

필리핀해 큐슈-팔라우 해령 심해표층퇴적물의 침식거동 특성

Erosion Behaviors of Deep-Sea Surface Sediment in the Kyushu-Palau Ridge, Philippine Sea

하헌준* · 이경은** · 하호경***

Hun Jun Ha · Kyung Eun Lee · Ho Kyung Ha

요약 필리핀해 큐슈-팔라우 해령(Kyushu-Palau Ridge, KPR)의 심해표층퇴적물의 침식거동 특성을 규명하기 위하여 멀티코어를 이용하여 퇴적물 시료를 채취하였다. 침식임계값 측정이 가능한 Gust Erosion Microcosm System을 활용하여 선상현장실험을 수행하였다. 생물기원 입자가 우세한 KPR 심해표층퇴적물은 사질니 퇴적물이 우세하게 나타나며, 중앙입도(d_{50})는 $31.2 \mu\text{m}$ 이다. 침식실험 후 d_{50} 은 모래입자의 잔류로 인하여 37% 증가하였다($d_{50} = 42.8 \mu\text{m}$). 한편 퇴적물 재부유는 “분급성 실트(sortable silt)”에서 우세하게 발생하였다. KPR 퇴적물의 침식임계값은 0.08 Pa로 측정되었으며, 그 결과는 Shields 곡선과 잘 일치하였다. 본 결과는 생물기원 심해퇴적물의 침식 프로세스를 규명하고 고해양환경 수리조건을 재구성하는 데 필요한 검증자료로 활용될 수 있다.

키워드 심해퇴적물, 침식임계값, 이동성, 분급성 실트, 큐슈-팔라우 해령

Abstract To investigate the erosion behaviors of deep-sea surface sediment on the Kyushu-Palau Ridge (KPR), Philippine Sea, the sediment core was collected using a multi-corer. An in-situ erosion experiment was carried out using a Gust Erosion Microcosm System, which measured the erosion threshold. The surface sediment on the KPR comprises biogenic calcareous sandy silt with a median grain size (d_{50}) of $31.2 \mu\text{m}$. After the erosion experiment, d_{50} increased by 37% ($d_{50} = 42.8 \mu\text{m}$) due to lag deposits of sand sediments. The dominant sediment resuspended was the non-cohesive sortable silt. The erosion threshold was estimated to be approximately 0.08 Pa which was in good agreement with the Shields curve. Outcomes of this study can be used to reveal the erosion process of biogenic deep-sea sediments, and to reconstruct the hydrodynamic conditions in the paleo-ocean environments.

Key words Deep-Sea Sediment, Erosion Threshold, Mobility, Sortable Silt, Kyushu-Palau Ridge

1. 서론

퇴적물의 침식은 바닥층과 수층 간의 마찰력에 의하여 발생하며, 퇴적물 개별 입자의 물리·화학적 특성(입도, 밀도, 점착성, 전자기적 성질 등)과 생물학적 특성이 이 과정에 영향을 준다(Grabowski et al., 2011). 퇴적물의 침식거동 특성은 침식임계값(erosion threshold)과 침식률로 정량화할 수 있다. 침식임계값은 정지된

퇴적물 입자를 침식시키기 위해 필요한 최소전단응력을 의미하며, 침식률은 침식임계값을 초과한 이후, 단위면적과 시간 당 침식되는 퇴적물양을 의미한다. 일반적으로, 모래와 같은 비점착성 퇴적물은 입도가 클수록 침식임계값이 증가한다. 하지만, 머드와 같은 점착성 퇴적물은 입자 간 응집력 때문에 입도가 작을수록 침식임계값이 증가하는 경향을 보인다(Winterwerp and van Kesteren, 2004).

Received: 2023.04.18, Revised: 2023.06.09, Accepted: 2023.06.09

* 인하대학교 해양과학과 박사후연구원(Postdoctoral Researcher, Department of Ocean Sciences, Inha University, Incheon 22212, Korea, hahunjun86@gmail.com) (주저자)

** 한국해양대학교 해양과학기술융합학과 교수(Professor, Department of Convergence Study on the Ocean Science and Technology, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea, kyung@kmou.ac.kr)

*** 인하대학교 해양과학과 교수(Professor, Department of Ocean Sciences, Inha University, Incheon 22212, Korea, hahk@inha.ac.kr) (교신저자)

심해퇴적물은 대부분 생물기원의 물질, 육상기원의 쇄설성 퇴적물, 심해환경에서 자생하는 퇴적물로 구성된다. 심해환경의 세립질 퇴적물은 응집 효과에 의해 플록(floc)이 형성됨에도 불구하고 대체로 낮은 침식임계값이 보고되었다(Thomsen and Gust, 2000; Black et al., 2003). 현재까지 심해퇴적물의 침식·재부유과정 연구는 극히 제한적이었기 때문에, 그 조성 및 퇴적물 등이 침식임계값에 미치는 효과에 대한 이해는 현저히 낮다. Seo et al.(2020)은 탄산염 보상 수심(calcite compensation depth, CCD) 위에서 획득한 심해퇴적물의 침식량이 아래에서 획득한 퇴적물보다 약 6배 높다는 사실을 국내 처음으로 측정하였다.

태평양 해역은 대서양에 비하여 CCD가 상대적으로 얇아 탄산염 퇴적물의 보존이 매우 어렵기 때문에 대부분 지역에 규산질 연니(siliceous ooze)가 우세하게 분포한다(Bostock et al., 2011). 그러나 CCD보다 얇은 수심의 큐슈-팔라우 해령(Kyushu-Palau Ridge, KPR)과 같은 높은 해저 지형에서의 퇴적물은 탄산염 보존이 상대적으로 양호하며(Kennett, 1982), 이러한 탄산염이 우세한 심해퇴적물의 침식특성에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다. 본 연구에서는 KPR 심해퇴적물의 정량적인 침식특성을 평가하기 위하여 Gust Erosion Microcosm System(GEMS)을 활용한 침식실험을 수행하였다.

2. 연구지역

서필리핀 분지와 파레스 벨라(Parecs Vela) 분지의 경계에 위치하는 KPR은 수심이 1,000~4,000 m에 이

르며, 해령주변부는 3,000~4,000 m의 평탄한 지형이다(Fig. 1). 해령의 남-북 방향 총 길이는 약 2,750 km이며 폭은 90 km 이다(Tang et al., 2011). KPR은 올리고세 중기부터 마이오세 초기에 형성된 잔류 호상열도(remnant arc)이며, 다수의 해저화산에 의해 둘러싸인 해저지형이다. KPR 남측의 해저화산 사이에는 저층류의 통로역할을 하는 압 게이트웨이(Yap Gateway)가 존재한다(Lee and Chun, 2002; Wang et al., 2021).

연구지역의 심해표층퇴적물은 주로 생물과 해저화산 기원 성분으로 구성되어 있으며, 일부는 육지로부터 운반된 쇄설성 기원 물질을 포함한다(Qin et al., 2021). 파레스 벨라 분지 서측에는 원양성 점토가 얇게 분포한다(Scott and Kroenke, 1980). KPR 중앙에 위치한 MC1 정점(15° 18.13'N, 134° 40.80'E, 수심 3,197 m)은 연구지역의 CCD(4,600 m)보다 얇은 수심에 위치하기 때문에 퇴적물의 탄산염 보존이 양호한 편이다(Shibamoto and Harada, 2010). 연구정점 인근에서 획득한 박스코어(BC070301, 수심 3,440 m)의 표층퇴적물 탄산염 함량은 약 65%이다(Khim et al., 2010).

3. 재료 및 방법

심해표층퇴적물의 침식거동 특성을 규명하기 위해 2019년 11월 25일부터 12월 16일까지 해양과학조사선 이사부호(R/V ISABU)를 활용하여 현장조사(항차: HI-19-16)를 진행하였다(Fig. 1). 멀티코어를 이용하여 MC1 정점에서 총 2개의 퇴적물코어를 획득하였고, 교란되지 않은 상태를 확인한 1개의 코어는 연구선 실

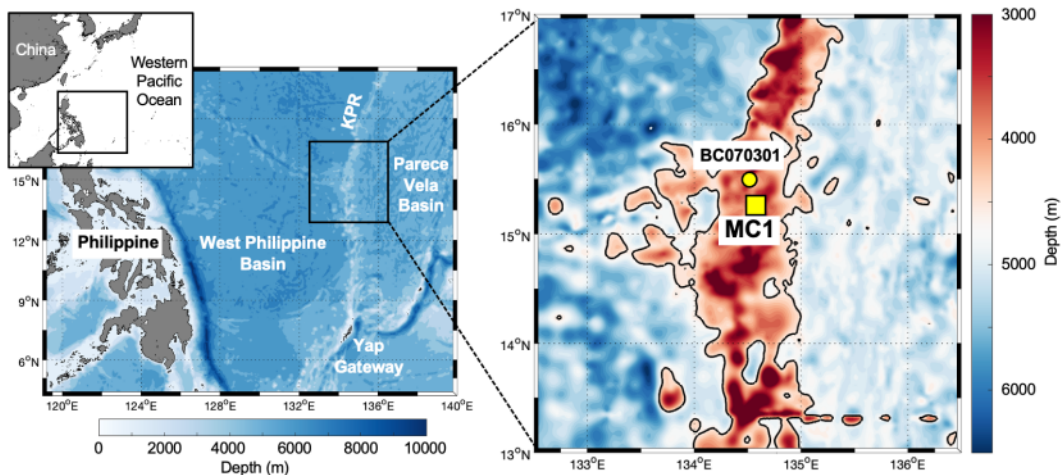


Figure 1. Map of the Philippine Sea showing the sediment multi-core sampling site (MC1) in the Kyushu-Palau Ridge (KPR). Yellow circle indicates the box-core sampling site (BC070301) (Khim et al., 2010). The black line on the right panel is 4,500 m isobath

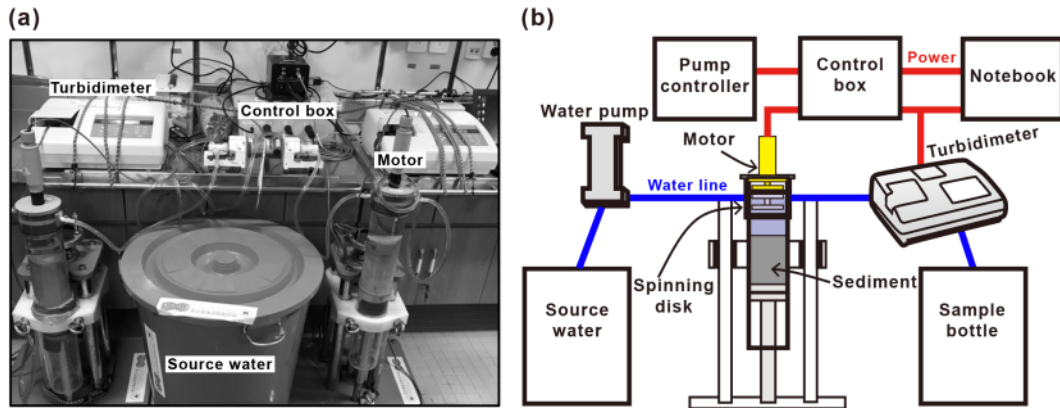


Figure 2. (a) Photograph of GEMS installed at the R/V ISABU laboratory, and (b) schematic diagram explaining the operation (modified after Ha et al. (2021))

내실험실로 운반하여 GEMS에 거치하였다. 나머지 코어는 표층퇴적물 부시로 채취에 활용되었다.

GEMS는 Gust and Müller(1997)에 의해 개발된 침식특성을 측정하는 장비이다. 현장에서 획득한 퇴적물 코어에 미리 설정된 전단응력을 전달하여 퇴적물 침식을 인공적으로 발생시킴으로써 침식입계값을 측정할 수 있다. GEMS는 크게 실험장치부와 제어장치부로 구성되어 있다(Fig. 2). 실험장치부는 코어 튜브(직경 10 cm, 높이 60 cm), 회전판, 탁도계로 구성되며, 실험 목적에 맞게 전단응력을 조절하는 제어장치부는 컨트롤 박스, 분당회전수(RPM) 제어 드라이버, 순환펌프로 구성되어 있다.

연구지역에서 멀티코어를 통해 획득한 퇴적물 시료는 퇴적물의 공극수 증발과 압밀작용을 최소화하기 위해 1시간 이내에 GEMS 실험을 진행하였다. RPM 드라이버 아래에 위치한 회전판을 통해 퇴적물 표층에 전단응력(0.01~0.6 Pa)을 가함으로써 인위적인 침식을 재현하였다. 전단응력에 의해 수층으로 침식 혹은 부유된 퇴적물은 펌프를 통해 공급되는 실험수와 함께 퇴적물 코어에서 탁도계(2100N, Hach)로 배출되어 연속적인 탁도(NTU)를 측정하였다. 배출된 실험수는 채수 후 필터링을 통해 부유된 퇴적물의 무게를 측정하는 데 사용되었다. 각각의 무균채수병에 보관된 실험수를 메스실린더에 옮겨 정확한 부피를 측정하였다. 사전에 건조된(< 60°C, 24시간) 무게가 측정된 멤브레인 필터(공극: 0.45 μm , Whatman)에 실험수를 통과시키고 이를 페트리 디쉬에 밀봉하여 실험실로 운반하였다. 필터링 시스템 후의 멤브레인 필터의 건조된 무게를 측정하고 실험 전의 무게와 비교하였다. 해당 과정을 통하여 실험수의 부피와 부유퇴적물의 무게를 측정할 수 있으며, 이에 따라 부유퇴적물 농도(suspended

sediment concentration)를 산출하였다. 멀티코어 채취 지점의 환경조건을 최대한 유지하기 위하여, 채수기(Rosette sampler-12L Niskin bottle)를 이용하여 GEMS 운용에 필요한 해수를 채수하였다.

부시로 코어와 침식실험이 완료된 코어에서 약 10 g 정도 표층퇴적물을 각각 채취하여 침식 전과 후 퇴적물 입도분석을 진행하였다. 입도분석은 2% 황산제(sodium hexametaphosphate)를 시료에 첨가한 후 레이저회절 입도분석기(Mastersizer 3000, Malvern Panalytical)를 이용하여 분석하였다. 퇴적물의 조직 변수값은 Gradistat 프로그램을 이용하여 Folk(1980) 분석방법이 적용된 평균입도, 분급도, 왜도, 최빈값을 계산하였다(Blott and Pye, 2001). 퇴적물의 “이동성(mobility)”은 침식 전 입자크기 별 부피비율을 침식 후 잔류된 부피비율로 나누어 계산하였다.

4. 결과 및 토의

4.1. 퇴적물 이동성

KPR 심해퇴적물의 입도 분석 결과, 침식 실험 전·후 퇴적물 모두 주로 실트와 모래로 구성된 사질니(sandy Mud)가 우세하게 나타났다(Table 1). 침식 전 퇴적물의 중앙입도(d_{50})는 31.2 μm 이며, 최빈값은 48.7 μm 로 측정되었다. 침식 후 퇴적물은 d_{50} 과 최빈값이 각각 42.8 μm , 71.5 μm 로 증가하였다(Table 1). 특히, 조립 실트가 주로 재부유되어 침식 후 퇴적물에서 상대적 함량이 4.6% 감소하였다(Fig. 3a). 반면, 재부유되기 어려운 모래는 상대적 함량이 16.3% 증가하였고, 중립 및 세립질 실트와 점토 함량은 변화가 미비하였다. 분급은 침식 후 3.7 μm 에서 5.0 μm 로 증가하였다(Table 1). Lee and Chun(2002)에 따르면, KPR 심해퇴적물은

Table 1. Composition and textural parameters of surface sediments

	Composition (%)				Textural parameters (μm)					
	Sand	Silt			Clay	d_{50}	Mean	Sorting	Skewness	Mode
		Coarse	Medium	Fine						
Before erosion	23.1	43.5	11.3	16.8	5.5	31.2	23.2	3.7	-0.3	48.7
After erosion	39.4	28.6	10.1	16.8	5.1	42.8	32.7	5.0	-0.2	71.5

대부분 생물기원 탄산염 물질로 구성되어 있으며, 부분적으로 화산재층이 분포하는 것으로 알려져 있다. 침식 후 퇴적물 표층에는 수층으로 재부유되지 않고 밀집(bedload)으로 이동하여 표층에 잔류된 모래크기의 생물기원 탄산염 퇴적물과 화산재가 주로 분포하였다.

KPR 심해퇴적물의 이동성 분석 결과, 10~60 μm 입자에서 1.2 이상의 높은 이동성을 보이며, 60 μm 보다 큰 입자는 이동성이 1보다 낮았다(Fig. 3b). 10 μm 보다 작은 입자는 1.2 이하의 낮은 이동성을 보이므로 점착성에 의해 응집되어 상대적으로 쉽게 재부유되지 않았다. 10~60 μm 입자 크기 구간의 높은 이동성은 생물기원이 우세한 심해퇴적물의 비응집성 실트(혹은 분급성 실트, sortable silt)가 침식에 의해 점토와 모래입자로부터 재부유되는 분급작용이 나타났음을 의미한다. McCave et al.(1995)는 퇴적물 내 분급성 실트를 활용하여 고해양 환경의 심층해류 유속을 추론하였다. 10~60 μm 입자 크기 구간을 의미하는 분급성 실트는 유속에 따라 침식되는 입자 크기의 변화가 잘 반영된 쇄설성에 국한된다(McCave et al., 2017). 그러나, 육지로부터 멀리 떨어진 심해환경에서 퇴적물은 생물기원이 우세하기 때문에 쇄설성 입자의 분급성 실트를 고해양환경 유속 해석에 적용하기에는 제한적이다. 대부분 생물기원 입자들로 구성된 KPR 퇴적물에 대한

이동성 분석 결과, 분급성 실트의 크기에 해당하는 입자들이 주로 재부유되었음을 확인하였다(Fig. 3b). 이는 쇄설성 입자함량이 현저히 적은 퇴적물에서 심층해류의 유속을 해석함에 있어 생물기원 입자들이 활용 가능함을 보여준다. Ivanova et al.(2022)는 생물기원 퇴적물에 대한 분급성 실트를 활용하여 남대서양 플라이오세~제 4기 동안의 유속 변화를 보고한 바 있다. 특히, 석영입자의 밀도(2.65 g cm³)와 유사한 유공층 파편(2.71 g cm³)이 우세한 퇴적물을 분급성 실트 프록시로 활용하였다. 하지만, 생물기원 퇴적물은 입자 크기 뿐만 아니라 밀도와 형태 등이 이동성에 영향을 미친다(Prager et al., 1996). 따라서, 보다 정확하고 해양환경 유속의 프록시로 생물기원 퇴적물을 활용하기 위해서는 입자 특성(밀도, 형태 등)에 따른 이동성(또는 침식임계값) 변화에 대한 연구가 필요하다. 또한, 분급성 실트는 유체에 의해 분급 및 퇴적되는 입자에 의해 입도가 변화되므로, 침식 프로세스를 고려한 GEMS 실험 뿐만 아니라 침식-퇴적 프로세스를 동시에 파악하는 추가적인 연구가 필요하다.

4.2 심해표층퇴적물 침식특성

GEMS 실험 결과, 심해표층퇴적물은 전단응력의 증

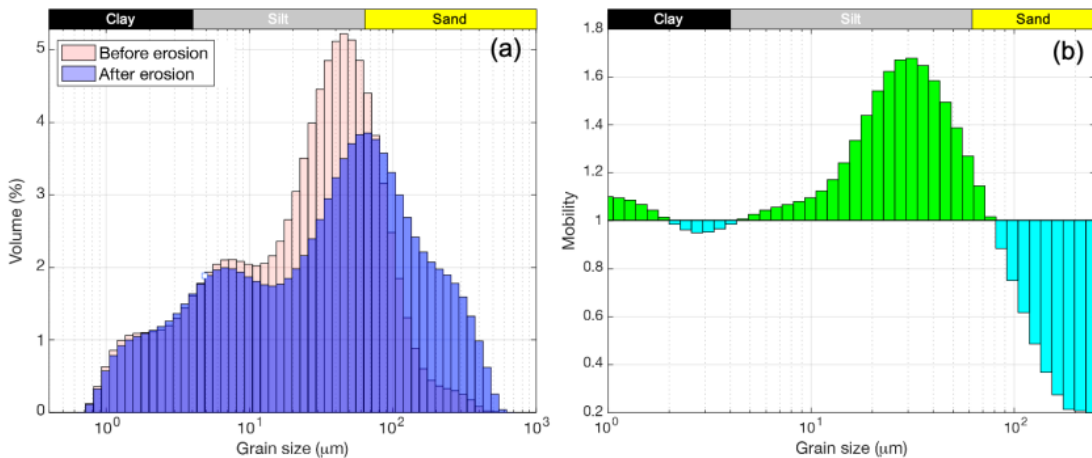


Figure 3. (a) Sediment size distributions before and after the erosion experiments and (b) size-specific mobility. Sizes with mobilities > 1 (green bars) and < 1 (cyan bars) represent resuspended and remained sediments, respectively

가에 따라 다양한 침식유형이 발견되었다(Fig. 4). 낮은 전단응력(0.01~0.08 Pa) 단계에서는 뚜렷한 반응을 보이지 않았으며, 0.1 Pa부터 퇴적물 입자가 재부유되기 시작하였다. 0.14 Pa부터 육안으로 확인 가능한 만큼 퇴적물 재부유가 발생하였으며, 높은 전단응력(0.46~0.6 Pa) 단계에서는 밀집이동과 함께 재부유과정이 뚜렷하게 관측되었다. 침식실험 후 재부유되지 못한 모래크기의 생물기원 퇴적물과 화산재들은 표층에 피복되었다(Fig. 5b). 전단응력 증가에 따라 퇴적물은 반복적인 재부유과정을 보였다(Fig. 4). 전단응력이 가장 낮은 0.01 Pa에서 부유퇴적물농도는 약 11.56 mg l^{-1} 였으며, 0.08 Pa에서 1.35 mg l^{-1} 까지 감소하는 경향을 보였다. 이는 퇴적물 표층 위에 고화되지 않은 얇은 층으로 쌓여진 보푸라기층(fluff layer)이 0.01 Pa에서 재부유되었음을 의미한다. 0.1 Pa부터 부유퇴적물농도가 최대 2.74 mg l^{-1} 까지 증가한 후 서서히 감소하였다. 0.2~0.6 Pa까지 각 단계별 초기에는 부유퇴적물농도가 증가하였으나, 이후 직선형으로 감소하는 경향을 보였다. 이는 깊이에 따라 퇴적물 침식특성이 변하는 전형적인 유형이다(Amos et al., 2003). 일반적으로 퇴

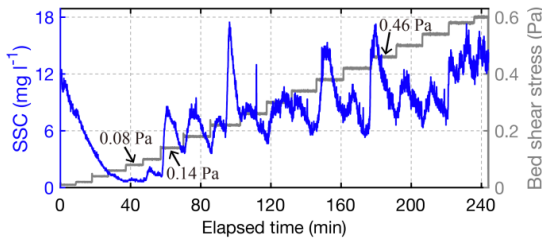


Figure 4. Time series of suspended sediment concentration (SSC, blue line) and bed shear stress (gray line) applied in the GEMS experiment

적물은 압밀작용에 의해 퇴적물 깊이에 따라 침식임계값이 달라진다. 따라서 위 실험에서도 각 전단응력 단계에서 침식 가능한 퇴적물이 침식된 후 상대적으로 고화된 퇴적물이 노출되며 더 이상 침식이 발생하지 않았다.

퇴적물의 침식임계값은 전단응력에 따른 침식률의 변화를 통해 정의되며, 침식실험을 통해 획득된 전단응력과 침식률의 상관분석을 통해 계산 가능하다(Amos et al., 2003). KPR 심해표층퇴적물의 침식임계값은 0.08 Pa로 측정되었다(Fig. 6). 과거 측정된 심해표층퇴적물의 침식임계값은 0.07~0.27 Pa의 범위에 분포하며(Seo et al., 2020), KPR 퇴적물은 상대적으로 낮은 침식임계값을 보이는 것으로 판단된다. Seo et al.(2020)은 KPR 서쪽에 위치한 필리핀해 벤헨라이즈

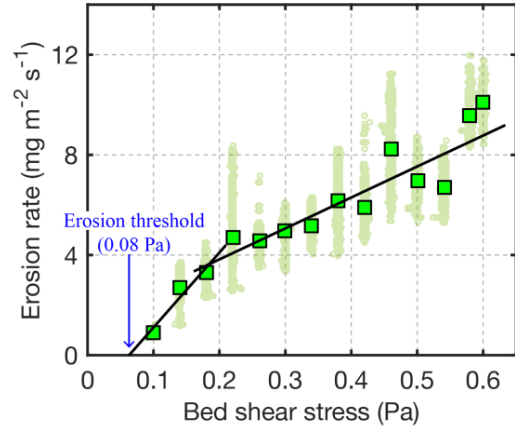


Figure 6. Determination of an erosion threshold in the KPR sediment. Green squares indicate the mean erosion rate at each step of bed shear stress. Black lines indicate the fitting lines for regression

(a) Before erosion



(b) After erosion

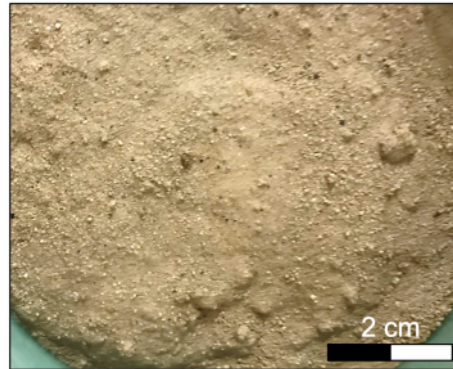


Figure 5. Photographs of core surfaces (a) before and (b) after erosion experiment

(Benham Rise, BR, 수심 약 3,100 m)에서 획득한 퇴적물의 침식특성을 측정하였다. 침식실험은 본 연구와 동일한 GEMS를 활용하였다. BR 퇴적물에 대한 침식 실험 결과, 0.2 Pa부터 퇴적물 입자가 재부유되기 시작 하였으며, 0.2~0.6 Pa 단계에서 초기에는 부유퇴적물 농도가 증가하였으나, 이후 직선형으로 감소하는 경향을 보였다(Seo et al., 2020). BR 퇴적물은 0.13 Pa의 침식임계값을 보였으나, KPR 퇴적물의 침식임계값은 0.08 Pa 로 측정되었다(Fig. 6). BR은 상대적으로 육지와 가까운 곳에 위치하므로 점착성을 띄는 육상기원 쇄설성 퇴적물이 유입될 수 있다. 실제로 BR 퇴적물은 탄산염 함량이 18%로써 KPR 퇴적물보다 육상기원 퇴적물이 우세하며 d_{50} (9.7 μm) 또한 상대적으로 작았다(Seo et al., 2020). 점착성 퇴적물은 입자간 응집력에 의해 입자크기가 작을수록 침식을 위한 보다 큰 전단 응력이 필요하므로, 점착성 퇴적물 함량이 높은 BR 퇴적물이 상대적으로 높은 침식임계값을 보인 것으로 판단된다. Fig. 7는 Unsöld(1982)가 제시한 Shields 곡선과 다양한 심해환경에서 측정된 퇴적물의 침식임계값을 도시화한 그림이다. KPR 심해표층퇴적물의 d_{50} 에 따른 침식임계값은 Shields 곡선과 잘 일치하였다. 이는 비점착성을 보이는 생물기원 탄산염과 쇄설성 퇴적물이 유사한 침식특성을 가짐을 의미한다. Mohr et al.(2018)는 수조실험을 통해 패각 등으로 구성된 생물기원 탄산염 모래입자가 쇄설성 모래입자의 침식임계값과 유사함을 보고하였다. Black et al.(2003)이 북대서양에서 측정한 생물기원 탄산염 퇴적물 또한 KPR과 유사한 침식임계값을 보였다(Fig. 7).

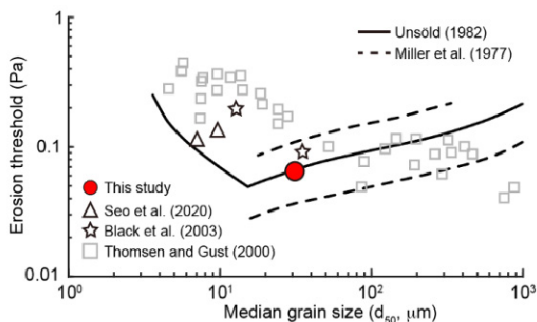


Figure 7. Erosion thresholds of continental margins to deep-sea sediments. The black solid and dashed lines represent the Shields curve (modified after Unsöld (1982)) and uncertainty limits (Miller et al., 1997)

5. 결론

필리핀해 KPR 심해표층퇴적물의 침식거동 특성을 규명하기 위하여 GEMS 선상현장실험을 수행하였다. 본 연구를 통해 도출된 결론과 향후 연구방향은 다음과 같다.

생물기원 탄산염 입자가 우세한 KPR 심해표층퇴적물은 침식작용에 의해 d_{50} 이 37% 증가하였다. 특히, 퇴적물 재부유는 분급성 실트에 해당하는 10~60 μm 입자에서 대부분 발생하였으며, 침식실험 이후 퇴적물 표층에는 모래크기의 생물기원 입자와 쇄설성 화산재가 잔류되었다. 따라서, 고해양환경 유속 프록시인 분급성 실트가 쇄설성 입자 뿐만 아니라 생물기원 퇴적물에도 활용가능함을 보여주었다.

KPR 퇴적물의 침식임계값은 0.08 Pa로 관측되었으며, 쇄설성 퇴적물의 d_{50} 에 따른 침식임계값의 변화를 표현한 Shields 곡선과 잘 일치하였다. 이는 비점착성 생물기원 퇴적물의 침식특성은 쇄설성 퇴적물과 유사함을 의미한다.

본 연구결과는 생물기원 심해퇴적물의 침식 프로세스를 규명하고 고해양환경 수리조건을 재구성하는 데 필요한 핵심 검증자료로 활용될 수 있다. 향후 퇴적물 특성(입도, 밀도, 함수율 등)이 침식임계값에 미치는 영향에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 한국해양과학기술원의 주요사업인 연구선 산학연 공동 활용 연구사업(PE99657)과 2023년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(20210427, 과학기술기반 해양환경영향평가 기술개발)(RS-2023-00256330, 쿠로시오 해류로 인한 한반도 해양위기 대응기술 개발).

참고문헌

1. Amos, C.L., Droppo, I.G., Gomez, E.A. and Murphy, T.P., 2003. The stability of a remediated bed in Hamilton Harbour, Lake Ontario, Canada. *Sedimentology*, 50:149-168.
2. Black, K.S., Peppeand, O.C. and Gust, G., 2003. Erodibility of pelagic carbonate ooze in the northeast Atlantic. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 285:143-163.
3. Blott, S.J. and Pye, K., 2001. GRADISTAT: A grain size distribution and statistics package for

- analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26:1237-1248.
4. Bostock, H.C., Hayward, B.W., Neil, H.L., Currie, K.I., and Dunbar, G.B., 2011. Deep-water carbonate concentrations in the southwest Pacific. *Deep-Sea Research I*, 58:72-85.
 5. Folk, R.L., 1980. *Petrology of sedimentary rocks*. Hemphill Publishing Company, Texas, 182p.
 6. Grabowski, R.C., Droppo, I.G. and Wharton, G., 2011. Erodibility of cohesive sediment: The importance of sediment properties. *Earth Science Reviews*, 105:101-120.
 7. Gust, G. and Müller, V., 1997. Interfacial hydrodynamics and entrainment functions of currently used erosion devices. In: *Cohesive Sediments*, edited by Burt, N., Parker, R. and Watts, J., Wiley, Chichester, p. 149-174.
 8. Ha, H.J., and Ha, H.K., 2021. Comparison of methods for determining erosion threshold of cohesive sediments using a microcosm system. *Frontiers in Marine Science*, 8:695845.
 9. Ivanova, E.V., Borisov, D.G., Murdmaa, I.O., and Ovsepyan, E.A., 2022. Contourite systems around the northern exit from the Vema Channel. *Marine Geology*, 449:106835.
 10. Kennett, J.P., 1982. *Marine Geology*. Prentice-Hall Inc, Eaglewood, 813p.
 11. Khim, B.K., Kim, Y.H., Kim, H.J., Hyeong, K., and Yoo, C.M., 2010. Variation calcium carbonate content in deep-sea pelagic sediments of the western Pacific Ocean. *Ocean and Polar Research*, 32:15-22.
 12. Lee, I.T., and Chun, S.S., 2002. Preliminary comparison of deep-sea sedimentation in the Ulleung and Shikoku basins: Deep-sea circulations and bottom current. *Journal of Korean Earth Science Society*, 23:259-269.
 13. Miller, M.C., McCave, I.N. and Komar, P.D., 1977. Threshold of sediment motion under unidirectional currents. *Sedimentology*, 24:507-527.
 14. McCave, I.N., Manighett, B. and Robinson, S.G., 1995. Sortable silt and fine sediment size/composition slicing: Parameters for paleocurrent speed and paleoceanography. *Paleoceanography*, 10:593-610.
 15. McCave, I.N., Thornalley, D.J.R. and Hall, I.R., 2017. Relation of sortable silt grain-size to deep-sea current speeds: Calibration of the 'Mud current Meter'. *Deep-Sea Research Part I*, 127:1-12.
 16. Mohr, H., Draper, S., White, D.J. and Cheng, L., 2018. The influence of permeability on the erosion rate of fine-grained marine sediments. *Coastal Engineering*, 140:124-135.
 17. Prager, E.J., Southard, J.B. and Vivoni-Gallart, E.R., 1996. Experiments on the entrainment threshold of well-sorted and poorly sorted carbonate sands. *Sedimentology*, 43:33-40.
 18. Qin, X., Luo, W., Li, P., Chen, H., Xiao, X., Hu, G., Tan, Y., Du, R., Sun, M., Cong, J., Hu, X., Lu, K., Wang, L., Zhang, H. and Zhou, H., 2021. Topographic and geomorphological features and tectogenesis of the southern section of the Kyushu-Palau Ridge (KPR) and its adjacent areas. *China Geology*, 4:571-584.
 19. Scott, R. and Kroenke, L.W., 1980. Evolution of back arc spreading and arc volcanism in the Philippine Sea: Interpretation of Leg 59 DSDP results. *Geophysical Monograph Series*, 23:283-291.
 20. Seo, J.Y., Choi, S.M., Ha, H.K. and Lee, K.E., 2020. Enhanced erodibility of deep-sea sediments by presence of calcium carbonate particles. *Geo-Marine Letters*, 40:559-571.
 21. Shibamoto, Y. and Harada, K., 2010. Silicon flux and distribution of biogenic silica in deep-sea sediments in the western North Pacific Ocean. *Deep-Sea Research I*, 157:163-174.
 22. Tang, Y., Li, M., Ji, J. and Wu, Z., 2011. The geomorphological features and continuity of the Kyushu-Palau Ridge (KPR). *Acta Oceanologica Sinica*, 30:114-124.
 23. Thomsen, L. and Gust, G., 2000. Sediment erosion thresholds and characteristics of resuspended aggregates on the western European continental margin. *Deep-Sea Research Part I*, 47:1881-1897.
 24. Unsöld, G., 1982. *Der Transportbeginn rolligen Materials in gleichförmigen turbulenten Strömungen*. Ph.D. Thesis, Kiel University, Kiel, 145p.
 25. Wang, J., Wang, F., Lu, Y., Ma, Q., Pratt, L.J. and Zhang, Z., 2021. Pathways, volume transport, and seasonal variability of the lower deep limb of the Pacific meridional overturning circulation at

the Yap-Mariana Junction. *Frontiers in Marine Science*, 8:672199.

26. Winterwerp, J.C. and van Kesteren, W.G.M., 2004. Introduction to the physics of cohesive sediment dynamics in the marine environment. Elsevier, Amsterdam, 450p.