

백악기 경상분지 신동층군의 미량원소 조성과 이의 기원암에 대한 의의

임현수¹ · 최태진^{2,*} · 이호종³ · 이용일^{3,4}

¹부산대학교 지질환경과학과

²조선대학교 에너지자원공학과

³서울대학교 지구환경과학부

⁴한국해양과학기술원 부설 극지연구소

요 약

신동층군은 백악기 경상분지의 최하부 퇴적층이며, 하부로부터 낙동층, 하산동층, 진주층으로 세분된다. 기존 연구에서 진주층 사암에 초고철질 기원암에서 유래된 크롬-침정석(Cr-spinel)이 산출된다고 보고되었다 (Hisada *et al.*, 2008). 초고철질암과 고철질암은 높은 Ni와 Cr의 함량을 가진다. 이 연구에서는 초고철질 기원암의 존재여부를 확인하기 위해 신동층군 퇴적물의 Cr과 Ni 지화학 조성 변화를 검토하였다. 연구된 시료들의 Cr과 Ni 함량은 상부 대륙 지각과 활성 연변부 퇴적물의 조성에 비하여 부화되어 있지만, 초고철질암으로부터 유래된 퇴적물 조성 보다는 낮게 나타난다. 이 연구 결과는 신동층군의 기원지인 영남육괴에는 신동층군 퇴적 동안 심부에 있는 산지의 뿌리 부분까지 삭박되기 전에는 맨틀 썩기의 감람암이 일부 분포했음을 지시한다. 하지만 감람암의 암체 규모가 크지 않았기에 영남육괴에서 유래된 신동층군 퇴적물의 미량 원소 조성은 기반암으로 유래된 성분들에 의해 영향을 많이 받았다.

주요어: 백악기, 신동층군, 미량원소, 감람암, 크롬-침정석

Hyoun Soo Lim, Taejin Choi, Hyojong Lee and Yong Il Lee, 2019, Trace-element composition of the Cretaceous Sindong Group, Gyeongsang Basin, Korea and its implication for provenance. Journal of the Geological Society of Korea. v. 55, no. 5, p. 531-549

ABSTRACT: The Sindong Group is the lowest stratigraphic sequence in the Cretaceous Gyeongsang Basin and comprises three stratigraphic units: the Nakdong, Hasandong, and Jinju formations in ascending order. A previous study reported the presence of Cr-spinel grains in Jinju sandstones, having been derived from ultramafic source rocks (Hisada *et al.*, 2008). Ni and Cr show higher concentrations in mafic and ultramafic rocks. In this study the variation in Cr and Ni geochemistry of Sindong Group sediments was examined to address the possible existence of a source with an ultramafic component. Cr and Ni concentrations of the studied samples are slightly enriched compared with those of upper continental crust and active margin sediments, but are much lower than those derived from ultramafic rocks. The results of this study indicate that the Yeongnam Massif, the source area of the Sindong Group, may have been partially comprised of mantle-wedge peridotite before its denudation to deep-seated mountain roots, but the mass of peridotite seemed insignificant, resulting in the sediment trace-element geochemistry largely influenced by basement-rock components.

Key words: Cretaceous, Sindong Group, trace elements, peridotite, Cr-spinel

(Hyoun Soo Lim, Department of Geological Sciences, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea; Taejin Choi, Department of Energy Resources Engineering, Chosun University, Gwangju 61452, Republic of Korea; Hyojong Lee, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 08826, Republic of Korea; Hyojong Lee and Yong Il Lee, Division of Polar Paleoenvironment, Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Republic of Korea)

* Corresponding author: +82-62-230-7867, E-mail: tchoi@chosun.ac.kr

1. 서론

한반도 남동부에는 백악기의 육성 퇴적분지인 경상분지가 분포한다(그림 1). 경상분지 발달 초기에 영남육괴와 접한 분지의 서쪽 가장자리를 따라 신동층군이 퇴적되었다. 신동층군의 층서는 하부로부터 낙동층과 하산동층, 진주층으로 구분된다. Hisada *et al.* (2008)은 신동층군 최상부 지층인 진주층 사암에서 크롬-침정석(Cr-spinel) 입자가 산출되는 것을 처음 보고하였으며, 이를 바탕으로 진주층의 퇴적물 기원지에 감람암(peridotite)이 존재했다고 주장하였다. 현재 영남육괴에는 감람암이 분포하지 않기 때문에 이 주장은 곧 일본의 부가퇴적체에서 진주층에 퇴적물을 공급하였을 가능성을 제시하는 것으로, 신동층군 퇴적물이 영남육괴로부터 유래했다는 기존의 학설(Chang and Kim, 1968; Koh, 1986)과는 다른 관점이다. 따라서 진주층이 퇴적될 당시 영남육괴로부터 크롬-침정석이 공급될 수 있었는지 여부를 확인할 필요가 있으며, 이는 신동층군 퇴적 당시 한반도의 지구조에도

중요한 정보를 제공할 수 있다.

쇄설성 크롬-침정석 입자는 퇴적물에 산출되는 양상과 이 광물이 지시하는 지체 구조적 특성이 독특하다(Lee, 1999a). 쇄설성 크롬-침정석 입자는 고철질 암석과 초고철질 암석, 특히 Alpine-type 감람암의 기원지 지시자로 알려지고 있다(Press, 1986; Arai and Okada, 1991; Cookenboo *et al.*, 1997 amongst others). 또한 쇄설성 크롬-침정석 입자는 이를 공급한 기원암에서 멀지 않은 곳에서 주로 산출되기 때문에 퇴적물 내에서 크롬-침정석 입자가 발견되면 이 퇴적물은 크롬-침정석을 함유한 기원암과 가까운 곳에 쌓였다는 것을 의미한다.

감람암은 감람석[(Mg,Fe)₂SiO₄]이 가장 주된 구성 광물이며, 다음으로 휘석이 그 뒤를 잇는다. 감람석과 휘석은 Goldich (1938)의 풍화 단계에서 높은 단계에 해당된다. 따라서 화학적 풍화에 의해 선택적으로 빠르게 풍화되기 때문에 풍화 산물인 대부분의 토양과, 퇴적물 또는 퇴적암에는 중광물로 남기 어렵다. 더구나 감람암은 지표에 노출되기 전에 보통 사문석화

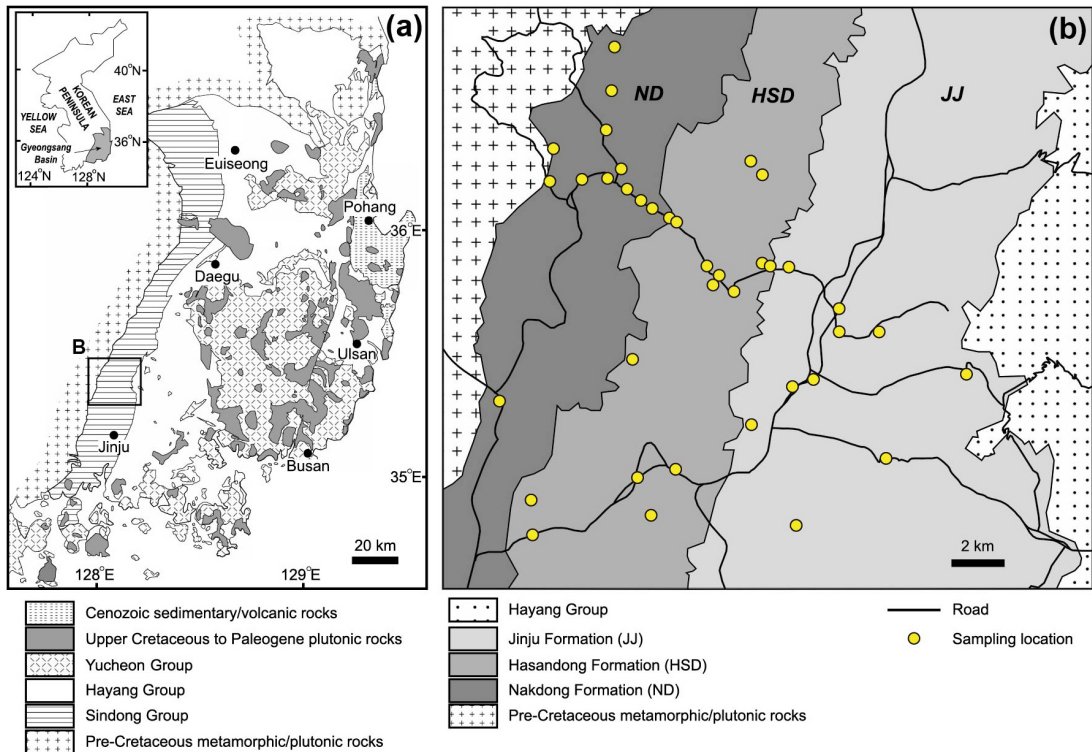


Fig. 1. a) Simplified geologic map of the Gyeongsang Basin (after Lee and Lee, 2000). b) Geologic map of the study area. Samples analyzed in this study are marked in yellow.

되기 때문에 신선한 상태의 감람석과 휘석은 잘 관찰되지 않는다. 감람석은 풍화를 받으면 특정한 화학 조성을 가지지 않는 이딩사이트(iddingsite)라고 하는 감람석의 잔류물과 점토광물, 철산화물, 철수산화물(ferrihydrite)의 혼합체로 변질된 후 점토광물로 바뀐다. 휘석 역시 화학적 풍화를 받아 철수산화물과 점토광물로 변질된다. 이에 따라 감람암이 화학적 풍화를 많이 받으면 모암인 감람암의 존재는 풍화에 비교적 강한 크롬-침정석이 소량(<2%; e.g., Lippard *et al.*, 1986)으로 산출될 경우 알아볼 수 있다(Arai and Okada, 1991). 이 중광물은 다양한 입도를 가지지만 밀도가 높기 때문에 수력학적 동등성으로 중-조립의 사질 퇴적물에서 관찰할 수 있다. 크롬-침정석은 현무암에도 부수 광물로 들어있지만 현무암에 들어있는 크롬-침정석의 크기는 감람암에 들어있는 것에 비해 작다(Arai, 1992).

초고철질암에 Cr과 Ni의 총함량은 약 4,000 ppm (Cr \approx 2,400 ppm, Ni \approx 1,500 ppm, Cr/Ni \approx 1.6; Goles, 1967; Niu, 2004)에 이를 정도로 월등하게 높기 때문에 지표에 분포하는 다른 암석들과 뚜렷이 구분된다. 상부 대륙지각의 조성은 평균 47 ppm의 Ni와 92 ppm의 Cr을 함유하고 있다(Rudnick and Gao, 2003). 감람암의 일부 단사휘석(clinopyroxenes)에도 Cr의 함량이 존재한다(0.58-1.58 wt.%; Furnes *et al.*, 1986). 그러나 Cr을 함유하는 주된 광물은 크롬-침정석이다. 크롬-침정석은 10~45 wt.%의 Cr을 함유하는 것으로 알려져 있다. 초고철질 암석의 감람석은 Ni을 평균 $\sim 2880 \pm 410$ ppm 함유하며 Ni을 함유하는 가장 주된 광물이다(Warren, 2016). 감람석이 분해되며 방출되는 Ni은 수화 규산염 광물과 Fe와 Mn 함유 풍화 산물상에 효율적으로 흡착된다(Beinlich *et al.*, 2018). Cr과 Ni은 수성 유체에 낮은 용해도를 가지는 원소(Taylor and McLennan, 1995)로 퇴적물에 들어있는 Cr과 Ni 함량은 퇴적물 기원지 암석의 풍화와 침식이 일어나는 동안 원소의 이동에 관련된 정보를 제공한다. 초고철질 암석은 풍화를 받아 Ni과 SiO₂가 풍부한 잔류물이 생성되며(Beinlich *et al.*, 2018), 초고철질 암석을 구성하고 있는 감람석과 휘석, 그리고 사문석들은 전술한 바와 같이 Goldich (1938)의 풍화계열에 의하면 지표 조건에서 풍화에 아주 약해 화학적 또는 물리적으로 불안정하기 때문에 초고철질 암석으로부터 유래되는 대부분의 Cr과 Ni은 일

부 초고철질암이 분포하는 지대에서 공급된 점토 크기의 세립질 퇴적물에서 관찰할 수 있을 것이다(Garver *et al.*, 1996). 기존의 여러 연구에서 현생이연의 세일에 함유되어 있는 Cr과 Ni 함량이 기원지에 초고철질암이 존재한다는 지시자로 활용되었다(예: Papavassiliou and Cosgrove, 1982; Yucesoy and Ergin, 1992; Thiébault and Clément, 1992; Garver and Scott, 1995; Asiedu *et al.*, 2000; Bracciali *et al.*, 2007). Hiscott (1984)는 북미 동부의 Taconic 조산대를 따라 퇴적된 플리시(flysch) 퇴적물에서 캐나다 지역의 퇴적물은 높은 Cr 함량(up to 3,950 ppm)을 나타낸 반면 남쪽인 미국 지역의 퇴적물에는 Cr 함량이 10-50 ppm으로 낮게 나타난다는 것을 관찰하였다. 이를 바탕으로 캐나다 플리시 퇴적물은 기원지에 오피올라이트 성분을 가지는 반면 더 남쪽 퇴적물은 기원지에 오피올라이트 성분이 존재하지 않는다고 해석하였다. 이러한 연구를 배경으로 Garver *et al.* (1996)은 Taconic 전지분지에 쌓인 세일을 조사하여 과연 세립질 퇴적물이 초고철질 암석의 기원지를 나타낼 수 있는지 여부를 검토하였으며, 세일에서 Cr과 Ni은 기원지에 초고철질 암석이 있다는 것을 민감하게 나타내는 지시자이지만 이들의 함량은 기원지에 분포하는 초고철질 암체의 부피에 따라, 또는 Cr과 Ni의 함량이 높지 않은 암석들에 의한 희석의 영향에 따라 달라진다고 하였다. Garver *et al.* (1996)은 세일에 높은 Cr과 Ni의 함량(Cr >150 ppm과 Ni >100 ppm), Cr/Ni 비가 1.3-1.5 사이, 그리고 Cr과 Ni이 높은 상관 관계($r \geq 0.90$)를 나타내면 퇴적물의 기원지에 초고철질 암석이 있다는 것을 지시한다고 주장하였다.

이상에서 살펴본 바와 같이 기원지에 감람암이 존재하였다면 이로부터 유래되는 퇴적물에서 그 흔적을 찾아볼 수 있다. 지화학적으로 조립질의 퇴적물에는 감람석과 휘석은 거의 산출하지 않는 반면 간혹 사문석의 입자가 산출하거나(Arai and Okada, 1991), 비교적 풍화에 강한 크롬-침정석 입자가 함유되어 있으며 높은 Cr의 함량을 나타내는 것으로 감람암 기원암을 유추할 수 있다. 감람석과 휘석의 화학적 풍화로 생성되는 점토 광물에 Cr과 Ni이 흡착되어 있으므로 세립질 퇴적물에서는 이들의 함량을 이용하여 기원지 암석에 감람암이 분포하였다는 것을 알아볼 수 있다.

이 연구에서는 Hisada *et al.* (2008)이 진주층 사

암에 감람암으로부터 유래된 부수 광물이 산출된다는 선행 연구 결과를 바탕으로 낙동층과 하산동층 사암에서도 쇄설성 크롬-철정석 입자의 산출 여부를 확인하고, 신동층군 퇴적물의 미량 원소 조성을 이용하여 신동층군의 기원지로 여겨지는 영남육괴(Chang and Kim, 1968; Koh, 1986)에 감람암의 분포 여부를 검토하고자 하였다. 기원지에 감람암이 광범위하게 분포한다면 이로부터 유래된 신동층군의 퇴적물은 Garver *et al.* (1996)이 제시한 기준처럼 높은 Cr과 Ni의 함량을 나타낼 것이다. 하지만 만약 기원지에 감람암의 암체가 소규모로 분포하였을 경우에는 감람암 이외의 기원암 영향으로 기원암의 분포 비율에 따라 감람암으로부터 유래되는 퇴적물은 희석이 되어 높은 Cr과 Ni의 특성을 나타내지 않을 수 있다. 이러한 점을 고려하여 진주층에 쇄설성 크롬-철정석이 함유된 점을 바탕으로 진주층의 기원지에 감람암이 분포했다고 전제한다면, 퇴적물에 들어있는 Cr과 Ni 함량은 기원지에 분포하는 감람암의 규모에 대한 정보를 제공할 수 있을 것이다.

2. 연구지역의 지질

2.1 영남육괴의 지질

영남육괴는 북동부의 소백산 편마암복합체와 남서부의 지리산 편마암복합체로 이루어졌다(Lee *et al.*, 1981). 지리산 편마암복합체는 선캄브리아기의 준편마암류와 정편마암류인 화강 편마암, 반상변정 편마암, 안구상 편마암, 미그마타이트 편마암과 호상 편마암으로 주로 이루어졌으며 약간의 편암과 각섬암이 산출된다. 이들 선캄브리아기 암석들은 백립암상까지 변성작용을 받았다(Lee *et al.*, 1986). 지리산 편마암복합체는 동쪽 가장자리에 선캄브리아기 동안 남북 방향으로 분포하는 산청-하동 화강암질암에 의해 관입되고 다시 중생대에 반려암, 섬록암, 섬장암, 화강암 등의 심성암 복합체에 의해 관입된 것으로 알려져 있다(Kim *et al.*, 1964, 1991; Jeong *et al.*, 1991; Kang *et al.*, 1994; Park *et al.*, 2006).

소백산 편마암복합체는 호상 흑운모 편마암, 운모 편암, 규암과 calc-silicate 암석과 같은 선캄브리아기의 변성 퇴적암으로 구성되어 있다. 트라이아스기 화강암은 I-type 심성암체로 소백산 편마암복합체에 소규모로 분포하며, metaluminous to weakly

peraluminous 조성을 가지며 중기 쥐라기 대보 조산운동으로 엽리화되었다. 쥐라기 화강암은 큰 저반을 이루며 대체로 중립에서 조립의 반정질 흑운모 화강암이다(Jwa, 2004). 쥐라기 화강암은 대부분이 규장질의 I-type, peraluminous 조성으로 calc-alkaline 대륙호 환경에서 생성된 것이다(Cheong and Chang, 1996a, 1996b; Jwa, 2004). 쥐라기 화강암은 영남 육괴의 장축 방향을 따라 분포하며 이들의 배태 심도는 지하 12-28 km에 해당한다고 한다(Cho and Kwon, 1994; Hong, 2001).

쥐라기 화강암은 경상 분지가 생성되기 이전에 이미 지표에 융기하여 분포하였던 것으로 여겨진다. 신동층군의 쇄설성 저어콘 U-Pb 연대에는 전기-중기 쥐라기(ca. 193-167 Ma)의 피크연대가 산출하는 것(Lee *et al.*, 2017; Choi *et al.*, unpublished data)으로 보아 신동층군의 기원지에는 전기-중기 쥐라기 화강암이 노출되어 지표에 분포하였다.

2.2 경상분지 지질

경상분지는 백악기에 한반도 남동부 지역에 생성된 육성 퇴적분지이다. 경상분지는 동아시아 대륙 아래로 고태평양(Izanagi) 판의 섭입에 따라 일어난 활성 대륙 연변부에서의 지각 신장 조구조작용으로 생성되었다. 경상분지를 충진한 백악기 지층은 화산 활동과 심성 활동에 따라 4개의 층군으로 구분된다(Chang, 1975). 이들은 층서적으로 하부로부터 신동층군, 하양층군, 유천층군과 불국사 관입암류로 구성된다.

신동층군(Aptian-Albian; Lee *et al.*, 2010)은 경상분지의 서측 가장자리를 따라 폭이 좁고 길게 연장된 열개 분지인 낙동곡분(Chang, 1987)에 쌓였다. 신동층군은 서쪽으로 기반암과는 부정합 관계를 가지며, 동쪽으로는 신동층군 위에 하양층군이 정합적으로 쌓였다. 신동층군은 두께가 약 2,300 m이며(Chang, 1975), 주로 사암과 이질암으로 구성되었으며, 약간의 역암과 이회암이 나타나기도 한다. 신동층군을 구성하는 퇴적암은 암색을 포함한 암상의 특징으로 하부로부터 선상지-하성 퇴적물인 낙동층, 하성 퇴적물인 하산동층과 최상부의 호수 퇴적물인 진주층으로 세분된다(Chang, 1975; Choi, 1981). 낙동층은 약 550 m 두께를 가지는데, 북쪽으로 가면서 두께가 증가한다. 낙동층의 최하부는 중부 선상지에 쌓인 역암, 그 상위에 쌓인 하부 선상지에 쌓인 사암과 이에 협재

된 암흑색의 이암과 흑색의 셰일로 이루어졌다. 선상지 퇴적물은 상부로 가면서 하성 평원 퇴적물로 점이적으로 변하는데, 하성 평원 퇴적물은 주로 하천 사암과 하천 사이의 암흑색 이암과 실트스톤의 반복적 발달로 이루어졌다. 하산동층은 대략 1,100 m의 두께를 나타내며 암상으로 볼 때 하천 사암과 범람원의 세립질 퇴적물이 반복적으로 쌓였다는 점에서 낙동층의 상부 암상과 유사하다. 그러나 세립질 퇴적물은 토양 기원의 탄산염 단괴와 탄산염 층준이 많이 산출하는 적색층의 특성을 나타낸다(Lee, 1999b). 최상위의 호수 퇴적물인 진주층은 두께가 약 1,200 m에 이르며, 주로 암회색에서 흑색의 이암, 수심이 깊은 호수 중앙의 흑색 셰일 및 호수로 유입되는 하천에 쌓인 사암으로 이루어졌다. 신동층군은 분지 발달의 과정에서 화산 활동이 일어나기 전의 퇴적물로 해석된다.

사암의 구성성분 관찰을 통하여 신동층군 퇴적물은 대부분 경상분지 서쪽과 북서쪽에 분포하는 선캄브리아기 편마암과 중생대 화강암으로부터 유래했다고 해석되었다(Koh, 1974; Lee *et al.*, 2010, 2015). 그렇지만 진주층 상부 퇴적물에는 상당한 양의 화산암 기원 물질이 들어있는데(Choi, 1986; Noh and Park, 1990; Lee and Lim, 2008; Lee *et al.*, 2015), 이러한 화산 기원 물질의 산출은 이 퇴적물이 퇴적 동시성 화산 활동으로부터 유래했다는 것을 지시한다. 신동층군과 하양층군의 고수류 연구는 퇴적물의 운반 방향이 동쪽과 동남쪽의 영향을 가진다고 하였는데(Chang and Kim, 1968; Koh, 1986), 낙동곡분의 최북단에 쌓인 신동층군 퇴적물은 북쪽과 북서쪽에서 유래한 것으로 보고되었다(Rhee *et al.*, 2002).

신동층군 사암의 암석학적인 자료를 종합해 보면 사암은 대체로 석영과 장석이 풍부하며 평균적인 석영(Q)과 장석(F), 암편(R)의 모드 조성은 $Q_{59}F_{31}R_{10}$ (Lee *et al.*, 2015)인 것으로 보고되었다. 분지 전체에 걸쳐 석영의 함량은 지층의 상부로 가면서 감소하는 반면, 장석의 함량은 지층의 상부로 가면서 증가하는 경향을 띠며 암편의 함량은 상부로 가면서 약간 증가하는 경향을 보인다. 특징적으로 낙동층과 하산동층 사암에 들어있는 암편은 변성암과 퇴적암의 암편으로 이루어진 반면 퇴적 동시성 화산호 화산활동으로 유래된 화산암편은 진주층 상부의 사암, 특히 낙동곡분의 중부와 남부에 분포하는 진주층 상부 사

암에서 흔히 산출된다. 낙동곡분에 쌓인 전기 백악기 쇄설성 저어콘의 공간적 분포를 바탕으로 Lee *et al.* (2010)은 낙동층이 퇴적되는 동안 화산활동은 영남육괴의 북부와 중부에서 일어났으며, 하산동층과 진주층이 쌓이는 동안에는 영남육괴의 중부와 남부에서 화산 활동이 일어났었다고 주장하였다.

경상분지는 약 260°C 정도의 최대 매몰 온도(Lim *et al.*, 2003)를 겪었으며 두 번에 걸친 냉각 사건(Choi and Lee, 2011)을 겪었다. 처음 일어난 냉각 사건은 매우 빠르게 일어났었는데 이 냉각 사건은 이자나기-태평양판의 해령 섭입에 따른 것으로 해석되었다(Choi and Lee, 2011).

3. 연구 방법

신동층군 사암과 이질암의 미량 원소 분석 자료는 이미 보고된 자료(사암 시료 26개, 이질암 시료 29개)와 이 연구에서 새로 분석한 자료(사암 시료 29개, 이질암 시료 32개)를 이용하였다. 기존자료는 북부 낙동곡분의 신동층군 사암과 이질암 시료를 분석한 Roser *et al.* (1999)과 낙동곡분 전반의 이질암 시료를 분석한 Lee and Lee (2003) 자료를 이용하였으며, Roser *et al.* (1999)의 연구에 사용된 사암은 극세립질~극조립질의 범위를 보이나 대부분 중립질과 세립질 사암이 분석되었다. 이 연구에서 분석한 사암과 이질암 시료들은 남부 낙동곡분에서 채취하였으며(표 1; 그림 1), 미량원소 함량은 한국기초과학지원연구원 서울센터의 유도결합 플라즈마 원자 방출 분광기(Cr, Sc, V; Jobin Yvon Ultima 2)와 유도결합 플라즈마 질량분석기(Ni, Y, Th; Elan DRC II)를 사용하여 분석하였다. 일부 문헌 자료는 Cr과 Ni의 분석 자료를 제시하지 않는다(표 2).

4. 연구 결과

조사된 신동층군의 사암 시료의 Cr과 Ni 함량은 시공간적으로 변화를 보이는 반면, 이질암의 경우는 낙동층의 남부 시료들을 제외하면 변화가 크지 않다(표 3). 사암 시료의 미량원소 조성은 평균 Sc = 5.5 ppm, V = 40.7 ppm, Cr = 63.8 ppm, Ni = 28.6 ppm, Y = 14.6 ppm, Th = 9.4 ppm이며, 이질암 시료는 평균 Sc = 13.4 ppm, V = 103 ppm, Cr = 91.3 ppm,

Table 1. Locations of the Sindong Group sandstone and mudrock samples used in this study.

Formation	Lithology	Sample Code	Latitude	Longitude
Nakdong Fm.	mudrock	GS0620-3-1	35°22'50.9"N	128°00'35.3"E
	mudrock	GS0619-9-2	35°26'59.3"N	128°01'39.0"E
	mudrock	GS0619-9-1		
	mudrock	GS0619-10-2	35°26'26.2"N	128°01'38.8"E
	very fine sandstone	GS0617-9-5	35°26'29.4"N	128°02'15.6"E
	mudrock	GS0617-9-2		
	fine sandstone	GS0617-9-1		
	very fine sandstone	GS0617-7-1	35°26'29.3"N	128°02'50.7"E
	medium sandstone	GS0617-6-1	35°26'41.8"N	128°03'06.2"E
	sandstone	GS0617-5-1	35°27'16.2"N	128°02'51.3"E
	mudrock	GS0617-4-2	35°27'39.2"N	128°02'52.0"E
	mudrock	GS0617-4-1		
	fine sandstone	GS0617-3-4	35°28'44.3"N	128°02'59.8"E
	mudrock	GS0617-3-3		
	mudrock	GS0617-3-1		
	fine sandstone	GS0617-15-1	35°25'49.3"N	128°04'25.2"E
	medium sandstone	GS0617-14-1	35°25'52.2"N	128°04'13.6"E
	mudrock	GS0617-13-1	35°25'52.5"N	128°03'59.6"E
	fine sandstone	GS0617-12-1	35°25'57.4"N	128°03'48.0"E
	medium sandstone	GS0617-10-2	35°26'15.8"N	128°03'19.0"E
mudrock	GS0617-10-1			
Hasandong Fm.	fine sandstone	GS0617-2-3	35°23'29.1"N	128°03'16.1"E
	mudrock	GS0617-2-4		
	mudrock	GS0617-2-6		
	medium sandstone	GS0618-1-1	35°25'01.0"N	128°04'53.2"E
	mudrock	GS0618-2-1	35°24'50.8"N	128°05'05.2"E
	mudrock	GS0618-3-2	35°24'32.8"N	128°05'24.0"E
	fine sandstone	GS0618-3.5-1	35°24'43.7"N	128°05'04.2"E
	mudrock	GS0618-3.5-2		
	mudrock	GS0618-4-1	35°25'01.2"N	128°06'03.2"E
	medium sandstone	GS0618-5-1	35°25'00.1"N	128°06'10.5"E
	fine sandstone	GS0619-7-1	35°26'31.0"N	128°06'00.5"E
	very fine sandstone	GS0619-7-2		
	mudrock	GS0619-8-1	35°26'43.7"N	128°05'54.0"E
	medium sandstone	GS0620-1-2	35°21'33.5"N	128°04'09.8"E
	mudrock	GS0620-1-3		
	medium sandstone	GS0620-2-1	35°21'26.9"N	128°03'27.7"E
	fine sandstone	GS0620-2-2		
	mudrock	GS0620-2-4		
	mudrock	GS0620-2-5		
	fine sandstone	GS0620-6-1		
medium sandstone	GS0620-7-3	35°20'28.3"N	128°01'12.2"E	
very fine sandstone	GS0620-7-5			
mudrock	GS0620-9-1	35°20'44.6"N	128°03'41.5"E	

Table 1. continued.

Formation	Lithology	Sample Code	Latitude	Longitude
Jinju Fm.	mudrock	20120915-8-1	35°23'04.4"N	128°07'01.1"E
	fine sandstone	20120915-8-2		
	medium sandstone	GS0618-11-1	35°23'52.6"N	128°08'25.6"E
	mudrock	GS0618-11-2		
	medium sandstone	GS0618-13-1	35°23'05.2"N	128°10'15.8"E
	mudrock	GS0618-13-2		
	mudrock	GS0618-6-2	35°24'54.1"N	128°06'40.1"E
	mudrock	GS0618-8-1	35°24'15.8"N	128°07'32.2"E
	fine sandstone	GS0618-9-1	35°23'55.3"N	128°07'34.4"E
	mudrock	GS0618-9-2		
	fine sandstone	GS0619-4-1	35°22'57.2"N	128°06'43.9"E
	mudrock	GS0619-4-2		
	mudrock	GS0619-6-1	35°22'18.2"N	128°05'46.7"E
	medium sandstone	GS0620-10-3	35°21'42.8"N	128°08'33.5"E
	mudrock	GS0620-10-4		
	very fine sandstone	GS0620-12-2	35°20'36.5"N	128°06'36.5"E
	mudrock	GS0620-12-3		

Table 2. Concentrations of selected trace elements of Sindong Group sandstone and mudstone samples used in this study.

		Sc	V	Cr	Ni	Y	Th	Cr/Ni
Sandstone								
<i>Jinju Fm.</i>								
CH1*	N		44.0	23.0	9.0	17.0	13.1	2.6
CH2*	N		71.0	44.0	16.0	30.0	26.2	2.8
CH3*	N		58.0	84.0	50.0	18.0	10.1	1.7
CH4*	N		28.0	28.0	14.0	12.0	5.9	2.0
CH5*	N		36.0	43.0	16.0	16.0	7.9	2.7
CH6*	N		27.0	14.0	8.0	12.0	6.8	1.8
CH7*	N		49.0	39.0	21.0	30.0	11.9	1.9
GS0619-4-1	S	5.9	43.2	69.9	29.7	13.8	9.2	2.4
20120915-8-2	S	6.3	45.2	72.1	47.2	18.4	9.1	1.5
GS0618-9-1	S	5.5	35.2	116.5	26.8	13.2	8.7	4.3
GS0620-12-2	S	8.7	55.3	60.7	20.9	14.7	11.5	2.9
GS0618-11-1	S	6.6	50.7	31.4	12.5	12.2	9.4	2.5
GS0620-10-3	S	4.9	37.9	29.0	11.5	10.0	8.0	2.5
GS0618-13-1	S	10.1	92.9	34.8	10.2	14.2	8.7	3.4
<i>Hasandong Fm.</i>								
HA1*	N		35.0	51.0	19.0	13.0	10.4	2.7
HA2*	N		43.0	103.0	47.0	16.0	9.2	2.2

Table 2. continued.

		Sc	V	Cr	Ni	Y	Th	Cr/Ni
HA3*	N		37.0	128.0	39.0	15.0	8.4	3.3
HA4*	N		35.0	93.0	30.0	16.0	7.4	3.1
HA6*	N		23.0	19.0	10.0	14.0	7.1	1.9
HA7*	N		33.0	12.0	8.0	11.0	7.3	1.5
HA8*	N		27.0	18.0	9.0	13.0	7.5	2.0
HA8A*	N		58.0	37.0	17.0	24.0	18.4	2.2
HA9*	N		106.0	71.0	38.0	29.0	16.9	1.9
HA10*	N		78.0	38.0	20.0	15.0	7.9	1.9
HA11*	N		72.0	35.0	19.0	17.0	8.1	1.8
HA5*	N		35.0	19.0	11.0	14.0	7.1	1.7
GS0617-2-3	S	4.6	27.2	103.4	31.3	13.7	6.9	3.3
GS0620-2-1	S	5.2	29.6	83.3	51.0	8.5	5.9	1.6
GS0620-2-2	S	4.1	31.8	39.6	50.1	10.3	5.0	0.8
GS0618-1-1	S	5.5	40.1	58.4	39.5	11.7	9.0	1.5
GS0618-3.5-1	S	5.8	39.4	55.9	24.2	11.0	6.8	2.3
GS0619-7-1	S	4.6	26.6	45.5	23.2	9.6	6.8	2.0
GS0619-7-2	S	7.7	55.1	55.3	28.8	21.3	13.1	1.9
GS0620-1-2	S	3.8	26.3	27.0	13.8	7.8	6.9	2.0
GS0618-5-1	S	5.8	35.9	43.2	16.5	9.6	9.5	2.6
GS0620-6-1	S	4.3	33.7	49.2	33.7	11.3	6.2	1.5
GS0620-7-3	S	1.5	11.5	46.0	22.3	9.5	2.8	2.1
GS0620-7-5	S	7.7	65.5	80.8	48.9	17.4	10.2	1.7
<i>Nakdong Fm.</i>								
NK2*	N		21.0	74.0	25.0	16.0	5.3	3.0
NK3*	N		29.0	25.0	19.0	14.0	8.2	1.3
NK4*	N		31.0	93.0	26.0	13.0	7.4	3.6
NK8*	N		34.0	96.0	43.0	14.0	50.0	2.2
NK5*	N		20.0	47.0	37.0	11.0	4.9	1.3
NK6*	N		49.0	78.0	34.0	22.0	9.4	2.3
NK7*	N		21.0	56.0	33.0	13.0	4.6	1.7
GS0617-12-1	S	4.2	31.1	60.8	29.1	9.3	5.7	2.1
GS0617-14-1	S	5.6	36.9	151.3	40.3	11.8	8.2	3.8
GS0617-15-1	S	6.0	38.0	139.4	28.2	14.2	9.8	5.0
GS0617-9-1	S	3.8	28.5	133.7	36.9	11.7	7.2	3.6
GS0617-9-5	S	11.2	90.3	96.9	55.8	26.5	14.3	1.7
GS0617-3-4	S	2.8	18.0	64.6	39.5	10.5	4.6	1.6
GS0617-5-1	S	3.0	18.6	57.3	30.3	11.9	5.0	1.9
GS0617-7-1	S	3.7	24.0	48.0	82.6	14.0	5.2	0.6
GS0617-6-1	S	6.1	48.5	212.3	51.8	7.6	12.2	4.1
GS0617-10-2	S	4.1	23.6	74.5	17.0	12.7	5.8	4.4

Table 2. continued.

		Sc	V	Cr	Ni	Y	Th	Cr/Ni
Mudrock								
<i>Jinju Fm.</i>								
Q-11**	N	10.9		56.0	29.0	22.5	16.6	1.9
Q-42**	N	12.8		76.5	55.8	21.4	13.5	1.4
1102-6a*	N		128.0	126.0	22.0	34.0	-	5.7
1102-6b*	N		137.0	112.0	38.0	38.0	-	2.9
1103-2a*	N		93.0	85.0	42.0	34.0	-	2.0
1103-2b*	N		101.0	90.0	42.0	38.0	-	2.1
R-09**	M	13.2		89.8	73.2	24.4	13.7	1.2
D-34**	S	12.4		59.1	63.9	21.3	12.1	0.9
GS0618-6-2	S	12.1	91.3	87.7	58.4	22.7	13.8	1.5
GS0619-6-1	S	19.6	171.4	82.9	23.2	30.6	20.7	3.6
GS0619-4-2	S	11.7	105.7	105.9	59.3	19.7	4.1	1.8
20120915-8-1	S	14.6	112.7	110.6	57.2	25.5	21.1	1.9
GS0618-8-1	S	13.3	102.7	117.2	59.5	26.1	17.3	2.0
GS0618-9-2	S	9.0	61.6	77.5	52.2	22.2	11.8	1.5
GS0620-12-3	S	13.3	104.1	106.3	59.1	32.5	19.2	1.8
GS0618-11-2	S	13.4	104.6	114.2	89.1	23.6	13.4	1.3
GS0620-10-4	S	16.5	121.7	96.2	54.0	26.2	19.9	1.8
GS0618-13-2	S	11.6	115.9	69.5	54.7	22.1	15.0	1.3
<i>Hasandong Fm.</i>								
Q-16**	N	10.4		70.3	27.0	18.1	13.9	2.6
Q-17**	N	9.5		43.9	21.8	16.9	12.9	2.0
1102-4A*	N		75.0	130.0	93.0	19.0	-	1.4
1102-7a*	N		92.0	74.0	32.0	28.0	-	2.3
1102-7b*	N		85.0	88.0	40.0	17.0	-	2.2
1102-7c*	N		83.0	71.0	30.0	21.0	-	2.4
1102-7d*	N		65.0	62.0	27.0	34.0	-	2.3
1102-5a*	N		115.0	151.0	59.0	50.0	-	2.6
D-42**	M	15.4		89.7	64.3	28.4	16.9	1.4
M-19**	M	13.4		73.5	55.7	27.7	13.6	1.3
N-32**	S	12.7		74.2	63.4	19.1	13.0	1.2
GS0617-2-4	S	16.5	126.3	134.8	73.3	27.8	23.1	1.8
GS0617-2-6	S	17.9	135.3	92.9	74.9	26.7	22.8	1.2
GS0620-2-4	S	13.2	93.3	56.0	64.6	26.3	16.7	0.9
GS0620-2-5	S	12.3	108.3	95.8	71.0	25.3	16.2	1.3
GS0618-2-1	S	15.4	117.1	73.9	60.3	26.0	20.5	1.2
GS0619-8-1	S	14.9	113.6	104.0	56.5	34.9	19.4	1.8
GS0618-3.5-2	S	11.9	91.7	83.0	46.8	28.5	15.7	1.8
GS0620-9-1	S	11.8	99.3	61.8	53.6	24.8	14.2	1.2

Table 2. continued.

		Sc	V	Cr	Ni	Y	Th	Cr/Ni
GS0620-1-3	S	11.5	90.6	54.7	49.7	23.6	16.3	1.1
GS0618-3-2	S	13.4	89.3	82.3	56.4	24.1	17.2	1.5
GS0618-4-1	S	13.4	100.2	97.0	54.1	23.8	19.4	1.8
<i>Nakdong Fm.</i>								
H-42**	N	16.4		70.0	35.7	25.0	18.4	2.0
Q-29**	N	22.4		149.6	56.3	35.7	23.9	2.7
1102-1a*	N		107.0	115.0	35.0	21.0		3.3
1102-1b*	N		129.0	109.0	43.0	27.0		2.5
1102-2a*	N		106.0	141.0	61.0	31.0		2.3
1102-2b*	N		70.0	128.0	73.0	32.0		1.8
1102-2c*	N		90.0	117.0	63.0	32.0		1.9
E-01**	M	9.7		64.3	18.9	21.1	16.0	3.4
D-50**	S	12.6		82.3	52.5	38.0	12.7	1.6
I-03**	S	16.0		78.8	48.3	27.2	16.5	1.6
GS0617-13-1	S	13.4	107.1	119.3	80.7	39.2	17.2	1.5
GS0619-9-1	S	11.2	84.8	78.3	12.1	23.8	19.7	6.4
GS0619-9-2	S	12.1	90.2	82.3	13.8	24.0	19.1	6.0
GS0619-10-2	S	11.6	80.3	73.6	10.4	41.0	33.2	7.1
GS0620-3-1	S	7.7	58.9	26.6	6.3	14.7	14.2	4.2
GS0617-9-2	S	14.6	119.0	119.0	88.0	30.0	18.3	1.4
GS0617-3-1	S	15.1	128.5	113.2	88.3	32.6	18.0	1.3
GS0617-3-3	S	11.7	101.0	85.9	32.9	23.2	15.8	2.6
GS0617-4-1	S	14.3	118.0	83.4	79.2	33.6	17.3	1.1
GS0617-4-2	S	14.8	127.4	105.0	94.1	27.3	18.0	1.1
GS0617-10-1	S	14.4	93.1	102.5	57.8	28.1	17.8	1.8

*Roser *et al.* (1999)

**Lee and Lee (2003)

N: northern part of the Nakdong Trough; M: middle part of the Nakdong Trough; S: southern part of the Nakdong Trough.

Ni = 51.8 ppm, Y = 27.3 ppm, Th = 17.0 ppm의 조성을 보인다.

진주층 사암에 크롬-침정석의 존재(Hisada *et al.*, 2008)를 바탕으로 낙동층과 하산동층 사암을 예비 조사한 결과 이들 낙동층과 하산동층의 사암에서도 드물게 크롬-침정석 입자들이 관찰되었다(그림 2). 이에 대하여는 추가연구를 수행하여 별도의 논문으로 발표하고자 한다. 이와 같이 신동층군 사암에 쇠설성 크롬-침정석 입자가 산출되므로 신동층군의 기원지에 감람암이 분포했다는 증거는 명확하다.

사암 시료에서 Sc와 V 함량은 낙동층에서 진주층으로 가면서 점차 증가하는 경향을 나타내지만 Cr과 Ni 함량은 점차 감소하는 경향을 나타낸다(그림 3a). Sc와 V 함량은 상부 대륙지각 조성(UCC: upper continental crust; Taylor and McLennan, 1995)이나 활성연변부 모래 조성(AMSand: active continental margin sand; McLennan, 2001) 보다는 상당히 낮은 함량을 보이지만, Cr과 Ni 함량은 UCC에 비해 낙동층에서는 비슷한 함량을 보이거나 하산동층과 진주층에서는 낮은 함량을 나타낸다. 하

Table 3. Comparison of average concentrations of Cr and Ni in Sindong Group sandstone and mudrock samples between the northern (N) and southern (S) parts of the Nakdong Trough.

Formation	Sandstone				Mudrock			
	Cr (ppm)		Ni (ppm)		Cr (ppm)		Ni (ppm)	
	N	S	N	S	N	S	N	S
Jinju	39.3	59.2	19.1	22.7	90.9	93.4	38.1	57.3
Hasandong	52.0	57.3	22.3	41.2	86.3	84.2	41.2	60.4
Nakdong	67.0	103.9	31.0	41.2	118.5	88.5	52.4	51.1

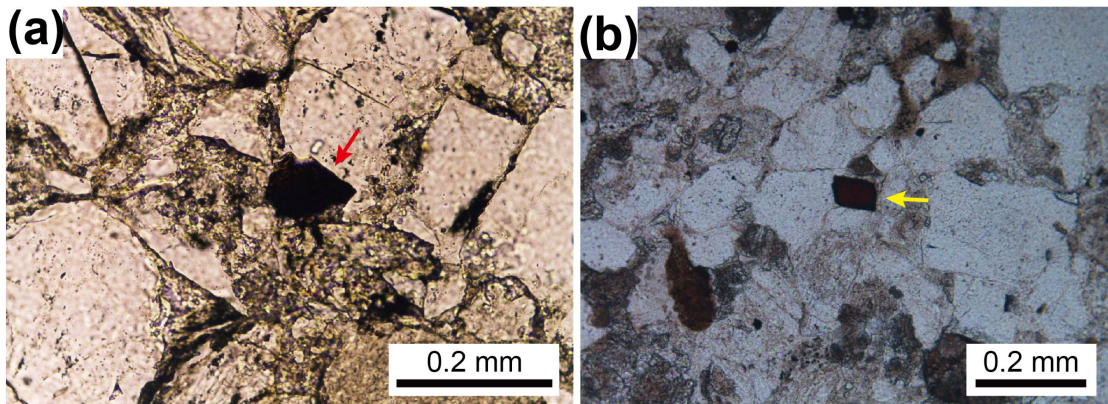


Fig. 2. Photomicrographs of Cr-spinel grain (red and yellow arrows) from representative (a) Nakdong and (b) Hasandong sandstones.

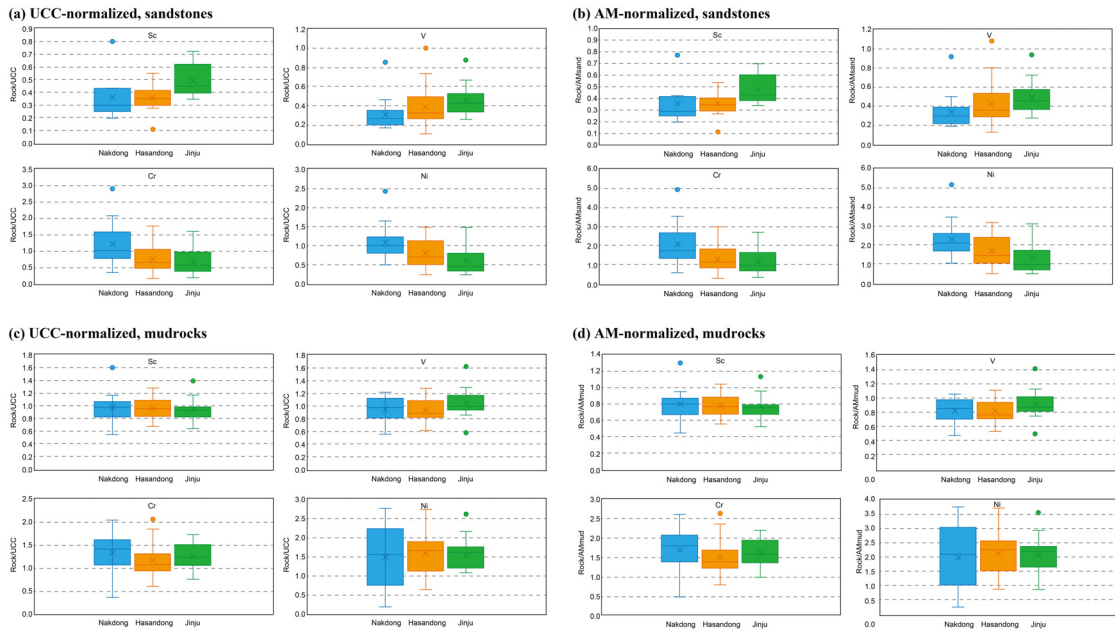


Fig. 3. UCC- and active margin sediment-normalized Sc, V, Cr, and Ni in Sindong Group sandstones (a, b) and mudrocks (c, d). UCC composition is after Rudnick and Gao (2003). Active margin sand (AMSand) and active margin mud (AMmud) compositions are from McLennan (2001).

지만 AMSand에 비하여는 Cr과 Ni 모두 비슷하거나 부화되어 있다. 사암 시료의 이러한 특성은 상부 대륙지각의 조성과 활성연변부에 분포하는 기원암들에 비하여 Cr과 Ni를 약간 더 많이 함유한 고철질/초고철질 암석이 기원지에 존재하였거나, Cr과 Ni 함량이 높은 고철질/초고철질 암석이 소규모로 존재하였다는 것을 시사한다.

이질암 시료의 Sc, V, Cr과 Ni 함량은 세 지층에서 평균적으로 큰 변화는 나타나지 않으나 낙동층에서 Ni 함량 변화가 가장 많이 관찰된다. Sc와 V 함량은 UCC와 활성연변부 머드 조성(AMmud; McLennan, 2001)과 비슷한 함량을 나타내나, Cr과 Ni 함량은 약간 더 부화되어 있다(그림 3c, 3d). 이질암과 사암 시료의 Cr과 Ni 함량 특성은 기원암에 이들 원소를 함유한 고철질/초고철질 암석이 UCC나 AMmud의 기원지 암석보다 좀더 많이 분포하였었다는 것을 시사한다.

5. 토의

5.1 미량원소 조성

5.1.1 Cr과 Ni

일반적으로 사암과 이질암에서 Cr과 Ni의 함량이 높은 것은 퇴적물의 기원지에 초고철질암이 존재했던 것을 지시하는 것으로 해석된다. 이질암에서 Cr의 높은 함량은 퇴적주기에서 분별작용이 일어났었다는 것을 가리키는데, 이는 점토광물과 같이 Cr을 함유하는 광물상이 선별적으로 농집되었음을 의미한다. 퇴적물의 Cr과 Ni 함량은 아마도 이들 원소들이 크롬-침정성 입자와 Ni를 함유한 휘석, 감람석과 사문석을 함유한 초고철질암의 풍화로 생성된 점토 물질과 쇄설성 입자에 들어있다는 것을 가리킨다.

Garver *et al.* (1996)은 초고철질암을 기원지로 가지는 세일을 알아보는 중요한 근거는 Cr이 약 >150 ppm, Ni이 약 >100 ppm이며, Cr/Ni 비가 1.3-1.5, 그리고 Cr과 Ni이 높은 상관관계 ($r \geq 0.90$)를 보이며, Cr과 Ni의 함량이 배경값(예, NASC: North American Shale Composite - Cr = 125 ppm, Ni = 58 ppm, Cr/Ni = 2.15; Gromet *et al.*, 1984)보다 높게 나타나는 것이라고 주장하였다. 퇴적물에 Cr과 Ni이 많이 나타나는 것은 초고철질암 기원지를 가졌다는 것을 분명하게 지시하지만 Cr/Ni 비는 오피

올라이트 층서 기록의 초고철질 암석들에서 10 또는 그 이상으로 나타나기도 한다(e.g., Jaques *et al.*, 1983). 연구된 사암 시료의 Cr과 Ni은 각각 평균 64 ppm과 28.6 ppm이며 Cr/Ni 비는 0.6-5.0(평균 2.3)의 범위를 가진다. 이질암 시료의 Cr과 Ni은 사암 시료에 비하여 더 부화되어 있으며 각각 평균 91 ppm과 52 ppm이며 Cr/Ni 비는 0.9-7.1(평균 2.2)의 범위를 가진다. 사암에 들어있는 대부분의 Cr은 아마도 사암에 드물게 산출되지만 다양한 양으로 들어있는 쇄설성 크롬-침정성 입자에 들어있는 것으로 여겨진다. 이러한 해석은 Cr과 Ni 사이의 상관관계가 중간 정도의 계수(0.56)를 나타내는 것으로 부분적으로 뒷받침된다. 특히 하산동층과 진주층의 상관계수는 >0.72로 이 두 지층은 낙동층의 0.17에 비하여 상당히 높다. 이질암의 Cr과 Ni의 배경값은 평균적인 UCC (Cr = 73 ppm, Ni = 34 ppm, Cr/Ni = 2.1; Rudnick and Gao, 2003)와 Post-Archean average Australian Shale (PAAS: Cr = 100 ppm, Ni = 60 ppm, Cr/Ni = 1.7; McLennan, 2001)과 같거나 또는 약간 부화되어 있다(그림 3b). 그렇지만 Garver *et al.* (1996)이 제시한 기준에 의하면 신동층군 거의 대부분의 사암 시료와 이질암 시료 조성은 이들 퇴적물이 초고철질 암석으로부터 유래된 퇴적물에는 부합하지 않는다. 단지 Cr 함량이 150 ppm 이상인 시료는 낙동층 사암 2개(151 ppm과 212 ppm)와 이질암 1개(150 ppm) 시료, 그리고 하산동층 이질암 1개(151 ppm)만이 이 기준을 충족하나, Ni 함량 기준을 충족하는 사암과 이질암 시료는 없다. 이로 보아 퇴적물 기원지에 초고철질암의 분포는 거의 없거나 있었다고 하더라도 아주 적게 분포했을 것으로 여겨진다.

대체로 기원지에 상당한 고철질 화산암의 분포가 있다면 Cr/Ni 비가 2.1이며 높은 Cr 함량을 가진다(cf., Garver *et al.*, 1996). 실제 모든 화산암은 Ni보다는 Cr을 훨씬 더 많이 함유(Gill, 1981)하기 때문에 Cr이 초고철질암으로부터 유래되었을 때 보다 고철질 화산암에서 기원을 한다면 Cr/Ni 비는 더 커지게 된다. 예를 들면 화산호로부터 유래된 퇴적물의 경우는 Cr과 Ni이 낮은 함량을 보이며 Cr/Ni 비는 2 이상이 될 것으로 예상된다(Garver and Scott, 1995). McLennan (2001)이 종합한 AMSand는 43 ppm Cr, 16 ppm Ni을 함유하여 Cr/Ni = 2.7이며, AMmud

는 57 ppm Cr, 25 ppm Ni을 함유하여 Cr/Ni = 2.3 을 나타낸다. 이를 고려할 때 사암 시료와 이질암 시료의 Cr/Ni 비는 기원지 암석에 분포하였을 고철질 화산암의 영향도 있었을 것으로 해석된다.

5.1.2 V-Ni-Th*10

퇴적물에 초고철질암으로부터 유래된 쇄설물이 들어있는 것을 알아보는 방법의 하나로 V-Ni-Th*10 삼각도표를 이용하여 확인해 볼 수 있다. 이 삼각도표에는 초고철질암, 고철질암과 규장질암의 영역이 뚜렷이 구분되어 도시된다(그림 4). 이 도표에 사용된 규장질암 단성분 조성(end-member composition)은 영남육괴에 분포하는 쥐라기 화강암의 조성(Kim *et al.*, 2005), 고철질암 단성분 조성은 영남육괴의 산청 지역에 분포하는 반려암 조성(Ko, 2006)을 이용했다. 초고철질암 조성은 Hisada *et al.* (2008)에서 진주층의 기원지에 supra-subduction zone 초고철질암의 존재 가능성을 제시하였기에 supra-subduction zone의 초고철질암 조성(Xia *et al.*, 2003)을 이용하였다. 사암 시료의 V-Ni-Th*10 삼각도표에서는 대부분의 시료는 고철질 조성과 규장질 조성의 사이에 도시된다(그림 4a). 하지만 낙동층과 하산동층 사암 시료의 일부는 초고철질 조성으로 치우쳐져 도시된다. 이에 반해 이질암 시료들은 모두 고철질 조성과 규장질 조성의 사이에 도시된다(그림 4b). 이 삼각도표에서 사암의 경우에는 초고철질암 쇄설물이 약간

포함된 것으로 나타나나 이질암의 시료에서는 초고철질암의 특성이 잘 드러나지 않는다.

5.1.3 Cr/Th versus Th/Sc

퇴적물에 들어있는 쇄설물들이 고철질 혹은 초고철질 특성과 규장질 특성을 얼마나 나타내는가를 알아보기 위하여 Cr/Th와 Th/Sc와 같은 원소 비를 검토하였다(그림 5). Cr/Th 비가 높으면 고철질-초고철질 성분이 많이 들어 있는 반면, Th/Sc 비가 높으면 규장질 성분이 많이 들어 있다는 것을 가리킨다(e.g., Hofmann *et al.*, 2003). 그림 5에는 고철질암과 규장질암 단성분의 혼합 곡선, 또 규장질암과 초고철질암 단성분의 혼합 곡선이 도시되어 있다. 고철질암과 규장질암, 초고철질암 단성분 조성은 Turekian and Wedepohl (1961)의 것을 따랐다. 이 단성분들의 조성을 이용한 이유는 문헌에 보고된 영남육괴에 분포하는 암석들의 화학 조성(Cho and Nam, 1990; Kim, 1992; Ahn *et al.*, 2001; Ko, 2006; Uchida *et al.*, 2012; Wee *et al.*, 2013; Kim *et al.*, 2014; Ok *et al.*, 2015; Kang *et al.*, 2017)이 너무나 많은 차이를 나타내기 때문이다. 이 도표에서 신동층군 이질암 시료는 규장질암과 고철질암 단성분 혼합 곡선 상에 놓이며, 대체로 규장질암 단성분으로부터 더 많은 물질이 유래되었다는 것을 가리킨다. 하지만 일부 이질암 시료들은 규장질암과 초고철질암 단성분 사이의 혼합 곡선 쪽으로 도시되어 초고철질암 성분의 영향을 약

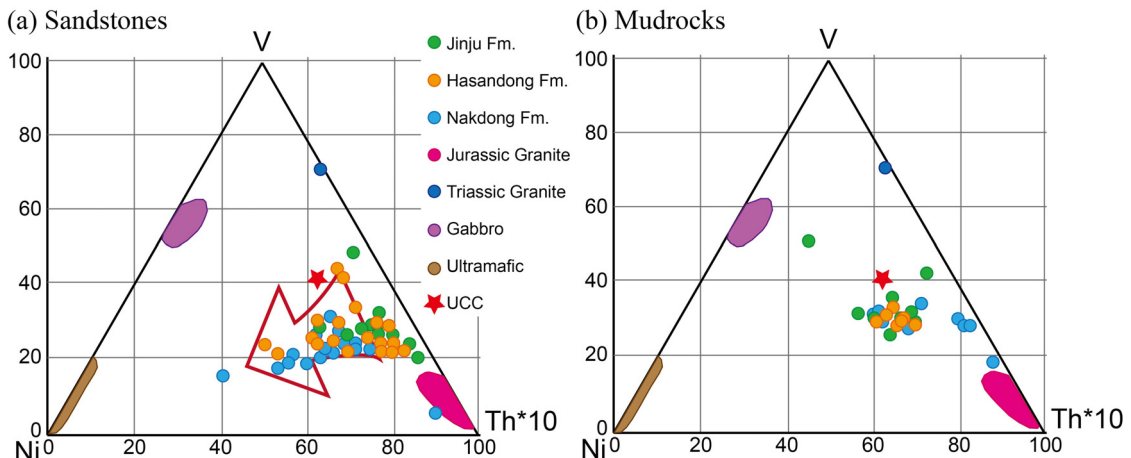


Fig. 4. V-Ni-Th*10 plot of (a) sandstones and (b) mudrocks. Concentrations of elements are in ppm. Shaded areas represent the composition of the felsic end member (Jurassic granite; Kim *et al.*, 2005) and mafic end member (gabbro; Ko, 2006). Ultramafic end member is from Xia *et al.* (2003). UCC (upper continental crust) is plotted for comparison.

간 받았다는 것을 가리킨다.

5.1.4 Cr/V versus Y/Ni

신동층군 이질암 시료에서 기원지를 잘 반영하는 미량원소들인 Cr, V, Y와 Ni의 원소 비 (Cr/V와 Y/Ni)를 이용하여 기원지의 암상의 특성을 알아보기 위하여 그림 6에 도시하였다. Cr, Ni과 V은 철마그네슘 원소로 이들 원소들은 고철질과 초고철질 암석에 많이 함유되어 있으며, 퇴적암에 이들 원소가 많이 들어있으면 오피올라이트와 관련된 고철질/초고철질 암석이 기원지에 분포하였다는 것을 가리킨다(Björlykke, 1974; Hiscott, 1978, 1984; Garver *et al.*, 1996). Cr/V 비는 Cr이 다른 철마그네슘 미량원소들에 비해 얼마나 부화되었는가를 나타내며, Y/Ni 비는 중희토류 원소의 대표성을 가지는 Y에 비해 철마그네슘 미량원소의 대표성을 가지는 Ni가 얼마나 부화되어 있는 가를 지시한다(McLennan *et al.*, 1993). 고철질-초고철질 암석은 철마그네슘 원소의 함량이 높기 때문에 이러한 암석을 기원지 암석으로 가지는 퇴적물은 낮은 Y/Ni 값을 가진다. 반면 오피올라이트 층서 기록에 주로 들어있는 크롬-침정석과 같은 광물은 Cr을 다른 철마그네슘 원소들에 비해 선별

적으로 더 많이 함유한다. Cr/V 비는 사암 시료에서 0.2-1.7의 범위를, 이질암 시료에서는 0.5-1.8의 범위를 가진다. 하지만 사암의 Cr/V 비는 대부분 UCC의 평균값인 0.8 (McLennan, 2001) 보다 낮은 값을 보이지만, 이질암의 Cr/V는 UCC의 비보다는 거의 대부분 높은 값을 나타낸다(그림 6). Y/Ni 비는 사암 시료에서 약 57%가, 이질암 시료에서는 41%가 UCC의 비보다는 낮은 값을 나타낸다. 비교를 위해 이질암에서 규장질-고철질암의 비와 규장질-초고철질암의 비를 단성분으로 하여 혼합 곡선으로 도시하였다. 여기에 이용된 규장질암, 고철질암과 초고철질암의 단성분 조성은 그림 5에서와 같이 Turekian and Wedepohl (1961)의 자료를 이용하였으며, 화강암류로 불리는 암석의 조성이 다양한 점을 고려하여 규장질암 단성분 조성은 Turekian and Wedepohl (1961)의 이상적인 화강암 조성을 이용하였다. 낙동층 몇 시료에서 Y/Ni 비율이 화강섬록암의 Y/Ni 비율(2.3)보다 높게(up to 4.0) 나타나기 때문에 Ca 함량이 낮은 화강암(Y/Ni = 8.9; Turekian and Wedepohl, 1961) 조성의 값을 이용하는 것이 적절한 것으로 보인다. 많은 수의 이질암 시료는 약 50:50 비율의 규장질암과 고철질암의 혼합 곡선 위쪽에 도시되므로(그

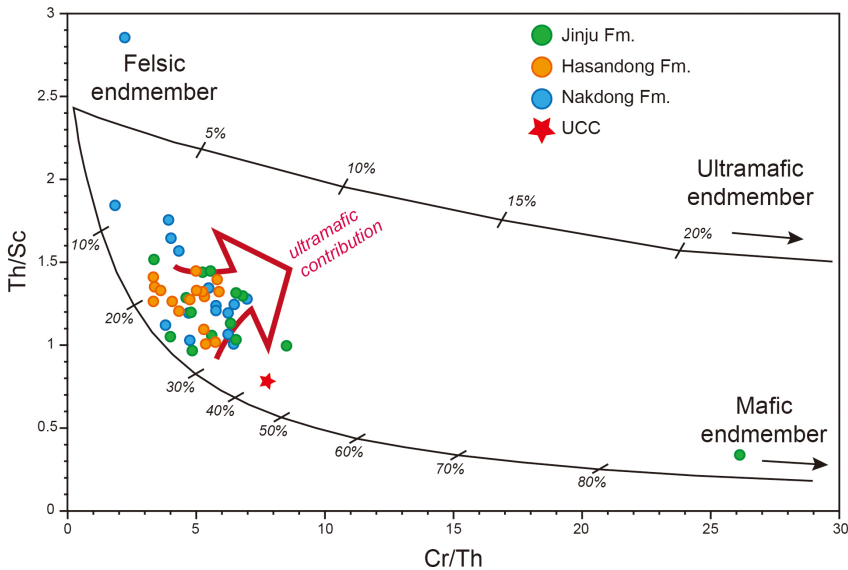


Fig. 5. The plot of Th/Sc versus Cr/Th in mudrock samples. Two mixing curves have been calculated between a felsic and a mafic end member. Element contents of end members are from Turekian and Wedepohl (1961). Percentages reported in the mixing curves represent the mafic end-member contribution to the mixing products. The large arrow indicates the shifting of some mudrock samples toward the ultramafic-felsic mixing line, suggesting a contribution from ultramafic detrital material. UCC (upper continental crust) is plotted for comparison.

림 6) 비록 아주 적은 양 (<5%)이지만 초고철질암으로부터 공급된 물질이 혼합되었다는 것을 지시한다. 이는 규장질암과 고철질암/초고철질암이 기원지에서 동시에 침식되었음을 의미한다.

5.2 기원지 및 조구조 환경

Hisada *et al.* (2008)은 신동층군의 최상부 지층인 진주층의 사암에 크롬-침정석 입자가 산출하는 것을 처음으로 보고하며 진주층 기원지에 감람암이 분포한다고 주장했지만, 현재의 영남육괴에 감람암이 분포하지 않으므로 진주층 크롬-침정석 입자들은 아마도 일본의 초고철질암이 분포하는 부가퇴적체(accretionary complex)로부터 유래하였을 것이라고 해석하였다. 하지만 지금까지 여러 학자들의 연구에 의하면 진주층을 포함한 신동층군의 퇴적물 기원지는 경상분지 서쪽, 북서쪽에 위치한 영남육괴인 것으로 해석(Chang and Kim, 1968; Koh, 1986)되었는데, Hisada *et al.* (2008)의 주장은 크롬-침정석 입자에 대한 고려만을 바탕으로 한 고지리적 해석이다. 이 연구에서 낙동층과 하산동층 사암에도 드물지만 크롬-침정석 입자가 산출하는 것으로 밝혀졌다. 따라서 이러한 기존의 기원지 해석을 바탕으로 하면 신동층군 퇴적 당시 영

남육괴에 감람암이 분포했음을 알 수 있다.

이와 같이 사암에서 크롬-침정석 입자가 산출되는 것은 기원지인 영남육괴에 감람암이 분포했음을 직접 지시하는 물리적인 증거이지만, 사암 시료의 Cr과 Ni 함량은 UCC와 AMsand에 비하여 약간 더 부화(낙동층 한 시료에서 최대 x2.9 versus UCC, x4.9 versus AMsand)되어 있는 점으로 보아 사암에 들어있는 크롬-침정석의 함량은 아주 낮을 것으로 여겨진다. 물론 감람암에서도 크롬-침정석은 부수 광물로 산출되기에 감람암으로부터 유래되는 쇄설성 크롬-침정석 입자의 산출은 많지는 않을 것으로 예상된다. 이질암의 Cr과 Ni 함량도 UCC와 AMmud에 비하여 최대 약 2배 이상으로 부화되어 있는 것으로 나타나 초고철질암으로부터 유래되는 이질암에 비해 많이 낮은 값을 보인다. 이러한 이질암의 조성은 기원지에 감람암이 분포했지만 여러 도표에서 알 수 있듯이 감람암의 영향이 크지 않으므로 기원지에 노출된 감람암의 암체 크기는 작았고 다른 기반암의 영향이 더 컸음을 지시한다. 영남육괴에 존재했던 감람암의 암체는 신동층군이 쌓이는 동안 공간적으로 보았을 때 큰 변화는 없었지만 낙동층이 쌓일 당시 영남육괴의 남쪽에 조금 더 큰 암체가 있

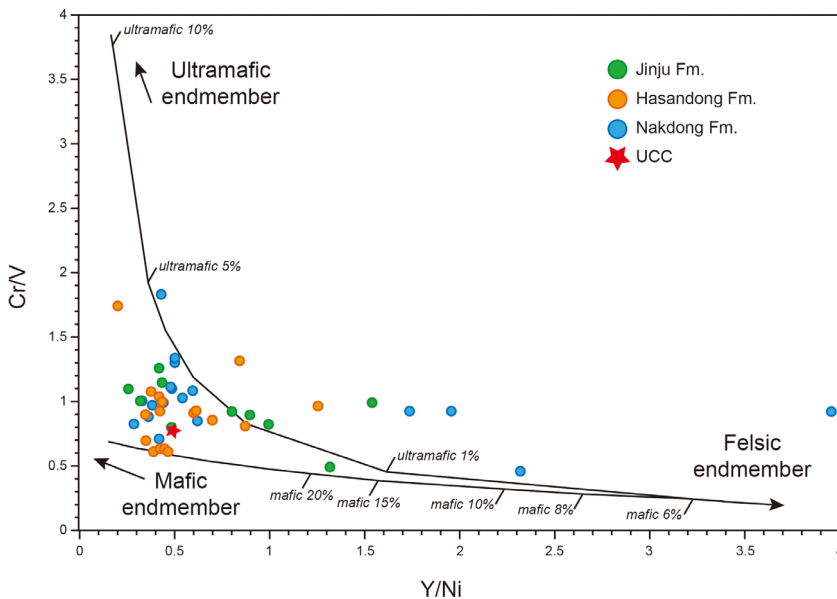


Fig. 6. The plot of Cr/V versus Y/Ni showing the distribution of Lower Cretaceous Sindong Group mudrocks. Upper and lower curves represent the mixing lines of ultramafic (Cr/V = 40; Y/Ni = ~0.0003) and mafic (Cr/V = 0.68; Y/Ni = 0.16) and felsic (Cr/V = 0.093; Y/Ni = 8.88) rocks. Element contents of end members are from Turekian and Wedepohl (1961).

있을 것으로 판단된다(표 3).

퇴적암 내 크롬-침정석의 존재는 경상분지의 조구조 환경에 중요한 의미를 가진다. 기원지인 영남육괴에 supra-subduction zone의 감람암이 존재하였다(Hisada *et al.*, 2008)는 것은 영남육괴에 생성된 쥐라기의 화산호 아래로 고태평양판이 북서쪽 방향으로 섭입하였다는 조구조 환경의 해석을 지지한다. 활성 대륙연변부 환경에 위치한 영남육괴에 생성된 경상분지는 분지 생성 이전의 쥐라기-전기 백악기 동안 조구조적으로 전호(forearc) 지역이었던 곳에 발달한 퇴적분지라는 것을 시사한다. 현재 영남육괴에는 화산호 특성을 가지는 전기 백악기의 화성암체가 분포하지 않지만 신동충군에는 138-106 Ma에 해당하는 화성암 기원의 쇄설성 저어콘이 인지될 정도로 산출된다(Lee *et al.*, 2010). 이로 보아 영남육괴는 전기 백악기 138-106 Ma 동안 고태평양판의 섭입으로 인한 초기 화산호의 발달이 있었다. 하지만 전호지역에 맨틀썰기(mantle-wedge) 감람암이 노출되기 위해서는 전호지역이 압축환경(compressional tectonic regime)에 놓여야 한다. 백악기 동안 한반도에 분포하는 화산호 기원의 칼크-알칼리 계열 심성암체는 북서에서 남동 방향으로 가면서 점차 생성 연대가 젊어지는데(Sagong *et al.*, 2005), 이러한 연대 분포 경향은 한반도뿐만 아니라 중국 동부와 일본 남서부를 포함하는 동아시아 대륙연변부에서 나타난다(Uyeda and Miyashiro, 1974; Wu *et al.*, 2007). 이렇게 화산호와 관련된 심성암체의 연대가 남동쪽으로 가면서 젊어진다는 것은 섭입대가 태평양 쪽으로 후퇴를 하면서 대륙 가장자리가 인장환경(extensional tectonic regime)에 있었다는 것을 가리킨다. 경상분지의 생성도 인장에 의해 발달했다고 해석되고 있으므로 경상분지가 생성될 당시에 한반도를 포함한 동아시아 대륙 연변부는 섭입대의 후퇴로 인한 인장을 겪었을 것으로 추정된다(c.f., Kiminami and Imaoka, 2013). 이런 시기에는 섭입대 상부(supra subduction zone) 맨틀썰기에 있는 감람암의 용기가 일어나지 않으므로 영남육괴에 분포했던 섭입대 상부 감람암은 아마도 동아시아 대륙연변부가 압축환경에 놓여 있었을 후기 쥐라기-초기 백악기 스러스트에 의해 고지대를 형성했을 것으로 해석된다. 이를 확인하기 위해서는 중생대 동안 영남육괴 조구조 환경에 대해 더 많은 연구가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

6. 결 론

경상분지 신동충군의 최상부층인 진주층에서 Hisada *et al.* (2008)은 크롬-침정석 입자의 산출을 보고하며 이 쇄설성 크롬-침정석 입자들은 감람암으로부터 유래되었다고 주장하였다. 이번 연구에서는 진주층뿐만 아니라 낙동층과 하산동층 사암에서도 크롬-침정석의 산출을 확인했다. 신동충군 사암 전체에서 쇄설성 크롬-침정석 입자가 산출되므로 신동충군 퇴적물의 기원지인 영남육괴에 감람암이 분포했을 것으로 해석된다.

신동충군 사암과 이질암 시료의 Cr 함량은 각각 평균 64 ppm과 91 ppm이며, Ni 함량은 각각 평균 28.6 ppm과 52 ppm이다. 사암 시료의 Cr 함량은 크롬-침정석 입자 함량의 함수로 낙동층 사암에서 평균 103.9 ppm으로 가장 높게 나타난다. 이질암의 Cr과 Ni 함량은 세 지층의 시간적, 공간적 분포에서 크게 차이가 나지 않는다. 사암과 이질암 시료의 Cr과 Ni 함량은 UCC와 활성연변부 퇴적물 보다는 부화되어 있지만 초고철질암의 기원지로부터 유래된 퇴적물의 조성보다는 낮은 값을 보인다. 이와 같은 미량 원소의 조성은 아마도 기원지에 분포했던 초고철질암 암체의 크기가 작았고, 다른 기반암에 의한 희석 효과가 컸기 때문인 것으로 해석된다.

이 연구결과는 신동충군의 기원지인 영남육괴에 감람암을 포함하는 높은 산지가 존재했으나 기원지 암석에서 감람암이 차지하는 비율은 그리 높지 않았음을 시사한다. 영남육괴에 맨틀썰기 감람암이 존재했던 것으로 추정되지만, 이 감람암의 존재에 대한 지구조 기작에 대하여는 추가 연구가 필요하다.

감사의 글

이 연구는 한국연구재단의 지원에 의해 수행되었다(NRF-2017R1A2B4007877, 2017R1C1B1007653). 이용일은 극지연구소의 지원에 감사드린다. 심사과정에서 유익한 조언을 해 주신 두 분의 심사위원과 편집위원께 감사드린다.

REFERENCES

Ahn, K.S., Oh, C.W. and Park, B.Y., 2001, *Geochemistry*

- of orthogneisses in the Seungju-Suncheon area, Korea. *Journal of Korean Earth Science Society*, 22, 163-178 (in Korean with English abstract).
- Arai, S., 1992, Chemistry of chromian spinel in volcanic rocks as a potential guide to magma chemistry. *Mineralogical Magazine*, 56, 173-184.
- Arai, S. and Okada, H., 1991, Petrology of serpentine sandstone as a key to tectonic development of serpentine belts. *Tectonophysics*, 195, 65-81.
- Asiedu, D.K., Suzuki, S., Nogami, K. and Shibata, T., 2000, Geochemistry of Lower Cretaceous sediments, Inner Zone of Southwest Japan: Constraints on provenance and tectonic environment. *Geochemical Journal*, 34, 155-173.
- Beinlich, A., Austrheim, H., Mavromatis, V., Grguric, B., Putnis, C.V. and Putnis, A., 2018, Peridotite weathering is the missing ingredient of Earth's continental crust composition. *Nature Communications*, 9: 634, doi:10.1038/s41467-018-03039-9.
- Bjørlykke, K., 1974, Geochemical and mineralogical influence of Ordovician island arcs on epicontinental clastic sedimentation: A study of Lower Palaeozoic sedimentation in the Oslo region, Norway. *Sedimentology*, 21, 251-272.
- Bracciali, L., Marroni, M., Pandolfi, L. and Rocchi, S., 2007, Geochemistry and petrography of Western Tethys Cretaceous sedimentary covers (Corsica and Northern Apennines): From source areas to configuration of margins. In: Arribas, J., Critelli, S. and Johnsson, M.J. (Eds.), *Sedimentary Provenance and Petrogenesis: Perspectives from Petrography and Geochemistry*. Geological Society of America Special Paper 420, 73-93.
- Chang, K.H., 1975, Cretaceous stratigraphy of Southeast Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 11, 1-23.
- Chang, K.H., 1987, Cretaceous Strata, Chapter 6-4, In: Lee, D.-S. (Ed.), *Geology of Korea*. Seoul, Kyohak-Sa, Geological Society of Korea, 157-201.
- 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.
- Cheong, C.S. and Chang, H.W., 1996a, Tectono-magmatism, -metamorphism, and -mineralization of the central Ogcheon belt, Korea (I). *Journal of the Geological Society of Korea*, 32, 91-116 (in Korean with English abstract).
- Cheong, C.S. and Chang, H.W., 1996b, Geochemistry of the Daebogranitic batholith in the central Ogcheon belt, Korea: A preliminary report. *Economic and Environmental Geology*, 29, 483-493 (in Korean with English abstract).
- Cho, D.L. and Kwon, S.T., 1994, Hornblende geobarometry of the Mesozoic granitoids and evolution of crustal thickness. *Journal of the Geological Society of Korea*, 30, 41-61 (in Korean with English abstract).
- Cho, K.S. and Nam, K.S., 1990, Geochemical study and abundance of trace elements of the gneisses in the south-western region of the Sobaegsan Massif (Namwon area). *Journal of the Geological Society of Korea*, 26, 227-234 (in Korean with English abstract).
- Choi, H.I., 1981, Depositional environments of the Sindong Group in the southwestern part of the Kyeongsang Basin. Unpublished Ph.D thesis, Seoul National University, 144 p.
- 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. and Lee, Y.I., 2011, Thermal histories of Cretaceous basins in Korea: Implications for responses of the East Asian continental margin. *Island Arc*, 20, 371-385.
- Cookinboo, H.L., Bustin, R.M. and Wilks, K.R., 1997, Detrital chromian spinels used to reconstruct the tectonic setting of provenance: Implications for orogeny in the Canadian Cordillera. *Journal of Sedimentary Research*, 67, 116-123.
- Furnes, H., Pedersen, R.B. and Maaløe, S., 1986, Petrology and geochemistry of spinel peridotite nodules and host basalt, Vestspitsbergen. *Norsk Geologisk Tidsskrift*, 66, 53-68.
- 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.
- 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.
- Gill, J., 1981, *Orogenic Andesites and Plate Tectonics*. Berlin, Springer-Verlag, 390 p.
- Goldich S.S., 1938, A study of rock weathering. *The Journal of Geology*, 46, 17-58.
- Goles, G.C., 1967, Trace elements in ultramafic rocks. In: Wyllie, P.J. (Ed.), *Ultramafic and Related Rocks*. New York, Wiley, pp. 222-238.
- Gromet, L.P., Haskin, L.A., Korotev, R.L., Dymek, R.F., 1984, The "North American shale composite": Its compilation, major and trace element characteristics. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48, 2469-2482.
- 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., 1978, Provenance of Ordovician deep-water sandstones, Tourelle Formation, Quebec, and im-

- plications for initiation of the Taconic Orogeny. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 15, 1579-1597.
- 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.
- Hong, S.S., 2001, Implication for the emplacement depth of the granites in the Yeongnam Massif, using the aluminum-in-hornblende barometry. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 10, 36-55.
- Jaques, A.L., Chappell, B.W. and Taylor, S.R., 1983, Geochemistry of cumulus peridotites and gabbros from the Marum Ophiolite Complex, northern Papua New Guinea. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 82, 154-164.
- Jeong, J.-G., Kim, W.-S. and Seo, B.-M., 1991, Differentiation of the plutonic rocks in Sancheong-gun: trace element modelling for the magmatic differentiation. *Journal of Mineralogical Society of Korea*, 4, 69-89.
- Jwa, Y.-J., 2004, Possible source rocks of Mesozoic granites in South Korea: implications for crustal evolution in NE Asia. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 95, 181-198.
- Kang, M., Kim, Y. and Wee, S., 2017, Geochemical characteristics of the Jurassic Chunyang granites in northeastern part of the Yeongnam Massif. *Journal of Korean Earth Science Society*, 38, 49-63 (in Korean with English abstract).
- Kang, S.-W., Yoo, B.-W., Ryoo, C. and Kim, Y.-J., 1994, Petrochemistry of plutons in the Hamyang-Macheon area, Gyeongnam. *Journal of Korean Earth Science Society*, 15, 100-114 (in Korean with English abstract).
- Kim, K.H., 1992, Geochemical study of some Mesozoic granitic rocks in South Korea. *Journal of Korean Institute of Mining Geology*, 25, 435-446 (in Korean with English abstract).
- Kim, O.J., Hong, M.S., Park, H.I., Park, Y.D., Kim, K.T. and Yoon, S., 1964, Geological report of the Sancheong sheet (1:50,000). Korea Institute of Energy and Resources, 25 p.
- Kim, S.W., Kwon, S., Yi, K. and Santosh, M., 2014, Arc magmatism in the Yeongnam massif, Korean Peninsula: Imprints of Columbia and Rodinia supercontinents. *Gondwana Research*, 26, 1009-1027.
- 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.
- Kim, Y.-J., Lee, C.-S. and Kang, S.-W., 1991, Petrochemistry on intermediated- basic plutons in Jirisan area of the Ryongnam Massif. *Journal of Korean Earth Science Society*, 12, 100-122 (in Korean with English abstract).
- Kiminami, K. and Imaoka, T., 2013, Spatiotemporal variations of Jurassic-Cretaceous magmatism in eastern Asia (Tan-Lu Fault to SW Japan): evidence for flat-slab subduction and slab rollback. *Terra Nova*, 25, 414-422.
- Ko, B., 2006, Petrological and geochemical studies of the petrogenesis of the Hadong-Sancheong anorthosite complex. Unpublished Ph.D thesis, Kangwon National University, 154p (in Korean with English abstract).
- Koh, I.S., 1974, Sedimentary petrology of Nakdong Group (I). *Journal of the Geological Society of Korea*, 10, 207-224 (in Korean with English abstract).
- Koh, I.S., 1986, Study on the source rocks of the Nakdong Group. *Journal of the Geological Society of Korea*, 22, 233-256 (in Korean with English abstract).
- Lee, C., Ryu, I.-C. and Shinn, Y.J., 2017, U-Pb ages of detrital zircons in Lower Cretaceous non-marine successions of the Gyeongsang Basin, Northeast Asia: Implications for sediment provenance. *Sedimentary Geology*, 353, 125-138.
- Lee, J.I. and Lee, Y.I., 2000, Provenance of the Early Cretaceous Hayang Group, Gyeongsang Basin, southeastern Korea: Implications for the Early Cretaceous continental arc volcanics. *Journal of Sedimentary Research*, 70, 151-158.
- 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, S.M., Kim, H.S. and Oh, I.S., 1986, Metamorphic petrology of Precambrian gneisses in Samcheok-Jukbyeon area. *Journal of the Geological Society of Korea*, 22, 257-277.
- Lee, S.M., Na, K.C., Lee, S.H., Park, B.Y. and Lee, S.W., 1981, Regional metamorphism of the metamorphic rock complex in the southeastern region of the Sobaegsan Massif. *Journal of the Geological Society of Korea*, 17, 169-188 (in Korean with English abstract).
- Lee, Y.I., 1999a, Geotectonic significance of detrital chromian spinel: a review. *Geosciences Journal*, 3, 23-29.
- Lee, Y.I., 1999b, Stable isotopic composition of calcic paleosols of the Early Cretaceous Hasandong Formation, southeastern Korea. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 150, 123-133.
- Lee, Y.I., Choi, T.J., 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. and Lim, D.H., 2008, Sandstone diagenesis of the Lower Cretaceous Sindong Group, Gyeongsang Basin, southeastern Korea: implications for compositional and paleoenvironmental controls. *Island Arc*, 17, 152-171.
- 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.
- Lim, H.S., Lee, Y.I. and Min, K.D., 2003, Thermal history of the Cretaceous Sindong Group, Gyeongsang Basin, Korea based on fission track analysis. *Basin Research*, 15, 139-152.
- Lippard, S.J., Shelton, A.W. and Gass, I.G., 1986, *The Ophiolites of Northern Oman*. Blackwell, London, 178 p.
- McLennan, S.M., 2001, Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2, 2000GC000109.
- 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.
- Niu, Y., 2004, Bulk-rock major and trace element compositions of abyssal peridotites: implications for mantle melting, melt extraction and post-melting processes beneath mid-ocean ridges. *Journal of Petrology*, 45, 2423-2458.
- Noh, J.H. and Park, H.S., 1990, Mineral diagenesis of sandstones of the Kyongsang Supergroup in Goryeong area. *Journal of the Geological Society of Korea*, 26, 371-392 (in Korean with English abstract).
- Ok, E.-Y., Kim, J.-S., Lee, S.-W. and Kang, H.-C., 2015, Petrology of the syenites in Sancheong, Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 24, 25-54 (in Korean with English abstract).
- Papavassiliou, C.T. and Cosgrove, M.E., 1982, The geochemistry of DSDP sediments from site 223, Indian Ocean. *Chemical Geology*, 37, 299-315.
- Park, K.-H., Kim, D.-Y., Song, Y.-S. and Cheong, C.-S., 2006, Rb-Sr isotopic composition of Mesozoic Sancheong syenite and its geologic implication. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 15, 1-9 (in Korean with English abstract).
- Press, S., 1986, Detrital spinels from alpinotype source rocks in Middle Devonian sediments of the Rhenish Massif. *Geologische Rundschau*, 75, 333-340.
- Rhee, C.W., Jo, H.R. and Chough, S.K., 2002, An allostrographic approach to a non-marine basin: the north-western part of Cretaceous Kyongsang Basin, SE Korea. *Sedimentology*, 45, 449-472.
- Roser, B., Ishida, H., Lee, H.-K., Dozen, K. and Yamazaki, C., 1999, Major and trace element analyses of Cretaceous sedimentary rocks from the Euisong block, Gyeongsang Supergroup, Korea. *Geoscience Report*, Shimane University, 18, 1-10.
- Rudnick, R.L. and Gao, S., 2003, The upper continental crust. In: Holland, H.D. and Turekian, K.K. (Eds.), *Treatise on Geochemistry* 2nd Ed., Vol. 4, Elsevier, Oxford, 1-51.
- Sagong, H., Kwon, S.-T. and Ree, J.-H., 2005, Mesozoic episodic magmatism in South Korea and its tectonic implication. *Tectonics* 24, TC5002. doi:10.1029/2004TC001720.
- Taylor, S.R. and McLennan, S.M., 1995, The geochemical evolution of the continental crust. *Reviews of Geophysics*, 33, 241-265.
- Thiébault, F. and Clément, B., 1992, Argiles et obduction-Le Jurassique supérieur et le Crétacé inférieur de la zone béotienne en Béotie (Grèce): *Bulletin de la Société Géologique de France*, 163, 435-446.
- 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.
- Uchida, E., Choi, S.-G., Baba, D. and Wakisaka, Y., 2012, Petrogenesis and solidification depth of the Jurassic Daebo and Cretaceous Bulguksa granitic rocks in South Korea. *Resource Geology*, 62, 282-295.
- Uyeda, S. and Miyashiro, A., 1974, Plate tectonics and the Japanese islands: a synthesis. *Geological Society of America Bulletin*, 85, 1159-1170.
- Warren, J.M., 2016, Global variations in abyssal peridotite compositions. *Lithos*, 248, 193-219.
- Wee, S., Kim, J.-Y. and Lim, S.-M., 2013, Geochemical characteristics of the Uljin granitoids in northeastern part of the Yeongnam Massif, Korea. *Journal of Korean Earth Science Society*, 34, 313-328 (in Korean with English abstract).
- Wu, F.-Y., Han, R.-H., Yang, J.-H., Wilde, S.A., Zhai, M.-G. and Park, S.-C., 2007, Initial constraints on the timing of granitic magmatism in North Korea using U-Pb zircon geochronology. *Chemical Geology*, 238, 232-248.
- Xia, B., Yu, H.-X., Chen, G.-W., Qi, L., Zhao, T.-P. and Zhou, M.-F., 2003, Geochemistry and tectonic environment of the Dagzhuka ophiolite in the Yarlung-Zangbo suture zone, Tibet. *Geochemical Journal*, 37, 311-324.
- Yucesoy, F. and Ergin, M., 1992, Heavy-metal geochemistry of surface sediments from the southern Black Sea shelf and upper slope. *Chemical Geology*, 99, 265-287.

Received : August 3, 2019

Revised : October 8, 2019

Accepted : October 10, 2019