

# 비측량용 카메라 내부표정요소의 장기간 안정성 평가

## Evaluation of Long-term Stability of Interior Orientation Parameters of a Non-metric Camera

정 수<sup>1)</sup>  
Jeong, Soo

### Abstract

In case of metric cameras, not only fiducial marks but also various parameters related to camera lens are provided to users for the interior orientation process. The parameters have been acquired through precise camera calibration in laboratory by camera maker. But, in case of non-metric cameras, the interior orientation parameters should be determined in person by users through camera calibration with great number of control points.

The interior orientation parameters of metric cameras are practically used for long time. But in case of non-metric cameras, the long-term stability of the interior orientation parameters have not been established. Generally, the interior orientation parameters of non-metric cameras are determined in every photogrammetric work. It's been an obstacle to use the non-metric camera in photogrammetric project because so many control points are required to get the interior orientation parameters.

In this study, camera calibrations and photogrammetric observations using a non-metric camera have been implemented 25 times periodically for 6 months and the results have been analyzed. As a result, long-term stability of the interior orientation parameters of a non-metric camera is analyzed.

Keywords : Non-metric camera, Interior orientation parameters, Camera calibration, Long-term stability of interior orientation parameters

### 초 록

측량용 카메라의 경우에는 내부표정을 위해 사진지표 뿐만 아니라 렌즈에 관련된 다양한 매개변수들이 제작사의 정밀 검정을 통해 제공된다. 반면에 비측량용 카메라는 정확한 위치를 알고 있는 다수의 기준점을 이용하여 사용자가 직접 카메라 검정을 통해 내부표정요소를 구하여야 한다.

측량용 카메라는 한번 검정된 내부표정 결과를 장기간 지속적으로 활용하고 있는 것에 반하여, 비측량용 카메라의 경우에는 아직까지 장기간에 따른 내부표정요소의 안정성이 충분히 규명되지 않은 상태이다. 따라서, 비측량용 카메라의 경우 사진측량작업을 할 때마다 내부표정요소를 구하기 위한 작업을 별도로 수행하는 경우가 많다. 이는 다량의 기준점을 이용해야 하므로 매우 번거로운 작업이며, 비측량용 카메라의 활용에 장애가 되어 왔다.

본 연구에서는 일반 디지털 카메라에 대해 6개월간에 걸쳐 25회의 카메라 검정과 관측을 주기적으로 실험하여 내부표정요소를 구하고, 이를 분석함으로써 비측량용 카메라의 내부표정요소가 장기간 동안 어느 정도 안정적인지를 검토하였다.

핵심어 : 비측량용 카메라, 내부표정요소, 카메라 검정, 내부표정요소의 장기간 안정성

## 1. 서 론

기존에는 사진측량을 수행하는 데 있어서 고가의 측량

용 카메라가 사용되어 왔으나 최근에는 저가의 디지털 카메라가 급격히 보급됨에 따라 비측량용 카메라를 사진측량에 활용하기 위한 연구가 다수 이루어져 왔다(정수,

1) 정회원 · 안동대학교 공과대학 토목공학과 부교수(E-mail : soo@andong.ac.kr)

2009; 정수, 2010).

측량용 카메라와 비측량용 카메라의 구분은 사진측량 작업 단계 중 내부표정 방법의 차이로 구분할 있다. 측량용 카메라의 경우에는 내부표정을 위한 사진지표가 제공될 뿐만 아니라 렌즈에 관련된 다양한 매개변수들이 제작사의 정밀 검정을 통해 제공된다. 반면에 비측량용 카메라는 정확한 위치를 알고 있는 다수의 기준점을 이용하여 사용자가 직접 초점거리, 주점의 위치, 영상왜곡 계수 등의 내부표정요소를 구하여 내부표정을 수행하여야 한다. 일반적으로 비측량용 카메라의 경우 사진측량작업을 할 때마다 내부표정요소를 구하기 위한 작업을 별도로 수행하는 경우가 많은데, 이는 다량의 기준점을 이용해야 하므로 매우 번거로운 작업이며, 비측량용 카메라를 활용하는 데 장애가 되어 왔다.

최근에 비측량용 디지털 카메라의 성능 및 기하학적 안정성이 비약적으로 향상되고 있으며, 특히 디지털 카메라를 이용해 손쉽게 수치영상을 얻을 수 있게 됨에 따라 사진측량 작업에 있어서 비측량용 카메라의 활용이 지속적으로 증대될 것으로 기대되고 있다. 그러나 측량용 카메라라는 한 번 검정된 내부표정 결과를 장기간 지속적으로 활용하고 있는 것에 반하여, 비측량용 카메라의 경우에는 아직까지 장기간에 따른 내부표정요소의 안정성이 충분히 규명되지 않은 상태이다.

수치사진측량을 기반으로 하는 근거리 사진측량에 대한 연구는 주로 수치사진측량의 활용 타당성 조사를 위한 연구, 최적 적용 방안 도출을 위한 연구, 카메라의 왜곡 보정에 관한 연구 등으로 이루어져 왔다.

이 중 지상카메라의 왜곡보정에 관한 연구로는 오재홍 등(2006)이 비측량용 카메라의 자체검정을 통해 내부표정요소를 계산하기 위해서 지상기준점의 수, 사진의 수, 기준점의 차원 등의 조건의 변화에 따른 카메라 자체검정의 정확도를 분석하였다. 정성수 등(2008)은 줌렌즈를 사용할 경우에 렌즈의 줌, 포커스, 조리개 수치 등의 변화에 따라 렌즈모델의 변화를 실험적으로 조사하고 특정한 변화 패턴을 찾을 수 있는 가능성을 제시하였다. 김기홍 등(2010)도 디지털 카메라의 줌렌즈에서 줌의 배율에 따른 렌즈의 주점과 방사왜곡 매개변수의 변화를 실험적으로 분석하였다.

해의 관련분야에서의 최근 연구동향을 살펴보면 Habib 등(2005)이 저가의 상용 디지털 카메라에 대해 직선을 이용하여 내부표정에 대한 검증을 실시하였다. Fraser 등(2006)은 줌렌즈가 장착된 디지털 카메라의 검정방법을

제안함으로써 내부표정과 렌즈왜곡을 초점거리의 함수로 표현하는 방법을 제안하였다.

기존의 연구들을 살펴보면, 비측량용 카메라의 활용 가능성만 입증했을 뿐 실무에서의 활용은 원활하지 못할 것으로 파악된다. 또한 정확한 위치를 알고 있는 상당한 수의 기준점이 필요하므로 실무에서 요구하는 신속하고 간편한 활용에는 한계가 있을 수 있다.

본 연구에서는 보급형 디지털 카메라에 대해 장기간에 걸쳐 카메라 검정과 사진측량 실측을 주기적으로 수행함으로써 내부표정요소 매개변수들의 장기간 안정성을 평가하고자 한다. 즉, 일반 디지털 카메라를 장기간의 사진측량 작업에 활용할 수 있는 가능성과 한계를 규명함으로써, 사진측량 작업에 있어서 일반 디지털 카메라의 활용도를 높이고, 아울러 경제성을 확보하고자 한다.

## 2. 사진의 내부표정요소

사진측량에서 대상공간 상의 점  $P(X,Y,Z)$ 과 그에 해당하는 사진 상의 점  $p(x,y)$ 의 기하학적 관계는 다음과 같은 공선조건식을 기반으로 한다(Atkinson, 1996).

$$\begin{aligned} x-x_o+\Delta x &= -f \frac{m_{11}(X-X_o)+m_{12}(Y-Y_o)+m_{13}(Z-Z_o)}{m_{31}(X-X_o)+m_{32}(Y-Y_o)+m_{33}(Z-Z_o)} \\ y-y_o+\Delta y &= -f \frac{m_{21}(X-X_o)+m_{22}(Y-Y_o)+m_{23}(Z-Z_o)}{m_{31}(X-X_o)+m_{32}(Y-Y_o)+m_{33}(Z-Z_o)} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $x_o$ 와  $y_o$ 는 상좌표계(image coordinate system)에서의 주점(principal point)의 위치,  $f$ 는 초점거리 또는 주점거리(principal distance),  $X_o, Y_o, Z_o$ 는 대상좌표계(object coordinate system)에서의 투영중심의 위치,  $m_{11}, m_{12}, \dots, m_{33}$ 는 대상좌표계와 사진좌표계간의 3차원 회전행렬의 요소,  $\Delta x, \Delta y$ 는 부가매개변수(additional parameters)이다.

사진의 내부표정요소는 카메라 내부에서 투영중심점으로부터 사진 상의 점까지의 광선 경로에 영향을 주는 요소들을 말하며, 식(1)에서  $x_o, y_o, f, \Delta x, \Delta y$ 가 내부표정요소가 된다.

부가매개변수  $\Delta x, \Delta y$ 는 렌즈왜곡을 물리적으로 표현하는 항들로 설정할 수 있으며, 렌즈의 중심으로부터의 이격량에 따라 방사방향으로 편이가 발생하는 방사왜곡(radial distortion)  $\Delta x_r, \Delta y_r$ 과 조합렌즈에서 렌즈의 중심이 일치하지 않아 편이가 발생하는 편심왜곡(decentering distortion)  $\Delta x_c, \Delta y_c$ 의 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta x &= \Delta x_r + \Delta x_c \\ \Delta y &= \Delta y_r + \Delta y_c \end{aligned} \quad (2)$$

방사왜곡은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다(McGlone 등, 2004).

$$\Delta r = K_1 r^3 + K_2 r^5 + K_3 r^7 + \dots \quad (3)$$

여기서,  $\Delta r$ 은 방사왜곡량,  $r = \sqrt{(x-x_o)^2 + (y-y_o)^2}$ 로서 주점으로부터의 방사방향의 거리를 나타내고,  $K_1, K_2, K_3, \dots$ 는 방사왜곡 매개변수가 된다. 방사왜곡  $\Delta r$ 은 x축 방향의 성분  $\Delta x_r$ 과 y축 방향의 성분  $\Delta y_r$ 로 분해할 수 있다.

편심왜곡은 다음과 같이 나타낼 수 있다(McGlone 등, 2004).

$$\begin{aligned} \Delta x_c &= [P_1(2x^2 + y^2) + 2P_2xy][1 + P_3r^2 + \dots] \\ \Delta y_c &= [2P_1xy + 2P_2(x^2 + 2y^2)][1 + P_3r^2 + \dots] \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,  $P_1, P_2, P_3, \dots$ 는 편심왜곡 매개변수가 된다.

일반적으로 방사왜곡 매개변수와 편심왜곡 매개변수의 고차항은 물리적으로 매우 미소한 값이 되므로 일반적으로 2차항까지만 고려해도 충분하다. 따라서 카메라의 내부표정요소는  $x_o, y_o, f, K_1, K_2, P_1, P_2$  등 7개의 요소로 나타낼 수 있다.

충분한 수의 기준점이 있을 경우에 내부표정요소는 조정값으로 간주될 수 있으며, 외부표정요소와 더불어 관측방정식을 구성하여 조정함으로써 그 값을 구할 수 있다.

### 3. 실험

#### 3.1 실험 장비

카메라는 비측량용 카메라 중에서도 손쉽게 활용할 수 있는 저가의 일반 컴팩트 디지털 카메라를 기준으로 선정하였다. 실험에서 사용한 카메라는 그림 1과 같은 일본 Canon사의 보급형 컴팩트 디지털 카메라인 IXUS 750 모델로서 2005년도에 출시되어 현재는 단종된 구형 제품이다. 이미지 센서는 1/1.8인치 CCD이며 유효화소수가 710만개이다. 렌즈는 약 7.7mm~23.1mm의 줌렌즈로 되어 있다. 대부분의 보급형 컴팩트 디지털 카메라와 마찬가지로 오토포커스를 비롯한 대부분의 기능이 자동으로 설정되어 촬영된다.

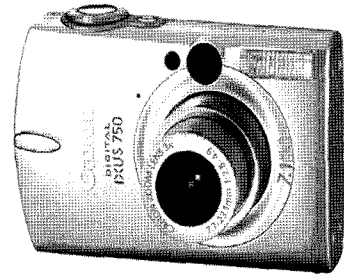


그림 1. 실험 대상 카메라(일본 Canon사의 IXUS 750)

비측량용 카메라의 내부표정요소는 카메라 검정을 통해 결정할 수 있다. 카메라 검정은 실험실에서 multicollimator나 goniometer 등의 전문 장비를 이용하는 방법, 천체를 이용하는 방법, 현장의 기준점을 이용하는 방법 등이 있다(Wolf, 1983).

본 연구에서는, 현장의 기준점을 이용하는 방법을 간편하게 적용할 수 있도록 개발된, 미국 EOS Systems Inc.에서 판매하고 있는 상용 수치사진측량시스템인 PhotoModeler<sup>®</sup> ver. 6.0에서 제공하는 카메라 검정 기능을 활용하여 카메라의 내부표정요소를 구하였다.

PhotoModeler<sup>®</sup>는 카메라 검정을 위해 그림 2와 같은 검정판(calibration board)을 PDF 포맷의 컴퓨터 파일로 제공하고 있으며, 이를 플로터를 사용하여 가로, 세로 각 36인치 크기로 인쇄하여 카메라 검정에 이용하도록 하고 있다.

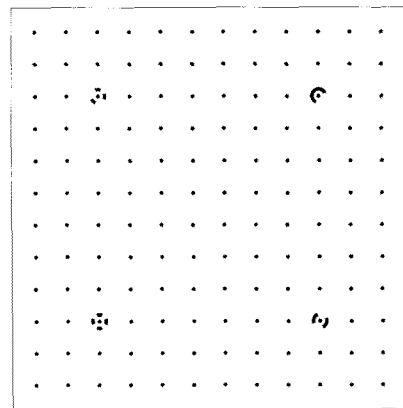


그림 2. PhotoModeler<sup>®</sup>의 카메라 검정판

카메라 검정 방법은, 제공된 검정판을 편평한 바닥에 펼쳐 놓고, 상하좌우 네 방향에서 가로 사진을 촬영한다. 그 다음에 카메라를 -90도 회전한 세로 사진 상태로 네 방향에서 촬영을 한다. 그 다음에는 카메라를 +90도 회전한

세로 사진 상태로 네 방향에서 촬영을 한다. 이렇게 총 12매의 사진을 촬영한 후, 카메라 검정 프로젝트(Camera Calibration project)를 구성하여 촬영된 12매의 사진을 지정하면 카메라 검정이 자동으로 수행된다.

검정용 사진을 촬영하는 동안에 검정판의 위치가 변동되지 않도록 하여야 한다. 검정판에는 그림 2에 나타난 것과 같이 4개의 부호화된 타겟점(coded target)이 있어서 프로그램에서 사진 촬영 방향을 자동 인식할 수 있으므로, 촬영 순서는 문제가 되지 않는다.

PhotoModeler<sup>®</sup>의 카메라 검정 기능은 초점거리( $f$ ), 사진의 좌측 상단을 기준으로 하는 주점의 위치( $x_p, y_p$ ), CCD의 높이( $F_h$ )를 기준으로 하는 CCD의 길이( $F_w$ ), 방사 왜곡 매개변수( $K_1, K_2, K_3$ ), 편심왜곡 매개변수( $P_1, P_2$ )를 구해준다. 또한, 카메라 검정과정에 상관성 분석을 통하여 불필요한 매개변수를 제거하는 기능도 제공하고 있다.

### 3.2 실험 방법

장기간 동안의 카메라 검정을 수행하기 위하여 2010년 8월 4일부터 2011년 1월 26일까지 약 6개월간 총 26주에 걸쳐 25회의 실험을 하였다. 가급적 매주 수요일 오후 2시를 기준으로 하여 실험을 수행하였으며, 추석 연휴로 인하여 시작 후 6주차에는 실험이 이루어지지 못하였다.

매회의 실험에서는 카메라 검정과 검정판을 이용한 사진 측량을 수행하였고, 이는 건물 옆의 실외에서 이루어졌다.

저가의 비측량용 카메라의 내부표정요소가 장기간에 걸쳐 어떻게 변동되는가를 실험해 보기 위해, 매회 실험 때마다 그림 2에 나타나 있는 검정판을 이용하여 3.1절에서 설명한 12매의 검정용 사진을 촬영하여 카메라 검정을 실시하였다. 장기간 동일한 검정판을 사용해야 하므로 플로터로 출력된 검정판을 나무 판넬에 부착하여 보관하면서 실험에 활용하였다.

사용된 카메라는 일반 콤팩트 디지털 카메라와 마찬가지로 줌렌즈가 장착되어 있다. 일반적으로 사진측량에서는 광각 촬영이 활용도가 높으므로 본 연구에서는 최대 광각으로 하여 검정용 사진을 촬영하였다. 아울러 촬영 시에는 현장에서의 일반적인 상황을 염두에 두고 삼각대 없이 손으로 들고 검정용 사진을 촬영을 하였다.

검정용 사진을 촬영한 후, 그림 3과 같이 검정판을 약 45도 각도로 벽에 기대어 세우고 약 2m 거리에서 좌측, 중앙, 우측 방향에서 3매의 수렴사진을 촬영하였다. 이때에도 삼각대 없이 카메라를 손으로 들고 촬영을 하였다. 촬영

된 3매의 수렴사진을 이용하여 검정판의 가장 외곽에 위치한 4개의 타겟점이 이루는 사각형의 각 변(그림 3에서 Line1, Line2, Line3, Line4)의 길이를 PhotoModeler<sup>®</sup>의 점 기반 프로젝트(points-based project) 기능을 이용하여 사진 측량 하였다.

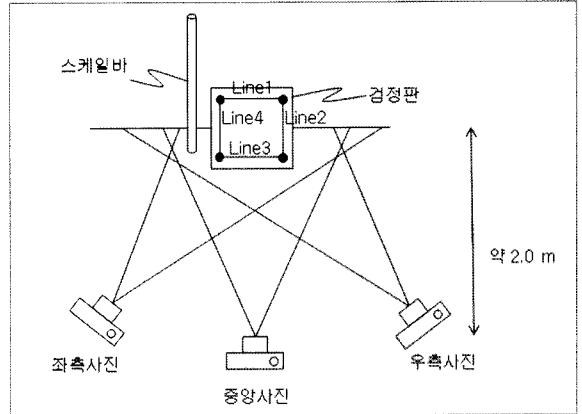


그림 3. 사진측량 실험을 위한 촬영 조건

점 기반 프로젝트를 구성하기 위해서는 내부표정요소를 주 내용으로 하는 카메라 정보를 입력하여야 한다. 본 연구에서는 최초의 실험에서 얻어진 내부표정요소를 이용하는 경우와 매회의 실험에서 얻어진 내부표정요소를 이용하는 경우, 2가지에 대해 점 기반 프로젝트를 구성하여 각각 사진측량을 실시하였다. 이는 처음에 구한 내부표정요소와 매회 실험 때마다 구한 내부표정요소에 따라 사진 측량 결과에 어떤 차이가 있는 지를 알아보기 위함이다.

PhotoModeler<sup>®</sup>에서는 여타의 사진측량시스템처럼 모델 별로 6개의 접합점(tie points)을 관측함으로써 상호표정(relative orientation)이 이루어진다. 상호표정 상태에서는 대상점들이 모델좌표로 관측되므로 이를 실좌표계로 전환하기 위해서는 실제 좌표를 알고 있는 절대표정점이 필요하다. 하지만, 길이와 같은 대상물의 단순 제원만을 알고자 할 때에는 모델좌표계와 실좌표계 간의 축척 변환만을 수행하여도 충분하다. 이 경우에 하나의 기선에 대한 모델좌표계 상에서의 길이와 실좌표계 상에서의 길이를 알면 변환이 가능하다.

본 연구에서는, 그림 3에 나타난 것과 같이, 길이 1083.99 mm인 스케일바를 검정판 우측에 세워놓고 촬영을 하였다. PhotoModeler<sup>®</sup>를 이용하여 촬영된 3매의 수렴 사진 상에서 검정판 상 가장 외곽에 위치한 4개의 타겟점과 스케일바의 양 끝 2점 등 총 6개의 점을 관측하였고, 이

를 접합점으로 하여 3매의 사진으로 이루어진 모델을 구성하였다. 그리고 스케일바의 양 끝단의 길이를 기준으로 모델좌표계와 실좌표계 간의 축척 변환을 수행하였다. 그리하여 앞서 설명한 검정판 상 가장 외곽에 위치한 타겟 점들이 이루는 사각형의 각 변의 길이를 실측하였다. 앞서 설명한 바와 같이, 이러한 사진측량에 의한 실측은 최초 실험에서 검정된 내부표정요소와 매회 실험에서 검정된 내부표정요소, 두 가지 경우에 대해 이루어졌다.

#### 4. 결과 분석 및 고찰

##### 4.1 내부표정요소의 변화 분석 및 고찰

본 연구에서 약 6개월간 총 26주에 걸쳐 수행한 25회의 실험에서, PhotoModeler<sup>®</sup>의 검정판을 이용하여 매번 카메라 검정 수행 결과로 얻어진 장기간의 내부표정요소 산

정 결과는 표 1과 같다.

표 1의 실험 결과에는 과대오차가 포함될 수 있다. 따라서 각 내부표정요소 값들에 대해 표준편차  $\sigma$ 를 구하고  $-3\sigma \sim +3\sigma$  범위를 벗어나는 값을 찾아본 결과, 2010년 12월 1일 실험결과 중에서 초점거리( $f$ )와 방사왜곡 매개변수  $K_2$ 가, 2010년 12월 8일 실험결과 중에서 방사왜곡 매개변수  $K_1$ 이 범위를 벗어나 있었다. 해당 날짜의 실험결과를 제외후 다시 표준편차를 구하고  $-3\sigma \sim +3\sigma$  범위를 벗어나는 값을 찾아본 결과, 2010년 10월 13일 실험결과 중 방사왜곡 매개변수  $K_1$ 이 범위를 벗어나 있었다. 해당 날짜의 실험결과를 제외하고 다시 확인해 본 결과 나머지 모든 실험결과는  $-3\sigma \sim +3\sigma$  범위에 있었다.

과대오차가 포함된 것으로 추정되는 날짜의 자료들을 제거한 나머지 22회 실험 결과에 의한 내부표정요소의 통계 분석 결과는 표 2와 같다.

표 1. 내부표정요소의 산정 결과

날짜	온도(°)	$f$ (mm)	$x_p$ (mm)	$y_p$ (mm)	$K_1$	$K_2$	$P_1$	$P_2$
2010.08.04	31	7.941	3.633	2.781	2.297E-03	-2.977E-05	6.947E-06	-9.701E-05
2010.08.11	30	7.940	3.632	2.777	2.301E-03	-2.899E-05	4.913E-06	-1.019E-04
2010.08.18	29	7.941	3.650	2.769	2.307E-03	-2.940E-05	3.038E-05	-8.007E-05
2010.08.26	31	7.940	3.631	2.780	2.337E-03	-2.979E-05	-3.530E-06	-1.043E-04
2010.08.31	28	7.941	3.634	2.780	2.303E-03	-2.961E-05	-7.497E-08	-1.027E-04
2010.09.08	28	7.941	3.631	2.779	2.317E-03	-3.063E-05	9.783E-06	-9.700E-05
2010.09.15	28	7.948	3.649	2.778	2.295E-03	-3.354E-05	2.826E-05	-3.268E-05
2010.09.29	23	7.941	3.628	2.776	2.312E-03	-3.025E-05	1.106E-05	-1.030E-04
2010.10.06	25	7.941	3.629	2.780	2.306E-03	-3.033E-05	1.246E-05	-1.006E-04
2010.10.13	24	7.947	3.648	2.784	2.189E-03	-2.531E-05	-2.736E-05	-8.966E-05
2010.10.20	23	7.940	3.634	2.776	2.274E-03	-2.705E-05	-1.435E-05	-1.111E-04
2010.10.27	17	7.936	3.620	2.783	2.300E-03	-3.001E-05	4.698E-06	-1.136E-04
2010.11.03	13	7.934	3.638	2.764	2.316E-03	-2.924E-05	2.587E-05	2.000E-06
2010.11.10	10	7.932	3.615	2.779	2.279E-03	-2.583E-05	1.423E-05	-1.225E-04
2010.11.17	10	7.934	3.621	2.783	2.341E-03	-3.161E-05	-5.637E-06	-1.050E-04
2010.11.24	13	7.934	3.617	2.781	2.330E-03	-3.058E-05	9.365E-06	-1.069E-04
2010.12.01	6	7.915	3.597	2.769	2.397E-03	-2.178E-05	3.414E-05	-1.642E-04
2010.12.08	1	7.949	3.623	2.785	2.150E-03	-2.708E-05	-1.527E-05	-9.044E-05
2010.12.14	5	7.934	3.616	2.778	2.321E-03	-3.019E-05	1.000E-06	1.300E-06
2010.12.23	8	7.935	3.620	2.779	2.307E-03	-2.969E-05	-5.221E-06	-1.050E-04
2010.12.29	-1	7.933	3.612	2.777	2.328E-03	-3.052E-05	1.021E-05	-1.139E-04
2011.01.05	2	7.931	3.612	2.775	2.318E-03	-2.804E-05	6.330E-06	-1.249E-04
2011.01.12	-2	7.934	3.613	2.777	2.329E-03	-3.051E-05	9.973E-06	-1.115E-04
2011.01.19	-1	7.932	3.631	2.765	2.327E-03	-3.035E-05	2.793E-05	-9.749E-05
2011.01.26	-1	7.934	3.613	2.777	2.319E-03	-3.026E-05	1.277E-05	-1.097E-04

표 2. 과대오차 제거 후의 내부표정요소 산정 결과의 통계 분석

통계항목	온도(°)	$f$ (mm)	$x_p$ (mm)	$y_p$ (mm)	$K_1$	$K_2$	$P_1$	$P_2$
평균	15.9	7.937	3.626	2.777	2.312E-03	-2.983E-05	8.971E-06	-9.262E-05
표준편차	12.1	0.004	0.011	0.005	1.725E-05	1.518E-06	1.164E-05	3.546E-05
최대값	31	7.948	3.650	2.783	2.341E-03	-2.583E-05	3.038E-05	2.000E-06
최소값	-2	7.931	3.612	2.764	2.274E-03	-3.354E-05	-1.435E-05	-1.249E-04
범위	33	0.017	0.038	0.019	6.700E-05	7.710E-06	4.473E-05	1.269E-04

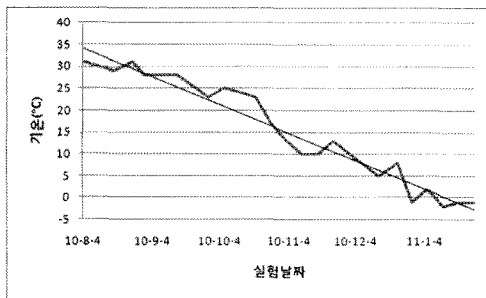
표 2의 통계분석결과를 보면, 초점거리는 평균 7.937 mm이며, 표준편차가 0.004 mm로 줌렌즈를 최대 광각에 맞추어 촬영한 것에 비해 매우 정밀한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 주점의 위치의 경우  $x_p$ 의 표준편차는 0.011 mm,  $y_p$ 의 표준편차는 0.005 mm로 나타났다. 이는 기존의 측량용 사진기에서 사진좌표 정밀도를 일반적으로 0.01 mm로 간주하였던 것을 감안하면, 저가의 비측량용 디지털 카메라의 결과값으로서는 예상보다 매우 양호한 정밀도를 나타낸다고 볼 수 있다.

방사왜곡 매개변수  $K_1$ 과  $K_2$ 의 경우에는 표준편차를 평균값으로 나눈 변동계수가 각각 0.7%, 5.1%로 매우 우수하다. 반면에  $P_1$ 과  $P_2$ 의 경우에는 (+)값과 (-)값이 무작위로 나타나며 변동계수도 각각 129.7%, 38.3%로 매우 크다. 이는 실험에 사용된 콤팩트 디지털 카메라의 경우 오

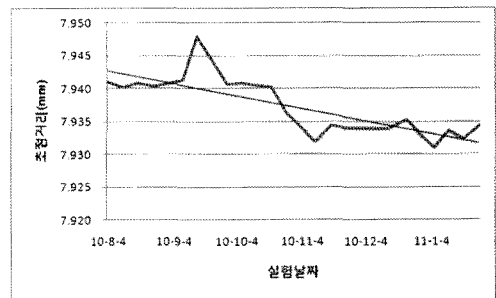
토포커스 기능 중에 렌즈의 회전이 이루어지는 것이 아닌 가 하는 추정을 하게 한다.

$P_1$ 과  $P_2$ 의 경우에 식(4)를 이용해 사진좌표  $(x, y)$ 의 최대값을 적용하여도  $\Delta x_c$ 의 최대값은 평균 -0.002 mm,  $\Delta y_c$ 의 최대값은 평균 -0.005 mm로 산정되었다. 이는 사진좌표의 정밀도를 통상 0.01 mm 정도로 간주한다는 것을 감안할 때 허용 정밀도 안에 드는 매우 작은 양이라고 할 수 있다. 따라서  $P_1$ 과  $P_2$ 의 경우 값의 변화가 상대적으로 커서 변동계수가 매우 크게 나타나나 그것이 내부표정에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 분석된다.

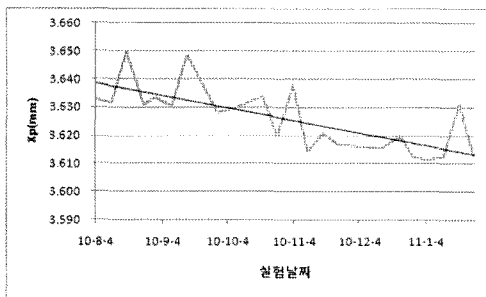
초점거리( $f$ )와 주점위치( $x_p, y_p$ )의 변화를 그래프로 그려보면 그림 4에 나타난 것처럼 실험 시의 온도의 변화와 유사하게 시간이 지날수록 감소하는 추세를 나타내고 있다.



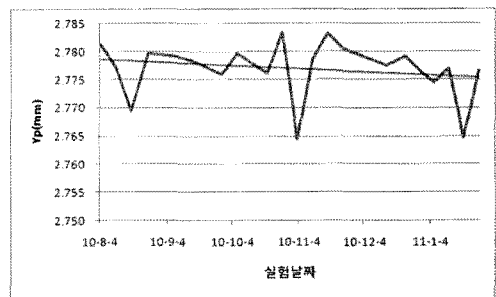
(a) 온도 변화



(b) 초점거리 변화



(c)  $x_p$ 의 변화



(d)  $y_p$ 의 변화

그림 4. 실험온도, 초점거리, 주점위치의 시간적 변화

표 2에 나타난 바와 같이 실험 시기가 한 여름에서 한 겨울에 걸쳐져 있고, 최고 31도에서 최소 -2도까지 기온이 점차적으로 낮아지는 상황에서 실험 하였으므로, 사용된 카메라에 기온 변화에 따른 신축의 영향이 있었을 것으로 추정된다. 하지만 이는 실제 필드의 상황이므로, 이러한 영향을 포함하여 결과를 분석하는 것이 필요하다.

내부표정요소 산정시의 과대오차가 포함된 것으로 추정된 실험값을 제거하였을 때, 단순히 정밀도가 향상되는 것이 아니라 온도의 변화에 따른 신축의 추세를 잘 나타내고 있는 것으로 보아, 이는 카메라에 관련된 특성이라기보다는 실험 과정에서의 실수에 의한 것으로 추정된다. 그리고 과대오차로 판단된 내부표정요소가 초점거리와

방사왜곡 매개변수였으므로, 검정용 사진 촬영 중 줌렌즈의 초점거리 변동이나 촬영 중 손떨림에 의해 과대오차가 발생한 것으로 짐작된다.

내부표정요소의 신축 추세는 초점거리와 주점위치 중 x축 성분에서는 뚜렷하게 나타나는 것에 비해 주점위치 중 y축 성분에서는 다소 뚜렷하지 못하다. 이는, 3.1절에서 설명한 바와 같이, 본 연구에 사용된 PhotoModeler<sup>R</sup>의 카메라 검정 방법이 CCD의 높이( $f_y$ )를 고정값으로 설정하는 특성 때문인 것으로 추정된다.

#### 4.2 실측 결과 분석 및 고찰

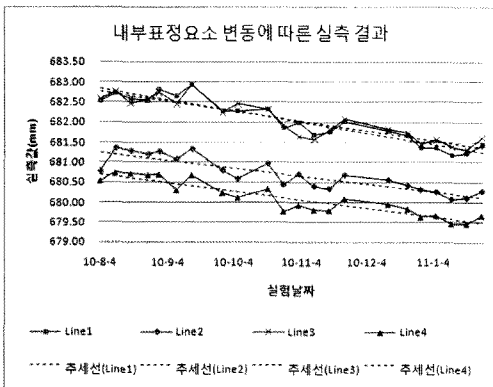
본 연구에서는 3.2절과 그림 3에서 설명한 바와 같이 매

표 3. 내부표정요소에 따른 실측 결과

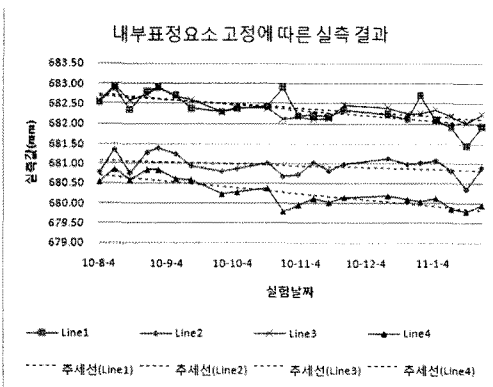
날짜	온도 (°)	내부표정요소 변동의 경우 (mm)				내부표정요소 고정의 경우 (mm)			
		Line1	Line2	Line3	Line4	Line1	Line2	Line3	Line4
2010.08.04	31	682.53	680.78	682.58	680.55	682.53	680.78	682.58	680.55
2010.08.11	30	682.72	681.35	682.76	680.74	682.89	681.35	682.93	680.86
2010.08.18	29	682.58	681.28	682.46	680.72	682.34	680.76	682.58	680.59
2010.08.26	31	682.53	681.20	682.57	680.69	682.81	681.28	682.72	680.85
2010.08.31	28	682.82	681.26	682.73	680.70	682.89	681.39	682.91	680.85
2010.09.08	28	682.64	681.08	682.45	680.31	682.70	681.24	682.68	680.62
2010.09.15	28	682.93	681.33	682.92	680.69	682.38	680.94	682.59	680.59
2010.09.29	23	682.28	680.80	682.24	680.24	682.30	680.80	682.29	680.23
2010.10.06	25	682.28	680.58	682.45	680.12	682.37	680.87	682.40	680.28
2010.10.20	23	682.33	680.96	682.32	680.34	682.43	681.01	682.38	680.38
2010.10.27	17	681.86	680.44	681.93	679.77	682.89	680.67	682.11	679.79
2010.11.03	13	682.00	680.71	681.64	679.94	682.20	680.73	682.18	679.96
2010.11.10	10	681.69	680.40	681.57	679.81	682.22	681.03	682.12	680.12
2010.11.17	10	681.76	680.34	681.81	679.80	682.17	680.81	682.13	680.02
2010.11.24	13	682.01	680.68	682.08	680.10	682.34	680.99	682.47	680.15
2010.12.14	5	681.77	680.57	681.82	679.95	682.23	681.13	682.40	680.19
2010.12.23	8	681.67	680.42	681.73	679.84	682.11	680.98	682.24	680.10
2010.12.29	-1	681.36	680.32	681.45	679.64	682.70	681.02	682.26	680.04
2011.01.05	2	681.35	680.26	681.56	679.67	682.09	681.08	682.35	680.13
2011.01.12	-2	681.18	680.08	681.38	679.46	681.90	680.81	682.19	679.85
2011.01.19	-1	681.21	680.11	681.32	679.47	681.44	680.35	682.02	679.79
2011.01.26	-1	681.43	680.28	681.62	679.67	681.93	680.90	682.23	679.95
평균	15.9	682.04	680.69	682.06	680.10	682.36	680.95	682.40	680.27
표준편차	12.1	0.55	0.41	0.50	0.43	0.36	0.24	0.26	0.34
최대값	31	682.93	681.35	682.92	680.74	682.89	681.39	682.93	680.86
최소값	-2	681.18	680.08	681.32	679.46	681.44	680.35	682.02	679.79
범위	33	1.75	1.27	1.60	1.28	1.45	1.04	0.91	1.07

실험 때마다 3장의 수렴사진을 촬영하고, 매 실험에서 구해진 내부표정요소를 입력값으로 하는 내부표정요소 변동의 경우와 첫 번째 실험에서 구해진 내부표정요소를 입력값으로 하는 내부표정요소 고정 of the 경우로 하여 검점판 가장 외곽에 있는 4 개의 타겟점이 이루는 사각형의 네 변을 실측하였다. 그 결과는 표 3과 같다.

표 3에 나타나 있는 실측 결과를 살펴보면, 표준편차는 내부표정요소 변동의 경우에 네 선의 평균이 0.47 mm 이었고, 내부표정요소 고정 of the 경우에는 네 선의 평균이 0.30 mm 이었다. 실측한 네 선의 관측값의 범위(range)는 내부표정요소 변동의 경우에는 1.48 mm, 내부표정요소 고정 of the 경우는 1.12 mm 이었다. 이는 관측할 때마다 내부표정요소를 구하여 사용하는 경우보다도, 한 번 구한 내부표정요소를 장기간 사용하는 경우에 사진측량의 정밀도가 오히려 양호하다는 예상 밖의 결과를 나타낸다. 하지만, 매 실험 시 기온의 변화를 고려할 때 대상물이 온도 변화에 따라 신축을 일으켰을 가능성을 생각해 볼 수 있다.



(a) 내부표정요소 변동의 경우



(b) 내부표정요소 고정의 경우

그림 5. 실측 결과의 변화

그림 5는 실측된 네 선의 관측 결과를 그래프로 나타내고 있다.

그림 5(a)의 내부표정요소 변동의 경우에는 실측한 네 선의 관측값이 유사한 형태의 변화를 나타내며, 장기적으로 감소하고 있다. 네 선의 관측값의 추세선이 거의 평행을 이루고 있으므로, 시간에 따라 (관측시 기온의 저하에 따라) 네 선이 길이가 일정한 변화량으로 수축하고 있는 것을 알 수 있다. 만약 장기간의 기온 변화에 따라 대상물에 실제로 신축이 발생하고, 이러한 영향을 제거한다면 내부표정요소를 매번 구하는 경우의 실측 정밀도는 훨씬 높게 나타날 것이다.

그림 5(b)의 내부표정요소 고정 of the 경우에는 장기적으로 관측값들이 감소하는 것은 내부표정요소 변동의 경우와 유사하다. 아울러 네 선의 관측값의 변화 형태도 어느 정도는 유사하게 나타난다. 하지만, 네 선의 관측값의 추세선은 평행에 가깝다고 보기 어렵다. 즉, 네 선의 크기가 장기적으로 줄어들고 있는 추세는 보여주고 있으나, 그 추세가 만약 대상물의 신축에 의해 발생된 것이라면, 대상물의 신축을 제대로 반영하고 있다고 보기 어렵다. 따라서 대상물의 신축의 영향을 제거하면 오히려 내부표정요소 변동의 경우보다 실측 정밀도는 낮게 나타날 것이다.

실측 대상으로 사용한, 나무 판넬에 부착한 검점판의 기온에 따른 신축을 실험 계획 단계에서 미리 고려하지 못한 것은 본 연구의 실험에서의 허점으로 지적될 수 있다. 보다 정교한 실험을 위해서는 기온에 따른 신축의 영향이 거의 없는 재료로 만들어진 대상물을 선택할 필요가 있을 것이다.

대상물에 기온에 따른 신축이 있다고 가정하고, 내부표정요소 변동의 경우에서의 관측값을 기준으로 하여, 내부표정요소 고정 of the 경우에서의 모든 관측값의 편차를 계산하였을 때, 6개월간의 평균값은 0.28 mm 이었고, 표준편차는 0.31 mm 이었다.

내부표정요소 변동의 경우와 내부표정요소 고정 of the 경우 실측한 네 선의 관측값의 차를 월별 평균값으로 구해보면 그림 6와 같다. 그림 6을 보면, 3월차에서 Line1의 편차의 월별 평균값은 0.41 mm로서 전체의 평균값인 0.28 mm를 넘어서는 것을 알 수 있다. 4월차 이후로는 4월차 Line4를 제외한 모든 값들이 평균을 넘어서고 있다. 따라서, 본 연구에서 실험한 디지털 카메라의 경우는, 한 번 구한 내부표정요소를 고정하여 사용할 경우에 2개월 이내까지는 그 편차가 6개월 간의 장기적 관측에서의 편차의 평균값 이하로 나타나고 있다고 분석할 수 있다.



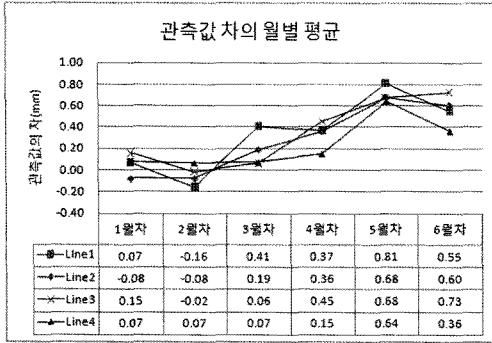


그림 6. 내부표정요소에 따른 관측값의 차의 월별 평균

본 연구의 실측 실험에서 촬영거리는 약 2.0m이고 초점 거리의 평균이 7.937mm이므로 사진의 축척은 약 1/250이다. 따라서 실측값의 차의 6개월간의 평균인 0.28mm는 사진 상으로는 약 1.1 $\mu$ m에 해당한다. 본 연구에 사용된 카메라의 화소 크기가 약 2.3 $\mu$ m이므로, 이는 CCD 상에서 반화소 이내의 크기에 해당한다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서 실험한 디지털 카메라의 경우, 한 번 구한 내부표정요소를 계속 사용할 경우 2개월 이내에서는 반화소 내의 정밀도로 사용하는 것이 가능하다는 판단을 할 수 있다.

### 5. 결론

비측량용 카메라의 내부표정요소가 장기간 동안 어느 정도 안정한가를 검토하기 위해 약 6개월간 25회의 카메라 검정 및 사진측량 실험을 수행함으로써 얻어진 결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 본 연구에서 사용한 컴팩트 디지털 카메라의 경우, 6개월간 내부표정요소의 변화는 초점거리, 주점위치, 방사왜곡 매개변수 등의 요소에서 안정적이었다. 반면에 편심왜곡 매개변수는 변동이 상대적으로 크게 나타났으나 사진좌표 관측에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 따라서 본 연구를 통해 사용한 컴팩트 디지털 카메라 내부표정요소의 장기적 안정성을 확인할 수 있었다.

둘째, 본 연구에서 사용한 컴팩트 디지털 카메라의 경우, 한 번의 검정을 통해 구해진 내부표정요소를 이용하여 장기간 실측을 할 때, 매번 카메라 검정을 하여 내부표정요소를 구한 경우의 실측값과의 편차를 분석한 결과, 6개월간의 편차의 평균은 사진 상에서 반화소 이내의 크기로 나타났다. 그리고, 2개월 내에서는 그 편차가 6개월간의 편차의 평균을 넘어서지 않았으므로, 본 연구에서 사용한 컴팩트 디지털 카메라의 경우, 한번 구한 내부표정요소를 2개월간

활용하는 것이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다.

셋째, 장기간에 걸친 사진측량 실험을 수행할 경우에는 카메라와 대상물의 장기간 기온변화에 따른 신축을 고려하여 실험을 수행하는 것이 필요하다는 것을 알 수 있었다.

### 감사의 글

이 논문은 2010학년도 안동대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었습니다.

### 참고문헌

김기홍, 정수, 김백석 (2010), 줌렌즈 디지털 카메라의 내부표정요소 변화, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제28권, 제1호, pp. 92-98.

오재홍, 이창노, 어양담 (2006), 비측정용 디지털 카메라의 효율적인 자체 검정을 위한 대상지 구성, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제24권, 제3호, pp. 281-288.

정성수, 허준, 우선규 (2008), 초점거리 변화에 따른 렌즈 왜곡의 경험적 모델링, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제26권, 제1호, pp. 93-100.

정수 (2009), 비측량용 카메라를 이용한 3차원 형상 해석, 한국지형공간정보학회지, 한국지형공간정보학회, 제18권, 제4호, pp. 41-50.

정수 (2010), 디지털 사진을 이용한 산불 피해 조사 방안, 한국지형공간정보학회지, 한국지형공간정보학회, 제17권, 제2호, pp. 91-99.

Atkinson, K. B. ed. (1996), *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*, Whittles Publishing, pp. 16-24.

Fraser, C. S. and S. Al-Ajlouni (2006), Zoom-Dependent Camera Calibration in Digital Close-Range Photogrammetry, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, ASPRS, Vol. 72, No. 9, pp. 1017-1026.

Habib, A. and M. Morgan (2005), Stability Analysis and Geometric Calibration of Off-the-Shelf Digital Cameras, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, ASPRS, Vol. 71, No. 6, pp. 733-741.

Slama, C. C, C. Theurer and S. W. Henriksen ed. (1980), *Manual of Photogrammetry, 4th ed.*, ASPRS, pp. 297-300.

Wolf, P. R (1983), *Elements of Photogrammetry*, McGraw-Hill, pp. 74-80.