

KOMPSAT-1 EOC Pass 영상의 기하정확도 분석에 관한 연구

서두천 · 임효숙

한국항공우주연구원 위성운영센터

A Study on the Analysis of Geo-Accuracy with KOMPSAT-1 EOC Pass Imagery

Doo-Chun Seo and Hyo-Suk Lim

Satellite Operation & Application Center, Korea Aerospace Research Institute

Abstract : This study investigated the method for obtaining 3-dimensional terrain information on inaccessible areas by evaluating geometric accuracy of the EOC pass image and scene image acquired from the KOMPSAT-1 satellite. For this purpose, the following four experiments were conducted to evaluate the accuracy of the KOMPSAT-1 EOC satellite data.

1) Calculation of ground coordinates by using ancillary data and image coordinates on Level 1R that were processed by the pre-processing system of KOMPSAT-1. 2) Calculation of 3-dimensional ground coordinates from the ground coordinates of stereo images calculated by using ancillary data, based on space intersections. 3) Execution of bundle adjustment by using GCP (Ground Control Point) extracted in a part of the stereo pass image (KOMPSAT-1 EOC, 1 scene size); and then, evaluation of the ground coordinates from the calculated exterior orientation. 4) Evaluation of accuracy by applying the exterior orientation calculated from 3) To the whole pass image.

Key Words : KOMPSAT-1 EOC, Geometric Accuracy, Pass Image, Bundle Adjustment.

요약 : 본 연구에서는 KOMPSAT-1 위성에서 취득한 EOC Pass 영상과 scene 영상의 기하정확도를 평가함으로써, 비접근지역에 대한 3차원 지형정보 추출 방안에 대하여 연구하였다. 이를 위하여 다음과 같은 4가지 실험을 수행하여 KOMPSAT-1 EOC 위성데이터의 정확도를 평가하였다. 1) KOMPSAT-1 전처리 시스템으로 처리된 Level 1R의 ancillary 데이터와 영상좌표를 이용한 지상좌표 계산 2) 보조자료를 이용하여 계산된 두 영상의 지상좌표를 공간교차이론으로 지상 3차원좌표 계산 3) 입체 Pass 영상의 일부(KOMPSAT-1 EOC, 1 scene size)에서 획득된 GCP(Ground Control Point)을 이용하여 Bundle adjustment을 수행하고, 그 결과 계산된 외부표정요소로 지상좌표의 계산 4) 3)에서 계산된 외부표정요소를 이용하여 전체 Pass 영상에 적용하여 정확도를 평가하였다.

1. 서론

우리나라는 1999년 12월 아리랑 1호(KOMPSAT-1)를 성공적으로 발사한 후, 지금까지 국토관리, 농업, 환경, 해양감시 등의 광범위한 분야에 KOMPSAT-1 위성자료를 활용하고 있다. 특히 KOMPSAT-1 EOC 센서는 한반도 지역의 지형도 제작에 필요한 입체영상을 획득하는 것이 그 주 임무이다.

KOMPSAT-1 EOC 위성 영상데이터로부터 지형도를 제작하기 위해서는 센서모델링기법, 매칭기법, 수치표고모델(DEM) 제작 기법, 정상영상제작기법 등 다양한 연구가 필요할 뿐만 아니라, 이와 관련된 기존 기술 및 연구들을 KOMPSAT-1 위성데이터 특성에 적합하도록 개발하여야 한다.

KOMPSAT-1 자료를 이용한 지도제작 및 기하정확도에 관련된 기존 연구 결과를 살펴보면, Jeong *et al.*(2000)은 KOMPSAT-1 EOC 입체영상과 10개 기준점을 사용하여 3차원 지상좌표를 1 픽셀 이내로 추출할 수 있음을 발표하였으며, 유환희(2001)등은 천체력 자료와 소수의 지상기준점을 이용하여 11~13 m의 정확도로 KOMPSAT-1 EOC 영상에서 지상좌표를 결정할 수 있음을 발표하였다.

임용조 등(2002)은 SPOT, EOC, IKONOS의 3 종류의 각기 다른 스테레오 영상으로 도심지역 DEM을 생성하여 정확도를 분석한 결과 SPOT 영상은 약 38 m, KOMPSAT-1 영상은 12 m, IKONOS는 6.5 m 정도의 정확도로 도심지역의 DEM을 생성할 수 있으며, 센서모델링에서는 ON 모델과 DLT 모델을 적용한 결과 카메라 모델의 정확도가 1 픽셀 이하임을 발표하였다.

이들 기존 연구 결과들은 KOMPSAT-1 EOC 입체영상(영상크기: 17 km×17 km, 기준점 사용)을 사용한 경우 센서모델링 결과의 평균제곱근오차(RMSE)는 약 1 픽셀이내, DEM은 약 2 픽셀 이내로 지상 3차원 정보를 획득할 수 있다고 발표하고 있다.

그러나 현재 KOMPSAT-1 위성 보조데이터들을 이용한 Pass 영역의 기하정확도, 기준점을 사용한 센서모델 결과를 Pass 영역에 적용 가능한 범위 및 정확도 분석 등에 대해서는 많은 연구가 진행되고 있지 않다.

따라서 본 연구에서는 KOMPSAT-1 위성에서 취득한 EOC 영상자료의 Pass 영상과 scene 영상의 기하정확도를 평가함으로써, 향후 2004년 발사될 KOMPSAT-2 MSC 영상의 기하정확도 향상을 위한 기초적 연구와 비접근지역에 대한 3차원 지형정보 추출 방안에 대하여 연구하고자 한다.

이를 위하여 다음과 같은 실험을 수행하였다. 1) KOMPSAT-1 전처리 시스템으로 처리된 Level 1R의 ancillary 데이터와 영상을 이용하여 지상위치를 계산하고 그 정확도를 평가한다. 2) Ancillary 데이터만을 이용하여 계산된 두 영상의 지상좌표를 공간교차(space intersection)이론으로 지상 3차원좌표를 추출하고 그 정확도를 평가한다. 3) 입체 Pass 영상의 일부분(KOMPSAT-1 EOC, 1 scene size)에서 획득된 기준점을 이용하여 번들조정을 수행하고, 그 결과 계산된 외부표정요소로 지상좌표의 정확도를 평가한다. 4) 3)에서 계산된 외부표정요소를 이용하여 전체 Pass 영상의 정확도를 평가한다.

위의 내용을 수행하기 위해서는 번들조정(Bundle Adjustment), 공간교차(SPI: SPace Intersection), SGPI(Single Ground Point Intersection) 및 SIPI(Single Image Point Intersection) 등을 구현할 수 있는 프로그램이 필요하다. 현재 일부 상용소프트웨어는 이들 기능을 일부 제공하고 있으나, 그 가격이 매우 고가이고 본 연구에서와 같이 Pass영상 전체를 처리를 위한 것이 아니므로, Compaq사의 Visual Fortran으로 프로그래밍하여 사용하였다.

2. 사용데이터

본 연구를 위해 사용된 데이터는 세 가지로 ① KOMPSAT-1 EOC Pass 영상데이터 ② 처리된

영상의 기하학적 정확도를 평가하기 위한 지상 및 영상 기준점 ③ 위성보조데이터 이다.

1) 영상데이터

영상데이터는 2001년 11월 27일 촬영된 10327 Pass 영상과, 2002년 11월 1일 15291 Pass의 두 영상이며, 영상데이터의 구체적인 특성은 Table 1과 같으며, 영상을 취득할 당시의 위성의 지상 궤적은 Fig. 1과 같다. Pass 영상은 위성이 궤도를 운행하는 중 위성운영국의 명령에 따라 특정시간 동안 1회 촬영한 전체 영상을 의미하며, Scene 영상은 Pass 영상을 17km×17km 크기로 편집한 영상을 나타낸다.

2) 기준점

영상의 기하학적인 정확도를 평가하기 위해서는 영상기준점과 이에 대응하는 지상기준점이 있어야 한다. 영상기준점은 지형지물의 반사특성이 대조를 이루는 지형지물의 위치를 선택하여, 픽셀 이하 단위로 읽었다. 영상기준점에 대응하는 지상기준점은 축척 1:5,000 수치지도로부터 획득하였으며, 총 기준점은 약 100여점 정도이다. 획득된 기준점을 WGS84 좌표계로의 변환에 사용된 지오이드고 계산은 EGM96의 반복계산법, 7개 매개변

수를 고려하는 Bursa-Wolf 모델식을 적용하였다 (최경재 등, 1999).

Fig. 2는 Pass내 대전영상을 중심으로 하여 거리별로 취득된 기준점의 수를 나타낸 것이다.

3) 위성보조데이터

KOMPSAT-1 EOC Level 1R 위성자료는 영상자료와 위성 취득당시의 위치, 자세 및 시간의 세 종류 ancillary 데이터를 1초 간격으로 제공하여 준다. 이 ancillary 데이터는 위성에 부착된 GPS센서, Gyro 센서로부터 측정된 후 영상데이터(X 대역 안테나)와 함께 지상으로 전송(S 대역 안테나, telemetry)된다. 전송된 데이터는 KOMPSAT-1 전

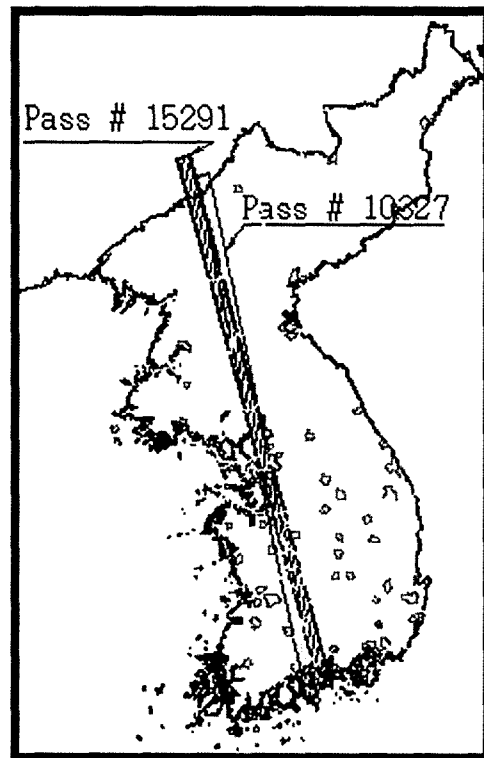


Fig. 1. Orbit ground track.

Table 1. Used image data.

	Left Image	Right Image
Pass No.	10327	15291
Date of Acq.	2001. 11. 27	2002. 11. 1
Tilt Angle	-15.29 deg	21.00 deg
Start time	02:05:39.509	01:46:41.509
End time	02:07:34.508	01:48:36.508
Image size(pixel)	117,708 × 2592	117,707 × 2592

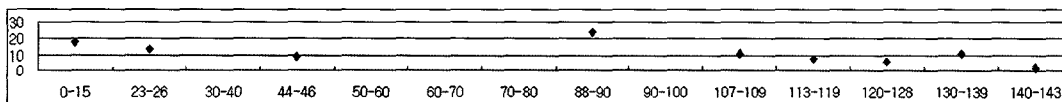


Fig. 2. Total number of ground coordinates each distance (unit; X axis, km, Y axis, GCP No.).

처리시스템에 의하여 위성의 위치, 속도, 자세 등의 정보를 가지는 ancillary 데이터와 위성의 시간 정보를 가지는 segment 데이터로 분리되어 저장된다. 이때 저장되는 ancillary 데이터에는 영상을 취득할 당시의 시간을 기록하는 OBT, GPS Time 과 ECEF와 ECI에서의 위성위치 및 속도 벡터 그리고 위성의 자세를 측정하는 지구센서, Gyro 센서의 측정치가 기록되어 있다. segment 데이터에는 영상을 취득할 순간의 시작 및 마지막 시간이 기록되어 있다.

이 데이터와 영상데이터는 CBM(Catalog Browse Module), PTM(Product Control Modul) 과정을 통하여 Level 1R 영상이 생성되며, 실제 사용자에게는 HDF 형식 데이터로 저장되어 제공된다(전정남 등 2003).

3. 실험 및 평가

1) 위성 Ancillary 데이터만을 이용한 지상 위치의 결정

실제 영상의 각 픽셀마다의 지상좌표를 계산하기 위해서는 앞장에서 언급된 위성 보조데이터로부터 각 라인마다의 위성 위치, 자세 및 시간이 있어야 한다. 본 실험에서는 Fig. 3과 같은 방법으로 영상에 대한 지상좌표를 계산하였다.

단계 1; Image Coordinate

이 좌표는 영상의 좌측 상단을 원점으로 각 영

상좌표를 칼럼(u)과 라인(v)좌표로 표현한다.

단계 2; Scan Line Coordinate

Pushbroom 방식으로 취득된 영상인 경우, 각 라인별 투영중심을 원점으로 x' 축은 위성 진행방향, z' 축은 지구중심에 대해 반대방향, y' 축은 x' 축과 z' 축에 직교되는 방향으로 right-handed coordinate system이며, Image Coordinate에서 Scan Line Coordinate로의 변환은 식(1)과 같다. u, v 는 영상의 좌표값이며 d 는 영상내 한 화소의 실제크기, Np 는 영상의 크기인 열의 총 화소수를 나타낸다. y' 축 방향으로 계통적 오차가 거의 없다고 생각하면 $y' = d(v - \frac{Np}{2})$ 이다.

$$r = \text{int}(u + 1), x' = d(u - r + \frac{1}{2})$$

$$y' = d(v - \frac{Np}{2}) + s[d(v - \frac{Np}{2})]^2, z' = -f \quad (1)$$

단계 3; Sensor Coordinate

영상을 경사방향으로 관측한 경우 경사각(tilt angle)이 존재하게 되는데 이 경우 Scan Line Coordinate는 촬영면에 대하여 경사지게 된다. 이러한 경사각을 고려한 좌표계로서, Scan Line Coordinate에서 Sensor Coordinate로의 변환은 식(2)와 같다.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = M_T \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix}, M_T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos a_T & -\sin a_T \\ 0 & \sin a_T & \cos a_T \end{bmatrix} \quad (2)$$

단계 4; Orbit Plane Coordinate

위성이 영상을 취득할 순간의 좌표를 결정하는

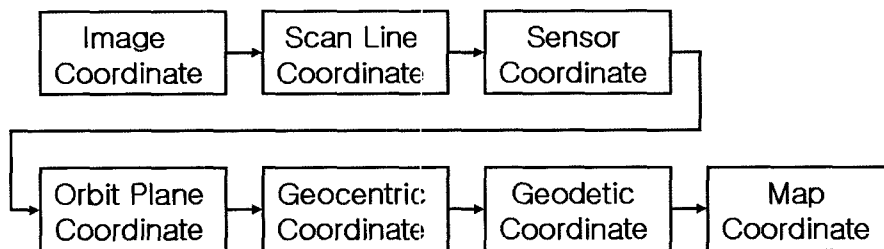


Fig. 3. Coordinate transformations.

것으로, 이는 위성 ancillary 데이터로부터 계산될 수 있다. 즉 위성이 Kepler 법칙에 따라 타원궤도로 움직인다면 위성은 Keplerian parameter로 그 위치를 표시할 수 있다. 이 parameter는 궤도타원체상에서 영상을 취득하는 순간(CCD의 각 라인)의 위성과 지구와 관계를 표현하는 parameter로 다음과 같다.

인공위성의 궤도요소를 위성 타원형을 결정하는 궤도 장반경(a_s), 궤도 제1이심율(e_s), 승교점의 적경(Ω), 궤도경사각(i), 근지점 인수(ω) 및 근지점(P)에서 영상 중심까지의 시간(t_p)의 모두 6가지 parameter이다. Keplerian 궤도요소로부터 위성 위치를 계산은 식(3)과 같다.

$$\begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix} = M_b^t \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ R_s \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서,

$$R_s = a_s(1 - e_s \cos E)$$

$$M_b = \begin{bmatrix} \cos a_3 \cos a_1 - \sin a_3 \sin a_2 \sin a_1 & \cos a_3 \sin a_1 + \sin a_3 \sin a_2 \cos a_1 & -\sin a_3 \cos a_2 \\ -\cos a_2 \sin a_1 & \cos a_2 \cos a_1 & -\sin a_2 \\ \sin a_3 \sin a_1 - \cos a_3 \sin a_2 \sin a_1 & \sin a_3 \sin a_1 - \cos a_3 \sin a_2 \cos a_1 & \cos a_3 \cos a_2 \end{bmatrix}$$

$$a_1 = \Omega - \omega_e t, \quad a_2 = i + \frac{\pi}{2}, \quad a_3 = \nu + \omega + \frac{\pi}{2}$$

단계 5; Geocentric Coordinate

지상좌표의 계산은 Keplerian 궤도요소로부터 계산된 위성위치와 Sensor Coordinate를 식(4)와 같은 공선조건식에 대입하여 계산한다. 식(4)의 k 는 축척요소(scale factor), M' 는 영상의 Sensor Coordinate를 Geocentric Coordinate로 회전시키는

직교 회전행렬이다.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix} + \frac{1}{k} M' \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (4)$$

본 연구에서는 지상좌표 결정시에는 위의 식(4)으로 관측방정식을 형성하였으며, 이를 SGPI (Single Ground Point Intersection)라 정의하였다. 또한 계산된 지상좌표는 위성의 ancillary 데이터의 기본타원체인 WGS 84 Geocentric상의 좌표값으로만 표현하였으며, 그 결과는 Table 2와 같다.

이 결과를 살펴보면, Pass 10327 영상인 경우 RMSE XYZ가 평균 0.2km, Pass 15291인 경우 평균 1.25km로 한 Pass내에서 결정되는 지상좌표의 정확도가 거의 일정함을 알 수 있다. 또한 KOMPSAT-1 EOC 영상데이터의 목표 설계 기하 정확도인 $\pm 2\text{km}$ 를 만족하고 있음을 알 수 있다.

2) 공간교차이론에 의한 Pass 영상의 지상 위치의 결정

좌, 우의 각기 다른 두 Pass에서 촬영된 위성영상을 이용하여 지상좌표를 계산할 경우, 기하정확도의 변화여부를 조사하기 위해서 공간교차이론(SPI: SPace Intersection)을 적용하였다. 공간교차이론은 좌, 우 영상의 동일점을 찾았을 경우 그때의 투영중심 L1, L2에 의하여 두 개의 직선이 형성된다는 원리에 근거한다. 이론적으로는 두 직선이 한 점에서 만나야 하지만, 일반적으로 위성위치, 자세 결정과정 및 매칭위치 결정에서 피할 수

Table 2. SGPI results and accuracy in WGS 84.

(unit: km)

RMSE \ 거리	0-15	23-26	44-46	88-90	107-109	113-119	120-128	130-140
10327	X	0.28	0.27	0.30	0.32	0.34	0.32	0.36
	Y	0.10	0.13	0.09	0.09	0.04	0.06	0.09
	Z	0.05	0.02	0.02	0.07	0.07	0.07	0.11
	XYZ	0.30	0.30	0.31	0.34	0.35	0.33	0.37
15291	X	1.02	1.07	1.04	1.07	1.04	1.06	1.07
	Y	0.74	0.75	0.74	0.75	0.73	0.73	0.74
	Z	1.79	1.75	1.77	1.73	1.75	1.73	1.71
	XYZ	2.19	2.18	2.18	2.17	2.16	2.16	2.14

없는 오차들로 인하여 두 직선은 서로 교차하지 않는다. 따라서 실제에 있어서는 두 직선의 최단 거리인 벡터를 찾아 이것의 중간점을 교차점으로 간주하여 지상좌표를 계산한다. 식(5)는 좌, 우 두 영상으로부터 지상좌표를 계산하기 위해 적용된 식으로 λ_1 , k 는 축척계수, d_x , d_y , d_z 는 교차되는 두 직선의 단위벡터 그리고 X_1 , Y_1 , Z_1 는 지상좌표를 계산할 때 한 영상에 대응하는 위성위치를 나타내는 것으로 본 연구에서 왼쪽 영상을 취득할 때의 위성위치를 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} + \lambda_1 \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \end{bmatrix} + \frac{1}{2}k \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

Table 3은 10327과 15291의 Pass 영상에 SSpace Intersection(SPI)이론을 적용하여 지상 3차원 위치를 계산하고, 이를 각 거리별 정확도로 나타낸 것이다. 여기에 사용된 좌우 두 영상의 동일점은 실제 영상으로부터 독취된 점이며, 위성의 위치와 자세는 위성 ancillary 데이터로부터 이미 구해진 값을 사용하였다.

두 영상을 이용한 지상좌표 결정 정확도가 크게 향상되지 않고, 두 영상이 영상오차의 평균에 가까운 값을 가지고 있다. 오차론에서는 측정횟수를 증가함에 따라 오차의 크기가 $\sigma_{mean} = \sigma/\sqrt{n}$ 라고 정의되는데, 이때 σ 는 두 관측치 사이에 상관성이 없고, 동일한 경중률인 경우에만 해당되는 방법이다 (Mikhail *et al.*, 1976). 즉 계산된 지상좌표의 정확도가 비슷하여야만 정확도 향상을 기대할 수 있다.

3) Scene 영상에 대한 번들조정

위성영상의 ancillary 데이터만을 이용한 지상좌표 계산은 위성에 부착된 GPS 센서와 Gyro 센서의 측정오차 등의 다양한 오차가 포함되어 있기 때문에 실제 영상의 공간해상력에 부합되는 정확도 확보가 어렵다. 따라서 지상기준점, 투영중심 및 영상점이 일직선상에 존재한다는 공선방정식을 기초하여 위성 위치(투영중심) 및 자세(회전요소)를 계산하면 좀 더 정확한 지상좌표를 계산할 수 있다. 이를 엄밀센서 모델링이라고 하며, 주로 번들조정법이 사용된다. 번들조정이란 다수의 번들에 대하여 공선조건식을 기본으로 하여 최소제곱법에 의하여 각 영상의 외부표정요소(위성위치, 자세)를 동시에 구하는 것으로서, 그 조정능력이 뛰어난 것으로 평가되고 있다(박병욱 1991; Allam 1978).

일반적으로 KOMPSAT-1과 같은 pushbroom 영상인 경우 각 라인마다 중심투영방식으로 데이터를 취득하므로 각각의 라인에 대하여 외부표정요소를 결정하여야 한다. 이를 위하여 식(6)과 같은 관측방정식을 형성하였으며, 지상기준점으로 조정되는 위성위치 (ΔX , ΔY , ΔZ), 위성자세 ($\Delta \omega$, $\Delta \phi$, $\Delta \kappa$)는 식(7)과 같은 시간의 함수형태로 단순화시켜 모델링하였다.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = k M_a M_b \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} - M_b' \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ R_s' \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Delta X &= \delta X_0 + \delta X_1 \Delta t + \delta X_2 \Delta t^2 + \dots \\ \Delta Y &= \delta Y_0 + \delta Y_1 \Delta t + \delta Y_2 \Delta t^2 + \dots \\ \Delta Z &= \delta Z_0 + \delta Z_1 \Delta t + \delta Z_2 \Delta t^2 + \dots \\ \Delta \omega &= \delta \omega_0 + \delta \omega_1 \Delta t + \delta \omega_2 \Delta t^2 + \dots \end{aligned} \quad (7)$$

Table 3. SPI results and accuracy in WGS 84.

(unit: km)

정확도	거리	0-15	23-26	44-46	88-90	107-109	113-119	120-128	130-140
	RMSE	X	0.19	0.19	0.18	0.16	0.16	0.17	0.16
Y		0.21	0.20	0.19	0.17	0.16	0.15	0.15	0.14
Z		1.12	1.12	1.10	1.09	1.07	1.08	1.07	1.06
XYZ		1.16	1.15	1.13	1.11	1.09	1.10	1.09	1.08

$$\Delta\phi = \delta\phi_0 + \delta\phi_1\Delta t + \delta\phi_2\Delta t^2 + \dots$$

$$\Delta\kappa = \delta\kappa_0 + \delta\kappa_1\Delta t + \delta\kappa_2\Delta t^2 + \dots$$

KOMPSAT-1 위성의 외부표정요소 모델링식은 0차에서 3차까지 다양한 모델링식을 적용할 수 있으나, 일반적으로 위성위치는 1차 다항식, 자세요소는 변하지 않거나, 고정된 상수값을 사용하는 모델링식이 정확도가 우수(RMSE ≤ 1 pixel)한 것으로 발표되고 있다(임용조 등 2002; Seo et al. 2003). 따라서 본 연구에서는 이러한 연구 결과를 바탕으로 한 모델식으로 위성위치는 1차 다항식, 위성자세요소는 scale line에 대하여 변화하지 않는 모델링식을 선정하여 번들조정을 수행하여 외부표정요소를 산출하였다.

실험에 사용된 영상은 Pass 10327과 15291영상의 전체 부분 중 일부 영역만(대전지역)을 대상으로 번들조정에 필요한 기준점을 독취하였다. 지상

기준점을 독취한 영역은 두 Pass가 중복되는 지역으로 약 1,100×1,800 pixel (Columns×Lines, 지상 크기: 7.3km×11.9km)이다. Fig. 4는 번들조정에 사용된 좌우 영상과 기준점의 분포 모습이다.

Table 4는 번들조정 결과로서, 지상기준점으로 조정되는 위성의 외부표정요소이다. 식(6)의 관측 방정식과 같이 ancillary 데이터로부터 계산된 위치, 자세와 Table 4의 결과를 조합으로 최종적인 위성 위치 및 자세가 결정된다.

번들조정의 결과는 정밀도(precision)와 정확도(accuracy)로 나누어 평가 하였다. 정밀도평가에 있어서는 기준점에 대하여 구하여진 지상좌표 X, Y, Z의 분산값의 평균인 $\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2$ 로서 이론적인 번들조정의 정밀도 평가기준으로 사용하였으며, 번들조정 성과의 양호여부를 결정하는 정확도는 번들조정으로 구하여진 외부표정요소 값을 사용

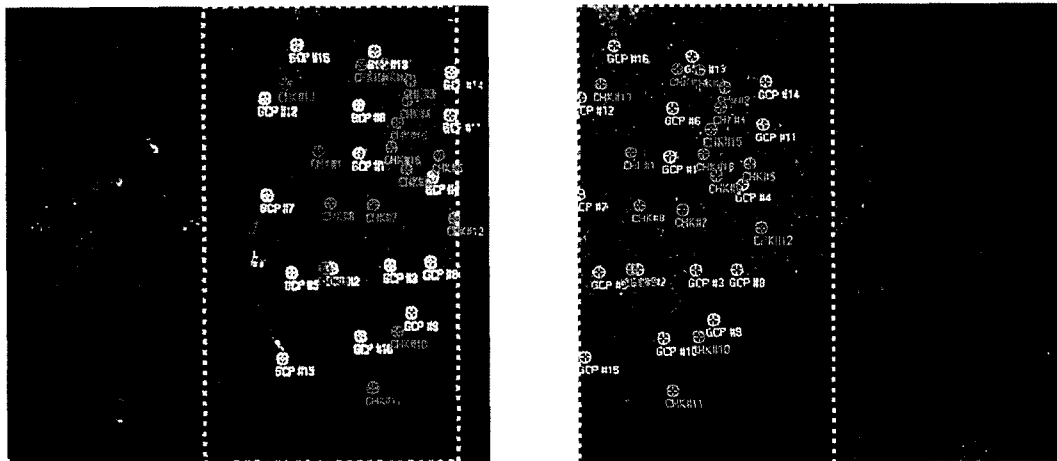


Fig. 4. Distribution of GCP for bundle adjustment (white; GCP, grey; CHK).

Table 4. Bundle adjustment results and computed satellite position and attitude

	Pass # 10327	Pass # 15291
위치 (단위: m)	$\Delta X = -2.465380712 - 1.082824525t$ $\Delta Y = -62.956597565 + 4.338834780t$ $\Delta Z = -31.726570634 + 1.327460729t$	$\Delta X = -3.561696663 + 5.490253020t$ $\Delta Y = 0.255851368 + 0.176709483t$ $\Delta Z = 1.702988963 + 4.420374104t$
자세 (단위: rad)	$\Delta\omega = -0.000440489551$ $\Delta\phi = 0.006108536779$ $\Delta\kappa = 0.021629899720$	$\Delta\omega = -0.000063370039$ $\Delta\phi = -0.002334826600$ $\Delta\kappa = -0.002271173680$

Table 5. Accuracy of Pass image using bundle adjustment resulted.

(unit: m)

항목	거리	0-15	23-26	44-46	88-90	107-109	113-119	120-128	130-140
	RMSE	X	4.03	6.01	39.41	48.51	47.78	59.11	64.23
Y		4.25	8.32	11.08	13.33	14.91	15.07	18.72	25.59
Z		3.97	21.79	77.45	100.26	110.32	123.94	130.76	142.69
XYZ		7.08	24.09	87.60	112.17	121.14	138.14	146.88	156.60

하여 검사점에 대한 지상위치를 계산하여 정확도를 평가하였다.

번들조정 정밀도 판단요소인 조정된 기준점의 지상좌표에 대한 공분산행렬은 $\sigma_x = 0.867m$, $\sigma_y = 0.874m$, $\sigma_z = 0.869m$ 및 $\sigma_{xy} = 0.871m$ 로 산출되었으며, 기준점의 영상좌표에 대한 잔차 $V_x = 8.891 \times 10^{-3}pixel$, $V_y = 5.309 \times 10^{-3}pixel$ 로 나타나 번들조정 정밀도가 비교적 우수한 것으로 판단된다.

Fig. 5는 번들조정 결과의 정확도를 나타낸 것으로, 좌측은 번들조정의 결과로 산출된 지상좌표를 좌표변환을 통해 우리나라 Bessel TM 투영으로 변환된 결과를 나타낸 것이고, 우측은 WGS 84 지심좌표(Geocentric)형태로 오차크기를 나타낸 것이다. 이들 모두 KOMPSAT-1의 공간해상력인 6.6m 이내로 거의 모든 지상좌표가 결정됨을 알 수 있다.

이는 본 연구에서 영상 기준점을 독취시, 영상

기준점의 독취 정확도를 향상시키기 위해 SIPI (Single Image Point Intersection)이론을 적용하여 검사점의 지상좌표에 대한 영상좌표를 계산하고, 이를 바탕으로 계산된 영상기준점과 지도상의 위치를 비교하면서 영상좌표의 정확도를 0.5pixel 이하로 독취하였기 때문이다. 이러한 결과는 번들조정의 정밀도를 나타내는 영상좌표의 잔차(V_x , V_y)에서도 잘 나타난다.

4) 번들조정 결과를 Pass 영상에 적용

번들조정 결과를 Pass 영상에 적용하기 위해 Table 4의 번들조정 결과를 이용하였다. 즉 1 영상 크기(7.3km×11.9km)내에서 독취된 기준점과 번들조정을 통해 엄밀하게 계산된 외부표정요소를 전체 Pass에 대하여 적용하여 지상 좌표를 산출하였다. 그 결과 계산된 지상좌표의 정확도를 Table 5와 같이 나타내었다.

이 표에서 거리는 실질적인 번들조정에 사용된 영상의 중심점에서 한쪽 방향(대전에서 서울 방

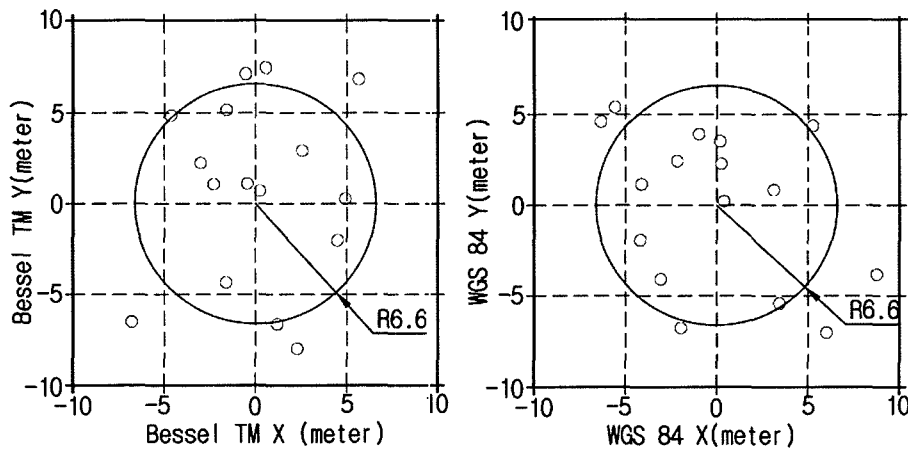


Fig. 5. Bundle adjustment results and diagram of error.

향)으로의 거리를 킬로미터 단위로 나타낸 것이며, 정확도는 WGS 84 지심좌표상의 오차를 미터 단위로 표현한 것이다.

Table 5의 결과를 살펴보면, X축과 Z축의 오차가 Y축에 비하여 상대적으로 매우 크게 발생하고 있음을 알 수 있다. 이 결과는 Table 2의 위성의 ancillary 데이터만을 이용한 결과에서 나타난 X축, Y축 오차가 비슷하게 산출되는 양상과 다르게 나타난다. 이러한 이유는 본 연구에서 수행된 번들조정은 식(6)과 같이 ancillary 데이터로부터 계산된 위성위치, 자세와 지상기준점으로 조정되는 위성위치 및 자세의 조합으로 지상좌표가 결정되기 때문이다. 즉 일부 영역에서 조정된 외부표정요소는 ancillary 데이터로부터 입력되는 초기 위성위치와 자세의 결과를 기준으로 조정되어 있기 때문에 전체 Pass 영역으로 확장시키기 위해서는 초기 위성위치와 자세를 수정할 필요가 있다.

따라서 ancillary 데이터로부터 매 라인마다 산출되는 위성위치, 자세의 모델링을 각기 다른 형태로 변화시켰다. 실험 결과 ancillary 데이터로부터 계산되는 위성위치 및 자세요소 중 승교점의 적경(Ω)과 근지점 인수(ω)는 2차 다항식 형태로, 그 이외의 나머지 요소인 궤도장반경(a_s), 궤도 제 1 이심율(e_s), 시간(t)은 1 다항식 형태인 경우 정확도가 비교적 양호하게 산출되었다.

Table 6은 ancillary 데이터로부터 계산되는 위성위치 및 자세 모델링을 수정하여, 번들조정을 수행하고 이 결과를 전체 Pass 영상에 적용했을 때 각 거리별로 산출된 지상좌표의 정확도이다.

Table 5와 Table 6의 결과를 살펴보면 번들조정

에 사용된 영상의 중심에서 약 100 km 이상 떨어진 지역의 정확도가 X축에 대해서는 약 5배 정도, Y축에 대해서는 2배정도 향상되었음을 보여준다. 그러나 Z축의 오차는 여전히 X축과 Y축에 비해 상당히 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이것은 기본적으로 번들조정이 지상기준점의 분포상태에 민감한 영향을 받기 때문에 일부 영역에서 획득된 기준점으로 전체 Pass내 위성의 상태를 표현하기가 힘들고, 한 Pass를 획득하는 시간이 KOMPSAT-1 EOC의 경우 약 120초 정도이고 1 Scene의 획득 시간은 2.73초 정도로 아주 짧기 때문이라 생각된다. 즉 번들조정에서 산출되는 외부표정요소는 기본적으로 1 Line을 취득하는 시간(sensing time)이 일정하다는 가정을 포함하기 때문에 일부 영역으로부터 산출된 외부표정요소를 전체 Pass에 적용하는 데에는 한계가 있음을 보여준다.

이러한 영향을 보정하기 위해서는 전체 Pass 내에 골고루 기준점을 분포시키는, 시간의 변화요소를 고려하는 형태로 외부표정요소를 산출하는 두 가지 방법을 생각할 수 있다. 첫 번째 방법은 전체 Pass 내에 기준점을 선정하기가 매우 어렵다. 특히 우리나라의 북한지역은 지도성과를 획득하기가 힘들거나, 지도가 있더라도 전체 Pass 영역에서 기준점을 선정하는 것은 경제적, 시간적으로 매우 많은 비용을 지불하여야 한다.

따라서, 향후 번들조정시에는 sensing time과 지구곡률을 표현하는 부가 매개변수를 고려하거나, 지상좌표계에서 지구곡률 보정을 고찰하면 Z축에 대한 정확도가 향상 될 것으로 기대된다.

Table 6. Accuracy of Pass image using adjusted ancillary modeling and bundle adjustment resulted.

(unit: m)

정확도	거리	0-15	23-26	44-46	88-90	107-109	113-119	120-128	130-140
		RMSE	X	4.03	4.30	12.75	14.55	12.27	5.99
Y	4.24		7.76	3.64	3.72	7.18	3.64	9.51	10.18
Z	3.97		21.39	36.91	72.93	93.79	103.09	115.66	121.12
XYZ	7.07		23.16	39.22	74.46	94.86	103.33	116.77	122.13

4. 결 론

본 연구에서는 KOMPSAT-1 EOC 영상의 Pass 영상과 Scene 영상의 기하정확도를 평가하고 이를 바탕으로 향후 2004년 발사될 KOMPSAT-2 MSC 영상의 기하정확도 확보 방안에 대한 기초적 연구를 수행하였다. 또한 비 접근지역에 대한 기하보정 방안으로 일부지역만을 대상으로 조정된 외부표정요소를 이용하여 전체 Pass 영상에 대하여 적용하는 방법과 중복 영상을 사용하여 보정하는 방법의 두 가지 방법을 살펴보았다.

향후, 이러한 연구결과를 2004년 발사될 KOMPSAT-2 위성에 적용하기 위해서는 센서모델링에 필요한 요소를 MSC 특성에 맞게 적용되어야 할 것이며, 번들조정시에는 sensing time과 지구곡률을 표현하는 부가 매개변수를 고려하는 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

참고문헌

박병욱, 1991. SPOT 위성데이터를 이용한 수치표고모델 생성에 관한 연구, 서울대학교, 박사학위 논문.

임용조, 김태정, 2002. SPOT, EOC, IKONOS 스테레오 영상으로부터 생성된 도심지역 DEM의 정확도 및 성능 비교분석, 대한원격탐사학회지, 18(4):221-231.

임용조, 김태정, 김준식, 2002. KOMPSAT-1 EOC

입체 영상을 이용한 DEM 생성과 정확도 검증, 대한원격탐사학회지, 18(2):81-90.

유환희, 성재열, 김동규, 진경혁, 2000. 매핑을 위한 고해상 위성영상의 궤도요소 모델링, 한국측량학회지, 18(4):405-414.

유환희, 손홍규, 김동규, 진경혁, 2001. 최소 기준점을 이용한 KOMPSAT-1호 입체영상의 3차원 위치결정 모델링, 대한토목학회논문집, 21(6-D):953-961.

전정남, 김윤수, 2003. KOMPSAT-1 EOC 표준영상처리, 항공우주기술, 2(1):197-204.

최경재, 최윤수, 1999. EGM96 모델을 이용한 Bessel 지오이드 계산, 한국측량학회지, 17(1): 33-39.

Allam, M. M., 1978. DTM Application in Topographic Mapping, *PE&RS*, 44(12):1513-1520

Jeong, S., Y. S. Kim, and H. N. Lee, 2000. Digital plotting with KOMPSAT-1 EOC stereo images using digital photogrammetry workstation, *Korean Journal of Remote Sensing*, 18(1):25-33.

Mikhail, E. M., and F. Ackermann, 1976. *Observation and least Squares*, Harper & Row, Publishers, New York, USA.

Seo, D. C. and H. S. Lim, 2003. A study on the analysis of geometric accuracy of tilting angle using KOMPSAT-1 EOC images, *Korean Journal of Geomatics*, 3(1):53-57.