

## 數值標高模型의 正確度 向上을 위한 地形의 分類와 補間法의 適用에 觀한 研究<sup>+</sup>

문 두 열\*  
(94년 8월 6일 접수)

A Study on the Application of Interpolation and  
Terrain Classification for Accuracy Improvement  
of Digital Elevation Model.

Du-Yeoul Mun\*

**Key Words** : Terrain, Topography(지형), Interpolation(보간법), Breakline(절선)  
Accuracy(정확도), Classification(분류), Digital elevation(수치표고)  
Inverse distance weighting power(거리경중률법), Deviation(분산)  
Harmonic vector(조화벡터), Parameter(매개변수), Quadrant(4분탐색법)  
Minimumcurve(최소곡률), Group(군)

### Abstract

In this study, terrain classification, which was done by using the quantitative classification parameters and suitable interpolation method was applied to improve the accuracy of digital elevation models, and to increase its practical use of aerial photogrammetry.

A terrain area was classified into three groups using the quantitative classification parameters to the ratio of horizontal, inclined area, magnitude of harmonic vectors, deviation of vector, the number of breakline and proposed the suitable interpolation.

Also, the accuracy of digital elevation models was improved in case of large grid intervals by applying combined interpolation suitable for each terrain group.

As a result of this study, I have an algorithm to perform the classification of the topography in the area of interest objectively and decided optimal data interpolation scheme for given topography.

+ 이 논문은 1994학년도 동의대학교 자체 학술연구조성비에 의하여 연구 되었음.

\* 동의대학교 공과대학 토목공학과 부교수

## 1. 서론

항공사진측량에 의한 지형정보시스템의 데이터베이스 설계나 대규모의 도시 시설물과 해저지형의 이용 및 계획을 수립하거나 지도제작을 할 때 현재의 지형에 대한 특징을 수치적으로 표현하는 수치표고모형이 널리 이용되고 있다.<sup>1)</sup> 수치표고모형은 기하학적 표고를 전산처리에 적합하게 수치적으로 표현하는 지형해석 방법이다. 수치표고모형의 정확도는 지형의 형상에 따른 보간법의 적용, 자료추출, 지형분류, 토공량 산정식의 합리적 적용에 따라 좌우된다.<sup>2)</sup>

실제지형과 부합되는 보간법의 연구는 1958년 Miller<sup>3)</sup>에 의해 최초로 연구하기 시작하였는데 1960년대에는 1, 2차의 다항식 보간법에 대한 연구가 활발 하였으며 미국의 MIT모형<sup>4)</sup>, 스웨덴의 VV모형<sup>5)</sup>, 영국의 CARD체계<sup>6)</sup>, 핀란드의 VIA-TEX모형<sup>7)</sup>등 세계각국에서 보간방법이 개발되기 시작하였다.

1970년대에는 Bonsman<sup>8)</sup>, Kraus<sup>9)</sup>, Jancatis<sup>10)</sup>가 3차 다항식의 보간법을 개발하였고, Kubic<sup>11)</sup>은 격자요소다항식을, Masson<sup>12)</sup>은 탄성격자법을 설명하였다.

1970년대 후반기 부터 자료추출이나 실제지형에 대한 적용이 활발하였는데, 미국의 수치표고모형 심포지움<sup>13)</sup>, Chandra<sup>14)</sup>, Turner<sup>15)</sup>는 지도제작이나 도로설계, 토지관리에 대해 논하였다.

1980년대에는 자료추출법의 알고리즘Collins<sup>16)</sup>가 개발하였고, Frederiksen<sup>17)</sup>은 내측적의 지도에 지형분류와 보간법의 타당성을, Sequ<sup>18)</sup>는 이중 chebyshev다항식을 이용하였고, Papo<sup>19)</sup>는 자료추출의 최적자료의 간격에 대해 연구하였다.

Ostman<sup>20)</sup>은 자료은행의 정확도를 추정하였고, Balce<sup>21)</sup>는 격자형수치표고모형의 최적 간격에 대하여, 그리고 Crespi<sup>22)</sup>는 지형분류에 대한 확률적 방법을 이용하였다. 1990년대에는 수치표고모형의 기법을 공사예정지의 토공량 산정에 주로 이용하거나<sup>23), 24), 25)</sup>, 선박의 몸체, 수문, 해양, 기상, 의학분야<sup>26)</sup>등의 여러 분야에 걸쳐 연구되고 있다. 따라서 본 연구에서는 수치표고모형의 정확도 향상을 위해 계획대상지의 6가지 지형(100x100m)

을 선정하여 항공사진측량에 의해 표고자료를 구하여 평탄지, 구릉지, 산악지의 분류를 8가지의 지형분류 매개변수 인자로서 정량화 시켰다.

또한 분류된 지형별로 적합한 보간법을 구하기 위해 격자간격을 달리하면서 최소곡률법, 거리경중율법, Spline, Kriging보간법을 직접 적용하여 최적 보간법을 구하며, 아울러 보간법을 조합시킨 조합보간법의 결과치와 등고선 표고잔차로서 비교하므로써 보간법 적용의 효율성과 정확도를 제안하고자 하였다.

## 2. 수치표고모형

### 2.1 수치표고모형의 정의

수치표고모형은 지표면상에 있는 임의의 점들의 3차원 좌표를 관측하고 수집하여 계산기 내에 저장 할 뿐 아니라, 지형특성의 공간분포를 나타내는 일정한 형식을 지닌 숫자의 나열이라고 한다. 즉 지형의 기하학적 성질을 수치적으로 표현한 것이라고 정의 할 수 있다.

수치표고모형은 자료의 취득, 변환, 저장, 수정 등을 포함하는데 지형경사나 유역, 복잡한 곡면형을 이루는 지형을 수치적으로 표현 할때 다음 사항을 고려해야한다. 즉 지형정보의 수치화, 필요한 정확도, 지형정보의 취득방법, 보간법의 이용방법, 자료의 입력형태, 지형자료의 취득 및 기계의 선정등을 고려하여 취득한 수치지형자료를 이용해서 미지점의 평면좌표에 대응하는 표고를 보간법으로 구하여 계산기에 입력한다. 또한 수치표고모형을 작성하는 경우 지형에 가까운 곡면을 선택해야 하며 합리적인 지형자료를 추출하여 계산기에 입력시킬수 있는 형태로 변환시키면서 계산에 요하는 시간이 짧아야 한다. 입력된 지형자료는 격자 프로그램을 연속한 곡면군에 가깝게 등고선으로 나타낼때 격자상에서 추출된 지형자료로부터 수치표고모형을 작성하여 지형을 곡면으로 나타낼 경우 곡면은 연속함수 이어야 하며, 인접한 2개의 곡면은 경사를 이루는 접평면에 연속이어야 하고, 또한 곡면이 정의되는 범위내에서 경사 변화가 가능해야 하며 보간계산이 용이해야

한다.

### 2.2 자료취득방법 및 처리

각 격자점의 좌표값을 이용하여 대상지역내의 임의의 점에 대응하는 지반고 Z를 구하는 과정은 아래와 같다.

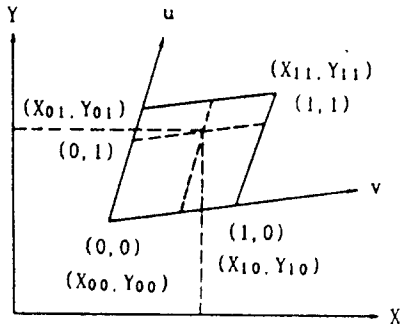


Fig. 1 Correlation of X, Y and u, v coordinates.

Fig.1 에서 X, Y 좌표계와 u, v좌표계는 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$X = \frac{a_3u + a_4v + a_5}{a_1u + a_2v + 1}$$

$$Y = \frac{a_6u + a_7v + a_8}{a_1u + a_2v + 1} \tag{2-1}$$

또한 Z를 u, v의 함수형태로 나타내면 식(2-2)와 같다.

$$Z = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 b_{ij}u_{4-j}v_{4-i} \tag{2-2}$$

식(2-1)을 u, v에 대해 정리하면 식(2-3)이 되고

$$u = \frac{(a_7 - a_2a_8)X + (a_2a_5 - a_4)Y - (a_4a_8 - a_5a_7)}{(a_2a_6 - a_1a_7)X + (a_1a_4 - a_2a_3)Y + (a_3a_7 - a_4a_6)}$$

$$v = \frac{(a_1a_8 - a_6)X + (a_3 - a_1a_5)Y - (a_5a_6 - a_3a_8)}{(a_2a_6 - a_1a_7)X + (a_1a_4 - a_2a_3)Y + (a_3a_7 - a_4a_6)} \tag{2-3}$$

식 (2-3)을 식 (2-2)에 대입하면 Z를 구할 수 있다.

### 2.3 자료취득의 수단

수치표고모형에 이용되는 자료는 지형도, 항공사진의 입체모형, 현장측량성과, 항공기나 인공위성에 탑재된 레이더와 레이저고도계로 취득할 수 있다.

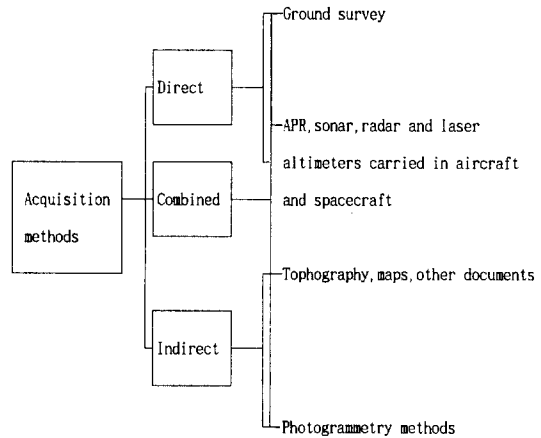


Fig.2 Classification of data acquisition methods.

#### 2.3.1 표본추출방법

자료취득수단으로 항공사진에 의한 표본추출법은 Fig.3과 같이 나열할 수 있다.

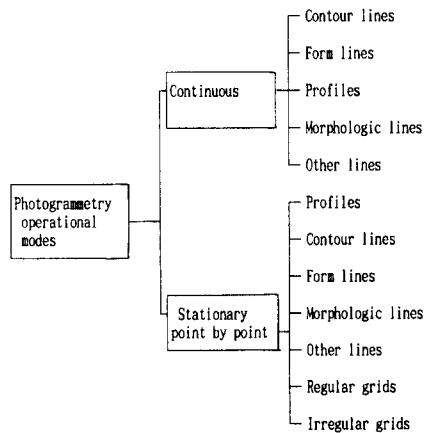


Fig.3 Sampling mode and output.

연속적 추출법은 작업속도가 신속하나 정확도는 상대적으로 낮고 많은 잉여자료를 수반한다. 단점식추출법은 작업속도는 느리나 정확도가 높고 적은 잉여자료를 수반하므로 연속추출법의 경우보다 더 간단하다. 앞에서 취득한 자료의 성파는 격자 형태를 형성하는데 격자망은 Fig.4와 같이 정규격자망, 불규칙격자망, 반정규격자망 등이 있으며 이중 정규와 반정규격자망이 중요하다.

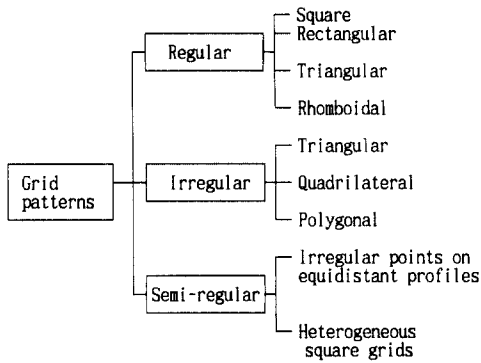


Fig.4 Classification of grids.

2.3.2. 등고선방법

지형정보원으로 등고선지도를 이용하는 경우 Fig.5 처럼 등고선으로 지형점을 추출할 수 있다.

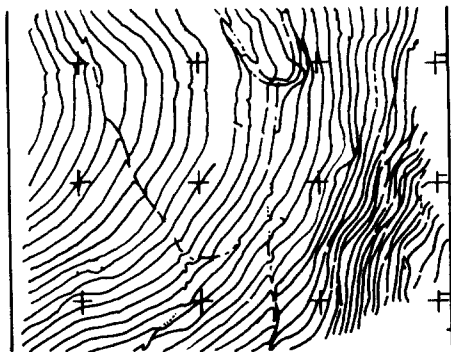


Fig.5 Contour method.

등고선을 표시하는 식  $f(x, y)=0$ 을 이들의  $x, y$  좌표에서 직접 정하는 것은 일반적으로 불가능한 것이므로 이 식을 1개의 매개변수  $t$ 를 써서

$$x = f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^n a_i \sin t_i + \sum_{i=1}^n b_i \cos t_i$$

$$y = g(t) = \frac{c_0}{2} + \sum_{i=1}^n c_i \cos t_i + \sum_{i=1}^n d_i \cos t_i$$

로 급수를 이용하여 바꾸어 표현할 수 있다.

여기서,  $a_i, b_i, c_i, d_i$ 는 지형의 굴곡을 나타내는 급수의 계수이다.

2.4 지형의 분류

2.4.1. 지형의 분류방법

수치표고모형의 자료추출과 수치자료의 연속적인 형태를 분석하기 위하여 지형기복 상태에 따른 적절한 분류가 필요한데 지형의 분류는 세가지 방법을 사용한다. 즉 정성적 방법, 정량적 방법, 그리고 이들 두가지를 혼합한 방법에 의해 접근 될 수 있다. 정성적 방법은 주관적인 판단에 의해 대상지형을 평지, 구릉지, 산악지 및 인위적인 지형 등으로 판단하므로서 지형상태에 따른 자료취득 방법에 대한 평가와 지형기복 등급에 따른 자료의 보간결과에 대한 평가등을 고려하지 못한 경우가 많았다. 정량적인 방법은 지형기복 상태를 수치적으로 표시할 수 있는 변수로 지형을 묘사하고 이 변수값들로 부터 지형을 수치화된 양으로서 객관적인 판단을 할 수 있게 한다.

지형을 정량적인 방법으로 묘사하는데 수 많은 변수들이 사용될 수 있는데 그 변수들은 다음의 몇가지 조건을 만족하여야 한다. 첫째, 변수들은 지형의 물리적 특성을 가능한 개념적으로 묘사할 수 있어야 하고, 둘째, 수치형태로 쉽게 관측 가능

Table-1 Terrain classification by Silar method.

Classification	Terrain type	Number of terrain breaking	Number of sampling point
Category I	The regular, plane surface	$t(10)/ha$	$(20-40)/ha$
Category II	The regular, varing surface	$t=(10-20)/ha$	$(40-100)/ha$
Category III	Irregular surface	$t)20/ha$	$(100-40)/ha$
Category IV	Artificial surface		

하여야하고 수치적 통계적 해석에 적당하여야 하며, 세째, 축척이 다른 경우에도 비교될 수 있어야 한다. 지형의 분류에 대한 연구는 Silar에 의해 처음으로 연구되었는데 지형의 경사도, 최대표고차, 절선 및 정점의 수, 지형의 복잡성등을 인자로 하여 Table-1 과 같이 분류하였다.

2.4.2. 지형묘사의 매개변수

2.4.2.1 경사와 곡률

경사는 지표면의 선이 수평선과 이루는 각이며 경사도는 이 각의 탄젠트 값으로서 표면 경사도는 영에서 무한대 까지 존재 한다. 한 지표면의 여러 점에서 경사도가 계산 된다면 그 표면위의 모든 경사의 변화를 표시할 수 있다. 지표면을 하나의 곡면식(z)으로 놓으면 평면(x, y)에 대한 표면의 공간 도함수는 (2-4) 식과 같다.

$$S = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} \quad (2-4)$$

여기서 S는 z에 대한 한쌍의 직교편미분에서 나오는 경사도의 크기이다. 곡률은 거리에 대한 경사도의 변화비율이므로 식 (2-4) 을 미분하여 구하면 된다.

$$S = \sqrt{\left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2}\right)^2 + \left(\frac{\partial^2 z}{\partial y^2}\right)^2} \quad (2-5)$$

2.4.2.2 돌출빈도 분포

돌출빈도는 하나의 정해진 기준면에서 부터 자료점의 변화를 표시하는 방법으로 세가지 방법이 있는데, 첫째 수직거리 즉 표고 자체로서 수평에서의 기복량을 표시하며, 둘째 최적 근사평면을 자료점 N개인 경우 평면계수를 (2-6)식으로 구하고 Fig.6의 최적 근사 평면으로 부터 지형점까지 법선방향으로 표시하는 경우와 지형점에서 최적 근사평면까지 수직거리로 표시하는 경우로 나눈다.

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & \sum x & \sum y \\ \sum x & \sum x^2 & \sum xy \\ \sum y & \sum xy & \sum y^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum z \\ \sum xz \\ \sum yz \end{bmatrix} \quad (6)$$

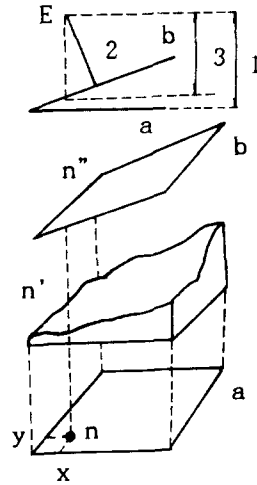


Fig.6 Three possible orientations of bump frequency.

2.4.2.3 평면의 분포

Fig.7 과 같이 지표면을 삼각형의 단위로 분할 하면 세개의 표고 기준점으로 이루어지는 삼각형의 평면들이 나누어져 각 평면들에 대한 단위 법선벡터들이 계산 될 수 있다. 곡면함수 Z에 대해 지표면의 단위 법선벡터는 다음과 같다.

$$\vec{n} = \frac{\text{grad } Z}{|\text{grad } Z|} \quad (2-7)$$

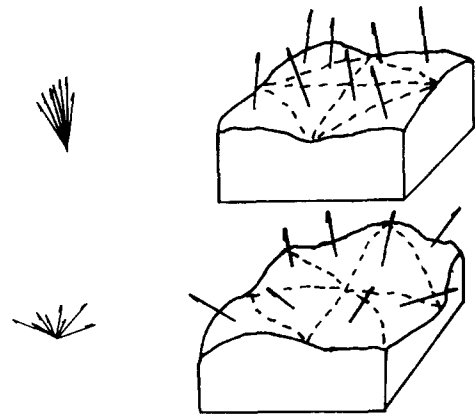


Fig.7 Planar surface by vector strength.

전체지형의 기복을 표시하는 벡터의 크기는 단

위 법선벡터의 방향여현에 대한 제곱합을 단위벡터수로 나누므로써 구해진다.

$$V_s = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (n_{xi}^2 + n_{yi}^2 + n_{zi}^2) \quad (2-8)$$

여기서  $n_x, n_y, n_z$  는 각각 단위법선벡터의 X, Y, Z 방향여현이며  $m$ 은 단위벡터의 수이다.

2.4.2.4. 수평면적에 대한 표면적의 비율

기지점 (X, Y)에 대한 수평면적에 비해 표면적은 지형의 기복이 심한 경우 증가한다는 가정으로부터 지표면의 변화상태를 묘사하는 변수로 사용할 수 있다. 분할된 삼각형으로부터 삼각형의 경사길이를 구하고 표면적  $A'$ 는 다음 식으로 구한다.

$$A' = \sum \sqrt{S_i(S_i - S_{i1})(S_i - S_{i2})(S_i - S_{i3})} \quad (2-8)$$

여기서,  $S_i = \frac{1}{2} (S_{i1} + S_{i2} + S_{i3})$  는 각 삼각형에서 각 변의 경사 길이 이다. 수평면적에 대한 경사면적의 비  $A' / A$  의 평균과 분산을 지형기복의 변수로 사용한다.

2.4.2.5. 조화벡터크기

조화벡터크기는  $m$ 과  $n$ 항으로 된 후리에계수의 제곱합에 대한 제곱근으로 정의한다. 지형표면 묘사에 사용되는 후리에계수들을 갖는 함수를 표시하면 다음과 같다.

$$f(x, y) = \left\{ \begin{aligned} & \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n (CC_{ij} \cos \frac{2\pi ix}{M} \cos \frac{2\pi jy}{N}) \\ & + \left( \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n (CS_{ij} \cos \frac{2\pi ix}{M} \sin \frac{2\pi jy}{N}) \right. \\ & + \left( \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n (SC_{ij} \sin \frac{2\pi ix}{M} \cos \frac{2\pi jy}{N}) \right. \\ & \left. \left. + \left( \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n (SS_{ij} \sin \frac{2\pi ix}{M} \sin \frac{2\pi jy}{N}) \right) \right\} \lambda_{ij} \end{aligned} \right. \quad (2-10)$$

이고  $\lambda_{ij}$ 는 축척계수이다. 후리에계수들은 전체적인 적합이 두개의 서로 직교하는 방향에서 조화적으로 진동하는 의미를 가지므로 후리에계수들의

크기는 진동의 증폭을 표시한다.

2.4.2.6. 절선

지형의 절선은 경사에 급격한 변화가 있는 선으로 수학적으로 공간 미분이 불연속적인 선을 나타낸다. 물리적으로 제방, 능선, 계곡선등으로 나타내며 절선이 지형표면의 조도를 표시하는 변수로 사용될 수 있지만 입체모형상에서 쉽게 인지되지 않는다. 포물선  $Z = a + bx + cx^2$  이 Fig.8처럼 A에서 I사이의 부분에 최소제곱법에 의해 점진적으로 적합되었다면 F와 I사이에서 포물선계수에 중요한 변수가 있다는 것을 알 수 있고, 이것은 H에서 단면의 형태에 변화가 있음을 알게 된다. 이산자료에 의해 절선을 찾는 다른 방법으로 변화가 생기는 단면부분을 절선으로 표시하거나 또는 x, y방향에 대한 미분의 요소가 (+)에서 (-)로 변화하는 점을 찾아서 절선으로 규정할 수 있다.

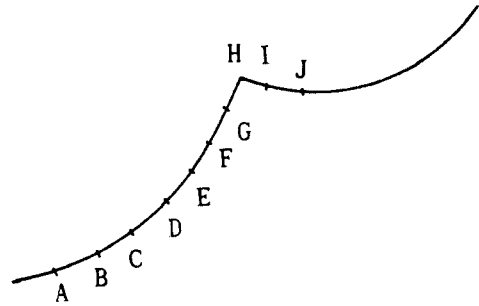


Fig.8 Breaklines.

2.5. 수치표고모형의 보간법

보간법이란 주어진 기지점을 이용하여 미지점을 추정하는 곡선점합을 위한방법으로 내삽과 외삽으로 나눌수 있는데, 수치표고모형에서는 일반적으로 내삽하게된다.높이 Z는 여러가지 보간법에 의해 결정되므로 지형의 형태에 따라 적절히 선택하여야 한다.

Quadrant searching method 는 Fig.9 처럼 보간하려는 점의 주위를 4개의 구역으로 나누어 한구역에서 인접한 점의 자료를 이용하여 보간점

을 구하는방법이고, Octant searching 방법은 Fig.10 처럼 보간점의 주위를 8가지의 구역으로 나누어 보간하는 방법이다.

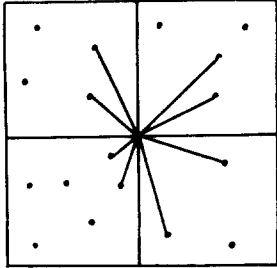


Fig.9 Quadrant searching method.

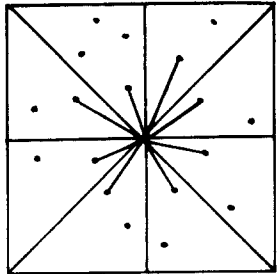


Fig.10 Octant searching method.

2.5.1 거리경중률 함수법

$Z_i$ 를 인접한 점의 표고자료,  $d_i$ 를 인접한 점까지의 거리,  $n$ 을 이용하려는 점의 갯수라 할때 거리경중률 함수는

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{d_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^2}} \tag{2-11}$$

이 된다. 만약 경중률 률 3 으로 한다면 식 (2-11)는 다음과 같이 표시된다.

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{d_i^3}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^3}} \tag{2-12}$$

이 방법에 사용되는 점들은 보간점에서의 거리가 멀수록 보간값에 미치는 영향이 적게 된다. 거리경중률 함수법은 처리속도가 빠르며 비교적 정확하다.

2.5.2 Kriging 보간법

Kriging 보간법은 탄광작업에서 과대오차를 줄이기 위하여 연구를 수행한 Krige, D. G. 에 의하여 개발되었으며 Matheron 이 공간 자료나 비고정자료에 대하여 일반화하였다.

일정지역에서 임의의 미지평균값  $y$  를 구하기 위한 보간방법으로 관측평균값을 표시하면,

$$y_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n y(x_i) \tag{2-13}$$

식 (2-13)은  $\frac{1}{N}$  의 동일한 경중률을 가지므로 효율적이지 못하며 경중률  $\lambda_i$ 를 도입하면

$$y_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i y(x_i) , \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \tag{2-14}$$

이 된다. 이 경우 각각에 합당한 경중률을 찾는 방법이 Kriging 으로서 관측평균값에 대한 오차가 0 이 되며 분산이 최소가 되고 또한, 선형결합을 만족하는  $y_s$  를 계산할 수 있다.

거리경중률함수법과 Kriging보간법은 보간점에서 인접한 점의 지형 자료를 이용하는 searching방법에의하여 Normal, Quadrant, Octant 의 세가지 방법으로 다시 구분된다. Normal searching 방법은 보간점에서 가장 가까운  $n$ 점의 자료를 이용하여 보간하는 방법이다.

2.5.3 최소곡률법

최소곡률법은 구하고자 하는 임의점의 높이를

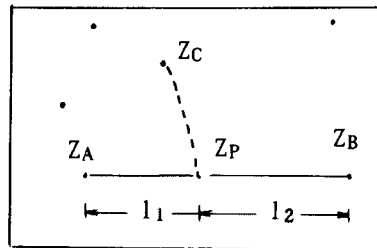


Fig.11 Minimum curvature method.

그 주위의 가장 가까운 점 즉 곡률이 최소가 되는 점을 기준으로 하거나 또는 가장 가까운 그 주위 두 점의 높이의 평균으로 표고를 보간하여 구하는 방법이다.

Fig.11 에서  $Z_p$ 는  $Z_c$ 를 기준값으로 하거나  $\frac{Z_A + Z_B}{2}$  값을 취한다.

그러므로 오직 홀수 개의 격자만이 최소곡률법의 이론에 적합하게 된다.

또한 다른 보간법에 비해 이 방법은 결과를 예측할 수 없으므로 자료의 외삽에는 이용 할 수 없다.

### 3. 관측결과 및 분석

#### 3.1 관측대상지 선정

본 연구의 관측대상지는 지형 분류를 통해 보간

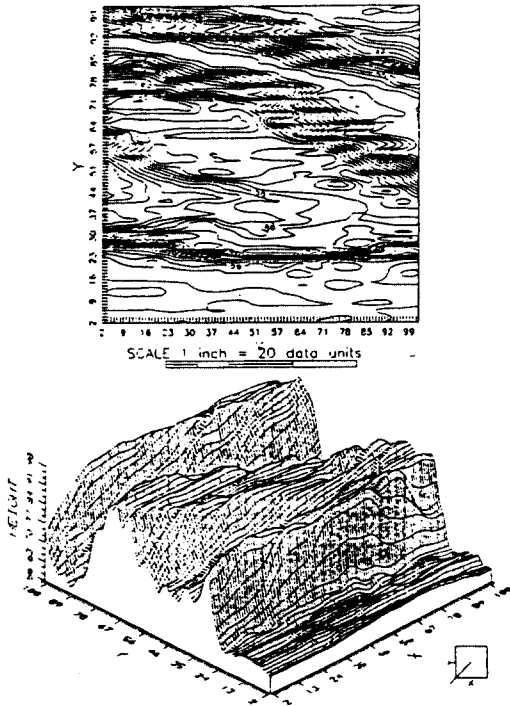


Fig.12 A contour map and perspective drawing by Mod5.

법을 적용하여 각 분류에 따른 최적보간법과 토공량의 정확도를 분석할 목적으로 골포장 건설을 위해 항공사진측량을 한 가지적으로 지형의 변화가 뚜렷한 100mx100m의 6개 지형을 선정하였다. 선정된 6가지 지형에 대한 표고자료는 각 지형이 포함된 축척 1/3000의 항공사진을 정밀도화기 Wild A10을 통해 격자간격 2mx2m(Mod1-Mod6)(본연구의 정확도의 기준) 및 5mx5m (Ad1-Ad6) 그리고 10mx10m(Mad1-Mad6)의 자료를 획득하였으며, 기준이 되는 2m로 획득한 표고값을 51x51개의 정규격자로 형성된 수치표고모형을 통해 Mod5 지형에 대한 등고선도와 3차원 투시도는 Fig.12와 같다(Mod1, 2, 3, 4, 6은 생략). 관측대상지를 가지적이고 정성적인 분류에서 지형 1, 2(Mod1, Mod2)는 Table-2에 나타난 바와 같이 경사도가 10%이내 인 평탄지에 해당하는 지형으로 분류될 수 있으며, 지형3, 4(Mod3, Mod4)는 경사도가 20% 정도로 구릉지로 분류되고, 지형5, 6(Mod5, Mod6)은 경사도가 40% 정도인 급경사의 산악지형으로 분류 할 수있다.

이와같이 가지적이고 주관적인 판단에 의해 분류된 지형은 취득 된 표고를 이용하여 정량적인 8가지 지형분류 변수를 통해 정량적이고 객관적으로 재분류하여 관측값 분석에 이용되어 진다.

Table-2 A feature of selection terrain.

Terrain	Interval	Magnitude	(m) Minimum-H	(m) Maximum-H	(%) Gradient
Mod1	2m	51x51	10.988	17.161	6.17
Mod2	2m	51x51	4.698	15.733	11.04
Mod3	2m	51x51	12.000	34.143	22.14
Mod4	2m	51x51	78.073	100.812	22.74
Mod5	2m	51x51	56.019	98.000	41.98
Mod6	2m	51x51	24.248	66.500	42.25

#### 3. 2. 분석자료의 선정

본 연구를 위한 분석자료의 획득에서는 2m의 간격으로 획득된 선정지형의 표고자료는 최확토공량 결정에 이용되며 5m 와 10m로 획득된 표고자료는 자료점 간격에 따른 각 분류된 지형의 보간



법에 적용에 따른 표고잔차 정확도를 분석할 목적으로 격자간격이 5m(Ad1-Ad6)와 10m(Mad1-Mad6) 형태의 2가지 분석 자료를 결정하였다. 이와같이 결정된 분석 자료는 격자간격이 넓으므로 경제적이거나 표고오차가 커서 정확도가 낮는데 본 연구에서 선택한 보간법으로 2m간격의 51x51 격자로 보간하여 표고값 및 토공량을 계산하여 최초의 2m간격으로 얻어진 지형의 표고값과 잔차를 분석하고 최확토공량과 정확도를 분석하기로 한다. 또한 자료점의 간격을 5m 및 10m로 취한 2가지 분석 자료를 통해 자료점 간격에 따른 분류된 지형의 보간법의 적용여부 특성 및 정확도를 분석하므로써 각 지형에 대한 최적 보간법을 찾는 데 이용된다.

격자간격이 5m(Ad5)와 10m(Mad5)로 분류된 지형의 등고선도 및 3차원 투시도는 Fig.13, 14와 같다.(Ad1, 2, 3, 4, 6, Mad1, 2, 3, 4, 6은 생략)

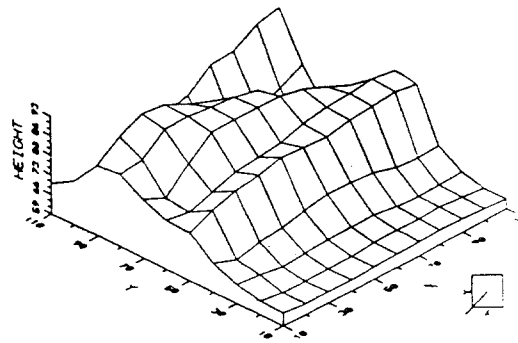
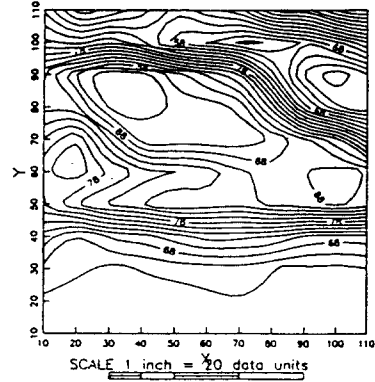


Fig.14 A contour map and perspective drawing of Mad5.

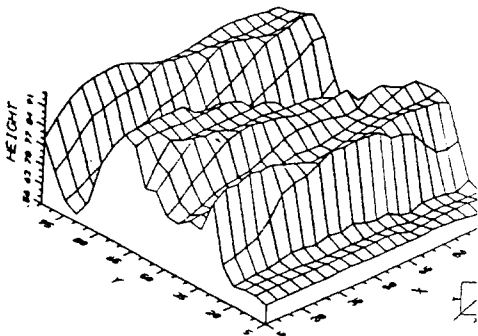
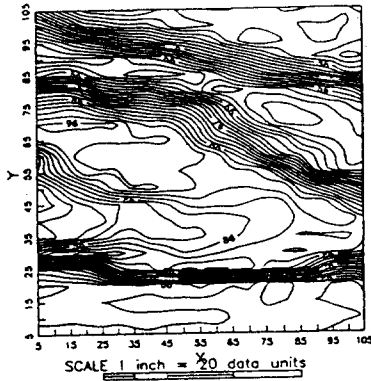


Fig.13 A contour map and perspective drawing of Ad5.

Fig.13, 14를 Fig.12의 원지형 형태와 비교해보면 지형의 윤곽은 비슷하나 섬세한 지형의 굴곡이나 자료점 간격이 변함에 따라 커다란 변화가 있음을 알 수 있다.따라서 본 연구에서는 먼저 지형을 8가지 인자로 된 정량적인 분석으로 지형을 분류한 후, 이와같이 자료점 간격이 2m에서 5m, 0m로 커진 분석자료를 이용하여 각지형별로 최소곡률법과 거리경중률법, Spline보간법 그리고 Kriging보간법, 조합보간을 적용하고 등고선의 표고잔차및 토공량을 분석 하므로써, 자료점 간격이 커진 2가지(Ad1-Ad6, Mad1-Mad6) 분석 경우에 대해 원지형(Mod1-Mod6)에 가장 접근할 수 있는 최적보간법을 지형군에 따라 제시하고자 한다.

3.3 지형분류변수에 따른 관측대상지의 분류

본 연구에서 선정된 6가지 지형의 객관적 분류를 위하여 지형을 정량적으로 표시할 수 있는 변수들을 선택하여 표고 범위별로 구분한 6가지의 지형에 대한 변수값을 구하였다. 그 계산 흐름도는 Fig.15와 같으며 변수들은 지형의 경사 크기를 표시하는 변수와 지형의 기복변화량을 표시하는 변수로 나누어서 고려하였다.

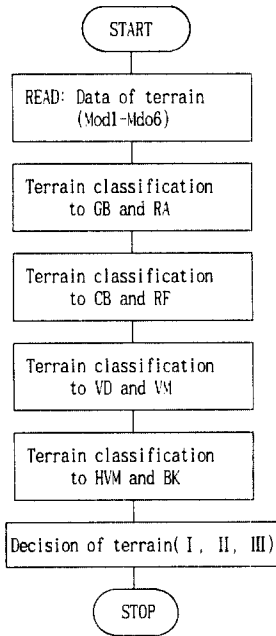


Fig.15 Flow chart of terrain classification by an exponential function.

경사의 크기를 표시하는 변수로는 각 격자점에서 경사를 구한 평균경사도(GB)와 격자 구역내의 수평면적에 대한 표면적의 비(RA)로서 평균경사도를 백분율로 표시하고 면적비는 경사면적(A')의 수평면적(A)에 대한 증분의 백분율  $100 \times (A'-A)/A$ 로 표시하였다. 기복의 변화량을 표시하는 변수로는 평균곡률(CB), 돌출빈도(BF) 벡터 분산(VD), 벡터크기(VM), 조화벡터량(HVM) 및 절선의 수(BK)로 나누었고, 절선의 수는 전체 관측점 수에 대한 비율로써 표시 하였다. 각 지형별

변수들에 대한 값은 Table-3과 같다.

Table-3 Quantative characteristics of terrain(1-6).

surface	GB	RA	CB	BF	VD	VM	HVM	BK	
I	MOD1	15.573	2.228	2.335	1.201	15.888	162.157	3.944	59
	MOD2	14.789	1.810	1.912	2.113	13.349	163.380	2.994	14
II	MOD3	31.128	6.869	5.217	5.384	21.777	146.574	8.090	194
	MOD4	32.696	7.763	4.112	4.211	23.487	146.203	13.459	95
III	MOD5	154.780	99.068	43.317	12.415	45.469	89.202	22.437	908
	MOD6	158.483	100.42	52.601	12.517	42.790	84.896	24.801	987

Table-3에서 평균 경사도(GB)를 이용하여 분석한 결과, 경사가 10-20%인 지형군 (I군, 평지 또는 완경사지), 20-35%인 지형군 (II군, 준경사지), 35%이상인 지형군 (III군, 급경사지)의 3개의 군집으로 분류하였다. 또한 수평면적에 대한 경사면적의 증분의 백분율(RA)에 의한 분류는 I군이 3% 이하, II군이 3-10%, III군은 10% 이상이었으며, 곡률에 의한 분류는 I군은 2내외 II군은 4에서 5까지로 거의 같으나, III군은 그 이상으로 나타났다. 돌출빈도에 의한 분류는 I군이 2.2 이하 II군이 4.2에서 5.4이며 III군이 10이상으로 분류되며, 벡터의 분산에 의한 분류는 Table-4에서 I군은 16이하 II군은 21-24 III군은 42-45로서 분류할 수 있으며, 벡터의 크기는 I군은 160 정도 II군에서는 140 그리고 III군에서는 80정도였다.

그리고 조화벡터량은 I군은 4.0이하 II군은 8.0-14.0 III군은 22-25으로 나눌수 있으며 절선은 +10% 경사에서 -10% 경사의 변화를 가지는 점으로 이 변수에 의한 분류는 I군은 60이하 II군 95-194 그리고 III군은 900 이상으로 나누어진다.

지형분류 변수를 적용하여 정량적인 지형분류를 실시 한 결과 3가지 군으로 분류 할 수 있었으며, I군에 해당하는 Mod1, Mod2는 완경사의 평탄지, II군에 해당하는 지형Mod3, Mod4는 준경사

의 구릉지 III군에 해당되는 지형Mod5, Mod6은 급경사지의 산악지형으로 분류 할 수 있다.

따라서 주관적으로 선정된 지형을 객관적인 주요 변수로 정량화하므로서 기존 지형에 대한 주관적 판단에 의해 야기 될수 있는 자료획득방법의 연구와 지형기록 등급에 따른 보간결과의 정확도와 객관성의 결여에서오는 문제점을 해결할 수 있었다.

3.4 지형분류에 따른 보간법의 정확도 분석

주관적으로 선정된 6가지 지형은 8개의 정량적인 변수로 분류한 후, 2m 간격으로 획득된 6가지 지형의 표고값을 기준으로 같은 대상 지형을 5m 및 10m의 넓은 간격으로 획득한 분석 자료에 대 지형과 비교하였다.

비교 방법으로 4가지 보간법을 적용하여 초기 자료의 격자인 2m간격으로 보간한 후 표고값의 잔차에 대한 표준편차를 구하여 그 정확도를 분석하였다.

본 연구에서 이용된 보간법으로는 자료점 간격 5m와 10m 모두에서 거리경중률 함수법과 최소곡률법, kriging보간법 및 지형smoothing에 많이 이용되는 Spline보간법을 6가지 지형에 대해 적용하였으며, 각 지형의 특성에 따라 거리경중률 함수법, 최소곡률법, kriging보간법에 spline보간법을 조합하는 조합보간방식으로 토공량의 오차및 표고잔차의 표준편차를 분석하였다. 또한, 모든 보간법의 탐색방법으로는 탐색 정확도가 Octant에 비해 다소 저하되나 계산시간이 현저하게 적게 드는 Quadrant 방법을 이용하였으며, 탐색 에 이

용되는 인접점은 10점 으로 하였고, 거리경중률 함수법에서는 경중률은 5로 최소곡률법에서 수렴값은 0.005, 반복 계산수는 500회로 하였다.

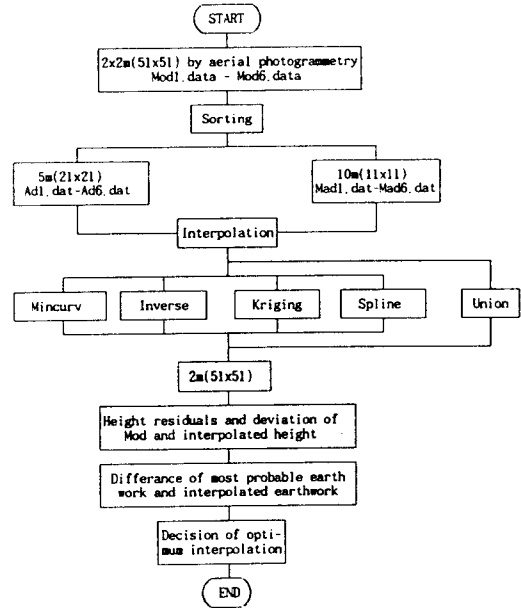


Fig.16 Algorithm of optimum interpolation by terrain classification.

3.5. 지형의 분류에 따른 표고잔차분석

분류된 지형에 적합한 보간법을 찾기 위해 5m간격의 분석자료(Ad1-Ad6:21x21)과 10m간격의 분석 자료(Mad1-Mad6:11x11)에 대해 최소곡률법, 거리경중률함수법, Spline보간법, Kriging보간법으로 51x51정규격자로 보간하여 초기 표고값 (Mod1-Mod6)과 표고잔차를 비교 분석하였다. 표고잔차 분석 결과는 Table-5, 6 그리고 Fig.17, 18과 같다.

Table-4 A feature of interpoation.

Feature	Min. curv	Inverse Weight	Spline	Kriging
Data interval	2m(51x51)	2m 51x51)	2m(51x51)	2m(51x51)
Searching method	.	Quadrant	.	Quadrant
Weight	.	5	.	.
Audience-point	10	10	10	10

Table-5 Mean of residuals(Mr) and standard deviation of Residuals (Sdr) to data point interval 5m (Ad1-Ad6). (m)

Terrain		Interpolation			
		Min.curv	Inverse Weight	Spline	Kriging
Ad 1	Mr	-0.009802	-0.005676	-0.006768	-0.008708
	Sdr	-0.255764	0.256276	0.243714	0.208123
Ad 2	Mr	0.002740	-0.004062	-0.002317	-0.001295
	Sdr	0.138786	0.206667	0.203114	0.131658
Ad 3	Mr	0.017623	-0.047607	-0.031246	-0.023480
	Sdr	0.308663	0.468773	0.307805	0.307715
Ad 4	Mr	0.003223	-0.0014585	0.002841	0.002483
	Sdr	0.280736	0.47228	0.238751	0.232762
Ad 5	Mr	-0.011438	-0.069076	-0.066217	-0.063202
	Sdr	1.845350	2.05022	1.831462	1.77975
Ad 6	Mr	-0.136809	-0.120909	-0.128185	-0.136006
	Sdr	2.334240	2.328630	2.325726	2.242160

Table-6 Mean of residuals(Mr) and standard deviation of Residuals(Sdr) to data point interval 10m (Mad1-Mad6).(m)

Terrain		Interpolation			
		Mincurv	Invere	Spline	Kriging
Mad 1	Mr	0.01968	0.03185	0.02637	0.02108
	Sdr	1.11129	1.09948	1.08742	1.05156
Mad 2	Mr	0.34969	0.32657	0.33714	0.33183
	Sdr	1.09907	1.09887	1.08469	1.06331
Mad 3	Mr	1.62567	1.47041	1.52145	1.58379
	Sdr	2.00293	2.00971	1.96317	1.92913
Mad 4	Mr	0.35978	0.33500	0.34162	0.35079
	Sdr	2.46436	2.44697	2.30014	2.29017
Mad 5	Mr	2.39394	2.22565	2.28415	2.31983
	Sdr	12.46140	12.29890	12.01417	11.73510
Mad 6	Mr	-3.84662	-3.68686	-3.75215	-3.69581
	Sdr	7.84792	7.75490	7.65214	7.44164

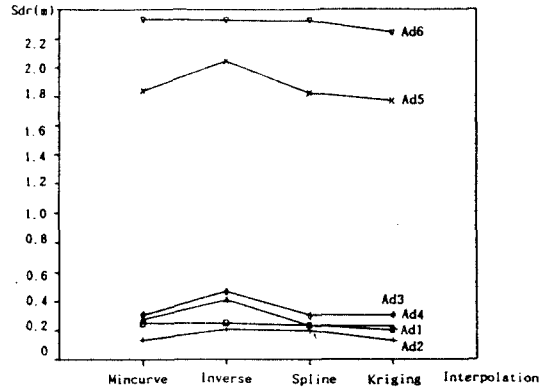


Fig.17 Standard deviation of residuals(Sdr) of height residuals of terrain Ad1-Ad6.

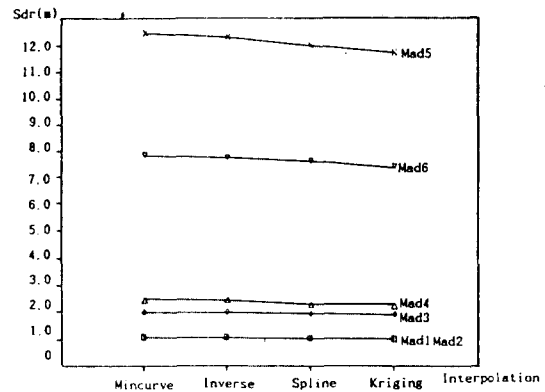


Fig.18 Standard deviation of residuals(Sdr) of height residuals of terrain Mad1-Mad6.

Table-5, 6 과 Fig.17, 18에서 나타난 것처럼 자료점 간격을 5m와 10m에 대해 보간법을 적용하여 초기표고(Mod1-Mod6)와 표고잔차를 분석한 결과 평탄지 및 구릉지로 분류된 I, II군 지형보다 급경사의 산지로 분류된 III군에서 11.3-16.8배 더 큰 표고잔차를 나타내었다. 또한 각 지형군에 대해 4가지 보간법을 적용하여 초기자료 획득간격인 2m의 51x51 정규격자형으로 보간을 실시하여 초기자료의 표고값과 표고잔차에 대한 표고잔차를 분석한 결과 자료점 간격이 5m인

Ad1-Ad6에 대해 평탄지로 분류된 I군의 지형1, 2에서는 Kriging보간법이 가장 정확도가 좋았으나 계산 소요시간에서 다른 보간법에 비해 많은 시간(약3배)이 소요되었으며, 정확도가 비슷한 최소곡률보간 으로서도 좋은 결과를 나타내었다.

구릉지로 분류된 II군에 해당되는 지형3, 4에서는 Kriging-Spline-최소곡률법-거리경중률합수법으로 나타났으나 지형의 특성에서 Smoothing기법이 요구되므로 Spline 보간법이 특성상 유리하였고, 산악지인 III군에서는 Kriging보간법이 다른 보간법에 비해 상대적으로 작은 표고잔차를 나타내었다. 그리고 격자간격 10m(Mad1-Mad6)에서는 모든 지형에 대해 Kriging-Spline-거리경중률합수법-최소곡률법 순으로 표고잔차 정확도가 양호하였으나 자료점 간격이 10m로 커짐에 따라 5m 간격에 비해 거리경중률합수법의 정확도가 향상되었고 동일 지형군에 대해서도 지형변화가 있는 II, III군에서는 최소표고가 큰 지형 4, 5가 지형 3, 6보다 표고잔차 정확도가 현저하게 저하되었다.

이상과 같이 자료점 간격을 5m, 10m로 변화시켜 각 지형에 대해 4가지 보간법을 적용하여 표고잔차 정확도를 분석 한 결과 보간에 소요되는 계산시간이나 정확도의 차이 등과 같은 경제성을 고려해 볼때 평탄지로 분류된 I군에서는 최소곡률

법이, 구릉지의 II군에서는 Spline보간법이, III군에서는 Kriging보간법이 대규모 지형의 수치지형모형에 대한 보간에서 가장 경제적인 보간법임을 알 수 있었다.

또한 자료점 간격에 대한 분석에서는 Ad, Mad에서 가장 높은 정확도를 나타낸 Kriging보간법에 대한 표고잔차의 표준편차를 분석하였다.

분석결과 Table-7 및 Fig.19에서 나타난 바와 같이 자료점 간격을 5m로 취한 지형이 10m 지형보다 I, II, III군에서 약 70-90%의 상대적인 정확도가 향상됨을 알 수 있었다.

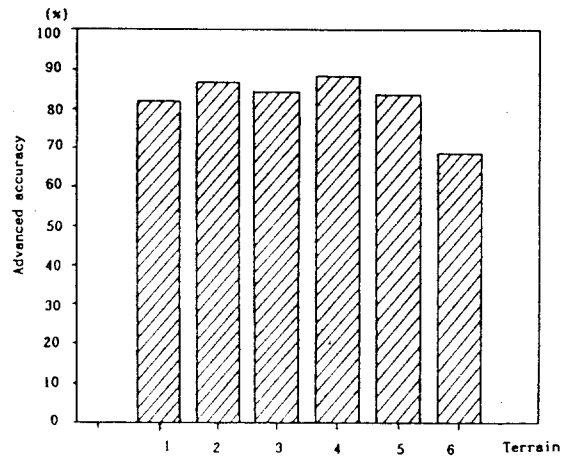


Fig.19 Bar graph of advanced accuracy ratio of height residuals and deviation to each terrain.

Table-7 Advanced accuracy ratio of height residuals and deviation to each terrain.

Terrain	5m Interval	10mInterval	Advanced accurracy(%)	
I	1	0.20812	1.05156	80.2
	2	0.13165	1.06331	87.6
II	3	0.30771	1.92913	84.0
	4	0.23276	2.29017	89.8
III	5	1.77975	11.73510	84.8
	6	2.24216	7.44164	69.9

### 3.6 조합보간에 의한 표고잔차 분석

앞 절의 자료점 간격 5m, 10m에 대한 4가지 보간법을 적용하여 표고잔차의 정확도를 분석한 결과 자료점 간격이 커짐에 따라 지형변화가 심한 III군에서는 정확도가 저하되었다.따라서, 본 연구에서는 자료점간격이 10m로 초기자료보다 자료점간격이 5배나 큰 Mad1-Mad6에 대해 조합보간을 실시하였다.보간 순서는 Mad1-Mad6에서 정확도가 불량한 순인 최소곡률보간-거리경중률합수보간법-Spline-Kriging보간법으로 조합하여 각

지형군에 대해서 표고잔차 정확도가 크게 향상되는 조합보간 단계를 찾았다. 각 지형군별 조합보간의 결과는 Fig.19 및 Table-8과 같다.

Table-8 Height residuals and deviation of terrain by union interpolation.

Terrain	A (m)	A+B (m)	A+B+C (m)	A+B+C+D(m)	Advanced accuracy(%)	
I	Mad 1	1.11129	0.377193	0.35214	0.34169	66.0
	Mad 2	1.09907	0.318673	0.30246	0.29471	71.0
II	Mad 3	2.00293	1.85143	0.56501	0.52142	71.8
	Mad 4	2.46436	2.65413	0.47186	0.44145	80.8
III	Mad 5	12.46140	10.14716	8.48923	2.21411	82.8
	Mad 6	7.84792	7.32417	5.24178	2.87234	63.4

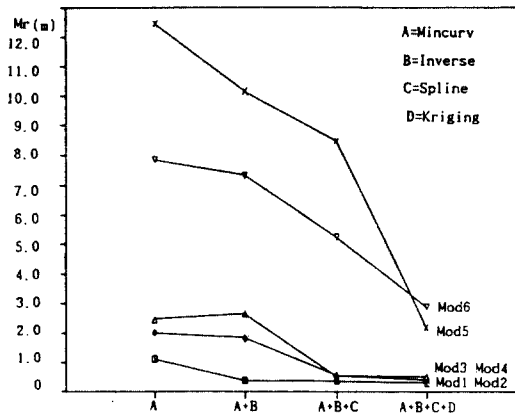


Fig.20 Height residuals and deviation of terrain by union interpolation.

Table-8과 Fig.20에서 나타난 것처럼, 자료점 간격이 10m인 Mad1-Mad6에 대해 조합보간을 실시한 경우, 평탄지로 분류된 지형 1,2의 I군에서는 최소곡률보간법과 거리경중률합수법만으로도 정확도를 향상시킬 수 있었으며, 차후의 보간에서의 유사한 정확도로 수렴하였다.

또한, 구릉지인 지형 3, 4의 II군에서는 최소곡률법과 거리경중률합수법, 그리고 Spline보간법

으로 조합한 보간으로 표고잔차를 감소시킬 수 있었으며, 특히 지형변화가 심한 지형 5, 6의 III군에서는 이용한 4가지 보간방법을 모두 조합한 보간방법으로 표고 잔차를 줄일 수 있었다.

따라서 Fig.21과 같이 조합보간을 통해 각 지형의 표고잔차의 정확도를 분석한 결과 I군은 최소곡률법과 거리경중률합수법, II군은 최소곡률법과 거리경중률합수법 그리고 Spline 보간법, III군은 4가지 모두를 조합보간하면 격자 간격에 따라 발생하는 표고잔차의 정확도를 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다. 또한 조합보간을 실시하지 않은 경우(A)와 각 지형군에서 표고잔차의 정확도가 급격히 향상되어 수렴되는 조합보간 단계의 정확도에 대한 상대적인 정확도 향상률을 분석한 결과, Fig.21과 같이 I, II, III군에서 약63-83%가량 정확도가 향상되었다.

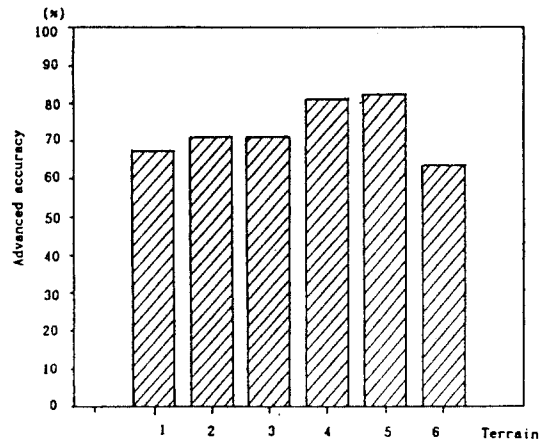


Fig.21 Bar graph of advanced accuracy ratio of height residuals and deviation to each terrain.

#### 4. 결 론

지금까지 수치표고모형에 의한 지형의 정량적 분석과 넓은 표고 자료점 간격에 따른 정확도 향상을 위한 보간법의 적용과 지형도 작성을 실제의 지형에 직접 적용하여 본 결과 다음과 같은 결론

을 얻을 수 있었다.

1. 지형의 분류에 있어서 종래의 방법은 지형의 경사도나 비고차로서 분류하므로써 객관성이 결여되었으나, 본 연구에서는 8가지의 지형 분류 인자로서 정량적인 분석을 하였으므로 지형 분류에 보다 정확한 자료를 제공할 수 있다.

2. 자료점의 간격을 5m, 10m로 변화시켜 표고잔차분석을 한 결과 각 지형군별로 I군(평탄지)에서는 최소곡률법이, II군(구릉지)에서는 Spline보간법이, III(산악지)에서는 Kriging보간법이 더 정확 하였다.

3. Kriging보간법을 적용할 때 각 탐색방법의 정확도는 8분탐색법이 우수하였으나 지형도 작성에 소요되는 시간을 고려하면 일반탐색법이 효과적 이었다.

4. 자료점 간격이 넓으면 경제적이지만 정확도가 떨어지므로 전체계획 대상지역을 단일 보간법으로 적용하면 오차가 크게 나온다. 따라서 본 연구에서 적용해 본 4가지의 보간법을 단계별로 적용한 결과 I군에서는 최소곡률법 + 거리경중률함수법이, II군에서는 최소곡률법 + 거리경중률함수법 + Spline보간법이, III군에서는 최소곡률법 + 거리경중률함수법 + Spline보간법 + Kring보간법을 조합시켜 본 결과가 64-81% 더 정확도가 향상 되었다.

## 참 고 문 헌

- 1) 村井俊治, "地形の數量化", 日本土木學會誌, 1973, pp.93-99.
- 2) 村井俊治, "地形の數量化", 日本土木學會誌, 1972, pp.61-69.
- 3) Miller, C. L., Laflame, R.A., "The Digital Terrain Model Theory and Application", Photogrammetric Engineering, 1958.
- 4) Ayeni, O.O., "Consideration for Automated Digital Terrain Models with Application in Differential Photo Mapping", Ph. D Dissertation, Ohio State University, 1976.
- 5) Nordin, H., "La Representation digitale du terrain en vue de la mesure des profils en long et en travers pour les projets routiers," Photogrammetric et etudes d'autoroutes, Bfulletin No.27, 1967
- 6) Wilson, S., "Digital Terrain Model-Appresentation of the practical Application of some Existing DTM", Intercommisssional Working Group IV/V, ISP, 1968.
- 7) Vuta, E., "La mise au poit, en Finlande, de la methode par Surface", Photogrammetrie et etude d'autoroutes, Bulletin No.27, 1967.
- 8) Bonsman, E.R, Eckhart, D, kubik, k, "Delft-A Programme system for suface Approximation", Bul, 13, 1972.
- 9) Kraus, K., Mikhail, E.M, "Linear Least-Squares Interpolation", PE & RS, Vol.38, No. 10, October 1972, pp.1016~1029.
- 10) Jancatis, J.R., Junkins, J.L., "Modeling Irregular Surfaces", PE & RS, Vol. 39, No. 5, May 1973, pp.413-420.
- 11) Kubik, K., Botman, A.G., "Interpolation Accuracy for Topographical and Geological Surface ", VIII ISP Conggress Commission III, Presented Paper, Helsinki 1976, pp.135.
- 12) Masson d'Autume, G., "Interpolation by a Flexible Rod:Applications to Digital Photogrammetry ", VIII ISP Congress Commission III, Presented Paper, Helsinki 1979, pp.1-9.
- 13) Terry W. Gossand, "Application of DTM in the Forest Service", PE & RS,

- 44(12), 1978, PP.1577-1586.
- 14) Chadra, N., "Application of Photogrammetry to DTM's of Highway Design and Construction", M. S. Thesis I.T.C., 1979.
  - 15) Turner, A. K., "A Decade Experience in Computer Aided Route Selection", PE & RS, 44(12), 1978, pp. 1561-1576.
  - 16) Collins, S.H., "Algorithms for Dense Digital Terrain Models", PE & RS, Vol.47, No.1, January 1981, pp71-76.
  - 17) Frederikson, P., "Terrain Analysis and Accuracy Prediction by means of the Fourier Transformation" XIVISP Congerss Commission VI, Presented Paper, Hamburg 1980, pp.284-293.
  - 18) Segu, W.P., "Terrain Approximation by Fixed Grid Polynomial", Photogrammetry Record, 11(65), April 1985, pp.581-591.
  - 19) Papo, H.B., Gelbman, E., "Digital Terrain Models for slope and Curvatures", PE & RS, Vol. 50, No. 6, June 1984, pp.695-701.
  - 20) Ostman, A., "Accuracy Estimation of Digital Elevation data banks", PE & RS, Vol. 53, No. 4, April 1987, pp.425-430.
  - 21) Balce, A.E., "Determination of Optimum Sampling Interval in Grid Digital Elevation Model Data Acquisition", PE & RS, Vol. 53, No.3, March 1987, pp.323-330.
  - 22) Crespoi, M., Forlani, G., Mussio, L. & Radicioni, F., "Terrain Classification by Cluster analysis ", XVI ISP Congress Commission III, Presented Paper, Kyoto 1988, pp.128-137.
  - 23) Ostman, A., "Accuracy Estimation of Digital Elevation data banks", PE & RS, Vol. 53, No. 4, April 1987, pp.425-430.
  - 24) Ismat, M. El - Hassan, "Irregular Boundary Area Computation by Simpson's 3/8 Rule", ASCE, Journal of Surveying Engineering, Vol. 113, No 3, 1987. PP. 127-132
  - 25) Youssuf, M. Siyam, "Precision in Cross-Sectional Area Calculations on Earthwork Determination ", ASCE, Journal of Surveying Engineering, Vol. 113, No. 3, 1987.