



Short Note

## 동해안 묵호·북평 분지의 층서적 상관관계를 통해 유추되는 한반도 동안의 신생대 지구조 진화

김기범\*

부산대학교 지질환경과학과

### Cenozoic tectonic evolution of the eastern Korean margin, inferred from the stratigraphic relationship between Mukho and Bukpyeong basins, Korean East Coast

Gi-Bom Kim\*

Department of Geological Sciences, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea

Received: April 3, 2024 / Revised: April 17, 2024 / Accepted: April 19, 2024

\*Corresponding author: +82-51-510-2253 / E-mail: kimgb@pusan.ac.kr

**요약:** 본 논문은 한반도 동해안 육상과 해양 대륙사면에 인접 분포하는 신생대 묵호분지와 북평분지의 층서 및 지구조적 상관 관계에 대해 고찰한다. 강원도 동해시와 삼척시 연안 대륙붕 및 대륙사면부에 분포하는 묵호분지는 신생대 전기 마이오세 동해 인리형 배호분지 확장에 수반되어 북동-남서 주향의 정단층 운동을 통해 형성된 열개동시성 퇴적분지 중 하나로 분류된다. 반면, 동해시 북평항 인근 조선누층군과 중생대 심성암질 기반암상에 발달하는 북평분지는 내부 북평층에서 발견되는 어류, 규조류, 화분포자 등의 화석 증거를 통해 그 생성 시기가 마이오세 말-플라이오세 초로 제안된 바 있다. 이는 육상의 북평분지가 해양의 묵호분지와 같은 마이오세 열개동시성 퇴적분지가 아니라 약 5 Ma 이후 한반도에 작용한 동-서 압축성 신기지구조운동에 의해 생성된 신기 퇴적분지들 중 하나일 수 있음을 암시한다. 동해의 신기지구조운동에 대한 개념이 정립되기 시작한 2010년대 말에 이르기까지 북평분지와 같은 신기 퇴적분지들은 마이오세 열개동시성 퇴적분지들과 구분되지 않은 채 단순히 신생대 제3기 분지군으로 분류되어 왔다. 본 논문에서 제시하는 층서학적 증거들은 북평분지가 동해안 대륙붕 및 대륙사면에 산재하는 신기 퇴적분지 중 하나로서, 플라이오세 이후 동-서 압축응력에 의해 생성된 남-북 또는 북북서-남남동 방향 축을 갖는 단층전파습곡의 향사부를 수렴충전하는 과정을 통해 생성되었을 가능성을 보여준다.

**주요어:** 북평분지, 묵호분지, 동해, 신기 퇴적분지, 신기지구조 진화

**ABSTRACT:** This paper contemplates the stratigraphic and tectonic features of the Mukho and Bukpyeong basins located around the eastern coast of Korean Peninsula. Seismic reflection analyses revealed that the offshore Mukho Basin began to form in the Early Miocene in association with the pull-apart back-arc opening of the East Sea. On the other hand, fossil evidence, such as the cyprinid pharyngeal teeth and palynomorphs found in the terrestrial Bukpyeong Basin, indicates that the basin formed in the early Pliocene, when the East Sea has already entered into the E-W compressional neo-tectonic stress regime. Until mid-2010s, the Mukho and Bukpyeong basins have been classified into the Tertiary basin group, and occasionally they were regarded as a single sedimentary basin. In this paper, we propose a new classification criterion for Cenozoic sedimentary basins around the eastern coast of Korean Peninsula. The criterion classifies the marine Mukho Basin into a syn-extensional sedimentary basin coeval with the East Sea back-arc opening in the Early Miocene, but the Bukpyeong Basin into a neo-tectonic basin formed under the E-W compressional stress regime in the Pliocene.

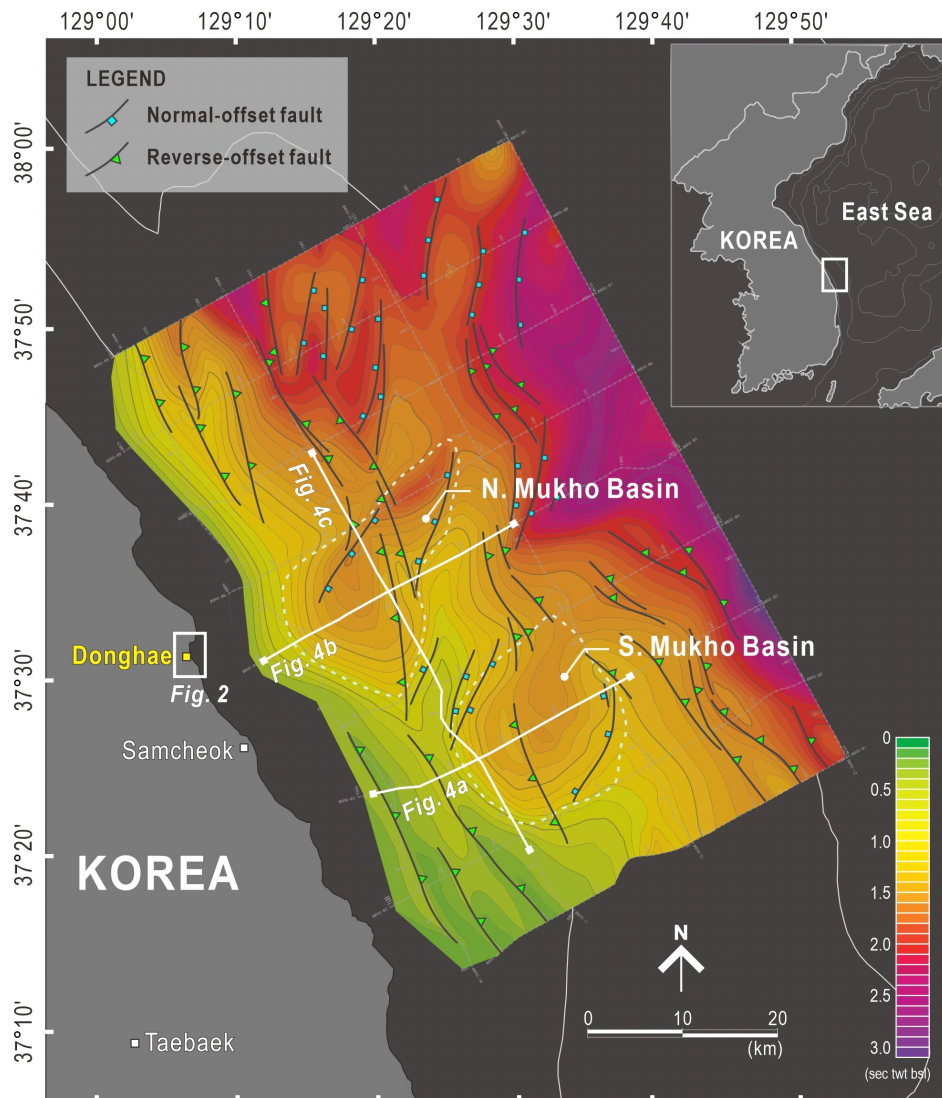
**Key words:** Bukpyeong Basin, Mukho Basin, East Sea, neotectonics

## 1. 서론

한반도 동부를 포함하는 동해의 신생대 지구조 발달사는 1)전기 마이오세(약 23 Ma 이후) 동해 울릉분지와 한반도 동부 대륙 연변부 소분지들의 인리형 배호 확장과, 2)중기 마이오세(약 15-12 Ma) 필리핀 해판의 북상 및 그로 인한 동해의 남-북 압축성 지구조 반전의 두 단계로 널리 인용되어 왔다(Chough and Barg, 1987; Yoon and Chough, 1995). 최근 이 2단계 지구조 발달 시나리오에 더해, 약 5 Ma 마이오세 말 또는 플라이오세 초부터 유라시아판과 태평양 판 사이 응력장 변화에 따른 아무르판과 오희츠크판(북미판) 간의 동-서 압축성 상대운동에 의하여 동해 전반과 한반도 동부, 일본 서부에 추가적 지각변형이 발생중임이

보고되었다(No *et al.*, 2014; Kim *et al.*, 2018; Taira, 2001). 이를 바탕으로 기존 2단계 지구조 발달사에 플라이오세 이후 신기지구조운동 단계가 추가된 3단계 지구조 발달사가 새로이 제안되기도 하였다(Lee *et al.*, 2022). 해당 동해 신기지구조운동은 두께 약 30 km의 대륙지각과 두께 약 13 km의 배호분지 지각이 맞닿아 있는 동해 울릉분지와 한반도의 경계를 따라 태아 단계의 섭입대를 발생시키고 그와 동시에 한반도 동부를 광범위하게 용기시켜 후포분지 등과 같은 압축동시성 신기 퇴적분지들을 형성하고 있다는 의견이 제기되기도 하였다(Kim *et al.*, 2018; Lee *et al.*, 2023).

강원도 삼척-동해시 연안 대륙붕과 해저사면에 걸쳐 위치하는 묵호분지(그림 1)와 동해시 북평항 주변 육상에 위



**Fig. 1.** (a) Time-structure map visualizing the topography of the acoustic basement around the Mukho Basin, offshore Gangwon Province, Korea. The map also presents the track lines of the seismic reflection survey and the distribution of structural components. For location, see the inset on the top right corner.

치하는 북평분지(그림 2)는 한반도 동해안을 따라 분포하는 울산분지, 장기분지, 포항-영덕분지, 영해분지 등과 더불어 신생대 제3기 분지군으로 분류되어 왔다(Tateiwa, 1924; Kim, 1982; Yoon, 1986; Yoon and Chough, 1993 등). 신기 지구조운동에 대한 개념이 아직 확립되지 않았던 과거 2010년대 후반까지 해당 신생대 제3기 분지들은 마이오세 초·중반 동해의 배호확장 동안 생성된 후 마이오세 중기 울릉분지 남부 돌고래습곡대(Dolgorae Thrust-Fold Belt)로 대표되는 동해 지구조반전(tectonic inversion) 운동에 의해 육상에 드러난 것으로 널리 받아들여져 왔다(Son *et al.*, 2013 등). 하지만 오래 전부터 강원도 동해시 북평분지를 중심으로 수행된 층서·고생물학 연구들은 우리나라 동해안에 마이오세 동해 확장 및 지구조반전 시점 보다 훨씬 이전에 생성된 퇴적분지가 존재함을 암시해왔다(Yoo, 1970;

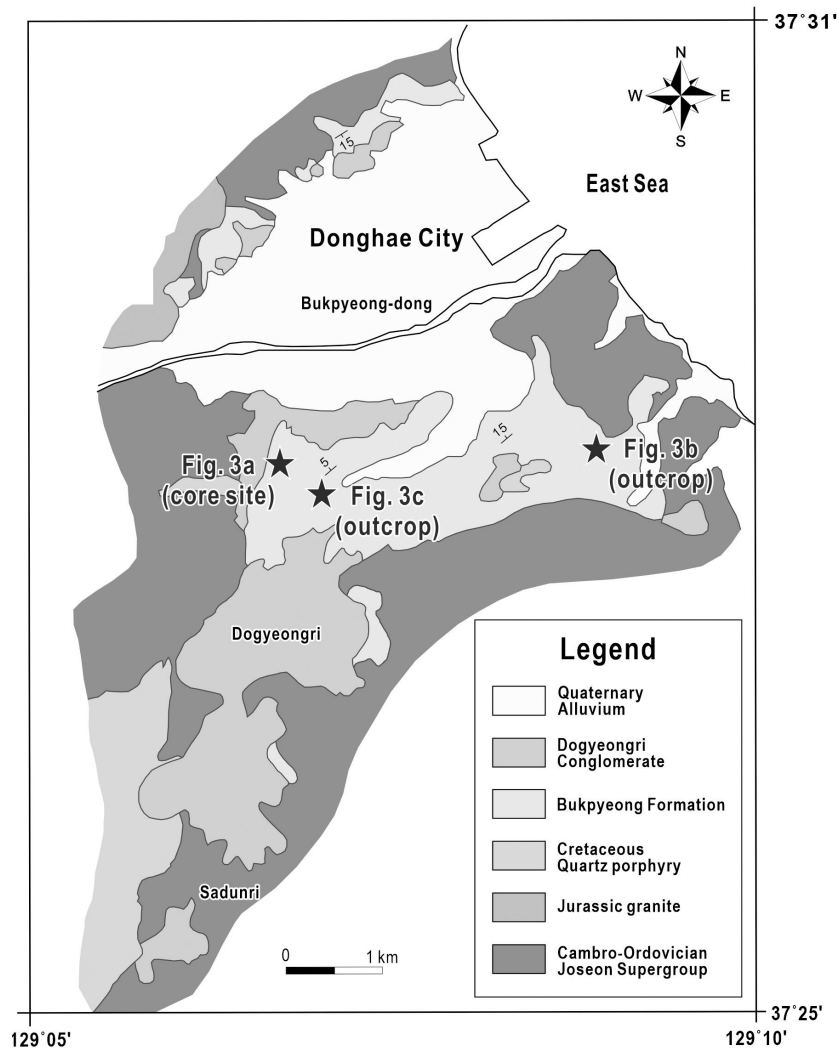
Choi and Bong, 1986; Lee *et al.*, 2003 등).

본 논문은 강원도 동해안 육상과 연안 대륙붕-대륙사면부에 각각 존재하는 북평분지와 묵호분지 관련 과거 연구 사례를 종합하고 해당 지역에서 획득된 탄성과 반사 자료 해석을 통해 두 퇴적분지의 기원 및 발달 과정의 동일성 여부를 평가하는데 주안점을 둔다. 본 연구는 한반도 동해안에 작용한 전기 마이오세 동해 확장과 플라이오세 이후 신기 지구조운동의 특성과 그 과정에 생성된 고기 및 신기 퇴적분지들 간의 층서 관계를 개념화하고자 한다.

## 2. 지질개요

### 2.1. 북평분지

강원도 동해시 북평동과 삼척시 미로면에 걸쳐 북동-남



**Fig. 2.** Geological map of the Bukpyeong Basin, Donghae City, Korea. Stars indicate the location of the core site and outcrops shown in Figure 3. For the location of the Bukpyeong Basin, see Figure 1.

서 방향 약 12.5 km 영역에 분포하는 북평분지는 고생대 조선누층군과 이를 관입한 백악기 화성암류를 기반암으로 한다. 분지를 충전하는 퇴적층은 갈탄층을 대량 포함하는 니질/사질/역질 미고결 퇴적층인 하부의 북평층과 상부 층적선상지 또는 층적평원 환경에서 생성된 것으로 추정되는 도경리역암으로 구성된다(Lim and Choi, 1982; Lee *et al.*, 2003)(그림 2, 3). 하부의 북평층에서는 다양한 규조류, 유공충, 포자화분, 이매패류, 복족류 등의 화석이 산출되었으며(Kim, 1970; Yoo, 1970), 이들 화석군을 바탕으로 하는 다양한 퇴적환경 해석이 존재한다.

Yoo (1970)는 북평분지 하부 북평층의 이암층으로부터 부유성유공충 1속 3종과 저서성유공충 14속 17종을 보고하였고 이를 바탕으로 북평층을 플라이오세 해성층으로 해석하였다. Lee (1977)는 북평층의 구조질 이암층에서 산출된 규조류 화석을 통해 북평분지를 형성 초기에 호소 또는 소택지 환경이 우세하였으나 때때로 해수의 영향을 받은 기수환경으로 해석하였다. Lim and Choi (1982)은 북평층에 대한 퇴적학적 연구를 통해 층적선상지, 층적평원과 소택지 환경이 전이되면서 국부적으로 바다의 영향을 받는 호수와 석호 환경이 분지 내에 조성되었을 것으로 추정하였다. 반면 Kim *et al.* (1996)은 Yoo (1970)에 의해 보고된 유공충 화석이 해당 연구에서 발견되지 않았다는 이유로 유공충 기반의 해양환경 추정 논리에 의구심을 제기하였으며, 발견된 화분 및 담수성 조류 화석을 근거로 북평분지의 퇴적환경을 담수 호소 환경으로 추정하였다. 보다 최근 Lee *et al.* (2003)은 북평층의 상부 사암층에서 산출된 잉어아과(*Cyprinus* sp.) 어류 화석군을 바탕으로 북평층을 전기 플라이오세 민물 환경으로 추정하였다.

## 2.2. 목호분지

Kim (1982)은 한반도 강릉-포항 앞바다 대륙연변부 대상 탄성과 반사 탐사를 통해 목호, 후포, 포항 분지로 명명된 세 개의 퇴적분지를 보고하였다. 세 분지 중 가장 북쪽 강릉-삼척 사이 대륙붕과 대륙사면부에 걸쳐 분포하는 목호분지는(그림 1), Yoon and Chough (1993)에 의해 신생대 마이오세 초 포항-영덕 분지의 우수향 당겨열림작용(pull-apart opening)과 더불어 한국대지와 접한 한반도 대륙연변부의 블럭단층운동을 통해 형성된 열개동시성 퇴적분지로 해석되었다.

## 3. 목호분지 및 그 인근 해역 탄성파층서

국방과학연구소에 의해 동해 목호분지 및 인근 해역에서 획득된 탄성과 반사자료를 해석한 결과, 목호분지는 기반암 고지대에 의해 분리된 남부와 북부 두 개의 소분지로 구성된

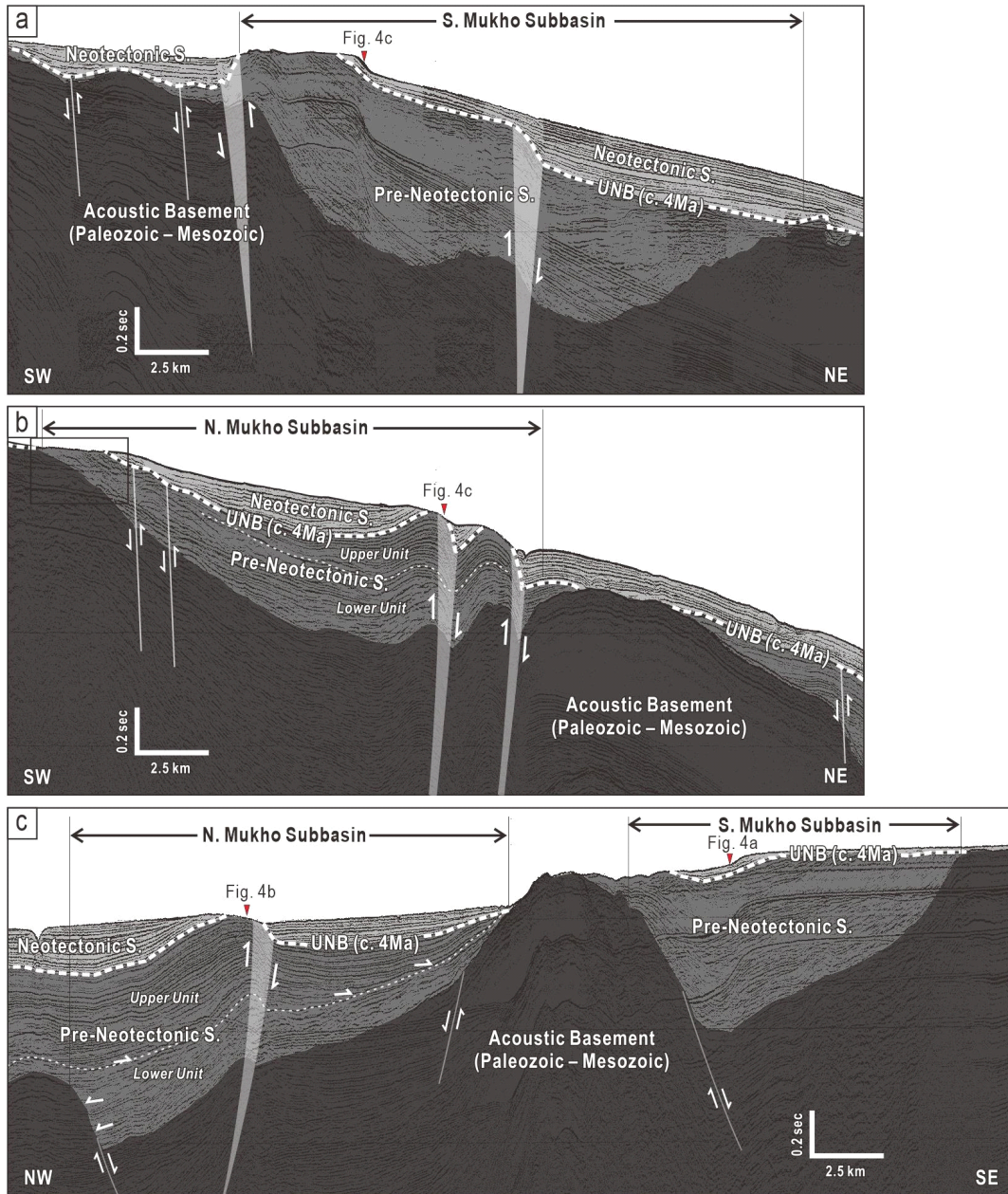


**Fig. 3.** (a) Photograph showing the three representative facies of the sediment cores recovered from the Bukpyeong Basin. (b and c) Outcrop photographs showing the sedimentary facies of the Bukpyeong Formation. For the locations of the coring site and outcrops, see Figure 2.

다. 본 논문에서는 두 소분지를 편의상 각각 북묵호소분지 (N. Mukho Subbasin)와 남묵호소분지(S. Mukho Subbasin)로 명명하였다(그림 4). 북묵호소분지는 북북동-남남서 주향의 정단층에 의해 구획된 북동-남서 최대 폭 약 25 km, 북서-남동 최대 폭 약 20 km의 반지구형 기반암 저지대로 정의되며, 수직 왕복주시(two-way travel time) 최대 0.5 sec의 퇴적층으로 충전되어 있다. 주변 한국대지 및 후포분지에서 수행된 탄성파 층서 연구결과(Yoon and Chough, 1995; Kwon *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2023)와의 대비를 통해 해당

분지 충전층의 연대는 전기 및 중기 마이오세로 해석된다(그림 4a, 4c). 남묵호소분지는 북서-남동 및 북동-남서 폭 모두 약 20 km이며, 두께 1 km 이상의 마이오세 퇴적층에 의해 충전되어 있다.

본 논문에서는 한반도 동부 대륙연변부 육상 및 해양, 울릉분지 남서부 및 중부 지역에서 지금까지 제안된 층서체계를 종합 및 광역대비하여(그림 5), 연구지역의 약 4 Ma 부정합 경계를 울릉신기지구조경계(Ulleung Neotectonic Boundary: UNB)로, 울릉신기지구조경계 하부 마이오세 퇴적층을 신



**Fig. 4.** Selected seismic reflection profiles showing the configurations of stratigraphic and structural components of the Pre-Neotectonic and Neotectonic sequences around the Mukho Basin. For the locations of the seismic profiles, see Figure 1.

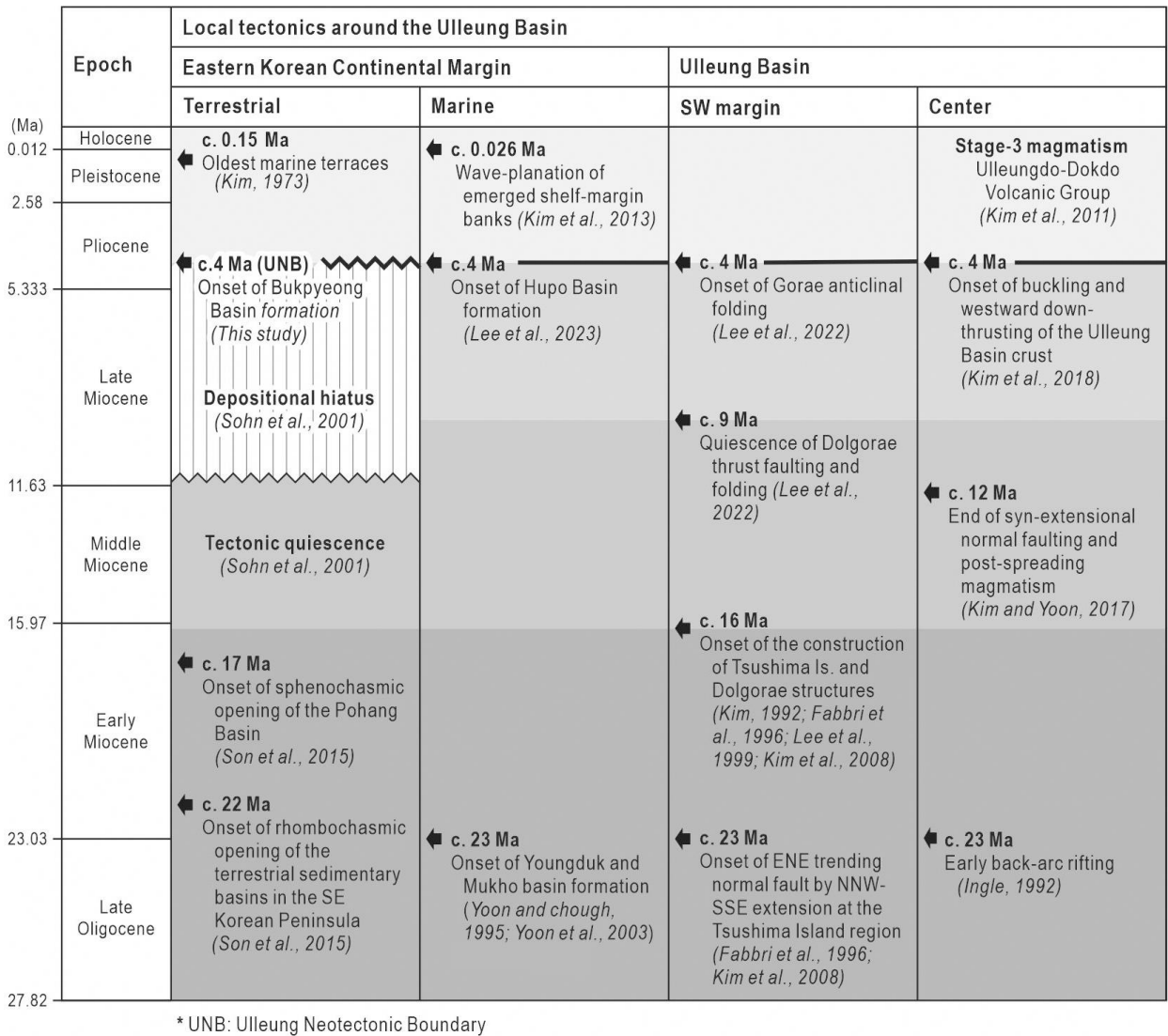
기지구조전층(Pre-Neotectonic Sequence), 상부 플라이오세 퇴적층을 신기지구조층(Neotectonic Sequence)으로 각각 명명하였다(그림 4).

**3.1. 신기지구조전층(Pre-Neotectonic Sequence)**

목호분지 내 남, 북 소분지 모두 북부 사면의 경사는 가파르고 남부 사면의 경사는 완만한 반지구 형태의 음향기반암(acoustic basement) 기하를 보인다(그림 4c). 이 반지구형 기반암 저지대를 충전하는 신기지구조전층(Pre-Neotectonic Sequence)은 다시 하부 층단위(Lower Unit)와 상부 층단위(Upper Unit)로 구분된다(그림 4b, 4c).

신기지구조전층 하부층단위는 고경사의 북부 기반암 사면에 대해 고각의 사면결침(onlap) 층리종결상을 보이는데,

이는 두 소분지가 북부경계를 따라 발달하는 북동-남서 주향의 경계 정단층 운동으로 인해 형성되었음을 지시한다(그림 4c). 경계단층 부근에서 해당 하부 층단위는 수직 왕복주시가 약 0.5초로 가장 두꺼우며 맞은편의 상대적으로 완만한 기반암 사면 방향으로 층후가 점진적으로 감소하여 침멸하는 전형적 수렴충전(convergent-fill) 층리 기하를 나타내는데, 이는 해당 층단위가 정단층의 점진적 성장과 더불어 퇴적된 열개동시성 성장층(syn-rift growth strata)임을 지시한다. 신기지구조전층의 하부 층단위는 연속성이 불량한 고진폭의 난반사상(또는 무반사상) 반사면들로 구성되는데, 이러한 반사상은 과거 연구에서 열개 초기 하천 및 호수 환경에서 퇴적된 퇴적물과 이와 교호하는 관입/분출 화성암류 복합체로(volcanic sill/flow-sediment complex)로 해



**Fig. 5.** Stratigraphic chart showing the local tectonic features around the Korean Peninsula and the East Sea. Modified after Lee et al. (2022).

석된 바 있다(e.g., Chough and Lee, 1992; Kwon *et al.*, 2009).

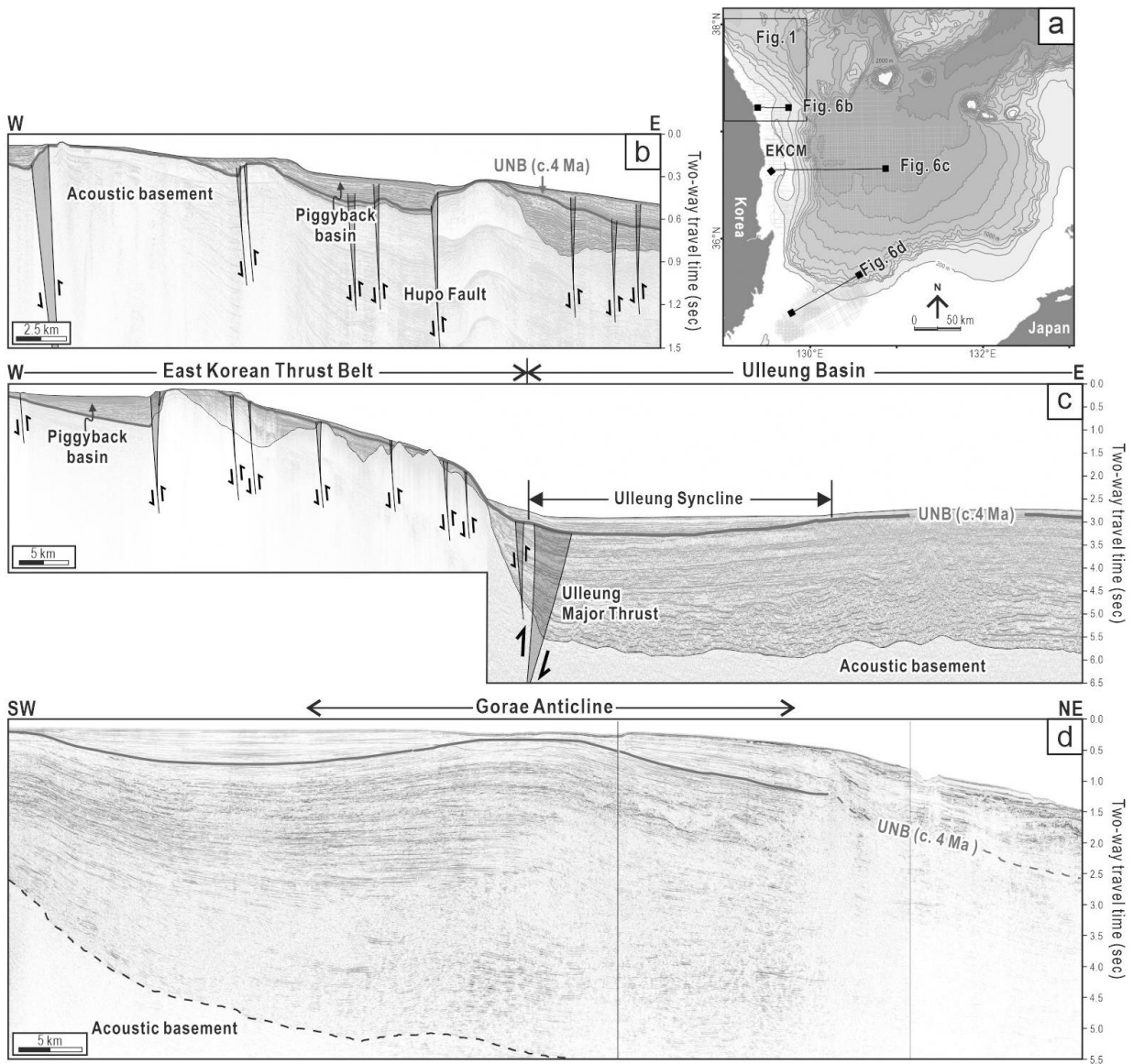
반면 신기지구조전층 내 상부 층단위(Upper Unit)는 하부 층단위에 대비 연속성이 좋은 반사면들로 구성된다. 상부 층단위 내에서는 기반암 정단층에 의한 층리 변형이 발견되지 않고 수렴층리가 아닌 사면결침하는 평행층리가 나타난다. 이와 같은 반사상은 해당 층단위가 경계정단층 운동이 종료된 후 퇴적되었음을 지시하며, 과거 연구에서는 해당 층단위를 동해 전반의 광역 열침강 단계에 퇴적된 열개후(post-rift)층으로 해석하였다(Kwon *et al.*, 2009; Kim and Yoon, 2017).

묵호분지 신기지구조전층 내에서 확인되는 열개동시성

및 열개후 층단위들 간의 층서적 상관관계는 Kwon *et al.* (2009)에 의해 제안된 서남한국대지(Western South Korea Plateau)의 층서 체계와 잘 부합하며, 동시에 ‘묵호분지가 마이오세 초 동해 배호확장 당시 블럭단층운동에 의해 형성되었다’는 Yoon and Chough (1993)의 해석에 잘 부합한다.

### 3.2. 울릉신기지구조경계(Ulleung Neotectonic Boundary)

울릉신기지구조경계는 Kim *et al.* (2018)에 의해 약 4 Ma경 시작된 울릉분지 지각의 좌굴(buckling)과 울릉분지의 서부 주층상단층(Major Thrust)의 운동 시작시점과 대비되는 층경계로 그 개념이 최초 제안되었다. Lee *et al.*



**Fig. 6.** Seismic reflection profiles showing the geometry, stratigraphy, structural components of the throughout the Eastern Korean Margin. Modified after Lee *et al.* (2022 and 2023). The present study area and locations of seismic reflection profiles are shown in the inset on the top right side.

(2022, 2023)에 따르면 이 층경계는 울릉분지 남부 고래항사(Gorae Anticline)구조 및 한반도 동부 대륙사면 압축성 신기지구조변형 시작시점을 지시하는 층경계와도 잘 부합한다(그림 5, 6). 연구지역인 강원도 삼척-동해시 연안 묵호분지 일대에서 울릉신기경계는 신기지구조전층과 그 상부의 비대칭성 습곡 저지대를 수렴충전하는 신기지구조층 사이 층경계에 직접 대비된다(그림 4). 신기지구조전층 상부에 나타나는 비대칭 습곡의 고정사 습곡날개 하방에는 삼각수렴하는 기하의 역단층성 삼각전단대가 나타나는데, 이를 통해 해당 습곡이 일종의 단층전파습곡(fault-propagate fold)으로써 지각 심부에 존재하는 보다 완경사의 역단층 또는 층상단층과 이어져 있음이 유추된다. 해당 역단층 또는 층상단층들은 두세개가 모여 단층대를 형성하며 주향은 북북서-남남동 또는 남-북 방향이다. 경사는 대부분 북동 또는 동북동 방향이나 묵호 분지 중앙부를 따라 서남서 경사의 단층대도 뚜렷이 인지된다.

### 3.3. 신기지구조층(Neotectonic Sequence)

신기지구조층(Neotectonic Sequence)은 연구지역인 묵호분지 일대 대륙붕단 및 대륙사면부에서 플라이오세 초 건층면 울릉신기지구조경계(Ulleung Neotectonic Boundary) 상에 발달하는 수직 왕복주시 약 0.25초 이하의 층으로, 폭 5-10 km의 비대칭 향사습곡을 수렴충전하는 퇴적 기하를 보인다. 이 층은 비대칭 향사습곡의 전방날개(foreside)에 대해 고각으로 사면결침하는 동시에 습곡 후방날개(backlimb) 방향으로는 수렴 침멸하는 층리종결(stratal termination) 패턴을 보인다. 이와 같은 신기지구조층의 수렴충전구조는 기저 역단층 또는 층상단층의 지속적 성장과 더불어 점진적으로 깊어지고 비대칭화되는 향사습곡 내 신규 퇴적가능공간을 생성 즉시 해당 층이 충전한 결과로서, 신기지구조층이 압축동시성 성장층임을 지시한다. 묵호분지 일대에서 역단층들의 누적 수직 변위는 미터 단위 환산 시 최대 200 m에 달하며 변형이 해저면까지 이어지는 것으로 보아, 해당 역단층 운동은 현재까지도 진행중인 것으로 추정된다.

## 4. 토 의

### 4.1. 동해 대륙사면 신생대 퇴적분지의 발달 특성

삼척-동해시 앞바다 대륙붕 및 대륙사면부에서 획득된 탄성과 반사자료를 해석한 결과 신생대 제3기 전기 마이오세 퇴적층과 플라이오세 이후 퇴적층에서 상이한 메커니즘의 구조운동에 따른 퇴적분지의 형성이 확인되었다.

묵호분지는 동북동-서남서(또는 북동-남서) 주향의 음향기반암상 정단층에 의해 구획되는 반지구형 분지로, 마이오세 신기지구조전층의 하부 층단위가 수렴충전한다. Kwon

*et al.* (2009)의 층서 체계와의 대비를 통해 중기 및 후기 마이오세로 그 연대가 추정되는 신기지구조전층 상부층단위에서는 화성암류 반사상이 나타나지 않으며 기반암 정단층의 지속적 성장에 의한 층단위의 변형이 발견되지 않는다. 이 점으로 미루어 볼 때 화성작용을 수반한 동해 대륙사면의 열개동시성(syn-rift) 지구조 침강(tectonic subsidence)은 전기 마이오세동안 절정에 달하고 이후 점진적으로 감소하여 중기 마이오세에 들어서는 느린 속도의 열개후(post-rift) 열침강(thermal subsidence)만이 대륙사면 및 한국대지 전반에 걸쳐 균일하게 발생했을 것으로 추정된다. 이와 같은 동해 대륙사면부 신생대 열개동시성 퇴적분지의 침강 시작 및 종료 양상은 인접한 동해 서남한국대지 지역 온누리 및 반달분지(Kwon *et al.*, 2009), 그리고 한반도 동부 신생대 신제3기 육상 퇴적분지에서도 유사한 양상을 보인다(Sohn *et al.*, 2001)(그림 5).

울릉신기지구조경계상의 비대칭 향사습곡을 수렴충전하는 신기지구조층(Neotectonic Sequence)은 Kwon *et al.* (2009)에서 Unit 4로 명명된 서남한국대지 최상부 층단위와 층서적으로 대비된다. Kwon *et al.* (2009)은 해저면 시추를 통해 층단위 중하부에서 회수한 부석질 테프라층의 연대(약 2.68 Ma)와 퇴적율을 고려하여 Unit 4의 퇴적 시작시점을 플라이오세 초로 추정하였다. 보다 최근에는 울릉분지-한국대지-동한국대륙사면부 간의 탄성파반사자료 대비를 통해 신기지구조층의 연대를 약 4 Ma 경으로 특정한 바 있다(Kim *et al.*, 2018; Lee *et al.*, 2023; Moon *et al.*, 2023). 연구지역인 강원 앞바다에서 신기지구조층은 폭 약 5-10 km 최대 두께 200 m 이상의 북북서-남남동 방향 장축 배열된 비대칭 향사습곡들을 수렴충전한다. 이와 같은 퇴적충전된 향사습곡 다발은 보다 남쪽의 후포-울진 해역에서 최대 수직변위 약 1 km의 고각 역단층인 후포단층 운동에 의해 형성된 폭 약 20 km의 후포분지로 대체된다. Lee *et al.* (2023)은 동해 대륙붕 및 대륙사면부에 발달하는 비대칭 향사습곡 다발과 후포단층을 묶어 동한국충상단층대(East Korean Thrust Belt)로 명명하였으며, 단층판 사이 저지대(또는 비대칭 향사습곡)에 형성된 퇴적분지를 일종의 피기백 분지(piggyback basin)로 해석한 바 있다(그림 6).

### 4.2. 북평분지의 지구조적 분류

한국지질자원연구원과 한국수자원공사에서 수행한 북평분지 시추 보고서에 따르면, 고생대 조선누층군 석회암으로 구성된 북평분지의 기반암은 분지 중앙부에서 약 140-150 m 심도를 갖는다(KIGAM, 2010). 2022년 동해시 지가동 일대에서 수행된 신규 시추 결과는 북평분지의 기반암 심도가 최대 200 m 이상인 곳도 존재함을 보여준다(그림 3). 기반암 상부에는 주변 기반암으로부터 기원된 직경



**Table 1.** Fossil contents of the Bukpyeong Formation.

Publications	Fossil contents	Discovered sequence	Estimated ages	Sedimentary environment
Yoo (1970)	<b>Foraminifers:</b> Planktonic (3 species of 1 genus); Benthic (17species of 14 genera)	<b>Bukpyeong Fm.</b> Lower member (middle-upper parts)	<b>Pliocene</b>	Marine and brackish water
Lee (1977)	<b>Diatoms:</b> Both fresh and brackish-water diatom (21 species, 5 varieties and 5 forms)	<b>Bukpyeong Fm.</b> Diatomaceous deposit	N/A	Eutrophic stagnant lake (dominant); Brackish water (subordinate)
Choi and Bong (1986)	<b>Spore-Pollens:</b> Algae (9 species), Fungus (24 species), Pteridophyta (18 species), gymnosperm (17 species), anthophytes (75 species); Abundant <i>Taxodiaceae-Cupressaceae-</i> <i>Taxaceae</i> group, <i>Deciduous</i> <i>angiosperms</i>	<b>Bukpyeong Fm.</b> Lignite beds	<b>Latest Miocene</b> <b>Pliocene</b> (Younger than Yeonil Group)	Coastal plain or swamp with juxtaposed lake and lagoon
Kim <i>et al.</i> (1996)	<b>Pollens:</b> 143 species of <i>Jglandaceae</i> , <i>Taxdiaceae</i> , <i>Pinaceae</i> , <i>Fagaceae</i>	<b>Bukpyeong Fm.</b>	N/A	Freshwater lake adjacent to alluvial fan (or plain)
Lee <i>et al.</i> (2003)	<b>Fish teeth:</b> <i>Cyprinus sp.</i>	<b>Bukpyeong Fm.</b> Upper sandstone beds	<b>Early Pliocene</b>	Mesotrophic or eutrophic lake

수 센티미터에서 수십 센티미터의 각력으로 구성된 역지 지각력층이 10 m 이상 발달하며 그 위로는 갈탄을 대량 포함하는 미고결 니질/사질/역질 퇴적층이 불규칙하게 교호하는 전형적 북평층의 퇴적압상이 나타난(그림 3).

북평층 대상 과거 퇴적/고생물학 기반 연구들은 북평분지의 퇴적환경을 충적선상지, 충적평원, 소택지 환경이 우세한 육성환경으로 간주하였으나(Kim *et al.*, 1996; Lee *et al.*, 2003), 국부적으로 기수역 또는 석호 환경이 분지 내에 조성되었을 가능성을 열어두고 있다(Yoo, 1970; Lim and Choi, 1982; Choi and Bong, 1986)(표 1). 다수의 화석 기반 연구들은 북평분지의 형성 시점을 포항분지로 대표되는 한반도 동남부 신제3기 퇴적분지 형성에 비해 젊은 것으로 추정하였다(표 1). 특히 Choi and Bang (1987)은 북평층에서 발견되는 화분포자 화석 동정을 통해 북평층이 최소한 포항분지 연일층군보다는 젊다는 코멘트와 함께, 그 퇴적 연대를 마이오세 말 또는 플라이오세 초로 추정하였다.

산출 화석을 통해 추정된 북평층 퇴적 시기는 본 연구 및 과거 Kim *et al.* (2018)과 Lee *et al.* (2023)이 신기지구조층(Neotectonic Sequence)이라 명명하고, Kwon *et al.* (2009)이 Unit 4로 명명한 플라이오세 이후 층단위의 연대에 부합한다. 이는 북평분지가 인접한 해양의 묵호분지와 같은 전기 마이오세 열개동시성 퇴적분지가 아니라 플라이오세 이후 동-서 압축성 습곡 및 역단층 운동이 지배적이었던 신기 지구조 환경 하에서 생성된 동해 대륙 연변부 신기 퇴적분지(neotectonic basin) 중 하나일 가능성을 암시한다(그림 5). 북평분지는 북동-남서 폭이 5 km 이상이며 시추를 통해

확인된 퇴적층의 두께는 분지 중심부에서 150-200 m 또는 그 이상으로 묵호분지 주변 비대칭 향사습곡을 충전하는 해양의 압축동시성 신기 퇴적분지와 규모 면에서 거의 동일하다. 이를 통해 육상 후포분지 역시 인근 연안의 신기 퇴적분지들과 유사한 분지 기하 및 경계 단층 특성을 가졌을 가능성이 유추된다. 동해시 추암해수욕장 인근 북북서 방향 해안선을 따라 분포하는 석회암질 조선누층군 기반암 고지대는 인접 해역 북북서 주향의 역단층과 및 단층전파습곡과 구조적 관련성이 높은 것으로 추정된다.

#### 4.3. 동해안 신생대 분지 분류 체계 관련 제언

지금까지 언급한 분지 충전 퇴적층의 절대 및 상대 연대 그리고 경계 단층의 기하학적 특성을 종합적으로 고려할 때 동해시 육상에 존재하는 북평분지와 삼척-동해시 앞바다 대륙사면에 위치하는 묵호분지는 상이한 시점, 상이한 배경응력 하에서 만들어진 지구조적으로 연관성이 없는 개별 퇴적분지임이 분명해 보인다. 하지만 신기지구조운동에 대한 개념이 정립되지 않았던 과거 전기 마이오세 열개동시성 퇴적분지부터 북평분지와 같이 마이오세 말 또는 플라이오세에 이르러 형성되기 시작한 신기 퇴적분지에 이르기까지 신생대 신제3기 내에 만들어진 퇴적분지들은 그 지구조적 기원을 불문하고 단순히 제3기 분지군으로 통칭되어 왔다. 그 결과 2000년대 중반에 들어 육상 북평분지와 외해 묵호분지를 묶어 북평분지로 통칭하는 사례까지 나타나게 되었으며(Ryang *et al.*, 2007; Kim and Kim, 2013; Kwon, 2018), 이는 우리나라 신생대 분지 연구자들에게

적지 않은 혼란을 야기한다.

플라이오세 이후 동해 서편 경계에서 발생한 압축성 구조 운동과 그에 수반된 퇴적분지 생성은 이미 Yoon and Chough (1995)의 동해 후퇴분지 층서 연구, Yoon *et al.* (2003)의 동해 울릉분지 남서부 구조 반전 연구, Kwon *et al.* (2009)의 동해 한국대지 층서 연구와 같은 선행 연구에서 다루어진 바 있으나, 한반도 육상 지질과 해당 신기지구조운동의 상관관계에 대해서는 심도있게 논의된 바 없다. 본 연구에서 살펴본 동해안 북평 및 묵호분지 지역 층서 체계 및 구조 발달 특성은 한반도 육상에도 압축성 신기지구조 환경 하에서 생성된 퇴적분지가 존재할 수 있음을 강하게 암시한다. 하지만 특정 방법론에 경도되어 육상과 해양을 분리해서 다루는 지금까지의 연구풍토 하에서는 육상과 해양을 가로질러 발달하는 한반도 신기지구조운동의 특성을 파악한다는 것은 쉽지 않은 일이다.

우리나라 신기지구조운동의 실체를 규명하여 한국 지질사의 마지막 장을 완성하기 위해서는 육상과 해양에 걸쳐 분포하는 지질요소들을 병렬적으로 풀어낼 수 있는 지질/지구물리 복합 방법론적 접근이 요구된다. 한편, 화석 동정에 기초한 지금까지의 신기 퇴적분지 절대연대 측정법은 마이오세 이후 전지구적 생물종의 변화가 미미하였다는 점을 감안할 때 그 정확도가 높다고 할 수 없다. 신기지구조 환경 하에서 생성된 분지의 연대, 분지 생성을 제어한 단층의 변위율, 지각의 변형율 등에 대한 보다 신뢰할 수 있는 수치적 결과를 얻기 위해서는 다양한 침단의 연대측정 방법론들이 신기 퇴적분지 연구에 동원될 필요가 있다.

## 감사의 글

이 과제는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

## REFERENCES

- Choi, D.K. and Bong, P.Y., 1986, Neogene palynomorphs from lignite beds of Bugpyeong and Yeonghae areas, Korea. *Journal of the Paleontological Society of Korea*, 2, 1-17.
- 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* (2nd edition). Elsevier, 313 p.
- Chough, S.K. and Lee, K.E., 1992, Multi-stage volcanism in the Ulleung Back-arc Basin, East Sea (Sea of Japan). *Island Arc*, 1, 32-39.
- Fabbri, O., Charvet, J. and Fournier, M., 1996, Alternate Senses of Displacement along the Tsushima Fault System during the Neogene Based on Fracture Analyses Near the Western Margin of the Japan Sea. *Tectonophysics*, 257, 275-295.
- Ingle, J.C.Jr, 1992, Subsidence of the Japan Sea: Stratigraphic Evidence from ODP Sites and Onshore Sections. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 127/128, 1197-1218.
- KIGAM, 2010, Developing geological design technique for CO<sub>2</sub> capture and storage, Project Report.
- Kim, B.K., 1970, A Study on the Neogene Tertiary Deposits in Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 6, 77-96 (in Korean with English abstract).
- Kim, C.S., 1982, Submarine Geology of Continental Margin of the East Sea, Korea. *Journal of the Korean Institute of Mining Geology*, 15, 65-88 (in Korean with English abstract).
- Kim, G.B. and Yoon, S.H., 2017, An Insight into Asymmetric Back-Arc Extension: Tecto-Magmatic Evidences from the Ulleung Basin, the East Sea (Sea of Japan). *Tectonophysics*, 717, 182-192.
- 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, 43-56.
- 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, 603-606, <https://doi.org/10.1130/G40305.1>.
- 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, H.G., Song, C.W., Kim, J.S., Son, M. and Kim, I.S., 2008, Tertiary Geological Structures and Deformation History of the Southern Tsushima Island, Japan. *Journal of the Geological Society of Korea*, 44, 175-198 (in Korean with English abstract).
- Kim, I.S., 1992, Origin and Tectonic Evolution of the East Sea (Sea of Japan) and the Yangsan Fault System: A New Synthetic Interpretation. *Journal of the Geological Society of Korea*, 28, 84-109 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.H. and Kim, J.M., 2013, Prediction and Analysis of Behavior of Carbon Dioxide Injected into Target Geologic Formations in the Bukpyeong Basin, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 49, 389-406 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.Y., Ko, Y.K., Jeong, C. and Kim, H.G., 1996, Paleocology of Neogene Palynoflora from the Bugpyeong Formation, Donghae Area, Korea. *Journal of the Paleontological Society of Korea*, 12, 168-180 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.W., 1973, A Study on the Terraces along the Southeastern Coast (Bang-Eojin-Pohang) of the Korean Peninsula. *Journal of the Geological Society of Korea*, 9, 89-121.
- Kwon, Y.K., 2018, Demonstration-scale Offshore CO<sub>2</sub> Storage Project in the Pohang Basin, Korea. *The Journal of Engineering Geology*, 28, 133-160 (in Korean with English abstract).
- 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.

- Lee, J.H., Lee, J.H., Yoon, S.H., Lee, H.S., Song, H.Y. and Kim, G.B., 2022, Two distinct back-arc closure phases of the East Sea: Stratigraphic evidence from the SW Ulleung Basin margin. *Frontiers in Earth Science*, 10, 839712.
- Lee, J.H., Yoon, S.H., Kim, Y.M., So, B.D. and Kim, G.B., 2023, Failing Subduction Initiation in an Opposing Pair of Incipient-Diffuse Subduction Margins: A Case from the East Sea (Japan Sea). *Tectonics*, 42, e2023TC007773.
- Lee, Y.G., 1977, On the fossil diatoms in the Bukpyeong Formation, Bukpyeong area, Gangweon-do, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 13, 23-40.
- Lee, Y.N., Lee, Y.S. and Yoon, S., 2003, Cyprinid pharyngeal teeth from the Bukpyeong Formation, Donghae City, Gangweon Province. *Journal of the Geological Society of Korea*, 39, 199-210 (in Korean with English abstract).
- 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.
- Lim, S.B. and Choi, Y.J., 1982, Research of Tertiary Lignite Beds in the Bukpyeong Basin. *KIER Special Publication*, 35, 38 (in Korean with English abstract).
- Moon, S., Kim, H.J., Kim, C., Lee, S.H., Lee, S.H. and Kim, G.B., 2023, Fault activity on the inner continental shelf of the SE Korean Peninsula associated with back-arc opening and closing in the NW Pacific subduction zone. *Marine Geophysical Research*, 44, 1, <https://doi.org/10.1007/s11001-022-09510-z>.
- No, T., Sato, T., Kodaira, S., Ishiyama, T., Sato, H., Takahashi, N. and Kaneda, Y., 2014, The source fault of the 1983 Nihonkai-Chubu earthquake revealed by seismic imaging. *Earth and Planetary Science Letters*, 400, 14-25.
- Ryang, W.H., Kwon, Y.K., Jin, J.H., Kim, H.T. and Lee, C.W., 2007, Geoacoustic Velocity of Basement and Tertiary Successions of the Okgye and Bukpyeong Coast, East Sea. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 28, 367-373 (in Korean with English abstract).
- Sohn, Y.K., Rhee, C.W. and Shon, H., 2001, Revised Stratigraphy and Reinterpretation of the Miocene Pohang Basinfill, SE Korea: Sequence Development in Response to Tectonism and Eustasy in a Back-Arc Basin Margin. *Sedimentary Geology*, 143, 265-285.
- Son, M., Song, C.W., Kim, M.C., Cheon, Y., Cho, H. and Sohn, Y.K., 2015, Miocene Tectonic Evolution of the Basins and Fault Systems, SE Korea: Dextral, Simple Shear during the East Sea (Sea of Japan) Opening. *Journal of Geological Society*, 172, 664-680, <https://doi.org/10.1144/jgs2014-079>.
- Son, M., Song, C.W., Kim, M.C., Cheon, Y., Jung, S., Cho, H., Kim, H.G., Kim, J.S. and Sohn, Y.K., 2013, Miocene Crustal Deformation, Basin Development, and Tectonic Implication in the Southeastern Korean Peninsula. *Journal of the Geological Society of Korea*, 49, 93-118 (in Korean with English abstract).
- Taira, A., 2001, Tectonic evolution of the Japanese island arc system. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 29, 109-134.
- Tateiwa, I., 1924, 1:50,000 Geological atlas of Chosen, No. 2, Ennichi, Kuryuho and Choyo sheets. *Geological Survey of Chosen* (in Japanese).
- Yoo, E.K., 1970, Foraminifera from the Bukpyeong Basin. *Journal of Geological Society of Korea*, 6, 72-73.
- Yoon, S., 1986, Tectonic history of the Tertiary Pohang and Yangnam basins, Korea. In Nakagawa, H., Kotaka, T. and Takayanagi, Y. (eds.), *Essays in Geology Professor Nobu Kitamura Commemorative Volume*, 637-644.
- Yoon, S.H. and Chough, S.K., 1993, Evolution of Neogene Sedimentary Basins in the Eastern Continental Margin of Korea. *Korean Journal of Petroleum Geology*, 1, 15-27 (in Korean with English abstract).
- 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, 83-97.
- 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.