

KODOS 지역의 망간단괴 부존률 분포해석

정문영* · 김인기** · 성원모** · 강정극***

Analysis of Manganese Nodule Abundance in KODOS Area

Moon Young Jung*, In Kee Kim**, Won Mo Sung** and Jung Keuk Kang***

ABSTRACT: The deep sea camera system could render it possible to obtain the detailed information of the nodule distribution, but difficult to estimate nodule abundance quantitatively. In order to estimate nodule abundance quantitatively from deep seabed photographs, the nodule abundance equation was derived from the box core data obtained in KODOS area(long.: 154° ~ 151°W, lat.: 9° ~ 12°N) during two survey cruises carried out in 1989 and 1990. The regression equation derived by considering extent of burial of nodule to Handa's equation compensates for the abundance error attributable to partial burial of some nodules by sediments. An average long axis and average extent of burial of nodules in photographed area are determined according to the surface textures of nodules, and nodule coverage is calculated by the image analysis method. Average nodule abundance estimated from seabed photographs by using the equation is approximately 92% of the actual average abundance in KODOS area. The measured sampling points by box core or free fall grab are in general very sparse and hence nodule abundance distribution should be interpolated and extrapolated from measured data to uncharacterized areas. The another goal of this study is to depict continuous distribution of nodule abundance in KODOS area by using PC-version of geostatistical model in which several stages are systematically proceeded. Geostatistics was used to analyse spatial structure and distribution of regionalized variable(nodule abundance) within sets of real data. In order to investigate the spatial structure of nodule abundance in KODOS area, experimental variograms were calculated and fitted to a spherical models in isotropy and anisotropy, respectively. The spherical structure models were used to map out distribution of the nodule abundance for isotropic and anisotropic models by using the kriging method. The result from anisotropic model is much more reliable than one of isotropic model. Distribution map of nodule abundance produced by PC-version of geostatistical model indicates that approximately 40% of KODOS area is considered to be promising area(nodule abundance > 5 kg/m²) for mining in case of anisotropy.

서 론

심해저 망간단괴의 부존률을 파악하기 위한 광역탐사법으로 상자형 시료채취기(box core, BC), 자유낙하식 시료채취기(free fall grab, FFG)를 사용한다. 이와 같은 장비들이 해저면에서 채취한 망간단괴를 "채취단위면적당 중량"으로 환산하여 부존률(abundance)을 구하고 이 값을 근거로 하여 망간단괴의 분포도작성 및 매장량을 추정평가하고 있다. 특히 자유낙하식 시료채취기(FFG)는 단기간 동안 넓은 해역을 조사할 수 있어 광역탐사에 주로 이용되고 있으나 시료채취면적이 작기 때문에 동일 정점에서 부존률에 상당한 차

이를 보이는 경향이 있다(Hennigar *et al.*, 1986). 또한 시료채취정점이 수십 km에 이르므로 넓은 조사지역의 망간단괴 분포상태를 연속적인 상태로 파악하는데 어려움이 따른다. 한편 심해용카메라시스템은 부존률파악에 필요한 망간단괴 시료를 획득할 수 없다는 단점은 있으나, 망간단괴는 해저면에 2차원적으로 분포되어 있고 퇴적물과는 명암차가 뚜렷하므로 해저면을 연속적으로 폭넓게 관찰할 수 있는 장점때문에 정밀탐사에 이용된다. 이때 촬영한 해저면사진을 영상분석하여 망간단괴의 점유율(coverage)을 구하고 이로부터 부존률을 정량적으로 산출하는 방법이 있다(Ewing *et al.*, 1971; Handa and Tsurusaki, 1981). Felix(1980)는 해저면 사진에서 망간단괴의 부존률을 추정하는 경우, 퇴적물의 영향때문에 실제부존률의 50~75%정도 밖에 평가될 수 없다는 문제점을 지적한바 있다. 일반적으로 망간단괴는 그 표면조직(surface texture)에 따라 3가지 유형으로 분류된다(Bonatti *et al.*, 1972). 즉 해저산지역에서 주로 산출되는 표면이 매끈한

*세명대학교 자원공학과 (Department of Mineral and Energy Resources Engineering, Semyung University, Republic of Korea)
**한양대학교 공과대학 자원공학과 (Department of Mineral and Petroleum Engineering, Hanyang University, Republic of Korea)
***한국해양연구소 심해저탐사사업단 (Korea Ocean Research & Development Institute)

수성기원의 S형(smooth type), 퇴적물의 속성작용에 의해 성장하는 표면이 거친 R형(rough type), 그리고 전술한 두 가지 특성이 상하부에 달리 나타나는 T형(transitional type)의 망간단괴이다. S형 망간단괴는 주로 해저면에 노출되어 있는 반면에 R형은 퇴적물에 피복되어 있거나 묻혀있는 경우가 대부분이다(Sorem *et al.*, 1979). 이처럼 망간단괴는 그 표면 조직에 따라 부존상태를 구분할 수 있으므로 점유율에서 부존물을 정량적으로 산출할 때 표면조직에 따라 매물물을 고려하여 계산하면 Felix(1980)가 지정한 퇴적물의 피복영향을 보정할 수 있을 것이다. 한편 실험역탐사에서 획득한 국부적이고 한정된 정점자료값(부존률)을 근거로 조사지역 전체에 대한 연속적인 부존률분포도를 작성하고 매장량을 보다 정확히 추정할 수 있어야만 한다. 지구통계학은 육상광상의 부광대해석에 관한 기초연구를 시작으로 광량계산 및 품위의 통계적 처리에 이용되었다(David, 1977; Journel and Huijbregts, 1978). 그후 더욱 발전하여 공간적 변화와 관련된 여러 현상의 특성을 파악하는데 응용되고 있으며, 결과에 대한 통계적인 신뢰성이 기타 방법들에 비해 높다는 사실은 이미 입증된 바 있다(Journel, 1986; Isaaks and Srivastava, 1989; Herzfeld, 1989; 김인기 등, 1993; 김현태, 1994). 일반적으로 자료값에 대한 특성값은 공간에 분포된 광상의 품위, 저류층의 투과도, 망간단괴 부존률 등이 공간적 변화와 관련된 광역변수(regionalized variables)로서 표현된다. 이러한 광역변수는 국부적인 시각에서는 구조적인 특성을 보이지 않으나 광역적인 관점에서 보면 공간적인 분포특성을 보인다. 이와 같은 특성은 변수간의 거리를 증가시킴으로써 발생하는 변수값간의 분산을 분석하여 파악할 수 있다. 이렇게 파악된 공분산을 특성분포함수로 정의하여 추정공간에서도 이 특성분포함수값이 유지되도록 새로운 추정값들을 구성하는 방법이다(Journel and Huijbregts, 1978; 新井, 1985). 이에 본 연구에서는 실험역탐사에서 획득된 망간단괴 자료를 분석하여 망간단괴의 평균장축, 부존률, 점유율 및 매물물을 파악하고, 이들의 상호관련성을 회귀분석하여 해저면사진에서 부존률을 정량적으로 계산할 수 있는 부존률산출식을 제시하고자 한다. 또한 정점별 망간단괴의 부존률을 광역변수로 간주하고 전체 조사지역에 대한 정점부존률간의 공간적 분산특성을 등방성 모델과 이방성 모델로 각각 간주하여 지구통계학적 방법인 크리깅(Kriging)과정을 통해 그 결과에 대한 신뢰도를 비교 분석하고 부존률 분포도를 작성한다.

자료 처리 및 분석

연구지역(서경: 151° ~ 154°, 북위: 9° ~ 12°)은 1989년 10월과 1990년 9월에 한국해양연구소와 미국국립지질조사소

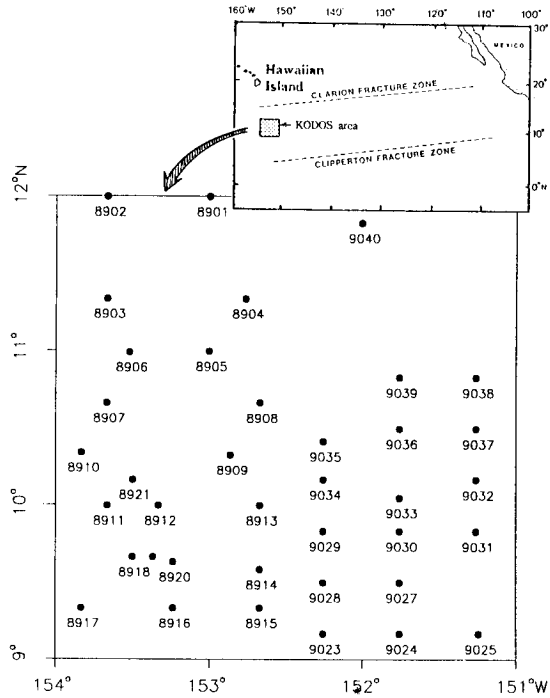


Fig. 1. Cruised area and location map of sampling stations in KODOS area.

(USGS)가 공동으로 망간단괴를 광역탐사한 북동 태평양의 클라리온-클리퍼톤 균열대 서단에 위치하고 있으며, KODOS (Korea Deep Ocean Study)지역으로 명명하였다(Fig. 1). KODOS지역은 수심 5,000 m 내외의 해저평원지역으로 남부지역 곳곳에 해저산 및 해저능이 분포되어있는 다소 복잡한 지형적 특성을 갖는다(한국해양연구소, 1990, 1991). 연구에 이용한 자료는 직접 시료채취장비(BC, FFG)로 획득한 망간단괴자료(Table 1)와 상자형시료채취기(BC)의 표면사진 및 격자판 사진(Photo. 1), 그리고 심해용 카메라를 이용하여 촬영한 해저면정지사진(Photo. 2)이다. 조사정점별 망간단괴의 평균장축(average long axis), 점유율 및 부존률은 다음과 같은 방법으로 구한다. 평균장축(\bar{D} , cm)은 망간단괴를 입도군(size fraction)별로 분류한 후, 식 (1)을 이용하여 구한다(Anonymous, 1979).

$$\bar{D} = \frac{\sum[\frac{d_{i1}+d_{i2}}{2}]p_i}{\sum p_i} \tag{1}$$

여기에서, d_{i1} 과 d_{i2} 는 입도군 i 의 범위를 2 cm 간격으로 나타낸 정점별 망간단괴의 장축이며 p_i 는 그 입도군의 백분율이다. 점유율(C, %)은 망간단괴가 해저면을 차지하고 있는 면적의

Table 1. continued.

station number	sample number	size distribution (long axis, cm)										nodule abundance (kg/m ²)	surface texture	topography
		<2		2 - 4		4 - 6		6 - 8		>8				
		no.	wt.(g)	no.	wt.(g)	no.	wt.(g)	no.	wt.(g)	no.	wt.(g)			
9027	BC 27-1	-	-	31	410	16	420	-	-	-	-	13.83	smooth	seamount
	FFG 27-2	124	1570	71	1910	-	-	-	-	-	-	15.44		
9028	FFG 28-1	-	-	29	450	51	1300	6	280	-	-	9.01	"	abyssal plain
	FFG 28-2	-	-	51	660	37	1190	4	180	-	-	9.01		
	FFG 28-3	-	-	35	540	38	1060	7	330	-	-	8.56		
9029	BC 29-1	-	-	1	45	3	150	1	120	-	-	5.25	rough	"
9030	BC 30-1	1	1	2	40	1	55	2	260	-	-	5.93	"	"
	FFG 30-1	5	4	4	60	1	75	1	120	-	-	1.15		
	FFG 30-2	5	3	2	25	1	70	1	160	-	-	1.14		
9031	BC 31-1	1	2	1	13	1	37	1	50	-	-	1.70	"	"
	FFG 31-1	40	30	5	65	7	370	-	-	-	-	2.06		
	FFG 31-2	29	35	3	20	2	75	1	85	-	-	0.95		
9032	BC 32-1'	10	8	4	28	1	50	-	-	-	-	1.43	"	seamount
9033	FFG 33-1	-	-	39	570	16	530	-	-	-	-	4.98	smooth	"
	FFG 33-3	10	30	47	550	22	710	-	-	-	-	5.72		
9034	BC 34-1 DSC 34	33	50	39	410	-	-	-	-	-	-	7.67	"	"
9035	FFG 35-2	10	17	32	530	13	490	2	120	-	-	5.13	rough	abyssal plain
	FFG 35-3	28	25	24	375	16	580	-	-	-	-	4.35		
9036	BC 36-1	13	13	3	15	-	-	-	-	-	-	0.50	"	"
	FFG 36-1	74	70	2	20	-	-	-	-	-	-	0.40		
	FFG 36-2	84	70	1	4	1	30	-	-	-	-	0.40		
	FFG 36-3	60	65	11	55	-	-	-	-	-	-	0.53		
9037	BC 37-1	1	2	4	30	-	-	-	-	-	-	0.53	"	"
	FFG 37-1	10	10	7	25	-	-	-	-	-	-	0.16		
9038	BC 38-1	1	4	-	-	-	-	-	-	-	-	0.07	"	"
	FFG 38-1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00		
9039	FFG 39-2	70	45	-	-	-	-	-	-	-	-	0.02	"	"
	FFG 39-3	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00		
9040	BC 40-1	42	45	7	40	-	-	-	-	-	-	1.41	"	"

Note ; BC : box core (sampling area=0.06 m²), FFG : free fall grab (sampling area=0.225 m²), DSC : deep sea camera system.

백분율로서 식 (2)를 이용하여 구하고,

$$C = \frac{A_n}{A_s} \times 100 \quad (2)$$

부존률(A, kg/m²)은 다음과 같이 식 (3)을 이용하여 구한다 (Anonymous, 1982).

$$A = \frac{\sum W}{A_s} \quad (3)$$

식 (2)에서 A_n은 퇴적물위에 노출되어 있는 망간단괴의 표면적, A_s는 시료채취면적, 그리고 식 (3)의 $\sum W$ 는 채취된 망간단괴의 총중량(total wet weight)이다. 채취된 망간단괴를 표면조직의 특성만을 고려하여 S형, R형 및 T형으로 분류하여

가장 우세하게 나타나는 표면조직을 조사점점의 대표형으로 한다. 망간단괴는 대부분 검은색으로 퇴적물과의 명암차가 뚜렷하므로 영상분석기(KIT-500, PIAS Co.)를 이용, Fig. 2와 같은 처리순서로 분석하여 망간단괴의 점유율을 구한다. 분석원리는 망간단괴와 퇴적물과의 영상휘도차(difference of grey level)를 이용한 방법이므로 육안으로 볼때 점유율이 높고 명암차가 없는 사진은 전체를 이치화(binanzation)하여 일괄 화상처리한다. 점유율은 높으나 명암차가 심한 사진에 대해서는 구역별로 화상처리한다(한국해양연구소, 1990, 1991).

망간단괴의 매몰률(B, %)은, 먼저 영상분석법으로 상자형 시료채취기의 표면사진과 채취된 모든 망간단괴를 격자판 위에 진열하여 촬영한 사진에서 망간단괴 점유율을 측정하고, 이 두 값사이의 관계로부터 구한다(Sharma and Kodagali,

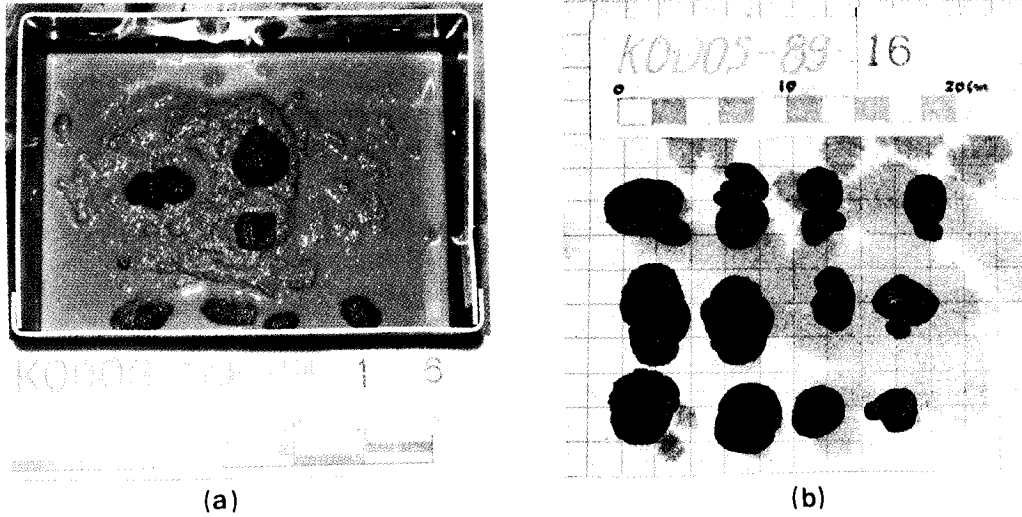


Photo. 1. Pictures of the box core surface and the grid table. (a) : surface area of the box core covers 20 cm × 30 cm, (b) : each scale mesh of the grid table indicates 2 cm × 2 cm.

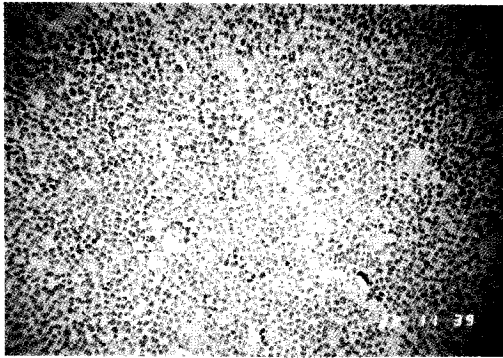


Photo. 2. Picture of manganese nodules lying on the deep seabed. Seabed photograph obtained at st. 8915 using 28 mm still camera. The photograph covers a seabed area of about 16 m².

1990).

$$B = (1 - \frac{C_s}{C_r}) \times 100 \quad (4)$$

여기서, C_s는 상자형 시료채취기의 표면사진(Photo. 1a)에서 구한 점유율로서 해저면에 부존되어 있는 망간단괴의 실제 점유율을 나타낸 것이다. 반면에 C_r는 격자판사진(Photo. 1b)에서 구한 이상적인 점유율이다. 부존률산출식의 유도는 Handa와 Tsurusaki(1981)가 제안한 기본원리에 근거를 두고 상자형시료채취기에서 구한 망간단괴의 부존률 및 평균장축과 C_s와의 관계, 또한 C_r와의 관계를 회귀분석하여 상관

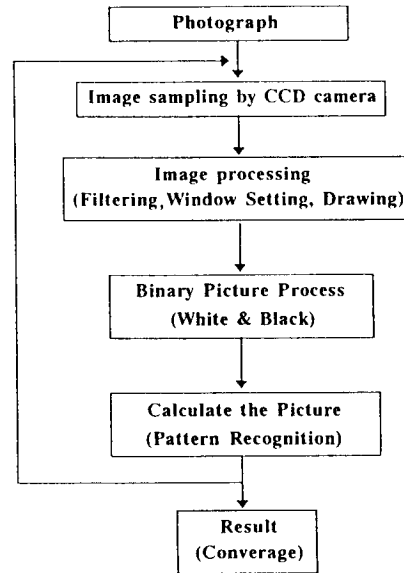
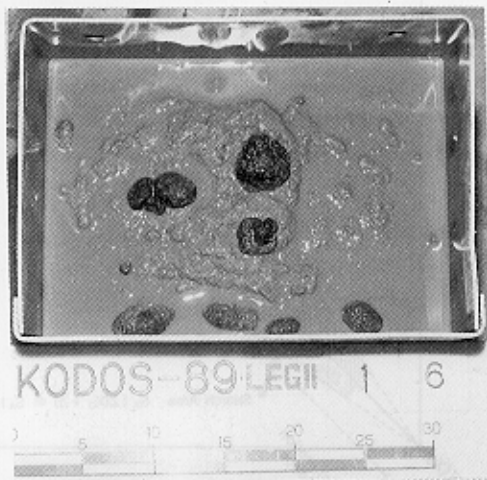


Fig. 2. Flow chart of image analysis method.

관계식을 도출한다.

지구통계모델의 활용

각기 다른 위치에서 채취된 시료의 특성값, 즉 광역변수 사이의 공간적 변화정도를 나타낸 것이 variogram으로서 다음과 같이 정의된다.



(a)

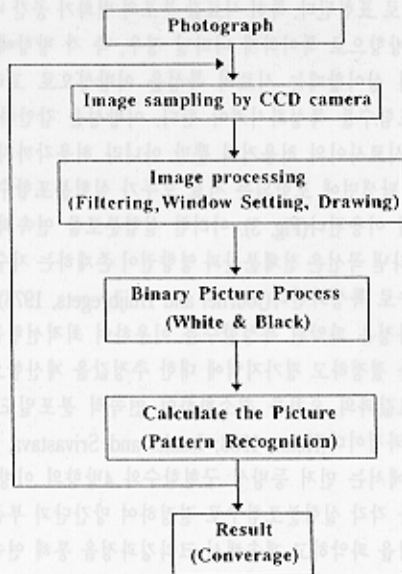


(b)

Photo. 1. Pictures of the box core surface and the grid table. (a): surface area of the box core covers 20 cm \times 30 cm, (b): each scale mesh of the grid table indicates 2 cm \times 2 cm.



Photo. 2. Picture of manganese nodules lying on the deep seabed. Seabed photograph obtained at st. 8915 using 28 mm still camera. The photograph covers a seabed area of about 16 m².



$$2\gamma(\vec{h}) = \text{VAR}[Z(x_i) - Z(x_i + \vec{h})] \\ = E\{[Z(x_i + \vec{h}) - Z(x_i)]^2\} \quad (5)$$

식 (5)는 방향성을 고려한 단위구획거리 \vec{h} 만큼 떨어진 두 시료값 사이의 분산값들에 대한 탐색면 내에 포함하는 전체 시료들에 대한 산술평균값이 평가지역에서 시료값 사이의 상관도를 나타내는 실험분포(experimental semivariogram)로서 아래와 같이 표현된다(Clark, 1982).

$$\gamma^*(\vec{h}) = \frac{1}{2N(\vec{h})} \sum [Z(x_i + \vec{h}) - Z(x_i)]^2 \quad (6)$$

실험분포는 주로 선형, 지수 및 구형함수로 특성화된다. 일반적으로 지구통계모델과 관련된 지수함수와 구형함수의 특성에 의하면 시료점간의 거리가 멀어짐에 따라 서로 상관도가 낮아져서 일정거리 이상에서 존재하는 두 시료값간의 상관도는 서로 독립적으로 작용한다. 따라서 이론분포함수(semivariogram)는 일정한 전체분산인 sill이 존재한다. 이때 상관도의 영향이 미치는 시료 사이의 거리가 영향권(influence range)으로 표현된다. 특히 시료값 분포의 변화가 공간 내에서 임의의 방향으로 특이하게 나타날 경우, 즉 각 방향에 대한 영향권이 상이할때는 시료의 특성을 이방성으로 고려하여 이론분포함수를 특성화시켜야 한다. 이방성을 감안하기 위해서는 시료사이의 허용거리 뿐만 아니라 허용각까지 고려하여 그 탐색면에 포함되는 시료 모두가 실험분포함수를 도출하는데 이용된다(Fig. 3). 이러한 실험분포를 연속적 개념으로 나타낸 곡선은 전체분산과 영향권이 존재하는 지수 또는 구형함수로 특성화된다(Journel and Huijbregts, 1978). 한편 크리깅과정은 파악된 특성함수를 이용하여 최적선형불편추정계수를 결정하고 평가지역에 대한 추정값을 계산함으로써 실제시료값과의 오차를 최소화하여 연속적 분포모델을 산출하는 과정이다(Hohn, 1988; Isaaks and Srivastava, 1989). 본 연구에서는 먼저 등방성 구형함수와 4방향의 이방성 구형함수를 각각 실험분포함수로 결정하여 망간단괴 부존률의 분포특성을 파악하고 계속해서 크리깅과정을 통해 연속적인 부존률 분포도를 얻고자 하였다.

결과분석 및 토의

해저면사진으로부터 망간단괴의 부존률을 정량적으로 계산할수 있는 부존률산출식을 유도하기 위한 과정으로, 망간단괴의 점유율 및 평균장축과 실제부존률과의 관계를 분석 검토하였다. Fig. 4a는 Handa와 Tsurusaki(1981)가 제안한 원리에 근거하여 BC의 표면사진에서 구한 망간단괴의 점유율 및 평균장축과 실제부존률과의 관계를 회귀분석하여 나타낸

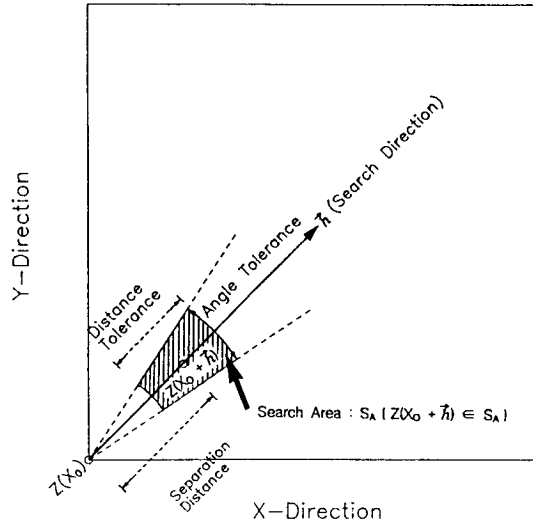


Fig. 3. Method of setting distance and direction tolerance.

그래프로서 다음의 관계식으로 유도된다. 식 (7)의 상관계수는 0.95이다.

$$A = 8.06 \frac{\bar{D} \cdot C_b}{100} \quad (7)$$

한편 Handa와 Tsurusaki(1981)가 시료채취 직전에 FFG에 장착된 단발사진기에 의해 촬영된 해저면사진으로부터 유도한 부존률산출식의 회귀계수는 7.7이었다. 이처럼 회귀계수는 조사지역의 특성에 따라 다른 값을 가지며, 특히 망간단괴의 산출상태에 의해 큰 영향을 받는다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위한 방법으로 망간단괴의 산출상태를 이상적인 상태로 놓고 부존률산출식을 유도하였다. 즉, 격자판 사진에서 구한 망간단괴의 점유율 및 평균장축과 실제부존률과의 관계를 회귀분석하였다(Fig. 4b). 이 때의 상관계수는 0.98로서 부존률산출식은 다음과 같다.

$$A = 6.35 \frac{\bar{D} \cdot C_g}{100} \quad (8)$$

그러나 해저면사진으로부터 구할수 있는 점유율은 격자판 사진으로부터 구한 점유율(C_g)이 아니라 상자형시료채취기의 표면사진으로부터 구한 점유율(C_b)이다. 따라서 해저면사진으로부터 망간단괴 부존률을 산출하는데 망간단괴가 해저면에 이상적으로 부존하고 있다는, 즉 퇴적물에 전혀 피복되지 않았다는 가정하에 유도된 식 (8)을 직접 이용할수는 없다. 그러므로 식 (4)를 식 (8)에 대입하여 재정리하면 다음과 같이 매몰물 B를 고려한 부존률산출식이 유도되며 여기서

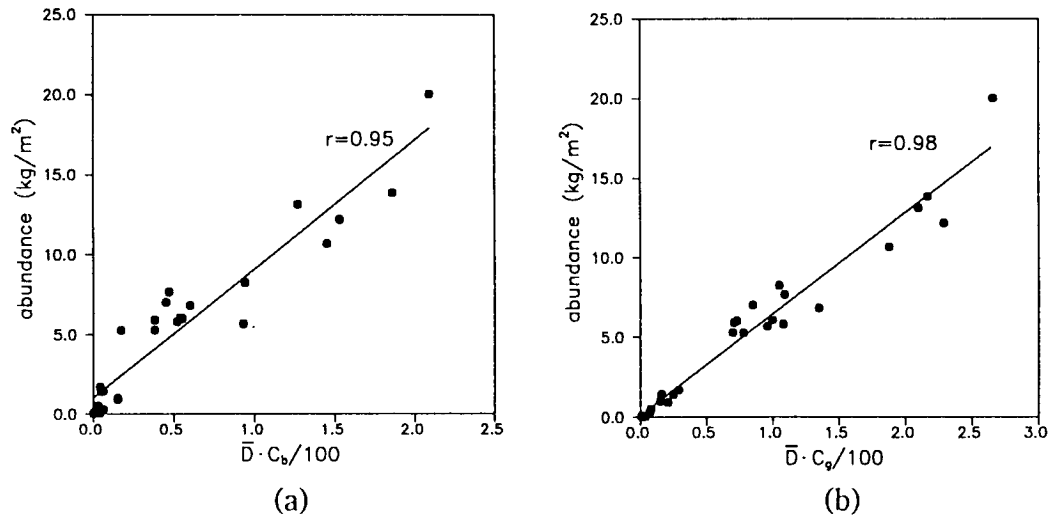


Fig. 4. Relationship of average long axis and coverage to abundance of manganese nodule. (a): nodule coverage for box core(C_b), (b): nodule coverage for grid table(C_g).

Table 2. Comparison of manganese nodule coverage on photographs of box core and grid table at each stations in KODOS area.

sample number	coverage (%)		extent of average nodule burial (%) (B)	average long axis (cm)(D)	nodule abundance (kg/m²)(A)	surface texture type
	box core (C_b)	grid table (C_g)				
BC1-1	2.5	3.0	17	2.25	0.30	rough
BC2-1	43.0	48.0	10	2.18	8.25	smooth
BC3-1	3.0	3.0	0	5.00	1.0	rough
BC7-1	0.0	0.5	100	1.50	0.03	"
BC8-1	3.5	5.0	30	4.20	0.92	"
BC9-1	1.0	3.0	67	2.44	0.30	smooth
BC11-1	19.2	20.0	5	4.82	5.67	rough
BC12-1	16.5	22.0	25	3.31	6.03	"
BC13-1	13.3	30.0	56	4.50	6.83	"
BC14-1	38.0	63.0	40	3.34	13.12	smooth
BC15-1	1.0	1.0	0	4.20	0.05	rough
BC16-1	13.0	24.0	46	4.16	6.08	"
BC17-1	4.5	20.0	78	3.88	5.27	"
BC18-1	56.5	72.0	22	3.70	20.00	smooth
BC20-1	38.5	50.0	23	3.76	10.67	transition
BC21-1	11.0	23.0	52	4.71	5.82	rough
BC23-1	12.0	22.5	47	3.77	7.02	"
BC25-1	40.0	60.0	33	3.82	12.17	smooth
BC27-1	50.5	59.0	14	3.68	13.83	"
BC29-1	7.5	14.0	46	5.00	5.29	rough
BC30-1	8.5	16.0	47	4.42	5.93	"
BC31-1	1.0	7.0	86	4.13	1.70	"
BC32-1	3.0	7.5	60	2.13	1.43	"
BC34-1	20.5	47.0	56	2.31	7.67	smooth
BC36-1	1.5	4.5	67	1.78	0.50	rough
BC37-1	0.8	3.5	77	2.25	0.53	"
BC38-1	0.0	0.5	100	1.50	0.07	"
BC40-1	2.5	12.0	79	2.05	1.41	"

부존률 A는 퇴적물의 피복영향을 보정한 값이 될 것이다.

$$A = 6.35 \frac{\bar{D} \cdot C_b}{100 - B} \quad (9)$$

이 식을 이용하기 위해서는 먼저 해저면사진에서 망간단괴의 매물률을 구해야만 한다. 정확한 매물률은 망간단괴와 해저면사진을 동시에 얻을 수 있는 장비, 즉 BC 또는 단발 사진기가 부착된 FFG를 사용하여야만 구할 수 있다. 그러나 심해용 카메라로 연속 촬영한 해저면정지사진(Photo. 2)에서는 매물률을 구할 수 없다. Sorem *et al.*(1979)의 연구결과에 의하면 망간단괴의 표면조직과 산출상태는 밀접한 관계가 있다고 하였다. 즉, S형의 망간단괴는 주로 해저면에 노출되어 있는 반면에 R형은 퇴적물에 피복되어 있거나 묻혀있는 경우가 대부분인데, 이와 같은 양상은 망간단괴의 생성기원과 해저지형의 특성에 따라 나타난다. KODOS지역의 경우도 해저평원지역에서 주로 산출되는 R형의 망간단괴는 속성기 원으로서 퇴적물에 일부 피복되어 있거나 묻혀서 산출되는 반면에 해저산지역에서 산출되는 수성기원의 S형 망간단괴는 해저면에 노출되어 있고 표면에 퇴적물이 거의 묻어있지 않는 특성을 보인다(한국해양연구소, 1990, 1991). 따라서 망간단괴와 해저면사진을 동시에 얻을 수 있는 장비인 상자형시료채취기(BC)의 자료만을 이용하여 망간단괴의 표면조직에 따른 매물률을 분석하였다. Table 2는 각 조사점별 망간단괴의 매물률(B)을 계산한 결과이다. 표에서 알 수 있듯이 매물률은 정점에 따라 다르며 0%에서부터 100% 까지 다양

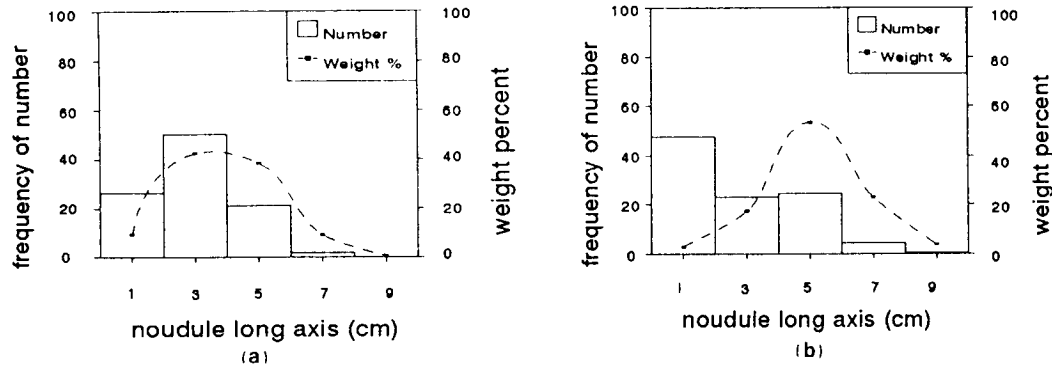


Fig. 5. Size and weight distribution for various surface manganese nodules sampled in KODOS area. (a): S type, (b): R type.

Table 3. Comparison of real nodule abundance and estimated nodule abundance.

surface texture	sample number	coverage(%) (C _s)	extent of burial(%) (B)	abundance (kg/m ²) (A)	estimated abundance (kg/m ²)					
					A ₁	A ₁ /A, %	A ₂	A ₂ /A, %	A ₃	A ₃ /A, %
S	BC 2-1	43.0	10	8.25	10.40	126.1	9.10	110.3	11.54	139.8
	BC 14-1	38.0	40	13.12	9.19	70.0	12.06	91.9	10.20	77.7
	BC 18-1	56.5	22	20.00	13.66	68.3	13.80	69.0	15.16	75.8
	BC 25-1	40.0	33	12.17	9.67	79.4	11.37	93.4	10.73	88.2
	BC 27-1	50.5	14	13.83	12.21	88.3	11.19	80.9	13.55	98.0
	BC 34-1	20.5	56	7.67	4.96	64.7	8.88	115.8	5.50	71.7
	Average			29	12.51	10.02	80.1	11.07	88.5	11.11
R	BC 11-1	19.2	5	5.67	6.65	117.3	5.52	97.3	9.53	168.1
	BC 12-1	16.5	25	6.03	5.72	94.8	6.01	99.7	8.19	135.8
	BC 13-1	13.3	56	6.83	4.61	67.5	8.25	120.8	6.60	96.6
	BC 16-1	13.0	46	6.08	4.50	74.0	6.57	108.1	6.45	106.1
	BC 17-1	4.5	78	5.27	1.56	29.6	5.58	105.9	2.23	42.3
	BC 21-1	11.0	52	5.82	3.81	65.5	6.26	107.6	5.46	93.8
	BC 23-1	12.0	47	7.02	4.16	59.2	6.18	88.0	5.96	84.9
	BC 29-1	7.5	46	5.29	2.60	49.1	3.79	71.6	3.72	70.3
	BC 30-1	8.5	47	5.93	2.94	49.6	4.38	73.9	4.22	71.2
Average			45	5.99	4.06	67.8	5.84	97.5	5.82	97.2
Total average			38	8.60	6.44	74.9	7.93	92.2	7.93	92.2

Note :

$$A_1 = 8.06 \frac{\bar{D} \cdot C_s}{100}, A_2 = 6.35 \frac{\bar{D} \cdot C_s}{100 - B}, A_3 = 6.35 \frac{\bar{D} \cdot C_s}{100 - \bar{B}}; \text{ where, } \bar{D} \text{ is an average long axis according to nodule types, that is 3.0 cm}$$

for S type and 4.3 cm for R type. B is an extent of nodule burial at each sampling station. \bar{B} is an average extent of nodule burial according to nodule types, that is 29% for S type and 45% for R type.

함을 보여주고 있다. S형의 매몰률도 BC 14-1(정점 8914)와 BC 34-1(정점 9034)에서와 같이 40% 이상으로 비교적 높은 경우도 있다. 이는 해저산지역의 기저부 및 봉우리 사이의 골에서 산출되는 망간단괴는 해저평원지역의 경우와 같은 특성을 보이기 때문이다(정희수 등, 1990; 이경용 등, 1992). 매몰률이 100% 인 BC 7-1(정점 8907)과 BC 38-1(9038지역)은 퇴적율이 높은 해저능과 해저평원지역(한국해양연구소, 1990,

1991)이고, 산출된 망간단괴는 속성기원인 R형이므로 본래 완전 매몰되어 산출될 수도 있다. 그러나 이러한 정점에서 산출된 망간단괴의 크기는 2 cm 미만으로 매우 작고 부존률도 0.1 kg/m² 이하(Table 1 참조)이므로 약간의 퇴적물 교란에 의해서도 쉽게 회복될 수 있을 것이다. 이처럼 시료채취시 어떤 충격에 의해 약간의 퇴적물 교란이 일어나 망간단괴가 회복될 수도 있다는 점도 간과할 수 없다. 이와 같은 영향으로

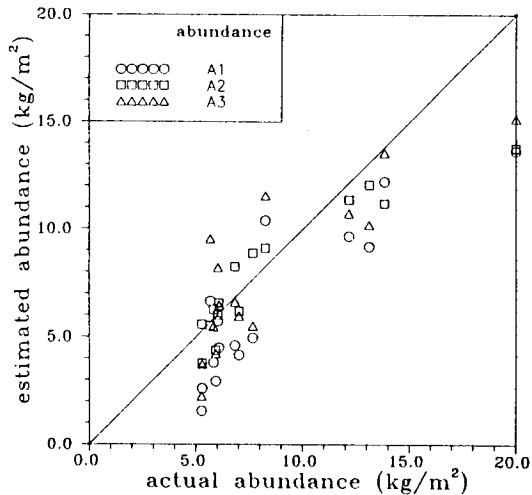


Fig. 6. Scatterplotting of estimated abundances versus actual abundances.

Note : $A_1 = 8.06 \frac{\bar{D} \cdot C_b}{100}$, $A_2 = 6.35 \frac{\bar{D} \cdot C_b}{100 - B}$, $A_3 = 6.35 \frac{\bar{D} \cdot C_b}{100 - \bar{B}}$

where, \bar{D} is an average long axis according to nodule types. B is an extent of nodule burial at each sampling station. \bar{B} is an average extent of nodule burial according to nodule types.

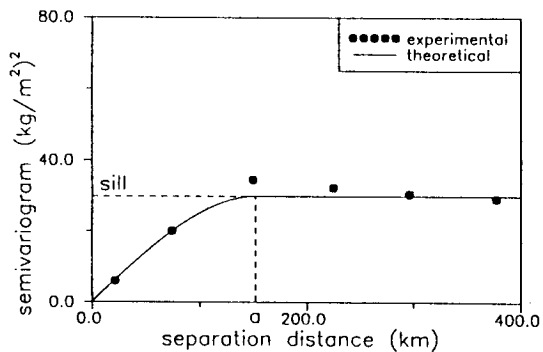


Fig. 7. Fitting of experimental semivariograms to spherical function in isotropy.

인해 발생되는 매물물의 오차는 부존률이 작을수록 증가할 것이다. 또한, 현재 심해저광업의 부존률채산점(cut off abundance)이 5 kg/m² 이상되는 지역만을 유망광구로 설정하고 있다. 앞서 언급한 두가지 이유때문에 부존률이 5 kg/m² 이상인 정점만을 대상으로 망간단괴의 표면조직에 따른 평균 매물률 \bar{B} 를 계산해 본 결과, S형에서는 29%, R형의 경우는 45%로 S형에 비해 높다. 이러한 부존특성때문에 직접 망간단괴를 채취하지 못한 촬영지역에 대해서도 지형정보만 알면

주로 산출되는 망간단괴의 표면조직은 판단할 수 있으므로 평균매물률도 결정할 수 있다. 따라서 식 (9)에서 정점별 매물률 대신 평균매물률을 이용할 수 있다. 부존률산출식을 이용하는데 또 하나의 문제점은 심해용카메라시스템이 촬영한 해저면사진에는 크기를 예측할 수 있는 표식물이 없어 망간단괴의 크기를 실측할 수 없다는 점이다. 이러한 경우에는 그 지역에서 주로 산출되는 망간단괴의 표면조직에 근거하여 망간단괴의 평균장축을 결정할 수 밖에 없다. 식 (1)로부터 구한 S형과 R형의 평균장축은 각각 3.0 cm와 2.7 cm로 S형이 약간 큰 것으로 나타났다. 그러나 평균중량(습윤기준)면에서 볼때는 R형이 18.6 g으로 15.2 g인 S형보다 약간 무거운 것으로 분석되었다. 이처럼 망간단괴의 표면조직에 따라 평균장축과 평균중량이 다르다. 따라서 망간단괴의 크기와 부존률과의 관계를 검토하여 부존률에 미치는 그의 영향을 조사하였다. Fig. 5는 KODOS지역 내에서 BC와 FFG에 의해 채취된 망간단괴를 표면조직에 따라 분류하고 입도군별로 갯수분포와 중량분포의 백분율로 나타낸 그림들이다. Fig. 5a와 5b는 각각 S형과 R형의 망간단괴에 대한 입도군별 갯수빈도와 중량백분율을 나타낸 것이다. 특히 R형의 경우, 2 cm이하의 갯수백분율은 48%로 가장 높은 편이나 중량백분율은 3%로 매우 낮다. 이와 같은 결과는 KODOS지역내 해저면사진에서 R형의 망간단괴부존률을 추정할 경우, 2 cm 이하의 망간단괴를 무시하여도 정량적인 양에는 큰 차이가 없다는 증거이다. 따라서 2 cm이하의 입도군을 제외하면 R형의 평균장축은 4.3 cm이다. 지금까지의 KODOS지역 내에서 채취된 망간단괴 분석결과, S형 망간단괴의 평균매물률은 29%, R형에서는 45%, 그리고 S형 망간단괴의 평균장축은 3.0 cm, R형은 4.3 cm이다. 이와 같은 값들을 망간단괴의 표면조직에 따른 매물률과 평균장축의 대표값으로 간주하고 유도된 부존률산출식의 신뢰성을 검증해 보고자 한다. Table 3은 Handa와 Tsurusaki(1981)가 제안한 방법대로 유도된 부존률산출식과 본 연구에서 매물률을 고려하여 유도한 부존률산출식에 각 변수값들을 대입하여 구한 결과들이다. 그리고 Fig. 6은 실제부존률에 대한 추정부존률의 산점도를 나타낸 것이다. 표와 그림에서 알 수 있듯이 각 정점에 대해 추정부존률은 실제부존률 보다 대부분 낮은 값이며 많은 편차를 보여주고 있다. 그러나 망간단괴의 평균부존률만을 고려해 볼 때, Handa와 Tsurusaki(1981)가 제안한 부존률산출식 (7)로 계산된 평균추정부존률(\bar{A})은 6.44 kg/m²로서 실제부존률의 평균값인 8.60 kg/m²의 75% 정도이다. 이는 해저면사진으로부터 부존률을 추정할 경우, 퇴적물의 영향으로 실제부존률의 50~75% 정도밖에 평가되지 않는다고 한 Felix(1980)의 연구결과와 일치하였다. 한편 매물률을 고려하여 수정된 식 (9)로 계산된 평균추정부존률(\bar{A})은 7.93 kg/m²으로 평균실

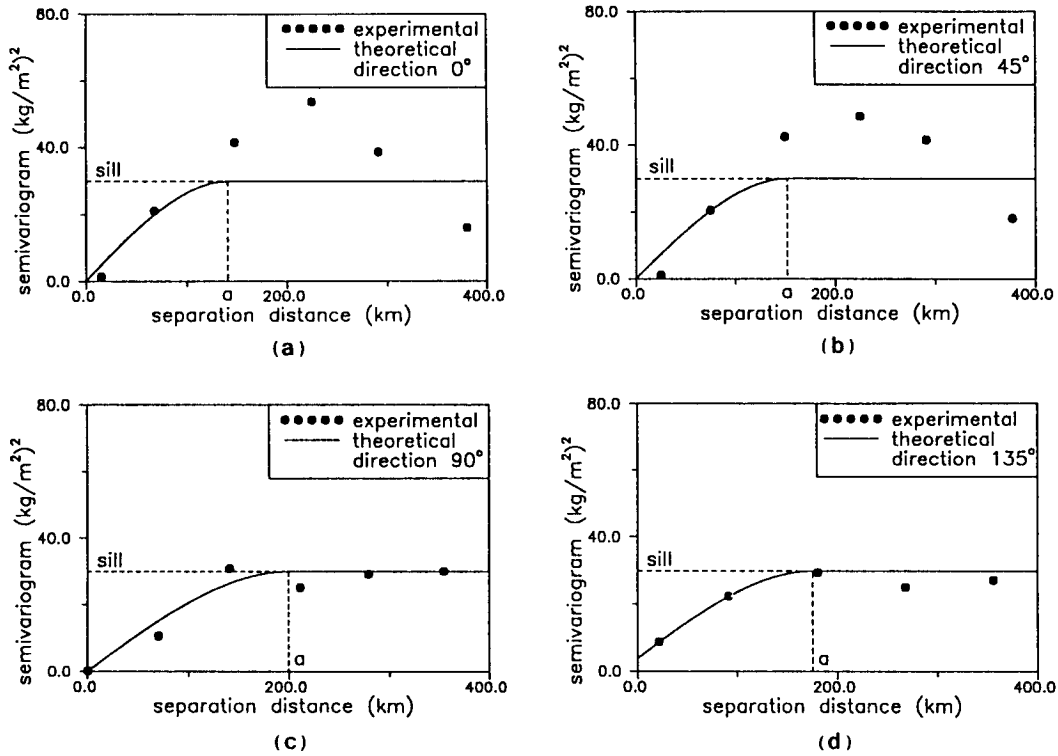


Fig. 8. Fittings of experimental semivariograms to spherical functions in anisotropy. (a) direction 0°, (b) direction 45°, (c) direction 90°, (d) direction 135°.

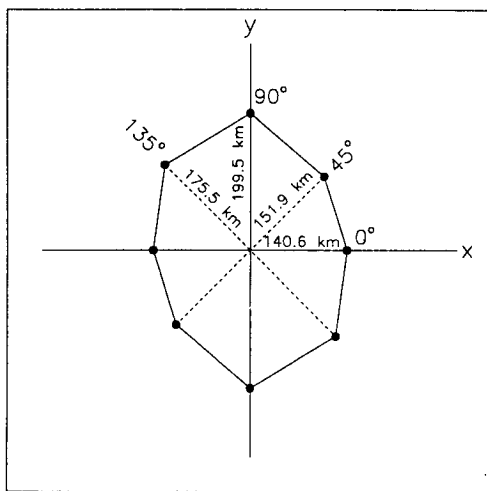


Fig. 9. Experimental influence ranges determined from anisotropic model with four directions.

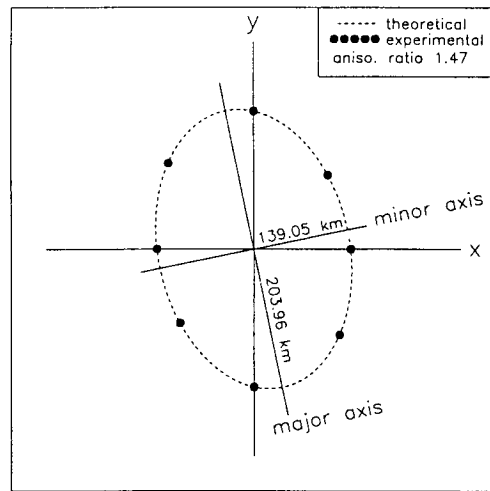


Fig. 10. Typical ellipsoidal range determined from experimental influence ranges of anisotropic model.

제부존들의 92%까지 평가되었다. 특히 식 (9)에 정점별 매물 대신 평균매물들을 대입하여도 평균추정부존들(\bar{A}_i)은

동일하였다. 한편 상자형시료채취기의 표면사진으로부터 구한 점유율(C_i)은 해저면사진에서 영상분석법으로 구할 망간

Table 4. Parameters of variogram for isotropic and anisotropic model.

correlation parameters	isotropy	anisotropy			
		0°	45°	90°	135°
random variance (kg/m ²) ² (C _o)	0.15	0.15	0.15	0.15	3.87
spatial variance (kg/m ²) ² (C)	29.66	29.66	29.66	29.66	25.94
sill (kg/m ²) ² (C _o + C)	29.81	29.81	29.81	29.81	29.81
influence range (km) (a)	151.88	140.63	151.88	199.50	175.50
separation distance (km) (h)	75.00	75.00	75.00	70.00	90.00
distance tolerance (%)	35.00	30.00	35.00	20.00	30.00
r-squared (fraction)	0.95	0.53	0.56	0.78	0.89

Table 5. Summarized parameters by using geostatistical model.

description	isotropy	anisotropy
specified cutoff abundance	5.0 kg/m ²	5.0 kg/m ²
size of one grid block	10.9 km ²	10.9 km ²
number of total grid blocks	100×100	100×100
number of grid blocks upper cutoff	3523	4030
ratio of grid blocks upper cutoff	0.35	0.40
mean of abundance upper cutoff	8.55 kg/m ²	8.58 kg/m ²
mean of total abundance	4.18 kg/m ²	4.45 kg/m ²

단괴의 점유율(C)과 동일하다고 볼 수 있다. 이와 같은 결과는 탐사지역내의 망간단괴 표면조직에 따른 평균매몰률(\bar{B}) 및 평균장축(\bar{D})과 촬영지역의 해저지형정보를 알고, 또한 해저면사진에서 망간단괴의 점유율(C)을 구함으로써 다음식으

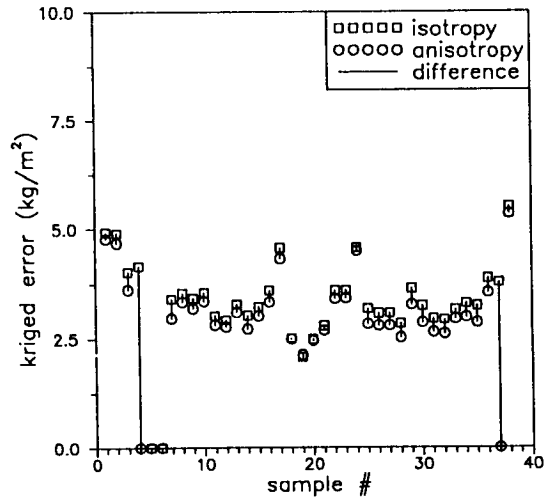


Fig. 11. Kriged errors between actual abundances and kriged abundances for isotropic and anisotropic models.

로부터 탐사지역내의 평균부존률을 정량적으로 계산해 낼 수 있다.

$$A = 6.35 \frac{\bar{D} \cdot C}{100 - \bar{B}} \quad (10)$$

다음은 채취된 시료점을 정점으로한 망간단괴의 부존률을 광역변수로하여 추정평가하고자 하는 구역에서 연속적인 부존률분포도를 얻기 위해 지구통계모델을 이용하였다. 본 모델(김인기 등, 1993)에 의한 방법은 과거의 IDS법, 다각형법 등과 같은 단순평균법에 비해 추정값과 시료값간의 오차가 현저히 작은 것으로 그 신뢰성이 입증되었다. 과거에는 지

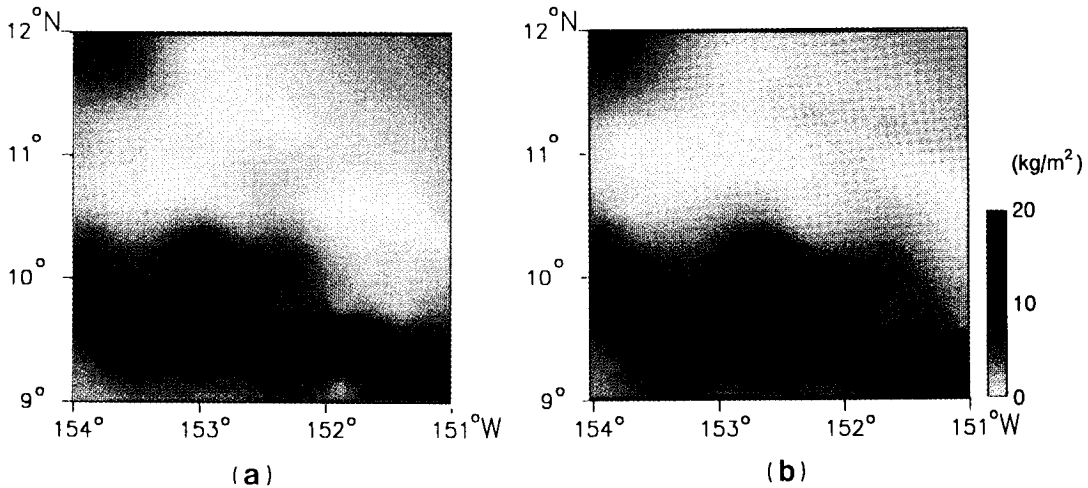
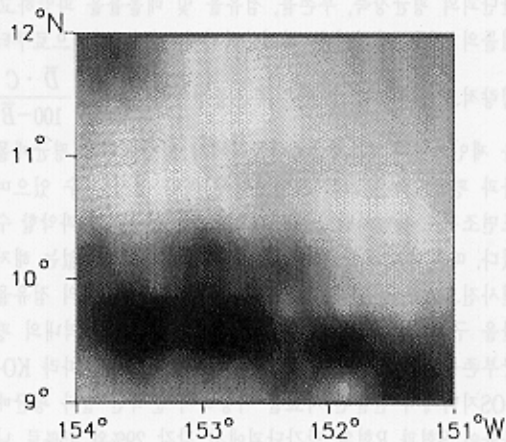
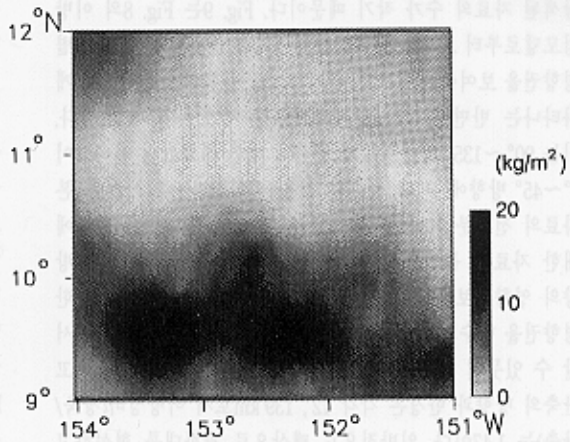


Fig. 12. Kriged areal distributions of nodule abundance in KODOS area. (a) isotropy, (b) anisotropy.



(a)



(b)

Fig. 12. Kriged areal distributions of nodule abundance in KODOS area. (a) isotropy, (b) anisotropy.

구통계모델로 접근한 이론분포함수는 등방성으로만 가정하였으나, 금번 연구에서는 이론분포함수를 등방성모델과 이방성모델로 각각 가정하여 추정값에 대한 신뢰성을 비교하고자 한다. 지구통계모델과정의 첫 단계로는 공간에서 자료간의 분산정도를 파악할 수 있는 이론분포함수를 결정해야 한다. 등방성인 경우는 1개의 이론분포함수가 필요하나 이방성은 여러방향에 대한 영향권을 비교하므로써 예측할 수 있으므로 본 연구에서는 0°, 45°, 90°, 135° 방향을 갖는 4개의 이론분포함수를 도출하였다. 이론분포함수의 형태는 시료점간의 거리가 증가함에 따라 안정화되는 특성을 지닌 구형함수로 결정하였으며 일반적인 형태는 다음과 같다.

$$r(h) = C_0 + C \left(1.5 \frac{h}{a} - 0.5 \frac{h^3}{a^3} \right) \quad h < a$$

$$r(h) = sill = C_0 + C \quad h \geq a \quad (11)$$

여기서, C_0 은 무작위분산값으로서 시료점간의 상관성을 저하시키는 매개변수이며 C 는 공간분산값으로서 시료점간에 상관도의 크기를 의미하는 변수이다. 이 함수로써 KODOS 지역내의 망간단괴의 실제부존률과 추정된 부존률간의 오차를 최소화하는 크리깅과정을 이용하여 연속적인 부존률 분포도를 얻게된다. Fig. 7은 등방성모델에 대한 이론분포함수로서 망간단괴의 부존특성이 각 방향에 대해 동일한 영향권(a)을 갖는다는 가정하에 산출되었으며 실험분포값과의 적합도가 양호함을 보여준다. Fig. 8은 0°, 45°, 90°, 135° 방향을 갖는 이방성모델에 대한 이론분포함수로서 Fig. 7의 등방성모델에 비해 실험분포값과의 적합도가 낮게 나타났다. 이는 시료의 정점간의 단위구획거리(h)뿐 아니라 각 방향에 대해서도 시료의 정점이 탐색되어야 하므로 등방성모델에 비해 탐색된 자료의 수가 작기 때문이다. Fig. 9는 Fig. 8의 이방성모델로부터 도출된 시료값간의 공간분산에 대한 각 방향별 영향권을 보여주는 것으로서 90°~135°방향의 영향권이 크게 나타나는 반면에 0°~45°방향으로는 작게 나타나고 있다. 이는 90°~135°방향으로의 공간에 대한 시료값의 연속성이 0°~45°방향에 비해 적다는 것을 의미한다. 즉 이것은 본 자료의 전체분산(sill)을 필요로 하기 위해 90°~135°방향에 대한 자료의 불연속한 속성을 연속화하기 위해 0°~45°방향의 영향권보다 커져감을 의미한다. 이상의 4방향에 대한 영향권을 함수화하면 Fig. 10과 같이 타원형이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 장축의 방향과 반경은 각각 102°, 204 km이고 단축의 방향과 반경은 각각 12°, 139 km로서 이방성비(장축/단축)는 1.47이다. 일반적으로 맥상으로 광화대를 형성하고 있는 광상의 이방성비는 2.0 이상으로 매우 높다. 반면에 광역적 광화대(pervasive mineralization)를 이룬 광상일수록

그의 이방성비는 1에 근접한다(Journal and Huijbregts, 1978). 따라서 KODOS지역의 망간단괴 광상은 비교적 광역적 광화대를 형성하고 있으나 부존률분포가 약간 이방성화 되어 있음을 알 수 있다. 이상의 등방성과 이방성모델에 대한 이론분포함수의 특성값들은 Table 4에 나타내었다.

다음은 KODOS지역을 1만개(100×100)의 소구역으로 분할하고 크리깅 과정을 통해 망간단괴 부존률을 추정하였다. 먼저 등방성과 이방성 모델에 근거하여 추정된 부존률과 실제 부존률과의 오차를 비교해 보면, 이방성에 대한 크리깅오차(kriged error)가 등방성의 그것에 비해 작게 나타났다(Fig. 11). 여기서 크리깅오차란 크리깅 값(kriging value)이 그 위치에서 실제자료값에 대해 어느 정도의 오차를 갖고 있는지를 나타낸 것으로 추정값에 대한 정확도를 판단하는 기준이 된다. 이 오차는 지구통계학적 모델이 적합할수록 감소한다. 따라서 이방성분포를 보이는 망간단괴의 부존률분포 해석시, 이방성 모델이 등방성모델에 비해 신뢰도가 높음을 보여주고 있다. 부존률분포에 대한 결과는 Fig. 12에 나타내었으며 이에 대한 내용은 Table 5에 요약하였다. 망간단괴의 등방성분포와 이방성분포에 대한 KODOS지역의 평균 부존률은 각각 4.2 kg/m²와 4.5 kg/m²이다. 한편 심해저광업의 부존률 채산점인 5 kg/m² 이상을 차지하는 구역의 평균 부존률은 두 경우 모두 8.6 kg/m²이고, 구역도 북위 9°~10.5°, 서경 151°~154°에 위치하고 있다. 그러나 그 면적은 이방성분포의 경우, 전체의 약 40%를 차지하는 약 44,000 km²로서 약 39,000 km²인 등방성분포에 비해 5% 정도 넓게 평가되었다.

결론

KODOS지역에서 획득한 망간단괴의 자료를 분석하여 망간단괴의 평균장축, 부존률, 점유율 및 매물률을 파악하고, 이들의 상호 관련성을 회귀분석하여 해저면사진으로부터 정량적으로 계산할 수 있는 부존률산출식 $A = 6.35 \frac{\bar{D} \cdot C}{100 - B}$ 을 제안하였다. 이 부존률산출식에서 망간단괴의 평균매물률과 평균장축은 그의 표면조직에 따라 결정될 수 있으며 표면조직도 촬영지역의 해저지형정보를 이용하면 파악할 수 있다. 따라서 평균장축과 매물률을 직접 구할 수 없는 해저면사진으로부터 영상분석법을 이용하여 망간단괴의 점유율만을 구하게 되면, 부존률산출식으로부터 탐사지역내의 평균부존률을 정량적으로 계산해낼 수 있다. 이에 따라 KODOS지역에서 산출된 자료를 이용하여 분석한 결과 평균매물률이 S형과 R형의 망간단괴에서 각각 29%와 45%로 나타났으며, 평균장축은 3.0 cm와 4.3 cm로 각각 결정되었다. 이 값들을 유도된 부존률산출식에 대입하여, 해저면사진과

동일하게 취급할 수 있는 상자형시료채취기의 표면사진으로부터 망간단괴의 부존률을 추정한 결과 Handa와 Tsurusaki가 제안한 부존률산출식보다 더 높은 평가의 신뢰성을 얻을 수 있었다. 본 탐사구역에서의 심해저망간단괴의 분포특성상 이방성비는 1.47로서 약간 이방성화되어 있음을 알 수 있다. 이방성분포를 보이는 망간단괴의 부존률분포해석시, 등방성 모델에 비해 이방성모델에 의한 추정결과와 실제값간의 오차가 최소화됨을 알 수 있어 이방성모델의 적용시 결과에 대한 신뢰도를 보다 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 이방성분포에 대한 KODOS지역의 망간단괴 평균 부존률은 4.5 kg/m²이다. 한편 심해저광업의 부존률 채산점(5 kg/m² 이상)을 만족하는 지역의 평균 부존률은 8.6 kg/m², 그 면적은 전체의 약 40%를 차지하는 약 44000 km²이며, 그의 위치는 북위 9°~10.5°, 서경 151°~154°에 집중되어 있다.

참고문헌

- 김인기, 성원모, 정문영 (1993) 수정된 Kriging법을 응용한 다목적지구통계모델의 개발 및 타당성검토. *자원환경지질학회지*, 제26권 3호, p. 207-215.
- 김현태 (1994) 이방성-추계론적 모델을 이용한 불균질저류층의 특성규명. *한양대학교석사학위논문*.
- 이경용, 문제운, 강정극, 정희수, 지상범 (1992) KODOS-89지역 망간단괴의 산상 및 분포특성. *한국해양학회지*, 제27권 3호, p. 210-227.
- 정희수, 정갑식, 이경용, 강정극, 정문영 (1990) KODOS-89지역 망간단괴의 성인과 분포. *한국해양학회지* 제25권 4호, p. 189-204.
- 한국해양연구소 (1990) 심해저광물자원개발전략연구(II). BSPG 00094-296-5.
- 한국해양연구소 (1991) 태평양 심해저광물자원개발연구. BSPG 00118-369-5.
- 新井 勝男 (1985) 地球統計學の 基本的 概念と その應用. *鑛山地質*, 35 (4), p. 299-311.
- Anonymous (1979) Manganese nodules: Dimensions and prospective. UNDPET publication, D. Reidel Pub. Co., p. 8-20.
- Anonymous (1982) Assessment of manganese nodule resource: Data and Methodologies. Graham and Trotman Ltd.
- Bonatti, E., Kraemer, T. and Rydell, H. S. (1972) Classification and genesis of submarine iron-manganese deposits. In: D.R. Horn (Editor), *Ferromanganese Deposits on the Ocean Floor*. Nat'l Sci. Found., Washington, p. 149-166.
- Clark I. (1982) *Practical Geostatistics*. Applied Science Publishers Ltd, 2nd ed., p. 99-120.
- David, M. (1977) *Geostatistical ore reserves estimation*. Elsevier. Amsterdam, the Netherlands.
- EWig, M., D. Horn, L. Sullivan, T. Aitken and E. Thorndike (1971) *Photographing manganese nodules on ocean floor*. *Oceanology International*, Dec.
- Felix, D. (1980) Some problem in making nodule abundance estimates from sea floor photographs. *Marine Mining*, v.2 (3); p. 293-302.
- Handa, K. and K. Tsurusaki (1981) Manganese nodules; Relationship between coverage and abundance in Northern part of central Pacific. G.S.J. cruise report, v.15, p. 184-217.
- Hennigar, H. F., R. E. Dick, and E. J. Foell (1986) Derivation of abundance estimates for manganese nodule deposits: Grab sampler recoveries of ore reserves, OTC 5237: p. 147-150.
- Herzfeld, U. C. (1989) Geostatistical methods for evaluation of Seabeam bathymetrical surveys: Case studies of wegener Canyon, Antarctica. *Marine Geology*, v. 88, p. 83-95.
- Hohn M. E. (1988) *Geostatistics and Petroleum Geology*. Van Nostrand Reinhold, p. 101-168.
- Isaaks E. N. and R. M. Srivastava (1989) *Applied Geostatistics*. Oxford University Press.
- Journal, A. G. and C. J. Huijbregts (1978) *Mining geostatistics*. Academic Press.
- Journal, A. G. (1986) *Geostatistics: Models and Tools for the Earth Sciences*. *Mathematical Geology*, v. 18, p. 119-121.
- Sharma, R. and V. N. Kodagali (1990) A system for cataloguing and interpreting seabed photographs of nodules. *Marine Geology*, v. 92, p. 139-146.
- Sorem, R. K., W. R. Reinhart, R. H. Fewkes and W. D. Mcfarland (1979) Occurrence and character of manganese nodules in DOMES site A,B and C, East equatorial Pacific ocean. In: J. L. Bischoff and D.Z. Piper(Editors). *Marine Geology and Oceanography of the Pacific Manganese nodule province*. Plenum. New York. N. Y., p. 475- 527.