

연안 해역 음향 측심 자료의 계층적 보간

The Hierarchical Interpolation of the Coastal Echo Sounding Data

이 석 찬* 이 창 경**
Lee Such-Chan Lee Chang-Kyung

요 旨

음향측심자료는 연직단면상의 연속자료이며 측심선사이에는 자료추출점이 없다. 본 연구에서는 음향측심자료에 대하여 측심선상에서 등간격으로 선형보간을 실시하고, 이 보간점을 자료점으로 하여 반분산으로 부터 유도된 크리깅 법으로 측심선 사이에 위치한 정규격자점의 수심을 보간하였다. 이와같은 계층적 보간법은 음향측심 자료에 있어서 기존의 이동평균법이나 크리깅법에 비해 정확도 향상과 보간소요시간절감 효과를 보였다.

ABSTRACT

The data type of the echo sounding for the contouring of coastal chart is continuous profiles, and there are no data between the profiles.

In this study, at first, the depths of the regular grid along the sounding line were interpolated by linear equation. After that the depths of the regular grid located between the profiles were interpolated by kriging. The semivariogram contributes to the weight of interpolation. After comparison with the conventional Moving Average and Kriging, it turns out that this algorithm shows merits in the field of the accuracy and computing time.

1. 서 論

수치지형모델(DTM 또는 DEM)은 지형표본 자료의 추출과 비추출지점의 특정값을 유추하는 보간 및 이들 수치자료를 이용한 지형의 재현 과정으로 이루어진다. 최적 표본추출은 최소의 표본추출로 규정 정확도를 만족하는 등고선을 작도하는데 그 목적이 있다. 표고 표본을 추출하는 형태에는 해당지역을 일정 격자로 나누어 그 격자점의 높이를 기록하는 격자형, 등고선의 곡률 변화점의 연속적인 X, Y 좌표들을 기록하는 수평단면형, 해당지역을 일정한 간격의 띠로 분할하여 각 종단면에서 경사 변화점의 거리, 높이를 기록하는 연직단면형 및 불규칙하게 분포한 표본점의 X, Y, Z

좌표들을 기록하는 비정규형 등이 있다. 보간법은 우선 하나의 함수로 전체구역을 묘사하는 전역법과 일부구역을 묘사하는 지역법으로 나뉜다. 전역법에는 다항회귀식에 의한 방법과 Fourier 급수에 의한 방법이 있으며 지역법에는 운형선법, 加重移動平均法, Kriging법 등이 있다. 이들 방법은 지형과 자료추출방법에 따라 그 정확도 및 효율성이 달라진다.

본 연구에서 다루는 연안해역 수심자료는 몇 가지 점에서 육상지형을 다루는 일반적인 DTM과 차이가 있다. 첫째는 자료취득방법의 문제로 육상 DTM자료는 기존지도, 항공사진(또는 Remote Sensing), 지상측량 등으로 부터 추출하나, 수심자료는 대부분 음향측심으로 부터 얻어지며, 자료추출형태도 연직단면법에 국한된다. 둘째는 연안해역이라 하더라도 그 이용가치가 육상에 비해 전반적으로 떨어져 표본추출간격이 육상에 비해 넓다(측심선 간격

* 한양대학교 토목공학과 교수

** 한양대학교 대학원 박사과정

250m). 셋째는 관측값의 수평위치가 육분의 및 삼각분도기에 의해 결정되기 때문에 육상측량에 비해 정확도가 떨어지며 수심측정값은 조석의 영향을 받는다. 넷째는 육상 DTM은 육안으로 확인 가능한 지역을 취급하나 수심측량은 육안으로 확인하기 어려운 해저 지형을 취급한다.

Monahan과 Casey(1986)는 음향측심자료를 운형선에 의해 보간하는 방법으로 등수심도를 작성하였다. 즉 음향측심선 사이를 3등분하는 정규격자망을 구성한 다음 외부격자점(12점)의 수심을 먼저 음향측심자료로 부터 평면 3차운형선으로 보간하고, 이들 외부격자점을 기준으로 내부격자점(4점)의 수심을 공간 3차운형선으로 보간하였다. 이 방법의 특성은 음향측심선상의 등간격의 격자점 수심을 1차로 보간하고 내부격자점의 보간은 1차보간점을 기준으로 한데 있다.

일반적으로 운형선은 한번에 소수의 점을 사용하는 구분함수이기 때문에 내삽값을 신속하게 계산하며 경향면이나 가중 평균과는 대조적으로 소규모의 특성을 처리한다. 운형선법의 내삽오차는 Jack-Knifing 법과 같은 순환 기법으로 처리할 수는 있지만, 직접 측정할 수 없다. 실질적인 문제는 패치를 어떻게 정의 하느냐 하는 것과 이들 패치를 어떻게 결합하여 원자료에 없는 오류를 만들어 내지 않고 3차원 내삽면을 만들어 내느냐 하는데 있다. 즉 3차운형선은 같은 자료점을 이용하더라도 단절점(break point)의 위치에 따라 그 線形이 달라지며, 음향측심자료와 같은 띠 형태의 자료는 측심선의 직각방향에 자료가 분포하지 않아 공간의 3차운형선에 의한 경향면의 신뢰도가 떨어진다. 따라서 본 연구에서는 기존의 방법대로 음향측심자료를 이용하여 비정규 자료구조의 견지에서 이동평균법, Kriging법 및 비정규 삼각망에 의한 정규격자점의 수심을 보간하고, 이와는 달리 음향측심자료를 측심선상에 정규격자로 1차보간한 후에 측심선과 측심선 사이에 위치한 격자점의 수심을 Kriging법으로 보간하여 그 정확도 및 계산효율을 비교평가하여

우리나라 연안 해역측량에 적합한 모형을 제시하고자 한다.

2. 보간법

(1) 가중이동평균법

공간적 내삽 또는 외삽의 이론적 근거는 서로 가까이 있는 점들은 멀리 떨어져 있는 점보다 더 유사한 값을 갖는다는 토블러의 법칙(Tobler's law of geography)이다. 이 법칙에 따라 관측점과 내삽지점 사이의 거리에 따라 가중치를 주어 인접 자료점으로 부터 평균값을 계산한다. 즉

$$\hat{Z}(X) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i), \quad \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (1)$$

와 같이 계산되며 가중치 λ_i 는 $\Phi(d(x, x_i))$ 로 정해진다. dx 가 0에 접근하면 $\Phi(d)$ 가 증가하므로 역수 또는 역지수함수가 사용될 수 있으며 역거리 제곱 가중치로 식 1을 고쳐쓰면 다음과 같다.

$$\hat{Z}(x_i) = \frac{\sum_{j=1}^n Z(x_j) d_{ij}^{-2}}{\sum_{j=1}^n d_{ij}^{-2}} \quad (2)$$

이동 평균법은 평활법이기 때문에 내삽면의 최대값이나 최소값은 자료점에서만 나타난다.

(2) 비정규삼각망에 의한 격자점의 보간

비정규 삼각망은 불규칙하게 위치해 있는 데이터들의 상호 기하학적 관계로부터 지형의 3차원적 표현을 가능케 하기 위한 수치표고 모델의 데이터구조이다. 지금까지 개발된 비정규 삼각망 데이터구조는 대부분 Delaunay triangulation에 그 바탕을 두고 있다. 그림 1에서 A점을 둘러싸고 있는 다각형안의 모든 점들이 B,C,D,E,F 점에서 보다 A점에 더 가까운 다각형을 생각할 수 있는데 이러한 조건을 만족하는 다각형을 Thiessen Polygon이라고 하며 이는 선분 AB,AC,AD,AE,AF의 수직이등분선에 의하여 만들어진다. 이와같이 Thiessen Polygon이 구성될 수 있도록 구성된 삼각형 BAC, CAD, DAE, EAF, BAF가

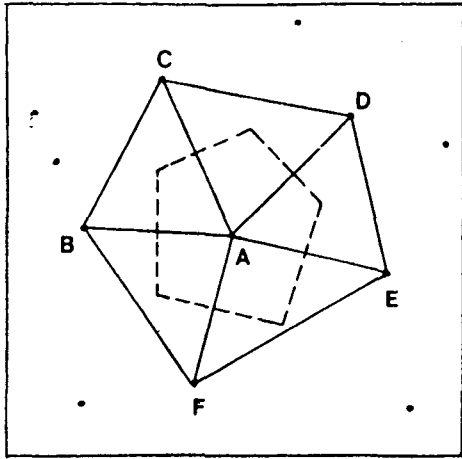


그림 1. Delaunay Triangulation

Delaunay triangles이다. 이와같은 조건을 만족하는 Delaunay triangle 또는 Thiessen polygon의 집합은 유일하다. 불규칙 데이터로부터 비정규 삼각망이 구성되면 정규격자점의 표고는 그 격자점이 속해있는 삼각형의 세 점으로부터 보간된다.

비정규 삼각망으로부터 정규 격자망으로의 보간은 격자점이 속한 삼각형의 꼭지점 자료에 의존한다. 보간식은 그 격자점이 속해있는 삼각형의 세 꼭지점만을 사용할 경우 고차의 보간식을 사용할 수 없으며 산술평균값이나 평면 1차식을 사용하여야 하나 주변 삼각형을 포함할 경우 고차식을 사용하여 보간을 수행할 수 있다. 그러나 이 경우 보간에 소요하는 시간은 증가할 것이다. 따라서 본 연구에서는 보간하고자하는 격자점이 속해 있는 삼각형의 세 꼭지점에 의한 평면 1차식이 보간에 사용되었다.

$$Z = a + bx + cy \quad (3)$$

(3) 크리깅

Mathron과 Krige는 지역화 변수이론을 토대로 하여 내삽함수가 최적화되도록 내삽중량을 택하는, 즉 주어진 점에서 변수값의 최적 선형 불편추정량(BLUE)을 찾는 최적 내삽법을 고안하였다. 지역화 변수이론은 어떠한 변수의 공간적 변동을 세계의 주요한 선분의 합

으로 표현할 수 있다고 가정한다. 즉 X에서의 변수 Z값은 다음과 같이 주어진다.

$$Z(x) = m(x) + \epsilon'(x) + \epsilon''(x) \quad (4)$$

$m(x)$: 경향면 결정함수

$\epsilon'(x)$: 공간에 종속인 잔차

$\epsilon''(x)$: 공간에 무관한 가우스 잔차

경향이 단순한 경우의 $m(x)$ 는 표본지역의 평균값과 같고 x로부터 h만큼 떨어져 있는 곳과의 기대차이는 0,

$$E[Z(x) - Z(x+h)] = 0 \quad (4)$$

이며, 차이의 변동은 지점간의 차이 h에만 의존하는 것으로 가정하여 반분산(semivariance)을 구하면

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \{Z(x_i) - Z(x_i+h)\}^2 \quad (5)$$

n : 거리 h에 의한 분리된 표본점 쌍의 수

h : 표본 간격(lag)

이다. h가 일정값보다 커지면 $\gamma(h)$ 가 임의값에 수렴하게 되는데, 이 범위보다 더 멀리 떨어진 자료점은 서로 영향을 받지 않는다고 가정한다. 이 범위는 크리깅에서의 최대 표본추출 간격이 된다. 크리깅에서의 보간은 범위(range)안의 보간지점과 자료점간의 공분산을 응용하여 상대적으로 큰 반분산을 가진 자료는 보간지점의 값에 적게 영향을 미치도록 이동 평균법의 중량값을 정하는 기법이다. 즉 식 1의 λ_i 를 Z(x)가 편이가 없고 분산 σ_e^2 의 추정량이 자료값의 선형 결합에서 최소가 되도록 선택한다. $\hat{Z}(x)$ 의 분산은 모든 점 i에서

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma(x_i, x_j) + \phi = \gamma(x_i, x) \quad (6)$$

$\gamma(x_i, x_j)$: 자료점 i, j 사이의 반분산

$\gamma(x_i, x)$: 보간점과 자료점 i 사이의 반분산

가 충족될 때 최소가 되며, 이때의 분산값은

$$\sigma_e^2 = \sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma(x_j, x) + \phi \quad (7)$$

이다. 위에서 주어진 방정식이 사용될 때 자료값이 주어진 자점에서의 내삽값과 자료값이 일치할 것이라는 의미에서 크리깅은 엄격한 보간법이며, 더불어 내삽오차 σ_e^2 를 알 수 있다.

(4) 음향측심자료의 계층적 보간

음향측심기에 의한 수심측량은 평행한 측심선을 따라 시행되므로 앞에서 밝힌 바와 같이 자료형태는 연직단면형이다. 따라서 측심선과 측심선 사이에는 자료점이 없다. 이와는 대조적으로 측심선을 따라서는 연속적인 수심자료가 있다. 따라서 측심선 사이의 임의점의 보간을 위해서는 먼저 보간에 이용될 측심선상의 자료점을 선정하고 나서 이들 자료점을 이용한 최적 보간법을 찾아야 할 것이다. 본 연구에서는 먼저 측심선(X축) 단면의 경사변화를 고려하여 현저한 지형 변화점마다 X, Z좌표를 취하고 이 자료점중 보간점 전후 일정 한계거리내의 자료점만을 이용하여 아래의 Lagrange 다항식에 의해 등간격 격자점의 수심을 보간하였다.

$$Z_n(X) = \sum_{i=1}^n Z_i \prod_{j \neq i} \frac{(x-x_j)}{(x_i-x_j)} \quad (8)$$

n : 보간에 이용된 자료점의 수

측심선 사이에 위치한 격자점의 보간은 양 측심선에서 보간점에 가장 가까운 각각 3점씩을 취하여 반분산도에서 구한 $\gamma(h)$ 에 근거하여 식 6을 적용하였다. 이때에 반분산도에서의 회귀식은 Dewijs 모델인

$$\gamma(h) = a \times \log|h| + b \quad (9)$$

을 이용하였다. 미지점의 보간값은 식 6으로부터 중량계수 λ 가 결정되면 식 1에 의해 구해진다.

3. 시험

(1) 시험자료

연안해양 기본조사는 수심 약 20m 미만의 연안해양의 해저 지형, 지반의 상황과 조석등을 조사하여 1:25,000 연안해양 기본도를 제작함으로써 연안해양의 개발, 이용, 보전을 위한 각종공사에 계획 또는 기본설계등의 기초자료를 제공하는데 그 목적이 있다.

본 연구에 사용된 음향측심 자료는 국립지리원에서 실시한(1983년) 연안해양 기본조사의 일부로 위치상으로는 서해남부지역의 전남 함

평군 손불면에 속하는 구역이다.

수심측량은 기준점 측량, 수준측량, 조석관측의 결과를 기초로하여 음향測深儀에 의해 실시되었으며, 船位決定은 船上에서 두대의 六分儀로 임의의 기준점 3점간의 두 협각을 측정하여 三桿分度器를 사용하여 原圖上에 位置를 展開하는 三點兩角法을 적용하였다. 水深圖는 1m 간격의 등고선으로 묘사되어 있으며, 그 기준은 인천만의 평균해수면이다. 따라서 본 조사지역의 수심은 海圖上의 水深(略最低干潮面下)보다 약 3.2m가 깊게 나타났다.

조사에 사용된 음향측심의 (PS-10E)의 주파수는 200KHz이고 精度는 5cm×(수심/1000)이며, 표본 지역의 항정도 및 가상좌표계는 그림 2와 같다.

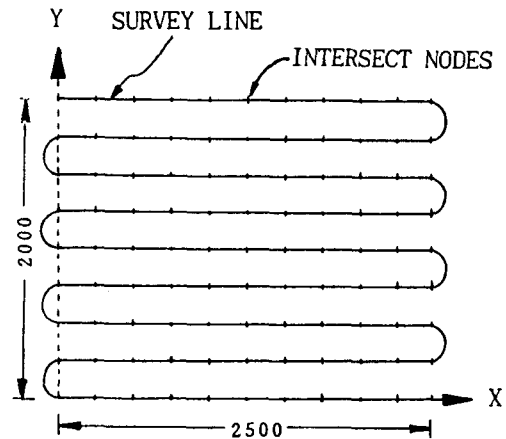


그림 2. 시험지역의 항정도 및 가상좌표계

시험지역의 넓이는 2500×2000m²이며 250m의 간격의 9개 측심선을 배치하였다. 수치시험의 편리를 위해 가상 평면직각좌표계의 X축은 동서방향, Y축은 남북방향이며 X축으로부터 북쪽방향의 순서로 1, 2, 3, ... 9노선이라 부르기로 한다.

(2) 음향 측심 기록지의 수치화

음향측심야장은 측심기록지상에 250m 간격의 구분점 수심과 그 사이에 3점의 지형변화점의 수심을 기록하여 제도사의 등고선 작도에

대비하였으나, 그 추출지점이 지형변화점이 아니거나 지형변화가 심한 구간에서 추출점의 수를 증가시키는 등의 배려가 부족하다고 판단되어 추심기록지와 항정도에 표기된 지점을 기준으로 하여 현저한 지형변화점마다 원점으로 부터의 거리와 수심을 재추출하였다. 시험지역 노선시중점의 음향측심기록지 길이와 항정도 상의 거리 및 추출점의 수는 표 1과 같다.

표 1. 음향측심 자료추출 제원

① 노선	② 시중점의 실거리	③ 시중점의 기록지 거리	②/③ 축 적	추출점수
9	1975(m)	73(cm)	27.05	32
8	2275	81.7	27.85	49
7	2605	97.5	26.72	42
6	2605	99	26.31	30
5	2725	104.2	26.15	14
4	2807	96.2	29.18	22
3	2800	116.4	24.05	14
2	2875	97.3	29.55	17
1	2725	96.7	28.18	20

(3) 기존의 보간법에 따른 처리

앞절에서와 같이 추출된 자료를 랜덤 자료라 전제하고 지형도의 등고선 작도에 널리 쓰이는 가중이동평균법 및 크리깅기법에 따라 62.5m×62.5m간격의 정규격자점의 수심을 보간하여 Golden software社의 Surfer 패키지에 의해 ASCII코드의 GRD 화일을 만들고 등고선을 작도하였다. 보간에 적용된 자료점 선택방법은 4분원법이며 최소자료점의 수는 다른 보간법과 동일하게 6점으로 하였다. 한편 비정규삼각망을 이용하는 방법에서는 먼저 주어진 자료점들로 비정규 삼각망을 구성하고 정규 격자점의 수심은 해당 격자점이 속한 삼각형의 세 꼭지점 수심으로부터 가중이동평균법에서 중량을 (1/거리)로 주어 보간하였다.

(4) 연직단면형 자료의 계층적 보간

기존의 보간법은 대상지역에서 랜덤한 형태로 자료점을 추출하였다는 가정아래 구상된 방법이나 음향측심자료는 測量船이 지나간 경로에 따른 평행한 띠형 자료이므로 이 특성을 활용하여 측심선상에서 지형 변화점마다 추출한 자료를 최종 정규 격자형의 격자간격으로 1차 보간을 실시하였다. 또한 크리깅은 최적의 보간법이나 보간점 주위에 랜덤형태로 분포된 자료점에 대한 중량값을 반분산도로 부터 유도하는데 너무 많은 시간이 소요된다. 따라서 보간점과 자료점에 크리깅을 적용하기전에 일정한 기하학적 형태로 재배열한다면 크리깅을 적용하더라도 단 몇개의 중량값을 구하여 반복적으로 적용할 수 있으므로 크리깅의 약점을 보완하면서 최적 보간값을 취할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 측심선 사이를 3등분하는 방법을 택하였으므로 정규격자 간격은 62.5m이다. 측심선상의 추출점은 평탄지형에서 그 추출간격이 넓고 요철이 심한 지역에서는 그 간격이 좁아 정규격자 구간에 따라 그 구간에 추출점이 없는 경우가 많고 요철이 심한 지역에서는 여러 추출점을 포함하는 수가 있었다. 이때에는 보간점에서 규정된 한계내에 있는 모든 추출점들로 Lagrange 다항식을 적용하여 보간값을 구하였다.

이렇게 하여 250m×62.5m의 정규격자 자료점(1차보간점)이 완성되었다. 이 자료로부터 거리차(h)에 따른 각 방향으로의 반분산값을 식 5에 의거하여 X,Y축방향 및 X축에서 +45°, -45°방향으로의 반분산값을 구하고 식 9 형식의 회귀식을 다음과 같이 구사하였다.

$$\begin{aligned} X\text{축방향} &: y = 23.96 \times \text{LN}(x) - 112.467 \\ Y\text{축방향} &: y = 11.83 \times \text{LN}(x) - 64.822 \quad (10) \\ 45^\circ\text{경사방향} &: y = 24.29 \times \text{LN}(x) - 132.842 \end{aligned}$$

모든 방향에서 식 4의 $\epsilon''(x)$ 의 영향으로 $h=0$ 에서 $\gamma(h)$ 는 음수값을 가지는 결과가 되어 $h=0$ 에서 $\gamma(h)$ 가 0이 되도록 식 10의 x 값에 평행이동값을 더해 주어 보정하였다.

X,Y방향의 반분산을 최대, 최소 반분산 방

향으로 가정하여 Burgess의 경사계수 결정방식과 유사하게 임의 방향에서의 $\gamma(h)$ 를 다음 식으로 계산하였다.

$$\gamma(h, \theta) = \sqrt{(X_H)^2 \cos^2 \theta + (Y_H)^2 \sin^2 \theta} \quad (11)$$

그림 3에서 보는 바와같이 시험지역 및 측심선의 배치특성으로 부터 X축방향의 반분산이 Y축방향의 반분산에 비해 약 4배 만큼 큰것을 감안할 때 측심선사이의 3개 격자점의 보간은 양 측심선 좌우방향의 영향이 적고, Y축방향이 큰 영향을 미치고 있다고 볼 수 있으므로 그림 4-a,b와 같이 6개의 자료점으로부터 3개 격자점의 보간값을 구하도록 설계하였다. 그림 4-c,d는 시작점과 끝점에서 좌우측 자료점이 없는 경우이다.

위와 같은 구상아래 크리깅의 중량계수 및 2차 요소인 λ_i 와 ϕ 를 구하기 위해 식 6을 적용하면

$$\begin{bmatrix} \gamma(x_i, x_j) \cdot 1 \\ \dots \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_j \\ \dots \\ \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma(x_i, x) \\ \dots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

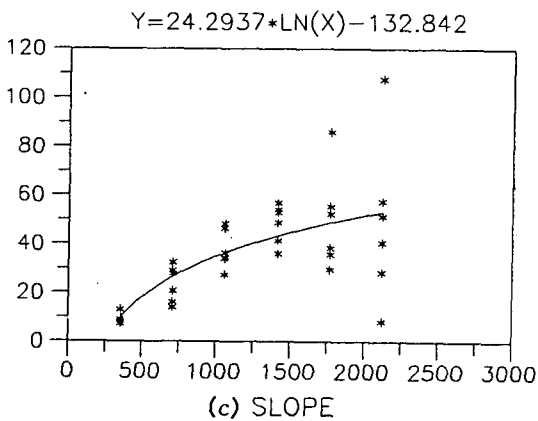
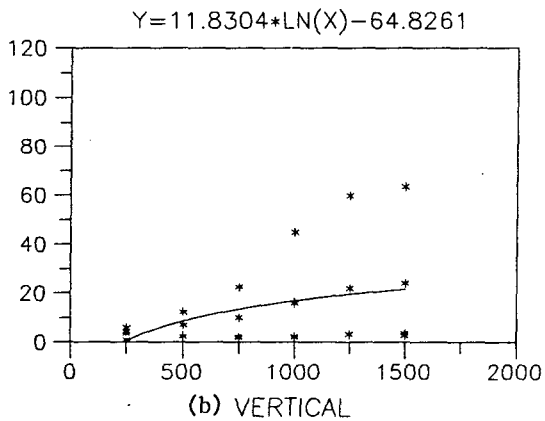
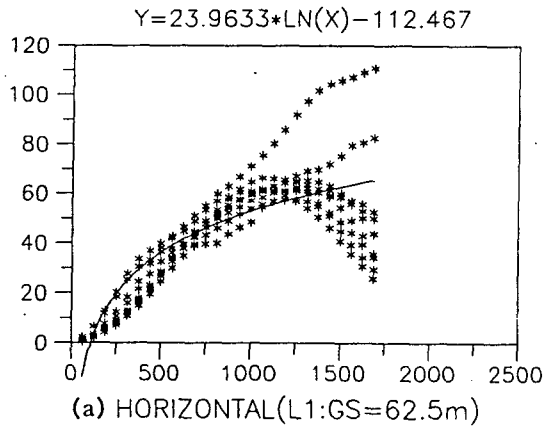


그림 3. SEMIVARIOGRAM

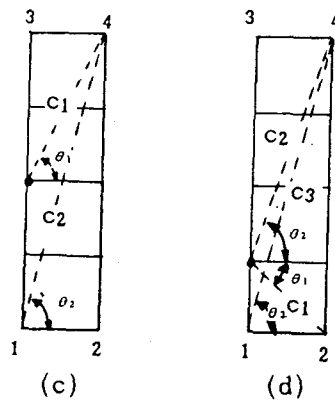
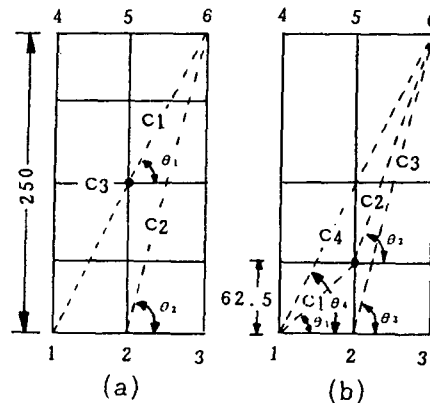
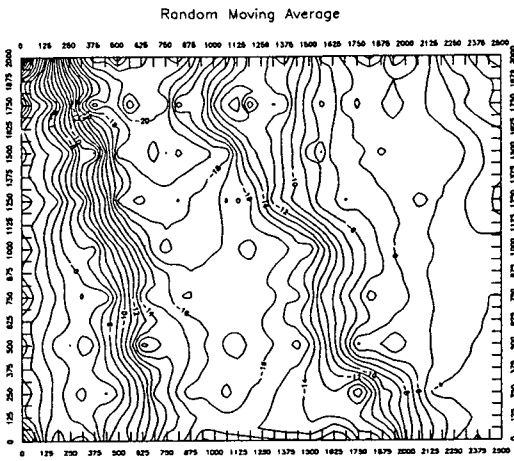
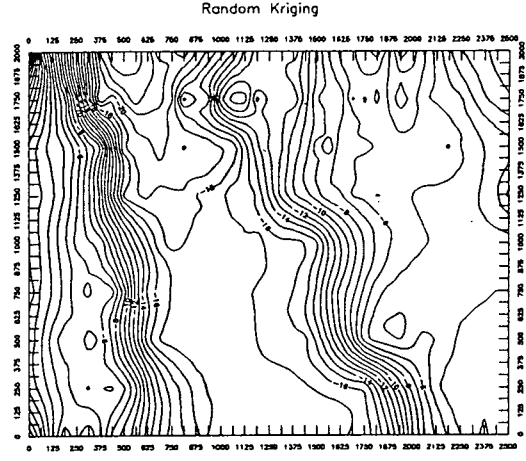


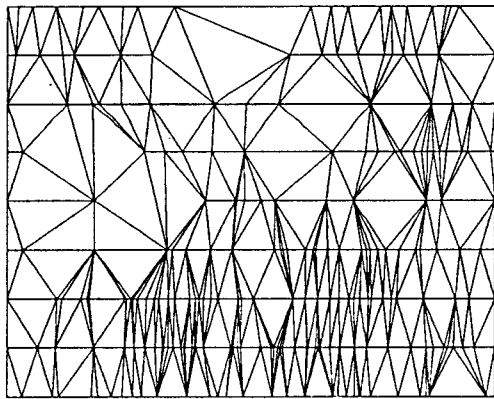
그림 4. 크리깅에 적용된 격자구조



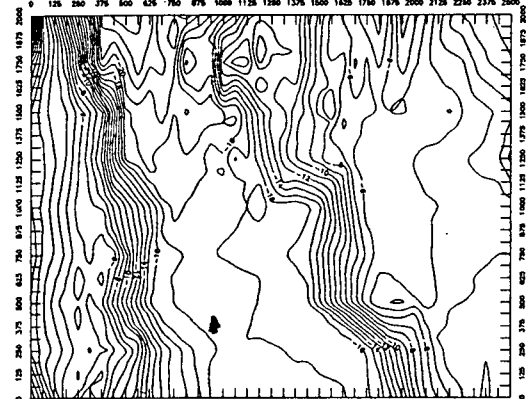
(a) 가중이동평균



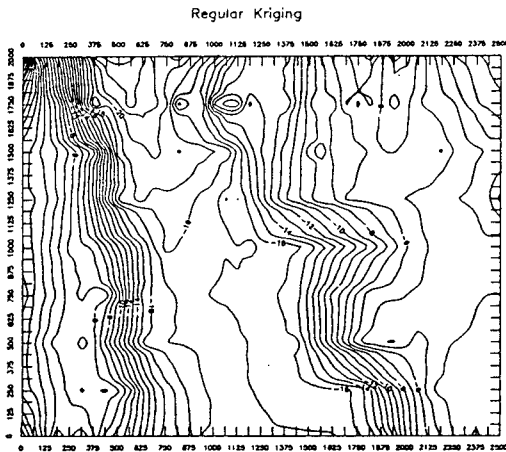
(b) 크리깅법



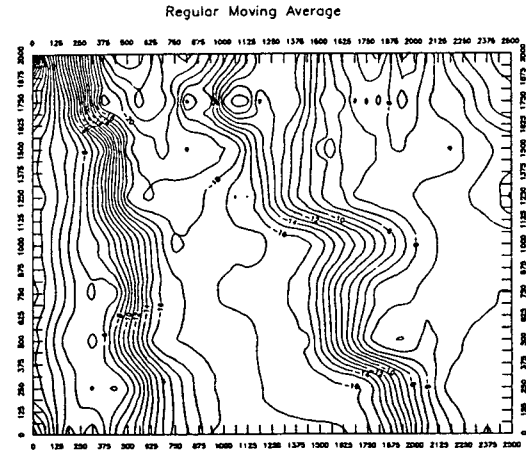
(c) 비정규 삼각망



(d) 티센 다각형 보간법



(e) 계층적 크리깅법



(f) 계층적 가중이동평균법

그림 5. 등고선도

와 같이 간단한 행렬식으로 쓸 수 있다. 측심 선간에 위치한 격자점의 수심은 식 12의 중량 값과, 해당 자료점을 식 1에 대입하여 구하였으며 그림 5-e는 이와 같은 방법으로 보간된 격자점 수심의 등고선을 Surfer에 의해 작도한 것이다.

4. 결과분석

DTM의 정확도는 자료추출과 보간과정의 오차의 영향을 받는다. 해상 음향측심오차는 수심오차와 수평오차로 나눌 수 있다. 음향측심기의 측심오차는 $\pm 5\text{cm} \times (\text{수심}/1000)$ 이므로 평균수심 10m를 가정할때 $\pm 15\text{cm}$ 의 수심오차가 예상된다. 한편 수평위치에 대하여는 표 1에서 보는 바와 같이 측심선 시종점간의 항정도와 수심기록지의 축척이 24.05~29.55의 범위에 있음을 볼 때 조사선의 운항속력이 일정치 않았음을 보이며, 운항속력이 일정했다면 육분의 및 삼각분도기에 의한 船位決定에 수반된 오차는 $[\pm 1/2 \times (\text{최대축척} - \text{최소축척}) \times \text{측심선 평균거리}]$ 로 부터 $\pm 260\text{m}$ 가 되어 수심오차와 큰 불균형을 보였다. 보간과정의 오차는 측심선사이에 위치한 보간점의 실측값이 없기 때문에 각 보간법에 따라 62.5m×62.5m정규격자점의 보간수심을 구하여 Surfer에 의해 등고선도를 작도하여 그 형태를 개략적으로 비교하였고, 이어 비정규 크리깅 보간값을 정확값으로 보고 기타 보간에 의해 구한값의 표준오차를 구하였다.

첫번째 비교대상은 추출자료형태를 랜덤형으로 간주하여 Surfer에 의해 이동평균법, 크리깅법에 따라 62.5m×62.5m 정규격자점의 수심을 보간하였다. 또한 비정규 삼각망의 구성에 이어 격자점이 속한 삼각형을 이루는 세 꼭지점을 자료점으로 하여 격자점의 수심을 평면선형식으로 보간하였다.

그림 5-a에서 보는 바와 같이 거리역제곱가중이동평균법은 크리깅이나 비정규 삼각망법에 비해 측심선위치 지역에서 넓은 등고선사이에

작은 동심원이 많이 나타나고 있다. 비정규 삼각망 중하부의 -16m 등고선이 보이며 좌하부의 -5m 등고선의 궤적이 현저히 차이가 난다. 즉 본 연구에서와 같이 작성된 자료에는 거리역제곱 중량이 적합치 않았다. 그림 5-b는 자료추출점으로 구성된 비정규 삼각망이며 대체로 경사변화가 급격한 곳에서 조밀하게 자료가 추출되었음을 알 수 있다.

두번째로 본 연구에서 제안한 계층적보간법의 정확도와 효율성을 파악하기위해 측심선상의 1차보간점을 정규격자형 자료점으로 보아 이동평균법과 크리깅에 의해 측심선사이의 62.5m×62.5m간격으로 배치한 보간점의 수심을 구하였다. 1차적으로 측심선상의 자료를 지형변화 점에서 점 자료로 추출하여 보간점 전후 일정 한계 내에 위치한 자료점들을 지나는 Lagrange 다항식으로 등간격으로 보간하여 본 결과 보간 한계(윈도우)를 넓게 줄 경우 다항식의 차수가 커져서 보간점의 위치에 따라 실제 지형과 전혀 다른 보간값을 보였다. (그림 6) 즉 본 연구에서와 같이 지형변화점 마다 자료 추출이 가능한 경우는 보간 한계를 좁게 설정하여 선형보간을 적용하여야만 보간의 신뢰도를 기할 수 있을 것이다.

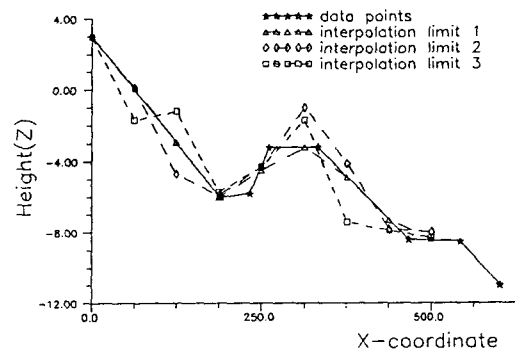


그림 6. 보간위치와 다항식의 차수에 따른 오차

다음단계로 측심선사이에 위치한 격자점의 수심의 보간은 Kriging법이 적용되었는데 이때에 각 방향별로 거리차이별 수심에 대한 반분산도는 그림 7과 같이 격자간격의 長短에는 무

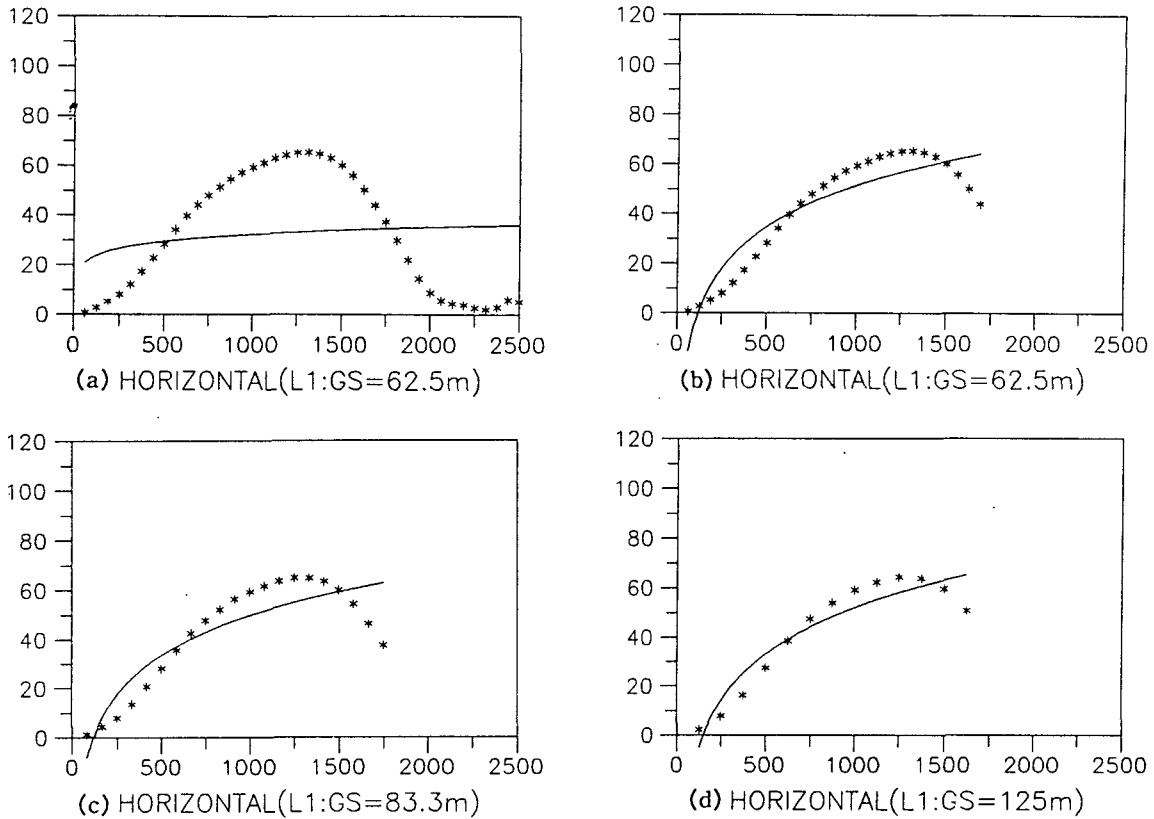


그림 7. X축방향의 半分散圖

관하다.

그림 7-a는 격자간격 62.5m일때의 반분산도인데 거리차 h 가 1250m일 때 최대값을 보이고 있으며 이 거리차를 넘는 범위부터 축심선 중점까지는 $\gamma(h)$ 가 감소하고 있다. 이는 시험지역의 지형적 특성으로 부터 나온 결과이며 각 축심선상의 반분산도의 회귀분석 과정에서는 그림 7-b,c,d와 같이 1750m이상 거리차에서의 자료를 생략하여 그림 3-a와 같은 평균회귀곡선을 구하였다. 그림 4-a에서 보는 바와 같이 X축방향의 반분산이 Y축방향의 반분산보다 약 3배만큼 크게 나타났다. 즉 시험지역의 자료점간에 연관성이 X방향보다는 Y방향으로 큼을 보여주고 있다. 이러한 특성은 크리깅의 중량값 λ 에 잘 반영 되었으며, 본 시험지역의 축심선의 방향이 결과적으로 반분산이 큰 방향으로 계획되어 있어 보간결과의 향상을 가져왔

다고 보여진다. 그림 7은 X축방향과 45°, -45° 경사를 이루는 방향으로의 반분산도이며 이 두방향의 반분산도는 X,Y축 방향의 중간정도이나 동일하지는 않았으나 계산의 편리를 위해 두 경사 방향의 반분산도를 합성하여 작도한 분산도가 그림 4-c이며, 이 분산도의 회귀식을 X,Y축 회귀식으로부터 Burgess의 경사계수 추정식을 적용하여 구한값과 비교한 결과는 표 2와 같다. 즉 거리차가 62.5m~250m일 때의 오차가 ± 0.54 이하로, X,Y축을 최대, 최소 경사방향으로 간주하고 임의 방향의 반분산값을 수정 Burgess식에 환산한 결과 ± 0.54 이하의 차이를 보이고 있다. 따라서 자료점이 분포한 모든 방향에 대한 반분산도를 작성하는 대신 식 11로써 근사값을 구할 수 있으므로 크리깅의 계산 소요 시간을 단축할 수 있었다.

한편 그림 4와 같은 격자구조에서 보간점에

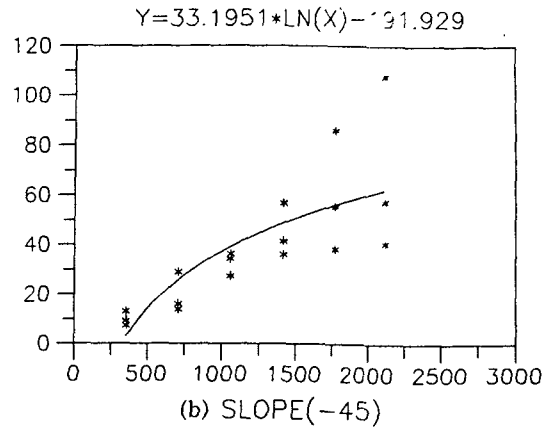
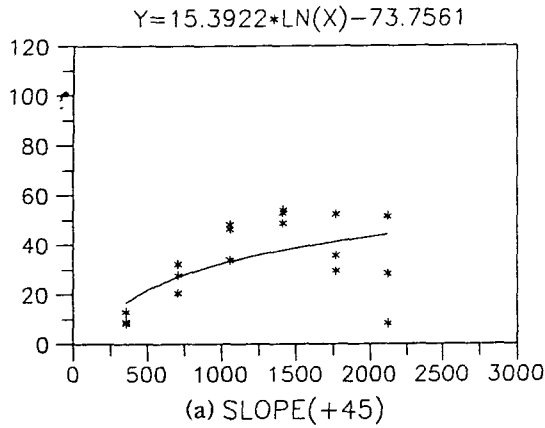


그림 8. 경사 45°와 -45°방향의 반분산도

표 2. 방향별 $\gamma(h)$ 와 상호관계

구분	거리차(h) 방향	62.5m	125m	250m
①	X	10.84	17.76	28.53
②	Y	2.74	4.80	8.45
③	경사실측값	5.68	10.30	17.50
④	경사환산값	5.92	10.38	16.96
⑤	③-④	-0.24	-0.08	0.54

서의 크리깅보간 분산값을 식 7로부터 구하면 표 3과 같다.

즉 6점을 사용하는 보간중 중앙격자점(그림 4-a)에서 분산값이 가장 작았으며 아울러 같은 단면의 상하부점에서 가장 큰 분산값을 보였다. 만일 이와 같은 분산값을 본 연구에서와 같이 구조적인 등격자 자료점을 가상하지 않고 비정규자료점으로부터 구한다면 각 격자점에서

표 3. 방향별 $\gamma(h)$ 와 상호관계

보간면위치 보간점위치	좌단	중앙	우단
상부점	3.71	4.346	3.71
중간점	4.05	2.915	4.05
하부점	3.71	4.346	3.71

크리깅에 따른 분산값을 구하여 보간에 대한 정확도의 척도로 이용할 수 있을 것이다.

다음 표 4는 비정규형 자료를 크리깅에 의해 보간한 값을 정확값으로 간주하고 각 보간법과의 표준오차를 계산한 것이다. 아울러 각 보간법에 소요되는 시간을 PC AT/286(16Mhz)에서 점검하여 보았다.

표 4. 보간법별 표준오차 및 보간소요시간

보간법	랜덤 크리깅	랜덤 이동평균	랜덤 티센 다각형	정규형 이동 평균	정규형 크리깅
표준오차	-	1.086m	0.529m	0.463m	0.467m
보간 소요시간	22분45초	2분15초	1분30초	4초	4초*

*semivariogram 및 중량계수 계산시간은 제외됨

정규형 이동평균 및 크리깅을 이용한 보간법의 표준오차가 비정규형 이동평균 보간법의 표준오차보다 절반에 가까운 값을 나타내는 것은 주어진 자료가 지형변화 점단을 추출하였다는 점과 이러한 조건 및 지형에서의 중량의 설정이 최적임을 보여준다. 등간격으로 1차보간한 자료점을 이용한 정규형 이동평균은 표준오차가 현저히 낮았다. 보간소요시간을 보면 비록 랜덤 자료점을 가정한 크리깅이 최적보간법이라 하더라도 이동평균법이나 정규형 크리

강에 비해 과대한 시간을 필요로 하는 점은 크리깅의 이용에 큰 장애요인이다. 반면에 본 연구에서 제시한 계층적 크리깅은 최적의 중량을 부여하여 정확도를 향상시킴과 아울러 최소의 중량계산(실제 계산 중량은 4개)만 하면 되도록 설계되어 보간소요시간을 단축할 수 있었다.

5. 결론

평행선 형태로 주어지는 음향측심 자료로부터 정확하고 효율적인 등수심도 작성을 위한 보간법에 대한 본 연구의 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 측심선의 연속형 자료를 일정간격으로 1차 선형보간하고 이 점을 자료점으로하여 측심선 사이의 격자점을 2차 크리깅 보간하는 방법은 기존의 가중 이동평균 보간법보다 정확하고 효율적이었다.

둘째, Burgess의 반분산도 경사계수 추정식은 최대 반분산 방향 및 최소 반분산 방향의 반분산으로부터 임의의 방향의 반분산을 유추하는데 적용될 수 있으며 이에따라 크리깅 중량계수에 소요되는 과대한 시간을 대폭 절감할 수 있어 크리깅의 단점을 개선시킬 수 있었다.

셋째, 해상 음향측심 오차는 수심 측량오차보다는 수평위치 오차가 더 크게 나타났으며, 측심선이 지형변화가 심한 방향과 일치했을 때 더 좋은 보간값을 구할 수 있을 것으로 사료된다.

REFERENCES

1. Arbind M Tuladhar and Branko Makarovic, 1988. "Upgrading DTMs from Contour Lines Using Photogrammetric Selective Sampling", ITC journal 1988-4.
2. Ayeni O.O., 1982. "Optimum Sampling for Digital Terrain Models: A Trend Towards Automation", Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.48, No.11, November 1982, pp.1687-1694.
3. Blace A.E., 1987. "Determination of Optimum Sampling Interval in Grid Digital Elevation Models(DEM) Data Acquisition", PE&RS, Vol.53, No.3, March 1987, pp.323-330.
4. Burrough P.A., 1985. "Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment", Oxford: Clarendon Press.
5. Carter J.R., 1988. "Digital Representation of Topographic Surfaces", Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.54, No.11, November 1988, pp.1577-1580.
6. Casey M.J. and Monahan D., 1985. "Contours and Contouring in Hydrography Part I: The Fundamental Issues", International Hydrographic Review, Monaco, LXII(2), July, 1985.
7. Caséy M.J. and Monahan D., 1986. "Contours and Contouring in Hydrography Part II: Interpolation", International Hydrographic Review, Monaco, LXIII(1), January 1986.
8. Davis J.C., 1973. "Statistics and Data Analysis in Geology", John Wiley & Sons, Inc.
9. Ebner H. and Reiss P., 1984. "Experience with Height Interpolation by Finite Element", Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.50, No.2, February 1984, pp. 177-182.
10. Pavlidis T., 1982. "Algorithms for Graphics and Image Processing", Computer Science Press, Inc.
11. 建設部 國立地理院, 1983, "沿岸海域 基本調査報告書(法聖浦地區)"
12. 이 석찬, 조 규전, 이 창경, 최 병길, 1990. "비정규삼각망 데이터구조에 의한 수치지형모델의 구성", 한국측지학회지, 제 8 권 제 2 호, 1990년 12월.