

Note

자유낙하식 시료채취기(free-fall grab)의 개량에 따른 회수율 향상 검토

이근창* · 지상범 · 박정기 · 유찬민 · 고영탁 · 함동진

한국해양연구원 해저환경 · 자원연구본부
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29호

Review of Recovery Efficiency for Modified Free-fall Grab

Gun Chang Lee*, Sang-Bum Chi, Cheong-Kee Park, Chan Min Yoo,
Young-Tak Ko, and Dong Jin HamMarine Geoenvironment and Resources Research Division, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

Abstract : Deep-sea Resources Research Center (DRRC) has been using a free-fall grab (FFG) for the resource evaluation of polymetallic nodules in the KODOS (Korea Deep Ocean Study) area, NE Pacific, since 1992. A FFG model (Model 4200, Benthos) adapting one glass buoy system (diameter 17 inch, net buoyance 25.4 kg) has been used until 1993. Since then, DRRC has carried out a study to increase the recovery rate of FFG and it was found that a revised system adapting an additional buoy (diameter 10 inch, net buoyance 4.5 kg) gives improved results. The nodule sampling tests were performed using two different models for the same study area and the resulting recovery rates were compared. The result shows no distinct difference in recovery time between two models, but average recovery rate of the revised model was increased to 99.44% from 96.06% of the original model.

Key words : 자유낙하 시료채취기(free-fall grab), 회수율(recovery rate)

1. 서 론

태평양 심해저의 망간단괴 연구에서 가장 기초적이고 중요한 시료채취 기법 중 하나는 자유 낙하 시료채취기(free-fall grab, FFG)를 이용하는 것이다. 채취된 시료는 심해에 부존하는 망간단괴의 부존량 평가와 망간단괴의 성인 연구 등 광범위한 연구의 기초 자료 획득에 활용되어 왔다. 망간단괴의 탐사를 위해서는 특별한 종류의 그래프이 널리 사용되어진다. 망간단괴는 심해저면에 넓은 지역에 분포되어 있기 때문에, 시료 채취 시간을 단축하고 통계적인 해석과 시료분석의 정확성을 기하기 위해 세계적으로 특별한 형태의 채취기가 사용된다(Plüger and Kundendorf 1986). 이와 같은 목적을 위해 제작된 FFG는 60년대 말부터 사용되어져 왔으며, 효율성과 확실성을 높이기 위해 기

능적인 개선과 보완이 지속되어 왔다. 현재 세 가지 형태의 프랑스형, 미국형, FRG형의 FFG가 널리 사용되고 있다(Fellerer 1986).

해저면에 분포하는 망간단괴 채취를 위해 FFG 뿐만 아니라 박스코어러(box corer), 트롤(trawl), 드렛지(dredge) 등 여러 종류의 시료채취기가 사용되고 있으나, 이들 장비 운영에는 조사선내 윈치와 케이블을 운용할 수 있는 대형 연구선이 요구된다. 특히 평균 수심 5,000 m인 심해저에서 망간단괴를 채취하는 것은 천해저에서 오는 달리 장비의 이동 거리가 왕복 10,000 m로 매우 길다. 약 60 m/min의 속도를 가진 윈치를 이용해 장비를 투하·회수할 경우에 약 3시간 이상이 소요되며, 채취장비의 해저면 착지를 확인하기 위한 핑거시스템(pinger system)과 케이블 장력 변화 관찰을 위한 윈치미터 운용 등 많은 시간, 기술과 노력이 요구된다(지 등 1995). 이러한 문제점을 극복하기 위해 개발된 FFG는 연구선의 윈치 및 케이블 지원 없이 해

*Corresponding author. E-mail : gcllee@kordi.re.kr

수 중으로 자유낙하하여 해저면의 망간단괴를 채취하므로 짧은 시간 안에 여러 개의 채취기 사용이 가능한 효율적

인 시료 채취 장비이다.

심해저자원 연구센터에서는 1992년부터 종합해양연구선 온누리호를 이용하여 북동태평양의 한국 심해 연구지역(KODOS)에서 망간단괴의 분석 및 매장량 평가의 일환으로 FFG를 이용하여 망간단괴 시료를 채취하였다. 장비의 회수율을 높여 망간단괴 시료의 획득률을 향상시키고, 장비의 분실을 줄이고자 1994년도 탐사부터 기존의 장비를 개량하여 사용하여 왔다. 개량 전과 개량 후의 자료 중 두 탐사의 자료를 선택하여 비교·분석한 이유는 FFG의 투하지역 및 투하횟수를 비교적 동일한 조건에서 비교하기 위함이다.

본 연구에서는 심해용 유리 부이의 장착 수에 따른 장비의 회수율과 회수시간을 비교하여 장비 운영의 효율성을 알아보려고 한다.

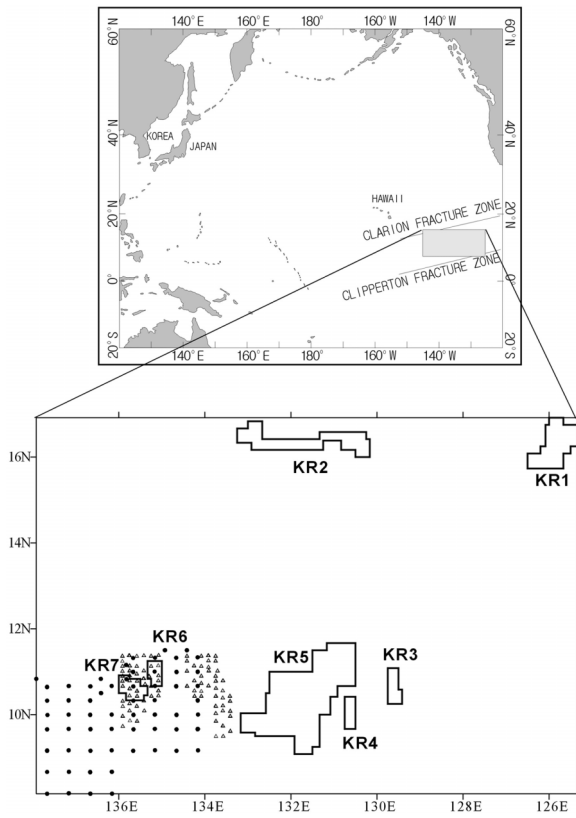


Fig. 1. Location maps showing the KODOS (Korea Deep Ocean Study) area. Sites for FFG sample in KODOS 92-1 cruise are filled circle, and KODOS 95-3 are open triangle.

2. 연구지역

본 연구지역은 KODOS 92-1 탐사(8°15'N~11°50'N, 134°10'W~137°55'W)와 KODOS 95-3 탐사(9°30'N~11°23'N, 133°25'W~135°55'W)가 수행된 지역으로 북적도 태평양 클라리온 균열대와 클리퍼튼 균열대 사이의 북서부에 위치하는 한국 심해연구지역 중 최종 광구가 확정된 KR6과 KR7 지역의 주변부이다(Fig. 1).

KODOS 92-1의 FFG 투하지역은 평균수심이 4,895 m (4,621 m~5,164 m)이며, KODOS 95-3 지역은 평균수심이 4,902 m(4,626 m~5,158 m)이다. 두 지역이 교차되는 지역의 지형은 전반적으로 평탄하며 7개의 독립된 해저산과 2개의 소규모 해저산이 분포한다. 나머지 지역은 지세

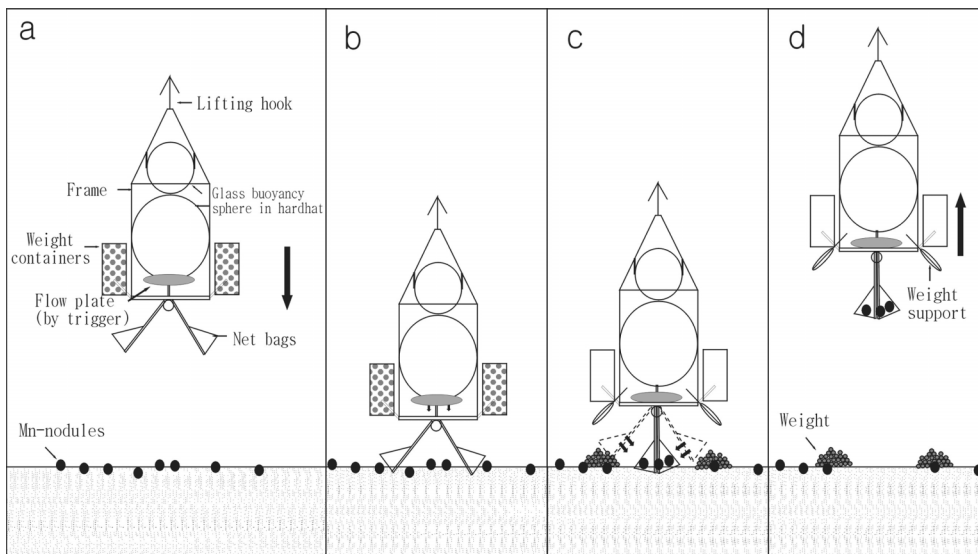


Fig 2. Cartoons showing four operation sequences of free-fall grab(FFG). FFG goes down in seawater (a), touches the bottom (b), gathers manganese nodules (c), and goes up to surface (d).

가 완만한 평탄한 구릉과 계곡으로 이루어져 있다. 구릉의 정상에서 계곡에 이르는 완만한 경사면은 클라리온 클리퍼톤 해역에서 나타나는 북북서-남남동의 방향성이 뚜렷하다(통상산업부 1995).

3. 장비구성

FFG는 (1) 부력부(float section), (2) 밸러스트부(ballast section), (3) 취부(sampling section), (4) 작동 기계부(release mechanism section)로 구성된다(Fig. 2).

(1) 부력부는 중력에 의하여 해저면으로 낙하된 채취기가 망간단괴를 채취한 후 해수면으로 상승하도록 부력을 제공하는 부분임.

이 부분은 개량 전과 개량 후의 모습이 변화된 부분으로, 개량 전은 직경 17 inch, 부력 25.4 kg인 심해용 유리부이 1개만이 사용되었다(Fig. 3).

개량 후는 직경 10 inch, 부력 4.5 kg인 심해용 유리부이를 추가하여 사용하였으며, 2개의 유리부이를 효과적으로 연결하기 위하여 틀(frame)을 제작·연결하였다(Fig. 3).

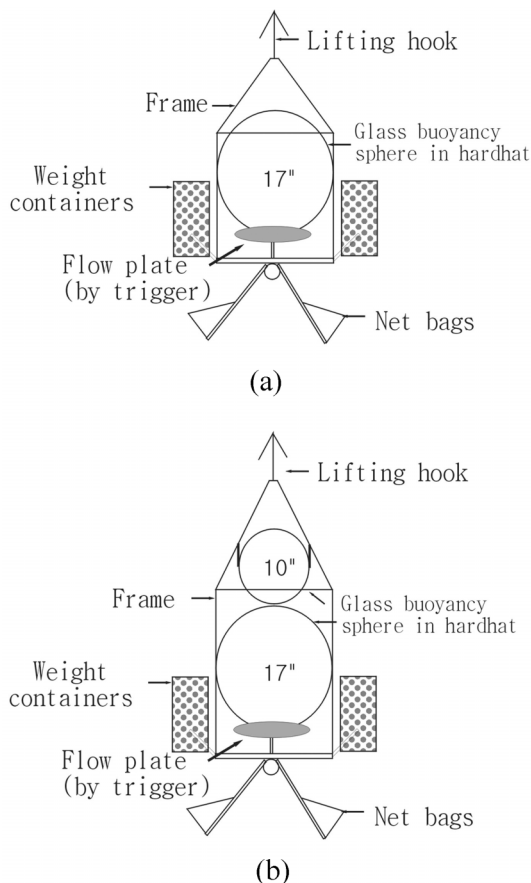


Fig. 3. Comparison of FFG's before (a) and after (b) modifying.

(2) 밸러스트부는 채취기의 하강을 유도하고, 시료 채취 후 해저면으로 weight를 방출하여 부력을 발생시키는 부분으로 시료 채취부 위쪽, 부이의 양쪽에 위치한다.

(3) 취부는 시료 채취기가 해저면에 닿으면 밸러스트부와 함께 triggering되면서 망간단괴를 채취하는 부분으로서 채취기 입구(net bag)는 망으로 형성되어 망간단괴와 함께 채취된 퇴적물은 부상중에 해수에 씻겨지도록 구성되어 있다.

(4) 작동 기계부는 채취기 입구의 여닫이 기능 및 밸러스트부의 weight를 방출하는 기능을 가지고 있으며, 모두 스테인레스 강철(stainless steel)로 제작되어 있다.

4. 작동원리

연구선상에서 조립된 FFG는 투하 전 채취기 양쪽의 weight 용기(containers)에 약 40 kg의 weight를 충전한다. weight로 충전된 시료채취기는 해수로 투하되어 해저면까지 자유 낙하한다. 투하시 채취기 입구는 개방된 상태를 유지해야 하며, 장비 이동간에 triggering이 되지 않도록 일정 수압이 작용할 때까지 triggering 방지를 위한 2차 안전장치를 설치한다. 투하된 FFG는 flow plate가 해수에 닿으면서 위쪽으로 올라가 flow plate에 연결된 release arm과 2차 안전장치에 고정된 release arm 2개가 벌려진 망의 상태를 유지시키며, 해저로 낙하한다. 일정 압력에 도달하면 2차 안전장치는 이탈하고, flow plate에 연결된 release arm에 의해 그 상태를 유지하게 된다. FFG가 해저면에 닿으면 중력에 의해 flow plate가 아래로 내려오며, 연결된 release arm이 triggering 되어 채취기 망이 닫히게 된다. 이때 양쪽의 weight 용기에 들어있던 weight가 빠져나가고 시료를 채취한 채취기는 부이의 자체부력만으로 해수면으로 상승하게 된다(Fig. 2). 채취기 입구는 망으로 쌓여있으며, 약 0.2 평방미터 넓이의 해저면에서 시료를 채취한다.

5. 현장운영

KODOS 92-1 탐사에서는 74정점에서 FFG를 이용하여 시료를 채취하였으며, 이 FFG는 Benthos사의 제품인 Net buoyancy 25.4 kg인 Model Sphere 2040-17V Buoy 1개를 본체에 부착하여 사용하였다. KODOS 95-3 탐사에서도 90정점에서 FFG를 이용하여 시료를 채취하였으나, 이 당시의 FFG는 Net buoyancy 4.5 kg인 Model Sphere 2040-10V Buoy를 추가하여 사용하였다. 또한 2개의 부이를 효과적으로 연결하기 위하여 틀(frame)을 제작·연결한 개량된 FFG를 사용하였다(Fig. 3).

현장에서의 망간단괴 탐사는 시료를 채취하기 전에, 각

Table 1. Specification of the free-fall grab (FFG).

Sections	Items	Specification	
		Model 2040-17V	Model 2040-10V
Float section	Hard hat weight in air	2.95 kg	0.74 kg
	Weight in air	17.7 kg	4.1 kg
	Net buoyance	25.4 kg	4.5 kg
	Depth rating	6,700 m	6,700 m
	Outside diameter	43.2 cm	25.4 cm
	Inside diameter	40.4 cm	23.6 cm
	Frame material	Stainless steel	Stainless steel
Ballast section (without weight)	Dimension	33 cm × Outside diameter 16.8 cm	
	Weight in air	3.0 kg × 2ea	
	Material	PVC	
Sampling section	Sampling area	0.2 m ²	
	Material	Stainless steel construction	
Release mechanism section	Weight in air	18 kg	
	Material	Stainless steel	

정점 간 측선을 따라 다중빔 음향 측심기(Seabeam 2000)을 이용한 폭 10~12 km의 평면적 지형조사와 EA-500 음향측심기를 이용한 측선 단면상의 수심 조사를 병행하여 비교하였고, 시료채취 정점에 도착하면 약 1 km 정도 지형조사를 실시하여 투하지점의 적정성을 판단한 후, 측선을 따라 되돌아가면서 각 정점 당 4개의 FFG를 200~300 m의 간격으로 투하하여 단괴분포의 연속성을 조사하였다(Fig. 3). 한편 FFG에 의한 단괴의 채취량과 해저의 실제 단괴 부존량을 비교·분석하기 위하여 2개의 FFG에는 단발형 심해저카메라를 부착하여 해저면 사진을 촬영하였다(통상산업부 1995). KODOS 92-1 탐사에서는 정점당 4-5개의 FFG를 투하하였으며, 그 중 1개의 FFG에 단발촬영용 심해저카메라를 부착하여 해저면 사진을 촬영하였으나, 카메라 부착 FFG에는 2개의 부이를 부착하였기 때문에 KODOS 92-1의 자료에서 제외시켰다.

6. 결과 및 토의

동일한 연구지역에서 개량 전과 개량 후의 FFG를 이용한 결과 장비의 회수시간은 큰 차이가 없었으나, 장비의 회수율이 뚜렷히 향상됨을 보여준다(Table 2).

KODOS 92-1의 회수시간 결과는 74정점에서 195개의 FFG의 낙하·회수시간을 계산한 결과이며, KODOS 95-3은 90정점에서 356개의 낙하·회수시간 자료를 계산한 결과이다(Table 2). KODOS 92-1 탐사와 KODOS 95-3 탐사에서 투하시킨 FFG의 평균 회수시간은 각각 3시간 6분과 3시간 2분으로 4분의 차이밖에 나지 않는다. 심해용

Table 2. Comparative results of free-fall grab (FFG) exploration between the KODOS 92-1 and 95-3 cruise.

Survey area	Average recovery time		Recovery rate (%)
	including outliers*	excluding outliers*	
KODOS 92-1	3 hr. 6 min.	3 hr. 1 min. ±25 min. (1s ^{**})	96.06
KODOS 95-3	3 hr. 2 min.	3 hr. ±12 min. (1s ^{**})	99.44

outlier*: data lying outside of ±1 standard deviation.
1s^{**}: standard deviation.

유리 부이를 1개 장착한 개량전 KODOS 92-1 탐사와 틀(frame)과 부이를 개량하여 사용한 KODOS 95-3 탐사시 FFG의 회수시간이 차이가 나지 않는 이유는 장비가 해저면 착지시 weight를 버리고 해수면으로 상승하는 부력은 증강되었으나, 낙하시 해저면으로 하강할 때 같은 양의 weight를 주었기 때문에 추가된 부력에 의한 하강 속도의 저하에 기인한 것으로 사료된다.

일반적으로 평균치를 크게 벗어나는 자료로 인하여 평균 회수시간의 오차를 줄이고자 KODOS 92-1과 KODOS 95-3의 회수시간 자료 중 각각의 산포도를 나타내는 표준편차를 구하여 그 범위의 밖에 놓인 자료들을 제외하고, 나머지 자료들을 이용하여 계산하였다. 그 결과 KODOS 92-1은 59정점에서 155개의 낙하·회수시간 자료를 사용하였으며, KODOS 95-3은 79정점에서 226개의 낙하·회수시간 자료를 사용하여 계산한 값이다(Table 2). KODOS

92-1 탐사와 KODOS 95-3 탐사에서 장비의 평균 회수시간 차이는 1분 정도(3시간 1분과 3시간)로 오차요인을 제외한 값들도 역시 장비에 부착한 심해용 유리 부이 수에 따른 회수시간에 차이가 없음을 보여 주었다(Table 2). 표준편차를 벗어나는 자료들 중 회수시간이 빠른 것 들은 FFG가 선상에서 투하되어 하강할 때 weight container에 연결된 arm과 trigger의 접촉 불량으로 weight인 washer slug가 해저면에 닿기 전에 방출되어 중간에 부상한 것으로 사료된다. 또한 회수시간이 늦은 것 들은 특수한 지형적 상황으로 trigger는 되었으나 밸러스트부(ballast section)의 밀판이 완전히 열리지 않아 weight인 wash slug가 천천히 밖으로 빠져나오므로써 회수가 늦어지는 경우, 함께 투하되었던 다른 자유낙하식 시료채취기 보다 많은 양의 시료를 채취하여 부상함에 따라 늦어지는 경우 등으로 판단된다. FFG의 회수시간에 직접적인 영향을 미치는 수층환경특성 자료 중 연구해역의 저층해류는 약 1~7 cm/sec의 북향류가 강약으로 반복되고 있는 것으로 보고된다(해양수산부 1996). 본 연구에서 비교한 KODOS 92-1과 95-3에 대한 저층해류의 직접 측정된 자료는 획득하지 못하였으나, 그 동안의 연구결과로 볼 때 연구해역은 7 cm/sec(평균 1.8~2.9 cm/sec) 이하의 유속이 나타나는 것으로 판단된다(일본광업사업단 1995). 따라서 FFG의 회수시간에 해류에 의한 영향은 크게 미치지 않는 것으로 사료된다.

FFG가 해저면에 투하되어 분실하는 조건은 여러 가지 요인을 예상할 수 있다. 연속적으로 부이를 사용함에 따라서 glass sphere에 미세한 균열이 발생하여 파손됨으로 부력을 상실한 경우, 해저면이 불규칙하여 FFG가 해저면 착지시 수평을 유지하지 못해 triggering이 되지 않는 경우, 퇴적물의 성향에 따라 시료채취기가 너무 깊이 관입되어 부상하지 못하는 경우, 취부의 입구가 그물망으로 쌓여 있어 암반 등에 걸려 부상하지 못하는 경우, 회수시 해황이 악화되어 부상한 시료채취기를 못 찾는 경우 등이 포함된다. 상기의 분실 요인은 회수율에 영향을 미친다.

KODOS 92-1의 회수율 결과는 투하한 203개의 FFG 중 8개를 분실하여 계산한 결과이며, KODOS 95-3의 회수율 결과는 투하한 358개 중 2개를 분실하여 계산한 결과이다(Table 2). 회수율은 KODOS 92-1 탐사와 KODOS 95-3 탐사에서 뚜렷이 구별되는 점을 보인다. KODOS 92-1 탐사는 장비의 회수율이 96.06%이며, KODOS 95-3 탐사는 99.44%로 약 4%의 차이를 보인다. 이는 회수시간은 큰 차이를 보이지 않으나 개량된 장비에 심해용 유리 부이를 2개를 장착함으로써 장비가 시료를 채취한 후 해

수면으로의 상승시 우려되는 다량의 시료채취로 인한 장비의 무게 증가, 시료 채취시 장비가 해저퇴적물에 관입되어 상승시 추가부력의 필요성 등 제반 문제들을 해결해줌으로써 회수율이 향상된 것으로 사료된다.

7. 결 론

평균적으로 한해의 심해저 탐사시 FFG 사용은 탐사에 따라 차이는 있으나 약 700회에 걸쳐 투하했으며, 이를 4%의 분실율로 환산하면 FFG 28대를 더 잃어버리는 결과를 초래한다. 1대당(buoy 2 set, frame, body, accessory 포함) 평균 6,000,000원으로 계산했을 때 연간 약 168,000,000원의 경제적 손실을 불러온다.

결론적으로 FFG의 개량은 회수시간에는 영향을 주지 않으나, 회수율을 높여 망간단괴 시료의 획득율을 향상시켰고, 경제적인 측면에서도 장비제작 비용의 상당한 절감 효과를 가져왔다.

사 사

이 연구는 해양수산부가 지원하는 '태평양 심해저 광물 자원 개발사업'의 일환으로 수행되었다. 연구 수행에 많은 도움을 주신 심해저자원연구센터 연구원 여러분과 온누리호 승조원 여러분께 감사드리며, 심사와 교정에 많은 시간을 할애해 주신 심사자께 감사드립니다.

참고문헌

- 일본 금속광업사업단. 1995. 1994년도 망간단괴 채광 환경조사 보고서. 203 p.
- 지상범, 어영상, 정희수, 박동원, 이근창. 1995. 피스톤식 자유낙하 주상시료 채취기. *한국해양학회지*. 30(4), p. 365-370.
- 통상산업부. 1995. 95 태평양 광물자원탐사 보고서. 763 p.
- 해양수산부. 1996. 96 심해저 광물자원탐사 보고서. 954 p.
- Fellerer, R.M. 1986. Exploration, Mining, and Processing. p. 167-208. In: *The manganese nodule belt of the Pacific Ocean*. eds. by P. Halbach, G. Friedrich, U. von Stackelberg. Ferdinand Enke Verlag Stuttgart, Stuttgart.
- Plüger, W.L. and H. Kunzendorf. 1986. Marine geochemical exploration method. p. 121-156. In: *Marine mineral exploration*. ed. by H. Kunzendorf. Elsevir, Amsterdam.

Received Apr. 16, 2004

Accepted May 12, 2004