

## 황해중앙이질대 퇴적물에 대한 중광물 예비 연구

### Preliminary Study of Heavy Minerals in the Central Yellow Sea Mud

이부영(Bu Yeong Lee)<sup>1</sup> · 조현구(Hyen Goo Cho)<sup>1,\*</sup> · 김순오(Soon-Oh Kim)<sup>1</sup> · 이희일(Hi Il Yi)<sup>2</sup>

<sup>1</sup>경상대학교 지질학과 및 기초과학연구소

(Department of Geology and Research Institute of Natural Science, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea)

<sup>2</sup>한국해양과학기술원 해저환경자원연구본부

(Marine Geology and Geophysics, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Ansan 15627, Korea)

**요약** : 실체현미경과 전계방출형 주사전자현미경 관찰, 에너지분산형 분광분석기를 이용한 화학 분석을 통하여 황해중앙이질대에서 채취된 46개의 표층 퇴적물 시료 내에 포함되어 있는 중광물의 종류, 함량, 광물 특성 및 분포를 연구하였으며, 이 결과를 바탕으로 조립질 퇴적물의 기원지를 유추하였다. 황해중앙이질대 표층 퇴적물 내에 존재하는 중광물들은 녹렴석군 광물, 각섬석군 광물, 석류석군 광물, 저어콘, 금홍석, 스피넬 순으로 산출하는데, 특히 녹렴석군 광물과 각섬석군 광물의 비율이 50% 이상으로 매우 높다. 녹렴석군 광물은 녹렴석, 각섬석군 광물은 에데나이트, 석류석군 광물은 알만딘이 대부분인 것으로 판단된다. 황해중앙이질대를 124°E 기준으로 구분할 경우, 동부지역이 서부지역에 비해 녹렴석 및 풍화에 강한 (저어콘 + 금홍석)의 함량은 높고, 풍화에 약한 각섬석의 함량은 낮게 나타난다. 이는 서부지역의 퇴적물은 기원지에 가까운 곳에, 동부지역의 퇴적물은 기원지로부터 먼 곳에 퇴적되었을 것임을 시사해준다. 추후 황해로 유입되는 강 퇴적물과 해양 퇴적물에 대한 추가적인 중광물 연구가 진행되어야만 정확한 기원지와 퇴적과정에 대한 해석을 할 수 있을 것으로 여겨진다.

**주요어** : 황해중앙이질대, 중광물, 녹렴석, 각섬석, ZTR 지수, 기원지

**ABSTRACT** : We studied the heavy minerals in 46 surface sediments collected from the Central Yellow Sea Mud (CYSM) to characterize the type, abundance, mineralogical properties and distribution pattern using the stereo-microscopy, field-Emission scanning electron microscopy (FE SEM) and chemical analysis through the energy dispersive spectrometer (EDS). Heavy mineral assemblages are primarily composed of epidote group, amphibole group, garnet group, zircon, rutile and sphene in descending order. Epidote group and amphibole group minerals account for more than 50% of total heavy minerals. The minerals in epidote group, amphibole group and garnet group in studied area are epidote, edenite and almandine, respectively. When we divided the CYSM into two regions by 124°E, the eastern region contain higher contents of epidote and (zircon + rutile), which are more resistant to weathering but lower of amphibole, which is less resistant to weathering than the western region. Based on this results, it is possible to estimate that the eastern region sediments are transported for a long distance while western region sediments are transported for a short distance from the source area.

\*Corresponding author: +82-55-772-1474, E-mail: hgcho@gsnu.ac.kr

In the future, the additional study on the heavy minerals in river sediments flowing into the Yellow Sea and much more samples for marine sediments must be carried out to interpret exactly the provenance and sedimentation process.

**Key words** : Central Yellow Sea Mud, heavy mineral, epidote, amphibole, ZTR index, provenance

## 서 론

비중이 2.89 이상인 중광물은 경광물에 비하여 암석마다 변화가 심하므로 근원지의 암석에 관한 더 많은 정보를 제공해 주며(Stattegger, 1987), 특히 저어콘(zircon), 전기석(tourmaline), 금홍석(rutile)은 기계적, 화학적 풍화에 대한 안정도가 높기 때문에 기원지 연구에 매우 적합한 광물이다. 즉, 각 중광물의 특성은 근원암으로부터 유래하는 것이므로 근원지 암석의 특성이 그대로 반영되어 있고, 이들은 풍화에 대해 매우 강하므로 풍화나 이동에 의한 변화가 거의 없다(Yang *et al.*, 2009; Tsikouras *et al.*, 2011). 이런 특징은 퇴적 환경에 관계되는 근원지 암석의 특성, 퇴적작용 및 속성작용, 이동 과정, 기후와 지형, 고지형, 지구조, 퇴적물 기원지 등의 정보를 제공한다(Morton, 1984, 1985; Morton and Hallsworth, 1999, 2007). 특히 중광물 분석은 모래와 사암의 기원지를 알아내는데 있어 검증된 방법이므로(Morton, 1985), 전 세계 여러 지역에서 해안 퇴적물의 중광물에 관한 연구가 수행되었다(Eisenmann, 2001). Hubert (1962)는 투명하고 비운모질이며 쇄설성인 석류석, 스피넬 등의 중광물에 대한 저어콘-전기석-금홍석 광물의 비를 zircon-tourmaline-rutile (ZTR) 지수(index)로 제시하고, 이 값은 사암의 광물학적 성숙도(maturity)를 정량적으로 지시하는 값이라고 주장하였다.

Stattegger (1986)는 중광물 연구를 통하여 오스트리아 북부 Bohemian Massif의 현생 하천 모래의 근원 암석을 매우 정확하게 추적하였으며, Vital *et al.* (1999)은 석류석, ZTR 지수, 녹렴석, 휘석, 각섬석을 이용하여 아마존 하구 지역의 퇴적물 근원지를 연구하였다. Mohamed and Dar (2005)는 이집트 홍해 연안 퇴적물에 대한 중광물 분포 연구를 통하여 지역적 구분이 생기는 이유를 퇴적물 기원지가 차이가 나는 것에 기인하고, 국지적 차이는 성인적 차이를 반영하는 것이라고 하였으며, Schuttenhelm and Laban (2005)은 북해 남부 해역 seabed sand에 대한 중광물 연구를, Neto and

Brehme (2006)는 브라질 리우데자네이루의 Guanabara Bay의 표층 퇴적물 내 중광물 분포 연구를 수행하였다.

최근에는 중광물 표면에 대한 주사전자현미경 관찰을 통하여 풍화 정도, 구형도와 원마도를 명확하게 구분할 수 있으며, 중광물에 대한 전자현미분석 연구를 통하여 퇴적물의 기원지를 연구하기도 한다. Hegde *et al.* (2006)은 중광물 연구와 티탄철석(ilmenite)의 미량원소 연구(특히 Mn/Mg ratio)를 통하여 인도 중서부 해안의 Honnavar beach의 기원지를 자세하게 연구하였고, Kettanah and Wach (2006)는 캐나다 Nova Scotia의 Venture B-13 시추공 시료 내 중광물에 대하여 전자현미분석기를 이용한 광물화학적 연구를 실시하여 석류석과 전기석이 퇴적물 근원을 지시하는 유용광물임을 제시하였다. 이들 광물은 광물학적, 화학적으로 매우 다양성을 가지기 때문에 근원지 추적에 적합하다.

이번 연구의 대상이 되는 황해는 육상기원 퇴적물이 집적된 분지이며, 퇴적물 내에 포함된 중광물을 이용하여 근원지를 식별하려는 시도가 일부 학자들에 의하여 이루어졌다(Lee *et al.*, 1988; Lee and Chough, 1989; Li *et al.*, 2001). 이들 결과에 의하면 황해 남동부 해역에서 중광물의 함량은 최소 0.7%, 최대 22.5%까지 도달하며, 각섬석, 녹렴석 및 석류석이 주를 이룬다(Lee *et al.*, 1988). 본 연구는 황해 중앙 니질대(CYSM, Central Yellow Sea Mud) 표층 퇴적물 내에 포함되어 있는 중광물의 종류, 함량, 광물 특성 및 분포를 연구하여 조립질 퇴적물의 기원지와 퇴적과정을 해석하기 위한 예비 연구로써 수행되었다.

## 연구재료 및 방법

이번 연구에 사용된 시료는 한국해양과학기술원(KIOST, Korea Institute of Ocean Science and Technology)에서 운영하는 이어도호를 이용하여 2001년 실시한 황해 주변 해역 탐사에서 채취한

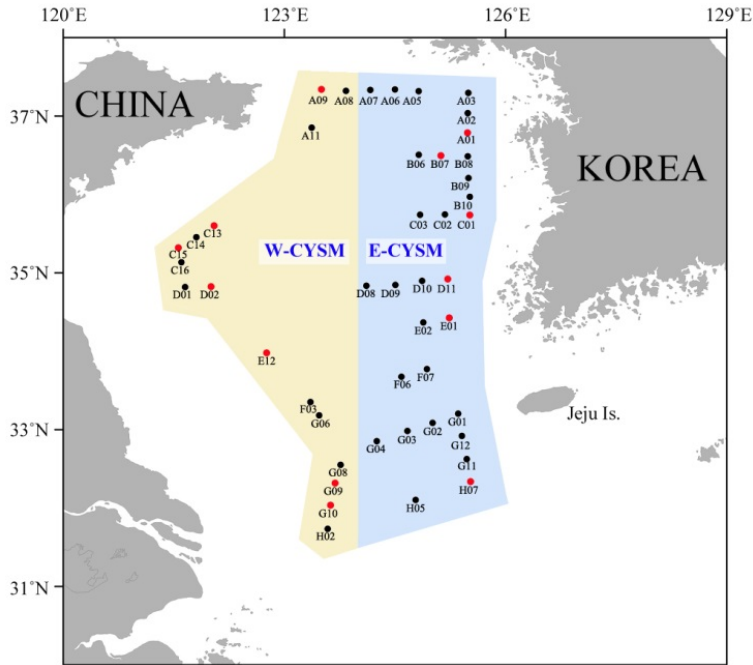


Fig. 1. Map showing grab sample locations used in this study.

표층 퇴적물 시료이다. 2001년 황해 탐사에서 그랩 샘플러(grab sampler)를 이용하여 표층 5 cm 이내의 퇴적물 시료를 모두 86개를 채취하였는데, 이 중 중광물 분석에 적절한 모래(sand)의 비율이 40% 이상 되는 46개의 시료만 이번 연구에 사용하였다(Fig. 1).

중광물을 분리하기 위하여 시료 전처리, 자성 광물 분리 및 중액 분리 과정을 수행하였다. 퇴적물 시료는 6% 과산화수소수( $H_2O_2$ )를 이용하여 3~5일간 상온에서 유기물을 제거한 후 습식 체질하여 63-125  $\mu m$  구간의 입자를 분리하여 사용하였다. 초음파세척기를 이용하여 충분히 세척한 시료를 60°C 온도의 건조기에서 8시간 이상 건조시킨 후, 네오디움 자석을 이용하여 자성이 강한 광물을 분리하였다. 나트륨 폴리텡스테이트(sodium polytungstate) 분말 1 kg을 약 250 mL의 증류수에 녹여 비중이 약 2.8 정도인 중액을 제조하였다. 100 mL 원형 플라스크에 중액과 자성광물을 제거한 시료를 약 1 : 5의 비율로 넣고 흔들어 섞은 후, 원형플라스크 안의 용액이 세 개의 층(중광물, 중액, 경광물)으로 분리되면 원형플라스크에서 중광물만 따로 분리하였다. 중광물은 충분히 세척한 후 60°C 온도의 건조기에서 8시간 이상 건조시켰다.

분리한 중광물은 실체현미경을 사용하여 크기, 색깔 및 모양에 따라 구분하였으며, 전계방출형 주사전자현미경(FE SEM, field-emission scanning electron microscope) 분석을 통해 미세한 중광물 표면조직을 관찰하였다. 중광물의 정확한 감정을 위하여 에너지분산형 분광분석기(EDS, energy dispersive spectrometer)를 사용하여 화학조성을 분석하였다. 약 8,000개의 입자를 실체현미경으로 관찰하였고, 이 중 2,000개 입자를 FE-SEM을 이용하여 분석하였다. FE-SEM관찰과 EDS 분석은 경상대학교 공동실험실습관에서 보유하고 있는 JSM-7610 FE-SEM을 사용하였다.

## 결 과

황해중앙이질대 표층 퇴적물에서 산출되는 중광물의 실체현미경, FE-SEM 관찰 및 EDS 분석 결과를 통해 연구 지역의 퇴적물 내에 포함된 중광물은 녹렴석, 각섬석, 석류석, 저어콘(zircon), 금홍석(rutile), 스피넬(sphene) 순으로 산출되었으며 이 중 녹렴석과 각섬석의 비율이 가장 높다(Tables 1, 2). 녹렴석군 광물(epidote group mineral)은 실체현미경에서 옅은 초록이나 노란빛을 띠는 녹색으로 원

**Table 1.** Heavy mineral composition in the surface sediment of the East CYSM

Site	Count	Mineral (%)							
		Ep	Amp	Grt	Zrn	Rt	Spn	Ilm	Ap
A01	110	24.5	24.5	12.2	7.1	8.2	8.2	9.2	6.1
A02	99	36.4	18.2	14.1	7.1	15.2	8.1	0.0	1.0
A03	143	26.2	7.1	22.7	24.1	12.8	5.7	0.7	0.7
A05	197	39.6	20.3	17.8	9.6	5.6	4.6	1.0	1.5
A06	181	50.0	7.8	16.7	11.1	8.3	3.9	0.0	2.2
A07	198	55.6	14.8	11.2	7.7	8.2	2.0	0.0	0.5
B06	211	48.6	22.9	17.6	2.9	3.3	4.8	0.0	0.0
B07	159	49.0	6.2	6.9	8.3	2.8	17.9	0.0	9.0
B08	171	40.1	24.6	10.2	15.0	3.6	5.4	0.0	1.2
B09	124	47.1	16.5	7.4	4.1	21.5	0.8	2.5	0.0
B10	164	37.2	17.7	4.9	10.4	12.8	12.8	4.3	0.0
C01	178	16.0	2.3	8.6	46.3	11.4	9.1	2.9	3.4
C02	161	44.9	22.8	12.0	8.2	5.7	1.9	1.9	2.5
C03	124	39.7	12.4	9.1	16.5	10.7	11.6	0.0	0.0
D08	183	30.7	34.1	8.5	9.1	5.1	4.5	5.7	2.3
D09	172	51.8	15.9	11.2	6.5	6.5	5.9	1.8	0.6
D10	191	31.2	18.0	23.3	12.7	3.2	6.9	2.6	2.1
D11	110	21.4	18.4	11.2	10.2	12.2	7.1	12.2	7.1
E01	229	25.4	37.1	17.9	2.2	4.9	5.4	5.4	1.8
E02	171	30.2	30.2	11.2	8.9	1.8	9.5	4.1	4.1
F06	177	21.6	55.1	11.9	3.4	2.3	1.1	4.5	0.0
F07	179	42.1	20.8	10.7	10.1	7.9	5.6	1.1	1.7
G01	166	52.7	31.5	9.1	0.6	3.0	2.4	0.0	0.6
G02	137	32.1	40.1	5.1	9.5	5.8	2.2	4.4	0.7
G03	163	45.7	30.9	7.4	3.1	0.6	5.6	6.2	0.6
G04	140	42.4	48.2	4.3	0.7	3.6	0.7	0.0	0.0
G11	154	54.2	34.0	5.2	0.7	3.3	1.3	0.0	1.3
G12	206	25.6	39.4	15.3	5.9	8.9	2.5	0.0	2.5
H05	123	31.7	29.2	13.3	12.5	2.5	5.8	0.8	4.2
H07	121	32.0	10.7	11.7	7.8	10.7	14.6	4.9	7.8
Total	4842								
min		16.0	2.3	4.3	0.6	0.6	0.7	0.0	0.0
max		55.6	55.1	23.3	46.3	21.5	17.9	12.2	9.0
mean		37.5	23.7	11.6	9.4	7.1	5.9	2.5	2.2

Abbreviation : Ep; epidote, Amp; amphibole, Grt; garnet, Zrn; zircon, Rt; rutile, Spn; sphene, Ilm; ilmenite, Ap; apatite

**Table 2.** Heavy mineral composition in the surface sediment of the West CYSM

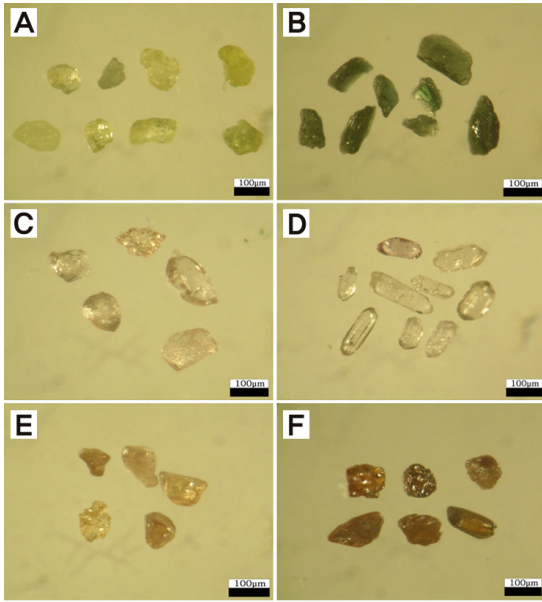
Site	Count	Mineral (%)							
		Ep	Amp	Grt	Zrn	Rt	Spn	Ilm	Ap
A08	198	37.2	29.1	13.3	0.0	9.2	3.6	5.6	2.0
A09	257	27.8	24.8	14.5	4.3	8.5	9.8	3.0	7.3
A11	193	34.4	41.1	11.5	0.5	6.8	2.1	3.6	0.0
C13	178	8.5	64.2	13.9	0.0	1.2	4.2	3.0	4.8
C14	196	42.7	30.7	6.3	5.2	8.3	4.2	2.1	0.5
C15	157	22.4	32.2	13.8	4.6	2.0	7.2	13.2	4.6
C16	217	33.3	29.6	17.1	6.5	5.6	5.1	0.5	2.3
D01	199	40.6	33.5	4.1	3.0	5.1	7.6	4.1	2.0
D02	145	34.5	10.6	14.8	5.6	10.6	13.4	1.4	9.2
E12	172	36.9	36.9	2.4	0.6	3.0	8.9	6.0	5.4
F03	185	42.3	20.3	12.1	11.0	5.5	4.9	0.5	3.3
G06	119	37.0	30.3	9.2	10.9	0.8	5.9	0.0	5.9
G08	157	20.4	32.5	9.6	13.4	3.8	7.0	13.4	0.0
G09	231	16.1	23.2	5.7	26.1	11.4	8.1	7.6	1.9
G10	138	23.2	25.0	5.4	10.7	11.6	11.6	6.3	6.3
H02	112	37.5	25.0	8.0	8.9	3.6	4.5	8.9	3.6
Total	2854								
min		8.5	10.6	2.4	0.0	0.8	2.1	0.0	0.0
max		42.7	64.2	17.1	26.1	11.6	13.4	13.4	9.2
mean		30.9	30.6	10.1	7.0	6.1	6.8	4.9	3.7

Abbreviations are the same as in Table 1.

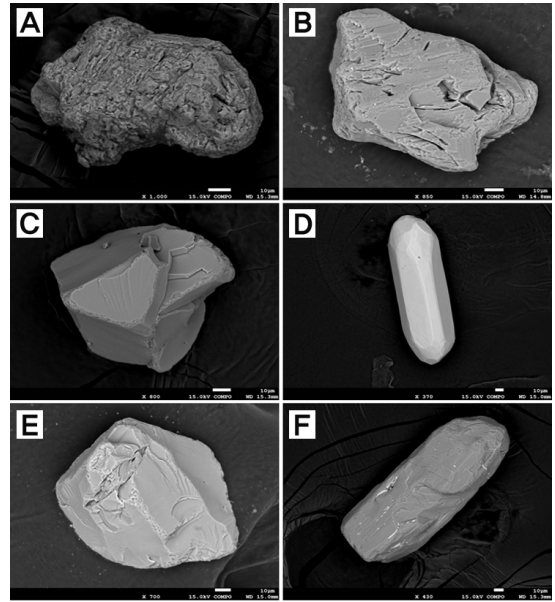
마도는 좋지 않고 모양이 불규칙적인 것으로 관찰된다. SEM 관찰에서도 표면에 여러 개의 균열이 나타나며, 마모를 심하게 받은 부분이 존재한다 (Fig. 2-A, 3-A). 녹염석군 광물은 독립사면체(SiO<sub>4</sub>)와 복사면체(Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>) 두 가지 구조 단위를 동시에 가지고 있으며, 능을 공유하는 AlO<sub>6</sub>와 AlO<sub>4</sub>(OH)<sub>6</sub> 팔면체 체인(chain)이 b축에 평행하게 배열되어 있다. 또 다른 팔면체 배위 자리가 체인 밖에 존재하고, Ca는 불규칙적인 8배위를 하게 되어 찌그러진 육면체를 이루면서 팔면체 체인 밖에 존재한다. 녹염석군 광물은 팔면체 체인 밖에 존재하는 팔면체자리와 Ca 자리에 어떤 양이온이 차지하고 있는지에 따라 클리노조이사이트(clinozoisite), 녹염석(epidote), 피몬타이트(piemontite), 알라나이트(allanite) 등 4개의 광물로 세분된다(Klein and Dutrow, 2007). 연구지

역에서 산출된 녹염석군 광물에 대한 EDS 분석 결과, Ca 자리에는 거의 전부 Ca<sup>2+</sup>이고, 팔면체 체인 밖의 팔면체 자리에 Al과 Fe<sup>3+</sup>이 거의 대부분인 것으로 보아 녹염석(epidote)으로 여겨진다.

각섬석군 광물(amphibole group mineral)은 실체현미경 관찰에서 흑녹색 내지 갈녹색의 입자로 산출되며 주상의 입자와 각진 형태가 많고, 한 방향의 쪼개짐이 관찰된다. SEM 관찰 결과에서도 각진 형태와 쪼개짐이 잘 나타난다(Fig. 2-B, 3-B). 각섬석군 광물의 결정구조는 c축에 평행하게 배열된 Si<sub>4</sub>O<sub>11</sub> 조성을 가진 이중사슬구조가 특징이며, A, M4, M3, M2 및 M1 자리를 가지고 있다. A 자리는 산소 및 (OH)와 10-12배위를 하고 있는 자리로써, 주로 Na 및 간혹 소량의 K를 가지고 있다. M4 자리는 6-8배위 자리로써, X형 양이온(Ca<sup>2+</sup>,



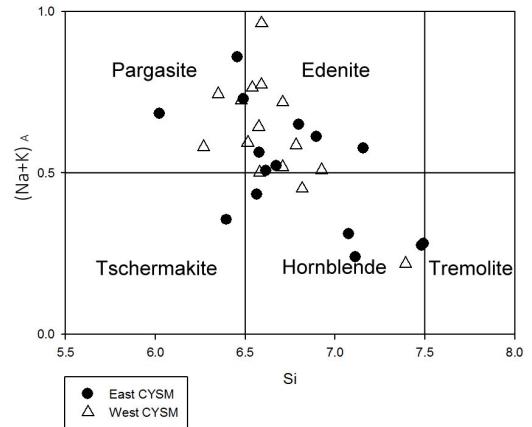
**Fig. 2.** Microphotographs of heavy minerals. A. epidote, B. amphibole, C. garnet, D. zircon, E. sphene, F. rutile.



**Fig. 3.** FE-SEM photographs of heavy minerals. A. epidote, B. amphibole, C. garnet, D. zircon, E. sphene, F. rutile.

Na<sup>+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Li<sup>+</sup>)을 가지고 있다. M1, M2 및 M3 팔면체 자리는 Y형 양이온(Mn<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Al<sup>3+</sup>, Ti<sup>4+</sup>)을 가지고 있으며, 서로 능을 공유하여 c축에 평행한 팔면체를 이룬다(Klein and Dutrow, 2007). 각섬석군 광물은 A, M4, M3, M2 및 M1 자리에 들어가는 양이온의 종류에 따라 매우 다양하게 분류할 수 있다. 연구 지역의 각섬석군 광물은 A자리에 소량의 Na와 K가, M4 자리에는 Ca<sup>2+</sup>를 포함하고 있는 칼슘 각섬석 그룹(calcic amphibole group)으로 분류된다. 칼슘 각섬석 그룹은 다시 A자리를 점유하는 (Na+K)의 수와 사면체 자리의 Si 값에 따라 5가지 광물로 나뉘는데(Fig. 4), 황해중앙이질대의 표층퇴적물에서 산출되는 각섬석은 에데나이트(edenite)가 대부분이며, 파가사이트(pargasite)와 보통각섬석(hornblende)도 일부 존재하는 것으로 여겨진다.

석류석군 광물(garnet group mineral)은 실체현미경에서 연분홍색이나 옅은 빨간색을 띠며 모양은 불규칙하고 각진 형태로 나타난다. SEM 관찰 결과에서도 각진 모양이 잘 관찰되며 표면은 대체로 매끈하다(Fig. 2-C, 3-C). 석류석군 광물의 결정구조는 8배위를 하는 A자리와, 6배위를 하는 B자리로 이루어져 있다. A자리는 상대적으로 크기가



**Fig. 4.** Classification of calcic amphiboles expressed as numbers of (Na+K) in A site and Si atoms per formula unit.

큰 2가의 양이온(Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>)이, B자리는 상대적으로 크기가 작은 3가 양이온(Al<sup>3+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Cr<sup>3+</sup>)이 점유한다. 석류석군 광물은 A와 B자리에 어떠한 양이온이 들어가느냐에 따라 세분된다(Klein and Dutrow, 2007). EDS 분석 결과, 연구 지역의 석류석은 B자리에는 Al<sup>3+</sup>이, A자리에는 Fe<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>이 포함된 파이랄스파이트(pyralospite)군 석류석

이며, 이 중 A자리에  $Fe^{2+}$ 의 함량이 많은 알만딘(almandine)으로 판단된다.

저어콘은 실체현미경에서 무색이나 분홍색을 띠고, 특유의 각진 다면체형 입자모양 또는 타원형의 결정으로 산출되며 SEM 관찰에서도 이런 입자의 형태가 잘 나타나며 표면은 매끈하다(Fig. 2-D, 3-D). 금홍석은 실체현미경에서 짙은 적색이나 갈색을 띠고 주상의 입자와 불규칙적인 형태의 입자가 나타난다. SEM 관찰 시 각진 모양과 주상의 형태가 잘 관찰되고 표면이 상대적으로 매끄러운 것으로 관찰된다(Fig. 2-E, 3-E). 스핀은 실체현미경 관찰에서 주황색, 연노랑, 옅은 갈색을 띠며 모양이 불규칙적이고 각진 형태이다. SEM 관찰 결과 역시 각진 모양이 잘 나타나며, 표면이 매끈한 것 과 그렇지 않은 것 모두가 관찰된다(Fig. 2-F, 3-F).

## 토 론

황해 주변 해역 퇴적물 내에 존재하는 중광물은 이를 이용하여 퇴적물, 특히 조립질 퇴적물의 근원지를 추적할 수 있다는 측면과(Lee *et al.*, 1988; Jiang *et al.*, 2000; Li *et al.*, 2001; Kang, 2003; Lee *et al.*, 2004) 중광물 내에 희토류 원소를 비롯한 많은 유용 광물 자원이 포함되어 있다는 측면에서 주목을 받고 있다(Lee *et al.*, 1997; Chae *et al.*, 2007, 2009, 2011).

본 연구에서는 황해중앙이질대를 124°E 기준으로 동부와 서부, 두 지역으로 구분하여(Fig. 1) 두 지역 표층 퇴적물 내에 포함된 중광물의 함량이나 광물조성이 어떤 차이가 있는지를 분석한 후 이를 바탕으로 퇴적물의 기원지 해석을 시도하였다. 이번 연구에 사용된 46개 표층 퇴적물 시료 중 동부 지역에는 30개, 서부 지역에는 16개 시료가 포함되며, 중광물 분석을 위하여 분리한 7,696개 광물 입자 중 동부 지역에서 4,842개, 서부 지역에서 2,854개의 광물 입자를 관찰하고 그 특성을 분석하였다.

중광물의 함량은 연구 지역의 동부와 서부 지역에 관계없이 녹렴석, 각섬석, 석류석 순으로 높은 비율을 차지하고 있지만, 그 함량에 있어서는 많은 차이를 나타낸다. 동부 지역의 경우 녹렴석이 37.5%로써 서부 지역(30.9%)에 비하여 매우 높고, 각섬석은 23.7%로써 서부 지역(30.6%)에 비하여 매우 낮다. 동부 지역의 경우 석류석(11.6%), 저어콘(9.4%) 및 금홍석(7.1%)의 함량은 서부 지역보다 약간 더 높고, 서부지역은 스핀(6.8%), 티탄철

석(4.9%) 및 인회석(3.7%) 함량이 동부 지역에 비하여 높은 경향을 가지고 있다(Tables 1, 2).

황해 남동부 지역 퇴적물의 기원지를 해석하기 위해서 중광물 조합 및 분포에 대한 연구를 수행한 결과에 따르면 이 지역에 분포하는 중광물은 각섬석, 녹렴석, 석류석, 저어콘, 휘석이며 각섬석(53.7%)과 녹렴석(17.3%)의 함량이 가장 많은 것으로 보고되었다(Lee *et al.*, 1988). 이는 본 연구 지역의 중광물 분포와 비슷한 양상을 보인다. 그러나 본 연구에 비하여 녹렴석 함량은 더 낮고, 각섬석 함량은 더 높게 나타난다. 이와 유사한 중광물 조성은 충청남도 해빈과 해안사구의 중광물을 연구한 결과에서도 확인되고 있다(Lee *et al.*, 1997; Kang, 2003). 또한 경기만의 해안퇴적물과 황해 남동쪽 해양퇴적물의 중광물 조합을 비교한 결과, 두 지역의 중광물 조합이 매우 유사한 것을 알 수 있다(Lee *et al.*, 1988). 한강 하상퇴적물에 대한 중광물 분석 결과에서도 각섬석, 녹렴석, 석류석 등이 주성분광물이며, 금홍석, 스핀, 티탄철석 등이 부성분광물로 존재한다는 사실이 밝혀졌다(Lee *et al.*, 2004). 이를 바탕으로, 황해중앙이질대 동부 지역의 조립질 퇴적물은 인접한 한국연안에서 황해 쪽으로 유입되는 하천으로부터 유래한 것으로 해석될 수 있다(Lee *et al.*, 1988; Lee and Chough, 1989).

황해중앙이질대 동부 지역의 조립질 퇴적물에 포함된 중광물로부터 유용 광물 자원을 채취하기 위하여 연구가 진행되었고, 그 결과 황해도 해주만 근해의 해사에 포함된 중광물은 각섬석과 석류석이 주를 이루고 유용광물로는 티탄철석, 자철석, 적철석, 저어콘 및 소량의 모나자이트가 포함된다(Chae *et al.*, 2009). 황해도 웅진군 해사 내 중광물은 보통각섬석, 녹렴석과 석류석 등이 대부분이며, 유용광물로 티탄철석, 저어콘 및 소량의 모나자이트 등이 들어있다(Chae *et al.*, 2011). 전라남도 신안군 자은도의 둔장해수욕장 해변으로부터 채취한 해빈사 내 중광물 역시 보통각섬석과 녹렴석으로 구성되며 유용광물로는 티탄철석, 저어콘, 금홍석, 아나타제, 모나자이트 및 제노타임 등이 존재한다(Chae *et al.*, 2007). 이전 연구들의 중광물 조성은 본 연구의 중광물 조성과 비슷한 것으로 여겨지며, 이전 연구결과에서는 희토류원소를 함유하는 저어콘, 모나자이트 및 제노타임 등이 일부 포함되어 있었으므로 본 연구 역시 이에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 여겨진다.



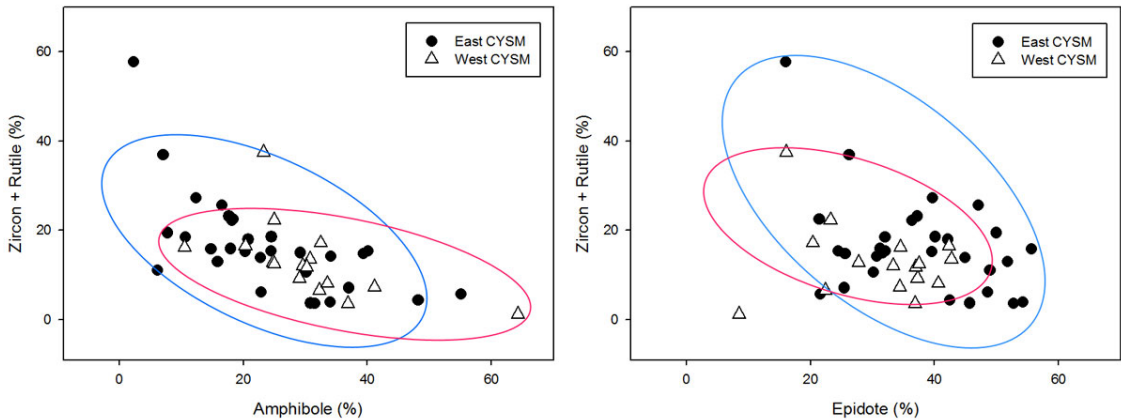


Fig. 5. Discrimination diagram in amphibole content and (zircon + rutile) content between East CYSM and West CYSM sediments.

연구 대상 표층 퇴적물 내에 가장 많이 포함된 녹렴석군 광물, 각섬석군 광물, 석류석군 광물 등에 대하여 EDS 분석을 실시하여 동부 지역과 서부 지역 사이에 광물 조성의 차이가 있는지를 연구하였다. 녹렴석군 광물은 동부와 서부 지역에서 Ca 자리에 거의 대부분  $Ca^{2+}$ 가 차지하고 팔면체 자리에는 Al과  $Fe^{3+}$ 이 포함된 녹렴석으로, 석류석군 광물은 B자리에는  $Al^{3+}$ , A자리에는  $Fe^{2+}$ 의 함량이 많은 알만딘으로 규명되어, 두 지역 사이의 차이는 거의 없었다. 그러나 각섬석군 광물의 경우 동부 지역에는 에테나이트, 파가사이트, 보통각섬석, 처마카이트(tschermakite), 투각섬석(tremolite) 등 다양한 칼슘각섬석이 존재하지만, 서부 지역에서는 에테나이트와 파가사이트 등 A자리에 (Na + K)가 비교적 많은 칼슘각섬석만 존재한다(Fig. 4).

중광물 연구에서는 기계적·화학적 풍화에 대한 안정도가 높은 저어콘, 전기석 및 금홍석을 이용하여 퇴적물의 성숙도를 나타내는 값인 ZTR 지수로 표현하여 기원지 해석에 이용하고 있다(Hubert, 1962; Yang *et al.*, 2009; Nie *et al.*, 2013). 근원지로부터 이동 거리가 먼 해빈이나 조간대 지역에서 ZTR 지수가 높는데 그 이유는 이 광물들이 비중이 크고 풍화에 대한 저항도가 크기 때문에 많이 발견되기 때문이다. 본 연구지역에서는 전기석이 산출되지 않으므로 이를 제외한 저어콘과 금홍석 등 두 광물만 사용하여 각섬석 및 녹렴석과의 관계를 알아보았다(Fig. 5). 황해중앙이질대 동부 지역에서 (저어콘 + 금홍석) 함량이 높게 나타나고, 서부 지역에서는 (저어콘 + 금홍석) 함량이 낮게 나

타난다. 저어콘과 금홍석은 기계적, 화학적 풍화에 안정하고 각섬석은 기계적, 화학적 풍화에 매우 불안정한 광물이므로(Nie *et al.*, 2013) 두 지역에서 중광물 분포와 각섬석 함량에 차이를 보이는 것은 두 지역의 기원지가 다를 가능성을 지시한다. 황해중앙이질대 동부 지역은 각섬석의 함량이 적고 저어콘, 금홍석의 함량은 높은 것으로 보아 기원지로부터 멀리 운반되어 풍화에 약한 각섬석이 사라지면서 저어콘, 금홍석의 함량이 상대적으로 높게 나타나난 것으로 생각되고, 황해 중앙 니질대 서부 지역은 각섬석의 함량이 높은 것으로 보아, 가까운 곳으로부터 운반되어 풍화작용을 상대적으로 적게 받아 퇴적되었을 것으로 해석된다(Cheong *et al.*, 2007; Nie *et al.*, 2013). 그러나 이번 연구는 황해중앙니질대 일부 표층 퇴적물 내에 존재하는 중광물에 대한 연구 결과이므로, 앞으로 보다 많은 해양 퇴적물 시료에 대한 추가적인 연구가 진행되어야만 황해중앙니질대 내에 존재하는 중광물의 특성과 분포 양상을 정확하게 파악할 수 있을 것으로 판단된다. 이와 더불어 황해로 유입되는 강 퇴적물 내에 존재하는 중광물 조성을 연구하고, 이 결과를 황해중앙니질대 표층퇴적물 내에 존재하는 중광물 특성과 비교하여 연구한다면 정확한 기원지와 퇴적 과정에 대한 해석을 할 수 있을 것으로 여겨진다.

## 결론

황해중앙이질대의 표층 퇴적물 내에 포함된 중광물에 대하여 연구한 결과는 다음과 같다.



- (1) 중광물은 녹렴석, 각섬석, 석류석, 저어콘, 금홍석, 스피인이 산출되었고 녹렴석과 각섬석의 비율이 가장 높다. 녹렴석군 광물은 녹렴석, 각섬석군 광물은 에테나이트, 석류석군 광물은 알만딘이 대부분인 것으로 판단된다.
- (2) 황해중앙이질대를 124°E 기준으로 동부와 서부로 나눌 경우, 동부 지역은 서부 지역보다 녹렴석과 석류석의 함량이 높은 반면 각섬석의 함량은 매우 낮다.
- (3) (저어콘 + 금홍석) 함량은 동부 지역에서는 높고 서부 지역에서는 낮게 나타나는데, 이를 통해 동부 지역의 퇴적물은 기원지로부터 멀리 운반되었고, 서부 지역은 가까이 운반되어 퇴적되었을 것으로 해석된다.

## 사 사

이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(과제번호 : NRF-2011-0021964)과 한국해양과학기술원(KIOST) 주요사업 (낙동강 하구 관리를 위한 환경변화 연구)이다. 실내 실험과 자료 처리에 많은 도움을 준 점토실험실의 황준기, 김보라 학생에게도 감사사를 드린다.

## REFERENCES

- Chae, S.C., Shin, H.Y., Jung, J.S., Jang, Y.N., and Bae, I.K. (2007) Mineralogy of beach sand in Jaegu Island, Shinangun, Chonranamdo. *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, 20, 289-302 (in Korean with English abstract).
- Chae, S.C., Shin, H.Y., Bae, I.K., Kwon, S.W., Lee, S.J., Kim, W.T., Lee, C.O., and Jang, Y.N. (2009) Separation and mineralogy of marine sand near Haeju bay, North Korea. *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, 22, 217-227 (in Korean with English abstract).
- Chae, S.C., Shin, H.Y., Bae, I.K., Kwon, S.W., Lee, C.O., Kim, J.Y., and Jang, Y.N. (2011) Mineralogy of sea sand near Ongjingu through the separation processes. *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, 24, 1-17 (in Korean with English abstract).
- Cheong, D.K., Park, S.Y., and Kim, B.H. (2007) Provenance study of the sedimentary rocks in the Cretaceous Gongju Basin based on heavy mineral assemblages and their surface textures. *Journal of the Geological Society of Korea*, 43, 381-394 (in Korean with English abstract).
- Eisenmann, M.D. (2001) Elutriation Technology in Heavy mineral separations. M. Sci. Thesis, Virginia Polytechnic Institute, Virginia, USA, 168p.
- Hegde, V.S., Shalini, G., and Gosavi Kanchanagouri, D. (2006) Provenance of heavy minerals with special reference to ilmenite of the Honnavar beach, central west coast of India. *Current Science*, 91, 644-648.
- Hubert, J.F. (1962) A zircon-tourmaline-rutile maturity index and the interdependence of the composition of heavy mineral assemblages with the gross composition and texture of sandstones. *Journal of Sedimentary Research*, 32, 440-450.
- Jiang, X.J., Li, S.Q., and Shen, S.X. (2000) Features of heavy minerals in the YSDP102 Core on the southeast continental shelf of the south Yellow Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 20, 27-31 (in Chinese).
- Kang, T.G. (2003) Beach and sanddune development along the coastline of the Chungcheong-Namdo province. *Journal of Korean Earth Science Society*, 24, 568-577 (in Korean with English abstract).
- Kettanah, Y.A. and Wach, G.D. (2006) The provenance of heavy minerals in the Mesozoic and Tertiary formations at the Venture B-13 Borehole, offshore Nova Scotia, Canada. *American Association of Petroleum Geologists Annual Convention*, Houston, Texas, 1-9.
- Kein, C. and Dutrow, B. (2009) *Manual of Mineral Science* (23th Ed.). John Wiley & Sons, INC., New York, 444-498.
- Lee, H.B., Oh, J.K., Kim, S.W., and Lee, S.R. (1997) Sedimentologic and mineralogic study in surface sediment off Biin Bay, west coast of Korea. *Journal of Korean Earth Science Society*, 18, 259-266 (in Korean with English abstract).
- Lee, H.J., Jeong, K.S., Han, S.J., and Bahk, K.S. (1988) Heavy minerals indicative of Holocene transgression in the southeastern Yellow Sea. *Continental Shelf Research*, 8, 255-266.
- Lee, H.J. and Chough, S.K. (1989) Sediment distribution, dispersal and budget in the Yellow Sea. *Marine Geology*, 87, 195-205.
- Lee, Y.H., Chi, J.M., and Oh, J.K. (2004) Geochemical relationship between stream sediments and regional geology of the upstream for the Hahn River drainage basin, Korea. *Economic and Environmental Geology*, 37, 153-171 (in Korean with English ab-

- stract).
- Li, C.X., Zhang, J.Q., Fan, D.D., and Deng, B. (2001) Holocene regression and the tidal radial sand ridge system formation in the Jiangsu coastal zone, East China. *Marine Geology*, 173, 97-120.
- Mohamed, A.W. and Dar, M.A. (2005) Cluster analysis and mineral provenances of recent sediments and their relation to the continental margin activity along the Red sea coast, Egypt. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 31, 29-44.
- Morton, A.C. (1984) Stability of detrital heavy minerals in Tertiary sandstones of the North Sea Basin. *Clay Minerals*, 19, 287-308.
- Morton, A.C. (1985) Heavy minerals in provenance studies. In: Zuffa, G.G. (Ed.), *Provenance of Arenites*. Reidel, Dordrecht, 249-277.
- Morton, A.C. and Hallsworth, C.R. (1999) Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones. *Sedimentary Geology*, 124, 3-29.
- Morton, A.C. and Hallsworth, C.R. (2007) Stability of detrital heavy minerals during burial diagenesis. In: Mange, M., Wright, D.K. (Eds.), *Heavy Minerals in Use: Developments in Sedimentology*, 58, 215-245.
- Neto, J.A.B. and Brehme, I. (2006) Spatial distribution of heavy metals in surficial sediments from Guanabara Bay: Rio de Janeiro, Brazil. *Environmental Geology*, 49, 1051-1063.
- Nie, J.S., Peng, W.B., Pfaff, K., Möller, A., Garzanti, E., Andò, S., Stevense, T., Birde, A., Chang, H., Song, Y.G., Liu, S.P., and Ji, S.C. (2013) Controlling factors on heavy mineral assemblages in Chinese loess and red Clay. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 381-382, 110-118.
- Schuttenhelm, R.T.E. and Laban, C. (2005) Heavy minerals, provenance and large scale dynamics of seabed sands in the Southern North Sea: Baak's (1936) heavy mineral study revisited. *Quaternary International*, 133-134, 179-193.
- Stattegger, K. (1986) Multivariate statistische Auswertung von Schwermineraldaten der alpinen Gosau und Bezüge zur plattentektonischen Entwicklung der Ostalpen während der Oberkreide. *Geologische Rundschau*, 75, 341-352.
- Stattegger, K. (1987) Heavy minerals and provenance of sands: modeling of lithological end members from river sands of northern Austria and from sandstones of Austroalpine Gosau Formation (Late Cretaceous). *Journal of Sedimentary Petrology*, 57, 301-310.
- Tsikouras, B., Pe-Piper, G., Piper, D.J.W., and Schaffer, M. (2011) Varietal heavy mineral analysis of sediment provenance, Lower Cretaceous Scotian Basin, eastern Canada. *Sedimentary Geology*, 237, 150-165.
- Vital, H., Stattegger, K., and Garbe-Schonberg, C.-D. (1999) Composition and trace-element geochemistry of detrital clay and heavy-mineral suites of the lowermost Amazon river: a provenance study. *Journal of Sedimentary Research*, 69, 563-575.
- Yang, S.Y., Wang, Z.B., Guo, Y., Li, C.X., and Cai, J.G. (2009) Heavy mineral compositions of the Changjiang (Yangtze River) sediments and their provenance-tracing implication. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35, 56-65.

---

Received December 15, 2015, Revised December 24, 2015, Accepted March 10, 2016, Responsibility Editor: Hyen Goo Cho