

탄성과 탐사자료를 이용한 울릉분지 고래 I 구조지역의 구조변형작용과 퇴적특성 해석

임선미^{1,2} · 정대교^{1,*}

¹강원대학교 지질·지구물리학과

²한국석유공사

요 약

울릉분지 남서부의 신생대 후기 퇴적층 내에 발달하고 있는 고래 I 구조의 구조발달사 및 퇴적사에 대한 연구는 석유부존 여부를 판단하는데 중요하지만 그 동안의 연구는 제한적이었다. 따라서 이번 연구에서는 3D 탄성과 자료 해석을 통해 고래 I 구조 발달사 및 퇴적환경을 보다 자세히 밝히고자 하였다. 탄성파상을 3개로 구분하여 연안, 내-외대륙붕 환경으로 해석하였고 10개의 탄성파 단위로 구분하였다. 탄성파 단위 1-3은 연안 또는 내대륙붕으로 전이되는 환경에서 퇴적되었고 탄성파 단위 3시기에 고래 I 구조가 형성되기 시작했다. 탄성파 단위 4는 연안환경에서 퇴적되었으며 점차 내대륙붕 환경으로 전이되었다. 탄성파 단위 5-10은 외대륙붕환경에서 퇴적되었으며 동 시기에 고래 I 구조의 형태가 변형되었다. 울릉분지는 후배호 열개분지로서 형성된 이후 마이오세 후기 동안 북동-남서 주향의 돌고래 구조 및 충상단층의 이동에 의해 고래 I 구조를 형성했다. 고래 I 구조는 끌림습곡으로써 북서방향의 침강습곡 양상을 띤다. 필리핀판과 유라시아판의 충돌로 북서-남동방향의 압축력을 받아 형성된 것으로 해석되며 연안-내대륙붕 환경에 위치한다. 플라이오세 이후에는 고래 V 구조의 용기와 함께 남서방향의 침강습곡구조가 발달하기 시작하였으며 유라시아판의 동진으로 인해 동서 방향의 압축력이 작용하여 2.6 Ma 이후에는 기존 충상단층이 주향이동하여 북동-남서 주향의 고래 I 배사구조가 형성되었다. 해저협곡/수로가 반복적으로 발달하는 외대륙붕환경에서 퇴적되었다.

주요어: 울릉분지, 고래 I 구조, 해저협곡, 탄성파상, 퇴적환경

Seonmi Lim and Daekyo Cheong, 2020, Structural deformation and depositional patterns of the Gorae I area of Ulleung Basin analyzed from 3D seismic data. Journal of the Geological Society of Korea. v. 56, no. 4, p. 405-424

ABSTRACT: Geological study of the Gorae I structure in the southwestern part of the late Cenozoic Ulleung Basin has rarely been performed even though the structural and depositional evolution of the Gorae I is crucial for analysis of the petroleum system in the basin. This study focuses on interpretation of the detailed history of the Gorae I structure and associated depositional environments by analyzing seismic facies of the 3D seismic and well data. Interaction between the Eurasian and Pacific Plates played a major role in the geological evolution of the Ulleung Basin, East Sea (Japan Sea) during the Cenozoic. The Basin was formed by back-arc rifting and thermal subsidence, and deformed by NW-SE compression in the late Miocene and by E-W compression from the Pliocene. The NW-plunging fold (the Gorae I structure) was induced by thrusting of the NE-SW trending Dolgorae structures during the NW-SE compressional stress. The late Miocene sediments, which were deposited in transitional environments from the coastal to the inner shelf, were generally supplied from the SW to NE direction in the area. In the E-W compressional tectonic setting, the Gorae I structure formed SW-plunging folds and NE-SW 4-way dip anticlines by strike-slip movements along the existing NE-SW thrust fault planes since the Pliocene. The growth strata sediments of the Plio-Pleistocene time consist predominantly of submarine canyon fills supplied from NNE or NE.

Key words: Ulleung Basin, Gorae I structure, submarine canyon, seismic facies, depositional environment

(Seonmi Lim and Daekyo Cheong, Division of Geology & Geophysics, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea; Seonmi Lim, Korea National Oil Corporation, Ulsan 44538, Republic of Korea)

* Corresponding author: +82-33-250-8559, E-mail: dkcheong@kangwon.ac.kr

1. 서론

울릉분지는 태평양판과 유라시아판의 움직임으로 인해 형성된 후배호 퇴적분지로 올리고세 이후의 퇴적물로 채워져 있다(Chough and Barg, 1987). 울릉분지는 동쪽으로는 오키뱅크, 서쪽으로 한반도, 남쪽으로 일본열도, 북쪽으로 한국대지와 접하고 있으며, 수심은 울릉분지의 북 또는 북동쪽으로 가면서 2000-2500 m에 이른다(Chough *et al.*, 2000) (그림 1a).

연구지역은 울릉분지 남서부에 위치한 고래 I 구조 지역으로 현재 수심 100-200 m 구간에 위치한다.

울릉분지 퇴적층에 관한 연구는 주로 2D 탄성파 및 시추공 자료를 이용해 탄성파 층서 및 구조를 해석하여 각 해당 연구지역 퇴적층의 형성과 진화를 밝히는 내용들로 이루어져 있다(Chough *et al.*, 1997; Lee and Suk, 1998; Lee *et al.*, 2001, 2011; Yoon *et al.*, 2003; Park *et al.*, 2019). Chough *et al.* (1997)은 대륙붕단에 발달하는 전진퇴적체의 형태를 구조의

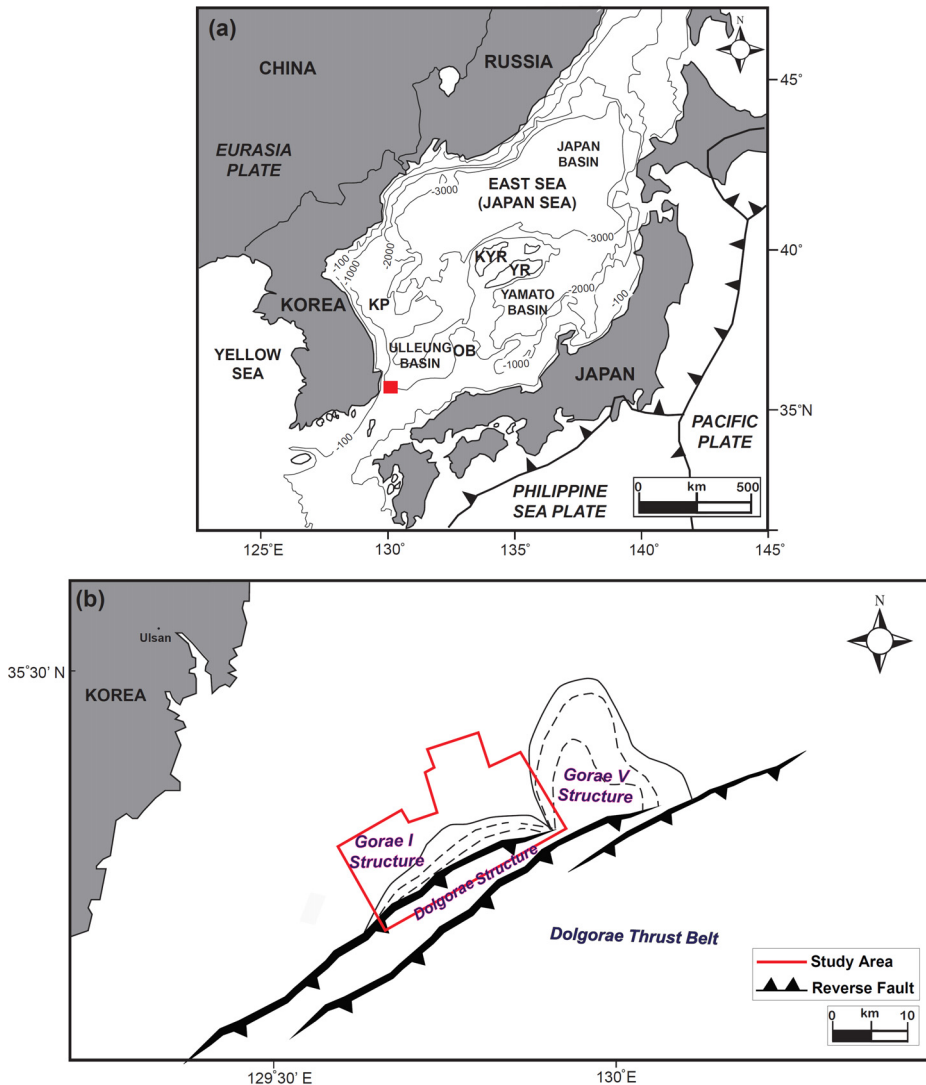


Fig. 1. (a) Physiographic map of the East Sea (modified from (Lee *et al.*, 2011) with plate boundary (modified from (Taira, 2001). KP: Korea Plateau, KYR: Kita-Yamato Ridge, OB: Oki Bank, YR: Yamato Ridge. Red box indicates the location of study area. (b) Location map of Gorae I, Gorae V and Dolgorae structures. Each structure indicates shape at the time of formation.

영향, 상대해수면 변화 및 퇴적물 공급량과 관련지어 시퀀스(sequence) 해석을 실시하였다. Lee and Suk (1998)은 UIG (Ulleung Interplain Gap)지역에 대한 탄성파상 분석을 통해 심해환경에서 형성된 중력류 퇴적층으로 해석하였으며, Lee *et al.* (2001)은 울릉분지의 심해지역 탄성파 퇴적상을 분석하여 심해지역의 분지발달사를 규명하였다. Yoon *et al.* (2003)은 울릉분지 대륙붕 및 대륙사면에 발달하는 퇴적체를 상대해수면 변화 및 퇴적물 공급량에 따른 변화와 함께 해석하여 시퀀스 분석을 수행하였고, Park *et al.* (2019)는 마이오세 동안 대륙붕단 및 대륙사면에서 발달하는 해저협곡의 형성 및 구조발달사를 규명하였다.

또한 연구지역의 고래 I 구조의 형성 시기는 석유배태와 관련이 깊기 때문에 석유시스템 분석에 필수적이지만 거의 연구가 수행되지 않았는데, Lee *et al.* (2011)은 2D 탄성파 자료의 구조복원을 통해 고래 I 구조는 10.5-5.5 Ma 동안 활동했었다고 해석한 바 있다. 하지만 2D 탄성파 자료를 통한 구조복원은 울릉분지 내 부정합면 이후에 발달하는 주향이동 단층의 움직임에 대해 설명하기 어렵다.

그동안 대부분의 연구는 이번 연구지역(연안 및 대륙붕)보다 북쪽 내지 북동쪽 지역(대륙사면 및 심해)에 집중되어 이번 연구 대상지역에 대한 세부적인 지질구조 형성과정 및 퇴적작용에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 또한 그동안의 연구는 2D 탄성파 자료를 주로 이용하여 연구가 진행되어왔는데, 기존 2D 탄성파자료에서는 플라이오세 이후의 탄성파상(수로 형태)을 해석하기 어려울 정도로 낮은 탄성파 해상도 때문에 세부적인 해석이 수행되기 어려웠다. 특히 플라이오세 이후의 층들은 석유시스템 분석 관점에서 주요 관심 대상층이 아니었기 때문에 연구가 거의 수행되지 않았다.

따라서 이번 연구에서는 그 동안 획득한 3D 탄성파 자료 도면에서 마이오세 이후부터 해저면까지 발달하는 퇴적체에 대해 특징적인 탄성파상을 분류하고, 각 시기별로 구분된 탄성파 단위를 구성하고 있는 탄성파상을 이용해 탄성파 특성 변화를 기재 해석하고자 한다. 이를 통해 고래 I 구조의 생성 시기와 변화 과정을 도출하고 이러한 구조 발달에 따른 퇴적물 공급 방향 변화와 퇴적환경 진화를 해석하여 울릉분지 고래 I 구조지역의 지질 진화 모델을 새로

게 제시하고자 하였다.

2. 지질개요

울릉분지가 위치한 동해는 유라시아판의 북동부에 위치하고 있고, 일본 열도를 사이에 두고 필리핀 판 및 태평양판과 접하고 있으며 울릉분지, 일본분지 및 야마토분지로 구성된다(그림 1a). 동해의 열림은 올리고세 전기(32 Ma)에 일본분지 내에서 처음 시작된 것으로 추정되는 열개작용에 의해 촉발된 후, 후기 올리고세(28 Ma)에는 울릉분지와 야마토분지에 이르기까지 열개작용이 연장되어 동해가 현재의 형태로 생성된 것으로 해석된다(Tamaki *et al.*, 1992).

울릉분지는 유라시아판 하부로 태평양판이 섭입하여 형성된 후배호 분지의 일부로 올리고세 말부터 형성되기 시작하였고, 전기 마이오세 이후 열적 침강 단계를 거쳤으며 중기 마이오세 이후에는 두 차례의 압축력이 작용하여 울릉분지는 점차 닫히기 시작한 것으로 추정된다(Chough and Barg, 1987). 마이오세 중기-후기 동안 보닌아크와 유라시아판의 충돌로 난카이해구 섭입대가 일본열도 방향으로 후퇴하면서 북서-남동방향의 압축력이 작용하여 분지가 1차로 닫히기 시작하였으며(Matsuda, 1978), 플라이오세 이후에는 유라시아판의 동진에 의해 동서방향의 압축력이 작용하여 분지가 2차로 닫히기 시작한 것으로 보인다(Tamaki and Honza, 1985).

울릉분지의 음향기반암은 퇴적 중심부에서는 해저면 하부 약 10 km 깊이에 존재하며 분지는 약 8-10 km 두께의 신생대 퇴적층으로 채워져 있다(Barg, 1986; Park, 1992). 퇴적층은 쇄설성 퇴적암으로 구성되어 있는데, 마이오세 초기에는 육성-연안환경에서 퇴적물이 퇴적되었으나 점차 천해, 심해환경으로 전이되어 퇴적되었다(Chough *et al.*, 2000). 현재 울릉분지는 수심 100 m 이내는 내대륙붕 환경으로, 100-300 m는 외대륙붕환경으로 구분하고, 대륙붕단은 수심 300-400 m 사이에 위치하는 것으로 정의하고 있다(Chough *et al.*, 2000). 또한 울릉분지로 유입되는 대부분의 퇴적물은 광역적으로 남서에서 북동방향으로 낙동강을 통해 공급되며(Um *et al.*, 2017) 돌고래 스트러스트 벨트(Dolgorae Thrust Belt)가 융기되기 시작하면서 마이오세 후기엔 대륙붕단의 형태 및 방향이 변화되어 돌고래 스트러스트 벨트로부터 침식된

일부 퇴적물이 공급된 것으로 추정된다(Chough *et al.*, 1997).

3. 연구지역 및 방법

연구지역은 울릉분지 남서쪽에 위치한 고래 I 구조지역으로 고래 I 및 고래 V, 돌고래 구조의 일부를 포함하고 있다(그림 1b). 고래 I 구조는 10.6 Ma 이후에 형성된 북서 방향의 침강습곡(NW-plunging fold) 구조로 이번 연구에서는 침강습곡 구조의 동쪽에 위치한 구조를 고래 V 구조, 남쪽에 위치한 구조를 돌고래 구조라 정의하였다. 연구지역은 돌고래 스트러스트 벨트와 고래 구조대의 경계면에 위치하고 있다(그림 1b).

2012년 및 2015년에 취득된 3D 탄성파자료를 해석하였으며 연구지역의 면적은 약 390 km²이다. 또한 연구지역 내 3 곳의 시추공인 고래 I, 고래 I-1, 고래 I-2 자료와 VSP (Vertical Seismic Profile) 자료를 이용하여 탄성파-시추공 대비(seismic-well tie)를 실시하고 지질학적으로 해석하였다(그림 2).

탄성파 자료 해석은 IHS사의 Kingdom 소프트웨어를 이용하여 수행하였으며 탄성파 층서 해석은 시추공 자료와 함께 탄성파상 해석을 통해 지질학적인 해석의 토대를 제시한 Mitchum *et al.* (1977) 및 Sangree

and Widmier (1977)의 이론을 바탕으로 수행하였다. 이러한 탄성파 층서 해석을 통해 시추되지 않은 지역의 암상 및 퇴적환경까지 유추 해석 할 수 있었다.

각각의 탄성파 시퀀스 경계는 고래 I 공에서 제안된 지질연대(KNOC, 2019)와 대비하여 설정하였으며 각각의 시퀀스 경계는 온랩(onlap), 침식절단(truncation), 다운랩(downlap), 탑랩(toplap) 유형을 인지하여 구분하였다. 해저면을 비롯하여 총 11개의 탄성파 층서 경계를 구분하였다(그림 3).

4. 탄성파 자료 해석

탄성파상은 진폭, 주파수, 내부 형태 등의 요소에 의해 특징지어진다(표 1). 탄성파상 1은 저-중 정도의 진폭, 불연속적이며 케오틱(chaotic)한 특성을 보인다. 이는 다양한 에너지 환경 하에서 퇴적된 퇴적물을 의미하고 대륙붕 내 수로 또는 주변해(marginal marine) 운반작용에 의해 형성된 퇴적체로 해석된다(Mitchum *et al.*, 1977; Sangree and Widmier, 1977). 따라서 탄성파 상 1을 주변해 퇴적체로 해석하였다.

탄성파상 2는 고진폭, 저주파수로 연장성이 좋으며 평행한 반사면을 보인다. 이는 셰일, 사암 및 실트암의 교호층으로 구성된 퇴적층으로 추정되며 파도 등의 영향을 받아 천해 환경에서 형성된 퇴적체로

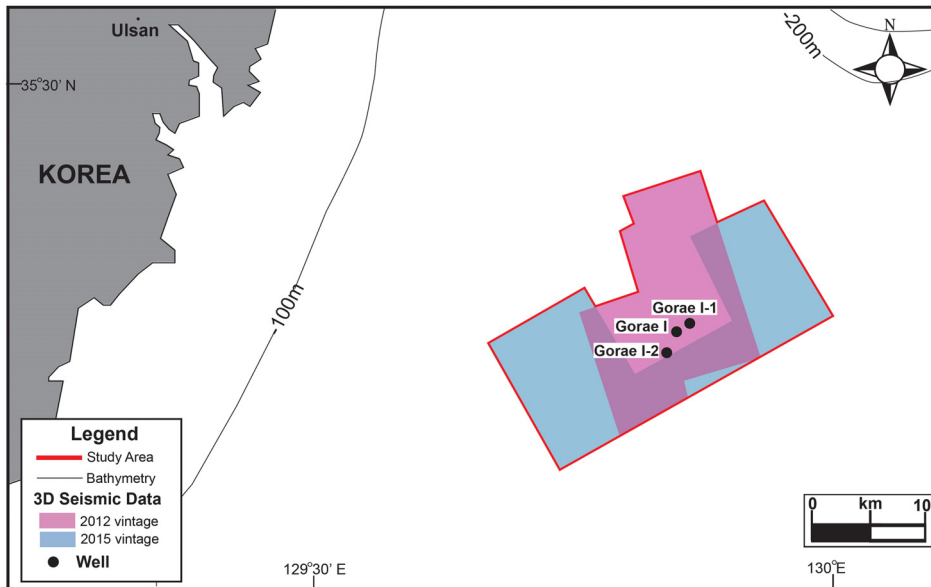


Fig. 2. Location map of seismic and well data used for this study.

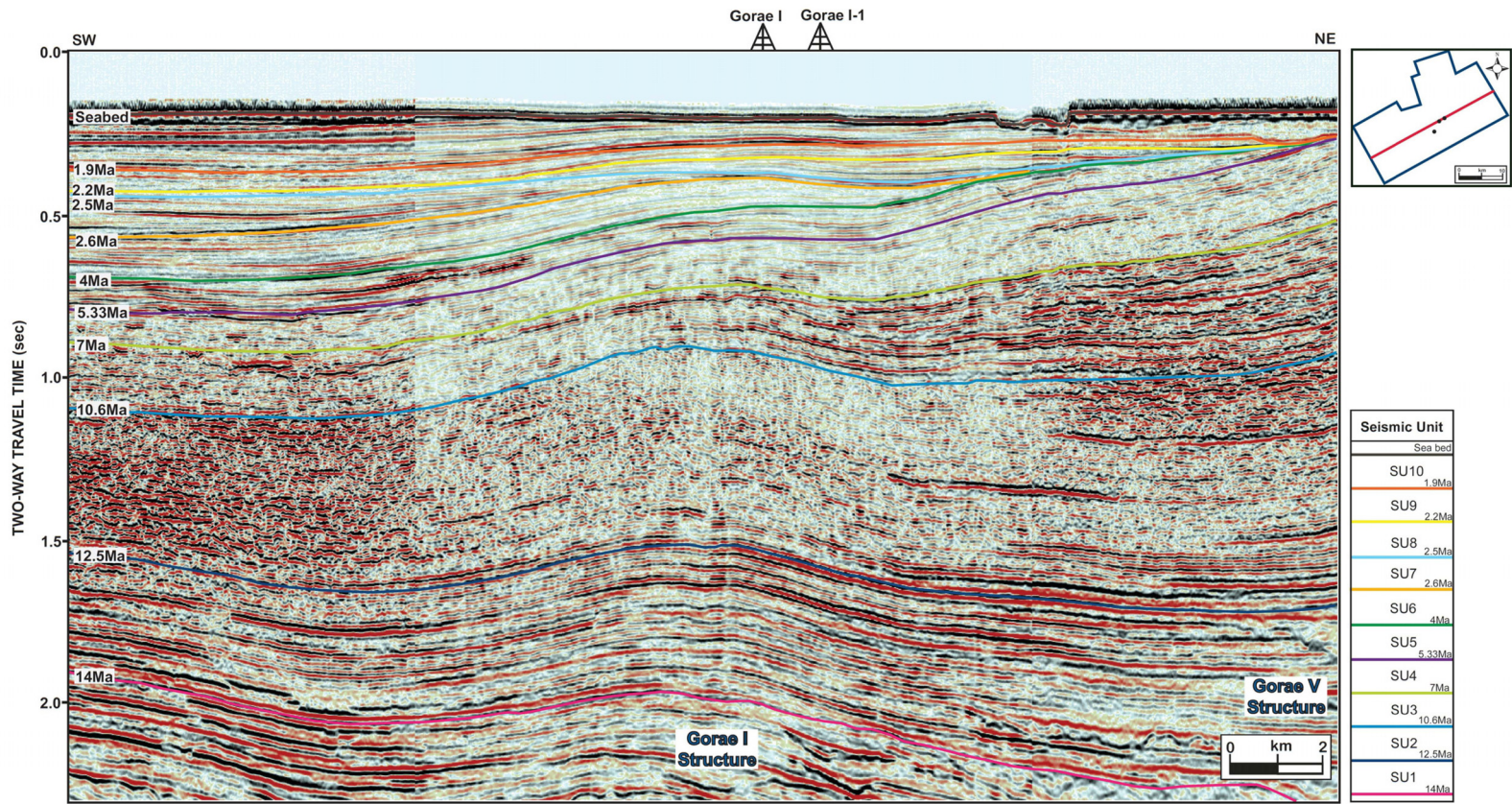
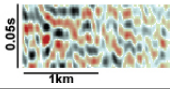
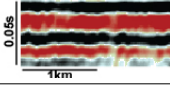
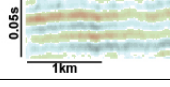


Fig. 3. A northeast-southwest seismic section showing 10 seismic units. SU: Seismic unit.

Table 1. Seismic facies of this study area and their characteristics.

Facies	Characteristics	Seismic Appearance	Geological Interpretation
Facies 1	Low-Moderate amplitude, discontinuity, chaotic		Coastal
Facies 2	High amplitude, low frequency, continuity to semicontinuity, parallel to subparallel		Inner shelf
Facies 3	Low amplitude, high frequency, continuity to semicontinuity, parallel to subparallel, occasional downlap		Outer shelf

해석되어(Sangree and Widmier, 1977) 내대륙붕 퇴적체로 해석하였다.

탄성파상 3은 저진폭, 고주파수로 나타나며 평행 또는 준평행 특성을 보이며 발달한다. 또한 대륙붕 단과 연결된 채널 형태를 보이며 채널 내부 퇴적체는 측방 연장성이 좋고 베이스랩(baselap)을 보인다. 이는 외대륙붕 퇴적체로 해석하였다.

탄성파 단위는 가장 오래된 것부터 젊은 순서대로 탄성파 단위 1에서 10까지 구분하였다(그림 3). 각각의 탄성파 단위에 대해 시간 구조도(Time structure map) 및 등시층후도(Isochron map)를 작성하여 연구지역 퇴적층의 형성과 진화 과정을 해석하였다. 각각의 탄성파 단위의 탄성파상을 해석하여 시추공 자료와 함께 퇴적환경을 해석하였고 작성된 시간 구조도를 통해서 구조의 형태 및 구조 운동 시기 등을 분석했다. 또한 등시층후도를 통해 퇴적층의 두께 변화를 추적하여 퇴적중심부(depocenter) 및 구조운동시기 등 연구지역의 지질진화과정을 해석하였다.

기재: 탄성파 단위 1(14-12.5 Ma)은 주로 탄성파상 2가 두드러지며 남서쪽으로 갈수록 탄성파 상 1이 발달하고 북동쪽으로 가면서 탄성파 상 3이 발달한다(그림 3). 탄성파 단위 1의 현재 분포는 연구지역 남쪽에서 높고 북쪽으로 가면서 낮게 나타난다(그림 4). 그리고 퇴적층의 두께는 남서에서 북동쪽으로 가면서 보다 두껍게 발달한다(그림 5).

해석: 탄성파 단위 1은 구조적으로 안정된 열적 침강 상태에서 퇴적되었다. 퇴적환경은 주로 내대륙붕 환경으로 해석되며 남서에서 북동쪽으로 가면서 연안환경에서 내·외대륙붕 환경으로 전이되는 것으로 해석된다. 퇴적물은 퇴적 당시의 광역 지질환경을 고려해보면 남서에서 북동방향으로 공급되었을

것으로 추정된다.

기재: 탄성파 단위 2(12.5-10.6 Ma)는 대표적으로 탄성파 상 1로 구성되고 북동방향으로 가면서 탄성파 상 2가 발달하기도 한다(그림 3). 탄성파 단위 1과 유사하게 퇴적층의 분포는 남쪽이 높고 북쪽으로 가면서 낮게 나타나고 층의 두께 또한 북동쪽으로 갈수록 보다 두껍게 발달된다(그림 4, 5).

해석: 탄성파 단위 2는 탄성파 단위 1과 마찬가지로 지구조적으로 안정된 열적 침강 상태에서 퇴적된 것으로 해석되며 퇴적환경은 주로 연안 환경이었고 북동쪽으로 가면서 내대륙붕 환경으로 전이하는 것으로 해석된다. 탄성파 단위 1과 마찬가지로 퇴적물은 남서에서 북동방향으로 공급되었을 것을 판단된다.

기재: 탄성파 단위 3(10.6-7 Ma)의 탄성파 상은 남서쪽에서는 탄성파 상 1이 우세하게 나타나며 북동쪽으로 갈수록 탄성파 상 2가 나타난다(그림 3). 탄성파 단위 1 및 2와 달리 현재 층의 분포는 남동쪽이 높고 북서쪽으로 가면서 낮게 나타나고 층의 두께는 남쪽이 얇고 북쪽으로 갈수록 두껍게 발달하며 남동쪽 지역에서는 무퇴적 또는 침식상태를 보여준다(그림 4, 5).

해석: 탄성파 단위 3은 이전 탄성파 단위들과는 달리 구조도와 등시층후도의 분포 양상이 유사하게 나타나는 것으로 보아 이 시기의 퇴적체는 10.6 Ma 이후 새로이 형성된 지질구조의 영향을 받으며 퇴적되었음을 인지할 수 있다. 이 시기에 연구지역 남쪽에서는 돌고래 구조의 융기작용이 발생하였고 부정합면이 형성되었으며 고래 I 구조가 북서 방향의 침강습곡(NW-plunging fold) 형태로 발달하였다. 퇴적환경은 연안에서 내대륙붕 환경으로 전이되는 환경으로 해석되며, 퇴적물의 주 공급방향은 남서에서

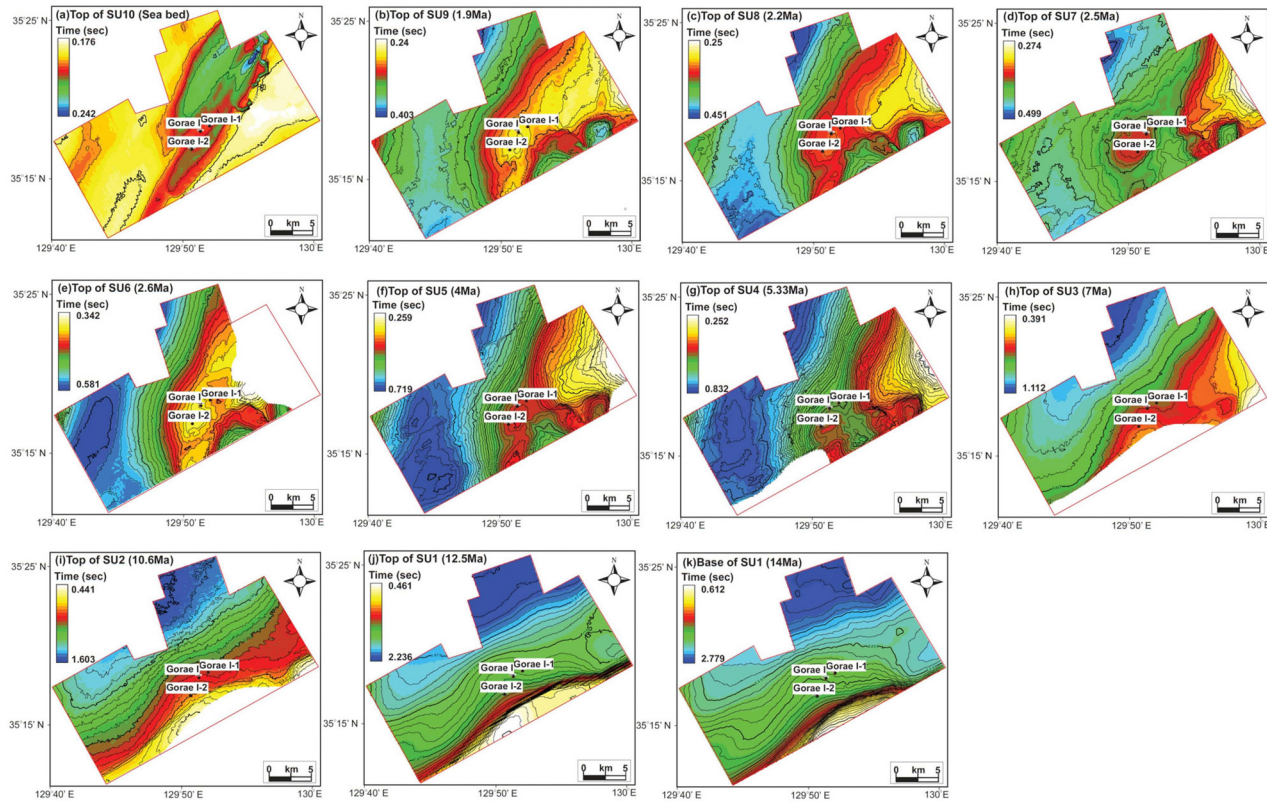


Fig. 4. (a) The present sea bed is described by the time structure map of the top of SU10. Distinguished submarine canyon features are well recorded on the sea bottom. (b) Time structure map of the top of SU9 (1.9 Ma). Small four way dip closures are developed within the Gorae I area. Structural highs are identified in the Gorae I and Gorae V, and in the northwestern corner of the study area. (c) Time structure map of the top of SU8 (2.2 Ma) similar with that of the top of SU9. The Gorae I area is generally attached with the Gorae V structure toward east. The strike of west limb in the Gorae I and V plunging fold is NE-SW. (d) Time structure map of top of SU7 (2.5 Ma) slightly modified from the general trends due to submarine canyon and channel incisions. (e) Time structure map of top of SU6 (2.6 Ma). (f) Time structure map of top of SU5 (4 Ma). NE-SW trending strike-slip faults are well observed. (g) Time structure map of the top of SU4 (5.33 Ma). The structural patterns are highly controlled by cut and fill activities within the study area from 5.3Ma to present time. (h) Time structure map of the top of SU3 (7 Ma) showing the Gorae I structure attached with the Dolgorae thrust area toward southeast. The general dipping trend of the west limb is changing from NE-SW to ENE-WSW within this interval. Southwestern edge of the Gorae V which is separated from the Gorae I is well observed. (i) The NW plunging Gorae I feature is well defined with the time structure map of the top of SU2 (10.6 Ma). The plunging direction of SU2 is changing from NNE of SU3. (j) Time structure map of top of SU1 (12.5 Ma) and (k) base of SU1 (14 Ma) showing the same plunging direction with the top of SU2.

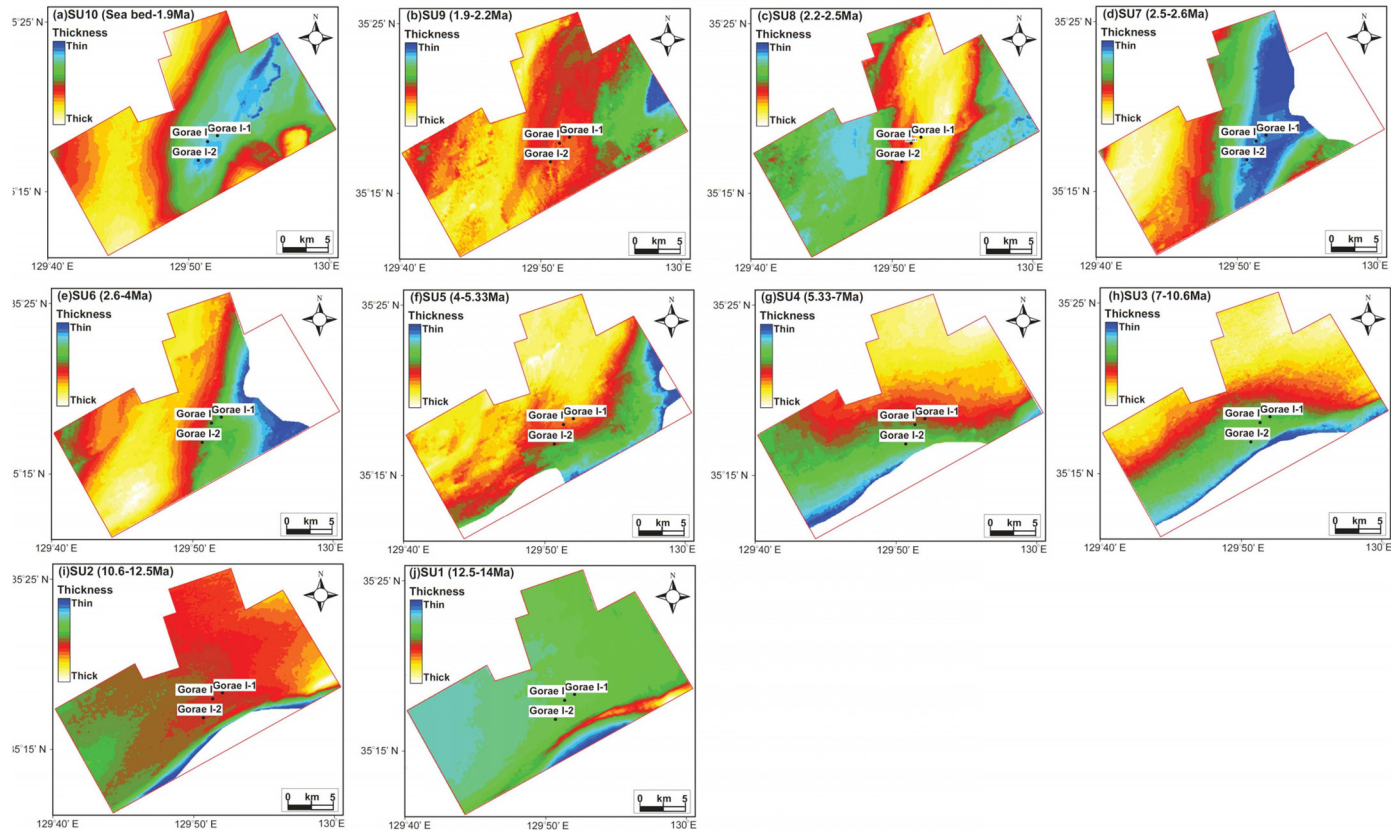


Fig. 5. (a) Isochron map of SU10 (sea bed - 1.9 Ma). A NE-SW trending main thin part (blue) is controlled by the present submarine canyon incision. (b) Isochron map of SU9 (1.9-2.2 Ma). A small portion of submarine canyon cut and fill feature is remain in the NE corner. (c) Isochron map of SU8 (2.2-2.5 Ma). A striking NE-SW trending thick body (yellow) is submarine canyon fill. (d) Isochron map of SU7 (2.5-2.6 Ma). A thin opposite feature compared to SU8 is controlled by submarine canyon cut. (e) Isochron map of SU6 (2.6-4 Ma). A NW corner and NE part are getting thin due to structural developments. (f) Isochron map of SU5 (4-5.33 Ma). A thinning NE part is controlled by submarine cut and fill. Isochron maps from the sea bed to 5.3Ma in the study area are mainly controlled by submarine canyon activities. (g) Isochron map of SU4 (5.33-7 Ma). Growth strata of the Gorae I and the SW structure generate the thinning toward SW and SE features. (h) The growing of Gorae I structure provides generally thinning toward SE isochrons map of SU3 (7-10.6 Ma). (i) Isochron map of SU2 (10.6-12.5 Ma). A gentle thickening toward NE caused by thermal subsidence is observed. Without structural development, thermal subsidence of the Ulleung Basin provides deepening of the basin center which is NE direction in the study area. (j) Isochron map of SU1 (12.5-14 Ma). Thermal subsidence of the basin generates the subtle thickening toward NE.

북동방향으로 추정된다.

기재: 탄성과 단위 4(7-5.33 Ma)는 주로 탄성과 상 1로 구성되어 있으며 상부로 가면서 탄성과 상 2가 발달한다(그림 3). 이 시기엔 전반적으로 연구지역의 동쪽인 고래 V 구조 부분이 높게 나타나고 서쪽으로 가면서 낮아진다(그림 4). 퇴적층의 두께 분포 경향은 탄성과 단위 3과 유사하지만 보다 서쪽이 얇게 나타나고 북동쪽을 가면서 두꺼워진다. 탄성과 단위 2 및 3과 더불어 남쪽이 무퇴적 또는 침식되어 나타난다(그림 5).

해석: 탄성과 단위 4의 퇴적 기간 동안에는 용기 작용이 돌고래 구조뿐만 아니라 연구지역의 서쪽에서도 발생하고 있었던 것으로 해석된다. 퇴적환경은 주로 연안환경으로 해석되며 상부로 가면서 내대륙붕 환경이 발달하는 것으로 해석된다.

기재: 탄성과 단위 5(5.33-4 Ma)는 주로 탄성과 상 3으로 구성된다. 탄성과 도면에서 경사층형(cliniform)의 형태를 인지할 수 있으며(그림 3) 이전 탄성과 단위 4와 유사하게 구조도 상에서 연구지역의 동쪽인 고래 V 구조 부분이 높게 나타나며 서쪽으로 가면서 낮게 나타난다(그림 4). 이전 탄성과 단위와 달리 층의 두께는 고래 V 구조 부분에서 얇게 나타나거나 무퇴적 또는 침식되어 나타나며 북서 또는 북쪽으로 가면서 두꺼워진다. 또한 연구지역 내 돌고래 구조 주변에서는 탄성과 단위 4보다 침식 또는 무퇴적된 부분이 감소하였으며 4 Ma 층서 경계는 연구지역 전체에서 확인 가능하다(그림 5).

해석: 탄성과 단위 5 퇴적 시기부터(5.33 Ma 이후) 고래 V 구조의 용기작용이 시작된 것으로 해석되며 이와 더불어 고래 I 구조도 남서 방향의 침강습곡(SW-plunging fold) 구조로 변화된 것으로 추정된다. 돌고래 구조에서는 용기에 의한 침식작용보다 퇴적작용이 우세했던 것으로 판단된다. 또한 경사층형(cliniform)의 형태가 발달되는데 이는 해저수로 퇴적체로 해석된다(그림 11). 남서방향에서 북동방향으로 해저수가 발달하며 퇴적환경은 외대륙붕 환경으로 해석되고, 퇴적물은 남서에서 북동방향으로 공급된 것으로 보인다.

기재: 탄성과 단위 6(4-2.6 Ma)은 주로 탄성과 상 3으로 구성되어 있다. 퇴적층은 썩기형태인데 고래 V 구조방향으로 가면서 점차 얇아지다가 무퇴적 또는 삭박되어 있는 상태를 보인다(그림 3). 퇴적층의

분포는 이전 탄성과 단위 5와 유사하게 고래 V 구조 방향으로 가며 높게 발달하고 서쪽 부분으로 가면서 낮게 나타나지만, 층의 두께 분포 경향은 이전과 다르게 북동-남서방향으로 발달하고 연구지역 동쪽인 고래 V 구조 지역에서는 대부분 무퇴적 또는 침식된 상태를 보여준다(그림 4, 5).

해석: 탄성과 단위 6은 고래 V 구조의 용기 작용의 영향을 받으며 퇴적되었으며 상부 탄성과 단위 8에 분포하고 있는 해저협곡에 의한 침식작용으로 층의 두께 변화가 발생한 것으로 추정된다. 특히 이로 인해 고래 V 구조 발달 지역에서는 대부분 침식되어 나타난다. 퇴적환경은 외대륙붕 환경으로 해석된다.

기재: 탄성과 단위 7(2.6-2.5 Ma)은 탄성과 상 3으로 주로 구성되며 고래 I 구조에 온랩(onlap)하는 양상이 나타난다(그림 3). 구조도 상에서 고래 V 구조 쪽이 높게 나타나고 서쪽으로 가면서 점차 낮아지고 북동-남서 방향의 배사구조가 인지된다(그림 4). 층의 두께 분포 경향은 이전 탄성과 단위 6과 유사하게 북동-남서방향으로 발달하며 고래 V 구조 부분은 무퇴적 또는 삭박된 상태로 나타난다. 중앙의 북동-남서 지역에서 퇴적층이 가장 얇게 분포하다가 양 옆으로 가면서 점차 두꺼워지는 양상을 확인할 수 있다(그림 5).

해석: 탄성과 단위 7이 퇴적되는 동안 고래 V 구조의 용기가 계속 되었으며 고래 I 구조는 2.6 Ma 이후 용기 작용을 받은 것으로 해석된다. 이로 인해 고래 I 구조는 남서 방향의 침강습곡(SW-plunging fold) 구조 내에 북동-남서 주향의 배사구조가 추가로 형성되었다. 또한 2.5 Ma에 형성된 북북동-남남서 방향의 해저협곡에 의해 고래 I 구조의 탄성과 단위 7은 일부 삭박되어 구조가 변형되었다. 퇴적환경은 외대륙붕 환경으로 퇴적물의 주 공급 방향은 남남서에서 북북동방향으로 해석된다.

기재: 탄성과 단위 8(2.5-2.2 Ma)은 탄성과 상 3으로 주로 구성되며 완만한 경사층형(cliniform)의 형태를 가지며 하부 탄성과 단위 6과 7을 일부 침식하면서 채우고 있는 상태를 보인다(그림 3). 경사층형의 형태는 남남서에서 북북동방향으로 발달한다. 구조도 상에서 이전 탄성과 단위와 유사하게 고래 V 구조가 높고 서쪽으로 가면서 낮게 나타나며 북동-남서 주향의 배사구조가 인지된다(그림 4). 층의 두께는 탄성과 단위 7과 반대로 얇았던 부분이 가장 두

겹게 발달하고 양 옆으로 보다 얇게 발달하는 모습을 볼 수 있다(그림 5).

해석: 탄성파 단위 8은 2.5 Ma에 형성된 해저협곡의 내부를 채우는 퇴적체이다. 해저협곡은 북북동-남남서 방향으로 발달한다. 퇴적환경은 외대륙붕 환경으로 퇴적물 주 공급 방향은 남남서에서 북북동 방향으로 해석된다.

기재: 탄성파 단위 9(2.2-1.9 Ma)는 탄성파 상 3으로 구성되어 있고 탄성파 단위 8과 유사하게 경사층 형이 발달하고(그림 3) 구조도에서 보이는 퇴적층의 분포도 유사한 형태를 보인다(그림 4). 층의 두께는 고래 V 구조 부분에서 층이 얇게 발달하다가 점차 서쪽으로 갈수록 두껍게 발달하는 양상을 확인할 수 있고, 퇴적층 두께 발달 방향이 이전 탄성파 단위와 유사하다(그림 5).

해석: 탄성파 단위 9에도 이전 탄성파 단위에서 관찰된 것과 유사하게 북북동-남남서방향의 해저협

곡이 발달한다. 퇴적환경은 외대륙붕 환경이며 퇴적물 공급 방향은 남남서-북북동방향이다.

기재: 탄성파 단위 10(1.9 Ma 이후)은 탄성파 상 3으로 구성되어 있다. 탄성파 도면에서 보면 해저면 근처까지 배사구조 및 주향이동단층이 발달하고 있다. 해저면에서 해저수로 형태가 관찰되기도 하고 탄성파 단위 10 하부 퇴적층에서도 관찰된다(그림 3). 퇴적층의 발달 방향은 이전과 유사하게 북동-남서 방향으로 발달하며 고래 I 시추공 근처에서는 얇게 발달하면서 양 옆으로 가면서 두꺼워지는 양상을 확인할 수 있다(그림 4, 5).

해석: 탄성파 단위 10은 최상부까지 배사구조가 발달한 것으로 보아 최근까지 구조운동을 받아 고래 I 구조에도 영향을 주었을 것으로 해석된다. 또한 해저면에 북북동-남남서 방향으로 해저협곡이 발달하고 있어 하부 퇴적층을 침식하는 모습이 관찰되며 탄성파 단위 10 하부에도 해저협곡이 발달하고 있어

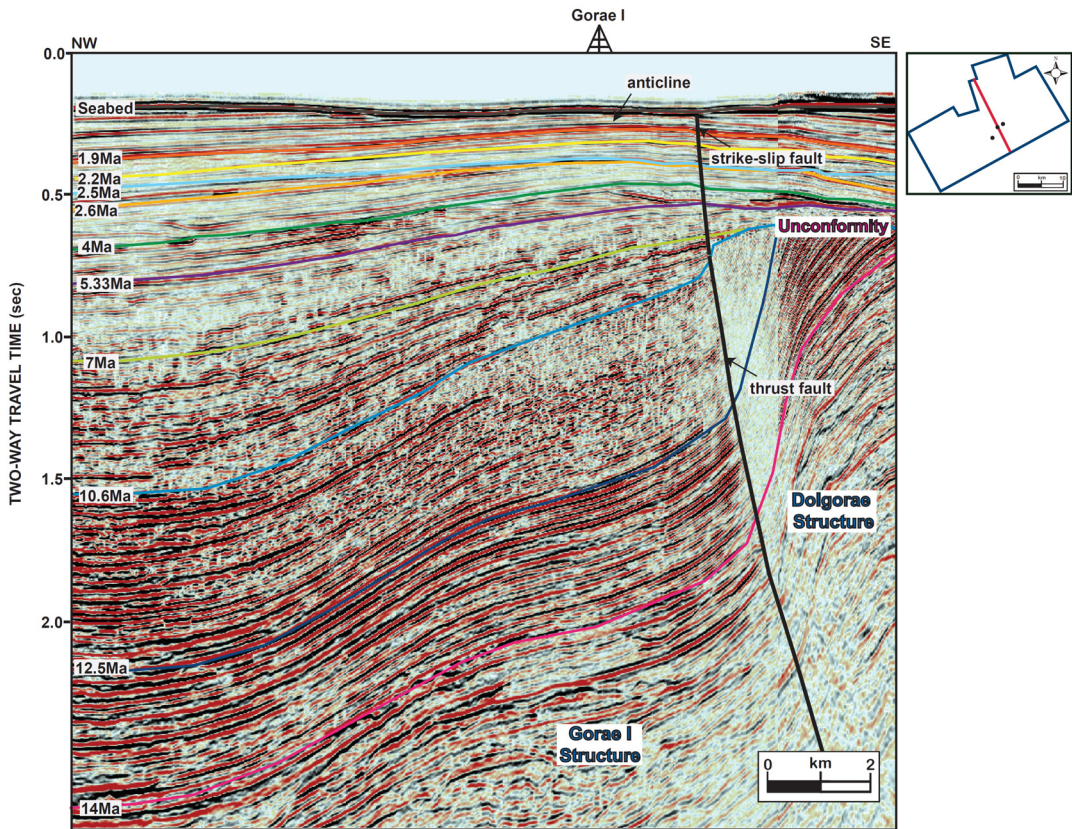


Fig. 6. A northwest-southeast seismic section showing the Gorae I structure as a plunging fold with a Dolgorae structure and reactivated reverse fault by strike slip movement.

탄성과 단위 9의 일부 퇴적층을 침식하기도 했다. 퇴적환경은 외대륙붕 환경으로 퇴적물은 남남서에서 북북동 방향으로 공급된 것으로 보인다.

5. 토 의

5.1 고래 I 구조 발달

탄성과 자료를 분석한 결과, 고래 I 구조는 후기 마이오세 10.6 Ma 이후 돌고래 구조의 충상단층 이동에 의해 형성된 끌림습곡(drag fold)으로 해석되며 북서 방향의 침강습곡(NW-plunging fold) 구조를 보이고 있다(그림 6, 7c). 울릉분지는 마이오세 중기-후기 동안 보닌아크와 혼슈의 충돌에 의해 유발된 북서-남동방향의 압축력이 작용하면서 분지가 닫히기 시작하였는데(Matsuda, 1978), 이러한 압축력의 영향으로 고래 I 구조가 형성된 것으로 추정된다(그림 7d).

Lee *et al.* (2011) 연구에 따르면 고래 I 구조는 10.5-8.2 Ma에 형성되기 시작하여 6.3 Ma에 일부 침식작용을 받았고 5.5 Ma에 강력한 용기작용을 받는 등 10.5-5.5 Ma 동안 고래 I 구조가 형성되었다고 해석하였지만 본 3D 탄성파 자료를 분석한 결과 5.5 Ma 이후에도 고래 I 구조의 움직임이 있었던 것으로 추

정된다.

플라이오세(5.33 Ma) 이후부터는 고래 V 구조의 용기가 시작하여 고래 I 구조에 영향을 미쳤다. 고래 V 구조의 용기로 인해 연구지역에는 남서방향의 침강습곡(SW-plunging fold) 구조가 추가로 형성되었다. 또한 2.6 Ma 이후에는 고래 I 구조의 용기작용이 발생하였는데, 이로 인해 침강습곡 구조 내에 북동-남서 주향의 배사구조가 형성되고 주향이동 단층이 발달하였다(그림 6, 7a). 이는 플라이오세 이후부터 유라시아판의 동진으로 인해 동서 방향의 압축력이 작용하여(Tamaki and Honza, 1985) 기존의 북동-남서 방향의 충상단층이 주향이동을 하게 되면서 북동-남서주향의 배사구조 및 주향이동단층을 형성한 것으로 보인다(그림 7b, 8). 만일 순수하게 동서방향의 압축력이 작용하여 배사구조가 형성되었다면 남북방향의 습곡축을 갖게 되는데 고래 I 구조는 동서방향의 압축력을 받았음에도 불구하고 북동-남서주향의 배사구조 및 주향이동 단층의 특징을 갖고 있다. 이는 동서방향의 압축력으로 충상단층이 주향이동했다는 것을 뒷받침해준다.

고래 I의 배사구조 및 단층의 움직임은 해지면 바로 아래까지 관찰된다(그림 6). 현재 울릉분지에서 관찰되는 유라시아판의 동진으로 유발된 동서방향

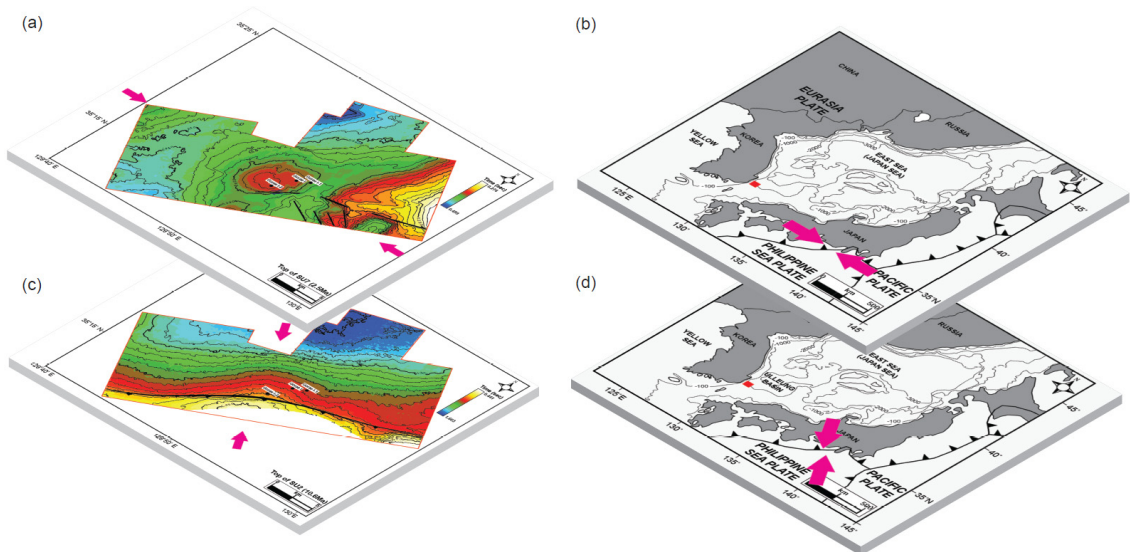


Fig. 7. (a) Time structure map of 2.5 Ma showing northeast anticline of the Gorae I structure. (b) E-W compression by eastward movement of the Eurasian Plate after Pliocene. (c) Time structure map of 10.6 Ma showing northwest plunging of the Gorae I structure. (d) NW-SE compression due to subduction of the Philippine Plate to the Eurasian Plate during 10.6-5.33 Ma. Arrows mean direction of compression.

Table 2. Interpretation of depositional environments of study area.

Seismic Unit	Seismic Facies	Biostratigraphy (KNOC, 2019)	Well Log Pattern/ Rock Sample	Depositional Environment
SU10 1.9 Ma	Facies 3	No data	Cylindrical shape	SW NE Outer shelf
SU9 2.2 Ma				
SU8 2.5 Ma				
SU7 2.6 Ma				
SU6 4 Ma				
SU5 5.33 Ma	Facies 1(SW), Facies 2(NE)	Coastal to inner shelf	Bell shape, Thin sandstone (Max. 5 m) Shale dominant, Coal bed	Inner shelf
SU4 7 Ma				
SU3 10.6 Ma	Facies 1	Coastal to inner shelf	Bell shape (Funnel) Thick sandstone (Max. 15 m)	Coastal Inner shelf
SU2 12.5 Ma				
SU1 14 Ma	Facies 2			Inner shelf

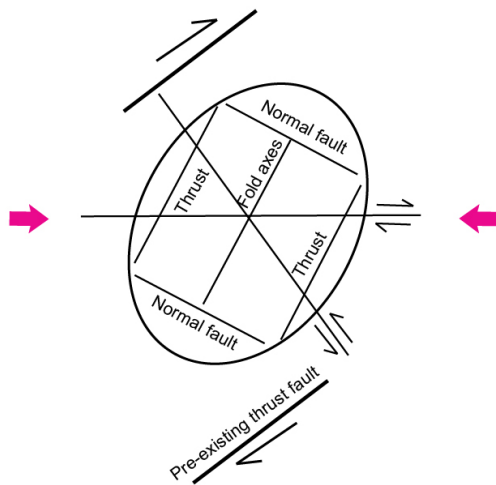


Fig. 8. Strain ellipse of the Gorae I structure. Formation of the northeast-southwest Gorae I anticline and reactivation of pre-existing thrust faults with strike slip movement due to east-west compression after the Pliocene. Arrows mean direction of compression.

의 압축력은 석유탐사의 시추공벽 붕괴 특성 분석으로 신뢰도 높게 확인된다. 시추공벽이 다양한 이유로 불규칙하게 붕괴되는 현상과 달리 일정 방향을 가지고 붕괴되는 현상인 breakout은 최소 4개 방향의 시추공벽 크기를 취득하는 물리검층자료(dip meter)에 기록되어 현재의 수평적 지구구조 응력을 파악할 수 있다(Zoback *et al.*, 1985). 울릉분지 스러스트 지역

에 굴착된 시추공과 달리 단층대에서 멀리 떨어진 고래-I 및 고래-V 시추공에서 남북방향으로 시추공 파쇄가 시추 비트크기보다 크고 동일한 방향성이 공통적으로 나타나고 있는 것으로 보아 동서 방향의 압축력에 의해 형성된 시추공의 breakout 현상으로 추정된다.

5.2 퇴적환경 해석 및 해저협곡/수로 형성

5.2.1 퇴적환경 해석

탄성과 상 분석, 시추공 생층서 분석, 시추공 압편 및 물리검층 자료를 바탕으로 종합적으로 퇴적환경 해석을 수행하였다(표 2). 생층서 분석 자료에 의하면 고래 I 공의 720-3030 mMD 구간에 해당하는 퇴적층은 연안 내지 내대륙붕 환경에서 형성된 것으로 해석된다(KNOC, 2019). 720-3030 mMD 구간은 탄성과 단위 1-3(7-14 Ma) 구간에 해당하는데, 탄성과 자료 분석결과 탄성과 상 1(연안 환경) 및 2(내대륙붕 환경)가 주로 분포하는 구간이다. 동 구간을 세부적으로 살펴보면 탄성과 단위 1(14-12.5 Ma)구간은 대표적으로 탄성과 상 2(내대륙붕 환경)가 발달하며 주로 두꺼운 사암층(최대 약 15 m)이 박층의 이암층과 교호하고 물리검층 자료에서는 주로 상향세립화가 나타나며 가끔 상향조립화가 나타나기도 한다. 탄성과 상 및 시추공 자료를 바탕으로 추정해보면 탄성과 단위 1(14-12.5 Ma)구간은 내대륙붕 환경에

서 퇴적된 층으로 해석된다. 탄성파 단위 2(12.5-10.6 Ma) 구간은 탄성파상 1(연안 환경)이 발달하며 시추공 암상 및 물리검층 자료를 분석해보면 주로 이암으로 구성되어 있고 박층의 사암과 호층을 이루거나 탄층이 여러 번 반복되어 발달하며 상향세립화 형태가 나타난다. 따라서 이 구간은 연안 환경에서 형성된 퇴적층으로 해석된다. 탄성파 단위 3(10.6-7 Ma) 구간에서는 주로 탄성파 상 1(연안 환경)이 나타나고 연구지역의 북동쪽에서는 탄성파 상 2(내대륙붕 환경)가 주로 발달한다. 또한 탄성파 단위 2와 유사한 암상 및 물리검층 자료 특성을 보인다. 따라서 이 구간에 해당하는 퇴적 시기 동안 연구지역의 남서쪽에는 연안 환경이 분포했고 북동쪽으로 가면서 내대륙붕 환경으로 전이된 것으로 추정된다.

생층서 자료가 부재한 구간은 탄성파 상 및 물리검층 자료를 이용해 퇴적환경을 해석하였는데, 탄성파 단위 4(7-5.33 Ma)구간에서는 주로 탄성파 상 1(연안 환경)이 나타난다. 연구지역의 남서쪽에서는 탄성파 상 1(연안 환경)이 발달하고 북동쪽 및 층의 상부로 가면서 탄성파 상 2(내대륙붕 환경)가 발달한다. 시추공 물리검층 형태는 탄성파 단위 3(10.6-7 Ma)과 유사한 패턴을 보이며 이 구간은 연구지역의 남서쪽에서는 연안 환경에서 퇴적된 것으로 해석되며 북동쪽 및 층의 상부로 가면서 내대륙붕 환경에서 퇴적된 것으로 해석된다. 탄성파 단위 5(5.33 Ma)

구간 이후부터 해저면까지 탄성파 상 3(외대륙붕 환경)이 발달하고 탄성파 상에서 수로 형태가 반복적으로 발견되고 이 수로는 대륙붕단까지 연결된다(그림 9a). 이 구간은 외대륙붕 환경에서 퇴적된 것으로 해석된다.

5.2.2 해저협곡 및 해저수로 형성

연구지역의 해저면에서 발달하는 해저협곡은 연구지역 밖까지 연장되어 울릉분지의 대륙붕 단 및 대륙사면까지 연결된다(그림 9a). 연구 지역 내 해저면에서 채널 형태를 보이는 부분은 해저협곡의 canyon head에 해당하는데, 연구지역에서 관찰되는 폭은 최대 약 8-9 km, 높이는 최대 0.066초(약 30-35 m)로 북북동-남남서 방향으로 발달한다(그림 9b). 기존 2D 탄성파자료의 낮은 해상도로 인해 연구지역 내에서 플라이오세 이후의 채널형태를 인지되지 못했지만 3D 탄성파 해석을 통한 이번 연구에서는 플라이오세 이후 발달하는 채널형태를 해저협곡 및 해저수로로 구분하였다. 통상 해저면에서 나타나는 해저협곡과 유사한 규모 및 형태를 갖는 것은 해저협곡으로 정의하였고 보다 대륙붕 안쪽에서 발달하는 채널 형태를 해저수로라 정의하였다(그림 10, 11).

5.33-4 Ma 시기 퇴적층에 분포하는 해저수로는 연구지역 내에서 폭은 최대 약 5 km, 높이는 최대 0.037초(약 17-19 m)로 북동-남서 방향으로 발달한

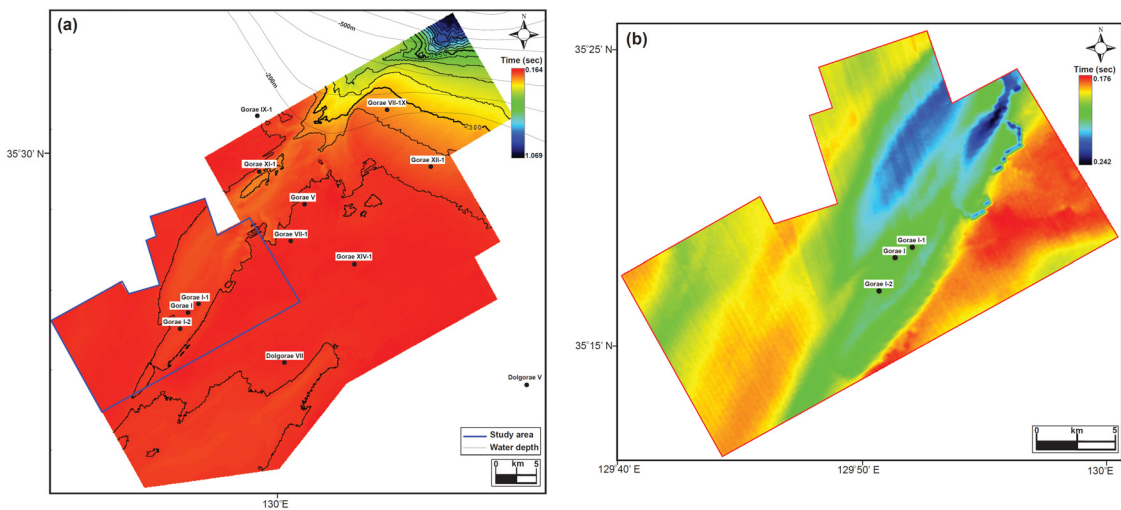


Fig. 9. Time structure maps of seafloor at present. (a) Submarine channels extend shelf edge (b) Submarine channels of enlarged study area.

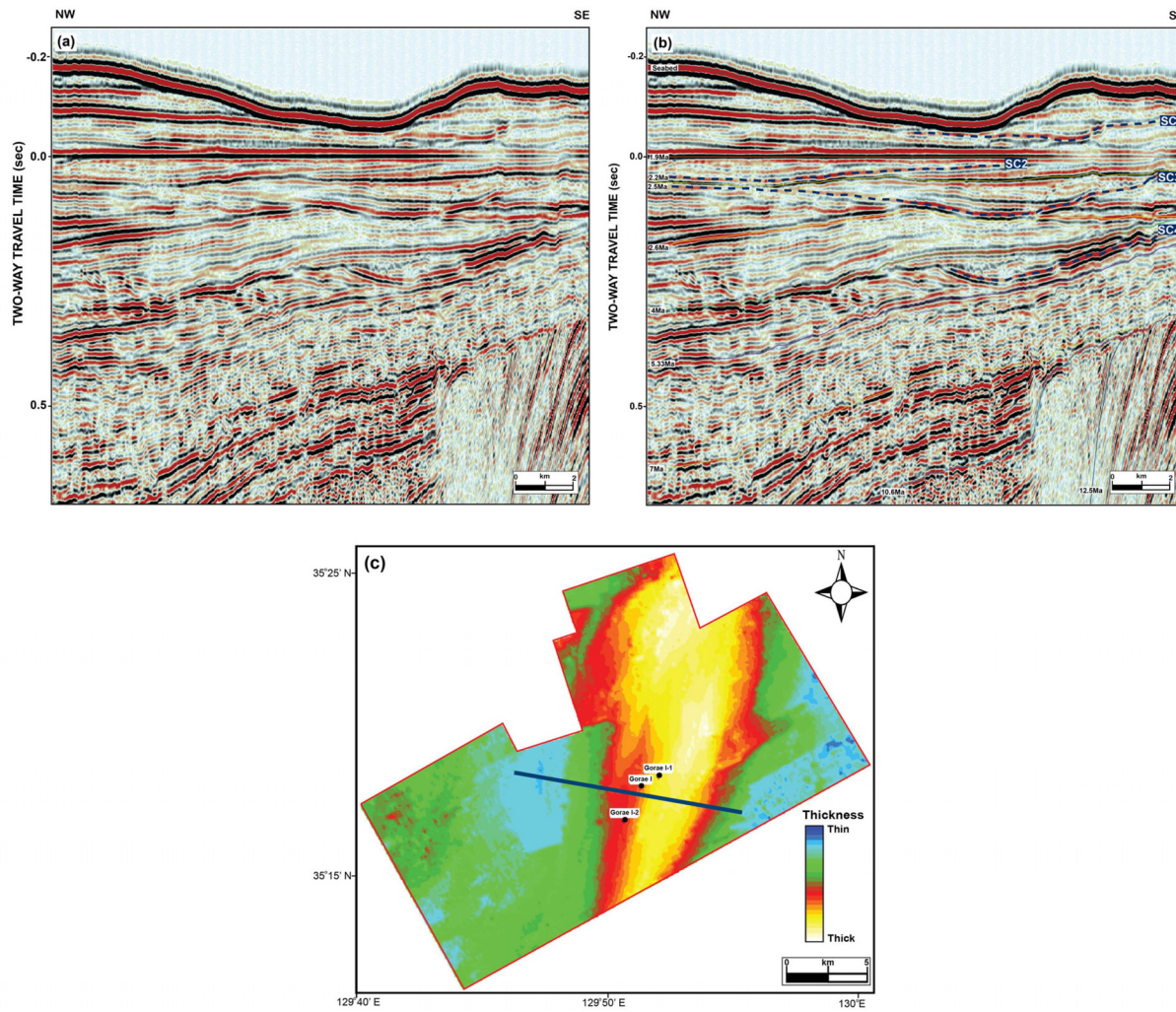


Fig. 10. Seismic sections showing submarine channels. (a) A un-interpreted seismic section with flatten 1.9 Ma horizon. (b) A seismic section with interpreted submarine channels. (c) A isochron map of SU8 with location of a seismic section (blue line). SC: Submarine canyon or submarine channel.

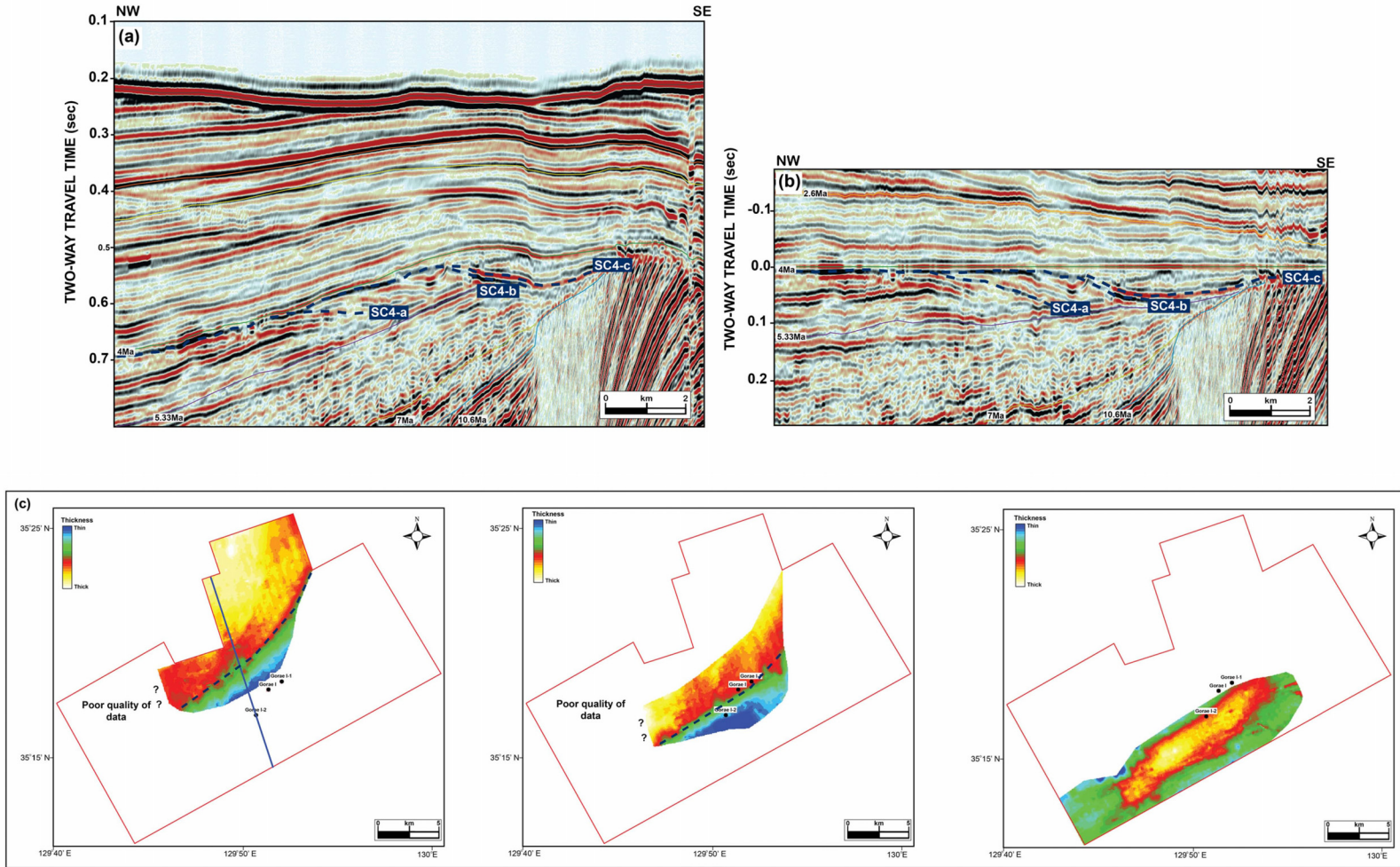


Fig. 11. Seismic sections and structure maps of submarine channels. (a, b) Seismic sections show lateral accretion of submarine channels during 5.33-4 Ma (c) Time structure maps of each submarine channels. Blue line means location of seismic section. SC: Submarine channel.

다. 해저수로는 연구지역 내 북서쪽에서 남동쪽으로 평행 측방이동을 하면서 발달하며(그림 11) 이는 강한 해류가 수로 측면을 침식하면서 측방이동을 한 것으로 해석된다(그림 12).

연구지역에서는 2.6 Ma 이후부터 연속적으로 해저협곡이 발달하는데 해저협곡이 발달하는 주된 요인은 대륙사면에서의 퇴적층 붕괴에 의한 것이다(Lewis, 1982). 울릉분지에서는 사면 붕괴현상이 자주 발견된다(Lee *et al.*, 1993; Koo *et al.*, 2014; Park *et al.*, 2019). 사면붕괴는 대륙붕단 및 대륙사면에 쌓여있던 퇴적층이 불안정해지면 발생하는데, 이러한 요인으로는 사면까지 공급되는 퇴적물의 양 및 퇴적

물 두께의 빠른 증가 등이 있다(Lee, 2009). 퇴적물 공급량 변화는 해수면 변동 및 지구조 운동과 관련된다. 해수면이 낮아지는 시기(LST: Lowstand System Tracts) 동안에는 대륙붕단에 도달하는 퇴적물의 양이 증가하고 대륙사면의 경사도 증가하게 되어 대륙붕단 및 대륙사면이 불안정하게 된다(Arnott, 2010). 지진 등의 강력한 외부 이벤트에 의해 대륙붕단에 위치한 불안정한 퇴적물이 사태에 의해 무너져 내리면 해저협곡을 형성하게 되고 이를 통해 퇴적물은 대양저 방향으로 이동된다. 이후 해수면이 상승하는 시기(TST: Transgressive System Tracts) 및 해수면이 최고점(HST: Highstand System Tracts)에 도달

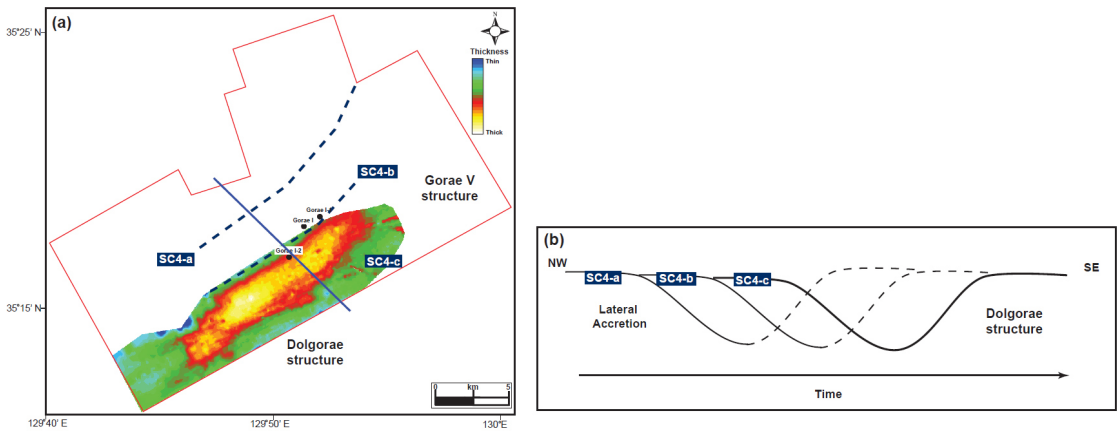


Fig. 12. (a) A isochron map of SC4-c with boundary of SC4-a and SC4-b. A blue line means location of fig. (b). (b) Lateral migration to southeast direction of submarine channels during 5.33-4 Ma. Dolgorae structures block lateral migration of submarine channels. SC: Submarine channel.

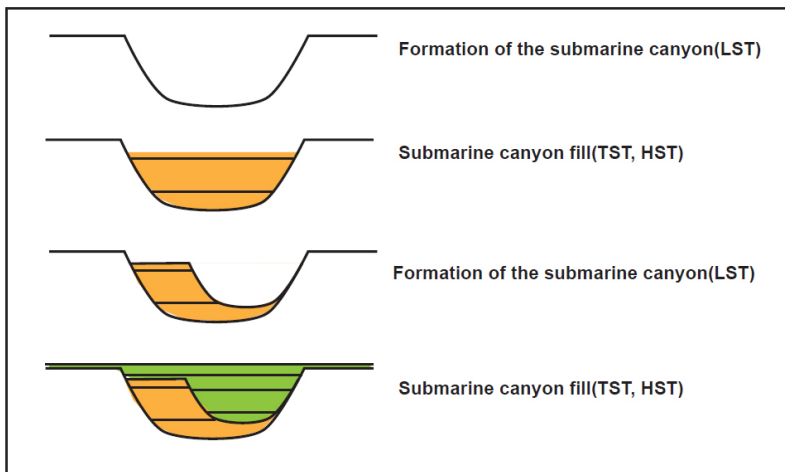


Fig. 13. Development of submarine channels formed by mass failure after 2.6 Ma.

하면 퇴적물은 이전에 형성된 해저협곡을 채우게 된다(Brown and Fisher, 1977; Posamentier *et al.*, 1988; Posamentier and Vail, 1988; Emery and Myers, 1996)(그림 13).

퇴적물의 공급량 변화는 해수면 변동뿐만 아니라 퇴적물 공급지의 용기 및 침강과 관련된 지구조운동과도 연관된다. 울릉분지는 마이오세 후기 동안 돌고래 지역에서 대규모의 용기 작용이 발생하여 기존에 쌓여있던 퇴적층으로부터 많은 퇴적물이 침식되었고 주변 울릉분지의 저지대로 공급되었다. 이로 인해 분지 닫힘 1단계 동안 울릉분지 내에는 다수의 해저협곡이 발달하였다(Park *et al.*, 2019). 분지 닫힘 2단계인 플라이오세 이후에는 돌고래지역의 용기작용이 약화되어 퇴적물 공급량이 감소하여 낮은 빈도로 해저협곡이 형성된 것으로 추정된다.

해저수로 및 해저협곡의 발달 및 이동하는 방향은 지질구조의 발달과 관련이 있는 것으로 해석된다. 5.33-4 Ma 동안에 북동-남서방향으로 발달한 해저수로는 연구지역의 북서쪽에서 남동쪽방향으로 측방이동하다가 남동쪽에 위치한 돌고래 구조에 막혀 더 이상 남동쪽으로 이동하지 못하고 유기(abandonment)되었으며 북동쪽으로는 고래 V구조에 막혀 북동쪽에서의 발달이 제한되었다(그림 11, 12). 이 시기 동안에는 돌고래 구조의 일부가 주변 해저면보다 돌출하여 노출되어 있었고 5.33 Ma 이후부터 고래 V 구조가 용기되기 시작하였다. 따라서 해저면 위로 용기된 돌고래 구조 및 고래 V 구조가 존재하여 해저수로 연장 발달에 방해물이 되어 해저수로는 북동-

남서방향으로 제한적으로 발달하였다(그림 14).

2.6 Ma 이후에 발달한 해저협곡은 북동-남남서 방향으로 발달하며 이전에 돌고래 용기대였던 곳에서 발달한다(그림 14). 이는 돌고래 구조의 용기작용이 멈춰 더 이상 돌고래 구조가 해저면 상에 노출되지 않고 평탄한 지형을 유지했기 때문에 이전 돌고래 용기대 지역에 해저협곡이 발달할 수 있었다. 2.6 Ma 이후에 형성된 해저협곡은 돌고래 구조가 방해물로 작용하지 않고 고래 V 구조의 영향만 받아 북북동-남남서 방향으로 형성되었다.

5.3 울릉분지 고래 I 구조 지역의 지질진화단계

울릉분지의 고래 I 구조 지역은 네 단계의 지질진화과정을 거쳤다. 지질진화 I 단계(28-22 Ma) 동안에는 분지 열개작용이 발생하였으며 지질진화 II 단계(22-10.6 Ma) 동안에는 분지 열적 침강상태로 구조적으로 안정된 상태에서 퇴적물이 퇴적되었다. 퇴적환경은 연구지역의 남서쪽에서는 연안 환경이었으며 북동쪽으로 가면서 내대륙붕 환경으로 전이하였고 퇴적물은 남서에서 북동방향으로 공급되었다.

지질진화 III 단계(10.6-5.33 Ma) 동안에는 분지 닫힘 1차 단계로 북서-남동방향의 압축력이 작용하지만 연구지역은 충상단층이 발달하는 경계부에 위치하고 있어 연구지역 전체적으로는 구조가 복잡하게 발달하지는 않는다. 하지만 연구지역 남부에 충상단층이 존재하여 돌고래 구조가 용기되면서 끌림(drag)에 의해 북서방향의 침강습곡(NW-plunging fold) 구조 형태로 고래 I 구조가 형성되었다(그림

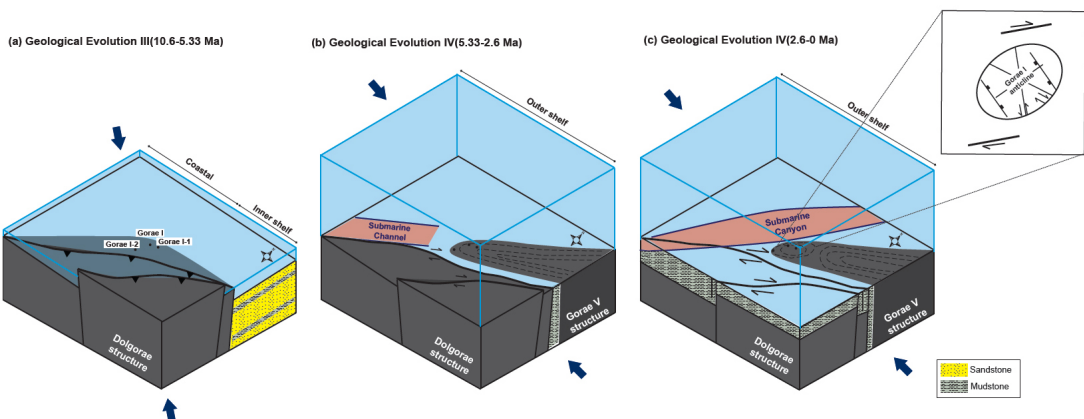


Fig. 14. Geological evolution of study area during formation of the Goraе I structure. Arrows mean direction of compression. Dotted lines indicate form of structures.

14). 이 시기에 유라시아판 하부로 필리핀판이 섭입하여 보니아크와 큐슈가 충돌하게 되어 북서-남동 방향의 압축력이 발생해 돌고래구조가 형성된 것으로 해석된다. 퇴적환경은 연구지역의 남서쪽에서는 연안 환경이었으며 북동쪽으로 가면서 내대륙봉 환경이었고 퇴적물은 남서에서 북동방향으로 공급된다. 또한 이 시기에 돌고래 구조가 용기되어 돌고래 스트러스트 벨트의 침식에 의해 퇴적물이 공급되었을 가능성이 존재한다.

지질진화 IV 단계(5.33 Ma 이후) 시기는 분지 단층 2차 단계로 고래 V 구조가 형성되기 시작한 시기이다. 고래 V 구조가 용기하기 시작하였으며 4Ma 이후에는 본격적으로 고래 I 구조에 영향을 주어 남서방향의 침강습곡(SW-plunging fold)구조로 변화되기 시작하였다. 2.6 Ma 이후에는 고래 I 구조의 용기작용이 발달하였으며 기존에 형성된 충상단층의 재활성화 및 주향이동을 통해 북동-남서방향의 배사구조 및 북서-남동 주향 및 북동-남서 주향의 주향이동단층이 형성되었다(그림 14). 이는 유라시아판의 동진으로 인해 동서방향의 압축력이 발생하였기 때문이고, 시추공에서 확인된 남북방향의 breakout 현상과 탄성과 자료에서 해석된 근처까지 배사구조 발견되는 것으로 보아 최근까지도 고래 I 구조는 변형작용을 계속 받고 있는 것으로 추정된다.

또한 이 시기에는 외대륙봉 환경에서 반복적으로 해저협곡 및 해저수로가 발달하였다. 해저협곡 및 해저수로는 고래 V 구조 발달 및 돌고래 구조의 용기에 따라 남남서-북북동 또는 -북동 방향으로 발달되었다. 지질구조의 발달과 분포는 해저협곡 및 해저수로 연장 발달 방향에 영향을 주었으며 퇴적물은 이와 동일한 방향으로 공급되었다.

6. 결론

진폭, 주파수, 내부 형태 등의 탄성과 특성을 바탕으로 탄성과상을 3가지로 구분하여 탄성과상 1은 주변해, 탄성과상 2는 내대륙봉, 탄성과상 3은 외대륙봉환경에서 퇴적된 퇴적체로 해석하였다. 또한 각 시기별로 구분한 10개의 탄성과 단위를 탄성과상 및 구조도, 동시층후도로 분석한 결과 탄성과 단위 1은 열적 침강 상태 동안 내대륙봉 환경에서 퇴적된 퇴적체로 퇴적물은 남서에서 북동방향으로 공급되었

다. 탄성과 단위 2는 열적 침강 상태 동안, 주로 연안 환경에서 내대륙봉으로 전이되는 환경에서 퇴적된 퇴적체로 퇴적물은 남서에서 북동방향으로 공급되었다. 탄성과 단위 3이 퇴적되는 동안 돌고래 구조의 용기작용 발생하였고 고래 I 구조가 형성되기 시작하였다. 퇴적환경은 연안에서 내대륙봉으로 전이되는 환경으로 퇴적물은 남서에서 북동방향으로 공급되었다. 탄성과 단위 4가 퇴적되는 동안 연구지역의 서쪽에서도 용기작용이 발생하였으며 퇴적환경은 주로 연안환경으로 층의 상부로 가면서 점차 내대륙봉환경으로 전이되는 환경이었다. 탄성과 단위 5가 퇴적되는 시기에는 고래 V구조의 용기작용이 시작되었으며 고래 I 구조도 남서방향의 침강 습곡 구조로 변화되었다. 퇴적환경은 외대륙봉환경으로 해저수로가 발달하며 퇴적물은 남서에서 북동방향으로 공급되었다. 탄성과 단위 6은 외대륙봉환경에서 퇴적된 퇴적체로 동시기에 해저협곡의 침식작용이 활발하였다. 탄성과 단위 7이 퇴적되는 시기에는 고래 I 구조가 용기되어 배사구조가 추가로 형성되었으며 퇴적환경은 외대륙봉환경으로 퇴적물은 남남서에서 북북동 방향으로 공급되었다. 탄성과 단위 8, 9 및 10은 외대륙봉에서 퇴적된 퇴적체로 해저협곡이 발달하며 퇴적물은 남남서에서 북북동방향으로 공급되었다.

탄성과 자료를 분석한 결과 울릉분지의 고래 I 구조지역은 지질진화 I 및 II 단계 동안 분지 열개 및 열적 침강작용을 거쳤으며 지질진화 III 단계부터 분지 변형 작용이 발생하였다. 지질진화 III 단계(10.6-5.33 Ma)에는 돌고래구조의 용기 및 충상단층의 이동과 함께 돌고래 구조의 끝림 습곡작용에 의해 북서방향의 침강습곡(NW-plunging fold) 특성을 갖는 고래 I 구조를 형성했다. 주로 연구지역의 남서쪽은 연안 환경이 지속되었으며 북동쪽으로 가면서 내대륙봉 환경으로 전이하였고 퇴적물은 주로 남서에서 북동방향으로 공급되었다. 지질진화 IV 단계(5.33 Ma 이후)에는 고래 V 구조의 용기와 함께 연구지역에는 남서방향의 침강습곡(SW-plunging fold)구조가 발달하기 시작하였으며 2.6 Ma 이후에는 고래 I 구조의 용기작용으로 인해 고래 I 구조는 북동-남서 주향의 배사구조가 형성되었다. 5.33 Ma 이후 유라시아판의 동진으로 인해 동서방향의 압축력이 작용하여 기존에 발달한 북동-남서방향의 충상단층이 주향이

동을 하면서 북동-남서주향의 배사구조 및 주향이동 단층 및 정단층이 형성되었다. 또한 동 시기에는 해저협곡 및 해저수로의 발달이 활발하게 이뤄지는데 이는 연구 지역 내 고래 V 구조 및 돌고래 구조의 진화를 반영하며 북북동-남남서 또는 북동-남서 방향으로 연장 발달되어 있다.

감사의 글

이번 연구는 2017년도 강원대학교 대학회계 학술 연구구성비(관리번호-520170520)를 지원받아 수행되었기에 감사 드립니다. 또한 이번 연구에서 활용된 탄성파 탐사자료를 대여해주신 한국석유공사(KNOC)와 포스코인터내셔널 측과 심사과정에서 유의한 의견을 주신 익명의 심사위원들께 감사 드립니다.

REFERENCES

- Arnott, R.W.C., 2010, Deep-marine sediments and sedimentary systems. In: James, N.P. and Dalrymple, R.W. (eds.), *Facies Models*, 4. Chapter 12. Geological Association of Canada, 295-322.
- Barg, E., 1986, Cenozoic geohistory of the southwestern margin of the Ulleung Basin, East Sea. Unpublished MS thesis. Seoul National University, Seoul, 174 p.
- Brown Jr, L.F. and Fisher, W.L., 1977, Seismic-stratigraphic interpretation of depositional systems: Examples from Brazilian Rift and pull-apart basins: Section 2. Application of seismic reflection configuration to stratigraphic interpretation. In: Payton, C.E. (eds.), *Seismic stratigraphy: Applications to hydrocarbon exploration*. The American Association of Petroleum Geologists, 26, 213-248.
- 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., 2000, Marine geology of Korean seas. Second Edition. Elsevier, 329 p.
- Chough, S.K., Yoon, S.H. and Park, S.J., 1997, Stratal patterns in the southwestern margin of the Ulleung Basin off southeast Korea: sequence architecture controlled by back-arc tectonism. *Geo-Marine Letters*, 17, 207-212.
- Emery, D. and Myers, K., 1996, *Sequence stratigraphy*. Blackwell Science, 297 p.
- KNOC, 2019, Stratigraphic nomenclature of the Ulleung Basin, East Sea, Korea. Unpublished internal report, 98 p.
- Koo, B.Y., Kim, S.P., Lee, G.S. and Chung, G.S., 2014, Seafloor morphology and surface sediment distribution of the southwestern part of the Ulleung Basin, East Sea. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 35, 131-146 (in Korean with English abstract).
- Lee, G.H., Kim, H.J., Han, S.J. and Kim, D.C., 2001, Seismic stratigraphy of the deep Ulleung Basin in the East Sea (Japan Sea) back-arc basin. *Marine and Petroleum Geology*, 18, 615-634.
- Lee, G.H. and Suk, B.C., 1998, Latest Neogene-Quaternary seismic stratigraphy of the Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan). *Marine Geology*, 146, 205-224.
- Lee, G.H., Yoon, Y., Nam, B.H., Lim, H., Kim, Y.S., Kim, H.J. and Lee, K., 2011, Structural evolution of the southwestern margin of the Ulleung Basin, East Sea (Japan Sea) and tectonic implications. *Tectonophysics*, 502, 293-307.
- Lee, H.J., 2009, Timing of occurrence of large submarine landslides on the Atlantic Ocean margin. *Marine Geology*, 264, 53-64.
- Lee, H.J., Chun, S.S., Yoon, S.H. and Kim, S.R., 1993, Slope stability and geotechnical properties of sediment of the southern margin of Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan). *Marine Geology*, 110, 31-45.
- Lewis, D.W., 1982, Channels across continental shelves: corequisites of canyon-fan systems and potential petroleum conduits. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 25, 209-225.
- Matsuda, T., 1978, Collision of the Izu-Bonic Arc with central Honshu: Cenozoic tectonics of the Fossa Magna, Japan. *Journal of Physics of the Earth*, 26, 409-420.
- Mitchum Jr, R.M., Vail, P.R. and Sangree, J.B., 1977, Seismic stratigraphy and global changes of sea-level: Part 6. Seismic stratigraphic interpretation procedure. In: Payton, C.E. (eds.), *Seismic stratigraphy: Applications to hydrocarbon exploration*. The American Association of Petroleum Geologists, 26, 117-134.
- Park, K.S., 1992, Geologic structure and seismic stratigraphy of the southern part of Ulleung Basin. In: Chough S.K. (eds.), *Sedimentary Basins in the Korean Peninsula and Adjacent Seas*. Sedimentary Geology, Korean Sedimentology Research Group Special Publication, 86, 40-59.
- Park, Y., Yoo, D., Kang, N. and Yi, B., 2019, Origin and evolution of stacked cut-and-fill structures on the southwestern margin of the Ulleung Basin, East Sea (Japan Sea). *Journal of Sedimentary Research*, 89, 679-700.
- Posamentier, H.W., Jervey, M.T. and Vail, P.R., 1988, Eustatic controls on clastic deposition I-Conceptual framework. *SEPM*, 42, 109-124.
- Posamentier, H.W. and Vail, P.R., 1988, Eustatic controls

- on clastic deposition II-Sequence and systems tract models. *SEPM*, 42, 125-154.
- Sangree, J.B. and Widmier, J.M., 1977, Seismic stratigraphy and global changes of sea level: part 9. Seismic interpretation of clastic depositional facies. In: Payton, C.E. (eds.), *Seismic stratigraphy: Applications to hydrocarbon exploration*. The American Association of Petroleum Geologists, 26, 165-184.
- Taira, A., 2001, Tectonic evolution of the Japanese Island arc system. *Annual Review of the Earth and Planetary Sciences*, 29, 109-134.
- Tamaki, K. and Honza, E., 1985, Incipient subduction and obduction along the eastern margin of Japan Sea. *Tectonophysics*, 119, 381-406.
- Tamaki, K., Suyehiro, K., Allan, J., Ingle Jr, J.C. and Pisciootto, K.A., 1992, Tectonic synthesis and implications of Japan Sea ODP drilling. In: Tamaki, K., Suyehiro, K., Allan, J. and McWilliams, M. (eds.), *Proceedings of ODP Scientific Results, 127/128, Scientific Results*. Texas: Ocean Drilling Program, College Station, 1333-1348.
- Um, I.K., Choi, M.S., Bahk, J.J. and Chun, J.H., 2017, Provenance of late Quaternary sediments on the southwestern slope of the Ulleung Basin, East/Japan Sea. *Quaternary International*, 459, 153-164.
- Yoon, S.H., Chough, S.K. and Park, S.J., 2003, Sequence model and its application to a Miocene shelf-slope system in the tectonically active Ulleung Basin margin, East Sea (Sea of Japan). *Marine and Petroleum Geology*, 20, 1089-1103.
- Zoback, M.D., Moos, D. and Mastin, L., 1985, Well bore breakouts and in situ stress. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 90(B7), 5523-5530.

Received : June 2, 2020

Revised : June 4, 2020

Accepted : July 23, 2020