



Review

행매층에 대한 새로운 정의와 이의 지질학적 중요성

박채원¹, 송윤구^{1,*}, 김남수¹, 최성자², 최위찬³, 장이랑⁴

¹연세대학교

²한국지질자원연구원

³에스씨 컨템포러리

⁴전남대학교

A new definition of the Haengmae Formation and its geological significance

Chaewon Park¹, Yungoo Song^{1,*}, Namsoo Kim¹, Sung-Ja Choi², Ueechan Chwae³, Yirang Jang⁴

¹Department of Earth System Sciences, Yonsei University, Seoul 03722, Republic of Korea

²Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon 34132, Republic of Korea

³S/C Comtemporay, Daejeon 34139, Republic of Korea

⁴Faculty of Earth System and Environmental Sciences, Chonnam National University, Gwangju 61186, Republic of Korea

Received: May 8, 2024 / Revised: June 1, 2024 / Accepted: June 1, 2024

*Corresponding author: +82-2-2123-2671 / E-mail: yugoo@yonsei.ac.kr

요약: Park *et al.* (2023)은 최근 Scientific Reports에 발표한 논문에서 태백산분지 정선형 조선누층군의 행매층을 ‘오르도비스기-실루리아기 전이(Ordovician-Silurian Transition, OST) 시기에 형성된, 하부 탄산염암(정선석회암)을 부정합으로 덮고 있는 함력 미사질 쇄설성암(Pebble-bearing Fine Sand-sized Clastic rock, PBSC)’이라고 새롭게 정의하였다. 이 같은 정의를 내린 근거로, Park *et al.* (2023)은 Kim *et al.* (2020)이 행매층을 쇄설성 퇴적암의 층서적 단위로 기재한 정밀지질도를 발전시키며, 다음의 새로운 증거를 제시하였다. (1) 하부의 정선석회암층과 행매층 경계부에서 경사부정합 노두와 정선석회암층 최상부 표면에서 연속적인 카르스트(Karst) 침식구조가 발견되었다. (2) 행매층 쇄설성 저어콘의 U-Pb 연대자료들이 오르도비스기 최후기를 지시하였다. (3) *in-situ* $\delta^{18}\text{O}_{\text{quartz}}$ 및 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{carbonates}}$ 동위원소 분석값이 행매층에서 이상치를 보였다. Park *et al.* (2023)의 논문은 회동리층이 실루리아기 지층임을 시층서적 및 암층서적으로 재확인해 주었다는 점과, 전지구적 분포를 갖는 오르도비스기-실루리아기 전이(Ordovician-Silurian Transition, OST) 시기의 쇄설성암층이 한반도에도 존재한다는 것을 처음 확인했다는 점에서 중요한 지질학적 의미를 갖는다. 또한 이 연구가 행매층이 오르도비스기-실루리아기 전이 시기를 지시하는 층임을 증명함에 따라, 정선형 조선누층군과 다른 지역 조선누층군과의 층서 대비에서 요구되는 기준층을 확보하게 되었다. 이에 본 논평은 Park *et al.* (2023)의 논문이 갖는 지질학적 의미를 공유하고자 한다.

주요어: 행매층, 회동리층, 오르도비스기-실루리아기 전이, 쇄설성암, 정선형 조선누층군

ABSTRACT: Park *et al.* (2023) in a article published in Scientific Reports newly defined the Haengmae Formation of the Jeongseon-type Joseon Supergroup in the Taebaeksan Basin as follows. 『It is a Pebble-bearing Fine Sand-sized Clastic rock (PBSC) that uncomfortably covers the lower carbonate rock (Jeongseon Limestone), formed during the Ordovician-Silurian Transition (OST).』 Based on this definition, Park *et al.* (2023) further developed the detailed geological map provided by Kim *et al.* (2020), who designated the Haengmae Formation as a litho-stratigraphic unit of clastic sedimentary rocks, and presented the following new evidence: (1) At the boundary between the underlying Jeongseon Limestone and the Haengmae Formation, angular unconformity outcrop and continuous karst erosion structures on the upper surface of the Jeongseon Limestone were found. (2) U-Pb dating of detrital zircons from the Haengmae Formation indicated the latest Ordovician age. (3) In-situ $\delta^{18}\text{O}_{\text{quartz}}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{carbonates}}$ isotope analyses showed anomalies in the Haengmae Formation. The paper by Park *et al.* (2023) has significant geological importance for two main reasons: (1) It provides a reconfirmation chrono-stratigraphically and litho-stratigraphically that the Hoedongri Formation is of the Silurian period. (2) It finds firstly the presence of the clastic sedimentary unit at the Ordovician-Silurian Transition (OST) period with a global distribution, on the Korean Peninsula. Furthermore, by demonstrating that the Haengmae Formation serves as a stratigraphic marker indicating the Ordovician-Silurian Transition period, it has secured the essential reference layer required

for stratigraphic correlations between the Jeongseon-type Joseon Supergroup and the Joseon Supergroups of other regions. Therefore, this comment aims to share the geological significance of the paper by Park *et al.* (2023).

Key words: Haengmae Formation, Hoedongri Formation, Ordovician-Silurian Transition, clastic sedimentary rock, Jeongseon-type Joseon Supergroup

1. 서 언

태백산분지 정선형 조선누층군, 또는 용탄층군 내에 발달하는 행매층은 Lee (1980, 1982)에 의해 태백산분지에 분포하는 실루리아기 지층으로 보고된 회동리층 직하부에 위치하면서 정선석회암과 회동리층을 구분하는 기준이 되는 층으로 정의된 바 있다(Cheong *et al.*, 1979). 그러나 태백산분지 조선누층군 내 실루리아기 지층(회동리층)의 존재 가능성을 부정하는 의견이 대두되면서, 문제 해결의 중요한 열쇠가 되는 행매층이 독립된 암층서학적 단위인지와 언제 형성되었는지에 대해 논란이 지속되어 왔다.

최근 Park *et al.* (2023)은 Scientific Reports에 발표한 ‘In-situ $\delta^{18}\text{O}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ proxies in an unconformable clastic unit at the Ordovician-Silurian transition’ 논문에서 새로운 증거 제시를 통해 행매층이 『오르도비스기-실루리아기 전이(Ordovician-Silurian Transition, OST) 시기에 형성된, 하부 탄산염암(정선석회암)을 부정합으로 덮고 있는 쇄설성암 단위(Unconformable clastic unit)이며, 함력 미사질 쇄설성암(Pebble-bearing Fine Sand-sized Clastic rock, PBSC)』이라는 새로운 정의를 제시하였다. 이는 행매층을 암층서적으로 독립된 단위로 규정하고 그 형성시기를 결정한 결과로, 한반도 전기고생대 지질과 관련하여 매우 중요한 두 가지 의미를 갖는다. 첫 번째로, 행매층의 형성 시기가 오르도비스기-실루리아기 전이(Ordovician-Silurian Transition, OST) 시기로 정의됨에 따라 최근까지 논란이 되고 있는 상부의 회동리층이 실루리아기 지층임을 재확인했다는 것이며, 두 번째로 전기구적 분포를 갖는 오르도비스기-실루리아기 전이(Ordovician-Silurian Transition, OST) 시기의 쇄설성암층이 한반도에서 처음으로 확인되었다는 것이다.

본 논평에서는 먼저 Park *et al.* (2023) 논문의 대상인 행매층이 한반도 전기고생대 태백산분지 진화과정 연구에서 어떤 중요성이 있는지와, 행매층과 관련된 암층서적, 생층서적 및 시층서적 논란의 핵심이 무엇인지를 이전 연구 결과들을 종합 검토하여 제시하고, 그리고 Park *et al.* (2023) 논문이 이와 관련되어 어떤 새로운 증거들과 해석을 제시하였는지를 국내 지질학계에 소개하여 그 지질학적 의미를 공유하고자 한다.

2. 행매층의 층서적 중요성

행매층은 Son and Cheong (1976, 1977)이 정선도폭(1962)

서부 회동리지역에서 태백산지하자원조사단에 의해 정의된 정선석회암 상부에 발달하고 있는 함력 석회암층에 대해 처음 명명된 층이다. 이후 Cheong *et al.* (1979)이 코노돈트와 석회암 암상을 기준으로 정선지역 정선석회암을 하부에서 상부로 가면서 정선석회암, 행매층, 회동리층으로 세분화하면서 행매층을 회동리층 바로 아래에 있는 층으로 정의하였다.

행매층이 국내 지질학계에서 주요 관심의 대상이 된 이유는 Lee (1980, 1982)가 코노돈트 생층서 연구를 통해 행매층의 상부에 위치하는 회동리층을 실루리아기 지층으로 정의하였지만, 이후 이에 대한 반론으로 태백산분지 조선누층군 내에 실루리아기 지층의 존재 가능성을 부정하는 의견이 제기되었기 때문이다(Choi, 2019; Lee, 2018, 2019). 행매층은 논란이 있는 회동리층 하부에 위치하면서 정선석회암과 회동리층을 구분하는 기준이 되는 층이다. 따라서 행매층이 층서적 단위로 정의될 수 있는지와 그 형성 시기가 언제인지가 회동리층이 실루리아기의 지층이라는 Lee (1980)의 정의에 대해 제기된 의문을 해결할 수 있는 핵심이라는 점에서 중요성이 크게 부각되었다.

3. 행매층과 관련된 논란

3.1. 행매층은 암층서적(litho-stratigraphic)으로 독립된 단위인가?

행매층의 독립된 암층서적 단위 여부에 대한 논란은 Kim *et al.* (2020)이 정선지역 1:25,000 지질도 작성을 통해 행매층의 분포를 도시하면서 결론이 난 문제지만, 이번 Park *et al.* (2023) 논문에서 추가적인 증거가 제시되었기에 이를 언급하기에 앞서 이전에 어떤 의견과 반론들이 있었는지를 다시 한번 정리하고자 한다.

행매층의 층서적 문제의 시작은 Chae *et al.* (2011), Ree and Lee (2012) 및 Ree (2017) 등이 정선군 비룡동 지역 행매층을 함력 석회암층이 아니라 정선석회암층이 전단변형에 의해 국지화된 압쇄암질 대리암(Mylonitic marbles)이라고 주장하며, 이 변형 지역을 ‘비룡동전단대’로 명명하면서 부터이다. 이 주장에 따르면 ‘비룡동전단대’는 행매층과 회동리층의 경계에서 북서 내지 북동 주향에 북쪽으로 낮은 경사를 갖고, 역단층성 이동 감각을 보이며, 10 m 두께의 아문(healed) 단층각력암대를 지칭한다.

이에 대해 Kim *et al.* (2020)은 정선지역 전반에 걸친 지

질조사를 통해 기존의 태백산지구지질도(The Geological Investigation Corps Taebaegsan Region, 1962) 1:50,000 도폭에서 정선석회암층으로만 도시되어 있는 대상지역에서 정선석회암층, 행매층, 회동리층 분포를 상세히 기재한 정밀지질도(1:25,000)를 작성하여 공개하였다. 이를 통해 (1) 행매층이 지질도 상에서 추적 기재가 되는 뚜렷한 암상 특성을 갖는 암층서적 단위이고, (2) 소위 ‘비룡동전단대’는 전단대의 측방연장이 확인되지 않음을 밝혔다. 이 견해에 따르면 Ree and Lee (2012) 및 Ree (2017)이 제기한 ‘비룡동전단대’는 전단대 정의에 따라 존재해야 하는 연장성이 없으며, 단지 국지적인 전단작용의 증거가 일부 지역에서 나타난 현상에 불과하다는 것이다. 실제로 정선군 용탄리 비룡동 하천가에서 전단작용을 받은 행매층 노두가 관찰되나, 이는 엽리층과 괴상체가 교호하는 층이 습곡 운동 시에 습곡의 익부(Limb)를 따라 발생한 전단작용의 결과물이며, 비룡동 지역에 국한된 현상으로 그 연장은 확인되지 않았다(Kim *et al.*, 2020), Ree and Lee (2012) 및 Ree (2017)의 연구에서도 전단대 연장선의 존재 여부를 추적한 자료가 제시된 바 없다.

또 다른 의견으로 Woo and Ju (2016)은 다음과 같은 이유로 독립적인 지층이 될 수 없고, 정선석회암층의 일부라고 주장하였다. (1) 행매층과 회동리층 사이에 정선석회암층의 퇴적학적 특징을 가지는 석회암층이 나타난다. (2) 행매층의 두께가 불규칙적이다. (3) 행매층에 함유된 석영 입자가 속성작용의 영향을 받은 자생기원 가능성이 큰 분급 불량 특성을 보인다.

Kim *et al.* (2020)은 Woo and Ju (2016)이 주장한 (1) 행매층과 회동리층 사이에 정선석회암층의 퇴적학적 특징을 가지는 석회암층은 행매층 내 협재된 박층으로, 간헐적 분포를 하고 있을 뿐, 행매층을 대표하는 암상이 아니라는 반론을 제시하였다. (2) 행매층의 두께가 불규칙적이라는 의견에 대해서 Kim *et al.* (2020)은 황갈색 쇄설성 함력 탄산염암층인 행매층이 약 50 ~ 200 m 층후를 가지며 발달하고 있으며, 비룡동-행매동 일대까지 저각도의 층리를 유지하면서 측방 연장 추적이 비교적 용이한 암층서적 단위임을 보여주었다. 추가 연구를 통해서 행매층이 정선군 북평면과 강릉시 옥계면 일대까지 북동 방향으로 연장되고 있다는 것도 확인하였다(Song *et al.*, 2021). 또한 행매층 구성 물질들의 차별풍화로 인해 거칠고 기공이 많은 표면 특성(Kim *et al.*, 2020; Song *et al.*, 2021)으로 인해 일부 지역에서 층간 경계 구분이 어렵다는 점이 불규칙한 층 두께의 원인일 수는 있지만, 층후의 불규칙성이 행매층이 독립적 암층서 단위임을 부정할 이유가 될 수 없다고 하였다. (3) Woo and Ju (2016)의 또 다른 의견인 행매층 석영 입자가 속성작용의 영향을 받은 자생기원 가능성이 큰 분급 불

량 특성을 보인다는 것은 Kim *et al.* (2020)이 제시한 행매층 암석 시편의 미세조직 관찰 결과와 상반된다. Kim *et al.* (2020)은 행매층 내 단결정 석영입자 대부분이 0.2~0.5 mm 크기의 비교적 분급과 원마도가 좋은 쇄설성 기원의 미세조직 특성을 갖는다는 다수의 SEM-BSE 영상증거를 제시하여 이를 반박한 바 있다.

3.2. 행매층 구성암은 암석기재적(petrographic)으로 어떻게 정의할 수 있는가?

이전의 행매층 암상에 대한 기재들은 육안 관찰에 의존한 것으로, 역을 함유했다는 공통점이 있으나, 구체적인 암상 기재는 미흡했다. Son and Cheong (1977)은 행매층을 협재된 지층이 아니라 하부 정선석회암층을 부정합으로 덮고 있는 역을 함유한 층으로 간략히 정의한 바 있다. Cheong *et al.* (1979)는 황색 내지 황갈색 함력 석회암으로, 육안으로도 사암과 유사한 입상조직을 가지고 있고 쇄설성 조직이며, 특히 석영 입자는 원마도가 좋을 뿐만 아니라 자생기원이 아닌 쇄설성 기원임을 지시하는 여러 가지 쇄설성 퇴적물의 특징을 가진다고 구체적으로 기술하였다. 앞에서 언급한 바와 같이, Ree and Lee (2012) 및 Ree (2017)은 일부에서 나타나는 전단작용을 받은 함력 탄산염암을 정선석회암층이 전단변형에 의해 국지화된 압쇄암질 대리암으로 기재하였다.

Park *et al.* (2019)는 이전보다 구체적인 광물조성 및 미세조직 특성 연구를 통해 행매층을 함돌로마이트역-미사질 백운암(dolomite-pebble bearing fine sand-sized dolostone)으로 정의하였으며, 일부 방해석 함량이 높은 경우는 함돌로마이트역-미사질-방해석질 백운암(dolomite-pebble bearing fine sand-sized calcitic dolostone), 또는 함돌로마이트역-미사질-백운암질 입자암(dolomite-pebble bearing fine sand-sized dolomitic grainstone)으로 분류할 수 있음을 제시하였다.

Kim *et al.* (2020)은 Park *et al.* (2019)가 행매층을 함돌로마이트역-미사질 백운암(Dolomite pebble bearing fine sand-sized dolostone)으로 규정한 것은 구성 광물조성으로 분류하는 탄산염암 분류기준으로 볼 때 타당하다고 하였다. 이를 발전시켜서 Kim *et al.* (2020)은 행매층 암석에 대한 미세구조 관찰을 통해 구성물질들을 쇄설성 물질(돌로마이트 역을 비롯한 다양한 종류의 역, 원마도와 분급이 좋은 석영)과 열수 유입으로 생성된 자형, 혹은 반자형의 돌로마이트 단결정과 마그네슘-펜자이트 광물(Mg-Phengite series), 그리고 이후 충전물질(cement)로 침전된 방해석으로 구분하면서 이들이 단계적으로 퇴적, 혹은 생성되었으며, 따라서 쇄설성 물질을 약 50%를 함유한 행매층을 기원적으로는 쇄설성 함력 미사질암으로 정의할 수 있다는 의

견을 제시하였다.

Park *et al.* (2020)은 행매층에서 관찰되는 마그네슘-펜자이트 광물(Mg-Phengite series)의 광물화학적 특성과 미세조직 특성을 기반으로, 이 광물이 쇄설성 퇴적암이 생성된 후에 유입된 열수로부터 침전된 결과물임을 규명하였다. 역질 돌로마이트가 아닌 반자형의 돌로마이트 단결정도 열수변질 과정에서 생성된 것으로 판단하였다. 행매층 노두에 특징적으로 나타나는 많은 기공을 갖는 곰보구조(pock mark)의 발달 또한 행매층에 열수로 인한 열수변질 작용이 일어났음을 지지하는 뚜렷한 증거로 보았다(Park *et al.*, 2020). 이처럼 상하부의 탄산염암층(정선석회암과 회동리층)과는 달리 행매층이 집중적인 열수변질작용을 겪었다는 것은, 쇄설성 매체인 행매층이 탄산염암층보다 상대적으로 높은 다공질(porous) 특성을 가져 열수 유입이 용이했음을 지지한다.

위의 결과들을 종합해 보면, 행매층의 암석은 다양한 역을 함유하며, 쇄설성 물질과 탄산염광물을 유사한 비율로 함유하고 있다. 따라서 구성광물 함량을 기준으로 한다면 탄산염암으로 분류할 수 있다. 그러나 돌로마이트 역을 포함한 다양한 암석의 역과 사질 쇄설물들만이 행매층 퇴적 시기에 퇴적되었고, 탄산염광물 대부분은 행매층 퇴적 이후에 열수작용의 산물 및 충전물질(cement)로 생성되었다는 점에서 행매층을 기원적으로 쇄설성 퇴적암으로 분류하는 것이 타당하다고 본다.

3.3. 행매층의 퇴적 시기는 언제인가?

행매층의 퇴적 시기 결정을 위해 Choi (1980)와 Lee (1983)는 행매층 코노돈트 생층서 연구를 처음으로 시도하였다. Choi (1980)은 평창군 미탄면 평안리에 분포하는 행매층 시료로부터 많은 개체의 코노돈트를 발견하였으나, 산출 개체의 70% 이상 보존상태가 불량한 상태였으며, 식별이 가능한 코노돈트의 개체분류법을 통해 분류된 단순형 대부분은 오르도비스기 전반에 걸쳐 나타나는 속들이고, 복합형인 *Appalachiagnathus. cf. delicatus*는 중부 오르도비스기의 속임을 확인하였다. Lee (1983)는 Choi (1980)에 의해 분류된 행매층 코노돈트가 중기 오르도비스기를 지시한다고 해석하였으며, 행매층을 오르도비스기의 상부인 카라독세(Caradocian)에 대비하였다.

최근, Lee (2020)는 비룡지역에 분포하고 있는 행매층으로부터 산출된 코노돈트 화석군을 복합형 분류법(Multielement)으로 분류한 화석군이 중기 오르도비스기의 후기 다리윌리세2(Late Darriwilian 2)에 대비된다는 결과를 근거로 정선서부지역의 하부 석회암층과 행매층이 정선 중부 및 동부 지역 정선석회암층의 하부 및 중부에 대비되는 층이라고 주장한 바 있다.

행매층이 Park *et al.* (2019) 및 Kim *et al.* (2020)에 의해 기원적으로 쇄설성 퇴적암임이 밝혀진 점을 고려한다면, 행매층의 코노돈트는 원지성(in-situ)이 아닌 이차 퇴적과정을 거쳤을 것이다. Choi (1980)의 연구에서 산출된 코노돈트 개체의 70% 이상이 보존상태가 불량했던 것도 행매층 코노돈트 화석군이 이차 퇴적작용의 산물임을 지지한다. 따라서 행매층의 형성 시기는 코노돈트 화석군 생층서 연대 이후로 보는 것이 타당하고, Lee (1983)은 이를 고려하여 행매층을 코노돈트 화석군의 연대보다 후기인 오르도비스기의 상부인 카라독세(Caradocian)에 대비하였다. 이와는 달리, Lee (2020)은 코노돈트 화석군이 이차 퇴적작용의 결과물일 가능성을 배제하고 원지성(in-situ)이라는 전제로 생층서 연대를 결정하고 행매층을 중기 오르도비스기에 대비하였다.

Jang (2018)과 Kim *et al.* (2020)의 행매층 쇄설성 저어콘 대상 U-Pb LA-MC-ICP-MS/SHRIMP 연대 결과는 행매층 생성 시기에 대한 진전된 정보를 제공하고 있다. Jang (2018)은 비룡동 행매층에서 분리한 쇄설성 저어콘으로부터 449.5 ± 1.5 Ma ($n=18$)의 신뢰도 높은 U-Pb 연대 값을 취득했다. Kim *et al.* (2020)의 쇄설성 저어콘 U-Pb 연대 값 결과는 450~470 Ma의 넓은 범위에 분산되어 연대 특징이 어려웠지만, 다양한 기원물질이 유입된 쇄설성 퇴적암의 특성을 반영한 결과로 판단된다. 쇄설성 저어콘 U-Pb 연대 결과 중 높은 신뢰도를 갖는 Jang (2018)에 의해 취득된 연대는 오르도비스기 후기인 카티세(Katian)에 해당하는 시기이며, 이는 행매층의 최대 퇴적 시기이다.

위의 행매층 퇴적 시기에 대한 연구결과들을 종합해 보면, 쇄설성 퇴적암인 행매층의 퇴적 시기는 Lee (1983)의 코노돈트 화석군 생층서 연대에서 제시된 카라독세(Caradocian), 그리고 Jang (2018)의 U-Pb SHRIMP 연대인 카티세(Katian)보다도 후기인 오르도비스기 최후기, 혹은 실루리아기까지 연장될 수 있다고 보는 것이 타당할 것이다.

4. Park *et al.* (2023)이 제시한 행매층의 새로운 정의와 증거

4.1. 행매층의 새로운 정의

Park *et al.* (2023)은 행매층을 함돌로마이트역-미사질 백운암(Dolomite pebble bearing fine sand-sized dolostone)으로 규정한 Park *et al.* (2019)과, 쇄설성 물질을 약 50%를 함유한 행매층을 기원적으로는 쇄설성 함력 미사질암으로 정의할 수 있다는 Kim *et al.* (2020)의 견해를 발전시켜, 그 특성과 퇴적 시기에 대한 추가 증거를 근거로 『오르도비스기-실루리아기 전이(Ordovician-Silurian Transition, OST) 시기에 형성된, 하부 탄산염암(정선석회암)을 부정함으로

덮고 있는 쇄설성암 단위(Unconformable clastic unit)이며, 함력 미사질 쇄설성암(Pebble-bearing Fine Sand-sized Clastic rock, PBSC)』이라는 새로운 정의를 제시하였다.

특히 오르도비스기-실루리아기 전이(OST) 시기는 전지구적인 빙하기 도래로 인한 기후변화와 해수면 하강에 따른

퇴적환경 변화로 곤드와나 초대륙(Gondwana Supercontinent)을 비롯한 대륙 연변부 곳곳에 육원성 쇄설물의 대량 유입과 퇴적으로 쇄설성 퇴적암이 형성되었던 시기이다(Park *et al.* (2023)의 그림 1a 참조). Park *et al.* (2023)은 곤드와나 초대륙의 일부인 카세이시아 터레인(Cathaysia terrane)

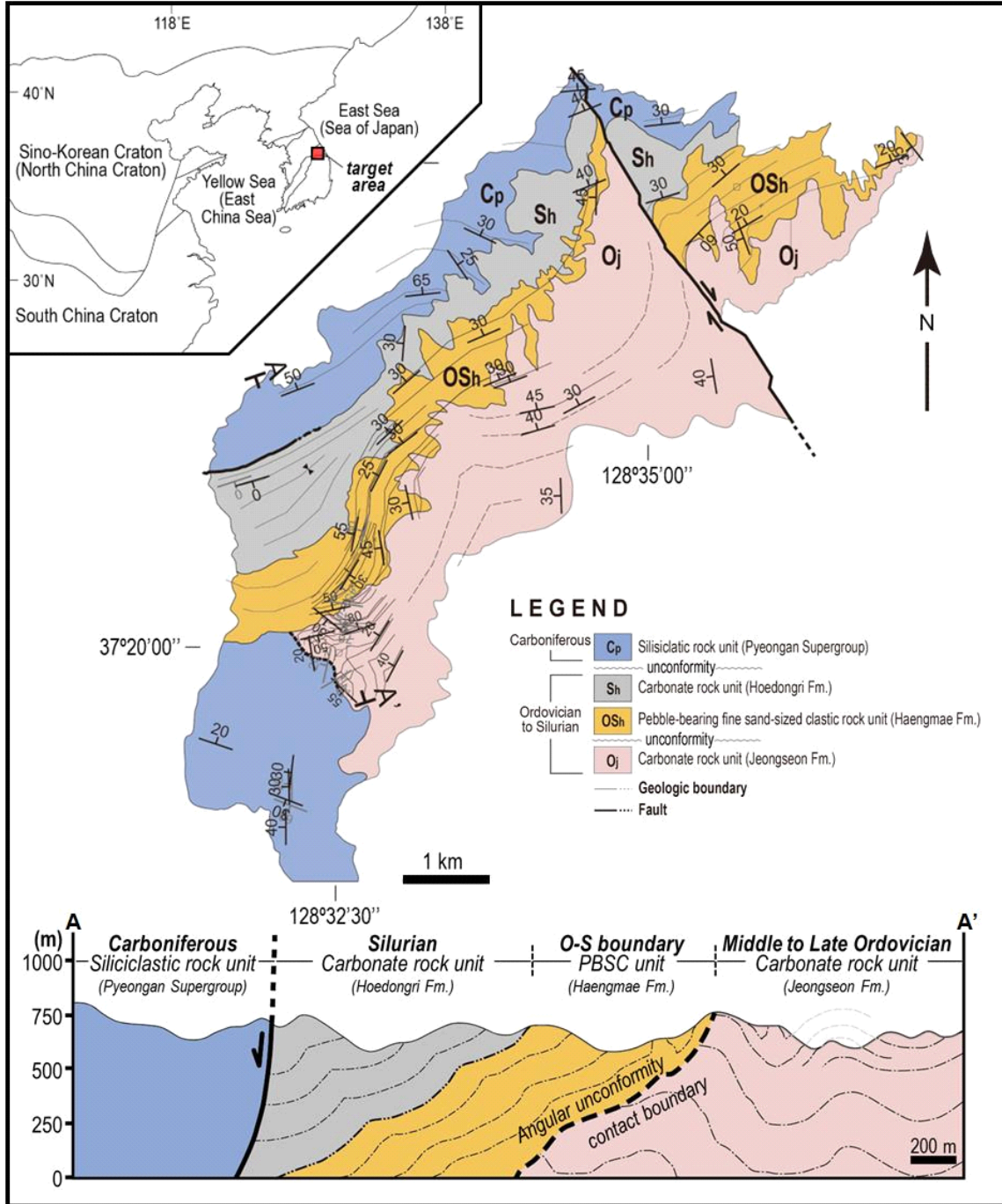


Fig. 1. Simplified geologic map of the study area showing the distribution of the Haengmae Formation, a unique clastic sedimentary succession, and Interpretative A-A' cross-section of the study area. This map is the distinct difference in the structural features between the Haengmae Formation and the underlying carbonate rock unit indicates that these are unconformable. Horizontal axis is 2.5X and vertical axis is 3X exaggerated. This figure is modified after Park *et al.*, 2023.

에 위치했던 한반도 또한 OST 시기에 유사한 퇴적환경의 조성으로 쇄설성 퇴적암인 행매층이 형성되었다고 해석하였다. OST 시기의 지층이 한반도에도 존재한다는 것은 국내 지질학계에서 큰 의미를 갖는 새로운 발견이다.

4.2. 행매층을 정의하는 새로운 증거들

Park *et al.* (2023)은 논문에서 다음 세 가지의 결정적인 증거 제시를 통해 행매층에 대해 새로운 정의를 내리게 되었다.

첫 번째로, Park *et al.* (2023)은 정선지역의 추가적인 정밀 지질조사를 통해 Kim *et al.* (2020)이 제시한 지질도를 일부 수정한 개선된 지질도(Park *et al.*, 2023; 그림 1)와 함께 정선형 조선누층군의 정선석회암층과 행매층 간의 상관관계를 규정해 주는 새로운 증거를 제시하였다. 이 중 가장 중요한 증거는 정선석회암층과 행매층 경계부에서 발견된 경사부정합과 정선석회암층 최상부 표면에서 연속적으로 발견된 카르스트(Karst) 침식구조이다(Park *et al.*, 2023; 그림 2). 경사부정합 노두(그림 2a)에서 하부 정선석회암층과 상부 행매층은 주향과 경사에서 뚜렷한 차이를 보인다(Park (2024)의 그림 A5.1 참조). 이는 행매층에서는 관찰되지 않는 최소 2회 이상의 변형작용이 있었음을 지시하는 S형의 중첩습곡(F2) 형태들이 정선석회암층에서만 관찰된다는 점(Kim *et al.*, 2020)과 함께 정선석회암층과 행매층 사이에 큰 시간적 격차가 있었음을 지시하는 결정적인 증거다.

두 번째로 Park *et al.* (2023)은 추가적인 행매층 쇄설성 저어콘의 U-Pb 연대자료를 제시하였다(Park *et al.* (2023)의 그림 S7 참조). 불충분한 저어콘 산출과 불량한 상태로

신뢰성이 높지 않은 분산된 값을 보이지만, Jang (2018)의 값과 유사하다. 이 자료와 신뢰성 높은 쇄설성 저어콘 연대(449.5±1.5 Ma; Jang, 2018) 및 생층서 연대(Caradocian; Lee, 1983), 그리고 앞서 새롭게 제시한 정선석회암층과 행매층의 경사부정합 관계 등을 종합 해석하여 Park *et al.* (2023)은 행매층 형성 시기를 오르도비스기-실루리아기 전이(OST) 시기로 판단하여, OST 시기의 쇄설성 퇴적암이라고 새롭게 정의하게 되었다.

세 번째로 Park *et al.* (2023)은 처음으로 행매층과 그 하부 정선석회암층 및 상부 회동리층 내에 함유된 쇄설성 석영에 대해 *in-situ* $\delta^{18}\text{O}_{\text{quartz}}$ 동위원소 chemo-stratigraphy 분석을 실시하였다(Park *et al.* (2023)의 그림 3 참조). 그 결과 석영 함량이 급격히 증가한 행매층의 *in-situ* $\delta^{18}\text{O}_{\text{quartz}}$ 동위원소 분석값이 상하부의 탄산염암층 값에 비해 뚜렷하게 낮음을 확인하여 행매층 쇄설성 석영의 기원지(Provenance) 변화가 있었음을 증명하였고, 이를 통해 같은 시기의 전지구적 빙기에 따른 해수면 하강(Eustatic regression)에 따른 육원성으로의 기원지 변화가 그 원인이었을 것으로 해석하였다(Park *et al.*, 2023). 이와 함께 행매층 내 쇄설성 돌로마이트역 탄산염광물에 대해 처음 실행한 *in-situ* $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{dolomite}}$ 동위원소 분석값에서도 높은 이상치를 확인하여 그 기원지 차이를 확인하였다(Park *et al.*, 2023).

5. 행매층의 새로운 정의가 갖는 지질학적 의미

5.1. 회동리층 형성 시기의 재확인

최근 국내 지질학계의 주요 논란 중의 하나는 회동리층

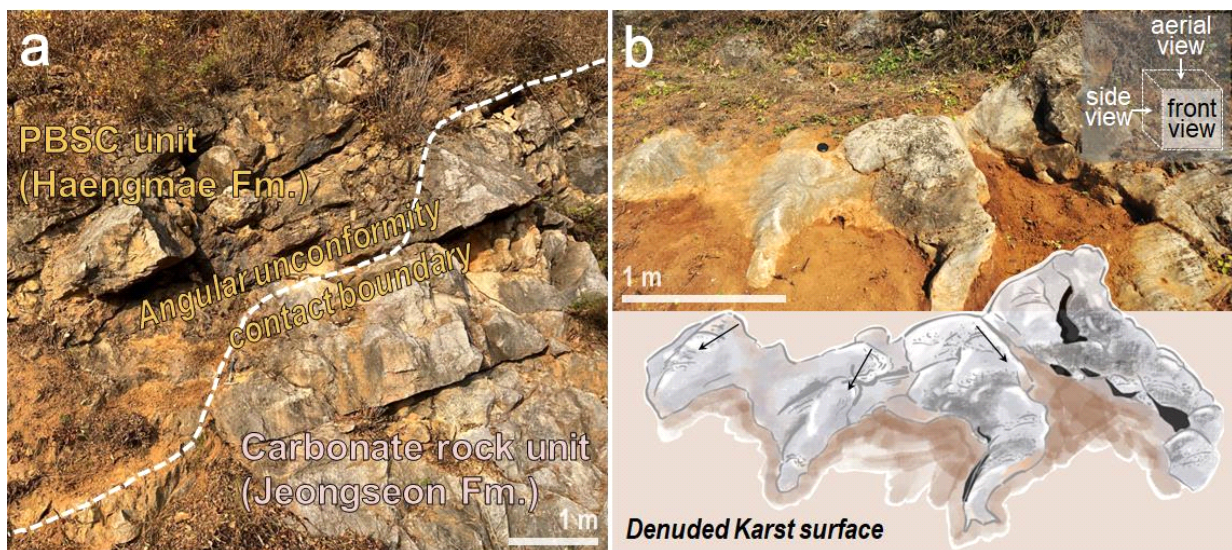


Fig. 2. (a) Outcrop showing the angular unconformity contact between the Haengmae Formation and the lower carbonate rock unit. (b) Magnified photograph and its sketch showing the 'Karst' surface features below the Haengmae Formation. This figure is identical to Figure 2f and 2g published in Park *et al.*, 2023.

의 형성 시기 논란이다. 그 이유는 Lee (1980, 1982)가 코노돈트 생층서 연구를 통해 정선형 조선누층군의 최상부인 회동리층이 실루리아기 층이라고 최초로 해석했던 것에 대해, 최근 Choi (2019)은 북중국 블록(North China Block)에 속하는 태백산 분지 내에 실루리아기 탄산염암층이 존재할 가능성을 부정하였으며, Lee (2018, 2019)는 코노돈트 생층서 연구를 통해 회동리층이 오르도비스기 중기에서 후기 초에 대비되는 층이라는 상반된 해석을 제시하였기 때문이다. 행매층이 이 논란에서 중요한 이유는 회동리층 바로 하부에 위치한 행매층이 독립된 압층서적 단위인지와 그 형성 시기가 언제인지가 회동리층의 형성 시기 문제와 직결되어 있기 때문이다.

앞에서 제시한 새로운 증거들을 근거로 Park *et al.* (2023)은 행매층의 퇴적 시기를 오르도비스기-실루리아기 전이(OST) 시기임을 증명하였다. 이는 코노돈트 화석군 생층서 연구에서의 이견으로 논란이 있었던 회동리층의 형성 시기가 Lee (1980, 1982)이 제시한 실루리아기임을 시층서적 및 압층서적으로 지시해 주는 중요한 결과였다.

그럼에도 불구하고, 회동리층을 대상으로 코노돈트 생층서 방법을 동일하게 적용한 Lee (2018, 2019)의 결과는 왜 오르도비스기를 지시하는 것인지, 이에 대해서 그 자료들의 재검토를 통한 합리적인 설명이 요구된다. 이를 위해 두 생층서 해석의 근거로 제시된 코노돈트 화석군을 정리하여 비교하였다. 우선 Lee (1980)은 회동리층에서 827개의 코노돈트 화석을 분리하여 이들을 6속 12종의 단순형과 16속 43종의 복합형으로 분류하였고, 이들이 유럽 Carnic Alps의 실루리아기 Bereich 1 상부와 *patula* 대에 대비되

는 것으로 해석하였다. Lee (1982)에서는 이를 발전시켜 두 개의 생층서 대(Zone)을 설정하여, 하부는 북미 *Distomodus kentuckyensis* Zone과 유럽 Carnic Alps의 Bereich 1 상부에, 상부는 Carnic Alps의 *celloni-amorphognathoides* Zone에 각각 대비하였다.

이에 반해 Lee (2018)은 행매층과 회동리층 경계의 상하부 지층으로부터 286개의 코노돈트 화석을 분리하여 12속 15종의 복합형으로 분류하고 *Aurilobodus serratus* Zone으로 설정, 북중국 중기 오르도비스기의 다리윌리 3세(Darriwilian, D3)의 Machiakou 층에 대비하였다. 또한 Lee (2019)는 회동리층으로부터 669개의 코노돈트 화석을 분리하여 10속 16종으로 분류하였다. 이 화석군을 *Tasmanognathus sishuiensis-Erismodus asymmetricus* Zone으로 설정하여 후기 오르도비스기 초의 샌드비 2세(Sandbian, Sa2)로 해석하였다. 즉, Lee (2018, 2019)는 회동리층이 중기에서 후기 초의 오르도비스기 층임을 주장하였다.

위의 코노돈트 생층서 연구의 문제점은 다음과 같다. 첫째로, 두 연구의 특이한 점은 같은 회동리층을 대상으로 했음에도 불구하고, 두 연구에서 분리된 코노돈트 종이 극히 일부 중 이외에는 겹치는 종이 거의 없다는 것이다. 특히 Lee (2018, 2019)는 행매층-회동리층 경계부부터 회동리층의 상부층까지를 대상으로 했음에도 실루리아기에 해당하는 코노돈트 화석군을 확인하지 못했다. 연구지역의 공식 발간된 1:50,000 지질도에 행매층과 회동리층 분포가 구분되지 않고 정선석회암으로만 기재되어, 각 연구자의 시료채취 대상 층의 불확실성이 존재한다. 두 연구자의 코노돈트 화석군의 분류에 문제가 없다고 전제로 한다면, 두

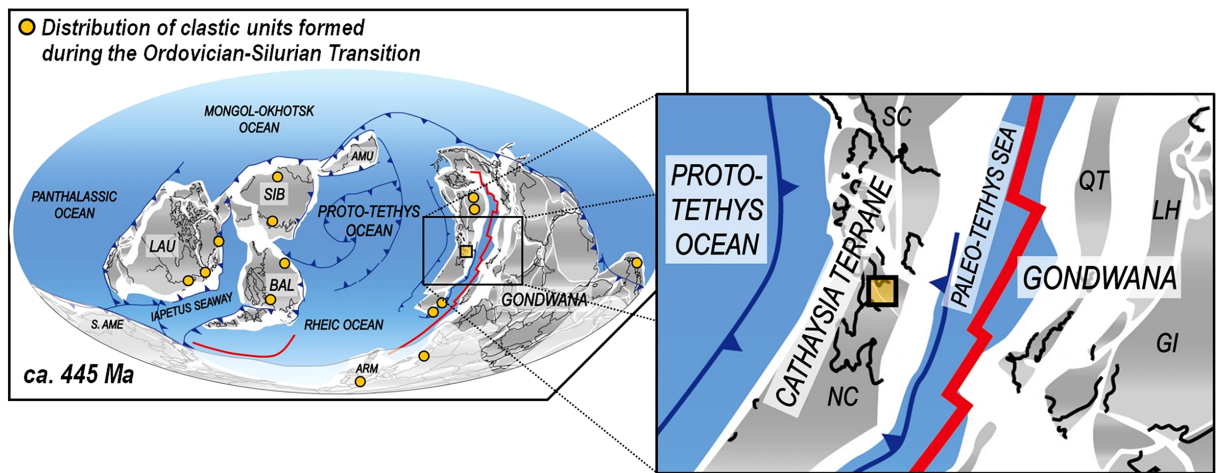


Fig. 3. Reconstruction of paleogeography (ca. 445 Ma) showing the tectonic environment and global glacial extent. The distribution of the clastic sedimentary succession of each continent and the related references were presented together. Magnified tectonic map showing the Cathaysia terrane break-up and subsequent Paleo-Tethys Sea opening on the northwestern margin of the Gondwana Supercontinent is also suggested. These figures are modified after Park *et al.*, 2023. Abbreviations: BAL; Baltic, LAU: Laurentia, SIB; Siberia, GI; Greater India, LH; Lhasa, QT; Qingtang, NC; North China, and SC; South China.

연구자가 분리한 코노돈트 화석군이 중복되지 않는다는 것은 각각 시기가 다른 지층을 대상으로 코노돈트 생층서 연구를 수행했다고 볼 수밖에 없다. 두 연구자의 코노돈트 화석군의 분류 결과를 부정할 근거는 없으며, 따라서 실루리아기 코노돈트 화석군을 기재하고 그 지층을 회동리층으로 정의한 Lee (1980, 1982)의 결과는 존중되어야 한다.

두 번째로, Lee (1980, 1982)가 실루리아기로 분류한 코노돈트 화석군 분류에 문제가 있는지 여부이다. Lee (2018)는 Lee (1982)가 제시한 코노돈트 중 가운데 17 실루리아기 종이 ‘실질적으로(actually) 오르도비스기 종이며, 따라서 회동리층이 오르도비스기 층’이라고 이의를 제기했다는 An and Zheng (1990)의 단행본 『The Conodonts of the Marginal Areas around the Ordos Basin, North China. Science Press, Beijing, 199 p (in Chinese with English abstract).』을 인용하면서 Lee (1982)의 코노돈트 분류에 문제가 있음을 언급했지만, 어떤 오류가 있었는지에 대한 구체적인 증거제시가 없었다. 따라서 An and Zheng (1990)의 단행본에서 어떤 문제를 논리적으로 지적했는지에 대한 상세한 검토가 선행되어야 할 것이다. 그러나 An and Zheng (1990)의 주장에 근거가 있더라도, 이의가 제기된 종도 Lee (1982)가 제시한 실루리아기 코노돈트 중 일부(17개) 종에 국한된 것이며, 이것만을 근거로 회동리층 전체를 오르도비스기 층으로 보는 것은 합리적이지 않다. 무엇보다도, 전문 학술지를 통해 발표된 Lee (1980, 1982) 결과가 잘못되었다고 하기 위해서는 Lee (1980, 1982)에서 제시한 코노돈트 화석군을 분류한 결과 자체에 문제가 있음을 논리적으로 지적해야 하고, 화석군의 재분류를 통한 생층서 시기의 재해석과 이에 대한 논리적인 토의 내용 등이 기 발표논문(Lee, 2018, 2019)에 포함되어 있어야 한다.

이 같은 결과를 종합한다면, 회동리층을 실루리아기 층으로 정의한 Lee (1980, 1982)의 결과를, 이후의 Lee (2018, 2019)의 코노돈트 화석군 생층서 연구로 부정할 만한 타당한 근거가 매우 부족하다. 반면 Park *et al.* (2023)이 행매층 연구를 통해 얻은 새로운 증거들은 상부의 회동리층을 실루리아기 층으로 정의한 Lee (1980)의 연구 결과를 다시 한번 명확히 해주었다는 점에서 중요한 지질학적 의미를 갖는다.

5.2. 한반도 내 오르도비스기-실루리아기 전이(Ordovician-Silurian transition) 시기 지층 확인

앞에서 언급한 바와 같이 Park *et al.* (2023)이 행매층을 오르도비스기-실루리아기 전이(OST) 시기에 형성된, 함력미사질 쇄설성암(Pebble-bearing Fine Sand-sized Clastic rock, PBSC)이라고 새롭게 밝힌 것은, 전지구적인 기후변화와 해수면 하강에 따른 퇴적환경 변화를 반영한 지층이

한반도에서도 존재한다는 것을 처음으로 확인한 국내 지질학계의 새로운 발견이었다. 이 발견은 그 시기의 전지구적인 기후 및 지구조 환경변화 속에 한반도가 어떤 환경에 노출되어 있었는지를 이해하는 실마리를 제공하고 있다.

그림 3은 Scotese (2018, 2021)가 지속적인 개선을 통해 복원한 오르도비스기-실루리아기 전이(OST) 시기의 전지구적 대륙분포 및 지구조운동을 보여주는 고지형도(Paleogeographic map)이다. 이 고지형도에 따르면, 오르도비스-실루리아기 전이(OST) 시기는 전지구적인 환경변화 격동기로, 남극에서 시작된 빙하기가 오르도비스기 최후기인 히르난티기(Hirnantian)에 최대치에 이른 시기였다. 빙하기의 확장은 전지구적 해수면 하강을 동반하여 모든 대륙의 지표 노출을 크게 증가시켜 대륙 연변부에 육원성 쇄설물들의 대량 유입과 퇴적을 초래하였다(Kim *et al.*, 2023). OST 시기의 이 같은 급격한 지구환경 변화를 대변해 주는 열쇠층(Key bed)이 전지구적으로 형성되어 분포하는 쇄설성 퇴적암층이다(그림 3).

Park *et al.* (2023)은 OST 시기 동안 전지구적 기후변화와 퇴적환경 변화를 반영하여 곤드와나 초대륙의 일부인 카세이시아 테레인(Cathaysia terrane) 연변부에 위치한 한반도의 연안에 형성된 쇄설성 퇴적암층이 행매층이라고 해석하였다. 특히 Park *et al.* (2023)은 약 480 Ma 부터 카세이시아 테레인(Cathaysia terrane)이 곤드와나 초대륙에서 분리를 시작하여 고테티스해(Paleo-Tethys Sea)의 열림에 따른 압축력의 응력장 영향으로 지각의 용기운동까지 더해지면서 카세이시아 테레인(Cathaysia terrane) 연변부로의 대륙 기원 쇄설물들의 유입량이 가중된 퇴적환경이 조성되었을 것으로 해석하고 그 과정을 모델로 제시하였다.

5.3. 태백산분지 진화모델의 재정립 필요성

Scotese (2018, 2021) 등 다수의 연구자들에 의해 복원된 고지형도들에 따르면 전기고생대 시기의 한반도는 곤드와나 초대륙(Gondwana Supercontinent) 북서 연변부에 위치해 있었으며, 특히 태백산분지는 북중국 블록에 속해 있다. 다만, Scotese (2018, 2021)의 고지형도는, 이전의 고지형도와는 달리, 오르도비스기-실루리아기 전이(Ordovician-Silurian Transition, OST) 시기에 한반도가 속한 북중국 블록과 남중국 블록이 분리되지 않은 카세이시아 테레인(Cathaysia terrane) 상태로 유지되고 있으며(그림 3), 이후 약 350 Ma 시기부터 두 블록으로 분리가 일어났음을 보여준다. 이는 전기고생대 시기에 이미 북중국과 남중국 블록이 분리되어 있었고, 한반도는 북중국 블록에 위치하면서 남중국 블록과는 다른 지구조적 환경에 놓였을 것으로 본 이전 고지형 모델과는 상반된다. Choi (2019)는 분리된 북중국 블록에 해당하는 중국지역에서 실루리아기 지층의 존재가 확인된 바 없다는 결과를 근거로, 남중국 블록과는 다

른 지구조적 환경에 놓인 북중국 블록에 속하는 한반도 태백산분지에는 오르도비스기 이후 탄산염암층의 형성이 이루어지지 않았다는 주장을 견지해 왔다.

Park *et al.* (2023)이 행매층 형성연대 결정을 통해 상부의 회동리층이 실루리아기 층임을 정의한 Lee (1980, 1982, 1983)의 결과를 재확인한 것은 태백산분지가 속한 북중국 블록에도 실루리아기 지층이 존재함을 보여준 중요한 지질학적 의미를 갖는다. 이는 북중국과 남중국 블록이 분리되지 않은 Scotese (2018, 2021)의 고지형도 모델을 고려한다면 하나의 천해환경이므로 쉽게 설명될 수 있지만, 이 모델이 맞다는 근거가 되는 것은 아니며, 단지 분리 여부와 관계없이 북중국 블록에서도 실루리아기에 탄산염암이 형성된 천해 퇴적환경이 지역적으로 만들어졌음을 지시하는 직접적인 증거가 된다. 따라서 북중국 블록 전체가 오르도비스기 이후 퇴적암층의 형성이 이루어지지 않았다는 전제는 논리적 근거가 부족하다.

Park *et al.* (2023)이 실루리아기 회동리층 존재를 재확인한 것을 기반으로, 다양하게 복원된 고지리 및 지구조 자료들을 종합하여 캄브리아기-오르도비스기에 국한되었던 태백산분지의 정선형 조선누층군 탄산염암층 형성과정을 실루리아기까지 확대하여 설명할 수 있는 모델을 재정립해야 할 것이며, 태백산분지 내의 타지역 지층과의 대비를 통해 태백산분지 전체의 형성 모델을 설정하고 분지 진화과정을 해석하는 지속적 연구가 필요할 것이다.

6. 결론

Park *et al.* (2023)의 논문은 새로운 지질학적 증거제시를 통해 행매층을 오르도비스기-실루리아기 전이(OST) 시기를 지시하는 쇄설성암층으로 새롭게 정의하여 정선형 조선누층군의 시층서 확립과 다른 지역 조선누층군과의 층서 대비에 중요한 기반을 제공하였다. 또한 논란이 되었던 실루리아기 회동리층 존재를 재확인해 줌으로써 태백산분지 전체의 퇴적환경 및 지구조적 진화 모델을 새롭게 설정해야 하는 과제를 제시한다.

REFERENCES

An, T. and Zheng, Z., 1990, The Conodonts of the Marginal Areas around the Ordos Basin, North China. Science Press, Beijing, 199 p (in Chinese with English abstract).
 Chae, S., Hong, J., Jung, S. and Ree, J., 2011, The Silurian Hoedongri Formation in the Taebaeksan Basin of Korea Revisited: its Significance in the Tectonic Reconstruction of East Asia. American Geophysical Union, Fall Meeting 2011, T33B-2415.
 Cheong, C.H., Lee, H.Y., Kog, I.S. and Lee, J.D., 1979, A study on stratigraphy and sedimentological environments of the

Lower Paleozoic Sequences in South Korea. Journal of the National Academy of Sciences, Republic of Korea, Natural Science Series, 18, 123-159.
 Choi, D.K., 2019, Evolution of the Taebaeksan Basin, Korea: I, early Paleozoic sedimentation in an epeiric sea and break-up of the Sino-Korean Craton from Gondwana. Island Arc, 28, e12275, <https://doi.org/10.1111/iar.12275>.
 Choi, S.-J., 1980, A study on Biostratigraphy and Micropaleontology of the Hoedongri and Haengmae Formation in Pyeonganri Area, Pyeongchang-Gun, Gangweon-Do. MS. Thesis, Yonsei University, 65 p (in Korean with English abstract).
 Jang, Y., 2018, Structural style of the Phanerozoic polyphase orogenic belt in the western Taebaeksan Zone, Okcheon Belt, Korea: Insights from multidisciplinary analyses. Ph.D. Thesis, Yonsei University, Seoul, 220 p, https://collection.yonsei.ac.kr/public_resource/pdf/000000514860_20240605113701.pdf.
 Kim, N., Choi, S.-J., Song, Y., Park, C., Chwae, U. and Yi, K., 2020, Distribution and Stratigraphical Significance of the Haengmae Formation in Pyeongchang and Jeongseon areas, South Korea. Economic and Environmental Geology, 53, 383-395, <https://doi.org/10.9719/EEG.2020.53.4.383> (in Korean with English abstract).
 Lee, B.S., 2018, Recognition and significance of the Aurilobodus serratus conodont Zone (Darriwilian) in lower Paleozoic sequence of the Jeongseon-Pyeongchang area, Korea. Geosciences Journal, 22, 683-696, <https://doi.org/10.1007/s12303-018-0032-1>.
 Lee, B.S., 2019, Upper Ordovician (Sandbian) conodonts from the Hoedongri Formation of western Jeongseon. Korea. Geosciences Journal, 23, 695-705, <https://doi.org/10.1007/s12303-019-0009-8>.
 Lee, B.S., 2020, Conodonts from the Lower Limestone and Haengmae Formation in western Jeongseon, Korea and their implication for lithostratigraphic correlation. Geosciences Journal, 24, 113-120, <https://doi.org/10.1007/s12303-019-0034-7>.
 Lee, H.Y., 1980, Discovery of Silurian Conodont fauna from South Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 16, 114-123.
 Lee, H.Y., 1982, Conodonts from the Hoedongri Formation (Silurian), western Jeongseon area, Kangweon-Do, South Korea. Journal of National Academy of Sciences, Republic of Korea, Natural Science Series, 21, 43-131.
 Lee, H.Y., 1983, Conodont Biostratigraphy of the Hoedongri Formation (Silurian) in the Western Jeongseon Area, Kangweondo, South Korea. Institute of Natural Sciences, Yonsei University, 12, 77-99.
 Park, C., Kim, N. and Song, Y., 2019, Mineralogical and micro-textural characteristics of Haengmae Formation. Abstract, 2019 Joint Conference of the Geological Science Technology of Korea, The Korean Society of Economic and Environmental Geology, p. 236.
 Park, C., Kim, N., Choi, S.-J. and Song, Y., 2020, Mg-Phengite in Carbonate Rock Syngenetically Formed from Hydrothermal Fluid: Micro-Textural Evidence and Mineral Chemistry. Minerals, 10, 668, <https://doi.org/10.3390/min10080668>.
 Park, C., Song, Y., Kim, N., Choi, S.-J., Chwae, U., Jang, Y., Kwon, S., Kim, J., Kim, H. and Jeong, Y.-J., 2023, In-situ $\delta^{18}\text{O}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ proxies in an unconformable clastic unit at the

- Ordovician-Silurian transition. *Scientific Reports*, 13, 15174.
- Park, C., 2024, Lithological and chronostratigraphic significance of the Haengmae formation at the Ordovician-Silurian transition based on mineralogy and in-situ mineral chemistry. Ph.D Thesis, Yonsei University, Seoul, 203 p, https://dcollection.yonsei.ac.kr/public_resource/pdf/000000554271_20240601094016.pdf.
- Ree, J.-H., 2017, Deformation History and Tectonic evolution of the early Paleozoic Joseon Supergroup in Jeongseon area. Korea University Research Management System, Ministry of Science and ICT, <https://doi.org/10.23000/TRKO201800005116> (in Korean).
- Ree, J.-H. and Lee, S., 2012, Early Paleozoic carbonate rocks in the northwestern Jeongseon area: Any stratigraphic meaning of the Jeongseon, Haengmae and Hoedongri Formations?. Annual Conference of the Geological Society of Korea (Abstracts), Jeongseon, October 24-27, p. 89 (in Korean).
- Scotese, C.R., 2018, Plate tectonic evolution during the last 1.5 billion years: the movie. The Geological Society of America Annual Meeting, Indianapolis, November 5, No. 93-1, <https://doi.org/10.1130/abs/2018AM-320136>.
- Scotese, C.R., 2021, An atlas of Phanerozoic paleogeographic maps: The seas come in and the seas go out. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 49, 679-728, <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-081320-064052>.
- Son, C.M. and Cheong, J.G., 1976, On the geologic structure of Pyeongchang area. *Journal of the National Academy of Sciences, Republic of Korea (Natural Sciences)*, 16, 221-245.
- Son, C.M. and Cheong, J.G., 1977, On the Geologic Structure of Pyeongchang-Jeongseon Area. *Journal of the Korean Institute of Mining Geology*, 10, 165-176 (in Korean with English abstract).
- Song, Y., Park, C., Kim, N., Choi, S.-J., Chwae, U., Kwon, S. and Jang, Y., 2021, New Occurrence of Haengmae Formation in Taebaeksan Basin. *Economic and Environmental Geology*, 54, 365-372, <https://doi.org/10.9719/EEG.2021.54.3.365>.
- The Geological Investigation Corps Taebaegsan Region, 1962, Geological map of the Taebaegsan Region. The Geological Society of Korea (in Korean with English abstract).
- Woo, K.S. and Ju, S.O., 2016, Stratigraphic and sedimentological meaning the Haengmae Formation in Yongtan Group, Joseon Supergroup, Korea. 2016 Fall Joint Conference of the Geological Science in Korea (Abstracts), Pyeongchang, October 26-29, p. 99 (in Korean).