

남해중앙니질대 세립질 퇴적물의 기원지 및 이동과정 변화

Changes in Provenance and Transport Process of Fine Sediments in Central South Sea Mud

이홍금(Hong Geum Lee) · 박원영(Won Young Park) · 구효진(Hyo Jin Koo) ·
최재영(Jae Yeong Choi) · 장정규(Jeong Kyu Jang) · 조현구(Hyen Goo Cho)*

경상대학교 지질과학과 및 기초과학연구소

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

요약 : 남해 섬진강 하구유역에 발달되어 있는 남해중앙니질대는 흑산머드벨트의 퇴적물들과 섬진강의 퇴적물들을 공급받는 것으로 알려져 있다. 그러나 니질 퇴적체를 형성하기 위해서는 위 지역에서 공급되는 퇴적물보다 더 많은 양의 퇴적물이 공급되어야 하기 때문에, 추가적인 퇴적물 공급원에 대한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 남해중앙니질대 퇴적물의 기원지 및 퇴적물 유입경로의 변화를 알아보기 위해, 16PCT-GC01 및 16PCT-GC03 코어에 대해 점토광물 및 주성분원소 분석을 수행하였다. 황하 퇴적물은 스멕타이트의 함량이 높고, 양쯔강 퇴적물은 일라이트의 함량이 높으며, 한국 강 퇴적물들은 카올리나이트와 녹니석의 함량이 높다. 또한 한국 강 퇴적물은 Al, Fe, K가 풍부하고, 중국 강 퇴적물은 Ca, Mg, Na 등이 풍부하다. 따라서 점토광물과 주성분원소를 이용해 퇴적물의 기원지를 추적할 수 있다. 연구 결과, 남해중앙니질대의 코어 퇴적층은 총 3개의 퇴적 단위(sediment unit)로 구분할 수 있다. 해수면이 가장 낮은 저수위기(lowstand stage)에 해당되는 퇴적 단위 3은 황하로부터 공급된 퇴적물이 연안류 혹은 조석 작용에 의해 연구지역으로 공급된 것으로 해석되고, 해수면이 빠르게 상승하는 해침기(transgressive stage)에 해당되는 퇴적 단위 2는 황하의 영향이 약해지고 양쯔강과 한국 강들의 영향이 강해지는 것으로 해석된다. 현재와 같은 해수면과 해류의 순환이 형성된 고수위기(highstand stage)에 해당되는 퇴적 단위 1은 양쯔강과 한국 강으로부터 퇴적물이 해류를 통해 연구지역으로 공급된 것으로 해석된다.

주요어 : 점토광물, 주성분원소, 남해중앙니질대, 퇴적물 기원지, 해수면 변화

ABSTRACT : The Central South Sea Mud (CSSM), developed in the Seomjin River estuary, is known to be supplied with sediments from Heuksan Mud Belt (HMB) and Seomjin River. However, in order to form a mud belt, more sediments must be supplied than supplied in the above areas. Therefore, research on additional sources should be conducted. In this study, clay minerals, major elements analyzes were performed on cores 16PCT-GC01 and 16PCT-GC03 in order to investigate the transition in the provenance and transport pathway of sediments in CSSM. The Huanghe sediments are characterized by higher smectite and the Changjiang sediments are characterized by higher illite. Korean river sediments contain more kaolinite and chlorite than those of chinese rivers. Korean river sediments have higher Al, Fe, K concentraion than Chinese river sediments and Chinese rivers have higher Ca, Mg, Na than those of Korean rivers. Therefore, clay minerals and major elements can be a

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

useful indicator for provenance. Based on our results, CSSM can be divided into three sediment units. Unit 3, which corresponds to the lowstand stage, is interpreted that sediments from Huanghe were supplied to the study area by coastal or tidal currents. Unit 2, which corresponds to the transgressive stage, is interpreted to have a weaker Huanghe effect and a stronger Changjiang and Korean rivers effect. Unit 1, which corresponds to the highstand stage when the sea level is the same as present and current circulation system is formed, is interpreted that sediments from Changjiang and Korean rivers are supplied to the research area through the current.

Key words : clay mineral, major elements, Central South Sea Mud, sediment provenance, sea-level change

서 론

남해(South Sea)는 한반도 남서부의 흑산도, 동쪽의 대마도, 남쪽으로 제주도를 연결하는 한반도 남쪽 해역으로, 면적은 약 75,000 km²로 알려져 있다. 남해는 등수심선이 매우 복잡하게 발달되어 있는 리아스식 해안으로, 수심 70~80 m를 경계로 내대륙붕과 외대륙붕으로 구분된다(Park *et al.*, 1990; Park *et al.*, 1996). 또한, 주변 해류에는 한반도 연안을 따라 흐르는 한국연안류(KCC, Korea Coastal Current)와 외해로부터 유입되는 대마난류(TWC, Tsushima Warm Current)가 있다(Fig. 1).

한반도 주변에는 서해 남부의 흑산머드벨트(HMB, Heuksan Mud Belt) 또는 황해남동니질대(SEYSM, Southeast Yellow Sea Mud), 남해 중앙부의 남해중앙니질대(CSSM, Central South Sea Mud) 및 남해 동부의 대한해협니질대(KSSM, Korea Strait Shelf Mud) 등 3개의 특징적인 니질 퇴적체가 존재한다(Fig. 1). 각 니질 퇴적체들은 금강, 섬진강, 낙동강 하구 부근에 위치하며, 홀로세(Holocene) 동안 형성된 것으로 보고되었다(Park *et al.*, 1996; Kwak *et al.*, 2016; Kim *et al.*, 2018). 또한, 인접한 강들로부터 배출되는 퇴적물의 양을 고려하면, 니질 퇴적체의 형성에는 추가적인 퇴적물 공급원이 필요한 것으로 판단되어 왔다(Park *et al.*, 1996; Lim *et al.*, 2007a; Um *et al.*, 2015).

연구지역인 남해중앙니질대는 나로도(Naro-do)와 남해도(Namhae-do) 연안의 내대륙붕에 위치하며, 섬진강 하구가 위치하고 있는 광양만과 좁은 해협으로 연결되어 있다(Fig. 1a). 남해중앙니질대는 약 20~50 m 두께의 홀로세 퇴적물로 구성되며, 모래가 풍부한 퇴적물들로 분포하고 있다(Park *et al.*, 1996). 남해중앙니질대의 형성은 약 5 ka에 시작된 것으로 보고된 바 있으며(Park *et al.*, 1996),

표층 퇴적물을 이용한 기존 연구에 의하면 금오도(Geumo-do)를 경계로 서부 남해중앙니질대(W-CSSM)와 동부 남해중앙니질대(E-CSSM) 두 구역으로 구분될 수 있다(Bae *et al.*, 2014; Um *et al.*, 2018). 남해중앙니질대의 퇴적물 기원은 다른 니질대들과 비교하여 적은 관심을 받아왔지만, 최근 남해의 고수로(paleo-channel) 연구와 관련하여 일부 연구들이 수행되었다(Bae *et al.*, 2014; KIGAM, 2016; Um *et al.*, 2018). Bae *et al.* (2014)은 퇴적물의 밀도, 함수율, 공극률 등 물성 분석을 통해 동부 남해중앙니질대는 섬진강 유역으로부터, 서부 남해중앙니질대는 흑산머드벨트 침식 퇴적물과 중국 강 유역으로부터 유래한 퇴적물의 혼합체라고 보고하였다. 그러나 흑산머드벨트에서 재공급된 퇴적물로 추정하였을 뿐 정량적인 증거는 제시되지 않았다(KIGAM, 2016). Um *et al.* (2018)은 희토류 원소의 분포 특성을 바탕으로 동부 남해중앙니질대는 섬진강 유역으로부터 기원한 반면, 서부 남해중앙니질대는 흑산머드벨트의 재동된 퇴적물이 공급된 것으로 해석하였다. 그러나 이 연구 결과는 희토류 원소 하나의 지표만을 이용하여 해석되었고, 최근 흑산머드벨트 퇴적물에 대한 연구들이 흑산머드벨트의 상부는 주로 한국 강 퇴적물 기원, 하부는 한국 강과 중국 강 퇴적물의 복합 기원으로 해석하고 있으므로(Lim *et al.*, 2007a; Cho *et al.*, 2015; Kwak *et al.*, 2016), 상세한 퇴적물 기원과 이동 경로에 대해 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 남해중앙니질대에서 획득한 2개의 코어 퇴적물에 대하여, 점토광물 및 주성분원소 두 가지의 지표를 이용하여 퇴적물 기원지를 밝히고, 남해중앙니질대의 퇴적환경 및 퇴적물 유입 경로의 변화를 알아보고자 하였다.

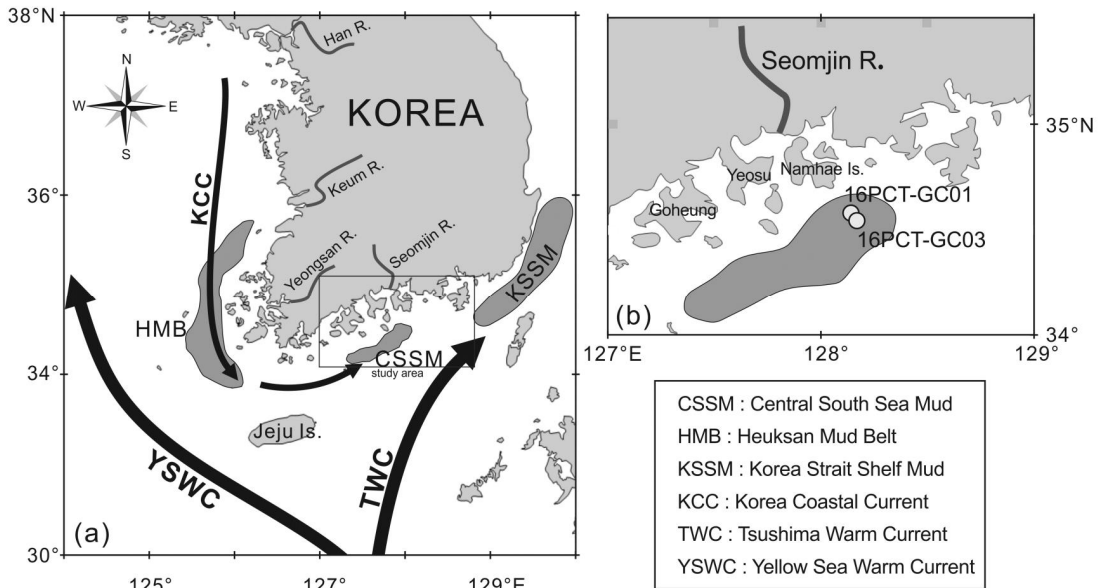


Fig. 1. Map showing (a) the surface circulation in the South Sea and rivers around the study area as well as the (b) locations of core 16PCT-GC01 and 16PCT-GC03.

시료 및 연구방법

남해중앙니질대 퇴적물의 기원지 변화를 알아보기 위해 한국지질자원연구원(KIGAM)에서 보유하고 있는 16PCT-GC01 (34°34'44.520" N, 128°08'16.620" E), 16PCT-GC03 (34°32'40.200" N, 128°09'39.120" E) 2개의 피스톤 코어를 이용하였다 (Fig. 1b). 길이 8.4 m의 16PCT-GC01 코어는 수심 40 m에서, 길이 8.6 m의 16PCT-GC03 코어는 수심 49 m에서 획득되었다. 16PCT 코어들은 이질 퇴적상, 사질 퇴적상, 이질 교호 퇴적상으로 구분된다. GC01 코어는 상부(0~550 cm)와 최하부(740~840 cm)에서 무 구조의 진회색 이질 퇴적상을 보이며, 하부(550~740 cm)에 사질 퇴적상을 가진다. GC03 코어는 균질한 이질 퇴적상(0~480 cm), 사질 퇴적상(480~590 cm), 이질 교호 퇴적상(590~860 cm)으로 나타난다.

점토광물 및 주성분원소 분석을 위한 부시료는 30 cm 간격으로 각 코어에서 29개씩 총 58개를 채취한 후, 점토광물 분석을 위한 양이 충분한 48개의 부시료를 이용하였다. 채취된 부시료들은 점토광물 분석을 위해 과산화수소(H₂O₂)를 이용하여 유기물을 제거한 후, Stoke's law를 이용하여 점토를 분리하여 smear on glass slide 방법을 이용하여

정방위 시편으로 제작되었다. 제작된 시편은 경상대학교 지질학과에서 보유하고 있는 고분해능 X-선 회절분석기(Siemens D5005, Bruker)를 이용하여 흑연 단색화된 파장(CuK α = 1.5406 Å)을 사용하여 분석되었으며, 광물 동정을 위해 동일한 시료에 대하여 에틸렌글리콜(ethylene glycol)로 포화시킨 후 다시 X-선 회절분석을 실시하였다. 일라이트(illite), 녹니석(chlorite), 카올리나이트(kaolinite), 스멕타이트(smectite) 등 네 가지 주요 점토광물의 상대적인 함량은 Biscaye (1965)에서 제시된 반정량 분석법을 이용하여 계산되었다.

주성분원소 분석은 시료가 충분한 28개의 부시료를 이용하였으며, 63 μ m체를 이용하여 세립질 부분을 분리하고, 용제와 시료를 10 : 1로 혼합한 후, 회화기기(Katanax, K2 Prime)를 이용하여 고온에서 용융시켜 Glass-Bead로 제작되었다. 제작된 Glass-Bead는 X-선 형광분석기(S8 TIGER, Bruker)를 사용하여 총 11개의 산화물(Na₂O, MgO, Al₂O₃, SiO₂, P₂O₅, SO₃, K₂O, CaO, TiO₂, MnO, Fe₂O₃)을 정량 분석하였다.

퇴적물의 입도와 퇴적연대는 KIGAM (2016)에서 제시한 결과를 이용하였다. 퇴적물의 입도는 한국지질자원연구원의 표준 시료처리과정을 따라 전처리 후, 레이저 회절 입도분석기 Microtrac S3500을

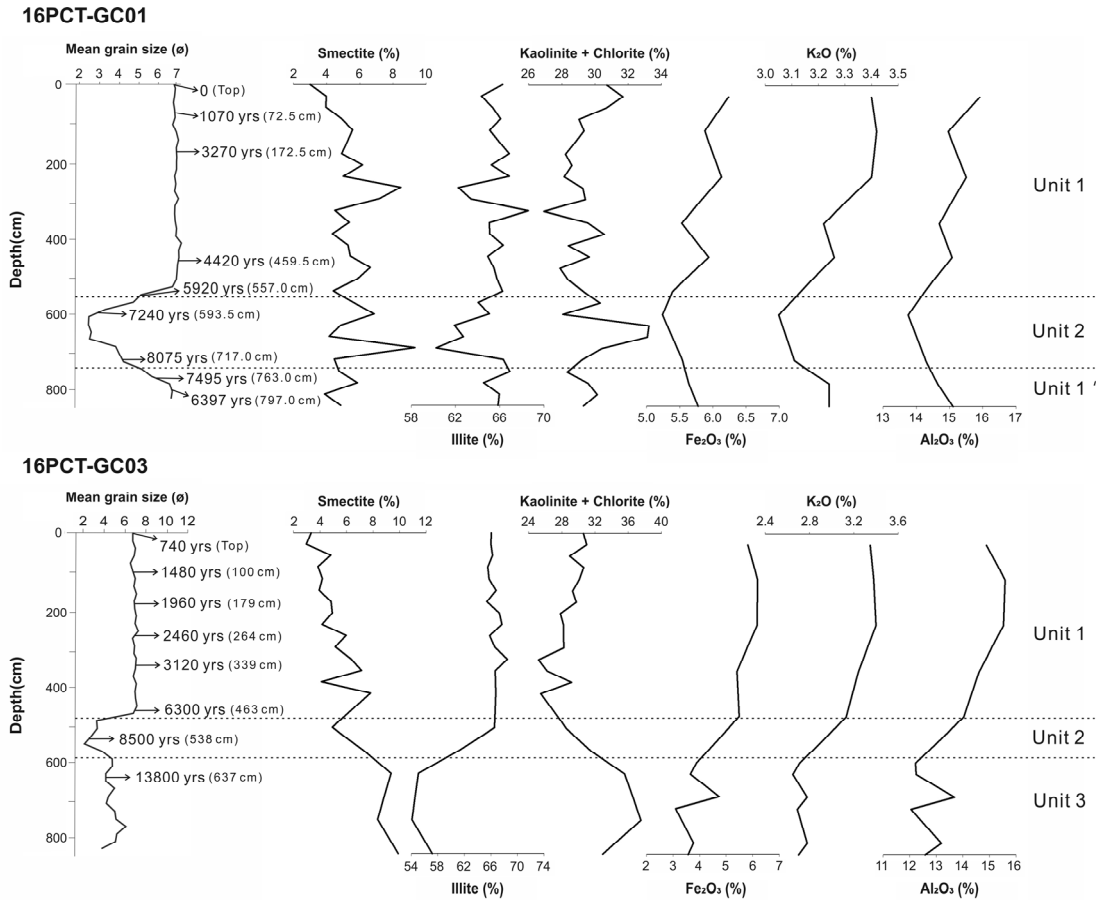


Fig. 2. Vertical variations of grain size, clay minerals and major elements compositions of core 16PCT-GC01 and 16PCT-GC03. Mean grain size data and age data (yr BP) of cores were obtained from KIGAM (2016).

이용하여 분석되었다(KIGAM, 2016). 퇴적연대는 방사성 탄소 동위원소(¹⁴C-AMS), OSL (optically stimulated luminescence) 연대분석을 이용하여 결정되었으며, Fig. 2에 제시하였다(KIGAM, 2016).

결 과

퇴적 단위별 점토광물과 주성분원소 함량은 Tables 1과 2에 제시되었다. 네 가지 주요 점토광물은 두 코어 모두에서 일라이트, 녹니석, 카올리나이트, 스펙타이트의 순으로 풍부하다(Table 1). 일라이트는 54.1~68.6 % (평균 64.9 %), 녹니석은 14.7~20.7 % (평균 17.7 %)의 함량을 가진다. 그 뒤로 카올리나이트가 8.6~17.5 % (평균 12.0 %)의 함량을 보이며, 스펙타이트의 함량은 3.0~9.9 % (평균 5.5 %)로 가장 낮다. 주성분원소의 평균함량은

Al₂O₃ 12.1~15.9 % (평균 14.2 %), Fe₂O₃ 3.1~6.2 % (평균 5.2 %), K₂O 2.7~3.4 % (평균 3.1 %), MgO 1.2~2.5 % (평균 2.0 %), CaO 0.6~3.3 % (평균 1.6 %) 등으로 나타났다(Table 2).

퇴적상, 연대 및 입도분석 결과를 토대로, 코어들은 3개의 퇴적 단위(sediment unit)로 구분될 수 있으며, 점토광물과 주성분원소 결과 또한 구분된 퇴적 단위를 경계로 뚜렷한 차이를 보인다(Fig. 2).

퇴적 단위 1 (< ~6 ka)은 6~8 phi의 평균입도를 가지는 균질한 이질 퇴적상으로 코어 16PCT-GC01의 상부(0~550 cm)와 최하부(740~840 cm), 코어 16PCT-GC03의 상부(0~480 cm)에 해당한다(Fig. 2). 16PCT-GC01의 하부 이질 퇴적층은 상부와 유사한 퇴적상과 연대를 가지기 때문에 퇴적 단위 1'로 기재하였다(Fig. 2). 퇴적 단위 1은 대체로 일정한 점토광물 함량을 가지나, 코어 상부로 가며 스

Table 1. Comparisons between clay mineral characteristics (%) of 16PCT cores and those of the potential provenances

Samples	Unit	Smectite	Illite	Kaolinite + chlorite	S/I ratio ($\times 100$)	Reference
GC01-01		3.0	66.3	30.7	4.6	
GC01-02		4.0	64.3	31.7	6.2	
GC01-03		4.0	65.4	30.7	6.1	
GC01-04		4.9	66.1	29.0	7.4	
GC01-05		5.6	65.1	29.4	8.5	
GC01-07		4.9	66.9	28.2	7.3	
GC01-08		6.2	65.2	28.6	9.5	
GC01-09		5.0	66.9	28.1	7.5	
GC01-10	1	8.5	62.3	29.3	13.6	
GC01-11		7.2	63.4	29.4	11.3	
GC01-12		4.5	68.6	26.9	6.6	
GC01-13		5.4	65.1	29.6	8.3	
GC01-14		4.4	65.1	30.6	6.7	
GC01-15		5.3	66.3	28.4	8.0	
GC01-16		5.4	64.9	29.7	8.4	
GC01-17		6.6	65.5	27.9	10.1	
GC01-18		5.9	65.8	28.4	8.9	
GC01-19		4.4	66.3	29.3	6.7	
GC01-20		5.6	64.1	30.3	8.8	
GC01-21		6.9	65.1	28.1	10.6	This study
GC01-22	2	4.9	61.9	33.2	7.8	
GC01-23		4.2	62.7	33.2	6.6	
GC01-24		9.3	60.3	30.4	15.5	
GC01-25		4.5	66.3	29.2	6.7	
GC01-26		4.8	66.9	28.3	7.1	
GC01-27	1'	5.9	64.6	29.6	9.1	
GC01-28		3.9	66.0	30.1	5.9	
GC01-29		4.9	65.9	29.3	7.4	
GC03-01		3.3	66.1	30.6	5.0	
GC03-02		3.0	66.0	31.0	4.5	
GC03-03		4.8	66.3	28.9	7.3	
GC03-04		3.8	65.5	30.6	5.9	
GC03-05		4.2	65.7	30.1	6.4	
GC03-06	1	3.9	66.8	29.3	5.9	
GC03-07		4.8	65.4	29.8	7.4	
GC03-08		4.9	67.3	27.8	7.3	
GC03-09		4.2	67.6	28.2	6.2	
GC03-10		6.0	65.8	28.2	9.1	
GC03-11		5.1	66.6	28.3	7.7	

To be continued.

Table 1. Continued

Samples	Unit		Smectite	Illite	Kaolinite + chlorite	S/I ratio (× 100)	Reference
GC03-12			6.3	68.5	25.2	9.2	
GC03-13	1		7.1	66.6	26.3	10.7	
GC03-14			4.1	66.7	29.2	6.2	
GC03-15			7.8	66.7	25.4	11.7	
GC03-18	2		4.9	66.6	28.5	7.4	This study
GC03-20			7.3	61.2	31.5	11.9	
GC03-22			9.4	55.1	35.5	17.0	
GC03-26	3		8.3	54.1	37.6	15.4	
GC03-29			9.9	57.2	32.9	17.3	
Samples	Unit	n	Smectite	Illite	Kaolinite + chlorite	S/I ratio (× 100)	Reference
16PCT-GC01	1	18	5.3	65.5	29.2	8.1	
16PCT-GC01	2	6	5.9	63.4	30.7	9.3	
16PCT-GC01	1'	4	4.8	65.8	29.3	7.4	This study
16PCT-GC03	1	15	4.9	66.5	28.6	7.3	
16PCT-GC03	2	2	6.1	63.9	30.0	9.7	
16PCT-GC03	3	3	9.2	55.5	35.3	16.6	
Huanghe		13	8.9	62.2	28.9	14.5	Koo <i>et al.</i> (2018)
		4	11	56.5	32.5	19.8	Cho <i>et al.</i> (2015)
Changjiang		13	1.6	68.1	30.5	2.1	Koo <i>et al.</i> (2018)
		3	3.2	61	35.9	5.2	Cho <i>et al.</i> (2015)
Korean rivers		26	1.6	59.3	39	2.7	Cho <i>et al.</i> (2015)
		21	4	52	44	7.7	Lim <i>et al.</i> (2015)
Heuksan Mud Belt		78	6.7	64.2	29.1	10.5	Cho <i>et al.</i> (2015)

멕타이트가 감소하고 카올리나이트 + 녹니석이 증가하는 경향이 약하게 나타난다(Fig. 2). 또한, 다른 퇴적 단위와 비교하여 높은 Fe, Al 및 K 함량을 가지며, 이 원소들의 함량은 퇴적 단위 2와 가까울수록 낮아진다(Fig. 2).

퇴적 단위 2 (~13~6 ka)는 2~4 phi의 사질 퇴적상으로 16PCT-GC01의 550~740 cm와 16PCT-GC03의 480~590 cm에 해당한다(Fig. 2). 퇴적 단위 2의 평균 점토광물 함량은 퇴적 단위 1과 유사하지만(Table 1), 코어 GC03에서 상부로 가며 일라이트가 증가하고, 스�멕타이트와 카올리나이트 + 녹니석이 감소하는 뚜렷한 경향이 확인된다. 퇴적 단위 2의 주성분원소 함량 또한 대체로 퇴적 단위 1과 유사하며, 상부 퇴적 단위로 가며 Fe₂O₃, K₂O, Al₂O₃의 증가가 확인된다(Fig. 2). 코어 GC01의 경우, 퇴적 단위 2는 하부의 퇴적 단위 1'과 상부의 퇴적 단위 1 사이에서 점토광물과 주성분원소 함량의 일시

적인 증가 또는 감소 후, 원래의 값으로 돌아온다.

퇴적 단위 3 (> ~13 ka)는 4~5 phi의 사질과 이질 퇴적물이 교호하는 엽층리(lamination)가 발달하는 퇴적층으로, 코어 16PCT-GC03의 최하부(590~860 cm)에서만 확인된다. 퇴적 단위 3는 상대적으로 낮은 일라이트 함량과 높은 스�멕타이트, 카올리나이트 + 녹니석 함량을 가지며, 수직적인 변동은 뚜렷하지 않다(Fig. 2). 주성분원소 함량에서도 대체로 일정하며, 다른 퇴적 단위와 비교하여 확연히 낮은 Al, Fe, Mg 및 K 함량으로 특징된다(Table 2).

토 의

점토광물을 이용한 퇴적물 기원지 식별

해양퇴적물에서 가장 풍부한 광물 성분 중 하나인 점토광물은 풍화, 운반, 퇴적과정 중에 크게 변

Table 2. Average compositions of major elements (%) in each unit of 16PCT cores

Samples	Unit	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	L.O.I.
GC01-02		59.4	15.9	0.8	6.2	0.2	2.5	1.1	1.7	3.4	0.3	0.1	8.2
GC01-05		58.8	15.0	0.8	5.9	0.2	2.1	1.0	3.7	3.4	0.3	0.0	8.2
GC01-09	1	59.0	15.5	0.8	6.1	0.2	2.5	1.4	1.7	3.4	0.3	0.0	9.0
GC01-13		61.4	14.7	0.8	5.5	0.2	2.3	2.0	1.7	3.2	0.3	0.0	8.0
GC01-16		57.8	15.1	0.8	5.9	0.2	2.4	2.0	1.8	3.3	0.3	0.0	9.1
GC01-19		58.8	14.2	0.8	5.4	0.1	2.3	2.8	1.7	3.1	0.2	0.2	8.1
GC01-21	2	61.6	13.8	0.8	5.2	0.1	2.1	3.3	1.9	3.1	0.3	0.3	7.5
GC01-25		59.6	14.3	0.8	5.5	0.1	2.2	2.8	1.9	3.1	0.3	0.3	8.1
GC01-27	1'	58.5	14.6	0.8	5.6	0.2	2.4	3.0	1.7	3.2	0.3	0.2	8.7
GC01-29		57.4	15.1	0.7	5.8	0.2	2.5	2.4	1.7	3.2	0.2	0.1	9.9
GC03-02		60.5	14.9	0.8	5.8	0.2	2.2	1.0	1.7	3.4	0.3	0.0	7.3
GC03-05	1	59.3	15.6	0.8	6.2	0.2	2.4	1.2	1.6	3.4	0.3	0.1	8.6
GC03-09		58.4	15.5	0.8	6.2	0.2	2.4	1.2	1.7	3.4	0.3	0.1	8.7
GC03-13		63.1	14.6	0.8	5.4	0.2	2.2	0.9	1.8	3.2	0.3	0.0	6.7
GC03-17	2	60.3	14.0	0.8	5.5	0.1	2.2	3.0	1.8	3.1	0.3	0.1	8.1
GC03-21		66.5	12.2	0.7	3.9	0.1	1.2	1.0	2.0	2.7	0.4	0.0	5.1
GC03-22		68.1	12.2	0.6	3.7	0.1	1.2	0.9	2.2	2.7	0.4	0.0	5.4
GC03-24	3	64.9	13.7	0.7	4.7	0.1	1.6	0.6	2.1	2.8	0.6	0.0	7.0
GC03-25		69.1	12.1	0.7	3.1	0.1	1.2	0.9	2.2	2.7	0.3	0.0	5.0
GC03-28		68.6	13.2	0.7	3.8	0.1	1.5	0.7	2.1	2.8	0.3	0.0	5.8
GC03-29		70.5	12.6	0.7	3.6	0.1	1.3	0.9	2.1	2.7	0.4	0.0	5.1
16PCT-GC01 Unit 1	6	59.2	15.1	0.8	5.9	0.2	2.4	1.7	2.0	3.3	0.3	0.0	8.4
16PCT-GC01 Unit 2	2	60.6	14.0	0.8	5.4	0.1	2.2	3.0	1.9	3.1	0.3	0.3	7.8
16PCT-GC01 Unit 1'	2	58.0	14.9	0.8	5.7	0.2	2.4	2.7	1.7	3.2	0.2	0.1	9.3
16PCT-GC03 Unit 1	4	60.3	15.2	0.8	5.9	0.2	2.3	1.1	1.7	3.3	0.3	0.1	7.8
16PCT-GC03 Unit 2	1	60.3	14.0	0.8	5.4	0.1	2.2	3.0	1.9	3.1	0.3	0.2	8.1
16PCT-GC03 Unit 3	6	68.0	12.7	0.7	3.8	0.1	1.3	0.8	2.1	2.7	0.4	0	5.6

화되지 않고 기원지 암석의 특성을 유지하고 있기 때문에, 퇴적물 기원지 연구에 유용하게 이용될 수 있다(Choi *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2014a; Koo *et al.*, 2018). 남해로 퇴적물을 공급할 수 있는 잠재적 기원지에는 중국 대륙의 황하(Huanghe), 양쯔강(Changjiang)과 한반도의 한강(Hangang River), 금강(Keum River), 영산강(Yeongsan River), 섬진강(Seomjin River) 등의 하천들과 한반도 남서부에 위치한 흑산머드벨트 퇴적물의 재동에 의한 공급이 고려될 수 있다. 한반도의 여러 강들로부터 공급된 퇴적물들은 대체로 유사한 점토광물 조성을 가지며, 황하와 양쯔강 퇴적물과 비교하여 카올리나이트 + 녹니석 함량이 높은 특징을 가진다(Table 1). 반면,

중국의 황하에서 공급되는 퇴적물은 스�멕타이트가 풍부하며, 양쯔강에서 공급되는 퇴적물은 일라이트 함량이 높다(Table 1)(Yang *et al.*, 2003; Cho *et al.*, 2015; Koo *et al.*, 2018). 이러한 점토광물 함량 차이는 한국 강과 중국 강 퇴적물의 기원지 구분에 있어 중요한 지시자로 사용될 수 있으며, 한반도 주변 해역에서 수행된 많은 기원지 연구에 유용하게 이용되고 있다(Li *et al.*, 2014a; Cho *et al.*, 2015; Lim *et al.*, 2015; Kwak *et al.*, 2016; Koo *et al.*, 2018).

퇴적물의 기원지를 구분하기 위해 (카올리나이트 + 녹니석)-일라이트-스멕타이트 삼각도표를 이용하였다(Fig. 3). 황하 퇴적물은 양쯔강 퇴적물, 한국 강

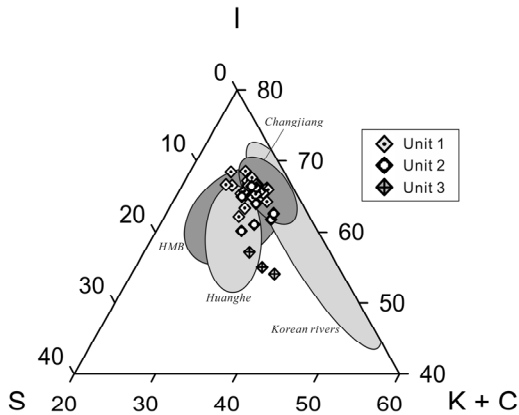


Fig. 3. Ternary diagram of major clay mineral groups, illite, smectite, and kaolinite + chlorite of 16PCT cores and river sediments from potential provenance of the study area. Data on potential sources, including Changjiang and Huanghe (Cho *et al.*, 2015; Koo *et al.*, 2018) and Korean rivers and HMB data (Cho *et al.*, 2015) are drawn for comparison.

퇴적물과 점토광물 함량에 의해 뚜렷하게 구분되며, 비교적 넓은 범위에 도시되는 한국강 퇴적물들은 양쯔강 퇴적물과 일부 중첩된다. 흑산머드벨트 퇴적물들은 세 기원지 전반에 걸쳐 넓게 분포하며, 주로 황하와 양쯔강의 영역에 중첩된다(Fig. 3). 퇴적 단위별 코어 퇴적물들을 삼각도표에 도시한 결과, 퇴적 단위 3 (> ~13.0 ka)는 주로 황하 기원 퇴적물로 확인된다. 퇴적 단위 2 (~13~6 ka) 퇴적물들은 대체로 황하와 양쯔강 사이에 위치하며, 한국강의 영역에도 포함될 수 있다. 퇴적 단위 2 점토광물의 수직적 변동을 고려하면(Fig. 2), 이 시기 동안 황하의 영향은 감소하고 양쯔강과 한국 강으로부터의 영향이 강해진 것으로 판단된다. 그러나 퇴적 단위 2는 흑산머드벨트 영역에도 속하므로, 양쯔강과 한국 강들로부터의 공급뿐만 아니라 흑산머드벨트 퇴적물의 재동에 의한 공급도 고려되어야 한다. 퇴적 단위 1 (> ~6 ka) 퇴적물들은 퇴적 단위 2에 비해 상대적으로 양쯔강과 한국 강으로 치우친 위치에 집중되며, 퇴적 단위 2와 마찬가지로 흑산머드벨트의 영역에도 포함될 수 있다.

따라서, 점토광물을 이용한 기원지 식별에서 남해중양니질대 퇴적물들은 퇴적 단위 3 동안 황하로부터 주로 공급되었으며, 이후 황하 퇴적물의 영향은 약해지고 양쯔강과 한국강 퇴적물 또는 재동된 흑산머드벨트 퇴적물의 공급이 강해진 것으로 판단

된다. 수직적 변동을 고려하면, 퇴적 단위 2 동안 빠르게 퇴적물 기원지가 변화하였으며, 퇴적 단위 1에 이르러 비교적 일정한 공급이 이루어진 것으로 사료된다.

주성분원소 함량을 이용한 퇴적물 기원지 식별

주성분원소는 점토광물과 마찬가지로 기원지의 특성을 반영하기 때문에, 기원지 식별을 위해 활발히 이용되어 왔다(Lim *et al.*, 2007b; Ha *et al.*, 2013, Koo *et al.*, 2018). 한국 강 퇴적물은 일반적으로 Al, Fe, K 등이 풍부한 반면, 중국 강 퇴적물은 탄산염암과 황토(loess)층으로부터 공급되기 때문에 Mg, Ca, Na 등이 풍부한 것으로 알려져 있다(Lim *et al.*, 2007b; Ha *et al.*, 2013, Koo *et al.*, 2018). 그러나 Na와 Ca는 화학적 작용에 약하고, 퇴적물 운반 중 해수의 염분과 탄산염, 해양 생물 등의 이차적 요인에 의해 조절되기 때문에 기원지 지시자로 이용하기는 부적합하다(Cho *et al.*, 1999; Yang *et al.*, 2003, Lim *et al.*, 2007b, Ha *et al.*, 2013). 또한, 강 퇴적물에서 주성분원소의 함량은 일차적으로 퇴적물의 입도(grain size)에 의해 조절되기 때문에(Lim *et al.*, 2007b; Ha *et al.*, 2013), 입도효과의 상쇄가 필수적이며, 본 연구에서는 입도효과를 최소화하기 위해 63 μm 이하의 입자만을 이용하였다.

주성분원소 함량에 따른 기원지 식별을 위해, 남해중양니질대와 잠재적 기원지들의 Fe, K, Al의 함량을 그래프에 도시하였다(Fig. 4). 황하 퇴적물은 낮은 Fe 함량으로 인해 다른 기원지들과 뚜렷하게 구분되며, 양쯔강과 한국 강 퇴적물들은 Mg과 Al 함량의 차이로 구분이 가능하다. 한편, 흑산머드벨트 퇴적물들은 대체로 양쯔강과 한국 강 퇴적물들 사이에 위치한다(Fig. 4).

전반적으로, 주성분원소를 이용한 기원지 식별은 점토광물의 결과와 동일하다. 주성분원소를 이용한 두 그래프 모두에서, 퇴적 단위 3 퇴적물들은 황하 기원으로 확인된다(Fig. 4). 퇴적 단위 1과 2의 퇴적물들은 양쯔강과 한국 강 퇴적물들 사이에 위치하여, 두 기원지 퇴적물의 복합적 공급을 나타낸다. 그러나 점토광물 결과와 마찬가지로 두 기원지의 특성을 모두 가지고 있는 흑산머드벨트 또한 일치하기 때문에, 흑산머드벨트 퇴적물의 재동에 의한 공급은 여전히 고려되어야 한다. 퇴적 단위 2는 퇴적 단위 1과 비교하여 황하에 가까운 위치에 도시

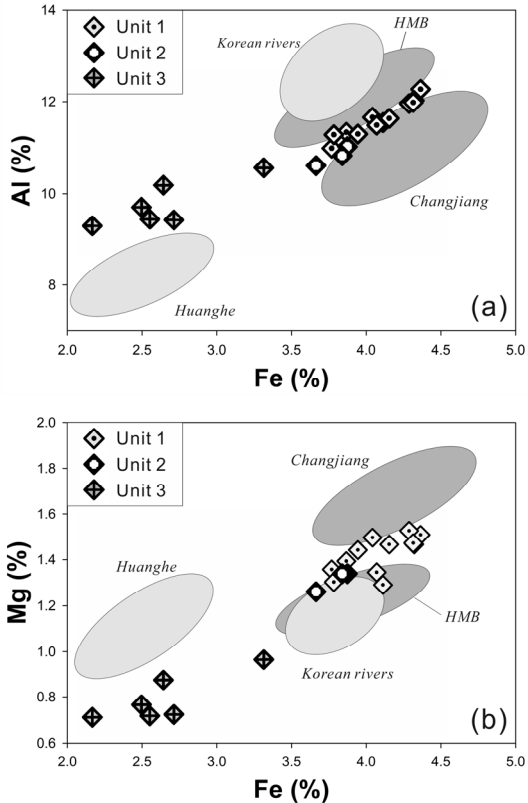


Fig. 4. Discrimination plot between Fe and (a) Al and (b) Mg of 16PCT cores and river sediments from potential provenance of the study area. Data on potential sources, including Changjiang, Huanghe, Korean rivers (Lim *et al.*, 2007b), and HMB data (Ha *et al.*, 2013), are drawn for comparison.

되며, 이는 퇴적 단위 2 동안 퇴적물의 기원지가 황하로부터 양쯔강과 한국강들의 복합기원으로 변화하고 있음을 나타낸다. 또한, 퇴적 단위 2 시기의 초기에는 황하로부터의 세립질 퇴적물들이 연구지역으로 유입될 수 있었음을 의미할 수 있다(Fig. 2).

점토광물과 주성분원소의 결과를 종합하면, 퇴적 단위 3 동안 퇴적물 공급은 주로 황하로부터 이루어졌으며, 퇴적 단위 1은 양쯔강과 한국 강들로부터 퇴적물을 공급받거나, 흑산머드벨트의 재동된 퇴적물이 공급된 것으로 판단된다. 퇴적 단위 2는 퇴적물 기원지가 변화되는 시기로, 점토광물과 주성분원소의 평균함량은 대체로 퇴적 단위 1과 유사하지만, 황하의 영향이 일부 확인된다. 따라서 남해중앙니질대의 세립질 퇴적물들은 ‘황하 기원’으로부터 ‘양쯔강과 한국 강의 복합 기원’ 또는 ‘흑산머

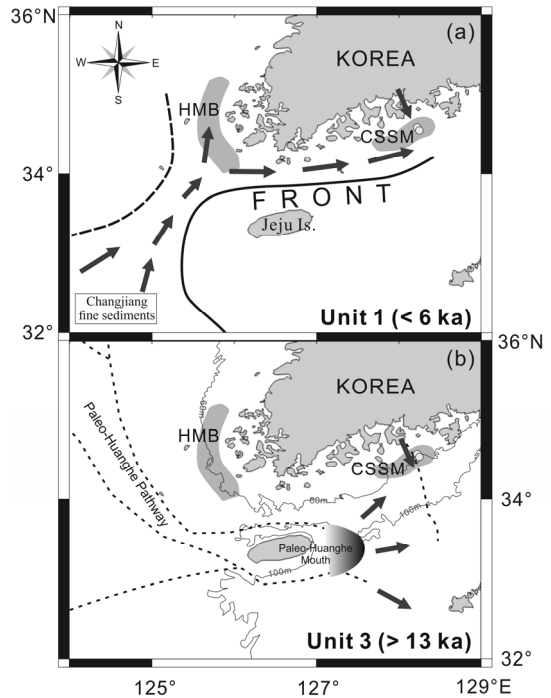


Fig. 5. Schematic map summarizing the sediment transport patterns in the study area in (a) Unit 1 (< 6 ka) and (b) Unit 3 (> 13 ka) (Modified after Lim *et al.*, 2007a). The coastline of the Unit 3 is represented by the current isochore line (60 m). Interpretation for figures is given in the text.

드벨트에서 재동된 퇴적물의 공급’으로 바뀌어왔다.

해수면 변화에 따른 퇴적물의 유입

남해중앙니질대의 두 코어 퇴적물은 약 15 ka 동안의 퇴적 기록을 보존하고 있으며, 퇴적물 기원지 변화와 퇴적 당시의 해수면 변화에 대한 이해를 통해, 최후빙기극대기(LGM, Last Glacial Maximum) 이후 남해 내대륙붕으로의 퇴적물 유입 경로와 과거 환경을 유추할 수 있다.

퇴적 단위 3은 ~13 ka 이전에 형성된 층으로 현재 보다 해수면이 100~60 m 낮은 저수위기(lowstand stage)에 해당한다(Saito, 1998; Li *et al.*, 2014b). 사질과 이질퇴적물의 교호 및 그 두께의 변화는 조석 리듬층으로 해석되었으며, 연구지역이 강한 조석 작용을 겪었던 것으로 보고되었다(KIGAM, 2016). 최근 탄성과 자료를 기반으로 복원된 황해의 고수

로 지도에서, 황하의 수로는 제주도 남쪽을 지나 대한해협으로 이어지며, 양쯔강의 수로는 현재의 위치에서 남동쪽으로 넓게 뻗어있는 것으로 보고되었다(Yoo *et al.*, 2016)(Fig. 5). 이 시기 황하로부터 공급된 세립질 퇴적물들은 당시의 연안류 또는 조석작용에 의해 연구지역으로 공급되었을 수 있다. 동중국해 북동부에 위치한 코어 PC-1에서도 저해수면 시기에 황하의 영향이 나타나며(Xu *et al.*, 2014), 이는 황하 퇴적물이 한반도 주변을 비롯한 동중국해의 넓은 범위로 공급되었음을 의미할 수 있다. 연구지역은 섬진강 고수로와 인접해 있으므로(KIGAM, 2016), 섬진강 퇴적물 또한 유입되었을 것으로 판단되지만, 황하로부터 공급된 많은 세립질 퇴적물들로 인해 섬진강의 점토광물 및 주성분원소의 특징이 나타나지 않은 것으로 사료된다(Figs. 3 and 4). 또한, 퇴적 단위 3 시기동안 황하와 연구지역 사이의 거리가 섬진강보다 멀었던 것을 고려하면(Yoo *et al.*, 2015; KIGAM, 2016), 퇴적 단위 3의 조립질 퇴적물들은 황하보다는 섬진강으로부터 유입되었을 것으로 보인다.

퇴적 단위 2는 ~13~6 ka 동안 형성된 사질 퇴적층으로 현재보다 해수면이 60~0 m 낮은 해침기(transgressive stage)에 해당한다(Saito, 1998; Li *et al.*, 2014b). 퇴적 단위 2의 사질 퇴적층은 일부 패각 파편들이 관찰되는데, 폭풍 이벤트로 인해 재동된 것이다(KIGAM, 2016). 남해 대륙붕은 완만한 경사를 가지고 있기 때문에, 해수면 상승 동안 빠르게 해안선이 후퇴했으며, 빠른 해안선의 후퇴는 퇴적물 퇴적 공간에 강한 조류와 해류가 미치게 함으로써, 조립퇴적물의 우세한 선별 퇴적이 이루어졌을 것이다(KIGAM, 2016). 이러한 해침에 의한 사질 퇴적물 층은 한반도 주변 대륙붕 전체에 걸쳐 넓게 분포하며, 일반적으로 3 m 이하의 얇은 퇴적층을 형성하고 있다(Saito, 1998; Berne *et al.*, 2002; Yoo and Park, 2000; Shinn *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2013). 한편, 해수면 상승으로 인해 황하의 하구는 황해의 중앙으로 이동되었으며(Yoo *et al.*, 2016), 연구지역으로의 황하의 영향 또한 점차 감소되었다. 세립질 퇴적물의 기원은 퇴적 단위 2 동안 빠르게 변화하고, 최종적으로 퇴적 단위 1의 퇴적물 기원과 동일해진다(Fig. 2).

퇴적 단위 1은 ~6 ka 이후의 이질 퇴적층으로 현재와 비슷한 해수면과 해양순환이 형성되고 남해중앙니질대가 형성된 시기이다. 남해중앙니질대는 섬진강과 매우 가까움에도 계산된 남해중앙니질대 총

퇴적물의 양과 섬진강의 비교적 작은 유량을 고려하여, 섬진강 이외의 다른 퇴적물 공급원이 있을 것으로 추측되었다(Um *et al.*, 2018). 코어 GC01에서만 나타나는 퇴적 단위 1'은 퇴적 단위 1과 연대, 암상 및 입도 등의 특징이 동일하고 점토광물과 주성분원소의 분석 결과 역시 비슷하기 때문에 폭풍 이벤트에 의한 퇴적층의 역전이 일어난 것으로 판단된다.

기존 연구들은 한국연안류를 퇴적물 운반의 주요 경로로 제안하였으며, 서부 남해중앙니질대는 HMB의 재동된 퇴적물로 구성되고, 동부 남해중앙니질대는 인접한 섬진강의 영향을 받는 것으로 보고하였다(Bae *et al.*, 2014; Um *et al.*, 2018). 코어 GC01과 GC03은 섬진강 기원으로 보고된 동부 남해중앙니질대에 위치하지만(Bae *et al.*, 2014; Um *et al.*, 2018), 점토광물 및 주성분원소 결과는 ‘양쯔강과 한국 강 퇴적물의 복합 기원’ 또는 ‘재동된 흑산머드벨트 기원’을 나타낸다(Figs. 3 and 4). 따라서 코어 GC01과 GC03의 결과는 한국연안류를 따라서 공급된 흑산머드벨트 퇴적물 또는 양쯔강 퇴적물들이 동부 남해중앙니질대까지 이동될 수 있는 것으로 판단되며, 표층 퇴적물에 대한 추가적인 연구를 통해 분명하게 확인될 것으로 기대된다.

한편, 남해중앙니질대로 공급되었을 것으로 제안된 흑산머드벨트는 퇴적물의 기원에 대해 많은 논란이 있었지만, 최근에는 북부와 남부가 서로 다른 퇴적 기원을 갖는 것으로 보고되었다(Wei *et al.*, 2003; Lim *et al.*, 2007a; Cho *et al.*, 2015; Kwak *et al.*, 2016). 남부 흑산머드벨트는 황하 퇴적물의 영향이 우세하며 6 ka 이후 퇴적이 이루어지지 않고 있으나, 북부 흑산머드벨트는 한국 강과 양쯔강 퇴적물이 우세하며 2~5 mm/yr의 높은 퇴적률을 가진다(Lim *et al.*, 2007a; Cho *et al.*, 2015; Kim *et al.*, 2018). 높은 퇴적률을 가지는 북부 흑산머드벨트는 남해중앙니질대와 마찬가지로 한국 강 이외의 퇴적물 공급원이 있어야 할 것으로 제안되었고(Lim *et al.*, 2007a), 북부 흑산머드벨트 퇴적물이 재동되어 남해중앙니질대로 공급되는 것은 어려워 보인다. 현재 퇴적물이 ‘0’인 남부 흑산머드벨트는 침식되어 연구지역으로 공급될 수 있을 것으로 보이지만(Lim *et al.*, 2007a), 퇴적 단위 1 퇴적물에서 황하의 특성이 전혀 나타나지 않으므로 남부 흑산머드벨트로부터의 공급은 없거나 미미할 것으로 판단된다. 따라서 퇴적 단위 1 퇴적물들은 양쯔강과 한국강의 복합기원으로 사료되며, 한국강 퇴

적물은 주로 인접한 섬진강으로부터 공급되었을 것이다.

Lee *et al.* (1998)은 계절에 따라 한반도와 중국 연안의 혼탁수(turbid water mass)가 변동되고, 겨울철에 두 수계가 연결됨을 보였다. Lim *et al.* (2007a)은 겨울철에 형성되는 이 통로를 양쯔강 퇴적물들이 한반도로 유입될 수 있는 이동경로로 제안하고, 흑산머드벨트와 남해중앙니질대의 형성에 기여할 수 있다고 보고하였다(Fig. 5). 그러므로 양쯔강 희석수(Changjiang Diluted Water)를 통해 퍼져나갈 수 있는 양쯔강의 세립질 퇴적물들이 겨울철 연결된 수괴 통로를 통해 연구지역으로 공급되었을 것으로 판단되며, 이 영향은 퇴적 단위 2부터 점차 증가하여 퇴적 단위 1에 이르러 일정하게 유지된다.

결 론

남해중앙니질대에서 채취한 16PCT-GC01, 16PCT-GC03 코어를 이용하여 코어의 점토광물 및 주성분원소를 통해 퇴적물의 기원지에 대한 연구를 수행하였다.

1) 16PCT-GC01, 16PCT-GC03 코어는 연대 및 입도분석 결과를 바탕으로 3개의 퇴적 단위로 구분할 수 있다. 퇴적 단위 3은 ~13 ka 이전의 층으로, 사질과 이질퇴적물이 서로 교호하며 나타난다. 퇴적 단위 2는 ~13~6 ka 시기의 층으로, 사질 퇴적층이 나타난다. 퇴적 단위 1은 ~6 ka 이후의 이질 퇴적층이다.

2) 점토광물 및 주성분 원소를 이용해 각 퇴적 단위별 기원지를 분석해본 결과 퇴적 단위 3은 황하 퇴적물 기원, 퇴적 단위 2는 황하에서 양쯔강 및 한국 강 퇴적물의 복합기원으로 기원지가 변화하는 과정, 퇴적 단위 1은 양쯔강 및 한국 강 퇴적물의 복합기원 혹은 흑산머드벨트 퇴적물이 재동된 것으로 판단된다.

3) 기원지 분석결과와 연대 및 입도분석 결과를 종합한 결과, 퇴적 단위 3은 황하로부터 공급된 퇴적물이 연안류 혹은 조석 작용에 의해 연구지역으로 공급된 것으로 해석된다. 퇴적 단위 2는 해수면이 상승하면서 현재보다 높은 해저면의 용력으로 인해 조립질 퇴적물이 퇴적되고 황하의 하구가 연구지역과 점점 멀어지며 퇴적물의 기원지가 퇴적 단위 1의 기원지로 변화하는 과정으로 판단된다. 퇴적 단위 1은 양쯔강과 한국강으로부터 퇴적물이 해류를 통해 연구지역으로 공급된 것으로 해석되

며, 황하 퇴적물의 특징이 나타나지 않기 때문에 흑산머드벨트 퇴적물의 재동 가능성은 없는 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다(No. 2017R1D1A1B03027818, 최후빙기극대기 이후 한반도 주변 고환경 변화 연구; 광물학적인 방법). 또한 이 논문에서 참고한 KIGAM의 자료는 미래창조과학부에서 시행한 ‘남해 섬진강 고수로 해저지질 자원조사 연구’ 사업의 결과입니다. 부족한 원고를 세밀하게 심사하여 문제점을 지적해주시고 훌륭한 제안을 해주신 심사위원님들께 감사드립니다.

REFERENCES

- Biscaye, P.E. (1965) Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans. Geological Society of America, Bulletin, 76, 803-832.
- Berne, S., Vagner, P., Guichard, F., Lericolais, G., Liu, Z., Trentesaus, A., Yin, P., and Yi, H.I. (2002) Pleistocene forced regressions and tidal sand ridges. Marine Geology, 188, 293-315.
- Bae, S.H., Kim, D.C., Lee, G.S., Kim, G.Y., Kim, S.P., Seo, Y.K., and Kim, J.C. (2014) Physical and acoustic properties of inner shelf sediments in the South Sea, Korea. Quaternary International, 344, 125-142.
- Cho, Y.G., Lee, C.B., and Choi, M.S. (1999) Geochemistry of surface sediments and sedimentary rocks. Marine Geology, 159, 111-129.
- Cho, H.G., Kim, S.O., Kwak, K.Y., Choi, H., and Kim, B.K. (2015) Clay mineral distribution and provenance in the Heuksan mud belt, Yellow Sea. Geo-Marine Letters, 35, 411-419.
- Choi, J.Y., Lim, D.I., Park, C.H., Kim, S.Y., Kang, S.Y., Kang, S., and Jung H.S. (2010) Characteristics of clay mineral compositions in river sediments around the Yellow Sea and its application to the provenance of the continental shelf mud deposit. Journal of the Geology Society of Korea, 46, 497-509 (in Korean with English abstract).
- Ha, H.J., Chun, S.S., and Chang T.S. (2013) Distribution pattern, geochemical composition and provenance of the Huksan Mud Belt sediment in the Southeastern Yellow Sea. Journal of the Korean Earth Science

- Society, 34, 289-302 (in Korean with English abstract).
- KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources) (2016) Study on marine geology and mineral resources in buried paleo-channel of Seomjin River, South Sea. Report of Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 180p.
- Kim, G.Y., Narantsetseg, B., Lee, J.Y., Chang, T.S., Lee, K.S., Yoo, D.G., and Kim, S.P. (2018) Physical and geotechnical properties of drill core sediments in the Heuksan Mud Belt off SW Korea. *Quaternary International*, 468, 33-48.
- Koo, H.J., Lee, Y.J., Kim, S.O., and Cho, H.G. (2018) Clay mineral distribution and provenance in surface sediments of Central Yellow Sea Mud. *Geosciences Journal*, 22, 989-1000.
- Kwak, K.Y., Choi, H., and Cho, H.G. (2016) Paleo-environmental change during the late Holocene in the southeastern Yellow Sea, Korea. *Applied Clay Science*, 134, 55-61.
- Lee, G.S., Kim, D.C., Yoo, D.G., and Yi, H.I. (2013) Sedimentary environment and sequence stratigraphy of late Quaternary deposits in the East China Sea. *Marine Georesources and Geotechnology*, 31, 17-39.
- Lee, J.H., Yoo, S.J., and Chang, K.I. (1998) Inflow of warm waters into the Yellow Sea observed by coastal zone color scanner. In: Brown BA(ed) *Remote Sensing of The Pacific Ocean by Satellites*. Southwood Press, Marrickville, 251-254pp.
- Li, J., Hu, B., Wei, H., Zhao, J., Zou, L., Bai, F., Dou, Y., Wang, L., and Fang, X. (2014a) Provenance variations in the Holocene deposits from the southern Yellow Sea: Clay mineralogy evidence. *Continental Shelf Research*, 90, 41-51.
- Li, G., Li, P., Liu, Y., Qiao, L., Ma, Y., Xu, J., and Yang, Z. (2014b) Sedimentary system response to the global sea level change in the East China Seas since the last glacial maximum. *Earth Science Review*, 139, 390-405.
- Lim, D.I., Choi, J.Y., Jung, H.S., Rho, K.C., and Ahn, K.S. (2007a) Recent sediment accumulation and origin of shelf mud deposits in the Yellow Sea and East China Seas. *Progress in Oceanography*, 73, 145-159.
- Lim, D.I., Shin, I.-H., and Jung, H.S. (2007b) Major elemental compositions of Korean and Chinese River Sediments: Potential tracers for the discrimination of sediment provenance in the Yellow Sea. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 28, 311-323 (in Korean with English abstract).
- Lim D.I., Xu, Z., Choi, J.Y., Li, T., and Kim, S.Y. (2015) Holocene changes in detrital sediment supply to the eastern part of the central Yellow Sea and their forcing mechanisms. *Journal of Asian Earth Sciences*, 105, 18-31.
- Park, Y.A. and Kim, B.K. (1990) Clay minerals of the recent fine-grained sediments on the Korean continental shelves. *Continental Shelf Research*, 10(12), 1179-1191.
- Park, S.C., Hong, S.K., and Kim, D.C. (1996) Evolution of late Quaternary deposits on the inner shelf of the South Sea of Korea. *Marine Geology*, 131, 219-232.
- Satio, Y. (1998) Sedimentary environment and budget in the East China Sea. *Bulletin on Coastal Oceanography*, 36, 43-58 (in Japanese).
- Shinn, Y.J., Chough, S.K., Kim, J.W., and Woo, J. (2007) Development of depositional systems in the southeastern Yellow Sea during the postglacial transgression. *Marine Geology*, 239, 59-82.
- Wei, J., Shi, X., Li, G., and Liang, R. (2003) Clay mineral distributions in the southern Yellow Sea and their significance. *Chinese Science Bulletin*, 48, 7-11.
- Um, I.K., Choi, M.S., Lee, G.S., and Chang, T.S. (2015) Origin and depositional environment of fine-grained sediments since the last glacial maximum in the southeastern Yellow Sea: Evidence from rare earth elements. *Geo-Marine Letters*, 35, 421-431.
- Um, I.K., Choi, M.S., Bae, S.H., Song, Y.H., and Kong, G.S. (2018) Provenance of fine-grained sediments in the inner shelf of the Korea Strait(South Sea), Korea. *Ocean Science Journal*, 53, 31-42.
- Xu, Z.K., Li, T.G., Chang, F.M., Wan, S.M., Choi, J.Y., and Lim, D.I. (2014) Clay-sized sediment provenance change in the northern Okinawa Trough since 22 kyr BP and its paleoenvironmental implication. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 399, 236-245.
- Yang, S.Y., Jung, H.S., Lim, D.I., and Li, C.X. (2003) A review on the provenance discrimination of sediments in the Yellow Sea. *Earth Science Reviews*, 63, 93-120.
- Yoo, D.-G. and Park, S.C. (2000) High-resolution seismic study as a tool for sequence stratigraphic evidence of high-frequency sea-level changes: Latest Pleistocene-Holocene example from the Korea Strait. *Journal of Sedimentary Research*, 70, 210-223.
- Yoo, D.-G., Koo, N.-H., Lee, H.-Y., Kim, B.-Y., Kim, Y.-J., and Cheong, S. (2015) Acquisition, processing and interpretation of high-resolution seismic data using a small-scale multi-channel system: An example

from the Korea strait inner shelf, south-east Korea. *Exploration Geophysics*, 47, 341-351.

Yoo, D.-G., Lee, G.-S., Kim, G.-Y., Kang, N.-K., Yi, B.-Y., Kim, Y.-J., Chun, J.-H., and Kong, G.-S. (2016) Seismic stratigraphy and depositional history of late Quaternary deposits in a tide-dominated setting: An example from the eastern Yellow Sea. *Ma-*

rine and Petroleum Geology, 73, 212-227.

Received November 20, 2019, Revised December 6, 2019, Accepted December 11, 2019, Associate Editor: Kideok Kwon