

## 경상분지 남부의 밀양소분지 호성퇴적층: 산상과 층서적 변화 및 고환경적 의미

백인성<sup>1,2,\*</sup> · 김현주<sup>1,2</sup> · 박정규<sup>1</sup> · 김영석<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>부경대학교 지구환경시스템과학부

<sup>2</sup>부경대학교 활성단층 및 지진재해저감연구소

### Lacustrine deposits of the Miryang Sub-basin in the southern Gyeongsang Basin, Korea: Occurrences, stratigraphic changes, and paleoenvironmental implications

In Sung Paik<sup>1,2,\*</sup> · Hyun Joo Kim<sup>1,2</sup> · Jung Gyu Park<sup>1</sup> · Young-Seog Kim<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Division of Earth and Environmental System Sciences, Pukyong National University,  
Busan 48513, Republic of Korea

<sup>2</sup>Active Fault & Earthquake Mitigation Institute, Pukyong National University,  
Busan 48513, Republic of Korea

#### 요 약

경상분지 남부의 밀양소분지에 발달된 호성퇴적층들을 대상으로, 퇴적상, 화석상, 고토양, 층서 등에 대한 통합적인 분석이 이루어졌다. 밀양소분지에서의 분지 규모의 호수는 일차적으로 경상분지 발달 초기의 변환인장 운동에 의한 침강으로부터 형성된 것으로 여겨지며, 이후 구조적 요인과 함께 기후와 하천 발달 등 여러 요인에 의해 다양한 유형의 호수가 밀양소분지에 발달하였다 - 하성기원의 범람원 호수(낙동층, 하산동층, 함안층), 우각호(하산동층), 담수호(진주층), 염호(함안층, 진동층, 유천층군), 다년호(하산동층, 진주층), 간헐호(함안층, 진동층), 균형층진 호수(하산동층, 진주층), 미층진 호수(진동층, 유천층군) 등. 밀양소분지 호수 유형의 층서적 변화는 경상분지 발달과정에서의 기후변화의 특성을 반영한다: 하부층으로부터 습윤(낙동층) → 건조(하산동층) → 습윤에서 건조(진주층) → 건조(함안층과 진동층 및 유천층군 지층). 이와 같은 밀양소분지 호수 유형의 층서에 따른 기후적 변화 특성은 경상분지 발달과정에서의 산악효과의 증가에 따른 것으로 해석된다. 함안층과 진동층에 발달한 증발암광물 및 건조기후와 관련된 여러 퇴적구조는 퇴적 당시 건조한 기후가 우세하였음을 지시하며, 이 시기에 발달한 경상분지 내 호수의 중앙에는 증발암층이 일정 규모로 퇴적되었을 것으로 추정된다. 한편, 공룡을 비롯한 척추동물 발자국화석들이 진주층 상부와 함안층 및 진동층의 호성퇴적층에 집중되어 산출하는 특성은 건조한 시기에 척추동물들의 호수 이용이 보다 활발히 이루어지고, 발자국의 보존 확률 또한 상대적으로 높은 데에 기인한 것으로 해석된다. 밀양소분지 내 호수의 전반적인 퇴적기록과 고환경 및 층서적 변화 특성은 백악기 동아시아 지역에서의 기후변화 및 한반도 동남부에서의 조구조운동 특성과 부합하며, 함안층과 진동층에서의 염호 발달은 경상분지 중심부가 해수면 아래에 놓였을 가능성을 시사한다.

**주요어:** 경상분지, 밀양소분지, 호성퇴적층, 호수유형, 층서적 변화

**ABSTRACT:** Lacustrine deposits of the Miryang Sub-basin in the southern Gyeongsang Basin, Korea, were synthetically analyzed based on the sedimentary facies, fossil occurrences, paleosols, and stratigraphy. It is deemed that lake basin in the Miryang Sub-basin was initially formed by the depression due to transtensional movements in the early stage of the Gyeongsang Basin development. Subsequently, diverse lake types were formed in the Miryang Sub-basin by the temporal changes of climatic condition and fluvial processes, together with the tectonic movements: floodplain lakes (Nakdong, Hasandong, and Haman formations), ox-bow lakes (Hasandong Formation),

\*Corresponding author: +82-51-629-6620, E-mail: paikis@pknu.ac.kr

fresh water lakes (Jinju Formation), saline lakes (Haman and Jindong formations, and Yucheon Group), perennial lakes (Hasandong and Jinju formations), ephemeral lakes (Haman and Jindong formations), balance-filled lake (Hasandong and Jinju formations), and underfilled lake (Jindong Formation and Yucheon Group). The stratigraphic changes of lake types in the Miryang Sub-basin reflect the tempo-spatial changes of paleoclimatic condition during the sedimentation: in stratigraphically ascending order, humid (Nakdong Formation) → arid (Hasandong Formation) → humid to arid (Jinju Formation) → arid (Haman and Jindong formations, and Yucheon Group). It is interpreted that these climatic changes resulted from a progressive increase in orographic effect. Common occurrence of the evaporite minerals in the Haman and Jindong formations suggest the development of saline lakes under arid climatic conditions, and it is expected that significant amounts of evaporites were accumulated in the depocenter of the lake. This suggests that the depocenter of the Gyeongsang Basin could have been below sea level. The frequent occurrences of vertebrate tracks in the lacustrine deposits of the upper part of the Jinju Formation and Haman and Jindong formations might have been attributed to that lake exploitation by vertebrates became more active and preservation potential of the tracks increased during drying periods. Overall stratigraphic changes of the Miryang Sub-basin lakes in the sedimentary records and paleoenvironments are correspondent with the paleoclimate changes and the tectonic movements in eastern Asia region during the Cretaceous.

**Key words:** Gyeongsang Basin, Miryang Sub-basin, lacustrine deposits, lake types, stratigraphic changes

## 1. 서 언

경상남북도 일원에 분포하는 중생대 백악기의 경상누층군에 대해서는 지금까지 층서와 고생물 및 퇴적암석학적 측면에서 여러 연구자에 의한 조사가 수행되었다. 그 결과 경상누층군 전반에 걸친 층서확립과(Chang, 1975) 퇴적환경에 대한 해석이 이루어졌으며(Um *et al.*, 1983; Choi, 1986a), 근래 들어서는 보다 구체적인 고환경에 대한 이해가 점증되고 있다(Paik and Lee, 1998; Jo and Chough, 2001; Paik *et al.*, 2001a, 2001b, 2004, 2007, 2019, 2021; Jo, 2003; Lee and Kim, 2005; Paik and Kim, 2006; Nehza *et al.*, 2009; Chough and Sohn, 2010; Hong *et al.*, 2012, 2020; Kim *et al.*, 2022; etc.).

대체로 고환경에 대한 해석은 퇴적층에 남겨진 여러 다양한 지질기록을 바탕으로 고지리 및 고지형과 고기후, 그리고 고생태적인 측면에서 이루어진다. 경상누층군이 퇴적된 경상분지의 전반적인 고지형은 산지로 둘러싸인 충적분지였던 것으로 알려져 있으며, 분지 내에는 가장자리에 발달된 충적선상지를 비롯하여 하성평야와 호수 등의 환경이 복합된 것으로 해석되었다(Choi, H.I., 1985; Chough and Sohn, 2010). 고기후의 경우 경상누층군에 나타나는 각종 식물 및 동물화석과 고토양, 증발암의 흔적 및 탄산염퇴적물의 특성 등을 토대로 경상누층군 퇴적 당시의 기후조건은 전반적으로 온난한 가운데에, 건조와 습윤 기후의 반복이 일어난 것으로 알려져 있다(Choi,

1987, 1989; Paik and Lee, 1998; Paik *et al.*, 2001a, 2007; Paik and Kim, 2003, 2006; Hong *et al.*, 2012, 2020). 이와 함께 고생태환경의 경우 산출화석과 화석화작용에 대한 연구를 바탕으로, 경상분지 육성생태시스템에 대한 부분적인 해석이 이루어지고 있다(Paik *et al.*, 2019).

이와 같은 경상누층군에 대한 여러 연구자들의 노력에 의하여 중생대 백악기 당시 한반도의 고환경에 대한 전반적인 윤곽이 어느 정도는 밝혀져 있으나, 경상분지의 구체적인 고환경적 특성과 이의 변화과정을 심층적으로 이해하고, 이를 토대로 한 백악기 한반도 고환경의 입체적인 복원과 보다 차별화된 자연사적 가치의 도출을 위해서는 새로이 조사되고 연구되어야 할 지층과 지질기록들에 대한 연구자들의 끊임없는 도전이 필요하며, 이와 함께 다양한 연구결과들을 통합적으로 분석하는 것이 필요하다.

즉, 특정 층군 또는 특정 지역의 퇴적층이나 지층에 대한 연구결과만으로는 경상분지의 특성과 발달과정을 거시적인 측면에서 이해하는 데에는 한계가 있을 수 있다. 예를 들어, 신동층군 호성퇴적층인 진주층(전기백악기)의 발달특성과 하양층군의 호성퇴적층인 진동층(후기백악기)의 발달특성(퇴적상, 화석상, 고토양상 등)의 시공간적 차이와 그 차이에 대한 원인 분석이 이루어졌을 때, 백악기 당시 한반도의 고환경에 대한 이해가 보다 입체적으로 이루어질 수 있다. 아울러 이와 같은 대규모 호성퇴적층들에 대한 비교분석 및 통합적 해석뿐만이 아니라, 대규

모 호성퇴적층과 소규모 호성퇴적층 간의 통합적인 비교분석 또한 뒷받침이 되어야 한다.

지질시대를 통해 발달된 호성퇴적층은 고지리 및 고기후 등의 고환경의 변화과정을 이해하는 데에 매우 유용한 기록체인 동시에, 석유 및 광물자원의 탐사대상으로서도 그 효용가치가 부각됨에 따라, 20세기 후반에 들어 호성퇴적층에 대한 관심과 이에 따른 퇴적지질학적 연구는 날로 증가하고 있는 실정으로(Anadon *et al.*, 1991; Gierlowski-Kordesch and Kelts, 1994, 2000; Renaut and Last, 1994; Bohacs *et al.*, 2000; White and Riggs, 2001; Tiercelin, 2002; Cohen, 2003; De Batist and Chapron, 2008; Giralt *et al.*, 2010), 백악기 경상분지의 호성퇴적층 또한 지구환경의 특성과 변화 과정에 대한 이해 및 자원 탐사 등에 유용하게 활용될 수 있는 다양한 지질학적 정보들이 풍부히 잠재되어 있다.

이러한 맥락에서 이 논문에서는 경상분지의 전반적인 진화과정을 대표하는 경상분지 남부의 밀양소분지에 발달된 다양한 특성의 호성퇴적층들을 대상으로, 퇴적상, 화석상, 고토양상, 층서 등에 대한 통합적인 분석을 다루었다. 이 연구의 결과는 경상분지 호수의 고환경 특성에 대한 보다 입체적인 이해의 발전은 물론, 경상분지 진화과정 동안의 고환경 변화를 포괄적으로 이해하는 데에도 바탕 자료로 활용될 수 있을 것이다.

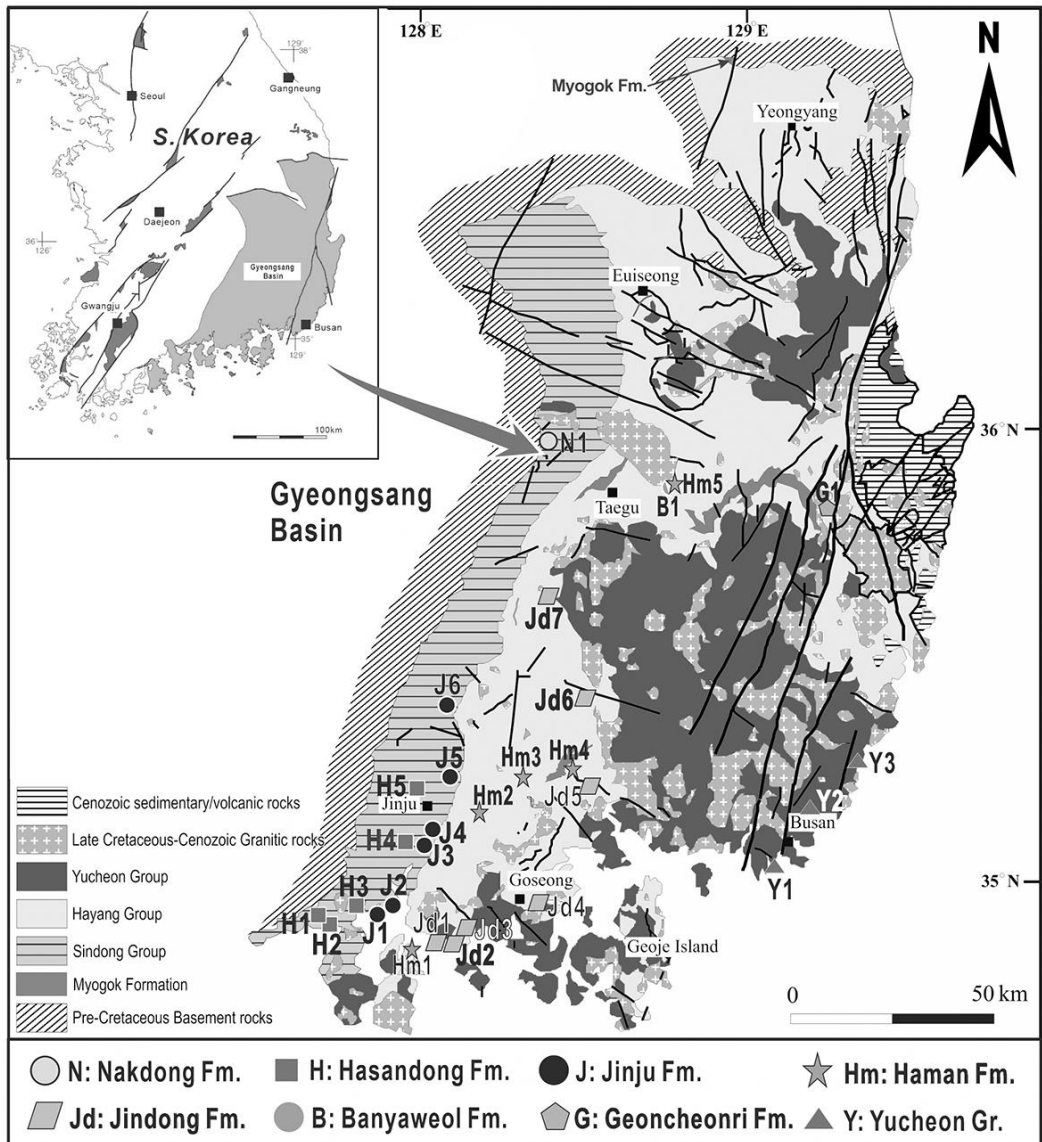
## 2. 지질개관

한반도 동남부 일대에 광역적으로 발달된 백악기 경상분지는 한반도에 분포하는 지질시대의 육성 퇴적분지 중 공간적인 분포와 두께의 규모가 가장 큰 퇴적분지이다(Kee *et al.*, 2019). 경상분지를 형성시킨 조구조운동의 특성과 변화과정에 대해서는 현재까지 명확한 실체가 규명되어 있지는 않으나(Choi, 1986a; Lee, 1999; Okada, 1999; Chough and Sohn, 2010), 최근에 이루어진 광역적인 구조분석에 의해, 이자나기 판의 유라시판에 대한 북북서 방향으로의 섭입으로부터 기인된 배호지역에서의 변환인장(transensional) 운동으로부터 경상분지의 발달이 시작된 것으로 제시되었다(Cheon *et al.*, 2020). 이 운동에 의해 경상분지의 서측 경계부에 대체로 북북서-남남동 방향의 낙동곡분이 형성되었으며, 이후 진행된 섭입판의 roll-

back에 의해 분지의 공간이 동측으로 점차 확장되면서 동측부에 있던 소규모 분지들과의 병합이 일어나, 현재의 경상분지 분포 공간이 형성된 것으로 해석하였다(Choi, 1986b; Lee, 1999; Okada, 1999; Chough and Sohn, 2010; Cheon *et al.*, 2020). 한편, 신동층군 퇴적층에 함유된 쇄설 기원의 크롬철정석에 대한 성분 분석을 바탕으로 경상분지 발달 초기에는 분지 서측에 화산호가 발달했음이 최근에 이루어진 Lee and Lim (2022)의 연구에서 제시되었다. 이와 함께 경상분지 서측 기원지에서의 초염기성암의 존재가 Lim *et al.* (2019)과 Paik *et al.* (2020b)에 의해서도 제시되었다.

경상분지 지층에 대한 층서는 Koto (1903)에 의해 처음으로 경상층으로 명명된 이래 Tateiwa (1929)에 의해 층서구분이 부분적으로 이루어졌다. Tateiwa의 층서 구분은 시층서와 암층서가 혼용이 된 것으로, 경상분지 지층(경상누층군)에 대한 체계적인 암층서구분은 Chang (1975, 1977)과 Chang *et al.* (2003)에 의해 확립되었다. 한편, Um *et al.* (1983)과 Choi, H.I. (1985)는 경상누층군의 지층별 퇴적특성과 퇴적환경을 포괄적으로 정리하였으며, 이 자료들이 현재까지 이루어지고 있는 경상누층군 대상 여러 후속 연구의 층서적 바탕이 되었다. 그러나 경상누층군에 대해 근래에 이루어진 여러 퇴적지질학적 연구들은 경상누층군 각 지층의 일반화된 층서 특성의 보완과 이에 대한 새로운 해석이 필요함을 시사한다(Paik *et al.*, 2018b, 2020b).

한편, 경상분지 지층들의 공간적인 암상 변화와 지구 구조 특성을 바탕으로, Chang (1975, 1977)은 남북 방향으로 길게 발달하는 분지 서측의 낙동곡분, 분지 최북단의 일월산 층상단층과 청송령 사이에 발달하는 영양지괴, 안동 층상단층 및 청송령과 팔공산 융기대 사이에 발달하는 의성(도평)지괴, 그리고 팔공산 이남지역에 발달하는 밀양(유천)지괴로 세분하였다. Won *et al.* (1978)은 Chang (1975)이 제시한 각 지괴를 영양소분지, 의성소분지 및 유천소분지로 구분하였다. 유천소분지에 대해서는 밀양소분지 또는 진주소분지 등의 이름이 함께 사용된다. 이 연구의 대상인 밀양소분지의 지층들은 경상분지 발달 기간의 전반에 걸쳐 형성되었으며, 층군 내 응회질 퇴적물의 함량 및 화산암의 분포에 따라 하부로 부터 신동층군, 하양층군 및 유천층군으로 구분된다



N1: Geumho-ri, Chikgok  
 H1: Daesong-ri, Hadong  
 H2: Hanchi Maeul, Hadong  
 H3: Yangpo-ri, Hadong  
 H4: Yusu-ri, Jinju  
 H5: Yugok-dong, Jinju  
 J1: Bito-ri, Sacheon  
 J2: Jahye-ri, Sacheon  
 J3: Jeongchon, Jinju  
 J4: Hotan-dong, Jinju  
 J5: Jiphyeon, Jinju  
 J6: Ssangbaek, Hapcheon

Hm1: Gain-ri, Namhae  
 Hm2: Gajin-ri, Jinju  
 Hm3: Sopo-ri, Haman  
 Hm4: Yongsan-ri, Haman  
 Hm5: Wachon, Gyeongsan  
 Jd1: Deokho-ri, Goseong  
 Jd2: Deokmyeong-ri, Goseong  
 Jd3: Yongtae-ri, Goseong  
 Jd4: Duho-ri, Goseong  
 Jd5: Hogye-ri, Changwon  
 Jd6: Docheon-ri, Changnyeong  
 Jd7: Dalseong, Daegu

B1: Wachon, Gyeongsan  
 G1: Geoncheon-ri, Gyeongju  
 Y1: Dadaepo, Busan  
 Y2: Mt. Hwangryeongsan, Busan  
 Y3: Icheon-ri, Busan

**Fig. 1.** Geological map of the Gyeongsang Basin (modified after Kee *et al.*, 2019). Localities of the studied lacustrine deposits are marked on the map.

(Chang, 1975).

경상누층군 지층들의 지질시대는 산출화석의 종류에 따라 서로 차이가 나며, 절대연령과 고지자기 자료에 의해서도 서로 다른 결과들이 제시되어 있다 (Kang and Paik, 2013). 근래들어 발전된 절대연령 자료들이 경상누층군 각 지층들로부터 보다 세밀하게 제시됨에 따라, 경상누층군의 전반적인 지질시대는 Barremian에서 Campanian에 이르는 것으로 여겨진다(Kang and Paik, 2013; Lee, T.-H. *et al.*, 2018a, 2018b; Cheon *et al.*, 2020). 한편, 경상누층군의 각 지층 간 경계는 암층서 경계이므로, 이들 암층서 경계부에 대해서 절대연령을 토대로 한 시층서를 적용하는 것은 타당하지 않다. 따라서 절대연령 자료를 이용하여 경상누층군의 지질시대를 특정할 때에는 암층서와 시층서와의 불일치성을 반드시 고려해야 할 것이다.

### 3. 밀양소분지의 호성퇴적층 산상

밀양소분지의 경상누층군 지층에 발달된 호성퇴적층은 신동층군 상부의 진주층과 하양층군 상부의 진동층으로 대표된다. 이들 두 지층은 두께가 1,000 m 내지 2,000 m 내외에 달하며, 호수환경이 수백만 년 동안 유지되면서 형성된 지층이다(Kang and Paik, 2013). 따라서 이 두 지층은 경상분지 진화과정의 고환경 변화 특성을 이해하는 데에 매우 상징적인 기록체이다. 이 두 지층 외에 경상분지의 고환경을 이해하는 데에 유용한 정보가 기록된 호성퇴적층은 경상누층군 내의 여러 지층 내에 수 m 내지 수십 m의 두께를 가지며 시공간적인 측면에서 소규모로 존재한다.

이 연구에서 경상누층군에 발달된 모든 호성퇴적층을 대상으로 조사와 분석이 수행될 수는 없었으나, 대규모 호성퇴적층인 진주층과 진동층을 비롯하여, 신동층군과 하양층군, 유천층군 등 밀양소분지 내의 경상누층군 지층 전반에 발달된 여러 소규모 호성퇴적층들이 이 연구의 분석 대상이 되었다(그림 1).

#### 3.1 신동층군

경상분지 발달 초기의 낙동곡분에 퇴적된 경상누층군 최하부 층군인 신동층군의 경우, 퇴적층의 전반적인 형성은 최하부로부터 층적선상지 퇴적층으로 시작하여, 하성퇴적층을 거쳐 호성퇴적층으로 변화

된 퇴적특성을 보인다(Um *et al.*, 1983; Choi, 1986b). 이 발달과정에 낙동곡분 내에는 다양한 특성의 호성퇴적층이 형성되었으며, 이들 호성퇴적층의 산상은 다음과 같다.

##### 3.1.1 낙동층

경상누층군 최하부 지층인 낙동층은 전반적으로 산화 환경에서의 퇴적산물인 붉은색 퇴적층이 부재하는 지층으로, 환원성 환경의 호성퇴적층이 흔히 나타날 가능성이 내재한다. 그러나 지표상에서 나타나는 낙동층의 전반적인 구성은 층적선상지퇴적층(하부)과 저굴곡의 하성퇴적층으로 이루어져 있다(상부)(Um *et al.*, 1983). 따라서 호성퇴적층의 발달은 매우 제한적이며, 작은 웅덩이나 호소 성격의 퇴적층이 렌즈상을 이루며 하성 퇴적층 내에 부분적으로 나타난다. 경북 칠곡군 왜관읍 금무산 부근의 낙동층 중부 층군에 발달된 하성퇴적층의 단면에서 이와 같은 낙동층 내 호성퇴적층의 발달 특성이 부분적으로 나타난다.

렌즈상의 발달을 보이는 역질조립사암과 중립 내지 세립사암 등으로 이루어진 이 지역의 하성 기원 퇴적층 사이에는 수십 cm에서 2 m 내외의 두께를 가지는 암회색의 세일질이암이 간헐적으로 나타난다. 이들 퇴적층에서는 오목한 하위 경계면과 평탄한 상위 경계면의 특성이 나타나며(그림 2a), 대체로 석회질을 띠고, 부분적으로 탄질을 띤다. 이와 같은 렌즈상의 탄질세립질퇴적층 발달은 낙동층 하부 퇴적층에서의 드물지 않은 산상이다(Um *et al.*, 1983). 한편 이 퇴적층의 내부에서는 불규칙상의 건열 발달에 따른 각력화작용이 관찰되며, 미끌림면(그림 2b)과 위배사구조(그림 2c) 등의 버티줄고도양의 특성이 나타난다. 이와 함께 이들 퇴적층에서는 양치류 잎화석과 이매패류 화석이 부분적으로 산출된다. 이러한 퇴적특성은 이들 퇴적층이 유기된 소규모 하도나 범람원 위에 형성된 소규모 물웅덩이 기원의 퇴적산물임을 시사한다. 한편 이들 퇴적층에서 증발암이나 스트로마톨라이트의 발달은 나타나지 않는다.

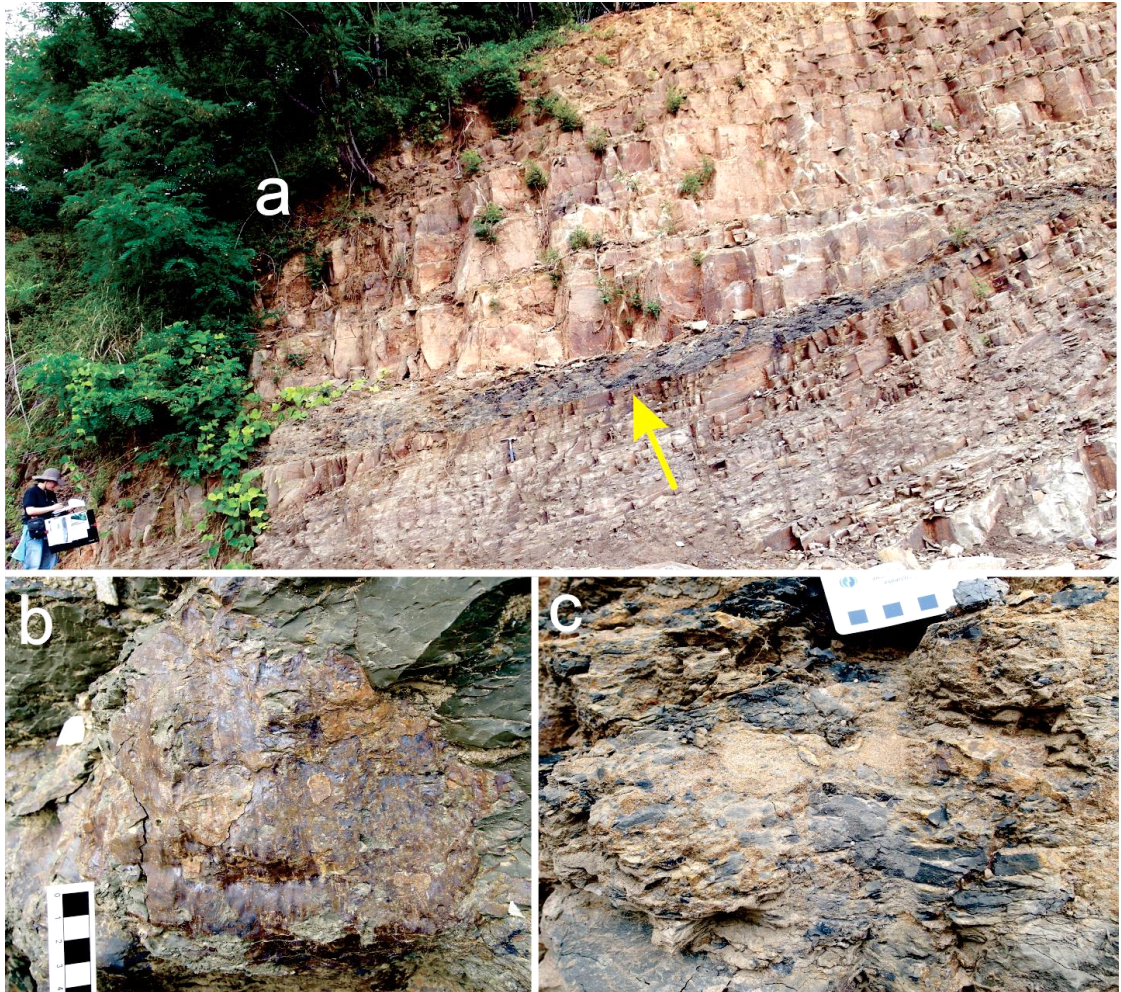
##### 3.1.2 하산동층

하산동층은 경상누층군 지층 중 붉은색 퇴적층의 협재가 빈번한 대표적인 지층이다. 전반적으로 하성퇴적층의 발달이 지배적인 지층으로, 고굴곡 사행하

천의 발달(Paik and Lee, 1994, 1998)과 석회질 및 버타졸고토양의 발달(Paik and Kim, 1995; Paik, 1998)이 흔히 나타난다. 그럼에도 불구하고, 하산동층 중부에는 두께와 분포에 있어서 상당한 규모를 가지는 호성퇴적층이 발달되어 있으며(Paik *et al.*, 2021), 하산동층의 하부와 상부에는 소규모의 호성퇴적층이 나타난다.

**하동 대송리:** 이 지역은 하산동층의 하부 퇴적층이 분포하는 지역으로, 전반적으로 하산동층의 일반적인 퇴적 특성인 하도퇴적층과 범람원퇴적층의 반복으로 이루어져 있다(Paik *et al.*, 2020b). 이 퇴적층 내에 암회색 내지 회색의 석회질 세립질퇴적층

(실트스톤과 이암, 셰일 등)이 수십 cm 내지 2 m 내외의 두께를 가지며 범람원퇴적층 내에 간헐적으로 나타난다(그림 3a, 3b). 이와 함께 이 퇴적층에는 개방수류 기원의 퇴적층(암회색 내지 회색의 세립사암 내지 실트스톤과 이암의 교호엽층 내지 교호층)이 부분적으로 나타난다, 이 퇴적층에서는 북쪽류와 이매패류 패각화석(그림 3c, 3d), 식물편 화석 등이 산출되며, 무척추동물의 생흔화석과 척추동물의 발자국화석이 드물게 관찰된다. 패각화석의 경우 파편상과 완형 모두 나타난다. 한편, 이질퇴적층에서는 고토양기원의 미끌럼면이 부분적으로 관찰된다(그림 3c). 이와 같은 퇴적특성은 이들 퇴적층이 하도의



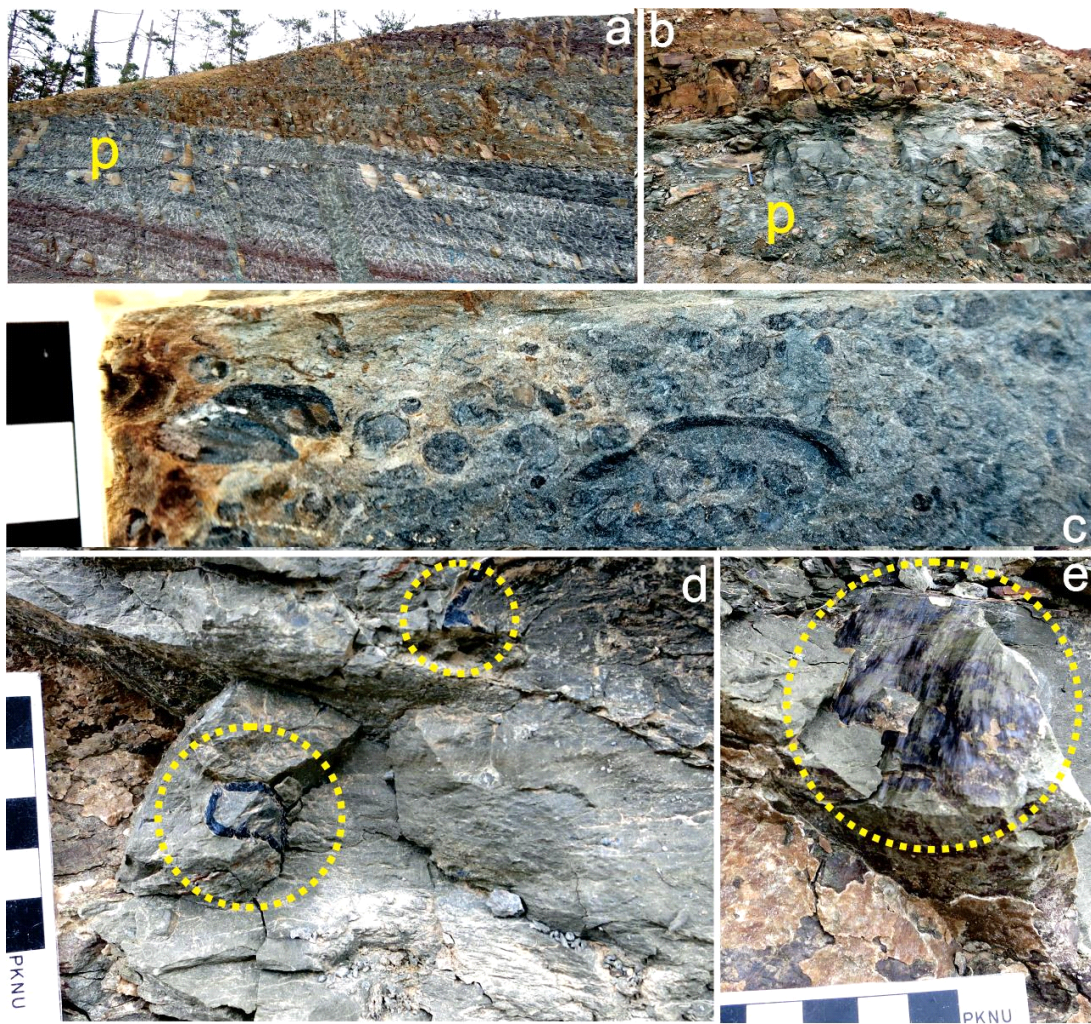
**Fig. 2.** Occurrence of the pond deposits in the Nakdong Formation. a. Pond deposit consisting of dark gray shaly mudstone (arrow) intervened between fluvial sandy deposits, showing concave lower contact and planar upper contact. b, c. Pedogenic slickensides (b) and pseudoanticlines (c) observed in the shaly deposits.

범람 이후에 범람원 내의 저지대에 국부적으로 형성된 소규모 호소 기원의 퇴적산물임을 지시하며, 퇴적 이후에 토양화 과정을 거친 것으로 해석된다. 전술한 낙동층 호성퇴적층 산상과 마찬가지로 이들 퇴적층에서 증발암이나 스트로마톨라이트의 발달은 나타나지 않는다.

**하동 양포리와 대송리:** 이 지역에 분포된 하산동층 중부의 퇴적층에는 하성 기원의 붉은색 퇴적층의 협재가 부재한 가운데, 복족류패각화석층이 반복적으로 발달된 회색질 퇴적층이 수십 m 두께로 나

타난다(Paik *et al.*, 2011, 2021). 이 퇴적층은 전반적으로 파상층리의 중립 사암, 괴상 내지 점이층리가 발달한 세립 사암, 판상 내지 사엽층리가 발달된 세립 사암, 석회질의 사질 내지 실트질 이암, 엽층 내지 매우 얇은 층으로 발달한 세립 사암 내지 실트스톤과 이암의 호층, 세일질이암 등으로 구성되며, 양포리 지역에서는 스트로마톨라이트가 산출된다(Paik *et al.*, 2011, 2021).

이 퇴적층의 전반적인 퇴적 특성, 즉 일반적으로 환원환경에서의 퇴적을 지시하는 회색질의 암색, 균



**Fig. 3.** Occurrence of the pond deposits in the lower part of the Hasandong Formation. a,b. Pond deposits (P in the photos) consisting of grayish shaly and calcareous mudstone intervened between fluvial deposits. c. Sectional view of the gastropod shell-bearing calcareous mudstone. d. Articulated (lower dotted circle) and fragmentary (upper dotted circle) fossils of bivalve shells observed in the calcareous mudstone. e. Pedogenic slickensides (dotted circle) observed in the mudstone.

일 층리, 하도퇴적층의 부재, 파도연흔, 스트로마톨라이트, 복족류 패각화석층의 발달 등을 바탕으로 이 퇴적층은 호수 기원으로 해석되었다(Paik *et al.*, 2011, 2021). 따라서 하산동층의 퇴적과정에 강수량이 증가하면서 충적분지 중심에 발달된 호수의 확장이 일정 기간 일어나고, 이후 강수량이 감소하여 다시 호수가 축소되는 과정이 발생한 것으로 해석된다. 한편, 이 호성퇴적층은 경상누층군의 퇴적층 중 스트로마톨라이트가 처음으로 출현한 퇴적층으로, 하산동층의 퇴적 시기에 알칼리성 호수를 발달시키는 건조 기후가 경상분지 내에서 본격적으로 영향을 미치기 시작했음을 지시하는 퇴적층이다(Paik *et al.*, 2021).

**진주 유수리:** 이 지역의 퇴적층은 하산동층 상부에 해당하는 퇴적층으로, 사행하천의 퇴적특성이 전형적으로 나타나는 퇴적층이다(Paik and Lee, 1994, 1998; Paik and Kim, 1995). 이 퇴적층에는 사행하는 하도의 유기로부터 형성된 우각호 기원의 호성퇴적층이 수 m의 두께로 나타난다(Paik and Lee, 1994). 이 호성퇴적층에서는 제자리 기원의 나무그루터기 화석, 화석숯 기원의 탄화목편, 이매패류 화석, 공룡 이빨과 발자국 화석, 거북배갑편 화석, 무척추동물의 생흔화석, 스트로마톨라이트, 퇴적소극 등이 나타난다(Paik and Lee, 1994; Kim and Paik, 1997a; Park *et al.*, 2000). 이 호성퇴적층의 이와 같은 퇴적 특성은 대체로 건조한 기후조건이 지배적인 하산동층 충적평원의 환경에서 우각호의 발달이 국부적으로 생태친화적인 환경을 조성했음을 지시한다.

**진주 유곡동:** 이 지역은 하산동층의 최상부에 해당하는 퇴적층이 분포한 지역으로, 사암층의 조직과 두께 등의 측방변화가 발달한 범람원퇴적층 사이에 50 cm 두께의 소규모 호성퇴적층이 발달한다(그림 4). 범람원퇴적층은 전반적으로 녹회색의 중립 내지 세립사암과 석회질의 사질 내지 실트질이암으로 구성된다. 사암은 대체로 아장석질을 띠며, 판상 내지 사엽층리가 나타나고, 이암 내에는 토양기원의 캄크리트 단괴가 나타난다. 이 범람원퇴적층 사이에 협재된 호성퇴적층은 아래와 같은 퇴적 특성을 보인다.

호성퇴적층은 아래로부터 회색의 석회질 실트질이암(50 내지 60 cm 내외 두께) - 암회색의 석회질 실트질 내지 세일질이암(수 cm 두께) - 회갈색의 세립사암(수 mm 두께) - 암회색의 세일질이암(40 cm

내외 두께) 순으로 이루어져 있다(그림 4). 하부의 석회질이암에는 단괴상, 렌즈상 내지 층상의 캄크리트가 발달되어 있으며, 내부에서는 실뿌리 흔적, 환상균열, 펠로이드 발달, 각력화, 건열 등 토양 기원의 특성이 나타난다. 이와 함께 무척추동물의 생흔이 부분적으로 관찰된다. 하부에 발달된 세일질이암에는 건열이 나타나며, 버티졸고토양 기원의 미끌림면과 위배사구조가 관찰된다.

한편, 이 호성퇴적층에서는 구과류 잎화석이 집단으로 산출되며, 구과류 열매와 씨 화석이 산재되어 나타난다(그림 4a-f). 박층으로 발달된 세립사암층에서는 탄화된 줄기편 화석들과 현화식물로 추정되는 화석들이 산출되며(그림 4g), 줄기편 화석들의 경우 방향성의 배열을 보인다. 이들 식물화석 외에, 하부의 세일질이암에서는 약 50 cm 길이의 경린어류 화석이 산출되며(그림 4h), 상부의 세일질이암에서는 개형충화석이 다량으로 산출된다. 한편 이 지역 퇴적층에서 산출된 암회색의 세일질이암 전석에서 거북알 등지화석이 확인되었으며(그림 4i)(Choi *et al.*, 2023), 수각류 공룡의 발자국 화석이 관찰되었다.

위와 같은 유곡동 호성퇴적층의 퇴적특성은 하산동층의 퇴적 말기에 일시적인 호수의 확장과 축소가 일어났음을 시사한다. 즉 전술한 이 호성퇴적층의 층서적 발달특성으로 미루어, 이 퇴적층은 다음과 같은 발달 과정을 겪은 것으로 해석된다. 강수량 증가에 의해 호수가 확장이 되면서, 호수 주변에 식생을 비롯한 작은 생태계 형성 - 석회질토양층이 형성될 정도로 상당 기간 노출 - 다시 범람을 겪으며 호수 확장 - 강수량 감소에 따라 호수 후퇴. 한편 버티졸고토양의 발달은 호수 형성 당시의 기후조건이 건기와 우기가 뚜렷이 교차하는 사바나성 기후였음을 지시한다(Mack and James, 1994; Demko *et al.*, 2004).

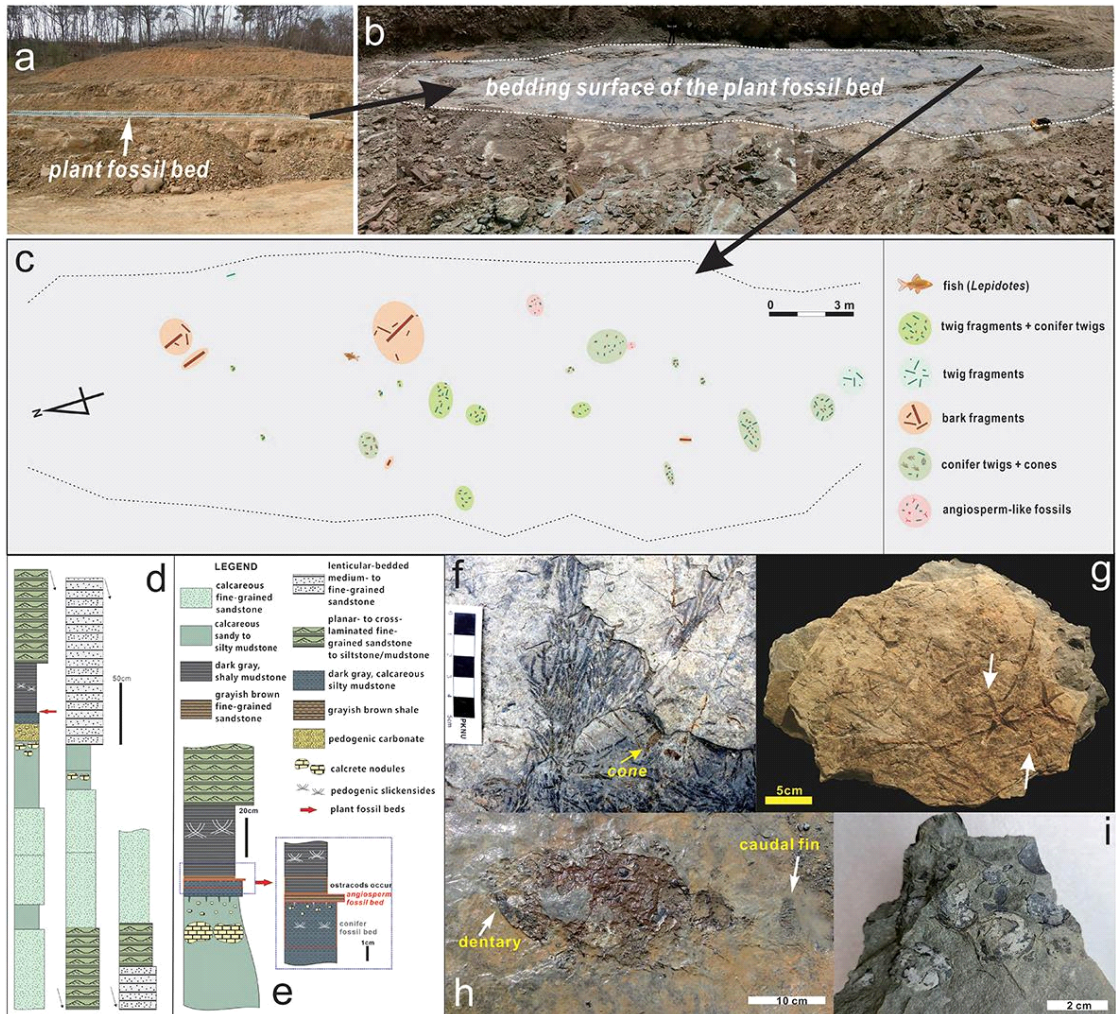
### 3.1.3 진주층

진주층은 경상분지가 형성된 이후에 처음으로 나타나는 최대두께가 1,800 m에 달하는 대규모 호성퇴적층(Um *et al.*, 1983)이다. 아울러 진주층은 경상누층군의 지층 중 파도연흔, 저탁류퇴적층, 스트로마톨라이트 등 호수 환경의 특성이 가장 뚜렷하게 발달한 퇴적층으로, 퇴적특성의 시공간적인 변화가 매우 다양하게 나타나는 지층이다(Um *et al.*, 1983;



Paik *et al.*, 2019). 진주층은 천호퇴적층과 호수주변부퇴적층으로 이루어진 가운데에 호수로 유입된 하천으로부터 기원한 삼각주퇴적층과 이에 수반된 독터진퇴적층과 개방수류퇴적층 등이 복합되어 있으며, 지역과 층준에 따라 발달 퇴적층과 화석산출의 변화를 보인다(Um *et al.*, 1983; Sohn, 1989; Choi, 1999; Paik *et al.*, 2019). 이와 같은 진주층 퇴적특성의 전반적인 산상과 시공간적 변화특성은 Paik *et al.* (2019)의 논문에서 정리되었다. 이와 함께 Paik

*et al.* (2019)은 진주층의 퇴적상, 석회암층, 응회질 퇴적층, 탄질층, 증발암광물층, 식물화석, 고토양, 스트로마톨라이트, 고지진기록 등의 발달 특성을 바탕으로, 진주층 발달 당시의 전반적인 퇴적분지 특성이 Bohacs *et al.* (2000)이 제시한 호수분지 모델 중 습윤 기후와 건조 기후의 중간 형인 균형충전 호수분지(balanced-fill lake basin)에 해당하는 것으로 해석하였다. 한편, 진주층 식물화석 내 유기물의 탄소동위원소 특성을 바탕으로, 진주층의 전반적인 고



**Fig. 4.** Occurrence of the plant fossil-bearing lacustrine deposits in the upper part of the Hasandong Formation. a, b. Sectional (a) and oblique (b) views of the outcrop of the plant fossil-bearing deposits. c. Distribution map of the fossils on the plant fossil bed. d, e. Overall (d) and detailed (e) stratigraphic sections of the plant fossil deposits. f. Bundles of conifer leaves with cones. g. Angiosperm-like fossils showing the pentamerous organization (upper arrow) and the axes terminated by a cup-shaped organ (lower arrow). h. A fish fossil of *Lepidotes* sp. i. Partial clutch of the turtle eggs.

기후 특성은 아건조와 아습윤의 기후가 교호된 것으로 해석되었다(Hong *et al.*, 2020).

### 3.2 하양층군

진주층의 퇴적 이후에 경상분지는 동측으로의 공간적인 확장과 화산활동의 증가, 기후변화 등을 겪으며, 하위 신동층군의 지층과는 다른 퇴적특성을 보이는 지층들이 분지 내에 형성되었다. 밀양소분지에서의 하양층군 퇴적의 시작은 전술한 대규모 호성 퇴적층인 진주층 상위에 발달된 하성평원 퇴적층인 칠곡층으로부터 시작된다. 칠곡층은 하산동층에 이어 다시금 붉은색 퇴적층의 반복적인 협재가 나타나는 퇴적층으로, 저경사의 하도퇴적층이 지배적인 하산동층에 비해 망상하천의 발달 등 비교적 상류 지역의 하성환경에서 쌓인 퇴적층으로 해석되었다(Um *et al.*, 1983; Chough and Sohn, 2010). 이와 같은 퇴적특성으로 인해 칠곡층에서의 호성퇴적층 발달에 대한 보고는 없으며, 500 m 이상의 층후를 가짐에도 불구하고, 구체적인 퇴적학적 연구가 발전적으로 이루어져 있지 않은 상태이다. 칠곡층 상위에 발달된 신라역암 또한 층적선상지 퇴적층으로 호수층의 발달이 부재한다. 그러나 신라역암 상위에 발달된 하양층군 상부 지층인 함안층과 진동층에서는 다시금 호성퇴적층의 발달이 나타나며, 이들의 산상은 다음과 같다.

#### 3.2.1 함안층

함안층은 하산동층과 함께 경상누층군 지층 중 붉은색 퇴적층의 반복적인 협재로 특징되는 대표적인 지층으로, 층후가 2,600 m에 달한다(Um *et al.*, 1983; Chough and Sohn, 2010). 전술한 하산동층과는 달리, 함안층에는 하도기원의 사암과 고토양 기원 캘리트의 발달이 제한적이다. 이는 함안층의 퇴적이 개방수류(unconfined flow)가 우세한 층적평원 환경에서 이루어졌음을 시사해 주며(Chang, 1978; Um *et al.*, 1983; Choi, 1986a; Chough and Sohn, 2010), 퇴적속도 또한 비교적 빨랐음을 시사한다.

이와 같은 일반적으로 알려진 함안층의 퇴적특성과는 달리, 경남 창녕군 남지 일원에 분포하는 함안층 상부에서는 붉은색 퇴적층이 협재하지 않은 수 m 내지 수십 m 이상 두께의 퇴적층 발달이 보고된 바 있다(Um *et al.*, 1983). 이와 함께 경남 군북면 소

포리의 함안층 상부에는 두꺼운 녹회색질층과 암회색층의 산출이 빈번하고, 고토양층과 증발암광물혼이 흔히 발달된 천호에서 호수주변에 이르는 환경의 퇴적층이 나타난다(Kim, H.J. *et al.*, 2018). 이와 같은 퇴적특성은 경남 남해군 가인리의 함안층 상부 퇴적층에서도 잘 나타난다(Kim *et al.*, 2011). 또한 경남 사천시 신수도에 발달된 함안층 상부 퇴적층에서도 붉은색 퇴적층이 부재한 호수주변부 기원의 퇴적층이 약 40 m 두께로 나타나며, 이러한 퇴적특성은 함안층의 상위 지층인 진동층과 유사한 특성(후술)이다(So *et al.*, 2007). 이와 같은 함안층 상부에서의 암회색질 내지 흑색 퇴적층의 협재는 Um *et al.* (1983)의 보고에서도 제시되었다.

한편, 경남 함안군 용산리 일원(Kim *et al.*, 2011)과 경북 경산시 부근(Park *et al.*, 2017)의 함안층 최상부 퇴적층에서도 비록 붉은색 퇴적층이지만, 호수 주변부의 사질 내지 이질평원 퇴적층의 특성이 잘 나타난다. 경산시 부근 함안층(대구층 하부) 상부 퇴적층에서는 호안 기원의 *Skolithos* 생흔화석상과 천호저기원의 *Mermia* 생흔화석상의 발달이 보고되었다(Park *et al.*, 2017)(그림 5a, 5b). 이와 같은 호성 퇴적층 발달특성은 새발자국 화석산지로 잘 알려진 진주시 가진리의 함안층 중부 퇴적층에서도 나타난다(Kim *et al.*, 2011). 또한 함안층과 암층서적으로 대비되는 울산 지역의 대구층(Kim *et al.*, 2014)과 사연리층(Paik *et al.*, 2020a)에서도 호성퇴적층의 발달특성이 나타난다. 이들 퇴적층에서는 공통발자국 화석이 흔히 수반되어 있음이 특징이다.

가진리의 함안층 퇴적층에서는 수 cm 정도의 매우 얇은 수심에서 잔물결에 의해 형성된 직선형의 파도연흔이 비교적 빠른 유속에 의해 형성된 유수연흔 위에 중첩된 퇴적기록이 뚜렷이 나타나는데(그림 5c, 5d), 이는 층적평원에 범람이 일어난 후, 일부 낮은 지형에 소규모의 호소들이 일시적으로 발달했음을 시사해 준다. 이와 같은 붉은색 퇴적층으로 이루어진 함안층 내의 호성퇴적층에서는 물업구조 등의 미생물기원 퇴적구조(Microbially induced sedimentary structures, MISS)가 잘 나타난다(Paik and Kim, 2014)(그림 5e, 5f).

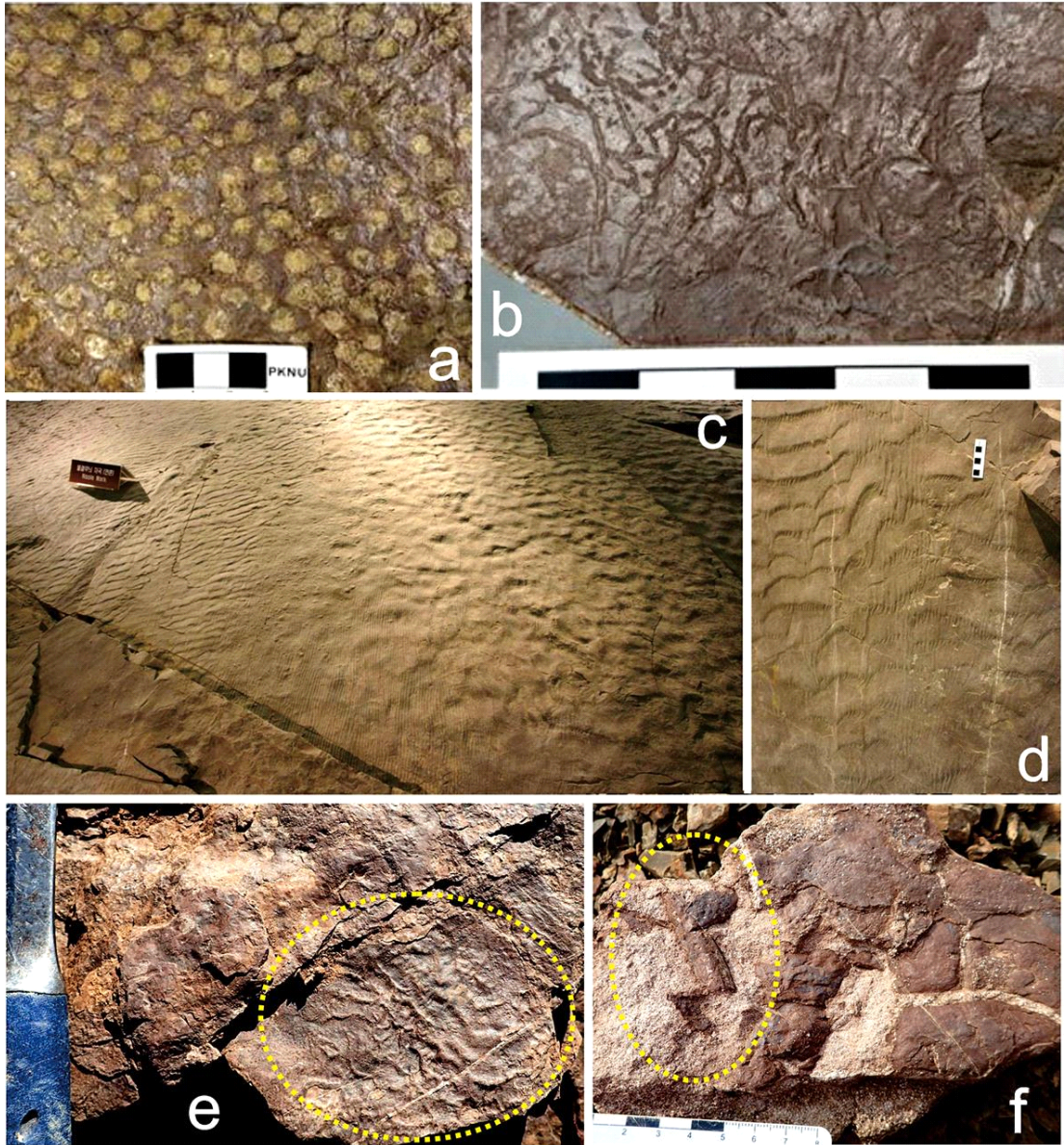
이상에서와 같은 함안층 내 호성퇴적층의 발달특성은 함안층 퇴적과정의 층적평원 내에서 크고 작은 호소들의 형성과 쇠퇴가 생흔화석상의 변화와 함께

반복되었으며(그림 6), 상부 시기로 가면서 층적평원의 저지대에 호수의 공간이 점차 확장되었음을 지시한다.

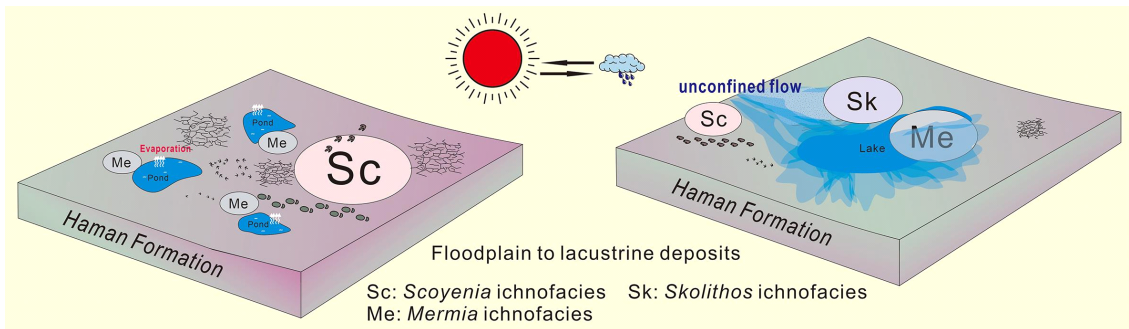
### 3.2.2 진동층

진동층은 밀양소분지의 남부 지역에 분포하며,

전술한 진주층과 함께 층후가 2,400 m 이상에 달하는 경상누층군의 대표적인 호성퇴적층이다(Um *et al.*, 1983). 밀양소분지 내 진동층 분포지의 여러 지역에서 이루어진 퇴적지질학적 조사와 연구 결과는 지역 및 층서적으로 다소 차이는 있으나, 전반적으로 호수주변부 퇴적층(이암과 세립사암 내지 실트



**Fig. 5.** Occurrence of the lacustrine deposits in the Haman Formation. a. *Skolithos* ichnosp. b. *Mermia* ichnofacies. c. Sub-linear wave ripples on sub-sinuuous current ripples. d. Closer view of c. e, f. Microbially induced sedimentary structures. e is wrinkle structure (dotted ellipse) on the bedding surface, and f is roll-up clast (dotted ellipse) associated with desiccation cracks.



**Fig. 6.** Schematic diagram of the paleoenvironmental shifts associated with ichnofacies changes on the Haman floodplain due to alternation of wetting and drying periods.

스톤이 엷층 또는 얇은층으로 교호하는 암상)이 지배적으로 발달되며, 토양기원의 탄산염암(호수주변부 탄산염암)이 흔히 나타나는 특성을 보인다(Kim and Paik, 2001; Paik *et al.*, 2001; Paik and Kim, 2003, 2006). 또한, 진동층에는 건열과 파도연흔이 빈번하게 나타나며, 양방향성 사엽층리(Paik and Kim, 2018a), 우흔, 소금과 석고 등의 증발광물흔(Paik *et al.*, 2007), 미생물기원의 퇴적구조(MISS, Microbially induced sedimentary structures) (그림 7a, 7b), 티피구조(그림 7c, 7d), 지진기원의 연질퇴적변형구조(SSDS) 등 여러 특성의 고환경 기록이 나타난다.

한편 진동층 중부의 티피구조가 반복적으로 발달된 퇴적층에 퇴적층을 따라 선별적으로 열수변질을 받은 두께 수 cm 내외의 층상 또는 렌즈상의 퇴적층이 나타나는데, 이 열수변질 광물은 ferro-axinite로 확인되었다(그림 7e, 7f). 이 퇴적층의 산상과 광물 성분으로 미루어, 이 퇴적층은 증발광물암의 변질 산물로 해석된다(Warren, 2010). 이와 함께 빈도의 차이는 있으나 진동층에는 응회질 퇴적물의 함유가 나타나며(Houck and Lockley, 2006), 척추동물 발자국화석(공룡, 새, 익룡)이 흔히 산출되는 특성을 보이거나(Paik *et al.*, 2001; Kim *et al.*, 2008; Kim and Huh, 2018) 몸체화석의 산출은 매우 드물다.

위와 같은 발달특성은, 진동층의 퇴적이 전반적으로 건조한 기후가 지배적인 가운데에 건기와 우기가 반복되는 계절성 기후에서 이루어졌음을 지시하며, 이러한 기후조건으로 인해 플라야호수 또는 염호의 기록이 나타난다(Um *et al.*, 1983; Paik and Kim, 2006). 따라서 진동층 발달 당시의 전반적인 퇴적분지 특성은 Bohacs *et al.* (2000)이 제시한 호수분지

모델 중 건조 기후형인 미충전 호수분지(underfilled lake)에 해당하는 것으로 해석된다. 한편, 진동층의 퇴적과정에 호수 주변 지역에서는 간헐적으로 화산활동과 지진이 발생하며 진동층의 퇴적에 영향을 미쳤을 것으로 해석된다.

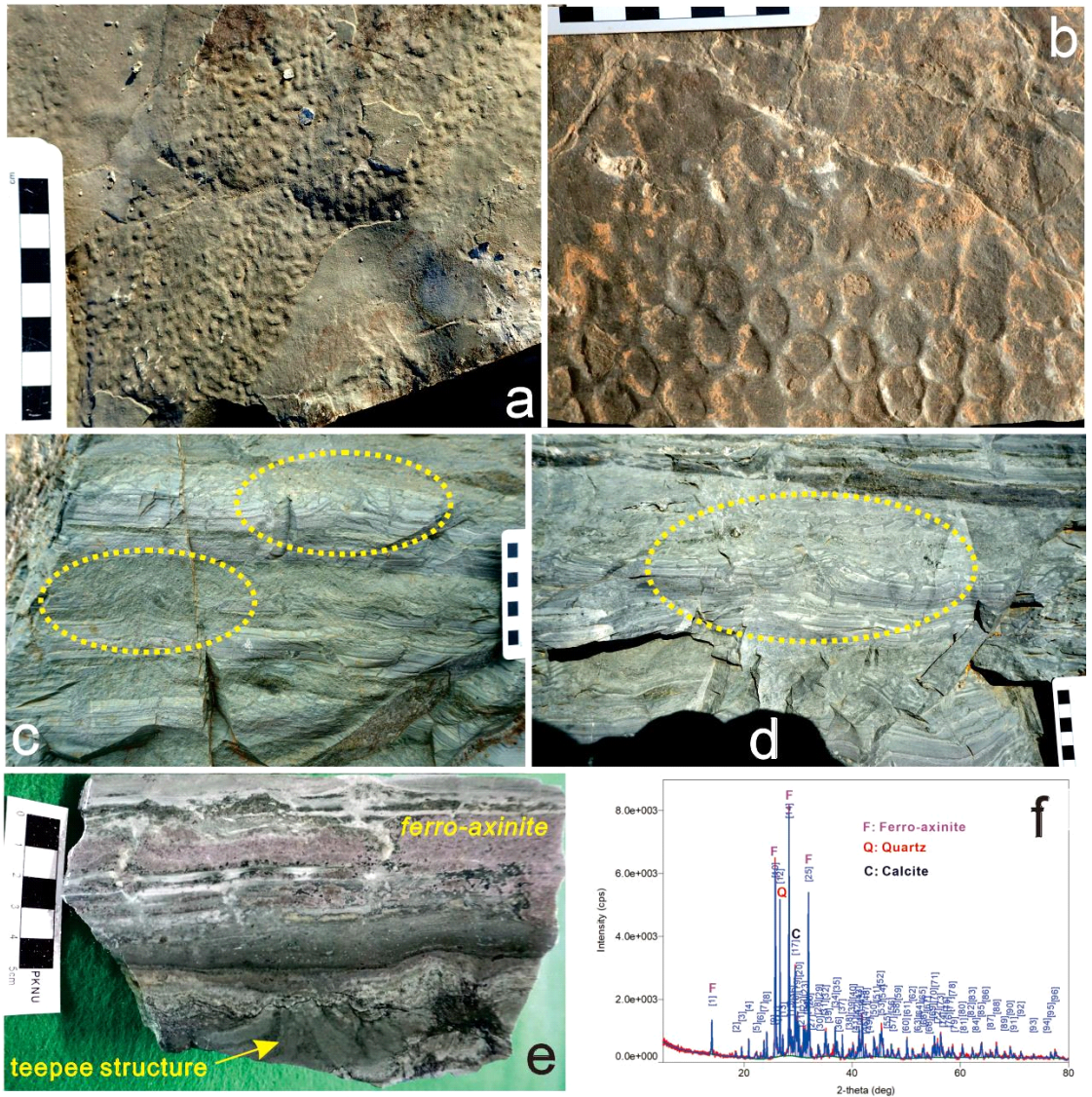
한편, 진동층은 퇴적특성과 산출화석에 있어서 남부지역과 북부지역 간에 차이가 나타난다. 남부지역은 북부지역에 비해 사암층(사구상 사암층, 판상 내지 사엽층리가 발달한 사암층 등)의 발달이 빈번하고, 층적평원 내지 호수주변부 퇴적층(개방수류 퇴적층)이 지배적으로 나타난다(Paik and Kim, 2006; Paik *et al.*, 2018a). 이와 함께 증발광물흔이 드물게 산출되나, 공룡발자국 화석과 무척추동물의 생흔화석은 흔히 산출되는 경향을 보인다(Paik *et al.*, 2001). 북부지역은 남부지역에 비해 응회질사암층이 빈번하게 협재하며, 개방수류 퇴적층의 발달이 제한적이고, 천호저환경의 퇴적층(석회질의 실트질 이암층)이 흔히 발달한다(Paik and Kim, 2006). 또한, 증발광물흔은 흔히 나타나지만, 공룡발자국 화석이 드물게 산출되고 무척추동물의 생흔화석은 부재하거나 매우 드물다(Paik *et al.*, 2007).

이와 같은 진동층의 공간적 변화 특성으로 미루어, 남부지역은 사질평원 내지 이질평원이 넓게 발달한 호수주변부 환경(개방수류 퇴적층 발달)이 지배적이었으며, 북부지역에 비해 상대적으로 염도가 낮은 호수환경이 공룡, 새, 익룡, 무척추동물 등의 서식에 도움을 주었을 것으로 해석된다. 반면, 북부지역은 남부지역에 비해 개방수류 퇴적층의 제한적인 발달, 호수환경의 높은 염도, 화산활동의 영향 등으로 인해 생물이 서식하기에는 상대적으로 열악한 환

경이었을 것으로 해석된다.

층준에 따른 진동층의 퇴적특성 변화는 남부지역에서 관찰된다. 진동층의 하부는 상대적으로 사암층(사구상 사암층, 판상 내지 사염층리가 발달한 사암층)의 협재가 빈번한 반면, 상부로 가면서 진동층에서 가장 지배적인 암상인 엽층 내지 얇은층으로 발달한 세립사암 내지 실트스톤과 이암의 교호암이 우

세하게 발달된 특성을 보인다. 이와 함께 상부로 가면서 응회질 성분의 함량은 다소 증가하고, 무척추 동물 생흔화석의 산출은 다소 감소하는 경향을 보인다. 한편, 증발광물흔의 산출은 중상부로 가면서 다소 증가하는 경향이 나타난다. 이와 같은 특성은 하부에서 상부로 가면서 공간적으로는 층적평원 - 호수주변부의 사질평원 내지 이질평원이 우세한 환경



**Fig. 7.** Occurrence of the diverse paleoenvironmental features observed in the Jindong Formation. a, b. Microbially induced sedimentary structures. a is kinneyia structure and b is reticulated surface. c, d. Sectional views of teepee structures (dotted ellipses) in the beds of interaminated fine-grained sandstone to siltstone and mudstone. Buckling and subsequent brecciation are well observed. e. Ferro-axinite deposit associated with the teepee structure bed, polished rock slab. f. XRD analysis for the ferro-axinite deposit.

에서 점차 호수주변부 이질평원이 우세한 환경으로 변화되고, 호수의 염도는 점차 높아진 결과로 해석된다.

### 3.2.3 반야월층

반야월층은 밀양소분지 북부(경주-왜관 지역)에서 암층서적으로 전술한 진동층의 하부에 대비되는 지층이다(Chang, 1975, 1977). 반야월층 또한 진동층과 유사하게 전반적으로 호수주변에서 천호 기원의 회색 내지 암회색의 호성퇴적층으로 이루어져 있으나(Lee *et al.*, 1991; Park *et al.*, 2017), 퇴적상 구성과 화석산출 특성 등에서 진동층과는 부분적으로 다른 특성을 보인다. 퇴적상의 경우, 복족류와 엽지개 화석이 산출되는 천호 기원의 석회질 이암이 흔히 발달되며, 진동층에서는 부재한 스트로마톨라이트(Lee *et al.*, 1991; Nehza *et al.*, 2009)가 나타난다. 반야월층에서는 건조기후를 지시하는 *Frenelopsis* 잎화석(Escapa and Leslie, 2017)이 산출되며(Tateiwa, 1929)(그림 8a), 호안 기원의 *Skolithos* 생흔화석상과 천호저기원의 *Mermia* 생흔화석상이 나타난다(Park *et al.*, 2017). 한편, 반야월층에서는 고토양 기원 엽층상 캘크리트의 발달이 나타나며(Paik and Chun, 1993), 이러한 특성은 반야월층과 대비되는 군위 지역의 화산층(Paik and Chun, 1993)과 경산지역의 자인층에서도 나타난다. 이와 함께 증발광물흔이 부분적으로 나타나는데, 특히 경산지역 반야월층에서 확인된 엽층상 캘크리트에서의 황산염증발광물흔의 수반(그림 8b)에 대해서는 구체적인 후속 연구가 필요하다.

### 3.2.4 건천리층

경주시 건천리 일대에 분포하는 건천리층은 암층서상 전술한 반야월층의 상위에 놓이는 지층으로, 진동층의 최상부에 대비되는 지층이다(Chang, 1975, 1977). 건천리층 또한 전반적으로 호수주변에서 천호 기원의 회색 내지 암회색의 호성퇴적층으로 이루어져 있으나(Paik *et al.*, 2000), 퇴적상 구성과 화석산출 특성 등에서 진동층과는 부분적으로 다른 특성을 보인다. 퇴적상의 경우, 천호 기원의 박엽층상으로 발달된 실트스톤과 이암의 호층과 석회질이암이 흔히 나타나는 것이 진동층과 다른 특성이며(Paik *et al.*, 2000), 증발광물흔 또한 관찰되지 않았다. 화석 산출의 경우, 진동층에 흔히 나타나는 공통발자국 화석의 보고가 없는 반면, 복족류와 부족류, 엽지개, 개형층, 윤조류 등 다양한 화석 산출이 건천리층에서 보고되었다(Suzuki, 1940; Yang, 1978; Chun *et al.*, 1988). 이와 함께 건조기후를 지시하는 화분과 포자화석이 건천리층으로부터 보고되었으며(Choi, D.K., 1985), 식물화석 내 유기물의 탄소동위원소 특성을 바탕으로 건천리층의 전반적인 고기후 특성은 아건조 내지 아습윤성의 기후로 해석되었다(Hong *et al.*, 2012). 한편, 건천리층에서도 반야월층에 발달된 고토양 기원의 엽층상 캘크리트가 나타난다(Paik *et al.*, 2000).

### 3.3 유천층군

하양층군과 부정합의 관계를 가지며 발달된 유천층군은 전반적으로 화산암이 지배적으로 발달된 가

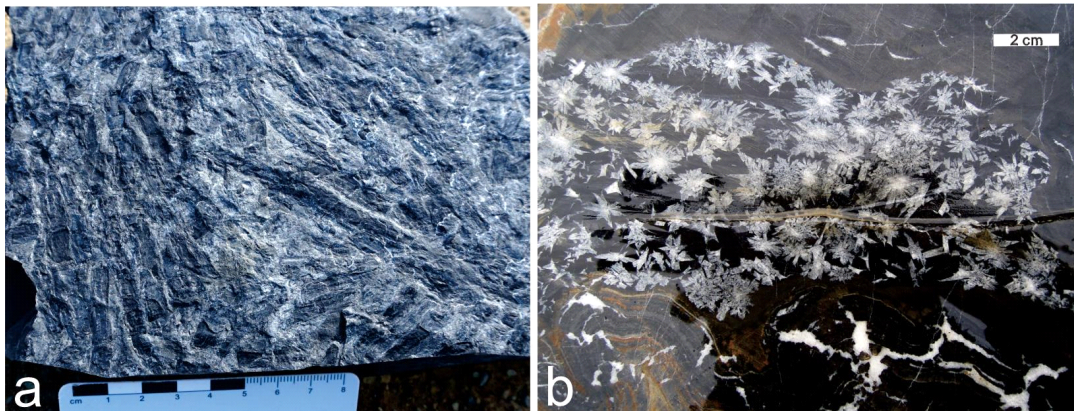


Fig. 8. Fossils of *Frenelopsis* sp. (a) and cluster of rosette-shaped sulfate mineral casts (b) observed in the Banyaweol Formation.

운데에, 주로 응회질퇴적층으로 이루어진 퇴적층들이 화산암체 사이에 불연속적으로 산재하여 분포한다. 따라서 이들 퇴적층들에 대해서는 각 분포지에서 독립적인 층서를 가지며, 여러 지층으로 설정되어 있다. 이 중 호성퇴적층으로서의 특성이 잘 나타나는 부산 지역의 다대포층과 암회색응회질퇴적암(부산 황령산 지역의 비공식 지층명) 및 이천리층 내 호성퇴적층의 주요 산상은 다음과 같다.

최근의 저어콘 연대측정 결과 93 Ma-97 Ma (Cenomanian ~ Turonian)의 지층으로 확인된(Chae *et al.*, 2022) 다대포층은 화쇄류퇴적층을 경계로 하부다대포층과 상부다대포층으로 구분된다(Chough and Sohn, 2010). Chough and Sohn (2010)은 하부다대포층과 상부다대포층의 퇴적환경을 각각 하천의 영향이 우세한 충적선상지와 호성퇴적층으로 환경으로 해석하였다. 아직까지 다대포층에 대한 구체적인 퇴적학적 연구가 진행되지는 않았으나, 하부다대포층에서는 석회질고토양과 버티졸고토양이 발달된 범람원 퇴적층 내에서 소규모 호성퇴적층의 발달이 보고되었으며, 아울러 이 퇴적층에서는 10여 m 두께의 켈크리트복합층과 티피구조의 발달이 보고되었다(Paik *et al.*, 1997; Paik and Kim, 2003). 한편 상부다대포층에서는 소구상사층리가 발달된 비교적 깊은 수심의 퇴적층이 보고되었다(Chough and Sohn, 2010).

부산 황령산 지역에 제한적으로 분포된 암회색응회질퇴적암(Chang *et al.*, 1983)은 호수의 확장과 후퇴의 반복으로부터 형성된 120여 m 두께의 호성퇴적층으로 이루어져 있다(Paik and Kim, 1998). 이 퇴적층은 전반적으로 응회질을 띠는 사암과 이암의 교호로 이루어져 있으나, 이회암층과 쳐트층이 부분적으로 나타난다. 이질평원 기원의 퇴적층에서는 소금과 석고 등 증발광물 기원의 캐스트가 보고되었으며(Paik and Kim, 1998), 사암층리가 발달된 쳐트층에서는 *Skolithos*의 집중발달과 함께 *Palaeophycus* 생존화석이 보고되었다(Kim and Paik, 1997b).

부산 기장군 신평리 해안에 발달된 호성퇴적층은 석회질고토양이 수반된 수 m 두께의 호수주변부 기원 퇴적층으로 이루어져 있으며, 이 퇴적층은 하성기원의 조립질(역암층 및 사암층) 우세 퇴적층과 교호되어 나타난다(Kim *et al.*, 2022). 이와 같은 층서적 발달 특성을 바탕으로 이 호성퇴적층은 하천분산형 퇴적계(Nichols and Fisher, 2007)에서의 퇴적산

물로 해석되었다(Kim *et al.*, 2022). 한편, 이 호수 주변 퇴적층에서는 진동층에서 확인된 양방향 사암층리가 나타나며, 이와 함께 공룡발자국 화석, 새발자국 화석, 공룡뼈 화석, 건조기후에서 생육하는 구과식물 화석(*Frenelopsis* sp.), 지진 기원의 연질퇴적변형구조 등, 한반도 공룡시대를 입체적으로 이해하는 데에 유용한 지질과 고생물기록들이 공간적으로 압축되어 나타남이 특징이다(Kim *et al.*, 2022). 이와 함께 이 지역의 호성퇴적층에서는 동해 형성 이전의 일본으로부터 기원된 방산층화석 함유 쳐어트 역이 나타난다(Kim *et al.*, 2022).

#### 4. 밀양소분지 호수의 유형과 층서적 변화

지구 환경에 존재하는 호수의 유형은 형성 기원과 호수의 수리체계 및 화학적 특성, 지속 기간 등에 따라 여러 유형으로 구분되며(표 1), 경상분지에 발달했던 분지 규모의 호수는 일차적으로 조구조운동에 의한 침강으로부터 형성된 것으로 여겨진다. 전술한 바와 같이 경상분지의 형성은 배호지역에서의 변환인장(transtensional) 운동으로부터 시작된 것으로 제시되었다(Chough and Sohn, 2010; Cheon *et al.*, 2020). 밀양소분지 내에 발달된 호성퇴적층들의 다양한 산상은 경상분지의 발달과정에 이와 같은 구조적 요인 이외에, 기후와 하천 발달 등 여러 요인에 의해 다양한 유형의 호수가 존재했음을 지시한다.

현재까지 알려진 경상분지의 고지형과 고기후 등 고환경 특성을 고려할 때, 경상분지의 호수는 표 1에 열거된 성인에 따른 호수 유형 중 주로 하성기원의 것들로 해석된다. 이와 함께 화산 기원의 호수, 상류 지역에서의 산사태 또는 용암류로부터 만들어진 댐에 의해 형성된 호수, 풍성환경에서의 호수 또한 경상분지에 발달했을 가능성은 있으나, 지금까지 이와 같은 특성의 호성퇴적층은 확인되지 않았다. 한편 수리체계와 화학적 특성, 지속 기간 등에 따른 호수 유형의 경우, 개방과 폐쇄 호수, 균형충전과 미충전 호수, 담수호와 기수호 및 염호, 다년호와 간헐호 등이 경상분지에 시공간적으로 변화하며 발달한 것으로 해석된다. 그림 9와 10은 전술한 경상누층군 호성퇴적층들의 지층별 산상을 바탕으로, 각 지층별 호수의 발달 유형 및 변화 특성의 고환경적 요인을

**Table 1.** Classification of lake types (after Cohen, 2003).

	Glacial: glacial and periglacial lakes
	Tectonic: rift lakes, foreland basin lakes, back-arc basin lakes, transtensional and transpressional lakes, cratonic lakes
Mechanism	Fluvial: floodplain lakes, abandoned channel lakes, delta plain lakes plunge pools
	Coastal: back-barrier lakes
	Volcanic: crater lakes, lava-dammed lakes
	Eolian: deflation basin lakes, dune field-dammed lakes
	Solution: sinkholes, karst
	Landslide Damming
	Meteorite impact
Drainage	open and closed lakes
Discharge	overflowed, balanced-fill, and underfilled lake basins (Bohacs <i>et al.</i> , 2000)
Salinity	fresh, brackish, and saline lakes
Temporal duration	perennial and ephemeral lakes

층서적으로 간략히 정리한 것으로, 다음은 이에 대한 종합적인 해설이다.

**낙동층:** 지표에서 관찰되는 낙동층의 퇴적층에서는 일정규모 이상의 공간적 범위를 가지는 호성퇴적층의 발달은 나타나지 않으며, 대체로 상류 지역에서 형성된 하성 기원의 간헐성 소규모 호소 기록만이 나타난다. 이러한 제한된 기록이 낙동층의 퇴적 시기에 경상분지에 호수의 발달이 없었음을 지시하는 것은 아니다. 즉, 지표에 노출된 낙동층 퇴적층은 퇴적분지 경계부에 해당하는 공간에서의 기록이기 때문에, 지하에 발달한 낙동층의 동측으로의 측방 연장부에는 호성퇴적층이 존재할 것이다. 한편, 낙동층에 발달된 호소퇴적층이 대체로 탄질을 띤 퇴적 당시의 기후가 호소 주변에 어느 정도의 식생이 생육하는 습윤한 기후 조건이었음을 지시하며, 이는 낙동층의 식물화석에 의해서도 뒷받침된다(Philippe *et al.*, 2009; Oh *et al.*, 2011, 2015).

**하산동층:** 하산동층은 낙동층에 비해 분지 경계부에서 상대적으로 먼 지역, 즉 하류 지역에서의 퇴적층이다. 따라서 하산동층은 전반적으로 고굴곡 하천이 흐르는 하성평원에서 쌓인 붉은색 퇴적층이 반복적으로 나타나는 가운데에, 하성 기원의 범람원 호성퇴적층과 우각호 퇴적층이 각각 중부와 상부 퇴적층에서 관찰되었다. 중부층에 발달된 호수는 발달 두께를 고려할 때 다년호의 성격을 띤다. 한편, 이들

퇴적층에서 식물 생육의 흔적은 매우 제한적인 반면, 자연화재의 기록과 스트로마톨라이트 등의 석회질 퇴적층의 발달이 나타난다. 이와 같은 퇴적특성은 하산동층의 퇴적 시기에 이르러 기후조건이 전반적으로 건조한 환경으로 바뀌었고, 이에 따라 호수는 어느 정도 알칼리성을 띤었음을 시사한다. 이와 같은 건조한 기후조건은 발달된 하산동층에 발달된 석회질과 버티졸고토양에 의해서 뒷받침된다(Paik and Kim, 1995; Paik, 1998; Paik and Lee, 1998). 한편 하산동층 최상부에 발달된 다양한 동식물 화석상이 나타나는 호성퇴적층은 하산동층의 퇴적시기 말에 일정 규모 이상의 동식물이 물가에 생육할 수 있는 습윤한 기후조건이 짧은 기간 존재했음을 지시하며, 이는 이 시기에 강우량 증가에 따른 분지 중심부 호수의 확장이 잠시 일어난 것으로 해석된다.

**진주층:** 진주층은 경상분지 발달 초기에 존재한 낙동곡분(Chang, 1975; Chough and Sohn, 2010; Cheon *et al.*, 2020)의 확장에 따라, 분지 규모의 대규모 호수가 지속적으로 발달하면서 형성된 것으로 해석된다. 따라서 진주층 호수는 다년호의 성격을 띠며, 이는 진주층 퇴적기간 동안에 비교적 습윤한 기후조건이 일정 부분 유지된 결과(Hong *et al.*, 2020)로 여겨진다. 호수 성분은 경우, 진주층 퇴적 초기의 호수는 담수성을 띤었으나, 중기 이후로 가면서 점차 알칼리성을 띠게 된 것으로 해석된다. 이와 함께 진주층 초기의 퇴적에



호안퇴적층의 전진현상(progradation)이 일반적인 반면, 후기의 퇴적에는 누진현상(aggradation)이 일반적인 특성은(Paik *et al.*, 2019) 진주층 퇴적 기간 동안 호수분지의 유형이 균형충전에서 미충전 호수로 변화해 갔음을 시사한다(Bohacs *et al.*, 2000). 한편, 남부지역의 진주층에는 이질평원의 발달이 일반적인 반면, 북부지역에는 삼각주 퇴적층의 수반이 흔히 나타나는 특성은(Choi *et al.*, 1982; Sohn, 1989; Chun, 1992) 경상분지 발달 초기의 분지 확장이 북동-남서 방향으로 일어남에 따라(Cheon *et al.*, 2020), 북측 지역이 분지의 경계부에 가깝게 위치한 까닭으로 해석된다.

**함안층:** 함안층에 나타나는 호수의 기록은 때때로 일어난 홍수 후에 충적평원의 저지대에 일시적으로 형성되는 전형적인 범람원 호수의 유형으로, 간헐호의 특성을 띤다. 이와 같은 간헐호의 발달은 연흔과 건열의 반복 발달 및 호성퇴적층임에도 불구하고 산화환경 기원의 붉은색 암색을 띠는 것에 의해서 뒷받침된다. 이와 함께 MISS의 흔한 발달과 증발광물혼의 수반 등은 건조한 기후조건에서의 퇴적을 나타내는 것으로, 함안층 호수의 성분이 부분적으로 함수였음을 지시한다. 한편, 함안층 퇴적 말기에 이질평원 퇴적층의 누진기록이 뚜렷이 나타남은 분지 중심부에 발달한 미충전 호수의 서측으로의 공

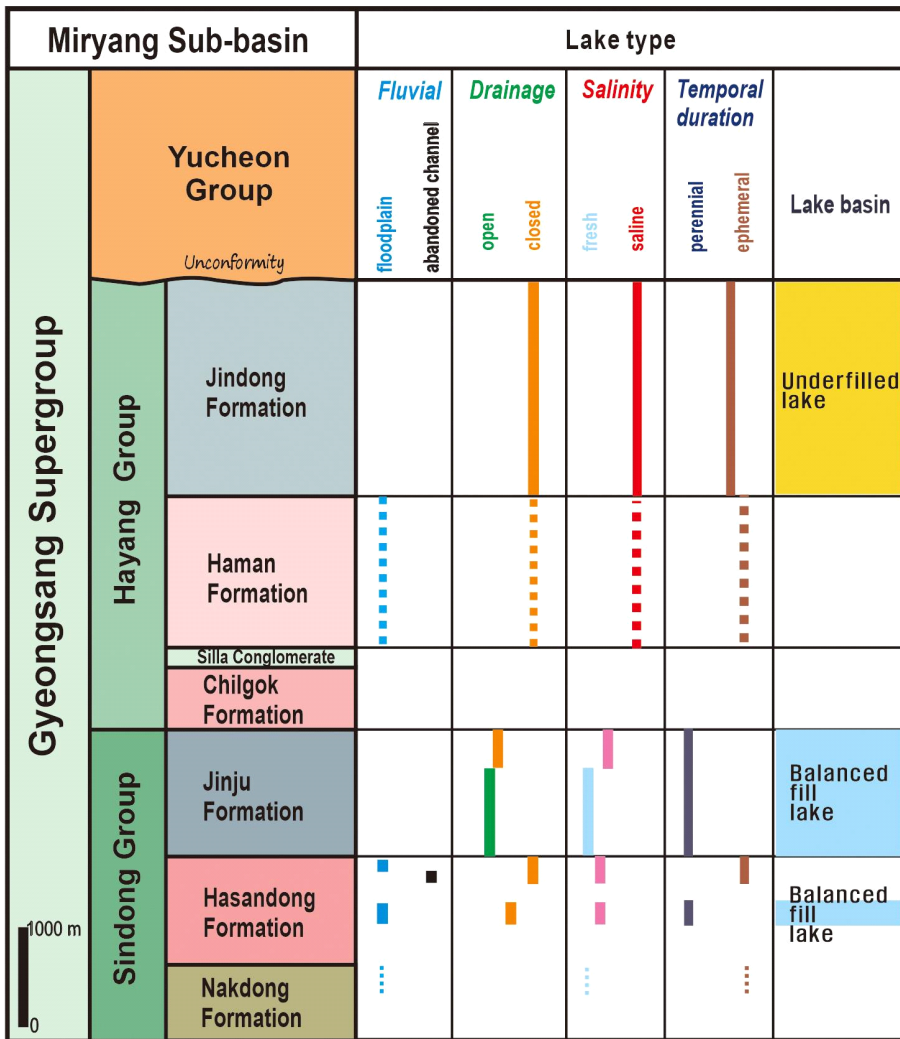


Fig. 9. Brief summary of the stratigraphic changes in lake types of the Miryang Sub-basin, Gyeongsang Supergroup.

간 확장이 일시적으로 일어났음을 지시하는 것으로, 이는 함안층 퇴적 이후에 도래한 환경변화의 전조현상으로 여겨진다.

**진동층:** 전술한 바와 같이 진동층은 범람과 이어진 가뭄의 퇴적기록이 반복적으로 누진된 미충전 호수분지의 퇴적특성을 띠며, 전반적으로 건조한 기후조건에서의 퇴적을 지시하는 퇴적기록들이 흔히 나타난다. 따라서 진동층 호수 또한 함안층에서와 마찬가지로 간헐호의 성격을 띠었던 것으로 해석된다. 그러나 진동층 호수의 발달은 공간적으로 분지 중심부에 위치한 까담에 함안층 호수와는 달리,

간헐호에서의 퇴적이 상당 기간 반복되면서 지속적으로 이루어진 것으로 해석된다. 진동층 호수의 성분 또한 함안층 호수와 마찬가지로 일정 부분 함수였을 것으로 여겨진다. 한편 진동층과 암층서적으로 대비되는 반야월층과 건천리층의 호성퇴적층 또한 건조한 기후조건에서의 미충전 호수분지에서의 퇴적특성을 띤다. 그러나 진동층과는 달리 천호기원 이암층의 흔한 발달과 스트로마톨라이트의 발달 등은 이들 지층의 호수가 간헐호보다는 다년호였음을 시사한다.

**유천층군:** 유천층군은 전반적으로 화산암류로 구

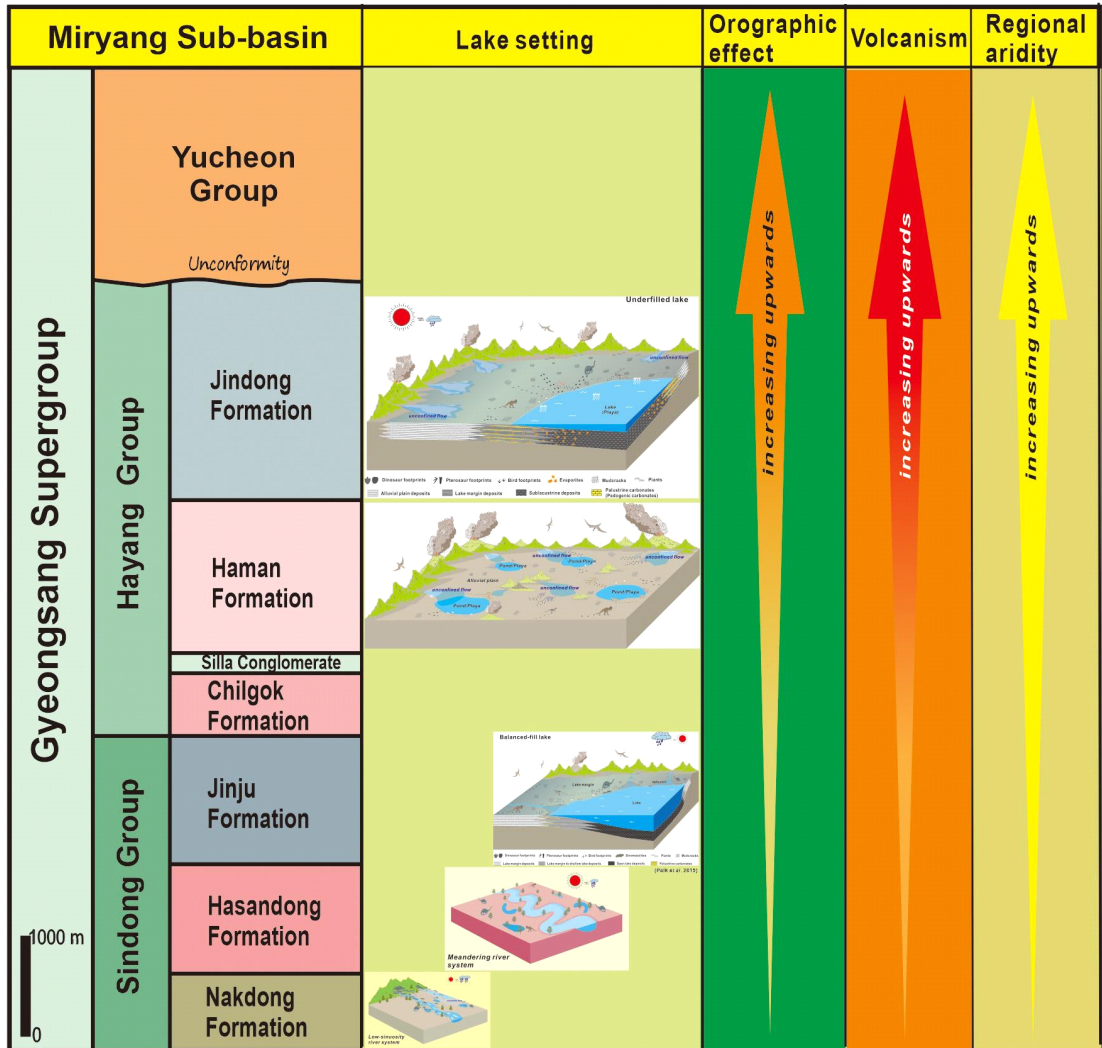


Fig. 10. Brief summary of the stratigraphic changes in lake setting in the Miryang Sub-basin, Gyeongsang Supergroup, related with exogenous forcing variables.

성되며, 퇴적층은 화산암층 사이에 국소적으로 나타난다(Hwang *et al.*, 2019). 이들 유천층군 내에 협재된 퇴적층들은 일반적으로 응회질을 띠며, 지표에서 대부분 화산암체들에 의해 둘러싸인 고립적이고 국소적인 분포의 특성을 보인다. 따라서 이들 유천층군 퇴적층들의 퇴적과정에는 전반적으로 화산활동이 관여한 것으로 여겨진다(Chang, 1975, 1979; Chough and Sohn, 2010; Hwang *et al.*, 2019). 이에 따라 유천층군의 퇴적 당시, 화산분화구 기원의 호수와 용암류 또는 대규모 화산쇄설류에 의한 물막이 지형(dam) 형성으로부터 만들어진 호수들이 존재했을 가능성이 있다.

실례로 경북 의성 금성산(Yun, 1993)과 부산 장산(Han *et al.*, 2019)의 유천층군에서 콜드론 구조의 발달이 확인되었으나, 이들 지층으로부터 분화구 기원의 호수 기록은 확인되지 않았다. 한편, 전술한 부산의 상부다대포층에 나타나는 호성퇴적층의 경우, 하성퇴적층을 덮은 두꺼운 화쇄류퇴적층을 기반으로 발달한 특성이 화산쇄설류에 의한 물막이 지형(dam) 기원의 호수(Manville *et al.*, 2007; Kataoka *et al.*, 2008) 가능성을 시사하나, 이에 대해서는 구체적인 후속 연구가 필요하다. 전술한 부산 황령산과 기장이천리층 호성퇴적층이 화산분출 기원의 호수에서 쌓였는지에 대한 여부는 이 연구에서 확인되지 않았다. 다만 황령산 호성퇴적층의 호수는 일정 부분 염호의 특성을 띠며, 기장 지역 이천리층의 호수 또한 호성퇴적층의 발달 두께와 산출화석, 고토양 특성 등으로 미루어 간헐호였던 것으로 해석된다.

## 5. 토 의

앞에서 살펴 본 바와 같이, 밀양소분지에 발달했던 호수들은 하성기원의 범람원 호수와 우각호, 담수호와 염호, 다년호와 간헐호, 균형충전 호수와 미충전 호수 등 여러 유형의 특성을 띤다. 이와 같은 밀양소분지 지층에서 확인된 호수 유형들은 최하부 지층인 낙동층으로부터 최상부 지층인 유천층군 지층에 이르기까지 층서적인 변화를 보이며, 이러한 변화에는 경상분지 발달기간 동안의 기후조건 및 조구조운동 특성이 주된 영향을 미친 것으로 여겨진다.

기후조건인 경우, 호수 유형의 전반적인 층서적 변화(그림 9)는 하부층으로부터 습윤(낙동층) → 건조

(하산동층) → 습윤에서 건조(진주층) → 건조(함안층과 진동층 및 유천층군 지층) 순으로의 변화를 나타낸다. 이와 같은 호수유형의 기후적 변화 특성은 밀양소분지 지층에서 산출된 식물화석과 탄소동위원소 분석에 의한 고기후 해석 결과(전술)에 의해서도 뒷받침되는 물론, 백악기 동안 동아시아 지역의 광역적인 고기후 변화 특성에도 부합된다. 즉, 전기 백악기의 압트절에서 알바절로 가면서 동아시아 지역의 건조대가 한반도까지 확장되었으며(Chumakov *et al.*, 1995), 이러한 건조대의 발달은 백악기말까지 이어졌다(Vakhrameev, 1991; Chumakov *et al.*, 1995).

일반적으로 건조대의 광역적인 발달은 적도를 중심으로 북반구와 남반구의 저위도대(15도에서30도 사이)에 나타나며, 이는 Hardley cell로 불리는 저위도 지역에서의 대기순환 특성에 의한 것으로 알려져 있다(Diaz and Bradley, 2004; Frierson *et al.*, 2007). 이와 함께 전지구적인 기온 상승이 Hardley cell의 고위도 방향으로의 부분적인 확장으로 이어질 수 있음이 또한 제시되었다(Diaz and Bradley, 2004; Frierson *et al.*, 2007). 백악기 당시 경상분지의 고지리적 위치(현재와 유사한 중위도 지역)(Lee *et al.*, 1987; Kim *et al.*, 1993; Lee and Kim, 2005)를 고려할 때, 경상분지의 건조한 기후조건이 Hardley cell의 직접적인 영향에 의한 것으로 보기는 어렵다. 그러나 백악기의 기후가 지금보다는 전반적으로 온난하였음(Frakes, 1979)을 고려한다면, 경상분지의 건조한 기후 조건이 Hardley cell 확장의 영향을 부분적으로 받았을 가능성도 있다.

그럼에도 불구하고, 밀양소분지 내 건조기후 조건의 호수 유형 발달은 중위도 지역에서의 산악효과(Critchfield, 1983; Broccoli and Manabe, 1997)에 의해 지배된 것으로 해석된다(Paik *et al.*, 2007). 일반적으로 산악효과가 나타나는 지형의 경우, 배후산지에는 연평균 강수량 1,000~2,000 mm, 퇴적분지에는 비그림자(rain shadow)가 형성되면서 300 mm 내외의 연평균 강수량을 보이는 아건조성 기후 조건이 나타난다(Nichols and Fisher, 2007). Okada (2000)는 백악기 당시 동아시아 지역의 대륙주변부에 매우 높은 해안산맥이 발달되었음을 제시한 바 있다. 이와 함께 이자나기판의 섭입에 따른 대륙부 가대의 성장에 의한 경상분지 동측에서의 고산지대

발달이 Lee and Kim (2005)에 의해서 제시되었다. 아울러 백악기후기 경상분지 동측에서의 활발한 화성활동에 의한 지반의 융기가 Chough and Sohn (2010)과 Cheon *et al.* (2020)에 의해서도 제시되었다. 따라서 경상분지 발달과정에서의 산악효과의 증가가 백악기후기로 가면서 밀양소분지 내 호수의 유형이 점차 건조한 기후조건 호수 유형으로 변화된 주요인으로 해석된다(그림 10).

한편, 발달 규모와 특성의 차이는 있으나, 밀양소분지에 발달된 지층들 중 하양층군의 최하부 지층인 칠곡층과 신라역암을 제외한 모든 지층에는 호성퇴적층이 나타난다. 신라역암은 층적선상지 퇴적층(Um *et al.*, 1983; Choi, H.I., 1985)이므로 호성퇴적층의

발달이 부재할 수 있다. 그러나 칠곡층은 하성평원 퇴적층의 특성을 가지며 두께 또한 500 m에 달하므로(Um *et al.*, 1983; Choi, H.I., 1985; Chough and Sohn, 2010), 하산동층이나 함안층에서와 같은 유형의 호성퇴적층이 발달되었을 가능성이 내재한다. 그럼에도 불구하고 지금까지 칠곡층에서의 호성퇴적층의 발달은 보고된 바 없다. 이에 대한 구체적인 원인 규명이 이 연구에서는 이루어지지 않았으나, 칠곡층 및 신라역암의 퇴적 시기에 수반된 퇴적분지 중심의 동측으로의 이동 및 동측부에서의 활발한 화산분출 활동(Chough and Sohn, 2010)에 의한 화산체의 성장이 호성퇴적층의 부재로 이어진 것으로 해석된다. 이와 같은 칠곡층 내 호성퇴적층의 부재는

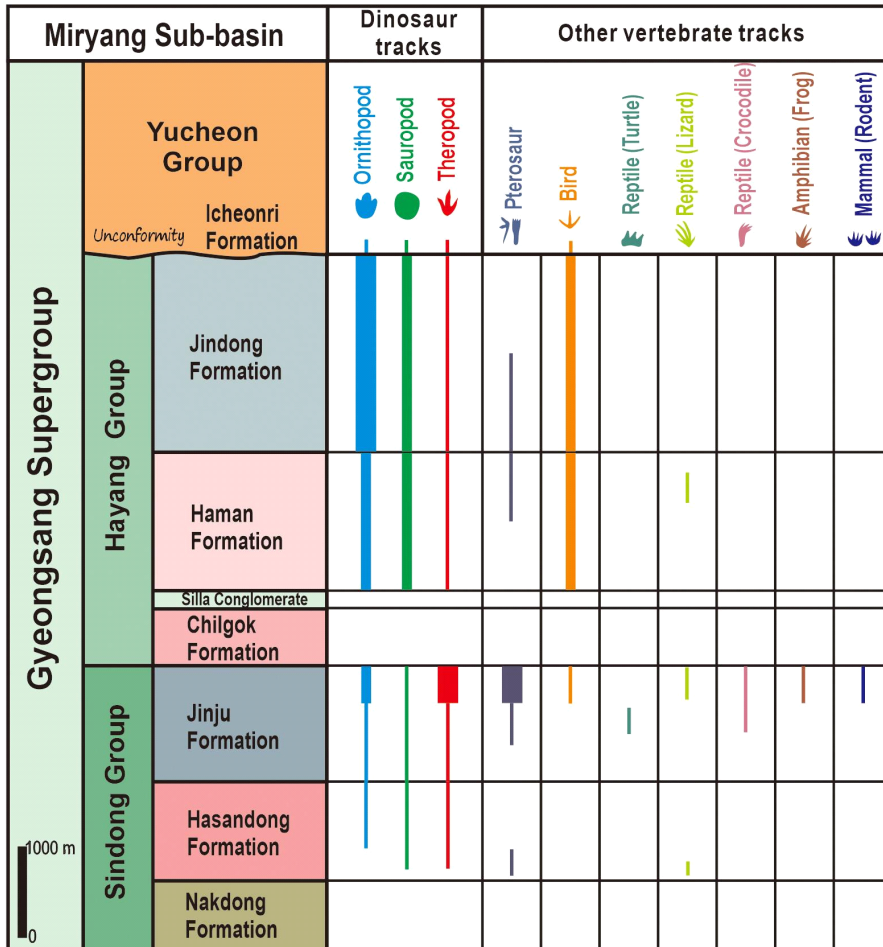


Fig. 11. Brief summary of the stratigraphic occurrences of the vertebrate tracks in the Miryang Sub-basin, Gyeongsang Supergroup (summarized from Kim and Paik (2017), Kim, K.S. *et al.* (2017a, 2017b, 2018, 2019a, 2019b, 2020), Kim and Huh (2018), Lee *et al.* (2018), Lockley *et al.* (2020), and Ha *et al.* (2022)).

공룡을 비롯한 척추동물의 발자국화석이 칠곡층 내에서 아직까지 보고되지 않은 사실(그림 11)과도 연관되어 있을 것으로 여겨진다.

칠곡층과 신라역암의 퇴적 이후에, 동측부로의 분지 확장이 이어지며(Chough and Sohn, 2010; Cheon *et al.*, 2020) 발달된 함안층 및 진동층의 호수주변부 이질평원 퇴적층에 나타나는 증발광물흔들은 퇴적 당시 염호의 존재를 지시한다(Paik and Kim, 2006; Paik *et al.*, 2007). 실제로 의성분지 하양층군 분포 지역에서의 심부 지하수의 지화학적 특성에 대한 분석과 반응모델링 결과, 지하에 석고와 암염등의 증발암과 탄산염암층이 존재함이 확인되었으며, 특히 지하수 내 황산염 내의 황 동위원소( $\delta^{34}\text{S}$ ) 값은 육성기원 증발암의 특성과 일치하는 것으로 나타났다(Choi *et al.*, 2012). 이는 지표에 노출된 하양층군 퇴적층에서의 증발광물흔 존재와 함께, 경상분지 진화과정에서 염호가 발달했음을 뒷받침하는 것이다. 즉, 함안층과 진동층의 퇴적 시기에 발달된 호수의 중심부에는 증발암층이 일정 규모로 퇴적되었을 것이며, 전술한 바와 같이 이와 같은 층 규모의 부분적인 발달은 대구 달성과 경남 고성 지역에 분포된 진동층의 이질평원퇴적층에서 확인되었다. 따라서 지표에 노출된 함안층과 진동층 퇴적층들의 측방 연장부인 지하에는 호수중심부 공간에서 퇴적된 증발암층이 존재할 것으로 여겨진다.

한편, 밀양소분지 호성퇴적층에는 호수의 규모가 제한적인 낙동층을 제외하고는 공룡발자국 화석을 비롯한 척추동물 발자국화석의 산출이 일반적이다(그림 11). 특히 진주층 상부와 함안층 및 진동층의 호성퇴적층에서 이들 척추동물 발자국화석의 양적인 산출과 다양성이 높게 나타난다. 이러한 산출 배경에는 화석층의 노출과 조사의 부족함에 일정 부분 기인할 수도 있을 것이나, 이보다는 이들 퇴적층의 고환경적 요인에 의한 것에 더욱 무게를 둘 수 있다. 즉, 습윤한 시기보다는 가뭄이 지속되는 시기에 척추동물들의 호수 이용이 보다 활발이 이루어지고(Paik *et al.*, 2001a, 2006; Kim *et al.*, 2016), 이와 함께 발자국의 보존 확률 또한 습윤한 시기보다는 건조한 시기가 상대적으로 높은 고환경적 배경이 이들 호성퇴적층에서의 다양한 척추동물 발자국화석의 보존으로 이어진 것으로 해석된다. 한편, 함안층 퇴적시기에 발달했던 간헐호들은 백악기에 한반도를 통과

하는 나그네새들의 일시적인 서식 터로 이용되었을 것이다(Kim *et al.*, 2011).

이상에서 살펴 본 바와 같이 밀양소분지 내 호수의 전반적인 퇴적기록과 고환경 및 층서적 변화 특성은 백악기 동아시아 지역에서의 기후변화 및 한반도 동남부에서의 조구조운동 특성과 부합하여 나타난다. 한편, 경상분지 내 염호의 발달은, 오늘날의 대표적인 내륙 건조분지로 알려진 호주 남동부 Lake Eyre 분지(Nanson *et al.*, 2008)와 미국 캘리포니아 Death Valley 분지처럼, 분지 중심부가 해수면 아래에 놓였을 가능성을 시사한다. 이와 같은 지형 특성은 Lee and Lim (2022)이 제시한 경상분지 초기의 전호분지 발달 이론과 연계되는 것으로, 이에 대해서는 다각적인 측면에서의 후속연구가 필요할 것으로 여겨진다.

## 6. 결론

1) 경상분지 남부의 밀양소분지에 발달했던 호수들은 하성기원의 범람원 호수(낙동층, 하산동층, 함안층), 우각호(하산동층), 담수호(진주층), 염호(함안층, 진동층, 유천층군), 다년호(하산동층, 진주층), 간헐호(함안층, 진동층), 균형층전 호수(하산동층, 진주층), 미충전 호수(진동층, 유천층군) 등 여러 유형의 특성을 띤다.

2) 기후조건에 따른 밀양소분지의 호수 유형은 하부층으로부터 습윤(낙동층) → 건조(하산동층) → 습윤에서 건조(진주층) → 건조(함안층과 진동층 및 유천층군 지층) 순으로의 층서적 변화를 나타내며, 이처럼 상부층으로 가면서 점차 건조한 기후조건의 호수 유형으로 변화된 특성은 경상분지 발달과정에서의 산악효과의 증가에 따른 것으로 해석된다.

3) 함안층과 진동층에서의 염호 발달은, 오늘날의 대표적인 내륙 건조분지에서와 같이, 경상분지 중심부가 해수면 아래에 놓였을 가능성을 시사한다.

4) 함안층과 진동층의 퇴적 시기에 발달된 호수의 중심부에는 증발암층이 일정 규모로 퇴적되었을 것이며, 이에 따라 지표에 노출된 함안층과 진동층 퇴적층들의 측방 연장부인 지하에는 호수중심부 공간에서 퇴적된 증발암층이 존재할 것으로 여겨진다.

5) 밀양소분지 내 호수의 전반적인 퇴적기록과 고환경 및 층서적 변화 특성은 백악기 동아시아 지

역에서의 기후변화 및 한반도 동남부에서의 조구조 운동 특성과 부합한다.

6) 이상에서의 연구결과가 경상분지 호수들의 전체 특성을 대표하는 데에는 비록 제한성이 있을 것이나, 경상분지에 발달했던 호수들의 고환경적 특성을 통합적으로 이해하는 데에는 유용한 바탕 자료가 될 수 있을 것이다.

## 감사의 글

이 연구는 한국연구재단 이공학 개인기초연구사업 과제(NRF-2018R1D1A1B07041872)와 산업통상자원부 및 한국에너지기술평가원 과제(No. 2020 151010020)의 지원에 의해 이루어졌으며, 이에 감사를 드린다. 아울러 논문 내용의 완성도 및 가독성을 높이기 위해 가치 있는 의견을 제시해 주신 심사위원분들께 큰 감사를 드립니다.

## REFERENCES

- Anadon, P., Cabrera, L. and Kelts, K. (Eds.), 1991, Lacustrine Facies Analysis. John Wiley & Sons, 318 p.
- Bohacs, K.M., Carroll, A.R., Neal, J.E. and Mankiewicz, P.J., 2000, Lake-basin type, source potential, and hydrocarbon character: an integrated sequence- stratigraphic geochemical framework. In: Gierlowski-Kordesch, E. and Kelts, K.R. (eds.), Lake Basins Through Space and Time. AAPG Studies in Geology, 46, 3-34.
- Broccoli, J.A. and Manabe, S., 1997, Mountains and mid-latitude aridity. In: Ruddima, W.F. (Ed.), Tectonic Uplift and Climate Change. Plenum Press, New York, 89-121.
- Chae, Y.-U., Ha, S., Joo, Y.J., Paik, I.S., Kang, H.-C. and Lim, H.S., 2022, Detrital zircon U-Pb ages of the Cretaceous Dadaepo Formation in Busan, Korea and their geological implication. Episodes, <https://doi.org/10.18814/epiiugs/2022/022031>.
- Chang, K.H., 1975, Cretaceous stratigraphy of southeast Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 11, 1-23.
- Chang, K.H., 1977, Late Mesozoic stratigraphy, sedimentation and tectonics of southeastern Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 13, 76-90 (in Korean with English abstract).
- Chang, K.H., 1978, Late Mesozoic stratigraphy, sedimentation and tectonics of southeastern Korea (II)-with discussion on petroleum possibility. Journal of the Geological Society of Korea, 14, 120-135 (in Korean with English abstract).
- Chang, K.H., Suzuki, K., Park, S.-O., Ishida, K. and Uno, K., 2003, Recent advances in the Cretaceous stratigraphy of Korea. Journal of Asian Earth Sciences, 21, 937-948.
- Chang, T.W., Kang, P.J., Park, S.H., Hwang, S.G. and Lee, D.W., 1983, Explanatory text of a geologic map of Pusan-Gadeog sheet (1:50,000). Korea Institute of Energy and Resources, 22 p.
- Cheon, Y., Ha, S., Lee, S. and Son, M., 2020, Tectonic evolution of the Cretaceous Gyeongsang Back-arc Basin, SE Korea: Transition from sinistral transtention to strike-slip kinematics. Gondwana Research, 83, 16-35.
- Choi, B.Y., Yun, S.T., Mayer, B., Hong, S.Y., Kim, K.H. and Jo, H.Y., 2012, Hydrogeochemical processes in clastic sedimentary rocks, South Korea: A natural analogue study of the role of dedolomitization in geologic carbon storage. Chemical Geology, 306-307, 103-113.
- Choi, D.K., 1985, Spores and pollen from the Gyeongsang Supergroup, southeastern Korea and their chronologic and paleoecologic implications. Journal of Paleontological Society of Korea, 1, 33-50 (in Korean with English abstract).
- Choi, H.I., 1985, Sedimentology and its implication for stratigraphic classifications of the Cretaceous Gyeongsang Basin. Journal of the Geological Society of Korea, 21, 26-37.
- Choi, H.I., 1986a, Sedimentation and evolution of the Cretaceous Gyeongsang Basin, southeastern Korea. Journal of Geological Society of London, 143, 29-40.
- Choi, H.I., 1986b, Fluvial plain/lacustrine facies transition in the Cretaceous Sindong Group, south coast of Korea. Sedimentary Geology, 48, 295-320.
- Choi, H.I., 1999, Upper Mesozoic. In: Geological Society of Korea (ed.), Geology of Korea. Sigma Press, 233-273 (in Korean).
- Choi, H.I., Son, J.D., Oh, J.H., Choi, Y.J., Yoon, H.S., Cheon, S.S., Yang, M.Y., Kim, S.G., Cho, D.H., Moon, C.B., Min, S.S. and Park, Y.S., 1982, Geological, Geochemical and Geophysical studies on the Gyeongsang Supergroup in the Euseong area. KIER Bulletin 28, Korea Institute of Energy and Resources, 50 p (in Korean).
- Choi, S., Kim, H.J., Paik, I.S., Park, Y., Jung, H. and Xing, X., 2023, Turtle eggs from the Lower Cretaceous Hasandong Formation (South Korea) with relic aragonite under significant thermal maturity. Journal of Vertebrate Paleontology, <https://doi.org/10.1080/02724634.2023.2183866>.
- Choi, S.J., 1987, Study on the Lower Cretaceous charophytes from the upper Gyeongsang Supergroup. Journal of the Paleontological Society of Korea, 3, 79-92.
- Choi, S.J., 1989, Fossil charophytes from the Nagdong Formation in Seonsangun, Gyeongsangbukdo, Korea. Journal of the Paleontological Society of Korea, 5,

- 28-38.
- Chough, S.K. and Sohn, Y.K., 2010, Tectonic and sedimentary evolution of a Cretaceous continental arc-backarc system in the Korean peninsula: new view. *Earth-Science Reviews*, 101, 225-249.
- Chumakov, N.M., Zharkov, M.A., Herman, A.B., Doludenko, M.P., Kalandadze, N.N., Lebedev, E.L., Ponomarenko, A.G. and Rautian, A.S., 1995, Climatic zones in the middle of the Cretaceous Period. *Stratigraphy and Geological correlation*, 3, 3-14.
- Chun, H.Y., Bong, P.Y., Lee, H.Y. and Choi, S.J., 1988, Paleontology and stratigraphy of the Chungnam Coalfield. KR-87-28, 1-52 (in Korean with English abstract).
- Chun, J.H., 1992, Depositional environments of the Lower Cretaceous Jinju Formation in the Euisung Sub-basin, Gunwi and Daegu areas and Miryang Sub-basin, Jinju area. M.S. thesis, Pukyong National University, 76 p (in Korean with English abstract).
- Cohen, A.S., 2003, *Paleolimnology*. Oxford University Press, 500 p.
- Critchfield, H.J., 1983, *General Climatology*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs. 453 p.
- De Batist, M. and Chapron, E., 2008, Lake systems: Sedimentary archives of climate change and tectonics. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 259, 93-95.
- Demko, T.M., Currie, B.S. and Nicoll, K.A., 2004, Regional paleoclimatic and stratigraphic implications of paleosols and fluvial/overbank architecture in the Morrison Formation (Upper Jurassic), Western Interior, USA. *Sedimentary Geology*, 167, 115-135.
- Diaz, H.F. and Bradley, R.S., 2004, The Hadley Circulation: Present, Past and Future. *Advances in Global Change Research*, 21, [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2944-8\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2944-8_1).
- Escapa, I. and Leslie, A., 2017, A new Cheirolepidiaceae (Coniferales) from the Early Jurassic of Patagonia (Argentina): Reconciling the records of impression and permineralized fossils. *American Journal of Botany*, 104, 322-334.
- Fierson, D.M.W., Lu, J. and Chen, G., 2007, Width of the Hadley cell in simple and comprehensive general circulation models. *Geophysical Research Letters*, 34, <https://doi.org/10.1029/2007GL031115>.
- Frakes, L.A., 1979, *Climates throughout Geologic Time*. Amsterdam, New York: Elsevier Scientific, 304 p.
- Gierlowski-Kordesch, E. and Kelts, K., 1994, *Global Geological Record of Lake Basins*. Vol. 1, Cambridge University Press, 427 p.
- Gierlowski-Kordesch, E. and Kelts, K., 2000, Lake Basins through Space and Time. *AAPG Studies in Geology*, 46, 648 p.
- Giralt, S., Cabrera, L. and Gierlowski-Kordesch, E.H., 2010, Paleolimnology. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 294, 1-93.
- Ha, S., Kim, K.S., Lim, H.S., Lockley, M.G., Yoo, J.S. and Lim, J.D., 2022, Diminutive pterosaur tracks and trackways (*Pteraichnus gracilis* ichnosp. nov.) from the Lower Cretaceous Jinju Formation, Gyeongsang Basin, Korea. *Cretaceous Research*, 131, 105080, <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2021.105080>.
- Han, R., Kim, J.-S., Kim, C.-M., Hirose, T., Jeong, J.O. and Jeong, G.Y., 2019, Dynamic weakening of ring faults and catastrophic caldera collapses. *Geology*, 47, 107-110.
- Hong, S.K., Lee, Y.I. and Yi, S., 2012, Carbon isotope composition of terrestrial plant matter in the Upper Cretaceous Geoncheonri Formation, Gyeongsang Basin, Korea: Implications for Late Cretaceous palaeoclimate on the East Asian continental margin. *Cretaceous Research*, 35, 169-177.
- Hong, S.K., Yi, S. and Shinn, Y.J., 2020, Middle Albian climate fluctuation recorded in the carbon isotope composition of terrestrial plant matter. *Journal of Asian Earth Sciences*, 196, 104363.
- Houck, K.J. and Lockley, M.G., 2006, Life in an active volcanic arc: Petrology and sedimentology of dinosaur track beds in the Jindong Formation (Cretaceous), Gyeongsang Basin, South Korea. *Cretaceous Research*, 27, 102-122.
- Hwang, S.K., Kim, S.W., Kim, S.-K., Ahn, U.S., Jo, I.H., Lee, S.J. and Kim, J.J., 2019, Chronostratigraphic implication of the Yucheon Group in Gyeongsang basin, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 55, 633-647 (in Korean with English abstract).
- Jo, H.R., 2003, Depositional environments, architecture, and controls of Early Cretaceous non-marine successions in the northwestern part of Kyongsang Basin, Korea. *Sedimentary Geology*, 161, 269-294.
- Jo, H.R. and Chough, S.K., 2001, Architectural analysis of fluvial sequences in the northwestern part of Kyongsang Basin (Early Cretaceous), SE Korea. *Sedimentary Geology*, 144, 307-334.
- Kang, H.C. and Paik, I.S., 2013, Review on the geological ages of the formations in the Gyeongsang Basin, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 49, 17-29 (in Korean with English abstract).
- Kataoka, K.S., Urabe, A., Manville, V. and Kajiyama, A., 2008, Breakout flood from an ignimbrite-dammed valley after the 5 ka Numazawako eruption, northeast Japan. *GSA (Bulletin)*, 120, 1233-1247.
- Kee, W.-S., Kim, S.W., Kim, H., Hong, P., Kwon, C.W., Lee, H.-J., Cho, D.-L., Koh, H.J., Song, K.-Y., Byun, U. H., Jang, Y. and Lee, B.C., 2019, *Geologic Map of Korea*. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources.
- Kim, H.J. and Paik, I.S., 2001, Sedimentary facies and environments of the Cretaceous Jindong Formation in

- Goseong-gun, Gyeongsangnamdo. Journal of the Geological Society of Korea, 37, 235-256 (in Korean with English abstract).
- Kim, H.J. and Paik, I.S., 2017, Preliminary study on the new pterosaur footprints from the Early Cretaceous Hasandong Formation of Hadong-gun, Gyeongsangnam-do, South Korea. 77<sup>th</sup> Annual Meeting of Society of Vertebrate Paleontology (Abstracts), August 23-26, Calgary, Canada, p. 142.
- Kim, H.J., Paik, I.S. and Huh, M., 2011, Bird footprint-bearing deposits from the Cretaceous Haman Formation in the southern Gyeongsang Basin: occurrences, taphonomy and paleoenvironments. Journal of the Geological Society of Korea, 47, 97-122 (in Korean with English abstract).
- Kim, H.J., Paik, I.S., Kim, S. and Lee, H., 2018, Sedimentary facies, paleoenvironments, and stratigraphy of the Haman Formation (Early Cretaceous) in Sopo-ri, Haman-gun, Gyeongsangnam-do, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 54, 1-19 (in Korean with English abstract).
- Kim, H.J., Paik, I.S., Lee, J.E. and Huh, M., 2008, Bird footprint fossils from the Upper Cretaceous Jindong Formation at Hogyeri, Masan city, Gyeongsangnamdo, Korea: occurrences and paleoenvironmental implications. Journal of the Geological Society of Korea, 44, 729-745 (in Korean with English abstract).
- Kim, H.J., Paik, I.S. and Lim, J.-D., 2014, Dinosaur Track-Bearing Deposits at Petroglyphs of Bangudae Terrace in Daegokcheon Stream, Ulju (National Treasure No. 285): Occurrences, Paleoenvironments, and Significance in Natural history. Munhwajae Korean Journal of Cultural Heritage Studies, 47, 46-67 (in Korean with English abstract).
- Kim, H.J., Paik, I.S., Park, J.G., Jeong, E.K., Kim, K., Baek, S.G., Seo, Y.K., Kim, Y.-S. and Lee, H., 2022, Cretaceous Icheonri Formation at Sinpyeongri Coast, Gijang County, Busan, Korea: Occurrences and values in geological heritage. Journal of the Geological Society of Korea, 58, 1-22 (in Korean with English abstract).
- Kim, I.S., Kang, H.C. and Lee, H.K., 1993, Paleomagnetism of Early Cretaceous sedimentary rocks in Chingyo-Sachon area, southwestern Gyeongsang Basin. Economic and Environmental Geology, 26, 519-539 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.Y. and Huh, M., 2018, Dinosaurs, Birds, and Pterosaurs of Korea: A Paradise of Mesozoic Vertebrates. Springer, 320 p.
- Kim, J.Y., Lockley, M.G. and Chun, H.Y., 2016, New dinosaur tracks from the Lower Cretaceous (Valanginian-Hauterivian) Saniri Formation of Yeongdong area, central Korea: Implications for quadrupedal ornithopod locomotion. Cretaceous Research, 61, 5-16.
- Kim, J.Y. and Paik, I.S., 1997a, Nonmarine *diplocraterion luniforme* (Blackenhorn 1916) from the Hasandong Formation (Cretaceous) of the Jinju area, Korea. Ichnos, 5, 131-138.
- Kim, J.Y. and Paik, I.S., 1997b, Origin of graded cherty beds containing *Skoliithos* ichnosp. from the Cretaceous Yucheon Group in Mt. Hwangryeong Area, Pusan, Korea. Jour. Korean Earth Science Society, 18, 51-59.
- Kim, K.S., Lim, J.D., Lockley, M.G., Kim, D.H., Piñuela, L. and Yoo, J.S., 2019b, Largest Cretaceous lizard track assemblage, new morphotypes and longest trackways comprise diverse components of an exceptional Korea Konservat-Lagerstätten ichnofauna. Scientific Reports, 9, 13278, doi.org/10.1038/s41598-019-49442-0.
- Kim, K.S., Lim, J.D., Lockley, M.G., Xing, L. and Choi, Y., 2017a, Koran trackway of a hopping, mammaliform trackmaker is first from the Cretaceous of Asia. Cretaceous Research, 74, 188-191.
- Kim, K.S., Lim, J.D., Lockley, M.G., Xing, L., Ha, S.J., Kim, C.B., Paik, I.S., Ahn, J.H. and Mun, S.C., 2018, First report of a distinctive theropod track assemblage from the Jinju Formation (Lower Cretaceous) of Korea provides strong correlations with China. Cretaceous Research, 81, 26-35.
- Kim, K.S., Lockley, M.G., Lim, J.D., Bae, S.M. and Romilio, A., 2020, Trackway evidence for large bipedal crocodylomorphs from the Cretaceous of Korea. Scientific Reports, 10, 8680, doi.org/10.1038/s41598-020-66008-7.
- Kim, K.S., Lockley, M.G., Lim, J.D. and Kim, D.H., 2019a, The oldest known anuran (frog) trackways from the Jinju Formation, Lower Cretaceous, Korea. Cretaceous Research, 96, 142-148.
- Kim, K.S., Lockley, M.G., Lim, J.D., Pinuela, L., Xing, L. and Moon, H.W., 2017b, First report of lacertiform (lizard) tracks from the Cretaceous of Asia. Cretaceous Research, 69, 62-70.
- Koto, B., 1903, An orographic sketch of Korea. Journal of the College of Science, Imperial University, Tokyo, 19-1, 1-16.
- Lee, D.W., 1999, Strike-slip fault tectonics and basin formation during the Cretaceous in the Korean Peninsula. Island Arc, 8, 218-231.
- Lee, G., Besse, J. and Courtillot, V., 1987, Eastern Asia in the Cretaceous: new paleomagnetic data from South Korea and a new look at Chinese and Japanese data. Journal of Geophysical Research, 92, 3580-3596.
- Lee, H.-J., Lee, Y.-N., Fiorillo, A.P. and Lü, J., 2018, Lizards ran bipedally 110 million years ago. Scientific Reports, 8, 2617, https://doi.org/10.1038/s41598-018-20809-z.
- Lee, K.C., Woo, K.S., Paik, K.H. and Choi, S.J., 1991, Depositional environments and diagenetic history of the Panyaweol, Hwasan, and Shinyangdong formations.



- Kywongsang Supergroup, Korea-with emphasis on carbonate rocks. *Journal of the Geological Society of Korea*, 27, 471-492.
- Lee, T.-H., Park, K.-H. and Yi, K., 2018a, Nature and evolution of the Cretaceous basins in the eastern margin of Eurasia: A case study of the Gyeongsang Basin, SE Korea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 166, 19-31.
- Lee, T.-H., Park, K.-H. and Yi, K., 2018b, SHRIMP U-Pb ages of detrital zircons from the early Cretaceous Nakdong Formation, SE Korea: initiation of non-marine basin development and tectonic inversion. *The Island Arc*, 27, e12258.
- Lee, Y.I. and Kim, J.Y., 2005, Provenance of the Hayang Group (Early Cretaceous) in the Yeongyang Subbasin, SE Korea and its bearing on the Cretaceous paleogeography of SW Japan. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 228, 278-295.
- Lee, Y.I. and Lim, H.S., 2022, Detrital chromian spinels in the Cretaceous Sindong Group, SE Korea: implications for tectonic emplacement of hydrated mantle peridotites. *Journal of the Geological Society*, 179, <https://doi.org/10.1144/jgs2022-003>.
- Lim, H.S., Choi, T., Lee, H. and Lee, Y.I., 2019, Trace-element composition of the Cretaceous Sindong Group, Gyeongsang Basin, Korea and its implication for provenance. *Journal of Geological Society of Korea*, 55, 531-549 (in Korean with English abstract).
- Lockley, M.G., Lim, J.D., Park, H.D., Romilio, A., Yoo, J.S., Choi, J.W., Kim, K.S., Choi, Y., Kang, S.-H., Kim, D.H. and Kim, T.H., 2020, First reports of *Crocodylropodus* from East Asia: implications for the palaeoecology of the Lower Cretaceous. *Cretaceous Research*, 111, 104441, [doi.org/10.1016/j.cretres.2020.104441](https://doi.org/10.1016/j.cretres.2020.104441).
- Mack, G.H. and James, W.C., 1994, Paleoclimate and the global distribution of paleosols. *The Journal of Geology*, 102, 360-366.
- Manville, V., Hodgson, K.A. and Nairn, I.A., 2007, A review of break-out floods from volcanogenic lakes in New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 50, 131-150.
- Nanson, G.C., Price, D.M., Jones, B.G., Maroulis, J.C., Coleman, M., Bowman, H., Cohe, T.J., Pietsch, T.J. and Larsen, J.R., 2008, Alluvial evidence for major climate and flow regime changes during the middle and late Quaternary in eastern central Australia. *Geomorphology*, 101, 109-129.
- Nehza, O., Woo, K.S. and Lee, K.C., 2009, Combined textural and stable isotopic data as proxies for the mid-Cretaceous paleoclimate: a case study of lacustrine stromatolites in the Gyeongsang Basin, SE Korea. *Sedimentary Geology*, 214, 85-99.
- Nichols, G.J. and Fisher, J.A., 2007, Processes, facies and architecture of fluvial distributary system deposits. *Sedimentary Geology*, 195, 75-90.
- Oh, C., Kim, K., Paik, I.-S. and Lim, J.-D., 2011, Cretaceous conifer woods of Korea: Occurrences and palaeobiological implications. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 164, 67-83.
- Oh, C., Philippe, M. and Kim, K., 2015, *Xenoxylon* synecology and palaeoclimatic implications for the Mesozoic of Eurasia. *Acta Palaeontologica Polonica*, 60, 245-256.
- Okada, H., 1999, Plume-related sedimentary basins in East Asia during the Cretaceous. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 150, 1-11.
- Okada, H., 2000, Nature and development of Cretaceous sedimentary basins in East Asia: a review. *Geosciences Journal*, 4, 271-282.
- Paik, I.S., 1998, Vertic paleosols from the Sindong Group: occurrences, paleoenvironments, and stratigraphy. *Journal of the Geological Society of Korea*, 34, 58-72 (in Korean with English abstract).
- Paik, I.S. and Chun, J.H., 1993, Laminal calcretes, calcrete pisoids and ooids, and rhizoliths from the Kyeongsang Supergroup, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 29, 108-117 (in Korean with English abstract).
- Paik, I.S., Huh, M. and Kim, H.J., 2004, Dinosaur egg-bearing deposits (Upper Cretaceous) of Boseong, Korea: occurrence, palaeoenvironments, taphonomy, and preservation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 205, 155-168.
- Paik, I.S., Huh, M., Park, K.H., Hwang, K.G., Kim, K.S. and Kim, H.J., 2006, Yeosu dinosaur track sites of Korea: The youngest dinosaur track records in Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 28, 457-468.
- Paik, I.S., Huh, M., So, Y.H., Lee, J.E. and Kim, H.J., 2007, Traces of evaporites in the Upper Cretaceous lacustrine deposits of Korea: origin and paleoenvironmental implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 30, 93-107.
- Paik, I.S. and Kim, H.J., 1998, Subaerial lenticular cracks in Cretaceous lacustrine deposits, Korea. *Journal of Sedimentary Research*, 68, 80-87.
- Paik, I.S. and Kim, H.J., 2003, Palustrine calcretes of the Cretaceous Gyeongsang Supergroup, Korea: Variation and paleoenvironmental implications. *The Island Arc*, 12, 110-124.
- Paik, I.S. and Kim, H.J., 2006, Playa lake and sheetflood deposits of the Upper Cretaceous Jindong Formation, Korea: Occurrences and paleoenvironments. *Sedimentary Geology*, 187, 83-103.
- Paik, I.S. and Kim, H.J., 2014, Roll-up clasts in the Cretaceous Haman Formation, Korea: Occurrences, origin and paleoenvironmental implications. *Journal of the Geological Society of Korea*, 50, 269-276 (in Korean with English abstract).
- Paik, I.S., Kim, H.J., Baek, S.G. and Seo, Y.K., 2020a, New

- evidence for truly gregarious behavior of ornithopods and solitary hunting by a theropod. *Episodes*, 43, 1045-1052.
- Paik, I.S., Kim, H.J., Hwang, J.Y., Park, J.G., Lee, H. and Park, M.E., 2020b, Occurrences and provenance of the chrome mica clasts from the lower part of the Hasandong Formation, Hadong, Gyeongsangnam-do, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 56, 311-326 (in Korean with English abstract).
- Paik, I.S., Kim, H.J., Kim, K., Jeong, E.-K., Oh, C., Kim, N.-Y. and Lim, H.S., 2018b, Some reports and discussion for the paleoenvironments and stratigraphy of the Gyeongsang Basin. 2018 Fall Joint Conference of the Geological Sciences (Abstracts), Gyeongju, October 24-27, p. 161 (in Korean).
- Paik, I.S., Kim, H.J., Kim, S., Lee, J.E., So, Y.H. and Lee, H., 2019, Fossil-bearing deposits in the Jinju Formation at Jinju: Occurrences, paleoenvironments and stratigraphic implications. *Journal of the Geological Society of Korea*, 55, 513-530 (in Korean with English abstract).
- Paik, I.S., Kim, H.J. and Kim, Y.-S., 2021, Lacustrine deposits of the Hasandong Formation at Yangpori Coast, Hadong County, Gyeongsangnam-do, Korea: Occurrence, paleoenvironments, and stratigraphy. *Journal of the Geological Society of Korea*, 57, 629-647 (in Korean with English abstract).
- Paik, I.S., Kim, H.J., Lee, J.D., Kim, I.S., Kim, J.S. and Moon, B.C., 2000, Comparative sedimentology for the lacustrine deposits of the Upper Gyeongsang Supergroup in the Southeastern Gyeongsang Basin, Korea. *Journal of the Korean earth science society*, 21, 423-436 (in Korean with English abstract).
- Paik, I.S., Kim, H.J. and Lee, Y.I., 2001, Dinosaur track-bearing deposits in the Cretaceous Jindong Formation, Korea: occurrence, paleoenvironments and preservation. *Cretaceous Research*, 22, 79-92.
- Paik, I.S., Kim, H.J. and Park, J.G., 2018a, Bidirectional paleocurrent records in the Jindong Formation of the Gyeongsang Supergroup, Korea: Occurrences and paleoenvironmental implications. *Journal of the Geological Society of Korea*, 54, 321-333 (in Korean with English abstract).
- Paik, I.S., Kim, H.J., Park, K.H., Song, Y.S., Lee, Y.I., Hwang, J.Y. and Huh, M., 2001b, Palaeoenvironments and taphonomic preservation of dinosaur bone-bearing deposits in the Lower Cretaceous Hasandong Formation, Korea. *Cretaceous Research*, 22, 627-642.
- Paik, I.S. and Kim, J.Y., 1995, Calcareous paleosols from the Upper Hasandong Formation in the vicinity of Jinju, Korea: implications in floodplain sedimentation and paleoclimate. *Journal of the Geological Society of Korea*, 31, 482-498 (in Korean with English abstract).
- Paik, I.S., Kim, N.Y. and Kim, H.J., 2011, Shell deposits in the Lower Cretaceous Hasandong Formation from Daesong-ri, Geumnam-myeon, Hadong-gun: occurrences, taphonomy, paleoenvironments, and implications in Geological Heritage. *MUNNHWAJAE Korean Journal of Cultural Heritage Studies*, 44, 4-29 (in Korean with English abstract).
- Paik, I.S., Lee, J.D., Kim, J.J., Kim, I.S. and Park, C.W., 1997, Compound calccrete deposits from the Dadaepo Formation in Dusong Peninsula, Pusan: Origin, paleoenvironments, and stratigraphic implication. *Economic and Environmental Geology*, 30, 263-275 (in Korean with English abstract).
- Paik, I.S. and Lee, Y.I., 1994, Paleoclimatic records in floodplain lake deposits of the Cretaceous Hasandong Formation in Jinju area, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 30, 410-424 (in Korean with English abstract).
- Paik, I.S. and Lee, Y.I., 1998, Desiccation cracks in vertic paleosols of the Cretaceous Hasandong Formation, Korea: genesis and paleoenvironmental implications. *Sedimentary Geology*, 119, 161-179.
- Park, E.J., Yang, S.Y. and Currie, P.J., 2000, Early Cretaceous dinosaur teeth of Korea. *J. Paleont. Soc. Korea Special Publication*, 4, 85-98.
- Park, J.G., Paik, I.S. and Kim, H.J., 2017, A Preliminary study on the occurrences and paleoenvironments of ichnofacies in the Daegu and the Banyawol formations, Gyeongsan city. 2017 Annual Fall Joint Conference of the Geological Sciences (Abstracts), Jeju, October 25-28, p. 423 (in Korean).
- Philippe, M., Jiang, H.E., Kim, K., Oh, C., Gromyko, D., Harland, M., Paik, I.S. and Thévenard, F., 2009, Structure and diversity of the Mesozoic wood genus *Xenoxylon* in Far East Asia: implications for terrestrial palaeoclimates. *Lethaia*, 42, 393-406.
- Renaut, R.W. and Last, W.M. (eds.), 1994, *Sedimentology and Geochemistry of Modern and Ancient Saline Lakes*. SEPM Special Publication, 50, 334 p.
- So, Y.H., Paik, I.S., Kim, H.J. and Kim, S.J., 2007, Cyclic deposits in the Haman Formation (Cretaceous) of the Gyeongsang Supergroup at Sinsu Island, Sacheon, Korea: Occurrence and origin. *Journal of the Geological Society of Korea*, 43, 1-19 (in Korean with English abstract).
- Sohn, J.D., 1989, *Sedimentology of the Jinju and Iljik formations of the Cretaceous Gyeongsang Supergroup in the Gunwi area, Gyeongsangbuk-do, Korea*. Ph.D. Thesis, Seoul National University, 110 p (in Korean with English abstract).
- Suzuki, K., 1940, Non-marine molluscan faunule of the Shiragi Series in South Korea. *Japanese Journal of Geology and Geography*, 17, 215-231.
- Tateiwa, I., 1929, *Geological Atlas of Chosen, Waegwan, Daegu, Yeongcheon, Gyeongju, and Joyang sheets*.

- Geological Survey of Chosen (Korea).
- Tiercelin, J.-J., 2002, Preface. *Sedimentary Geology*, 148, 3-8.
- Um, S.H., Choi, H.I., Son, J.D., Oh, J.H., Kwak, Y.H., Shin, S.C. and Yun, H.S., 1983, Geological and Geochemical Studies on the Gyeongsang Supergroup in the Gyeongsang Basin. Korea Institute of Energy and Resources Bull. 36, Korea Institute of Energy and Resources, Daejeon. 124 p (in Korean with English abstract).
- Vakhrameev, V.A., 1991, Jurassic and Cretaceous Floras and Climates of the Earth. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 318 p.
- Warren, J.K., 2010, Evaporites through time: Tectonic, climatic and eustatic controls in marine and nonmarine deposits. *Earth-Science Reviews*, 98, 217-268.
- White, J.D.L. and Riggs, N.R., 2001, Volcaniclastic Sedimentation in Lacustrine Settings. International Association of Sedimentologists Special Publication, No. 30, 309 p.
- Won, C.K., Kang, P.C. and Lee, S.H., 1978, Study on the tectonic interpretation and igneous pluton in the Gyeongsang Basin. *Journal of the Geological Society of Korea*, 14, 79-92 (in Korean with English abstract).
- Yang, S.Y., 1978, On the discovery of *Nipponoaia ryosekiana* from Gyeongsang Group, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 14, 33-43.
- Yun, S.H., 1993, Volcanic activity and cauldron structure of the Geumseongsan volcanic complex. *Journal of the Geological Society of Korea*, 29, 309-323 (in Korean with English abstract).

---

Received : October 3, 2022

Revised : November 11, 2022

Accepted : November 15, 2022