

경상북도 봉화군 석포면 소재 너뱅이동굴의 형성과정

권순율 · 박태영 · 안효리 · 김상윤 · 조경남[†]
강원대학교 지질학과

Speleogenesis of Neobaeng-i cave, Seokpo-myeon, Bonghwa-gun, Gyeongsangbuk-do, South Korea

Sunyoul Kwon · Tae-yeong Park · Hyori Ahn · Sangyun Kim · Kyoung-nam Jo[†]
Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea

요 약

이 연구에서는 경상북도 봉화군 석포면에 위치한 너뱅이동굴의 형성 및 진화과정을 규명하기 위해 동굴 통로 패턴 등 동굴지질학적 분석을 실시하였다. 이 동굴은 총 길이 335 m로 조선누층군 태백층군에 포함되는 두 무골층 중부층원 내 수 미터 규모의 두꺼운 셰일층 사이에 위치한 석회암에서 제한적으로 발달하고 있으며, 석회암-셰일 교호층과 석회 잔자갈 역암 지층을 따라 발달하는 특징을 보인다. 동굴 내외부 조사 결과에 따르면, 너뱅이동굴은 약 30°의 지층 경사를 따라 통로가 발달한 수위 하강 통기대 동굴(drawdown vadose cave)로 분류될 수 있다. 또한, 동굴의 발달이 성숙단계에 이르지 못해 전형적이지는 않지만, 복수의 지표 점원들(point sources)을 통한 동굴수 유입에 조절받은 가지형 동굴(branchwork cave)로 해석된다. 통로 발달이 이루어진 지층을 수직적으로 재구성하면 0~3 m까지 약 60%의 통로가, 3~9 m까지는 40%의 통로가 분포하는 것으로 나타났다. 이들 중에서도 통로가 가장 우세하게 발달한 구간에 해당하는 2~3 m 구간은 24%의 통로가 분포하여 이 구간을 초기 통로형성면(inception horizon)으로 판단하였다. 동굴의 형성 및 진화과정은 다음과 같이 크게 3 단계로 구분할 수 있다: 1) 포화대-천부포화대 조건에서 통로 연결이 불량한 초기 공동 형성단계, 2) 돌리네 형성과 통로 연결 및 확장단계, 3) 현재의 진화 정체단계. 이들 중 두 번째 단계는 구간별 퇴적물 집적단계, 부분적 통로 범람단계, 재개방단계로 다시 세분할 수 있다. 결론적으로 너뱅이동굴의 형성은 석회암-셰일 지층의 교호 특성 등 초기 지질학적 조절요인과 후기의 지표 카르스트 지형 발달 및 외부 퇴적물의 직접적 유입에 의해 크게 영향받았음을 시사한다.

주요어: 용해동굴, 석회암동굴, 동굴형성과정, 돌리네, 카르스트 지형

ABSTRACT: A cave geological analysis of Neobaeng-i cave (total length: 335 m), Bonghwa-gun, Gyeongsangbuk-do, was conducted to present the epigenic speleogenesis and a conceptual model of the cave. The development of cave passages has been limited to several strata, which consist of limestone-shale couplet and flat pebble conglomerate facies, between meter-scale thick shale beds in the middle member of the Dumugol Formation. Neobaeng-i cave can be classified as a drawdown vadose cave, mainly obeyed by the stratal dip of approximately 30 degrees. It can be also correspond with a branchwork cave controlled by cave water originated from surface point sources although it is atypical because of the immature stage in cave development. Based on the columnar section of strata involving Neobaeng-i cave, 60% and 40% of the total passage has been distributed over 0~3 m and 3~9 m intervals, respectively, from the bottom of the section. The most active depth interval for the passage development is 2~3 m, and it accounts for 24% of the total. This is considered as the 'inception horizon'. The evolutionary process of the cave can be divided into three stages as follows: 1) the stage of the initial unconnected conduit under phreatic-epiphreatic conditions, 2) the stage of the doline formation and passage connection/enlargement, and 3) the stage of current stagnation for cave development. The second stage can be subdivided into three substages: clogged passages in the relatively narrow spots with allogenic sediments, partially flooded passages, and reopened

[†]Corresponding author: +82-33-250-8555, E-mail: kjo@kangwon.ac.kr

passages. In conclusion, the speleogenesis of Neobaeng-i cave has been strongly affected by the basal geological setting like the alternations of limestone-shale beds and, in the latter period, by the evolution of surface karst landforms and large-scale input of allogenic sediments.

Key words: solution cave, limestone cave, speleogenesis, doline, karst landform

1. 서론

국제동굴연맹(International Union of Speleology)에서는 동굴의 정의를 ‘사람이 들어갈 수 있을 만큼 충분히 큰 지표 아래에 자연적으로 형성된 공동’으로 채택하고 있다(Ford and Williams, 2007). 대다수의 동굴지질학자들은 위와 같은 정의에 동의하고 있으나, 연구자에 따라 약간의 견해 차이를 보이기도 한다. 예를 들면, Palmer (2007)는 동굴로 정의하기 위해서는 영구암대(total darkness)의 존재가 필수적인 요소라고 강조하였다. 또한, Gillieson (1996)은 사람의 출입이 가능한 공동이라는 언급에 대해 일반적으로 통로의 횡단면 직경이 0.3 m 이상이어야 한다고 제시한 바 있다. 우리나라 문화재청의 경우 동굴의 정의에 대해 사람의 출입이 어렵더라도 통로의 연장 가능성이 충분히 있는 경우까지를 포함하고 있다(Cultural Heritage Administration, 2000).

한반도 남부에서 보고된 동굴의 유형 대부분은 용해동굴(solution caves), 화산동굴(volcanic caves), 침식동굴(erosion caves)에 해당된다. 이들 중 용해동굴은 고생대 석회암이 위치한 강원도, 충청북도 그리고 경상북도 일대에 주로 분포하고 있으며, 동굴의 수는 최소한 1,200개소 이상 존재하는 것으로 보고되고 있다(Cultural Heritage Administration, 2022). 이처럼 국내에는 많은 수의 용해동굴이 보고되었음에도 불구하고, 동굴 통로의 초기 형성 원인 및 내부 구조의 발달 과정에 대한 연구가 극히 미흡한 편이다. 일정 수준을 갖춘 전문 학술지에 게재된 용해동굴의 성인 관련 논문은 강원도 지방기념물 옥계동굴과 전라남도 기념물 화순 백아산 자연 동굴 2건에 불과하다(e.g., Choi *et al.*, 2003; Jo *et al.*, 2019). 이들 역시 해외 수준에 비하면 초기 연구 도입단계에 머물러 있다고 평가할 수 있으며, 이는 아직까지 최신 연구기법이 적용되기 이전이고 국내 용해동굴에 대한 다양한 연구사례가 부족하기 때문인 것으로 생각된다. 이와 같은 국내 연구상황과는 달리, 해외에서는 매우 활발히 연구가 진행되고 있으며(e.g., Ballesteros

et al., 2015; Antonellini *et al.*, 2019; Columbu *et al.*, 2021; Spötl *et al.*, 2021) 그 이유는 전 세계적으로 넓게 분포하고 있는 용해동굴, 그 중에서도 석회암 지대를 따라 발달하는 석회암동굴과 카르스트 지형은 카르스트 대수층을 따르는 지하수 이동 및 오염물질 추적을 포함하여 싱크홀 발생 등 지질재해 문제와 지질공원 등 천연관광자원으로서의 가치 등 사회경제적 의미가 매우 크기 때문이다(Palmer, 1999; Filipponi *et al.*, 2009). 이에 더해 Jo *et al.* (2019)은 동굴형성과정을 이해하는 것이 제4기 지표지질학 및 퇴적암석학 분야 등과 깊이 관련되어 있다고 강조하였다.

이번 연구에서는 경상북도 봉화군 석포면 소재 매장문화재인 너뱅이동굴에 대한 형성과정을 동굴지질학적으로 분석하였다. 지난 2004년 환경부 전국 자연동굴 조사결과에 의하면, 너뱅이동굴은 동굴생성물이 매우 미약하게 발달한 석회암동굴로서 문화재로서의 가치는 높지 않은 것으로 평가되었으나, 입구가 수직으로 발달하고 통로의 대부분이 30° 이상의 고각으로 연결된 점 등 너뱅이동굴만의 특이한 동굴지질학적 특징을 언급한 바 있다(National Institute of Environmental Research, 2004). 또한, Kim *et al.* (2018)에 의하면 너뱅이동굴은 멸종위기 야생생물 II급으로 지정된 토끼박쥐(*Plecotus ognevi*)의 주요한 동면처로 확인되었으며, 온도 및 습도에 대해 모니터링을 실시하여 토끼박쥐가 선호하는 서식지와 너뱅이동굴의 환경이 서로 밀접하게 연관되어 있음을 제시하였다. 따라서 본 연구에서는 국내 석회동굴 중 통로의 발달구조 측면에서 특이성이 있고 생태학적 의미가 큰 너뱅이동굴을 대상으로 동굴지질학적 특징을 분석하고 형성과정을 이해하고자 하였다.

2. 연구지역

너뱅이동굴의 입구는 행정구역상 경상북도 봉화군 석포면 석포리 산 1-189, 너뱅이골에 발달하고 있다(그림 1). 너뱅이골을 따르는 계곡 상류 부근에서

폭 10 m의 돌리네(doline)가 발달하며, 이 돌리네의 최심부에 동굴의 입구가 노출되어 있다(그림 1, 3a). 동굴의 전반적인 발달 방향은 강원도 삼척시와 경상북도 봉화군의 행정 경계를 가로지르는 북북서 방향

이 우세하다. 삼척시와 봉화군의 경계 지역인 석개재 일대는 해발고도 800 m 이상의 고산지대이며, 기상청 자료에 따르면 지난 2021년 한 해 동안 봉화군 석포면에서 측정된 연평균 기온과 강수량은 각각 9

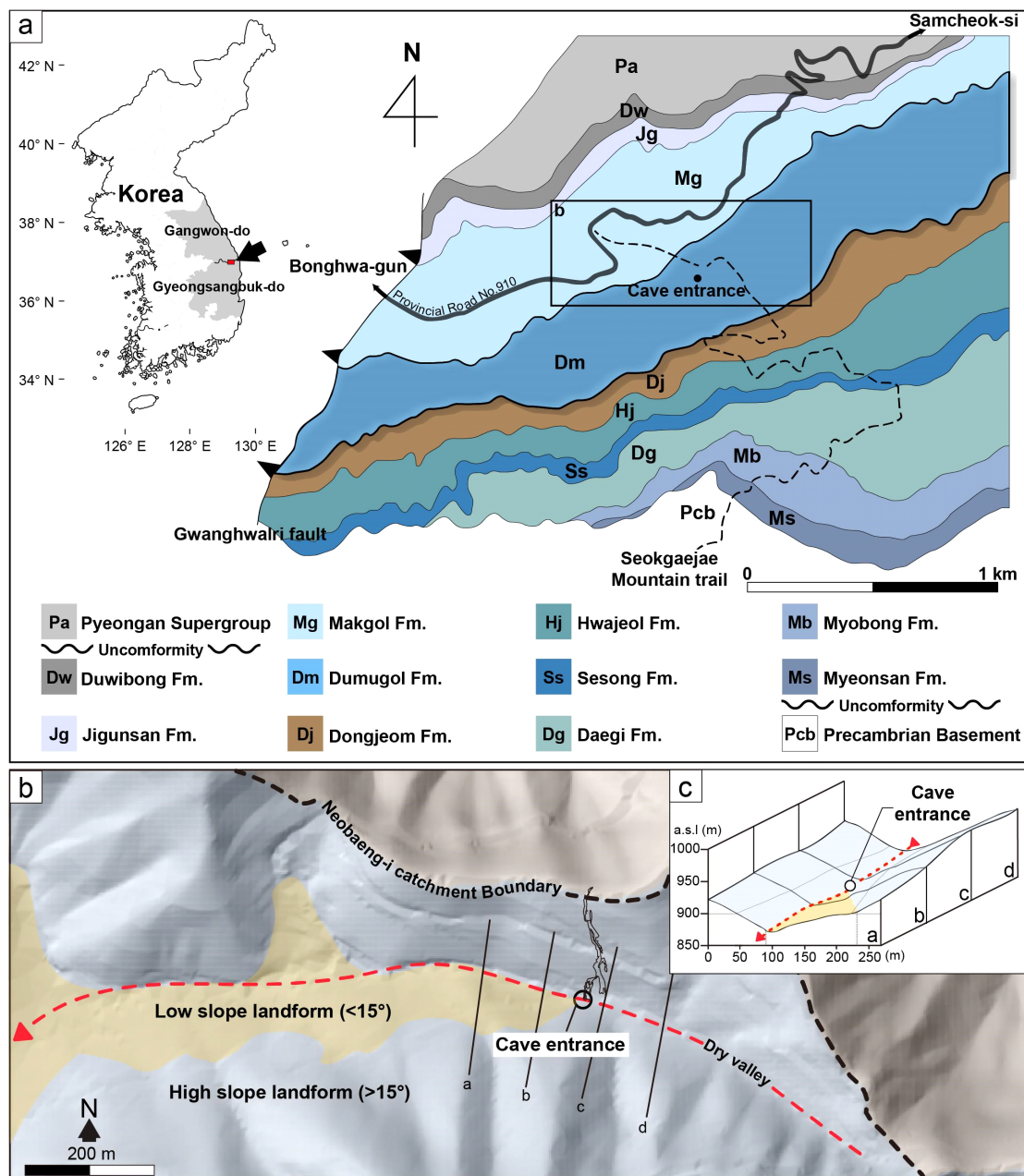


Fig. 1. Geological map of the study area (modified from Choi *et al.*, 2004). (a) and DEM topography map (b) and (c). The yellow areas in (b) and (c) represent sediment in the valley, slopes with angles less than 15 degrees, while the blue areas indicate steep slopes with angles more than 15 degrees. Red dash line indicate dry valley. In (c), the cross-section profile is shown along the lines a, b, c, and d in (b).

°C, 1,411 mm이다. 일 년 중 여름철(6~8월)에 대부분의 강수(614 mm)가 집중되는 전형적인 한반도 강우 특성을 보인다. 고산지대 계곡을 따라 흐르는 지표수량의 정성적 범위, 돌리네 주변 지표지형의 단기변화 및 동굴 내부로의 강수 유입시기를 파악하고자 화상 모니터링을 수행하였다. 그 결과, 100 mm 이상의 많은 강수가 집중되었던 5월 16일과 9월 1일에도 너뱅이동굴의 입구가 위치한 계곡을 따라 흐르는 지표수량 증가와 동굴입구로의 뚜렷한 강수 유입은 관찰되지 않았다.

너뱅이동굴의 인근에서 널리 알려진 석개재 단면의 지질은 전기 고생대 캄브리아기-오르도비스기에 퇴적된 태백층군의 지층들이 연속적으로 나타나고

(Choi *et al.*, 2004; Kwon and Chough, 2005), 동굴의 입구를 중심으로 계곡 상류에서 하류까지 동점층, 두무골층, 막골층이 관찰된다. 이 지역의 동점층은 암회색 사암이 주요하게 나타나고 상부로 갈수록 석회질 성분이 많아지는 특징을 보였다. 또한, 너뱅이골 계곡의 하류로는 막골층이 관찰되며, Dunham (1962)의 석회암 분류를 기준으로 석회암(mudstone), 골격이 포함된 와케스톤(wackestone) 내지 입자암(grainstone), 괴상 내지 생교란된 입자암이 관찰된다. 이 외에도 타 지역과 마찬가지로 암회색 백운암(dolostone)이 이 지역의 막골층을 구성한다. 너뱅이동굴 입구부 노두의 특징에 의하면 계곡 종류, 동굴 입구 부근은 두무골층에 발달한 것으로 판단된다(그

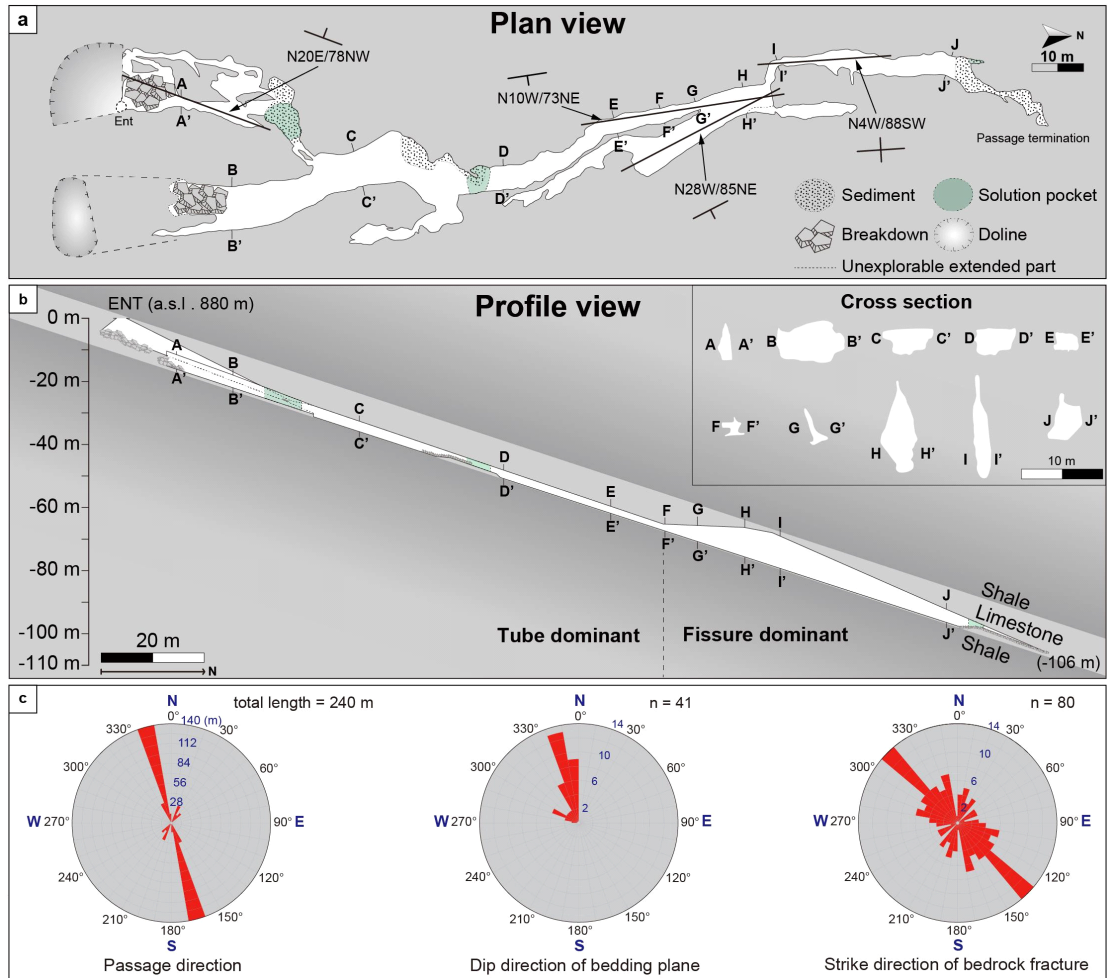


Fig. 2. The cave map of the Neobaeng-i cave. (a) A projected plan view of the cave. (b) A projected profile view of the cave and passage cross-section. (c) is a rose diagram showing the measured structure data in the cave.

림 1, 3a). 이 지점의 두무골층 암석은 화석 입자를 풍부하게 함유하고 일부의 층준에서 괴상의 생물초가 관찰되는 특징이 있고, 석개재 단면에서 측정된 두무골층의 주향과 경사는 N50~90°E 및 30~40°NW이다. Kwon and Chough (2005)의 연구에 의하면 두무골층은 크게 3개의 층원으로 구분할 수 있으며, 하부층원에서는 대부분 갈색 내지 녹회색의 석회질 셰일(calcareous shale)이 주요하게 나타나는데 반해, 중부-상부층원으로 갈수록 점차 석회암층이 주를 이룬다. 주요 암상으로 석회질 셰일, 석회암-셰일 교호층(limestone-shale couplet), 생교란작용이 우세한 석회암(bioturbated limestone)과 석회 잔자갈 역암(limestone pebble conglomerate) 등이 관찰되고, 생물초(reef)가 제한적으로 나타난다(Choi *et al.*, 2004).

3. 연구방법

너뱅이동굴의 입구 주변 지표지형 및 지질학적 조건을 파악하기 위해 실내의 조사를 수행하였다. 실내에서는 소프트웨어 QGIS를 활용하여 수치지형도 및 DEM 기반 음영기복도를 작성한 후 주변 계곡의 형태와 유역분지를 확인하였고(그림 1b), 입구부 노두를 대상으로 주상도 작성과 지질구조, 돌리네의 형태와 규모를 측정 및 기재하였다.

통로 패턴 분석을 위한 동굴평면도(cave map; plan view)는 강원대학교 동굴연구회에서 작성한 기존의 간이측량도를 재확인 및 보정 후 활용하였다. 너뱅이동굴의 전반적인 형태와 구조 및 방향성을 재확인하였으며, 동굴내부조사를 통해 통로 발달방향, 기반암의 층리 및 절리면의 방향을 측정한 후 장미도표를 작성하였다(그림 2). 동굴 통로에 대한 측량 시술자, 레이저거리측정기(bd-d100, Bluetec; 오차범위 ± 2 mm), 클리노콤파스(CH2000, Korean scientific; 측정해상도 1°)를 이용하였으며, 모든 측정치는 동굴 입구를 시작점으로 하고 종점을 향해서 구간별로 측정한 값을 기준으로 하였다. 측정된 자료를 기반으로 동굴평면도의 방향과 통로의 규모를 미세 보정하였다. 통로의 높이와 횡단면을 이용하여 평면도 상에서의 N-S 방향을 기준으로 투영시킨 종단면도를 작성하였다(그림 2b).

이번 연구에서는 너뱅이동굴 내부에서 관찰되는 암상의 변화, 지질구조 및 동굴퇴적물이 통로 발달

에 미치는 영향과 상호연관성을 평가하고자 하였다. 이를 위해 동굴 내부에서 관찰되는 통로의 형태 및 미지형(speleogen), 지질구조, 기반암 암상 변화 및 퇴적물에 대한 특징을 기재하였다. 기반암 암상의 변화를 파악하기 위해 동굴 입구에서부터 동굴 내부까지 별도의 주상도를 작성하였으며, Filipponi *et al.* (2009)의 연구에서 사용된 방법과 동일하게 지층별로 존재하는 통로의 부피를 백분율로 나타내기 위해 평면도와 종단면을 이용해 계산한 통로의 부피를 주상도에 1 m 단위로 도시하였다. 이를 통해 통로가 우세하게 발달한 층준을 분석하였다. 다음으로, Palmer (1999)의 제안에 따라 각 통로 구간의 발달방향과 측정된 지층 경사방향 사이의 편차를 누적빈도곡선으로 도시하여 동굴 내부의 지질구조가 통로 발달에 미치는 영향을 평가하였다.

4. 연구결과

4.1 너뱅이동굴의 발달 방향 및 구조

너뱅이동굴의 전체 길이는 약 335 m이고, 통로의 폭은 약 0.5~8.0 m, 높이는 1.0~12.0 m의 범위로 측정되었다. 동굴 발달 방향은 전체적으로 북북서(N24°W) 방향으로 발달하며, 통로의 경사는 약 30~50°로 가파른 양상을 보인다(그림 2). 입구부 및 일부 내부 구간을 제외하고 너뱅이동굴의 통로는 전반적으로 두무골층 퇴적암의 일부 층준을 따라 일정하게 북북서 경사 방향으로 형성된 특징을 보여준다(그림 2a). 동굴 내부는 주통로를 중심으로 4개의 부속통로가 연결된 형태를 보이며, 이들 중 통로의 규모 및 연결성을 기준으로 판단한 주통로의 길이는 약 200 m로 나타났다. 바닥과 천장 사이 통로의 높이는 약 1.5~3.0 m 사이의 범위가 우세하다(그림 2b). 입구부에서 확인된 2개소의 돌리네 중 계곡 상류쪽 돌리네로부터 약 20 m 북쪽에 위치한 주통로의 시작과 끝부분은 현재 동굴퇴적물에 의해 막힌 상태이지만, Palmer (2007)에 의하면 이와 같은 특징이 퇴적물 너머로 연결 통로가 존재할 가능성이 있는 것으로 평가된 바 있다(그림 2).

동굴 입구 부근의 외부 노두에서는 단층, 습곡 및 미소 규모의 균열을 따라 발달한 수 내지 수십 센티미터 규모의 용식구조를 관찰할 수 있다(그림 3a). 너뱅이동굴의 입구는 약 10 cm 이내의 소규모 변위

를 보이는 역단층면을 따라 발달한다(그림 3a, 3b). 습곡이 관찰되는 입구부 단층 상반과는 달리, 하반에서는 매우 규칙적이고 일관성 있는 평균 N70°E/34°NW 방향의 층리가 관찰된다(그림 3a). 이와 같이 외부에서 관찰할 수 있는 층리는 동굴 내부에서도 뚜렷하게 확인되는데, 동굴 내부에서 측정한 층리는 전체적으로 매우 규칙적인 평균 N62°E/33°NW 방향이 우세하다. 내부 통로의 벽면을 따라 많은 미

소 규모의 단열이 관찰되며 이들의 주향은 N45°W 방향이 가장 우세하지만 이를 중심으로 거의 모든 방향성의 절리가 측정되었다(그림 2c). 내부에서 관찰할 수 있는 수십 미터 규모의 주요 절리의 방향은 각각 N20°E, N10°W, N28°W, N04°W 등이다(그림 2a). 너벵이동굴의 발달 방향은 앞서 서술한 지질구조의 방향과 매우 유사하게 나타난다. 즉, 동굴 입구부터 최심부까지 대체로 일정한 북북서(N24°W) 방

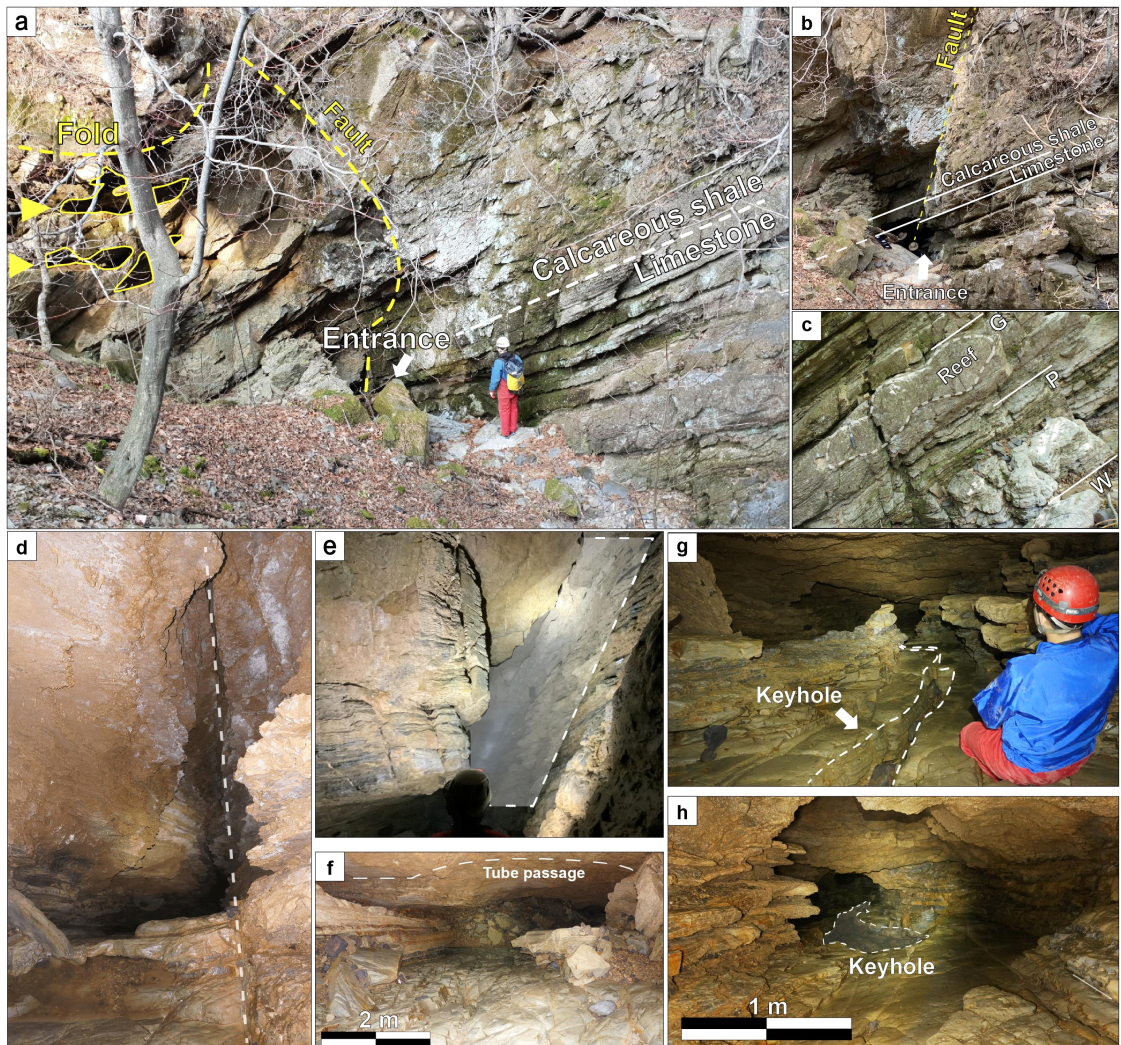


Fig. 3. Doline and passage type of Neobaeng-i cave. (a) the yellow dash lines represent the observed geological structure at doline, and the yellow triangle indicates the solution structure. (b) and (c) are enlarged images of (a). In (b), white line represents the boundary between limestone and limestone-shale layers. In (c), 'G', 'P' and 'W' represent limestone texture (Dunham, 1962). 'G' = grainstone, 'P' = packstone, 'W' = wackestone. (d) and (e) illustrate typical forms of fissure passages. White dotted line and plane indicates geological structures, joint and fault. (f)~(h) show tube and keyhole passages inside the cave.

향의 통로가 발달하는데, 이는 동굴 내외부에서 측정된 층리의 주요 경사 방향과 유사하다(그림 2c).

4.2 동굴 내외부 지형적 특징

너뱅이동굴 입구 부근에는 붕괴성(dropout) 내지

침윤성(suffosion) 돌리네(doline 또는 sinkhole) 2 개소가 동서 방향으로 발달한 계곡을 따라 나란히 위치하고, 이들 중 장축 20 m, 단축 15 m로 발달한 서쪽 돌리네의 최심부에 동굴 입구가 발달한다(그림 2a, 3a). 너뱅이굴 유역의 최상부에서부터 약 1

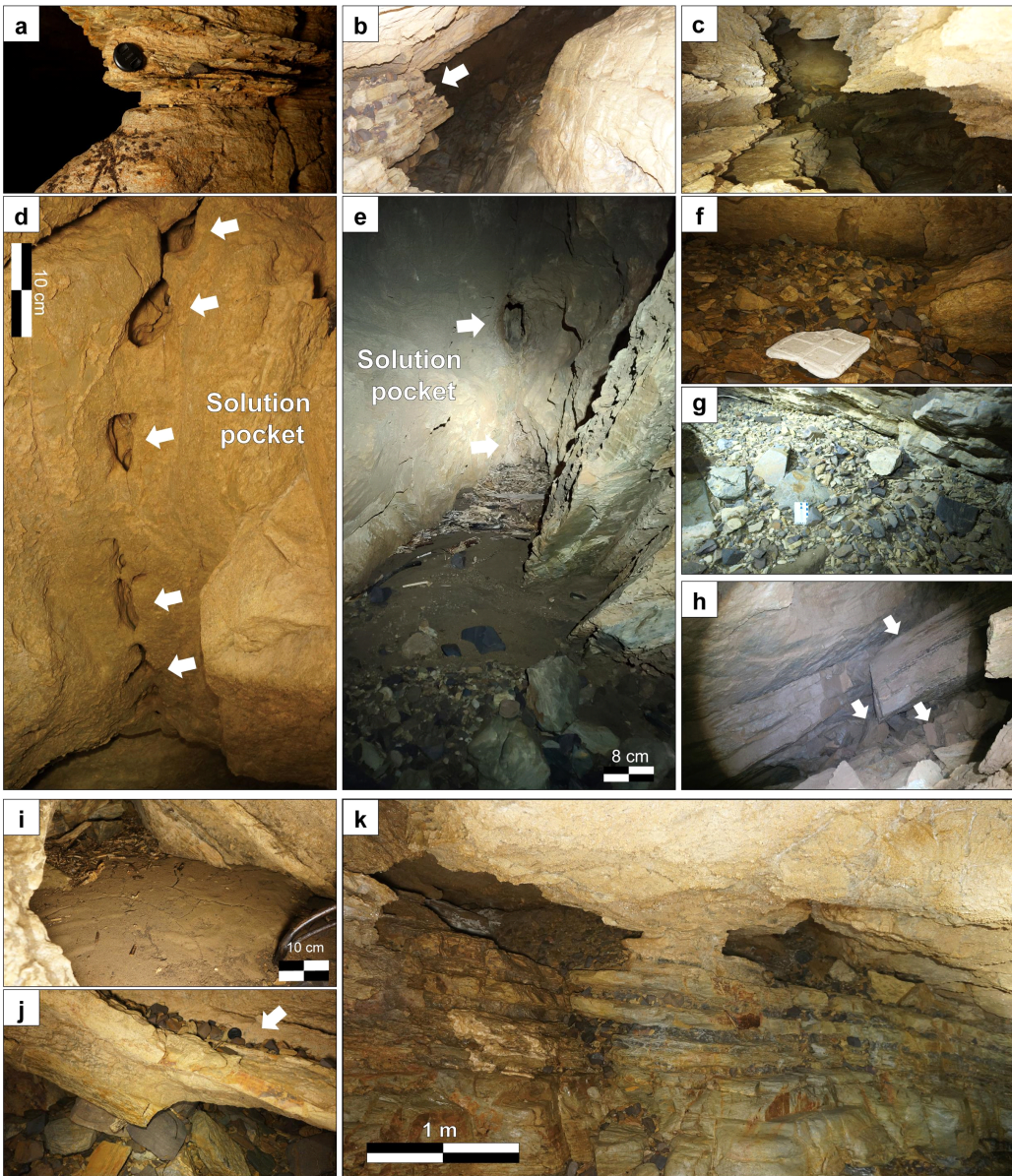


Fig. 4. Solution and sediment features observed in the Neobaeng-i cave. (a)~(c) show typical examples of ‘differential solution’ in the cave. (d) and (e) display linearly arranged ‘solution pocket’. (f)~(k) illustrates sediment features inside the cave. (f) and (g) are sediments near the entrance. Sediment consists mostly of cobble to sand-sized particles, and artificial waste is observed in (f). (h) shows boulder and block formed by ‘breakdown’. In (j) and (k), white arrows indicate sediment remaining on the cave wall.

km 하류까지 계곡은 연중 항상 마른 상태를 유지하고 있으며, 동굴 입구가 위치한 돌리네를 기점으로 서쪽 방향으로는 경사가 완만해지며 계곡의 규모와 폭이 크게 증가하는 형태를 보인다(그림 1b, 1c).

너뱅이동굴의 횡적 통로 형태는 내부에서 관찰한 지질구조에 따라 조절된 3가지의 주요 형태로 분류할 수 있다. 첫 번째 유형은 전형적인 열극형 통로(fissure passage)로서, 절리를 따라 발달하여 통로의 폭과 높이가 매우 큰 편차를 보이는 경우에 해당한다. 너뱅이동굴에서는 전반적으로 수직 절리를 따라 발달한 좁고 긴 형태의 열극형 통로가 우세하다(그림 2b의 G-G', I-I' cross section, 3d, 3e). 두 번째 유형은 지층의 층리면을 따라 발달한 통로로, 납작한 튜브형 통로(tube passage)이다(그림 2b의 B-B', C-C', D-D' cross section, 3f). 이 유형의 통로에서는 횡단면을 가로지르는 절리가 관찰되지 않는 특징이 있다. 마지막 유형은 열쇠구멍형 통로(keyhole passage) 내지 협곡형 통로(canyon passage)로서, 이전에 존재하던 다른 유형의 통로 하부에서 동굴수(cave stream water) 유로를 따라 하강 지형이 발달한 형태이다(그림 2b의 F-F', 3g, 3h). 대다수의 경우, 각 유형의 통로는 복합적인 형태로 발달한다. 예를 들면, 튜브형 통로(tube passage)의 상부 천장 부분에서 열극형 통로가 연결되거나 열쇠형 통로 상부 지점과 열극형 구조가 접합되기도 한다. 후자의 경우, 횡단면의 상부에서 하부로 갈수록 열극형 통로에서부터 튜브형을 거쳐 열쇠구멍형 통로로 연결되는 특징이 관찰되기도 한다. 열극형 통로와 다른 형태의 통로가 접합된 경우에는 열극형 구조가 상부 천장 방향으로만 연결되는 특징이 관찰되었다(그림 2b의 H-H', J-J').

너뱅이동굴 내부에서는 용해에 의한 소규모 미지형을 관찰할 수 있다(그림 4a~4c). 통로 벽면에서는 수 센티미터의 요철을 보이는 차별 용해(differential solution) 구조가 우세하게 나타나며, 이러한 특징들은 입구 주변 및 주통로의 중부-최심부 구간에서 집중적으로 관찰된다(그림 4a~4c). 반면, 수직형 통로에 해당하는 입구의 직하부로부터 약 10 m 내부 지점까지는 차별 용해의 흔적이 거의 관찰되지 않는다. 또한, 너뱅이동굴 내부 3지점에서는 장경 5~10 cm의 선상 배열을 보이는 용식공(solution pocket)이 확인되며, 이들은 대개 1 m 이내의 단열면을 따

라 동굴 천장에 발달한다(그림 4d, 4e; e.g., Osborne, 2009).

4.3 너뱅이동굴 내부 암상

동굴 입구부 노두에서는 바운드스톤(boundstone)에 해당하는 석질해면류(lithistid sponge) 생물조 암상이 관찰되며, 와케스톤 혹은 팩스톤(packstone)이 우세하게 관찰된다(그림 3c, 5). 이 외에도 입구 주변부로부터 석회질 세일, 석회암-세일 교호층 등의 암상을 관찰할 수 있다.

Choi *et al.* (2004)의 석개재 단면 퇴적암상 연구 결과와 너뱅이동굴 입구부 노두 암상의 상대적 두께 및 순차적 변화를 대비하였을 때 동굴통로의 거의 대부분은 두무골층 중부층원에 발달하는 것으로 확인되었다.

입구부 노두 중 최상부 지층에서는 입자암이 관찰되며, 이 지층의 직하부로 놓인 약 4 m 두께의 석회질 세일층이 너뱅이동굴의 천장부를 구성하고 있다(그림 5). 석회질 세일층 하부로부터 약 6 m 두께의 석회암-세일 교호층이 우세하게 관찰되며, 이 석회암-세일 교호층 내에서 하부로 갈수록 생파편(bioclasts)의 비율이 감소하여 입자암에서 석회암 내지 와케스톤까지 점진적인 변화를 보인다. 동굴의 입구는 석회질 세일층과 석회암-세일 교호층의 경계부로부터 발달하고, 입구부 수직 통로의 경우 석회암-세일 교호층을 수직으로 관통하는 구조이다. 대부분의 통로는 석회암-세일 교호층의 직하부에 위치하는 괴상의 와케스톤부터 그 하부에서 약 15 cm 두께로 반복되어 나타나는 2~3매의 석회암 잔자갈 역암과 석회질 세일층을 따라 발달하고 있다(그림 6). 석회 잔자갈 역암을 구성하는 역 입자들은 지층 단면에서 최대 장경 1~8 cm의 타원형이고 분급이 다소 불량한 특징을 보이며 대체로 층리면을 따라 배열된 특징을 보이기도 한다(그림 6c, 6d). 구간에 따라 너뱅이동굴 바닥면에는 석회질 세일층의 층리면이 넓게 노출되어 있다. 전 구간에 걸쳐 동굴의 통로는 9 m 두께의 지층 내에 발달하고 있으며, 통로 천장에는 동굴 외부 노두에서 관찰할 수 있는 4 m 두께의 석회질 세일층이, 통로 벽면에는 석회 잔자갈 역암-석회질 세일이 반복되는 지층이, 바닥면에는 지층 두께를 확인할 수는 없으나 석회질 세일층이 각각 위치한다.

4.4 동굴 퇴적물

너뱅이동굴의 퇴적물은 국내 다른 석회암동굴에 비해 매우 결핍되어 있는 편이지만, 일부 구간에서는 나뭇가지 등 외부 유입물 및 인공 오염물과 함께 집적되어있는 퇴적물을 관찰할 수 있다(그림 2a, 4f). 퇴적물 크기는 거력부터 실트까지의 다양한 입자로 구성되며, 이들은 타지성 입자(allogenic grains)인 동점층 기원의 암회색 사암 역을 다량 포함한다(그림 4g). 구간별로 살펴보면 너뱅이동굴 입구와 주통

로 최상부에서는 천장 및 벽면 붕괴에 의한 최대 수미터 규모의 낙반(breakdown)을 관찰할 수 있다(그림 4h). 이들은 붕괴 이전 존재하던 통로 일부를 메워 통로의 크기를 축소시켰으며, 최종적으로는 현재 진입이 불가능한 화석 통로(fossil passage) 내지 침식 충전(cut and fill) 구조를 형성하고 있다. 주통로 최상부의 붕괴성 퇴적물 내부에서는 타지성 입자를 관찰할 수 없는 특징이 있다. 입구부와 주통로 최상부를 제외한 동굴 내부에서는 주로 모래 내지 실트 크기의 입자로 구성된 세립질 퇴적물의 집적부를 3 지점에서 관찰할 수 있는데, 수 미터 이내의 퇴적물 집적부 길이에도 불구하고 동굴 내부를 향해 상대적으로 조립 입자에서부터 세립 입자까지 퇴적물의 분급을 확인할 수 있다(그림 4e, 4i). 중부 지점 퇴적물 집적부(그림 2a)의 표면에서는 활발한 대기 순환의 결과로 진열이 관찰된다(그림 4i). 일부 지점들에서는 통로 벽면의 움푹한 미지형 내에 부착된 퇴적물이 침식 및 이동되지 않고 보존된 경우가 있으며, 이들은 주로 잔자갈 크기 이상의 입자가 독립적으로 존재하거나 혹은 세립질 입자와의 혼합 퇴적물로 구성되고 분급이 불량한 특징이 있다(그림 4b, 4j, 4k).

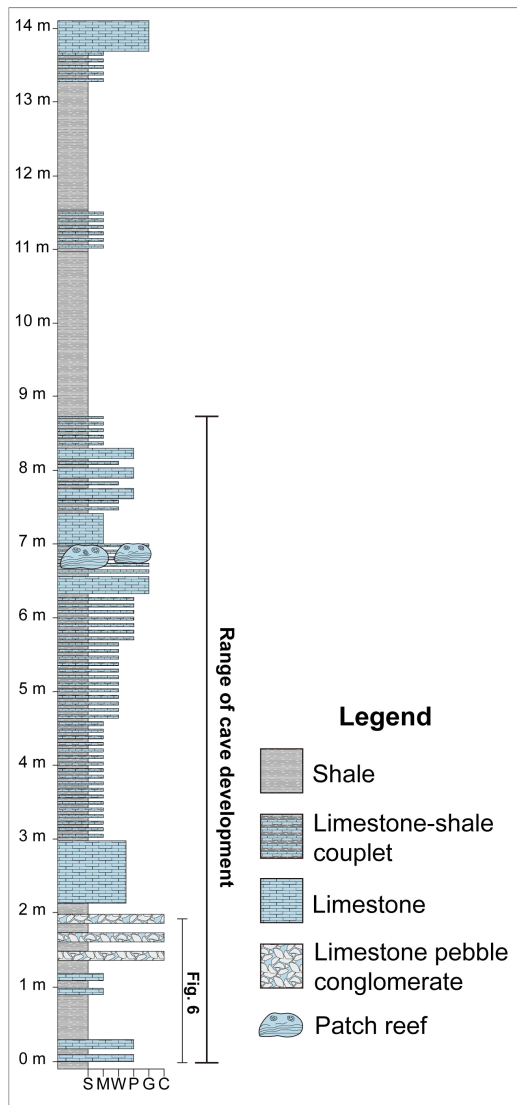


Fig. 5. Geological column of Neobaeng-i cave section. The shale, under the 0 m of the column, is basement rock of the cave.

5. 토 의

5.1 동굴지질학적 해석

Ford and Williams (2007)의 분석 절차를 참조하여 너뱅이동굴에서 관찰한 동굴지질학적 특성을 외부적 특징과 내부적 특징으로 구분하여 해석하였다(표 1). 외부적 특징은 주로 통로의 형성과 발달에 미친 영향 요인으로서 대체로 암상과 지질구조 등의 요소들이 여기에 해당하고, 이를 이용하여 동굴 초기 형성의 배경을 해석할 수 있다(Jo et al., 2019). 내부적 특징은 동굴 내부에서 관찰할 수 있는 미지형적 특징과 퇴적물 및 동굴생성물의 분포 등의 요소들을 포함한다. 이를 통해 주로 동굴의 발달과정 중 발생된 동굴 내외부의 환경변화 즉 동굴진화과정에 영향을 미친 요인을 분석할 수 있다.

평면도상 특징에 따라 너뱅이동굴의 형태는 가지형 동굴(branchwork cave)로 분류할 수 있다(표 1; Palmer, 1991). 그 근거는 가지형 동굴의 주요 특징인 부속통로가 주통로로 합류하는 가지상 패턴과 입구부에서 확인할 수 있는 돌리네 등 동굴수 유입이

주로 점원(point source)을 통해 이루어진다는 관찰 사실에 있다(그림 2a, 3a). 또한, 붕괴된 낙반에 기인한 연결 통로 이외에는 닫힌 고리형 통로(closed loop passages)가 부재하다는 점(그림 2a; Dom and Wicks, 2003)도 이러한 구분을 뒷받침하고 있다. 너뱅이동굴에서 나타나는 특징과 전형적인 가지형 동굴 사이의 가장 큰 차이점은 너뱅이동굴에서는 부속통로가 주통로로 합류하는 과정에서 하류로 갈수록 주통로의 규모가 커지지 않는다는 점이다. 일반적인 가지형 동굴에서는 동굴수 내지 지하수의 유동에 가장 유리한 주통로로 지류가 합류되면서 확장이 이루어지는 것으로 잘 알려져 있다(Palmer, 1991). 이러한 너뱅이동굴의 차이점은 동굴이 산지 정상 부근 매우 작은 규모의 유역분지 내에 위치하기 때문에 동굴수의 공급량 자체가 부족하여 큰 규모의 동굴로 발달하지 못했기 때문으로 추정된다(그림 1). 이에 더해 너뱅이동굴 하류 구간에서 관찰할 수 있는 N10°W 및 N04°W 방향의 주요 절리를 따라 수직방향으로 대폭 확장된 열극형 통로와 비교적 불규칙한 평면상 형태로 보아 지하수 유동 방식이 상류와 하류 구간에서 서로 달랐을 가능성도 있다(Palmer, 1999, 2007).

즉, 상류의 경우 유선형의 평면 형태 및 튜브형-열쇠구멍형 통로가 우세한 경향을 보이며, 이는 통기대(vadose zone) 내지 천부 포화대(epiphreatic zone)의 유수에 의한 통로 형성을 암시한다. 이에 반해 하류는 열극형 통로와 불규칙한 단면이 우세하고 상대적으로 정체된 지하수에 의한 용해가 우세했던 것으로 추정할 수 있다.

너뱅이동굴의 종단면 형태는 일정한 지층의 경사를 따라 발달한 특징을 명확히 보여준다(그림 2b). 또한 너뱅이동굴 천장부를 구성하고 있는 석회질 셰일이 입구부 돌리네 및 계곡부로 직접 노출된 상태이다. 이 경우, 동굴 통로가 주로 형성되어 있는 석회질 셰일 직하부의 석회암-셰일 교호층부터 석회암 자갈 역암까지의 지층을 통해 지표수의 유입과 통기대 지하수의 유동이 원활히 이루어질 수 있게 된다. 너뱅이동굴에서 나타나는 이러한 지질학적 조건은 초기 포화대(phreatic zone) 기원 공동으로부터 진화하는 소위 수위 하강 통기대 동굴(drawdown vadose cave) 모델에 부합한다(표 1; 그림 2b; Ford and Ewers, 1978; Ford and Williams, 2007). 이러한 관점에서 층리면을 따라 발달한 튜브형 내지 열쇠구멍

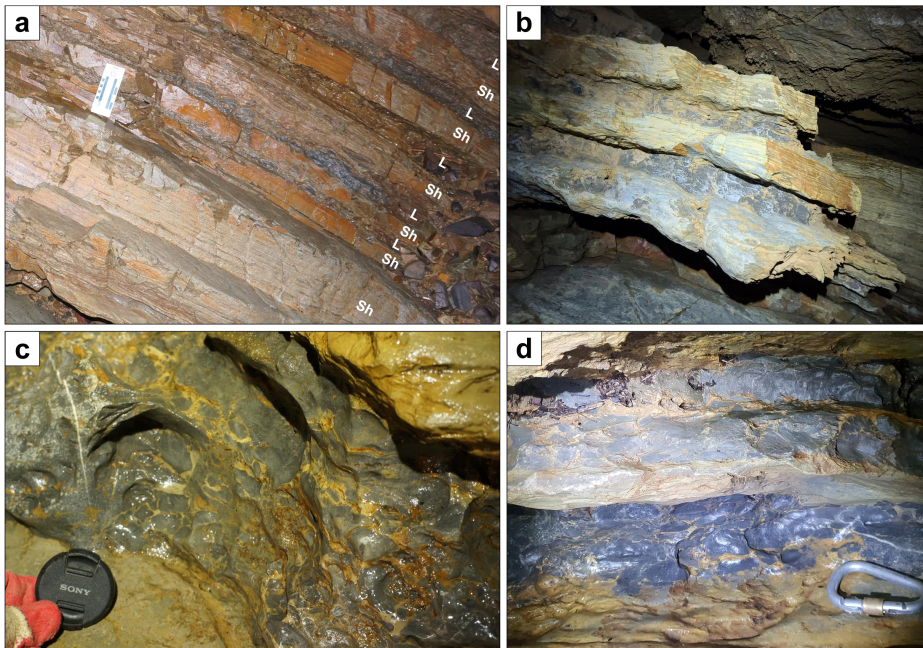


Fig. 6. Photographs of sedimentary facies observed inside Neobaeng-i cave. (a) and (b) show shale and limestone layers between 0~2 m in the geological column (scale bar is 15 cm). In (a), 'Sh' is shale facies, 'L' is limestone facies. (c) and (d) are limestone pebble conglomerate in the cave. The scale in (c) is 6 cm, and in (d) it is 8 cm.

Table 1. A summary of cave geological features identified from the Neobaeng-i Cave.

Characters	Description	Interpretation (references)		
Internal characters	Branchwork cave	In a plan view, a short passage joins the main passage; multiple point-sources for the groundwater recharge; no closed loop	Free flows in the vadose or the epiphreatic zone (Palmer, 1991; Dom and Wicks, 2003)	
	Drawdown vadose cave	In profile view, a passage development following bedding plane dip; exposed impermeable caprock (shale) to surface	Change from initial phreatic conditions to vadose conditions due to rapid draw-down of the water table (Ford and Ewers, 1978)	
	Passage type	Fissure	Development along geological structures such as joints; pinch-out shape at top of passage	Hydrological changes such as periodic flooding or epiphreatic condition (Palmer, 2007)
		Tube	Tube, tabular, lenticular shape passage; rounded cross section	Phreatic condition (Ford and Williams, 2007; Palmer, 2007)
	Keyhole	Placed at the other passage type floor; narrow channel; erosion feature	Hydrological changes from the phreatic to the vadose condition in a cave passage (Ford and Williams, 2007; Palmer, 2007)	
	Differential solution	A high relief shale layer on the passage wall; looks like niche and notch shape	Dissolution to slow-moving water; low-energy condition and limited erosion (Palmer, 2007)	
	Solution pocket	Located on the cave passage ceiling; a hole size of 5~10 cm; arranged linear along a fissure	Periodic water table change from flood or epiphreatic condition (Lauritzen and Lundberg, 2000; Palmer, 2007)	
	Breakdown	The boulder size clasts larger than 50 cm; remaining collapsed surfaces on the roof or the passage wall	Buoyancy removed (drawdown); collapse along the weak plane of the rock (White and White, 2000; Palmer, 2007)	
	Diamicton facies	Various particles from silt to gravel; very poor sorting	Steep gradient passage or flooding (Bosch and White, 2004)	
	External characters	Geological structure	Main joint plane; bedding plane; small fracture	Controls on the initial genesis of cave conduits (Palmer, 1999; Klimchouk and Ford, 2000)
Limestone and shale		Thick shale at the top & bottom; limestone-shale couplet facies; limestone and shale interbedding	A perched or confined aquifer condition by the shale bed; passage development focused the limestone bed (Klimchouk and Ford, 2000; Palmer, 2007)	

형 통로가 열극형 통로와 접합된 구간(그림 2b의 “fissure dominant”)은 지하수 수위 하강 과정에서 나타난 횡단면 형태 진화의 결과로 해석할 수 있다.

너뱅이동굴, 특히 주통로 상류 구간에서 가장 상세하게 관찰할 수 있는 통로의 유형은 튜브형 통로이다(그림 2b의 “tube dominant”). 튜브형 통로는 포화대와 같이 통로 전체가 지하수로 채워져 있고 지하수와 모든 접촉면에 걸쳐 용해작용의 정도가 유사한 속도로 발생하는 경우 형성되는 형태이다(Ford

and Williams, 2007). 너뱅이동굴의 튜브형 통로는 석회 잔자갈 역암과 셰일층이 반복되면서 벽면에 니치(niche) 및 노치(notch)와 같은 매우 규칙적인 굴곡이 형성된 특징을 보인다(그림 3e, 3f, 3g, 3h, 6b). 이러한 너뱅이동굴의 튜브형 통로는 지질조건에 강하게 조절 받은 통로 형성과정을 제시한다. 특히 이들 반복 지층 중 셰일층의 낮은 수리전도도는 셰일의 층리면 위로 간헐적인 포화대 조건을 형성시키기에 유리했을 것이다. 주통로 중류-하류에서 두드러

지게 관찰되는 열쇠구멍형 통로는 다른 유형의 통로들과 복합적으로 나타나며, 이들은 통로 형성 환경 조건이 동굴진화과정에 따라 변화하였음을 지시한다(표 1; Palmer, 2007). 주로 하류구간에서 큰 규모로 발달하고 있는 열쇠구멍형 통로는 절리를 따라 포화대에서 형성되었을 가능성을 보여주며, 그 구체적인 증거로는 기반암의 암석학적 특징, 즉 석회암-세일 교호층에 의해 조절된 거친 표면의 차별용해 특징과 용식공(solution pocket) 등의 천부 포화대성 미지형을 들 수 있다. 따라서 너벵이동굴의 횡단면 형태는 포화대 동굴환경으로부터 통기대 동굴환경으로의 전이를 명확히 지시하고 있으며, 평면 및 종단면상의 특징과 종합할 경우 계곡부 및 입구부에 노출된 석회암-세일 교호층 지층에 의해 지배된 수위하강 통기대 동굴로 해석할 수 있다.

너벵이동굴에서 관찰되는 대표적인 미지형인 차별 용해 미지형과 용식공을 통하여 동굴의 형성 환경과 수력학적 에너지 조건을 해석할 수 있다(그림 4a, 4b, 4c, 4d, 4e). 동굴환경에서의 차별 용해는 포화대 내지 침출성 저에너지 유수에 의해 암석 구성광물 간의 용해도 차이에 의하여 발생된다(Palmer, 2007). 너벵이동굴 입구부와 주통로 하류 구간의 천장 내지 최상부 지점에서 두드러지게 나타나는 차별 용해 미지형은 초기 공동(initial conduit) 형성 시기부터 현재까지 어느 시기나 형성될 수 있는 특징이지만 적어도 현재의 차별 용해 미지형 형성 이후에는 고에너지 환경에 이르지 못했음을 강하게 지시한다. 따라서 현재와 유사한 동굴로 진화한 이후 해당 위치에는 고에너지 유수가 영향을 미치지 못했음을 보여준다. 너벵이동굴의 용식공은 드문 편이지만 총 3 지점에서 관찰할 수 있다(그림 2a의 녹색 표시 지점). 이들 용식공은 주로 천부 포화대 환경에서 주기적 혹은 간헐적 범람에 의하여 형성되는 것으로 알려져 있다(Ford and Williams, 2007; Palmer, 2007). 그 이유는 천부 포화대 환경 조건 하에서는 통기대 지하수가 지하수면에 도달하여 혼합 용식(mixing corrosion) 작용이 원활해지고, 지하수면의 반복적 상승 하강에 의해 절리를 따라 지하수의 물리적 주입 효과(injection effect)가 극대화되기 때문이다(Lauritzen and Lundberg, 2000; Osborne 2004; Bella and Bosak 2012). 따라서 너벵이동굴에 분포하는 용식공은 초기 동굴 통로 형성 시기부터 현재의 통기대 환경으로

완전히 노출되기 이전 시기 사이에 형성되었을 것으로 해석할 수 있다. 동굴 통로 내 미지형적인 특징을 종합하면 주로 포화대 및 천부 포화대 조건으로 해석할 수 있는 특징들이 우세하게 나타나고 있다.

입구 외부의 붕괴성 돌리네 및 입구부 부속통로 구간에 위치한 수 미터 크기의 대형 낙반은 석회암 사이에 협재하고 있는 박층의 세일 층리면을 따라 분리 및 붕괴되었다(표 1; 그림 4h; White and White, 2000). 이러한 통로 붕괴 및 붕괴성 돌리네의 형성은 입구부 바닥면 하부로도 퇴적 공간이 존재하였음을 지시하며, 장기적인 퇴적물의 유입과 추가 붕괴는 통로의 규모를 축소시키는 원인을 제공할 수 있다(Šušteršič, 1984). 주통로 최상류 구간에서도 입구부와 유사하게 층리면을 따라 붕괴된 낙반이 존재하지만, 이 지점에서는 외부에서 유입된 타지성 역이 관찰되지 않았다. 따라서 단시간 폭우에 의한 지표수와 퇴적물의 직접 유입은 현재의 돌리네 및 입구를 통해서만 가능했음을 명확하게 제시한다. 너벵이동굴 내부에서 관찰되는 퇴적물은 용식공이 존재하는 3지점 인근에 집중 분포하고 있으며, 이들 중 입구부 부속통로의 퇴적물은 주로 자갈로 이루어져 있다. 이에 반해 주통로 중류와 하류 구간에 분포하는 퇴적물은 주로 모래나 실트질 퇴적물로 구성되어 있다. 이들 쇄설성 퇴적물과 함께 관찰되는 나뭇가지 등 식물 파편들의 경우 퇴적물 운반 당시 유수의 흐름이 고에너지의 난류(turbulent flow) 체제에서 정온한 상태로 전이되는 과정에서 퇴적되었던 것으로 해석할 수 있다(그림 4c, 4j). 입구부 부속통로-주통로 연결구간 그리고 주통로에서 관찰한 퇴적물 중 일부는 동굴 벽면의 오목한 미지형 표면에 부착 및 잔류되어 있다. 이들은 최소한 해당 통로 인근까지 퇴적물로 완전히 채워진 시점이 존재했음을 지시하며, 앞서 서술한 고에너지 난류 조건에서 형성된 퇴적물 특징과 종합할 때 부분적인 동굴 범람(cave flooding)을 암시한다(Bosch and White, 2004). 이러한 해석은 너벵이동굴 퇴적물의 분포가 매우 국지적이고 입자의 크기와 분급 특징이 극히 다양하다는 점에서 통로의 일부 구간이 퇴적물에 의해 막히고 부분적인 범람이 발생한 이후 다시 재개방되는 등 급격한 환경변화를 겪었음을 지시한다. 따라서 현재와 같은 너벵이동굴의 동굴환경은 타지성 퇴적물이 빠르게 유입될 수 있는 입구부 부속통로가 연결되면서

형성되었을 것으로 판단된다.

5.2 너벵이동굴의 형성요인 및 과정

용해동굴 그중에서도 석회동굴 통로의 패턴을 결정하는 주요 요인으로는 암석 공극 유형, 지질구조 등과 같은 기반암의 고유 특성 및 지하수 함양 방식이 있으며, 이외에도 외부 지표지형 진화 및 지구 내부로부터의 열수 작용도 영향을 미칠 수 있다(Osborne, 1999; Sauro, 2003; Filipponi and Jeannin, 2008; Klimchouk *et al.*, 2016). 이 연구에서는 너벵이동굴의 내부 및 주변 지역의 암석, 지질구조, 지하수 함양, 외부 지형 진화에 관해 논의하여 너벵이동굴의 형성에 영향을 미친 주된 요인을 해석하고자 하였다.

너벵이동굴 형성에 영향을 미친 주요 요인들 중 암석의 영향은 여러 증거를 통해 확인할 수 있다. 먼저 너벵이동굴이 발달하는 지층은 두무골층 중부층원에 해당하는 것으로 확인되었으며, 이 지층은 석회암과 셰일이 수 미터 규모에서 수 센티미터 규모로 교호하는 등 상대적으로 암질의 변화가 큰 특징을 보인다. 반면에 거의 셰일 내지 석회질 셰일로 구성되어 있는 하부 층원과 석회암이 우세한 상부층원으로는 부속통로의 분기 내지 연결이 이루어지지 못

했다. 특히, 너벵이동굴의 직상부 기반암의 경우 4 m 두께의 석회질 셰일로 구성되어 있어 이 층준을 가로지르는 지하수의 흐름이 매우 제한적이었을 것으로 판단된다(Lowe, 2000). 이와 같은 기반암의 특성과 너벵이동굴 내부와 주변 지층으로부터 측정된 약 30~50° 범위의 경사각을 고려하였을 때, 두무골층 중부층원 내에 반복적으로 나타나는 약 1 m 내외의 석회질 셰일층들은 너벵이동굴이 발달하고 있는 석회암 지층을 포함하여 셰일 사이에 교호하는 석회암 지층들을 간헐적으로 피압대수층 조건으로 만들었을 가능성이 있다(Klimchouk and Ford, 2000). 실제로 동굴 내부 미지형 조사에 의하면 너벵이동굴의 주통로 발달이 이루어진 석회질 셰일-석회암 잔자갈 역암 반복 지층은 가장 뚜렷한 용식 미지형 특성을 보여주고 있다.

너벵이동굴의 종단면 형태에 의하면 통로의 발달이 셰일층 사이 9 m 범위 내에 제한적으로 발달하고 있다는 사실을 명확하게 보여준다(그림 2b와 7a). 지층별 통로 부피의 분포를 도시해보면 바닥면 지층을 기준으로 2 m 까지는 약 36%의 통로가 분포하며, 그 위 1 m 두께의 석회암 층준 내에 약 24%의 통로가, 상부의 6 m 구간에는 40%의 통로가 분포하는 것으로 나타났다. 따라서 1 m 단위로 보았을 때 2~3

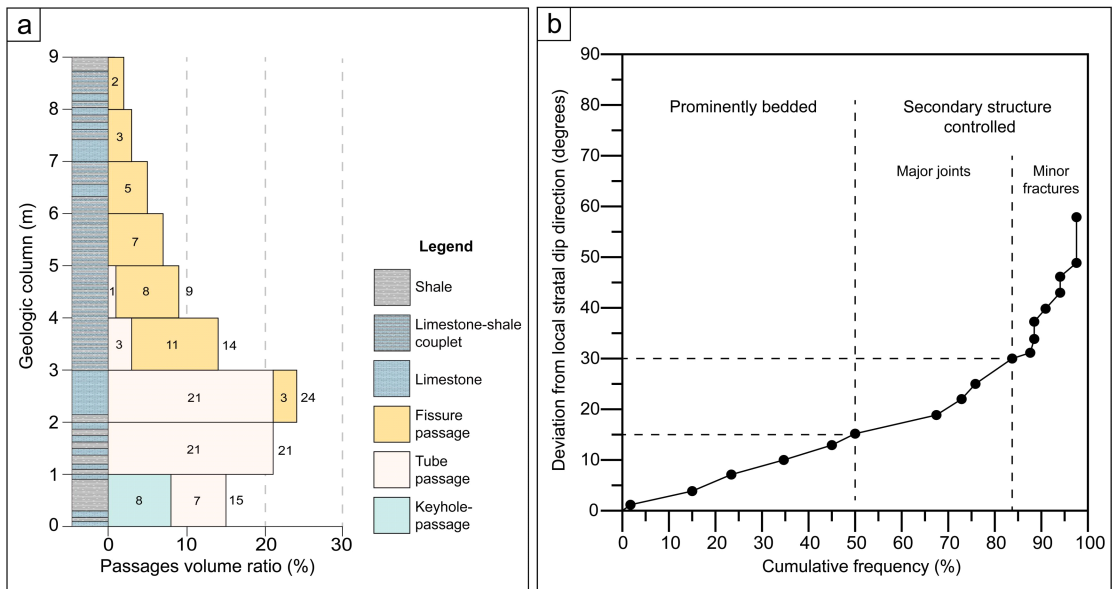


Fig. 7. (a) Graph showing cave development volume per meter in the geological column. (b) Graph indicating the deviation between the direction of a cave passage and dip direction of bed (Palmer, 1999).

m 구간의 석회암 층준이 가장 우세하게 통로가 발달한 초기 통로형성면(inception horizon)이었을 것으로 추정할 수 있다(Lowe, 1992; Lowe and Gunn, 1997). 앞서 논의한 바와 종합하면 너뱅이동굴은 두 무골층 중부층원의 석회질 세일-석회암 반복 지층 내에 제한되어 있으며, 이들 중 석회암 층준 내에 통로 형성이 집중된 특성을 보여준다. 이와 유사하게 너뱅이동굴에서 나타나는 횡단면 유형 중 튜브형 통로의 경우 불투수성 암석인 세일과 용해성 암석인 석회암 사이 접합면 조건에서 우세하게 형성된 것을 관찰할 수 있다.

너뱅이동굴 형성에 대한 지질구조의 영향성을 평가하기 위해 층리의 경사방향과 통로 방향 사이의 편차를 누적빈도곡선으로 도시하였다(Palmer, 1999). 그 결과, 전체적으로 동굴 내부 층리의 경사 방향은 평균 N26°W으로 측정되었으며, 너뱅이동굴 전체 통로 중 약 50%에 해당하는 통로에서 층리의 경사방향과 15° 이내의 편차를 보이는 것으로 확인되었다(그림 7b). 이와 같이 작은 편차를 보이는 통로들은 일반적으로 층리의 발달이 양호한 지층의 경사방향에 의해 영향받은 결과로 해석될 수 있다. 이어서 50~84% 까지의 구간에서는 경사방향으로부터 15~30°에 이르는 편차를 보이는데, 이는 경사방향에 의해 조절되었다기보다는 동굴 내부의 절리와 단층 등이 차적 지질구조의 방향에 우선적으로 조절된 것으로 해석된다. 너뱅이동굴의 경우 평면도 상에서 확인할 수 있는 직선형의 통로 중 일부가 이러한 방향성에 크게 영향을 받은 것으로 판단된다. 이와 같은 해석은 너뱅이동굴 내부에서 측정된 통로의 방향, 층리 및 절리의 주향과 경사 측정자료를 고려하면 더욱 명확하다(그림 2). 마지막 구간으로서, 84% 이상의 누적빈도구간에서 나타나는 높은 편차의 방향을 보이는 통로는 소규모 절리 내지 동굴 내부의 미소규모 단열에 기인한 것으로 해석하였다.

현장조사를 통해, 주통로 1개 지점 및 부속통로 3개 지점을 통한 침출수 유입이 확인되었으나, 동굴 형성 초기에는 매우 다른 조건의 지하수 함양이 추정된다. 그 이유는 동굴내부에서 확인할 수 있는 통로의 횡단면 및 용해 미지형으로 보았을 때 현재의 통기대 환경보다는 초기 포화대 조건에서 형성된 통로를 지시하고, 이후의 점진적인 지하수 흐름 조건의 변화를 보여주고 있기 때문이다. 즉 횡단면 유형

에 있어서 복합적 횡단면 유형이 다수 관찰되는데, 대부분의 열극형 통로는 해당 횡단면의 상부로 접합되어 있고 통기대 통로 확장을 강하게 지시하는 열쇠구멍형 통로의 경우 이와 반대로 하부로 연속되는 특징을 나타내고 있다. 따라서 이러한 순차적 변화는 초기 공동 형성 시 열극형 통로의 발달로부터 천부 포화대 영역으로 해석할 수 있는 튜브형 통로를 거쳐 통기대 환경을 지시하는 열쇠구멍형 통로로 진화했음을 잘 보여주고 있다. 이 특징은 지층별 통로 부피의 비율 결과와도 일치하는데, 전체 통로 횡단면 유형 중 열극형 통로가 약 38%로 대부분 3~9 m 구간을 차지하고 있으며, 튜브형의 경우 3 m 이하 구간에 53%가 집중적으로 분포하고 있는 특징을 보여준다. 열쇠형 통로는 8% 이내로 비교적 미약하게 발달하며 가장 최근 발달한 통로의 유형으로 여겨진다.

마지막으로 고려할 수 있는 요인으로, 외부 지형 진화와의 관련성에 대해 논의하였다. 현재 너뱅이동굴의 유역분지는 매우 작은 편이지만, 대부분의 동굴수는 지표에 노출된 점원에 의해 공급되는 시스템을 유지하고 있다. 특히, 주통로와 입구부 부속통로 주변에 발달하고 있는 돌리네의 경우는 지표수가 직접 동굴로 유입될 수 있는 조건을 갖추고 있으며, 이들의 형성은 너뱅이동굴 발달에 매우 주요한 요인을 제공하였을 것으로 판단된다. 실제로 내부에서 관찰할 수 있는 왕자갈을 포함한 타지성 쇄설성 퇴적물은 입구부 돌리네를 통한 지표수 유입이 적어도 간헐적으로는 매우 활발했음을 지시하며, 너뱅이동굴의 통로 확장 및 연결성에 중요한 역할을 했을 것으로 해석된다. 이와 같은 돌리네 및 너뱅이동굴 입구의 형성은 주변 지표지형의 발달과 연계될 수 있다. 외부 지형분석 결과, 현재 입구부 돌리네를 기점으로 계곡의 폭과 경사가 급격하게 증가하는 특징이 관찰되며, 이는 계곡 상류로부터 공급되는 지표수와 쇄설성 퇴적물의 혼합 유체가 동굴 입구 근처에 퇴적물을 집중적으로 퇴적시킬 수 있는 조건을 의미한다. 이에 따라 현재 너뱅이동굴 내부에서 관찰되는 타지성 퇴적물은 통로 발달에 대한 돌리네 형성의 영향을 강하게 암시하고 있다. 종합하면 초기 공동의 형성은 주로 암석의 종류와 지질구조에 크게 지배되었을 것으로 추정되며, 후기의 동굴 진화는 점진적으로 변화한 지하수 함양 조건 및 주변 지형발달에 주요하게 영향받았을 것으로 해석된다.

너벵이동굴의 지질학적 연구결과와 형성 조건 해석을 종합하면 동굴의 형성과정은 크게 3단계로 요약할 수 있다(그림 8): 1) 포화대-천부포화대 조건에서 통로 연결이 불량한 초기 공동 형성단계, 2) 돌리네 형성과 통로 연결 및 확장단계, 3) 현재의 진화 정체단계. 초기 공동은 세일층 사이 석회암층을 따라 지하수가 피압된 조건에서 확장되어 층리면을 따르는 초기 튜브형 통로와 단열면을 따르는 열극형 통로를 형성하였다(그림 8의 stage 1). 초기 공동의 발달은 지하수위를 하강시키며 동굴 통로를 점차 천부포화대를 거쳐 통기대 조건으로 변화시키고, 이와 함께 입구부 돌리네 형성 이후 연결성이 불량한 통로를 서로 연결 및 확장시켰다(그림 8의 stage 2). 이때 돌리네를 통해 공급된 퇴적물과 유체는 용해뿐만 아니라 침식에 의한 동굴 확장을 가속화 하는 결과를 낳았다. 내부의 퇴적물은 침식을 돕는 한편, 구간에 따라 통로를 막는 역할을 하기도 하였다(그림 8a). 일시적으로 막힌 통로 상류 방향에서는 동굴 범

람이 발생하기도 하며(그림 8b; e.g., Valen *et al.*, 1997), 이후 퇴적물로 막혀있던 통로가 재개방되면서 동굴 통로가 발달하였다(그림 8c). 최종적으로 현재와 유사한 조건에 이르렀으며, 수 년 내지 그 이상의 시간 간격으로 발생하는 극한 강수 시점(extreme rainfall event)에만 다량의 퇴적물이 유입될 수 있는 상태로 보인다(그림 8의 stage 3).

6. 결론

경상북도 봉화군 석포면에 위치한 용해동굴(석회암동굴)인 너벵이동굴은 수위 하강 통기대 동굴로 분류할 수 있다. 이러한 사례는 국내 타 동굴에서도 보고될 수 있으나 너벵이동굴은 가장 단순하고 명확한 특징을 보여주는 사례로 판단된다. 또한, 대규모의 지표기원(epigenetic) 석회동굴 형성 모델 관점에서는 최상류 구간에 해당하는 끝 성분(end member)의 대표적 예를 보여주는 것으로 평가할 수 있다. 불

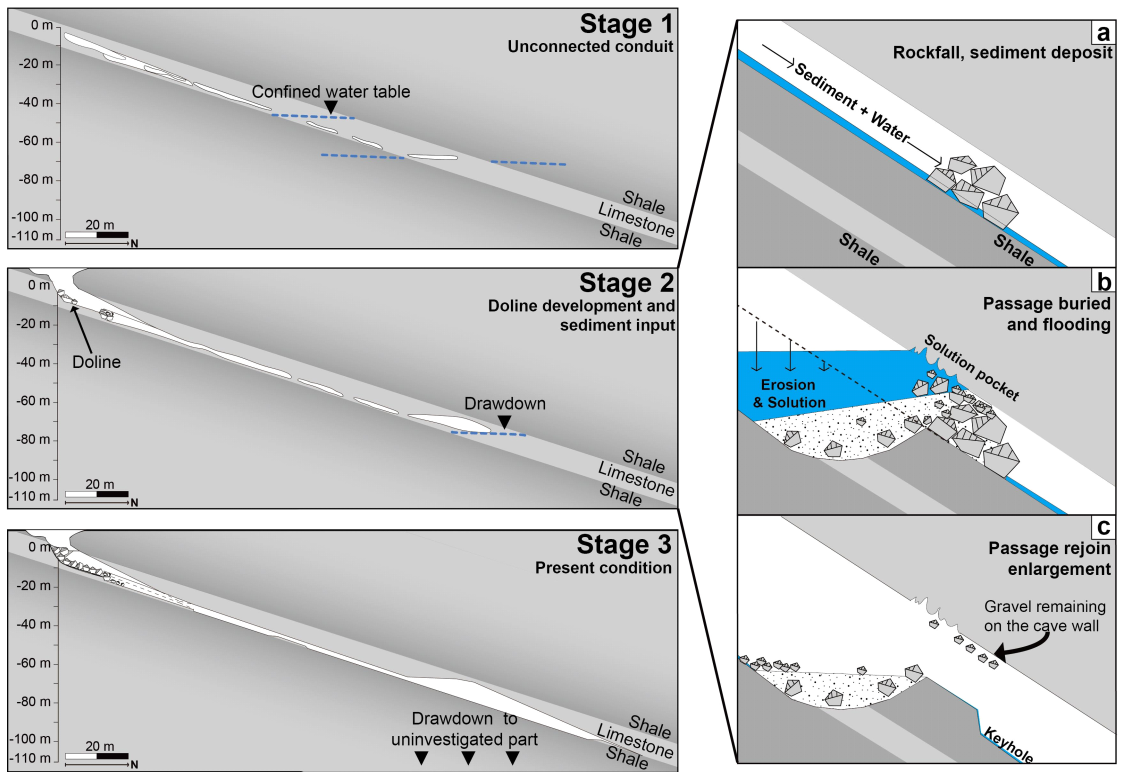


Fig. 8. Stages 1~3 are a speleogenesis model of the cave. During Stage 2, the cave gradually expands downstream through the repeated process shown in a~c.

투수성 암석과 용해성 암석의 교대 분포는 너뱅이동굴의 초기 공동 형성에 주요하게 영향을 미친 것으로 해석되며, 통로의 방향은 지층의 경사방향에 크게 지배된 특징을 뚜렷하게 제시하고 있다. 무엇보다 지표 계곡부 퇴적물 축적과 돌리네 형성 등 지표 지형 진화와 연관된 너뱅이동굴 형성과정은 향후 국내의 석회암동굴 형성과정 연구에 중요한 의미를 부여할 수 있을 것이다.

너뱅이동굴에서 서식 중인 회귀성 박쥐류는 이 동굴의 통로 패턴 등 지질학적 특성에 강하게 영향받았을 것으로 추정할 수 있다. 즉, 너뱅이동굴 통로의 일정한 하향 경사는 이 일대 지층의 경사방향에 크게 조절됨으로써 동절기 한기 유입에 매우 유리한 조건을 제공하였다. 이에 더해 동굴 내부 심부까지 원활한 한기 유입이 이루어지기 위한 기존 온기의 원활한 배출도 함께 예측할 수 있다. 현재까지 국내 동굴의 지질학적 가치는 주로 동굴생성물의 경관적 측면에 크게 치우쳐 있는 경향이 있다. 이 연구의 결과는 국내 동굴의 학술적 가치 판단이 동굴생성물 발달 뿐 만 아니라 통로의 기하학적 구조, 미지형 특성, 형성원인의 특이성, 동굴생태계와의 연관성 등으로 폭 넓게 제고되어야 할 필요성을 제시한다.

감사의 글

논문이 개선될 수 있도록 제언하여 주신 편집위원장님, 편집위원님, 심사위원님들께 감사드립니다. 본 연구는 한국연구재단의 중견연구과제(NRF-2023 R1A2C1006352)로부터 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

- Antonellini, M., Nannoni, A., Vigna, B. and De Waele, J., 2019, Structural control on karst water circulation and speleogenesis in a lithological contact zone: The Bosse cave system (Western Alps, Italy). *Geomorphology*, 345, 106832.
- Ballesteros, D., Jiménez-Sánchez, M., Giralt, S., García-Sansegundo, J. and Meléndez-Asensio, M., 2015, A multi-method approach for speleogenetic research on alpine karst caves. Torca La Texa shaft, Picos de Europa (Spain). *Geomorphology*, 247, 35-54.
- Bella, P. and Bosak, P., 2012, Speleogenesis along deep regional faults by ascending waters: case studies from Slovakia and Czech Republic. *Acta Carsologica*, 41, 169-192.
- Bosch, R.F. and White, W.B., 2004, Lithofacies and transport of clastic sediments in karstic aquifers. In: Sasowsky, I.D. and Mylroie, J. (eds.), *Studies of Cave Sediments*. Springer, Dordrecht, 1-22.
- Choi, D.K., Chough, S.K., Kwon, Y.K., Lee, S.B., Woo, J., Kang, I., Lee, H.S., Lee, M.S., Sohn, J.W., Shinn, Y.J. and Lee, D.J., 2004, Taebaek group (Cambrian-Ordovician) in the Seokgaejae section, Taebaeksan Basin: a refined lower Paleozoic stratigraphy in Korea. *Geosciences Journal*, 8, 125-151.
- Choi, D.W., Woo, K.S., Kim, R. and Lee, K.C., 2003, The origin of the Okgye Cave and the genesis of speleothems, Kangneung, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 39, 41-64 (in Korean with English abstract).
- Columbu, A., Audra, P., Gázquez, F., D'Angeli, I.M., Bigot, J.Y., Koltai, G., Chiesa, R., Yu, T.-L., Hu, H.-M., Shen, C.-C., Carbone, C., Heresanu, V., Nobécourt, J.C. and De Waele, J., 2021, Hypogenic speleogenesis, late stage epigenic overprinting and condensation-corrosion in a complex cave system in relation to landscape evolution (Toirano, Liguria, Italy). *Geomorphology*, 376, 107561.
- Cultural Heritage Administration, 2000, https://www.cha.go.kr/cop/bbs/selectBoardArticle.do?nttId=18797&bbsId=BBSMSTR_1021&pageUnit=10&searchCnd=title&searchWrd=&ctgryLrcls=&ctgryMdcls=&ctgrySmcls=&ntcStartDt=&ntcEndDt=&searchUseYn=Y&mn=NS_03_08_01 (April 29, 2023).
- Cultural Heritage Administration, 2022, https://www.cha.go.kr/cop/bbs/selectBoardArticle.do;jsessionid=DwvGqR0vr6pCSjV3PUKAuzmdkN1p92B3ndkzhtNbNlOtlYc2xc2SOxNpzPIZyrkV.cha-was01_servlet_engine1?nttId=85171&bbsId=BBSMSTR_1021&pageIndex=6&pageUnit=10&searchCnd=title&searchWrd=&ctgryLrcls=&ctgryMdcls=&ctgrySmcls=&ntcStartDt=&ntcEndDt=&searchUseYn=Y&mn=NS_03_08_01 (April 29, 2023).
- Dom, J.E. and Wicks, C.M., 2003, Morphology of the caves of Missouri. *Journal of Cave and Karst Studies*, 65, 155-159.
- Dunham, R.J., 1962, Classification of carbonate rocks according to depositional texture. *AAPG Special Volumes*, A038, p. 108-121.
- Filipponi, M. and Jeannin, P.Y., 2008, What makes a bedding plane favourable to karstification?-The role of the primary rock permeability. *Proceeding of 4th European Speleological Congress-Vercors*, 32-37.
- Filipponi, M., Jeannin, P.Y. and Tacher, L., 2009, Evidence of inception horizons in karst conduit networks. *Geomorphology*, 106, 86-99.

- Ford, D.C. and Ewers, R.O., 1978, The development of limestone cave systems in the dimensions of length and depth. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 15, 1783-1798.
- Ford, D.C. and Williams, P., 2007, *Karst hydrogeology and geomorphology*. John Willey & Sons Ltd., Chichester, 209-265.
- Gillieson, D., 1996, *Caves: Processes, Development and Management*. Blackwell Publishers Ltd., Oxford, UK, 324 p.
- Jo, K.-N., Lee, J.Y., Shin, S.W. and Roh, Y., 2019, Cave geologic characteristics and speleogenesis of Baek-ah-san cave (Provincial monument No. 24) in Hwasun-gun, Jeollanam-do, Republic of Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 55, 21-36 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.-S., Choi, Y.S. and Kim, L., 2018, The Relationship between Thermal Preference and Hibernation Strategies in Endangered *Plecotus ognevi*. *Korean Journal of Ecology and Environment*, 51, 345-353 (in Korean with english abstract).
- Klimchouk, A., Auler, A., Bezerra, F., Cazarin, C., Balsamo, F. and Dublyansky, Y., 2016, Hypogenic origin, geologic controls and functional organization of a giant cave system in Precambrian carbonates, Brazil. *Geomorphology*, 253, 358-405.
- Klimchouk, A. and Ford, D.C., 2000, Lithologic and structural controls of dissolutional cave development. In: Klimchouk, A., Ford, D.C., Palmer, A.N. and Dreybrodt, W. (eds.), *Speleogenesis: Evolution of karst aquifers*. National Speleological Society Inc., Alabama, 54-64.
- Kwon, Y.K. and Chough, S.K., 2005, Sequence stratigraphy of the cyclic successions in the Dumugol Formation (Lower Ordovician), mid-east Korea. *Geosciences Journal*, 9, 305-324.
- Lauritzen, S.E. and Lundberg, J., 2000, Solutional and erosional morphology. In: Klimchouk, A., Ford, D.C., Palmer, A.N. and Dreybrodt, W. (eds.), *Speleogenesis: Evolution of karst aquifers*. National Speleological Society Inc., Alabama, 408-426.
- Lowe, D.J., 1992, The origin of limestone caverns : an inception horizon hypothesis. Ph.D. thesis, Manchester Metropolitan University, Manchester, UK, 512 p.
- Lowe, D.J., 2000, Role of stratigraphic elements in speleoinception concept. In: Klimchouk, A., Ford, D.C., Palmer, A.N. and Dreybrodt, W. (eds.), *Speleogenesis: Evolution of karst aquifers*. National Speleological Society Inc., Alabama, 65-77.
- Lowe, D.J. and Gunn, J., 1997, Carbonate speleogenesis: An inception horizon hypothesis. *Acta Carsologica*, 26, 457-488.
- National Institute of Environmental Research, 2004, <https://dl.nanet.go.kr/SearchDetailView.do?cn=MONO1200410357#none> (April 29, 2023).
- Osborne, R.A.L., 1999, The inception horizon hypothesis in vertical to steeply-dipping limestone: applications in New South Wales, Australia. *Cave and Karst Science*, 26, 5-12.
- Osborne, R.A.L., 2004, The troubles with cupolas. *Acta Carsologica*, 33, 9-36.
- Osborne, R.A.L., 2009, Hypogene caves in deformed (fold belt) strata: observations from Eastern Australia and Central Europe. In: Klimchouk, A. and Ford, D.C. (eds.), *Hypogene Speleogenesis and Karst Hydrogeology of Artesian Basins*. Ukrainian Institute of Speleology and Karstology Special Paper, 1, 33-43.
- Palmer, A.N., 1991, Origin and morphology of limestone caves. *Geological Society of America Bulletin*, 103, 1-21.
- Palmer, A.N., 1999, A statistical evaluation of the structural influence on solutionconduit patterns. In: Palmer, A.N., Palmer, M.V. and Sasowsky, I.D. (eds.), *Karst Modeling*. Karst Waters Institute Inc., Special Publication, 5, 187-195.
- Palmer, A.N., 2007, *Cave geology*. Cave Books, Dayton, 1-301.
- Sauro, U., 2003, Dolines and sinkholes: aspects of evolution and problems of classification. *Acta Carsologica*, 32, 41-52.
- Spötl, C., Dublyansky, Y., Koltai, G., Honiat, C., Plan, L., and Angerer, T., 2021, Stable isotope imprint of hypogene speleogenesis: Lessons from Austrian caves. *Chemical Geology*, 572, 120209.
- Šušteršič, F., 1984, A simple model of the collapse doline transformation. *Acta Carsologica*, 12, 107-138.
- Valen, V., Lauritzen, S.E. and Løvlie, R., 1997, Sedimentation in a high-latitude karst cave: Sirijordgrotta, Nordland, Norway. *Norges Geologisk Tidsskrift*, 77, 233-250.
- White, E.L. and White, W.B., 2000, Breakdown morphology. In: Klimchouk, A., Ford, D.C., Palmer, A.N. and Dreybrodt, W. (eds.), *Speleogenesis: Evolution of karst aquifers*. National Speleological Society Inc., Alabama, 427-429.

Received : March 17, 2023

Revised : April 17, 2023

Accepted : April 21, 2023