

한라산 구린굴의 천장 함몰로 인한 병문천의 유로 변경

김태호* · 안중기**

Channel Migration of Byeongmun River Caused by Roof Collapse of Gurin Cave in Mount Halla, Jeju Island

Taeho Kim* · Junggi An**

요약 : 한라산 북사면에 소재하는 구린굴의 천장이 함몰되고, 동굴 지상을 흐르던 병문천이 동굴 안으로 유입되면서 442m 길이의 구린굴 가운데 73m 구간이 하천 유로로 바뀌었다. 구린굴 유로의 폭과 높이는 각각 447cm 및 501cm이며, 벽면은 용암선반이 발달한 전형적인 용암동굴의 모습을 보이거나 바닥에는 기반암 하도 특유의 마식지형이 나타난다. 거북등 모양의 절리가 발달한 동굴 천장의 암반 두께는 30~60cm에 불과하며, 이런 장소에서는 천장이 함몰하기 쉬워 유로 구간에는 전부 4개 지점에 윈도우가 발달한다. 구린굴 유로가 출현하기 이전의 지상 유로는 병문천의 지류로서 제4함몰 윈도우 지점을 지나 표고 653m 지점에서 구린굴 동쪽 유역으로부터 흘러나오는 본류에 합류하였다. 그러나 구린굴 지상 유로의 하상에 윈도우가 형성되면서 지상 유로는 구린굴 유로로 대체되고, 새로운 유로는 표고 660m 지점에서 본류에 합류하게 되었다. 이후 구린굴 상류 쪽으로 병문천 유역이 확대되면서 구린굴을 통과하는 유로가 본류로 바뀌었다. 그러나 홍수류가 발생하면 구린굴 지상 유로에도 유수가 발생하므로 병문천은 제4함몰 윈도우 지점에서 일시적으로 분기 하천의 형태를 이룬다. 제주도 용암동굴의 천장에서는 낙반 현상이 지속적으로 일어나고 있으므로 제주도의 수계 발달에 미치는 용암동굴의 영향은 현재 진행형이라고 할 수 있다.

주요어 : 용암동굴, 천장 함몰, 유로 변경, 구린굴, 병문천, 한라산

Abstract : Gurin Cave, 442 m long, is a lava tube developed on the northern slope of Mount Halla. Seventy-three meters of its lower reach became a river channel since Byeongmun River flowed into a window after roof collapse took place. The subterranean channel has a width of 447 cm and a height of 501 cm, respectively. Its banks show well-developed lava shelves of a typical lava tube, while its floor has sculpted forms which characterize a bed of a bedrock stream. The reach is likely to be collapsed and then has four collapsed windows since its roof has the densely developed testudinal joints and consists of thin lavas with a thickness of 30 to 60 cm. Before the subterranean channel appeared, a ground channel flowed over the cave and joined into a main channel of Byeongmun River at 653 m in altitude. However, the subterranean channel substituted the ground channel since a bed of the ground channel collapsed into the cave. The new channel, flowing through the cave, joined into a main channel at 660 m in altitude. As the drainage area of Byeongmun River expanded upstream the cave, the new channel changed into a main channel. Since floodwater flows down the ground channel as well as the subterranean channel, a distributary stream has temporarily appeared at the collapsed window. Lava tubes are likely to have an affect on the development of river system in Jeju Island, in that the caves have constantly shown roof-fall.

Key Words : lava tube, roof collapse, channel migration, Gurin Cave, Byeongmun River, Mount Halla

* 제주대학교 지리교육과 부교수 겸 교육과학연구소 연구원(Associate Professor, Department of Geography Education, and Researcher, Educational Research Institute, Cheju National University), kimtaeho@cheju.ac.kr

** 한국농촌공사 제주지역본부 환경지질팀 차장(Section Chief, Team of Environmental Geology, KRC Jeju Province Office), angro40@hanmail.net

1. 서론

유로 변경은 수해 방지, 경지 정리 또는 용수 공급 등을 목적으로 인위적으로 발생하는 경우가 많다. 예를 들면, 홍수류의 신속한 배수를 위하여 곡류하천의 유로를 직선화하는 첩수로(shortcut) 및 직강화 공사는 하천 정비사업의 핵심을 이루고 있다(Knighton, 1998; 손일 외, 2007). 물론 인공적인 유로 변경뿐 아니라 하천 고유의 침식작용을 통한 유로 변경도 빈번하게 일어난다. 하천 중·하류역의 범람원을 흐르는 자유 곡류하천이나 상류역의 좁은 하곡을 흐르는 감입 곡류하천에서 볼 수 있듯이, 활발한 측방침식으로 위치를 끊임없이 바꾸는 하천은 곡류절단을 통하여 유로를 변경할 수 있다(Hickin and Nanson, 1975; Hooke and Redmond, 1989; 송언근, 1993; 이광률·윤순옥, 2004). 또한 두부침식으로 상류 쪽으로 유로를 연장함으로써 인접하고 있는 하천의 유역을 빼앗는 하천쟁탈을 통해서도 유로는 쉽게 변경될 수 있다(장호·고기만, 1995; 大矢, 2006).

한편, 화산활동이 활발한 지역에서는 분화로 생성된 화산체로 인하여 기존의 유로가 위치를 바꾸거나 인접하는 화산체 사이의 저지대를 따라 새로운 수계가 만들어진다(Ollier, 1988). 뿐만 아니라 분화로 야기된 매스무브먼트나 화산분출물에 의하여 유로가 매몰되고, 이후 새로운 유로가 다시 출현하면서 유역의 수계가 재편성되는 경우도 일어난다(Major, 2003). 예를 들면, 미국 북서부에 소재하는 세인트헬렌스 화산(Mount St. Helens)의 경우, 1980년의 대분화로 산체가 붕괴되면서 발생한 2.5km³ 규모의 암설애벌런치와 이류로 인하여 주변 하곡이 전부 매몰됨으로써 일시적으로 하계망이 소멸하였다(Cummans, 1981; Glicken, 1996). 유사한 현상은 현무암질 용암대지의 형성 과정에서도 나타난다(Baker et al., 1987; Ollier, 1988). 즉 하곡이나 저지대로 흘러들어가던 용암류가 기존의 유로를 매워 없앨 뿐 아니라 지표 기복의 역전이나 분수계의 이동을 초래함으로써 새로운 유로를 발달시키는데, 이런 사례는 한반도의 철원·평강 용암대지에서도 확인되고 있다(이민부 외, 2004). 화산분출물 이외에도 지진으로

발생한 토석류로 유로가 매몰되고 언색호(堰塞湖)가 형성되면서 하계망의 혼란이 일어날 수 있으며(丸井·吉松, 2005), 빙하의 전진과 후퇴로 인하여 하계망이 재편성될 수도 있다(Feldman et al., 1968; Ten Cate, 1981).

이와 같이 유역에 유입된 다양한 물질에 기인하여 수계가 재편성되는 과정에서 발생하는 유로 변경과는 달리 지하 동굴이 잘 발달한 지역에서는 유로 밑으로 지나가는 동굴의 천장이 붕괴되고 지상의 유로가 지하로 연결되면서 급격하게 유로가 변경될 수 있다. 본 논문에서는 현무암질 용암류로 이루어진 한라산 북사면에서 구린굴의 천장 붕괴로 발생한 병문천의 유로 변경 사례를 통하여 화산활동 지역의 하천 특성을 밝히고자 한다.

2. 연구지역

연구지역은 한라산 북사면 표고 600~800m의 산록에 위치하며, 한라산 국립공원 관음사지구 안내소로부터 북쪽으로 1.3km 정도 떨어져 있다(그림 1). 한라산은 화산체의 완만한 사면이 특징인 순상화산에 해당하므로 연구지역도 비교적 완경사로 이루어져 있으나, 용암류의 말단부에는 급사면도 발달한다(윤정수·손인석, 1991). 알칼리 현무암으로 분류되는 오등동 현무암 분포 지역으로 연구지역 동쪽의 화북천과 서쪽의 한천을 경계로 해서 월평동 현무암과 오라동 하와이아이트가 분포한다. 암회색의 오등동 현무암은 두께 1m 정도의 용암류로 이루어져 있으며, 용암류 사이에는 클링커가 형성되기도 한다(제주도, 1998).

연구지역에서 북서쪽으로 1.5km 떨어진 표고 513m 지점에 위치하는 오등 자동기상관측소의 연평균기온은 12.4℃이다. 최한월인 1월과 최난월인 8월의 월평균 기온은 각각 0.7℃와 23.7℃로서 연교차는 23℃이다(표 1). 연평균 강수량은 2,669.5mm로서 월별로는 태풍이 북상하는 8월과 9월이 503.3mm와 326.5mm이며, 장마철인 7월이 492.4mm를 기록하고 있다. 강수량의 하계 집중도가 높은 편이나, 100mm 이상의 강수량을

표 1. 오등 자동기상관측소의 기온 및 강수량

기후요소	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	전년
기온(℃)	0.7	2.0	5.5	11.9	16.0	20.1	23.5	23.7	19.6	13.9	8.7	2.8	12.4
강수량(mm)	80.0	87.7	122.8	166.5	338.3	210.3	492.4	503.3	326.5	113.6	123.6	104.5	2669.5

자료: 제주지방기상청(2007)

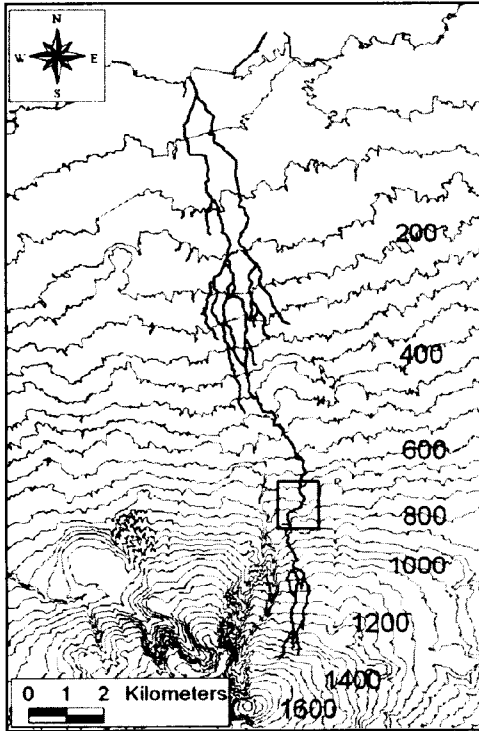


그림 1. 한라산 북사면과 병문천 수계
사각형은 그림 9의 범위에 해당한다.

기록한 달이 10개월로서 전년에 걸쳐 강수가 발생하고 있다(표 1).

연구지역을 흐르는 병문천은 한라산 북사면 표고 1,540m 지점에서 발원하여 제주시 용담동 해안으로 유입하는 지방2급 하천으로 유로의 길이는 15.7km이며, 유역 면적은 10.4km²이다(건설교통부, 2000; 그림 1). 축척 1:5,000 지형도에 표시된 유로를 대상으로 분석한 병문천의 하천차수는 3차수이며, 1차수 하천의 수는 13개에 불과하다(김미령, 2003). 1차수 하천의 수가 많지 않은 저밀도 하계는 기반암의 높은 투수율로

인하여 지표유출이 일어나기 어려운 현무암질 유역의 지질 조건을 잘 반영하고 있다. 병문천의 굴곡도 (sinuosity)는 1.2로서 직류하천으로 분류되며(강상배, 1980), 본류에 합류하는 지류들도 사면경사의 영향을 받아 최단거리의 유로를 유지하면서 본류와 동일한 방향으로 평행하게 흘러내리고 있다.

3. 구린굴 유로의 지형 특성

구린굴은 한라산 관음사 등산로의 표고 715m 지점에 입구가 위치하는 용암동굴이다(그림 2). 제주시 오등동에 소재하는 kunangmugul, pangnammugul 및 pinggul과 함께 오등동 동굴지대(손인석, 2005)를 이루는 동굴로서 이 가운데 가장 높은 고도에 나타나고 있다. 동굴의 규모는 34m 길이의 가지굴과 82m 길이의 2층굴을 포함하



그림 2. 구린굴 입구

동굴 입구에서 천장의 암반 두께는 40cm에 불과하여 천장이 무너져 내리기 쉬운 장소임을 알 수 있다.

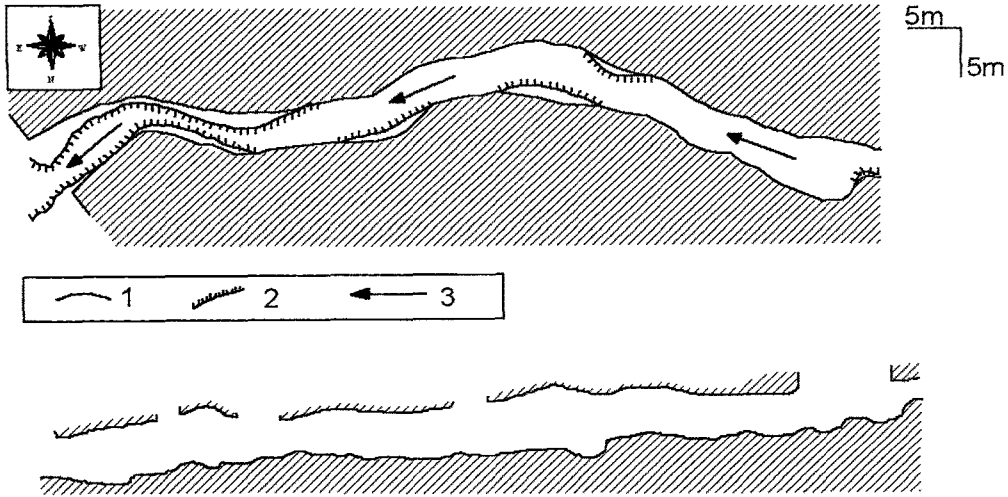


그림 3. 구린굴 유로 구간의 평면도(상) 및 단면도(하)

1. 최대 폭의 동굴 경계, 2. 최대 폭을 보이지 않는 바닥에서의 동굴 경계, 3. 유로 방향

여 총길이가 442m에 이른다(손인석, 2005).

병문천의 유로를 이루고 있는 구린굴 구간의 길이는 73m로서 주굴 최하류 구간에 해당한다. 구린굴 유로는 N52°E~S68°E의 유향(流向)을 보이며 서쪽에서 동쪽으로 완만하게 곡류하고 있다. 그러나 사행 진폭(meandering amplitude)이 크지 않아 굴곡도는 1.1에 불과하므로 유로의 평면형은 직류하천에 해당한다(그림 3).

동굴 입구로부터 하류로 19m 떨어진 지점에 폭 2m, 길이 2.5m, 높이 60cm 규모의 동굴 막장이 남아 있다. 동굴 입구와 막장 사이 구간은 침식작용으로 동굴 천장은 물론 벽면도 대부분 제거되어 동굴의 형태를 찾아보기 어렵다(그림 4).

구린굴 유로 구간의 동굴 폭은 평균 447cm로서 입구에서 660cm로 가장 넓고, 입구로부터 15m 떨어진 지점에서 340cm로 가장 좁다. 천장이 함몰되어 동굴 벽면이 폭포벽을 이루고 있는 길이 9.5m 구간(후술하는 제4함몰 원도우에 해당)을 지나 다시 등장하는 구린굴의 입구는 폭이 290cm로 크게 줄어들고 있다(그림 3).

동굴 내부의 단면은 반타원형을 이루고 있으므로 동굴 폭은 바닥에서 가장 넓게 나타난다. 그러나 동굴 벽

면에 용암선반이 돌출하여 스페이드 형태를 보이는 구간에서는 동굴 폭이 바닥으로 가면서 좁아진다. 따라서 동굴 바닥에서의 폭은 평균 352cm로 줄어들며, 특히 입구로부터 15m 떨어진 지점에서는 폭이 132cm에 불과하다(그림 3). 이 일대의 좁은 바닥은 동굴 벽면의 용암선반 이외에 유수의 침식작용으로 포트홀과 소가 만들어지면서 바닥이 깊게 세굴되었기 때문이다.



그림 4. 구린굴 최하류의 막장

구린굴 입구로부터 막장에 이르는 구간의 동굴 천장과 벽면은 대부분 제거되어 용암동굴의 형태를 알아보기 어렵다.

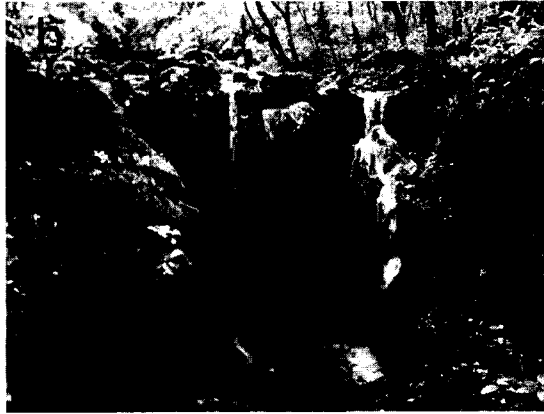


그림 5. 구린굴 유로 구간에 발달한 동굴 천장의 함몰 윈도우

- a) 제2함몰 윈도우로 천장 단면에 보이는 암반의 최소 두께는 30cm에 불과하다.
- b) 병문천 지상 유로에 발달한 제4함몰 윈도우를 통하여 유수가 구린굴 유로 구간으로 흘러 들어가므로 동굴 벽면은 폭포벽의 역할을 하며, 동굴 바닥에는 폭호가 형성되어 있다.

동굴 천장의 높이는 평균 501cm로서 입구로부터 47.5m 떨어진 지점에서 650cm로 가장 높고, 23.5m 떨어진 지점에서 380cm로 가장 낮다. 제4함몰 윈도우를 지나 계속 이어지는 구린굴 구간에서도 천장의 높이는 200cm에 불과하여 동굴 내부의 규모가 크게 줄어들고 있다(그림 3).

구린굴 유로 구간에는 전부 4개 지점에서 동굴 천장이 무너져 내려 외부와 통하는 함몰 윈도우(collapsed window)가 나타난다(그림 3). 동굴 입구로부터 11m 떨어진 지점에 위치하는 제1함몰 윈도우는 높이 550cm의 동굴 천장에 형성된 250×200cm 크기의 타원형으로서 윈도우 단면에 보이는 동굴 천장의 암반 두께는 40~60cm이다.

제1함몰 윈도우로부터 9m 떨어져 있는 제2함몰 윈도우는 높이 400cm의 동굴 천장에 형성된 390×350cm 크기의 원형 윈도우이다. 윈도우 단면에 보이는 동굴 천장의 암반 두께는 30cm에 불과하다(그림 5a). 또한 제2함몰 윈도우로부터 21m 상류 지점에 위치하는 제3함몰 윈도우는 높이 500cm의 동굴 천장에 300×250cm 크기의 타원형으로 나타나며, 천장의 암반 두께는 30~60cm이다.

제4함몰 윈도우는 구린굴 유로 구간으로 유수가 흘러 들어오는 윈도우에 해당한다(그림 5b). 다른 윈도우

와는 달리 유수의 영향을 직접 받는 장소이므로 동굴 천장은 전부 제거되었으며, 동굴 벽면과 바닥은 침식 작용으로 본래의 동굴 내부보다 더 확대된 상태이다(그림 3). 즉 길이 9.5m, 최대 폭 6m의 타원형 윈도우로서 폭포벽에 해당하는 동굴 오른쪽 벽면의 높이는 6.4m이다. 윈도우의 하류 쪽 단면에서 동굴 천장의 암반 두께는 230cm이며, 상류 쪽 단면에서는 160cm로서 다른 윈도우 출현 지점보다는 동굴 천장이 두꺼운 편이다.

4. 구린굴 유로 주변의 수계

병문천 하상에 형성된 제4함몰 윈도우는 지상 유로가 구린굴 지하 유로로 이어지면서 유향이 급변하는 지점이다. 즉 N56°E 방향으로 지상에서 북동류하던 최대 폭 11.1m의 병문천 유로는 제4함몰 윈도우를 통하여 지하로 내려가 구린굴로 흘러들면서 S70°E 방향으로 남동류한다.

한편, 제4함몰 윈도우 하류 쪽에는 지하의 구린굴 유로와는 별도로 지상에도 유로가 출현한다(그림 6). 즉 윈도우 맞은편에 폭 3.5m의 지상 유로가 N82°E 방

향으로 북동류한다. 따라서 지상 유로는 윈도우 상류의 병문천 유로와는 154° 의 교차각을 보이므로 126° 의 교차각을 보이는 구린굴 지하 유로에 비하여 유향의 변화가 크지 않다.

이 지상 유로는 하류로 가면서 하폭이 증가하여 윈도우로부터 9.5m 떨어진 지점에서 하폭은 5m가 된다. 또한 동쪽으로 향하는 구린굴 유로로부터 점차 멀어지며, 표고 710m 부근에서는 북쪽으로 유향을 바꾼다. 표고 665~705m 사이의 급사면 구간에서는 3단의 폭포를 형성하면서 고도를 낮추며, 이후 유향을 북동쪽으로 바꾸어 표고 653m 지점에서 병문천 유로의 좌안에 합류한다.

$N52^\circ W$ 방향으로 진행하던 병문천 본류는 이 합류점에서 $N25^\circ W$ 방향으로 유향을 다소 바꾸나 10m 정도의 유로 폭은 변화를 보이지 않는다. 제4함몰 윈도우로부터 분기되어 내려온 지상 유로는 이 합류점에 $N60^\circ E$ 의 방향으로 흘러 들어오므로 병문천 유로와는 112° 의 합류 각도를 보이며 비대칭적인 형태로 합류한다(그림 7a). 합류점에서 지상 유로의 폭은 암반 하상만을 대상으로 하면 4m에 불과하나 조릿대로 덮여 있는 하상까지 포함하면 유로 폭은 최대 8m까지 확대된다.



그림 6. 제4함몰 윈도우 지점에서 분기되는 구린굴 지하 유로와 기존의 지상 유로

구린굴 입구 하류에서는 $S78^\circ E$ 방향으로 동굴을 빠져나와 막장 쪽으로 진행하던 7.5m 폭의 유로는 $N03^\circ E \sim N87^\circ E$ 방향으로 유향을 바꾸면서 크게 곡류하며 북류한다. 곡류 구간의 활주사면에 해당하는 유로 우안도 전부 암반으로 이루어져 있어 홍수류가 발생하면 전부 물에 잠기는 것으로 보인다. 즉 좁은 하폭의 구린굴 유로 구간을 빠져 나온 홍수류는 동굴 입구 하류에

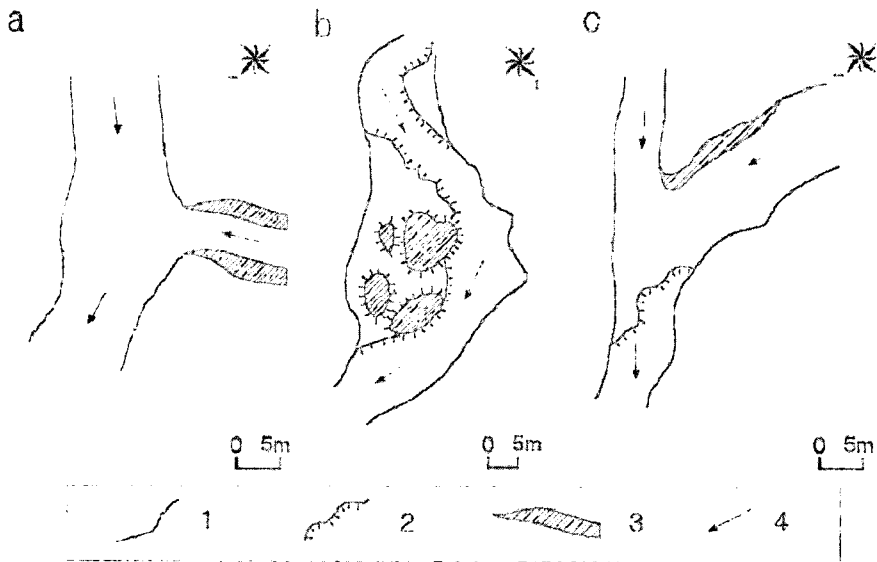


그림 7. 구린굴 주변의 유로 형태

1. 유로 경계, 2. 소규모 단애, 3. 식생, 4. 유로 방향

서 급격하게 하폭을 늘리면서 하도 단면을 조정한다. 활주사면에는 식생으로 덮여 있는 타원형의 미고지가 4곳 나타나며, 유로 밖으로 유수가 넘치는 경우에는 망류하도의 하중도 모습을 이루게 된다(그림 7b).

구린굴 구간을 빠져 나와 북동쪽으로 향하는 병문천 유로는 표고 665~705m 사이의 급사면 구간에서 두개의 폭포를 만들며, 표고 660m 지점에서 동쪽으로부터 흘러나오는 유로와 합류한다. 즉 N03°W 방향으로 내려오는 병문천 유로와 N59°W 방향으로 내려오는 동쪽 유로는 56°의 각도를 이루며 합류한다(그림 7c). 두 유로의 하폭은 병문천이 9.5m, 우안으로 합류하는 동쪽 유로의 하폭은 5m로서 병문천이 본류의 형태를 보인다. 그러나 합류점 하류 쪽의 유로는 동쪽 유로의 유향과 거의 동일한 N5°W 방향으로 흐르므로 합류의 평면 형태를 보면 오히려 병문천 유로가 동쪽 유로의 좌안에 비대칭적으로 합류하는 모습이다.

5. 고찰

용암동굴은 용암류 분출원과의 위치 관계를 반영하여 세 유형으로 구분된다. 첫 번째는 용암수로(lava channel)형 동굴로서 분출원에 가장 가까운 곳에서는 제방이 발달한 용암수로 안을 용암류가 유동하게 되는데, 시간이 지나면서 아치 모양으로 성장한 제방이 용암수로를 완전히 덮어버림으로써 용암동굴이 형성된다. 두 번째 유형은 암거(暗渠)형 동굴로서 용암수로 구역을 빠져나온 용암류는 윗부분이 평탄한 모습으로 바뀌게 되며, 이때 고결된 표면 아래로 액상의 용암류가 마치 암거를 따라 흐르듯이 분출원에서 멀리 떨어진 주변부까지 효율적으로 유동한다. 이 액상의 용암류가 빠져나가면서 암거 역할을 한 지하 용암동굴이 나타난다. 마지막으로 분출원에서 가장 멀리 떨어진 용암류 말단부에서는 라바토(lava toe)를 뚫고 액상의 용암류가 빠져나가면서 파호이호이 용암의 라바토 안에 소규모의 단일 동굴이 형성된다(Ollier, 1988).

이와 같이 용암류 내부에 속이 빈 튜브의 모습으로 형성되는 용암동굴은 용암류 본래의 형태로서 중유굴

이나 해식동과 같이 침식작용을 통하여 형성된 동굴과는 형성과정이 전혀 다르다. 침식작용으로 지속적으로 성장하는 중유굴이나 해식동과는 달리 용암동굴은 용암류의 분출이 종료되는 시점부터 붕괴 단계로 들어가게 된다.

제주도에는 천연기념물로 지정된 10개의 용암동굴을 포함하여 전부 136개의 용암동굴이 분포하고 있다(문화재청, 2003). 현재 제주도 용암동굴의 붕괴와 관련하여 가장 큰 문제는 동굴 천장에서 발생하는 낙반 현상이다(김범훈 · 김태호, 2007; 손인석 외, 2008). 용암동굴은 천장의 암반 두께가 얇고 또 고온의 용암류가 냉각되는 과정에서 발생하는 거북등 모양의 절리가 천장에 조밀하게 발달하고 있으므로 절리면을 따라 발생하는 낙반 현상은 결국 용암동굴의 붕괴로 이어지게 된다.

예를 들면, 천연기념물 제342호 빌레못동굴은 9,020m 길이의 전 구간에 걸쳐 전부 60곳의 낙반지대가 출현한다(제주도동굴연구소, 2005). 또한 천연기념물 제466호 수산굴에서도 29곳에 낙반지대가 나타나는데, 특히 입구로부터 1km 지점에는 최대 높이 10m를 넘는 암괴 더미가 수 백m에 걸쳐 동굴 바닥을 덮고 있어 '낙석광장'이라고 표현할 정도이다(남제주군, 2004). 물론 동굴 천장의 함몰은 지하에 위치한 동굴을 발견하는 중요한 실마리가 될 수 있으며, 이후 동굴 입구의 역할을 하는 순기능을 갖고 있기도 하다.

이와 같이 제주도의 대다수 용암동굴에서는 천장에서 낙반 현상이 발생하고 있으며, 구린굴의 경우도 예외는 아니어서 100m 정도 길이의 유로 구간에서 동굴 입구를 포함하여 전부 5곳에서 함몰 원도우가 출현하고 있다. 이는 구린굴 유로 구간의 동굴 천장에 조밀하게 발달한 거북등 모양의 절리와 더불어 제2함몰 원도우와 제3함몰 원도우 단면에서 확인할 수 있는 30cm 두께의 얇은 암반이 천장의 낙반과 함몰을 일으키고 있기 때문이다. 특히 제4함몰 원도우는 병문천 하상에 발달한 원도우로서 용암동굴의 천장이 유로의 바닥에 해당하므로 유수에 의한 마식 및 굴식작용까지 가세하여 천장 붕괴를 조장하고 있다. 현무암질 용암류로 이루어진 병문천 하상에도 거북등 모양의 절리가 잘 발달하고 있으므로 유수의 굴식작용에 의한 하상 지하에



그림 8. 병문천 암반 하상에 발달한 거북등 모양의 절리

유리하다(그림 8).

제주도 하천의 유로 형성에는 용암동굴의 존재가 중요한 것으로 알려져 있다(김상호, 1963; 윤정수·손인석, 1991; 제주도, 1998). 즉 용암동굴의 천장이 붕괴 되면 동굴 구간은 협곡 형태의 유로로 바뀔 수 있으므로 용암류와 용암류 사이의 경계부를 따라 발달하는 일반적인 유로뿐 아니라 용암류 내부에 발달하는 유로에도 차별침식을 일으키는 절리와 용암동굴의 위치가 중요하다.

일반적으로 제주도는 투수성이 매우 높은 지역으로 알려져 있으며, 이런 높은 투수성은 현무암질 용암류에 전형적으로 나타나는 절리, 층리 및 화산쇄설층 이외에 용암동굴에도 크게 기인하고 있다(제주도, 2000). 제주도의 지하에 형성된 용암동굴은 지하수의 수평 방향으로의 통로, 즉 지하 유로의 역할을 하고 있으며, 지상에 입구가 일부 노출된 숨골을 통해서도 이런 사실을 확인할 수 있다. 구린굴 유로 구간은 아직 동굴 천장이 그대로 남아 있어 지하 유로의 형태를 보이고 있으나, 동굴 입구와 막장 사이의 구간에서 볼 수 있듯이 침식작용으로 천장과 벽면이 전부 제거되면 보통의 지상 유로로 바뀔 것이다(그림 4). 이런 점에서 구린굴은 지하의 용암동굴이 지상 하천의 유로 형성에 어떻게 관여하는 지를 보여주는 매우 모식적인 사례라고 할 수 있다.

한편, 두 하천이 합류하는 경우에 합류점에 출현하

는 유로의 평면 형태는 대칭형과 비대칭형으로 구분된다(Mosley, 1976; Best, 1986; De Serres and Roy, 1990 金泰鎬, 1996). 일반적으로 합류하는 두 하천의 유량과 토사량 등 수리 조건이 비슷한 경우에는 Y자와 같은 대칭적인 합류 형태가 나타나기 쉽다. 심지어 비대칭적인 합류 형태를 초기 조건으로 설정한 수로 실험에서도 본류와 지류의 수리 조건이 동일하면, 합류 후의 유로는 합류하는 유로 사이를 이등분하는 선과 일치하게끔 점진적으로 유로의 위치가 바뀌어 대칭적인 합류 형태를 만든다(Mosley, 1976; Best, 1988; 金泰鎬, 1996).

반면에 합류하는 두 하천의 수리 조건에 차이가 있는 경우에는 비대칭적인 합류 형태가 출현하며, 특히 본류에 비하여 지류 하천의 규모가 현저하게 작으면 합류 후의 유로는 본류의 연장선 위에 위치하므로 합류점에서 본류의 유향은 변하지 않는다(Horton, 1945; Roy, 1983). 두 하천의 규모 차이가 크지 않은 경우라면 합류 후의 유로를 합류점 위로 연장했을 때, 이 연장선과 합류하는 유로 사이에 만들어지는 각도가 지류 쪽보다는 본류 쪽에서 작아지는 위치에 합류 후의 유로가 놓이게 된다(Howard, 1971). 즉 합류점에서 일어나는 유향의 변화를 비교하면 지류 하천보다 본류 하천에서 작게 나타난다.

병문천 수계에 나타나는 합류 형태는 대부분 비대칭적인 모습으로 본류 하천에 비하여 규모가 작은 지류 하천들이 합류하면서 병문천 수계를 만들고 있다(윤정수·손인석, 1991; 김미령, 2003). 그러나 구린굴 구간을 빠져나오는 병문천 본류와 구린굴 동쪽 유역에서 흘러나오는 유로가 합류하는 표고 660m 지점에서의 합류 형태를 보면 오히려 병문천 본류보다는 동쪽 지류의 유향 변화가 작다. 반면에 제4함몰 원도우로부터 분기되어 내려온 지상 유로가 병문천 본류에 합류하는 653m 지점에서는 이 지상 유로의 유향 변화가 병문천 본류에 비하여 훨씬 크다.

이와 같은 합류점에서의 합류 형태와 유향 변화를 토대로 구린굴 일대에서 일어난 수계의 변천 과정을 추정하면 다음과 같다. 구린굴 유로가 형성되기 이전에는 구린굴 상류 쪽 유역에서 흘러나오는 유로는 제4함몰 원도우 지점과 이곳에서 분기되는 구린굴 지상

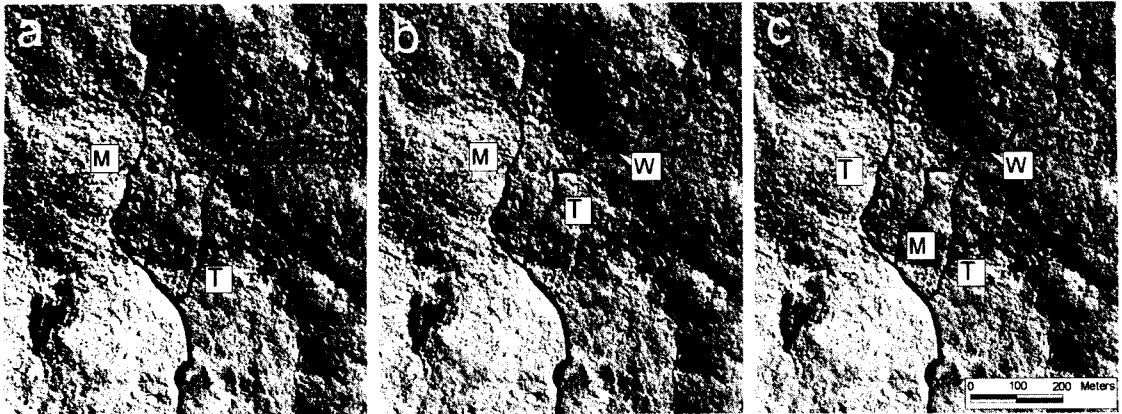


그림 9. 구린굴 일대 병문천 수계의 변천

M: 본류, T: 지류, W: 함몰 원도우, ▨: 구린굴 분포 구역, □: 구린굴 유로 구간

구간을 흐르다가 구린굴 동쪽 유역에서 흘러나오는 유로와 합류하였다. 이때는 동쪽 유역에서 흘러나오는 유로가 병문천의 본류였으며, 구린굴 지상 유로는 병문천의 지류였다(그림 9a). 이후 구린굴 지상 유로의 하상에 함몰 원도우가 형성되면서 지상 유로는 구린굴 유로로 대체되었고, 구린굴 구간을 경유하는 유로가 지상 유로의 합류점보다 120m 정도 상류 지점에서 동쪽 유역에서 흘러나오는 병문천 본류의 좌안에 합류하였다(그림 9b). 이후 구린굴 상류 쪽으로 병문천의 유역이 크게 확대되고 구린굴 구간을 경유하는 유로의 수리 조건이 동쪽 유역에서 흘러나오는 유로보다 더 커지면서 이쪽 유로가 병문천의 본류로 바뀌었다. 그러나 홍수류가 발생하여 제4함몰 원도우와 동굴 유로에서 충분한 통수 단면적이 확보되지 않는 경우에는 현재도 구린굴 지상 구간의 유로 쪽으로도 유수가 발생함으로써 병문천 본류는 제4함몰 원도우에서 일시적으로 분기 하천을 이루게 된다(그림 9c).

6. 결론

하천의 유로 변경은 다양한 요인을 통하여 인위적으로 또는 자연적으로 일어날 수 있다. 화산활동이 활발

한 지역이라면 용암류, 화산쇄설류 및 이류 등의 화산 분출물로 인하여 기존의 유로가 막히거나 매몰되고, 이후 새로운 유로가 형성되면서 수계가 재편성되는 경우도 빈번하게 발생하고 있다. 더욱이 용암동굴의 발달이 탁월한 현무암질 용암류 분포 지역에서는 지하에 형성된 용암동굴의 붕괴와 동굴 지상에 위치한 하천 유로가 결합하여 용암동굴이 새로운 유로로 바뀌면서 수계의 발달을 초래할 수도 있다.

한라산 북사면을 흐르는 병문천 유로와 이 유로 밑으로 병문천과 교차하는 구린굴의 경우에는 교차 지점에 해당하는 유로의 하상, 즉 동굴 천장이 무너져 내리면서 지상의 유로가 자연스럽게 지하의 동굴로 연결되었다. 그 결과 동굴을 빠져나온 새로운 유로가 기존 유로에 다시 합류하면서 수계의 변화를 가져왔다.

구린굴 사례에서 볼 수 있듯이 현무암질 용암류가 넓게 분포하고 있을 뿐 아니라 많은 용암동굴이 발달한 것으로 알려져 있는 제주도에서 수계 형성은 물론 수계 변천에 이들 용암동굴의 존재가 관련되어 있을 가능성은 적지 않다. 지금도 제주도의 용암동굴이 지닌 가장 큰 문제가 동굴 천장에서 발생하고 있는 낙반 및 붕괴 현상이라는 점을 고려한다면, 제주도 지역의 수계 발달에 미치는 용암동굴의 영향은 현재 진행형이라고 할 수 있을 것이다.

謝辭

현장에서의 측량 작업을 도와준 제주대학교 지리교 육과의 김민수, 고성준, 진효성, 강제훈군 그리고 논문 수정에 유익한 의견을 주신 심사위원들께 고마운 마음을 전합니다.

文獻

- 강상배, 1980, “제주도 남·북사면지형의 비교연구,” 지리학연구, 5, 157-179.
- 건설교통부, 2000, 한국하천일람.
- 김미령, 2003, 제주도 하천의 하계망 분석, 제주대학교 석사학위논문.
- 김범훈·김태호, 2007, “제주도 용암동굴의 보존 및 관리 방안에 관한 연구,” 한국지역지리학회지, 13, 609-622.
- 김상호, 1963, “제주도의 자연지리,” 지리학, 1, 2-14.
- 남제주군, 2004, 수산굴·마장굴 실태조사보고서.
- 문화재청, 2003, 제주도 천연동굴 일제조사 보고서.
- 손인석, 2005, 제주도의 천연동굴, 나우출판사.
- 손인석·김봉현·박화용·송지인·박우용, 2008, “제주도 도로 밑을 지나는 화산동굴 유로방향 연구,” 동굴연구, 5, 5-66.
- 손일·손명원·박경·장은미·서종철·박수진·김성환·박정재(역), 2007, 휴먼 임팩트, 푸른길, 서울 (Goudie, A., 2000, *The Human Impact on the Natural Environment*, Blackwell, Oxford).
- 송언근, 1993, 한반도 중·남부 지역의 감입곡류지형발달, 경북대학교 박사학위논문.
- 윤정수·손인석, 1991, “제주시 3대 하천지대의 지질구조와 지형발달,” 제주대학교 해양연보, 15, 45-60.
- 이광률·윤순옥, 2004, “경기·강원 지역 감입곡류 하천의 곡류절단면 분포 특성,” 대한지리학회지, 39(6), 845-862.
- 이민부·이광률·김남신, 2004, “추가령 열곡의 철원·평강 용암대지 형성에 따른 하계망 혼란과 재편성,” 대한지리학회지, 39(6), 833-844.
- 장호·고기만, 1995, “운봉분지의 하천쟁탈,” 전북의 자연연구, 5, 35-40.
- 제주도, 2000, 제주도 지하수 보전·관리계획 보고서.
- 제주도, 1998, 제주·애월도폭 지질보고서.
- 제주도동굴연구소, 2005, 빌레못동굴 평면도.
- 제주지방기상청, 2007, 제주도 AWS 기상특성집.
- 金泰鎬, 1996, “合流点の流路形状に及ぼす合流の平面形と角度の影響に關する水路實驗,” 地學雜誌, 105, 198-207.
- 大矢雅彦, 2006, 河道變遷の地理學, 古今書院, 東京.
- 丸井英明·吉松弘行, 2005, 中越地震により生じた地すべりダム對策, 日本地すべり學會·日本應用地質學會, 平成16年新潟縣中越地震災害被害調査報告書, 60-68.
- Baker, V. R., Gredey, R., Komar, P. D., Swanson, D. A., and Waitt, R. B., 1987, Columbia and Snaker river plains, in Graf, W. L.(ed.), *Geomorphologic Systems of North America*, The Geological Society of America, 403-468.
- Best, J. L., 1988, Sediment transport and bed morphology at river channel confluences, *Sedimentology*, 35, 481-498.
- Best, J. L., 1986, The morphology of river channel confluences, *Progress in Physical Geography*, 10, 157-174.
- Cummans, J., 1981, Mudflows resulting from the May 18, 1980, eruption of Mount St. Helens, Washington, U.S. Geological Survey Circular 850-B.
- De Serres, B. and Roy, A. G., 1990, Flow direction and branching geometry at junctions in dendritic river networks, *The Professional Geographer*, 42, 194-201.
- Feldman, S., Harris, S. A., and Fairbridge, R. W., 1968, Drainage patterns, in Fairbridge, R. W.(ed.), *The Encyclopedia of Geomorphology*, Dowden, Hutchinson & Ross, Stroudsburg, 284-290.
- Glicken, H., 1996, Rockslide-debris avalanche of May 18, 1980, Mount St. Helens Volcano, Washington, U.S. Geological Survey Open-File Report 96-677.
- Hickin, E. J. and Nanson, G. C., 1975, The character of channel migration on the Beaton River, north-east British Columbia, Canada, *Bulletin of the Geological Society of America*, 86, 487-494.

- Hooke, J. M. and Redmond, C. E., 1989, Use of cartographic sources for analysing river channel change with examples from Britain, in Pett, G. E.(ed.), *Historical Change of Large Alluvial Rivers: Western Europe*, Wiley, Chichester, 79-93.
- Horton, R. E., 1945, Erosional development of streams and their drainage basins, hydrophysical approach to quantitative morphology, *Bulletin of the Geological Society of America*, 56, 275-370.
- Howard, A. D., 1971, Optimal angles of stream junction: Geometric, stability to capture, and minimum power criteria, *Water Resources Research*, 7, 863-873.
- Knighton, D., 1998, *Fluvial Forms and Processes: A New Perspective*, Hodder Arnold, London.
- Major, J. J., 2003, Post-eruption hydrology and sediment transport in volcanic river systems, *Water Resources IMPACT*, 5, 10-15.
- Mosley, M. P., 1976, An experimental study of channel confluences, *Journal of Geology*, 84, 535-562.
- Ollier, C., 1988, *Volcanoes*, Blackwell, Oxford.
- Roy, A. G., 1983, Optimal angular geometry models of river branching, *Geographical Analysis*, 15, 87-96.
- Ten Cate, J., 1981, The river and coastal plains of the Netherlands, Report on the Working Group on the Geomorphology of River and Coastal Plains, International Geographical Union.
- 교신: 김태호, 690-756 제주특별자치도 제주시 제주대학교로 66, 제주대학교 사범대학 지리교육과 (이메일: kimtaeho@cheju.ac.kr, 전화: 064-754-3235)
- Correspondence: Taeho Kim, Department of Geography Education, Cheju National University, Jejudaehak-Road, Jeju 690-756, Korea (e-mail: kimtaeho@cheju.ac.kr, phone: +82-64-754-3235)

최초투고일 08. 08. 12
최종접수일 08. 09. 23