

SPOT 위성의 수치영상자료를 이용한  
정사투영사진지도의 제작에 관한 연구  
A Study on the Production of Orthophoto Map  
from Digital Imagery Data of SPOT Satellite.

유복모\* 손덕재\*\* 박정남\*\*\* 정수\*\*\*\*  
YEU Bock-Mo SOHN Duk-Jae PARK Jung-Nam JEONG Soo

要 旨

정사투영사진지도는 지형도와 동일한 축척을 지니면서도 사진의 형태로 표현되므로 현장감이 양호할 뿐만 아니라 판독이 용이하여 차세대의 지형도로 이용될 가능성이 매우 크다. 또한 수치형태의 정사투영영상은 현재 널리 응용되고 있는 지형공간정보체계의 격자형 기본 지형정보자료로 이용가능하므로 그 효용성이 매우 크다.

본 연구에서는 프랑스의 SPOT 위성으로부터 취득한 수치영상자료를 이용하여 정사투영사진지도를 제작하는 방안을 연구하였다. 정사투영사진지도를 제작하기 위해서는 수치표고모형과 원영상을 이용하여 정사투영영상을 생성하는 과정이 요구되며 이를 수치미분편위수정이라고 한다. 수치미분편위수정 방법에 있어서는 수치표고모형의 정확도가 최종적인 정사투영사진지도의 정확도를 좌우하게 되므로 정확하고 효율적인 수치표고모형의 생성방법이 선행되어야 한다.

본 연구에서는 SPOT 위성영상으로부터 수치표고모형을 직접 생성하는 방안을 연구하였고, 이를 이용하여 정사투영영상을 생성하여 등고선을 중첩시키므로서 간단한 형태의 정사투영사진지도를 제작하는 방안을 제시하였다.

ABSTRACT

The orthophoto map is seen as the form of picture with the uniform reduced scale as the current terrain map. Thus it provides a reasonable feeling of scene and is easy to be interpreted. Furthermore, digital orthophoto is currently used as the basic terrain information data of the Geo-Spatial Information System(GSIS). Therefore, the orthophoto map has high potential use as a future terrain map.

This paper studies the method of producing orthophoto map by using the digital satellite imagery data taken from SPOT satellite of France. The production of orthophoto map requires the process of generating orthophoto imagery with digital elevation model, which process is called digital differential rectification. As the final accuracy of orthophoto map depends on that of digital elevation model, the precise and efficient production method of digital elevation model should be preceded.

This study investigated the method of producing digital elevation model directly from SPOT satellite imagery and generated ortho-image by resampling the original SPOT imagery through digital differential rectification. Finally, Simple orthophoto map was made by overlaying the ortho-image and the contour map from digital elevation model.

\* 연세대학교 토목공학과 교수

\*\* 서남대학교 토목공학과 조교수

\*\*\* 순천공업전문대학 토목공학과 조교수

\*\*\*\* 연세대학교 토목공학과 박사과정

## 1. 서론

지표면의 정보를 표현하는 가장 일반적인 방법은 지도에 의한 표현방법이라 할 수 있으며, 그 중 지형도가 지상의 지형지물을 표시하는 대표적인 방법으로 서 주로 이용되고 있다.

그러나 지형도만으로 그 지역의 형상에 대한 현장감이나 입체감을 느끼기란 매우 어렵기 때문에 이를 보완하기 위한 수단으로서 정사투영영상(사진)이 이용된다.

일반적으로 사진은 카메라 렌즈의 중심으로 투영되어 얻어지기 때문에 지형의 기복에 따른 변위가 포함되어 있으며, 또한 촬영당시의 카메라 자세에 의한 피사체의 왜곡이 존재한다. 이러한 변위를 제거하여 지도와 같은 정사투영의 기하학적 특징을 가지는 사진을 제작하는 과정을 미분편위수정(differential rectification)이라하며, 미분편위수정을 거쳐 제작된 사진을 정사투영사진이라 한다.

정사투영사진은 무한대의 지형정보와 문화적 정보를 판독해 낼 수 있는 사진의 세세한 부분까지 그대로 포함하고 있으며, 거리, 각, 그리고 면적 등을 그대로 관측할 수 있는 지도의 특성을 지니게 된다. 또한 정사투영사진에 지도요소(map entity)를 중첩하여 제작된 사진지도는 지도로서의 효용성이 배가된다는 장점이 있다.<sup>1)</sup>

미분편위수정은 1970년대까지 주로 광학적인 방법에 의해 수행되었는데, 이를 위해서는 정사투영기(orthoprojector)와 같은 고가의 장비와 고도로 숙련된 전문가가 필요하고, 또한 사진에 지형도를 중첩시키기 위해서는 등고선도의 drop line 인화과정을 거쳐야 하는 등 매우 복잡하고 비용도 많이 드는 단점이 있다.<sup>2)</sup>

1970년대 중반부터는 급속히 발달한 전산기 기술과 인공위성 수치영상자료의 출현에 힘입어, 항공사진을 주사(scanning)하여 얻은 수치자료를 이용하는 수치적 미분편위수정방법에 대한 연구가 시작되었다.

수치적 편위수정방법에 의한 정사투영영상생성에 있어서는 수치표고모형(Digital Elevation Model: DEM)이 필수적으로 요구된다. 수치표고모형은 2차원

평면상에서 일정한 간격으로 표고를 기록한 것으로, 그 지역의 한 점에 대한 X, Y 좌표와 격자간격에 대한 정보만 있으면 나머지 모든 점들의 X, Y 좌표가 자동적으로 결정되므로 전산기에 입력할 때 기억용량이 상대적으로 적게 소요되며 또한 처리속도도 빠른 장점이 있어 가장 많이 사용된다.

최근 전산기 분야의 급격한 발전에 힘입어 상대적으로 막대한 자료인 수치표고모형 자료를 개인용 전산기에서도 손쉽게 처리할 수 있게 되었고, 또한 이 자료들을 응용하는 정보처리방법이 많이 개발됨에 따라 수치표고모형에 대한 관심이 높아지고 있다.<sup>3)</sup>

최근 인공위성영상은 탑재기(platform)와 감지기(sensor)의 발달로 자료 취득시간이 단축되고 공간해상력이 향상됨에 따라 자원 및 환경분야의 정성적인 관측목적으로 이용되었던 종래의 활영범주에서 탈피하여 지형도 제작이나 대규모 지역의 지형공간정보체계를 위한 자료기반(database) 생성 등 정량적인 위치결정에도 이용되고 있다.<sup>4)</sup>

특히, SPOT(Le Système Probatoire d'Observation de la Terre)위성은 안정된 궤도특성, 높은 공간해상력, 적합한 기선고도비를 갖고 있으며, 다른 궤도에서 경사관측(off-nadir viewing)에 의해 입체영상을 취득할 수 있다. 따라서, SPOT 위성영상은 농림, 수산, 해양, 환경, 지질분야에 종래에는 얻을 수 없었던 새로운 영상자료를 제공함은 물론 소축척 이나 중축척 지형도의 제작과 수정 및 접근 불가능한 지역의 위치결정에도 이용할 수 있다.<sup>5)</sup>

SPOT 위성영상을 이용한 수치표고모형 생성은 항공사진측량 방법에 비해 넓은 피복면적(1 영상 당 최소 60 km×60 km)을 포함하며, 난접근 및 비접근 지역에 대한 자료를 수시로 취득할 수 있는 장점이 있다.<sup>6)</sup>

일반적으로 SPOT 위성영상을 이용한 수치표고모형 생성에는 동적인 위성위치와 자세를 결정하는 외부표정요소를 결정하고 영상의 기하학적 왜곡을 보정하고 입력자료에 포함되는 과대오차를 탐색, 소거하기 위한 조정해석방법 및 조정과정에 입력자료로 이용되는 지상기준점의 정확도 등이 중요한 요소가 된다. 또한, 수치입체영상에 대해 전산기상에서 자동정

합기법을 적용하여 좌우 동일점을 찾은 후 이 좌우 동일점에 지상의 표고를 결정하는 on-line 체계의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 수치위성영상자료를 이용하여 SPOT 위성의 기하학적 보정을 위한 외부표정요소를 결정하고, 자동정합기법에 의해 좌우 영상의 동일점을 검색한 후 공간교선이론에 의해 지상의 표고를 계산하여 수치표고모형을 생성하고 이를 미분편위과정에 적용하므로써 SPOT 위성영상으로 부터 정사투영사진지도를 제작하기 위한 방법을 제시하고자 하였다.<sup>7)</sup>

SPOT 위성영상에 의하여 수치표고모형을 생성하기 위한 연산법을 확립하기 위한 기본 해석방법은 영역적 정합기법 중 영상상관정합 기법을 이용하였으며, 동적인 위성의 외부표정요소 추정을 위해 해석사 진측량의 광속조정법과 주사선 수의 외부표정요소 다항식을 채택하였다. 지상좌표의 계산에 있어서는 공간교선이론을 적용하였고, 이에 의하여 계산된 3차원 좌표를 가상적인 모형좌표로 설정한 다음 독립모형법의 절대표정개념을 도입하여 실제 3차원 지상좌표를 계산하였다.

정합기법을 적용하는데 있어서 계산시간을 단축하기 위하여 좌우영상에 대한 기하학적 조건을 결정하기 위하여 연구대상지역에 대해 적합한 좌표변환방법을 선정하였으며, 이 결과로 선정된 좌표변환식에 의해 정합대상지역을 예측하였다.

본 연구에 적용된 수치위성영상은 SPOT 위성에 의하여 취득된 CCT 형태의 수치위성영상이며, 대상 지역은 위도 36°05'~36°39', 경도 127°03'~127°47'에 해당되는 충남북 일대지역으로서 약 60 km×60 km를 포함하고 있다. SPOT 위성영상은 1987년 11월 29일 취득된 좌측영상과 11월 30일에 관측된 우측영상으로 구성된 수준 1A 수치영상자료이며, 수직관측영역에 해당되는 좌측영상과 경사관측에 해당되는 우측영상으로 입체영상을 형성하였다.

관측과장대는 흑백모드(panchromatic mode)로서 자료의 공간해상력은 약 10m 이며 전처리수준은 표고추출에 용이한 수치영상형태인 수준 1A 이다.

좌표변환에 이용된 기준점을 선정하기 위하여

ERDAS사의 workstation용 IMAGINE 영상처리체계를 이용하였으며, 정합을 실시한 후 동일점에 대한 정합여부를 확인하기 위하여 IMAGINE 영상처리체계를 적용하였다.

본 연구에서 생성된 수치표고모형의 정확도를 검토하기 위하여 5,000의 1의 지형도상에서 100m 단위로 3차원 좌표를 취득하여 수치표고모형을 형성하여 위성영상에 자동정합기법을 적용하여 취득된 수치표고모형과의 정확도를 비교하였다.

생성된 수치표고모형의 각 격자점 상에서의 3차원 좌표를 영상좌표로 역계산하고 이를 수치미분편위수정과정에 적용하여 대단위지역에 대한 정사투영영상을 생성하였다.

대상지역에 대한 영상과 수치표고모형으로부터 생성된 등고선도를 중첩하므로써 간단한 형태의 정사투영사진지도를 제작하였다.

## 2. SPOT 위성영상의 정사투영영상의 생성

### 2.1 자동영상정합기법

#### 2.1.1 영상상관정합의 원리

영상상관정합은 영역적정합에 있어 가장 간단한 방법으로, 영상상에서의 밝기값을 이용하며, 기준영역 및 탐색영역을 형성하여 취득한 상관계수를 정합의 기준으로 좌우영상상의 동일점을 정합하는 것을 말한다.

여기서, 탐색영역의 크기는, 외부표정의 인지정도여부에 좌우되며 표고차에 의해서도 영향을 받는다. 또한, 대응점은 기준영역의 중앙영상소를 선택하거나, 가장 유사한 탐색영역을 사용한다.

상관기법은 x,y 두 신호의 거동상에서 유사성을 통계적으로 관측하는 것으로, 공분산  $cov_{xy}$ 에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$cov_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n-1} \quad (1)$$

또는,

$$\text{COV}_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n-1} \quad (2)$$

상관계수  $r_{xy}$ 로 표현하면,

$$\Gamma_{xy} = \frac{\text{COV}_{xy}}{S_x \cdot S_y}, \quad -1 \leq \Gamma \leq 1 \quad (3)$$

이다. 여기서,  $S_x, S_y$ 는 각각 신호  $x, y$ 의 표준편차를 의미한다.

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad S_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} \quad (4)$$

따라서, 상관계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Gamma_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\left[ \sum_{i=1}^n (x_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i)^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (5)$$

따라서, 상관계수를 통하여 두 신호  $x, y$ 사이의 선형상관성을 알 수 있다.

이와같은 수치영상상관기법을 그림 1과 같은 영상면에 적용할 경우에는 좌측영상의 지상기준점을 중심으로  $M1 \times N1$  크기의 기준영역  $W(x, y)$ 을 설정하고 이에 대응하는 우측영상에  $M2 \times N2$  크기의 탐색영역  $S(x, y)$ 을 설정한 후, 좌측영상의 기준영역을 우측영상의 탐색영역 내에서 한 영상소씩 이동시켜 각각의 위치에 대한 상관계수를 결정한다.

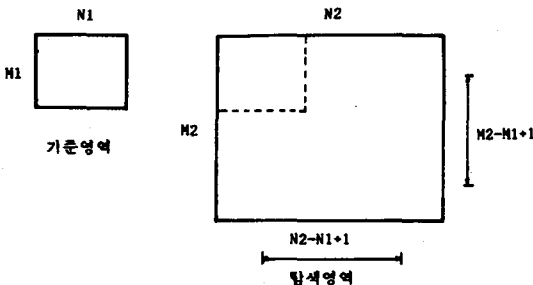


그림 1. 수치영상상관기법

이때, 식(5)는 다음과 같이 계산된다.

$$\Gamma(m, n) = \frac{\sum \sum (S(x, y) - \bar{S}(x, y)) \cdot (W(x, y) - \bar{W}(x, y))}{[\sum \sum (S(x, y) - \bar{S}(x, y))^2 \cdot \sum \sum (W(x, y) - \bar{W}(x, y))^2]} \quad (6)$$

여기서,  $-1 \leq \Gamma(m, n) \leq 1$  이며,

$$\bar{S}(x, y) = \{ \sum \sum S(x, y) \} / (M1 \times N1)$$

$$\bar{W}(x, y) = \{ \sum \sum W(x, y) \} / (M2 \times N2)$$

이 된다.

### 2.1.2 자동정합기법의 적용

자동영상정합기법에 있어서 기준영역에 대한 탐색영역의 크기는 영상정합의 정확도와 속도를 좌우한다. 탐색영역의 크기가 지나치게 크면 정합의 속도가 저하되며, 탐색영역의 계조분포가 반복적일 경우에 실제와는 다른점에 정합될 가능성도 있다. 또한 탐색영역의 크기가 지나치게 작은 경우에는 정합대상점이 탐색영역 외부에 존재하게 되어 정합이 수행될 수도 있다. 그러므로 자동영상 정합기법을 적용하기 전에 탐색영역의 크기 및 위치를 예측할 수 있는 방법이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 부등각사상변환식, 의사부등각사상변환식, 2차 다항 변환식, 3차 다항 변환식, 평면 투영 변환식을 각각 적용하여 본 연구대상지에 적합한 변환식을 선정하였다.

## 2.2 지상좌표의 결정

### 2.2.1 벡터해석에 의한 가상모형좌표계산

지상좌표의 결정은 공간교선(space intersection) 이론에 의하여 계산할 수 있다. 즉, 그림 2에서 보는 바와 같이 자동정합으로 동일점  $p_1, p_2$ 를 찾았을 경우 그 때의 투영중심  $L_1, L_2$ 에 의하여 두개의 직선이 형성된다. 이론적으로 두 직선이 한 점에서 만나야 하지만, 일반적으로 외부표정요소의 결정이나 정합위치결정에서 피할수 없는 오차들로 인하여 두 직선은 서로 교차하지 않는다.

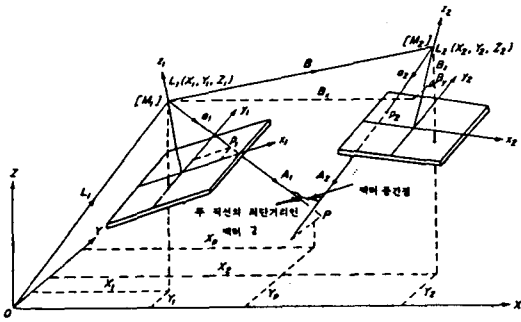


그림 2. 공간교선이론

따라서 실제에 있어서는 두 직선의 최단거리인 벡터  $\vec{d}$ 를 찾아 이것의 중간점을 교차점으로 간주하여 가상모형좌표를 계산한다.

$\vec{d}$ 는 두 직선에 수직인 벡터이므로  $\vec{a}_1$ 와  $\vec{a}_2$ 의 외적으로 표현된다. 즉,

$$\vec{d} = \vec{a}_1 \times \vec{a}_2 \quad (7)$$

식(7)을 행렬의 형태로 나타내면 식(8)과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ u_1 & v_1 & w_1 \\ u_2 & v_2 & w_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 w_2 - v_2 w_1 \\ u_1 w_2 - u_2 w_1 \\ u_1 v_2 - u_2 v_1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서  $\vec{i}$ ,  $\vec{j}$ ,  $\vec{k}$ 는 X, Y, Z 방향의 단위벡터이며,

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \end{bmatrix} = M_1^T \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ -f \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ w_2 \end{bmatrix} = M_2^T \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ -f \end{bmatrix}$$

식(9)에서  $M_1$ ,  $M_2$ 는 회전행렬로서 외부표정요소에 의해 구할 수 있으므로, 식(8)에 의해  $\vec{d}$ 를 구할 수 있다.

한편 벡터의 합에 의하여 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$\vec{B} = \lambda_1 \vec{a}_1 + k \vec{d} - \lambda_2 \vec{a}_2 \quad (10)$$

식(10)을 벡터의 성분으로 표시하면

$$\begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_2 - X_1 \\ Y_2 - Y_1 \\ Z_2 - Z_1 \end{bmatrix} = \lambda_1 \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \end{bmatrix} + k \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} - \lambda_2 \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ w_2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$= \begin{bmatrix} u_1 d_x - u_2 \\ v_1 d_y - v_2 \\ w_1 d_z - w_2 \end{bmatrix}$$

따라서 식(11)에서  $\lambda_1$ ,  $k$ ,  $\lambda_2$ 를 구할 수 있게 된다. 실제로 구하고자 하는 점 P의 가상모형좌표  $(X_p, Y_p, Z_p)$ 는 식(12)에 의해 구해진다.

$$\vec{p} = \vec{L}_1 + \lambda_1 \vec{a}_1 + 1/2 k \vec{d} \quad (12)$$

이 방법은 실제에 있어서는 지상좌표의 계산에 직접적으로 적용이 가능하지만 외부표정요소의 오차에 매우 민감하게 변화하므로 이를 가상모형좌표의 계산으로 간주한 후, 독립모형법의 절대표정과정을 도입함으로써 지상좌표를 계산해 내는 것이 바람직하다.

### 2.2.2 독립모형법에 의한 절대 표정

절대표정은 입체모형(model)좌표, 종점합모형(strip)좌표 및 종횡점합모형(block)좌표의 가상 3차원좌표로부터 얻어지는 표정기준점좌표를 이용하여 축척 및 경사등을 조정함으로써 절대(혹은 대지)좌표를 얻는 과정을 의미한다. 절대표정의 일반식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{bmatrix} = S R \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{bmatrix} \quad (13)$$

여기에서  $X_G, Y_G, Z_G$ 는 절대좌표,  $X_m, Y_m, Z_m$ 은 입체모형좌표,  $X_o, Y_o, Z_o$ 는 입체모형좌표계의 원점위치이며, S는 축척인자, R은 회전행렬이다.

식 (13)에 포함된 미지의 외부표정요소는 S,  $X_o, Y_o, Z_o$  및 R을 구성하는 3개의 회전각  $K, \Phi, \Omega$ 의 7개 이다.

이 7개의 표정요소를 최소제곱법으로 결정하기 위해서는 적어도 3 개의 기준점이 필요하며, 식 (12)가 비선형이므로 순차근사법으로 해를 얻게 된다. 식

(13)을 선형화하면

$$\begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{bmatrix} = \left\{ R\Delta + S^o \left( \frac{\partial R}{\partial \Omega} \Delta\Omega + \frac{\partial R}{\partial \Phi} \Delta\Phi + \frac{\partial R}{\partial K} \Delta K \right) \right\} + \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X_o \\ \Delta Y_o \\ \Delta Z_o \end{bmatrix} + S_o R \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_o^o \\ Y_o^o \\ Z_o^o \end{bmatrix} \quad (14)$$

입체모형좌표계와 대상물공간좌표와의 관계에서  $S^o = 1$ , 회전각의 근사값을 0이라고 가정하면 다음과 같은 관측방정식이 된다.

$$\begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_m & 0 & 0 \\ 0 & Y_m & 0 \\ 0 & 0 & Z_m \end{bmatrix} \Delta S + \begin{bmatrix} 0 & Z_m & -Y_m \\ -Z_m & 0 & X_m \\ Y_m & -X_m & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\Omega \\ \Delta\Phi \\ \Delta K \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X_o \\ \Delta Y_o \\ \Delta Z_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_m + X_o^o - X_G \\ Y_m + Y_o^o - Y_G \\ Z_m + Z_o^o - Z_G \end{bmatrix} \quad (15)$$

여기에서  $V_X, V_Y, V_Z$ 는 잔차이다.

### 2.3 수치표고모형의 생성

#### 2.3.1 거리경중를 함수법에 의한 보간

$Z_i$ 를 인접한 점의 자료,  $d_i$ 를 인접한 점까지의 거리,  $n$ 을 이용하려는 점의 갯수라 하면 거리경중를 함수는

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i / (d_i)^2}{\sum_{i=1}^n 1 / (d_i)^2} \quad (16)$$

이 된다. 만약 weighting power 를  $P$ 라고 하면 식 (16)은 다음과 같이 표시된다.

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i / (d_i)^P}{\sum_{i=1}^n 1 / (d_i)^P} \quad (17)$$

이 방법에 사용되는 점들은 보간점에서의 거리가 멀수록 보간값에 미치는 영향이 적게된다. 거리경중를 함수법은 처리속도가 빠르며 비교적 정확하다.

거리경중를 함수법은 인접한 점의 지형자료를 이용하는 searching 방법에 따라, 보간점주변 최근  $n$ 점의 자료로써 보간을 실시하는 normal searching 기

법, 보간하려는 점의 주위를 4개의 구역으로 나누어, 한구역에서 각각 인접한  $n$  점의 자료를 이용하므로서 보간점의 자료를 구하는 quadrant searching 기법, 보간점의 주위를 8개의 구역으로 나누어 보간하는 octant searching 기법으로 구분할 수 있다

#### 2.3.2 이상표고소거

영상정합에 의한 수치표고모형의 생성에 있어서 정합이 잘못되어 실제와는 다른 점들이 한쌍의 공역점으로 결정될 경우, 지상좌표의 계산에 있어서 오차를 유발하게 되며, 그에 따라 수치표고모형의 정확도도 저하된다.

수치표고모형에 있어서 실제 지형상의 표고와 매우 상이한 높이값이 존재할 때 이상표고가 존재한다고 할 수 있으며, 이러한 이상표고가 계속 존재할 경우에는 최종적인 정사투영사진지도의 정확도도 저하되게 된다.

이상표고는 대상지역의 허용경사도의 개념으로 검사할 수 있다. 즉, 대상지역에 대한 전체 수치표고모형의 경사도를 분석한 후 그에 따른 한계값을 설정하고, 그 한계값을 초과하는 경사도를 나타내는 격자점의 높이를 이상표고로 간주하여 이를 제거할 수 있다.

이때 한계값은 수치표고모형상 전체격자점의 높이값과 주위의 8격자점의 평균값과의 차이에 대한 평균제곱근오차의 3배에 해당하는 값으로 설정할 수 있다. 즉, 전체의 수치표고모형 상의 격자점간의 평균경사도를 계산하여 이를 평균제곱근오차의 개념으로 간주하고 3 $\sigma$  법칙을 적용하여 3 $\sigma$  이상의 값들은 제거하는 것이다.

#### 2.4 수치미분편위수정

수치미분편위수정(digital differential rectification)은 인공위성으로 취득되거나 항공사진을 주사하여 취득된 영상자료(raster data)와 수치표고모형을 이용하여 정사투영사진을 제작하는 방법으로 지상기준점 또는 수치표고모형의 자료가 입력용으로 사용되는가의 구분에 의해 직접적 방법(direct method)과 간접적 방법(indirect method)으로 구분된다.

직접적 방법은 주로 인공위성 영상을 기하보정할 때 사용되는 방법으로 지상좌표를 알고 있는 현저한 지물의 영상좌표를 관측하여 식(18)에 의해 각 출력 영상소의 위치를 결정하는 방법이며, 영상소의 값과 위치를 결정하기 위해서는 영상재배열(resampling)을 거쳐야 하므로 off-line 방법이라고도 한다.

$$\begin{aligned} X &= F_1(X', Y') \\ Y &= F_2(X', Y') \end{aligned} \quad (18)$$

여기서,  $(X', Y')$ 는 출력영상의 좌표이며,  $(X, Y)$ 는 입력영상의 좌표이다.

간접적인 방법은 지상기준점 좌표에 의해 출력영상소의 위치가 이미 결정되어 있으므로 입력 영상에서 관측된 좌표로 식 (19)을 이용하여 출력 영상소값을 구하기 위한 입력 영상소의 위치를 결정하는데 사용되므로 on-line 방법이라고도 한다.

$$\begin{aligned} X' &= F_1(X, Y) \\ Y' &= F_2(X, Y) \end{aligned} \quad (19)$$

식 (19)를 SPOT 위성의 수치위성영상자료에 적용하기 위해서는 다음과 같은 식을 적용하여야 한다.

$$X = (Z - Z_0) \frac{M_{11}(x - x_c) + M_{21}(y - y_c) + M_{31}f}{M_{13}(x - x_c) + M_{23}(y - y_c) + M_{33}f} + X_0 \quad (20)$$

$$Y = (Z - Z_0) \frac{M_{12}(x - x_c) + M_{22}(y - y_c) + M_{32}f}{M_{13}(x - x_c) + M_{23}(y - y_c) + M_{33}f} + Y_0$$

여기서  $X, Y, Z$  : 지상좌표

$X_0, Y_0, Z_0$  : 투영중심

$x, y$  : 영상좌표

$x_c, y_c$  : 영상좌표의 중심좌표

$f$  : 초점거리

$M_{11}, M_{12}, \dots, M_{33}$  : 회전행렬요소이다.

### 3. 관측값 해석

#### 3.1 영상자료 및 해석대상지역의 특성

본 연구에서 이용된 해석대상지역은 그림 3에서 보는 바와 같이 좌우 전체영상이 포함하고 있는 충청남북도 일대의 전체영역 중 CRT 모니터상에서 출

력하기에 적절한 위도  $N36^{\circ}19'30'' \sim 36^{\circ}16'30''$ , 경도  $E127^{\circ}25'30'' \sim E127^{\circ}28'30''$  에 위치한 대전직할시 일대의 약  $4\text{km} \times 4\text{km}$  의 지역이며, 대상지역에 대한 기준점 탐색에는 1:5,000 국가기본도 총 9장이 소요되었다.

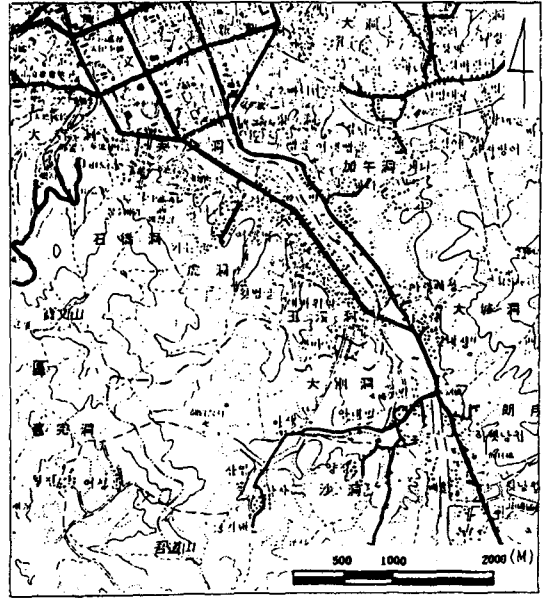


그림 3. 해석대상지역

또한, 본 연구에 이용된 수치영상은 전처리 수준이 수준 1A인 CCT 형태의 위성영상으로 이들 영상은 SPOT-1 위성에 의해 취득되었다. 영상은 위치결정에 적합한 흑백 P형자료로서,  $6,000 \times 6,000$  영상소의 전체영상 중에서 해석대상지역을 포함하고 있는  $440 \times 440$  영상소 크기의 좌측영상과 영상정합시의 탐색영역을 고려한  $600 \times 600$  크기의 우측영상을 절취하여 이용하였다.

#### 3.2 관측값의 형성

본 연구에서는 총 30 점의 지상기준점을 이용하였으며, 이중에서 지형의 변화로 지형도상에서 위치선정이 곤란한 7점을 제외하고 23점이 관측값해석에 이용되었

다. 여기서, 23점의 지상기준점 중 13점은 기준점으로 10점은 검사점으로 이용하였다. 또한, 지상기준점에 대한 영상좌표의 취득은 ERDAS 사의 IMAGINE 영상처리용 패키지를 이용하여 관측하였다.

3.2.1 지상측량에 의한 지상기준점의 3차원 좌표

지상측량에 의한 지상기준점의 3차원좌표는 그림 4와 같이 선정된 지상기준점과 기존의 국가기준점을 연결하는 관측망을 형성하여 취득하였다.

또한, 외부표정요소의 소지역보정 및 지상좌표계산시의 절대표정과정을 위해 대상지역에 대해 25개의 보조 기준점을 선정, 영상자료를 기초로 1:5,000 지형도상에서 3차원좌표를 취득하였다.

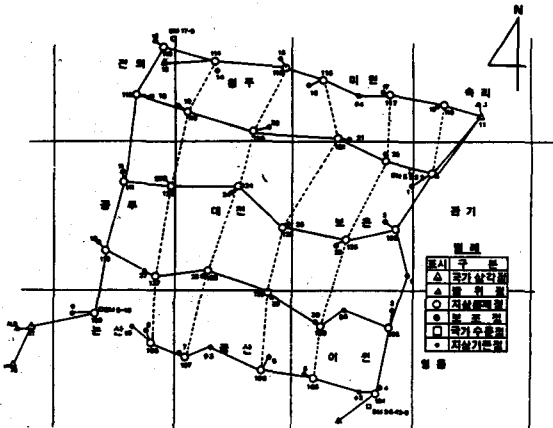


그림 4. 지상측량방법의 관측망도

3.2.2 외부표정요소의 초기값

외부표정요소에 대한 초기값 결정은 위성사진의 주석부분에 제공되는 자료를 이용하는 방법과 수치영상의 header 자료에 포함된 영상보조자료를 이용하는 방법으로 대별된다.

본 연구에서는 외부표정요소의 초기값 결정을 위해 위성위치에 대해서는 영상보조자료를 보간하여 결정하였으며, 위성의 자세에 대해서는 주석정보를 이용하였다.

위성사진의 초기값은 영상중심의 주사시간과 근접하는 3개의 위성위치를 다항식의 형태에 따라 보간하

여 결정하였으며, 위성자세에 대한 초기값은 영상표정( $\gamma$ )을  $K_0$ , 감지기의 경사각은  $\phi_0$ ,  $\omega_0$ 는  $0_0$ 로 설정하여 radian 값으로 변환하였다.

위성위치의 결정에 있어서는 본 연구에서 채택한 3차원 절대좌표계로 통일시키기 위해 평면직교좌표체계인 TM 좌표계로 변환하였다. 또한, 본 연구에서 결정된 외부표정요소의 초기값은 표 1과 같다.

표 1. 외부표정요소의 초기값

외부표정요소	좌측영상	우측영상
$X_0$	168,987 m	590,452 m
$Y_0$	337,715 m	273,729 m
$Z_0$	827,732 m	813,746 m
$\kappa_0$	-0.1988 rad	-0.1436 rad
$\phi_0$	-0.0980 rad	0.4567 rad
$\omega_0$	0.0 rad	0.0 rad
$K_4$	2.41 m	1.93 m
$K_5$	9.73 m	9.86 m
$K_6$	0.02 m	0.02 m

3.3 수치표고모형 생성

3.3.1 광속조정에 의한 외부표정요소 결정

본 연구에서는 광속조정법을 도입, 해석대상지역에 균등분포된 25개의 보조기준점을 이용하여 전체영상에 대한 외부표정요소를 보정하였으며, 대상지역에 대한 외부표정요소 다항식을 표 2와 같이 나타낼 수 있다.

표 2 연구대상지역에 대한 위성영상자료의 외부표정요소

구분	항목	외부표정요소 다항식
좌측영상	$\omega_L$	- 0.01650463 - 2.314392 E -07 Y
	$\phi_L$	- 0.09381273 - 1.698438 E -07 Y
	$\kappa_L$	- 0.19541094 + 1.613241 E -07 Y
	$X_L$	153123.265 + 2.32945 Y
	$Y_L$	302908.148 + 9.92432 Y
	$Z_L$	827783.683 + 0.03532 Y
우측영상	$\omega_R$	0.03894309 + 2.565036 E -07 Y
	$\phi_R$	0.46711327 + 5.445994 E -07 Y
	$\kappa_R$	- 0.15628434 + 2.001352 E -07 Y
	$X_R$	638835.285 + 2.36103 Y
	$Y_R$	257494.638 + 9.60341 Y
	$Z_R$	806705.375 + 0.32209 Y



### 3.3.2 영상정합에 의한 지상좌표계산

#### (1) 영상정합의 예측모형식

본 연구에서는 사진측정학에서 일반적으로 쓰이는 부등각사상변환식, 의사부등각사상변환식, 평면투영변환식, 2차 다항 변환식 및 3차 다항 변환식에 대한 좌표변환을 각각 적용하여 영상에 대하여 좌표변환을 시행한 후 단위경중률에 대한 잔차가 가장 작은 변환식을 영상정합예측모형식으로 채택하였다.

영상에 고루 분포된 25개의 기준점을 이용하여 각 변환식을 적용한 결과를 표 3에 나타내었다.

표 3. 영상정합예측모형식 적용에 따른 정확도 비교

방법	단위경중률의 분산값
부 등 각 사 상 변 환	9.726755
의사부등각 사 상 변 환	4.440363
평 면 투 영 변 환	6.069896
2 차 다 항 식 변 환	3.846275
3 차 다 항 식 변 환	3.588482

본 연구 대상지역에 대해 각 모형식을 적용한 결과 표 3과 같이 3차 다항 변환식을 적용한 결과에서 단위중률의 분산값이 가장 작게 나타나기 때문에 본 연구에서는 3차 다항 변환식을 적용하였다.

#### (2) 기준영역, 한계상관계수, 탐색영역의 결정

본 연구에서 기준영역 및 한계 상관계수값을 각 경우에 대하여 비교하기 위하여 영상정합을 대상영역에 대하여 80 영상소 마다 실시하였으며, 영상정합으로 구해진 정합점은 총 25점으로 영상전반에 걸쳐 고루분포되게 하였다. 기준영역의 크기는 7 x 7에서 29 x 29 까지, 한계 상관계수의 값은 0.5, 0.7, 0.75 및 0.8 으로 각각 단계적으로 변화시켜 상관계수의 값이 가장 크게 나타나는 경우 기준영역과 한계 상관계수의 값을 채택하였다. 그 결과 본 연구에서는 기준영역의 크기를 11 x 11 로 설정하고 한계 상관계수의 값은 0.8 로 설정하여 영상정합을 실시하였다.

탐색영역의 크기는 본 연구에서 채택된 예측모형식의 기준점에 대한 잔차를 분석하여 결정하였다. 대

상지역에 대한 소영상 전진체에 대해 골고루 분포된 25점의 기준점에 대한 예측모형식의 잔차를 분석해 본 결과 최대 7영상소까지의 잔차가 발생하였다. 따라서 이에 안전율을 부과하여 본 연구에서는 10 X 10 크기의 탐색영역을 결정하였다.

#### 3.3.3 수치표고모형의 생성

앞절의 방법을 통해 좌우 두영상의 영상좌표를 구하기 위해 좌우 전체영상에서 400 X 400 으로 절취된 대상지역에 대하여 영상정합을 실시하였으며, 계산속도와 처리용량을 고려하고 중복되어 정합이 이루어지지 않도록 5 영상소마다 한점씩에 대하여 영상정합을 실시하였다.

영상정합의 결과로 얻어진 정합점은 총 대상점 6,400점 중에서 3,774점이었으며, 정합의 결과 나타난 평균상관계수의 값은 0.882402이었다.

본 연구에서는 각각의 정합점마다 정합을 수행함과 동시에, 공간교선이론을 적용하여 가상모형좌표를 계산하고 이를 절대표정하여 지상좌표를 계산할 수 있도록 프로그램을 작성하였다.

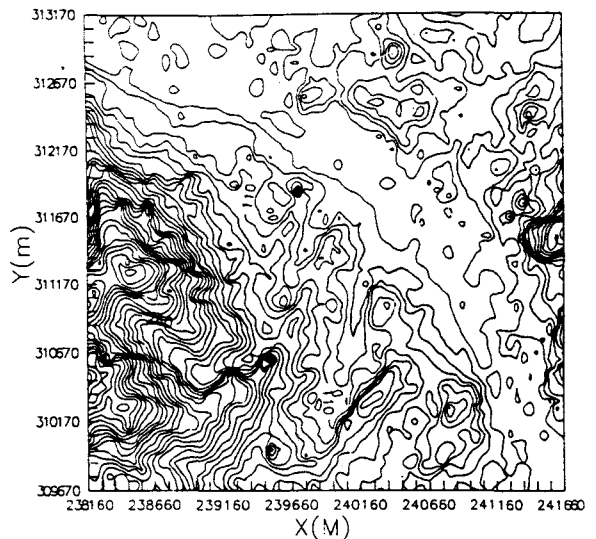


그림 5. 영상정합에 의한 수치표고모형

또한, 평면좌표조정 경의 경우에 있어서는 3차다항식 변환을 이용하여 조정을 수행하였으며, 평면좌표조정이 수행된 이후에는 평면좌표의 변환결과와 높이 기준점을 이용하여 높이에 대한 조정을 수행하였다.

이를 통해 취득한 3차원 좌표로써 그림 5와 같이 해석대상지역내 50m x 50m 간격으로 지상 약 3.5km x 3.5km 크기의 수치표고모형을 생성하였다.

### 3.3.4 수치표고모형의 정확도분석

본 연구에서는 생성된 수치표고모형에 대한 정확도를 분석하기 위해 1:5,000 지형도로 부터 50 m X 50 m 간격으로 3.5 km X 3.5 km 크기의 수치표고모형을 추출하여 그림 6과 같이 나타내었으며, 이로써 그림 5와 같이 영상정합을 통해 취득한 3차원 자료로써 생성한 수치표고모형의 정확도를 분석하였다.

정확도는 1:5,000 지형도에서 추출한 수치표고모형과 동일격자점의 3차원좌표에 대한 평균제곱근오차로 나타낼 수 있으며, 정확도분석결과는 표 4와 같다.

표 4. 정확도분석결과

구 분	이상표고 소거전 수치표고모형	이상표고 소거후 수치표고모형
총 격자점수	5,041	5,041
잔차의 평균(M)	8.75	8.57
잔차의 평균제곱근오차(M)	12.89	12.48

그러나, 그림 5와 그림 6를 비교해 볼 때 이상표고가 다소 발생하였음을 육안으로 식별할 수 있으며, 이것은 영상정합의 오차에 의해 실제와는 다른점을 정합한 것으로 사료된다. 따라서, 본 연구에서는 최종적으로 더 이상의 이상표고가 발생하지 않을 때까지 좌표를 보간하였으며, 그 결과 총 5,041 점의 격자에 대하여 98점이 이상표고로 판정되어 소거되었고 전체 수치표고모형의 정확도는 평균제곱근오차가 12.48 m로서 이상표고소거 전보다 약 3.18 % 이상 정확도가 향상되었으며, 이상표고소거 후의 수치표고모형을 그림 7과 같이 나타내었다.

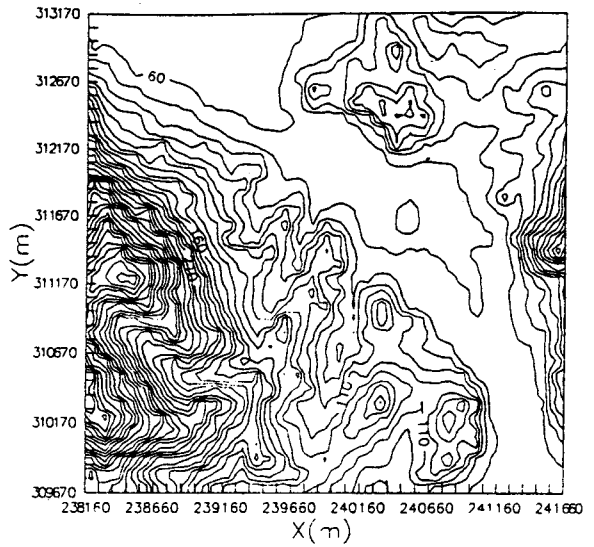


그림 6. 1:5,000 축척의 지형도에 의한 수치표고모형

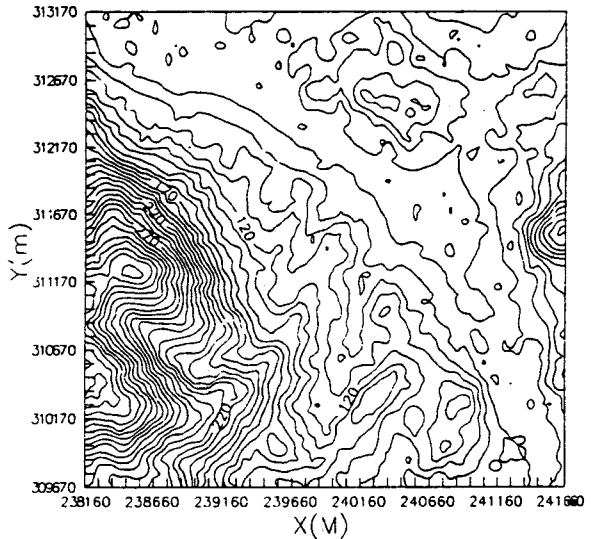


그림 7. 이상표고소거 후의 수치표고모형

## 3.4 정사투영사진지도의 제작

SPOT 위성영상은 투영중심과 위성의 자세가 계속해서 변화하기 때문에, 지상좌표만으로 그 대응하는 영상좌표와 외부표정요소를 동시에 구할 수 없다. 따

라서, 본 연구에서는 정사투영사진지도를 제작하기 위하여 그림 8과 같은 과정의 수치미분편위수정 방법을 사용하여 정사투영영상을 생성하였다.

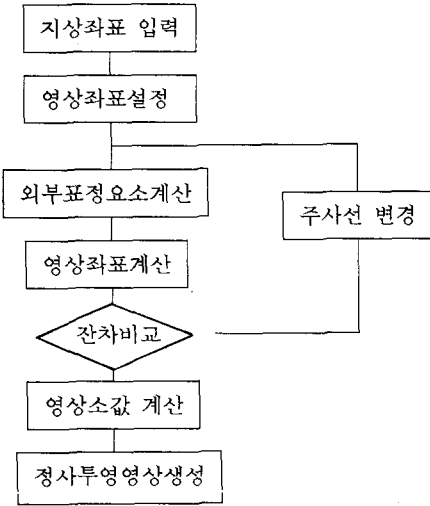


그림 8. 수치미분편위수정

그림 8에서 주사선 변경시 주사선값의 초기값 설정에는 지상좌표와 영상좌표의 관계를 3차 다항식 좌표변환방법에 의해 근사화하여 설정하였다.

SPOT 위성의 수치영상자료로부터 정사투영영상의 영상소값을 추출하는 방법으로는 지상좌표로부터 계산된 영상좌표 주위에 있는 4 개의 영상소값의 거리에 따른 가중평균값을 출력영상의 영상소값으로 사용하는 공일차보간법(bilinear interpolation)을 적용하였다.

본 연구에서 생성한 정사투영영상은 그림 9와 같다. 또한 본 영상을 3차원적으로 표현하면 그림 10 과 같은 형태의 영상을 얻을 수 있고 이는 경관분석, 수로분석, 경사분석 등에 다양하게 이용될 수 있다. 따라서, 정사투영영상에 수치표고모형으로부터 생성된 등고선과 중횡축의 좌표값을 중첩시키면 간략한 형태의 정사투영사진지도를 제작할 수 있으며 본 연구에서 제작된 정사투영사진지도는 그림 11과 같다.

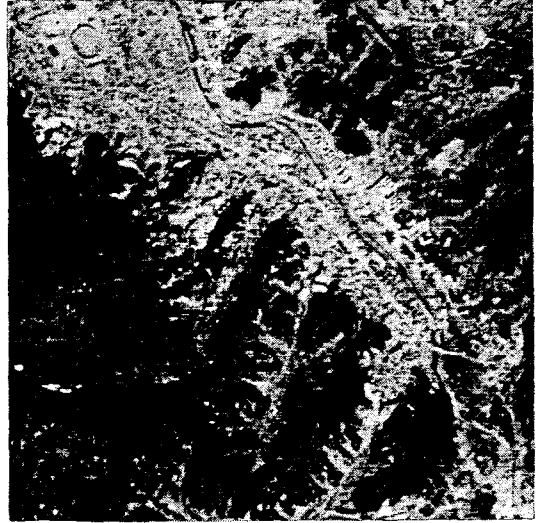


그림 9. 생성된 정사투영영상

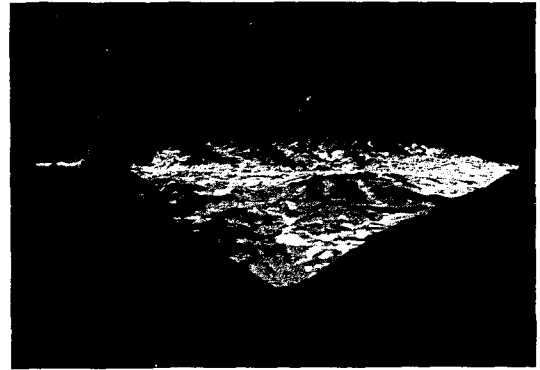


그림 10. 정사투영영상의 3차원적 표현

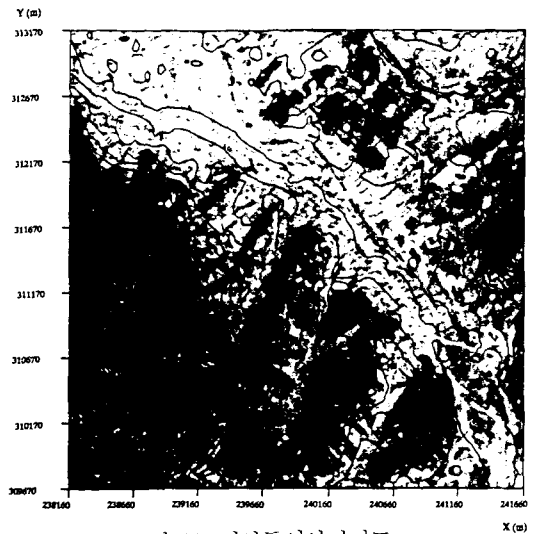


그림 11. 정사투영사진지도

### 3.5 정사투영사진지도의 정확도 분석 및 고찰

본 연구에서 생성한 정사투영사진지도에 대한 정확도 평가는 정사투영영상을 제작하는데 사용된 수치표고모형의 정확도로서 간접적으로 평가할 수 있다. 본 연구와 같이 정사투영사진지도를 제작하기 위해 정사투영영상에 중첩시킨 등고선은 정사투영영상을 제작하는 데 사용된 수치표고모형을 이용하였기 때문에 정사투영사진지도의 정확도는 바로 수치표고모형의 정확도와 동일하다고 볼 수 있다. 따라서 정사투영사진지도의 정확도를 평가하기 위한 간접적인 방법으로서 수치표고모형의 정확도분석을 분석한 결과, 앞절의 결과값에서 나타난 바와 같이 본 연구에서 제작한 정사투영영상의 정확도는 12.48 m 라고 평가할 수 있다. 이는 영상정합의 방법에 의해 생성된 수치표고모형에서 이상표고만을 소거한 것으로 생성된 모든 격자점의 표고값들을 비교대상인 1:5,000 지형도상에서 추출한 수치표고모형의 해당 격자점과 1:1로 비교를 해서 정확도를 분석한 값들이다.

이 결과값은 현재 우리나라 국가 기본도 중의 하나인 1:50,000 지형도의 등고선 간격이 20 m임에 비추어 볼 때 그에 근접하는 정확도를 확보하고 있다고 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서 사용한 SPOT 위성영상의 해상력이 10m임을 감안한다면 생성된 수치표고모형의 정확도를 10m까지 확보할 경우 SPOT 위성영상을 이용한 정사투영사진지도 제작에 있어 최적의 자료로써 활용할 수 있을 것이다.

본 연구에서 사용된 방법은 종래의 고가의 장비를 이용하고 광학적 방법을 적용하여 지형도를 제작하는 방법과는 달리 개인용 전산기상에서 수치표고모형의 취득에서 정사투영영상의 제작, 정사투영사진지도까지를 모두 처리할 수 있는 장점이 있다. 또한, 그림 9과 그림 10에서 보는 바와 같이 한번 구축된 수치지형모형과 정사투영영상은 2차원과 3차원등의 표현이 기존의 지형도제작 또는 정사투영영상이 다소 일회성인 것에 비하여 자유로운 장점이 있다.

또한, 그림 11에서 보는 바와 같이 정사투영사진지도는 사진의 특성과 지도의 특성을 동시에 지니고 있으므로 지형정보의 추출이 용이할 뿐만 아니라 시

간적으로 지연됨이 없이 신속히 지도화할 수 있는 장점이 있다.

정사투영영상이 지형공간정보체계의 자료기반 구축 시 기본도로써 이용될 경우 환경변화에 따른 자료기반 갱신요구에 신속히 대처할 수 있을 것이다. 또한 위성영상은 항공사진이나 지상사진에 비하여 포함 단 위면적이 대규모일 뿐만 아니라 항공기가 침투하기 곤란한 적지역의 영상도 취득이 가능하고 자료 취득을 위한 관측주기도 일정하므로 국내의 지형정보의 구축을 위한 수단을 넘어서서 적국의 지형정보를 취득하는 매우 중요한 도구로 이용될 수 있다.

## 4. 결론

입체 SPOT 위성의 수치영상자료를 수치적 연산법에 의해 처리하므로써 수치표고모형을 제작하고 이를 미분편위수정과정에 적용하여 정사투영영상을 생성하므로써 정사투영사진지도를 제작하는 방안을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. SPOT 위성영상의 사진측정학적 해석 연산법을 광속조정법의 적용에 의해 개발하였으며, 이를 이용한 외부표정요소 결정을 수행하였다. 또한 3 차원 위치결정방법을 연구한 결과 공간교선법에 의해 가상모형좌표를 계산하고 이를 절대표정하여 지상좌표를 구하는 방법을 제시하였다.
2. SPOT 위성영상으로 부터 수치표고모형을 생성하기 위한 연산법을 제시하고 이를 적용하므로써 광범위한 지역의 수치표고모형을 경제적이고 효율적으로 생성할 수 있는 방안을 제시하였고 이는 향후 국내 전지역에 대한 수치표고모형의 제작에 이용될 수 있을 것으로 사료된다.
3. 수치표고모형의 생성에 있어서 자동영상정합기법을 적용하기 위해 다양한 평면좌표변환식의 적용에 의한 정합예측모형식을 결정하고자 하였으며, 그 결과 3차 다항식 변환이 가장 적합한 것으로 나타났다.

또한, 예측모형식의 적용으로 인하여 영상정합의 속도와 정확도가 향상되었음을 알 수 있었다.

4. 수치표고모형 상의 이상표고를 소거하기 위한 연산법(algorithm)을 연구한 결과 대상지역 전체의 경사도를 분석하고 이에 의하여 한계 경사도를 결정하여 이상표고를 소거하는 방법을 제시하였으며 이에 따라 최종 수치표고모형의 정확도를 향상시킬 수 있었다.

5. 수치표고모형과 수치위성영상자료를 결합하여 미분편위수정을 수행하므로써 수치정사투영영상을 생성하였고 이에 수치표고모형에서 추출한 등고선도를 중첩시키므로써 1:50,000 축척 지형도의 정확도에 상응하는 정사투영사진지도를 제작하는 방법을 제시하였다.

## 참고문헌

- Gugan, D. J., "Future Trends in Photogrammetry", Photogrammetric Record, 13(73), 1989, pp.79-83.
- 유복모, 사진측정학, 문운당, 1991, pp.408-417.
- 박 병 욱, " SPOT위성영상을 이용한 수치지형표고생성에 관한 연구 ", 박사학위논문, 서울대학교 대학원, 1991.
- Ehlers, M., "Increase in Correlation Accuracy of Remote Sensing Imagery by Digital Filtering", P.E. & R.S., Vol.48, No.3, 1982, pp.415-420.
- CNES and SPOT IMAGE, SPOT User's handbook, vol I,II, reference manual, 1987, France.
- CNES, SPOT Design Manual, Toulouse, 1981, France.
- G. Konecny, "Methods and Possibilities for Digital Differential Rectification", Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 45, No. 6, 1979, pp. 727 - 734.
- Begni, G. , B. Boissin, and J. Perbos, "SPOT Image Quality and Postlaunch Assessment", Advanced Space Research, Vol. 5, No. 5. 1985, pp. 51-60.
- Jacobsen, K. , H. Engel, P. Lahman, and G. Picht, "Aerial Triangulation of SPOT and Aerial Photography", ISPRS, Kyoto, 1988, pp.III-436~III-441.
- Gugan, D. J., "Practical Aspects of Topographic Mapping from SPOT Imagery" , Photogrammetric Record, Vol.12 , No.69, 1987, pp.349-355.
- Li Deren and Cheng Jiaju, "Bundle Adjustment of SPOT Imagery", ISPRS, Commission III, 1988, pp. 449-455.
- Liang-Hwei Lee and Liang-Chien Chen, "Bundle Adjustment with Additional Parameter for SPOT Stereopairs", ISPRS, Commission III, Vol. 27, 1988, pp. III-1~III-10.
- Welch, R., "Cartographic Potential of SPOT Image Data", P.E.& R.S., Vol.51, No.8, 1985, pp.1085-1091.
- Ehlers, M., "The Effects of Image Noise on Digital Correlation Probability", P.E. & R.S., Vol.51, No.3, 1985, pp.357-365.
- Shibasaki, R. and S. Murai, "Improvement of Mapping Accuracy by Applying Triplet Matching to SPOT Imagery", ISPRS, Comm.III, 1988, pp.IV-264~IV-273.
- Rikimaru, A., M. Konishi, and T. Oshina, "Extract Method of High Accuracy Control Point for Geometric Correction from Center of Gravity in Closed Area", Journal of the Japan Society of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol.28, No.2, 1989, pp.14 - 24.
- 유 복 모, "공중삼각측량에 있어서 독립모델의 연구", 대한토목학회창립 20주년 기념 논문집, 1972, pp.222 - 229.
- 유 환 회, "근거리 사진측량에 의한 변형해석에 관한 연구", 박사학위논문, 연세대학교 대학원, 1988.
- 유 복 모, 조 기 성, 권 현 , "SPOT위성영상의

- 외부표정요소 결정에 관한 연구”, 대한토목학회 논문집, 제 10 권, 제 4 호, 1990, pp.77-85.
20. 유복모, 이현직, “전처리수준에 따른 SPOT 위성사진의 정확도분석에 관한 연구”, 한국측지학회지, 제 9 권, 제 1 호, 1991, pp.71-84.
  21. 유복모, 조기성, 이현직, “SPOT 위성영상을 이용한 3차원위치결정의 정확도 향상에 관한 연구”, 대한토목학회 논문집, 제 11 권 4호, 1991, PP. 163-170.
  22. 유복모, 측량학원론(I), 개문사, 1986, pp.172-173.
  23. ZEISS, SPOT-Bundle Adjustment Program for Engineering Objects and Restitution of SPOT Images, ZEISS Oberkochen, 1987.
  24. 국방과학연구소, 지역측지계와 세계측지계의 변환, 국방과학연구소용역보고서, 1991.
  25. 국방과학연구소, 위성사진 방향표정요소 획득 (I),(II), 국방과학연구소용역보고서, 1990, 1991.
  26. Merchant, C., "Analytical Photogrammetry Theory and Practice", Ohio State University, 1984.