

석조문화재의 생물학적 손상과 보존방안

The biodeterioration and conservation of stone historical monuments

鄭容在 · 徐民錫 · 李奎植 · 韓成熙*

Yong Jae Chung, Min Seok Seo, Kyu Shik Lee and Sung Hee Han*

ABSTRACT

Stone has been one of the most intensely studied materials in conservation. Understanding the deterioration of stone needs various knowledge in different mineralogical and physical characteristics and its weathering response under different climate and environment.

The alteration and weathering of stone is affected by natural or artificial elements whether they are physical, chemical or biological damaging factors. It can be said that the biodeterioration of stone is coupled with every environmental factors, which induce decomposition of stone structure, either directly or indirectly as a form of catalysis. Many elements contribute to the deterioration of stone monuments and other objects of cultural value such as pagoda, stature of Buddha, etc. This report concentrates on the action of biodeteriorative factors including bacteria, algae and higher plants. Preventive and remedial methods and a selection of chemical treatments are also described.

* 국립현대미술관 학예연구실(Curatorial Office, National Museum of Contemporary Art)

I. 서론

석재재질은 예술적 종교적 표현을 위해서 유럽에서 건물 및 고대 기념물과 같은 건조물을 비롯하여 조각상과 같은 소형유물에서 사용하여 왔으며, 우리나라에서는 석탑과 석불 등 종교적 표현과 건축물 및 탑비 등에 주로 사용하여 왔다.

지구가 생성된 이후 풍화작용에 따른 돌의 토양화는 필연적인 자연현상이다. 그러나 문화재에 있어서 이러한 현상은 돌이킬 수 없는 문화유산의 손실을 의미한다. 즉 석조문화재는 만들어져 현재 장소에 위치되는 순간부터 바람, 빛, 온도뿐만 아니라 비, 눈 그리고 습도 등의 다양한 풍화원인에 노출된다¹⁾. 최근에는 자동차 및 비행기와 같은 운송수단, 발전소 그리고 주거난방 등의 증가에 따른 공기오염이 석조문화재에 더욱 심각한 문제를 발생시키고 있다. 공기오염은 석재표면에 침착될 수 있는 무기 및 유기물의 공기중 농도를 증가시키며, 이러한 공기오염 물질이 석재표면에 침착되면 광물질과 물리·화학적 상호작용으로 석재가 부식되어 손상되게 된다. 또한 석재표면에 침착된 유기물은 미생물의 영양원으로 작용하여 생물의 발생을 유발시킬 수 있으며, 이에 따른 생물막(biofilms) 형성은 석재의 심각한 표면오염 및 이차적인 석재의 물리적 손상을 증진시키는 등 석재의 풍화를 촉진시킨다.

석재표면에서 생물의 발생은 생물종과 석재의 특성(광물질 조성, 영양분, pH, 다양한 광물질의 조성, 염분, 함수율 등)에 따라 발생할 수 있으며, 또한 온도, 상대습도, 광조건, 공기오염 정도, 바람, 강수량 등과 같은 주변 환경조건에 따라 발생할 수 있다.²⁾ 석조문화재에 손상을 줄 수 있는 생물은 미생물인 박테리아(bacteria), 곰팡이(fungi)에서 하등식물인 조류(algae), 지의류(lichen), 이끼류 및 선태류 그리고 고등식물(higher plants)에 이르기까지 다양하다. 우리나라는 생물이 번식하기 좋은 무덥고 습한 여름철이 있으며, 대부분의 석조문화재가 옥외에 노출되어 있어 생물체에 의한 석조물의 풍화가 심각하게 발생될 수 있음에 따라 이에 대한 종합적인 보존방안 수립이 필요한 실정이다.

이에 본 연구는 국립문화재연구소에서 2002년도에 실시한 '중요 석조문화재 생

물피해 조사' 결과 중 유형별 석조문화재의 대표적 피해사례와 중원 미륵리석불입상 등 국내 석조문화재로부터 분리된 생물종을 보고하고자 한다. 또한 지금까지 국내의 보존처리 현황과 최근 보고 된 「Biodeterioration of stone in tropical environments, research in conservation」 연구 보고서³⁾ 중 생물피해 방제 및 보존처리에 관련된 자료를 간략히 소개하고자 한다.

II. 본론

1. 석조문화재의 생물피해 현황

1) 우리나라의 석조문화재 분포

우리나라 석조문화재는 석탑, 석불, 건축물, 비석, 석등 부도 등 여러 가지 형태로 전해오고 있다. 이들은 거의 대부분이 화강암이며 일부가 응회암, 대리석으로 되어 있고 유물의 제조년도는 짧게는 100여년에서 길게는 1,700여년 정도 이다.

현재 지정문화재중 석조문화재는 2003년 9월 현재 국보 64건, 보물 463건, 시도 유형문화재 674건으로 각각 21%, 34%, 33%의 높은 비율을 차지하고 있다(문화재청 통계자료, 2003). 그러나 대부분의 석탑과 석비 등 석조문화재는 야외에 노출되어 있는 상태로 이에 대한 보존관리가 매우 필요한 실정이다.

2) 한국의 기후 및 생물손상의 생태학적 특성

생물의 발생 및 성장은 지역의 기후조건에 영향을 많이 받는다. 우리나라는 지리적으로 중위도 온대성 기후대에 위치하여 봄, 여름, 가을, 겨울의 사계절이 뚜렷하게 나타난다. 겨울에는 한랭 건조한 대륙성 고기압의 영향을 받아 춥고 건조하며, 여름에는 고온 다습한 북태평양 가장자리에 들어 무더운 날씨를 보이고, 봄과 가을에는 이동성 고기압의 영향으로 맑고 건조한 날이 많다. 우리나라의 평균 온도 및

강수량은 다음과 같다. 중부산간지방을 제외하고, 대체로 연평균기온은 10~16℃이며, 가장 무더운 달인 8월은 23~27℃, 5월은 16~19℃, 10월은 11~19℃, 가장 추운 달인 1월은 -6~7℃이다. 연강수량은 중부지방은 1100~1400mm, 남부지방은 1000~1800mm로 경북지역은 1000~1200mm이며, 경남해안 일부지역은 1800mm정도, 제주도지방은 1450~1850mm이다. 계절적으로는 연강수량의 50~60%가 여름에 내린다. 습도는 7월과 8월이 높아서 전국적으로 80%정도이고, 9월과 10월은 70%내외이다(기상청 통계자료, 2003). 이와 같이 우리나라는 여름철의 고온·다습한 기후조건은 석재 표면에서 미생물과 조류 및 이끼류 등의 생물의 성장을 가능케 하며, 특히 여름철 높은 강수량으로 대부분 야외에 위치한 석조문화재는 생물의 성장에 필요한 수분을 충분히 공급 받을 수 있다.

3) 석조문화재 유형별 피해사례

국립문화재연구소에서 2002년 실시한 보물 제 610호 현일동삼층석탑 등 30기의 경북지역 석조문화재 보존상태조사를 실시한 결과 중 석탑, 석불 등 생물피해가 발생한 석조문화재의 유형별 대표적 피해사례는 다음과 같다.

(1) 석탑 - 보물 제 610호 현일동삼층석탑

• 조사결과

- 탑 전체에 고착지의류 및 엽상지의류가 덮여 있음.
- 탑 바닥 표면에 잡초가 성장하고 있으며, 오랜기간 동안 토양의 퇴적화에 따른 지반상승으로 지대석은 토양으로 덮여 있었고 이에 따른 기단부 균열 부위에 초본류의 성장이 관찰됨.

• 보존방안

- 탑 전체에 분포되어 있는 지의류는 기단부 및 옥개석에 심하게 서식하여 미관을 손상시키고 있으며, 특히 탑신부에 양각되어져 있는 12지신상의 조각상을 손상시킬 우려가 있으므로 세척 및 보존처리가 요망됨.

- 탑 바닥표면의 잡초를 제거하고 상승된 지반을 낮춰 토양이 기단부위를 덮지 않도록 하여 하등식물의 유입을 근본적으로 방지하여야 할 것임.
- 논 가운데 있어 물길에 따른 수분의 유입이 우려되므로 종합적인 주변환경 정비 필요.



탑신의 조각상부위



기단부 및 1층 탑신 상태

Photo 1.
현일동 삼층석탑의
생물풍화 상태

(2) 전탑- 보물 제 189호 송림사오층석탑

• 조사결과

- 기단부에 고착지의류 및 잔디와 이끼 서식이 확인되었으나 탑신 및 옥개석은 지의류의 서식이 거의 없는 양호한 상태였음.
- 탑 우측면과 후면은 주변 나무로부터 화분의 유입과 높은 습도로 인해서 1, 2, 3층 옥개부에 초본식물과 목본식물이 자생하고 있으며 특히 우측면 3층 옥개부에 목본식물(아카시나무)이 자생하고 있는 상태임.

• 보존방안

- 기단부에 서식하는 잔디와 이끼는 제거하여 탑 주변의 습도를 낮춰주고 하등식물에 의한 2차 침입을 방지하여야 함.
- 옥개부에 서식하고 있는 초본식물과 목본식물은 뿌리의 성장에 따른 옥개부의 손상이 크게 우려되므로 제초제를 투여하여 시급히 고사시키는 것이

요망되며, 화분의 유입에 따른 2차 성장을 방지하기 위해서 제초제를 정기적(년 1회)으로 처리하는 것이 필요함.



탑 후면 옥개부에 초본류 서식



3층 옥개부에 목본류 서식

Photo 2.
송림사오층석탑의 생물풍화 상태

(3) 석불 - 보물 제 680호 영주 신암리마애삼존석불

• 조사결과

- 물막이 제방공사가 있기 전까지는 석불 하단부분 40cm 정도까지 물에 잠겨있었음. 이를 방지하기 위해서 콘크리트 물막이 구조물을 설치하고 석불 앞에 인공적 웅덩이를 설치하여 지하에서 올라오는 물을 모아 배출하게 만들었음. 또한 보호각을 설치함.
- 물에 잠겨 있을 때 주변의 높은 습도로 인하여 삼존석불 전면의 윗부분 및 후면에는 많은 이끼류가 성장한 흔적이 남아 있으나 현재는 고사되어 석재 표면에 흡착되어 있는 상태임. 석불 뒷면은 산 절개지와 바로 붙어 있어서 비가 올 때 튀어 들어오는 토양이 흡착되어 있음.

• 보존방안

- 석재표면이 심하게 풍화되어 있으므로 부드러운 솔과 나무칼을 이용한 건식세척으로 고사된 이끼류를 제거하고 뒷면 절개지로부터 석불로 토양의 흡착을 방지하기 위한 지반정비가 요구됨.



물막이 구조물과 보호각이 설치된
삼존석불 전경



삼존석불 전면 상태
물에 잠겼던 하단부의 석재 풍화가 심함

Photo 3.
영주신암리마애삼존석불
생물풍화 상태

(4) 불상 - 보물 제 221호 영주 가흥리마애삼존불상

- 조사결과
 - 삼존불상의 두상과 광배에 엽상지의류 및 고착지의류의 성장이 관찰됨.
 - 석재 표면에 전체적으로 흑화현상이 발생되어 있고, 주변 암석에 초본류가 성장하고 있음
- 보존방안
 - 두상 위에서 성장하고 있는 엽상지의류는 미관을 훼손시키고 있으므로 부드러운 솔 및 나무칼을 이용한 건식세척으로 제거가 필요함.
 - 입상 표면에 성장하고 있는 지의류는 석재의 풍화도를 지속적으로 증가시키므로 향후 세척 및 살균처리하는 것이 좋을 것으로 사료되며, 입상 주변에 성장하고 있는 초본류는 제초제를 이용하여 제거함.

2. 생물학적 손상원인 및 생물종 분석

1) 생물학적 손상원인

Photo 4.
영주기흥리마애삼존불상
생물풍화 상태



삼존불상의 전경



고착지의류가 성장한 세부상태

석조문화재에서 발생된 생물학적 손상은 크게 물리적 손상, 화학적 손상 그리고 생물체의 성장에 따른 표면오염 즉 미관 손상으로 나눌 수 있다. 석조문화재의 물리적 손상은 생물체 혹은 생물체의 조직이 성장하는 동안 석재표면 재질에 압력을 가해 발생된다. 즉 미생물의 균사 또는 식물체의 뿌리는 갈라진 틈을 통해서 석재내부로 깊이 파고 들어가 주변 석재재질에 물리적 손상을 야기 시킬 수 있다. 또한 건조와 습한 상태가 반복되는 동안 부착부위의 주기적인 약화현상으로 석재에 손상을 발생시킬 수 있다. 일단 석재가 생물에 의한 물리적 손상을 받게 되면 화학적 손상과 같은 이차적인 다른 손상을 받기 쉽다.

생물체가 석재표면에서 영양원을 소비함에 따라 발생된 동화작용(assimilatory processes)으로 인한 화학적 손상은 이화작용(dissimilatory processes) 즉, 생물체가 성장함에 따라 만들어진 부생성물과 재질과의 반응으로 발생된 손상과정 보다 쉽게 이해될 수 있다. 대부분의 미생물과 식물들은 성장하는 동안 산성물질인 유기산을 분비하며, 이는 석재를 녹이고 손상을 줄 수 있다. 부식성 기작에 따른 석재의 화학적 손상은 무기 또는 유기산이 형성될 때 발생된다. 이러한 산은 석재재질을 염(salt)과 킬레이트(chelate) 화합물로 변화시키고 이와 같은 부식 생성물이 석재 내부에 발생되면 물리적 압력을 증진시켜 석재를 손상시킬 수 있다.

석재 표면의 생물열화에 따른 시각 및 미관의 영향은 다소 주관적이지만 그럼에도 불구하고 매우 중요하다. 석재표면에서 생물군체의 성장은 석조문화재의 외형을 변화시킬 수 있다. 특히 문양과 기록물이 조각된 석조문화재가 많은 우리나라에서는 생물체의 성장에 따른 미관의 손상 방지는 매우 중요하다. 또한 이러한 생물체의 미관 손상은 이차적으로 물리적 손상을 발생시킬 수 있다.

2) 우리나라 석조문화재에서 발생된 생물종 분석

석조문화재의 손상을 줄 수 있는 생물은 미생물인 박테리아(bacteria), 곰팡이(fungi)에서 하등식물인 조류(algae), 지의류(lichen), 이끼류 및 선태류 그리고 고등식물(higher plants)에 이르기 까지 다양하다. 우리나라 석조문화재에 있어서 각 생물체별 석재에 미치는 영향 및 손상기작에 대한 조사는 민(1985) 등⁴⁾에 의해서 보고 되어졌다. 또한 우리나라 석조문화재에서 발생된 생물종의 동정으로 민 등(1986)⁵⁾은 홍릉(洪陵)·유릉(裕陵), 영릉(英陵), 용릉(隆陵), 신록사 다층전탑 및 다층석탑에서 지의류를 분리하고 동정결과를 보고한 바 있다. 최근에 김 등(2003)⁶⁾은 중원미륵리사지 석불과 주변 석축물에서 분리된 종 분석을 실시하여, 조류 7종, 지의류 21종, 선태류 8종, 고등식물 18종 등 총 54종을 동정하여 보고하였으나 (Table 1), 우리나라 석조문화재에서 발생된 생물종에 대한 전체적인 조사는 실시되지 않음에 따라 향후 이에 대한 지속적인 조사가 필요하다.

3. 생물피해 방제 및 보존처리 방법

석조문화재의 생물열화 문제를 해결하기 위한 방법을 고려할 때에는 3가지 요소, 생물체, 환경조건, 그리고 석재표면을 고려해야 한다. 이중 어떤 한 조건의 변화도 생물체의 성장에 영향을 줄 수 있으며 이는 즉 생물열화에도 영향을 준다. 석조물에서 미생물의 제거 및 조절을 위해서 다양한 방제 및 보존처리 방법들이 사용되어져 왔다.

방제법(preventive method)은 간접적인 처리방법으로 이는 석조물 표면을 가능

Table 1. 중원마르리사지 식물과 주변 석축물에서 분리된 종 분석결과(2003년)

	종(Species)		종(Species)
Algae (7종)	<i>Microcystis</i> sp.	Mosses (8종)	<i>Polytrichum alpinum</i>
	<i>Oscillatoria</i> sp.		<i>Brachymerium nepalense</i>
	Pinnate diatoms (2 species)		<i>Leucobryum glaucum</i>
	<i>Bracteacoccus</i> sp.		<i>Hypnum lindbergii</i>
	<i>Pseudochlorella pyrenoidosa</i>		<i>Atrichum undulatum</i>
	<i>Klebsormidium klebsii</i>		<i>Ulota crispa</i>
Lichens (21종)	Crustose lichen (genus unidentified)	Mosses (8종)	<i>Frullania ericoides</i>
	Foliose lichen (genus unidentified)		<i>Scapania stephanii</i>
	<i>Arthrorhaphis</i> sp. (photobiont <i>lorococcoid</i>)		Rooted plants (18종)
	<i>Caloplaca</i> sp. (photobiont <i>Trebouxia</i>)	<i>Justicia procumbens</i>	
	<i>Caloplaca holocarpa</i>	<i>Commelina communis</i>	
	<i>Caloplaca crenularia</i>	<i>Cirsium japonicum</i>	
	<i>Pannaria conoplea</i> (photobiont <i>Nostoc</i>)	<i>Ceranium nepalense</i>	
	<i>Candelaria</i> sp.	<i>Artemisia princeps</i>	
	<i>Lecanora gangaleoides</i> (photobiont <i>Trebouxia</i>)	<i>Artemisia annua</i>	
	<i>Fuscidea cyathoides</i> (photobiont <i>Trebouxia</i>)	<i>Artemisia</i> sp.	
	<i>Lepraria</i> sp. (photobiont <i>Stichococcus, Chlorella</i>)	<i>Oxalis corniculata</i>	
	<i>Anaptychia runcinata</i> (syn. <i>A. fusca</i>)	<i>Indigofera kirilowi</i>	
	<i>Cladonia coniocraea</i> (photobiont <i>Trebouxia</i>)	<i>Erigeron annuus</i>	
	<i>Cladonia chlorophaea</i>	<i>Calamagrostis arundinacea</i>	
	<i>Parmelia mexicana</i> (photobiont <i>Trebouxia</i>)	<i>Lepisorus thunbergiana</i>	
	<i>Parmelia crinita</i>	<i>Athyrium yokoscense</i>	
	<i>Parmelia caperata</i>	<i>Ulmus davidiana</i>	
	<i>Parmelia</i> sp.	<i>Erigeron annuus</i>	
	<i>Umbilicaria</i> sp.	<i>Ixeris dentata</i>	
	<i>Ramalina</i> spp. (2 species) (photobiont <i>Trebouxia</i>)	<i>Rubus phoenicolasius</i>	

한 생물체의 성장에 좋지 않은 물리·화학적 특성과 환경조건으로 변화시켜 석조물 표면에 생물체의 발생을 방지하는 목적을 둔 모든 활동을 의미한다. 환경에 대한 생물체의 강한 의존성을 이용한 이러한 방법은 생물체의 불필요한 성장을 제거하기

위한 가장 효과적인 방법이다.

보존처리 방법(remedial method)은 석재에서 모든 생물체의 직접적인 제거 및 조절을 목적으로 한다. 예로써 화학적 처리(chemical treatment), 물리적 처리(mechanical treatment), 스팀 세척(steam cleaning), 그리고 저압 물세척(low-pressure water washing)등이 생물체의 성장을 조절하고 제거하기 위한 직접적인 방법들이다. 처리의 효능은 방법과 선택되어진 제품에 따라 다르지만, 궁극적으로 생물이 성장하기 좋은 환경조건을 조절하지 않는다면 새로운 생물체가 재 발생할 수 있다.

1) 생물피해 방제(Preventive method)

(1) 주기적인 관리 및 청소

일반적인 방제 방법으로 석재표면의 습도를 조절하고 물기(수분)의 원인을 제거하면 과도한 생물 성장과 발생을 감소시킬 수 있다. 또한 식물들은 일반적으로 석조물의 틈새 및 빈 공간에서 성장한다. 그러므로 주의 깊게 석조물의 상태를 관찰하고 틈새를 보충하고 연결부위를 재결합시키는 등의 지속적인 관리는 식물체의 성장 및 발생을 방지할 수 있다.

생물체의 영양원으로써 이용될 수 있는 먼지, 다양한 유기 퇴적물, 조류의 배설물 그리고 부적절한 보수재료 등은 석재표면으로부터 제거되어야 한다. 예방적인 보존 방법으로써 주기적인 청소는 매우 중요하며 이는 바람에 의해서 유입된 포자나 식물체의 씨로부터 지의류, 곰팡이, 조류 및 고등 식물이 발생하는 것을 초기에 방제할 수 있는 효과적인 방법으로써 외부에 노출된 석조물의 생물발생을 방지하고 예방하기 위한 유일한 방법일 수 있다.

(2) 발수제 및 경화제 처리

합성 중합체(polymer) 및 수지(resin)는 발수제 및 경화제로써 사용되어져 왔다. 최근 현장에 적용하기 전에 다양한 발수제들이 미생물에 미치는 영향을 실험실에

서 조사한 결과, 실리콘(silicone), 아크릴(acrylic), 에폭시(epoxy), 폴리비닐 아세테이트(polyvinyl acetates) 등의 발수제 및 경화제는 미생물의 성장을 뚜렷하게 억제시키지 않은 것으로 나타났으며, 오히려 이들 중 일부는 미생물의 영양원으로 작용할 수 있는 것으로 밝혀졌다. 그러나 일부 처리제는 미생물의 성장을 억제하는 것으로 나타나 아마도 이러한 현상이 발수제에 첨부된 살생물체 특성을 가진 성분 및 독성용매에 의한 것으로 여겨진다.

그러나 일반적으로 실제 현장에서는 미생물의 발생이 수분함수량과 상관관계가 있어 일부 발수제는 세척된 표면에서 미생물의 성장을 억제하고 살균제의 지속성을 증가시키는데 사용되어질 수 있다. 이러한 처리는 이미 살생물체로 처리되어진 세척처리된 석재에 적용할 때 보다 효과적인 작업이다.

2) 생물피해 보존처리(Remedial method)

(1) 석재표면의 세척

살생물체를 적용하기에 앞서 부분적으로 생물체를 제거하는 것이 필요하다. 특별히 오랜 기간 이끼, 지의류, 그리고 조류의 성장으로 두꺼운 완충물로 덮여 있는 석조 구조물에서 세척처리는 매우 중요하며, 이러한 처리를 통해서 살생물체의 투과력을 증진시킴으로써 살생물체의 효능을 증진시킬 수 있다.

전통적으로 보존처리자들은 석재 표면으로부터 불순물을 제거함으로써 생물의 성장을 제거하는 기계적인 방법을 선호하여 왔다. 이러한 방법들은 손 또는 솔 등의 도구를 사용하여 생물체를 물리적으로 제거하는 것이다. 그러나 이러한 처리방법은 조류는 공기로부터 포자가 새로 유입될 수 있으며, 지의류의 균사는 석재 내부에 남아있어서 재발생할 수 있고 식물들도 적당한 환경조건만 된다면 빠르게 재성장을 할 수 있기 때문에 오랜 기간 생물체의 성장을 억제시킬 수는 없다. 완벽하게 생물체의 성장을 제거하기 위해서는 처리자는 반복적으로 시간을 두고 처리를 실시하는 것이 필요하다. 더구나 기계적 처리는 석재표면에 손상을 줄 수 있으므로 항상 처리에 위험이 따른다.

물과 함께 솔로 세척하는 처리방법은 조류(algae)와 종자식물(spermatophyte) 및 양치류(pteridophyte)의 제거에 매우 효과적이다. 그러나 대부분 이끼(moss) 및 고착지의류(crustose lichen)에는 효과적이지 않다. 이끼와 지의류는 그들을 분해시킬 수 있는 화학약품을 처리하고 저압 세척을 통해서 매우 쉽게 제거할 수 있다.

건조한 상태로 죽어 있는 조류는 일반적인 세척처리 전 저압 분무처리만으로도 쉽게 제거될 수 있으며 또한 스팀세척은 습기찬 표면에서 곰팡이 및 조류를 죽이는데 매우 효과적일 수 있다. 그러나 이렇게 물로 세척하는 동안 유입된 수분은 조류의 빠른 재성장을 촉진시킬 수 있음을 유의하여야 한다. 이러한 문제는 물 세척 후에 살생물제(biocide) 처리로 해결할 수 있다.

지의류의 경우, 석재 표면에서 기계적으로 제거를 용이하게 하고 지의류를 부풀리고 부드럽게 하기 위해서 희석된 암모니아(ammonia)가 사전 처리되어진다. 2~5% 암모니아 용액은 어떤 부가적인 다른 영향을 주지 않으면서 이끼, 지의류, 조류, 그리고 곰팡이로 덮여 있는 석조물의 세척에 매우 효과적이다. 이러한 세척처리는 일반적으로 생물의 성장을 억제하기 위한 살생물제 처리와 방수처리를 위한 발수제 혹은 보존처리시 함께 실시되어진다.

Siswowyanto(1981)⁷⁾과 Sadirin(1988)⁸⁾은 석조물에서 생물의 성장을 제거하기 위해서 킬레이팅 작용제인 EDTA(ethylenediaminetetraacetic acid)를 기초로 한 습포제 처리방법을 고안하였다. 이러한 약품은 AC322로 그리고 유럽과 미국에서는 AB 57로 알려져 있다. 이것은 sodium carbonate(Na_2CO_3), ammonium carbonate($(\text{NH}_4)_2\text{CO}_2$), EDTA, carboxymethyl cellulose(C.M.C), 그리고 세제(detergent)와 때때로 살균제가 포함된 혼합물로 구성된다. 석재표면에서 조류를 제거하기 위해서 hydrogen peroxide와 sodium hypochloride의 희석용액의 사용은 매우 널리 보고되어 있다. 이와 같은 화학적 세척은 일반적으로 살생물제 및 다른 보존처리 등의 부가적인 처리가 없을 때 6~8개월 동안 생물의 재성장을 방지할 수 있다.

(2) 살생물제 처리

살생물제(biocide)란 박테리아 및 곰팡이를 제거하기 위한 살균제와 조류, 초본류를 제거하기 위한 살초제 등을 통틀어 부르는 말이다. 살생물제는 생물체의 대사 작용을 억제하여 치사시키는 작용을 한다.

Richardson(1973⁹⁾, 1976¹⁰⁾, 1988¹¹⁾은 살생물력이 표면활성 4급 화합물(surface active quaternary compounds)에서 매우 강하게 증진되는 것을 보인다고 보고하였다. 최근에 지의류를 제거하는데 가장 효과적인 처리방법으로 tin oxide(tri-n-butyl-tin oxide, TBTO) 또는 다른 살생물제들과 함께 사용되는 4급 암모늄 화합물(quaternary ammonium compounds)이 있다. 이 화합물은 석조물에 존재하는 조류, 지의류, 이끼 및 초본류 등 미생물에 대해서 효과적이며 오랜 지속력을 가진다¹²⁾.

또한 Benzalkonium chloride(20%), Sodium hypochloride(13%) 그리고 Formaldehyde (5%) 용액의 처리는 처리 후 솔과 물로 세척하면 석재에서 지의류를 죽이는데 매우 효과적이다.¹³⁾ 그러나 이러한 처리는 일시적인 처리로써 생물체의 재침입을 방지하기 위해서 주기적인 처리가 요구되어진다. Polybor (polyborates와 boric acid의 혼합물)는 비록 제거력이 빠르진 않지만 조류 성장을 적어도 2~3년동안 억제시키며 부가적으로 지의류 및 이끼류도 오랜기간 동안 성장을 억제시키는 것으로 현장실험에서 조사되어졌다.

구리화합물(copper compound)은 잔류성을 가져 다른 살생물제보다 석재표면에 오랜기간동안 남아있을 수 있다. 그러나 이러한 화합물의 결점은 석재표면을 착색시킬 수 있다는 것이다. 최근 지의류를 제거하기 위해서 사용되어지는 살생물제를 조사한 결과에 따르면 구리가 함유된 처리제는 지의류 성장을 제어할 수 있는 매우 높은 가능성을 가지고 있다는 것을 보여 준다.¹⁴⁾

아크릴 또는 PVA와 같은 발수제 희석액과 Zinc hexafluosilicates를 함께 처리하는 것은 석조물에서 미생물의 성장을 억제하는데 매우 효과적으로 사용되어지고 있다. 이러한 처리는 적어도 4~5년 동안 효과적으로 지속된다.

(3) 국내 보존처리 예

생물피해 방지를 위해서 국내 석조문화재의 보존처리로는 1990년 한 등¹⁵⁾이 일본과 인도네시아에서 사용된 세척제인 AC322약제에 살생물제인 benzalkonium chloride를 혼합한 지의류 제거방법을 보고한 이후, 국립문화재연구소에서 1992년 연곡사 소재 국보 제 53호 동부도 등 6건의 중요 석조문화재의 표면세척 및 보존처리를 AC322 약제를 사용하여 처음 실시하였다. 1997년에는 송산리고분군의 현황과 보존대책 보고서¹⁶⁾에서 공주대학교 기초과학연구소는 고분군에서 발생된 남조류를 제거하기 위해서 AC322약제와 AB57약제의 조성성분을 일부 수정한 K101 약제를 개발하고 표면에 분무하고 습포를 처리한 후 자외선을 24시간 조사하는 처리 방법으로 벽돌에 손상 없이 남조류 제거가 가능함을 보고하였다. 그리고 이 결과에 따라 1997년 공주송산리 고분군의 보존처리를 실시한 후 매년 남조류의 재발생 여부를 모니터링해 온 결과 보존상태가 매우 양호한 것으로 조사되어졌다. 2002년에는 부여 대조사 석조미륵보살입상의 생물오염에 따른 보존처리를 공주대학교 기초과학연구소에서 실시하고 그 결과를 보고하였다¹⁷⁾. 이때 사용된 살생물제로는 AC322 성분 중 기존에 사용되었던 살생물제 benzalkonium chloride를 구리화합물인 황산구리(CuSO₄)와 NaOCl로 대체하고 지지체인 carboxymethyl cellulose를 제거하여 액상화 시킨 K201약품을 사용하였다(Table 2).

최근에는 생물피해를 방지하기 위한 기초 연구를 실시한 결과, 민 등(2001)¹⁸⁾은 석조문화재 보존처리에 주로 사용되어지고 있는 살생물제인 *p*-chloro-*m*-cresol, benzalkonium chloride, *ortho*-phenyl-phenol과 *p*-chloro-*m*-cresol + phenyl mercuric acetate를 사용하여 살균효과를 실험한 결과 benzalkonium chloride가 효과적인 것으로 보고하였으며, 김 등(2003)¹⁹⁾은 현재 지의류제거 약품으로 상용화 된 K201(공주대학교, 한국), Algikiller (AMPRO, 미국), Koretrel(도카이 콘크리트 사업, 일본), PROTOALGEN(Spigel, 네덜란드) 그리고 benzalkonium chloride(Sigma, 미국) 등 약제 5종류에 대한 살균효과 및 변색부위 회복여부 실험을 실시하여 K201과 Algikiller가 살균력 및 변색정도에서 효과적인 것으로 보고

하였다. 이와 같이 최근에 석조문화재의 보존을 위해서 생물손상의 방지 및 보존처리를 위한 살생물제에 대한 많은 연구들이 수행되어지고 있으며, 현재 국립문화재연구소는 국내 석조문화재에 적용할 수 있는 살생물제의 선정 및 약품의 효과를 검증하기 위해서 중원 미륵리 석불 입상 및 주변 석축물에 선정된 약품을 분무도포하고 주기적으로 상태변화를 조사하고 있으며, 향후 그 결과를 보고할 예정이다.

4. 화학약품의 선택

1) 살생물제 선택의 고려할 점

살생물제(biocide)란 의미는 살아있는 생물체의 성장을 억제하거나 죽일 수 있는 화학 물질이라는 의미를 내포하고 있다. 이것은 일반적으로 미생물과 고등식물에 적용하여 사용된다. 그러나 이러한 화학물질은 또한 야생 동식물과 인간에게 해를 줄 수 있다. 이러한 이유로, 살생물제는 독성을 분리하여 그 특성을 표시해야 하며, 확인되지 않은 살생물제는 사용되기 전에 독성 안정성 테스트를 실시하여 안정성을 평가받아야만 한다. 석조물에서 생물의 성장을 제거하고 조절하기 위한 살생물제를

Table 2. 국내에서 사용된 약제 2종의 제조 방법

약품명 기능	AC322(1000ml D.W.)	K201(1000ml D.W.)
세척제 (AC322)	Na ₂ CO ₃ 50g	Na ₂ CO ₃ 50g
	(NH ₄) ₂ CO ₂ 30g	(NH ₄) ₂ CO ₂ 30g
	EDTA 25g	EDTA 25g
	Carboxymethyl cellulose..... 60g	
살생물제	Benzalkonium chloride 3ml	CuSO ₄ 10g NaClO 10%

선정할때, 제거 종에 대한 살균효과, 약제 내성, 인체 유해성, 환경오염 그리고 석재 친화성 및 다른 보존처리제 간의 상호작용 등을 고려하여 사용하여야 한다.

2) 제거 종에 대한 살균효과

살생물제를 선정하기 위한 첫 번째 단계는 가능하면 정확하게 생물 손상종을 분리 동정하는 것이다. 종종 특정 살생물제는 특정 종에 보다 효과적으로 작용하는 경향이 있다. 약제 효과는 살생물제의 종류에 따라 그리고 약제를 처리하는 조건에 따라서 다르다.

대부분의 생물종에 대한 넓은 효과와 지속력을 가지는 살생물제는 가장 좋은 약제일 것이다. 최근까지 석재에 손상을 주는 모든 형태의 생물종의 제거에 있어서 동일한 효과가 있는 살생물제는 소수이다. 비록 오랜 지속력을 위한 잔류성이 있는 살생물제는 생물의 성장을 오랜 기간동안 억제시킬 수 있는 장점도 있지만 한편으로는 보건과 환경에 해로울 수 있다.

3) 제거 종의 약제 내성

화학 독성물에 저항하기 위한 생물체가 가진 자연적 그리고 유전적 특성인 내성(resistance)은 살생물제의 사용에 있어서 매우 중요하게 고려해야 한다. 특히 박테리아는 짧은 시간내에 특정 살생물제에 대해서 내성균으로 발전할 수 있다. 이러한 경우 다른 종류의 살생물제의 처리가 필요하며, 교대로 살생물제를 사용하는 것은 미생물의 내성균주의 발달을 막는데 유용하다. 그러나 미생물의 살균과 제거에 매우 효과적일 수 있으나 과거에 처리했던 약제와 친화성을 가져야 한다.

4) 인체 유해성 및 환경오염

석재표면에 살생물제를 처리하기 전에 생물의 성장에 대한 살생물제의 효능뿐만 아니라 인체에 대한 독성도 반드시 확인해야 한다. 이와 같은 독성 정보는 제조사, 공인된 독성물질 관리기관, 그리고 독성관련 전문서적을 통해서 얻을 수 있다.

또한 환경보존에 대한 관심이 증진되면서 살생물제의 사용에 따른 환경오염의 위험성에 대한 관심이 고조되고 있다. 살생물제는 처리하는 석조물 주변의 식물과 동물 그리고 수중생물 등에 작용하여 생태계를 파괴하는 위험성을 가지고 있다. 특히 이러한 문제는 토양이나 수질이 오염되기 쉬운 곳에서 특별히 관리 되어져야 한다. 각 나라에서는 이러한 문제를 방지하기 위해서 살생물제 사용과 관리 및 처리에 따른 규정 및 법규를 만들어서 관리하고 있다.

5) 석재와의 친화성

살생물제는 처리하는 석재 표면과 반드시 친화적이어야 한다. 즉 석재가 가진 본래 특성, 조직 구성물 그리고 외형을 변질시켜서는 안 된다. 살생물제는 일반적으로 농업, 의약품 그리고 공업용으로 제조되어져 왔으며 매우 적은 약제들만이 석재에 적용하기 위해서 개발되었다. 결과적으로 석재에 대한 화학물질의 영향은 제조단계에서 대부분 무시되어져 왔으나 최근에는 석재의 손상을 발생시키는 살생물제의 영향에 대한 관심이 증진되고 있다.

살생물제에 있는 화학성분의 일부는 석재 광물과 상호작용을 할 수 있고 이것은 석재의 내구성에 영향을 줄 수 있다. 일부 살생물제는 석재 광물의 색변화와 부식을 일으키며 이러한 결과는 염 결정화에 따른 손상을 발생시킨다고 보고 되었다.

6) 생물처리제의 적용과 처리시 유의점

- ① 살생물제는 처리 후 비가 오면 효능이 소멸될 수 있으므로 살생물제의 처리는 건조한 조건에서 실시해야 한다. 바람 부는 날에는 분무시 약제가 넓게 퍼질 수 있으므로 작업자와 주변 환경에 해를 주지 않도록 각별히 주의해야 한다.
- ② 석재표면의 생물체의 성장 형태에 따라서 살생물제 처리 전에 생물체의 부분적인(기계적 혹은 수작업) 제거작업이 필요할 수 있다. 석재 표면이 지의류와 이끼류 그리고 식물체로 두껍게 층을 이루고 있을 때 표면으로 살생물제가 충분히 투과되기 어렵다. 반면에 생물층이 두껍지 않다면 사전 세척은 불필요

하다. 어떤 살생물제는 일차적으로 생물체를 죽일 뿐만 아니라 고사에 따른 생물체의 건조화로, 약제 처리 후 주변 환경과 종에 따라서 6~24개월 후에 바람이나 빗물의 작용을 통해서 자연적으로 부스러지거나 떨어져 나가게 된다. 가벼운 솔질과 기계적인 세척은 이러한 과정을 촉진시킨다.

- ③ 선택된 살생물제 용액은 작업자와 주변 환경의 안전과 보호를 위해서 제조사의 권고에 따라 정확하게 사용하고 조심스럽게 준비되어야 한다. 석조물 주변지역의 식물을 보호하기 위해서 항상 주의해야 한다. 즉 보존 처리시 밑으로 흘러내린 약제로 인한 피해를 방지하기 위해서 약품 처리전에 보호 시트를 식물체 및 토양 위로 덮어 놓아야 한다. 물의 수원과 가까운 지역에서는 처리된 표면으로부터 살생물제가 용해되어 흘러내림에 따른 수질오염을 발생시킬 수 있으므로 처리하는 동안이나 처리 후에는 단지 기계적 세척만을 실시해야 한다.
- ④ 처리방법으로는 석재의 보존 상태, 제거하고자 하는 생물체, 생물피해의 밀도와 분포 그리고 약제의 선택에 따라서 분무(spraying), 도포(brushing), 습포제 방식(poultices) 또는 주입방식(injection)이 있다. 일부 보고서 및 석조물에 대한 살생물제 처리방법 연구결과에는 적용하는 방법뿐만 아니라 방법을 선택한 이유에 대해서도 언급하고 있다.
- ⑤ 전세계적으로 희석된 살생물제 용액을 분무(spraying) 및 도포(brushing) 방법으로 처리하는 것이 가장 일반적인 방법이다. 도포방법은 석재표면이 매우 좋은 상태로 약품 처리가 필요한 부분이 상대적으로 작을 때 권장된다. 분무는 손상된 석재표면을 처리할 때 선호되어진다. 분무 처리법은 희석된 살생물제 용액을 압축공기를 이용한 분사 노즐이 조절 되는 정원 관리용 분무기를 사용하여 처리할 수 있다. 저장탱크에 펌프질을 한 후, 분무시 과도한 튀김이나 흘러내림이 없도록 노즐과 압력을 조절하여 석재표면에 분무하도록 한다. 일반적으로 분무 처리는 처리하기 위한 석재 표면 위에서부터 수평으로 이동하면 천천히 밑으로 내려온다. 효과적으로 생물 성장을 억제하기 위해서는 살생물

제의 반복적인 처리가 필요할 때도 있다.

- ⑥ 식물을 제거 처리할 때는 부분적인 분무와 도포가 일반적으로 적용된다. 식물의 초본과 목본류의 밑동에 살생물제를 도포 또는 분무 처리 하면 그들의 퇴화를 촉진시키고 재성장을 방지할 수 있다. 살생물제는 밑동의 측면과 윗부분에 젖을 정도로 충분히 처리하며, 때때로 처리제가 용이하게 내부로 주입될 수 있도록 드릴을 이용하여 목재 밑동에 구멍을 뚫기도 한다.
- ⑦ 석재 표면에 특별히 고착된 침적물이 있는 경우 살생물제의 희석된 용액과 표면의 접촉시간을 증진시키기 위해서 셀룰로즈 습포제를 이용하여 처리하기도 한다. 이러한 습포제는 일반적으로 증발을 감소시키기 위해서 폴리에틸렌 천으로 덮여 있는 형태이다. 때때로 일부 살생물제는 석재 세척에 일반적으로 사용되어지고 있는 AC322이라 불리는 아교질의 연화제 연고에 첨가되어 사용되기도 한다.
- ⑧ 두 종류의 살생물제가 생물의 성장을 완벽하게 제거하기 위해서 사용되어질 경우에 먼저 적용된 살생물제는 적어도 초기 살균에 영향을 주기 위해서 처리된 후 1주일 이상은 유지되어야 한다. 1주일 후 죽은 생물조직은 솔로 제거하고 지속적인 활성과 성공적으로 생물의 성장을 억제할 수 있도록 2차 살생물제를 제조사가 제안하는 방법으로 신중히 처리하도록 한다.

Ⅲ. 결론

우리나라에 석조문화재는 지정된 문화재 중 약 30%이상의 높은 비율을 차지하고 있다. 석조문화재의 풍화요인은 다양한 조건에 따라 복합적으로 작용한다. 따라서 석조문화재의 보존처리를 실시할 때는 석재의 재질적 특성과 석조물이 위치한 주변의 환경적 요인 등을 고려하여 실시하여야 한다. 대부분의 석조문화재는 사찰과 사찰 터 등 야외에 노출되어 있으며 이러한 위치적 특성은 석조문화재의 보존 관리에

매우 어려움을 준다. 특히 사찰이 주로 깊은 산속에 위치한 지형적 특성을 고려할 때, 자연으로부터 곰팡이 및 이끼류 그리고 식물체와 같은 생물체의 포자 및 종자가 지속적으로 유입되고 이에 따른 석조물의 생물피해가 발생할 가능성은 매우 높다. 이러한 손상을 방지하기 위해서 생물피해가 진행된 석조물의 직접적인 보존처리는 필요하나 석탑, 조각물 그리고 비석과 같은 석조문화재의 영구보존을 위한 보존처리는 종합적으로 접근하는 것이 필요하다.

특히 주기적인 청소 및 관리 그리고 모니터링을 통한 예방적인 보존방법은 매우 중요하며 외부에 노출된 석조물에서 생물발생을 방지하고 예방할 수 있는 유일한 방법일 수 있다. 그럼으로 향후 이와 같은 예방보존을 위한 표준관리 지침이 수립되고 관리자에 대한 교육을 통해서 정기적인 보존처리 및 관리가 이루어진다면 귀중한 석조문화재를 보존하는데 매우 효과적일 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Keller, W.D., and A.F. Frederickson, 1952, Role of plants colloidal acids in the mechanisms of weathering, *American Journal of Science* 250: 594-608.
2. Caneva, G., and O. Salvadori, 1988, Biodeterioration of stone. In *Deterioration and conservation of stone*, ed. Lorenzo Lazzarini and Richard Pieper, 1820234. Studies and Documents on the Cultural Heritage, no. 16. Paris: unesco.
3. Kumar, R. and A. V. Kumar, 1999, Biodeterioration of stone in tropical environments, research in conservation, The Getty Conservation Institute.
4. 민경희, 1985, 하등식물이 석조문화재에 미치는 영향, *보존과학연구* 6 : 1-11.
5. 민경희, 안희균, 이규식, 1986, 서울 근교릉원의 석조문화재 자생지의류의 생물학적 분포 조사, *보존과학연구* 7 : 14-31.
6. 김광훈, T. A. Kotchkova, 정용재, 2002, 중원미륵사지석탑 생물침해조사에 관한 연구, *일한공동연구보고서*, : 65-92.
7. Siswowyanto, S., 1981, How to control the organic on Borobudur stones after the restoration, In *Conservation of Stone 2: Preprints of the Contributions to the International Symposium, Bologna, 27-30 October 1981*, ed. Raffaella Rossi-Manaresi, 759-68. Bologna: Centro per la Conservazione della sculture all' aperto.
8. Sadirin, H., 1988, The deterioration and conservation of stone historical monuments in Indonesia. In *6th International Congress on Deterioration and conservation of stone*, vol. 1, comp. J. Ciabach, 722-31. Torun, Poland: Nicholas Copernicus University Press Department.

9. Richardson, B. A., 1973, Control of biological growths, *Stone Industries* 8 : 1-6.
10. Richardson, B. A., 1976, Control of moss, lichen and algae on stone, In *Conservation of Stone 1: Proceedings of international Symposium*, Bologo, June 19-21, 1975, ed. R. Rossi-Manaresi, 225-31. Bologna: Centroper la Conservazione dells sculture all' aperto.
11. Richardson, B. A., 1988, Control of microbial growth on stone and concrete, In *Biodeterioration 7: Selected Papers Presented at the Seventh International Biodeterioration Symposium, Cambridge, U.K.*, 6-11 September 1987, ed. D. R. Houghton, R. N. Smith, and H. O. W. Egging, 101-6. New York: Elsevier Applied Science.
12. Ashurst, J., and F. G Dimes, 1990, Conservation of Building & Decorative Stone, *Butterworth-Heinemann Series in Conservation and Museology* : 136-137.
13. Nishiura, T., and T. Ebisawa, 1992, Conservation of carved natural stone under extremely severe conditions on the top of an high mountain, In *Proceedings of the 2nd International Conference on Biodeterioration of Cultural Property, October 5-8. 1992, Held at Pacifico Yokohama*, ed. K. Toshi, H. Arai, T. Kenzo, and K. Yamano, 506-11. Tokyo: International Communications Specialist.
14. Martin, A. K., and G. C. Johson, 1992, Chemical control of lichen growths established on building materials: A complication of the published literature, *Biodeterioration Abstracts* 2(6): 101-17.
15. 한성희, 안희균, 1990, 석조문화재의 생물학적 손상요인과 보존대책, *문화재* 24, : 155-163.
16. 충청남도 공주시, 1997, 송산리고분군의 현황과 보존대책: 382-398.

17. 충청남도 부여군, 2000, 부여 대조사 석조미륵보살입상의 보존처리 공사 연구보고서: 30-45.
18. 문화재청, 2001, 석조문화재 보존관리연구: 190-240.
19. 국립문화재연구소, 2003, 익산 미륵사지석탑의 생물침해현화 및 보존처리제 조사보고서