



Article

다중 퇴적 기원지 조건에서 해수면 변동이 선상지-삼각주 층서에 미치는 영향: 3차원 수조 실험

정소정¹, 김원석^{1,*}, 백세익²

¹연세대학교 지구시스템과학과

²한국석유공사 국내사업개발처

Effects of sea-level variations on fan-delta stratigraphy under multiple sediment sources: 3D tank experiments

Sojung Jung¹, Wonsuck Kim^{1,*}, Seik Paik²

¹Department of Earth System Sciences, Yonsei University, Seoul 03722, Republic of Korea

²Domestic Business Development Department, Korea National Oil Corporation, Ulsan 44538, Republic of Korea

Received: December 31, 2025 / Revised: February 9, 2026 / Accepted: February 10, 2026

*Corresponding author: +82-2-2123-2666 / E-mail: delta@yonsei.ac.kr

요약: 열개 분지에서는 다중 퇴적 기원지가 공존하며 상호작용하는 경우가 흔하지만, 기존 연구는 대부분 상류에 존재하는 단일 기원지만을 고려하여 다중 퇴적 기원지 시스템의 지형 변화 및 층서 발달을 충분히 설명하지 못하였다. 본 연구는 이러한 한계를 극복하기 위해 두 기원지를 모사한 3차원 수조 실험을 수행하고, 세 가지 속도의 해수면 변동 조건에서 선상지-삼각주 시스템의 발달을 분석하였다. 실험 결과, 두 퇴적시스템의 경계는 상대적 퇴적 공급 우세성과 유로의 자생적 이동에 따라 진동하였으며, 그 이동 규모는 하류로 내려갈수록 크게 나타났다. 또한 해수면 변동 속도에 따라 각 퇴적시스템의 상부 경사도와 경계 이동 규모 및 주기가 체계적으로 달라지는 양상이 확인되었다. 이러한 결과는 기존의 단일 기원지 기반 퇴적 모델로는 설명이 어려웠던 열개 분지 내 다중 기원지 경계 지역의 층서 발달 양상을 재현하며, 해수면 변동이 층서 기록에 반영되는 과정을 정량적으로 이해하는 데 중요한 근거를 제공한다.

주요어: 다중 퇴적 기원지, 열개 분지, 해수면 변동, 경계 이동, 층서 발달

ABSTRACT: Rift basins commonly host multiple coexisting and interacting sediment sources; however, most previous studies have focused on systems with a single upstream source, limiting our understanding of geomorphic and stratigraphic evolution in multi-sediment-source settings. To address this limitation—the inability of single-source based models to explain boundary migration, stratigraphic development in multi-source rift basin systems—we conducted three-dimensional tank experiments simulating two sediment sources and examined the evolution of a coupled alluvial fan-delta system under three different rates of sea-level change. The experimental results show that the boundary between the two depositional systems oscillates in response to relative supply dominance and autogenic channel migration, with the magnitude of boundary migration increasing downstream. In addition, systematic variations in topset slope, boundary migration amplitude, and oscillation periodicity were observed as a function of sea-level change rate. These findings provide experimental constraints on the mechanisms controlling the stratigraphic development of interaction zones arising from multiple sediment sources and sea-level fluctuations, commonly observed in rift-basin depositional systems.

Key words: multiple sediment sources, rift basin, sea-level cycle, boundary migration, stratigraphic evolution

1. 서론

열개 분지는 지각의 신장운동에 의해 형성되는 퇴적분지로, 기반암과 퇴적분지 사이에 발달하는 일련의 정단층에 의해 구분된다(Prosser, 1993). 이러한 분지는 지각 변형에 따른 단열과 퇴적 공간 생성이 반복되며, 주변 고지대로부터 다양한 기원지의 퇴적물이 공급되어 퇴적된다(Leeder and Gawthorpe, 1987; Blair and Bilodeau, 1988; Son and Lee, 2018; Xu *et al.*, 2020). 특히 열개 분지는 단층 활동에 따른 분절된 지형과 경사 방향의 발달로 여러 방향에서 동시에 여러 개의 퇴적 기원지가 발달하는 특성으로 인해 단일 기원지 기반으로 정립된 퇴적 모델로는 3차원적인 분지 충전 양상을 충분히 설명하기 어렵다. 따라서 열개 분지에서의 퇴적체 경계, 입도 및 광물 조성의 공간적 변화, 그리고 기원지 혼합을 이해하는 것은 석유 시스템을 이해하는 데 핵심적인 단서를 제공한다.

석유 시스템은 근원암, 저류암, 덮개암, 이동경로, 그리고 탄화수소의 생성 이동 집적 시점을 포괄하는 통합 개념이다(Magoon and Dow, 1994). 열개 분지에서는 열개기(syn-rift) 및 열개 이후기(post-rift) 동안 단층 활동과 침강 양상의 변화로 퇴적 공간(accommodation)과 퇴적 중심이 시공간적으로 이동하며, 그 결과 퇴적상의 분포(e.g., 해성 퇴적체의 측방 교호)와 층서 경계의 발달 양상이 복잡하게 나타나는 것이 일반적이다(Prosser, 1993; Gawthorpe and Leeder, 2000).

이러한 퇴적학적 층서적 이질성은 기존 연구에서 보고된 바와 같이 저류체의 연결성과 불투수층의 분포를 다양화하여 근원-저류-덮개 조합이 여러 방식으로 형성되고 탄화수소의 이동 및 집적 양상에 중요한 영향을 줄 수 있으며(Prosser, 1993; Gawthorpe and Leeder, 2000; Doust and Sumner, 2007), 동시에 공극 구조와 저류암 품질의 공간적 변동을 유도한다(Li *et al.*, 2023). 이러한 이유로 열개 분지는 전세계적으로 중요한 석유 및 가스 탐사 대상이며(Fraser *et al.*, 2007) 구조 해석과 함께 기원지 분석 및 층서 연구가 필수적으로 수행되고 있다.

동중국해 대륙붕 분지는 중국 동부 해역에서 가장 중요한 해상 탄화수소 분지 중 하나로(그림 1), 2020년 기준 연간 약 4.64×10^6 m³의 환산 석유 생산량을 기록하고 있다(Wang *et al.*, 2022). 이 중 시후 분지(Xihu Basin)는 1974년 탐사 이후 현재까지 30개 이상의 시추에서 19개의 유가스전이 발견된 핵심 지역으로 평가된다(Ye *et al.*, 2007). 시후 분지는 후기 백악기에서 에오세의 1차 열개, 올리고세에서 중기 마이오세의 2차 열개 후 침강기, 그리고 후기 마이오세 이후의 지속적 침강기로 구분되는 세 단계의 구조 진화를 겪었다(Weilin *et al.*, 2019). 이 분지는 최대 15 km에 달하는 두꺼운 퇴적층이 누적되어 있으며, 에오세 평후(Pinghu)층과 올리고세 후아강(Huangang)층이 분지 내 주요 석유 시스템을 구성한다(Ye *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2022).

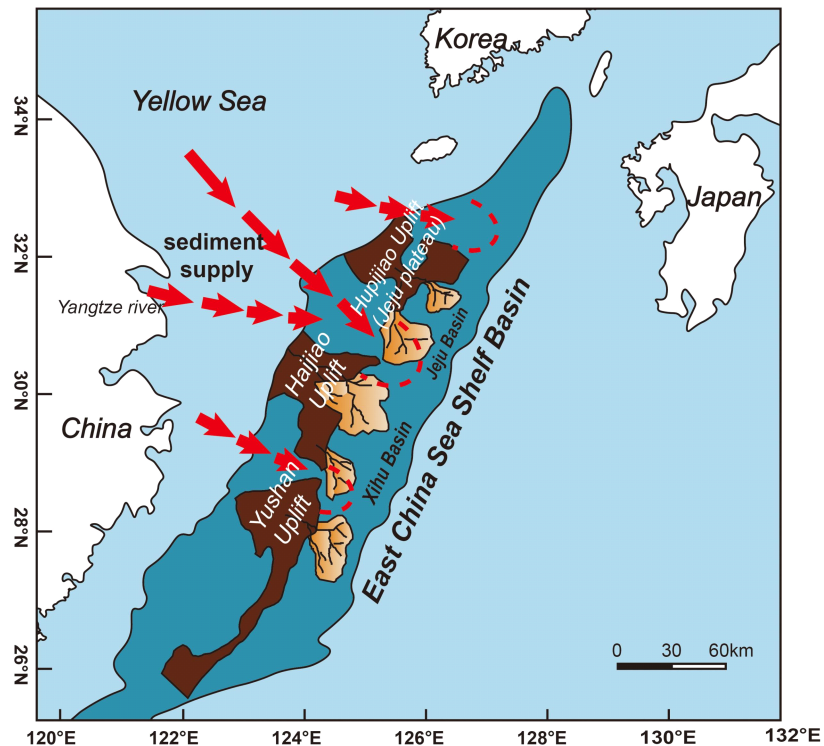


Fig. 1. Location of Xihu Basin (Modified from Weilin *et al.*, 2019).

또한 시후 분지의 퇴적물은 북동부 Hupijiao 고지, 서부 Haijiao 고지, 남서부 Yushan 고지 등 여러 용기대로부터 공급된 다중 퇴적 기원지(multiple provenance) 특성을 보인다(Jiang *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2018).

Zhou *et al.* (2024)은 시후 분지에 대해 고지형 복원, 지르콘 U-Pb 연령, 중광물(heavy minerals) 조성 분석을 종합적으로 적용하여, 여러 용기대로부터 공급된 퇴적물이 단층과 분지 경계 지형에 의해 이동 경로와 혼합 구간이 통제되면서 공간적으로 구획화 된 다중기원지 퇴적물 유입체계를 형성함을 규명하였다. 이 연구는 서로 다른 고지대에서 기원한 퇴적물이 각각 우세하게 나타나는 선상지 및 삼각주 구역과, 이들이 혼합되는 퇴적 상호작용 구역(sedimentary interaction zone)을 공간적으로 구분해 제시하였다. 그러나 기존의 접근 방식은 주로 구조적·지화학적 분석에 치중되어 있어, 다중 기원지 공급체계가 실제 어떠한 과정을 통하여 분지 내에서 특정한 층서학적 패턴으로 기록되는지에 대한 기작 연구는 충분히 다루어지지 않았다. 즉, 각 기원지별 퇴적물 공급량(sediment supply)과 공급 빈도, 그리고 상호작용에 의한 혼합 양상이나 서로 교호하는 층준의 두께 변화 및 경계의 이동 등, 상호작용 구역 내 시공간적 변동과 층서 발달 사이의 상관 관계에 대한 이해는 여전히 연

구 공백으로 남아 있다. 이에 더하여, 해수면 변동과 같은 외부적인 환경변화에 따른 상호작용 구역의 층서 발달 영향은 물론, 개별 기원지의 변동 특성이 상호작용 구역 내에 어떠한 형태로 전이(transfer)되거나 변형되어 층서 상 기록되는지에 대한 심도 있는 논의가 필요하다. 따라서 본 연구는 다중 퇴적 기원지 시스템이 분지 충전 과정에서 자생적인 프로세스(e.g., 유로의 이동 등에 의한 지역적 퇴적물 공급량 및 빈도 변화)와 타생적 요인(e.g., 해수면 변동 등 광역적 변화)에 의한 변화를 정량적으로 규명하기 위해 해수면 변동의 유무와 속도를 달리한 수조 실험을 진행하였다. 이러한 실험을 통해, 1) 시간에 따른 퇴적체의 발달 양상, 2) 두 기원지의 퇴적체가 형성하는 선상지-삼각주 경계의 시간에 따른 이동 양상, 3) 결과 퇴적물의 절단면에 기록되어 있는 층서 패턴을 중심으로 분석하였다.

2. 연구 방법

실험은 연세대학교 퇴적형태 및 층서역학 연구실의 3차원 수조에서 진행되었다. 수조 내부에는 가로 1 m, 세로 1.8 m의 평탄한 아크릴 플랫폼을 설치하였다. 육성기원 환경과 해양기원 환경을 대표하는 선상지와 삼각주를 구현하기 위해 플랫폼을 기울여 4%의 경사($S = 0.04$)를 주었다(그림 2).

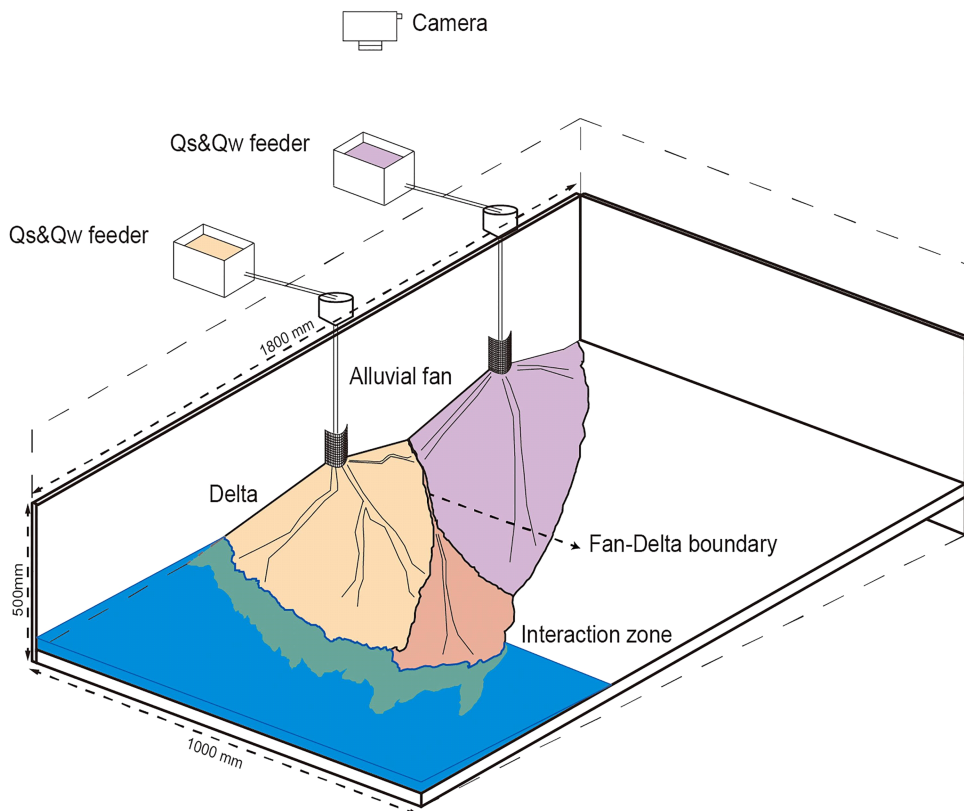


Fig. 2. Schematic image of experimental setup.

Table 1. Experimental parameters.

Run	Source	Qs (cm ³ /min)	Qw (L/min)	Qs/Qw	Runtime (sec)
Constant	Fan	40	1067	0.037	10980
	Delta	43	1179.5	0.036	
Slow	Fan	40	1050	0.038	9520
	Delta	45	1180	0.038	
Fast	Fan	40	1046	0.038	6480
	Delta	45	1182	0.038	

이로 인해 해수면 변동은 플랫폼 하류에만 영향을 미치도록 설계되었으며 상부 기원지는 선상지를 형성하고, 하부 기원지는 삼각주를 발달시킨다. 플랫폼 상류로부터 50 cm와 90 cm 지점에 각각 퇴적물 기원지를 배치하였으며, 두 기원지의 일정한 상류경계 조건을 구현하기 위해 동일한 퇴적물-유수 비율 (Q_s/Q_w)을 유지하였다(표 1). 이러한 비율은 기존 수조연구(e.g., Powell *et al.*, 2012)에서 제시한 퇴적물 공급률과 유량 범위를 반영하여 설정된 값이다. 상부 기원지와 하부 기원지에서 직경 0.1 mm의 단일 석영 모래를 공급하였으며, 상부 선상지의 모래는 붉은색으로 염색을 시켜 두 기원지의 공급 퇴적물에 색상 차이를 두었다. 삼각주와 바다의 경계인 해안선 및 삼각주와 선상지 상부에 발달하는 하천을 명확히 구분하기 위해 기원지에 유입되는 물과 해수면 변동에 투입되는 물은 파란색으로 염색하여 사용하였다. 해수면 변동 시나리오에 따라 총 3가지의 실험을 진행하였다. 이때 실제 자연계에서 강의 깊이와 당시의 해수면 변동 폭의 관계를 사용한 기존의 연구 방법(Kim *et al.*, 2006; Yu *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2024)을 따라 예비실험에서 측정한 평균 하천의 깊이 1 mm를 바탕으로 최대 해수면 변동폭을 10배인 1 cm로 설정하였으며, 초기 해수면 높이는 삼각주의 퇴적물 공급 위치와 일치하도록 설정하였다. 해수면 변동이 있는 두 실험에 대해서도 초기 50분간은 해수면 변동이 없는 정지기(stillstand)로 하여 선상지와 삼각주가 외부적 환경의 변화 없이 발달하도록 하였다. 해수면 상승과 하강의 첫번째 변동 주기를 거친

이후 느린 해수면 변동에서는 11분 동안, 빠른 해수면 변동에서는 9분 동안 2차 정지기를 두어 퇴적체가 발달하도록 하고 다시 해수면 상승과 하강의 주기를 반복하는 형태로 해수면 변동을 구성하였다. 이때 해수면 변동 속도는 해수면 변동이 없는 실험에서 추정된 삼각주의 분지 평형시간(equilibrium timescale, $T_{eq} = 32$ min)을 기준으로 설정하였다. 기존 연구에 따르면 삼각주 시스템의 해수면 변동에 대한 층서 반응은 해수면 변동의 지속 시간과 분지 평형시간 사이의 상대적 관계에 의해 결정된다(Muto *et al.*, 2007; Paola *et al.*, 2009). 느린 해수면 변동 실험은 해수면 상승과 하강의 주기(T)를 48분으로 삼각주 평형시간(T_{eq})보다 길도록 설계하였다. 반대로 빠른 해수면 변동 실험에서는 상승과 하강을 24분 동안 발생시켜 변동주기가 삼각주 평형 시간보다 짧도록 설계하여 시스템에 상대적으로 빠른 해수면 변동을 경험하도록 하였다. 결과적으로, 느린 해수면 변동에서는 해수면 상승과 하강이 0.04 cm/min의 속도로, 빠른 해수면 변동에서는 0.08 cm/min의 속도로 설계되었다(그림 3).

주어진 실험 조건에서 지형역학적 변화를 관찰하기 위해 고해상도 디지털 카메라를 수조 위에 달아 20초 간격으로 평면도를 촬영하였다. 퇴적되어 발달하는 면적을 계산하기 위해 RGB 사진을 흑백으로 이진화 하였으며, 이후 삼각주 영역을 반원으로 개념화하여 그 넓이를 계산하고, 해당 반원의 반지름을 기원지로부터 해안선까지의 대표 거리로 정의하였다.

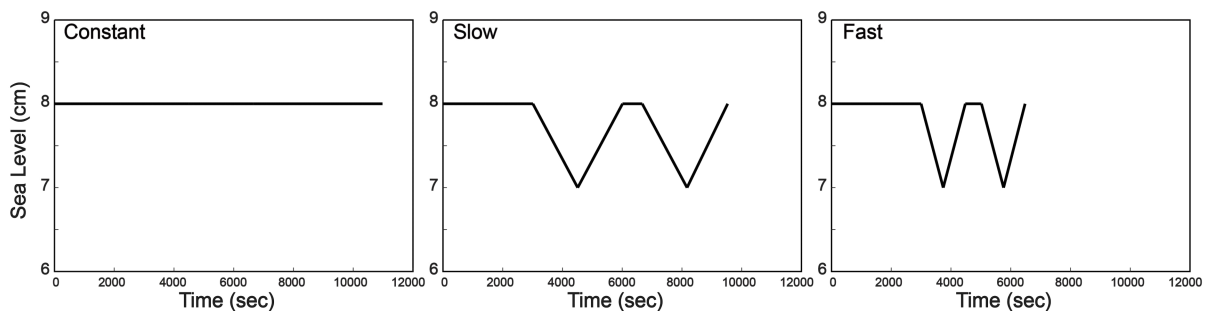


Fig. 3. Sea-level cycle scenarios.

실험 종료 후에는 퇴적층의 기하와 층서 발달 특성을 확인하기 위해, 선상지와 삼각주 경계 부근의 단면을 획득, 관찰하였다. 단면은 기원지가 위치한 분지의 경계부에서 직선거리로 10 cm와 30 cm에 횡(strike)방향으로 퇴적물을 잘라 관찰하였으며, 이때의 위치를 각각 근원부와 말단부라 명명하였다(그림 4b). 추가적으로 선상지-삼각주 경계의 측면 이동 양상을 정량화하기 위해 모든 평면도에서 단면도를 획득한 근원부와 말단부의 절단선을 기준으로 경계 위치를 추출하여 시계열 데이터로 구성하였다. 이후 Shin *et al.* (2024)에서 제시한 절차를 적용하여 초기 경계값을 기준으로 모든 시점에서 경계 위치에 대한 수평 편차를 중심선으로부터 계산하였다. 또한 실제 단면도마다 전체 퇴적 두께가 서로 다르기 때문에 발생할 수 있는 비교상의 왜곡

을 제거하기 위해, 편차를 각 단면의 전체 두께로 나누어 무차원화하였다. 마지막으로 정규화 된 편차 값의 표준편차를 산정하여 해당 단면의 위치에서 나타나는 선상지-삼각주 경계의 측면 이동 규모를 정의하였다.

3. 연구결과

3.1. 전반적인 퇴적 시스템의 발달

세 가지 해수면 변동 실험에서 공통적으로 초기에는 선상지와 삼각주가 각각의 기원지를 중심으로 경사 방향을 따라 비대칭적으로 신장되었다(그림 5). 선상지와 삼각주 상부 표면에서는 유로가 집중되는 하천류(channelized flow)와 확장되는 판류(sheet flow)가 교대로 반복되어 발달하고, 각 기원지를 중심으로 방사상으로 이동하는 특성을 보였다. 선상지와 삼각주 경계에서는 각 기원지에서 유래한 하도(channel)들이 합류하여 새로운 하도를 형성하였으며, 측면이동과 함께 하류 방향으로 흐르면서 로브(lobe) 형태의 퇴적체를 형성하였다. 각 기원지에서 유래한 퇴적물로 인해 로브 퇴적체는 퇴적물 색상의 혼합이 관찰되었으며 이를 기준으로 상호작용 영역(interaction zone)을 정의하였다(그림 5). 반면, 선상지에서부터 기원하여 선상지 종단의 플랫폼 경사를 따라 내려오는 축(axial) 하천에 의해 상호작용 영역이 침식되는 말단부 절단(toe-cutting)이 반복적으로 발생하였다(Kim *et al.*, 2011; Connell *et al.*, 2012). 이는 선상지 하천의 자생적 과정에 따른 하천의 공간적 점유에 따라 달라진다. 선상지의 하천이 플랫폼 상부로 집중되면 그만큼 경사를 따라 흘러내려오는 유량이 증가하여 상호작용 영역을 절단하게 된다. 반대로 하천이 삼각주와 의 경계방향으로 우세하게 흐르면 경사를 따라 흘러내려오

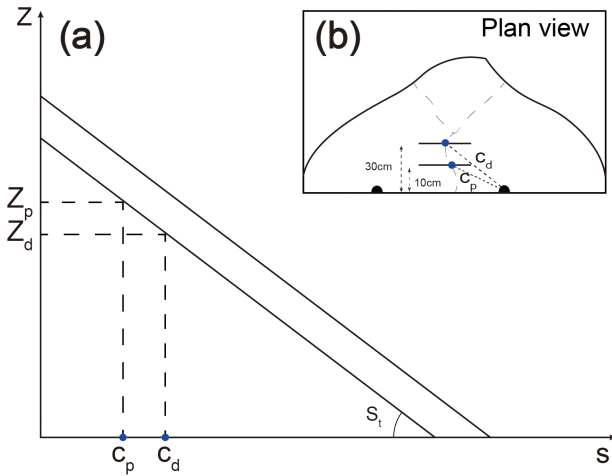


Fig. 4. (a) Conceptual triangular geometry of the delta evolution and (b) location of cross-sections in plan-view image.

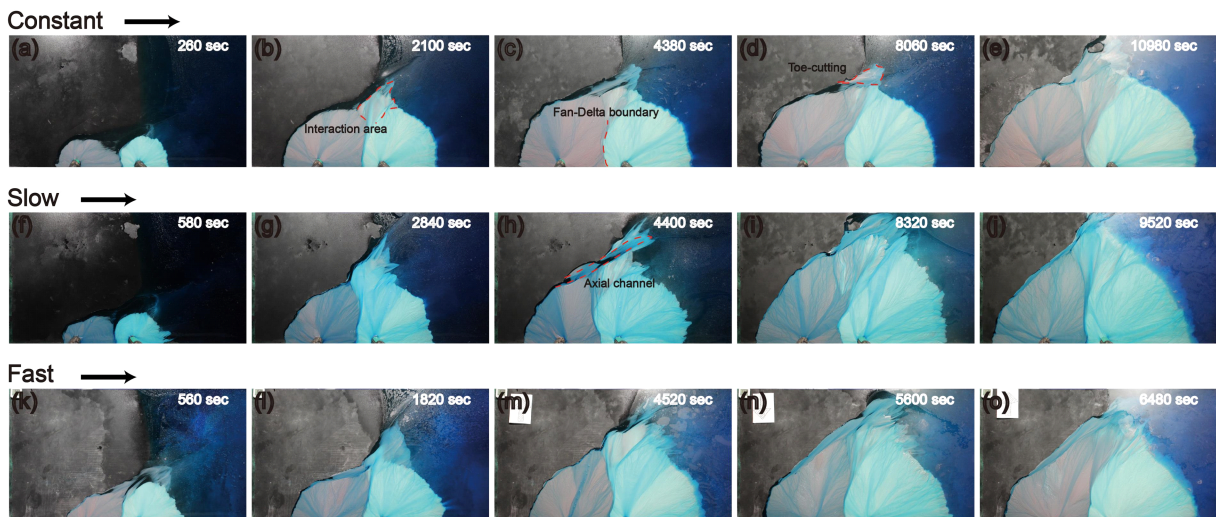


Fig. 5. Overall evolution of each experiment. (a~e) Constant sea-level experiment. (f~j) Slow sea-level cycle experiment. (k~o) Fast sea-level cycle experiment.

는 유량이 상대적으로 감소하여 말단부 절단이 약화되는 반면 경계 방향으로 유입된 퇴적물에 의해 상호작용 영역에 오히려 퇴적 로브의 발달이 이루어진다(그림 5d, 5h).

일정한 해수면 실험에서는 시간이 지남에 따라 지속적으로 삼각주의 해안선이 전진하는 모습을 보인다(그림 6a). 하지만, 해안선의 전진 속도는 시간이 지남에 따라 점진적으로 줄어들었다. 느린 해수면 변동 실험과 빠른 해수면 변동 실험에서도 이러한 전반적인 전진 퇴적 속도의 저감은 있으나, 해수면의 하강에 반응하여 전반적인 추세속도보다 더 빠르게 전진하다가 해수면 상승 시에는 후퇴하는 모습을 보였다(그림 6b, 6c). 다만, 똑같은 진폭과 주기의 해수면 변동이 주어졌음에도 첫번째 해수면 변동 주기보다 두번째 해수면 변동 주기에서 해안선의 전진과 후퇴의 폭이 상대적으로 더 크게 나타나며, 빠른 해수면 변동 실험에서 그 차이가 더 크게 나타났다(그림 6b, 6c).

3.2. 선상지와 삼각주 경계의 거동

각 기원지에서 수렴한 하도의 측면이동으로 선상지-삼각주 경계는 시간에 따라 불규칙하게 변화하였다. 선상지-삼각주 경계를 흐르는 하천은 직선이거나, 두 기원지 중 한 쪽 방향으로 치우쳐진 모양으로 곡선 수로를 만들기도 하였다(그림 5). 예를 들어, 삼각주를 형성하는 하도가 경계 부를 향해 발달하는 경우, 해당 방향으로 퇴적이 발생하면서 삼각주 표면의 국지적 상승이 발생하였고, 선상지 쪽으로 경계가 이동하는 상황이 관찰되었다(그림 5h). 반대로 선상지 기원 하천의 공급이 우세해질 경우에는 경계가 삼각주 방향으로 이동하였다(그림 5l).

선상지-삼각주 경계의 측면 이동 규모를 계산한 결과, 모든 실험에서 근원부보다 말단부에서 선상지-삼각주 경계의 좌우 이동 규모가 더 크게 나타났으며 그 차이는 해수면 변동 속도가 빠를수록 줄어들었다(그림 7).

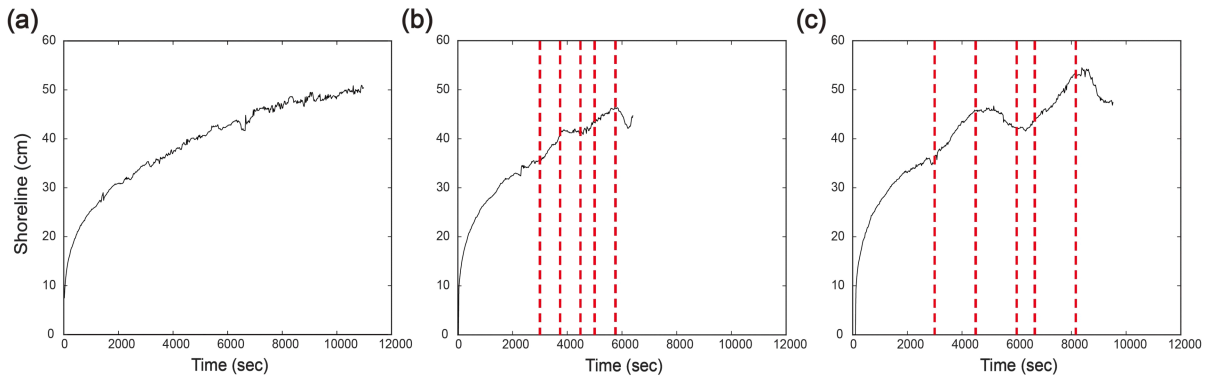


Fig. 6. Shoreline time-series data for the (a) constant, (b) slow sea-level, and (c) fast sea-level experiments. Each dashed line indicates the timing of sea-level change, in chronological order.

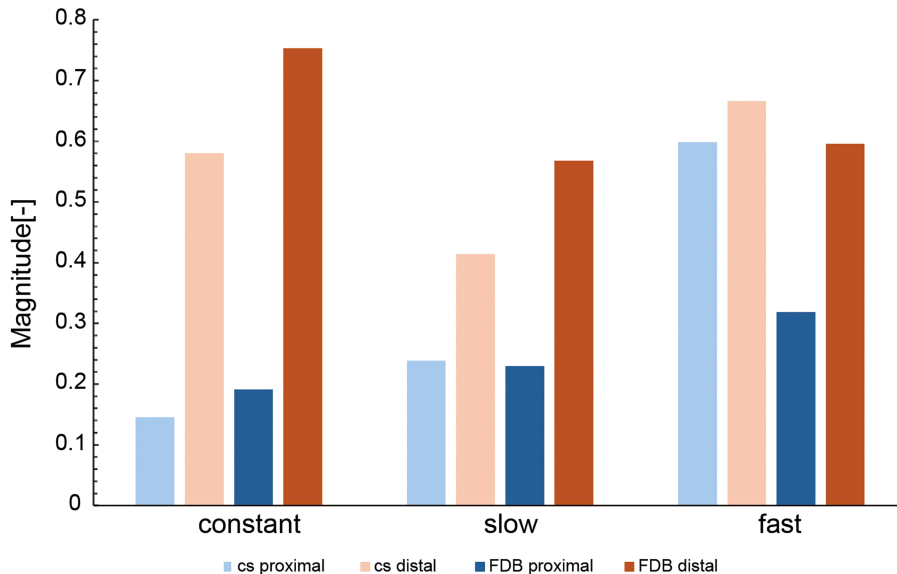


Fig. 7. Magnitude of zigzag patterns in cross sections (cs) and fan-delta boundary (FDB) oscillations in plan-view images.

3.3. 단면도 상 지그재그 패턴의 규모

실험 종료 후 근원부와 말단부에서 취득한 퇴적 단면도 상에는 선상지와 삼각주 기원의 퇴적물이 색상 차이에 의해 뚜렷한 경계를 보이며 구분되어 관찰되었다(그림 8). 경계를 중심으로 양편에 위치한 각각의 선상지와 삼각주 퇴적층은 붉은색과 흰색의 진한 정도에 차이를 보이며 0.5

cm 내외의 여러 층으로 구성된 모습을 보인다. 두 기원지 퇴적물의 경계는 서로 교호하며 지그재그 형태의 패턴을 형성함을 볼 수 있었으며 그 패턴은 매끄럽지 않고 끝이 뾰족한 침두형 형태를 보였다(그림 9, 10). 육안상 두 기원지의 퇴적물이 교호하는 너비는 근원부 보다는 말단부에서 더 넓게 나타났다. 정확한 해석을 위해 이를 규모로 정의하

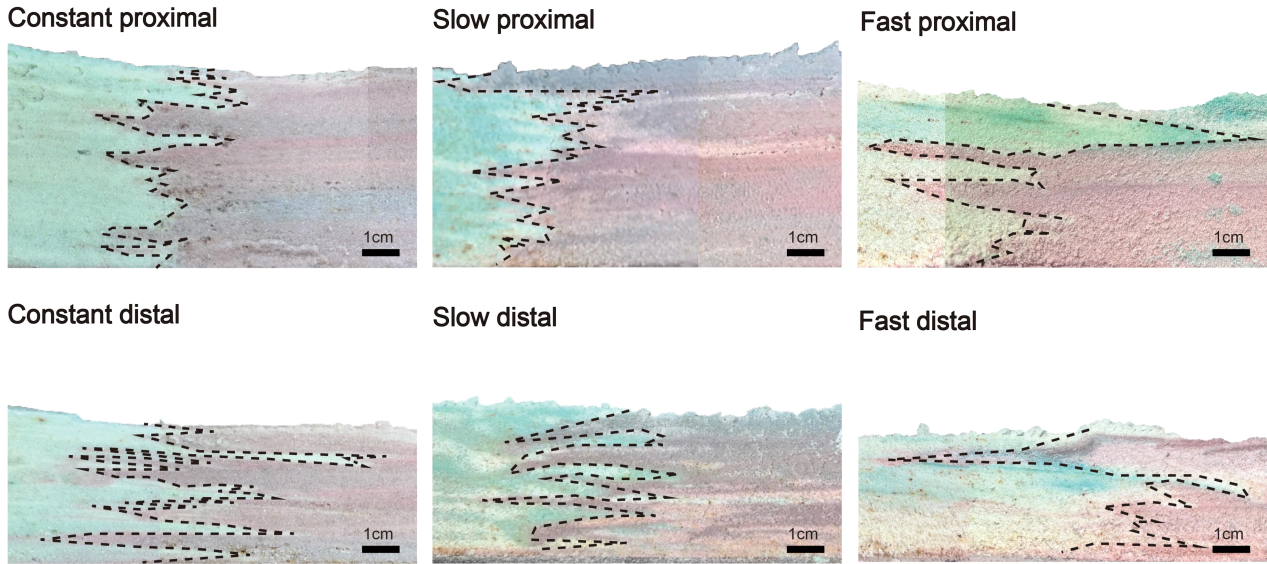


Fig. 8. Cross sections at the proximal and distal locations for all three experiments.

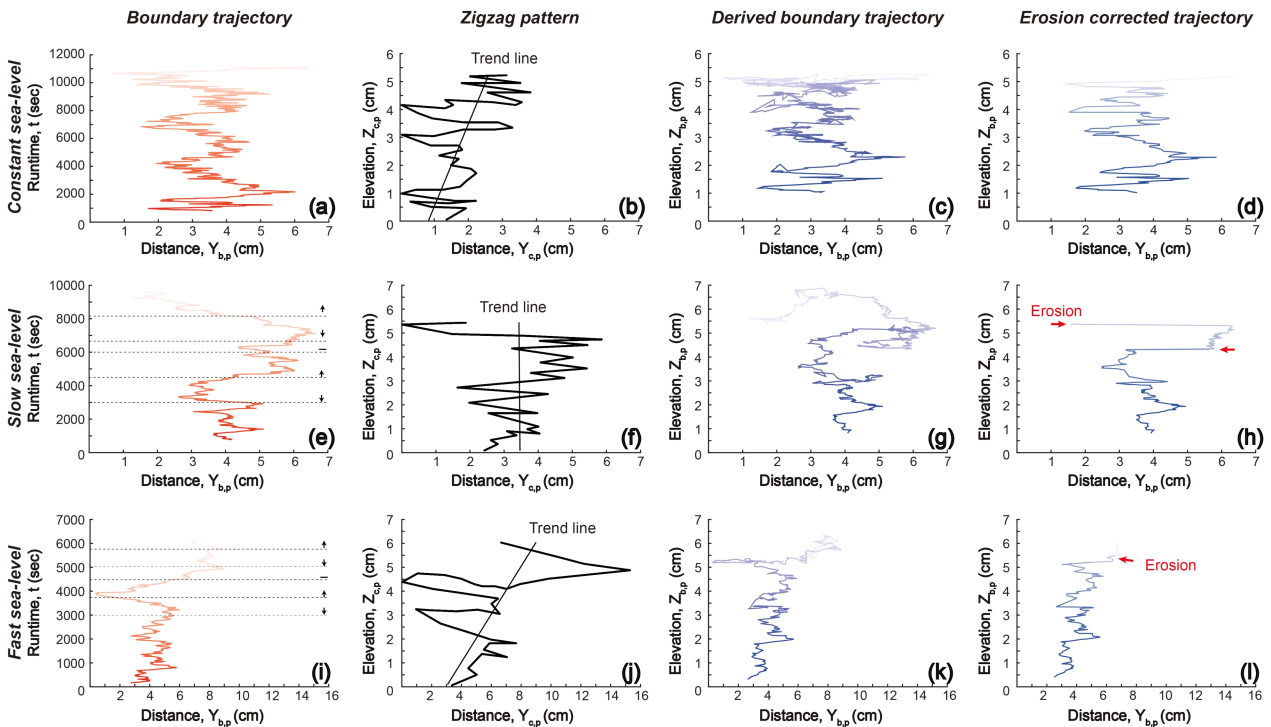


Fig. 9. Trajectories at proximal part of all experiments. (a, e, i) Boundary trajectory. (b, f, j) Zigzag patterns in cross sections. (c, g, k) Model derived boundary trajectory through time. (d, h, l) Erosion corrected trajectory from c, g, and k.

고 실험 영상의 평면도 상 선상지-삼각주 경계에 적용한 계산 방법을 적용하되, 기준 중심선 대신 지그재그 점들의 선형 추세선을 기준으로 편차를 산정하였다. 앞서 연구 방법에서 기술한 평면도 분석에서 산출된 선상지-삼각주 경계의 좌우 이동 규모와 동일하게, 단면도 분석에서도 세 실험 모두에서 근원부보다 말단부의 지그재그 규모가 더 크게 나타났으며 그 차이는 해수면 변동 속도가 빠를수록 작게 나타났다.

3.4. 경계 기반 시계열 데이터

실험 종료 후 획득한 단면도는 각 퇴적층과 지그재그 패턴의 두께를 제공하지만 시간 정보가 부재한 반면, 평면도에서 산출한 선상지-삼각주 경계의 위치를 시간순으로 적층한 그래프는 시간축을 포함하나 고도 정보가 존재하지 않는다. 두 자료를 일관되게 비교하기 위해 삼각주의 해안선을 단순화하여 평균 삼각주 크기를 계산하고, 삼각주의 평균 상부경사(S_t)를 활용하여 선상지-삼각주 경계의 고도를 예측하였다(그림 4). 이러한 예측 방식은 기존의 이론적 삼각주 연구(Kim *et al.*, 2009; Edmonds *et al.*, 2022)에서 널리 사용되는 접근으로, 삼각주의 장기적인 전진 양상을 하나의 직선 경사면으로 표현함으로써, 지형 및 층서 관계를 간단하게 해석하는 장점을 갖는다. 삼각주의 해안선까지의 거리를 s 라 했을 때, 기원지로부터 하류 방향으로 거

리 x 위치에 있는 고도, Z 는

$$Z(t) = (s(t) - x)S_t \quad (1)$$

로 주어지며, 경사는 각 단면도의 실제 최종 두께를 이용하여 각각 산출하였다. 실험 종료 후 획득한 단면도의 두 지점인 근원부와 말단부의 기원지와와의 평균 직선거리(c_p, c_d)를 대입하면, 고도 Z_p, Z_d 를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Z_p = (s(t) - c_p)S_t \quad (2)$$

$$Z_d = (s(t) - c_d)S_t \quad (3)$$

이를 통해 시간의 함수인 해안선의 움직임에 따라 시계열 데이터(그림 9a, 9e, 9i, 10a, 10e, 10i)로부터 복원된 고도를 예측하고(그림 9c, 9g, 9k, 10c, 10g, 10k) 실제 단면의 고도 데이터(그림 9b, 9f, 9j, 10b, 10f, 10j)와 동일한 수직축(Z)에서 비교할 수 있게 되었다.

단면도 상 지그재그 패턴의 최대 범위(ΔY_c)와 평면도에서 측정된 경계의 좌우 이동 최대 범위(ΔY_b)의 차이는 빠른 해수면 변동의 근원부에서 가장 크게 나타났다(표 2). 복원된 경계 고도 데이터에서 퇴적물의 고도는 시간이 지남에 따라 점차 증가하지만 시간에 따라 감소하기도 하여

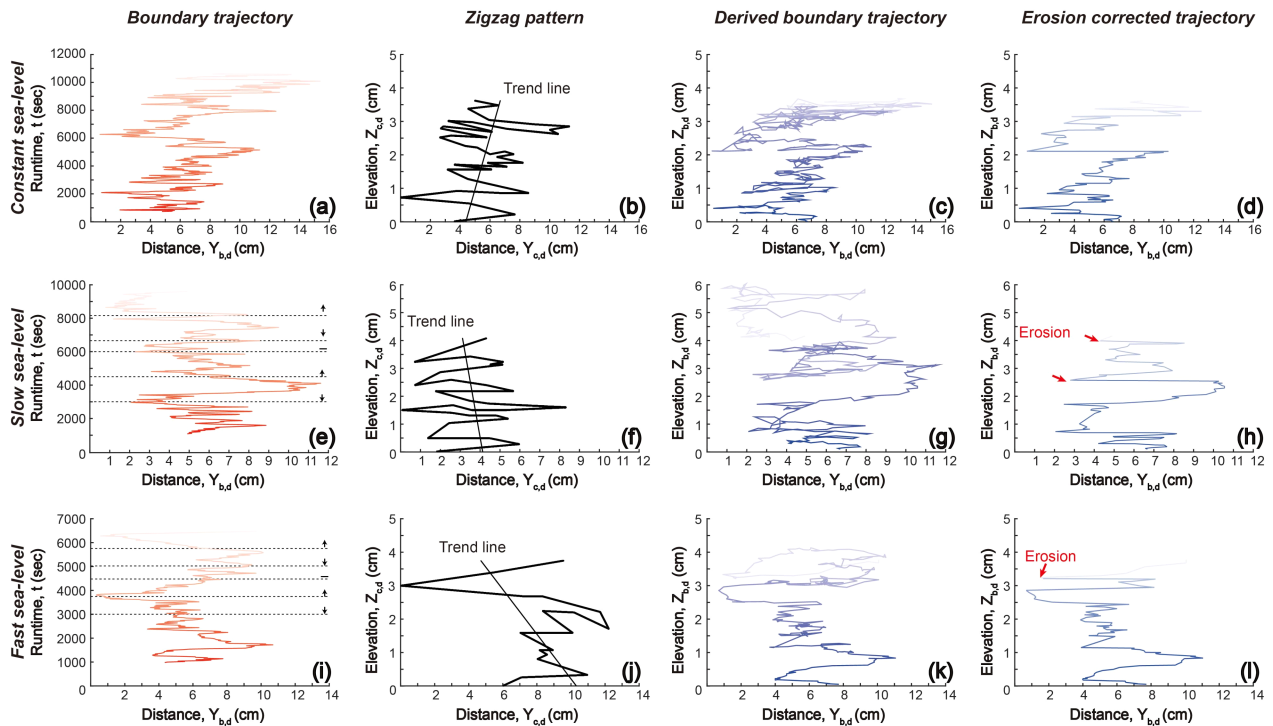


Fig. 10. Trajectories at distal part of all experiments. (a, e, i) Boundary trajectory. (b, f, j) Zigzag patterns in cross sections. (c, g, k) Model derived boundary trajectory through time. (d, h, l) Erosion corrected trajectory from c, g, and k.

Table 2. Model derived parameters.

Run	Cross-section						Model derived boundary trajectory							
	$Z_{c,p}$	$Z_{c,d}$	$\Delta Y_{c,p}$	$\Delta Y_{c,d}$	c_p	c_d	$S_{t,prox}$	$S_{t,dist}$	$Z_{b,p,fin}$	$Z_{b,d,fin}$	$Z_{b,p,max}$	$Z_{b,d,max}$	$\Delta Y_{b,p}$	$\Delta Y_{b,d}$
Constant	5.19	3.61	3.78	11.28	15.34	29.34	0.15	0.17	5.19	3.61	5.86	3.99	6.03	14.7
Slow	5.35	4.06	5.87	8.23	20.36	32.32	0.20	0.27	5.35	4.06	6.41	5.81	5.43	10.83
Fast	5.97	3.73	15.29	12.19	17.65	27.26	0.22	0.21	5.97	3.73	6.93	4.26	8.6	10.37

- $Z_{c,p}$ proximal elevation (cm)
- $Z_{c,d}$ distal elevation (cm)
- $\Delta Y_{c,p}$ lateral distance of the cross-section at proximal (cm)
- $\Delta Y_{c,d}$ lateral distance of the cross-section at distal (cm)
- c_p average distance between source-proximal cross section (-)
- c_d average distance between source-distal cross section (-)
- $S_{t,prox}$ proximal topset slope (-)
- $S_{t,dist}$ distal topset slope (-)
- $Z_{b,p,fin}$ final proximal elevation of model derived boundary trajectory (cm)
- $Z_{b,d,fin}$ final distal elevation of model derived boundary trajectory (cm)
- $Z_{b,p,max}$ maximum proximal elevation of model derived boundary trajectory (cm)
- $Z_{b,d,max}$ maximum distal elevation of model derived boundary trajectory (cm)
- $\Delta Y_{b,p}$ lateral distance of the proximal zigzag pattern in model derived boundary trajectory (cm)
- $\Delta Y_{b,d}$ lateral distance of the distal zigzag pattern in model derived boundary trajectory (cm)

실제 단면도의 두께(Z_c)와 동일한 값으로 최종 고도($Z_{b,fin}$)가 기록된다(표 2; 그림 9c, 9g, 9k, 10c, 10g, 10k). 반면 동일 위치에서 획득한 실제 단면도에서는 이러한 고도 감소 구간이 직관적이지 않고 최종 퇴적 기록만이 관찰되는 특징을 보인다(그림 9b, 9f, 9j, 10b, 10f, 10j). 또한 그래프의 색상은 시간의 순서를 나타내는데, 복원된 경계 데이터로부터 고도의 감소를 반영한 데이터(그림 9d, 9h, 9l, 10d, 10h, 10l)에서는 데이터 색상의 차이가 큰 지점이 뚜렷한 고도의 감소 시점임을 확인할 수 있었다.

정리하면, 복원된 경계 고도 데이터에서는 지층 두께의 증가와 이후 감소하는 모든 과정이 기록되는 반면, 실제 단면도에는 침식 이후 최종적으로 부정합면 하부에 보존된 지층만 기록된다. 이러한 차이는 퇴적 작용에 따른 층서 발달 과정이 층서 단면 기록에서는 누락되어 나타날 수 있음을 시사한다.

4. 토 의

4.1. 선상지-삼각주 경계의 좌우 이동양상

선상지-삼각주 경계는 두 기원지에서 공급되는 흐름과 퇴적물이 만나는 전이대를 따라 설정되며 그 위치는 시간에 따라 비선형적으로 변동하였다. 그 경계의 좌우 이동은 상류에서 어느 기원지가 상대적으로 더 우세하게 유량과 퇴적물을 공급하느냐에 의해 1차적으로 조절되었다. 특정 시점에서 선상지의 공급이 더 우세할 경우 경계는 삼각주

방향으로 이동하고(그림 5l), 반대로 삼각주의 공급이 우세할 경우에는 경계는 선상지 방향으로 이동하였다(그림 5h). 이렇게 시간과 공간적인 차이를 갖는 자생적인 프로세스에 따라 공급되는 퇴적물로 인해 그 이동의 방향이 결정되었다. 또한, 선상지-삼각주 경계를 따라 퇴적 작용이 활발할 경우 하도는 곡선 유로 형태를 주로 갖는 반면, 상류에서 둘의 공급이 비슷하거나 흐름 자체가 경계로 집중되지 않을 때에는 경계는 비교적 선형을 이루었다(그림 5b).

그러나 선상지-삼각주 경계는 세 실험 모두 근원부보다 말단부에서 훨씬 더 크게 좌우로 이동하였다(그림 7). 이 차이는 단순히 두 기원지의 공급 경쟁 때문 뿐만 아니라, 각 기원지에서 자생적 프로세스에 따라 발달한 하천들의 측면 이동이 하류부에서 더 빈번하게 발생하기 때문이다. 말단부는 상대적으로 경사가 완만하고 흐름이 확산되는 영역으로, 상류에 비해 지형이 하천의 흐름 방향에 미치는 영향이 크지 않으며, 말단부의 완만한 경사와 이에 따른 하천의 자유로운 측면이동은 경계면의 이동을 보다 쉽게 하기 때문에 같은 퇴적물 공급 경쟁에도 더 큰 이동 결과를 낳는다(Baumanis and Kim, 2018).

해수면 변동 속도 또한 이러한 공간적 패턴을 증폭하거나 완화하였다. 느린 해수면 변동 속도의 실험에서는 하천의 자생적 좌우 이동이 넓은 공간에서 느린 변동에 의한 비교적 약한 환경 변화를 경험하며 발현되어 근원부와 말단부 간 규모 차이가 해수면 변동이 없는 경우와 비슷하게 크게 나타났다. 반면 빠른 해수면 변동 속도의 실험에서는 의

부적 요인에 의해 좁은 공간에서 퇴적물이 더 빠르게 반응하여 경계 이동의 시차가 줄어들고 근원부와 말단부의 이동 규모 대비가 다소 축소되었다(그림 7). 이는 외부적 요인과 사면 조정의 자생적 주기 간 상호작용이 하천의 좌우 이동 공간을 조절한다는 기존 이론과도 부합한다(Kim and Paola, 2007; Jerolmack and Paola, 2010).

종합하면, 상류 지역의 경우, 두 기원지에서 기원한 두 수로가 만나 지형적 제한과 더불어 각 수로의 공급 우세성이 근원부에서의 상대적으로 작은 규모의 경계 이동을 발생시키는 반면 하류 지역의 경우, 각 기원지에서 유래한 수로들의 제한이 적고, 합류 하천 자체의 좌우 이동에 대한 지형적 제한이 적어 말단부의 경계 이동을 크게 유발하였다. 이러한 특성은 실제 자연계의 두 퇴적체가 중첩되어 있는 구간에서 층서 신호를 판별할 때, 경계에서의 상류 및 하류 위치가 같은 퇴적 환경임에도 서로 다른 규모의 기록을 보여줄 수 있는 가능성을 시사한다. 즉, 기원지에서 가까운 구간에서는 퇴적물 공급량에 의한 변화가, 먼 부분에서는 수로의 좌우 이동과 같은 하천 자체의 자생적인 요인이 더 뚜렷하게 기록되며, 해수면 변동 속도가 두 위치의 층서적 대비를 조절한다. 따라서 자연계 자료를 해석하고 연구지점을 선정하는 데 있어 기원지의 자생적 요인과 해수면 변동 속도는 중요한 기준이 될 수 있다.

4.2. 단면도 vs 해안선 기반으로 복원된 퇴적 고도를 반영한 경계 이동 패턴

평면도에서 추출한 경계의 시계열 데이터(그림 9a, 9e, 9i, 10a, 10e, 10i)에서 계산되어 복원된 경계 패턴(그림 9c, 9g, 9k, 10c, 10g, 10k)은 실제 퇴적 단면에서 추출한 지그재그 패턴(그림 9b, 9f, 9j, 10b, 10f, 10j)보다 미세한 스케일의 수직적 변동성까지 포함하고 있었다. 이는 경계의 복원된 고도가 각 시점별 해안선의 미세한 위치 변화까지 반영하여 계산된 값이기 때문이다. 즉 복원 값은 모든 순간에서 발생한 해안선의 미세한 전진과 후퇴 신호까지도 누락 없이 반영하기 때문에, 실제보다 훨씬 민감하게 반응한 결과로 해석할 수 있다. 반면 실제 단면에서 확인된 지그재그 패턴은 이러한 미세 변동성이 크게 완화된 형태로 나타났다(그림 9b, 9f, 9j, 10b, 10f, 10j). 이러한 현상은 해안선 변동 신호가 시스템 내의 여과 과정(filtering process)을 거치며 근원부와 말단부에 이르기까지 선별적으로 기록될 가능성을 시사한다(Jerolmack and Paola, 2010). 해안선의 미세한 전진과 후퇴는 시스템 내부의 자생적(autogenic) 과정에 의해 완충되어 즉각적인 퇴적과 침식 패턴으로 기록되지 않을 수 있다. 반면, 상대적으로 규모가 크고 지속적인 타생적(allogenic) 변화는 거리가 있는 상류까지 영향이 전파됨으로써, 층서 기록 상에 뚜렷한 지그재그 패턴을 남길

수 있다. 퇴적 시스템이 외부 환경 변화에 대해 보이는 이러한 자기조직적(self-organized) 완충작용은 이미 선행 연구를 통해 보고된 바 있다(Jerolmack and Paola, 2010; Hajek and Straub, 2017; Straub *et al.*, 2020).

복원된 경계의 데이터에서는 특정 시점에서 경계 고도가 하강하는 구간이 나타났으며, 이는 침식에 의한 것으로 해석할 수 있다(그림 9c, 9g, 9k, 10c, 10g, 10k). 그러나 이러한 하강 구간은 실제 단면에서는 기록으로 남지 않으며, 침식은 불연속면(discontinuity)으로 남게 된다. 이는 실제 단면이 모든 침식과 퇴적 과정을 기록하지 않고, 이후의 재퇴적에 의해 새로운 퇴적층이 침식면 상부에 축적되기 때문이다. 일례로 그림 9d, 9h, 9l 중 가장 뚜렷한 침식은 느린 해수면 변동일 때인 그림 9-h에서 확인할 수 있으며, 그 시점은 두 번째 해수면 하강이 발생했을 때임을 알 수 있다. 기존의 실험연구에서는 해수면이 빠르게 하강하는 경우 협소하고 깊은 침식 수로가 형성되어 침식이 크게 발생하는 반면, 해수면이 느리게 하강할 때는 침식이 넓은 범위에서 완만하게 형성되는 것으로 알려져 있다(Muto and Steel, 2004). 이에 반해 본 실험에서는 해수면 변동이 느릴 때 침식이 더 우세하게 발생한 것으로 해석된다(표 2; 그림 9g, 9h, 10g, 10h). 기존 연구에서의 빠른 해수면 하강 시 발생하는 깊은 침식은 좁은 범위에 국한되어 해당 위치의 최대 해안선을 기준으로 한다. 하지만 이번 실험에서 계산된 해안선은 퇴적체의 전범위의 평균값을 사용하여 경계 패턴을 복원하였기 때문에 넓은 범위의 침식이 발생한 느린 해수면 변동일 때 선상지와 삼각주 경계에서의 침식이 더 우세하게 발생한 것으로 보여진다.

이번 연구에서 선상지-삼각주 경계를 하나의 중심으로 추출하여 그래프를 구성하였기 때문에 경계가 실제로 가지는 면적 폭은 반영하지 못한다는 한계가 있다. 실제 선상지와 삼각주 경계는 단순한 선이 아니라 대부분 합류 하천을 이루며 면의 성격으로 존재하고, 시간이 지남에 따라 좌우로 이동하면서 그 폭도 변화하고, 이전에 쌓인 퇴적층을 침식할 수 있다. 이와 같이 경계의 폭과 형태에 따라 침식과 재퇴적의 공간적 분포가 크게 달라질 수 있지만, 그래프에서는 하나의 점만으로 축약되기 때문에 실제 단면도와 상이한 침식 신호는 경계의 면적 이동 과정에 따른 결과일 수 있다.

4.3. 삼각주 상부 경사도의 공간적 차이

퇴적 단면에서 보여지는 두께(Z_c)를 사용하여 삼각주 상부 경사도를 예측하였다(표 2). 해수면 변동이 없는 일정한 해수면 실험과 느린 해수면 변동 실험에서는 근원부와 말단부의 경사(S_i)가 각각 0.15와 0.17 및 0.20과 0.27로 서로 유사하게 유지되었으며, 이는 해수면이 정지되어 있는 조

건이나 해수면의 변동이 분지의 평형시간보다 느린 변화 조건이었을 때, 시스템이 안정적으로 충전된다는 이론적인 퇴적 양상과 부합한다(Muto and Steel, 2002). 두 실험에서 공통적으로 관찰된 근원부 대비 말단부의 가파른 경사는 삼각주 하류 방향으로 위로 볼록한(convex-up) 형태를 띠고 있음을 잘 보여준다. 이러한 퇴적 양상은 삼각주가 전진 퇴적보다 상대적으로 상향 퇴적이 우세하게 일어났음을 의미하며, 이는 해수면이 정체되거나 매우 느리게 변화하는 환경에서 삼각주가 충분한 시간을 갖고 안정적으로 발달했음을 반영하는 중요한 근거가 될 수 있다.

반면, 빠른 해수면 변동 실험에서는 근원부와 말단부 위치의 경사도가 각각 0.22와 0.21로 유사하게 측정되었으며, 이는 삼각주 하류 방향으로 아래로 볼록(concave-up)하거나 선형(linear)에 가까운 형태를 띠고 있음을 시사한다. 이러한 결과는 빠른 해수면 변화로 인해 경계부의 퇴적물이 원활하게 이동되었음을 의미하며, 삼각주가 상향 적층보다는 전진 퇴적하며 성장 했음을 반영한다.

4.4. 실험결과와 시후 분지의 비교

시후 분지는 북측 육상 기원과 서·남측 해저 사면을 따라 공급되는 다중 퇴적기원지가 존재하며, 분지 발달 단계에 따른 해양과 비해양 간 환경 변화에 따라 공간적으로 비대칭적이고 시간적으로 불연속적인 층서 패턴을 형성한다(Zhou *et al.*, 2024). 본 실험에서 확인된 경계의 좌우 진동과 침식 및 재퇴적에 따른 기록의 소멸은 Zhou *et al.* (2024)에서 보고한 시후 분지의 상호작용 구간에서 나타나는 복잡한 층서 구조와 공간적으로 비균질한 두께 분포가 형성될 수 있는 과정적 기작을 제시한다.

특히 경계 이동의 규모와 주기는 상호작용 구간 내 저류층의 두께와 측방 연속성을 결정하는 핵심 요인으로 작용한다. 경계 이동의 규모가 클수록 저류암과 덮개암이 광범위하게 교호하며 중첩될 가능성이 높아지는데, 이는 시후 분지에서 보고된 대규모 저장층과 실트와 점토질 덮개암이 발달하게 된 주요 기작으로 설명할 수 있다. 또한 경계 이동 주기가 길수록 개별 지그재그 단계마다 더 두꺼운 퇴적층이 충전 되어, 느린 해수면 변동 단계에서 두꺼운 저류암이 반복적으로 축적되는 시후 분지의 실제 관측과 유사한 경향도 보인다. 이러한 결과는 해수면 변동 속도에 따라 저장층의 두께와 연속성이 체계적으로 달라질 수 있으며, 열개 분지 내 다중 기원지 시스템에서 외부적 요인(해수면 변동)과 자생적 과정이 결합해 층서를 비선형적으로 조절한다는 최근 해석(Zhou *et al.*, 2024)과 일관성을 보인다. 따라서 시후 분지에 관한 기존의 관측 기반 해석에 층서 발달 과정을 수조 실험으로 규명하면서, 다중 퇴적 기원지 내 석유 시스템 발달 과정의 해석을 보완할 수 있다.

5. 결론

본 연구는 다중 퇴적 기원지 조건에서 해수면 변동 속도가 선상지-삼각주 시스템의 지형 및 층서 발달에 미치는 영향을 정량적으로 규명하였다. 실험 결과, 선상지-삼각주 경계의 이동은 상류에서의 상대적 공급 우세성이 방향을 결정하며, 말단부에서의 유로 이동 자유도가 그 규모를 증폭시키는 방식으로 조절되었다. 근원부에서는 두 기원지로부터의 퇴적물 공급량 변화에 민감하게 반응하며 경계 이동 방향을 바꾸었지만, 말단부에서는 지형적 구속이 약해 유로의 좌우 이동이 더욱 크게 나타나 경계 이동 규모가 확대되었다. 해수면 변동 속도 또한 경계 이동의 규모와 주기를 결정하는 중요한 요인으로 작용하였다. 느린 해수면 변동 조건에서는 경계가 넓은 범위에서 장주기 진동을 보이며 두꺼운 퇴적체가 반복적으로 중첩될 수 있는 환경을 형성한 반면, 빠른 해수면 변동 조건에서는 이동 폭이 제한적이고 침식·보존 불균형이 두드러졌다. 단면에서는 두 기원지 퇴적체가 교호하며 나타나는 지그재그 패턴이 말단부에서 특히 크게 나타났고, 이는 하류부에서 유로 재배치와 재작용이 집중되는 지형 동역학(morphodynamics)을 반영하는 것으로 해석된다.

물론 수조 실험만으로 자연계의 복잡한 지형 변동과 정확한 시공간적 규모를 묘사하는 데에는 한계가 있다. 그럼에도 불구하고 수조 실험은 자연계에서 확인할 수 있는 자생적인 프로세스와 이에 따른 층서적 결과까지도 확인할 수 있다는 장점을 가진다. 따라서 이번 수조 실험에서 확인한 종합적 결과는 시후 분지와 같이 다중 기원지와 다중 해수면 주기가 동시에 작용하는 자연 시스템에서 관찰되는 층서의 불연속성, 두께 변화, 상호작용 구역의 형성 메커니즘을 설명하는 데 중요한 실험적 근거를 제공하며, 향후 분지 내에서 유망 탐사 개발 타깃 구간을 선정하는 데에도 활용 가능한 기준을 제시한다.

감사의 글

본 연구는 한국석유공사 “남해대륙붕 종합기술평가” 사업과 산업통상부 유전개발사업출자의 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

- Baumanis, C. and Kim, W., 2018, Reverse migration of lithofacies boundaries and shoreline in response to sea-level rise. *Basin Research*, 30, 89-100.
- Blair, T.C. and Bilodeau, W.L., 1988, Development of tectonic cyclothem in rift, pull-apart, and foreland basins: sedimentary response to episodic tectonism. *Geology*, 16, 517-520.
- Connell, S.D., Kim, W., Paola, C. and Smith, G.A., 2012, Fluvial

- morphology and sediment-flux steering of axial-transverse boundaries in an experimental basin. *Journal of Sedimentary Research*, 82, 310-325.
- Doust, H. and Sumner, H.S., 2007, Petroleum systems in rift basins—a collective approach in Southeast Asian basins. *Petroleum Geoscience*, 13, 127-144.
- Edmonds, D., Chadwick, A.J., Lamb, M.P., Lorenzo-Trueba, J., Murray, B., Nardin, W., Salter, G. and Shaw, J.B., 2022, Morphodynamic modeling of river-dominated deltas: A review and future perspectives. *Treatise on Geomorphology*, 110-140.
- Fraser, S.I., Fraser, A.J., Lentini, M.R. and Gawthorpe, R.L., 2007, Return to rifts—the next wave: fresh insights into the petroleum geology of global rift basins. *Petroleum Geoscience*, 13, 99-104.
- Gawthorpe, R. and Leeder, M., 2000, Tectono-sedimentary evolution of active extensional basins. *Basin Research*, 12, 195-218.
- Hajek, E.A. and Straub, K.M., 2017, Autogenic sedimentation in clastic stratigraphy. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 45, 681-709.
- Jerolmack, D.J. and Paola, C., 2010, Shredding of environmental signals by sediment transport. *Geophysical Research Letters*, 37, L19401.
- Jiang, S., Li, S., Chen, X., Zhang, H. and Wang, G., 2016, Simulation of oil-gas migration and accumulation in the East China Sea Continental Shelf Basin: a case study from the Xihu Depression. *Geological Journal*, 51, 229-243.
- Kim, W., Connell, S.D., Steel, E., Smith, G.A. and Paola, C., 2011, Mass-balance control on the interaction of axial and transverse channel systems. *Geology*, 39, 611-614.
- Kim, W., Dai, A., Muto, T. and Parker, G., 2009, Delta progradation driven by an advancing sediment source: Coupled theory and experiment describing the evolution of elongated deltas. *Water Resources Research*, 45, W06428.
- Kim, W. and Paola, C., 2007, Long-period cyclic sedimentation with constant tectonic forcing in an experimental relay ramp. *Geology*, 35, 331-334.
- Kim, W., Paola, C., Swenson, J.B. and Voller, V.R., 2006, Shoreline response to autogenic processes of sediment storage and release in the fluvial system. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 111, F04013.
- Leeder, M. and Gawthorpe, R., 1987, Sedimentary models for extensional tilt-block/half-graben basins. Geological Society, London, Special Publications, 28, 139-152.
- Li, J., Qin, D., Yin, W., Wang, X., Dai, Y., Shi, H. and Fan, C., 2023, The Origin of Overpressure in the Pinghu Tectonic Zone of Xihu Depression and Its Relationship with Hydrocarbon Accumulation. *Energies*, 16, 8055.
- Magoon, L.B. and Dow, W.G., 1994, The petroleum system - From source to trap. AAPG Memoir 60, 655 p.
- Muto, T. and Steel, R.J., 2002, In defense of shelf-edge delta development during falling and lowstand of relative sea level. *The Journal of Geology*, 110, 421-436.
- Muto, T. and Steel, R.J., 2004, Autogenic response of fluvial deltas to steady sea-level fall: Implications from flume-tank experiments. *Geology*, 32, 401-404.
- Muto, T., Steel, R.J. and Swenson, J.B., 2007, Autostratigraphy: a framework norm for genetic stratigraphy. *Journal of Sedimentary Research*, 77, 2-12.
- Paola, C., Straub, K., Mohrig, D. and Reinhardt, L., 2009, The “unreasonable effectiveness” of stratigraphic and geomorphic experiments. *Earth-Science Reviews*, 97, 1-43.
- Powell, E.J., Kim, W. and Muto, T., 2012, Varying discharge controls on timescales of autogenic storage and release processes in fluvio-deltaic environments: Tank experiments. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117, F02011.
- Prosser, S., 1993, Rift-related linked depositional systems and their seismic expression. Geological Society, London, Special Publications, 71, 35-66.
- Shin, H., Kim, W., Lee, H., Johnson, J.P. and Paola, C., 2024, Fossilized autogenic responses of grain-size transition to sediment supply and water discharge: Alluvial fan experiments. *Sedimentology*, 71, 1270-1290.
- Son, B.K. and Lee, H.Y., 2018, 3-D petroleum system modeling of the Jeju Basin, offshore southern Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 54, 587-603 (in Korean with English abstract).
- Straub, K.M., Duller, R.A., Foreman, B.Z. and Hajek, E.A., 2020, Buffered, incomplete, and shredded: The challenges of reading an imperfect stratigraphic record. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 125, e2019JF005079.
- Wang, R., Kim, W., Colomera, L., Mountney, N.P., Lee, Y. and Lee, J., 2024, Autogenic evolution of valley-confined deltas during sea-level rise: Insights from numerical and physical modelling. *Sedimentology*, 71, 1389-1418.
- Wang, Y., Chen, J., Pang, X., Zhang, T., Zhu, X. and Liu, K., 2022, Hydrocarbon generation and expulsion of tertiary coaly source rocks and hydrocarbon accumulation in the Xihu Sag of the East China Sea Shelf Basin, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 229, 105170.
- Weilin, Z., Kai, Z., Xiaowei, F., Chunfeng, C., Minqiang, Z. and Shunli, G., 2019, The formation and evolution of the East China Sea Shelf Basin: A new view. *Earth-Science Reviews*, 190, 89-111.
- Xu, H., George, S.C., Hou, D., Cao, B. and Chen, X., 2020, Petroleum sources in the Xihu Depression, East China Sea: Evidence from stable carbon isotopic compositions of individual n-alkanes and isoprenoids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 190, 107073.
- Ye, J., Qing, H., Bend, S.L. and Gu, H., 2007, Petroleum systems in the offshore Xihu Basin on the continental shelf of the East China Sea. *AAPG Bulletin*, 91, 1167-1188.
- Yu, L., Li, Q. and Straub, K.M., 2017, Scaling the response of deltas to relative-sea-level cycles by autogenic space and time scales: a laboratory study. *Journal of Sedimentary Research*, 87, 817-837.
- Zhang, J., Lu, Y., Krijgsman, W., Liu, J., Li, X., Du, X., Wang, C., Liu, X., Feng, L. and Wei, W., 2018, Source to sink transport in the Oligocene Huagang Formation of the Xihu Depression, East China Sea shelf basin. *Marine and Petroleum Geology*, 98, 733-745.
- Zhou, Z., Zhu, H., Liu, Q. and Qin, L., 2024, The Segmented Multi-Source Sediment Routing System on the Hangingwall Dipslope of the Xihu Depression, East China Sea Shelf Basin: Insights From Palaeogeomorphology, U-Pb Ages and Heavy Minerals. *Basin Research*, 36, e70007.