KODOS 남쪽광구에서 자유낙하식 채취기로 채취된 망간단괴 부존률 평가를 위한 보정상수 검증

이현복* · 고영탁 · 김종욱 · 지상범 · 김원년

한국해양연구원 심해 · 해저자원연구부

Evaluation of Correction Parameter for the Free-fall Grab Based Mn Nodule Abundance in the Southern Sector of the KODOS

Hyun-Bok Lee*, Young-Tak Ko, Jonguk Kim, Sang-Bum Chi and Wonnyon Kim

Deep-sea & Marine Georesources Research Department, KORDI, Ansan 425-600, Korea

Quantitative estimate of manganese nodules based on the operation of a free fall grab (FFG) needs to be corrected because of its less retrieval ability. Previously, the correction parameter of the nodule abundance collected by FFG was calculated based on the image analysis of the photos of bottom sediment in the northern sector of the nodule exploration area of Korea in the NE equatorial Pacific. However, nodules in the southern sector are commonly covered by sediment, which may prevent the use of the correction parameter estimated by photographic techniques. In this study, we attempted dual nodule sampling at the same location by different equipments (i.e. box corer (BC) and FFG) to examine the previous correction parameter of nodule abundance for FFG operation. During the exploration cruises in 2007 to 2009, Mn-nodules were collected from 40 stations both by BC and FFG in the southern sector. The correlation analysis between BC and FFG operations revealed that the BC collected nodules 1.43 times larger than FFG. Our result suggests that the correction parameter of 1.43 can be applied for collection of FFG data to estimate Mn-nodule distribution in the southern sector. The obtained parameter is similar to the previous parameter (1.42~1.45) calculated by the image analysis method, indicating an usefulness of new correction parameter suggested by this study.

Key words : box corer, correction factor, free fall grab, nodule abundance

자유낙하식 망간단괴 채취기 (FFG)는 정점의 해저면에 분포하는 망간단괴를 모두 채취하기 어렵기 때문에 망간단괴의 부존률을 평가할 때 반드시 보정해서 사용해야 한다. 북동태평양에 위치한 대한민국의 망간단괴 광구 중에서 북쪽광구의 보정상수는 이미 해저면 영상분석으로 결정되어 있다. 그러나 남쪽광구는 망간단괴가 퇴적물에 피복되어 있어서 영상분석에 의한 부존률 평가에 지장을 받을 가능성이 있다. 이번 연구에서는 과거에 남쪽광구에서 FFG로 획득한 부존률 자료에 사용한 보정상수를 검증하기 위하여 2007~2009년에 상자형 시료 채취기와 FFG를 동시에 운영하여 40개의 정점자료를 획득하였다. BC와 FFG의 상관분석을 통하여 BC가 FFG에 비하여 1.43배 부존률이 크게 나타났으며, 이것은 남쪽광구에서 실제 망간단괴 분포를 평가하기 위해서는 FFG 자료에 1.43의 보정상수를 곱해서 사용해야 되는 것을 의미한다. 이번에 획득한 보정상수는 기존에 영상분석을 통해 얻은 보정상수(1.42~1.45)와 유사한 결과로서 남쪽광구에서 사용할 보정상수가 검증되었다고 판단된다.

주요어 : 상자형 시료 채취기, 보정상수, 자유낙하식 망간단괴 채취기, 단괴 부존률

1. 서 론

망간단괴는 약 40여 종의 유용 금속을 함유하고 있

는 광물 덩어리로서 전 세계의 대양저 및 호수 등에 광범위하게 분포되어 있다. 망간단괴에 함유된 금속 중에 특히 니켈, 구리, 코발트, 망간 등은 전략적인 금속

*Corresponding author: hblee@kordi.re.kr

으로서 각광을 받고 있는데, 이러한 금속이 상업적 가치를 가질 정도로 매장되어 있는 망간단괴 광상은 세계적으로 일부 지역에 분포하고 있다. 그 중에서도 북동태평양의 클라리온-클리퍼튼 균열대 해역(Clarion-Clipperton Fracture Zone, CCFZ)은 전 세계에서 가장 주목 받고 있는 망간단괴 개발 후보지이다. 우리나라는 망간단괴 개발을 위하여, 1990년대부터 지금까지 약 20년 간 CCFZ 내에 위치한 대한민국 단독 개발 광구(Korean license area)에서 망간단괴의 부존률과 주요 금속원소의 분포 특성 연구, 수심, 해저지형 등의 지구물리 특성 연구 및 수층과 저층 환경 연구를 망라하는 종합 심해저 연구(Korea Deep Ocean Study, KODOS)를 수행하고 있다.

최종적으로 망간단괴 개발지를 선택하기 위해서는 채광기의 원활한 주행을 위해서 해저지형, 경사도, 표층 퇴적물의 물성 등의 요인들도 고려해야하지만, 망간단괴의 부존률과 금속함량이 높은 지역을 선택하는 것이 가장 중요하다(IFREMER, 1989; MLTM, 2011). 부존률은 망간단괴의 단위면적당 질량으로 평가하는데, 대부분의 망간단괴 탐사에서는 단시간에 넓은 해역을 조사할 수 있기 때문에 자유낙하식 시료채취기(Free Fall Grab, FFG)를 주로 이용하여 부존률을 산출하였다. 그러나 FFG는 시료채취 면적이 작고, 탐사지역의 해황, 해저면과 망간단괴의 분포상태, FFG의 기계적인 성능에 따라서 동일 정점에서 망간단괴의 채취율에 차이가 나타나기 때문에(Hennigar *et al.*, 1986), FFG로 채취한 망간단괴 양을 기반으로 계산된 부존률은 반드시 보정해서 사용해야 한다.

부존률을 보정하는 방법은 실험적인 방법을 통해서 FFG의 효율을 조사하여 보정하는 방법(OMCO, 1992)과 해저면 사진을 이용하여 보정하는 방법으로 나눌 수 있다 (IFREMER, 1989). OMCO (Ocean minerals company)의 방법은 실험실의 수조에서 일정한 크기의 단괴모형을 넣어 모형실험을 한 결과로서 실험의 환경 변수 적용이 불확실하고, 해저면 영상분석은 망간단괴가 표층 퇴적물에 의해서 피복되어 있는 경우에는 사진상으로 퇴적물과 단괴의 구별이 모호하여 정확한 분석이 어려운 단점이 있는 방법이다. 우리나라의 경우는 미국 OMCO의 보정방법을 적용하여 수행한 적도 있으며(KORDI, 1992), 해저면 사진을 이용하여 부존률을 보정한 적도 있다(KORDI, 1993). 또한 해저면 영상분석은 삼차원적인 망간단괴를 이차원적으로 평가하기 때문에 발생할 수 있는 오류를 줄이기 위해서 망간단괴를 몇 가지 형태로 분포양상(facies)을 나뉘서 분

석한 적도 있었다(MOMAF, 1998). 망간단괴 보정상수는 연구 초창기부터 만들어서 사용하였지만 자료가 축적됨에 따라서 1994년부터는 기존 자료를 모아서 통합된 보정상수인 1.29를 사용하였다. 그러나 지난 20년간의 자료를 분석해온 결과 우리나라 북쪽광구에서 조사된 망간단괴의 보정상수는 1.28~1.30으로 편차가 적은 반면에 남쪽광구에서 조사된 망간단괴의 보정상수는 1.14~1.61로 편차가 매우 크게 나타났다(KORDI, 1993; KORDI, 1994; MOMAF, 2002). 이러한 이유는 우리나라의 북쪽과 남쪽광구는 망간단괴의 형태 및 크기와 같은 분포특성, 퇴적물의 구성 성분, 지질공학적인 특성 등이 다르기 때문이다(Chi *et al.*, 2003; MOMAF, 2007; Lee *et al.*, 2008). 즉, 북쪽광구에서 산출되는 망간단괴는 남쪽광구에서 산출되는 것에 비해서 크기가 작고, 금속원소를 해수로부터 공급받는 수성기원 망간단괴가 많이 분포하며, 표층퇴적물에 피복되어 있지 않아서 사진으로 점유율을 분석하기가 용이하다. 반면에 남쪽광구의 망간단괴는 퇴적물로부터 속성작용을 받아서 금속원소가 공급되는데, 성장속도가 북쪽의 망간단괴에 비해서 상대적으로 빠르게 때문에 크기가 크지만 표층퇴적물이 망간단괴의 표면을 덮고 있는 경우가 많아서 사진 분석이 매우 어렵다. 따라서 두 지역간의 FFG 채취효율이 다를 가능성이 있으며 또한 해저면 사진상의 피복률이 다르게 나타나기 때문에 보정상수를 구별하여 적용할 필요가 있다.

본 논문은 우리나라 남쪽광구의 망간단괴의 부존률 보정상수를 검증하기 위하여 수행하였다. 기존에 수행했던 실험적인 방법과 해저면 사진을 이용하는 방법의 단점을 보완하기 위하여 실험의 동일정점에서 FFG와 상자형 시료 채취기(Box corer, BC)를 이용하여 획득한 망간단괴의 부존률을 비교하는 방법으로 보정상수를 산출하였다.

2. 재료 및 방법

본 연구는 태평양 심해저 망간단괴 개발 사업의 일환으로 2007년부터 2009년 사이에 한국해양연구원 온누리호를 이용하여 수행되었으며, 망간단괴 부존률은 CCFZ 내의 40개 정점에서 각 정점마다 FFG와 BC에서 획득한 망간단괴로 계산되었다(Fig. 1). BC는 온누리호의 윈치에 연결하여 30~50 m/min의 속도로 투하하였으며, FFG와 BC 시료 채취 위치를 최대한 일치시키기 위하여 수심과 해황을 고려하여 BC 투하 후 약 1~1.5 시간 후에 FFG를 투하하여 두 장비의 해

Fig. 1. Location map of the study area. Korea license Mn-nodule field is divided into two sub areas (northern and southern sectors) that consist of seven potential mining sites.

저면 도달 시간을 최대한 일치시켰다.

BC 시스템은 Supporting frame, triggering system, shovel, sample canister로 이루어져 있으며 sample canister의 규모는 50 (H)×50 (W)×50 (L) cm³이다. BC 시스템은 해저면에 닿았을 때 main cable에 연결된 triggering system이 작용을 하여 해저면의 퇴적물과 망간단괴를 교란 없이 획득할 수 있다(Fig. 2). 따라서 BC로 획득한 망간단괴의 면적은 0.25 m²이므로 망간단괴 부존률은 BC로 채취된 망간단괴 중량에 4를 곱해서 단위면적당 중량으로 계산하였다. FFG는 부력을 유발하는 진공된 유리공 부분, 수층을 통해 낙하할 수 있도록 쇠조각을 넣어 중력이 생기게 하는 부분과 해저면에 닿았을 때 쇠조각들이 채취기로부터 빠져나가면서 망간단괴를 채취하는 부분으로 구성되어 있다(Fig. 3). FFG는 매우 빠르게 가라앉기 때문에(80 m/min) 해류에 의해서 정점이 이동되는 영향이 매우 적다(Pattan and Kodagali, 1988). 망간단괴 부존률은 FFG의 망을 벌린 상태의 면적과 채취된 망간단괴의 중량을 이용하여 단위면적당 중량으로 환산하여 계산하였다.

3. 결 과

2007 년 이전의 연구에서는 FFG로 채취된 망간단괴의 부존률에 실험적인 방법 또는 영상처리 방법과 같은 간접적인 방법으로 산출된 보정상수를 곱하여 망간단괴 부존률을 평가하였다. 그러나 이번 연구에서는 FFG로 산출된 부존률과 보정상수가 필요 없는 BC로

Fig. 2. Schematic diagrams showing the major parts and the operation sequence of a box corer (BC) on the seabed (after Lee *et al.* 2008).

Fig. 3. Cartoons showing the recovery process of Mn-nodules using a free fall grab (FFG) (after Lee *et al.* 2008).

산출된 부존물을 직접 비교하여 보정상수를 산출하였다.

2007~2009 년 동안에 KODOS 남쪽광구 내의 40개 정점에서 BC에 의해 측정된 평균 망간단괴 부존물은 5.57 kg/m^2 ($0.00 \sim 24.32 \text{ kg/m}^2$)로 나타났다(Table 1). FFG로 측정된 부존물값의 편차를 줄이기 위해서 BC를 수행한 정점에서 각각 2번씩 투하하였다. FFG1과 FFG2의 망간단괴 평균 부존물은 각각 2.92 kg/m^2 ($0.00 \sim 9.08 \text{ kg/m}^2$)와 2.61 kg/m^2 ($0.00 \sim 9.72 \text{ kg/m}^2$)로 유사하게 나타나며, FFG1과 FFG2 전체적으로는 망간단괴 평균 부존물이 2.76 kg/m^2 ($0.00 \sim 8.15 \text{ kg/m}^2$)로 나타났다. 이론적으로는 동일한 정점에서 채취한 망간단괴의 부존물은 FFG의 채취효율을 감안하면 BC로 측정된 값이 약간 높거나 유사하게 나타나야 한다. 이번 연구의 경우, 4개 정점에서 서로 유사한 값을 보였으며, BC로 측정된 부존물이 FFG로 측정된 부존물의 평균값보다 크게 나타난 정점은 26개로 나타났다. 특히 BC에 의한 부존물이 3 개 정점(Station No. 7, 9, 28)에서 매우 높게 나타났으며, 일부 정점(Station No. 2, 6, 18, 21, 31, 33, 34)에서는 FFG에 의한 부존물이 월등히 높게 나타난 경우도 있었다(Fig. 4).

비록 동일 정점에서 BC와 FFG의 자료를 획득하였지만 해저면의 상태, 망간단괴 채취과정에서 발생할 수 있는 장비의 오작동 등과 같은 변수들 때문에, FFG의 채취효율을 평가하기 위해서는 BC와 평균 FFG 부존물의 비를 이용하여 두 자료의 선형관계에 사용할만한 자료를 선별할 필요가 있다. 따라서 FFG로 망간단괴 채취에 실패한 두 정점(Station No. 4, 5)을 제외한 38 개의 정점을 BC와 평균 FFG 부존물의 비를 이용

Fig. 4. Comparison between the nodule abundances that collected by BC (solid bar) and FFG (grey bar), respectively, at the same sampling station.

하여 자료를 세 개의 집단으로 분리하였다(Table 2). 첫 번째 집단(class 1)은 BC/FFG_{avg} 가 0.5 미만으로 나타난 정점으로 8 개의 정점에서 나타났다. 이 집단은 BC로 채취된 망간단괴의 부존물이 FFG로 채취된 부존물의 50% 미만이 채취되었음을 뜻하는 것으로 같은 해저면을 대표하는 시료가 아닌 것으로 판단된다. 물론 이론적으로는 FFG의 실수율을 감안하면 동일 정점에서 BC/FFG_{avg} 가 1 미만으로 나타날 수는 없지만, 실해역이 수심 4,000~5,000 m 해저면이고, BC의 면적이 $0.5 \times 0.5 \text{ m}$ 에 불과하다는 것을 감안하여 명백하게 두 장비의 채취율을 비교하기 어려운 조건을 BC/

Table 1. Nodule abundances obtained by BC and FFG at the same stations

No.	Station	BC abn. (kg/m ²)	FFG 1 abn. (kg/m ²)	FFG 2 abn. (kg/m ²)	FFG avg. (kg/m ²)	BC/FFG avg.	BC/FFG max.
1	07-02-03	2.22	0.75	1.48	1.11	1.99	1.50
2	07-02-04	6.12	8.16	6.75	7.45	0.82	0.75
3	07-02-05	5.82	6.45	0.05	3.25	1.79	0.90
4	07-02-06	16.28	0.00	0.00	0.00	-	-
5	07-02-07	8.18	0.00	0.00	0.00	-	-
6	07-02-09	5.60	5.55	6.66	6.10	0.92	0.84
7	07-02-10	19.34	2.20	1.91	2.06	9.41	8.77
8	07-02-12	0.00	0.43	0.00	0.22	0.00	0.00
9	07-02-14	12.45	0.95	1.53	1.24	10.02	8.13
10	07-02-15	9.36	2.45	9.09	5.77	1.62	1.03
11	07-02-16	0.60	0.07	0.00	0.03	17.60	8.80
12	07-02-17	11.28	6.59	9.72	8.15	1.38	1.16
13	07-02-18	4.70	5.36	1.41	3.38	1.39	0.88
14	07-02-19	0.54	0.14	0.00	0.07	7.92	3.96
15	07-02-22	6.80	4.93	1.50	3.22	2.11	1.38
16	07-02-23	4.14	1.91	3.13	2.52	1.64	1.32
17	07-02-27	5.72	6.45	4.78	5.62	1.02	0.89
18	08-02-01	1.12	2.24	6.02	4.13	0.27	0.19
19	08-02-02	5.92	3.49	0.00	1.75	3.39	1.70
20	08-02-03	6.18	7.92	5.04	6.48	0.95	0.78
21	08-02-05	0.44	1.80	2.67	2.23	0.20	0.16
22	08-02-06	5.24	0.51	1.25	0.88	5.96	4.19
23	08-02-07	7.06	9.08	3.71	6.40	1.10	0.78
24	08-02-08	1.84	0.77	2.61	1.69	1.09	0.70
25	08-02-09	0.00	0.23	0.00	0.12	0.00	0.00
26	08-02-10	7.62	1.84	1.44	1.64	4.64	4.14
27	08-02-11	6.88	1.37	0.66	1.02	6.76	5.02
28	08-02-12	24.32	2.63	3.95	3.29	7.39	6.16
29	08-02-13	3.44	4.60	3.35	3.97	0.87	0.75
30	08-02-14	7.02	1.11	3.30	2.20	3.19	2.13
31	09-01-01	1.72	6.05	0.27	3.16	0.54	0.28
32	09-01-02	4.00	2.09	5.50	3.79	1.05	0.73
33	09-01-04	0.68	3.53	1.30	2.42	0.28	0.19
34	09-01-05	0.76	0.92	3.67	2.30	0.33	0.21
35	09-01-06	0.00	0.13	0.09	0.11	0.00	0.00
36	09-01-07	6.64	4.98	3.05	4.02	1.65	1.33
37	09-01-08	2.24	1.74	1.21	1.48	1.52	1.29
38	09-01-09	0.38	1.24	3.58	2.41	0.16	0.11
39	09-01-10	6.58	3.83	2.27	3.05	2.16	1.72
40	09-01-11	0.14	0.11	0.19	0.15	0.93	0.74
min.		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
max.		24.32	9.08	9.72	8.15	17.60	8.80
avg.		5.57	2.92	2.61	2.76	2.76	1.95

abn. = abundance, avg. = average, min. = minimum, max. = maximum

FFG_{avg.}가 0.5미만으로 넓게 설정하였다.두 번째 집단(class 2)은 BC/FFG_{avg.}가 0.5~2.0의 범위 내에 들어있는 정점으로 18개의 정점에서 나타났다.

다. 이 집단은 BC로 채취된 망간단괴의 부존률이 FFG로 채취된 것에 비해서 최소 절반 이상 채취되었으며 최대 2배는 넘지 않는 집단이다. 이 집단의 자료

Table 2. Classified nodule abundances according to the ratio of BC and average FFG abundance

Class	BC/FFG _{avg.}	BC abn. (kg/m ²)		FFG _{avg.} abn. (kg/m ²)		FFG _{max.} abn. (kg/m ²)	
		range	avg.	range	avg.	range	avg.
1 (n=8)	< 0.5	0.00~1.12	0.42	0.11~4.13	1.74	0.13~6.02	2.53
2 (n=18)	0.5 ~ 2.0	0.14~11.28	4.90	0.15~8.15	4.14	0.19~9.72	5.51
3 (n=12)	> 2.0	0.54~24.32	8.61	0.03~3.29	1.70	0.07~4.93	2.33
Overall (n=38)		0.00~24.32	5.13	0.03~8.15	2.87	0.07~9.72	3.88

가 실질적으로 두 장비간의 선형관계를 구하기에 적합한 시료로 판단된다.

세 번째 집단(class 3)은 BC/FFG_{avg.}가 2.0이 넘는 집단으로 12개의 정점에서 나타났다. 이 집단은 BC로 채취된 망간단괴의 부존률이 FFG로 채취된 것에 비해서 2배 이상 높게 나타난 정점이다. 이 집단의 BC 평균 부존률은 8.61 kg/m²으로 위의 class 1, 2 (0.42 kg/m², 4.90 kg/m²)의 부존률에 비해서 매우 높게 나타났다. 그러나 FFG의 평균 부존률은 2.33 kg/m²으로 class 1, 2 (2.53 kg/m², 5.51 kg/m²)에 비해서 높게 나타나지 않았다. 따라서 class 3은 실제 망간단괴 부존률이 높은 정점이지만 FFG가 해저면에서 무거운 망간단괴의 일부를 채취하지 못한 결과로 판단된다.

FFG로 채집된 망간단괴 부존률을 보정하기 위해서 BC와 FFG로 채집된 망간단괴의 부존률을 비교하였다 (Fig. 5). FFG 자료를 얻지 못한 2 정점을 제외한 38

개 자료를 비교하였다. 모든 자료 중에서 class 1은 흰색 원, class 2는 검은색 원, class 3은 정사각형으로 표기하였다. Class 1, 2, 3의 자료를 모두 합쳐보면 BC와 FFG 사이의 상관관계는 거의 나타나지 않는다. 그러나 BC와 FFG를 통한 시료채취 효율을 비교하기 위해서 선형관계에서 벗어나는 class 1, 3의 정점을 제외하고 나머지 class 2 정점만을 대상으로 두 장비를 통한 망간단괴의 부존률의 선형관계식을 추출하였다. 위에서 설명하였듯이 선형관계에서 벗어나는 경우 국부적인 해저면의 차이로 인하여 동일지점이라고 할 수 없거나 장비의 시료채취가 실패하여 완벽하지 않은 결과라고 한다면, 좋은 선형관계를 보이는 경우는 이와 반대로 유사한 조건의 해저면에서 채취된 두 장비의 채취효율을 비교할 수 있는 자료가 된다. Fig. 5에서 선형관계를 보이는 정점들의 결정계수(R²)는 0.72로 통계학적으로 강한 양의 상관관계의 범주에 들어가며, 거의 원점을 가까이 지나므로 이 관계식을 통해 두 장비의 채취효율의 차이를 판단할 수 있다. BC와 FFG 평균 부존률을 비교한 결과 선형관계의 기울기는 0.70을 나타내는데, 이는 FFG를 통한 시료 채취가 BC에 비해 70%만 이루어졌음을 의미한다. BC를 통한 망간단괴의 부존률이 실제 해저면의 부존률을 반영한다고 한다면 FFG를 통해 망간단괴를 회수하는 과정에서 약 30%의 망간단괴가 회수되지 못하는 것으로 판단할 수 있다. 이를 보정상수로 환산하면 1.43에 해당한다.

4. 토의 및 결론

망간단괴 부존률은 망간단괴 개발지를 결정하고 매장량을 평가하는데 가장 중요한 요소지만 북동 적도 태평양에 위치한 대한민국 단독개발광구(75,000 km²)의 심해저(~5,000 m)에서 망간단괴 부존률을 정확히 산출하는 것은 매우 어려운 일이다. 망간단괴 부존률을 평가할 때 BC를 사용하면 일정한 면적에서 교란없이 퇴적물과 망간단괴를 채취할 수 있기 때문에 추가로 부존율을 보정할 필요 없는 장점이 있다. 그러나

Fig. 5. Correlation analysis of the nodule abundances between BC and FFG. Nodule abundances is classified into 3 classes according to the ratio of BC and average FFG abundance. Class 1: open circle, class 2: solid circle, class 3: open square.

BC는 FFG에 비해서 탐사 시간이 많이 걸리기 때문에 단기간에 넓은 지역을 조사해야 하는 실해역 탐사에서는 주로 FFG를 사용하여 망간단괴를 채취하였으며, 실험적 또는 카메라 영상분석을 통해서 얻은 보정상수를 이용하여 부존률을 보정하여 사용해왔다.

그러나 FFG를 이용하여 부존률을 측정하면 탐사지역의 해저면 또는 FFG의 기계적인 상태에 따라서 실제보다 적은 양의 시료가 채취되기도 한다. 예를 들면 FFG의 무게중심이 한쪽으로 치우쳐져 있어 FFG가 해저면에 대하여 수직으로 낙하 및 착지를 못하거나 해저면 자체가 기울어져 있는 경우, 해저 퇴적물의 물성이 FFG의 정상적인 작동을 방해할 경우에 채취율이 감소된다(MOST, 1992). 또한 FFG는 선상에서 뼈대 구조 부분, 진공 유리공 부분, 채집 망 부분 등을 조립하여 투하하기 때문에 기계적인 성능에 따라 채취율이 조금씩 다를 수 있다.

FFG의 채취효율을 보정해 주기 위해서 기존 연구에서는 실험적인 방법과 카메라 사진을 이용한 영상분석을 주로 사용하여 왔다. 실험적인 방법(OMCO, 1992)은 해저면의 상황을 실험실에서 재현하여 채취기의 효율을 구하는 방법으로서, 망간단괴의 부존률과 크기에 따라서 다양한 채취효율을 산출할 수 있다는 장점이 있지만 실제 해저면의 다양한 상황을 충분히 재현이 불가능할 뿐만 아니라 수조 모형의 설계시에 단괴의 크기가 일정하게 제한된다는 단점이 있다. 이 실험을 통해서 FFG 시료채취기에 의한 채취효율은 망간단괴의 부존률과 망간단괴의 크기에 따라서 55~79%까지 채취되는 것으로 나타나며, 이를 보정상수로 환산하면 1.27~1.82의 범위로 나타난다(Table 3). 해저면 사진을 이용하는 방법은 해저면에 노출된 망간단괴의 점유율만을 이용하는 방법(KORDI, 1993, 1994)과 점유율 및 단괴 축의 길이를 이용하여 부존률을 보정하는 방법으로 구분할 수 있다(Handa and Tsurusaki, 1981; Sharma, 1989a, 1989b; Sharma and Kodagari, 1990). 이 방법은 해저면의 상황을 명확하게 알 수 있는 사진

자료를 이용한다는 장점이 있지만, 표층 퇴적물의 영향 때문에 실제 부존률의 50~75% 정도로 낮게 파악될 가능성도 있다(Felix, 1980). 실제 망간단괴의 퇴적물 피복률은 망간단괴의 표면조직과 연관되어 차이가 있으며 일반적으로 s-형(표면조직이 매끄러운 형태)은 해저면에 노출되어 있는 반면에 r-형(표면조직이 거친 형태)은 퇴적물에 피복되어 있거나 묻혀 있는 경우가 많다(Usui, 1983). 망간단괴의 점유율과 단괴의 장축 또는 각 축의 길이를 이용하여 보정식을 도출하는 방법은 프랑스의 해양개발 조사기관(IFREMER/AFERNOD)과 일본 심해 자원개발 주식회사(Deep Ocean Resources Development Co. Ltd., DORD)에 의해 사용되었다(Park *et al.*, 1996). 해저면 사진을 이용해서 망간단괴의 부존률을 보정하는데 있어서 망간단괴의 크기(장축)를 이용하는 이유는 망간단괴의 부존률은 망간단괴의 체적에 비례하지만, 납작한 모양의 망간단괴의 경우 이차원적인 사진상의 점유율은 높지만 체적이 크지 않기 때문에 무게가 작은 경향이 나타나기 때문이다. 따라서 망간단괴를 외부형태에 따라서 6가지로 구분하여 다양한 외부형태를 기하학적인 모델(구)로 가정하고 체적을 구하기 위하여 각각의 외부형태별로 장축을 수정해주는 수정 체적을 이용하여 보정하는 경우도 있다(Park *et al.*, 1996).

국내에서는 1992년에 최초로 OMCO의 실험식을 망간단괴의 크기와 부존률을 단순화하여 적용하였는데, 망간단괴의 크기가 8 cm보다 큰 경우는 1.34의 보정상수로, 8 cm보다 작은 경우는 1.20의 보정상수를 도출하였다(KORDI, 1992; KORDI, 1993). 1993년 이후부터는 단괴 채취량 및 크기 분포, 해저면 사진 자료를 근거로 하는 보정상수를 산출한 결과 우리나라 북쪽광구에서 조사된 망간단괴의 보정상수는 1.28~1.30으로 거의 일정하게 나타났지만, 남쪽광구에서 조사된 망간단괴의 보정상수는 1.14~1.61로 조사연도에 따라서 편차가 크게 나타났다(KORDI, 1993; KORDI, 1994; MOMAF, 2002). 최근까지 사용되고 있는 보정상수는 수년간 축적된 망간단괴의 지역적 크기분포와 분포양상을 고려하여, 형태적 보정상수와 채취효율을 기반으로 하고 있다(MOMAF, 2002). Chang *et al.* (2004)에 의하면 대한민국 단독 개발광구에서 산출되는 망간단괴의 분포형태(mode)는 2~4 cm 크기에서 하나의 변곡점을 갖는 형태(Unimodal), 2~4 cm 크기와 8 cm 이상에서 각각 변곡점을 형성하는 형태(Bimodal)로 나뉘어 진다. 또한 망간단괴의 크기(size)는 집단의 규모와 빈도를 기준으로 세 개의 집단

Table 3. Reference correction efficiency for the FFG sampler (After OMCO, 1992)

Nodule diameter (longest axis)	Nodule abundance (kg/m ²)			
	0~5	5~10	10~15	> 15
0~6 cm	78%	76%	75%	73%
6~8 cm	79%	77%	75%	74%
8~10 cm	76%	73%	71%	69%
> 10 cm	62%	59%	57%	55%

(Small, Medium, Large)으로, 부존률은 3 kg/m²과 5 kg/m²을 기준으로 세 개의 집단(Low, Middle, High)으로 구분된다(Table 4). 즉, 우리나라에서 산출되는 망간단괴를 단괴의 분포형태, 크기, 부존률 등의 세부 분류의 영문 머리글자를 따서 USL, USM, USH, UML, UMM, UMH, ULL, ULM로 단괴의 크기 분포에 상관없이 부존률이 비교적 높고 퇴적물의 피복률이 높은 것이 특징인데, 124개의 자료를 분석하였으며 보정상수는 1.45로 나타났다. Facies group C (Bimodal)에 속하는 망간단괴는 주로 bimodal한 것이 특징이다. 대체로 큰 단괴의 영향으로 부존률이 높지만 국부적으로 BLL이 산출된다. Facies group C는 KODOS 남쪽광구에서 가장 적게 나타나는 형태로 56개의 자료를 분석하였으며 보정상수는 1.42으로 나타났다. 따라서 남쪽광구에서 분석한 327개의 자료의 보정상수의 범위는 분포양상에 따라 1.42~1.45로 나타났다.

MOMAF (2002)에서 연구한 지역 중에서 본 연구지역과 같은 남쪽광구의 보정상수는 단괴의 분포양상에 따라 세 개의 그룹으로 구분된다(Table 5). Facies group A (Unimodal small to medium size and low abundance)에 속하는 망간단괴의 분포양상은 USL, USM, UML로 4 cm 이하의 단괴가 주를 이루며, 부존률이 5 kg/m² 미만으로 낮고 해저면 사진이나 심해저 카메라의 영상에서 퇴적물에 의한 피복률이 높아서 단괴가 적게 분포하는 양상을 보인다. Facies group A는 KODOS

남쪽광구에서 가장 많이 나타나는 형태로 147개의 자료를 분석하였으며, 보정상수는 1.42으로 나타났다. Facies group B (Unimodal medium to high abundance buried in sediments)에 속하는 망간단괴는 UML, UMM, UMH, ULL, ULM로 단괴의 크기 분포에 상관없이 부존률이 비교적 높고 퇴적물의 피복률이 높은 것이 특징인데, 124개의 자료를 분석하였으며 보정상수는 1.45로 나타났다. Facies group C (Bimodal)에 속하는 망간단괴는 주로 bimodal한 것이 특징이다. 대체로 큰 단괴의 영향으로 부존률이 높지만 국부적으로 BLL이 산출된다. Facies group C는 KODOS 남쪽광구에서 가장 적게 나타나는 형태로 56개의 자료를 분석하였으며 보정상수는 1.42으로 나타났다. 따라서 남쪽광구에서 분석한 327개의 자료의 보정상수의 범위는 분포양상에 따라 1.42~1.45로 나타났다.

이번 연구에서는 BC와 FFG로 채취한 망간단괴의 부존률의 비를 이용하여 같은 해저면을 대표하는 자료를 추출하였다. Class 1 (BC/FFG_{avg.} < 0.5)의 경우는 앞서 설명한 바와 같이 명백하게 같은 정점을 설명할 수 없는 자료이다. 또한 OMCO의 실험에서 보면 망간단괴 장축의 길이가 10 cm 이상이면서 부존률이 15 kg/m²이 넘는 실험 조건에서도 55%의 회수율이 나타나는 것을 감안하면 class 3 (BC/FFG_{avg.} > 2.0)의 경우도 실험역에서는 비현실적인 자료라고 볼 수 있다(Table 3). 따라서 실제 해양환경에서 BC와 FFG

Table 4. Criteria for the classification of the occurrences of KODOS (Korea Deep Ocean Study) ferromanganese nodules (After Chang *et al.*, 2004)

Classification	Property	Description
Mode	Unimodal	The most common type having one peak in the 2~4 cm size
	Bimodal	The type having each peak in 2~4 cm and in >8 cm.
Size	Small	The frequency of nodules in < 2 cm is higher than that in 4~6 cm, and no nodules in 6~8 cm.
	Medium	The frequency of nodules in 4~6 cm is higher than that in <2 cm, and always a few nodules in 6~8 cm.
	Large	The frequency of nodules in >8 cm is high, whereas, few or no nodules are found in < 6 cm.
Abundance	Low	Abundance is <3 kg/m ² or weight of samples by free grab is less than 0.5 kg.
	Middle	Abundance is 3~5 kg/m ² or weight of samples by free fall grab is 0.5~1 kg.
	High	Abundance is > 5 kg/m ² or weight of samples by free fall grab is over than 1 kg.

Table 5. Correction factor for manganese nodule abundance according to facies on the southern part of KODOS area (After MOMAF, 2002)

group	facies	correction factor	R ²	No. of data
A	USL, USM, USH	1.4200	0.870	147
B	UML, UMM, UMH, ULL, ULM	1.4491	0.850	124
C	ULH, BSL, BSM, BSH, BMM, BLM, BLH	1.4169	0.866	56

R² = coefficient of determination

가 같은 해저면을 나타내고 있는 것으로 판단되는 자료는 class 2 (BC/FFG_{avg}. 0.5 ~ 2.0)이고 보정상수는 1.43이 된다. 이번 연구를 통하여 KODOS 남쪽광구의 해저면 영상분석시에 퇴적물의 피복률에 의한 망간단괴 점유율의 과소평가 우려에도 불구하고 MOMAF (2002)가 단괴의 분포양상에 따라서 연구하여 제시된 보정상수와 이번 연구에서 BC와 FFG의 상관관계로 도출된 보정상수는 매우 유사하게 나타났다. 따라서 이번 BC와 FFG의 부존률 비교를 통해서 도출된 1.43의 보정상수는 우리나라 남쪽광구에서 FFG로 획득한 망간단괴 부존률을 보정할 때 사용할 수 있는 대표적인 보정상수로 검증되었다고 판단된다.

사 사

현장 조사에 많은 도움을 주신 ‘온누리호’ 승조원께 감사드립니다. 본 연구는 국가연구개발사업인 “태평양 심해저 광물자원 개발 [광구관리 및 정밀평가] (PM56281, PM56282)”의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Chang, S.W., Choi, H.S., Kang, J.S., Kong, G.S., Lee, S.R. and Chang, J.H. (2004) SiO₂-CaO-MnO correlations and distributions of KODOS manganese nodules. *Ocean and Polar Research*, v.26, p.199-205.
- Chi, S.B., Hyeong K.S., Kim, J.U., Kim, H.S., Lee, G.C. and Son, S.K. (2003) Classification of Deep-sea sediment by geotechnical properties from the KODOS area in the C-C zone of the northeast equatorial Pacific. *Ocean and Polar Research*, v.25, p.529-543.
- Felix, D. (1980) Some problems in making nodule abundance estimates from sea floor photographs. *Marine Mining*, v.2, p.293-302.
- Handa, K. and Tsurusaki, K. (1981) Manganese nodules: relationship between coverage and abundance in northern part of Central Pacific Basin. In: *Deep Sea Mineral Resources Investigation in the Northern Part of Central Pacific Basin*, Geological Survey of Japan Cruise Report, n.15, p.184-217.
- Hennigar, H.F., Dick, R.E. and Foell, E.J. (1986) Derivation of abundance estimates for manganese nodule deposits : Grab sampler recoveries of ore reserves. *OTC 5237*, p.147-150.
- IFREMER (1989) Evaluation et etude des moyens necessaires a l'exploitation des nodules polymetalliques, Rapport final, TOME I, pp 1/1-5/10, unpublished.
- KORDI (1992) A report on '92 deep seabed mineral resources exploration. Seoul, 366p.
- KORDI (1993) A report on '93 deep seabed mineral resources exploration. Seoul, 496p.
- KORDI (1994) A report on '94 deep seabed mineral resources exploration. Seoul, 708p.
- Lee, G.C., Kim, J.U., Chi, S.B., Ko, Y.T. and Ham, D.J. (2008) Examination of correction factor for manganese nodule abundance using the free fall grab and box corer. 『The Sea』 *Journal of the Korean Society of Oceanography*, v.13, p.280-285.
- Lee, H.B., Chi, S.B., Park, C.K., Kim, K.H., Ju, S.J. and Oh, J.K. (2008) Physical properties of surface sediments of the KR(Korea Reserved) 1, 2, and 5 areas, northeastern equatorial Pacific. 『The Sea』 *Journal of the Korean Society of Oceanography*, v.13, p.168-177.
- MLTM (2011) A report on 2010 deep seabed mineral resources exploration. BSPM55650-2267-5, Seoul, 76p.
- MOMAF (1998) A report on '98 deep seabed mineral resources exploration. Seoul, 1209p.
- MOMAF (2002) A report on 2001 deep seabed mineral resources exploration. CRPM088-00- 1387-5, Seoul, 707p.
- MOMAF (2007) A report on 2006 deep seabed mineral resources exploration. CRPM38200- 1838-5, Seoul, 161p.
- MOST (1992) A study on the strategy for the development of deep seabed mineral resources. BSPG00143-2-452-5, 720p.
- OMCO (1992) Methods for correcting nodule abundance estimates based upon free fall grab recoveries. Exploration data transfer between Ocean Minerals Company and Korea Ocean Research and Development Institute. 450p.
- Park, C.Y., Chen, H.T. and Kang, J.K. (1996) Correction of nodule abundance using image analysis technique on manganese nodule deposits. *Economic and Environmental Geology*, v.29, p.429-437.
- Pattan, J.N. and Kodagali, V.N. (1988) Seabed topography and distribution of Manganese nodules in the central indian ocean. *Mahasagar*, v.21, p.7-12.
- Sharma, R. (1989a) Effect of sediment-water interface 'boundary layer' on exposure of nodules and their abundance: a study from seabed photos. *Journal of the geological society of India*, v.34, p.310-317.
- Sharma, R. (1989b) Computation of nodule abundance from sea bed photos. In: *Proc The 21st offshore Technology Conference*. 1-4 May 1989, Houston, TX, p. 201-212.
- Sharma, R., Kodagari, V.N. (1990) SPHINCS: A system for cataloguing and interpreting seabed photographs of nodules. *Marine Geology*, v.92, p.139-146.
- Usui, A. (1983) Regional variation of manganese nodule facies on the Wake - Tahiti transect: morphological, chemical and mineralogical study. *Marine Geology*, v.54, p.27-51.