

군위 삼존석굴의 지질환경과 훼손원인

황상구^{1*} · 김수정² · 이현우³

¹안동대학교 지구환경과학과, ²현대건설주식회사 엔지니어링사업본부, ³한국원자력안전기술원 구조부지실

Geological Environments and Deterioration Causes of the Buddhist Triad Cave in Gunwi, Korea

Sang Koo Hwang^{1*}, Su Jeong Kim² and Hyunwoo Lee³

¹Dept. of Earth and Environmental Sciences, Andong Nat'l Univ., Andong 760-749, Korea

²Hyundai Engineering and Construction Co. Ltd., Seoul 110-723, Korea

³Korea Institute of Nuclear Safety, Taejeon 305-338, Korea

The Buddhist Triad Cave in Gunwi (National treasure No. 109) consists of porphyritic biotite granite, and it has been deteriorated into microorganic smears, white films, brown rusts, granular decay, color changes, and joints by the same weathering factors as rain, moisture, temperature variation and microorganic living. Main origin is probably the rain that leaks into the cave along joints in Palgongsan granite, and then its moisture grows many microorganism and is frozen over during winter. The granites around the cave regularly develop two NEE and NWW joint sets that are conjugate to be a joint system. The NEE set extends far away with narrow joint spacings and affects the leakage of the rains, and is divided into 4 joint zones, among which J_m and J_3 immediately affect the leaking water into the cave. An extensional joint, in northern wall of the cave, was formed by toppling of the block between J_m and J_3 joint zones from widening the J_m aperture by roots of a big pine tree, and passes through the J_m joint zone. This bypass allows no circulation of small rain, but a good circulation of heavy rain from influx to the cave for a long pathway. Many joints and cracks, in the ceiling near the cave entrance, immediately get through the J_3 joint zone, and have a good circulation of small rain 10 mm. Both J_m and J_3 joint zones are, therefore, chief influxes that cause leakage of the rains.

Key words : Buddhist Triad Cave, Weathering factor, Joint set, Joint zone, Leakage, Chief influx

군위 삼존석굴(국보 109호)은 반상 흑운모 화강암으로 구성되고 이들의 훼손은 풍화에 의해 미생물얼룩, 백색피막, 갈색녹, 입상분해, 변색과 절리 등으로 나타나며 풍화의 요인은 주로 빗물, 누출수분, 기온변화, 생물서식 등이다. 이들의 환경인자는 수분이며 이의 공급원은 빗물이고 공급통로는 절리이다. 빗물이 화강암 내의 절리를 따라 스며들어 석굴내부로 누출되어 습기를 많이 하며 미생물을 서식케 하고 결빙을 일으킨다. 삼존석굴 주변의 화강암은 북동동과 북서서 절리조를 규칙적으로 발달시키며, 서로 공액관계에 있어 하나의 절리계를 나타낸다. 북동동 절리조가 훨씬 뚜렷하게 나타나고 석굴 주위에서 4개 절리대를 형성하며, 이중에 J_m 과 J_3 절리대가 누수의 직접적인 원인이 된다. J_m 절리대는 석굴 안쪽의 인장절리로 통하며, 이 인장절리는 석굴 상위의 큰 소나무가 J_m 절리틈을 벌림으로서 J_m 과 J_3 절리대간의 암반이 토폰링 효과로 벌어진 단열이다. 이 경로는 매우 길기 때문에 작은 빗물은 석굴내부까지 누출되지는 않겠지만 큰비는 누출을 상당히 오래 지속시킬 것으로 생각된다. J_3 절리대는 석굴입구에서의 훼손에 영향을 미치며, 이곳에는 절리와 균열이 매우 많고 경로가 매우 짧기 때문에 10 mm 이내의 작은 비에도 빗물이 쉽게 석굴내부로 스며든다. 결과적으로 J_m 과 J_3 절리대가 누수의 원인을 제공하는 빗물의 주 유입부인 것으로 판단되고 문화재를 훼손하는데 큰 영향을 미치는 것으로 생각된다.

주요어 : 삼존석굴, 풍화요인, 절리조, 절리대, 누수, 주 유입부

*Corresponding author: hwangsk@andong.ac.kr

1. 서 론

군위 삼존석굴은 경북 군위군 부계면 남산리 산16번지인 팔공산 북서부의 양산(陽山) 절벽 북측부에 위치한다. 이 삼존석굴은 천연의 암벽에 동굴을 축조하여 그 속에 불상을 안치한 복합 문화재로서 1962년 12월 20일에 국보 109호로 지정되었다. 석굴 안의 삼존불은 중앙에 아미타본존불을 위시하여 왼편에 관세음보살, 오른편에 대세지보살이 안치된 석조문화재이다.

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 귀중한 문화재이다(진홍섭, 1995).

석굴 바로 뒤에 있는 양산은 342 m이고 북측부와 동측부가 하상으로부터 30~40 m 높이의 거대한 암벽을 이루고 있다(Fig. 1A). 이 절벽은 반상 흑운모 화강암으로 이루어져 있으며, 석굴은 이 북측부의 암벽에 270 m의 하상으로부터 약 10~15 m 높이에 북쪽으로 수평굴을 뚫어 만든 것이다.

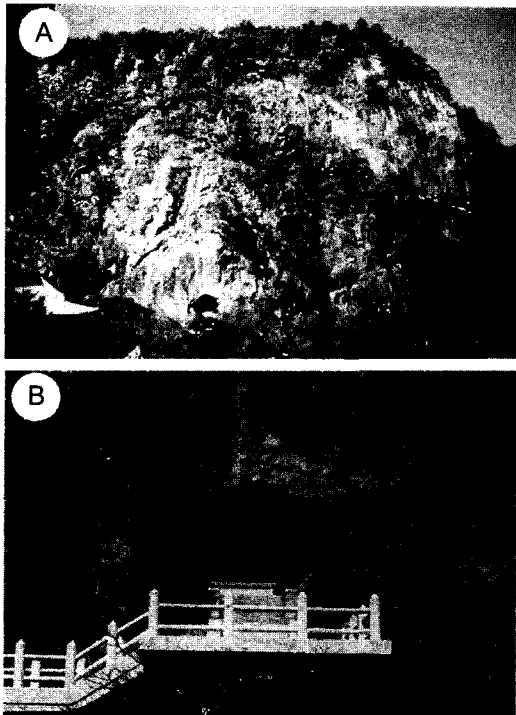


Fig. 1. (A) A view of the Mount Yangsan situated by the Buddhist Triad Cave; (B) A view of the cave with 4.25 m in vertical diameter.

모든 물질은 시간과 함께 변하는 것이 자연의 이치이다. 석조문화재도 세월과 함께 그 모습과 내부가 변할 수밖에 없다. 이러한 변화는 주위 환경과의 반응에 의해 진행된다. 석조문화재의 훼손은 근본적으로 물의 영향을 가장 많이 받으며 물이 암석과 반응함에 따라 풍화되고 용해된 물질이 결정화되면서 부피가 팽창하여 물리적 또는 화학적 풍화가 진행된다(Drever and Zobrist, 1992; 이상현, 1998). 또한 이 과정에서 공급되는 무기물과 공극은 선대류와 지의류 등의 하등식물과 고등식물의 서식처를 제공하게 되어 생물적 풍화도 뒤따르게 마련이다. 이는 석조문화재가 대부분 옥외에 노출되어 있기 때문에 자연적인 풍화와 물성변화를 일으키게 한다. 그러나 군위 삼존석굴은 석굴 내에 조성되어 있음에도 불구하고 천년 이상 내려오는 동안에 석굴 내의 누수에 의한 큰 훼손을 받고 있다.

현재 삼존석굴은 우기에 빗물에 의한 누출이 일어나도 방지되어 있고 내부는 오랫동안 풍화를 받아 손으로도 결정입자가 떨어져 나오고 하등식물로 덮여 있다. 이 석굴의 훼손 원인은 다양한 풍화이며 풍화는 근본적으로 누수에 의해서 일어난다(황상구 등, 2002). 지금 훼손 방지대책을 세우기 위해서는 누수에 의한 훼손원인을 알아내는 것이 우리의 과제이다. 누수에 의하여 석굴내부가 심하게 풍화되어 훼손되어 있다. 현재 국내에는 화강암의 풍화에 대한 연구가 여러 차례 수행된 바 있다(Lee, 1993; 김수진 등, 1994; 정기영과 이병윤, 1998; 이상현, 1999; 최석원과 이찬희, 2000).

그러므로 우리는 삼존석굴 주변에서 빗물 유입부로 예상되는 절개면에 접근하여 구성암석의 분포, 암질과 내부구조를 파악하고, 절리의 위치, 방향성과 성인 등을 정밀하게 분석함으로써 종합적으로 석굴 내의 훼손원인을 알아내고 누수경로를 추적하는데 그 목적을 두었다. 그리하여 이 연구는 앞으로 훼손방지 방안에 대한 객관성 있는 대책을 수립하여 국보 문화재를 영구히 보존하는데 이용될 것으로 본다.

2. 지질환경

군위 삼존석굴은 장축이 N60°W 방향으로 놓인 24 × 10 km 크기의 팔공산 화강암 저반 북서부에 자리잡고 있다(Fig. 2A). 연구의 주 대상은 이 석굴이 위치하는 군위군 부계면 남산리의 양산이지만 지질학적으로 발생하는 문제를 찾아내기 위해서 광역적인 접근이 필요했다. 본역의 지질은 경상분지의 중앙부에 해당하는 곳으로 백악기의 퇴적암류와 심성암류로 구성된다.

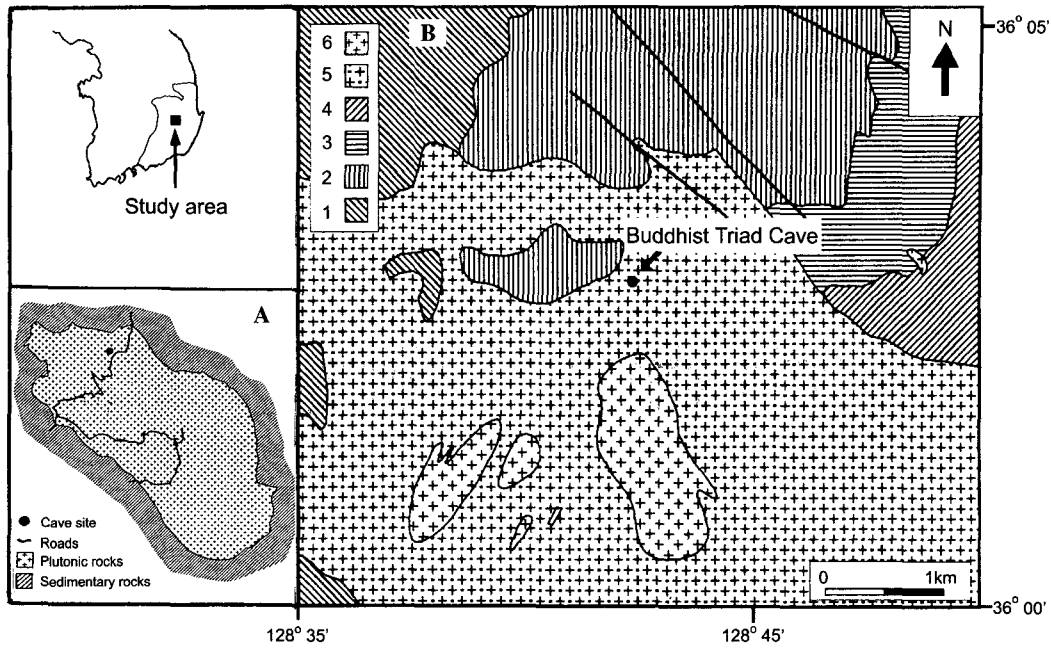


Fig. 2. Simplified geological map(A) and Generalized geological map(B) around the Buddhist Triad Cave. 1, Jinju Formation; 2, Ilgik Formation; 3, Hupyeongdong Formation; 4, Jeomgok Formation; 5, Porphyritic biotite granite; 6, Biotite granite.

2.1. 퇴적암류

본역에서 퇴적암류는 주로 본역 북부에 분포되며 암석의 색깔과 잠색 역암의 협층을 기준으로 하부로부터 진주층, 일직층, 후평동층과 점곡층 순으로 구분되고 서쪽에서 동쪽으로 가면서 얇아진다(Fig. 2B).

진주층은 북북동 주향과 10°~15°SE로 경사지며, 암회색 세일, 사암과 역암으로 구성되고 세일이 절대적으로 우세하다. 간혹 본층은 회색 석회암 회백색 응회암을 협재한다. 일직층은 본역에서 4개 층 가운데 가장 두껍게 분포되며 대체로 N10°~15°E 주향에 10°~15°SE 경사를 가진다. 본층은 암회색 내지 녹색 회색 세일, 이암, 사암, 역암 등으로 구성되며 회색의 이회암, 저색 이암과 사암이 협재되고 국부적으로 회백색 응회암이 협재된다. 저색층은 북쪽으로 갈수록 두꺼워진다. 하위의 진주층과는 최하부의 저색층에 의해 구분된다. 후평동층은 4개 층 중에 가장 얇고 대체로 NS 주향에 5°~12°E 경사를 갖는다. 본층은 주로 담홍색 내지 회백색 사암과 역암으로 구성되며 최하부에 적색 혹은 녹색의 찰트 역을 포함하는 1~2 m 두께의 잠색 역암을 협재하여 일직층과 구분된다. 점곡층은 본역 동부에 분포되고 북쪽으로 연장된다. 본층은 본역에서 N1°~25°W 주향에 10°~18°NE 경사를 갖는다. 본층은 대부분 녹색 회색 세일로 구성되고 사암이 협재된

다. 따라서 저색의 후평동층과 구분된다.

2.2. 심성암류

심성암류는 N60°W 방향으로 길쭉한 팔공산 저반(24 × 10 km)을 형성한다(Fig. 2A). 이 저반은 백악기 후기의 불국사 관입암군의 일부로서 대을도폭에서 팔공산 화강암으로 기재되었다(김봉균 등, 1981). 이 저반은 관입시에 높은 열에 의해 퇴적암류를 그 경계부로부터 약 2 km 내외의 접촉변성대를 형성한다(좌용주와 최원희, 2002). 이 저반은 같이 칼크알칼리 계열의 몬조화강암에 속하고 I형으로 화성기원이며(Hong, 1983), K-장석의 K-Ar 연대가 73 Ma이고(Kim, 1971) 흑운모의 연대가 82 Ma이며(Lee, 1987), Rb-Sr 전암 연대가 84 ± 9 Ma로 나타난다(좌용주와 최원희, 2002).

2.2.1. 암질기재

팔공산 저반은 광물조성, 색지수, 입도와 상호관계에 의해 회백색 반상 흑운모 화강암과 담홍색 화강암으로 구분된다. 특히 본 심성암체의 연변부에는 큰 퇴적암류의 포획체 혹은 현수체를 가진다. 이 퇴적암류는 조립질 반상 흑운모 화강암에 의해 관입 되고, 이 반상 흑운모 화강암은 중립질 흑운모 화강암에 의해 관입 되어 있다.

반상 흑운모 화강암은 팔공산 저반의 대부분을 차지

하며 삼존석굴을 구성하는 암상이다(Fig. 2B). 이 화강암은 풍화에 강하여 높은 산지를 이룬다. 본암은 거의 모든 곳에서 크고 작은 세립질 내포체를 가진다. 이 반상 흑운모 화강암은 신선한 면에서 회백색을 띠고 석기의 입도가 중립질 내지 조립질이며 큰 장석 결정이 반정으로 포함하는 반상조직을 나타낸다. 그러나 반정은 크기가 작은 편이기 때문에 등립상으로 보일 때도 있다. 퇴적암류와의 접촉부에 인접할수록 그 입도가 다소 줄어드는 연변상을 나타낸다. 이 암상은 야외에서 석영, K-장석, 사장석, 흑운모와 각섬석 등이 확인된다. K-장석은 담홍색을 나타내고 사장석은 유백색을 나타내기 때문에 야외에서 구별된다. 특히 이 두 장석은 내핵부에 K-장석이 존재하고 그 외곽부를 사장석이 둘러싸는 라파키비 조직을 이룬 경우도 많다(김상욱, 1976).

이 화강암은 경하에서 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 파상 누대로 과성장된 경우도 있다. K-장석은 타형으로서 사장석에 의해 둘러싸이거나 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 암맥으로 노출된다(Fig. 2B). 이 암상은 회백색 내지 담홍색을 띠고 중립질 내지 세립질이며 석영, 사장석, K-장석으로 구성되고 흑운모, 각섬석, 전기석과 자철석을 소량 함유한다. 사장석은 다른 결정보다 다소 크게 나타나서 반정을 이루는 것도 있으며, 흑운모나 각섬석이 몰려 있는 경우도 있다. 이 암상은 간혹 세립질 내포체를 함유하고 있다.

경하에서 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 점도광물로 변질되어 있다. 흑운모는 자형 내지 반자형이고 국부적으로 몰려 있다. 각섬석은 대부분 자형이고 크기가 다양하며 흑운모와 같이 나타난다. 전기석과 자철석도 미립

으로서 흔히 유색광물의 근처에 존재하는 경우가 많다.

2.2.2. 내부구조

저반의 대부분을 차지하는 반상 흑운모 화강암은 퇴적암류의 층리를 자르고 있고, 큰 포획체 혹은 현수체를 포함하고 있다(Fig. 2B). 두 암체와의 경계는 불규칙하고 퇴적암류 내의 층리는 반상 흑운모 화강암에 평행하지 않고 불규칙하게 사교하여 관입 관계를 나타낸다. 이외 퇴적암의 포획체가 반상 흑운모 화강암에서만 발견된다. 그리고 흑운모 화강암은 반상 흑운모 화강암 내에 암주상 혹은 맥상으로 관입되며, 큰 암주에서 중립질이지만 연변부로 가면서 세립질로 변화되고 암맥에서는 모두 세립질이다. 그러므로 이들 두 암상간에는 점이적 변화를 나타내는 증거가 나타나지 않고 어떤 한 암상의 암맥이 다른 암상을 절단하거나 냉각대와 같은 증거만을 나타낸다. 팔공산 심성암체에서 발견되는 내포체(enclave)의 유형은 포획체와 고철질 미립상 내포체가 있다. 포획체는 흔하지는 않지만 규모가 크며 고철질 미립상 내포체는 거의 모든 반상 흑운모 화강암에서 흔하게 발견된다. 또한 이 내포체는 심존불에서도 관찰된다.

2.3. 단열계

2.3.1. 단층

단층은 본역 북부에서 서북서 방향으로 지나는 3개가 인지된다(Fig. 2B). 이 중에서 북쪽에 있는 신령단층(원종관 등, 1980)은 규모가 가장 우세하게 발달되며 변위가 가장 크고 뚜렷하다. 이 신령단층은 N65°W 방향이고 넓은 단층 계곡을 줄기차게 형성하지만 그 폭이 넓기 때문에 본역에서 파쇄대를 인지하기가 어렵다.

두 번째 단층은 국부적으로 파쇄대가 4 m 폭과 N45°W 방향으로 형성되어 있으며 암회색 세일층과 회백색 응회암층을 서로 변위 시키고 그 면을 따라 방해석이 10여cm 두께로 충전되어 있다. 세 번째 단층은 저반의 암지가 북서 방향으로 노출되는 곳에서 인지되며, 그 파쇄대가 35 cm 폭과 N55°W, 77°SW 방향으로 형성되어 있고 합전기석 석영맥을 농집하는 N30°W, 77°NE 방향의 절리를 자르고 있다. 이들은 모두 퇴적층 지대를 지나기 때문에 그 변위가 뚜렷하게 인지된다.

또한 저반 내에서도 가산산성 입구에서 N60°W 방향의 단층이 인지되며 그 파쇄대 폭은 10 cm 내외이고 그 면을 따라 얇은 석영맥이 충전되어 있다. 이 단층은 기준층이 없기 때문에 변위를 인지하기는 어렵다.

2.3.2. 절리

본역에서 절리는 냉각절리, 층상절리, 전단절리 등이

다양한 방향으로 발달되어 있다. 냉각절리는 심성암체가 냉각에 따라 수축될 때 형성된 절리로서 후기 마그마 물질에 의한 작은 압력으로 채워져 있다. 층상절리는 심부에 존재하던 압제가 침식과 삭박에 의해 높은 압력이 줄어들면서 생겨나는 절리로서 500 m 이상의 고도에서 흔하게 발견된다. 그러므로 이 두 절리는 연구 대상에서 제외한다.

전단절리는 광역적으로 지각에 작용하는 전단운동에 수반되어 나타난다. 따라서 전단절리는 비교적 광역적으로 형성되어 있고 주위의 단층과도 연관되어 있다. 이 절리는 일반적으로 절리 생성시의 응력장과 깊은 관계가 있으며 때문에 같은 지역에서 몇 개의 일정한 패턴을 나타낸다. 본역에서 절리들을 분석해본 결과 4개의 절리조(joint set)로 구분된다. 즉 가장 높은 밀도를 갖는 절리조를 세트 1(N30°~45°E)이라 하고, 그 다음 밀도를 갖는 절리조를 차례로 세트 2(N15°~30°W), 세트 3(N45°~70°W), 세트 4(N45°~75°E)로 구분한다(Fig. 3A). 절리의 우세방향을 더욱 쉽게 알기 위하여 압축별로 나누어 살펴보면 마찬가지로 위의 4개 절리조가 더 뚜렷해진다(Fig. 3B, C).

절리조 세트 1과 2는 서로 공액관계에 있고 세트 3과 4도 공액관계에 있어 각각 독립된 절리계(joint system)를 형성한다. 세트 3은 신령단층에 평행한 단층계와 평행관계에 있으므로 동시에 세트 4는 이 단층계와 공액관계에 있다. 그러므로 전자의 공액관계에서 응력장의 주응력은 대체로 남북방향(N05°E)이고 후자의 공액관계에서 주응력은 동서방향으로 작용했던 것으로 분석된다. 이들은 Hwang(1992)이 경상분지에서 고응력장 복원 및 구조운동사를 밝힌 것 중에서 남북방향의 압축응력과 동서방향의 압축응력에 잘 부합된다. 신령단층은 압축응력축이 동서방향이며(이병주와 황재하, 1997) 백악기 말에서 제3기초에 걸친 압축응력에 좌수향으로 변위되었다(Hwang, 1992).

절리조 중에 세트 1은 삼존석굴 북동쪽 250 m 지점의 개천 바닥 반상 흑운모 화강암에서 소단층으로

발견된다. 이 소단층은 N30°W, 85°SW 방향이고 2~4 cm 폭의 파쇄대를 가진다. 세트 4에 속하는 보다 작은 소단층은 N75°E, 55°SE 방향이고 녹색 녹니석과 녹염석을 농집하는 폭 1~2 cm 파쇄대를 가지며, N70°E, 83°NW 방향의 절리와 거의 평행하다(Fig. 4A). 이 두 소단층 중 전자는 신령단층과 20°~30°의 각도차를 가지는데 이런 양상을 주 단층과의 2차단열로 생각해볼 수 있겠으나 신령단층이 좌수향 주향이동했다는 것과 상치된다. 따라서 이 단층은 신령단층계와는 별개의 단층으로 간주돼야만 한다. 후자 소단층은 우수향 주향이동 변위를 가지고 신령단층과 45°~55°의 각도차를 가지기 때문에 좌수향 주향이동의 신령단층과 공액단층으로 해석된다.

퇴적암에서도 세트 3(N65°W, 61°SW)과 세트 4(N70°E, 68°SE)가 세트 1(N23°E, 67°SE)을 절단하고 있다(Fig. 4B). 또한 N70°W, 78°SW 절리가 이 모든 세트에 의해 절단되고 교란되어 있는데, 이는 아마도 심성암류가 퇴적암류에 관입될 때 심성암류 주변에 동심원상으로 형성된 절리인 것으로 생각된다. 그러므로 심성암류의 관입시에 형성된 절리를 제외하면 절리조 중에 세트 1이 가장 먼저 형성되었으며 세트 4 혹은

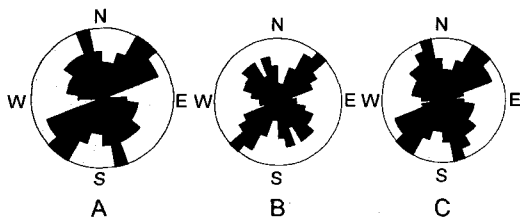


Fig. 3. Rose diagrams of joints from all the rocks(A), sedimentary rocks(B) and plutonic rocks(C).

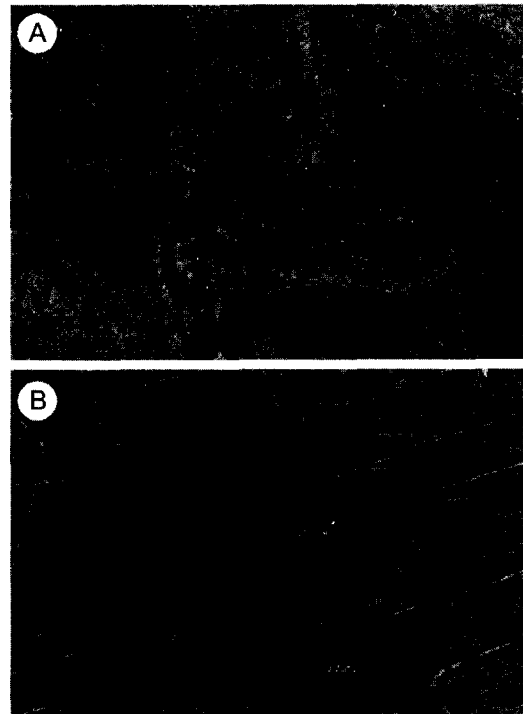


Fig. 4. (A) NNE minor fault cutting another NEE one; (B) NNE joint set cut by NWW and NEE joint sets.

세트 3보다 선기인 것을 알 수 있다.

삼존석굴 주변에서 나타나는 절리조는 N65°~70°E, 75°~85°SE와 N50°~70°W, 64°~70°SW 등의 두 세트가 규칙적으로 나타나며, 각각 세트 4와 세트 3에 해당된다. 이 두 절리조는 서로 공액관계에 있어 하나의 절리계를 이룬다. 두 절리조 중에서 세트 4가 훨씬 뚜렷하게 나타나고 절리의 간격이 좁고 연장성이 좋다. 그러므로 이 절리계는 경상분지의 고응력장에 결부해보면 백악기 말에서 제삼기 초에 걸쳐 경상분지에 지배했던 동서방향의 압축응력에 신령단층과 함께 형성된 것으로 해석된다.

3. 훼손원인

삼존석굴의 훼손과 그 원인들을 알아보고 주원인으로서는 절리의 발달상태를 철저히 조사했다. 그리고 누수의 경로를 정확히 알기 위해서는, 예상 절리를 따라 인위적 훼손없는 육안관찰과 전기비저항 검증을 실시하였다.

3.1. 석굴내부의 훼손

석굴은 화강암 절벽의 해발 약 280 m 위치에 수직 직경 4.25 m, 동서직경 4.20 m, 남북심도 4.3 m로 뚫려 있다(Fig. 1B). 입구는 원형에 가깝고 내부 평면은 방형이며 천장은 도음형을 이루었다. 석굴 내의 벽면에는 아무런 조식이 없고 도음형의 천장까지 높이가 약 4.25 m에 달하며 벽면 입구에는 천공의 흔적이 남아 있다. 석굴과 삼존은 모두 암회색 내포체를 함유하는 반상 흑운모 화강암으로 되어있지만 풍화도가 서로 크게 다르다. 삼존은 석굴 주위에서 풍화가 되지 않은 화강암으로 조각하여 반입된 것이다. 이 삼존은 모두 벽면에 붙여서 독립된 삼존석상으로 배치되고 있다. 그 중 본존불만은 방형대좌에 안치됨과 동시에 그 후단이 벽면에 마련된 턱 위에 얹혀져 있다.

3.1.1. 풍화와 훼손

삼존은 풍화가 매우 미미하지만 석굴은 천장과 내벽이 미생물서식과 백색피막으로 얼룩얼룩하게 착색되고 광물의 차별 풍화로 울룩불룩하게 요철되어 심하게 훼손되어 있으며 이 현상을 크고 작은 절리를 따라 심하게 나타난다.

(1) 미생물일록

미생물일록은 석굴 북쪽과 서쪽 내벽과 입구 천장에서 심하다. 천장에서는 절리 근처에서 심하고 벽면에서는 절리 아래로 크게 나타난다. 이는 조류, 이끼류(선태

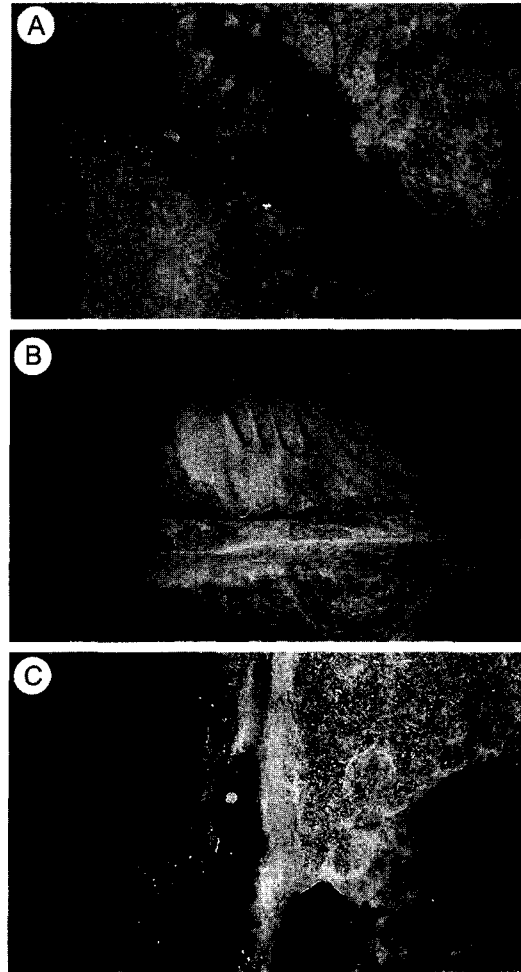


Fig. 5. Serious deteriorations in the Buddhist Triad Cave (A) Extentional joint, blackish algae, yellowish green mosses and blueish gray lichen on the back wall, and two green ferns in the joint; (B) Brown rusts, and scaling and mondmilch exfoliations showing some deterioration of carving lines on the side of a block below the Buddha; (C) White calcic film and blackish algae and mosses on the western wall.

류)와 지의류 등의 하등식물이 미관을 해치는 것은 물론이거니와 암석에 고착되어 기생하면서 생물적 풍화를 일으킨다. 우기에 절리를 통해 누출되는 수분이 아래로 흐를 때 조류와 이끼류는 검푸른색, 검붉은색으로 서식하여 물의 흐름자국을 나타내고(Fig. 5A) 건기에 성장을 멈추어 검은색으로 말라서 결국 딱지모양으로 조각조각 떨어지며, 건기에 음지에서 누수로 암석에 포화된 습기에 의해 이끼류가 연녹색으로 서식한다. 그리고 천장과 북쪽 내벽 상부의 절리가 없는 곳과 삼존

의 뒷면 부분은 청회색 지의류가 드문드문 암석에 고착되어 기생한다(Fig. 5A, B). 그러므로 이 하등식물의 서식은 음지에서 습기에 의해 일어남을 알 수 있다. 이 하등식물의 포자근과 균사는 암석내부의 공극과 결정 경계부를 침투하여 생물적 풍화를 일으킨다(최석원과 이찬희, 2000; 최석원 등, 2001; 이찬희 등, 2001). 이런 곳은 모두 절리가 가까이 있고 연약해진 결정이 떨어져 나오며 백색피막도 결부되거나 갈색녹이 형성되어 있다(Fig. 5C). 따라서 암석의 화학적 풍화와도 연관되어 있음을 암시한다.

(2) 백색피막 및 갈색녹

백색피막은 마찬가지로 석굴의 서쪽 벽면과 입구 천장에서 관찰되며 벽면에 회백색 방해석으로 피막을 형성한 것이다. 이 피막은 절리틈이 1~2 mm되는 곳에서 가장 심하며 벽면에서는 흔히 절리 아래로 수직하게 선상 자국을 나타내고(Fig. 5A, C) 천장에서는 절리와 균열 주위에만 번진 양상을 나타낸다. 이는 수분이 아주 느리게 스며 나와 아래로 흘렀던 곳이나 번진 곳에서 Ca 이온이 대기와 반응하여 회백색 방해석이 효과적으로 침착된 것이다. 왜냐하면 북쪽 벽면의 큰 인장절리나 매우 작은 균열에는 거의 백색피막이 관찰되지 않기 때문이다. 이 백색피막은 암석의 화학적 풍화에 의해 선택적으로 용해된 물질이 공기와 접하면서 물의 증발과 동시에 방해석이 침착된 것이다. 이들의 양이온은 석조물 자체의 조암광물로부터 기인하는 반면에 음이온은 대기, 산성비와 같은 외부의 영향에 의해 유래된다. 이때 염이 결정화할 때 결정압이 130 kg/cm²까지 올라가 석조물을 압박하여 복합적으로 기계적 풍화를 일으키는 것으로 알려져 있다.

또한 석굴 하부, 좌대와 양쪽 보살상의 다리 부분은 그 표면이 다갈색 내지 적갈색 철질녹을 형성하고(Fig. 5B) 움푹한 곳에는 적갈색 토양으로 채워져 있다. 암석표면의 갈색녹은 흑운모 풍화로 철성분이 유리된 것이거나(Lee and Parsons, 1999) 장석 등이 풍화되어 고령토로 될 때 그 속의 미량의 철성분이 유리되어 산소나 물과 반응하여 산화철 또는 수산화철로 침착된 것이다(이상현, 1999).

(3) 요철현상과 변색

벽면과 천장에는 요철현상이 심하고 절리의 모서리는 둥글게 마모되어 있다(Fig. 5B). 또한 흑색 광물은 흔히 암녹색과 적갈색으로 변색되어 있다. 요철 부분에서 석영은 튀어나와 있고 장석들이 불규칙하게 들어가 있다. 장석은 수화반응과 가수분해에 의해 견운모나 고령석으로 변해서 쉽게 침식될 수 있는 광물적 풍

화를 받는다. 반면에 석영은 어느 풍화도 쉽게 받을 수 없을 정도로 강하다. 이러한 광물적 풍화의 차이로 벽면은 입상분해되어 요철현상을 나타내고 모서리는 둥글게 마모되는 것으로 생각된다. 또한 흑운모는 결정의 경계와 벽개를 따라 쉽게 가수분해와 산화작용에 의해 2차적으로 녹색의 녹니석과 적갈색의 수산화철로 변하는 광물적 풍화를 받는다(Nagano and Nakashima, 1989). 이차적 광물은 습도와 온도에 따라 특정한 양의 물분자를 함유하여 다양한 수산화물질로 존재하는데 이때 수화압이 300 kg/cm²까지 생겨 기계적 풍화도 가중시켜 층상 혹은 딱지상 박리를 일으킨다(Fig. 5B). 이러한 광물적 풍화는 대부분 습기에 의해 촉발된다.

3.1.2. 석굴내부의 절리

삼존석굴의 훼손은 풍화에 의한 것이며 이의 원인은 수분이다. 석굴은 치밀한 반상 흑운모 화강암으로 이루어져 있기 때문에 석굴 내의 수분은 절리를 통한 누수현상일 것으로 예상된다. 석굴내부에서 절리는 규칙성이 없지만 안쪽 벽면에 가장 뚜렷하다(Fig. 5A). 이 절리는 면이 불규칙하지만 대체로 N60°~80°W, 40°~60°SW이고 1 cm 내외로 벌어져 있는 인장절리에 속하며 주변에서 흔히 관찰되는 규칙성 있는 전단절리와는 전혀 다르다. 이 절리 주변에는 미생물서식이 심한데 이는 아마도 암반 자체에서 약간의 습기가 항상 유지되기 때문이다. 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 스미는 따름이다. 그러나 6월 18~19일 약 100 mm 비에는 물기가 비치고 방울로 떨어졌으나 흐름 현상까지는 가지 않았다.

석굴 입구 근처에는 미세한 절리와 균열이 무수하게 발달되어 있는데 이 절리는 대체로 절벽의 암벽에 거의 평행하면서 석굴 내부로 완만하게 경사지며 균열은 이에 사교하고 횡단하지 않는다. 그래서 이 절리와 균열들은 누수경로로서 길이가 매우 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 젖어있었다. 6월 18~19일 양일간의 93 mm 비에는 20일 천장에서 물방울이 똑똑 떨어졌고 21일에는 20분에 한방울씩 떨어졌으며 22일에는 떨어지지 않았다.

3.2. 석굴외부의 절리

석굴내부의 누수현상은 치밀한 화강암으로 이루어져 있기 때문에 절리가 절대적인 원인이 된다. 그래서 석

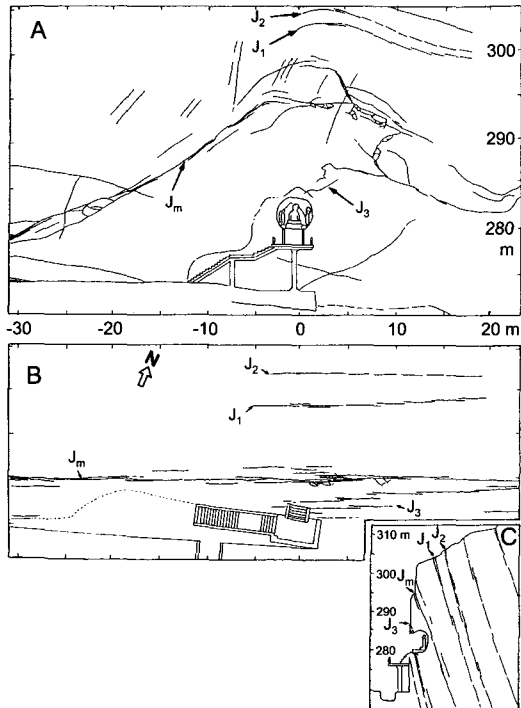


Fig. 6. A sketch of joints on the vertical wall of the porphyritic biotite granite(A), horizontal section(B) and on vertical section(C) showing locations of the J_m , J_1 , J_2 and J_3 joint zones.

굴외부에서 절리 발달상태를 철저히 조사하여 그 규칙성을 알아내고 그 중에서 석굴 내부로 연결되는 절리를 찾는 것이 문제해결의 핵심이다.

석굴 주위에는 전술한 바와 같이 두 개의 절리조가 규칙적으로 발달되어 있다. 그 중에서 가장 뚜렷한 것이 $N65^{\circ}\sim 70^{\circ}E$, $75^{\circ}\sim 85^{\circ}SE$ 방향의 북동동 절리조(세트 4)이고, 다른 한 절리조는 $N50^{\circ}\sim 70^{\circ}W$, $64^{\circ}\sim 70^{\circ}SW$ 방향의 북서서 절리조(세트 3)이다. 이 두 절리조는 서로 공액관계에 있어 하나의 절리계를 이룬다. 이 절리들은 모두 $64^{\circ}\sim 85^{\circ}$ 범위로 급하게 경사 되기 때문에 북동동 절리조의 주향에 거의 평행하게 절개된 암벽에서는 불규칙하게 나타나며(Fig. 6A) 하지만 평면도에서는 매우 규칙적으로 나타난다(Fig. 6B).

3.2.1. 북동동 절리조

삼존석굴 주위에서는 두 절리조 중 세트 4에 해당되는 북동동 절리조가 훨씬 뚜렷하게 나타나고 절리의 간격이 좁고 연장성이 좋다. 이 절리조는 석굴 위에서 3개 절리대(joint zone)를 형성하고 석굴 아래에서 1개 절리대가 관찰된다. 이 4개 절리대 중에서 가장 뚜렷하고 연장성이 좋은 것을 주절리대 J_m 이라 하고, 이로

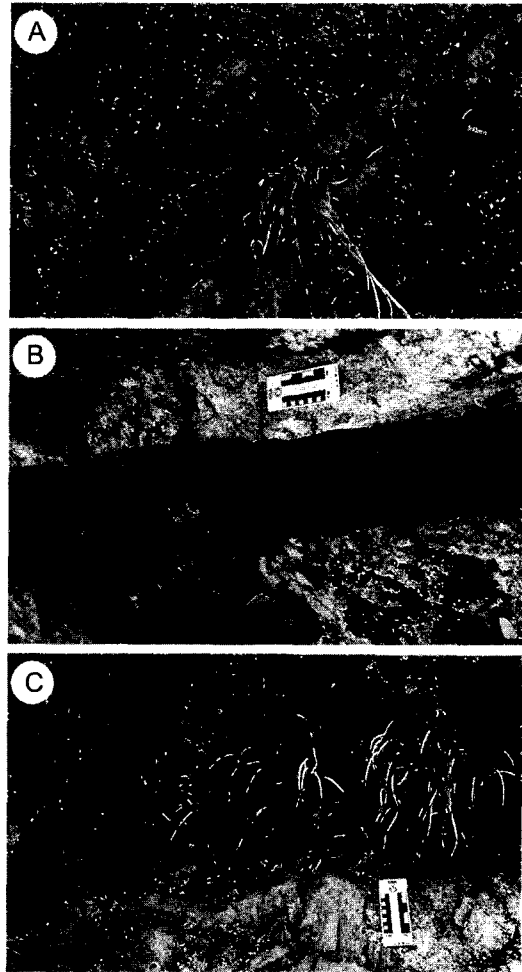


Fig. 7. (A) Typical joint apertures in J_m joint zone, and rock surfaces covered with lichens and mosses; (B) Joint apertures, showing 30 cm in width, near a big pine tree upward 10 m from the cave top; (C) Plants growing along a joint filled with soils, and upper rock surface covered with lichens and mosses.

부터 북쪽으로 가면서 차례로 J_1 , J_2 로 표기하고 J_m 절리대 남쪽에 있는 것을 J_3 로 표기한다. J_m 과 J_1 의 간격은 약 8 m이고 J_1 과 J_2 의 간격은 약 3~4 m이며, J_m 과 J_3 의 간격은 약 2~4 m이다(Fig. 6B, C). 그리고 석굴 중앙부에서 이들 절리대에 수선을 그어 만나는 지점을 0으로 하고 이로부터 수평거리(D)를 서쪽으로는 -m로 표시하고 동쪽으로 +m로 표시하여 기재하며, 동시에 그 지점의 해발고도(H)를 표시한다.

(1) 주절리대

주절리대 J_m 은 D: -31 m에서 D: +27 m까지의 범위에 걸쳐 정밀조사를 했다. 이 절리조는 전체적으로

2~5개 절리가 한데 묶여져 무리를 이룬다.

절리의 틈 : 주절리대 내에서 각 절리들간의 간격은 대체로 15~80 cm 범위이며 최소 1 cm인 경우도 있고 최대 120 cm되는 경우도 있다. 각 절리에서 벌어진 절리틈은 대개 2~25 mm 범위이며(Fig. 7A) 최대 40 mm되는 곳도 있다. 한편 석굴 상위의 해발고도 H: 294.5 m 지점의 큰 소나무가 있는 곳에서는 최대 30~40 cm까지 벌어져 있고(Fig. 7B) 여기서 동서로 가면서 2 cm로 좁아지고 아래로 가면서도 20 cm 정도로 약간 좁아진다. 이는 소나무 뿌리의 성장에 따라 기존 전단절리가 벌어진 것이다.

절리 충전물 : 절리틈은 그대로 비워있는 부분도 있으며(Fig. 7A), 대부분 토양으로 채워져 있고 동시에 주위에서 떨어진 암석조각으로 덮여 있는 경우도 있다(Fig. 7B). 이러한 토양과 암석조각은 어디서 이동되어 온 것이 아니라 풍화작용에 의해 자체 내에서 생성된 것들이다. 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. 빈 틈은 빗물이 흘러들어 빠르게 아래로 이동될 것이며 건기에는 이내 말라서 공기가 쉽게 유통할 것이다. 그러나 이 빈 틈도 아래로 내려가면서 계속 비어있지는 않고 아마도 미세한 토양이나 방해석으로 막혀있을 수도 있다. 토양충진 틈은 빗물이 오랫동안 토양에 스며있게 하고 또한 우기에 밑으로 서서히 스며든 빗물이 장기간에 걸쳐 아래로 혹은 좌우로 이동되게 한다. 방해석 세맥은 자연적으로 빗물의 이동을 차단시킨다. 암석 중에서 방해석 물질이 용해되어 아랫부분으로 스며들어 벽면에 침착됨으로써 흰 얼룩을 지게 할 수도 있다. 이러한 모든 현상은 풍화의 주요현상에 속하고 스며드는 빗물과 식생은 풍화를 더욱 촉진시키는 요소이다.

절리의 식생 : 토양충진 틈은 모두 야생풀이 줄지어 자생하고 있고(Fig. 7C) 특히 소나무, 참나무, 뽕나무, 호도나무 등 고등식물이 성장하는 곳도 있다. 특히 절리의 밀도가 높거나 토양이 풍부한 곳에서는 이끼류가 무수하게 자생함으로써 토양과 암석조각의 유실을 방지하기도 한다(Fig. 7B). 한편 절벽에는 대부분 청회색 지의류가 고착되어 기생하고 있다(Fig. 7A, C). 그러나 식물 뿌리의 성장점에는 극산성 분비물을 발생시켜 암석을 부식시키는 강력한 화학적 풍화작용을 촉진시킨다(Lee and Parsons, 1999). 이들 식물은 대부분 건조지대에서 성장할 수 있는 것들이다.

소나무는 가파른 절벽에서 흔하게 볼 수 있듯이 절벽에서도 뿌리를 내릴 수 있는 틈이 있으면 상당한 크기로 성장할 수 있다. 즉 수고 2 m인 소나무는 직경이 최고 22 cm나 되고 뿌리 바로 위에서 양파모양으로 벌어져 있으며, 여기서 뺏어나온 뿌리가 1 cm의 절리를 4 cm로 벌리고 있다. 이 뿌리의 힘에 의하여 기둥뿌리의 주변은 방사상으로 균열이 발생되었다. 이런 현상은 식물뿌리의 생장이 기존 절리의 틈을 확대시키고 새로운 균열을 만든다는 좋은 증거가 된다.

석굴 상위 294.5 m 고도에서의 큰 소나무도 기존 절리를 크게 확대시킨 것으로 판단된다. 이 소나무는 수고가 약 5 m이고 밑둥치 직경이 최고 30 cm나 되기 때문에 기존 절리의 틈을 더 크게 확대시킬 수 있다. 왜냐하면 이 절리는 틈이 2 cm이던 것이 최대 40 cm로 확대되어 있고(Fig. 7B) 이곳으로부터 떨어지면서 좁아지기 때문이다. 또한 주위에 여러 갈래의 절리와 균열과 함께 파손된 큰 암석덩어리들이 많이 놓여 있기 때문이다.

암반의 토폴링 : J_m 절리대는 절리의 경사가 북쪽으로 향하면서 그 면이 암벽에 거의 평행하게 놓이고 해발 275 m의 남쪽 지면보다 높은 곳에서 교차한다. 또한 이 절리대 내에서 각 절리들간의 간격은 전술한 바와 같이 15~120 cm이므로 암반의 두께는 15 cm에서 최대 120 cm가 된다. 이때 공교롭게도 절리대의 남측 하반이 절리면을 경계로 떨어져 나가 현재 절리면에 의한 암벽을 형성한 부분이 여러 곳 있다. 그러므로 이런 곳에서 암벽의 경사가 북쪽으로 향하여 역경사 암벽을 이루고 있기 때문에 절리대 내의 암반은 중력에 의해 항상 아래로 힘을 받게 된다. 이때 암반이 남쪽으로 쓰러지면서 회전하는 토폴링(toppling)에 의해 와해형 붕괴를 일으킨다. 즉 암반이 토폴링에 의해 북측의 절리면을 따라 떨어지고 암반 하부가 절리의 경사와 반대로 거의 EW, 50°~60°S 방향의 불규칙한 단열면을 형성하면서 떨어지게 된다.

이러한 예는 삼촌석굴 내에 형성된 N75°W, 50°SE 방향의 인장절리가 이에 속한다. 이 절리는 석굴 북쪽의 암반이 294.5 m 고도의 큰 소나무가 J_m 절리대의 틈을 최고 40 cm로 벌림으로서(Fig. 7B) 마치 토폴링과 같은 효과로 형성된 단열이다. 이러한 효과는 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 생각된다.

(2) J_1 과 J_2 절리대

J_1 절리대는 주절리대 J_m 으로부터 북쪽으로 약 8 m 위치에 있고 J_2 절리대는 J_1 으로부터 약 3~4 m 위치에 있다(Fig. 6B). 이 두 절리대는 암벽을 이루지 않고 약 20~40°의 산사면을 이루기 때문에 올라가 관찰할 수 있다.

J_1 절리대는 2개의 절리가 15 m 간격으로 N20°E, 80°NW 방향으로 달리고 있다. 또한 이의 동쪽에서 이와 같은 방향으로 4~6 m 높이의 참나무 10여 개가 줄지어있다. 절리의 틈은 남쪽의 것이 3 mm 내외이고 북쪽의 것이 10~15 mm이며 참나무 뿌리가 절리의 틈을 따라 성장되어 있다. 이 절리대는 동쪽으로 더 강하게 발달되지만 토양과 나무이끼로 덮여 있다. 그러나 자생 나무들이 왼쪽으로 휘면서 배열하기 때문에 이 절리대가 좌향 안행상 배치를 나타내는 것으로 보인다(Fig. 6B).

J_2 절리대는 N70°E, 85°NW 방향의 절리면에 의한 단애로 나타난다. 이의 동쪽 방향으로 큰 참나무가 다소 불규칙하지만 줄지어서 있다. 그리고 이 절리벽을 제외하고 거의 모두 토양으로 덮이고 나무이끼로 덮여 있다.

(3) J_3 절리대

J_3 절리대는 서쪽에서는 줄기차게 발달되지만 동쪽으로 오면서 약해지고 석굴입구 부분에서 좌향 안행상 배치를 한다(Fig. 6B). 그래서 J_m 과 J_3 의 절리간격은 서쪽에서 거의 4 m 이지만 동쪽으로 가면서 3 m 내지 2 m로 좁아지고 결국 1 m 정도로 더 좁아진다. 그러나 J_3 절리대 내에서 절리간격은 10~20 cm 범위이다(Fig. 8A). 이 절리대는 석굴 동쪽에서 계단상 절벽을 형성하기 때문에 토양이 형성되어 있어 관목, 소나무, 호두나무 등이 몇 군데에 성장하고 지의류와 나무이끼 등 식생도 서식하고 있다. 이 절리는 석굴입구 바로 위로 연결되어 있으며 절리틈이 4 cm 이내이고 거의 비어 있다(Fig. 8B). 석굴 위에서 한 절리는 J_3 절리대에 사교하고 틈이 2~5 cm로 벌어져 있다. 이 절리들은 주위에 불규칙하게 많은 균열이 형성되어 있으며 이들의 틈이 대부분 수mm로 좁다(Fig. 8C).

석굴 바로 위에 있는 절리와 균열들은 석굴입구 천장으로 연장되어 있다. 그래서 이들 절리와 균열들은 작은 비에도 빗물이 쉽게 석굴내부로 스며든다. 특히 석굴 서쪽 경계부의 위쪽은 암벽이 수직이 아니고 경사를 이루기 때문에 10 mm 이내의 작은 비에도 빗물이 쉽게 스며든다. 그러나 반대편 석굴 동쪽 경계부의 위쪽은 암벽이 역경사를 이루어 처마와 같은 역할을

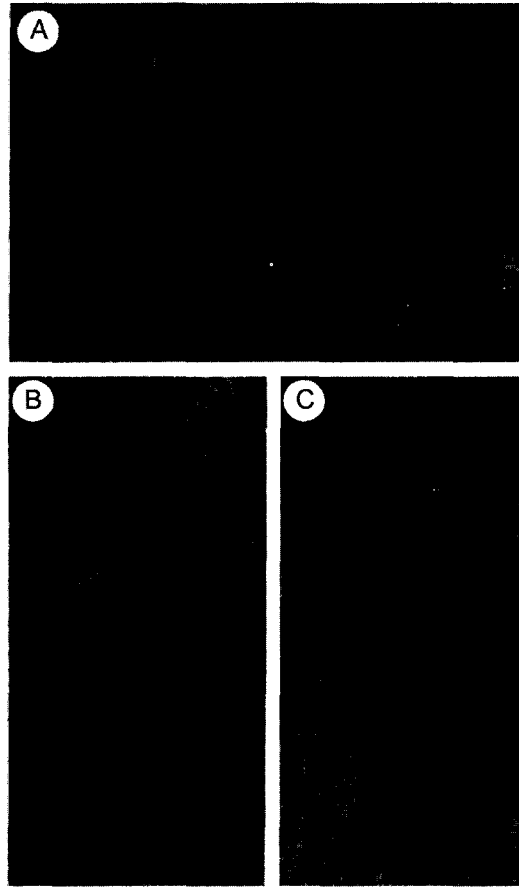


Fig. 8. Joint spacings(A), apertures(B), and small joints and cracks(C) in the J_3 joint zone of the NEE set.

하기 때문에 작은 비에는 직접 맞지 않아 스며든 빗물이 석굴내부까지 미치지 못한다. 하지만 이 동쪽 경계부는 절리와 균열이 더 많고 틈이 더 넓기 때문에 큰 비에는 더 많은 빗물이 스며들게 된다. 따라서 이 부분의 절리들은 모두 적은 강우에도 민감하게 좌우되기 때문에 문화재를 훼손하는데 큰 영향을 미치는 것으로 보인다.

3.2.2. 북서서 절리조

북서서 절리조는 북동동 절리조와 공액관계를 이루지만 본역에서 후자보다 산출빈도가 매우 낮기 때문에 절벽의 두 군데에서만 관찰된다(Fig. 6A).

하나는 석굴 동쪽 상위를 지나는 절리대이며, 이는 5 cm 간격으로 두개 절리가 N65°W, 65°SW 방향으로 달리고 있다. 절리틈은 10 mm 내외이고 남쪽의 하반이 떨어져 나갔기 때문에 토양으로 충전되지 않고 그대로 비워 있다. 이 절리대는 연속성이 좋지 않지만

북쪽으로 J_m 절리대와 사각으로 교차하고 남쪽으로 삼존석굴 근처로 지난다(Fig. 6A). 따라서 이 교차선은 하방으로 연속되어 빗물의 통로 역할을 할 것으로 생각된다. 그러나 이 절리는 하반이 떨어져 나가 역경사되어 있기 때문에 비가 직접 이 절리로 스며들지는 않을 것으로 생각된다.

다른 하나는 석굴 서쪽 상위에서 3개 절리들로 구성된다. 이 세 절리들은 약 1 m의 간격을 두고 N60°W, 67°SW 방향으로 달린다. 이 절리들 중에서 가장 북동쪽에 있는 절리면을 따라 상반이 떨어져 나갔기 때문에 매끈한 암벽을 이루고 있다. 이 절리조는 아래로 갈수록 석굴 위치와 멀어지기 때문에 석굴 내의 누수에는 아무 영향을 미치지 않는다.

3.3. 비저항 검증

3.3.1. 탐사방법

삼존석굴 주변은 북동동 방향과 북서서 방향의 2 절리조가 하나의 절리계를 이루면서 발달되어 있다. 이 중에서 북동동 절리조는 석굴내부의 누수에 직·간접적으로 영향을 주고 있다. 그런데 이 절리조의 J_m , J_1 , J_2 , J_3 등 3절리대 중에서 J_m 과 J_3 가 가장 큰 영향을 미친다는 것은 앞에서 설명되었다. 왜냐하면 J_1 과 J_2 절리대는 석굴에서 멀리 떨어져있고 북쪽으로 경사지기 때문이다. J_m 과 J_3 절리대 중에서 어느 것이 어느 부위에서 영향을 미치는지를 알아내기 위해서 물리적인 방법을 강구하였다. 방법 중에서 색수 살포 등이 있겠으나 이는 문화재 보존을 위한 방법으로는 적당하지 않기 때문에 배제되었다. 왜냐하면 불감이 토양에 함유되어 있다가 오랫동안에 걸쳐 서서히 빠져 나옴으로써 오히려 문화재 보호는커녕 문화재를 더 훼손할 수 있기 때문이다. 그래서 문화재를 훼손하지 않고 물의 이동을 알아낼 수 있는 방법으로 전기비저항 탐사법을 적용하였다.

이 비저항탐사는 약간이라도 함수가 되어 있는 물질이라야 가능하기 때문에 토양이 있는 절리대에만 적용되었다. 토양이 없는 곳 즉 석굴내부의 절리에서 측정을 시도해보았지만 측정이 불가능했다. 또한 J_3 절리대도 측정이 불가능하기 때문에 제외되었다. 이때 전기비저항 배열법은 웬너 배열을 이용하였으며, 측정 가능한 절리에 못을 박고 전극을 설치·고정하여 강우 전후를 고려하여 절리의 전기 비저항탐사를 적용하여 비저항치를 측정하였다. 전극 거리는 절리간격을 고려하여 1 m로 하였다.

3.3.2. 비저항의 변화와 해석

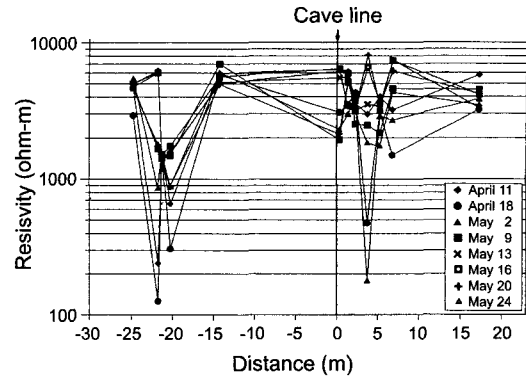


Fig. 9. Variation diagrams of electric resistances in J_m joint zone.

얻어진 각 절리대의 비저항치는 위치와 일자에 따라 변화도를 작성하였다. 한편 강우량은 2001년 4월 11일 10 mm, 5월 7~8일 25 mm, 5월 21~22일 24 mm, 5월 30~31일 12 mm를 나타낸다.

먼저 J_m 절리대에서 비저항변화는 전체적으로 동쪽으로 갈수록 높아진다. 하지만 더 자세히 살펴보면 아래로 낮은 곡을 이루다가 다시 상승하여 거의 평행한 형태를 나타낸다(Fig. 9). 전체적인 동향 상승은 아마도 절리대의 고도를 지시하는 것으로 해석된다. 왜냐하면 고도가 높을수록 암석이나 토양은 함수율이 떨어지므로 비저항치가 높게 나타나기 때문이다. 서쪽에서 낮은 곡을 형성하는 것은 고도가 낮을 뿐만 아니라 개울과 인접해 있기 때문에 다른 부분보다 암석의 함수율이 높은 것을 암시한다.

그리고 낮은 곡을 이루는 서쪽 지역과 석굴 직상위의 동쪽 지역은 측정일자에 따라 매우 큰 변화를 나타낸다(Fig. 9). 이러한 변화는 강우량 변화와 대조해보면 강우에 따라 큰 변동이 있었음을 지시한다. 즉 비온 뒤에 측정한 날은 비저항치가 이 지역에서 급격히 떨어진다. 그렇다면 또 하나의 문제는 왜 측정 일자마다 지역에 따라 비저항의 변화폭이 매우 다르겠는가이다. 동쪽 지역에서는 절리틈이 보다 넓고 많은 토양이 채워져 있어서 비온 뒤에 스며든 빗물이 비저항치를 낮게 했기 때문에 강우량에 따라 변화폭이 달라질 것이다. 절리틈이 토양으로 채워져 있지 않고 비어 있다면 빗물은 이미 밑으로 새나가고 없어질 것이다. 그러므로 절리틈에 채워진 토양은 적은 비에서는 함수만 하고 아래로 흘러보내지 않은 역할을 할 것이고 큰비에서는 포화되어 더 오랫동안 물을 아래로 흘러보내는 역할을 할 것이다. 그러나 조사기간에는 불행히도 큰

비가 오지 않아 후자에 대한 검증을 할 수 없었다. 따라서 석굴 직상위의 J_m 절리대는 누수의 원인을 제공하는 빗물의 주요 유입부인 것으로 판단된다.

4. 토 의

석조물은 견고하고 불변성을 지닌 물질 같지만 수백 년 이상 외부에 노출되어 있다면 기후에 의한 풍화를 받지 않을 수 없고 훼손된다는 것은 어쩔 수 없는 일이다. 그러나 석굴내 삼존의 예를 보면 알 수 있는 것처럼 천이백년을 내려오는 동안 거의 훼손되지 않는 경우도 있다. 이것은 석재 중에 풍화를 방해하는 항풍화성 암질이 존재하기 때문이 아니며 환경조건이 풍화를 억제하기 때문이다. 그러므로 우리는 풍화를 일으키는 주변환경인자를 생각해야만 한다.

석조물의 풍화를 일으키는 주변환경인자는 수분, 산소, 온도의 3가지를 들 수 있겠다. 생물적 풍화는 위의 3 인자 중에 어느 하나라도 결핍되면 식물의 생육을 정지시켜 일어날 수 없다. 화학적 및 광물적 풍화는 주로 수분과 산소가 많아짐으로서 일어난다. 기계적 풍화는 주로 일교차, 연교차 등의 온도 차이와 동절기의 결빙에 의해 발생한다. 그러나 석조물에서 풍화를 방지하기 위해서는 3가지 환경인자 중에 수분 환경의 조절이 용이하고 효과도 크다. 왜냐하면 산소나 온도를 인위적으로 조절하는 것은 한정된 공간 이외에는 곤란하지만 수분 환경을 억제하는 것은 쉽게 가능하기 때문이다. 또한 삼존석굴에서 모든 풍화는 수분 환경으로부터 발생되거나 그 원인이 있기 때문이다. 따라서 이 석굴에서 수분 환경의 억제로 풍화를 방지할 수 있고 훼손을 저감하여 거의 영구적인 보존을 할 수 있겠다.

삼존석굴은 석굴 내에 위치하고 있지만 오랜 세월동안에 그 삼존불과 석굴의 건강상태는 자연환경에 따라 변화되어 왔다. 삼존석굴에서 훼손은 화강암의 자연적 풍화에 의한 것이며, 이 풍화작용의 요인은 주로 빗물, 습기, 대기, 결빙, 생물서식 등이다(Lee, 1993; 김수진 등, 1994; 이상헌, 1999; 최석원과 이찬희, 2000; 황상구 등, 2002).

신선한 암석은 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. 그러나 절리가 발달된 암석은 빗물이 절리를 따라 이동함으로써 쉽게 암석 속으로 퍼지고 그 아래로 누출된다. 그래서 삼존석굴의 풍화현상은 빗물에 의해 직접적인 영

향을 받지 않더라도 절리를 따라 스며든 수분에 의해 큰 영향을 받는다. 삼존석굴 내부의 암석은 물과 반응할 기회가 많기 때문에 상당히 빠른 속도로 풍화되고 있다.

석굴내부는 천이백년이 넘게 계속 빗물로부터 스며 들어온 물과 반응하여 암석중의 장석과 흑운모들이 물과 반응하여 상당히 풍화되어 있다. 특히 장석은 우선 담홍색, 담홍색에서 백색으로 표백되고 그 표면에서 스며 나온 빗물에 용해되어 장석이 있던 자리가 움푹 들어간 요철현상을 나타낸다(이상헌, 1999). 그래서 벽면에 남아있던 석영과 장석 입자들이 약간의 힘만 주어도 떨어져 나올 정도로 입상분해 현상을 나타낸다. 이때 용해된 물질 중 일부는 빗물과 함께 스며 나오면서 절리 근처에 방해석과 석고로 침착되어 백색피막을 일으킨다. 또한 흑운모와 장석이 풍화되어 고령토로 될 때 그 속의 미량의 철성분이 유리되어 산소나 물과 반응하여 산화철 또는 수산화철로 변하여 갈색피막을 나타낸다(이상헌, 1999; Lee and Parsons, 1999).

삼존석굴은 노천이 아니지만 우기에 누수에 의해 수분이 묻어 있는 때가 많다. 수분은 절리와 균열의 틈을 따라 퍼져 이들 근처의 벽면을 물로 포화시키는 때가 많다. 그래서 포화된 벽면은 여러 이끼류가 풍부한 수분과 접하면서 번성하여 그 표면에 얼룩덜룩하게 더럽혀진다. 또한 안쪽 천장과 삼존의 뒷면은 물로 포화되어있지 않더라도 항상 풍성한 습기에 의하여 지의류가 서식하기에 알맞은 조건이다. 이 미생물들의 포자근과 균사체는 흑운모, 석영과 장석의 벽개 혹은 입자 경계에까지 뻗쳐 들어가고 뿌리 끝에서 극산성 분비물을 분비하여 암석을 부식시켜 풍화를 촉진시킨다(Lee and Parsons, 1999; 최석원과 이찬희, 2000; 최석원 등, 2001; 이찬희 등, 2001).

삼존석굴은 동절기에 결빙이 심하게 일어나는 것으로 판단된다. 겨울철 낮에 눈, 비가 와서 누수로 벽면이 젖은 상태로 있다가 밤에 기온이 영하로 내려가면 동결 현상이 일어나고 낮에는 용해 현상이 일어난다. 이때의 동결-용해에 의하여 암석에 균열이 생기고 이미 생긴 절리틈을 더 넓힐 것이다(이상헌, 1998).

이와같이 석굴내부에서의 미생물서식, 백색피막, 입상분해와 변색 등은 석굴내부의 외관을 망칠 뿐만 아니라 하등식물의 뿌리로부터 나오는 유기산과 절리틈에서 물의 결빙으로 인하여 암석의 풍화를 더욱 촉진시킨다. 따라서 훼손을 없애고 풍화를 방지하기 위하여 석굴내의 물기와 습기 등의 수분을 많게 하는 누수 원인을 제거하여야만 한다.

풍화는 지질환경과 기후환경의 결합에 의해서 일어난다. 이러한 훼손의 환경인자는 수분이며 이는 그 공급원이 빗물이고 절리를 따라 누수가 일어남으로서 풍부해진다. 왜냐하면 삼존석굴은 그 풍화요인들의 환경인자가 모두 수분인데다가 치밀한 화강암으로 구성되고 지표로부터 약 10 m 위에 놓인 것을 고려할 때 수분이 대기로부터 기대되는 것보다 훨씬 많기 때문이다. 풍화는 암석표면에서 약한 광물의 결정 경계나 벽개를 따라 시작된다. 이들의 대상표면은 대부분 절리와 균열이고 대상광물은 주로 장석과 흑운모 등의 입자경계와 벽개에서 시작된다(Nagano and Nakashima, 1989; 김수진 등, 1994; Lee and Parsons, 1999). 장석과 흑운모 등은 수분에 의하여 용해되거나 분해되며 한편 미생물이 번성하고 결빙이 일어나며, 이 수분은 절리와 균열을 따라 석굴내부로 스며들어서 누출된 것이고 이의 공급원은 빗물이다. 그러므로 삼존석굴의 훼손의 원인은 누수이며 이에 대한 기후환경 요인은 빗물이고 지질환경에서 주요 요인은 대부분 절리와 균열이다. 따라서 누수를 차단하기 위해서는 누출부를 막을 것이 아니라 누수의 경로를 추적하여 훼손의 원인이 되는 빗물의 유입부를 막아야만 한다.

빗물이 석굴내부로 침투하는 절리는 J_m 절리대와 J_3 절리대이며, J_m 절리대는 석굴내부 안쪽의 인장절리와 관련되어 있다(Hwang *et al.*, 2002). 이 인장절리는 큰 소나무가 J_m 절리대 속으로 뿌리를 박고 성장하여 절리의 틈을 최대 30~40 cm까지 벌림으로서 남측 암반이 토플링될 때 형성된 틈으로서 J_m 절리대로 연결되어 있다. 그러므로 이 경로는 매우 길기 때문에 작은 빗물은 석굴내부까지 누출되지는 않겠지만 절리틈이 넓기 때문에 큰비는 누출을 상당히 오래 지속시킬 것이며, 길이가 긴 만큼 빗물이 유입될 수 있는 영향권도 매우 클 것으로 생각된다. 그 영향권은 암벽을 포함하는 수직면에서 석굴 중심으로부터 좌우방향으로 45°로 직선을 그을 때 그 윗부분이 될 것으로 추정된다. 왜냐하면 J_m 절리대 내에서 유입된 빗물은 좁은 절리면을 따라 45°로 퍼져나가 이동할 수 있기 때문이다. 이 영향권 내의 절리들은 넓은 범위에 속하더라도 모두 삼존석굴을 훼손하는데 영향을 미치기 때문에 반드시 이 영향권 내의 빗물 유입부를 막아야만 한다(황상구 등, 2002).

J_3 절리대는 석굴입구에서의 훼손에 영향을 미친다. 이곳에는 절리와 균열이 매우 많고 경로가 매우 짧기 때문에 그 영향을 쉽게 알아낼 수가 있다. 석굴 바로 위에 있는 절리와 균열들은 석굴입구 천장으로 연장되

어 있다. 따라서 이들 절리와 균열들은 작은 비에도 빗물이 쉽게 석굴내부로 스며든다. 그 영향권은 석굴을 중심으로 하여 반경 5 m의 원을 그렸을 때 그 상반부가 해당될 것으로 생각된다. 이 부분의 절리와 균열들도 모두 문화재를 훼손하는데 더 빈번하게 영향을 미칠 것으로 생각되기 때문에 반드시 빗물 유입부를 막아야만 한다(황상구 등, 2002).

5. 결 론

군위 삼존석굴에서 훼손은 풍화에 의해 미생물얼룩, 백색피막, 갈색늑, 요철현상과 변색 등으로 나타나며 풍화의 요인은 주로 빗물, 누출 수분, 기온변화, 생물 서식 등이다. 이들의 환경인자는 수분이며 이의 공급원은 빗물이고 공급통로는 절리이다. 빗물이 화강암 내의 절리를 따라 스며들어서 석굴내부로 누출되어 수분을 많이 하여 광물을 용해하거나 분해하며 식물을 서식시키고 결빙을 일으킨다.

삼존석굴 주변의 화강암은 북동동과 북서서 절리조를 규칙적으로 발달시키며, 서로 공액관계에 있어 하나의 절리계를 나타낸다. 두 절리조는 구체적으로 $N65^\circ\sim70^\circ E$, $75^\circ\sim85^\circ SE$ 와 $N50^\circ\sim70^\circ W$, $64^\circ\sim70^\circ SW$ 이며 이중에서 북동동 절리조가 훨씬 뚜렷하게 나타난다. 북동동 절리조는 석굴 주위에서 4개 절리대를 형성하며 이중에서 가장 뚜렷하고 연장성이 좋은 J_m 절리대와 석굴입구를 지나는 J_3 절리대가 석굴 내의 누수에 직접적인 원인이 된다.

J_m 절리대는 석굴 안쪽의 인장절리로 통하며, 이 인장절리는 석굴 상위의 큰 소나무가 J_m 절리틈을 벌림으로서 J_m 과 J_3 간의 암반이 토플링 효과로 형성된 단열이다. 이 경로는 매우 길기 때문에 작은 빗물은 석굴내부까지 누출되지는 않겠지만 큰비는 누출을 상당히 오래 지속될 것으로 생각된다. J_3 절리대는 석굴입구에서의 훼손에 영향을 미치며, 이곳에는 절리와 균열이 매우 많고 경로가 매우 짧기 때문에 10 mm 이내의 작은 비에도 빗물이 쉽게 석굴내부로 스며든다. 결과적으로 J_m 과 J_3 절리대가 누수의 원인을 제공하는 빗물의 주요 유입부인 것으로 판단되고 문화재를 훼손하는데 큰 영향을 미치는 것으로 생각된다.

참고문헌

- 김봉균, 정창희, 김수진, 양승영 (1981) 한국지질도 대우도 폭. 한국동력자원연구소, 29p.

- 김상옥 (1976) 대구부근 화강암류에 산출되는 Rapakivi 장석의 성인. 경북대학교 논문집, v. 21, 191-197.
- 김수진, 이민성, 김원사, 이수재 (1994) 서울지역의 자연환경 변화에 관한 연구: 남산화강암의 풍화에 관한 환경 광물학적 연구. 지질학회지, v. 30, 284-296.
- 원종관, 윤선, 소철섭 (1980) 한국지질도 설명도록. 자원개발연구소, 21p.
- 이병주, 황재하 (1997) 경상분지 북동부에서의 가음단층과 양산단층의 관계. 지질학회지, v. 33, 1-8.
- 이상현 (1998) 국내 석조문화재의 보전 대책수립을 위한 지질학적 고찰. 보존과학회지, v. 7, 9-18.
- 이상현 (1999) 석굴암을 이루는 암석의 풍화현상. 보존과학회지, v. 8, 1-9.
- 이찬희, 최석원, 한경순, 원정식 (2001) 경주 서악동 삼존불 입상의 기계적 훼손과 보존과학적 접근. 지질학회지, v. 37, 611-627.
- 정기영, 이병윤 (1998) 팔공산 화강암내 사장석의 풍화. 지질학회지, v. 34, p. 44-57.
- 좌용주 · 최원희 (2002) 팔공산 화강암체의 냉각사와 접촉 변성대. 2002년도 춘계 공동학술발표회 논문집, 한국암석학회, p. 112-114.
- 진홍섭 (1995) 한국의 석조미술. 문예출판사, 571p.
- 최석원, 이찬희 (2000) 부여 대조사 화강암 미륵보살입상의 물리적 및 화학적 풍화. 지질학회지, v. 36, p. 559-574.
- 최석원, 이찬희, 서만철 (2001) 산청 도전리 마애불상군의 산출상태와 훼손 및 보존방안. 지질학회지, v. 37, p. 393-406.
- 황상구, 김수정, 이현우 (2002) 군위 삼존석굴의 지질환경과 보존대책. 2002년도 춘계 공동학술발표회 논문집, 대한자원환경지질학회, p. 321-324.
- Drever, J.L. and Zobrist, J. (1992) Chemical weathering of silicate rocks as a function of elevation in the southern Swiss Alps. *Geochem. Cosmochem. Acta.*, v. 56, p. 3209-3216.
- Hong, Y.K. (1983) Petrology and geochemistry of the Cretaceous Palgongsan granite, Southern Korea. *J. Korea Inst. Mining Geol.*, v. 16, p. 83-109.
- Hwang, J.H. (1992) Paleostress reconstructions and the tectonic evolution of the Kyungsang basin. *J. Geol. Soc. Korea*, v. 28, p. 471-482.
- Hwang, S.K., Kim S.J. and Lee, H. (2002) Geological environments and weathering causes of the Buddhist Triad Cave in Gunwi, Korea. Abstracts of 2002 Annual Meeting of Geological Society of Korea.
- Kim, O.J. (1971) Study on the intrusion epochs of younger granites and their bearing to orogenies of South Korea. *J. Korea Inst. Mining Geol.*, v. 4, p. 1-9.
- Lee, D.S. (1987) *Geology of Korea*. Kyohak-sa, 514p.
- Lee, M.R. and Parsons, I. (1999) Biomechanical and biochemical weathering of lichen-encrusted granite: textural controls on organic-mineral interactions and deposition of silica-rich layers. *Chem. Geol.*, v. 161, p. 385-397.
- Lee, S.G. (1993) Weathering of granite. *J. Geol. Soc. Korea*, v. 29, p. 396-413.
- Nagano, T. and Nakashima, S. (1989) Study of colors and degrees of weathering of granitic rocks by visible diffuse reflectance spectroscopy. *Geochem. J.*, v. 23, p. 75-83.

2002년 7월 31일 원고접수, 2002년 10월 24일 게재승인.