

## TerraSAR-X를 이용한 지상기준점 추출

박정원\* · 홍상훈\*\* · 원중선\*†

\*연세대학교 지구시스템과학과, \*\*마이애미대학교 해양지질 및 지구물리과

### Extraction of Ground Control Points from TerraSAR-X Data

Jeong-Won Park\*, Sang-Hoon Hong\*\*, and Joong-Sun Won\*†

\*Department of Earth System Sciences, Yonsei University

\*\*Division of Marine Geology and Geophysics, University of Miami

**Abstract :** It is possible to extract qualified ground control points (GCPs) from SAR data itself without published maps. TerraSAR-X data that are one of highest spatial resolution among civilian SAR systems is now available. In this study, a sophisticated method for GCP extraction from TerraSAR-X data was tested and the quality of the extracted GCPs was evaluated. Mean values of the distance errors were 0.11 m and -3.96 m with standard deviations of 6.52 m and 5.11 m in easting and northing, respectively. The result is one of the best among GCPs possibly extracted from any civilian remote sensing systems. The extracted GCPs were used for geo-rectification of IKONOS image. The method used in this study can be applied to KOMPSAT-5 for geo-rectification of high-resolution optic images acquired by KOMPSAT-2 or follow-up missions.

**Key Words :** TerraSAR-X, ground control point (GCP), synthetic aperture radar, geo-rectification.

**요약 :** 지도가 없는 지역에서는 SAR 자료로부터 신뢰도 높은 지상기준점(GCP)을 추출하는 방법이 적용될 수 있다. 최근 민간용 SAR 중 가장 해상도가 높은 TerraSAR-X 자료가 제공되기 시작하였다. 이 연구에서는 신뢰도 높은 지상기준점을 추출하는 방법을 TerraSAR-X 자료에 적용하였으며 또한 추출된 지상기준점의 정밀도를 분석하였다. 추출된 지상기준점의 평균오차는 동서방향과 남북방향으로 각각 0.11 m, -3.96 m였으며 표준편차는 각 방향으로 6.52 m 및 5.11 m 였다. 이는 현재 민간용 위성 원격탐사 모든 시스템에서 추출될 수 있는 어떤 경우보다 정밀한 결과이다. 추출된 지상기준점을 이용하여 IKONOS 영상의 기하보정을 수행 하였다. 이 방법은 향후 아리랑-5호 (KOMPSAT-5) 자료에 적용하여 지상기준점 추출로 아리랑-2호 (KOMPSAT-2) 및 후속 위성시스템에 의해 얻어지는 고해상도 광학영상의 기하보정에 활용될 수 있을 것이다.

## 1. 서론

원격탐사 기술이 점점 발전하면서 수 m 급의 고해상도 영상이 제공되고 있으며, 이들은 고해상 및 고정밀의 지도역할을 하고 있다. 그러나 인공위성으로부터 얻어진 영상이 지도로서의 역할을 하기 위해서는 영상에 정밀한 지리적 좌표가 부여되어야 한다. 원격탐사자료는 통상 시스템적 오차와 비시스템적 오차를 같이 포함하고 있으며, 시스템적 오차는 위성체의 조건을 잘 알고 있으면 보정이 가능하나 비시스템적 오차를 보정하기 위해서는 지상기준점을 이용해야 한다(John, 1996). 또한 지상기준점은 원격탐사자료에 지리적 좌표를 부여하는 데에 이용될 수 있다. 특히 고해상도 광학영상의 경우 궤도정보 및 카메라 모델링에 의해 얻어지는 정보만으로는 정밀한 지리적 좌표부여가 어려우며, 이에 따라 좌표체계가 정립되어있는 지도와 영상과의 기준점 정합을 통해 좌표부여를 수행할 수 있다. 그러나 요구되는 축척의 지도를 구할 수 없는 지역이나 지상기준점(GCP)의 정보가 없는 지역에 대해서는 이러한 방법을 사용할 수 없다.

SAR 영상은 스펙클잡음과 측면관측의 시스템적 특성으로 인한 기하적 왜곡을 가지고 있다. 따라서 SAR 영상의 좌표부여는 기준점 정합으로 해결하기 매우 어려우며, 각 영상점에 대해서 수동적으로 좌표를 주는 것이 효과적이다. 그러나 광학위성시스템과는 다르게 위성에 탑재된 SAR는 능동 센서로서 위성과 지표의 사물간의 거리 정보와 반사 신호에서의 도플러(Doppler)정보를 포함하고 있기 때문에 위성 궤도정보 및 영상 취득시의 시스템정보(PRF, 파장, 비행방향 자료획득 시간, 거리방향 자료획득 시간 등)를 이용하면 레이더좌표계(azimuth, range)에서 특정한 영상 좌표에 대응하는 지리좌표의 계산이 가능하다는 장점을 갖는다. 이를 응용하여 간접적으로 지구타원체 위에서의 지상 기준점을 획득할 수 있으며, 널리 사용되고 있는 SAR 영상의 좌표부여에 대한 알고리즘은 Curlander (1982)와 Curlander and McDonough (1991)에 의해 처음 제안되었다. Mohr and Madsen (1999)은 SAR 영상화 개념을 적용하여 기존의 알고리즘을 더욱 발전시켰다. 그러나 기존의 SAR 영상 좌표부여 알고리즘은 range-Doppler 방정식을 포함한 세 개의 방정식을 풀어서 지

상좌표에 대한 해를 구하는 것으로 지형기복의 영향을 고려하지 않기 때문에 기하적인 오차를 발생시킨다. 특히 동서방향의 오차가 남북방향의 오차보다 더 크게 나타난다. 즉, 이러한 방법으로부터 계산된 지상기준점은 지형의 고저차가 포함되지 않은 지구 타원체 위의 있는 점이므로 평면적인 오차가 발생하여 실제 활용에 있어 제한적이다. SAR 영상에서 임의의 픽셀 위치는 지형고도모델(DEM)과 위성체의 궤도정보를 이용하여 계산할 수 있다. Hong 등(2006)은 이와 같은 점에 착안하여 SAR 모사기법을 이용한 '역좌표부여 알고리즘'을 제안하였으며, 이 방법을 ERS 영상과 SRTM 3초 DEM에 적용하여 정밀좌표추출을 수행하였다. 역좌표부여 알고리즘은 지형고도의 변화를 고려하여 실제 SAR 영상과 SRTM 자료로부터 모사된 영상간의 상호교차상관도를 이용한 영상시간을 보정하여 10 m 급의 정밀도를 갖는 지상기준점을 추출해 낼 수 있었다. 이 연구는 Hong 등(2006)에 의해 개발된 역좌표부여 알고리즘을 최근 자료공급이 시작된 3 m 급 고해상 X-밴드 SAR 시스템을 탑재한 TerraSAR-X의 영상에 적용하여 지상기준점을 추출하고, 추출된 지상기준점의 정밀도를 분석하는 것이 주 목적이다. 또한 추출된 지상기준점을 이용하여 IKONOS 영상을 기하보정 함으로써 현재 운용중인 고해상 광학시스템을 탑재한 아리랑-2호 및 후속 위성시스템에서 얻어지는 고해상도의 광학영상과 향후 발사될 고해상 SAR 시스템인 아리랑-5호의 협동운용시의 기하보정의 응용 가능성을 보인다. 정밀한 지상기준점의 추출기술은 SAR 활용기술 중 기반기술의 하나로서 다양한 활용분야에의 정밀도 향상을 통한 SAR의 이차적 활용효과를 기대할 수 있다.

## 2. 역좌표부여 알고리즘

일반적으로 많이 사용되고 있는 거리방정식, Doppler 방정식 및 지구타원체 방정식의 세 방정식을 이용한 좌표부여방법은 영상좌표계를 직교좌표계로 바꾼다(Curlander and McDonough, 1991). 이때 좌표부여 알고리즘의 정밀도는 센서의 위치, 속도벡터, 펄스지연시간, 지표 사물의 고도에 따라 달라진다. 만약 위성의 위치자료와 영상시간 자료가 정확하다면, 기하적 오

류는 오직 사물의 고도에 의해 발생한다.

이와는 반대로 역좌표부여 알고리즘은 SAR 모사와 지형을 고려한 geocoding에 기초하고 있다(Hong *et al.*, 2006). SAR영상의 지형보정을 고려한 geocoding 방법은 Schreier *et al.* (1990), Wivel *et al.* (1992), Olmsted (1993)에 의해 처음 제안되었다. Liu *et al.* (2004)은 지도와 DEM에서의 위치오차를 보정하기 위해서 SAR 모사 기법을 적용하였다. Liu 등 (2004)은 SAR 자료에 기록된 시간이 정확한 것이라고 가정하고 DEM을 수정하였음에 반하여, Hong 등 (2006)이 제안한 역좌표부여 알고리즘에서는 SRTM DEM의 전체적인 위치정보에는 체계적인 동서 혹은 남북방향의 이동 오차는 없다는 가정 하에 SAR 모사를 통하여 영상시간을 보정 후 지상기준점을 추출한다. Olmsted(1993)는 영상시간보정을 위해서 다음과 같은 식을 고안했다.

$$\Delta t = \Delta df_D / [df_D(t_0) / dt] \quad (1)$$

여기에서  $\Delta df_D = f_D(t) - f_{DC}$ 이고,  $f_{DC}$ 는 도플러 중심주파수,  $f_D(t)$ 는 시간에 따른 Doppler shift이다. 레이더 빔의 중심이 목표물을 지날 때의 도플러 주파수는 도플러 중심주파수와 같으므로,

$$f_D(t) - f_{DC} = \frac{2}{\lambda R(t)} (\bar{V}_s(t) - \bar{V}_p(t)) \cdot (\bar{S}(t) - \bar{P}(t)) - f_{DC} = 0 \quad (2)$$

이 된다. DEM의 픽셀  $\bar{P}(t)$ 에 대한 영상시간  $t$ 는 위의 식(2)를 통해 계산할 수 있다. 그러나 식(2)는 시간  $t$ 에 대해서 비선형이므로, 위의 식을 통해서 단일해를 얻기는 어렵다. 식(2)의 시간에 대한 미분은 다음과 같다.

$$\frac{df_D(t)}{dt} = \frac{2}{\lambda R(t)} \left[ \frac{(\bar{S}(t) - \bar{P}(t)) \cdot (\bar{A}_s(t) - \bar{A}_p(t))}{R(t)} + \frac{|\bar{V}_s(t) - \bar{V}_p(t)|^2}{R(t)} \right] \quad (3)$$

여기에서  $\bar{A}_s$ 와  $\bar{A}_p$ 는 각각 위성과 목표물의 가속도벡터이다. 식(1)의 해는 식(1)과 식(3)을 가지고 Newton-Raphson 반복해법을 적용하여 구할 수 있다. 그리고 그 해는 Doppler shift가 식(2)를 만족시킴을 보인다. 이를 위해서 먼저 초기값  $t_0$ 를 통해서 식(1)과 식(3)으로부터  $\Delta t$ 를 구하고, 얻어진  $\Delta t$ 를 이용하여  $t_1 = t_0 + \Delta t$ 로 갱신하여 다시 같은 과정으로  $\Delta t$ 를 구한다. 이를  $\Delta t$ 가

수렴할 때까지 반복하여 수행한다. 이 계산을 통해서 구해지는 최종 영상시간  $t$ 를 이용해서 영상의 비행방향 픽셀번호를 구할 수 있다.

$$\text{Azimuth pixel} = PRF \times (t - t_a) \quad (4)$$

여기에서 PRF (Pulse repetition frequency)는 펄스의 반복주파수이고  $t_a$ 는 SAR 영상에서 주어지는 첫 번째 비행방향 픽셀의 영상시간이다. 위성체와 지상의 사물 사이의 거리  $R(t)$ 는 새로 계산된 영상시간  $t$ 를 이용해서 수정할 수 있다. 수정된 거리방향 픽셀좌표는 다음 식으로 결정된다.

$$\text{Range pixel} = 2 \times RSR \times \left( \frac{R(t)}{c} - t_r \right) \quad (5)$$

여기에서 RSR(Range Sampling Rate)은 거리방향 샘플링 비율이고,  $c$ 는 빛의 속도,  $t_r$ 는 첫 번째 픽셀까지의 시간(range gate time)이다. 식(2)과 식(3)을 풀기 위한 입력요소로서 위성체의 위치벡터가 필요하다. 또한 DEM은 식(3)의  $\bar{P}(t)$ 를 위해 사용된다. 연산시간의 효율과 정밀도를 고려하여 수렴조건 값으로 위치벡터는  $1 \times 10^{-7} m$ 를 영상시간은  $1 \times 10^{-10}$  초를 지정하였다. 모사과정은 도플러 중심주파수에 상응하는 Doppler frequency shift를 만족시키는 비행방향 시각을 구하기 위해 도입하였다.

이 연구에 사용된 TerraSAR-X 영상의 도플러 중심주파수는 거의 0에 가깝다. 이러한 방법으로 영상시간을 얻었을 때 거리방향 시각은  $R(t)$ 로부터 쉽게 구할 수 있다. 이 연구에서의 자료처리 과정은 Fig.1에 요약된 바와 같다.

### 3. 자료 및 전처리

#### 1) TerraSAR-X 영상과 DEM

이 연구에서는 2007년 12월 9일 군산지역에서 획득된 TerraSAR-X의 HH 단일편광 기본모드(Stripmap mode) SLC 영상이 이용되었다. 영상의 시스템적인 구성요소는 Table 1과 같다. TerraSAR-X의 궤도정밀도 ( $1\sigma$ )는 700 m 내외의 predicted orbit, 2 m 내외의 rapid orbit 및 20 cm 내외의 science orbit의 3가지로 구분된다. 정확한 궤도정보는 좌표부여 알고리즘에 있

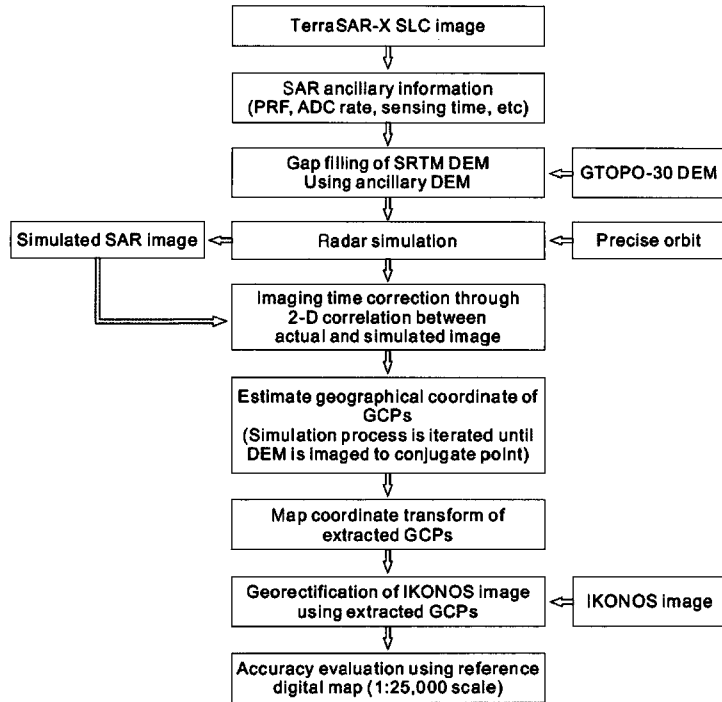


Fig. 1. Flowchart of the inverse geolocation algorithm (modified from Hong *et al.*, 2006).

Table. 1. TerraSAR-X scene parameters

Parameter	Value
Acquisition date	09-DEC-07
Scene center latitude	35.87°N
Scene center longitude	126.79°E
Orbit	Ascending
Incidence angle	39.23°
Sampling rate	109.89 MHz
Pulse repetition frequency	3815.49 Hz
Wavelength	3.11 cm
Range Spacing	1.36 m
Azimuth Spacing	1.85 m

어서 매우 중요한 요소로, 이 연구에서는 가장 정밀한 science orbit을 이용하였다. 추출되는 지상기준점의 정확도는 DEM의 품질에도 좌우된다. 이 연구에서는 가장 일반화된 적용을 시험하기 위하여 범용으로 구할 수 있는 SRTM 3초 자료를 이용하였다. 보다 정밀한 DEM을 이용하는 경우 보다 좋은 결과를 기대할 수 있다. 아시아 지역의 SRTM 3초 DEM의 수평방향과 수직방향의 정밀도는 각각 8.8 및 6.2 m로 알려져 있다 (Rodriguez, 2005). 그러나 SRTM DEM은 레이더 간

섭기법을 통해 획득된 자료로 레이더의 기하적 특성에 의하여 곳곳에 누락된 표고값이 존재한다. 이 누락된 값들을 보정하지 않으면 추출된 지상기준점에 심각한 오차가 발생하게 되므로 누락 표고값에 해당하는 부분은 USGS에서 배포하는 10초 간격의 GTOPO-30 DEM을 이용하여 보간하여 사용하였다. 일반적인 range-Doppler 방정식을 통해 추출되는 지상기준점의 DEM 오차에 따른 좌표의 이론적 오차는 40°의 입사각과 6m의 DEM오차를 갖는 경우 약 7 m이다(TerraSAR-X basic product manual, 2008).

## 2) 거리 및 비행방향 시간보정

영상 취득 시에 기록되는 SAR 시스템 관련 요소 중 range gate time과 azimuth start time은 실제 영상 취득시의 값과 비교하여 약간의 오차가 존재한다. 이러한 시간적 오차는 SAR 영상을 지상위치로 복원하는 과정에서 위성의 위치에 대한 오차를 발생시키며 결과적으로 추출되는 지상기준점의 좌표정밀도를 저하시킨다. 즉, SAR 영상에서 각 픽셀에 대응되는 지상좌표값은 궤도에서의 안테나 위치와 관련되기 때문에 시스템에 기록된 시간오차는 안테나 위치에 대한 오차를 발생시켜

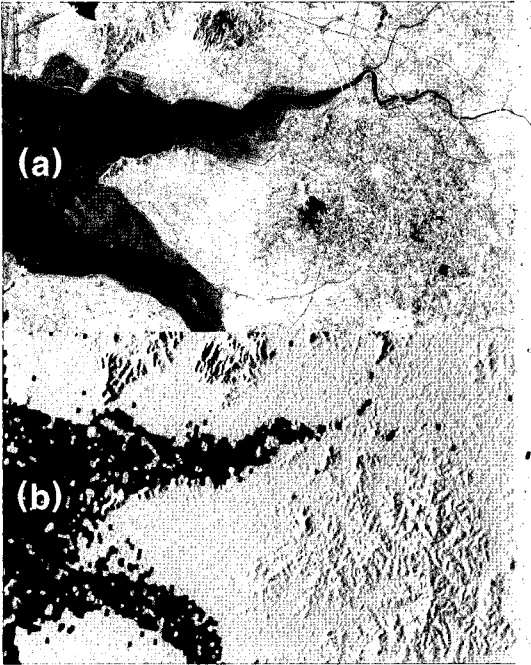


Fig. 2. (a) TerraSAR-X image and (b) a simulated SAR image. The GCPs extracted by the tested method are denoted by white stars on (a). The simulated SAR image was created by SRTM-3 DEM.

결국 픽셀좌표값에 대한 오차를 유발하며, 이 경우 영상이 전체적으로 동서방향 또는 남북방향으로 이동된 형태를 갖는다. DEM도 각 지점에 대한 위치 및 고도오차를 갖고 있으나 전체적인 이동현상은 적기 때문에 SAR 영상의 전체적인 이동오차는 DEM을 기준으로 하면 보정이 가능하다. Fig. 2(b)는 시간보정을 위해 사용된 STRM DEM으로부터 제작된 SAR 모사 영상이다.

일반적인 SAR 지리좌표 복원 방법은 SAR 영상의 각 픽셀의 지리적 좌표를 계산하는 방법인데 비하여, 역좌표부여 알고리즘은 이와는 반대로 DEM에서 선택된 지점을 SAR 영상 내에서 찾는 방법으로, DEM 좌표로부터 대응되는 SAR 영상 픽셀좌표를 역으로 계산하는 방법이다. 따라서 이 방법의 정밀도는 DEM의 정밀도에 영향을 받는다. 이 작업을 수행하기 위해서는 DEM을 이용한 SAR 영상모사 과정이 필요하며 이때 궤도, 안테나 위치, 펄스반복주파수(PRF), 샘플링 비율, 도플러 중심주파수 등의 정보가 필요하다. 영상 취득시에 얻어지는 상기의 모사 요소들을 이용하여 만든 SAR 모사 영상과 실제 SAR 영상과의 픽셀편차량을 계산하여 역산하면 시간오차를 보정할 수 있다. 픽셀편차량은 두 영상의

2차원 상관관계를 구했을 때 상관계수의 최대값 위치로부터 계산이 가능하다. 따라서 상관계수가 가장 높은 픽셀의 위치를 찾아서 거리방향과 비행방향 각각의 편차량을 계산한 후 그에 상응하는 영상시간으로 변환하여 안테나 위치보정을 함으로서 오차보정을 할 수 있다. 이때, DEM의 해상도가 높을수록 정밀한 보정이 가능하다.

#### 4. 실험결과 및 토의

역좌표부여 알고리즘을 TerraSAR-X 영상에 적용하여 22개의 지상기준점을 추출하고, 추출된 지상기준점의 정밀도를 1:25,000 수치지도와 비교하여 평가하였다. TerraSAR-X 영상과 추출된 지상기준점의 위치는 Fig. 2(a)와 같다. 추출할 지상기준점은 모서리 산란체 역할을 하여 SAR 영상에서 쉽게 인식되는 인공구조물을 중심으로 하였다. 좌표부여는 Transverse Mercator (TM) 투영과 Tokyo datum을 이용하였다.

지상기준점의 좌표추출은 2장에서 언급한 두 가지 방법을 모두 적용하였으며, 두 방법을 통하여 얻어진 결과는 Table 2에 요약되어 있다. Fig. 3(a)는 range-Doppler 방법을 이용했을 때의 좌표오차분포이고 Fig. 3(b)는 시간보정을 수행한 역좌표부여 방법을 이용했을 때의 좌표오차분포를 도시한 것이다. 사각형의 위치는 평균오차를 나타내며 오차막대는 오차의 표준편차를 나타낸다. 먼저 전통적인 range-Doppler 방법의 경우 평균오차는 남북방향과 동서방향으로 각각 0.03 m, 31.08 m이고, 표준편차는 각각 5.13 m, 9.40 m로 나타났다. 이 경우 동서방향의 오차가 남북방향의 오차보다 훨씬 크게 나타나고 있다. 동서방향의 평균 이동 오차값은 LANDSAT ETM+의 픽셀크기보다도 큰 값을 나타내었으므로 전통적인 range-Doppler 방법은 지상기준점의 추출시 큰 오차로 인하여 추가적인 보정 없이는 고해상도 영상에 사용이 적합하지 않다는 것을 알 수 있다. range-Doppler 방법에서는 지상기준점의 목표물이 지구타원체면에 위치하는 것으로 가정하게 되나 실제 목표물은 지구타원체로부터 지형효과에 의한 고도 변위를 갖는 위치에 있으므로 이러한 점이 오차의 주요 원인이 된다. 지형효과를 무시하는 가정은 특히 동서방향인 거리방향에서 더 큰 오차를 생성한다.

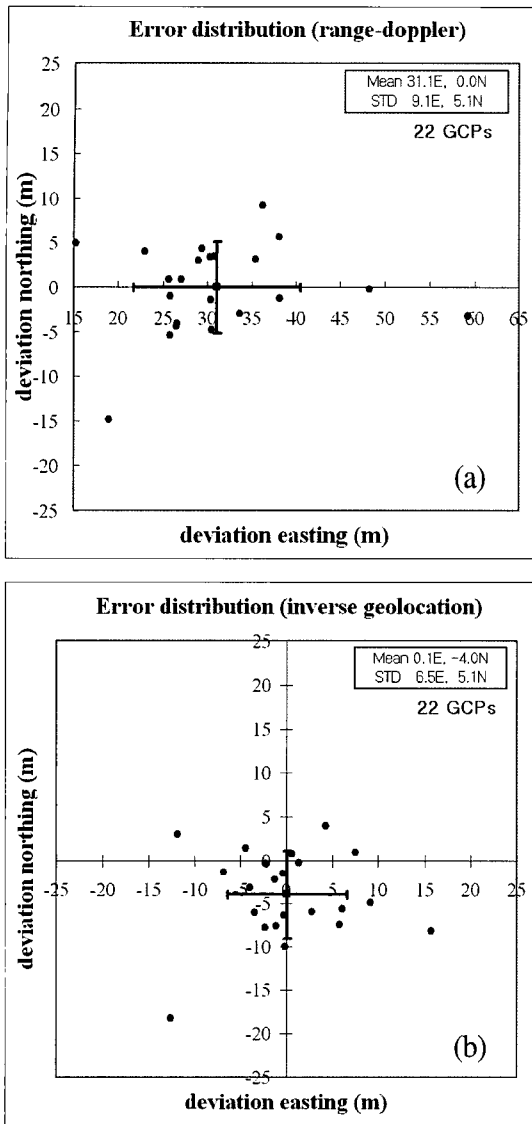


Fig. 3. Error distribution of the extracted GCPs obtained by (a) a conventional range-Doppler algorithm and (b) the inverse geolocation algorithm.

역좌표부여 방법의 경우 거리 및 비행방향의 시간보정 전과 후를 비교하였다(Table 2 참조). 시간보정을 수행하지 않았을 경우의 평균오차는 남북방향으로 -1.87 m, 24.19 m이고, 표준편차는 4.87 m, 6.55 m로 나타났다. range-Doppler에서 무시했던 지형효과를 고려해 줌으로써 평균오차와 표준편차가 줄어 들었다. 그러나 여전히 동서방향으로의 지상기준점들의 체계적인 이동효과가 있음을 알 수 있다.

펄스지연시간이나 영상촬영시간의 오차에 의해 발생

하는 픽셀편차량은 앞 절에서 기술한대로 실제영상과 모사된 영상간의 상호상관계수를 이용하여 보정을 수행하였다. TerraSAR-X 영상의 해상도가 약 3 m인데 반하여 SRTM DEM의 해상도는 약 90 m (3초)이므로 모사 영상과 실제 SAR 영상간의 수렴은 쉽지 않다. 특히 지표면의 기복이 적은 지역의 경우에는 수렴하지 않을 가능성이 있기 때문에 전체영상 중 지형기복이 뚜렷한 부분을 선별하여 일부분만을 이용하여 상호상관계수를 구하였다. 거리방향의 보정값은 11,185픽셀( $5.0894 \times 10^{-8}$ 초), 비행방향의 보정값은 -1,293픽셀( $-3.3888 \times 10^{-4}$ 초)로 나타났다. 시간보정을 수행하였을 경우의 평균오차는 남북방향, 동서방향으로 -3.96 m, 0.11 m, 표준편차는 5.11 m, 6.52 m로 특히 평균오차에 대한 정밀도가 크게 향상되었다. 이는 위성에 기록된 시간 오차에 의해 체계적으로 발생한 영상의 이동현상이 시간 보정에 의해 크게 개선되었음을 나타낸다. 시간 보정 후 역좌표부여 방법을 적용한 결과(Fig. 3(b))가 전통적 방법에 의한 결과(Fig. 3(a))에 비해 평균오차와 표준편차가 모두 개선된 것을 확인할 수 있다. 특히 약 30 m 이상의 동서방향의 위치 이동에 의한 오차가 역좌표부여 방법에 의해 거의 제거된 것을 알 수 있다. 지상기준점의 평균 위치정확도가 최대 4 m 이내이며, 또한 정밀도를 나타내는 표준편차가 최대 6.5 m 정도임을 감안할 때 TerraSAR-X를 이용하여 역좌표부여 방법을 이용한 지상기준점 추출방법이 현재 민간용 위성자료로부터 추출될 수 있는 가능한 지상기준점 정보 중 가장 정확도와 정밀도가 높은 결과임을 알 수 있다. 이와 같은 방법은 지도를 구할 수 없는 해외지역에 대한 지상기준점 정보획득에 가장 효과적으로 사용될 수 있다.

이와 같은 방법으로 추출된 지상기준점은 궁극적으로 고해상도 광학영상의 기하보정에 사용된다. 같은 해상도를 갖는 영상일 때 일반적인 지표 사물에 대한 육안 식별도는 SAR 영상보다 광학영상에서 우수하기 때문에 이러한 방식을 통해 좌표가 부여된 고해상 광학영상은 고해상 지도의 역할을 할 수 있다. 또한 스테레오 형태로 획득된 고해상도 광학영상을 이용하여 지형고도 정보를 추출하는 경우 특히 정밀한 지상기준점은 필수적이다. Fig. 4는 동일지역에서 획득된 IKONOS 영상을 이 연구에서 추출된 지상기준점을 이용하여 기하보정 후 1:25,000 수치지도와 비교한 것이다. TerraSAR-X

Table 2. Positional errors of extracted GCPs

GCP no.	Elevation of GCPs (m)	range-Doppler mapping		Inverse geolocation method			
				before time correction		after time correction	
		$\Delta$ Northing (m)	$\Delta$ Easting (m)	$\Delta$ Northing (m)	$\Delta$ Easting (m)	$\Delta$ Northing (m)	$\Delta$ Easting (m)
1	4.3	4.33	29.33	2.52	24.70	0.78	0.63
2	2.2	4.02	22.91	3.19	19.86	1.47	-4.42
3	7.0	5.69	38.04	2.79	31.41	0.97	7.53
4	7.0	-1.06	25.80	-3.88	19.19	-6.06	-3.49
5	5.8	3.38	30.31	0.43	17.05	-1.39	-6.85
6	12.3	-4.40	26.50	-4.25	23.39	-6.38	-0.31
7	3.0	-3.25	59.29	-5.65	40.37	-8.18	15.66
8	17.6	3.16	35.41	1.85	21.67	-0.34	-2.24
9	2.0	4.94	15.26	4.41	11.43	3.03	-11.85
10	5.8	-5.45	25.82	-5.17	24.42	-7.61	-1.12
11	5.1	-4.77	30.46	-7.60	24.72	-10.03	-0.15
12	3.3	2.98	29.00	0.19	24.90	-1.55	-0.39
13	4.4	-2.97	33.66	-5.07	29.41	-7.51	5.77
14	4.4	-1.41	30.40	-4.21	26.04	-5.97	2.80
15	4.5	0.86	25.60	-0.70	19.91	-3.19	-3.96
16	15.8	-4.11	26.56	-5.69	21.35	-7.83	-2.32
17	4.5	-0.20	48.20	-3.49	29.17	-5.63	6.09
18	4.0	3.48	30.79	1.56	25.88	-0.20	1.39
19	6.8	0.90	27.04	0.26	23.82	-2.22	-1.29
20	5.2	-14.85	18.98	-15.68	12.11	-18.20	-12.59
21	7.1	9.21	36.18	5.79	28.96	3.99	4.29
22	5.3	-1.26	38.14	-2.78	32.49	-4.96	9.19
Mean	<b>6.3</b>	<b>-0.03</b>	<b>31.08</b>	<b>-1.87</b>	<b>24.19</b>	<b>-3.96</b>	<b>0.11</b>
STD	<b>4.0</b>	<b>5.13</b>	<b>9.40</b>	<b>4.87</b>	<b>6.55</b>	<b>5.11</b>	<b>6.52</b>

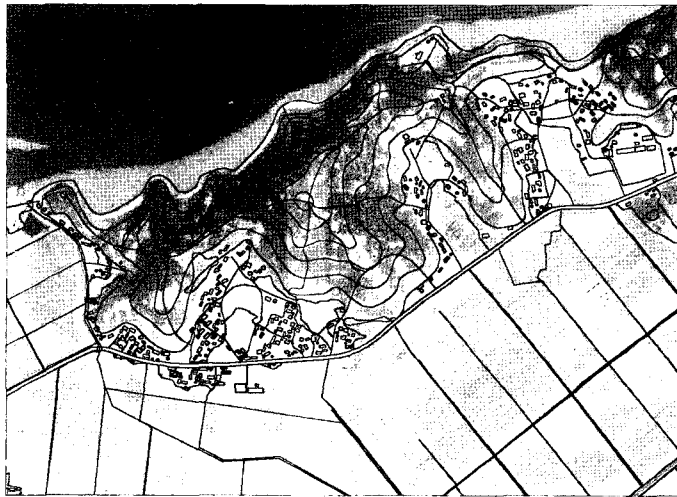


Fig. 4. Georectified IKONOS image overlaid with national digital map. The IKONOS image was georectified using the GCPs extracted from the TerraSAR-X SAR data.

영상에서 추출한 지상기준점 중 IKONOS 영상 내에 포함되는 일곱 개의 지상기준점을 이용하여 기하보정을 수행하였다. 기하보정된 영상과 수치지도 벡터간의 경계선이 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 따라서

TerraSAR-X로부터 추출되는 지상기준점은 수 m 급의 고해상도 영상의 기하보정에 활용될 수 있다.

TerraSAR-X 영상으로부터 역좌표부여 방법을 적용하여 정밀한 지상기준점을 추출하는 실험은 평균 위

치정확도 4 m 이하이며 정밀도 6.5 m 이하의 성공적인 결과를 나타냈다. 그러나, 이 시험적용결과를 아리랑-5호에 적용하기 위해서는 향후 보다 다양한 지역에서 추가 적용시험이 요구된다. 이 방법은 앞서 설명한 바와 같이 궤도정보를 포함한 SAR 시스템 정보의 정밀도와 사용되는 DEM의 정밀도에 좌우된다. 우선 아리랑-5호의 예상되는 궤도정밀도는 현재로서는 정확하게 예측하기 어렵다. 그러나 다양한 종류의 DEM 및 지상기준점의 고도 변화에 따른 정밀도 검증은 TerraSAR-X 자료 및 다른 종류의 DEM을 이용하여 검증이 가능하다. 이 연구에서는 전 세계적으로 대부분의 지역에서 자료의 획득이 가능한 90 m 간격의 SRTM 3초 DEM을 사용하여 전 세계 어디서나 적용했을 때의 정밀도를 분석하고자 하였다. 그러나, 보다 구체적인 대상지역이 선정되면 이보다 정밀도가 높은 다양한 DEM이 가능할 수 있다. 따라서 비록 지도는 없더라도 다양한 종류의 DEM이 가능한 경우 더 정밀하게 지상기준점을 추출할 수 있는 개선 가능성이 있다. 반면 이번 연구는 한반도 서해안 지역으로 비교적 지형의 고도가 낮으며 영상 내에 고저차가 적은 지역이었다. 지형의 고저차가 크고 또한 고지형인 지역에서의 추출은 비록 DEM을 이용한 지형보정이 이뤄지더라도 더 큰 오차가 발생할 수 있다. 특히 고지형인 경우 정밀한 지표측량 자료를 사용한 경우가 아니면 일반적으로 DEM의 정밀도는 더 떨어질 수 있다. 따라서 향후 실험에서는 지상기준점의 고도에 따른 정밀도 분석이 요구된다.

## 5. 결론

원격탐사 광학영상의 좌표부여를 위해 정밀한 지상기준점은 필수적이다. 그러나 접근이 용이하지 않은 지역으로 정밀한 지도를 구하기 어려운 경우 지상기준점의 지리적 좌표는 SAR 자료로부터 효과적으로 얻을 수 있다. 이 연구에서는 고해상도 SAR 위성인 TerraSAR-X의 일반모드 영상과 역좌표부여 방법을 통하여 정밀한 지상기준점의 좌표를 추출하였다. SRTM 3초 DEM을 보조자료로 이용한 경우 추출된 지상기준점의 평균오차는 동서방향과 남북방향으로 각각 0.11 m, -3.96 m였으며 표준편차는 각 방향으로 6.52 m 및 5.11 m였다.

이는 기존의 전통적인 range-Doppler 방법에 기초한 SAR 영상의 위치복원 방법에 비해 특히 동서방향으로 크게 개선된 결과이며, 또한 현재 민간용으로 사용할 수 있는 모든 원격탐사 영상자료로부터 얻을 수 있는 가장 정밀한 결과 중 하나이다. TerraSAR-X 영상으로부터 추출된 지상기준점을 고해상 광학위성인 IKONOS 영상의 기하보정에 적용한 결과 비교적 정밀한 위치복원이 가능하였다.

이러한 방법은 고해상 SAR 위성고 고해상 광학위성의 협동운용시 시너지 효과를 극대화 할 수 있으며, 향후 발사될 아리랑-5호와 아리랑-2호 및 그 후속 고해상도 광학위성의 활용기술로서 제안될 수 있을 것이다. 2006년에 발사되어 현재 운용 중에 있는 아리랑-2호는 IKONOS와 동급의 해상도를 지닌 고해상 광학위성이며, 후속적인 고해상도 광학위성이 준비되고 있다. 또한 2010년 발사예정인 아리랑-5호는 TerraSAR-X와 동급의 해상도 및 성능을 지닌 SAR 위성이다. 따라서 두 위성체는 상호보완적인 장단점을 지니고 있어 시너지효과가 크다. SAR보다 육안식별도가 높은 고해상 광학위성인 아리랑-2호와 기상조건에 영향을 받지 않고 전천후로 촬영을 하며 자체적으로 정밀좌표를 추출해 낼 수 있는 고해상 SAR인 아리랑-5호의 결합은 효과적인 지표관측을 통한 국토관리의 중요한 도구가 될 것이다.

## 감사의 글

이 연구는 과학기술부 다목적실용위성 5호 시스템종합개발연구(SAR 영상자료 활용 기초기술 개발)에 의해 수행되었으며, 이 연구에 사용된 TerraSAR-X 자료는 TerraSAR-X Science Team 연구과제(COA00047)에 의해 획득되었다.

## 참고문헌

- John, R. J., 1996. Introductory Digital Image Processing, pp. 124-134, Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall.



- Curlander, J. C., 1982. Location of spaceborn SAR imagery, *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 20: 359-364.
- Curlander, J. C. and McDonough, R. N., 1991. Synthetic Aperture Radar, System and Signal Processing, pp. 372-387, New York, John Wiley & Sons.
- Mohr, J. J. and Madsen, S. N., 1999. Automatic generation of large scale ERS DEMs and displacement maps. In FRINGE '99, 10-12 November 2000, Liege, Belgium, ESA SP-478.
- Hong, S.-H., H.-S., Jung, and J.-S., Won, 2006. Extraction of ground control points (GCPs) from synthetic aperture radar images and SRTM DEM, *International Journal of Remote Sensing*, 27(18-20): 3813-3829.
- Rodriguez, E., 2005. A global assessment of the SRTM accuracy, Available at: [http://eros.usgs.gov/conferences/SRTM/presentations/abstract04\\_rodriguez.pdf](http://eros.usgs.gov/conferences/SRTM/presentations/abstract04_rodriguez.pdf)
- TerraSAR-X Ground Segment Basic Product Specification Document, 2008. Available at: [http://www.dlr.de/tsx/documentation/SAR\\_Basic\\_Products.pdf](http://www.dlr.de/tsx/documentation/SAR_Basic_Products.pdf)
- Olmsted, C., 1993. Alaska SAR Facility Scientific SAR User's Guide, ASF-SD-003
- Schreier, G., D. Kosmann, and A. Roth., 1990. Design aspects and implementation of a system for geocoding satellite SAR-images, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 45: 1-16.
- Wivell, C. E., D. R. Steinwant, D. J. Meyer, and G. G. Kelly, 1992. The evaluation of digital elevation models for geocoding synthetic aperture radar images, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing*, 30: 1137-1144.
- Liu, H., Z. Zhao, and K. C., Jezek., 2004. Correction of positional errors and geometric distortions in topographic maps and DEMs using a rigorous SAR simulation technique, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 70: 1031-1042.