

## RPC를 이용한 이종센서 위성영상으로부터의 수치고도모형 정확도 평가

# Accuracy Investigation of DEM generated from Heterogeneous Stereo Satellite Images using Rational Polynomial Coefficients

송영선\*

Song, Yeong-Sun

### 요 旨

본 연구에서는 이종센서로부터 취득된 입체영상에 대해서 RPC를 이용하여 수치고도모형을 생성하고, 생성된 수치고도모형의 정확도를 평가하였다. 이종센서 위성영상으로 공간해상도가 상이한 SPOT-5 흑백영상과 IKONOS 영상을 사용하였고, 정확도의 평가를 위해서 IKONOS 입체영상과 SPOT-5 입체영상으로부터 생성된 수치고도모형과 비교하였다. 정확도의 평가 결과, 공간 해상도가 상이한 입체영상일지라도 정확한 공역점에 대해서는 동종센서 입체영상과 유사한 3차원 위치결정의 정확도를 보였으나, 수치고도모형의 품질측면에서는 동종센서 수치고도모형보다 RMSE가 약 2배, LE90은 약 3배 정도의 차이를 보였다. 결론적으로, 이종센서 입체영상으로부터 수치고도모형의 생성이 가능하지만, 공간해상도가 상이한 입체영상의 경우에는 영상정합이 수치고도모형의 품질에 매우 중요한 요소임을 알 수 있었다.

핵심용어 : 이종센서, RPC, SPOT-5, IKONOS, DEM

### Abstract

This study investigated the accuracy of DEM generated by heterogeneous stereo satellite images based on RPC. Heterogeneous sensor images with different spatial resolution are SPOT-5 panchromatic and IKONOS images. For the accuracy evaluation of the DEM, we compared the DEMs generated from two kinds of sensors and that produced using homogeneous SPOT-5 and IKONOS stereo images. As results of the evaluation, accuracy of 3D positioning by heterogeneous images was substantially similar to that of homogeneous stereo images for exact conjugate points. But, in terms of quality of the DEM, DEM generated by heterogeneous sensor showed a lower accuracy about twice in RMSE and about 3 times in LE90 than that of homogeneous sensors. As a result, DEM can be generated by using heterogenous satellite imagery. But if we use a stereo image with different spatial resolution, the performance of image matching was very important factor for the production of high-quality DEM.

Keywords : Heterogeneous sensor, RPC, SPOT-5, IKONOS, DEM

## 1. 서 론

1960년대 초 이후로 수많은 지구관측용 위성들이 발사되어 위성영상을 취득하여 왔다. 이러한 위성영상들은 위성 고유의 물리적 센서모델을 제공하여 왔으며, 이러한 고유 센서모델은 이종센서 위성영상으로부터 3차원 위치결정에 문제점이 되었다. 위성의 센서모델링은 카메라(센서) 투영중심, 사진상의 점 그리고 지상점 사이의 기하학적인 관계를 정의하는 과정으로서 Camera

모델, Polynomial-based Pushbroom 모델, Orbital Pushbroom 모델, Whiskbroom 모델, Panoramic 모델, RFM(Rational Function Model), Mixed Sensor 모델 등 매우 다양하며, 최근에는 1m급 이상의 고해상도 광학 영상은 대부분 RFM을 위한 RPC(Rational Polynomial Coefficient)를 제공하고 있다. RFM은 지상좌표와 영상 좌표간의 기하관계를 단순하고도 정확하게 묘사할 수 있는 추상적 모델(abstract model)의 한 종류로서, 과거 복잡한 처리과정을 요구했던 물리적 센서 모델의 대안

Received: 2014.08.08, revised: 2014.09.17, accepted: 2014.09.23

\* 정희원 · 인하공업전문대학 항공지리정보과 부교수(Member, Dept. of Aerial Geoinformatics, Inha Technical College, point196@inhac.ac.kr)

으로서 활발하게 이용되고 있다. RPC의 장점은 모델식의 단순함 외에도 이중센서로 취득된 영상 간 같은 개념의 센서모델을 사용함으로써 이중센서 입체영상으로부터 3차원의 정보를 추출할 수 있는 장점이 있다. RPC를 제공하고 있는 위성영상으로는 IKONOS, QuickBird, ORBIMAGE, CARTOSAT, RESOURCESAT, ALOS, WorldView, DPPDB, IND High Res, GeoEye, KOMPSAT, DEIMOS, RAPIDEYE, PLEIADES, SPOT6, TH-01, SkySat, GOKTURK/RASAT 등 매우 다양하며, 앞으로 계속 증가할 것으로 예상된다.

이러한 환경에서 국내외적으로 수많은 RPC 관련 연구가 수행되어 왔다. 지금까지의 RPC 관련 연구들을 분석하면 위성에서 주어진 RPC를 갱신함으로써 3차원 좌표의 정확도 향상방안(Tao et al., 2002; Di, 2003; Grodecki et al., 2003; Lee et al., 2009; Oh et al., 2011), RPC의 기준점의 분포 및 다항식의 차수에 따른 정확도의 분석(An et al., 2002; Lee et al., 2003; Cho and Lee, 2002), RPC에 필요한 기준점의 효과적인 추출방안(Oh and Jung, 2012), RPC가 제공되는 이중센서 위성영상으로부터 3차원 좌표추출 정확도 평가(Choi and Kang, 2012; Li, 2007; Zhu, 2008), 물리적 센서모델과 RPC 모델로부터 생성된 수치고도모형의 정확도를 평가(Dial and Grodecki, 2004; Lee et al., 2011) 등으로 나눌 수 있다. 이러한 RPC 관련 연구들의 내용들은 동일 센서 위성영상을 이용하고 있거나 이중센서이지만 RPC를 제공하면서 유사한 해상도를 지닌 위성영상들에 대해서 연구가 수행되었다는 특징을 가지고 있다. 3차원 위치결정에 관련된 연구들에 있어서도 공액점들에 대한 3차원 위치결정의 정확도 평가가 주요 내용이며, 공간해상도가 서로 다른 이중센서 위성영상을 이용하여 수치고도모형의 생성 및 정확도 평가에 관련된 연구는 부족한 실정이다.

이에 본 연구에서는 RPC와 이중센서 위성영상을 이용한 검사점들에 대한 3차원 위치결정 뿐만 아니라 수치고도모형을 생성하여 정확도를 평가하고자 하였다. 사용된 위성영상은 기존의 연구와는 달리 RPC를 제공하지 않는 SPOT-5와 RPC를 제공하는 IKONOS 위성영상을 사용하였으며, 두 영상은 2배 이상의 해상도 차이를 가지는 영상이다. 물론, 수치고도모형의 생성을 위해서 좋은 기하조건을 가진 동일 위성영상 혹은 유사한 해상도의 이중센서 위성영상을 활용하는 것이 타당하다. 하지만 본 연구에서는 이러한 요구조건을 만족시키는 영상취득이 어려운 지역에서 서로 다른 해상도를 가지는 이중센서 입체 위성영상이 존재할 경우 이를 이용하여 수치고도모형의 생성이 가능한지에 대한 평가

측면에서 본 연구의 의의를 두고자 한다.

## 2. RPC의 수학적 모델 및 RPC 생성

### 2.1 RPC의 수학적 모델

RPC모델은 영상과 지상좌표간의 3차방정식의 비율로 표현되는 수학적 모델이다. RPC 모델은 Camera 모델을 대체하기 위해 제작되었으며, 미국의 민간회사인 SPACE Imaging사에서 개발되었다. RPC모델의 장점은 물리적 센서모델(PSM: physical sensor model)를 대체할 수 있는 모델링 방식으로 정확도 손실 거의 없으며, 영상별로 각각 다른 RPC 생성이 가능하다. 뿐만 아니라 기존 물리적 모델에 비해 사용하기 쉽고, 입체영상을 이용한 3차원 지도제작과 단일영상을 이용한 정사영상 제작 가능하다는 특징이 있다. 이에 향후 대부분의 고해상도 위성영상에서 RPC 파일을 제공할 것으로 예상된다. RPC 수학적 모델은 아래 식 (1)과 같다(An et al., 2002).

$$l = \frac{Num_L(U, V, W)}{Den_L(U, V, W)}, s = \frac{Num_S(U, V, W)}{Den_S(U, V, W)} \quad (1)$$

$$Num_L(U, V, W) = a_1 + a_2 \cdot V + a_3 \cdot U + a_4 \cdot W + a_5 \cdot V \cdot U + a_6 \cdot V \cdot W + a_7 \cdot U \cdot W + a_8 \cdot V^2 + a_9 \cdot U^2 + a_{10} \cdot W^2 + a_{11} \cdot U \cdot V \cdot W + a_{12} \cdot V^3 + a_{13} \cdot V \cdot U^2 + a_{14} \cdot V \cdot W^2 + a_{15} \cdot V^2 \cdot U + a_{16} \cdot U^3 + a_{17} \cdot U \cdot W^2 + a_{18} \cdot V^2 \cdot W + a_{19} \cdot U^2 \cdot W + a_{20} \cdot W^3$$

$$Den_L(U, V, W) = b_1 + b_2 \cdot V + b_3 \cdot U + b_4 \cdot W + b_5 \cdot V \cdot U + b_6 \cdot V \cdot W + b_7 \cdot U \cdot W + b_8 \cdot V^2 + b_9 \cdot U^2 + b_{10} \cdot W^2 + b_{11} \cdot U \cdot V \cdot W + b_{12} \cdot V^3 + b_{13} \cdot V \cdot U^2 + b_{14} \cdot V \cdot W^2 + b_{15} \cdot V^2 \cdot U + b_{16} \cdot U^3 + b_{17} \cdot U \cdot W^2 + b_{18} \cdot V^2 \cdot W + b_{19} \cdot U^2 \cdot W + b_{20} \cdot W^3$$

$$Num_S(U, V, W) = c_1 + c_2 \cdot V + c_3 \cdot U + c_4 \cdot W + c_5 \cdot V \cdot U + c_6 \cdot V \cdot W + c_7 \cdot U \cdot W + c_8 \cdot V^2 + c_9 \cdot U^2 + c_{10} \cdot W^2 + c_{11} \cdot U \cdot V \cdot W + c_{12} \cdot V^3 + c_{13} \cdot V \cdot U^2 + c_{14} \cdot V \cdot W^2 + c_{15} \cdot V^2 \cdot U + c_{16} \cdot U^3 + c_{17} \cdot U \cdot W^2 + c_{18} \cdot V^2 \cdot W + c_{19} \cdot U^2 \cdot W + c_{20} \cdot W^3$$

$$Den_S(U, V, W) = d_1 + d_2 \cdot V + d_3 \cdot U + d_4 \cdot W + d_5 \cdot V \cdot U + d_6 \cdot V \cdot W + d_7 \cdot U \cdot W + d_8 \cdot V^2 + d_9 \cdot U^2 + d_{10} \cdot W^2 + d_{11} \cdot U \cdot V \cdot W + d_{12} \cdot V^3 + d_{13} \cdot V \cdot U^2 + d_{14} \cdot V \cdot W^2 + d_{15} \cdot V^2 \cdot U + d_{16} \cdot U^3 + d_{17} \cdot U \cdot W^2 + d_{18} \cdot V^2 \cdot W + d_{19} \cdot U^2 \cdot W + d_{20} \cdot W^3$$

식 (1)에서  $a_1 \sim a_{20}$ ,  $b_1 \sim b_{20}$ ,  $c_1 \sim c_{20}$ ,  $d_1 \sim d_{20}$ 는 RPC 상수이고, U, V, W는 지상좌표계(Fig. 1의 object space) 좌표인 위도, 경도, 고도값을 정규화한 것이다. 각 수평단위는 degree, 수직단위는 meter, 지상좌표의 수평위치는 WGS84 타원체의 경위도이고, 수직위치는 타원체고(ellipsoid height)이다. 지상좌표 정규화는 식 (2)로서 계산한다.

$$U = \frac{(\phi - O_\phi)}{SF_\phi}, V = \frac{\lambda - O_\lambda}{SF_\lambda}, W = \frac{(h - O_h)}{SF_h} \quad (2)$$

여기서,  $\phi, \lambda, h$ 는 지상좌표,  $O_\phi, O_\lambda, O_h$ 는 지상좌표 평균값(offset),  $SF_\phi, SF_\lambda, SF_h$ 는 지상좌표 축척계수(scale factor)이다. 식 (1)에서 l과 s는 영상좌표계(L,S)를 정규화한 좌표로서, L과 S는 행렬 좌표이다. 영상좌표의 정규화는 아래 식 (3)을 이용하여 계산할 수 있다. 여기서, L, S는 영상좌표,  $O_S, O_L$ 는 영상좌표 평균값,  $SF_L, SF_S$ 는 영상좌표 축척계수이다.

$$l = \frac{(L - O_L)}{SF_L}, \quad s = \frac{(S - O_S)}{SF_S} \quad (3)$$

### 2.2 물리적 센서모델로부터 RPC 생성

물리적 센서모델을 이용하여 생성한 3차원 그리드로부터 78개의 계수를 최소제곱법으로 계산한다. 3차원 그리드 생성은 전체 영상크기에서 일정간격(Sample × Line)으로 영상좌표를 추출하며, 또한 높이별로 동일한 영상좌표를 추출한다. 여기서, 고도값과 높이 레이어, 해당지역의 최소 및 최대 고도값은 사용자가 직접 설정하여야 한다. 지상 좌표값 산출은 추출된 3차원 그리드 자료(추출된 영상좌표와 높이레이어별 고도값)와 물리적 센서모델 성과를 활용하여 지상좌표를 도출한다. 만

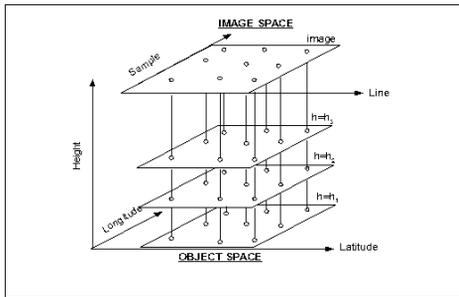


Figure 1. 3D grid(generation of ground and image coordinates)

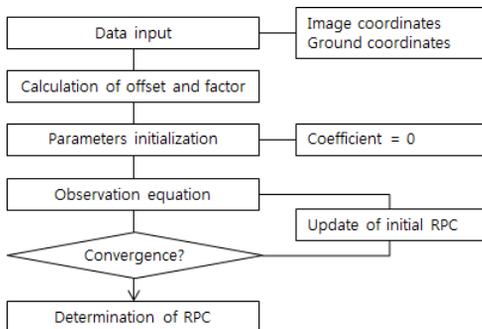


Figure 2. Process of the RPC Determination

약, 도출된 지상좌표가 WGS84 경위도 및 타원체고가 아닐 경우, 좌표변환을 통해 RPC 계수 산출을 위한 입력자료를 생성하여야 한다. 물리적 센서모델로부터 RPC 계수를 생성하는 절차는 Fig. 2와 같고, 물리적 센서모델을 이용하여 생성한 3차원 그리드는 Fig. 1과 같다.

다수의 기준점을 이용하여 RPC를 계산하는 과정은 먼저, RPC 수학적 모델은 식 (1)과 같고, 이 식은 78개의 미지계수( $a_0, \dots, a_{19}, b_1, \dots, b_{19}, c_0, \dots, c_{19}, d_1, \dots, d_{19}$ )와 정규화된 지상좌표 및 영상좌표를 지닌 비선형식이다. 뉴턴의 1차 근사식을 이용하여 정리하면 다음과 같은 선형방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} F &= (F)_o + \left(\frac{\partial F}{\partial a_0}\right)_o \Delta a_0 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial a_{19}}\right)_o \Delta a_{19} \\ &- l \times \left[ 1 + \left(\frac{\partial F}{\partial b_1}\right)_o \Delta b_1 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial b_{19}}\right)_o \Delta b_{19} \right] \\ &+ \nu_F = 0 \\ G &= (G)_o + \left(\frac{\partial G}{\partial c_0}\right)_o \Delta c_0 + \dots + \left(\frac{\partial G}{\partial c_{19}}\right)_o \Delta c_{19} \\ &- s \times \left[ 1 + \left(\frac{\partial G}{\partial d_1}\right)_o \Delta d_1 + \dots + \left(\frac{\partial G}{\partial d_{19}}\right)_o \Delta d_{19} \right] \\ &+ \nu_G = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,  $F$ 는  $Num_L(U, V, W) - l \times Den_L(U, V, W)$ ,  $G$ 는  $Num_S(U, V, W) - s \times Den_S(U, V, W)$ ,  $(F)_o$ 와  $(G)_o$ 는 초기치에 대한 값,  $\left(\frac{\partial F}{\partial a_0}\right)_o, \left(\frac{\partial F}{\partial a_1}\right)_o, \dots$ 는 초기치에 대한 편미분 값,  $\Delta a_0, \Delta a_1, \dots$ 는 초기치 값의 보정값이다. 초기 미지계수( $a_0, \dots, a_{19}, b_1, \dots, b_{19}, c_0, \dots, c_{19}, d_1, \dots, d_{19}$ )값은 0.0으로 설정할 수 있고, 초기값 오차항은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} e_f &= -(F)_o = \left(\frac{\partial F}{\partial a_0}\right)_o \Delta a_0 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial a_{19}}\right)_o \Delta a_{19} \\ &- l \times \left[ 1 + \left(\frac{\partial F}{\partial b_1}\right)_o \Delta b_1 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial b_{19}}\right)_o \Delta b_{19} \right] \\ e_g &= -(G)_o = \left(\frac{\partial G}{\partial c_0}\right)_o \Delta c_0 + \dots + \left(\frac{\partial G}{\partial c_{19}}\right)_o \Delta c_{19} \\ &- s \times \left[ 1 + \left(\frac{\partial G}{\partial d_1}\right)_o \Delta d_1 + \dots + \left(\frac{\partial G}{\partial d_{19}}\right)_o \Delta d_{19} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

위 수식을 행렬식으로 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_F \\ V_G \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{00} \cdots a_{019} - la_{020} \cdots - la_{038} & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & a_{139} \cdots a_{158} - s a_{159} \cdots - s a_{177} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta a_0 \\ \vdots \\ \Delta a_{19} \\ \Delta b_1 \\ \vdots \\ \Delta b_{19} \\ \Delta c_0 \\ \vdots \\ \Delta c_{19} \\ \Delta d_1 \\ \vdots \\ \Delta d_{19} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_f \\ e_g \end{bmatrix} \quad (6)$$

따라서, 영상에서 점  $j$ 의 상좌표 관측방정식은  $V_j + \dot{A}_j \dot{\Delta}_j = \epsilon_j$  과 같이 쓸 수 있다. 위 (2,1) (2,78)(78,1) (2,1) 식은 다음과 같이 치환하면  $AX=B$  같은 관측방정식을 얻을 수 있으며, 따라서  $X=(A^T A)^{-1} A^T B$  로 해를 구할 수 있다.

### 3. 연구방법

본 연구에서는 RPC를 이용하여 이중센서 위성영상으로부터 생성된 수치고도모형의 정확도를 파악하고자 하였으며, 이를 위해서 SPOT-5 흑백영상과 IKONOS 영상을 이중센서 위성영상으로 선택하였다. 이중센서 위성영상으로부터 3차원의 위치를 결정하기 위해서는 동일한 센서 모델식을 사용하여야 하며, 본 연구에서는 RPC모델을 지상과 영상을 연결하는 모델식으로 사용하였다. SPOT-5의 경우는 RPC 계수를 제공하지 않기 때문에 2.2에서 언급한 과정대로 물리적 모델링을 먼저 수행하고, 물리적 모델링 결과를 이용하여 RPC 계수를 생성하였다.

전체적인 연구의 과정은 Fig. 3과 같다. SPOT-5 & IKONOS 입체영상으로부터 생성되는 수치고도모형의 정확도를 분석하기 위해서 동중선로서 SPOT-5 입체영상과 IKONOS 입체영상으로부터도 각각 수치고도모형을 생성하였다. SPOT-5의 물리적 모델로부터 생성된 RPC의 정확도 검증과 및 SPOT-5&IKONOS로부터 생성된 수치고도모형의 정확도 평가를 좀 더 다양하게 수행하고자 SPOT-5입체영상에 대해 RPC를 생성하고 수치고도모형을 추가적으로 생성하였다. 이중센서 수치고도모형의 정확도 평가는 IKONOS 입체영상으로부터 생성된 수치고도모형을 기준 수치고도모형으로 가정하여 평가하였으며, 이외에도 추가적인 지상의 3차원 좌표 82점을 생성된 수치고도모형과 비교하였다. 수치지도로부터 생성되는 수치고도모형의 경우 건물에 대

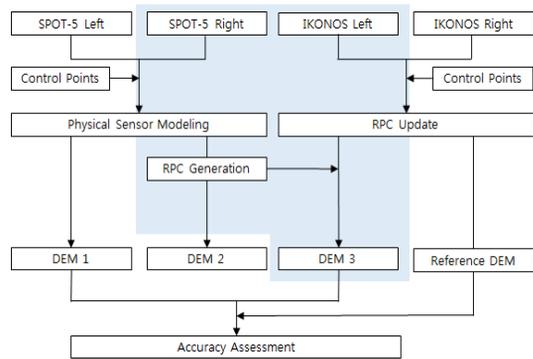


Figure 3. Flowchart of the study

한 정보가 누락되어 있으므로 이를 기준 수치고도모형으로 활용하지 않았다.

위의 경우별 4가지 수치고도모형의 해상도는 원영상의 해상도의 2배를 적용하여 동중선 SPOT-5의 경우는 5m, IKONOS는 2m, 이중센서를 적용할 경우는 SPOT-5의 해상도를 기준으로 5m 수치고도모형을 생성하였다. 생성되는 입력 기준점 및 검사점의 좌표계는 Bessel 타원체, 127도 기준, TM 좌표계, Tyoko(Korea) 데이텀이며, 생성된 수치고도모형의 좌표계는 GRS80 타원체, 127도 기준, TM 좌표계, ITRF 데이텀이다.

### 4. 실험 및 분석

#### 4.1 연구대상 지역 및 사용 위성영상

본 연구의 대상지역은 비교적 많은 공간정보가 구축되어 있는 대전시 및 그 인근지역을 대상으로 하였으며, 사용된 위성영상은 SPOT-5 입체영상과 IKONOS 입체영상이다. 영상의 해상도, 취득시기, 영상의 크기 등은 Table 1과 같고, 사용된 SPOT-5 및 IKONOS의 입체영상은 Fig. 4와 같다.

Table 1. Specifications of satellite images

	IKONOS		SPOT-5 Panchromatic	
	Left	Right	Left	Right
Acquisition Date	2003.4.25	2003.6.2	2003.5.16	2003.5.16
Resolutions	1m	1m	2.5m	2.5m
Image Size	13816 by 13824	13816 by 14336	24000 by 24000	24000 by 24000

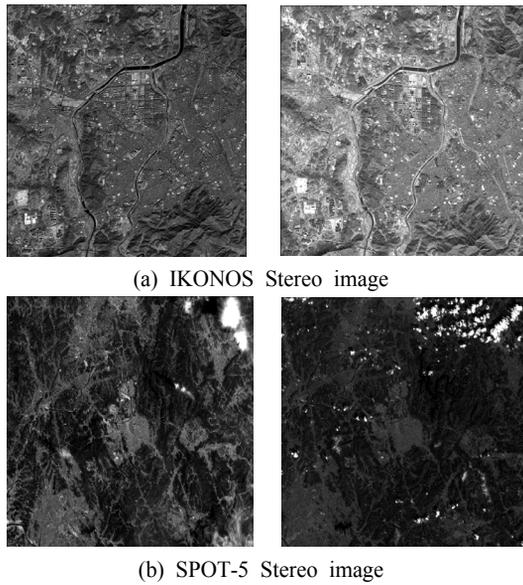


Figure 4. Satellite Images

### 4.2 자료처리 및 평가

위성궤도의 모델링 및 보정을 위해서 필요한 기준점은 static GPS 측량을 수행하여 취득하였으며, 원점은 중부도원점을 기준으로 하였다. 삼각점은 전의410 외 5개의 점을 이용하였으며, 상시기준국은 국토지리정보원 청주, 천문연구소 대전 기준국을 활용하였고, GPS 데이터의 처리를 위해서 기선의 해석 및 망조정 등을 수행하였다.

SPOT-5 물리적 센서모델링은 10점의 기준점과 위성영상 보조정보 활용하여 좌우 영상에 대해서 시간의 2차 다항식계수를 산출하였다. 결정된 물리적 센서모델을 이용하여 아래 Fig. 3에서 보는 바와 같이 프로그램

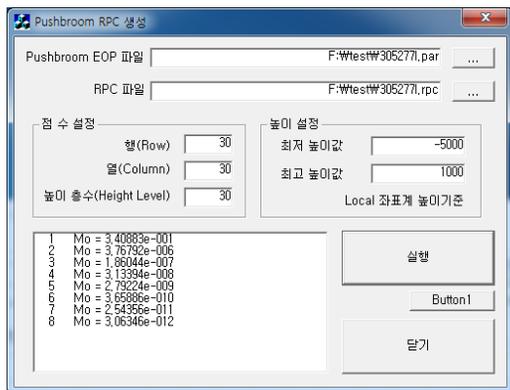


Figure 5. Module for RPC generation using physical sensor model

을 개발하여 RPC 계수를 생성하였으며, RPC계수의 생성을 위해서 고도값의 설정은 SRTM을 이용하여 최저 고도값 및 최고 고도값을 설정하였고, 30계층으로 가로 세로 30격자로 기준점을 생성하였다.

IKONOS는 물리적 센서모델이 아니라 기본적으로 RPC를 제공하며, Geo level IKONOS의 경우 제공하는 RPC를 기준점을 이용하여 보정하지 않을 경우 최대 15m(CE90)까지 오차가 발생할 수 있다(Lee et al., 2003). IKONOS 입체영상으로부터 생성되는 수치고도모형을 정확도 평가를 위한 기준 수치고도모형으로 사용하고자 하였기 때문에 보다 정밀한 IKONOS RPC의 보정을 위해서 SPOT-5보다 많은 42개의 기준점을 사용하였고, SPOT-5 & IKONOS 입체영상의 경우는 6점의 기준점을 사용하였다.

IKONOS 입체영상, SPOT-5 입체영상, 그리고 SPOT-5와 IKONOS의 센서 모델링을 수행 후 검사점에 대해서 정확도를 평가한 결과는 Fig. 4와 같다. 평가를 위해서 IKONOS는 40점, SPOT-5는 10점, 그리고 SPOT-5 & IKONOS는 5점을 검사점으로 이용하였다. 정확도 평가결과, 수직정확도의 경우 Fig. 6에서 보는 바와 같이 이중센서로부터 취득된 입체영상의 결과가 동중센서로부터 취득된 입체영상의 결과와 비교했을 때는 저해상도 영상기준으로 약 2배, 고해상도 기준으로는 약 7배의 정확도 차이를 보였다.

Fig. 7은 각각의 경우별 기준점과 검사점의 분포 및 모델링 후 기준점 및 검사점에 대한 오차벡터를 나타내고 있다.

영상정합을 위한 탐색윈도우의 크기는 7×7 영상소, 탐색영역은 열 방향으로 21 영상소, 행 방향으로 3 영상소로 4가지 경우 모두 동일하게 설정하였다. 영역기반 상관계수정합에서 임계값은 4가지 경우에 대해 먼저 영상정합을 먼저 수행하여 전체적인 정합결과를 분석(Table 2) 후 설정하였으며, IKONOS RPC, SPOT-5

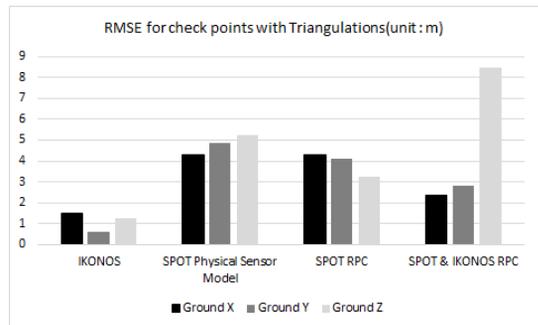


Figure 6. RMSE for check points with triangulations

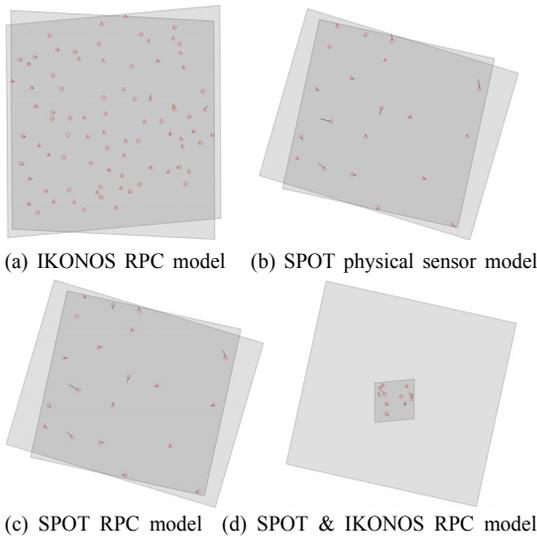


Figure 7. Distribution and residuals of control & check points in planimetry (○: check points, △: control points)

Table 2. Quality of Image Matching

Quality	IKONOS RPC	SPOT-5 physical sensor model	SPOT-5 RPC	SPOT-5 & IKONOS RPC
Excellent %(1~0.85)	29.0910	47.9036	46.8847	0.8904
Good %(0.85~0.70)	61.8228	51.5499	52.5620	20.6713
Fair %(0.70~0.50)	9.0862	0.5464	0.5534	78.4383

물리적 센서모델, SPOT-5 RPC의 경우는 0.7으로 설정하였고, SPOT-7 & IKONOS RPC의 경우는 이중센서이므로 다른 경우에 비해 상대적으로 영상정합의 품질이 낮아 너무 높게 설정할 경우 정합점의 개수가 적어지므로 0.5로 설정하였다.

아래 Fig. 8은 입체 위성영상으로부터 생성된 수치고도모형으로서 생성된 수치고도모형의 크기는 IKONOS 영상의 영역을 모두 포함한다. 생성된 수치고도모형을 육안으로 평가한 결과 이중센서 위성영상으로부터 생성된 수치고도모형의 경우 특징점의 추출이 곤란한 하천이나 산림지역에서 영상정합의 오류로 인해 다른 수치고도모형들과 상이한 형상을 보였으며, 특징점의 추출이 용이한 도시지역의 경우 상대적으로 하천이나 산림지역에 비해 좋은 품질의 수치고도모형이 생성되는 것으로 나타났다.

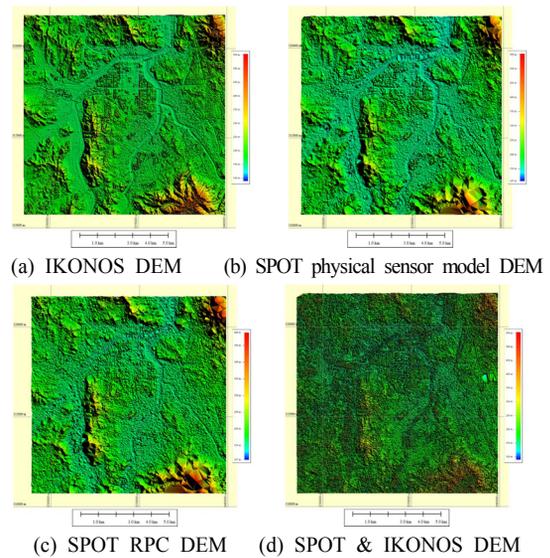


Figure 8. DEM

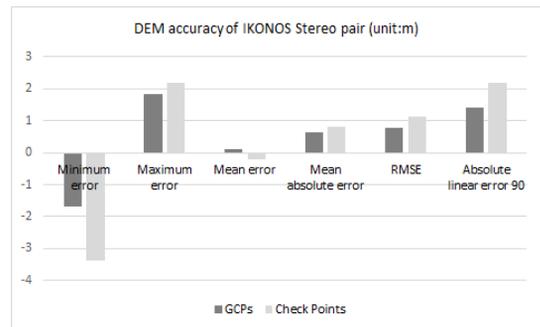


Figure 9. Accuracy of IKONOS stereo DEM

기존 수치고도모형인 IKONOS 입체영상으로부터 생성된 수치고도모형의 정확도 평가는 IKONOS RPC 입체영상에 대하여 모델링 과정에서 사용했던 기준점(42점)과 검사점(40점)에 대하여 분석하였으며, 결과는 Fig. 9와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 검사점에 대한 RMSE 및 LE90(Absolute Linear Error 90)는 각각 1.12m, 2.18m로 나타났다.

SPOT-5 물리적 센서모델, SPOT-5 RPC모델 그리고 SPOT-5 & IKONOS RPC 모델로부터 생성된 수치고도모형의 정확도 평가결과는 Fig 10, 11과 같다. Fig. 9의 정확도 평가에 이용된 사용자 정의 검사점(user defined check points)은 IKONOS 영상의 RPC 계수의 보정과정에서 기준점 및 검사점으로 사용했던 점들을 이용하였고, 기존 수치고도모형은 IKONOS RPC로부터 생성된 수치고도모형을 이용하였다. IKONOS로부

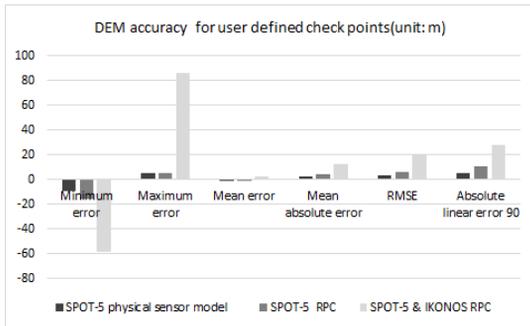


Figure 10. Accuracy for user defined check points

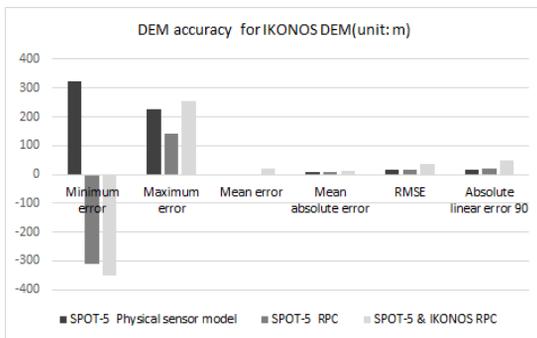


Figure 11. Accuracy for IKONOS RPC DEM

터 생성된 수치고도모형을 기준으로 한 평가는 모든 동일 지상좌표에서의 고도값들을 상호 비교하여 계산하였다.

사용자 정의 검사점을 기준으로 계산한 RMSE는 SPOT-5 물리적 센서모델이 2.98m, SPOT-5 RPC는 5.77m인데 비해 SPOT-5 & IKONOS의 경우는 20.96m로서 나타났다. IKONOS RPC 수치고도모형을 기준으로 계산한 RMSE는 SPOT-5 물리적 센서모델의 경우 14.94m, SPOT-5 RPC의 경우 15.23m인데 비해 SPOT-5 & IKONOS의 경우는 35.26m로 나타났으며, 이종센서로부터 생성한 수치고도모형이 동종센서로부터 생성된 수치고도모형에 비해 약 2배 정도 크게 RMSE가 나타났다. LE90의 경우는 약 3배 정도의 차이를 보였다.

## 5. 결론

본 연구에서는 RPC와 이종센서로부터 취득된 위성영상을 이용하여 수치고도모형을 생성하고, 정확도를 평가하였다. 이종센서 위성영상으로 RPC가 제공되지 않는 SPOT-5 흑백영상과 RPC가 제공되는 IKONOS

위성영상을 사용하였으며, 두 영상은 2배 이상의 공간 해상도 차이를 보이는 영상이다. 이종센서 위성영상으로부터의 3차원 위치결정 및 수치고도모형의 정확도 평가는 동종센서인 IKONOS 입체영상 RPC로부터 생성한 수치고도모형, SPOT-5의 물리적 센서모델 및 RPC로부터 생성한 수치고도모형과 비교하였다. 추가적으로 임의 지점의 정확도 평가를 위해서 사용자 정의 검사점을 이용하여 정확도 평가를 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

첫째, SPOT-5 위성영상에 대해 RPC를 생성하고 이를 이종센서인 IKONOS 위성영상과 3차원 위치결정을 수행한 결과 매칭을 통한 공액점이 정확하게 추출된다면 이종센서로 취득된 입체위성영상일지라도 동일센서 입체위성영상과 유사한 정확도를 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

둘째, RPC가 제공되지 않는 이종센서 위성영상일지라도 RPC 계수를 생성할 수 있다면 RPC를 이용하여 3차원 위치결정이 가능하고, 수치고도모형의 생성도 가능함을 알 수 있었다. 그러나 두 영상간 공간해상도의 차이로 인해 특징점의 추출이 곤란한 하천이나 산림지역에서 영상정합의 오류로 인해 다른 수치고도모형들과 상이한 형상을 보였으며, 특징점의 추출이 용이한 도시지역의 경우 상대적으로 하천이나 산림지역에 비해 좋은 품질의 수치고도모형이 생성되는 것으로 나타났다. 위의 결과는 기존에 많은 논문에서 발표된 바와 같이 공간해상도가 상이한 입체영상이더라도 RPC가 매우 안정적인 위성모델임을 의미한다.

셋째, 본 연구에서는 공간해상도가 상이한 이종센서 위성영상으로서 SPOT-5와 IKONOS를 대상으로 수치고도모형을 생성하고 정확도 평가를 수행하였으며, 결과로서 수치고도모형의 생성이 가능함을 제시하였다. 본 연구를 통해서 이종센서 위성영상으로부터 정확한 공액점에 대해서는 동종 센서와 유사한 정도의 3차원 좌표를 생성할 수 있으나, 생성되는 수치고도모형의 품질 향상을 위해서는 공간해상도가 상이한 위성영상사이의 매칭 정확도 향상이 필수적인 부분이며, 이에 대한 연구가 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 2013학년도 인하공업전문대학 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음.

## References

1. An, K. W., Lim, H. C. and Seo, D. C., 2002, The application of RFM for geometric correction of high-resolution satellite image data, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 20, No. 2, pp.155-164.
2. Cho, W. S. and Lee, D. G., 2002, RFM for high resolution satellite sensor modeling, *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 18, No. 6, pp.337-344.
3. Choi, S. and Kang, J., 2012, Accuracy investigation of RPC-based block adjustment using high resolution satellite images GeoEye-1 and WorldView-2, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 30, No. 2, pp.107-116.
4. Di, K. Ma, R. and Li, R., 2003, Rational functions and potential for rigorous sensor model recovery, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, ASPRS*, Vol. 69, No. 1, pp.33-41.
5. Grodecki, J. and Dial, G., 2003, Block adjustment of high-resolution satellite images described by rational polynomials, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, ASPRS, CD-ROM*
6. Lee, J. B., Kwak, T. S. and Kim, Y. I., 2003, Improving the accuracy of 3D object-space data extracted from IKONOS satellite images-by improving the accuracy of the RPC model, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 21, No. 4, pp.301-308.
7. Lee, H. S, Song, J. H., Kim, Y. I. and Ahn, K. W., 2003, Evaluation of the image segmentation method for DEM generation of satellite imagery, *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 19, No. 2, pp.149-157.
8. Lee, J. D., and So, J. K. 2009, Development of the accuracy improvement algorithm of geopositioning of high resolution satellite imagery based on RF models, *Journal of KAGIS*, Vol. 12, No. 1, pp.106-118.
9. Lee, S., Jeong, J., Lee, T. and Kim, T., 2011, DEM generation and accuracy comparison from multiple Kompsat-2 images, *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 27, No. 1, pp. 51-58.
10. Lutes, J., 2004, Accuracy analysis of rational coefficients for IKONOS imagery, *Proceedings of ASPRS 2004, Denver, May 23-28, 2004*.
11. Oh, K. Y., Jung, H. S., Lee, W. J. and Lee, D. T., 2011, 3D geopositioning accuracy assessment using KOMPSAT-2 RPC, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 29, No. 1, pp.1-9.
12. Oh, K. Y. and Jung, H. S., 2012, Automatic geometric calibration of KOMPSAT-2 stereo pair data, *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 28, No. 2, pp.191-202.
13. Tao, C. V., and Hu, Y. 2002, 3D reconstruction methods based on the rational function model, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, ASPRS*, Vol. 68, No. 7, pp.705-714.