The Journal of Engineering Geology
pISSN : 1226-5268 eISSN : 2287-7169

Vol. 32, No. 3, September, 2022, pp. 339-350
https://doi.org/10.9720/kseg.2022.3.339

RESEARCH ARTICLE

경주 골굴사 응회암 사면의 타포니 분포 특성과 미세구조

추창오[1] · 이진국[2*]

[1]국립안동대학교 지진방재공학과 강의교수, [2]경북대학교 지구시스템과학부 지질학전공 강의교수

Tafoni Patterns on Tuff Slopes in Gogulsa Temple, Gyeongju and Its Microstructural Properties

Chang-Oh Choo[1] · Jin-Kook Lee[2*]

[1]Lecture Professor, Department of Earthquake and Disaster Prevention Engineering, Andong National University
[2]Lecture Professor, Department of Geology, Kyungpook National University

Abstract

There are a variety of types in tafoni formed in Miocene tuff from Golgulsa, Gyeongju. Tuff bearing tafoni was quite weathered, composed of quartz, feldspars, micas, vermiculite, chlorite, smectite, and analcite. In the early stage of the tafoni development, tafoni preferentially formed from cavities where volcanic breccias were removed or from microcavities where microcrystals were chemically altered. Small tafoni grew into large one by merging each other. The orientation of tafoni is inversely arranged to slopes, with slight inclination toward the inner cavity. Height, width, and depth of tafoni are closely interrelated: the correlation coefficients are 0.839 (width-height), 0.900 (width-depth), and 0.856 (height-depth), respectively. Removal of walls between tafoni resulted in lenticular or crescent forms, and small tafoni laterally combined to large tafoni. Large tafoni is weak because of high porosity and low strength compared to normal slope. Therefore, systematic monitoring for slope strength, pore proportion and volume, and growth of cavity needs to secure the slope stability where tafoni in Golgulsa is widespread.

Keywords: tafoni, Golgulsa, microcavities, slope strength, correlation coefficient

초 록

경주시 골굴사 신생대 응회암에서는 다양한 형태의 타포니가 다수 발달한다. 응회암은 풍화변질되어 있는데, 석영, 장석류, 운모, 버미큘라이트, 녹니석, 스멕타이트와 제올라이트 광물인 아날사이트 등으로 구성된다. 타포니는 초기 단계에서는 각력이 제거된 동공이나, 응회암 결정 입자의 풍화변질에 의해 형성된 미세 동공에서부터 시작하여 점차 확대된다. 타포니는 사면의 반대방향으로 약하게 경사지면서 발달한다. 타포니의 상관계수는 폭-높이 0.839, 폭-깊이 0.900, 높이-깊이 0.856인데 서로 밀접한 관련성이 있다. 타포니 벽체가 제거되면 반달형이나 신장된 타포니로 되는데, 작은 동공들이 횡적으로 병합되면서 확대된다. 커다란 타포니 동공들은 암반 사면에 비하여 내부가 비어있기 때문에 암반의 강도가 더 낮다. 따라서 타포니 사면의 강도, 동공의 비율, 체적, 합병 양상에 대한 지속적인 모니터링이 요구된다.

주요어: 골굴사, 응회암, 타포니, 미세공극, 사면강도, 상관계수

OPEN ACCESS

***Corresponding author:** Jin-Kook Lee
E-mail: leejkk@hanmail.net

Received: 17 August, 2022
Revised: 23 August, 2022
Accepted: 24 August, 2022

Ⓒ 2022 The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

타포니(tafone)는 풍화에 의한 동공 또는 구멍을 말하는데, 다양한 암석에서 습기, 동결 · 융해 작용, 염의 결정화 작용, 차별적인 풍화침식 제거, 화학적 풍화작용 등에 의해서 발생한다(Mustoe, 1982; Campbell, 1999; Chen et al., 2021). 타포니의 형성은 습기, 온도와 같은 기후적인 측면과 염풍화나 화학적 풍화가 주요 원인이지만, 전 세계적으로는 지질, 기후, 지역적 조건, 바람, 습기, 햇볕 등의 물리 화학적 요소가 매우 다양하므로 타포니 연구가 수행된지 1세기가 지났지만, 주도적 메커니즘의 정립은 여전히 논란 중이다. 즉 타포니 형성 특징은 지역적 변수가 크고 그 메커니즘이 매우 다양함을 의미한다. 타포니는 단일동공의 크기 범위는 일반적으로 1.0 cm~1.0 m인데, 최대 직경이 수 m에 이르기도 한다. 벌집 풍화(honeycomb weathering)는 동공의 크기가 2 cm 이하이면서 동공이 매우 밀집되고 배열은 다소 규칙적이다. 벌집 타포니는 작은 규모의 타포니가 집단으로 나타날 때 그 모양이 마치 벌집 모양과 같다고 해서 이를 “벌집 타포니”라고 한다. 벌집 타포니를 소규모 타포니나 초기형태의 타포니로 간주하기도 한다. 특히 동공의 크기가 3~5 cm 이하이면서도 수직 단면에서 발달하는 경우, 이를 “알비오(Alveole)”라고 한다.

경상북도 경주시 양북면 안동리 계곡에는 타포니로 유명한 골굴사가 위치하는데, 골굴사는 7세기 신라 선덕여왕 때 창건된 자연 석굴사원이다. 골굴사 내에는 자연적으로 형성된 12개의 석굴이 있는데, 이들은 타포니에 해당한다. 골굴사 최상부의 큰 절벽 면에 있는 마애여래좌상은 보물 581호로 지정되어 있는데, 마애여래좌상의 좌측 및 좌상단에 다수의 벌집 타포니가 발달하고 있다. 골굴사 일대의 타포니의 형태적 분류, 지형 및 수분의 역할에 관한 연구는 Shin et al.(2017)에 의해 수행된 적이 있다.

본 연구의 목적은 골굴사 입구와 경내지역에 발달하는 모암의 특성에 따른 타포니의 분포와 미세조직의 특징을 파악하고, 문화재 사면의 보존과 안정성을 고찰하는 데 있다. 이를 위하여 기반암의 풍화 특성, 타포니의 규모와 발달 특징, 현미경적 조직, 구성 광물의 종류와 함량, 미세조직의 특징을 분석하였다.

지질

연구지역은 경상북도 경주시 양북면 안동리에 소재하는 골굴사 내 타포니 사면과 계곡 일대이다. 골굴사는 해안으로부터 직선거리로 약 9 km 이내에 위치해 있으나 연구지역 배후의 토함산지에서부터 해안에 이르기까지 산악지형이 연속되고 있다(Fig. 1). 골굴사 일대 주변에는 신생대 신제3기(Neogene) 하부 범곡리층군의 용동리응회암과 범곡리안산암질응회암이 분포한다. 골굴사 구역은 북동-남서로 발달하는 계곡을 따라 분포하는데, 특히 사찰 입구와 경내 구역의 주요 타포니 사면은 남동~동쪽으로 주로 발달한다. 사면 1의 경우 남동쪽으로 발달한 작은 계곡을 따라서 남쪽~남서쪽으로 분포한다. 용동리응회암은 마애석불을 포함하여 안동리 방향으로 분포하고, 범곡리안산암질응회암은 마애석불의 서쪽에 광범위하게 분포한다. 용동리응회암의 최하부는 층후 약 10 m의 데사이트질 화산집괴암, 그 상위는 응회암, 최상위는 응회암질 사암으로 구성된다. 용동리응회암에 협재하는 데사이트질 용암의 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 연대측정결과는 21.6 ± 0.4 Ma인데 이는 마이오세에 해당된다(Kim et al., 2005). 골굴사 선무도 수련원 앞 주차장 노두에서 응회암은 하부에서 층리를 보이는데, 지층의 배향은 N20-50E, 20 NW를 보인다. 이 주향을 따라서 골굴사 계곡이 발달한다. 본 연구지역 타포니 사면은 세립의 산성 응회암으로 백색 내지 회백색을 띠는데, 장석류, 흑운모 및 각섬석을 소량으로 포함한다. 골굴사 대부분의 지점에서는 직경 1.0~10 cm 크기의 화산암편들이 약한 층리를 이룬다.

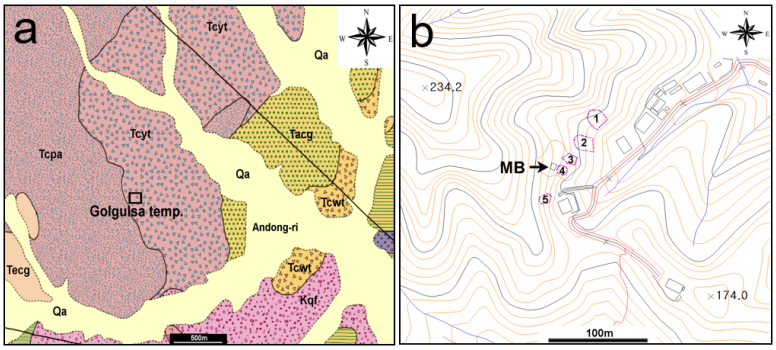

Fig. 1. (a) Geologic map modified after KIGAM (1922). (b) Geographic map of investigated sites of the Golgulsa area. Kqf: Felsic porphyry, Tcwt: Waeumri andesitic tuff, Tacg: Andongri conglomerate, Tcyt: Yongdongri tuff, Tcpa: Beomgokri andesite and tuff, temp: temple. MB arrowed indicates Golgulsa Maaeseokbul and numbers represent investigated sites. Diagonal black line in the right represents a fault line.

연구방법

골굴사 지역의 타포니는 그 크기가 다양하면서도 집단적이며 대규모로 발달하고 있다. 본 연구에서는 타포니의 형태적 분류와 발달 방향을 확인하기 위해 마애불을 중심으로 약 70여 개의 타포니의 배향, 타포니의 깊이(내부 쪽 길이), 폭 및 높이를 측정하였다. 타포니 생성과 암석학적 특징의 관련성을 파악하기 위해 라필리의 함량에 따라서 각각 채취하여 박편을 제작한 후에 편광현미경으로 관찰하였다. 편광현미경은 Zeiss사의 Axiophot를 이용하였다. 한편 광물조성과 미세구조 분석은 X-선회절분석(XRD), 주사전자현미경(SEM)을 이용하였다. XRD는 국립안동대학교 공동기기원의 Ultima IV Rigaku 기종을 사용하여 5~65° 2θ 범위, 40 kv/30 mA 조건에서 Ni 필터 Cu 타켓 빔을 통하여 광물분석을 시행하였고, 정량계산 프로그램인 Siroquant v.3을 이용하여 구성 광물의 함량을 정량적으로 계산하였다. 주사전자현미경 분석은 한국기초과학지원연구원(Korea Basic Science of Institute, KBSI) 대구센터의 전계방출형 주사전자현미경(field emission-scanning electron microscope, FE-SEM, Hitachi S4800)을 이용하여 오스뮴(Os)으로 시료 표면을 코팅한 후에 20 kV/10 nA 조건 하, 40~10,000배율에서 관찰 분석하였다. 미세조직의 화학조성 분석은 SEM의 에너지분산스펙트럼(energy dispersive spectrum, EDS)을 이용하여 반 정량분석(semi-quantitative analysis)적으로 수행하였다.

결과 및 토의

타포니의 발달분포 특징

골굴사 주변의 암상은 신생대 응회암이 주를 이루고 있는데, 이 응회암층은 세립의 산성 응회암 기질 속에 장석류, 흑운모 및 각섬석 등의 결정과 암편을 포함하고 있다. 골굴사 일대에서 타포니의 빈도가 가장 높은 마애불 지역인 사면 4에서는 1~10 cm 정도 크기의 암편들이 괴상의 응회암 내에서 약한 층상구조를 보인다. 타포니는 형태적으로 보면 타원형 또는 원형, 초승달 형 등으로 뚫린 동공이 특징적인데, 이 동공들은 병합되면서 횡적, 수직적 및 동공 안쪽으로 점차 확대된다. 골굴사 입구나 마애불 아래 타포니에서도 화산각력을 흔히 볼 수 있는데 화산각력이 빠져나간 곳에서 물리적인 동공이 형성된다. 이 같은 지점은 화학적 풍화작용에 매우 취약하므로 향후 본격적인 타포니 동공이 형성되는 데 매우 유리하다. 응회암 기질부가 풍화 제거된 후에도 화산력들이 잔존하는데, 이 경우에 기질부가 풍화되면서 더욱 느슨해지면 결과적으로

화산력들은 빠져나가므로 이런 지점은 향후 타포니 발달의 또 다른 시작점으로 작용하게 된다. 타포니의 형성이 역의 이탈 및 박리가 발생한 지점에서부터 시작되는 경우는 응회질 집괴암이 분포하는 울릉도의 도동해안산책로 구간에서도 흔히 볼 수 있다. 또한 구미 천생산의 백악기 조립질 퇴적암 지역에서도 이런 특징이 보고된 바가 있다(Shin et al., 2015).

타포니의 동공이 커질수록 동공은 병합하고 넓어지다가 결국에는 거의 수평으로도 편평한 표면을 형성하는데 이는 마치 반달형이나 초승달 형태를 띤다. 사면 5에서는 벌집 타포니와 가로 방향의 타포니 병합이 두드러지는데 벌집 타포니는 응회암의 층리를 따라서 배열되는 특징을 보인다(Fig. 2). 특히 화산각력이 미약하게 층리를 이루는데, 각력들이 빠져나간 자리에서 소형 타포니를 형성한다. 큰 타포니는 납작한 초승달 형 또는 렌즈 상을 이루는데, 바닥이 비교적 편평한 것이 특징이다. 큰 타포니 속에서는 작은 타포니들이 연합하여 합병되어 커지는데, 얇은 타포니 벽이 잔존하기도 한다. 이런 벽체는 그 강도가 취약하여 쉽게 붕괴된다. 타포니 벽체가 제거되면 아래쪽에는 반달형이나 신장된 타포니로 되어 작은 동공들은 횡적으로 병합되면서 커진다. 한편 응회암의 풍화작용으로 용탈된 함철 성분은 침식 골을 따라서 흘러내리면서 표면에 침착하게 된다(Fig. 3). 이때 철, 망간 산화물의 피각을 형성하여 타포니 벽체나 동공, 벽면에 침전한다. 결과적으로 단단한 피각과 안쪽의 느슨한 응회암의 물성 차이로 인하여 껍질이 탈락하는 박리(spalling)가 발생한다.

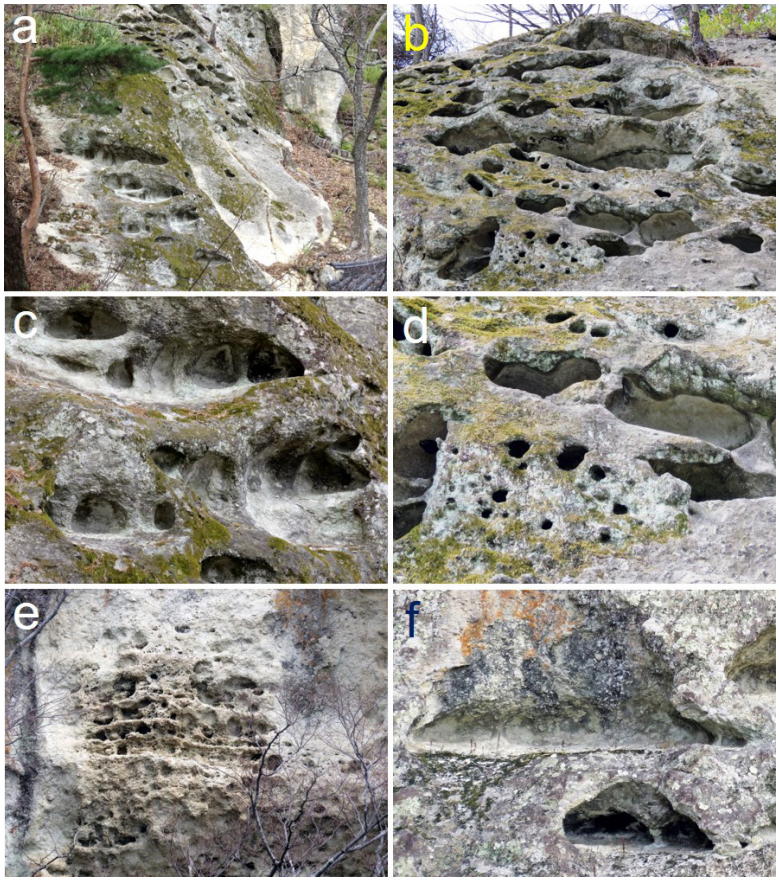

Fig. 2. A variety of tafoni patterns in the site 5. (a), (b) Lenticular tafoni groups facing the south. (c), (d) Merge of small tafoni. (e) Honeycomb tafoni array. The arrangement of ribs and cavities in the tafoni indicates the dependence of horizontal bedding planes in the tuff. (f) Crescent-shaped tafoni by merging small tafoni with walls between holes inside still remained.

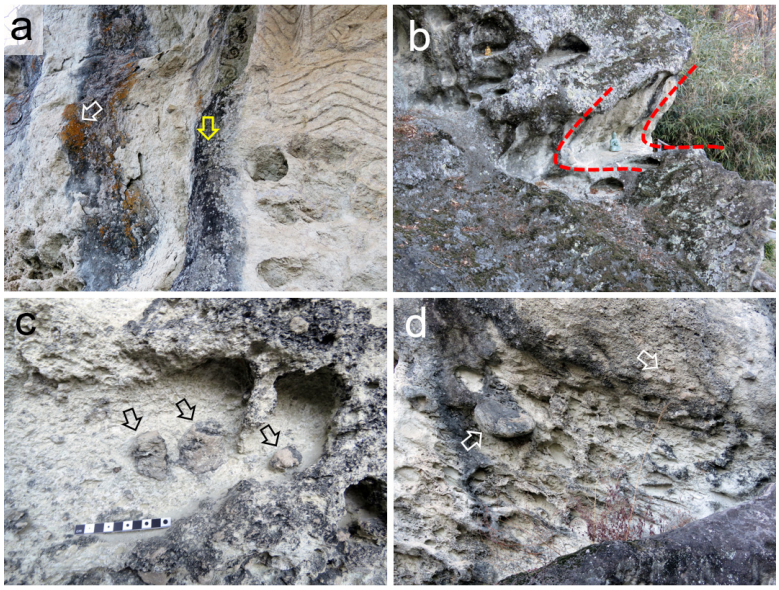

Fig. 3. Golgulsa tafoni in the site 4. (a) Tafoni and weathering with Mn crust contamination under the Budda statue, Left arrow indicates iron-coating and right arrow is manganese coating. (b) Tafoni holes with angles open to sun illuminance. (c), (d) Remained clasts (shown as arrows).

타포니 응회암의 현미경적 특징과 구성 광물

현미경 관찰 결과 노두에 따라 구성 광물과 조직은 다양한데, 응회질 기질 속에서는 장석류와 석영이 가장 풍부하다 (Fig. 4). 함철 광물과 암편은 철산화물로 부분 변질되고 흑운모는 부분적으로 녹니석으로 변질되어 있다. 또한 응회암 내 미세한 유리질(glass shard)과 장석질 결정은 화학적 풍화로 심하게 변질되어 있다.

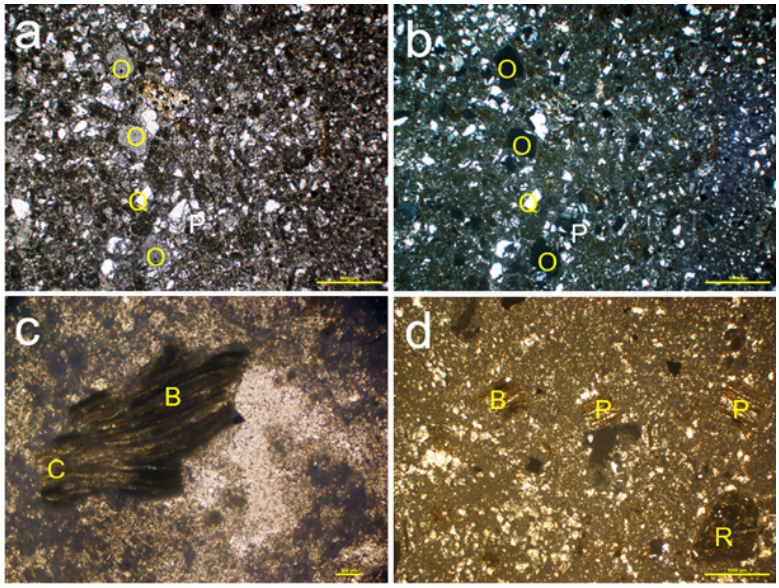

Fig. 4. Photomicrographs of tuffaceous rocks in Golgulsa tafoni. (a) Site 1: host rocks (cross polarized light). (b) Site 1: host rocks (cross polarized light). (c) Site 1: altered tuff (plane polarized light). (d) Site 2: altered tuff (plane polarized light). Symbols: B: biotite, C: chlorite, O: orthoclase, Q: quartz, P: plagioclase, R: rock fragment. Scale: (a), (b), (d) 1,000 μm; (c) 100 μm.

XRD 정량분석 결과에 의하면 사면 1 시료에서는 석영 36.2%, 아날사이트(analcite) 4.0%, 장석류 54.8%, 버미큘라이트 5.1%, 사면 2에서는 석영 18.8%, 장석류 42.4%, 아날사이트 3.6%, 방해석 6.0%, 운모류 18.2%, 녹니석 10.9%, 사면 3에서는 석영 30.9%, 장석류 61.4%, 아날사이트 4.9%, 스멕타이트 2.9%이다(Table 1). 특히 방해석은 사면 2에서 산출되며, 버미큘라이트는 사면 1에서 산출된다. 특히 스멕타이트와 제올라이트 광물의 산출은 Si, Al, 알칼리성 이온이 풍부한 응회암에서 이차적으로 잘 형성된다. 버미큘라이트와 녹니석은 Fe, Mg 함유 운모류의 풍화 변질에 의하여 이차적으로 형성된다. 이로 보아 타포니가 발달하는 응회암 사면은 다양한 화학적 풍화작용의 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 제올라이트, 점토광물과 같은 이차광물들은 결정구조 내에 수산기나 수분을 높게 함유하는 함수성 광물(hydrous minerals)이 특징인데, 이들 광물은 빗물, 습기에 민감하므로 후속 화학적 풍화작용에 취약하여 추가로 분해, 변질될 가능성이 높다.

Table 1. XRD quantitative analysis data of tafoni rocks (unit: wt.%)

Sites	Quartz	Feldspars	Analcite	Calcite	Chlorite	Vermiculite	Micas	Smectite
1	36.2	54.8	4.0		10.9	5.1		
2	18.8	42.4	3.6	6.0			18.2	
3	30.9	61.4	4.9		2.9			2.9

Feldspars include albite, orthoclase, microcline, and anorthite feldspar species.
Micas include biotite and muscovite.

타포니의 미세조직 특징

전자현미경(SEM) 분석 결과, 타포니 응회암은 다양한 형태의 미세조직을 보여준다. 응회암에서 광물 반정이나 기질부의 차별적인 물성 차이로 인해 풍화 용해되어 형성된 미세 동공이 흔히 확인된다. 이런 미세 동공은 점차 확장되어 타포니로 발전한다(Fig. 5). 이러한 미시적 용해 동공의 형성 특징은 화산암 각력이 탈락하면서 생긴 동공에서 타포니가 집중적

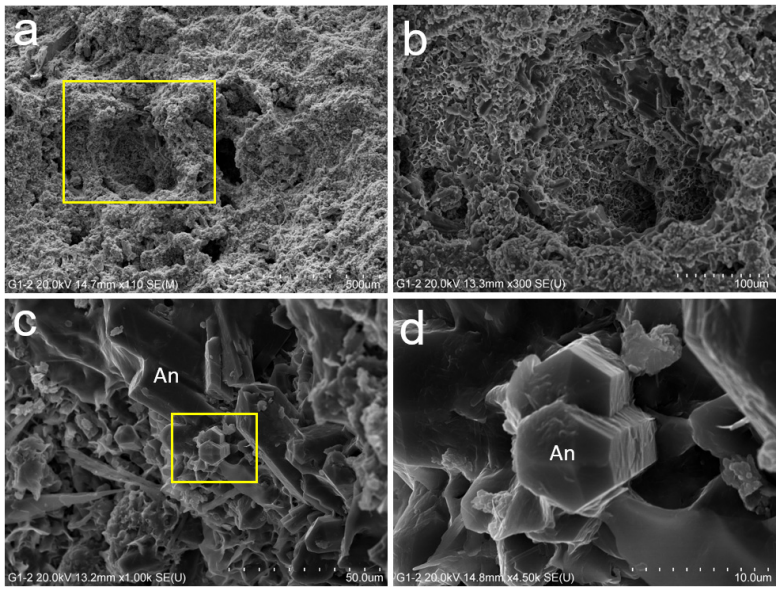

Fig. 5. SEM microphotographs of altered tuffaceous rocks in sites 1 and 2. (a) Hollows in tafoni. (b) Enlarged image of the box area in (a) shows alteration minerals in hollow. (c) Analcite formed in glassy tuff. (d) An enlarged image in the box area in (c) showing euhedral analcite. An: Analcite.

으로 형성되는 현상과 흡사하다. 즉 골굴사 응회암에서 마이크론 규모의 미시적 용해 동공은 노두 규모에서의 거시적 동공 특징과 매우 유사하다는 것은 주목할 만하다. 타포니 용해동공에서는 Na-제올라이트 광물인 아날사이트(또는 아날심), 석영, 장석이 둘러싸고 있다. 아날사이트와 석영은 자형의 결정형을 보이며, 장석류는 약간 별질된 길쭉한 막대형(lath)으로 산출된다(Fig. 6). 자형의 아날사이트와 석영은 동공에서 정동 결정처럼 후속 단계에서 성장한 것으로 해석된다.

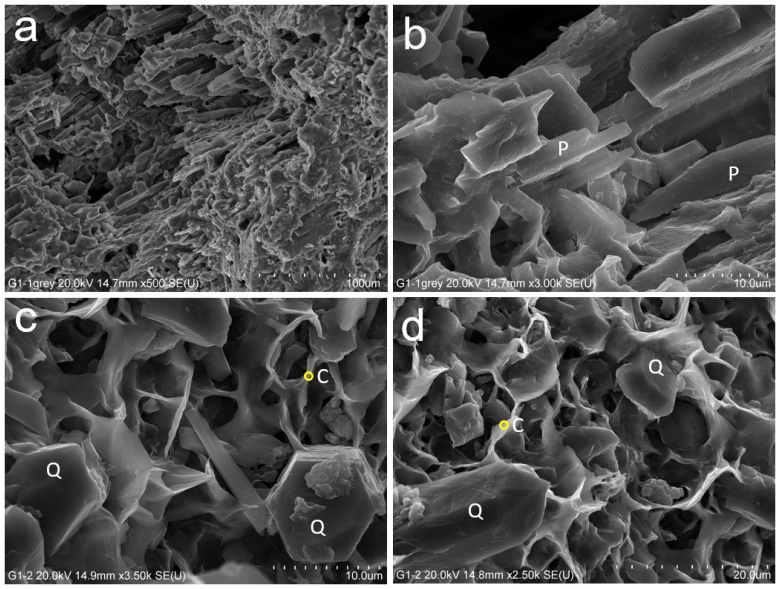

Fig. 6. SEM microphotographs of altered tuffaceous rocks in sites 1 and 2. (a) Hollow surrounded by plagioclase laths. (b) Plagioclase laths dissolved. (c), (d) Quartz crystals with altered surface and chlorite supporting crystals. C: Chlorite, P: Plagioclase, Q: Quartz.

방해석은 부분적으로 용해되어 뾰족한 미세결정들은 능면체 주축을 따라서 집단으로 배열되어 있다. 즉 방해석은 능면체의 c축으로 10 μm 이하의 많은 미세침상 결정들이 배열되어 있는데, 이는 방해석 결정이 자형으로 성장한 결과임을 지시한다(Fig. 7). 그런데 이러한 방해석의 자형의 미세침상 결정들은 풍화작용 또는 용해 시간이 길어질수록 신장되거나 종횡비가 커진다(Long et al., 2014). 타포니는 물리적 작용에 의하여 일단 형성되면 태양의 조사, 함수율, 습도에 의하여 화학적 풍화작용이 가속화되면서 타포니의 동공 형성이 활성화된다. 타포니 형성과 관련된 미세구조 연구에 의하면 타포니는 화학적 분해작용보다는 광물 입자들의 분리에 기인한다. 특히 광물의 벽개나 쌍정을 따라서 쉽게 분리될 수 있다(Mustoe, 1982).

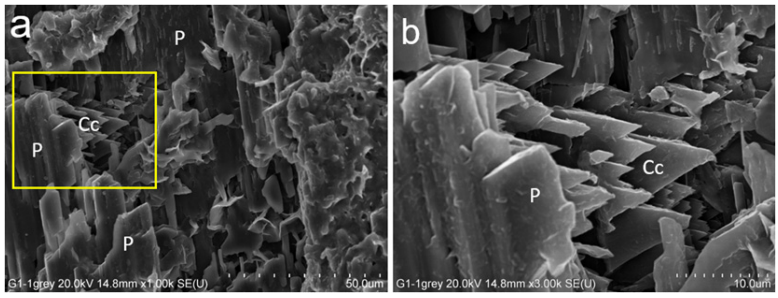

Fig. 7. SEM microphotographs of altered rocks in the site 1. (a) Array of calcite micro-needles by dissolution and altered plagioclase. (b) Enlarged image of the box area in (a). Cc: Calcite, P: Plagioclase.

수 μm 크기의 석영 결정은 육방정계나 자형인데 반해 사장석은 변질된 조직을 보여준다. 이는 석영은 화학적 풍화작용에 대해 저항성이 높지만, 장석류는 낮음을 보여준다. 특이하게 화분(pollen) 입자들이 응회암에 포함되어 있는데, 석영과 사장석 입자를 감싸거나 변질된 사장석 결정에 밀접하게 엉겨있다(Fig. 8). 이때 화분은 치밀하게 붙어있거나, 화분의 형태가 변질되어 있는데 이는 화분 입자가 단순하게 응회암 표면에 붙어있는 것이 아니고, 화분 자체도 풍화되면서 변질되어 있기 때문이다. 화분에 의한 풍화 변질 현상은 향후 규명되어야 할 부분이나, 타포니의 응회기질부가 화분과 밀접하게 관련된 것은 매우 흥미롭다. 그 외에 박테리아의 일종인 규조(diatom)류가 일부 화분과 함께 관찰되는데, 규조류가 수성 친화적 미생물인 점을 고려하면 타포니는 습하거나, 타포니 동공이 일시적으로나마 물이 고인 환경이 있었음을 지시한다.

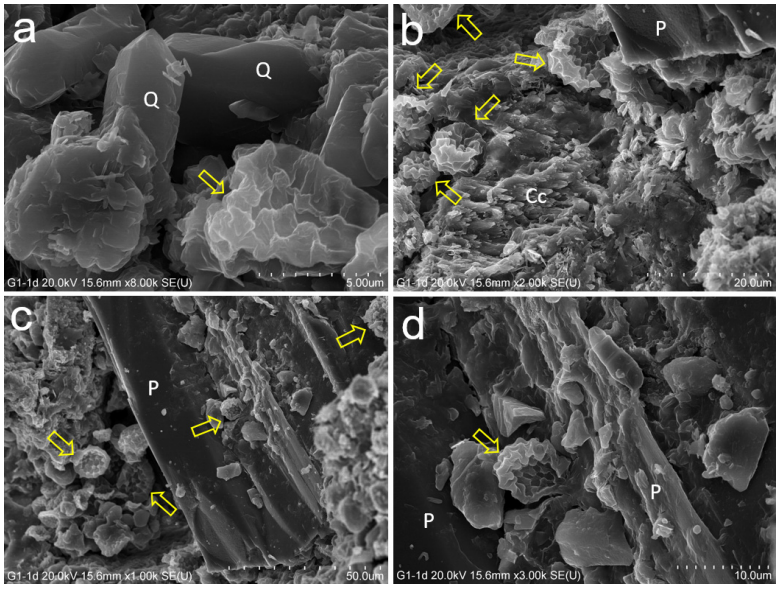

Fig. 8. SEM microphotographs of altered rocks in association with pollen particles in the site 1. (a) Euhedral quartz crystal (upper left) and altered quartz crystal (upper rright) and pollen (lower right as arrowed). (b) Pollen (arrowed parts) and altered calcite and plagioclase. (c) and (d) pollen (arrowed parts) in contact with altered plagioclase. Cc: Calcite, P: Plagioclase, Q: Quartz.

사장석은 용해 동공이 발달하거나, 결정축을 따라 변질 작용이 흔하게 발달하고 있다. 사장석의 용해 변질 작용에 의하여 Na, K, Ca와 같은 알칼리원소, 알칼리 토금속원소 들이 용출(leaching)되면서 사장석은 점차 약화된다.

골굴사에서는 화산각력이 탈락하면서 발생한 동공을 중심으로 초기 타포니가 형성되는데, 이후에는 화학적 풍화작용이 이런 동공에서 집중적으로 진행된다. 미세 규모에서는 화학적 풍화작용에 의한 동공 형성이 중요함을 알 수 있다.

사면과 동공 발달 경향성

타포니가 발달하는 5개의 소구역 사면에서 동공의 폭(width), 높이(height), 수평 방향의 심도(lateral depth)를 측정하고, 심도의 방향을 기준으로 타포니의 경사와 경사배향을 측정하였다(Fig. 9). 타포니는 가장 빈도가 높은 크기 구간인 50 cm 이하의 소형 동공을 위주로 측정하였는데(Table 2), 이들은 동공 발달의 초기 발달 패턴과 관련이 깊기 때문이다.

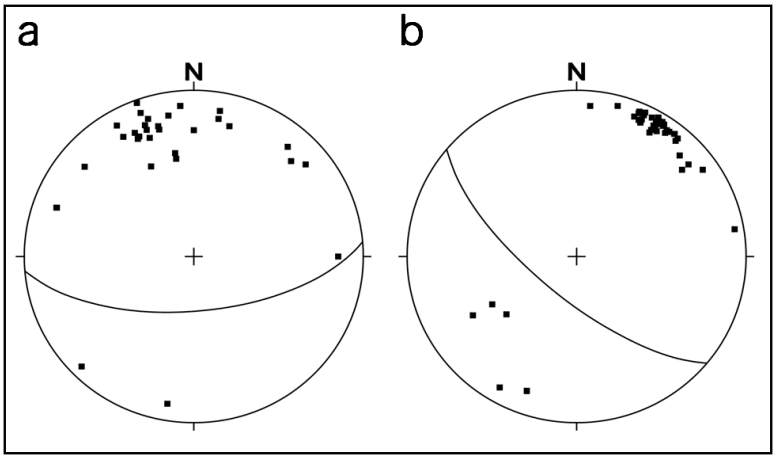

Fig. 9. Dip angles of Golgulsa tafoni showing the long axis orientations and slopes. (a) site 1. (b) sites 3 and 4.

Table 2. Sizes of representative tafoni measured in Golgulsa tafoni (unit: cm)

Width	Height	Depth	Site	Width	Height	Depth	Site	Width	Height	Depth	Site
140	95	60	1-1	107	30	52	1-6	400	130	200	3
55	29	19		57	40	31		200	60	70	
86	43	37		43	34	25		16	11	17	
33	28	20		32	20	23		150	40	65	
36	32	19		42	23	15		108	18	40	
37	36	27		90	40	37		70	32	65	
115	44	42	1-2	55	20	28	2	16	10	13	4
28	19	13		160	76	60		29	10	18	
62	45	29		87	30	17		11	7	7	
49	50	31		205	36	63		14	9	13	
34	26	19		70	45	31		20	12	6	
36	24	19		36	30	25		20	10	13	
14	12	11		300	65	63		29	12	19	
27	17	23		115	40	45		9	6	7	
37	24	24		23	13	11		20	9	11	
35	30	28		31	18	35		14	12	11	
83	23	21		70	12	12		19	14	9	
37	23	19		30	20	25		15	9	9	
30	16	7		75	30	30		15	16	11	
51	30	18		30	16	17		18	8	15	
15	12	12		24	13	13		15	13	16	
26	18	24		16	11	9		20	13	12	
39	41	33		45	24	22		25	10	19	
26	18	14		38	23	18		33	20	9	
17	17	19						16	15	6	
39	22	18						19	28	9	
34	26	17									
136	44	44									

본 골굴사 타포니 동공의 바닥은 안쪽으로 경사지면서, 항상 사면의 반대 방향으로 발달한다. 즉 타포니는 사면의 방향과 반대 방향으로 발달한다. 예를 들면, 남쪽 사면의 타포니는 사면의 반대 방향인 북쪽으로, 남서쪽 사면에서는 북동쪽으로 발달하는데, 이때 약한 경사를 보인다. 사면의 방향과 반대 방향으로 발달하면서도 약하게나마 타포니가 경사진 것은 빗물이 타포니의 바닥에 고인 후에 바닥의 물이 건조되는 동안 염분농도가 증가하기 때문이다. 이로 인해 타포니 동공의 바닥에서는 화학적 풍화작용이 빠르게 진행되므로 점차 안쪽으로 경사지게 된다. 특히 태양 빛이 조사되면 천정보다는 바닥 쪽으로 비치게 되므로 물기는 태양 빛에 더 노출되어 물은 증발하면서 염분은 증가한다. 즉 태양에 노출되면서 보다 많은 염분이 타포니 동공 속에 집적되기 때문에 그런 동공은 더욱 확장되기 쉽다(Doe, 2011).

타포니의 수평 방향 너비인 폭, 수직 방향의 높이, 구멍 내부로의 수평 깊이 간의 상관계수는 높게 나타나 이들은 서로 매우 밀접한 관련성이 있는 것으로 밝혀졌다(Table 3). 예를 들면 폭-높이 간 상관계수는 0.839, 폭-깊이 간 상관계수는 0.900, 높이-깊이 간 상관계수는 0.856으로 각각 나타났다. 이는 타포니가 넓거나 높으면 안쪽으로도 깊다는 의미이다. 특히 타포니의 수평적 깊이는 높이보다는 폭과 상관성이 약간 더 높음을 보여준다. 이러한 상관관계는 대부분의 깊은 타포니 동공들이 수직 방향보다는 수평으로 더 넓게 발달하는 실제 현상과도 잘 일치한다. 이는 타포니 동공이 위로 높아지면서 커지는 것보다는, 횡적으로 여러 동공이 병합되면서 넓어지는 것이 더 안정적이기 때문이다. 타포니 동공들은 작은 것들이 서로 병합되면서 더욱 커지는데, 각 동공의 경계부인 벽이 점점 얇아지면서 파괴되기 때문에 결국에는 타포니 동공은 점점 횡적으로 커지는 결과를 초래한다.

Table 3. Pearson correlation coefficients of width, height, and depth in tannin from Golgotha temple (N = 78)

	Width	Height	Depth
Width	1.000		
Height	0.839	1.000	
Depth	0.900	0.856	1.000

타포니 동공의 발달과 사면의 안정성

응회암이 풍화될 경우에 이차광물의 형성은 암석의 강도에 영향을 미친다(Choo et al., 2004; Wedekind et al., 2013; Kogure et al., 2022). 커다란 타포니 동공들은 암반 사면과 비교해 동공의 내부가 비어있기 때문에 암반의 강도가 더 낮다. 타포니 벽들이 얇아지면 붕괴하기 때문에 향후 지속적인 관찰과 모니터링이 필요하다. 다행히 사면의 방향에 대하여 반대쪽으로 타포니 구멍이 점점 심화되면서 형성되기 때문에 사면 자체의 붕괴는 다소 지연될 수 있다. 그럼에도 1 m 이상의 대형 타포니 분포상황에 대하여서는 지속적인 모니터링이 필요하다. 이는 경북동해안 국가지질공원의 지질명소 보존을 위해서도 필요한 조치이다. 골굴사 가장 높은 사면에 있는 마애불은 신라 선덕여왕 시기에 조각된 것으로 알려져 있는데, 마애불의 서쪽 부분에서는 벌집형 타포니가 다수 형성되어 있다. 최초에는 신선한 응회암 벽면에 마애불이 조각되었던 것이 분명함을 고려한다면 타포니 형성 또는 풍화에 소요되는 기간은 최대 1,500년 이내로 볼 수 있다. 풍화작용 동안에 가수분해 때문에 장석류는 점토광물로 전이되는데 함수성인 점토광물에 의한 팽창압력은 응회암의 공극률과 투수성을 증가시켜 점차 암석을 붕괴시킨다. 특히 이차적 기원의 팽창성 점토광물은 암반의 풍화와 파괴에 영향을 주는데, 습기에 의한 팽창은 팽창압력에 영향을 준다(Wedekind et al., 2013). 동공은 습한 환경에 반복적으로 노출되면 규모가 커지면서 점차 풍화 속도를 가속화시킨다(Campbell, 1999). 골굴사에서는 지형적으로 산지의 남사면에서 타포니가 집중적으로 발달하는데, 이런 곳은 주변에 비해 높은 함수율을 명확히 보여주므로 암석 내의 수분은 타포니 발생에 상당한 영향을 끼치는

것으로 판단된다(Shin et al., 2017). 특히 골굴사의 남-남동쪽으로는 동해 문무대왕릉의 봉길 해안으로 이어지는 고기 해안만의 평야를 따라 해풍이 불어오는 지형적 특성과도 관련된다. 연구지역 일대는 동해안으로부터 직선거리 9 km 이내의 비교적 해안에 가까운 내륙지역에 위치하는데, 해안으로부터 염류의 공급 가능성이 제기된 바 있다. 예를 들면, Shin et al.(2017)의 연구 결과에 의하면 골굴사 타포니 지역의 나마(gnamma)에 고인 정체수의 Na과 Cl값은 각각 2.9~17.4 mg/L, 8.79~23.2 mg/L로 나타났는데, 이는 국내 다른 내륙지역에 비해 높은 값이다. 따라서 바람 흐름을 통한 염분의 영향을 배제할 수 없다.

타포니 형성에서 물리, 화학적 작용은 복합적으로 발생하는데, 암석 표면수 때문에 모세관 현상에 의해 이동하는 염분은 응회암의 박리를 일으키고, 구성 광물은 화학적으로 풍화 변질된다. 예를 들어 장석은 벽개를 따라 미세균열이 발생하거나 화학적 분해가 일어나며, 흑운모는 풍화되면서 철 성분이 용탈되면서 응회암에는 철산화물이 착색된다(Topal and Sözmen, 2003). Fig. 3에서처럼 골굴사 응회암의 풍화작용은 철, 망간 산화물의 침착물을 형성시켜 피각 상을 형성하거나, 타포니 벽체나 동공 면을 피복하게 된다. 이로 인해 타포니 문화재에 대해 외관상 부정적인 오염물로 작용하거나, 강도 저하에 따른 붕괴 위험성을 증가시킨다. 병합되는 타포니 동공의 벽체는 그 강도가 취약한데 타포니 동공이 커지거나 동공의 분포 빈도가 증가하면 강도는 약해지고, 동공 내부의 습기로 인해 표면에는 풍화가 활성화되면서 결국에는 암석의 강도는 약화한다(Goudie, 2016). 따라서 타포니 사면의 강도, 동공의 비율과 체적, 동공의 합병 양상에 대한 지속적인 모니터링이 요구된다.

결 론

골굴사 타포니의 초기 단계에서는 화산각력이 탈락하면서 발생한 동공을 중심으로 타포니가 형성되는데, 이후에는 화학적 풍화작용이 이런 동공에서 집중적으로 진행된다. 각력들이 층준을 이루는 응회암에서 타포니는 일정한 간격을 따라 비슷한 규모의 군집으로 발달하는데, 이 경우에는 벌집형이 압도적이다. 타포니 동공은 항상 사면의 반대 방향으로 발달하는데, 사면 안쪽으로 약하게 경사한다. 타포니의 폭, 높이, 동공 내부로의 수평 깊이 간의 상관계수는 서로 밀접한 것으로 나타났다. 커다란 타포니 동공들은 많은 작은 동공이 병합되어 형성되는데 특히 횡적으로 확장되는 특징이 있다. 타포니 사면은 일반 암반 사면과 비교해 동공의 내부가 크게 비어있기 때문에 암반 강도가 낮고 타포니 벽들이 얇아지면서 붕괴하기 때문에 지속적인 관찰과 모니터링이 필요하다.

References

Campbell, S.W., 1999, Chemical weathering associated with tafoni at Papago Park, central Arizona, Earth Surface Processes and Landforms, 24, 271-278.

Chen, X., Chen, L.q., Zhang, Y.h., Du, D.d., Hu, H.p., Liu, D.x., Li, W.z., 2021, Lithological and environmental controls on large tafoni along conglomerate cliffs in subtropic humid Danxiashan UNESCO Global Geopark, Journal Mountain Sciences, 18(5), 1131-1143.

Choo, C.O., Jeong, G.C., Ho, D.Y., Kim, J.T., Seiki, T., 2004, Chemical weathering deterioration of Oya Tuff and its alteration to zeolitic materials, The Journal of Engineering Geology, 14(4), 381-390 (in Korean with English abstract).

Doe, N., 2011, The geometry of honeycomb weathering of sandstone, SHALE, 26, 31-60.

Goudie, A.S., 2016, Quantification of rock control in geomorphology, Earth-Science Reviews, 159, 374-387.

KIGAM, 1922, Geological map 1:50,000 Gampo sheet, Retrieved from https://data.kigam.re.kr/mgeo/map/main.do?pro

cess=geology_50k.

Kim, J.S., Son, M., Kim, J.S., Kim, J., 2005, $^{40}Ar/^{39}Ar$ ages of the Tertiary dike swarm and volcanic rocks, SE Korea, The Journal of the Petrological Society of Korea, 14(2), 93-107 (in Korean with English abstract).

Kogure, T., Sueyoshi, R., Ohira, H., Sampei, Y., Shin, K.S., Yutaka Abe, Y., 2022, Formation processes of tafoni on pyroclastic rock surfaces with hydrothermal alteration on the Isotake coast, Shimane, Japan, Geomorphology, 398, 108050.

Long, X., Meng, R., Wu, W., Ma, Y., Yang, D., Qi, L., 2014, Calcite microneedle arrays produced by inorganic ion-assisted anisotropic dissolution of bulk calcite crystal, Chemistry A European Journal, 20(15), 4264-4272.

Mustoe, G.E., 1982, The origin of honeycomb weathering, Geological Society of America Bulletin, 93(2), 108-115.

Shin, J.R., Choo, C.O., Lee, J.K., Park, K.G., 2017, Weathering processes of tafoni at Golgulsa temple, Gyeongju, South Korea, Journal of the Korean Association of Regional Geographers, 23(1), 168-177 (in Korean with English abstract).

Shin, J.R., Lee, J.K., Choo, C.O., Park, K.G., 2015, A Study on weathering processes of tafoni in Mt. Cheonsaeng, Gumi, the Republic of Korea: Interpretation of water content data using GIS interpolation analysis, Journal of Korean Earth Sciences Society, 36(6), 543-552 (in Korean with English abstract).

Topal, T., Sözmen, B., 2003, Deterioration mechanisms of tuffs in Midas monument, Engineering Geology, 68, 201-223.

Wedekind, W., López-Doncel, R., Dohrmann, R., Kocher, M., Siegesmund, S., 2013, Weathering of volcanic tuff rocks caused by moisture expansion, Environmental Earth Sciences, 69, 1203-1224.