

# 지상기준점을 이용한 비측량용 카메라 렌즈 캘리브레이션

## Non-Metric Digital Camera Lens Calibration Using Ground Control Points

원재호<sup>1)</sup> · 소재경<sup>2)</sup> · 윤희천<sup>3)</sup>

Won, Jae Ho · So, Jae Kyeong · Yun, Hee Cheon

### Abstract

The most recent, 80 mega pixels digital camera appeared through the development of digital technology, and non-metric digital cameras have been using in various field of photogrammetry.

In this study, we experimented lens calibration using aerial photographs and ground control points. The aerial photographs were taken a non-metric digital camera which is CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor) 21.1 mega pixels sensor and 35mm lens at a helicopter. And the ground control points were selected on the 1:1,000 plotting origin data.

As a result, we calculated focal length, PPA(Principal Point of Autocollimation) and symmetric radial distortion coefficients from the lens. Also, RMSE(root mean square error) and maximum residual of the ground control points from the aerial triangulation were compared before and after calibration. And we found that the accuracy of the after calibration was improved very significantly.

Keywords : Non-Metric Digital Camera, Lens Calibration, Ground Control Points, Aerial Triangulation

### 초 록

최근 비약적인 기술발전을 통해 8,000만 화소급 디지털 카메라가 등장했으며, 비측량용 디지털 카메라가 사진 측량 분야에서 다양하게 활용되고 있다.

본 연구에서는 항공사진과 지상기준점을 이용하여 렌즈 캘리브레이션을 수행하였다. 항공사진은 35mm 렌즈가 장착된 CMOS 2,110만 화소급 비측량용 디지털 카메라를 헬리콥터에 설치하여 취득하였고, 지상기준점은 1:1,000 도화원도에서 선점하였다.

그 결과 렌즈에 대한 초점거리, PPA, 방사왜곡계수를 계산할 수 있었다. 또한 렌즈 캘리브레이션 전후에 항공삼각측량을 수행하여 지상기준점의 평균계급근오차와 최대 잔차를 비교하였으며, 캘리브레이션 후 정확도가 매우 큰 폭으로 향상됨을 알 수 있었다.

핵심어 : 비측량용 디지털 카메라, 렌즈 캘리브레이션, 지상기준점, 항공삼각측량

## 1. 서 론

전문가용으로만 여겨져 왔던 SLR(Single-Lens Reflex) 카메라가 최근 저가의 고해상도 DSLR(Digital SLR) 카메라로 보급되어 활용되고 있으며 디지털 카메라 기술의 비약적인 발전으로 비측량용 디지털 카메라 센서는 수천만 화

소에 이르고 있다. 이러한 추세로 측량용 카메라로만 수행되던 사진측량 분야에서 비측량용 디지털 카메라를 이용해 손쉽게 수치영상을 획득하고 다양한 목적으로 활용할 수 있는 계기가 마련되었다.

그러나 일반적으로 사용되고 있는 보급형 디지털 카메라는 측량용으로 제작된 제품이 아니기 때문에 이를 이

1) 정희원 · 충남대학교 토목공학과 박사과정(E-mail:aerowon@nate.com)

2) (주)범아엔지니어링 국토정보시스템연구소 주임연구원(E-mail:sojk0070@gmail.com)

3) 교신저자 · 정희원 · 충남대학교 토목공학과 부교수(E-mail:hcyoon@cnu.ac.kr)

용해 3차원 공간 측량을 수행하기 위해서는 정확한 내부 표정요소를 알아야 하며 이를 위해서는 카메라 캘리브레이션을 거쳐야 한다(오재홍 등, 2006). 이와 같은 캘리브레이션에 관해서는 그동안 많은 연구가 이루어져 왔다. 캘리브레이션 모델로는 1970년대 초에 제안된 8 매개변수 식을 가장 많이 활용하여 왔다(Kenefick 등, 1972). Fraser(1997)는 이미지의 x, y축 간의 축척 및 비직교성분을 나타내는 두 개의 변수를 추가하여 10 매개변수 식을 제안하였고 왜곡 변수의 선정에 관해 고정밀 측량이 필요치 않은 3차원 공간 측량 분야의 경우 초점거리(c), 주점 이동량( $x_0, y_0$ ), 방사왜곡계수( $k_1$ )의 네 인자로 어느 정도 정확한 결과를 얻을 수 있음을 밝혔다. Gruen 등(1992)은 검정 대상지 구성과 관련하여 다양한 조건 별로 내부 표정요소를 결정하는 실험을 수행하였으며, 그 결과 수렴각도가 큰(high convergence) 최소 두 장 이상의 영상을 사용하고 지상 기준점은 3차원으로 구성할 것을 제안하였다.

또한 비측량용 디지털 카메라에 대한 캘리브레이션과 정확도 검증에 관한 연구도 다양하게 진행되어 왔다. 김기홍 등(2010)은 CMOS 1,080만 화소급 디지털 카메라 두 대를 기선거리 1m 간격으로 고정하여 스테레오 촬영이 가능한 장비를 제작하였고, 표정판을 이용하여 두 대의 카메라를 캘리브레이션하여 좌우 각각의 카메라에 대한 내부표정요소를 획득하였다.

정성혁 등(2009)은 무인항공기와 2,000만 화소의 일반 디지털 카메라 및 초점거리 24mm의 렌즈를 이용해 원격으로 촬영이 가능한 장비를 구축하였다. 이를 위해 카메라와 렌즈는 검정판을 이용한 실내 실험을 통해 내부표정요소를 계산하였고 촬영한 사진은 도화하여 수치지형도와 정확도를 비교하였다.

강진아 등(2008)은 사진측량에서 사용되는 왜곡보정 방법을 저가형 로봇에서 사용되는 광각어안렌즈에 적용하여 광각렌즈에 적합한 보정모델을 개발하였으며 이를 이용해 왜곡계수를 산출하였고, 관측한 영상점을 왜곡이 보정된 영상점으로 위치를 보정하는 프로그램을 개발하였다.

이와 같이 카메라를 이용한 사진측량은 카메라와 렌즈에 대한 정확한 내부표정요소를 알고 있어야 하며, 이를 위해 정밀한 캘리브레이션 타겟을 이용한 실내 실험을 통해 그 요소들을 획득하고 있다. 반면 본 연구에서는 카메라의 내부표정 요소를 획득하는데 있어서 정밀한 실내 실험을 대신하여 항공기에서 촬영된 항공사진과 지상기준점을 이용한 캘리브레이션이 가능한지 검토해 보고 항공

삼각측량에 의한 정확도를 비교하고자 한다. 또한 본 연구를 통해 이와 같은 캘리브레이션 방법으로 비측량용 디지털 카메라를 항공사진측량에 활용하기 위해 충분한 정확도를 확보할 수 있는지 분석하는데 목적이 있다. 연구 흐름도는 그림 1과 같다.

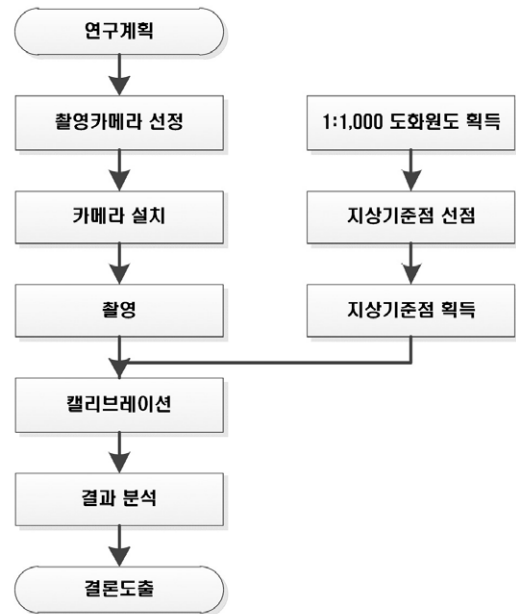


그림 1. 연구 흐름도

## 2. 장비 구성

### 2.1 카메라 및 렌즈 구성

본 연구에서 사용한 카메라는 그림 2(a)와 같이 Canon 전문가용 카메라인 EOS-1Ds Mark III로서 2,110만 유효화소의 CMOS 센서가 탑재된 DSLR이다. 이미지 센서는 풀 프레임을 채용하고 있으며 화소 크기는  $6.4\mu m$ , 이미지 크기는  $5,616 \times 3,744$  픽셀이다. 풀 프레임 센서는 코닥이 스틸 사진용으로 출시한 35mm 넓이의 필름과 동일한 크기인  $36 \times 24mm$  넓이의 이미지 센서를 가리킨다. 풀 프레임 센서는 이미지 셀의 면적이 커서 넓은 다이내믹 레인지(dynamic range)와 고감도에서 낮은 노이즈로 좋은 화질의 영상을 획득할 수 있고 더 선명한 해상력을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 광각 렌즈를 폭넓게 사용할 수 있다.

또한 그림 2(b)와 같이 Canon EF 35mm f/1.4L USM으로서 초점거리가 35mm인 단초점 렌즈를 사용하였다. 이 렌즈는 풀 프레임 규격 센서에 대응하는 제품으로 사람이



제조사	Canon
제품	EOS-1Ds Mark III
형태	디지털 일안 반사식 카메라(DSLR)
이미지센서형태	CMOS
화소크기 [ $\mu m$ ]	6.4
이미지크기 [pixels]	5,616 × 3,744
센서크기 [mm]	35.9424 × 23.9616
유효화소수	2,110만

a) 카메라 제원



제조사	Canon
제품	EF 35mm f/1.4L USM
렌즈구분	준표준단렌즈
초점거리 [mm]	35
조리개값	f/1.4~22 (최소~최대)
최대배율	0.18
필터지름 [mm]	72
화각	54°/38°/63° (수평/수직/대각선)
렌즈 구성	9군 11매 (8번째 비구면 렌즈)

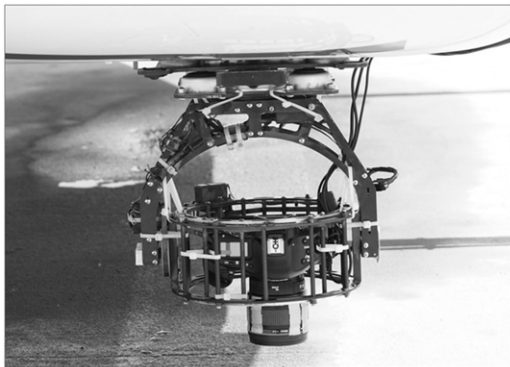
b) 렌즈 제원

그림 2. 카메라 및 렌즈 제원

눈으로 바라보는 시야각과 원근감에 가장 유사한 43 mm에 근접한 광각렌즈이나 약 40~60도의 표준화각을 갖고 있어 표준렌즈에 가깝다. 또한 렌즈는 9군 11매로 구성되어 있으며 접안 렌즈부(9번째에 위치)에 비구면 렌즈가 장착되어 있어 렌즈의 주변부를 통과하는 빛이 중심부를 통과하는 빛보다 더 짧은 거리에 초점을 맺히게 하는 구면 수차를 억제해 준다. 이와 같이 풀 프레임 센서가 내장된 카메라와 빛의 왜곡을 최소화 할 수 있는 렌즈를 사용한 보급형 장비를 본 연구에 활용하였다.

## 2.2 카메라 설치

항공사진촬영을 위해 그림 3(a)와 같이 헬리콥터 하단부에 카메라를 장착하였고 그림 3(b)와 같이 헬리콥터 내부에서 수동 조작하여 촬영할 수 있는 시스템을 구축했다. 촬영 영상은 카메라의 메모리와 노트북에 동시에 저장되도록 하였다. 또한 렌즈의 초점은 무한대 영역으로 설정하였고 초점모드는 MF(manual focus)로 하였다.



a) 카메라 장착



b) 촬영 제어

그림 3. 카메라 장착 및 촬영 제어

### 3. 자료 취득

#### 3.1 연구지역 선정

본 연구에서는 성남시 내 평지 부분을 연구지역으로 선정하였으며 1:1,000 도화원도를 획득할 수 있는 지역이다. 그림 4는 수치표고모델(DEM; Digital Elevation Model) 위에 정사영상을 3차원 가시화 한 것으로 흰색 테두리 내부 지역이 연구 대상지역이다. 이 지역은 주택이 밀집되어 있고 평지와 표고차가 5~15m 내외의 완만한 경사면으로 이루어진 특징이 있다.

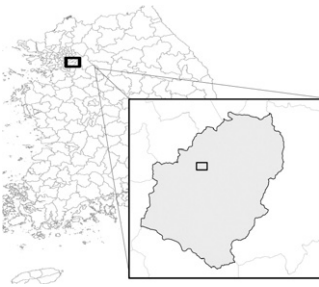


그림 4. 연구지역

#### 3.2 항공사진 촬영

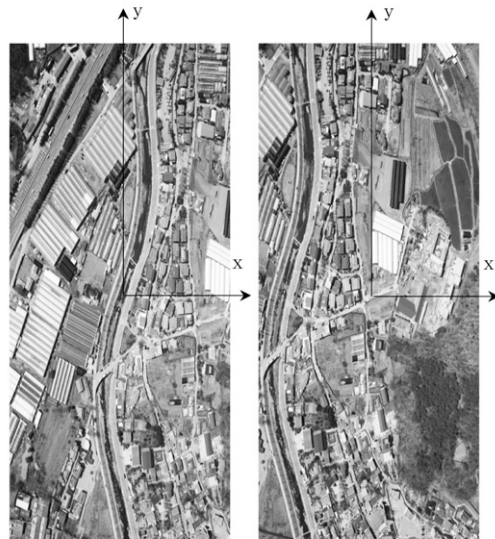
항공사진은 그림 5(a)와 같이 평균 575m 고도에서 중중복도 60%, 지상해상도 10cm 급으로 촬영하였다. 또한 획득한 항공사진은 촬영방향과 이미지 좌표를 일치시키기 위해 그림 5(b)와 같이 시계 방향으로 각각 90도 회전시켜 영상좌표를 설정하였다.

#### 3.3 지상기준점 획득

도화원도는 지형을 표현한 등고선과 표고점 외에 건물, 교량 등과 같은 구조물에 대해 매우 높은 정확도로 묘사



a) 항공사진 촬영



b) 영상좌표 설정

그림 5. 항공사진 촬영과 영상좌표 설정

되어 있을 뿐만 아니라 수직위치에 대한 정보를 포함하고 있어 3차원 정보를 획득하는데 매우 활발히 이용되고 있다. 본 연구에서는 도화원도를 이용하여 지상기준점을 3차원으로 구성하였고, 그림 6과 같이 사진 한 모델에 해당하는 면적에 고르게 분포되도록 1:1,000 도화원도에서 지상기준점을 선점하였다. 지상기준점은 건물 모서리 등과 같이 육안으로 뚜렷하게 구분되는 지점으로 선점하여 TL1~TL25까지 25점을 정의하였다.

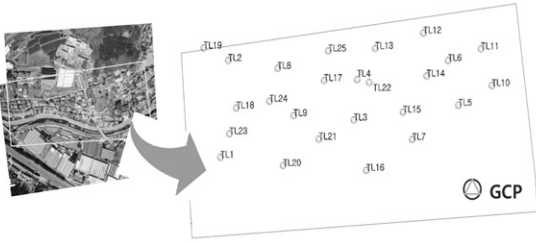


그림 6. 지상기준점

## 4. 렌즈 캘리브레이션

### 4.1 렌즈왜곡

일반적으로 촬영된 모든 광학영상에는 왜곡이 포함되어 있으며 사용하는 렌즈에 따라 촬영되는 영상의 왜곡 정도는 모두 다르게 나타난다(강진아 등, 2008). 본 연구에서 실험하는 35mm 렌즈는 표준렌즈로 분류되고 있으나 초점거리의 특성상 광각렌즈의 특징이 있다. 광각렌즈는 일반적인 표준렌즈보다 초점거리가 짧지만 피사계 심도가 깊어 시야각이 넓은 특징이 있다. 그러므로 촬영시 표준렌즈 보다 화상은 작아지게 되고 원근감에 따른 입체감이 지나치게 강조되기 때문에 피사체가 렌즈에 가까이 있으면 확대되어 보이고, 반대로 거리가 멀어지면 크기가 축소되는 등 물체들 사이의 거리감이 확대된다. 이와 같이 광각렌즈는 표준렌즈보다 짧은 초점거리와 깊은 피사계 심도에 의해 렌즈 가장자리에서 수평방향과 수직방향으로 왜곡이 나타난다. 따라서 광각렌즈를 사용하여 촬영된 영상을 사진측량에 활용하기 위해서 렌즈 중심에서 방사방향으로 발생하는 왜곡의 보정은 매우 중요한 요소라 할 수 있다.

렌즈왜곡 현상은 일반적으로 방사왜곡(radial distortion)과 편심왜곡(decentering distortion)으로 구분할 수 있다. 방사왜곡은 주점으로부터 방사방향으로 발생하는 왜곡으로 주점으로부터 거리가 멀어질수록 그 왜곡량은 증가한

다. 또한 방사방향으로 왜곡량이 대칭적으로 증가하기 때문에 대칭적 방사왜곡(symmetric radial distortion)이라고 하는데 이는 다시 양(+)과 음(-)의 방사왜곡으로 나누어지며 그림 7과 같이 렌즈 반경에 따른 왜곡량의 방향으로 방사왜곡 형태를 구분할 수 있다.

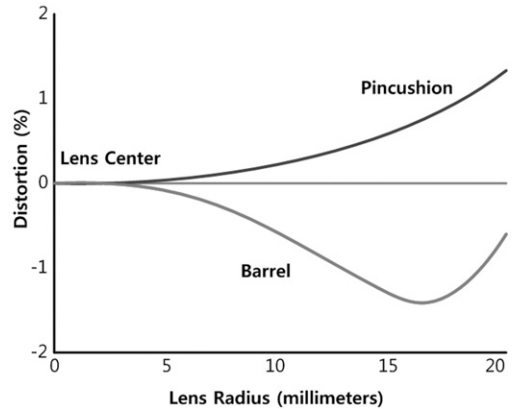


그림 7. 방사왜곡의 형태

양(+)의 방사왜곡은 pincushion 방사왜곡으로도 표현되며, 그림 8(a)의 a와 같이 영상의 네 모서리가 주점으로부터 멀어져 측면이 오목하게 휘어진 형태이다. 반대로 음(-)의 방사왜곡은 barrel 방사왜곡으로도 표현되며, 그림 8(a)의 b와 같이 영상의 네 모서리가 주점으로 가까워져 측면이 볼록하게 부풀어 오른 형태이다(황현덕, 2004).

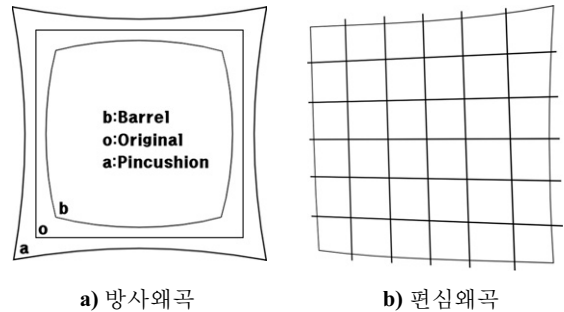


그림 8. 방사왜곡과 편심왜곡

편심왜곡은 카메라를 구성하고 있는 렌즈 조합의 불완전에 의해 발생하며 각 렌즈의 축이 일치하지 않고 카메라의 광축이 영상면과 수직을 이루지 않아 발생한다. 또한 편심왜곡은 비대칭방사왜곡(asymmetric radial distortion)과 접선왜곡(tangential distortion)이 합성되어 나타나며

렌즈에 따라 매우 다양한 형태를 띤다(강진아 등, 2008). 그림 8(b)은 편심왜곡의 예이다. 그러나 대부분의 카메라에서 편심왜곡보정량은 방사왜곡보정량에 비해 미소하기 때문에 무시하여도 큰 문제가 되지 않는다(Mikhail 등, 2001). 따라서 본 연구에서는 편심왜곡량이 없다고 가정하였으며 방사왜곡보정량만 계산하였다.

### 4.2 렌즈 캘리브레이션 방법

디지털 카메라를 이용한 사진측량시스템을 통해 보다 정확하고 안정적으로 정보를 취득하기 위해서는 카메라 특성에 맞는 기하학적인 모델을 적용하여야 한다(김기홍 등, 2010). 왜곡을 일으키는 카메라를 통하여 촬영된 영상과 대상공간과의 기하학적 모델을 수립하기 위해서는 카메라와 렌즈의 특성을 알아야 하며 이와 같은 과정을 통해 내부표정요소를 계산하는 일련의 과정을 캘리브레이션이라고 한다. 특히 카메라의 화소 및 이미지 센서 크기와 같은 정량적 파라미터 외에 렌즈에 대한 초점거리와 PPA 및 방사왜곡량과 같이 사진측량을 위해 필요한 내부표정요소인 정성적 파라미터를 계산하는 것이 렌즈 캘리브레이션이다. 이와 같은 렌즈 캘리브레이션 방법으로 검정표 및 캘리브레이션 타겟 등을 이용한 실내 실험이 이용되고 있으나 본 연구에서는 항공사진과 지상기준점을 이용한 캘리브레이션 방법을 선택하였다. 자료처리를 위한 설정에서 초기 내부표정요소는 초점거리( $c$ )가  $35\text{ mm}$ , PPA( $x_p, y_p$ )와 방사왜곡계수( $k_n$ )는 0으로 설정한 후 항공삼각측량 및 렌즈 캘리브레이션을 하였다. 캘리브레이션 후 계산된 내부표정요소( $c', x_p', y_p', k_n'$ )를 이용하여 다시 한 번 항공삼각측량을 하였으며 두 경우에 대한 지상기준점의 평균제곱근오차와 최대 잔차를 비교하였다. 렌즈 캘리브레이션 방법 및 자료처리 과정은 그림 9와 같다.

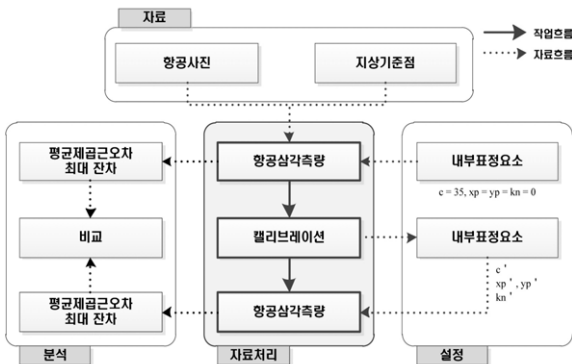


그림 9. 렌즈 캘리브레이션 및 자료처리 과정

### 4.3 렌즈 캘리브레이션 결과

사진 한 모델과 균등한 분포로 선점된 지상기준점을 이용한 렌즈 캘리브레이션 결과 표 1과 같이 카메라의 내부표정요소를 획득하였으며 특히 방사왜곡계수는  $k_0, k_1, k_2, k_3$ 와 같이 네 가지 요소로 계산하였다.

표 1. 렌즈 캘리브레이션에 의한 내부표정요소

구분	내부표정요소
초점거리	33.558 mm
PPA	$x_p = 0.0699\text{ mm}, y_p = -0.3153\text{ mm}$
방사왜곡계수	$k_0 = 1.617980\text{e-}02, k_1 = -9.05352\text{e-}05$ $k_2 = 1.122070\text{e-}07, k_3 = -5.33262\text{e-}11$

항공삼각측량 및 렌즈 캘리브레이션은 Bingo 5.3 소프트웨어를 이용하였다. 렌즈 캘리브레이션 이전의 내부표정요소를 이용하여 항공삼각측량을 실시한 결과 지상기준점의 평균제곱근오차 및 최대 잔차는 표 2와 같다.

표 2. 지상기준점의 평균제곱근오차 및 최대 잔차 (렌즈 캘리브레이션 전)

구분	X	Y	Z
평균제곱근오차 (m)	0.390	0.210	0.241
최대 잔차 (m)	0.803	0.443	0.562

지상기준점을 이용해 렌즈 캘리브레이션으로 획득한 초점거리, PPA, 방사왜곡계수의 7가지 내부표정요소를 적용하여 항공삼각측량을 하였다. 그 결과 렌즈 캘리브레이션을 실시한 후의 지상기준점에 대한 평균제곱근오차와 최대 잔차는 표 3과 같다.

표 3. 지상기준점의 평균제곱근오차와 최대 잔차 (렌즈 캘리브레이션 후)

구분	X	Y	Z
평균제곱근오차 (m)	0.037	0.055	0.013
최대 잔차 (m)	0.089	0.093	0.028

## 5. 분석

### 5.1 렌즈의 방사왜곡

캘리브레이션 결과 렌즈의 방사왜곡량을 그림 10과 같이 가로, 세로 1mm 간격으로 계산하여 각각 36mm의 정방향으로 도해하였으며 격자마다 x, y 축에 대해 +, -

방향의 평면 이동량을 표현하였다. 왜곡량은 렌즈 중심에서 반경 16mm까지 주점에서 멀어지는 방향으로 발생하다가 0이 되고 이후 급격히 중심 방향으로 크게 나타나며 이로 인해 영상의 모서리를 주점방향으로 당기는 형태를 띤다.

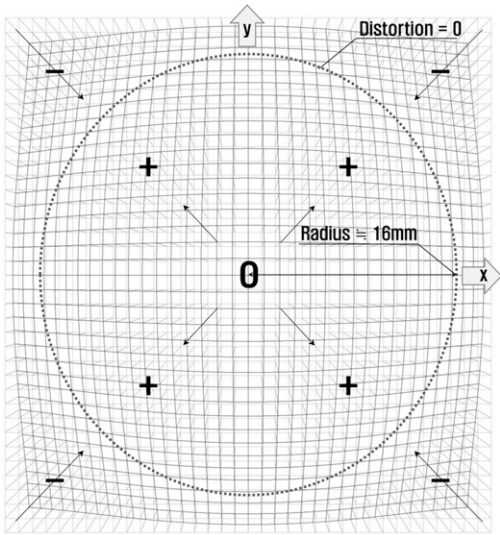


그림 10. 렌즈의 방사왜곡

렌즈 캘리브레이션 결과 렌즈 반경에 따른 방사왜곡량을  $\mu\text{m}$  단위로 계산하여 중심에서 반경 25mm까지 계산하였으며 그림 11과 같이 표현하였다. 그 결과 렌즈 중심으로부터 반경 16mm까지 양(+)의 방사왜곡이 나타났고 이후 가장자리 방향으로 음(-)의 방사왜곡이 급격히 증가하였다. 또한 가장자리의 최대 방사왜곡량은  $-248.97\mu\text{m}$  로써 39픽셀이었다.

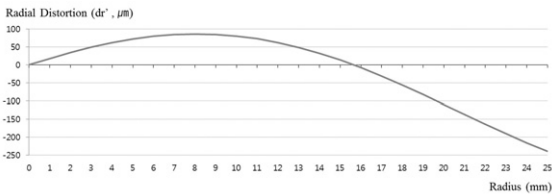
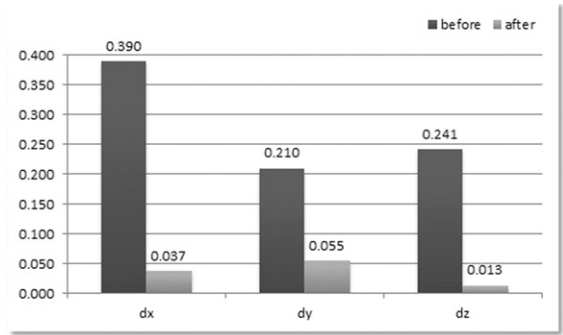


그림 11. 렌즈 반경에 따른 왜곡량

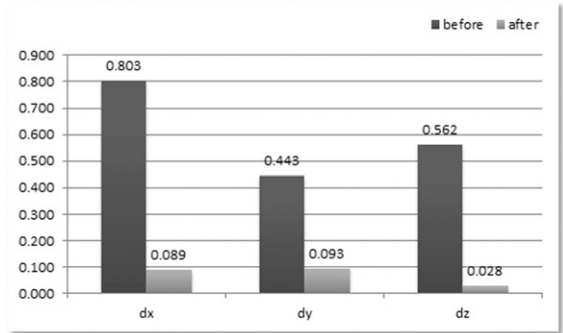
### 5.2 항공삼각측량 결과 분석

항공삼각측량 결과 그림 12와 같이 렌즈 캘리브레이션 전후에 대한 지상기준점의 평균제곱근오차와 최대 잔차를 그래프로 표현하였다. 그 결과 그림 12(a)와 같이 렌즈

캘리브레이션 후의 평균제곱근오차는 전보다 X, Y, Z 방향에서 각각 11배, 4배, 19배 작았으며 그림 12(b)와 같이 최대 잔차는 9배, 5배, 20배 더 작게 나타나 렌즈 캘리브레이션에 의한 정확도가 매우 큰 폭으로 향상되었음을 알 수 있었다. 항공삼각측량시 지상기준점에 대한 관측 정확도는 0.146m이다.



a) 평균제곱근오차



b) 최대 잔차

그림 12. 렌즈 캘리브레이션 전후에 대한 지상기준점의 평균제곱근오차와 최대 잔차

## 6. 결론

최근 광학 디지털 기술의 발달로 수천만 화소의 카메라를 쉽게 접할 수 있게 되었을 뿐만 아니라 정밀한 렌즈와 함께 사용할 수 있는 DSLR 카메라는 사진측량 분야에 다양하게 활용되고 있다. 그러나 이와 같은 카메라를 활용하기 위해서는 카메라와 렌즈에 대한 내부표정요소의 정보는 필수적이나 제조사에서는 이를 제공하고 있지 않다. 따라서 캘리브레이션 과정을 통해 내부표정요소를 획득하는 것은 필수적이며, 특히 렌즈에 의한 왜곡현상을 보정하는 것은 매우 중요하다. 이를 위한 방법으로 캘리브레이션 타겟 등을 이용한 실내 정밀 캘리브레이션 방법이

이용되고 있으나 본 연구에서는 지상기준점을 이용하여 캘리브레이션 하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 본 연구를 통해 2,110만 화소급 비측량용 디지털 카메라와 35mm 렌즈를 축척 1:1,000 도화원도에서 획득한 지상기준점을 활용하여 캘리브레이션 하였으며 왜곡 형태 및 왜곡량과 같은 렌즈의 특징을 획득할 수 있었다.

둘째, 캘리브레이션 결과 렌즈에 대한 초점거리( $c$ ), PPA( $x_p, y_p$ ), 방사왜곡계수( $k_0, k_1, k_2, k_3$ )를 획득하였다.

셋째, 항공삼각측량을 통해 렌즈 캘리브레이션 전후의 평균제곱근오차와 최대 잔차를 비교하였으며, 그 결과 렌즈 캘리브레이션 후에는 항공삼각측량에 의한 지상기준점의 평균제곱근오차와 최대 잔차가 매우 큰 폭으로 향상되었음을 알 수 있었다.

본 연구를 통해 비측량용 디지털 카메라는 지상기준점을 이용한 렌즈 캘리브레이션 만으로도 항공사진측량에 충분히 활용할 수 있을 것으로 판단되며, 수치도화 및 정사영상제작에 활용하기 위한 있는 연구가 필요할 것으로 사료된다. 또한 실제 측량된 지상기준점을 이용하고 두 모델 이상의 항공사진을 이용한 캘리브레이션을 통해 본 연구에서 실험한 캘리브레이션 방법의 활용 범위를 판단할 필요가 있을 것으로 사료된다.

### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시기술개발사업 - 지능형국토정보기술혁신사업과제의 연구비지원(06국토정보 B01)에 의해 수행되었습니다.

### 참고문헌

강진아, 박재민, 김병국 (2008), 사진측량 기법을 사용한 광각렌즈 왜곡보정에 관한 연구, 한국측량학회지, 제 26권 제 2호, pp. 103-110.

김기홍, 윤준희, 박하진 (2010), 스테레오 디지털 카메라를 이용한 사진측량의 정확도, 한국측량학회지, 제 28권, 6호, pp. 663-668.

김기홍, 정수, 김백석 (2010), 줌렌즈 디지털 카메라의 내부표정요소 변화, 한국측량학회지, 제 28권, 제 1호, pp. 93-98.

오재홍, 이창노, 어양담 (2006), 비측정용 디지털 카메라의 효율적인 자체 검정을 위한 대상지 구성, 한국측량학회지, 제 24권, 제 3호, pp. 281-288.

정성혁, 임형민, 이재기 (2009), 디지털 카메라를 이용한 무인항공 사진측량의 정확도 분석, 한국측량학회지, 제 27권, 제 6호, pp. 741-747.

황현덕 (2004), 4S-Van 영상을 이용한 정밀 3차원 위치결정에 관한 연구, 석사학위논문, 인하대학교, pp. 11-16.

Fraser, C.S. (1997), Digital camera self-calibration, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol. 52, pp. 149-159.

Gruen, A. and Beyer, H.A. (1992), System calibration through self-calibration., Workshop on Calibration and Orientation of Cameras in Computer Vision(TU-1), *ISPRS XVII Congress*, Washington, D.C., pp. 33.

Kenefick, J.F., Gyer, M.S. and Harp, B.F. (1972), Analytical self-calibration, *Photogrammetric Engineering*, Vol. 38, pp. 1117-1126.

Mikhail, E. M., Bethel, J. S., McGlone, J. C. (2001), *Introduction to Modern Photogrammetry*, John Wiley & Sons Inc., pp. 41-44, 247-275.