

경남 하동군의 하산동층 하부 퇴적층에서 산출된 크롬운모편의 산상과 기원

백인성^{1,*} · 김현주¹ · 황진연² · 박정규¹ · 이호일³ · 박맹언¹

¹부경대학교 지구환경과학과

²부산대학교 지질환경과학과

³한국지질자원연구원

요 약

경상분지 남서부(경남 하동)의 하산동층(신동층군 중부) 하부 퇴적층과 경상분지 북서부(경북 왜관)의 낙동층(신동층군 하부) 최상부 퇴적층의 하성퇴적층으로부터 녹색을 띠는 운모편의 함유가 새로이 확인되었으며, 엑스선 회절분석과 형광분석을 바탕으로 이 운모는 크롬을 함유한 fuchsite로 감정되었다. 크롬운모편들이 산출하는 퇴적층은 열수변질이나 광역변성작용을 받지 않은 하도기원의 협력조립사암층이다. 크롬운모편들은 원마를 받은 상태로 범람원에서 기원한 이암편들과 밀접히 수반되어 산출하며, 처트역들이 함께 나타남이 특징이다. 이와 같은 크롬운모편들의 산상은 이 크롬운모편들이 상류지역에서의 범람으로부터 기원하였음을 지지한다. 따라서 크롬운모의 기원암 유형, 백악기초 경상분지 기원지의 지질특성, 크롬운모의 국내 산출 사례 등과 하산동층과 낙동층 내 크롬운모편의 매우 제한된 층준에서의 산출 특성을 복합적으로 고려할 때, 신동층군 크롬운모편의 기원암은 발달 규모가 제한적인 초고철질암의 열수변질대일 가능성이 높다. 이는 쥐라기말에서-백악기초 사이에 영남육괴에 소규모 고철질암체의 존재가 제시된 것(Lim *et al.*, 2019)과 함께 신동층군 퇴적 당시 영남육괴에 부가복합체의 부분적인 존재 가능성을 시사해 주는 것으로, 이에 대한 심화된 후속연구가 필요하다. 한편 경상분지 남서부 지역의 하산동층 하부 퇴적층과 경상분지 북서부 지역의 낙동층 최상부 퇴적층에서의 특이성과 희소성이 매우 높은 쇄설 기원의 크롬운모 산출은 경상분지 북부 지역의 낙동층 최상부와 남부 지역 하산동층의 최하부가 시층서적으로 대비될 가능성이 있음을 시사한다.

주요어: 경상분지, 하산동층, 낙동층, 크롬운모편, 초고철질암, 시층서

In Sung Paik, Hyun Joo Kim, Jin-Yeon Hwang, Jung Gyu Park, Hoil Lee and Maeng Eon Park, 2020, 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. v. 56, no. 3, p. 311-326

ABSTRACT: Greenish mica clasts were newly found in the fluvial deposits of the lower part of the Hasandong Formation (the middle part of the Sindong Group) in southwestern area of the Gyeongsang Basin (Hadong, Gyeongsangnam-do) and of the uppermost part of the Nakdong Formation (the lower part of the Sindong Group) in northwestern area of the basin (Waegwan, Gyeongsangbuk-do). Based on the results of XRD and XRF analyses, the greenish micas were identified as a chrome mica (fuchsite). The chrome mica clast-bearing deposits are pebble-bearing coarse-grained sandstone of channel deposits not influenced by hydrothermal alteration or regional metamorphism. The chrome mica clasts are rounded and closely associated with intraformational mudstone chips derived from a floodplain, indicating that they were transported from upstream area by flooding. Chert pebbles are also associated. Considering the kinds of chrome mica-bearing rocks, provenance geology of the Gyeongsang Basin during the Early Cretaceous, previous reports of chrome mica occurrence in South Korea, and very restricted occurrence of the chrome mica clasts in the Sindong Group, it is highly probable that they were derived from hydrothermally altered ultramafic rocks. Since Lim *et al.* (2019) suggested the existence of ultramafic rocks in the Yeongnam Massif from Late Jurassic to Early Cretaceous, the detrital occurrence of the chrome micas with chert pebbles in the Sindong Group implies partial existence of accretionary complex in the Yeongnam Massif during the Sindong period. Further advanced study as to the provenance of the Gyeongsang Basin is therefore needed. The occurrence of detrital chrome micas both in the lower part of the Hasandong Formation in southwestern area

* Corresponding author: +82-51-629-6625, E-mail: paikis@pknu.ac.kr

of the Gyeongsang Basin and in the uppermost part of the Nakdong Formation in northwestern area of the basin suggests the possibility that two deposits can be chronostratigraphically correlated.

Key words: Gyeongsang Basin, Hasandong Formation, Nakdong Formation, chrome mica clasts, ultramafic rocks, chronostratigraphy

(In Sung Paik, Hyun Joo Kim, Jung Gyu Park and Maeng Eon Park, Department of Earth and Environmental Sciences, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea; Jin-Yeon Hwang, Department of Geological Sciences, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea; Hoil Lee, Center for Active Tectonics, Korea Institute of Geoscience and Mineral resources, Daejeon 34132, Republic of Korea)

1. 서 언

Gottsche (1886)와 Koto (1903)에 의해 한반도에 발달했던 육성 퇴적분지 중 가장 큰 규모인 경상분지가 확인된 이후, 경상분지의 조구조적 특성에 대해서는 인리형 퇴적분지(Lee, 1999)와 배호(backarc) 분지(Chough and Sohn, 2010) 등이 제시되었다. 이와 함께 Chang *et al.* (1990)은 경상분지 동부 하양층군의 고수류 특성과 기사동층 내에 방산층 처트역들이 함유되어 있음을 확인하고, 이 처트역들이 일본의 고생대말에서 쥐라기초의 방산층 처트로부터 기원한 것으로 해석하여, 경상분지의 배호분지로서의 해석에 바탕 자료가 되었다. 한편 Hisada *et al.* (2008)은 진주층 사암 내에서 확인된 쇠철성 크롬첨정석(chromian spinel)의 광물화학 특성을 바탕으로 이 광물의 기원암이 낙동곡분 동측에 위치했던 화산호 지역의 초고철질암일 것으로 해석하여, 경상분지의 배호분지 기원에 무게를 실었다.

그러나 Lim *et al.* (2019)은 최근에 이루어진 신동층군 사암 내에서의 크롬 함량 특성에 대한 연구결과와 고수류 자료를 바탕으로, 경상분지의 서측 기원지에 위치한 영남육괴 지역에 소규모의 감람암체가 존재했던 것으로 해석하여, 경상분지 생성 이전의 쥐라기에서 전기 백악기 사이에 경상분지 지역이 조구조적으로 전호(forearc) 지역이었을 것으로 제시하였다. 한편 Song *et al.* (2004)은 영남육괴 내에 존재하는 변성퇴적암류인 마천 반려암질 층상관입암으로부터 크롬첨정석의 함유를 확인하고, 이 암체가 진주층 내에서 보고된 쇠철성 크롬첨정석(Hisada *et al.*, 2008)의 기원암일 가능성이 있음을 제시하였다. 이와 함께 Lee, T.H. *et al.* (2018)은 신동층군 내 쇠철성 저어콘의 U-Pb 연령측정 결과를 바탕으로 신동층군의 주된 기원지는 영남육괴와 옥천변성대였

을 것으로 해석했다.

이와 같은 경상분지 진화과정에 있어서의 기원지 지질 특성과 연관된 조구조적 환경에 대한 해석에 여러 연구가 이루어져 오고 있는 가운데에, 이번 연구에서는 경상분지 남서부 지역인 경남 하동에 분포하는 신동층군의 하산동층 하부 퇴적층과 경상분지 중북부 지역인 경북 왜관의 낙동층 최상부 퇴적층(그림 1)으로부터 크롬운모편의 함유가 새로 확인되었다. 이 연구에서는 하동 지역의 하산동층 하부퇴적층을 주 대상으로, 크롬운모편의 산상과 퇴적특성, 기원 등에 대한 연구가 이루어졌으며, 이를 바탕으로 신동층군 퇴적 당시 경상분지의 조구조 환경 특성과 층서에 대해 토의했다.

2. 지질개관

연구지역인 경상남도 하동군 금남면 대송리는 1:50,000 남해 지질도엽(Chang *et al.*, 1989)의 북서부 지역으로, 이 지역에는 신동층군 하산동층의 하부 퇴적층이 분포한다(그림 1). 하산동층은 Tateiwa (1929)에 의해 왜관도폭에서 명명되었으며, 진주 주변 지역의 여러 도폭들에서는 ‘마동층’이란 명칭이 사용되었다(Kim *et al.*, 1969; Kang and Park, 1975). 하산동층의 상한과 하한은 각각 붉은색 층의 출현과 소멸 층준으로 설정되어 있으며, 층후는 지역에 따라 640~1,300 m로 변화한다(Um *et al.*, 1983).

하산동층의 지질시대는 윤조류 화석에 의해 Barremian에서 Hauterivian의 시기로 대비되었으나(Seo, 1985), 근래에 이루어진 절대연령 측정 연구결과와 고지자기 자료는 Aptian의 시기를 나타낸다(Kim *et al.*, 2005; Sano *et al.*, 2006; Lee *et al.*, 2010; Kang and Paik, 2013). 이와 함께 Lee, T.H. *et al.* (2018)은 하산동층 내 쇠철성 저어콘의 U-Pb 절대연령을 바탕으로 하

산동층의 지질시대를 Aptian에서 Albian 초기로 제시하였다. 그러나 하산동층의 하위 지층인 낙동층에서 비교적 한랭하고 습한 기후조건에서 온난하고 건조한 기후조건으로 변화되는 퇴적 및 식물화석기록이 함께 나타남은 낙동층과 하산동층의 경계부 시기가 Aptian과 Albian의 경계부일 수 있음을 시사한다(Paik *et al.*, 2018).

하산동층의 전반적인 퇴적환경은 충적평원으로, 충적평야상에 발달하는 고굴곡하천의 사행과 범람 및 유기의 결과로 이루어진 하도퇴적층, 하도주변의 범람원퇴적층, 둑터짐(crevasse splay/channel)퇴적층, 범람원호소퇴적층 등으로 구성되어 있으며, 사질로 이루어진 하도퇴적층과 이질 우세인 범람원퇴적층의 교호가 하산동층의 대표적인 퇴적특성이다(Um *et al.*, 1983; Choi, 1985; Paik and Lee, 1994). 따라서 하산동층은 붉은색층을 빈번히 협재하는 하성평원퇴적층의 발달에 의해 하위의 낙동층 및 상위의 진주층과 일반적으로 구분된다(Um *et al.*, 1983; Choi, 1985). 이와 같은 퇴적특성에 의한 하산동층의 층서적 구분에도 불구하고, 하산동층의 중부에는 수십 m 두께의 붉은색 층을 협재하지 않은 암회색 우세의 호소 내지 호수 기원의 퇴적층이 진주와 하동 지역에 단속적으로 발달되어 있으며(Paik and Lee, 1994; Paik *et al.*, 2012), 연구지역인 대송리 지역에도 이와

같은 특성의 퇴적층이 발달되어 있다(Paik *et al.*, 2011). 따라서 이들 하산동층 내 호수퇴적층에 대해서는 암층서적으로 하산동층 내의 층원 또는 렌즈층으로 설정할 필요성이 있다.

한편 하산동층은 경상누층군의 지층 중 석회질고토양의 발달이 가장 현저한 지층이며, 이들 퇴적층 내에는 다양한 유형의 고토양 기원 캘크리트가 발달되어 있고, 고토양 기원의 미끌림면과 위배사구조가 발달된 버티줄 고토양이 흔히 수반되어 있어, 하산동층 퇴적시기의 전반적인 기후조건은 아건조 기후로 해석되었다(Paik and Kim, 1995; Paik, 1998; Paik and Lee, 1998).

하산동층에서는 공룡의 뼈와 이빨, 알화석, 익룡 뼈와 발자국 화석, 악어 두개골 화석, 거북 배갑화석, 물고기 화석 등 다양한 척추동물 화석들의 산출이 보고되었으며, 무척추동물인 복족류 및 이매패류의 패각화석과 생흔화석의 산출도 보고되었다(Lee, S.S. *et al.*, 1990; Kim and Paik, 1997; Yun and Yang, 1997, 2001; Paik, 2000; Dong *et al.*, 2001; Kim *et al.*, 2002; Lee and Lee, 2005, 2007; Yun *et al.*, 2005; Lee, 2007, 2008; Lee, Y.N. *et al.*, 2008; Park *et al.*, 2020). 또한 최근에는 연구 지역 인근의 하산동층에서 이족보행을 하는 도마뱀 발자국 화석이 보고되었다(Lee, H.J. *et al.*, 2018). 이와 함께 하산동층 내의 호수퇴적

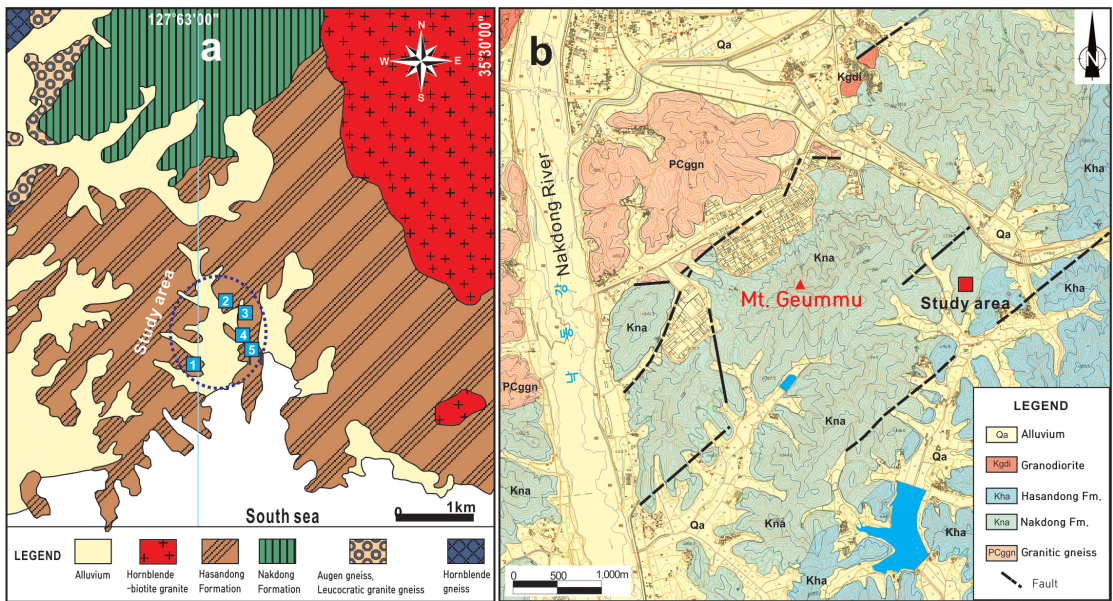


Fig. 1. Location and geological map of study area. a. Hadong area (Chang *et al.*, 1989). b. Waegwan area (Tateiwa, 1929).

층에서는 스트로마톨라이트가 산출된다(Paik and Lee, 1994; Paik *et al.*, 2012).

3. 하동 지역 크롬운모편 산출 지역의 퇴적층 분포 특성

하동 지역에 분포하는 하산동층의 퇴적층은 대체로 북동 내지 동북동 방향의 주향과 10~20도 내외의 남동 방향 경사를 보인다. 이 지역에서 이루어진 토목공사에 의해 하산동층의 하부퇴적층이 여러 곳에 새로 노출되었으며, 대송산업개발(주)의 도움을 받아 이 지역 하산동층 퇴적층의 분포 특성을 확인하였다. 이 지역의 하산동층 퇴적층은 전반적으로 하산동층의 일반적인 퇴적 특성인 하도퇴적층과 범람원퇴적층의 반복으로 이루어져 있으며, 수십 cm 내지 수 m 폭의 중성암맥들이 국부적으로 발달되어 있다. 이와 같은 이 지역 퇴적층의 하부와 상부에 해당 하는 퇴적층의 주요 발달특성은 다음과 같다.

3.1 하부 퇴적층(1, 2, 3지역)

하부층 분포 지역에 해당하는 3개 지역에 노출된 퇴적층들은 전반적으로 하도 기원의 사암층과 범람원 기원의 퇴적층으로 이루어져 있으며, 상부층에 비해 조립질사암층이 발달하는 특성을 보인다(그림 2a, 2b, 2c).

1지역에 분포하는 퇴적층의 하부에는 5 m 이상의 두께를 가지는 하도사암층이 발달하고, 중부에는 범람원퇴적층이 2 m 이상의 두께로 발달하며, 상부에는 다시 하도사암층이 덮여 있다(그림 2a, 3a, 3b). 하위에 발달한 두꺼운 사암층은 렌즈상의 층리를 이루는 사암이 여러 매 중첩되어 나타난 결과로서(그림 3c), 하부는 조립질 내지 중립질의 사암, 중부는 중립질 내지 세립질 사암으로 이루어진 상향세립화현상이 관찰된다. 하부의 조립질 내지 중립질 사암층에서는 곡상사층리가 발달하며, 중부의 중립질 내지 세립질 사암층에서는 수평엽층리가 발달하고(그림 3d), 탄화된 식물편화석이 부분적으로 포함되어 있다. 이들 사암층에서는 수 mm 내지 수 cm 크기의 이암편들이 흔히 포함된다(그림 3e).

사암층의 상위에는 독터짐 기원의 렌즈상 세립질 사암층과 범람원기원의 녹회색의 세일질 이암과 붉은색의 사질 내지는 실트질의 이암이 발달한다. 특히 붉은색의 사질 내지 실트질의 이암에서는 무척추

동물의 생흔구조와 석회질 고토양기원인 캘크리트 단괴들이 1 cm 내외의 크기로 산출한다. 회색 내지 녹회색의 범람 퇴적층에서는 실뿌리구조와 탄화된 식물편들이 관찰되며, 버티줄고토양 기원의 미끌림면이 드물지 않게 나타난다. 한편 이 지역의 붉은색 범람퇴적층에서는 골편화석들(수 cm 크기)의 산출이 확인되었다.

하위에 발달한 두꺼운 하도기원의 사암층은 남북 방향으로 가면서 점차 얇아지고, 엽층리가 잘 발달한 제방기원 퇴적층이나 범람원기원 퇴적층으로 전이된다. 특히 북측에서는 하도사암층과 제방기원 퇴적층의 접촉부가 나타나며, 이 두 퇴적층이 설교하는 현상(intertonguing)이 관찰된다(그림 3f). 한편 이 지역 퇴적층과 대비되는 층준을 가지는 2지역의 퇴적층에서도 1지역과 유사한 특성의 퇴적층이 나타난다(그림 2b, 3g, 3h, 3i).

2지역 퇴적층의 상위 층준인 3지역의 퇴적층은 붉은색의 석회질의 실트질 이암, 녹회색의 세일질 이암, 담녹회색의 세립사암, 붉은색의 이암과 세립사암 내지 실트스톤의 교호암 등으로 구성된다(그림 2c, 3j, 3k). 붉은색의 석회질의 실트질 이암에서는 캘크리트 단괴와 얼룩구조 등이 발달되어 있으며, 붉은색의 이암과 세립사암 내지 실트스톤의 교호암에서는 얼룩구조, 생교란구조, 서관구조 등이 흔히 나타나고, 간혹 캘크리트 단괴가 관찰된다. 독터짐 기원의 녹회색의 세립사암은 중간층 내지는 두꺼운 층으로 발달하며, 하부 경계는 침식경계이고 점이층리를 이룬다. 또한 사암층의 상부는 이암의 피막으로 피복되어 있으며, 흔히 무척추동물의 생흔구조가 발달되어 있다(그림 3l). 한편, 사암층은 횡적으로 가면서 층의 두께가 변화하는 양상이 나타나는데, 때로는 하부면은 수평적이고, 상부는 위로 볼록한 형태를 보인다. 따라서 이 지역의 퇴적층은 전반적으로 범람원퇴적층으로 해석되며, 녹회색의 세립사암은 범람원 내 독터짐 퇴적층으로 해석된다.

3.2 상부 퇴적층(4, 5지역)

상부층 분포 지역에 해당하는 2개 지역에 노출된 퇴적층들의 경우, 하부층과 마찬가지로 전반적으로 하도 기원의 사암층과 범람원 기원의 퇴적층으로 이루어져 있으나, 하부층에 비해 세립질 퇴적층의 발달이 증가된 특성을 보인다(그림 2d, 2e). 하도사암층

의 경우, 수 m 두께의 렌즈상 중립 내지 세립사암층이 여러 매 중첩되어 나타나며(그림 4a), 상부로 가면서 점차 세립화하는 양상을 보인다. 이 사암층에

는 수평엽층리 내지 사암층리가 발달되어 있으며(그림 4b), 때때로 이암편을 포함한다. 범람원퇴적층은 붉은색을 띠는 엽층 내지 얇은층으로 교호하는 세립

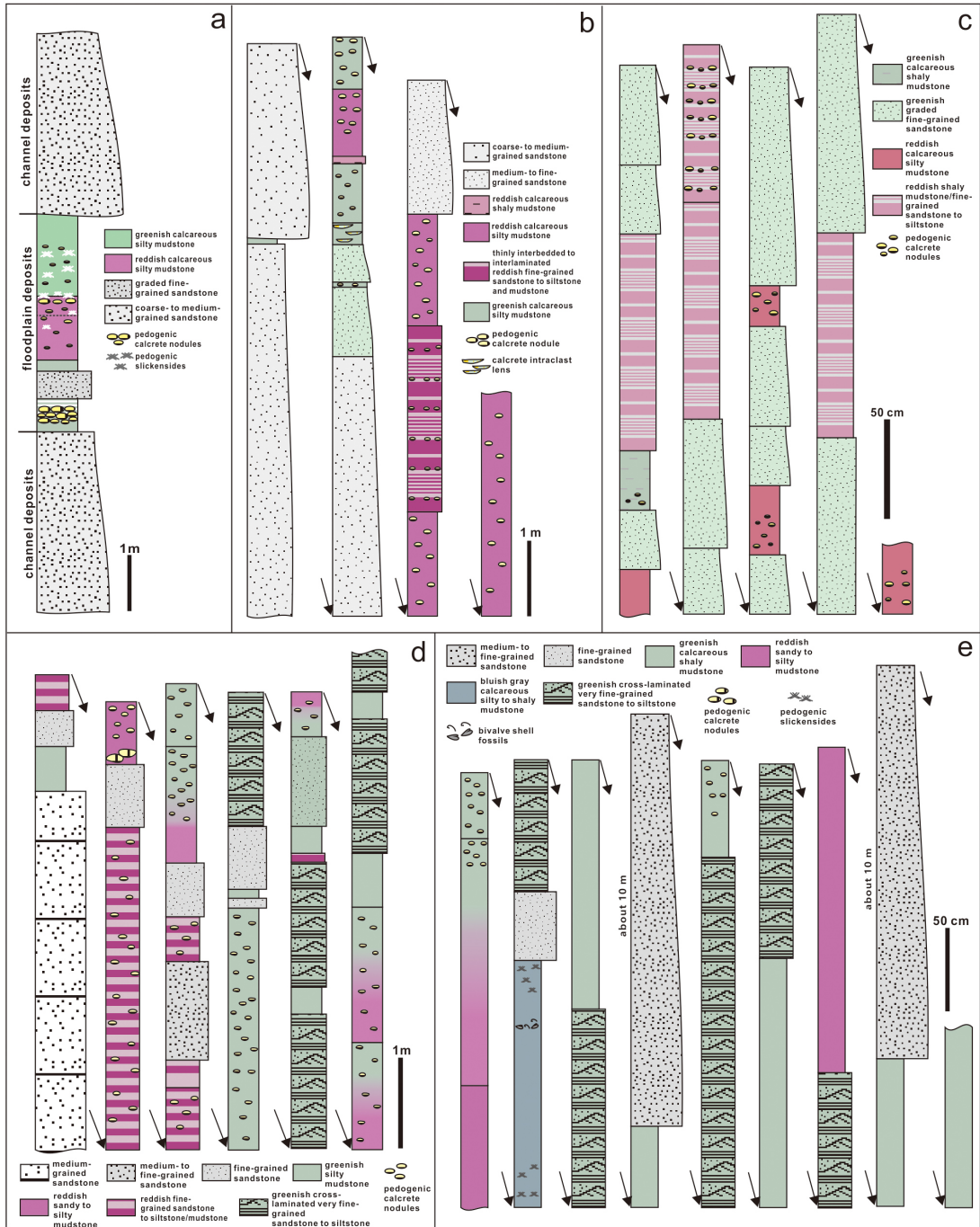


Fig. 2. Stratigraphic sections of the lower (a, b, c) and upper parts (d, e) of the examined deposits of the lower part of the Hasandong Formation at Hadong area. a. Site 1. b. Site 2. c. Site 3. d. Site 4. e. Site 5.

사암 내지 실트스톤과 이암과 부분적으로 석회질을 띠는 괴상의 실트질 이암 등으로 구성된다.

엽층 내지 얇은층으로 교호하는 세립질 사암 내지 실트스톤과 이암에서는 건열과 무척추동물의 생흔이 흔히 발달되어 있으며(그림 4c), 때때로 이들에

의해 층리가 교란되고 파괴되어 있거나 얼룩구조가 나타난다. 이 세립질 퇴적층에는 간헐적으로 독티짐 기원의 세립사암층이 협재하며(그림 4d), 이 사암층 상위에는 무척추동물의 생흔구조가 발달한 이암이 분포한다(그림 4e). 괴상의 실트질 이암에는 석회질

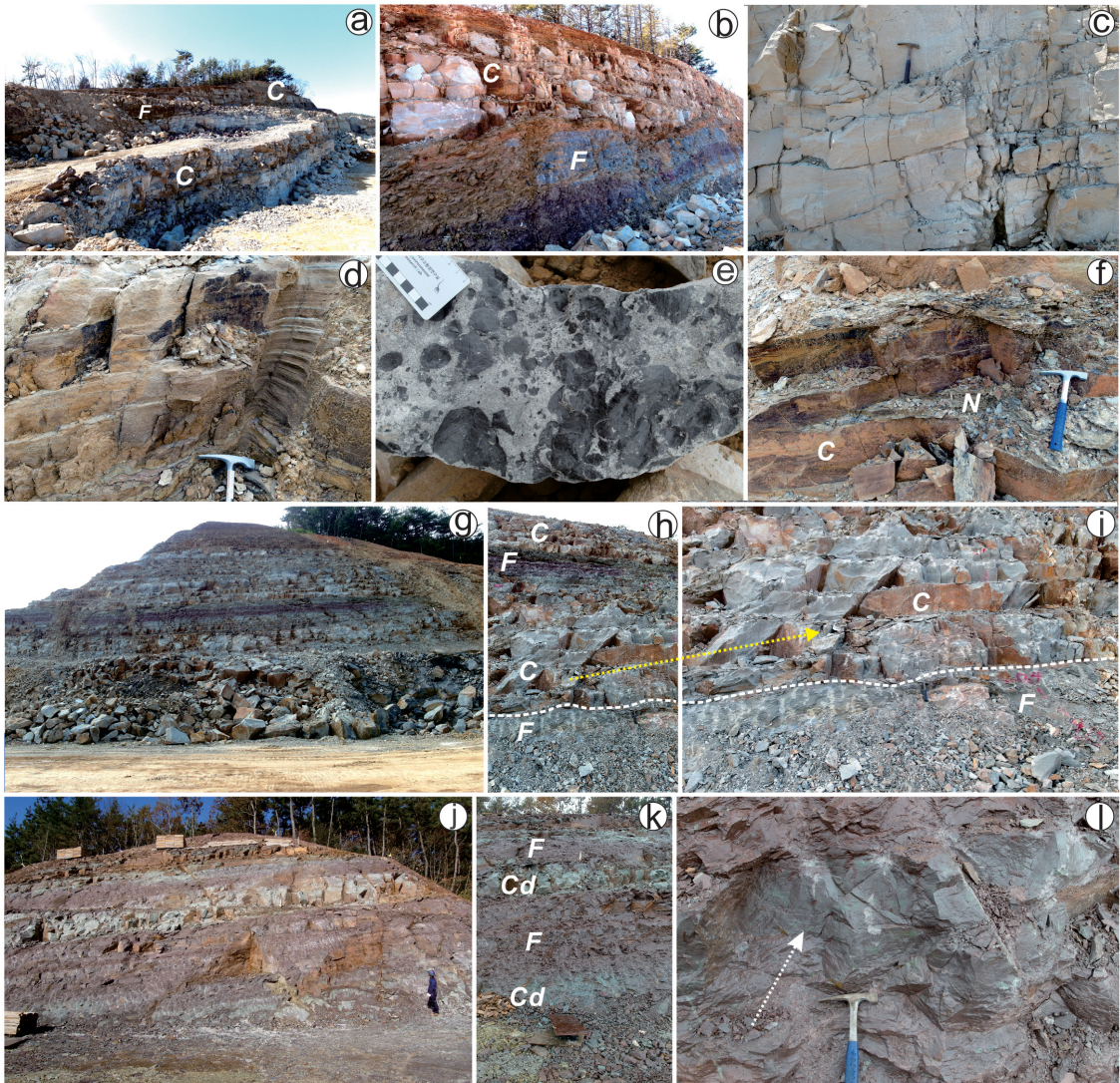


Fig. 3. Occurrences of the lower part deposits in study area at Hadong. Site 1: a. An overall view of the outcrop exposure consisting of channel (C) and floodplain deposits (F). b. The upper channel deposits (C) with sharp erosive base on floodplain deposits (F). c. Lenticular bedding of the lower channel sandstones. d. Planar lamination in the medium- to fine-grained sandstone of the lower channel deposits. e. Concentration of mudstone chips in the lower channel deposits. f. Intertonguing of the channel deposits (C) and the natural levee deposits (N). Site 2: g. An overall view of the outcrop exposure consisting of channel and floodplain deposits. h. A close view of g. i. A closer view of h. Site 3: j. An overall view of the outcrop exposure consisting of floodplain deposits. k. A closer view of j. Floodplain deposits (F) intercalated with crevasse splay deposits (Cd). l. A closer view of the crevasse splay deposit with invertebrate bioturbation traces (arrow).

고토양기원의 켈크리트가 단괴상 내지 층상으로 발달되어 있으며, 이 암상에서도 무척추동물에 의한 생교란구조와 얼룩구조가 나타난다. 한편 이 지역의 상부에 산출되는 청회색 내지 회색을 보이는 석회질의 실트질 내지 세일질 이암에서는 이매패류의 패각화석이 파편상으로 산출되며(그림 4g), 버티줄고토양의 특성인 위배사구조(그림 4h)와 고토양기원 미끌

림면(그림 4h)이 부분적으로 나타난다.

4. 크롬운모편 산상

4.1 크롬운모편의 산출 특성

크롬운모편들의 산출은 1과 2지역의 하도 기원 함력조립사암층(그림 2a) 내에서만 확인되었으며, 그

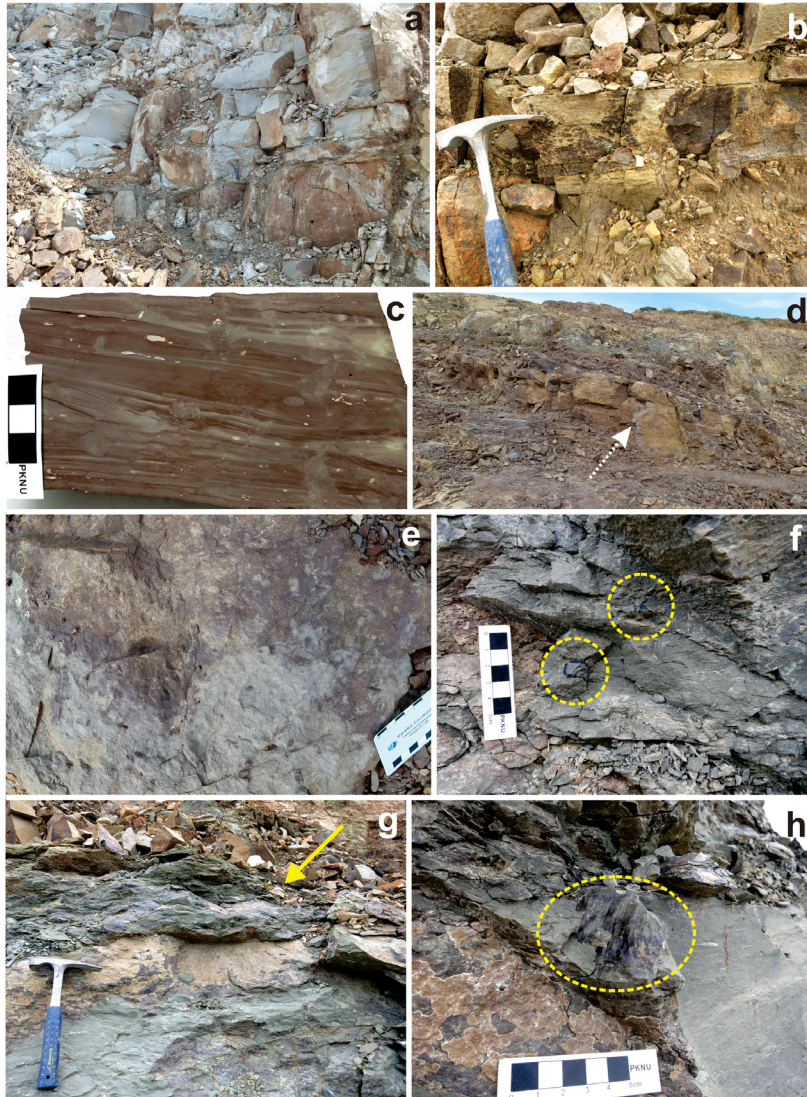


Fig. 4. Occurrences of the upper part deposits in study area at Hadong. a. Lenticular-bedded channel sandstones. b. Planar- to low-angular lamination in the medium- to fine-grained sandstones. c. Thinly interbedded to interlaminated fine-grained sandstone to siltstone and mudstone with desiccation cracks and invertebrate burrows. d. Floodplain deposits intercalated with crevasse channel deposit (arrow). e. Invertebrate bioturbation traces observed in the mudstone on the sandstone. f. Bivalve shell fossils (dotted circles) in the calcareous silty to shaly mudstones. g, h. Pedogenic pseudoanticlines (arrow) (g) and slickensides (dotted circle) (h) observed in the silty to shaly mudstones.

외의 퇴적층에서는 관찰되지 않는 층서적으로 제한적인 산출 양상을 보인다. 1지역의 크롬운모편은 이 지역의 하부와 상부에 발달한 하도기원의 함력조립 사암층에서 모두 나타나며, 부분적으로 지방 광택의

녹색을 띠는 수 mm 내지 수 cm 크기의 아원상 내지 원마도가 양호한 판상 입자로 산출되어, 야외에 노출된 사암 내에서 비교적 쉽게 육안으로 관찰된다 (그림 5a, 5b, 5c). 상부의 크롬운모 함유 함력조립사



Fig. 5. Occurrences of the chrome mica clasts from the lower part of the Hasandong Formation at sites 1 and 2 in Hadong area. Site 1: a, b, c. Subrounded to well-rounded greenish chrome mica clasts (dotted circles) in the coarse-grained sandstones. d. Chrome mica-bearing coarse-grained channel sandstones with erosive base on floodplain deposits. e. A close view of d. f. A chrome mica clast (arrow) in an abandoned rock from the coarse-grained sandstones in e. g. Thin-section photomicrograph of the chrome mica-bearing coarse-grained sandstone showing sublithic composition with a chert grain (Ch). h. Chrome mica clasts (dotted circles) associated with mudstone chips. i. A chert clast associated with a chrome mica clast (dotted circle) in the coarse-grained sandstone. Site 2: j, k. Chrome mica clasts (dotted circles) in the coarse-grained sandstones. l. Outcrop exposure of the chrome mica-bearing coarse-grained channel sandstones.

암층은 세일질의 범람원퇴적층 바로 위에 불규칙한 침식기복을 뚜렷이 가지며 놓여 있으며(그림 5d, 5e), 대체로 상향박층화와 상향세립화의 양상을 보인다. 이 크롬운모편 함유 함력조립사암층 내에는 수회의 점이층리가 나타나며, 크롬운모편은 이들 점이층과 이로부터 산출된 전석들에서 관찰된다(그림 5f).

이들 함력조립사암의 분급은 대체로 불량한 편이며, 사립들의 원마도는 대체로 아원상을 보인다. 이 사암의 모래 입자들은 직소광 또는 파동소광을 보이는 석영입자가 우세한 가운데에 규암, 사암, 변성암 등의 암편이 나타나고 장석입자는 드물게 관찰되는 등, 전반적으로 아암편 내지 암편사암의 성격을 띤다(그림 5g). 역질 입자들은 전반적으로 층내 기원의 이암편들이 우세한 편이며(그림 5h), 판상의 이암편들은 대체로 층리에 평행한 배열을 보인다. 이와 함께 변성암역과 고철질암역, 규암역들이 부분적으로 나타나며, 흑색의 처트편도 수반되어 있다(그림 5i).

2지역에서도 하도기원의 조립사암층에서 크롬운모편들의 산출이 확인되었다(그림 5j, 5k). 2지역의 경우에도 1지역과 마찬가지로 하도사암층과 범람원퇴적층의 반복으로 이루어져 있다. 크롬운모편 산출 사암층 또한 이암편을 풍부히 함유하는 함력조립사암

으로 이루어져 있으며, 하위의 범람원퇴적층 위에 뚜렷한 침식면을 가지며 나타나고 상향박층화와 상향세립화의 양상을 보인다(그림 5l). 이와 함께 1지역의 함력사암층 내에서도 골편화석이 확인되었다. 이와 같은 1지역의 퇴적 특성은 산출 층준과 함께 2지역 퇴적층이 1지역 퇴적층과 대비될 수 있음을 뒷받침한다.

한편 경상분지 북서부 지역인 경북 왜관의 낙동층 최상부에 해당하는 퇴적층에서도 이암편을 함유한 하성기원의 조립사암층(그림 6a, 6b, 6c)에서 녹색을 띠는 크롬운모편의 산출이 확인되었다(그림 6e, 8b). 이 사암층 또한 하성사암층의 일반적 특성인 상향세립화를 보이며, 기저면에는 이암 파편의 산출이 일반적이다. 이와 함께 처트편 또는 처트역도 드물게 관찰된다(그림 6e). 한편 이 지역의 퇴적층에는 붉은색 퇴적층이 협재하지 않으며, 웅덩이 기원의 탄질층이 수반되어 있음이 특징이다(그림 6a, 6b, 6c). 이와 함께 이 퇴적층의 하위에 발달한 범람원퇴적층에서도 골편화석이 부분적으로 산출되었다.

4.2 크롬운모편의 광물학적 특성

하동의 하산동층에서 산출된 크롬운모편의 화학

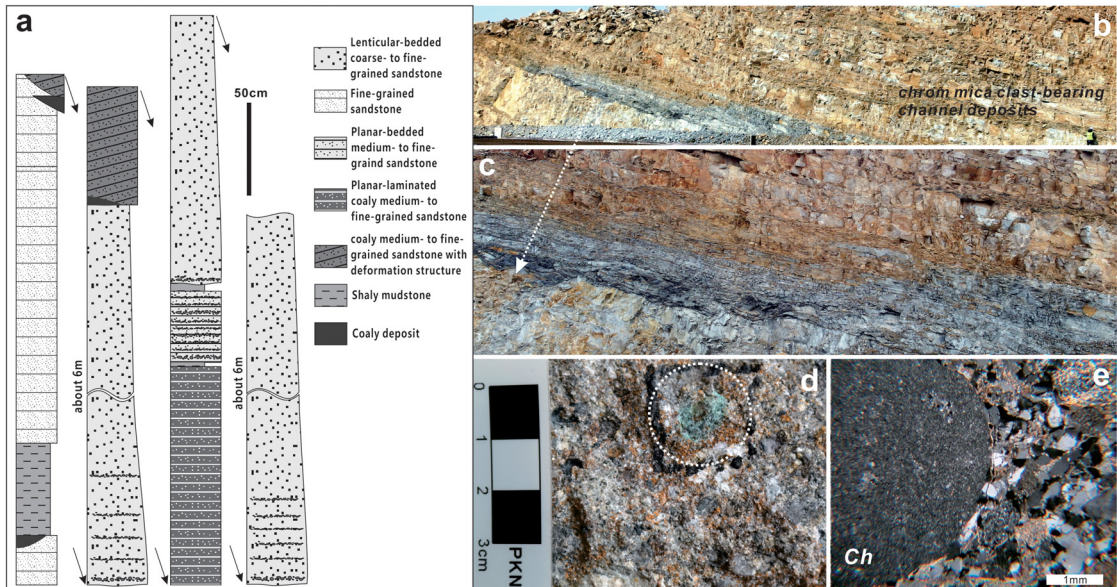


Fig. 6. Occurrences of the chrome mica clasts from the uppermost part of the Nakdong Formation at Waegwan area. a. Stratigraphic sections. b. Outcrop exposure of the chrome mica-bearing channel deposits. c. A close view of b. d. A subrounded chrome mica clast (dotted circle) in the coarse-grained sandstone. e. Thin-section photomicrograph of the chrome mica-bearing coarse-grained sublithic sandstone containing chert clast (Ch).

조성과 광물학적 특성을 파악하기 위해 X-선형광분석(표 1)과 X-선회절분석(그림 7), SEM/EDS 분석(그림 8a) 등이 이루어졌으며, 왜관의 낙동층에서 산출되는 크롬운모편에 대해서는 SEM/EDS 분석(그림 8b)이 이루어졌다. 하산동층과 낙동층의 크롬운모편에 대한 SEM/EDS 분석 결과 모두 크롬의 함량이 확인되었다(그림 8). 하산동층의 크롬운모편에 대한 X-선회절분석의 측정조건은 전압 30 kV, 15 mA, scan speed 2°2θ/min, 시정수 1 sec, slit 1° ~ 0.3 mm ~ 1°로 측정하였다. 이 크롬운모편 시료는 10.39, 5.01, 4.50, 3.66, 3.33, 3.07, 2.56, 2.39, 2.14, 2.002, 1.664, 1.498 Å의 회절선을 나타냈으며(그림 7), 이들은 모두 운모(운모점토광물)에 해당되는 것으로 확인되었

다. 다른 광물의 회절선은 거의 검출되지 않는 것으로 나타났다. 따라서 녹색을 띠는 부분은 운모(운모점토광물)로 구성된 것으로 판단된다. 그리고 1.49 Å의 큰 회절선을 나타내는 것으로 보아 이팔면체형 운모광물에 속하는 것으로 볼 수 있다. 회절선의 패턴으로 볼 때 폴리타이프는 1M에 가까운 것으로 보인다.

그러나 운모(운모점토광물)에는 매우 많은 종류들이 있으므로 단순히 X-선 회절분석 결과만 가지고 광물종을 판별하기는 어려우며, 화학성분 등의 검토가 필요하다. 이 녹색광물에 대한 엑스선형광분석 결과(표 1)에 의해 이 광물의 화학구조식은 $(K_{0.72}Na_{0.03}Ca_{0.04})(Al_{1.62}Fe_{0.07}Mg_{0.11}Cr_{0.09})(Si_{3.52}Ti_{0.02}Al_{0.46})O_{10}(OH)_2$

Table 1. Chemical composition by XRF analysis for the chrome mica clast from the Hasandong Formation at site 1 of study area, Hadong.

Analyte	Result	Proc-Calc	Line	Net Int.	BG Int.
SiO ₂	56.5417 %	Quant.-FP	SiKa	655.366	2.454
Al ₂ O ₃	28.5771 %	Quant.-FP	AlKa	544.942	31.661
K ₂ O	9.0719 %	Quant.-FP	K Ka	437.074	2.322
Cr ₂ O ₃	1.8075 %	Quant.-FP	CrKa	49.791	0.465
Fe ₂ O ₃	1.5097 %	Quant.-FP	FeKa	82.712	0.956
MgO	1.1691 %	Quant.-FP	MgKa	7.728	0.584
CaO	0.6547 %	Quant.-FP	CaKa	21.257	0.983
TiO ₂	0.3971 %	Quant.-FP	TiKa	3.935	0.168
Na ₂ O	0.2428 %	Quant.-FP	NaKa	0.656	0.050
NiO	0.0284 %	Quant.-FP	NiKa	2.759	1.353

Proc-Calc, Processing Calculation; Int., Intensity; BG Int., Background Intensity; Quant.-FP, Quantitative Fundamental parameter method.

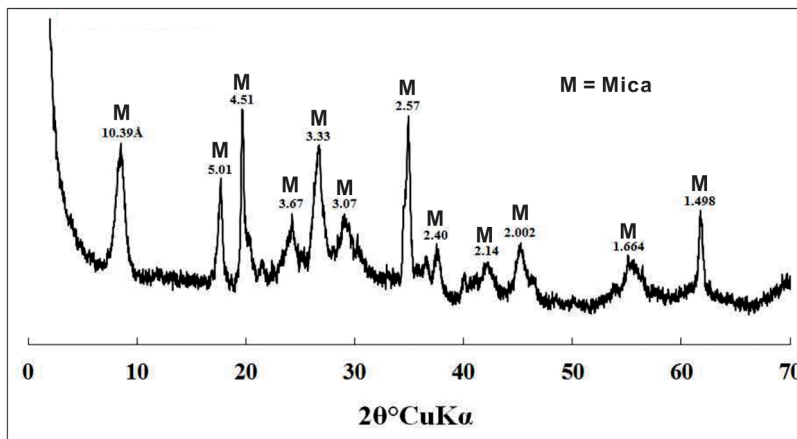


Fig. 7. XRD analysis for the chrome mica clast from the Hasandong Formation at site 1 of study area, Hadong.

로 계산되었다. 철은 3가철로 계산하였으며, 음이온 $O_{10}(OH)_2$ 을 기준으로 계산하였다. 이 결과로 보면 Cr이 팔면체층에 상당량 포함되어 있음을 알 수 있다. Cr 성분을 고려하지 않고, 이 분석결과를 운모의 일반적인 성분과 비교해 보면(Bailey, 1987), 일라이트(illite)의 성분에 가장 가깝게 나타난다. 따라서 Cr을 상당량 포함하는 일라이트로 판단된다. 특히 Cr을 상당량 포함하는 운모광물에 대해서는 별도의 광물종으로 fuchsite와 mariposite로 구분하기도 한다.

Fuchsite는 Cr을 포함하는 운모로 Cr_2O_3 가 0.84-3.95%의 범위를 주로 보이며, 최대의 것으로 6.08%인 것도 보고되었고, 이들보다 크롬 함량이 낮은 운모로는 mariposite가 보고되었다(Whitmore *et al.*, 1946). 분석 대상 시료의 경우 Cr_2O_3 가 1.80%이므로(표 1) fuchsite의 성분 범위에 포함된다. 이러한 이 팔면체형 운모광물의 크롬운모인 fuchsite와 mariposite는 주로 Al을 Cr이 치환하고 있다. 이러한 치환에 따라 주로 녹색을 띠는 것으로 알려져 있다.

Cr을 포함하는 운모광물은 사면체층의 Al과 Si의 비율에 대한 차이로도 구분하는 것으로 알려져 있다. 즉, fuchsite는 사면체층의 성분이 Al:Si = 2:6을 가지며 백운모에 가까운 크롬 함유 변종으로 보며,

mariposite는 사면체층의 성분이 Al:Si = 1:7을 가지며 phengite에 가까운 크롬 함유 변종으로 보고 있다(Heinrich, 1965). 이러한 점으로 볼 때 전술한 화학구조식을 $O_{20}(OH)_4$ 의 기준으로 하면, Al:Si = 0.92:7.04로 되어 mariposite의 성분비에 매우 가깝다. 따라서 연구지역의 하산동층 퇴적층에서 산출된 크롬운모편의 보다 정확한 광물종의 확인을 위해서는 적외선분광분석과 결정구조분석 등에 대한 추가 연구가 필요한 것으로 판단된다.

5. 토 의

일반적으로 크롬운모는 열수맥 및 열수교대광상과 편암과 편마암 등의 광역변성작용에 의한 변성암에서 산출하는 것으로 알려져 있으며, mariposite는 열수 기원인 반면, fuchsite는 열수와 변성 기원 모두에 해당하고, 이 경우 변성 기원의 fuchsite가 열수기원의 fuchsite보다 훨씬 많은 것으로 보고되었다(Heinrich, 1965). 이와 함께 녹색을 띠는 규암과 역암 내에서도 크롬운모의 산출이 여러 지역에서 보고되었으며(Blackwelder, 1926; Eskola, 1933; Frankel, 1939; Basset, 1956; Padget, 1956; Clifford, 1957),

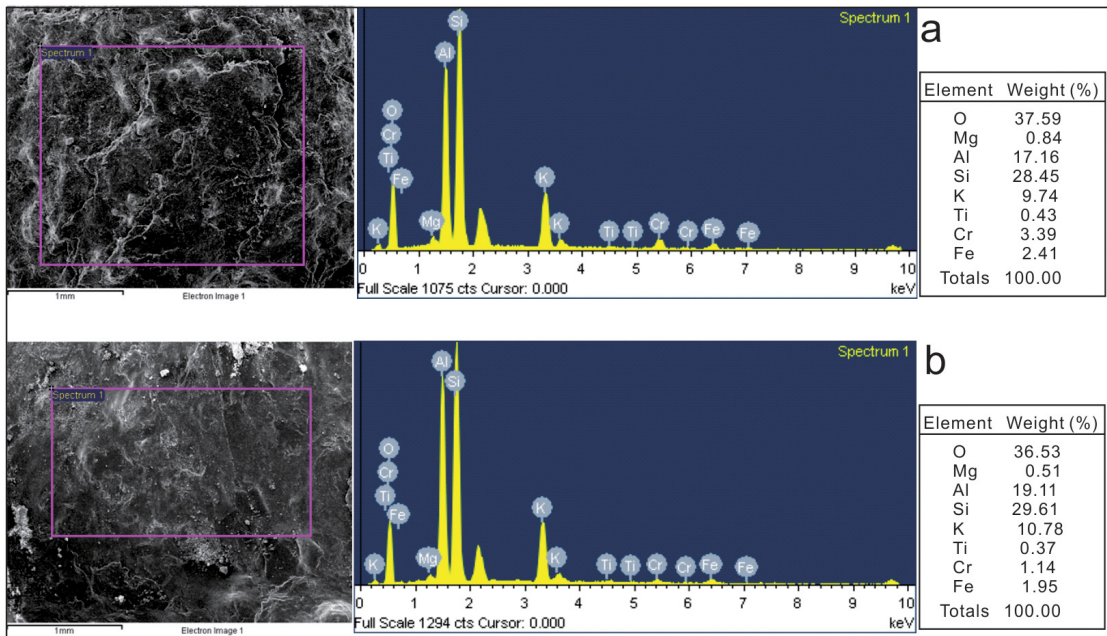


Fig. 8. SEM/EDS analysis for the chrome mica clasts from the Hasandong Formation (Hadong area) (a) and the Nakdong Formation (Waegwan area) (b).

이 경우 크롬운모는 변성기원으로 해석되었다. 한편 브라질의 선캠브리아누대 녹색 규암 내 크롬운모의 기원은 광역변성작용, 인접해 있는 고철질 내지 초고철질암석의 열수에 의한 용해로부터 크롬물질이 변성암으로 유입된 결과, 열수교대작용 등으로 해석되었다(Leo *et al.*, 1965). 이 외에도 화강섬록암 내 변성교대기원의 fuchsite (Babadzhanyan, 1960), 열수변성작용 기원의 크롬운모(Ergunalp, 1944), 금광상에 포함된 크롬운모(Whitmore, 1946; Li *et al.*, 2019), 초고철질암의 변성 산물(Schreyer *et al.*, 1981; Ferenc *et al.*, 2016; Pirouei *et al.*, 2020) 등 다양한 산상의 크롬운모가 보고되었다.

한편 국내의 경우 크롬을 함유한 광물의 산출이 보고된 경우는 매우 드물다. 한반도에서 녹색을 띠는 운모가 보고된 사례는 장군광산 부근의 장산규암 내에 함유된 바나듐-백운모(Imai *et al.*, 1980)와 회남과 덕평 지역의 옥천누층군 탄질변성이질암 내의 함유된 바륨-바나듐 백운모(Lee *et al.*, 1997; Lee and Lee, 1997a)가 있으며, 크롬운모는 충북 영동과 전북 무주의 접경부에 발달한 나림금광상의 모암인 소백산 편마암복합체의 화강편마암과 고철질 맥암의 열수변질대에서 처음으로 보고되었다(Lee and Lee, 1997b). 이와 함께 Song *et al.* (2004)는 경남 마천의 소백산 육괴 내에 발달한 반려암질 층상관입암에서 크롬침정석의 함유를 보고한 바 있다. 한편 변성작용이나 열수변질작용, 고철질암 등이 아닌 퇴적암에서의 크롬침정석의 산출이 하산동층(Lim *et al.*, 2019)과 진주층(Hisada *et al.*, 2008)에서 보고된 바 있다.

연구지역의 하산동층 퇴적층에 중성암맥들이 국부적으로 발달해 있으나, 전술한 바와 같이 연구지역에서 산출하는 크롬운모는 열수변질이나 광역변성작용을 받지 않은 함력조립사암층 내에 파편상으로 산재하여 나타난다. 이와 함께 크롬운모편들이 원마를 받은 상태로 일반 역들과 함께 산출함은 이들이 속성기원이 아닌 쇄설기원임을 뚜렷이 지시한다. 한편 크롬운모편이 산출하는 퇴적층에 나타나는 상향세립화된 하도퇴적층의 발달, 고토양이 발달한 범람원퇴적층의 발달, 하도퇴적층과 제방퇴적층의 설교접촉 등의 퇴적 특성은 이 퇴적층이 사행하천 환경에서 퇴적되었음을 지시하며(Galloway and Hobday, 1996; Bridge, 2006), 이는 하산동층의 일반적인 퇴적환경과 동일하다(Um *et al.*, 1983; Paik and Lee,

1998). 따라서 연구지역에서 산출된 크롬운모편들은 기원지에 노출된 크롬운모를 함유한 암석의 침식작용으로부터 기원한 것으로 해석된다. 한편 크롬운모편들이 점이층의 기저부에 이암편들과 밀접히 수반되어 산출되는 것은 크롬운모편들이 상류지역에서의 범람으로부터 기원되었음을 지시한다.

하산동층을 포함한 신동층군의 기원암은 경상분지의 서측과 북서측에 분포했던 심성암과 변성암으로 제시되었으며, 이에 따라 하산동층의 기원암은 경상분지 서측의 영남육괴와 북서측의 옥천변성대로 해석되었다(Chang and Kim, 1968; Choi, 1986; Koh, 1986; Lee *et al.*, 2015). 이와 함께 쇄설성 저어콘의 연대측정 자료를 기준으로 하산동층 기원암의 지질시대 특성이 해석되었다(Lee, T.H. *et al.*, 2018; Choi *et al.*, 2020). Lee, T.H. *et al.* (2018)은 하산동층의 기원암 구성이 양적으로 트리아스기, 쥐라기-시생누대, 고원생누대-중원생누대, 신원생누대-고생대-백악기의 순으로 이루어졌다고 해석했다. Choi *et al.* (2020)은 하산동층 남부 지역에는 고원생대의 기원암이 지배적인 반면, 북부 지역의 기원암에는 쥐라기의 심성암이 우세했을 것으로 분석하여 하산동층의 기원암 특성이 시공간에 따라 변화한 것으로 해석하였다. 아울러 북부 지역 낙동층의 기원암은 하산동층 남부 지역의 기원암과 동일한 특성을 가진 것으로 해석하였다. 한편 Lim *et al.* (2019)은 미량원소 조성을 바탕으로 신동층군 퇴적 당시 서측부에 맨틀췌기의 감람암이 소규모로 분포했을 것으로 추정하였다.

위와 같은 크롬운모편의 기원암 유형과 하산동층 퇴적 당시 경상분지 기원지의 지질특성, 크롬운모의 국내 산출 사례 등을 복합적으로 고려할 때, 열수변질대의 금광상이나 열수변성을 받은 초고철질암 및 이에 수반된 변성암 등을 하산동층 크롬운모편의 기원암으로 추정해 볼 수 있다. 이와 함께 크롬운모편이 제한된 층준에서 산출되는 것은 광역변성암이 아닌 발달 규모가 제한적인 열수변질대가 기원암임을 뒷받침해 준다. 열수변질대 금광상의 경우, Lee and Lee (1997b)에 의해 보고된 크롬운모를 배태한 맥암의 연령이 백악기 후기에 해당하므로 하산동층 크롬운모편의 기원암으로는 시기적으로 맞지 않는다. 또한, 경상분지 서측부에서의 초고철질암의 존재는 마천반려암질 층상관입암(Song *et al.*, 2004)을 제외하

고는 확인되지 않은 상태이다(Lim *et al.*, 2019). 따라서 현재로서는 경상분지 서측에서 하산동층 크롬운모편의 기원암에 대한 직접적인 흔적은 알 수 없다.

Lim *et al.* (2019)은 신동층군 사암과 이질암에 대한 미량원소(Cr, Ni 등) 분석결과를 바탕으로, 후기 쥐라기-초기 백악기의 압축운동에 의해 영남육괴에 소규모의 고철질암체가 존재했을 것으로 제안하였다. 이와 함께 이 고철질암체가 신동층군에서 산출하는 크롬점정석의 기원암인 것으로 판단하였다. 따라서 Lim *et al.* (2019)의 연구결과와 함께 크롬운모가 오피올라이트 내의 열수변질 산물로도 산출되는 점(Ferenc *et al.*, 2016; Pirouei *et al.*, 2020), 하산동층의 크롬운모편 퇴적층에 처트편들이 수반된 점, 크롬운모편이 제한된 층준에서만 산출되는 점 등은 신동층군 퇴적 당시 압축운동으로부터 기원한 부가복합체(accretionary complex)가 영남육괴에 소규모로 존재했을 가능성을 시사한다. 따라서 신동층군에서 산출되는 크롬점정석에 대한 후속연구를 통해 중생대 동안의 한반도 조구조 특성이 보다 발전적으로 파악될 수 있을 것으로 기대된다.

한편 경상분지 북서부 지역인 경북 왜관의 낙동층 최상부에서 확인된 크롬운모편 산출 퇴적층의 퇴적 특성은 전술한 하동 지역 하산동층의 크롬운모편 산출 퇴적층의 퇴적특성과 상이점을 보이며 암층서층준 또한 차이가 있다. 그러나 암층서는 시층서와 층준을 달리하므로, 두 지역에서의 특이성과 희소성이 매우 높은 쉘설성 크롬운모의 산출은 경상분지 북서부 지역의 낙동층 최상부와 남부지역 하산동층의 최하부가 시층서적으로 대비될 가능성이 있음을 시사한다. 온난하고 비교적 습윤한 환경을 지시하는 나무고사리화석이 왜관 일대의 낙동층 상부에서는 산출하는 반면(Ogura, 1941; Kim *et al.*, 2014) 경상분지 남부 지역의 낙동층에서는 산출하지 않는 점은 동시공간대에 경상분지 북부와 남부의 기후조건에 차이가 있었으며, 이에 따라 동일한 시층서 층준에서의 암상변화가 나타났음을 뒷받침해 준다.

6. 결론

- 1) 경상분지 남서부 지역인 경남 하동에 분포하는 신동층군의 하산동층 하부 퇴적층과 경상분지 북서부 지역인 경북 왜관의 신동층군 낙동층

최상부 퇴적층의 하성층으로부터 녹색을 띠는 운모의 산출이 새로이 확인되었다.

- 2) 이 녹색 광물에 대한 엑스선 회절분석과 형광 분석 결과에 의해 이 광물의 화학구조식은 $(K_{0.72}Na_{0.03}Ca_{0.04})(Al_{1.62}Fe_{0.07}Mg_{0.11}Cr_{0.09})(Si_{3.52}Ti_{0.02}Al_{0.46})O_{10}(OH)_2$ 로 계산되었으며, Cr_2O_3 의 함량을 기준으로 fuchsite로 감정되었다.
- 3) 이 크롬운모들이 열수변질이나 광역변성작용을 받지 않은 함력조립사암층 내에 파편상으로 산재하며, 원마된 상태로 일반 역들과 함께 산출하는 특성은 이들이 속성기원이 아닌 쉘설기원임을 지시한다. 또한 이 크롬운모편들이 점이층의 기저부에 층적평원에서 기원한 이암편들과 밀접히 수반되어 산출되는 점은 크롬운모편들이 상류지역에서의 범람으로부터 기원하였음을 지시한다.
- 4) 크롬운모의 기원암 유형, 하산동층 퇴적 당시 경상분지 기원지의 지질특성, 크롬운모의 국내 산출 사례 등과 하산동층 내 크롬운모편이 매우 제한된 층준에서 산출된다는 점을 종합적으로 고려할 때, 하산동층 크롬운모편의 기원암은 발달 규모가 제한적인 초고철질암의 열수변질대일 가능성이 높다.
- 5) Lim *et al.* (2019)에 의해 쥐라기말에서-백악기 초 사이에 영남육괴에 소규모 고철질암체의 존재가 제시된 것과 함께 크롬운모가 오피올라이트 내에 열수변질 산물로도 산출하는 점, 하산동층의 크롬운모편에 처트편들이 수반된 점 등은 신동층군 퇴적 당시 영남육괴에 부가복합체의 부분적인 존재 가능성을 시사해 주는 것으로, 이에 대한 후속연구가 필요하다.
- 6) 경상분지 남서부 지역의 하산동층 하부 퇴적층과 경상분지 북서부 지역의 낙동층 최상부 퇴적층에서의 특이성과 희소성이 매우 높은 쉘설기원의 크롬운모 산출은 경상분지 북부 지역의 낙동층 최상부와 남부지역 하산동층의 최하부가 시층서적으로 대비될 가능성이 있음을 시사한다.

감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2019

년)에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드린다. 이 논문의 부족한 부분에 대한 보완과 내용 개선을 위해 가치 있고 유익한 도움말을 주신 심사위원님께 감사를 드리며, 야외조사에 도움을 준 부경대학교 지구고환경실�험실원들에게도 고마움을 전한다.

REFERENCES

- Babadzhanyan, A.K., 1960, Fuchsite from the granodiorite intrusion at Gazma (Armenian S.S.R.). Mem. All-Union Min. Soc., 189, 232-233 (in Russian).
- Bailey, S.W., 1987, Classification and structures of the micas. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 13, 1-12.
- Basset, H., 1956, Chromiferous muscovite mica in Tanganyika. Rec. Geol. Survey Tanganyika, 4, 103-104.
- Blackwelder, E., 1926, Pre-Cambrian geology of the Medicine Bow Mountains. Bulletin of the Geological Society of America, 37, 615-658.
- Bridge, J.S., 2006, Fluvial facies models: recent developments. In: Posamentier, H.W. and Walker, R.G. (eds), Facies models revisited, SEPM Special Publication, 84, 85-170.
- Chang, K.H. and Kim, H.M., 1968, Cretaceous paleocurrent and sedimentation in northwestern part of Kyongsang Basin, southern Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 4, 77-97.
- Chang, K.H., Lee, Y.G. and Kim, K.H., 1989, Geological report of the Namhae-Seosang Sheet (1:50,000). Korea Institute of Energy and Resources, 28 p.
- Chang, K.H., Woo, B.G., Lee, J.H., Park, S.K. and Yao, A., 1990, Cretaceous and Early Cenozoic stratigraphy and history of eastern Kyongsang Basin, S. Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 26, 471-487.
- 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., 1986, Sandstone petrology of the Sindong Group, southwestern part of the Gyeongsang Basin. Journal of the Geological Society of Korea, 22, 212-223.
- Choi, T., Lee, Y.I., Lim, H.S. and Orihashi, Y., 2020, Detrital zircon geochronology of the Cretaceous Sindong Group, Gyeongsang Basin, Korea and its implications for paleodrainage system. Episodes, <https://doi.org/10.18814/epiiugs/2020/020003>.
- 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.
- Clifford, T.N., 1957, Fuchsite from a Silurian (?) quartz conglomerate, Acworth Township, New Hampshire. American Mineralogist, 42, 566-568.
- Dong, Z.M., Paik, I.S. and Kim, H.J., 2001, A preliminary report on a sauropod from the Hasandong Formation (Lower Cretaceous), Korea. Proceedings of the 8th annual meeting of the Chinese Society of Vertebrate Paleontology, China Ocean Press, 41-53.
- Ergunalp, F., 1944, The chromite deposits of Turkey. A.I.M.E. Tech. Publ., 1746, Min. Tech. Sept. 1-11.
- Eskola, P., 1933, On the chrome minerals of Outokumpu. Bulletin Commission of Geology of Finlande, 103, 26-44.
- Ferenc, Š., Uher, P., Spišiak, J. and Šimonová, V., 2016, Chromium- and nickel-rich micas and associated minerals in listvenite from the Muránska Zdychava, Slovakia: products of hydrothermal metasomatic transformation of ultrabasic rock. Journal of Geosciences, 61, 239-254, doi.org/10.3190/jgeosci.217.
- Frankel, J.J., 1940, The green colour of the Hospital Hill quartzite. South African Journal of Geology, 42, 15-17.
- Galloway, W.E. and Hobday, D.K., 1996, Terrigenous Clastic Depositional Systems (2nd ed). Springer-Verlag, 489 p.
- Gottsche, C., 1886, Geologische skizze von Korea. Sitzungsberichte der Koniglich Preussischen Akademie der Wissenschaften Zu Berlin. 36, 1-17 (in German).
- Heinrich, E.W., 1965, Further information on the geology of chromian muscovites. American Mineralogist, 50, 758-762.
- 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.
- Imai, N., Lee, H.K. and Machida, M., 1980, Vanadium-bearing green mica from the Jangsan quartzite in the Janggun mine area, Republic of Korea. Clay Science, 5, 221-236.
- 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).
- Kang, P.J. and Park, S.W., 1975, Explanation of the Samga sheet (1:50,000). Geological and Mineral Institute of Korea, 16 p.
- Kim, C.-S., Park, K.-H. and Paik, I.S., 2005, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age of the volcanic pebbles within the Silla Conglomerate and the deposition timing of the Hayang Group. Journal of the Petrological Society of Korea, 14, 38-44 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.Y., Kim, K.S. and Pickerill, R.K., 2002, Cretaceous

- nonmarine trace fossils from the Hasandong and Jinju formations of the Namhae area, Gyeongsangnamdo, southeast Korea. *Ichnos*, 9, 41-60.
- Kim, J.Y. and Paik, I.S., 1997, Nonmarine *Diplocraterion luniforme* (Blankenhorn, 1916) from the Hasandong Formation (Cretaceous) of the Jinju area, Korea. *Ichnos: An International Journal of Plant & Animal*, 5, 131-138.
- Kim, K., Jeong, E.K., Paik, I.S., Kim, H.J. and Kim, K., 2014, Anatomical study of new fossil tree ferns and woods from the Gummubong, Chilgok-gun, Korea. 2014 Fall Joint Conference of the Geological Sciences (Abstracts), Jeongsun, October 29-November 1, 69 p (in Korean).
- Kim, O.J., Yoon, S. and Gil, Y.J., 1969, Explanatory text of the Geological map of Jinju sheet (1:50,000). Geological Survey of Korea, 11 p.
- Koh, I.S., 1986, Study on the source rocks of the Nagdong Group. *Journal of the Geological Society of Korea*, 22, 233-256 (in Korean with English abstract).
- Koto, B., 1903, An orographic sketch of Korea. Imperial University of Tokyo, Japan, 19, 1-61.
- Lee, C.H., Lee, H.K. and Shin, M.A., 1997, Barium-vanadium muscovite of coaly metapelite in the Hoenam area of the Ogcheon Supergroup, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 33, 55-64 (in Korean with English abstract).
- Lee, D.W., 1999, Strike-slip fault tectonics and basin formation during the Cretaceous in the Korean Peninsula. *Island Arc*, 8, 218-231.
- Lee, H.J. and Lee, Y.N., 2005, A new protosuchian (Archosauria: Crocodyliformes) skull from the Hasandong Formation (Lower Cretaceous) of Hadong County, South Korea. *Journal of Vertebrate Paleontology*, 25, 83A.
- Lee, H.J., Lee, Y.N., Fiorillo, A.R. 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, H.K. and Lee, C.H., 1997a, Geochemical origin behavior and enrichment of environmental toxic elements in coaly metapelite from the Deokpyeong Area, Korea. *Economic and Environmental Geology*, 30, 553-566.
- Lee, H.K. and Lee, C.H., 1997b, Mineralogy and Geochemistry of Green-colored Cr-bearing Sericite from Hydrothermal Alteration Zone of the Narim Gold Deposit, Korea. *Economic and Environmental Geology*, 30, 279-288 (in Korean with English abstract).
- Lee, S.S., Yang, S.Y. and Lee, Y.D., 1990, On the *Brotiopsis* spp. (Cretaceous Non-Marine Gastropod) from the Lower Formations of Gyeongsang Super Group, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 26, 143-153 (in Korean with English abstract).
- Lee, T.-H., Park, K.-H. and Yi, K., 2018, 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, 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., Yi, J. and Choi, T., 2015, Provenance analysis of Lower Cretaceous Sindong Group, Gyeongsang Basin, Korea using integrated petrography, quartz SEM-cathodoluminescence, and zircon Zr/Hf analysis. *Journal of Sedimentary Research*, 85, 529-543.
- Lee, Y.N., 2007, New theropod teeth from the Juji Island (Hasandong Formation), Daedo-ri, Hadong County, South Gyeongsang Province. *Journal of the Geological Society of Korea*, 43, 151-166 (in Korean with English abstract).
- Lee, Y.N., 2008, The first tyrannosauroid tooth from Korea. *Geosciences Journal*, 12, 19-24.
- Lee, Y.N. and Lee, H.J., 2007, The first ornithopod tooth in Korea. *Journal of the Paleontological Society of Korea*, 23, 213-225 (in Korean with English abstract).
- Lee, Y.N., Lee, H.J., Lü, J. and Kobayashi, Y., 2008, New pterosaur tracks from the Hasandong Formation (Lower Cretaceous) of Hadong County, South Korea. *Cretaceous Research*, 29, 345-353.
- Leo, G.W., Rose Jr, H.J. and Warr, J.J., 1965, Chromian muscovite from the Serra de Jacobian, Bahia, Brazil. *American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials*, 50, 392-402.
- Li, H., Wang, Q., Groves, D.I., Deng, J., Dong, C., Wang, X. and Yang, L., 2019, Alteration of Eocene lamp-phyres in the Zhenyuan orogenic gold deposit, Yunnan Province, China: Composition and evolution of ore fluids. *Ore Geology Reviews*, 107, 1068-1083.
- 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).
- Ogura, Y., 1941, Additional notes on the structure of fossil tree ferns. *Bot. Mag. Tokyo*, 55, 453-461.
- Padgett, P., 1956, The Pre-Cambrian geology of West Finnmark. *Norsk. Geol., Tids.*, 36, pt. 2, p. 80.
- 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., 2000, Bone chip-filled burrows associated with bored dinosaur bone in floodplain paleosols of the

- Cretaceous Hasandong Formation, Korea. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 157, 213-225.
- Paik, I.S., Kim, H.J., Kim, K., Jeong, E.K. and Kang, H.C., 2012, Research report on conservation plan of the Mesozoic fossil sites among Natural Monuments of Korea. Cultural Heritage Administration, 320 p (in Korean).
- Paik, I.S., Kim, H.J., Kim, K., Jeong, E.-K., Oh, C., Kim, N.-Y. and Lim, H.S., 2018, 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, 161 p (in Korean).
- 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 the geological Heritage. *Munhwajae Korean Journal of Cultural Heritage Studies*, 44, 4-29 (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, Dessiccation cracks in vertic palaeosols of the Cretaceous Hasandong Formation, Korea: genesis and palaeoenvironmental implications. *Sedimentary Geology*, 119, 161-179.
- Park, J.Y., Lee, S., Kim, S., Son, M. and Lee, Y.-N., 2020, A pterosaur wing phalanx from the Lower Cretaceous Hasandong Formation of Hadong-gun, Gyeongsangnam-do, South Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 56, 77-84 (in Korean with English abstract).
- Pirouei, M., Kolo, K. and Kalaitzidis, S.P., 2020, Hydrothermal listvenitization and associated mineralizations in Zagros Ophiolites: Implications for mineral exploration in Iraqi Kurdistan. *Journal of Geochemical Exploration*, 208, <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.106404>.
- Sano, Y., Terada, K., Ly, C.V. and Park, E.J., 2006, Ion microprobe U-Pb dating of a dinosaur tooth. *Geochemical Journal*, 40, 171-179.
- Schreyer, W., W€erdling, C. and Abraham, K., 1981, Corundum-fuchsite rocks in greenstone belts of Southern Africa: petrology, geochemistry and possible origin. *Journal of Petrology*, 22, 191-231.
- Seo, S.J., 1985, Lower Cretaceous Geology and Paleontology (Charophyta) of Central Kyongsang Basin, Korea. Ph.D. Thesis, Kyungpook National University, Daegu, 1-177 p (in Korean with English abstract).
- Song, Y.S., Park, K.H. and Paik, I.S., 2004, Chromian spinels in the layered intrusive gabbroic rocks at Macheon: Probable source rock of the detrital chromian spinels in the Jinju Formation. *Proceedings of the Annual Joint Conference, Petrological Society of Korea and Mineralogical Society of Korea*, 39-41 (in Korean).
- Tateiwa, I., 1929, Geological Atlas of Chosen, Waegwan, Daegu, Yeongcheon, Gyeongju, and Joyang sheets. Geol. Survey of Chosen.
- 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 Bulletin*, 36, 124 p.
- Whitmore, D.R.E., Berry, L.G. and Hawley, J.E., 1946, Chrome micas. *American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials*, 31, 1-21.
- Yun, C.S. and Yang, S.Y., 1997, Dinosaur eggshells from the Hasandong Foramtion, Gyeongsang Supergroup, Korea. *Journal of the Paleontological Society of Korea*, 13, 21-36 (in Korean with English abstract).
- Yun, C.S. and Yang, S.Y., 2001, Occurrences of Cretaceous non-marine bivalve, *Nagdongis soni*, from the lower part of the Hasandong Formation near Weagwan, Korea. *Journal of the Paleontological Society of Korea*, 17, 87-97 (in Korean with English abstract).
- Yun, C.S., Yang, S.Y., Seo, S.J. and Lee, S.S., 2005, Cretaceous gastropod fossil, *Brotiopsis wakinoensis* from the Hanchi area, Hadong, Gyeongsangnam-do. *Journal of the Paleontological Society of Korea*, 21, 167-176 (in Korean with English abstract).

Received : April 2, 2020

Revised : May 6, 2020

Accepted : May 7, 2020