

## 군위 삼존석굴의 누수 원인과 방지대책

황상구

안동대학교 지구환경과학과, 경북 안동시 송천동 388

## Origins and Protective Schemes of Leaking Water into the Buddhist Triad Cave in Gunwi

Sang Koo Hwang

Dept. of Earth and Environmental Science, Andong National University, 388 Songcheon-dong,  
Andong City, Kyungbuk 760-749, KOREA

**초록** 군위 삼존석굴은 주로 반상 흑운모 화강암으로 구성되며 그 내부가 기계적, 화학적 및 생물적 풍화작용에 의해 훼손되었다. 이 풍화작용의 근본요인은 빗물에 의해 일어나며 이 빗물은 절리를 따라 스며들어 석굴내부로 누수된다. 그러므로 누수를 일으키는 절리를 조사하고 누수 경로를 추적하여 차수대책을 강구하였다. 석굴 주위의 반상 흑운모 화강암은 북동동과 북서서 절리조를 규칙적으로 발달시키며, 그 중에 북동동 절리조가 훨씬 뚜렷하게 나타난다. 북동동 절리조는 4개 절리대를 형성하며 이중에  $J_m$ 과  $J_3$  절리대가 누수의 직접적인 원인이 되며 석굴훼손에 큰 영향을 미친다. 석굴 안쪽의 인장절리는  $J_m$  절리대로 통하며, 이 경로는 작은 빗물이 석굴내부까지 누수되지는 않겠지만 큰비는 누수를 일으키며 상당히 오래 지속될 것으로 생각된다. 석굴입구 천장의 절리와 균열들은  $J_3$  절리대로 연장되며 10 mm 이내의 작은 비에도 빗물이 쉽게 석굴내부로 스며든다. 차수대책은 누수부위보다 L: -9m에서 L: +10m까지 범위의  $J_m$  절리대와, 반경 5m 원 상반부의  $J_3$  절리대의 빗물 유입부를 차단하는 방안이 가장 바람직하다. 처리제는 충전제와 발수경화제를 사용하여 절리와 열극의 틈을 일일이 막아야만 하며, 점도를 높이기 위해 경화제와 속결제를 혼합하여 사용하는 것이 좋다.

**ABSTRACT** The Buddhist Triad Cave in Gunwi, which consists of porphyritic biotite granite, has been deteriorated by a few weatherings. Origin of the weatherings is rain that can be leaked into the cave. Therefore the author investigates a few possible joints and bypasses leaking water, and reinforces any protective schemes for the rain influx. The porphyritic granite around the cave regularly develops two NEE and NWW joint sets. The NEE joint set could be divided into 4 joint zones among which  $J_m$  and  $J_3$  may directly affect the leaking water into the cave. A extensional joint, in northern wall of the cave, runs through the  $J_m$  joint zone. A small rain could rarely gets through the bypass, but a heavy rain has a good circulation through the joints to be leaked into the cave for a long time because of its long way. Many joints and cracks, in the ceiling near the cave entrance, immediately get to the  $J_3$  joint zone, and have a good circulation of a small rain 10 mm. It is the desirable pro-

tective schemes that forbid rains to influx along the ranges from L -9 m to +10 m in the  $J_m$  joint zone and upper half circle with radius 5 m in the  $J_3$  joint zone. The joint apertures should be filled with a petro-epoxy and petro-filler to stop the water flow

## 1. 서론

한반도는 약 70%가 산지이기 때문에 양질의 석재가 많이 분포한다. 조상들은 석재를 이용하여 많은 석조문화재를 축조하였다. 석조문화재는 국가지정 건조문화재 중 국보의 76%, 보물의 42%를 차지할 정도로 비중이 가장 크다. 이 석조문화재들은 대부분 암석을 채석해서 여러 모양으로 다듬어 축조하였거나 혹은 자연암석의 절개면에 그대로 조각하였다. 그러나 군위 삼존석굴은 천연의 암벽에 동굴을 축조하여 그 속에 불상을 안치한 복합 문화재이다.

지구상의 모든 물질이 물질순환법칙에 따라 합성과 분해과정이 반복되는 한 석조문화재도 역시 물질순환법칙의 한 대상이 된다. 이 물질순환에서 석조문화재의 분해과정이 바로 자연의 풍화작용이다. 국내 석조문화재는 축조시기가 다양하지만 축조시에 단단한 암석이었던더라도 대부분은 천년이 넘었기 때문에 풍화를 심하게 받아서 원래의 모습과 강도가 크게 훼손되어 있다. 더욱이 최근의 대기오염으로 인한 산성비는 과거 50년 전에 비하여 대부분의 석조문화재를 기하급수적으로 크게 훼손시키고 있는 실정이다. 그러므로 석조문화재는 더 늦기 전에 그 풍화현황과 원인을 알아내서 올바른 보존대책을 세워야만 한다.

여러가지 풍화작용에 의하여 석조문화재가 원래의 모습을 조금씩 잃어간다면 이를 더 이상 훼손되지 않도록 방지대책을 강구하는 것이 필요하다. 석조문화재의 훼손은 각종 환경과의 반응에 의하여 일어나는 것이기 때문에 석조물이 환경 중 어떤 요인에 의하여 어떤 상태로 훼손되는가를 규명하여 훼손현상이 일어나지 않도록 예방 또는 지연시켜서 조상의 문화재를 보존해야만 한다. 따라서 석조문화재에 대한 보존대책을 내리기 위해서는 먼저 지질학적 측면에서 철저히 조사하여 훼손발생의 원인부터 찾아야만

한다. 성급한 처리는 아무리 견고한 석조물이라도 영구히 망치게 되기 때문이다.

본 연구는 군위 삼존석굴 주변에서 빗물 유입부로 예상되는 절개면에 접근하여 구성암석의 암상과 내부구조를 파악하고, 절리의 위치, 방향성과 성인 등을 정밀하게 분석함으로써 석굴 내의 누수원인을 알아내고 누수정도를 추적하는데 주목적이 있다. 그리하여 이 연구는 앞으로 누수방지 방안에 대한 객관성 있는 대책을 수립하여 국보 문화재를 영구히 보존하는데 이용되도록 하고자 한다.

## 2. 삼존석굴의 모습

군위 삼존석굴은 국보 109호로서 군위군 부계면 남산리에 위치하며 팔공산 북서부의 양산(陽山) 절벽 북측부에 놓인다. 양산은 해발 342 m이고 북측부와 동측부가 하상으로부터 30~40 m 높이의 거대한 암벽을 이루고 있다. 이 절벽은 화강암 암벽으로 이루어져 있으며, 석굴은 이 북측부의 거대한 화강암 암벽 중에서 해발 270 m의 하상으로부터 약 10~15 m 높이에 북쪽으로 수평굴을 뚫어 만든 것이다.

이 삼존석굴 지하에는 북쪽과 남서쪽에서 흘러오는 두 개천이 만나고 이 개천 사이에 형성된 작은 충적층에는 소규모의 절이 있다. 석굴 앞으로는 멀리 팔공산의 연봉들이 둘러 있으며 이 연봉들로부터 발원하는 개울이 좁은 계곡을 따라 북쪽으로 흘러내리고 있다. 이러한 심산궁곡의 우수한 곳에 아담한 정사를 배치하고 암벽을 이용하여 석굴을 조성하여 삼존불을 안치하였던 것이다.

석굴은 수직직경 4.25 m, 동서직경 4.20 m, 남북심도 4.3 m이며 그 저면이 해발 약 280 m 위치에 놓인다(Fig. 1A). 입구는 원형에 가깝고 내부 평면은 방형이며 천장은 도움형을 이루었다.

석굴 내의 벽면에는 아무런 조식이 없고 도움

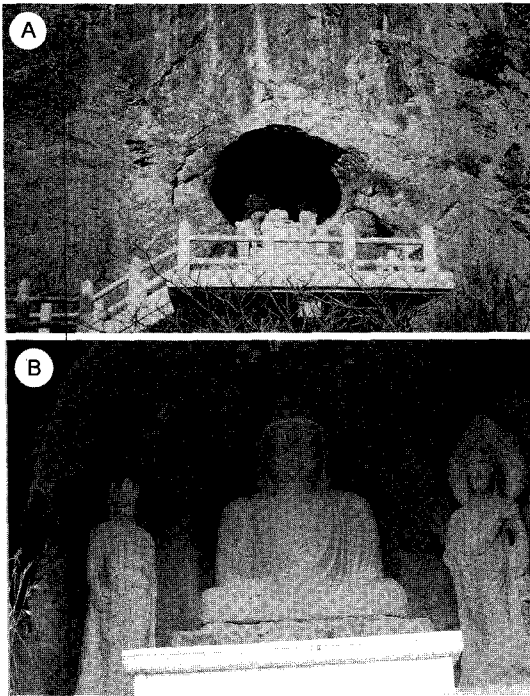


Fig. 1. (A) A view of the Buddhist Triad Cave with 4.25 m in vertical diameter; (B) Statues of the Buddhist Triad.

형의 천정까지 높이가 약 4.25 m에 달하며 벽면 입구에는 천공의 흔적이 남아 있다. 석굴과 삼존은 모두 암회색 내포체를 함유하는 반상 혹은 화강암으로 되어있지만 풍화도가 서로 크게 다르다. 이 차이는 삼존이 석굴 주위에서 풍화가 되지 않은 화강암으로 조각하여 반입된 것을 지시한다. 이 삼존은 모두 벽면 가까이에 붙여서 독립된 삼존석상으로 배치되어 있다(Fig. 1B). 그 중 본존불만은 대좌에 안치됨과 동시에 그 후단이 벽면에 마련된 턱 위에 얹혀져 있다. 석굴 내에는 동벽의 저면 입구 가까이에 방형의 구멍이 있어 문호를 위한 장치 가 있었던 것으로 생각된다. 최근 저면에는 화강석으로 판석을 깔고 밖으로 계단을 설치하였다. 그러나 원상은 더욱 낮고 다소의 경사를 이루었던 것으로 보인다. 이 계단 아래에는 작은 참배단을 만들고 지상까지 계단으로 오르내리게 하였다.

삼존상은 2.18 m 높이의 아미타여래좌상을 본존불로 봉안하고, 이의 왼쪽에 1.92 m의 관세음

보살상과 오른쪽에 1.80 m의 대세지보살상을 안치하였다. 본존불은 0.7 m 높이의 방형대좌를 따로 마련하여 그 위에 결가부좌되어 있다. 이 본존불은 통일신라 초기에 축지인불좌상이 전래되면서 그 수인의 의미를 완전히 이해하지 못한 단계에서 수용된 초기의 형태로서 축지의 수인 위치는 엄격한 의미에서 본다면 정확한 모습이 아닌 상태이다.<sup>2</sup> 따라서 이 본존불은 우리나라 향마축지인 불상의 최초의 예로서 보고있다. 본존불의 뒤쪽 벽면에는 후광이 조각되어 있는데 두광과 신광으로 나누어 음각되어있고 그 둘레에 불꽃무늬가 조각되어있다.

우리나라 석굴사원이 대부분 암벽에 마애불을 새기고, 그 위에 목조 전실을 세운 소규모의 석굴사원을 모방한 형식인 데 비해, 이 석굴은 천연암벽을 뚫고 그 속에 불상을 안치한 유일한 예라는 점에서 매우 귀중하다.<sup>3</sup> 대규모의 자연석굴을 본격적으로 만든 유일한 예이며 봉안된 불상의 양식도 고식이기 때문에 그 조성이 7세기 말경으로 추정되는 동시에 8세기 경주 석굴암과 같은 축조석굴로 발전하는 전초적 과정인 점에서 주목된다.<sup>4,5</sup>

### 3. 자연 환경

#### 3.1. 지형과 기후

삼존석굴 남쪽에는 팔공산의 주봉인 비로봉(1,192 m)이 우뚝 솟아 있고 좌우로 동봉(1,155 m)과 서봉(1,041 m)이 어깨를 나란히 동서방향으로 달리면서 주능선을 형성하며 대구직할시와 경계를 이루고 있다. 이 동서방향의 주능선의 비로봉에서와, 한티 서쪽 1 km 고지(790 m)에서부터 큰 지맥이 남북방향으로 뻗어 칠곡군·영천시와의 경계를 따라 분수령을 이루고 있다. 그리고 비로봉 북쪽 2.1 km 지점의 아차고개(840 m)에서부터 북서서쪽으로 또 다른 큰 지맥이 뻗어 나간다. 이들 남북방향의 지맥과 북서서방향의 지맥은 심성암과 퇴적암과의 경계되는 것과 관계가 있다. 즉 심성암의 관입으로 그 주변부의 퇴적암이 심한 열변성작용으로 견고한 접촉 변성대를 형성했기 때문이다. 이 지맥들의 안쪽 팔공산 심성암 지대는 비교적 높은 고산지형을

이루고 있고, 팔공산 주봉으로부터 심성암 경계 부까지 점차 완만하게 낮아지다가 경계부에서는 다시 급하게 높아져 험준한 지형을 형성한다.

석굴 주변에는 남쪽으로 주능선과 동쪽, 북쪽과 서쪽에 큰 지맥이 달리고 있어 작지만 산간 분지가 형성되어 있고 이 산간분지에는 동시에 골곡이 심한 복잡한 지형을 이루고 있다. 그리고 많은 분수령에서 수지상으로 분지 내로 흘러 내려오는 물은 모두 합쳐져 북쪽으로 흘러나간다. 따라서 주능선과 큰 지맥으로부터 수많은 작은 능선들이 부채살 모양으로 뻗어 나오고 그 사이에 계곡들이 수지상으로 모여져 남천(南川)을 이룬다. 이 남천은 본역에서 북쪽으로 흐르다가 북서쪽으로 꺾어 낙동강 분류로 유입된다.

산간분지 내에는 대부분 구릉지를 이루고 있기 때문에 경작지가 매우 적고 거의 과수원 등 밭으로만 이용될 뿐이다. 본역은 내륙산간에 위치하고 있어서 한서의 차가 심하며, 강수량이 적다. 연평균기는 12.0°C, 1월평균기는 -2.4°C, 8월 평균기는 26.8°C이며, 연강수량은 889.5 mm이다.

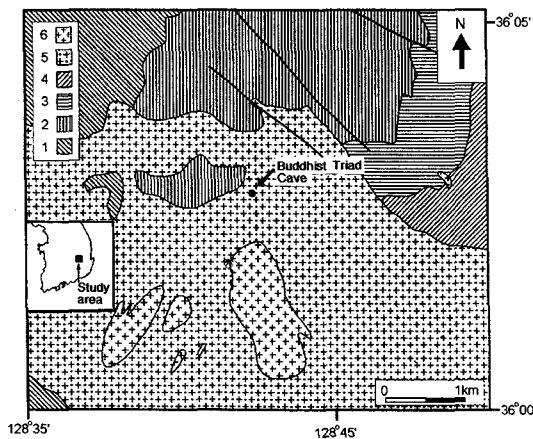
**3.2. 지질**

본역의 지질은 경상분지의 중앙부에 해당하는 곳으로 백악기의 퇴적암류와 심성암류로 구성된다. 퇴적암류는 주로 본역 북부에 분포되며 암

석의 색깔과 잡색 역암의 협층을 기준으로 하부로부터 진주층, 일직층, 후평동층과 점곡층 순으로 구분되고 서쪽에서 동쪽으로 가면서 짙어진다(Fig. 2). 이들은 대체로 NS-N15°E 주향에 5~15°SE의 경사를 가지며 심성암체로 접근하면 거의 수직으로 경사되는 곳도 있다.

심성암류는 N60°W 방향으로 길쭉한 팔공산 저반을 형성한다. 이 저반은 백악기 후기의 불국사 관입암군의 일부로서 대울도폭에서 팔공산 화강암으로 기재되었다.<sup>6</sup> 그러나 이 저반은 대부분 회백색 조립질 반상 흑운모 화강암으로 구성되고 담홍색 중립질 흑운모 화강암을 포함한다. 이 저반은 관입시에 높은 열에 의해 퇴적암류를 그 경계부로부터 약 2 km까지 심하게 접촉변성시켜 혼펠스화하였다.<sup>7</sup> 반상 흑운모 화강암은 팔공산 저반의 대부분을 차지하고 여러 곳에서 흑운모 화강암에 의해 관입된다.<sup>8</sup> 이 화강암은 풍화에 강하여 높은 산지를 이룬다. 본암은 거의 모든 곳에서 크고 작은 세립질 내포체를 가진다(Fig. 3A). 이 반상 흑운모 화강암은 신선한 면에서 회백색을 띠고 석기의 입도가 중립질 내지 조립질이며 큰 장석 결정을 반정으로 포함하는 반상조질을 나타낸다. 반상 흑운모 화강암은 사장석, K-장석, 석영, 흑운모, 각섬석, 자철석 등으로 구성되고 매우 드물게 저어콘과 인회석이 수반된다. 사장석은 자형 내지 반자형으로서 흔히 알바이트 쌍정을 보이며 내핵부가 연변부에 비해 흔하게 변질되어 있다. 초기 사장석은 파상누대 사장석으로 과성장된 경우도 있다. K-장석은 타형으로서 사장석에 의해 둘러싸여 라파키비 조질을 이루거나 사장석 사이에 입간상으로 존재하며 작은 사장석을 포유하는 것도 있다. 석영은 타형으로 다른 광물들 사이에 입간상으로 나타난다. 흑운모와 각섬석은 자형 내지 반자형이고 자철석과 함께 몰려 있는 경우가 많다. 각섬석은 장석과 흑운모에 의해 과성장된 경우도 있다.

흑운모 화강암은 반상 흑운모 화강암 내에 작은 암주 혹은 얇은 암맥으로 노출된다. 이 암상은 신선한 면에서 회백색 내지 담홍색을 띠고 중립질 내지 세립질이다. 흑운모 화강암은 석영, 사장석, K-장석, 흑운모, 각섬석, 전기석과 자철



**Fig. 2.** Geological map around the Buddhist Triad Cave. 1, Jinju Formation; 2, Ilgik Formation; 3, Hupyeongdong Formation; 4, Jeomgok Formation; 5, Porphyritic granite; 6, Biotite granite.

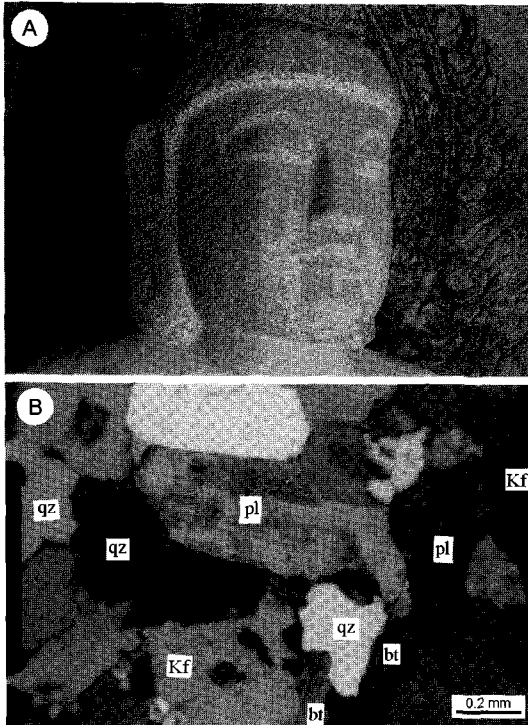


Fig. 3. (A) A mafic microgranular enclave in the head part of the Buddha; (B) Photomicrograph of porphyritic biotite granite showing quartz (qz), K-feldspar (Kf), plagioclase (pl) and biotite (bt).

석 등으로 구성된다(Fig. 3B). 석영은 다른 결정들 사이에서 타형의 큰 결정으로 나타나고 때때로 K-장석과 함께 미문상 조직을 보이기도 한다. 사장석은 보다 큰 결정으로서 자형이나 반자형이며 주로 알바이트 쌍정으로 나타나고 누대구조를 보이는 경우도 있다. K-장석도 반자형이나 타형으로 나타나고 퍼사이트 형태를 보이며 가끔 점토광물로 변질되어 있다. 흑운모는 자형 내지 반자형이고 국부적으로 몰려 있다. 각섬석은 대부분 자형이고 크기가 다양하며 흑운모와 같이 나타난다. 전기석과 자철석도 미립으로서 흔히 유색광물의 근처에 존재하는 경우가 많다.

#### 4. 절리와 풍화

삼존석굴은 치밀한 반상 흑운모 화강암으로 이루어져 있기 때문에 석굴 내의 누수현상은 위

에서 논의한 절리가 절대적인 원인이 된다. 그래서 석굴 주위의 풍화현상과 함께 절리 발달상태를 철저히 조사하여 그 규칙성을 알아내고 그 중에서 석굴 내부로 연결되는 절리를 찾는 것이 문제해결의 핵심이다.

#### 4.1. 석굴내부의 절리와 풍화

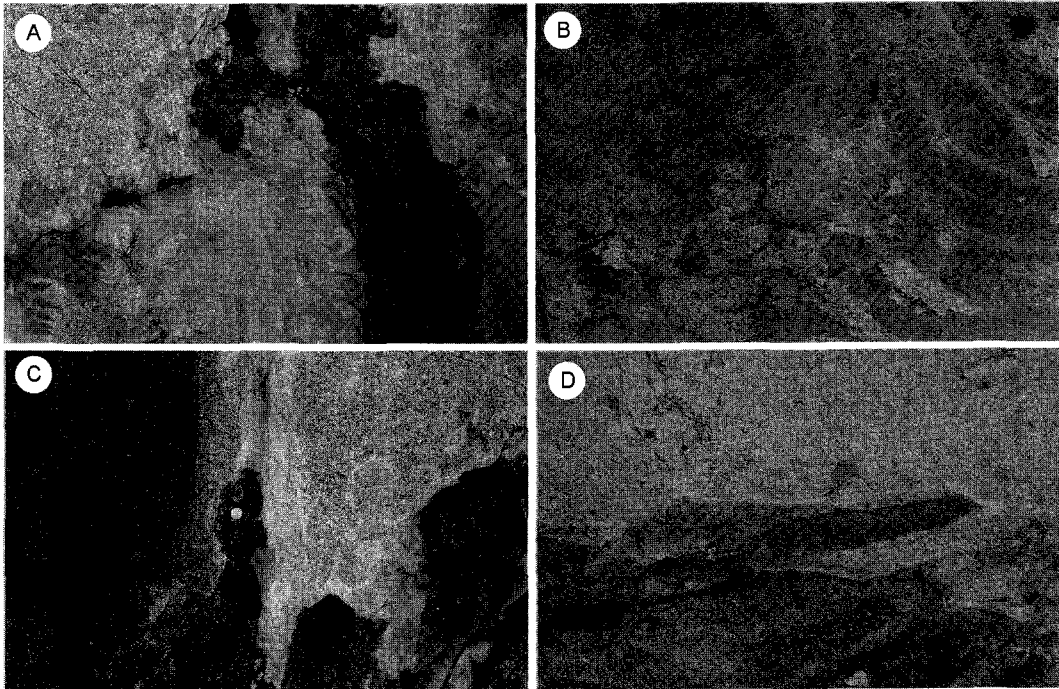
삼존은 풍화가 매우 미미하지만 석굴은 여러 가지 풍화로 인하여 심하게 훼손되어 있으며 이 풍화는 크고 작은 절리를 따라 심하다.

##### 4.1.1. 절리와 기계적 풍화

삼존석굴 내부에서 절리는 규칙성이 없다. 석굴 내부 안쪽 벽면에 가장 뚜렷한 절리가 하나 있다(Fig. 4A). 이 절리는 면이 불규칙하지만 대체로 N60°~80°W, 40°~60°SW(평균 N75°W, 50°SW)이고 1 cm 내외로 벌어져 있고 모서리 부분이 떨어져 나갔다. 이 절리는 외부의 전단절리와 전혀 다른 인장절리(tensional joint)에 속한다.<sup>8</sup> 습윤 정도는 2001년 4월 11일 10 mm, 5월 7일 20 mm와 5월 22일 19 mm의 작은 비에 의해 거의 변화되지 않았고 석굴입구 서측부에만 물기가 약간 스틸 따름이다. 그러나 6월 18~19일 약 100 mm 비에는 물기가 비치고 방울로 떨어졌으나 흐름 현상까지는 가지 않았다.

그리고 석굴 입구 근처에는 작은 절리가 대체로 절벽의 암벽에 거의 평행하고 석굴 내부로 완만하게 경사지면서 많이 발달된다. 또한 이 절리에 사교하나 절단하지 않는 미세한 균열이 무수하게 발달된다. 이 절리와 균열들은 그 경로로서는 짧기 때문에 작은 비에도 빗물이 쉽게 스며든다. 예를 들면 4월 11일 10 mm, 5월 7일 20 mm와 5월 22일 19 mm의 작은 비에도 석굴 내부로 빗물이 스며들어 벽면이 젖었다. 6월 18~19일 양일간의 93 mm 비에는 20일 천장에서 물방울이 똑똑 떨어졌고 21일에는 20분에 한방울씩 떨어졌으며 22일에는 떨어지지 않았다.

암석의 기계적 풍화는 입자의 경계부, 결정의 벽개, 절리와 같이 암석의 불연속면을 따라 입자들이 깨지고 박리가 일어나면서 진행된다. 이 풍화는 광물 및 화학적 변화와 생물적 풍화에 연관되어 일어난다.<sup>9,10,11</sup> 삼존석굴에서 기계적 풍화는 절리를 따라 누수된 물기가 결빙될 때 부



**Fig. 4.** Deteriorations in the Buddhist Triad Cave (A) Extensional joint, blackish algae and yellowish green mosses, blueish gray lichen on the back wall and a green ferns in the joint; (B) Brown rusts, and mondmilch exfoliations showing some deterioration of carving lines on the wall of a block below the Buddha; (C) White calcic film, and blackish algae and mosses on the western wall; (D) White calcic film, and blackish algae and mosses along cracks in southern part of the ceiling, and blueish gray lichen in northern part.

피가 팽창되면서 일어난다.<sup>12</sup> 특히 본존불과 접촉하는 대좌는 상단이 층상 박리를 일으키고 측면이 딱지상 박리를 일으켜 떨어진다(Fig. 4B).

#### 4.1.2. 광물적 풍화

벽면과 천장에는 광물적 풍화로 요철현상이 심하고 절리의 모서리는 둥글게 마모되어 있다. 요철 부분에서 석영은 튀어나와 있고 장식들이 불규칙하게 들어가 있다. 장식은 수화반응과 가수분해에 의해 견운모나 고령석으로 변해서 쉽게 침식될 수 있는 광물적 풍화를 받는다. 반면에 석영은 어느 풍화도 쉽게 받을 수 없을 정도로 강하다. 이때 공급되는 수분은 석굴이 치밀한 반상 흑운모 화강암으로 이루어져 있기 때문에 거의 전부 절리를 따라 누수됨으로서 공급된다.<sup>8</sup> 이러한 광물적 풍화의 차이로 벽면은 입상 분해되어 요철을 나타내고 모서리는 둥글게 마모된다(Fig. 4A).<sup>13</sup>

또한 흑운모는 결정의 경계와 벽개를 따라 쉽게 가수분해와 산화작용에 의해 2차적으로 녹색의 녹니석과 적갈색의 수산화철로 변하는 광물 및 화학적 풍화를 받는다.<sup>13,14</sup> 이차적 광물은 습도와 온도에 따라 특정한 양의 물분자를 함유하여 다양한 수산화물질로 존재하는데 이때 수화압이  $300 \text{ kg/cm}^2$ 까지 생겨 기계적 풍화도 가중시킨다고 한다. 이러한 광물적 풍화는 대부분 습기에 의해 촉발된다.

#### 4.1.3. 화학적 풍화

석굴의 서쪽 벽면과 입구 천장에는 화학적 풍화로 방해석이 침전되어 유백색 내지 회백색 피막을 형성한다. 이 침전피막은 절리틈이 1~2 mm 되는 곳에서 가장 심하며 벽면에서는 흔히 절리를 따라 좌우로 번져있고 아래로 길게 흐름자국을 나타내며 화강암 조직을 완전히 덮은 곳도 많다(Fig. 4C). 이는 누수의 흐름 흔적을 나타내고

아주 느리게 번지거나 아래로 흘렀던 곳에서 효과적으로 침착되었다는 것을 의미한다. 왜냐하면 북쪽 천장에는 탄산염에 의한 백색피막이 거의 관찰되지 않기 때문이다. 이 백색피막은 암석의 화학적 풍화에 의해 선택적으로 용해된 물질이 공기와 접하면서 물의 증발과 동시에 방해석이 침전된 것이다.

그리고 북쪽 벽면 하부, 보살상 다리 부분과 본존불 대좌는 산화철과 수산화철로 변화되어 얇은 다갈색 내지 적갈색 녹을 형성한다(Fig. 4B). 이들의 양이온은 석조물 자체의 조암광물로부터 기인하는 반면에 음이온은 대기, 산성비와 같은 외부의 영향에 의해 침착된다. 이때 염이 결정화할 때 결정압이 130 kg/cm<sup>2</sup>까지 올라가 석조물을 압박하여 복합적으로 기계적 풍화를 일으킬 수도 있다.

4.1.4. 생물적 풍화

석굴내부는 거의 80% 이상 조류, 선태류(이끼류)와 지의류 등의 하등식물로 얼룩져 있다. 석굴 북쪽, 서쪽과 동쪽 내벽과 남쪽 천장에는 흑색 조류 및 이끼류가 암석에 기생하면서 생물적 풍화를 일으키며 이들은 검푸르거나 검붉고 얼룩덜룩하게 미관을 크게 해치고 있다(Fig. 4). 이는 누수가 일어나 물기로 젖어있는 곳으로서 벽면에서는 절리 아래로 크게 나타나고(Fig. 4A) 천장에서는 절리 근처에서 심하다(Fig. 4D). 이들은 비온 뒤나 우기에 흑록색, 흑갈색, 흑적색

등으로 성장하여 가장 심하며(Fig. 4A, C), 전기에는 성장을 멈추어 말라서 결국 딱지형으로 조각조각 떨어진다.

인장절리의 주위와 그 아랫부분은 연록색 내지 황록색 이끼류가 성장하는데(Fig. 4A) 이 부분은 물기로 젖어있지 않고 하루종일 해가 들지 않는 항상 습한 음지에 속한다. 또한 틈이 넓은 인장절리에는 양치류가 성장하기도 한다(Fig. 4A). 그러므로 이 이끼류와 양치류의 서식은 음지에서 습기에 의해 일어남을 알 수 있으며, 이끼류가 발생하게 되면 암석 표면에 수분이 더 많이 보유하는 결과를 초래하여 화학적 풍화를 촉진하게 한다.

그러나 인장절리 위쪽에서 안쪽 천장 부분은 청회색 지의류가 고착하면서 부분적으로 서식하는데(Fig. 4D), 이 부분은 절리가 없고 습기가 적은 곳이다. 이 하등식물들은 유기산을 분비하여 암석 표면을 용해시켜 점차 부식되게 한다. 더 심하게 풍화된 경우에 이 하등식물들은 포자근과 균사를 암석내부의 공극과 결정 경계부로 침투시켜 생물적 풍화를 촉진시킨다.<sup>10,11,15</sup> 예를 들면 지의류로 덮힌 화강암의 흑운모가 이때 변질되어 화학적으로 K/Si 및 Fe/Si의 감소와 Al/Si 증가를 초래한다고 한다.<sup>16</sup>

4.2. 석굴외부의 절리와 풍화

삼존석굴 밖에는 두 개의 절리조가 규칙적으

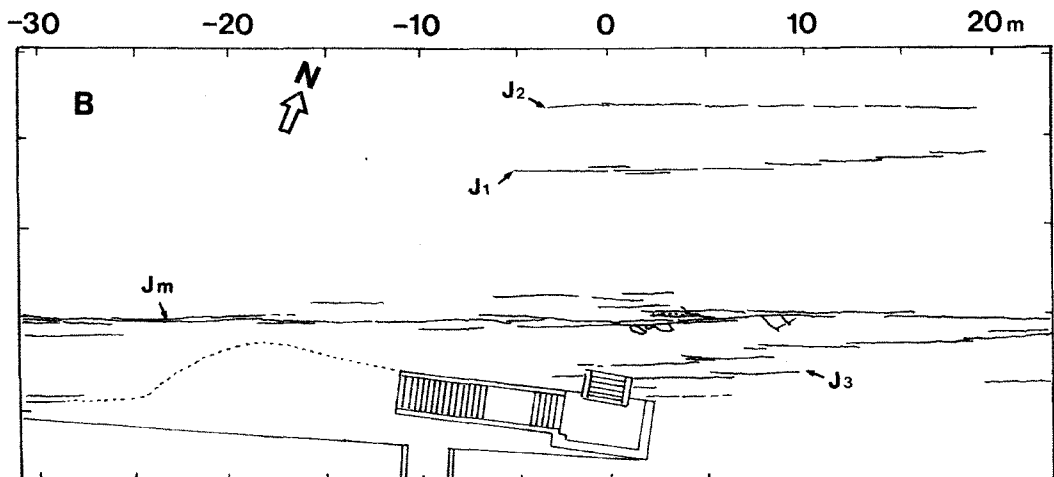


Fig. 5. Planar section showing locations of the J<sub>m</sub>, J<sub>1</sub>, J<sub>2</sub> and J<sub>3</sub> joint zones.

로 발달되어 있다. 즉 가장 뚜렷한  $N65^{\circ}\sim 70^{\circ}E$ ,  $75^{\circ}\sim 85^{\circ}SE$  방향의 북동동 절리조와,  $N50^{\circ}\sim 70^{\circ}W$ ,  $64^{\circ}\sim 70^{\circ}SW$  방향의 북서서 절리조이다. 이 두 절리조는 모두  $64^{\circ}\sim 85^{\circ}$  범위로 급하게 경사되며 서로 공액관계로서 하나의 절리계를 이룬다.<sup>17</sup> 이 절리계는 백악기 말에서 제삼기 초에 동서방향의 압축응력에 신령단층과 함께 형성된 것으로 해석된다.<sup>17</sup> 그러나 북서서 절리조는 석굴 주위에서 산출빈도가 매우 낮기 때문에 언급하지 않겠다.

북동동 절리조는 훨씬 뚜렷하게 나타나고 연장성이 좋다. 이 절리조는 석굴 위에서 3개 절리대(joint zone)를 형성하고 석굴 아래에서 1개 절리대가 관찰된다(Fig. 5). 이 4개 절리대 중에서 가장 뚜렷하고 연장성이 좋은 것을 주절리대( $J_m$ )이라 하고 이로부터 북쪽으로 가면서 차례로  $J_1$ ,  $J_2$ 로 하고 남쪽의 것을  $J_3$ 라 표기한다.  $J_m$ 과  $J_1$ 의 간격은 약 8 m이고  $J_1$ 과  $J_2$ 의 간에는 약 3~4 m이며,  $J_m$ 과  $J_3$ 의 간격은 약 2~4 m이다(Fig. 5).

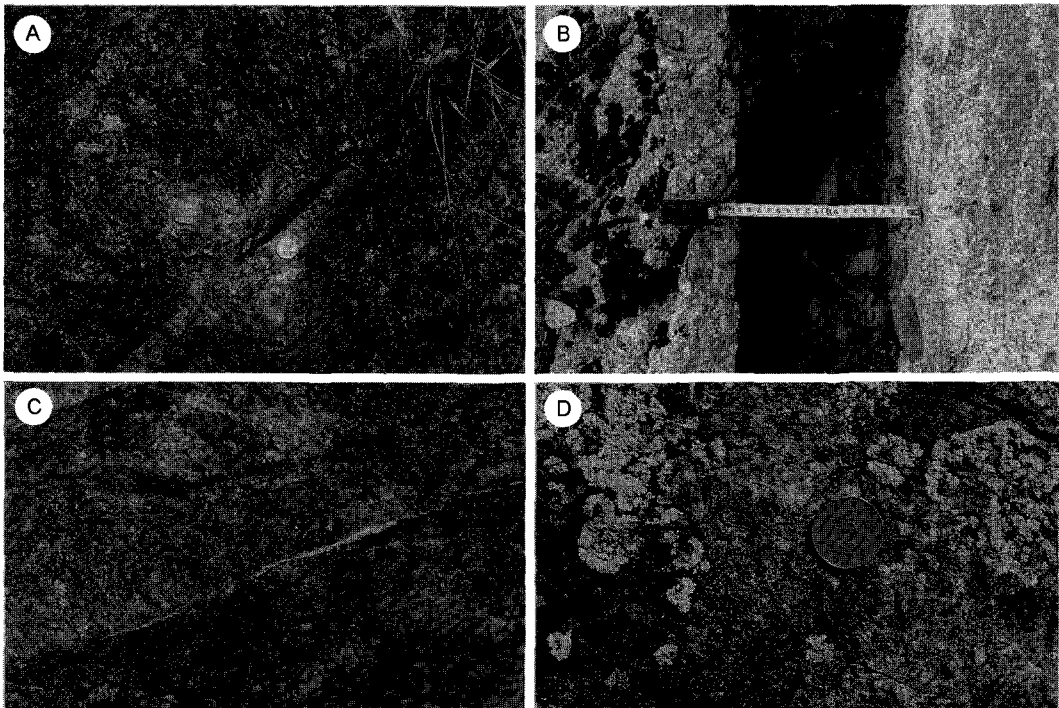
#### 4.2.1. 주절리대

주절리대  $J_m$ 은 전체적으로 2~5개 절리가 한데 묶여져 무리를 이룬다. 절리간격(joint spacing)은 대체로 15~80 cm 범위이며 최소 1 cm인 경우도 있고 최대 120 cm되는 경우도 있다. 각 절리에서 벌어진 절리틈(joint aperture)은 대개 2~25 mm 범위이며(Fig. 6A) 석굴 상위의 큰 소나무가 있는 곳에서 최대 40 mm되는 곳도 있다(Fig. 6B).

##### (가) 광물 및 화학적 풍화

절리틈은 그대로 비워있는 부분도 있으며(Fig. 6A), 대부분 토양으로 채워져 있고 동시에 주위에서 떨어진 암석조각으로 덮혀 있는 경우도 있다(Fig. 6B). 특히 2~3 mm로 아주 좁은 틈에서는 상부에서 빗물을 따라 녹아 흘러온 방해석 물질이 침전으로 채워져 매우 얇은 세맥을 형성한 곳도 있다.

이 절리의 틈은 빗물이 흘러들거나 스며드는 통로 역할을 하고 있다. 빈틈은 빗물이 흘러들



**Fig. 6.** (A) Typical joint apertures with grasses in  $J_m$  joint zone; (B) Joint apertures, showing 30 cm in width, near a big pine tree upward 10 m from the cave top; (C) A calcite vein filled along a small joint; (D) Blackish, blueish gray and blueish green lichens and mosses on the cliff.



어 빠르게 아래로 이동될 것이며 건기에는 이내 말라서 공기가 쉽게 유통될 것이다. 그러나 이 빈틈도 아래로 내려가면서 계속 비어있지는 않고 아마도 미세한 토양이나 방해석으로 막혀있을 수도 있다(Fig. 6C). 토양층진 틈은 빗물이 오랫동안 토양에 스며있게 하고 또한 우기에 밀어서 서서히 스며든 빗물이 장기간에 걸쳐 아래로 혹은 좌우로 이동되게 한다. 암석 중에서 방해석 물질이 용해되어 아래로 스며들어 벽면에 침착되어 흰 얼룩을 지게 할 수도 있다. 이러한 모든 현상은 풍화의 주요현상에 속하고 스며드는 빗물은 풍화를 더욱 촉진시키는 요인이다.

(나) 생물적 풍화

토양층진 틈은 거의 모두 잡초가 자생하고 있고(Fig. 6A) 절벽을 제외하고 주변으로 청회색 지의류, 청록색 이끼류 등의 하등식물이 자생하며(Fig. 6D), 여러가지 잡목이 성장하는 곳도 있다. 지의류는 암석 표면에 고착되어 기생한다. 특히 이끼류는 절리의 밀도가 높거나 토양이 풍부한 곳에서 자생함으로써 토양과 암석조각의 유실을 방지하기도 한다. 그러나 식물 뿌리의 성장점에는 극산성 분비물을 발생시켜 암석을 부식시키는 강력한 화학적 풍화를 촉진시킨다. 이들 식물은 모두 건조지대에서 성장할 수 있는 것들이다.

소나무는 가파른 절벽에서 흔하게 볼 수 있듯이 절벽에서도 뿌리를 내릴 수 있는 틈이 있으면 상당한 크기로 성장할 수 있다. 수m의 소나무는 밀둥치가 양파모양으로 벌어지고 절리를 벌리고 있으며 뿌리 주변은 방사상으로 균열이 발생되었다. 이런 현상은 식물뿌리의 성장이 기존 절리의 틈을 확대시키고 새로운 균열을 만든다는 좋은 증거이다. 식물뿌리는 성장하면서 암석과 광물의 틈을 넓혀가며 암석의 물리적 풍화 작용을 촉진시킨다. 보통 식물체 뿌리가 토양이나 암석에 가하는 근압은 암석의 기계적 풍화를 촉진시킨다. 마찬가지로 석굴 상위의 큰 소나무도 기존 절리를 크게 확대시킨 것으로 판단된다. 이 소나무는 수고가 약 5 m이고 밀둥치 직경이 최고 30 cm이지만 기존 절리틈이 2 cm이던 것을 최대 40 cm로 확대시켰다.

(다) 암반의 토폰링

$J_m$  절리대는 절리의 경사가 북쪽으로 향하면

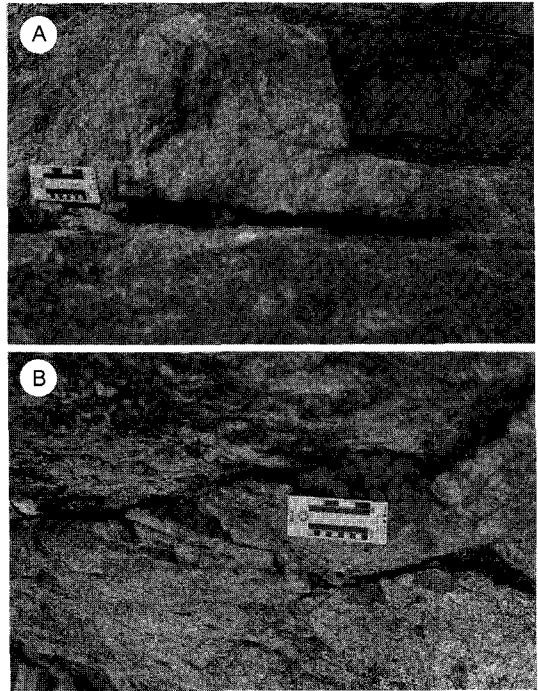


Fig. 7. Joint spacings (A), and small joints and cracks with a scrub (B) in the  $J_3$  joint zone.

서 그 면이 암벽에 거의 평행하게 놓인다. 그리고 암벽의 경사가 북쪽으로 향하여 역경사 암벽을 이루고 있는 곳에서 두 절리대 간의 암반은 중력에 의해 항상 아래로 힘을 받게 된다. 이때 암반이 남쪽으로 쓰러지면서 회전하는 토폰링(toppling)을 일으킨다. 이 예로서 남쪽으로 향하는 완경사 단열면은 암반이 토폰링에 의해 북측의 절리면을 따라 떨어지고 암반 내의 아랫부분이 절리의 경사와 반대쪽으로 떨어져 형성된 것이다.

또한 석굴내부의 인쪽 인장절리는  $J_m$ 과  $J_3$  간의 암반이 석굴 상위의 큰 소나무가 절리틈을 벌림으로서 마치 토폰링과 같은 효과로 형성된 단열이다.<sup>17</sup> 이러한 효과는 전술한 바와 같이 이 절리틈이 절벽 단면의 상부에서 넓던 것이 그 아래로 가면서 좁아진다는 점에서 지지되고, 동시에 암반이 남쪽으로 회전했다고 것을 설명해준다. 그러므로 석굴내부의 인장절리는 주절리대와 연결된 것으로 판단된다.

4.2.2. 기타 절리대

$J_1$  절리대는  $J_m$  절리대로부터 북쪽으로 약 8 m

위치에 있고  $J_2$  절리대는  $J_1$ 로부터 약 3~4 m 위치에 있다(Fig. 7A).  $J_1$  절리대는 2개의 절리가 15 m 간격으로 N20°E, 80°NW 방향으로 달리며,  $J_2$  절리대는 N70°E, 85°NW 방향의 절리면에 의한 단애로 나타난다. 따라서 이 두 절리대는 석굴 내로 연결될 수 없다.

$J_3$  절리대는 서쪽에서 뚜렷하지만 동쪽으로 오면서 약해지고 석굴입구 부분에서 좌향 안행상 배치를 한다(Fig. 5). 그래서  $J_m$ 과  $J_3$ 의 절리간격은 서쪽에서 거의 4 m이지만 동쪽으로 가면서 3 m 내지 2 m로 좁아지고 결국 1 m 정도로 더 좁아진다. 그러나  $J_3$  절리대 내에서 절리간격은 10 cm, 20 cm 등이다(Fig. 7A). 이 절리대는 석굴입구 바로 위로 연결되며 절리틈이 4 cm 이내이고 그대로 비어 있다(Fig. 7B). 이 곳에서  $J_3$  절리대에 사교하는 한 절리는 틈이 2~5 cm로 벌어져 있고 주위에 수 mm로 좁은 균열이 불규칙하게 많이 형성되어 있다(Fig. 7B). 이 절리대는 석굴 동쪽으로 계단상 절벽을 형성하기 때문에 토양이 형성되어 잡목이 몇 군데에 생장하고 지의류 등 하등식물도 서식하고 있다.

석굴 바로 위에 있는 절리와 균열들은 석굴입구 천장으로 연장되어 있다. 그래서 이들 절리와 균열들은 작은 비에도 빗물이 쉽게 석굴내부로 스며든다. 특히 석굴 서측 경계부의 위쪽은 암벽이 수직이 아니고 경사를 이루기 때문에 10 mm 이내의 작은 비에도 빗물이 쉽게 스며들어 내부가 젖어 있다(Fig. 4D). 그러나 반대편 석굴 동측 경계부의 위쪽은 암벽이 역경사를 이루어 처마와 같은 역할을 하기 때문에 작은 비에는 직접 맞지 않아 스며든 빗물이 석굴내부까지 미치지 못한다. 하지만 이 동측 경계부는 절리와 균열이 더 많고 틈이 크기 때문에 큰비에는 더 많은 빗물이 스며들게 된다. 따라서 이 부분의 절리들은 모두 적은 강우에도 민감하게 좌우되기 때문에 문화재를 훼손하는데 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

## 5. 토의

### 5.1. 누수원인

삼존석굴은 석굴 내에 위치하고 있지만 그 전

조연대가 오래되었기 때문에 삼존불과 석굴의 건강상태는 자연환경에 따라 크게 변화하였다. 이 삼존석굴의 훼손은 풍화에 의하여 일어났으며 풍화의 요인은 주변의 자연환경을 고려한다면 주로 빗물, 누수 습기, 기온변화, 생물서식 등이다. 따라서 이들의 환경인자는 수분이며 이의 공급원은 빗물이고 공급통로는 절리이다.

삼존석굴 주변은 북동동 방향과 북서서 방향의 2 절리조가 하나의 절리계를 이루면서 발달되어 있다. 이 중에서 북동동 절리조는 앞에서 언급한 바와 같이 석굴내부의 누수에 직·간접적으로 영향을 주고 있다. 그런데 이 절리조의  $J_m$ ,  $J_1$ ,  $J_2$ ,  $J_3$  절리대 중에서  $J_m$ 과  $J_3$ 가 가장 큰 영향을 미친다는 것은 앞에서 설명되었다. 그러나 이들 절리대 중에서 어느 절리대가 어느 부위에서 영향을 미치는지를 알아내기 위해서 물리적인 방법으로 전기 비저항탐사를 실시한 바 있다.

이 결과로  $J_m$  절리대의 절리틈이 넓고 많은 토양이 채워진 석굴 상위가 강우량에 따라 가장 큰 폭의 비저항치를 나타내기 때문에 가장 큰 빗물의 유입부로 해석된다.<sup>17</sup> 왜냐하면 이 부위의 절리틈에 채워진 토양은 작은 비에서는 함수만 하고 아래로 흘러보내지 않은 역할을 할 것이고 큰 비에서는 포화되어 더 오랫동안 물을 아래로 흘러보내는 역할을 할 것이기 때문이다. 따라서 석굴 직상위의  $J_m$  절리대는 누수의 원인을 제공하는 빗물의 주요 유입부인 것으로 판단된다.

빗물에 의한 삼존석굴의 풍화현상은 일반적으로 그 속도가 대단히 느리다. 신성한 암석인 경우에는 비가 오고 있는 동안에는 암석이 젖어 있지만 비만 그치면 대체로 그 표면의 빗물이 증발되어 건조하게 되며 암석 내부로 스며든 수분은 대기 중의 습도 여하에 따라 서서히 빠져 나온다. 그래서 삼존석굴 주변의 암석은 물과 반응 시간이 길지 않기 때문에 느린 속도로 풍화된다.

이러한 훼손의 근본 원인은 빗물에 의해 일어난다고 보아야 한다. 빗물이 스며들어 석굴내부로 누수되고 습기를 많게 한다. 이로 인해 암석을 이루는 광물이 용해되고 결빙을 일으키며 한편 식물이 서식케 하여 여러 풍화작용을 일으킨다. 그러므로 누수를 차단해야 하는데 이를 위

해서는 누수 부위를 막을 것이 아니라 누수의 경로를 추적하여 누수의 원인이 되는 빗물의 유입부를 막아야만 한다.

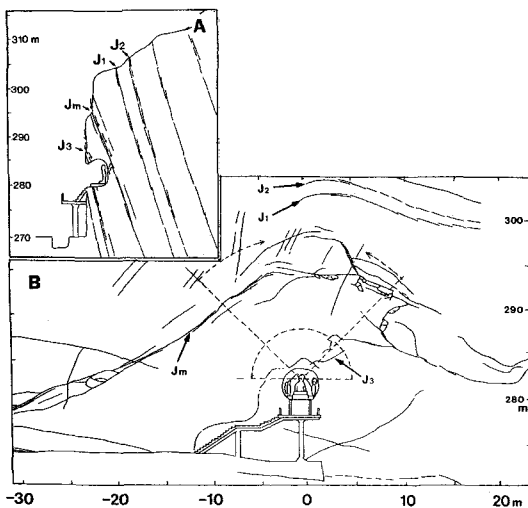
**5.2. 누수경로**

석굴내부로 빗물이 침투하는 곳은  $J_m$ 와  $J_3$  절리대이다.  $J_m$  절리대는 석굴내부 안쪽 절리의 누수에 영향을 미치고  $J_3$  절리대는 석굴입구쪽의 누수에 영향을 준다.

먼저 석굴내부 안쪽 절리에서의 누수경로를 알아본다면, 이 절리는 큰 소나무가 절리 속으로 뿌리를 박고 성장하여 절리의 틈을 최대 40 cm까지 벌림으로서 남측 암반이 토플링될 때 형성된 틈이다. 그러므로 석굴내부의 인장절리는  $J_m$  절리대로 연결되어 있는 것으로 해석되었다(Fig. 8A).<sup>17</sup> 이 경로는 매우 길기 때문에 작은 빗물은 석굴내부까지 누수되지는 않겠지만 큰비에는 누수가 일어날 것이며 큰 만큼 상당히 오래 지속될 것으로 생각된다. 왜냐하면 큰 소나무가 서있는 부위에서 절리틈이 워낙 넓기 때문이다. 이 경로는 길이가 긴 만큼 빗물이 유입될 수 있는 영향권도 매우 클 것으로 생각된다. 즉

암벽을 포함하는 수직면을 생각할 때 이 면상의 석굴 중심에서 좌우방향으로 45°로 직선을 그을 때 그 윗부분이 영향권일 것으로 추정된다(Fig. 8B). 왜냐하면  $J_m$  절리대 내에 유입된 빗물은 틈이 좁더라도 절리틈을 따라 퍼져나갈 것이며 이때 반드시 수직으로 이동하지 않고 45°로 이동할 수 있기 때문이다. 그러므로 이 영향권 내의 절리들은 넓은 범위에 속하더라도 모두 석굴을 훼손하는데 영향을 미치기 때문에 반드시 이 영향권 내의 빗물 유입부를 막아야만 한다.

그러면 석굴입구의 균열에서의 누수경로를 알아본다면, 이 부분에서의 절리는 대부분  $J_3$  절리대에 속한다. 이곳에는 절리와 균열이 매우 많지만 누수의 경로가 전자에 비하면 매우 짧기 때문에 쉽게 알아낼 수가 있다. 석굴 입구의 윗입술에 있는 절리와 균열들은 석굴입구 천장으로 직접 연결되어 있다(Fig. 8A). 따라서 이들 절리와 균열들은 작은 비에도 빗물이 쉽게 석굴내부로 스며든다. 그러므로 석굴을 중심으로 하여 반경 5 m의 원을 그렸을 때 그 상반부가 영향권일 것으로 생각된다(Fig. 8B). 특히 석굴 서측 경계부의 위쪽은 암벽이 수직이 아니고 경사를 이루기 때문에 10 mm 이내의 작은 비에도 빗물이 쉽게 스며든다. 그러나 반대편 석굴 동측 경계부의 위쪽은 암벽이 역경사를 이루어 처마와 같은 역할을 하기 때문에 작은 비에는 빗물이 직접 석굴내부까지 미치지 못한다. 하지만 이 동측 경계부는 절리와 균열이 더 많고 틈이 크기 때문에 큰 비에는 더 많은 빗물이 스며들게 된다. 그러므로 이 부분의 절리와 균열들도 모두 문화재를 훼손하는데 더 빈번하게 영향을 미칠 것으로 생각되기 때문에 반드시 빗물 유입부를 막아야만 한다.



**Fig. 8.** (A) Passways leaking water on vertical section; (B) Diagram showing protective schemes that forbid rains to influx along the ranges from L: -9 m to +10 m in the  $J_m$  joint zone and upper half circle with radius 5 m in the  $J_3$  joint zone, on the vertical cliff of the porphyritic granite.

**5.3. 차수대책**

삼존석굴에서 누수 방지대책은 석굴내부의 누수원인을 제거하는데 필요한 방안이어야 한다. 즉 석굴내부로 누수가 일어나기 때문에 이를 차단하는 공사가 필요하다. 누수 방지대책으로서 석굴내부에서의 누수 차단방안, 지상에서의 강수 차단방안과 지표에서의 유입부 차단방안이 있겠다.

첫째 방안은 석굴내부에서 공사하는 것으로서

소규모 장비와 작은 경비로서 공사가 가능하다. 이 방법은 누수되는 지하수를 차단하는 방안이기 때문에 차단시에 발생하는 지하수의 수압을 고려해야 한다. 지하수는 어느 한 곳을 막으면 다른 곳을 통하여 누수하게 된다. 그렇기 때문에 암벽을 천공하여 누수를 집중시키는 유도배수를 강구해야 한다. 따라서 이 방법은 보존하려던 석굴을 더 훼손할 우려가 있기 때문에 배제되어야만 한다.

둘째 방안은 비를 맞지 않도록 보호각을 세우는 것이 하나의 방편이겠지만 원래의 자연경관을 망치는 결과를 초래할 것이다. 이 방안은 누수의 원인을 근본적으로 완벽하게 제거할 수 있겠지만 엄청난 공사비가 요구될 것이고 보호각의 보존이라는 또 다른 보존관리비가 반복적으로 추가될 것이다. 그러므로 이 방안도 경제적으로 환영할 것이 못된다.

셋째 방안은 누수부위보다 빗물의 유입부에서의 절리틈을 효과적으로 차단하는 방안이다. 이 방법은 잘만 한다면 한번의 공사로 거의 영구적으로 차단시킬 수 있을 것이고 공사비도 저렴할 것으로 생각된다. 그러나 이 방안은 원인을 100% 완벽하게 제거할 수 있는지가 문제이지만 철저한 시공을 한다면 해결될 것으로 본다. 그렇기 때문에 필자는 암반에서 빗물의 유입부인 절리와 균열을 차단하는 공사를 하는 것이 가장 바람직하다고 본다.

그러면 누수를 차단하기 위한 공사는 어떤 범위에 어떤 처리제를 사용할 것인가에 대해 더 연구가 필요할 것으로 생각된다. 유입부의 차수공사의 범위는 영향권내에 있는 절리와 균열이며, 주요 대상 절리는 북동동 절리조의  $J_m$  절리대와  $J_3$  절리대이다. 그 범위는  $J_m$  절리대가 L: -9 m에서 L: +10 m까지이고,  $J_3$  절리대가 석굴을 중심으로 하여 반경 5 m의 원을 그렸을 때 그 상반부이다(Fig. 8B).

빗물의 유입부를 차단하기 위해서는 충전제와 발수경화제를 사용하여 절리와 열극의 틈을 일일이 막아야만 한다. 그리고 마감제로 강력한 에폭시 계열의 수지를 사용하는 것이 바람직하다. 암석의 틈을 충전하는 처리과정에서 합성수지만으로는 점도가 낮아 접착이 불가능하기 때문에

경화제와 속결제를 혼합하여 사용하는 것이 좋다. 암석에 적절한 처리제를 선택하기 위해서는 먼저 실험을 거쳐 결정해야만 하는 것은 기본적인 사항이다. 암석은 같은 이름을 가진 것이라도 그 종류가 대단히 많고 광물조성과 조직이 서로 다르며 풍화상태 또한 서로 다르다. 그래서 한 암석에 효과가 있는 처리제라 하더라도 다른 암석에서는 적합하지 않을 수 있기 때문에 항상 서로 다른 암석인 경우에는 별도의 실험을 거쳐 적합한 처리제를 선택해야 한다. 이 경우에도 역시 암석의 각종 성질과 실험결과 및 보존처리에 사용한 방법 및 처리제에 대한 기록을 상세하게 기술하여 기록으로 남기도록 해야 한다. 암석의 물성과 보존처리제의 실험을 거치지 않고 토목기술자들이 급작스럽게 차수제로 보존처리를 한 결과 단기간 내에는 보존처리가 잘된 것으로 보이지만 수년 내지 수십년이 지나면서 처리하지 않은 것만 못하다는 사실도 알아야만 하겠다.

또한 절리에 토양이 채워진 곳은 토양을 깨끗하게 제거하고 처리제를 사용해야 한다. 토양을 그대로 둔 채로 처리제를 사용한다면 훗날 토양의 이동으로 처리제가 떨어져 나올 수도 있다. 또한 절리에 서식하고 있는 잡초와 잡목은 처리 전에 제거해야 한다. 왜냐하면 식물의 서식은 암석의 화학적 풍화를 촉진시킬 뿐만 아니라 식물의 근압에 의해 절리가 더 벌어지고 또 다른 균열을 발생케 하기 때문이다. 물론 소나무와 같은 큰 나무는 석굴 주위의 경관을 좋게 하지만 더 이상의 풍화와 훼손을 방지하기 위해서는 망설일 필요가 없다고 본다. 또한 더 완벽하게 하기 위해서 절리대가 배수 역할을 못하도록 방안을 강구해야 한다.

그리고 어떤 경우에도 처리과정의 순서에 따라 진행해야 한다. 단기간에 끝내려고 순서를 거치지 않고 누수차단 처리를 시행한다면 무조건 처리과정을 중지시켜야 할 것이다. 한번 잘못된 누수차단 처리는 석굴을 복원 불가능하게 완전히 망칠 수 있기 때문이다.

## 6. 결론

군위 삼존석굴은 주로 반상 혹은모 화강암으

로 구성되며 그 내부가 여러 풍화작용에 의해 미생물 얼룩, 백색피막, 갈색늑, 요철현상과 변색으로 훼손되었으며 주위는 북동동과 북서서 절리조를 규칙적으로 발달시키며, 그 중에 북동동 절리조의  $J_m$ 과  $J_3$  절리대가 누수의 직접적인 원인이 되며 훼손하는데 큰 영향을 미친다.

석굴 안쪽의 인장절리는  $J_m$  절리대로 통하며, 이 경로는 작은 빗물이 석굴내부까지 누수되지는 않겠지만 큰 비는 누수를 일으키며 상당히 오래 지속될 것으로 생각된다. 석굴입구 천장의 절리와 균열들은  $J_3$  절리대로 연장되며 10 mm 이내의 작은 비에도 빗물이 쉽게 석굴내부로 스며든다.

차수대책은 누수부위보다 빗물의 유입부에서의  $J_m$ 과  $J_3$  절리대를 효과적으로 차단하는 방안이 가장 바람직하다. 그 범위는  $J_m$  절리대가 L: -9 m에서 L: +10 m까지이고,  $J_3$  절리대가 석굴을 중심으로 하여 반경 5 m의 원을 그렸을 때 그 상반부이다. 처리제는 충전제와 발수경화제를 사용하여 절리와 열극의 틈을 일일이 막아야 하며, 점도를 높이기 위해 경화제와 속결제를 혼합하여 사용하는 것이 좋다.

## 사의

본 연구는 군위군의 지원에 의해 이루어졌으며 군위군의 관계자와 연구를 도와준 모든 분들에게 감사드린다.

## 참고문헌

1. 김사덕, 황진주, 강대일, "대리석 문화재에 대한 산성비의 영향". *보존과학회지*, 7, 19-22 (1998).
2. 김리나, "한국고대 불교조각사 연구". 일조각, 1989.
3. 진홍섭, "한국의 석조미술". 문예출판사, 1995.
4. 진홍섭, "한국의 불상". 일지사, 1980.
5. 황수영, "한국의 불상". 문예출판사, 1989.
6. 김봉균, 정창희, 김수진, 양승영, "한국지질도 대륙도폭". 한국동력자원연구소, 1981.
7. 최원희, 좌용주, "팔공산 화강암체의 냉각사와 접촉변성대". 2002년도 춘계 공동학술발표회는문집. 한국암석학회, 112-114 (2002).
8. 황상구, 김수정, 이현우, "군위 삼존석굴의 지질환경과 보존대책". 2002년도 춘계 공동학술발표회는문집, 대한자원환경지질학회, 321-324 (2002).
9. 이상헌, "국내 석조문화재의 보전 대책수립을 위한 지질학적 고찰". *보존과학회지*, 7, 9-18 (1998).
10. 최석원, 이찬희, "부여 대조사 화강암 피복보살입상의 물리적 및 화학적 풍화". *지질학회지*, 36, 559-574 (2000).
11. 최석원, 이찬희, 서만철, "산청 도전리 마애불상군의 산출상태와 훼손 및 보존방안". *지질학회지*, 37, 393-406 (2001).
12. J.L. Drever and J. Zobrist, "Chemical weathering of silicate rocks as a function of elevation in the southern Swiss Alps". *Geochem. Cosmochem. Acta.*, 56, 3209-3216 (1992).
13. 이상헌, "석굴암을 이루는 암석의 풍화현상". *보존과학회지*, 8, 1-9 (1999).
14. T. Nagano and S. Nakashima, "Study of colors and degrees of weathering of granitic rocks by visible diffuse reflectance spectroscopy". *Geochem. J.*, 23, 75-83 (1989).
15. M.R. Lee and I. Parsons, "Biomechanical and biochemical weathering of lichen-encrusted granite: textural controls on organic-mineral interactions and deposition of silica-rich layers". *Chem. Geol.*, 161, 385-397 (1999).
16. J. Wierchos and C. Ascaso, "Morphological and chemical features of bioweathered granitic biotite induced by lichen activity". *Clays Clay Miner.*, 44, 652-657 (1996).
17. 황상구, 김수정, 이현우, "군위 삼존석굴의 지질환경과 훼손원인". *자원환경지질*, 35, 407-420 (2002).