

미생물이 문화재에 미치는 영향

민 경 회*

< 目 次 >

1. 서론
2. 목조문화재의 미생물 피해
3. 석조문화재의 미생물 피해
4. 금속문화재의 미생물 피해
5. 고분벽화의 미생물 피해
6. 보존대책
7. 결론
8. 참고문헌

1. 서론

문화재의 성분은 주로 석재, 목재, 섬유, 금속 등의 다양한 재료로 구성되어 있다. 이들은 자연상태에서 태양광선, 비바람, 오염물질, 온도 등의 물리, 화학적인 변화에 의한 손상과 미생물 등에 의한 생물학적 손상을 받고 있다.

문화재의 적합한 보존대책을 세우기 위하여 우선적으로 선행되어야 할 과제는 손상요인이나 훼손기작을 파악하는 것이 중요하다. 미생물은 자연계에 다양하게 토양이나 공기중에 존재하고 있으며 적당한 습기, 온도 및 양분이 있으면 곧 영양분을 에너지원으로 하여 성장한다. 그러므로 문화재의 원료인 석재, 섬유, 목재, 금속 등이 미생물의 영양분이 된다. 따라서 미생물의 가해 미생물의 방제대책을 규명하기 위하여는 미생물에 의한 문화재의 피해조사, 피해 및 손상기작 연구, 피해 미생물 방제법의 연구개발 등을 들 수 있다.

이러한 조사연구를 위해서는 첫째, 전시환경이나 수장고 등에 있어서 미생물학적 환경조사를 통하여 미생물의 분포상, 미생물의 생태나 성장조건 등에 관한 여구, 둘째, 각종 재질에 따른 미생물 분포 및 피해조사, 셋째, 피해미생물의 생장방지나 방제에 대한 연구를 병행해야 할 것이다.

2. 목조문화재의 미생물 피해

가. 목재문화재의 손상

목조건조물, 목조조각 및 목조문화재의 손상은 주위의 환경조건에 따라 물리적 화학적 성능이 저하되어 저분자물질로 분해, 변질, 소모되는데 이러한 현상을 목재의 손상(損傷)이라고 한다.

일반적으로 목재의 손상은 화재, 생물, 물, 자외선, 산소, 오존, 기계적 작용 및 화학약품 등에 의해 발생되며 발생원인에 따라 화재, 생물피해, 오존피해, 방사선 피해, 기계적피해, 화학적피해, 기상피해 등으로 구분되지만 실제로는 복합적으로 발생된다. 주요한 목재손상은 주로 화재와 가해생물에 의하여 발생한다.

생물에 의한 목재의 피해는 주로 균류, 곤충류에 의해 발생되며 목재를 손상시키는 미생물은 주로 진균류에 속하며 광합성과 운동성을 갖고 있지 않고 포자를 형성하여 증식한다. 목재는 유기물이이기 때문에 여러 가지 균에 의해 침해를 받으며 목재 분해 미생물을 분해되는 목재 성분에 따라 cellulose 분해균, hemicellulose 분해균, lignin 분해균으로 구분하고 손상상태에 따라 목재부후균(木材腐朽菌), 연부후균(軟腐朽菌), 변색 및 오염균으로 구분된다. 목재에 피해를 주는 균류에는 목재내에 침입하여 번식할 수 있는 것에서부터 목재 표면에서만 생육할 수 있는 여러 가지가 있으나 과정의 차이는 있지만 생육하게 되면 목재 형태의 변화를 주게 된다. 이중 가장 현저한 것이 부후이다. 목재의 부후는 주로 사상균에 의해 균사로부터 cellulase(섬유소분해효소)가 분비되어 발생된다.

나. 목조문화재를 손상하는 미생물

문화재 중 목조 문화재가 차지하는 비율은 우리나라의 경우는 대단히 높다고 하겠다. 절의 사찰 및 왕궁을 비롯하여, 우리가 쉽게 사용할 수 있는 것이 목재로 만든 문화재로 우리 주변에서 쉽게 발견할 수 있다.

미생물은 세포외 효소를 분비하여 목재를 파괴한다. 심한 경우는 미생물 군집(colonization)을 만들어 부식을 한다.

- 1) 세균 : 1980년 Cubble는 목재 문화재를 부식하는 미생물은 주로 grampositive 간균(桿菌)임을 보고한 바 있다. 1950에서 1980에 이르기까지 목재문화재를 부식하는 세균으로는 *Bacillus* sp. *B. asterosporus*, *B. cereus*, *B. megaterium*, *B. macerans*, *B. subtilis*, *B. pumulus*, *B. polymyxa* 등이 발견되었다. *Corynebacterium humiferum*과 *Clostridium* spp.가 섬유소를 분해한다는 것과 *Sarcina* spp. *Micrococcus* spp. 또는 *Vibrio* 등도 섬유소를 이용할 수 있음을 보고한 바 있다.
- 2) 곰팡이: 목재의 섬유소 분해 곰팡이는 다양하며 자낭균(*Ascomycetes*)과 불완전 균류(*Fungi Imperfecti*) 등이 있다. 섬유소가 포함된 한천배지에 이들 곰팡이는 섬유소 분해 효소(*cellulase*)를 분비하여 섬유소를 에너지원으로 사용하는 것으로서 *Trichoderma viride*나, *Gliocladium roseum* 등이 우점종이다.
- 3) 부후균(soft rots) : 부후균은 자낭균 및 불완전균류에 의한 목재의 부후이다.

이들은 목재 세포벽의 제2차벽(Secondary wall, S layer)에 침입하여 파괴한다. 균사로 직접 세포벽을 분해하기도 하며(Corbett's type II attack), 세포벽 내에 공간을 형성한다(Corbett's type I attack).

(가) 연부후의 특성

담자균에 의한 부후와는 달리 피해는 표층부에만 한정되고 있다. 연부후가 진행된 목재는 표면이 갈색 내지 청암색을 나타내고 그 이름처럼 연화하여 잘부서져서 탈락하기 쉽다. 건조하면 연부후균에 의해 침범된 부분은 금이 생긴다. 현미경하에서 연부후균재의 조직을 보면 2차벽중층층부에 마름모 또는 양단이 뾰족한 원통상의 공통(空洞)이 보인다. 이것은 특히 목섬유(木纖維)에 있어서 뚜렷하다.

(나) 표면변색 및 오염

목재변색은 주로 자낭균류에 의해 변재부에 발생하며 목재변색균은 목재중의 유출성분을 이용할 뿐 셀룰로오즈나 리그닌은 분해하지 않으므로 강도저하를 거의 야기시키지는 않는다. 그러나 변색균의 발생은 부후균의 침입 계기가 되기도한다. 목재오염은 주로 불완전균류에 의해 목재표면에만 발생하며 목재조직내에는 침투하지 않는 점이 변색균과 다르다. 목재표면을 오염시키는 사상균은 주로 *Alternaria*, *Aspergillus*, *Chaetomium*, *Cladosporium*, *Fusarium*, *Mucor*, *Penicillium*, *Rhizopus*, *Trichoderma* 등이며 목재문화재의 표면에 착생하여 미관을 손상시키게 된다.

4) 목재부후성 담자균류

(가) 부후

주로 담자균류에 의한 목재의 손상현상을 부후라고 한다. 목재의 부후는 진균류인 민주름목, 주름버섯과 같은 담자균이 주원인이 되어있으나 미생물의 변이의 관점에서 보면 세균류, 방사선균류, 기타 미생물도 관여하고 있다.

목재부후균은 포자의 상태에서 공기중이나 목재의 표면에 존재한다. 적당한 수분과 온도가 주어지면 발아하여 균사가 되며 목재조직내에 침입한다. 또 토양속에는 많은 균류가 서식하고 있으므로 목재가 토양에 접촉하였을 때는 균사가 직접 목재 속으로 침입한다. 목재속으로 들어간 균사는 세포내에 함유되어 있는 당이나 전분 등의 유출 성분을 이용하여 성장하며 균사에서 효소를 분비하여 목재 세포벽을 구성하고 있는 셀룰로오즈, 헤미셀룰로오즈, 리그닌 등을 분해하여 저분자의 화합물로 변화시켜 영양원으로 만들어 성장을 계속한다. 균사 생육 초기에는 목재 외관상의 변화를 볼 수 없으나 균사가 성장함에 따라 변색이 나타난다.

(나) 외관

목재부후성 담자균류(wood-rotting basidiomycetes)에 의하여 부후가 진행된 목재는 갈색으로 변할 때와 백색으로 변화하는 경우가 있다. 전자인 갈색부후(brown rots)는 주로 셀룰로오스를 분해하며 부후재는 갈색으로 된다. 후자인 백색부후(white rots)는 주로 리그닌을 분해하지만 셀룰로오스를 분해하기도 한다. 건축재가 부후하는 경우에는 갈색부후가 많다.

갈색부후에서는 먼저 세포벽의 다당류중 비결정부분의 셀룰로오스가 분해되고 다음에 결정부분으로 확대되어 부후가 진행된다. 백색부후는 전체가 표백된 것처럼 흰 띠를 띠울 때와 부후재 부분에 점점이 구멍을 만들어 그 부분이 백색으로 될 때가 있다. 먼저 세포벽에 많은 공동이 생겨 점차 확대되는 방식으로 부후가 진행된다.

(다) 목재부후성 담자균류

(1) 민주름목(Aphylophorales)

이에 속하는 균 중에선 목재부후에 관여하는 주된 것은 다음 4가지가 있다.

①버즘버섯과(Coniophoraceae) : Coniophora puteana, Serpula lacrymans (버즘버섯)이 유명하다. 어느 것이나 건축재에 갈색부후를 일으킨다.

②고약버섯과(Corticaceae) : Astrostroma apalum은 건축재에 백색 부후를 일으킨다.

③구멍장이버섯과(Polyporaceae) : Coriolua versicolor(구름버섯), Lenzites betulina, Pycnoporus coccineus는 백색부후를 Gloeophyllum saepiarium(조개버섯), Tyromyces palustris(개떡버섯)는 갈색부후를 일으킨다.

④부채버섯과(Schizophyllaceae) : Schizophyllum commune(부채버섯) 등과 같이 부채형으로 백색부후를 일으킨다.

(2) 주름버섯목(Agaricales)

①송이버섯과(Trichotomataceae) : Lentinus lepideus는 대형의 자실체를 만들며 토목용재에 갈색부후를 일으킨다.

②우단버섯과(Paxillaceae) : Paxillus panuoides(은행잎우단 버섯)은 건축,토목용재에 갈색부후를 일으킨다.

3. 석조문화재의 미생물 피해

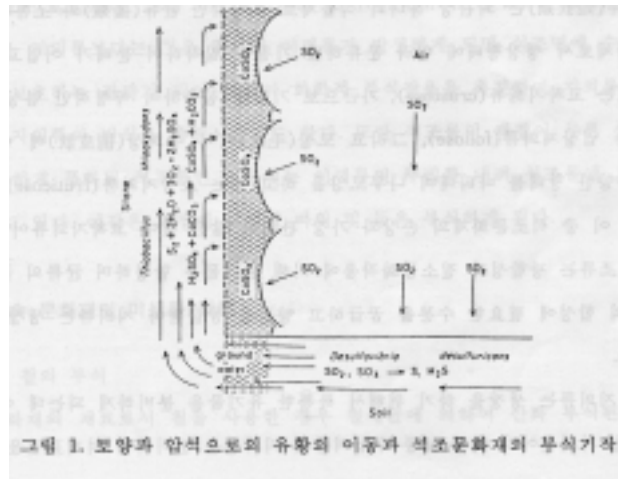
석조물의 손상은 일반적으로 기후적인 환경변화에 의해 손상되고 있다. 석조문화재에 있어서 나타나는 손상현상으로 석회암, 석회성사암, 사암, 응회암 등의 석조물에서

표면이 융기하게 되어 내부에 공간이 생긴 다음 균열이 발생하게 되어 층상으로 박리되는(scaling)현상이 있다. Scaling 하부에 형성된 분리층에는 질소고정세균, 초화세균, 암모니아화성균, 유황세균이 형성하여 토양과 현미한 미생물상을 형성한다. 또 하나는 석회암, 안산암의 석조물에 mondmilch라고 하는 백색 또는 황백색의 딱지상으로 형성되는 현상을 말하며 성분은 탄산칼슘이다. 이것이 벗겨져 떨어지면 부조면(浮彫面)이나 문자가 침식되어 조각이나 명문(銘文)이 호미해진다. Mondmilch에도 토양과 유사한 미생물상이 확인되고 있다. 그리고 석조문화재를 손상시키는 생물적 요인으로는 수근(樹根)의 침입, 지의류, 선태류, 세균류의 번식을 들 수 있다.

가. 세균류

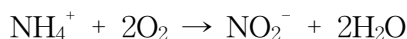
1) 유황산화세균(Sulfur-oxidizing bacteria)

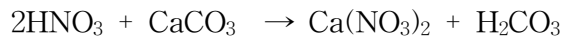
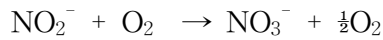
미생물에 의한 석조문화재의 파괴에 있어서 가장 손상되기 쉬운 석조 문화재는 대리석(limestone)과 sandstone이다. 유황이 포함된 돌의 성분을 산화하는 세균들은 돌 빌딩과 조각, monument 석조 문화재를 파괴한다. 그러므로 석조문화재 보존하기 위하여는 비가 온 후나 청소한 후에 물을 속히 건조시켜야 한다. 분해과정의 기작은 그림 1과 같이 토양입자나 비에 젖어서 산화된 유황(oxidized sulfur)이나 환원된 유황(reduced sulfur)이 계속 축적되고 이를 이용하여 Tiobacillus thioxydens는 H_2SO_4 를 생성하고, 다시 돌 성분인 $CaCO_3$ 와 반응하여 $CaSO_4$ 를 만들어 돌의 표면에 축적된다.



2) 질화세균(nitrifying bacteria)

질화세균이 돌과 바위의 표면을 부식한다. 대리석에 기생하는 질화 세균은 돌로부터 Ca^{+2} 을 제거하여 calcium nitrate[$Ca(NO_3)_2$]를 형성하여 물에 녹아 있으며, 이것이 다시 돌 표면에 결정화하여 흰 반점을 형성한다. 질화세균은 다음과 같이 우선 암모니아로 부터 질산을 형성한다.



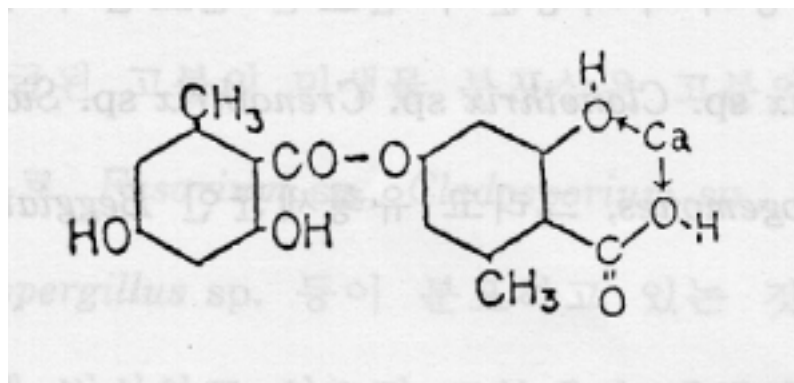


질산염(NO_3^{2-})은 돌을 건조에서 젖은 상태로 변화하는 동안에 파괴하는 효과가 있다. 이들 질화세균은 탄산바위(carbonate rock), carbonate mortar, concrete, cement 등을 바위나 광물질과 함께 분해한다.

나.지의류(lichens)

지의류(地衣類)는 외관상 하나의 식물체로 보이지만 균류(菌類)와 조류(藻類)의 공생체로서 성장형태에 따라 분류하면 기질에 밀착하여 분해가 어렵고 상피층이 없는 고착지의류(crustose), 가근으로 기질을 침입하며 곡형적인 엽상을 하고 있는 엽상지의류(foliose), 그리고 모상(毛狀)에서 수피상(樹皮狀)에 이르기까지 다양한 형태를 나타내며 나무모양을 하고 있는 소상지의류(fruticose)로 분류된다. 이중 석조문화재의 손상과 가장 관련이 많은 것이 고착지의류이다. 지의류의 조류는 광합성과 질소동화작용에 의해 유기물을 합성하며 균류의 균사는 유기물의 합성에 필요한 수분을 공급하고 양분을 공급받아 지의류는 생장을 하게 된다.

이들 지의류는 생장을 하기 위해서 독특한 유기물을 분비하게 되는데 이러한 유기산을 지의산이라 하며 보통 수십여종의 지의산을 분비하여 석재표면을 용해시킨다. 젤라틴 같은 지의류 엽상체가 젖었을 때 또는 건조할 때에 팽창하고 수축하므로써 바위가 쪼개진다는 학설이 있었으나, 최근의 학설은 지의산(lichenacid)이 석조 성분중의 칼슘(Ca^{+2}), 마그네슘(Mg^{+2}), 또는 다른 광물질을 제거하여 킬레이트를 만들어(chelating) 바위를 파괴한다는 것이다.



다. 선태류

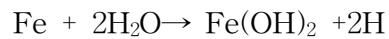
선태류(鮮苔類)는 보통 이끼류라고도 한다. 이끼류의 번식으로 인한 석조물의 손상은 지의류보다는 적은 편이나 이끼류가 발생하게 되면 석조면에 수분을 더 많이 보호하는 결과가 되어 암석의 화학적 부식작용을 촉진하며 지의류와 공생하여 지의류의 번식을 촉진시키기도 한다. 또한 석조물의 재질이 무른 상태이거

나 심하게 풍화된 석조물인 경우에는 이끼류의 뿌리를 내려 석조물에 고착하는 경우도 있다. 이같은 과정에 의하여 바위 및 돌은 부식하게 된다.

4. 금속문화재의 미생물 피해

가. 철의 부식

문화재의 재료로서 철을 사용한 경우 철세균에 의하여 산화 부식된다. 철은 Fe^{+2} 로서 용액 중에 이동되면 물과 반응하여 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 가 생성된다.



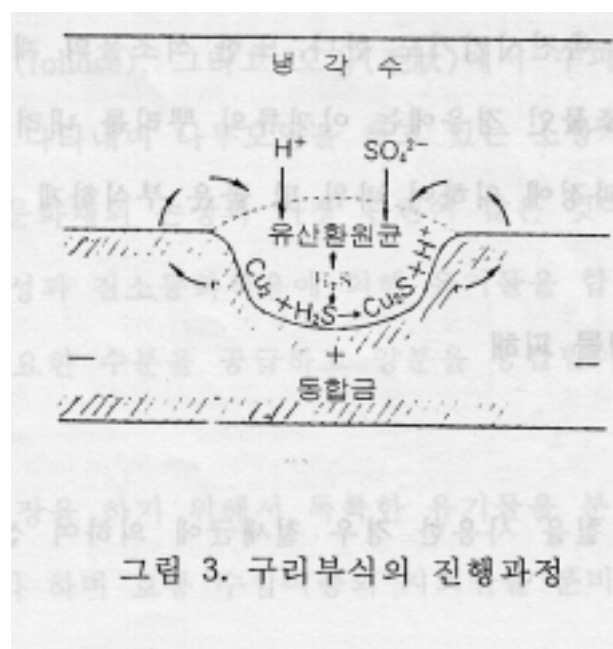
세균, 효모, 곰팡이, 조류, 원생 동물들은 위와 같은 철의 부식 속도를 증가시킨다. 세균이 부식을 촉진하는 요인은 특히 습도, 온도, pH등이며, 인, 칼슘(Ca), 마그네슘(Mg), 유황, 철 등의 무기성분과 탄소원 질소원이 필요하다.

철세균으로서 *Leptothrix* sp. *Clonothrix* sp. *Crenothrix* sp. *Sidercap* sp. 등이 있으며 수소생성세균인 *Hydrogemones*, 그리고 유황세균인 *Beggiatoa*, *Thiobacillus* 등이 있다.

나. 동(銅)의 부식

동(銅·Cu)이 포함된 문화재의 부식은 미생물에 의하여 발생한다. 동부식의 기작을 도식으로 표시하면 그림 3과 같다. 미생물 부식은 금속 표면이 반점상이되며 중심부에는 반드시 깊은 구멍이 생긴다.

이때 유화수소(H_2S)가 많이 생성되는데, 관여하는 세균은 유산환원균인 *Desulfovibrio* 속이나 *Colostridium nigrificans* 이다.



5. 고분벽화의 미생물 피해

일반적으로 벽화고분내의 환경은 온도 12~17℃, 상대습도 95% 이상을 유지하고 있으며 발굴직후 고분내에는 미생물이 번식하고 있지 않는 것으로 알려져있다. 그러나 발굴전의 고분은 혐기성 상태로 산소가 부족하여 미생물의 분포가 거의 소수이나 발굴된 고분의 미생물 분포상은 고분의 위치나 환경에 따라 달라 질 수 있다. 대체로 *Fusarium* sp., *Cladosporium* sp., *Trichoderma* sp., *Mucor* sp., *Penicillium* sp., *Aspergillus* sp. 등이 분포하고 있는 것으로 알려져 있다. 이러한 미생물이 고분내에 번식하고 있으면 고분내의 채색변화에 백색집락을 형성하거나 균사가 벽화면의 안료 사이에 번식하여 안료박리의 원인이 된다. 일단 발굴된 벽화고분은 벽화면에 이러한 미생물수가 급증하여 벽화면의 오염, 안료의 변퇴색, 박리 등으로 인하여 급속히 손상되기 시작한다. 이러한 사실로 부터 미발굴된 다습한 고분환경에서는 미생물 발생을 억제하는 인자가 존재하고 있다는 것을 추정할 수 있다.

新井英夫(1974)은 저분자량의 아민류가 미생물의 번식을 억제하는 작용을 하고 있다는 것을 규명하였으나 고분내에 아민류의 형성과정을 다음과 같이 규정하였다. 즉 유체가 고분내에 매장된 후 유체(幽體)를 형성하고 있는 단백질은 장내세균, 토양미생물 등에 의해 부패하게 된다. 먼저 고분자인 단백질은 가수분해되어 아미노산으로 된다. 이러한 아미노산은 부패과정에서 탈탄산작용에 의해 각각의 아미노산에 해당하는 아민류를 부패생성물로 형성하게 된다. 이러한 아민류에는 ptomine(시독(屍毒)이라고 하는 유독물질)도 포함되어 있으면 이러한 아민류는 고분내의 미생물에 의해 저분자량의 알킬아민으로 분해되어 토양중에 흡수된다. 저분자량의 알킬아민은 빙점이 -6.7~16.6℃이므로 온도가 12~17℃인 고분환경내에서 토양중에 흡착과 중산을 천천히 반복하게 된다.

따라서 저분자량의 알킬아민류가 미발굴 고분내에서 미생물 발생의 억제인자로 작용한다고 생각하면 미발굴 고분내에서 사상균이 번식하고 있지 않는 현상을 합리적으로 납득할 수 있을 것이다. 따라서 발굴후에 고분내에 급속히 미생물수가 증가하는 것과 벽화의 손상현상이 발생하는 것은 이러한 알킬아민류가 공기중으로 방출되어 고분이 갖고 있는 미생물에 대한 자정작용 능력을 상실했기 때문이다.

6. 보존대책

가. 목조문화재보존

목재는 유기물이므로 여러 가지 균에 의해 공격을 받으며 부후한다는 것은 어쩔 수 없는 것이다. 그러나 고건축의 예를 보면 잘 알 수 있는 것처럼 수백년이 되어도 전혀 부후하지 않은 부분도 있다. 이것은 목부중에 균이 생육을 방해하는 항균성물질이 존재하기 때문이거나 환경조건이 균이 생육에 적합하지 않기 때문이다.

균류가 생육하는데 필요한 환경인자로는 수분, 효소, 온도의 3가지를 들 수 있다.

위의 3가지 환경인자중 하나라도 결핍되면 균의 생육은 정지되어 부후도 발생하지 않게 된다. 고건축에서 보이는 고내후성의 원인의 하나는 세가지 환경요인중 수분환경에 기인하게 된다. 효소나 온도를 인위적으로 조절하는 것은 소범위 혹은 한정된 공간 이외에는 곤란하나 수분 환경을 억제하는 것은 어느정도 가능한 편이기 때문이다.

나. 석조문화재보존

석조문화재의 지의류 등이 착생하게 되면 명문(銘文)의 은폐, 지의산의 분비로 인한 석재의 용해 가근의 성장으로 인한 석재의 부식 그리고 토양 미생물의 번식으로 인한 토양화 촉진 등으로 석조물은 풍화가 가속된다. 따라서 이러한 피해를 방지하기 위해는 지질에 비교적 영향을 주지 않는 약제를 선택하여 가급적 빠른 시기에 처리하여 제거하여야 한다. 그러나 우리나라에서는 아직 석조문화재에 발생하고 있는 지의류, 이끼류의 방지를 미적 가치의 부여와 석조물의 보호론적 주장으로 인하여 적극적으로 행하고 있지 않으나 유럽이나 동남아시아등에서는 석조물의 표면에 지의류등이 발생하는 즉시 제거하고 있다. 현재 가장 유효한 약제로 사용하고 있는 것이 AC322라고 하는 약제이며, 그 조성은 ammonium carbonate 30g, sodium carbonate 50g, carboxymethyl cellulose(C.M.C)60g, ethylene dinitrilotetra acetic acid(EDTA) 25g, benzalkonium chloride 3ml, Distilled water 1000ml이다. 또한 0.3~0.5%의 p-chloro-m-cresol을 ethanol에 녹여 살포하기도 한다.

다. 금속문화재 보존

장해가 되는 미생물을 조기에 발견하여 판정하여양 하며 미생물의 생활 또는 생육에 불리한 환경을 만들어 주든가, 약제 등의 방법을 사용한다. 철표면에는 도장 등의 방법으로 미생물의 직접적인 접촉을 막아준다. 구리를 변화시키는 미생물에는 살균제, 가스 살균 방식을 보호 피막을 만들어 준다. 알루미늄의 경우도 살균제의 사용 내지는 표면을 코팅하여 미생물의 접근을 차단한다.

라. 고분의 보존

현재 우리나라에는 매년 고분들이 발굴되고 있으며 특히 벽화 고분인 경우에는 발굴후 보존과 관찰을 위한 시설을 설치하는 경우 발굴전의 매장 환경에 대한 배려를 하지 않으면 고분내에 잔유하는 알킬 아민류가 공기중으로 방출되거나 회석되어 미생물 발생에 대한 자정 작용을 상실하게 되어 급속히 고분 벽화의 손상을 초래하게 된다. 또한 도굴된 고분을 발굴하는 경우에는 이미 미생물의 발생에 대한 자정작용이 상실되어 있으므로 미생물의 발생을 억제 시키기 위한

p-formaldehyde가 효과가 있으며, 사용 양은 40g/m³이 바람직하다.

7. 맺음말

문화재는 지구상에 존재하는 한 하나의 물체로서 자연계의 물질 환경 순환 법칙에 의거 분해되는 과정에서 각종 손상 현상이 일어나게 된다. 이러한 손상현상을 통하여 문화재의 재질 상태를 조사 분석 함으로써 더 이상 손상이 진행되지 않도록 하는 분야가 보존과학이며 또한 손상 현상을 미연에 방지하는 조치가 예방 보존과학이다. 보존과학에서 미생물분야는 재질 분해 과정에서 분해자로서 역할을 하고 있으므로 그 생육을 억제할 수 있는 방안이 모색되어야 한다. 앞에서 살펴본 바와 같이 현재 문화재가 놓여있는 환경은 대체로 미생물이 생육하기에는 적합한 환경은 아님에도 불구하고 문화재가 미생물에 의해 손상되고 있는 것이 현실이다. 이것은 문화재를 관리함에 있어 미생물에 대한 기본 지식이 부족하기 때문에 야기되는 것을 근본 과정을 통하여 미생물의 역할에 대한 인식을 새롭게 하여 이를 토대로 하여 문화재의 보존에 관심을 갖는 기회가 되길 바란다.