

황해남동니질대와 제주남서니질대 표층퇴적물의 중광물 특성 비교 연구

Characteristics of Heavy Minerals in the South East Yellow Sea Mud (SEYSM) and South West Cheju Island Mud (SWCIM)

구효진(Hyo Jin Koo)¹ · 조현구(Hyen Goo Cho)^{1,*} · 이부영(Bu Yeong Lee)¹ · 이희일(Hi Il Yi)²

¹경상대학교 지질과학과 및 기초과학연구소

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

²한국해양과학기술원 해저환경자원연구본부

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

요약 : 조립질 퇴적물의 근원지에 관한 정보를 제공할 뿐만 아니라 유용 광물자원으로서의 가치를 지니는 황해남동니질대와 제주남서니질대 표층퇴적물 내 중광물의 특성을 비교 연구하였다. 두 지역에서 각각 28개씩 시료를 선정하여 중광물을 분리한 후 실체현미경과 주사전자현미경 관찰, 에너지 분산형 분광분석과 전자현미분석을 실시하였다. 각섬석과 녹염석은 연구지역에서 주된 중광물로서 두 광물의 합계 함량이 70% 이상을 점유한다. 저어콘과 스피넬은 황해남동니질대에서, 인회석과 금홍석은 제주남서니질대에서 상대적으로 많은 함량을 나타내며, 모나자이트는 황해남동니질대 일부 지역에서만 산출된다. 스피넬과 모나자이트 함량은 황해남동니질대 북부에서 남부로 갈수록 감소하는 경향을 보여준다. 황해남동니질대는 낮은 석류석-저어콘 지수와 금홍석-저어콘 지수를 가지는데 반하여, 제주남서니질대는 높은 석류석-저어콘 지수와 금홍석-저어콘 지수를 가진다. 각섬석의 경우 황해남동니질대는 대부분 보통각섬석에 해당되지만, 제주남서니질대는 파가사이트, 처마카이트, 보통각섬석, 투각섬석 등 다양한 조성을 가진다. 황해남동니질대 지역의 석류석은 높은 Mg와 낮은 Ca 함량을, 제주남서니질대 지역 석류석은 낮은 Mg와 다양한 Ca 함량을 가진다. 이와 같이 두 지역의 중광물 특성이 서로 다른 것은 두 지역의 퇴적물 기원지가 다르다는 것을 지시한다. 황해남동니질대의 퇴적물 기원지는 인접한 한반도의 서해안으로 유입되는 하천 퇴적물인 것으로 여겨지나, 추후 황해로 유입되는 강 퇴적물과 해양 퇴적물에 대한 추가적인 중광물 연구가 진행되어야만 정확한 기원지와 퇴적과정에 대한 해석을 할 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 : 황해남동니질대, 제주남서니질대, 중광물, 각섬석, 석류석, 모나자이트, 광물화학

ABSTRACT : Heavy mineral provide an important information for sediment provenance as well as a potential submarine mineral resources. We compared the heavy mineral characteristics between Southeastern Yellow Sea Mud (SEYSM) and Southwestern Cheju Island Mud (SWCIM) surface sediments. We separated heavy minerals from 28 surface sediments in each mudbelt, and then carried out stereo-microscopic, field-emission scanning electron microscopic, energy dispersive spectroscopic

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

and electron probe microanalysis to characterize the type, abundance, mineralogical properties and distribution pattern of heavy mineral. Amphibole and epidote, which are two major heavy minerals, account for more than 70% of total heavy minerals. Zircon and sphene contents are more abundant in SEYSM, whereas apatite and rutile contents are more abundant in SWCIM. Monazite only occurs in some area of SEYSM. Sphene and monazite content decrease to the south in SEYSM. Both garnet-zircon index (GZi) and rutile-zircon index (RuZi) are low in SEYSM but high in SWCIM. Amphiboles in SEYSM primarily correspond to hornblende, however those in SWCIM represent variable composition from pargasite, tschermakite, hornblende to tremolite. Garnets in SEYSM have high Mg and low Ca, but those in SWCIM have low Mg with variable Ca. Different heavy mineral characteristics between SEYSM and SWCIM suggests that sediments in each mudbelt have different provenances. Although this study implies that SEYSM sediment may mostly come from nearby Korean western rivers such as the Keum and Han rivers, this study does not suggest any idea of the source area of SWCIM sediment. Further study is needed to interpret the provenance and transportation mechanism of mudbelt sediments through the heavy mineral research for the river sediments flowing into the Yellow Sea and much more marine sediments.

Key words : Southeastern Yellow Sea Mud (SEYSM), Southwestern Cheju Island Mud (SWCIM), heavy mineral, epidote, amphibole, garnet, monazite, mineral chemistry

서 론

중광물이란 석영(S.G. = 2.65) 또는 장석(S.G. = 2.54~2.76)보다 비중이 큰 광물로써, 일반적으로 비중이 2.8 이상인 광물을 말한다. 지각을 이루는 암석 내에서 중광물은 대체로 1% 미만으로 존재하며, 주로 규산염광물이나 산화염광물에 속한다. 이들 중광물 중 많은 광물들이 화학적 풍화나 기계적 마모에 강하기 때문에 퇴적물의 기원지, 특히 조립질 퇴적물의 특성을 재구성하거나 퇴적물의 이동경로 추적에 유용하게 활용되고 있다(Lee *et al.*, 1997).

황해와 동중국해는 한반도와 중국 대륙 사이에 위치하며, 중국 대륙의 황하와 양자강 및 한국 연안의 강들로부터 막대한 양의 육상기원 퇴적물이 유입되어 집적되고 있다(Milliman and Meade, 1983). 이들로부터 공급된 퇴적물은 중국과 한국의 연안, 황해 중앙부, 그리고 제주도 남서쪽의 북동중국해 대륙붕에 독립적으로 퇴적되어 몇 개의 특징적인 니질대를 형성하는데, 황해중앙니질대(Central Yellow Sea Mud, CYSM), 황해남동니질대(Southeastern Yellow Sea Mud, SEYSM)와 제주남서니질대(Southwestern Cheju Island Mud, SWCIM) 등이 대표적이다. 이러한 니질대는 황해-동중국해의 독특한 해류 시스템에 의해 발달하는 와류와 용승 작용에 의해 형성된다(Hu, 1984, Shi *et al.*, 2003).

이번 연구에서는 황해남동니질대(SEYSM)와 제주도남서니질대(SWCIM)에 포함되어 있는 중광물

의 종류 및 함량을 알아보고, 각 중광물의 분포특성을 바탕으로 두 니질대의 중광물 특성을 비교하고자 하였다.

황해남동니질대 해역 퇴적물의 중광물 구성에 대하여 Lee *et al.* (1988)은 각섬석이 가장 많고 녹염석이 그 다음으로 많은 양을 차지하며, 석류석, 저어콘, 전기석, 금홍석, 스핀, 모나자이트 등이 포함되어 있다고 보고하였다. Kang (2003)은 충청남도 해안에 발달한 해빈과 해안사구의 중광물은 각섬석과 녹염석으로 주로 구성되며, 전기석, 저어콘, 철산화물이 소량 포함되어 있고, Chae *et al.* (2007)은 전라남도 신안군 자은도 해빈사의 중광물 역시 각섬석과 녹염석이 주를 이루며, 티탄철석, 저어콘, 금홍석, 아나타제, 모나자이트 및 제노타임 등이 일부 포함된다고 보고하였다. Lee *et al.* (2004)는 한강 퇴적물의 중광물은 각섬석이 주를 이루며, 티탄철석, 석류석, 녹염석, 금홍석, 스핀 등이 포함된다고 보고하였다. 황해남동니질대 해역과 근원지로 여겨지는 하천과 해빈 퇴적물에 대한 중광물 연구를 토대로 황해남동니질대 퇴적물은 인접한 한반도 서쪽에 분포하는 화성암 및 변성암에서 기원하였을 것으로 생각된다.

그러나 현재까지 황해남동니질대 지역에 대한 중광물 연구는 매우 부족하며, 더욱 제주남서니질대 지역에 대한 중광물 연구는 거의 없는 실정이다. 따라서 이들 지역에 대하여 많은 시료를 바탕으로 한 체계적인 중광물 연구가 필요한 실정이다.

Table 1. Heavy Mineral Composition in the Surface Sediment of the South East Yellow Sea Mud (SEYSM)

#	count	Amp	Ep	Zrn	Spn	Grt	Ap	Rt	Moz
G-7	191	35.3	30.1	3.8	12.2	7.7	8.3	2.6	-
G-8	193	31.0	31.6	-	16.8	11.6	5.8	3.2	-
G-33	281	44.5	38.6	3.5	7.9	4.7	-	0.8	-
G-87	180	32.1	39.4	10.9	13.3	3.6	-	0.6	-
G-106	191	51.9	30.4	2.8	9.9	1.7	-	2.8	0.6
G-113	311	52.2	40.1	1.0	3.8	1.0	0.3	1.4	-
11YS-105	204	32.4	34.6	22.9	1.7	6.7	1.1	0.0	0.6
11YS-111	193	33.5	40.9	1.2	12.2	8.5	-	3.7	-
11YS-123	118	31.8	24.3	24.3	5.6	4.7	3.7	2.8	2.8
11YS-174	208	26.7	29.3	27.7	7.3	4.7	2.1	1.6	0.5
11YS-169	258	31.0	37.1	17.1	5.7	4.1	1.2	2.9	0.8
12HMB-P03	277	44.6	41.0	1.1	7.0	4.8	1.5	-	-
12HMB-B14	164	41.4	36.9	8.3	3.8	4.5	1.3	3.8	-
12HMB-B16	106	48.0	38.0	1.0	6.0	5.0	1.0	1.0	-
11YS-125	376	23.3	23.3	7.5	17.2	13.6	11.1	3.2	0.7
11YS-126	198	40.9	28.7	7.7	12.7	5.5	1.1	2.2	1.1
11YS-127	288	45.0	30.8	2.7	9.2	8.1	2.3	1.9	-
11YS-132	209	40.2	29.6	-	15.6	5.0	1.7	7.8	-
11YS-145	255	36.2	28.1	15.4	8.1	5.9	2.7	3.2	0.5
11YS-148	334	51.4	29.3	4.8	8.2	5.1	0.7	0.7	0.0
11YS-159	265	30.9	32.9	14.1	12.0	3.6	-	2.4	4.0
11YS-163	318	26.8	24.2	23.5	11.7	1.0	10.1	0.7	2.0
11YS-185	272	40.1	35.5	6.1	13.4	3.4	-	1.5	-
11YS-190	461	33.2	30.8	18.1	6.1	11.1	-	0.5	0.2
11YS-137	388	42.7	39.1	1.4	5.6	8.9	1.1	1.1	-
11YS-147	523	34.2	35.3	12.3	10.4	6.1	1.0	0.6	-
11YS-162	361	36.4	35.0	9.0	8.1	9.2	0.9	1.2	0.3
11YS-193	230	29.7	34.4	15.6	7.1	9.4	1.4	1.4	0.9
avg	263	37.4	33.2	10.1	9.2	6.0	2.9	2.1	1.1

*Abbreviation : Amp, amphibole; Ep, epidote; Zrn, zircon; Spn, sphene; Grt, garnet; Ap, apatite; Rt, rutile; Moz, monazite.

연구 재료 및 방법

이번 연구에 사용된 시료는 한국해양과학기술원(KIOST, Korea Institute of Ocean Science and Technology)과 한국지질자원연구원(KIGAM, Korea Institute of Geology and Mineral Resources)에서 채취된 표층 5 cm 이내의 퇴적물 총 240개의 시료 중, 모래 비율이 20% 이상이 되는 것들을 황해남동니질대와 제주남서니질대 각각 28개씩 선정하여

총 56개에 대하여 실험을 진행하였다. 중광물을 분리하기 위하여 시료 전처리, 자성 광물 분리 및 중액 분리 과정을 수행하였으며, 자세한 실험 과정은 Lee *et al.* (2016)의 방법에 따라 실시하였다.

분리한 중광물은 실체현미경을 사용하여 크기, 색깔 및 모양에 따라 구분하였으며, 전계방출형 주사전자현미경(FE SEM, Field-Emission Scanning Electron Microscope) 관찰을 통해 중광물 표면의 미세 조직을 관찰하였다. 중광물의 정확한 감정을

Table 2. Heavy Mineral Composition in the Surface Sediment of the South West Ceju Island Mud (SWCIM)

#	count	Amp	Ep	Zrn	Spn	Grt	Ap	Rt
07G-19	155	29.1	33.1	-	11.0	11.8	13.4	1.6
07G-21	167	32.9	32.2	-	4.1	13.0	15.8	2.1
07G-23	174	34.9	30.9	2.6	5.3	10.5	9.9	5.9
07G-26	202	47.4	35.3	-	2.9	4.6	4.6	5.2
07G-29	186	56.5	24.7	5.3	1.8	7.6	-	4.1
07G-33	197	40.3	34.7	2.8	1.1	9.7	7.4	4.0
07G-36	187	39.8	30.4	-	5.0	9.3	8.7	6.8
07G-42	155	47.3	26.4	-	7.0	9.3	7.0	3.1
07G-45	195	27.1	30.7	3.0	13.9	10.2	14.5	0.6
07G-53	144	39.0	38.1	-	1.7	4.2	8.5	8.5
07G-54	189	33.3	34.5	2.4	7.3	10.3	9.7	2.4
07G-59	150	47.1	27.2	4.4	5.9	5.9	4.4	5.1
07G-62	206	31.6	41.2	2.8	3.4	11.3	5.1	4.5
07G-69	119	34.0	35.0	3.0	3.0	5.0	12.0	8.0
07G-70	150	41.2	33.3	3.5	7.0	4.4	5.3	5.3
07G-77	184	31.9	42.3	2.5	3.1	8.6	6.7	4.9
07G-80	146	42.6	31.1	4.1	2.5	8.2	6.6	4.9
07G-85	208	46.3	35.6	4.3	1.6	7.4	-	4.8
07G-90	198	44.2	37.4	1.2	2.5	4.9	7.4	2.5
07G-93	140	47.9	37.2	0.8	3.3	3.3	4.1	3.3
07G-94	177	43.7	38.4	2.0	2.0	5.3	5.3	3.3
07G-98	196	38.8	34.8	4.5	1.1	9.6	7.3	3.9
OG-01	195	51.4	38.4	1.7	0.6	4.5	1.7	1.7
OG-06	145	36.4	34.9	-	7.0	3.1	14.7	3.9
OG-53	185	55.9	33.5	2.2	1.1	2.8	3.4	1.1
OG-55	202	46.4	37.2	3.3	2.7	3.3	4.4	2.7
OG-59	212	50.3	27.8	-	3.0	8.9	7.7	2.4
OG-63	176	44.9	29.9	6.6	3.6	6.0	3.0	6.0
avg	176	41.5	33.8	3.2	4.1	7.3	7.6	4.0

*Abbreviations are the same as in Table 1.

위하여 에너지 분산형 분광분석기(EDS, Energy Dispersive Spectrometer)를 사용하여 화학조성을 분석하였다. 중광물 중 각섬석, 녹염석 및 석류석은 전자현미분석(EPMA, Electron Probe Micro-Analyzer) 분석을 실시하여 정확한 화학 조성을 구하였다. 약 12,000개의 입자를 실체현미경으로 관찰하였고, 이 중 1,500개 입자를 FE-SEM을 이용하여 분석하였다. FE-SEM과 EPMA 분석은 경상대학교 공동실험실습관에서 보유하고 있는 JSM-

7610F FE-SEM과 JEOL JXA-8100을 사용하였다.

결 과

황해남동니질대와 제주남서니질대의 표층 퇴적물 시료 각각 28개에 대하여 실체현미경, FE-SEM 및 EDS를 이용하여 중광물 분석한 결과는 Table 1과 Table 2에 각각 나타나 있다. 중광물 함량은 황해남동니질대가 제주남서니질대보다 월등히 많

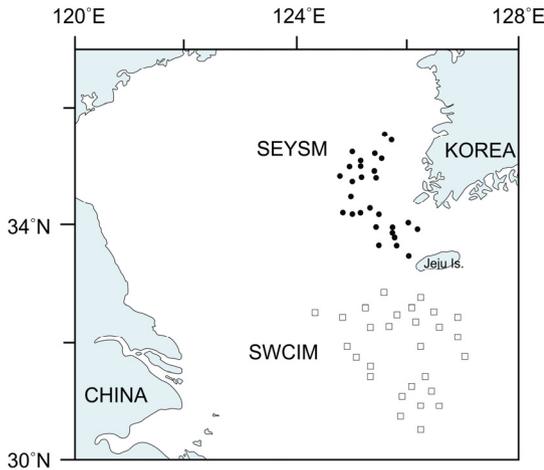


Fig. 1. Marine sediment sample location map used in this study.

은 것을 알 수 있다. 황해남동니질대의 경우 중광물 함량은 각섬석, 녹염석, 저어콘, 스피넬, 석류석, 인회석, 금홍석, 모나자이트 순으로 존재하는데 반하여, 제주남서니질대에서는 각섬석, 녹염석, 인회석, 석류석, 스피넬, 금홍석, 저어콘 순으로 산출된다. 각섬석은 황해남동니질대와 제주남서니질대 두 지역 모두에서 가장 많이 존재하는 중광물로서 각각 37.4%와 41.5%이며, 녹염석은 두 지역 모두에서 두 번째로 많이 산출되는데 각각 33.2%와 33.8%이다. 각섬석과 녹염석은 두 지역 모두에서 중광물의 주구성광물로서 그 합은 70% 이상이다. 저어콘과 스피넬은 황해남동니질대에서, 그리고 인회석과 금홍석은 제주남서니질대에서 우세하게 산출되는 경향을 보였다.

연구지역의 중광물 중 가장 많은 함량을 나타내는 각섬석은 진한 초록색을 띠며, 대체로 주상이고 각진 형태로 산출되었으며 한 방향의 쪼개짐이 관찰되었다. SEM 관찰 결과에서도 각진 형태와 쪼개짐이 잘 나타난다(Fig. 2A). 두 번째로 많이 존재하는 중광물인 녹염석은 옅은 초록빛을 띠고, 원마도가 좋지 않고 모양이 불규칙적이었으며, SEM 관찰결과 표면에 여러 개의 균열과 마모를 심하게 받은 부분이 존재하여 풍화를 받은 것을 알 수 있었다(Fig. 2B).

저어콘은 옅은 갈색 내지 짙은 갈색을, 저어콘 특유의 각진 다면체형의 입자를 나타내는 것과 타원형의 입자가 주로 산출되었다(Fig. 2C, Fig. 3B). 석류석은 연분홍색이나 옅은 빨간색을 띠며, 모양

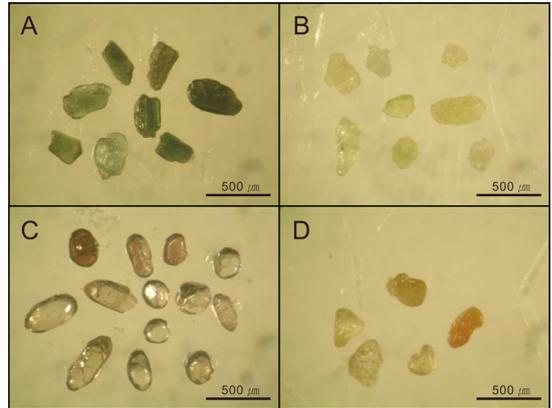


Fig. 2. Microphotographs of heavy minerals. A. amphibole, B. epidote, C. garnet, D. monazite.

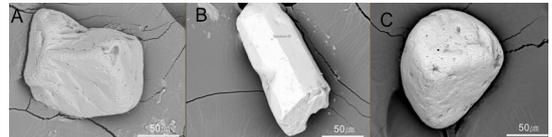


Fig. 3. FE-SEM photographs of heavy minerals. A. sphene, B. zircon, C. monazite.

은 불규칙적이고 각진 형태로, SEM 관찰 결과 표면이 다른 광물 입자에 비해 상대적으로 매끄럽다. 특히 제주남서니질대의 석류석은 황해남동니질대의 석류석에 비해 입자 표면이 깨끗하고 모양이 각진 것을 통해 풍화를 덜 받은 것으로 판단되었다. 스피넬은 노란빛을 띠며 실제현미경상에서 석류석과 비슷한 모양으로 관찰되었으나 SEM 관찰에서 표면이 거칠어 그 차이를 확인할 수 있었다(Fig. 3A). 인회석은 타 광물에 비해 원마도와 구형도가 상대적으로 뛰어나지만 주상의 형태를 띠는 것도 관찰되었다. 금홍석은 짙은 붉은색을 띠며, 주상의 입자와 불규칙적인 형태의 입자가 나타난다. 황해남동니질대의 일부 지역에서 발견된 모나자이트는 옅은 초록빛 내지 주황빛으로 나타났으며, 원마도가 뛰어나게 관찰되었다(Fig. 3C).

토 론

중광물 분포

중광물은 해양 퇴적물, 특히 조립질 퇴적물의 근원지 추적과 해양 광물 자원 탐사 측면에서 주목을 받고 있다(Lee *et al.*, 1988; Kang, 2003; Lee *et*

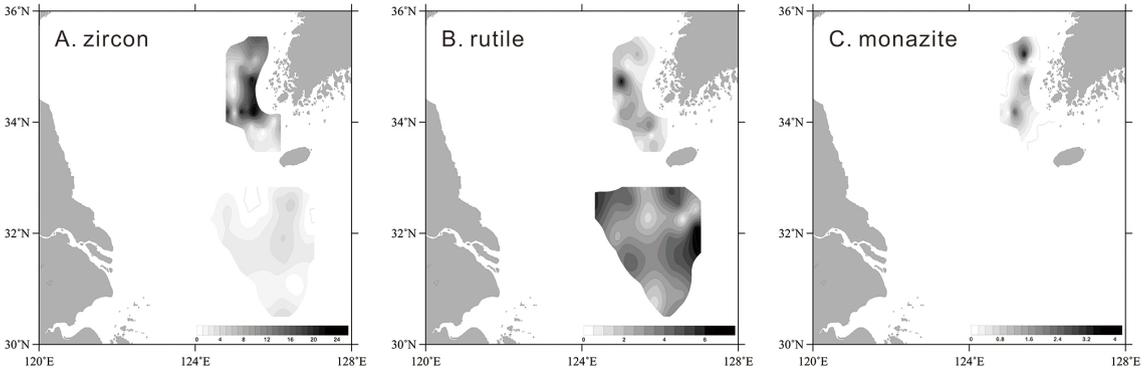


Fig. 4. Heavy mineral distribution map. A. zircon, B. rutile, C. monazite.

al., 2004; Chae *et al.*, 2007, 2009, 2011). 중광물 중 유용광물 자원으로 여겨지는 저어콘과 모나자이트는 황해남동니질대에서, 금홍석은 제주남서니질대에서 상대적으로 많이 존재한다. 이번 연구의 목적은 황해남동니질대와 제주남서니질대 두 지역 내 중광물 특성이 어떤 차이가 있는가를 규명하는 것이므로, 중광물 분포도, 중광물 지수 및 중광물의 광물화학분석을 통하여 황해남동니질대와 제주남서니질대 두 지역의 차이를 보다 자세하게 연구하였다.

각섬석의 경우 황해남동니질대 북부보다 남부 지역이 더 많은 함량을 나타내며, 제주남서니질대에서는 중심부 지역이 외곽 지역보다 더 많은 함량을 나타낸다. 녹염석은 황해남동니질대 서부보다 동부 지역이 더 많지만, 제주남서니질대의 경우 동부보다 서부 지역이 더 많이 존재한다. 저어콘의 경우 황해남동니질대가 제주남서니질대보다 더 많은 양 존재하며, 특히 황해남동니질대 동부에서 서부로 갈수록 감소하는 경향을 잘 보여준다(Fig. 4A). 스피넬 역시 황해남동니질대가 제주남서니질대보다 더 많은 양 존재하며, 황해남동니질대 북부에서 남부로 갈수록 감소하는 경향을 잘 보여준다. 그러나 금홍석은 황해남동니질대보다 제주남서니질대에 더 우세하며, 제주남서니질대에서는 외곽 지역이 중심부 지역보다 더 많은 함량을 나타낸다(Fig. 4B). 황해남동니질대에서만 산출되는 모나자이트는 북부에서 남부로 갈수록 감소하는 경향을 나타낸다(Fig. 4C). 황해남동니질대에서 모나자이트 산출은 한반도 서해안을 따라 존재하는 모나자이트 사광상과 매우 밀접한 연관을 가지는 것으로 판단된다. 모나자이트의 궁극적인 공급원은 호남지역에 분포하는 북운모화강암과 화강편마암인 것으로

보고되어 있다. 화강암 또는 편마암내의 조암광물 중 모나자이트의 존재 또는 성분 등(Park and Lee, 1968).

황해남동니질대 내 중광물 분포 특성을 통하여 조립질 퇴적물들이 가까운 한반도의 서해안으로부터 공급된 것임을 알 수 있다. 제주남서니질대 조립질 퇴적물의 공급지는 이 자료만으로는 판단할 수 없지만 최소한 황해남동니질대와 다른 것은 알 수 있다.

중광물 지수

중광물 연구에서는 기계적·화학적 풍화에 대한 안정도가 다른 저어콘, 석류석, 금홍석, 인회석 및 모나자이트 등을 이용하여 다양한 중광물 지수(heavy mineral index)가 퇴적물의 특성을 해석하는데 이용되고 있다(Morton and Hallsworth, 1994; Hallsworth *et al.*, 2000; Hallsworth and Chisholm, 2008). 이번 연구에서는 석류석, 저어콘, 금홍석 등 세 광물은 연구 지역 거의 모두에서 다 산출되기 때문에, 이들을 포함하는 석류석-저어콘 지수(GZi; the garnet-zircon index)와 금홍석-저어콘 지수(RuZi; the rutile-zircon index)를 이용하여 황해남동니질대와 제주남서니질대 두 지역 중광물 특성을 비교하였다.

석류석-저어콘 지수와 금홍석-저어콘 지수는 서로 양의 상관관계를 잘 나타내는데 황해남동니질대보다 제주남서니질대에서 상관관계가 더 양호하게 보인다. 황해남동니질대의 경우 석류석-저어콘 지수와 금홍석-저어콘 지수가 매우 넓게 분포하는데 반하여, 제주남서니질대에서는 두 지수 모두가 제한된 지역 내에 한정되는 특성을 나타낸다. 석류

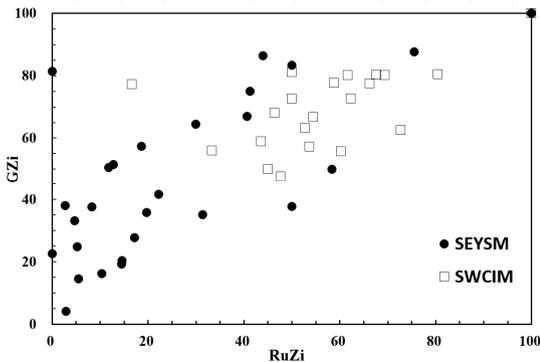


Fig. 5. Binary plot for RuZi and GZi of SEYSM and SWCIM sediments. RuZi; $100 \times \text{rutile}/(\text{rutile} + \text{zircon})$, GZi; $100 \times \text{garnet}/(\text{garnet} + \text{zircon})$

석-저어콘 지수와 금홍석-저어콘 지수는 황해남동니질대는 낮은 석류석-저어콘 지수와 금홍석-저어콘 지수를, 제주남서니질대는 높은 석류석-저어콘 지수와 금홍석-저어콘 지수를 가진다. 이러한 중광물 지수에서도 두 지역은 매우 다른 특성을 가지는 것으로 보아 퇴적물 기원지가 다를 가능성이 매우 높다는 것을 시사한다.

중광물의 광물화학

전자현미분석을 이용한 광물화학(mineral chemistry) 연구는 실체현미경 관찰을 통한 중광물 감정을 증빙할 수 있을 뿐만 아니라 광물군(mineral group) 내 광물종(mineral species)의 결정과 광물군 내 화학조성의 변화를 고찰할 수 있게 해 준다(Morton, 1994, 1999). 광물군이나 광물종과 같은 한 광물상(mineral phases) 내 화학조성의 다양성은 서로 다른 근원암을 구별할 수 있게 해 주고, 근원암의 암석학적 특성에 관한 정보를 제공해 준다(von Eynatten *et al.*, 1999). 그러므로 중광물에 대한 광물화학 연구는 근원암이나 근원지의 특성에 관한 중요한 정보를 알아낼 수 있으므로 많은 학자들에 의해 연구가 수행되어 왔다. 중광물 중 각섬석과 석류석은 가장 흔히 존재하는 중광물 중 하나이고, 풍화나 매몰 속성과과정에서 상대적으로 안정하고, 다양한 화학조성을 가지고 있기 때문에 이들에 대한 광물 화학적인 연구가 많이 수행되고 있다(Mange and Morton, 2007; Decou *et al.*, 2011).

각섬석은 연구지역에서 가장 많이 존재하는 중광물이다. 각섬석의 일반화학식은 $W_{0-1}X_2Y_3Z_8O_{22}(OH)_2$

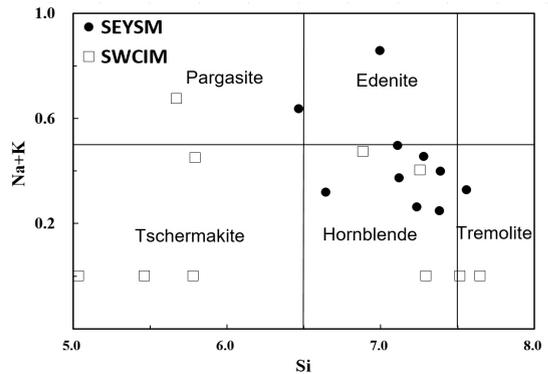


Fig. 6. Classification of calcic amphiboles expressed as numbers of (Na+K) in A site and Si atoms per formula unit.

로 나타낼 수 있는데, W는 10-12 배위수를 가지는 A 자리에 해당되며 Na와 K가 들어가고, X는 6-8 배위수를 가지는 M4 자리로써, Ca^{2+} , Na^+ , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Mg^{2+} , Li^+ 등이 들어갈 수 있다(Klein and Dutrow, 2007). Y는 M1, M2 및 M3 팔면체 자리에 해당되며, Mn^{2+} , Fe^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} , Ti^{4+} 등이 들어가며, Z는 사면체 자리로써, Si와 Al이 주로 들어간다. 각섬석군 광물은 A, M4, M3, M2 및 M1 자리에 들어가는 양이온의 종류에 따라 매우 다양하게 분류된다. 이번 연구지역에서 산출되는 각섬석은 거의 대부분 A site에는 주로 Na와 약간의 K가, M4 자리에는 Ca이 대부분을 차지하는 칼슘 각섬석(calcic amphibole)에 해당된다. 칼슘 각섬석군은 (Na + K)의 함량과 사면체 자리에 포함된 Si 함량에 따라 다시 파가사이트(pargasite), 에데나이트(edenite), 처마카이트(tschermakite), 보통각섬석(hornblende) 및 투각섬석(tremolite) 등 5가지 광물로 세분할 수 있다(Hawthorne, 1981; Hawthorne *et al.*, 2012).

황해남동니질대에서 산출된 각섬석은 대부분 보통각섬석에 해당되며, 일부 파가사이트와 투각섬석에 해당되는 것도 존재한다. 이에 반하여 제주남서니질대에서 산출된 각섬석은 파가사이트, 처마카이트, 보통각섬석, 투각섬석 등 다양한 조성을 가진다. 각섬석의 광물화학적 특성에서도 황해남동니질대와 제주남서니질대 두 지역은 뚜렷하게 구별되는 것으로 보아 이 역시 퇴적물 기원이 서로 다를 가능성을 시사하고 있다.

석류석은 황해남동니질대와 제주남서니질대 두 지역 모두에서 비슷한 함량을 가지고 있다. 석류석

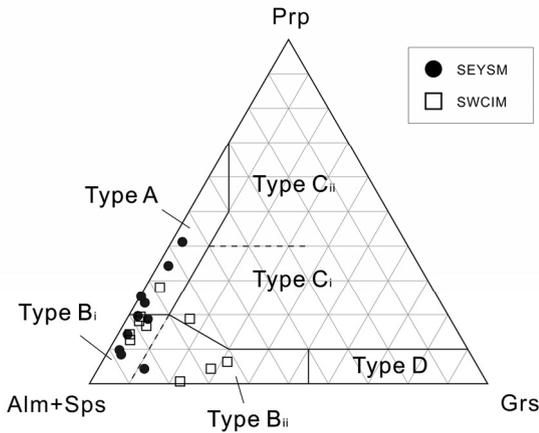


Fig. 7. Classification of garnet almandine (Alm) + spessartine (Sps) - pyrope (Prp) - grossular (Grs) ternary diagram showing definition of garnet types A, B, C and D.

의 일반화화학식은 $A_3B_2(SiO_4)_3$ 로 나타낼 수 있는데, A자리는 8배위수를 가지는 자리로써 상대적으로 크기가 큰 2가의 양이온(Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+})이, B자리는 6배위수에 해당하며 상대적으로 크기가 작은 3가 양이온(Al^{3+} , Fe^{3+} , Cr^{3+})이 점유한다. 석류석군 광물은 A와 B자리에 어떠한 양이온이 들어가느냐에 따라 세분된다(Klein and Dutrow, 2007). 연구 지역의 석류석은 B자리에는 Al^{3+} 이, A자리에는 Fe^{2+} , Mg^{2+} , Mn^{2+} 이 포함된 파이랄스파이트(pyralspite)군 석류석이며, 이 중 A자리에 Fe^{2+} 의 함량이 많은 알만딘(almandine)-스페사르틴(spessartine)으로 판단된다. 황해남동니질대보다 제주남서니질대에 Mn과 Ca의 함량이 더 많았다.

석류석의 광물화학적 특성을 (알만딘 + 스페샤틴) - 파이로프(pyrope) - 그로술라(grossular) 삼각다이어그램을 이용하여 해석하여 보았다(Mange and Morton, 2007). 황해남동니질대 지역의 석류석은 거의 모두 Type A와 Type Bi에 해당되지만, 제주남서니질대 지역 석류석은 Type Bi과 Type Bii에 해당한다(Fig. 7). 이 삼각다이어그램을 이용하여 많은 학자들이 석류석 기원지를 연구하였다(Morton *et al.*, 2004, 2005, 2011; Whitham *et al.*, 2004; Mange and Morton, 2007; Meinhold *et al.*, 2010). 높은 Mg와 낮은 Ca 함량을 가지는 Type A 석류석은 주로 고변성 퇴적기원의 변성암(백립암상)이나 카노카이트(charnockite)에서 주로 기원하고 일부 중성-산성 화성암에서도 유래하기도 한

다. 이에 반하여 낮은 Mg와 다양한 Ca 함량을 가지는 Type B 석류석은 각섬암상 변성퇴적암에서 주로 형성되지만, 중성-산성 화성암에서도 일부 Type Bi 석류석이 기원하기도 한다.

황해남동니질대 퇴적물 내 중광물은 주로 각섬석과 녹염석으로 구성되며, 저어콘과 스피넬 등이 포함되어 있었다. 거의 비슷한 지역에 대한 기존 연구에 의하면 중광물 종류는 비슷하지만 본 연구에 비하여 녹염석 함량(17.3%)은 더 낮고, 각섬석 함량(53.7%)은 더 높게 나타난다(Lee *et al.*, 1988). 충청남도 해빈과 해안사구에 대하여 조사한 결과도 중광물 경향은 본 연구와 유사한 결과를 보이고 있다(Lee *et al.*, 1997; Kang, 2003). 또한 모나자이트가 한반도 서해안을 따라 유입되는 하천이나 해안의 모래 속에 포함되어 있다(Park and Lee, 1968). 이를 바탕으로, 황해남동니질대의 조립질 퇴적물은 인접한 한국연안에서 황해 쪽으로 유입되는 하천으로부터 유래한 것으로 해석될 수 있다(Lee *et al.*, 1988; Lee and Chough, 1989). 해양 퇴적물의 근원지를 정확하게 연구하기 위해서는 퇴적물 유입 경로와 주변 하천 퇴적물에 대한 중광물 연구가 필수적이므로, 추후 하천 퇴적물에 대한 중광물 연구가 수행될 경우 더욱 정확한 퇴적물 근원지와 이동 경로에 대한 해석을 할 수 있을 것으로 판단된다.

결론

황해남동니질대와 제주남서니질대 표층 퇴적물 내에 포함된 중광물 특성을 비교하여 연구한 결과는 다음과 같다.

(1) 황해남동니질대와 제주남서니질대 모두 각섬석과 녹염석 함량이 70% 이상을 점유한다. 황해남동니질대의 경우 저어콘과 스피넬이, 제주남서니질대의 경우 인회석과 금홍석이 상대적으로 많은 함량을 나타내며, 모나자이트는 황해남동니질대 일부 지역에서만 산출된다.

(2) 저어콘의 경우 황해남동니질대 동부에서 서부로 갈수록 감소하는 경향을, 스피넬과 모나자이트는 황해남동니질대 북부에서 남부로 갈수록 감소하는 경향을 보여준다. 금홍석은 제주남서니질대 외곽 지역이 중심부 지역보다 더 많은 함량을 나타낸다.

(3) 황해남동니질대는 낮은 석류석-저어콘 지수와 금홍석-저어콘 지수를, 제주남서니질대는 높은 석류석-저어콘 지수와 금홍석-저어콘 지수를 가진다.

(4) 황해남동니질대에서 산출된 각섬석은 대부분 보통각섬석에 해당되지만, 제주남서니질대에서 산출된 각섬석은 파가사이트, 처마카이트, 보통각섬석, 투각섬석 등 다양한 조성을 가진다. 황해남동니질대 지역의 석류석은 높은 Mg와 낮은 Ca 함량을 가지는 Type A와 Type Bi에 해당되지만, 제주남서니질대 지역 석류석은 낮은 Mg와 다양한 Ca 함량을 가지는 Type B에 해당한다.

(5) 중광물 종류와 함량, 중광물 분포도, 중광물 지수 및 중광물의 광물화학을 통하여 황해남동니질대와 제주남서니질대는 서로 다른 특성을 가지는 것으로 여겨지며, 이것은 퇴적물 기원지가 다르다는 것을 지시한다.

사 사

이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원 기초연구사업(과제번호 : 2017R1D1A1B03027818)과 한국해양과학기술원 (낙동강하구 관리를 위한 환경변화연구, 과제번호 PE99533)의 일환으로 수행되었습니다. 실내실험과 자료 처리에 많은 도움을 준 점토실험실의 남상규, 한정아 학생에게 감사를 표한다. 부족한 원고를 열심히 읽고 유익한 지적을 하여 주신 채수천 박사님과 익명의 심사자에게도 감사들 드립니다.

REFERENCES

- Chae, S.C., Shin, H.Y., Jung, J.S., Jang, Y.N., and Bae, I.K. (2007) Mineralogy of beach sand in Jaeyun 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).
- Decou, A., H. von Eynatten, A., M. Mamani, M., T. Sempere, T., and G. Wörner, G. (2011) Cenozoic forearc basin sediments in Southern Peru (15-18°S): Stratigraphic and heavy mineral constraints for Eocene to Miocene evolution of the Central Andes. *Sedimentary Geology*, 237, 55-72.
- Hallsworth, C.R. and Chisholm, J.I. (2008) Provenance of late Carboniferous sandstones in the Pennine Basin (UK) from combined heavy mineral, garnet geochemistry and palaeocurrent studies. *Sedimentary Geology*, 203, 196-212.
- Hallsworth, C.R., Morton, A.C., Claoue-Long, J., and Fanning, C.M. (2000) Carboniferous sand provenance in the Pennine Basin, UK: constraints from heavy mineral and detrital zircon age data. *Sedimentary Geology*, 137, 147-185.
- Hawthorne, F.C. (1981) Crystal chemistry of the amphiboles. In: Veblen, D.R. (ed) *Amphiboles and their Other Hydrous Pyriboles-Mineralogy*, *Reviews in Mineralogy*, 9A, 1-102.
- Hawthorne, F.C., Oberti, R., Harlow, G.E., Maresch, W.V., Martin, R.F., Schumacher, J.C., and Welch, M.D. (2012) Nomenclature of the amphibole supergroup. *American Mineralogist*, 97, 2031-2048.
- Hu, D.X. (1984) Upwelling and sedimentation dynamics. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2, 12-19.
- 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).
- Klein, C. and Dutrow, B. (2009) *Manual of Mineral Science* (23th Ed.). John Woley & Sons, INC., New York, 444-498.
- Lee, B.Y., Cho, H.G., Kim, S.-O., and Hi Il Yi, H. Y. (2016) Preliminary Study of Heavy Minerals in the Central Yellow Sea Mud. *Journal of Mineralogical Society of Korea*, 29(1), 1-10 (in Korean with English abstract).
- Lee, H.J. and Chough, S.K. (1989) Sediment distribution, dispersal and budget in the Yellow Sea. *Marine Geology*, 87, 255-266.
- Lee, H.B., Oh, J.K., Kim, S.W., and Lee, S.R. (1997) Sedimentologic and mineralogic study in surface sediment off Bin 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, 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 drain-

- age basin, Korea. *Economic and Environmental Geology*, 37, 153-171 (in Korean with English abstract).
- Mange, M. A. and Morton, A. C. (2007) Geochemistry of heavy minerals. In: Mange, M. A. and Wright, D. T. (eds) *Heavy Minerals in Use*. Elsevier, 58, 345- 391.
- Meinhold, G., Reischmann, T., Kostopoulos, D., Frei, D., and Larionov, A.N. (2010) Mineral chemical and geochronological constraints on the age and provenance of the eastern Circum-Rhodope Belt low-grade metasedimentary rocks, NE Greece. *Sedimentary Geology*, 229, 207-223.
- Milliman, J. D. and Meade, R. H. (1983) Worldwide delivery of river sediment to the oceans. *The Journal of Geology*, 91, 1-21.
- 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. (1991) Stability of detrital heavy minerals in Tertiary sandstones of the North Sea Basin. *Clay Minerals*, 19: 287-308.
- Morton, A. C. and Hallsworth, C. R. (1994) Identifying provenance specific features of detrital heavy mineral assemblages in sandstones. *Sedimentary Geology*, 90: 241-256.
- Morton, A.C. and Hallsworth, C.R. (1999) Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones. *Sedimentary Geology*, 124, 329.
- Morton, A. C., Hallsworth, C. R., and Chalton, B. (2004) Garnet compositions in Scottish and Norwegian basement terrains: a framework for interpretation of North Sea sandstone provenance. *Marine and Petroleum Geology*, 21: 393- 410.
- Morton, A. C., Whitham, A. G., and Fanning, C. M. (2005) Provenance of Late Cretaceous to Paleocene submarine fan sandstones in the Norwegian Sea: Integration of heavy mineral, mineral chemical and zircon age data. *Sedimentary Geology*, 182: 3-28.
- Morton, A.C., Meinhold, G., Howard, J.P., Phillips, R.J., Strogon, D., Abutarruma, Y., Elgady, M., Thusu, B., and Whitham, A.G. (2011) A heavy mineral study of sandstones from the eastern margin of the Murzuq Basin, Libya: constraints on provenance and stratigraphic correlation. *Journal of African Earth Sciences*, 61, 308-330.
- Park, B.C. and Lee, J.K (1968) Monazite placer of Republic of Korea. Report for Geology and Ore Deposit, 10, 133-152 (in Korean with English abstract).
- Shi, C., Zhang, D.D., and You, L. (2003) Sediment budget of the Yellow River delta, China: the importance of dry bulk density and implications to understanding of sediment dispersal. *Marine Geology*, 199, 13-25.
- Von Eynatten, H. and Gaupp, R. (1999) Provenance of Cretaceous synorogenic sandstones in the Eastern Alps: constraints from framework petrography, heavy mineral analysis and mineral chemistry. *Sedimentary Geology*, 124, 81-111.
- Whitham, A.G., Morton, A.C., and Fanning, C.M. (2004) Insights into Cretaceous-Palaeogene sediment transport paths and basin evolution in the North Atlantic from a heavy mineral study of sandstones from southern East Greenland. *Petroleum Geoscience*, 10, 61-72.

Received August 4, 2017, Revised August 24, 2017,
Accepted August 25, 2017, Associate Editor: Chul-Min Chon