



Article

부산 기장군 신평리 해안 일대에 분포하는 백악기 이천리층의 미량원소 조성: 초고철질 기원암과 경상분지 발달사에서의 의의

양희선¹, 김경태¹, 김현주^{2,3}, 채용운^{2,3}, 임현수⁴, 주영지^{1,2,*}

¹국립부경대학교 지구환경시스템과학부 지구환경과학전공

²국립부경대학교 환경지질과학전공

³국립부경대학교 SEED 연구소

⁴부산대학교 지질환경과학과

Trace-element composition of the Cretaceous Icheonri Formation at Sinpyeong-ri Coast, Gijang-gun, Busan, Korea: Implications for ultramafic source and developments of the Gyeongsang Basin

Heeseon Yang¹, Kyeongtae Kim¹, Hyun Joo Kim^{2,3}, Yong-Un Chae^{2,3}, Hyoun Soo Lim⁴, Young Ji Joo^{1,2,*}

¹Major Earth and Environmental Sciences, Division of Earth and Environmental System Science, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

²Major of Environmental Earth Sciences, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

³Institute of Sustainable Earth and Environmental Dynamics (SEED), Pukyong National University, Busan 48547, Republic of Korea

⁴Department of Geological Sciences, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea

Received: September 18, 2025 / Revised: November 10, 2025 / Accepted: November 11, 2025

*Corresponding author: +82-51-629-6628 / E-mail: yjoo@pknu.ac.kr

요약: 이천리층은 경상분지 동남부 가장자리에 분포하는 백악기 육성 퇴적층으로 경상누층군 유천층군에 대비되어 왔으나, 최근 연구에서 하양층군과 대비될 가능성이 제안되며 상세한 퇴적환경 및 암석학적 특징에 대한 연구가 진행 중이다. 그 결과 신동층군에서만 보고된 바 있는 초고철질암 기원의 쇠철성 크롬침정석이 산출하는 것이 확인되었는데, 이 같은 맨틀 기원의 초고철질 기원암의 존재는 퇴적 당시 지구조 환경 해석에 중요한 의미를 갖는다. 본 연구에서는 이천리층 퇴적물의 미량원소 함량을 이용하여 초고철질 기원암의 영향을 확인하고, 경상누층군 신동층군 및 하양층군과 비교하였다. 이천리층 퇴적물의 Cr과 Ni의 함량은 상부 대륙 지각과 활성 대륙연부의 퇴적물 조성보다 대부분 부화되어 있어 초고철질 암체의 영향이 있었으나 그 규모는 크지 않았던 것으로 추정된다. 또한 이천리층 퇴적물에서 고철질 암석으로부터의 기여는 신동층군 퇴적물에서 관찰되는 것과 유사한 수준으로 판단되나, 하양층군 퇴적물에서는 그 영향이 거의 나타나지 않는다. 따라서 이천리층에 퇴적물을 공급한 초고철질 암체는 선행 연구에서 복원한, 경상분지의 서편에 분포하였던 신동층군의 초고철질 기원암과는 별개의 것으로 경상분지 동부에 노출되었던 것으로 해석된다. 본 연구의 결과는 경상누층군의 퇴적시기 동안 시간 간격을 두고 분지의 동부와 서부, 적어도 두 곳에 초고철질 암체가 노출되었음을 시사한다.

주요어: 육성분지, 이자나기판, 화산호, 고철질 미량원소, 초고철질암

ABSTRACT: The Icheonri Formation is a Cretaceous non-marine sedimentary formation distributed in the southeastern part of the Gyeongsang Basin. Detrital chromian spinel, previously reported only from the Sindong Group of the Gyeongsang Supergroup, has recently been reported in the Icheonri Formation. The occurrence of chromian spinel, derived from ultramafic rocks, provides key evidence for reconstructing the tectonic setting during deposition, and sediments containing this mineral typically exhibit elevated concentrations of chromium (Cr) and nickel (Ni). In this study, we assessed the influence of ultramafic source rocks (e.g., mantle peridotite) using the trace element compositions of sandstones and mudrocks from the Icheonri Formation, in comparison with those from the Sindong and Hayang Groups of the Gyeongsang Supergroup. Trace element enrichment in the Icheonri sediments, relative to those in both the upper continental crust and active continental

margin sediments, implies an input from ultramafic sources, albeit with a limited degree. While the extent of sediment supply from mafic rocks is comparable to that observed in the Sindong Group, such influence is not evident in the Hayang Group. Therefore, ultramafic rocks were likely exposed on a small scale along the eastern margin of the Gyeongsang Basin, in addition to the ultramafic bodies located to the further west that supplied mafic sediments to the Sindong Group. This suggests that ultramafic rocks were exposed in at least two distinct localities around the basin during both the early and late stages of its evolution.

Key words: continental basin, Izanagi plate, volcanic arc, mafic trace elements, ultramafic rocks

1. 서론

중생대 백악기 동안 한반도 인근에는 고태평양판의 섭입에 의해 화산호가 발달하였으며 그 주변에 크고 작은 육성 퇴적분지가 형성되었다(Lee, 1999; Chough and Sohn, 2010; Lee *et al.*, 2023). 그 중 한반도 동남부에 가장 넓게 발달한 경상분지를 충진하는 경상누층군에 대한 활발한 연구를 통하여 퇴적물의 기원지와 분지 발달사, 고지리 분포와 지구조 환경에 대한 종합적인 해석이 이루어졌으나 대부분의 연구가 분지 서부에 집중되었으며, 분지 동남부의 퇴적층에 대한 연구는 다소 제한적이다(Kim and Paik, 1997; Cho *et al.*, 2016). 이천리층은 경상분지 동남부 가장자리에 분포하는 백악기 육성 퇴적층으로 경상누층군 유천층군에 대비되어왔으며, 최근 퇴적환경과 지질유산으로서의 가치 및 암석학적 특징에 대한 연구가 수행되었다(Kim *et al.*, 2022; Joo *et al.*, 2023). 그 중 Joo *et al.* (2023)은 경상누층군의 신동층군에서만 특징적으로 산출하는 쇄설성 크롬침정석이 이천리층 사암에서도 산출됨을 보고하고 이천리층의 기원지에 초고철질암이 분포하였을 가능성을 제안하였다.

초고철질 암체를 구성하는 부수 광물인 크롬침정석은 초고철질 암체 내의 함량은 낮으나 (<2%) 풍화에 저항성이 강하여 사문석화와 풍화, 운반 과정 이후에도 퇴적암 내에 보존될 수 있다(Metcalf and Shervais, 2008). 따라서 사암 내 쇄설성 크롬침정석의 산출은 기원지에 초고철질 암체가 분포하였음을 반영하는 증거로 활용된다(e.g., Arai and Okada, 1991; Hisada *et al.*, 2008; Lee and Lim, 2022). 한편, 세립질 퇴적물의 경우 고철질 미량원소 함량을 통해 초고철질 기원암의 존재 여부를 확인할 수 있는데(Garver *et al.*, 1996), 대표적인 원소는 Sc와 V, Cr, Ni로서, Sc는 주로 휘석에, V는 자철석과 티탄철석에, Cr은 크롬침정석과 단사휘석에, Ni은 감람석에 포함된다(Hiscott, 1984). 이들 원소 중 특히 Cr과 Ni은 초고철질 암체에서 매우 높은 함량을 보이며(Hiscott, 1984; Garver *et al.*, 1996) 유체에 낮은 용해도를 가지므로 점토광물에 농집된다(Bhatia and Crook, 1986; Taylor and McLennan, 1995; Lim *et al.*, 2019). 따라서 세립질 퇴적물에서 Cr과 Ni의 함량은 초고철질 암석이 기원지에 분포하였음을 나타내는 지시자로 이용되며, 그 함량은 이들을 공급한 암체의 부피를 반영할 것이다(Garver *et al.*, 1996). 일례로 경상분지의 경우 Lim *et al.* (2019)이 신동층

군 이질암의 Cr 및 Ni 함량을 바탕으로 기원지에 초고철질 암체가 소규모로 분포하였음을 해석한 바가 있다.

본 연구에서는 이천리층 사암과 이질암의 고철질 미량원소 조성을 바탕으로 기원지에 초고철질암의 분포 여부와 그 영향을 확인하고자 한다. 또한 경상분지 서부에 넓게 분포하는 경상누층군 신동층군 및 하양층군의 고철질 미량원소 조성과의 종합하여, 초고철질 암체 기원 퇴적물의 기여를 비교하고 이들이 동일한 초고철질 기원암을 공유하였는지 여부를 확인하는 것을 목표로 한다. 이와 같은 정보는 경상누층군이 퇴적되던 백악기 당시 경상분지 인근에 맨틀 기원 초고철질 암체의 정치와 노출을 수반하였던, 섭입대 인근 지구조 환경에 대한 종합적 해석에 중요한 단서를 제공할 수 있을 것이다.

2. 지질 개요

경상분지는 백악기 초 유라시아판 아래로 이자나기판이 사각섭입을 하면서 발생한 좌수향 주향이동단층에 의해 지각이 동-서 방향으로 신장되면서 형성된 인리형 분지(pull-apart basin)로 알려져 있다(Chun, 1992; Chough *et al.*, 2000; Ryu *et al.*, 2006). 분지를 충진하는 육성퇴적층인 경상누층군은 암층서적으로 하부로부터 신동층군, 하양층군, 유천층군으로 분류되며, 상부로 갈수록 화산 기원 물질의 함량이 점차 증가한다(Chang, 1975).

이 중 최하위 층군인 신동층군은 125-100 Ma (압트절-알바절) 동안(Lee *et al.*, 2023 and references therein) 층적 평원 및 하호성 환경에서 퇴적되었으며, 분지 발달의 과정에서 화산 활동이 일어나기 이전의 퇴적물로 해석된다. 신동층군의 퇴적 초기에는 영남육괴의 북부와 중부에서 화산 활동이 일어났으며, 신동층군의 퇴적 중기-후기에는 영남육괴의 중부와 남부에서 화산 활동이 발생하였다(Lee *et al.*, 2010). 신동층군의 고수류 방향에 근거하여 신동층군 퇴적물의 기원지는 북서부에 분포하는 영남육괴로 알려져 있다(Chang and Kim, 1968; Kim, 1994). 또한 신동층군의 사암에서는 특징적으로 쇄설성 크롬침정석이 산출되며 이를 바탕으로 현재는 분포하지 않지만 신동층군 퇴적 당시 영남육괴에 초고철질 암체가 노출되었던 것으로 해석되었다(Lim *et al.*, 2019; Lee and Lim, 2022). 하양층군은 100-95 Ma (세노마늄절) 동안(Lee *et al.*, 2023 and references therein)

하호성 환경에서 퇴적된 퇴적층으로 화산 기원 물질을 상당량 포함하고 있으며, 하양층군 퇴적 기간동안 간헐적으로 화산 활동이 발생하였다(Chang, 1975; Won *et al.*, 1978; Kim *et al.*, 2000). 고수류 방향(Chough and Sohn, 2010 and references therein), 역암 내 처트 역의 방산층 미화석(Choi,

1999; Kamata *et al.*, 2000; Mitsugi *et al.*, 2001) 등 다양한 근거를 바탕으로 하양층군은 영남육괴와 일본의 부가복합체로부터 퇴적물을 공급받은 것으로 해석되었으며(Chang, 1988; Chough and Sohn, 2010; Lee *et al.*, 2023), 하양층군 내 쇄설성 크롬침정석의 산출은 보고되지 않았다. 경상

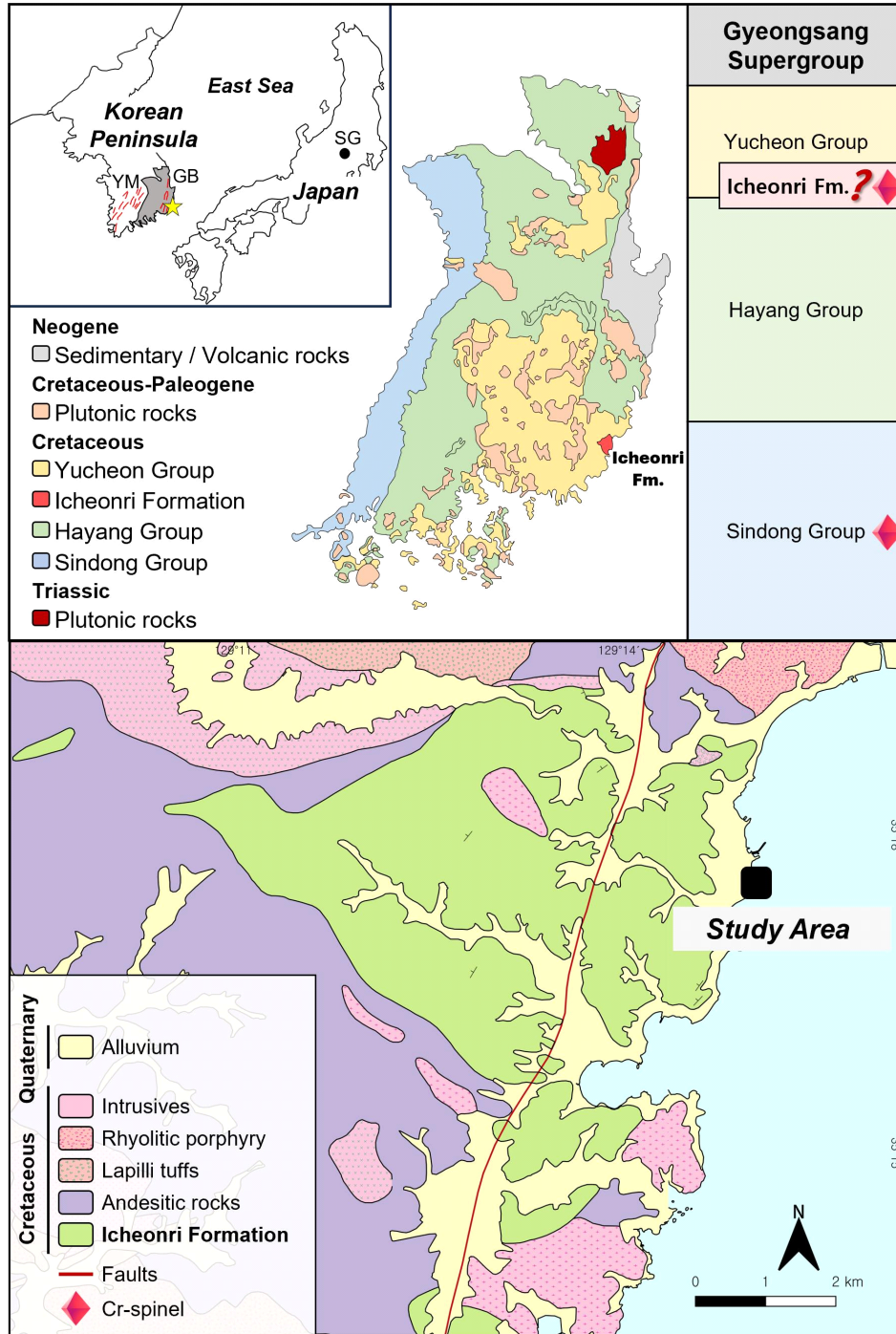


Fig. 1. Geologic map of the southeastern part of the Gyeongsang Basin, where the Cretaceous Icheonri Formation is distributed (Son *et al.*, 1978). The red dashed lines indicate the strike-slip shear zone (after Lee and Lim, 2022; Lee *et al.*, 2023). YM: Yeongnam Massif; GB: Gyeongsang Basin.

누층군 최상부의 유천층군은 94-60 Ma (투로니아절-고진기 초기) 동안 형성되었으며(Lee *et al.*, 2023 and references therein), 주로 화산 기원 물질로 구성된다(Chang, 1975).

이천리층은 경상분지의 동남부, 특히 부산 기장군 일광읍 전역에 넓게 분포하며, 일부 금정산과 백양산 일대에 소규모로 분포한다(Son *et al.*, 1978) (그림 1). 이천리층 퇴적암은 후기 백악기 관입 또는 분출 기원 암석으로 둘러싸여 있으며, 후기 화성 활동에 의한 혼펠스화(Kim *et al.*, 2022), 및 일광단층과 부차단층들의 발달이 확인된다(Ha *et al.*, 2016). 연구지역인 부산 기장군 신평소공원 일대에 노출된 이천리층 노두의 퇴적상 분석 결과, 하성 기원의 조립질 우세 퇴적층과 호수 주변부에서 퇴적된 세립질 우세 퇴적층이 교호하는 하천분산형 퇴적계에서 호수를 포함하는 퇴적환경이 발달하였던 것으로 해석되었다(Kim *et al.*, 2022). 이천리층의 층서는 1:250,000 부산지질도폭(Kim *et al.*, 1998)에서 유천층군 다대포층에 대비되는 것으로 여겨져 왔으며 최근 연구에서 쇄설성 U-Pb 연대 측정을 통해 이천리층의 최대 퇴적시기는 약 95 Ma로 보고되었다(Kim *et al.*, 2024). 이는 시층서적으로 93-98 Ma로 보고된 유천층군 다대포층과 중첩되는 시기이며(Chae *et al.*, 2023), 하양층군 최상부의 진동층과 연대의 유사성이 높은 것으로 해석되었다(Kim *et al.*, 2024). 그러나 최근 이천리층의 산상을 바탕으로 한 퇴적환경과 고환경 해석에 대한 연구에서 이천리층과 하양층군 진동층은 유천층군 퇴적 시기 동안의 화성활동에 의한 열변성의 영향으로 혼펠스화 되어 있는 반면, 유천층군 다대포층에서는 열변성의 영향이 부재하다는 관찰 결과를 근거로 이천리층이 하양층군 진동층에 시층서적으로 대비될 가능성이 제시되었다(Kim *et al.*, 2022). 또한 Joo *et al.* (2023)은 이천리층 사암의 암석학적 특징이 하양층군 상부 지층과 유사함을 보고하며 암층서적으로 하양층군과 대비될 가능성을 보고하였다. 이를 종합하면 이천리층은 시층서적으로 하양층군과 유천층군에 중첩되는 시기를 보이지만 암층서의 기준이 되는 암석학적 특징은 하양층군 진동층과 유사하게 나타난다. 이천리층의 기원지와 관련하여 Kim *et al.* (2024)은 이천리층 내 방산층 처트 역의 산출과 쇄설성 저어콘의 U-Pb 연대 분포를 바탕으로 이천리층의 주된 기원지로 영남육괴와 일본에 분포하는 미노-탐바 쥐라기 부가복합체(Mino-Tamba Jurassic accretionary complex)를 제안하였다.

3. 연구 방법

부산 기장군 신평리 해안가 일대에 노출된 이천리층에서 15개의 사암과 35개의 이질암을 채취하였다. 사암 및 이질암의 미량원소 함량은 캐나다 ALS Geochemistry에서

수행되었다. 미량원소(Sc, V, Cr, Th, Y)의 함량 분석은 시료를 리튬 보로산염(Li₂B₄O₇)로 융합(fusion)한 후 완전 용해하여 유도결합플라즈마 질량분석기(Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometer; ICP-MS)로 분석하였다. Ni의 함량은 시료를 염산(HCl), 질산(HNO₃), 불산(HF), 과염소산(HClO₄)의 혼합산으로 완전 분해한 후 유도결합플라즈마 방출분광기(Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy; ICP-AES)를 이용하여 분석하였다. 표준물질에 대한 분석 결과, 회수율은 대체로 0.2-8% 범위로 나타났다. 복수의 표준물질을 반복 분석한 결과, 최대 오차범위는 상대표준편차(Relative Standard Deviation)를 기준으로 2-13% 수준으로 확인되었다(표 1). 경상누층군 신동층군과 하양층군의 미량원소 분석 자료는 선행연구에서 보고된 자료를 종합하였는데, 신동층군 사암 및 이질암의 조성은 Lee and Lee (2003)과 Lim *et al.* (2019), 하양층군 이질암의 조성은 Lee and Lee (2003) 자료를 이용하였다.

4. 연구 결과

이천리층 사암 및 이질암의 고철질 미량원소의 함량은 전반적으로 부화되어 있으며, 층군에 따른 특징적인 변화는 관찰되지 않는다. 사암 시료의 미량원소 조성은 평균 Sc = 18.3 ppm, V = 79.7 ppm, Cr = 77.9 ppm, Ni = 32.3 ppm, Th = 8.25 ppm, Y = 21.6 ppm이며, 이질암 시료는 평균 Sc = 17.9 ppm, V = 113 ppm, Cr = 97.3 ppm, Ni = 54.1 ppm, Th = 11.2 ppm, Y = 26.7 ppm의 조성을 보인다(표 1). 이천리층 사암과 이질암 모두 평균 상부 대륙지각 조성(UCC: upper continental crust; Taylor and McLennan, 1985)보다 Sc, V, Cr과 Ni의 함량이 부화되어 있다(그림 2). 또한 사암과 이질암 시료를 각각 활성 대륙연변부의 평균 모래 조성(AMSand: active continental margin sand; McLennan, 2001), 평균 머드 조성(AMmud: active continental margin mud; McLennan, 2001)과 비교하였을 때, V는 활성 대륙연변부의 퇴적물보다 낮거나 유사한 함량을 보이나 Sc는 유사하거나 높은 함량, Cr과 Ni은 높은 함량을 나타낸다. 한편, 신동층군의 사암은 UCC와 비교하여 Sc와 V는 낮은 함량을, Cr과 Ni은 매우 높은 함량을 보인다. 신동층군과 하양층군의 이질암은 UCC에 비하여 Sc, V, Cr과 Ni의 함량이 모두 부화된 것으로 나타난다. 신동층군과 하양층군의 사암 및 이질암은 활성 대륙연변부의 퇴적물과 비교하여 Sc과 V이 비슷하거나 결핍되어 있으며, Ni은 부화된 특징을 보인다. Cr의 경우, 신동층군 사암 및 이질암에서는 활성 대륙연변부의 퇴적물보다 매우 부화된 것으로 나타나, 하양층군 이질암의 Cr은 활성 대륙연변부의 퇴적물보다 낮거나 유사한 함량을 보인다. 하양층군 이질암은 신동층군 이질암에 비해

Table 1. Concentrations of trace elements (in ppm) of Icheonri sandstone and mudrocks samples. Average concentrations of trace elements in Icheonri, Sindong, Hayang samples, UCC, and active margin sediments are also shown for comparison.

| Sample code | Location | Sc | V | Cr | Ni | Th | Y |
|------------------|----------|-------------------------|-----|-----|----|------|------|
| <i>Sandstone</i> | | 35.29281°N, 129.26048°E | | | | | |
| IC220924-1 | | 15.6 | 52 | 91 | 24 | 8.06 | 15.1 |
| IC220924-2 | | 14 | 50 | 38 | 20 | 5.23 | 14.7 |
| IC220924-3 | | 16.6 | 66 | 71 | 23 | 5.22 | 14.6 |
| IC220924-4 | | 20.3 | 78 | 126 | 29 | 8.01 | 19 |
| IC220924-5 | | 15.4 | 53 | 55 | 56 | 10.1 | 19.2 |
| IC220924-6 | | 14 | 61 | 56 | 29 | 6.79 | 18.4 |
| IC220924-7 | | 20.5 | 94 | 80 | 36 | 8.58 | 27 |
| IC220924-8 | | 17.9 | 79 | 81 | 26 | 6.46 | 15.6 |
| IC220924-9 | | 18.3 | 92 | 91 | 23 | 10.5 | 28.7 |
| IC220924-10 | | 27.1 | 134 | 104 | 47 | 15.1 | 30.6 |
| IC220924-11 | | 19.1 | 91 | 80 | 41 | 7.92 | 22.9 |
| IC220924-12 | | 15.6 | 64 | 48 | 21 | 5.74 | 22.6 |
| IC220924-13 | | 19.8 | 88 | 84 | 34 | 8.32 | 21.7 |
| IC220924-14 | | 21.5 | 102 | 88 | 36 | 9.33 | 27.2 |
| IC220924-15 | | 18.4 | 91 | 76 | 39 | 8.45 | 27.2 |
| <i>Mudrock</i> | | 35.29283°N, 129.26051°E | | | | | |
| IC240318-2 | | 16 | 100 | 87 | 57 | 11.6 | 27.3 |
| IC240318-9 | | 18 | 115 | 98 | 73 | 10.5 | 27 |
| IC240318-10 | | 13.4 | 89 | 81 | 39 | 8.38 | 19.3 |
| IC240318-13 | | 16 | 105 | 90 | 51 | 9.56 | 24.1 |
| IC240318-14 | | 17.4 | 116 | 106 | 50 | 11.1 | 25.7 |
| IC240318-15 | | 20.5 | 123 | 110 | 58 | 11.5 | 28.4 |
| IC240318-17 | | 20.9 | 137 | 115 | 53 | 12.6 | 24.6 |
| IC240318-21 | | 15.9 | 103 | 99 | 51 | 10.1 | 24.7 |
| IC240318-23 | | 17.2 | 95 | 89 | 55 | 11.6 | 22.2 |
| IC240318-27 | | 16.6 | 103 | 84 | 46 | 11.3 | 24.4 |
| IC240318-28 | | 20 | 111 | 84 | 44 | 11.9 | 26.6 |
| IC240318-29 | | 20.7 | 121 | 103 | 48 | 11.5 | 27.2 |
| IC240318-30 | | 21.4 | 154 | 119 | 84 | 13.6 | 29.6 |
| IC240318-31 | | 15.7 | 87 | 86 | 73 | 8.82 | 28.1 |
| IC240318-32 | | 19.8 | 122 | 108 | 49 | 11.6 | 29.4 |
| IC240318-34 | | 23.3 | 143 | 108 | 75 | 12.1 | 28.8 |
| IC240318-36 | | 22.1 | 125 | 101 | 49 | 11.5 | 27.6 |
| IC240318-38 | | 16.3 | 103 | 105 | 50 | 10.7 | 27.2 |
| IC240318-39 | | 18.9 | 115 | 110 | 51 | 11.1 | 25.1 |
| IC240318-41 | | 17.1 | 110 | 96 | 52 | 10.9 | 21.3 |
| IC240318-43 | | 20.9 | 144 | 110 | 69 | 12.2 | 31.1 |
| IC240318-45 | | 14.2 | 97 | 86 | 42 | 9.71 | 24.4 |
| IC240318-46 | | 14.8 | 100 | 87 | 44 | 10.3 | 26 |
| IC240318-47 | | 21.5 | 160 | 113 | 56 | 15.1 | 36.7 |
| IC240318-48 | | 14.2 | 93 | 75 | 41 | 9.77 | 25.4 |

Table 1. continued.

| Sample code | Location | Sc | V | Cr | Ni | Th | Y |
|--|----------|------|------|------|------|------|------|
| IC240318-49 | | 19.7 | 143 | 113 | 93 | 12.8 | 29.4 |
| IC240318-51 | | 14.9 | 103 | 97 | 53 | 9.36 | 25.5 |
| IC240318-52 | | 16.5 | 117 | 104 | 50 | 11.4 | 20.8 |
| IC240318-53 | | 20.2 | 119 | 114 | 56 | 11.7 | 26.2 |
| IC240318-54 | | 14.3 | 91 | 85 | 42 | 8.26 | 22.4 |
| IC240318-56 | | 16.4 | 92 | 86 | 40 | 9.48 | 25.7 |
| IC240318-57 | | 21.1 | 135 | 103 | 59 | 12.3 | 31.8 |
| IC240318-58 | | 23.6 | 142 | 120 | 70 | 12.8 | 35.3 |
| IC240318-60 | | 20.6 | 119 | 106 | 55 | 11.6 | 35.3 |
| IC240318-62 | | 15 | 97 | 77 | 42 | 11.6 | 28.6 |
| <i>Average composition</i> | | | | | | | |
| Icheonri sandstones | | 18.3 | 79.7 | 77.9 | 32.3 | 8.3 | 21.6 |
| Icheonri mudrocks | | 17.9 | 113 | 97.3 | 54.1 | 11.2 | 26.7 |
| Sindong sandstones ^a | | 5.5 | 40.7 | 63.8 | 28.6 | 9.4 | 14.6 |
| Sindong mudrocks ^a | | 13.4 | 103 | 91.3 | 51.8 | 17.0 | 27.3 |
| Hayang mudrocks ^b | | 12.3 | - | 54.8 | 36.3 | 11.5 | 20.8 |
| UCC ^c | | 11 | 60 | 35 | 20 | 10.7 | 22 |
| AMsand ^d | | 14.4 | 98 | 43 | 16 | 9.2 | 19.4 |
| AMmud ^d | | 17.2 | 122 | 57 | 25 | 13.8 | 25.3 |
| Maximum analytical error (Relative Standard Deviation, %) | | 13 | 6 | 4 | 2 | 2 | 3 |

^aLim *et al.* (2019)^bLee and Lee (2003)^cTaylor and McLennan (1985)^dMcLennan (2001)

고철질 미량원소의 함량이 낮다.

5. 토 의

5.1. 고철질/초고철질암의 영향

5.1.1. 초고철질암 기원 미량원소

사암 및 이질암에서 Cr은 주로 크롬침정석 입자에, Ni은 감람석에 일차적으로 함유되어 있을 뿐만 아니라(Hiscott, 1984), 이들의 풍화로 생성된 쇄설성 입자 및 점토 물질에도 포함된다(Bhatia and Crook, 1986). Goles (1967)에 의하면, 초고철질 암석의 Cr과 Ni의 함량(Cr = 2400 ppm, Ni = 1500 ppm)은 다른 분출/관입암보다 현저히 높다. Garver *et al.* (1996)는 타코닉전지분지(Taconic Foreland Basin)에 퇴적된 오피올라이트 기원 쇄설물을 포함하는 세일의 Cr과 Ni 함량을 바탕으로 초고철질 암석으로부터 기원한 세일의 기준을 Cr 농도는 150 ppm, Ni의 경우 100 ppm을 상

회하며, Cr/Ni 비는 1.3-1.5 범위로 제안하였다. 반면 활성 대륙연변부 환경에서 발달한 고철질 화산호로부터 기원한 퇴적물의 경우 Cr과 Ni의 함량은 낮으며 Cr/Ni 비는 2 이상이다(Garver and Scott, 1995). 이는 모든 화산암에서 Ni보다 Cr 농도가 더 높기 때문인데, 그 결과 초고철질암 기원일 때보다 화산암 기원일 경우 퇴적물 내 Cr/Ni 비가 증가한다(Gill, 1981). 실제 McLennan (2001)이 종합한 활성 대륙연변부 환경 퇴적물의 경우 평균 사암의 Cr/Ni 비는 2.7이며, 평균 이질암의 경우 2.3임을 확인할 수 있다.

이천리층 퇴적물은 UCC나 활성 대륙연변부의 퇴적물에 비하여 고철질 미량원소가 부화된 특징이 나타나므로 기원지에 이들 원소를 함유한 고철질/초고철질 암석이 UCC나 활성 대륙연변부의 환경에서보다 상대적으로 높은 비중을 차지하였음을 시사한다(그림 2). 또한 하양층군에 비해 이천리층과 신동층군 퇴적물에서 더 강한 고철질 미량원소 부화 정도는 이들의 퇴적 당시 고철질/초고철질 기원암의

영향이 더 컸음을 의미한다. 그러나 이천리층의 대부분의 이질암 시료는 Garver *et al.* (1996)이 제시한 초고철질암 기원의 퇴적물의 기준에 부합하지 않는다(그림 3). 신동층군 이질암 역시 Garver *et al.* (1996)의 기준에 부합하지 않

으며, 하양층군 이질암의 경우 Cr/Ni 비는 Garver *et al.* (1996)이 제시한 1.3-1.5에 가장 유사하나 Cr과 Ni의 함량이 낮다. 전술한 바와 같이 Cr은 크롬침정석에, Ni은 감람석에 주로 포함되는데, 하양층군의 Cr은 활성 대륙연변부의 평

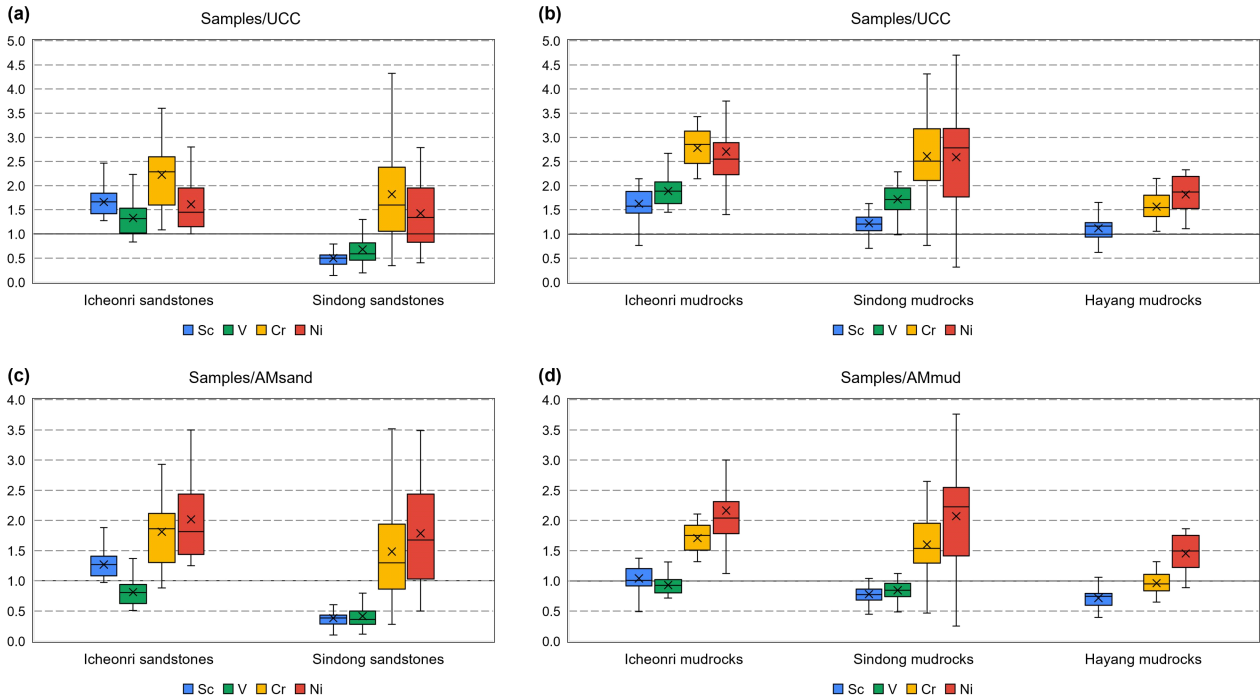


Fig. 2. UCC- and active margin sediment-normalized Sc, V, Cr, and Ni in Icheonri and Sindong sandstones (A, C) and in Icheonri, Sindong, and Hayang mudrocks (B, D). Sindong and Hayang sediment compositions are from Lee and Lee (2003) and Lim *et al.* (2019). UCC composition is from Taylor and McLennan (1985), and active margin sediment (AMSand and AMmud) compositions are from McLennan (2001).

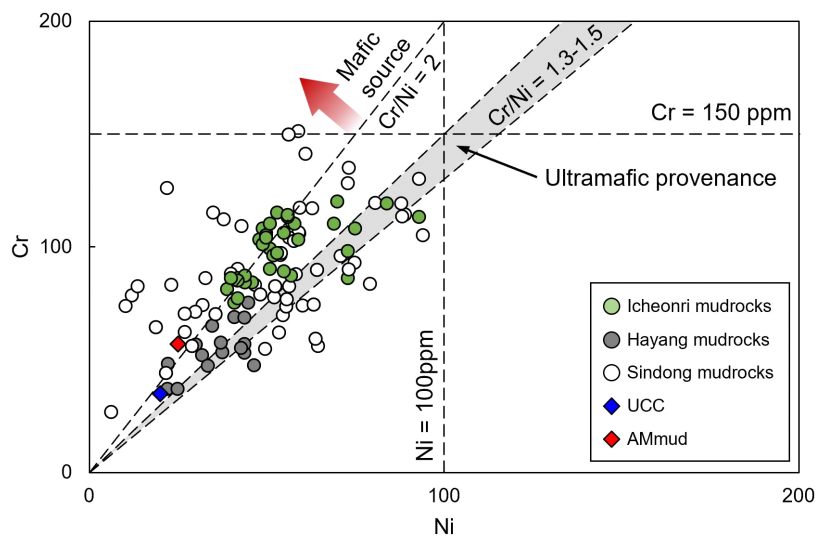


Fig. 3. Cr vs. Ni diagram. High concentrations of Cr (>150 ppm) and Ni (>100 ppm), together with high Cr/Ni ratios (1.3-1.5; grey shaded area) are indicative of an ultramafic provenance, whereas higher Cr/Ni ratios (>2; red arrow) typify input from mafic volcanic rocks (Garver *et al.*, 1996). Sindong and Hayang sediment compositions are from Lee and Lee (2003) and Lim *et al.* (2019).

균 사암 조성과 유사하며, Ni은 약간 부화되어 있다. 하양층군 이질암의 Cr/Ni 비가 Garver *et al.* (1996)이 제시한 초고철질암 기원 퇴적물의 Cr/Ni 비와 유사하지만, 하양층군 이질암의 Cr과 Ni의 낮은 함량과 하양층군 사암에서는 크롬침정석의 산출이 보고된 바가 없다는 점을 고려하면 초고철질 암체의 영향은 매우 미약하였으며, 하양층군 고철질 미량원소의 약한 부화는 백악기 당시 경상분지 인근에 분포하였던 화산암의 영향으로 판단된다. 물론 이천리층과 신동층군의 Cr/Ni 비 또한 이들이 주로 화산호의 영향 하에서 퇴적되었을 것이라는 점을 시사한다. 그러나 이들 층서 단위에서는 쇄설성 크롬침정석이 산출하며, 초고철질 암체의 기원임을 지지하는 Cr과 Ni이 UCC나 활성 대륙연변부의 퇴적물보다 매우 부화된 특징이 나타나므로 이들의 기원지에는 소규모의 초고철질암이 분포하였던 것으로 보인다.

5.1.2. 고철질 및 초고철질 암석의 상대적 기여

고철질 미량원소(Sc, V, Cr, Ni)의 함량 및 미량원소 간의 비는 기원지 암석 조성의 지시자로 이용할 수 있다(Taylor and McLennan, 1985; Floyd and Leveridge, 1987). 일반적으로 고철질-초고철질 암석에는 Sc, V, Cr, Ni과 같은 미량원소가 부화되며, 규장질 암석의 경우 Th 함량이 높다(Wronkiesicz and Condie, 1987; McLennan, 1989; Cullers, 1994). 따라서 Th/Sc, Y/Ni 비가 낮을수록, Cr/Th, Cr/V 비가 높을수록 고철질 기원암으로부터의 기여가 증가함을 의미한다(Hofmann *et al.*, 2003). 이를 바탕으로 Cr/Th - Th/Sc 도표(그림 4a)와 Y/Ni - Cr/V 도표(그림 4b)에서 규장질 암석과 고철질 및 초고철질 암석의 단성분 조성 사이의 혼합 비율을 나타낼 수 있다(Perri *et al.*, 2012). 예를 들어, 규장

질 암석과 고철질 암석의 혼합 곡선 상에서 10% 지점에 밀집되어 있다면 규장질 성분이 90%, 고철질 성분이 10%로 혼합되었음을 의미한다.

이천리층 이질암 시료는 규장질 암석과 고철질 암석 사이의 혼합 곡선에서 40-50% 사이에 도시되어 규장질 암석 및 고철질 암석 기원암의 기여가 유사한 수준이었으며, 적은 양 (<2%)이지만 초고철질 암석으로부터 공급된 물질이 혼합된 것으로 보인다(그림 4). 그리고 이천리층 퇴적물의 Th/Sc 비가 낮다는 점과 Joo *et al.* (2023)이 보고한 이천리층 사암의 미성숙한 조성을 고려하면 기원지에서 유훈된 퇴적물의 기여는 상대적으로 제한적이었을 것으로 보인다. 신동층군 이질암 또한 규장질 암석과 고철질 암석 사이에 도시되는데, 이천리층과 비교하면 규장질 암석의 기여(약 60-90%)가 우세한 편이다(그림 4a). 일부 신동층군 이질암 시료는 초고철질 성분 근방에 도시되어 초고철질 암석의 영향을 강하게 반영하지만, 전반적으로 초고철질 암석의 기여는 3% 미만으로 나타난다(그림 4b). AMmud와 비교하였을 때 역시, 이천리층과 신동층군 모두 고철질 암석의 영향이 큰 것으로 나타나 기원지에 초고철질 암체가 노출되었음을 시사한다. 신동층군의 경우 높은 Th 함량으로 인하여 AMmud에 비하여 규장질 암석의 기여가 상대적으로 크게 나타난다. 이는 선행 연구에서 해석한 신동층군 퇴적물의 주된 기원암 성분 - 대부분 규장질 암석과 소량의 고철질/초고철질 암체의 기여 - 와 일치하는 결과이다(Lee and Lee, 2003; Lim *et al.*, 2019). 그림 4b의 Y/Ni 비는 중희토류 원소의 대표성을 가지는 Y에 비하여 고철질 미량원소의 대표성을 가지는 Ni이 얼마나 부화되었는지, Cr/V 비는 다른 고철질 미량원소에 비해서 Cr이 얼마나 부화되어 있는가를 지시한다(McLennan *et al.*, 1993). 이천리층과 신동

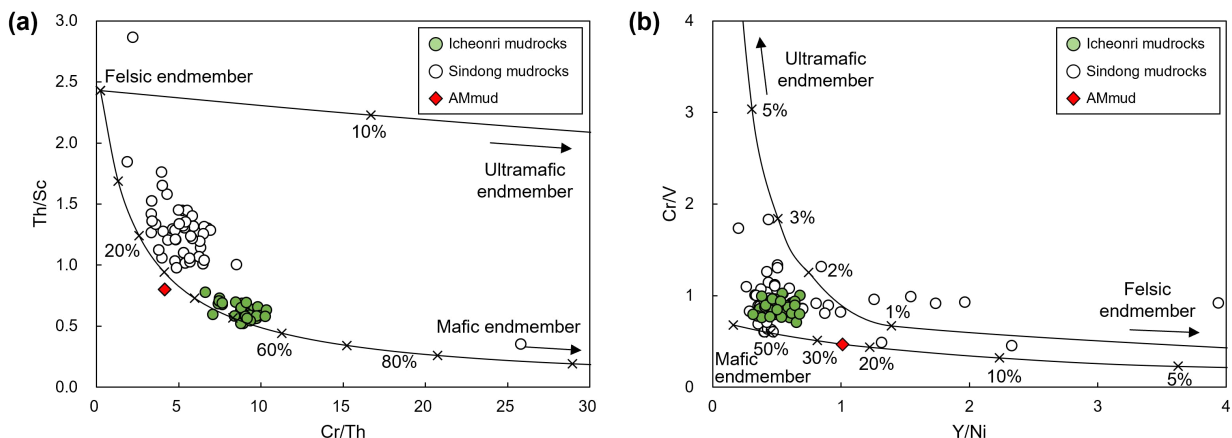


Fig. 4. (a) Plot of Cr/Th versus Th/Sc and (b) Y/Ni versus Cr/V in Icheonri and Sindong mudrocks. Two mixing curves were calculated between felsic and mafic/ultramafic end members. Element contents of the felsic and mafic end members are from Turekian and Wedepohl (1961), and the ultramafic end member (forearc peridotite) is from Parkinson and Pearce (1998). Sindong sediment compositions are from Lee and Lee (2003) and Lim *et al.* (2019).

층군 이질암의 Cr과 Ni의 함량이 유사하므로 그림 4b에서는 두 층서 단위에서 뚜렷한 차이가 나타나지 않지만, 규장질 성분을 지시하는 Th와 고철질 성분을 지시하는 Sc 및 Cr의 함량을 비교하는 그림 4a에서는 이천리층과 신동층군 퇴적물에서 뚜렷한 차이를 보이는 것으로 해석된다. 따라서 신동층군에서보다 이천리층에서 강하게 나타나는 고철질/초고철질암의 영향은 이천리층과 신동층군 기원지에 모두 규장질 암석과 소규모의 고철질/초고철질 암석이 분포하였으나, 신동층군 기원암과 비교하여 이천리층 기원암의 고철질 미량원소 함량이 높았거나 혹은 암체의 규모가 상대적으로 컸을 가능성을 반영한다.

그림 4의 도표에서 나타난 것처럼 이천리층 시료들이 규장질 암석과 고철질 암석으로부터 비슷한 비율로 기원하였을 수 있지만, 앞서 언급한 Garver *et al.* (1996)의 초고철질암 기원의 퇴적물의 기준과 비교하면 이천리층과 신동층군 퇴적물은 초고철질 암체의 기여가 매우 낮은 편이다. 또한 이천리층을 구성하는 전체 쇄설물이 규장질 암석과 고철질 암석으로부터 비슷한 비율로 기원하였다면 이천리층 사암 내에 상당한 양의 고철질암 기원의 입자가 포함되어 있어야 하지만 선행 연구에서 보고된 바에 따르면, 이천리층 사암을 구성하는 주된 입자는 석영과 장석, 암편이며 크롬철정석을 포함한 고철질 광물은 부수적으로 산출한다(Joo *et al.*, 2023). 뿐만 아니라 앞선 AM 퇴적물과의 비교에서 이천리층과 신동층군의 Cr과 Ni의 부화 정도가 유사하게 나타나므로 이천리층 퇴적물이 신동층군에 비해 고철질암의 영향이 크게 나타나는 것은 이천리층 퇴적물이 주로 중성질암에서 기원한 결과일 가능성이 있어 이에 대한 고려가

필요하다. 따라서 그림 4에 나타난 것과 같이 이천리층 전체 퇴적물의 50%가 고철질 암체로부터 기원하였다고 보기는 어렵지만 기원지에 분포하였을 고철질 암체의 특성을 반영하는 것은 분명하다.

5.1.3. 잠재적 기원암의 영향

이천리층 퇴적물 기원암의 조성을 파악하기 위하여 규장질암과 고철질암, 초고철질암의 영역이 명확하게 구별되는 V-Ni-Th*10 삼각도표를 이용하였다(그림 5). 이 도표에 이용된 단성분 조성은 경상분지 인근에 실제 분포하는, 혹은 분포하였으리라 생각되는 암석의 조성을 이용하였다. 규장질암의 단성분 조성은 영남육괴에 분포하는 쥐라기 화강암의 조성(Kim *et al.*, 2005), 고철질암의 단성분 조성은 경상분지에 분포하는 백악기 현무암질 화산호의 조성(Kim *et al.*, 2000)을 이용하였다. 초고철질암의 조성은 Hisada *et al.* (2008)이 신동층군의 기원지에 섭입대 상부(suprasubduction zone) 초고철질암의 분포를, Lee and Lim (2022)이 신동층군 크롬철정석의 기원암이 전호환경의 감람암(forearc peridotite)인 것을 보고하였음을 고려하여 섭입대 상부(suprasubduction zone)에 분포하는 전호 감람암(forearc peridotite)의 조성(Parkinson and Pearson, 1998)을 이용하였다. 또한 비교를 위하여 Turekian and Wedepohl (1961)이 제시한 평균적인 규장질암, 고철질암, 초고철질암의 조성과 화강섬록암과 유사한 UCC의 조성(Taylor and McLennan, 1985)을 함께 도시하였다.

잠재적인 기원암 성분과 비교한 결과, 앞서 논의한 바와 같이 이천리층 퇴적물의 기원암은 규장질과 고철질 사이의

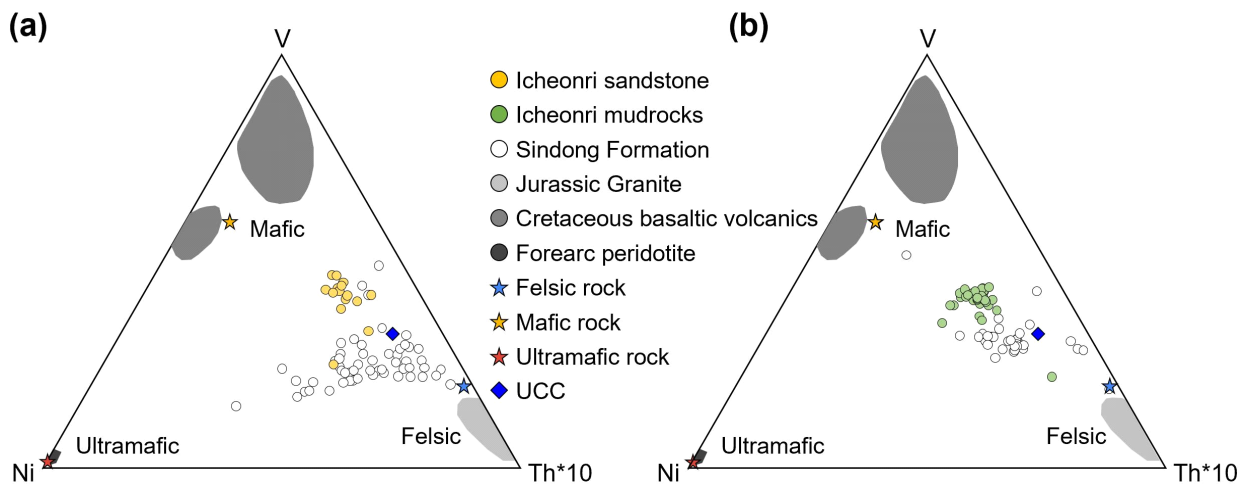


Fig. 5. V-Ni-Th*10 plots of (a) sandstones and (b) mudrocks. Shaded areas represent the compositions of the felsic end member (Jurassic granite; Kim *et al.*, 2005) and mafic end member (Cretaceous basaltic volcanics; Kim *et al.*, 2000). Ultramafic end member (Forearc peridotite) is from Parkinson and Pearce, (1998). Average compositions of felsic, mafic, and ultramafic rocks (Turekian and Wedepohl, 1961) are plotted for comparison. Sindong sediment compositions are from Lee and Lee (2003) and Lim *et al.* (2019).

조성으로, 일부 사암 및 이질암 시료에서 초고철질 기원암의 영향이 확인된다(그림 5a, 5b). 특히 사암과 이질암 모두 화강섬록암 조성에 가까운 UCC 보다도 고철질 조성에 가까이 도시되어 이천리층의 기원지에 중성질의 암석이 가장 넓게, 고철질/초고철질암은 소규모로 분포하였을 것으로 추정된다. 신동층군에서 역시 이천리층보다 강한 규장질 기원암의 영향이 나타나며, 대부분의 시료들이 평균 상부 대륙지각과 유사하거나 보다 화강암 성분에 가까운 조성으로 보인다(그림 5a, 5b). 사암의 경우 일부 시료가 초고철질 조성으로 치우쳐져 도시되므로 초고철질암 쇄설물이 약간 포함된 것으로 나타나나 이질암 시료에서는 초고철질암의 특성이 잘 드러나지 않는다(그림 5). 요약하면 이천리층과 신동층군의 주된 기원암의 성분에는 다소 차이가 있지만, 두 층서 단위 모두 초고철질 암체의 영향을 받은 것으로 판단된다. 또한 이천리층의 주된 기원암 성분을 보다 명확히 해석하기 위해서는 추가적인 암석학적 및 지화학적 연구가 필요할 것이다.

5.2. 이천리층 기원지의 초고철질암 노출 기작

이천리층 사암 내 쇄설성 크롬침정석의 존재는 기원지에 분포한 초고철질 암체의 명확한 증거이지만(Joo *et al.*, 2023), 사암과 이질암의 고철질 미량원소(Sc, V, Cr, Ni) 함량과 상대적인 비율을 바탕으로 기원암의 성분과 그 영향 등을 추정할 결과 기원지에 노출된 초고철질 암체의 크기는 매우 작았으며, 대부분의 퇴적물은 중성질 암석에서 공급되었을 가능성이 높다. 특히 고철질 미량원소의 부화 정도를 고려할 때, 이천리층의 기원지에 분포하였던 고철질 암체는 신동층군에 크롬침정석을 공급한 고철질암과 유사한 규모로 분지 주변에 노출되었을 것으로 보인다.

백악기 동안 경상분지 인근에는 신동층군에 퇴적물을 공급한 전호환경의 감람암(Lee and Lim, 2022)과 일본 혼슈 중부에 분포하는 백악기 산추층군(Sanchu Group)에 크롬침정석을 공급한 전호환경의 사문암(foerarc serpentinite; Hisada and Arai, 1993)이 지표 부근에 정치되었던 것으로 여겨진다. 백악기 당시의 지구조 환경과 지리적인 위치를 고려하면 이천리층 역시 유사한 환경에서 형성된 전호 감람암의 영향을 받았을 가능성이 높은 것으로 보이나, 이를 확인하기 위해서는 이천리층 크롬침정석의 화학 조성 등 추가 연구가 필요하다.

섭입대에서는 흔히 주향이동단층대를 따라 감람암이 노출되는데(Saumur *et al.*, 2010), 전호 맨틀감람암(foerarc mantle peridotite)은 섭입대에서 유체에 의해 사문암화되며, 사문암의 부력에 의해 상부의 전호 감람암이 주향이동단층대를 따라 수직적으로 상승하여 지표에 노출될 수 있다(Saumur *et al.*, 2010; Guillot *et al.*, 2015). 이때 사문암

은 분출암체 또는 얇은 지각 수준에 정치될 수 있으며 실제 미국 캘리포니아주 샌안드레아스 단층계(Irwin and Barnes, 1975; Coleman, 2000; Moore and Rymer, 2007; Kirby *et al.*, 2014), 과테말라(Harlow *et al.*, 2004), 도미니카 공화국(Lewis *et al.*, 2006; Saumur *et al.*, 2010) 및 튀르키예의 아나톨리아 단층(Karabacak *et al.*, 2011)에서 이와 같은 현상이 관찰된다. 일본의 산추층군에 일부 쇄설성 크롬침정석을 공급한 것으로 여겨지는 사문암 역시 주향이동단층대를 따라 노출되어 있다(Hisada and Arai, 1993). 또한 현재는 남아있지 않지만 신동층군에 크롬침정석을 공급한 전호 감람암 역시 영남육괴 서부의 호남전단대를 따라 노출되었으며, 이 과정에서 쥐라기-초기 백악기 대보 조산운동 동안 압축운동의 영향이 있었던 것으로 추정된다(Lee and Lim, 2022).

한반도는 쥐라기-초기 백악기 동안 압축 운동을, 후기 백악기에는 고태평양판의 섭입대 후퇴작용(slab-rollback)에 의한 인장 운동을 겪었으므로 이천리층 주변에 초고철질 암체가 지각 상부에 정치되는 시점과 과정에 대한 몇 가지 가설을 고려할 수 있다. 우선 Lim *et al.* (2019)이 제안한 바와 같이 초고철질 암체가 쥐라기-초기 백악기 대보 조산운동 동안 압축 환경에서 얇은 지각 수준의 단층대를 따라 정치된 이후 상부 암석이 지속적으로 삭박되어 이천리층이 퇴적되던 시기에 지표에 노출되었을 가능성이 있다. 혹은 이천리층이 형성되기 직전 혹은 퇴적과 동시기에 노출되었다면, 얇은 지각 수준에 있던 초고철질 암체가 소규모의 지역적인 압축운동에 의하여 용기하여 노출되었거나, 당시 분지 주변에 주향이동단층이 발달하는 과정에서 작용하는 인장력에 의해 소규모의 감람암이 상승하여 노출되었을 수 있다.

전술한 바와 같이, 섭입대 환경에서 주향이동단층대를 따라 전호 감람암이 노출되는 현상은 일본을 포함한 여러 나라에서 관찰된다. 백악기 동안 고태평양판의 사각섭입에 의하여 동아시아 대륙연변부를 따라 넓은 지역에 걸쳐 다수의 주향이동단층이 발달하였던 당시 환경(Okada, 2000 and references therein)과 이 단층계의 일부로 한반도 남부에도 여러 주향이동단층이 발달하였으며 백악기에 재활성화되었다는 점(Lee, 1999; Lee and Lim, 2022), 일본의 산추층군에 쇄설성 크롬침정석을 공급한 사문암의 노출은 퇴적과 거의 동시 혹은 직전에 발생하였다는 연구 결과(Hisada and Arai, 1993)를 종합적으로 고려하면, 이천리층에 쇄설성 크롬침정석을 공급한 초고철질 암체는 이천리층의 퇴적과 유사한 시기에 주향이동단층이 발달하는 과정에서 작용한 인장력에 의해 소규모의 전호 감람암이 노출될 것일 가능성이 가장 높은 것으로 판단된다. 이와 관련한 구체적인 해석을 위해서는 경상분지와 인근의 구조운동 역사에 대한 보다 상세한 연구가 수행되어야 할 것으로 생각된다.

5.3. 경상분지 발달 역사에서의 의의

이천리층 퇴적물에서 산출하는 쇠설성 크롬침정석과 고철질 미량원소의 높은 함량은 경상누층군 신동층군과 유사한 특징이다. 그러나 유천층군에 대비되어온 이천리층의 최대 퇴적 시기가 95 Ma (Kim *et al.*, 2024) 임을 고려하면 두 층서 단위가 동시기에 퇴적되었다고 보기 어려우며, 이들 간의 암석학적 유사성은 이천리층의 퇴적 당시 신동층군과 유사한 환경이 형성된 결과로 보는 것이 타당할 것이다. 반면, 그 최상부가 이천리층과 유사한 시기에 퇴적된 것으로 여겨지는 하양층군에서는 쇠설성 크롬침정석 및 초고철질 기원암을 시사하는 미량원소 특징이 부재하므로 이천리층 및 신동층군과는 형성 환경이 상이하었던 것으로 보인다. 하양층군에서 관찰되는 Ni의 약한 부화로부터 맨틀 기원 초고철질암 보다는 분지 인근의 화산활동의 영향이 있었던 것으로 추정된다.

이천리층과 신동층군 퇴적시기의 시간적 간격과 두 층서 단위의 공간적 분포를 고려하면 이천리층에 퇴적물을

공급한 초고철질암은 신동층군의 기원암과는 시공간적으로 별개의 암체로 추정된다. 우선 하양층군에 부재한 초고철질암의 영향은 신동층군에 크롬침정석을 공급한 영남육괴의 초고철질 암체가 하양층군의 퇴적 이전에 모두 삭박되었을 가능성을 시사한다. 실제 영남육괴에 분포하였던 초고철질 암체는 신동층군의 퇴적 동안 공간적으로 큰 변화는 없었으나 최하부 낙동층이 퇴적될 당시에 더 큰 규모였을 것으로 해석되었다(Lim *et al.*, 2019). 또한 이천리층의 초고철질 기원암이 경상분지 서부에 노출되었다면 퇴적 시기가 겹치는 하양층군 상부에서도 관찰되어야 할 초고철질암 기원의 고철질 미량원소 부화와 쇠설성 크롬침정석이 확인되지 않는다. 따라서 이천리층 퇴적 당시 고철질 암체는 이천리층이 퇴적되었던 퇴적 중심 인근, 경상분지 동부에 분포하였을 가능성이 높다. 이는 경상누층군 퇴적 동안 시간 간격을 두고 공간적으로 경상분지 동부와 서부, 적어도 두 곳에 발달한 단층대를 따라 초고철질 암체가 노출되었을 가능성을 제시한다(그림 6).

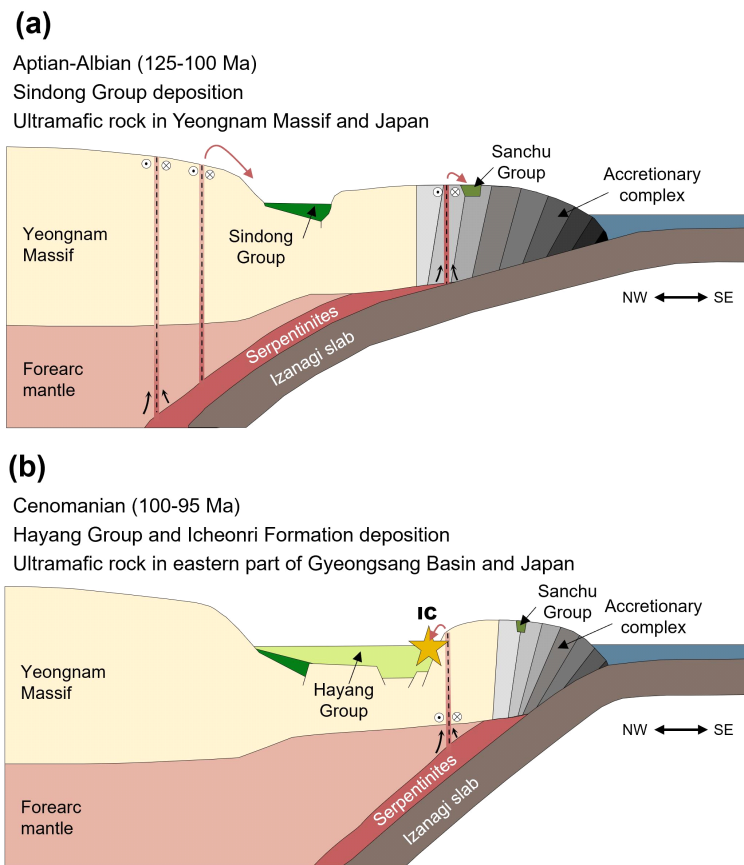


Fig. 6. Reconstruction of the evolution of the forearc peridotite exposure in the Gyeongsang Basin during the Cretaceous. (a) Deposition of the Sindong Group with forearc peridotite to the west of the Gyeongsang Basin. (b) Late stage of deposition of the Hayang Group and Icheonri Formation with forearc peridotite to the east of the Gyeongsang Basin. IC: Icheonri Formation. Symbols ⊙ and ⊗ indicate the general directions of the postulated strike-slip faults. The symbol ⊙ means a vector pointing out of the page, and ⊗ means a vector pointing into it.

6. 결론

본 연구에서는 선행연구에서 쇄설성 크롬침정석 산출이 보고된 경상분지 동남부 가장자리에 분포하는 이천리층의 사암 및 이질암 시료의 미량원소 조성을 이용하여 기원지에 초고철질 암체의 분포 여부와 그 영향을 확인하였다. 이천리층 사암 및 이질암의 Cr과 Ni 함량은 활성 대륙연변부의 평균적인 퇴적물 조성보다는 높지만 대규모 초고철질암이 분포하는 환경의 퇴적물 보다는 낮으며, 고철질/초고철질 및 규장질 기원암 성분을 지시하는 다양한 미량원소의 함량과 비를 함께 비교한 결과 역시 초고철질암의 영향은 확인하나 그 강도는 미약한 편이었음을 지시한다. 따라서 이천리층 기원지에 초고철질 암체가 분포하였음은 명확하지만 암체의 규모는 크지 않았을 것으로 해석된다. 유사하게 쇄설성 크롬침정석이 산출하는 경상누층군 최하위의 신동층군과 비교한 결과, 신동층군에 비하여 이천리층에서 고철질 성분의 영향이 큰 것으로 나타나는데, 이는 이천리층이 주로 규장질암에서 기원한 신동층군과는 달리 전반적으로 중성질 기원암에서 공급된 결과로 추정되며, 기원지에 분포한 초고철질 암체의 규모는 신동층군과 유사하였을 것으로 해석된다. 퇴적 시기가 유사한 하양층군의 상부에서는 초고철질암의 영향이 부재하므로, 이천리층에 쇄설물을 공급한 암체는 섭입과 관련하여 발달한 단층대를 따라 분지의 동부에 노출되었을 가능성이 높다. 즉, 경상누층군 퇴적 동안, 초기에는 분지 서부 영남육괴의 호남전단대를 따라, 후기에는 분지 동부 이천리층의 퇴적 중심 인근에, 적어도 두 차례 초고철질 암체가 지표에 정치하였음을 의미한다. 선행연구의 결과에 따르면 이천리층은 퇴적 시기를 공유하는 하양층군과 암석학적 특징이 유사하지만, 본 연구에서 확인한 초고철질 기원암의 영향과 이를 조절한 퇴적 당시 지구조 환경에서 명백한 차이를 보인다. 이를 통하여 크롬침정석과 같은 특징적인 쇄설성 입자와 미량원소의 함량이 층서 대비와 분지 발달 해석에 중요한 실마리를 제공함을 알 수 있다.

감사의 글

이 논문은 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 G-램프(LAMP) 사업 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2023-00301702). 또한 한국연구재단 중견연구(2022R1A2C1004798)의 지원을 받았다. 연구 과정 동안 부산광역시 도 움과, 논문 투고 과정에서 지질학회지 편집위원과 두 분 심사위원의 세심한 조언에 감사드립니다.

REFERENCES

Arai, S. and Okada, H., 1991, Petrology of serpentine sandstone as

- a key to tectonic development of serpentine belts. *Tectonophysics*, 195, 65-81.
- Bhatia, M.R. and Crook, K.A., 1986, Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins. *Contributions to mineralogy and petrology*, 92, 181-193.
- Chae, Y.-U., Ha, S., Joo, Y.J., Paik, I.S., Kang, H.-C. and Lim, H.S., 2023, Detrital zircon U-Pb ages of the Cretaceous Dadaepo Formation in Busan, Korea and their geological implication. *Episodes*, 46, 269-279.
- Chang, K.H., 1975, Cretaceous stratigraphy of southeast Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 11, 1-23.
- Chang, K.H., 1988, Cretaceous stratigraphy and paleocurrent analysis of Kyongsang Basin. *Journal of the Geological Society of Korea*, 24, 194-205.
- Chang, K.H. and Kim, H.M., 1968, Cretaceous paleocurrent and sedimentation in northwestern part of Gyeongsang Basin, southern Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 4, 77-97.
- Cho, H., Son, M., Cheon, Y., Sohn, Y.K., Kim, J.S. and Kang, H.C., 2016, Evolution of the Late Cretaceous Dadaepo Basin, SE Korea, in response to oblique subduction of the proto-Pacific (Izanagi/Kula) or Pacific plate. *Gondwana Research*, 39, 145-164.
- Choi, H., 1999, Upper Mesozoic Strata. *Geology of Korea*, 233-267.
- Chough, S., Kwon, S.-T., Ree, J.-H. and Choi, D., 2000, Tectonic and sedimentary evolution of the Korean peninsula: a review and new view. *Earth-Science Reviews*, 52, 175-235.
- Chough, S. and Sohn, Y., 2010, Tectonic and sedimentary evolution of a Cretaceous continental arc-backarc system in the Korean peninsula: New view. *Earth-Science Reviews*, 101, 225-249.
- Chun, S., 1992, Tectonic history of Cretaceous sedimentary basins in the southwestern Korean Peninsula and Yellow Sea. *The Sedimentary Basins in the Korean Peninsula and Adjacent Seas*, 60-76.
- Coleman, R.G., 2000, Prospecting for ophiolites along the California continental margin, <https://doi.org/10.1130/0-8137-2349-3.351>.
- Cullers, R.L., 1994, The chemical signature of source rocks in size fractions of Holocene stream sediment derived from metamorphic rocks in the Wet Mountains region, Colorado, U.S.A. *Chemical Geology*, 113, 327-343.
- Floyd, P. and Leveridge, B., 1987, Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, south Cornwall: framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones. *Journal of the Geological Society*, 144, 531-542.
- Garver, J.I., Royce, P.R. and Smick, T.A., 1996, Chromium and nickel in shale of the Taconic foreland; a case study for the provenance of fine-grained sediments with an ultramafic source. *Journal of Sedimentary Research*, 66, 100-106.
- Garver, J.I. and Scott, T.J., 1995, Trace elements in shale as indicators of crustal provenance and terrane accretion in the southern Canadian Cordillera. *Geological Society of America Bulletin*, 107, 440-453.
- Gill, J., 1981, *Orogenic Andesites and Plate Tectonics*. Berlin,

- Springer-Verlag, 390 p.
- Goles, G., 1967, Trace elements in ultramafic rocks. *Ultramafic and related rocks*, 352-362.
- Guillot, S., Schwartz, S., Reynard, B., Agard, P. and Prigent, C., 2015, Tectonic significance of serpentinites. *Tectonophysics*, 646, 1-19.
- Ha, S., Cheon, Y., Kang, H.-C., Kim, J.-S., Lee, S.-K. and Son, M., 2016, Geometry and kinematics of the subsidiary faults of the Ilgwang fault, SE Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 52, 31-50 (in Korean with English abstract).
- Harlow, G.E., Hemming, S.R., Lallemand, H.G.A., Sisson, V.B. and Sorensen, S.S., 2004, Two high-pressure-low-temperature serpentinite-matrix mélange belts, Motagua fault zone, Guatemala: a record of Aptian and Maastrichtian collisions. *Geology*, 32, 17-20.
- Hisada, K. and Arai, S., 1993, Detrital chrome spinels in the Cretaceous Sanchu sandstone, central Japan: indicator of serpentinite protrusion into a fore-arc region. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 105, 95-109.
- Hisada, K.I., Takashima, S., Arai, S. and Lee, Y.I., 2008, Early Cretaceous paleogeography of Korea and Southwest Japan inferred from occurrence of detrital chromian spinels. *Island Arc*, 17, 471-484.
- Hiscott, R.N., 1984, Ophiolitic source rocks for Taconic-age flysch: trace-element evidence. *Geological Society of America Bulletin*, 95, 1261-1267.
- Hofmann, A., Bolhar, R., Dirks, P. and Jelsma, H., 2003, The geochemistry of Archaean shales derived from a mafic volcanic sequence, Belingwe greenstone belt, Zimbabwe: provenance, source area unroofing and submarine versus subaerial weathering. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67, 421-440.
- Irwin, W.P. and Barnes, I., 1975, Effect of geologic structure and metamorphic fluids on seismic behavior of the San Andreas fault system in central and northern California. *Geology*, 3, 713-716.
- Joo, Y.J., Yang, H., Kim, K. and Kim, H.J., 2023, Preliminary Results from Sandstone Petrography of the Icheonri Formation in Gijang-gun, Busan: Implications for Provenance and Tectonic Setting. *Journal of the Korean earth science society*, 44, 161-168 (in Korean with English abstract).
- Kamata, Y., Hisada, K.-I. and Lee, Y.I., 2000, Late Jurassic radiolarians from pebbles of Lower Cretaceous conglomerates of the Hayang Group, southeastern Korea. *Geosciences Journal*, 4, 165-174.
- Karabacak, V., Altunel, E. and Çakir, Z., 2011, Monitoring aseismic surface creep along the North Anatolian Fault (Turkey) using ground-based LIDAR. *Earth and Planetary Science Letters*, 304, 64-70.
- Kim, D.H., Hwang, J.H., Park, G.H. and Song, G.Y., 1998, Explanatory text of the geological map of Pusan sheet (1:250,000). Korea research Institute of Geoscience and Mineral Resources, 62 p (in Korean with English abstract).
- Kim, G.Y., Chae, Y.U., Joo, Y.J., Choi, T. and Lim, H.S., 2024, Depositional Age and Provenance of the Cretaceous Icheonri Formation based on U-Pb Dating of Detrital Zircons. *Journal of the Korean earth science society*, 45, 532-558 (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, H.M., 1994, Paleocurrent Analysis and Depositional History of the Cretaceous Jinju Formation in Jinju-Sacheon Area, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 30, 506-519 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.Y. and Paik, I.S., 1997, Origin of Graded cherty beds containing Skolithos ichnosp. from the Cretaceous Yucheon Group in Mt. Hwangryeong Area, Pusan, Korea. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 18, 51-59.
- Kim, S.W., Hwang, S.K., Lee, Y.J. and Koh, I.S., 2000, Diversity of the Cretaceous basaltic volcanics in Gyeongsang Basin, Korea. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 9, 1-12 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.W., Oh, C.W., Choi, S.G., Ryu, I.-C. and Itaya, T., 2005, Ridge subduction-related Jurassic plutonism in and around the Okcheon metamorphic belt, South Korea and implications for northeast Asian tectonics. *International Geology Review*, 47, 248-269.
- Kirby, S.H., Wang, K. and Brocher, T.M., 2014, A large mantle water source for the northern San Andreas fault system: a ghost of subduction past. *Earth, Planets and Space*, 66, 1-18.
- Lee, D.W., 1999, Strike-slip fault tectonics and basin formation during the Cretaceous in the Korean Peninsula. *Island Arc*, 8, 218-231.
- Lee, J.I. and Lee, Y.I., 2003, Geochemistry and provenance of Lower Cretaceous Sindong and Hayang mudrocks, Gyeongsang Basin, southeastern Korea. *Geosciences Journal*, 7, 107-122.
- Lee, Y.I., Choi, T., Lim, H.S. and Orihashi, Y., 2010, Detrital zircon geochronology of the Cretaceous Sindong Group, Southeast Korea: Implications for depositional age and Early Cretaceous igneous activity. *Island Arc*, 19, 647-658.
- Lee, Y.I., Lee, J.I. and Choi, Y.S., 2023, Provenance analysis of the Cretaceous Gyeongsang Basin, SE Korea: A synthesis and tectonic implications for active continental margin in East Asia. *Earth-Science Reviews*, 238, 104334.
- 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>.
- Lewis, J.F., Draper, G., Proenza, J., Espallat, J. and Jiménez, J., 2006, Ophiolite-related ultramafic rocks serpentinites in the Caribbean region: a review of their occurrence, composition, origin, emplacement and Ni-laterite soil formation. *Geologica Acta*, 4, 237-263.
- 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 the Geological Society of Korea*, 55, 531-549 (in Korean with English abstract).
- Lippard, S.J., 1986, *The ophiolite of northern Oman*. Blackwell,

- London, 11, 178 p.
- McLenna, S.M., 1989, Rare earth elements in sedimentary rocks: influences of provenance and sedimentary processes. *Reviews in Mineralogy*, 21, 169-200.
- McLennan, S.M., 2001, Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2.
- McLennan, S.M., Hemming, S., McDaniel, D.K. and Hanson, G.N., 1993, Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics. In: Johnsson, M.J. and Basu, A. (Eds), *Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments*. Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper, 284, 21-40.
- Metcalf, R.V. and Shervais, J.W., 2008, Suprasubduction-zone ophiolites: Is there really an ophiolite conundrum?. *Geological society of America, Special papers*, 438, 191-222.
- Mitsugi, T., Ishida, K., Woo, B.-G., Chang, K.-H., Park, S.-O. and Hirano, H., 2001, Radiolarian-bearing conglomerate from the Hayang Group, the Kyongsang Supergroup, southeastern Korea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 19, 751-763.
- Moore, D.E. and Rymer, M.J., 2007, Talc-bearing serpentinite and the creeping section of the San Andreas fault. *Nature*, 448, 795-797.
- Okada, H., 2000, Nature and development of Cretaceous sedimentary basins in East Asia: a review. *Geosciences Journal*, 4, 271-282.
- Parkinson, I.J. and Pearce, J.A., 1998, Peridotites from the Izu-Bonin-Mariana forearc ODP Leg 125: evidence for mantle melting and melt-mantle interaction in a supra-subduction zone setting. *Journal of petrology*, 39, 1577-1618.
- Perri, F., Critelli, S., Cavalcante, F., Mongelli, G., Dominici, R., Sonnino, M. and De Rosa, R., 2012, Provenance signatures for the Miocene volcanoclastic succession of the Tuffi di Tusa Formation, southern Apennines, Italy. *Geological Magazine*, 149, 423-442.
- Ryu, I.C., Choi, S.G. and Wee, S.M., 2006, An Inquiry into the Formation and Deformation of the Cretaceous Gyeongsang (Kyongsang) Basin, Southeastern Korea. *The Korean Society of Economic & Environmental Geology*, 39, 129-149 (in Korean with English abstract).
- Saumur, B.-M., Hattori, K.H. and Guillot, S., 2010, Contrasting origins of serpentinites in a subduction complex, northern Dominican Republic. *Bulletin*, 122, 292-304.
- Son, C.M., Lee, S.M., Kim, Y.K., Kim, S.W. and Kim, H.S., 1978, Explanatory text and Geological map of Dongrae and Weolnae sheets (1:50,000). *Korea Research Institute of Geoscience and Mineral Resources*, 27 p (in Korean with English abstract).
- Taylor, S.R. and McLennan, S.M., 1985, *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 312 p.
- Taylor, S.R. and McLennan, S.M., 1995, The geochemical evolution of the continental crust. *Reviews of geophysics*, 33, 241-265.
- Turekian, K.K. and Wedepohl, K.H., 1961, Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. *Geological society of America bulletin*, 72, 175-192.
- 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).
- Wronkiewicz D.J. and Condie K.C., 1987, Geochemistry of Archaean shales from the Witwatersrand supergroup, South Africa: Sourcearea weathering and provenance. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51, 2401-2416.