

만장굴 용암동굴의 내부구조에 대한 연구

안웅산, 황상구*

안동대학교 대학원 지구환경과학과

1. 서언

제주도 북동부에 분포하는 거문오름 용암동굴계의 만장굴 용암동굴(이하 만장굴)은 다층 구조를 갖는 전형적인 주동굴(master tube)로 다양한 동굴내부 구조들이 관찰된다. 초기 용암 동굴 생성 후 지속적인 분출활동에 의해 흘러온 용암에 의해 생성당시의 내부구조들이 지워 지고 덮여 초기형태가 완벽하게 남아있지 않더라도, 동굴 내에 존재하는 내부구조는 용암동 굴 형성과 성장과정을 해석하는데 많은 도움이 된다(Calvari and Pinkerton, 1999; Allred and Allred, 1997; Espinasa, 2006).

2. 연구방법

만장굴 측량자료(안웅산과 황상구, 2008)를 토대로 동굴내부 각 지점의 특징적인 구조를 기재하였다. 특히 전형적인 상·하위동굴구조가 관찰되는 2입구~1입구 구간에 대해서는 상·하위동굴의 동일지점에서 사진을 촬영하고 이를 바탕으로 상·하위동굴 전체 단면도를 작성하여, 만장굴의 성장과정을 살펴본다.

3. 연구결과

3-1. 상·하위동굴의 바닥구조

2입구~1입구 구간에서 상·하위동굴의 특징을 살펴보면, 상위동굴 바닥은 대체로 밧줄구조가 잘 관찰되고, 동굴통로의 가운데 부분이 불룩하게 부풀어 올랐거나, 혹은 V자 형태로 내려앉은 불규칙한 형태를 띠며, 벽과 바닥 사이에는 용암이 비집고 나온 용암발가락(lava toe)구조가 간혹 관찰된다. 동굴바닥 색깔은 흔히 적갈색을 띠며, 간혹 검은색을 띠기도 한다. 상위동굴에는 소규모 용암다리(lava bridge)가 관찰되며, 동굴바닥보다 높은 곳에 오목하게 들어간 공간(alcove)이나 가지굴 흔적이 관찰된다.

이에 반해 하위동굴은 바닥이 일정하게 하류방향으로 기울어져 있으며, 상위동굴에 비해 동굴폭이 좁고, 동굴천장 높이변화가 작다. 대체로 바닥과 벽면은 검은색을 띠며, 바닥에는 중력신장균열(crack by gravitational stretching or tearing)이 발달하였다. 또한 상층동굴 바닥에는 용암에 의해 떠내려가는 표류암괴(rafted block)의 잔재가 관찰되지 않지만, 하위동굴에는 흔히 이러한 표류암괴 잔재가 관찰된다.

3-2. 용암에 의한 침식구조

Greeley et al.(1998)은 500개 이상의 용암동굴시스템 연구자료에 근거하여 용암에 의한 침식의 증거가 되는 6가지 기준을 제시하고, 이들 기준이 야외에서 모두 만족되지 않더라도 용암에 의한 침식작용은 흔히 일어나는 현상이라고 추론하였다.

만장굴 내에는 ①용암동굴 벽면에 나타나는 클링커층, ②단면상 동굴 벽면 상하부의 비대칭적 형태, ③평면상에서 상·하위동굴 통로의 어긋남, ④상위동굴 바닥보다 높은 곳에 발달

한 오목하게 들어간 다락구조(alcove) 혹은 가지굴 흔적, ⑤해골형 혹은 모래시계형의 용암 동굴 단면 등과 같은 침식을 지시하는 내부구조들이 관찰된다.

3-3. 용암의 부가구조

용암동굴의 모양에 영향을 주는 중요한 요인은 용암의 부가(deposition)와 침식작용일 것이다(Allred and Allred, 1997). 기존의 여러 연구는 용암에 의한 침식작용에 많은 관심을 쏟았다(Peterson et al., 1994; Kauahikaua et al., 1998; Greeley et al., 1998; Fagents and Greeley, 2001). 이에 반해 상대적으로, 용암의 부가작용에 대한 관심과 연구는 적은 편이다(Allred and Allred, 1997).

만장굴 내에는 용암동굴 내를 흘러가는 용암이 동굴내부에 부가되어 생성된 ①다층구조, ②용암선반, ③선반형 용암중유, ④포획암(규질암편) 산출양상(용암동굴 천정부에 주로 부가되어 나타남), ⑤부가층 내에 용암관입 현상 등과 같은 특징적인 부가구조가 관찰된다.

4. 토의 및 결론

상·하위동굴의 특징적인 다층구조와 바닥구조를 조합하여 상·하위동굴이 생성되는 과정을 유추해 보면, 상위동굴 바닥은 동굴내부를 흘러가던 용암의 표층이 서서히 식으면서 생성된 용암층으로 용암의 공급이 우세한 상황을 지시하며, 하위동굴 바닥은 동굴내부를 흘러가던 용암이 배수되면서 최후에 생성된 바닥면으로 용암배수가 우세한 상황을 지시한다. 특히 상위동굴 바닥높이가 불규칙한 것은 초기 상위동굴의 최상부층이 생성된 후 그 하위를 흘러가던 용암수위가 일정하게 유지되기 보다는 공급지에서의 용암공급 변화나 동굴하류의 막힘 혹은 트임에 의한 동굴 내의 용암수위 변화에 기인한 것으로 여겨진다. 즉 용암공급이 배수보다 우세한 경우 용암표층이 부풀어 오르고 혹은/그리고 이미 형성된 용암층에 균열이 발생할 것이며, 공급보다 배수가 우세한 경우에는 용암표층이 자체하중을 이겨낼 만큼 성장하지 못하여 붕괴되는 과정을 겪었을 것으로 생각된다.

만장굴 내부에서 상·하위 다층구조, 용암에 의한 침식구조, 부가구조 등을 고려하여 만장굴 성장과정을 추론해 보면, 초기형태의 용암동굴이 만들어진 후, 시간적 간격을 두고 이미 생성된 초기형태의 용암동굴로 분출량이 대체로 일정한 새로운 용암이 흘러가면서 그 표면이 굳어 상위동굴 바닥이 생성되었으며, 이후에도 용암은 계속 흘러 동굴바닥은 더 깊게 침식되었고, 천장과 벽면에는 용암이 부가되어 현재와 같은 하위 용암동굴이 형성되었다.

하위 동굴 내를 흘러가는 용암은 침식작용과 부가작용을 일으키는데, 동굴바닥에는 용암에 의한 침식이 우세하게 일어나는 반면, 용암동굴 천정에는 용암부가가 더 우세하게 일어나, 천장높이를 비롯한 동굴규모가 급격히 변하는 불규칙한 형태의 동굴로 성장해 간다. 즉 용암동굴 생성초기에 동굴폭이 넓었던 곳은 시간이 지나면서 더욱 규모가 커지고, 초기에 좁고 천장이 낮았던 곳은 시간이 지나면서 더 낮아지고, 좁아지는 것으로 추측된다.

참고문헌

- 안웅산, 황상구, 2008, 정밀측량을 통한 만장굴 용암동굴의 형성과 성장과정에 대한 해석. 지질학회지, 44, 657-672.
- Allred, K. and Allred, C., 1997, Development and morphology of Kazumura cave, Hawaii. Journal of Cave and Karst Studies, 59(2), 67-80.

- Calvari, S. and Pinkerton, H., 1999, Lava tube morphology on Etna and evidence for lava flow emplacement mechanisms. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 90, 263-280
- Espinasa-Perena, R., 2006, Lava tubes of the Suchiooc Volcano, Mexico. *Association for Mexican Cave Studies Bulletin* 17, 80p.
- Fagents, S.A. and Greeley, R., 2001, Factors influencing lava-substrate heat transfer and implications for thermomechanical erosion. *Bulletin of Volcanology*, 62(8), 519-532.
- Greeley, R., Fagents, S.A., Harris, R.S., Kadel, S.D. and Williams, D.A., 1998, Erosion by flowing lava: Field evidence. *Journal of Geophysical Research*. 103(B11), 27,325-27,345.
- Kauahikaua, J., Cashman, K.V., Mattox, T.N, Heliker, C.C., Hon, K.A., Mangan, M.T. and Thornber, C.R., 1998, Observations on Basaltic lava streams in tubes from Kilauea Volcano, Island of Hawaii. *Journal of Geophysical Research*, 103(B11), 27,303-327,323.
- Peterson, D.W., Holcomb, R.T., Tilling, R.I. and Christiansen, R.L., 1994, Development of lava tubes in the light of observations at Mauna Ulu, Kilauea Volcano, Hawaii. *Bulletin of Volcanology*, 56, 343-360.