

성류굴 내 호수구간의 수중통로에서 발견되는 동굴생성물의 고기후적 의미

김 련^{1),2)}, 우경식^{1),2)*}, 김봉현¹⁾, 박재석^{1),2),3)}, 박현영^{1),3)}, 정혜정²⁾, 이종희^{1),2)}
^{1)한국동굴연구소, 2)강원대학교 지질학과, 3)Diver's Republic}

Paleoclimatic Implication of Cave Speleothems in the Submerged Parts of the Seongnyu Cave, Republic of Korea

Ryeon Kim^{1),2)}, Kyung Sik Woo^{1),2)*}, Bong Hyeon Kim¹⁾, Jae Suk Park^{1),2),3)},
Hun Young Park^{1),3)}, Hee Jeong Jeong²⁾, Jong Hee Lee^{1),2)}

^{1)Cave Research Institute of Korea, 2)Kangwon National University, 3)Diver's Republic}

요약 : 성류굴은 전체적으로 북동-남서방향으로 하부고생대 조선누층군 탄산염암층 내에 발달하고 있는 수평동굴이며, 동굴 내 3개 구간에 규모가 큰 호수가 분포한다. 성류굴의 주굴의 길이는 약 330m, 지굴의 길이는 약 540m로 총 연장은 약 870m이며, 이중에서 수중탐사를 통해 약 85m 정도의 수중구간을 발견하였다. 성류굴 내에는 종유관, 종유석, 석순, 석주, 유석, 휴석, 동굴방패, 커튼(혹은 베이컨시트)과 일부구간에 동굴진주, 석화, 곡석, 부유방해석 등이 분포한다. 특히 수중구간 내에서도 과거에 성장하였던 동굴생성물이 발견되었으며, 물속에서 분포하는 종유석, 석순, 유석, 석주 등에서는 과거 동굴바다를 흐르던 동굴수에 의해 침식(혹은 용식)된 흔적이 발견된다. 동굴생성물 중에서 종유석, 석순, 유석, 석주와 같은 동굴생성물은 동굴 내 물 속에서는 자랄 수 없기 때문에, 이들은 과거 동굴 내에 호수가 존재하지 않던 시기에 성장하였다가 호수물의 수위가 높아지면서 호수 내에 잠긴 것으로 판단된다. 이러한 사실은 성류굴 내 수중구간의 동굴생성물이 과거 해수면이 낮았던 빙하기 동안에 형성되었음을 시사한다. 따라서, 이 동굴생성물에 대한 지속적인 연구는 한반도 주변의 해수면 변동과 고기후 변화를 추정하는데 매우 중요한 자료를 제공할 것으로 판단된다.

주요어 : 성류굴, 동굴생성물, 빙하기, 고기후, 석회동굴

Abstract : Seongnyu Cave have developed along the NE-SW direction in carbonate rocks of the Joseon Supergroup. The cave mostly shows horizontal passages and contains three lakes. The main passage is about 330 m long with 540 m-long branches, thus the total length of the cave is about 870 m. Through cave diving, about 85 m-long new passages were discovered. Numerous speleothems such as soda straws, stalactites, stalagmites, columns, flowstones, rimstones, cave shields, cave corals, curtains (and bacon sheets), cave pearls, cave flowers, helictites and calcite rafts can be found in the cave. Especially, some speleothems which were believed to have grown in the past were discovered in the submerged passage, and a few stalactites, stalagmites, flowstones and columns were eroded (or corroded) by the cave stream that flowed on the floor. Because these speleothems only grow in subaerial environments within limestone caves, it appears that they grew when there was no lake in the cave and became submerged as the lake level rose in the cave. The presence of these speleothems in the lakes indicate that they only grew during glacial periods when sea-level was lower. Therefore, detailed investigation of these speleothems will provide invaluable information on paleoclimatic evolution around the Korean

* corresponding author: Kyung Sik Woo, Tel. 033-250-8556, E-mail. wooks@kangwon.ac.kr

peninsula in the future.

Key Words : Seongnyu Cave, speleothem, glacial period, paleoclimate, limestone cave

1. 서론

인간이 생활하고 적응해온 자연환경은 우리의 중요한 서식처이며 우리에게 생명의 기원과 진화의 기록, 지구의 생성과 지구표면 환경의 변화 등과 같은 여러 중요한 자료가 기록되어 있는 장소이기도 하다. 많은 지구의 역사에 대한 자료가 지구 표면에 존재하는 암석이나 퇴적물을 통해 밝혀지고 있으며, 특히 지구 표면의 환경변화에 대한 자료들은 주로 해양환경 내의 퇴적물, 산호와 같은 생물체의 골격(skeleton)을 통해 얻어져 왔다. 또한 육상환경 중에서 퇴적된 호수퇴적층, 풍성퇴적층, 동굴생성물에도 이에 대한 자료가 있으며 극지역의 빙하에서도 많은 자료가 밝혀지고 있다(e.g., Ruddiman, 1997, 2003; Zachos *et al.*, 2005; Jo *et al.*, 2010a). 특히 최근에 사회와 학계의 중요한 관심사가 되고 있는 대기의 온실가스 증가에 따른 지구온난화는 인류의 생존을 위협하고 있으며, 학자들은 다각도로 미래의 기후변화를 예측하기 위해 과거의 기후변화(고기후)를 추적하고 있다(IPCC, 2007). 이러한 고기후 자료에 최근에 많은 기여를 하고 있는 것이 천연동굴 내 성장하는 동굴생성물이다(Jo *et al.*, 2010b). 천연동굴은 인간이 출입할 수 있는 자연현상에 의해 생성된 공동으로 정의되며(Gillieson, 1996), 학술적 및 자연유산적 가치가 높은 주요한 관광지 중의 하나이다. 국내의 천연동굴은 약 1,000여개가 분포할 것으로 학자들은 추정하고 있으며, 그 중에서 강원도, 충청북도 일원에는 석회동굴이, 그리고 제주도에는 용암동굴이 분포한다. 해식동굴은 주로 퇴적암이 노출되어 있는 해안지역에 많이 발달한다.

석회동굴은 빗물이 지하로 침투하여 지하수면 근처에서 주로 생성되거나, 해안가에 석회암이 분

포할 경우에는 해수와 담수가 만나는 혼합대(mixing zone)에서 만들어진(James and choquette, 1990) 석회암의 그 발달 정도와 지하수면의 위치에 따라 고에너지동굴, 중에너지동굴, 저에너지동굴로 구분된다(우경식, 2002). 고에너지동굴은 동굴 내에 지하수가 활발히 흘러서 동굴이 계속 확장되는 동굴이며, 중에너지동굴은 우기 시에 일시적으로 바닥에 동굴수가 흐르거나 간헐적으로 천장이나 벽면으로부터 물이 공급되는 동굴이다. 저에너지동굴인 경우에는 동굴 내에 동굴수가 거의 흐르지 않고 우기 시에 천장으로 약간의 물이 공급된다. 일반적으로 동굴 내에 생성되는 동굴생성물 중에서 휴석이나 휴석 내의 동굴팝콘, 부유방해석과 같은 동굴생성물만이 물 속에서 성장하며, 대부분의 동굴생성물은 일시적이나 지속적으로 동굴 속으로 공급되는 물에서 만들어지지만 동굴 내의 통기대 환경에서 성장한다. 이러한 동굴생성물에는 종유관, 종유석, 석순, 석주, 유석, 동굴방패, 커튼 등이 있다. 하지만 동굴산호, 석화, 곡석과 같은 동굴생성물은 동굴 내부로 물의 공급이 아주 적게 일어나는 지역에서 성장한다(Woo and Won, 1989). 즉 동굴 내부로 서서히 공급되는 물이 벽면이나 천장, 바닥에 얇은 막의 물로 만들어지면서 주로 증발작용에 의해 성장한다(Hill and Forti, 1997). 따라서 석회동굴 내에서 성장하는 동굴생성물 중에서 물속에서 성장하는 것과 대기환경에서 적게 공급되는 물에 의해 성장하는 동굴생성물은 확실히 구분된다.

지구의 표면은 플라이오세(약 3백만 년 전)에 북극에 빙하가 덮이기 시작하면서, 전체적으로 많이 추워졌다(DeConto and Pollard, 2003). 특히 신생대 제4기인 플라이스토세에 이르면서 북극 지역 부근에 존재하는 빙하의 크기가 커졌다 작아짐을

반복하면서 지구표면의 빙하기와 간빙기가 반복되었다(Lisiecki and Raymo, 2005). 학자들마다 약간의 차이는 있지만 신생대 제4기 동안 20회 이상으로 빙하기와 간빙기가 반복되었다고 학자들은 주장하고 있다(Ding *et al.*, 2002). 지구표면에 존재하는 물의 양이 거의 일정하게 유지되며 순환하기 때문에 빙하기 동안에는 해수면이 하강하고, 간빙기 동안에는 해수면이 상승한다. 지금부터 약 18,000년 전인 마지막최대빙하기(Last Glacial Maximum)동안에 해수면은 현재보다 약 120미터 정도 낮았다는 것은 이미 학계에 잘 알려져 있다(Fairbanks, 1989; Shackleton, 2000; Siddall *et al.*, 2003; Peltier and Fairbanks, 2006). 따라서 이러한 빙하기와 간빙기의 반복은 해안선 근처에 분포하는 석회동굴에 많은 영향을 미쳤을 것으로 생각할 수 있다. 성류굴은 경상북도 울진군에 있으며, 해안선으로부터 약 3.5 km 떨어진 지점에 위치한다. 성류굴은 수평동굴로서 동굴 내에 여러

광장에 호수가 발견된다. 입구 부근의 호수는 주변의 왕피천이 흘러들어 다시 나가고 있으나, 내부의 호수구간은 항상 동굴수에 의해 채워져 있다. 이 논문의 목적은 성류굴 내에 많이 분포하는 동굴생성물 중에서 호수구간 내에 분포하는 동굴생성물에 대한 고기후학적 의미를 고찰하는데 있다.

2. 성류굴 개관과 주변지질

성류굴은 행정구역상 경상북도 울진군 근남면 구산리 산 30번지에 해당한다. 성류굴을 배태하고 있는 선유산 성류봉은 해발 약 199m이며 일반인에게 개방되어 있는 동굴의 입구(제1입구)는 해발 약 20m 지점의 북위 36° 57' 21.87", 동경 129° 22' 44.34" (세계좌표 WGS84 기준)에 위치한다(그림 1). 이 동굴은 1963년 5월 7일에 천연기념물로 지정되면서 같은 달에 민간 위탁관리 방식으로 일

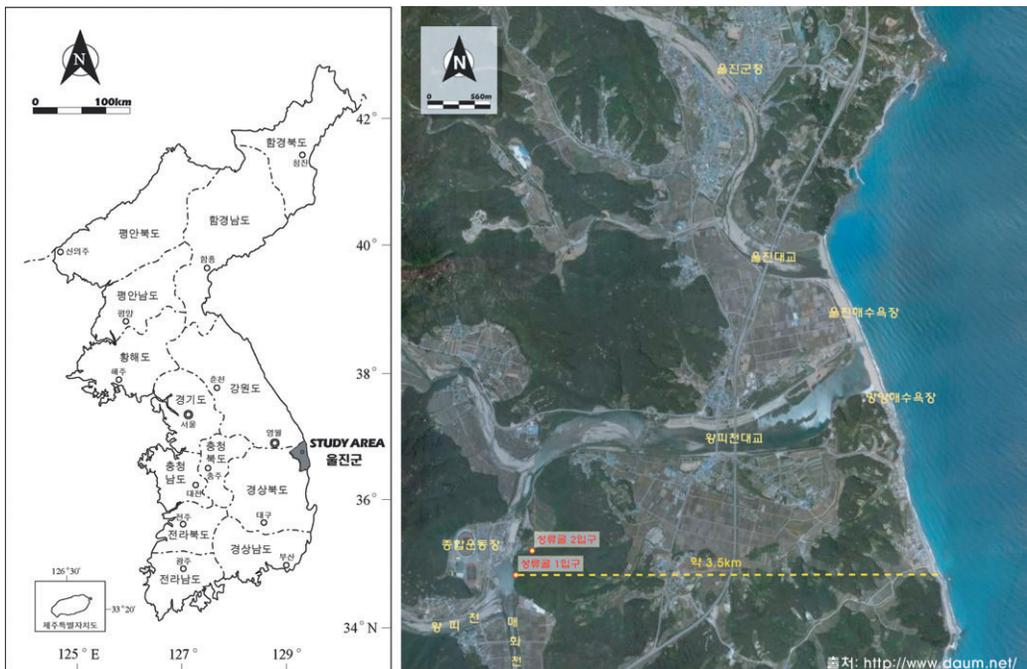


Fig. 1. Location of the Seongnyu Cave

반인들에게 일부 구간이 개방되었으나, 1976년에 울진군에서 직접 동굴에 대한 관리를 시행하였다. 성류굴의 입구 앞에는 왕피천이 흐르고 있으며 이하천의 물이 주로 우기인 여름철에 동굴 내부로 흘러들어갔다 다시 나온다. 동굴의 전체 규모는 약 870m이며, 이중에서 개방된 구간이 약 270m이다(우경식 외, 2007b). 성류굴은 제1입구에서 전반적으로 동북 방향으로 발달해 있다(그림 2). 성류굴은 다른 입구인 제2입구는 비교적 좁은 틈으로 이루어지며, 해발 약 25m 지점의 북위 36° 57' 25.70", 동경 129° 22' 49.12"(세계좌표 WGS84 기준)에 위치한다(김련 외, 2010).

성류굴이 위치한 근남면 주변에는 선캄브리아 시대의 원남통에 속하는 동수곡층과 장군석회암층 및 중생대 화강암이 분포하는 것으로 제안된 바 있다(윤석규와 신병우, 1963). 윤석규와 신병우(1963)

는 이 지역의 석회암을 선캄브리아 누대의 장군석회암으로 기재하였으며, 층서적으로는 원남통의 최상부층으로 선캄브리아 시대의 울리층 아래 놓이는 것으로 해석하였다. 또한 이 석회암층을 비롯한 경상북도 봉화군 장군광산 부근과 평해에 분포되는 석회암과 함께 시대미상이나 선캄브리아 시대의 장군석회암으로 기술되거나 원남통을 부정함으로 피복하는 변성퇴적암류로 기재된 바 있다(이동진 외, 1993). 김옥준 외(1963)는 이 지역의 퇴적암을 후포리층으로 기재하였으며, 후포리층은 많은 단층과 습곡으로 교란되어 있어 주향과 경사를 유지하고 있지 않다고 하였다. 이 층은 석회암, 암회색 편암, 셰일, 규암으로 구성되어 있으며 후포리층 내 석회암은 결정질석회암, 어란상(Oolitic) 석회암, 층식석회암, 호상석회암으로 분류되었다. 이동진(2000)은 경상북도 울진군 근남면 주변에 고생대 퇴적암인 조선누층군이 분포하고 있을 가능성이 있다고 제시하였으며, 대한광업진흥공사는 2000~2001년까지 부가가치가 높은 산업원료 광물에 대하여 정밀조사를 실시하는 과정에서 암상이나 층서를 대비해 본 결과 연구지역의 변성퇴적암류는 전기고생대의 조선누층군과 대비됨을 제시하였다(임병렬 외, 2003). 임병렬 외(2003)는 장군석회암층이 석회암층으로 이루어진 단일층이 아니라 다양한 암상으로 구성된 점에 근거하여 이 층을 하부로부터 매산층, 구산리층, 남수산층, 송촌층, 몽천층, 금매리층으로 구분하고, 각 층을 암상의 특성으로 보아 전기고생대 조선누층군의 묘봉층, 대기층, 화절층, 동점층에 대비하였다. 하지만 최근에 김련 외(2010)는 성류굴 주변에 나타나는 암상과 층서를 기준으로 이 층은 태백층군에 대비시켜 하부로부터 대기층, 화절층, 동점층, 그리고 근남층으로 제안하였다.

성류굴 주변에 나타나는 대기층은 주로 괴상의 유백색의 결정질 석회암으로 이루어져 있다. 석회암은 석회암 내에 포함되어 있던 원래의 우이드

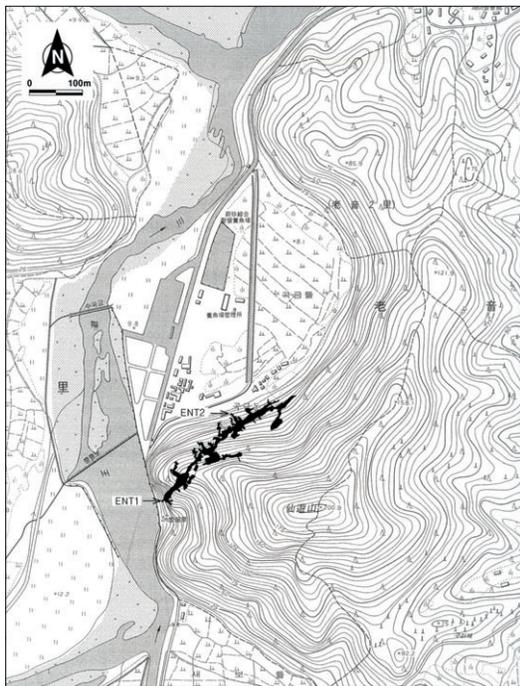


Fig. 2. Location map of the Seongnyu Cave. Seongnyu Cave (arrow) is shown as the black area with two entrances (ENT1 & ENT2).

(oid)를 포함한 탄산염 입자가 거의 발견되지 않으며, 이는 대기층 석회암이 심한 열수변성작용에 의해 결정질 석회암으로 변하면서, 원래의 퇴적조직과 구조가 거의 남아 있지 않다고 제안되었다(김련 외, 2010). 하지만 석회암 내에 매우 드물게 발견되는 우이드는 성류굴 주변의 대기층도 다른 지역에 나타나는 태백층군의 대기층과 같이 천해에서 퇴적되었음을 나타낸다(박병권과 한상준, 1986). 화절층은 다른 지역 태백층군의 화절층과 같이 주로 리본암으로 이루어져 있다. 동점층은 거의 동굴의 입구 부분까지 나타나며, 주로 암록색의 사암 내지 규암으로 이루어져 있다. 김련 외(2010)는 동점층의 암석들이 구조적인 운동을 심하게 받아 구성하고 있는 입자의 조직은 퇴적암의 조직을 거의 잃어버린 상태라고 기술하였다. 또한 동점층은 주로 석영 입자로 이루어져 있고 상부로 갈수록 석회성분이 포함되며, 이는 다른 지역 태백층군의 동점층에서 전반적으로 나타나는 경향이다(Woo, 1992). 동점층을 정합적으로 덮고 있는 주로 담홍색 내지 암회색의 석회암이 성류굴을 배태하고 있는 석회암이다. 이 층은 석회암 내에 화석이 거의 발견되지 않으며, 심한 변성과 변형 작용을 받아 대부분 결정질 석회암으로 나타난다(김련 외, 2010).

우경식 외(2007a)는 울진 성류굴-평해 지역에 나타나는 퇴적암의 층서와 암상이 조선누층군 태백층군과 매우 유사하기 때문에 태백층군과 같은 층명을 사용하였다. 하지만 성류굴을 배태하며 동점층 상부에 나타나는 담홍색 석회암층은 층서적으로 태백층군의 두무골층과 대비되지만 태백지역의 두무골층과는 암상이 많은 차이를 보인다. 또한 이 층 내에는 태백층군의 막골층에서 나타나는 특징은 전혀 발견되지 않는다. 이러한 이유로 이 석회암층은 새로이 근남층으로 제안된 바 있다(김련 외, 2010).

3. 연구방법

성류굴의 발달방향과 분포를 알기 위해 동굴에 대한 측량을 실시하여 성류굴의 평면도(1 : 500)를 작성하였다(그림 3). 또한 동굴 내 지형적으로 특징이 다른 구간을 선정하여 64개 지점에서 횡단면도를 작성하였으며(우경식 외, 2007b), 동굴의 입구에서 동굴의 막장(끝 지점)까지 주 통로를 따라 동굴의 높이와 바닥의 경사를 측정하여 종단면도를 작성하였다(그림 4). 또한 성류굴 내 호수구간에 대해 수중동굴탐사를 총 4차례 실시하여 성류굴 내 수중통로의 연장 가능성과 아직 기존의 동굴

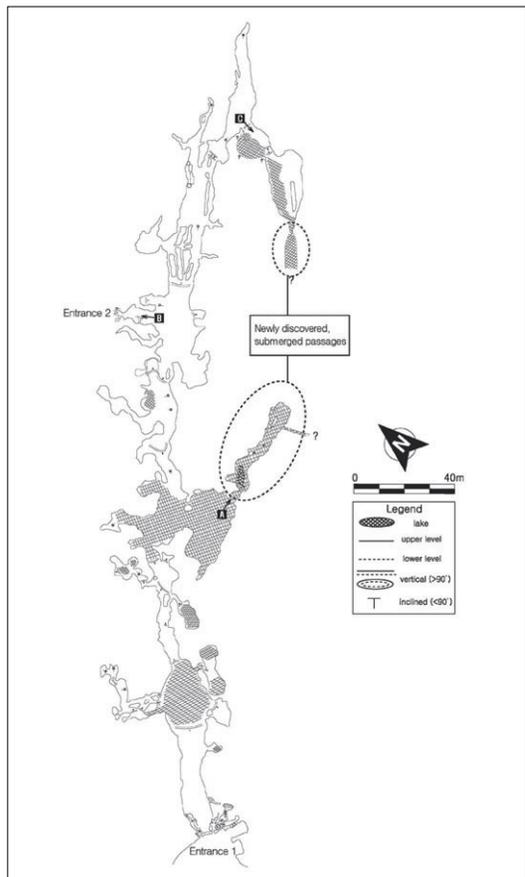


Fig. 3. Plan map of the Seongnyu Cave. Newly discovered submerged passages are shown in dotted circles with the entrances (A & C).

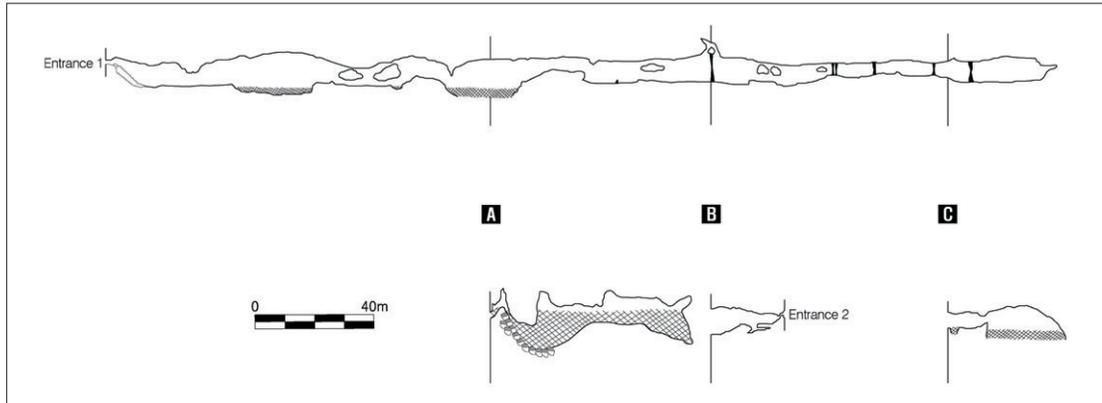


Fig. 4. Longitudinal section of the Seongnyu Cave. Note the passage is more or less horizontal.

탐사를 통해서 조사되지 않았던 구간에 대한 통로의 발달방향, 규모 등을 조사하였다(그림 3; 우경식 외, 2007b).

성류굴 내 분포하는 동굴생성물의 분포를 조사하기 위해 동굴 전체를 동방의 위치와 분포에 따라 5개 구역으로 구분한 후, 각 구역별로 천장, 벽면과 바닥으로 구분하여 주요 동굴생성물을 기재하였다(우경식 외, 2007b). 동굴생성물 중에서 대기 중에서 성장한 동굴생성물과 수중에서 발견된 동굴생성물의 조직을 구분하기 위해 각각의 시료를 채취하였다. 표본 채취는 이미 훼손된 동굴생성물에 국한하여 동굴내부의 환경을 훼손하지 않도록 주의하였다. 또한 동굴 내에서 채취한 동굴생성물의 표본의 조직을 관찰하기 위하여 박편으로 제작하여 편광현미경과 실체현미경을 이용하였다.

4. 연구결과 및 토의

4.1. 동굴개관

성류굴은 근남층 석회암 내에 전체적으로 북동-남서방향으로 발달한다(그림 2, 3). 동굴의 통로는 수직통로가 거의 발달하지 않는 수평동굴이며, 북동방향의 절리면을 따라 일자형으로 발달한다(그림 3).

동굴 내 주 통로를 따라 약간의 가지굴이 존재하지만 그 발달 정도는 매우 미약하다. 동굴의 막장 부근(그림 3의 C) 광장으로부터 호수가 있다. 성류굴 내부에는 모두 3개 지점에는 호수가 존재하며, 이 호수들에는 동굴수가 채워져 있다(그림 3). 이 중에서 입구에 가까운 첫 번째 호수는 왕피천으로부터 공급되는 강물에 의해 호수물이 채워지기 때문에 주로 우기인 여름철에만 호수물이 많이 존재하며, 건기인 겨울철에는 아주 소량의 물이 있다. 하지만 두 번째와 세 번째 호수는 일 년 내내 항상 동굴수가 있다. 성류굴 통로의 주된 발달 방향으로 존재하는 주굴의 길이는 약 330m, 가지굴의 길이는 약 540m로서 동굴의 총 연장은 약 870m에 이른다. 이 중에서 일반인들에게 개방된 구간이 약 270m이다. 우경식 외(2007)는 그림3의 A지점으로부터, 그리고 C지점으로부터 각각 수중 조사를 실시하여 새로운 통로를 발견하였다. 이 조사를 통하여 A지점으로부터 새로이 발견된 수중통로의 길이는 약 65m이다. 또한 수중 조사를 실시하면서 이 통로 내에서 다수의 동굴생성물을 발견하였다. 또한 C지점으로부터 수중 조사를 하여 새로이 발견된 구간은 약 20m에 이르며, 이 통로는 A지점으로부터 발견된 수중통로와 연결되어 있을 가능성이 매우 높다(그림 3).

4.2. 동굴생성물

성류굴 내부에는 다른 석회동굴과 같이 일반적으로 발견되는 종유관, 종유석, 석순, 석주, 유석, 휴석, 동굴방패, 커튼, 베이컨시트와 일부 구간에 소규모로 동굴진주, 석화, 곡석, 부유방해석 등이 분포한다. 하지만 성류굴 내에는 전체적으로 다른 동굴에 비해 유석, 종유석과 석순이 전체적으로 우세하게 성장하고 있다(그림 5). 성류굴 공개구간 내에는 대부분 인위적으로 훼손된 동굴생성물이 분포하고 있다. 공개구간 내에는 높은 천장으로부터 성장한 대형종유석과 그 하부로부터 성장한 대형석순, 그리고 종유석과 석순이 서로 만나서 형성된 대형석주들이 다른 동굴에 비해 많이 발견된다. 또한 다른 동굴에서 찾아보기 힘든 동굴생성물 중 동굴방패의 경우에는 성류굴에서 우세하게 나타난다. 특히 강원도와 충청북도에 분포하는 다른 석회

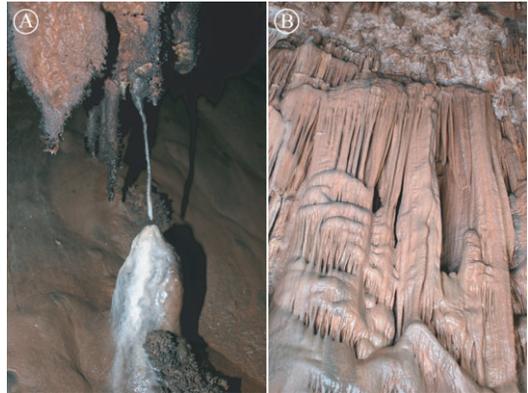


Fig. 5. Speleothems in Seongnyu Cave. A) A Soda Straw and stalagmite. B) flowstone growing on the wall of the cave.

동굴에 비해 동굴방패가 우세하게 나타난다. 성류굴 내 동굴생성물의 가장 큰 특징은 수심이 5~7m 정도가 되는 호수 내에 대형 석순이 존재하며, 천장으로부터 바닥을 향해 성장한 대형 종유석이 호



Fig. 6. Distribution of the speleothems on the cave ceiling (A), and cave wall and floor (B) in the submerge passage.

수 속으로 잠겨 있는 것이다. 또한 수중탐사를 통해 새롭게 발견된 수중통로 구간에서도 다수의 동굴생성물이 발견된다(그림 6, 7). 이 구간의 일부 지역에는 상부의 수면위에 공기층이 존재하기도 한다(그림 6). 수면 위에는 종유관, 종유석, 유석, 석순, 베이컨시트 등 다양한 동굴생성물들이 성장하고 있으며 이 중 대형종유석과 유석은 수면의 수위변화에 따라 잠기는 부분도 있다(그림 6). 이 수중통로 내에는 다수의 종유석, 유석, 석순, 석주, 커튼과 같은 동굴생성물이 발견된다. 이러한 동굴생성물은 일반적으로 동굴 내에서 물속이 아닌 대기환경에서 천장으로부터 떨어지는 물이나 벽면이나 바닥을 따라 흐르는 물에 의해 성장한다고 알려



Fig. 7. A stalagmite discovered on the cave floor of the submerged passage. Note the thin part in the lower part. This could result from erosion/corrosion when stream flows strongly on the cave floor during a glacial period.

져 있는 동굴생성물이다. 이러한 사실은 이 동굴생성물이 과거 이 구간이 수중통로가 아닌 일반적인 동굴환경으로 존재하였을 때 성장했다고 판단할 수 있다. 특히 물속에서 분포하고 있는 종유석, 석순, 유석, 석주와 벽면 등에서 동굴 바닥을 흐르던 동굴수에 의해 침식된 흔적이 발견되는데(그림 7, 8), 이는 이러한 동굴생성물이 대기환경에서 생성된 후에 바닥을 흐르던 동굴수에 의해서 침식(혹은 용식)되었다는 것을 지시한다.

성류굴 내 훼손되어 바닥에 있던 몇 개의 동굴생성물을 채취하여 이들의 조직을 관찰하였다. 종유석의 경우에는 외부 형태는 종유관과 종유석의 중간 형태를 보인다(그림 9A). 즉, 종유관의 성장이 멈추고 천장에서 공급되는 물이 증가하면서 종유석으로 변한 경우로서 종유석의 내부는 완전히 비어 있는 상태는 아니며 일부분이 등립질 방해석에 의해 채워져 있는 상태이다(그림 9C). 종유관 부분은 그 두께가 거의 일정하며 거의 단결정의 방해석으로 이루어져 있다(그림 9C). 또한 종유관의 외부는 주상의 방해석이 성장하면서 종유석의 형태로 변한 것을 알 수 있다. 종유관으로부터 종유석으로 성장한 주상 방해석은 거의 등두께(isopachous)를 보여주지만, 종유관의 빈 내부를 충전하고 있는 등립질 방해석의 두께는 다양하게 나타난다. 이는 간



Fig. 8. Speleothems in the submerged part of the passage. Stalactites, stalagmites, columns and flowstones are abundant.

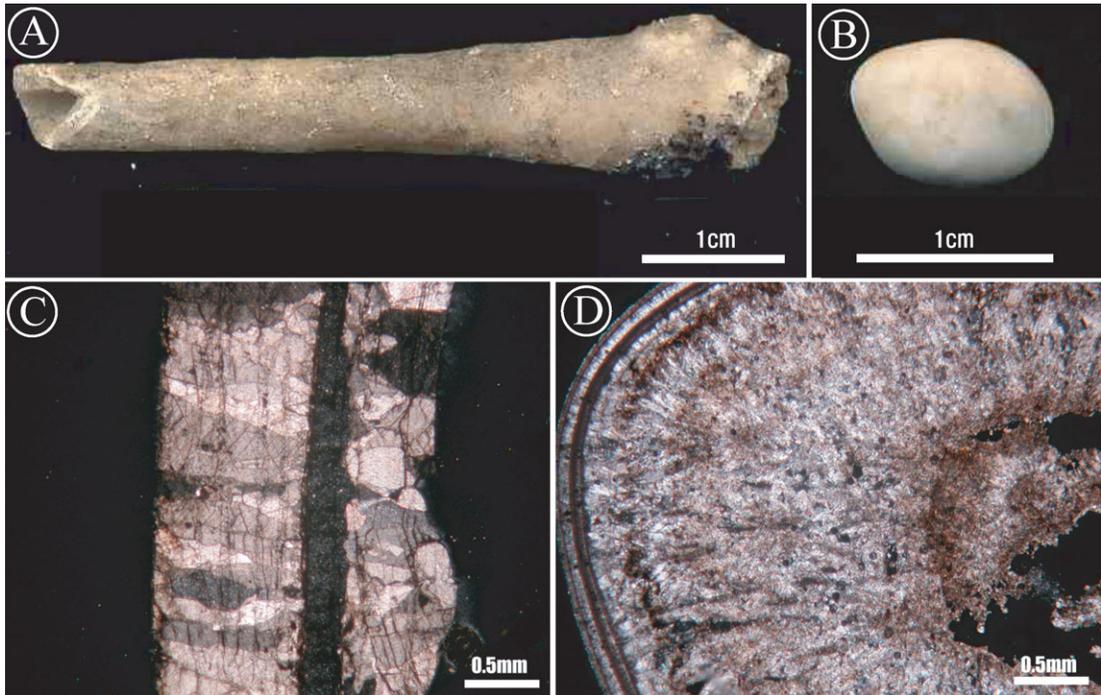


Fig. 9. A & C) Photo of a stalactite and its thin section photomicrograph. The hole within the stalactite in (A) implies that the stalactite grew over the soda straw. The extinct part in the central part of the photo (C) is the part of the soda straw. Unit extinction of the soda straw calcite indicate that the calcite is a single crystal. Note uneven growth of calcite crystals with the hole of the soda straw. The calcite crystals are mostly composed of equant to bladed. The fibrous calcite on the left part of (C) is the part of the stalactite. Note the complete optical discontinuity between the calcite in the soda straw and the calcite in the stalactite. B & D) Photo of a cave pearl and its thin section photomicrograph. The cave pearl is mostly composed of randomly oriented fibrous calcite in (D). Note the disincetive growth laminae towards the outer part. Above the growth laminae, calcite crytals grew more or less normal to the substrate.

혈적으로 종유관 내부로 물이 공급되었는데. 그 물이 종유관 내부를 통과하면서 일시적으로 정지되면서 그 부분에서 등립질 방해석의 성장이 더 많이 이루어진 결과로 생각된다. 전체적으로 하부는 종유관과 유사하게 일정한 직경을 띠고 있으며, 상부로 갈수록 점차 직경이 굵어지는 특징을 보인다.

동굴진주는 외부 표면이 흰색을 띠고 있으며, 잘 마모되어 기복 없이 매끄러운 형태를 보여준다(그림 9B). 동굴진주 내부의 조직은 두꺼운 갈색의 성장선을 기준으로 얇게 섬유상 방해석으로 이루어진 희색의 외부층과 성장선이 뚜렷이 나타나지 않으며 섬유상 방해석이 어느 정도 무질서적으로 성장한 황토색의 내부층으로 구별된다. 내부층 내에

동굴진주가 성장하기 시작한 중앙부에서는 뚜렷한 핵이 관찰되지 않고 갈색의 마이크로이트로 이루어져 있는 것이 특징이다. 이 핵 부분은 주로 물리적으로 세립의 방해석 결정으로 이루어져 있다. 동굴진주는 내부층의 최외곽 부분은 불규칙한 경계를 보이면서 형성되어 있고 매우 성긴 결정구조로 보아 이 동굴진주는 작은 풀(pool) 내에서 피졸라이트(pisolite)로 성장하여 내부층을 만들었으며, 이후 구르면서 방해석이 외부를 피복하면서 동굴진주로 성장한 것으로 판단된다(그림 9B, D).

성류굴 호수 내에서 채취한 석순은 깨진 틈을 따라 용해된 형태를 보인다(그림 10A). 성장방향에 수직으로 절단하여 관찰한 결과, 이 용해된 틈 내

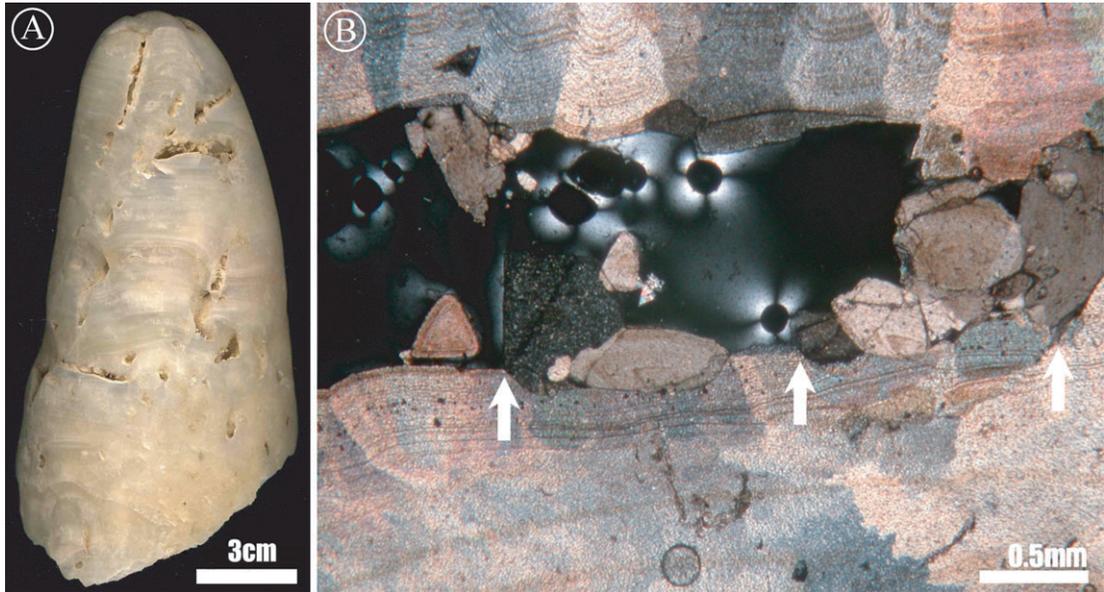


Fig. 10. A) A stalagmite collected from the cave flow of the submerged passage. Note that the surface of the stalagmite are smooth probably due to erosion and corroded pits are present on the surface. B) Thin section photomicrograph of (A). Corroded surface (arrows) can be observed within the pits. Note the calcite grown in the pit.

에는 이차적으로 성장한 등립질 방해석이 성장하고 있었던 것으로 나타났다(그림 10B). 따라서, 이 동굴호수의 화학적 성질 또한 방해석에 대해 불포화 상태인 시기에는 용해가 우세하게 발생되었으며, 방해석에 대해 과포화 상태인 시기에는 이러한 작은 등립질 방해석이 성장하였음을 나타낸다.

물속에서 분포하고 있는 중유석, 석순, 유석, 석주 등이 동굴수에 의해 침식된 흔적을 찾을 수 있다. 중유석, 석순, 유석, 석주 등의 동굴생성물은 동굴 내 물 속에서는 자랄 수 없기 때문에, 이들은 호수의 물이 없었던 기간에 성장하였다가 호수물의 수위가 높아지면서 현재 호수 내에 잠겨 있는 것으로 판단된다. 이러한 사실은 성류굴 내에 물속에 잠겨 있는 동굴생성물이 해수면이 낮았던 빙하기 동안에 형성되었다는 것을 의미하여, 이 동굴생성물에 대한 지속적인 연구는 한반도 주변의 해수면 변동과 고기후 변화를 추정하는데 매우 중요한 자료를 제공할 것으로 판단된다.

5. 성류굴 수중구간의 고기후적 의미

이미 언급한 바와 같이 신생대 제4기 동안 지구표면은 빙하기와 간빙기의 반복을 거처왔다(Lisiecki and Raymo, 2005; Ding *et al.*, 2002). 이러한 빙하기와 간빙기의 반복은 지구와 태양의 천체운동(Milankovitch cycle)과 관련이 있으며(Shackleton, 2000), 과거 빙하기 동안에는 많은 양의 해수가 극지방의 빙하의 형태로 저장되면서 해수면이 현재보다 현저히 낮았다고 잘 알려져 있다. 해수면이 낮아지면 바다쪽으로 혼합대(mixing zone)와 지하수면(water table)도 함께 이동하게 될 것이다. 이들의 이동거리는 해수면의 하강폭과 직접적인 관계가 있다. 따라서 해안가에 인접한 위치에 있는 성류굴은 이와 같은 해수면 변동에 많은 영향을 받았을 것으로 생각할 수 있다. 현재 성류굴 내의 호수구간과 수중통로 내에는 다수의 동굴생성물이 분포한다. 이들 동굴생성물들은 천장으로부터 떨어지는 물방울에 의해 성장하는 중유관,

중유석, 석순, 석주, 커튼과 천장과 벽면으로부터 흘러내리는 물에 의해 성장하는 유석이 대부분이다(우경식, 2002; Woo, 2005). 이는 이들 동굴생성물이 공기가 차있는 동굴 내에서 성장했으며, 이들의 성장 당시에는 동굴 통로 내에 물이 차있지 않았다는 것은 지시한다. 그렇다면, 이들 동굴생성물은 지하수면이 낮았던 빙하기에 성장했다는 것을 의미한다.

이러한 동굴생성물이 현재와 같이 물속에서 존재하게 된 과정이 모식도로 표현되어 있다(그림 11). 그림 11A는 과거 빙하기와 간빙기의 반복으로 해수면이 계속 변화하던 중에서 해수면이 낮았던 빙하기를 지시한다. 빙하기 동안에는 시기에 따라 차이는 있지만 대략 현재보다 약 100미터 이상 해수면이 더 낮았다(Fairbanks, 1989). 그 결과 혼합대와 지하수면도 함께 낮았다. 이 시기 동안에 성류굴의 모든 통로에는 물이 거의 없었을 것으로 추정된다. 성류굴은 그 당시 중에너지동굴로서 동굴에 유입되는 물은 오직 천장으로부터 떨어지는 물방물이나 우기 동안 벽면이나 바닥에 일시적으로 흐르던 동굴수가 전부이었을 것이다. 이러한 물의 공급에 의해 성류굴 내 현재 수중에 잠겨있던 구간도 지속적으로 동굴생성물이 성장하였다. 하지만 아직도 과거 여러 차례 빙하기들 중에서 어느 시기에 주로 이러한 동굴생성물이 성장했는지는 현재의 자료로서는 알 수 없다. 이를 규명하기 위해서는 동굴생성물에 대한 연령측정이 병행되어야 할 것으로 생각된다. 빙하기가 끝나고 간빙기로 변하면서 해수면 상승과 함께, 혼합대와 지하수면도 상승하였을 것이다. 지하수면이 상승하면 하천의 수면도 상승하게 되고 성류굴 내에서 지속적으로 바닥에 동굴수가 흐르게 되었을 것이다(그림 11B). 그 결과 이미 성장하고 있던 석순의 일부나 벽면은 흐르던 물에 의해 침식(용식)을 받게 되기도 하였다(그림 8). 간빙기에 이르면서 해수면은 지속적으로 상승하고, 그 결과 현재와 같이 성류굴의 여러

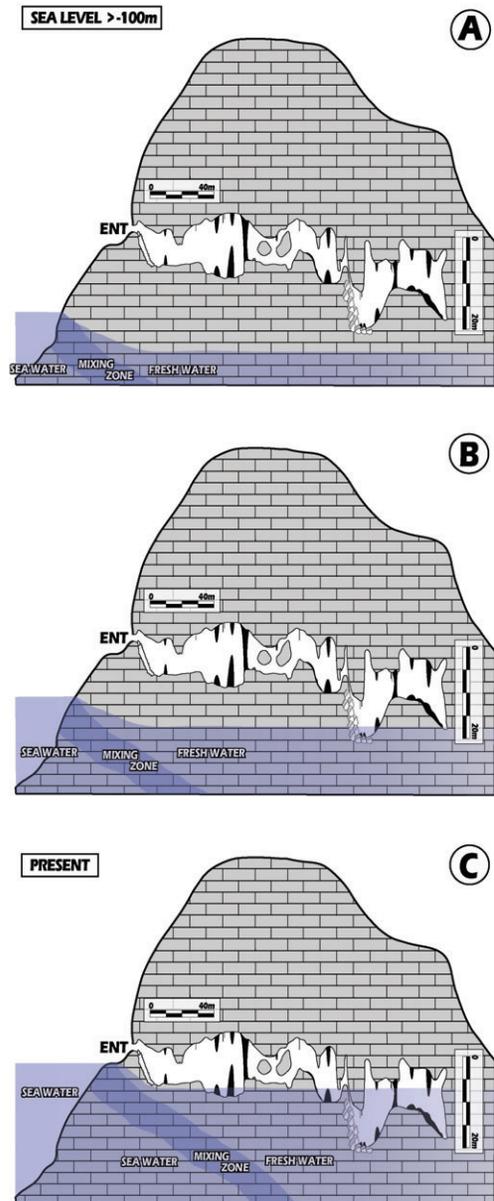


Fig. 11. Schematic diagram of the lake level change within the Seongnyu Cave from fully glacial (A) and transitional (B) to interglacial (C) period.

구간의 통로들이 물에 차있게 되었으며, 이들 동굴생성물의 성장은 멈추게 되었다(그림 11C). 공기로 채워져 있던 통로가 물속에 잠기게 되면서 동굴생

성물에 다른 영향이 미치게 되었다. 우기 동안에 동굴 내로 뜬짐상태로 유입되는 물속에 많은 세립질의 이질 퇴적물이 동굴생성물의 표면에 퇴적되기 시작하였다. 따라서 성류굴 내에는 과거 빙하기 동안에만 성장했던 동굴생성물과 빙하기/간빙기 동안에 지속적으로 성장했던 동굴생성물이 모두 존재하는 학술적으로 매우 중요한 동굴이라고 평가할 수 있다. 해수면의 변동에 따라 민감하게 반응하였던 성류굴 내의 동굴생성물에 대한 추가적인 연구는 동굴생성물의 생성과정과 한반도의 고기후에 대한 연구를 수행하는데 중요한 자료를 제공할 수 있을 것이다.

6. 결 론

성류굴은 중에너지동굴에 해당되는 석회동굴이다. 이 동굴은 태백층군의 근남층 내에 배태되어 있으며, 전체적으로 수평굴에 해당된다. 동굴 내에는 3개 지점에 호수가 있으며, 호수구간으로부터 60미터 이상의 수중통로가 발달한다. 성류굴 내의 호수구간과 수중통로 내에는 다수의 동굴생성물이 분포한다. 이들 동굴생성물들은 천장으로부터 떨어지는 물방울에 의해 성장하는 종유관, 종유석, 석순, 석주, 커튼과 천장과 천장과 벽면으로부터 흘러내리는 물에 의해 성장하는 유석이 대부분이다. 이는 이들 동굴생성물이 공기가 차있는 동굴 내에서 성장했으며, 이들의 성장 당시에는 동굴 통로 내에 물이 차있지 않았다는 것을 지시한다. 즉, 이들 동굴생성물은 지하수면이 낮았던 빙하기에 성장했다는 것을 의미한다. 따라서 성류굴 내에는 과거 빙하기 동안에만 성장했던 동굴생성물과 빙하기/간빙기 동안에 지속적으로 성장했던 동굴생성물이 모두 존재하는 학술적으로 매우 중요한 동굴이라고 평가할 수 있다. 해수면의 변동에 따라 민감하게 반응하였던 성류굴 내의 동굴생성물에

대한 추가적인 연구는 동굴생성물의 생성과정과 한반도의 고기후에 대한 연구를 수행하는데 중요한 자료를 제공할 수 있을 것이다.

사 사

이 논문은 울진군과 한국지질자원연구원 기본과제(GP2009-005)의 지원으로 이루어졌다. 이 논문심사를 통해 원고의 질을 높게 해준 익명의 심사위원님께 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌

- 김 련, 우경식, 김봉현, 박재석, 박현영, 정혜정, 이종희, 2010, 성류굴(천연기념물 제155호)의 과학적 중요성. 문화재지, 43, 236-259.
- 김옥준, 홍만섭, 원종관, 박희인, 박양대, 김기태, 1963, 한국지질도(1:50,000), 평해도폭 및 설명서, 국립지질조사소 28 p.
- 박병권, 한상준, 1986, 중부 캄브리아기 우이드 여울 퇴적층: 풍촌석회암층 하부의 어란상 탄산염암. 지질학회지, 22, 183-199.
- 우경식, 2002, 동굴. 지성사, 서울, 231 p.
- 우경식, 우승현, 정혜정, 2007a, 경상북도 울진군 근남면 구산리와 평해읍 후포리 일대 퇴적암류의 층서적 연구. 대한지질학회 추계학술발표회(초록), 강원대학교, 10월 25일-26일, 215 p.
- 우경식, 김련, 이광춘, 최용근, 김봉현, 박재석, 2007b, 성류굴 종합학술조사 보고서. 울진군, 208 p.
- 윤석규, 신병우, 1963, 한국지질도(1:50,000), 울진도폭 및 설명서, 국립지질조사소, 23 p.

- 이동진, 김용욱, 김대업, 유장한, 홍세선, 이형재, 최춘기, 이종석, 1993, 울진 석회석광상(울진도폭 75, 77, 78, 85, 86호) 조사보고서, 한국자원연구소, 105 p.
- 이동진, 2000, 경상북도 울진군일대에 분포하는 하부 고생대층, 한반도 고생대 층서연구회 제10차 모임, 10 p.
- 임병렬, 김정환, 이기무, 2003, 울진군 근남-원남면 일대의 지질구조: 소위 장군석회암에 대하여. 대한지질학회 2003년 추계학술발표회(초록), 10월 24일-25일, 11 p.
- DeConto, R.M. and Pollard, D., 2003, Rapid Cenozoic glaciation of Antarctica induced by declining atmospheric CO₂. *Nature*, 421, 245-249.
- Ding, Z.L., Derbyshire, E., Yang, S.L., Yu, Z.W., Xiong, S.F., and Liu, T.S., 2002, Stacked 2.6-Ma grain size record from the Chinese loess based on five sections and correlation with the deep-sea $\delta^{18}\text{O}$ record. *Paleoceanography*, 17, 1033, doi:10.1029/2001PA000725.
- Fairbanks, R.G., 1989, A 17,000 year glacio-eustatic sea level record: Influence of glacial melting rates on the Younger Dryas event and deep-ocean circulation. *Paleoceanography*, 342, 637-642.
- Gillieson, 1996, *Caves Processes, Development, Management*. Blackwell, Cambridge, USA, 324 p.
- Hill, C and Forti, P., 1997, *Cave Minerals of the World*. National Speleological Society, Huntsville, 463 p.
- IPCC, 2007, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jame, N.P. and Choquette, P.W., 1990, Limestones - The meteoric diagenetic environment. In: McIlreath, I.A. and Morrow, D.W. (eds.), *Diagenesis*, Geoscience Canada Reprint Series 4, p. 35-73.
- Jo, K., Woo, K.S., Cheng, H., Edwards, L.R., Wang, Y., Kim, R., and Jiang, X., 2010a, Textural and carbon isotopic evidence of monsoonal changes recorded in a composite-type speleothem from Korea since MIS 5a. *Quaternary Research*, 74, 100-112.
- Jo, K., Woo, K.S., Hong, G.H., Kim, S.H. and Suk, B.C., 2010b, Rainfall and hydrological controls on speleothem geochemistry during climatic events (droughts and typhoons): An example from Seopdong Cave, Republic of Korea. *Earth and Planetary Science Letters*, 295, 441-450.
- Lisiecki, L.E. and Raymo, M.E., 2005, A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. *Paleoceanography*, 20, PA1003, doi:10.1029/2004PA001071.
- Peltier, W.R. and Fairbanks, R.G., 2006, Global glacial ice volume and last glacial maximum duration from an extended Barbados sea level record, *Quaternary Science Review*, 25, 3322-3337.
- Ruddiman, W.F. (ed), 1997, *Tectonic Uplift and Climate Change*. Plenum Press, New York, 535 p.
- Ruddiman, W.F., 2003, Orbital insolation, ice

- volume and greenhouse gases. *Quaternary Science Review*, 15-17, 1597-1629.
- Shackleton, N.J., 2000, The 100,000-year ice-age cycle identified and found to lag temperature, carbon dioxide, and orbital eccentricity. *Science*, 289, 1897-1902.
- Siddall, M., Rohling, E.J., Almogi-Labin, A., Hemleben, Ch., Meischner, D., Schmelzer, I. and Smeed, D.A., 2003, Sea-level fluctuations during the last glacial cycle. *Nature*, 423, 853-858.
- Woo, K.S., 2005, *Caves: A Wonderful Underground*. Hallym, 230 p.
- Woo, K.S. and Won, C.K, 1989, Original mineralogy and carbonate diagenesis of speleothems in Kwanum and Hwansun Cavern, Kangweondo, Korea: Preliminary results. *Journal of the Geological Society of Korea*, 25, 90-97.
- Woo, K.S., 1992, Marine pisolites in the Ordovician Dongjeom Formation, Taebaeg City, Korea, *Journal of the Geological Society of Korea*, 28, 384-391.
- Zachos, J.C., Röhl, U., Schellenberg, S.A., Slujs, A., Hodell, D.A., Kelly, D.C., Thomas, B., Nicolo, M., Raffi, I., Lourens, L.J., McCarren, H. and Kroon, D., 2005, Rapid acidification of the ocean during the Palaeocene-Eocene thermal maximum, *Science*, 308, 1611-1615.

투 고 일 10. 03. 18
심 사 일 10. 03. 22
심사완료일 10. 06. 14