

국내 9기 석조문화재의 생물오염피복도 및 기중조류 군집

김용진 | 김옥진 | 이옥민¹
경기대학교 생명과학과

The Community of Aerial Algae and the Biological Pollution Coverage at 9 Stone Cultural Heritages in Korea

Yong-Jin Kim | Ok-Jin Kim | Ok-Min Lee¹

Department of Life Science, Kyonggi University, Suwon 443-760, Korea

¹Corresponding Author: omlee@kyonggi.ac.kr, +82-31-249-9643

초록 본 연구는 2008년 6월에서 11월까지 국내 9기의 석조문화재를 대상으로 색에 따른 오염등급의 평가와 생물오염피복도를 조사하였다. 생물오염피복도는 홍천물걸리삼층석탑, 수타사삼층석탑 및 수타사홍우당부도에서 90% 정도로 나타났으며, 선태류의 생물오염피복도가 15~23%의 범위로 생물오염이 가장 심한 것으로 나타났다. 색에 따른 생물오염등급은 괘석리사사자삼층석탑, 수타사삼층석탑, 수타사홍우당부도가 등급 5로 오염등급이 가장 높았으며, 여주창리삼층석탑이 등급 2로 양호하게 나타났다. 상관분석 결과 생물오염등급과 지의류의 생물오염피복도는 높은 상관성($r=0.91$)을 나타냈지만, 기중조류와 선태류의 생물오염피복도와는 상관성은 낮게 나타나 이에 대한 보완이 필요할 것으로 판단된다. 각 출현종과 생물오염피복도(선태류, 지의류, 기중조류)의 상관분석결과 선태류의 생물오염피복도와 *Cosmarium decedens*, *Chlorella ellipsoidea*, *Anabaena fertilissima*, *Botryococcus braunii*, *Chroococcus turgidus*, *Navicula cryptocephala* 및 *Xenococcus acervatus*가 상관계수 0.56~0.85의 범위로 높은 상관성을 나타냈다. 지의류의 생물오염피복도는 *Trebouxia* sp. 및 *Chroococcus varius*와 상관계수 0.50 및 0.43으로 나타났으며, 기중조류의 생물오염피복도는 *Achnanthes laterostrata* 및 *Ulothrix zonata*와 상관계수 0.76 및 0.57의 상관성을 나타냈다. 생물오염피복도와 상관성이 높은 기중조류는 출현 경향성이 대체로 뚜렷하게 나타나, 지표종으로 유용하게 사용될 수 있을 것이라 판단된다.

중심어: 기중조류, 생물오염피복도, 생물오염등급, 생물풍화

ABSTRACT This research was to examine the biological pollution class by color of the polluted section and calculate the biological pollution coverages of 9 stone heritages in Korea, from June to November 2008. Three storied stone pagoda in Mulgeol-ri, Hongcheon, Three storied stone pagoda in Suta Temple and Stupa to Hongudang in Sutasa Temple showed 90% biological pollution coverage and each stone cultural heritages showed 15~23% range of Bryophyte coverage, proving severe biological pollution. The Four-lion three storied stone pagoda of Gwaeseok-ri, Three storied stone pagoda in Suta Temple and Stupa to Hongudang in Sutasa Temple showed the worst biological pollution class by color of class 5. Three storied stone pagoda in Chang-ri showed satisfactory level of class 2. The result of the correlation analysis between biological pollution class and the biological pollution coverage of lichen showed high correlation coefficient of 0.91, however, the correlation analysis between biological pollution class and bryophyte or aerial algae coverage showed the low correlation coefficient. Eight taxa among all the aerial algae, *Cosmarium decedens*, *Chlorella ellipsoidea*, *Anabaena fertilissima*, *Botryococcus braunii*, *Chroococcus turgidus*, *Navicula cryptocephala* and *Xenococcus acervatus* showed

high correlation coefficient of 0.56~0.85 with biological pollution coverage of bryophyte, in the correlation analysis. The correlation coefficient between biological pollution coverage of lichen, *Trebouxia* sp. and *Chroococcus varius*, had a range between 0.43 to 0.50. The correlation coefficient between biological pollution coverage of aerial algae, *Achnanthes laterostrata* and *Ulothrix zonata* showed a range of 0.57 to 0.76. Since the aerial algae with high correlation between biological pollution coverage showed clear appearance tendency, they can be used as indicator.

Key Words: Aerial algae, Biological pollution coverage, Biological pollution class, Biodeterioration

1. 서 론

최근 전 세계적으로 문화재의 보존과 관리에 대한 관심이 고조되고 있으며¹, 이에 따른 각 분야의 연구가 국내외에서 이루어지고 있다. 이 중 기증조류(aerial algae)에 의한 석조문화재의 생물오염이 가장 심각한 것으로 알려져 있으나, 기증조류에 대한 연구는 국내외 모두 미흡하다.¹ 석조문화재에 기증조류가 서식함으로써 변색을 유발하고² 다른 생물들과의 상호작용에 의해 풍화를 촉진시킨다.^{3,4} 이러한 풍화작용은 대부분 복합적(생물, 물리, 화학)으로 발생하여³, 석조문화재에 문제를 야기 시키기 때문에 이를 해결하기 위한 연구가 진행 중이다.

기증조류에 의한 석조문화재의 생물풍화에 관한 국외의 연구는 기질에 붙어사는 생물량의 구성에 대한 연구⁵와 기증 남조류(aerial cyanobacteria) 군집의 개체특성에 관한 연구⁶ 등 기증조류의 생태와 군집구성과 관련된 연구가 있다. 반면 국내의 석조문화재에 서식하는 기증조류에 관한 연구는 미약한 편으로, 공주 무령왕릉에 대한 연구⁷, 중원 미륵사지의 석불입상에 관한 연구⁸, 익산 미륵사지석탑에 대한 연구⁹와 국내 석조문화재에 분포하는 기증조류와 생물학적 등급에 관한 연구^{10,11,12} 등이 있다. 석조문화재의 생물풍화연구는 엽록소 *a*를 측정하는 정량적인 분석 방법^{13,14}이 일반적으로 이용되고 있으나, 이러한 등급은 엽록소 *a*의 농도가 각 등급별로 중복되는 구간이 있으며, 이것은 색에 의해 최종적으로 등급이 결정된다. 색은 서식하는 기증조류 및 지의류의 군집조성에 의해 녹색 또는 청녹색 그리고 검은색 등으로 나타나기 때문에¹⁵ 색에 의한 등급은 다소 주관성이 내포되어 있다.

따라서 본 연구에서는 여주창리삼층석탑 외 8기의 석조문화재를 대상으로 서식기증조류의 분포를 밝히고, 석조문화재의 변색정도와 생물오염피복도를 통한 생물오염등급을 산정하고자 한다. 또한 생물오염등급에 따른 오염 지표종을 발굴함으로써 석조문화재의 생물오염을 손쉽게 파악할 수 있는 방법을 제시하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

본 연구는 2008년 6월에서 11월까지 경기도 여주군의 여주창리삼층석탑(보물 제91호)과 신륵사보제존자석종비(보물 제229호), 강원도 원주시의 진공대사탑비 귀부 및 이수(보물 제463호)와 흥법사지삼층석탑(보물 제463호), 홍천군의 괘석리사사자삼층석탑(보물 제540호), 홍천물걸리삼층석탑(보물 제545호), 수타사삼층석탑(강원도 문화재자료 제11호) 및 수타사홍우당부도(강원도 문화재자료 제15호), 충북 괴산군의 괴산각연사통일대사탑비(보물 제1295호) 등 총 9기의 석조문화재를 대상으로 조사하였다.

환경요인 측정은 봉상 온도계를 사용하여 기온을 측정하였으며, 표면온도는 testo 830-T1(Testo, Germany)를 이용하였고, 습도는 testo 625(Testo, Germany)와 그리고 조도는 LX-1108(Lutron, Taiwan)을 이용하여 측정하였다. 시료의 채집은 정면, 좌측면, 후면, 우측면 방향의 한군데 이상의 정점으로 부터 시료를 채집하였으며, 채집방법은 부드러운 솔이나 멸균된 압설자를 이용하였다.¹⁶ 채집된 시료는 4℃ 상태의 아이스박스에 넣어 실험실로 옮겨와 -20℃의 냉동고에 넣어 동결시켰으며, 나머지 시료의 일부는 포르말린으로 고정하여 보관 및 분석하였다.

생물오염도의 등급은 Donner *et al.*¹³이 제안한 6단계의 등급 중 색을 기준으로 나누었으며, 생물오염피복도는 AutoCAD(2008)를 사용하여 각각 선타류, 지의류, 기증조류 및 비오염 등으로 구분하여 생물별 오염면적을 산출하였다.

기증조류의 동정은 출현 분류군을 순수 분리하여 배양하거나 시료를 직접 광학현미경을 이용하여 1,000배로 관찰하였으며, 정¹⁷, Hirose *et al.*¹⁸, John *et al.*¹⁹ 그리고 Barberousse *et al.*²⁰ 을 참고하였다. 생물오염등급과 출현종 간의 상관성을 분석하기 위해서 SPSS(12.0)을 이용하여 상관분석 및 주성분분석을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 환경요인

국내 9기의 석조문화재들에 대한 기온, 표면온도 및 조도를 측정하였다(Table 1). 각 환경요인은 석조문화재의 정면, 좌측면, 후면, 우측면의 상중하를 측정하였으며, 각 방

향의 평균값을 산출하였다. 측정된 요인 중 기온은 3.4~32.5°C의 범위로 나타났으며, 표면온도는 0.5~33.3°C의 범위로 기온의 경우와 같이 조사시기와 지역에 따라 각기 다르게 나타났다. 기온과 표면온도의 차이는 0.2~(±)11.0°C의 범위로 수타사삼층석탑 전면에서 가장 큰 차이를 나타냈고, 여주창리삼층석탑 좌측면에서 가장 적은 차이를 나타냈다. 또한 각 방위에 따른 표면온도는 각 문화재의 전면

Table 1. The physico-chemical factors of sampling points of 9 stone cultural heritages of Korea in 2008.

Cultural heritages (Sampling date)	Code	Temp. (°C)	Sampling point	Surface Temp. (°C)	Humidity (%)	Intensity of Illumination ($\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
Three storied stone pagoda in Chang-ri, Yeosu (June, 2008)	a	29.0	front	30.7	56	-
			left	29.2	54	-
			back	26.2	56	-
			right	26.7	56	-
Stele to buddhist priest Bojeonja of Silleuksa Temple (June, 2008)	b	22.0	front	24.5	69	-
			left	25.2	73	-
			back	23.3	76	-
			right	23.3	72	-
Stele of Tongildaesa in Gageonsa Temple, Goesan (July, 2008)	c	32.5	front	31.2	53	-
			left	33.3	54	-
			back	29.3	54	-
			right	28.5	55	-
Capstone and base of stele to high priest Jingongdaesa (September, 2008)	d	16.1	front	15.3	45	23
			left	14.0	45	25
			back	9.8	45	10
			right	11.8	45	13
Four-lion three storied stone pagoda of Gwaeseok-ri, Hongcheon (September, 2008)	e	18.7	front	25.5	29	41
			left	15.0	28	41
			back	12.2	29	25
			right	14.2	30	43
Three storied stone pagoda in Mulgeol-ri, Hongcheon (October, 2008)	f	18.2	front	21.5	40	41
			left	13.0	42	34
			back	10.8	42	33
			right	10.5	41	33
Three storied stone pagoda in Suta Temple (October, 2008)	g	12.9	front	23.9	43	148
			left	8.8	56	43
			back	7.8	56	33
			right	10.7	43	135
Stupa to Hongudang in Sutasa Temple (October, 2008)	h	3.4	front	1.5	85	32
			left	1.3	86	8
			back	0.5	86	12
			right	0.8	86	37
Three storied stone pagoda of Heungbeop Temple site (November, 2008)	i	16.1	front	14.2	43	40
			left	9.7	43	24
			back	11.0	43	23
			right	14.5	42	44

Table 2. continued.

Species	a	b	c	d	e	f	g	h	i
<i>Stigonema mamillosum</i>		+							
Phylum CHLOROPHYTA									
Cl. CHLOROPHYCEAE									
Ord. CHLOROCOCCALES									
Fam. Chlorococcaceae									
<i>Chlorococcum infusionum</i>	+	+							
<i>Trebouxia</i> sp.				+			+		
Fam. Oocystaceae									
<i>Chlorella ellipsoidea</i>						+	+		
<i>Chlorella vulgaris</i>			+				+		+
Ord. ZYGNEMATALES									
Fam. Desmidiaceae									
Subfam. Cosmarieae									
<i>Cosmarium decedens</i>							+	+	
Fam. Mesetaeniaceae									
<i>Cylindrocystis gracilis</i>		+							
<i>Mesotaenium chlamydosporum</i>		+							
Ord. ULOTRICHALES									
Fam. Ulotrichaceae									
<i>Klebsormidium crenulatum</i>							+		+
<i>Klebsormidium dissectum</i>		+							
<i>Klebsormidium flaccidium</i>		+							
<i>Stichococcus minutissima</i>		+							
<i>Ulothrix zonata</i>		+					+		+
Fam. Microsporaceae									
<i>Microspora willeana</i>		+							
Ord. ULOTRICHALES									
Fam. Protococcaceae									
<i>Protococcus viridis</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Phylum CHRYSOPHYTA									
Cl. BACILLARIOPHYCEAE									
Ord. PENNALES									
Subord. RAPHAIDINEAE									
Fam. Achnantheaceae									
<i>Achnanthes laterostrata</i>						+			
Fam. Naviculaceae									
<i>Cymbella lacustris</i>		+							
<i>Navicula cryptocephala</i>							+		
<i>Navicula geoppertiana</i>		+						+	
<i>Pinnularia borealis</i>		+							
Fam. Nitzschiaceae									
<i>Nitzschia brevissima</i>		+					+		
Cl. XANTHOPHYCEAE									
Ord. Mischoceales									
Fam. Chlorobotrydaceae									
<i>Botryococcus braunii</i>							+		
Total	4	17	4	6	4	8	13	10	9

전체 출현 분류군 중 남조강의 *Synechocystis aquatilis*와 녹조강의 *Protococcus viridis*는 생육범위가 넓은 기중조류¹⁷로 9

기의 석조문화재에서 모두 출현하였으며, *Chlorella* 속 조류도 각 문화재에서 빈번히 출현한 것으로 나타났다. *Cosmarium*

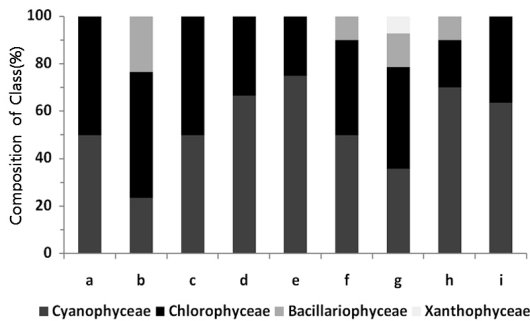


Figure 1. The composition of class in 9 stone cultural heritages of Korea in 2008(a: Three storied stone pagoda in Chang-ri, Yeosu, b: Stele to buddhist priest Bojeonja of Silleuksa Temple, c: Stele of Tongildaesa in Gagybonsa Temple, Goesan, d: Capstone and base of stele to high priest Jingongdaesa, e: Four-lion three storied stone pagoda of Gwaeseok-ri, Hongcheon, f: Three storied stone pagoda in Mulgeol-ri, Hongcheon, g: Three storied stone pagoda in Suta Temple, h: Stupa to Hongudang in Sutasa Temple, i: Three storied stone pagoda of Heungbeop Temple site).

*decedens*와 *Ulothrix zonata*는 일반적으로 하천이나 호소의 주요 출현종으로 알려져 있으나^{17,19}, 선행연구^{11,12,21}에서 수중 환경 뿐 아니라 기증의 석조물에서도 서식하는 것으로 나타난 바 있다. *Cosmarium decedens*와 *Ulothrix zonata*가 출현한 석조문화재의 경우 대체적으로 다양한 선태류가 출현하며, 습도의 유지가 비교적 양호한 정점에서 나타나며, 토양성 규조류인 *Cymbella lacustris*, *Navicula cryptocephala*, *Navicula geoppertiana* 및 *Pinnularia borealis*이 함께 출현하는 것으로 *Cosmarium decedens*와 *Ulothrix zonata*는 생물오염이 심화된 곳에 출현하는 지표종으로 활용가치가 높을 것으로 판단된다.

각 석조문화재의 강별 출현종은 신록사보제존자석종비와 수타사삼층석탑을 제외하고 남조강의 비율이 50% 이상을 나타냈으며, 패석리사자삼층석탑의 경우 75%의 종이 남조강으로 나타났다. 신록사보제존자석종비와 수타사삼층석탑의 경우 녹조강이 남조강보다 다양한 종이 출현하였으며, 규조강은 신록사보제존자석종비, 흥천물걸리삼층석탑, 수타사삼층석탑 및 수타사홍우당부도에서만 출현하였다(Figure 1). 황록조강은 수타사삼층석탑에서만 출현하였으며, 남조강, 녹조강, 규조강 등 다양한 분류군이 출현한 4기의 석조문화재가 생물오염도가 높을 것으로 판단된다.^{11,11,12}

3.3. 생물오염피복도와 색에 따른 생물오염등급

각 석조문화재의 생물오염피복도의 산출결과, 패석리사

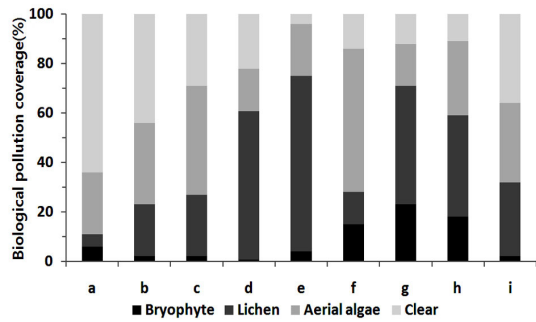


Figure 2. Biological pollution coverage in 9 stone cultural heritages of Korea in 2008(a: Three storied stone pagoda in Chang-ri, Yeosu, b: Stele to buddhist priest Bojeonja of Silleuksa Temple, c: Stele of Tongildaesa in Gagybonsa Temple, Goesan, d: Capstone and base of stele to high priest Jingongdaesa, e: Four-lion three storied stone pagoda of Gwaeseok-ri, Hongcheon, f: Three storied stone pagoda in Mulgeol-ri, Hongcheon, g: Three storied stone pagoda in Suta Temple, h: Stupa to Hongudang in Sutasa Temple, i: Three storied stone pagoda of Heungbeop Temple site).

사자삼층석탑이 96%로 가장 높게 나타났으며, 여주창리삼층석탑이 36%로 가장 낮게 나타났다(Figure 2, Table 3). 패석리사자삼층석탑의 경우 지의류가 71%로 광범위하게 오염되어 있으며, 9기의 석조문화재 중 지의류의 오염비율이 가장 높은 것으로 나타났다. 수타사삼층석탑의 경우 생물오염피복도가 89%로 9기의 석조문화재 중 두 번째로 높게 나타났으며, 선태류의 생물오염도가 23%, 지의류의 피복도가 48%로 패석리사자삼층석탑보다 오염이 진행된 것으로 나타났다. 석탑에서의 생물오염과정은 기증조류, 지의류 및 선태류의 순으로 오염이 진행되며, 이러한 생물오염과정은 석탑의 위치와 주변 환경의 영향을 받는다.¹ 수목으로 둘러싸인 수타사삼층석탑이 도시에 위치한 패석리사자삼층석탑에 비해 습도의 유지 등 지의류에서 선태류로의 오염진행이 보다 유리하였을 것으로 판단된다.

색에 따른 생물오염등급¹³의 산정 결과 패석리사자삼층석탑, 수타사삼층석탑, 수타사홍우당부도가 등급 5로 가장 오염이 심한 것으로 나타났으며, 여주창리삼층석탑이 등급 2로 9기의 문화재 중 상태가 양호한 것으로 나타났다(Table 3). 이러한 결과는 색과 엽록소 a를 모두 사용하여 석조문화재의 등급을 판정한 김 등¹²의 연구결과(홍법사지삼층석탑 외 4기)와 일치했다. 이는 석조문화재의 엽록소 a 측정 시 전체면적에 대한 산출이 아닌 오염면적에 대한 엽록소 a만을 측정하였으며, 선태류의 오염을 고려하지 않았기 때문에 엽록소 a의 기준이 실제 석조문화재의 생물오

Table 3. Biological pollution class and coverages of 9 stone cultural heritages of Korea in 2008.

Site	Biological pollution coverage(%)				Color	Class
	Bryophyte	Lichen	Aerial algae	Total		
a	6	5	25	36	light green	2
b	2	21	33	56	green	3
c	2	25	44	71	green	3
d	1	60	17	78	black	5
e	4	71	21	96	black	5
f	15	13	58	86	green	3
g	23	48	17	89	black	5
h	18	41	30	88	black	5
i	2	30	32	64	dark green	4

Table 4. Correlation comparison of biological pollution coverage and class of 9 stone cultural heritages of Korea in 2008.

	Bryophyte	Lichen	Aerial algae	Clear	Class
Bryophyte	1	0.01	0.03	-0.46	0.29
Lichen		1	-0.63*	-0.71*	0.91**
Aerial algae			1	0.01	-0.55*
Clear				1	-0.78**
Class					1

*P<0.01, **P<0.05, n=9

염을 반영하지 못하였고, 결과적으로 생물오염등급이 색에 의해 결정되었음을 의미한다.

생물오염등급과 생물오염피복도의 상관관계는 지의류의 오염피복도와 생물오염등급과는 상관계수 0.91로 상관성이 매우 높은 것으로 나타났으나, 선태류의 오염피복도와는 상관성이 높지 않은 것으로 나타났다(Table 4). 또한 기중조류의 오염피복도와 생물오염등급은 음의 상관관계(-0.55)로 나타났으며, 이는 선태류와 같이 기중조류에 의한 생물오염이 생물오염등급에 거의 반영되지 않고 있음을 나타낸다. 석조문화재에서 지의류의 오염이 생물오염의 많은 부분을 차지하며, 생물물화에 미치는 영향이 크지만, 기중조류와 선태류에 의한 생물오염도 매우 중요하다. Donner et al.¹³의 등급은 지의류의 색변화를 중점으로 평가되는 것으로 사료되며, 기중조류와 선태류의 오염을 반영할 수 있도록 보완이 필요할 것으로 판단된다.

3.4. 통계분석을 통한 지표종의 발굴

기중조류는 석조문화재의 생물물화가 진행됨에 따라 남조강에서 녹조강, 규조강으로 군집 구조가 바뀐다.^{10,12} 이것은 단순히 강별 우점종의 변화를 나타내는 것이 아니라,

출현종의 변화를 의미하며, 특정 출현종은 기중조류의 서식조건 즉 서식환경을 대변한다.^{10,11,12} 김 등¹²의 연구에서는 엽록소 a와 생물오염등급을 기준으로 지표종을 발굴하였으나, 본 연구에서는 선태류, 지의류 및 기중조류의 생물오염피복도를 중심으로 지표종을 발굴하였다(Table 5, Figure 3).

상관분석결과 선태류의 생물오염피복도와 *Cosmarium decedens*, *Chlorella ellipsoidea*, *Anabaena fertilissima*, *Botryococcus braunii*, *Chroococcus turgidus*, *Navicula cryptocephala* 및 *Xenococcus acervatus*가 상관계수 0.56~0.85의 범위로 높은 상관성을 나타냈다. 지의류의 생물오염피복도는 *Trebouxia* sp. 및 *Chroococcus varius*와 상관계수 0.50 및 0.43으로 나타났으며, 기중조류의 생물오염피복도는 *Achnanthes laterostrata*, 및 *Ulothrix zonata*와 상관계수 0.76 및 0.57로 상관성을 나타냈다. 또한 선태류 및 지의류와 상관관계가 높았던 *Cosmarium decedens*와 *Chlorella ellipsoidea* 등과 같은 좋은 비오염면적(Clear)과 음의 상관관계를 나타냈다. 각 생물오염피복도와 상관성이 높은 기중조류는 일부 다른 생물오염피복도와 상관성을 나타내기도 하지만 대부분 출현 경향성이 뚜렷하게 나타나 지표종으로 유용하게 사용될 수 있을 것이라 판단된다.

각 석조문화재에 출현한 기중조류들 간의 관계를 확인하기 위해 주성분분석(Principal component analysis)을 하였으

Table 5. Correlation comparison of biological pollution coverage and aerial algae of 9 stone cultural heritages of Korea in 2008.

Species	Code	BR ¹	LI ²	AR ³	CL ⁴
<i>Achnanthes laterostrata</i>	ACLA	0.31	-0.38	0.76	-0.24
<i>Anabaena fertilissima</i>	ANFE	0.67	0.22	-0.39	-0.28
<i>Aphanocapsa grevillei</i>	APGR	-0.19	-0.02	0.27	-0.09
<i>Botryococcus braunii</i>	BOBR	0.67	0.22	-0.39	-0.28
<i>Chlorella ellipsoidea</i>	CHEL	0.74	-0.11	0.28	-0.39
<i>Chlorella vulgaris</i>	CGVU	0.08	-0.02	0.01	-0.02
<i>Chlorococcum infusionum</i>	CHIN	-0.28	-0.57	-0.08	0.82
<i>Chroococcus bituminosus</i>	CHBI	-0.01	0.04	0.28	-0.24
<i>Chroococcus pallidus</i>	CHPA	0.45	0.10	-0.02	-0.30
<i>Chroococcus turgidus</i>	CHTU	0.67	0.22	-0.39	-0.28
<i>Chroococcus varius</i>	CHVA	-0.01	0.43	-0.17	-0.36
<i>Cosmarium decedens</i>	CODE	0.85	0.25	-0.31	-0.44
<i>Cylindrocystis gracilis</i>	CYGR	-0.27	-0.24	0.06	0.35
<i>Klebsormidium crenulatum</i>	KLCR	0.30	0.11	-0.27	-0.07
<i>Klebsormidium flaccidium</i>	KLFL	-0.27	-0.24	0.06	0.35
<i>Microcystis protea</i>	MIPR	-0.27	-0.08	0.03	0.19
<i>Navicula cryptocephala</i>	NACR	0.67	0.22	-0.39	-0.28
<i>Nitzschia brevissima</i>	NIBR	0.30	-0.01	-0.24	0.05
<i>Pleurocapsa minor</i>	PLMI	0.45	0.10	-0.02	-0.30
<i>Stigonema mamillosum</i>	STMA	-0.27	-0.24	0.06	0.35
<i>Synechocystis pevalekii</i>	SYPE	-0.07	-0.30	0.14	0.28
<i>Trebouxia</i> sp.	TRSP	0.26	0.50	-0.58	-0.27
<i>Ulothrix zonata</i>	ULZO	-0.16	-0.46	0.57	0.20
<i>Xenococcus acervatus</i>	XEAC	0.56	0.16	-0.25	-0.26

1: Bryophyte, 2: Lichen, 3: Aerial algae, 4: Clear

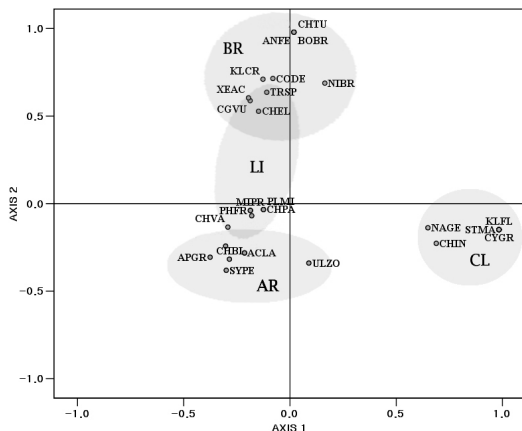


Figure 3. Principal component analysis plots of aerial algae of 9 stone cultural heritages of Korea in 2008.

며, 주성분 분석은 Varimax법²²으로 회전시켜 결과를 도출하였고 이를 도표로 나타내었다(Figure 3). 분석결과 기중조류

는 크게 선타류 그룹(BR), 기중조류 그룹(AR) 및 비오염 그룹(CL)으로 나누어지며, 각 그룹은 생물오염피복도의 상관성이 높았던 기중조류로 이루어져 있다. 지의류의 생물오염피복도와 상관성이 높았던 기중조류를 지의류 그룹(LI)으로 묶으면, 선타류 그룹과 기중조류 그룹의 중간에 위치하며, 일부 출현종은 선타류 및 기중조류 그룹과 중복되는 것으로 나타났다.

생물오염피복도는 석조문화재의 생물오염을 나타내며, 기중조류는 이러한 생물오염을 나타내는 지표생물로서 유용할 것이라 판단되며, 추가적인 연구를 통해 기중조류를 이용한 석조문화재 생물오염평가방법을 개발 할 수 있을 것이라 판단된다.

4. 결론

본 연구는 2008년 6월에서 11월까지 국내 9기의 석조문화재를 대상으로 환경요인과 생물오염피복도의 조사와 색에 따른 오염등급을 평가 하였다. 각 방위에 따른 표면온도

는 각 문화재의 전면과 후면에서 차이가 가장 컸으며, 이러한 표면온도의 차이는 습도가 높은 여름철 보다 습도가 낮은 봄과 가을에 보다 많은 차이를 나타냈다.

생물오염피복도는 패석리사자삼층석탑이 96%로 가장 높았으며, 지의류가 71%로 광범위하게 오염되어 있었다. 홍천물길리삼층석탑, 수타사삼층석탑 및 수타사홍우당 부도는 선태류가 15~23%오염되어 있으며, 전체생물오염 피복도가 90%에 가깝게 나타나 가장 오염이 심한 것으로 판단된다.

색에 따른 생물오염등급은 패석리사자삼층석탑, 수타사삼층석탑, 수타사홍우당부도가 등급 5로 오염등급이 가장 높았으며, 여주창리삼층석탑이 등급 2로 양호하게 나타났다. 이것은 염록소 a와 색을 모두 사용한 결과와 일치하며, Donner *et al.*¹³의 등급은 색에 의해 결정되었음을 의미한다. 또한 상관분석결과 지의류는 생물오염등급과 높은 상관성($r=0.91$)을 나타냈지만, 기증조류와 선태류와의 상관성은 낮게 나타나 이에 대한 보완이 필요할 것으로 판단된다.

출현종은 총 9기의 석조문화재에서 34분류군의 기증조류가 출현하였으며, 남조강의 출현 비율이 가장 높았다. 각 출현종과 생물오염피복도(선태류, 지의류, 기증조류)의 상관분석결과 선태류의 생물피복도와 *Cosmarium decedens*와 *Anabaena fertilissima* 등 7종이 상관계수 0.56~0.85의 범위로 높은 상관성을 나타냈다. 지의류의 생물피복도는 *Trebouxia* sp. 및 *Chroococcus varius*와 상관계수 0.50 및 0.43으로 나타났다. 기증조류의 생물오염피복도는 *Achnanthes laterostrata* 및 *Ulothrix zonata*와 상관계수 0.76 및 0.57의 상관성을 나타냈다. 생물오염피복도와 상관성이 높은 기증조류는 대부분 출현 경향성이 뚜렷하게 나타나 지표종으로 유용하게 사용될 수 있을 것이라 판단된다.

사 사

본 연구는 국립문화재연구소(10B014Y-00130-2010)와 한국연구재단 기초연구사업(2010-0006680)에 의해 지원되었습니다.

참고문헌

1. 국립문화재연구소, "석조문화재 손상메커니즘 및 평가기술 개발". 연구보고서, p695, (2007).

2. Warscheid Th. and Braams J., "Biodeterioration of stone: a review". *International Biodeterioration & Biodegradation*, **46**, p343-368, (2000).

3. Jain K.K., Mishra A.K. and Singh T. "Biodeterioration of stone: A review of mechanisms involved". In:Garg K.L., Garg N. and Mukerji K.G.(Eds.), *Recent Advances in Biodeterioration and Biodegradation*, **1**, p323-354, (1993).

4. Ortega-Clavo J.J., Hernandez-Marine M. and Saiz-Jimenez C., "Experimental strategies for Investigating Algal Deterioration of Stone". In: Podrigues J., Henriques F. and Jeremias F.(Eds.), *Proceedings of the 7th international congress on Deterioration and Conservation of stone*, Lisbon, Portugal, p541-549, (1992).

5. Gaylarde C.C and Gaylarde P.M., "A comparative study of the major microbial biomass of biofilms on exteriors of building in Europe and Latin America". *International Biodeterioration & Biodegradation*, **55**, p131-139, (2005).

6. Youping Tian, Jie Zhang, Linhua Song, Haosheng Bao, "A study on aerial algae communities on the surface of carbonate rock of the yunnan stone forest". *Carsologica sinica*, **22**, p203-211, (2003).

7. Kim G. H., Klotchkova T.A. and Suh M.C., "The effect of chemical treatments on biodeterioration of stone cultural properties". *Kor. J. Environ. Biol*, **19**, p101-105, (2001).

8. Klotchkova T.A and Kim G.H. "Ornamented resting spores of a green alga, *Chlorella* sp., collected from the stone standing buddha statue at Jungwon Miruksazi in Korea". *Algae*, **20**, p295-298, (2005).

9. Klotchkova T.A., Cho G.Y., Pueschel C.M., West J.A. and Kim G.H., "Biology of a terrestrial green alga *Chlorococcum* sp. (Chlorococcales, Chlorophyta) collected from the Miruksazi stupa in Korea". *Phycologia*, **45**, p349-358, (2006).

10. 임안숙, 이옥민, "국내 5기의 석조문화재에 분포하는 기증조류와 생물학적 등급에 관한 연구". *Algae*, **23**, p63-69, (2008a).

11. 임안숙, 이옥민, "경기도내 5기 석조문화재의 기증조류의 분포와 조류 서식 등급". *Algae*, **23**, p269-276, (2008b).

12. 김용진, 김옥진, 이옥민, "국내 8기 석조문화재의 기증조류 분포 및 생물오염도 평가", *보존과학회지*, **26**, p259-268, (2010).

13. Donner A., Minden V., Rickler M., Rasch B., "Evaluation

- of algae infestation on building facades using a quantitative chlorophyll *a* method". *Qualität/Baisanierung Schriftenreihe*, **13**, p89-95, (2002).
14. Schumann R., Häubner N. Klausch S. and Karsten U., "Chlorophyll extraction methods for the quantification of green microalgae colonizing building facades". *International Biodeterioration & Biodegradation*, **55**, p213-222, (2005).
15. Bordo I.M., Sharnoff S.D. and Sharnoff S., "*Lichens of North America*". Yale University Press, New Heaven, USA, p828, (2001).
16. Kiel G. and Gaylarde C.C., "Bacterial diversity in biofilms on external surfaces of historic building in Porto Alegre". *World J. Microbiol. Biotechnol.*, **22**, p293-297, 2005).
17. 정준, "한국담수조류도감". 아카데미출판사, 서울, p496, (1993).
18. Hirose H.M., Akiyama T., Imahori H., Kasaki H., Kumano S., Kobatani H., Takahashi E., Tsumura T., Hirano M. and Yamagishi T., "*Illustrations of the Japanese freshwater algae*". Uchidarokakugo publishing Co., Ltd., Tokyo, Japan. p933, (1977).
19. John D.M., Whitton B.A. and Brook A.J., "*The Freshwater Algal Flora of the British Isles*". Cambridge University Press, Cambridge, UK, p702, (2002).
20. Barberousse H., Lombardo R.J., Tell G. and Couté A., "Factors involved in the colonization of building facades by algae and cyanobacteria in France". *Biofouling*, **22**, p69-77, (2006).
21. Zurita Y.P., Cultrone G., Castillo P.S., Sebastián E. and Bolívar F.C., "Microalgae associated with deteriorated stonework of the fountain of Bibatauin in Granada, Spain". *International Biodeterioration & Biodegradation*, **55**, p55-61, (2005).
22. 김경아, 김예진, 송미정, 지기원, 유평중, 김창원 "다변량 통계분석을 이용한 낙동강 상수원수의 수질변화 특성조사". *한국물환경학회지*, **23**, p814-821, (2007).
-