

## 고해상도 위성영상의 센서모형화 방법 비교

### Comparison Among Sensor Modeling Methods in High-Resolution Satellite Imagery

김의명\* · 이석군\*\*

Kim, Eui Myoung · Lee, Suk Kun

#### Abstract

Sensor modeling of high-resolution satellites is a prerequisite procedure for mapping and GIS applications. Sensor models, describing the geometric relationship between scene and object, are divided into two main categories, which are rigorous and approximate sensor models. A rigorous model is based on the actual geometry of the image formation process, involving internal and external characteristics of the implemented sensor. However, approximate models require neither a comprehensive understanding of imaging geometry nor the internal and external characteristics of the imaging sensor, which has gathered a great interest within photogrammetric communities. This paper described a comparison between rigorous and various approximate sensor models that have been used to determine three-dimensional positions, and proposed the appropriate sensor model in terms of the satellite imagery usage. Through the case study of using IKONOS satellite scenes, rigorous and approximate sensor models have been compared and evaluated for the positional accuracy in terms of acquirable number of ground controls. Bias compensated RFM(Rational Function Model) turned out to be the best among compared approximate sensor models, both modified parallel projection and parallel-perspective model were able to be modelled with a small number of controls. Also affine transformation, one of the approximate sensor models, can be used to determine the planimetric position of high-resolution satellites and perform image registration between scenes.

**Keywords :** *high resolution, sensor modeling, satellite imagery, positional accuracy, photogrammetry*

#### 요 지

고해상도 위성의 센서모형화는 도면화와 지형공간정보(Geo-spatial Information System)의 응용을 위해서는 필수적인 단계이다. 영상과 대상물과의 기하학적인 관계를 규정하는 센서모형은 크게 엄밀(rigorous)센서모형화와 간략(approximate)센서모형화의 두 가지로 나눌 수 있다. 엄밀센서모형화는 위성의 실제적인 촬영기하를 고려한 것으로 센서의 내외부적인 특성을 알고 있어야 하는 반면에 간략센서모형화 방법은 영상취득기하의 종합적인 이해나 센서의 내외부적인 특성정보를 필요로 하지 않기 때문에 사진측량 커뮤니티에서 많은 관심이 증대되고 있다. 본 연구에서는 고해상도 위성영상의 3차원 위치결정에 이용되고 있는 엄밀센서모형과 다양한 간략센서모형에 대해 비교연구를 수행하였으며 위성영상의 이용목적에 따른 적합한 모형화 방법을 제안하였다. IKONOS 위성영상을 이용한 사례연구를 통하여 엄밀센서모형과 간략센서모형에 대한 비교연구를 수행하였으며, 수집 가능한 지상기준점에 따른 위치정확도를 평가하였다. 간략센서모형화 방법 중에서 편의보정된 다항식비례모형(bias compensated RFM)이 가장 우수하였으며 개량평행투영모형(modified parallel projection)과 평행-중심투영모형(parallel-perspective model)은 적은 수의 기준점을 이용하여 센서모형화가 가능하였다. 또한 간략센서모형화 방법 중 부등각 사상변환(affine transformation)은 고해상도 위성의 수평위치결정과 영상간의 등록에 활용가능하다.

**핵심용어 :** 고해상도, 센서모형화, 위성영상, 위치정확도, 사진측량

#### 1. 서 론

광학, 위성역학 등의 기술발달에 힘입어 상업용 고해상도 위성의 지상해상도는 1m~cm 수준에 이르기까지 대상물을 식별할 수 있게 되었다. 또한 위성영상의 처리기술은 항공사진측량분야에서 거의 독점적으로 다루었던 지도제작의 영역에 이르기까지 그 응용분야를 확대하고 있는 실정이다 (Gruen, 2000).

고해상도 위성영상의 기하학적 모형화는 도면화(mapping)와 지형공간정보(Geo-spatial information system)의 응용을 위해서는 필수적인 단계이다. 센서모형화는 대상물과 영상간의 관계를 설정하는 것으로 위성영상을 처리하기 위해서는 선행되어야 할 과정이다. 일반적으로 센서모형화는 크게 엄밀센서모형화(rigorous sensor modeling)와 간략센서모형화(approximate sensor modeling)의 두 가지로 나눌 수 있다. 엄밀센서모형화는 위성의 실제적인 촬영기하를 고려한 것으로

\*정회원 · 교신저자 · (주)한국공간정보통신 3차원GIS기술연구팀 팀장 (E-mail : kemyoung@ksic.net)

\*\*정회원 · 영남건설기술교육원 겸임교수 (E-mail : aimsk@hitel.net)

로 센서의 내·외부적인 특성을 알고 있어야 한다. 센서의 내·외부적인 특성은 주점위치, 초점거리, 왜곡계수를 나타내는 내부표정요소와 센서의 자세와 위치를 나타내는 외부표정요소를 나타낸다.

센서의 외부표정요소는 GPS/INS를 이용하는 직접지형보정과 지상기준점을 이용하는 간접지형보정으로 나누며 직접지형보정의 경우는 GPS/INS의 편위(또는 오차)가 3차원 위치 결정에 직접적으로 영향을 미치게 된다. 간접지형보정의 경우는 촬영시야각이 좁아짐에 따라 외부표정요소간의 상관관계가 높아지는 반면에 직접지형보정의 경우는 내·외부표정요소의 편위에 따라 대상물의 위치가 달라질 수 있다(Kim 외 5인, 2005).

뿐만 아니라 직접지형보정을 위한 정보는 영상제공업체에 따라 비공개되기도 하는 단점이 있다. IKONOS 영상을 제공하고 있는 Space Imaging사의 경우는 기존의 위성영상에서 제공하던 위성궤도정보와 센서정보를 제공하지 않고 다항식비례모형(RFM : Rational Function Model)의 다항식비례계수(RPC : Rational Polynomial Coefficients)를 제공하고 있다. 또한 Digital Globe사에서 제공하고 있는 QuickBird 영상의 경우에도 다항식비례계수를 RPB 파일형태로 제공하고 있다(Digital Globe, 2006; Grodecki 외 1인, 2001).

고해상도 위성을 제공하는 업체의 증가와 이를 이용한 응용분야가 확대됨에 따라 센서모형화에 대한 다양한 연구가 수행되고 있다(Fraser 외 1인, 2004; Valadan Zoej 외 1인, 2003; Zhang 외 1인, 2002). 대표적인 간략센서모형에는 다항식비례모형(RFM : Rational Function Model), 편위를 보정한 다항식비례모형(bias compensated RFM), 직접선형변환(DLT : Direct Linear Transformation), 평행투영모형(parallel projection model, 또는 2차원부등각사상변환), 개량 평행투영모형(modified parallel projection model), 평행-중심투영모형, 자체보정-직접선형변환(SDLT : Self-calibrating DLT) 등이 있다(Gupta 외 1인, 1997; Hattori 외 4인, 2000; Okamoto 외 3인, 1996; Okamoto 외 4인, 1998). 간략센서모형식은 위성이 대상물을 촬영하는 시간이 수 초 이내이고 궤도가 안정되어 등속도 직선운동을 하며 촬영고도가 높다는 특성을 이용하여 엄밀모형식을 간략화하여 표현하고 있기 때문에 센서의 특성에 대한 정보를 필요로 하고 있지 않다.

대상물의 3차원좌표는 어떤 센서모형화 기법과 지형보정방법을 사용하느냐에 따라 영향을 받게 된다. 이에 따라 위성영상을 이용한 3차원 지형정보 취득 시 요구되는 입력자료와 처리과정이 달라지며 사용목적과 기대결과에 적합한 모형을 선정할 수 있는 기준마련이 요구되고 있다.

본 연구에서는 고해상도 위성영상을 이용하여 엄밀센서모형화와 간략센서모형화방법을 비교하였으며, 위성영상의 이용목적에 따른 적합한 모형화 방법을 제안하였으며 이를 위해 고해상도 위성영상 중 IKONOS 위성영상을 이용하였으며 사례연구분석을 통해 내용을 정리하였다.

2절과 3절에서는 엄밀센서모형과 간략센서모형의 특징에 대해 각각 살펴보고, 4절에서는 IKONOS 위성영상을 이용하여 수행한 센서모형화에 대한 비교·분석을 하고 마지막으로 5절에서는 본 연구를 통해 도출된 결론을 정리하였다.

## 2. 엄밀센서모형

엄밀센서모형은 센서의 촬영기하와 물리적인 특성을 반영함으로 물리적 센서모형(physical sensor model)이라고도 한다. 엄밀센서모형은 센서-독립적이기 때문에 센서의 종류에 따라 모형식도 바뀌게 된다. 프레임(frame), 푸시브room(pushbroom), 위스크브room(whiskbroom), 파노라마(panoramic), SAR(Synthetic Aperture Radar)와 같은 센서의 개발에 따라 새로운 센서 자료를 처리하기 위해서는 사용자가 신규센서 모형을 처리할 수 있는 모듈이 추가된 소프트웨어의 구입이나 센서모형에 대한 개발을 수행해야 하는 단점이 있다.

일반적으로 위성은 안정된 선형 등속 운동을 하고, 위성에 탑재된 센서는 일정한 시간 간격으로 빛의 밝기값을 관측함으로써 영상을 취득한다. 한 영상(scene)에 포함된 지상 정보를 취득하기 위해서는 일정한 시간이 소요되고 각 스캔라인(scanline)상의 영상(image)은 중심투영으로 간주할 수 있다. 엄밀센서모형화는 센서의 내부표정요소와 각 영상(image)의 취득시점에 대한 외부표정요소를 필요로 하며 일반적으로 외부표정요소는 영상취득 시 갑자기 변화하지 않는다고 가정한다.

따라서, 위성영상의 경우는 외부표정요소를 시간의 다항식으로 나타내어 식 (1)과 같이 모형화하고 있다. 다항식 모형을 이용한 알고리즘은 각 스캔라인에 대해 항공사진과 마찬가지로 6개의 외부표정요소가 존재하고, 중심 궤도를 갖는 고도위성은 인접한 스캔라인과 상관성이 크므로 스캔라인 수나 스캐닝시간 함수로 외부표정요소를 추정할 수 있다.

따라서 각 스캔라인의 외부표정요소를 시간에 관한 함수로 나타내며 이를 다시 공선조건식을 이용하여 관측방정식을 구성한 다음 각각의 스캔라인을 중심투영으로 간주하여 최소제곱법을 적용하여 최종 외부표정요소를 결정한다. 최소제곱법을 적용함에 있어 내부표정요소와 6개의 외부표정요소에 대한 초기값 설정이 중요하며 이는 위성영상과 함께 제공되는 헤더에서 그 정보를 취득할 수 있다(El-Manadili 외 1인, 1996; Gupta 외 1인, 1997).

$$\begin{bmatrix} x-x_0-\Delta x \\ y-y_0-\Delta y \\ -f \end{bmatrix} = \lambda M \begin{bmatrix} X-X_0 \\ Y-Y_0 \\ Z-Z_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서,  $x, y$ 는 각 스캔라인의 영상(image)좌표이고  $X, Y, Z$ 는 영상좌표에 대응하는 지상좌표이다.  $x_0, y_0, f$ 는 센서의 내부표정요소를 나타내고  $\Delta x, \Delta y$ 는 영상취득 시 발생하는 센서의 왜곡을 보정하기 위한 것이며  $\lambda$ 는 영상과 지상에 대한 축척계수를 나타낸다.  $X_0, Y_0, Z_0$ 와  $M$ 는 각각 시각에서의 센서의 위치와 회전행렬을 나타내고 있다.

## 3. 간략센서모형

간략센서모형은 센서플랫폼에 무관하기 때문에 엄밀센서모형에 비해 최근에 큰 관심의 대상이 되고 있다. 또한 영상취득을 위한 센서의 기하상태에 대한 정보를 필요로 하지 않기 때문에 서로 다른 형태의 센서에 적용이 가능하고 엄

밀센서모형에 비해 처리방법이 간단하므로 영상의 실시간 처리에 활용되고 있다. 다음은 대표적인 간략모형식을 열거하고 각 모형식의 특징을 설명하였다.

### 3.1 다항식비례모형

다항식비례모형은 센서의 내·외부표정요소를 나타내는 물리적 정보의 사용여부에 따라 지형독립적인(terrain independent) 방법과 지형종속적인(terrain dependent) 방법으로 구분된다(Tao 외 1인, 2002). 지형독립적인 방법의 경우 위성제도정보는 센서에 장착된 GPS 수신기와 지상관제국에서 처리한 GPS정보를 이용하여 결정되고, 센서의 자세는 센서에 장착된 자이로(gyros)에 의해 관측된 정보와 별 추적기(star tracker)정보를 통하여 결정된다.

RPC는 결정된 센서의 내·외부표정요소로부터 가상의 지형독립적인 3차원 지상기준점을 생성하여 추정된다. 그러므로 직접적인 지상기준점관측의 필요성이 없는 반면에 내·외부표정요소의 편이는 대상물의 3차원 위치에 악영향을 미치게 되는 단점이 있다. 이에 반해 지형종속적인 지상기준점을 이용하는 경우는 다항식비례계수를 추정하기 위해서 많은 수의 기준점이 필요로 하나 대상물의 3차원 위치는 상당히 정확하게 결정할 수 있다.

IKONOS에서 제공하는 다항식비례모형의 경우 표준기하보정(GEO-level)의 경우 수평위치정확도는 25 m이고 수직위치정확도는 22 m로 보고되고 있다. 이는 센서의 내외부표정요소를 이용하여 지형독립적으로 대상물의 3차원 위치를 결정한 것으로 추가적인 지상기준점을 사용할 경우 수평위치와 수직위치는 각각 2 m, 3 m의 관측정확도를 얻을 수 있다(Grodecki 외 1인, 2001).

다항식비례모형은 영상좌표와 지상좌표간의 관계를 다항식의 비례형태로 나타낸 것으로 전방 다항식비례모형(forward RFM)과 후방 다항식비례모형(backward RFM)으로 나눌 수 있으며 식 (2)는 전방 다항식비례모형을 나타내고 있다(Tao 외 1인, 2001).

$$\begin{aligned}
 x &= \frac{F_1(X, Y, Z)}{F_2(X, Y, Z)} = \frac{\sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \sum_{k=0}^{m_3} a_{ijk} X^i Y^j Z^k}{\sum_{i=0}^{n_1} \sum_{j=0}^{n_2} \sum_{k=0}^{n_3} b_{ijk} X^i Y^j Z^k} \\
 y &= \frac{F_3(X, Y, Z)}{F_4(X, Y, Z)} = \frac{\sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \sum_{k=0}^{m_3} c_{ijk} X^i Y^j Z^k}{\sum_{i=0}^{n_1} \sum_{j=0}^{n_2} \sum_{k=0}^{n_3} d_{ijk} X^i Y^j Z^k}
 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $x, y$ 는 영상좌표를 나타내고 있으며  $X, Y, Z$ 는 영상좌표에 대응하는 지상좌표를 나타내고 있다. 또한  $a_{ijk}$ ,  $b_{ijk}$ ,  $c_{ijk}$ ,  $d_{ijk}$ 는 다항식비례모형의 계수를 나타내고 이 계수를 조절하는  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$ ,  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$ 는 0~3이고  $i+j+k \leq 3$ 으로 제한된다. 다항식비례모형에서 광학투영에 의한 왜곡은 1차항으로, 지구곡률, 대기굴절, 렌즈왜곡 등에 의한 왜곡은 2차항으로, 이외의 부가적인 왜곡은 3차항으로 보정하게 된다(Tao 외 4인, 2000).

### 3.2 편이보정된 다항식비례모형

다항식비례모형에서 IKONOS 영상과 같이 제공되고 있는 RPC는 일정량의 위치편의를 발생시키는 것으로 알려져 있다. 따라서, IKONOS 영상과 함께 제공되는 RPC를 이용하여 3차원 위치결정하기 위해서는 추가적인 지상기준점을 이용하여 위치편의를 보정해야 한다. RPC의 편이는 식(3)과 같이 영상좌표에 대한 오차로 가정하여 연구가 수행되었으며 영상좌표에 대해 이동량, 다항식 또는 부등각사상변환(affine transformation) 등을 통하여 보정할 수 있다(Fraser 외 1인, 2003; Gruen 외 1인, 2005; Hanley 외 1인, 2004).

$$\begin{aligned}
 x + \Delta x &= x + a_1 x + a_2 y + a_3 = \frac{F_1(X, Y, Z)}{F_2(X, Y, Z)} \\
 y + \Delta y &= y + a_4 x + a_5 y + a_6 = \frac{F_3(X, Y, Z)}{F_4(X, Y, Z)}
 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, 영상좌표에 대한 이동량인  $\Delta x, \Delta y$ 만을 고려하는 경우는 최소 지상기준점 1점을 이용하여 구할 수 있으며 부등각사상변환을 고려할 경우는 최소 3점 이상의 지상기준점이 필요하다. RPC의 편이를 보정하는 식 (3)은 간편성과 적용성에서 장점이 있다. 즉, 새로운 RPC를 생성하는 것이 아니라 소수의 기준점을 이용하여 편이량을 결정하고 이를 이용하여 원 영상과 함께 제공되는 RPC를 수정하여 3차원 위치를 결정할 수 있다.

### 3.3 직접선형변환

직접선형변환(DLT)은 2차원 상좌표관측기(comparator)에서 3차원 지상좌표계로 직접변환할 목적으로 만들어졌으며 식 (4)와 같이 센서의 내외부표정요소를 필요로 하지 않는다. DLT식은 주로 근거리 사진측량에 활용되어 왔으나 El-Manadili와 Novak (1996)은 SPOT 영상에 대해 위성의 경시촬영과 지구자전에 의한 영상왜곡에 관한 보정을 수행한 후에 지상의 3차원 좌표를 결정하기 위해서 DLT식을 적용하였다.

$$\begin{aligned}
 x &= \frac{L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} \\
 y &= \frac{L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1}
 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,  $L_1 \sim L_{11}$ 은 DLT 매개변수이고  $x, y$ 는 영상좌표 그리고  $X, Y, Z$ 는 이에 대응되는 지상좌표를 나타낸다. 앞서 설명한 RFM을 간략모형식의 가장 일반적인 형태라고 하면 DLT 모형은 RPC의 차수가 1차인 RFM의 특수한 형태라고 할 수 있다.

### 3.4 자체보정-직접선형변환

Wang(1999)은 DLT식에 매개변수  $L_{12}$ 를 추가한 자체보정(self-calibrating) DLT식을 제안하였다. 이 식은 위성이 등속도 직선운동을 한다고 가정하여 유도되었다. 푸시브룸 센서에서 하나의 스캔라인에 공선조건식을 적용하고 외부표정요소를 시간에 관한 다항식으로 가정하였으며 위성 진행방향 축의 회전을 0으로 가정함으로써 식 (5)와 같은 모형을 생성하였다.

$$\begin{aligned} x_p &= \frac{L_1X+L_2Y+L_3Z+L_4}{L_9X+L_{10}Y+L_{11}Z+1} \\ y_p-L_{12}x_p &= \frac{L_5X+L_6Y+L_7Z+L_8}{L_9X+L_{10}Y+L_{11}Z+1} \end{aligned} \quad (5)$$

### 3.5 평행-중심투영모형

평행-중심투영모형은 Gupta와 Hartley에 의해 발표된 센서 모형화 방법으로서 센서는 선형 궤적을 등속으로 움직(등속도 직선운동)이며 고정된 표정요소를 갖는 투영(perspective) 사진기로 간주하였다(Gupta 외 1인, 1997). 지상의 3차원 대상물은 센서를 통해 각 영상(image)에 투영되고 일정시간 동안 취득된 일차원 영상(image)을 모아서 이차원 영상(scene)을 구성한다. 평행-중심투영모형은 식 (6)과 같으며 위성의 진행방향(x)은 평행투영의 특성을 나타내고 스캔라인 방향(y)은 중심투영의 특성을 나타내고 있다.

$$\begin{aligned} x &= A_1X+A_2Y+A_3Z+A_4 \\ y &= \frac{A_5X+A_6Y+A_7Z+A_8}{A_9X+A_{10}Y+A_{11}Z+A_{12}} \end{aligned} \quad (6)$$

### 3.6 평행투영모형

평행투영모형(또는 2차원 부등각사상변환)에서 영상과 대상물과의 관계는 식 (7)과 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 0 \end{pmatrix} = s\lambda M \begin{pmatrix} J \\ K \end{pmatrix} + sM \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

여기서,  $x, y$ : 영상좌표  
 $X, Y, Z$ : 지상좌표  
 $s, \lambda$ : 축척계수  
 $I, J, K$ : 단위투영벡터  
 $\Delta x, \Delta y$ : 이동량  
 $M$ : 회전행렬

$$M = M_\kappa M_\phi M_\omega$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\phi \cos\kappa & \cos\omega \sin\kappa + \sin\omega \sin\phi \cos\kappa & \sin\omega \sin\kappa - \cos\omega \sin\phi \cos\kappa \\ -\cos\phi \sin\kappa & \cos\omega \cos\kappa - \sin\omega \sin\phi \sin\kappa & \sin\omega \cos\kappa + \cos\omega \sin\phi \sin\kappa \\ \sin\phi & -\sin\omega \cos\phi & \cos\omega \cos\phi \end{bmatrix}$$

식 (7)은 축척계수(s), x축과 y축에 대한 이동량( $\Delta x, \Delta y$ ), 3축 회전각( $\omega, \phi, \kappa$ ), 평행투영계수(I, J, K)의 8개 매개변수를 내포하고 있는 비선형식으로 이를 선형식으로 나타내면 식 (8)과 같다(김의명 외 1인, 2005; Morgan 외 3인, 2004, Okamoto 외 4인, 1998).

$$\begin{aligned} x &= A_1X+A_2Y+A_3Z+A_4 \\ y &= A_5X+A_6Y+A_7Z+A_8 \end{aligned} \quad (8)$$

선형 CCD스캐너에 의해 취득된 원 영상은 위성의 진행방향은 평행투영이고 스캔라인 방향은 중심투영이다. 따라서 평행투영모형을 적용하기에 전에 스캔라인 방향으로 중심투영을 평행투영으로 변환하는 과정이 필요하다. 이러한 변환 과정은 식 (9)를 이용하여 스캔라인 방향에 대해 영상좌표를 변경하여 평행투영으로 만들 수 있으며 이때 스캐너의 좌우회전각(roll angle)에 대한 정보가 필요하다. 중심투영을 평행

투영으로 변환한 후에는 최소 4개의 지상기준점을 이용하여 평행투영모형의 매개변수를 추정할 수 있다. IKONOS와 QuickBird와 같은 고해상도 위성영상은 촬영시야각이 각각 0.93°와 2.1°로 아주 좁기 때문에 스캔라인 방향에 대해서도 평행투영으로 가정할 수 있다(Dial 외 4인, 2003; Dial 외 1인, 2004). 평행투영모형은 촬영시야각이 좁은 고해상도 위성에서 엄밀모형식을 대체할 수 있는 간략모형식이다.

$$y' = \frac{y}{1 - \frac{y \cdot \tan\omega}{f}} \quad (9)$$

여기서,  $y'$ 는 평행투영된 좌표이고  $\omega$ 는 좌우회전각을 나타낸다.

### 3.7 개량평행투영모형

개량평행투영모형(modified parallel projection)은 식 (8)의 평행투영모형과 중심투영을 평행투영으로 변환하는 과정인 식 (9)를 결합하여 유도할 수 있으며 식 (10)과 같다(김의명 외 1인, 2004; Morgan 외 3인, 2004).

$$\begin{aligned} x &= A_1X+A_2Y+A_3Z+A_4 \\ y &= \frac{A_5X+A_6Y+A_7Z+A_8}{1 + \frac{\tan\omega(A_5X+A_6Y+A_7Z+A_8)}{f}} \end{aligned} \quad (10)$$

개량평행투영모형에서 스캐너의 좌우회전각은 최소 5점의 지상기준점을 이용하여 다른 매개변수와 동시에 추정할 수도 있다.

### 3.8 부등각사상변환

부등각사상변환은 회전, 두 축의 비수직성, 두 축의 축척 변화와 평행이동의 6가지 매개변수를 갖고 있으며 선형식으로 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} x &= A_1X+A_2Y+A_3 \\ y &= A_4X+A_5Y+A_6 \end{aligned} \quad (11)$$

부등각사상변환은 중·저해상도 영상의 기하보정을 위하여 많이 사용되어 왔다. 중·저해상도 위성의 경우 촬영고도가 높기 때문에 촬영대상지역은 상대적으로 고도변화가 아주 적은 동일한 평면으로 가정할 수 있고 이는 곧 평행투영모형에서 Z항이 소거된 6개의 매개변수를 갖는 부등각사상변환으로 모형화될 수 있다(Baltsavias 외 2인, 2001).

## 4. 센서모형화의 방법비교

### 4.1 실험자료

앞서 열거한 센서모형의 비교를 위해서 본 연구에서는 표 1에 나타낸 것과 같이 방사보정만 된 IKONOS 입체영상을 이용하였다.

엄밀모형식과 간략모형식에 대해 지상기준점의 개수, 분포 등에 따른 위치정확도를 평가하기 위해 대전지역을 대상으로 GPS 측량을 수행하였다. 그림 1은 IKONOS 위성의 센서모형화를 위해 관측된 72개의 GPS 관측점의 분포도를 나

표 1. IKONOS 입체영상(stereo pair)의 정보

		좌측영상	우측영상
영상취득시각		2001-11-19 02:18 GMT	2001-11-19 02:19 GMT
영상처리수준		방사보정(radiometrically corrected)	
지상해상도	위성진행방향	0.93 m	0.88 m
	스캐닝방향	0.93 m	0.91 m

타내고 있다. 취득된 지상기준점의 일부는 센서모형화를 위한 기준점으로 사용되고 일부는 모형화의 결과를 비교하기 위한 검사점으로 사용되었다. 센서모형화의 정확도 평가는 평균제곱근오차(RMSE : Root Mean Square Error)를 이용하였다.

위성영상으로 부터 지도제작을 목적으로 할 때 그 처리과정은 위성영상의 취득, 지상기준점 측량, 센서모형화, 에피폴라 영상생성, 도화 및 지도편집 순으로 이루어진다. 이러한 각 과정에서 센서모형화의 결과는 각 단계의 결과에 직접적인 영향을 미치는 주요한 요인이다.

본 연구에서는 고해상도 위성영상에서 활용되고 있는 센서모형화 기법들에 대한 비교를 위해서 엄밀센서모형화 기법과 간략센서모형화 기법에 대해 연구를 수행하였으며 72개의 지상기준점을 여러 가지로 조합하여 기준점의 개수를 변화했을 때 센서모형화 기법에 대한 결과를 분석하였다.

#### 4.2 센서모형화

본 연구에서는 센서모형화의 비교를 위해 표 2와 같이 8가지 모형에 대해 실험을 수행하였다. 센서모형화의 비교를 위해 사용된 기준점과 검사점의 개수의 합은 72개로서 이들

점들은 GPS측량을 통해 관측된 점이다. 표 2에서 X축은 위성의 진행방향을 나타내고 Y축은 스캔라인 방향이다. 비교된 모형식에서 수평위치에 대한 평가만 가능한 부등각사상변환을 수행한 것은 위성영상의 다양한 활용측면을 고려하여 사용자에게 제시하기 위해서 이다.

IKONOS 위성영상에 엄밀센서모형식을 적용하기 위하여 센서의 내부표정요소에 해당하는 초점거리는 10m로 설정하였으며 위성의 외부표정요소의 초기값은 평행투영모형으로부터 결정된 매개변수값을 참고하여 사용하였다(Gruen, 2000).

엄밀센서모형은 간략모형식에 비해 센서의 내·외부적인 특성과 상대적으로 많은 수의 기준점을 필요로 한다. 본 연구에서는 간접지형보정을 이용하여 위성의 이동궤적을 선형직선운동을 하는 1차 다항식으로 모형화하였으며 9~10개의 기준점(EX\_D1, EX\_E1)을 이용하였을 때 대상물의 위치오차가 대략  $\pm 2.5$  m로 나타났다. 이용 가능한 지상기준점의 수가 증가함(EX\_F1, EX\_G1)에 따라 점진적으로 위치오차가 줄어들었으나 10개의 기준점을 사용할 때와 비교해서 크게 차이가 없음을 알 수 있다. 엄밀센서모형은 센서의 내·외부표정요소를 알고 있고 지도제작 목적이거나 대상물의 3차원 위치를 비교적 정확하게 결정하기 위해서 선택할 수 있는 방법이다. 엄밀센서모형은 센서모형화에 대한 풍부한 경험이 요구되는 방법으로 일반 사용자들이 쉽게 접근하기는 어려운 방법이다.

간략센서모형화 방법 중 편의보정된 RPC(편의보정\_RPC)의 경우는 가장 적은 수의 기준점을 이용하여 센서모형화를 수행할 수 있는 방법이며 2점의 지상기준점(EX\_A0)으로 엄밀센서모형화에 가장 근접한 결과를 나타내고 있다. 이는

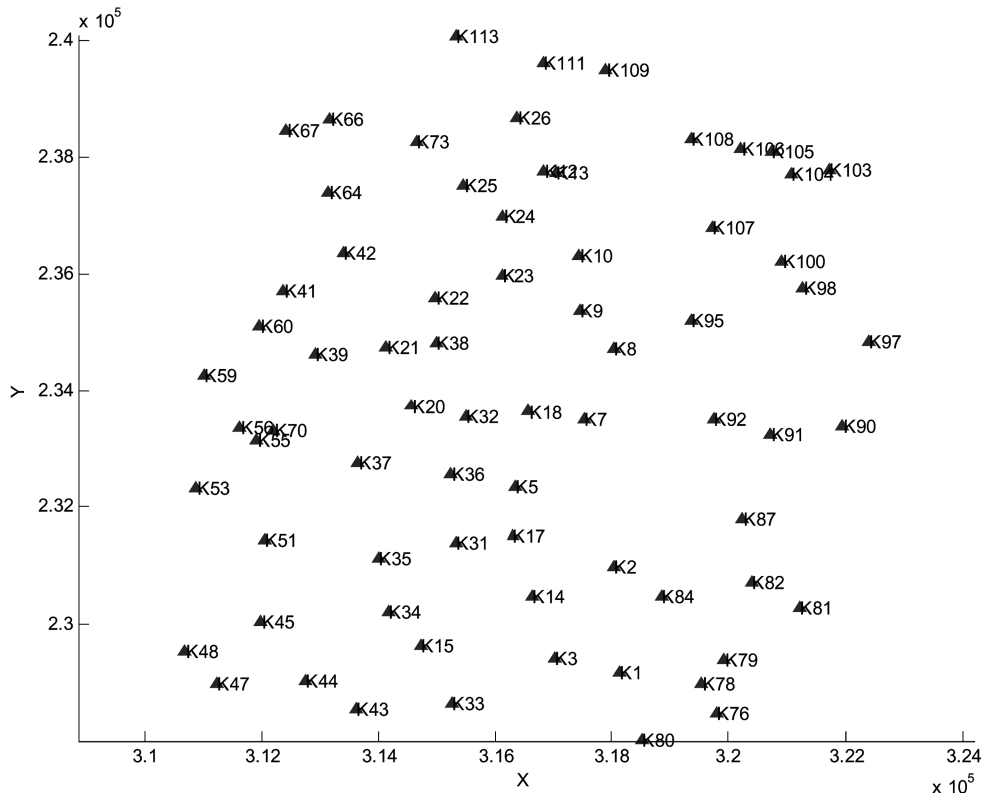


그림 1. 지상기준점의 분포도

표 2. 센서모형화 방법 비교

ID	기준점수	검사점수	모형식	평균제곱근오차(m)				
				X	Y	Z	XY	XYZ
EX_A0	2	70	편의보정_RPC	1.248	1.442	1.377	1.907	2.353
EX_B1	7	65	엄밀센서모형	4.614	2.495	16.205	5.246	17.033
EX_B2			평행투영모형	1.516	4.070	7.913	4.343	9.026
EX_B3			개량평행투영모형	1.496	1.386	7.329	2.039	7.608
EX_B4			평행-중심투영	1.489	1.993	6.868	2.488	7.304
EX_B5			직접선형변환	7.771	4.495	7.484	8.978	11.688
EX_B6			자체검정-DLT	48.425	7.891	3.869	49.063	49.216
EX_B7			부등각사상변환	1.287	6.496	-	6.622	-
EX_C1	8	64	엄밀센서모형	1.361	1.831	3.360	2.281	4.061
EX_C2			평행투영모형	1.312	4.001	6.629	4.211	7.853
EX_C3			개량평행투영모형	1.289	1.446	6.149	1.937	6.447
EX_C4			평행-중심투영	1.282	1.647	5.715	2.087	6.084
EX_C5			직접선형변환	3.153	2.404	6.389	3.965	7.519
EX_C6			자체검정-DLT	3.093	2.338	6.335	3.877	7.427
EX_C7			부등각사상변환	1.262	6.590	-	6.710	-
EX_D1	9	63	엄밀센서모형	1.172	1.444	1.859	1.859	2.629
EX_D2			평행투영모형	1.285	4.230	6.012	4.421	7.463
EX_D3			개량평행투영모형	1.255	1.065	5.507	1.646	5.748
EX_D4			평행-중심투영	1.245	1.412	4.853	1.883	5.206
EX_D5			직접선형변환	3.232	2.672	6.430	4.193	7.676
EX_D6			자체검정-DLT	3.817	2.841	6.679	4.759	8.201
EX_D7			부등각사상변환	1.279	6.413	-	6.539	-
EX_E1	10	62	엄밀센서모형	1.084	1.276	1.854	1.674	2.498
EX_E2			평행투영모형	1.196	4.081	6.437	4.253	7.715
EX_E3			개량평행투영모형	1.169	1.151	6.056	1.641	6.274
EX_E4			평행-중심투영	1.153	1.670	5.227	2.029	5.607
EX_E5			직접선형변환	3.510	2.691	6.839	4.423	8.145
EX_E6			자체검정-DLT	3.580	2.750	6.879	4.515	8.229
EX_E7			부등각사상변환	1.200	6.410	-	6.522	-
EX_F1	15	57	엄밀센서모형	1.099	1.474	1.663	1.838	2.479
EX_F2			평행투영모형	1.181	3.776	5.954	3.956	7.149
EX_F3			개량평행투영모형	1.140	1.414	5.427	1.816	5.723
EX_F4			평행-중심투영	1.132	1.716	4.798	2.055	5.219
EX_F5			직접선형변환	3.265	2.334	5.849	4.014	7.094
EX_F6			자체검정-DLT	3.150	2.356	5.530	3.934	6.786
EX_F7			부등각사상변환	1.205	6.084	-	6.202	-
EX_G1	40	32	엄밀센서모형	0.989	1.134	1.373	1.504	2.037
EX_G2			평행투영모형	1.165	3.576	6.684	3.761	7.669
EX_G3			개량평행투영모형	1.135	0.958	6.217	1.485	6.392
EX_G4			평행-중심투영	1.112	1.543	5.370	1.902	5.697
EX_G5			직접선형변환	3.080	1.797	5.691	3.566	6.716
EX_G6			자체검정-DLT	3.003	2.114	5.253	3.673	6.410
EX_G7			부등각사상변환	0.927	5.950	-	6.021	-

IKONOS의 경우 정밀하게 보정된 내부표정요소와 GPS/INS, 별 추적기 등의 다중센서에서 후처리하여 결정된 외부표정요소, 그리고 이를 이용하여 생성된 가상의 3차원 좌표로 RPC 계수가 산출되었기 때문에 엄밀모형식을 대체하고 있기 때문이다.

편의보정된 RPC는 엄밀모형에 비해서는 좀 더 쉽게 센서 모형화를 수행할 수 있는 방법이며 위치정확도 또한 엄밀모형과 거의 유사한 결과를 얻을 수 있을 뿐만 아니라, 적은 수의 기준점으로도 3차원 위치결정이 가능한 방법이다. 이러한 편의보정된 RPC 모형은 센서의 종류에 관계없이 모형화

가 가능한 방법으로 위성을 제작하고 관리하는 기관에서 일반사용자에게 제공할 수 있는 방법이다. 대부분의 위성영상 처리가 가능한 상업용 소프트웨어는 RPC를 이용한 센서모형화 뿐만 아니라 편의보정된 RPC 모형이 이용가능하며, 센서모형화를 거친후에 입체영상을 이용하여 에피폴라 영상을 생성하거나 DEM 제작이 가능하다.

평행-중심투영과 개량평행투영모형은 편의보정된 RPC 모형을 제외한 비교된 간략센서모형화 방법 중에서 가장 좋은 결과를 나타내고 있으며 개량평행투영모형은 사용된 지상기준점으로부터 좌우회전각을 추정하여 스캔라인 방향에 대한 축척변화를 고려하기 때문에 평행-중심투영모형에 비해 상대적으로 스캔라인 방향(Y축)에 대한 오차가 적게 나타나고 있다. 개량평행투영모형에서 사용된 지상기준점이 대상지역을 대표하는 지형특성을 가지고 있을 경우는 좌우회전각이 잘 추정될 수 있지만 그렇지 않을 경우는 평행-중심투영 모형에 비해 스캔라인 방향에 상대적으로 큰 오차를 나타낼 수 있다.

평행-중심투영과 개량평행투영모형은 엄밀센서모형에 비해 적은 수의 기준점인 7개(EX\_B3, EX\_B4)를 이용할 때에도 3차원 위치결정이 가능한 것을 알 수 있다. 이 방법은 기준점의 확보가 용이하지 않은 비접근지역이나 접경지역에 적용 가능한 방법으로 특히 이 방법은 에피폴라 모형식을 이용할 수 있는 장점이 있다(김의명 외 1인, 2005).

평행투영모형은 평행투영을 특성을 갖고 있는 위성의 진행방향(X축)에 대해서는 좋은 결과를 나타내는 반면에 스캔라인 방향에 대한 축척변화를 고려하지 못하기 때문에 스캔라인 방향에 대한 오차가 상대적으로 크게 나타나고 있다(EX\_B2, EX\_C2, EX\_D2, EX\_F2, EX\_G2). 그러나 이 모형의 선행연구사례를 통해 알 수 있듯이 위성영상으로부터 y-시차가 소거된 에피폴라 영상을 생성할 수 있고 이를 이용한 수치고도모형의 생성이 상대적으로 쉽다(김의명 외 2인, 2005).

직접선형변환(DLT)과 자체검정-DLT 모형의 경우는 위성의 진행방향과 스캔라인 방향에 대해 앞서 비교한 개량평행투영, 평행투영, 평행-중심투영 모형에 비해 기준점의 수가 적을 경우(EX\_B5, EX\_B6) X, Y축에 대한 오차가 크게 나타나고 있으며 IKONOS와 같이 촬영시야각이 좁은 고해상도 위성영상에는 모형식이 잘 맞지 않는 것으로 사료된다.

자체검정-DLT 모형에서 기준점을 7개 이용한 EX-B6의 경우는 위성의 진행방향(X)의 오차가 특히 많이 나타나고 있는데 이는 위성의 진행방향을 중심투영으로 가정한 모형식 자체의 문제와 미지수를 결정하기 위한 관측값의 잉여도 등이 전반적으로 낮기 때문으로 추정된다. 직접선형변환은 주로 근거리 사진측량에서 대상물의 3차원 위치결정이나 센서의 내외부표정요소를 역추적하기 위한 방법으로 많이 활용되었다.

부등각사상변환의 경우는 4~5점의 기준점을 이용하여 센서모형화를 할 수 있는 방법으로 위성의 진행방향(X축)에 대해서는 아주 좋은 결과를 나타내고 있는 반면에 스캔라인 방향(Y축)에 대해서는 평행투영모형과 같이 상대적으로 취약한 것을 알 수 있다. 이 방법은 고해상도 위성의 수평위치

결정과 위성영상간의 등록(registration)에 활용가능하고 촬영 고도가 높고 영상의 공간해상도가 낮은 위성영상의 경우 직접적으로 기하보정에 이용가능하다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 고해상도 위성영상에 대한 엄밀센서모형과 간략센서모형을 비교하였으며 IKONOS 영상을 이용한 사례 연구를 수행하였다. 엄밀센서모형식은 센서의 내·외부적인 특성에 대한 이해를 필요로 할 뿐만 아니라 고해상도 위성영상의 경우는 영상제공업체에 따라 이에 대한 정보를 제공하고 있지 않은 경우가 있다. 뿐만 아니라 센서의 종류에 거의 상관없이 모형화가 가능하고 사용자가 쉽게 모형화를 할 수 있는 다항식비례계수를 제공하는 경우가 많다. 다항식비례계수를 이용하는 다항식비례모형은 직접 지형보정에 의한 것으로 센서모형화를 위해 1~3점 정도의 적은 수의 기준점을 이용하여 엄밀센서모형과 유사한 결과를 얻을 수 있다.

간략센서모형화 방법 중에서는 다항식비례모형을 제외한 개량평행투영모형과 평행-중심투영모형이 10점 미만의 지상기준점을 이용하여도 센서모형화가 안정적으로 가능하였으며 기준점 수의 증가에 따라 정확도가 조금씩 향상되었다. 평행투영모형은 위성의 진행방향에 대해서는 좋은 결과를 나타낸 반면 스캔라인 방향에 대해서는 축척변화를 고려하지 못하여 상대적으로 많은 오차를 포함하였다.

근거리사진측량에 많이 이용되었던 직접선형변환과 SPOT 위성영상을 위해 고안된 자체검정-DLT모형식은 촬영시야각이 좁은 IKONOS 위성영상에는 잘 맞지 않는 것으로 나타났다. 안정적인 센서모형화를 위해서 상대적으로 많은 기준점을 필요로 하였다. 부등각사상변환은 고도값을 고려하지 못하는 특성으로 인하여 고해상도 위성의 수평위치결정과 위성의 고도가 높고 지형의 고저가 많지 않은 지역에 대해 직접적인 기하보정에 이용될 수 있다.

비교된 다양한 센서모형화 방법들은 그 사용목적과 확보 가능한 정확도 등을 고려하여 적절한 센서모형화 방법을 선택하는 것이 중요하며 엄밀센서모형은 지도제작과 DEM 생성을 위해서 활용되고 있는 모형화 방법인 반면에 자료처리 과정이 복잡한 단점이 있다. 간략센서모형화 방법은 엄밀센서모형화 방법에 비해 자료처리과정이 비교적 간단하기 때문에 웹기반의 사진측량의 구현과 비접근 지역이나 접경지역에서 기준점의 확보가 쉽지 않은 지역에 활용가능 할 것으로 사료된다.

본 연구에서는 센서모형화를 위해 주로 점(point) 형태의 기준점을 사용하였으나 최근에는 선형(linear feature)정보를 센서모형화에 이용하거나 점과 선형정보를 혼용하여 이용하는 연구가 진행되고 있으며 향후 이들 정보를 이용한 센서모형화 방법에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 참고문헌

김의명, 김성삼, 유환희(2005) 평행투영모형에 의한 IKONOS 위성영상의 수치고도모형 생성, 한국지형공간정보학회지, 한국지형공간정보학회, 제13권 제1호, pp. 55-61.

- 김의명, 정원조(2004) 영상좌표 보정을 통한 SPOT 위성영상의 모형화 개선, *대한토목학회논문집*, 대한토목학회, 제24권 제4D호, pp. 641-648.
- 김의명, 함창학(2005) 위성영상의 에피폴라 기하특성 분석, *대한토목학회논문집*, 대한토목학회, 제25권 제2D호, pp. 347-352.
- Baltsavias, E., Pateraki, M., and Zhang, L. (2001) Radiometric and Geometric Evaluation of IKONOS GEO Images and Their Use for 3D Building Modelling, *Proc. Joint ISPRS Workshop "High Resolution Mapping from Space 2001"*, Hannover, 19-21 September, 21p. (on CDROM).
- Dial, G. and Grodecki, J., (2004) Satellite Image Block Adjustment Simulations with Physical And RPC Camera Models, *ASPRS Annual Conference Proceedings*, May 2004, Denver, Colorado, (on CDROM).
- Dial, G., Bowen, H., Gerlach, F., Grodecki, J., and Oleszczuk, R., (2003) IKONOS satellite, imagery, and products, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 88, pp. 23-26.
- Digital Globe (2006) QuickBird Image Products - Product Guide Revision 4.7.2.  
<http://www.digitalglobe.com/downloads/QuickBird%20Imagery%20Products%20-%20Product%20Guide.pdf>
- El-Manadili, Y. and Novak, K. (1996) Precision rectification of SPOT imagery using the direct linear transformation model, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 62, No. 1, pp. 67-72.
- Fraser, C. and Hanley, H. (2003) Bias compensation in rational functions for IKONOS satellite imagery, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 69, No. 1, pp. 53-57.
- Fraser, C. S. and Yamakawa, T. (2004) Insights into the affine model for high-resolution satellite sensor orientation, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol. 58, pp. 275- 288.
- Grodecki, J. and Dial, G. (2001) Ikonos geometric accuracy. *Proceedings of Joint ISPRS Workshop on High Resolution Mapping from Space*, 2001. Hanover, 19-21 September 2001 (on CD ROM).
- Gruen, A. (2001) Potential and Limitations of High-Resolution Satellite Imagery. Keynote Address, *21st Asian Conference on Remote Sensing*, Taipei, 4-8 December 2000, p. 13.
- Gruen, A., Li, Z., and Henri Eisenbeiss (2005) 3D Precision Processing of High-Resolution Satellite Imagery, *ASPRS 2005 Annual Conference "Geospatial Goes Global: From Your Neighborhood to the Whole Planet" March 7-11*, Baltimore, Maryland.
- Gupta, R. and Hartley, R. I. (1997) Linear pushbroom cameras, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 189, No. 9, pp. 963-975.
- Hanley, H. B. and Fraser, C. S. (2004) Sensor orientation for high-resolution satellite imagery: Further insights into bias-compensated RPCs, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 35 Part B1, Istanbul, Turkey.
- Kim, E., Morgan, M., Kim, C., Kim, K., Jeong, S., and Habib, A., (2005) Comprehensive Comparisons Among Alternative Sensor Models for High Resolution Satellite Imagery, *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2005. IGARSS '05. Proceedings. 2005 IEEE International, Vol. 8, 25-29 July 2005, pp. 5580 - 5583.
- Morgan, M., Kim, K., Jeong, S., and Habib, A. (2004) Parallel Projection Modelling for Linear Array Scanner Scenes, *XXth ISPRS Congress*, Istanbul, Turkey, PS WG III/1: Sensor Pose Estimation, pp. 52-57.
- Okamoto, A., Fraser, C., Hattori, S., Hasegawa, H., and Tetsu, Ono (1998) An alternative approach to the triangulation of SPOT imagery, *IAPRS International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 32, B4, pp. 457-462.
- Tao, C., Hu, Y., Mercer, J., Schnick, S., and Zhang, Y. (2000) Image rectification using a generic sensor model-rational function model, *The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 33, Part B3, Amsterdam, The Netherlands, pp. 874-881.
- Tao, C. V. and Hu, Y. (2001) A comprehensive study of the rational function model for photogrammetric processing, *Photogrammetry Engineering and Remote Sensing*, Vol. 66, No. 12, pp. 1477-1485.
- Tao, C. V. and Hu, Y. (2002) 3-D Reconstruction method based on the rational function model, *Photogrammetry Engineering and Remote Sensing*, Vol. 68, No. 7, pp. 705-714.
- Valadan Zoej, M. J. and Sadeghian, S. (2003) Rigorous and Non-Rigorous Photogrammetric Processing of Ikonos Geo Image, Joint Workshop of ISPRS Working Groups I/2, I/5, IC WG II/IV, and EARSeL Special Interest Group: 3D Remote Sensing.
- Wang, Y. (1999) Automated Triangulation of Linear Scanner Imagery. *Joint Workshop of ISPRS WG I/1, I/3 and IV/4, Sensors and Mapping from Space*, Hanover, September 27-30.
- Zhang, J. and Zhang, X. (2002) Strict geometric model based on affine transformation for remote sensing image with high resolution, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 34, No. B3, pp. 309-312.

(접수일: 2006.8.22/심사일: 2006.9.15/심사완료일: 2006.9.15)