



## Discussion

# 박채원 외(2024, *지질학회지*, 60, 181-190)의 “행매층에 대한 새로운 정의와 이의 지질학적 중요성”에 대한 비평

조문섭

서울대학교 지구환경과학부

## Comments on “A new definition of the Haengmae Formation and its geological significance” by Park *et al.* (2024, *Journal of the Geological Society of Korea*, 60, 181-190)

Moonsup Cho

School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 08826, Republic of Korea

Received: June 29, 2024 / Accepted: July 16, 2024

†Corresponding author: E-mail: moonsup@snu.ac.kr

**요약:** 이 비평은 박채원 외(2024, *지질학회지*, 60, 181-190)의 “행매층에 대한 새로운 정의와 이의 지질학적 중요성”이란 논평에 대해 몇가지 지질연대-지구조층서 논의를 다룬다. 위 논평은 행매층이 오르도비스기-실루리아기 전이 시기에 쌓인 독특한 쇄설성 퇴적암으로 남중국의 카세이시아 터레인으로부터 기원한다고 제안하였다. 하지만, 이 주장은 납 손실 문제를 지닌 쇄설성 저어콘의 U-Pb 연대에 대한 과잉 해석으로부터 자유롭지 못하다. 따라서, 코노돈트 화석군에 근거한 행매층의 중기 오르도비스기 다리월 절 퇴적 시기는 유효하다.

**주요어:** 행매층, 용탄층군, 오르도비스기, 쇄설성 저어콘 연대, 코노돈트

**ABSTRACT:** This Comment presents a few geochronological and tectonostratigraphic issues against the Review of Park *et al.* (2024, *Journal of the Geological Society of Korea*, 60, 181-190), entitled “A new definition of the Haengmae Formation and its geological significance”. The Review suggested that the Haengmae Formation consists of unique clastic rocks accumulated during the Ordovician-Silurian transitional time and that this formation has an affinity to the Cathaysian terrane. However, such an argument apparently results from an overinterpretation of U-Pb spot dates of zircon, partially affected by Pb loss. Consequently, the Darriwilian depositional age of the Haengmae Formation, based on conodont faunal assemblages, is valid.

**Key words:** Haengmae Formation, Yongtan Group, Ordovician Period, detrital zircon ages, conodonts

태백산분지 용탄층군의 회동리층에서 실루리아기 코노돈트가 처음 보고된 이후, 이 층은 바로 아래 놓인 행매층과 함께 우리나라의 층서계통도에서 논란의 중심에 서 왔다 (Cheong *et al.*, 1979; Lee, H.Y., 1980; Lee, B.S., 2018, 2019, 2020; Kwon and Kwon, 2024; Park *et al.*, 2024). 우리나라의 대결층에 해당되는 후기 오르도비스기-실루리아기 층의 산출 유무와 기원에 관한 논의는, 이 시기에 해당되는 코노돈트 화석을 오랫동안 재확인할 수 없었던 만큼, 국내 지질학계에서 미해결 과제 중의 하나로 꼽혀 왔었다. 하지만, 최근 새로운 연구 결과들이 발표되며 관심을 불러 일으키고 있다. Lee (2018, 2019, 2020)은 코노돈트 화석에 대한 세편의 연작 논문을 통해 행매층과 회동리층이 오르도비스기 중-후기의 다리윌-샌드비절(Darriwilian-Sandbian Age)에 퇴적된, 북중국에 대비되는 층으로 결론지었다. 한편, Kim *et al.* (2020)을 필두로 Park *et al.* (2023, 2024)는 행매층이 오르도비스기-실루리아기 전이(Ordovician-Silurian Transition, OST) 시기(443.1 Ma; Gradstein and Ogg, 2020) 언저리에 쌓인 독특한 쇄설성 퇴적암으로 남중국의 카세이시아 테레인(Cathaysian terrane)으로부터 기원하였다고 제안하였다. 두 연구진이 제시한 퇴적 시기는 서로 양립하기 어렵고, 비전문가의 눈에는 매우 혼란스럽게 비쳐질 수 있다. 우리나라의 층서 계통도에 대한 신뢰를 해칠 수도 있겠다 싶어, 조속히 행매층에 대한 퇴적 시기와 기원에 대한 논란이 불식되기를 바라는 마음에서 논평을 기고한다.

Park *et al.* (2024)은 행매층이 OST 시기에 퇴적된 “합력 미사질 쇄설성암(pebble-bearing fine sand-sized clastic rock)”이며, 그 상위에 놓인 회동리층은 실루리아기 지층임을 재론하고자 국내외 학술지에 이미 발표된 자신의 연구 결과들을(Kim *et al.*, 2020; Park *et al.*, 2023) 중심으로 *지질학회지*에 논평을 발표하였다. OST 기간은, 저자들의 지적대로, 전지구적 빙하기가 도래하며 기후변화는 물론이고 해수면 하강과 이에 따른 대량의 육성 쇄설물 유입으로 연안 퇴적 환경이 크게 변화했던 지질시대이다. 따라서, 행매층이 OST 시기에 쌓인 쇄설성 퇴적암이며, 우리나라의 지구조층서 확립에 지대한 의미를 지닌다는 저자들의 주장은 그냥 지나치기 어렵다. 왜냐하면, 행매층이 OST 시기의 퇴적물이라면, Lee (2018, 2020)이 행매층과 정선석회암을 대상으로 자세히 기재한 다리윌절(469.4-458.2 Ma; Gradstein and Ogg, 2020) 코노돈트 화석군의 산출과 완전히 배치되기 때문이다. 이러한 차이를 설명하기 위해 Park *et al.* (2024)은 행매층 내에 다리윌절 기원암이 침식-재동되며 만들어진 쇄설물들이 쌓여, 쇄설성 저어콘 연대로부터 유추한 퇴적 시기(즉, OST 시기)보다 더 오래된 코노돈트 화석군이 나타난다고 제안하였다. 하지만, 이 주장은 수 백 미터 이상 정교하게 쌓였을 뿐만 아니라 하부층인 정선석회암으로부터

행매층-회동리층까지 상위층준으로 갈수록 체계적으로 변화하는 코노돈트 화석군을 설명하기 어렵다. 더 나아가, OST 시기의 퇴적을 제안한 배경에 편향된 쇄설성 저어콘 연대 해석이 자리잡고 있어 Park *et al.* (2023, 2024)의 주장을 그대로 받아들이기 어렵다.

행매층이 오르도비스기 최후기 또는 실루리아기(약 450-443 Ma)에 쌓인 쇄설성 퇴적암이라는 Park *et al.* (2023, 2024)의 제안은 서로 다른 기기를 사용해 여러 번에 걸쳐 분석한 U-Pb 연대 자료 해석으로부터 비롯되었다. 우선, 정선군 용탄리 비룡동에서 채취한 한 개 행매층 시료로부터 레이저 삭박 유도결합 플라즈마 질량분석기(LA-ICP-MS)를 사용해 구한 쇄설성 저어콘 연대는 약 2.86 Ga부터 445 Ma까지 넓은 범위에 걸쳐 분포한다(Jang, 2018). 이들 중 60여개의 점 분석 연대(spot-analysis dates)는 약 1.8 Ga 이상인 반면, 36개의 젊은 연대는 488.8±3.3 Ma부터 444.5±4.0 Ma까지 거의 연속적으로 분포한다. Park *et al.* (2024)은 이들 중 가장 젊은 연대를 보이는 18개의 점 분석 연대로부터 구한 449.5±1.5 Ma를 퇴적 상한 연대(maximum depositional age; MDA)로 받아들여, 행매층이 약 450 Ma 이후에 퇴적되었다고 해석하였다. 하지만, 이러한 해석은 주의를 요한다. 왜냐하면, 약 45 m.yr.의 긴 기간에 걸쳐 흩어져 나오는 이들 점 분석 자료는 납 손실(Pb loss) 문제로부터 자유롭지 못하기 때문이다. 즉, 저어콘 입자 내 방사성 납이 일부 손실된 경우 참값보다 젊은 연대가 측정될 수 밖에 없다. 필자가 가장 젊은 연대 그룹(449.5±1.5 Ma; n=18)보다 좀 더 오래된 U-Pb 값들(Table S5-2; Park *et al.*, 2023)을 사용해 임의로 계산한 연대(464.9±5.4 Ma; n=13)가 오히려 더 참값에 가까울 수 있다. 이러한 점 분석 자료를 제대로 이해하려면 LA-ICP-MS보다 정밀한 고분해능 이차이온질량분석기(SHRIMP)를 사용해 분석할 필요가 있으며, Kim *et al.* (2020)은 바로 이러한 시도의 일환이라 추정된다.

Kim *et al.* (2020)은 평창군 미탄면 평안리와 정선군 정선읍 행매동에서 채취한 세 개 행매층 시료에 대해 SHRIMP U-Pb연대를 분석하였고, 3.37 Ga로부터 416 Ma에 이르는 쇄설성 저어콘 연대를 보고하였다. 세 개 시료 모두 약 1.85 Ga와 2.5 Ga로 대표되는 선캠브리아 저어콘 연대들과 함께, 약 480-420 Ma에 걸쳐 흩어져 나오는 고생대 연대들이 특징적으로 나타난다[Kim *et al.* (2020)의 Fig. 8 참고]. Park *et al.* (2023)은 후자에 속하는 연대 중 가장 젊은 연대 5개만을 취합해 445.9±32.3 Ma의 평균값을 제시하고(Fig. S7A), Jang (2018)이 구한 평균 연대와 함께 OST시기를 지지하는 보조자료로 사용하였다. 하지만, 이 평균값 또한 납 손실에 의해 크게 흐트러진(2σ > 30 m.yr.), 지질학적으로 의미가 없는 숫자에 지나지 않는다. 따라서, Kim *et al.*

(2020)이 본래 제안했던 바와 같이 행매층의 MDA는 470-450 Ma의 중-후기 오르도비스기라고 결론짓는 게 더 적절해 보인다.

한편, Park *et al.* (2023)은 자신들의 논점을 강화하고자 LA-ICP-MS를 사용해 두개 시료로부터 구한 쇄설성 저어콘 연대(443.46±1.47 Ma; n=9)를 미발표자료로 추가 보고하였다(Fig. S7A; Tables S5-1, S5-2). 유감스럽게도 이 평균값 역시 편향된 해석의 산물이며, 지질학적으로 받아들이기 어렵다. 이러한 생각은 무엇보다, 평균값 계산에 사용된 두 개의 점 분석 연대(IG 28-1와 IG 28-3; Table S5-2)로부터 분명해진다. 같은 입자로부터 구한 이들 두 분석치는 각각 450.3±3.9 Ma와 429.9±6.1 Ma로, 납 손실의 영향을 받은 후자를 평균값 계산에서 제외하는게 현명할 것이다.

종합하자면, Park *et al.* (2023)에 제시된 연대 자료 해석에 근거해 OST 시기 퇴적을 주장함은 무리이며, 오히려 Kim *et al.* (2020)이 제안한 바와 같이 470-450 Ma의 쇄설성 저어콘 연대가 행매층의 MDA에 해당된다고 해석하는 게 더 적절해 보인다. 따라서, 납 손실 문제를 고려할 경우, 행매층의 퇴적시기는 다리질철이라는 Lee (2018, 2020)의 코노돈트 화석 연구 결과가 쇄설성 저어콘 연대 자료와 부합한다고 결론지을 수 있다. 참고로, 태백산분지 내 사암에서 구한 쇄설성 저어콘 연대 역시 납 손실 문제 때문에 퇴적 시기보다 젊은 U-Pb 연대가 참값으로 잘못 해석된 경우가 있었음은 주지하는 바와 같다(Cho and Cheong, 2016).

한편, 행매층에서 Park *et al.* (2023, 2024)이 보고한 4개 시료들은 모두 쌍봉형 선폰브리아 연대 피크(약 1.85 Ga 및 2.5 Ga)를 보여준다. 이 연대 분포는 Cho *et al.* (2021)이 태백층군에서 보고한 제1유형(Type 1)에 해당되며, 행매층이 북중국 기원임을 진단하는데 사용될 수 있을 만큼 특징적이다. 이와 함께, 용탄층군의 하부층인 정선규암에서 보고된 쇄설성 저어콘의 연대 분포(Lee *et al.*, 2020) 역시 제1유형의 패턴을 보여주므로, 용탄층군의 쇄설성 구성원 모두가 북중국 기원임을 말해준다.

Park *et al.* (2024)은 쇄설성 저어콘 연대(ca. 450-443 Ma)를 바탕으로, 행매층이 OST 시기에 해당되는 전지구적 열쇠층의 일부이며, 더 나아가 이들 쇄설물들이 남중국의 카세이시아로부터 기원한 쇄설성 퇴적암이라 추론하였다. 하지만, 이 제안의 지질학적 근거는 미약해서 행매층이 남중국 기원이라는 저자들의 주장에 강한 의문을 안긴다. 앞에서 언급한 바와 같이, 행매층과 정선규암의 쇄설성 저어콘 연대 분포는 전형적인 북중국 패턴에 해당되며, 용탄층군의 코노돈트 화석은 모두 북중국 동물군과 대비(Lee, 2018, 2019, 2020)되기 때문이다.

이상에서 살펴본 바와 같이, Kim *et al.* (2020)과 Park *et al.* (2023, 2024)이 제시한 연구결과는 쇄설성 저어콘 연대

가 화석 증거와 함께 사용될 때, 매우 강력한 증서 자료로 사용될 수 있음을 웅변해준다. 또한, 사암뿐만 아니라 불순질/사질(impure/sandy) 탄산염암에서도 쇄설성 저어콘을 사용해 MDA를 구할 수 있다는 점은 특기할 만하다. 불순질 탄산염암을 대상으로 한 쇄설성 저어콘 연대 측정은 화석 정보와 함께, 향후 우리나라 지구조증서 확립에 중요한 역할을 감당하리라 기대된다. 그럼에도 불구하고, 행매층이 OST 시기의 쇄설암이라고 주장하기에 앞서 납 손실 효과에 대한 면밀한 검토가 선행되지 못했음은 유감이다. 앞으로 보다 자세한 쇄설성 저어콘 연대 분석을 통해 용탄층군은 물론이고 우리나라 전체를 아우르는 고생대 진화사의 새로운 지평이 열리길 고대한다.

## 감사의 글

행매층에 대한 흥미로운 지질학적 서사를 제공한 Park *et al.* (2024)의 노고에 사의를 표한다. 야외조사를 포함한 필자의 행매층 연구는 한국고원대학교 김태환 교수가 제공한 GPS 자료의 도움을 입었고, 한국기상산업진흥원의 지진기술개발사업(KMI2022-00710)에 의해 지원되었음을 밝힌다.

## REFERENCES

- Cheong, C.H., Lee, H.Y., Ko, I.S. and Lee, J.D., 1979, A study on stratigraphy and sedimentological environments of the lower Paleozoic sequences in South Korea (chiefly in Jeongseon area). *Journal of National Academy of Sciences, Republic of Korea, Natural Science Series*, 18, 123-159.
- Cho, M. and Cheong, W., 2016, Comments on “Detrital zircon geochronology and Nd isotope geochemistry of the basal succession of the Taebaeksan Basin, South Korea: implications for the Gondwana linkage of the Sino-Korean (North China) Block during the Neoproterozoic-early Cambrian” by Lee *et al.* [*Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 441 (2016) 770-786]: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 459, 606-609, <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2016.04.024>.
- Cho, M., Cheong, W., Ernst, W.G., Kim, Y. and Yi, K., 2021, U-Pb detrital zircon ages of Cambrian-Ordovician sandstones from the Taebaeksan Basin, Korea: Provenance variability in platform shelf sequences and paleogeographic implications. *The Geological Society of America Bulletin*, 133, 488-504, <https://doi.org/10.1130/B35521.1>.
- Gradstein, F.M. and Ogg, J.G., 2020, Chapter 2 - The Chronostratigraphic Scale. In: Gradstein, F.M., Ogg, J.G., Schmitz, M.D. and Ogg, G.M. (eds.) *Geologic Time Scale 2020*. Elsevier, 1, 23-32.
- 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.
- 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:10.9719/EEG.2020.53.4.383> (in Korean with English abstract).
- Kwon, Y.J. and Kwon, Y.K., 2024, A new lithostratigraphic scheme of the Ordovician Jeongseon Formation of the Yongtan Group in the Taebaeksan Basin and sequence stratigraphic analysis with discussion on basin geometry. *Geosciences Journal*, 28, 261-285.
- 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.
- Lee, B.S., 2019, Upper Ordovician (Sandbian) conodonts from the Hoedongri Formation of western Jeongseon, Korea. *Geosciences Journal*, 23, 695-705.
- 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.
- Lee, C., Kwon, Y.K., Yeo, J.M., Kwon, Y.J. and Han, H.-C., 2020, U-Pb ages of detrital zircons in lower Palaeozoic quartzites of the Taebaeksan Basin, eastern Sino-Korean Block: sediment provenance response to relative sea-level changes. *International Geology Review*, 63, 2129-2145.
- Lee, H.Y., 1980, Discovery of Silurian conodont fauna from South Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 16, 114-123.
- Park, C., Song, Y., Kim, N., Choi, S.-J., Chwae, U. and Jang, Y., 2024, A new definition of the Haengmae Formation and its geological significance. *Journal of the Geological Society of Korea*, 60, 181-190, <https://dx.doi.org/10.14770/jgsk.2024.012> (in Korean with English abstract).
- 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, <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42200-3>.