복계산의 수는 有意水準이 증가함에 따라 점차 증가하였다.

본 연구에서 설정한 검정전략의 적용을 통하여 과대오차의 크기 및 수, 사진좌표관측의 輕重率, 有意水準을 다양하게 변화시켜 가면서 과대오차의 검출 특성을 고찰함으로써 효율적인 多重過大誤差 檢出戰略을 설정할 수 있었다.

3. 構造物의 内部 全面解析

3.1 資料 取得

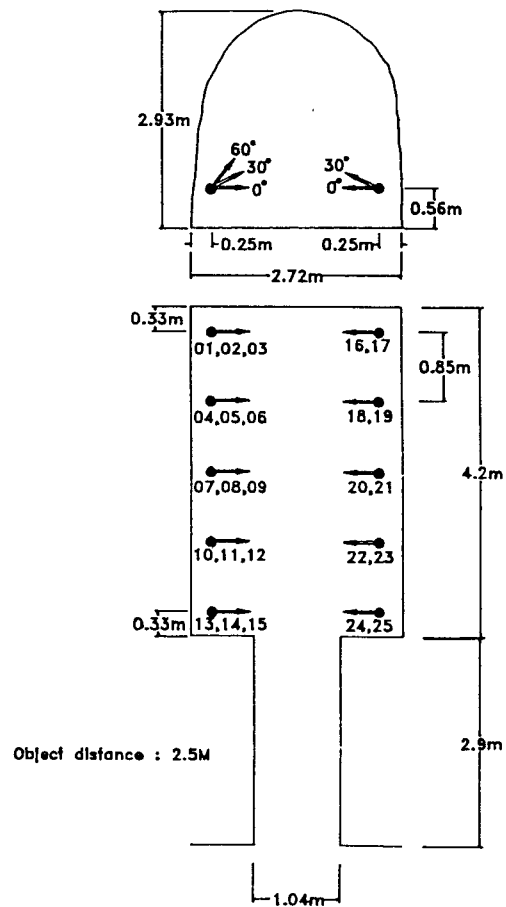


Fig. 2. Two or three direction photographing case.

3.1.1 網 構成 및 撮影

武寧王陵 内部는 羨道(폭 1.04 m, 길이 2.9 m, 높이 1.45 m)와 墓室(폭 2.7 m, 길이 4.2 m, 높이 2.9 m)로 이루어져 있다. 아아치形 内部 全壁面に 대략 균등한 간격으로 400여점의 對象點 및 15점의 水準點을 배치하였다.

Fig. 2, 3에 도시한 바와 같이 42개의 撮影點을 갖도록 撮影網을 계획하여 解析的 縱接合模型 또는 縱橫接合模型의 형성을 통하여 内部全面을 동시 해석할 수 있도록 하였다. 墓室部의 아아치형 천정 및 양측벽을 피복하마에 있어서 Fig. 2의 #01~#25로써 나타낸 바와 같이 촬영거리 약 2.5 m에서 橫으로 약 30%의 橫重複度를 주어 1點 2方向, 또는 1點 3方向 撮影網을 구성하였고, 縱방향으로는 인접사진간에 약 60%의 縱重複度를 갖도록 하였다.

Fig. 3의 #26~#29는 촬영거리 약 4.0 m의 직각

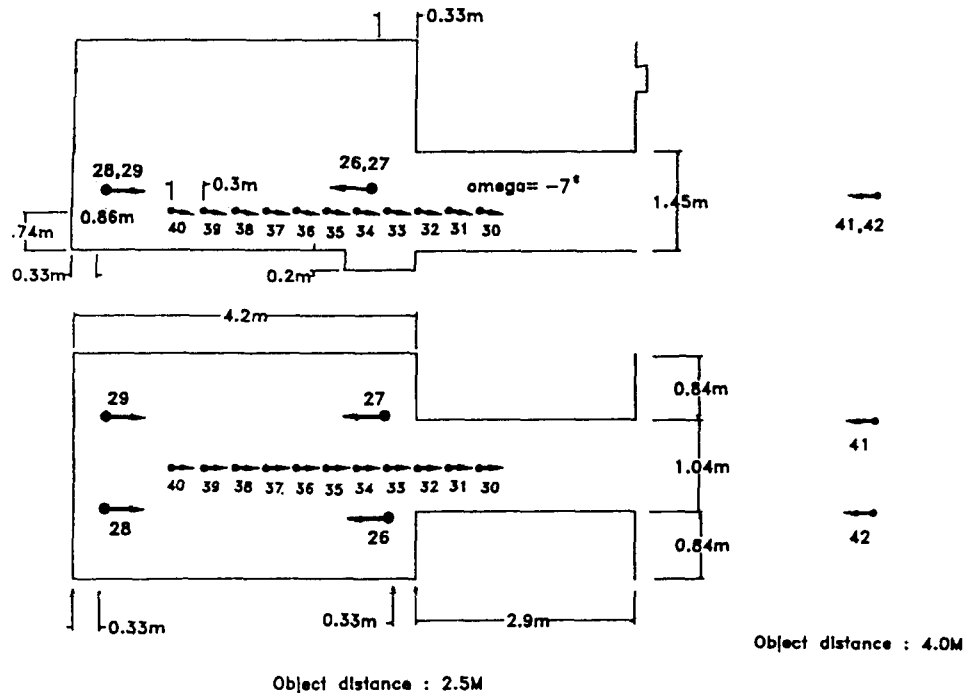


Fig. 3. Normal case and parallel case.

수평촬영지점들로서 墓室 北壁과 南壁을 각각 2매의 사진으로 중복될 수 있도록 하였다. 羨道部는 #30~#40으로 나타난 바와 같이 평행촬영의 극단적인 경우(偏角 0° , 또는 180°)를 도입, 인접사진간 약 70%의 縱重複度로 피복되도록 하여 비교적 좁고 긴 虹霓廊 구간에서 單一縱接合模型에 의한 해석을 할 수 있도록 撮影網을 계획하여 해석을 위한 사진매수의 최소화를 도모하였다. 이때 P31 지상측량용 사진기의 被寫角 특성(橫指標연결선을 기준으로 상부 30° , 하부 15° 의 被寫角)을 고려하여 하향 7g의 경사로 촬영하였다. 羨道入口壁 역시 2매의 직각수평촬영(#41, #42)을 통하여 피복시켰다. 모든 촬영조건은 F-stop 22, 散亂圓의 직경 $30\ \mu\text{m}$ 로 하여 深度를 충분히 고려해주었다.

墓室 내부에 사변형을 구성하여 이 4개 지점에 데오들라이트를 설치, 삼각측량으로 네 벽면에 배치한 15개 기준점들의 평면위치 및 높이를 관측하고 이들 좌표값들을 동일좌표계로 변환해 주었다.

3.1.2 座標 解析

光束調整法에 의한 좌표계산을 위하여 多重地點에서 얻어진 각 사진의 外部標定媒介變數들의 초기근

사값 $\omega_i^0, \phi_i^0, \kappa_i^0, (X_i^0), (Y_i^0), (Z_i^0)$ 및 초점거리 f , 그리고 모든 像座標觀測값(x_{ij}, y_{ij})이 하나의 자료화일로 입력된다. 기준점 측량값(X, Y, Z) 및 대상점들의 대상공간좌표의 초기근사값(X_j^0, Y_j^0, Z_j^0)들이 다른 하나의 자료화일로 입력된다. 조정과정에서 3차원 座標系의 標定을 설정하는데 필요한 기준점들의 좌표는 X, Y, Z 방향에서 각각 $1\ \mu\text{m}$ 의 標準誤차를 갖는 것으로 간주되었고, 모든 사진좌표 x, y 에는 각각 $3\ \mu\text{m}$ 의 標準誤차의 推定값을 적용하여 輕重率을 산정할 수 있도록 하였다.

정규방정식의 최소제곱해는 Cholesky 分割法에 의해 外部標定媒介變數의 補正量 $\Delta\omega_i, \Delta\phi_i, \Delta\kappa_i, \Delta X_i^c, \Delta Y_i^c, \Delta Z_i^c$ 와 對象點들의 空間座標의 補正量 $\Delta X_j, \Delta Y_j, \Delta Z_j$ 이 미소한 양으로 무시될 수 있을 때까지 반복 계산된다. 이러한 과정을 통하여 각 사진당 모든 像座標들의 殘差(V_x, V_y), 각 사진의 外部標定媒介變數들의 最確값($\omega_i, \phi_i, \kappa_i, X_i^c, Y_i^c, Z_i^c$) 및 이들의 標準誤差($\sigma_\omega, \sigma_\phi, \sigma_\kappa, \sigma_{X_i^c}, \sigma_{Y_i^c}, \sigma_{Z_i^c}$). 대상점들의 3차원 좌표의 最確값(X_j, Y_j, Z_j) 및 이들의 標準誤差($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$), 계산의 신뢰도의 지표인 單位輕重率 標準誤差(σ_0) 등이 출력된다.

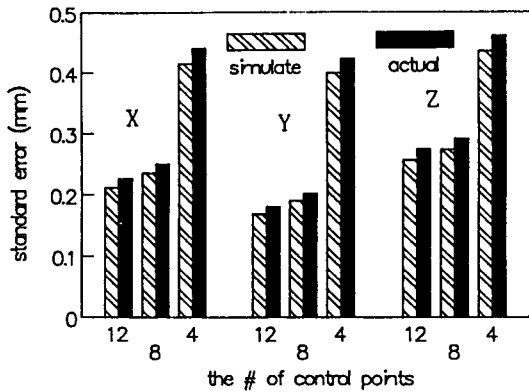


Fig. 4. Variation of standard error with the # of control points in analyzing the tomb room with twenty-nine photos.

3.2 資料處理값의 分析

모든 좌표들에 대한 標準誤差는 $\sigma_x = \sigma_0 \sqrt{(Q_{XIX})}$ 에 의하여 實測에 의한 標準誤差(actual standard error)와 幾何學的 標準誤差(simulated standard error)의 두가지 유형으로 계산하였다. 前者는 관측값과 수학적 모형 그 자체에 근거한 것으로서 계산된 대상좌표들의 信賴度의 指標이다. 즉 결정된 대상점좌표들의 불확실성을 반영한다. 後者는 사전에 既知값으로 주어진 사진좌표관측의 표준오차 추정값과 기하학적 촬영망에 입각한 수학적 모형의 模擬觀測에 근거한다.

3.2.1 基準點 數에 따른 標準誤差

Fig. 4는 墓室의 벽면과 천정에 일정간격으로 배치한 250개의 대상점을 29매의 사진에 의해 동시해석함에 있어서 네 벽면에서 3점씩 고르게 비치한 12개의 기준점으로부터 8개, 4개로 줄여가며 해석한 결과의 표준오차를 나타낸 것이다. 실측표준오차가 기하학적 표준오차에 일관성있게 접근하여 나타남으로써 본 관측의 신뢰성을 시사해준다.

8개의 기준점으로 해석한 경우 12개 기준점의 경우에 비해 각 방향의 관측표준오차는 6~12% 정도 미소하게 증가하였으나 네 벽면에서 1점씩 이용한 4개 기준점으로 해석한 경우 8개 기준점의 경우에 비하여 1.5~2배 정도 큰 폭으로 증가하였다. 소요 정확도에 따라 全 對象面에 적절한 수의 기준점을 균등하게 배치하는 것이 중요함을 알 수 있다.

3.2.2 基準點의 偏重配置에 의한 解析

入口壁을 포함한 羨道部를 동시 해석함에 있어서

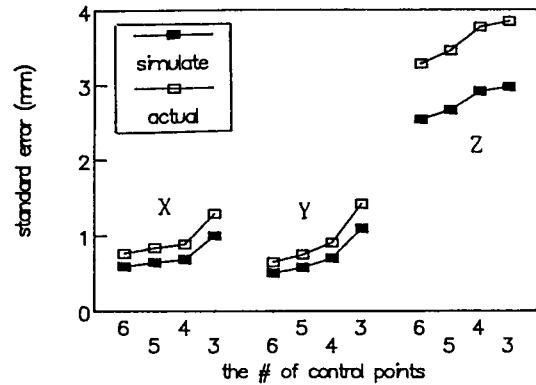


Fig. 5. Variation of standard error with the # of control points in analyzing the passage into the tomb on one-sided configuration of control points.

좁고 긴 羨道部에 대한 데오도라이트의 시준은 곤란하므로 이 부분에 기준점을 배치하는 것은 어려운 문제이다. Fig. 5는 13매 사진에 의해 羨道 및 入口壁의 150개 대상점을 해석한 결과로서 墓室南壁에만 偏重配置한 6개 기준점으로부터 한점씩 줄여가면서 해석하였을 때 기준점의 수에 따른 X, Y, Z좌표의 표준오차를 나타낸 것이다.

X, Y방향의 오차가 거의 유사한 분포를 보이고 있으나 Z방향에서는 X, Y방향에 비하여 3~4배 정도 높은 분포를 나타내고 있으며 이는 사용기준점들이 墓室 南壁에만 배치된 관계로 기준점들의 X, Y좌표가 다양한 반면, Z좌표값들은 거의 일정하기 때문인 것으로 思料된다. 기준점 수가 6개에서 5개로의 감소 구간과 5개에서 4개로의 감소구간에서는 X, Y, Z방향의 관측표준오차가 각각 5~10% 정도 미소하게 감소하다가 3점의 기준점으로 해석하였을 때 X, Y방향에서는 45~60% 정도 크게 감소한 반면, Z방향에서는 거의 변화가 없다.

3.2.3 基準點 數의 擴張에 의한 均等配置 解析

좁고 긴 羨道部 및 入口壁에 기준점을 배치할 수 없어 이로 인한 기준점의 편중배치의 단점을 보완하고 정확도를 향상시키기 위한 방법으로서 사진삼각측량에 의한 기준점수의 확장방법을 도입하였다. 편중배치한 기준점을 이용하여 이미 해석한 자료를 바탕으로 사진좌표의 殘差 및 3차원 좌표의 표준오차가 비교적 작게 나타난 일반대상점들 중에서 羨道部와 入口壁에

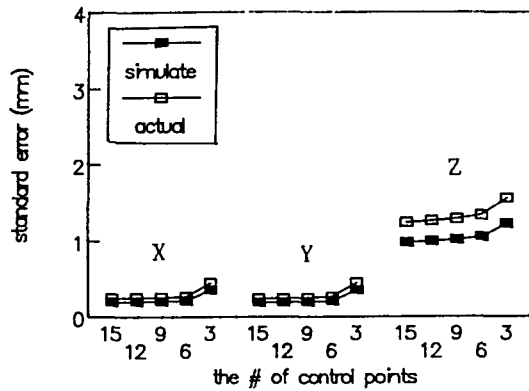


Fig. 6. Variation of positional standard error with the # of control points in analyzing the passage into the tomb on balanced configuration of control points.

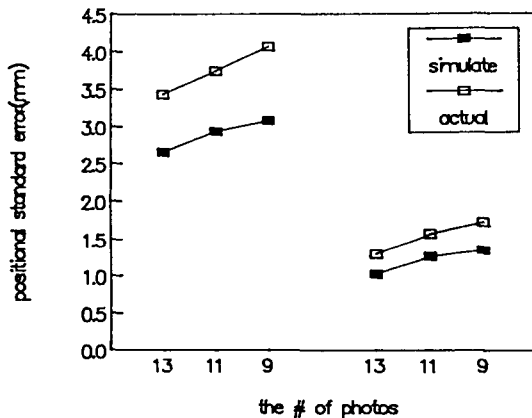


Fig. 7. Comparison of positional standard error in accordance with the # of photos between two types of control point configuration.

배치된 각각 5개씩 10개의 점들을 基準點化하였다.

Fig. 6은 墓室 南壁에 既配置된 5개의 기준점에 羨道部와 入口壁에 각각 5개씩 고른 분포로 확장시킨 10개의 점을 추가하여 도합 15개의 기준점으로부터 墓室 南壁 羨道部, 入口壁의 세 부분에서 각각 한점씩 순차적으로 줄여가면서 해석하였을 때 기준점수에 따른 표준오차를 나타낸 것이다. 6개 기준점까지는 기준점수가 정확도에 미치는 영향이 5% 전후로 미소한 반면, 6개 기준점에서 3개로 감소시켰을 때 관측표준차는 X, Y에서 각각 66%, 69% 정도 크게 증가하였고 Z방향에서는 16% 정도 증가하였다. 기준점

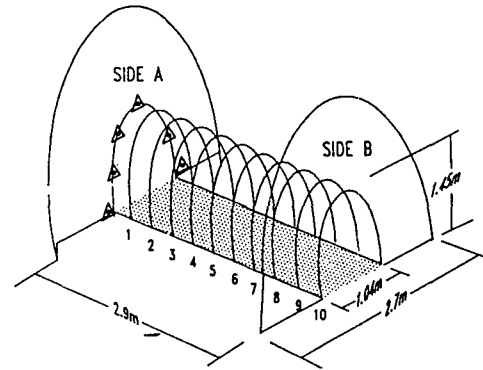


Fig. 8. Target arrangement for analyzing the passage into the tomb.

수의 확장을 통하여 균등하게 배치한 6개의 기준점을 이용한 경우가 편중배치한 동일 개수가 기준점들을 이용하여 해석한 경우에 비하여 X, Y, Z방향의 관측의 정확도가 각각 2.8배, 2.4배, 2.4배 정도 크게 향상되었고, 3개 기준점의 경우에서도 X, Y, Z방향의 관측 정확도가 각각 2.9배, 3.1배, 2.5배 정도 큰 폭으로 향상됨으로써 기준점수의 확장을 통한 균등재배치의 효용성을 입증해주고 있다.

3.2.4 寫眞枚數에 따른 標準誤差

Fig. 7은 墓室 南壁에만 편중배치한 6개 기준점을 이용하여 南壁과 羨道部 및 入口壁을 동시 해석한 경우, 그리고 墓室 南壁의 5개 기준점에 羨道部 및 入口壁에 균등하게 확장배치한 10개의 기준점을 추가한 도합 15개의 기준점을 이용하여 동시 해석한 경우로서 13매 사진으로부터 9매까지 2매씩 줄여가며 해석하였을 때 사진매수에 따른 位置誤差를 비교 도시한 것이다.

기준점을 편중배치한 경우가 균등배치한 경우에 비하여 각 사진매수에서 2.3~2.6배 정도 현저히 높은 분포를 보임으로써 균등배치의 적용타당성을 재입증해주고 있다.

3.2.5 基準點과 對象點간 거리에 따른 標準誤差

Fig. 8은 墓室 南壁(A)으로부터 羨道내 벽면에 통로 縱(Z)방향 약 30 cm 간격으로 아치벽면을 따라 11점씩 배치한 對象點群을 나타낸 것이다.

Fig. 9은 墓室 南壁(A)으로부터 對象點群까지의 거리에 따른 3차원 공간위치오차를 나타낸 것으로서 기준점배치의 두가지 유형을 비교도시하였다.

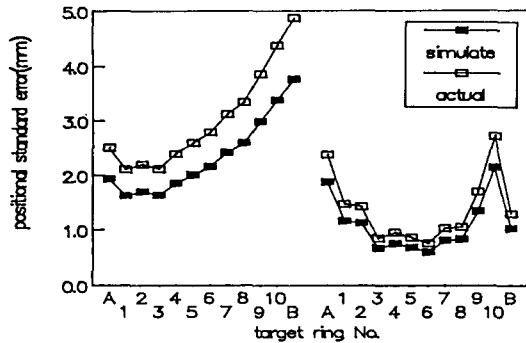


Fig. 9. Comparison of positional standard error in accordance with distance from side A between two types of control point configuration.

Table 7. Section area and volume of the interior of the tomb room

station No.	end area (mm ²)	section No.	avarage distance (mm)	volume (mm ³)
1	6,539,277.443	1~ 2	418.416	2,741,699,302
2	6,566,359.791	2~ 3	568.555	3,060,177,609
3	6,494,577.538	3~ 4	487.676	3,155,566,432
4	6,446,027.112	4~ 5	537.808	3,466,103,683
5	6,443,908.507	5~ 6	458.515	2,955,499,482
6	6,448,128.511	6~ 7	536.918	3,458,599,950
7	6,435,462,283	7~ 8	506.568	3,247,082,007
8	6,383,653,447	8~ 9	467.642	3,076,302,439
9	6,773,002.489	9~10	131.634	889,818,447
10	6,746,581.331	Total volume		26,050,849,350 mm ³ =26.051 m ³

A에서 No. 2까지의 구간에서 對象點群의 표준오차가 다소 불규칙하게 나타나는 것은 일반적으로 가장 양호한 深度범위가 촬영거리 전 1/3, 후 2/3지점인데 Fig. 3에 나타낸 #40 사진의 촬영거리를 對象點群(A)이 아닌 對象點群(1)에 맞추었기 때문이다. 기준점을 一面에만 편중배치한 경우 거리가 멀어질수록 표준오차가 점차 커지고 있으나 기준점을 균등하게 재배치한 경우 縱방향 거리의 영향이 제거되어 거의 평균화된 양상을 나타내었고 羨道の 중앙부인 No. 3~

Table 8. Section area and volume of the passage into the tomb

station No.	end area (mm ²)	section No.	avarage distance (mm)	volume (mm ³)
1	1,375,883.959	1~ 2	351.221	473,677,166
2	1,321,432.919	2~ 3	243.393	322,551,328
3	1,329,023.976	3~ 4	315.805	417,456,099
4	1,314,734.667	4~ 5	268.031	351,087,923
5	1,305,021.429	5~ 6	335.122	436,979,917
6	1,302,864.161	6~ 7	296.248	386,092,372
7	1,303,684.220	7~ 8	271.361	352,712,441
8	1,295,896.711	8~ 9	328.987	431,885,343
9	1,329,649.849	9~10	337.608	451,779,551
10	1,346,705.869	10~11	158.908	211,247,633
11	1,312,035.453	Total volume		3,835,469,773 mm ³ =3.835 m ³

No. 8의 구간에서 비교적 낮은 분포를 보였다.

3.2.6 内部空間의 斷面積 및 體積 算定

Table 7, 8은 해석된 대상점들의 3차원 좌표를 이용하여 墓室과 羨道部の 아이치형 단면적을 座標法에 의하여 계산하고 兩斷面平均法에 의해 墓室 및 羨道 내부공간의 체적을 산출한 결과이다.

3.2.7 壁面の 傾斜度 解析

구조물의 변형량은 주기적인 실측을 통하여 각 실측단계간의 X, Y, Z 각 방향의 座標差를 통하여 도출될 수 있으나 본 관측에서는 王陵이 축조되었을 당시 이 벽면이 수직이라는 가정하에 下端部の 한 점을 기준으로 한 Z좌표의 차를 變位量으로 간주하여 羨道 入口壁과 墓室 北壁에 대한 경사도를 도출하였다.

(1) 羨道 入口壁의 解析

Fig. 11의 (a), (b), (c)는 각각 Fig. 10의 arch I, II, III部에서 바닥면으로부터의 높이(Y)에 따른 표면기복(Z)을 下端部の 한 점을 기준으로 하여 나타낸 것이다. 여기서 Y는 실측 당시 설정한 座標系상에서 계산된 Y좌표를 바닥면을 기준으로 線形移動시킨 값이다. Z는 벽 하단부의 Z값을 동일한 값이 되도록,

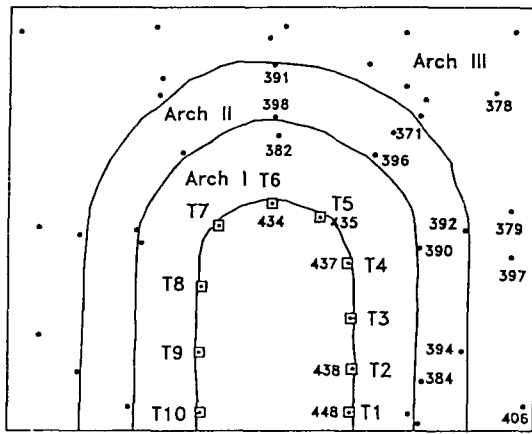


Fig. 10. Target arrangement on the wall of the passage entrance into the tomb And illustration of arch zones.

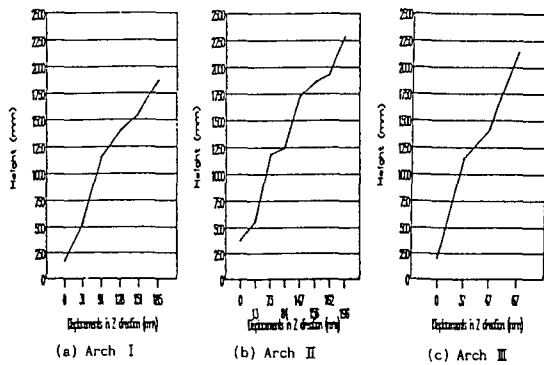


Fig. 11. Relief displacement (Z') in accordance with elevation (Y') from bottom in each zone of the wall of the passage entrance into the tomb.

즉 X축을 벽면과 평행하도록 해주기 위하여 Y축을 기준으로 하여 X, Z축을 회전변환시켜 얻어진 값이다.

arch I에서는 바닥면으로부터 높이 약 0.17 m 지점과 1.87 m 지점간의 Z' 좌표차가 185 mm로 나타났으므로 入口 外側으로 $6^{\circ}(6^{\circ}13'06'')$ 기울어져 있음을 알 수 있다. arch II에서는 바닥면으로부터 높이 0.38 m 지점과 높이 2.29 m 지점간의 Z' 좌표차가 196 mm를 나타냄으로써 外側으로 $6^{\circ}(5^{\circ}51'07'')$ 기울어져 있는 것으로 확인되었으며, arch III에서도 바닥면으로부터 높이 0.2 m 지점과 높이 2.14 m 지점간의 Z' 좌표차가 67 mm를 나타냄으로써 역시 外側으로 $2^{\circ}(1^{\circ}57'56'')$ 기울어져 있는 것으로 판단된다.

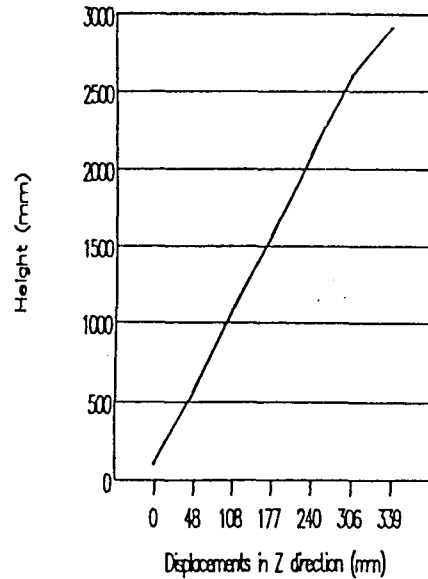


Fig. 12. Relief displacement (Z') in accordance with elevation (Y') from bottom in the northern wall of the tomb room.

(2) 墓室 北壁의 解析

Fig. 12는 墓室 北壁에 배치한 점들의 3차원 해석 결과를 기초로 하여 바닥면으로부터의 높이에 따른 점들의 Z좌표의 변화를 下端部の 한 점을 기준으로 하여 나타낸 것이다.

바닥면으로부터 높이 약 0.10 m 지점과 2.91 m 지점간의 Z' 좌표차가 338.87 mm로 나타남으로써 벽면이 內側으로 약 $7^{\circ}(6^{\circ}51'33'')$ 만큼 경사져 있음을 알 수 있다.

Fig. 13, 14는 벽면에 고르게 배치한 44개 점들의 좌표들을 자료로 하여 北壁의 표면기복상태를 각각 高等線圖와 3次元 模型으로 나타낸 것이다. 벽면상부로 갈수록 Z값이 점차 크게 나타남으로써 內측으로 점차 경사져 있음을 볼 수 있다.

5. 結 論

多重地點에서의 近接寫眞測量에 의한 구조물 내부의 全面解析에 있어서 光束調整法에 의해 3차원 자료를 산출, 寫眞測量網의 構成要素에 따른 標準誤차를 비교분석하고 過大誤差의 檢出演算法을 개발하여 이를 검증한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

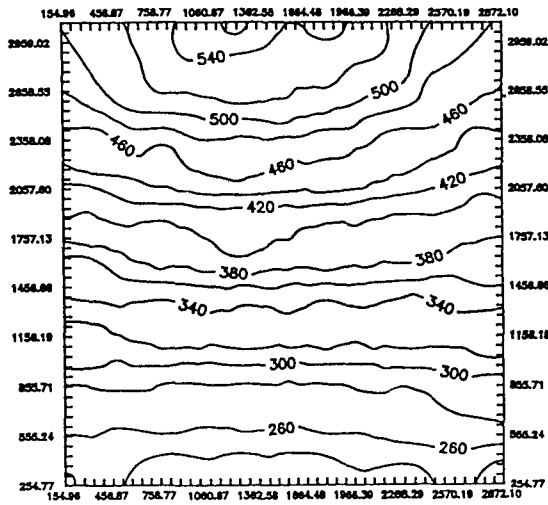


Fig. 13. Contour map of the northern wall of the tomb room.

(1) 사진좌표관측의 표준오차를 $3\mu\text{m}$ 로 주어 等輕重率을 부여하고 12개의 기준점을 균등배치하여 해석한 결과, 90% 이상의 신뢰성을 가지고 각각 $226\mu\text{m}$, $180\mu\text{m}$, $274\mu\text{m}$ 의 표준오차를 얻을 수 있었으므로 縱接合模型이나 縱橫接合模型의 형성을 통한 全面同時 解析의 可能性을 입증할 수 있었다.

(2) 한정된 지하공간에서 一點多方向 攝影網 및 특수한 平行攝影網(偏角 0° 또는 180°)을 적용함으로써 현저히 적은 사진매수로 構造物의 内部全面을 효율적으로 해석할 수 있었다.

(3) global test(F 검정, χ^2 검정)를 통하여 전체적인 조정결과의 신뢰성을 검정하고 local test(data snooping 기법, tau 검정)를 통하여 過大誤差를 檢出할 수 있는 演算法을 개발하고 이의 적용타당성을 입증함으로써 사진측량의 신뢰도 향상이 기대된다.

(4) 기준점의 균등한 배치가 이상적이지만 기준점 측량이 곤란한 구조물 내부의 좁고 긴 통로부에서는 국부적으로 배치된 少數의 基準點 測量成果를 바탕으로 하여 기준점수를 全面에 均등하게 확장배치해 줌으로써 정확도를 크게 향상시킬 수 있었다.

謝 辭

본 연구는 韓國科學財團의 1990~1992년도 目的基礎研究 支援에 의하여 수행된 것으로서 본 연구를

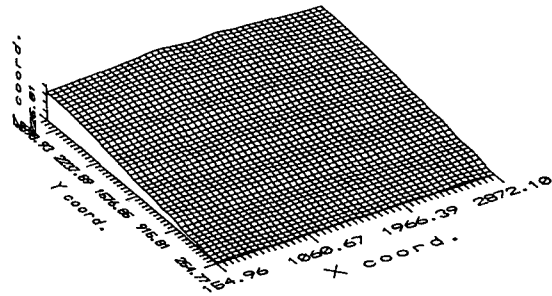


Fig. 14. 3-D model of the northern wall of the tomb room.

수행할 수 있도록 후원해준 韓國科學財團에 깊이 감사드립니다.

참고문헌

1. Karara, H.M., Non-Topographic Photogrammetry, 2nd ed., American Society for Photogrammetry & Remote Sensing, 1989.
2. Fraser, C.S., "Network Design Considerations for Non-Topographic Photogrammetry", Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 50, No. 8, pp. 1115-1126, 1984.
3. Ahmed, F.A., "A Parallel Case of Photogrammetry and its Application in Narrow Transits", Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 50, No. 10, pp. 1443-1448, 1984.
4. Hintz, R.J., Kang, Joon-Mook, and Oh, Won-Jin, "A Study on the Improvement of Accuracy for Deformation Measurement of Circular Structures by Multiple Method", Journal of the Korean society", Journal of the Korean Society of Geodesy, Photogrammetry, and Cartography, Vol. 6, No. 1, pp 13-24, 1988.
5. Granshaw, S.I., "Bundle Adjustment Method in Engineering Photogrammetry," Photogrammetric Record, Vol. 10, No. 56, pp. 181-207, 1980.
6. Chong, A.K., On the Detection of Multiple Functional and Non-functional Outliers in Photogrammetry, University of Washington, 298p, 1986.
7. Slama, C.C., editor, Manual of Photogrammetry, 4th Edition, American Society of Photogrammetry, pp. 48-101, 1980.
8. 李鎮德, 姜準默, "近接寫真測量的 網 構成이 3次元位置解析에 미치는 影響," 韓國測地學會誌, 제 8권, 제 1호, pp. 15-22, 1990.

9. El-Hakim, S.F., "Photogrammetric Measurement of Microwave Antennae," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 51, No. 10, pp. 1577-1581, (1985).
10. 문화재 관리국, 무령왕릉 발굴조사 보고서, 삼화출판사, 1973.