고해상도 스테레오 위성영상의 3차원 정확도 평가 및 향상

정인준* · 이창경** · 윤공현**†

*(주)고원항공정보, **군산대학교 토목공학과

Improvements on the Three-Dimensional Positioning of High Resolution Stereo Satellite Imagery

In-Jun Jeong*, Chang-Kyung Lee** and Kong-Hyun Yun**†

*GO-ONE Aerial Information Co., ** Department of Civil Engineering, Kunsan National University

Abstract : The Rational Function Model has been used as a replacement sensor model in most commercial photogrammetric systems due to its capability of maintaining the accuracy of the physical sensor models. Although satellite images with rational polynomial coefficients have been used to determine three-dimensional position, it has limitations in the accuracy for large scale topographic mapping. In this study, high resolution stereo satellite images, QuickBird-2, were used to investigate how much the three-dimensional position accuracy was affected by the No. of ground control points, polynomial order, and distribution of GCPs. As the results, we can confirm that these experiments satisfy the accuracy requirements for horizontal and height position of 1:25,000 map scale.

Key Words : Rational Function Model, Accuracy, Satellite Images, Topographic Mapping

요약 : 가장 대표적인 범용센서모델인 다항식비례모형(Rational Function Model)은 물리적 센서모델의 정확도에 견줄 수 있는 특성으로 인하여 상업용 위성영상의 센서모델링 기법에서 가장 많이 쓰이고 있다. RPCs를 이용하여 인공위성 영상의 3차원 위치를 결정할 수 있지만, 대축척의 지형도 제작시 정확도 측면에서 한계를 가지고 있다. 본 연구에서는 QuickBird-2, 인공위성 영상을 이용하여 지상기준점의 수량, 분포 및 다항식비례모형의 차수에 따른 정확도 분석을 수행하였다. 그 결과 1:25,000 축척의 지형도 제작시 수행 위치 및 표고 허용오차 범위에 포함 될 수 있는 가능성을 확인하였다.

1. 서론

위성에 탑재된 센서로부터 취득한 고해상도 위성영

상은 광역에 대한 최신의 영상정보를 제공하며, 군사, 국토관리, 자원탐사 등 다양한 분야에서 활용되고 있다 (Chubey *et al.*, 2006; Mishra *et al.*, 2006).

접수일(2014년 9월 15일), 수정일(1차 : 2014년 10월 10일, 2차 : 10월 13일), 게재확정일(2014년 10월 18일).

† 교신저자: 윤공현(khyun@kunsan.ac.kr, khyun1010@gmail.com)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

우리나라에서는 통신 및 과학 위성 외에 다목적 위성인 아리랑 1호(KOMPSAT-1, 공간해상도 6.6 m급)를 발사한 이후, 2012년 5월경 고해상도 광학 탐사위성인 아리랑3호(KOMPSAT-3, 공간해상도 0.7 m급)가 성공적으로 발사되어 그 임무를 수행하고 있다. 외국의 경우, 공간해상도 0.5 m급인 WorldView-1와 GeoEye-2가 발사되어 다양한 분야에 활용되고 있다. 이러한 활용의 증가에도 불구하고 고해상도 위성영상의 한계가 존재하는데 GeoEye-2를 포함한 대부분의 고해상도 위성영상의 경우 특수적, 상업적인 이유 혹은 모델 구현의 복잡성으로 인하여 위성의 궤도요소나 표정요소를 포함하는 물리적 센서모델을 제공하는 대신 일반적으로 수학적 센서모델인 Rational Function Model(RFM)을 적용시킬 수 있는 Rational Polynomial Coefficients(RPCs)를 제공하고 있다.

최근의 RFM에 관한 연구성과로서 QuickBird 영상에 대하여 다양한 방법으로 정확도 평가가 이뤄졌으며(Aguilar *et al.*, 2007), 농경지역의 정책수립을 위한 위성영상의 활용측면에서 RFM에 관한 연구가 수행되었다(Aguilar *et al.*, 2008). 또한 스테레오 고해상도 위성영상을 이용하여 3차원 위치정보 추출시 수렴각(convergency angle)에 대한 연구가 이뤄졌으며(Li *et al.*, 2009), 지상기준점 외에 Lidar 측량 지형자료를 추가 활용에 따른 정확

도 향상에 관한 연구도 발표되었다(Qiao *et al.*, 2010).

국내에서도 고해상도 위성영상의 다양한 센서모델링 방법에 대한 비교연구와(Kim and Lee, 2006), RFM을 SAR영상에 적용시킨 연구가 있었다(Bang *et al.*, 2012).

본 연구에서는 QuickBird-2 스테레오 영상을 이용하여 DEM과 정사영상 생성을 위해 RFM 기반의 모델링을 수행하였으며, 지상기준점 수량, 분포 그리고 RFM의 차수에 따른 평가를 수행하여 대축척 지형도 제작의 가능성을 고찰하였다.

2. 접근방법 및 연구자료

본 연구에서는 QuickBird-2 스테레오 영상을 이용하여 기존의 고해상도 위성영상의 센서모델링에 적용해 왔던 RFM을 지상 기준점의 수량, 배치 및 RFM 다항식 차수에 따른 3차원 위치 정확도를 분석한다. 위 결과로 선정된 최소의 지상기준점을 이용하여 의사지상기준점(Pseudo Ground Control Points : PGCPs)을 구한다. 이러한 의사지상기준점을 지상기준점과 공동 이용하여 RFM에 의한 위성영상의 3차원 지상좌표를 계산하여 정확도 평가를 수행하였다.

실험계획 수립시 지상기준점 수량은 총 30점이며, 이

Fig. 1. Schematic Block Diagram for this study.

Table 1. The brief characteristics of datasets used

Category	Attributes and/or Items		Remarks
QuickBird-2 Imagery	Product Level	Standard	
	Radiometric Resolution	16bit	
	FORMAT	GeoTIFF 1.0	
	Off-Nadir angle	LEFT	12.6°
		RIGHT	16.5°
	Collection Data	LEFT	2005. 5. 3
		RIGHT	2005. 5.16
Digital map	Scale	1/1,000	
GCPs	Field Surveying		Total Station, GPS

로부터 정확도가 높은 20점, 10점, 4점을 각각 이용하여 차수에 따른 3차원 지상좌표의 RMSE를 산정하여 정확도를 비교하였으며, PGCPs를 이용한 경우에는 최소기준점의 수에 추가적으로 100점, 50점, 20점을 각각 균등분포시켜 영향을 평가하였다. 또한 기하학적 배치의 측면에서는 대상지역을 기하학적으로 남과 북으로 구분하여 균등 또는 편중분포의 실험을 수행하였다. Fig. 1은 전반적인 연구의 흐름을 보여주고 있다.

1) QuickBird-2 스테레오영상

시험지역은 전북 전주시를 대상으로 하였으며 사용된 위성영상은 QuickBird-2로서 공간해상도는 수직 촬영시 전정색(Panchromatic) 영상은 0.61 m, 다중분광(Multispectral) 영상은 2.44 m이다. 실험에 이용된 영상의 취득 시점은 2005년 5월이며 스테레오 영상으로서 16 Bits의 방사학적 해상도를 지니고 있다. Table 1은 본 연구에 사용된 자료의 주요 특성을 보여주고 있다.

2) 지상기준점 측량

지상기준점은 식별이 명확하고 비교적 변화가 적은 교량, 교차로, 교통섬 등의 시설물을 대상으로 QuickBird-2 영상에서 지상기준점으로 적합한 시설물 및 지형이 명확한 지점으로 선정하였다. 사용된 기준점은 도로와 지하시설물 공동구축 사업 시 공공측량 성과심사를 획득한 2급 및 4급 도시기준점이다.

테스트 대상지역중에 건물이 밀집된 전주 시가지의 경우 GPS 측량시 멀티패스 등 전파방해요소가 많을 것으로 판단하여 토털스테이션으로 총 45점을 측량하였으며 고른 지상 기준점 배치를 위해 시 외곽부에 대해서는 GPS 정지측량에 의해 총 7점을 관측하였다.

Fig. 2. Distribution of GCPs and Coverage of Stereo Images in the study area.

지상기준점에 대한 GPS 측량 정확도 계산결과 평면 위치오차는 약 3.0 cm, 표고오차는 약 2.7 cm로 지상기준점 측량 정확도를 “공공측량의 작업규정 세부기준, 제3편 지형측량, 제3장 항공사진측량” 기준으로 평면위치는 1/500축척의 허용오차를 만족하였으나 표고는 1/10,000 축척의 정확도를 만족한다. Fig. 2는 대상지역의 지상기준점분포를 보여주고 있다.

3) 수치표고모델

본 연구에서는 정사보정에 필요한 수치표고모델을 구축하였다. 1/1,000 수치지형도에서 1 m 간격의 등고선(주곡선, 계곡선)과 표고점 등의 표고 정보를 취득하여 불규칙 삼각망을 구축하고, 보간법에 의해 격자망 수치표고모델을 구축하였다.

Fig. 3. Shaded relief map generated from DEM in the study area.

3. RFM기반 센서모델링

RFM은 다항식 영상 기하모델 (polynomial image geometry model)로서 관측방정식의 분모, 분자가 고차함수의 다항식으로 구성되며 분모, 분자 각 3차 다항식 형태가 가장 널리 사용되고 있다. RFM은 영상내의 임의의 점과 이에 대응하는 지상좌표의 관계를 고차 다항식의 형태로 식(1)과 같이 표현될 수 있다.

$$x = \frac{P_1(X, Y, Z)}{P_2(X, Y, Z)} \quad y = \frac{P_3(X, Y, Z)}{P_4(X, Y, Z)} \quad (1)$$

식(1)에서 x, y 는 정규화된 오프셋 및 축척 조정된 영상 좌표이며 X, Y, Z 는 정규화된 경위도 및 고도로서 $-1 \sim +1$ 의 값의 분포를 갖는다. 정규화된 과정을 수행하는 이유는 계산과정 중 수학적 안정성 (numerical stability)을 취하기 위함이다 (Tao and Hu, 2001). 정규화 좌표와 원 좌표간의 관계식은 식(2)과 같다.

$$R = \frac{R_n - R_o}{R_s} \quad (2)$$

식(2)에서 R 은 x, y, X, Y, Z 가 될 수 있으며 R_n 은 원 좌표이며, R_o 과 R_s 는 각각 오프셋과 축척 요소이다. 지상좌표를 나타내는 X, Y, Z 와 관련된 분모, 분자식은 일반적으로 다음 식(3)과 같이 3차항으로 구성되어 있다.

$$\begin{aligned} P_1(X, Y, Z) &= a_1 + a_2X + a_3Y + a_4Z + a_5XY + \dots + a_{19}X^2Z + a_{19}Z^3 \\ P_2(X, Y, Z) &= b_1 + b_2X + b_3Y + b_4Z + b_5XY + \dots + b_{19}X^2Z + b_{19}Z^3 \\ P_3(X, Y, Z) &= c_1 + c_2X + c_3Y + c_4Z + c_5XY + \dots + c_{19}X^2Z + c_{19}Z^3 \\ P_4(X, Y, Z) &= d_1 + d_2X + d_3Y + d_4Z + d_5XY + \dots + d_{19}X^2Z + d_{19}Z^3 \end{aligned} \quad (3)$$

식(3)에서 $a_1, a_2, \dots, a_{20}, b_1, b_2, \dots, b_{20}, c_1, c_2, \dots, c_{20}, d_1, d_2, \dots, d_{20}$ 은 RPC이며 1차항의 계수는 광학투영 (optical

projection)의 왜곡량, 2차항의 계수들은 지구곡률 (earth curvature), 대기굴절 (atmosphere refraction), 렌즈왜곡 (lens distortion)과 같은 오차를 보정하며 3차항 계수들은 그 이외의 나머지 왜곡들을 보정한다. 따라서 RFM은 본질적으로 다항식모델의 확장이며, 또한 많은 다른 센서모델들의 일반적인 형태이기도 하다 (Tao and Hu, 2002).

4. 정확도 평가 및 분석

1) RFM기반 정확도 평가

지상기준점을 이용하지 않고 QuickBird-2 영상과 함께 제공되는 좌측, 우측의 각각의 RPCs와 1 m 간격의 수치표고모델을 이용하여 ERDAS-LPS 9.1 S/W로 정사보정하는 방법이다. 상기의 방법에 의해 계산된 3차원 지상좌표와 지상측량으로 구한 검사점의 좌표를 비교한 결과는 Table 2와 같다.

Table 2에서 보는 바와 같이 검사점 10점에 대하여 지상측량 좌표와 위성영상으로부터 RFM에 의해 계산된 3차원 지상좌표를 비교해 본 결과 평균제곱근오차 (RMSE)는 평면에서 23.44 m, 표고에서 64.23 m이었다. 또한 RFM과 DEM에 의해 정사보정된 영상을 “도로와 지하시설물 공동구축 사업”의 도로측량 자료와 중첩시 Fig. 4와 같이 도로경계에 상당한 평면 위치오차가 있음을 확인할 수 있었다.

Table 2. The three-dimensional positioning Error of Check Points

ID	Horizontal		Vertical (m)
	Northing (m)	Easting (m)	
Chk_01	-6.132	22.036	61.137
Chk_02	-8.529	21.673	61.772
Chk_03	-8.662	22.000	62.663
Chk_04	-8.942	21.873	64.734
Chk_05	-8.725	21.642	64.012
Chk_06	-8.126	22.131	65.997
Chk_07	-9.817	21.625	67.002
Chk_08	-8.248	21.558	66.410
Chk_09	-9.275	21.798	64.852
Chk_10	-8.863	21.898	65.227
RMSE	8.631	21.790	64.229

Fig. 4. The comparison of road boundaries between orthorectified images using RFM only and terrestrial surveyed digital map (a) left image, (b) right image.

2) 지상기준점 수량별 정확도 평가

확보된 총 52점의 지상기준점 중 좌, 우 영상의 중첩 부분에 해당하는 지상기준점을 선별하여 “공공측량의 작업규정 세부기준, 제5장, 제169조 영상지도제작”을 기준으로 평면 및 표고오차가 3σ 이상이 되는 지상기준점을 제거하여 총 30점의 지상기준점을 선정하였다. 이 중 RFM의 미지수 “ $B = D = 1$ ” 조건으로 3차 다항식을 적용하기 위한 최소한의 지상기준점인 20점을 제외한 10점은 검사점으로 이용하였다. 이 조건은 식(3)에서 P_2, P_4 식의 계수 중 $b_1 = d_1 = 1$ 이며, 나머지 계수는 0이라는 것을 의미하며, 3차항의 경우 지상기준점의 수가 가장 적게 필요로 하는 형태이다.

스테레오 위성영상의 RFM에 지상기준점 20점을 추가하여 지상기준점의 3차원 지상좌표를 계산하고, 그 중 수평위치 및 표고 정확도가 우수한 10점을 RFM의 2차 다항식에 적용할 지상기준점으로 선정하였다. 이와

같이 선정된 지상기준점 10점을 스테레오 위성영상의 RFM에 추가하여 지상 기준점의 3차원 위치 좌표를 계산하고, 그 중 수평위치 및 표고 정확도가 우수한 4점을 RFM의 1차 다항식에 적용할 지상기준점으로 선정하였다.

지상기준점 수량 및 RFM의 다항식 차수에 따른 검사점의 오차를 비교한 결과는 Table 3과 같다. 평면위치오차는 지상기준점 수량이 증가할수록, RFM의 다항식 차수가 증가할수록 축소되었으나, 표고오차는 RFM의 1차 다항식에 지상기준점 20점을 추가하였을 때 가장 작았다. 이러한 결과는 RFM의 다항식 차수와 관계없이 지상기준점 20점, 10점을 추가할 때 도화 축척 1/25,000 평면위치 및 표고허용오차를 만족시켰으나 1/5,000의 경우에는 평면위치 허용오차만을 만족하는 결과를 보였다. 또한 Fig. 5에서 보는 바와 같이 RFM에 지상기준점을 추가하여 모델링하는 방법이 RFM만을 이용하는 것보다 우수함을 육안으로도 확인할 수 있었다.

Table 3. Positioning accuracy of check points using RFM approach with GCPs by the polynomial order

No. of GCPs	Horizontal(m)			Vertical(m)		
	1 st order	2 nd order	3 rd order	1 st order	2 nd order	3 rd order
4 GCPs	.	.	.	.	.	.
10 GCPs	0.969	0.923	.	1.468	1.314	.
20 GCPs	0.935	0.852	0.711	0.953	1.211	1.293

Fig. 5. The comparison of road boundaries between orthorectified images using RFM with 20 GCPs and terrestrial surveyed digital map (a) left image, (b) right image.

3) 지상기준점과 의사지상기준점 수량별 정확도 평가

(1) 지상기준점 20점과 의사지상기준점 수량별 정확도 평가

이번 실험은 최소화된 지상기준점과 영상에서 임의로 선정한 의사지상기준점을 공동 이용하여 위성영상으로부터 구한 3차원 지상좌표 정확도를 평가하기 위한 것이다. 앞선 실험에서 선정된 지상기준점 20점에 RFM의 3차 다항식으로 구한 의사지상기준점(100점, 50점, 20점)을 추가하여 지상기준점을 집합을 보강하고 이들과 RFM으로부터 검사점의 3차원 지상좌표를 계산하였다.

의사지상기준점의 평면위치 정확도는 RFM의 차수가 고차식으로 갈수록 개선되었으며 특히, 의사지상기준점 20점이 고르게 배치되었을 때 조금 더 개선되었다. 의사지상기준점의 표고 정확도는 RFM 1차, 3차 다항식

보다 2차 다항식에서 약간 떨어지는 것으로 나타났다.

검사점 10점에 대한 오차는 Table 4 에서 의사지상기준점 100점, 50점, 20점을 추가한 경우 모두 RFM 1차, 2차 다항식에서 지상기준점 20점만을 이용한 경우보다 크게 나타났으나 RFM 3차 다항식에서는 거의 유사한 오차를 보였다.

RFM의 3차 다항식은 평면위치 및 표고 모두 지상기준점 20점의 오차와 유사하였으며 이는 지상기준점 20점을 RFM의 3차 다항식에 적용하여 의사지상기준점을 생성하였기 때문에 추가된 의사지상기준점 모두 RFM의 3차 다항식에서는 지상기준점 20점과 유사한 오차를 나타내고 있다.

(2) 지상기준점 10점과 의사지상기준점 수량별 정확도 평가

이번 실험에서는 상기 4.2에서 선정된 지상기준점 10

Table 4. Positioning accuracy of check points using RFM approach with 20 GCPs and PGCPs by the polynomial order

No. of GCPs	Horizontal(m)			Vertical(m)		
	1 st order	2 nd order	3 rd order	1 st order	2 nd order	3 rd order
20 GCPs	0.935	0.852	0.714	0.953	1.211	1.293
20 GCPs+20 PGCPs	0.986	0.930	0.712	1.192	1.425	1.293
20 GCPs+50 PGCPs	1.063	0.984	0.713	1.128	1.422	1.291
20 GCPs+100 PGCPs	1.185	1.093	0.711	1.026	1.302	1.291

Table 5. Positioning accuracy of check points using RFM approach with 10 GCPs and PGCPs by the polynomial order

No. of GCPs	Horizontal(m)			Vertical(m)		
	1 st order	2 nd order	3 rd order	1 st order	2 nd order	3 rd order
10 GCPs	0.969	0.928	0.914	1.468	1.314	
10 GCPs+20 PGCPs	0.932	0.923	0.911	1.396	1.314	1.344
10 GCPs+50 PGCPs	0.953	0.925	0.919	1.233	1.314	1.331
10 GCPs+100 PGCPs	0.989	0.928	0.914	1.396	1.314	1.338

Table 6. Positioning accuracy of check points using RFM approach with 4 GCPs and PGCPs by the polynomial order

No. of GCPs	Horizontal(m)			Vertical(m)		
	1 st order	2 nd order	3 rd order	1 st order	2 nd order	3 rd order
4 GCPs	4.084	.	.	3.623	.	.
4 GCPs+20 PGCPs	4.082	4.081	4.087	3.619	3.596	3.701
4 GCPs+50 PGCPs	4.083	4.083	4.084	3.621	3.618	3.669
4 GCPs+100 PGCPs	4.083	4.083	4.084	3.621	3.619	3.656

점을 기준으로 RFM의 2차 다항식을 적용하여 생성된 의사지상기준점(100점, 50점, 20점)을 원 지상기준점 20점에 추가하여 지상기준점 집합을 보강하고 이들과 RFM으로부터 검사점의 3차원 지상좌표를 계산하였다.

지상기준점 수량 및 RFM의 다항식 차수에 따른 검사점 오차를 비교한 결과는 Table 5와 같이 RFM의 다항식 차수가 고차식일수록 대체적으로 수평위치 정확도가 향상되었으며 특히, 의사지상기준점 수량이 적을수록 수평위치 정확도가 더 높게 나타났다. 표고는 고차식으로 갈수록 정확도가 대체적으로 낮아지는 것으로 나타났다. Table 5의 결과는 의사지상기준점 수량별, 다항식 차수별 모든 조건에서 도화 축척 1/25,000 평면위치 및 표고의 허용오차를 만족하였으나 1/5,000의 경우에는 평면위치 허용 오차만을 만족하였다.

의사지상기준점을 활용함으로써 4.2의 실험에서 수평위치 정확도가 가장 좋게 나타난 RFM의 3차 다항식에 대하여 지상기준점 10점과 의사지상기준점을 공동 이용할 경우 정사보정의 평면위치 정확도가 개선되었음을 확인할 수 있었다.

(3) 지상기준점 4점과 의사지상기준점 수량별 정확도 평가

이번 실험에서는 상기 4.2에서 선정된 지상기준점 4점을 기준으로 RFM의 1차 다항식을 적용하여 생성된 의사지상기준점(100점, 50점, 20점)을 원 지상기준점 20점에 추가하여 지상기준점 집합을 보강하고 이들과

RFM으로부터 검사점의 3차원 지상좌표를 계산하였다. 지상기준점 수량 및 RFM의 다항식 차수에 따른 검사점의 3차원 위치 좌표를 비교한 결과는 Table 6과 같다. 의사지상기준점 수량별, RFM의 다항식 차수별 모두 평면 위치 및 표고 정확도는 거의 개선되지 않았으며 RFM의 1차 다항식에 의한 정확도와 거의 유사한 정확도를 보였다.

지상기준점 선정시 배치를 고려하지 않고 수평위치 및 표고 오차만을 고려하여 지상기준점 4점을 선정하였기 때문에 결과적으로 지상기준점 배치가 중첩 영상에서 서편으로 편중되었다.

(4) 지상기준점 배치에 따른 정확도 평가

이번 실험은 4.3의 실험에서 평면위치 및 표고 오차 기준으로 선별된 지상기준점을 수량에 따라 평가한 것과 달리 최소화된 지상기준점이 균등 배치된 경우와 편중 배치된 경우로 나누고 의사지상기준점을 활용하여 3차원 지상좌표를 계산하였다.

실험 지역을 남과 북으로 나누어 북쪽 지역을 비접근 지역으로 가정하였다. 먼저 지상기준점(10점, 4점)을 균등 배치한 경우와 남쪽 지역에만 편중 배치한 경우로 구분하였고, 이에 추가하여 의사지상기준점(100점, 50점, 20점)을 순차적으로 고르게 분포시켜 RFM의 다항식 차수별로 검사점의 수평위치 및 표고를 계산하였다.

검사점 10점에 대한 오차를 비교한 결과는 Table 7과 같다. 지상기준점 10점을 균등 배치했을 경우 추가된 의

Table 7. Positioning accuracy of check points using RFM by the polynomial order and the distribution of GCPs

No. of GCPs		Horizontal(m)			Vertical(m)		
		1 st order	2 nd order	3 rd order	1 st order	2 nd order	3 rd order
evenly distribution	20 GCPs	0.935	0.953	0.711	0.953	1.211	1.293
	10 GCPs+20 PGCPs	1.019	0.984	0.863	1.241	1.245	3.701
	10 GCPs+50 PGCPs	1.023	0.984	0.886	1.188	1.245	3.701
	10 GCPs+100 PGCPs	1.051	0.984	0.934	1.193	1.245	3.701
unevenly distribution	20 GCPs	0.935	0.852	0.711	0.953	1.211	1.293
	10 GCPs+20 PGCPs	1.279	1.376	1.437	1.390	1.985	1.976
	10 GCPs+50 PGCPs	1.412	1.376	1.439	1.510	1.986	1.972
	10 GCPs+100 PGCPs	1.465	1.376	1.437	1.894	1.986	1.971

사지상기준점 수량에 관계없이 RFM의 차수가 고차식으로 갈수록 평면위치 오차가 비교적 균등하게 개선되었으나 표고 오차는 균등하게 개선되는 경향이 뚜렷하지 않았으나 상기 4.3.2 실험의 결과보다 오차는 다소 적었다. 또한 지상기준점 10점을 편중 배치했을 경우와 비교시 평면위치 및 표고 오차가 각각 약 50 cm, 70 cm 이상 개선되는 것으로 나타났다.

RFM의 3차 다항식을 기준으로 지상기준점 20점의 결과와 비교해 본 결과 수평위치 오차는 0.15 m 증가하였으나 오차는 오히려 약 0.06m 정도 감소되었음을 확인할 수 있었다. 지상기준점을 균등 배치했을 경우는 의사지상기준점 수량 및 RFM의 다항식 차수 모두 정확도에 큰 변화가 없었으나 상기 4.3.3의 실험한 결과와는 달리 수평 및 표고 오차가 각각 2.6 m, 1.3 m 이상 감소된 것으로 나타났으며 지상기준점 10 점을 편중 배치했을 때보다도 수평 및 표고 오차는 각각 0.3 m, 0.6 m 이상 개선되는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 통해 지상기준점의 배치가 정확도에 큰 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있었다.

편중된 지상기준점 4점으로 정사보정 시 정확도가 앞서 실험한 4.3.3의 결과 보다 크게 개선된 것으로 나타났는데 이는 지상기준점 배치가 동서방향이 아닌 남북 방향 중 남쪽으로 편중 배치되었으므로 RFM이 갖고 있는 동서방향 오차 영향을 덜 받은 것으로 판단된다.

이러한 실험 결과는 균등 배치한 지상기준점 10점과 의사지상기준점을 이용할 경우 1/25,000의 평면위치 및 표고의 허용오차를 모두 만족하였고 이를 제외한 실험 조건에서는 1/25,000의 평면위치 허용 오차를 모두 만족하였으나 표고의 허용오차는 모두 만족하지 못했다.

1/5,000의 경우에는 지상기준점 10점과 의사지상기준점을 활용했을 경우에만 평면위치의 허용오차를 만족하는 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서 동일한 지역에 대해 시차를 두고 촬영한 QuickBird-2 스테레오 영상을 RFM과 지상기준점 및 가상지상기준점을 이용하여 3차원 지상좌표를 계산하고 수치지도로부터 생성된 DEM을 이용하여 정사보정 영상을 제작하였으며, 그 정확도를 평가한 결과는 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 1) QuickBird-2 스테레오 영상과 RFM만을 이용하여 계산된 평면위치와 표고의 오차는 각각 23.447 m, 64.229 m로 나타났으며, 대축척 수치지도 제작은 현실적으로 어려울 것으로 판단된다.
- 2) 3차원 위치 정확도 향상을 위해 추가된 지상기준점의 수량별 정확도 평가에서는 RFM의 3차 다항식을 풀 수 있는 최소 지상기준점 20점일 때 평면위치와 가장 적었으며, 대부분 RFM의 다항식 차수가 고차로 갈수록 평면위치오차는 개선되었으나 표고 오차는 불균등하였다.
- 3) 지상기준점 20점 및 10점과 의사지상기준점을 이용하였을 경우 RFM의 다항식 차수가 고차로 갈수록 평면위치오차는 대체적으로 줄었으며, 표고오차는 RFM의 다항식 차수와는 관계없이 불균등하게 나타났으나 의사지상기준점을 추가 사용함으로써 RFM의 3차 다항식 적용 및 정확도 개선이 가

능함을 확인할 수 있었다.

- 4) 지상기준점 배치에 따른 정확도 평가에서는 지상 기준점 10점을 균등 배치했을 경우는 축척 1/25,000 수치지도의 평면위치 및 표고의 허용오차를 모두 만족하였고, 축척 1/5,000 수치지도에 대해서는 평면위치 허용오차를 만족하였다. 지상기준점을 편중 배치했을 경우는 축척 1/25,000 수치지도의 평면위치 허용오차를 만족하였으나 표고 허용오차 범위를 초과하였다. 이러한 결과를 근거로 지상기준점이 10점 이하인 경우에도 의사지상기준점을 지상기준점에 추가하여 균등배치함으로써 축척 1/25,000 정사영상 및 수치지도 제작이 가능함을 알 수 있었고 RFM에 내재된 오차는 지상기준점을 균등하게 배치시 가장 효과적으로 감소됨을 알 수 있었다.

References

- Aguilar, M.A., F.J. Aguilar, F. Aguera, and J.A. Sanchez, 2007. Geometric accuracy assessment of Quick-Bird basic imagery using different operational approaches, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 73(12): 1321–1332.
- Aguilar, M.A., F. Aguera, F.J. Aguilar, and F. Carvajal, 2008. Geometric accuracy assessment of the orthorectification process from very high resolution satellite imagery for common agricultural policy purposes, *International Journal of Remote Sensing*, 29(24):7181–7197.
- Bang, S., J. Koh, K. Yun, and J. Kwak, 2012. A Study on RFM Based Stereo Radargrammetry Using TerraSAR-X Datasets, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 32(1D): 88–94 (in Korean with English abstract).
- Chubey, M.S., S.E. Franklin, and M.A. Wulder, 2006. Object-based analysis of Ikonos-2 imagery for extraction of forest inventory parameters, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72(4):393–394.
- Kim, E., and S. Lee, 2006. Comparison Among Sensor Modeling in High-Resolution Satellite Imagery, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 26(6D): 1025–1032 (in Korean with English abstract).
- Li, R., X. Niu, C. Liu, B. Wu, and S. Deshpande, 2009. Impact of imaging geometry on 3D geopositioning accuracy of stereo Ikonos imagery, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 75(9): 1119–1125.
- Mishra, D., S. Narumalani, D. Rundquist, and M. Lawson, 2006. Benthic habitat mapping in tropical marine environments using QuickBird multispectral data, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72(9): 1037–1048.
- Qiao, G., W. Wang, B. Wu, C. Liu, and R. Li, 2010. Assessment of Geo-positioning Capability of High Resolution Satellite Imagery for Densely Populated High Buildings in Metropolitan Areas, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 76(8): 923–934.
- Tao, C. Vincent and Yong Hu, 2001. A Comprehensive Study of the Rational Function Model for Photogrammetric Processing, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 67(12): 1347–1357.