

동해 울릉분지 북서해역에 분포하는 해저협곡의 탄성과 층서와 발달사

김지현¹ · 강년건² · 이보연² · 박용준² · 유동근^{1,2*}

¹과학기술연합대학원대학교 석유자원공학과

²한국지질자원연구원 석유해저연구본부

Seismic Stratigraphy and Evolutionary History of Submarine Canyon in the Northwestern Part of the Ulleung Basin, East Sea

Ji Hyun Kim¹, Nyeon Keon Kang², Bo Yeon Yi², Yong Joon Park², and Dong Geun Yoo^{1,2*}

¹Department of Petroleum Resources Technology, Korea University of Science and Technology (UST),
Daejeon 305-350, Korea

²Petroleum and Marine Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM),
Daejeon 305-350, Korea

요약: 동해 울릉분지 북서해역에 위치한 해저협곡의 층서 및 발달사를 연구하기 위해 다중빔 및 탄성과 자료를 분석하였다. 탄성과 자료 해석에 의하면 연구지역의 퇴적층은 침식 부정합면에 의해 분리되는 4개의 층서단위로 구분된다. 대륙사면에 발달한 퇴적층은 사면붕락을 포함하는 평행층리 음향상이 우세한 반면, 분지로 향하면서 평행층리 음향상과 캐오틱 음향상을 보이는 퇴적층이 분포한다. 전반적으로 사면에서는 얇은 층후를 보이며, 사면기저부와 분지 평원에서는 두꺼운 층후로 발달한다. 탄성과 특징과 분포에 의하면 각 층서단위의 퇴적은 해저협곡의 발달사와 잘 대비된다. 음향기반 암 상부에 위치하는 층서단위 1은 사면에서는 얇은 층후로 발달하며 분지로 향하면서 층후는 점차 증가한다. 층서단위 2는 다른 층서단위에 비해 사면에서 두꺼운 층후를 보이며 단층과 관련된 사면붕락이 발생한다. 사면붕락에 의해 유발된 질량류 퇴적체는 사면기저부에 주로 퇴적되며, 이 퇴적체는 심해 선상지로 해석된다. 퇴적물의 퇴적보다는 침식작용이 우세하여 협곡의 폭과 깊이는 증가한다. 층서단위 3은 해저협곡 주변부의 사면에서 얇은 층후를 보이며, 분지로 향하면서 퇴적두께는 점차 증가한다. 층서단위 4는 사면에서 슬라이드/슬럼프를 포함하는 얇은 층후를 보이며, 사면기저부에는 두꺼운 층후로 퇴적되는 심해 선상지가 발달한다. 해저협곡 주변부에서의 사면붕락과 우세한 침식작용에 의해 해저협곡의 폭과 깊이는 증가한다. 결과적으로 연구지역의 해저협곡과 연계된 층서단위의 형성은 사면붕락에 의한 퇴적물 공급량, 광역적인 구조운동, 해수면 변동에 의해 크게 조절되었다.

주요어: 울릉분지 북서해역, 해저협곡, 사면붕락, 해수면 변동

Abstract: Multibeam and seismic data in the northwestern part of the Ulleung Basin were analyzed to study stratigraphy and evolutionary history of submarine canyon. A detailed analysis reveals that the sedimentary sequences in this area consist of four stratigraphic units separated by erosional unconformities. On the continental slope, these units are dominated by well-stratified facies with some slope failures, whereas these units show well-stratified and chaotic facies toward the basin floor. Generally, the sediment thickness is relatively thin on the slope, whereas thick sediment accumulation occurs on the base of slope and basin floor. Based on seismic characteristics and distribution, the deposition of each units are well correlated with the evolutionary history of the submarine canyon. Unit 1 directly overlying the acoustic basement has thin sediment layer on the slope, whereas its thickness gradually increase toward the basin floor. Compared to other units, Unit 2 is relatively thick accumulations on the slope and contains some slope failures related to faults systems. The mass transport sediments due to slope failures, mainly deposited on the base of slope as a submarine fan. The width and depth of submarine canyon increase due to dominant of the erosional process rather than the sediment deposition. Unit 3 is thin accumulation on the slope around the submarine canyon. Toward the basin floor, its thickness gradually increases. Unit 4 is characterized by thin layers including slides and slumps on the slope, whereas it formed thick accumulations at the base of slope as a submarine fan. The increase in the width and depth of submarine canyon results from the dominant of the

Received: 13 June 2017; Revised: 23 June 2017; Accepted: 27 June 2017

*Corresponding author

E-mail: dgyoo@kigam.re.kr

Address: Gwahang-no 124, Yuseong-gu, Daejeon, 305-350, Korea

©2017, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

erosional process and slope failures around the submarine canyon. Consequently, the formation of sedimentary units combined with the development of submarine canyon in this area is largely controlled by the amounts of sediment supply originated from slope failures, regional tectonic effects and sea-level fluctuations.

Keywords: northwestern Ulleung Basin, submarine canyon, slope failure, sea level fluctuations

서 론

전 세계 대륙주변부에서 흔히 관찰되는 해저협곡(submarine canyon)은 대륙사면을 가로질러 심해저 평원까지 연결되어 나타나는 U자 혹은 V자형의 골짜기로(Shepard, 1981; Pratson *et al.*, 2007), 대륙붕에서 심해저 평원까지 중력류에 의해 다량의 퇴적물을 이동시키는 통로이다(Shepard, 1981). 해저협곡은 퇴적물 공급이 많은 지역(Gong *et al.*, 2011; He *et al.*, 2013)이나 능동형 대륙주변부에서 대규모로 발달한다(Mountjoy *et al.*, 2009; Iacono *et al.*, 2011; Ratzov *et al.*, 2012). 해저협곡의 형성과 발달은 지형 및 지질학적 조건에 따라 복합적인 요인에 의해 형성되고 진화하며, 대부분 수십만 년 이상 침식과 퇴적을 반복하며 발달하는 것으로 알려져 있다(Shepard, 1981; Harris and Whiteway, 2011).

해저협곡을 대상으로 한 연구는 형성기원과 발달 과정을 규명하고자하는 퇴적학적 분야에서 많이 수행되었다(Twichell and Roberts, 1982; Farre *et al.*, 1983; Pratson *et al.*, 1994; Pratson and Coakley, 1996; Straub and Mohrig, 2009; Jobe *et al.*, 2011; Iacono *et al.*, 2014; Almeida *et al.*, 2015). 해저협곡은 발달 위치 및 형태학적 특징에 따라 대륙붕 만입 협곡(shelf-indenting canyon)과 사면 한정 협곡(slope-confined canyon)으로 구분된다(Twichell and Roberts, 1982; Farre *et al.*, 1983; Pratson *et al.*, 1994; Pratson and Coakley, 1996; Pratson *et al.*, 2007; Iacono *et al.*, 2014). 대륙붕 만입 협곡은 대륙붕에서부터 대륙붕단을 가로지르며 발달하고 저해수면 시기에 대륙붕 지역에 퇴적된 사질 퇴적물이 중력류에 의해 이동하여 발달하거나(Popescu *et al.*, 2004), 하성 시스템과 연계되어 형성된다(Vail, 1987; Posamentier and Vail, 1988). 이러한 협곡은 육상으로부터 공급된 다량의 사질 퇴적물이 이동하면서 발생하는 침식작용이 우세한 환경에서 발달하고 퇴적물 공급이 많거나 지구조 운동이 활발한 대륙주변부에서 주로 관찰된다(Harris and Whiteway, 2011). 이 협곡은 형태학적으로 경사가 완만하고 총 길이가 길며, 중심축은 사행하는 특징을 가진다(Harris and Whiteway, 2011; Iacono *et al.*, 2014). 사면 한정 협곡은 대륙사면에 한정되어 발달하는 해저협곡으로 사면붕락의 후퇴작용(retrogressive slope failure)에 의해 주로 형성된다(Twichell and Roberts, 1982; Farre *et al.*, 1983; Pratson and Coakley, 1996). 이러한 협곡은 대륙붕으로부터 이동되는 육상기원 퇴적물의 공급이 적은 지역에서 발달하는 것으로 알려져 있으며, 내부는 질량류 퇴적체(mass transport deposits)

또는 반원양성 퇴적물과 같은 이질 퇴적물이 주로 퇴적된다(Li *et al.*, 2015; Zhou *et al.*, 2015). 이 협곡의 발달은 하부 지형 및 지구조 운동에 의해 조절된다고 알려져 있다. 사면 한정 협곡은 수동형 및 능동형의 모든 대륙주변부의 대륙사면에서 관찰되며(Harris and Whiteway, 2011), 형태학적 특징은 경사가 가파르며, 총 길이가 짧고 중심축은 직선 형태이다(Harris and Whiteway, 2011; Rise *et al.*, 2013; Iacono *et al.*, 2014).

울릉분지에서는 해저협곡의 발달과 관련하여 남서대륙주변부에서 일부 연구되었으며(Park *et al.*, 2015), 해저협곡의 형성과 발달에 대한 연구는 매우 미흡하다. 울릉분지 대륙주변부에서는 협곡의 형성 원인 중 하나인 사면붕락과 질량류 퇴적작용에 대한 많은 연구가 수행되어 왔다(Lee *et al.*, 1991; Lee *et al.*, 1996; Chough *et al.*, 1997; Lee and Suk, 1998; Lee *et al.*, 1999; Lee *et al.*, 2014; Cukur *et al.*, 2016). Lee *et al.* (2014)는 울릉분지 대륙주변부에 발달하는 사면붕락의 형태를 연구하였다. 이 연구에 의하면 서쪽 대륙주변부에는 다수의 소규모 침식수로(gully)가 관찰되고, 연구지역 중앙부에 위치한 대규모의 침식수로의 하부에는 심해선상지(deep-sea fan)가 발달한다고 보고된 바 있다. Cukur *et al.* (2016)는 사면 안정성 분석을 통해 울릉분지 서쪽사면의 사면붕락을 유발하는 요인은 해수면 하강에 의한 퇴적층 내에 발생하는 과잉 공극압 조건과 지진활동이라고 제시하였다. 기존에 수행된 연구들은 현생퇴적물을 대상으로 제한되어 연구가 수행되었고, 해저협곡과 질량류 퇴적과정의 연계성은 부족하다.

따라서 본 연구에서는 2차원 탄성과 및 다중빔 자료를 활용하여 울릉분지 북서해역에서 발달한 현생 해저협곡의 형태를 알아보고 협곡 주변부의 탄성과 층서와 고기에 발달한 협곡의 형태 분석을 실시하여 협곡의 층서와 발달사에 대해 밝히고자 한다.

연구지역

동해는 동아시아 대륙과 일본 열도(Japan Arc) 사이에 위치한 반 폐쇄성 주변해(semi-enclosed marginal sea)로 심부 퇴적분지인 울릉분지(Ulleung Basin), 일본분지(Japan Basin), 야마토 분지(Yamato Basin)로 구성되며, 이들은 지형학적 고지대인 한국대지(Korea Plateau), 오키 뱅크(Oki Bank), 야마토 해령(Yamato Ridge)에 의해서 분리된다. 울릉분지는 동해의 남서부에 위치하는 오목한 형태의 퇴적분지로 북쪽으로는 한국대지와 서쪽과 남쪽으로는 각각 오키 뱅크와 일본 열도로

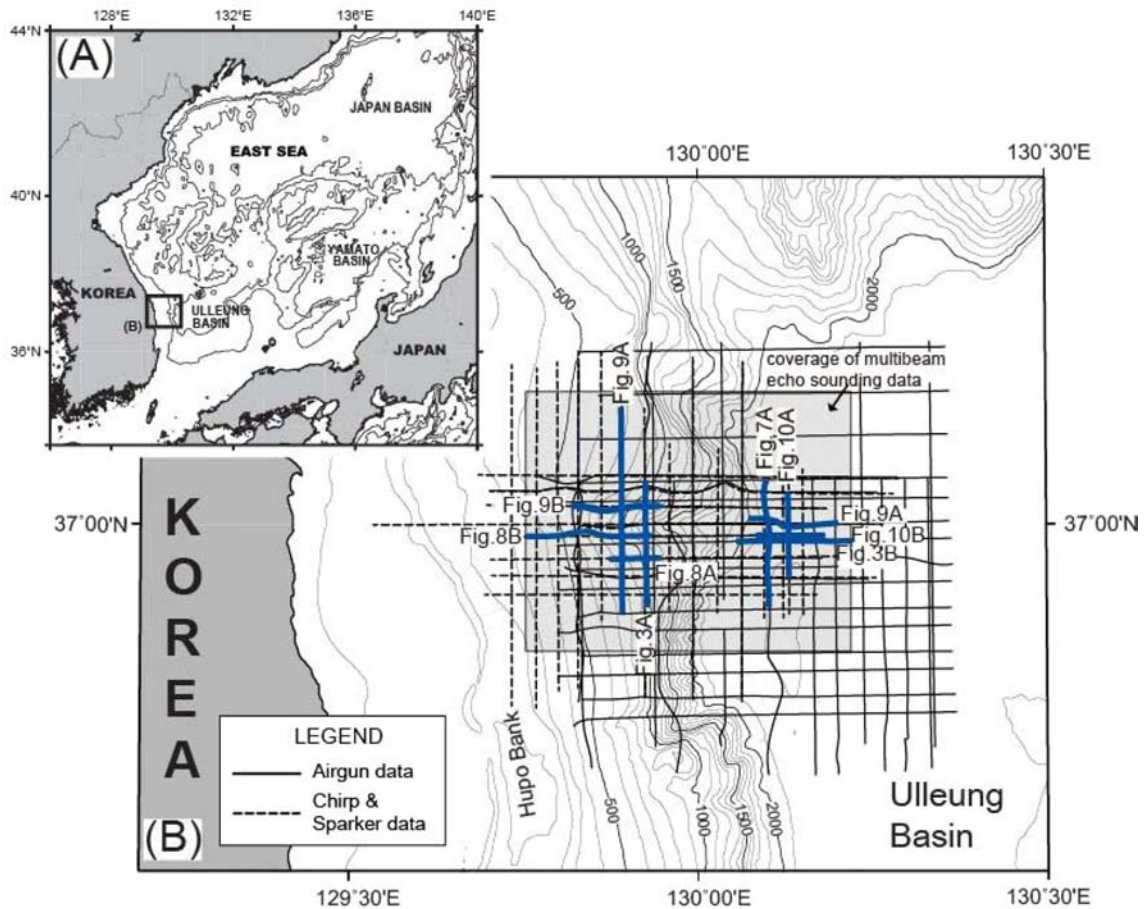


Fig. 1. (A) Physiographic map of the East Sea (contour interval is 1 km). Inserted box indicates the study area shown in Fig. 1(B). (B) Bathymetry map (contours in meters) of the northwestern area in the Ulleung Basin and the track lines of air-gun, sparker, chirp seismic survey lines. Gray box indicates the coverage of multibeam echo sounding data. Heavy lines denote the selected profiles shown in Fig. 3 and Figs. 7 ~ 10.

둘러싸여 있다(Fig. 1(A); Yoon and Chough, 1995; Lee and Suk, 1998; Chough *et al.*, 2000).

연구지역은 울릉분지 서쪽 대륙주변부로 해안선과 평행하게 남북 방향으로 발달하며 남쪽 대륙주변부에 비해 좁은 대륙붕 (< 20 km)과 급경사의 대륙사면(4 ~ 10°)으로 구성된다(Yoon and Chough, 1995; Chough *et al.*, 2000). 울릉분지 서쪽 대륙주변부는 대륙붕, 대륙사면 그리고 분지 평원으로 구성되며 해저지형의 급격한 변화를 보인다. 연구지역의 상부 대륙사면 경사는 2° 내외이며, 중부 및 하부 대륙사면으로 갈수록 수심이 점차 증가하여 경사는 최대 11°에 이른다. 가파른 경사의 대륙사면을 지나 수심 1,500 ~ 2,100 m에서는 비교적 평탄한 분지 평원으로 이어진다(Fig. 1(B); Chough *et al.*, 2000; Yoon *et al.*, 2014).

서쪽 대륙주변부는 큰 하성 시스템은 발달하지 않은 지역으로 작은 하천이 존재한다. 연구지역의 대륙붕은 남북으로 약 140 km에 걸쳐 후포단층이 발달하고, 길이 약 80 km, 폭 1 ~ 20 km의 후포뱅크가 위치한다(Yoon and Chough, 1995;

Chough *et al.*, 2000; Yoon *et al.*, 2014). 또한, 해안선과 평행하게 위치하는 후포뱅크는 한반도로부터 유입되는 퇴적물을 차단하기 때문에 이 지역의 퇴적층은 주로 해양성 퇴적물로 구성된다(Yoon and Chough, 1995). 가파른 경사를 갖는 중부 및 하부 사면은 큰 규모의 사면붕락 흔적이 존재하며, 이와 관련된 질량류 퇴적체가 분포한다(Chough *et al.*, 1992; Chough *et al.*, 1997).

ODP Leg 127/128 결과에 의하면 동해의 지구조적 진화는 올리고세 중기(32 Ma)에 일본분지 동쪽에서 지각의 얇아짐에 의해 시작되었고, 이후 올리고세 말(28 Ma)에 열개와 해저 확장이 진행되었다. 울릉분지 열림시기 동안 작용한 신장력은 중기 마이오세에 일본 열도와 필리핀 판의 충돌로 인해 압축력으로 전환된다(Ingle, 1992; Jolivet and Tamaki, 1992; Tamaki *et al.*, 1992). 연구지역은 후기 마이오세에서 제 4기 동안 발달된 퇴적층으로 구성된다. 울릉분지 서쪽 대륙주변부에 발달한 후포단층은 전기 마이오세 시기의 신장성 주향이동단층 운동을 야기시켰다(Yoon and Chough, 1995; Yoon *et al.*, 2014).

후기 마이오세에는 점진적인 침강에 의해 사면지역에 두꺼운 퇴적층이 퇴적된다(Yoon and Chough, 1993). 이후 후기 마이오세 말에 대륙주변부의 융기가 일어나 한반도로부터 유입된 퇴적물이 사면지역으로 퇴적되고, 플라이오세에는 후포뱅크가 발달한다(Yoon and Chough, 1995; Yoon *et al.*, 2014).

연구자료 및 연구방법

본 연구에 사용된 자료는 한국지질자원연구원에서 탐해 2호를 이용해 취득된 다중채널 2차원 탄성과 자료(2D seismic data), 스파커 자료(sparker data), 고해상도 칩 자료(chirp data) 그리고 다중빔 음향 측심 자료(multibeam echo sounding data)이다(Fig. 1(B)).

2차원 탄성과 탐사에 이용된 장비는 항측시스템, 기록시스템, 스트리머, 음원 등으로 구성되며 스트리머는 156채널(1.95 km)을 사용하였고 음원그룹은 1,035 in³ 용량의 에어건 배열 1개를 수심 5 m 깊이에서 전인하면서 25 m 마다 등 간격으로 발파하였다(KIGAM, 2015).

해저협곡 내에 분포하는 퇴적층의 정밀 분석은 스파커 자료 및 천부 지층 탐사 자료를 이용하였다. 본 연구에서 사용된 스파커 음원은 SIC (Service and Instruments of Geophysique)사가 제작한 기기로 1,000 ~ 6,000 Joule 범위 내에서 음원 에너지 가변이 가능하다. 수신기는 Geo Marine Survey Systems사의 Geo-Sens Mini-Streamer가 이용되었다. 스파커 음원 및 스트리머는 속도 약 4.2 ~ 4.5 knot로 5 s 간격 등 시간 발파를 실시하였다. 칩 자료는 스파커 자료와 동시에 취득되었다. 다중빔 음향 측심 자료는 해저면의 형태를 고해상으로 구현 가능한 자료로서 약 1,600 km²를 이용하였다. 다중빔 음향측심기는 Kongsberg사의 EM 302를 사용하였고 30 kHz의 주파수를 갖는 다중빔을 발생시켜 수심 10 ~ 7,000 m 사이 해역의 측량이 가능하다.

탄성과 단면해석은 Mitchum *et al.* (1977)에 기초하여 탄성과 반사 특성에 따라 기반암 및 퇴적층의 경계부를 인지하여 해석하였다. 경계부에 의해 설정된 각 층서단위는 내부에 나타나는 음향상 분석을 통해 퇴적환경에 대한 정보를 얻을 수 있다. 각 층서단위는 시간구조도(time-structure map)와 등시층후도(isochron map)를 작성하여 분석하였으며, 이들은 하부 경계면의 형태와 각 층서단위의 퇴적분포에 대한 정보를 제공한다.

연구결과

해저지형 특징

본 연구해역은 울릉분지의 북서쪽에 위치하며 수심 500 ~ 2,200 m에 분포를 보인다(Fig. 2). 다중빔 음향 측심 자료를 이용한 해저지형 분석 결과에 의하면 연구해역의 중앙부는 동서 방향으로 해저협곡이 발달하고 연구해역의 남측과 북측에는

다수의 소규모 걸리(gully)가 관찰된다(Fig. 2(A)). 협곡의 주변부에서는 경사가 급격히 변하는 최소 3개의 봉락단애(headwall scarp)가 수심 600 ~ 850 m에 분포하며 돔형(amphitheater)이나 아치형(arcuate) 형태로 나타난다(Fig. 2(B); Table 1). 이러한 봉락단애는 평면상에서 연속적인 급경사면을 가지는데 따라 구분하였다. 봉락단애는 질량류 퇴적체의 상부사면 방향에 위치하는 급경사면 또는 경계면으로 정의되며, 평면상에서 연속적인 급경사면과 하나 이상의 아치형의 형태를 보이며 발달한다고 알려져 있다(Bull *et al.*, 2009).

해저협곡의 규모 및 형태는 협곡의 종단면 및 횡단면상의 형태를 통해 확인하였다(Fig. 2(B) and 2(C)). 종단면상 분석 결과에 의하면 협곡이 발달하지 않은 사면인 공해사면(open slope)에서는 종단면상이 볼록한(convex)한 형태를 보이고 해저협곡 발달 지역에서는 오목한(concave) 형태를 보인다(Fig.

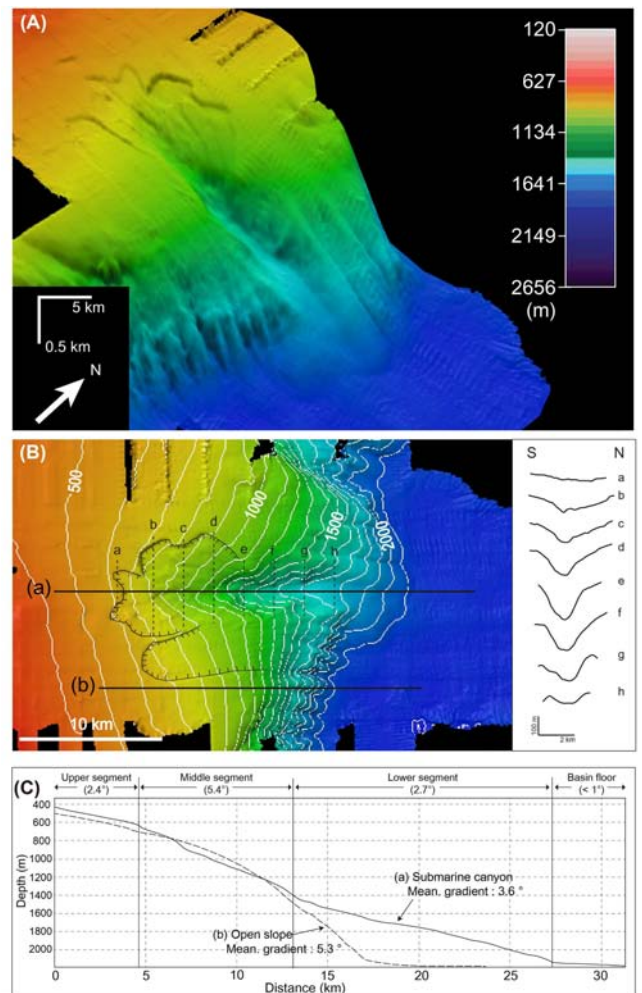


Fig. 2. (A) Three dimensional high-resolution bathymetric relief image of the northwestern area in the Ulleung Basin. (B) Plan view of the bathymetric relief image with cross-sectional profiles. (C) Longitudinal profiles showing the slope gradient (a) in the submarine canyon and (b) in the open slope (for location, see Fig. 2(B)).

Table 1. Main morphologic and sedimentary features of the modern submarine canyon in the study area.

Along-axis profile	Headscarp shape	Plain view path trajectory	Headscarp position	Type of evolution
concave-upward	amphitheater	straight	slope-confined	bottom-up

2(B) and 2(C)). 해저협곡이 발달한 사면의 종단면은 평균 경사가 3.6°이며 공해 사면은 평균 경사 5.3°로 협곡이 발달한 사면이 공해 사면에서의 경사보다 완만하게 나타난다. 연구해역에 발달한 해저협곡의 종단면상은 지형구배에 따라 4개의 구역으로 나뉜다(Fig. 2(B) and 2(C)). 봉락단에 상부에 위치한 상부 부분(upper segment)은 경사가 2.4°로 완만하고 평탄한 지형을 보이며, 수심 600 m까지의 해역에 해당한다. 중부 부분(middle segment)은 5.4°로 가파른 경사를 보이고 수심 600 ~ 1,400 m에 위치한다. 중부 부분에 주로 나타나는 봉락단에는 높이가 60 ~ 88 m이며 경사는 7 ~ 15°의 분포를 보인다. 봉락단의 높이와 경사는 북쪽 사면에서 최대값을 보인다. 하부 부분(lower segment)은 경사 2.7°의 완만한 경사를 보이고 수심 1,400 ~ 2,100 m에 위치한다. 하부 부분은 불룩한 지형을 보이며 완만한 사면을 지나 매우 평탄한 지역인 분지 평원으로 이어지는 특징을 보인다(Fig. 2(C)).

해저협곡의 횡단면상 도시 결과에 의하면 a ~ d 구간에서는 U자형, e ~ h는 V자 형태로 나타난다. 전반적으로 사면에서

분지 평원으로 향하면서 U자형에서 V자형의 형태 변화를 보이며, 협곡의 깊이는 깊어지고 폭은 좁아지는 양상을 보인다(Fig. 2(B)). 연구해역에 발달하는 해저협곡의 폭은 2.5 ~ 7.7 km, 최대 높이 360.0 m, 길이는 총 14.7 km를 보인다. 또한, 평면상에서 협곡의 중심축은 직선 형태로 나타난다. 협곡 측면부(sidewall)의 경사는 최대 17°로 두부(headwall)에서 나타나는 봉락단보다 가파른 경사를 보인다(Fig. 2(C)).

탄성파 층서

연구해역에 분포하는 퇴적층은 침식 부정합면에 의해 분리되는 4개의 층서단위로 구성된다(Fig. 3). 각 층의 경계면은 하부에서부터 상부로 H1(음향기반암), H2, H3, H4로 명명하였

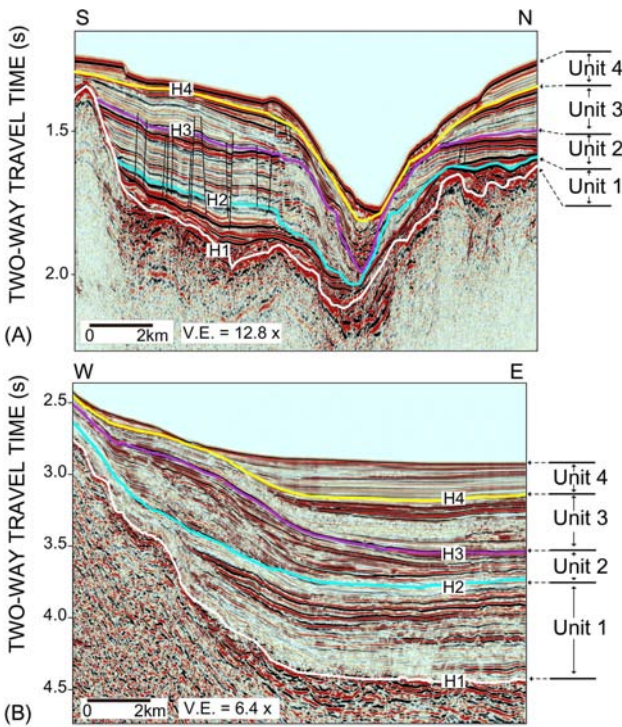


Fig. 3. Selected air-gun seismic profiles near the submarine canyon showing four stratigraphic units (1 ~ 4 in ascending order) (for location, see Fig. 1). (A) N-S direction seismic profile representing the slope region. Vertical black line indicates the fault. (B) E-W direction seismic profile showing the basin floor.

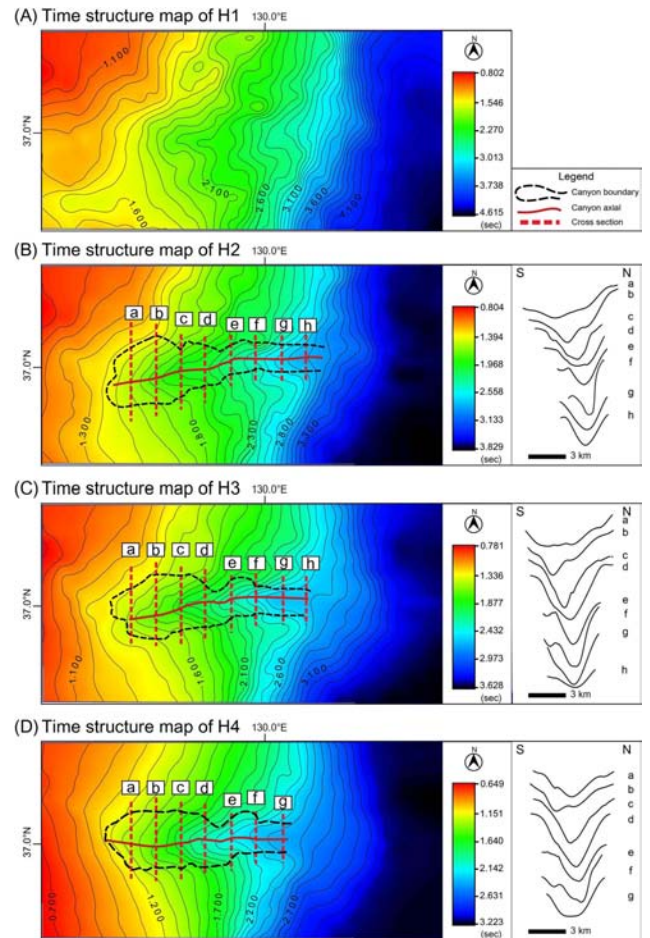


Fig. 4. Time-structure map of each reflector (H1 ~ H4) and cross-sectional profiles. Contour interval is 0.1 seconds. (A) Time-structure map of H1. (B) Time-structure map of H2. (C) Time-structure map of H3. (D) Time-structure map of H4.

으며 각각의 층서단위는 층서단위 1(Unit 1), 층서단위 2(Unit 2), 층서단위 3(Unit 3), 층서단위 4(Unit 4)로 명명하였다(Fig. 3). 각 층서 경계면의 연대는 H1에서 초기 마이오세 말, H2는 후기 마이오세, H3는 후기 마이오세 말, H4는 플라이오-플라이스토세 경계에 대비된다(Lee and Kim, 2002; Yi *et al.*, 2012).

층서단위 1은 불규칙한 음향기반암을 피복하는 층서단위로 음향기반암 직상부에 위치한다(Fig. 3). 탄성과 단면상에서 층서단위 1의 내부 음향상은 두개로 구분된다. 하부는 강한 진폭의 연속성이 양호한 평행층리(well-stratified) 음향상과 부분적으로 카오틱한(chaotic) 음향상이 협재되어 나타나며 상부는 약한 진폭의 연속성이 양호한 평행층리 음향상이 나타난다

(Fig. 3(A)). 내부 음향상은 사면에서 분지로 향하면서 카오틱한 음향상이 우세하게 나타난다(Fig. 3(B)). 이 층서단위는 사면지역을 얇게 피복하는 형태로 나타나며 분지쪽으로 향하면서 급격하게 층후가 증가하는 썸기(wedge)형태로 발달한다(Fig. 3(B)). 시간구조도 분석 결과, 층서단위 1은 연구해역의 서쪽에서 동쪽으로 향하면서 경사가 급격하게 변화하는 경향을 보이며(Figs. 4(A) and 5(A)), 연구지역 중앙부에는 동서 방향으로 발달한 골(trough)이 관찰된다(Fig. 4(A)). 등시층후도 분석 결과에 의하면 사면 전역에 걸쳐 퇴적층은 박층으로 분포하며 남쪽의 저지대를 왕복주시(two-way travel time; TWT) 160 ~ 360 ms 두께의 퇴적층이 피복하고 있다(Fig. 6(A)). 급경사의 하부사면을 지나 분지에서는 500 ms 이상의 두께로 분

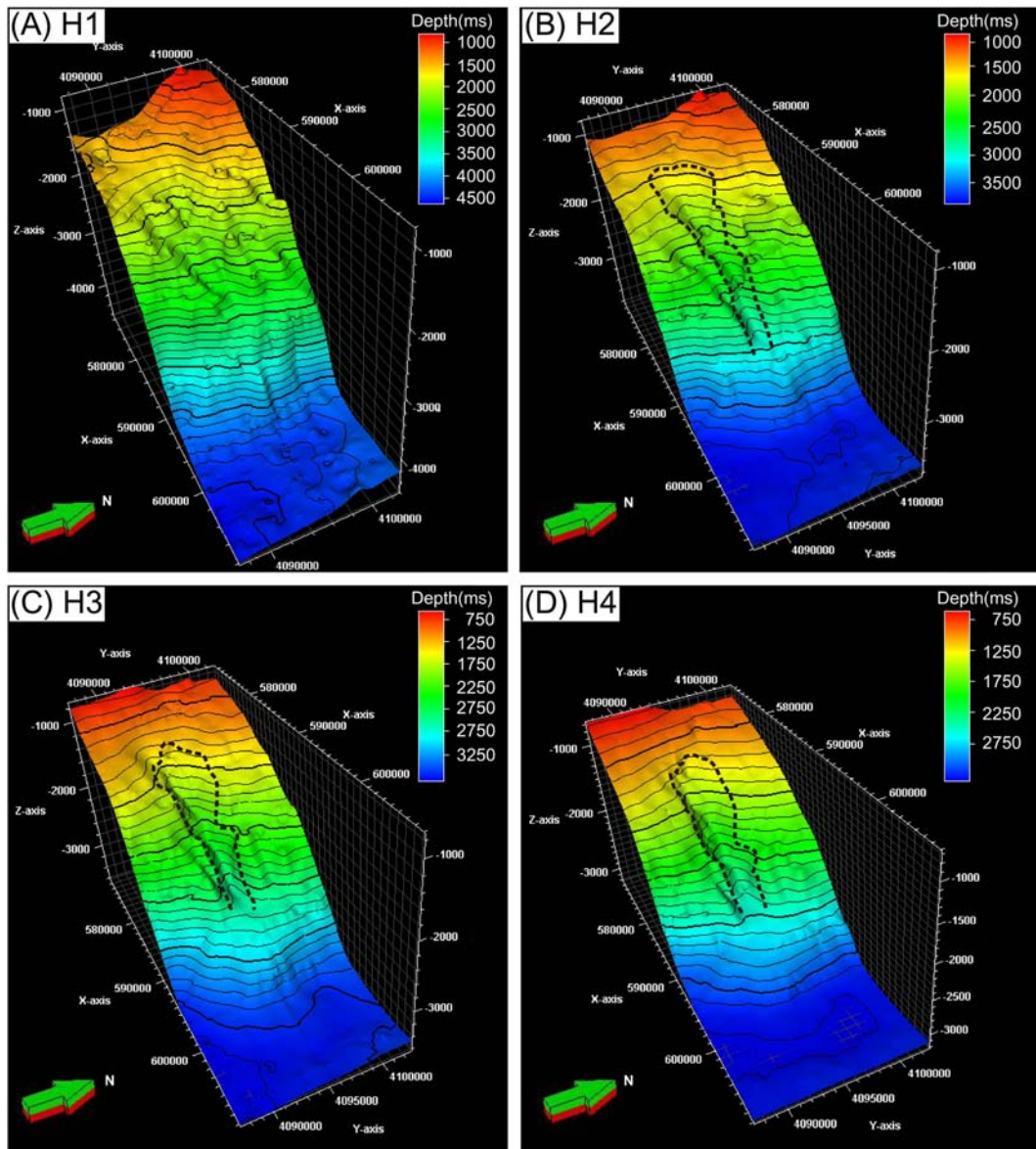


Fig. 5. 3D-structure map of each reflector (H1 ~ H4). Contour interval is 0.1 seconds. (A) 3D-structure map of H1. (B) 3D-structure map of H2. (C) 3D-structure map of H3. (D) 3D-structure map of H4. Dotted black line indicates the boundary of the canyon.

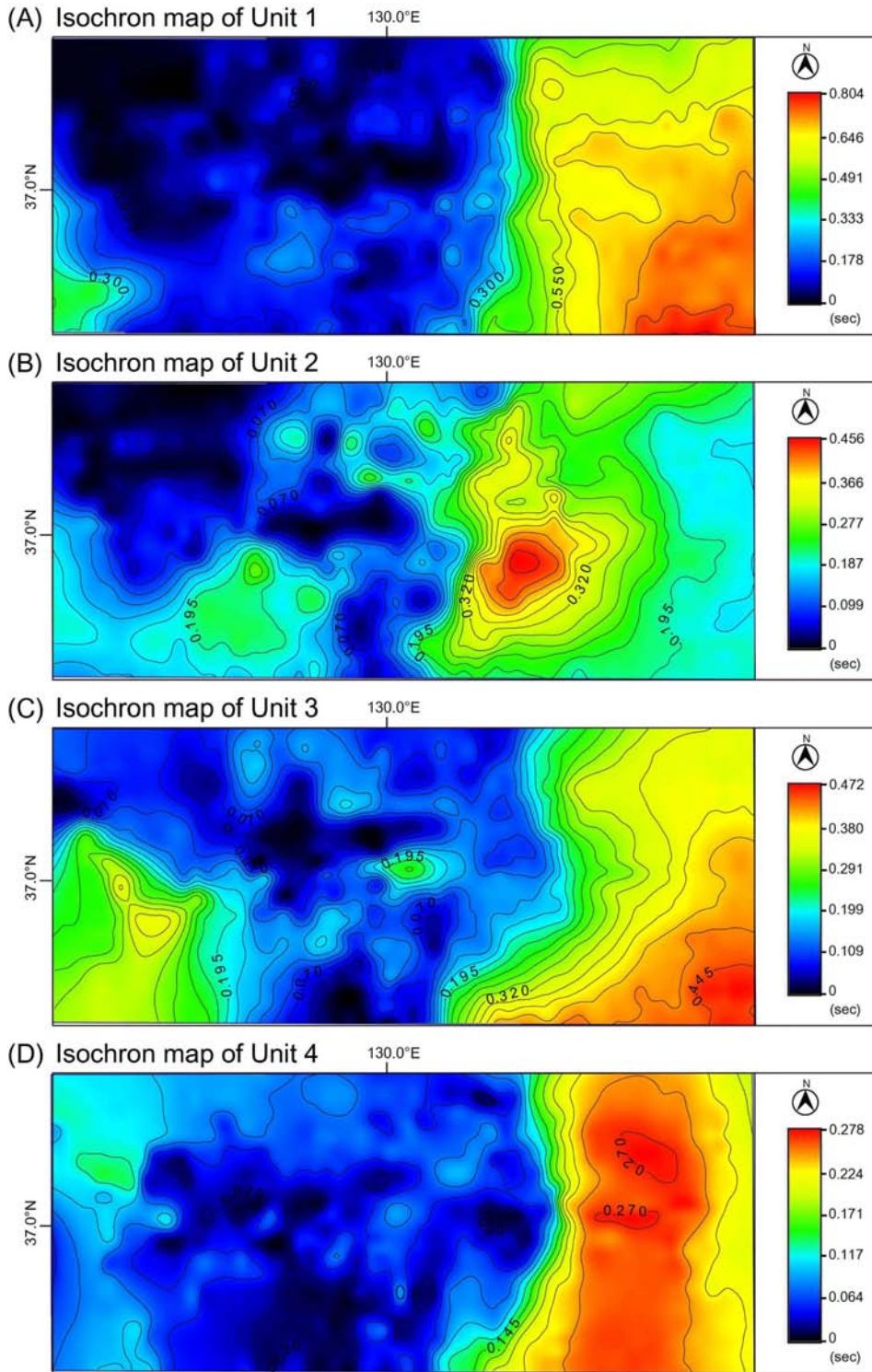


Fig. 6. Isochron map of the Unit 1 ~ 4. Contour interval is 0.025 seconds. (A) Isochron map of the Unit 1. (B) Isochron map of the Unit 2. (C) Isochron map of the Unit 3. (D) Isochron map of the Unit 4.

포하며, 남동쪽으로 향하면서 퇴적두께는 점차 증가하여 최대 770 ms 이상의 두께를 보이는 퇴적중심(depocenter)을 보인다 (Fig. 6(A)).

층서단위 2는 H2 상부에 퇴적되는 층서단위로 두개의 음향

상으로 구성된다(Fig. 3). 하부는 중간 진폭의 연속성이 양호한 평행층리 음향상이 우세하게 나타나며, 분지로 향하면서 평행층리 음향상과 캐오틱 음향상이 협재되어 나타난다. 상부는 강한 진폭의 연속성 좋은 평행층리 음향상이 나타난다. 이 층서

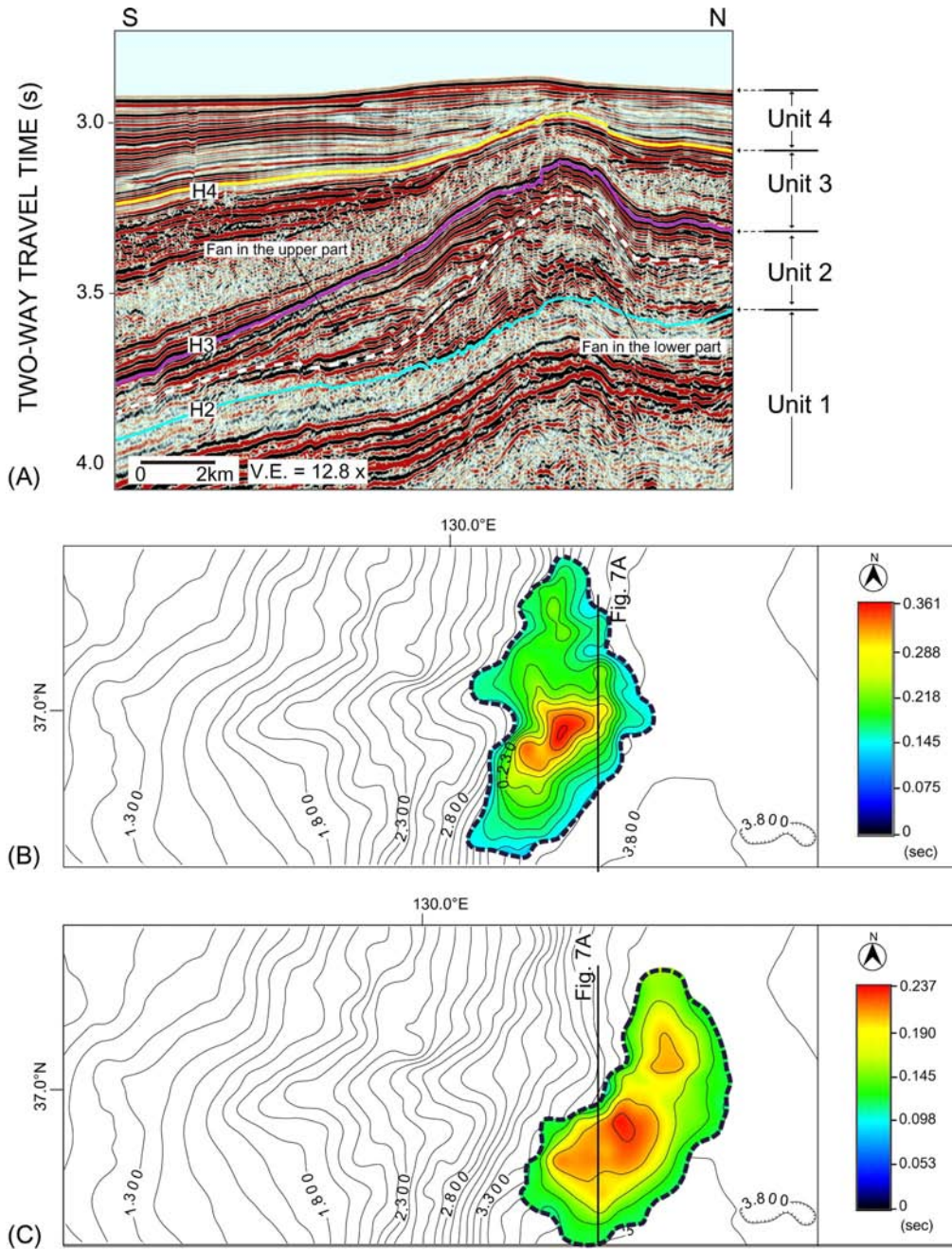


Fig. 7. Seismic profile and isochron maps representing the submarine fan within the Unit 2 (for location, see Fig. 1). (A) N-S direction air-gun profile showing the submarine fan. (B) Distribution of the submarine fan in the lower part within the Unit 2 with time-structure of H2. (C) Distribution of the submarine fan in the upper part within the Unit 2 with time-structure of H2. Dotted black line indicates boundary of the submarine fan. Contour interval is 0.025 seconds.

단위는 사면기저부에서 캐오틱 음향상을 보이는 렌즈상의 퇴적체가 협재되어 나타나는 것이 특징이다(Fig. 3(B)). 이러한 렌즈상의 퇴적체는 하부 반사면에 온랩(onlap) 또는 다운랩(downlap)하는 반사종결(reflection terminations)을 보이며 발달한다(Fig. 7(A)). 층서단위 2는 사면지역을 두껍게 피복하는 형태로 발달하며, 분지로 향하면서 두께가 감소하는 췌기형태로 발달한다(Fig. 3). 남쪽 사면에서는 다수의 단층과 대규모의

침식면(erosional surface)이 관찰되는 것이 특징이다(Figs. 3(A) and 8(A)). 시간구조도 분석 결과에 따르면 층서단위 1에서 골이 발달한 부근에서 협곡이 발달하며 층서단위 1에 비해 서쪽으로 확장되어 나타난다. 이 층서단위의 사면기저부에 발달하는 불룩한 형태는 층서단위 1에 비해 전진하여 나타난다(Figs. 4(B) and 5(B)). 등시층후도 분석 결과에 의하면 층서단위 2는 남쪽 사면에서 130 ~ 200 ms 두께의 퇴적층이 넓게

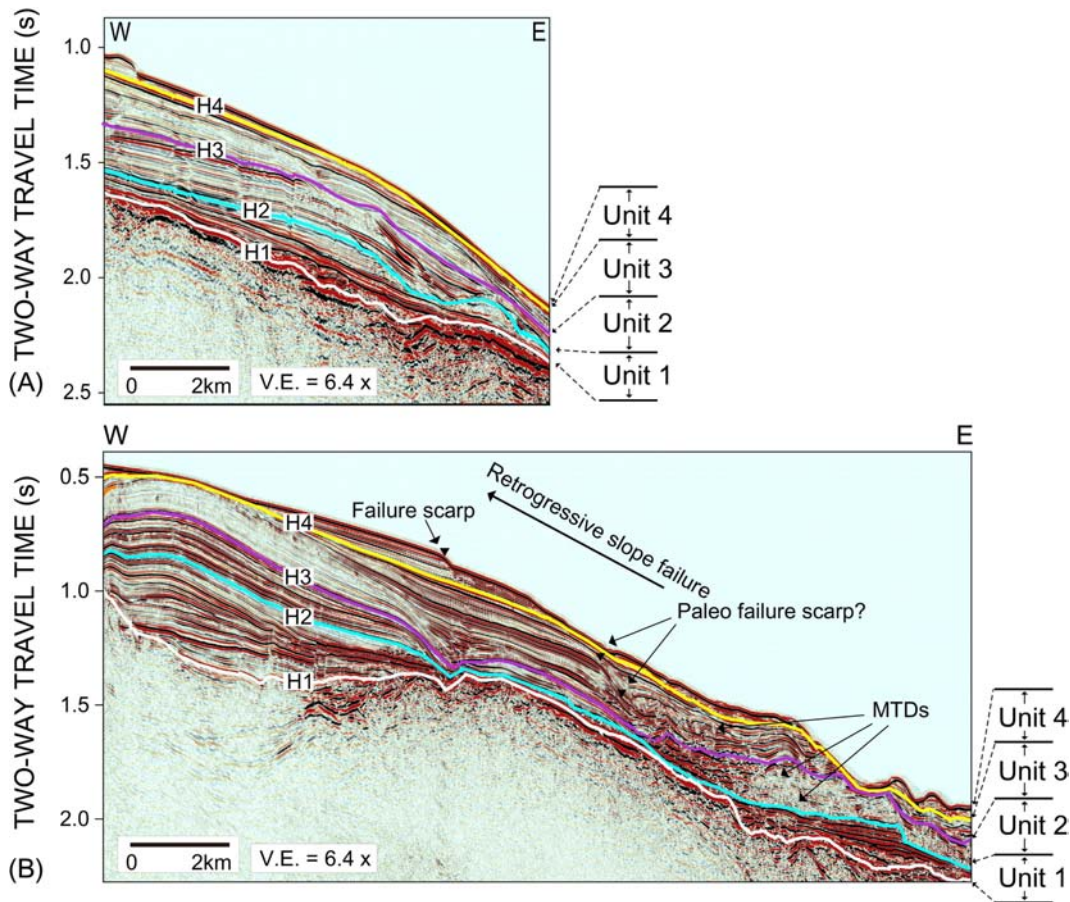


Fig. 8. Seismic profiles representing the slope region. (A) Seismic profile representing the erosional surface near the canyon. (B) Seismic profile showing the failure scarp and paleo-failure scarp like step morphology and mass-transport deposit (MTD) and it indicates retrogressive slope failure.

분포하며 중앙부에는 동서 방향으로 박층으로 분포한다(Fig. 6(B)). 사면기저부에서는 190 ms 이상의 두꺼운 층후를 보이며 특히 250 ~ 450 ms의 부채꼴형의 퇴적체가 분포한다(Fig. 6(B)). 이 부채꼴형 퇴적체는 반사중결에 의해 상부 부분과 하부 부분으로 구분할 수 있으며, 등시층후도 작성결과 분지방향으로 전진하는 양상으로 퇴적된다(Fig. 7(B) and 7(C)).

층서단위 3은 H3 상부에 퇴적되는 층서단위로 두개의 음향상으로 구성된다(Fig. 3). 하부는 사면에서 약한 진폭의 연속성이 양호한 평행층리 음향상이 나타나며 분지에서는 대규모의 캐오틱한 음향상을 보이는 퇴적체를 포함한다. 상부는 사면과 분지에서 강한 진폭의 연속성이 양호한 평행층리 음향상이 나타난다(Fig. 3). 층서단위 3은 사면지역을 피복하며 협곡 주변부에서 얇은 층후를 보이고 분지쪽으로 향하면서 층후가 증가하는 췌기형태로 발달한다(Fig. 3). 이 층서단위는 내부의 평행층리 음향상을 급격하게 절단하는 스텝(step)형태의 외부형태가 관찰되는 것이 특징이다(Fig. 8(B)). 시간구조도 분석결과, 연구지역 중앙에 위치한 협곡은 이전시기에 비해 가파른 경사를 보이며, 동쪽에 발달한 블록한 지형은 남동쪽으로 전진하여 나타난다(Figs. 4(C) and 5(C)). 등시층후도 작성결과, 층서단

위 3은 사면에서 160 ~ 320 ms의 퇴적분포를 보이며 협곡 중앙부에 동서로 연장된 퇴적체가 140 ~ 240 ms로 분포한다. 분지평원으로 점차 완만하게 퇴적층후가 증가하여 420 ms 이상의 퇴적중심이 연구지역의 남동쪽에 위치한다(Fig. 6(C)).

층서단위 4는 H4 상부에 위치하는 최상부 퇴적층으로 탄성과 단면상에서 연속성이 양호한 약한-중간 진폭을 가진 평행층리 음향상이 연구지역 전반에 걸쳐 우세하게 나타난다(Fig. 3). 이 층서단위는 사면지역을 피복하는 형태로 나타나며 분지쪽으로 향하면서 급격하게 층후가 증가하는 췌기형태로 발달한다(Fig. 3). 고해상도 탄성과 자료인 첩과 스파커 단면도 상에서 봉락단애와 하부의 허모키한(hummocky) 표면이 관찰되며 해저협곡 중앙부에는 다수의 퇴적체 블록(block; slump deposit)이 나타난다(Fig. 9(A)). 블록의 내부는 층리가 발달하거나 변형된 층리상을 보이며 이러한 퇴적체는 협곡의 중심부 인근에서 주로 관찰된다. 퇴적체 블록 하부에는 강한 진폭의 반사면인 미끄러짐 면(glide surface)이 관찰되며(Fig. 9(A)) 사면붕락이 발생하지 않은 상부 사면에서는 작은 단층과 같은 수직변위를 보이는 크라운 크랙(crown crack)이 나타난다(Fig. 9(B)). 사면기저부에는 렌즈모양의 외부형태와 캐오틱한 내부

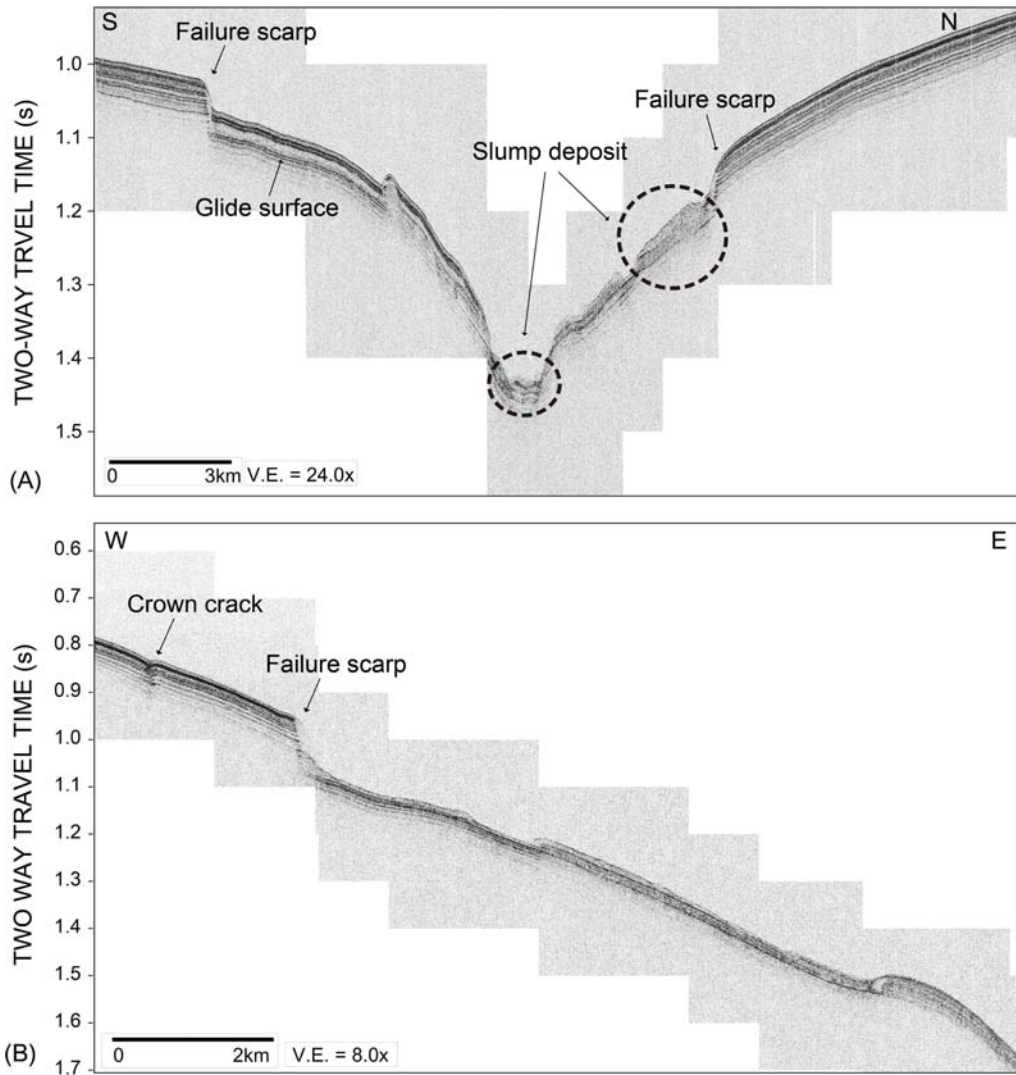


Fig. 9. Chirp seismic profiles showing the upper part of the submarine canyon. (A) N-S direction seismic profile showing distinct failure scarp and slide/slump deposit. The slide/slump deposits converge into the axis of the canyon. (B) E-W direction seismic profile representing crown crack in the undisturbed slope.

음향상을 보이는 쇄설류 로브(debris lobe) 3개가 평행층리 음향상 사이에 협재하여 나타난다(Fig. 10(A) and 10(B)). 시간 구조도 분석결과, 연구지역 중앙부에 위치한 협곡은 연구지역의 서쪽으로 이동하였고, 동쪽에 위치한 불룩한 지형은 층서단위 3에 비해 사면으로 후퇴하여 나타난다(Figs. 4(D) and 5(D)). 이 층서단위는 전반적으로 사면일대에 박층으로 분포하며, 상부사면 일대에서 60 ~ 130 ms의 층후를 보인다(Fig. 6(D)). 사면기저부에서는 퇴적층후가 급격하게 증가하며 분지 전역에 걸쳐 200 ~ 260 ms의 퇴적중심을 갖는다. 스파커 단면도 상에서 인지되는 3개의 쇄설류 로브 중 최상부에 위치한 로브에 대하여 등시층후도를 작성한 결과, 이 퇴적체의 최대 두께는 약 17 m, 면적은 65 km², 체적은 0.5 km³이다(Fig. 10(C)).

해저협곡의 형태

해저협곡의 경계는 탄성과 단면상에서 내부 반사면들이 급경사로 절단된 지점인 봉락단에 또는 변곡점으로 설정하였고, 각 층서단위에 나타나는 협곡의 기하학적 특징을 알아보기 위해 협곡의 중심축을 수직으로 가로지르는 횡단면 형태를 1 km 간격으로 도시하여 분석하였다(Fig. 4). 해저협곡의 높이는 탄성과 속도를 평균 1,500 m/s로 가정하여 구하였다.

H2 반사면에 발달하는 협곡은 폭 1.9 ~ 5.4 km, 길이는 17.5 km, 최대 높이는 193.5 m를 보인다(Table 2). 해저협곡 중심축의 방향은 두부가 남쪽을 향해 발달한다(Fig. 4(B)). H3 반사면에 발달하는 협곡은 폭 2.0 ~ 5.1 km를 보이며, 길이는 16.5 km, 최대 높이는 287.3 m를 보인다(Table 2). H2 반사면에 발달하는 협곡에 비해 폭은 감소하고 깊이는 증가하였다. H4 시기에는 해저협곡의 폭은 2.3 ~ 4.4 km, 길이 14.7 km, 최대 높이는 228.7 m를 보인다(Table 2). 협곡의 중심축은 거의 직선

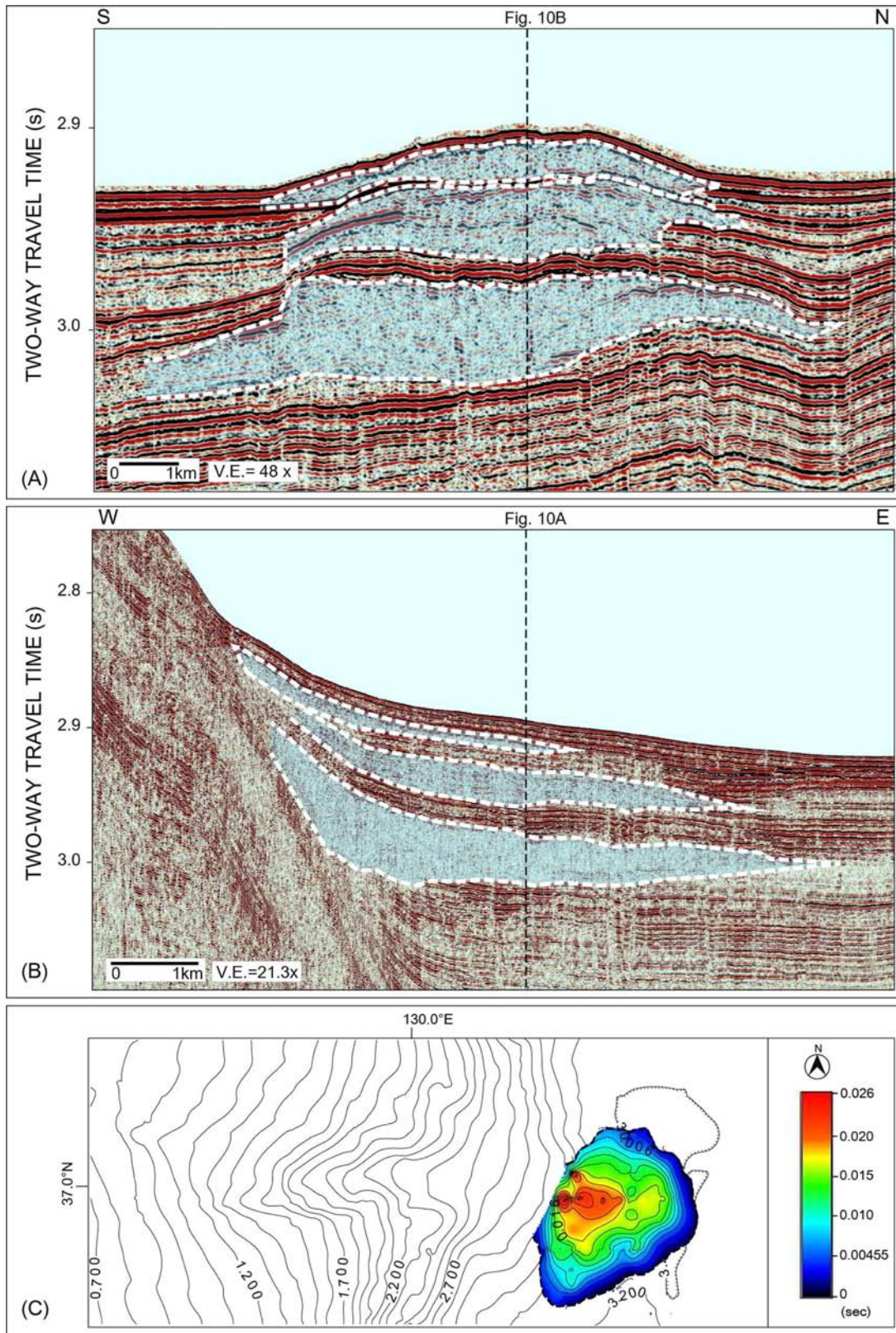


Fig. 10. Seismic profiles and isochron map representing the submarine fan within the Unit 4. (A) N-S direction sparker profile and (B) E-W direction sparker profile showing the modern submarine fan stacked in three debris lobe in the base of slope (for location, see Fig. 1). Dotted white line indicates the boundary of debris lobe. (C) Distribution of the submarine fan in the uppermost of the Unit 4 with time-structure of H4. Contour interval is 0.002 seconds.

Table 2. Summary of geometric analysis for the canyon developed in each horizon.

Horizon	Width (km)	Length (km)	Max. height (m)	Thalweg path	Shape change
H2	1.9 ~ 5.4	17.5	193.5	straight	U → V
H3	2.0 ~ 5.1	16.5	287.3	straight	U → V
H4	2.3 ~ 4.4	14.7	228.7	straight	U → V
SF	2.5 ~ 7.7	14.7	360.0	straight	U → V

형태로 발달한다. 해저면(seafloor; SF)에 이르러서는 H4에 발달한 해저협곡에 비해 폭이 상당히 커지며, 폭은 2.5 ~ 7.7 km, 길이는 14.7 km, 최대 높이는 360.0 m를 보인다(Table 2).

상기 결과에 따르면 연구지역에 존재하는 해저협곡은 H2에서부터 발달하기 시작하였다. 이후 협곡의 규모는 작아지다가 현생의 해저협곡에서 다시 커지는 양상을 보인다(Table 2). 또한, 협곡의 경계는 상부로 이동하는 양상을 보이고 협곡의 중심축은 두부 부근에서 작은 변화를 보인다. 해저협곡의 중심축은 협곡의 초기 발달상인 H2에서는 두부가 남쪽으로 치우쳐 발달하며 점차 북쪽으로 이동하여 이후 시기부터 전 시기에 걸쳐 직선 형태를 나타낸다(Fig. 4). 협곡의 횡단면 분석결과에 의하면 횡단면은 상부 사면에서는 U자형을 보이며 하부로 내려갈수록 V자형을 보이고 분지에 이르러서 다시 U자형의 횡단면상을 보인다(Fig. 4). 현생에서의 해저협곡 분석결과와 마찬가지로, 사면에서 분지평원으로 향하면서 협곡의 깊이는 깊어지고 폭은 좁아지는 양상을 보인다(Fig. 4).

토 의

해저협곡 발달모델

해저협곡은 다양한 요인들에 의해 복합적인 기원과 형성기작을 통해 진화하며, 장시간에 걸쳐 발달하는 것으로 알려져 있다(Shepard, 1981; Harris and Whiteway, 2011). 이러한 해저협곡의 발달은 저탁류와 사면붕락과 관련된 질량류에 기인하는 해저침식(submarine erosion)이 중요한 역할을 한다(Shepard, 1981). 앞서 제시된 해저침식과 관련하여 발달모델은 탑-다운 모델(top-down model)과 바텀-업 모델(bottom-up model)이 존재한다(Twicheil and Roberts, 1982; Farre *et al.*, 1983; Pratson *et al.*, 1994; Pratson and Coakley, 1996; Pratson *et al.*, 2007).

탑-다운 모델에 의해 형성된 해저협곡은 대규모로 발달하고(Harris and Whiteway, 2011), 하성 시스템과 연계되어 발달하거나 상부 대륙사면 또는 대륙붕에 위치한 사질 퇴적물의 이동에 의한 저탁류의 침식작용에 의해서 사면 상부에서 분지방향으로 협곡이 발달하는 모델이다(Popescu *et al.*, 2004; Pratson *et al.*, 2007). 협곡의 입구에서 사질퇴적물로 구성된 저류층이 잘 발달하는 것이 특징이다(Posamentier and Kolla, 2003; Mayall *et al.*, 2006; Jobe *et al.*, 2011). 바텀-업 모델에 의해 형성된 해저협곡은 사면붕락과 관련된 질량류 퇴적작용

에 의해 하부사면에서 상부로 협곡이 발달하는 모델로(Pratson *et al.*, 2007), 탑-다운 모델에 비해 규모가 작다(Harris and Whiteway, 2011). 초기에 작은 사면붕락 등에 의해 걸리(gully)가 형성된 후, 저지대를 따라 협곡이 점진적으로 상부사면으로 발달한다. 이러한 협곡을 미성숙 협곡(immature canyon)이라 하며, 계속된 두부침식으로 협곡이 대륙붕과 연장되면 성숙 협곡(mature canyon)이라고 한다(Twicheil and Roberts, 1982; Farre *et al.*, 1983; Pratson and Coakley, 1996; Pratson *et al.*, 2007). 이 모델에 의해 발달하는 협곡의 내부는 주로 캐오틱한 음향상이 나타나는 것이 특징이다(Zhou *et al.*, 2015).

바텀-업 모델에 의해 발달한 협곡은 탑-다운 모델에서 관찰되는 상부사면에서 수로 형태의 침식구조가 관찰되지 않으며 대륙붕과 연장되지 않고 사면에 한정되어 나타난다. 본 연구해역의 상부사면은 수로에 의한 침식 흔적이 관찰되지 않으며 협곡의 주변부에서는 뚜렷한 봉락단애가 관찰된다(Fig. 2). 해저면 뿐만 아니라 각 층서단위 경계면의 상부사면에서도 고-봉락단애(paleo-headscarp)가 관찰된다(Figs. 3(A) and 8(B)). 바텀-업 모델에 의해 발달하는 협곡은 두부에서 사면붕락이 활발히 일어나기 때문에 협곡의 중앙부는 주로 슬라이드/슬럼프와 같은 질량류 퇴적체가 퇴적되는 것이 특징이다(Rise *et al.*, 2013; Zhou *et al.*, 2015). 본 연구해역에 발달한 해저협곡은 사면붕락에 의해 기인한 캐오틱 음향상을 보이는 질량류 퇴적체가 관찰된다. 이 질량류 퇴적체는 협곡의 중앙부를 충전하는 형태로 나타나며 층서단위에 협재되어 관찰된다(Figs. 3(A) and 8(B)). 사면기저부에서도 층리발달 음향상과 질량류 음향상이 협재된 두꺼운 퇴적체가 부채꼴 상으로 분포한다(Figs. 7 and 10). 바텀-업 모델에 의해 형성된 협곡은 횡단면상 분석결과, 두부에서는 질량류에 의한 퇴적이 일어나기 때문에 U자형의 형태를 보이고 하부로 향하면서 저탁류에 영향에 의해 V자형의 변화양상을 보인다고 알려져 있다(Covault *et al.*, 2011). 현생 협곡과 고기에 발달한 해저협곡은 전반적으로 횡단면상이 U자형에서 V자형으로의 변화 양상을 보이며 사면에서 분지로 향하면서 깊이가 증가하고 폭은 좁아지는 특징을 가진다(Fig. 2; Table 2). 상기결과는 Rise *et al.* (2013)이 보고한 노르웨이 북서부 대륙주변부에서 발달한 협곡과 유사한 특징을 보인다.

따라서 전반적으로 연구지역에 발달한 해저협곡은 발달규모, 협곡의 발달위치, 협곡 내부를 충전하는 음향상 등을 근거로 주로 사면붕락과 관련된 질량류 퇴적작용에 의해 발달하는 바

텀-업 모델에 의해 형성된 것으로 해석된다.

해저협곡 발달기작

해저협곡의 발달 원인인 사면붕락은 사면안정성에 영향을 주는 다양한 요인들인 사면의 과경사, 높은 퇴적물 공급량, 지진, 해수면 변동과 해파작용, 쓰나미, 단층, 화산활동 등에 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Hampton *et al.*, 1996). 본 연구 결과에 의하면 다수의 단층이 발달한 층서단위 2에서 협곡의 규모가 크게 나타나며, 층서단위 4의 최상부층에서 협곡의 규모가 다시 커지는 것으로 나타난다(Table 2).

사면붕락은 구조 운동과 관련하여 가장 흔히 발생한다고 알려져 있다(Hampton *et al.*, 1996). 선행연구에 의하면 퇴적물 공급이 적은 대륙주변부에서는 기반암의 형태 및 하부 지층의 구조가 협곡 발달의 중요한 요인인 것으로 알려져 있다(Elliott *et al.*, 2006). 이러한 협곡의 발달은 아일랜드 서쪽에 위치한 북동 애틀랜틱 대륙주변부(Atlantic continental margin)에서 보고되었다(Elliott *et al.*, 2006). 해저협곡 주변부에서 단층 및 융기에 의해서 하부 지층에 저지대가 발달하면, 저지대를 따라 중력류(gravity flow)가 흐르게 되고 침식작용에 의해 주변 퇴적층은 과경사를 형성한다. 따라서 그 주변부를 따라 사면붕락과 저탁류가 활발히 발생한다(Ediger *et al.*, 1993; Mountjoy *et al.*, 2009; Dantec *et al.*, 2010; Restrepo-Correa and Ojeda, 2010; Jobe *et al.*, 2011). 울릉분지는 후기 마이오세에 압축력을 받았으며 이와 관련하여 서쪽 대륙주변부는 단층 및 습곡이 발달한다(Yoon and Chough, 1993; Yoon *et al.*, 2014). 연구해역에 분포하는 층서단위 2는 사면일대에서 두꺼운 퇴적분포를 보이며 다수의 단층이 발달한다. 사면붕락 흔적은 저지대에 발달한 단층 주변부에서 관찰되는 것으로 보아 층서단위 2는 기반암 및 단층 등의 국부적인 구조운동에 의해 협곡 발달이 조절된 것으로 판단된다.

구조 운동이 미약한 환경에서 사면붕락이 일어나는 원인 중 하나는 해수면변동이다. 먼저, 해수면이 낮아지면 정수압(hydrostatic pressure)의 감소와 퇴적물 내의 과잉 공극압을 형성한다. 결국 퇴적층 내의 전단강도(shear strength)의 감소를 초래한다. 이로 인해 사면이 불안정해지면 사면붕락 등의 중력류가 쉽게 발생한다고 알려져 있다(Hampton *et al.*, 1996; Lee *et al.*, 1996). 퇴적층 내에 과잉 공극압을 형성하는 요인으로서는 저해수면 시기의 가스하이드레이트의 해리가 있다. 해수면이 하강하게 되면 가스하이드레이트의 안정영역의 변동으로 가스하이드레이트의 해리가 일어나는 것으로 알려져 있다(Paull *et al.*, 1996; Rao *et al.*, 2002). Lee *et al.* (1996)에 의하면 울릉분지 서쪽 사면에서 저해수면 시기인 플라이스토세 동안 빈번한 사면붕락이 발생하고, 홀로세인 고해수면 시기에는 사면이 안정해진다고 보고된 바 있다. 또한, Lee *et al.* (1991)과 Chough *et al.* (1992)는 울릉분지 서쪽 대륙주변부의 수심 400 m 이상에서 큰 규모의 사면붕락이 흔히 발생하며,

사면붕락이 등수심선과 평행하게 분포함을 확인하였다. 선행 연구에 의하면 울릉분지 천부지층 전역에는 가스하이드레이트 부존을 나타내는 탄화수소 지시자가 분포한다고 알려져 있으며(Yoo *et al.*, 2008, 2013), 연구해역의 상부 사면에서는 다수의 푼마크(pock mark)가 분포한다고 보고되어 가스하이드레이트 해리에 의한 사면붕락 가능성이 제시되었다(Cukur *et al.*, 2016). 본 연구해역에 분포한 층서단위 4는 큰 규모의 해저협곡이 발달하며, 상부사면에서 사면붕락이 아치형 형태로 발달하고 사면기저부에 쇄설류 로브가 중첩되어 나타난다(Figs. 9 and 10; Table 2). 이 시기에 형성된 쇄설류 로브는 발달시기 2에서 형성된 부채꼴상의 퇴적체 보다 규모가 작다(Fig. 6). 따라서 대규모로 부채꼴상 퇴적체가 발달한 층서단위 2와는 다른 원인에 의해 해저협곡이 발달한 것으로 해석된다. 층서단위 4에서 협곡이 발생한 이유는 저해수면 시기에 사면붕락이 일어나 기존의 형성된 저지대를 따라 사면붕락이 발생하여 협곡이 발달한 것으로 사료되며 발달시기 4의 협곡발달의 조절요인은 국부적인 구조 운동 보다는 해수면 변동으로 판단하였다.

해저협곡의 발달사

선행 연구에 의하면 연구해역에 분포하는 퇴적층은 마이오세부터 제 4기 동안 퇴적된 것으로 해석된다(Yoon and Chough, 1993, 1995; Yoon *et al.*, 2014). 협곡의 발달은 4단계로 요약되며, 발달시기는 층서단위와 각각 대비된다(Fig. 11).

발달시기 1은 전기 마이오세에서 후기 마이오세로 층서단위 1에 대비된다(Fig. 11(A)). 울릉분지는 후기 올리고세에서 전기 마이오세 시기에 동해의 후열도 확장 및 분지의 열림이 진행되었다(Ingle, 1992; Jolivet and Tamaki, 1992; Tamaki *et al.*, 1992). 분지 열림과 관련하여 대륙주변부에는 빠른 침강이 발생한 시기이다(Yoon and Chough, 1993). 연구지역의 남서쪽과 중앙에 위치한 골은 울릉분지 열림시기에 작용한 신장력의 영향으로 형성된 것으로 판단된다(Fig. 4(A)). 후기 마이오세 동안 층서단위 1은 기존에 발달한 골을 중간 진폭의 연속성이 양호한 평행층리 음향상을 보이는 퇴적층이 피복하며 분지에서는 층후가 급격히 증가하는 양상으로 퇴적되었다(Figs. 3, 4(A) and 6(A)). 이 시기는 협곡의 발달이 미약했던 것으로 판단된다.

발달시기 2는 후기 마이오세에서 후기 마이오세 말로 층서단위 2에 대비된다(Fig. 11(B)). 울릉분지는 중기 마이오세 말에 신장력에서 압축력으로 응력장이 바뀌며(Chough and Barg, 1987; Yoon and Chough, 1995; Lee *et al.*, 2002), 이와 관련하여 연구해역은 국부적으로 단층과 습곡이 발달한다고 보고된다(Yoon and Chough, 1993; Yoon *et al.*, 2014). 서쪽 대륙 주변부는 후기 마이오세 시기까지 점진적인 침강을 받은 지역으로 이로 인해 연구해역에 두꺼운 퇴적물의 퇴적을 가능하게 해준다(Yoon and Chough, 1993). 이 시기 동안 퇴적된 층서단위 2는 사면에서 두꺼운 층후로 퇴적되며 사면일대에서는 다

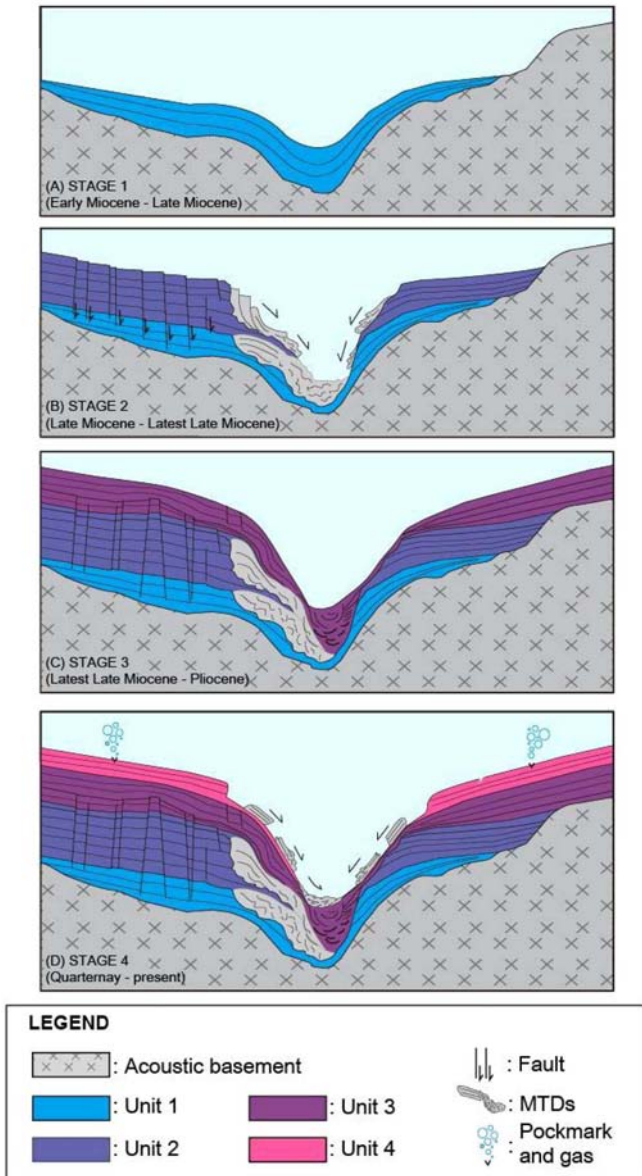


Fig. 11. A schematic model illustrating the evolutionary history of submarine canyon in the northwestern part of the Ulleung Basin.

수의 단층이 발달한다. 큰 규모의 침식면이 협곡의 주변부에서 흔히 관찰되며(Fig. 8(A)), 층서단위 1과 층서단위 2의 해저협곡의 측면에서는 사면붕락이 일어나 침식절단면이 형성되고, 이후 그 상부를 질량류 퇴적체가 피복하여 퇴적된다(Fig. 3). 사면붕락에 의해 유발된 질량류 퇴적체는 협곡을 따라 이동하여 주로 사면기저부에 쌓이며, 평행층리 음향상과 캐오틱 음향상이 협재된 두꺼운 부채꼴형 퇴적체가 퇴적된다. 이 퇴적체는 심해 선상지로 해석되며 이전 시기에 비해 분지쪽으로 전진하여 퇴적된다(Fig. 6). 또한, 협곡의 규모도 크게 나타난다(Table 2). He *et al.* (2014)에 의하면 해저협곡의 발달과 질량류 퇴적체의 분포를 통해 해저협곡이 발달 시기에 협곡 내에서 질량류 퇴적체가 빈번히 발생한다고 보고된 바 있다. 따라서 발달

시기 2는 사면붕락에 의한 많은 퇴적물 공급과 단층과 같은 국부적인 구조운동에 의해 협곡의 발달이 활발했던 시기로 해석된다.

발달시기 3은 후기 마이오세 말에서 플라이오세로 층서단위 3에 대비된다(Fig. 11(C)). 울릉분지 서쪽 대륙주변부는 초기 플라이오세에 후포단층의 재활성화가 일어나며 이와 관련하여 후포뱅크의 용기가 발생한다(Yoon and Chough 1993, 1995; Yoon *et al.*, 1997, 2014). 이후 후기 플라이오세에 지구구조적으로 안정적인 환경에 이른다. 연구해역은 평행층리 음향상을 보이는 퇴적층이 협곡 주변부를 피복하는 형태로 퇴적되며, 사면 일대에서 층서단위 3의 중간부분까지 단층의 변위가 관찰된다(Fig. 3(A)). 이 시기에 퇴적된 퇴적층은 협곡 내부를 일부 충전하며(Fig. 3(A)), 협곡의 중앙부에는 동서로 연장된 퇴적체가 관찰된다(Fig. 6(C)). 발달시기 3은 사면기저부에 두드러진 부채꼴형의 퇴적체가 분포하지 않으며 사면기저부는 서쪽으로 후퇴하여 나타난다(Fig. 6(C)). 사면에서 작은 규모의 사면붕락이 발생하지만 이전 시기에 비해 규모가 작으며 이후 안정적인 환경에서 퇴적물이 상부를 피복하기 때문에 협곡의 규모는 이전 시기에 비해 작아지는 것으로 판단된다(Table 2). 따라서 이 시기는 작은 퇴적물 공급량과 약화된 구조운동에 의해 해저협곡의 발달은 미약했던 것으로 해석된다.

발달시기 4는 제 4기 퇴적층으로 층서단위 4에 대비된다(Fig. 11(D)). 층서단위 4의 하부 경계면인 H4는 플라이오-플라이스토세 경계부로(Yi *et al.*, 2012), 기존연구에 의하면 울릉분지는 후기 플라이오세 이후로 지구구조적으로 안정적인 환경을 보인다(Yoon *et al.*, 2014). 층서단위 4는 사면과 분지 전역에 약한-중간 진폭의 연속성이 양호한 평행층리 음향상이 우세하게 나타난다(Fig. 3). 이 층서단위는 최상부층에서 사면붕락이 발생하여 뚜렷한 붕락 단애가 아치형으로 발달한다. 붕락된 퇴적물은 이전시기에 형성된 저지대를 따라 이동하며 일부는 사면일대에 슬라이드/슬럼프 형태로 퇴적되고 점차 하부 사면으로 이동하여 일부는 쇄설류 및 저탁류로 사면기저부와 분지 평원에 쌓인다. 발달시기 4의 사면기저부에는 쇄설류 로브 3개가 부채꼴 형태로 중첩되어 퇴적되며(Figs. 9 and 10), 이 퇴적체는 심해 선상지로 해석된다. 또한, 협곡의 규모도 크게 확장된다(Table 2). 따라서 이 시기는 구조운동이 미약했던 시기로 저해수면 시기의 사면불안정에 의해 협곡의 발달이 활발했던 시기로 해석된다.

따라서 연구해역에 발달한 해저협곡은 이전에 형성된 저지대 부근에서의 지속적인 퇴적과 침식의 반복으로 형성된 해저협곡으로 판단된다.

결론

연구해역의 대륙사면에는 해저협곡이 발달하며, 해저협곡 주변부 퇴적층은 침식 부정합면에 의해 분리되는 4개의 층서

단위로 구분된다. 해저협곡의 발달은 4단계로 요약되며 각 층서단위와 대비된다. 연구해역에 발달한 협곡은 발달위치, 발달 규모, 내부 충전 음향상을 근거로 사면붕락과 질량류에 의해 형성된 것으로 해석되며, 층서단위 2와 4에서 주로 발달한다. 층서단위 1은 사면에 위치한 골 형태의 지형 상부를 퇴적물이 얇게 피복하며 해저협곡의 발달은 미약하다. 협곡의 규모가 크게 나타나는 층서단위 2는 사면일대에 두꺼운 퇴적분포를 보이며 단층발달과 관련된 사면붕락이 활발히 일어난다. 또한 사면기저부에서 부채꼴형태의 퇴적분포를 보이는 심해선상지가 발달한다. 층서단위 3은 협곡주변부에서 얇은 퇴적분포를 보이며 협곡의 내부를 충전하는 퇴적작용에 의해 협곡의 규모가 작아진다. 협곡의 발달규모가 다시 커지는 층서단위 4는 사면에서 얇은 퇴적분포를 보이며 해저면에서 사면붕락이 발생한다. 이로 인해 사면기저부에는 쇄설류 로브가 중첩되어 나타난다. 이는 구조운동이 미약한 환경에서 저해수면시기의 사면불안정에 의해 해저면 붕락이 활발히 일어난 것으로 사료된다. 따라서 현생에 발달하는 대규모의 해저협곡의 발달은 고기에 발달한 저지대를 따라 지속적인 퇴적과 침식작용이 반복적으로 이루어졌으며 사면붕락에 의한 퇴적물 공급과 광역적인 구조운동, 해수면변동에 의해 조절되었다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원의 연구과제 “가스하이드레이트 탐사 및 개발연구(17-1143)”와 “유가스 부존특성 및 해저천부구조 정밀 규명을 위한 융복합 탐사기술개발(17-3312)”의 지원에 의해 수행되었습니다. 자료 취득에 도움을 주신 탐해 2호 승조원분들께 감사드립니다. 또한 심사를 통해 유익한 조언을 해주신 익명의 심사위원 분들께 감사드립니다.

References

- Almeida, N. M. D., Vital, H., and Gomes, M. P., 2015, Morphology of submarine canyons along the continental margin of the Potiguar Basin, NE Brazil, *Mar. Pet. Geol.*, **68**, 307-324.
- Bull, S., Cartwright, J., and Huuse, M., 2009, A review of kinematic indicators from mass-transport complexes using 3D seismic data, *Mar. Pet. Geol.*, **26**, 1132-1151.
- Chough, S. K., and Barg, E., 1987, Tectonic history of Ulleung basin margin, East Sea (Sea of Japan), *Geology*, **15**, 45-48.
- Chough, S. K., Lee, H. J., and Yoon, S. H., 1992, Submarine slides in the eastern continental margin, Korea, *Marine Geotechnology*, **10**, 71-82.
- Chough, S. K., Lee, H. J., and Yoon, S. H., 2000, *Marine geology of Korean seas*, 2nd Ed., Elsevier.
- Chough, S. K., Lee, S. H., Kim, J. W., Park, S. C., Yoo, D. G., Han, H. S., Woon, H. S., Oh, S. B., Kim, Y. B., and Back, G. G., 1997, Chirp (2 ~ 7 kHz) echo characters in the Ulleung Basin, *Geosci. J.*, **1**, 143-153.
- Covault, J. A., Fildani, A., Romans, B. W., and McHargue, T., 2011, the natural range of submarine canyon and channel longitudinal profiles, *Geosphere*, **7**, 313-332.
- Cukur, D., Kim, S. P., Kong, G. S., Bahk, J. J., Horozal, S., Um, I. K., Lee, G. S., Chang, T. S., Ha, H. J., Volker, D., and Kim, J. K., 2016, Geophysical evidence and inferred triggering factors of submarine landslides on the western continental margin of the Ulleung Basin, East Sea, *Geo-Marine Letters*, **36**, 1432-1157.
- Dantec, N. L., Hogarth, L. J., Driscoll, N. W., Babcock, J. M., Barnhardt, W. A., and Schwab, W. C., 2010, Tectonic controls on nearshore sediment accumulation and submarine canyon morphology offshore La Jolla, Southern California, *Mar. Geol.*, **268**, 115-128.
- Ediger, V., Okyar, M., and Ergin, M., 1993, Seismic stratigraphy of the fault-controlled submarine canyon/valley system on the shelf and upper slope of Anamur Bay, Northeastern Mediterranean Sea, *Mar. Geol.*, **115**, 129-142.
- Elliott, G. M., Shannon, P. M., Haughton, P. D., Praeg, D., and O'Reilly, B., 2006, Mid-to Late Cenozoic canyon development on the eastern margin of the Rockall Trough, offshore Ireland, *Mar. Geol.*, **229**, 113-132.
- Farre, J. A., McGregor, B. A., Ryan, W. B. F., and Robb, J. M., 1983, Breaching the shelfbreak: passage from youthful to mature phase in submarine canyon evolution, In Stanley, D. J., and Moore, G. T., Ed., *The shelfbreak: Critical Interface on Continental Margins*, SEPM Special Publication, **33**, 25-39.
- Gong, C., Wang, Y., Zhu, W., Li, W., Xu, Q., and Zhang, J., 2011, The Central Submarine Canyon in the Qiongdongnan Basin, northwestern South China Sea: Architecture, sequence stratigraphy, and depositional processes, *Mar. Pet. Geol.*, **28**, 1690-1702.
- Hampton, M. A., Lee, H. J., and Locat, J., 1996, Submarine landslides. *Rev. Geophys.*, **34**, 33-59.
- Harris, P. T., and Whiteway, T., 2011, Global distribution of large submarine canyons: Geomorphic differences between active and passive continental margins, *Mar. Geol.*, **285**, 69-86.
- He, Y., Xie, X., Kneller, B. C., Wang, Z., and Li, X., 2013, Architecture and controlling factors of canyon fills on the shelf margin in the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea, *Mar. Pet. Geol.*, **41**, 264-276.
- He, Y., Zhong, G., Wang, L., and Kuang, Z., 2014, Characteristics and occurrence of submarine canyon-associated landslides in the middle of the northern continental slope, South China Sea, *Mar. Pet. Geol.*, **57**, 546-560.
- Iacono, C. L., Sulli, A., Agate, M., Presti, V. L., Pepe, F., and Catalano, R., 2011, Submarine canyon morphologies in the Gulf of Palermo (Southern Tyrrhenian Sea) and possible implications for geo-hazard, *Mar. Geophys. Res.*, **32**, 127-138.
- Iacono, C. L., Sulli, A., and Agate, M., 2014, Submarine canyons of north-western Sicily (Southern Tyrrhenian Sea): Variability

- in morphology, sedimentary processes and evolution on a tectonically active margin, *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, **104**, 93-105.
- Ingle, J. C., 1992, Subsidence of the Japan Sea: stratigraphic evidence from ODP sites and onshore sections, *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, **127/128**, 1190-1218.
- Jobe, Z. R., Lowe, D. R., and Uchytel, S. J., 2011, Two fundamentally different types of submarine canyons along the continental margin of Equatorial Guinea, *Mar. Pet. Geol.*, **28**, 843-860.
- Jolivet, L., and Tamaki, K., 1992, Neogene kinematics in the Japan Sea region and volcanic activity of the northeast Japan Arc. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, **127/128**, 1311-1331.
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), 2015, *Studies on gas-hydrate resource assessment and reservoir characterization*, GP2012-026-2015(4), 418pp.
- Lee, G. H., and Kim, B., 2002, Infill history of the Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan) and implications on source rocks and hydrocarbons, *Mar. Pet. Geol.*, **19**, 829-845.
- Lee, G. H., and Suk, B. C., 1998, Latest Neogene-Quaternary seismic stratigraphy of the Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan), *Mar. Geol.*, **146**, 205-224.
- Lee, H. J., Chough, S. K., and Yoon, S. H., 1996, Slope-stability change from late Pleistocene to Holocene in the Ulleung Basin, East Sea (Japan Sea), *Sediment. Geol.*, **104**, 39-51.
- Lee, H. J., Chough, S. K., Chun, S. S., and Han, S. J., 1991, Sediment failure on the Korea Plateau slope, East Sea (Sea of Japan), *Mar. Geol.*, **97**, 363-377.
- Lee, S. H., Bahk, J. J., Kim, H. J., Kim, G. Y., Kim, S. P., Jeong, S. W., and Park, S. S., 2014, Contrasting development of the latest Quaternary slope failures and mass-transport deposits in the Ulleung Basin, East Sea (Japan Sea), in Krastel S., Behrmann J. H., Volker, D., Stipp, M., Berndt, C., Urgeles, R., Chaytor, J., Huhn, K., Strasser, M., and Harbitz, C. B., Ed., *Submarine mass movements and their consequences-6th International Symposium*, Springer, **37**, 403-412.
- Lee, S. H., Chough, S. K., Back, G. G., Kim, Y. B., and Sung, B. S., 1999, Gradual downslope change in high-resolution acoustic characters and geometry of large-scale submarine debris lobes in Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan), *Korea, Geo-Marine Letters*, **19**, 254-261.
- Li, X., Liu, L., Li, J., Gao, S., Zhou, Q., and Su, T., 2015, Mass movements in small canyons in the northeast of Baiyun deepwater area, north of the south China Sea, *Acta Oceanologica Sinica*, **34**, 35-42.
- Mayall, M., Jones, E., and Casey, M., 2006, Turbidite channel reservoirs—Key elements in facies prediction and effective development, *Mar. Pet. Geol.*, **23**, 821-841.
- Mitchum, Jr. R. M., Vail, P. R., and Sangree, J. B., 1977, Seismic stratigraphy and global changes of sea level: Part 6. Stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences, in Payton, C. E., Ed., *Seismic Stratigraphy Applications to Hydrocarbon Exploration*, AAPG Memoir, **26**, 117-133.
- Mountjoy, J. J., Barnes, P. M., and Pettinga, J. R., 2009, Morphostructure and evolution of submarine canyons across an active margin: Cook Strait sector of the Hikurangi Margin, New Zealand, *Mar. Geol.*, **260**, 45-68.
- Park, Y. J., Kang, N. K., Yi, B. Y., and Yoo, D. G., 2015, Origin and Distribution of Cut and Fill Structures in the Southwestern Margin of Ulleung Basin, East Sea, *Geophys. and Geophys. Explor.*, **18**, 39-53 (in Korean with English abstract).
- Paull, C. K., Buelow, W. J., Ussler, W., and Borowski, W. S., 1996, Increased continental margin slumping frequency during sea-level lowstands above gas hydrate-bearing sediments, *Geology*, **24**, 143-146.
- Popescu, I., Lericolais, G., Panin, N., Normand, A., Dinu, C., and Drezan, E. L., 2004, The Danube submarine canyon (Black Sea): morphology and sedimentary processes, *Mar. Geol.*, **206**, 249-265.
- Posamentier, H. W., and Kolla, V., 2003, Seismic geomorphology and stratigraphy of depositional elements in deep-water settings, *J. Sediment. Res.*, **73**, 367-388.
- Posamentier, H. W., and Vail, P. R., 1988, Eustatic controls on clastic deposition II—Sequence and systems tract models, in Wilgus, C. K., Hastings, B. S., Posamentier, H., Van Wagoner, J. C., Ross, C. A., and Kendall, C. G. St.C. Ed., *Sea-Level Changes—An Integrated Approach*, SEPM Special Publication, **42**, 109-124.
- Pratson, L. F., and Coakley, B. J., 1996, A model for the headward erosion of submarine canyons induced by downslope-eroding sediment flows, *Geol. Soc. Am. Bull.*, **108**, 225-234.
- Pratson, L. F., Nittrouer, C. A., Wiberg, P. L., Steckler, M. S., Swenson, J. B., Cacchione, D. A., Karson, J. A., Murray, A. B., Wolinsky, M. A., Gerber, T. P., Mullenbach, B. L., Spinelli, G. A., Fulthorpe, C. S., O'Grady, D. B., Parker, G., Driscoll, N. W., Burger, R. L., Paola, C., Orange, D. L., Field, M. E., Friedrichs, C. T., and Fedele, J. J., 2007, Seascape evolution on clastic continental shelves and slopes, in C. A., Nittrouer, J. A., Austin, M. E., Field, J. H., Kravitz, J. P. M., Syvitski, and P. L., Wiberg, Ed., *Continental margin sedimentation*, Special Publication of the International Association of Sedimentologists, **37**, 339-380.
- Pratson, L. F., Ryan, W. B., Mountain, G. S., and Twichell, D. C., 1994, Submarine canyon initiation by downslope-eroding sediment flows: evidence in late Cenozoic strata on the New Jersey continental slope, *Geol. Soc. Am. Bull.*, **106**, 395-412.
- Rao, H. Y., Subrahmanyam, C., Rastogi, A., and Deka, B., 2002, Slope failures along the western continental margin of India: a consequence of gas-hydrate dissociation, rapid sedimentation rate, and seismic activity?, *Geo-Marine Letters*, **22**, 162-169.
- Ratzov, G., Sosson, M., Collot, J.-Y., and Migeon, S., 2012, Late Quaternary geomorphologic evolution of submarine canyons as a marker of active deformation on convergent margins: the example of the South Colombian margin, *Mar. Geol.*, **315**, 77-97.
- Restrepo-Correa, I. C., and Ojeda, G. Y., 2010, Geologic controls

- on the morphology of La Aguja submarine canyon, *J. South Am. Earth Sci.*, **29**, 861-870.
- Rise, L., Bøe, R., Riis, F., Bellec, V. K., Laberg, J. S., Eidvin, T., Elvenes, S., and Thorsnes, T., 2013, The Lofoten-Vesterålen continental margin, North Norway: Canyons and mass-movement activity, *Mar. Pet. Geol.*, **45**, 134-149.
- Shepard, F. P., 1981, Submarine canyons: multiple causes and long-time persistence, *AAPG Bulletin*, **65**, 1062-1077.
- Straub, K. M., and Mohrig, D., 2009, Constructional canyons built by sheet-like turbidity currents: observations from offshore Brunei Darussalam, *J. Sediment. Res.*, **79**, 24-39.
- Tamaki, K., Suyehiro, K., Allan, J., Ingle, J. C. Jr., and Pisciotto, K. A., 1992, Tectonic synthesis and implications of Japan Sea ODP Drilling, *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, **127/128**, 1333-1348.
- Twichell, D. C., and Roberts, D. G., 1982, Morphology, distribution, and development of submarine canyons on the United States Atlantic continental slope between Hudson and Baltimore canyons, *Geology*, **10**, 408-410.
- Vail, P. R., 1987, Seismic stratigraphy interpretation using sequence stratigraphy: Part 1: Seismic stratigraphy interpretation procedure, in Bally, A. W., Ed., *Atlas of Seismic Stratigraphy*, AAPG studies in Geology, **27**, 1-10.
- Yi, S. H., Bahk, J. J., Jia, H., and Yoo, D. G., 2012, Pliocene–Pleistocene boundary determination in hemipelagic sediment from the Ulleung Basin (East Sea, offshore Korea) inferred from terrigenous and marine palynofloras, *Rev. Palaeobot. Palynol.*, **181**, 54-63.
- Yoo, D. G., Kang, D. H., Koo, N. H., Kim, W. S., Kim, G. Y., Kim, B. Y., Chung, S. H., Kim, Y. J., Lee, H. Y., Park, K. P., Lee, G. H., and Park, S. C., 2008, Geophysical evidence for the occurrence of gas hydrate in the Ulleung Basin, East Sea, *J. Geol. Soc. Korea*, **44**, 645-655 (in Korean with English abstract).
- Yoo, D. G., Kang, N. K., Yi, B. Y., Kim, G. Y., Ryu, B. J., Lee, K. S., Lee, G. H., and Riedel, M., 2013, Occurrence and seismic characteristics of gas hydrate in the Ulleung Basin, East Sea, *Mar. Pet. Geol.*, **47**, 236-247.
- Yoon, S. H., and Chough, S. K., 1993, Evolution of Neogene sedimentary basins in the eastern continental margin of Korea, *Korean J. Petro. Geol.*, **1**, 15-27.
- Yoon, S. H., and Chough, S. K., 1995, Regional strike slip in the eastern continental margin of Korea and its tectonic implications for the evolution of Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan), *Geol. Soc. Am. Bull.*, **107**, 83-97.
- Yoon, S. H., Park, S. J., and Chough, S. K., 1997, Western boundary fault systems of Ulleung Back-arc Basin: further evidence of pull-apart opening, *Geosci. J.*, **1**, 75-88.
- Yoon, S. H., Sohn, Y. K., and Chough, S. K., 2014, Tectonic, sedimentary, and volcanic evolution of a back-arc basin in the East Sea (Sea of Japan), *Mar. Geol.*, **352**, 70-88.
- Zhou, W., Wang, Y., Gao, X., Zhu, W., Xu, Q., Xu, S., Cao, J., and Wu, J., 2015, Architecture, evolution history and controlling factors of the Baiyun submarine canyon system from the middle Miocene to Quaternary in the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea, *Mar. Pet. Geol.*, **67**, 389-407.