

사찰에 조성된 조립 사질 토양이 석조 문화재의 훼손에 끼치는 영향

도진영

경주대 문화재학부

Influence of Coarse Sandy Soil in Temples on the Deterioration of Stone Cultural Properties

Jinyoung Do

School of Cultural Assets, Gyeongju University,
San 42-1 Hyohyun-dong Gyeongju Gyeongbuk 780-210, KOREA

1. 서론

우리나라 석조 문화재는 다수가 사찰의 경내에 위치하고 있으며 이들 석조 문화재 주변 지면에는 잔디나 조립 사질의 토양이 조성되어 있다. 비단 석조문화재 뿐만 아니라 문화재를 둘러싸고 있는 환경적인 요인은 문화재의 손상에 복잡하게 작용하여 다양한 형태의 손상을 일으킨다.

각각 국보 20호, 21호로 지정된 불국사 내의 다보탑과 불국사 삼층석탑의 손상 문제는 요즘 큰 화두로 오를 만큼 세간의 관심을 끌고 있다. 이들 석조 문화재의 손상 상태는 이미 조사가 많이 진행되어 보존처리를 기다리고 있고 이러한 손상이 일어나게 된 원인에 대해서도 여러 각도로 연구되었으며, 또 연구 중에 있다(김수진, 서만철). 본 연구에서는 문화재에 문제를 일으키는 여러 환경 요인 중 석조 문화재 주변 지면에 조성된 조립 사질 토양이 이들 문화재의 손상에 끼치는 영향을 불국사 경내 마당에 조성된 조립 사질 토양을 대상으로 간단한 몇 가지 예비 분석을 통하여 살펴보았다.

불국사는 이미 알고 있듯이 연중 일반 관광객과 봄가을의 학생단체 여행단을 포함하여 다수의 관광객들에 의해 몸살을 앓고 있다. 불국사 측은 자체사정으로 관람객수의 정확한 통계치를 밝히지 않고, 대략적인 수치를 연간 100만 정도로 밝히고 있으나, 경주시청이 2003년 12월 기준으로 경주시 관광객 수를 연간 7,948,000으로 통계 보고한 것을 보더라도 경주 관광의 중심이 되고 있는 불국사를 찾는 사람들의 수를 추측해볼 수 있다. 불국사의 경내에 조성된 조립 사질 토양은 이러한 많은 관람객이 밟음으로 인해 작은 크기의 입자로 공

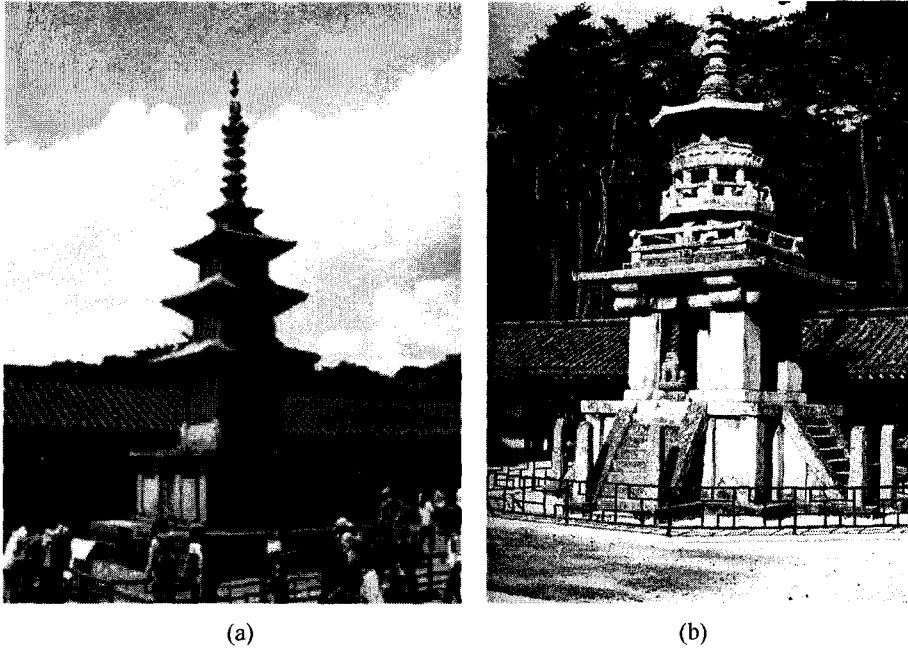


그림 1. 불국사 관람객과 주변의 조립 사질토양.

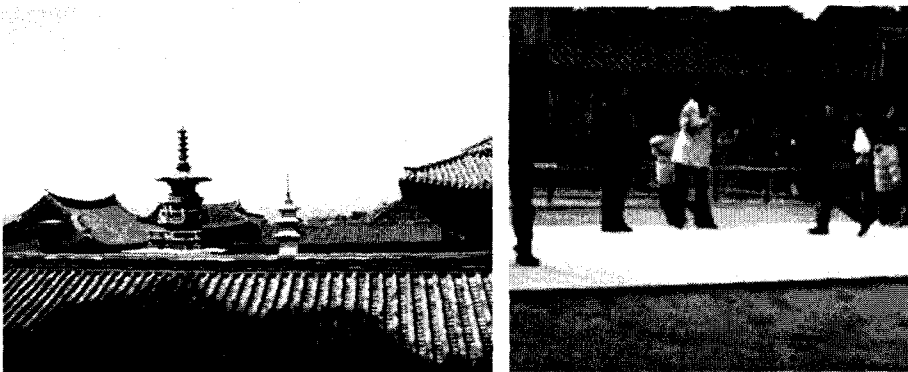


그림 2. 대웅전과 회랑으로 둘러싸인 다보탑과 불국사삼층석탑과 그 주변.

기 중에 날리게 되고 다보탑과 같은 복잡한 구조를 가진 곳에서는 이러한 부유물질의 침착이 용이하게 된다(그림 1). 더구나 두 석탑은 대웅전과 회랑으로 둘러싸여 있어 부유된 지면의 토양성분이 더 잘 침착될 수 있다(그림 2). 여기에 계절에 관계없이 강하게 부는 바람 또한 지면의 토양을 부유시키는 작용을 할 수 있다(표 1). 이렇게 침착된 부유 토양은 생물이 서식할 수 있는 장소와 양분을 제공하기도 하며, 토양의 수용성 염성분이 석재와 반

표 1. 경주의 평균 기상데이터(경주시 농업기술센터 발표치)

년도	기온(°C)		습도(%)	강우량(mm)	풍속(m/s)
	최고	최저			
2002	35.5	-12.5	73.5	1428.0	8.0
2001	36.5	-13.5	71.0	971.0	11.1
2000	35.8	-9.2	69.2	985.5	6.7
1993~2002 평균	31.3	-6.4	-	1113.7	-

응하여 석재를 약화시키는 등 손상을 초래하기도 한다.

부유먼지량에 대한 정확한 조사연구가 함께 실시되어야 하지만 여기에서는 예비적인 연구로 조립사질 토양의 수용성 염성분 분석과 광물성분분석을 실시하여, 이 토양이 야기시킬 수 있는 문제점들을 도출해보고자 한다.

2. 연구대상 및 분석방법

경주 불국사 경내 다보탑과 불국사삼층석탑 주변 지면에 깔려져 있는 조립사암 토양과 두 석탑의 보호철책 위에 쌓여진 침착물질을 각각 채취하였다.

채취한 시료는 실체현미경으로 관찰하였으며, 광물 조성 분석을 위하여 시료를 60도에서 1시간 동안 건조한 후 구경 0.177 mm의 체로 시료를 분리한 후 아게이트 유발에서 분쇄하여 분말 X선 회절분석을 실시하였다. XRD 분석은 Rigaku RINT2200 모델의 X선 회절기를, 분석조건은 40 kV/30 mA의 CuK α 선을 이용하였다.

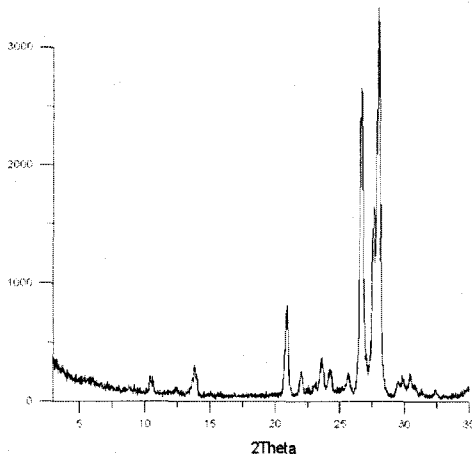
조립 사질 토양과 부유침착물 시료를 분말화한 후 증류수에 넣어 녹아 나온 이온을 기기로 측정하여, 가능한 수용성 염성분을 통계학적으로 조합하였다. 가라앉은 것과 물위에 떠있는 것들은 원심분리 후 여과지로 걸러내었다. 걸러진 용액 중 Cl⁻, NO₃⁻, PO₄³⁻과 SO₄²⁻ 등은 이온 크로마토그래피(Ion Chromatograph, LC-10AVP Shimadzu Co.)를 이용하였으며 엘루언트는 1.7 mM NaHCO₃와 12.5 mmol H₂SO₄/1.8 mM Na₂CO₃를 사용하여 한국 기초과학지원연구원에서 분석하였다. 음이온의 검출한계는 각각 F⁻ : 0.5 ppm, Cl⁻ : 0.2 ppm, NO₃⁻ : 1 ppm, SO₄²⁻ : 2 ppm, PO₄³⁻ : 5 ppm이다. Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ 및 K⁺ 등의 양이온은 유도전자결합플라즈마분석기(ICP-AES, ICP Atomic Emission Spectrometer, SHIMADZU/ICPS-1000IV)를 사용하여 서울대학교 기초과학교육연구 공동기기원에서 분석하였다. 시료는 각각 3번씩 분석하여 그 값을 평균내었으며, 분석 검출한계는 Na⁺, Ca²⁺,

$Mg^{2+} < 0.1 \text{ ppm}$, $K^+ < 0.5 \text{ ppm}$ 이다.

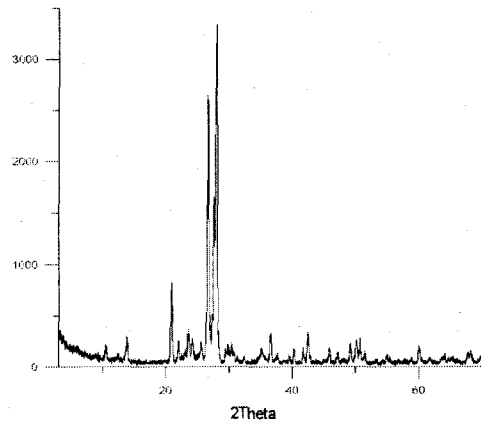
3. 결과 및 고찰

1) 조성광물성분

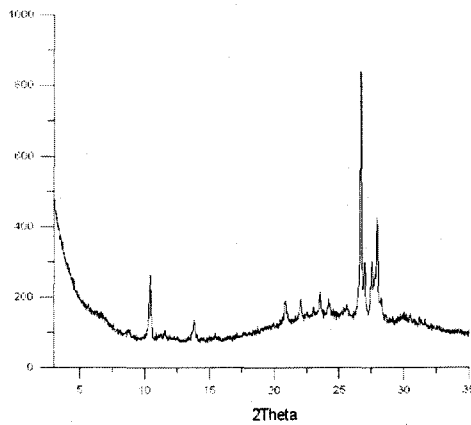
경주불국사 경내에 조성된 조립 사질 토양의 분말 XRD 분석결과, 그림 3(a), (b)에서 보
는바와 같이 주구성 광물은 석영과 장석류이며 여기에 스�멕타이트, 일라이트와 캐올리나이트



(a) 조립 사질토양 입자크기 <0.177mm



(b) 조립 사질토양 입자크기 <0.177mm



(c) 다보탑 난간 내부의 점토층

그림 3. 경주불국사 경내 조립 사질 토양과 다보탑 난간 내부에 형성된 점토층의
분말 XRD 패턴.

가 함께 검출되었다.

불국사 다보탑 탑신부 난간 내부에 점토층이 형성된 것이 관찰되는데 이 점토층의 XRD에 의한 구성광물성분은 석영, 각섬석, 사장석 및 소량의 집섬으로 분석되었으며, 이외에 흑운모, 일라이트, 스�멕타이트와 캐올리나이트가 확인되었다. 더 많은 시료를 분석한 후에 비교를 하여야겠지만 우선 분석된 두 결과만을 비교하자면 조립 사질 토양과 다보탑 난간 내부에 침착된 점토층의 구성광물이 매우 유사하다. 이는 다보탑 난간 점토층이 구성암석의 풍화에 의해 생성된 것일 수도 있지만, 주변에 조성된 조립 사질 토양이 공기 중으로 부유하여 난간의 표면에 쌓여서 생성된 것일 수 있음도 배제할 수 없다는 것을 암시한다.

2) 수용성 염성분

시료에서 용출된 이온은 Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 및 K^+ 로 시료에 따라 차이는 있지만 상당량 검출되었다. 검출된 이온이 형성 가능한 염은 NaCl 이며 Na 과 K 는 사장석의 주구성 원소로 다량 검출된 이들 이온의 기원으로 추정된다.

석조물 표면에 쌓인 부유토양이 빗물과 같은 수분과 반응하면 토양 중의 수용성 성분이 녹아나오고 이 성분들이 염을 형성하여 암석의 표면에서 결정화되면서 암석의 손상에 큰 영향을 끼치게 된다. 더구나 다보탑은 이러한 부유물질이 잘 쌓이고 배수의 막힘 등으로 빗물에 의해 쉽게 쌓여진 먼지가 씻겨나가지 못하는 구조라서 연구 결과와 같은 성질을 가진 염성분에 의해서 그 손상은 더욱 클 것으로 사료된다. 실제로 불국사 다보탑에서는 탑신부 난간 내부에 점토층이 형성된 것이 관찰된다. 빗물에 의해 난간 아래로 스며내리는 수분 중에는 침착된 토양에서 용해된 염성분들이 함유될 수 있다. 상부에서 흘러내린, 염이 함유된 수분은 부재와 부재사이에서 머무르게 되고 건조되면서 결정으로 석출된다. 난간 모서리의 햇볕이 잘 들지 않는 위치의 특성상 습한 분위기가 자주 형성되므로 염용액이 건조되어 결정화되었다 할지라도 강한 흡습성을 지닌 염이 늘 수분을 함유하게 된다. 이렇게 함유된 수분은 암석조직의 미세한 틈으로 침투하여 그 모세관압에 의해 틈이 더 커지게 하는 등의 물리적 손상을 불러일으킨다. 염용액은 또한 산성과 염기성 pH값을 보여 석재의 다른 광물들의 용

표 2. 경주불국사 경내 조립사질토양과 부유침착면지에서 용출된 이온성분 (wt.%)

Sample	Cl^-	NO_3^-	PO_4^{3-}	SO_4^{2-}	Na^+	Mg^{2+}	K^+	Ca^{2+}
earth particulate-1	0.082	0.028	-	0.005	0.430	0.152	2.148	0.438
earth particulate-2	0.075	0.011	-	0.002	0.288	0.108	1.657	0.455
air particulate-1	0.024	0.014	-	0.012	0.267	0.143	2.226	0.370
air particulate-2	0.028	0.009	-	0.008	0.383	0.183	2.217	0.403

해를 유도하며, 이온교환 과정으로 광물들은 부식된다.

4. 결론

문화재들은 주어진 주변 환경에 의해 여러 손상이 일어날 수 있다. 불국사 다보탑에서는 탑신부 난간 내부에 석영, 각섬석, 흑운모, 사장석 및 일라이트, 스펙타이트, 캐올리나이트 등의 점토광물로 구성된 흑갈색층이 형성되어 있다. 여러 원인들이 있겠지만 주변 지면에 조성된 조립사질 토양이 관람객의 이동이나 바람에 의해 부유되어 석조물 표면에 쌓여 형성 되었을 가능성에 대해, 조립 사질 토양의 조성광물성분이 다보탑 난간에 형성된 점토층의 조성성분과 유사함을 보여주는 간단한 분석을 통해 살펴보았다. 이렇게 침착된 토양이 빗물 과 같은 수분과 반응하면 수용성 염성분이 녹아나와서 암석의 표면에서 결정화되어 암석의 표면을 변화시키게 된다. 물에 잘 용해되는 염은 다공성 구조의 암석을 다양한 방법으로 손상시킨다. 염은 흡습작용을 하기 때문에 표면에 형성된 염 때문에, 암석 안의 습기는 증가 하고 그로 인해 습기가 증가된 부분에서 모세관물흡수가 일어나는 악순환이 계속된다.

불국사 두 석탑 주위에는 그림 2에서 보는 바와 같이 바닥의 일부는 돌판을 깔아 그 위로 사람들의 이동을 유도하였으나 관람객이 많을 경우에는 통제가 어려울 것이다. 또한 바람으로 인해 토양이 부유되는 것도 제지하기 어려운 일이다. 따라서 문화재의 손상에 영향을 끼칠 수 있는 조립 사질 토양이 문화재 주변에 조성되어야 하는가에 대해 고려해 보아야 할 것으로 사료된다. 조립 사질토양이 사찰의 고유한 성격이어서 그대로 조성되어야 하는 것이라면 관람객의 수를 제한 또는 관람방법에 대한 주의사항을 강화시킨다든지 하는 여러 방법을 숙고하여야 할 것이다.

참고문헌

1. Nord, A., Ericsson, T., Chemical Analysis of Thin Black Layers on Building Stone, *Studies in Conservation*, 38, p.25-35 (1993).
2. Leysen, L. et al., Air-Pollution-Induced chemical decay of a Sandy-Limestone cathedral in Belgium, *The Science of the Total Environment*, 78, p.263-287 (1989).
3. Aires-Barros, L., *The Decay of Stonework: Mechanism, Methodology of Study, Weathering and Air Pollution*, p.111-118, 1991.
4. Vos, B.H. and Tammes, E., Flow of water in the liquid phase, *TNO for building materials and building structures*, Rep No B1, Inst. Delft, Holland, p.45 (1969).
5. Winkler, E.M., *Stone in Architecture*, 3ed., p.166, Springer-Verlag, Germany, 1994.

6. Winkler, E.M. and Wilhelm, E.J, Saltburst by hydration pressures in architectural stone in urban atmosphere, *Geol Soc Am Bull*, 81(2), p.567-572 (1970).
7. Arnold. A. Zehner K., Salt weathering on monuments, *Analytical methodologies for the investigation of damaged stones*, p.14-21, 1990.
8. Riederer, J., Staub-Reinhalt, *Luft*, 33, 5 (1973).