

# 고해상도 SAR 영상의 기하 위치정확도 관련 중요변수 분석

## Error Budget Analysis for Geolocation Accuracy of High Resolution SAR Satellite Imagery

홍승환<sup>1)</sup> · 손홍규<sup>2)</sup> · 김상필<sup>3)</sup> · 장효선<sup>4)</sup>

Hong, Seung Hwan · Sohn, Hong Gyoo · Kim, Sang Pil · Jang, Hyo Seon

### Abstract

The geolocation accuracy of SAR satellite imagery is affected by orbit and sensor information and external variables such as DEM accuracy and atmospheric delay. To predict geolocation accuracy of KOMPSAT-5 and KOMPSAT-6, this paper uses TerraSAR-X imagery which has similar spec. Simulation data for sensitivity analysis are generated using range equation and doppler equation with several key error sources. As a result of simulation analysis, the effect of sensor information error is larger than orbit information error. Especially, on-board electronic delay needs to be monitored periodically because this error affects geolocation accuracy of slant range direction by 30m. Additionally, DEM accuracy causes geolocation error by 20~30m in mountainous area and atmospheric delay can occur by 5m in response to atmospheric condition and incidence angle.

Keywords : KOMPSAT-5, KOMPSAT-6, Geolocation Accuracy, Sensitivity Analysis

### 초 록

SAR 위성 영상의 기하 위치정확도는 크게 시스템 내적 변수인 위성 궤도 및 센서 정보와 시스템 외적 변수인 DEM 오차, 대기 지연 등에 영향을 받는다. 이러한 변수들이 현재 운용 중인 다목적실용위성 5호와 개발 중인 다목적실용위성 6호의 영상 내 기하 위치정확도에 미치는 영향을 분석하기 위하여 유사한 제원을 지닌 TerraSAR-X 영상을 이용하여 연구를 수행하였다. 오차 분석을 위해 경사거리 방정식과 도플러 방정식을 이용하여 시뮬레이션 데이터를 생성하였으며, 위성 궤도 변수, 센서 변수, 시스템 외적 변수에 대한 오차를 지상 좌표와 영상 좌표 간 관계식에 반영하여 해당 변수들에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 오차 분석을 통해 저궤도 위성의 위치 및 속도 정보로 인한 영상 내 오차는 이중주파수 GPS 데이터 이용에 따라 20cm 내외로 크지 않음이 확인되었다. 따라서 센서 관련 변수들이 위치정확도에 영향을 줄 수 있으며, 특히 센서 내 전자적 시간 지연은 경사거리 방향의 정확도에 영향을 크게 미쳐 지속적인 모니터링이 필요할 것으로 판단되었다. 시스템 변수 외에도 DEM 정확도에 의한 오차로 인해 산지지역에서 영상 Geocoding 시 오차가 20~30m까지 크게 발생하고, 대기 지연 현상에 의해 오차는 입사각에 따라 5m까지 발생할 수 있어 영상 활용 시 이에 대한 고려가 필요함이 확인되었다.

핵심어 : 다목적실용위성 5호, 다목적실용위성 6호, SAR, 기하 위치정확도, 민감도 분석

## 1. 서 론

최근 X-Band SAR 센서를 탑재한 다목적실용위성 5호가 발사되어, 전천후의 국토 관리, 재난 감시 등에 활용될 예정이다. 영상의 효과적인 활용과 광학 위성, 항공사진 등 다양한

### 1.1 연구배경

1) Member, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University (E-mail:hotaeim@yonsei.ac.kr)

2) Corresponding Author, Member, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University (E-mail:sohn1@yonsei.ac.kr)

3) Member, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University (E-mail:spkim09@yonsei.ac.kr)

4) Dept. of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University (E-mail:hyoseon9206@yonsei.ac.kr)

데이터와의 융합을 위해서는 사용자들이 요구하는 기하정확도 (Geolocation accuracy) 품질 확보가 중요하다. 그러나 시스템 내 정보만 이용할 경우 SAR 영상 내 대상물의 기하 위치 결정에 오차가 수반된다. 이는 지상기준점을 통해 보정될 수 있지만 정확한 검보정을 위해서는 정확한 지상 기준점이 필요하며, 일반적으로 SAR 영상에서는 Corner reflector를 인위적으로 설치한다. 많은 수의 Corner reflector 설치 및 관리는 비용, 크기 등의 문제로 현실적으로 어려운 실정이다. 또한 항공 영상 또는 수치지도 등을 이용하여 기하보정 시에는 SAR 영상 내 정확한 위치 판독이 어려워 취득된 지상기준점 오차로 인한 기하보정 오차가 존재할 수 있다. 따라서 SAR 영상의 활용성을 높이기 위해서는 영상 시스템 검보정을 통해 별도의 지상기준점 없이 위치정확도를 확보할 수 있어야 한다.

독일의 TerraSAR-X 위성은 발사 전 기하 위치정확도 예측을 위해 위성 궤도 위치, 기준 좌표계 변동, 도플러 중심 주파수 오차, 영상 촬영 시작 시간 오차, 대기 지연에 관한 예상 오차 분석을 실시된 바 있다(Frey *et al.*, 2004). 또한 발사 후 위성 궤도의 3차원 위치정확도가 4.2cm까지 확보됨을 확인하였으며, 이를 바탕으로 기하 위치정확도 분석과 보정 및 활용을 위해 대류권 지연, 전리층 지연, 지구 조석 효과, 지각 변동에 따른 기준 좌표계 변동에 의한 오차 보정에 관한 연구가 진행되었다(Eineder *et al.*, 2011; Schubert *et al.*, 2012; Balss *et al.*, 2011). 최근에는 신호 지연 및 지각 오차 보정을 통해서 TerraSAR-X가 cm 단위의 위치정확도를 확보 가능함을 Corner reflector를 통해 확인하였다(Balss *et al.*, 2013).

SAR 위성 영상 활용에 있어 기하정확도는 중요한 요소임에도 위성 궤도와 센서 안정성, 지형효과, 대기효과 외 정확도에 미치는 요인에 대한 복합적인 영향 분석이 이루어지지 않았으며, 운용 중인 SAR 위성 내 오차 분석 및 영상의 효과적인 활용을 위해서는 다양한 오차요소들에 대한 영향 분석이 필수적이다(Eineder *et al.*, 2011; Schubert *et al.*, 2012; Balss *et al.*, 2011; Balss *et al.*, 2013).

또한 위성과 지상위치 간 단순 관계식을 통한 행 방향 및 열 방향에서의 오차 분석은 도플러 방정식과 거리 방정식에 의해 결정되는 SAR 영상 좌표의 오차 분석에는 한계가 있어, 정확한 분석을 위해서는 영상과 지상좌표 간 관측 방정식을 통해 생성된 시뮬레이션 데이터를 이용하여 오차 영향 분석을 수행할 필요성이 있다(Curlander *et al.*, 1991; Frey *et al.*, 2004).

이에 본 연구에서는 가상의 오차요소들이 포함된 시뮬레이션 데이터 생성을 통해서 다목적실용위성 5호, 6호에 나타날 수 있는 오차에 대한 분석을 수행하였다. 다목적실용위성 5호의 제원이 주어지지 않은 관계로 유사한 특징과 정확도를 가진

TerraSAR-X의 제원을 활용하여 다목적실용위성 5호의 위치정확도를 추정하였다. TerraSAR-X는 X-band 센서를 탑재하였으며, 평균촬영고도 514 km, 촬영 해상도는 약 1m, 3m, 16m로, 평균촬영고도 550 km, 촬영 해상도 약 1m, 3m, 20m의 다목적실용위성과 유사한 제원을 지닌다(DLR, 2008; Lee *et al.*, 2012).

TerraSAR-X의 위성 궤도 및 센서 제원들과 대상물 지상좌표에 대한 영상 좌표 간 관계식을 통해 시뮬레이션 데이터를 생성하고, 기존 연구결과를 바탕으로 중요변수에 대한 위치정확도의 민감도 분석을 실시하여 각각 변수가 미치는 영향과 이들 변수가 복합적으로 작용하였을 때 생기는 위치정확도 오차를 추정하였다.

## 2. 기하 위치정확도 관련 중요변수

SAR 영상은 위성에 탑재된 센서에서 방출된 신호가 지각면의 대상물에 반사되어 돌아오는 신호의 세기와 돌아오는데 걸린 시간으로부터 관측된 거리를 이용하여 생성된다. SAR 영상의 기하정확도에 영향을 미치는 변수들은 위성 궤도와 센서의 불안정성, 지형효과, 대기효과 등이 있으며(Curlander *et al.*, 1991; Frey *et al.*, 2004), SAR 영상 기하모델에 따라 기하 위치정확도 관련 중요변수를 크게 1) 위성 궤도 관련 변수 2) 센서 관련 변수 3) 시스템 외적 변수로 구분하여 분석을 실시하였다. SAR 영상의 기하 위치정확도에 영향을 미칠 것으로 예상되는 10가지 변수들은 Table 1과 같이 요약할 수 있다. 과거 SAR 위성 궤도 정보의 경우에는 정확한 궤도 정보를 제공하지 못하여, 영상 활용 시 위성 궤도 보정이 필요했으나, TerraSAR-X와 같이 최근 위성들은 20cm 이내의 정확한 궤도 위치 정보를 제공하여, 센서 관련 변수와 시스템 외적 변수들이 주요 오차 원인으로 작용한다(Jeong *et al.*, 1997; Sohn *et al.*, 2004; Eineder *et al.* 2011; Shrank *et al.*, 2011; Schubert *et al.*, 2012).

Table 1. Key parameters for geolocation accuracy

	Key parameters
Orbit information	1. Satellite position 2. Satellite velocity
Sensor information	3. Echo samples datation accuracy 4. On-board electronic delay 5. Pulse repetition frequency (PRF) 6. Range sampling frequency (RSF)
System external variables	7. DEM accuracy 8. Atmospheric delay 9. Earth tide 10. Reference frame

## 2.1 위성 궤도 관련 변수

TerraSAR-X 영상 제품의 궤도 정보는 목적에 따라 Predicted(PRED), Rapid(RAPD), Science(SCIE) 3가지 유형으로 제공되며, 각 유형별 요구 3D 정확도는 700m, 2m, 20cm이다(DLR, 2008). 이중주파수 GPS 신호의 정밀 궤도 분석을 통해 제공되는 Science mode의 TerraSAR-X 위성의 궤도 정보는 20cm 이내 정확도의 궤도 정보를 제공하며, 실제 관측 결과 4.2 cm 이내의 3D 정확도를 지남이 확인되었다(Yoon *et al.*, 2009). 또한 SAR 영상의 기하 위치정확도는 광학위성과 달리 위성의 자세 정보보다 위성의 속도 정보 정확도에 영향을 받게 된다. 이중주파수의 GPS 신호에 대한 정밀궤도분석 시 위성 속도 정확도는 0.02m/s까지 확보될 수 있음이 연구된 바 있다(Hwang *et al.*, 2009).

## 2.2 센서 관련 변수

신호 샘플링 정확도(Echo samples datation accuracy)는 위성 시계와 위성 궤도 자료로부터 위성 궤도력(Ephemeris) 정보를 유도하기 위해 사용한 시계 사이의 편차로 위성 진행 방향의 위치정확도에 영향을 주게 된다. 또한 전자적 시간 지연(On-board electronic delay)은 레이더 송신기 및 수신기 전체에서의 신호의 전자적 지연 펄스를 생성하기 위해 제어신호가 여자기로 전달되고 반사파가 ADC에 의해 변환되기까지 소요되는 전체 지연시간으로, 경사거리 방향의 위치정확도에 영향을 주게 된다(Curlander *et al.*, 1991). 독일의 고해상도 X-band SAR 위성인 TanDEM-X에 대한 픽셀 위치정확도 평가 결과 위성 진행 방향의 신호 샘플링 정확도가 평균 29 $\mu$ sec, 표준편차 13 $\mu$ sec(9.2cm)가 발생하며, 전자적 시간 지연이 평균 212nsec, 표준편차 0.74nsec(11cm)으로 발생함이 확인된 바 있다(Shrank *et al.*, 2011).

센서 정보 중 펄스 반복 주파수와 거리방향 샘플링 주파수는 각각 영상 내 위성 진행방향, 경사거리 방향 픽셀 간격을 결정하게 되고, 불안정한 센서는 영상 내 위치 오차를 발생시킨다. 일반적으로 이러한 주파수의 일시적인 미소한 변동은 영상의 기하학적 왜곡에 크게 영향을 미치지 않으나 장기간에 걸친 변동은 영상이 기하학적 안정성에 큰 영향을 미치게 된다(Curlander *et al.*, 1991).

## 2.3 시스템 외적 변수

영상의 Geocoding 시 영상 픽셀 좌표는 DEM에 투영되어 위치정확도는 DEM의 고도 정확도에 영향 받게 된다. TerraSAR-X 자료 처리를 위한 DEM은 주로 SRTM DEM을 사용한다(DLR, 2008). SRTM DEM의 오차는 1:5000 수치

지형도를 통해 만들어진 DEM과 비교 결과 평지 지역에서 약 8~10m, 산지 지역에서 31~33m의 RMSE로 나타났다(Kang *et al.*, 2010).

대기 지연은 대류권 지연현상과 전리층 지연 현상으로 구분된다. 대류권 지연은 크게 건조 부분에 의한 영향과 습윤 부분에 대한 영향으로 구분된다. 건조 부분에 의한 지연은 2.4m, 습윤 부분에 의한 지연은 0.4m까지 나타난다(Choi, 2009). 또한 전리층 지연 현상은 일반적으로 연직방향 총전자수(VTEC, Vertical Total Electron Content)는 5~10TECU(TEC Unit)로 나타남에 따라 약 0.2~0.4 m로 발생하게 된다(Schrank *et al.*, 2011).

지구 조석(Soild Earth Tide), 극 조석(Pole tide), 해양 조석 부하(Tidal ocean loading) 등으로 인한 지각의 움직임도 영상 내 위치 오차를 발생시킨다. 지구 조석으로 인한 지각의 움직임은 대전 지역 관측 결과 높이 방향으로 최대 10cm, 수평 방향으로 최대 5cm의 변화를 보이며, 극 조석 현상으로 인한 움직임은 높이 방향으로 최대 2.5cm, 수평방향으로 0.7cm의 변화로 나타난다(Choi, 2009). 또한 해양 조석 부하로 인한 지각의 움직임은 수직 방향으로 부하 영향이 없는 동해안 지역은 수 mm, 부하 영향이 큰 서해안 지역은 30mm까지 나타났다(Yun *et al.*, 2003).

매년 지각변동으로 인해 KGD2002와 세계측지계인 ITRF 사이에 지속적인 차이가 발생한다. 또한 IGS-ITRF2005 측지계(기준시점: 2007.183)에 따른 성과와 우리나라 국가삼각점 산출 좌표계 KGD2002 측지계(기준시점: 2002.0)의 성과를 비교한 결과 남쪽으로 0.082m, 동쪽으로 0.161m, 높이방향으로 0.002m 만큼 차이가 있음이 확인되었다(Jeong *et al.*, 2011).

## 3. 시뮬레이션 데이터 생성

SAR 영상에서 지상의 대상물과 영상 좌표간의 관계는 경사거리 방정식과 도플러 방정식을 통해 모형화 할 수 있다. 경사거리방정식과 도플러 방정식은 식 (1), (2)와 같이 표현될 수 있다(Curlander *et al.*, 1991).

$$R(t) = |\vec{R}^s(t) - \vec{R}_T| \quad (1)$$

$$f_{DC}(t) = \frac{2(\vec{V}^s(t) - \vec{V}_T) \cdot (\vec{R}^s(t) - \vec{R}_T)}{\lambda|\vec{R}^s(t) - \vec{R}_T|} \quad (2)$$

여기서,  $\vec{R}^s = (X^s(t), Y^s(t), Z^s(t))^T$  로서 위성의 위치벡터,  $\vec{R}_T = (X_T, Y_T, Z_T)^T$  는 대상의 위치벡터,  $\vec{V}^s = (V_x^s(t), V_y^s(t), V_z^s(t))^T$

는 위성의 속도벡터,  $\vec{V}_T = (V_{Tx}, V_{Ty}, V_{Tz})^T$ 는 대상의 속도벡터를 나타낸다. SAR 영상의 기하 위치정확도는 위성 궤도 정보 정확도에 직접적인 영향을 받으며, 위치 정보는 20cm, 속도 정보는 0.02cm/s의 정확도가 확보 가능하다(Yoon et al., 2009; Hwang et al., 2009). 따라서 위성 궤도 관련 변수인 위성의 위치에 대한 오차는 식 (3), (4)와 같이 궤도 정보 제공 유형에 따른 요구 정확도를 2차식으로 표현된 위성 궤도 모델 식에 오차로 부여하여 민감도 분석을 실시하였다.

$$\begin{aligned} X^s(t) &= a_1 + a_2t + a_3t^2 + \beta_{Rx} \\ Y^s(t) &= b_1 + b_2t + b_3t^2 + \beta_{Ry} \\ Z^s(t) &= c_1 + c_2t + c_3t^2 + \beta_{Rz} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} V_{sx} &= d_1 + d_2t + d_3t^2 + \beta_{vx} \\ V_{sy} &= e_1 + e_2t + e_3t^2 + \beta_{vy} \\ V_{sz} &= f_1 + f_2t + f_3t^2 + \beta_{vz} \end{aligned} \quad (4)$$

제로 도플러로 영상이 처리되었을 때를 가정하면 도플러 방정식에 Newton-Raphson 방법을 적용하여 대상물 지상좌표에 대한 영상 촬영 시간을 계산할 수 있다. Newton-Raphson 방법의 적용 식은 식 (5), (6)와 같다.

$$(t) = (\vec{V}^s(t) - \vec{V}_T) \cdot (\vec{R}^s(t) - \vec{R}_T) \quad (5)$$

$$n+1 = t_n - \frac{f(t_n)}{f'(t_n)} \quad (6)$$

$f(t)$ 는 영상촬영을 계산하기 위한 방정식으로 제로 도플러를 가정한 도플러 방정식이다.  $\vec{V}_s, \vec{R}_s$ 는 위성의 속도 및 위치 벡터이며,  $\vec{V}_t, \vec{R}_t$ 는 대상물의 속도 및 위치 벡터이며,  $f(t_{n+1})$ 와  $f(t_n)$  차가 일정 값 이하로 수렴할 때까지 계산을 반복하여 영상 촬영 시간  $t$ 를 구한다. 계산된 영상 촬영과 위성 궤도 모델을 통해 위성 위치와 대상물 간의 경사거리를 계산할 수 있으며, 식 (7), (8)을 통해 계산된 영상 촬영 시간과 대상물과 위성 간 경사거리로부터 대상물의 지상좌표에 대한 영상 좌표를 계산할 수 있다.

$$i = \frac{t - t_0}{1/PRF} \quad (7)$$

$$j = \frac{2*(R_s - R_{s_0})/c}{1/RSF} \quad (8)$$

$i$ 는 대상물의 행 방향 영상 좌표,  $t$ 는 영상 촬영시간,  $t_0$ 는 영상 촬영 시작 시간, 펄스 반복 주파수는 펄스 반복 주파수이다.  $j$ 는 대상물의 열 방향 영상 좌표,  $R_s$ 는 대상물과 위성 간 경사거리,  $R_{s_0}$ 는 열 방향 첫 번째 픽셀까지의 거리 값,

$c$ 는 빛의 속도, 거리방향 샘플링 주파수는 경사거리 방향 샘플링 주파수이다.

위 관계식에 의해 행 방향의 위치정확도는 신호 샘플링 정확도와 펄스 반복 주파수에 영향을 받게 되며, 열 방향의 위치정확도는 전자적 시간 지연과 거리방향 샘플링 주파수에 영향을 받음을 알 수 있다. 센서 정확도에 따른 위치정확도 분석을 위해 식 (9)와 같이 위성 궤도 시간에 오차를 부여하여, 신호 샘플링 정확도에 따른 영상 내 오차 시뮬레이션 데이터 생성하였으며, 식 (10)와 같이 경사거리 신호 전파 시간에 오차를 부여하여 전자적 시간 지연에 따른 영상 내 오차 시뮬레이션 데이터 생성하였다. 또한 펄스 반복 주파수, 거리방향 샘플링 주파수 오차에 따른 위치정확도 분석을 위해 식 (11), (12)와 같이 오차량을 부여하여 행 방향, 열 방향의 오차 시뮬레이션 데이터를 생성하였다.

$$t_{biased} = t + \beta_t \quad (9)$$

$$R_{biased} = R_s + \beta_{R_s} = R_s + \beta_{\tau} \frac{c}{2} \quad (10)$$

$$i = \frac{t - t_0}{1/(PRF + \beta_{PRF})} \quad (11)$$

$$j = \frac{2*(R_s - R_{s_0})/c}{1/(RSF + \beta_{RSF})} \quad (12)$$

## 4. 민감도 분석 수행 및 결과

### 4.1 사용 영상 제원

본 연구에서는 X 밴드 SAR 센서를 탑재한 다목적실용위성 5호와 유사한 제원의 TerraSAR-X 위성 영상을 사용하였

Table 2. SAR imagery information

Imaging mode	HS / SSC
Start time	2009.07.12. 21:35:21.698739
Stop time	2009.07.12. 21:35:22.422956
Orbit direction	Descending
No.of row.	6012
No.of col.	8352
First range sample timing	0.0043046279sec
pixel spacing	Row: 0.85181737m Col: 0.90940340m
PRF	8300Hz
RSF	164829192Hz
Incidence angle	39.6340°



다. 사용된 영상은 HS(High resolution Spotlight) 모드로 촬영된 SSC(Single look Slant range Complex) 데이터로 위성 진행 방향 0.85m, 경사거리 방향 0.91m의 높은 공간해상도를 지닌다. Table 2는 사용된 영상의 제원 정보이다.

4.1.1 TerraSAR-X 위치 정확도 확인

실제 SAR 영상 제품에서 제공하는 헤더정보로부터 결정되는 위치정확도를 확인하기 위하여, 대전지역의 TerraSAR-X 영상으로부터 15점의 지상기준점을 추출하여 위치정확도를 확인하였다. 항공영상을 통하여 지상기준점의 수평 위치를 추출하고, 해당 위치의 고도는 1:5000 수치지도를 이용하여 추출하였다. 위성의 위치 및 속도 정보를 영상의 헤더파일로부터 추출하여 위성 궤도를 모델링하였으며, 위성 센서 정보 및 지상기준점의 지상좌표로부터 영상 좌표를 결정하였다. 그 결과, 열 방향 방향에서 평균 17~18 픽셀의 오차를 보였으며, 행 방향에서 평균 0.5의 픽셀 오차가 존재했다. 오차는 주로 열 방향에서 나타났으며, 이는 지상 좌표의 고도 정보의 정확도, 대기 지연, SAR 센서의 전자적 시간지연으로 인한 복합적인 오차의 결과로 판단된다. Spotlight 모드로 촬영된 SAR 영상은 1m 이하의 고해상도 영상이므로, 지상기준점 추출에 있어 사용된 정사영상과 수치지도의 오차로 인한 지상기준점의 위치오차가 포함되어 있다. Figure 1는 15개의 지상기준점의 위치정확도이며, 가로축은 행 방향 정확도, 세로축은 열 방향 정확도이다.

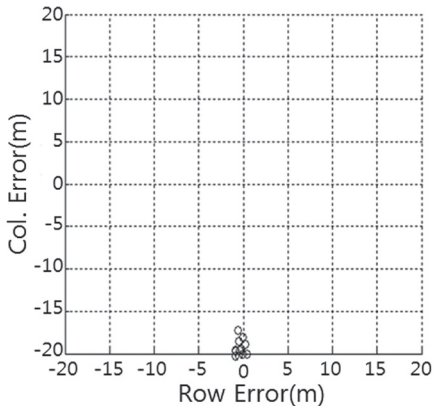


Fig 1. The accuracy of TerraSAR-X over the test site Daejeon

4.2 민감도 분석 결과

4.2.1 위성 궤도 관련 변수

위성 궤도의 위치 및 속도 오차에 대한 위치정확도에 영향

분석을 위해 다른 변수들에는 오차가 없음을 가정하고 위성 위치와 속도의 X, Y, Z 방향에 오차를 설정하여 시뮬레이션 데이터를 생성하였다. 각 영상에서 행과 열 방향의 좌표 오차를 산출한 결과 각 방향의 오차에 따라 영상 좌표 오차는 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. Figure 2, 3는 위성의 위치 및 속도 오차로 인한 민감도 분석 결과이다. 위성 궤도가 X, Y, Z 방향으로 20 cm의 위치 오차가 발생하였을 때, 영상 내 오차는 최대 행 방향 15.9cm, 열 방향 -18.3cm로 나타났다. 또한 속도오차로 인한 영향은 열 방향으로 거의 나타나지 않았으며, 행 방향으로 0.02cm/s의 속도 오차에 대해 최대 1.5cm 오차가 나타났다.

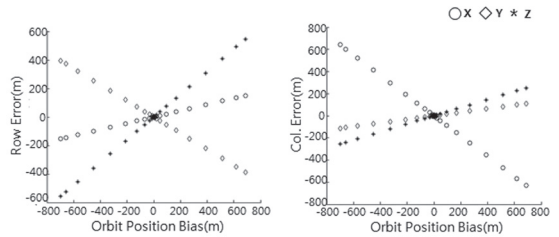


Fig 2. Sensitivity analysis about orbit position error (Left: Azimuth direction, Right: Range direction)

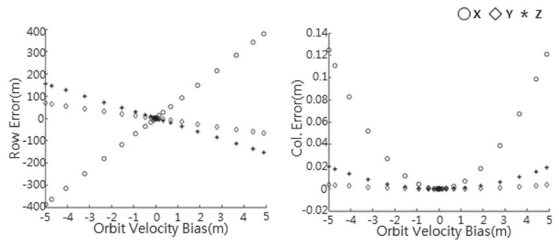


Fig 3. Sensitivity analysis about orbit velocity error (Left: Azimuth direction, Right: Range direction)

4.2.2 센서 관련 변수

이중주파수 GPS를 이용한 정밀궤도분석을 통해 얻은 위성 궤도정보 사용 시 영상 내 위치 오차는 거의 나타나지 않기 때문에 신호 샘플링 정확도와 전자적 시간 지연은 영상 위치 오차에 중요한 변수로 작용한다. 신호 샘플링 정확도 분석을 위해 영상 촬영 시간에 임의의 오차를 부여하여 분석을 수행한 결과 10 $\mu$ sec에서는 0.071m, 30 $\mu$ sec에서는 0.212m의 오차가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 전자적 시간 지연에 대한 분석을 위해 경사거리 방향의 신호 전파 시간에 오차를 부여한 결과 1nsec의 지연량에 대해서는 0.140m의 작은 오차를 보였지만, 지연량이 200nsec까지 증가하였을 때는

28.080m의 오차로 경사거리 방향으로 큰 오차가 발생하였다. 또한 펄스 반복 주파수 오차 1Hz 발생 시 위성 진행방향으로 0.535m, 거리방향 샘플링 주파수 오차 10kHz 발생 시 경사거리 방향으로 0.309m의 영상 내 오차가 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

4.2.3 시스템 외적 변수

4.2.3.1 DEM 정확도

영상의 Geocoding 시 주로 사용되는 SRTM DEM의 경우에는 평지지역에서는 약 8~10m, 산지지역에서는 약 31~33m의 고도오차를 수반한다(Kang *et al.*, 2010). 이에 DEM 오차에 따른 영상 내 오차 시뮬레이션 데이터 생성을 위해 실제 DEM 데이터에 랜덤 오차를 부여하여 분석을 수행하였다. Figure 4는 분석에 사용한 DEM 데이터(좌: 산지, 우: 평지)이며, Table 3는 그 결과이다. 평지는 약 35~56m의 고도분포를 보였으며, 이에 8~10m의 DEM 오차가 발생하였을 때 평균 6.963m의 오차를 보였다. 또한 산지 지역은 약 55~408m의 고도 분포를 보였으며, 이에 31~33m의 DEM 오차가 발생하였을 때 평균 24.779m의 오차를 보였다. 또한 위에서 계산된 오차는 입사각 39.6°에서의 결과로 입사각이 다목적실용 위성 5호에서의 최대 입사각인 20°~55°까지 변함에 따라(이상률 등, 2012) 평지에서의 오차는 약 12.977~5.794m, 산지에서 는 46.181~20.617m로 나타날 수 있다.

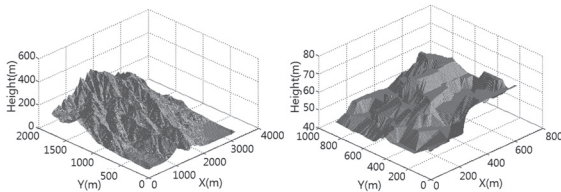


Fig 4. DEM for error simulation (Left: Mountain, Right: Flatland)

Table 3. Error simulation about DEM accuracy

	Flatland	Mountain
Elevation(m)	35~56	55~408
DEM accuracy(m)	8~10	31~33
Pixel accuracy(m)	6.963	24.779

4.2.3.2 지구 조석 및 기준 좌표계 오차

지구 조석으로 인한 오차는 대상물의 좌표 값에 오차를 발생시켜 영상 내 좌표 값에 영향을 주게 된다.

계산 결과 지구 조석으로 인한 지각의 움직임에 따라 영상 내 오차가 위성 진행 방향 및 경사거리 방향으로 약 20cm까지 나타났다. Figure 5은 지각의 움직임에 의한 오차에 따른 민감도 분석 결과이다. 기준 좌표계로 인한 시뮬레이션 결과 매년 발생하는 오차는 위성 진행 방향 및 경사거리 방향에서 행 방향 8mm, 열 방향 -17mm의 오차로 발생되며, 이는 지각 변동 모델이나 GPS 관측을 통해 오차량을 산출하여 보정할 수 있다. 하지만 KGD 2002 측지계와 ITRF 2005 측지계의 성과가 남쪽으로 82mm, 동쪽으로 161mm의 오차가 발생함에 따라 영상 내의 오차도 행 방향 52mm, 열 방향 -110mm로 발생됨을 알 수 있다.

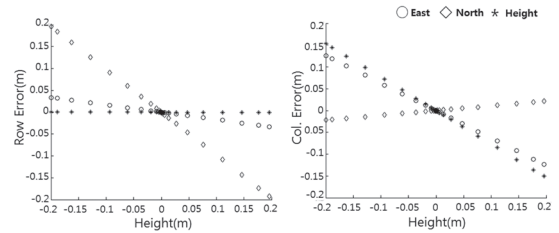


Fig 5. Sensitivity analysis about earth tide (Left: Azimuth direction, Right: Range direction)

4.2.4 복합변수 오차 영향 분석

중요 변수들의 복합적인 영향을 분석하기 위해 랜덤 오차 시뮬레이션 데이터를 생성하여 분석을 실시하였다. 시뮬레이션 데이터 생성을 위해 각 변수의 랜덤오차는 1 표준편차 값으로 가정하여 오차를 부여하였으며, 일정 방향성을 지닌 신호 샘플링 정확도, 전자적 시간 지연, 대기 지연, 기준 좌표계 변동으로 인한 오차에는 해당 편위량을 부여하였다. 중요변수의 복합적 오차를 반영한 5천개의 랜덤 데이터를 샘플링하여

Table 4. Error sources for analysis about combinational parameters

Orbit position error	±20cm
Orbit velocity error	±0.02cm/s
Echo samples datation accuracy	-29±13μsec
On-board electronic delay	-212±0.074nsec
Atmospheric delay	-3±1m
Earth tide	Hori. ±10cm Vert. ±30cm
Reference frame error	North 81mm East 161mm

평균과 표준편차를 분석하는 방법으로 중요변수 오차에 의한 영상 좌표의 정확도 및 정밀도를 분석하였다. 분석에 반영한 오차는 Table 4와 같다. 분석 결과 영상 내 오차는 위성 진행방향, 경사거리 방향으로 각각 평균  $-0.152\text{m}$ ,  $-34.886\text{m}$ 로 주로 전자적 시간 지연과 대기 지연 효과로 인해 경사거리 방향에서 영상 내 오차가 발생할 것으로 나타났으며, 표준편차는  $0.243\text{m}$ ,  $1.141\text{m}$ 로 나타났다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 다목적실용위성 5호의 위치정확도 검토 및 6호의 설계를 위해 기존 SAR 위성 위치정확도 관련 연구결과들을 바탕으로 높은 해상도와 위치정확도를 지닌 TerraSAR-X 영상을 이용하여 분석을 수행하였다. 실제 영상 제원을 통해 가상의 오차가 포함된 시뮬레이션 영상을 생성하여 각 중요변수에 대한 민감도 분석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 위성 궤도 정보 정확도는 이중주파수 GPS 신호 사용 시  $20\text{cm}$  이내 수준의 위치정확도를 확보할 수 있는 반면 SAR 센서의 전자적 시간지연에 의한 오차는 수십 m까지 오차를 발생시킬 수 있어 다목적실용위성 5호 운영에도 센서에 대한 주기적인 모니터링이 필요함을 알 수 있었다.
- 2) 시스템 오차 외에도 대기효과와 지형효과에 의한 오차가 크게 나타나 효과적인 영상 활용과 정확한 시스템 검보정을 위해서는 이를 제거할 필요성이 있음을 확인하였다.
- 3) 위성 궤도, 센서 오차, 대기오차, DEM 오차 이외에도 기타 영향 요인들이 SAR 영상의 정확도에 영향을 주기 때문에 mm단위의 보다 정확한 다목적실용위성 5호의 시스템 검보정을 위해서는 이에 대한 효과를 제거할 필요성이 있음을 확인하였다.

향후에는 본 연구를 기반으로 최근 발사된 다목적실용위성 5호의 실제 영상 내 기하 위치 정확도 오차를 분석하고 이를 통해 다목적실용위성 5호의 시스템 검보정을 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

본 연구는 항공우주연구원 다목적실용위성 6호 개발 사업 (SAR 영상 Geo-location 보정을 위한 핵심 파라미터 산출방법 및 시스템 보정방법 연구)에 의해 수행되었습니다.

#### References

- Ager, T. P. and Bresnahan, P. C. (2009) Geometric precision in space radar imaging: result from TerraSAR-X, ASPRS 2009 Annual Conference, Baltimore, Maryland, March 9-13.
- Balss, U., Eineder, M., Fritz, T., Breit, H. and Minet, C. (2011) Techniques for high accuracy relative and absolute localization of TerraSAR-X/ TanDEM-X data, Geoscience and Remote Sensing Symposium 2011 IEEE International, pp. 2464-2467.
- Balss, U., Gisinger, C., Cong, X.Y., Eineder, M. and Bricic, R. (2013) Precise 2-d and 3-d ground target localization with TerraSAR-X, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS Hannover Workshop 2013, Volume XL-1/W1.
- Choi, Byung Kyu (2009) Development of a Regional Ionosphere Model for Improving Geodetic Performance in the Middle Range Baseline, Ph.D. dissertation, Chungnam National University, Korea, p. 143. (in Korean with English abstract)
- Curlandar, J. C. and McDonough, R. N.(1991) Synthetic Aperture Radar, System and Signal Processing, New York, John Wiley & Sons, pp. 372-387.
- DLR, TerraSAR Ground Segment-Basic Product Specification Document (2008) Doc. TX-GS-DD-3302, issue 1.5.
- Eineder, M., Minet, C., Steigenberger, P., Cong, X. Y. and Fritz, T. (2011) Imaging Geodesy-Toward Centimeter Level Ranging Accuracy With TerraSAR-X. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 49 (2), pp. 661-671.
- Frei, O., Meier, E., Nuesch, D., and Roth, A. (2004) Geometric error budget analysis for TerraSAR-X. Proceedings of EUSAR 2004, Ulm, Germany.
- Hwang, Yoo La, Lee, Byoung Sun, Kim, Jae Hoon, Yoon, Jae Cheol (2009) Precise Orbit Determination of LEO Satellite Using Dual-Frequency GPS Data, Journal of the Korean society for space sciences, Vol. 26, No. 2, pp. 229-236. (in Korean with English abstract)
- Jung, Kwang Ho, Lee, Hung Kyu (2011) A Study on Continuous Management Strategy or Published Coordinates of National Geodetic Control Points using GPS Network

- Adjustment, Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography, Vol. 29, No. 4, pp. 367-380. (in Korean with English abstract)
- Jeong, Soo, Sohn, Hong Gyoo, Yeu, Bock Mo (1997) Rigorous Geocoding of Radarsat Satellite SAR Data, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 17, No. 3, pp. 239-247. (in Korean with English abstract)
- Kang, Kyung Ho, Kim, Chang Jae, Sohn, Hong Gyoo, Lee, Won Hee (2010) Accuracy Evaluation of ASTER DEM, SRTM DEM using Digital Topographic Map, Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography, Vol. 28, No. 1, pp. 168-178. (in Korean with English abstract)
- Lee, S. R., Kim, J. H., Yoon, J. C. (2012) Development of KOMPSAT-5 System, Proc. of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences Conference, 2012. 11, pp. 846-850. (in Korean with English abstract)
- Liu, H, Zhao, Z and Jezek, K.C. (2004) orrection of Positional Errors and Geometric Distortions in Topographic Maps and DEMs Using a Rigorous SAR Simulation Technique, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 70, No. 9, pp. 1031-1042.
- Schubert, A., Jehle, M., Small, D. and Meier, E. (2011) Mitigation of Atmosphere Perturbations and Solid Earth Movements in a TerraSAR-X Time-Series, Journal of Geodesy, Volume 86, Issue 4, pp. 257-270.
- Schrank, D., Schwerdt, M., Gonzalez, J. H., Bachmann, M., Döring, B., Ramon, N. T. and Antony, J. W. (2011) In-Orbit Calibration of Both TanDEM-X Satellites. Cal, 63, 600.
- Schreier, G, 1993. SAR Geocoding: Data and Systems, Wichmann, pp. 160-163.
- Sohn, Hong Gyoo, Song, Yeong Sun, Kim Gi Hong, Bang, Soo Nam (2004) A Rigorous Geometric Rectification of RADARSAT SAR Imagery Using a Single Control Point, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 24, No. 1, pp. 107-115. (in Korean with English abstract)
- Song, Yeong Sun (2010) A Study on Geometric Correction Method for RADARSAT-1 SAR Satellite Images Acquired by Same Satellite Orbit, Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography, Vol. 28, No. 6, pp. 605-612. (in Korean with English abstract)
- Yoon, Y., Eineder, M., Yague-Martinez, N. and Montenbruck, O. (2009) TerraSAR-X precise trajectory estimation and quality assessment, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 47, No. 6, pp. 1859-1868.
- Yun, Hong Sic, Lee, Dong Ha (2003) Determination of Ocean Tidal Loading Components at GPS Permanent Stations, Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography, Vol. 21, No. 4, pp. 317-322. (in Korean with English abstract)

---

(Received 2013. 10. 22, Revised 2013. 12. 18, Accepted 2013. 12. 30)