

# 국내 8기 석조문화재의 기중조류 분포 및 생물오염도 평가

김용진 | 김옥진 | 이옥민<sup>1</sup>  
경기대학교 생명과학과

## The Distribution of Aerial Algae and the Assessment of Biological Pollution Class at 8 Stone Cultural Heritages in Korea

Yong-Jin Kim | Ok-Jin Kim | Ok-Min Lee<sup>1</sup>

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

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

**초록** 본 연구는 2007년 4월에서 6월까지 국내 8기의 석조문화재를 대상으로 환경요인과 엽록소 *a* 및 색에 따른 생물오염 등급을 평가하였다. 엽록소 *a*의 경우 16.2~136.6 $\mu\text{g g}^{-1}$ 의 농도를 나타냈으며, 색은 녹색에서 검정색의 범위로 나타났다. 생물오염등급 평가 결과 물결리삼층석탑과 수타사삼층석탑은 3등급을 나타냈고, 쾌석리사자석탑 및 5개의 문화재는 4등급 이상을 나타냄으로써 생물오염이 심각한 것으로 나타났다. 기중조류는 총 32분류군이 출현하였으며, 이 중 남조강은 16분류군이고, 녹조강은 13분류군이며 규조강은 3분류군으로 나타났다. 엽록소 *a*와 생물오염등급 간의 상관분석 결과, 상관계수는 0.43을 나타냈다. 엽록소 *a*와 출현종 간의 상관분석에서 *Trebouxia* sp.와 *Chroococcus bituminosus*는 상관계수 0.89와 0.65로써 높은 상관성을 나타냈다. 생물오염등급과 출현종의 경우에는 *Chroococcus bituminosus*, *Aphanocapsa grevillei*, *Xenococcus acervatus*, *Chlorella vulgaris* 및 *Synechocystis pevalekii* 등이 상관계수 0.54~0.65의 범위로 높은 상관성을 나타냈다.

**중심어:** 기중조류, 생물풍화, 생물오염등급, 석조문화재

**ABSTRACT** To evaluate the biological pollution class, Chl-*a* concentration and color were examined in 8 stone cultural heritages of Korea from April to June 2007. In the case of Chl-*a*, it had the range of 16.2 to 136.6 $\mu\text{g g}^{-1}$ , and for the range of the colors, it came out from green to black. As the result of the evaluation, the Three storied stone pagoda in Mulgeol-ri and the Three storied stone pagoda in Suta Temple both showed class 3 and the other 6 stone cultural heritages showed the classes above 4, proving severe biological pollution. The total of 32 aerial algae taxa were found in 8 stone cultural heritages. Out of the 32 taxa, 16 taxa were found in Cyanophyceae, 13 taxa in Chlorophyceae, and 3 taxa in Bacillariophyceae. The correlation coefficient showed 0.43, as a result of the correlation analysis between Chl-*a* and the biological pollution class. Two among all the aerial algae taxa, *Trebouxia* sp, and *Chroococcus bituminosus*, showed high correlation coefficients of 0.89 and 0.65 with Chl-*a*, in the correlation analysis. High correlation coefficients from 0.54 to 0.65 were shown in a correlation analysis between the biological pollution class and the aerial algae taxa, which are *Chroococcus bituminosus*, *Aphanocapsa grevillei*, *Xenococcus acervatus*, *Chlorella vulgaris*, and *Synechocystis pevalekii*.

**Key Words:** Aerial algae, Biodeterioration, Biological pollution class, Stone cultural heritages

## 1. 서 론

기중조류(aerial algae)는 독립영양생물체인 조류를 서식처에 따라 분류했을 때, 물이 아닌 암벽, 토벽, 암석, 돌담 및 육상식물 등에 서식하는 조류를 말하며, 토양조류를 기중조류에 포함시키기도 한다.<sup>1,2</sup> 석조문화재에 기중조류가 서식함으로써 변색에 의하여 미적가치의 감소를 가져오고,<sup>3</sup> 조류의 높은 수분 보유 능력으로 인하여 수분의 해동과 동결이 반복됨으로써 암석에 물리적인 압력이 가해져 암석표면의 구조적인 변화를 초래하여 비 생물적인 풍화현상을 촉진시킨다.<sup>2,4</sup> 또한 기중조류가 분비하는 대사산물에 의한 화학적인 풍화현상이 야기되며, 다른 생물들과의 상호작용에 의해 풍화를 촉진시키고<sup>5</sup>, 이러한 풍화작용은 대부분 복합적(생물, 물리, 화학)으로 발생한다.<sup>4</sup>

이러한 이유로 기중조류에 의한 석조문화재의 생물학적 풍화에 관한 연구가 진행 중이다. 국외의 경우, 기질에 붙어사는 생물량의 구성에 대한 연구<sup>6</sup>와 기중 남조류(aerial cyanobacteria) 군집의 개체특성에 관한 연구<sup>7</sup> 등 기중조류의 생태와 군집구성과 관련된 연구가 있다. 또한 일반 건축물에 대한 연구<sup>8,9,10</sup>와 대리석에 서식하는 녹조류인 *Coccomyxa*를 포함한 5종류에 대한 연구<sup>11</sup>, 분자적 기법을 이용한 기중조류 분석에 관한 연구<sup>12,13,14</sup> 등 많은 연구가 수행되었다. 국내의 경우 공주 무령왕릉에 대한 연구<sup>15</sup>와 충원미륵사지의 석불입상에 관한 연구<sup>16</sup>, 익산 미륵사지석탑에 대한 연구<sup>17</sup>, 경기도에 소재한 석조문화재에 분포하는 기중조류와 생물학적 등급에 관한 연구<sup>18,19</sup> 등이 있다. 국내의 석조문화재에 서식하는 조류에 관한 연구는 미약한 편으로, 출현 기중조류의 생태적 특성이나, 생물오염등급과 출현종의 상관성에 대한 연구는 거의 전무한 상태이다.

또한 석조문화재의 생물풍화에 관한 연구는 엽록소 *a*를 측정하는 정량적인 분석 방법<sup>20,21,22</sup>이 일반적으로 사용되고 있으며, 암석의 색과 서식 세포 수는 서로 유의한 상

관관계가 있는 것으로 밝혀진 바 있다.<sup>20,23</sup> 하지만 이러한 엽록소 *a*의 측정과 색을 통한 생물오염등급 산정은 석조문화재의 생물오염을 세부적으로 반영하지 못하고 있어 기중조류의 군집분석을 통한 보완이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 석조문화재의 생물풍화에 관한 조류의 영향을 밝히기 위하여 월남사지삼층석탑 외 7기의 석조문화재를 대상으로 서식 기중조류의 분포를 밝히고, 석조문화재의 변색과 엽록소 *a* 측정을 통한 생물오염등급을 산정하고자 하였다. 또한 생물오염등급에 따른 조류 지표종을 발굴함으로써 석조문화재의 생물오염등급을 손쉽게 파악 할 수 있는 방법을 제시하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

본 연구는 2007년 4월에서 6월까지 전라남도 강진군 월남사지삼층석탑(보물 제298호), 강원도 원주시 진공대사탑비귀부 및 이수(보물 제463호)와 흥법사지삼층석탑(보물 제464호), 강원도 홍천군 개석리사자삼층석탑(보물 제540호), 물결리삼층석탑(보물 제545호), 수타사삼층석탑(강원도 문화재자료 제11호) 및 수타사홍우당부도(강원도 문화재자료 제15호), 경기도 용인공세리오층석탑(경기도 문화재자료 제42호) 등 총 8기의 석조문화재를 대상으로 조사 하였다. 채집 시기는 조류의 생장이 가장 활발한 봄철에 채집하였으며, 강우와 같은 기상상황을 피하고, 조사시각(10시~15시)을 고려하여 채집하였다.

환경요인 중 기온은 봉상 온도계를 사용하였으며, 표면 온도는 testo 830-T1(Testo, Germany)를 사용하였다. 습도는 testo 625(Testo, Germany)를 사용하였고, 조도는 LX-1108(Lutron, Taiwan)을 이용하여 측정하였다. 시료의 채집은 동서남북 방향의 한군데 이상의 정점으로부터 시료를 채취하였으며, 시료의 채취는 부드러운 솔이나 멸균된 압설자를 이용하였다.<sup>24</sup> 채취된 시료는 4℃ 상태의 아이스박스에

**Table 1.** The Chl-*a* concentrations in visual 6-step color scale<sup>27</sup>.

Class	Color	Chl- <i>a</i> ( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )
0	valid for surfaces without visible algae	1
1	light discoloration to be visually recognised by brighter regular spots from plastered wall plugs or other specific details	2
2	light green	7-20
3	green	10-70
4	dark green, red and/or brown	29-153
5	black with some dark green areas	37-74

넣어 실험실로 옮겨와 시료의 일부는 색소의 추출을 위해  $-20^{\circ}\text{C}$ 의 냉동고에 넣어 동결시켰으며, 나머지 시료의 일부는 포르말린으로 고정하여 보관 및 분석하였다.

엽록소 *a*는 약 0.1g정도의 시료에 아세톤을 넣어 냉암소에서 24시간 이상 정치하여 색소를 추출한 후, 파장 630 nm, 645nm, 663nm, 750nm에서 흡광도를 측정하여 산출하였다.<sup>25,26</sup> 생물오염도의 등급은 Donner *et al.*<sup>27</sup>이 제안한 6단계의 등급(Table 1)으로 나누었으며, 임과 이의 연구를 참고하여 보완하였다.<sup>18</sup> 또한 각 등급에 따라 엽록소 *a*의 양을 비교하고, 그에 따른 분포 생물군을 파악하였다.

기중조류의 동정은 출현 분류군을 순수 분리하여 배양하거나 시료를 직접 광학현미경을 이용하여 1,000배하에서 관찰 하였으며, 정<sup>1</sup>, Hirose *et al.*<sup>28</sup>, John *et al.*<sup>29</sup> 그리고 Barberousse *et al.*<sup>30</sup> 등을 참고하였다. 생물오염도와 출현 종 간의 상관성을 살펴보기 위해서 SPSS(12.0)을 이용하여 상관분석 및 주성분분석을 실시하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 환경요인

8기의 석조문화재들에 대한 표면온도 그리고 조도를 측정하였다. 측정된 요인 중 표면온도는  $12.0\text{--}45.5^{\circ}\text{C}$ 의 범위로 월남사지삼층석탑의 동쪽 기단 윗부분에서 가장 높게 나타났으며, 용인공세리오층석탑 서쪽 3층 옥개석에서 가장 낮게 나타났다. 월남사지삼층석탑의 경우 각 방위별 온도차가 가장 크게 나타났으며, 용인공세리오층석탑을 제외한 6개 문화재는 각 방위별 표면 온도차가  $5^{\circ}\text{C}$  이하로 나타났다. 습도의 경우 26.9~76.2%의 범위로 물걸리삼층석탑의 남쪽 기단 위가 가장 높게 나타났으며, 용인공세리오층석탑에서 가장 낮게 나타났다. 또한 용인공세리오층석탑을 제외하고, 7기의 석조문화재가 60~70% 범위의 습도를 나타냄으로써 습도가 높은 편으로 기중조류의 서식이 용이한 환경으로 판단된다. 조도는  $150\text{--}93,800\text{lm m}^{-2}$ 의 범위로 월남사지삼층석탑에서 가장 높은 조도를 나타냈으며, 홍우당 부도에서 가장 낮은 조도를 나타냈다. 월남사지삼층석탑의 경우 표면온도와 같이 동쪽 방위에서 조도가 높았으며, 서쪽 기단하부와  $900\mu\text{m m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 의 차이를 보였다. 대부분의 석조문화재가 방위에 따른 조도의 차이가 크게 나타났으며, 진공대사탑비 귀부 및 이수외의 경우 전 방위에서  $20\mu\text{m m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  전후의 조도를 나타냈다(Table 2).

각 문화재마다 표면온도와 습도 그리고 조도의 값이 서로 많은 차이를 보이는데 이러한 이유는 채집한 시기의 날씨와 서로 다른 주변 환경 때문으로 판단된다.<sup>31</sup> 또한 이러한 주변 환경의 차이는 기중조류의 서식과 군집변화에 영향을 미칠 것으로 사료 된다.<sup>18</sup>

#### 3.2. 기중조류 분포

총 8기의 석조문화재에 서식하는 기중조류는 3문 3강 9목 2아목 14과 25속에 속하는 31종과 1미동정종으로 총 32분류군이 출현하였다.<sup>28</sup> 이 중 남조강이 3목 1아목 5과 12속 16종으로 가장 많은 분류군이 출현하였으며, 녹조강이 5목 7과 10속에 속하는 12종 1미동정종이 출현하였고, 규조강은 1목 1아목 2과 3속 3종이 출현하였다(Table 3). 임과 이<sup>18,19</sup>의 연구에서 석조문화재에 출현한 기중조류가 21~29분류군으로 이전연구와 비교할 때 본 연구에서 보다 다양한 기중조류가 출현한 것으로 나타났다.

전체 출현분류군 중 남조강의 *Synechocystis aquatilis*는 생육범위가 넓어 늪, 웅덩이 및 돌담 등에 서식하는 조류<sup>1</sup>로 본 연구에서 가장 많은 출현빈도를 나타냈으며, 총 8기의 석조문화재 중 월남사지삼층석탑을 제외한 7기의 문화재에서 출현하였다. 녹조강의 *Protococcus viridis*의 경우 6기의 석조문화재에서 출현하였으며, 임과 이<sup>19</sup>의 연구에서 가장 많은 출현빈도를 나타낸 조류이다. 이밖에 *Chlorococcum infusionum*, *Ulothrix zonata*, *Synechocystis pevalekii* 등의 조류가 3기 이상의 석조문화재에서 출현한 것으로 나타났다(Figure 1)(Table 3).

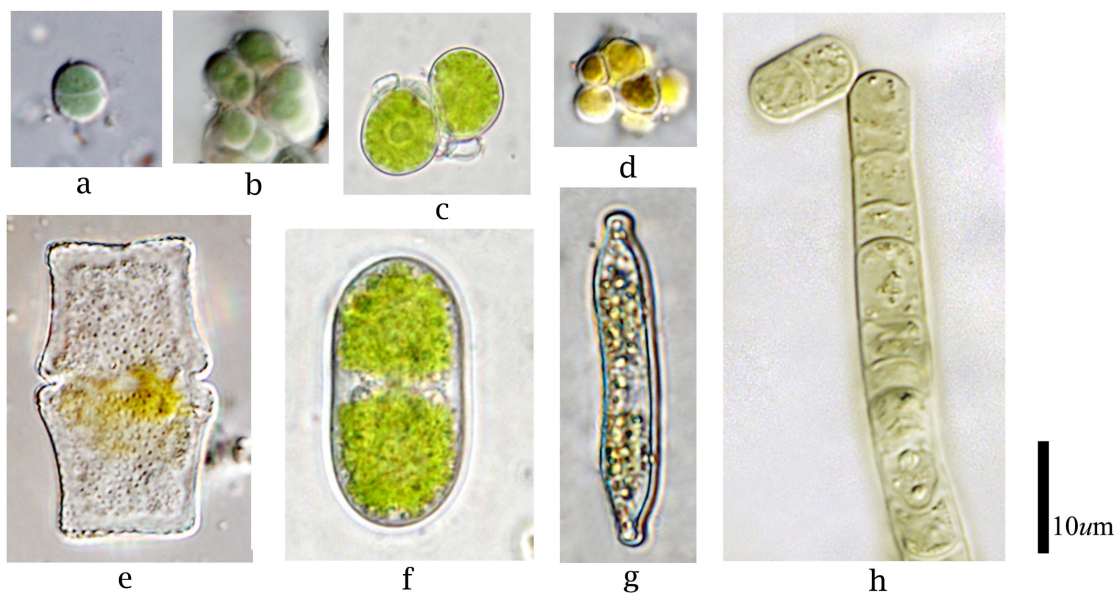
*Chlorococcum infusionum*의 경우 토양성 조류<sup>29</sup>로 알려져 있으나, 임과 이<sup>19</sup>의 연구에서 석조문화재에 서식하는 국내산 미기록 종으로 죽산리오층석탑, 죽산리삼층석탑, 신록사보존자석종비 및 고달사원종대사혜진탑 등에 출현한 것으로 나타났다. *Ulothrix zonata*는 일반적으로 하천이나 호소의 주요 출현종으로 알려져 있으나<sup>1,29</sup>, 이전의 연구들을 통해 수중의 환경뿐 아니라 기중의 석조물에서도 서식하는 것으로 나타난 바 있다.<sup>18,19,32</sup> 또한 출현종 중 *Trebouxia*속의 조류는 지의류와 공생하는 대표적인 기중조류로 기중에서 빈번하게 출현하는 것으로 알려져 있으며<sup>29</sup>, 프랑스 전역 71개 건물 표면에 서식하는 기중조류에 관한 연구에서 전체 시료 중 49%의 높은 비율로 출현한 것으로 나타났다.<sup>30,33</sup>

각 석조문화재의 강별 출현종의 구성은 대체로 남조강

**Table 2.** The physico-chemical factors of sampling points of 8 stone cultural heritages of Korea in 2007.

cultural heritages (Sampling date)	Sampling point	Surface temp. (°C)	Humidity (%)	Intensity of Illumination ( $\mu\text{m m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )
Three storied stone pagoda of Wollam temple site (June, 2007)	E/lower foundation	42.0	49.0	938
	W/lower foundation	20.5	52.0	28
	S/lower foundation	35.5	46.0	69
	N/lower foundation	23.0	54.0	62
	E/upper foundation	45.5	48.0	789
	W/upper foundation	20.0	50.0	40
	S/upper foundation	32.0	46.0	68
	N/upper foundation	27.0	50.0	87
Capstone and base of stele to high priest Jingongdaesa (June, 2007)	E/turtle base of a stone monument	24.0	70.9	23
	W/turtle base of a stone monument	20.3	71.6	21
	S/turtle base of a stone monument	23.5	70.9	19
	N/turtle base of a stone monument	22.5	71.0	17
	E/capstone	22.0	70.6	19
	W/capstone	22.5	71.3	18
	S/capstone	22.5	69.3	15
	N/capstone	22.0	70.8	14
Three storied stone pagoda of Heungbeop temple site (June, 2007)	E/lower foundation	23.0	65.2	84
	W/lower foundation	22.0	64.2	98
	S/lower foundation	24.0	67.3	58
	N/lower foundation	22.5	67.0	127
	E/upper foundation	21.5	64.8	99
	W/upper foundation	23.0	63.8	115
	S/upper foundation	22.5	65.5	81
	N/upper foundation	23.0	64.7	130
Four-lion three storied stone pagoda of Gwaeseok-ri, Hongcheon (June, 2007)	E/lower foundation	20.0	64.0	5
	W/lower foundation	21.0	67.3	19
	S/lower foundation	21.0	63.2	17
	N/lower foundation	20.0	65.9	14
	E/1 story roof stone	21.1	65.3	38
	W/1 story roof stone	23.0	65.5	56
	S/1 story roof stone	21.5	63.8	41
	N/1 story roof stone	23.0	65.4	53
Three storied stone pagoda in Mulgeol-ri, Hongcheon (June, 2007)	E/lower foundation	19.0	72.4	22
	W/lower foundation	18.5	72.2	20
	S/lower foundation	18.0	72.2	17
	N/lower foundation	20.5	69.8	84
	E/upper foundation	19.0	75.1	25
	W/upper foundation	18.5	73.2	12
	S/upper foundation	18.5	76.2	16
	N/upper foundation	19.5	73.6	29
Three storied stone pagoda in Suta temple (June, 2007)	E/lower foundation	21.0	56.5	166
	W/lower foundation	20.0	57.7	139
	S/lower foundation	19.5	64.2	81
	N/lower foundation	20.0	60.7	97
	E/upper foundation	20.0	58.0	186

	W/upper foundation	19.0	57.4	125
	S/upper foundation	19.0	61.4	108
	N/upper foundation	19.5	59.6	125
Stupa to Hongudang in Suta temple (June, 2007)	E/spire	17.5	64.8	7
	W/spire	17.0	63.1	3
	S/spire	18.5	64.0	11
	N/spire	16.5	67.0	2
Five storied stone pagoda in Gongse-ri, Yongin (April, 2007)	E/1 story roof stone	23.5	26.9	633
	W/1 story roof stone	13.0	27.0	62
	S/1 story roof stone	24.0	29.5	710
	N/1 story roof stone	12.0	26.9	24
	E/3 story roof stone	24.0	27.0	695
	W/3 story roof stone	12.0	33.6	62
	S/3 story roof stone	21.0	31.7	572
	N/3 story roof stone	12.5	31.8	24
	E/5 story roof stone	26.0	26.3	783
	W/5 story roof stone	16.5	31.8	456
	S/5 story roof stone	25.5	32.3	799
N/5 story roof stone	18.5	30.1	445	



**Figure 1.** The aerial algae occurred on 8 stone cultural heritages of Korea in 2007. (a: *Synechocystis aquatilis*, b: *Chroococcus varius*, c: *Trebouxia* sp., d: *Protococcus viridis*, e: *Cosmarium decedens*, f: *Cylandrocystis gracilis*, g: *Hantzschia amphioxys*, h: *Klebsormidium dissectum*).

의 비율이 높았으며, 수타사삼층석탑의 경우 75%의 종이 남조강으로 구성되어 있다. 월남사지삼층석탑, 진공대사탑 비구부 및 이수와 흥법사지삼층석탑의 경우 녹조강이 남조강보다 다양한 종이 출현하였으며, 흥법사지 삼층석탑은

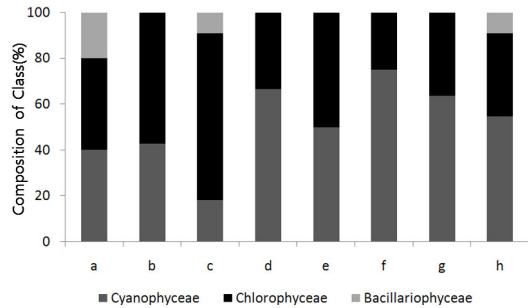
73%의 종이 녹조강으로 구성되어 있는 것으로 나타났다. 규조강의 출현비율은 매우 낮았으며, 월남사지삼층석탑, 흥법사지삼층석탑 및 공세리오층석탑에서만 출현하였다 (Figure 2). 대체적으로 군집의 구조가 단순한 기증조류에

**Table 3.** The list of aerial algae occurred on 8 stone cultural heritages of Korea in 2007.

Species	Site							
	a	b	c	d	e	f	g	h
Phylum CYANOPHYTA								
Cl. CYANOPHYCEAE								
Ord. CHROOCOCCALES								
Fam. Chroococcaceae								
<i>Aphanocapsa grevillei</i>				+			+	
<i>Aphanothece clathrata</i>	+							
<i>Chroococcus bituminosus</i>				+			+	
<i>Chroococcus turgidus</i>	+							
<i>Chroococcus varius</i>	+				+	+		
<i>Microcystis marginata</i>								+
<i>Microcystis protea</i>	+						+	
<i>Synechococcus lividus</i>	+							
<i>Synechocystis aquatilis</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Synechocystis pevalekii</i>	+		+					+
Ord. CHAMAESIPHONALES								
Fam. Chamaesiphonaceae								
<i>Xenococcus acervatus</i>								+
Ord. NOSTOCALES								
Subord. NOSTOCHINEAE								
Fam. Nostocaceae								
<i>Anabaena fertilissima</i>								+
<i>Nostoc microscopicum</i>								+
Fam. Scytonemataceae								
<i>Tolypothrix tenuis</i>								+
Subord. OSCILLATORIINEAE								
Fam. Oscillatoriaceae								
<i>Lyngbya maior</i>			+					
<i>Phormidium fragile</i>								+
Phylum CHRYSOPHYTA								
Cl. BACILLARIOPHYCEAE								
Ord. PENNALES								
Subord. RAPIDINEAE								
Fam. Naviculaceae								
<i>Navicula crytocephala</i>								+
<i>Hantzschia amphioxys</i>	+							
Fam. Nitzschiaceae								
<i>Nitzschia brevissima</i>	+		+					
Phylum CHLOROPHYTA								
Cl. CHLOROPHYCEAE								
Ord. ULOTRICHALES								
Fam. Ulotrichaceae								
<i>Klebsormidium crenulatum</i>	+							+
<i>Klebsormidium dissectum</i>				+				
<i>Klebsormidium flaccidum</i>				+				
<i>Stichococcus minutissima</i>				+				

<i>Ulothrix zonata</i>	+	+	+					+
Ord. CHAETOPHORALES								
Fam. Trentepohliaceae								
<i>Trentepohlia aurea</i>								+
Fam. Protococcaceae								
<i>Protococcus viridis</i>	+	+	+	+			+	+
Ord. CHLOROCOCCALES								
Fam. Chlorococcaceae								
<i>Chlorococcum infusionum</i>		+	+		+			+
Fam. Hydrodictyceae								
<i>Chlorella ellipsoidea</i>		+						+
<i>Chlorella vulgaris</i>								+
Ord. ZYGNEMATALES								
Fam. Mesotaeniaceae								
<i>Cylindrocystis gracilis</i>							+	
<i>Mesotaenium chlamyosporum</i>							+	
Ord. Microthamniales								
Fam. Trebouxiophyceae								
<i>Trebouxia sp.</i>						+	+	

a: Three storied stone pagoda of Wollam temple site, b: Capstone and base of stele to high priest Jingongdaesa, c: Three storied stone pagoda of Heungbeop temple site, d: Four-lion three storied stone pagoda of Gwaeseok-ri, e: Three storied stone pagoda in Mulgeol-ri, f: Three storied stone pagoda in Suta temple, g: Stupa to Hongudang in Suta temple 1, h: Five storied stone pagoda in Gongse-ri.



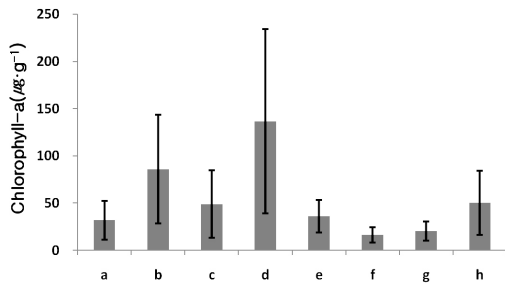
**Figure 2.** The class composition of aerial algae in 8 stone cultural heritages of Korea in 2007. (a: Three storied stone pagoda of Wollam temple site, b: Capstone and base of stele to high priest Jingongdaesa, c: Three storied stone pagoda of Heungbeop temple site, d: Four-lion three storied stone pagoda of Gwaeseok-ri, e: Three storied stone pagoda in Mulgeol-ri, f: Three storied stone pagoda in Suta temple, g: Stupa to Hongudang in Suta temple, h: Five storied stone pagoda in Gongse-ri).

서 다양한 종의 출현은 생물오염도가 높다는 것으로 판단되며, 남조강, 녹조강 및 규조강이 모두 출현한 3기의 석조

문화재가 생물오염도가 높을 것으로 사료된다.

### 3.3. 엽록소 a 및 색에 따른 생물오염등급

각 석조문화재의 엽록소 a 농도의 분석 결과, 패석리사사자삼층석탑에서 평균 136.6 $\mu\text{g g}^{-1}$ 의 농도로 가장 높게 나타났으며, 수타사삼층석탑에서 평균 16.2 $\mu\text{g g}^{-1}$ 의 농도로 가장 낮게 나타났다(Figure 3). 패석리사사자삼층석탑의 경우 각 방위별, 부분별 농도차가 매우 큰 것으로 나타났으며, 대체적으로 북서쪽 방위의 농도가 동남쪽 방위에 비해 높게 나타났다. 이는 다른 문화재에서도 유사한 경향을 나타냈으며, 임과 이<sup>18</sup>의 연구결과와 일치한다. 또한 이러한 결과는 방위와 주변 환경의 영향으로 판단되며, 수목이나 그늘진 곳이 많은 문화재일수록 이러한 농도 차이가 큰 것으로 사료된다.



**Figure 3.** The Chl-a concentrations of 8 stone cultural heritages of Korea in 2007. (a: Three storied stone pagoda of Wollam temple site, b: Capstone and base of stele to high priest Jingongdaesa, c: Three storied stone pagoda of Heungbeop temple site, d: Four-lion three storied stone pagoda of Gwaeseok-ri, e: Three storied stone pagoda in Mulgeol-ri, f: Three storied stone pagoda in Suta temple, g: Stupa to Hongudang in Suta temple, h: Five storied stone pagoda in Gongse-ri).

엽록소 a 및 색에 따른 생물오염등급<sup>27</sup>의 산정 결과 패석리사사자삼층석탑, 수타사홍우당부도 및 용인공세리오층석탑이 등급 5로 가장 오염이 심한 것으로 나타났으며, 물걸리삼층석탑과 수타사삼층석탑이 등급 3으로 8기의 문화재 중 상태가 양호한 것으로 나타났다(Table 4). 하지만 이러한 결과는 엽록소 a의 측정 시 선택류를 제외하였기 때문에 다소 오차를 나타낼 수 있으며, 색에 의한 판별은 조사자에 따른 오차가 크게 날 것으로 판단된다.

또한 엽록소 a에 의한 등급도 0~2등급과 3~5등급 간의 농도범위가 일부 중복되어 이것을 색을 통하여 구별하게 되며<sup>18</sup>, 색은 서식하는 기증조류 및 지의류의 군집조성에 의해 녹색 또는 청녹색 그리고 검은색 등으로 나타나기 때문에<sup>34</sup> 특정군집을 색으로 정의하기엔 다소 무리가 있을 것으로 판단된다. Schumann *et al.*<sup>21</sup>의 경우 0~2등급, 3~5등급까지 통합을 제안 하였으나, 통합된 두 개의 등급으로 석조문화재의 생물오염도를 세부적으로 평가 할 수 없을 것으로 사료된다.

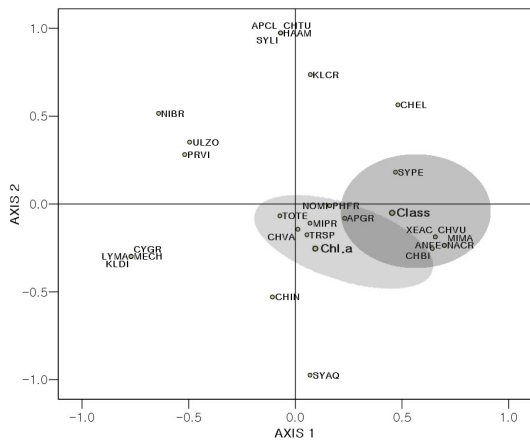
### 3.4. 통계분석

조류는 환경변화에 민감하고 외부변화에 따라 군집구조가 변하여, 자료로서 가치가 높은 것으로 알려져 있다.<sup>35,36</sup> 수중생태계에서 조류의 지표종 발굴은 일반적으로 영양염류 및 유기물 농도와 같이 오염의 기준이 되는 항목으로 산정하며<sup>36,37</sup>, 본 연구에서는 오염의 기준이 되는 엽록소 a와 생물오염등급을 사용하여 산정하였다.

상관분석 결과, 엽록소 a와 생물오염등급(Class)간의 상관성은 상관계수 0.43으로 상관성이 있는 것으로 나타났다. 엽록소 a는 *Trebouxia* sp.와 *Chroococcus bituminosus* 등 두 종과 상관계수 0.89와 0.65로 매우 높은 상관성을 나타냈으며, 생물오염등급(Class)은 *Chroococcus bituminosus*,

**Table 4.** The biological pollution class of 8 stone cultural heritages of Korea in 2007.

Cultural Heritages	Chl-a( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	Color	Class
Three storied stone pagoda of Wollam temple site	31.7	dark green	4
Capstone and base of stele to high priest Jingongdaesa	85.9	brown	4
Three storied stone pagoda of Heungbeop temple site	48.9	dark green	4
Four-lion three storied stone pagoda of Gwaeseok-ri, Hongcheon	136.6	black	5
Three storied stone pagoda in Mulgeol-ri, Hongcheon	35.8	green	3
Three storied stone pagoda in Suta temple	16.2	green	3
Stupa to Hongudang in Suta temple	20.1	black	5
Five storied stone pagoda in Gongse-ri, Yongin	50.3	black	5



**Figure 4.** Principal component analysis plots of aerial algae taxa, biological pollution class and chl-*a* at 8 stone cultural heritages in 2007. (ANFE: *Anabaena fertilissima*, APGR: *Aphanocapsa grevillei*, APCL: *Aphanothece clathrata*, CHBI: *Chroococcus bituminosus*, CHTU: *Chroococcus turgidus*, CHVA: *Chroococcus varius*, LYMA: *Lyngbya maior*, MIMA: *Microcystis marginata*, MIPR: *Microcystis protea*, NOMI: *Nostoc microscopicum*, PHFR: *Phormidium fragile*, SYLI: *Synechococcus lividus*, SYAQ: *Synechocystis aquatilis*, SYPE: *Synechocystis pevalekii*, TOIE: *Tolythrix tenuis*, XEAC: *Xenococcus acervatus*, CHVU: *Chlorella vulgaris*, PRVI: *Protococcus viridis*, STMI: *Stichococcus minutissima*, TRSP: *Trebouxia* sp.).

*Aphanocapsa grevillei*, *Xenococcus acervatus*, *Chlorella vulgaris* 및 *Synechocystis pevalekii* 등과 상관계수 0.54~0.65의 범위 위 상관성이 높게 나타났다.

주성분분석(Principal component analysis)은 Varimax법<sup>38</sup>으로 회전시켜 결과를 도출하였으며, 엽록소 *a*, 생물오염등급 및 각 출현종간의 관계를 확인하기 위해 도표로 나타내었다(Figure 4). 그 결과 엽록소 *a* 및 생물오염등급을 중심으로 상관성이 높은 출현분류군은 두 항목 가까이 위치하며, 넓은 생육범위를 갖고 있는 *Synechocystis aquatilis*와 *Protococcus viridis*는 두 항목으로부터 멀리 떨어져 있는 것으로 나타났다. 두 항목과 상관성이 모두 높았던 *Trebouxia* sp.와 *Chroococcus bituminosus*는 임과 이<sup>18</sup>의 연구에서 생물오염등급 5등급에 출현한 것으로 나타났으며, 추가적인 연구를 통해 보다 많은 지표종을 발굴 할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구는 2007년 4월에서 6월까지 국내 8기의 석조문

화재를 대상으로 환경요인과 엽록소 *a* 및 색에 따른 생물오염등급을 평가 하였다. 조사결과 환경요인은 방위에 따른 표면온도 및 조도가 문화재마다 큰 차이를 보였으며, 동남쪽이 북서쪽 방위에 비해 표면온도 및 조도가 높게 나타났다. 이러한 차이는 채집시기와 날씨의 영향, 주변 환경요인에 의한 것으로 사료되며, 이러한 주변 서식환경의 차이는 기증조류의 서식과 군집변화에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 엽록소 *a*와 색에 의한 생물오염등급 평가결과 물걸리삼층석탑과, 수타사삼층석탑은 3등급으로 나타났으며, 나머지 6개의 문화재는 4등급 이상으로 기증조류에 의한 생물오염이 심각한 것으로 나타났다.

총 8기의 석조문화재에서 3문 3강 9목 2아목 14과 25속 31종 1미동정종으로 총 32분류군의 기증조류가 출현하였으며, 남조강의 출현 비율이 가장 높았다. 상관 분석 결과, 엽록소 *a*와 생물오염등급 간의 상관계수는 0.43을 나타냈으며, 엽록소 *a*와 출현종 간의 상관분석에서 *Trebouxia* sp.와 *Chroococcus bituminosus*는 상관계수 0.89와 0.65로써 높은 상관성을 나타냈다. 생물오염등급과 출현종의 경우에는 *Chroococcus bituminosus*, *Aphanocapsa grevillei*, *Xenococcus acervatus*, *Chlorella vulgaris* 및 *Synechocystis pevalekii* 등이 상관계수 0.54~0.65의 범위로 높은 상관성을 나타냈다. 엽록소 *a* 측정 시 선택류를 포함하여 분석하는 것이 보다 정확한 등급을 산정 할 것이라 판단되며, 엽록소 *a* 및 색 외에 주변 환경요인과 지표종 등을 활용하여 석조문화재의 생물풍화를 평가하는 연구가 진행되어야 할 것이다.

#### 사 사

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

#### 참고문헌

1. 정준, "한국담수조류도감". 아카데미출판사, 서울, 496pp, (1993).
2. Sze, P., "A biology of the Algae". 3rd Edition, McGraw-Hill Companies, Inc, 288pp, (1997).
3. Warscheid, T. and Braams, J., "Biodeterioration of stone: a review". *International Biodeterioration & Biodegradation*, **46**, p343-368, (2000).
4. 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).
5. 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 th 7th international congress on Deterioration and Conservation of stone, Lisbon, Portugal, p541-549, (1992).
  6. 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).
  7. Tian, Y., Zhang, J., Song, L. and Bao, H., "A study on aerial algae communities on the surface of carbonate rock of the yunnan stone forest". *Carsologica sinica*, **22**, p203-211, (2003).
  8. Sarró, M.I., García, A.M., Rivalta, V.M., Mereno, D.A. and Arroyo, I., "Biodeterioration of the Lions Fountain at the Alhambra Lalace, Granada(Spain)", *Build. Environ.* **41**, p1811-1820, (2006).
  9. Zurita, Y.P., Cultrone, G., Castillo, P.S., Sebastián, E. and Bolivar, F.C., "Microalgae associated with deteriorated stonework of the fountain of Bibatauin in Granada, Spain". *International Biodeterioration & Biodegradation*, **55**, p55-61, (2005).
  10. Crispim, C.A., Gaylarde, C.C and Gaylarde, P.M., "Biofilms on church walls in Proto Alegre, RS, Brazil, with special attention to cyanobacteria". *International Biodeterioration & Biodegradation*, **54**, p121-124, (2004).
  11. Lamenti, G., Tiano, P. and Tomaselli, L., "Biodeterioration of ornamental marble statues in th Boboli Gardens (Florence, Italy)". *J. phycol.*, **12**, p427-433, (2000).
  12. Cezar, A.C., Peter, M.G., Christine, C.G., Brett, A.N., "Deteriogenic cyanobacteria on historic buildings in Brazil detected by culture and molecular techniques". *International Biodeterioration & Biodegradation*, **57**, p239-243, (2006).
  13. Neilan, B.A., Jacobs, D., Del, D. T., Blackall, L.L., Hawkins, P.R., Cox, P.T. and Goodman, A.E., "rRNA Sequences and Evolutionary Relationships among Toxic and Nontoxic Cyanobacteria of the Genus *Microcystis*", *J. Bacteriol.*, **47**, p693-697, (1997).
  14. Miller, A.Z., Laiz, L., Gonzalez, J.M., Dionísio, A., Macedo, M.F., Saiz-Jimenez, C., "Reproducing stone monument photosynthetic-based colonization under laboratory conditions". *Sci. Total Environ.*, **405**, p278-285, (2008).
  15. 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).
  16. Klotchkova, T.A and Kim, G.H., "Ornamented resting spores of a green alga, *Chlorella* sp., collected from the stone standing buddha statue ar Jungwon Miruksazi in Korea". *Algae*, **20**, p295-298, (2005).
  17. 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).
  18. 임안숙, 이옥민, "국내 5기의 석조문화재에 분포하는 기증 조류와 생물학적 등급에 관한 연구". *Algae*, **23**, p63-69, (2008a).
  19. 임안숙, 이옥민, "경기도내 5기 석조문화재의 기증조류의 분포와 조류 서식 등급". *Algae*, **23**, p269-276, (2008b).
  20. Prieto, B., Silva, B. and Lantes, O., "Biofilm quantification on stone surfaces: comparison of various methods". *Sci. Total Environ.*, **333**, p1-7, (2004).
  21. 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).
  22. Eggert, A. Häubner, N., Klausch, S. Karsten, U. and Schumann, R., "Quantification of algal biofilms colonising building materials: chlorophyll *a* measured by PAM-fluorometry as a biomass parameter". *Biofouling*, **22**, p79-90, (2006).
  23. Prieto, B., Rivas, T. and Silva, B., "Rapid Quantification of Phototrophic Microorganisms and their Physiological state through their colour". *Biofouling*, **18**, p229-236, (2002).
  24. 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).

25. Jeffrey, S.W. and Humphrey, G.F., "New spectrophotometric equations for determining chlorophylls *a*, *b*, *c*1 and *c*2 in higher plants, algae and natural phytoplankton". *Biochem. Physiol. Pflanzn*, **167**, p191-194, (1975).
26. Greenberg, A.E., Clesceri, L.S. and Eaton, A.N., "*Standard method for the examination of water and wastewater*", 21st. ed., American Public Health Association, Washington, D.C., USA, (2000).
27. Donner, A., Minden, V., Rickler, M., Rasch, B., "Evaluation of algae infestation on building facades using a quantitative chlorophyll *a* method". *Qualität/Basisanierung Schriftenreihe*, **13**, p89-95, (2002).
28. 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. 933pp, (1977).
29. John, D.M., Whitton, B.A. and Brook, A.J., "*The Freshwater Algal Flora of the British Isles*". Cambridge University Press, Cambridge, UK, 702pp, (2002).
30. 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, (2006a).
31. 국립문화재연구소, "석조문화재 손상메커니즘 및 평가기술 개발". 연구보고서, 695pp, (2007).
32. Tomasellie, L., Lamenti, G., Bosco, M. and Tiano, P., "Biodiversity of photosynthetic micro-organisms dwelling on stone monuments". *International Biodeterioration & Biodegradation*, **46**, p251-258, (2000).
33. Barberousse, H., Tell, G., Yéprémian, C. and Couté, A., "Diversity of algae and cyanobacteria growing on building facades in France". *Algological Studies*, **120**, p81-105, (2006b).
34. Bordo, I.M., Sharnoff, S.D. and Sharnoff, S., "*Lichens of North America*". Yale University Press, New Heaven, USA, 828pp, (2001).
35. Descy, J.P., "New Approach to Water Quality Estimation Using Diatoms". *Nova Hedwigia. Beih.*, **64**, p305-323, (1979).
36. Watanabe, T., Asai, K., and Houki, A., "Numerical simulation of organic pollution in flowing waters". *Hazardous Waste Containment and Treatment*, **4**, p251-281, (1990).
37. Kelly, M.G. and Whitton, B.A., "The trophic Diatom Index: a new index for monitoring eutrophication in rivers". *J. Appl. Phycol.*, **7**, p434-444, (1995).
38. 김경아, 김예진, 송미정, 지기원, 유평종, 김창원, "다변량 통계분석을 이용한 낙동강 상수원수의 수질변화 특성조사". *한국물환경학회지*, **23**, p814-821, (2007).