국내 석회동굴(고씨동굴, 백룡동굴, 성류동굴)에 분포하는 박쥐 구아노의 광물학적 특성

Mineralogy of Guano Distributed in the Limestone Cave in Korea (Gossi Cave, Baekrong Cave, and Sungryu Cave)

공 달 용(Dal-Yong Kong)¹ · 이 성 주(Seong-Joo Lee)² · 전 창 표(Chang Pyo Jun)² ·
김 영 규(Yeongkyoo Kim)^{2*}

¹문화재청 국립문화재연구소

(National Research Institute of Cultural Heritage, Daejeon 305-380, Korea)

²경북대학교 지질학과

(Department of Geology, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea)

요약 : 동굴 속에서 박쥐 배설물에 의하여 형성된 구아노에는 쇄설성 광물과 더불어 배설물 내의 성분과 주변 암석과의 반응 등을 통하여 생성된 다양한 황산염 및 인산염 광물들이 존재한다. 따라서 이러한 광물들의 연구는 광물형성에 영향을 미치는 동굴 내 지구화학적 환경에 대한 기본적인 정보를 제공한다. 본 연구는 국내의 대표적인 세 석회동굴에서 구아노의 시료를 채취하여 이들에 대한 광물학적 특성과 화학 성분 비교를 통하여 동굴 내 구아노를 구성하는 기본적인 광물 성분을 밝히고 이들의 특성에 영향을 미치는 인자를 도출하고자 실시되었다. 연구 결과 고씨동굴의 경우 채취된 시료에서 운모, 석영, 장석과 같은 쇄설성 광물과 더불어 많은 양의 석고가 함께 산출되었다. 석고의 양은 하부로 갈수록 증가하며 이것은 백룡동굴과 석류동굴과는 다른 특징이다. 백룡동굴의 시료는 쇄설성 광물로 카올리나이트를 추가적으로 포함하며 상대적으로 매우 적은 양의 석고를 포함한다. 성류동굴 시료의 경우 쇄설성 광물의 성분은 고씨동굴과 같으나 석고 대신 바사나이트가 미량으로 관찰된다. 이러한 광물의 분포는 구아노 시료의 화학분석 결과와 일치한다. 이러한 결과를 종합하여 볼 때 고씨동굴에서는 많은 양의 박쥐 배설물로부터 상대적으로 습도가 높거나 홍수가 자주 일어나는 환경에서 이차 광물이 형성되었음을 의미한다. 또한 성류동굴의 경우는 비교적 건조한 환경에서 생성되는 바사나이트의 존재로 미루어 볼 때 다른 동굴에 비하여 상대적으로 건조한 환경에서 생성되었음을 지시한다.

주요어 : 박쥐배설물, 고씨동굴, 백룡동굴, 성류동굴, 석고

ABSTRACT : The guano formed from the bat excrement in a cave contains various sulfate and phosphate minerals formed from the reaction of bat excrement with surrounding rocks and clastic minerals. Therefore, the mineral compositions in the guano provide basic informations on the geochemical environments affecting mineral formation in a cave. This study was conducted to study the mineral compositions of guano and the factors affecting those compositions by comparing mineralogical and chemical compositions in three different limestone caves in Korea. The guano samples in Gossi Cave contain detrital

* Corresponding author: +82-53-950-5360, E-mail: ygkim@knu.ac.kr

minerals such as illite, quartz and feldspar and relatively large amount of gypsum. The contents of gypsum increase with increasing depth, which is different from the samples collected in other caves. The samples collected from Baekryong Cave have the similar mineral compositions to those in Gossi Cave, but they also contain additional kaolinite and very small amount of gypsum. The samples in Sungryu Cave have similar mineralogical compositions to those in Gossi Cave, but contain bassanite instead of gypsum. The mineralogical compositions are well correlated with the chemical compositions of guano. The mineral compositions indicate that, in Gossi Cave, the minerals were formed by the reaction of large amount of bat excrement with surrounding rocks in high humidity condition or in the condition of frequent floods. In the case of Sungryu Cave, bassanite which can be formed in a dry condition indicates that minerals were formed in a relatively low humidity condition.

Key words : bat guano, Gossi Cave, Baekryong Cave, Sungryu Cave, gypsum

서 론

“구아노(Guano)”란 특정 지역에 서식하는 척추동물의 배설물이 퇴적되어 마운드 형태를 띠는 것으로 높은 인산 함량을 보이는 것을 일컫는다. 예를 들어 해안가 절벽에 서식하는 조류는 절벽 아래에 일정 두께의 구아노를 만들며 동굴에서 서식하는 박쥐들은 인간의 간섭이 미치지 못하는 깊은 동굴 내부에 구아노를 형성하여 이들을 박쥐 구아노(bat guano)라 한다. 박쥐는 특정 지역에 집단적으로 서식하는 특성이 있기 때문에 이들의 배설물은 특정한 서식지 바닥(동굴 내부에 물이 차지 않는 지역)에 순차적으로 퇴적되어 그 결과 호수 퇴적물 등과 같은 과거 환경의 층서학적 기록을 갖는다(Maher, 2006). 따라서 박쥐 구아노는 새에 의한 구아노와는 달리 퇴적 후에 외부 환경의 영향을 거의 받지 않고 마치 퇴적암과 동일한 과정에 의해 퇴적되기 때문에 고환경을 복원하는데 매우 유용하며 고환경과 더불어 지구화학적 환경의 지시자의 역할을 할 수 있다(Fiore and Laviano, 1991; Hill and Forti, 1997; Onac and Veres, 2003; Jun *et al.*, 2010). 특히 2000년대 후반에 들어 박쥐의 배설물인 구아노를 이용한 고환경 복원 연구도 활발히 진행되고 있다(e.g., Bird *et al.*, 2007; Maher, 2006; Carrion *et al.*, 2006). 이러한 박쥐 구아노 연구의 대부분은 구아노에 함유된 화분과 특정 광물의 안정동위원소 분석을 통한 것으로 최근 외국의 연구사례에 의하면 이러한 연구를 통하여 특히 신생대 홀로세의 고환경을 효과적으로 복원할 수 있는 것으로 알려져 있다(e.g., Carrion *et al.*, 2006; Leroy and Simms, 2006).

한편 국내의 동굴생성물 관련 논문은 극히 적으

며(총 11편) 이 중 동굴에서 생성된 구아노에 대한 광물학적인 연구는 고씨 동굴의 구아노에 대하여 수행된 Jun *et al.* (2010)이 유일하다. 구아노에서의 광물 생성 및 광물학적 특성에 대한 연구는 과거 지구화학적 환경의 지시자는 중요성에도 불구하고 국내에 분포하는 여러 동굴에 대한 기초적인 광물학적인 연구가 미비한 상황이다.

박쥐 구아노에는 자생광물, 변질광물 및 외부에서 유입된 쇄설성 광물을 포함하여 다양한 광물이 포함된다(Bridge, 1973; Onac and Veres, 2003; Shahack-Gross *et al.*, 2004). 박쥐 구아노에는 N과 P가 가장 풍부하게 포함되어 있으며 이외에서 Ca, Mg, K, Al, Fe, S 등이 5% 미만으로 함유되어 있다(Hutchinson, 1950). 박쥐 구아노의 또 다른 특징으로는 낮은 pH를 들 수 있는데 보통 pH 4에서 6 사이의 약산성을 띠고 있어 주로 석회암 동굴에서 이들 암석들을 용해시킬 수도 있으며 이러한 과정으로 인하여 추가적인 광물 성분을 함유할 수도 있다(Leroy and Simms, 2006). 따라서 구아노에는 인산염과 황산염을 포함하는 다양한 광물 종들이 발견될 수 있으며 동굴 내 지구화학적 조건에 따라서 다양한 종류의 광물이 생성될 수 있다(e.g., Fiore and Laviano, 1991; Onac and Veres, 2003; Shahack-Gross *et al.*, 2004). 외국의 경우에 있어서도 동굴에 따라서 이러한 광물종들이 다를 수 있음을 보여주었다(Onac and Veres, 2003; Shahack-Gross *et al.*, 2004).

본 연구는 국내의 대표적인 세 개의 석회암 동굴인 고씨동굴, 백룡동굴, 성류동굴에 분포하는 박쥐 구아노에서 생성된 광물들에 대한 광물동정 및 화학성분 분석을 통하여 각각의 동굴에서 생성된 광물의 차이와 이에 대한 생성환경 등을 비교하여

이들에 대한 일차적인 정보를 제공하고 이들의 생성 환경을 비교해 보고자 한다.

고씨동굴, 백룡동굴, 성류동굴의 박쥐 구아노 분포

우리나라 태백산맥의 동쪽에 위치한 울진 성류동굴(천연기념물 제155호)과 태백산맥의 서쪽에 위치한 영월 고씨동굴(천연기념물 제219호), 평창 백룡동굴(천연기념물 제260호)에는 일반인에게 개방되지 않은 구간에 상당한 두께의 박쥐 구아노가 퇴적되어 있다(그림 1). 각각의 동굴에 분포하는 박쥐 구아노는 다양한 두께(20~45 cm)와 퇴적 양상을 나타내는데 이는 각 동굴의 고유한 환경적 특성 때문으로 생각된다.

고씨동굴은 강원도 영월군 김삿갓면에 위치하며 하부 고생대 조선 누층군 태백층군의 막골층에 해당되는 탄산염 지역에 분포한다. 고씨동굴은 전체적으로 다층구조의 미로형태로 남북방향과 동서방향으로 발달하며 수직과 수평의 기복이 반복되나 전체적인 동굴의 발달형태는 수평굴 양상이다. 호수와 광장으로 이루어진 고씨굴은 주굴의 길이가 약 950 m이고 지굴의 길이는 약 2,438 m로 총연장은 3,368 m에 이른다. 이 중 620 m 구간이 일반인에게 공개되고 있으며 박쥐 구아노는 사람들의 손길이 닿지 않는 미개방 구간에 약 2.4 m의 폭과 약 45 cm의 두께의 마운드 형태로 퇴적되어 있다. 하부 20 cm 정도는 박쥐 구아노와 기반암이 반응하여 이루어진 유밀(moon milk)과 같은 퇴적물로 이루어져 있으며 최상부는 구아노 고유의 작은 알갱이 형태를 간직하고 있다.

백룡동굴은 평창군 미탄면에 위치하며 고씨동굴과 마찬가지로 막골층의 석회암 지대에 분포한다. 이 동굴은 동서방향으로 발달해 있는 수평굴로 동굴의 총 길이가 1,875 m이며 1개의 주굴과 3개의 가지굴로 이루어져 있다. 백룡동굴에는 마운드 형태의 구아노와 얇고 넓게 퍼져있는 형태의 두 가지 서로 구아노가 가까운 지역에서 발견된다. 박쥐 구아노 퇴적물의 최상부는 1~2 cm 두께의 동굴 퇴적물이 피복하고 있다. 마운드 형태의 박쥐 구아노에서 채취된 시료의 단면은 약 36 cm이며 동굴 바닥에 분포하는 퍼진 구아노에서 얻어진 시료는 29 cm이다. 두 시료의 하부는 모두 쇄설성 동굴 퇴적물로 이루어져 있다. 하부 15 cm 정도는 박쥐 구아노가 아닌 동굴 쇄설성 퇴적물로 이루어져 있다.

며 고씨동굴의 박쥐 구아노 시료와 달리 유밀 퇴적물은 관찰되지 않는다.

성류동굴의 울진군 근남면에 위치하며 태백층군 두무골층의 석회암 지대에 발달해 있다. 전체적으로 북동방향으로 발달하고 있는 수평동굴로서 주굴의 길이는 약 330 m, 지굴의 길이는 약 540 m로 총 연장은 870 m이다. 박쥐 구아노는 바닥에 넓게 분포하며 다른 두 동굴에 비해 두께가 얇다. 3개의 박쥐 구아노 퇴적물 중 기반암의 유입이 가장 적으며, 다짐작용을 많이 받아 비교적 치밀한 퇴적 양상을 보인다. 최상부는 약 1 cm의 동굴 퇴적물이 덮고 있고 최하부도 5 cm 정도의 동굴 퇴적물로 이루어져 있다.

연구 방법

시료 채취

박쥐 구아노는 2010년 4월에 3개의 동굴로부터 채취되었으며, 모두 관람객의 출입이 금지되어 있는 미 개방 구간에서 이루어졌다(그림 2). 동굴에 퇴적된 박쥐 구아노의 두께와 퇴적양상은 각기 다르게 나타나며 이는 각 동굴의 고유한 환경적 특성에 의해 결정되었을 것으로 추정된다.

고씨동굴의 박쥐 구아노는 박스코어(가로 20 cm, 세로 10 cm)를 이용하여 구아노의 가장 두꺼운 부분의 교란되지 않은 시료를 채취하였으며, 회수된 시료는 약 45 cm의 두께를 가진다. 박스 코어 이용하여 교란되지 않은 박쥐구아노 시료를 채취하였다. 회수된 시료의 전체 두께는 약 45 cm 정도이며 하부 20 cm 정도는 박쥐 구아노가 아닌 동굴 퇴적물로 구성되어 있다.

백룡동굴의 경우 박스 코어를 이용하여 마운드 형태의 박쥐 구아노에서 박스코어를 이용하여 36 cm의 시료를 회수하였으며 총 36개의 시료를 1 cm 간격으로 채취하였다(그림 2).

성류동굴에서는 두께가 가장 두꺼운 부분에서 박스코어를 이용하여 시료를 채취하였다. 총 21 cm의 시료가 채취되었으며 이 중 최상부와 하부는 동굴 쇄설성 퇴적물로 이루어져 있다(그림 2).

Fig. 1. The locations of the caves (A) and geometric maps of three caves containing bat guanos (B: Gossi Cave, C: Baekryong Cave, D: Sungryu Cave).

Fig. 2. Columnar sections of the bat guano (A: Gossi Cave, B: Baekryong Cave, C: Sungryu Cave). Note that the dark color represents the bat guano containing great amount of organic matters, which overlies white cave sediments.

Table 1. Mineral compositions in bat guano samples identified by XRD in three different caves.

	Gossi cave	Baekryong cave	Sungryu cave
Silicate minerals	mica, quartz, feldspar	mica, kaolinite, quartz, feldspar	mica, quartz, feldspar
Sulfate minerals	gypsum	gypsum	bassanite
Phosphate minerals		taranakite (?)	

분석 방법

X-선 회절분석법(XRD, X-ray Diffraction)

분석시료는 실험실로 운반 뒤 오븐에서 60℃에서 24 h 건조하여 수분을 증발시킨 후 분석하였다. 박쥐 구아노를 구성하고 있는 채설성 광물과 2차적으로 형성된 광물을 동정하기 위해 X-선 회절분석법(XRD, X-ray diffraction) 분석을 실시하였다. 분석은 한국기초과학지원연구원 대구 센터에서에서 Cu-K α 파장을 이용하여 실시되었으며(X'pert

APD Phillips) 40 kV와 30 mA 조건에서 2θ 5~50°의 범위 내에서 0.016° 스텝으로 스텝 당 1초를 이용하여 분석하였다.

X-선 형광분석법(XRF, X-ray Fluorescence)

구아노 시료에 포함되어 있는 원소들의 함량 및 성분의 변화를 알아보기 위하여 기초과학지원연구원 대구센터에서 X-선 형광분석기(Phillips, PW-2400)를 이용하여 시료를 추가 분석하였다.

Fig. 3. Compiled XRD patterns of the samples collected along the bat guano horizons from top to bottom in Gossi Cave. The lowermost patterns represents the bottom sample (GS 1A-25). (M: mica, G: gypsum, Q: quartz, F: feldspar).

Fig. 4. Compiled XRD patterns of the samples collected along the bat guano horizons from top to bottom in Baekryong Cave. The lowermost patterns represents the bottom sample (BR 1A-30). (M: mica, K: kaolinite, G: gypsum, Q: quartz, F: feldspar, T: taranakite).

연구결과 및 토의

XRD 결과

각 시료의 XRD 데이터를 통하여 주요 광물들에 대한 동정이 가능하였다(표 1, 그림 3, 4, 5). 세 동굴에서 채취된 구아노의 시료는 구성 광물에 있어서 약간의 차이를 보이고 있다. 고씨동굴의 경우

상부의 시료는 유기물을 많이 포함하고 있어 일부 배경치의 증가를 보여주며 주로 운모, 석영, 장석으로 구성되어 있었다. 그러나 하부의 시료의 경우 상부에 비하여 운모와 석영, 장석 등의 쇠설성 광물의 양은 줄어들며 석고의 양이 급격하게 증가하여 일부 석영 피크를 제외하고 대부분 석고로 이루어져 있음을 보여준다.

Fig. 5. Compiled XRD patterns of the samples collected along the bat guano horizons from top to bottom in Sungryu Cave. The lowermost patterns represents the bottom sample (SR 1A-21). (M: mica, B: bassanite, Q: quartz, F: feldspar).

백룡동굴의 경우 역시 상부의 경우 증가된 배경치를 보여주며 운모, 석영, 장석 외에 카올리나이트가 추가적으로 관찰된다. 백룡동굴의 시료는 하부의 시료의 경우도 많은 경우 쇄설성 광물이 주성분을 이루고 있으며 일부 석고가 소량으로 포함되어 있음을 보여준다. 일부 XRD 피크의 경우 정확한 동정이 불가능하였으며 인산염광물의 일종인 타라나카이트(taranakite)와 유사한 피크가 존재하나(그림 4의 T?) 기타 주요 피크들이 확인되지 않

았고 상부로부터 7 cm 하부의 시료도 동정되지 않는 광물의 피크를 포함하고 있다.

성류 동굴의 시료도 주요 쇄설성 광물로 운모, 석영, 장석 등이 동정되었다. 성류동굴에서는 백룡동굴에서 동정된 카올리나이트가 발견되지 않는다. 이 동굴의 시료에서는 또한 다른 두 동굴에서 동정된 석고가 발견되지 않는다. 그 대신 아주 적은 양으로 바사나이트(bassanite $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)가 일부 시료에서 동정된다.

Jun *et al.* (2010)의 경우 고씨 동굴의 연구에서 황산염 광물로 석고와 중정석을 보고하였고 인산염 광물로는 프란코아넬라이트(francoanellite), 타라나카이트, 아디알라이트(ardealite), 브루샤이트(brookite), 모네타이트(monite) 등을 보고하였다. 본 연구에서는 기존에 보고된 황산염 광물과 인산염 광물이 동정되지 않았는데 이는 본 연구에 사용된 시료는 특정 부위의 시료를 분리하지 않고 채취된 시료에 대하여 전체 시료를 분석하여 아주 작은 양으로 존재하며 일부분에만 존재하는 황산염 및 인산염의 시료는 동정되지 않은 것으로 생각된다.

XRF 결과

고씨동굴에서 채취된 시료에 대한 XRF 데이터를 보면 상부에서 하부로 갈면서 가장 큰 차이를 보이는 것은 Ca의 양이다(그림 6, 7, 8). 이는 XRD 데이터에서 확인된 바와 같이 하부로 가면서 석고의 양이 증가하며 석고의 주 성분이 Ca인 것과 일치하는 결과이다. 또한 작열감량(LOI)의 경우 하부로 가면서 감소하는데 이는 상부의 시료가 유기물을 많이 포함하고 있기 때문이며 또한 작열감량의 경우 기화된 황(S)을 포함하고 있어 본 데이터만으로 본 시료에 포함된 황의 양에 대한 정확한 정보를 알 수 없다. 또한 본 데이터의 경우 인의 함량이 약 4% 정도로 상부에서 하부로 가면서 크게 변화 없이 존재함을 보여준다. XRF 데이터에 의하면 본 시료에 약간의 인산염 광물이 추가로 존재할 가능성이 있다. 본 연구에서 수행된 XRD 데이터의 경우 Jun *et al.* (2010)에서 제시된 인산염 광물은 동정되지 않았지만 일부 시료에서 순수한 브루샤이트가 관찰되었는데(데이터는 본 연구에는 제시되지 않았음) 브루샤이트의 XRD 피크는 석고의 피크와 많은 부분에서 일치한다. 따라서 석고에 비하여 적은 양으로 존재하는 브루샤이트는 XRD 데이터로는 석고의 피크에 의하여 가려져서 동정되

Fig. 6. XRF data of selected guano samples in Gossi Cave.

Fig. 7. XRF data of selected guano samples in Baekryong Cave.

지 않았을 가능성이 크다.

백룡동굴의 경우 상부의 시료가 유기물을 포함하고 있는 관계로 고씨 동굴과 마찬가지로 역시 하

부로 가면서 작열감량이 감소하는 경향을 보이며 약간의 배정치의 증가를 보인다. 그 외 Si와 Al이 주요 성분으로 되어 있음을 보여주는데 이는 XRD

Fig. 8. XRF data of selected guano samples in Sungryu Cave.

데이터의 결과에서 보여주듯이 시료가 주로 운모, 카올리나이트, 석영, 장석 등으로 이루어져 있는 것과 밀접한 연관성이 있다. 대부분의 성분이 상부에서 하부로 가면서 증가하는데, 이는 유기물의 감소로 인한 채설성 광물의 상대적 비가 증가하기 때문이다. 본 시료들의 특징은 고씨동굴과 달리 Ca의 함량이 매우 낮음을 보여준다. 이는 백룡동굴에서 고씨동굴과 달리 아주 미량의 석고가 관찰되기 때문이다. 백룡동굴에서는 하부로 갈수록 인의 함량이 증가하여 가장 하부의 시료는 약 10%의 인의 함량을 보여주며 고씨동굴의 시료보다도 인의 함량이 많음을 알 수 있다. 그러나 XRD 분석 결과 뚜렷한 인산염 광물을 관찰할 수 없었다. 이는 단일 광물이 아닌 여러 종류의 인산염 광물이 적은 양으로 존재할 가능성도 있으며 고씨동굴에서와 같이 브루사이트 존재할 경우 석고와 XRD 피크의 위치가 비슷하여 동정하지 못하였을 수도 있다.

성류동굴에서 채취된 시료는 작열감량의 경우 뚜렷한 변화양상을 보이지 않으며 상부에서 하부로의 성분 변화도 뚜렷하지 않다. 이는 아마도 시료의 산출양상이 다른 동굴에 시료에 비하여 치밀한 양상을 보여주며 이로 인하여 시료 내 성분의 분화가 쉽게 일어나지 않았기 때문으로 생각된다.

본 시료의 경우도 역시 백룡동굴과 마찬가지로 채설성 광물이 주를 차지하고 있기 때문에 Si와 Al의 양이 상대적으로 많다. 또 다른 특징으로는 고씨동굴 시료에 비하여 Ca양은 많이 적으나 백룡동굴 시료와 비교할 때 상부에서 하부까지 크게 변화 없이 상대적으로 약간 많은 양을 함유하고 있음을 볼 수 있다. 이것은 아마도 Ca 황산염 광물인 바사나이트와 존재와 연관성이 있을 것으로 생각된다. 본 시료에서도 인이 어느 정도 함유되어 있는 것으로 나타났으나 XRD 상에서는 동정하지 못하였다.

동굴에서의 광물 생성환경 비교

채설성 퇴적물의 경우 박쥐에 묻어서 외부로부터 유입되었거나 박쥐의 먹이에 묻었던 광물 성분들이 추후에 배설물로 배출되었을 것으로 사료된다. 우선 채설성 퇴적물의 경우 백룡동굴과 성류동굴의 경우 이차적으로 침전된 광물과 비교할 때 그 양이 상대적으로 많고 백룡동굴의 경우는 다른 동굴과 달리 카올리나이트를 함유하고 있다. 채설성 퇴적물 성분의 경우 박쥐를 통하여 또는 박쥐의 배설물로부터 유입된 경우 모두 주변의 토양이나 분진에서 유래되었을 것으로 추측할 수 있다. 따라서

이러한 쇄설성 광물의 성분의 차이는 이러한 광물의 유입과정의 차이라기보다는 주변 토양 또는 대기 중 분진의 성분 차이에 의한 것으로 생각해 볼 수 있다. 이차광물의 경우 많은 경우 박쥐의 배설물에서 유래한 성분과 동굴을 구성하고 있는 광물 성분(주로 방해석)과의 반응에 의하여 이차광물이 형성된다(Onac and Veres, 2003). 따라서 이차광물이 풍부하게 관찰되는 고씨동굴의 경우 기본적으로 구아노의 높이가 다른 동굴의 구아노와 비교하여 높은 것을 고려할 때 다른 동굴의 시료보다 많은 양의 배설물로부터 충분한 양의 이차광물을 만들 수 있는 황 성분을 공급했다고 볼 수 있다(Hutchinson, 1950). 또한 이러한 성분들이 하부의 석회암과 충분히 반응할 수 있는 환경을 제공해야 하는데 이는 수분 및 물의 공급으로 인하여 구성 성분의 이동 및 반응 속도 증가를 야기하여야 한다. 기존의 연구에 의하면 습도와 배설물의 습도를 증가시킬 수 있는 홍수 등이 이차광물의 형성에 중요한 영향을 미치는 것으로 보고되어 있다(Onac and Veres, 2003). 실제 각 시료에 대하여 본 연구실에서 수행된 ^{14}C 를 이용한 연대측정 결과(미발표 자료)에 의하면 세 동굴의 시료들의 연대가 크게 차이가 나지 않는 것으로 나타났다. 따라서 반응의 시간보다는 반응을 용이하게 만든 환경이 이차광물의 형성에 더 중요한 영향을 미쳤음을 볼 수 있다. 고씨동굴의 경우 많은 양의 배설물과 또한 하부의 석회암과의 반응이 활발하게 했을 것은 홍수나 높은 습도가 많은 양의 석고를 형성시켰을 것으로 판단되며 백룡동굴의 경우는 석고가 적은 양으로 산출되는 것으로 미루어 보아 상대적으로 이러한 홍수 등과 같은 환경에 덜 노출이 되었거나 상대적으로 좀더 건조한 환경이었을 것으로 유추할 수 있다. 성류동굴의 경우 애초부터 박쥐의 배설물이 적어서 이차광물 생성에 필요한 성분의 공급이 적었으며 다른 동굴에 비하여 건조한 환경이었을 것으로 판단된다. 이는 바사나이트의 존재로부터 확인될 수 있는데 바사나이트의 경우 석고에 비하여 물분자가 적게 포함된 광물로 동굴내에서 생성된 석고가 추후 건조한 환경에서 변화되어 생성되는 것으로 보고되어 있다(Bridge, 1973; Fiore and Laviano, 1991; Onac and Veres, 2003). 따라서 치밀한 시료의 산출상태와 바사나이트의 존재는 성류동굴의 경우 가장 건조한 환경이었음을 지시한다.

결 론

국내의 대표적인 석회동굴인 고씨동굴, 백룡동굴, 성류동굴에 분포하는 구아노에 대하여 XRD 및 XRF를 통하여 광물 동정 및 화학성분 분석을 실시하였다. 연구결과 세 동굴의 경우 외부기원의 쇄설성 광물과 추후 자생적으로 만들어진 이차 광물들을 포함하고 있었다. 백룡 동굴의 경우 운모, 석영, 장석 등의 쇄설성 광물과 많은 양의 이차광물인 석고로 구성되어 있으며 하부로 갈수록 석고의 양이 증가하는 것으로 나타났다. 이에 비하여 백룡동굴은 카올리나이트가 추가적으로 관찰되며 석고의 함량은 고씨동굴에 비하여 상대적으로 매우 적었다. 성류동굴의 경우 백룡동굴과 같이 쇄설성 광물이 주성분을 이루고 있었으며 황산염 광물로는 석고 대신 물분자의 함량이 적은 바사나이트가 일부 동정되었다. 쇄설성 광물의 경우 동굴 주변의 토양이나 분진의 차이에서 기인된 것으로 생각되며 석고와 같은 이차광물은 동굴 내의 환경의 차이에서 기인한 것으로 판단된다. 고씨동굴의 경우 많은 양의 박쥐 구아노에 의하여 이차광물이 만들어질 수 있는 충분한 양의 황 및 인 등이 공급되었으며 또한 홍수나 높은 습도 등으로 인하여 하부의 동굴을 구성하고 있는 광물과 충분한 반응이 일어날 수 있는 여건을 만든 것으로 생각된다. 성류동굴의 경우 다른 세 동굴 중에서 가장 건조한 환경이었을 것으로 생각되며 이는 석고가 아닌 바사나이트가 관찰되는 것으로 유추할 수 있다.

사 사

이 연구는 문화재청 국립문화재연구소의 천연기념물 개방동굴 특성연구에 의하여 수행되었다.

참고문헌

- Bird, M.I., Boobyer, E.M., Bryant, C., Lewis, H.A., Paz, V., and Stephens, W.E. (2007) A long record of environmental change from bat guano deposits in Makangit Cave, Palawan, Philippines. *Earth and Environ. Sci. Trans. R. Soc. of Edinb.*, 98, 59-69.
- Bridge, P.J. (1973) Guano minerals from Murra-el-elevyn Cave Western Australia. *Mineral. Mag.*, 39, 467-469.
- Carrión, J.S., Scott, L., and Marais, E. (2006) Environmental implications of pollen spectra in bat drop-

- pings from southeastern Spain and potential for palaeoenvironmental reconstructions. *Rev. Palaeobot. Palyno.*, 140, 175-186.
- Fiore, S. and Laviano, R. (1991) Brushite, hydroxypapatite, and taranakite from Apulian caves (southern Italy): New mineralogical data, *Am. Miner.*, 76, 1722-1727.
- Hill, C.A. and Forti, P. (1997) Cave minerals of the world (2nd ed.) National Speleological Society, Huntville, Alabama, 463p.
- Hutchinson, G.E. (1950) Survey of Contemporary Knowledge of Biogeochemistry: 3. The Biogeochemistry of Vertebrate Excretion. *Bulletin of the American Museum of Natural History*, 554p.
- Jun, C.P., Lee, S.J., Kong, D.Y., Kang, I.M., and Song, Y. (2010) Mineralogy of secondary phosphates and sulfates precipitated within the sequence of bat guano deposits in the Gossi Cave, Korea. *J. Miner. Soc. Korea*, 23, 395-402 (in Korean with English abstract).
- Leroy, S.A.G. and Simms, M.J. (2006) Iron age to medieval entomogamous vegetation and *Rhinolophus hipposideros* roost in South-Eastern Wales (UK). *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 237, 4-18.
- Maher, L.J. (2006) Environmental information from guano palynology of insectivorous bats of the central part of the United States of America. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 237, 19-31.
- Onac, B.P. and Veres, D.S. (2003) Sequence of secondary phosphates deposition in a karst environment: evidence from Magurici Cave (Romania). *Eur. J. Mineral.*, 15, 741-745.
- Shahack-Gross, R., Berna, F., Karkanas, P., and Weiner, S. (2004) Bat guano and preservation of archaeological remains in cave sites. *J. Archaeol. Sci.*, 31, 1259-1272.

접수일(2012년 8월 27일), 수정일(1차 : 2012년 9월 19일),
 게재확정일(2012년 9월 19일), 책임편집위원 : 김건영