

경주 서악리 삼층석탑의 훼손상태 및 보존처리

이명성 | 정민호* | 정영동* | 이찬희¹

공주대학교 문화재보존과학과

*국립경주문화재연구소

Deterioration and Conservation Treatment of the Three Storied Stone Pagoda in Seoak-ri, Gyeongju

Lee Myeong-seong | Jeong Min-ho* | Jung Young-dong* | Lee Chan-hee¹

Department of Cultural Heritage Conservation Sciences, Kongju National University, Kongju 314-701, Korea

*Gyeongju National Research Institute of Cultural Properties, Gyeongju 780-410, Korea

¹Corresponding Author : chanlee@kongju.ac.kr

초록 경주 서악리 삼층석탑의 모든 부재는 정동이 잘 발달된 중립질의 회백색 알카리 화강암으로 구성되어 있다. 이 석탑은 이미 보수되어 전체적으로 안정감을 주며 상륜부를 제외하면 거의 원형을 보존하고 있다. 그러나 석탑에 직접적인 영향을 가하는 주변의 수목과 지반에 서식하는 잔디의 영향으로 지대석과 기단부 및 옥개석의 상부에는 지의류를 비롯한 미생물의 서식이 심각한 상태이다. 따라서 보존처리는 일차 건식세정을 실시하였고 이차로 습식세정을 실시하였다. 이때 잘 제거되지 않는 지의류 및 오염물 등은 고온스팀을 이용하여 제거하였다. 또한 이미 보수에 사용되었던 콘크리트와 에폭시 수지를 제거를 하고 에폭시계 합성수지에 탈크와 알카리 화강암 파우더 등의 충전제를 혼합하여 복원하였다. 부재들의 질감을 맞추기 위해 합성수지와 충전제의 혼합과정에서 색 맞춤을 하였다. 또한 석탑의 동쪽에 있는 사면으로부터 흘러내리는 빗물의 유입을 최소화하기 위해 배수로를 설치하였으며, 석탑 주변에 서식하고 있는 수목 및 잔디를 제거하여 습기 발생을 최소화함으로써 향후 지의류의 발생을 억제시키고자 하였다.

중심어 : 알카리 화강암, 훼손상태, 보존처리

ABSTRACT All rock materials of the three storied stone pagoda in Seoakri were composed of light gray alkali granite with medium grained and developed with small mialolitic cavities. This stone pagoda is preserving almost archetype except the head part because there was repair work already. But, foundation, basement and roof rocks are serious state by microbial invasion such as lichens. Because there are tree and grass that cause direct effect to stone pagoda surrounding. Therefore, conservation treatment executed the primary dry cleaning and secondary wet cleaning treatment. Stone surface is partly not removed well such as lichens which part removed using cleansing device that use high temperature steam. Some treated part concrete and epoxy resin remove and retreatment with mixing talc and alkali granite powder to epoxy resin. Did color matching at mixing process of epoxy resin and fillers to properties with set the feel of a material. Also, drainage ditched to minimize inflow of rainwater fall from slope that is on the east of stone pagoda, tree and grass in stone pagoda surrounding wished to do remove and control occurrence of lichens hereafter minimizing moisture conteats.

Key word : alkali granite, deterioration, conservation treatment

1. 서론

경상북도 경주시에 위치한 서악리 삼층석탑(보물 제 65호)을 대상으로 지질 및 암석학적 특징과 풍화상태를 진단하여 보존과학적 의미를 검토하고 간단한 보존처리를 실시하였다. 이 삼층석탑은 경상북도 경주시 서악동 무열왕릉 동북쪽 비탈진 곳에 위치하고 있으며, 1963년 1월 21일에 보물 65호로 지정된 통일신라시대의 석조문화재이다. 이 석탑은 암석을 벽돌 모양으로 다듬어 쌓아 올린 모전탑 계열에 속하는 탑이며 재질은 알카리 화강암으로 이루어져 있다.

석조문화재의 풍화작용은 근본적으로 물(산성비)의 영향을 받으며, 온도변화와 물-암석 반응에 따라 풍화산 류물을 생성하며, 이 잔류물이 결정화되면서 부피가 변화하여 물리적 및 화학적 풍화를 진전시킨다.^{1,2} 서악리 삼층석탑도 이와 같은 과정을 겪어가면서 기계적 및 화학적 풍화를 받았으며 옥개석과 기단의 거의 모든 부분이 지의류에 의하여 피복되어 있다. 또한 암석 표면은 심한 풍화작용으로 인하여 부계의 탈락, 변색 및 균열이 생성되어 있으며 부분적으로 콘크리트와 에폭시 수지를 혼용하여 보수한 흔적도 보인다.

석조문화재의 표면은 근본적으로 보습력이 낮고 유기물을 거의 함유하고 있지 않아 생물들이 살기에 적합한 환경은 아니다. 하지만 풍화과정에서 생성되는 무기산과 공극은 하등식물의 서식처를 제공하게 되고 이들의 상호작용으로 표면에는 미생물의 번식이 계속 진행되어 서서히 점유면적을 넓혀간다.^{3,4,5} 따라서 야외에 있는 대부분의 석조문화재는 더 이상의 생물오염이 진행되기 전에 임상실험이 선행된 생물학적 보존처리가 절실하다.

이 연구에서는 경주 서악리 삼층석탑을 대상으로 석조문화재의 암석 및 광물학적 특성과 기계적, 광물학적 풍화상태를 진단하였다. 또한 표면에 발생한 생물 오염도 분석 및 주변환경에 따른 영향을 규명하여 대상문화재의 가장 적절한 보존방법과 보존처리 방안을 제시하고 부분적인 보존처리를 실시하였다. 이 자료는 정량화를 통해 또 다른 석조문화재의 체계적인 보존연구를 위한 기초 자료로 활용할 것이다.

2. 현황 및 연구방법

2.1. 현황

경주 서악리 삼층석탑은 행정구역상 경북 경주시 서악동 92-1번지로 서악서원 서쪽 뒤편 선도산 기슭에 위치하고 있다. 이 탑의 남쪽에는 황씨 재실과 서악리 고분군이 있고 북쪽 산언덕에는 진흥왕릉과 진지왕릉, 문성왕릉, 현안왕릉이 있다. 이 탑은 언덕 사이 좁은 계곡의 발 가운데 있는데, 탑의 높이는 5.07 m, 기단 너비는 2.34 m이고 주위에는 보호 철책을 두르고 지반에는 잔디가 심어져 있다(Figure 1A).

이 삼층석탑은 모전탑 계열에 속하는 탑으로 4장의 장대석으로 된 지대석과 그 위에 8개의 주사위 모양 석괴로 2단을 쌓아 이형기단을 구성하였다(Figure 1B). 기단 윗면에 1층 몸돌을 받치기 위한 1장의 평평한 암석이 있고 그 위에 탑신부를 구성하였는데 몸돌과 지붕돌이 각각 1장의 암석으로 구성되어 있다. 1층 몸돌에는 큼직한 네모꼴 감실을 얇게 파서 문을 표시하였으며 문의 좌우에는 1구씩의 인왕상이 문을 향해 조각되어 있다. 지붕돌은 하나의 암석에 밑받침과 윗면의 층급을 표시하였으며, 처마는 평행을 이루고 있다.⁶

상륜부에는 노반만 남아 있으며 찰주가 있던 부분에는 원통형 흔적만 남아 있다(Figure 1C). 각층의 옥개석 처마에는 풍탁의 흔적이 있으며 이 부분은 거의 모두 탈락되어 있다. 기단부와 옥개석의 상부에는 지의류를 비롯한 미생물의 서식이 심각한 상태이다(Figure 1D). 이 삼층석탑의 전반적인 사이트 환경은 양호하나 탑에 직접적인 영향을 가하는 주변에는 수목이 서식하고 있고 지반에 서식하고 있는 잔디와 습기에 의해 지대석 및 기단부가 미생물의 오염이 심각하다(Figure 1E). 따라서 이 석탑의 풍화와 훼손을 저감하기 위한 보존대책이 절실한 실정이다.

2.2. 연구방법

이 연구에서는 경주 서악리 삼층석탑 주변에 관한 지형 및 지질조사와 석탑의 물리적 또는 생물학적 풍화특성에 관한 정밀조사가 실시되었다. 또한 석탑의 주변에 분포하는 석탑에서 탈락된 암편으로 암석학적 및 광물학

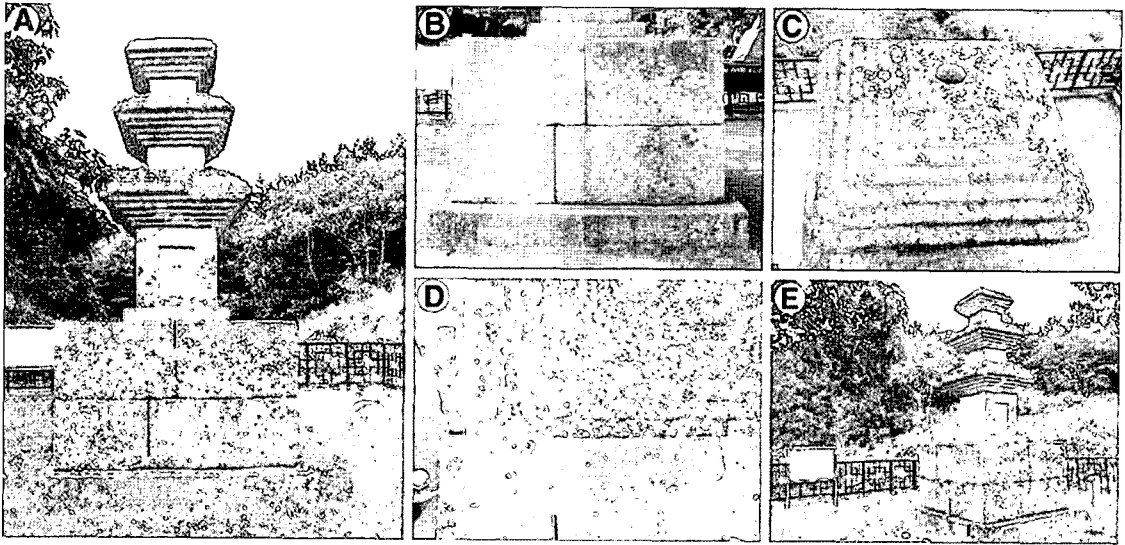


Figure 1. Field occurrence of the three-storied stone pagoda in Seoakri. (A) Southern frontal view. (B) Cube-shaped 2nd stage base-rock covered by contaminants. (C) Iron pipe traces on the upper part of the pagoda. (D) Algae and lichen grow on the surface of the roof rocks. (E) Plant and lawn occurred around the pagoda and basement.

적 분석용 시료를 채취하였다. 연구시료의 반정량적인 광물조성, 상대적 함량, 광물학적 공생관계, 조직 및 풍화에 의한 변질광물의 생성 등을 관찰하기 위해 편광현미경을 사용하였다. 편광현미경은 자동계수기가 장착된 Nikon사의 Eclipse E600W 편광/반사 겸용 현미경을 이용하였다.

또한 암석의 광물조성을 밝히고자 일부 시료에서 X-선 회절분석을 실시하였다. 분석기기는 Rigaku제 모델 D/Max-IIIB였고, X-선은 CuK α 에 조건은 40kV와 100mA 이다. 이 석탑의 조암광물에 관한 조성비와 광물종, 풍화에 따른 광물 및 생물학적 변화를 관찰하기 위하여 주사전자현미경(SEM)을 사용하였다. 전자현미경의 모델은 Oxford사의 에너지 분산형 성분 분석기(EDXA, Inca M/X)가 장착된 JEOL사의 JSM-6335F 이다. 분석시료는 탄소와 금으로 이중 피복한 것을 이용하였다. 대자를 측정은 10⁻⁵ SI 단위의 측정 한계를 가진 KT-6(Pocket Susceptibility Meter) 모델을 사용하여 측정하였고, 대자율의 크기는 10⁻³ SI 단위계를 사용하였다.

3. 부재의 암석학적 특징

3.1. 암석분포와 재질특성

경주 서악리 삼층석탑이 위치하고 있는 선도산 일대의 기반암은 백악기 경상누층군의 대구층으로서 주로 녹회색 셰일 및 사암의 호층으로 구성되어 있다.⁷ 선도산 중턱에서부터는 위의 퇴적암류를 관입 또는 분출한 안산암질암이 분포하며, 북서부에는 위의 모든 암석을 관입한 흑운모 화강암이 산출된다(Figure 2). 그러나 서악리 삼층석탑을 이루는 암석은 알카리 화강암으로서 주변에서는 산출되지 않는 암석이다. 이번 조사에서는 정밀한 육안관찰과 탑의 본체에서 탈락된 암편을 대상으로 현미경 관찰, X-선 회절분석을 통하여 삼층석탑의 구성암석은 알카리 화강암이며 이는 A-형 화강암으로 알려진 남산화강암과 동일한 것임을 밝혔다.

경주 부근의 화강암체에 대해서 이미정⁸ 등과 이준동과 황병훈⁹에 의해 암석학적인 연구 결과가 보고 되었다. 이미정⁸ 등은 조성적인 차이로부터 각섬석 흑운모 화강섬록암, 흑운모 화강암, 알카리 화강암의 3가지로 구분했다. 한편 이준동과 황병훈⁹에 따르면 경주 부근 화강암

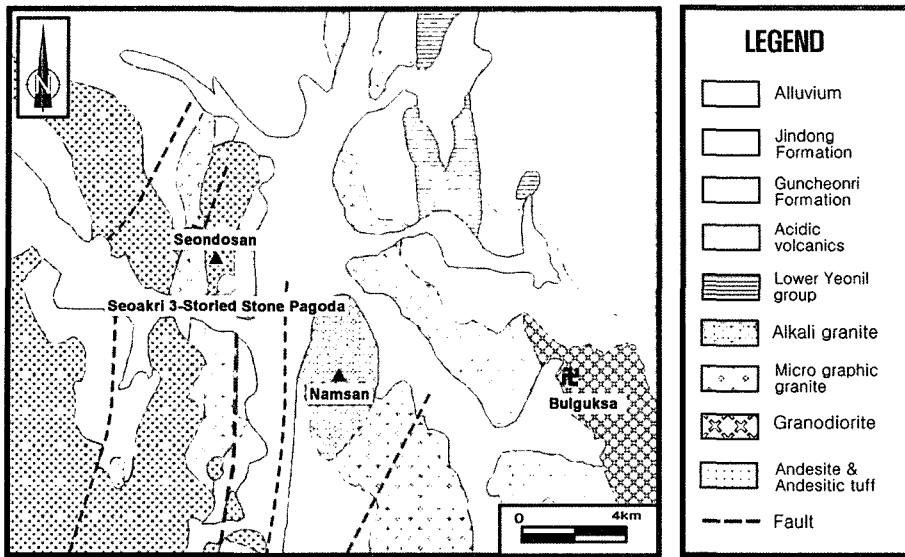


Figure 2. Geological map around the Gyeongju and three-storied stone pagoda in Seokri.

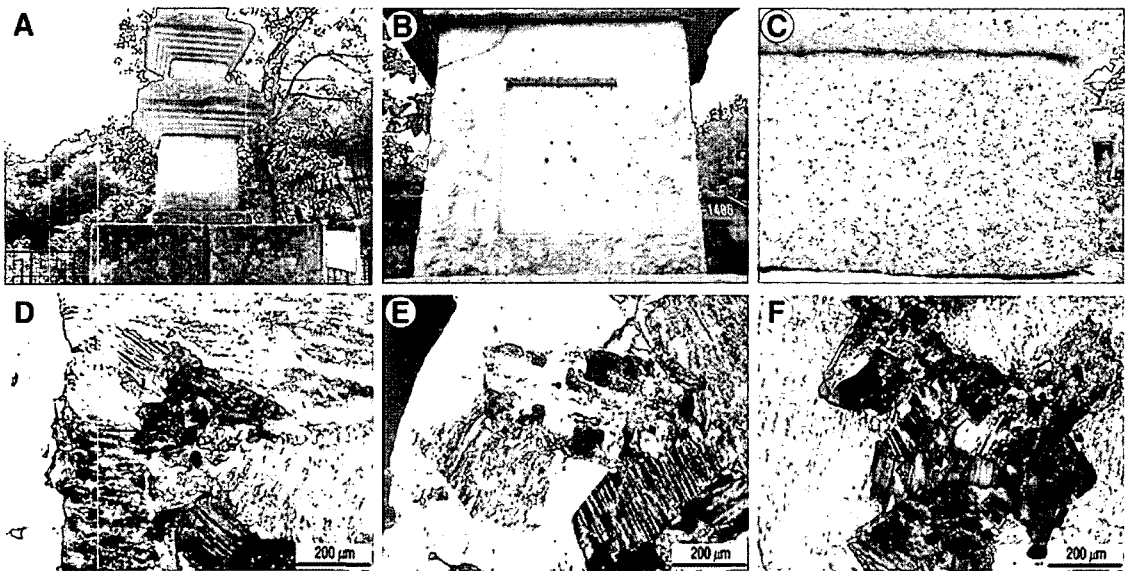


Figure 3. Constituting rock properties of alkali-granite and microphotographs of the three-storied stone pagoda in Seokri. (A) All rock materials of the stone pagoda is composed of alkali granite. (B) The rocks show light grey with medium-grained texture. (C) Tiny miolitic cavities developed to the rocks. (D) Rock forming mineral assemblages of alkali feldspars, quartz and biotite. (E) Equigranular phaneritic of quartz and highly altered clay minerals occurred along the alkali feldspars. (F) Alkali feldspars changed into clay minerals and highly chloritized biotite.

체는 기재적인 차이로부터 6개의 암상, 즉 화강섬록암, 세리사이트 화강암, 반상 화강암, 등립질 화강암, 미문상 화강암 및 알카리 화강암으로 구분된다.

알카리 화강암은 흔히 남산 화강암으로 불리는 A-형 화강암으로서 서악리 삼층석탑을 이루고 있는 모든 부재와 가장 유사한 암석이다(Figure 3A). 서악리 삼층석탑

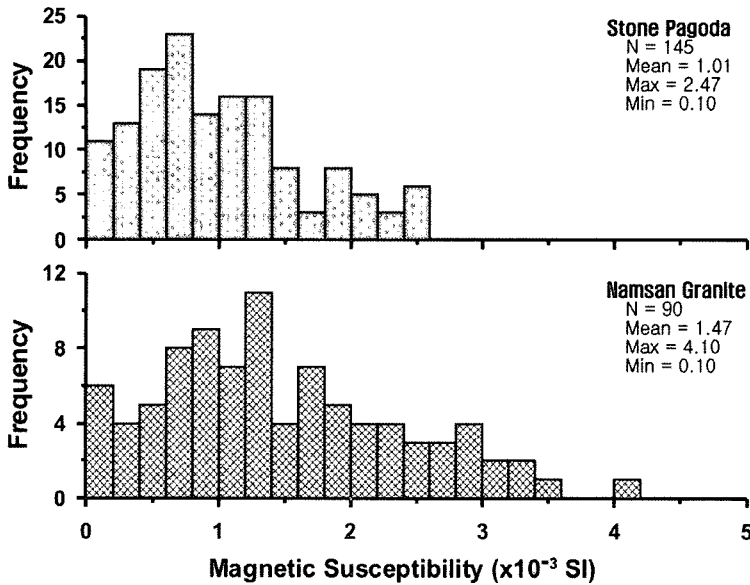


Figure 4. Histogram showing magnetic susceptibility of the three-storied stone pagoda in Seoakri and Namsan Granite.

을 구성하는 암석은 중립질의 회백색 알카리 화강암으로 수 mm 정도의 정동조직이 관찰된다(Figure 3B, 3C). 이 정동에서는 석영, 알카리 장석, 전기석, 자철석의 자형결정이 성장하였다. 또한 이 암석은 선도산 부근에 분포하는 흑운모 화강암과는 암석학적 특성이 전혀 다른 것이다.

이 삼층석탑을 이루는 알카리 화강암을 편광현미경에서 관찰한 결과, 구성광물들은 알카리 장석, 석영, 흑운모, 알카리 각섬석, 형석 등이며 저어콘, 인회석, 자철석 등이 부구성광물로 수반된다. 이 알카리 화강암은 석영이 약 30%, 사장석이 약 15%, 알카리 장석이 약 50% 함유되어 있고, 유색광물로는 흑운모가 5% 미만이다. 현미경하에서는 세이에이트 조직을 갖는 석영과 퍼사이트화된 알카리 장석이 주류를 이룬다(Figure 3D). 이 중에 알카리 장석은 대부분 견운모화 되어 있으며, 흑운모는 입자의 경계나 벽개면을 따라 녹니석화 되어 있다(Figure 3E, 3F).

3.2. 전암 대자율

전암 대자율은 암석의 전체 자화강도를 구분하기 위

해 응용된 암석학 연구의 한 수단으로 이미 잘 알려져 있다. 대자율은 외부자기장에 대한 전체 자화강도를 의미하며 진공에서 0이다. 일반적인 화강암의 평균 대자율은 $2.512(\times 10^{-3} \text{ SI unit})$ 으로 암석에 함유된 불투명 광물로 나타나는 강자성 광물인 자철석의 함량과 정의 상관관계를 가진다. 따라서 대자율을 통해 자철석을 함유한 암석의 광역적 분포를 파악할 수 있기 때문에 1.256을 기준으로 이보다 높은 경우는 자철석 계열로, 낮은 경우는 티탄철석 계열의 암석으로 구분한다.¹⁰ 또한 전암 대자율은 캄보디아 앙코르 사원의 부채 연구에도 적용된 바 있으며, 석조문화재를 구성하는 부채의 다각적인 성인적 해석으로도 이용되는 방법이다.^{11,12}

대자율은 KT-6 모델로 경주 서악리 삼층석탑과 남산 화강암을 대상으로 측정하였다. 서악리 삼층석탑의 전암 대자율 값의 범위는 0.10~2.47 ($\times 10^{-3} \text{ SI unit}$)이고 남산화강암은 0.10~4.10으로 다소 넓은 범위를 가진다(Figure 4). 삼층석탑의 대자율값이 다소 낮지만 남산화강암의 대자율값 범위안에 측정되므로 이들은 서로 동일한 분화과정을 경험한 동일한 종류의 암석으로 해석할 수 있다. 좌용주¹³에 의하면 알카리 화강암의 대자율 분포가 0.25~6.00의 범위를 가지며 암체의 노두에 따라

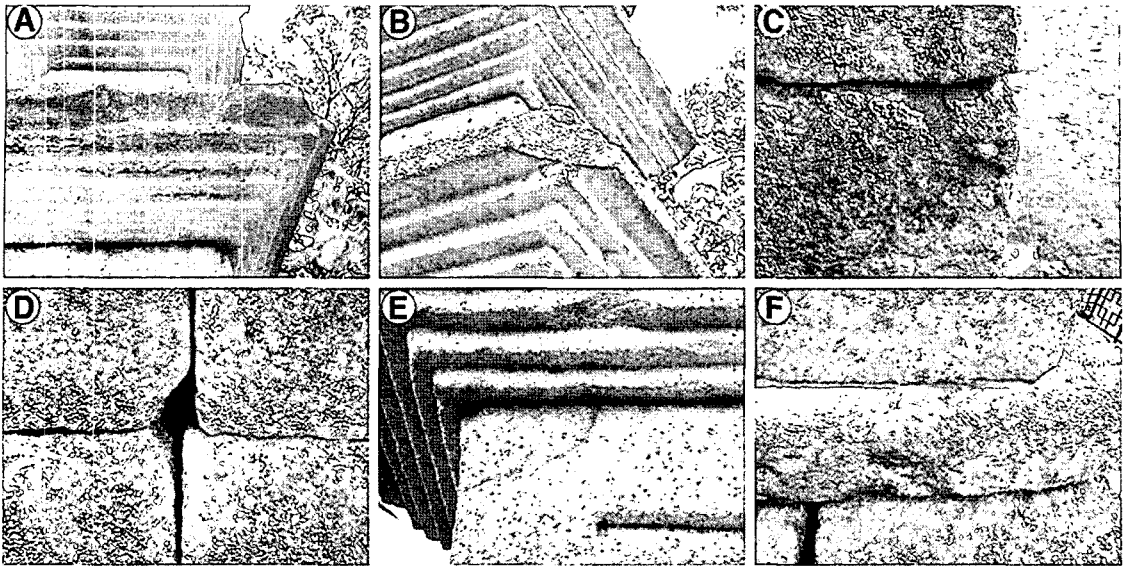


Figure 5. Deterioration and weathering degree for host rocks of the three-storied stone pagoda in Seoakri. (A) The 2nd storied roof rocks show highly fracture. (B) Broken-out along the corner of the roof rock. (C) Corner of the basement rock appear exfoliation and falling off. (D) Wide gap between the each block of basement rock. (E) Yellowish brown discoloration by iron hydroxides. (F) Vertical crack of the body underpinning rock occur into concrete and epoxy resin.

약간씩 다르기도 하지만, 하나의 노두에서도 대자울값의 변화가 심하게 나타난다고 하였다. 이런 변화는 일반적인 화강암에서는 보기 드문 경우이며 알카리 화강암 내의 대자울값을 제어하는 자철석의 분포가 매우 불균질함을 지시하는 것으로 판단된다.

4. 풍화 및 훼손상태와 진단

4.1. 물리화학적 풍화와 진단

암석의 기계적인 풍화작용이란 큰 화학적 변화없이 입자와 입자의 경계부, 공극과 광물의 불연속면을 따라 입자들이 깨지는 물리적인 분해현상을 말한다. 이 기계적 풍화작용은 대기에 노출된 곳이면 어디든지 발생할 수 있으며 특히 암석으로 피복된 지면과 노출된 절벽에서 뚜렷하다. 암석의 화학적 풍화작용은 근본적으로 물과 조암광물의 반응에 의해 발생하며 암석의 입자상 분해, 점토광물화 작용, 표면변색 및 차별침식을 가속시킨

다. 이들이 암석의 물리화학적 변화를 초래하게 되며 한번 생성된 충격은 반복되는 풍화작용에 따라 박리와 박락이 발생되고 절리 또는 불연속면으로 발전하여 건조물의 구조적 안정성에 심각한 타격을 주게 되는 것이다.

경주 서악리 삼층석탑은 이미 보수공사가 수행된 바 있다. 현재 특별한 구조적 불안요인은 없는 것으로 판단되기 때문에 부분적으로 풍화훼손 상태에 대해 간단히 기술하기로 한다. Figure 5는 서악리 삼층석탑에 나타난 부재의 물리적 및 기계적 풍화와 훼손현황을 보여주는 것으로서 각층의 옥개석 모서리와 처마가 탈락되어 멸실되어 있으며(Figure 5A, 5B), 기단을 구성하는 부재의 모서리에 박리와 박락으로 인하여 지대석과 기단의 거의 모든 면에서 부재와 부재사이는 이격을 보이고 있다(Figure 5C, 5D). 또한 석재의 표면에는 부분적으로 철광물의 산화작용에 의하여 결정의 일부가 피복하여 갈색으로 변질된 부분이 보인다(Figure 5E). 이 이외에도 3층 탑신석과 탑신부 받침석에는 멸실 및 심한 균열이 생성되어 있어 이를 충진한 콘크리트와 에폭시 수지가 흉하게 나타나 있다(Figure 5F).

4.2. 생물학적 오염과 진단

서악리 삼층석탑은 바로 인근에 일조량을 방해하는 수목과 야산이 있어 수분의 증발산이 불량하여 미생물에 의한 생물학적 풍화가 심각한 상태이다. 이런 미생물들은 암석에 서식하면서 뿌리나 균사가 가하는 기계적인 압력에 의하여 암석에 충격을 가하고 미생물의 대사과정에서 나오는 유기산 등이 축적되어 결국 암석의 화학적 및 생물학적 풍화를 촉진시킨다.^{14,15}

서악리 삼층석탑도 기단부와 각층의 옥개석에 조류 및 지의류가 부재의 표면을 거의 덮고 있어 식물체에 의한 기계적 풍화를 가속시키고 있다(Figure 6A, 6B, 6C). 또한 석탑에는 곤충의 생식지와 조류 배설물이 관찰되기도 한다(Figure 6D, 6E). 이 석탑의 지의류에 의한 피도를 보면 부재마다 부분적으로 차이가 있으나 보통 50~70 %로 부착생물의 번식이 심각한 수준이며, 석탑의 기단과 옥개석의 상부는 거의 100%에 달한다. 이 생물들은 석탑에 밀착하여 서식하기 때문에 제거할 때 암석의 인위적인 풍화도 감수해야 할 것이다. 한편 기단부에는 이미 잡초의 서식이 왕성한 상태이다(Figure 6F).

이 석탑에 착생하는 조류, 지의류와 및 선대류들은 Figure 7에서와 같이 다양한 종류가 서식하고 있다. 암석의 광물학적 오염과 함께 암회색의 지의류가 밀집하여 분포하며, 연회색의 엽상지의류가 다발모양으로 관찰된다(Figure 7A, 7B). 또한 녹조류와 연회색 지의류가 공존하여 넓게 분포하기도 한다(Figure 7C). 이런 곳은 암석의 박리현상과 함께 화학적 및 광물학적 풍화도 심하게 진행되어 있어 약한 충격에도 쉽게 떨어져 나온다. 이 부분을 주사전자현미경을 이용하여 관찰한 결과, 석영과 장석의 입간 공극에는 풍화에 따라 점토광물이 생성되어 있었으며(Figure 7D) 지의류의 뿌리조직 및 균사와 결합되어 조암광물의 입간을 충진하는 등, 아주 다양한 형태의 생물학적 풍화현상을 관찰할 수 있다(Figure 7E, 7F). 따라서 식물체가 부재의 기계적 풍화를 가속시키고 있어, 이에 대한 대비가 있어야 하겠다.

5. 보존처리 및 관리

경주 서악리 삼층석탑은 선도산 기슭에 위치하고 있고 주변에는 보존을 저해하는 수목이 지반에는 잔디가

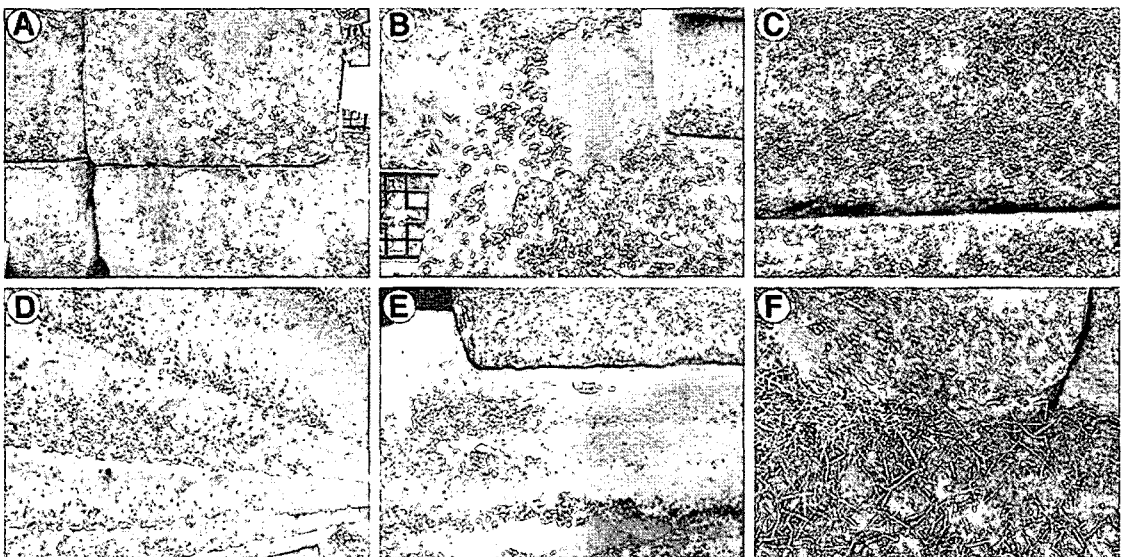


Figure 6. Biological deteriorations showing the three-storied stone pagoda in Seoakri. (A) Algae and lichen aggregate covered on the basement rocks. (B) Algae and lichen show on the roof rocks. (C) Lichen and green algae grow on the body rocks of lower part. (D) Insect habitat showing the roof underpinning rock. (E) Bird secretion show on the 1st roof rocks. (F) Weeds grow naturally between ground and ground rocks.

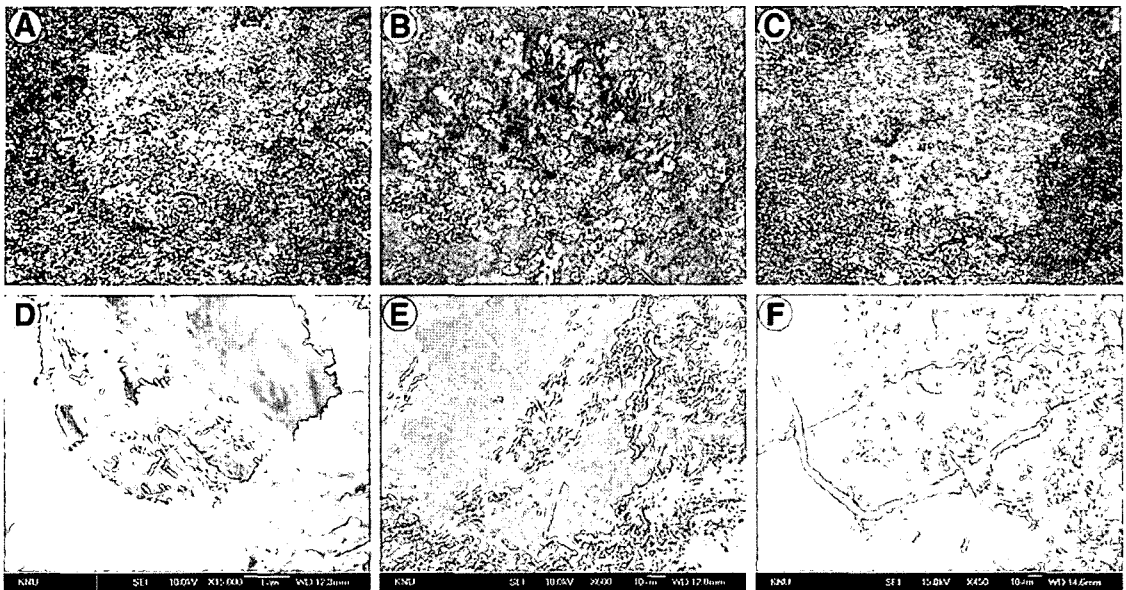


Figure 7. Biological contaminants of the rock surface and scanning electron microphotographs (SEM) showing rock-forming minerals and micro-organism for host rock of the three-storied stone pagoda in Seoakri. (A) Light grey colored lichen. (B) Dark grey and light grey colored foliated lichen. (C) Grey lichen and green algae covered on the roof rock surface. (D) Near surface of the stone material composed of feldspars and microscopic clay minerals due to the weathering process. (E, F) Rootlets of lichen and algae occur with the grain boundary of host rock.

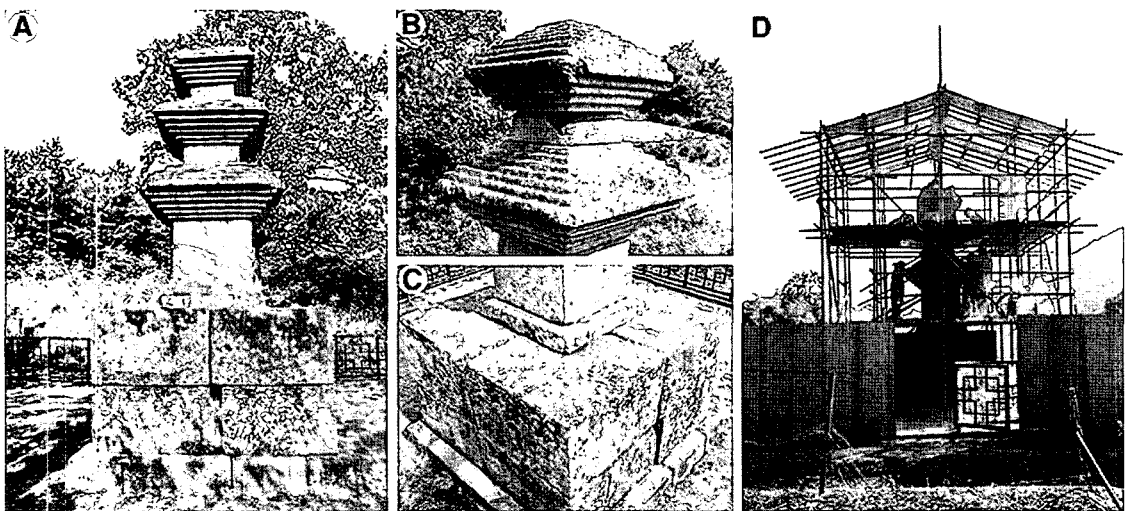


Figure 8. Frontal view of the stone pagoda before conservation treatment. (A) Tree and lawn inhabit in the vicinity of the pagoda. (B, C) Each floor of roof rocks and basement rocks grow lichen and algae. (D) Construction equipment for conservation treatment.

심어져 있다(Figure 8A). 이 탑의 기단부와 옥개석의 상부에는 지의류를 비롯한 미생물의 오염이 심각하여 (Figure 8B, 8C) 경주문화재연구소가 2004년 10월 1

일부터 11월 30일까지 보존처리를 실시하였다. 처리는 석탑 전면의 세정과 지의류, 이끼류를 제거하는 작업을 실시하였으며 이전의 보수 시에 사용되었던 콘크리트를

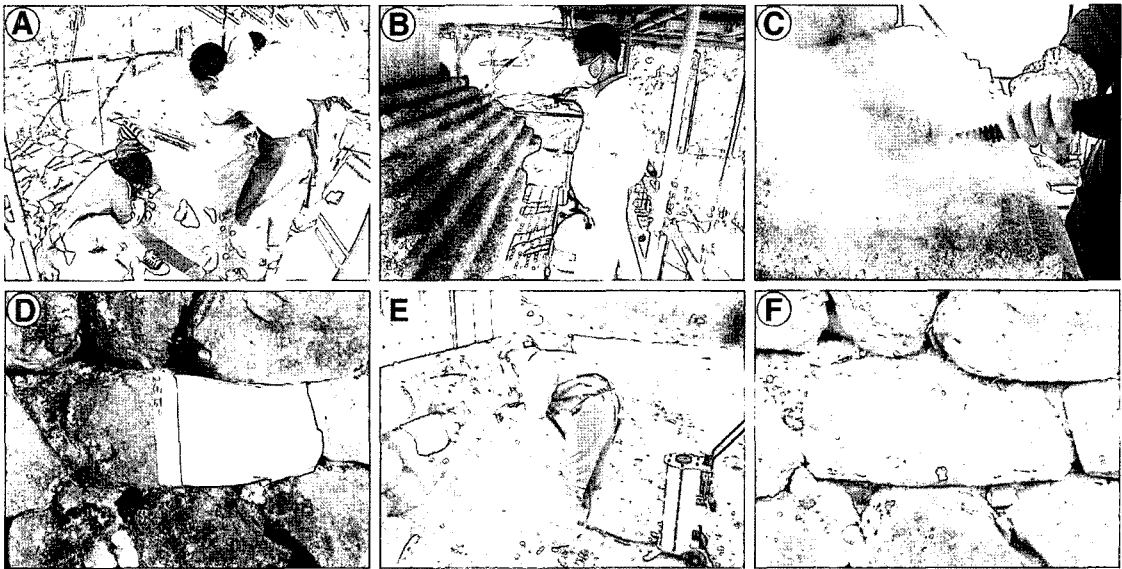


Figure 9. Surface periphyton treat removal works and clinical test of dry blasting treat in the fundamental rock piles. (A) Dry cleaning treatment using wood-knife. (B) Photograph show atomizing distilled water. (C) Cleaning treatment using high temperature steam. (D) Partly covered area is compared with effect an experiment. (E) Apply and test by high tension dry spray. (F) Occurrence after clinical test by dry blasting.

제거하고 에폭시수지로 충전 및 보강하였다. 또한 삼층 석탑의 주변정리 공사와 빗물의 유입을 최소화하기 위해 배수로를 만들고 기반과 부지를 정비하였다.

5.1. 표면세정과 임상실험

삼층석탑을 구성하는 암석은 수 mm 내외의 정동이 잘 발달되어 있으며, 부분적으로 철수산화물로 변색되어 있다. 부재와 부재사이에는 암흑색 오염물질이 피복되어 있으며 1층 탑신에는 연한 갈색조의 오염물질이 우수의 낙하방향을 따라 오염되어 있다. 또한 삼층석탑의 기단부와 지대석 및 옥개석에는 담록색, 녹황색, 암흑색, 암회색 및 흑회색의 미생물이 서식하고 있다.

삼층석탑에 비계를 설치한 후 먼저 표면세정을 실시하였다(Figure 8D). 표면세정은 시방서에 명기된 방법으로 석재에 손상이 가지 않도록 가능한 부드러운 솔과 나무칼을 사용하여 일차 건식 세정을 실시하였고 이차로 습식세정을 실시하였다(Figure 9A). 이때 잘 제거되지 않는 지의류 및 오염물 등은 증류수를 뿌려 충분히 불린

다음 부드러운 솔, 나무칼과 고온스팀을 이용한 세척기를 이용하여 제거하였다(Figure 9B, 9C).

고착지의류처럼 암석 표면에 깊이 뿌리 내리고 부착 생활을 하는 생물은 증류수를 이용한 습식세정으로는 제거에 어려움이 많아 고온스팀 세척기를 사용하였다. 고온의 스팀은 건조한 암석 표면에 분사되어 석재표면을 적시어 주면서 고압공기 세정도 동시에 할 수 있으며, 남아있는 균사의 제거까지도 용이하게 한다. 이번 처리 작업에서는 고착지의류와 같은 부착생물이 분포하는 부분을 중심으로 고온스팀 세척을 실시하였다(Figure 9C). 전체적으로는 삼층석탑의 석재 표면세정이 끝난 후에 마무리 과정으로 고온스팀 세정을 실행하였다.

이번 표면세정 과정에서는 임상실험으로 건식 블라스팅을 실시하였다. 삼층석탑 주변의 석축을 구성하는 암석을 대상으로 실험을 하였으며 처리 효과를 비교하고자 대상 암석의 한쪽부분을 마감하여 실시하였다(Figure 9D). 실험은 고압 건식 분무기를 이용하여 실험부위에 적용하였다(Figure 9E). 이 실험결과, 건식 블라스팅을 실시한 부분에는 세정효과가 뛰어나지만 암석표면의 광

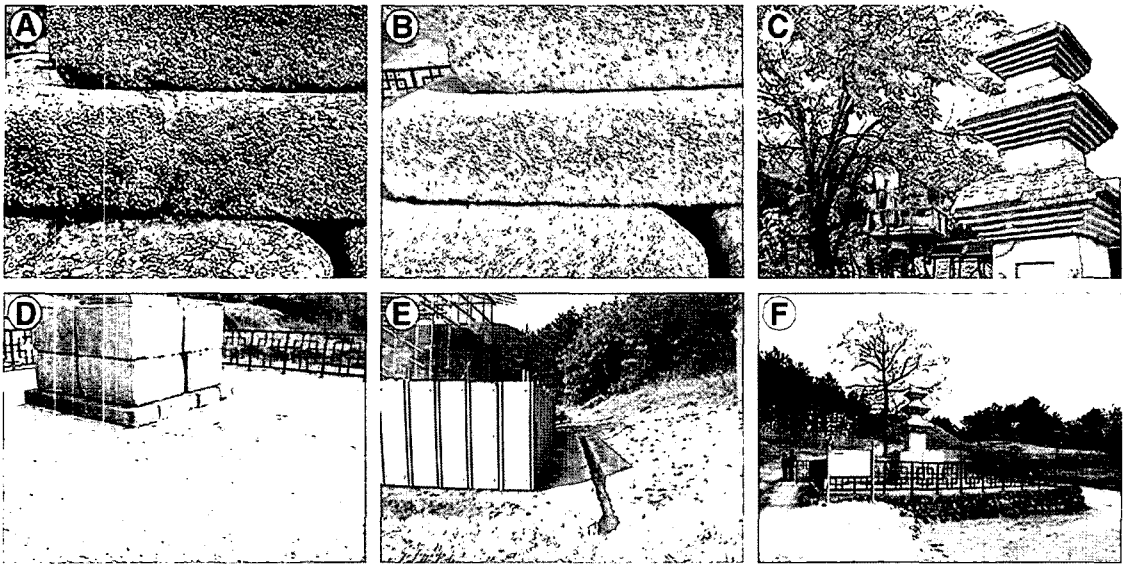


Figure 10. Conservation treatment area and arrangement around the three storied stone pagoda. (A, B) Resin sticking state and after conservation treatment of the 1st body underpinning. (C) Breach of tree exclude for conservation environment around the stone pagoda. (D) State of the ground remove after grass on basement. (E) Drainage ditched to control for overflow from the eastern slope around the pagoda. (F) Field view after conservation treatment and rearrangement of the stone pagoda.

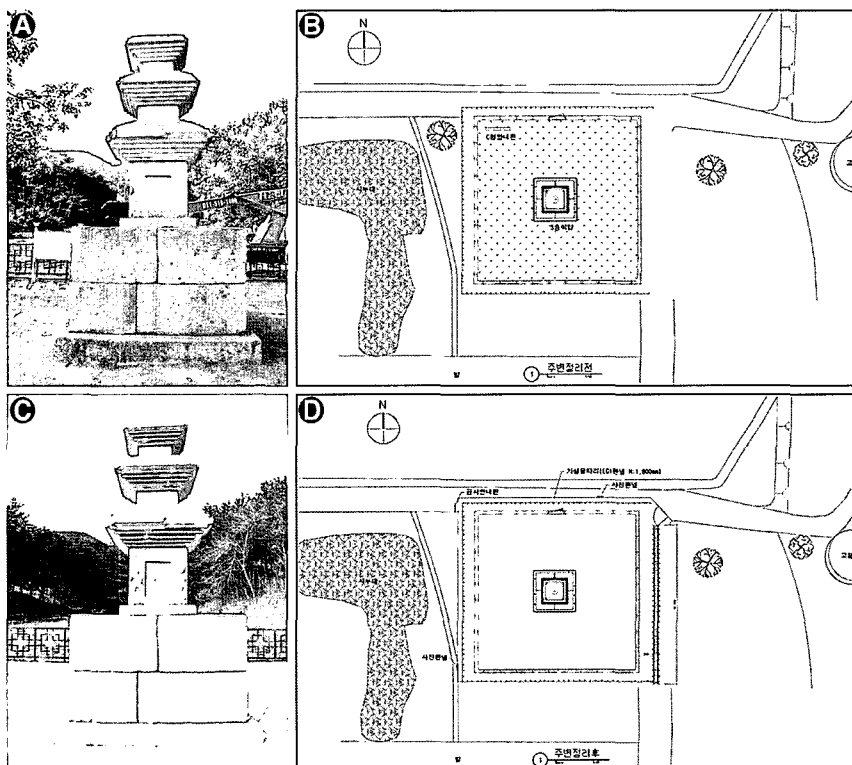


Figure 11. Conservation treatment before and after state of the three-storied stone pagoda in Seoakri. (A, B) Occurrence and plane map before the conservation treatment. (C, D) Occurrence and plane map after the conservation treatment.

물입자의 탈락현상이 발생하여 이번 표면세정에는 적용하지 않았다(Figure 9F).

5.2. 보강접합과 주변환경 정비

이 삼층석탑에는 각층의 옥개석 모서리와 처마가 탈락되어 있으며 옥개석 하부와 기단부의 모서리에 균열 및 박리, 박락을 관찰 할 수 있다. 또한 북서쪽 1층 기단 상부 모서리, 북쪽 1층 탑신 받침석, 북서쪽 3층 탑신석에는 벌실 및 균열이 생성되어 있어 이를 충전한 콘크리트와 에폭시 수지가 흉하게 나타나 있다(Figure 10A).

이 부위는 치과용 소도구 및 작업공구를 이용하여 제거하였으며 콘크리트의 잔량, 먼지, 흙 등 불순물은 증류수로 세정하여 제거하고 건조하였다. 콘크리트가 제거된 부재의 이탈부위는 에폭시수지(L-30)를 사용하였으며 충전제로는 탈크와 알카리 화강암 파우더를 혼합하여 사용하였다. 에폭시수지와 충전제의 혼합과정에서 석탑의 암석과 동일한 질감을 가질 수 있도록 색 맞춤을 하여 사용하였다(Figure 10).

또한 삼층석탑의 주변에 서식하고 있는 수목 및 잔디는 완전히 제거하였으며(Figure 10C, 10D), 그늘에 의한 습기 발생을 최소화하여 향후 지의류 및 이끼류 발생을 억제하였다. 이 삼층석탑의 동쪽에 있는 비탈로부터 흘러내리는 빗물을 최소화하기 위해 암거를 두고 배수로를 설치하였다(Figure 10E). 현재는 일차적인 보존처리가 완료되었으며, 주변환경도 정비되었다(Figure 10F). 이전과는 대조적인 모습으로 정돈되어 있다(Figure 11).

6. 결론

1. 경주 서악리 삼층석탑은 중립질의 회백색 알카리 화강암으로 구성되어 있으며 상륜부를 제외하면 원형을 거의 보존하고 있는 것으로 보인다. 그러나 지대석과 기단부 및 옥개석의 상부에는 지의류를 비롯한 미생물의 서식이 심각한 상태이다. 상륜부에는 노반만이 남아 있으며 철주가 있던 부분에는 원통형의 흔적만 남아 있다.
2. 이 탑은 이미 보수공사가 되었으며 벌실부위도 보

강되었다. 주요 보강부위는 1층 기단 상부 모서리, 1층 탑신 받침석, 1층 탑신석, 3층 탑신 상단부 등으로 부분적으로 콘크리트와 에폭시 수지를 혼용하였다. 또한 각 층의 옥개석 처마에는 풍탁의 흔적이 있으며 이 부분은 거의 모두 탈락되어 있다.

3. 기단부와 지대석 및 옥개석에는 담록색, 녹황색, 암흑색, 암회색 및 흑갈색의 미생물 오염이 심각하다. 이는 주로 고착지의류, 엽상지의류 및 녹조류들로서 피도가 거의 90 % 정도이다. 그러나 탑신부는 일부 담황색의 변색을 제외하면 양호한 보존상태를 보인다.
4. 지대석과 지반의 접촉면은 토사와 잔디로 되어 있어 생물상의 천이, 수분상승, 토양오염물질의 부착 등에 우려가 있어 완전히 개량하였다. 보호 철책은 아주 양호하나 철책내부의 지반은 탑의 중심부에서 외각부로 약간의 경사를 주어 배수가 용이하도록 조절하였다.
5. 이 탑의 표면세정은 시방서에 명기된 방법으로 석재에 손상이 가지 않도록 가능한 부드러운 솔과 나무갈을 사용하여 일차 건식세정을 실시하였고 이차로 습식세정을 실시하였다. 이때 고착지의류 등 잘 제거되지 않는 부분은 고온스팀을 이용한 세척기를 사용하여 제거하였다.
6. 이미 보수되었던 콘크리트와 에폭시 수지를 제거하고 에폭시수지(L-30)를 사용하여 접합 및 보강하였으며 충전제로는 탈크와 알카리 화강암 파우더를 혼합하여 사용하였다. 부재와 질감을 맞추기 위해 합성수지와 충전제의 혼합과정에 색 맞춤을 하여 사용하였다.
7. 이 석탑 주변의 수목 및 잔디는 완전히 제거하여 그늘에 의한 습기 발생을 최소화하여 향후 지의류 발생을 억제토록 조치하였다. 이 석탑의 동측 경사면 비탈로부터 흘러내리는 빗물을 최소화하기 위해 배수로를 설치하였으며 주변환경과 지반을 정비하였다.

사사

이 연구는 경주시가 국고보조사업의 일환으로 국립경

주문화재연구소에 의뢰한 경주 석탑 및 석조문화재 보수 정비 사업으로 완성되었음을 명기하며, 사업의 수행과 행정 및 재정적 지원에 감사한다.

참고문헌

1. J. Fidler, "Stone building, construction and associated component system: their decay and treatment". *English Heritage Research Transactions*, 2, 1-104 (2002).
2. S. G. Lee and D. H. De Freitas, "A revision of the description and classification of weathered granite and its application to granites in Korea". *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 22, 31-43 (1989).
3. 최석원, 윤용혁, 서만철, 김광훈, 이찬희, "충남지역 석조문화재의 현황과 보존대책". 충청남도, 조사연구보고서, 425 (1999).
4. G. G. Amoroso and V. Fassina, "Stone decay and conservation". *Materials Science Monographs II, New York, Elsevier*, (1983).
5. C. A. Price, "Stone conservation. An overview of current research". *The Getty Conservation Institute*, (1996).
6. 문화재청, "문화재 상세정보. <http://www.ocp.go.kr/>, 경주서악리삼층석탑". 문화재청, (2005).
7. 김남장, 진명식, "한국지질도 모량도폭 및 설명서 (1:50,000)". 국립지질조사소, (1971).
8. M. J. Lee, J. I. Lee and M. S. Lee, "Mineralogy and major element geochemistry of A-type alkali granite in the Kyeongju area, Korea". *Journal of the Geological Society of Korea*, 31, 583-607 (1995).
9. 이준동, 황병훈, "경주 남산-토함산 일원의 화강암류에 관한 암석학적 연구". *한국지구과학회지*, 20, 80-95 (1999).
10. S. Ishihara, "Granitoid series and mineralization in the Circum-Pacific Phanerozoic granitic belts". *Resource Geology*, 48, 219-224 (1998).
11. E. Uchida, Y. Ogawa and T. Nakagawa, "The stone materials of the Angkor monuments, Cambodia : the magnetic susceptibility and the orientation of the bedding along of the sandstone". *Journal of Mineralogy, Petrology and Economic Geology*, 93, 411-426 (1998).
12. E. Uchida, Y. Ogawa, N. Maeda and T. Nakagawa, "Deterioration of stone materials in the Angkor monuments, Cambodia". *Engineering Geology*, 55, 101-112 (1999).
13. 좌용주, 이상원, 김진섭, 손동운, "경주 불국사와 석굴암의 석조 건축물에 사용된 석재의 공급지에 대하여". *지질학회지*, 36, 335-340 (2000).
14. E. May, F. J. Lewis, S. Pereira, M. R. D. Seaward and D. Allsopp, "Microbial deterioration of building stone - a review". *Biodeterioration Abstracts* 7 (2), 109-123 (1993).
15. 민경희, "석조문화재의 생물학적 훼손에 관한 최근 연구 동향". *한국문화재보존과학회 학술대회 발표논문집*, 12, 10-12 (2000).