

## 망간단괴의 분화율과 망간단괴 분말 및 해저퇴적물의 물리적 특성

### Shattering Ratio of Manganese Nodule and Physical Properties of Powdered Manganese Nodule and Sea Bottom Sediment

최현수 (Hunsoo Choi)\* · 강중석 (Jung Seock Kang) · 장세원 (Se Won Chang) ·  
고상모 (Sang-Mo Koh) · 엄인권 (Inkwon Um)

한국지질자원연구원

(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon, 350-305, Korea)

**요약:** 망간단괴의 분말과 채광과정에서 함께 유입되는 해저퇴적물이 양광과정에 어떠한 영향을 끼치는지 파악하기 위하여 망간단괴의 분화정도와 망간단괴의 분말과 해저퇴적물의 물리적 특성을 파악하였다. 망간단괴의 자체분화율과 파쇄분화율은 각각 약 27%와 3%로, 총 분화율은 약 30% 정도이다. 망간단괴의 탁도는 초기에는 매우 높은 값(약 3,100)을 보이나 시간에 따라 급격히 감소하여 1 h 후에는 반으로(약 1,570) 줄어든다. 해저퇴적물 시료는 초기의 약 1,850의 높은 값에서 1 h 후 1,310, 2 h 후 약 1,110으로 빠른 감소를 보이나 망간단괴에 비해 느린 감소를 보인다. 그러나 시추용 이수제로 사용되는 Na-벤토나이트는 초기 820에서 1 h 후 730, 2 h 후 700으로 매우 변화가 적다. 망간단괴의 점도는 1.4~1.5 cP이며, 해저퇴적물의 점도는 1 cP 미만으로 매우 낮다. 반면 Na-벤토나이트의 점도는 초기 37.2에서 시간이 갈수록 증가하여 30 min 후에는 86.4cP의 값을 보인다. 망간단괴의 탁도 초기 값이 높은 것은 망간단괴 자체의 짙은 색깔에 의한 것으로 생각되며, 높은 비중으로 쉽게 침전되어 탁도의 빠른 감소를 보인다. 해저퇴적물은 매우 미립으로 쉽게 분산되어 초기에는 높은 값을 보이나 물과 결합하여 젤을 형성하기보다 응집되어 쉽게 침전되므로 탁도의 빠른 감소를 보이게 된다. 그러나 이들 망간단괴 및 퇴적물의 구성광물은 거의 비팽윤성으로 젤을 형성하지 않아 매우 낮은 점도 값을 보인다. 이러한 특성으로 미루어 보아 망간단괴의 파쇄된 분말이 양광과정에서 양광관이나 수중펌프의 내부에 강하게 점착되어 스케일링을 형성할 가능성은 비교적 낮을 것으로 생각된다. 반면 채광과정에 유입된 해저퇴적물도 그 특성상 망간단괴의 부양을 쉽게 할 수 있는 이수로서의 역할은 거의 할 수 없을 것으로 생각되며, 매우 미립이므로 양광 후 분리는 쉬우나 해상에서 폐기처리 할 경우 환경적인 문제의 가능성을 있을 것으로 사료된다.

**주요어:** 망간단괴, 해저퇴적물, 분화율, 물리적 특성

**ABSTRACT:** To understand the effects of the powdered manganese nodule and sea bottom sediment pumped up with nodules on the mining process, the shattering ratio of manganese nodule and their physical properties are analyzed. The self shattering ratio and crushing shattering ratio are about 27% and about 3%, respectively. Then total shattering ratio is about 30%. The initial turbidity of the pow-

\*교신저자: hunsoo@kigam.re.kr

dered manganese nodule and the bottom sediment show high, i.e., about 3,100 and 1,850 respectively. But their turbidities decrease rapidly with time. After 1 hour, turbidity of the powdered manganese nodule drops to about 1,570 and that of the bottom sediment to 1,310. The turbidity of Na-bentonite changes from 820 to 730 after 1 h and to 700 after 2 h. The viscosity of powdered manganese nodule is 1.4~1.5 cP, and the viscosity of bottom sediment is less than 1 cP. The viscosity of Na-bentonite is initially 37.2 and increase with time to 86.4 cP after 30 min. The high initial turbidity of powdered manganese nodule is due to dark color of the powder. The high specific gravity makes rapid precipitation and then decreases the turbidity rapidly. The bottom sediment shows high initial turbidity because of easy suspension with very fine particle size. But it cannot be hydrated and formed gel in suspension, then it is easily precipitated. However Na-bentonite is hydrated to the expended state and makes gel state, then it shows high turbidity and high viscosity. These physical properties of the powdered manganese nodule suggest that the powder of manganese nodule should not make scaling inside of lifting pipe or pump. And the bottom sediment lifted up with manganese nodule should not play the role of drilling mud such as Na-bentonite.

**Key words :** manganese nodule, deepsea sediment, shattering ratio, physical properties

## 서 론

우리나라의 심해저 광물자원의 개발은 1992년도부터 북동태평양 C-C zone에서 탐사를 시작하여 연구를 수행하여 왔다. 그 결과 2004년도에는 우리나라의 단독개발광구 75,000 km<sup>2</sup>를 확정하였으며, 현재는 정밀탐사와 환경탐사를 수행하고 있으며, 채광 및 제련에 관한 연구도 꾸준히 수행하여 최근에는 근해역에서 양광시험을 성공적으로 수행하기도 하였다. 이러한 연구의 일환으로 망간단괴의 물리적 특성이 채광이나 제련에 어떠한 영향을 미치는지에 관한 연구를 2001년도부터 수행하여 제련공정에 영향을 미치는 망간단괴의 화학조성 분포를 파악하고 하였다(장세원 외, 2004).

망간단괴에 대한 광물학적 및 지화학적 연구나 조직과 성인에 관한 연구는 70, 80년대에 많은 연구가 이루어져 왔다. 국내에서의 연구는 90년대에 이르러 시작되어 조직에 따른 광물조성 및 화학조성의 차이(최현수 외, 2000)와 연대측정을 통한 성장률의 차이에 관한 연구 결과(Lee et al., 2001) 등이 보고된 바 있다. 또한 해저퇴적물의 물리적 특성에 관한 연구는 지상범 등(2000)에 의해 시작된 이후로 최근까지(이현복 등, 2006) 꾸준히 연구되고 있다. 그러나 현재까지 연구된 해저퇴적물의 물리적 특성이란 모두 지질공학적인 특성만을 다루어, 해저퇴적물의 전단강도가 퇴적물의 심도별, 위·경도별 어떠한 변화가 있는지에 주 관심을 보여 왔다.

기존에 알려진 바와 같이 망간단괴란 미립의 산화망간광물이나 산화철광물 등이 동심원상으로 침전되어 형성된 괴상집합체로서 매우 잘 깨어지며, 특히 건조되면 저절로 부서지는 경향을 보이기도 한다. 망간단괴의 채광과정을 살펴보면 채광기의 집광기를 통하여 채집되어진 망간단괴는 파쇄기에 의해 2 cm 이하로 파쇄되어(최종수 등, 2006), 유연판, 버퍼, 양광펌프, 양광관 등을 거치며 해상으로 이송된다. 이러한 과정에서 망간단괴는 파쇄기에 의해 파쇄되며, 서로 부딪히거나 수력펌프의 임펠라에 부딪혀 미립의 분말로 파쇄될 것으로 생각된다. 그러나 현재까지 집광과정에서 망간단괴가 얼마나 작은 입자로 얼마나 많이 분쇄되어지는지 전혀 알려져 있지 않다. 그 결과, 현재의 양광 및 채광기술 연구에 있어 많은 실험들과 모델분석이 직경 2 cm 정도의 모조단괴를 이용하고 있다(윤치호 등, 2006; 홍섭 등 2006). 이러한 결과는 실제 망간단괴를 이용한 실해역 시험이나 개발 시에 중대한 오류를 유발할 수 있으며, 망간단괴의 또 다른 회수공정이 필요할 수도 있다.

그러므로 망간단괴의 분쇄과정에 관한 연구가 빨리 이루어져 분쇄과정과 그 결과에 대한 연구결과가 축적되어 이후의 채광기술 개발에 활용될 수 있도록 하여야 할 것이다. 망간단괴가 채광과정에서 얼마나 미립의 입도로 분쇄되어지는가를 나타내는 용어는 기존에 정의된 바가 없어 본 연구에서는 이를 “분화율(shattering

ratio)”이라는 용어를 사용하고자 한다. 또한 망간단괴가 채광과정에서 분화되는 과정을 고려하여, 파쇄기를 이용해 분쇄할 때 분화되는 정도를 “파쇄분화율(crushing shattering ratio)”로, 양광관 내에서 서로 부딪히거나 관 내벽에 부딪혀서 분화되는 정도를 “자체분화율(self shattering ratio)”로 표기하고자 한다.

또한 망간단괴의 채광과정에서는 부유된 해저 퇴적물이나 망간단괴에 부착된 해저퇴적물이 함께 집광기로 유입되어진다. 그러므로 양광과정에서의 망간단괴는 채광된 덩어리로서의 망간단괴가 아니라 미세분말로 파쇄된 망간단괴와 미립의 해저퇴적물이 함께 섞이어 양광되어진다. 이러한 분말이 관내에서 어떠한 거동을 하는가는 큰 단괴로서의 거동과 많은 차이를 보이며, 해저퇴적물의 존재는 양광과정의 또 다른 요인으로 작용할 수 있다. 이러한 미세입자와 물의 혼합물의 거동은 기존 점토광물에서 많이 활용하고 있는 물성인 산도, 점도 및 탁도를 파악함으로써 예측할 수 있을 것으로 사료된다. 그러므로 본 연구는 파쇄된 작은 입자로서의 망간단괴와 집광과정에서 유입될 수 있는 해저퇴적물의 물성을 분석하고 심부시추 시 사용되는 이수제의 물성과 비교하여 양광과정에 미치는 영향을 파악하고 망간단괴의 회수과정에 대한 기본 자료를 제공하고자 한다.

## 시료 및 연구방법

본 연구에 사용된 망간단괴는 북동태평양 C-C 구역의 우리나라 광구에서 1998년, 2002년 및 2003년도 정밀탐사 시에 자유낙하식 시료채취기(Free Fall Grab)와 베스트롤(Beam Trawl)을 이용하여 획득한 것이다. 분화율 측정을 위한 시료는 크기에 따라 분류하여 사용하였으며, 분말시료는 사기유발을 이용하여 분쇄한 후 표준체를 이용하여 200 mesh 이하의 분말시료만을 선택하였다. 이 실험에 사용된 망간단괴시료는 대체로 거친 표면조직을 갖는 타원형 또는 원반형의 단괴들로 우리나라 광구 중 부존율이 높고 가장 우선적으로 개발대상이 될 수 있는 단괴들이다. 사용된 단괴시료의 화학분석 결과는 표 1과 같다.

분화율은 양광과정의 양광관 내에서 서로 부딪히거나 관 내벽에 부딪혀 깨어지는 현상과

분쇄기를 이용한 분쇄과정을 재현하여 그 깨어진 정도로 측정하였다. 그러므로 이와 유사한 환경을 만들기 위하여, 폐쇄된 용기 내에 물과 망간단괴를 일정한 용적비로 채우고 흔들어서 분쇄시키는 방법과 죠크러셔(Jaw Crusher)에 의한 분쇄법을 사용하였다. 자체 충돌에 의한 분쇄실험은 회전밀(rotary mill)과 진동밀(vibrating mill)의 분쇄매체인 볼(ball) 또는 로드(rod)를 제거한 용기와 동력만을 활용하였다. 망간단괴의 용적비와 분쇄시간을 달리하여 각각 실험을 실시한 후 분쇄된 시료는 표준체를 사용하여 4 ~ 1.41 mm, 1.41 ~ 0.71 mm, 0.71 ~ 0.35 mm, 0.35 ~ 0.088 mm와 0.088 mm 이하의 분말까지 입도별로 분리하였다. 입도별 분리시료 중 0.35 mm 이하의 입도로 분리된 시료의 함량의 전체 시료에 대한 비율을 분화율로 표시하였다(최현수 등 2007).

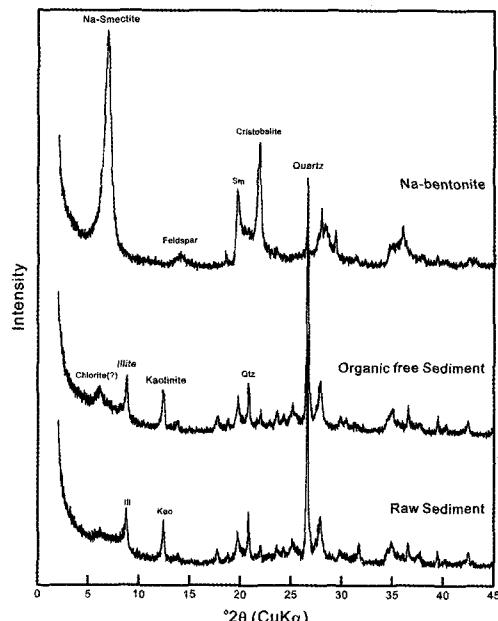
해저퇴적물 시료는 2006년도 정밀탐사기간 동안 다중주상시료채취기(MC, multiple corer)를 통하여 채취된 시료 중 최상부 암갈색 점토층의 상부 10 cm 시료를 분리하여 채취한 것이다. 이 층은 암갈색(10YR4/3)의 규질연니층으로 함수율이 매우 높은 거의 고화되지 않은 층이다. 그러므로 망간단괴 채광 시 쉽게 교란되어 망간단괴와 함께 양광시스템에 유입될 것으로 생각되는 퇴적물이다. 해저퇴적물의 X-선회절분석에 의하면 대부분이 석영으로 구성되어 있으며, 일라이트, 캐오리나이트, 장석 및 녹니석을 소량 수반하고 있다(그림 1). 화학분석결과도  $\text{SiO}_2$ 가 52.3%로 매우 높은 함량을 보인다(표 1).

또한 이들의 물성을 비교하고자 이수로 많이 사용되고 있는 Na-벤토나이트를 함께 분석하였다. Na-벤토나이트는 국내 Süd-Chemie사에서 제조판매하고 있는 제품을 이용하였다. Na-벤토나이트는 Na-스메타이트를 주구성 광물로 하며, 크리스토발라이트, 석영, 장석을 수반하고 있다(그림 1).

망간단괴와 해저퇴적물의 물리적 특성을 파악하기에 앞서 이들 시료의 입도분포를 파악하였다. 시료에 따라 유기물제거 및 생규소 제거 처리를 하여 함께 입도분석을 하였으며, 입도분석방법은 피펫법과 레이저 회절 입도분석기(LPA)를 함께 사용하였다. 레이저회절 입도분석기는 한국지질자원연구원의 Microtrac사의

**Table 1.** Chemistry of manganese nodule and sea bottom sediment

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	L.O.I	Cu	Ni	Co	Zn
manganese nodule	17.05	5.52	0.61	0.33	8.91	35.06	3.16	2.19	3.16	1.50	14.88	0.69	1.04	0.21	0.10
sea bottom sediment	52.33	12.44	0.59	0.41	7.44	1.73	3.32	1.40	5.26	2.79	12.14	0.09	0.05	0.00	0.02

**Fig. 1.** X-ray diffraction patterns of sea bottom sediment and Na-bentonite.

S3500 모델을 사용하였으며, 0.2% Calgon 용액을 주입하여 5 mL로 맞춘 후 초음파 세척기를 이용하여 완전히 분산시켜 분석하였다.

분말시료들에 대한 물리적 특성은 일반적인 점토에서 측정되는 기본 물성인 산도(pH), 점도(viscosity) 및 탁도(turbidity)를 측정하였다. 산도(pH)는 시료 각 4 g씩과 증류수 36 mL를 섞어서 10% 농도의 혼탁액을 제조하여 초기산도를 측정하고 산도 값이 안정화되기를 기다려 다시 측정하였으며 24 h 후 최종 산도를 측정하였다. 혼탁액을 만들기 위한 증류수의 산도는 5.7이며, 산도 측정에 사용된 기기는 미국의 Orion Research Inc.에서 제조한 Model 301이다. 망간단괴 분말의 점도는 시료 3 g과 증류수 27 mL를 섞은 10% 농도의 혼탁액을 만들어 5

분간 분산시킨 후에 2분 후와 1 h 후에 측정하였으며, 퇴적물과 이수의 점도는 시료 2.5 g과 증류수 47.5 mL를 섞어 5% 농도의 혼탁액을 만들어 5 min간 분산시킨 후에 초기점도를 측정하고, 5 min, 10 min 및 30 min 후의 점도를 각각 측정하였다. 실험에 사용된 기기는 Brookfield DV II<sup>+</sup> Viscometer, USA이다. 탁도는 단괴분말시료 0.15 g과 증류수 30 mL를 섞은 약 0.5% 농도의 혼탁액을 만들어 혼든 후에, 1 h 동안 적절한 간격으로 측정하였다. 탁도 측정은 2회 수행하였다. 퇴적물 및 이수의 탁도는 시료 0.05 g과 증류수 30 mL를 섞은 약 0.2% 농도의 혼탁액을 만들어 혼든 후에, 2 h 동안 20 min 간격으로 HACH 2100N Turbidimeter, USA를 사용하여 측정되었다. 이들 분석은 한국지질자원연구원의 장비를 이용하여 시행되었다.

## 결과 및 토론

### 분화율

회전밀에 의한 자체분화율은 표 2에, 진동밀에 의한 자체분화율은 표 3에 각각 종합하였다. 회전밀이나 진동밀에 의한 자체분화된 망간단괴의 입도별 분포를 살펴보면, 주로 4 mm 이상과 0.088 mm 이하의 입도로 분화되어진다. 4~0.088 mm의 입도로 분화된 분말은 대부분 1% 미만의 값을 보이며, 가장 많은 경우 2.3%에 그치고 있다(그림 2). 분화시간에 따른 분화율의 변화를 살펴보면, 15 min일 때 평균 27.0%, 25 min일 때, 평균 24.1%, 35 min일 때 평균 28.7%의 값을 보인다. 그러나 25 min 분화실험의 경우 R-09와 R-10시료가 비정상적으로 작은 값을 보이는데 이는 망간단괴의 조성 또는 핵의 성질에 관련된 것으로 보인다. 이를 제외한 25 min 분화 시 평균 분화율은 27.5%의 값을

**Table 2.** Self shattering ratio by rotary mill

operating time (min)	weight (g)	volumetric bulk density (%)	size fraction (%)				shattering ratio (%)	
			>4 mm	4~0.35 mm	0.35~0.088 mm	<0.088 mm		
R-01	13	1,233	10.75	75.42	0.45	0.36	23.76	24.13
R-12	15	1,224	10.75	71.10	0.16	0.25	28.49	28.73
R-15	15	1,248	11.11	71.57	0.20	0.16	28.07	28.23
R-21	15	1,216	10.57	77.28	0.16	0.29	22.27	22.56
R-02	13	1,943	18.06	73.08	1.16	1.18	24.57	25.76
R-13	15	2,049	17.65	70.05	0.32	0.44	29.19	29.63
R-16	15	1,931	17.24	73.53	0.31	0.65	25.51	26.16
R-22	15	1,947	18.06	76.00	0.51	0.33	23.15	23.48
R-03	15	2,470	24.09	70.12	0.20	0.67	29.01	29.68
R-14	18	2,602	23.64	67.25	0.40	0.79	31.56	32.35
R-26	15	2,718	24.54	73.40	0.61	0.57	25.42	25.99
R-04	25	1,187	10.75	75.82	0.29	0.34	23.55	23.89
R-10	25	1,282	11.11	89.73	0.39	0.27	9.60	9.88
R-24	25	1,262	10.57	72.53	0.36	0.28	26.84	27.11
R-05	25	1,817	17.65	79.23	0.41	0.69	19.67	20.36
R-11	25	2,018	17.24	66.24	0.20	0.05	33.51	33.56
R-25	25	2,048	18.06	66.90	0.44	0.49	32.17	32.66
R-09	25	2,414	23.64	86.99	0.99	0.97	11.04	12.01
R-20	25	2,489	24.09	66.56	0.34	0.72	32.37	33.10
R-07	35	1,246	11.11	77.07	0.20	0.32	22.41	22.73
R-18	35	1,306	10.75	72.74	0.31	0.23	26.72	26.95
R-27	35	1,282	10.57	69.40	0.16	0.19	30.25	30.44
R-08	35	2,012	17.24	72.08	0.22	0.60	27.10	27.70
R-19	35	2,055	17.65	68.02	0.32	0.24	31.42	31.67
R-28	35	2,089	18.06	70.24	0.55	0.74	28.47	29.21
R-06	35	2,478	24.54	79.31	0.69	0.38	19.62	20.00
R-17	35	2,477	23.64	66.41	0.24	0.87	32.48	33.35
R-23	35	2,686	24.09	62.91	0.47	0.86	35.77	36.62
average				0.40	0.50	26.21	26.71	

보이며, 분화시간에 따라 분화율이 증가하는 경향을 잘 보인다. 단괴의 용적율에 따른 분화율의 변화를 살펴보면, 용적율 약 10%에서 평균 26.5%, 용적율 약 18%에서 평균 28.0%, 용적율 약 24%에서 30.2%로 용적율에 따른 분화율의 증가가 뚜렷이 나타난다.

진동밀에 의한 자체분화율은 분화시간 및 용적율과 뚜렷한 상관관계를 보이지 않으며, 거의

유사한 값을 갖는다. 이는 진동에 의한 망간단괴의 분화는 각 망간단괴의 물리적 특성에 더 좌우되는 것으로 사료된다. 일부 낮은 용적율에서 높은 분화율을 보이기도 하는데 이는 낮은 용적율에 의한 단괴의 운동성이 좋아 더 잘 분화된 것으로 보인다. 전체적으로 자체분화율은 10%에서 58%까지 매우 넓은 값의 분포를 가지나 회전밀에 의한 자체분화율과 진동밀에 의한

**Table 3.** Self shattering ratio by vibrating mill

operating time (min)	weight (g)	volumetric density (%)	bulk	size fraction (%)				shattering ratio (%)
				>4 mm	4~0.35 mm	0.35~0.088 mm	<0.088 mm	
V-01	15	727	11.45	74.27	0.21	0.34	25.18	25.53
V-10	15	722	10.78	69.27	0.14	0.28	30.31	30.59
V-19	15	683	10.45	71.78	0.15	0.29	27.78	28.08
V-28	15	672	11.11	67.70	0.30	0.37	31.63	32.00
V-04	15	1,078	17.83	69.12	0.14	0.23	30.51	30.74
V-13	15	1,103	19.35	70.73	0.18	0.41	28.68	29.09
V-22	15	1,054	18.59	84.48	0.24	0.62	14.67	15.29
V-31	15	1,003	17.46	75.81	0.15	0.20	23.84	24.04
V-07	15	1,476	26.71	79.95	0.10	0.61	19.34	19.95
V-16	15	1,411	25.85	77.24	0.11	0.32	22.34	22.66
V-25	15	1,519	27.59	71.44	0.07	0.46	28.03	28.50
V-02	25	696	11.45	72.12	0.22	0.50	27.17	27.67
V-11	25	725	10.78	71.55	0.14	0.14	28.18	28.32
V-20	25	607	10.45	75.84	0.25	0.41	23.50	23.91
V-29	25	697	11.11	78.95	0.22	0.29	20.55	20.83
V-05	25	1,143	17.83	66.03	0.13	0.35	33.49	33.84
V-14	25	1,213	19.35	65.29	0.16	0.16	34.38	34.54
V-23	25	1,094	18.59	73.56	0.18	0.41	25.85	26.26
V-32	25	1,038	17.46	79.21	0.10	0.05	20.65	20.70
V-08	25	1,551	26.71	75.69	0.16	0.58	23.57	24.15
V-17	25	1,480	25.85	74.94	0.14	0.30	24.62	24.93
V-26	25	1,617	27.59	42.05	0.12	0.28	57.55	57.83
V-03	35	770	11.45	68.22	0.39	0.45	30.93	31.39
V-12	35	685	10.78	75.81	0.15	0.37	23.68	24.04
V-21	35	642	10.45	71.94	0.23	0.47	27.36	27.83
V-30	35	650	11.11	79.87	0.23	0.38	19.51	19.90
V-06	35	1,071	17.83	71.36	0.19	0.14	28.31	28.45
V-15	35	1,147	19.35	77.18	0.17	0.44	22.21	22.64
V-24	35	1,022	18.59	80.79	0.54	0.20	18.47	18.67
V-33	35	1,055	17.46	67.17	0.95	0.24	31.64	31.88
V-9	35	1,471	26.71	72.87	0.17	0.27	26.68	26.96
V-18	35	1,436	25.85	75.57	0.17	0.24	24.01	24.25
V-27	35	1,412	27.59	79.30	0.07	0.18	20.46	20.63
average					0.21	0.33	26.52	26.85

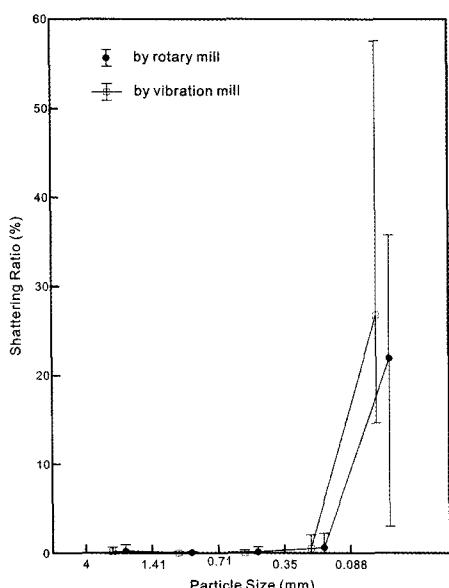
자체분화율이 거의 유사한 평균 약 27%의 값을 보인다.

파쇄분화율은 집광시 파쇄공정에서 망간단괴를 2 cm 이하로 분쇄하여 양광시키는(최종수 등, 2006) 과정에서 얼마나 많은 양이 어느 정도의 입도로 분화되는지를 나타낼 수 있는 자료이다. 그 결과는 표 4에 종합하였다. 파쇄분

화율은 1.8%에서 3.9%까지의 값을 보이며, 자체분화율에 비해 매우 낮은 값을 가진다. 단괴의 크기에 따른 파쇄분화율을 보면 크기가 클수록 파쇄분화율은 커지는 것을 알 수 있다. 2 cm 이상 4 cm 이하의 단괴를 이용한 분화실험에서는 평균 2.0%의 파쇄분화율을 보이는 반면 4 cm 이상 8 cm 이하의 단괴는 평균 3.4%의

**Table 4.** Crushing shattering ratio

nodule size (mm)	weight (g)	size fraction (%)				shattering ratio (%)	
		> 4 mm	4~0.35 mm	0.35~0.088 mm	< 0.088 mm		
20~40	1	4,474	92.21	5.84	1.30	0.65	1.95
	2	4,540	90.71	7.48	1.10	0.71	1.81
	3	4,422	90.54	7.35	1.41	0.70	2.11
	4	4,550	89.00	8.78	1.49	0.73	2.22
	5	4,474	91.89	6.27	1.22	0.61	1.83
	average	4,492	90.87	7.14	1.30	0.68	1.98
40~80	1	4,560	85.92	10.23	2.86	0.99	3.85
	2	4,504	86.12	10.24	2.64	1.01	3.65
	3	4,457	88.16	8.96	2.02	0.84	2.86
	4	4,495	87.61	9.06	2.34	0.98	3.32
	5	4,450	86.34	10.42	2.33	0.91	3.24
	average	4,493	86.83	9.78	2.44	0.95	3.38
20~80	1	4,437	88.89	8.23	2.04	0.84	2.88
	2	4,576	89.18	7.99	2.05	0.79	2.84
	3	4,628	89.33	8.19	1.77	0.70	2.47
	4	4,607	89.00	8.30	1.89	0.80	2.69
	5	4,651	91.04	6.76	1.54	0.66	2.20
	average	4,580	89.50	7.89	1.86	0.76	2.62

**Fig. 2.** Self shattering ratio with particle size.

파쇄분화율을 보인다. 모든 크기의 단괴를 함께

사용한 경우는 그 중간 값인 2.6%의 파쇄분화율을 보인다.

파쇄된 입도별 분포를 보면 파쇄분화율과 자체분화율은 뚜렷한 차이를 보인다. 자체분화율은 대부분의 입자가 0.088 mm 이하의 매우 미세한 분말로 분화되며, 4 mm 이하 0.088 mm 이상의 입도는 약 1% 정도의 낮은 분화율을 보였다(그림 2). 이에 반하여 파쇄에 의한 분화율은 미분화된 입자의 입도에 따라 감소하는 경향을 보인다(그림 3). 파쇄분화율은 파쇄공정에 의한 일반적인 경향으로 순차적으로 입도가 작아지는데 반하여 자체분화율은 단괴간의 또는 관내벽과의 약한 충돌에 의한 파쇄로 단괴의 표면에서부터 미립의 분말형태로 떨어져나가는 양상임을 알 수 있다.

자체분화율과 파쇄분화율을 종합적으로 보면 망간단괴는 채광과정에서 0.35 mm 이하의 미립으로 분화되는 양이 전체의 약 30% 정도에 이를 것으로 사료된다. 이러한 분말상태의 망간단괴는 양광과정에서의 거동에도 영향을 줄 뿐

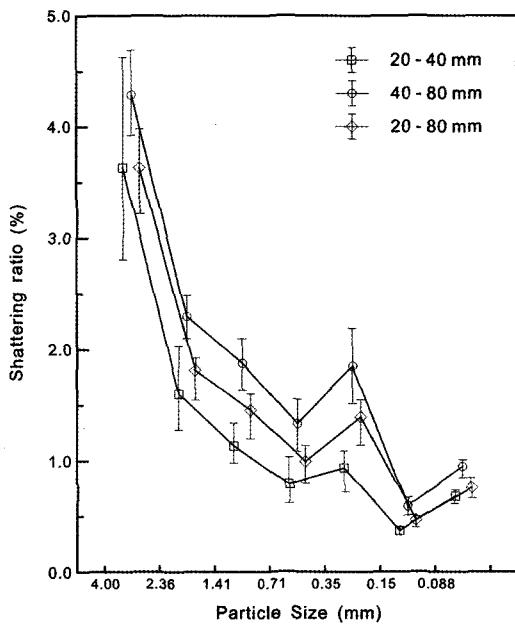


Fig. 3. Crushing shattering ratio with particle.

아니라 망간단괴의 회수공정에도 영향을 줄 것으로 생각된다. 미립의 망간단괴가 고·액상 분리공정에서 충분히 회수되지 못하면 이는 채광효율에도 매우 큰 영향을 주게 된다. 그러므로 이들의 회수공정은 필수적으로 고려하여야 할 것이며, 분화율에 관한 정확한 자료는 회수공정의 설계에 유용한 기초자료로 사용될 수 있을 것이다.

#### 망간단괴 및 해저퇴적물 분말시료의 물리적 특성

파쇄된 망간단괴의 분말과 해저퇴적물이 양광과정의 고·액상으로서의 거동에 어떤 영향을 미칠지에 대한 기초자료로 물리적 특성을 분석하고 이수제로 사용되는 Na-벤토나이트와 비교하였다. 파쇄된 망간단괴의 입도분포는 평균  $4.11\phi$ 이며, 모래 61.0%, 실트 31.6%, 점토 7.4%인 실트질모래에 해당한다(그림 4). 해저퇴적물의 입도는 수십  $\mu\text{m}$  이하로 매우 세립질이며(평균입도 약  $8\phi$ ) 역질 및 사질이 거의 없는 니질 실트 퇴적물이다. 유기물을 제거하면 평균입도가 원 시료에 비해 약간 작아지나, 생규소를 제거하면 입도의 변화는 별로 보이지 않는다. 이는 해저퇴적물을 구성하는 광물질들이 거의 점토크기의 미립이며 오히려 생물기원

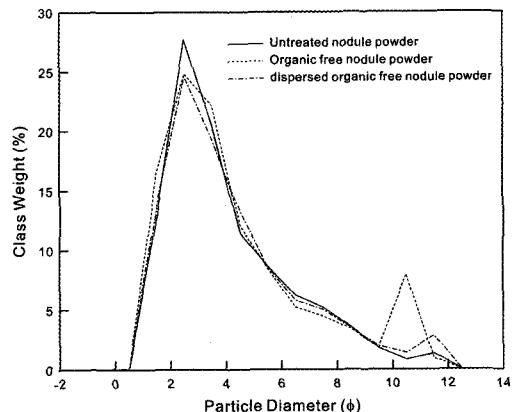


Fig. 4. Size distribution of powdered manganese nodule.

의 유기물이나 규소들이 오히려 퇴적 광물 입자보다 큰 것을 알 수 있다(그림 5).

망간단괴 분말의 pH는 8.2~8.9로서 비교적 높은 알칼리성을 보이며, 해저퇴적물의 산도는 원 시료(pH 7.7)가 유기물을 제거한 시료(pH 7.2)보다 높으나 Na-벤토나이트(pH 10.3)보다는 낮은 값을 보인다(표 5). Na-벤토나이트는 Na-스黠타이트의 교환성 층간 양이온인 Na 이온의 영향으로 강한 알카리성을 나타낸다(고상모 외, 2003). 이에 반하여 해저 퇴적물은 석영이나 층간양이온이 없는 캐올리나이트와 층간양이온이 교환되지 않는 일라이트를 주 구성광물로 하고 있어 거의 중성의 산도를 보인다. 또한 망간단괴는 층간양이온을 갖는 부서라이트나 베네사이트와 같은 층상구조형 산화망간광물의 영향으로 약한 알칼리성을 보이는 것으로 사료된다.

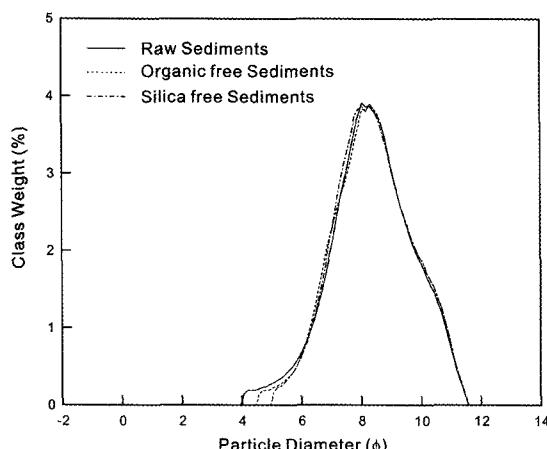
점토광물에 있어서 점도는 유체의 흐름에 대한 저항력을 나타내는 유변학적인 성질로서 기본적으로 입도분포 및 분산이나 응집의 성질에 의해 그 값이 크게 지배될 것으로 생각된다(고상모 외, 2002; 송민섭 외, 2004). 점도 값이 높다는 것은 분산 및 결화가 보다 용이하다는 것을 의미한다. 망간단괴 분말과 해저퇴적물의 점도는 각각  $1.38 \sim 1.49 \text{ mPa} \cdot \text{s(cP)}$  및 검출한계 미만의 매우 낮은 값을 보인다. 해저퇴적물의 매우 낮은 점도는 용액속의 농도가 5% 정도로 낮기 때문이기도 하지만, 이수제로 사용되는 같은 농도의 Na-벤토나이트( $10.3 \sim 10.8 \text{ cP}$ )에 비해 매우 낮은 값이다(표 6). 이는 해저 퇴적물이 어느 정도 유체에 함유되어 있어도 유체의 흐

**Table 5.** Acidity of powdered manganese nodule and sea bottom sediment

	Acidity (pH)		
	initial value	after stabilization	after 24 h
powdered manganese nodule	8.2	8.9	8.9
raw sediments	8.4	8.4	7.7
organic free sediments	7.2	7.2	7.2
Na-bentonite	10.8	10.6	10.3

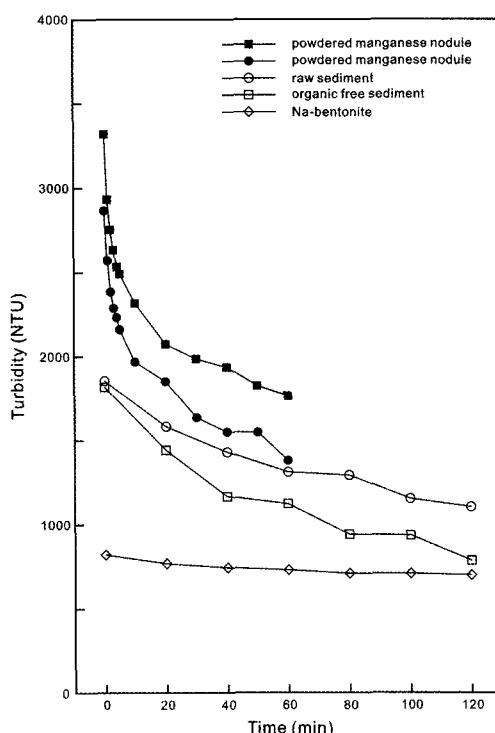
**Table 6.** Viscosity of powdered manganese nodule and sea bottom sediment

	viscosity (cP : centi Poise)			
	initial	5 min	10 min	30 min
powdered manganese nodule	1.38			1.48
raw sediments		less than detection limit (1 cP)		
organic free sediments		less than detection limit (1 cP)		
Na-bentonite	37.2	40.8	72.0	86.4

**Fig. 5.** Size distribution of sea bottom sediment.

름에 아무런 영향을 주지 않는다는 것을 의미한다. Na-벤토나이트의 높은 점도는 분산이나 결화가 강하고 용이하게 일어나기 때문인데(고상모 외, 2002), 망간단괴나 해저 퇴적물은 작은 입도에 의해 분산은 쉽게 일어나지만 비팽윤성 광물들이어서 결화가 거의 일어나지 않기 때문에 낮은 점도 값을 보이는 것으로 생각된다.

탁도는 혼탁액의 분산 및 응집 성질을 파악하는데 결정적으로 이용되는 성질로서 초기 탁도 값은 분산의 정도를 시간에 따른 변화는 응집의 정도를 의미한다. 망간단괴 분말은 매우

**Fig. 6.** Turbidity of powdered manganese nodules and sea bottom sediments.

높은 초기값을 보이나 시간에 따라 매우 빠른 감소를 보인다. 또한 해저 퇴적물도 Na-벤토나

이트보다 높은 초기치를 보이나 시간에 따라 빠른 감소를 보인다(그림 6). 망간단괴 분말의 높은 초기치는 분산에 의한 영향보다 망간단괴의 짙은 색에 의한 영향이 클 것으로 사료된다. Na-벤토나이트의 초기 탁도가 해저 퇴적물에 비해 낮은 값을 보이는데, 이는 Na-벤토나이트의 입도가 해저 퇴적물의 입도보다 크기 때문인 것으로 사료된다. 시간에 따른 탁도의 변화는 망간단괴 분말이 가장 빠르며, 유기물 제거 해저 퇴적물, 해저 퇴적물 원시료, Na-벤토나이트 순서로 감소한다(그림 6). Na-벤토나이트의 탁도는 시간에 따라 거의 감소하지 않는데 이는 좋은 이수제로서의 특징으로 쉽게 수화되어 침전되지 않아 물의 비중을 증가시키는 역할을 한다. 그러나 해저 퇴적물은 입도가 매우 작아 쉽게 분산은 일어나지만 거의 수화가 되지 않아 쉽게 침전됨을 알 수 있다. 망간단괴 분말은 높은 비중에 의해 빨리 침전하기 때문에 탁도가 매우 빨리 감소하게 된다.

망간단괴의 분말과 해저퇴적물의 높은 초기 탁도와 빠른 감소는 이들이 매우 빨리 분산되지만 침전도 매우 빠르다는 것을 의미하며, 이 수제로의 역할을 거의 할 수 없을 것으로 사료된다. 또한 이들은 점도가 매우 낮아 관내나 펌프 내에 스케일링을 형성할 가능성은 낮을 것으로 생각된다.

## 결 론

심해저에서 망간단괴를 침광하고 양광하는 과정에서 발생할 수 있는 다양한 현상들을 고려하여 망간단괴의 분화특성과 분화된 망간단괴의 분말과 해저퇴적물의 물리적 특성을 파악하였다. 이들 자료는 망간단괴의 채광과정에서 어떤 거동을 보일지에 관한 기초자료로 활용할 수 있을 것이다.

망간단괴의 채광시스템 내에서의 실제적인 분화는 양광과정에서 망간단괴가 어떤 운동에 의한 영향이 큰가에 달려있다. 양광펌프에 의한 상승력과 중력에 의한 하강이 서로 작용하여 부딪힐 경우는 진동밀에서의 분화과정이 주로 일어날 것이며, 양광 매체인 물이나 공기에 의한 와류의 작용에 의해 회전력이 발생할 것을 고려하면 회전밀에서와 같은 분화과정이 일어날 것으로 보인다. 회전밀과 진동밀에서의 자체

분화율이 거의 비슷한 값을 보였으나 진동밀에서 약간 큰 값을 보인다. 망간단괴의 서로간 충돌이나 양관관 내벽과의 충돌에 의한 자체 분화에 의하면 대부분이 0.088 mm 이하의 미립의 입자로 분화되며 자체분화율은 약 27%일 것으로 보인다. 채광공정의 파쇄기에 의한 파쇄공정에 의한 분화는 입도가 작아질수록 분화양이 적어지는 일반적인 순차파쇄과정을 보이며, 이에 의한 파쇄분화율은 약 3% 정도로 파악된다. 전체적으로 보아 총 분화율은 약 30% 정도일 것으로 사료된다. 즉 전체 채광된 망간단괴 중 약 30%가 0.35 mm 이하의 미립으로 분화되므로 이의 회수공정을 고려하지 않으면, 실제 채광효율이 70% 이하로 낮아짐을 알 수 있다. 또한 해상에서 망간단괴를 회수한 나머지 해수를 바다에 폐기할 경우 이들 미립의 망간단괴와 해저퇴적물은 심각한 환경 문제를 야기할 수 있다.

미립으로 분화된 망간단괴 분말과 함께 양광될 수 있는 미립의 해저퇴적물에 대한 물리적 특성을 살펴보면, 점도가 매우 낮고 탁도는 시간에 따라 빠른 감소를 보인다. 이러한 특성은 양광관이나 양광펌프내부에 스케일링을 형성하여 문제를 야기할 가능성은 낮을 것으로 생각된다. 미립의 해저퇴적물은 거의 석영이나 캐올리나이트, 일라이트와 같은 비 팽윤성 광물로 구성되어 Na-벤토나이트와 같은 이수제의 역할을 거의 하지 못할 것으로 생각된다.

## 사 사

본 연구는 해양수산부의 지원으로 수행된 “심해저 광물자원의 광물·지화학적 요인연구” 사업의 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다. 또한 이 논문을 심사하여 주신 익명의 심사위원과 안동대학교 정기영 교수님께 감사드립니다.

## 참고문헌

- 고상모, 손병국, 송민섭, 박성완, 이석훈 (2002) 벤토나이트의 물리-화학적 성질을 지배하는 요인분석. 한국광물학회지. 15. 259-272.
- 고상모, 홍석정, 송민섭 (2003) HDTMA-, BDTDA- 및 CP- 스멕타이트의 물리-화학적 특성. 한국광물학회지. 16. 295-305.
- 송민섭, 고상모, Tetsuichi Takagi (2004) 일본 벤토나

- 이트 광상의 부존특성 및 광석의 물리화학적 특성. 한국광물학회지. 17. 245-265.
- 윤치호, 이상권, 최용석, 강상수, 선우춘, 강중석, 조영도, 홍성규, 권석기, 김영주, 박용찬, 이동길, 조규남, 최재웅, 이재환 (2006) 심해저 광물자원 양광시스템 개발. “2005 심해저 광물자원개발 보고서 III. 심해저 광물자원 개발기술연구” 중에서. 해양수산부. 221p.
- 이현복, 지상범, 형기성, 박정기, 김기현, 오재경 (2006) 북동태평양 대한민국 광구 KR5 지역 표층 퇴적물의 물리적 특성. Ocean and Polar Research. 28. 475-484.
- 장세원, 최현수, 강중석, 공기수, 이성록, 장정해 (2004) KODOS 망간단괴의  $\text{SiO}_2\text{-CaO-MnO}$  상관 관계와 분포양상. Ocean and Polar Research. 26. 199-205.
- 지상범, 김기형, 문재운, 이경용, 손승규, 오재경 (2000) 북동태평양 KODOS 지역 심해저 퇴적물의 지질공학적 특성. 한국해양학회지 바다. 5. 320-334.
- 최종수, 홍섭, 김형우, 여태경 (2006) 심해저 망간단괴 집광시스템의 파쇄기 개념설계. 2006년 한국해양과학기술형의회 공동학술대회. 부산 BEXCO 5월 15-16일. 1798-1802.
- 최현수, 장세원, 이성록 (2000) 망간단괴 미세조직에 따른 광물조성과 화학조성의 상관관계. 한국광물학회지. 13. 205-220.
- 최현수, 장세원, 장정해, 강중석, 공기수 (2007) 심해저 광물자원의 광물·지화학적 요인연구. “2006 심해저 광물자원개발 보고서 I. 자원탐사 및 환경영구” 중에서. 해양수산부. 299-315.
- 홍섭, 김형우, 최종수, 여태경 (2006) 심해저 광물자원 집광시스템 및 채광운용기술 개발. “2005 심해저 광물자원개발 보고서 III. 심해저 광물자원 개발기술연구” 중에서. 해양수산부. 372p.
- Lee S.-R., Choi H., Chang S.W. and Graham I. (2001)  $^{10}\text{Be}/^{9}\text{Be}$  Dating of Ferro- Manganese Nodules from the NE Pacific Ocean. J. Korea Physical Society. 39. 766-771.

---

2007년 11월 29일 원고접수, 2007년 12월 12일 게재승인.