



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

석사학위논문

동해 대륙주변부 퇴적분지의
탄성파층서

제주대학교 대학원

지구해양융합학부 지구해양전공

김 우 성

2022 년 8 월

동해 대륙 주변부 퇴적분지의 탄성파층서

지도교수 윤 석 훈

김 우 성

이 논문을 이학 석사학위 논문으로 제출함

2022 년 6 월

김우성의 이학 석사학위 논문을 인준함

심사위원장 송 상 근 ①

위 원 윤 석 훈 ①

위 원 문 재 홍 ①

제주대학교 대학원

2022 년 6 월



Seismic Stratigraphy of the Sedimentary Basin in the East Sea Continental Margin, Korea (Sea of Japan)

U-Seong Kim

(Supervised by professor Seok-Hoon Yoon)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree of Master of Science

2022. 06.

This thesis has been examined and approved

Sang-Keun Song, Prof. of Earth and Marine Sciences

Seok-Hoon Yoon, Prof. of Earth and Marine Sciences

Jae-Hong Moon, Prof. of Earth and Marine Sciences

Date 2022. 06.

Faculty of Earth and Marine Convergence
Earth and Marine Science

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

List of Figures	ii
List of Tables	v
Abstract	vi
I. 서론	1
II. 지역개요	3
2.1 동해의 기원과 진화과정	3
2.2 해저지형	7
2.3 지질개요	11
III. 연구 자료 및 방법	14
3.1 연구 자료	14
3.2 분석 방법	16
IV. 탄성파 층서	19
4.1 층서 경계면	19
4.2 탄성파단면 해석	31
4.3 탄성파 층서	49
V. 탄성파상	58
5.1 음향기반암 탄성파상	58
5.2 퇴적층 탄성파상	61
VI. 지질구조	64
VII. 토의	67
7.1 지구조운동	67
7.2 층서연대 및 진화과정	68
VIII. 결론	76
참고문헌	78
요약	84

List of Figures

Fig. 1. Physiographic map of the East Sea, showing distribution of crust type suggested by Tamaki (1988). Bathymetric contours are in meters. After Yoon et al. (2014).	5
Fig. 2. Tectonic and volcanic events in the Ulleung Basin region. (A) In the Early Miocene, back-arc opening of the East Sea was achieved by complex pull-apart block movement accompanied by a southward drift of the Japanese Arcn (B) During the Middle to Late Miocene, tectonic regime in the East Sea regioninverted from tensional to compressional as a result of collision of the Bonin Arc with central Japan. After Yoon et al. (2014).	6
Fig. 3. Bathymetric map of the eastern continental margin of Korea. Contours in meters. After Yoon et al. (2015).	9
Fig. 4. Bathymetric map of Ulleung Basin area. Contours in meters. Modified from Yoon et al. (2014).	10
Fig. 5. Distribution map of sedimentary basins in the eastern continental margin of Korea.	12
Fig. 6. Map showing locations of 2D Seismic tracklines and Drilling wells (blue dot) analyzed in this study.	15
Fig. 7. Diagram showing reflection termination patterns and types of dIs-continuities. Modified from Vail and Mitchum (1987).	17
Fig. 8. Interpreted seismic profile showing sequence boundaries (SB2~SB6). RP: reference points.	20
Fig. 9. Interpreted seismic profile showing sequence boundaries (SB2~SB6). RP: reference points.	21
Fig. 10. Time structure map of SB1. Contours in sec (two-way travel time).	22
Fig. 11. Time structure map of SB2. Contours in sec (two-way travel time).	

.....	24
Fig. 12. Time structure map of SB3. Contours in sec (two-way travel time).	25
Fig. 13. Time structure map of SB4. Contours in sec (two-way travel time).	27
Fig. 14. Time structure map of SB5. Contours in sec (two-way travel time).	28
Fig. 15. Time structure map of SB6. Contours in sec (two-way travel time).	30
Fig. 16. Seismic profile and interpretation of Line 01.	32
Fig. 17. Seismic profile and interpretation of Line 02.	34
Fig. 18. Seismic profile and interpretation of Line 03.	36
Fig. 19. Seismic profile and interpretation of Line 04.	38
Fig. 20. Seismic profile and interpretation of Line 05.	40
Fig. 21. Seismic profile and interpretation of Line 06.	42
Fig. 22. Seismic profile and interpretation of Line 07.	44
Fig. 23. Seismic profile and interpretation of Line 08.	46
Fig. 24. Seismic profile and interpretation of Line 09.	48
Fig. 25. Isochron map of SU1. Contours in sec (two-way travel time).	52
Fig. 26. Isochron map of SU2. Contours in sec (two-way travel time).	53
Fig. 27. Isochron map of SU3. Contours in sec (two-way travel time).	54
Fig. 28. Isochron map of SU4. Contours in sec (two-way travel time).	55
Fig. 29. Isochron map of SU5. Contours in sec (two-way travel time).	56
Fig. 30. Isochron map of SU6. Contours in sec (two-way travel time).	57
Fig. 31. Interpreted seismic section showing seismic facies SF-1, -2, and -3.	63
Fig. 32. Map showing geologic structures in the eastern continental margin of Korea.	66
Fig. 33. Chronostratigraphic correlation between seismic units and drilling	

well (UBGH). The Miocene/Pliocene and Pliocene/Quaternary boundaries are correlated with 5.5 and 2.58 Ma, respectively, based on biostratigraphic data (Lee, 1994; Park, 1998; Yi et al., 2012) and well location (Fig.5). Modified from Yoo et al. (2017). 70

Fig. 34. Schematic illustration of the tectonic and stratigraphic evolution of the eastern continental margin of Korea in the Tertiary Period. 72

Fig. 35. Schematic illustration of the tectonic and stratigraphic evolution of the eastern continental margin of Korea in the Quaternary Period. 74

Fig. 36. Oxygen isotopic-based sea-level estimate for the past 9 My (Miller et al., 2005). 75

List of Table

Table 1. Seismic facies of acoustic basement and sedimentary sequences in the East Sea continental margin of Korea.	60
---	----

ABSTRACT

This study purposes to present an evolution model of sedimentary sequences in the eastern continental margin of Korea based on integrated analyses of seismic stratigraphy, seismic facies, and geological structures using 2D multi-channel seismic profiles newly acquired since the 2000s. In the eastern continental margin of Korea, sedimentary sequences mainly occur in various-scale sedimentary basins developed in graben and half-graben structures in the basement. The sedimentary sequences are divided into 6 seismic units (SU1, 2, 3, 4, 5 and 6) bounded by unconformities or lap-out surfaces (SB1, 2, 3, 4, 5 and 6). In addition, the chronostratigraphy of the seismic units is suggested based on the biostratigraphic framework established from the drilling core of the Ulleung Basin plain. On the other hand, 6 seismic facies are classified in the acoustic basement and sedimentary sequences on the basis of external forms and internal reflection configuration. The seismic facies from the acoustic basement is suggestive of crystalline and volcanic rocks, and the facies from sedimentary sequences are interpreted to reflect a wide range of sedimentation from hemipelagic settling to mass flows such as turbidity currents and debris flows. Deformation structures within the acoustic basement and sedimentary sequences include strike-slip fault in the Hupo Basin, reverse faults and folds in the Pohang basin, and thrust faults along the western margin of the Ulleung Basin.

Based on the seismic stratigraphic and structural analyses, six phases of stratigraphic evolution is suggested during the Tertiary and Quaternary periods. Sedimentary sequences of SU1, SU2, and SU3 deposited in the Tertiary are divided by lap-out pattern in shallow waters and increase in thickness toward deep Ulleung Basin plain. These seismic units are experienced by widespread structural deformation. The lower part of SU1

(Oligocene to Miocene) was mainly deposited within small basins as graben or half-graben structures were developed in the basement due to the opening of the East Sea. During the deposition of the upper part of SU1, subaerial erosion seems to be extensive because of shallow water depth, and subsequently various thickness of sedimentary sequences were accumulated as the basement gradually subsided. During the Pliocene, SU2 was deposited in the Hupo Basin and the continental slope, and reverse faults and folds were developed by compressional deformation due to closing of the East Sea. In particular, the Hupo fault was reactivated as a compressional strike-slip fault, accompanied by gradual uplift of the Hupo Bank region. In the Quaternary time, deformation event hardly happened and sequence boundaries (SB4 to SB6) were intermittently formed mainly in relation to relative sea-level fluctuations. In the Ulleung Basin, SU4 and SU5 developed in the form of filling the synclinal upper part of folded SU3. During the boundary between SU5 and SU6, the Hupo Bank area was eroded due to the relative sea-level fall.

I. 서론

동해의 대륙주변부에는 지구조 운동의 영향으로 기반암이 용기되면서 형성된 후포뱅크가 존재하고 있다. 후포뱅크의 상부면은 해양운동으로 형성된 파식대지(wave-cut terrace)가 발달하고 있으며, 내부에는 동해지역에 다양한 응력장 변화의 영향으로 인한 변형대(deformation zone)가 존재하고 있기 때문에(Yoon and Chough, 1995) 대륙사면-울릉분지에서 설정된 층서경계면과 후포분지에서 설정된 층서경계면이 단절되어 있는 특징을 가지고 있다. 이와 같은 특징과 더불어 각 지역의 자료 취득시기가 달라 기존 선행연구들은 후포분지와 울릉분지가 별개의 지역으로 연구가 진행되어 왔기 때문에 지금까지 대륙붕(후포분지)-대륙사면-심해저분지(울릉분지)를 아우르는 통합층서에 대한 연구가 아직 많이 부족한 실정이다.

동해 탐사는 1972년 한국지질조사소(현 한국지질자원연구원)와 독일지질조사소(Geological Survey of the Federal Republic of Germany)에서 합동으로 해저 자원탐사를 목적으로 약 2,520 Line-km의 단일채널탄성파탐사자료가 취득되었다. 이 자료를 기반으로 울릉분지의 구조진화(Chough and Barg, 1987; Yoon et al., 2002; Yoon et al., 2003; Yoon et al., 2014) 남동부 연안 대륙붕의 퇴적사(Park and Yoo, 1988), 울릉분지 남서부 층서분석(Park, 1988), 울릉분지 남서부의 지질 구조 및 지구조진화(Choi et al., 1994), 대륙주변부의 퇴적학적 특성 및 후포분지 진화(Yoon and Chough, 1993), 동해 대륙주변부의 기반암 분포 및 특성연구(Yoon et al., 2015) 등 다양한 연구가 진행되었다. 하지만 이 시기에 취득된 자료는 당시 탐사기술 단일채널기법으로 탐사되었으며, 자료처리기술이 좋지 않았기 때문에 해상도가 낮아 자료의 신뢰도가 높지 않았다. 이후 물리탐사기법이 계속해서 발전하였으며, 2000년대에 이르러 동해의 배타적경제수역(EEZ)에 해당되는 대부분의 지역에서 물리탐사가 이루어졌다. 한국지질자원연구원에서는 가스하이드레이트 탐사의 일환으로 2000년~2005년 동안 울릉분지의 전 지역에서 자료를 취득하였으며, 이후 국토해양부 해양과학조사연구사업의 일환으로 2005년~2010년 동안 동해 대륙주변부 지역에서의 자료가 새롭게 취득되었다. 이 자료

들은 다중채널탐사기법으로 취득되었으며, 지난 30년간 자료처리능력 향상으로 1972년에 취득된 자료보다 높은 해상도의 탄성과탐사단면도가 얻어지게 되었다. 이로 인하여 기존에 단일채널기법으로 얻어진 자료에서 확인되지 않았던 지하지질구조, 지층경계면 및 지층내부배열 등이 뚜렷하게 구분되면서 더 구체적이고 세부적인 지구조시스템에 대한 연구가 가능하게 되었다. 이와 더불어 탄성과탐사 자료를 분석할 수 있는 소프트웨어의 보급으로 자료의 분석 능력이 향상되면서 다양한 도면 및 지형모델을 작성할 수 있게 되었다.

본 연구에서는 2000년대에 새롭게 취득된 고해상도 2D 탄성과탐사자료를 분석하여 후포분지와 울릉분지 지역의 층서를 상세히 구분하였으며, 선행연구를 통해서 얻어진 후포분지의 진화과정을 통해 추정된 연대(Yoon and Chough, 1993)와 울릉분지 시추코어에서 얻어진 연대자료(Yoo et al., 2017)를 기반으로 후포분지와 대륙사면-울릉분지의 층서를 설정하였다. 또한, 각 층서별로 도면(시간구조도, 등층후도)을 도시하였으며, 최종적으로 후포분지-울릉분지의 각 층서형성 및 구조 진화과정에 대한 모델을 제시하였다.

II. 지역 개요

2.1 동해의 기원과 진화과정

동해는 유라시아판(Eurasian Plate) 위에 발달하며, 태평양판의 섭입에 따라 형성된 후열도분지(back-arc basin)로 알려져 있다. 지구조적으로는 해양지각이나 확장되어 침강된 대륙지각으로 이루어진 3개의 심해분지(일본분지, 울릉분지, 야마토분지 등)와 이들 분지를 둘러싸고 있는 대륙지각의 조각에 해당하는 기반암 고지대(한국대지, 야마토해령, 오키뱅크 등)로 구성된다(Fig. 1). 동해의 형성과 지구조적 진화과정에 대해서는 Ocean Drilling Program을 통한 심부시추와 활발한 지구물리탐사 및 층서분석의 결과로 비교적 자세히 알려져 있다(Tamaki et al., 1992). 동해의 생성은 올리고세 중기(약 32 Ma)에 일본분지의 동쪽에서 대륙지각의 확장과 뒤이은 올리고세 말(약 28 Ma)의 해저확장에 의해서 시작되었고, 약 16 Ma까지 확장이 진행되다가 16~14 Ma 경 필리핀해판과 일본열도가 충돌하면서 현재까지는 서서히 닫히는 과정인 것으로 알려져 있다(Yoon et al., 2014) (Fig. 2). 그러나 동해 울릉분지의 지구조적 진화와 이에 관련된 지각변형 양상에 대해서는 두 가지의 서로 다른 가설이 제시되어 있다. 즉, Yoon and Chough (1995)는 울릉분지의 열림이 동아시아 대륙지괴의 일부였던 일본열도가 남쪽 내지 남동쪽으로 이동하면서 대륙지각의 확장(extended continental crust)을 동반한 당겨열림(pull-apart opening)의 형태로 이루어졌고, 이 과정에서 동해 대륙 주변부를 따라 남북으로 확장성의 우수향 구조변형이 일어났음을 주장한 바 있다. 반면에 Kim et al. (2007)은 울릉분지가 해양지각의 생성을 동반한 동-서 내지 북서-남동 방향으로의 해저확장(seafloor spreading)의 결과로서 형성되었으며, 이 과정에서 동해 대륙주변부는 동서 방향의 확장성 구조운동을 겪었다고 주장하고 있다. 한편, 동해의 응력장은 약 15 Ma를 전후한 중기 마이오세에 신장력에서 압축력으로 역전되어 동해의 확장은 종결되었고 국지적인 압축성 변형이 시작되었다. 그 결과, 울릉분지의 남부와 서부 경계부를 따라 지각단축(crustal

shortening)이 야기되어 용기, 드러스트(thrust) 단층운동 및 습곡 변형이 마이오세와 플라이오세 퇴적층에서 광범위하게 발생하였다. 특히, 후포단층은 이 기간 동안에 두 번의 압축성 재동을 겪게 되었고 이 과정에서 후포뱅크가 발달하게 된다.

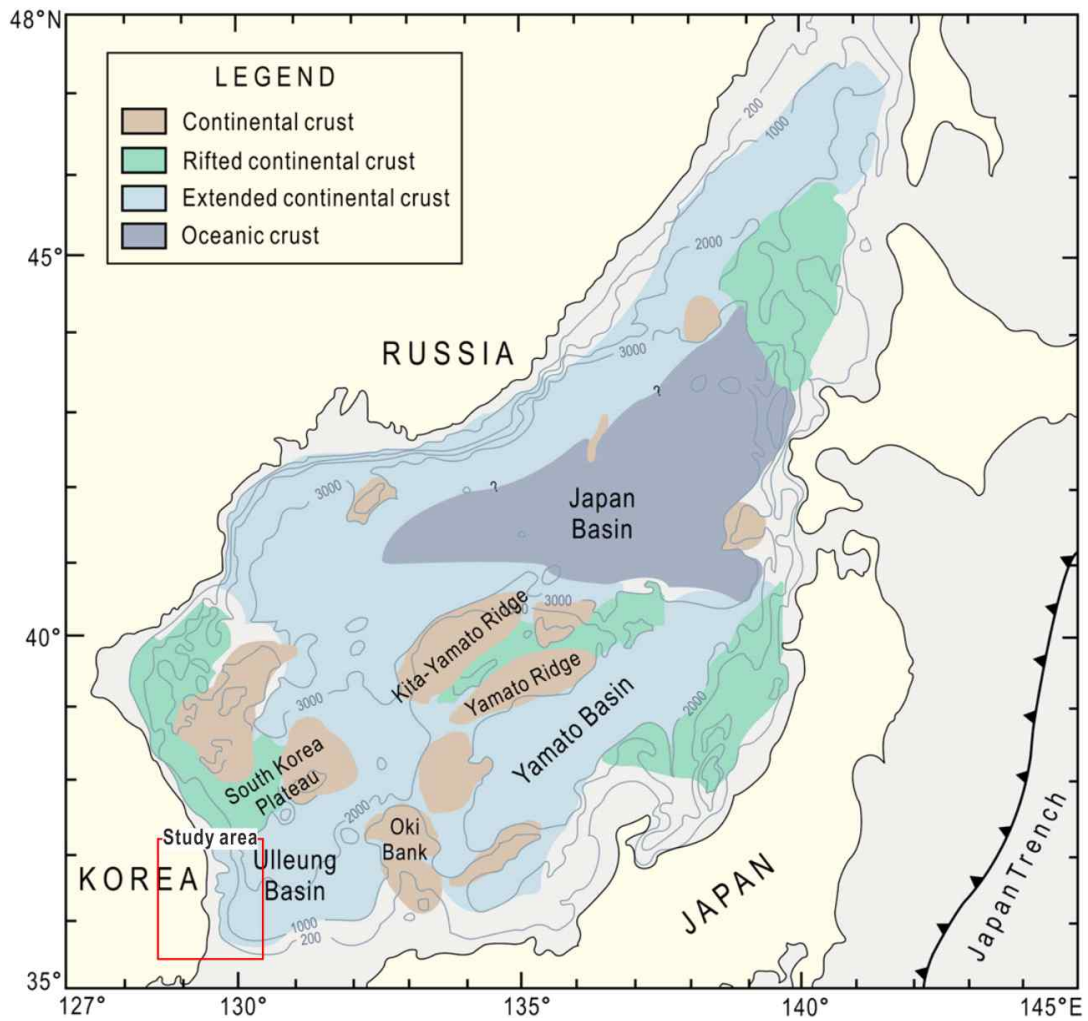


Fig. 1. Physiographic map of the East Sea, showing distribution of crust type suggested by Tamaki (1988). Bathymetric contours are in meters. After Yoon et al. (2014).

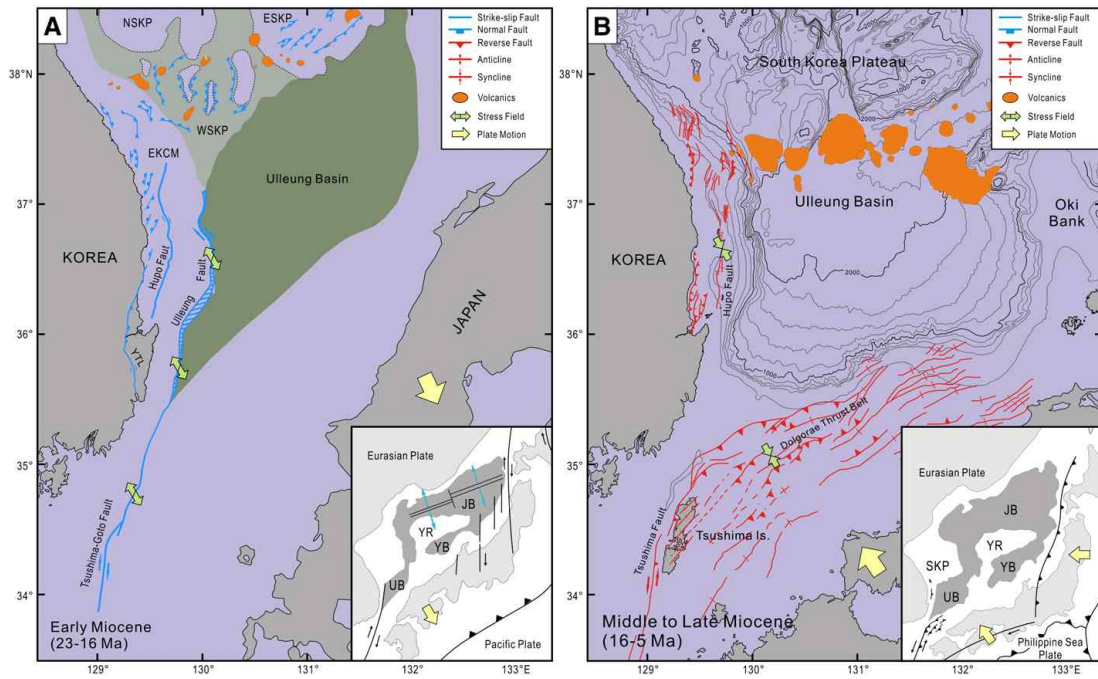


Fig. 2. Tectonic and volcanic events in the Ulleung Basin region. (A) In the Early Miocene, back-arc opening of the East Sea was achieved by complex pull-apart block movement accompanied by a southward drift of the Japanese Arc (B) During the Middle to Late Miocene, tectonic regime in the East Sea region inverted from tensional to compressional as a result of collision of the Bonin Arc with central Japan. After Yoon et al. (2014).

2.2 해저지형

한반도 동해 대륙주변부는 주로 대륙붕으로 이루어진 서해나 남해와는 달리 해안에서부터 대륙붕, 대륙사면 그리고 울릉분지의 심해평원으로의 급격한 해저지형 변화를 보이는 곳이다(Fig. 3). 동해 대륙붕은 전반적으로 평탄하지만 폭이 20 km 이하로 좁게 나타나며 수심 130~150 m에서 비교적 경사가 급한 대륙사면으로 이어진다. 북위 36°20′과 37°20′사이의 상부 대륙사면에는 후포뱅크(bank)와 이에 인접한 후포해곡(trough)이 해안선에 평행한 남북 방향으로 형성되어 있다. 후포뱅크는 길이가 남북으로 약 100 km에 달하며, 폭은 1~14 km로 변화가 큰데, 북쪽으로 가면서 점차 그 폭이 감소된다. 후포뱅크의 정상부는 비교적 평탄하며 수심 10~200 m의 범위에 나타난다. 후포뱅크의 서쪽 상부대륙사면을 따라 분포하는 후포해곡은 동쪽 경계부에서 230 m의 최대수심을 보이며 서쪽으로 가면서 점차 얕아지는 반지구(half-graben) 형태의 단면을 보인다. 후포뱅크 동쪽의 중부 및 하부 대륙사면은 수심이 깊어지면서 경사가 점차 증가하여 8°에 이른다. 동해안에는 대규모 하천이 거의 없기 때문에 동해 대륙주변부의 현생 육상퇴적물의 유입은 매우 제한적으로 일어나며, 따라서 대륙사면에는 대규모의 해저협곡이나 수로가 거의 나타나지 않는다. 대신에 대규모의 해저사태와 이에 연계된 질량류(mass flow) 퇴적층이 분포하고 있다(Chough et al., 1991; Lee et al., 1991). 사면사태에 의한 함몰대는 수심 300~1,500 m 지역에 우세하게 나타나며, 하부사면 지역에는 이로부터 재동되어 온 퇴적체가 집적되어 있다. 대륙사면은 수심 1,500~2,100 m에서 비교적 평탄한 울릉분지 평원으로 이어진다.

북위 37°20′ 이북의 대륙주변부는 북북서-남남동의 방향으로 발달하며, 동쪽으로는 복잡한 해령, 해곡, 해저산으로 이루어진 한국대지 접하고 있다. 이 지역에는 후포뱅크와 같은 대규모 해령이나 해곡은 발달하지 않는다. 국립해양조사원의 해저지형도에 따르면, 대륙붕단은 일반적으로 수심 150 m에 나타나며, 완경사의 비교적 넓은 대륙사면으로 이어진다. 대륙사면의 경사는 3° 이하이나, 북쪽으로 가면서 점차 증가한다. 북쪽의 급경사 대륙사면은 수심 1200 m에서 일본분지의 서쪽 주변부에 해당하는 원산해곡(Wonsan Trough)으로 이어진다. 또한 소규모의 수로와 협곡들이 대륙붕단 인근에서 시작되어 수심 800 m의 완만한 대륙사면

까지 계속된다. 해저사태에 의한 함몰대는 수심 500 m 이상의 대륙사면을 따라 뚜렷하게 나타나며, 이보다 더 깊은 곳에는 해저사태에 의해 운반되어 온 퇴적체들이 불규칙한 해저지형을 형성하고 있다.

한편, 울릉분지의 해저평원은 약 2,000~2,500 m 사이의 수심범위를 보이는데, 전반적으로 북쪽 혹은 북서쪽으로 완만히 경사져 있으며 독도 북쪽 울릉분지간통로(Ulleung Interplain Gap)에서 최대수심(>2,500 m)의 해저가 나타난다. 분지평원은 일부 화산기원의 해저산이나 도서를 제외하고는 대체로 매끈한 해저지형을 보인다.

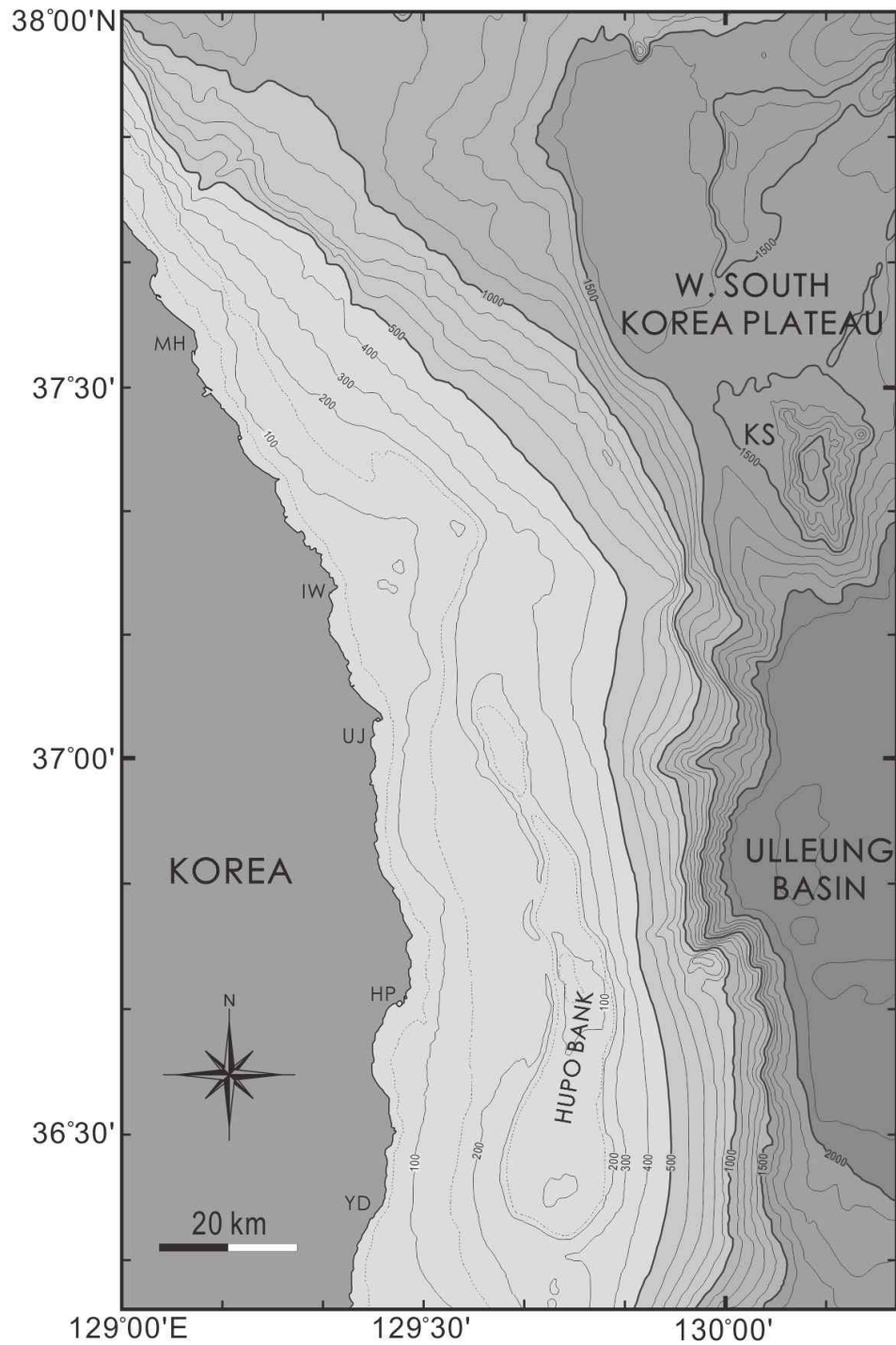


Fig. 3. Bathymetric map of the eastern continental margin of Korea. Contours in meters. After Yoon et al. (2015).

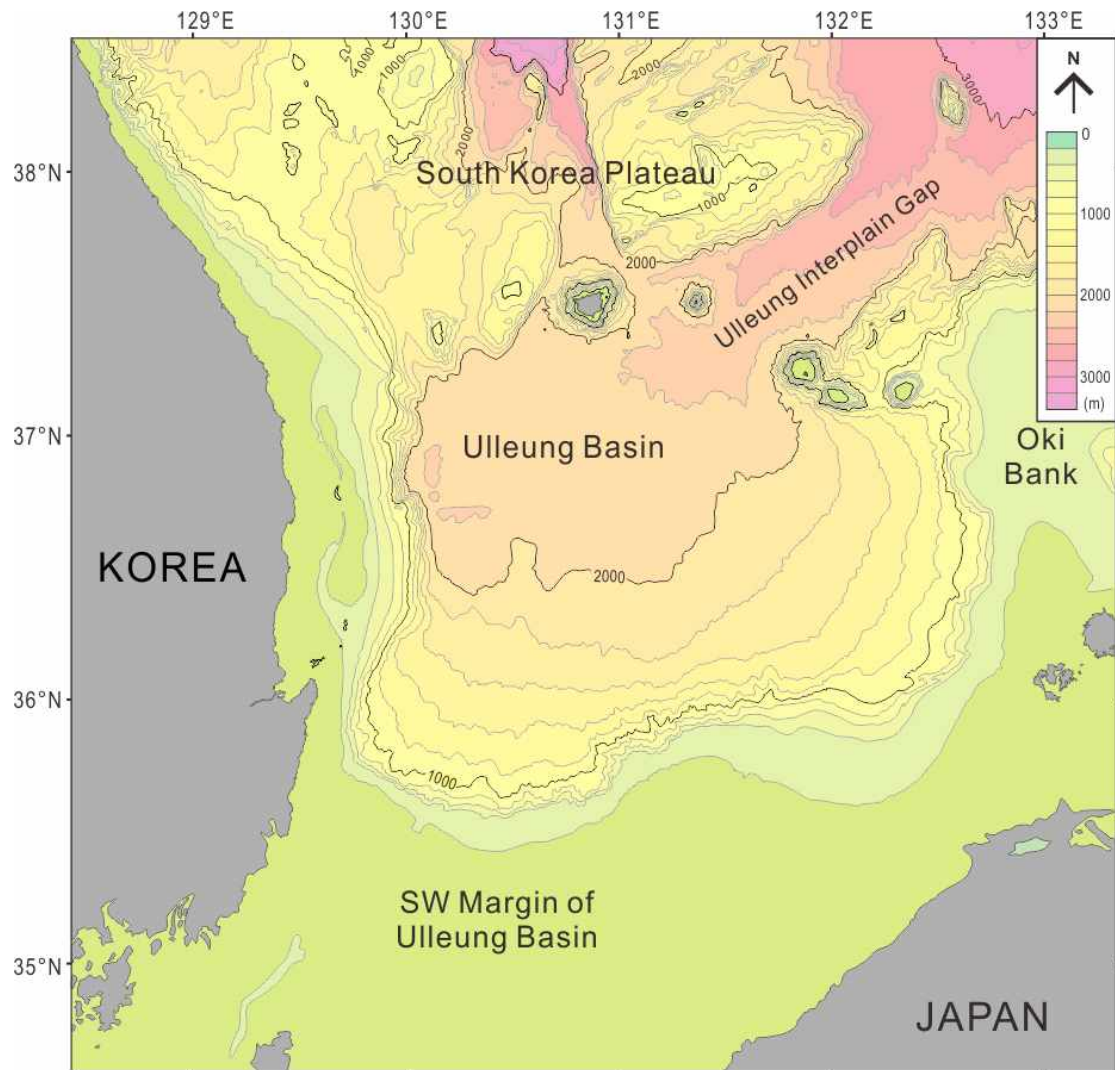


Fig. 4. Bathymetric map of Ulleung Basin area. Contours in meters. Modified from Yoon et al. (2014).

2.3 지질개요

2.3.1 동해 대륙주변부

동해 대륙주변부의 기저를 이루고 있는 기반암은 탄성파탐사 단면에서 뚜렷하지는 않지만 성층화(stratified)되어 있거나 내부반사면이 없이 불투명하게 나타나는 것으로 보고되었다(Yoon, 1994). 성층화된 기반암은 주로 후포 이남의 대륙붕의 일부에 분포하며, 후자는 그 밖의 대부분 해저에서 발견된다. 대륙붕의 기반암은 해수면 하강기에 일어난 침식으로 비교적 평탄하지만, 대륙사면에서는 신장된 해령과 해곡, 돔(dome) 등 불규칙한 기반암 지형들이 나타난다. 신장된 해령과 해곡은 대부분 남북 방향으로 배열되어 있으며, 일부는 정단층을 경계로 하는 지구(graben) 혹은 반지구(half-graben) 형태의 퇴적분지를 형성하기도 한다. 동해 대륙주변부와 울릉분지의 경계를 이루는 하부 대륙사면의 기반암은 표면이 비교적 평탄하고 최대 경사가 30° 이상으로 급경사를 이루고 있다.

동해 대륙주변부의 기반암은 대부분 한반도 동부지역에 노출되어 있는 지층의 연장으로 추정되고 있다(Yoon, 1994). 북위 36°40′ 이북의 해안지역에는 주로 선캄브리아기 변성암과 쥐라기-백악기에 화강암 관입을 받은 고생대 퇴적암이 분포한다. 이들 암층들은 대륙붕과 37°15′ 이북의 북부 대륙사면 지역에까지 연장되어 비교적 기복이 기반암을 형성하는 것으로 보인다. 북위 37°15′ 이남의 대륙사면 기반암은 복잡한 표면 지형을 보이는 화산암으로 이루어져 있으며, 이 암석은 북위 36°40′ 이남의 해안지역에 분포하는 화산암대의 연장으로 해석된다(Yoon, 1994). 해안지역에 분포하는 화산암은 K-Ar 연대측정 결과, 중기 에오세와 초기 마이오세에 분출한 것으로 알려져 있다(Jin et al., 1989; Lee et al., 1992).

한반도 동해 대륙주변부에는 두께 수 십 m에서 최대 1,200 m까지의 신제삼기(Neogene) 및 제사기(Quaternary) 퇴적층이 분포한다(Schlüter and Chun, 1974). 특히, 신제삼기 퇴적층은 대륙붕에서 두께가 30 m 이하로 얇게 나타나며, 대부분 영덕분지(두께 1 km), 후포분지(1.2 km), 목호분지(1.4 km) 등에 두껍게 집적되어 있다(Yoon and Chough, 1992)(Fig. 5). 이들 중 포항의 외해역에 위치한 영덕분지의 신제삼기 퇴적층은 육상 포항분지의 연일층군과 대비되는 것으로 추정된다(Huntec Ltd, 1967).

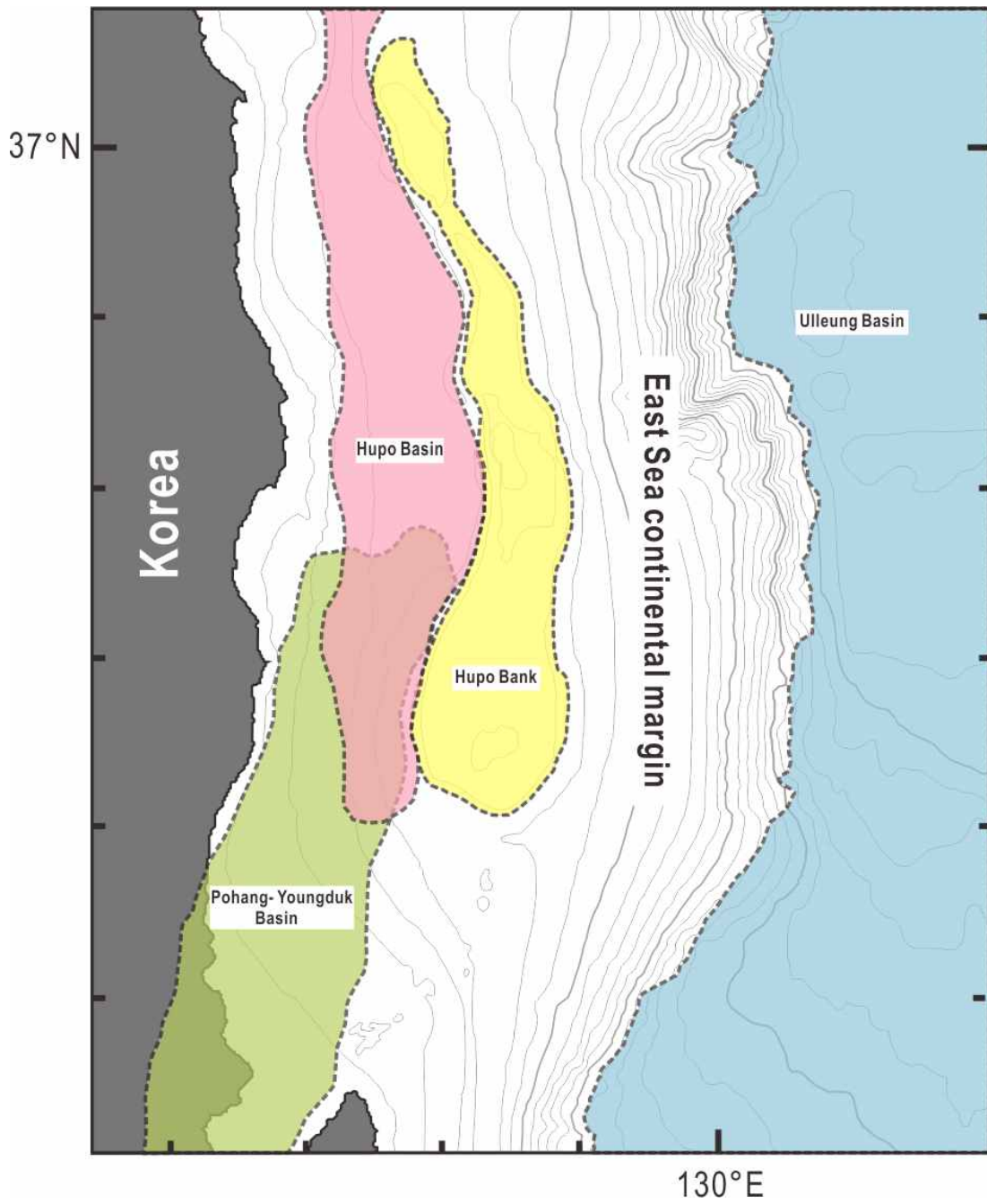


Fig. 5. Distribution map of sedimentary basins in the eastern continental margin of Korea.

2.3.2 울릉분지

해저지진계(Ocean Bottom Seismometer; OBSs)를 이용한 심부 지진파 속도분석에서는 동해 분지의 지각이 전반적인 해양과 대륙의 특성이 복합적으로 나타나는 것으로 밝혀졌다(Chung et al., 1990; Hirata et al. 1992; Kim et al., 1998). 일본분지의 지각은 약 2~5 km (Hirata et al. 1992) 두께로 분포하고 있으며, 고지자기 때가 관찰되는 해양지각으로 구성되어 있다. 한편, 야마토분지와 울릉분지는 일반적으로 대륙지각으로 구성되어 있는 것으로 해석된다(Tamaki et al., 1992). 울릉분지의 모호면 경계는 약 15~17 km 깊이에 위치하는 것으로 추정하였으며(Shin, 2004), 심부 탄성파탐사 자료를 통해 음향기반암 상부에 화성암과 퇴적암 복합체의 존재가능성이 제시되었다(Lee et al., 1999). 한편, 굴절법 탄성파탐사를 통해 야마토분지와 울릉분지는 내부지진파 속도가 해양지각의 물리적 특성과 유사하다는 주장도 있는데, 이를 근거로 맨틀의 온도가 정상온도보다 상승하게 되면서 형성된 두꺼워진 해양지각(Su et al., 1994)이라는 해석도 있다(Kim et al., 2007).

울릉분지의 남부 주변부에는 넓은 대륙붕이 발달하며, 완만한 대륙사면을 통해 울릉분지와 연결된다. 이 지역의 대륙사면 퇴적체는 넓은 대륙붕으로부터 많은 양의 퇴적물이 공급됨으로서 약 1,000 m 두께의 퇴적층이 분포하고 있으며, 울릉분지 주변부 중에서 가장 두꺼운 퇴적체가 발달한다. 또한, 상부대륙사면에서 발생한 암설류(debris flow) 또는 중력류(mass flow)가 하부대륙사면으로 활발하게 유입되어 퇴적체에 집적되면서 내부에는 다소 불규칙한 렌즈형 퇴적체가 분포하고 있다. 울릉분지 중앙부에 분포하는 퇴적층의 대부분은 분지 남부로부터 주로 슬라이드/슬럼프, 저탁류 형태로 공급된 퇴적물로 구성된다.

Ⅲ. 연구 자료 및 분석 방법

3.1 연구 자료

한국지질자원연구원에서는 해양조사선 탐해 2호를 이용하여 가스하이드레이트 연구사업의 일환으로 2000년부터 2002년까지 울릉분지에서 동-서, 남-북 방향으로 2D 반사법 탄성파탐사자료(GH)를 취득하였으며, 국토해양부 해양과학조사연구사업의 일환으로 2005년부터 2010년 동안에는 동해 연안역에서 동-서, 북-남 방향으로 설계된 탐사 축선을 따라 2D 반사법 탄성파탐사자료(HZT)를 획득하였다(Fig. 6).

이 연구에서는 위도 $36^{\circ}10' \sim 37^{\circ}00'$, 경도 $129^{\circ}30' \sim 130^{\circ}30'$ 에서 취득된 탄성파탐사 자료를 분석하였다. 자료의 위치정보는 탐사가 진행된 시기에 따라 다른 측지계로 취득되었기 때문에 WGS Datum과 WGS84 Spheroid를 사용하여 모든 위치 자료를 통일하였다. 탐사수행 당시에는 TM (Transverse Mercator) 도법을 사용하였으며, 탐사 축선도 작성에는 SM (Standard Mercator)도법을 바탕으로 작성되었다. 탄성파탐사자료는 Western-Geco사의 Trilogy 다중채널 탄성파 시스템이 이용되었다. 탐사에 사용된 음원은 bolt사의 long life 에어건(airgun)을 사용하여 탐사가 수행되었다. 수신기는 Western-Geco사 NessieIII 다중채널 디지털 스트리머(streamer)가 사용되었다. 취득된 자료는 한국지질자원연구원에서 Gedco사의 전산처리 소프트웨어 'Vista'를 사용하여 전산처리가 수행되었다.

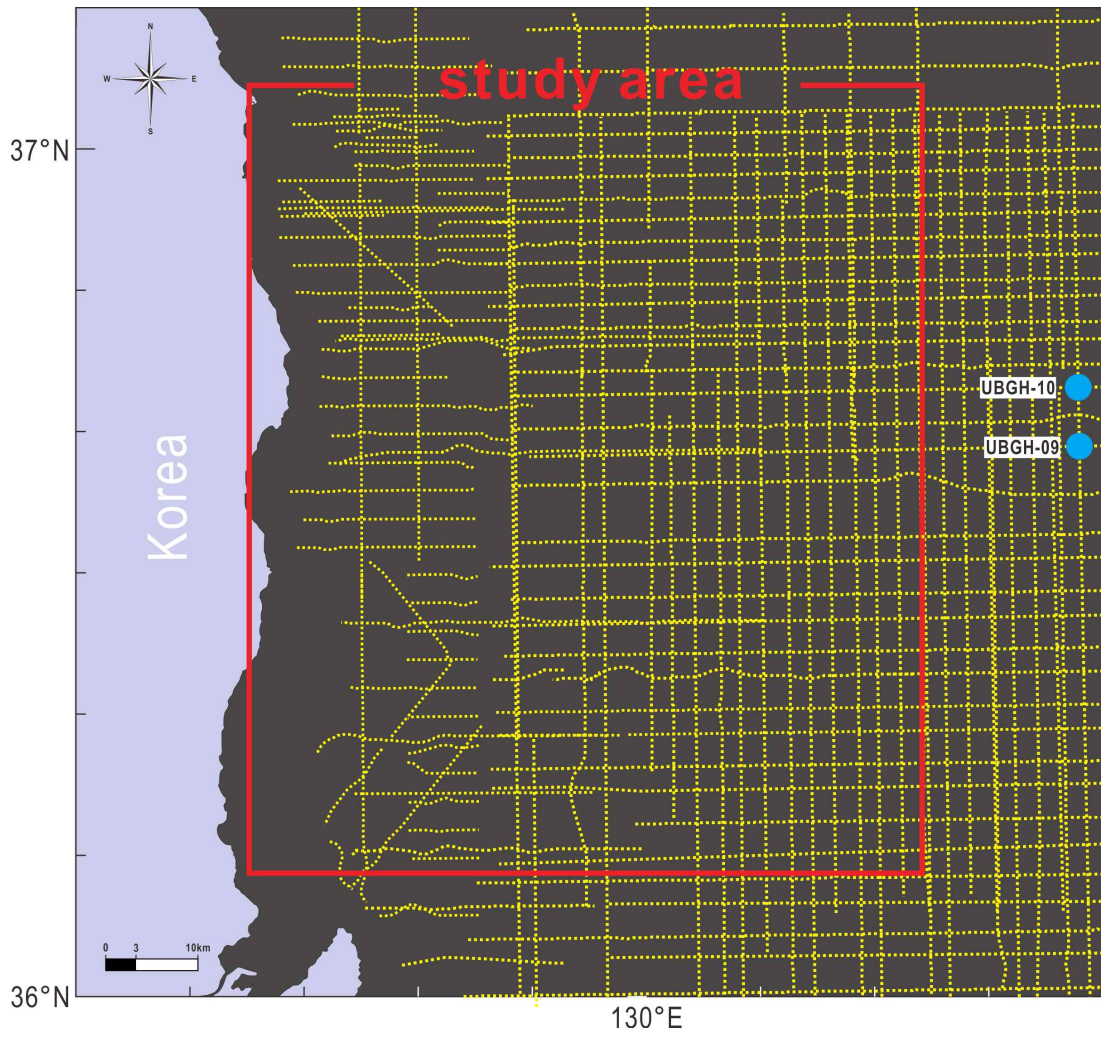


Fig. 6. Map showing locations of 2D Seismic tracklines and Drilling wells (blue dot) analyzed in this study.

3.2 분석 방법

3.2.1 탄성파층서 분석

탄성파층서(seismic stratigraphy) 분석은 기본적으로 탄성파 자료에 지질학적 개념을 적용하여 층서적 해석을 하는 방법이다(Vail and Mitchum, 1977). 반사법 탄성파탐사 자료는 실제 지질단면 형태와 유사한 단면을 제공하여 지하의 세부구조를 연구하는데 있어 매우 중요한 정보를 포함하고 있다.

탄성파층서는 기본적으로 퇴적시퀀스(depositional sequence)를 기초로 층단위가 구분되며, 퇴적시퀀스를 구성하는 반사면(reflection)은 지질학적 관점에서 퇴적환경과 형성시기가 유사한 층으로 이루어져 있다(Vail and Mitchum, 1977). 퇴적시퀀스는 비교적 평행하고 정합적인 관계를 갖는 지층들로 구성되며, 상하부는 부정합면(unconformities) 또는 이에 대비되는 정합면(correlative conformities)로 구분되는 종단양상(reflection termination)이 나타난다(Vail and Mitchum, 1977) (Fig. 7). 종단양상은 반사면의 유형인 층리반사면, 부정합면, 비퇴적반사면, 인위적반사면에 의해 나타난다. 층리반사면은 일반적으로 지층의 등시선에 해당하는 층리면(bedding planes)을 따라 나타나며, 에너지 레벨(energy level), 퇴적속도(sedimentation rate), 퇴적환경(depositional environment), 공급원(input source), 숙성정도(degree in diagenesis), 공극률(pore contents)과 연관된다. 부정합면은 침식(erosion) 또는 무퇴적(non-erosion)으로 인한 시간적 공백을 나타내며, 상부 경계면에서는 침식절단(erosional truncation)과 탑랩(toplap)으로, 하부 경계면에서는 온랩(onlap)과 다운랩(downlap) 오프랩(offlap)의 랩아웃(lapout) 유형이 나타난다(Fig. 7). 비퇴적 반사면은 단층 또는 퇴적층에 포함된 유체 및 광물 등에 의해 단면에서 인지되며, 인위적 반사면은 회절곡선(diffraction curve), 다중반사(multiple) 등에 의해 나타난다.

위와 같은 개념을 바탕으로 탄성파층서를 구분하였으며, 전체 탄성파 측선에 대해 각 퇴적시퀀스의 층서 구분 및 대비 분석을 위해 IHS사의 Kingdom2017 소프트웨어를 활용하였다. 분석된 자료들은 퇴적시퀀스의 지형기복, 퇴적층 두께 및 분포범위를 파악하기 위해 시간구조도(time structure map)와 등층후도

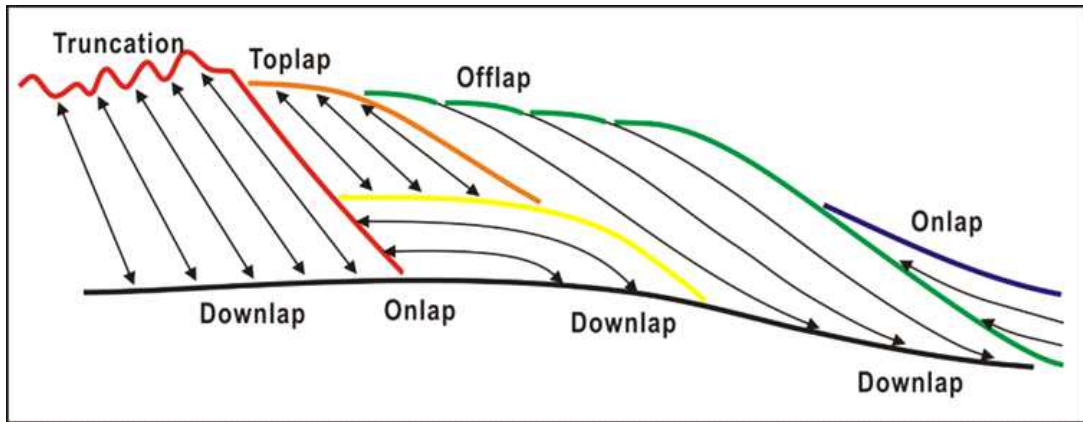


Fig. 7. Diagram showing reflection termination patterns and types of discontinuities. Modified from Vail and Mitchum (1977).

(isochron map)를 작성하였다.

3.2.2 탄성파상 분석

탄성파상(seismic facies)은 도면화가 가능한 3차원 탄성파 단위로서(Sangree and Widmier 1977), 탄성파 단면상에서 구분된 퇴적시퀀스 내부의 반사면 배열 형태(reflection configuration)인 측면 연속성, 진폭, 주파수, 구간속도와 외형(external form) 등의 반사적 탄성파 특성 요소를 종합하여 탄성파상을 기술하고 해석하는 것을 말한다(Vail and Mitchum, 1977). 각 반사파적 요소들은 퇴적시퀀스의 경계를 걸치고 있는 형태로 분포할 수 있다. 또한, 실제 지질학적 환경을 직·간접적으로 제시하고 이러한 특성을 기초로 하여 탄성파자료 상에서 퇴적과정 및 환경, 암상분포에 대한 유추가 가능하다(Vail and Mitchum, 1977).

반사적 특성요소의 변화가 인지되는 반사면 유형을 구분하여 탄성파상을 결정하였으며, 그룹화를 통해 작성된 도면을 퇴적환경, 퇴적물공급원 및 지질학적 관점에서 해석하였다. 이 연구에서는 복잡한 구조운동과 변형으로 인해 퇴적환경이 급격하게 변화하는 지형 특성상 전체지역에 대한 탄성파상 대비에 어려움이 있다고 판단하여, 부분적으로 도시하였다.

3.2.3 지질구조 분석

지질구조는 지각변동에 의한 요인으로 암석 및 퇴적층에 작용된 힘(응력; stress)에 의해서 변형된 구조를 말하며, 단층 및 습곡 등이 대표적이다. 탄성파 단면도는 지하 지질구조의 형태가 잘 드러나기 때문에 반사면들의 변형된 배열 형태를 파악하여 지질구조를 분석할 수 있으며, 나아가 변형된 구조의 기하학(geometry)과 운동학적(kinematics)인 특성을 통해 변형의 원인이 되는 응력장 및 응력장 변화와 연관된 조건을 해석하고 판과 판의 상호작용에 의한 지구조적 작용을 유추가 가능하다.

탄성파 단면도상 퇴적층에서 인지되는 변형된 구조를 구분하였으며, 지질구조의 유형, 특성 및 분포지역에 따라 분류하여 이를 기반으로 지질구조도를 작성하였다.

IV. 탄성과 층서

4.1 층서 경계면

본 연구에서는 탄성과 단면에서 층서분석을 위하여 6개의 층서 경계면(SB: sequence boundary)을 기준으로 총 6개의 층단위(SU: sequence unit)로 구성된 층서체계를 설정하였다. 여기서 층서 경계면은 음향기반암 상부면(SB1), 그리고 퇴적층에서 인지되는 정합 또는 부정합면(SB2, SB3, SB4, SB5, SB6) 등에 해당한다(Figs. 8, 9).

4.1.1 SB1: 음향기반암(acoustic basement)

경계면 SB1은 탄성과단면 상에서 가장 최하부에서 인지되는 층서 경계면이다. 음향기반암의 특성상 매우 강하고 비교적 측면연장성이 양호한 반사면이 상부 퇴적층과의 경계를 이루고 있으며, 측면 연속성이 상당히 좋게 나타나는 특성을 보인다. 한편, 대륙사면에서는 일반적인 음향기반암의 최상부 경계면과 비슷한 강한 반사면경계면으로 구분되지만 상대적으로 연속성이 약하고 불규칙한 쌍곡선형태의 반사면이 나타난다.

연구지역에서 SB1은 연안역에 위치한 약 0.3 sec의 기반암 고지대를 기준으로 동쪽으로 갈수록 기반암 심도가 깊어지며, 최대 약 6.0 sec에 기반암이 분포하고 있다. 한편, 후포분지는 후포단층대를 따라 구조운동에 의해 국지적으로 기반암이 융기되어 있으며, 분지의 가장 깊은 곳은 주변의 기반암 고지대보다 0.8 sec의 깊이 차이를 보인다. 기반암 저지대는 단층운동으로 인해 지구 또는 반지구 형태로 지형이 발달하였으며, 국지적으로 신장된 해릉과 해곡(ridge and trough)으로 인하여 복잡한 지형기복이 나타난다. 한편, 동경 약 130° 부근에서 급격한 경사변화가 나타나며, 이후 울릉분지로 연결되면서 다시 완만하게 깊어지는 특성을 보인다(Fig. 10).

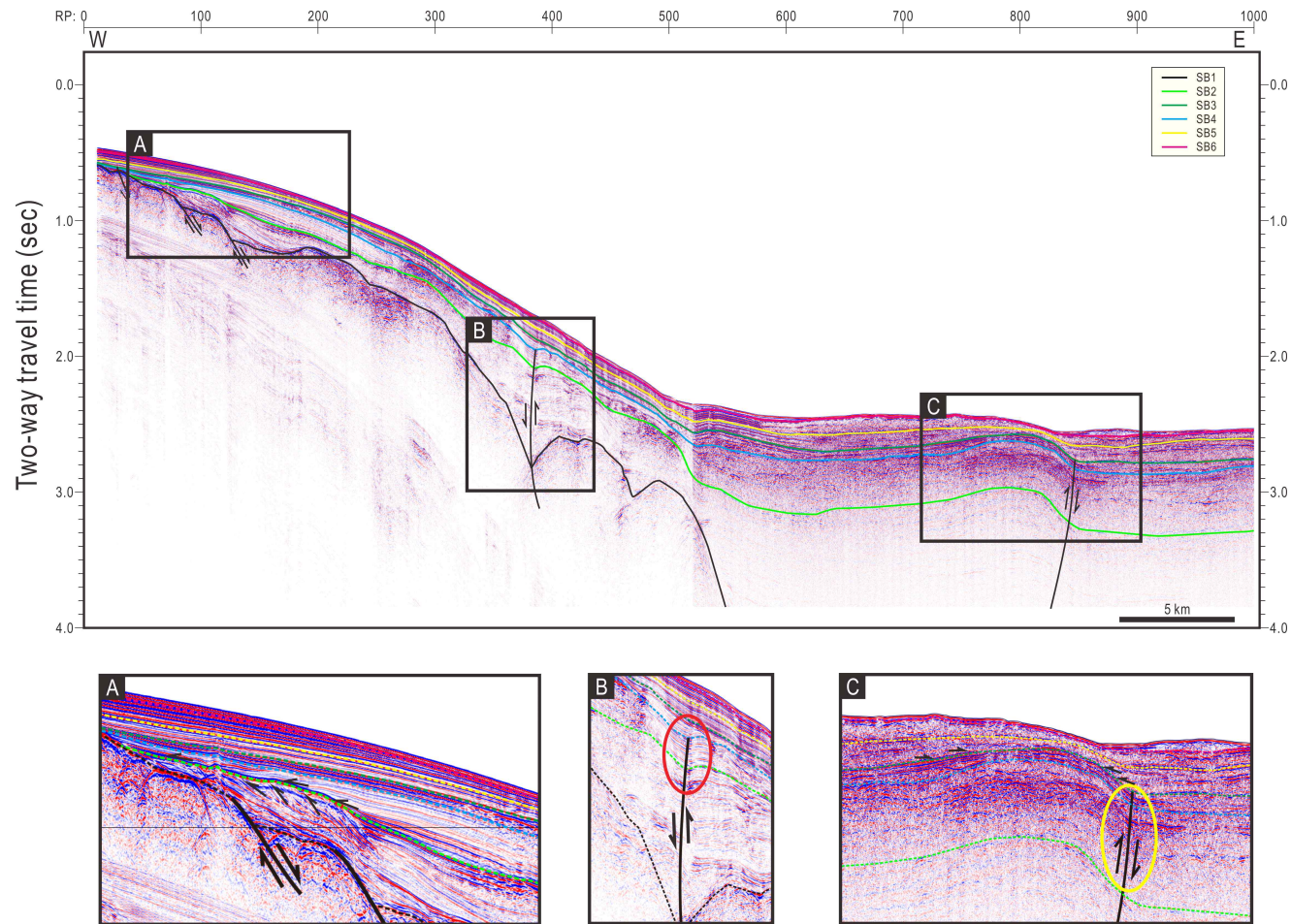


Fig. 8. Interpreted seismic profile showing sequence boundaries (SB2~SB6). RP: reference points.

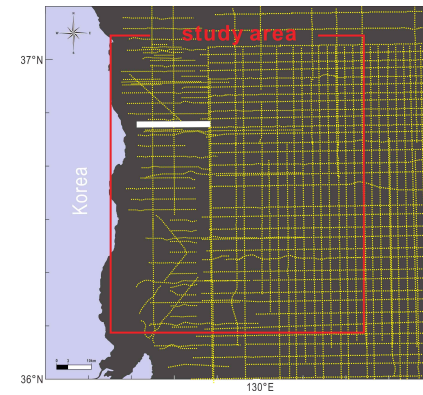
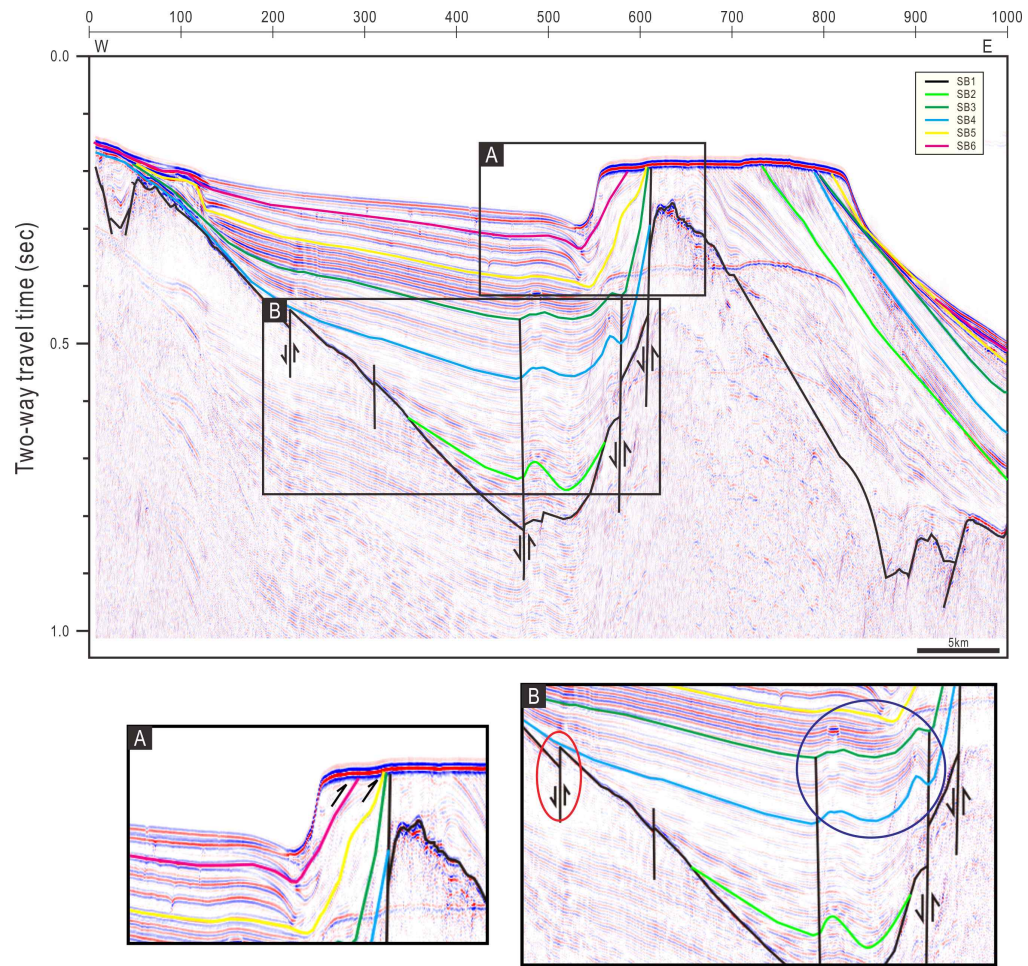


Fig. 9. Interpreted seismic profile showing sequence boundaries (SB2~SB6). RP: reference points.

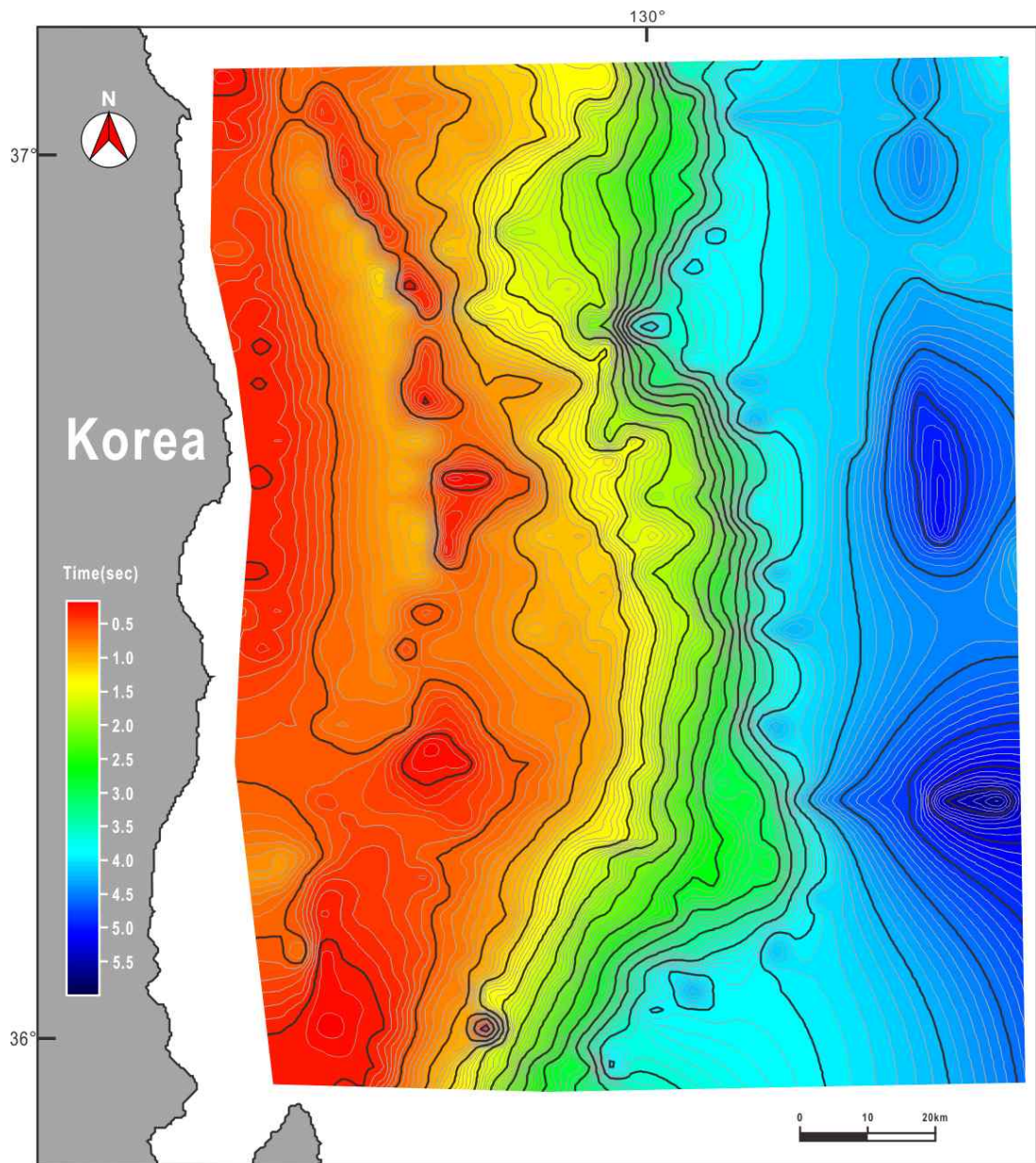


Fig. 10. Time structure map of SB1. Contours in sec (two-way travel time).

4.1.2 SB2

경계면 SB2는 후포분지에서는 대부분 연속성이 좋게 나타나며 음향 기반압과 나란히 놓인 반사면을 기준으로 설정하였으나, 자료의 해상도 및 다중반사(multiple)에 의해 뚜렷한 구분이 어렵다. 또한, 후포단층이 사교이동(oblique-slip)형태로 재활성되면서 형성된 후포뱅크(Hupo Bank)로 인해 경계면이 단절되었으며, 일부 대륙사면에서는 탑랩 형태의 상부경계면과 온랩 형태의 하부경계면을 통해 구분되는 부정합면을 경계면으로 설정하였다. 울릉분지 시추코어(UBGH)의 생층서 분석결과 마이오세-플라이오세의 경계인 약 5.5 Ma로 측정되었으며(Lee, 1994; Park, 1998; Yi et al., 2012), 이와 대비되는 경계면이다.

연구지역에서 SB2는 SB1의 상부에 위치한 경계면으로 서에서 동으로 갈수록 경사가 깊어지는 특징을 보인다. 전반적으로 완만한 깊이 변화를 보이고 있으며, SB1보다는 지형변화로 인한 기록이 거의 없기 때문에 완만한 깊이 변화로 울릉분지까지 연결된다(Fig. 11).

4.1.3 SB3

경계면 SB3은 후포분지의 일부지역에서 압축성 구조변형으로 보이는 퇴적 반사면을 기준으로 구분하였으며, 울릉분지에서는 경계부 하부의 혼돈(chaotic) 반사면과 대비되는 측면연속성이 좋고 뚜렷한 반사면을 기준으로 경계를 설정하였다. 울릉분지 시추코어(UBGH)의 생층서 분석결과(Lee, 1994; Park, 1998; Yi et al., 2012) 플라이오세-플라이스토세의 경계인 약 2.58 Ma 층서경계면과 대비된다.

연구지역에서 SB3은 SB2의 상부에 위치한 경계면으로 연안역에서 동쪽 심해저분지로 갈수록 경사가 깊어지는 특징을 보이며, 동경 약 130° 부근에서만 급격한 깊이 변화가 나타난다. 연구지역의 남동부에서는 SB4의 시기에 발생한 구조운동이 하부에 위치한 SB3에도 영향을 미쳐 기존에 있던 층이 변형되면서 지형 기록을 보인다(Fig. 12).

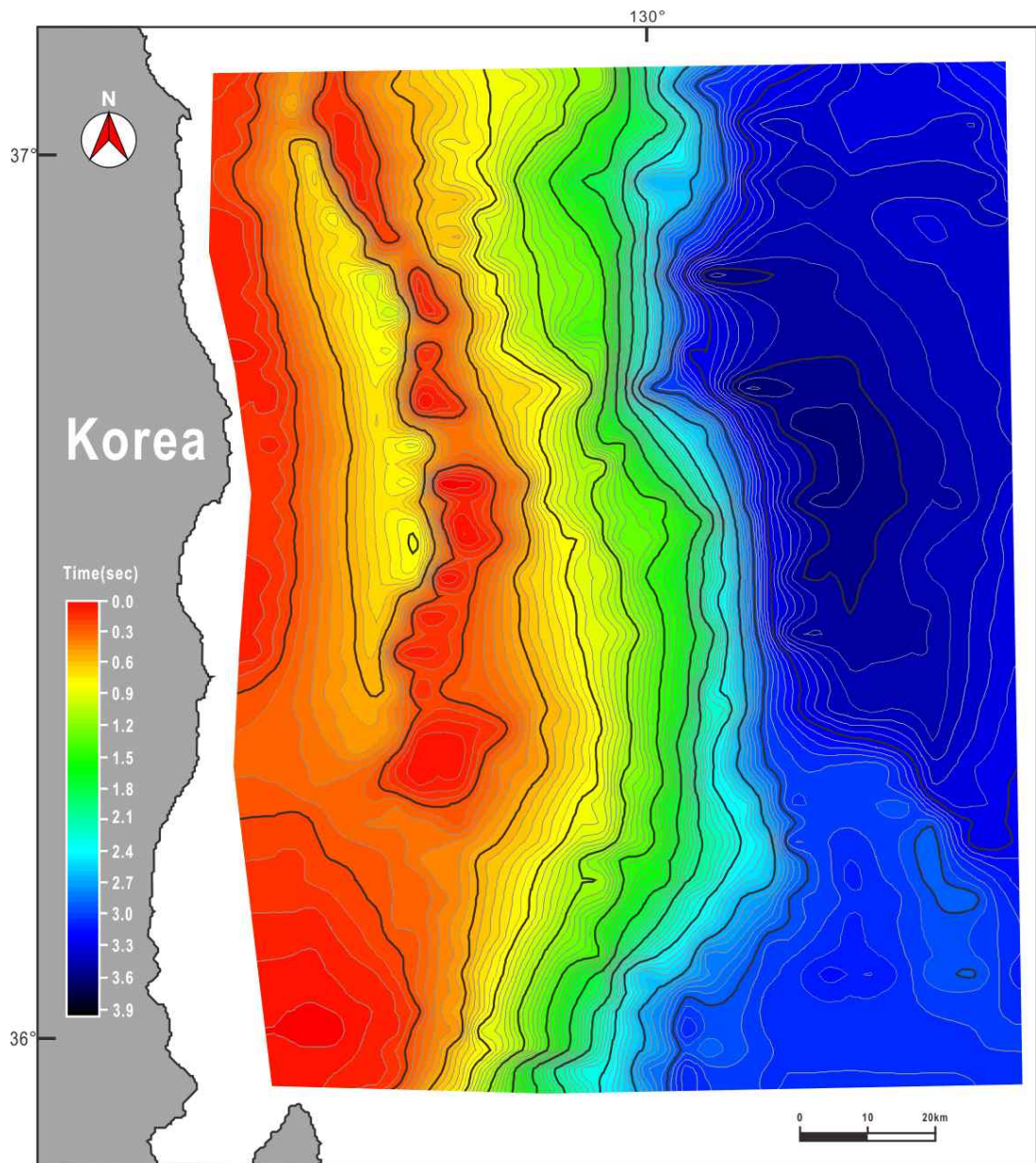


Fig. 11. Time structure map of SB2. Contours in sec (two-way travel time).

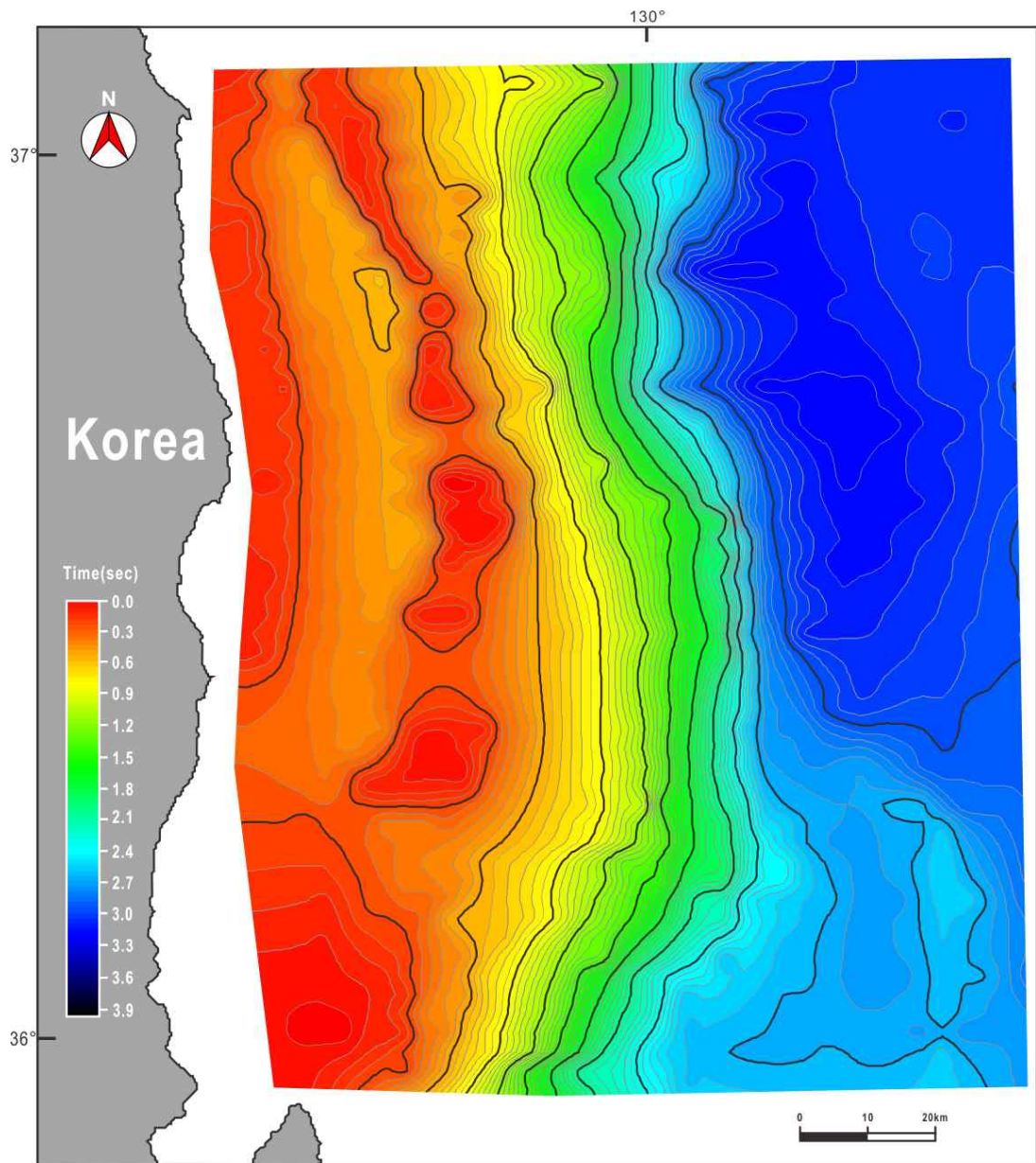


Fig. 12. Time structure map of SB3. Contours in sec (two-way travel time).

4.1.4 SB4

울릉분지 지역에서는 제4기 구조운동(Neotectonic)의 압축성 응력의 영향으로 습곡(folding) 형태로 변형된 퇴적시퀀스가 존재한다. 경계면 SB4는 이러한 구조운동으로 변형된 퇴적층에서 나타나는 최상부경계면에 대비되는 것으로 설정하였다. 한편, 후포분지에서는 SB3을 구분했던 압축성 구조변형이 나타나는 경계면의 최상부 반사면을 경계면으로 설정하였다.

연구지역에서 SB4는 SB3의 상부에 위치한 경계면으로 다른 경계면들과 마찬가지로 연안역에서 심해저분지로 갈수록 경사가 깊어지는 특징을 보이며, 위도 약 130° 부근에서만 급격한 깊이 변화가 나타난다. 한편, 연구지역 위도 36° 50', 경도 130° 위치에서 계곡(Valley) 형태의 지형이 나타난다(Kim et al., 2017). 연구지역의 남동부에서는 구조운동으로 변형되어 지형기복을 보이는 것이 특징이다(Fig. 13).

4.1.5 SB5

경계면 SB5는 전반적으로 퇴적층 내에서 정합 또는 부정합면으로 인지되는 반사면이 존재하지 않아 명확하게 구분되지 않는다. 반면, 대륙연안부(후포분지 서편)와 후포뱅크(후포분지 동편)의 최상부에서는 침식절단면(truncation)의 종단양상으로 경계가 구분되는 부정합이 존재하며, 부정합면의 하부에는 경사 부정합면이 발달되어 있다. 이를 기준으로 부정합면과 측면으로 연결되는 반사면을 경계면으로 설정하였다. 한편, 울릉분지에서는 경계면 SB4 시기에 압축성구조운동으로 지질지형이 분지형태로 변형되었다. 이 지역에서는 분지를 온랩으로 채워진 종단양상이 나타나며, 일부 지역에서는 상부 퇴적반사면과 부정합면으로 구분되는 경계를 기준으로 설정하였다.

연구지역에서 SB5는 SB4의 상부에 위치한 경계면으로 서-동으로 갈수록 경사가 깊어지며, SB4와 SB5에서 확인되었던 곡(Valley)이 나타난다. 한편, 연구지역의 남부에서는 SB4보다 남서-북동 방향으로 경계면의 깊이가 얕아졌으며, 완만한 지형 변화가 나타나는 특징을 보인다(Fig. 14).

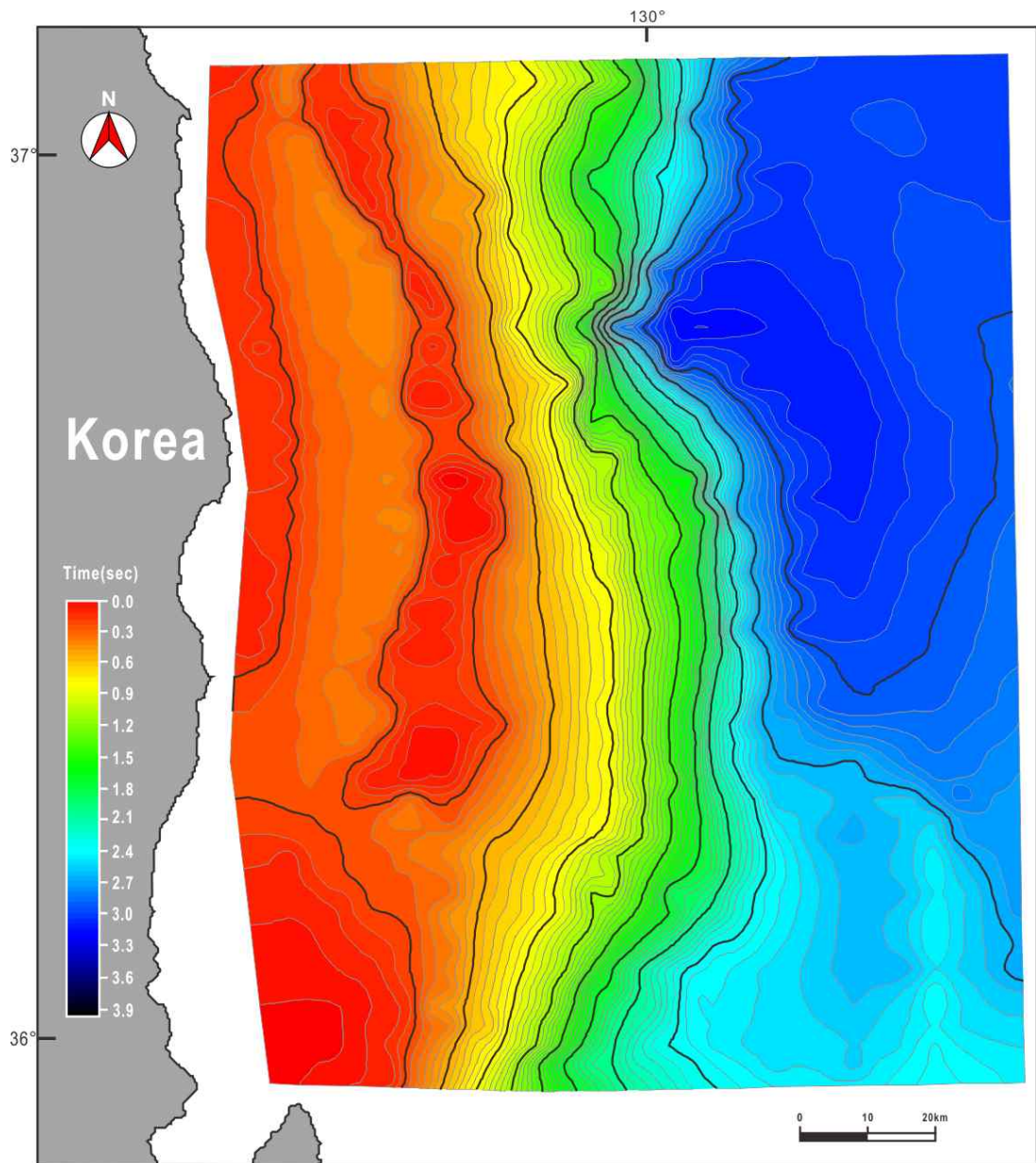


Fig. 13. Time structure map of SB4. Contours in sec (two-way travel time).

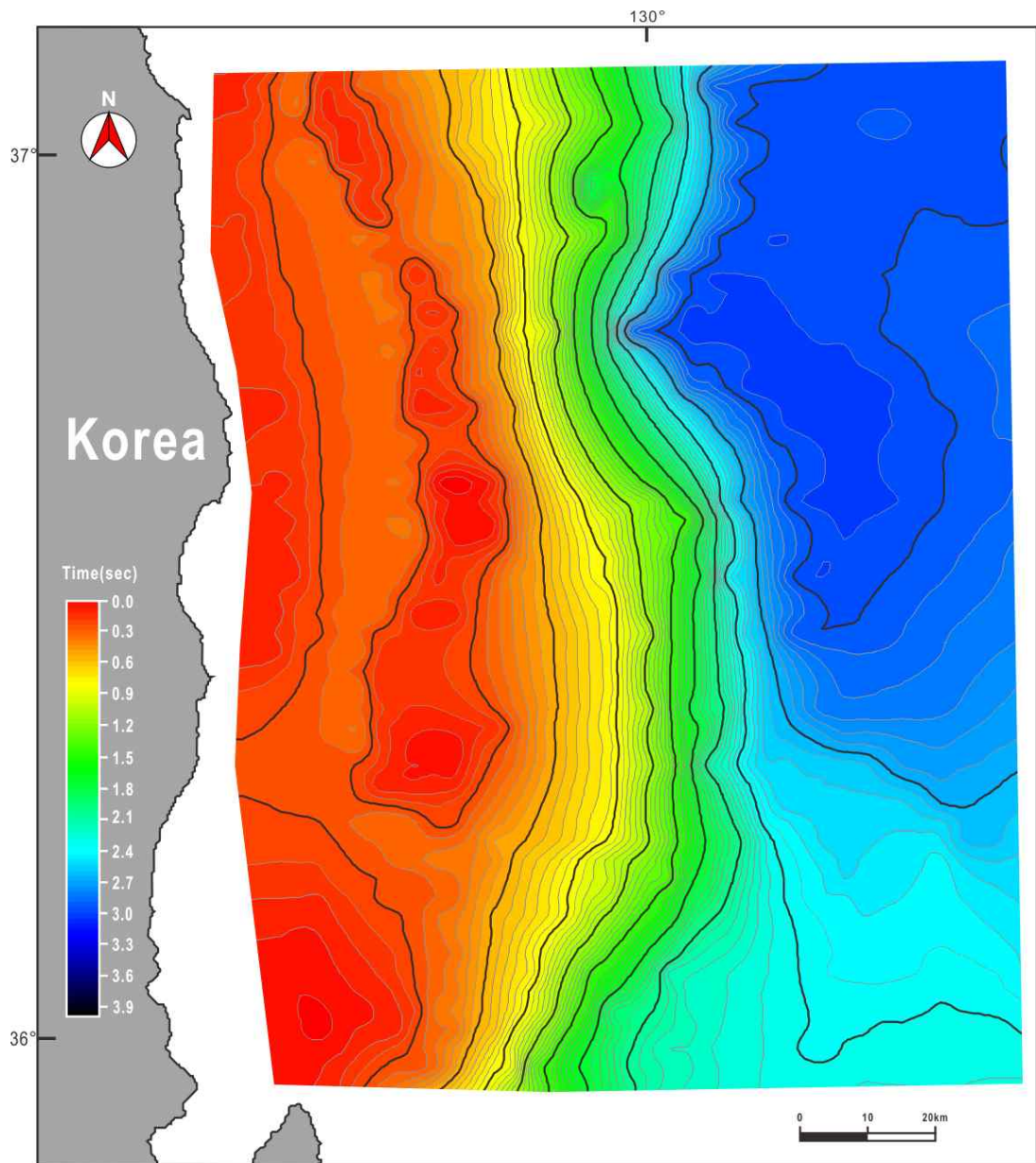


Fig. 14. Time structure map of SB5. Contours in sec (two-way travel time).

4.1.6 SB6

경계면 SB6은 대륙연안부(후포분지 서편)와 후포뱅크(후포분지 동편)의 침식 절단면 하부에서 가장 외부에 발달한 사선방향의 부정합면을 따라 측면으로 연결되는 반사층을 경계로 설정하였다. 울릉분지에서는 경계면 SB5의 상부에 놓인 캐오틱한 반사면과 구분되는 측면연속성이 양호한 부정합면을 기준으로 설정하였다.

연구지역에서 SB6은 SB5의 상부에 위치한 경계면으로 서쪽부인 대륙연안부에서 동쪽부인 심해저분지로 갈수록 경사가 깊어진다. SB4에서 확인되었던 위도 $36^{\circ} 50'$, 경도 130° 의 계곡(Valley) 지형이 도면상에서 일부 확인된다. 연구지역의 남부에서는 SB5에서 나타났던 남서-북동 방향으로의 지형변화와 더불어 남남서-북북동으로 더 이동하여 깊이가 얕아진 특징을 보인다(Fig. 15).

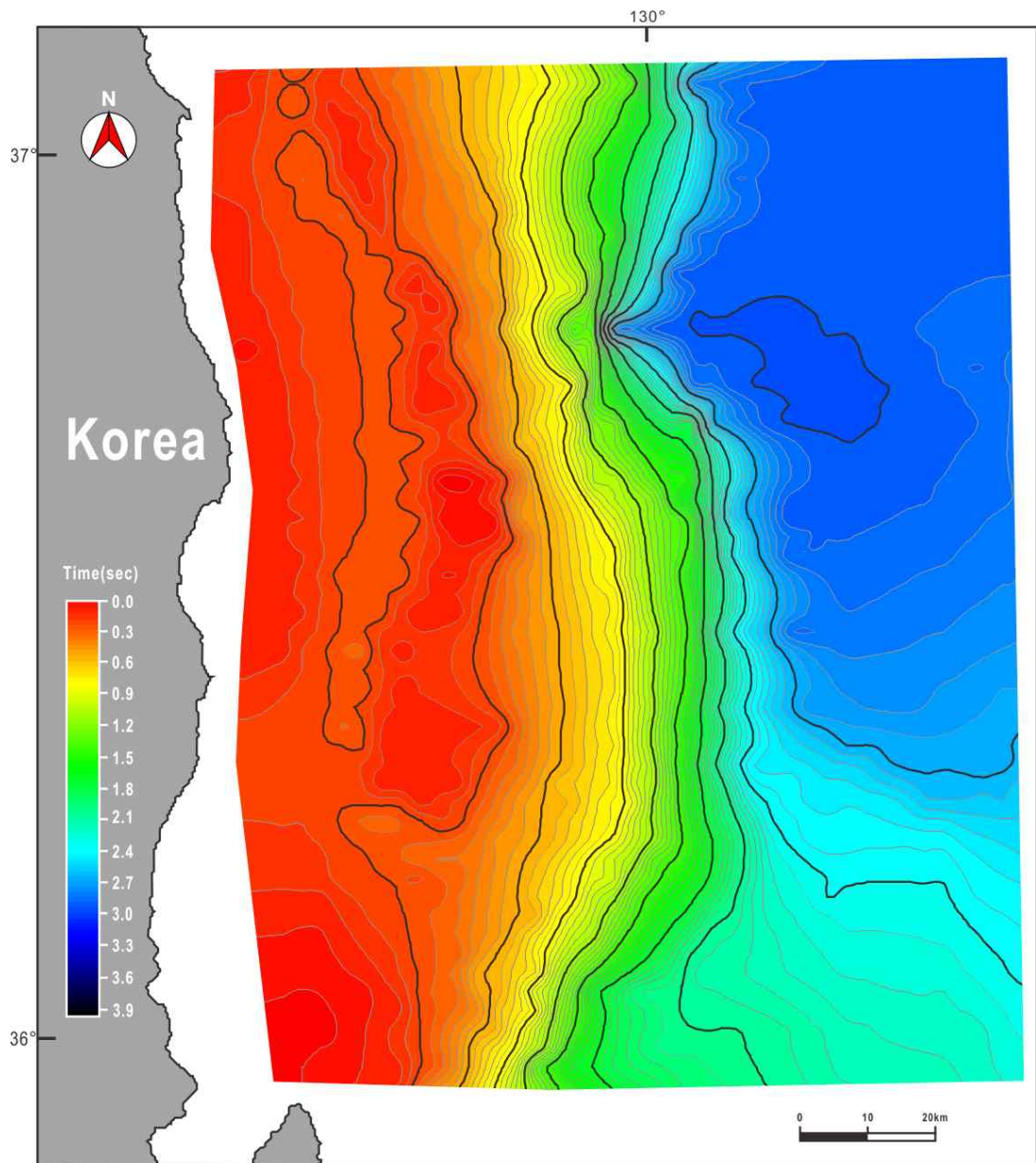


Fig. 15. Time structure map of SB6. Contours in sec (two-way travel time).

4.2 탄성파단면 해석

4.2.1 Line 1

탄성파단면 Line 1은 포항 북동쪽에 위치한 대륙붕과 대륙사면을 지나는 측선이다(Fig. 16). 단면좌측 가장자리 RP (reference point) 50에는 서쪽으로 경사진 신장단층이 발달되어있으며, 지구대(graben) 형태의 영덕-포항분지가 일부 나타난다. 또한, 사면지역에서 확인할 수 있는 얇은 퇴적층(약 0.05 sec) 상부는 침식으로 인해 매우 강하고 측면 연속성이 양호한 부정합면이 지구구조를 채우고 있는 퇴적층 상부와 연결된다.

음향기반암은 전반적으로 서에서 동으로 갈수록 깊어진다. RP 50과 500 지역에서는 약 0.3 sec의 얇은 위치에 놓여있으며, 대체로 평탄하면서 완만한 지형기복을 보이지만 RP 300과 500사이의 음향기반암은 불규칙한 형태를 띠고 있다. 또한, 음향기반암 하부는 결정질형태의 반사배열로 구성되어있으며, 상부에 놓인 퇴적층과 뚜렷하게 구분된다. RP 500의 동쪽에 놓인 기반암은 서쪽에 놓인 기반암과 달리 불규칙한 표면과 내부반사면을 보이며, 급격하게 가라앉은 지형변화로 울릉분지까지 연결된다.

RP 400 서쪽 퇴적층은 대륙방향으로 기반암 상부에 썩기형태로 약 0.1 sec (약 75 m)의 얇은 층으로 놓여있다. 이 퇴적층의 상부경계면은 침식으로 인한 부정합면이 나타나며, RP 300과 400의 퇴적층 상부는 경사부정합면 형태의 특징을 보인다.

RP 400의 동쪽 퇴적층은 고진폭의 반사면으로 온랭하는 여섯 개의 층단위로 구분된다. 최하부 층단위 SU1은 비교적 평행하고 약한 진폭으로 희미하게 층화된 반사면이 나타나며, 울릉분지 방향의 RP 950부터 층이 약하게 불규칙한 형태를 띤다. 또한, RP 400의 서쪽에 분포하는 퇴적층과 연결되며, 층단위의 가장 최하단부서 최상단부(층경계면)으로 올라갈수록 진폭이 상대적으로 증가하는 특징을 보인다. 층단위 SU2와 SU3은 층경계면 SB2의 상부를 썩기형태로 채워진 양상이 나타난다. 층단위 SU2는 SU1과 유사한 배열특성을 보이고 있으며, 층단위 SU3은 약한 진폭으로 층화된 반사면과 고진폭으로 층화된 반사면이 교호하면서 나타나는 내부 반사패턴을 보인다. 상부 층단위 SU4와 SU5는 경계면 SB2에

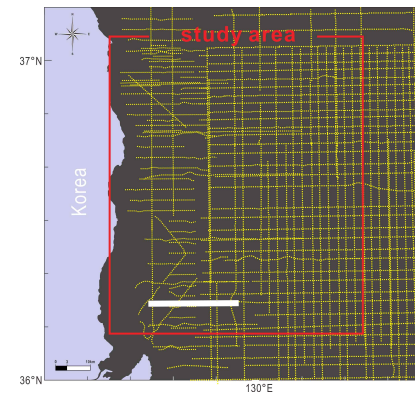
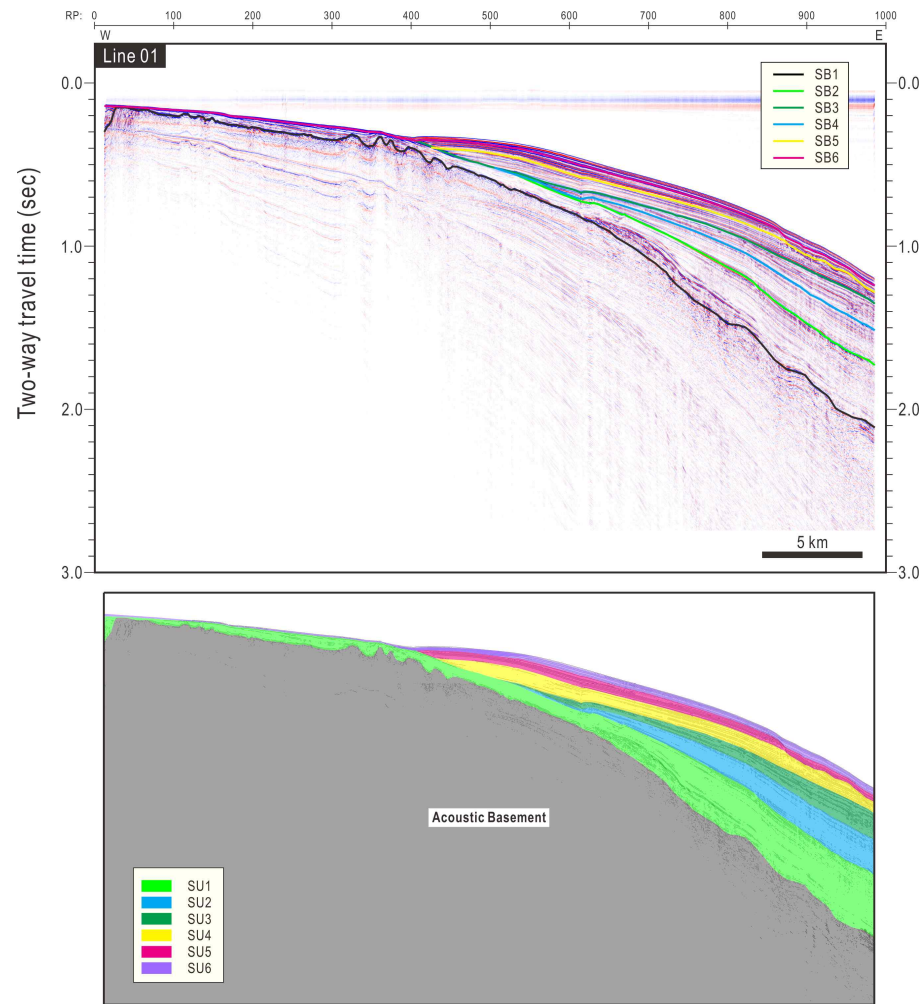


Fig. 16. Seismic profile and interpretation of Line 01

온랩하는 종단양상으로 놓여 하부 층단위와 구분된다. 층단위 SU4는 적당한 중간 진폭으로 양호한 연속성으로 층을 이루고 있으며, 울릉분지방향으로 갈수록 진폭의 세기가 강해지는 특징이 나타난다. 또한, RP 870과 1000사이에서는 지형 기록이 불규칙한 형태로 나타나며, 내부내열이 일부 캐오틱한 배열특성을 보인다. 층단위 SU5와 SU6은 음향학적으로 강한 고진폭의 뚜렷한 반사면이 RP 1000까지 매우 양호한 연속으로 연결된다.

4.2.2 Line 2

탄성파단면 Line 2는 영덕-포항 사이에서 취득된 탄성파단면이다(Fig. 17). RP 100에서 대륙붕단이 나타나며, RP 200부근에서 음향기반암 반사면이 동-서방향으로 급격하게 가라앉은 단층을 따라 영덕-포항분지와 연결된다. 이 단면도에서 영덕-포항분지 내부는 불규칙한 반사면으로 구성되어 있어 층서가 명확하게 구분되지 않는다. 음향기반암은 RP 200에서 RP 500까지는 완만한 경사로 약 0.2~0.3 sec의 얇은 위치에 놓여있으며, RP 500에서 동쪽으로 갈수록 급격한 경사변화로 울릉분지까지 연결된다. RP 200과 500 사이의 음향기반암은 지형기록이 약하게 혹은 거의 평탄한 특징을 보인다. RP 500부근에서는 후포단층의 영향으로 약간 상승된 형태를 보이며, 대체로 완만한 지형기록을 보이나 RP 700이후부터 불규칙한 표면이 나타난다.

RP 200 서쪽에 위치한 영덕-포항분지 내부는 불규칙한 반사면으로 구성되어 있어 층서가 명확하게 구분되지 않으나 상부에 고진폭으로 연속성이 양호한 반사면 특성을 가진 부정합면이 나타난다. RP 200과 500사이는 약 0.05 sec의 매우 얇은 퇴적층이 놓여있으며, 중간대륙사면(RP 500 부근)의 퇴적층과 연결된다.

RP 500 이후에서는 퇴적층 내부에서 강하게 나타나는 부정합 또는 정합면을 따라 6개의 층단위로 구분하였다. 층단위 SU1과 SU2는 내부 반사면들이 비교적 평행하지만 약한 진폭으로 불연속하며 희미하게 층화된 특징을 보인다. 층단위 SU3과 SU4는 중간정도 진폭으로 연속성이 양호한 반사면으로 층화된 특징을 보인다. 층단위 SU1~SU4는 상부사면으로 가면서 평탄한 음향기반암의 상부면에서 합쳐지면서 사라지게 된다. 층단위 SU5와 SU6은 고진폭으로 평행한 반사면이

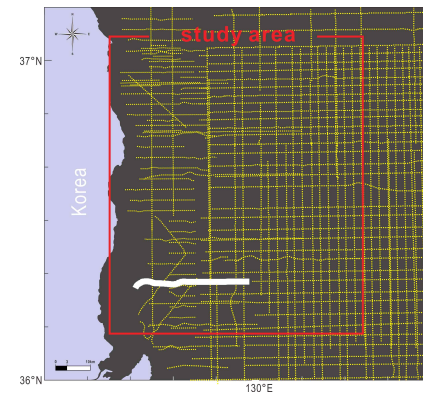
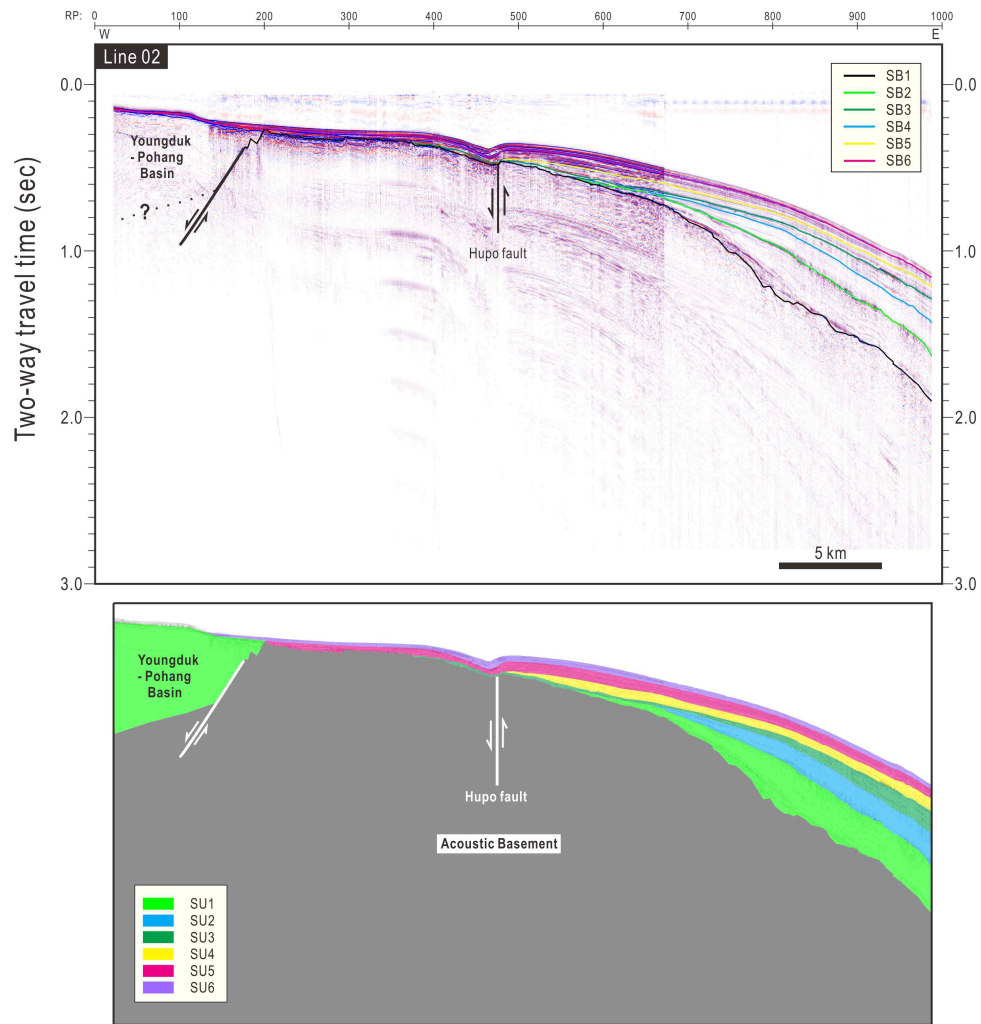


Fig. 17. Seismic profile and interpretation of Line 02

연속적으로 층화되었으며, RP 100 부근에 위치한 대륙붕단에 온렙한 종단양상이 나타난다.

4.2.3 Line 3

탄상과단면 Line 3은 영덕 대륙주변부의 후포분지와 후포뱅크 남쪽에서 취득된 단면이다(Fig. 18). 음향기반암은 RP 0부터 RP 130까지 분지형태의 지형으로 발달되어 있다. RP 200에서 RP 500 사이에는 후포단층이 존재하며, 단층의 영향으로 용기된 기반암이 RP 300에서 약 0.14 sec의 매우 얇은 위치에 음향기반암이 일부 돌출되어 있다. RP 500 동쪽에 놓인 기반암은 울릉분지 방향으로 급격하게 깊어지며, 표면은 매끄럽지만 전체적으로 지형기복이 심하게 나타난다. 또한 RP 800과 900 사이에는 강한 구조변형으로 일부 퇴적시퀀스가 습곡형태로 변형되어 나타난다.

후포분지의 퇴적시퀀스는 동쪽 방향으로 완만하게 층화되며, 후포뱅크(RP 140과 150 사이) 지역에서 고진폭 반사면으로 나타나는 경사 부정합에 의해 여섯개의 층단위로 구분된다. 최하부 층단위 SU1은 분지 형태의 음향기반암 상부를 채우고 있는 형태를 보이는데, 이 층단위는 포항-영덕분지 퇴적층의 연장으로 보인다. 층단위 SU2~SU5는 반지구대(half-graben)에 해당하는 후포분지를 서-동방향으로 채우고 있으며, 후포뱅크의 부정합면으로 구분되지만 후포분지 내부의 퇴적층에서는 경계면 SB2 상부에서 희미하고 중간정도의 진폭으로 뚜렷한 경계면이 나타나지 않아 반사면 구분이 어렵다.

RP 300과 500 사이의 시퀀스는 구조적으로 변형된 또 다른 기반암퇴적 분지가 층단위 SU1이 약 0.5 sec 두께로 대부분 채우고 있으며, 후포분지의 SU1과 대비된다. 층단위 SU1은 후포뱅크의 상단에서 삭박되어 얇은 퇴적층과 경사부정합을 이루고 있다.

대륙사면(RP 500 이후)에서 SU1은 기복이 심한 기반암 저지대를 채우고 있으며, 중간 진폭으로 준평행 및 불연속 반사면이 특징이다. 층단위 SU2~SU5는 일반적으로 저진폭과 낮은 연속성으로 희미하게 층화된 특징을 보인다. SU6은 상대적으로 하부 층단위보다 반사면의 연속성과 진폭이 더 높게 나타난다. 또한 사면붕괴로 인한 함몰대(scar)가 존재하며 이로부터 재동된 퇴적

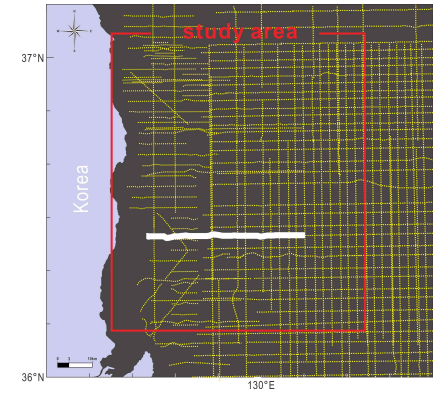
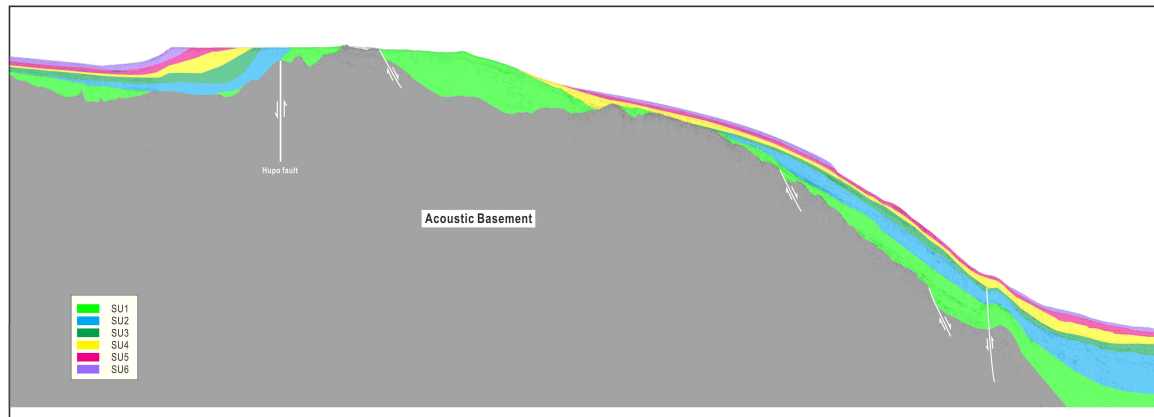
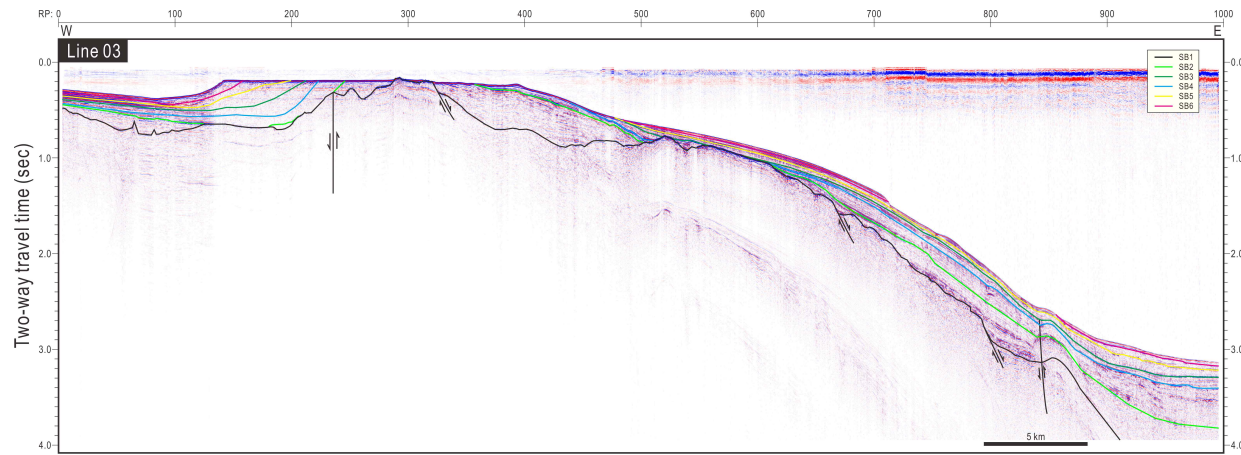


Fig. 18. Seismic profile and interpretation of Line 03.

층은 대륙사면의 하단부 또는 울릉분지 서쪽 경계부에 집적되어 있다. 한편, RP 800 과 900 사이의 SU1~SU3 은 변형을 받은 습곡이 나타나며, SU4~SU6 은 비교적 약한 변형을 받은 지층으로 구성되어 있다.

4.2.4 Line 4

탄성과단면 Line 4는 후포 연안의 대륙붕과 사면을 가로지르는 축선을 따라 취득된 단면이다(Fig. 19). 대륙붕과 후포분지의 음향기반암은 고진폭 반사면으로 지형기복이 거의 없이 평탄하게 동쪽으로 깊어지는 반지구대 형태로 나타난다. RP 400과 800사이의 음향기반암은 상부에서 강한 반사면이 나타나지만 지형기복이 상당히 심하게 나타나며, 내부는 비조직화된 반사배열로 화산기원으로 추정되며, 특히, RP 700와 RP 800에서는 기반암이 돌출되어 있다. RP 850 이후의 음향기반암은 상당히 급격한 경사변화를 보인다.

후포분지에서 SU1은 다중반사에 의해 뚜렷한 구분이 어렵지만 경계면 SB2 하부에서 음향기반암의 상부를 따라 평행하고 희미하게 층화되어 있으며, 후포단층에 의해 단절되어있다. 층단위 SU2는 중간 진폭으로 평행한 반사면이 후포분지에 가까워질수록 두께가 증가하는 발산하는 외형(external form)을 보이며, 변형된 기반암을 따라 후포뱅크의 경사부정합면에 연결된다. SU3~SU6은 구조변형으로 형성된 반지구대를 채우고 있으며, SU3은 SU2와 비슷한 반사면으로 평행하고, SU4~SU6은 비교적 강한 반사면으로 평행하게 놓여있다. 특히, 경계면 SB4의 상부에는 전진형 퇴적체가 발달되어 있으며, 이 퇴적체 내부에서 구분되는 경사부정합면과 경계면 SB3 상부에 놓인 층단위들과 연결된다.

중부 대륙사면(RP 500~700)에서 층단위들은 돌출된 기반암사이의 저지대에 집적된 양상을 보인다. 층단위 SU1 내부는 화성기원으로 추정되는 기반암에 의해 변형되어 일부 불규칙한 반사면이 나타나며, 이를 제외한 부분은 적당히 강한 진폭과 상대적으로 약한 진폭이 교호하면서 층화되어있다. 층단위 SU2~SU6은 전반적으로 평행한 반사면으로 구성되어 있으며, 상부에 위치할수록 반사면의 진폭이 강해진다. 또한, 모든 층단위는 RP 850 부근에서 기반암 돌출대(slope break)로 인해 울릉분지 층단위와 단절된다.

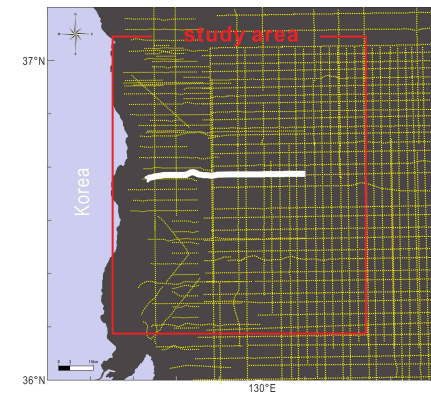
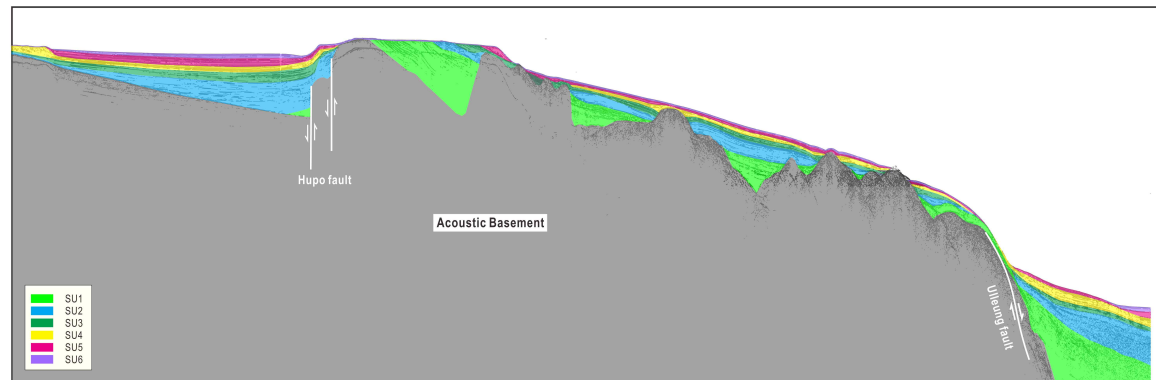
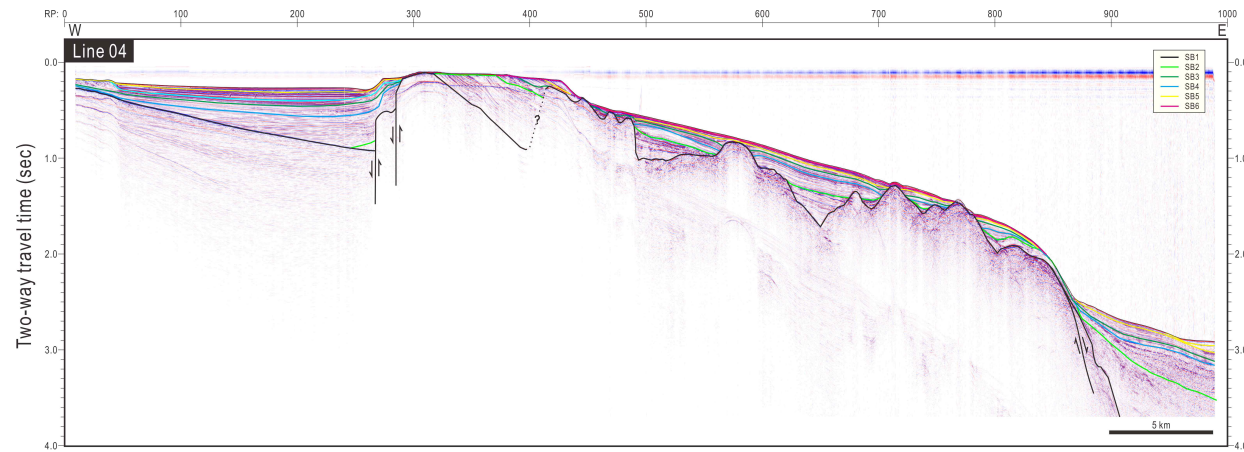


Fig. 19. Seismic profile and interpretation of Line 04.

4.2.5 Line 5

탄성과단면 Line 5는 후포항 북동쪽의 대륙붕과 사면지역에서 취득된 동서 방향의 단면도이다(Fig. 20). 이 지역의 음향기반암은 상부면에 고진폭의 반사면으로 나타나며, 국지적으로 구조운동에 의해 기반암 변형으로 인한 지형변화가 나타난다. 후포분지의 음향기반암은 후포뱅크 방향으로 완만한 경사를 이루고 있으며, 지형 기복이 거의 나타나지 않는다. 단면도 좌측 끝에는 기반암 저지대가 존재하며, 영덕-포항분지와 연결된다. RP 200 부근에서는 후포단층으로 인해 음향기반암이 주변보다 융기되어 있으며, 기반암 최상부가 약 0.1~0.2 sec의 얇은 위치에 놓여있다. 후포뱅크(RP 250~450)에는 평탄한 지형기복으로 기반암 저지대를 형성하고 있다. 중간 대륙사면(RP 450)의 기반암 표면은 불규칙하고 기복이 대체로 작지만 RP 550 부근에서 기반암 돌출대가 나타나며, 이후 RP 550과 700에서 기반암 심도가 약 2.0 sec 이상 차이가 나는 매우 급격한 경사변화를 보인다. 또한, 가파른 경사의 중하부 대륙사면에는 불투명한 반사특성을 보이는 음향기반암이 주변 음향기반암보다 약 1.0 sec 높은 위치에 돌출되어 다른 지역의 대륙사면 기반암보다 복잡한 구조를 보인다.

후포분지에서 층단위 SU1은 기반암 상부경계면에 약 0.05 sec의 두께로 매우 얇게 집적되어 있으며, 경계면 SB1이 서쪽 가장자리의 영덕-포항분지 퇴적층 상부에 경사부정합면 형태로 나타난다. 층단위 SU2는 다른 지역의 단면들과 마찬가지로 발산하는 외형을 보인다. 층단위 SU3~SU6은 대체로 평행하고 뚜렷한 반사면으로 후포뱅크의 경사부정합과 연결된다. 한편, RP 200부근에서 층단위 SU6의 상하부는 외형적으로 정합적인 관계를 보이지만, 수로 침식구조 형태의 특성이 자주 나타난다.

RP 250과 600사이에서 층단위 SU1은 준평행한 반사면이 국지적인 구조 변형에 의해 음향기반암 상부에 다운랩하는 종단양상을 보인다. 층단위 SU2~SU6은 매우 얇은 두께로 집적된 퇴적층이 후포뱅크방면으로 온랩하는 특징을 보이며, RP500부근에서 나타나는 기반암 돌출대로 모든 층단위가 중부대륙사면의 퇴적체와 단절된다. RP 600 이후의 중부 대륙사면에서는 대부분 슬라이딩/슬럼프 형태의 퇴적체로 내부가 혼돈된 반사배열로 울릉분지까지 연결되기 때문에 울릉분지의 층단위와 연결되지 않는다.

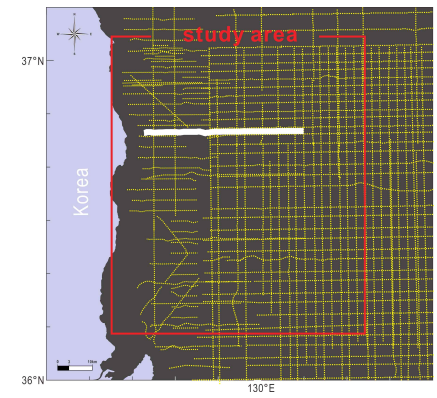
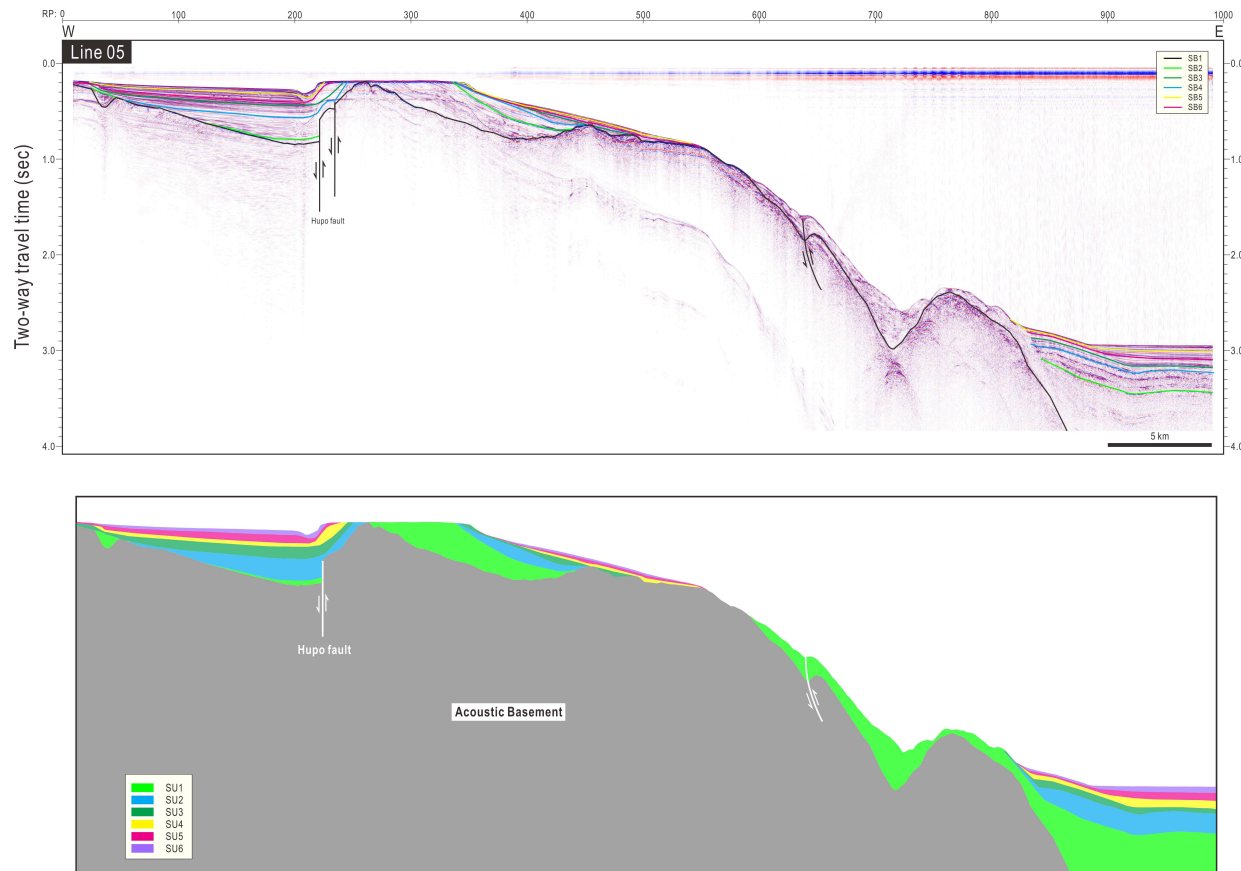


Fig. 20. Seismic profile and interpretation of Line 05.

4.2.6 Line 6

탄성과단면 Line 6은 울진과 후포 사이의 대륙 주변부에서 취득된 W-E 탄성과 단면도이다(Fig. 21). 서쪽에서부터 후포 분지, 후포뱅크, 대륙사면의 해저지형이 발달되어 있으며, 구조운동에 의해 발달한 후포 단층 및 습곡이 나타난다.

음향 기반암은 전반적으로 내부반사면이 불규칙하고 비교적 강한 반사면이 나타나는 특징을 가지며, 연안에서 분지로 갈수록 완만한 경사로 깊어진다. 후포뱅크 서쪽에 위치한 기반암은 반지구대 형태로 기울기가 완만하게 울릉분지 방향으로 깊어지고 있으나 후포단층으로 인해 후포뱅크의 기반암이 용기되어 주변보다 0.7 sec (약 525m) 높은 위치에서 기반암이 존재한다. 또한, 후포뱅크 동쪽은 약간의 지형기복이 있으며, 구조운동에 의한 지형변형이 나타난다.

후포 분지의 층단위 U1은 매우 희미하고 연속성이 불량한 형태로 층화되어 있으며, RP 370 인근에서 후포단층으로 인해 절단되어있다. 층단위 SU2~SU6은 전반적으로 서쪽방면 음향기반암에 온랩하는 중단양상을 보인다. SU2는 후포뱅크 쪽으로 중간 진폭의 연속성이 양호한 층이 점차 발산하며, RP 350에서 RP 400 사이에서는 후포단층의 변형으로 인해 층내부가 변형되어 나타난다. SU3은 전반적으로 평행하고 SU2보다 약간 강한 반사면으로 층화되어 있다. 층단위 SU3 또한 후포단층에 의한 구조변형의 영향이 나타난다. SU4~SU6은 연속성이 양호한 고진폭의 반사면이 평행하게 발달되어 있으며, 층단위 SU1~SU3보다 비교적 약한 변형이 나타난다.

대륙사면의 층단위는 대체로 후포뱅크 방향으로 온랩 형태의 중단양상을 보여준다. 층단위 SU1은 삭박된 후포뱅크의 경사부정합면(SB2)으로 구분되는 최하부 층단위이다. 내부는 대부분 약한 진폭으로 중간 정도 연속성의 반사면과 중간 진폭으로 연속성이 양호한 반사면이 교호하는 특징을 보인다. SU2는 희미한 진폭으로 연속성이 양호한 반사면이 층화되어있으며, 층단위 SU3은 SU2보다 상대적으로 강하고 뚜렷한 반사면으로 구성된다. 또한, 층단위 SU1~SU3은 RP 500부터 RP 700에서 습곡으로 인한 지형변형을 보이며, SU2와 SU3은 RP 650과 700지역의 습곡축면부가 일부 삭박된 경사부정합면이 나타난다. 층단위 SU4~SU6은 압축력에 의한 지형변화가 거의 보이지 않는다. 층경계면 SB3 상부 층단위 SU4와 SU5는 SU3과 유사한 반사면 특징을 보이며, SU6은 연장성이 양호한 고진폭

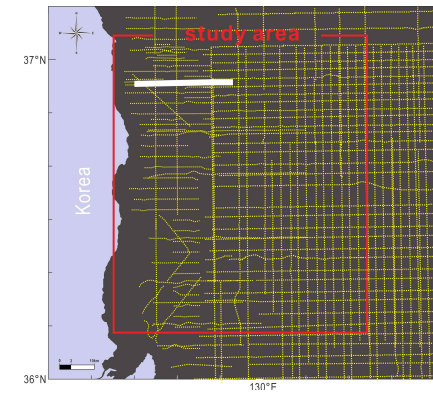
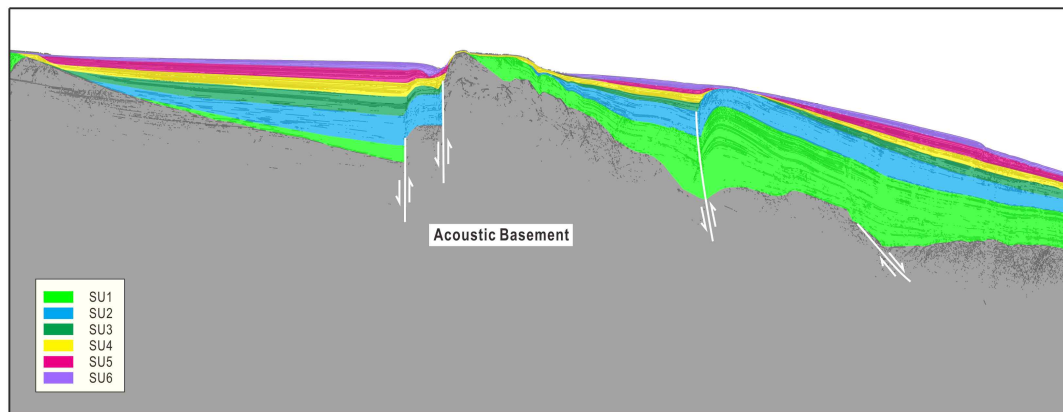
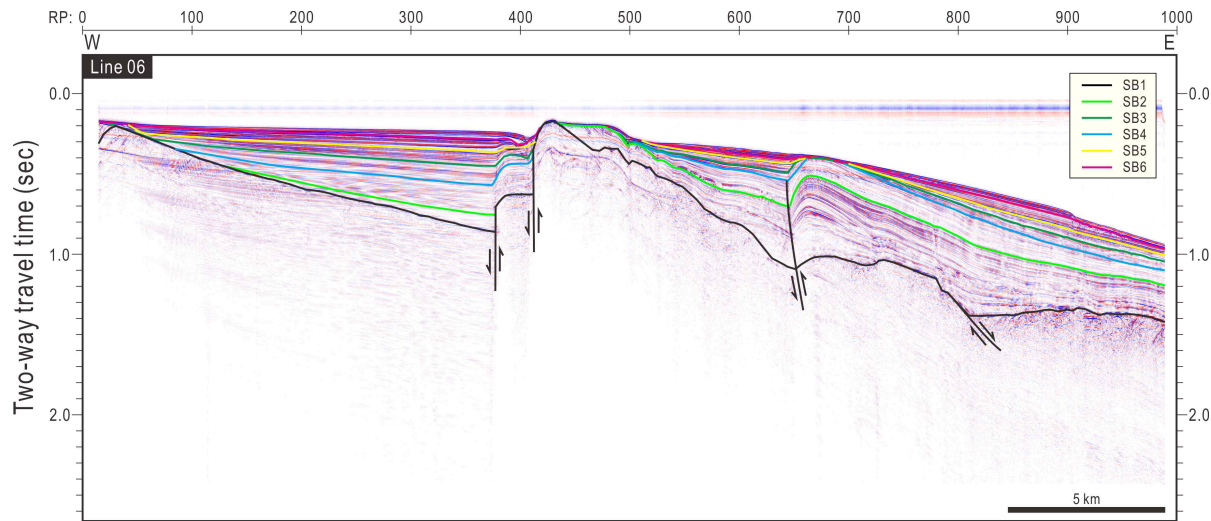


Fig. 21. Seismic profile and interpretation of Line 06.

반사면으로 증화되어 향사구조를 채우고 있다. 한편, RP 700 동쪽 사면은 서쪽의 반사면 특성이 동일하고, 발산하는 외형이 나타난다.

4.2.7 Line 7

탄성과단면 Line 7은 영덕 북동쪽에서 취득된 단면으로서 영덕-포항분지와 후포분지 및 후포뱅크의 다양한 구조지형을 보여준다(Fig. 22). 음향기반암은 단면도 서쪽 가장자리(육지방향)에서 영덕-포항분지와 연결되는 기반암 저지대가 형성되어 있다. 전체적으로 반지구대 형태의 분지구조로 되어 있으며, 후포뱅크까지 서-동방향의 경사가 깊어진다. 음향기반암의 최상부면은 연장성이 양호한 고진폭의 반사면으로 구성되어 있다. 또한, 내부는 조직화된 무반사(reflection free)가 우세하게 나타난다. 한편, RP 300과 500에는 지루와 지구 형태의 구조지형이 일부 존재하며, RP 700 부근에서는 후포단층의 영향으로 기반암이 융기되어 나타나는 것이 특징이다. 또한, RP 800에는 압축성 구조운동에 의한 습곡구조가 발달되어 있다.

후포분지의 퇴적층은 반지구대의 분지를 썩기모양으로 채운 형태를 보인다. 경계면 SB1은 서쪽 가장자리에서 영덕-포항분지와 RP 400과 500에 존재하는 기반암 저지대 상부에서 부정합면으로 나타난다. 이 단면도에서 층단위 SU1 거의 나타나지 않으나 RP 400과 500 사이의 기반암 저지대를 채우고 있으며, 후포단층 왼쪽에서 약 0.03 sec의 얇은 퇴적으로 일부 존재한다. 층단위 SU2는 약한 진폭으로 준평행한 반사면으로 구성되어 있다. 한편, RP 0과 300에 최상부에는 두께 약 0.1 sec, 길이 약 10 km의 거대한 전진형 퇴적구조가 발달되어 있다. 전진형 퇴적체의 내부는 혼돈 반사배열이 나타나며, 뚜렷한 고진폭의 부정합 경계면이 나타난다. 층단위 SU3~SU6은 전진형 퇴적층에서 구분되는 부정합면을 경계로 구분되며, 대체로 중간내지 고진폭의 연속성이 양호한 반사면으로 나타난다.

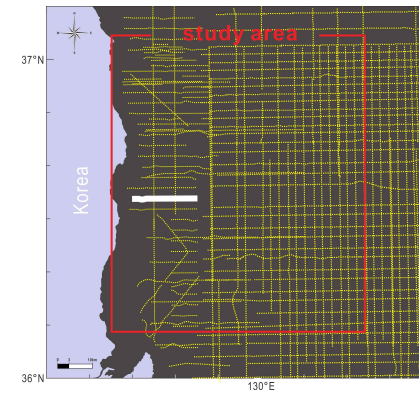
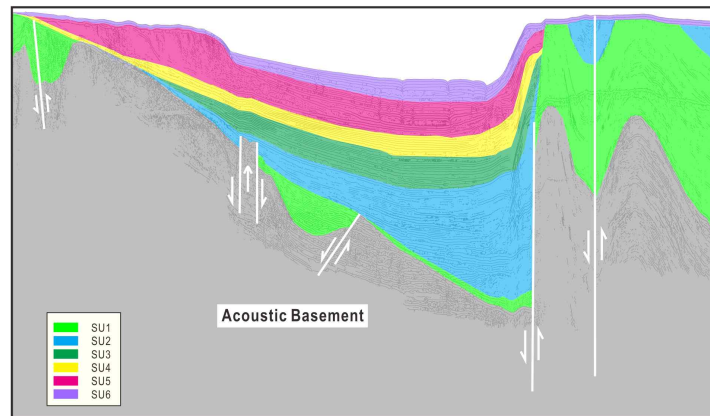
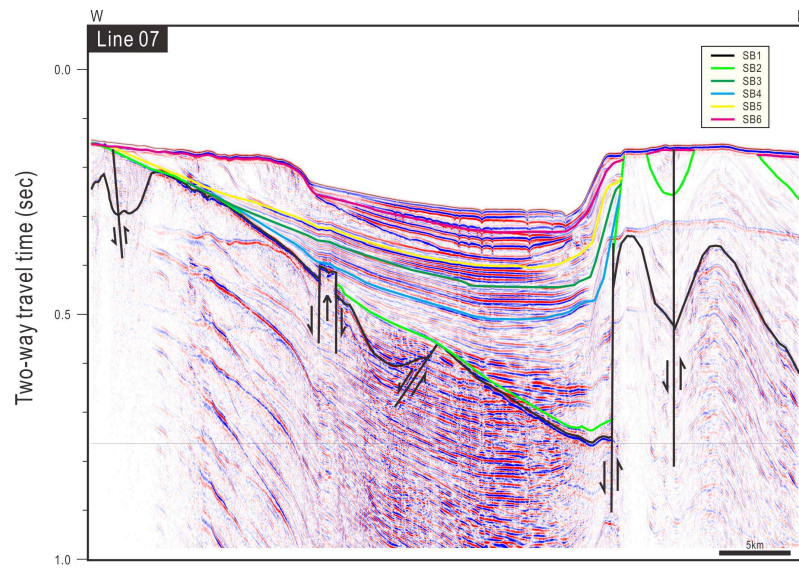


Fig. 22. Seismic profile and interpretation of Line 07

4.2.8 Line 8

탄성파단면 Line 8은 영덕 남동쪽 대륙사면부터 울릉분지까지 취득된 단면도이다(Fig. 23). 전반적으로 층단위는 서-동방향의 급격한 경사를 보이며, 울릉분지에서 다소 평탄 지형변화가 나타난다. 음향기반암은 국지적으로 음향기반암 상부가 평탄하지만 전체적인 지형은 구조변형으로 인해 복잡한 지형기복이 나타난다. 음향기반암 상부면은 대체로 뚜렷한 고진폭의 반사면으로 연속성이 좋게 나타나며, 하부 대륙사면으로 갈수록 퇴적반사면과의 경계가 모호한 탄성파적 특성을 보인다. 또한, RP 500에서 급격한 경사변화로 울릉분지와 연결되나 이후로 음향기반암의 반사적 특성이 나타나지 않는다.

대륙사면의 층단위 U1은 상부 대륙사면에서 층경계면 UB1에 탐랩하는 종단양상으로 접하고 있으며, 층단위 하부는 퇴적층이 음향기반암 저지대를 서-동 방향으로 채우는 다운랩의 종단양상을 보인다. 또한, 하부 대륙사면으로 갈수록 층의 두께가 두꺼워지며, 희미한 내부반사면이 혼돈 또는 준평행한 반사적 특성으로 변화된다. 층단위 SU2는 경계면 SB1에 온랩하는 특징을 보이며, 다소 희미한 반사특성을 보인다. 층단위 SU1과 SU2는 하부 대륙사면에서 구조운동으로 인한 층변형이 나타난다. 층단위 SU3-SU6은 고진폭의 반사면으로 평행한 반사면으로 울릉분지까지 연결된다.

울릉분지 하부 층단위 SU1~SU3은 압축성 구조변형에 의한 습곡지형이 나타난다. 층단위 SU1은 경계면 SB1의 하부 층단위로 내부에는 일부 준평행으로 희미한 반사면을 보이지만 뚜렷한 반사적 특성이 나타나지 않는다. 층단위 SU2는 SU1보다 강한 진폭을 보이며, 내부는 혼돈한 반사특성을 보이지만 습곡지형에서는 준평행한 반사면 특징을 보이면서 두껍게(0.6 sec) 집적되어 있다. 층단위 SU3은 중간 진폭의 반사면으로 준평행한 반사면으로 약 0.1 sec의 두께로 경계면 SB2 상부에 놓여있다. 상부 층단위 SU4~SU6은 변형된 습곡을 채우는 양상으로 발달되어 있다. 층단위 SU4~SU5는 대륙사면과 연결되는 부분에서는 중간 내지 고진폭의 반사면이 평행하게 배열되어있으며, RP 600 부근에서 내부가 캐오틱한 반사적 특징을 보인다. 최상부 층단위 SU6은 경계면 SB6상부에 매우 얇은 퇴적층이 놓여있으며 이 층단위도 마찬가지로 캐오틱한 반사적 특징을 보이는 층이 나타난다.

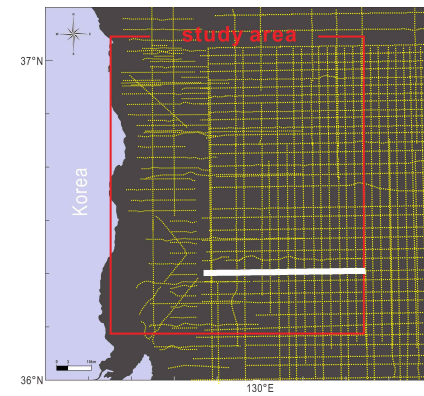
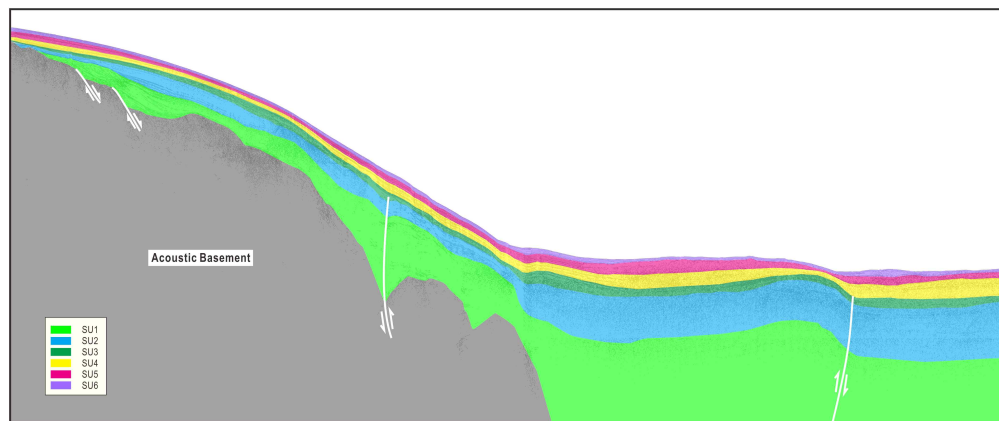
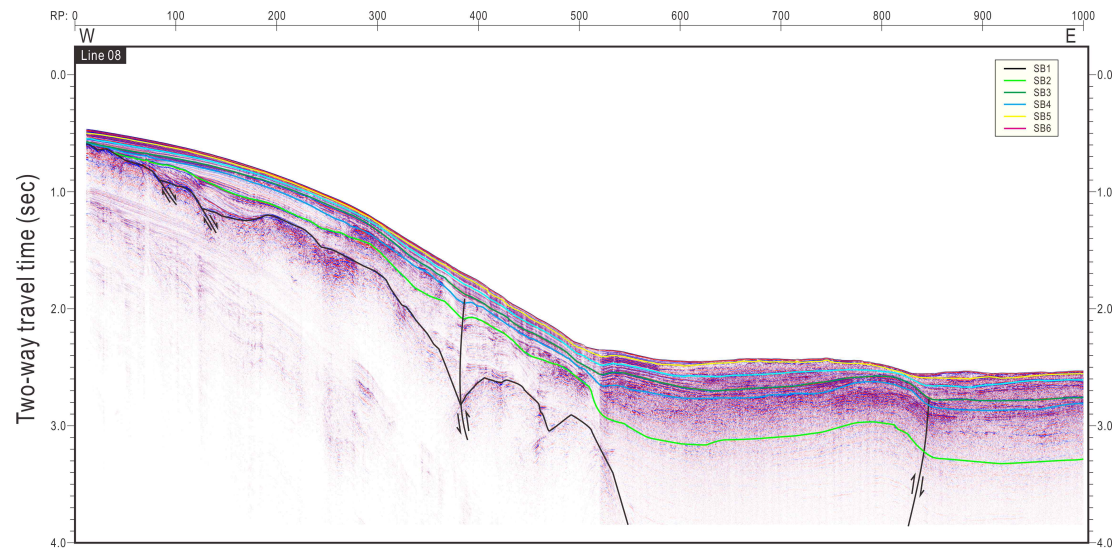


Fig. 23. Seismic profile and interpretation of Line 08.

4.2.9 Line 9

탄성과단면 Line 9는 울진-영덕 사이에서 얻어진 단면으로 하부 대륙사면에서 울릉분지까지 연결된 단면이다(Fig. 24). 울릉분지의 층단위는 대륙사면에서 관측되는 기반암돌출대로 인하여 퇴적체가 슬라이딩/슬럼프 형태로 존재하여 대륙사면의 층단위와 연결되지 않기 때문에 다른 지역에서 설정된 층경계면으로 이 단면도의 울릉분지 층단위가 구분되었다.

음향기반암은 대륙사면에서 불규칙한 지형기복을 보인다. RP 300 부근에서 기반암돌출대가 나타나며, 급격한 경사변화로 울릉분지와 연결된다. 울릉분지에서의 기반암은 4.0 sec 이상의 심도에서는 자료가 취득되지 않아 RP 150 이후로 음향기반암이 나타나지 않는다.

대륙사면의 층단위는 대체로 대륙사면 음향기반암에 온랩하는 종단양상을 보인다. 음향기반암 상부 층단위 SU1이 중간 진폭의 평행한 반사면으로 약 0.3 sec의 두께로 피복되어 있다. 층단위 SU2는 하부는 중간 진폭으로 준평행한 반사면이 나타나며, 상부는 약간 혼돈한 반사배열로 구성되어 있다. 층단위 SU3~SU6은 각각의 층단위가 중부 대륙사면에서 연결되는 경계면을 따라 구분되었으나, 아주 얇게 관측되어 각 층단위의 반사적 특성을 구분하기 어렵다. 층단위 SU1와 SU2는 Line 8 단면에서 나타나는 반사적 특징과 비슷한 특성을 가지고 있다. 층단위 SU3~SU6은 상부 층단위로 갈수록 고진폭으로 평행한 반사면을 보이며, 특히 SU4와 SU5는 다른 지역에서 나타나는 혼돈 반사배열과 대비되는 특징을 보인다.

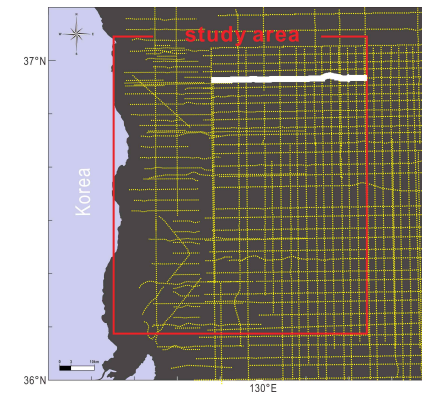
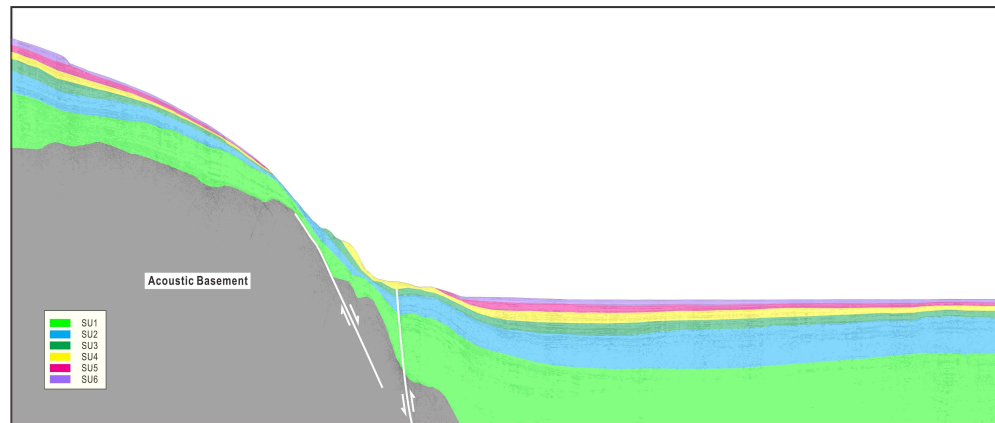
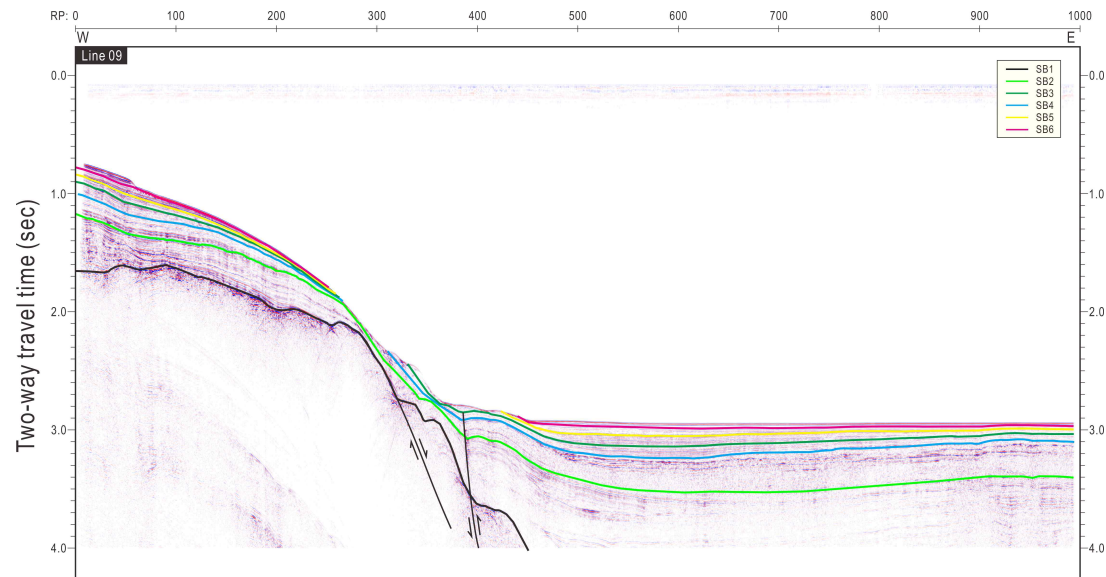


Fig. 24. Seismic profile and interpretation of Line 09

4.3 단성과 층서

4.3.1 층단위 SU1 (SB1-SB2)

층단위 SU1은 주로 울릉분지에서 두껍게 나타나며, 층두께는 울릉분지의 북에서 남, 서에서 동으로 갈수록 점차 층의 증가하는 양상을 보인다(Fig. 25). 또한, 연구지역의 동쪽과 남동쪽에서 두 개의 퇴적중심지(depocenters)가 발달하였으며, 최대 2.0 sec (약 1400 m)의 두께를 보인다. 후포분지에서는 거의 0.0 sec에 수렴하여 층이 존재하지 않거나 상당히 얇은 퇴적층으로 나타나지만, 일부지역에서 최대 약 0.5 sec 두께로 분포하는 층이 존재한다.

층단위 SU1의 등층후도는 분석에 사용된 단성과 자료가 울릉분지의 기반암 심도까지 자료가 취득되지 않은 일부 자료로 인하여 내삽법(보간법; interpolation)으로 도면이 제작되는 소프트웨어의 특성상 울릉분지의 북쪽과 남쪽은 정확한 도면화가 이루어지지 않았다.

4.3.2 층단위 SU2 (SB2-SB3)

층단위 SU2는 후포분지에서 층단위 SU1에서 거의 존재하지 않았던 두꺼운 퇴적층이 남-북으로 길게 발달되었다(Fig. 26). 또한, 서에서 동으로 갈수록 두꺼워지는 특징을 보이며, 두께 약 0.40 sec의 퇴적중심지가 후포분지 동쪽의 여러 지역에서 나타난다. 후포분지는 연구지역 동쪽 지역에서는 북서-남동으로 두껍게 발달한 퇴적체가 존재하며, 남동쪽 가장자리 부근에 퇴적중심지가 나타난다. 연구지역 남쪽지역에는 국지적으로 두꺼운 층후가 발달하여 나타난다.

4.3.3 층단위 SU3 (SB3-SB4)

층단위 SU3은 후포뱅크의 동-서 방향으로 평균두께 약 0.13 sec의 퇴적체가 발달하며, 전반적으로 서에서 동으로 갈수록 층의 두께가 두꺼워지나 층단위 SU2보다 완만한 두께 변화를 보인다(Fig. 27). 울릉분지에서는 퇴적체가 남-남동과 북북동-동북동 두 개의 그룹으로 구분된다. 남-남동의 퇴적체는 두껍게 집적된 층후를 보이며, 남과 남동 위치에 각각 퇴적중심지가 존재한다. 한편, 북북동-동북동에서는 남-북 방향으로 길게 발달한 퇴적체로 중심부로 갈수록 다소 층후

가 두꺼워지는 특징이 나타나며, 전반적으로 완만하거나 일정한 두께변화가 나타난다.

4.3.4 층단위 SU4 (SB4-SB5)

층단위 SU4는 후포분지에서 다른 층단위와 마찬가지로 남-북 방향으로 길게 퇴적체가 발달하였으며, 서-동으로 갈수록 층후가 두꺼워진다(Fig. 28). 후포분지의 최대 층후는 약 0.07 sec (약 53 m)로 나타나는데 전반적으로 남쪽보다 북쪽이 두껍게 집적되어 있으며, 후포분지의 최남단부에는 약 0.13 sec (약 98 m)의 층후를 중심으로 원형의 형태로 두꺼운 퇴적체의 분포를 보인다. 한편, 울릉분지에는 SU4는 크게 연구지역 남부-남서부와 연구지역 북부에 퇴적중심지가 발달하고 있다. 연구지역 남부-남서부에서는 층단위 SU4의 퇴적중심지가 SU3의 퇴적중심지보다 북쪽으로 약 10 km 이동하였으며, 다소 완만한 층후변화를 보였던 북북동-동북동 지역에서 크게 두 개의 큰 퇴적중심지를 기준으로 여러 퇴적중심지가 나타난다. 연구지역 북부는 다소 완만하고 두께변화가 거의 없는 SU3와는 달리 약 0.17 sec (약 128 m)로 두껍게 집적된 지역을 중심으로 원형으로 퇴적중심지의 형태를 이루고 있다.

4.3.5 층단위 SU5 (SB5-SB6)

층단위 SU5는 층단위 SU4와 마찬가지로 울릉분지 남부(연구지역 남쪽)와 연구지역 서쪽에 퇴적중심지가 두 곳에서 나타난다(Fig. 29). 울릉분지 남부의 퇴적중심지는 최대 약 0.20 sec (약 150 m)의 층후를 보이고 있으며, 이 지역에서 SU4는 두 개의 퇴적중심지가 발달한 것과 다르게 하나의 퇴적중심지만 나타난다. 연구지역 서쪽에 위치한 퇴적중심지는 약 0.13 sec (약 98 m)으로 집적되어 있으며, SU4에서 나타나는 위치에서 남쪽으로 약 20 km 정도 퇴적중심지가 이동하여 나타난다. 후포분지에서는 다른 층단위와 마찬가지로 서에서 동으로 갈수록 점차 층후가 두꺼워지며 최대 약 0.08 sec (약 60 m)로 퇴적체가 집적되어 있다.

4.3.6 층단위 SU6 (SB6-Sea bottom)

층단위 SU6은 본 연구에서 분석된 층단위 중 가장 얇은 퇴적층 두께가 나타난다(Fig. 30). 이 층단위의 최대 두께는 0.13 sec (약 98 m)로 나타나는데 연구 지역 남서쪽 가장자리에 매우 좁은 범위에 국한되어 나타나며, 대부분의 지역에서 약 0.05 sec (약 38 m)의 두께로 분포하고 있다. 한편, 연구지역 남쪽에서만 퇴적중심지를 보이는 층단위 SU5와는 달리 연구지역 남동쪽 가장자리에서 다른 퇴적중심지의 일부가 나타난다. 한편, 후포분지에서는 전반적으로 서쪽에서 동쪽으로 갈수록 층후가 두꺼워지나 국지적으로 동서로 길게 두껍게 발달한 지역이 존재한다.

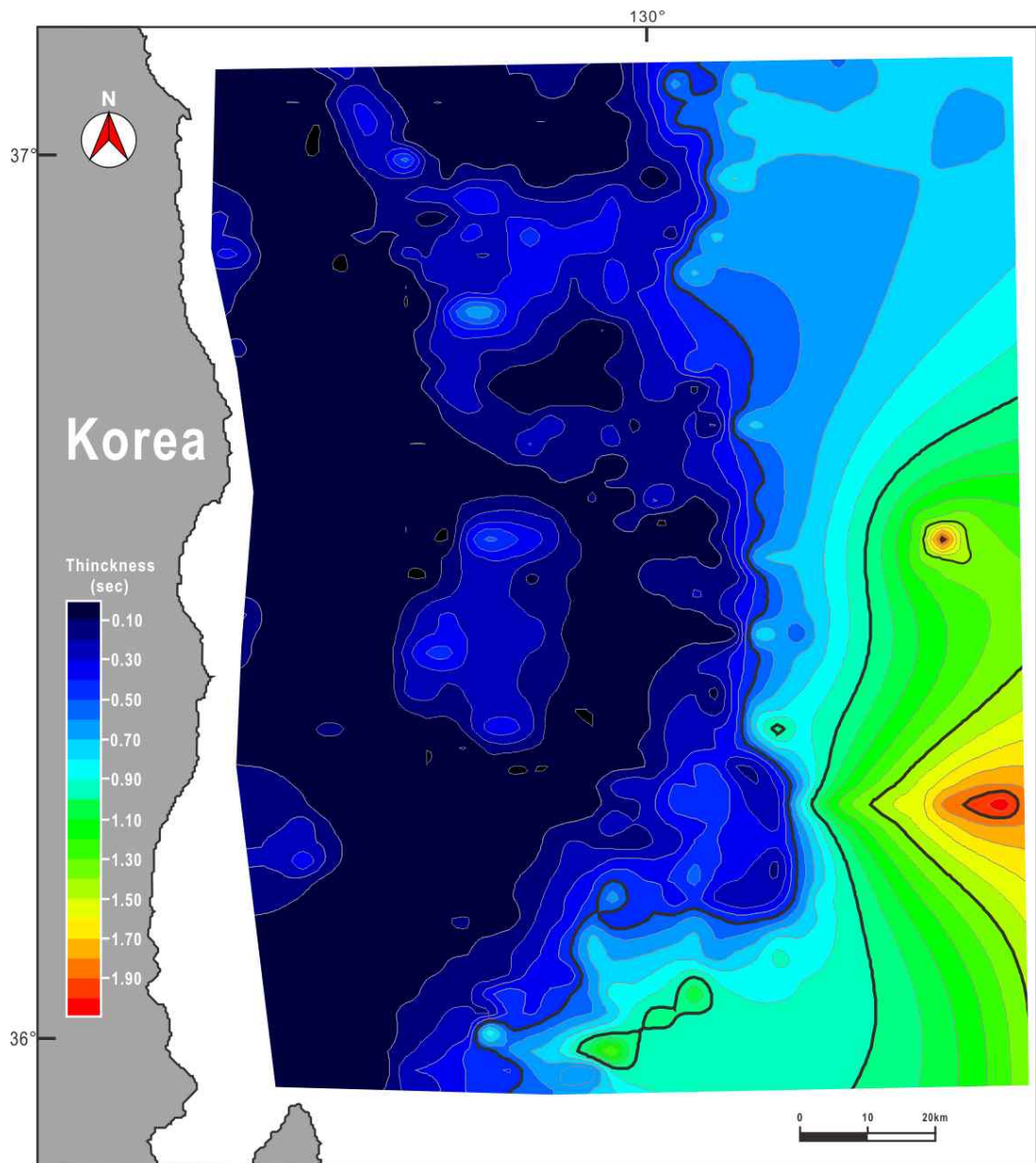


Fig. 25. Isochron map of SU1. Contours in sec (two-way travel time).

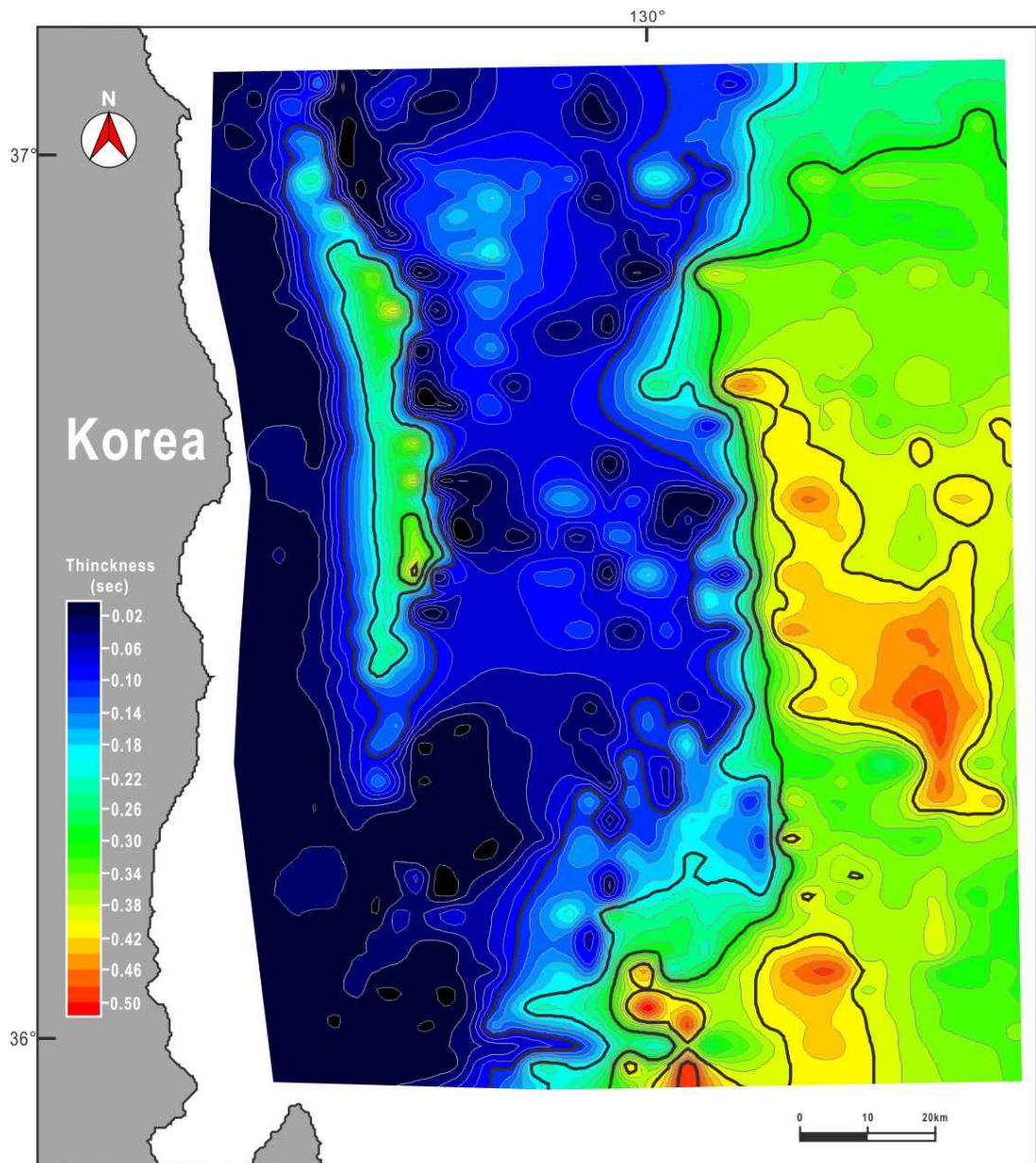


Fig. 26. Isochron map of SU2. Contours in sec (two-way travel time).

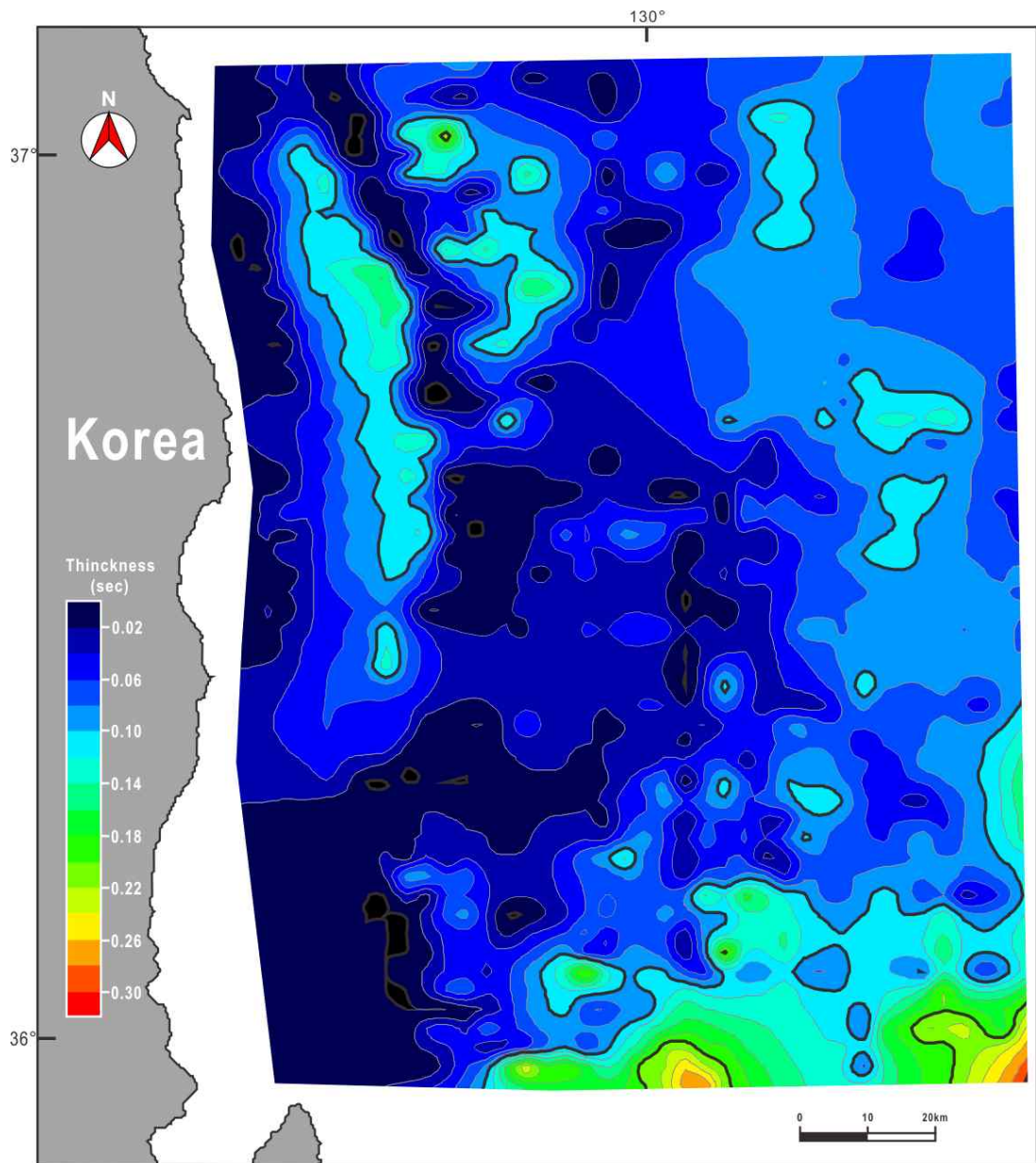


Fig. 27. Isochron map of SU3. Contours in sec (two-way travel time).

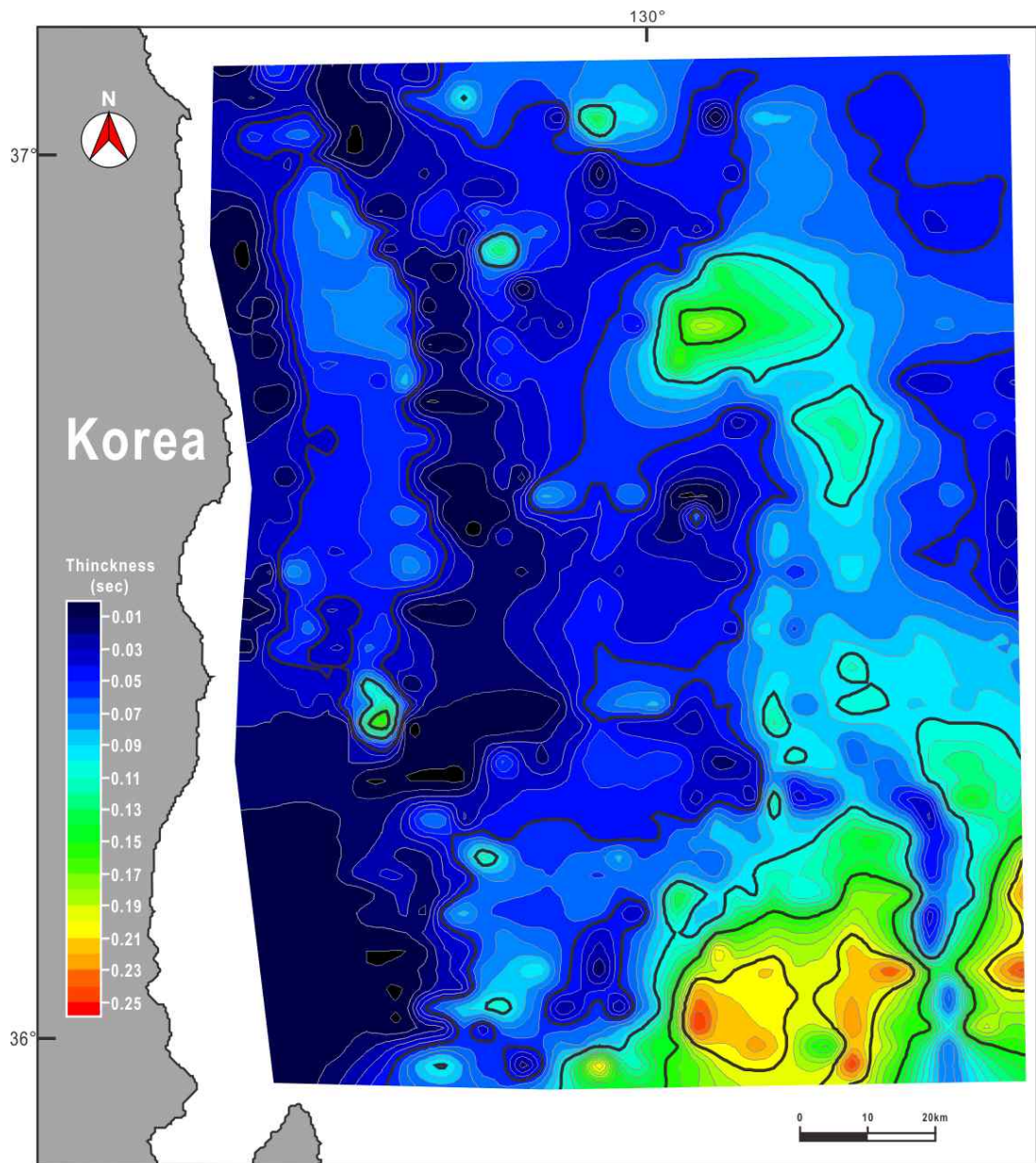


Fig. 28. Isochron map of SU4. Contours in sec (two-way travel time).

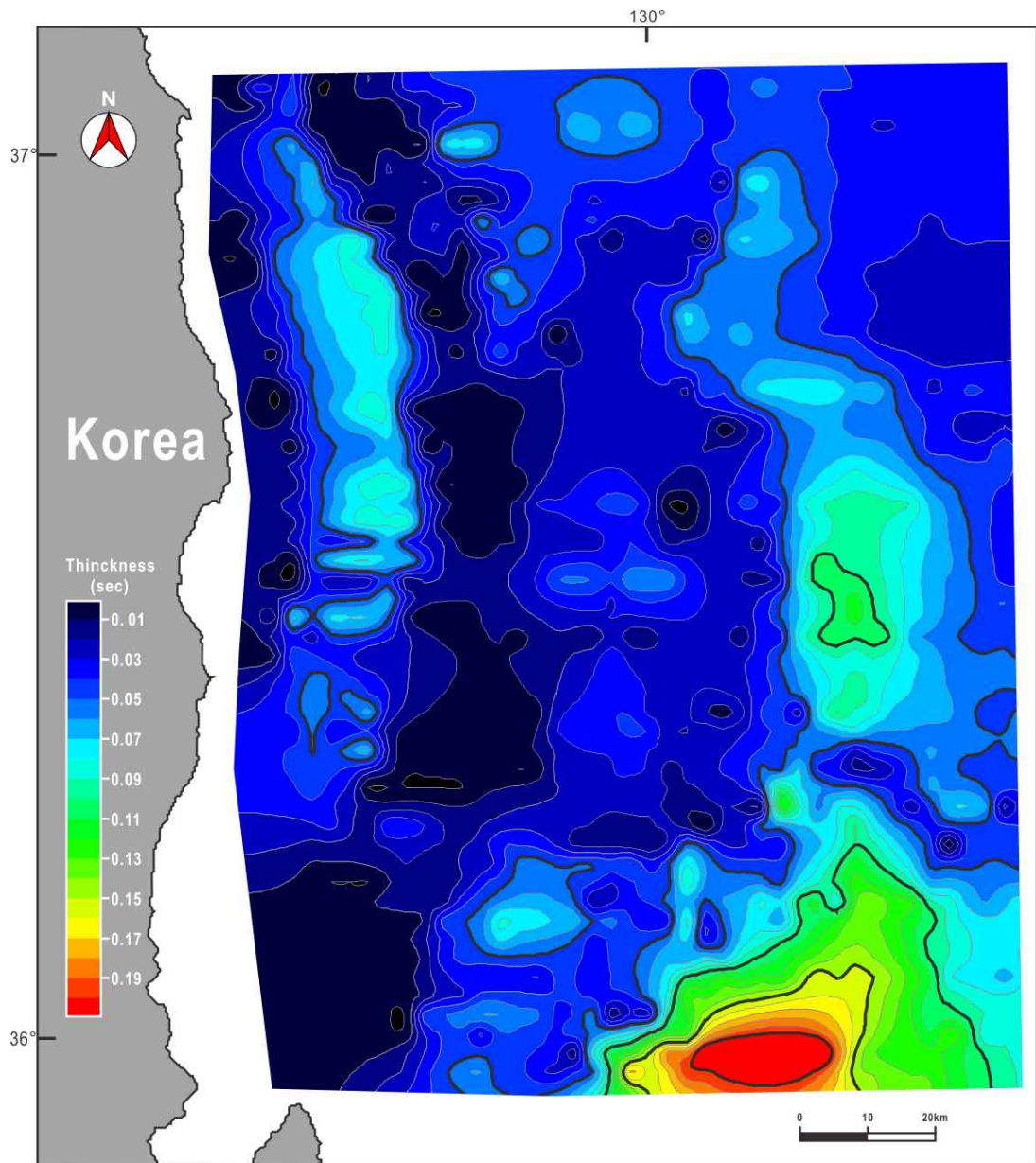


Fig. 29. Isochron map of SU5. Contours in sec (two-way travel time).

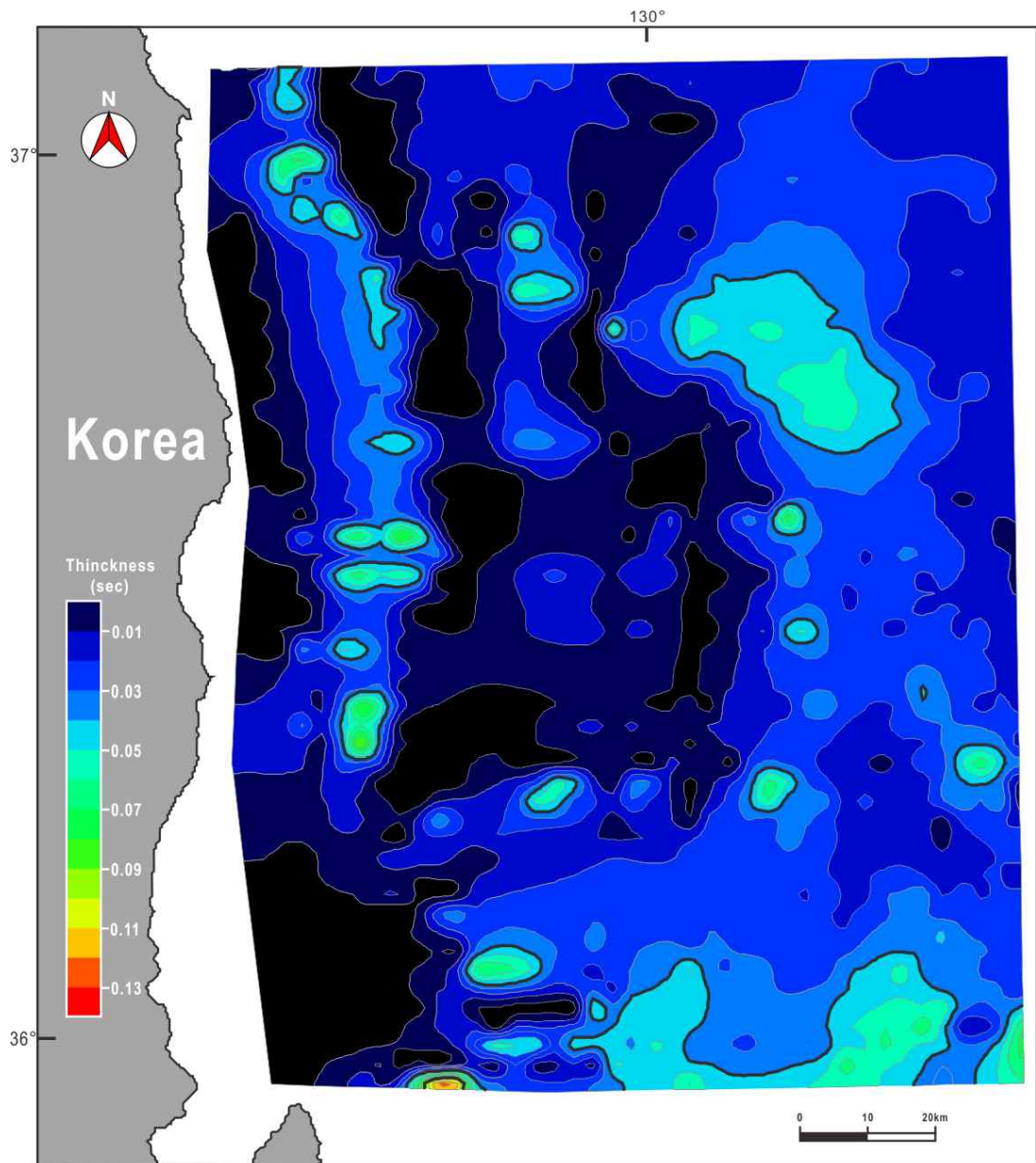


Fig. 30. Isochron map of SU6. Contours in sec (two-way travel time).

V. 탄성파상

5.1 음향기반암 탄성파상(Acoustic Basement Facies; BF)

음향기반암(Neuendorf et al., 2005)에서 나타나는 반사배열, 진폭, 연속성, 외형을 기초로 하여 음향기반암 탄성파상을 BF1, BF2 두 가지로 구분하였다(Table.1).

5.1.1 탄성파상 BF1

탄성파상 BF1은 상당히 강한 진폭과 수평 연장성이 양호한 반사면이 음향기반암 최상부에서 뚜렷한 경계면으로 구분된다. 이러한 특성은 기저에서 기반암을 이루고 있는 단단한 암석과 상부에 놓인 미고화 퇴적층의 각각 다른 물성에 의한 음향임피던스 차이로 인해 나타나는 음향학적 특징이다. 탄성파상 BF1의 내부 반사배열은 주로 무반사(reflection-free) 또는 난반사(chaotic) 형태의 반사면들로 구성되어 있으며, 주로 약 1.0sec의 깊이의 상부 대륙사면에 분포하고 있다. 또한, 탄성파상 BF1 상단부 표면은 지형기복이 거의 없이 평탄하며, BF1 하단부에서 일부 불규칙한 특징을 보인다.

Yoon et al. (2015)에서는 음향기반암 탄성파상을 A, B, C, 세 가지로 구분하였으며, 탄성파상 A, B가 본 연구에서 구분된 BF1과 대비된다. 탄성파적으로 투명하거나 비조직적 특성을 보이는 음향기반암체는 일반적으로 결정질 암체 관련된 것으로 해석하였다(Fountain, 1986; Coffin et al., 1990). 또한, 탄성파상 BF1의 상단부에 해당되는 탄성파상 A는 해수운동으로 인해 음향기반암이 평탄화 작용을 받았으며, 주변에는 전진형 퇴적체가 분포하는데, 이는 평탄화 작용으로 삭박된 잔해가 주변 저지대를 채우면서 형성된 것으로 분석되었다. 탄성파상 BF1의 하단부에 해당되는 탄성파상 B는 A와 마찬가지로 오랜 기간 동안 육상이 노출되어 있으면서 대규모 지형기복은 해파에 의해 제거되었으나 기반암 특성 차이로 인한 차별침식 때문에 국지적으로 불규칙한 지형이 남아있는 것으로 해석

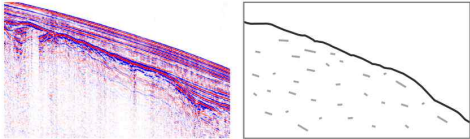
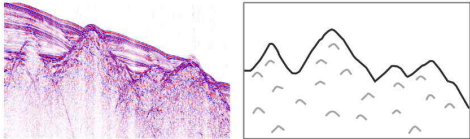
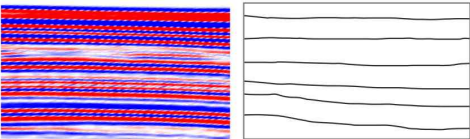
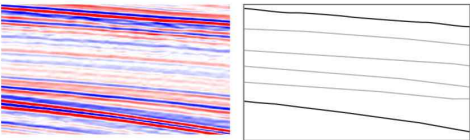
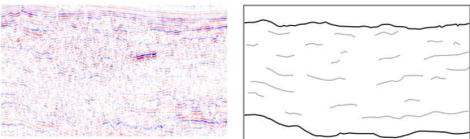
된다. 따라서, 탄성파상 A와 B는 동해 울릉분지의 형성 당시에 상대적으로 열개 중심에서 가까운 곳에 위치한 B가 A보다 기반암이 빠르게 침강하였으며, 대기 중에 노출되었던 기간이 A보다 짧았기 때문에 상대적으로 불규칙한 지형기복이 남아있는 것으로 설명할 수 있다.

5.1.2 탄성파상 BF2

탄성파상 BF2는 약 1.5sec 깊이에서 하부 대륙사면 또는 울릉분지에 연결되는 대륙대에 주로 분포하고 있다. 탄성파상 BF-1보다 진폭과 수평연속성이 다소 약한 반사면으로 구분되며, 상당히 불규칙한 지형기복이 나타나는 것이 특징이다. 내부 배열은 쌍곡선(hyperbolic)과 난반사 형태의 반사파들로 구성되어 있으며, 쌍곡선 반사파는 불규칙한 기복의 지형에서 탄성파의 회절(diffraction)에 의해 나타나는 음향학적 특성이다(Lillie, 1999; Veeken, 2006).

탄성파상 BF2는 Yoon et al. (2015) 연구에서 탄성파상 C로 구분되었다. 이 탄성파상에서 나타나는 특징은 주로 화산활동으로 형성된 화산지형에서 나타나는 음향학적 특성으로 알려져 있다(Planke et al., 2000). 또한, 동해에 발달한 화산체인 울릉도와 독도 사면에서 취득된 탄성파자료와 매우 유사한 특징을 가지고 있다(Kwon et al., 2009; Kim et al., 2011). 한편, 일부 지역에서는 탄성파상 BF2의 기반암 경계면과 상부 퇴적층 사이에서 뚜렷한 경계가 나타나지 않는데, 이는 화산활동으로 분출된 용암류가 퇴적층 상부를 덮게 되면서 얇은 용암층과 퇴적층의 음향학적 특성이 교호하기 때문에 나타나는 특징으로 해석된다.

Table 1. Seismic facies of acoustic basement and sedimentary sequences in the East Sea continental margin of Korea.

Type	Facies code	Features in seismic profile	Characteristics	Interpretation	Location	Stratigraphic occurrence
Acoustic basement	BF1		High-amplitude, continuous top reflection; internally reflection-free and/or chaotic pattern	Crystalline basement	Upper slope	—
	BF2		Relatively high amplitude, moderate continuous top reflections; interlayer hyperbolic and/or chaotic pattern	Volcanics basement	Lower slope	—
Sequence	SF1		High amplitude, continuous and parallel reflections	Hemipelagic sediments	Slope, Basins plain	SU3, SU4 SU5, SU6
	SF2		Low amplitude, continuous and parallel reflections	Turbidity current deposits	Slope, Basins plain	SU1, SU2
	SF3		Low amplitude, poorly continuous and chaotic reflection	Debris flow deposits	Ulleung Basin	SU1, SU4 SU5, SU6

5.2 퇴적층 탄성파상(Sequence Facies; SF)

퇴적층에서 구분되는 음향학적 특성을 기준으로 탄성파상 SF1, SF2, SF3, SF4로 분류하였다(Table.1, Fig. 31).

5.2.1 탄성파상 SF1

탄성파상 SF1은 강한 진폭으로 양호한 연속성이 좋은 반사면들이 평행하게 배열되어 나타난다. 이러한 음향학적 특성은 다른 입자특성(물리적특성)을 가진 층들이 교호하여 집적된 퇴적층으로 구성되어 있기 때문에 퇴적층 간의 음향임피던스가 상대적으로 달라서 나타나는 특성으로 해석된다. 이 탄성파상은 탄성파단면 상에서 전반적으로 전 지역(후포분지, 대륙사면, 울릉분지)에 분포하고 있다. 특히, 후포분지와 대륙사면에서는 층서경계면 SB4의 상부에 놓인 퇴적층에서 나타나며, 울릉분지에서는 연구지역의 북부지역에서 층서경계면 SB3의 상부 퇴적층에 나타나는 경향을 보인다.

5.2.2 탄성파상 SF2

탄성파상 SF2는 SF1과 유사한 배열형태로 연속성이 좋은 반사면들이 평행하게 배열되어 나타나지만 진폭의 세기가 약하게 나타나는 것이 특징이다. 이와 같은 음향학적 특성은 유사한 입자특성을 가진 층들이 교호하기 때문에 상대적으로 작은 음향임피던스의 차이에 의해 진폭의 세기가 약하게 나타나는 것으로 해석된다. 이와 같은 탄성파적 특성은 조립질 입자부터 세립질 입자로 순차적으로 퇴적되는 점이층리 퇴적체로 해석되며, 해양환경에서 점이층리는 저탁류로 공급된 퇴적물이 집적되면서 형성된 부우마유회층(Bouma sequence; 저탁암)에서 주로 나타난다, 탄성파상 SF2는 SF1과 마찬가지로 탄성파단면도상 사면과 분지에 분포하고 있으며, 주로 층단위 SU1, SU2에서 나타나는 음향학적 특성이다.

5.2.4 탄성파상 SF3

탄성파상 SF3은 진폭의 세기가 약하며 수평 연속성이 매우 불량한 특성을 보이며, 대부분 하부 대륙사면과 울릉분지에서 나타나는 경향을 보인다. 이러한 음

향학적 특성은 퇴적층이 불규칙하게 교란되면서 나타나는 것으로 보이며, 대륙붕과 대륙사면 퇴적물이 주로 암설류(debris-flow) 또는 중력류(gravity-flow) 형태로 심해저분지(울릉분지)에 교란된 퇴적물이 집적된 것으로 보인다. 한편, 탄성파상 SF4는 주로 층경계면 SB2 하부에서 나타나며, 울릉분지 남부에 위치한 층단위 SU4와 SU5에서 렌즈형의 퇴적체로 분포한다.

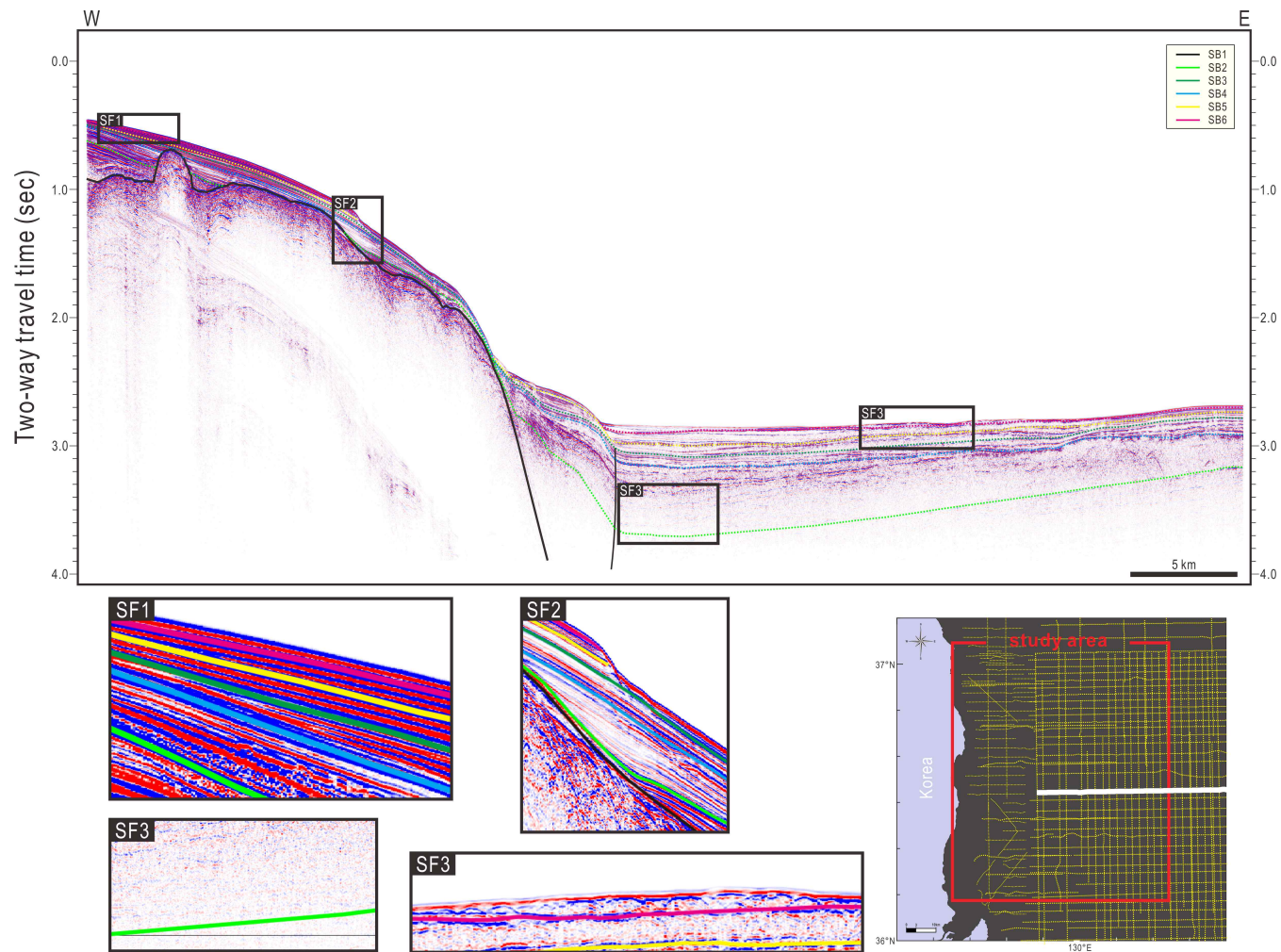


Fig. 31. Interpreted seismic section showing seismic facies SF-1, -2, and -3.

VI. 지질구조

탄성과 단면의 지질구조 분석결과, 연구지역에는 수직단층(주로 압축성), 습곡, 변형대(고변형밀도대), 국지단층 등이 분포한다(Fig. 32). 지질구조 분포도에서 보면, 동해 대륙주변부에서 가장 큰 규모의 지질구조는 후포단층대로서 선행연구를 통해서 포항 영일만 입구에서부터 삼척 인근 해역까지 상부 대륙사면을 따라 약 140 km에 걸쳐 남북으로 발달하는 것으로 제시되었다. 그러나, 이번 연구 결과, 실제로 연결된 것으로 해석되는 후포단층은 북위 36°25′ 영덕 외해역에서부터 37°07′ 죽변 인근 해역까지 남북, 북서-남동, 북동-남동의 방향성을 갖고 약 90 km에 걸쳐 연속적으로 발달하는 것이 확인되었다. 영덕 이남에서는 약 10 km의 간격을 두고 후포단층과 분리된 유사(변형유형) 단층대가 호미곶(구룡포)을 지나 울산 방향(남남서)으로 전개되는 것으로 파악된다.

죽변-삼척 해역에서도 후포단층대와는 분리된 것으로 보이는 연장성 20 km 이내의 단층들 다수가 주로 북동-남서 혹은 북북동-남남서 방향으로 중첩(평면도 상에서)되어 나타난다. 단층대의 변형유형은 지층 간 수직 변위와 주변 배사 구조 등을 근거로 기존의 해석과 마찬가지로 대부분 압축성 주향이동의 결과로 해석된다.

후포단층의 단층선은 몇 개의 만곡부를 제외하면 대부분 수 십 km 이상 곧은 형태로 전개된다. 탄성과탐사 단면에서 후포단층은 후포뱅크의 서쪽 경계부나 중앙부를 따라 발달하는데, 단층면은 거의 수직에 가깝고 음향기저(acoustic basement)와 SU1을 절단하고 있다. 영덕 외해역에서는 단층의 동쪽지괴가 융기되어 있는데, 단면상에서 단층의 낙차는 외형적으로 약 1 sec(왕복주시)에 이르는 곳도 있으며, 단층의 북쪽 말단부에서는 100 m 이하로 감소된다. 단층대의 일부에서는 주단층면의 동쪽에 3~4 km 폭의 좁은 변형대(deformation zone)를 동반하여 나타나는데, 이곳에서는 배사습곡과 고각도의 단층들이 주변형태에 거의 평행하거나 약간 비스듬히 발달한다.

후포단층을 제외한 압축성 단층 및 습곡 구조들은 주로 포항영덕분지와 후포

이북의 상부 및 중부 대륙사면 퇴적층 내에서 나타난다. 포항-영덕분지를 채우고 있는 퇴적층은 심한 압축변형을 받았고 국지적으로 융기되어 나타난다. 영덕과 포항 사이에서는 두 개의 드러스트(thrust) 변형대가 분지의 서쪽과 동쪽 경계부 인근에 분포한다. 이들 두 개의 드러스트 단층대 사이의 지층 내에서는 다수의 소규모 역단층들과 습곡들이 주로 남북 내지 북북동-남남동 방향으로 발달되어 있다.

후포 이북의 상부 및 중부 대륙사면에 분포하는 다양한 규모의 압축성 변형구조들은 대부분 기반암까지 변형시킨 단층이나 습곡, 단사구조(flexures)의 형태로 나타난다. 압축성 단층은 수직 내지 고각도의 단층면을 보이며, 보통 융기된 단층지괴 내에 배사습곡이나 단층끌림구조(fault drag)를 동반하여 나타난다. 단층면과 습곡축은 북동-남서 방향이나 북서-남동 방향으로 우세하게 배열되어 있다. 한편, 북서-남동 방향의 단층과 습곡은 후포 북쪽의 대륙주변부에 광범위하게 산재하며, 전기 내지 후기 플라이오세의 구조적 변형과 연관되어 있는 것으로 추정된다. 북서-남동 방향의 역단층들은 서쪽방향의 경사를 보인다.

한편, 동해대륙주변부와 인접한 울릉분지 서부에는 남-북 방향으로 약 150 km 이상에 걸쳐 울릉단사구조(Ulleung Monocline)와 대륙사면 하부를 따라 역단층대가 발달한다. 이들 압축성 구조들은 전 구간에 걸쳐 서쪽방향의 경사를 보이는데 이는 해당 단사구조가 한반도 쪽을 상반으로 하고 울릉분지 쪽을 하반으로 하는 역단층 내지는 드러스트 운동의 결과로 만들어졌음을 지시한다(Kim et al., 2018).

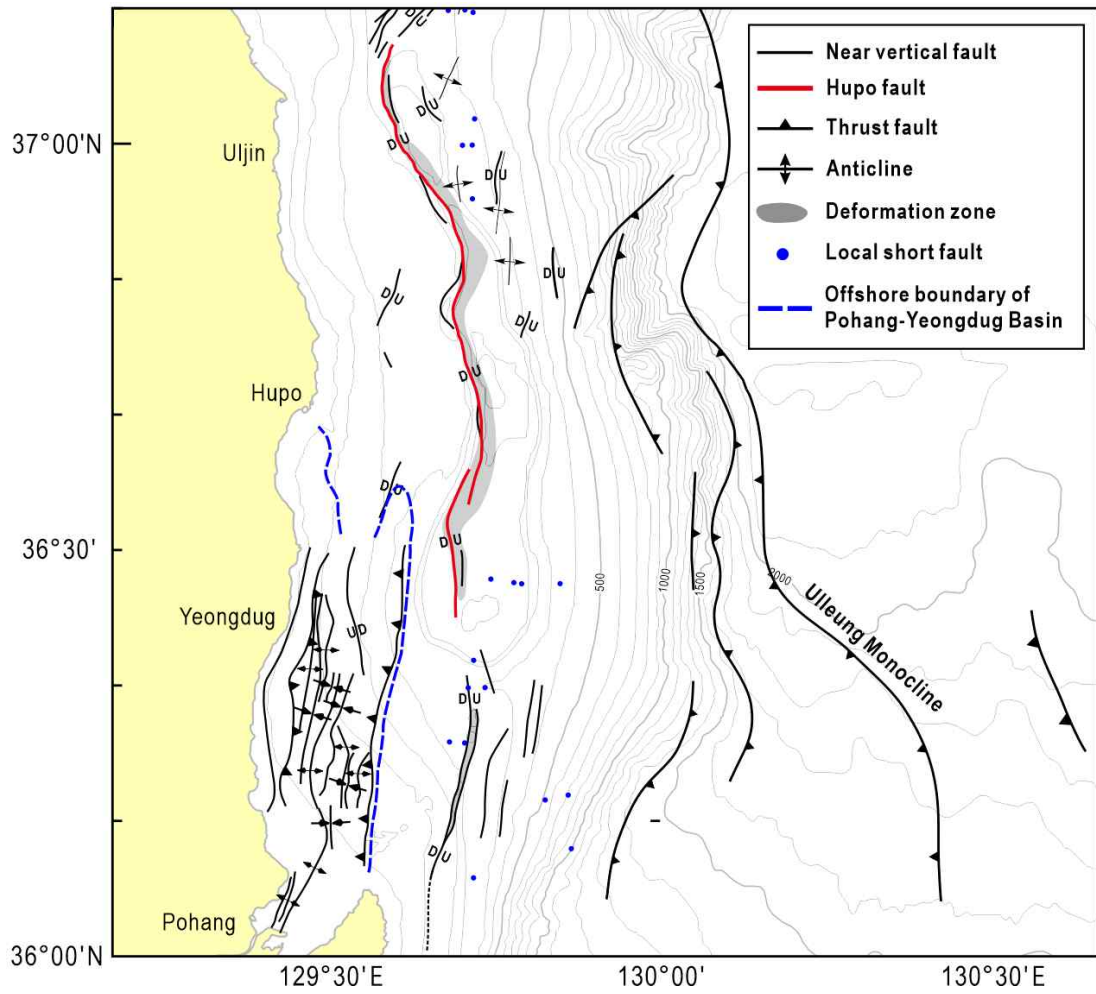


Fig. 32. Map showing geologic structures in the eastern continental margin of Korea.

Ⅶ. 토 의

7.1 지구조운동

동해의 확장은 일본분지와 야마토분지에서 실시된 해양시추프로그램 통해 올리고세 후기에서 마이오세 초기에 일어난 것으로 밝혀졌다(Kaneoka et al., 1992; Tamaki et al., 1992). 탄성파단면상에서 확인된 기반암에는 일부 지역에서 동쪽으로 경사진 정단층이 관찰되며, 주로 음향기반암 상부 층단위까지 연장되지 않고 음향기반암 경계면을 따라 나타나는 것이 특징이다. 이는 동해가 후열도 열개(back-arc rifting) 시스템으로 확장하는 시기에 기반암에는 인장력으로 인해 유발된 신장성 단층으로 해석하였다. 한편, Yoon et al. (2015) 연구에서 해파평탄면(Kim et al., 2013)으로 해석된 탄성파상 BF1은 현재 탄성파단면도상 해수운동의 영향이 미치지 않는 약 0.8~1.0 sec(약 600~750 m) 깊이에 위치하고 있다. 이는 동해의 확장으로 인해 기존에 존재하던 기반암 및 퇴적층은 구조적 침강을 겪은 것으로 밝혀졌으며(Chough and Barg, 1987), 동해확장 이전인 올리고세에는 탄성파단면도 상에서 나타나는 곳이 아닌 해수면에 인접하여 위치했던 것으로 추정된다. 또한, 퇴적물의 하중이 침강속도에 영향을 미치는 것으로 확인되었으며, 울릉분지에 쇄설성 퇴적물이 많이 공급된 마이오세 초기와 마이오세 중기에 기반암 침강이 빠르게 나타난 것으로 분석되었다(Chough and Barg, 1987). 이를 근거로 하여 동해 확장시기에는 전반적으로 동해 대륙주변부 기반암이 구조적 침강을 겪으면서 지역적 침강 속도의 차이가 발생하였으며, 동해 대륙주변부의 퇴적층 두께양상은 등층후도를 통해 확인한 결과 대륙사면에서 울릉분지로 갈수록 점차 두꺼워지는 양상을 보인다. 따라서, 탄성파상 BF1이 나타나는 상부 대륙사면이 얇은 두께 퇴적층 분포와 해저확장의 복합적인 요소로 인해 상대적으로 느린 침강을 겪은 것으로 해석하였다. 한편, 대륙사면과 울릉분지에서는 기반암에서 층단위 SU3까지 연장되어 있는 단층들이 관측되며, 이 단층이 관통하는 퇴적층 주변에는 압축성 구조운동에 의한 지층변형이 나타나는 것이 특징으로 동해의 응력장이 전환된 이후에 영향을 받은 단층으로 해석된다.

7.2 층서연대 및 진화과정

동해에서 취득된 탄성과 자료를 통해 대륙주변부에 발달한 대륙붕, 대륙사면, 분지 내의 퇴적층서와 퇴적상을 분석하였다. 퇴적층서는 광역 부정합면으로 식별된 총 5개의 경계면(SB2~SB6)과 이를 기준으로 6개의 층단위(SU1~SU6)를 구분하였다. 후포분지에서의 상부층서(SB4~SB6)는 후포뱅크에서 침식면을 따라 나타나는 경사부정합면을 기준으로 층서가 구분되었으며, 하부층서(SB1~SB3)는 다중 반사파에 의해 일부 탄성과자료에서는 기반암과 층서의 경계가 모호하여 최하부에서 나타나는 경계면을 음향기반암 경계면을 설정하였다. 내부층서는 반사파의 배열형태와 높은 음향임피던스차로 인하여 강하게 인지되는 반사면을 통해 층서를 구분하였다. 대륙사면과 심해저분지의 퇴적층서는 대부분 대륙사면에서 반사면이 중단되는 양상을 통해 층서를 구분하였고, 울릉분지의 퇴적층까지 연결하였다. Yoo et al. (2017) 연구에서는 울릉분지에서 취득된 시추코어를 분석을 통해 얻어진 생층서 연대(Yi et al., 2012)를 탄성과층서에 적용하여 탄성과단면 상에서 마이오세/플라이오세와 플라이오세/플라이스토세 경계면을 구분하였다(Fig. 33). 한편, Yoon and Chough(1993)에서는 후포분지가 전기 플라이오세(약 5 Ma)에 후포단층이 사교이동양상(oblique-slip sense)을 보이면서 재활성화 되면서 형성된 퇴적분지로 제시되었다. 이러한 연구결과들을 종합하여 후포뱅크로 인해 단절되어있는 울릉분지와 후포분지의 층서경계면을 연결하였고, 각 층단위에 대한 연대를 설정하였다.

7.2.1 제3기(Fig. 34)

7.2.1.1 SU1 (올리고세 - 마이오세)

SU1은 가장 최하부에 위치한 층단위로 음향기반암 상부에 놓여있으며, 등층후도(Fig. 25)를 보면 대륙사면에서 약 1.0 sec (750 m), 울릉분지에서 최대 약 2.0 sec (약 1500 m)의 두께를 보이는 가장 두꺼운 층단위이다. Yoo et al. (2017)의 연구를 적용할 경우, SU1의 기준이 되는 층서경계면 SB2는 약 5.5 Ma인 마이오세/플라이오세 경계면과 대비된다. 따라서, SU1의 퇴적체는 올리고세 이전(약 28 Ma)부터 마이오세 후기(5.5 Ma)까지 상당히 장기간에 걸쳐 집적된 층단위로 해

석된다. 대륙사면에서 층단위 SU1의 최하부층에는 동해의 확장기에 기반암에 형성된 정단층을 따라 지구 또는 반지구 형태로 변형된 층이 나타나는데, 이는 대륙사면의 SU1 하부 퇴적체는 동해가 확장되기 이전부터 기반암 상부에 집적되었던 퇴적층으로 추정되며, 동해 확장시기에 기반암과 동시에 인장성 변형이 발생했던 것으로 해석된다. 대륙사면 지역에 약 0.4 sec (약 30 m)의 층후가 나타나는 지역이 있는데, 이 지역은 기반암 침강이전에 기반암 저지대에 집적된 퇴적체인 것으로 추정된다. 한편, 후포분지는 후포단층이 플라이오세 초기 재활성화로 인해 형성되기 시작된 것으로 밝혀졌다(Yoon and Chough, 1993). 탄성과단면도상(Fig. 16, 18, 19, 20)에서는 후포분지 최하부에서 SU1이 얇게 분포하고 있는 것으로 확인되었으며, 동쪽으로는 용기된 기반암에 의해 층이 단절된 형태를 보인다. 이는 후포분지 형성 이전에 형성되었던 SU1이 후포단층 동편이 용기하면서 후포단층을 경계로 층이 끊어졌으며, 용기의 영향을 받지 않은 후포단층 서쪽에 위치한 SU1이 잔존하여 나타나는 것으로 해석된다.

7.2.1.2 SU2 (플라이오세 초기 - 후기)

SU2는 SU1 상부에서 썩기형태로 놓여있으며, 등층후도(Fig. 26)를 보면 후포분지에 두꺼운 층후변화가 뚜렷하게 나타나기 시작하는 층단위이다. 대륙사면과 울릉분지에서는 SU2는 SU1과 마찬가지로 압축력에 의한 구조변형이 층단위 내부에서 관측된다. Yoo et al. (2017)의 연구에서 SU2의 기준이 되는 층서경계면 SB2는 약 2.58 Ma로 플라이오세/플라이스토세 경계면과 대비된다. SU2는 탄성과 단면도상 후포분지에서 동쪽으로 갈수록 층후가 두꺼워지는 발산하는 형태의 배열이 나타난다. 대륙사면과 울릉분지에서는 전반적인 퇴적체의 두께가 큰 변화를 보이지 않고 일정한 두께로 분지까지 연결되며, 후포분지와 차이를 보인다. 이와 같은 차이는 후포분지의 SU2가 후포분지가 형성되는 시기에 기반암이 용기하면서 후포분지의 퇴적물 수용공간(accommodation space)이 계속해서 확장하게 되었고, 이와 동시에 후포분지로 공급되는 퇴적물이 확장하는 퇴적물 수용공간을 따라 지속적으로 집적됨으로서 나타나는 것으로 해석된다. 또한, 후포분지에서 SU2는 전반적으로 서-동으로 경사가 깊어지나 용기된 기반암 부근에서 층의 경사가 U 또는 V 형태로 방향이 바뀌게 되는데, 이러한 지층 경사의 변화는

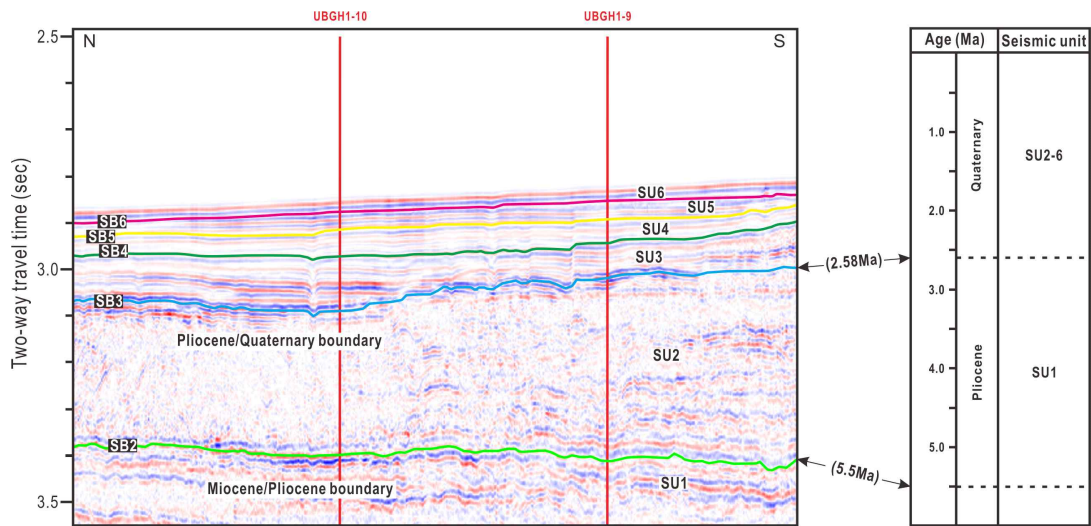


Fig. 33. Chronostratigraphic correlation between seismic units and drilling well (UBGH). The Miocene/Pliocene and Pliocene/Quaternary boundaries are correlated with 5.5 and 2.58 Ma, respectively, based on biostratigraphic data (Lee, 1994; Park, 1998; Yi et al., 2012) and well location (Fig.5). Modified from Yoo et al. (2017).

SU2가 후포분지 형성 동안 야기된 구조운동과 동시에 집적된 층단위암을 지시한다.

7.2.1.3 SU3 (플라이오세 후기 - 플라이스토세 초기)

SU3은 압축성 구조운동이 영향으로 변형된 지형이 나타나는 층서경계면 SB4로 구분된다. 연구지역에서는 국지적으로 기반암부터 SU3까지 연장된 단층이 발달하고 있으며, 단층 주변에는 압축응력과 관련된 습곡 또는 역단층이 나타난다. SU3은 평균 약 0.07 sec (약 55 m)의 얇은 층후를 보이는데, 연안역에 두꺼운 층후를 보이는 하부의 SU2는 주로 울릉분지 남쪽에서만 두껍게 나타난다. Yoon et al. (2014)에 의하면 동해 대륙주변부는 총 3회의 축소과정을 겪었으며, 그 중 마지막 단계는 플라이오세 초기에 시작되었다고 분석되었다. 따라서, SU3까지 연장된 단층대는 플라이오세에 발생한 것으로 추정되며, 플라이오세 층서인 SU2 상부에 위치하고 있기 때문에 초기 플라이스토세까지 축소의 영향을 받은 것으로 해석된다.

7.2.2 제4기(Fig. 35)

7.2.2.1 SU4 (플라이스토세 초기 - 중기)

SU4는 구조운동으로 변형된 층이 나타나지 않고, 대륙사면과 울릉분지에서 세 번째 축소 이후 습곡 및 역단층으로 변형된 SU3의 상부에 온랩유형으로 채워진 형태를 보인다. SU3까지 연장된 단층으로 발생한 구조변형은 울릉분지남부(연구지역 남동부)와 북부대륙사면(연구지역 북서부)에서 퇴적층이 가장 강하게 변형되어 나타나며, 층등후도(Fig. 28)를 통해 확인한 결과 울릉분지 남부 지역에서는 변형대를 중심으로 좌우로 두꺼운 층후가 나타나는 퇴적중심지가 존재한다. 한편, 후포뱅크는 평탄화된 지형이 나타나는데, 플라이스토세 후기부터 시작되는 빙하기로 인해 해수면이 낮아지면서 후포뱅크의 상부면이 해수운동에 영향을 받은 것으로 추정된다(Fig. 36). 제4기 층은 주로 후포뱅크의 평탄면에서 연결되는 경사부정합면을 기준으로 경계면으로 구분되었고, 해수운동으로 인해 영향을 받은 층들은 침식된 퇴적물이 주변에 재퇴적되는 재동퇴적체와 연계되어 있는데 SU4의 내부에는 발견되지 않았다. 따라서, SU4는 본격적으로 저해수면 시기에

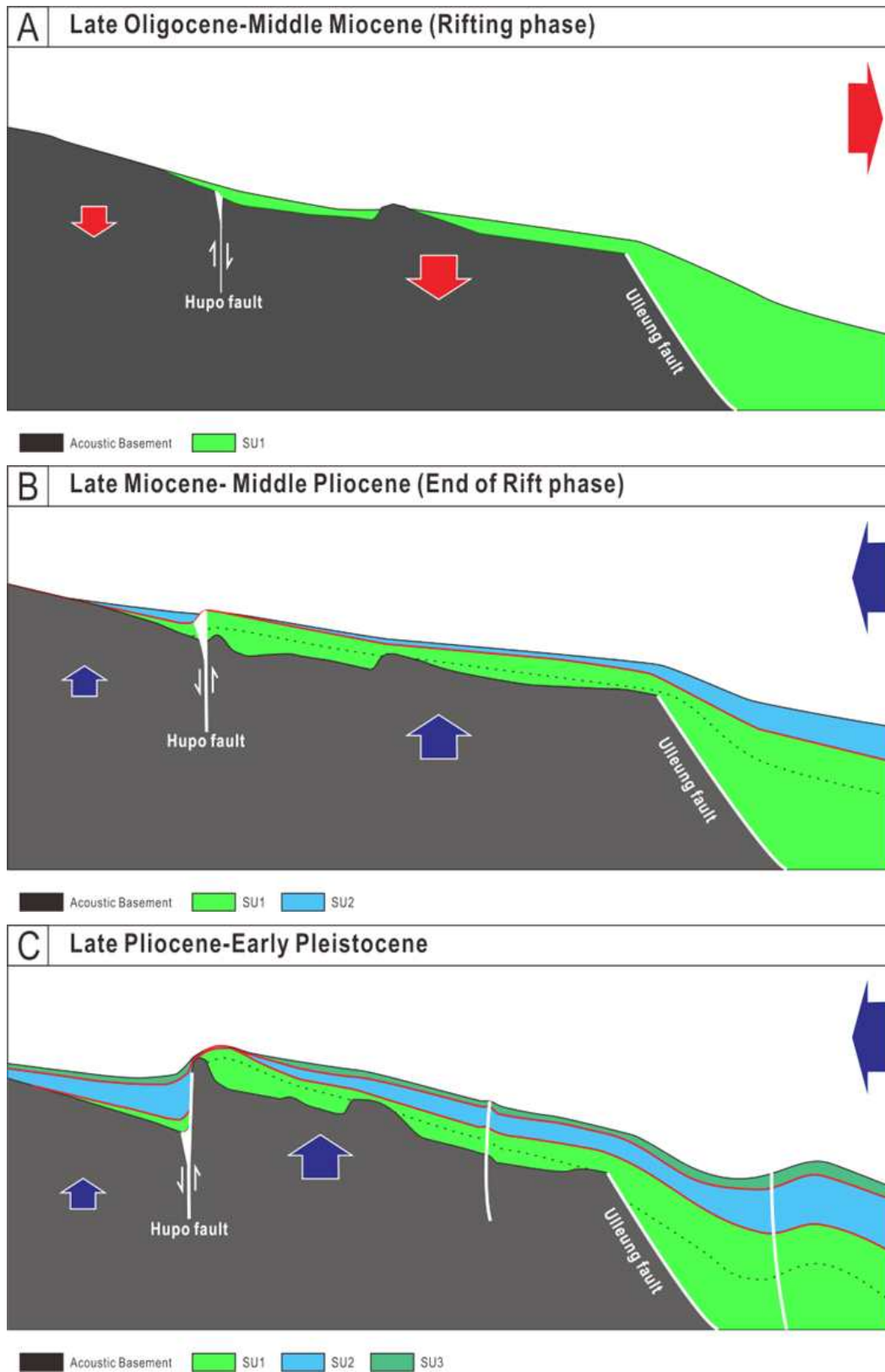


Fig. 34. Schematic illustration of the tectonic and stratigraphic evolution of the eastern continental margin of Korea in the Tertiary Period.

들어서는 0.86 Ma(플라이스토세 중후기) 이전에 형성된 층단위로 해석되며, 플라이오세 초-중기로 연대를 설정하였다.

7.2.2.2 SU5 (플라이스토세 중기 - 후기)

SU5는 SU4와 마찬가지로 울릉분지에 습곡으로 구조변형된 지형을 온랩 또는 슬럼프 퇴적체로 SU4의 상부에 집적되어 있으며, 층단위에 내부에는 구조운동의 영향으로 변형된 구조가 나타나지 않는다. 한편, 후포분지에서는 후포뱅크 주변으로 재동퇴적체가 분포하고 있다. 이는 저해수면기에 상대적으로 수심이 얕아진 후포뱅크는 해수운동의 영향을 받았으며, 이때 침식된 퇴적물이 후포뱅크 주변에 재퇴적된 것으로 추정된다. 따라서, SU5는 빙하기가 여러 번 발생했던 플라이스토세 중기에서 후기에 집적된 층단위로 해석된다.

7.2.2.3 SU6 (플라이스토세 후기 - 현재)

SU6은 SU5와 마찬가지로 후포뱅크 주변에 침식퇴적체가 분포하고 있으며, 이는 플라이스토세 후기에 발생했던 빙하기로 인해 형성된 것으로 해석하였다. 한편, 현재 후포뱅크는 해수면으로부터 약 0.15~0.17 sec (약 112~127 m) 하부에 위치하고 있다. 이는 산소동위원소를 이용하여 해수면의 위치를 추정한 결과 약 1만년 전에 발생하였던 마지막 빙하기(Last Glacial Maximum; LGM)의 해수면 높이가 현재보다 약 120 m 낮았으며(Fig. 36), 이후 간빙기에 접어들게 되면서 지속적으로 해수면의 상승하여 현재 해수면 높이에 도달하게 되었고, 탄성파단면에서 확인되는 대륙주변부 및 퇴적분지의 지형구조가 만들어진 것으로 해석된다.

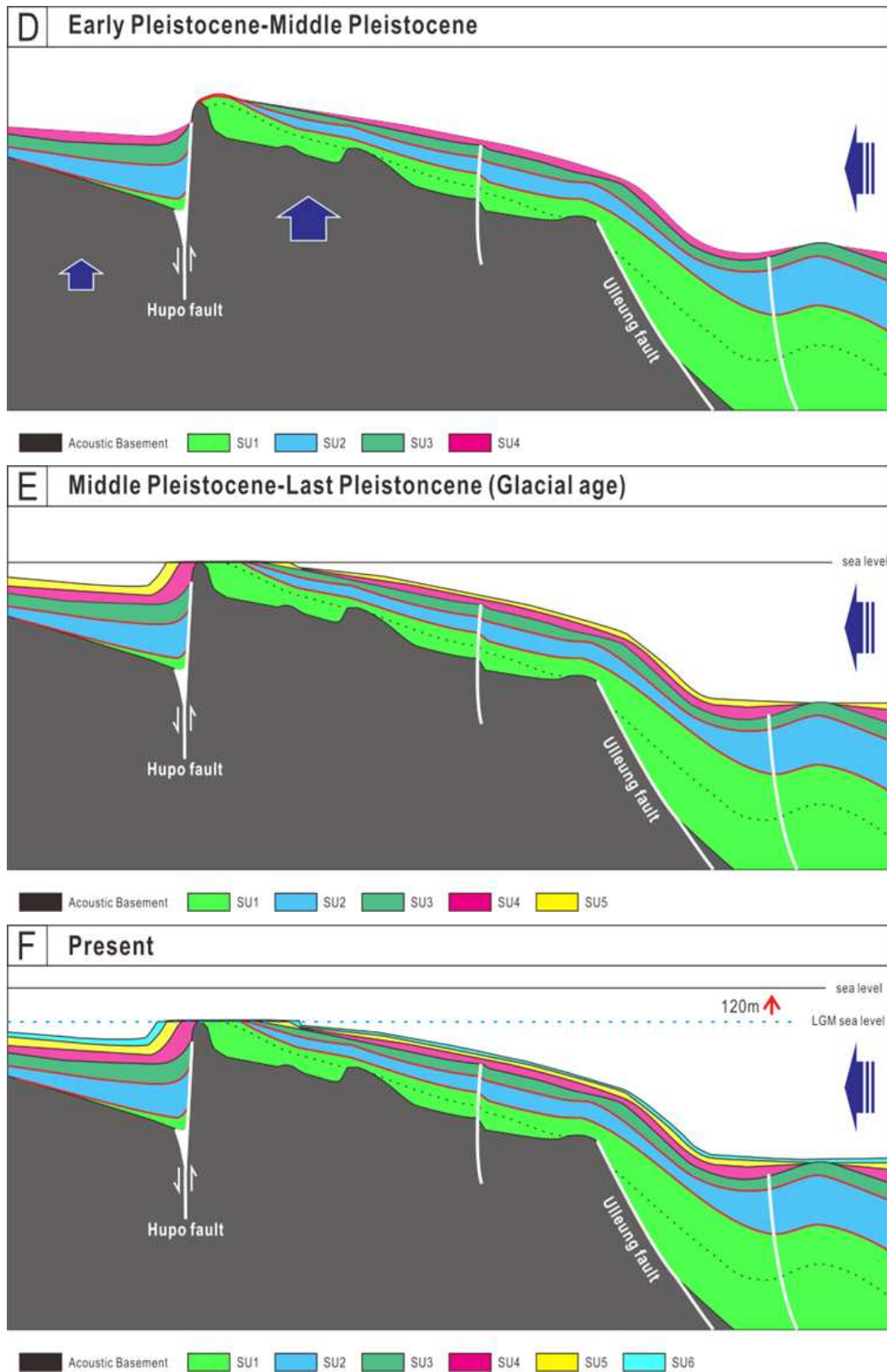


Fig. 35. Schematic illustration of the tectonic and stratigraphic evolution of the eastern continental margin of Korea in the Quaternary Period.

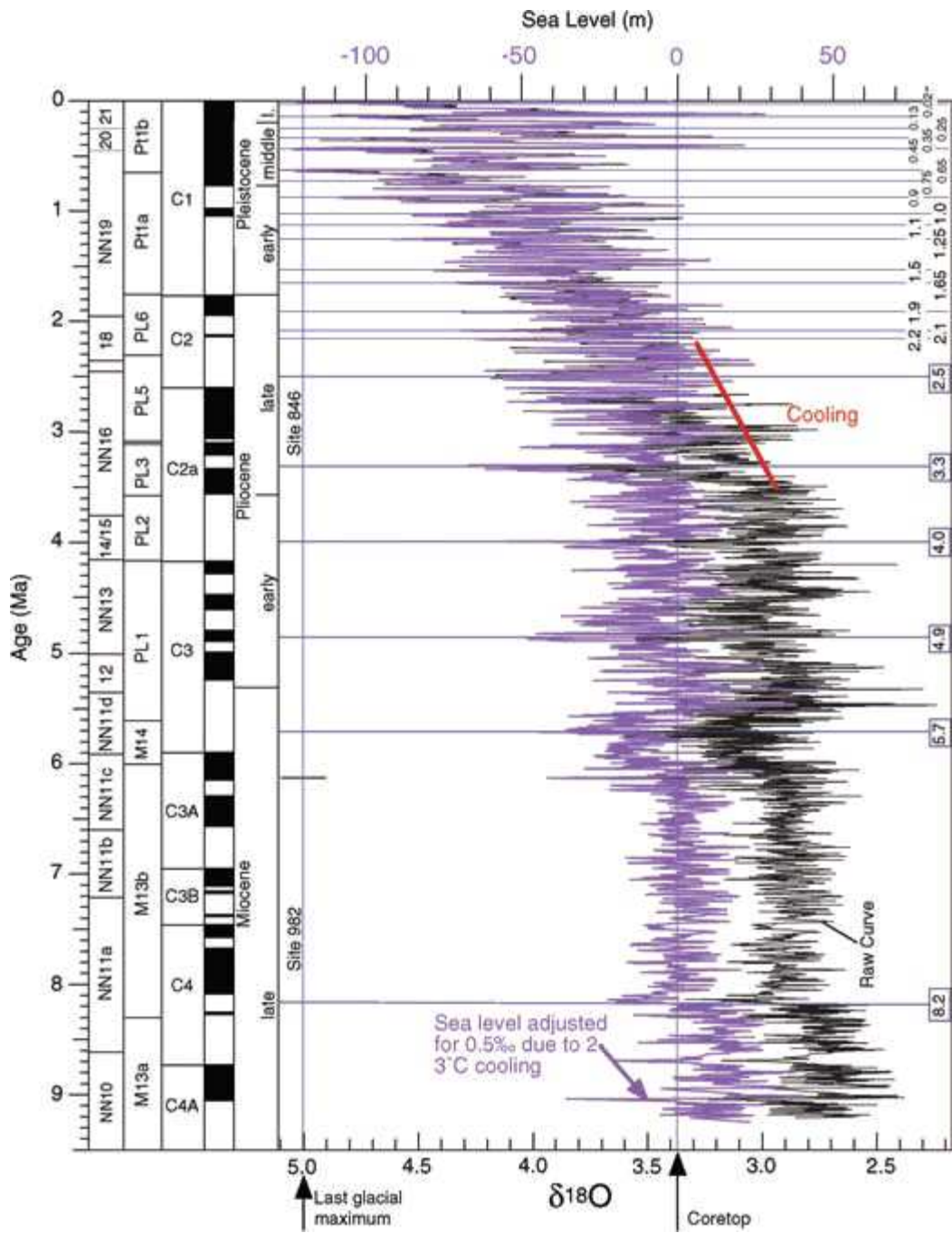


Fig. 36. Oxygen isotopic-based sea-level estimate for the past 9 My (Miller et al., 2005).

VIII. 결 론

동해지역에서 취득된 2D탄성과 탐사자료를 분석하여 동해 연안역의 후포분지에서 대륙사면, 심해저분지의 층서 및 구조 분석을 통해 지구조 및 층서 발달사를 해석하였다.

동해 대륙주변부에 분포하고 있는 음향기반암은 가장 최하부에서 강하게 인지되는 경계면(SB1)으로 구분되었다. 한편, 퇴적층 내의 층서경계면은 정합 또는 부정합면으로 구분되는 종단양상으로 (SB 2, 3, 4, 5, 6)가 설정되었으며, 층서경계면을 따라 6개의 층단위(SU1, 2, 3, 4, 5, 6)가 구분되었다. 층서경계면 중 SB2, SB3은 울릉분지 코어에서 분석된 생층서 자료를 통해 각각 5.5Ma, 2.58Ma의 연대가 분석되었고, SB4는 기존연구에서 설정된 Neo-Tectonic 경계면으로 해석되었다.

탄성과상은 단면 상에서 인지되는 탄성과적 특성을 기초로 하여 구분되었다. 음향기반암 탄성과상은 다른 지역에서 연구되어 분석된 탄성과적 특성을 기초로 하여 BF1은 결정질기반암, BF2는 화산기원 기반암으로 해석하였다. 퇴적층내 탄성과상은 기존 연구에서 육상 또는 해양에서 나타나는 퇴적시스템의 탄성과적 특징을 통해 SF1은 반원양성 퇴적체, SF2는 저탁류 퇴적체(turbidity current), SF3은 쇄설류 퇴적체(debris flow)로 해석되었다.

동해 대륙주변부의 지질구조는 탄성과단면에서 인지되는 단층을 종합하여 분석하였다. 후포분지 단층대는 주로 동해의 확장에 기여한 단층대이다. 포항분지 단층은 동해의 확장이 종료된 후 동해의 응력장이 인장력에서 압축력으로 전환된 후 압축력의 영향으로 지층이 변형된 동해의 축소와 연관된 단층대이다. 울릉분지 단층대는 동해에 압축되는 응력장이 지속적으로 영향을 미치게 되면서 드러스트 형태의 단층대가 형성되었으며, 현재 섭입대로 진화하는 과정에 놓여있는 것으로 보인다.

이와 같은 분석결과를 종합하여 신생대 제3기와 제4기에 걸쳐 6단계의 퇴적분지 층서 발달사를 재구성해볼 수 있다. 제3기에 퇴적된 SU1, SU2, SU3은 대부

분 얇은 수심에서 랩아웃으로 구분되어 깊은 심해저 분지까지 연결되며, 층단위 내부에서 주로 지구조운동에 의한 변형구조가 발달한 층단위들이다. SU1(올리고세-마이오세)의 하부 퇴적층은 동해가 확장되는 시기에 기반암이 인장력의 영향으로 지구대 또는 반지구대로 구조로 진화하면서 그 내부에 집적된 층단위이다. SU1의 상부 퇴적층은 상부 대륙사면에서 침식절단면이 나타나는데, 이는 동해의 확장이 지각침강을 야기하였기 때문에 심부에 가라앉게 된 것으로 해석된다. SU2(플라이오세 초기- 후기)는 동해의 응력장이 압축력으로 전환되면서 후포분지 및 대륙사면에서 역단층으로 변형된 구조가 나타나는 층단위이다. 특히, 동해의 응력장이 전환되면서 후포단층이 재활성화 되었는데, 이 영향으로 현재 후포뱅크 지역이 서서히 융기되면서 후포분지가 형성되었고 동시에 퇴적과정이 진행되면서 SU2가 형성되었다. SU3(플라이오세 후기-플라이스토세 초기)은 동해 남서부에서 일어난 압축성 구조운동에 의해 형성된 습곡구조가 나타나는 층단위이다. SU3의 변형구조는 하부에 발달한 SU1, SU2와 거의 동일한 형태로 변형되었는데, 이를 미루어볼 때 동해의 축소 초기단계부터 지속적으로 영향을 받아 변형된 것이 아니라 SU3이 집적되던 시기에 발생한 응력으로 구조변형된 것으로 해석된다.

제4기에 퇴적된 SU4, SU5, SU6은 구조운동으로 변형된 층이 나타나지 않고, 주로 해수면변동과 관련된 층단위들이다. SU4(플라이스토세 초기-중기)와 SU5(플라이스토세 후기)는 주로 울릉분지에서 마지막 구조운동으로 관측되는 SU3의 상부를 채우고 있는 것으로 미루어 볼 때 지구조운동이 발생하지 않았거나 층변형을 일으킬만한 응력을 가진 구조운동이 나타나지 않은 것으로 해석된다. 해수면의 상승과 하강이 반복되던 시기에 발달한 SU5와 SU6 형성 시에는 후포뱅크 지역에서 침식이 우세하게 일어났다. 침식된 퇴적물은 후포뱅크 주변에 재퇴적되었다. 이후, 가장 최상부에 위치한 SU6은 마지막최대빙하기(LGM)의 영향을 마지막으로 간빙기로 전환되었으며, 이후 해수면이 상승하게 되면서 전반적으로 일관적인 해양퇴적작용으로 층이 발달하게 되면서 현재 탄성파단면에서 확인되는 대륙주변부의 지형 및 퇴적분지가 되었다.

참고 문헌

- Choi, D.L., Oh, J.K. and Mikio, S., 1994, Cenozoic geological structures and tectonic evolution of the southern Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan). *The Korean Journal of Petroleum Geology*, 2(2), 59-70.
- 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., Yoon, S.H. and Lee, H.J., 1991, Submarine slides in the eastern continental margin, Korea. *Marine Georesources and Geotechnology*, 10(1-2), 71-82.
- Chough, S.K., Lee, S.H., Kim, J.W., Park, S.C., Yoo, D.G., Han, H.S., Yoon, S.H., Oh, S.B., Kim, Y.B. and Back, G.G., 1997, Chirp (2-7 kHz) echo characters in the Ulleung Basin. *Geoscience Journal*, 1, 143-153.
- Chung, T.W., Hirata, N. and Sato, R., 1990, Two-dimensional P and S wave velocity structure of the Yamato basin, the southwestern Japan Sea, from refraction data collected by ocean bottom seismographic array. *Journal of Physics of the Earth*, 38(2), 99-146.
- Coffin, M.F., Munsch M., Colwell, J.B., Schlich, R., Davies, H.L. and Li, Z.G., 1990, Seismic stratigraphy of the Raggatt Basin, southern Kerguelen Plateau : Tectonic and paleoceanographic implications. *Geological Society of America Bulletin*, 102, 563-579.
- Fountain, D.M., 1986, Implications of deep crustal evolution for seismic reflection interpretation. In: Barazangi, M., Brown, L., (eds.), *Reflection Seismology: A Global Perspective*. American Geophysical Union Geodynamics Series, 13, 1-7.
- Hirata, N., Karp, B.Y., Yamaguchi, T., Kanazawa, T., Suyehiro, K., Kasahara, J., Shiobara, H., Shinohara, M. and Kinoshita, H., 1992, Oceanic crust in

- the Japan Basin of the Japan Sea by the 1990 Japan USSR Expedition. Geophysical Research Letters, 19(20), 2027-2030.
- Huntec Ltd., 1967, Report on the offset geophysical survey in the Pohang area, Republic of Korea. UN ECAFE/CCOP Technical Bulletin, 1, 1-12.
- Kaneoka, I., Takigami, Y., Takaoka, N., Yamashita, S. and Tamaki, K., 1992, ^{40}Ar - ^{39}Ar analysis of volcanic rocks recovered from the Japan Sea floor: Constraints on the age of formation of the Japan Sea. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 127, 819-836.
- Kim, G.B., Yoon, S.H., Chough, S.K., Kwon, Y.K. and Ryu, B.J., 2011, Seismic reflection study of acoustic basement in the South Korea Plateau, the Ulleung Interplain Gap, and the northern Ulleung Basin: Volcano-tectonic implications for Tertiary back-arc evolution in the southern East Sea. Tectonophysics, 504(1-4), 43-56.
- Kim, G.B., Yoon, S.H., Sohn, Y.K. and Kwon, Y.K., 2013, Wave-planation surfaces in the mid-western East Sea (Sea of Japan): Indicators of subsidence history and paleogeographic evolution of back-arc basin. Marine Geology, 344, 65-81.
- Kim, G.B., Yoon, S.H., Kim, S.S. and So, B. D., 2018, Transition from buckling to subduction on strike-slip continental margins: Evidence from the East Sea (Japan Sea). Geology, 46(7), 603-606.
- Kim, H.J., Han, S.J., Lee, G.H. and Huh, S., 1998a, Seismic study of the Ulleung Basin crust and its implications for the opening of the East Sea (Japan Sea). Marine Geophysical Research, 20, 219 - 237.
- Kim, H.J., Lee, G.H., Jou, H.T., Cho, H.M., Yoo, H.S., Park, G.T. and Kim, J.S., 2007, Evolution of the eastern margin of Korea: Constraints on the opening of the East Sea (Japan Sea). Tectonophysics, 436, 37-55.
- Kim, J.H., Kang, N.K., Yi, B.Y., Park, Y.J. and Yoo, D.G., 2017, Seismic Stratigraphy and Evolutionary History of Submarine Canyon in the Northwestern Part of the Ulleung Basin, East Sea. Geophysics and

- Geophysical Exploration, 20(3), 146-162.
- Kwon, Y.K., Yoon, S.H. and Chough, S.K., 2009, Seismic stratigraphy of the western South Korea Plateau, East Sea: implications for tectonic history and sequence development during back-arc evolution. *Geo-Marine Letters*, 29, 181-189.
- Jin, M.S., Kim, S.J., Shin, S.C. and Lee, J.Y., 1989, K-Ar fission track dating for granites and volcanic rocks in the southeastern part of Korean Peninsula: Korea Institute of Energy and Resources Research Report, KR-88-6D, 51-84.
- Lee, H.Y., 1994, Neogene Foraminifera Biostratigraphy of the Southern Margin of the Ulleung Basin, East Sea. Ph.D. Thesis, Seoul National University.
- 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). *Marine Geology*, 97(3-4), 363-377.
- Lee, Y.S., Ishikawa, N. and Kim, W.K., 1999, Paleomagnetism of Tertiary rocks on the Korean Peninsula: tectonic implications for the opening of the East Sea (Sea of Japan). *Tectonophysics*, 304, 131 - 149.
- Lillie, R.J., 1999, *Whole Earth Geophysics: An introductory textbook for geologists and geophysicists*.
- Miller, K.G., Kominz, M.A., Browning, J.V., Wright, J.D., Mountain, G.S., Katz, M.E., Sugarman, P.J., Cramer, B.S., Christie-Blick, N. and Pekar, S.F. 2005, The Phanerozoic record of global sea-level change. *Science*, 310(5752), 1293-1298.
- Neuendorf, K.K.E., Mehl Jr, J.P. and Jackson, J.A., 2005, *Glossary of Geology*. American Geological Institute, Alexandria, Virginia, 779.
- Park, S.C. and Yoo, D.G., 1988, Depositional history of Quaternary sediments on the continental shelf off the southeastern coast of Korea (Korea Strait). *Marine Geology*, 79(1-2), 65-75.
- Park, S.J., 1998, Stratal patterns in the southwestern margin of Ulleung

- back-arc basin: a sequence stratigraphic analysis. Ph.D. Thesis, Seoul National University.
- Planke, S., Symonds, P.A., Alvestad, E. and Skogseid, J., 2000, Seismic volcanostratigraphy of large volume basaltic extrusive complexes on rifted margins. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B8), 19335-19351.
- Sangree, J.B. and Widmier, J.M., 1977, Seismic stratigraphy and global changes of sea level: Part 9. Seismic interpretation of clastic depositional facies: Section 2. Application of seismic reflection configuration to stratigraphic interpretation. *American Association of Petroleum Geologists*, M26, 165-184
- Schlüter, H.V. and Chun, W.C., 1974, Seismic survey of the East Coast of Korea. *UN ECAFE/CCOP Technical Bulletin*, 8, 1-16.
- Shin, Y.H., 2004, An integrated analysis on gravity anomaly, crustal structure, isostasy, and effective elastic thickness of Ulleung basin, east sea. Ph.D. thesis, Pusan National University.
- Su, W.J., Woodward, R.L. and Dziewonski, A.M., 1994, Degree 12 model of shear velocity heterogeneity in the mantle. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B4), 6945-6980.
- Tamaki, K., 1988, Geological structure of the Japan Sea and its tectonic implications. *Chishitsu Chosasho Geppo*;(Japan), 39(5), 296-365
- Tamaki, K., Suyehiro, K., Allan, J., Ingle Jr., J.C. and Pisciotta, K.A., 1992, Tectonic synthesis and implications of Japan Sea ODP drilling. *Proceedings. Ocean Drilling Program. Scientific Results 127/128*, 1333 - 1348.
- Vail, P.R. and Mitchum, R.M., 1977, Seismic stratigraphy and global changes of sea level, Part 1: overview. In: Payton, C. (ed.), *Stratigraphic Interpretation of Seismic Data*. *American Association of Petroleum Geologists Memoir*, 26, 83-97.

- Veeken, P.P., 2006, Seismic stratigraphy, basin analysis, and reservoir characterization. Elsevier Science.
- 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. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 181, 54–63.
- Yoo, D.G., Kim, K.J., Kang, N.K., Yi, B.Y. and Cho, M.H., 2017, Plio - Quaternary seismic stratigraphy and depositional history of the Ulleung Basin, East Sea: Association with debris-flow activity. *Quaternary International*, 459, 69–88.
- Yoon, S.H. and Chough, S.K., 1992, Evolution of Neogene sedimentary basins in the eastern continental margin of Korea. *The Korean Journal of Petroleum Geology*, 1(1), 15–27.
- Yoon, S.H. and Chough, S. K., 1993, Evolution of Neogene sedimentary basins in the eastern continental margin of Korea. *The Korean Journal of Petroleum Geology*, 1(1), 15–27.
- Yoon, S.H., 1994, The eastern continental margin of Korea : seismic stratigraphy, geologic structure and tectonic evolution. Ph.D. Thesis, Seoul National University.
- 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). *Geological Society of America Bulletin*, 107(1), 83–97.
- Yoon, S.H., Park, S.J. and Chough, S.K., 2002, Evolution of sedimentary basin in the southwestern Ulleung Basin margin: sequence stratigraphy and geologic structures. *Geosciences*, 6(2), 149–159.
- 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.

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). *Marine Geology*, 352, 70-88.

Yoon, S.H., Kim, G.B., Joe, Y.J., Koh, C.S. and Kwon, Y.K., 2015, Origin and evolution of geologic basement in the Korean continental margin of East Sea, based on the analysis of seismic reflection profiles. *Journal of the Geological Society of Korea*, 51(1), 37-52.

요 약

본 연구에서는 2000년대 이후 동해 대륙붕 및 울릉분지에서 다중채널탄성파탐사기법으로 새롭게 취득한 고해상도 2D 탄성파자료를 해석하여 통합층서, 탄성파상, 구조분석을 중점으로 동해 대륙주변부에 발달한 퇴적분지의 발달사에 대한 연구를 수행하였다.

동해 대륙주변부는 기반암이 상대적으로 얇은 심도에 분포하고 있기 때문에 판의 상호작용으로 발생하는 응력에 의해 복잡하게 변형된 지형이 잘 나타나는 지역이다. 탄성파단면도상에서 음향기반암은 지구 또는 반지구 구조로 형성된 기반암저지대가 발달하였으며, 퇴적분지들은 기반암저지대 사이에 분포하고 있다. 층서경계면은 음향기반암 경계와 각 퇴적분지에 나타나는 정합 또는 부정합면으로 구분되는 종단양상으로 기초로 하여 총 6개의 경계면(SB1, 2, 3, 4, 5, 6)을 설정하였으며, 층서경계면을 따라 6개의 층단위(SU1, 2, 3, 4, 5, 6)가 설정되었다. 또한, 울릉분지 시추코어의 생층서자료를 적용하여 각 퇴적분지에서 설정된 층서를 연결하고 각 층의 지질연대를 설정하였다. 탄성파상은 단면도상에서 인지되는 탄성파적 특성을 기초로 하여 음향기반암 탄성파상(BF1, 2), 퇴적층내 탄성파상(SF1, 2 3)으로 총 5개의 탄성파상이 구분되었다. 음향기반암은 각각 결정질기반암, 화산기원기반암으로 구분되었고, 퇴적층은 각각 반원양성, 저탁류, 쇄설류 퇴적체로 분류하였다. 지질구조는 탄성파단면상에서 인지되는 변형양상을 종합한 결과 후포분지의 구조는 주향이동단층, 포항분지의 구조는 역단층 및 습곡, 울릉분지의 구조는 드리프트 유형으로 단층대가 분석되었다. 최종적으로 지구조적 운동변화를 기준으로 분지진화를 제3기와 제4기 범주로 분류하였으며, 층단위를 기준으로 각 시기마다 3단계 과정으로 진화사를 설명하였다.

제3기에 퇴적된 SU1, SU2, SU3은 대부분 얇은 수심에서 랩아웃 유형으로 구분되어 깊은 심해저 분지까지 연결되고, 주로 지구조운동으로 인해 변형된 층이 나타난다. SU1(올리고세-마이오세)의 하부 퇴적층은 동해 확장으로 기반암이 지구대 또는 반지구대 구조로 발달하게 되면서 유사한 구조로 퇴적층이 변형되어

나타난다. SU1의 상부 퇴적층은 발달초기에 해수면에 인접하고 있어 침식작용의 영향으로 침식절단면을 형성하였고, 이후 동해가 확장되면서 지각침강을 야기하여 심부에 위치하게 되었다(약 1.0 sec). SU2(플라이오세 초기- 후기)는 후포분지 및 대륙사면에서 주로 압축력에 의한 변형구조가 나타난다. 특히, 후포분지에서는 동해가 축소되면서 후포단층이 재활성화 되었고, 서서히 후포뱅크 지역이 융기되는 것과 동시에 퇴적이 진행되면서 층단위가 발달하게 되었다. SU3(플라이오세 후기-플라이스토세 초기)은 울릉분지에서 북서-남동 방향으로 관측되는 드러스트 단층에 의한 영향으로 구조변형된 습곡축이 나타나는 층단위이다. SU3의 하부에는 동일한 형태로 변형된 SU1, SU2가 나타나는데, 이는 동해의 축소 초기부터 지속적으로 변형된 것이 아니라 SU3이 집적되는 시기에 발생한 강한 응력으로 인해 구조변형이 동시에 발생하게 되었다.

제4기에 퇴적된 SU4, SU5, SU6은 구조운동으로 변형된 층이 나타나지 않고, 주로 빙하기-간빙기의 순환으로 인한 해수면변동과 관련되어 있다. SU4와 SU5는 울릉분지에서 습곡으로 변형된 SU3의 상부를 채우는 형태로 발달하였다. 해수면의 상승과 하강이 반복되던 시기에 발달한 SU5와 SU6 형성 시에는 후포뱅크 지역에서 침식이 우세하게 일어났다. 침식된 퇴적물은 후포뱅크 주변에 재퇴적되었다. 이후, 가장 최상부에 위치한 SU6은 마지막최대빙하기(LGM)의 영향을 마지막으로 해수면이 상승하게 되면서 전반적으로 일반적인 해양퇴적과정으로 층이 발달하게 되었다.