

동중국해 99MAP-P63 코어 퇴적물의 기원지 연구

Provenance Study of 99MAP-P63 Core Sediments in the East China Sea

최재영(Jae Yeong Choi) · 구효진(Hyo Jin Koo) · 조현구(Hyen Goo Cho)*

경상대학교 지질학과 및 기초과학 연구소
(Department of Geology and Research Institute of Natural Science, Gyeongsang National University,
Jinju 52828, Korea)

요약 : 동중국해는 황하(Huanghe), 장강(Changjiang) 및 한국의 여러 강들로부터 많은 양의 퇴적물을 공급받는 것으로 알려져 있으며, 각 강들의 영향 및 퇴적과정을 밝혀내기 위해 많은 연구가 수행되었으나, 의견일치가 이루어지지 못하였다. 본 연구에서는 동중국해 퇴적물의 기원지 및 퇴적 환경 유추를 위해, 99MAP-P63 코어 퇴적물에 대해 입도, 점토광물 및 희토류원소 분석을 수행하였다. 점토광물 분석 결과, 일라이트(illite)의 함량이 가장 높고, 카올리나이트(kaolinite) 및 녹니석(chlorite), 스멕타이트(smectite)의 순으로 풍부하며, 점토광물을 이용한 99MAP-P63 퇴적물의 기원지는 깊이에 관계없이 모두 장강인 것으로 판단된다. 희토류원소 분석 결과, 99MAP-P63 퇴적물들은 중국 강 퇴적물의 희토류원소 함량과 매우 유사하다. 따라서 99MAP-P63 퇴적물들의 기원지는 장강이며, 한국 강의 영향은 미미하거나 없을 것으로 판단된다. 99MAP-P63 퇴적물은 대체로 사질 실트로 구분되지만, 코어의 최상부는 모래의 함량이 85 %인 사질로 구분된다. 주변 코어들과 비교한 결과, 사질 실트는 해수면이 낮았던 저수위기(lowstand stage)에 해당되며, 장강의 고수로를 통해 퇴적물들이 직접 공급되었을 것으로 판단된다. 코어 최상부의 사질 퇴적물은 해침기(transgressive stage)에 해당되며 해수면 상승으로 인해 강 하구와의 거리는 멀어졌지만, 현재보다 높은 해저면의 응력으로 인해 조립질 퇴적물들이 공급될 수 있었으며, 인근에 퇴적되었던 고 장강(paleo-Changjiang) 퇴적물들이 재동된 것으로 해석된다.

주요어 : 점토광물, 희토류원소, 퇴적물 기원지, 동중국해, 장강

ABSTRACT : East China Sea (ECS) is known to be supplied with large amounts of sediments from Huanghe, Changjiang and various rivers in Korea. Many studies have been conducted to identify the effects of rivers and deposition process of ECS, but no consensus has been reached. In this study, clay minerals, rare earth elements (REEs) and grain size were analyzed to study the provenance and sedimentation environment of core 99MAP-P63 in ECS. Clay mineral contents of 99MAP-P63 are abundant in order of illite, chlorite, kaolinite, and smectite. The provenance of 99MAP-P63 sediments using clay minerals is interpreted as the Changjiang regardless of depth. As a result of REEs analysis, 99MAP-P63 sediments are very similar to Chinese rivers sediments. Therefore, the provenance of 99MAP-P63 is Changjiang, and the influence of Korean river seems to be insignificant. 99MAP-P63 sediments are generally classified as sandy silt, but the top of the core is divided into sand with a sand contents of 85 %. Compared with surrounding cores, sandy silt sediments corresponded to the low stand stage when sea-level was low, and the sediments were thought to have been supplied directly

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

through the paleo-Changjiang. Sandy sediments in uppermost of core are corresponded to transgressive stage. Although distance from estuary was increased due to sea-level rise, it was possible to supply coarse sediments due to high bottom stress, and the paleo-Changjiang sediments deposited in study area were re-deposited.

Key words : Clay mineral, rare earth elements, sediment provenance, East China Sea, Changjiang

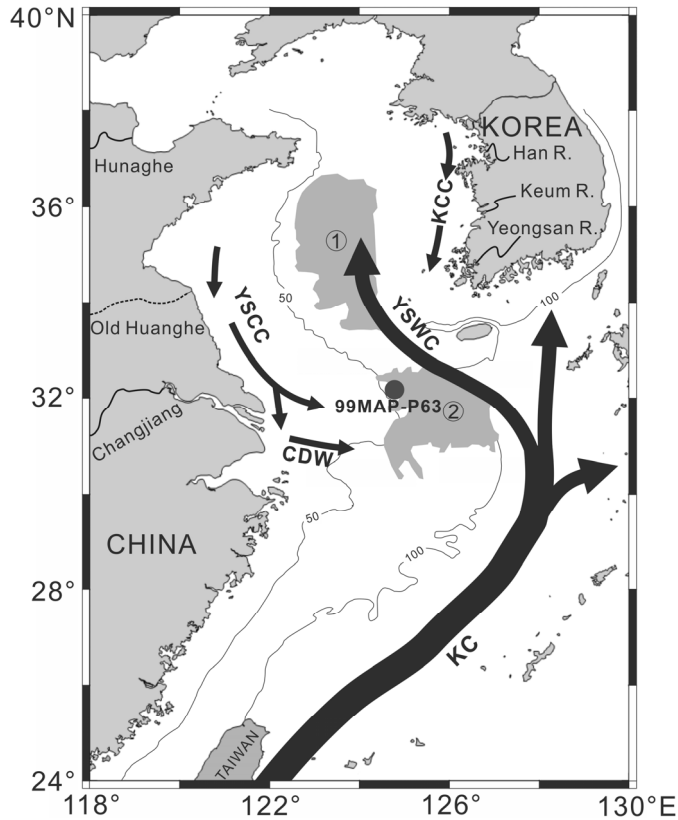


Fig. 1. Map showing the location of core 99MAP-P63 as well as the surface circulation in the East China Sea (modified from Dou *et al.*, 2010; Hu *et al.*, 2014; Dou *et al.*, 2015). ① Central Yellow Sea Mud (CYSM); ② Southwestern Cheju Island Mud (SWCIM); KC = Kuroshio current; YSWC = Yellow Sea Warm Current; KCC = Korean Coastal Current; YSCC = Yellow Sea Coastal Current; CDW = Changjiang Diluted Water.

서 론

동중국해는 장강의 북쪽 해역부터 제주도, 류큐 열도 및 대만의 남동부 해역을 포함하는 해역으로, 장강 어귀와 제주도 남서부, 오키나와 트러프의 북서부를 포함하는 넓은 대륙붕을 가진다(Butenko *et al.*, 1985; Youn and Kim, 2011). 동중국해는 쿠로시오 해류(Kuroshio Current, KC), 황해 연안류(Yellow Sea Coastal Current, YSCC), 황해 난류

(Yellow Sea Warm Current, YSWC), 한반도 연안류(Korean Coastal Current, KCC), 장강 희석수(Changjiang Diluted Water, CDW) 등 복잡한 해류 시스템의 영향을 받으며(Fig. 1), 최후빙기극대기(Last Glacial Maximum, LGM) 이후 조류에 의해 형성된 조류사퇴(tidal sand ridge)와 연안역과 분리되어 독립적으로 발달한 제주남서이질대(Southwestern Cheju Island Mud, SWCIM)가 존재한다(Yang *et al.*, 2003a; Choi *et al.*, 2010;

Dou *et al.*, 2015).

동중국해는 황하, 장강, 한국의 한강, 금강, 영산강 등 주변 대륙의 크고 작은 강들로부터 많은 양의 퇴적물을 공급받는 것으로 알려져 있으며, 각 강들의 영향 및 퇴적과정을 밝혀내기 위해 많은 연구가 수행되었다(Yang *et al.*, 2003b; Jung *et al.*, 2006; Youn and Kim, 2011; Hu *et al.*, 2014; Dou *et al.*, 2015). 특히, 제주도 남서부 해역은 최후빙기극대기 이후 해수면 상승에 의해 형성된 전형적인 해침 대륙붕환경으로(Yoo *et al.*, 2002), 해수면의 상승, 해류 순환 및 강 퇴적물의 유입량에 따라 퇴적물의 기원지 및 공급경로가 변화한다(Yang *et al.*, 2014; Hu *et al.*, 2014; Dou *et al.*, 2015).

초기 연구들은 이 지역을 황하 퇴적물들이 분산되어 공급되는 말단부로 간주하고 황하 기원으로 해석하였으나(DeMaster *et al.*, 1985; Milliman *et al.*, 1985; Alexander *et al.*, 1991 Saito, 1998), 최근 수행된 연구들에 의해 황하 기원(Dou *et al.*, 2015), 장강 기원(Youn *et al.*, 2005; Youn and Kim, 2011), 복합 기원(Yang *et al.*, 2003b, 2009) 등 다양한 의견이 제시되며 의견일치가 이루어지지 못하였다. 또한, Hu *et al.* (2014)는 탄산염 광물 분석을 통해 12.5-6.8 ka 시기 동안 조류에 의해 동중국해 남동쪽으로부터 조립질 퇴적물들이 공급되었고, 6.8 ka 이후 황하와 장강의 복합기원을 제시한 반면, Dou *et al.* (2015)는 회토류 원소를 이용한 연구를 통해 15-6 ka 동안 장강과 한국 강들의 퇴적물들이 공급되었으며, 6 ka 이후 황하 퇴적물들의 공급으로 제주남서이질대가 형성된 것으로 보고하여, 코어 퇴적물을 이용한 고환경 연구에서도 다양한 의견이 제시되고 있다.

회토류원소는 화학적으로 안정하여 퇴적 과정 동안 크게 변화하지 않기 때문에, 퇴적물 기원지 연구에 활용될 수 있다(Taylor and McLennan, 1985). 최근 연구들을 통해 중국 강들과 한국 강들의 퇴적물 내 회토류원소 함량에 뚜렷한 차이가 있음이 밝혀졌으며(Jung *et al.*, 2006; Song and Choi, 2009; Xu *et al.*, 2009), 이러한 특징을 이용한 기원지 연구들이 황해 및 동중국해에서 수행되고 있다(Jung *et al.*, 2006; Hu *et al.*, 2014; Dou *et al.*, 2015; Lim *et al.*, 2015). 또한, 이토질 퇴적물에서 가장 풍부한 성분 중 하나인 점토광물(clay mineral)은 바다로 운반되는 동안 화학적 특성이 크게 변화하지 않고, 기원지 암석의 특성을 그대로 유지하고

있기 때문에 퇴적물의 기원지 및 운반 경로를 밝혀내는데 중요한 실마리를 제공할 수 있다. 특히, 중국의 황하와 장강 그리고 한국의 강들은 퇴적물 내 점토광물의 상대적 함량에서 뚜렷한 차이를 보이기 때문에, 황해중앙이질대의 기원지 연구에 유용하게 이용되어왔다(Choi *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2014; Koo *et al.*, 2018). 그러나, 제주남서이질대에서는 점토광물을 이용한 기원지 연구가 상대적으로 덜 수행되었다. 퇴적물의 입도는 퇴적환경의 변화를 해석할 수 있는 잠재적인 가능성이 있다(Hyun *et al.*, 2006; Dou *et al.*, 2015). 퇴적물 공급지와 거리에 따라 퇴적되는 퇴적상이 다르다(Choi *et al.*, 2010), 수력학적 조건에 따라서도 퇴적되는 퇴적상이 다르다(Jung *et al.*, 2006; Lim *et al.*, 2015). 동중국해는 해침기 동안 해수면 변화에 기인한 퇴적환경 변화가 발생한 해역으로(Yoo *et al.*, 2002; Hyun *et al.*, 2006), 퇴적물의 입도가 이러한 퇴적환경의 변화를 잘 반영할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 동중국해 해역에서 채취된 코어 퇴적물에 대해 점토광물과 회토류원소 두 가지를 지시자로 이용하여 퇴적물의 기원지를 밝히고, 퇴적과정을 유추해 보고자 하였다.

시료 및 연구방법

시료

연구에는 1999년 동중국해 해역에서 수행된 한국 지질자원연구원 탐사에서 획득한 99MAP-P63 코어(32.1717 °N, 124.5447 °E)를 이용하였다(Fig. 1). 코어의 길이는 330 cm이며, 수심 약 44 m에서 채취되었다. 교란이 심한 표층을 제외하고, 10 cm 간격으로 획득한 32개의 부시료를 연구에 이용하였다.

점토광물함량분석

점토광물함량분석은 32개의 부시료를 이용하였다. 전처리 과정은 Koo *et al.* (2018)의 논문에 제시된 방법에 따라, 유기물을 제거하고 시료의 점토 부분을 분리하여 수행하였다. 점토광물의 함량은 X-선 회절분석을 통해 측정하였고, 분석을 수행하기 위해 농집시킨 점토 부분을 “smear-on-glass slide” 방법을 이용해서 시편으로 제작하였다. X-선 회절분석은 경상대학교 지질학과에서 보유

Table 1. Comparisons of clay mineral characteristics of core 99MAP-P63 with those of Changjiang, Huanghe and Korean riverine sediments

Samples	n	Smectite	Illite	Kaolinite + Chlorite	S/I ratio ($\times 100$)	Reference
99MAP-P63	32	3	64	33	4.7	This study
Changjiang	9	2	68	32	2.9	Koo <i>et al.</i> (2018)
	3	3.2	61.0	35.9	5.3	Cho <i>et al.</i> (2015)
Huanghe	13	9	62	33	14.5	Koo <i>et al.</i> (2018)
	4	11.5	56.7	31.8	20.3	Cho <i>et al.</i> (2015)
West Korean Rivers (Han/Keum/Yeongsan)	26	1.7	58.5	39.8	2.9	Cho <i>et al.</i> (2015)
	21	4	52	44	7.7	Lim <i>et al.</i> (2015)

중인 SIMENS/Bruker D5005 기기를 이용해 수행하였고, 흑연 단색화된 파장($\text{CuK}\alpha = 1.5406 \text{ \AA}$)을 이용하였다. 반정량 분석을 위한 시료의 분석조건은 40 kv/40 mA, 3-30 ° 2-theta 구간에서 주사간격 0.02 °, 주사 시간 2초로 설정하여 스텝-스캔 방식으로 회절 값을 기록하였다.

네 가지 주요 점토광물(스멕타이트, 일라이트, 카올리나이트, 녹니석)의 상대적인 함량은 공기 중 건조시료(air-dry)와 에틸렌글리콜로 포화시킨 시료(ethylene glycolated)에 대하여 X-선 회절분석을 실시하여 그 결과를 이용해 Biscay's law에 따른 반정량분석법으로 측정하였다. X-선 회절분석 결과에서 나타난 주요 점토광물들의 피크 면적은 Eva 3.0 프로그램을 이용하여 측정하였고, 카올리나이트와 녹니석의 함량은 공기 중 건조 시료의 X-선 분석결과에서 카올리나이트 (002) 피크와 녹니석 (004) 피크의 회절 강도 비를 이용하여 결정하였다.

입도분석 및 히토류원소 분석

입도분석은 20개의 부시료를 이용하였다. 약 10 g 정도의 시료를 6 % 과산화수소와 0.1 N 염산을 이용하여 유기물과 탄산염을 제거한 이후, 230 mesh (63 μm)체를 사용하여 모래 부분과 실트 및 점토 부분을 분리시켰다. 모래 부분의 무게를 측정하여 전체 시료무게와 모래 부분 무게의 비로 모래 부분의 함량을 계산하였다. 실트 및 점토부분의 함량은 부산대학교의 Sedigraph III를 이용하여 각 입도별 함량을 구한 후, 모래 부분을 제외한 시료의 무게에 곱하여 실트와 점토의 함량을 계산하였다.

히토류원소 분석은 위의 과정을 통해 분리된 점토 시료 중 11개를 선정하여 캐나다 Actlabs Laboratories

에 의뢰하여 ICP-MS를 이용해 분석하였다.

결과 및 토의

점토광물학적 연구

코어의 점토광물함량 분포는 일라이트, 녹니석 및 카올리나이트, 스멕타이트의 순으로 풍부하다 (Table 1). 코어 내 가장 풍부한 광물은 일라이트로 평균 64 % (최저 61 %-최대 67 %)의 함량을 가지며, 두 번째로 풍부한 점토광물은 녹니석으로 평균 18 % (최저 16 %-최대 19 %)의 함량을 가진다. 그 뒤로 카올리나이트가 평균 15 % (최저 12 %-최대 17 %)의 함량을 보이며, 스멕타이트의 함량은 평균 3 % (최저 2 %-최대 4 %)로 가장 낮았다. 코어의 수직적 변화를 살펴보면 각각의 점토광물의 그래프가 증가 감소의 패턴을 반복하고, 코어 상부에서 녹니석 및 카올리나이트의 함량은 증가하고 일라이트의 함량은 감소하는 경향을 보이지만, 전체적인 함량에는 큰 변화가 없다(Fig. 2).

점토광물의 함량 및 상대적인 비는 모암에 따라 다른 특성을 가지기 때문에, 연구지역의 잠재적 기원지인 중국, 한국 강 퇴적물들을 구분하는데 많이 적용되어왔다(Li *et al.*, 2014; Lim *et al.*, 2015; Koo *et al.*, 2018). 황하에서 공급되는 퇴적물들은 다른 강들보다 스멕타이트 함량이 높다. 장강에서 공급되는 퇴적물들은 다른 강들에 비해 일라이트의 함량이 높은 특징을 보이고, 한국 강 퇴적물들은 카올리나이트와 녹니석의 함량이 높은 특징을 보인다(Table 1)(Choi *et al.*, 2010; Cho *et al.*, 2015; Lim *et al.*, 2015; Koo *et al.*, 2018). 스멕타이트가 전혀 포함되지 않은 대만 퇴적물들은 기원지로서의 가능성이 거의 없는 것으로 판단된다

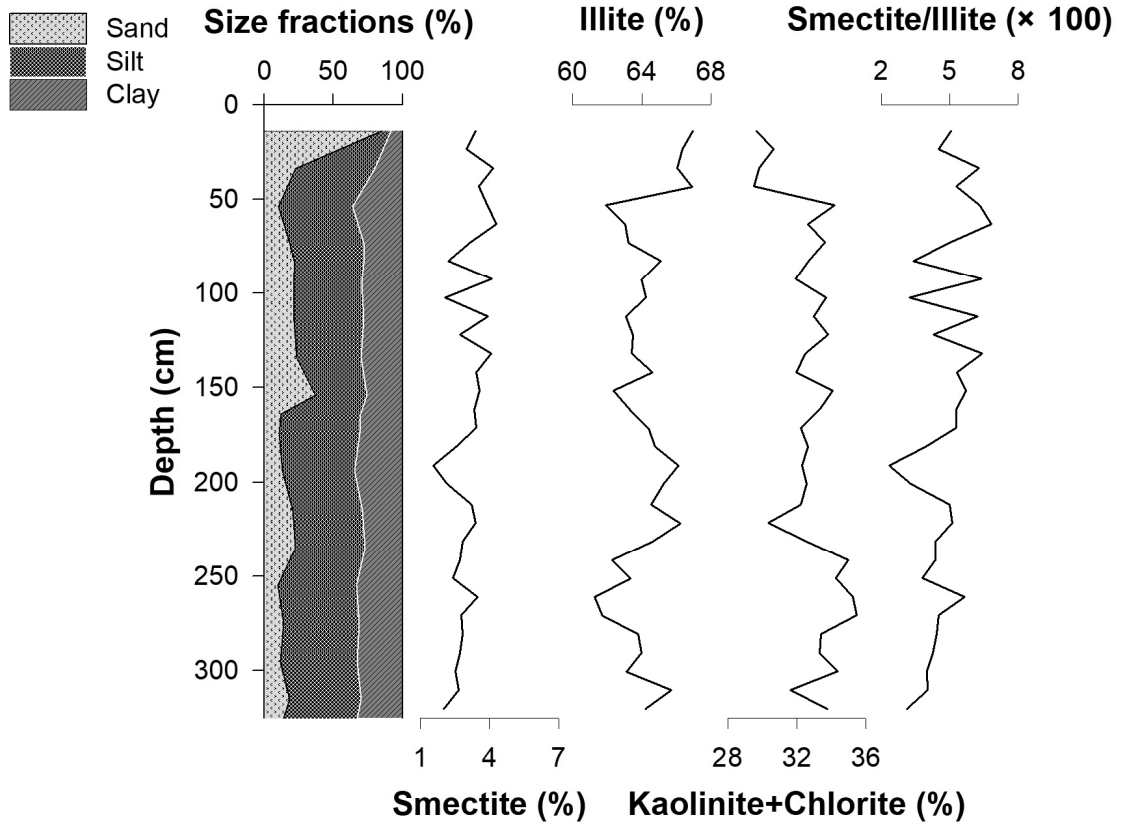


Fig. 2. Vertical variations of grain size and clay mineral compositions of core 99MAP-P63 sediments.

(Lim *et al.*, 2015). 따라서, (녹니석 + 카올리나이트)-일라이트-스멕타이트 삼각도표는 중국의 황하 및 장강, 한국의 강 퇴적물들을 구분하는데 매우 유용한 자료로서 사용될 수 있다(Choi *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2014; Kwak *et al.*, 2016; Koo *et al.*, 2018). 코어의 점토광물 함량을 삼각도표에 도식한 결과, 99MAP-P63 퇴적물들은 코어 깊이에 관계없이 모두 장강 퇴적물의 영역에 도식된다(Fig. 3a). 일라이트에 대한 스멕타이트의 함량 비(S/I ratio ($\times 100$))와 녹니석 및 카올리나이트의 함량(K + C) 등 점토광물 간의 상대적인 비 또한 기원지 연구의 유용한 지시자로서 활용될 수 있다(Cho *et al.*, 2015; Lim *et al.*, 2015; Kwak *et al.*, 2016; Koo *et al.*, 2018). 황하 퇴적물은 높은 스멕타이트의 함량으로 인해 평균 14 이상의 높은 S/I ratio ($\times 100$)를 가지는 특징을 보인다. 장강 및 한국 강 퇴적물들은 S/I ratio는 유사하지만 K + C 함량을 통해 구분이 가능하다. 연구지역 코어의 S/I ratio (\times

100)는 4.7로, 장강 및 한국 강 퇴적물들의 S/I ratio ($\times 100$)과 유사한 값을 가지나, K + C 함량은 33.0으로 장강 퇴적물의 K + C 함량과 유사한 값을 나타낸다(Table 1). 그래프에 도식하면, Fig. 3a와 마찬가지로 장강의 영역에 도식된다(Fig. 3b). 그러므로, 99MAP-P63 퇴적물들은 깊이에 따라 점토광물 함량이 조금씩 변화하지만 기원지에는 변화가 없었으며 모두 장강으로부터 공급된 것으로 판단된다.

희토류원소를 이용한 연구

퇴적물의 희토류원소함량을 상부 대륙지각(Upper Continental Crust, UCC)의 희토류원소함량으로 정규화한 값(UCC-normalized pattern)은 퇴적물의 기원지 연구를 위해 널리 사용되는 방법이다(Taylor and McLennan, 1985; Jung *et al.*, 2006; Xu *et al.*, 2009; Lim *et al.*, 2015; Dou *et al.*, 2015). 희

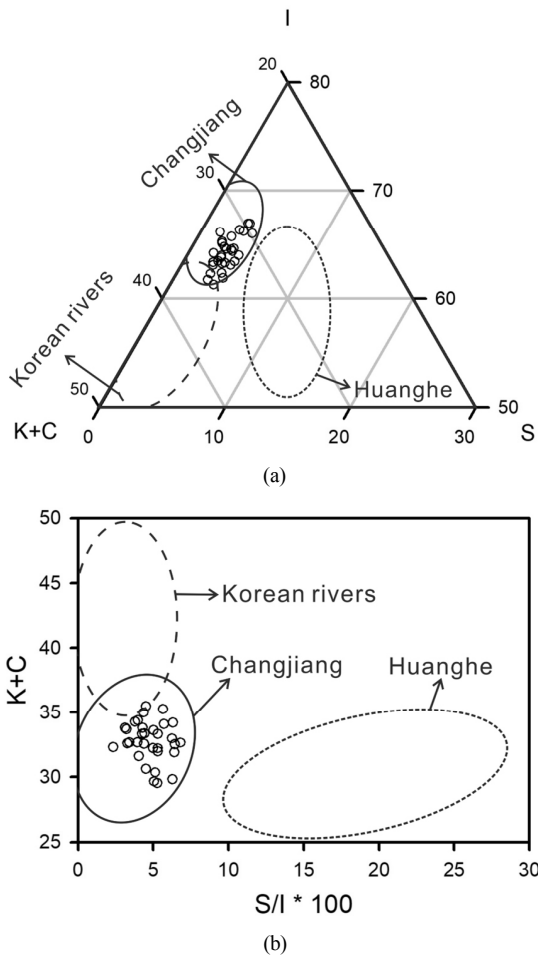


Fig. 3. (a) Ternary diagram of major clay mineral groups, illite, smectite, and kaolinite + chlorite and (b) discrimination plot between S/I ratio ($\times 100$) and K + C of core 99MAP-P63 and river sediments from potential provenance of study area. Data regarding the potential provenance comprising the Changjiang and Huanghe (Cho *et al.*, 2015; Koo *et al.*, 2018) and western Korean rivers (Cho *et al.*, 2015) are plotted for comparison.

토류원소함량은 황하와 장강 퇴적물의 분포양상이 유사하여 구분하기 어렵다는 단점이 있지만(Jung *et al.*, 2006), 한국 강들과 중국 강 퇴적물들을 확실하게 구분해 낼 수 있다(Hu *et al.*, 2014; Dou *et al.*, 2015). 한국 강 퇴적물들은 경희토류(LREEs, La-Eu)함량이 부화된 특징을 보이고, 중국 강 퇴적물들은 중간희토류(MREEs, Sm-Dy)함량이 부화된

특징을 보인다(Yang *et al.*, 2003b; Song and Choi, 2008; Xu *et al.*, 2009). 희토류원소의 함량이 동중국해와 크게 다르고 공급할 수 있는 퇴적물의 양이 제한적인 제주도 퇴적물들은 기원지로서의 가능성이 거의 없을 것으로 판단된다(Dou *et al.*, 2015). 그러나, 희토류원소의 함량은 모암의 조성 이외에도 퇴적물의 입도 및 중광물 함량에 의해 크게 달라질 수 있다(Jung *et al.*, 2012). 본 연구에서는 희토류원소 분석에 퇴적물의 점토부분만을 이용하였기 때문에 입도 및 중광물로 인한 영향은 없을 것으로 사료된다. 희토류 원소를 정규화한 그래프에서 99MAP-P63 퇴적물들은 깊이에 따라 값은 조금씩 다르지만 중간희토류가 부화된 동일한 특징을 가지며(Fig. 4a), 이는 중국강 퇴적물의 경향과 매우 유사하다.

중희토류(HREEs, Gd-Lu)에 대한 경희토류의 상대적인 비($\Sigma\text{LREEs}/\Sigma\text{HREEs}$)와 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{UCC}}$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{UCC}}$ 또한 중국과 한국 강 퇴적물을 구분하는 유용한 지시자로서 이용될 수 있다(Xu *et al.*, 2009). LREEs가 부화된 한국 강 퇴적물들은 12, 1.5, 1.6의 높은 $\Sigma\text{LREEs}/\Sigma\text{HREEs}$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{UCC}}$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{UCC}}$ 값을 보인다. 반면, 중국 강 퇴적물들은 장강은 9.0, 1.1, 1.2, 황하는 9.5, 1.1, 1.3의 낮은 값으로, 서로 비슷한 값을 가진다(Table 2). 99MAP-P63 퇴적물의 $\Sigma\text{LREEs}/\Sigma\text{HREEs}$ 값은 9.5이며, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{UCC}}$ 는 1.1, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{UCC}}$ 또한 1.1로 모두 한국 강 퇴적물보다는 중국 강 퇴적물과 유사한 값을 가진다(Table 2). 따라서, 99MAP-P63 퇴적물들은 중국 강들로부터 공급되었으며, 한국 강의 영향은 미미하거나 없을 것으로 사료된다(Fig. 4b). 또한, 점토 광물의 결과와 종합하면 99MAP-P63은 깊이에 따른 기원지의 변화 없이 모두 장강으로부터 공급된 퇴적물로 판단된다.

퇴적물의 유입 경로 및 퇴적 환경 유추

99MAP-P63 퇴적물의 입도는 대체로 일정하며 모래 평균 22 % (최저 10 %-최대 85 %), 실트 평균 50 % (최저 7 %-최대 58 %), 점토 평균 28 % (최저 8 %-최대 36 %)로 이루어진 사질 실트로 구분된다. 그러나 코어의 최상부는 모래의 함량이 85 %인 사질로 구분된다.

최후빙기극대기 이후 동중국해의 퇴적상은 크게 사질 실트, 사질, 점토질의 순으로 변화한다(Hu *et al.*, 2014; Dou *et al.*, 2015). 해수면이 상승 이전

Table 2. Comparisons of REEs characteristics in the fine-grained sediments of core 99MAP-P63 with those of Chinese and Korean riverine sediments

Samples	n	Σ REEs (ppm)	Σ LREEs/ Σ HREEs	(La/Yb) _{UCC}	(Gd/Yb) _{UCC}	Reference
99MAP-P63	11	200.2	9.5	1.1	1.1	This study
Changjiang	10	205.3	9.0	1.1	1.2	Song and Choi (2009)
Huanghe	3	201.1	9.5	1.1	1.3	
West Korean Rivers (Han/Keum/Yeongsan)	18	243.8	12.0	1.6	1.5	

인 저수위기(> 15 ka)에는 주로 사질 실트 퇴적상이 나타나고, 해수면이 빠르게 상승하는 해침기(15-6 ka)에는 사질 퇴적상이 나타난다. 해수면이 상승하여 현재와 같은 해류의 흐름이 형성된 고수위기(highstand stage, < 6 ka)에는 점토질 퇴적상이 나타나지만, 동중국해 전역이 아닌 특징적인 이질대 퇴적체가 형성된다(Saito, 1998; Uehara and Saito, 2003; Dou *et al.*, 2015). 99MAP-P63 코어 퇴적물의 입도는 사질 실트, 사질 순으로 변화하며, 이는 저수위기에서 해침기의 퇴적상과 매우 유사하다. 또한, 인접한 코어에서 유사한 퇴적상을 가지고, 최상부의 연대가 해침기에 속하는 9,780 yr BP로 계산되었으며(Badejo *et al.*, 2014), 현재 표층의 퇴적상이 사질일 경우 퇴적률이 1.0 mm/yr 보다 낮거나 거의 퇴적이 되고 있지 않다는 연구결과 역시 99MAP-P63 코어 최상부의 사질 퇴적물이 현재 공급된 것이 아닌 해침기 동안 공급되었다는 것을 의미할 수 있다(Qiao *et al.*, 2017). 그러므로, 99MAP-P63 코어를 통해 최후빙기극대기 이후 동중국해의 저수위기, 해침기의 퇴적 과정을 유추해 볼 수 있다.

저수위기 동안 해수면은 현재보다 약 100-120 m 정도 낮았다(Saito, 1998). 연구지역은 이 시기에 지면으로 노출되거나 강 하구와 인접한 연안 환경이었을 수 있다. 고 장강(paleo-Changjiang) 및 고 황하(paleo-Huanghe)의 고수로들이 연구지역 인근에 분포하기 때문에(Wang, 1999; Yang *et al.*, 2014; Yoo *et al.*, 2016), 이 시기에는 고수로를 통해 퇴적물들이 유입될 수 있다(Dou *et al.*, 2015). 강에서 공급된 퇴적물 중 조립질 퇴적물들은 공급지와의 거리가 가까운 지역에서 퇴적되고, 점토와 같은 세립질 퇴적물들은 해류를 따라 강으로부터 멀리 운반되어 퇴적될 수 있다(Choi *et al.*, 2010). 한반도 남해 해역, 낙동강과 섬진강의 고수로가 많이 분포하는 지역에서도 연구지역과 비슷한 퇴적

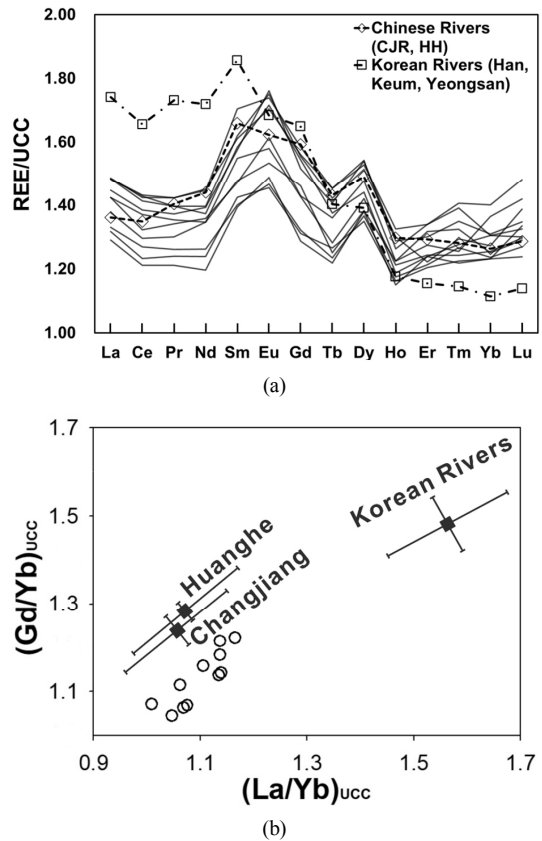


Fig. 4. (a) UCC-normalized pattern of REE composition and (b) discrimination plot between (La/Yb)_{UCC} and (Gd/Yb)_{UCC} of core 99MAP-P63 and river sediments from potential provenance of study area. Data regarding the potential provenance comprising the Chinese and western Korean rivers (Song and Choi; 2009) are plotted for comparison.

상을 가진 조립질 퇴적물들이 존재하였고, 고수로를 따라 공급된 퇴적물로 보고된 바 있다(Yoo *et al.*, 2003; Park *et al.*, 2003). 연구지역의 퇴적상은

사질 실트로 조립하므로, 퇴적물이 공급지와 가까운 거리에서 퇴적되었을 것으로 고려되며, 연구지역은 고 장강의 하구와 매우 가까운 지역에 위치하므로(Yang *et al.*, 2014), 장강 퇴적물들이 직접적으로 공급되었을 것으로 판단된다. 저수위기 동안 낮은 해수면으로 인해 고 황하 또는 한국 강들의 하구 또한 황해 남쪽에 위치하였을 수 있으나(Yoo *et al.*, 2016), 기원지 분석 결과 장강의 퇴적물들만 퇴적되고 황하 및 한국 강들의 퇴적물들은 영향을 미치지 못하였으므로, 강 하구가 연구지역과 비교적 먼 지역에 위치하였거나 비교적 가까운 곳에 위치하더라도 해류가 형성되지 않아 퇴적물들이 연구지역에 도달할 수단이 없었던 것으로 판단된다.

사질 퇴적물로 특징되는 99MAP-P63의 최상부는 해수면이 빠르게 상승하는 약 13 ka부터 9 ka의 해침기에 해당될 수 있으며, 이 시기 해수면은 -80 m에서 현재와 같은 수준으로 빠르게 상승하였다(Saito, 1998). 해수면 상승과 함께 주변 강들의 하구 또한 연구지역에서 멀어졌으나, 현재보다 높은 해저면의 응력(> 1.0 N/m²)으로 인해 조립질 퇴적물들이 공급될 수 있다(Hu *et al.*, 2014; Dou *et al.*, 2015). 동중국해는 해침기 동안 현재보다 강한 조석작용으로 인한 응력에 의해 해역전체에 조류사퇴가 형성되었고, 특히 해수면이 현재보다 60-75 m 낮았던 약 12,000년-13,500년 전에 주로 형성되었다(Uehara and Saito, 2003). 따라서, 99MAP-P63 코어 최상부의 시기를 특정하기는 어렵지만 해침기에 형성된 사질 퇴적물들로 판단되며, 기원지가 장강으로 동일하므로 인근지역에 퇴적되어 있던 고 장강 퇴적물들이 강한 해저 응력에 의해 재동된 것으로 해석된다.

결 론

동중국해 해역에서 채취한 99MAP-P63 코어 퇴적물을 이용하여 코어의 입도, 점토광물 및 희토류 원소를 통해 퇴적물의 기원지 및 퇴적환경에 대한 연구를 수행하였다.

1) 점토광물 분석 결과, 일라이트의 함량이 가장 높고, 녹니석, 카올리나이트, 스�멕타이트의 순으로 풍부하다. 점토광물을 이용한 99MAP-P63 퇴적물의 기원지는 깊이에 관계없이 모두 장강으로 구분되었다.

2) 희토류원소 분석 결과, 99MAP-P63 퇴적물들은 중국 강 퇴적물의 희토류원소 함량과 매우 유사

하다. 99MAP-P63 퇴적물들의 기원지는 장강이며, 한국 강의 영향은 미미하거나 없을 것으로 판단된다.

3) 99MAP-P63 퇴적물은 대체로 사질 실트로 구분되지만, 코어의 최상부는 모래의 함량이 85 %인 사질로 구분된다. 주변 코어들과 비교한 결과, 사질 실트는 저수위기에 해당되며 장강의 고수로를 통해 퇴적물들이 직접 공급되었을 것으로 판단되며, 사질은 해침기에 해당되며 현재보다 높은 해저면의 응력으로 인해 인근에 퇴적된 고 장강 퇴적물들이 재동된 것으로 해석된다.

사 사

이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2017 R1D1A1B03027818, 최후빙기극대기 이후 한반도 주변 고환경 변화 연구, 광물학적인 방법). 시료 준비 및 분석을 도와준 경상대학교 지질과학과 점토실험실의 강현진, 구미향 학생에게 감사드립니다. 부족한 원고를 세밀하게 심사하시고 문제점을 지적하여 주신 심사위원님께 감사드립니다.

REFERENCES

- Alexander, C.R., DeMaster, D.J. and Nittrouer, C.A. (1991) Sediment accumulation in a modern epicontinental-shelf setting: The Yellow Sea. *Marine Geology*, 98, 51-72.
- Badejo, A.O., Gal, J.K., Hyun, S.-M., Yi, H.-I., and Shin, K.-H. (2014) Reconstruction of paleohydrological and paleoenvironmental changes using organic carbon and biomarker analyses of sediments from the northern East China Sea. *Quaternary International*, 344, 211-223.
- Butenko, J., Milliman, J.D., and Yincan, Y. (1985) Geomorphology, shallow structure and geological hazards in the East China Sea. *Continental Shelf Research*, 4, 121-141.
- Cho, H.G., Kim, S.-O., Kwak, K.Y., Choi H.S., 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.R., 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).
- DeMaster, D.J., McKee, B.A., Nittrouer, C.A., Jiangchu, Q., and Guodong, C. (1985) Rates of sediment accumulation and particle reworking based on radiochemical measurements from continental shelf deposits in the East China Sea. *Continental Shelf Research*, 4, 143-158.
- Dou, Y., Yang, S., Liu, Z., Clift P.D., Shi, X., Yu, H., and Berne, S. (2010) Provenance discrimination of siliciclastic sediments in the middle Okinawa Trough since 30 ka: Constraints from rare earth element compositions. *Marine Geology*, 275, 212-220.
- Dou, Y., Yang, S., Lim, D.-I., and Jung, H.-S. (2015) Provenance discrimination of last deglacial and Holocene sediments in the southwest of Cheju Island, East China Sea. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 422, 25-35.
- Hu, B., Yang, Z., Qiao, S., Zhao, M., Fan, D., Wang, H. Bi, N., and Li, J. (2014) Holocene shifts in riverine fine-grained sediment supply to the East China Sea Distal Mud in response to climate change. *The Holocene*, 24(10), 1253-1268.
- Hyun, S.M., Lim, D.-I., and Yoo, H.-S. (2006) Transgressive Geochemical Records in the East China Sea. A Perspective with Holocene Paleoceanography, *Economic and Environmental Geology*, 39(1), 53-61.
- Jung, H.-S., Lim, D.-I., Yang, S., and Yoo, H.-S. (2006) Constraints of REE distribution patterns in core sediments and their provenance, northern East China Sea. *Economic and Environmental Geology*, 39, 39-51 (in Korean with English abstract).
- Jung, H.-S., Lim, D.I., Choi, J.-Y., Yoo, H.-S., Rho, K.-C., and Lee, H.-B. (2012) Rare earth element compositions of core sediments from the shelf of the South Sea, Korea: Their controls and origins. *Continental Shelf Research*, 48, 75-86.
- 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, *Geoscience Journal*, 22, 989-1000.
- Kwak, K.Y., Choi, H., and Cho, H.G. (2016) Paleoenvironmental change during the late Holocene in the southeastern Yellow Sea, Korea. *Applied Clay Science*, 134, 55-61.
- Li, J., Hu, B., Wei, H., Zhao, J., Zou, L., Bai, F., Dou, Y., Wang, L., and Fang, X. (2014) Provenance variations in the Holocene deposits from the southern Yellow Sea: Clay mineralogy evidence, *Continental Shelf Research*, 90, 41-51.
- 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.
- Milliman, J.D., Beardsley, R.C., Yang, Z., and Limeburner, R. (1985) Modern Huanghe-derived muds on the outer shelf of the East China Sea: identification and potential transport mechanisms. *Continental Shelf Research*, 4, 175-188.
- Park, S.-C., Han, H.-S., and Yoo, D.-G. (2003) Transgressive sand ridges on the mid-shelf of the southern sea of Korea (Korea Strait): formation and development in high-energy environments. *Marine Geology*, 193, 1-18.
- Qiao, S., Shi, X., Wang, G., Zhou, L., Hu, B., Hu, L., Yang, G., Liu, Y., Yao, Z., and Liu, S. (2017) Sediment accumulation and budget in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea. *Marine Geology*, 390, 270-281.
- Saito, Y. (1998) Sedimentary environment and budget in the East China Sea. *Bulletin on Coastal Oceanography*, 36, 43-58 (in Japanese).
- Song, Y.H. and Choi, M.S. (2009) REE geochemistry of fine-grained sediments from major rivers around the Yellow Sea. *Chemical Geology*, 266, 328-342.
- Taylor, S.R. and McLennan, S.M. (1985) The continental crust: its composition and evolution. Blackwells, Oxford, 312p.
- Uehara, K. and Saito, Y. (2003) Late Quaternary evolution of the Yellow/East China Sea tidal regime and its impacts on sediments dispersal and seafloor morphology. *Sedimentary Geology*, 162, 25-38.
- Wang, L. (1999) Holocene variations in Asian monsoon moisture: a bi-decadal sediment record from South China Sea. *Geophysical Research Letters*, 26, 2889-2892.
- Xu, Z., Lim, D.I., Choi, J.Y., Yang, S., and Jung H.S. (2009) Rare earth elements in bottom sediments of major rivers around the Yellow Sea: implications for sediment provenance. *Geo-Marine Letters*, 29, 291-300.
- Yang, S., Jung, H.S., Lim, D.I., and Li, C.X. (2003a) A review on the provenance discrimination of sediments in the Yellow Sea. *Earth-Science Reviews*, 63, 93-120.
- Yang, S., Li, C., Lee, C.B., and Na, T.K. (2003b) REE geochemistry of suspended sediments from the rivers around the Yellow Sea and provenance indicators. *Chinese Science Bulletin*, 48, 1135-1139.
- Yang, S. and Youn, J.-S. (2007) Geochemical compo-

- sitions and provenance discrimination of the central Yellow Sea sediment. *Marine Geology*, 243, 229-241.
- Yang, S., Wang, Z., Dou, Y., and Shi, X. (2014) A review of sedimentation since the Last Glacial Maximum on the continental shelf of eastern China. *Continental Shelves During Last Glacioeustatic Cycle: Shelves of the World*, Geological Society of London, Memoirs, 293p.
- Yang, W., Chen, M., Li, G., Cao, J., Guo, Z., Ma, Q., Liu, J., and Yang, J. (2009) Relocation of the Yellow River as revealed by sedimentary isotopic and elemental signals in the East China Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 58, 923-927.
- Yoo, D.G., Lee, C.W., Kim, S.P., Jin, J.H., Kim, J.K., and Han, H.C. (2002) Late Quaternary transgressive and highstand systems tracts in the northern East China Sea mid-shelf. *Marine Geology*, 187, 313-328.
- Yoo, D.-G., Park, S.-C., Sunwoo, D., and Oh, J.-H., (2003) Evolution and chronology of late pleistocene shelf-perched lowstand wedges in the Korea strait. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22, 29-39.
- 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. *Marine and Petroleum Geology*, 73, 212-227.
- Youn, J.-S., Lim, D.-I., Byun, J.-C., and Jung, H.-S. (2005) Discrimination of Sediment Provenance Using $87\text{Sr}/86\text{Sr}$ Ratios in the East China Sea. *Journal of the Korean Society of Oceanography*, 10, 92-99 (in Korean with English abstract).
- Youn, J.S. and Kim, T.-J. (2011) Geochemical composition and provenance of muddy shelf deposits in the East China Sea. *Quaternary International*, 230, 3-12.

Received November 9, 2018, Revised December 5, 2018,
Accepted December 10, 2018, Associate Editor: Dong Bok Shin