

최후 빙기 이후 제주남서니질대 세립질 퇴적물의 기원지 변화

구효진 · 최재영 · 조현구[‡]

경상대학교 지질학과 및 기초과학연구소

요 약

해수면 변화를 지시하는 프록시 중 퇴적물의 기원지 변화에 대한 기록이 중요하게 이용되고 있다. 동중국해 북단에 위치한 제주남서니질대는 퇴적물의 기원지 변화를 이용한 해수면 변화 연구가 선행되어 왔지만 의견 일치는 이루어지지 않았다. 이번 연구에서는 입도 자료와 연대측정 자료가 알려진 3개의 코어에 대하여 희토류원소와 점토광물조성을 이용하여 최후 빙기 이후 해수면 상승에 따른 기원지 변화를 추적하였다. 유닛 3는 현재보다 해수면이 최대 120 m 낮은 최후 빙기에 해당한다. 유닛 3 퇴적물들은 높은 실트 함량과 높은 S/I (스멕타이트/일라이트) 비로 특징되며, 퇴적물의 대부분이 고 황하를 통해 직접 유입되었다. 그러나, 비교적 높은 총 희토류 함량을 가지는 일부 유닛 3 퇴적물들은 한국의 강들로부터 유래한 것으로 여겨진다. 해침기에 해당하는 유닛 2는 현재보다 강한 조석 작용으로 인한 응력에 의해 높은 모래 함량을 나타내며, 이 시기 동안 퇴적물의 기원지는 황하에서 장강으로 변화하였다. 유닛 1은 현재와 유사한 해수면과 해양 순환이 형성된 고수위기에 해당한다. 유닛 1 퇴적물들은 모래의 함량이 적고 점토 함량이 많은 전형적인 니질퇴적체의 특징을 가지며, 퇴적물들은 장강 기원으로 구분되었다. 장강 퇴적물들은 장강희석수 또는 황해난류에 의하여 연구지역으로 공급되는 것으로 여겨진다. 따라서, 제주남서니질대의 세립질 퇴적물 기원지는 해수면 변화에 따라 황하 기원, 황하와 장강의 복합 기원, 장강 기원의 순으로 변화하는 양상을 나타낸다.

주요어: 제주남서니질대, 동중국해, 희토류원소, 점토광물조성, 퇴적물 기원지

Hyo Jin Koo, Jae Young Choi and Hyen Goo Cho, 2021, Provenance change of fine-grained sediments in the South West Cheju Island Mud (SWCIM) since the last glacial period. Journal of the Geological Society of Korea. v. 57, no. 2, p. 165-179

ABSTRACT: The records of changes in sediment provenance have been importantly used for sea level variation. The South West Cheju Island Mud (SWCIM), located at the northern end of the East China Sea, has been attracting attention from many researches because it probably records the provenance change according to sea level change. However, the sediment provenance and changes in the provenance due to sea level rise remain unclear. In this study, we traced the provenance change due to sea level rise after the last glacial period using rare earth elements and clay mineral composition for three cores for which data of grain size and dating are known. Unit 3, which is the last glacial period, was characterized by a high silt content and S/I (Smectite/Illite) ratio, and most of the sediments were sourced directly from the paleo Huanghe. However, some of Unit 3 sediments with relatively high total rare earth content are believed to originated from the Korean rivers. Unit 2, which corresponds to the transgressive period, exhibited an abundance of sand due to the tidal stress stronger than the present, and during this period the sediment provenance changed from the Huanghe to the Changjiang. Unit 1 corresponds to highstand period when sea level and oceanic circulation similar to the present is established. Unit 1 sediments have a characteristic of typical mud patch with low sand and high clay contents, and the sediment provenance was identified as Changjiang. The Changjiang sediments are believed to be supplied to the study area through the Changjiang Diluted Water or Yellow Sea Warm Current. Therefore, the fine sediment provenance in the SWCIM changes in the order of the Huanghe origin, the multi-origin of the Huanghe and Chang jiang, and the Changjiang origin according to sea level change.

Key words: South West Cheju Island Mud, East China Sea, rare earth element, clay mineral composition, sediment provenance

(Hyo Jin Koo, Jae Young Choi and Hyen Goo Cho, Department of Geology and Research Institute of Natural Science, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Republic of Korea)

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

1. 서론

동중국해는 한국-일본-중국의 배타적 경제수역이 상호 접해있는 지역으로, 장강(Changjiang) 북쪽 해안부터 제주 해역, 류큐 열도, 대만의 남쪽 해역까지 포함하는 바다이다. 동중국해는 쿠로시오 해류(KC, Kuroshio Current), 황해 연안류(YSCC, Yellow Sea Coastal Current), 황해 난류(YSWC, Yellow Sea Warm Current), 장강 희석수(CDW, Changjiang Diluted Water), 한반도 연안류(KCC, Korean Coastal Current) 등의 영향을 받는 복잡한 해류 흐름과 퇴적물 유입 환경으로 인해 기원지가 명확하게 밝혀져 있지 않고, 또한, 해수면 변화에 민감한 지역으로 퇴적물의 유입 환경이 다양한 곳이기 때문에 고환경에 대한 많은 연구들이 수행되고 있다(Butenko *et al.*, 1985; Youn and Kim, 2011).

동중국해 북단의 제주도 남서부 대륙붕 지역에 발달한 니질대인 제주남서니질대(SWCIM, South West Cheju Island Mud)는 전형적인 해침 대륙붕 환경을 보이며, 해수면의 상승, 해류 순환 및 강 퇴적물의 유입량에 따라 퇴적물의 기원지 및 공급경로가 변화하므로, 해수면 변화에 따른 퇴적물의 기원지 변화가 기록되어 있을 것으로 추정되어 많은 연구자들의 관심을 받아왔다(그림 1)(Yoo *et al.*, 2002; Yang *et al.*, 2003, 2014; Jung *et al.*, 2006; Youn and Kim, 2011; Hu *et al.*, 2014; Dou *et al.*, 2015). 제주남서니질대는 중국의 장강과 황하(Huanghe), 한국의 강들과 같은 주변 대륙의 여러 강들로부터 많은 양의 퇴적물을 공급받았을 것으로 여겨지며, 각 강들의 영향을 밝혀내기 위한 연구가 수행되어 왔다.

제주남서니질대에 관한 초기 연구는 주로 표층 퇴적물에 대하여 이루어졌는데, 황하 기원(DeMaster *et al.*, 1985; Milliman *et al.*, 1985; Alexander *et al.*, 1991; Saito, 1998), 장강 기원(Youn *et al.*, 2007; Youn and Kim, 2011) 및 황하와 장강의 복합 기원(Yang *et al.*, 2003; Cho *et al.*, 2013) 등 기원지에 관한 다양한 견해가 존재하고 있다. 코어 시료에 대한 연구 결과는 약 10여 년 전부터 발표되기 시작하였다. Hu *et al.* (2014)은 희토류 원소, 입도, 방해석/백운석 비를 이용하여, 12,000-6,800년 전까지는 동중국해 남동쪽에서 조립질 퇴적물이 공급되다가, 6,800년 전 이후 황하와 장강 퇴적물이 복합적으로 공급되었다고 주장하

였다. Dou *et al.* (2015)은 희토류원소(REEs, Rare Earth Elements)와 입도를 이용하여, 마지막 최대 빙하기(LGM, Last Glacial Maximum) 동안 황하에서 퇴적물이 공급되다가, 15,000-6,000년 전 동안에는 장강과 한국 강들의 퇴적물이 공급되었으며, 6,000년 전 이후 황하 퇴적물이 공급되었다고 주장하였다. 이처럼 제주남서니질대의 기원지 및 시대별 기원지 변화에 대하여 아직 일치된 견해는 없다고 할 수 있다.

점토광물은 주변 대륙을 구성하는 모암의 성질을 반영하며, 바다로 운반되는 동안 화학적 특성이 크게 변하지 않고, 기원지 암석의 특성을 그대로 유지하고 있으므로 전 세계 해양퇴적물뿐만 아니라 한반도 주변 해양퇴적물의 기원지 연구에 유용하게 이용되어 왔다(Choi *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2014; Cho *et al.*, 2015; Kwak *et al.*, 2016; Koo *et al.*, 2018; Park *et al.*, 2019). 한반도 주변 해역 퇴적물의 중요 기원

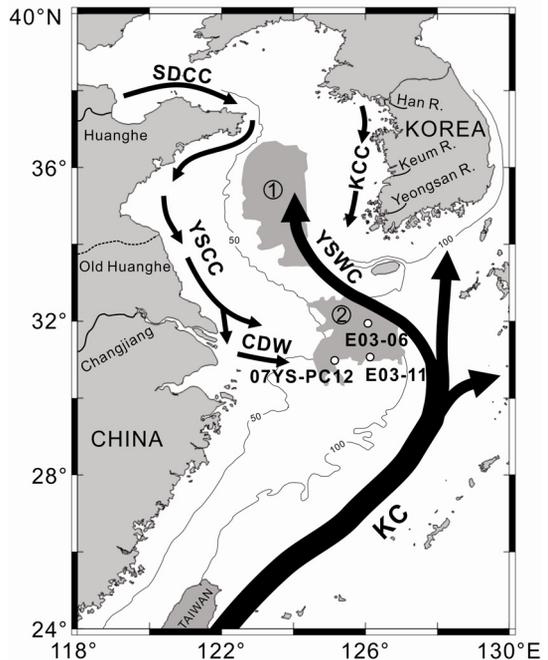


Fig. 1. Map showing the location of core E03-06, E03-11, and 07YS-PC12 as well as the surface circulation in the East China Sea (modified from Dou *et al.*, 2010a, 2010b, 2015; Hu *et al.*, 2014). ① Central Yellow Sea Mud (CYSM), ② Southwestern Cheju Island Mud (SWCIM), Kuroshio current (KC), Yellow Sea Warm Current (YSWC), Korean Coastal Current (KCC), Yellow Sea Coastal Current (YSCC), Changjiang Diluted Water (CDW).

지 중, 황하 퇴적물은 일반적으로 스멕타이트(smectite)의 함량이 높은 반면, 강강 퇴적물은 일라이트(illite)의 함량이 높다. 또한, 한국 강들은 카올리나이트(kaolinite)와 녹니석(chlorite)의 함량이 높은 특징을 가진다. 이와 같은 특성을 이용하여 한반도 서부 해역인 황해중앙니질대(CYSM, Central Yellow Sea Mud)와 흑산니질대(HSM, Heuksan Mud)의 퇴적물 기원지와 변화에 대한 연구가 많이 수행된 데 비하여, 제주남서니질대의 점토광물을 이용한 기원지 변화는 상대적으로 연구된 바가 적다.

희토류 원소는 화학적으로 안정하여 퇴적 과정 동안 크게 변화하지 않고, 지역마다 부화된 정도가 달라 그 함량 비는 퇴적물의 기원지 연구에 잘 활용되고 있다(Taylor and McLennan, 1985). 그리고 중국 강들과 한국 강들의 퇴적물 내 희토류 원소 함량에 뚜렷한 차이가 존재한다는 연구 결과가 발표되어 있다(Jung *et al.*, 2006; Song and Choi, 2009; Xu *et al.*, 2009).

본 연구에서는 제주남서니질대 코어 시료의 점토광물조성과 희토류원소 함량비를 토대로, 제주남서니질대의 연대별 퇴적물의 기원지를 밝히고, 마지막 최대 빙하기 이후 해수면 상승에 따른 퇴적물 유입 환경 변화를 밝히고자 한다.

2. 연구 재료 및 방법

연구 지역으로 유입되는 퇴적물의 시대별 기원지 변화를 알아보기 위해 제주남서니질대에 위치한 07YS-PC12, E03-06, E03-11 등 3개의 코어에서 채취한 퇴적물 시료를 사용하였다(그림 1). 07YS-PC12 코어는 2007년 한국해양과학기술원 탐사를 통하여 직접 획득하였으며, E03-06과 E03-11 코어는 한국해양과학기술원 남해연구소의 해양시료도서관(LIMS, Library of Marine Samples)에 보관된 시료를 사용하였다.

E03-06 코어는 길이가 305 cm로써, 상부는 주로 실트와 점토로, 하부는 모래로 구성되어 있으며, 07YS-PC12와 E03-11 코어는 길이가 각각 300 cm, 370 cm이며, 주로 모래, 실트, 점토의 혼합물로 구성되어 있다. 각 시료들은 심도별로 부시료를 채취하여, 점토부분을 분리한 후 점토광물과 희토류원소 분석을 실시하였다. 모든 코어의 입도 자료는 기 발표된 논문 자료를 사용하였다(Badejo *et al.*, 2014; Dou *et al.*, 2015).

세립질 퇴적물 내에 포함된 점토광물들의 상대조성을 알아보기 위하여 점토 부분을 분리한 후, X-선 회절분석을 실시하여 주요 점토광물들의 함량비를 계산하였다. 점토 부분 분리는 Koo *et al.* (2018)에 따라 다음과 같이 시행하였다. 각 시료들은 유기물 제거, 습식 체질, 원심분리 과정을 거쳐 2 μm 이하의 점토 부분을 분리한 후 “smear-on-glass-slide” 방법을 사용하여 정방위시편(preferred oriented specimen)으로 제작하였다. 점토광물 감정은 공기 중 건조 시료(air-dried specimen)와 에틸렌글리콜로 포화시킨 시료(ethylene glycolated specimen)에 대하여 X-선 회절분석을 실시하여 그 결과를 비교하여 결정하였다. 녹니석, 스멕타이트, 일라이트, 카올리나이트 등 4가지 주요 점토광물들의 상대적인 함량은 에틸렌글리콜로 포화시킨 시료에서 각 광물들의 특징적인 (001) 피크의 면적비를 이용하여 계산하였다. 각 광물들의 (001) 피크 강도차를 보정하기 위하여 계산된 면적에 가중치를 곱하였다(Biscaye, 1965). 녹니석과 카올리나이트의 상대적인 함량은 녹니석 (004) 피크와 카올리나이트 (002) 피크 면적비를 이용하여 계산하였다. 각 피크의 면적들은 EVA 3.0 프로그램을 이용하여 계산하였다. X-선 회절분석은 경상대학교 지질과 학과에서 보유하고 있는 SIMENS D5005/Bruker 고분해능 X-선 회절분석기를 사용하였으며, 흑연 단색화된 파장($\text{CuK}\alpha = 1.5406 \text{ \AA}$)을 사용하였다. 분석 조건은 40 kV/40 mA, 3-30° 2 θ 구간에서 주사 간격 0.02°, 주사 시간 2초로 설정하여 스텝-스캔(step-scan) 방식으로 회절값을 기록하였으며, 슬릿은 1.0-0.6-1.0°를 이용하였다.

희토류 원소 분석을 위해 10% 과산화수소수(H_2O_2)와 0.1N 염산(HCl)을 이용하여 유기물과 탄산염 성분을 제거한 후, 점토광물분석과 같은 과정을 거쳐 점토 부분을 분리하였다. 분리한 점토 시료는 80°C에서 건조한 후 아게이트 몰탈(agate mortar)을 이용하여 분말로 만들어 캐나다 Actlab에 의뢰하여 플라즈마 질량분석기(ICP-MS)를 이용하여 분석하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 유닛(Unit) 구분

수직적인 입도 변화, 점토광물함량 변화 및 연대 측정이 되어있는 기존 연구 결과를 바탕으로 3개의

코어를 비교하여 최상부의 유닛 1부터 최하부의 유닛 3까지 모두 3개의 유닛을 구분하였다(그림 2)(Badejo *et al.*, 2014; Dou *et al.*, 2015).

코어 E03-06은 약 150 cm를 기준으로 상부의 유

닛 1과 유닛 2로 나눌 수 있다(그림 2). 유닛 1은 점토 함량이 매우 높고, 깊이에 따른 점토광물의 함량 변화가 심하지 않다. 유닛 2는 유닛 1에 비하여 모래 함량이 매우 높고, 깊이에 따른 점토광물의 함량 변화

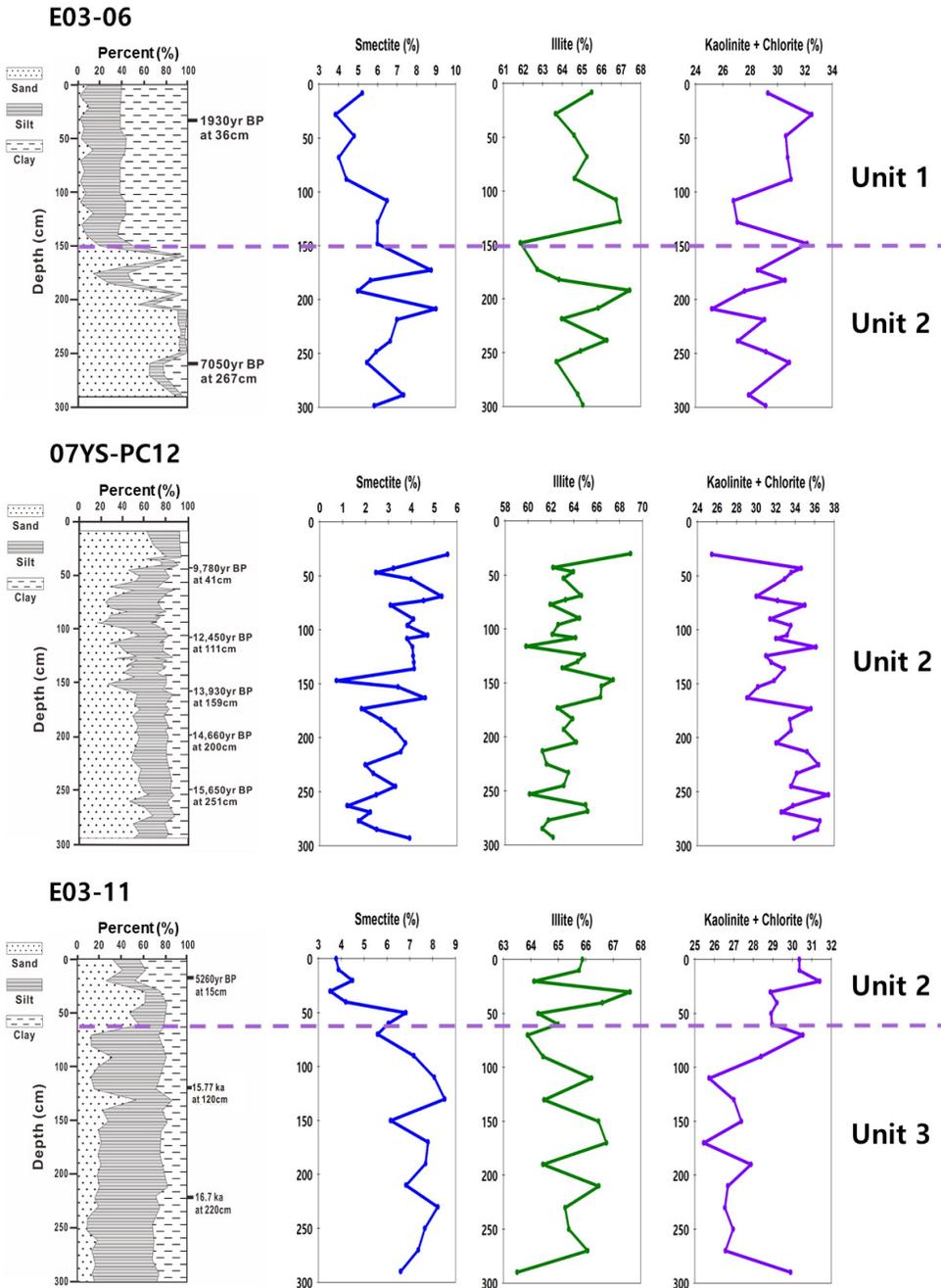


Fig. 2. Downcore variations of clay mineral composition in core 07YS-PC12, E03-06 and E03-11. Grain size data and age data were obtained from Badejo *et al.* (2014) and Dou *et al.* (2015).

가 매우 크다.

코어 E03-11은 약 60 cm를 기준으로 상부의 유닛 2와 하부의 유닛 3으로 나눌 수 있다(그림 2). 유닛 2는 유닛 3에 비해 모래 함량이 급증하고, 깊이가 감소함에 따라 스멕타이트는 감소하고, 일라이트는 증가하는 경향을 보인다. 유닛 3은 깊이에 따른 점토광물 함량 변화는 유닛 2와 비슷하지만, 입도가 훨씬 세립하다.

코어 07YS-PC12 코어는 수직적인 점토광물함량이나 입도에서 큰 차이가 나지 않아 전체가 하나의 유닛으로 여겨진다(그림 2). 입도는 약 120 cm에서 모래 함량이 감소하는 경향이 있지만 그 외에는 입도에 큰 변화가 존재하지 않고, 점토광물의 함량 또한 표층을 제외하고 큰 변화가 없다. 입도분석 결과를 통해 유닛을 판단해보면 실트의 함량이 높아 유닛 3과 닮아있지만 점토광물함량의 평균값이 유닛 3과는 다르고 스멕타이트와 일라이트의 함량은 증가하고 카올리나이트와 녹니석의 함량은 감소하는 유닛 2와 비슷한 경향을 보여 유닛 2에 대비된다고 판단하였다.

동중국해 대륙붕의 퇴적상은 최후빙기극대기 이후 해수면 상승에 따라 사질 실트, 사질, 점토질의 순으로 변화한다(Hu *et al.*, 2014; Dou *et al.*, 2015). 해수면의 상승 이전 시기였던 최후 빙기는 저수위기로써 주로 사질 실트 퇴적상이 나타나고, 해수면이 빠르게 상승하는 해침기에는 사질 퇴적상이 나타난다. 해수면이 현재의 높이로 상승한 후, 현재와 같은 해류의 흐름이 형성된 고수위기에는 점토질 퇴적상이 나타나며, 황해와 동중국해의 대륙붕에 독립적인 여러 개의 이질퇴적체가 형성된다(Saito, 1998; Uehara and Saito, 2003; Dou *et al.*, 2015). 위와 같이 나는 3개의 유닛을 연대측정이 되어 있는 기존 연구 결과를 바탕으로 해석하면(Badejo *et al.*, 2014; Dou *et al.*, 2015), 제일 하부층인 유닛 3은 약 15,000년 이전의 최후 빙기(Last glacial stage), 유닛 2는 15,000 - 7,000년 전의 해침기(transgressive stage), 제일 상부의 유닛 1은 약 7,000년 전부터 현재까지의 고수위기(high stand stage)에 해당된다. 유닛 3은 해수면의 높이가 현재보다 100 - 120 m 낮은 최후 빙기로, E03-11 코어의 하부 230 cm가 해당된다. 유닛 2는 최후 빙기 이후 해수면이 현재와 같은 높이로 빠르게 상승되는 시기이며, 07YS-PC12 코어 전체, E03-11

코어의 상부 70 cm, E03-06 코어의 하부 155 cm가 해당된다. 유닛 1은 해수면의 높이가 현재와 같아지며, 동중국해에 현재와 같은 해류 순환이 형성된 시기로서, E03-06의 상부 150 cm가 해당된다(Saito, 1998; Badejo *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2014; Dou *et al.*, 2015).

3.2 희토류원소

황해와 동중국해로 유입되는 강 퇴적물 중 한국 강 퇴적물들과 중국 대륙 및 타이완의 강 퇴적물 사이에는 희토류원소 조성에서 확실한 차이가 존재하기 때문에 퇴적물의 기원지를 명확하게 구분할 수 있는 것으로 보고되고 있다(Song and Choi, 2009; Xu *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2013). 시료 처리와 분석 방법에 따라, 차이가 존재하지만, 한국 강 퇴적물들은 총 희토류원소함량(ΣREEs)이 225 ppm 이상으로 높은데 반하여, 중국 대륙이나 타이완의 강 퇴적물들은 205 ppm 이하로 낮은 값을 가진다(표 1). 중희토류(HREE, Heavy Rare Earth Elements. Gd에서 Lu)에 대한 경희토류(LREE, Light Rare Earth Elements. La에서 Eu)의 비($\Sigma\text{LREEs}/\Sigma\text{HREEs}$) 역시, 한국 강 퇴적물들은 12.39로써 높은 데 반하여, 중국 대륙이나 타이완의 강 퇴적물들은 10 이하의 낮은 값을 가진다. 이와 같은 수치는 한국 강 퇴적물들은 중국 대륙이나 타이완의 강 퇴적물들에 비하여 총희토류의 함량이 높을 뿐만 아니라, 경희토류의 부하가 매우 심하다는 것을 지시한다(Song and Choi, 2009; Xu *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2013).

퇴적물의 희토류원소함량을 콘드로다이트(Chondrodite), 상부 대륙지각(UCC, Upper Continental Crust), 북미 셰일(NASC, North American Shale Composite) 등 잘 알려진 표준물질의 희토류원소함량으로 정규화한 값(normalized value)은 퇴적물의 기원지 연구를 위해 널리 사용되어온 방법인데, 이 중 황해에서 가장 많이 사용되는 표준물질은 상부 대륙지각이다(Taylor and McLennan, 1985; Jung *et al.*, 2006; Xu *et al.*, 2009; Dou *et al.*, 2015; Lim *et al.*, 2015). 상부 대륙지각으로 정규화한(UCC-normalized) 값 중, 경희토류와 중희토류 사이의 분별도(degree of fractionation)를 지시하는 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{UCC}}$ 값의 경우 한국 강 퇴적물들은 1.5 이상으로 높은데 반하여, 중국 대륙이나 타이완의 강 퇴적물들은 1.1 이하의 낮은 값을 가진다(표 1). $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{UCC}}$ 값 역시 한국 강 퇴적물들

Table 1. REEs (Rare Earth Elements) characteristics of fine-grained sediments in cores E03-06, 07YS-PC12 and E03-06 from SWCIM in comparison with those in the potential provenances of SWCIM.

Samples	n	ΣREEs	ΣLREEs	ΣHREEs	ΣLREEs/ ΣHREEs	(La/Yb) _{UCC}	(Sm/Nd) _{UCC}	(Gd/Yb) _{UCC}	Reference
E03-06 Unit 1	4	170.2	154.8	15.5	9.99	1.11	1.08	1.09	This study
E03-06 Unit 2	6	194.8	176.2	18.5	9.50	1.13	1.09	1.08	
07YS-PC12	13	199.4	181.2	18.2	9.95	1.13	1.11	1.09	
E03-11 Unit 2	2	182.4	165.0	17.5	9.45	1.10	1.14	1.17	
E03-11 Unit 3	8	219.6	198.8	20.8	9.55	1.14	1.15	1.26	
Changjiang	18	183.2	167.3	15.9	10.50	1.01	1.05	1.08	Xu <i>et al.</i> (2009)
	10	205.3	184.7	20.6	8.98	1.06	1.16	1.23	Song and Choi (2009)
Huanghe	42	152.1	138.0	14.1	9.79	0.90	1.08	1.01	Xu <i>et al.</i> (2009)
	3	201.1	182.1	19.1	9.56	1.09	1.15	1.28	Song and Choi (2009)
Taiwan Rivers	38	193.1	173.7	19.5	8.88	1.06	1.05	1.25	Li, 2013
West Korean Rivers (Han/Keum/Yeongsan)	10	268.4	248.1	20.3	12.21	1.58	1.08	1.47	Song and Choi (2009)
	5	234.1	215.8	18.3	11.83	1.55	1.09	1.47	
	3	228.9	211.2	17.7	11.89	1.56	1.08	1.50	

n; number of sample, ΣREEs; sum of Rare Earth Elements, ΣLREEs; sum of Light Rare Earth Elements (La - Eu), ΣHREEs; sum of Heavy Rare Earth Elements (Gd - Lu)

은 1.45 이상으로 높는데 반하여, 중국 대륙이나 타이완의 강 퇴적물들은 1.28 이하의 낮은 값을 가진다. 또한 (La/Yb)_{UCC} 값과 (Gd/Yb)_{UCC} 값은 서로 양의 상관관계를 나타낸다. 그러나 경희토류와 중희토류(MREE, Middle Rare Earth Elements, Sm에서 Dy) 사이의 분별도를 지시하는 (Sm/Nd)_{UCC} 값은 중국, 타이완, 한국강 퇴적물 모두 1.05에서 1.16 정도의 범위 내에서 비슷한 값을 나타낸다. 이와 같은 결과는 한국 강 퇴적물들을 중국 대륙이나 타이완의 강 퇴적물로부터 구분할 수 있는 지표로 (La/Yb)_{UCC} 값과 (Gd/Yb)_{UCC} 값이 사용될 수 있음을 지시한다.

중국대륙의 강 중 장강 퇴적물이 황하 퇴적물에 비하여 조금 높은 총 희토류원소함량을 나타내지만, 그 차이가 비교적 크지 않다(표 1). 장강, 황하, 타이완 강 퇴적물의 중희토류에 대한 경희토류의 비는 모두 8.9 내지 10.5로 서로 비슷하며, (La/Yb)_{UCC} 값 (Gd/Yb)_{UCC}이나 (Sm/Nd)_{UCC} 값 역시 비슷하므로 장강 퇴적물, 황하 퇴적물과 타이완 강 퇴적물들을 희토류원소만을 이용하여 구분하는 것은 어려운 것으로 판단된다(Jung *et al.*, 2006; Song and Choi, 2009; Xu *et al.*, 2009; Dou *et al.*, 2015).

3개의 코어를 이용하여 구분한 각 유닛에 대한 희

토류원소 함량과 상부 대륙지각으로 정규화한 값은 황해나 동중국해로 유입 가능한 강 퇴적물의 값과 비교하기 위하여 표 1에 같이 제시되어 있다. 희토류원소의 총 함량은 유닛 1과 유닛 2는 모두 200 ppm 이하로써, 중국이나 타이완 강 퇴적물의 함량과 유사하지만, 유닛 3의 평균값은 220 ppm 으로 다른 유닛에 비하여 다소 높은 것을 알 수 있다. 중희토류에 대한 경희토류의 비(ΣLREEs/ΣHREEs)는 모든 유닛에서 10 이하이며, 한국강 퇴적물보다 중국이나 타이완 강 퇴적물과 비슷한 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 모든 유닛의 퇴적물들이 한국강 퇴적물보다는 중국이나 타이완 강 퇴적물의 영향을 더 많이 받았다는 것을 지시할 수 있다. 그러나, 유닛 3의 비교적 높은 총 희토류원소 함량은 중국이나 타이완 강 퇴적물뿐만 아니라 희토류원소가 풍부한 한국강 퇴적물이 혼합되어 나타날 수 있으며, 이는 유닛 3는 한국강 퇴적물의 영향을 일부 받았을 가능성이 있다는 것을 지시한다.

경희토류와 중희토류 사이의 분별도를 지시하는 (La/Yb)_{UCC} 값은 모든 유닛에서 1.10 내지 1.15 범위를 가지는데, 이 값 역시 모든 유닛들이 한국강 퇴적물보다 중국이나 타이완 강 퇴적물의 값과 유사하

다(표 1). $(Gd/Yb)_{UCC}$ 의 경우 유닛 1과 유닛 2는 모두 1.25 이하로 중국이나 타이완 퇴적물과 유사하지만, 유닛 3의 경우 평균값은 1.27로 다른 유닛에 비하여 조금 큰 값을 가진다. 특히 유닛3의 하부 구간에서는 1.32에서 1.43의 비교적 높은 값을 가지는 것을 알 수 있다.

3개로 구분한 각 유닛들의 희토류원소 조성을 $(La/Yb)_{UCC}$ 와 $(Gd/Yb)_{UCC}$ 를 나타내는 그래프에 나타내면, 유닛들의 특성과 기원지를 쉽게 추론할 수 있다(그림 3). E03-11 코어의 하부에 해당하는 유닛 3은 대부분 중국강이나 타이완강 퇴적물의 영역에 도시되지만, 일부 시료는 중국강, 타이완강, 한국강 퇴적물 중간 영역에 표시된다. 3개 코어 모두 해당하는 부분이 있는 유닛 2의 경우, 모든 퇴적물들이 황하, 장강, 타이완 강 퇴적물 영역에 위치한다. E03-06 코어 상부에만 존재하는 유닛 1 퇴적물들은 장강이나 황하 퇴적물 영역에 대부분 표시된다(그림 3). 이와 같은 결과는 앞서서도 지적한 바와 같이 모든 유닛 퇴적물들이 주로 중국강이나 타이완 강 퇴적물의 영향을 받았다는 것을 지지하며, 유닛 3 하부 구간의 경우 한국강 퇴적물의 영향이 있었을 가능성을 암시하고 있다. 그러나 중국의 장강이나 황하 퇴적물 중 어느 강 퇴적물의 영향이 더 큰지는 이 자료만으로는 정확하게 해석이 어렵다. 희토류원소 분석을 통하여 추론한 세립질 퇴적물의 기원지를 요약하면, 모든 유닛의 퇴적물들은 주로 중국의 장강이나 황하 또는 타이완의 강 퇴적물로부터 기원했으며, 유닛 3 하부 구간에서 한국강 퇴적물이 부분적으로 유래할 가능성이 있다.

3.3 점토광물조성

모든 코어 내 점토광물 함량은 일라이트, 녹니석 및 카올리나이트, 스�멕타이트 순으로 풍부한 양상을 보인다(그림 2). E03-06 코어에서 가장 풍부한 광물은 일라이트로 평균 60%의 함량을 가지고, 두 번째로 풍부한 광물은 녹니석으로 평균 20%의 함량을 가진다. 그 뒤로 카올리나이트가 평균 15%의 함량을 보이며, 스�멕타이트는 평균 5%의 함량으로 가장 적은 함량을 보인다(표 2). E03-11 코어 역시 일라이트가 평균 63%로 가장 풍부하고 그 뒤로 녹니석, 카올리나이트, 스�멕타이트가 각각 평균 19%, 15%, 3%의 함량을 가진다. 07YS-PC12 코어 또한 일라이트

가 평균 64%, 녹니석 평균 18%, 카올리나이트 평균 15%, 스�멕타이트 평균 3%의 함량을 가진다.

점토광물의 함량 및 상대적인 비는 모양에 따라 다른 특성을 가지기 때문에, 연구지역의 잠재적 기원지인 중국, 한국, 타이완 강 퇴적물들을 구분하는

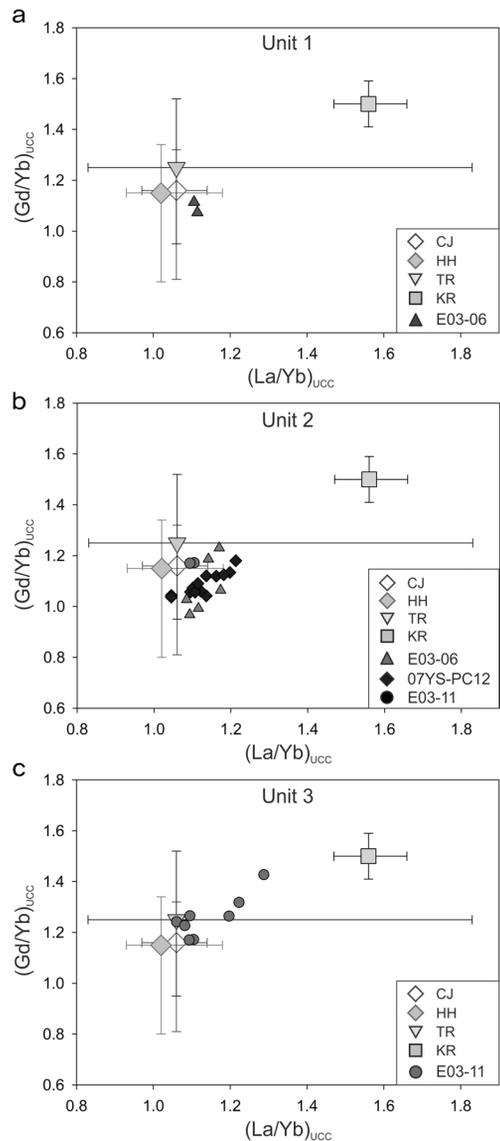


Fig. 3. Discrimination plot between $(La/Yb)_{UCC}$ and $(Gd/Yb)_{UCC}$ of core sediments from SWCIM. a. Unit 1, b. Unit 2, c. Unit 3. Data regarding the potential provenance comprising the Chinese, Taiwan and western Korean rivers (Song and Choi, 2009; Li *et al.*, 2013) are plotted for comparison. CJ; Changjiang, HH; Huanghe, TR; Taiwan rivers, KR; western Korean rivers.

Table 2. Clay mineral characteristics of fine-grained sediments in cores E03-06, 07YS-PC12 and E03-06 from SWCIM in comparison with those in the potential provenances of SWCIM.

Samples	n	Smectite (%)	Illite (%)	Kaolinite + Chlorite (%)	S/I ratio ($\times 100$)	Reference
E03-06 Unit 1	8	4.0	65.4	30.6	6.2	This study
E03-06 Unit 2	9	5.3	65.5	29.2	8.1	
07YS-PC12	32	3.3	63.5	33.2	5.2	
E03-11 Unit 2	7	4.7	65.6	29.7	7.1	
E03-11 Unit 3	15	7.3	64.8	27.8	11.3	
Changjiang	9	2	68	32	2.9	
	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)
Taiwan Rivers	19	0	55	44	1.9	Liu <i>et al.</i> (2008)
	44	0	70.9	29.1	0	Li <i>et al.</i> (2012)
West Korean Rivers (Han/Keum/Yeongsan)	26	1.7	58.5	39.8	2.9	Cho <i>et al.</i> (2015)

n; number of samples, S/I; Smectite/Illite

데 많이 적용되어 왔다(Li *et al.*, 2014; Lim *et al.*, 2015; Koo *et al.*, 2018). 황하에서 공급되는 퇴적물들은 다른 강들에 비해 스멕타이트의 함량이 높고, 양쯔강에서 공급되는 퇴적물들은 다른 강들에 비해 일라이트의 함량이 높으며, 한국 강들로부터 공급되는 퇴적물들은 녹니석 및 카올리나이트의 함량이 다른 강보다 높은 특징을 보인다. 또한 타이완에서 공급되는 퇴적물들은 스멕타이트가 전혀 포함되지 않는다는 특징을 보인다(Choi *et al.*, 2010; Cho *et al.*, 2015; Lim *et al.*, 2015; Koo *et al.*, 2018).

E03-06 코어의 유닛 1에서 일라이트의 평균 함량은 65.4%, 카올리나이트와 녹니석의 합은 30.6%, 스멕타이트는 4.0%이고, S/I 비((스멕타이트/일라이트) $\times 100$ ratio)는 6.2이다(표 2). 유닛 1에서 모든 점토광물들은 깊이에 따라 특별한 변화 양상을 나타내지 않는다. E03-06 코어의 유닛 2의 경우 일라이트의 평균 함량은 65.5%, 카올리나이트와 녹니석의 합은 29.2%, 스멕타이트는 5.3%이고, S/I 비는 8.1이다. 유닛 2에 속하는 07YS-PC12 코어 퇴적물 내 일라이트의 평균 함량은 63.5%, 카올리나이트와 녹니석의 합은 33.2%, 스멕타이트는 3.3%이고, S/I 비는 5.2이다. 이 코어의 경우 깊이가 감소함에 따라 스멕타이트 함량은 약간 증가하고, 카올리나이트와 녹니석의 합은 약간 감소하는 경향을 나타낸다. E03-11

코어의 유닛 2에서 일라이트의 평균 함량은 65.6%, 카올리나이트와 녹니석의 합은 29.7%, 스멕타이트는 4.7%이고, S/I 비는 7.1이다. E03-11 코어의 유닛 3의 경우 일라이트의 평균 함량은 64.8%, 카올리나이트와 녹니석의 합은 27.8%, 스멕타이트는 7.3%이고, S/I 비는 11.3이다. 유닛 3에서 깊이가 감소함에 따라 스멕타이트 함량은 감소하고, 카올리나이트와 녹니석의 합은 증가하는 경향을 나타낸다.

세 개로 구분한 유닛의 점토광물함량을 비교할 경우, 일라이트의 함량은 유닛에 따라 차이가 거의 없지만, 깊이가 감소하는 유닛 3-유닛 2-유닛 1 순으로, 스멕타이트 함량과 S/I 비는 적어지는 대신, 카올리나이트와 녹니석의 합은 많아지는 경향을 나타낸다(표 2).

녹니석과 카올리나이트의 함량, S/I비, 점토광물 간의 상대적인 비는 퇴적물의 기원지 연구에 유용한 지시자로서 활용될 수 있다(Cho *et al.*, 2015; Lim *et al.*, 2015; Kwak *et al.*, 2016; Koo *et al.*, 2018; Park *et al.*, 2019). 황하는 높은 스멕타이트의 함량으로 인해 평균 14 이상의 높은 S/I 비를 가지며, 타이완 강 퇴적물들은 스멕타이트 함량이 거의 0이며, 장강과 한국 강 퇴적물들은 S/I 비는 3 내지 5의 중간값을 가진다. 장강과 한국강 퇴적물들은 (녹니석+카올리나이트) 함량 차이로 구별이 가능한데, 장강의 경우

32-36%, 한국강 퇴적물들은 약 40%이다(표 2).

점토광물의 기원지를 구분하기 위해, 각 유닛들의 점토광물조성을 (녹니석+카올리나이트) 함량과 S/I 비를 나타내는 그래프에 나타냈다(그림 3). 유닛 3은 E03-11 코어의 하부에 해당하는데, 여기에 속하는 세립질 퇴적물들은 모두 황하 퇴적물의 영역에 표시된다. 유닛 2의 경우, 07YS-PC12 코어는 모두 장강 퇴적물의 영역에 표시되지만, E03-06 코어의 하부와 E03-11 코어의 상부에 해당하는 유닛 2 퇴적물들은 황하-장강 퇴적물 사이에 위치하며, 이는 코어의 위치에 의한 차이로 판단된다. E03-06 코어 상부에만 존재하는 유닛 1 퇴적물들은 장강 퇴적물 영역에 대부분 표시된다(그림 3).

점토광물조성을 통하여 추론한 각 유닛의 퇴적물 기원지를 정리하면, 깊이가 가장 깊은 유닛 3은 황하 기원, 유닛 2는 장강 기원 또는 황하-장강 복합기원, 깊이가 가장 얇은 유닛 1은 장강 기원으로 해석된다. 타이완 강 퇴적물의 경우, 매우 낮은 S/I 비를 가지기 때문에, 다른 강 퇴적물들과 혼합될 경우 뚜렷한 구분이 어려울 수도 있다. 그러나, 타이완 강은 중국 강들과 비교하여 퇴적물의 양이 매우 적고 연구지역과 가장 멀리 떨어져 있으며, 대부분의 퇴적물들이 황하와 장강 퇴적물의 조성과의 유사하다. 따라서, 본 연구 결과에서 타이완 강의 영향은 무시될 수 있을 정도로 적을 것으로 판단된다.

3.4 퇴적물의 기원지

앞에서 희토류원소 분석을 이용하여 모든 유닛의 세립질 퇴적물은 중국의 강 퇴적물로부터 기원했으며, 유닛 3 일부 구간이 한국강 퇴적물의 영향을 받았다는 사실을 알 수 있다. 한편 점토광물조성 분석 결과를 이용하여 유닛 3은 황하 기원, 유닛 2는 장강 기원 또는 황하-장강 복합기원, 유닛 1은 장강 기원으로 해석하였다. 희토류원소와 점토광물조성 분석 결과를 모두 고려하면 보다 합리적인 기원지를 추론하기 위해 3개로 구분한 각 유닛들의 S/I 비와 (La/Yb)_{UCC} 를 나타내는 그래프를 이용하였다(그림 4). E03-11 코어의 하부에 해당하는 유닛 3은 대부분 황하 퇴적물의 영역에 도시되지만, 일부 시료는 황하, 장강 및 한국강 퇴적물 중간 영역에 표시된다. 3개 코어 모두 해당하는 부분이 있는 유닛 2의 경우, 모든 퇴적물들이 황하-장강 퇴적물 사이에 위치한다. E03-06 코어

의 하부에 해당하는 부분은 황하 퇴적물에 조금 더 가깝게 표시되는데 반하여, E03-11 코어의 상부에 해당하는 부분은 장강 퇴적물에 조금 더 가깝게 표시된다. E03-06 코어 상부에만 존재하는 유닛 1 퇴적

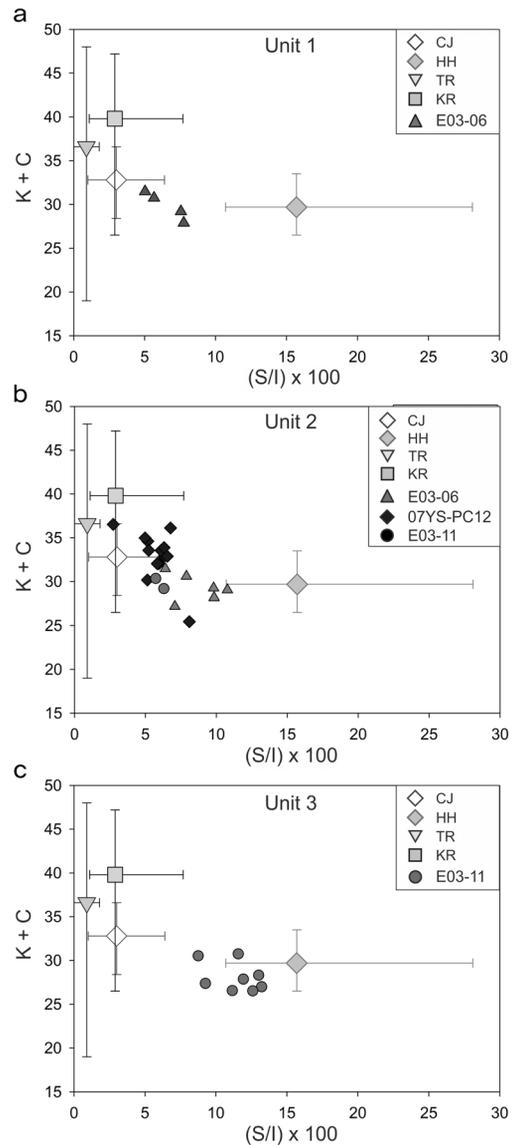


Fig. 4. Discrimination plot between S/I ratio ($\times 100$) and K+C of core sediments from SWCIM. a. Unit 1, b. Unit 2, c. Unit 3. Data regarding the potential provenance comprising the Chinese, Taiwan and western Korean rivers (Liu *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2012; Cho *et al.*, 2015; Koo *et al.*, 2018) are plotted for comparison. CJ; Changjiang, HH; Huanghe, TR; Taiwan rivers, KR; western Korean rivers.

물들은 장강 퇴적물 영역에 대부분 표시된다(그림 3). 이와 같은 결과는 앞서도 지적한 바와 같이 모든 유닛 퇴적물들이 중국강 퇴적물의 영향을 더 많이 받았다는 것을 지시하며, 유닛 3 하부 구간은 경우 한국강 퇴적물의 영향이 있었을 가능성을 암시하고 있다. 희토류원소 분석과 점토광물 조성을 통하여 추론한 세립질 퇴적물의 기원지를 요약하면, 유닛 3는 황하, 유닛 2는 황하와 장강, 유닛 1은 장강으로부터 기원했으며, 유닛 3 하부 구간에서 한국강 퇴적물이 부분적으로 유래할 가능성이 있다.

3.5 퇴적물의 유입 및 퇴적 환경

CLIMAP (Climate: Long range Investigation, Mapping, and Prediction)에 의하여 지난 18,000년 동안의 고기후와 고환경 변화에 대한 연구 결과 마지막 최대 빙하기 동안 지구의 해수면은 현재보다 평균 130 m 정도 낮았던 것으로 알려져 있다(Mix *et al.*, 2001). 동중국해에 대한 다양한 연구가 한국, 일본 및 중국학자들에 의하여 지난 60년 동안 수행되었으며(Li *et al.*, 2014), 동중국해에서 이루어진 고해양-고환경 연구에 의하면, 마지막 최대 빙하기 이후의 지질 시대를 크게 3개의 시기 즉, 최후 빙기, 퇴빙기 및 고수위기 등으로 구분하고 있다(Li *et al.*, 2014; Dou *et al.*, 2015). 일반적으로 동중국해와 황해에서 최후 빙기는 15,000년 이전, 퇴빙기는 15,000-7,000년 전, 고수위기는 7,000년 이후로 알려져 있다.

이번 연구에 사용된 코어들에서도 해수면 변화에 따른 동중국해 대륙붕의 대표적인 퇴적상들이 잘 나타나고 있다(그림 2). E03-11의 유닛 3는 사질 실트 퇴적상이 나타나고, 유닛 2는 사질 퇴적상이 나타난다. E03-06의 유닛 2는 사질 퇴적상이 나타나고 유닛 1은 점토질 퇴적상이 나타난다. 07YS-PC12는 코어 전체에서 사질 퇴적상이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 동중국해 주변에서 일어난 해수면 상승에 기인하여 유닛 3의 사질 실트 퇴적상으로부터 유닛 2의 사질 퇴적상을 거쳐, 유닛 1의 점토질 퇴적상 등으로 퇴적상이 변화하고 있다. 유닛 별 퇴적물의 입도 변화 요인은 여러 가지가 있을 수 있지만, 이 중 가장 중요한 것은 퇴적 환경의 변화로 해석할 수 있는데(Hyun *et al.*, 2006; Dou *et al.*, 2015), 그 이유는 퇴적물 공급지와와의 거리와 수력학적 조건에 따라 퇴적되는 퇴적상이 서로 다르게 나타나기 때문이다(Jung

et al., 2006; Choi *et al.*, 2010; Lim *et al.*, 2015). 그러므로 유닛별 퇴적상이 다르다는 점은 퇴적물이 공급될 당시의 환경이 서로 다르다는 것을 시사한다.

세립질 퇴적물의 기원지를 희토류원소 분석과 점토광물 조성을 통하여 연구한 결과, 유닛 3는 황하, 유닛 2는 황하와 장강, 유닛 1은 장강으로부터 기원한 것으로 추론하였다. 유닛별 퇴적상과 퇴적물 기원지 변화를 종합하여 유닛별 퇴적물의 유입과 퇴적 환경의 변화를 다음과 같이 해석하였다.

3.5.1 유닛 3: 최후 빙기

최후 빙기 동안, 동중국해와 황해를 비롯한 동아시아의 주변 해역은 현재보다 수심이 최대 120 m 정도 낮았던 것으로 여겨지므로(Saito, 1998; Hanebuth *et al.*, 2000; Li *et al.*, 2014), 이 시기 동안 연구지역은 대부분 지면으로 노출된 환경이었거나 강 하구와 인접한 연안 환경이었을 가능성으로 여겨진다. 또한, 과거 고수로 연구에 의하면 연구지역 인근에는 고 황하 및 고 장강의 수로들이 분포하고 있었기 때문에(Wang, 1999; Yang *et al.*, 2014; Yoo *et al.*, 2016), 이 시기에는 황하와 장강의 고수로를 통해 연구지역에 퇴적물이 직접적으로 유입될 수 있었을 것으로 여겨진다(Dou *et al.*, 2015). 강에서 공급된 퇴적물들은 강 하구와의 거리에 따라서 퇴적되는 퇴적물의 크기가 달라지는데, 조립질 퇴적물들은 강 하구와 거리가 가까운 지역에 퇴적되고, 점토와 같은 세립질 퇴적물들은 해류를 따라 강으로부터 멀리 운반되어 퇴적될 수 있다(Choi *et al.*, 2010). 유닛 3이 퇴적된 이 시기는 사질 실트 상으로써 비교적 조립된 퇴적상을 가지고 있으므로, 퇴적물이 공급지와 가까운 거리에서 퇴적되었을 것으로 고려된다. 연구지역 동쪽에 위치한 코어 EEZ02-PC20은 약 20,000년의 기록을 가지고 있으며, 이 코어의 하부에서도 최후 빙기에 해당하는 사질 실트 퇴적물이 확인된다(Hyun *et al.*, 2006). 이 사질 실트 퇴적물들은 퇴적물 상부와 비교하여 모두 C/N ratio가 10 이상으로 높고 $\delta^{13}\text{C}$ 의 값이 약 -2.5‰로 낮았으며, 이는 최후 빙기 동안 연구지역 주변으로 현재보다 육상 기원의 물질이 풍부하게 공급되었고 강 하구와 인접한 환경임을 나타낸다(Hyun *et al.*, 2006).

기원지 연구 결과 유닛 3의 세립질 퇴적물은 황하로부터 공급되었던 것으로 해석되었고(그림 5), 저

수위기에 황하의 고수로는 연구지역에 매우 가깝게 위치하였다(Yoo *et al.*, 2016). 따라서 이 시기에는 고 황하로부터 공급된 퇴적물이 연구 지역으로 공급된 것으로 판단된다.

저수위기 기간 동안 낮은 해수면으로 인해 고 장

강 또는 한국 강들의 하구 또한 황해 남쪽에 위치하였을 수 있다(Yoo *et al.*, 2016). 그러나 고 장강의 하구는 연구지역보다 더욱 남쪽 방향으로 위치하고 있었으며(Yoo *et al.*, 2015), 저수위기동안 고 장강을 통해 공급된 퇴적물들은 연구지역이 아닌 연구지역 남쪽의 오키나와 곡분(Okinawa Trough)으로 공급되어 퇴적되었다(Dou *et al.*, 2010a, 2010b; Xu *et al.*, 2019). 따라서 연구지역에는 장강에서 공급된 세립질 퇴적물이 공급되지 않았을 것으로 판단된다. 한국 서부 강들의 고수로는 장강의 고수로와는 다르게 황하의 고수로와 매우 근접한 지역에 위치하고 있었다(Yoo *et al.*, 2016). 그러나 한국의 강들로부터 공급되는 퇴적물들은 중국의 황하나 장강으로부터 공급되는 퇴적물들에 비해 매우 적은 양이 공급되고(Milliman and Meade, 1983), 세립질 퇴적물의 양 또한 황하나 장강에서 공급되는 양보다 매우 적은 양일 것으로 판단된다. 따라서 한국 강들로부터 공급된 퇴적물들은 연구지역으로 도달할 가능성은 있었을 수 있으나, 고 황하로부터 공급된 퇴적물에 비해 양이 매우 적었을 것으로 판단된다. 이와 같은 결과는 희토류 원소 분석을 통한 기원지 해석과도 일치하는 것으로 판단된다.

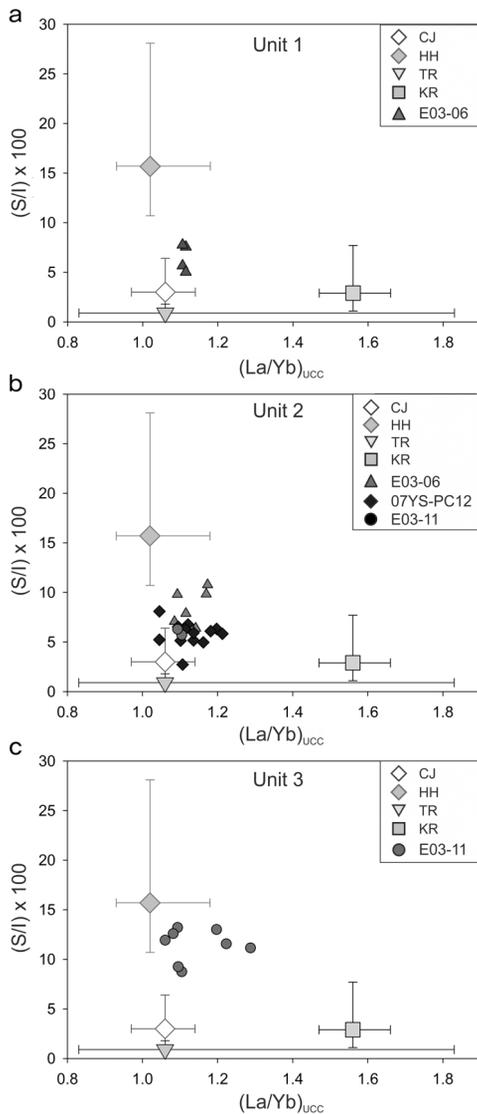


Fig. 5. Discrimination plot between $(La/Yb)_{UCC}$ and S/I ratio ($\times 100$) of core sediments from SWCIM. a. Unit 1, b. Unit 2, c. Unit 3. Data regarding the potential provenance comprising the Chinese, Taiwan and western Korean rivers (Liu *et al.*, 2008; Song and Choi, 2009; Li *et al.*, 2012, 2013; Cho *et al.*, 2015; Koo *et al.*, 2018) are plotted for comparison. CJ; Changjiang, HH; Huanghe, TR; Taiwan rivers, KR; western Korean rivers.

3.5.2 유닛 2: 해침기

유닛 2 시기는 해수면이 현재의 높이까지 빠르게 상승하는 시기였다. 빠른 해수면 상승 때문에, 이 기간 동안 동중국해는 현재보다 강한 조석 작용으로 인한 응력에 의해 해역 전체에 Tidal Sand Ridge가 형성되었다(Uehara and Saito, 2003; Li *et al.*, 2014). 해수면이 상승하면서 연구지역 주변에 위치하던 고 장강과 고 황하의 하구들은 연구지역으로부터 빠르게 멀어졌으나, 현재보다 높은 해저면의 응력과 그에 따른 강한 조석력으로 인해 연구지역에 조립질 퇴적물들이 공급되었다(Hu *et al.*, 2014; Dou *et al.*, 2015). 조립질 퇴적물들의 유입량이 많아져 3개의 코어가 속하는 유닛 2 시기에 공통적으로 모래의 함량이 높은 사질상이 지배적으로 나타난다(그림 2). 이러한 사질의 해침퇴적체는 탄성과 탐사를 통해 동중국해 대륙붕 전반에 분포하고 있음이 알려졌으며, 수로 또는 침식곡을 피복하는 형태로 발달한다(Choi *et al.*, 2005). 또한, 해침퇴적체의 하부에서는 경사 부정합이 관찰되어 광역적인 침식작용이 있었을 것

으로 판단되었으며(Choi *et al.*, 2005), 이는 E03-11 코어의 유닛 2와 3 사이의 상당한 시간 차이로 나타날 수 있다(그림 2). 유닛 2의 발달 시기는 해수면이 상승한 이후 약 15,000년 전부터 해수면이 현재의 위치에 도착까지인 6,000-7,000년 이전까지로 추정되나(Saito, 1998; Yoo *et al.*, 2002), 연구지역 주변의 코어 퇴적물들(코어 B2, B3, DH01, EEZ02-PC20)의 연대측정 결과에 의하면 약 5,000년 전까지 사질 퇴적물들이 공급될 수 있다(Choi *et al.*, 2005; Hyun *et al.*, 2006; Hu *et al.*, 2014; Shan *et al.*, 2018).

유닛 2에 속하는 3개의 코어들은 입도의 특징은 모두 유사하지만, 점토광물함량 변화는 두 가지로 구분할 수 있다. 즉, 시간의 경과에 따라 E03-06, E03-11과 같이 스�멕타이트는 감소하고 일라이트는 증가하는 것이고, 두 번째는 07YS-PC12와 같이 스�멕타이트는 증가하고, 일라이트가 감소하는 것이다. 두 가지 경우 모두 해수면이 상승하기 전과 후로 나눠 살펴보면 다음과 같다. 해수면이 상승하기 전 E03-06과 E03-11은 스�멕타이트가 높은 특징을 가져 황하의 영향을 더 많이 받은 것으로 나타나고, 두 개의 코어 중 E03-06이 더 조립한 특징을 통해 황하의 하구가 E03-06에 근접할 것으로 판단하였다. 또한 해수면 상승 전 07YS-PC12는 일라이트가 높고, 07YS-PC12가 다소 조립질인 것을 통해 황하보다는 장강의 영향을 더 많이 받았으며, 07YS-PC12는 장강의 하구에 인접하였던 것으로 판단할 수 있다. 그리고 07YS-PC12의 스�멕타이트 함량이 높아지는 것을 통해 해수면 상승 이전 07YS-PC12에 인접해있었다고 판단했던 장강의 하구가 해수면이 상승하면서 육지 쪽으로 이동한 것으로 해석하였다.

유닛 2 퇴적물의 기원지는 장강과 황하 복합 기원으로 해석된다. 해침기에는 강한 응력에 의해 고 장강 및 고 황하의 인근지역에 퇴적되어 있던 퇴적물들이 강한 응력에 의해 재동되어 퇴적되었을 가능성이 있다(Li *et al.*, 2014; Dou *et al.*, 2015). E03-11은 유닛 2에서 유닛 1로 변화하는 과정 동안 황하의 영향이 약해지고 장강의 영향이 강해지는 경향을 보이는데, 이는 해수면의 상승 때문에 황하의 고 하구는 황해 해역으로 멀어지며 재동된 퇴적물들이 황하의 고 하구 주변에 퇴적되고, E03-11 코어의 근처에 있던 장강의 고 하구 지역에 퇴적되었던 퇴적물들이 재동되어 공급되었을 가능성이 존재한다.

3.5.3 유닛 1 : 고수위기

유닛 1이 퇴적된 고수위기는 해수면의 높이가 현재와 거의 같아진 약 7,000년 전부터 현재까지로 추정되며(Saito, 1998; Yoo *et al.*, 2002), 강들의 하구가 현재의 위치와 같아지고, 동중국해와 황해에 현재와 같은 해류 순환 시스템이 형성된 시기이다. 해수면 상승에 의해 약해진 조석력과 강한 연안류에 의해, 강으로부터 배출된 퇴적물들은 대부분 연안 지역을 따라 퇴적되었으며, 일부 세립질 퇴적물들만이 해류 순환에 의해 동중국해와 황해의 대륙붕 내에 제주남서니질대, 황해중앙니질대, 흑산니질대와 같은 니질 퇴적체를 형성하였다(Saito, 1998; Liu *et al.*, 2008; Hu *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2014; Dou *et al.*, 2015). 연구지역의 유닛 1 퇴적물 내 모래의 함량은 적고, 점토 함량이 많은 특징은 전형적인 니질퇴적체의 특징을 나타낸다. 이 니질퇴적체가 발달하는 해역은 전반적으로 다른 지역보다 깊어 파인 저지대 지형으로, 침식 저지대에 점토질의 세립한 물질이 조용히 가라앉아 충전된 퇴적양상을 보인다(Choi *et al.*, 2005). 따라서, 유닛 1 퇴적물들은 황해의 다른 니질퇴적체와 마찬가지로(Lim *et al.*, 2015; Kwak *et al.*, 2016; Koo *et al.*, 2018), 연구 지역과 퇴적물 공급지와 거리가 멀어 세립한 입자들만이 공급되는 것으로 판단된다.

현재 퇴적되고 있는 제주남서니질대 퇴적물의 기원지에 대한 많은 연구가 수행되었지만, 아직도 완전히 일치된 결론에 도달하지는 못하였다. 현재 동안 황하와 장강은 각각 매년 1.1×10^9 톤과 5×10^8 톤이라는 엄청난 양의 퇴적물을 바다로 운반하고 있다(Milliman *et al.*, 1985; Choi *et al.*, 2005). 초기 연구들은 동중국해 북쪽에 분포하는 제주남서니질대를 반시계 방향의 순환 와류(counter-clockwise cyclonic eddy)에 의하여 형성된 황하 퇴적물의 말단부 퇴적물(distal end)로 간주하였다(DeMaster *et al.*, 1985; Milliman *et al.*, 1985; Sato, 1989; Alexander *et al.*, 1991; Yang *et al.*, 2003). 장강 퇴적물은 황해 연안류에 의해 동중국해를 거쳐 남쪽으로 운반되므로, 장강은 황해와 동중국해 북쪽 해역의 세립질 퇴적물의 중요한 기원지가 아닌 것으로 여겨졌다. 그러나, 또 다른 연구 그룹들은 제주남서니질대가 황하 퇴적물 이외에도 장강 퇴적물이 혼합되어 형성되었다는 연구를 발표하였으며(Yoo *et al.*, 2002; Choi

et al., 2005; Youn *et al.*, 2007), 지역에 따라 황하 또는 장강으로부터 서로 다른 정도의 퇴적물이 공급되었다는 결과도 발표되었다(Youn and Kim, 2011; Cho *et al.*, 2013). 더 나아가 제주남서니질대 전부가 장강 퇴적물에 기원했다는 연구 결과도 최근 발표되었다(Hu *et al.*, 2014).

점토광물조성과 희토류 조성을 이용한 이번 연구 결과는 현재 제주남서니질대에 해당하는 유닛 1 퇴적물들이 대부분 장강 기원으로 구분되었으며, 장강 퇴적물이 공급되었음을 제안한 최근 연구결과들과 일치한다(Hu *et al.*, 2014). 장강 퇴적물은 강한 연안류에 의해 남쪽으로 이동 및 퇴적되지만, 일부는 장강희석수에 의하여 직접 연구지역에 유입되거나, 남쪽으로 이동한 장강 퇴적물이 쿠로시오 해류에 의하여 북상한 후 황해난류에 의하여 공급되는 것으로 여겨진다(Youn and Kim, 2011; Cho *et al.*, 2013; Hu *et al.*, 2014; Dou *et al.*, 2015).

4. 결론

제주남서니질대에서 획득한 3개의 코어에 대하여 희토류원소 분석과 점토광물조성을 분석한 후, 이미 수행된 입도 자료와 연대측정 자료를 비교하여, 3개의 유닛으로 구분하였으며, 각 유닛의 기원지와 공급 방법은 다음과 같다.

- 1) 해수면의 높이가 현재보다 낮았던 시기인 최후 빙기에 퇴적된 유닛 3은 높은 실트 함량과 높은 S/I 비를 나타내며, 퇴적물들은 대부분 고 황하를 통해 직접 유입되었으며, 일부 퇴적물은 한국강으로부터 유래한 것으로 판단된다.
- 2) 15,000년부터 7,000년 전 해침기 동안 해수면의 높이가 상승하는 시기에 퇴적된 유닛 2는 높은 조석력에 의하여 조립질 퇴적물들의 유입량이 증가하여, 사질상을 나타내며, 황하에서 장강으로 기원지가 이동하는 경향을 보여 준다.
- 3) 해수면의 높이가 현재와 거의 같은 고수위기 퇴적물인 유닛 1의 퇴적물은 장강 퇴적물이 장강희석수에 의하여 연구지역에 유입되거나, 남쪽으로 이동한 후 황해난류에 의하여 공급되는 것으로 여겨진다. 유닛 1은 공급지와의 거리가 멀어 점토의 함량이 매우 높은 특징을

가진다.

- 4) 제주남서니질대의 세립질 퇴적물 기원지는 15,000년 전까지는 황하 기원, 그 이후부터 6,000년 전까지는 황하와 장강 복합 기원, 6,000년 이전부터 현재까지는 장강으로 해수면 상승에 따라 점점 이동하는 양상을 나타낸다.

감사의 글

이 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다(No. 2017R1D1A1B03027818, 최후빙기극대기 이후 한반도 주변 고환경 변화 연구; 광물학적인 방법). 시료 준비 및 분석을 도와준 경상대학교 지질학과 강현진, 구미향 학생에게 감사드립니다. 부족한 원고를 세심하게 검토하고, 유익한 지적을 하여주신 심사위원들에게도 감사를 드립니다.

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.
- Biscaye, P.E., 1965, Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans. *Geological Society of American Bulletin*, 76, 803-832.
- 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. and Khim, B.-K., 2015, Clay mineral distribution and provenance in the Heuksan mud belt, Yellow Sea. *Geo-Marine Letters*, 35, 411-419.
- Cho, H.G., Yi, H.-I., Lee, Y.J. and Kim, D.C., 2013, Clay mineral distribution in the southwestern Cheju Island mud. 13th International Multidisciplinary Scientific Geo Conference and EXPO SGEM 2013 Water Resources, Forest, Marine and Ocean Ecosystems, Albena, Bulgaria, June 16-22, 815-822.
- Choi, D.-L., Lee, T.-H., Yoo, H.-S., Lim, D.-I., Huh, S. and Kim, K.-H., 2005, A Seismic Study on Muddy Sediment Deposits in the Northern Shelf of the East China Sea.

- Economic Environmental Geology, 38, 633-642 (in Korean with English abstract).
- Choi, J.Y., Lim, D.I., Park, C.H., Kim, 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 Geological 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 measurement from continental shelf deposit in the East China Sea. *Continental Shelf Research*, 4, 143-158.
- 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.
- Dou, Y., Yang, S., Liu, Z., Clift, P.D., Shi, X., Yu, H. and Berne, S., 2010a, 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., Liu, Z., Clift, P.D., Yu, H., Berne, S. and Shi, X.F., 2010b, Clay mineral evolution in the central Okinawa Trough since 28 ka: Implications for sediment provenance and paleoenvironmental change. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 288, 108-117.
- Hanebuth, T., Stattegger, K. and Grootes, P.M., 2000, Rapid flooding of the Sunda Shelf: a lateglacial sea-level record. *Science*, 288, 1033-1035.
- 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, 1253-1268.
- Hyun, S., 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, 53-61.
- Jung, H.S., Lim, D.I., Yang, S.Y. 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).
- 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 south-eastern Yellow Sea, Korea. *Applied Clay Science*, 134, 55-61.
- Li, C.S., Shi, X.F., Kao, S.J., Chen, M.T., Liu, Y.G., Fang, X.S., Lü, H.H., Zou, J.J., Liu, S.F. and Qiao, S.Q., 2012, Clay mineral composition and their sources for the fluvial sediments of Taiwanese rivers. *Chinese Science Bulletin*, 57, 673-681.
- Li, C.S., Shi, X.F., Kao, S.J., Liu, Y.G., Lyu, H.H., Zou, J.J., Liu, S.F. and Qiao, S.Q., 2013, Rare earth elements in fine-grained sediments of major rivers from the high-standing island of Taiwan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 69, 39-47.
- Li, G., Li, P., Liu, Y., Qiao, L., Ma, Y., Xu, J. and Yang, Z., 2014, 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., Xu, Z., Choi, J., Li, T. and Kim, S., 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.
- Liu, Z., Tuo, S., Colin, C., Liu, J.T., Huang, C.Y., Selvaraj, K., Chen, C.T.A., Zhao, Y., Siringan, F.P., Boulay, S. and Chen, Z., 2008, Detrital fine-grained sediment contribution from Taiwan to the northern South China Sea and its relation to regional ocean circulation. *Marine Geology*, 255, 149-155.
- Milliman, J.D., Beardsley, R.C., Yang, Z.S. 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.
- Milliman, J.D. and Meade, R.H., 1983, Worldwide delivery of river sediment to the oceans. *The Journal of Geology*, 91, 1-21.
- Mix, A.C., Bard, E. and Schneider, R., 2001, Environmental processes of the Ice Age: Land, ocean, glaciers (EPILOG). *Quaternary Science Reviews*, 20, 627-657.
- Park, Y.K., Lee, J.I., Jung, J., Hillenbrand, C.-D., Yoo, K.-C. and Kim, J., 2019, Elemental Compositions of Smectites Reveal Detailed Sediment Provenance Changes during Glacial and Interglacial Periods: The Southern Drake Passage and Bellingshausen Sea, Antarctica. *Minerals*, 9, 322.
- Saito, Y., 1998, Sedimentary environment and budget in the East China Sea. *Bulletin on Coastal Oceanography*, 36, 43-58 (in Japanese with English abstract).
- Shan, X., Shi, X., Clift, P.D., Qiao, S., Jin, L., Liu, J., Fang, X., Xu, T., Li, S., Kandasamy, S., Zhao, M., Zhu, Y., Zhang, H., Zhang, D., Wang, H., Li, Y., Yao, Z., Wang, S. and Xu, J., 2018, Carbon isotope and rare earth element composition

- of Late Quaternary sediment gravity flow deposits on the mid shelf of East China Sea: Implications for provenance and origin of hybrid event beds. *Sedimentology*, 66, 1861-1895.
- 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, 190 p.
- 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, P.X., 1999, Response of Western Pacific marginal seas to glacial cycles: paleoceanographic and sedimentological features. *Marine Geology*, 156, 5-39.
- 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.
- Xu, Z., Lim, D.I., Li, T., Kim, S., Jung, H.S., Wan, S., Chang, F. and Cai, M., 2019, REEs and Sr-Nd isotope variations in a 20 ky-sediment core from the middle Okinawa Trough, East China Sea: An in-depth provenance analysis of siliciclastic components. *Marine Geology*, 415, 105970.
- Yang, S.Y., Li, C.X., Lee, C.B. and Na, T.K., 2003, REE geochemistry of suspended sediments from the rivers around the Yellow Sea and provenance indicators. *Chinese Science Bulletin*, 48, 1135-1139.
- Yang, S.Y., Wang, Z.B., Dou, Y. and Shi, X.F., 2014, A review of sedimentation since the last glacial maximum on the continental shelf of eastern China. In: Chiocci, F.J. and Chivas, A.R. (eds.), *Continental Shelves of the World: Their Evolution During the Last Glacio-eustatic Cycle*. the Geological Society of London, *Memoirs*, 41, 293-303.
- 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, 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 Seamid-shelf. *Marine Geology*, 187, 313-328.
- 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. and Kim, T.J., 2011, Geochemical composition and provenance of muddy shelf deposits in the East China Sea. *Quaternary International*, 230, 3-12.
- Youn, J.S., Yang, S. and Park, Y.A., 2007, Clay minerals and geochemistry of the bottom sediments in the north-western East China Sea. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 25, 235.

Received : March 16, 2021

Revised : April 6, 2021

Accepted : April 8, 2021