

## 망간단괴광상의 매장량평가를 위한 SIS (Sequential Indicator Simulation)의 응용

박찬영\* · 강정극\* · 전효택\*\*

### The Application of SIS (Sequential Indicator Simulation) for the Manganese Nodule Fields

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

**ABSTRACT** : The purpose of this study is to develop geostatistical model for evaluating the abundance of deep-sea manganese nodule. The abundance data used in this study were obtained from the KODOS (Korea Deep Ocean Study) area. The variation of nodule abundance was very high within short distance, while sampling methods was very limited. As the distribution of nodule abundance showed non-gaussian, indicator simulation method was used instead of conditional simulation method and/or ordinary kriging. The abundance data were encoded into a series of indicators with 6 cutoff values. They were used to estimate the conditional probability distribution function (cpdf) of the nodule abundance at any unsampled location. The standardized indicator variogram models were obtained according to variogram analysis. This SIS method had the advantage over other traditional techniques such as the turning bands method and ordinary kriging. The estimating values by indicator conditional simulation near high abundance area were more detailed than by ordinary kriging and indicator kriging. They also showed better spatial characteristics of distribution of nodule abundance.

## 서 론

망간단괴의 해저면의 분포상황은 비교적 짧은 거리 (수 m 내외)에서도 변화하며, 크기는 수 10 km의 범위에서 분포양상의 변화가 있다. 또한 이들은 분포형태가 2차원적이며, 지형의 영향을 많이 받는다. 이러한 망간단괴의 분포양상을 보다 광역적으로 추정하는 것은 이들의 자원 부존량을 평가하는데 필수적인 요소이다 (박찬영, 1995; 박찬영 등, 1996; 통상산업부, 1995; 해양수산부, 1996). 심해저 망간단괴자원의 자원 부존량평가를 위한 노력은 여러해 동안 이루어져 왔다. 초기 전통적인 방법의 다각형 (polygonal)법, 혹은 가중거리역산 (inverse distance)법 등이 사용되어졌으며, 차후 지구통계학적인 방법이 사용되어

져 왔다. 지구통계학적인 접근은 초기 ordinary kriging법, block kriging법, universal kriging법 등이 사용되어졌으며, 최근 그 분포형태의 특성을 고려하여 indicator kriging법이 사용되었다 (박찬영 등, 1996; 해양수산부, 1996).

본 연구는 한국심해연구지역 (KODOS area)의 망간단괴 부존밀도 자료를 이용하여 망간단괴자원의 광역적 부존량평가를 위한 지구통계학적 모델을 선정하기 위한 연구의 일환이다. 본 연구에서는 원 자료의 분포를 부드럽게 (smoothing)하는 kriging법 대신에 원 자료의 분포특성을 보존하는 모사 (simulation)법을 이용하여 단괴의 부존량 분포특성을 알고자 하였다. 또한 조건부 모사법의 하나인 SIS (Sequential Indicator Simulation)을 사용하여 기존 연구되었던 kriging법에 의한 추정분포와 비교하고, 최적의 현상화 (realization)를 선택함으로써 망간단괴의 세부변화양상을 추정하고자 하였다.

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

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

## 이론적 배경

SIS (Sequential Indicator conditional Simulation) 법

은 TBM (Turning Band Method)와 같은 보편적인 모사 법과는 크게 두 가지면에서 다르다. 첫째는 모사된 fields가 정규분포성에 의해 제한되지 않는, 보다 풍부한 공간구조군을 나타낼 수 있다는 점이며, 둘째는 모사 과정에서 조건제시 (conditioning)가 만들어진다는 점이다 (Gomez Hernandez, Strivastava, 1990).

TBM의 알고리즘은 다중정규분포성에 의해 제한되는 데 이는 결과적으로 NST (Normal score transform)에 의해 재 생성된 단일 공분산모델에 기초하고 있다. 보통 NST에 의해 얻어지는 단일 변량상의 정규분포는 두 개의 혹은 다중변량 상에서의 정규분포성을 의미하지는 않는다. SIS는 특별히 임의의 두점이 문턱값의 상·하에서 서로 관련되어 있는 확률을 문턱값과 거리의 함수로서 다룰 때 두점간 통계량의 조절을 좀더 용이하게 해준다. TBM은 그 자체로는 단지 무조건적 모사를 제공하지만 부수적인 kriging 계산과정에서 무조건적 모사가 조건적 모사로 변환되어진다. 반면 SIS는 조건적으로 구성되며, 상기와 같은 kriging이 필요하지 않다 (Gomez Hernandez and Strivastava, 1990).

SIS를 수행하기 위해서는 다음과 같은 것들을 더 요구한다. 좀더 많은 정보가 모사에 의해 재구성되는 공간구조를 만드는데 필요하다. 또한 모사된 field는 연속적이지 않고 나누어진 계급에 의해 재 분류된다.

공간적으로 분포하는 값들의 집합을 가정하면, 일련의 과정은 내포된 공간구조와 잘 맞는 새로운 값을 추출되지 않은 표본위치에 적용하는 알고리즘을 정의하는 것으로 구성된다. 한번 이 값이 얻어지면, 이 모사된 새로운 값은 추가적인 조건부표본으로서 초기의 데이터 집합에 추가 되고, 이러한 과정을 반복한다.

만들어진 마지막 모사된 집합은 초기의 데이터의 특성을 잘 가지고 있고 또한 원하는 형태로 된다. 이것은 각각의 추출되지 않은 표본지역의 조건부확률분포함수 (conditional probability distribution function, cpdf)의 순차적 추정에 의해 만들어진다. 이 조건부확률함수는 임의의 점에서 관심의 변량이 일정한 문턱값을 초과하지 않는 그런 확률을 제공한다. 이 확률은 초기의 값들과 모든 모사된 이전 값들에 대해 조건부 적이다. 이 조건부확률함수가 한번 추정되면 대응되는 값들의 모사는 Monte Carlo 법에 의한 것이다. 일정한 무작위수가 0과 1 사이에서 얻어지며 모사된 값들은 추정된 조건부확률분포함수 (cpdf)로부터 역산된다.

지역적인 cpdf를 추정하기 위하여 관심있는 속성의 변화성의 범위는 계급의 수에 따라 이산되어지며 cpdf의 값은 계급의 한계값에서 추정되어진다.  $\{z(x_\alpha), \alpha \in (n)\}$ 를

조건부 데이터 값이라 하고,  $x$ 를 cpdf가 추정될 추출되지 않은 지역이라 하자. 또한  $z_0$ 를 계급한계값의 하나라고 하면, cpdf값  $P\{Z(x) \leq z_0 | z(x_\alpha), \alpha \in (n)\}$ 은 식 (1)과 같이 indicator kriging에 의해 추정된다.  $x$ 지점에서의 indicator random variable을 문턱값  $z_0$ 에 대하여 다음과 같이 이진변환으로 정의하자.

$$I(x; z_0) = \begin{cases} 0 & \text{if } Z(x) > z_0 \\ 1 & \text{if } Z(x) \leq z_0 \end{cases}$$

조건부 기대값  $E\{I(x; z_0)\}$ 는

$$\begin{aligned} E\{I(x; z_0) | z(x_\alpha), \alpha \in (n)\} \\ = 0 \times P\{Z(x) > z_0 | z(x_\alpha), \alpha \in (n)\} \\ + 1 \times P\{Z(x) \leq z_0 | z(x_\alpha), \alpha \in (n)\} \\ = P\{Z(x) \leq z_0 | z(x_\alpha), \alpha \in (n)\} \end{aligned}$$

로 표시된다.

그러므로 조건부확률값  $P\{Z(x) \leq z_0 | z(x_\alpha), \alpha \in (n)\}$ 의 추정은 대응되는 indicator 조건부 기대값  $E\{I(x; z_0) | z(x_\alpha), \alpha \in (n)\}$ 을 추정하는 것에 의해 구할 수 있다.

조건부 기대값의 추정은 조건부데이터를 indicator 변환하여 kriging함으로서 얻을 수 있다 (Jourel, 1986). Kriging법은  $z(x_\alpha)$ 에 대응되는 indicator 값에 대한 조건부 기대값  $E\{I(x; z_0) | z(x_\alpha), \alpha \in (n)\}$ 의 최적의 선형불편추정자이다.

이 조건부확률의 추정은 indicator 자료의 선형조합으로서 얻어진다.

$$\begin{aligned} F^*(x; z_0 | z(x_\alpha), \alpha \in (n)) \\ = P^*\{Z(x) \leq z_0 | z(x_\alpha), \alpha \in (n)\} \\ = \sum_{\alpha=1}^n \lambda_\alpha(x; z_0) i(x_\alpha; z_0) \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 윗첨자 \*는 추정값을,  $i(x_\alpha; z_0)$ 는 문턱값  $z_0$ 에 대한 표본값  $z(x_\alpha)$ 의 indicator 변환값을,  $\lambda_\alpha(x; z_0)$ 는 indicator kriging의 가중치 값이다. 가중치가 문턱값  $z_0$ 와 cpdf가 추정될 위치  $x$ 의 함수라는 점에 주목하면, 가중치는 이진무작위함수  $I(x; z_0)$ 에 국한된 indicator 공분산함수  $C_1(h; z_0)$ 를 사용하여 kriging계를 풀면 얻을 수 있다.

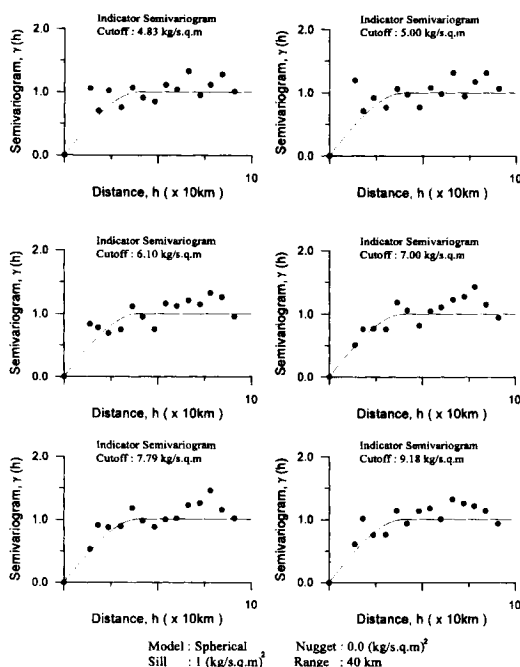
$$\begin{cases} \sum_{\beta=1}^n \lambda_\beta(x; z_0) C_1(x_\beta - x_\alpha; z_0) + \mu(x; z_0) \\ = C_1(x - x_\alpha; z_0) \forall \alpha = 1, \dots, n \\ \sum_{\beta=1}^n \lambda_\beta(x; z_0) = 1 \end{cases} \tag{2}$$

$Z(x)$ 값의 변화성 범위를 계급화 하는데 사용되는 문턱값  $z_0$ 의 개수만큼의 많은 indicator 공분산함수  $C_I(h; Z_0)$ 가 추정되어야 하며, 동일수의 indicator계가 cpdf를 추정하는데 필요하다.

**SIS 분석 및 토의**

본 연구에 사용된 자료는 KODOS (Korea Deep Ocean Study)지역내에서 한국해양연구소와 자원연구소가 공동으로 수행한 심해저 광물자원탐사에서 얻어진 망간단괴 부존밀도자료를 사용하였다 (동력자원부, 1992; 1993; 상공자원부, 1994). 표본추출 (시료채취)지역은 Fig. 1에 나타냈으며, 해석의 편의성을 위해 각 지점의 위·경도를 UTM법에 의해 환산하였고, 이를 임의의 한점을 기준하여 상대거리를 km단위로 표시하였다. 또한 사용된 semivariogram 자료는 박찬영 등 (1996)에 의해 연구된 indicator variogram을 이용하였다 (Fig. 2).

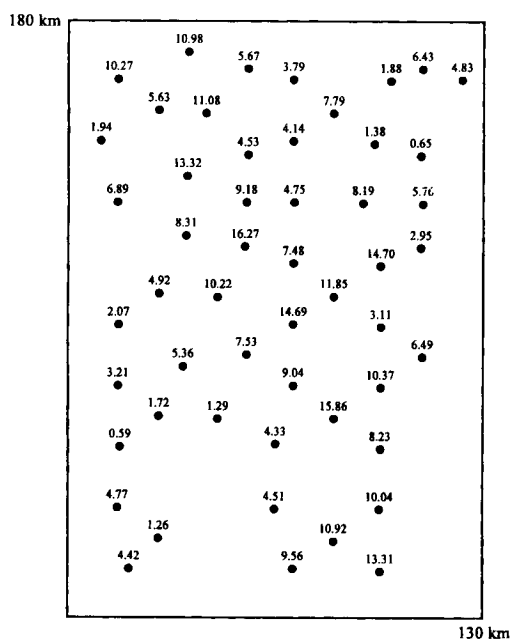
Indicator variogram 분석에 사용된 6개의 하안값 (cutoff)은 부존밀도의 누적분포에서의 십분율과 망간단괴 광상의 채산점인  $5 \text{ kg/m}^2$ 과  $7 \text{ kg/m}^2$  중 상위 6개를 선정한 것이다. 이 하안값들의 semivariogram을 동일모델 선정을 위하여, 표준화작업을 수행하였다. 분석에 사용된 수학적 모델은 영향범위 (range)가 40km 이고 nugget가



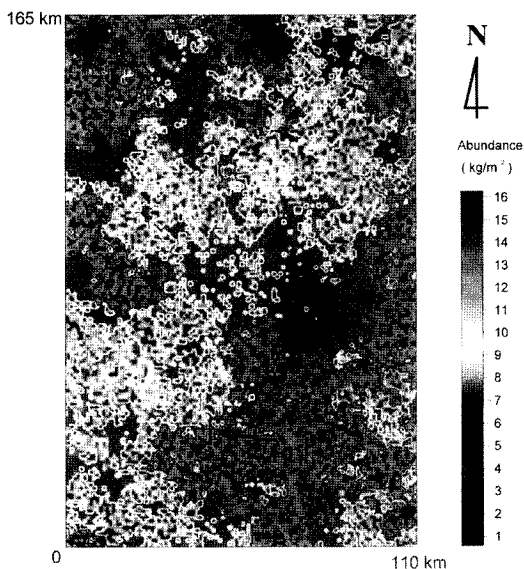
**Fig. 2.** Omnidirectional standrized indicator semivariograms of abundances and their model fits.

없는 구형모델이며, 전방향 표준화 semivariogram을 사용하여 모사법을 수행하였다.

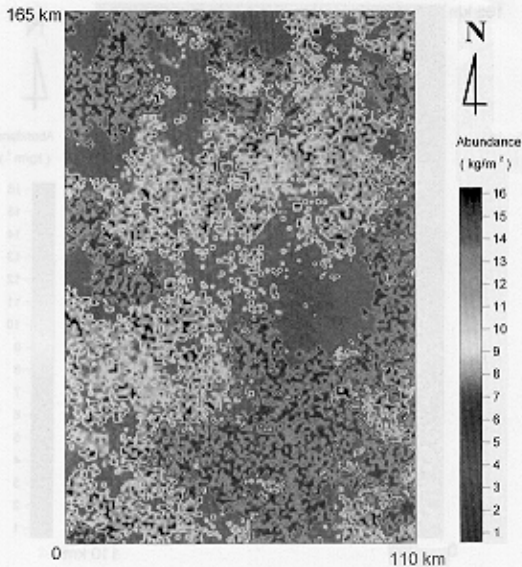
SIS분석에 사용되어진 프로그램은 GSLIB (Deutsch, Journel, 1992)이며, SIS를 수행하여 3개의 현상화 (reali-



**Fig. 1.** Location map of nodule abundance ( $\text{kg/sq.m}$ ) in the study area. Abundance values are plotted above "●" symbol.



**Fig. 3.** The image map of abundance using indicator simulation in the study area (realization 1).



**Fig. 3.** The image map of abundance using indicator simulation in the study area (realization 1).

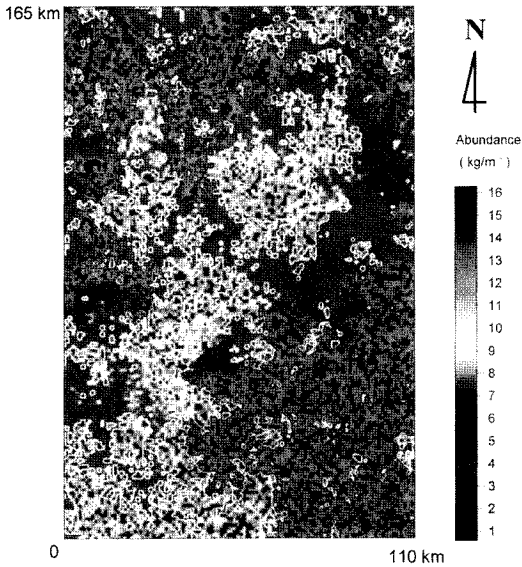


Fig. 4. The image map of abundance using Indicator simulation in the study area (realization 2).

zation)를 구하였다. 이 3개의 현상화는 모든 원자료값을 유지하면서 조건부분포를 구성한 것이다 SIS수행후 얻어진 3개의 현상화들을 살펴보면, 현상화 1의 경우 10 kg/m<sup>2</sup> 이상의 지역이 우상부에 주로 몰려 있으며, 좌하부와 좌측 중앙부에 밀집되어 나타난다 (Fig. 3). 또한 표본 추출 밀도가 적은 우하부의 지역에서도 10 kg/m<sup>2</sup>의 지역이 나타

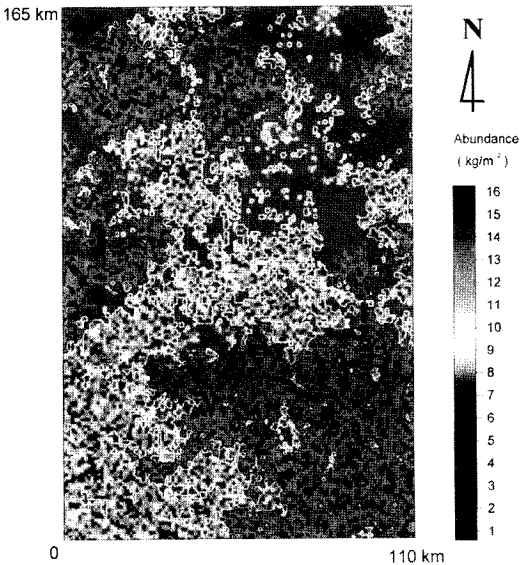


Fig. 5. The image map of abundance using Indicator simulation in the study area (realization 3).

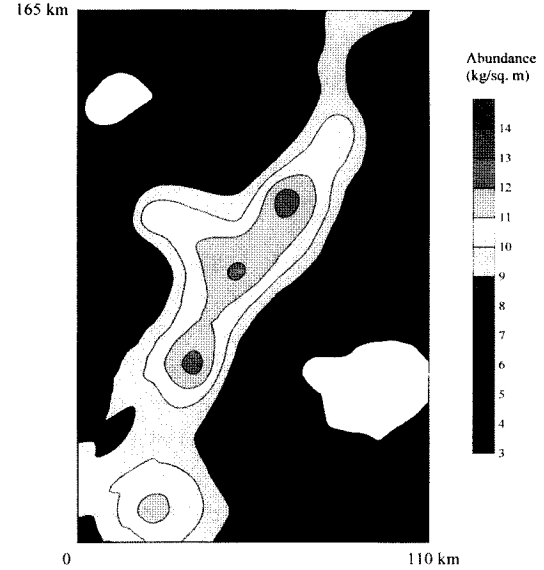


Fig. 6. Contour map of abundance using ordinary kriging in the study area (1 km x 1 km grid).

나는 것이 특징이다. 현상화 2의 경우, 고밀도지역 (10 kg/m<sup>2</sup> 이상)이 좌하부, 중앙부와 우측의 중앙상부에 걸쳐 대각선 방향으로 나타나고 있다 (Fig. 4). 현상화 2의 고밀도지역은 박찬영 등 (1996)에 의해 연구된 ordinary kriging법과 indicator kriging법에 의해 추정된 분포양상과 잘 일치하고 있다 (Fig. 6, 7). 현상화 3은 좌하부에서 고밀도지역

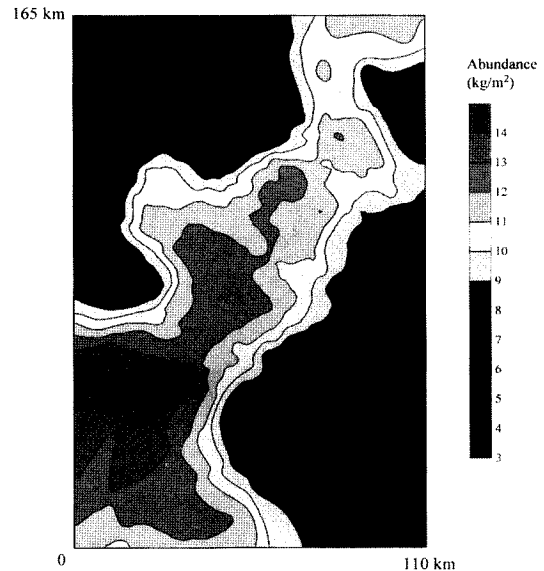
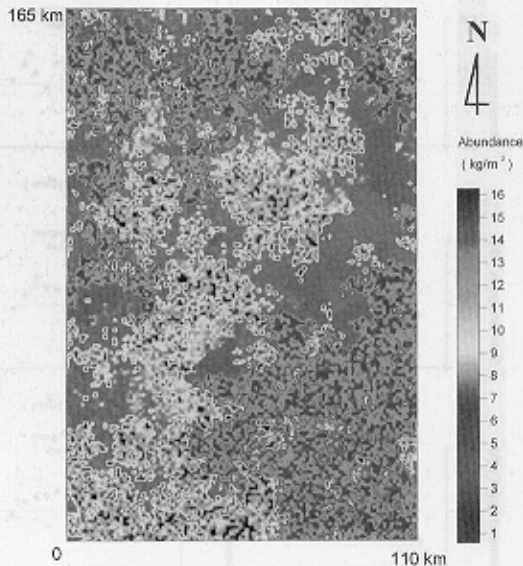
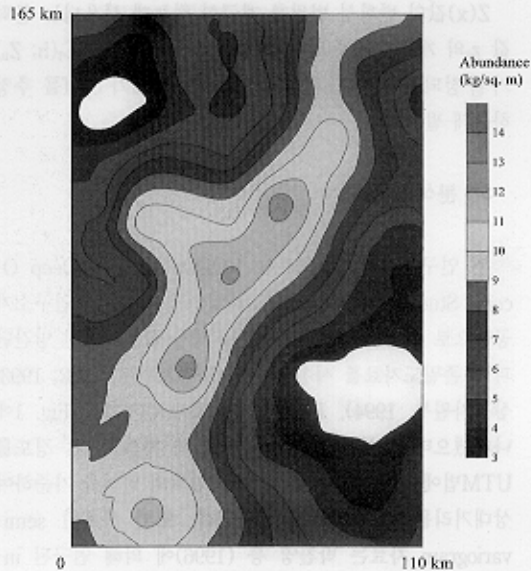


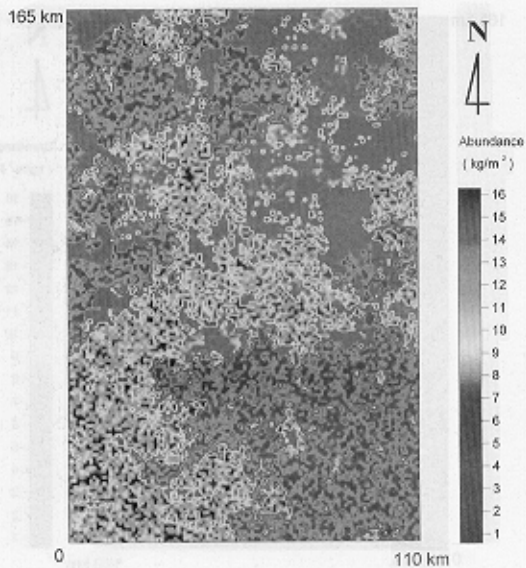
Fig. 7. Contour map of abundance using indicator kriging in the study area (1 km x 1 km grid).



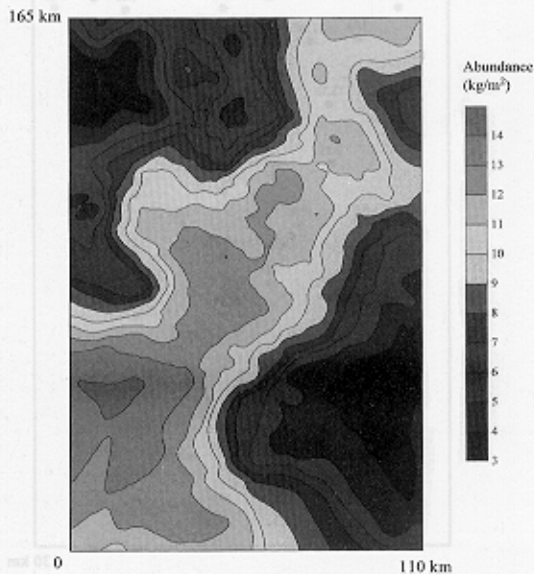
**Fig. 4.** The image map of abundance using Indicator simulation in the study area (realization 2).



**Fig. 6.** Contour map of abundance using ordinary kriging in the study area (1 km  $\times$  1 km grid).



**Fig. 5.** The image map of abundance using Indicator simulation in the study area (realization 3).



**Fig. 7.** Contour map of abundance using indicator kriging in the study area (1 km  $\times$  1 km grid).

이 밀집되어 나타나며, 중앙부와 우측중앙부 경계를 따라 고밀도 지역이 나타난다. 또한 상부 중앙 경계면에서도 고밀도지역이 일부 나타남을 볼 수 있다 (Fig. 5). 상부중앙부와 우측 중앙부경계면에서 나타나는 고밀도지역은 원자료의 표본추출도 (시료채취도)에서 보면 시료 (표본)가 채취되지 않은 지역으로서 박찬영 등 (1995)에 의해 연구된 분포 추정도에서는 나타나고 있지 않는 지역이다. 이는 경계효과에 의한 영향도 고려할 수 있으나, 분포양상을 고려한 모사에 의해 생성된 현상화의 특징이기도 하다.

상기에서 언급한바와 같이 모사에 의해 얻어진 망간단괴 부존밀도 분포는 원자료를 유지하면서, 표본 추출되지 않은 지역의 값을 원 분포에 무작위성을 가지고 구하므로 여러 가지의 현상화들을 통해 추정할 수 있다. 본 연구에서는 3개의 현상화 중 원 자료의 분포 양상과 통계량이 가장 잘 맞는 현상화 2를 선택하였으며, 이는 기존의 연구

결과와도 잘 일치하는 결과이다.

원 자료와 박찬영 등 (1995)에 의해 얻어진 kriging 추정값과 모사에 의해 얻어진 현상화 값들의 통계값들을 살펴보면, 통계량에서는 3개의 현상화들의 값이 타 kriging 법에서의 값보다 원 자료 (정점자료)와 밀접하며, 분포양상은 3개의 현상화 중 현상화 2가 원 자료와 가장 유사하다는 것을 알 수 있다 (Table 1, 2, 3). 각각의 kriging법과 SIS법에 의해 추정되어진 18,150개의 블럭 자료에 대한 부존밀도의 통계량을 Table 1에 나타내었다. 52개 정점의 원자료에서 부존밀도의 평균은 6.89 kg/m<sup>2</sup>이고, 18,150개의 추정자료에서 부존밀도의 평균은 Ordinary kriging법의 경우 7.01 kg/m<sup>2</sup>이며, Indicator kriging법에 의한 추정값의 평균은 8.68 kg/m<sup>2</sup>이고, SIS법에 의한 추정값의 평균은 7.16 kg/m<sup>2</sup> (현상화 1), 6.89 kg/m<sup>2</sup> (현상화 2), 7.06 kg/m<sup>2</sup> (현상화 3)이다. 망간단괴 부존밀도가

**Table 1.** Statistic on estimation f abundance using kriging and simulation.

	Abundance (kg/s.q.)					
	Station data	Ordinary kriging	Indicator kriging	SIS 1	SIS 2	SIS 3
Mean	6.89	7.01	8.68	7.16	6.89	7.06
Std. Dev.	4.19	2.65	3.16	4.12	4.04	4.29
Variance	17.59	7.03	9.96	16.98	16.29	18.42
Minimum	0.59	2.08	3.13	0.59	0.59	0.59
Maximum	16.27	12.74	14.39	16.27	16.27	16.27
No. of data	52	18,150	18,150	18,150	18,150	18,150

**Table 2.** Statistics on estimation of abundance ( $\geq 7.0$  kg/s.q.m) using kriging and simulation.

	Abundance (kg/s.q.m) $\geq 7.0$					
	Station data	Ordinary kriging	Indicator kriging	SIS 1	SIS 2	SIS 3
Mean	10.84	9.37	10.74	9.93	9.76	10.22
Std. Dev.	2.67	1.27	1.85	3.07	33.03	3.14
Variance	7.22	1.61	3.42	9.40	9.20	9.97
Minimum	7.48	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00
Maximum	16.27	12.74	14.39	16.27	16.27	16.27
No. of data	23 (44.33%)	8,931 (49.21%)	11,517 (63.45%)	10,453 (57.59%)	9,923 (54.67%)	9,806 (54.03%)

**Table 3.** Statistics on estimation of abundance( $\geq 10$  kg/s.q.m) using kriging and simulation.

	Abundance (kg/s.q.) $\geq 7.0$					
	Station data	Ordinary kriging	Indicator kriging	SIS 1	SIS 2	SIS 3
Mean	12.42	10.93	11.85	13.38	13.41	13.38
Std. Dev.	2.22	0.59	1.05	2.32	2.31	2.32
Variance	4.95	0.35	1.10	5.40	5.36	5.36
Minimum	10.04	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Maximum	16.27	12.74	14.39	16.27	16.27	16.27
No. of data	14 (26.92%)	2,865 (15.79%)	7,634 (42.06%)	3,859 (21.26%)	3,399 (18.73%)	4,123 (22.72%)



7 kg/m<sup>2</sup>이상인 정점과 추정값의 평균은 10.84 kg/m<sup>2</sup> (정점), 9.37 kg/m<sup>2</sup> (Ordinary kriging법), 10.74 kg/m<sup>2</sup> (Indicator kriging법), SIS법의 경우 9.93 kg/m<sup>2</sup> (현상화 1), 9.76 kg/m<sup>2</sup> (현상화 2), 10.22 kg/m<sup>2</sup> (현상화 3)이다 (Table 2). 부존밀도가 10 kg/m<sup>2</sup>이상인 정점과 추정값의 평균은 12.42 kg/m<sup>2</sup> (정점), 10.84 kg/m<sup>2</sup> (Ordinary kriging법), 11.85 kg/m<sup>2</sup> (Indicator kriging법), SIS법의 경우 13.38 kg/m<sup>2</sup> (현상화 1), 13.41 kg/m<sup>2</sup> (현상화 2), 13.38 kg/m<sup>2</sup> (현상화 3)이다 (Table 3).

상기의 결과에서 보듯이 모사방법은 시료가 채취되지 않은 지역의 값을 추정시 가장 최적의 추정값 (오차의 분산이 0이 되는 추정법을 이름)을 얻는 것은 아니지만, kriging법과는 달리 각각의 현상화들이 망간단괴 분포특성을 세부적인 변화정도까지 나타내고 있다. 이는 박찬영 등 (1995)이 언급한 바와 같이 가채지역을 위한 최적지 선정과 채광 설계에 기여하리라 사료된다. 또한 이 모사에 의한 추정분포는 타 특성들 (퇴적물의 전단강도, 지형의 경사도 분석)과의 종합적 분석을 통해 차후 정밀한 망간단괴 채광후보지역을 선정하는데 유용한 정보를 제공하리라 사료된다.

## 결 론

본 연구에서는 심해저 망간단괴자원의 광역적 자원부존량 평가를 위한 최적의 지구통계학적 모델을 찾고자 하였다. 원 자료의 분포특성을 보전하는 조건부 모사법의 하나인 SIS (Sequential Indicator Simulation)을 사용하여 기존 연구되었던 kriging법에 의한 추정분포와 비교하고, 최적의 현상화 (realization)를 선택함으로써 망간단괴의 세부변화양상을 추정하였다. 이상의 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 조건부 모사법의 하나인 SIS법을 이용하여 3개의 현상화를 구하였고, 얻어진 현상화들을 기존의 연구결과인

ordinary kriging 법과 indicator kriging법에 의해 추정된 망간단괴 부존밀도 분포를 상호 비교하였다. 모사법에 의한 현상화가 기존의 kriging법에 비해 고밀도지역 주변의 분포 변화성을 잘 보여주고 있다

2. SIS분석을 통해 얻어진 3개의 현상화중 원 자료의 분포양상과 통계량이 가장 잘 일치하는 현상화 2를 이 지역 망간단괴 부존밀도의 추정분포로 선정하였다.

3. 모사에 의한 현상화는 시료가 채취되지 않은 지역에서도 망간단괴 부존밀도의 분포특성을 세부적인 변화정도까지 나타내고 있다. 이는 가채지역을 위한 최적지 선정과 채광 설계에 기여하리라 사료된다. 또한 이 모사에 의한 추정분포는 타 특성들 (퇴적물의 전단강도, 지형의 경사도 분석)과의 종합적 분석을 통해 차후 정밀한 망간단괴 채광후보지역을 선정하는데 유용한 정보를 제공하리라 사료된다.

## 참고문헌

- 동력자원부 (1992) '92 심해저 광물자원탐사용역 보고서.  
 박찬영 (1995) 한국심해연구지역 망간단괴광상의 매장량평가를 위한 지구통계학적 연구. 박사학위논문, 서울대학교.  
 박찬영, 전효택, 강정극 (1996) 망간단괴광상의 유망광구선정을 위한 지구통계학적 연구. 자원환경지질, 29권, p. 575-587.  
 상공자원부 (1993) '93 심해저 광물자원탐사용역 보고서.  
 상공자원부 (1994) '94 심해저 광물자원탐사용역 보고서.  
 해양수산부 (1996) '96 심해저 광물자원탐사용역 보고서.  
 Deutsch, C.V. and Journel, A.G. (1992) GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide. Oxford University Press, 340p.  
 Gomez Hernandez, J.J. and Strivastava, R.M. (1990) ISIM3D: an ANSI-C three-dimensional multiple indicator conditional simulation program. Computer and Geosciences. v. 16, p. 395-440.  
 Journel, A.G. (1986) Constrained interpolation and soft kriging: Proc. 19th APCOM Symp. Publ. Soc. Min. Eng., Littleton, Colorado, p. 15-30.

1997년 10월 14일 원고접수