

비측량용 사진기를 이용한 사고현장 적용 해석에 관한 연구

A Study on the Analysis of Application of Non-metric Camera to Accident Sites

柳福模* · 金仁燮** · 曹基成***

Yeu, Bock Mo · Kim, In Sup · Cho, Gi Sung

Abstract

This study is about the analysis of the application of non-metric camera to accident sites and aims to present an efficient, an economical and an accurate method of processing accident sites. This was accomplished by observation and accuracy analysis of an experimental model.

It can be concluded that by applying the 3-D coordinate system and the bundle adjustment with additional parameters to non-metric cameras, it is possible to achieve an accuracy level of positional values which is similar to that achieved by conventional control surveying and by metric cameras. It was also found that the accuracy of absolute coordinates approached towards the accuracy of metric cameras with the increase of the film size and with the increase of the focal length of the non-metric camera.

要 旨

본 연구는 비측량용 사진기를 이용한 사고현장 적용해석에 관한 연구로서 사건·사고 현황을 간편하고 경제적이며, 신속 정확하게 처리할 수 있는 방법을 제시하기 위해 실내 모형관측을 통하여 정확도를 분석하였다.

비측량용 사진에 3차원 좌표대와 부가매개변수를 고려한 번들조정법을 적용하므로써 기존의 기준 점측량 성과와 측량용 사진기에 의한 위치해석 결과값에 준하는 정확도를 얻을 수 있었다. 또한, 절대좌표 정확도에 있어서 비측량용 사진기의 필름크기가 크고 초점거리가 길수록 측량용 사진기의 정확도에 근접함을 알 수 있었다.

* 정회원 · 연세대학교 공과대학 교수

** 정회원 · 경원전문대학 토목과 부교수

*** 정회원 · 연세대학교 산업기술연구소 객원연구원

1. 서 론

근거리 사진측량(close-range photogrammetry)은 토목 시설물의 변형해석, X-ray에 관한 위치해석, 항공기·선박의 구조설계, 의상설계, 자동차 산업, 경찰업무, 농업 분야 등에 이용될 뿐만 아니라, 역사적 문화재 보존기능 및 복원사업 등에 이용되고 있다. 또한, 교통사고, 열차사고, 토석류 붕괴에 의한 피해 및 화학물질의 폭발사고에 따른 재해조사, 민·형사사건 등의 정량적 현황처리 및 증거보존 등에 효과적으로 이용될 수 있어 본 연구의 필요성이 높아져가고 있다.

따라서 본 연구에서는 이와 같은 사건·사고현황을 간편하고 경제적이며, 신속정확하게 처리할 수 있는 방법을 제시하기 위해 실내 모형 관측을 통하여 정확도를 분석하므로써 본 연구의 실용성을 검증하였다.

2. 사진해석을 위한 번들조정의 해석

번들 조정법은 사진기의 투영중심(O), 대상물에 위치한 점(P), 그리고 P점에 대한 사진상의 점(p)이 동일직선상에 위치한다는 공선조건(collinearity condition)에 의해 조정이 이루어지며, 공선조건식은 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 F_{ij} &= F[x_{ij}, (X_o, Y_o, Z_o, \omega, \phi, \kappa)_i, (X, Y, Z)_j] \\
 &= -f \frac{m_{11}(X-X_o) + m_{12}(Y-Y_o) + m_{13}(Z-Z_o)}{m_{31}(X-X_o) + m_{32}(Y-Y_o) + m_{33}(Z-Z_o)} \\
 &\quad - x_o + \Delta x = 0 \\
 G_{ij} &= G[y_{ij}, (X_o, Y_o, Z_o, \omega, \phi, \kappa)_i, (X, Y, Z)_j] \\
 &= -f \frac{m_{21}(X-X_o) + m_{22}(Y-Y_o) + m_{23}(Z-Z_o)}{m_{31}(X-X_o) + m_{32}(Y-Y_o) + m_{33}(Z-Z_o)} \\
 &\quad - y_o + \Delta y = 0 \quad (1)
 \end{aligned}$$

식 (1)은 비선형 방정식이므로 Taylor 전개에 의해 선형화하면 다음과 같은 관측방정식으로 나타낼 수 있다.

$$V + B \cdot \delta + A \cdot \Delta = \epsilon \quad (2)$$

(2p_n, 1)(2p_n, 6)(6, 1)(2p_n, 3m)(3m, 1)(2p_n, 1)

또한 외부표정요소와 대상물 지표에 대한 관측방정식의 분할식은 다음과 같다.

$$\text{외부표정요소} : V_1 = \delta + \epsilon_1$$

$$\text{대상물 좌표} : V_2 = \Delta + \epsilon_2 \quad (3)$$

여기서, V₁ : 외부표정요소의 잔차벡터

V₂ : 대상물좌표의 잔차벡터

ε₁ : 외부표정요소의 관측값과 계산값 교차벡터

ε₂ : 대상물좌표의 관측값과 계산값 교차벡터이다. 식 (2)에 식 (3)을 고려하면 관측방정식은 다음 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B & A \\ -I & O \\ O & -I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \Delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon \\ \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

그리고, 식 (4)를 정규방정식으로 표시하면

$$\begin{bmatrix} B^T W_p B + W_e & B^T W_p A \\ A^T W_p B & A^T W_p A + W_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \Delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B^T W_p \epsilon - W_e \epsilon_1 \\ A^T W_p \epsilon - W_k \epsilon_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

이며, 식 (5)를 간단히 나타내면 식 (6)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{N} & \bar{N} \\ \bar{N}^T & \ddot{N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \Delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{C} \\ \ddot{C} \end{bmatrix} \quad (6)$$

식 (6)의 해를 구하기 위한 축약 정규방정식(reduced normal equation) 형태로 나타내면

$$(\dot{N} - \bar{N}\ddot{N}^{-1}\bar{N}^T) \delta = C - \bar{N}\ddot{N}^{-1}\ddot{C} \quad (7)$$

$$N_R \delta = U_R \quad (8)$$

이다. 여기서,

$$N_R = (\dot{N} - \bar{N}\ddot{N}^{-1}\bar{N}^T)$$

$$U_R = \dot{C} - \bar{N}\ddot{N}^{-1}\ddot{C}$$

이다.

식 (8)에 Cholesky 방법을 적용하여 외부표정요소 보정량 δ를 구하며, 그리고 지상절대좌표 보정량 Δ는 식 (6)으로부터

$$\Delta = \ddot{N}^{-1}(\ddot{C} - \bar{N}^T \delta) \quad (9)$$

로써 구할 수 있다.

2.1 부가매개변수를 갖는 번들조정법

부가매개변수를 갖는 번들 해석법의 관측방정식은 식 (4)에 부가매개변수항을 첨가하면 다음 식 (10)과 같다.

$$\begin{bmatrix} V \\ V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 & B_2 & B_3 \\ -I & 0 & 0 \\ 0 & -I & 0 \\ 0 & 0 & -I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon \\ \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{bmatrix} \quad (10)$$

또한 정규방정식은 부가매개변수를 고려하면 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} B_1^T W_p B_1 - W_e & B_1^T W_p B_2 & B_1^T W_p B_3 & \delta_1 & B_1^T W_p \varepsilon - W_e \varepsilon_1 \\ B_2^T W_p B_1 & B_2^T W_p B_2 - W_k & B_2^T W_p B_3 & \delta_2 & B_2^T W_p \varepsilon - W_k \varepsilon_2 \\ B_3^T W_p B_1 & B_3^T W_p B_2 & B_3^T W_p B_3 - W_n & \delta_3 & B_3^T W_p \varepsilon - W_n \varepsilon_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \Delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{C} \\ \ddot{C} \end{bmatrix} \quad (11)$$

부가변수를 갖는 변들조정에 있어서 정오차를 보정하기 위해서 적합한 정오차 보정식을 결정하여야 한다.

부가변수를 갖는 변들조정의 정규 방정식인 식 (11)에서 부가매개변수 부분만을 간단히 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{N}_{11} & \bar{N}_{12} \\ \bar{N}_{21} & \dot{N}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \Delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{C} \\ \ddot{C} \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서,

$$\dot{C} = \begin{bmatrix} B_1^T W_p \varepsilon - W_e \varepsilon_1 \\ B_2^T W_p \varepsilon - W_k \varepsilon_2 \end{bmatrix} \quad \ddot{C} = \begin{bmatrix} B_3^T W_p \varepsilon - W_n \varepsilon_3 \end{bmatrix}$$

이고, 식 (12)의 축약 정규방정식은

$$(\dot{N}_{11} - \bar{N}_{12} \dot{N}_{22}^{-1} \bar{N}_{21}) \delta = \dot{C}_1 - \bar{N}_{12} \dot{N}_{22}^{-1} \bar{C}_2 \quad (13)$$

이며, 외부표정요소 및 시상절대좌표의 보정량 δ 와 부가매개변수의 보정량 Δ 는 전절에서의 마찬가지로 Cholesky 방법에 의하여 구할 수 있다.

2.2 비축량용 사진기의 정오차 보정

사진의 정오차는 크게 필름 변형(film deformation)과 렌즈에 의한 상의 왜곡(lens distortion)으로 나눌 수 있다.

본 연구에서의 사고현장해석에 이용하는 비축량용 사진기의 경우는 특히 이와 같은 정오차가 많이 발생되기 때문에 이들 정오차의 보정 및 제거 방법에 대해 다루었다. 사진측량의 함수 모형은 상점과 노출점 및 상점에 대응하는 대상점이 일직선위에 존재하여야 한다는 공선조건식을 근거로 한다. 그러나 실제에 있어서는 대상점으로 부터의 광선이 일직선이 아닐 수도 있으므로 상좌표에 대한 보정이 필요하다. 이러한 보정에는 주점에 대한 보정 및 렌

즈왜곡에 대한 보정이 반드시 수행되어야 하며, 이 밖에도 필름의 신축 및 편평도, 대기의 굴절, 지표 좌표의 보정 등이 고려될 수 있으나 근거리 사진에서는 이들의 영향이 극히 작으므로 일반적으로 고려되지 않는다.

렌즈왜곡에는 두 가지 성분으로 나눌 수 있으며 렌즈왜곡의 첫번째 성분은 주점에 대해 방사적이고 대칭인 특징을 보이며 이것은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$dr = K_1 r^3 + K_2 r^5 + K_3 r^7 + \dots + K_n r^{2n-1} \quad (14)$$

여기서, K_1, K_2, K_3 는 방사방향 왜곡에 대한 계수이고 r 은 아래 식과 같이 주어진 방사거리(radial distance)이다.

$$r = [(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2]^{1/2} \quad (15)$$

렌즈 왜곡의 두번째 성분은 편심왜곡(decentering distortion)이라 불리우며 일반적으로 방사방향 왜곡보다 작은 양이다.

조합된 대물렌즈의 편심에 의한 오차는 방사성분과 접선성분 모두를 갖기 때문에 주점에 대해 비대칭이다. 수정된 Conrady-Brown 모형에 의하면 x 와 y 방향에 대한 편심 왜곡성분은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} dx &= [P_1(r_2 - 2x_2) + 2P_2xy](1 + P_3r_2 + \dots) \\ dy &= [2P_1xy + P_2(r_2 + 2y^2)](1 + P_3r_2 + \dots) \end{aligned} \quad (16)$$

여기서 P_1, P_2, P_3 는 무한 초점거리에서의 조합렌즈에 대한 편심왜곡의 계수로서, 대부분의 근거리 사진측량에 있어서는 P_1 과 P_2 만을 고려한다.

본 연구에서는 다음과 같은 오차모형식을 채택하였으며, 이는 순수히 기하학적인 개념만이 포함된 것으로서, 내부 표정요소에 대해 확장된 형태를 갖는 이변량 직교 다항식(bivariate orthogonal polynomial)의 형태를 나타낸다.

$$\begin{aligned} \Delta x &= a_1x + a_2y - a_3(2k) + a_4xy + a_5(l) + a_7x(l) \\ &\quad + a_9y(k) + a_{11}(kl) + (x/c)dc + x_p \\ \Delta y &= -a_1y + a_2x + a_3xy + a_4(2l) + a_6(l) + a_8y \\ &\quad + a_{10}x(l) + a_{12}(kl) + (y/c)dc + y_p \end{aligned} \quad (17)$$

여기서, $k: x - (2b^2/3)$, $l: y - (2b^2/3)$, a_1 : 다항식 계수, b : 주점 기선길이, dc : 사진기 상수에 대한 보

정이다.

2.3 광속조정의 정밀도 및 정확도

관측값 조정의 정확도 및 조정성과의 양호여부는 참값에 대한 조정추정값의 근접여부로서 나타내며, 일반적으로 최소제곱조정에 의한 결과값의 정확도는 조정된 값의 정밀도로써 나타낸다.

사진측량에 의한 해석에 있어서 분산-공분산행렬은 중요한 의미를 가지며, 스칼라값이 이론적인 정밀도의 척도로 이용된다. 이와 같은 스칼라값은 조정된 대상점좌표의 분산값에 대한 평균값으로 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_x^2 &= \frac{\text{tr}(\sigma X_{xx})}{n_{xy}} & \bar{\sigma}_y^2 &= \frac{\text{tr}(\sigma Y_{xx})}{n_{xy}} \\ \bar{\sigma}_{xy}^2 &= \frac{\bar{\sigma}_x^2 + \bar{\sigma}_y^2}{2} & \bar{\sigma}_z^2 &= \frac{\text{tr}(\sigma Y_{xx})}{n_z} \end{aligned} \quad (18)$$

여기서, σX_{xx} , σY_{xx} , σZ_{xx} : 미지수의 공분산행렬, n_{xy} , n_z : 평면과 높이 관측점수

관측값을 이용한 광속조정법에 있어서 검사점에 대한 정확도는 조정값과 절대값의 차이인 평균제곱근오차를 이용하여, 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \hat{\mu}_x^2 &= \frac{\Delta X^T \Delta X}{n_p} & \hat{\mu}_y^2 &= \frac{\Delta Y^T \Delta Y}{n_p} \\ \hat{\mu}_{xy}^2 &= \frac{\hat{\mu}_x^2 + \hat{\mu}_y^2}{2} & \hat{\mu}_z^2 &= \frac{\Delta Y^T \Delta Y}{n_z} \end{aligned} \quad (19)$$

여기서, $\Delta X = X_{gi} - X_{pi}; i=1, 2, \dots, n_p$, $\Delta Y = Y_{gi} - Y_{pi}; i=1, 2, \dots, n_p$, $\Delta Z = Z_{gi} - Z_{pi}; i=1, 2, \dots, n_z$ 이며, X_{gi} , Y_{gi} , Z_{gi} 는 절대좌표값이며, X_{pi} , Y_{pi} , Z_{pi} 는 광속조정에 의해 조정계산된 결과로 얻은 값이다. 그리고, n_p , n_z 는 검사점의 평면 및 높이 관측점수이다.

3. 모형대상물의 설치 및 관측

본 연구는 비측량용 사진기를 이용한 사건·사고의 현장해석을 효율적으로 수행하기 위한 연구로서 그림 1과 같은 모형대상물을 제작하여 관측을 실시하였다.

또한 지금까지는 사진측량에 의한 대상물의 3차원

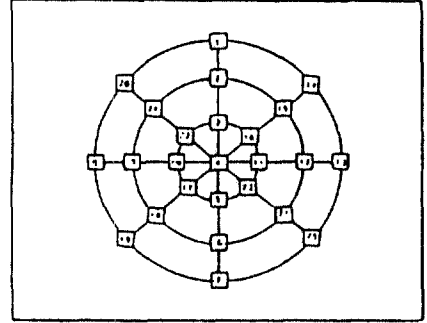


그림 1. 모형 대상물

위치해석을 위해 요구되는 표정점에 대해 기준점측량을 실시하였으나 기준점측량 실시상의 제반여건(인력·경제성·복잡불편·시간 등)을 고려, 사건·사고의 처리에 있어 간격 신속하게 해결하기 위해 기준점측정 대신 3차원 좌표대를 제작 사용하여 얻은 좌표값을 절대좌표값으로 이용하였다.

그리고, 3차원 좌표대를 이용한 위치해석의 정확도를 비교분석하기 위하여 정밀삼각수준측량에 의한 기준점측량을 실시하였다.

3.1 모형대상물 및 3차원 좌표대

모형대상물은 그림 2와 같이 1.18×0.9 m 크기의 판넬위에 25개의 검사점을 방사방향으로 분포시켜 배치하였다. 이들 검사점의 기복은 0.6~3.2 cm 범위로 하여 전면에 표지를 부착하여 이를 판넬에 설치하였으며, 또한 모형대상물인 판넬을 수직으로 세워 보조대에 고정하였다.

표지는 그림 2와 같은 20×20 mm의 정사각형상으로 제작하였으며, 제도오차를 줄이기 위해 제도 대신에 표지용지를 예리하게 절단하여 사용하였다.

3차원 좌표대의 구성은 그림 3, 4와 같이 몸체(body), 봉(bar)으로 이루어져 있으며, 필요에 따라 분해, 조립이 편리하도록 제작하였다.

몸체는 10×10×5 cm의 직육면체로 이루어져 있으며 4면에 5 cm, 2.5 cm, 2 cm, 1.5 cm, 1 cm 간격의 눈금이 새겨져 있고 수평을 맞출 수 있도록 윗면에 원형 기포관이 장치되어 있다.

봉의 크기는 30, 40, 60 cm로서 필요에 따라 수평 및 수직봉으로 활용할 수 있도록 제작하였으며 봉에

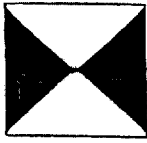


그림 2. 표지의 형상

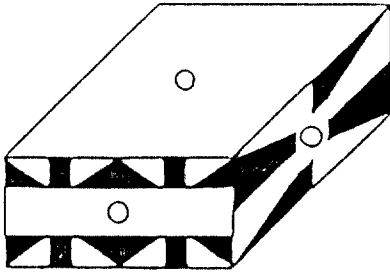


그림 3. 3차원 좌표대의 몸체

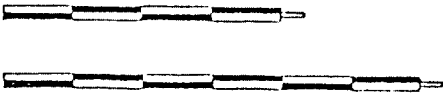


그림 4. 3차원 좌표대의 봉

5 cm 간격으로 눈금을 새겨 놓았다. 3차원 좌표대를 지지하는 3각대는 높낮이를 조절할 수 있도록 조절형 3각대를 사용하였다. 이상과 같이 제작한 3차원 좌표대를 조립하면 그림 5와 같다.

본 연구에 사용된 주요기기는 측량용 사진기인 Rollei 사진기 및 비측량용 사진기인 Mamiya, Nikon FM2, Auto camera와 MK-3 mono-comparator, theodolite Wild T2 등이다.

3.2 모형대상물의 관측

본 연구를 수행하기 위한 모형대상물의 관측을 다음 그림 6과 같이 설치하여 관측하였다.

그림 6에서 A, B는 3차원 좌표대에서 설치위치 하며 C는 모형대상물이다. 또한, 모형대상물로부터 3 m, 4 m되는 지점에 20 cm 간격으로 D, E, F, G 및 H, I, J, K의 사진투영점을 사진기 피사각을 고려하여 선점하였으며, 기준점측량을 위해 모형대상물로부터 6 m되는 지점을 중심으로 좌·우 1.6 m

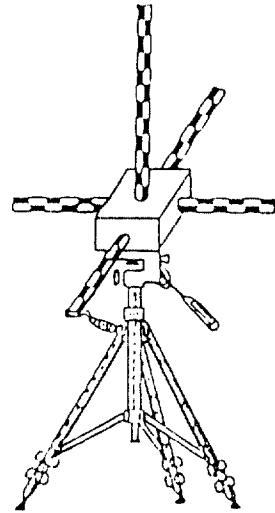


그림 5. 3차원 좌표대의 조립형태

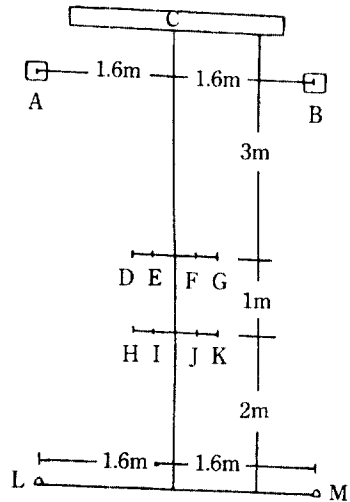


그림 6. 모형 대상물의 관측배치도

떨어진 곳에 L, M의 절대좌표 기준점을 선점하였다.

3.3 기준점 좌표계산

지상사진측량에 의한 3차원 위치해석 및 도화에는 기준점좌표를 관측하기 위한 기준점측량이 요구된다.

본 연구에서는 기준점좌표를 얻기 위한 수단으로 삼각수준측량법과 기준점측량 대신에 이용할 수 있는 3차원 좌표대를 사용하였다. 삼각수준측량의 각

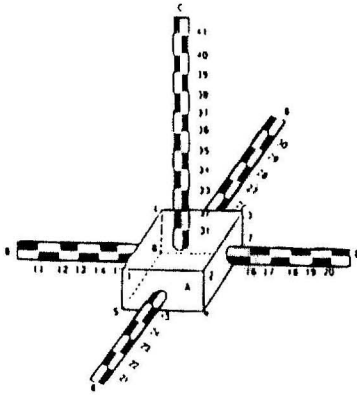


그림 7. 기준점 배치

측량은 1초독 데오들라이트(Wild T2)를 이용하였으며, 거리측량은 인바줄자를 이용하였다.

본 연구에서 사용하고자 하는 기준점은 두개의 3차원 좌표대에 설치하였으며 이들 기준점 배치는 그림 7과 같다.

4. 사건·사고현장 적용을 위한 3차원 위치 결정에 따른 정확도분석

본 장에서는 비측량용 사진기를 이용한 모형대상물의 정량적 해석을 위해 다음과 같은 사항을 분석하였다.

종래의 사진측량에서 이용하여 왔던 기준점측량 성과를 이용한 결과와 앞에서 언급한 3차원 좌표대를 사용한 결과를 분석하였다. 또한, 각각의 경우에 있어 정오차를 보정할 수 있는 자체검정(self calibration)을 고려한 번들조정법을 이용하여 얻은 결과를 비교 분석하였다.

4.1 기준점측량 성과를 이용한 3차원 좌표

번들조정법에 있어서 요구되는 표정점좌표로서 기준점측량 성과를 이용할 경우에 얻어진 결과값 분석으로 기준점은 3.1절에 나타낸 바와 같은 3차원 좌표대 2조에서 각각 6점씩 12점을 취하였고, 검사점은 모형대상물상의 25점을 이용하였다.

본 연구에서 목적으로한 사건·사고현장 해석의 범위에 따라 기준점의 수 및 배치를 다르게 하여야 할 필요가 있기 때문에 본 연구에서는 모형대상물의

좌우측 전면에 3차원 좌표대 A와 B를 설치하여 분석하였다.

3차원 좌표대가 1조인 경우는 모형대상물의 좌측전면에 설치한 3차원 좌표대 A에서 기준점을 취한 경우로서, 사진상에 나타나지 않는 점을 제외한 각 좌표대의 단부분 5점과 중앙점 1점을 합하여 총 6점으로 가장 일반적인 배치형태를 취하였다.

이와같이 3차원 좌표대 1조에 설치되어 있는 기준점을 이용하여 자체검정을 하지 않은 번들조정법에 의한 결과값의 정밀도 및 정확도는 수평위치 정밀도가 비측량용 사진기인 Auto 사진기에서 1조의 경우는 약 1.5 mm, 2조의 경우는 약 1.2 mm, Nikon FM2 사진기는 각각 약 1.7 mm와 1.1 mm, Mamiya 사진기는 약 0.8 mm와 0.7 mm로 나타났으며, 측량용 사진기인 Rollei 사진기의 경우는 약 0.4 mm와 0.3 mm로 나타났다. 또한, 수직위치 정밀도가 Auto 사진기는 약 4.8 mm와 2.7 mm, Nikon FM2 사진기는 약 4.2 mm와 2.6 mm로 나타났으며 초점거리가 긴 비측량용 사진기인 Mamiya 사진기는 약 0.8 mm와 0.7 mm로서 Rollei 사진기의 경우 약 0.6 mm와 0.5 mm에 가깝게 나타났다.

그리고 조정 결과값의 수평위치 정확도는 Auto 사진기의 경우는 약 1.2 mm와 1.1 mm로 나타났으며, Nikon FM2 사진기는 각각 약 1.7 mm와 1.5 mm, Mamiya 사진기는 약 0.9 mm와 0.8 mm로 나타났으며, 측량용 사진기인 Rollei 사진기의 경우는 각각 0.05 mm로 같게 나타났다. 또한, 수직위치 정확도가 Auto 사진기의 경우는 약 4.6 mm와 2.3 mm로 나타났으며, Nikon FM2 사진기는 약 3.9 mm와 2.1 mm, Mamiya 사진기는 각각 0.8 mm로 같게 나타났다. 그리고 Rollei 사진기는 약 0.02 mm와 0.01 mm이었다.

정밀도면에서 보면 3차원 좌표대 2조의 기준점측량 성과를 이용한 경우가 1조를 이용한 경우보다 수평위치 정밀도는 0.1~0.6 mm 정도밖에 향상되지 않았으나 수직위치 정밀도는 필름 크기가 작은 Auto와 Nikon FM2 사진기의 경우는 약 2 mm 정도 크게 향상되었다. 또한 정확도 면에서도 정밀도와 거의 비슷한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있었다. 그러나 측량용 및 비측량용 사진기의 경우 공히 촬영거리 및 수렴각 변화에 따른 정밀도와 정확도가

모두 큰 변화를 보이지 않음을 알 수 있었다.

4.2 3차원 좌표대를 이용한 3차원 좌표

일반적으로 근거리 측량에서는 기준점측량으로 삼각수준측량에 의한 성과를 이용하였다. 그러나 본 연구에서는 사고의 증거 보존 및 처리를 신속 간편하게 하기 위하여 좌표값은 3차원 좌표대에 이표시된 읽음으로서 정확한 좌표값을 얻을 수 있었다. 좌표대를 사용하였을 경우 조정 결과값의 비교 분석은 다음과 같다.

3차원 좌표대의 좌표값을 이용할 경우 수평위치 정밀도는 3차원 좌표대 1조의 좌표를 이용할 경우와 2조를 이용할 경우 각각 0.5~3.0 mm, 0.5~2.5 mm로 거의 비슷한 값을 보이며, 수직 위치 정밀도도 수평위치와 마찬가지로 각각 0.8~6.7 mm, 0.8~6.4 mm로서 거의같은 경향을 나타냄을 알 수 있다. 측량용 사진기와 비측량용 사진기의 정밀도는 비교하여 볼 때 Auto 사진기와 Nikon FM2 사진기의 경우는 수평위치는 약 3.0 mm, 수직위치는 약 5~6 mm인 반면 Rollei 사진기의 경우는 각각 0.5 mm, 0.8 mm로서 현저하게 작게 나타났다. 또한 초점거리가 길고 필름 크기가 70×55 mm로서 Rollei 사진기보다 큰 비측량용 사진기인 Mamiya 사진기의 경우는 각각 1.2 mm, 1.3 mm로서 측량용 사진기인 Rollei 사진기의 결과에 많은 접근을 나타냈다. 따라서 mm단위까지의 정확도·정밀도가 요구되는 사건사고 현장처리의 경우 일반 사진기와 3차원 좌표대를 동시에 사용하므로써 요구되는 정확도 및 정밀도에 접근함을 알 수 있었다. 또한 3차원 좌표대를 이용하는 경우 본 연구의 관측 대상과 같은 좁은 범위에서는 3차원 좌표대 1조로도 충분하지만, 넓은 범위의 대형 사고현장의 경우는 3차원 좌표대를 2조 이상 설치하여야 소요의 정밀도를 얻을 수 있으리라 사료된다.

4.3 자체 검정에 의한 번들 조정법의 결과분석 및 각 방법의 비교 고찰

사진측량에 의한 3차원 대상물 해석에 있어서 오차의 발생은 크게 과대오차, 정오차, 우연오차로 나눌 수 있으며, 과대오차는 혼하게 발생되지 않으며, 우연오차는 최소 제곱법에 의한 반복계산 등

계산방법에 따라 최소화 할 수 있다.

정오차 보정을 위한 부가매개변수를 고려한 경우는 4.2절에서 분석한 바와 같이 기준점이 3차원 좌표대 2조 모두에 고루 분포한 결과가 보다 나은 결과를 보이므로 기준점수 총 12점 및 검사점 25 점을 대상으로 분석하였다.

표 3은 앞의 4.1절에서와 같이 기준점좌표로 기준점측량 성과를 이용한 경우에 부가매개변수를 고려하여 얻은 정밀도와 정확도를 나타내었다. 또한 표 4는 4.2절의 3차원 좌표에의 좌표값을 기준점측량 대신으로 이용하고 부가매개변수를 고려하여 얻어진 결과값이다. 표 3과 표 4의 결과값을 그림 8 및 9에 도시하여 비교 분석하였다.

표 3 및 표 4와 그림 8 및 그림 9에서 첨자 14는 그림 6의 투영점 D와 G에서 촬영한 사진이며, 23은 E, F에서, 58은 H, K에서, 67은 I, J에서 12는 L, M에서 촬영한 사진으로서 첨자 c는 조정결과값(co-

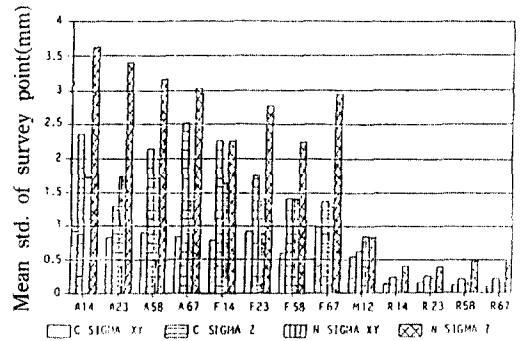


그림 8. 부가매개변수를 고려한 경우의 정밀도

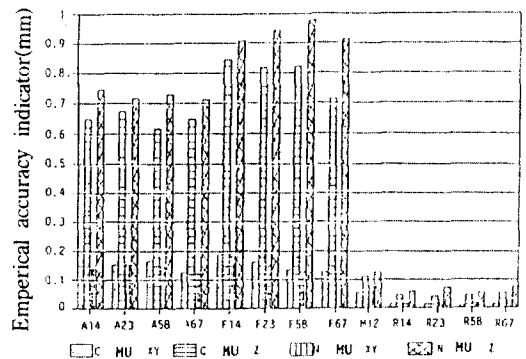


그림 9. 부가매개변수를 고려한 경우의 정확도

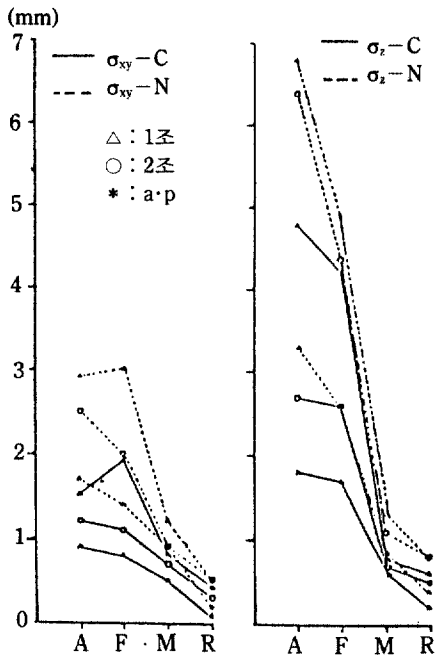


그림 10. 각 사진기와 방법별 정밀도 비교

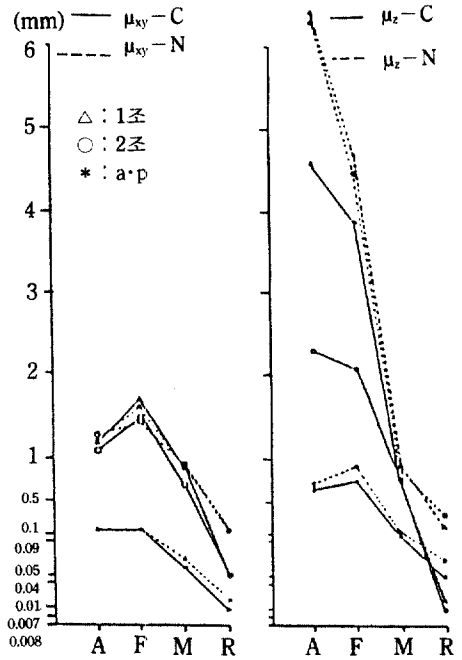


그림 11. 각 사진기와 방법별 정확도 비교

표 1. 기준점 및 검사점측량 결과

(단위 : cm)

No.	X	Y	Z	No.	X	Y	Z
1	74.402	593.374	26.308	2	74.408	593.549	13.511
3	74.661	592.255	.758	4	74.817	594.485	-12.083
5	74.970	591.559	-25.062	8	36.138	591.741	-12.539
7	75.232	592.196	-50.798	8	36.138	591.741	-12.539
9	49.162	590.202	-12.193	10	61.936	592.479	-12.264
11	87.603	592.662	-12.282	12	100.737	591.650	-12.065
13	113.152	594.762	-11.895	14	101.685	592.494	15.517
15	92.601	593.680	6.188	16	83.691	591.963	-3.125
17	65.706	591.943	-21.376	18	56.841	591.446	-30.631
19	47.655	591.995	-39.702	20	47.310	591.538	15.079
21	56.525	592.579	5.997	22	64.770	584.896	-3.098
23	83.932	593.325	-21.414	24	92.880	591.423	-30.071
25	102.141	493.648	-39.270	112	-22.044	546.476	-47.579
121	-15.473	508.617	-47.434	120	244.394	518.024	-47.348
130	15.742	558.906	-47.669	131	-.334	533.557	-40.069
141	-.443	534.125	9.422	211	127.123	559.571	-47.3885
220	153.272	506.454	-47.597	221	114.464	519.651	-17.549
230	168.005	545.590	-47.592	231	140.755	532.423	-40.187
241	140.549	533.002	9.274				

표 2. 3차원 좌표대를 이용한 기준점 및 검사점 좌표

(단위 : cm)

No.	X	Y	Z	No.	X	Y	Z
1	.323	.746	.916	2	.323	.617	.916
3	.334	.489	.904	4	.324	.360	.922
5	.342	.229	.896	6	.334	.099	.910
7	.343	-.030	.899	8	.006	.355	.693
9	.126	.359	.749	10	.224	.358	.836
11	.444	.357	.357	12	.562	.359	1.035
13	.652	.361	1.128	14	.563	.637	1.051
15	.480	.543	1.012	16	.413	.450	.949
17	.260	.266	.851	18	.187	.173	.798
19	.106	.081	.753	20	.101	.633	.755
21	.176	.542	.811	22	.288	.450	.788
23	.409	.265	.959	24	.497	.178	.989
25	.566	.085	1.065	112	-.250	.000	-.007
120	.299	.000	-.005	121	.006	.000	-.297
130	.008	.000	.299	131	.003	.075	-.002
141	.004	.573	.009	211	.962	.001	.895
220	1.468	-.004	.577	221	1.064	-.002	.485
230	1.387	-.002	.991	231	1.222	.072	.735
241	1.213	.570	.746				

표 3. 부가매개변수를 고려한 번들조정의 결과값(기준점 측량 성과를 이용한 경우) (단위 : mm)

사진기 기종	촬영 위치	조정 결과값의 정밀도				조정 결과값의 정확도				ITER- ATION수	
		σ_x	σ_y	α_{xy}	σ_z	μ_x	μ_y	μ_{xy}	μ_z		
비 측 량 용	A U T O	A14c	0.926	0.933	0.930	2.354	0.131	0.163	0.147	0.646	8
		A23c	0.880	0.732	0.832	1.292	0.125	0.183	0.154	0.674	4
		A58c	0.933	0.882	0.908	2.144	0.145	0.185	0.165	0.617	7
		A67c	0.690	1.004	0.847	1.523	0.131	0.121	0.126	0.648	6
	N I K O N F M2	F14c	0.848	0.743	0.796	2.264	0.223	0.154	0.189	0.844	6
		F23c	0.762	0.697	0.730	1.767	0.185	0.140	0.163	0.618	5
		F58c	0.603	0.598	0.601	1.418	0.144	0.128	0.136	0.823	6
		F67c	0.983	0.999	0.991	1.383	0.130	0.123	0.127	0.714	5
MAMI	M12c	0.508	0.600	0.554	0.630	0.069	0.043	0.056	0.111	6	
측 량 용	R O L L E I	R14c	0.146	0.137	0.142	0.248	0.015	0.016	0.015	0.043	5
		R23c	0.170	0.162	0.166	0.258	0.014	0.017	0.016	0.045	4
		R58c	0.108	0.142	0.125	0.226	0.010	0.008	0.009	0.047	4
		R67c	0.109	0.126	0.118	0.232	0.013	0.017	0.015	0.054	4

표 4. 부가매개변수를 고려한 번들조정법의 결과값(3차원 좌표대의 좌표를 이용한 경우) (단위 : mm)

사진기 가 종	촬영 위치	조정 결과값의 정밀도				조정 결과값의 정확도				ITER- ATION수	
		σ_x	σ_y	σ_{xy}	σ_z	μ_x	μ_y	μ_{xy}	μ_z		
비 측 량 용	A U T O	A14n	1.343	2.134	1.739	3.623	0.113	0.163	0.138	0.745	9
		A23n	1.104	2.402	1.753	3.402	0.127	0.182	0.155	0.714	6
		A58n	1.132	1.386	1.725	3.163	0.106	0.184	0.145	0.727	9
		A67n	1.376	2.241	1.381	3.030	0.121	0.127	0.124	0.712	8
	N I K O N F M2	F14n	1.045	1.882	1.643	2.253	0.236	0.153	0.182	0.907	7
		F23n	0.974	1.413	1.428	2.777	0.172	0.140	0.156	0.745	7
		F58n	1.418	1.404	1.416	2.244	0.122	0.128	0.125	0.977	7
		F67n	1.198	0.899	1.301	2.939	0.125	0.123	0.124	0.915	7
	MAMI	M12n	0.854	0.198	0.877	0.853	0.072	0.070	0.071	0.127	7
	측 량 용	R O L L E I	R14n	0.211	0.217	0.205	0.412	0.014	0.017	0.016	0.059
R23n			0.231	0.174	0.224	0.401	0.036	0.018	0.028	0.071	6
R58n			0.170	0.183	0.172	0.484	0.018	0.019	0.018	0.055	6
R67n			0.171	0.292	0.177	0.490	0.028	0.024	0.026	0.076	6

ntrol surveying)의 약자로서 기준점측량 결과를 나타낸다. 또한 그림 10 및 그림 11에서의 A는 Auto 사진기, F는 Nikon FM2 사진기를 나타내며, M은 Mamiya, R은 Rollei 사진기를 나타낸다.

그림 8은 부가매개변수를 고려하여 얻은 기준점측량 성과를 이용한 결과와 3차원 좌표대를 이용한 경우의 정밀도를 도시한 것으로 기준점측량 성과를 이용한 경우 수평위치 및 수직위치의 정밀도가 Auto 사진기는 약 0.9 mm와 1.8 mm Nikon FM2 사진기는 약 0.8 mm와 1.7 mm, Mamiya는 약 0.6 mm와 0.6 mm로 나타났으며 측량용 사진기인 Rollei 사진기는 각각 0.1 mm와 0.2 mm로 나타났다. 또한 3차원 좌표대의 좌표를 이용하는 경우 수평위치 및 수직위치의 정밀도는 Auto 사진기는 각각 1.7 mm와 3.3 mm, Nikon FM2 사진기는 1.4 mm와 2.6 mm이며, Mamiya 사진기는 수평·수직 마찬가지로 0.9 mm, Rollei 사진기는 0.2 mm와 0.4 mm로 나타났다.

조정 결과값의 정확도는 측량용 및 비측량용 사진기 모두 mm 단위 이하의 결과값을 나타내었다. 4.1절부터 분석한 바와 같은 조정 결과값을 서로 비교 고찰하기 위해 다음 그림 10, 11은 표 1~4에 각 방법별 수평 및 수직위치 정밀도와 정확도를 나타내었다.

그림 10에 나타난 바와 같이 기준점측량 성과와 3차원 좌표대의 좌표를 이용한 번들 조정 결과의 수평위치 정밀도는 부가매개변수를 고려한 경우가 부가매개변수를 고려하지 않은 3차원 좌표대 1조, 2조에 기준점을 배치한 것보다 크게 향상되지는 않았으나 수직위치 정밀도는 크게 향상시킬 수 있었다.

그림 11에 나타난 바와 같이 정확도 면에서는 수평 및 수직위치 모두 부가매개변수를 고려함으로써 크게 향상시킬 수 있었다. 또한 본 연구에서 제시한 3차원 좌표대의 좌표를 이용하고 부가매개변수를 고려한 번들조정법을 이용할 경우에는 정밀도와 정확도 모두 부가매개변수를 고려하지 않고 기준점측량 성과를 이용하여 얻은 결과에 근접하는 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 3차원 좌표대를 설치하고 비측량용 사진기를 이용하여 촬영한 사진에서 얻은 좌표값에 부가매개변수를 고려한 번들조정법을 이용하면 충분히 사진·사고현황처리에 활용할 수 있는 좌표라 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

5. 결 론

사고현장 해석을 위하여 비측량용 사진기를 이용

한 위치해석의 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 비측량용 사진기에 3차원 좌표대와 부가매개 변수를 고려한 번들조정법을 적용하므로서 기존의 기준점측량성과와 측량용 사진기에 의한 위치해석 결과값에 근접하는 정확도를 얻을 수 있었다.

2. 비측량용 사진기의 필름크기가 크고, 초점거리가 길수록 측량용 사진기의 정확도에 근접함을 알 수 있었다.

3. 비측량용 사진기와 3차원 좌표대의 조합사용이 사건·사고현장의 상황 분석 및 보존을 위한 실용적이고 효과적임을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. G.T. Marzan, *Rational Design for Close-Range Photogrammetry*, University of Illinois at Urbana-Champaign, Ph.D. Dissertation, 1876. pp. 1-15.
2. J.N. Hatzopoulos, "*The Combination Aerial and Terrestrial Photogrammetry in structural monitoring*", Ph.D. Dissertation, University of Washington, 1979.
3. T. Kawame, S. Matsumoto, Y. Watanabe, and S. Murai, "*Deformation Measurement of the Bandai Bridge by Close-Range Photogrammetry*", Comm. 5, ISPRS, 1988.
4. H.M. Karara, *Hand Book of Non-topographic Photogrammetry*, A.S.P. 1979, pp. 7-96, pp. 29-38, pp. 75-96.
5. H.M. Karara, "Aortic Heart Valve Geometry", *Photogrammetric Engineering*, Vol. 40, No. 12, 1974, pp. 1393-1402.
6. 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, 1981, pp. 235-301.
7. 유복모, 사진 측정학 개론, 탐출관사, 1976, pp. 7-20.
8. 유복모, 사진 측량학, 문운당, 1991, pp. 137-153.
9. 日本 寫眞測量學會 "防犯カメラによる犯人傷の計測", 寫眞による 3次元測定, 公立出版, 1983, pp. 164-165.
10. 백은기, 김감래, "교통사고처리의 합리화에 관한 연구", 한국측지학회지, 제 6권, 제 1호, 1988, pp. 48-57.

(接受 : 1991. 9. 12)