

망간단괴광상의 유망광구선정을 위한 지구통계학적 연구

박찬영* · 전효택** · 강정극*

A Geostatistical Study for the Selection of Prospective Areas of Polymetallic Nodule Deposits

Chan Young Park*, Hyo Taek Chon** and Jung Keuk Kang*

ABSTRACT : The purpose of this study is to develop geostatistical methods for selection of prospective areas of polymetallic nodule deposits in KODOS (Korea Deep Ocean Study) area of the North-East Pacific Ocean. In this study 110×165 grid system was used, and each node represents the center of an estimated block of 1 km×1 km. The ordinary kriging was applied to SeaBeam2000 data in order to evaluate the bathymetry. A structural analysis (variogram) of the bathymetry data was carried out for constructing digital terrain model (DTM) and the maximum slopes of the bathymetry were calculated by DTM data. The above method can be used to solve the problem that is resulted from the lack of theory of a change of support model for the maximum slope of the bathymetry. The ordinary kriging and the indicator kriging were used to evaluate the nodule abundance, and the different two kriging methods were compared to evaluate the accuracy for the estimation of the nodule abundance. It has been shown that indicator kriging was better estimation tool than the ordinary kriging. The overlay map is presented for the selection of potentially minable sites by combining the two indicator maps of the nodule abundance and the maximum slope of bathymetry. This overlay map could be utilized to establish follow-up survey and to investigate the potentially minable sites in the KODOS area.

서 론

심해저 망간단괴광상이 상업적 가치를 갖기 위해서는 지질학적, 기술적, 경제적인 제약조건들이 만족되어야 한다. 이러한 조건을 만족하는 고품위의 망간단괴광상에 대해서도 채광지역을 선정하기 위해서는 기타 다른 부수적인 요인들을 고려해야 한다. 이 요인들 중 기상조건, 해황 등과 같은 자연환경적인 요소들은 채광조건을 선정하는데 필수적인 것들이다 (홍승용, 강정극, 1993; Chautru *et al.*, 1987).

지질학적인 요인들로는 망간단괴의 부존밀도, 유용금속 함량, 해저면의 경사도와 해저퇴적물의 토질역학적인 특

성 등이 있다. 특히 이것들은 채광경로를 설계하는데 중요한 요소이기도 하다. 해저퇴적물이 무르거나 해저경사도가 10%이상인 경우 채광기계의 크기, 중량과 마력수에 관련해 안정성과 이동성에 상당한 제약을 주게 된다 (Chautru *et al.*, 1987). 이와 같은 이유로 망간단괴의 부존밀도, 유용금속함량과 해저면의 최대경사도 및 퇴적물의 공학적 특성 (전단강도) 등의 공간적인 분포를 아는 것이 유망광구의 선정시 선행되어야 할 과제들이다.

본 연구에서는 KODOS (Korea Deep Ocean Study) 지역의 심해저 망간단괴광상을 대상으로하여 유망광구지역을 선정하기 위한 지구통계학적방법을 찾아내고자 하였다. 이를 위하여 지질학적 요인들중 망간단괴의 부존밀도, 유용금속함량, 해저면의 경사도 등을 분석 하였고, 퇴적물의 공학적 특성은 자료의 부족으로 분석에서 제외하였다.

분석에 사용되어진 화학분석자료와 수심자료는 연구지역내에서 한국해양연구소와 한국자원연구소에 의해 수행된 탐사자료를 이용하였다 (동력자원부, 1992; 상공자원부, 1993; 상공자원부, 1994). 수심자료는 SeaBeam

* 한국해양연구소 심해저탐사사업단 (Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea)

** 서울대학교 공과대학 자원공학과 (Department of Mineral and Petroleum Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)

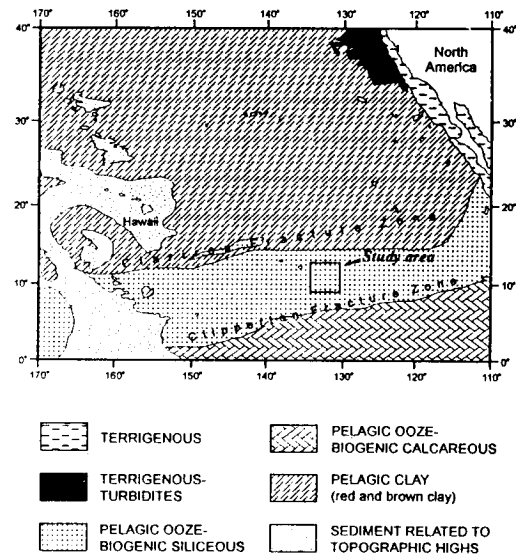


Fig. 1. Distribution of surface sedimentary facies in the Northeast Pacific (Horn *et al.*, 1973).

2000에 의해 얻어진 0.25분 간격의 격자자료를 이용하였다. 분석지역은 연구지역중 수심측정과 정점탐사가 수행된 약 110 km × 165 km 지역이며, 총 52개의 정점에서 FFG에 의해 채취된 시료들을 사용하였다.

연구지역의 지형

연구지역은 북동태평양내 Clipperton과 Clarion (C-C) 균열대 지역내에 위치하고 있다 (Fig. 1). Clarion 균열대는 북쪽에서 수심이 5,600 m보다 깊은 반면, Clipperton 균열대의 남측해역은 수심이 4,700 m보다 얇게 형성되어 있다. 남북방향으로는 균열대들이 가파르고 높은 급사면에 의해 둘러 쌓인 커다란 계단 단층으로 구성되며 북쪽으로 갈수록 점차적으로 깊어진다. 균열대들사이의 해저면은 몇 개의 해저산이 있고 평탄하며 균열대와 수직한 많은 단층들로 이루어져 있다 (Luyendyk, 1969; Herron, 1972; DeLong *et al.*, 1977). 해저산은 서쪽 Line Islands쪽에서 산재되고 동태평양 중앙해령 (East Pacific Ridge, EPR)부근 북동쪽 확장 해령에 비교적 평행하며, 이 지역의 일반적인 수심을 따르는 경향이 있다 (Luyendyk, 1970). 해저산은 열도 (island ridge and/or chain)에서와 같이 확장 해령에서나 주변에서 해저면상에 간헐적인 열점의 분출에 의해 형성되었다 (Sclater *et al.*, 1971; Herron, 1972; Morgan, 1972; Clague, 1981). 이 지역은 중앙부분에서 Orozco 균열대로부터 연장된 또 다

른 균열대가 EPR과 Mathematician 해령을 가로지르며, 특징적인 지형변화를 보이지 않는다 (Sclater *et al.*, 1971; Hayes, Pitman, 1970; van Andel *et al.*, 1975).

연구지역 주변의 해저지형은 전반적으로 20~30 km의 분포를 갖는 단층들에 의해 그 지형이 결정되는데, 이 단층들은 C-C균열대와 거의 수직을 보이는 남북방향의 구조를 보인다. 완만한 경사를 갖는 200 m이하의 해령이 우세하게 나타나며, 이 해령들은 기반암의 단층과 용기에 의해서도 형성되지만 주로 Cyclic unit의 차별침식과 퇴적에 의해 형성되기도 한다. 또한 저층해류의 영향에 의해 형성된 퇴적구릉 (sediment wave)을 이루는 해령도 나타난다. 이 해령들은 해곡과 함께 평원상에 고대로 흔히 발달하고 있다. 수심은 대체로 4,400 m에서 5,200 m 사이이나, 좁은거리내에서도 100 m~400 m가량의 기복이 나타난다. 전반적으로 연구지역 주변의 수심은 남남동에서 북서서의 방향으로 갈수록 약 300 m가량 깊어지는 경향을 나타낸다. 구릉은 주로 중앙과 서북부지역에서 나타나며 그 형태는 동서방향의 타원추형과 원추형으로 나타난다 (상공자원부, 1993; Jeong, 1993).

이론적고찰

Variogram

Variogram은 공간변수의 분포구조를 해석할 수 있게 해준다. 벡터 h 에 의해 분리되는 x 와 $x+h$ 의 두점에 대해 $z(h)$ 와 $z(x+h)$ 의 두개의 수량값이 있다고 가정하자. 이 두 수량사이의 분산정도는 variogram함수 $2\gamma(h)$ 에 의해 나타낼 수 있으며, 무작위함수 (random function) $[Z(x) - Z(x+h)]^2$ 의 기대값으로 정의할 수 있다 (Journel and Huijbregts, 1978).

$$2\gamma(x,h) = E\{[Z(x) - Z(x+h)]^2\}$$

이 variogram $2\gamma(x,h)$ 는 한점 x 와 벡터 h 의 함수이다. 그러므로 이 variogram의 추정은 무작위변수의 쌍인 여러 개의 현상화 (realization) $[z_{k_1}(x), z_{k_1}(x+h)], [z_{k_2}(x), z_{k_2}(x+h)], \dots, [z_{k_n}(x), z_{k_n}(x+h)]$ 를 필요로 한다. 실제의 경우, 특히 광량평가나 수심자료의 경우 단지 하나의 현상화만 있는 경우가 대부분이다. 즉, x 와 $x+h$ 점에서 실제 측정된 한쌍의 값만이 존재한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 *intrinsic hypothesis*를 제안했다 (Journel, Huijbregts, 1978). 이 *intrinsic hypothesis*은 variogram함수 $2\gamma(x,h)$ 는 단지 분리 벡터 h 의 함수이라는 가정이다. 이러한 가정에 의해 variogram 함수 $2\gamma(x,h)$ 는 실 자료로부터 추정되어

질 수 있다. 즉, 추정치 $2\gamma^*(x,h)$ 는 h 만큼 떨어진 임의의 두점 x 와 $x+h$ 에서 측정된 측정치 $[z_i(x), z_i(x+h)]$ 의 차를 제곱한 값의 산술평균으로 표시할 수 있다. semivariogram이란 variogram $2\gamma(x,h)$ 을 계산상의 편의를 위하여 $1/2$ 를 곱한 $\gamma(x,h)$ 로 표시하는 것을 말한다.

$$2\gamma^*(h) = \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i+h)]^2$$

Ordinary kriging

통계분석에는 크게 모수통계기법과 비모수통계기법으로 나뉜다. 모수통계기법은 통계량인 평균 (mean)과 분산 (variance)을 이용하여 모집단의 분포를 설명하는 기법이다. 비모수통계기법은 모집단의 분포를 알 수 없거나 자료가 명목척도나 순위척도인 경우 중앙값 (median) 또는 최빈값을 이용하여 모집단의 분포를 설명하는 기법이다 (Davis, 1986). 지질학적자료와 기타 공간자료를 다루는 다변량해석과 지구통계학에서는 주로 모수통계기법을 이용하여 자료를 분석한다. 또한, 다변량해석이나 지구통계학에서는 모수통계기법중 많은 기법들이 모집단이 정규분포를 따른다는 가정 하에 수행되어진다. 그러나 원소의 함량, 품위, 부존밀도 등과 같은 지질학적자료의 대부분은 대수정규분포를 따르는 경향이 있으며, 자료가 대수정규분포나 기타의 분포를 따를 경우 자료를 변환하여 정규분포화하여 분석을 수행한다 (Davis, 1986). 모집단의 추정과 분포해석등의 모수통계기법의 통계량인 평균과 분산은 이상치인 outlier 와 wild value가 자료에 있는 경우 이들의 존재는 평균과 분산에 상당한 영향을 미쳐 정확한 모집단의 추정이 불가능하게 된다. 이 경우 이상치를 제거하거나 영향범위를 줄이는 방법이나, 비교적 이상치에 의해 영향을 적게 받는 중앙값을 이용하는 비모수통계기법을 사용한다.

Ordinary kriging은 종종 BLUE라는 약어로 표현한다. BLUE란 best linear unbiased estimation의 약자로서 최적의 선형불편추정법이란 말이다. Ordinary kriging은 임의의 점 혹은 임의의 불력의 자료를 실 자료의 가중조합에 의해 추정하기 때문에 선형 (linear)이라고 한다. 불편 (unbiased)이라고 하는 것은 Ordinary kriging이 오차 혹은 잔차의 평균이 0이 되도록 추정하기 때문이다. 또한, 최적 (best)의 추정법이란 오차의 분산이 최소가 되도록 추정한다는 말이다. 다른 추정방법 (inverse distance법, 다각형법 등)도 선형이며 이론적으로 불편 (unbiased)이 되게 추정을 한다. 그러나, Ordinary kriging이 다른 방법

과 다른 점은 오차의 분산을 최소화시킨다는 점이다. 일반적으로 Ordinary kriging은 모집단의 평균과 분산을 알지 못할 때 사용된다 (Isaaks, Srivastava, 1989; Brook-er, 1979; Journel, Huijbregts, 1978).

실제 자료에서는 모집단의 대한 임의의 한점 혹은 임의의 불력의 참값을 알 수 없는 경우가 대부분이며, 추정을 하기전에는 참값과 추정값과의 차이 오차를 결코 알 수 없다. 또한 참값에 대한 평균을 알 수 없기 때문에 ordinary kriging에 의한 오차의 평균이 정확히 0이 될 것이라고 보증할 수 없다. 오차의 분산을 알 수 없기에 오차의 분산을 최소화한다는 것이 불가능하다는 것은 자명한 일이다. 따라서 우리가 할 수 있는 최선의 방법은 분석하려는 자료의 모델을 설정하고 이 모델에 대하여 평균오차와 오차의 분산을 계산하여 사용하는 것이다. Ordinary kriging법에서는 오차와 오차의 분산이 계산될 수 있는 확률모델을 선정하여 사용한다. 즉, 선정된 모델에 대하여 임의의 한 점 혹은 임의의 불력에서 평균오차가 정확히 0이 되고 오차의 분산이 최소화되게 주변의 자료에 가중치를 주어 그 점 혹은 불력의 값을 추정한다. 이때 추정을 위해 무작위함수 (random function)모델을 사용하는데, 이는 이 모델이 오차와 평균오차 및 오차의 분산을 계산할 수 있게 하여준다 (Isaaks, Srivastava, 1989; Royle, 1979; Journel, Huijbregts, 1978). 우리가 추정하려는 변수를 무작위함수의 현상화로 가정하고, 이 자료의 공간분포를 variogram으로 분석한 후 자료에 적합한 무작위함수모델을 선정한다. 이 함수를 이용하여 임의의 한 점 혹은 임의의 불력에 대하여 변수값을 추정한다.

Indicator kriging

Indicator kriging은 Journel (1983)에 의해 제안되었고, Lemmer (1984)가 발전시킨 방법이다. 이 방법을 수행하기 위하여 먼저 분석하고자하는 공간변수 $z(x)$, 부존밀도, 금속함량, 금속품위밀도 등)를 다음과 같은 Indicator step function에 의해 변환시킨다.

$$i(z(x), z_c) = \begin{cases} 1, & \text{if } z(x) \leq z_c \\ 0, & \text{if } z(x) > z_c \end{cases}$$

$z(x)$ 가 하한값 (cut off) z_c 보다 작거나 같으면 1 그렇지 않으면 0의 값을 갖는다. 즉, $z(x)$ 가 0에서 1 사이의 값으로 변환되어, 그 값으로 variogram을 계산하고 kriging을 수행하는데 변수가 된다. 임의의 영역 (panel)에 대한 이 함수의 평균값에 대해 알면 주어진 값에 대해서 그 영역에 대한 recovery function을 얻게 된다 (David,

1988). 영역 A에 대하여 하한값 z_c 에서의 회수된 광량의 분율은 다음과 같을 것이다 (Journel, 1983).

$$t(A, z_c) = 1 - \phi(A, z_c)$$

where,

$$\phi(A, z_c) = \frac{1}{A} \int_A i(x, z_c) dx$$

$\phi(A, z_c)$ 는 영역 A에 대한 품위의 누적분포함수이다.

이때 금속의 회수량은

$$q(A, z_c) = \int_{z_c}^{\infty} u \frac{\phi(A, u)}{\delta u} du$$

이고, 하한값에 대한 평균 품위는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$m(A, z_c) = \frac{q(A, z_c)}{t(A, z_c)}$$

무작위변수 $i(A, z_c)$ 의 현상화로서 Indicator변수들을 다룰 수 있고, 이들의 기대값은 다음과 같다.

$$E(i(x, z_c)) = F(z_c) = \text{Prob}\{Z(x) \leq z_c\}$$

또한, 중심 공분산은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\sigma_1 = E(i(X_{\alpha, z_c}) i(X_{\beta, z_c})) - F^2(z)$$

$$\text{variance} : \text{Var}(i(x), z_c) = \sigma_1^2(z_c) = F(z_c)(1 - F(z_c))$$

품위의 누적분포함수의 추정값 $\hat{\phi}^*(A, z_c)$ 은 Simple kriging이나 Ordinary kriging에 의해 구할 수 있다 (David, 1988).

수심과 경사도분포 해석

SeaBeam2000에 의해 얻어진 수심자료중 실 자료만을 이용하여 가중거리역산법 (inverse distance)에 의해 도면분석을 실시하였다. 경사도분석을 위하여 연구지역의 수심을 240×360 행렬로 재구성하였다. 또한 3×3 창을 이용하여 중심점과 외곽점과의 경사도를 계산하여, 한 지점의 최대경사도를 구하였다. 분석지역의 수심도와 최대 경사지시도를 Fig. 2 와 Fig. 3에 나타내었다. 경사지시도는 최대경사 10%를 경계값으로 하여 경사도 10%이내는 백색, 10%이상되는 지역은 흑색으로 표시하였다.

이 가중거리역산에 의한 방법은 Fig. 2 와 Fig. 3에서와 같이 수평으로 연속적인 노이즈 현상을 보이고 있다. 이는 노이즈가 보이는 지역의 수심 자료가 없어 주변으로부터 거리의 제곱에 반비례하는 가중치를 부여하여 주변의

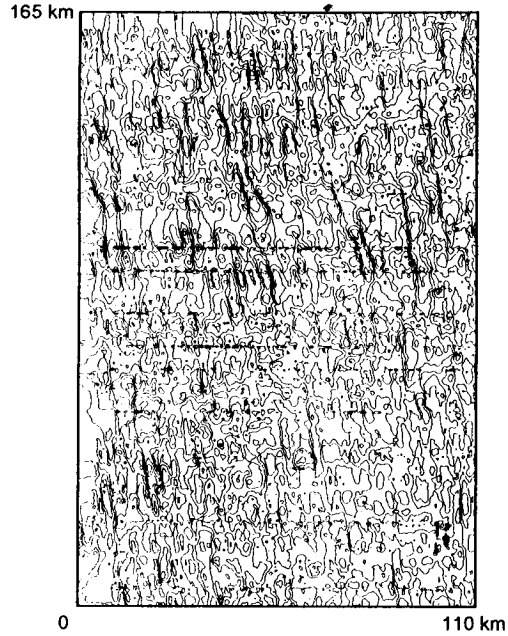


Fig. 2. Bathymetric map in the study area.

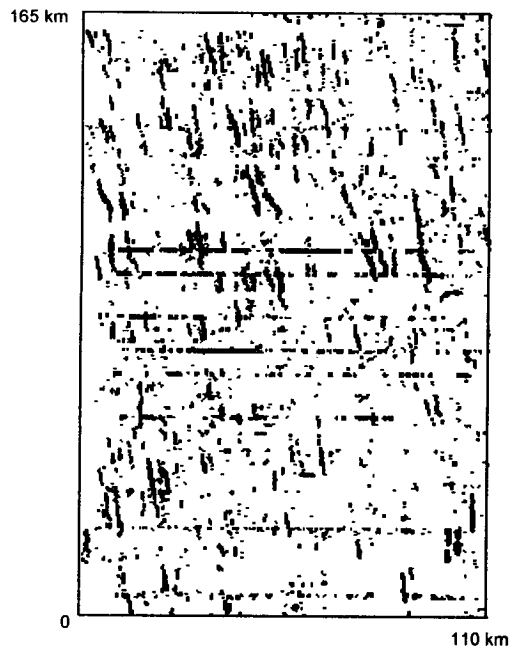


Fig. 3. Indicator map of slope in the study area. (white : maximum slope < 10%, black : maximum slope ≥ 10%)

지형 구조와는 다른 비슷한 값으로 추정되어 나타나는 현상이다. 또한 최대경사지시도에서 나타나는 수평의 검은 띠 모양의 구조도 수심도와 같은 노이즈 현상이다.

수심자료의 미확득지역의 영향으로 발생하는 노이즈현상과 수심자료의 공간분포분석 및 DTM (Digital Terrain Model)화 작업은 Herzfeld (1989a, 1989b)에 의해 수행된 바 있다. Herzfeld는 SeaBeam의 수심자료에 대해 variogram분석을 수행하였고, 이를 토대로 수심자료의 미확득지역을 추정하였다. 그는 추정되어진 전체 수심자료를 DTM화하여 지질학적 및 지구물리적 조사라인을 효율적으로 운영할 수 있게 하였다 (Herzfeld, 1989a, 1989b).

본 연구에서도 이러한 노이즈 현상을 제거하기 위하여 전체의 수심자료로부터 수심의 공간 분포를 분석하였다. 수심의 공간분포분석은 110×165의 격자행렬을 이용하였으며, 이들 격자간격은 1 km×1 km로 부존밀도와 유용금속의 품위밀도 추정시 사용되어진 격자의 간격과 동일하게 구성하였다. Ordinary kriging법을 이용하여 수심의 공간분포 추정과 수심자료를 DTM화 하였으며, 이를 토대로 최대경사도를 분석하였다 (Fig. 4, Fig. 5). 연구지역 수심자료의 DTM에 의한 개선된 수심도는 Fig. 4에 나타내었다. 수심의 공간분포를 분석하는데 사용된 semi-variogram과 모델은 Fig. 6에 나타내었다.

부존밀도 및 유용금속 품위밀도 분포 해석

망간단괴광상 개발시 목표금속인 Cu와 Ni의 함량을 이

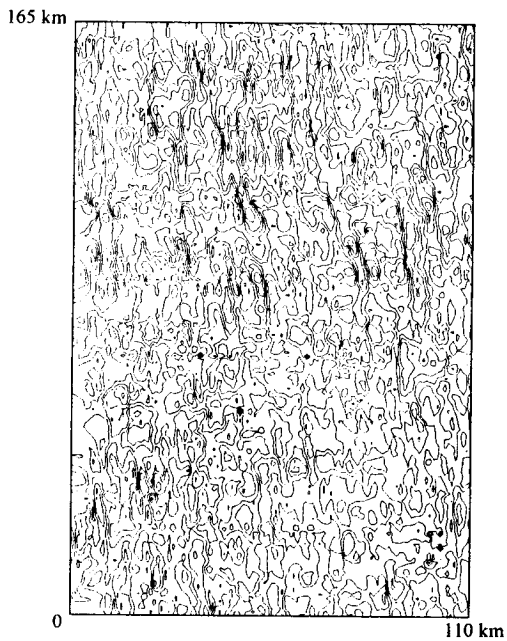


Fig. 4. Bathymetric map in the study area. (1 km×1 km grid)



Fig. 5. Indicator map of slope in the study area. (white : maximum slope < 10%, black : maximum slope ≥ 10%, 1 km×1 km grid)

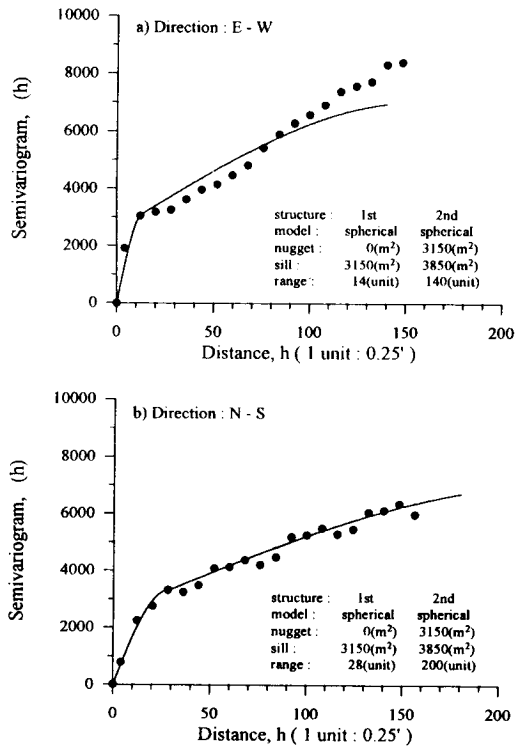


Fig. 6. Semivariogram of bathymetry using SeaBeam200 data.

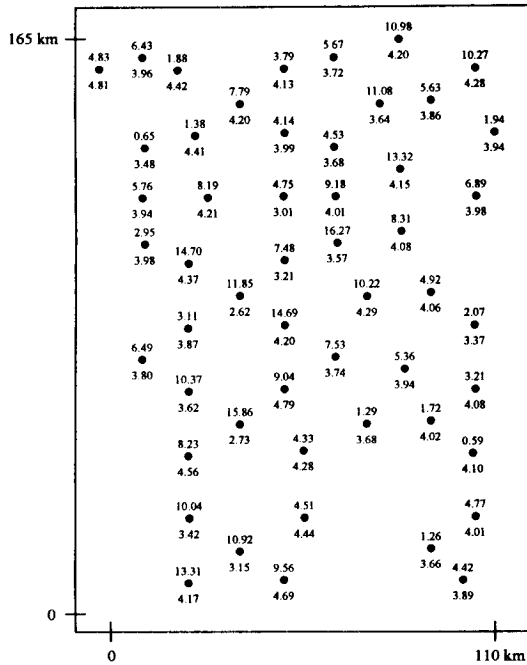


Fig. 7. Location map of nodule abundance (kg/m^2) and metal content ($\text{Cu}+2.2\text{Ni}$, %) in the study area. Abundance values are plotted above "●" symbol and metal content values are below

용하여 유용금속 품위밀도를 계산하였다. 이 유용금속들의 품위밀도는 망간단괴 부존밀도 (kg/m^2)에 금속의 함량값 (%)을 곱하여 구하였고, 그 단위를 g/m^2 으로 환산하였다. 망간단괴의 부존량 해석시 각각의 금속함량과 Cu와 Ni 함량을 합한 값 (Archer, 1976; Hosler, 1976; Kildow *et al.*, 1976) 및 Ni함량에 2.2를 곱한 Cu+2.2Ni값을 사용하였다 (Frazer, 1977). 이 Cu+2.2Ni의 경우, U.S. Bureau of Mines (1975)에 의해 과거 20년간의 금속가격동향을 분석한 결과 Ni의 가격은 Cu의 가격보다 2.2배 이상 상회하는 결과에 따라 계산된 값이다. 부존밀도의 채산점 (cutoff grade)을 5 kg/m^2 로 선정하였다. 유용금속의 경우, Cu는 1.03%, Ni은 1.24%을 채산점으로 잡아 Cu+Ni의 경우 2.27%, Cu+2.2Ni의 경우 3.0%을 채산점으로 잡았다 (Archer, 1976; Hosler, 1976; Kildow *et al.*, 1976; Frazer, 1977).

망간단괴의 부존밀도와 유용금속의 품위밀도의 공간적인 분포를 해석할 때 사용되어진 지역은 앞에서 언급한 바와 같이 수심과 정점탐사가 수행되어진 지역중 수심의 실 자료와 망간단괴의 분석자료가 충분히 있는 지역을 선택하였다. 이 지역의 정점탐사시 채취된 망간단괴의 시료 채취 위치와 망간단괴 부존밀도, 유용금속함량과 품위밀

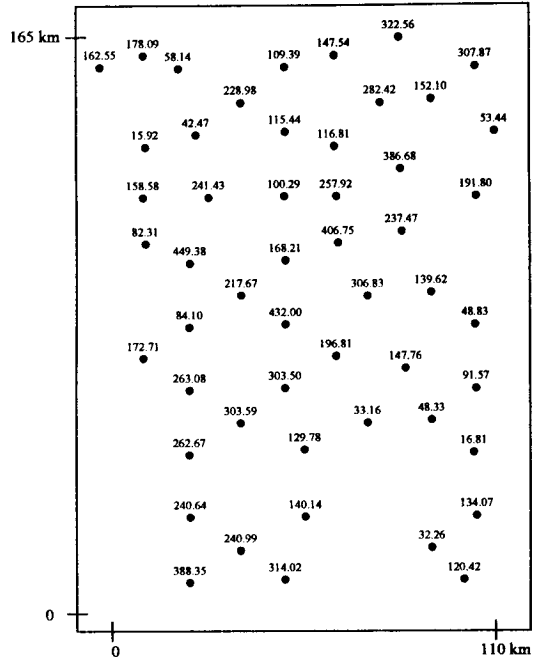


Fig. 8. Location map of metal accumulation ($\text{Cu}+2.2\text{Ni}$, g/m^2) in the study area. Values are plotted above "●" symbol

Table 1. Semivariogram models for nodule abundance and metal accumulation.

	Model	nugget	sill	range
Abundance	spherical	$6.0(\text{kg}^2/\text{m}^4)$	$11.0(\text{kg}^2/\text{m}^4)$	40 km
Metal accumulation ($\text{Cu}+2.2\text{Ni}$)	spherical	$3430(\text{g}^2/\text{m}^4)$	$9310(\text{g}^2/\text{m}^4)$	40 km

Table 2. Indicator semivariogram models for nodule abundance and metal accumulation.

	Model	nugget	sill	range
Abundance	spherical	0	1	40 km
Metal accumulation ($\text{Cu}+2.2\text{Ni}$)	spherical	0	1	40 km

도를 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다. 총 52개의 정점자료가 사용되어졌으며, 1개의 정점시료는 3-4개 FFG에 의해 채취된 시료의 평균값을 취하였다. 또한 약 200~300 m 간격으로 FFG시료채취를 수행한 자료이므로 한 개의 정점은 약 1 km^2 의 면적을 대표하는 것으로 가정하였다. 분석지역은 가로 110 km와 세로 165 km로 면적이 $18,150 \text{ km}^2$ 이다.

이 지역의 부존밀도와 유용금속 품위밀도의 공간분포를 분석하기 위하여 semivariogram분석을 실시하였다.

광상의 평가를 위하여 Ordinary kriging법과 Indicator kriging법을 사용하였다. 부존밀도와 금속품위밀도추정에 사용된 semivariogram과 Indicator semivariogram의 모델과 계수들은 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

Ordinary kriging에 의해 부존밀도를 추정하기 위하여 nugget를 가진 구형함수 (spherical function)를 semivariogram의 모델로 선정하였다. 부존밀도추정에는 nugget가 $6.0 \text{ kg}^2/\text{m}^4$, sill이 $11.0 \text{ kg}^2/\text{m}^4$ 이고 range가 40 km인 구형모델을 사용하였고, 유용금속 품위밀도추정에는 nugget가 $3,430 \text{ g}^2/\text{m}^4$, sill이 $9,310 \text{ g}^2/\text{m}^4$ 이고 range가 40 km인 구형함수모델 (spherical function model)을 사용하였다 (Fig. 9). 미국 OMCO (1992a)사는 망간단괴광상의 광역적인 공간분포특성으로 30해리의 range를 제시한 바 있다. 추정되어진 각 지점의 부존밀도와 금속의 품위밀도를 등치선으로 나타내었다 (Fig. 10, Fig. 11).

Indicator kriging을 수행하기 위하여 부존밀도와 금속 품위밀도에 대하여 각각 6개의 하한값 (cutoff)을 설정하였다. 이 하한값은 부존밀도의 경우 누적분포에서 십분율에 해당하는 값과 망간단괴광상의 채산점인 $5 \text{ kg}/\text{m}^2$ 과 $7 \text{ kg}/\text{m}^2$ (부존밀도)중 상위 6개를 선정하였다. 품위밀도의 경우 하한값으로 누적분포의 십분율과 채산점인 Cu+2.

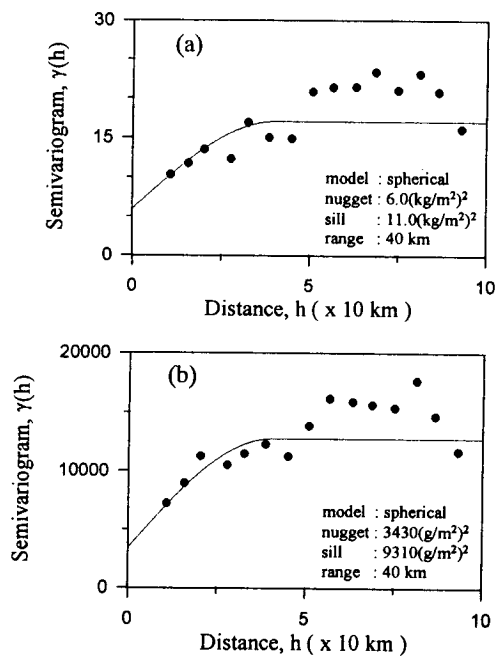


Fig. 9. Omnidirectional semivariograms (52 data) for (a) abundance of manganese nodule and (b) metal (Cu+2.2Ni) accumulation of manganese nodule.

2Ni의 함량 3.0%와 3.37%을 망간단괴의 채산점인 $7 \text{ kg}/\text{m}^2$ 과 곱한 값, $147 \text{ g}/\text{m}^2$ 과 $182 \text{ g}/\text{m}^2$ 을 선정하였다. 이 하한값을 이용하여 부존밀도와 품위밀도에 대해 각각 6개의 Indicator semivariogram을 분석하였다. 하한값들의 semivariogram들에 대한 동일모델 설정을 위하여 얻어진 semivariogram들을 표준화시켰다. 부존밀도와 품위밀도의 semivariogram모델은 range가 40 km인 nugget가 없는 구형모델 (spherical model)로 선정하였다 (Fig. 12,

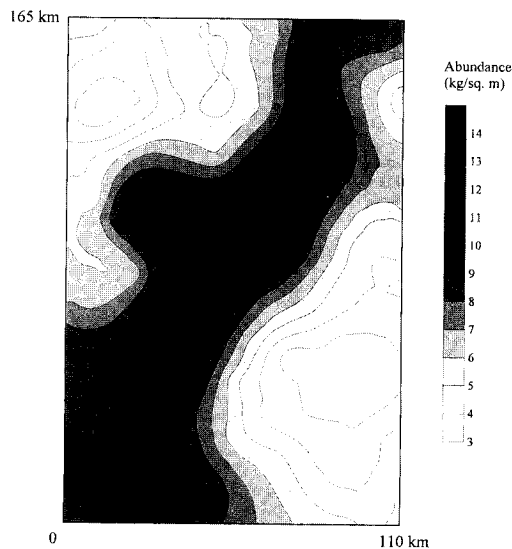


Fig. 10. Contour map of abundance using ordinary kriging in the study area (1 km x 1 km grid).

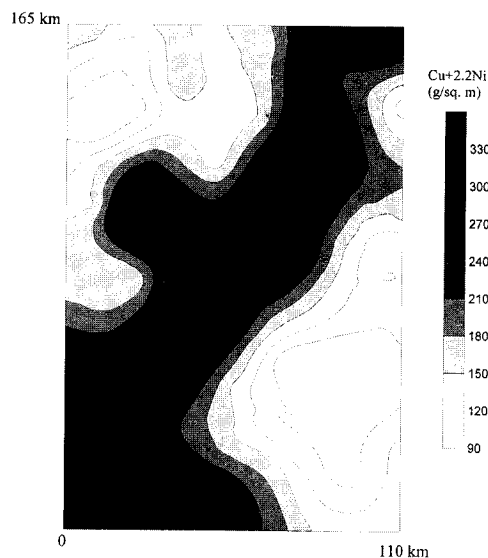


Fig. 11. Contour map of metal accumulation using ordinary kriging in the study area (1 km x 1 km grid).

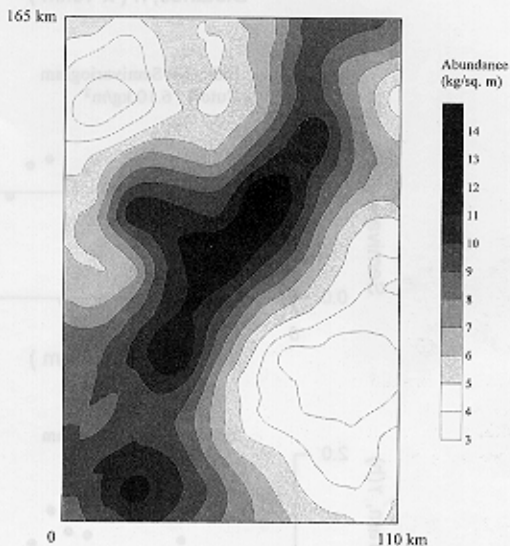


Fig. 10. Contour map of abundance using ordinary kriging in the study area (1 km \times 1 km grid).

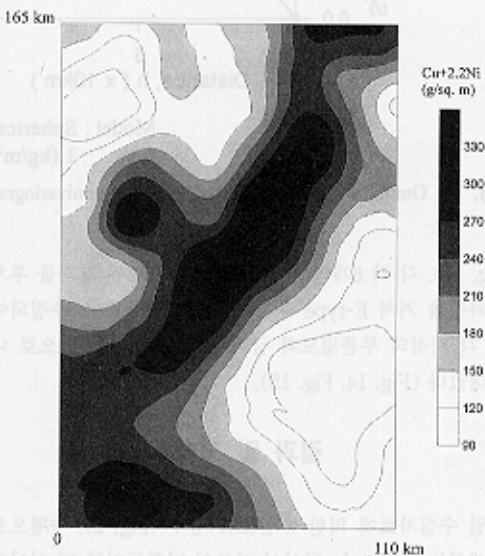


Fig. 11. Contour map of metal accumulation using ordinary kriging in the study area (1 km \times 1 km grid).

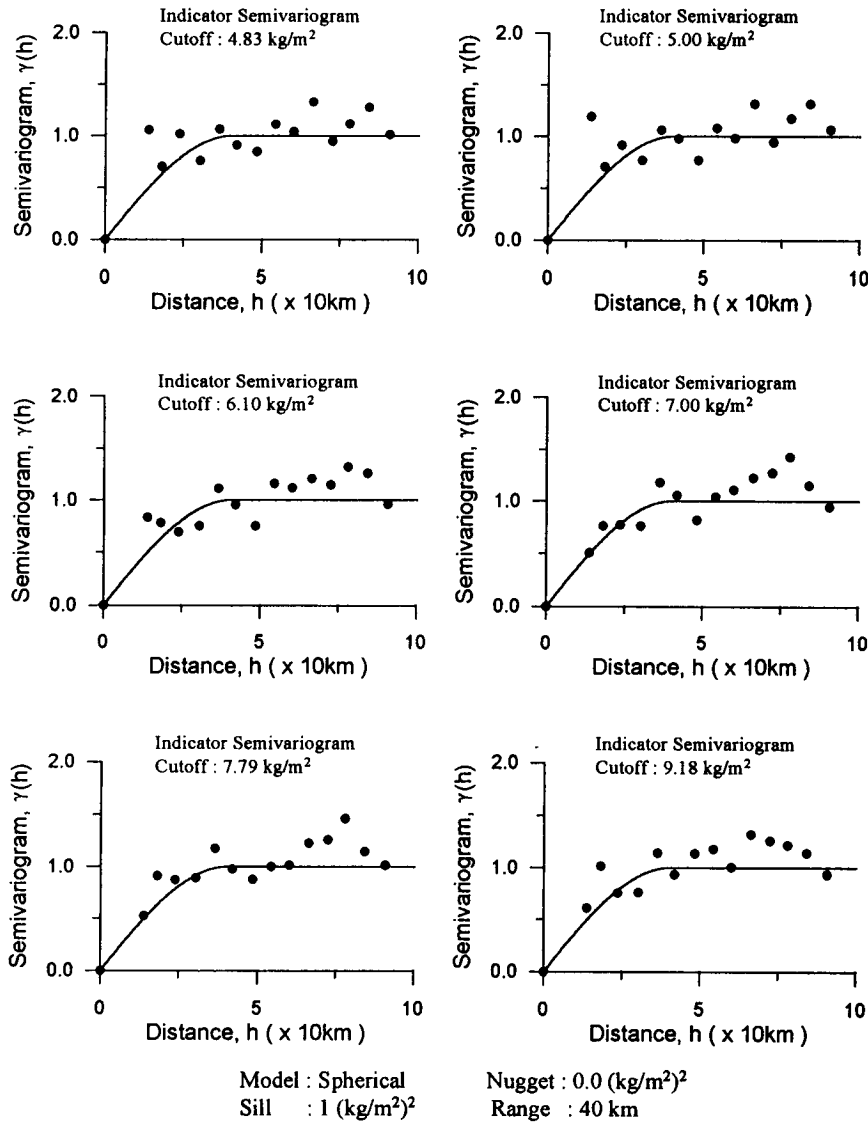


Fig. 12. Omnidirection standardized indicator semivariograms of abundances and their model fits.

Fig. 13). 각 각 6개의 하한값에 의해 추정된 결과를 후처리과정을 거쳐 E-type 추정법으로 추정하였다. 추정되어진 각 지점의 부존밀도와 금속품위밀도를 등치선으로 나타내었다 (Fig. 14, Fig. 15).

결과 및 고찰

원 수심자료에 의한 수심도의 경우 (Fig. 2), 수평으로 발생하는 노이즈는 탐사시 자료의 미획득지역 및 얻어진 자료의 왜곡성등의 이유로 초기 후처리과정중 자료의 일

부가 제거되어 나타나는 현상이다 (상공자원부, 1994). 이러한 현상은 탐사측선의 설계시 모서리부분이 완전하게 겹치도록 설계되었으나, 수심의 급격한 변화와 기기의 불안정성 등의 이유로 전체 해저면의 수심을 측정하지 못해 일어난다. 불완전한 SeaBeam2000의 수심자료를 이용하여 수심의 공간분포해석이 없이 단순방법 (inverse distance법 등)에 의해 전체의 수심도가 작성될 경우 탐사측선방향으로 실제 지형구조와는 상관없는 지형구조 (노이즈)가 발생한다. 또한 이러한 수심자료를 이용하여 잠재적 가채지역의 선정을 위한 최대경사도를 구할 경우

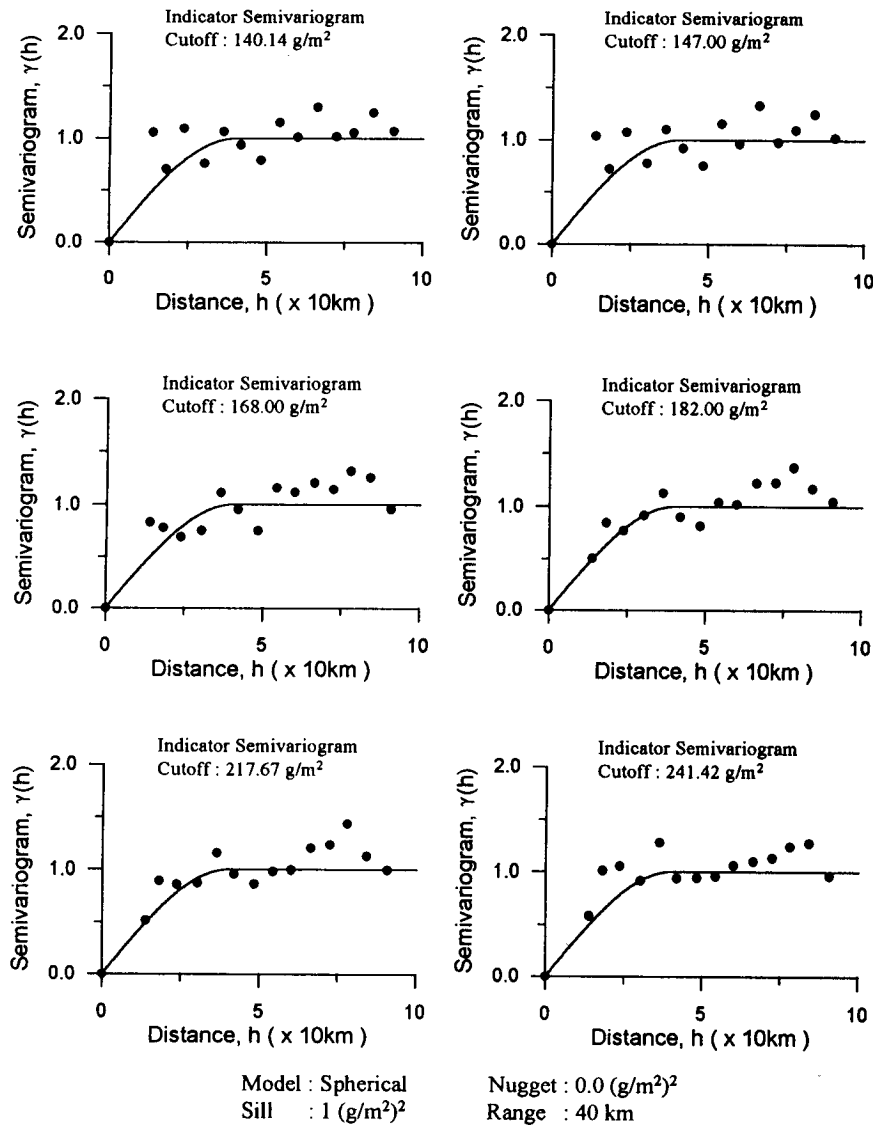


Fig. 13. Omidirectional standardized indicator semivariograms of metal (Cu+2.2 Ni) accumulations and their model fits.

많은 양의 오류를 범하게 될 것이다.

수심자료의 공간분포는 semivariogram 분석을 통하여 Fig. 6에서와 같이 남북방향과 동서방향의 지형구조를 나타내었다. 이 두 방향은 이 지역의 두개의 지형구조경향과 일치하고 있다. 또한 이 두 지형구조의 주 경향은 남북방향의 경우 약 12.6 km의 range를 갖는 국지적 경향성과 90 km의 range를 갖는 광역적 경향성을 갖는 것으로 해석되었다. 동서방향의 경우 6.3 km의 국지적 경향성과 63 km의 광역적 경향성의 두 지형 경향성을 해석할 수 있었다 (Fig. 6).

지형구조해석으로 얻어진 지형구조적 이방성을 이용하여 결손된 수심자료를 Ordinary kriging에 의해 복구하였고, 이를 DTM화 하였다. 이 DTM에 의해 얻어진 수심도 (Fig. 4)는 원 수심도 (Fig. 2)에 비해 남북방향의 지형구조선을 보다 잘 나타내며, 동서방향의 국부적 노이즈를 제거할 수 있었다. 최대경사지시도의 경우, 동서방향의 노이즈에 의한 가짜 최대 경사도는 거의 제거될 수 있었다 (Fig. 5).

SeaBeam2000에 의해 획득된 수심자료의 공간분포해석과 지형구조 경향성 해석을 통하여 보다 완전한 수심의

DTM화 작업을 수행하였고, 이를 통한 최대경사도 해석으로 잠재적 가채지역 선정의 기초 지형자료를 제공할 수 있으리라고 생각된다. 아직 남아있는 연구 지역의 모서리부분의 노이즈와 동서방향의 노이즈는 Herzfeld (1989a, 1989b)이 제시한 것과 같이 초기 수심자료의 획득시 SeaBeam2000 후처리과정의 알고리즘 개선과 보다 조밀한 수심자료의 획득으로 개선할 수 있을 것으로 사료된다.

Ordinary kriging법에 의해 추정된 각 지점의 값들은 원 정점의 부존밀도 및 유용금속 품위밀도분포를 잘 나타내고 있으며, 시료가 없는 지점의 추정은 주변자료가 평균되는 점에 의해 등치선의 곡면이 부드러워져 있다. 또한, 각 지점 추정값의 변화정도가 완만하게 나타나고있다.

Indicator kriging법에 의해 추정되어진 각 지점들에서 국부적인 변화의 정도가 Ordinary kriging에 의한 추정보다 자세하며, 등치선 곡면의 변화정도로 볼 때 이상치에 대한 영향이 Ordinary kriging보다 덜 미쳤음을 알 수있다. 자료가 없는 부분의 경우 추정값은 전체적인 구조의

경향성을 잘 나타내고 있다.

Ordinary kriging법에 의한 추정값과 Indicator kriging에 의한 추정값은 대동소이하다. 이는 시료채취점의 간격이 semivariogram 모델의 range값과 큰 차이가 없어 나타나는 결과로 해석되어진다. 그러나 국부적인 지점에 대한 추정값의 변화정도와 자료가 없는 지점의 구조적인 경향성의 반영 등을 고려할 때 Indicator kriging법이 Ordinary kriging법보다 이 지역자료의 해석과 추정에 더 나은 방법으로 사료된다.

Ordinary kriging법과 Indicator kriging법에 의해 추정되어진 18,150개의 블록 자료에 대한 부존밀도와 유용금속 품위밀도의 통계량을 Table 3에 나타내었다. 52개 정점의 원자료에서 부존밀도의 평균은 6.89 kg/m², 유용금속 품위밀도는 188.16 g/m²이고, 18,150개의 추정자료에서 부존밀도와 유용금속 품위밀도의 평균은 Ordinary kriging법의 경우 7.01 kg/m², 190.35 g/m²이며 Indicator kriging법에 추정값의 평균은 8.68 kg/m², 198.56 g/

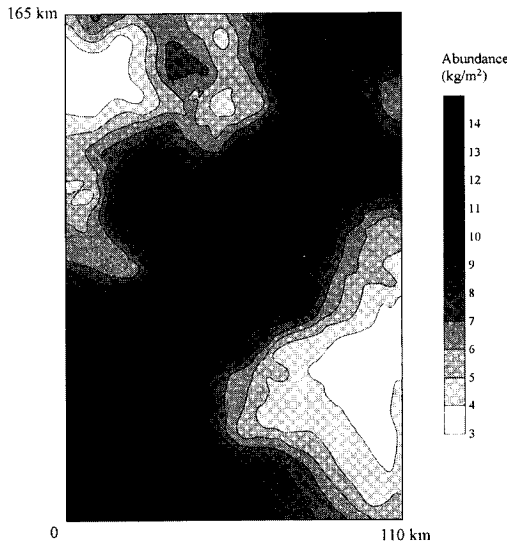


Fig. 14. Contour of abundance using indicator kriging in the study area (1 km x 1 km grid).

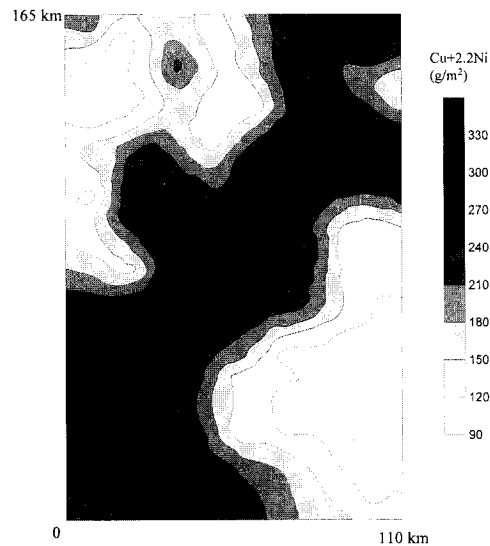


Fig. 15. Contour map of metal accumulation using indicator kriging in the study area (1 km x 1 km grid).

Table 3. Statistics on estimation of abundance and metal accumulation using Ordinary kriging and Indicator kriging.

	Abundance (kg/sq.m)			Metal accumulation (Cu+2.2Ni.g/sq.m)		
	Station data	Ordinary kriging	Indicator kriging	Station data	Ordinary kriging	Indicator kriging
Mean.	6.89	7.01	8.68	188.16	190.351	198.555
Std. Dev.	4.19	2.65	3.16	114.02	73.136	58.681
Variance	17.59	7.03	9.96	12,999.33	5,348.60	3,446.99
Minimum	0.59	2.08	3.13	11.15	47.278	95.613
Maximum	16.27	12.74	14.39	449.38	357.931	286.482
No. of data	52	18.150	18.150	50	18.150	18.150

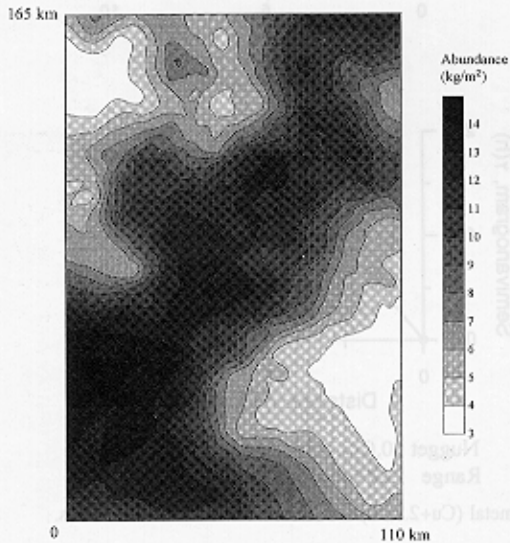


Fig. 14. Contour of abundance using indicator kriging in the study area (1 km × 1 km grid).

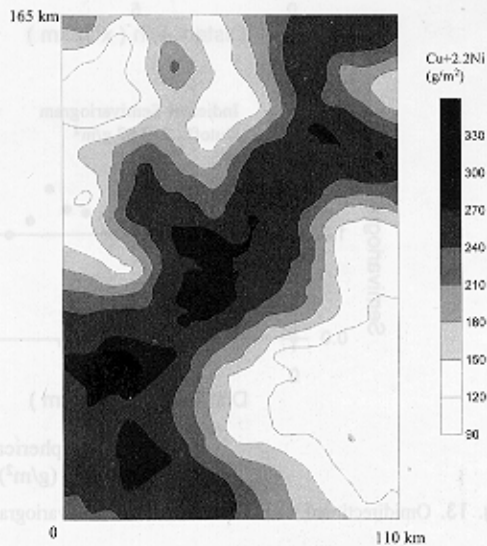


Fig. 15. Contour map of metal accumulation using indicator kriging in the study area (1 km × 1 km grid).

Table 4. Statistics on estimation of abundance using Ordinary kriging and Indicator kriging.

	Abundance (kg/sq.m)					
	≥ 7.0			≥ 10.0		
	Station data	Ordinary kriging	Indicator kriging	Station data	Ordinary kriging	Indicator kriging
Mean	10.84	9.37	10.74	12.42	10.84	11.85
Std. Dev.	2.67	1.27	1.85	2.22	0.59	1.05
Variance	7.22	1.61	3.42	4.95	0.35	1.1
Minimum	7.48	7.00	7.00	10.04	10.00	10.00
Maximum	16.27	12.74	14.39	16.74	12.74	14.39
No. of data	23	8.931	11.517	14	2.865	7.634
	(44.23%)	(49.21%)	(63.45%)	(26.92%)	(15.79%)	(42.06%)

Table 5. Statistics on estimation of metal accumulation using Ordinary kriging and Indicator kriging.

	Metal accumulation (Cu+2.2Ni.g/sq.m)					
	≥ 147			≥ 182		
	Station data	Ordinary kriging	Indicator kriging	Station data	Ordinary kriging	Indicator kriging
Mean	260.351	231.21	226.478	294.931	250.866	243.012
Std. Dev.	87.094	49.539	40.852	73.871	37.499	27.391
Variance	758.7149	2454.3659	1668.8567	5457.2476	1406.2069	75.0577
Minimum	147.546	147.00	147.01	191.807	182.02	182.01
Maximum	449.379	357.931	286.8567	449.379	357.931	286.489
No. of data	31	12.242	13.90	23	9.504	10.469
	(59.62%)	(67.45%)	(72.67%)	(44.23%)	(52.36%)	(57.68%)

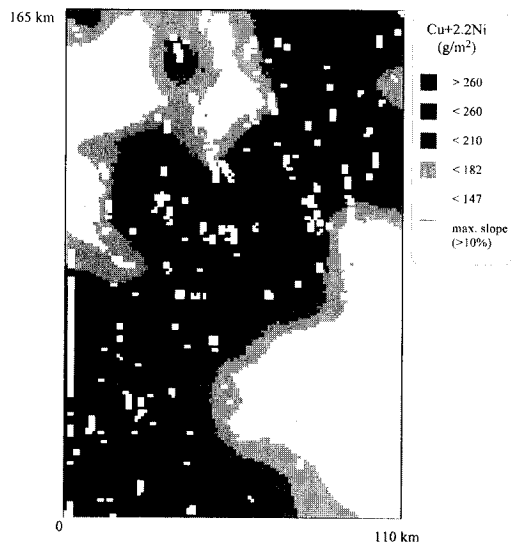


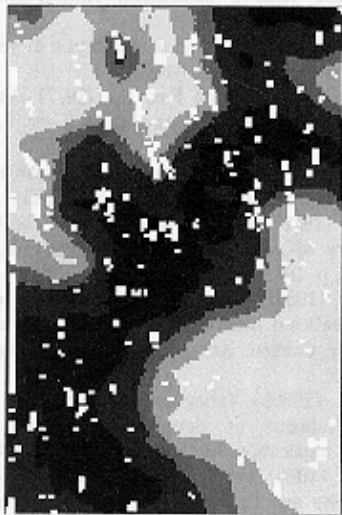
Fig. 16. Overlay map of maximum slopes (>10%) and metal accumulation (Cu+2.2Ni) in the study area.

m²이다. 망간단괴 부존밀도가 7 kg/m²이상인 정점과 추정치의 평균은 10.84 kg/m² (정점), 9.37 kg/m² (Ordinary kriging법), 10.74 kg/m² (Indicator kriging

법)이며, 부존밀도가 10 kg/m²이상인 정점과 추정치의 평균은 12.42 kg/m² (정점), 10.84 kg/m² (Ordinary kriging법), 11.85 kg/m² (Indicator kriging법)이다 (Table 4). 유용금속 품위밀도가 147 g/m²이상인 정점과 추정치의 평균은 260.35 g/m² (정점), 231.21 g/m² (Ordinary kriging법), 226.48 g/m² (Indicator kriging법)이며, 유용금속 품위밀도가 182 g/m²이상인 정점과 추정치의 평균은 294.93 g/m² (정점), 250.87 g/m² (Ordinary kriging법), 243.01 g/m² (Indicator kriging법)이다 (Table 5).

망간단괴광상의 개발시 장애가 되는 지역을 선별하는 최대경사도분포와 Indicator kriging법에 의해 추정된 유용금속 품위밀도의 분포도는 각각의 도면에 의해 채광지역을 선정하는 것은 차후 자료의 보안과 시료채취지점이 조밀하게 될 경우 해석의 복잡성이 야기된다. 이러한 점을 해결하기 위하여 두 도면을 하나의 도면으로 overlay 시켜 잠재적 채광지역을 선정하였다 (Fig. 16). 이 overlay기법을 이용하여 차후 퇴적물의 전단강도와 같은 공학적 특성과 기타의 채광에 영향을 주는 변수들의 지시도를 종합하는 종합적 가치지역 선정도의 작성에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

165 km



0

110 km

Fig. 16. Overlay map of maximum slopes (>10%) and metal accumulation (Cu+2.2Ni) in the study area.

결 론

망간단괴의 부존밀도 및 유용금속 품위밀도의 공간분포와 구조해석을 통하여 이 지역의 유용금속의 가채광량을 추정하는 최적의 지구통계학적방법을 찾아내고자 하였다. 가채지역의 선정시 장애요인인 해저면의 최대경사도를 구하여 이들을 도면화하였다. 이를 위하여 초기 수심자료를 kriging법에 의해 공간분포해석 및 지형의 경향성해석을 하였으며, 수심자료를 DTM화 하였다. 추정된 유용금속 분포도와 최대경사도시도를 도면으로 작성하였고 이를 overlay하는 기법을 찾아내어 도면화 하였다. 이상의 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 수심과 경사도 분석에 사용된 0.25분 간격의 격자형태의 수심자료는 자료의 미확득으로 인해 경사 경향성 및 유망지역 선정에 부적합하였다. semivariogram분석을 이용하여 수심자료의 공간분포해석과 구조해석을 하였고, 이 수심자료를 kriging법에 의해 재분석하여 DTM화 하였다. DTM 자료의 방향성해석 및 최대경사도분석을 통하여 유망지역을 선정할 수 있었다.

2. 광량평가모델로는 Ordinary kriging과 Indicator kriging을 사용하였다. Ordinary kriging법에 의한 부존밀도와 유용금속 품위밀도의 추정 결과, 추정값은 원 정점 자료의 형태를 잘 보여주며 각 지점의 추정값의 변화정도가 완만하게 나타나고 있다.

3. Indicator kriging에 의한 추정결과, 각 지점에서 국부적인 추정값의 변화정도가 Ordinary kriging에 의한 추정값의 변화보다 자세하며 이상치의 영향을 덜 받아 자료가 없는 지점에서도 전체적인 추정값의 변화정도를 잘 나타내고 있다.

4. 국부적인 지점에서 추정값의 변화정도와 자료가 없는 지점에 대한 추정값의 구조적 경향성 반영 등을 고려할 때 Indicator kriging법이 Ordinary kriging법보다 더 나은 추정방법이었다. 따라서, 이 지역 망간단괴광상에 대한 광량평가의 지구통계학적 모델로는 Indicator kriging법을 선정하였다.

5. 최대경사도 분석도와 Indicator kriging에 의한 부존밀도추정도의 overlay기법을 이용하여 유망지역의 선정을 효과적으로 수행할 수 있었으며, 채광에 장애가 되는 지역 선정 및 초기 가채광량계산에 유용한 종합적 가채지역 선정도의 작성에 기여할 것으로 사료된다.

사 사

이 연구는 한국과학재단 지정 전략광물자원연구센터

(CMR)의 연구비지원으로 수행되었다.

참고문헌

- 동력자원부 (1992) '92 심해저 광물자원탐사용역 보고서.
 상공자원부 (MOTIE) (1993) '93 심해저 광물자원탐사용역 보고서.
 상공자원부 (MOTIE) (1994) '94 심해저 광물자원탐사용역 보고서.
 홍승용, 강정극 (1993) 심해저 자원개발론. 서울프레스, 316p.
 Archer, A.A. (1976) Prospects for the exploitation of manganese nodules: the main technical, economic and legal problems. In: Papers Presented at the I.D.O.E. Workshop, Suba, Fiji, 1-6 September, 1975, Glasby, G. P., and Katz, H.R., ed. Technical Bulletin No. 2, U.N. Economic and Social Commission for Asia and the Pacific, CCOP/SOPAC, p. 21-38.
 Brooker, P. (1979) Kriging. In: Engineering and Mining Journal. v. 180, No. 9, p. 148-153.
 Chautru, J.M., Morel, Y. and Herrouin, G. (1987) Geostatistical simulation of a commercial polymetallic nodule mining site. APCOM 87. Proceedings of the Twentieth International Symposium on the Application of Computer and Mathematics in the Mineral Industries. v. 3: Geostatistics. Johannesburg, SAIMM, p. 177-185.
 Clague, D. (1981) Linear island and seamount chains, aseismic ridges and intra-plate volcanism: results from DeepSea Drilling Project, SEPM Spec. Publ., v. 32, p. 7-22.
 David, M. (1988) Handbook of applied advanced geostatistical ore reserve estimation. Amsterdam. Elsevier. 216p.
 Davis, J.C. (1986) Statistics and data analysis in geology. 2nd ed. John Wiley & Sons. 646p.
 DeLong, S.E., Dewey, J.F. and Fox, P.J. (1977) Displacement history of oceanic fracture zones, Geol. v. 5, p. 199-201.
 Frazer, J.Z. (1977) Manganese nodule reserves: an update estimate. Marine Mining, v. 1, p. 103-123.
 Herron, E.M. (1972) Sea-floor spreading and the Cenozoic history of east-central Pacific. Geol. Soc. Am. Bull., v. 83, p. 1671-1692.
 Herzfeld, U.C. (1989a) Geostatistical methods for evaluation of SeaBeam bathymetric surveys: Case studies of Wegener Canyon, Antarctica. Marine Geology, v. 88, p. 83-95.
 Herzfeld, U.C. (1989b) Variography of submarine morphology: Problems of deregularization, and cartographical implication. Math. Geol., v. 21, p. 693-713.
 Hewett, T.A. (1986) Fractal distributions of reservoir heterogeneity and their influence on fluid transport. SPE15386, 61th Annual SPE Technical Conference, October.
 Holser, A.F. (1976) Manganese nodule resources and mine site availability (Professional staff study, ocean mining Administration, Department of Interior, Washington, D.C.), Unpublished.
 Isaaks, E.H. and Srivastava, R.M. (1989) Applied geostatistics. Oxford University Press. 561p.
 Jeong, K.S. (1993) Sedimentary processes and formation of

- manganese nodules in the Korea Deep Ocean Study (KODOS) area, western Clarion-Clipperton Fracture zones, Northeast Equatorial Pacific, Seoul National University Ph.D. thesis.
- Journel, A.G. (1983) Nonparametric estimation of spatial distributions. *I.A.M.G. Journal*, v. 15, No. 3, p. 445-468.
- Journel, A.G. and Huijbregts, C.J. (1978) *Mining Geostatistics*. London. Academic Press. 600p.
- Kildow, J.T., Bever, M.B., Dar, V.K. and Capstaff, A.E. (1976) Assessment of economic and regulatory conditions affecting ocean minerals resources department (Report to the Department of Interior, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge), Unpublished.
- Lemmer, C. (1984) Estimating local recoverable reserves via IK. In: *Geostatistics for Natural Resources Characterization*, ed. Verly et al., v. 1, p. 349-364.
- Luyendik, B.P. (1969) Origin of short-wavelength magnetic lineations observed near the ocean bottom. *J. Geophy. Res.*, v. 74, p. 4869-4881.
- Luyendik, B.P. (1970) Origin and history of abyssal hills in the northeast Pacific Ocean. *Geol. Soc. Am. Bull.*, v. 81, p. 2237-2260.
- OMCO (1992) First consultant report. Exploration data transfer between Ocean Minerals Company and Korea Ocean Research and Development Institute. 29p.
- Royale, A. (1979) Why geostatistics?. In: *Engineering and Mining Journal*. v. 180, p. 92-102.
- Slater, S.O., Anderson, R.N. and Bell, M.L. (1971) Elevation of ridges and evolution of the central eastern Pacific. *J. Geophy. Res.* v. 76, No. 32, p. 7888-7915.
- U.S. Bureau of Mines (1975) *Mineral Facts and Problems, Bicentennial Edition*. Bureau of Mines Bulletin 667, U.S. Government Printing Office, Washington, D. C., p. 304 and 744.
- van Andel, T.H., Heath, G.R. and Moore, T.C. Jr. (1975) Cenozoic history and paleoceanography of the central equatorial Pacific Ocean. *Geol. Soc. Am. Mem.*, v. 143, p. 1-134.

1996년 6월 21일 원고접수