

<Review>

태백산분지에 분포하는 장산층의 퇴적시기 및 암석 특성 재고찰

이용일¹ · 최태진^{2,*} · 임현수³

¹서울대학교 지구환경과학부

²조선대학교 에너지자원공학과

³부산대학교 지질환경과학과

요 약

이 논평은 한반도 고생대 층서의 최하부 지층으로 여겨지고 있는 장산층의 지질시대를 재검토하고 장산층 사암의 암석학적 특성을 밝히고자 하는 것이다. 장산층은 주로 규암으로 이루어져 있어 지질시대를 지시하는 화석이 산출되지 않으며 장산층의 상위에 놓인 전기 캄브리아기 후기에서 중기 캄브리아기에 쌓인 묘봉층과 정합적인 층서 관계를 바탕으로 전기 캄브리아기에 퇴적되었을 것으로 여겨져 왔다. 그러나 장산층과 묘봉층의 부정합 관계, 장산층 하부에 놓인 800~900 Ma에 변성작용을 받은 울리층군의 역이 장산층 기저역암에 산출된다는 점, 그리고 강원도 임계 지역과 옥동단층을 따라 발달한 압쇄대의 형성 시기가 562 Ma라는 지질학적인 증거들을 바탕으로 장산층의 퇴적시기는 800~562 Ma 사이의 신원생대였을 것으로 해석된다. 또한 장산층 사암의 조성은 전형적인 규암과 달리 속성작용과 저변성작용을 받아 기질이 많은 사암의 조성이 변질된 것으로, 원사암의 조성은 준장석질 사암과 준 암편질 사암이었을 것으로 해석된다.

주요어: 태백산 분지, 장산층, 퇴적시기, 사암 조성

Yong Il Lee, Taejin Choi and Hyoun Soo Lim, 2016, Depositional age and petrological characteristics of the Jangsan Formation in the Taebaeksan Basin, Korea-revisited. Journal of the Geological Society of Korea. v. 52, no. 1, p. 67-77

ABSTRACT: This article reviews the depositional age of the Jangsan Formation and elucidates its petrological characteristics, with several lines of geological evidence in the literature. The Jangsan Formation mainly consists of quartzite and is biostratigraphically barren. It has been considered as the lowest stratigraphic unit of the Korean lower Paleozoic, with an early Cambrian age based on the conformable stratigraphic relationship with the overlying late early to middle Cambrian Myobong Formation. On the basis of (1) the unconformable stratigraphic contact between the Jangsan and Myobong formations, (2) the presence of gravels of the unconformably underlying Yuli Group metasediments, which underwent metamorphism between 800 and 900 Ma, in the basal conglomerates of the Jangsan Formation, and (3) a K-Ar age of 562 Ma of sericite obtained from the mylonite zone developed along the boundary between Precambrian basement and the Jangsan Formation, we interpret that the depositional age of the Jangsan Formation can be constrained between 800 and 562 Ma (Neoproterozoic). Although Jangsan sandstones are commonly regarded as quartzite, they do not show quartz-arenite composition but rich in matrix. We infer the original sandstone composition as subarkosic to sublitharenitic.

Key words: Taebaeksan Basin, Jangsan Formation, depositional age, sandstone composition

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

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

1. 서 언

한반도 중앙 동부의 영월-태백 지역에 위치하는 태백산 분지에는 전기 고생대의 조선누층군, 상부 고생대의 평안누층군 및 백악기 지층이 서로 부정합으로 접촉하며 분포한다. 장산층과 면산층은 태백산 분지의 최하부층으로 알려져 왔고(Cheong, 1969; Cheong *et al.*, 1973), 두 지층은 동일한 시기에 퇴적되었으며 서로 층서적으로 대비되는 것으로 해석되었다(Kim and Cheong, 1987). 이들 두 지층은 강원도 태백시 동점 지역에 발달한 동점단층을 경계로 접촉하고 있다(그림 1).

장산층은, 백운산 향사대의 남익부에서는 태백에서 단양까지 연속적으로 분포하여 추적이 가능하지만, 향사대의 북익부 중앙에 해당하는 정선군 화암 지역과 북쪽의 임계 및 여량 지역에서는 독립된 암

체로 분포한다. 장산층은 원생대 편마암과 변성퇴적암으로 구성된 태백산 편마암복합체 기반암 위에 경사부정합으로 놓인다(Cheong, 1969). 장산층은 유백색과 담홍색의 규암으로 이루어지고 층의 두께는 40~200 m에 이르며, 층의 하부에는 국부적으로 원마도가 좋은 규암 역들이 특정 층준에 밀집된 형태 또는 개별 자갈로 사암 내에 떠있는 형태로 산출한다. 동점단층 동쪽에 분포하는 면산층은 원생대 홍제사화강암 위에 난정합 관계로 분포하며, 최하부는 약 7 m 두께의 역암으로 이루어져 있고 그 상위로 약 100 m 두께의 암회색 사암과 실트암으로 이루어져 있다(Kim and Cheong, 1987; Kim and Lee, 2006).

장산층을 구성하는 사암은 지금까지 규암으로 여겨지고 있다(Yun, 1978; Lee, 1987; Woo *et al.*, 2006). 장산층은 선캠브리아누대의 기반암 위에 캄브리아기에 일어난 해침의 영향으로 해빈과 천해의 환경에서 많

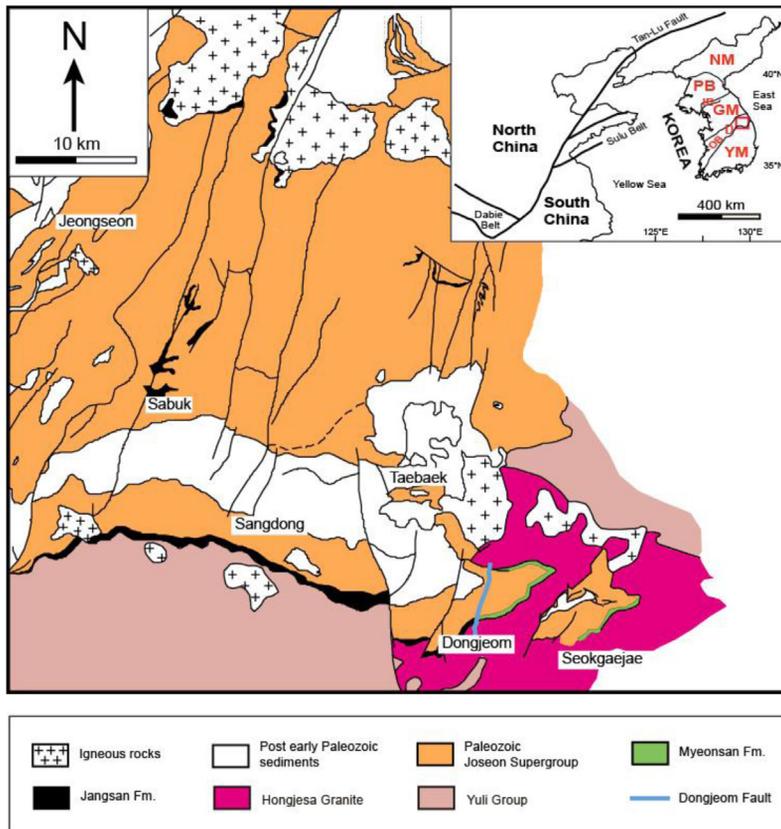


Fig. 1. Simplified geological map of the eastern Taebaeksan Basin (modified after Lee *et al.*, 2012). The boxed area in the inset represents the location of the Taebaeksan Basin. NM: Nangrim massif; PB: Pyeongnam Basin; IB: Imjingang belt; GM: Gyeonggi massif; OB: Okcheon belt; YM: Yeongnam massif.

은 재동작용을 받아 퇴적된 광물 성숙도가 높은 석영질 모래 퇴적물로 해석되었다(Yun, 1978; Woo *et al.*, 2006). 이 주장은 장산층이 거의 석영으로 구성된 석영질 사암으로 이들이 고화되고 저변성작용을 받아 규암이 되었다는 암석학적 특성과 장산층의 상부에 이질의 대륙붕 퇴적물로 해석되는 묘봉층이 정합적으로 쌓였다는 인식을 바탕으로 한다. 이에 따라 장산층 사암은 광물 성숙도가 높은 사암으로 여겨지고 있다.

이 논평에서는 지금까지 제안된 장산층의 지질시대(전기 캄브리아기)에 대한 문제점을 검토하고 최근 연구된 결과와 기존에 발표된 구조지질 및 지질연대 관련 문헌을 참조하여 장산층의 퇴적시기를 새롭게 제안하고자 한다. 또한 규암이라고 여겨지고 있는 장산층 사암의 암석학적 특징을 문헌에 발표된 현미경 관찰 자료와 지화학 자료를 이용하여 재검토하고자 한다.

2. 지질시대 고찰

장산층과 면산층은 모두 암회색 내지 암흑색의 셰일 또는 슬레이트로 구성된 묘봉층에 의해 정합적으로 덮이는 것으로 알려져 왔다. 묘봉층의 퇴적시기는 산출되는 삼엽충과 완족동물을 근거로 전기 캄브리아기 후기에서 중기 캄브리아기 전기로 제한할 수 있기 때문에(Kobayashi, 1966), Geological Investigation Corps of the Taebaeksan Region (1962)에 의하여 묘봉층의 하부에 놓인 장산층과 면산층의 지질시대는 전기 캄브리아기일 것으로 정립된 후 이후의 연구에서는 두 지층의 지질시대가 전기 캄브리아기라고 사용되고 있다(Geological Society of Korea, 1999).

이 중 장산층과 지질시대가 대비되는 것으로 여겨지지만 암석학적으로 전혀 다른 특성을 보이는 면산층에서는 해양 기원의 체화석이 산출되지는 않지만 대신 *Skolithos*와 *Laevicyclus*와 같은 흔적화석이 산출하여(Kim, 1991) 면산층의 지질시대는 지금까지 알려진 대로 전기 캄브리아기에 해당하는 것으로 여겨진다. 면산층의 지질시대가 전기 캄브리아기에 해당한다는 해석은 면산층에서 소위 '흑사(black sand)'라고 알려진 중광물(Fe-Ti 산화물)을 포함하는 고기 사광(paleoplacer) 퇴적물이 산출되는 것으로도 뒷받침된다. Parnell *et al.* (2014)은 캄브리아기가 시작되기 이전에는 지표에 노출된 선캄브리아누대의 암

석이 상당한 기간 동안 지표 아래 깊은 곳까지 풍화작용을 받아 생성된 평탄화된 지형으로부터 공급된 금속 성분이 많은 퇴적물이 캄브리아기의 해양분지로 운반되어 쌓인 지질기록이 나타나며, 또한 이렇게 지속된 풍화작용으로 인하여 선캄브리아누대와 캄브리아기 경계에 해당하는 지표면의 암석과 지층에는 운모류인 pinite가 많이 관찰된다고 하였다. 면산층에서 많이 산출되는 고기 사광 퇴적물(Kim, 1991; Kim and Lee, 2006)과 면산층 바로 아래에서 산출되는 얇은 두께의 석영질 지층 상부에 발달한 pinite(Kim and Lee, 2003)가 선캄브리아누대와 캄브리아기를 구분 짓는 근거로 이용될 수 있어 면산층의 지질시대가 전기 캄브리아기라는 해석을 지지한다.

그러나 전기 캄브리아기의 천해 환경에 쌓였다고 주장되는 장산층에는 고생대 해양 화석의 증거는 아직까지 보고되지 않았다. Kim and Lee (2006)와 Lee *et al.* (2012)은 장산층이 상위의 묘봉층과 부정합적인 관계를 나타낸다는 관찰을 통하여 장산층의 지질시대가 지금까지 일반적으로 알려진 전기 캄브리아기가 아니라 신원생대에 해당한다고 주장하였다. Lee and Kim (1984)은 장산층 하부에 부정합으로 놓인 울리층군의 변성작용이 약 8억~9억년 전에 일어났으며, 영월군 상동 지역에 분포하는 장산층의 최하부 기저역암에 울리층군의 역이 산출하는 것을 보고하였다. 이를 바탕으로 Lee *et al.* (2016)은 장산층의 퇴적시기는 8억년 전 이후의 신원생대라고 해석하였다.

구조지질 연구를 통해 Kim and Kee (1991)와 Kim *et al.* (1989)은 강원도 정선군 임계 지역에서 폭 150~250 m, 그리고 정선군 신동읍 예미리에서 경상북도 상주시 함창읍에 걸쳐 발달한 옥동단층을 따라서는 폭 10~30 m로 선캄브리아누대의 기반암인 화강암질암과 그 위에 난정합으로 쌓인 장산층과의 경계부에 압쇄대(mylonite zone)가 발달한다고 보고하였다. 임계 지역의 압쇄대는 화강암질암에서 유래된 압쇄화강암(mylonitized granite)과 장산층에서 유래된 석영암쇄암으로, 옥동단층을 따라서는 기반암과 장산층과의 사이에 단속적으로 분포하는 압쇄암(mylonite) 또는 천매암쇄암(phyllonite)으로 분포한다. 이렇게 압쇄대가 기반암과 장산층에 걸쳐 발달하고 있는 점으로 보아 압쇄대의 생성 시기는 기반암 위에 장산층이 쌓이고 난 후 변형작용이 일어난 시기를 가리킨다. Yun (1983)은 영월군 옥동 지역에서 옥동단층을

따라 발달한 편암(Kim *et al.*, 1989)에 의해 압쇄암으로 재해석됨)에서 분리한 견운모의 K-Ar 연대 측정을 하여 세 시기의 견운모 생성 연대를 보고하였다. 견운모 생성 연대는 석영 우세부에서 562 ± 5 Ma, 석영-견운모 혼합부에서 266 ± 5 Ma, 그리고 견운모 우세부에서 233 ± 5 Ma로 측정되었다. 여기서 주목할 점은 가장 오래된 연대인 562 Ma로 이 연대는 신원생대의 최후기에 해당하는 것이며, Yun (1983)이 보고한 결과는 이 시기에 압쇄대가 형성된 후에도 두 번에 걸쳐 단층운동이 더 일어났음을 나타내는 것이다. 이는 장산층이 퇴적된 후 압쇄화작용이 일어날 수 있는 깊이로 매몰된 후 562 Ma에 압쇄화작용이 일어났다는 것이며, 이를 근거로 장산층의 퇴적시기는 압쇄화작용이 일어났던 신원생대 최후기보다 이전이라는 것을 지시한다. 이와 같은 지질학적인 증거를 바탕으로 장산층의 퇴적시기는 800~562 Ma 사이의 신원생대로 제한시킬 수 있다.

이렇게 장산층의 퇴적시기가 신원생대로 재해석되는 결과는 장산층이 전기 캄브리아기에 퇴적된 면산층과는 층서적으로 대비되지 않으며, 태백산반지에 쌓인 전기 고생대 지층인 조선누층군의 퇴적이 면산층으로부터 시작되었다는 Kim and Lee (2006)의 주장을 뒷받침한다. 이와 같이 면산층부터 시작되는 조선누층군의 층서는 한반도와 인접한 중국 산동성에 분포하는 북중국대지의 전기 고생대 지층의 층서(Lee and Chough, 2011)와도 잘 대비된다.

3. 장산층 사암의 암석학적 특성 고찰

3.1 사암 조성과 기질의 중요성

장산층 사암의 조성을 살펴보기 전에 사암의 조성에 대한 기존의 연구를 먼저 소개한다. 사암의 기원지 연구와 조구조 환경에 대한 대부분의 연구는 현미경 관찰을 통하여 사암을 이루고 있는 광물 성분 에 대한 분석을 통해 이루어지고 있다. 그런데 사암의 조성 연구에서는 원 사암을 조성하는 입자 중 변질되기 쉬운 광물 입자와 암편들이 변질된 성분에 대하여는 종종 무시하는 경우가 있다. 대부분의 사암은 쇄설성 입자와 속성작용 동안 생성된 교결물 이외에도 세립질의 입간 물질을 함유하고 있는데, 이 세립질의 입간 물질은 “기질 (matrix)”이라고 부른다. 기질 문제는 쇄설성 사암을 연구하는데 항상

염두에 두어야 하므로 사암의 기질에 대하여는 오래 전부터 많은 연구(예, Dickinson, 1970; Graham *et al.*, 1976)가 이루어져 왔으며, 그동안 제안된 설명을 간단히 소개하고자 한다. Cummins (1962)는 사암에 포함된 기질은 퇴적될 당시에 모래 크기의 입자들과 함께 퇴적된 세립질 쇄설물이 아니라 쇄설성 광물 입자와 암편이 퇴적된 후 속성작용을 받는 과정 중에 생성되었다는 의견을 처음으로 제시하였다. 많은 쇄설성 광물과 암편들은 물리적 또는 화학적으로 불안정하기 때문에 매몰이 진행되면서 속성작용 동안 재결정화 되거나 다른 물질로 교대된다(Dickinson, 1970; Walker, 1974). 경우에 따라서는 이렇게 변질 작용이 심하게 일어나 많은 쇄설성 입자들이 점토광물, 석영 그리고 산화물의 미결정질 집합체로 산출되기도 한다(Wilson and Pittman, 1977; Pittman, 1979). 그런데 사암에서 이렇게 쇄설성 입자들이 변질작용을 받았다는 점은 사암의 조성을 이용하여 퇴적물 기원지와 조구조 환경을 해석할 때 중요하게 고려해야 한다는 것을 의미한다. 그 이유는 기원지와 퇴적환경 해석에 가장 중요한 정보를 제공하는 성분인 장석과 기타 규산염 광물, 그리고 암편이 고기의 암석에서는 속성작용을 받아 종종 기질로 변질되기 때문이다(Dickinson, 1970). 이에 대한 문제점을 간파한 Dickinson (1970)과 Whetten and Hawkins (1970)은 그레이와케(graywacke)와 장석질 사암의 조직적 특성에 대하여 잘 기술하였다. 하지만 이러한 중요성에도 불구하고 속성작용에 비교적 안정한 석영이 많이 들어있는 석영질 사암 내에 산출하는 기질은 상대적으로 많은 주의가 기울여지지 않았다.

Dickinson (1970)은 사암에 들어있는 기질을 구별하는 기준을 다음과 같이 제시하였다. 기질은 퇴적 당시 모래 입자의 사이에 붙잡힌 머드인 원기질(protomatrix), 재결정을 받은 기질인 정기질(orthomatrix), 모래 크기의 입자가 속성작용을 받아 변질되어 생성된 기질인 외기질(epimatrix), 그리고 연약한 이질 입자들이 변형작용을 받고 으깨어진 가기질(pseudomatrix)의 4 종류로 구분된다.

그렇지만 많은 암석에서 재결정된 입간 물질이 원래 다른 입자들과 함께 쌓인 쇄설성의 기질(원기질)인지 아니면 변질을 받기 쉬운 모래 입자에서 유래가 되었는지 판단하는 것은 그리 쉽지 않다. 더욱이 지질시대가 오래된 사암일수록 속성작용의 영향

을 더 많이 받는 경향이 있으며 이에 따라 이들 사암은 속성작용을 받아 생성된 이차 기질을 함유할 가능성이 높아진다(Dickinson *et al.*, 1969; Wilson and Tillman, 1974; Helmold, 1985). 이 논평에서는 속성작용을 받아 생성된 모든 이차 기질을 '가기질'로 통칭하겠다.

현생의 모래 퇴적물 연구(Visher, 1969)에서 밝혀진 기질의 함량을 살펴보면, 비교적 고에너지 환경에서 어느 정도 좋은 분급으로 유수에 의해 밀집으로 운반되어 쌓인 층리를 간직하는 모래 퇴적물에는 조립질 실트(0.07 mm)보다 세립의 퇴적물은 무거운 모래로 보아 1% 이하이며, 예외적으로 세립질 물질이 많이 들어 있다고 하여도 2% 이하로 알려지고 있다. 만약 사암에 이보다 많은 양의 세립질 물질이 들어있다면 일단 이들은 가기질로 간주하는 것이 바람직하다. 그런데, 고기의 사암에서는 이 세립질 물질의 양이 종종 10%를 상회하여 산출되기도 한다(Cox and Lowe, 1995 참조). 이렇게 사암에 기질이 10% 이상 들어 있으면 사암의 분류에서는 이들을 잡사암(wacke)으로 분류한다.

기질이 많은 사암의 예로 우리가 흔히 사암의 한 종류로 일컫는 야외 암석명으로 그레이와케가 있는데, 그레이와케는 사암의 분류 체계에서는 존재하지 않지만 이 그레이와케의 본질은 기질의 성인에 대한 문제이기도 하다. 지금까지 그레이와케의 기질에 대해 많은 설명이 있었지만 기질이 슬레이트의 조성을 띠는 것으로 보아 원래 쇄설성 머드가 저변성작용의 조건 하에서 재결정되어 생성되었다고 여겨졌다. 그렇다면 퇴적 당시 모래 입자와 머드 입자의 퇴적이 함께 일어나야 한다는 수력학적인 해석의 문제점이 제기된다. 정상적인 유수의 작용에 의해서는 모래 입자와 머드 입자가 운반되는 동안 서로 입자의 크기에 따라 분급작용을 받아 분리되어 쌓이는데, 머드를 많이 운반시키는 하천의 모래 퇴적물에서도 머드 성분은 거의 나타나지 않는다(Visher, 1969). 그레이와케는 대륙붕 사면에서 발생한 저탁류에 의해 모래와 머드가 분리되어 운반되다가 저탁류의 속도가 낮아지면서 점이층리를 나타내며 서로 섞여 쌓이는 것으로 해석되기도 하였다. 그런데 이 경우에도 실제 신생대와 고생대 저탁암(Cummins, 1962)에서나, 또는 이론적으로도(Kuenen, 1966) 저탁류 퇴적물에는 머드 기질이 10% 이상 나타나지 않는다고 한다. 실제 그레이와케의 기질은 재결정화되어 나타

나는 것으로, 이중 약간은 쇄설성 입자와의 반응에 의해 생성되는 것으로 여겨지고 있다. 이 경우 원래 물에 의해 운반되는 동안 마모된 석영 입자의 가장자리 경계는 거의 사라지고, 석영 입자의 가장자리는 녹색의 녹니석이 마치 기병을 막기 위해 배치한 방어용 거마창(chévaus-de-frise) 양상으로 산출된다. Dickinson (1970)의 기질 분류에 의하면 그레이와케에 들어있는 많은 기질은 사암 퇴적물이 깊은 매몰 속성작용과 저변성작용을 받아 생성된 외기질로 대부분 장석이 변질되어 생성된 것으로 알려지고 있다(Kuenen, 1966; Pettijohn, 1975).

잡사암의 경우와는 정반대로 기질을 거의 함유하지 않고 석영으로만 이루어진 깨끗한 사암으로 석영사암(quartz arenite)이 있다. 화산 기원의 사암을 제외하고는 거의 모든 쇄설성 사암은 석영을 많이 함유하고 있다. 물론 특정한 기후 조건(예: 열대 지역)의 화산호 환경에서 산성의 화산활동으로 공급된 퇴적물로부터 석영사암이 생성된다는 보고(Smyth *et al.*, 2008)도 있다. 석영 입자가 95% 이상인 모래 입자로 존재할 경우에는 이를 석영사암 또는 정규암(orthoquartzite)이라고 한다. 정규암은 석영 모래 입자가 실리카로 교결작용을 받은 것이다. 우리가 규암(quartzite)이라고 부르는 암석은 단단하며, 깨뜨릴 때 구성 입자의 가장자리를 따라 깨지지 않고 입자를 가로 지르면서 깨지는 특성을 이용하여 구분한다(Howard, 2005). 대체로 이 용어는 변성암에 주로 사용하지만, 석영사암 역시 이러한 특성을 띠기 때문에 규암이라고 부른다. 반면 석영이 많은 사암이지만 실리카 교결물이 적어 암석이 깨질 때 입자의 가장자리를 따라 깨지면 이를 규암으로 부르기도 하는 석영사암으로 구분한다. 그런데 석영사암이 변성작용을 받으면 석영 입자와 실리카 교결물의 가장자리가 재결정화되어 원래 퇴적물이 가지고 있던 조직과 구조가 지워지게 된다. 이런 암석을 변성규암(metaquartzite)이라고 한다. 한국의 퇴적층에서 규암으로 분류되는 지층의 예로는 태백산분지의 장산층과 동점층이 있다. 이들 지층들은 각각 장산규암, 동점규암으로도 불리며, 풍화에 강하기 때문에 지형적으로 높은 절벽을 이루며 분포한다. 특히 지질시대로 보아 규암은 선크렘리아누데 후기와 캄브리아기의 안정지괴에서 유래된 퇴적물 기록에 흔히 산출되며 조직적으로 그리고 조성으로 보아 초성속

(supermature)된 특성을 보인다.

정규암은 속성작용 동안 실리카로 교결작용을 받아 생성되며 쇄설성 조직을 잘 보존하고 있다. 정규암은 고화되지 않은 퇴적물과 저변성을 받은 퇴적물에서 관찰되며 또한 퇴적구조를 보존하고 있다. 정규암은 녹색편암상 변성작용 동안 재결정화작용이 일어나 몰타르(mortar) 조직이 발달하는데(Groshong, 1988), 이 경우 아직 원래 퇴적물 조직은 남아있지만 심하게 변형된 쇄설성 석영 입자의 가장자리에 새롭게 생성된 변형작용을 받지 않은 석영 결정이 성장하면

서 그 경계는 지워진다. 쇄설성 암편이나 장석과 같은 석영 이외의 구성 성분들은 몰타르 조직이 심하게 발달하면서 점차 운모로 변질된다. 이들 석영사암은 SiO₂의 함량이 매우 높으며, 많은 경우 기타 산화물의 함량은 1 wt% 이하로 나타난다(Pettijohn, 1975). 또 다른 성인의 석영사암으로는 퇴적 당시에는 장석질 사암이었으나 속성작용을 받아 장석이 선별적으로 용해가 일어나 석영사암으로 바뀐 것도 보고되었다(Abdel Wahab, 1998; Went, 2013). 이들을 속성기원 규암(diagenetic quartzite)이라고 한다. 이상

Table 1. Petrographic analysis of Jangsan Formation sandstones in volume percent (from Kim, 1991). QtFL point count data notation is from Dickinson and Suczek (1979). Normative QtF*L* values were calculated from petrologic and chemical data using the methods of Cox and Lowe (1995); F* = normative detrital feldspar, L* = normative detrital lithic fragments.

Sample	Point-count composition in volume percent										QtFL			Normative QtF*L*		
	Q _{nu}	Q _u	Q _p	K-feld	Plagio	Chert	RF	Mica	Matrix	Total	Qt	F	L	Qt	F*	L*
Js-1	58	6	10	0	0	7	0	17	2	100	100	0	0	72	4	24
Js-2	51	7	32	0	0	8	0	2	0	100	100	0	0	86	2	11
Js-3	57	10	13	0	0	1	0	20	0	100	100	0	0	79	3	18
Js-4	44	6	28	0	0	7	0	15	0	100	100	0	0	76	2	22
Js-5	42	19	11	0	0	8	0	18	3	100	100	0	0	70	4	26
Js-6	47	8	31	0	0	5	0	10	0	100	100	0	0			
Js-7	51	8	27	0	0	1	0	12	0	100	100	0	0			

Q_{nu} = non-undulose monocrystalline quartz; Q_u = undulose monocrystalline quartz; Q_p = polycrystalline quartz; RF = rock fragments.

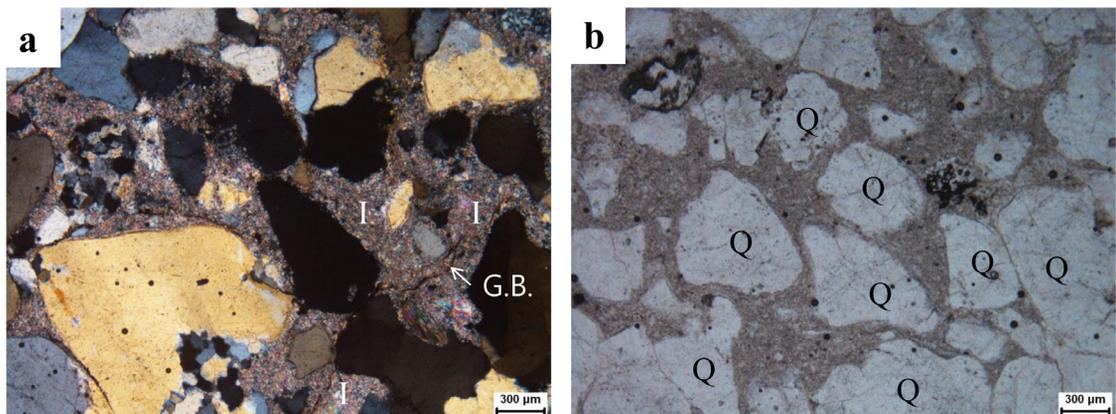


Fig. 2. Photomicrographs of Jangsan quartzite showing textural relationships between preserved detrital grains and pseudomatrix. Fields of view are 2 mm. (a) Pseudomatrix (labelled 'I') is an interstitial, sand-sized clot representing the labile detrital grain from which it formed. The pseudomatrix preserves relict grain boundaries (labelled 'G.B.'). (b) Detrital grains (labelled 'Q') surrounded by pseudomatrix. This is not a diamictite: the sample is cross-bedded, and the preserved detrital grains are well sorted.

Table 2. Chemical data for Jangsan Formation sandstones (after Kim, 1991).

Sample	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	SrO	ZrO ₂	LOI	Total
Js-1	92.9	4.1	0.08	0.67	0.04	0.01	0.01	0.02	1.31	0.06	0.02	0.00	0.00	0.01	0.69	96.98
Js-2	92.5	4.7	0.04	0.5	0.04	0.00	0.00	0.02	0.78	0.05	0.02	0.00	0.00	0.01	0.97	99.64
Js-3	95.4	3.0	0.58	0.01	0.01	0.02	0.00	0.01	1.02	0.07	0.03	0.00	0.00	0.01	0.39	100.57
Js-4	94.4	3.0	0.75	0.05	0.03	0.02	0.00	0.02	0.67	0.06	0.03	0.00	0.00	0.01	0.76	98.81
Js-5	92.6	4.2	0.76	0.09	0.03	0.03	0.00	0.01	1.26	0.06	0.03	0.00	0.00	0.01	0.88	99.92
Median	92.9	4.1	0.6	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0		

의 규암은 구성 광물이 비교적 간단하여 기원지, 풍화작용, 조구조 환경 등에 대한 더 자세한 정보를 얻어내는 데 어려움이 있기 때문에 다른 종류의 사암에 비하여 연구가 덜 되어 있는 편이다. 하지만 우리가 흔히 규암으로 부르는 사암에는 정규암이 아닌 속성작용 기원의 규암이 있으므로 이에 대한 연구를 통해 퇴적물에 관련된 더 많은 정보를 얻을 수 있다.

이상에서 살펴본 바와 같이 원래 장석질 사암이나 암편질 사암에서 변질을 쉽게 받는 입자들이 가 기질로 변질이 되었을 경우 이들의 변질작용을 고려하지 않고 기질로 취급을 한다면 석영-장석-암편(QFL 또는 QFR) 도표에서 석영사암으로 잘못 도시될 것이다. 또한 이를 토대로 퇴적물의 기원지, 조구조 환경, 퇴적환경 및 퇴적작용에 대하여 잘못된 해석을 할 수 있다. 이 논평에서는 이러한 점을 고려하여 Kim (1991)이 보고한 장산층 사암의 조성을 예로 들며 기질의 중요성을 검토하고자 한다.

3.2 장산층의 광물 및 화학 조성

Kim (1991)은 태백시 동점역 부근에 분포하는 장산층 사암 7개 시료의 입자 조성과 5개 시료의 주요 원소 화학조성을 보고하였으며, 이 자료는 표 1과 2에 제시되어 있다. Yun (1978)은 장산층 사암이 세립 조립질 모래로 구성되어 있으며, 거의 우유빛 백색에서 회색, 그리고 약한 핑크색 석영으로만 이루어진 정규암이고 입자들은 아각-원마상(subangular-rounded)을 나타내며, 세립의 석영과 견운모(sericite)로 교결되어 있다고 기술하였다. Yun (1978)의 기술과 같이 표 1에 의하면 장산층 사암에는 장석이 거의 관찰되지 않으며, 암편 역시 약간의 처어트 암편 외에는 관찰되지 않는다. Kim (1991)은 운모의 함량이 평균 13% 되는 것으로 보고하였는데, Cheong (1969)은 장산

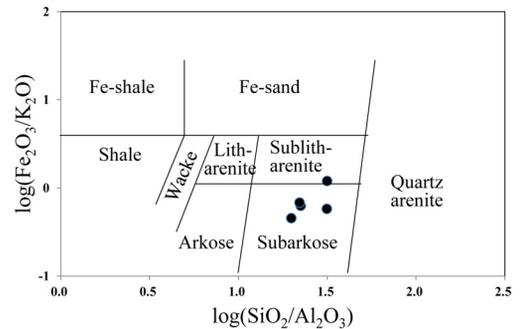


Fig. 3. Geochemical classification of Jangsan sandstone (after Herron, 1988). Four of five samples plot in the subarkose field and one sample plots in the sublitharenite field.

층 사암이 주로 중립질 모래로 구성되어 있으며 매우 소량의 처어트 입자가 관찰되고, 입간 물질로 약 30%의 견운모가 산출된다고 하였다.

이상과 같이 장산층 사암에는 석영 입자 이외에도 상당한 양으로 산출하는 견운모의 존재가 보고되었지만 견운모의 존재에 대하여는 더 구체적으로 고려되거나 해석되지 않았다. 그런데 이처럼 약 30% 정도까지 견운모가 산출한다는 것은 이들 견운모가 퇴적 당시 모래질 퇴적물의 구성 성분이었던 점토질 물질로부터 기인한 것이 아니라 다음과 같은 이유로 속성작용 동안 생성된 이차 기질, 즉 가기질로부터 유래된 것으로 해석할 수 있다. (1) 세립질의 퇴적물이 높게 산출하는 것은 규암이 퇴적되는 퇴적학적 과정으로는 설명하기 어렵다. 장산층 사암은 과상으로 산출하기도 하지만 평판사층리와 곡사층리가 발달되어 있는데, 이와 같이 유수에 의하여 밀집으로 쌓인 퇴적물에는 현생의 모래 퇴적물의 예(Visher, 1969)를 볼 때, 일차적인 기질로 산출하는 세립질 퇴적물의 양은 최대 4%에 불과하다. (2) 이들 견운모

는 산출하는 조직적 특성(Dickinson, 1970)을 고려하면 속성작용의 산물로 보아야 한다. 장산층의 견운모질 기질은 쇠설성 입자의 사이에 입자의 크기와 비슷한 공간을 차지하면서 흔히 분포하며, 기질 본체에서 가늘게 뻗은 돌기들이 인접한 견고한 석영 입자들 사이로 연장되어 있다(그림 2a). 또한 암편의 조직이 희미하게 보이는 견운모질 기질에 분급이 좋은 석영 입자들이 떠 있는 상태로 나타나기도 한다(그림 2b). 이러한 점을 고려할 때 장산층 사암의 기질은 퇴적물이 쌓인 후에 변질되어 생성된 것으로, 견운모질 기질의 함량으로 볼 때 현재 장산층 사암은 규암이 아닌 잡사암으로 분류된다. 규암으로 여겨지는 장산층 사암은 세립질의 석영과 견운모가 혼합된 기질이 쇠설성 석영 입자들을 견고히 묶어 비교적 단단한 암석으로 변화시킨 것으로 해석된다. 이에 따라 장산층 사암이 깨질 때 쇠설성 입자를 가로지르며 깨져 규암으로 명명할 수는 있으나, 이 암석을 사용하더라도 그 성인을 알고 사용하는 것이 바람직한 것으로 제안할 수 있다.

Kim (1991)이 보고한 장산층 사암의 화학 조성은 표 2에 제시되어 있다. SiO₂ 함량은 중앙값이 92.9 wt%, Al₂O₃ 함량은 4.1 wt%, 그리고 K₂O 함량은 1.0 wt%를 나타낸다. 다음으로는 Fe₂O₃ 함량(총 Fe산화물)은 0.80 wt%를 차지한다. 장산층 사암의 SiO₂ 함량은 Pettijohn *et al.* (1987)이 보고한 석영사암의 평균적인 SiO₂ 함량(95.4 wt%)보다는 약간 낮은 값을

가진다. 화학 조성을 이용하여 암편질 사암과 장석질 사암의 분류에 잘 적용되는 Herron (1988)의 사암 분류에 의하면 장산층 사암은 석영사암이라기 보다는 대부분 비석회질의 준아코스(준장석질 사암)이며 일부 준암편질 사암으로 분류된다(그림 3).

이와 같이 장산층 사암에 산출하는 견운모의 기질이 속성작용/저변성작용의 산물이라는 해석을 바탕으로 편광현미경 관찰에 의한 모드 조성과 지화학적 조성을 결합하여 퇴적될 당시 퇴적물 원래의 조성을 유추해 볼 수 있다. Kim (1991)이 제시한 사암의 모드 조성을 이용한 Q_tFL 도표(그림 4a; Dickinson and Suczek, 1979; Dickinson, 1985)에는 장산층의 사암 조성이 Q_t 꼭지점에 찍힌다. 이 도표에서 분석된 7개의 장산층 사암 시료 모두는 조구조 환경으로 안정 지괴 영역에 도시가 된다. 반면에 지화학 분석 자료를 이용하여 norm 광물 조성(Q_tF^{*}L^{*})을 분석하면 쇠설성 골격 입자에만 중심을 둔 Q_tFL 도표의 결과와 달리 퇴적물의 원래 조성을 유추해 볼 수 있다(Cox and Lowe, 1996 참조). 여기서 Q_t는 현미경 관찰에 의하여 직접 분석된 양을 가리킨다. 반면 F^{*}는 원 퇴적물에 들어있는 장석의 함량을 대변한다고 할 수 있다. 그런데 F^{*}는 원 퇴적물에 들어 있는 장석의 함량 보다는 약간 더 과장되어 나타날 수도 있는데 그 이유는 분석된 K₂O가 모두 장석에서 유래가 되었다고 할 수 없기 때문이다. 약간의 K₂O는 화산암편에 들어 있는 미세반정(microphenocryst)으로 존재하

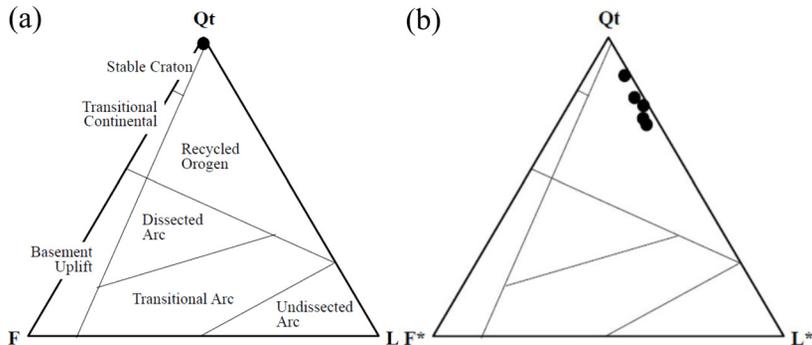


Fig. 4. Petrologic data for Jangsan Formation sandstone of Kim (1991). Complete data are shown in Table 1. Ternary diagram fields are from Dickinson and Suczek (1979) and Dickinson (1985). (a) Petrographic point-count data. Data points plot in a stable craton field. (b) Normative data combining petrographic and chemical analysis for 5 chosen samples. F^{*} and L^{*} represent preserved detrital grains plus grains reconstructed by normative analysis. There is a marked difference between the tight clustering of the points in Fig. 1a and the much more variable and immature compositions of the samples plotted in Fig. 1b. Restored detrital compositions plot in the more lithic-rich recycled orogen field, indicating derivation of the sediment from an uplifted, metamorphosed continental hinterland.

거나 또는 퇴적암편의 일라이트에 들어있을 수 있다. L^* 는 원 퇴적물에 들어있는 암편의 양을 대변한다. 장석이 아닌 모든 쇄설성 입자들이 L^* 에 포함된다. 만약 Q, FL 도표에서 고려하지 않은 운모나 그밖의 쇄설성 입자들이 있다가 2차 기질로 바뀌었다면 이들의 존재는 현미경 관찰에서 알아볼 수 있기 때문에 이 문제를 줄이기 위하여 화학 조성 자료에서 보정해주면 된다. Cox and Lowe (1996)가 제안한 normative 분석 기법을 적용하여 본 결과 변질을 받기 이전의 장산층 퇴적물 조성은 장석(F^*)과 암편(L^*)를 모두 함유하고 있었던 것으로 나타난다(그림 4b). 추정된 장산층 사암의 원래 조성은 장석이 모래 입자의 약 4%까지 존재하였을 것이며 대부분이 알칼리 장석이었을 것이다(표 1). 특히 암편은 모래 입자 중 26% 정도까지 상당량을 차지했을 것으로 추정된다. 이상의 norm 광물 조성을 이용하면 장산층의 퇴적환경이 재동이 활발히 일어나는 비교적 고에너지 환경인 해빈과 천해의 환경이었다는 기존의 해석(Yun, 1978; Woo *et al.*, 2006)을 재고할 필요성이 제기되며, 이에 대하여는 추가 연구가 필요하다.

장산층 사암과 같이 흔히 규암으로 불리는 쇄설성 사암의 원래 사암 조성이 석영사암이 아니었다는 예는 Cox and Lowe (1995, 1996)와 Cox *et al.* (2002)에 의해서도 보고되었다. 이 저자들은 현재 규암으로 분류가 된 이들 사암들로부터 해석한 기원지와 조구조 환경이 층서적·지질학적인 다른 관찰 사항들과는 많은 차이가 있다는 문제점을 지적하였으며, 사암의 모드 조성과 지화학 분석 결과를 종합하여 원래 퇴적물의 norm 조성을 복원해 본 결과 이들 퇴적물은 흔히 여겨지던 강괴 내부의 안정한 기원지에서 유래가 된 것이 아니고 조산대로부터 공급이 되었다는 것을 밝힐 수 있었다.

이렇게 현재 보존된 사암(규암)의 입자 조성으로 퇴적될 당시의 원래 퇴적물의 특성이 아닌 위조된 퇴적물의 성숙도와 이로부터 유추되는 강괴 조구조 환경의 해석은 결국 이들 퇴적물이 성숙된 석영사암으로 분류되어 조구조적으로 비활성연변부나 대륙붕 환경에 쌓였던 퇴적물이었다는 잘못된 해석을 야기시킬 수 있다. 실제로 Cox *et al.* (2002)은 연구한 규암과 함께 산출하는 화산암과 ophiolite의 존재 증거와 규암의 norm 광물 조성을 분석한 결과 조사된 규암은 안데스형(Andean-type) 화산호와 조산

운동을 겪은 intra-arc 분지에 쌓였던 것으로 재해석하였다. 또한 기원지의 정보가 속성작용 동안 기질의 생성으로 파괴된다는 점을 인식하지 못하면 고지리를 복원하는 데에도 상당한 영향을 받을 수 있다. 예를 들면 조사 결과 기원지에 근접한 곳에 쌓인 퇴적물에는 장석이 거의 산출되지 않은 반면, 기원지에서 먼 곳에 쌓인 퇴적물에서 장석이 산출된다면 아마도 고지의 조산대 지역의 화강암 기반암이 기원지에서 먼 곳에 국부적으로 노출되었을 것이라고 잘못 해석할 수 있다. 또한 일반적으로 사암의 속성작용은 변질을 받기 쉬운 쇄설성 입자들이 점토광물과 산화물 혹은 부서지거나 분해가 일어난 세립질의 파편으로 와해가 되는 것을 조장하기에 변질된 조성으로 기원지의 화학적 풍화작용의 영향을 과대 해석하는 결과를 낳기도 한다(Carrigy and Mellon, 1964; Whetten and Hawkins, 1970; McBride, 1985). 이에 더하여 속성작용을 통하여 남아있는 모래 입자들의 광물 성숙도를 증가시킨다(Helmold, 1985)는 점을 항상 염두에 두어야 한다. 따라서 사암의 조성을 분석할 때에는 속성작용에 의하여 변질된 사암의 조성인지 여부를 신중히 검토하여야 한다.

이 논평에서는 쇄설성 퇴적물의 조성에서 기질의 중요성과 퇴적물 조성의 해석에 속성작용의 영향을 고려하여 기원지, 풍화작용, 퇴적환경 및 조구조 환경의 해석에 좀더 주의 깊게 접근을 하여야 한다는 점을 강조하고자 한다.

4. 결 론

이 논평에서는 기존에 보고된 지질학적인 자료와 야외 관찰 증거를 종합하여 지금까지 태백산 분지에 퇴적된 전기 고생대의 최하부 지층으로 전기 캄브리아기에 쌓였다고 알려진 장산층의 퇴적시기를 신원생대(800~562 Ma)로 새롭게 제안한다. 장산층의 새로운 퇴적연대는 장산층과 묘봉층의 부정합 관계, 장산층 하부에 부정합으로 존재하는 800~900 Ma에 변성작용을 받은 울리층군의 역이 장산층의 기저역암에 산출한다는 점, 그리고 선캄브리아누대의 화강암질 암석과 장산층 사이에 발달한 압쇄대의 생성시기가 562 Ma라는 지질 연대 자료를 근거로 한 것이다.

또한 장산층의 사암이 규암으로 분류되어 얼핏 석영으로만 이루어진 정규암일 것으로 여겨질 수 있

지만, Kim (1991)에 의하여 보고된 장산층 사암의 암석현미경 관찰 자료와 지화학 분석 자료를 종합하여 재해석한 결과 장산층 사암의 원래 조성은 준장석질 사암과 준암편질 사암으로 분류된다. 이렇게 재해석된 장산층 사암의 조성은 장산층 사암이 쌓인 퇴적작용, 퇴적환경 및 조구조 환경을 재해석할 필요가 있음을 시사한다.

사 사

이 연구는 2014년도 정부(교육과학기술부)의 지원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(과제번호: NRF-2014R1A2A2A01005404)에 의하여 지원되었다. 장산층 야외 조사에 도움을 제공한 전 한국광물자원공사의 손길상 님, 이 논문을 심사하여 유익한 조언을 해주신 편집위원님과 김정찬 박사님께 감사드린다.

REFERENCES

- Abdel Wahab, A., 1998, Diagenetic history of Cambrian quartzarenites, Ras Dib-Zeit Bay area, Gulf of Suez, eastern desert, Egypt. *Sedimentary Geology*, 121, 121-140.
- Carrigy, M.A. and Mellon, G.B., 1964, Authigenic clay mineral cements in Cretaceous and Tertiary sandstones of Alberta. *Journal of Sedimentary Petrology*, 34, 461-472.
- Cheong, C.H., 1969, Stratigraphy and paleontology of the Samcheog coalfield, Gangweon-do, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 5, 13-56.
- Cheong, C.H., Lee, D.S., Um, S.H. and Chang, K.H., 1973, Investigation of Geological Classification of Korea. Ministry of Science and Technology, R-73-51, 68 p (in Korean with English Abstract).
- Cox, R. and Lowe, D.R., 1995, Compositional evolution of coarse clastic sediments in the southwestern United States. *Journal of Sedimentary Research*, 65, 477-494.
- Cox, R. and Lowe, D.R., 1996, The effects of secondary matrix on the analysis of sandstone composition, and a petrographic-chemical technique for retrieving original framework grain modes of altered sandstones. *Journal of Sedimentary Research*, 66, 548-558.
- Cox, R., Martin, M.W., Comstock, J.C., Dickerson, L.S., Ekstrom, I.L. and Sammons, J.H., 2002, Sedimentology, stratigraphy, and geochronology of the Proterozoic Mazatzal Group, central Arizona. *Geological Society of America Bulletin*, 114, 1535-1549.
- Cummins, W.A., 1962, The greywacke problem. *Geological Journal*, 3, 51-72.
- Dickinson, W.R., 1970, Interpreting detrital modes of graywacke and arkose. *Journal of Sedimentary Petrology*, 40, 695-707.
- Dickinson, W.R., 1985, Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstone. In: Zuffa, G.G. (ed.), *Provenance of Arenites*. Dordrecht, D. Reidel, 333-361.
- Dickinson, W.R., Ojakangas, R.W. and Stewart, R.J., 1969, Burial metamorphism of the Late Mesozoic Great Valley Sequence, Cache Creek, California. *Geological Society of America Bulletin*, 80, 519-526.
- Dickinson, W.R. and Suczek, C.A., 1979, Plate tectonics and sandstone compositions. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 63, 2164-2182.
- Geological Investigation Corps of the Taebaeksan Region, 1962, *Geologic Atlas of Taebaeksan Region*. Geological Society of Korea, 107 p.
- Geological Society of Korea, 1999, *Geology of Korea*. Geological Society of Korea, Sigma Press, Seoul, 802 p (in Korean).
- Graham, S.A., Ingersoll, R.V. and Dickinson, W.R., 1976, Common provenance for lithic grains in Carboniferous sandstones from Ouachita Mountains and Black Warrior Basin. *Journal of Sedimentary Petrology*, 46, 620-632.
- Groshong, R.H. Jr., 1988, Low-temperature deformation mechanisms and their interpretation. *Geological Society of America Bulletin*, 100, 1329-1360.
- Helmold, K.P., 1985, Provenance of feldspathic sandstones - the effect of diagenesis on provenance interpretation: a review. In: Zuffa, G.G. (ed.), *Provenance of Arenites*. Dordrecht, D. Reidel, 139-163.
- Herron, M.M., 1988, Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core and log data. *Journal of Sedimentary Petrology*, 58, 820-829.
- Howard, J.L., 2005, The quartzite problem revisited. *Journal of Geology*, 113, 707-713.
- Kim, J.H. and Kee, W.S., 1991, Geological structures of the Imgye area, Kangweondo, Korea. *Journal of the Korean Institute of Mining Geology*, 24, 43-55 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.H., Koh, H.J. and Kee, W.S., 1989, The Okdong Fault. *Journal of the Korean Institute of Mining Geology*, 22, 285-291 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.Y., 1991, Stratigraphy of the Myeonsan Formation in Samcheog-gun, Kangwon-do and Ponghwagun, Kyongsangbuk-do. *Journal of the Geological Society of Korea*, 27, 225-245.

- Kim, J.Y. and Cheong, C.H., 1987, The Precambrian-Cambrian boundary in the east of the Dongjeom fault, Gangweon-do, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 23, 145-158.
- Kim, Y. and Lee, Y.I., 2003, A new Late Proterozoic stratum in South Korea. *Geosciences Journal*, 7, 47-52.
- Kim, Y. and Lee, Y.I., 2006, Early evolution of the Duwibong Unit of the lower Paleozoic Joseon Supergroup, Korea: A new view. *Geosciences Journal*, 10, 391-402.
- Kobayashi, T., 1966, The Cambrian-Ordovician formations and faunas of South Korea. Part X. stratigraphy of Chosen Group in Korea and south Manchuria and its relation to the Cambro-Ordovician formation of other areas. Section A. The Chosen Group of South Korea. *Journal of Science, University of Tokyo*, 16, 1-84.
- Kuenen, Ph.H., 1966, Matrix of turbidites: experimental approach. *Sedimentology*, 7, 267-297.
- Lee, D.-S. (Ed.), 1987, *Geology of Korea*. Geological Society of Korea, Kyohak-sa, Seoul, 514 p.
- Lee, H.S. and Chough, S.K., 2011, Depositional processes of the Zhushadong and Mantou formations (Early to Middle Cambrian), Shandong Province, China: roles of archipelago and mixed carbonate-siliciclastic sedimentation on cycle genesis during initial flooding of the North China Platform. *Sedimentology*, 58, 1530-1572.
- Lee, S.M. and Kim, H.S., 1984, Metamorphic studies on the so-called Yulri and Weonnam Groups in the Mt. Taebaeg area. *Journal of the Geological Society of Korea*, 20, 195-214.
- Lee, Y.I., Choi, T., Lim, H.S. and Orihashi, Y., 2012, Detrital zircon U-Pb ages of the Jangsan Formation in the northeastern Okcheon belt, Korea and its implications for material source, provenance, and tectonic setting. *Sedimentary Geology*, 282, 256-267.
- Lee, Y.I., Choi, T., Lim, H.S. and Orihashi, Y., 2016, Detrital zircon geochronology and Nd isotope geochemistry of the basal succession of the Taebaeksan Basin, South Korea: Implications for Gondwana linkage of the Sino-Korean (North China) block during the Neoproterozoic-early Cambrian. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 441, 770-786.
- McBride, E.F., 1985, Diagenetic processes that affect provenance determinations in sandstone. In: Zuffa, G.G. (ed.), *Provenance of Arenites*. Dordrecht, D. Reidel, 95-113.
- Parnell, J., Mark, D.F., Frei, R., Fallick, A.E. and Ellam, R.M., 2014, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of exceptional concentration of metals by weathering of Precambrian rocks at the Precambrian-Cambrian boundary. *Precambrian Research*, 246, 54-63.
- Pettijohn, E.J., 1975, *Sedimentary Rocks* (3rd Ed.). Harper & Row, New York, 628 p.
- Pettijohn, E.J., Potter, P.E. and Siever, R., 1987, *Sand and Sandstone*. Springer-Verlag, New York, 618 p.
- Pittman, E.D., 1979, Recent advances in sandstone diagenesis. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 7, 39-62.
- Smyth, H.R., Hall, R. and Nichols, G.J., 2008, Significant volcanic contribution to some quartz-rich sandstones, East Java, Indonesia. *Journal of Sedimentary Research*, 78, 335-356.
- Visher, G.S., 1969, Grain size distribution and depositional processes. *Journal of Sedimentary Petrology*, 39, 1074-1106.
- Walker, T.R., 1974, Formation of redbeds in moist tropical climates: a hypothesis. *Geological Society of America Bulletin*, 85, 633-638.
- Went, D.J., 2013, Quartzite development in early Palaeozoic nearshore marine environments. *Sedimentology*, 60, 1036-1058.
- Whetten, J.T. and Hawkins, J.W., 1970, Diagenetic origin of greywacke matrix materials. *Sedimentology*, 15, 347-361.
- Wilson, M.D. and Pittman, E.D., 1977, Authigenic clays in sandstones: recognition and influence on reservoir properties and paleoenvironmental analysis. *Journal of Sedimentary Petrology*, 47, 3-31.
- Wilson, M.D. and Tillman, R.W., 1974, Diagenetic destruction of feldspar and genesis of clay: their influence on sandstone classification and grain size analysis. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 5, 130-131.
- Woo, J., Shinn, Y.J., Kwon, Y.K. and Chough, S.K., 2006, The Jangsan and Myeonsan formations (Early Cambrian) of the Taebaek Group, mideast Korea: depositional processes and environments. *Geosciences Journal*, 10, 35-57.
- Yun, H.S., 1983, K-Ar ages of micas from Precambrian and Phanerozoic rocks in the northeastern part of Republic of Korea. *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, 63, 295-300.
- Yun, S., 1978, Petrography, chemical composition, and depositional environments of the Cambro-Ordovician sedimentary sequence in the Yeonhwa I Mine area, southeastern Taebaegsan region, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 14, 145-174.

Received : December 24, 2015

Revised : February 12, 2016

Accepted : February 14, 2016