

제주도 용암동굴에서 발견되는 규질 동굴산호에 대한 연구: 고환경에 대한 적용

최돈원¹ · 우경식² · 이광춘³ · 이상현¹ · 김정찬¹ · 양동윤¹ · 김주용¹

¹한국지질자원연구원 지질환경재해연구부 제4기지질환경연구팀

²강원대학교 한국동굴연구소

³상지대학교 자원공학과

1. 서론

제주도를 포함하여 일본, 미국의 하와이와 서부지역, 호주 남주, 남미의 서부 등에 분포하는 대부분의 용암동굴은 현무암질 암석을 형성하는 용암에 의해 형성되었다. 신생대 제4기 화산활동으로 형성된 제주도에는 해식동굴을 제외한 127개의 천연동굴이 현무암지대에 발달해 있다(문화재청, 2003). 용암동굴 내에는 다양한 동굴생성물들이 형성되어 있으며, 대부분의 동굴생성물들은 동굴을 형성한 용암이 냉각·고결되면서 형성된 것으로 그 구성광물은 현무암과 거의 동일하게 나타난다. 그러나 남제주군 남원읍의 진개못굴과 아리랑굴, 성산읍의 수산굴, 서귀포시의 모시모루굴, 북제주군 애월읍의 빌레못굴과 한림읍의 소천굴 내에는 동굴이 형성된 후에 지하수에 의해 형성된 것으로 생각되는 동굴산호(cave coral)가 발견된다(Fig. 1). 이러한 동굴산호는 소위 규산화(珪酸華; siliceous sinter)로 불려져 왔으나 구성광물과 형성과정에 대해 국내에 거의 알려져 있지 않은 상태이다.

이들 동굴산호의 조직적 특징과 지화학적 분석을 통해 용암동굴에서 성장하는 동굴산호의 생성과정을 밝히고자한다. 이를 근거로 용암동굴로 유입되는 지하수의 화학성분의 변화를 통해 고환경에 대한 단서를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

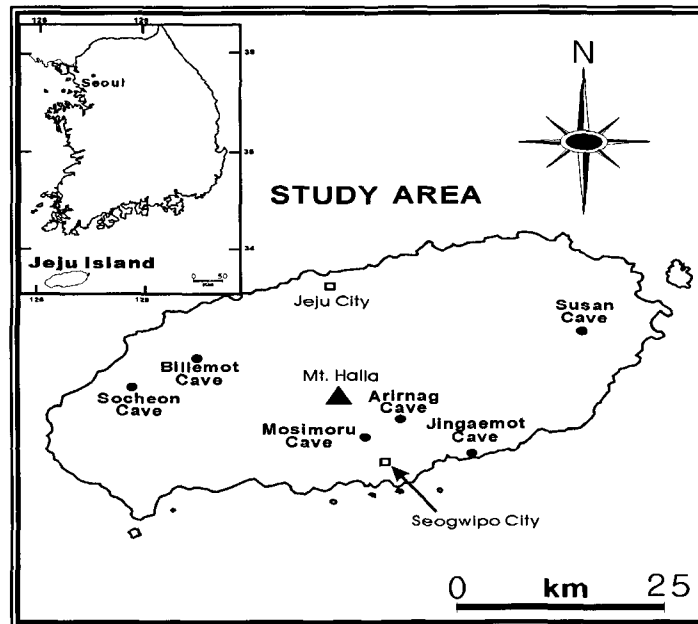


Fig. 27. Map showing the locations of the lava caves in this study.

2. 연구결과

2. 1. 동굴산호의 모양

용암동굴에서 발견되는 동굴산호는 대부분 흰색 내지 투명한 색을 보이고 크기는 0.5~6 cm까지 아주 다양하게 나타난다. 용암동굴의 벽면과 천장, 그리고 바닥에 지하수가 스며나오는 곳이나 고여 있는 곳에서 주로 관찰되며 성장형태에 따라 6가지로 구분된다. 꽃 형태(flower type)는 약 1~2 cm 정도의 길이로 흰색 내지 투명한 색을 보이며 침상의 결정으로 이루어져 있으며 석회동굴에 성장하는 석화와 유사한 형태를 보인다. 팝콘 형태(popcorn type)는 0.5~6 cm 크기로 다양하게 나타나며, 결정의 끝부분이 팝콘 형태를 이룬다. 혹 모양(knobby type)은 약 0.8 cm의 길이를 보이며 끝부분이 매우 불규칙한 크기와 형태로 혹

모양을 이룬다. 수지상 형태(arborescent type)로 약 0.8~1.5 cm의 길이를 보이고, 성장초기에는 한 방향으로 성장하지만 끝부분으로 갈수록 여러 방향으로 갈라지는 성장 형태를 보인다. 원뿔 모양(cone type)은 1~2 cm의 크기로 다양하게 나타나며 성장초기에는 각각의 핵에서 성장하나 결정의 끝부분으로 갈수록 굽어져 원뿔 형태를 이룬다. 혼합 형태(Mixed type)로 주로 수면 아래는 주상 내지 침상의 결정으로 성장하며 수면 위에서는 물의 표면장력으로 인해 혹 모양과 유사한 형태로 성장한다.

2. 2. 조직적 관찰결과

제주도의 용암동굴인 빌레못굴, 수산굴에서 성장하는 동굴산호들은 규질성분인 단백석으로 이루어져 있으며 모시모루굴은 방해석과 단백석이 호층을 이루고 있다. 아리랑굴과 진개못굴의 동굴산호는 방해석과 아라고나이트로 이루어진 탄산염광물과 단백석으로 이루어진 규산염광물로 구성되어 있다. 특히 소천굴의 동굴산호는 현무암을 기저로 얇은 대상의 방해석으로 이루어져 있다.

수산굴의 동굴산호는 모암의 표면을 따라 2~3 mm 두께의 단백석으로 이루어져 있으며, 내부에 수많은 성장선이 관찰된다. 그러나 단백석 내부에 발달하는 성장선의 일부가 용해되어 연장성이 불량하며 동굴산호의 표면이 불규칙한 형태로 용식된 것으로 보아 기존의 동굴산호가 탄산염광물로 이루어져 있었으며 현재에는 단백석으로 대부분 치환되었다는 것을 지시한다.

모시모루굴의 동굴산호는 주로 방해석으로 이루어져 있으며 성장선이 발달한 주상의 방해석과 세립의 침상으로 이루어진 방해석이 호층을 이루며 발달한다. 부분적으로 단백석의 치환으로 인해 불규칙한 경계를 보이는 용식된 구조가 관찰되며, 하부에는 방해석 결정이 잔유물 형태로 존재한다.

소천굴의 동굴산호는 현무암을 기저로 약 1 mm 정도의 등두께를 보이는 주상의 방해석으로 이루어져 있다. 동굴산호의 끝부분은 용해되어 불규칙한 형태가 나타나며 일부 결정의 끝부분에는 이질성분(?)이 관찰된다.

침상의 결정으로 이루어진 진개못굴의 동굴산호는 하부에서 상부로 갈수록 세립의 침상 방해석과 구과상-침상의 아라고나이트가 호층을 이루며 성장한다. 또한 성장선을 따라 단백석이 관찰되며, 1 mm 두께로 구과상-침상 형태로 성장한 상부 아라고나이트의 내부에는 방해석화작용으로 인해 성장한 등립질 방해석이 관찰된다. 등립질 방해석 내에는 구과상-침상의 아라고나이트가 잔류구조 형태로 존재하기도 한다. 특히, 단백석으로 치환된 결정 내부에는 방해석과 아라고나이트의 잔류결정이 관찰되며 이와 같은 결과를 통해 탄산염광물이 단백석으로 치환되었음을 알 수 있다.

2. 3. XRD 분석 결과

용암동굴에서 성장하는 동굴산호는 외형에 따라 6가지로 구분할 수 있으나 분말분석법에 의해 XRD 분석한 결과 거의 유사한 광물조성을 보이는 것으로 나타난다. 방해석으로 이루어진 소천굴을 제외하고 진개못굴, 수산굴, 모시모루굴, 빌레못굴 모두에서 넓고 불규칙한 경향(15~30° 2θ)을 보이는 비결정질인 단백석으로 이루어져 있다. 진개못굴의 경우, 현미경 관찰 결과와 같이 방해석(29° 2θ)이 단백석과 함께 관찰된다. 그러나 소천굴의 동굴산호는 대부분 방해석으로 이루어져 있다. 그 이유는 지표에 탄산염퇴적물로 이루어진 사구가 존재하며 이들 퇴적물과 반응한 물이 동굴로 유입되어 동굴산호를 성장시키기 때문으로 판단된다.

2. 4. SEM 및 EDAX 관찰결과

저진공주사전자현미경을 이용하여 관찰한 용암동굴 내의 동굴산호를 관찰한 결과, 단백석이 탄산염광물을 치환하는 형태에 따라 3가지 형태로 구분된다. 첫 번째, 단백석과 방해석이 호층을 이루는 형태로 침상의 방해석 표면이나 경계를 따라 구형의 단백석이 관찰된다. 이들 구형의 단백석은 서로 결합되어 판상의 단백석 결정으로 성장한다.

두 번째, 섬유상의 방해석을 수직으로 끊으며 단백석이 치환하는 형태이며 세 번째는 기존의 침상 방해석 결정의 경계를 따라 치환하는 경우로 수산굴의 동굴산호에서 관찰된다. 침상의 방해석으로 이루어진 부분은 침상의 형태가 잘 보존되어 있으며 대부분 기존의 방해석 결정의 경계를 따라 치환한다.

2. 5. 지화학적 분석 및 안정동위원소 분석결과

연구대상인 6개 동굴 중 매몰된 진개못굴과 천연기념물인 빌레못굴을 제외하고 4개의 동굴 내에 존재하는 동굴수에 대한 현장측정과 지화학분석은 Table 1과 같다. 단백석이 관찰되는 동굴(아리랑굴, 모시모루굴, 수산굴)의 동굴수는 pH가 6.1~6.7로 약산성을 보이고 Ca 이온의 농도는 1.4~3.6 ppm의 범위를 나타낸다. Si 이온은 0.5~0.8 ppm으로 동굴에 관계없이 거의 일정한 농도를 나타낸다. 방해석으로 이루어진 동굴산호가 관찰되는 소천굴의

동굴수는 pH가 7.4~7.8로 약알칼리성을 띠고 Ca 이온은 62.3~66.2 ppm으로 단백석이 침전하는 동굴에 비해 상대적으로 높은 농도를 보인다. 그러나 Si 이온은 약 0.4 ppm으로 단백석이 관찰되는 동굴과 거의 유사한 값을 보인다. 이는 적은 양의 Si 이온에 의해서도 단백석이 침전한다는 Wray(1999)의 연구 결과와 일치한다.

연구대상인 6개의 동굴 중 단백석 내에 탄산염광물이 존재하는 진개못굴의 동굴산호를 이용하여 안정동위원소를 분석한 결과, 탄소동위원소 값이 -26‰인 C3형의 식물이 우리나라에 주로 분포하고(Anderson and Arthur, 1983), 대기의 CO₂와 탄산염암의 탄소동위원소와 매우 큰 차이를 보인다. 따라서 진개못굴의 동굴산호에서 얻어진 부화된 탄소동위원소의 성분은 탄산염퇴적물로부터 탄소의 일부가 공급된 것으로 판단된다. 탄산염광물의 탄소동위원소 성분을 0‰로 가정할 경우, 탄소의 77~78% 정도가 탄산염광물로부터 공급되었으며, 나머지 22~23%정도가 유기물로부터 공급된 것으로 나타난다.

Epstein et al. (1953)의 식에 의해 제주도의 연평균 기온인 15.5 °C에서 평형상태로 침전되는 방해석 동굴생성물의 산소동위원소 성분을 계산한 결과 약 -9.3 ‰ (PDB)로 나타난다. 그러나 진개못굴의 동굴산호의 산소동위원소의 성분은 -4.7~-5.0 ‰로 평형상태에서 침전된 방해석의 산소동위원소 성분보다 4.3~4.6 ‰ 정도 부화된 값을 보여준다(Table 2). 부화된 산소동위원소 성분은 탄산염광물의 침전이 이산화탄소의 유리작용보다는 증발작용에 의해 더 많은 영향을 받은 것으로 생각할 수 있다.

Table 9. Trace element compositions and pH of cave waters and stream waters at Jeju island. JJ=Jeju island, SS=Susan cave, SC=Socheon Cave, AR=Arirang Cave, MS=Mosimoru Cave. (Unit: mg/L)

Sample No.	pH	Ca	Na	Mg	Si	K	Cl	SO ₄	NO ₃
JJ-1		27.4	23.6	12.9	4.7	4.3			
JJ-2		27.7	23.8	12.9	4.7	5.2			
SS	6.7	1.63	6.28	1.99	0.46	1.05	11.48	1.05	1.16
SC-1	7.8	62.62	27.76	11.58	0.39	3.95	66.42	5.74	23.9
SC-2	7.4	66.18	16.82	11.09	0.44	1.82	44.29	3.33	17.62
AR-1	6.5	3.55	4.6	2.27	0.45	2.76	8.58	2.36	5.44
AR-2	6.5	2.46	3.71	1.71	0.77	1.01	5.25	2.2	3.7
MS-1	6.3	2.41	2.48	0.69	0.45	0.91	2.99	1.52	4.18
MS-2	6.1	1.36	3.43	0.8	0.77	1.02	6.24	0.71	0.9

Table 10. Stable isotopic composition of the cave corals in the Jinggaemot Cave(JG)

Sampel No.	Mineralogy	δ ¹³ C (‰, PDB)	δ ¹⁸ O (‰, PDB)
JG-1	Calcite	-5.0	-5.0
JG-2	Calcite	-4.9	-4.7
JG-3	Calcite	-4.9	-4.9

3. 토의

초기 진개못굴의 동굴산호는 성장선이 발달한 방해석과 구과상 섬유상의 아라고나이트가 호층을 이루며 성장한다. 이들 광물이 성장하기 위해서는 동굴수 내의 Mg/Ca 비 혹은 포화도를 조절하는 탄산염 이온의 농도에 따라 조절되는 것으로 알려져 있다. 또한 Mill(1966)과 Hill and Forti(1997)의 주장처럼 증발에 의해 pH 변화로 광물이 조절된다면 용해구조와 함께 염층리의 형태가 관찰되어야 한다. 그러나 진개못굴의 동굴산호에서는 1mm 이상의 두꺼운 탄산염광물이 호층을 이루며 성장하는 것으로 보아 제주도의 동굴산호를 구성하는 광물은 pH의 변화에 의해 조절되는 것이 아니라 동굴외부 즉 동굴 외부에서 공급되는 동굴수의 성분 변화에 의해 조절되는 것으로 나타난다. 또한 동굴수의 성분 변화로 인해 탄산염광물

로 이루어진 초기 동굴산호가 성장선을 따라 규질화작용을 통해 단백석으로 치환된 것으로 해석된다.

제주도 동굴산호의 성장과 숙성작용은 Fig. 2와 같이 설명할 수 있다.

소천굴과 같이 탄산염퇴적물이 지표에 존재할 경우, 산도가 낮은 빗물에 의해 탄산염퇴적물이 완충역할을 하여 동굴수의 산도를 증가시키고 칼슘이온과 중탄산 이온을 공급하게 된다. 동굴로 유입된 동굴수는 증발에 의해 동굴의 천장, 벽면 그리고 바닥에 탄산염광물로 이루어진 동굴산호를 성장시킨다(Fig. 2A).

완충역할을 하던 탄산염퇴적물이 제거될 경우, 풍화토양대가 대기에 노출됨에 따라 많은 식물과 유기물이 번성하게 된다. 번성한 유기물과 식물이 빗물과 반응하여 산도가 낮은 물이 동굴로 유입됨에 따라 탄산염광물로 이루어진 동굴산호가 일부 용해되거나 단백석으로 치환하게 된다(Fig. 2B).

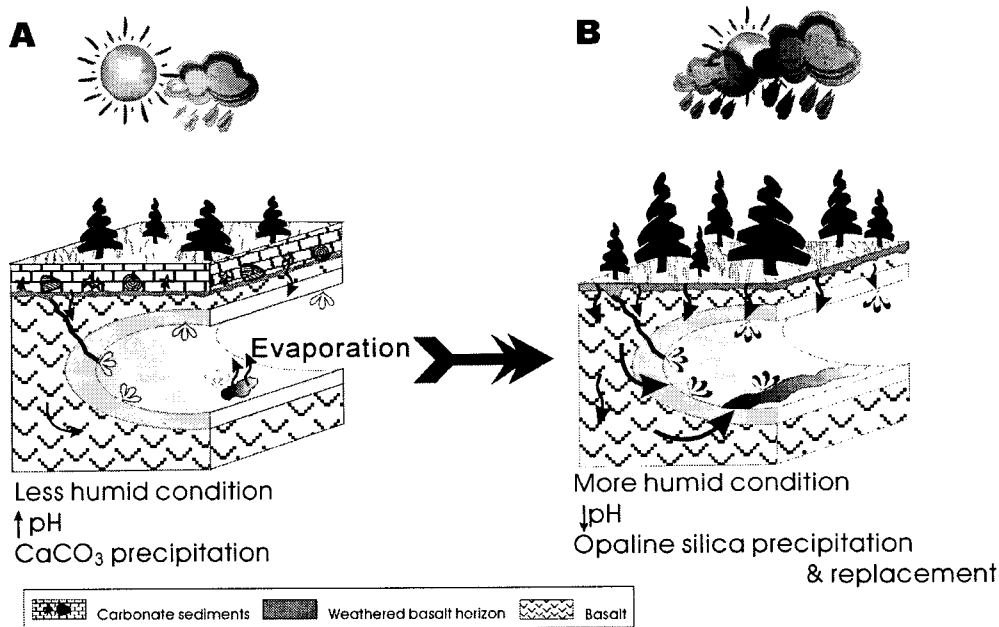


Fig. 28 The schematic diagram showing growth stages of the cave corals in the lava cave.

4. 결론

제주도의 동굴산호는 석회동굴의 동굴생성물과 성인에 있어 많은 차이가 있으며, 탄산염광물로만 이루어진 동굴산호와 탄산염광물이 단백석에 의해 치환된 동굴산호로 나눌 수 있다. 이들 동굴산호는 지하수의 증발에 의해 2차적으로 형성되었으며 구성광물의 변화는 동굴주변의 고환경과 관련이 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

- 문화재청, 2003, 제주도 천연동굴 일제조사 보고서. 263 p.
- Anderson, T.F. and Arthur, M.A., 1983, Stable isotopes of oxygen and carbon and their application to sedimentologic and paleoenvironmental problems, In : Arthur, M.A., Anderson, T.F., Kaplan, R.K., Veizer, J. and Land L.S.(eds.), Stable Isotopes in Sedimentary Geology. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Short Course 10, 1-1-1-151.
- Epstein, S., Buchsbaum, R., Lowenstam, H.A. and Urey, H.A., 1953, Revised carbonate-water isotopic temperature scale. Geological Society of America bulletin, 64, 417-426.
- Hill, C.A. and Forti, P., 1997, Cave Minerals of the World. National Speleological Society, Huntsville, Alabama, 177.
- Mills, J.P., 1965, Petrography of selected speleothems of carbonate caverns: Unpub. M.S. Thesis, Univ, Kansas, Lawrence, 44 p.
- Wray, R.A.L., 1999, Opal and chalcedony speleothems on quartz sandstones in the Sydney region, southeastern Australia. Australian Journal of Earth Sciences, 46, 623-632.