

옥천 누층군 탄산염암의 탄소 안정동위원소 분석을 통한 한반도 눈덩이 지구 가능성의 시험

류영준 · 안진호*

서울대학교 지구환경과학부

요 약

한반도의 옥천 누층군은 변형 및 변성 작용의 영향을 받아 층서적 해석이 어려운 지층으로, 그 퇴적 시기와 판구조론적 환경에 있어 활발한 논쟁이 이어지고 있다. 최근 제시된 신원생대 설(Choi *et al.*, 2012)은 남중국지괴와의 대비를 바탕으로 눈덩이지구 사건을 통한 옥천 누층군의 퇴적을 주장하였다. 이 가설에서 황강리층과 금강석회암층은 각각 빙하에 의해 생성된 다이아미타이트와 빙하기 이후 퇴적된 덮개 탄산염암이라 해석되었으나, 아직까지 금강석회암층에 대해서는 체계적인 연구가 이루어지지 않았다. 이번 연구에서는 X선 형광 분석과 탄소 및 산소 안정동위원소 비 측정을 중심으로 옥천, 괴산, 제천, 충주호의 지역에서 산출되는 금강석회암층 시료를 분석하였다. 분석된 시료들은 암석화학적 조성 및 변성정도에 따라 탄소 및 산소 안정동위원소 비 교차도에서 서로 다른 범위에 위치하였다. 백운암 시료들은 기존에 보고된 전형적인 덮개 탄산염암과 비슷한 동위원소 비(약 $-3 \sim -5\%$)를 보였으나, 칼슘-규산염암과 대리암의 탄소 안정동위원소 비는 더 결핍되었다. 이런 결핍은 변성과정과 관련된 동위원소비 변화로 설명될 수 있으나, 금강석회암층의 기원에 대한 정확하고 정량적인 해석을 위하여 보다 심층적인 동위원소화학 및 암석화학적 연구가 요구된다.

주요어: 옥천 누층군, 금강석회암, 눈덩이 지구, 덮개 탄산염암, 탄소 및 산소 안정동위원소

Yeongjun Ryu and Jinho Ahn, 2016, A test for Snowball Earth hypothesis in Korean peninsula by analyzing stable carbon isotopes of carbonates from the Okcheon Supergroup. Journal of the Geological Society of Korea. v. 52, no. 6, p. 829-845

ABSTRACT: Stratigraphic interpretation for Okcheon Supergroup in Korean peninsula is difficult due to deformation and metamorphism. The sedimentation ages and tectonic environments have been under active debates. Recently Choi *et al.* (2012) hypothesized that the part of Okcheon Supergroup formed during the Neoproterozoic through Snowball Earth event based on correlation with stratigraphy in South China Craton. In this hypothesis, the Hwanggangni and Geumgang Limestone formations were interpreted as glaciogenic diamictite and post-glaciogenic Cap Carbonates, respectively. Despite of its importance, however, the Geumgang Limestone formation has not been well investigated. In this study, we conducted a series of geochemical analyses for the Geumgang Limestone formation. Especially, we focused on X-Ray Fluorescence analysis, and isotopic measurements of carbon and oxygen for carbonates that occur in Okcheon, Goesan, Jaechon and Chungju Lake areas. In the cross-plot diagram of carbon and oxygen stable isotopes, the analyzed samples are grouped in several distinct ranges according to their rock chemistry and degree of metamorphism. Dolostone samples have similar isotopic values with those from other typical Cap Carbonates ($-3 \sim -5\%$), while calc-silicates and marbles which experienced strong metamorphism show more depleted carbon isotopic values. Isotopic alteration during metamorphism may explain the isotopic depletion, but further intensive isotopic and petrological studies are required for accurate and quantitative interpretation of the origin of the Geumgang Limestone.

Key words: Okcheon supergroup, Geumgang limestone, snowball earth, cap carbonates, carbon and oxygen stable isotopes

(Yeongjun Ryu and Jinho Ahn, Seoul National University School of Earth and Environmental Science, Seoul 08826, Republic of Korea)

* Corresponding author: +82-2-880-6726, E-mail: jinhoahn@gmail.com

1. 서 언

옥천 누층군은 한반도의 북동-남서방향을 가로지르는 습곡-단층대로서, 북동 방향으로는 경기지괴에, 남서 방향으로는 영남지괴에 닿아 있으며, 너비는 50 km 이상, 길이는 350 km 이상이다(Choi *et al.*, 2012). 옥천 누층군은 1960년대 이후 국내 지질학자들에 의해 연령 측정 등의 연구가 진행되었으나 퇴적 시기에 대해서는 아직 논란이 많다. 신원생대에서 고생대에 이르는 기간 동안 옥천누층군의 퇴적이 이루어졌을 것이라 여겨지지만, 퇴적층에서 발견되는 화석이 드물고, 변형과 변성작용의 정도가 심해 구조적 해석과 동위원소 연대 측정이 어려운 점 등은 아직도 학계에서 옥천 누층군의 연대로 활발한 논쟁이 되는 이유이다(Na, 2009). 옥천누층군의 퇴적시기에 대해서는 선캄브리아대(Precambrian)로 보는 주장과(Reedman and Fletcher, 1976; Choi *et al.*, 2012) 후기 캄브리아대(Post-Cambrian)로 보는 두 가지의 의견으로 나뉘어진다(Lee *et al.*, 1998; Yi *et al.*, 2000; Suzuki *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2009). 옥천누층군의 선캄브리아대 퇴적설은 미화석군들의 발견과 층서적 유사성을 주된 논거로 삼는다. 이는 이후 연령 측정을 바탕으로 한 연구들에서 반박되어져 왔으며, 최근까지의 연구들은 후기 캄브리아대 퇴적설에 무게를 두고 있다. 그러나 최근 Choi *et al.* (2012)에서 옥천 누층군의 중부(문경에서 수안보에 이르는 지역) 및 상부(수안보와 충주 사이 지역)에 속하는 지역인 충청 분지에서 발견되는 금강석회암층을 신원생대 덮개 탄산염(carbonates) 퇴적층이라 해석하고, 옥천 누층군이 남중국 지괴(South China craton)의 연장선에 존재한다고 주장함으로써 다시금 옥천 누층군의 선캄브리아대 퇴적설이 학계의 관심을 받게 되었다.

옥천 누층군은 충주호를 중심으로 계명산층과 향산리백운암층, 대향산규암층, 문주리층, 이후 황강리층과 금강 석회암층, 명오리층이 서에서 동쪽 방향으로 나란히 분포하고 있다(Na, 2009; Choi *et al.*, 2012). 일련의 변성암들에 대한 저어콘 연령측정 결과들은 계명산층에서 향산리백운암층, 대향산규암층에 이르는 층서가 정합적인 관계로, 신원생대 토니아기(1,000 Ma ~ 850 Ma)에서 고생대 데본기(419.2 Ma ~ 358.9 Ma)이후의 퇴적 기간을 포함함을 밝혔

다(Cho *et al.*, 2004; Kim *et al.*, 2006; Ryu and Kim, 2009; Park *et al.*, 2011). 문주리층 이후의 층서에 대해서는 가장 특징적인 암상 구조를 가진 황강리층을 중심으로 해석이 이루어졌다. 황강리층은 세립질 기질(matrix) 내에 수 센티미터 정도의 너비를 가진 암석들이 역(gravel)으로 존재하는 건층으로 수 백 킬로미터 이상의 좋은 연속성을 가진다. 황강리층에 존재하는 역들에 대해 Suzuki *et al.* (2006)에서는 370 Ma의 연령을 보이는 화강편마암체를 보고하였으며, Kim *et al.* (2009) 또한 415 Ma의 연령을 보고하였다. 이들 연령 측정값들은 황강리층의 퇴적 시기가 고생대 데본기(419.2 Ma ~ 358.9 Ma) 이후임을 의미한다. Lee *et al.* (1998)에서는 황강리층 석회암 역에서 발견된 코노돈트가 주로 오르도비스기에 산출되는 화석이라는 사실과 앞선 연구들의 황강리층에 대한 연령 측정에 근거해 황강리층의 생성 시기를 석탄-페름기로 추정하였다. 또한 함력천매암질 황강리층의 클라스트의 불량한 분급과 조흔(striation), 다각형의 면(facet) 등을 근거로 황강리층의 원암이 빙하기원 다이아미타이트(diamictite)임을 추정, 빙역암(tillite)으로 당시 해성 빙하퇴적에 의해 곤드와나 대륙(Gondwana Continent)의 일부를 구성하던 한반도에서 옥천 누층군이 생성되었음을 주장하였다. 반면, Choi *et al.* (2012)에선 동일하게 황강리층을 빙하기원의 층서로 해석하나, 남중국지괴와의 연관성을 바탕으로 황강리층과 금강석회암층의 퇴적 시기를 각각 신원생대 크라이오제니아기(720 ~ 635 Ma)와 에디아카라기(635 ~ 541 Ma)라 가정하며, 다이아미타이트(diamictite)와 덮개 탄산염암 층으로 해석하였다(표 1). 이는 앞선 연대 측정결과(Cho *et al.*, 2004; Kim *et al.*, 2006; Ryu and Kim, 2009; Park *et al.*, 2011)를 바탕으로 하는 고생대 기원설과는 상반되는 의견으로, 체계적인 검증은 필요로 하고 있다.

금강석회암층은 이러한 옥천누층군의 층서에 중요한 단서를 제공할 수 있다. 금강석회암층 역시 황강리층을 따라 좋은 연속성을 보이며, 2~10 m 정도의 비교적 일정한 두께를 가진다(Na, 2009; Choi *et al.*, 2012). 황강리층과 같이 분급이 좋지 않은 암상에 연속하여 나타나는 금강석회암층은 퇴적 환경의 급변을 의미할 수 있으며, 중요한 지질학적 사건들과의 연관성을 나타낼 수 있다. 옥천 누층군의 체계적인 층서의 확립을 위해서 금강석회암층의 퇴적 환

Table 1. Comparison of the stratigraphy of Chungcheong basin in Korea with Nanhua basin in South China (Choi *et al.*, 2012).

Age	Chungcheong Basin (Korea)		Nanhua Basin (South China)		Tectonic events in South China	Major lithology
			Yangtze Gorge	Jiangnan Ridge		
Ediacaran	Gounni Formation		Dengying/Liuchapo Fm (542-551 Ma)	Piyuancun Fm	deglaciation	limestone, dolostone, marble
	Seochangni Member		Doushantuo Fm (551-635 Ma)	Lantian Fm		dark gray to black slate/phyllite
	Myeongori Formation	Geumgang Limestone Member				limestone & dolomite
Cryogenian	Suanbo Group		Nantuo Fm (656-635 Ma)	Leigongwu Fm/ Nantuo Fm	Cryogenian glaciation	diamictite
		Hwanggangni Formation	Xiangmeng/Datangpo Fm (663-654 Ma)	Xiangmeng Fm/ Dongshanfeng Fm		
			Changgan/Fulu Guiping/Tiesiao Fm (725-663 Ma)	Xiuning Fm/ Zhitang Fm		
		Munjuri Formation	Liantuo Fm/Banxi Gp (748 Ma)		2 nd rift stage (820-720 Ma)	volcanics, slate, phyllite & schist
		Daehyangsan Quartzite				milky white quartzite
		Hyangsanni Dolomite				dolostone, limestone
	Chungju Group	Gyemyeongsan Formation	Sibao/Lengjiaxi/Shuangqiaoshan Gp (825-842 Ma; 878-879 Ma)		2 nd rift stage (850-820 Ma)	schist, phyllite, volcanics, quartzite
Paleo-Proterozoic	Busan/Bakdallyeong Gneiss Complex					migmatic banded gneiss, schist, quartzite

경은 필히 해석되어야 할 부분이나 아직 이에 대한 연구는 미흡하다. 이번 연구는 옥천 누층군 금강석회암의 탄소 안정동위원소 비를 중점적으로 측정함으로써 옥천 누층군의 과거 퇴적 환경에 대한 단서를 찾는데 목적을 두었다. 특히, 신원생대 눈덩이 지구 가설과의 부합 여부를, 덮개 탄산염암이 가지는 특징적으로 결핍된 탄소 안정동위원소 비 값(약 -3 ~ -5‰)과 비교하여 가설의 유효성을 검증하였다.

탄산염암 층의 탄소 동위원소 비는 중요한 고기후 프록시 자료로 사용될 수 있으므로, 이번 연구로부터 얻어진 자료는 앞으로 옥천누층군의 퇴적환경을 추론하는 데 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 생각된다. 본 연구에서는 Choi *et al.* (2012)에서 제시한 옥천누층군 충청 분지의 일곱 지역에서 채취한 금강석회암층 시료의 탄소 동위원소 비를 분석하였으며, 편광현미경 관찰 및 X선 형광분석(X-ray fluorescence

analysis), X선 회절분석(X-ray diffraction)등의 방법을 통해 시료의 조성을 파악하였다. 본 연구는 처음으로 한반도 내의 덮개 탄산염암의 존재 가능성을 시험한 연구이며, 측정된 값들에 대한 해석은 이 글의 후반부에서 다룰 것이다.

2. 눈덩이지구 가설

신원생대 크라이오제니아가 동안 지구는 세 차례 정도의 극심한 빙하기를 겪었을 것으로 여겨진다(Hoffman *et al.*, 1998). 고지자기적 분석에 따라 당시 적도 부근에 위치하였을 것으로 추정되는 대륙들에서도 신원생대 빙하기원의 다이아믹타이트 퇴적층이 나타나는 것을 확인하였으며, 이들 다이아믹타이트 층에 연속하여 나타나는 덮개 탄산염암(cap carbonate)의 존재는 신원생대 빙하기의 특징적인 퇴적구조로 주목받았다. 눈덩이지구 가설(Snowball earth hypothesis)은 이러한 퇴적구조 변화를 포함하여, 호상철광층, 스크론티 동위원소 값 등의 신원생대 빙하기 프록시(proxy)의 기원을 포괄적으로 설명하는 가설로, 커쉬빙크(Kirschvink)에 의해 처음 제시되었다(Kirschvink, 1992). 눈덩이지구 가설은 런-어웨이 얼음 알베도 되먹임 작용(run-away ice albedo feedback)을 통해 해수면 전체가 얼어붙음과 화산활동에 의해 누적된 대기 이산화탄소에 의한 슈퍼 온실효과(super greenhouse effect)로 해빙이 일어난다는 것을 주된 내용으로 하며, 이후 화학적 풍화작용으로 대기에서 해양으로 공급되는 탄소가 덮개 탄산염암과 같은 구조를 만들어 냈음을 설명한다(Hoffman *et al.*, 1998). 이후 연구들은 신원생대 빙하기와 간빙기 순환의 메커니즘을 비롯한 현재 지구 환경과 비견되는 당시 환경에 대한 생지화학적 특징들을 연구 주제로 삼고 있으며, 전 세계적으로 산출되는 덮개 탄산염암층의 특징들은 각각의 가설을 뒷받침하는 가장 주된 증거로 여겨진다(Kump and Arthur, 1999; Tziperman *et al.*, 2011). 덮개 탄산염암 층의 특징은 분급이 좋지 않은 다이아믹타이트(diamictite)층의 퇴적환경에서 덮개 탄산염암의 퇴적 환경으로의 급격한 변화, 티피 형태의 구조(tepee-like structure), 대롱 형태의 구조(tube structures), 부채모양의 중정석(barite fans)등의 특이한 퇴적구조, 탄소 동위원소 비($\delta^{13}\text{C}$)의 음의 방향으로의 변화

의 세 가지로 요약된다(Jiang *et al.*, 2006). 이중에서도 탄소 동위원소 비의 변화는 가장 집중적인 연구가 이루어진 부분이며, 당시 암석권과 생물권의 변화 및 덮개 탄산염암의 기원에 대한 프록시 자료로써 사용되고 있다(Ridgwell *et al.*, 2003; Rothman *et al.*, 2003; Bartley and Kah, 2004; Olcott *et al.*, 2005; Bjerrum and Canfield, 2011; Mills *et al.*, 2011).

Choi *et al.* (2012)에서 황강리층과 금강석회암층에 대비한 남중국 난후이(Nanhua)분지의 난투오(Nantuo)층과 도우산투오(Doushantuo)층 하부 덮개 탄산염암층은 앞선 여러 연구들을 통해 퇴적 연령이 잘 정립되어 있으며, 퇴적 구조가 잘 보존된 신원생대 마리노안 빙기(Marinoan glaciation)의 다이아믹타이트 층과 덮개 탄산염암층이다(Jiang *et al.*, 2003; Condon *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2008). 마리노안 빙기는 젊은 크라이오제니안 빙기(younger Cryogenian glaciation)로, 빙하기원 퇴적층이 15개의 고대륙(paleocontinents)의 대부분의 지역에서 나타나는 포괄적인 특징을 보인다. 빙상(ice sheet)의 후퇴로 인한 대륙붕과 내륙해의 범람을 통해 형성된 덮개 탄산염암(cap carbonates)이 전 세계적으로 일정한 두께(~ 18 m)로 나타나며(Jiang *et al.*, 2006; Hoffman and Li, 2009), 이들 덮개 탄산염암은 80%이상의 조성이 백운석(dolomite) 광물로써, 잘 적층된 펠로이드(peloid)의 형태로 퇴적되어 존재한다(James *et al.*, 2001). 대부분의 조성이 백운석으로 이루어져 있기에 덮개 탄산염암층은 덮개 백운암(cap dolostone)으로 불리기도 한다. 본 연구에서는 이들 층서에 나타난 특징적인 퇴적 구조와 암석의 조성, 얻어진 탄소 동위원소 비를 우리나라 옥천대 충청 분지의 황강리층과 금강석회암층에서 얻어진 자료에 대해 비교하는 것을 일차적인 목표로 하였다. 이는 한반도에서의 눈덩이지구 사건 기록에 대한 Choi *et al.* (2012)의 주장을 검정함과 동시에, 남중국과는 달리 아직 층서가 잘 정립되지 않은 옥천 누층군의 퇴적 기원에 대한 지구화학적 해석이다.

3. 연구지역

본 연구에서는 Choi *et al.* (2012)의 가설에 따라 신원생대 기원 금강석회암층이 존재하는 충청 분지 지역에 대해 중점적인 야외 조사를 진행하였다. 시

료를 채취한 지역은 충남 옥천군 동이면 조령리 금강휴게소 부근, 충북 괴산군 칠성면 외사리 산막이 옛길 부근, 충북 제천시 한수면 황강리 부근, 충북 충주시 살미면 무릉리 충주호 부근이다. 이들 지역은 각각 황강리층과 명오리층 사이에 석회암층이 노두로 산출되는 지역으로 Choi *et al.* (2012)에서 금강석회암 산출지로 지시한 곳이다(그림 1).

3.1 충남 옥천군 금강 휴게소 부근

3.1.1 경부고속도로 옆

금강 휴게소 북서쪽에 나타나는 노두로, 검붉은 색의 천매암으로 이루어진 명오리층과 진한 회색에서 검은색 사이의 기질(matrix)을 가진 황강리층 사이에 나타나는 석회암층이다. 황강리층은 검은색 계열의 기질에 황색에서 회색 사이 다양한 색상의 역들로 구성이 되어있다. 역은 약 3 ~ 10 cm 정도의 직경을 가진 화성암이 주를 이루며, 다양한 크기와 색깔로 분포하고 있다. 이는 Choi *et al.* (2012)에서 다이아미타이트 안의 드랍스톤(dropstone)이라 불려졌으며, 분급이 균일하게 이루어지지 않은 모습을 보인다. 기질은 무른 세립질 실트로 구성되어 있으며, 금강석회암층 노두의 너비는 약 11.5 m 이다(그림 2a).

금강석회암층에서도 황강리층에서와 비슷한 역들이 조금씩 보이며, 주로 규장질 광물로 구성된 역들이 존재한다. 석회암 층에 이어 드러난 황강리층의 층리의 주향은 북동이며, 경사는 북서방향이다. 경계층에서의 주향은 북동, 경사는 북서방향으로 석회암층의 층리 역시 같은 방향으로 존재한다. 이 지역에서 채취한 시료는 GG 라 명명하였다.

3.1.2 금암리 금강 유역

금강 휴게소 북서쪽 금강이 돌아나가는 부근에서 나타나는 석회암층이다. 길으로 드러난 노두의 가로 너비는 약 15 m 정도이며, 좌측 황강리층과의 경계 부근에서는 구분이 뚜렷한 반면 우측 명오리층과의 경계구분은 쉽지 않다. 전체적으로 GG 지역에 비해서 더 단단하며, 이는 대리암으로의 변성이 더 진행된 것으로 생각할 수 있다. 장축 120 cm, 단축 40 cm 정도 크기의 밝은 연황색의 화성암 역이 존재하는데, Choi *et al.* (2012)에서 드랍스톤(dropstone)으로 추정하였다. 이 역 주위에는 역을 둘러싸는 형태로 미습곡(micro folding) 구조가 나타난다. 주변 기질은 어두운 회색이며, 암맥(vein)이 기질을 지나 역의 하단 우측부분까지 대각선으로 관입한 것이 관찰

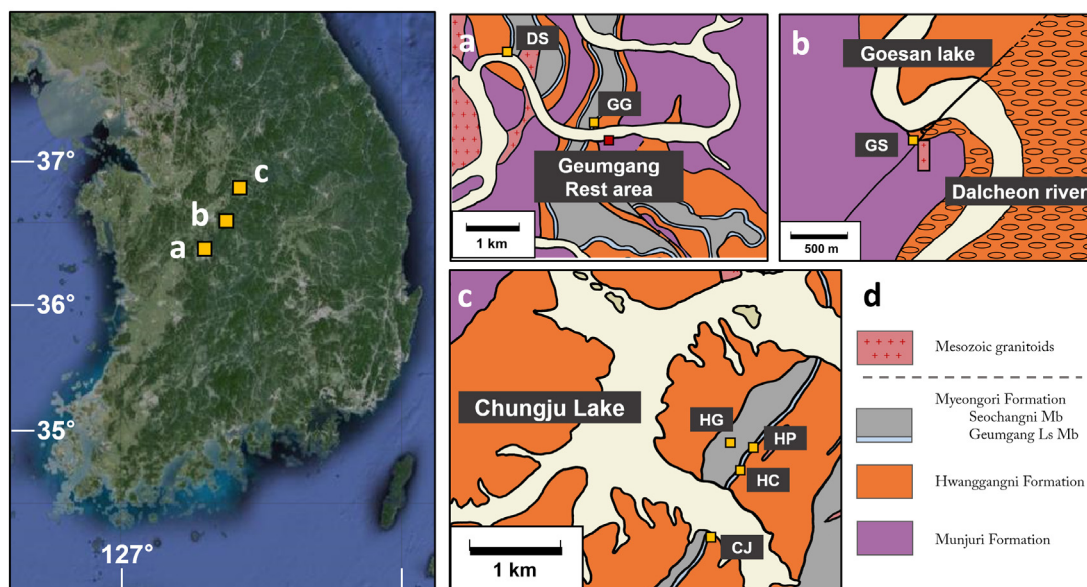


Fig. 1. Geologic map of study areas. (a) Geumgang rest area, Okcheon (GG and DS sites), (b) Goesan (GS site), (c) Chungju lake and Hwanggangni (CJ, HG, HP, HC sites), and (d) classification of each strata in Okcheon Group. The stratigraphic classification of the maps is from Choi *et al.* (2012). Our sample collection was focused on Geumgang limestone in Myeongori Formation.

된다. 역에서 약 1 m 오른편에는 길이가 약 2 m 인 단층이 발견되며 기질에서의 엽리가 지면과 수평으로 발달한다. 이 지역에서 채취된 시료는 DS 라 명명하였다(그림 2a).

3.2 충북 괴산군 칠성면 외사리 산막이 옛길

충북 괴산군 산막이 옛길 유원지 호수 전망대 부

근에서 산출되는 가로 너비 약 15 m 정도의 석회암 노두이다. 층리가 뚜렷하게 보이는 석회암 노두는 수 cm에서 수십 cm에 이르는 역이 나타나는 황강리층에 이어 있다. 경계는 뚜렷하지 않으며, 황강리층을 이루는 기질은 금강 휴계소 부근과 마찬가지로 진한 회색에서 검은색의 실트이다. 산막이옛길 내에 드러난 금강석회암 노두는 높이가 약 100 ~ 110 cm

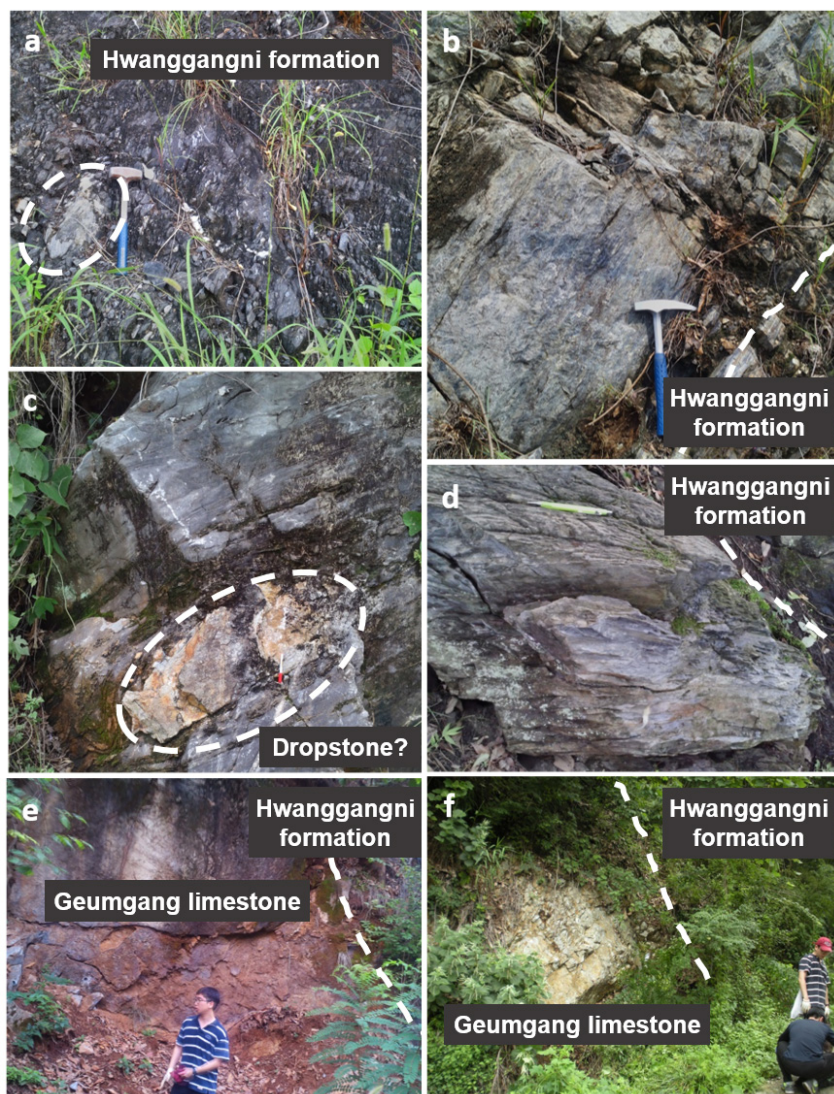


Fig. 2. Outcrop photographs of Geumgang Limestones at different study sites. (a) Hwanggangni formation at Geumgang rest area (GG site), (b) boundary between Hwanggangni formation (left) and Geumgang limestone (right) in Geumgang rest area (GG site), (c) granitoid rock in Geumgang limestone (DS site) near Geumgang rest area. The granitoid rock was suspected to be a dropstone (Choi *et al.*, 2012), (d) limestone in Goesan area which shows lamination (GS site), (e) dark limestone outcrop in Hwanggangni area (HG site), (f) white limestone outcrop in Hwanggangni area (HP site).

정도이다. 연한 회색에서 회색 사이의 색을 띄며, 층리를 따라 쉽게 부서진다. 석회암 노두의 윗부분은 단층 구조를 보인다. 이 지역에서 채취한 시료는 GS라 명명하였다(그림 2b).

3.3 충북 제천군 한수면 황강리 황학산 부근

충북 제천군 한수면 황강리 황학산에서 시료를 채취한 노두는 총 세 곳이며, 각각 HG, HP, HC 노두라 명명하였다(그림 1c).

3.3.1 HG 노두

제천시에서 황학산을 따라 나있는 산길에서 가장 멀리 떨어져 있는 노두이다. 황강리층의 모식단면(type section)으로서, 황강리층과 금강석회암층의 구분이 뚜렷하게 이루어지는 곳이다. 드러난 석회암 노두의 가로 너비는 약 6.4 m이며, 좌측 편에 황강리층과의 경계면이 존재한다. 석회암은 주로 어두운 회색을 보인다.

3.3.2 HP 노두

HG 노두가 위치한 곳에서 약 50 m 정도 산길을 따라 나오는 곳에 위치한다. HG 노두가 어두운 회색의 암상을 가진 반면, HP 노두는 전체적으로 밝은 회색에서 흰색, 옅은 황색이다. 가로 너비는 약 13 m 정도이며 수직 높이는 약 4 m 정도이다. 경계가 뚜렷하지 않으며, 대부분 결면이 파쇄된 상태이다.

3.3.3 HC 노두

HP 노두에서 길을 따라 이동하여, 마주보고 있는 부분에 나타나는 밝은 흰색의 노두이다. 대부분 흙으로 덮여 있어 전체적인 노두의 너비를 확인할 수 없지만, 겉으로 드러난 노두의 가로 너비는 약 3 m 정도이다. HP 노두와 마찬가지로 결면이 많이 부서져 있으며, 대리석 결정이 결면에 잘 드러난다. 전체적으로 백색 대리암에 3 mm 정도 크기의 황철석 결정이 분산되어 나타난다.

3.4 충북 충주시 살미면 무릉리 충주호 부근

충주시 충주호 부근에서 충주호를 따라 형성된 골짜기에 위치한 노두이다. 너비는 약 30 m 이상에 높이가 약 10 m 정도 되는 노두로서, 전체적인 암상은 연황색 석회암에 암록색의 천매암 층이 끼여 번

갈아 나타난다. 전체적으로 습곡이 강하게 발달해 있으며, 우세한 층리의 주향은 북동방향이며, 경사는 남동방향이다. 이 지역에서 채취된 시료는 CJ라 명명하였다(그림 3).

4. 시료 채취 및 분석

4.1 시료 채취

각각의 연구 지역에서 황강리층을 기점으로 약 10 ~ 100 cm 간격으로 금강석회암층의 시료를 채취하였다. Choi *et al.* (2012)의 주장에서 금강석회암층이라 여긴 석회암층에 관해 집중적으로 시료 채취가 이루어졌으며(GG 지역 8개, DS 지역 6개, GS 지역 12개, HG 지역 5개, HP 지역 6개, HC 지역 4개, CJ 지역 15개), 황강리층이나 명오리층에 대한 시료 채취는 이루어지지 않았다.

4.2 탄소 및 산소 안정동위원소 비 측정

채취한 석회암 층 시료의 탄소 및 산소 안정동위원소 비는 미국 오리건주립대학 안정동위원소 연구실(Stable Isotope Laboratory, College of Oceanic and Atmospheric sciences, Oregon State University)에서 Finnigan MAT 252 Isotope Ratio Mass Spectrometer(IRMS)와 Carbonate Device를 이용하여 분석이 이루어졌다. 암석을 세척 건조 후 절삭, 치과용 드릴(dental drill)을 사용해 시료의 일부분을 잘게 분쇄시켜 40 ~ 140 μg 의 순수한 탄산염 광물 시료를 취하였다. 10 ~ 20 cm의 암석 시료 내에서 각각 두 지점에 대해 진행하였으며, 이를 통해 한 암석 내에서의 안정동위원소 비의 균질도(homogeneity)를 시험하였다. 가루 형태로 분쇄된 시료는 Carbonate Device에서 ~ 105%의 오르토티산(orthophosphoric acid; H_3PO_4)과 70°C에서 5분 동안 반응시켜 CO_2 와 H_2O 기체를 얻었으며, -180°C 이하에서 포집되었다(McCrea *et al.*, 1950). 이후 응결시킬 수 없는 기체를 제거, H_2O 기체를 -100°C 트랩에 잡아 CO_2 기체만을 다시 포집한 뒤, MAT 252 Isotope Ratio Mass Spectrometer로 포집된 이산화탄소의 탄소와 산소 안정동위원소를 분석하였다. 정밀도는 각각 $\delta^{18}\text{O}$ 에 대해 $\pm 0.05\%$, $\delta^{13}\text{C}$ 에 대해서 $\pm 0.03\%$ 이다. GS, GG, DS 지역의 일부 시료에 대해서는 한국 기초과학 지원 연구원에서 교차 분석을 통해 결과 값을 확인하였으며,

오차 범위 내에서 값이 서로 일치함을 확인하였다.

4.3 X선 형광(X-ray fluorescence) 분석

각 채취 지역에 대해 두 개 정도의 암석 시료를 절삭, 세척하여 박편을 제작하였으며, 절삭된 부분의 일부를 막자사발로 곱게 간 후 X선 형광 분석을 실시하였다. 분석은 서울대학교 기초과학공동기기원의 XRF-1700 장비를 사용해 이루어졌으며, 시료는 유리 구슬(glass bead) 형태로 전처리(pretreatment)과정을 거쳤다. Si, Al, Ti, Fe, Mg, Ca, Na, K, Mn, P의 10대 원소를 정량하였다.

4.4 X선 회절 측정

절삭 후 세척, 건조 과정을 거친 암석 시료들에 대해 치과용 드릴을 이용해 고운 가루의 형태로 100 μ g 가량 준비하였다. 준비된 시료는 슬라이드 글라스 위에 올린 상태로 고르게 편 후 서울대학교 지구환

경과학부 MiniFlex 600 X-ray diffractometer를 통해 분석되었다.

5. 분석 결과

X선 형광 분석법과 X선 회절 분석법으로 각각의 탄산염암 시료를 분석 후, 구성 원소의 분포 비 및 광물 조성에 따라 세 가지 범주로 구분하였다. GS, HG 노두에서 얻어진 암석 시료들은 대부분의 광물 조성이 백운석(dolomite)인 백운암(dolostone)으로 확인되었으며, DS, HC, CJ 노두는 방해석 위주로 변성을 많이 받은 대리암, GG, HP 노두는 규산염 광물을 상당량 포함하고 있는 칼슘-규산염암(calc-silicate)으로 구분되었다(표 2).

표 2에서 구분된 세 가지 범주의 탄산염암 시료들의 탄소와 산소 안정동위원소 비 측정값들은 교차 도시(cross-plotting) 도면상에서 서로 다른 범위에



Fig. 3. Outcrops near Chungju Lake, (a) the whole view of study section limestone outcrop (CJ site), (b) Fold structure (enlarged portion of figure a).

Table 2. XRF analysis results. Orange area samples are Mg-rich, green ones are Silica-rich, and yellow ones are Ca-rich. The GS-01 sample is from fault gouge and CJ-02 from shale.

Sample	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	LOI	Total
GS-01	51.75	0.63	0.02	0.94	3.26	25.15	0.01	0.01	0.06	0.01	18.06	99.91
GS-02	3.34	1.78	0.05	1.01	20.47	31.34	0.01	0.29	0.40	0.05	41.21	99.94
HG-01	4.00	1.52	0.06	0.61	19.06	32.43	0.28	0.29	0.04	0.08	41.48	99.87
GG-01	53.00	9.07	0.45	3.42	5.66	13.26	0.53	2.94	0.08	0.10	11.31	99.82
GG-05	53.57	6.70	0.33	3.22	10.27	19.63	0.69	2.89	0.07	0.08	2.39	99.83
DS-01	7.10	1.16	0.02	0.41	0.85	51.05	0.08	0.18	0.03	0.06	39.01	99.95
CJ-01	8.74	1.96	0.06	0.77	0.73	48.91	0.02	0.36	0.04	0.06	37.89	99.55
CJ-02	27.51	5.93	0.22	2.58	0.96	32.68	0.30	1.32	0.04	0.16	27.86	99.56
HC-02	5.75	1.94	0.04	0.78	0.58	50.70	0.63	0.21	0.04	0.07	39.09	99.83
HP-02	48.38	3.55	0.11	0.99	1.27	24.73	0.15	0.88	0.03	0.06	19.72	99.86

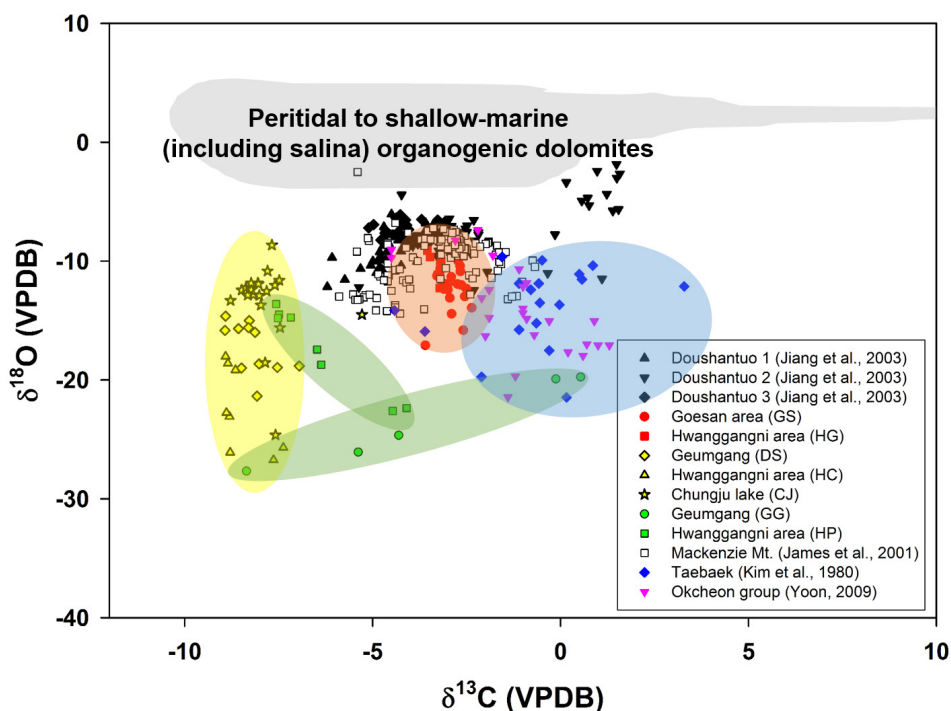


Fig. 4. Cross-plot diagram of carbon and oxygen isotope ratios. Black symbols (upright triangles, upside down triangles and diamonds) are from three different sections in Doushantuo formation, South China (Jiang *et al.*, 2003). Open squares are from Mackenzie Mountains, Canada (James *et al.*, 2001). Blue diamonds are from limestones in Taebaek basin, Korea, which thought to be formed during Paleozoic Era (Kim, 1980). The purple upside down triangles are from previous study (Yoon, 2009) for Okcheon group limestones (Youngweol, Samcheok, Jeongsun, Pyeongchang, Danyang, Jaechon, Geumsan, Jangseong, Muan). Red dots are from Geumgang Limestone for this study. The units of the data are per mil (‰). The isotopic data are grouped and indicated by color domains according to their rock types and elemental compositions classified in Table 2: Orange, dolostone; green, calc-silicates; and yellow, marbles. The blue ellipse domain indicates data from Taebaek and Okcheon group conducted in previous studies (Kim, 1980; Yoon, 2009). Typical isotopic range for peritidal to shallow-marine organogenic dolomites (Mazzollo, 2000) is symbolized by grey shade.

Table 3. Carbon and oxygen stable isotope data obtained for this study. The samples were analyzed with IRMS in Stable isotope laboratory at Oregon State University, USA.

Sample No.	Strat. Height (m)	Lithology	$\delta^{13}\text{C}$ (‰ VPDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰ VPDB)
GS-02-1	1.120	Fault gouge	-1.74	-17.56
GS-02-2	1.100	Dark gray dolostone	-1.77	-16.79
GS-03-1	0.960	Dark gray dolostone	-2.36	-13.93
GS-03-2	0.940	Dark gray dolostone	-2.59	-15.81
GS-04-1	0.885	Dark gray dolostone	-2.51	-12.31
GS-04-2	0.865	Dark gray dolostone	-2.55	-12.98
GS-05-1	0.835	Dark gray dolostone	-2.64	-12.00
GS-05-2	0.815	Dark gray dolostone	-2.90	-14.44
GS-06-1	0.775	Dark gray dolostone	-2.64	-12.02
GS-06-2	0.755	Dark gray dolostone	-2.91	-11.33
GS-07-1	0.710	Dark gray dolostone	-3.60	-17.08
GS-07-2	0.690	Dark gray dolostone	-2.95	-13.10
GS-08-1	0.640	Dark gray dolostone	-2.99	-11.89
GS-08-2	0.620	Dark gray dolostone	-3.29	-11.24
GS-09-1	0.500	Dark gray dolostone	-3.13	-11.86
GS-09-2	0.480	Dark gray dolostone	-3.15	-12.11
GS-10-1	0.365	Dark gray dolostone	-2.67	-10.40
GS-10-2	0.345	Dark gray dolostone	-2.74	-11.93
GS-11-1	0.205	Dark gray dolostone	-2.73	-9.97
GS-11-2	0.185	Dark gray dolostone	-2.67	-10.86
GS-12-1	0.020	Dark gray dolostone	-3.00	-12.40
GS-12-2	0.000	Dark gray dolostone	-3.10	-12.37
DS-01-1	0.000	Light gray marble	-8.08	-21.36
DS-01-2	0.100	Light gray marble	-8.49	-19.00
DS-02-1	2.000	Light gray marble	-8.02	-18.64
DS-02-2	2.100	Light gray marble	-7.53	-18.94
DS-03-1	4.000	Light gray marble	-8.28	-15.00
DS-03-2	4.100	Light gray marble	-8.13	-15.99
DS-04-1	6.000	Light gray marble	-8.91	-14.63
DS-04-2	6.100	Light gray marble	-8.93	-15.83
DS-05-1	8.000	Light gray marble	-8.39	-12.58
DS-05-2	8.100	Light gray marble	-6.95	-18.82
DS-06-1	10.000	Light gray marble	-8.30	-15.60
DS-06-2	10.100	Light gray marble	-8.57	-15.67
GG-01-1	0.000	Light gray calc-silicate	-0.12	-19.92
GG-01-2	0.100	Light gray calc-silicate	0.54	-19.75
GG-06-2	8.000	Light gray calc-silicate	-4.31	-24.66
GG-08-2	10.100	Light gray calc-silicate	-5.38	-26.07
HC-01-1	N/A	Bright gray marble, pyrite-rich	-7.38	-25.69
HC-01-2	N/A	Bright gray marble, pyrite-rich	-8.79	-26.10
HC-02-1	N/A	Bright gray marble, pyrite-rich	-7.61	-26.86
HC-02-2	N/A	Bright gray marble, pyrite-rich	-8.81	-23.08

Table 3. Continued.

Sample No.	Strat. Height (m)	Lithology	$\delta^{13}\text{C}$ (‰ VPDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰ VPDB)
HC-03-1	N/A	Bright gray marble, pyrite-rich	-8.65	-19.16
HC-03-2	N/A	Bright gray marble, pyrite-rich	-8.89	-22.77
HC-04-1	N/A	Bright gray marble, pyrite-rich	-8.91	-18.02
HC-04-2	N/A	Bright gray marble, pyrite-rich	-8.85	-18.60
HG-01-1	0.000	Dark gray dolostone	-3.26	-11.15
HG-01-2	0.050	Dark gray dolostone	-3.18	-10.03
HG-02-1	1.300	Dark gray dolostone	-3.53	-9.10
HG-02-2	1.350	Dark gray dolostone	-3.47	-9.66
HG-03-1	1.600	Dark gray dolostone	-3.20	-10.37
HG-03-2	1.650	Dark gray dolostone	-3.21	-10.83
HG-04-1	2.700	Dark gray dolostone	-3.21	-12.26
HG-04-2	2.750	Dark gray dolostone	-3.02	-12.08
HP-01-1	0.000	Dark gray marble	-7.18	-14.74
HP-01-2	0.100	Dark gray marble	-7.49	-14.49
HP-02-1	2.000	Dark gray marble	-4.10	-22.37
HP-02-2	2.100	Dark gray marble	-4.46	-22.61
HP-03-1	4.000	Dark gray marble	-7.57	-13.61
HP-03-2	4.100	Dark gray marble	-7.52	-14.79
HP-04-1	6.000	Dark gray marble	-6.37	-18.71
HP-04-2	6.100	Dark gray marble	-6.48	-17.44
CJ-01-1	0.000	Bright yellowish marble	-8.48	-12.44
CJ-01-2	0.100	Bright yellowish marble	-8.37	-12.23
CJ-02-1	0.700	Dark green shale	-7.48	-11.62
CJ-02-2	0.800	Dark green shale	-7.60	-12.02
CJ-03-1	1.400	Bright yellowish marble	-7.86	-18.54
CJ-03-2	1.500	Bright yellowish marble	-7.58	-24.63
CJ-05-1	2.800	Bright yellowish marble	-8.26	-12.20
CJ-06-1	3.500	Bright yellowish marble	-8.22	-12.40
CJ-06-2	3.600	Bright yellowish marble	-8.17	-12.82
CJ-07-1	4.200	Bright yellowish marble	-8.32	-12.86
CJ-07-2	4.300	Bright yellowish marble	-8.78	-13.31
CJ-08-1	4.900	Dark green shale	-7.84	-10.01
CJ-08-2	5.000	Bright yellowish marble	-8.01	-12.90
CJ-10-1	6.300	Bright yellowish marble	-7.97	-13.71
CJ-10-2	6.400	Dark green shale	-7.51	-12.58
CJ-11-1	7.000	Bright yellowish marble	-7.68	-8.65
CJ-11-2	7.100	Bright yellowish marble	-7.57	-15.27
CJ-12-1	7.700	Bright yellowish marble	-8.05	-11.86
CJ-12-2	7.800	Bright yellowish marble	-8.23	-11.85
CJ-13-1	8.400	Dark green shale	N/A	N/A
CJ-13-2	8.500	Bright yellowish marble	-8.04	-11.92
CJ-14-1	9.100	Bright yellowish marble	-7.82	-12.53
CJ-14-2	9.200	Bright yellowish marble	-5.28	-14.50

분포하였다(그림 4). 전체 탄산염암 시료의 탄소 및 산소 안정동위원소 비는 기준 물질을 Vienna Pee Dee Belemnite (VPDB)로 하여 측정되었다. 대리암의 탄소 및 산소 안정동위원소는 각각 $-5.28 \sim -8.91\%$, $-12.58 \sim -26.10\%$ 사이의 분포를 보였으며, 백운암 시료의 탄소 및 산소 안정동위원소는 각각 $-2.36 \sim -3.60\%$, $-9.11 \sim -17.08\%$ 사이의 분포를, 칼슘-규산염암 시료들은 탄소 $0.54 \sim -7.57\%$, 산소 $-13.61 \sim -25.7\%$ 사이의 안정동위원소 비 분포를 보였다(표 3; 그림 4).

백운암 시료들에서 얻어진 탄소 및 산소 안정동위원소 비는 $-2.36 \sim -3.60\%$ 사이 범위로, Jiang *et al.* (2003)의 남중국 난후아(Nanhua) 분지의 도우산 투오(Doushantuo) 덮개 탄산염암 층에서 얻어진 값들, James *et al.* (2001)의 캐나다 덮개 탄산염암 층에서 얻어진 값들과 비슷한 범위에 속한다. 반면, 대리암 시료와 칼슘-규산염 시료들은 더 결핍된 동위원소 비를 보이며, 두 원소에 대한 교차 도시에서도 백운암 시료보다 상대적으로 넓은 범위에 분포한다. 금강석회암층에 대한 탄소 안정동위원소 비는 한반도의 다른 지역에서 얻어진 값이나 옥천 변성대에 대한 다른 연구에서 얻어진 값과는 구분되는 범위에 위치한다(그림 4). 기존의 눈덩이 지구 가설에선 덮개 탄산염암의 결핍된 탄소 안정동위원소 값의 원인을 신원생대 빙하기의 둔화된 생명활동으로 기인한 분별작용(fractionation)의 감소와, 화산활동으로부터 공급된 ^{13}C 가 결핍된 이산화탄소의 누적 및 빙기 이후의 급격한 공급으로 해석한다(Hoffman *et al.*, 1998). 남중국에서 얻어진 분석 결과들을 토대로 메탄 하이드레이트(methane hydrate)와 같은 매우 결핍된 탄소 공급원의 산화작용에 의한 형성 가능성도 제시가 되었으나(Jiang *et al.*, 2003), 이번 분석 결과에서는 그와 같이 결핍된 탄소 안정동위원소 비는 확인되지 않았다.

기존의 덮개 탄산염암층에 대한 연구들은 잘 보존된 퇴적 지형에서 이루어져, 탄소 및 산소 안정동위원소 비의 분석에서 퇴적 당시의 값에서 큰 교란을 받지 않음을 가정하였다. 그러나 옥천 누층군은 전 세계적으로 분포하는 신원생대 빙기 퇴적층과는 달리, 대부분이 녹색편암(greenschist)에서 각섬암(amphibolite)에 이르는 높은 변성 정도를 보인다(Lee *et al.*, 1998). 변성 작용과정에서 열수의 유입은

탄산염암의 안정동위원소 값을 교란시킬 수 있으며, 암석은 퇴적 당시에 얻어진 안정동위원소 비에서 벗어난 값을 가지게 된다(Zheng and Hoef, 1993).

시료 변성 정도의 확인과 암석학적 기재를 위해서 편광 현미경을 이용한 관찰이 이루어졌다(그림 5). 백운암 시료는 약 $25 \mu\text{m}$ 의 직경을 보이는 세립질 백운석으로 구성되어 있으며, $40 \mu\text{m}$ 길이의 얇은 띠 형태로의 백운모(muscovite) 광물이 일정한 방향으로 정향배열하고 있다. 박편의 95% 정도를 세립질 백운석이 차지하고 있으며, 백운모 띠와 방해석 맥(calcite vein)이 약하게 나타나는 부분이 존재한다. 이번 연구에서 채취한 충북 괴산의 GS 노두와 충북 제천 황강리의 HG 노두의 백운암 암석은 기질로서의 백운석 입자의 크기나 광물 구성에 있어서 거의 일치하며, 높은 변성 정도를 지시하는 광물이 산출되지 않는다. 이는 백운암 시료들이 퇴적 기원 암석으로, 변성작용을 크게 받지 않았을 가능성을 지시한다.

그에 반해, 대리암 시료는 대부분 $400 \mu\text{m}$ 이상의 직경을 가지는 조립질의 방해석 결정들로 구성되어 있으며, 방해석 쌍정(calcite twin)이 뚜렷하게 나타난다. 금강 휴게소 부근 DS 노두와 충주호 부근 CJ 노두 대리암 시료와는 달리, 제천 황강리 부근 HC 노두 대리암 시료는 방해석 입자의 쌍정이 휘어 있는 미세 습곡 구조(microfolding structure)를 보이며, 황철석 광물이 1 mm 정도의 직경을 가지고 빈번하게 산출된다. 다른 대리암 시료들에 비해 밝은 흰색 계열의 색을 가지며, 열수작용에 의해 생성된 것으로 보이는 황철석의 존재는 HC노두에서의 대리암 시료가 심한 변질 작용을 받았음을 지시한다.

칼슘-규산염암 시료는 $200 \mu\text{m}$ 의 방해석 입자 사이로 정장석, 조장석과 같은 규산염 광물이 상당량 나타난다. 석영과 방해석 맥 또한 $10 \mu\text{m}$ 정도의 두께와 $400 \mu\text{m}$ 정도 너비로 약하게 드러나 있다. 제천 황강리 부근 HP 노두의 칼슘-규산염암 시료의 방해석은, HP 노두와 20 m 정도 거리를 두고 나타나는 HC 노두의 대리암 시료와 같이 쌍정이 휘어진 미세 습곡 구조를 가진다.

칼슘-규산염암 시료는 $200 \mu\text{m}$ 의 방해석 입자 사이로 정장석, 조장석과 같은 규산염 광물이 상당량 나타난다. 석영과 방해석 맥 또한 $10 \mu\text{m}$ 정도의 두께와 $400 \mu\text{m}$ 정도 너비로 약하게 드러나 있다. 제천

황강리 부근 HP 노두의 칼슘-규산염암 시료의 방해석은, HP 노두와 20 m 정도 거리를 두고 나타나는 HC 노두의 대리암 시료와 같이 쌍정이 휘어진 미세 습곡 구조를 가진다.

6. 자료 해석 및 토의

본 연구에서, 충북 괴산의 GS지역과 충북 제천 황강리의 HG지역에서 채취한 금강석회암 시료는 변성작용을 약하게 받은 백운암으로, 남중국 도우산투오(Doushantuo) 층의 덮개 탄산염암층에서 보이는 탄소 안정동위원소비와 비슷한 범위 내에 위치한다. 그림 4에서 이들 백운암이 가지는 탄소 및 산소 안정동위원소 비 범위는 천해환경에서 생성되는 일반적인 유기기원 백운암의 안정동위원소 비와 구분되며 (Mazzullo, 2000), 본 연구지역 백운암의 퇴적 환경이 천해 유기기원 백운암의 퇴적환경과는 다를 것임을 의미한다. 그러나 이를 통해 금강석회암층의 퇴적 시기를 신원생대로 한정하는 해석은 무리가 있

다. 먼저, 그림 4의 교차 도시에서 본 연구의 백운암 시료들이 가지는 값은 산소 안정동위원소 비가 연속적으로 결핍되어 나타난다. 백운암의 안정동위원소 비를 황강리층과의 경계를 기준으로 층후에 따라 도시할 경우, 괴산 지역에서 얻어진 안정동위원소 비는 단층 근처에서 더 결핍된 산소 동위원소 비가 나타나는 것을 확인할 수 있다(그림 6). 이러한 결과는 단층을 따라 발생한 열수의 흐름이 백운암의 동위원소 비에 영향을 미칠 수 있었을 가능성을 의미한다. 단층을 따라 유입된 열수와 반응은 탄산염의 안정동위원소 비를 변질시킬 수 있으며, 열수가 탄소를 충분히 포함하지 않을 경우 산소 안정동위원소 비의 변화가 탄소 안정동위원소 비의 변화에 비해 크게 나타날 수 있다.

본 연구에서 얻어진 금강석회암층의 탄소 및 산소 안정동위원소 비 자료들이 변성 정도와 조성에 따라 서로 다른 범주로 구분된다. 시료 채취지역 중 충북 제천시 황강리의 금강석회암층에선, 약 100 m 이내의 거리를 두고 HG 노두의 백운암시료와 HP

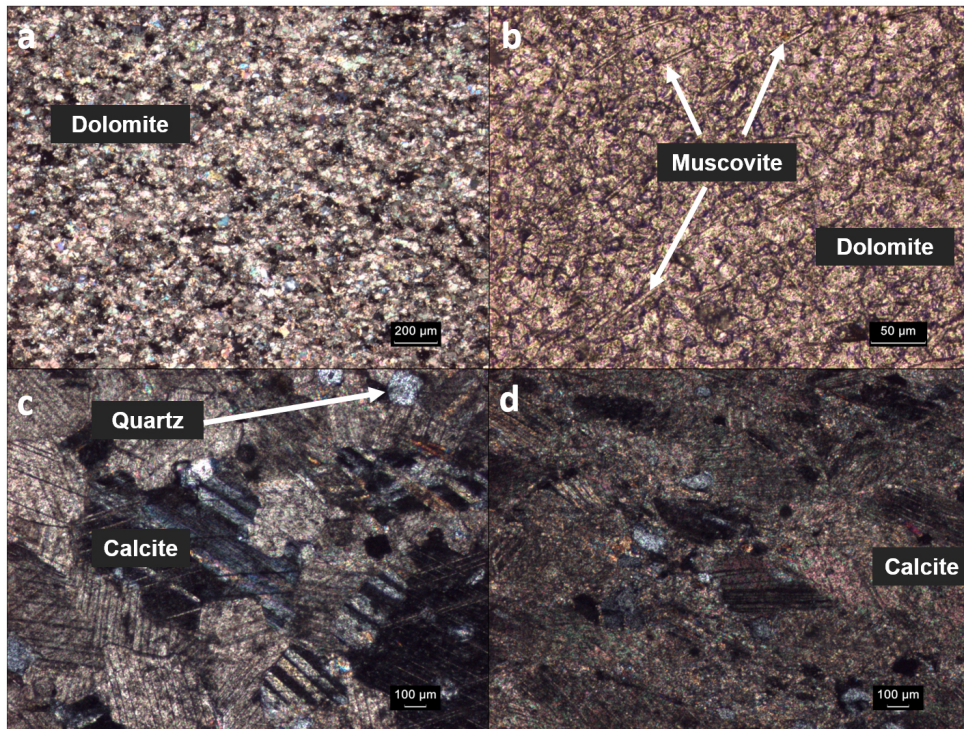


Fig. 5. Microscopic pictures of thin sections for carbonates samples under crossed (a, c, and d), and open (b) nicols. (a) dolostone (GS-12) from Goesan, (b) dolostone (HG-1) from Hwanggangni, (c) light gray marble (DS-1) from Geumgang rest area, (d) calc-silicate (HP-1) from Hwnaggangni.

노두의 칼슘-구산염암 시료, HC 노두의 대리암 시료가 각각 산출된다. 기존의 Choi *et al.* (2012)에서는 HP, HC 노두는 서로 연속신상에 위치하는 반면, HG 노두지역은 향사구조를 거쳐 명오리층을 사이에 두고 금강석회암층이 반복하여 나타나는 것으로 해석하였다. 원소 및 광물의 조성상과 변성 정도, 안정동위원소 비 분포에서 HG, HP, HC의 세 노두지역은 서로 많은 차이를 보인다. 백운석이 방해석에서 마그네슘의 함유와 속성작용을 통해 형성되는 2차적인 광물로 간주한다면, 세 지역을 같은 지층으로서 백운석과 방해석이 공존하며 일부분이 열수에 의한 변질을 받은 것으로 생각할 수 있다. Sheppard and Schwarz (1970)의 연구에서는, 실험을 통해 얻어진 방해석과 백운석 사이 탄소 및 산소 안정동위원소 비 분별작용 인자(fractionation factor)에 따라, 고온에서 백운석 시료가 더 무거운 안정동위원

소를 가지게 됨을 보였다. 이는 백운석과 방해석이 공존하는 계에서 백운석 시료의 탄소 및 산소 안정동위원소 비가 방해석에 비해 더 부화된 값을 나타낼 수 있음으로 해석되며, 백운암 시료들에 비해 대리암 시료가 더 결핍된 안정동위원소 비를 나타내는 결과와 부합한다. 그러나 위와 같은 해석을 위해서는, 50 m 정도의 짧은 거리를 사이에 두고 나타나는 같은 지층의 암상들이 서로 다른 조성과 결정크기, 변성 정도의 차이를 보이는 것에 대해 더 정밀한 암석학적 기재와 연구가 수반되어야 할 것으로 보인다.

백운암 시료가 약한 변성 작용을 받아 퇴적 당시의 안정동위원소 비를 그대로 보존하고 있을 것이라는 의견과는 달리, 대리암시료와 칼슘-구산염암 시료들에서 얻어진 탄소 및 산소 안정동위원소 비에 대한 해석은 보다 복잡하다. 대리암 시료들의 탄소 안정동위원소 비는 -5.28 ~ -8.91‰의 범위에 분포하며,

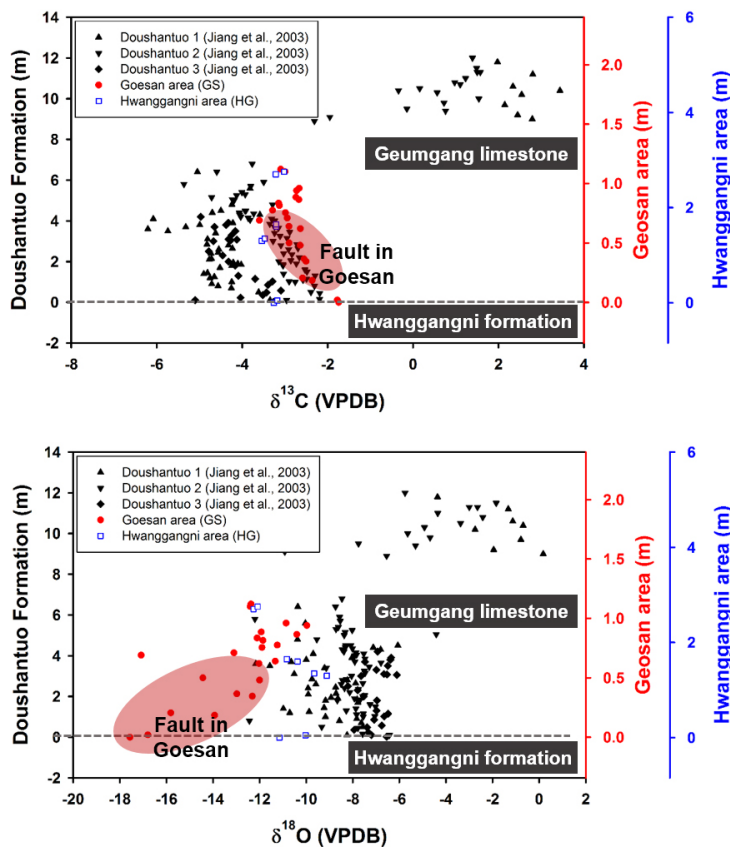


Fig. 6. Isotopic composition variations of dolostones (GS and HG sites) in Geumgang limestone. The axes in the right-hand side indicate distance from the fault boundary between Hwanggangni formation and Geumgang limestone. Oxygen isotope ratios from Goesan area rapidly decrease toward the fault boundary.

백운암의 탄소 안정동위원소 비에 비해 더 결핍된 값을 보인다. 대리암의 탄소 안정동위원소 비가 -8% 근처의 값을 가지며 암석이 거의 균질한 안정동위원소 비를 보이는 것은, 편광 현미경 관찰 결과에 미루어 변성 과정에서 재결정화(recrystallization)가 일어나는 동안 결핍된 탄소의 유입 또는 이산화탄소의 배출에 기원했을 것으로 여겨진다. 광물이 재결정화를 통해 성장하면, 광물을 구성하는 안정동위원소 비는 균일(homogeneous)해진다. 대리암 시료가 열수 변성을 겪었을 경우, 지각 아래의 마그마수(magmatic water)나 지하수가 결핍된 탄소의 공급원이 될 수 있으며, 기존 탄산염암의 탄소 안정동위원소 비의 교란을 야기한다(Zheng and Hoef, 1993). 대리암의 산소 안정동위원소의 비 분포가 -7% 에서 -27% 사이의 넓은 범위에 걸쳐 나타나는 점은, 변성 작용 동안 이산화탄소의 형태로 일부 산소 원자가 다양한 비율로 배출됨에 따른 결과일 수 있다. 변성 작용 동안 방해석은 석영 등과 반응할 수 있으며, 이 과정에서 이산화탄소는 상대적으로 ^{18}O 의 비율이 높은 상태로 배출 되어 탄산염암은 결핍된 산소 안정동위원소 비를 가질 수 있다(Valley, 1986). 탄소 안정동위원소 역시 이산화탄소의 형태로 배출될 경우 더 결핍된 방향으로의 이동이 일어나 그 정도는 산소 안정동위원소에 비해 작다(Valley, 1986). 이 경우 규회석(wollastonite)과 같은 광물의 형성이 이루어질 수 있으나, 많은 양의 규회석 광물이 관찰되지는 않는 것으로 보아 이산화탄소 배출로 인한 동위원소 비 변질의 효과는 제한적일 것이라 생각된다.

대리암과 달리, 칼슘-규산염암 시료의 안정동위원소 비 분포는 시료 채취 지역에 따라 교차도시 상에서 두 방향의 높은 상관관계를 보인다(그림 4). 금강 휴계소 부근 GG 노두 시료는 $-6.1 \sim -0.54\%$ 탄소 안정동위원소 비의 범위에서 산소 안정동위원소와 양의 상관관계를 보이는 반면, 제천 황강리 HP 노두의 경우 $-7.57 \sim -4.10\%$ 의 탄소 안정동위원소 비 범위에서 산소 안정동위원소 비와 음의 상관관계를 보인다. 두 칼슘-규산염암의 상반된 상관관계 분포는 서로 다른 유체와의 유체-암석 상호작용(fluid-rock interaction) 과정을 통해 형성된 것으로 이해할 수 있다(Zheng, 1990). 그러나 변성 작용을 받기 전 암석의 초기 동위원소 값과, 탄소와 산소 안정동위원소 비 사이의 높은 상관관계에 대한 정량적인 해석

은 암석 시료의 수가 적다는 점과 유체와의 상호작용 및 변성에 대한 정밀한 암석학적 기재가 이루어지지 않은 점에서 어려움이 있다. 규산염 광물을 포함하는 암석 시료의 탄소 안정동위원소 분석 과정에서, 탄산염 성분의 양이 충분하지 않아 안정적인 검출결과를 얻어내지 못한 점 역시 분석 오차를 크게 만들어 해석에 오류를 야기할 수 있다.

변성 작용을 경험한 암석의 안정동위원소 비에 대한 해석은 더욱 정밀한 암석 기재와 기원에 관한 보장된 연구가 필요할 것으로 여겨지며, 이를 통한 당시 퇴적 환경에 대한 해석은 유보한다. 그러나 백운암 시료 이외의 금강석회암층을 유기 탄소 기원의 탄산염암층이라 여길 경우, 신원생대 눈덩이 지구 가설과는 부합하지 않는다는 해석이 가능하다. 앞선 연구들에서의 연령 측정 결과들이 황강리층의 퇴적 시기를 최소 고생대 데본기 이후로 짐작하는 것과 Yi *et al.* (2000)의 연구가 황강리층을 석탄-페름기의 빙기 퇴적층으로 주장하였던 것에 미루어 본다면, 이는 오히려 대리암과 칼슘-규산염암을 포함하는 금강석회암층이 당시 석탄-페름기 빙기 이후 활발해진 생명활동을 통해 퇴적된 층서일 가능성 또한 내포한다. 그럼에도 전 세계적으로 분급이 좋지 않은 역암층에 이어서 나타나는 석회암층에 대한 연구들이 신원생대 마리노안 빙기 퇴적층을 제외하면 매우 드물게 존재한다는 점과, 이와 같은 퇴적 환경의 변화를 설명할 수 있는 가설의 부재는 차후 연구들을 통해 보장되고 설명되어야 할 부분들이다.

7. 결 언

본 연구는 옥천 누층군의 기원과 당시 퇴적환경에 대한 해석 및 신원생대 눈덩이 지구 가설의 시험을 위해 금강석회암층의 탄소 안정동위원소 비 및 화학적 조성을 분석하였다. 분석된 시료는 광물 조성과 성분 분포에 따라 세 가지 그룹으로 구분되었으며, 탄소-산소 안정동위원소 비 교차 도시 상에서 특정한 분포를 보였다. 변성작용을 거의 받지 않았을 것으로 여겨지는 일부 백운암 시료에서는 이미 알려진 덮개 탄산염암층의 안정동위원소 비와 비슷한 분포를 보이는 것을 확인하였으나, 변성 정도가 심한 대리암과 칼슘-규산염암에서 얻어진 값들에 대한 해석은 부가적인 연구가 필요하다. 시료 채취 지

역과 분석 시료의 수가 제한적인 점, 심한 변성 정도는 본 연구의 해석의 한계로 추후 결론을 위해 보강되어야 할 부분이며, 본 연구를 통해 얻어진 분석 자료는 옥천 누층군의 퇴적 환경을 연구하는 데 중요하게 기여할 것이라 여겨진다.

사 사

이 논문은 2015년도 서울대학교 유망선도연구자 지원사업 및 극지연구소 과제 사업비(PD12010, PE 15010) 지원을 받아 제1저자의 학부생연구 프로그램의 일부로 수행되었습니다. 연구 초기에 조언을 아끼지 않으신 서울대학교 최덕근교수님과 두 분의 논문 심사위원께 깊이 감사드립니다.

REFERENCES

- Bartley, J.K. and Kah, L.C., 2004, Marine carbon reservoir, C_{org} - C_{carb} coupling, and the evolution of the Proterozoic carbon cycle. *Geology*, 32, 129-132.
- Bjerrum, C.J. and Canfield, D.E., 2011, Toward a quantitative understanding of the late Neoproterozoic carbon cycle. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108, 14, 5542-5547.
- Cho, M.S., Kim, T.H. and Kim, H.C., 2004, SHRIMP U-Pb zircon Age of a Felsic Meta-tuff in the Ogcheon Metamorphic Belt, Korea: Neoproterozoic (ca. 750 Ma) Volcanism. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 13, 3, 119-125 (in Korean with English abstract).
- Choi, D.K., Woo, J.S. and Park, T.Y., 2012, The Okcheon Supergroup in the Lake Chungju area, Korea: Neoproterozoic volcanic and glaciogenic sedimentary successions in a rift basin. *Geosciences Journal*, 16, 3, 229-252.
- Condon, D., Zhu, M., Bowring, S., Wang, W., Yang, A. and Jin, Y., 2005, U-Pb ages from the neoproterozoic Doushantuo Formation, China. *Science*, 308, 5718, 95-98.
- Hoffman, P.F., Kaufman, A.J., Halverson, G.P. and Schrag, D.P., 1998, A Neoproterozoic Snowball Earth. *Science*, 281, 1342-1346.
- Hoffman, P.F. and Li, Z.X., 2009, A palaeogeographic context for Neoproterozoic glaciation, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 158-172.
- James, N.P., Narbonne, G.M. and Kyser, T.K., 2001, Late Neoproterozoic cap carbonates: Mackenzie Mountains, northwestern Canada: Precipitation and global glacial meltdown. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 38, 8, 1229-1262.
- Jiang, G., Kennedy, M.J. and Christie-Blick, N., 2003, Stable isotopic evidence for methane seeps in Neoproterozoic postglacial cap carbonates. *Nature*, 426, 822-826.
- Jiang, G., Kennedy, M.J., Christie-Blick, N., Wu, H. and Zhang, S., 2006, Stratigraphy, sedimentary structures, and textures of the late Neoproterozoic Doushantuo cap carbonate in South China. *Journal of Sedimentary Research*, 76, 978-995.
- Kim, K.H., 1980, Carbon and Oxygen Isotope Studies of the Paleozoic Limestones from the Taebaegsan Region, South Korea. *Journal of the Korean Institute of Mining Geology*, 13, 21-27 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.W., Oh, C.W., Ryu, I.-C., Williams, I.S., Sajeev, K., Santosh, M. and Rajesh, V.J., 2006, Neoproterozoic bimodal volcanism in the Okcheon Belt, South Korea, and its comparison with the Nanhua Rift, South China: Implications for rifting in Rodinia. *The Journal of Geology*, 114, 717-733.
- Kim, Y.S., Cheong, C.S. and Williams, I.S., 2009, SHRIMP U-Th-Pb ages of hornblende from granitic gneiss boulder in Hwanggangni Formation, Okcheon group, Korea. *Proceedings of the Annual Joint Conference, Mineralogical Society of Korea and Petrological Society of Korea*, 5, 80-81 (in Korean).
- Kirschvink, J.L., 1992, Late Proterozoic low-latitude global glaciation: The snowball Earth, In: *The Proterozoic biosphere: A multidisciplinary study*. Cambridge University Press, New York, 51 p.
- Kump, L.R. and Arthur, M.A., 1999, Interpreting carbon-isotope excursions: Carbonates and organic matter. *Chemical Geology*, 161, 181-198.
- Lee, M.S., Yeo, J.P., Lee, J.I., Jwa, Y.-J., Yoshida, S. and Lee, H.Y., 1998, Glaciogenic diamictite of Ogcheon System and its geologic age, and paleogeography of Korean Peninsula in Late Paleozoic. *Journal of the Geological Society of Korea*, 34, 343-370 (in Korean with English abstract).
- Mazzullo, S., 2000, Organogenic dolomitization in peritidal to deep-sea sediments. *Journal of sedimentary research*, 70, 10-23.
- Mills, B., Watson, A.J., Goldblatt, C., Boyle, R. and Lenton, T.M., 2011, Timing of Neoproterozoic glaciations linked to transport-limited global weathering. *Nature geoscience*, 4, 861-864.
- Na, K.C., 2009, Study on the stratigraphy and age of Ogcheon Supergroup. *Bulletin of the Natural Sciences*, 23, 1-7 (in Korean with English abstract).
- Oh, C.H., Trichet, J., Oh, J.H. and Rouzand, J.N., 1990, Relation between the thermal behaviour and the structure of kerogen in the Goesan uranium deposit, Korea. *Organic Geochemistry*, 16, 1, 609-619.

- Olcott, A.N., Sessions, A.L., Corsetti, F.A., Kaufman, A.J. and Oliviera, T.F., 2005, Biomarker Evidence for Photosynthesis During Neoproterozoic Glaciation. *Science*, 310, 471-474.
- Park, K.H., Lee, T.H. and Yi, K.W., 2011, SHRIMP U-Pb ages of detrital zircons in the Daehyangsan Quartzite of the Okcheon Metamorphic Belt, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 47, 423-431 (in Korean).
- Reedman, A.J. and Fletcher, C.J.N., 1976, Tillites of the Ogcheon Group and their stratigraphic significance. *Journal of the Geological Society of Korea*, 12, 107-112.
- Ridgwell, A.J., Kennedy, M.J. and Caldeira, K., 2003, Carbonate Deposition, Climate Stability, and Neoproterozoic Ice Ages. *Science*, 302, 859-862.
- Rothman, D.H., Hayes, J.M. and Summons, R.E., 2003, Dynamics of the Neoproterozoic carbon cycle. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100, 14, 8124-8129.
- Ryu, I.C. and Kim, T.H., 2009, Stratigraphy and Geological Structure of the Northwestern Okcheon Metamorphic Belt Near the Chungju Area. *Economical Environmental Geology*, 42, 9-25 (in Korean with English abstract).
- Sheppard, S.M.F. and Schwarz, H.P., 1970, Fractionation of carbon and oxygen isotopes and magnesium between coexisting metamorphic calcite and dolomite. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 26, 161-198.
- Suzuki, K., Dunkley, D., Adachi, M. and Chwae, U., 2006, Discovery of a c. 370 Ma granitic gneiss clast from the Hwanggangri pebble-bearing phyllite in the Okcheon metamorphic belt, Korea. *Gondwana Research*, 9, 85-94.
- Tziperman, E., Halevy, I., Johnston, D.T., Knoll, A.H. and Schrag, D.P., 2011, Biologically induced initiation of Neoproterozoic snowball-Earth events. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108, 37, 15091-15096.
- Valley, J.W., 1986, Stable isotope geochemistry of metamorphic rocks. In *Stable Isotopes in High Temperature Processes*. Mineralogical Society of America, *Reviews in Mineralogy*, 16, 445-489.
- Yi, J.-M., Kim, K.H., Tsuyoshi, T. and Iwao, K., 2000, REE and Sr isotopic compositions of carbonate pebbles in the phyllitic rocks of the Hwanggangni Formation, Okcheon zone. *Journal of the Geological Society of Korea*, 36, 257-278 (in Korean with English abstract).
- Yoon, C.H., 2009, Hydrothermal Alteration of Limestone in the Okcheon Belt by Stable Isotopes and Trace Elements. *Journal of the Korean Institute of Mineral and Energy Resources Engineers*, 46, 589-601 (in Korean with English abstract).
- Zhang, S., Jiang, G. and Han, Y., 2008, The age of the Nantuo Formation and Nantuo glaciation in South China. *Terra Nova*, 20, 4, 289-294.
- Zheng, Y.-F., 1990, Carbon-oxygen isotope covariation in hydrothermal calcite during degassing of CO₂: A quantitative evaluation and application to Kushikino gold mining area in Japan. *Mineralium Deposita*, 25, 246-250.
- Zheng, Y.-F. and Hoefs, J., 1993, Carbon and oxygen isotope covariations in hydrothermal calcites: Theoretical modeling on mixing processes and application to Pb-Zn deposits in the Harz Mountains, Germany. *Mineralium Deposita*, 28, 79-89.

Received : October 28, 2016

Revised : December 17, 2016

Accepted : December 21, 2016