

非測量用 寫眞機에 依한 近接寫眞 解析의 正確度 向上에 關한 研究

A Study on the Improvement of Accuracy of Close-Range Photogrammetry Analysis by Using Non-metric Camera

姜準默* · 吳元鎮** · 韓承熙***

Kang, Joon Mook · Oh, Won Jin · Han, Seung Hee

Abstract

In close-range photogrammetry, to employ non-metric camera especially for the purpose of precise measurement, systematic errors must, first of all, be corrected as they have a great influence on accuracies of results.

For it, fiducial marks was built in non-metric camera and the factors such as PPS, PPA, EFL, CFL, and radial lens distortion coefficients for each quadrant were calibrated through collimator test. Also, the coefficients of both radial and tangential lens distortion were calibrated from analytical plumb line method and therefore main systematic errors could be effectively corrected.

Using the calibrated non-metric camera, close-range photogrammetry could be successfully accomplished and accuracies could be improved sharply.

요 지

근거리 사진측량에서 정오차의 보정은 정확도 향상에 중요한 영향을 미치며, 특히 비측량용사진기를 정밀측량에 이용하기 위해서는 정오차에 대한 보정이 선행되어야 한다.

이를 위해 비측량용사진기에 지표를 설치하고 collimator검정방법에 의해 렌즈의 PPS, PPA, EFL, CFL 및 각 상한별 렌즈의 방사방향 왜곡계수를 구하였고, plumb line 검정방법에 의해서도 렌즈의 방사방향 및 접선방향에 대한 왜곡계수를 구하여 정오차 보정을 효율적으로 시도하였다.

이 검정된 비측량용사진기를 이용하여 근접사진측량을 실시하고, 정오차를 보정하므로써 정확도 향상을 꾀할 수 있었다.

1. 序 論

사진에 나타난 상과 대상물과의 투영관계로부터

대상물의 공간좌표를 결정하는 근접사진측량은 균일한 정확도로 다량의 미지점에 대한 동시 3차원 해석이 가능하므로, 경제적이고 정확함은 물론 사진기의 노출점을 미리 알 수 있고, 사진기와 대상물의 관계를 자유롭게 조정할 수 있으므로 일반측량 방법이나 항공사진측량 기법으로 해결할 수 없었던

* 정회원 · 忠南大學校 工科大學 教授

** 정회원 · 忠清專門大學 助教授

*** 정회원 · 忠南大學校 大學院 博士課程

정밀측량 분야에 널리 활용될 수 있다. 또한 자료를 영구적으로 기록할 수 있고, 반복측량이 가능하므로 교량, 댐, 도로, 터널, 건물 등 각종 토목, 건축구조물의 변형측량, 고고학, 문화재의 형상측량 등에 널리 활용되고 있다.^(1,2,5)

그러나 이와 같은 특성해석을 측량용사진기로 모두 처리하기에는 다소 어려움이 제기되고 있어, 비측량용사진기의 활용이 기대되고 있다. 측량용사진기에 비해 비측량용사진기는 가격이 저렴하고, 취급이 용이하며, 특정한 위치에서도 표정과 축척변경이 자유롭다는 장점을 가지고 있으나 왜곡이 크고 내부표정요소가 결핍되어 있어 정밀측량시 정확도 면에서 제한을 받고 있다.^(6,7) 그러므로 정확도에 많은 영향을 미치는 이러한 문제점을 효율적으로 해결하기 위한 연구 개발은 중요한 의미가 있다 하겠다.^(3,4,8,9)

본 연구에서는 비측량용사진기의 마운트에 유리 지표를 제작, 설치하여, collimator 방법에 의해 검정함으로써 PPA, PPS, EFL, CFL 및 렌즈의 방사방향 왜곡계수 등 제반 상수들을 결정 함으로써 비측량용사진기를 측량용사진기로 개발하고 이를 실제 실험에 적용, 정확도를 향상시키는데 본 연구의 목적이 있다.

2. 解析 理論

광속조정법의 해는 공선조건방정식을 이용한다.^(7,8)

$$f(L) = F(O, X) \quad (1)$$

여기서 L ; 정오차가 보정된 x, y 사진좌표
 O ; 외부표정요소 ($\omega, \phi, \kappa, X_0, Y_0, Z_0$)
 X ; 대상물 공간좌표(X_A, Y_A, Z_A)

이다. 관측값은 정오차를 보정한 후 잔차(V)를 고려하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L + V = F(O_0 + \Delta O, X_0 + \Delta X) \quad (2)$$

여기서 O_0, X_0 ; 근사값
 $\Delta O, \Delta X$; 보정값

이다. Taylor 급수전개에 의하여 (2)식을 전개하면 다음과 같다.

$$f(L) + \frac{\delta f}{\delta L} \Delta L = F(O_0, X_0) + \frac{\delta F}{\delta O} \Delta O + \frac{\delta F}{\delta X} \Delta X \quad (3)$$

이것을 i번째 사진의 j번째 상점에 대하여 나타내면 다음과 같다.

$$V_{ij} + \dot{B}_{ij} \delta_i + \ddot{B}_{ij} \delta_j = \varepsilon_{ij} \quad (4)$$

(2,1) (2,6)(6,1) (2,3)(3,1) (2,1)

여기서

$$V_{ij} = [V_x \ V_y]^T_{ij}; \text{ 사진좌표의 잔차}$$

$$\dot{B}_{ij} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & \dots & a_6 \\ b_1 & b_2 & \dots & b_6 \end{bmatrix}_{ij}; \text{ 계수행렬}$$

$\dot{\sigma}_i = [\sigma_\omega \ \sigma_\pi \ \sigma_\phi \ X_0 \ Y_0 \ Z_0]_i$; 외부표정요소의 보정값

$$\ddot{B}_{ij} = \begin{bmatrix} a_7 & a_8 & a_9 \\ b_7 & b_8 & b_9 \end{bmatrix}_{ij}; \text{ 계수행렬}$$

$\ddot{\sigma}_j = [\Delta X \ \Delta Y \ \Delta Z]_j$; 대상물좌표의 보정값

$\varepsilon_{ij} = [f(x) \ f(y)]_{ij}$; 근사값을 대입하여 계산한 값

(4)식을 간단히 나타내면

$$\bar{V} + \bar{B} \cdot \bar{\sigma} = \bar{\varepsilon} \quad (5)$$

(4) 및 (5)식으로 부터 정규방정식을 형성하면 다음과 같다.

$$N \cdot \sigma = C \quad (6)$$

여기서 $N = \bar{B}^T P \bar{B}$

$$C = \bar{B}^T P \bar{\varepsilon}$$

P = 경중률 행렬이다.

정규방정식의 해는 다음과 같다.

$$\delta = N^{-1} C \quad (7)$$

외부표정요소와 미지점좌표의 경중률행렬이 결정되면, 사진의 block 모형에 대한 동시해를 얻기 위하여 다음과 같이 식을 분할하여 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{N} + \dot{P} & N \\ \bar{N}^T & N + \bar{P} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \ddot{\sigma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{C} - \dot{P} \delta \\ \bar{C} - \bar{P} \bar{\varepsilon} \end{bmatrix} \quad (8)$$

(4)식을 행렬로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{N}_{ij} & \bar{N}_{ij} \\ \bar{N}_{ij}^T & \dot{N}_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\delta}_i \\ \dot{\delta}_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{C}_{ij} \\ \dot{C}_{ij} \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서 $\dot{N} = \dot{B}^T P \dot{B}$

$\bar{N} = \bar{B}^T P \bar{B}$

$\dot{C} = \dot{B}^T P \dot{\epsilon}$

$\bar{C} = \bar{B}^T P \bar{\epsilon}$

$P =$ 사진좌표의 경중률행렬이다.

(9)식은 다음과 같은 축약 정규방정식으로 나타낼 수 있다.

$$S \quad \delta_{ij} = E$$

$$(6m, 6m)(6m, 1) \quad (6m, 1)$$

3. 實驗

3.1 Collimator 검정방법

1) 유리건판의 제작

정확한 사진좌표의 획득을 위해서는 좌표계의 설정이 필요하므로 Rollei 측량용사진기 3003의 지표를 촬영하여 음화를 얻고 이를 이용하여 Nikon F-801 35mm 비측량용사진기에 적합한 지표를 그림 3-1과 같이 제작하였다.

유리건판은 촬영한 음화를 저감도의 인쇄용 리스 필름에 밀착 인화하여 그림 3-2, 그림 3-3과 같이 투명한 양화를 만들었다.

2) 관측

單 collimator에 사진기를 장치하고, 제작된 유리건판의 중앙 지표가 주점부근에 위치하도록 사진기

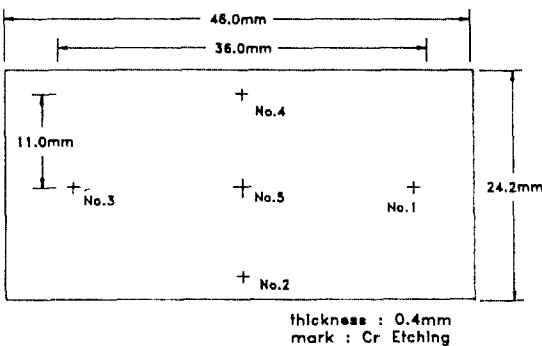


그림 3-1. Fiducial mark of glass plate

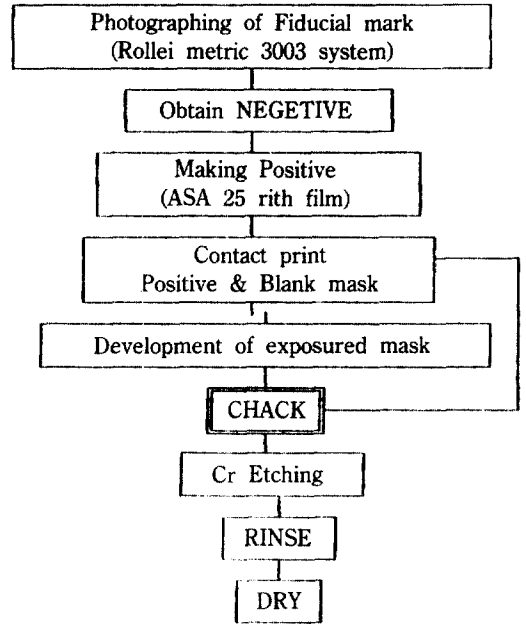


그림 3-2. Flow chart of making glass plate

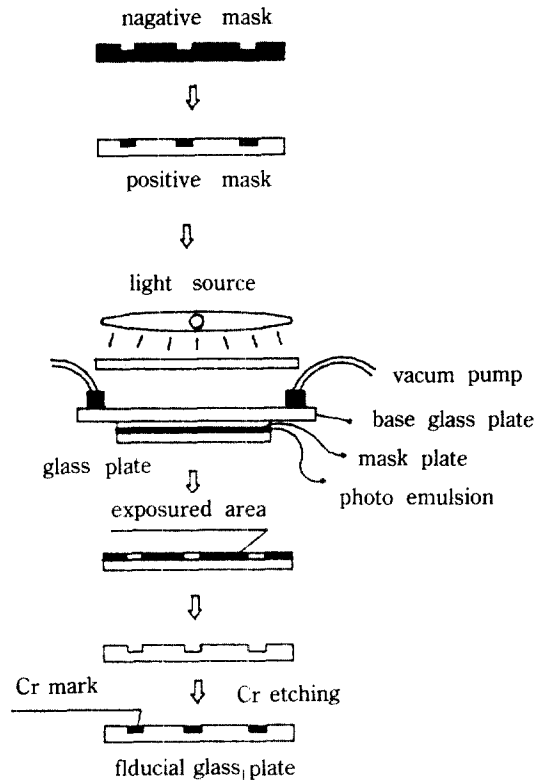


그림 3-3. The process of Cr etching for glass plate

표 3-1. Collimator shift angle versus radial distance.(Direction to horizontal & vertical)

radial distance (mm)	Collimator shift angle									
	(H)	+24°	+18°	+12°	+6°	0°	-6°	-12°	-18°	-24°
H r	(V)	+16°	+12°	+8°	+4°	0°	-4°	-8°	-12°	-16°
H r		-16.003	-11.718	-7.696	-3.810	0	3.821	7.704	11.735	16.020
V r		-10.356	-7.691	-5.086	-2.531	0	2.541	5.093	7.684	10.346

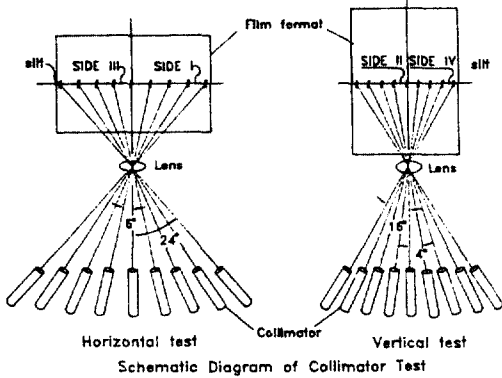


그림 3-4. The single collimator for camera calibration

마운트에 설치한 후 그림 3-4와 같이 검정하였다. 각 slit까지의 방사거리를 관측하고 중앙 지표에 대한 0°슬릿의 편위량을 관측하여 PPA(Principal Point of Autocollimation, $\Delta X = 103\mu\text{m}$, $\Delta Y = 30\mu\text{m}$)를 얻었다. 수평방향의 화각이 약 50°, 수직방향의 화각이 약 33°이므로 수평방향으로는 collimator를 6°씩, 수직방향으로는 4°씩 회전시켜 9개의 슬릿을 촬영하여, 수평 및 수직방향에 대한 방사거리의 차를 평균하여 PPS(Principal Point of Symmetry, $x=7\mu\text{m}$, $y=0\mu\text{m}$)을 구하였다.

3.2 해석적 Plumb Line검정방법

1) Plumb line의 설치 및 촬영

사진기의 화각과 촬영거리를 고려하여 검정색 배경에 흰색 plumb line을 설치하였고, 초점거리 35mm인 광각렌즈를 평행광선 조명상태에서 2중 노출함으로써 격자가 형성되도록 하였다. 필름은 Kodak Plus-X Pan을 사용하였으며 plumb line은 음화상에서 10 μm ~20 μm 의 굵기로 긴변에 약 10개, 짧은변에 약 7개가 되도록 촬영하였다.

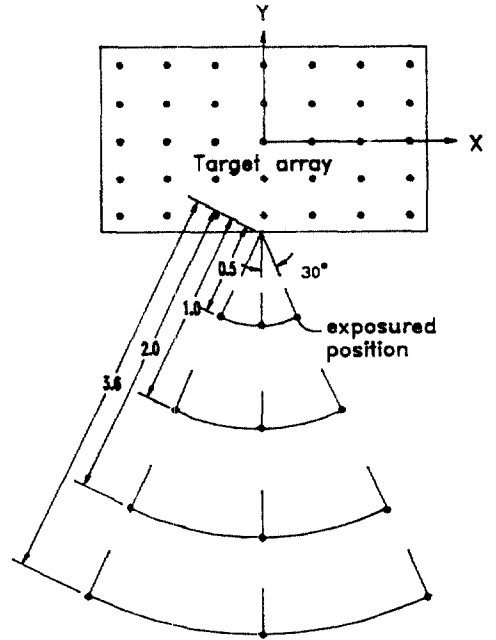


그림 3-5. The explanation of test field in the application

3.3 적용실험

1) 실험계획 및 촬영

촬영거리 0.5m, 1.0m, 2.0m, 3.6m에서 수렴각 ϕ 를 -30°, 0°, +30°로 하여 총 12점의 노출점을 그림 3-5와 같이 계획하였고, 촬영거리가 변화하여도 음화의 전면을 고르게 피복할 수 있도록 각 각의 촬영거리에 따라 미지점을 배치하였다.

각각의 촬영거리에 따라 피복면적에 고른 밀도로 배치된 6개의 기준점에 대한 정밀삼각측량은 Kern MK2-A 1초독 theodolite로 관측하였다.

4. 結 駁 分 析

4.1 Equivalent Focal Length의 산출

수평방향(shift angle $\pm 6^\circ$)과 수직방향(shift angle $\pm 4^\circ$)에 대한 EFL(Equivalent Focal Length, 등가초점거리)은 일반적으로 렌즈의 중심에서는 왜곡이 없다고 가정하므로 촬영한 slit중에서 $\pm 4^\circ$ 를 선택하여 $EFL(\text{radial distance} / \tan \theta) = 36.266\text{mm}$ 를 얻었다. 계산된 EFL을 이용하여 collimator로 부터 조명된 슬릿(slit)이 촬영되어야 할 이론적인 방사거리를 구하여 실제 촬영된 슬릿(slit)들의 방사거리와 비교함으로써 표 4-1과 같이 방사왜곡량을 구하였다.

그림 4-1에서 측면(Side) I, II, III, IV의 왜곡이 거의 비슷한 양상으로 일어나고 있어 왜곡이 대칭에 가까운 것을 알 수 있었고 방사거리 10cm 이상에서 왜곡량이 급격히 증가하고 있음을 알 수 있었다.

그림 4-2에서 수평방사거리 $\pm 8\text{mm}$, 수직방사거리 $\pm 6\text{mm}$ 이내에서는 $15\mu\text{m}$ 이내의 왜곡량을 보이고 있고 주변부로 갈 수록 불규칙하게 증가하고 있으므로 렌즈의 중심부를 이용하여 대상물을 해석하는 것이 바람직하다고 사료된다.

표 4-1에서 구한 각 상한 별 왜곡량을 이용하여 왜곡계수를 구하기 위해 보정다항식($\Delta r = K_1 r + K_2 r^2 + K_3 r^3 + K_4 r^4 + \dots$)에 의해 행렬해법으로 방사왜곡계수 K_1, K_2, K_3, K_4 를 표 4-2와 같이 구하였다.

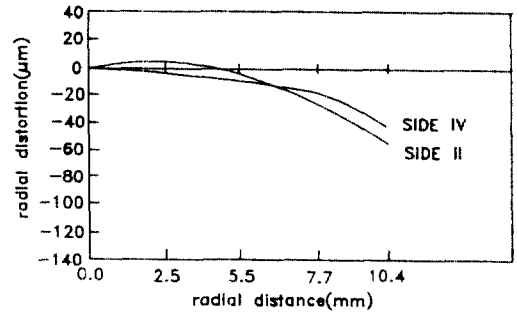
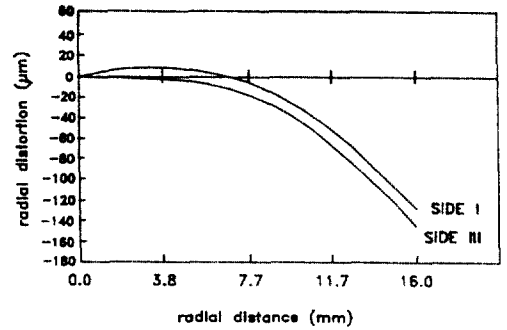


그림 4-1. Radial distortion vs. radial distance (by EFL)

4.2 Calibrated Focal Length의 산출

렌즈의 CFL(Calibrated Focal Length, 검정된 초점거리)은 방사상의 초점거리를 모두 평균하여 배분한 것이다. CFL은 $(r - CFL \tan \theta) + (r - CFL \tan \theta) = 0$ 식에 의해 Side I과 III에 대한 수평방

표 4-1. The radial lens distortion of each side vs. collimator shift angle. (by EFL)

shift angle($^\circ$)		radial lens distortion(mm)			
H	V	Side I	Side II	Side III	Side IV
± 6	± 4	0.009	0.005	-0.002	-0.005
± 12	± 8	-0.005	-0.004	-0.013	-0.011
± 18	± 12	-0.049	-0.025	-0.066	-0.018
± 24	± 16	-0.127	-0.053	-0.144	-0.043

표 4-2. The coefficient of radial lens distortion in each side obtained by collimator test. ($\times 10^{-3}$)

coeff.	Side I	Side II	Side III	Side IV
K_1	0.003546	0.003174	0.001178	0.004410
K_2	-8.552213E-5	-1.996202E-4	-4.344807E-5	-4.285227E-4
K_3	2.773137E-7	2.024559E-6	-1.133125E-7	7.853835E-6
K_4	-4.608873E-10	-8.256863E-9	4.990564E-10	-4.291548E-8

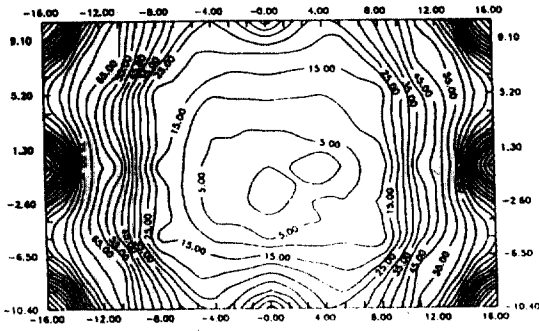


그림 4-2. Distortion contour in format

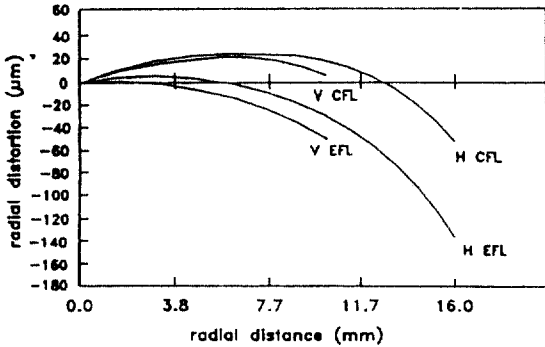


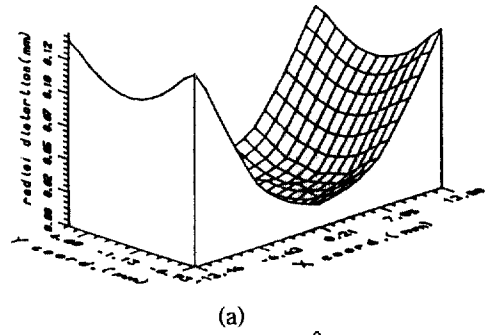
그림 4-3. Radial distortion by EFL & CFL

표 4-3. The radial lens distortion by CFL

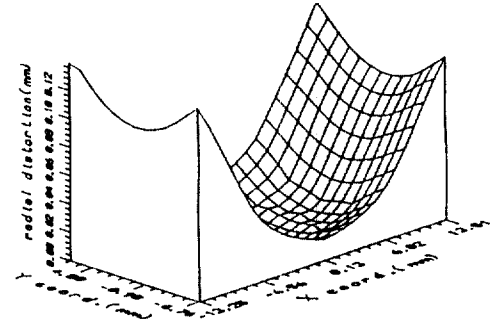
shift angle(°)		Δr (mm)	
H	V	Hori.	Ver.
± 6	± 4	0.024	0.013
± 12	± 8	0.031	0.019
± 18	± 12	0.004	0.019
± 24	± 16	-0.051	0.006

향의 왜곡량을 평균한 후 최대와 최소값을 이용해 36.027mm를 얻었고, Side II와 IV 수직방향의 왜곡량 역시 같은 방법으로 36.131mm를 얻어 이들을 평균하여 CFL = 36.079mm를 얻었다.

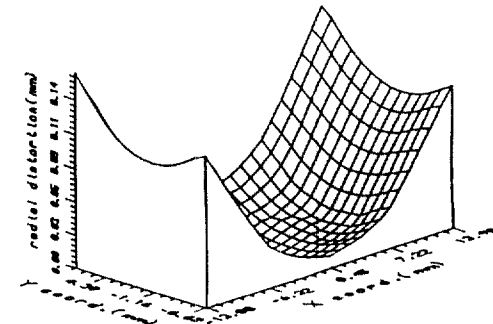
수평방향에 대한 왜곡에서 EFL을 적용한 경우는 0.009 ~ -0.144mm로 크게 나타났으나 CFL을 적용한 경우에는 표 4-3과 같이 약 64%가 감소된 0.004mm ~ -0.051mm로 왜곡이 배분되어 고르게 나타났으며, 수직방향의 경우도 역시 0.005mm ~ -0.053mm에서 0.019 ~ -0.006mm까지 약 76%의



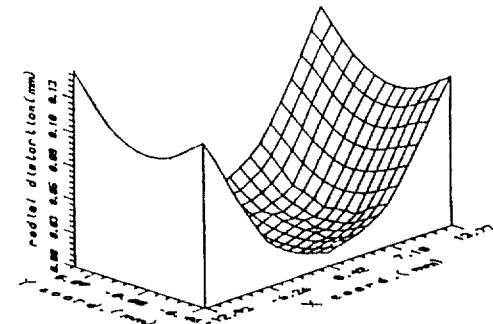
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 4-4. Amount of corrected distortion by plumb line method

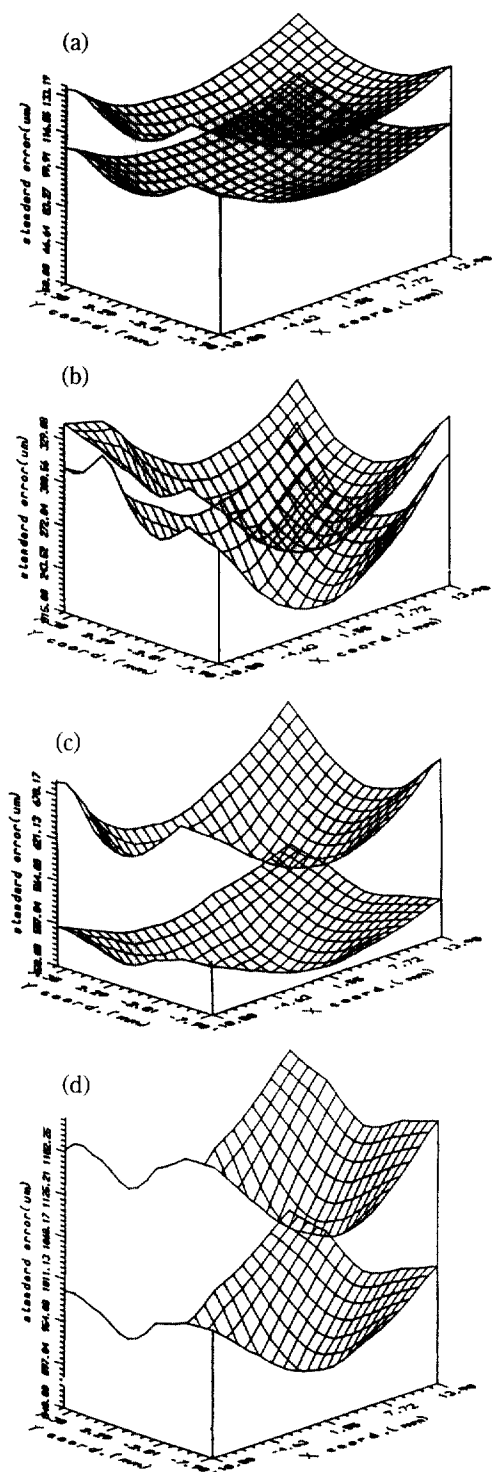


그림 4-5. Comparison of errors vs. the uncorrected distortion and the corrected distortion by collimator method and the corrected case by plumb line method

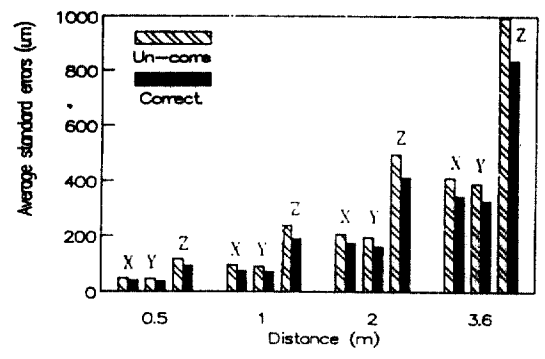


그림 4-6. Comparison of the standard errors vs. the uncorrected case

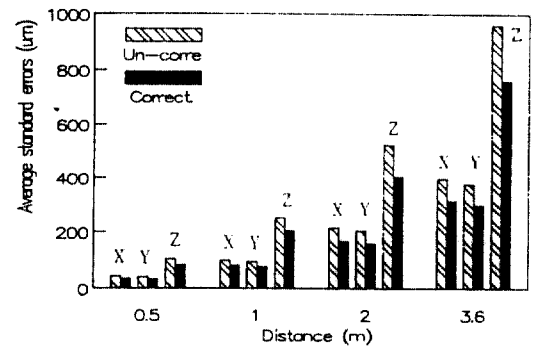


그림 4-7. Comparison of the standard errors vs. the uncorrected case and the corrected case by collimator method

왜곡량이 감소하여 나타났다. 그러므로 사진측량의 해석에서는 반드시 CFL을 적용하여야 함을 알 수 있다.

4.3 검정결과의 적용

그림 4-4는 plumb line검정방법에 의하여 구한 렌즈의 왜곡계수를 보정한 경우와 보정하지 않은 경우의 왜곡량의 차이를 도시한 것이다. (a), (b), (c), (d)는 각각 촬영거리 0.5 m, 1.0 m, 2.0 m, 3.6 m에서의 왜곡보정량을 나타낸 것으로 중심부에서의 왜곡 보정량은 매우 미소하여 20 μ m이내를 보이고 있으며, 주변부로 갈수록 점차적으로 증가하여 90 μ m~140 μ m 정도의 보정량을 나타내고 있다.

그림 4-5는 collimator검정방법에 의하여 구한 렌즈의 정오차 보정 요소들을 보정한 경우와 보정하지 않은 경우의 X, Y, Z의 위치오차를 도시한 것이다.

표 4-4. Comparison of the standard errors vs. the uncorrected case and the corrected case by plumb line method(μm)

object distance	uncorrected case			corrected case		
	X	Y	Z	X	Y	Z
0.5m	48.1	45.5	116.3	40.2	36.4	93.0
1.0m	95.5	90.1	237.7	74.9	71.5	188.7
2.0m	205.6	194.6	495.9	172.7	161.5	411.6
3.6m	411.4	389.9	994.9	345.0	326.9	833.7

표 4-5. Comparison of the standard errors vs. the uncorrected case and the corrected case by collimator method(μm)

object distance	uncorrected case			corrected case		
	X	Y	Z	X	Y	Z
0.5m	42.7	40.4	103.1	34.3	32.5	82.9
1.0m	99.7	94.4	250.0	81.4	77.0	204.4
2.0m	214.8	203.9	523.0	166.3	157.8	403.4
3.6m	396.5	376.0	961.2	313.8	297.6	760.7

표 4-6. Comparison of the positional errors vs. the plumb line method and the collimator method(μm)

case	object distance			
	0.5m	1.0m	2.0m	3.6m
Plu.	107.7	215.2	474.7	959.7
Col.	95.4	233.1	464.0	875.0

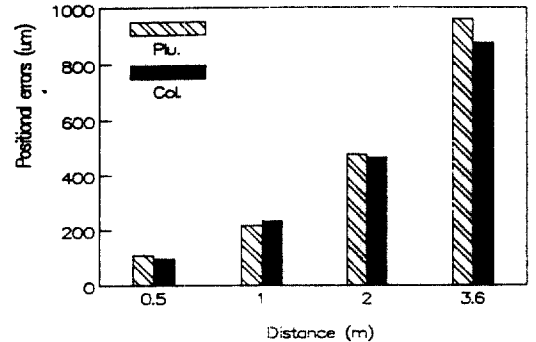


그림 4-8. Comparison of the positional errors vs. the plumb line method and the collimator method

(a)는 촬영거리 0.5m에서 얻은 3장의 사진을 해석한 경우로서 각 상한별 방사방향 왜곡계수, PPA 및 PPS를 보정하여 해석한 것과 이를 보정하지 않고 해석한 결과를 3차원 위치오차로 비교 도시한 것이다.

사진의 주변부로 갈수록 오차가 점차 증가되고 있으며 정오차를 보정한 경우가 보정하지 않은 경우에 비하여 약 30 μm ~40 μm 의 오차감소를 나타내고 있다. (b), (c), (d)는 촬영거리가 각각 1.0 m, 2.0 m, 3.6 m의 경우를 도시한 것으로 정오차를 보정한 경우가 보정하지 않은 경우에 비하여 약 20%~30%의 오차가 감소됨으로써 본 collimator검정방법에 의한 효용성을 입증해 주고 있다.

그림 4-6은 plumb line 검정방법에 의해 구한 렌즈의 방사방향과 접선방향에 대한 왜곡계수⁽¹⁰⁾를 보

정한 경우 X, Y, Z의 오차를 도시한 것이다.

렌즈의 왜곡을 보정한 경우 보정하지 않은 경우에 비하여 매우 양호한 결과를 얻을 수 있으므로 비측량용 사진기에 의한 정밀 관측시 정오차의 보정은 오차감소에 중요한 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

그림 4-7은 collimator검정방법에 의해 정오차 보정요소를 구하고 이를 보정하여 해석한 경우와 보정하지 않고 해석한 결과를 도시한 것이다.

collimator검정방법에 의하여 렌즈의 방사방향에 대한 왜곡계수를 상한별로 구하여 각에 대한 경중률, PPA, PPS 등에 대한 보정을 실시한 결과 약 20%~30% 정도의 오차가 감소되었으므로 collimator를 이용한 렌즈 검정의 효용성을 엿볼 수 있다.

그림 4-8은 plumb line방법과 collimator방법에 의해 렌즈를 검정하고 그를 적용하여 해석한 경우 위치오차를 도시한 것이다. 촬영거리 0.5m, 1.0m, 2.0 m, 3.6m에서 각각의 위치오차는 plumb line방법에 의한 경우 107.7 μ m, 215.2 μ m, 474.7 μ m, 959.7 μ m 이고, collimator 방법에 의한 경우 95.4 μ m, 233.1 μ m, 464.0 μ m, 875.0 μ m를 나타내고 있다.

5. 結 論

비측량용사진기로 소형 대상을 보다 정밀하게 관측하기 위해 비측량용사진기에 대한 검정을 실시하고 이를 실대상물에 적용한 결과 다음의 결론을 얻었다.

1) 비측량용사진기를 측량용사진기로 개발하기 위해 Cr 부식기법으로 지표를 제작하고 collimator 검정방법에 의해 렌즈의 상한별 방사방향 왜곡계수와 PPS, PPA, EFL, CFL 값을 도출하였다.

2) Collimator검정방법으로 렌즈의 equivalent focal length와 calibrated focal length를 구하여 왜곡량을 산정한 결과 calibrated focal length를 적용할 경우 64%~76%정도 왜곡량이 감소되므로 사진 측량의 해석에는 calibrated focal length를 적용하는 것이 바람직하다고 사료된다.

3) 해석적 plumb line방법과 collimator방법에 의해 비측량용사진기를 검정하였으며, 이를 정오차 보정에 적용하여 매우 양호한 결과를 얻을 수 있었으므로 비측량용사진기에 의한 정밀관측시 정오차의 보정은 오차감소에 중요한 영향을 미치고 있다.

謝 辭

본 연구는 한국과학재단의 1990년도 목적기초

연구지원에 의하여 수행된 것으로 본 연구를 수행할 수 있도록 지원해 준 한국과학재단에 깊이 감사드립니다.

參 考 文 獻

1. Joon-Mook Kang, Raymond J. Hintz, & Christos Karakadas "Analysis of Pavement Cracking and Rutting Using Close-Range sPhotography", *PE & RS*, Vol. 55, No. 2, pp. 217-221, 1989.
2. C. S. Fraser, "On the Use of Non metric Cameras in Analytical Close-Range Photogrammetry", *The Canadian Surveyor*, Vol. 36, No. 3, pp 259-279, 1982.
3. Donald, L. Light, "The New Camera Calibration System at the U.S. Geological Survey", *ACSM-ASPRS Technical Papers*, Vol. 5, pp 237-250, 1991.
4. I. W. Lee, H. M. Cho, Y. W. Lee, "Lens Diopter Measurement Standards", Korea Standards Research Institute, 90-28-1R, pp 74-105, 1990.
5. John G. Fryer, "Non-Metric Photogrammetry and Surveyors", *The Australian Surveyor*, Vol. 32, No. 5, pp 330-341, 1985.
6. L. P. Adams, "The Use of Non-Metric Cameras in Short-Range Photogrammetry", *Photogrammetria*, Vol. 36, pp 51-60, 1981.
7. Madani, Mostafa Seyed, "Accuracy Potential of Non-Metric Cameras in Close-Range Photogrammetry", The Ohio State University Ph.D.Paper, 1987.
8. Paul R. Wolf, and Scott A. Loomer, "Calibration of Non-Metric Cameras", ASP/ ISP Symposium on Close-Range Photogrammetric Systems Urbana, 1975.
9. Robert J. Karren, "Camera Calibration by the Multicollimator Method", *PE & RS*, Vol. 33, pp 706-719, 1967.
10. 강준목,오원진,배연성, "비측량용 사진기에 의한 정밀기계부품의 monitoring에 관한 연구", *한국측지학회지*, 9권 2호, 1991.

(接受 : 1992. 3. 4)