

# KOMPSAT-2 RPC를 이용한 3차원 위치결정 정확도 분석 3D Geopositioning Accuracy Assessment Using KOMPSAT-2 RPC

오관영<sup>1)</sup> · 정형섭<sup>2)</sup> · 이원진<sup>3)</sup> · 이동택<sup>4)</sup>

Oh, Kwan Young · Jung, Hyung Sup · Lee, Won Jin · Lee, Dong Taek

## Abstract

The objective of this paper is to improve the accuracy of the 3D geopositioning extracted from Rational Polynomial Coefficient(RPC) provide in the KOMPSAT-2 metadata files. In this paper, we developed the algorithm to adjust a RFM(Rational Functional Model), and could improve the accuracy of a RFM with this algorithm. Furthermore, when a RFM was adjusted with this algorithm, the effects of the number of GCPs on the accuracy of the adjusted RFM was tested. For accuracy assessment using adjusted RFM, 9 ground control points(GCPs) and 24 check points could be used.

Results indicated that the root mean squared errors(RMSEs) of horizontal residual errors calculated 24 check points were 2.20(m). The achieved accuracy of three dimensional object-point determination was 1.72(m) in the X-dimension and 1.37(m) in the Y-dimension and 2.20(m) in the Z-dimension.

Keywords : KOMPSAT-2, RPC, 3D geopositioning

## 초 록

본 논문의 목적은 KOMPSAT-2 영상과 함께 제공되는 RPC를 이용하여 계산된 3차원 지형정보의 정확도를 향상시키는 것이다. 본 논문에서는 보정된 RFM 알고리즘을 제안하였고, 이러한 알고리즘을 이용하여 정확도를 향상시킬 수 있었다. 또한, 지상기준점의 수에 따른 정확도의 변화도 실험하였다. 실험에는 9개의 GCP와 24개의 CP가 사용되었다.

24개의 CP를 이용하여 실험한 결과, 수평방향의 RMSE는 2.20(m)를 나타냈으며, X방향 1.72(m), Y방향 1.37(m), Z방향 2.20(m)의 RMSE를 나타냈다.

핵심어 : 아리랑 2호, RPC, 3차원 위치결정

## 1. 서 론

현재 위성영상은 영상지도 제작, 수치표고자료 제작, 자원 탐사, GIS 응용 등, 수많은 분야에서 이용되고 있다. 위성 영상으로부터 정확한 3차원위치 정보를 추출하는 것은 앞서 제시된 분야에 적용됨에 있어, 최종 성과물의 정확도 및 신뢰도의 향상에 매우 중요한 요소로 취급된다.

국내에서 두 번째로 발사된 상업용 다목적 실용위성인 KOMPSAT-2는 대상영역의 3차원 위치결정을 위하여, RPC(Rational Polynomial Coefficient)가 포함된 자료를 제공한다. RFM은 위성영상과 지상과의 기하학적인 관계를 간단한 구면이나 평면으로 표현이 가능하다는 가정 하에, 그 관계를 여러 개의 다항식으로 표현하여 해석하고자 한 방법으로, RPC는 RFM에 사용되는 계수이다(Tao 등, 2000). 이러한 RFM은 지상좌표와 영상 좌

1) 정희원 · 서울시립대학교 공간정보공학과 석사과정(E-mail: darby82@uos.ac.kr)  
2) 교신저자 · 정희원 · 서울시립대학교 공간정보공학과 교수(E-mail: hsjung@uos.ac.kr)  
3) 정희원 · 서울시립대학교 공간정보공학과 박사과정(E-mail: twother@uos.ac.kr)  
4) 서울시립대학교 공간정보공학과 석사과정(E-mail: leedt3423@uos.ac.kr)

표간의 기하 관계를 단순하고도 정확하게 묘사할 수 있어, 과거 복잡하게 계산 되었던 물리적 센서 모델의 대안으로 활발히 이용되고 있다.

그러나 추가적인 기준점정보 없이, 위성 영상과 함께 제공된 RPC를 이용하여 3차원 지형자료를 구축할 경우 사용자가 원하는 정확도를 확보하기 어렵다. 따라서 현재까지도 위성영상과 함께 제공되는 RPC를 이용하여 구축되는 3차원 지형자료의 위치정확도를 향상시키기 위한 RFM 보정 알고리즘에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 크게 두 가지 방법으로 구분할 수 있다. 첫 번째는 위성영상에서 제공하는 RPC 자료자체를 보정하는 방법이고, 두 번째는 제공된 RPC 자료에 수학적 보정 모델을 추가하는 조정 모델링 방법이다.

첫 번째 방법으로는 추가적인 GCP를 이용하여 RPC를 재계산하는 방법(Tao 등, 2002)이 있으며, 기존의 GCP와 추가적인 GCP를 모두 이용하여 RPC를 재계산 하는 방법과 기존의 RPC를 계산 할 때 생성된 공분산 행렬을 이용하여 RPC를 보정하는 방법으로 구분된다.

두 번째 방법으로는 다항식 모델링 방법(Di, 2003)과 RPC 블록조정 방법(Grodecki 등, 2003)을 들 수 있다. 다항식 모델링의 경우 측정된 지상기준점의 지상좌표와 제공되는 RPC로 계산된 지상좌표사이의 관계식을 구하여 모델링하는 방법이고, RPC 블록조정 방법은 중복된 영상의 수가 많을 경우 적용될 수 있는 방법으로 중복된 영상에서 테일러 선형화와 최소제곱법 그리고 반복계산에 의하여 RPC 편의를 보정하는 방법이다.

국내에서 안기원 등은 RFM을 적용한 IKONOS 영상의 기하보정과 다항식 차수에 따른 영상의 정확도를 평가하였으며(안기원 등, 2002), 이진덕 등은 IKONOS 영상에 대하여 RFM을 기반으로 추출되는 지상좌표의 정확도를 개선하기 위하여, 선형이동 모델, 축척 및 선형이동 모델, Affine 모델, 2차 다항식 모델을 제시하였고 보정 모델별 개선효과를 분석하였다(이진덕 등, 2009).

이와 같이 RPC를 이용하여 3차원 지형자료의 정확도를 향상시키기 위한 연구는 지속적으로 이뤄지고 있다. 그러나 현재까지의 연구는 IKONOS 위성에 초점이 맞춰진 것으로, KOMPSAT-2 RFM 보정 알고리즘에 대한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 KOMPSAT-2 RFM으로 계산된 영상 기하의 오차를 보정하기 위하여, RFM으로 계산된 영상좌표, 지상좌표와 실제 좌표사이에서 발생된 오차에 대한 상관성 분석을 수행하였고, 기존 IKONOS와는

다른 방법으로 전개된 다항식 모델링 방법을 제안하였다. 제안된 모델의 정확도를 검증하기 위하여 1쌍의 스테레오 영상과 영상 내의 33개 지상점이 사용되었으며, 기존의 모델과 비교하여 최대 3배 이상 향상된 위치 정확도를 획득하였다. 또한, 제안된 모델에 사용되는 지상 기준점의 수에 따라 달라지는 정확도의 변화도 실험하였다.

## 2. RFM 이론과 KOMPSAT-2 RPC 편의 보정식 유도

OGC (The OpenGIS™ Abstract Specification, Topic 7 : The Earth Imagery Case, Ver 4.0)에서 정의하고 있는 RFM 주변환식과 역변환식은 다음과 같다(나재홍 등, 2003).

### 2.1 RFM 변환식

RFM은 지상 좌표(latitude, longitude, height)와 영상 좌표(row, column)간의 변환을 수행하는 관계식으로, RFM 주변환식과 RFM 역변환식으로 구분 할 수 있다. RFM 주변환식은 지상좌표를 입력값으로 영상좌표를 구하는 분수식으로 분모와 분자는 3차의 다항식으로 구성된다. 식(1)은 OGC에서 정의한 RFM기본식이다. 여기서( $r_n, c_n$ )는 영상좌표, ( $X_n, Y_n, Z_n$ )은 지상좌표를 나타내며 -1에서 +1 사이의 값으로 정규화된 값으로 표현된다(식(2)).

$$r_n = \frac{p1(X_n, Y_n, Z_n)}{p2(X_n, Y_n, Z_n)}, c_n = \frac{p3(X_n, Y_n, Z_n)}{p4(X_n, Y_n, Z_n)} \quad (1)$$

$$r_n = \frac{r - r_o}{r_s}, c_n = \frac{c - c_o}{c_s}$$

$$X_n = \frac{X - X_o}{X_s}, Y_n = \frac{Y - Y_o}{Y_s}, Z_n = \frac{Z - Z_o}{Z_s} \quad (2)$$

단, ( $r_o, c_o, X_o, Y_o, Z_o$ ) : offset values, ( $X_s, Y_s, Z_s$ ) : scale vector

식 (1)의 분모와 분자는 3차의 다항식으로, 식 (3)과 같이 표현되며,  $p_i(X_n, Y_n, Z_n)$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ )는 계수값의 차이만 있을 뿐 식의 형태는 동일 하다. 식(4)는  $p_1(X_n, Y_n, Z_n)$  을 다항식으로 표현한 것이다. 또한,  $a_{ijk}, b_{ijk}, c_{ijk}, d_{ijk}$  는 분모와 분자의 다항식의 계수로 RFM를 나타낸다.

$$r_n = \frac{p1(X_n, Y_n, Z_n)}{p2(X_n, Y_n, Z_n)} = \frac{\sum_{i=0}^{n1} \sum_{j=0}^{n2} \sum_{k=0}^{n3} a_{ijk} X^i Y^j Z^k}{\sum_{i=0}^{n1} \sum_{j=0}^{n2} \sum_{k=0}^{n3} b_{ijk} X^i Y^j Z^k} \quad (3)$$

$$c_n = \frac{p3(X_n, Y_n, Z_n)}{p4(X_n, Y_n, Z_n)} = \frac{\sum_{j=0}^{m1} \sum_{k=0}^{m2} \sum_{l=0}^{m3} c_{jkl} X^j Y^k Z^l}{\sum_{j=0}^{n1} \sum_{k=0}^{n2} \sum_{l=0}^{n3} d_{jkl} X^j Y^k Z^l}$$

$$p1(X_n, Y_n, Z_n) = a_0 + a_1 X + a_2 Y + a_3 Z + a_4 X^2 + a_5 XY + a_6 XZ + a_7 Y^2 + a_8 YZ + a_9 Z^2 + a_{10} X^3 + a_{11} X^2 Y + a_{12} X^2 Z + a_{13} XY^2 + a_{14} XYZ + a_{15} XZ^2 + a_{16} Y^3 + a_{17} Y^2 Z + a_{18} YZ^2 + a_{19} Z^3 \quad (4)$$

RFM을 이용하여 3차원 지상좌표를 획득하기 위해서는 식(1)을 지상좌표에 관한 식으로 역변환 시켜줘야 한다. 이는 식(1)을 테일러 급수전개에 의한 선형화방법을 적용하여 변환한 후, 식(5)와 같이 관측방정식의 형태로 정리할 수 있다. 이를 식 (6)과 같이 행렬로 정리하고, 최소제곱법을 이용한 반복된 계산으로 3차원 좌표를 결정할 수 있다. 단,  $Vr_L, Vc_L, Vr_R, Vc_R$  는 잔차를 나타내고,  $r_L0, c_L0, r_R0, c_R0$  는 초기 영상좌표이며,  $r_L, c_L, r_R, c_R$  은 좌·우측 영상에서 실제 영상좌표를 의미한다.

$$\begin{aligned} Vr_L &= r_L0 + \frac{\partial r_L}{\partial X} \Delta X + \frac{\partial r_L}{\partial Y} \Delta Y + \frac{\partial r_L}{\partial Z} \Delta Z - r_L \\ Vc_L &= c_L0 + \frac{\partial c_L}{\partial X} \Delta X + \frac{\partial c_L}{\partial Y} \Delta Y + \frac{\partial c_L}{\partial Z} \Delta Z - c_L \\ Vr_R &= r_R0 + \frac{\partial r_R}{\partial X} \Delta X + \frac{\partial r_R}{\partial Y} \Delta Y + \frac{\partial r_R}{\partial Z} \Delta Z - r_R \\ Vc_R &= c_R0 + \frac{\partial c_R}{\partial X} \Delta X + \frac{\partial c_R}{\partial Y} \Delta Y + \frac{\partial c_R}{\partial Z} \Delta Z - c_R \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} Vr_L \\ Vc_L \\ Vr_R \\ Vc_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial r_L}{\partial X} & \frac{\partial r_L}{\partial Y} & \frac{\partial r_L}{\partial Z} \\ \frac{\partial c_L}{\partial X} & \frac{\partial c_L}{\partial Y} & \frac{\partial c_L}{\partial Z} \\ \frac{\partial r_R}{\partial X} & \frac{\partial r_R}{\partial Y} & \frac{\partial r_R}{\partial Z} \\ \frac{\partial c_R}{\partial X} & \frac{\partial c_R}{\partial Y} & \frac{\partial c_R}{\partial Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_L0 - r_L \\ c_L0 - c_L \\ r_R0 - r_R \\ c_R0 - c_R \end{bmatrix} \quad (6)$$

## 2.2 KOMPSAT-2 RPC 편차 보정식 유도 및 정확도 분석

우선 KOMPSAT-2 위성영상에서 제공된 RPC와 측량된 33개의 지상점(X, Y, Z)을 이용하여, 각각의 영상좌표를 계산하고, 오차의 크기와 빈도, 방향성을 분석한다. 또한, 각 지상점에서 나타난 영상 컬럼방향 오차와 라인방향 오차를 영상의 컬럼방향과 라인방향으로 1차 다항식에 피팅(fitting)하여 오차의 경향성을 관찰한다. 실험 결과를 바탕으로 KOMPSAT-2 RPC 편차 보정식을 세우고, 보정식으로 재계산된 지상점 좌표(X, Y, Z)와 그에 따른 RMSE를 계산한다. 그림 1은 KOMPSAT-2 RPC 편차 보정식의 유도 및 정확도 분석 과정을 나타낸다.

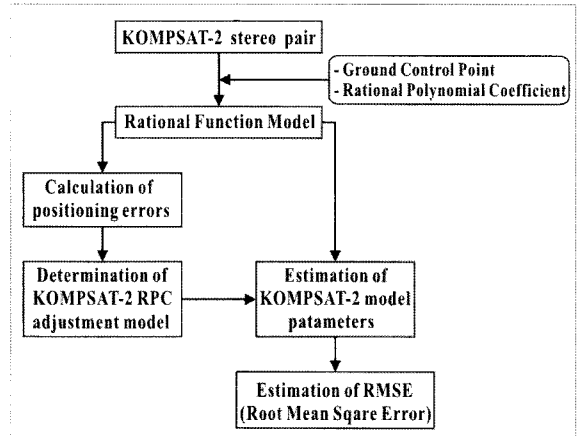


그림 1. RPC 편차 보정식의 유도 및 정확도 분석

## 3. 실험과 결과분석

본 연구에서는 도심과 산악지형을 동시에 관찰할 수 있고, 인근에 GPS 상시관측소가 있어 지상데이터의 획득이 용이한 대전지역을 연구 대상지역으로 선정하였다. 사용된 영상은 2009년 04월 12일과 2009년 09월 10일에 촬영된 KOMPSAT-2 스테레오 영상으로 1m급 흑백영상이다. 영상의 촬영 시기는 약 5개월의 시차를 가지고 있으며, 좌·우측 영상은 각각 16.8도와 -19.2도로 촬영되었고, 지형과 지물의 식별을 용이하게 하기 위해 다중 밴드영상과 Pansharping을 수행하여 연구에 사용하였다(표 1).

영상의 기하보정 정확도 평가를 위하여, 대상 영역에서 33개의 지상점을 영상전체에 골고루 분포하도록 선정하였고, 현장답사를 통해 지상좌표를 획득하였다. GPS 데이터의 수신은 TRIMBLE 5700장비를 이용하였고, Total RMSE 0.1m 이내의 정확도로 측정되었다.

표 1. KOMPSAT-2 위성영상의 제원

파라미터	좌측영상	우측영상
촬영날짜	2009-04-12	2009-09-10
관측각	-19.2°	16.8°
초점거리	PAN(9.02m), MS(2.26m)	
GSD	1m	
영상크기	15000화소*15500화소	

먼저 지상점의 지상좌표를 사용하여 RFM 주변환식의

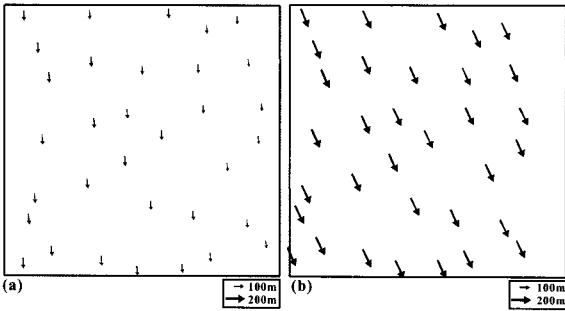


그림 2. 좌측영상(a)과 우측영상(b), 33개 지상점에 대한 오차벡터

정확도를 검증하였다. 그림 2은 RFM 주변환식을 이용하여 33개의 지상점에 대한 좌·우측 영상의 영상점을 계산하고, 계산된 영상점과 실제 영상점의 오차벡터를 도시한 것이다. 좌·우측 영상에 대하여 모든 오차 벡터는 일정한 방향을 향하였고, 오차 벡터의 크기는 거의 일정하였다.

표 2는 오차벡터에 대한 평균과 표준편차를 나타낸 것이다. 좌측영상에 대하여 컬럼방향과 라인방향의 오차 평균은 각각 4.54(픽셀)과 -71.24(픽셀)이었고, 표준편차는 각각 1.21(픽셀)과 6.37(픽셀)이었다. 우측 영상에 대하여 컬럼방향과 라인방향의 오차 평균은 각각 66.09(픽셀)과 -142.84(픽셀)이었으며, 표준편차는 2.09(픽셀)과 4.03(픽셀)이었다. 좌·우측 영상 모두 절대오차는 크지만 상대오차는 매우 작은 값을 나타냈다. 이러한 결과는 지상점에 대한 오차의 보정이 가능함을 나타낸다.

표 2. 오차벡터의 평균과 표준편차

파라미터	평균(Pixel)		표준편차(Pixel)	
	컬럼방향 오차	라인방향 오차	컬럼방향 오차	라인방향 오차
좌측영상	4.54	-71.24	1.21	6.37
우측영상	66.09	-142.84	2.09	4.03

그림 3은 좌·우측 영상에서 영상 컬럼 방향과 영상 라인방향으로의 오차의 크기와 빈도를 나타낸다. 그런데 영상 컬럼방향 오차의 분포에 비해, 영상 라인방향 오차의 분포가 더 불규칙한 결과를 보여 주었다. 따라서 영상 라인 방향 오차의 보정에 대한 정확도는 영상 컬럼 방향 오차의 보정에 대한 정확도에 비해 다소 떨어질 것으로 예상되었다.

그림 4와 5는 좌·우측영상의 33개의 지상점에 대하여 영상의 컬럼방향과 라인방향으로, 영상 컬럼방향 오

차와 라인방향 오차를 1차다항식에 피팅(fitting) 한 결과를 나타낸다.

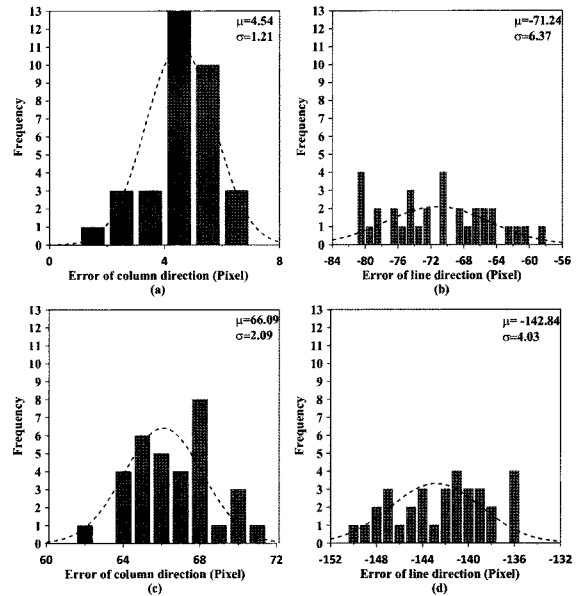


그림 3. 33개의 지상점에 대한 오차의 크기와 히스토그램, 좌측영상의 영상컬럼방향 오차(a), 영상라인방향 오차(b), 우측영상의 영상컬럼방향 오차(c), 영상라인방향 오차(d)

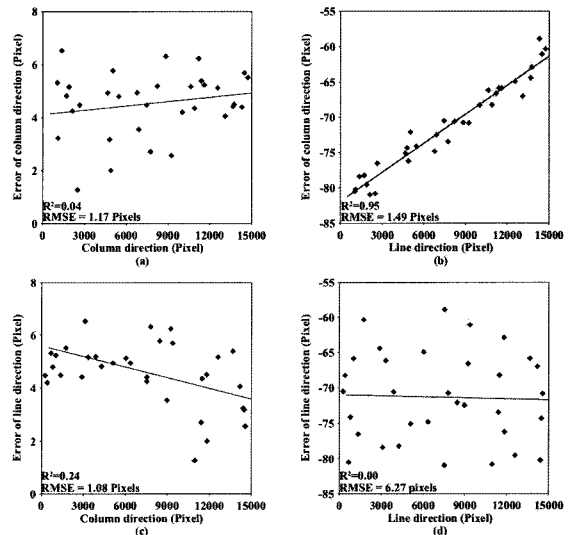


그림 4. 좌측영상의 컬럼방향 오차의 컬럼위치와의 관계(a), 라인위치와의 관계(b), 라인방향 오차의 컬럼위치와의 관계(c), 라인위치와의 관계(d)

좌측영상의 지상점에서 영상의 컬럼방향과 라인방향으로의 컬럼방향오차의 결정계수( $R^2$ )는 각 각 0.04과

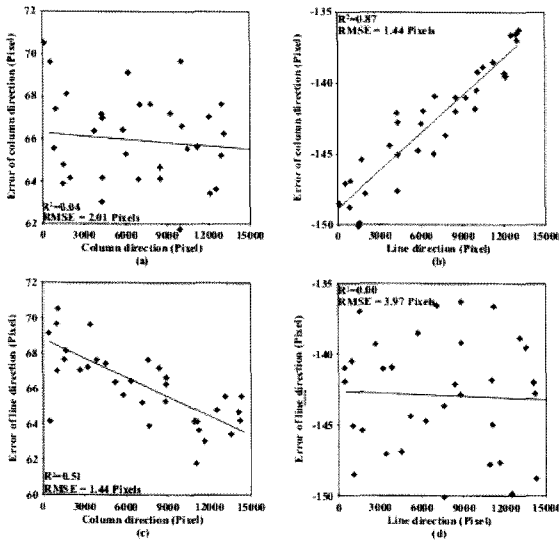


그림 5. 우측영상의 컬럼방향 오차의 컬럼위치와의 관계(a), 라인위치와의 관계(b), 라인방향 오차의 컬럼위치와의 관계(c), 라인위치와의 관계(d)

0.95, RMSE는 각각 1.17(픽셀)과 1.49(픽셀)을 나타냈고, 라인방향오차의 결정계수( $R^2$ )는 각각 0.24과 0.00, RMSE는 각각 1.08(픽셀)과 6.27(픽셀)을 나타냈다. 또한, 우측영상의 지상점에서 영상의 컬럼방향과 영상라인방향으로의 컬럼방향오차의 결정계수( $R^2$ )는 각각 0.04과 0.87, RMSE는 각각 2.01(픽셀)과 1.44(픽셀)을 나타냈고, 라인방향오차의 결정계수( $R^2$ )는 각각 0.51과 0.00, RMSE는 각각 1.44(픽셀)과 3.97(픽셀)을 나타냈다. 즉, 그림 4와 5의 (a)와 (d)와 같이 라인방향으로의 라인방향오차, 컬럼방향으로의 컬럼방향오차는 연관성이 적었으며, (b)와 (c)와 같이 영상의 컬럼방향오차는 라인방향으로, 라인방향 오차는 컬럼방향으로 상대적으로 큰 상관성을 지니고, 선형으로 비례함을 보였다.

이러한 결과는 KOMPSAT-2 RPC 편 of 보정의 경우, 라인(컬럼) 방향 오차는 라인(컬럼)과 관계된 변수로 조정되었던 기존의 IKONOS 보정모델(이진택 등, 2009)과는 다르게 전개되어야 하며, 식 (7)과 같은 1차 다항식 변환을 이용하여, RFM 주변환식으로 계산된 영상점의 위치 정확도를 향상시킬 수 있다는 것을 의미한다.

$$\Delta_c = \alpha_0 l + \beta_0 \quad \Delta_l = \alpha_1 c + \beta_1 \quad (7)$$

여기서,  $\Delta_c$  과  $\Delta_l$  는 각각 RPC에 의해 계산된 컬럼방향과 라인방향으로의 오차이며,  $C$  와  $l$  은 각각 컬럼수와

라인수이고,  $\alpha_0, \alpha_1, \beta_0, \beta_1$  는 RPC 편 of 보정계수이다.

제안된 모델(식(7))을 이용한 영상점 오차 보정의 정확도를 시험하기 위하여, 33개의 지상점을 9개의 지상기준점과 24개의 검사점으로 나누어 실험하였다. 그림 6는 9개의 지상기준점과 24개의 검사점의 분포를 나타내며, 지상기준점과 검사점은 영상 전체에 균등하게 배치하였다.

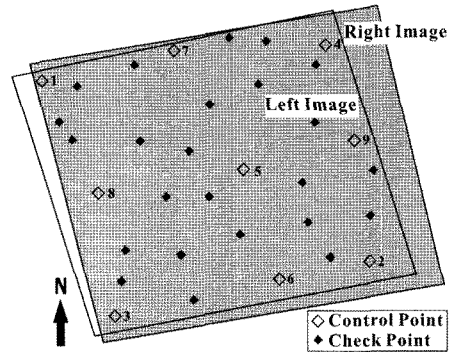


그림 6. 좌·우측영상에서 지상기준점과 검사점의 위치

또한, 제안된 모델의 상대적 평가를 위하여, 기존 IKONOS에 적용되었던 RPC 편 of 보정모델의 위치 정확도를 실험하였다. 표 3은 본 논문에서 제안된 모델과 기존 IKONOS에서 적용되었던 모델을 나타낸다.

표 3. 정확도 개선을 위한 RPC 편 of 보정 모델

RPC 편 of 보정 모델		
제안된 모델	$\Delta_c = \alpha_0 l + \beta_0$	$\Delta_l = \alpha_1 c + \beta_1$
IKONOS(기존 모델)	$\Delta_c = \alpha_0 c + \beta_0$	$\Delta_l = \alpha_1 l + \beta_1$

KOMPSAT-2 스테레오 영상에 골고루 분포되어 있는 9개의 지상기준점과 24개의 검사점을 이용하여 제안된 모델과 기존의 보정모델의 정확도를 실험하였고, 결과를 표 4에 나타내었다.

제안된 모델과 기존의 보정 모델을 이용하여, 총 24개의 검사점에서 계산된 영상 컬럼방향의 RMSE는 좌측 영상에서 1.16(픽셀)과 1.21(픽셀), 우측 영상에서는 1.54(픽셀)과 1.98(픽셀)을 나타냈다. 또한, 영상 라인방향의 RMSE는 좌측 영상의 경우 1.41(픽셀)과 5.60(픽셀), 우측 영상의 경우 1.64(픽셀)과 3.64(픽셀)을 나타냈다. 좌·우측 영상에서 각각의 보정 모델로 계산하였을 때, 영상 컬럼방향의 RMSE는 비슷한 크기를 나타냈으

표 4. RPC 편차 보정 모델로 계산된 검사점의 RMSE

RPC 편차 보정 모델	좌측영상			우측영상		
	오차(Pixel)		총 오차 (Pixel)	오차(Pixel)		총 오차 (Pixel)
	컬럼방향	라인방향		컬럼방향	라인방향	
제안된 모델	1.16	1.41	1.83	1.54	1.64	2.25
IKONOS(기존 모델)	1.21	5.60	5.73	1.98	3.64	4.14

나 영상 라인방향의 RMSE는 최소 2배 이상 큰 폭의 차이를 나타냈다. 또한 각 각의 보정 모델로 계산된 Total RMSE는 좌·우측영상에서 3.90(픽셀)과 1.89(픽셀)의 상대적으로 큰 정확도 차이를 나타냈다. 결과적으로 KOMPSAT-2 RPC의 편차 보정의 경우, 본 논문에서 제안된 모델은 기존의 보정 모델과 비교하여 최대 3배 이상 향상된 위치 정확도를 나타냈다.

앞서 선행된, 두 보정모델의 상대적 비교 실험에서는 총 9개의 지상기준점과 24개의 검사점이 사용되었다. 그런데 본 논문에서 제안한 모델을 통한 KOMPSAT-2 RPC 편차의 보정은 좌·우 영상에서 각 각 2개씩 총 4개의 RPC 편차 보정계수( $a_0, a_1, b_0, b_1$ )를 구해야 하므로 최소 2개의 지상기준점만으로도 계산이 가능하다.

일반적인 기하보정 방법 통한 3차원 모델링 시 지상기준점의 수가 증가함에 따라 오차는 지속적으로 줄어든다고 알려져 있다(김갑래 등, 2003). 그러나 정형섭이 제안한 기하보정 모델에서는 지상기준점의 수가 일정한 개수를 넘어서면 일정 크기의 정확도로 수렴하는 경향을 나타냈다(정형섭, 2010).

일반적으로 고해상도 위성영상 자료의 처리 및 정확도 분석을 위해 사용되는 지상기준점을 관측하기 위해서는 GPS 등의 지상관측용 장비가 필요하며, 현장에서 직접 작업이 이뤄져야 한다. 이와 같은 현장측량 작업은 많은 시간과 경제적 비용이 요구되며, 위성 영상에서 군사보호지역, 협준한 산악지역, 기타 접근이 용이하지 않

은 지역이 포함되어 있을 경우 충분한 수의 지상기준점을 확보하기는 쉽지 않기 때문에, 사용되는 지상기준점의 수는 최소로 하는 것이 바람직하다. 따라서 본 논문에서 제안한 모델을 사용하여 3차원 위치정보를 획득할 경우, 소요의 정확도를 만족시킬 수 있는 최소의 지상기준점 개수를 결정하는 연구가 요구된다.

지상기준점의 수와 배치유형 따른 정확도의 상관관계를 알기 위하여 지상기준점의 수를 2점부터 9점까지 그림 6의 지상기준점에 부여된 번호에 따라 하나씩 늘려가면서 실험하였다. 지상기준점은 영상에서 최대한 넓게 사용해야 한다는 점을 고려하여 처음 두 지상기준점은 영상의 좌상단과 우하단의 점을 사용하였고, 세 점 이상의 지상기준점에 대해서도 이를 고려하여 선택하였다. 표5는 지상기준점의 수에 따른 검사점에서의 영상 라인과 컬럼방향으로의 RMSE를 나타낸다.

지상기준점의 수를 2개에서 9개로 증가시킨 경우, 좌·우측 영상에서 영상 컬럼방향의 RMSE는 각 각 0(픽셀)과 0.67(픽셀), 영상 라인방향의 RMSE는 각 각 0.91(픽셀)과 0.54(픽셀)의 정확도 향상이 있었다. 또한, 24개의 검사점에 대해서 9개의 지상기준점으로 보정하였을 때, 좌·우측 영상에 대해서 영상컬럼 방향의 RMSE는 1.16(픽셀)과 1.54(픽셀), 영상 라인방향의 RMSE는 1.41(픽셀)과 1.64(픽셀)을 나타냈다. 표 5에서 지상기준점 없이 검사점에 대한 RMSE를 계산하였을 때, 좌·우측 영상에서 영상 컬럼방향의 RMSE 보다 영

표 5. 지상기준점의 수에 따른 검사점의 RMSE

기준점 개수		0	2	3	4	5	6	7	8	9
좌측 영상	컬럼방향오차(Pixel)	4.73	1.16	1.16	1.16	1.23	1.22	1.16	1.16	1.16
	라인방향오차(Pixel)	71.51	2.32	2.30	1.34	1.37	1.45	1.34	1.44	1.41
	총 오차(Pixel)	71.66	2.60	2.57	1.77	1.84	1.89	1.77	1.85	1.83
우측 영상	컬럼방향오차(Pixel)	65.99	2.12	2.32	1.76	1.86	1.87	1.82	1.61	1.54
	라인방향오차(Pixel)	142.78	1.73	1.81	1.56	1.67	1.67	1.55	1.67	1.64
	총 오차(Pixel)	157.29	2.74	2.94	2.35	2.50	2.50	2.39	2.32	2.25

상 라인방향의 RMSE 가 최소 2배 이상의 차이를 보였지만, 최종적으로 보정된 결과에서는 큰 차이를 보여주지 않았다. 이는 지상기준점의 수가 증가함에 따라 지상기준점 자체가 지니고 있는 오차를 상호 보정하기 때문인 것으로 판단된다.

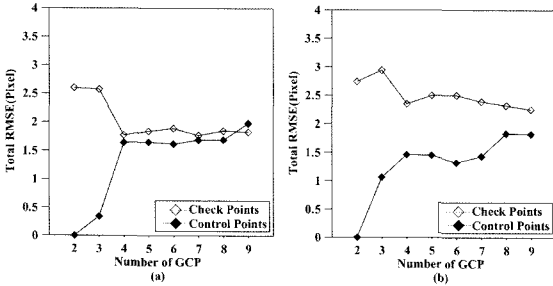


그림 7. 지상기준점의 수에 따른 검사점의 Total RMSE, (a) 좌측영상, (b) 우측영상

그림 7는 좌·우측 영상에서, 지상기준점에 의한 Total RMSE를 지상기준점의 수에 따라 도시한것이다. 지상기준점이 2개인 경우, Total RMSE는 좌·우측 영상에서 각각 2.60(픽셀)과 2.74(픽셀)을 나타냈고, 지상기준점의 수가 9개인 경우의 Total RMSE 각각 1.83(픽셀)과 2.25(픽셀)을 나타냈다. 즉, 기상기준점의 수가 2개에서 9개로 증가시켰을 때, 좌측영상은 0.77(픽셀), 우측영상은 0.49(픽셀)의 정확도 향상을 보였다. 그런데 좌·우측 영상 모두에서 지상기준점의 수가 3개에서 4개로 증가함에 따라, 상대적으로 큰 정확도 향상을 보였다가 수렴하는 양상을 보였다. 이러한 결과는 KOMPSAT-2 RPC 편위의 안정적인 보정을 위해서는 4점 이상의 지상기준점이 필요하다는 것을 나타낸다.

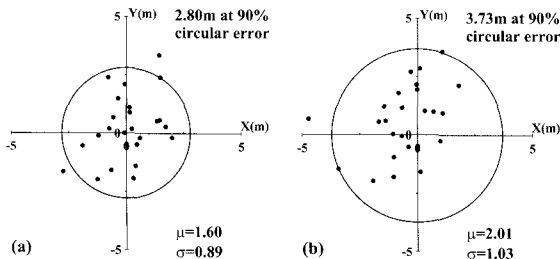


그림 8. 90% circular error, 좌측영상(a), 우측영상(b)

그림 8은 지상기준점의 수가 9점 일 때, 24개 검사점의 수평 오차에 대한 circular error를 나타낸 것이다.

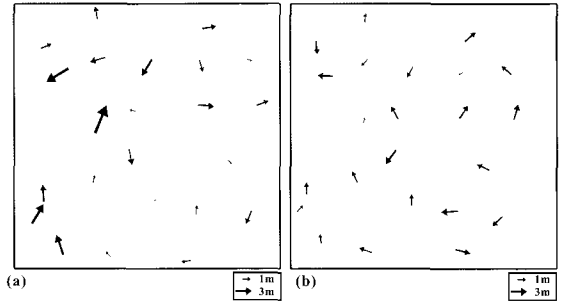


그림 9. 1차 다항식으로 보정된 24개 검사점의 오차 벡터, 좌측영상(a), 우측영상(b)

90% circular error은 좌·우측 영상에서 2.80(m)와 3.73(m)를 나타냈고, 평균과 표준 편차는 1.60(m)와 0.89(m), 2.01(m)와 1.03(m)를 나타냈다. 또한, 그림 9은 좌·우측 영상에서 검사점에 대한 오차 벡터를 보여주고 있다. 오차의 크기와 방향은 특별한 경향성이나 규칙을 가지지 않고 랜덤한 결과를 보여주었다. 그림 2에서 좌·우측 영상의 오차벡터가 비슷한 크기와 방향성을 가졌던 것과는 상이한 결과로, 규칙성을 지니는 오차들은 본 논문에서 제안한 모델을 통해 제거되었다는 것을 의미한다.

이와 같은 결과를 이용하여, 제안된 모델을 이용한 RFM 역변환식의 정확도 역시 검증해 보았다. 그림9는 RFM 역변환식을 보정하지 않았을 때, 33개의 지상점에서 3차원 지상좌표의 오차의 크기와 빈도를 나타낸 것이다. 이 때, X, Y방향의 RMSE는 WGS84 타원체에서 경도, 위도의 오차를 m단위로 환산한 것이고, Z 방향의 RMSE는 타원체고(m)에 대한 RMSE이다. 또한, 표 6는 오차벡터의 평균과 표준편차를 보여주고 있다.

표 6. 보정 전 오차벡터의 평균과 표준편차

파라미터	X방향 오차	Y방향 오차	Z방향 오차
평균(m)	-15.39	-114.00	-101.10
표준편차(m)	2.25	5.28	2.61

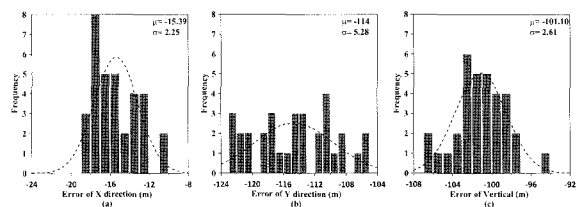


그림 10. 오차의 보정 전 33개 지상점에서 X방향(a), Y방향(b), Z방향(c) 오차의 크기와 히스토그램

RFM 역변환식을 이용하여 33개 지상점의 3차원 좌표를 계산하였을 때, 오차의 평균과 표준편차는 크기는 X방향의 경우, -15.39(m)와 2.25(m)이었고, Y방향은 -114(m)와 5.28(m), Z방향은 -101.10(m)와 2.61(m)이었다. RFM 주변환식으로 계산된 지상점에 대한 영상좌표의 오차(표2)와 동일하게 지상점에 대한 3차원 좌표의 경우에도 절대오차는 크지만 상대오차는 매우 작은 값을 나타냈다. 또한, Y방향 절대오차와 상대오차가 X방향 오차보다 더 큰 결과를 보여주었는데, 이는 영상 키프방향의 절대오차와 상대오차가 영상라인방향의 절대오차와 상대오차보다 상대적으로 큰 값을 가졌던 결과와 유사한 것이다. 반면, Z방향의 절대오차의 크기는 Y방향 절대오차의 크기와 유사한 값을 지녔고, 상대오차의 경우에는 X방향 오차와 비슷한 값을 보여주었다. 그림10은 X, Y, Z 방향 오차의 크기와 빈도를 나타낸 것으로, 다른 두 방향에 비해 Y방향의 오차 분포가 가장 조밀 하지 못한 결과를 보여 주었다.

RFM 역변환식을 제안된 모델로 보정하기 위하여, 9개의 지상기준점을 이용하여 RPC 편의 보정 계수를 구하고, 테일러 급수 전개를 이용하여, 보정된 RFM 역변환식을 구하였다. 표 7는 지상기준점 9점과 검사점 24점에 대해 RMSE를 구한 결과이다. 또한 그림 11은 24개 검사점에서 X, Y, Z 방향의 오차의 크기와 빈도를 나타낸 것이며, 그림 12은 평면 오차 벡터의 크기와 방향, 수직 오차의 크기를 나타내고 있다.

표 7. 오차의 보정 후 오차벡터의 평균과 표준편차

파라미터	X방향 오차	Y방향 오차	Z방향 오차
평균(m)	0.22	0.5	1.04
표준편차(m)	1.75	1.30	1.98
RMSE(m)	1.72	1.37	2.20
Total RMSE(m)	2.20		
	3.11		

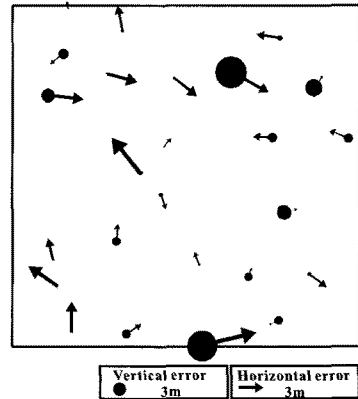


그림 12. 오차의 보정 후 24개 검사점의 수평 오차 벡터, 수직 오차

표 7의 결과와 같이 9개의 지상기준점을 이용하여 24개 검사점에 대한 3차원 좌표를 구했을 때, X방향, Y방향, Z방향에 대한 RMSE는 각각 1.72(m), 1.37(m), 2.20(m)였고, 수평 방향 RMSE는 2.20(m), Total RMSE는 3.11(m)를 나타냈다. 또한 그림 12과 같이 24개 검사점에 대한 평면 오차벡터의 크기와 방향, 수직 오차의 크기는 매우 불규칙한 결과를 보여 주었다. 그림 2에서 오차의 크기와 방향이 일정했던 것과는 차이가 있는 것으로, 제안한 모델을 이용한 좌표의 보정이 그림 2에서 보여준 공통된 경향의 오차를 모두 보정했다는 것을 의미한다. 이는 제안한 모델이 비교적 정확도가 높고 영상에 고루 분포하는 지상기준점을 이용하여 KOMPSAT-2영상 기하를 보정하였을 때, 4m 이하의 정확도로 보정할 수 있다는 것을 의미한다.

#### 4. 결론

이 연구에서는 KOMPSAT-2 위성영상에서 제공하는 RPC를 이용하여 계산된 영상 기하의 오차를 보정하기 위하여, RFM 주변환식과 역변환식으로 계산된 영상좌표, 지상좌표와 실제 좌표사이의 오차를 분석하였고, 나타난 결과를 이용하여 1차 다항식 보정 모델을 제안하였다. 제안된 모델의 정확도를 검증하기 위하여 1쌍의 스테레오 영상과 영상 내의 33개 지상점이 이용되었으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 좌·우측 영상에서 RFM 주변환식 이용하여 33개 지상점에 대한 영상좌표를 계산 했을 때, 영상 키프

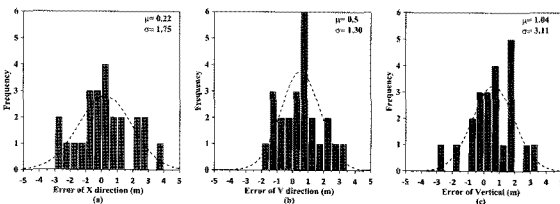


그림 11. 오차의 보정 후 24개의 검사점의 X방향(a), Y방향(b), Z방향(c) 오차의 크기와 히스토그램



방향 오차의 평균은 각각 4.54(픽셀)과 66.09(픽셀), 표준편차는 1.21(픽셀)과 2.09(픽셀)을 나타냈으며, 영상 라인방향 오차의 평균은 각각 -71.24(픽셀)과 -142.84(픽셀), 표준편차는 6.37(픽셀)과 4.03(픽셀)으로 영상 컬럼방향과 라인방향의 오차의 절대오차는 크지만 상대오차는 매우 작은 값을 나타냈다. 각 방향의 오차를 1차 다항식에 피팅한 결과 영상 컬럼방향 오차는 영상 라인방향으로 좌측 영상의 경우 0.95, 우측영상의 경우에는 0.87, 영상 라인방향 오차는 영상 컬럼방향으로 각각 0.24, 0.51의 결정 계수( $R^2$ )를 나타냈다. 또한 영상 컬럼방향 오차를 영상라인 방향으로 피팅한 경우의 RMSE는 좌·우측 영상에서 1.49(픽셀)과 1.44(픽셀)을 나타냈고, 영상 라인방향 오차를 영상 컬럼방향으로 피팅한 경우에는 1.08(픽셀)과 1.44(픽셀)을 나타냈다. 이는 1차 다항식 보정 모델을 KOPSAT-2 위성영상에 적용 할 수 있다는 것을 의미한다.

둘째, 9개의 지상기준점과 24개의 검사점을 이용하여, 제안된 모델과 기존 IKONOS에 적용되었던 보정 모델의 위치 정확도를 실험하였다. 제안된 모델과 기존의 모델을 이용하여 계산된 Total RMSE는 좌측영상의 경우, 1.83(픽셀)과 5.73(픽셀), 우측영상의 경우 각각 2.25(픽셀)과 4.14(픽셀)을 나타냈다. 결과적으로, 본 논문에서 제안된 모델은 기존의 보정 모델과 비교하여 최대 3배 이상 향상된 위치 정확도를 나타냈다.

셋째, 지상기준점의 수와 배치유형 따른 정확도의 상관관계를 알기 위하여 지상기준점의 수를 2점부터 9점까지 하나씩 늘려가면서 실험하였다. 지상기준점의 수를 2개에서 4개로 증가시켰을 때, 좌측영상은 0.83(픽셀), 우측영상은 0.39(픽셀)의 정확도 향상을 보였다. 그런데 지상기준점의 수가 4점 이상인 경우는 RMSE가 크게 좋아지지 않는 결과를 보였다. 이러한 결과는 제안된 모델을 이용하여, 안정적으로 KOMPSAT-2 RPC 편의를 보정하기 위해서는 최소 4점 이상의 지상기준점이 필요하다는 것을 나타낸다.

넷째, 9개의 지상기준점과 24개의 검사점을 이용하여, 제안된 모델을 이용한 RFM 역변환식으로 3차원 좌표를 계산하였다. 그 결과 수평 방향 RMSE는 2.20(m), Total RMSE는 3.11(m)를 나타냈다.

## 감사의 글

"논문의 질적향상에 도움을 주신 익명의 심사위원님

께 감사의 말씀을 드립니다. 이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(2010-0015268)과 공간정보전문인력 양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임."

## 참고문헌

- 안기원, 임환철, 서두천 (2002), 고해상도 인공위성 영상 데이터의 기하보정을 위한 RFM의 적용, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 20권, 제 2호, pp. 51~60.
- 김감래, 안병구, 김명배 (2003), SPOT 영상을 사용한 3차원 모델링시 지상기준점수에 따른 정확도 평가, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 21권, 제 1호, pp. 61~69.
- 나재홍, 조우석 (2003), IKONOS RPC를 이용한 지상좌표 결정, 대한토목학회지, 대한토목학회, 제 23권, 제 1호, pp. 123~129.
- 이진덕, 소재경 (2009), 고해상도 위성영상의 RF모델 기반 지상위치의 정확도 개선 알고리즘 개발, 한국지리정보학회지, 한국지리정보학회, 제 12권, 1호, pp. 106~118.
- 정형섭 (2010), SPOT 4 영상의 기하보정을 위한 시선 벡터 조정 모델, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 28권, 제 2호, pp. 133~142.
- Tao, C.V. and Y, Hu. (2000), Image rectification using a generic sensor model - rational function model, *IAPRS*, Vol. 33, Part. B3, pp. 359~366.
- Tao, C.V. and Y, Hu. (2002), 3D Reconstruction methods based on the rational function model, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, ASPRS*, Vol.68, No. 7, pp. 705~714.
- Di, K, R. Ma and R, Li. (2003), Rational functions and potential for rigorous sensor model recovery, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, ASPRS*, Vol.69, No. 1, pp. 33~41.
- 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.