

경주 감은사지 삼층석탑(서탑)에 발달한 표면균열에 대한 연구: 2층 탑신과 3층 옥개석의 사례

좌용주* · 김재환 · 박성철

경상대학교 지구환경과학과

A study on the Surface Cracks in the West Stone Pagoda of Gameunsa Temple Site, Gyeongju, Korea: Examples from the second story stone body and the third story capstone

Yong-Joo Jwa*, Jae Hwan Kim, and Sung Cheol Park

Department of Earth & Environmental Sciences, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea

요 약: 국보 제 112호로 지정되어 있는 감은사지 삼층석탑(서탑)은 표면 풍화로 인한 훼손 상태가 심각하여 빠른 시간 내에 보수되어야 한다. 표면균열에 대한 부분적인 관찰 결과 2층 탑신면에는 수직균열이 발달한다. 이는 상하로 작용하는 강한 주 압축력에 평행하게 발달한 균열이 더욱 더 성장한 것이라고 판단된다. 균열 성장의 원인에는 이미 존재하던 수직균열을 이용한 화학적 풍화작용 및 생물학적 풍화작용이 가세했을 가능성이 높다. 3층 옥개석의 경우 표면균열은 북동방향과 북서방향으로 교차하는 양상으로 발달하고 있다. 3층 옥개석의 동쪽과 남쪽에서 많은 수의 균열이 관찰되며, 중심축에서 바깥쪽으로 잇는 수직균열과 바깥쪽의 수평균열들이 발달하고 있다. 한편, 3층 옥개석의 서쪽과 북쪽은 균열이 많이 관찰되지 않으며, 대부분 수평균열이 발달하고 있다. 이는 중심축에서의 압축력이 모든 방향으로 동일하지 않으며, 무게 중심이 동쪽과 남쪽 방향으로 기울어져 이 방향으로 강한 압축력이 제공되는 것으로 판단된다.

주요어: 감은사지, 석탑, 탑신, 옥개석, 표면균열, 압축력

Abstract: The west stone pagoda of Gameunsa temple site(National Treasure No. 112) has been seriously damaged by surface weathering, and conservation treatment is needed. In the second story body stone, vertical cracks developed parallel to the main compressional axis. The vertical cracks seem to grow much more with the compression. Chemical and biological weathering along the vertical cracks could have enhanced the crack growth. In the third story capstone, the surface cracks strike toward NE and NW directions, which are intersecting each other. In the eastern and southern parts of the third story capstone, lots of vertical cracks develop along the lines from the axial center to outer rim, whereas horizontal cracks are easily observed at the outer rim of the capstone. On the other hand, a few horizontal cracks develop in the western and northern parts of the third story capstone. This fact indicates that the compression along the vertical axis is not uniform in direction. The west stone pagoda leans toward the east and the south, so it is considered that compression by deviatoric stress prevailed at these directions.

Key words: Gameunsa, stone pagoda, stone body, capstone, surface cracks, compression

서 론

경상북도 경주시 양북면 용당리 55-1번지에 위치한

감은사지 삼층석탑(서탑)은 높이 13.4 m의 신라 최대의 3층 석탑으로서 2단의 기단위에 3층 탑신을 올려 동탑과 서로 같은 규모와 양식을 하고 있다(Fig. 1). 이 석

*Corresponding author: Tel. 82-55-751-6004, E-mail. jwayj@gsnu.ac.kr



Fig. 1. The West Stone Pagoda of Gameunsa Temple Site (National Treasure No. 112).

탑의 가장 큰 특징은 각 부분들이 하나의 통 돌로 이루어진 것이 아니라 수십 개에 이르는 부분석재로 기단석 44점, 탑신석 13점, 옥개석 24점, 노반석 1점으로 이루어져 있다. 1962년에 국보 제 112호로 지정된 감은사지 삼층석탑(서탑)은 건립된 지 1300여년이 지남에 따라 붕괴 위험성이 높은 것으로 판단됨에 따라 1960년에 국립박물관 학술조사단에 의하여 해체 후 복원하였고 풍화가 심한 노반은 당시에 새로 조성하였다. 그러나 이후에도 상층기단과 탑신의 일부분이 떨어져 나가는 현상이 계속되고 있다고 보고하였다(이찬희 외, 2004).

보존과학적 측면에서 석탑 부재의 자연훼손에 대한 보존처리에는 여러 가지 방법이 있으나(김사덕 외, 1999; 엄두성 외, 1999), 감은사지 삼층석탑(서탑)의 경우 표면균열로 인한 그 훼손이 심각하여 부재들 중 일부는 새로운 석재로 대체하는 방법이 고려되어야 할 것이며, 표면균열의 메커니즘을 규명하여 훼손원인을 파악하여야 한다. 석탑의 보존처리의 경우 사용된 석재의 종류와 원

산지를 파악하는 것이 중요하다. 감은사지 삼층석탑(서탑)의 건립에 사용된 부재들에 관한 연구에서 이상현(1996)은 화강암으로, 이찬희 외(2004)는 화강섬록암으로 기재 하였으나, 좌용주 외(2006)에 의하면 범곡리 일대의 유리-결정 응회암 또는 결정 응회암이 석재로 사용되었음이 판명되었다.

감은사지 삼층석탑(서탑)은 표면손상으로 인한 그 훼손 상태가 심각하여 최근 보수처리가 진행되어 3층 옥개석과 노반 부분이 보수되었다. 표면손상을 야기시킨 대표적인 현상으로 박리, 박락, 균열 등이 있다. 그 중에서도 표면균열은 문화재 손상을 야기시키는 가장 원천적인 요인이라 할 수 있다. 따라서 감은사지 삼층석탑(서탑)의 표면균열의 메커니즘을 통해 표면균열의 원인을 파악하고자 한다.

본 연구는 석탑 표면의 균열을 방향성을 측정하여 감은사지 삼층석탑(서탑)의 균열 메커니즘을 규명하는데 목적이 있다. 단, 보수처리가 진행 중이던 시기에 관찰이 용이하던 2층 탑신과 3층 옥개석을 주 대상으로 하였다. 이 연구결과는 감은사지 삼층석탑(서탑)의 향후 보존방안에 대한 보존과학적 자료로 활용될 수 있을 것이다.

감은사지 삼층석탑(서탑)의 암석기재 및 풍화양상

감은사지 삼층석탑(서탑)의 석재는 주로 회백색 내지 담홍색의 결정질 응회암으로 세립질의 기질로 석영, 장석, 각섬석, 흑운모 등이 반정(결정편)을 이루고 있는 전형적인 반상조직을 보인다(Fig. 2). 석영의 결정편은 자형으로 단결정으로 나타나는 것이 보통이나 군집을 이루기도 하고 다결정 형으로 나타나기도 한다(Fig. 2의 A부분). 장석은 변질이 심해 구별이 힘들다(Fig. 2의 B부분). 각섬석의 결정편은 풍화로 분리, 제거되어 외부 형태만이 존재하는 경우도 두드러지게 나타나며 대부분 5~10 mm 장경을 가지는 주상의 형태를 보인다(Fig. 2의 C부분). 흑운모 결정편은 마름모꼴이나 육각형을 나타내며 평균 1~3 mm의 크기를 나타낸다(Fig. 2의 D부분). 각섬석과 흑운모는 부재에 따라 그 상대적 양의 차이가 있다.

석탑 표면에는 풍화에 의한 박리와 박락에 의해 훼손되어 있으며, 탑의 본체를 이루고 있는 부재에는 크고 작은 공동(cavity)들이 관찰 된다(Fig. 3). 이 공동의 대부분은 상대적으로 화학적 풍화에 약한 녹회색의 암편 들이 빠져나가 소실된 자리로서 석탑부재의 외면에서 흔히 관찰된다. 암석의 표면에는 아주 작은 공극들



Fig. 2. Stone surface of the West Stone Pagoda of Gameunsa Temple Site. A, B, C, and D indicate mineral fragments of quartz, feldspar (altered), hornblende (removed), and biotite (hexagonal shape), respectively.

이 발달되어 있는데 이는 1차적인 기공과 풍화에 의해 석영 등의 입자들이 부분적으로 떨어져 형성된 2차적인 것으로 구분된다(이찬희 외, 2004). 염기성 미립 포유암(MME)의 암편이 포함되어 있으나, 화학적 풍화로 말미암아 분리, 제거되어 외부 형태만 남아있는 경우가 흔하며 최장 20 cm에 이르기도 한다. 또한 각섬석의 반정 역시 풍화로 인하여 외부 형태만이 존재하는 경우도 두드러지게 나타난다.

감은사지 서탑은 두 기단과 1층~3층 탑신은 모두 같은 암석을 사용하여 건축한 것으로 판단된다. 그러나 1960년에 복원이 이루어진 상륜부의 노반은 기존의 암석과 다른 입자구성과 암색을 보이며 섬록암으로 판단된다(Fig. 4A, 4B). 3층 탑신 역시 표면이 심한 풍화현상을 보이고 있으며 탈락현상도 나타난다(Fig. 4C).

감은사지 삼층석탑(서탑)에 나타나는 표면 균열

차별응력에 의한 압축과 균열의 성장

감은사지 삼층석탑(서탑)의 2층 탑신면에서 수직 균열을 관찰할 수 있다(Fig. 5). 이 수직 균열은 석탑이 받고 있는 응력으로 말미암아 발생된 초기균열의 성장 결과로 해석된다. 즉, 석탑을 구성하고 있는 암석에 작용하는 힘은 세 방향의 좌표축에서 크기가 동일하지 않다. 따라서 세 방향에서의 힘의 크기에 차이가 발생하며, 이에 따른 차별응력이 작용한다.

석탑과 같이 중횡비를 가지는 구조물에서 최대 응력인 σ_1 은 지표에 수직이며, 강한 압축(compression)을

나타낸다. 그리고 균열은 σ_1 에는 평행하지만 σ_3 에는 수직인 면으로 발달한다. 감은사지 삼층석탑(서탑)의 2층 탑신면에 나타나는 이 수직균열들은 상하로 작용하는 강한 주 압축력(σ_1)에 평행하게 발달한 균열이 더욱 더 성장한 것이라고 판단된다. 물론 균열 성장의 원인에는 이미 존재하던 수직균열을 이용한 화학적 풍화 작용 및 생물학적 풍화작용이 가세했을 가능성이 높다.

균열성장의 압축과 인장력의 관계 및 요인

감은사지 삼층석탑의 3층 옥개석의 경우, 4개의 옥개석 부재들로 구성되어 있으며(북동, 북서, 남동, 남서 옥개석), 동서남북의 각 방위별로는 2개의 옥개석이 절반씩 하나의 방위면을 이룬다. 이들 옥개석의 표면에는 탈락, 균열에 의해 많이 훼손되어 있으며, 크고 작은 정동들이 관찰된다(Fig. 6). 미세균열과 탈락은 동쪽과 남쪽에서 많이 관찰되며, 암편 탈락은 서쪽에서 크게 나타난다. Fig. 7에서는 3층 옥개석 전반에 걸쳐 관찰되는 균열의 양상을 나타냈다. 동쪽과 남쪽에서는 많은 수의 균열이 관찰된다. 형태는 중심에서 바깥쪽으로 연장되는 균열이 잘 발달하고 있으며, 바깥쪽에는 수평균열들이 발달하고 있다. 이와는 달리 서쪽과 북쪽은 균열의 수가 적으며 대부분 수평균열이 발달하고 있다.

감은사지 삼층석탑의 3층 옥개석의 각 부재에 나타나는 미세균열의 방향성을 측정한 결과 북동 옥개석은 $N6^{\circ}E-N80^{\circ}E$, $N4^{\circ}W-N89^{\circ}W$, 북서 옥개석은 $N10^{\circ}E-N88^{\circ}E$, $N5^{\circ}W-N64^{\circ}W$, 남서 옥개석은 $N4^{\circ}E-N88^{\circ}E$, $N48^{\circ}W-N50^{\circ}W$, 남동 옥개석은 $N4^{\circ}E-N50^{\circ}E$, $N14^{\circ}W-N80^{\circ}W$ 의 범위로 균열이 관찰된다(Table 1). 측정된 방향성을 도시해 보면 모든 방향(북동, 북서, 남동, 남서)에서 동일하게 북동과 북서 방향이 우세하게 나타난다(Fig. 8). 따라서 균열성장이 지속될 경우 이 두 방향을 따라 부재가 파손될 위험성이 증가할 것으로 판단된다.

옥개석의 구조에 따른 균열의 방향성을 생각해 보면 중심축에 해당하는 곳에 무게에 의한 강한 압축이 작용하기 때문에, 그 중심점을 벗어난 곳에서는 당연히 반발에 의한 인장이 작용한다. 중심에서의 압축력과 바깥에서의 반발력은 어떤 형태로든 석재 표면에 균열을 성장시킬 가능성이 매우 큰 것이다. 압축의 중심축에서의 응력이 매우 커지고, 바깥쪽으로 갈수록 반발력이 작용하며, 중심축과 바깥 사이를 잇는 균열이 발생하기 쉽다. 경우에 따라서는 횡인장력(transension)이 작용하거나 횡인압력(transpression)이 작용하는 경우도 존재하게 되며, 이들에 따라 균열의 성장방향이 결정될 것으로 생각된다.

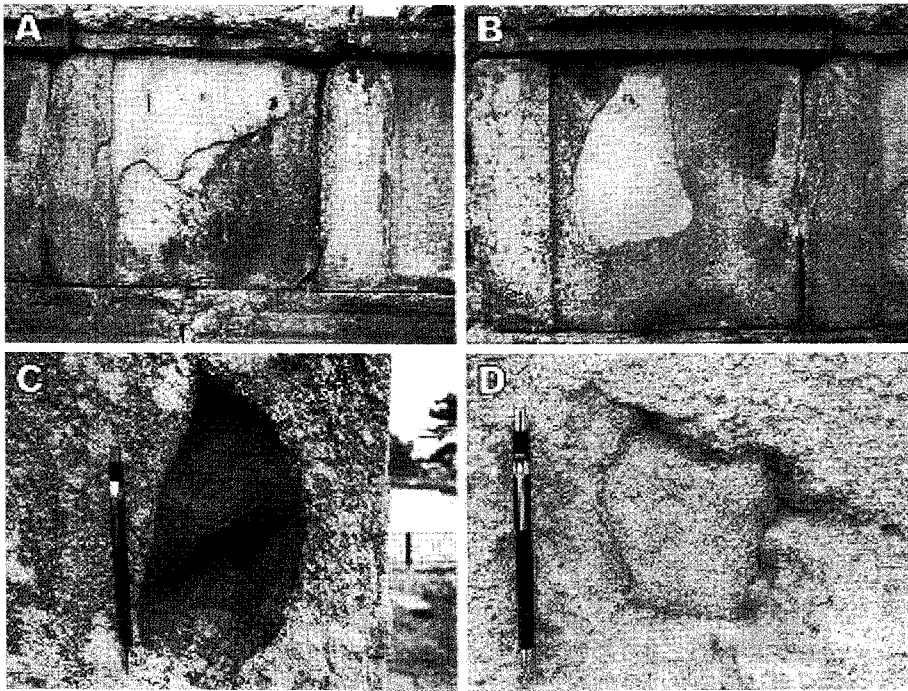


Fig. 3. Photographs showing weathering surfaces of the West Stone Pagoda. (A & B) Exfoliations. (C & D) Cavities after removal of rock fragments. Photographs are cited from Jwa *et al.* (2006).

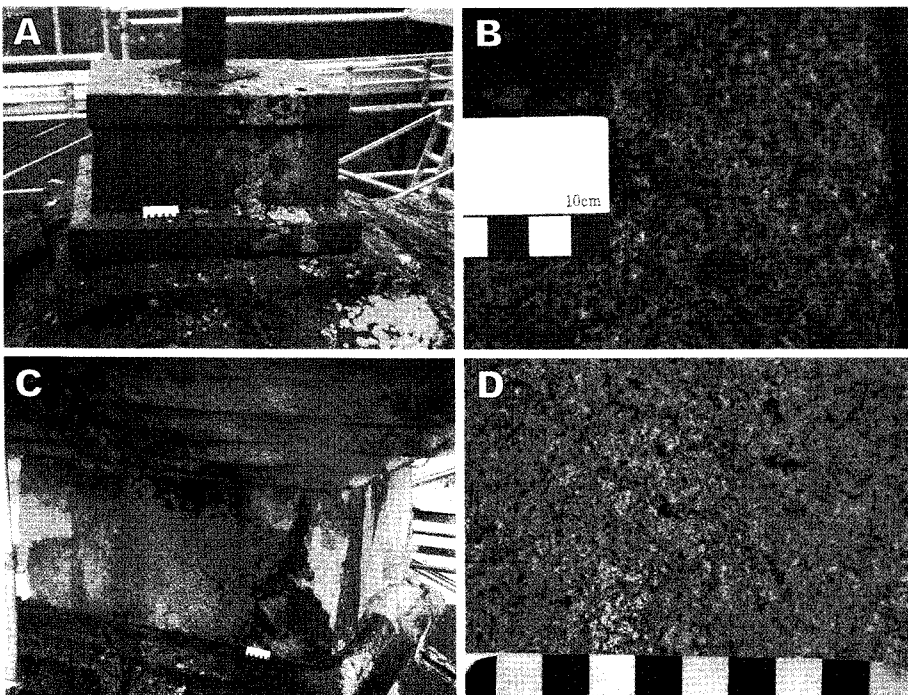


Fig. 4. Photographs showing the stones of the West Stone Pagoda. A, Nobanseok; B, stone surface of Nobanseok; C, severely weathered surface of the third story body stone and capstone; D, stone surface of the third story body stone.

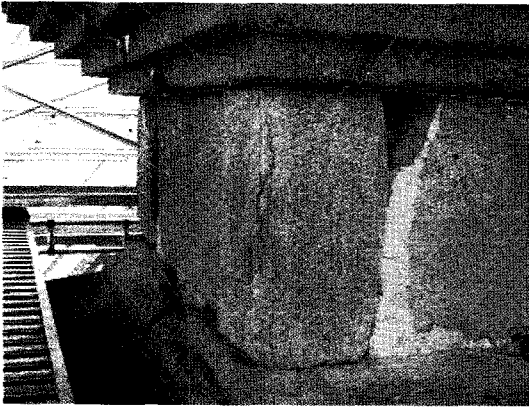


Fig. 5. Vertical cracks observed in the second story body stone of the West Stone Pagoda.

감은사지 삼층석탑(서탑)의 경우 중심축에서의 압축력이 모든 방향으로 동일하지 않으며, 이는 무게중심이 동쪽과 남쪽으로 경사져서, 이 방향으로 더 많은 압축력을 제공한 것으로 판단된다. 이는 서만철 외(2003)에 의해 보고된 감은사지 삼층석탑(서탑)이 동쪽으로 경사져 있다는 것과 부합하는 결과라 판단된다.

균열성장과 기후 및 지리적 요인

암석의 풍화는 지역적인 기후와 연관이 있다. 감은사지 지역의 기후인자에 대해서는 관측자료가 없기 때문에 인근 경주지역의 자료로 살펴보면, 1월 평균기온은 -0.3°C , 8월 평균기온은 26.6°C 이다. 연평균 기온은 13°C 이고, 연 강수량은 982 mm로서 전국 평균기온보다 높은 편이나, 강수량은 적다. 그러나 국지성 호우가

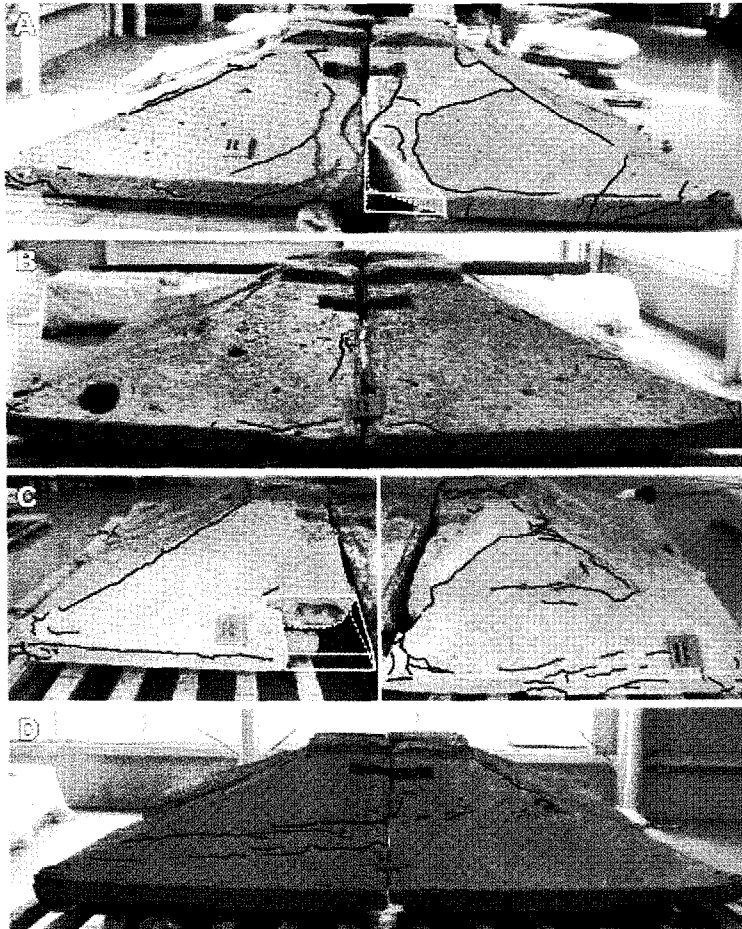


Fig. 6. Surface cracks observed in the third story capstone of the West Stone Pagoda. A, B, C and D indicate the eastern, western, southern and northern sides of the capstone, respectively. Black lines were drawn along the vertical and horizontal cracks. White polyhedrons indicate the deteriorated parts in the capstone.

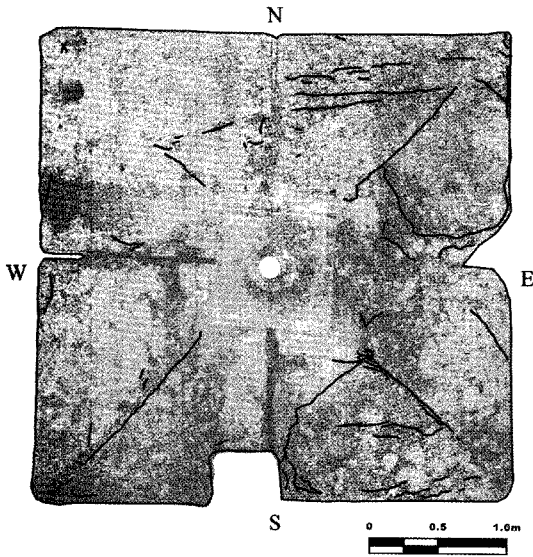


Fig. 7. Distribution of the surface cracks observed in the third story capstone of the West Stone Pagoda.

찾은 것으로 알려져 있다.

이러한 기상자료에 근거하여 Peltier (1950)가 제시한 기후와 풍화와의 관계로부터 경주지역의 기상학적 요인에 의한 암석의 풍화정도를 알아보면, 이 지역은 극심한 풍화대에 속하지는 않지만 동결에 의한 풍화가 우세하게 나타난다. 그리고 감은사지 삼층석탑(서탑)은 동해로부터 750 m 밖에 이격되어 있지 않아서 해양환경의 영향을 직·간접적으로 받고 있다. 감은사지 삼층석탑(서탑)의 물리적인 훼손이 동쪽과 남쪽에서 현저하게 나타나는데 이 두 방향은 동해로부터의 해풍이

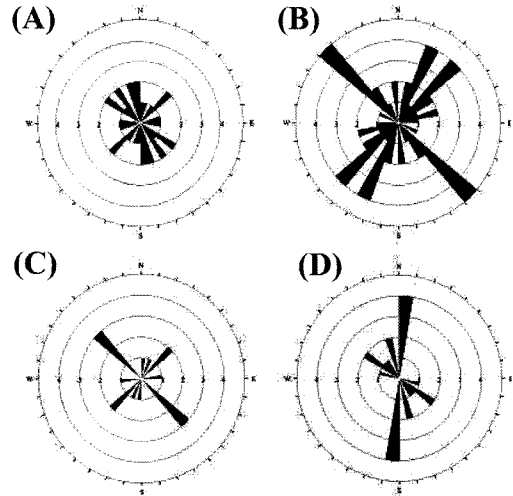


Fig. 8. Rose diagrams for the surface crack direction in the third story capstone. A, B, C, and D indicate the northeastern, northwestern, southwestern, and southeastern parts of the capstone.

직접적으로 영향을 미치는 방향이기도 하다. 따라서 감은사지 삼층석탑(서탑)의 동쪽과 남쪽 부재에 나타나는 균열들의 경우, 해수 분무에 의한 염풍화가 균열성장에 인자로 작용하였을 가능성도 배제할 수 없다 (김수진 외, 2006).

암석에서의 염풍화는 미세공극이 많을수록 더 빠르게 일어난다고 알려져 있기 때문에 암석의 균열이 발달할수록 투수율이 증가하여 염풍화가 촉진될 것으로 예상할 수 있다 (Yamada et al., 2005). 따라서 감은사지 삼층석탑(서탑)의 보존처리를 위해서는 균열의 성

Table 1. Directions of cracks developed on the third story capstone of the West Stone Pagoda of Gameunsa Temple Site

NE		NW		SW		SE	
N20°W	N80°E	N50°W	N5°W	N4°E	N20°E	N50°E	N8°E
N36°E	N6°W	N30°W	N44°E	N48°W	N48°W	N4°E	N55°W
N6°E	N4°W	N48°E	N44°E	N50°W	N88°E	N4°E	N50°E
N50°W	N70°E	N49°E	N88°E	N46°E	N40°E	N60°W	N50°E
N54°W	N10°E	N50°E	N78°E			N78°W	N46°E
N38°W	N89°W	N36°E	N18°E			N80°W	N48°E
N14°W	N55°W	N52°E	N40°W			N14°W	N53°W
N40°E	N20°W	N20°E	N40°W			N20°W	
N42°E	N18°W	N28°E	N49°W				
N60°W	N54°E	N10°E	N50°W				
		N48°W	N64°W				
		N60°E	N28°E				

장을 억제시킴과 동시에 석탑부재의 투수율을 저하시키는 방법을 함께 고려해야 할 것이다.

결 론

1. 감은사지 삼층석탑(서탑)의 2층 탑신면에 나타나는 수직균열들은 상하로 작용하는 강한 주 압축력에 평행하게 발달한 균열이 더욱 더 성장한 것이라고 판단된다. 물론 균열 성장의 원인에는 이미 존재하던 수직균열을 이용한 화학적 풍화작용 및 생물학적 풍화작용이 가세했을 가능성이 높다.

2. 감은사지 삼층석탑(서탑)의 3층 옥개석의 표면균열의 경우 모든 방향에서 북동방향과 북서방향으로 교차하는 양상으로 발달되어 있어 균열성장이 지속될 경우 이 균열의 방향으로 부재가 파손될 위험성이 증가할 것으로 판단된다.

3. 3층옥개석 표면에는 동쪽과 남쪽에서 많은 수의 균열이 관찰되는데, 중심축에서 바깥쪽으로 잇는 균열이 발달하고 있으며, 바깥쪽에는 수평균열들이 발달하고 있다. 이와는 달리 서쪽과 북쪽에서는 균열의 수가 많지 않은 반면, 대부분 수평균열이 발달하고 있다. 이는 감은사지 삼층석탑(서탑)의 경우 중심축에서의 압축력이 모든 방향으로 동일하지 않으며, 무게 중심이 동쪽과 남쪽 방향으로 기울어져 이 방향으로 강한 압축력이 제공되는 것으로 판단된다.

사 사

이 연구는 국립문화재연구소 연구개발사업인 “석조문화재 손상메커니즘 및 평가기술개발”의 일환으로 수행되었다. 이 논문에 대한 건설적인 비평과 조언을 해

주신 한국지질자원연구원의 홍세선 박사님과 익명의 심사위원께 감사드립니다.

참고문헌

- 김수진, 좌용주, 이찬희, 도진영, 조일원, 2006, 감은사지삼층석탑(서탑) 강화처리제 선정 및 신석 제작용 석재 연구. 국립문화재연구소, 218p.
- 김사덕, 김순관, 김창석, 홍정기, 강대일, 이명희, 1999, 석조문화재 에폭시수지 개발 시험연구. 국립문화재연구소, 보존과학연구, 20, 139-155.
- 엄두성, 김사덕, 홍정기, 강대일, 이명희, 1999, 석조문화재 발수경화제 시험연구(I). 국립문화재연구소, 보존과학연구, 20, 155-173.
- 이상현, 1996, 감은사지 삼층석탑(동탑)과 나원리 5층 석탑의 암석과 풍화현상의 특징에 대한 연구. 보존과학회지, 5, 41-68.
- 이찬희, 이명성, 서만철, 최석원, 김만갑, 2004, 감은사지 서탑의 풍화훼손도 진단 및 석재의 산지추정. 자원환경지질, 37, 569-583.
- 좌용주, 김건기, 고석백, 김종선, 2006, 감은사지삼층석탑(서탑)에 사용된 석재 공급지에 대한 연구. 암석학회지, 15, 128-138.
- Peltier, L., 1950, The geographic cycle in periglacial regions as it is related to climatic geomorphology. Ann. Assoc. Amer. Geog., 40, 214-236.
- Yamada, T., Aoki, H., Takahashi, M. and Matsukura, Y., 2005, Effect of rock properties on rates of salt weathering: A laboratory experiment. Journal of the Japan Society of Engineering Geology, 46, 72-78.

2008년 10월 22일 접수

2008년 10월 23일 심사개시

2008년 12월 5일 채택