

## 수용성 유리를 이용한 조류 성장 억제형 기능성 모르타르의 개발

김준환\* · 강호정\*\* · 최세영\*\*\* · 임윤묵\*\*\*\*

Kim, Jun Hwan\*, Kang, Hojeong\*\*, Choi, Se Young\*\*\*, Lim, Yun Mook\*\*\*\*

### Development of a Functional Mortar for Algae Growth Restraining by Using Soluble Glass

#### ABSTRACT

This study focuses on the algae growth restraining. Many researches on a critical damage from algae growth are published, but it is hard to find how to restrain. Abnormal algae increasing is a problem, because it makes red tides, biodeterioration, etc. Therefore this study aims to decrease the damage from algae growth. Some metal ions have been used as microorganism killing materials from old times. Especially, Cu ions are highly effective. Based on these uses of the metal ions, a functional mortar which restrains algae growth is developed. The mortar contains soluble glass which dissolves in water. The soluble glass was made of Cu ions and phosphates. When the soluble glass is dissolved, Cu ions are soaked out stably from the soluble glass. Culture mediums which incubate algae were made to evaluate the developed mortar specimens. Culture mediums were filled with fresh water and sea water. Algae were incubated for fourteen days in culture mediums. The evaluating methods are measuring volume of the dissolved organic carbon and the chlorophyll. Using these two measurements, the mortar specimens are judged that can restrain algae or not. According to the result, the functional mortars of culture medium filled with fresh and sea water shows similar trend. The functional mortar for restraining algae growth performs that's role well.

**Key words :** Biodeterioration, Soluble glass, Algae, Metal ion

#### 초 록

본 연구는 수중 구조물의 수명과 조류의 성장이 관계가 있다는 연구결과에 근거하여 조류의 이상증식 억제재 구조물에 영향을 미칠 수 있다는 것에 초점을 맞추었다. 따라서 본 연구는 조류의 활용을 극대화시키면서 조류로 인한 문제점을 억제할 수 있도록 조류의 성장을 억제할 수 있는 기능성 모르타르 개발을 목적으로 하였다. 조류의 성장을 억제하기 위한 방법으로 금속 이온(Hg<sup>+</sup>, Ag<sup>+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Au<sup>+</sup> 등)은 조류의 성장을 억제하는 물질로 오래전부터 사용되어져왔다. 이에 착안하여 수중에 용출되었을 때 유효한 금속 이온의 상태로 장시간에 걸쳐 안정한 수용성 유리를 사용하여 조류의 성장을 억제할 수 있는 기능성 모르타르 시편을 제작하였다. 제작된 모르타르 시편은 시편의 억제 기능을 평가하기 위해 해수와 담수에 성장하는 일반적인 조류를 배양시킬 수 있는 배지를 각각 제작한 다음 개발된 모르타르 시편을 투입한 후 일정기간이 지난 뒤 배지에 잔류하는 조류의 양을 측정함으로써 개발된 모르타르 기능을 판단하였다. 조류의 양을 측정하기 위하여 사용된 분석은 용존 유기탄소(dissolved organic carbon)의 양과 엽록소(chlorophyll)의 양을 측정하는 두 가지 분석 결과를 이용하였으며 분석을 통해 나온 결과는 개발된 시편의 조류 억제 기능성에 대하여 정성적인 평가를 하였다. 즉, 용존 유기탄소의 양이 증가하고 엽록소의 양이 감소하면 조류에 대한 성장 억제성이 있는 것으로 판단하였다. 두 가지 분석 결과, 해수와 담수 모두 조류 성장 억제용 모르타르는 억제 기능이 나타나고 있었다.

**검색어 :** 생물학적 열화, 수용성 유리, 조류, 금속 이온

\* 연세대학교 토목환경공학과 석사과정 (Yonsei University · knight0117@yahoo.co.kr)

\*\* 정희원 · 연세대학교 토목환경공학과 교수 (Yonsei University · hj\_kang@yonsei.ac.kr)

\*\*\* 연세대학교 신소재공학과 교수 (Yonsei University · sychoi@yonsei.ac.kr)

\*\*\*\* 정희원 · 교신저자 · 연세대학교 토목환경공학과 교수 (Corresponding Author · Yonsei University · yunmook@yonsei.ac.kr)

Received April 2, 2011/ revised March 20, 2015/ accepted June 15, 2015

## 1. 서론

산업화로 인한 무분별한 자원 채취는 대기오염, 수질오염과 같은 환경파괴를 일으키고 있다. 이러한 오염은 환경의 부영양화를 발생시키며 다양한 문제를 일으키고 있다. 그 중에서 조류의 이상증식도 중요한 환경 문제 중의 하나로 꼽을 수 있다. 조류의 이상증식으로 인한 문제들 중 대표적인 문제점으로 구조물의 생물학적 열화(biodeterioration)와 같은 문제점을 들 수 있다.

콘크리트는 여러 건설 재료들 중에 대표적인 건설 재료로서 경제적 측면과 시공의 편리성 때문에 수중해양 구조물 건설에 많이 사용되고 있다. 콘크리트는 혼합재료로서 물과 시멘트의 화학적 결합에 의해 강한 알칼리성을 가지고 있다. 이러한 강한 알칼리성은 철골 재료를 보호하는 부동태 피막을 형성하여 구조물의 기능을 유지하게 한다. 그러나 과거에는 콘크리트 구조물에 조류가 부착하게 되면 그 영향은 단순히 미관상의 문제만으로 생각되어 왔지만 최근에는 조류의 부착으로 인해 발생하는 유기산(organic acid)에 의해 생물학적 풍화가 콘크리트에 발생하게 되어 구조물의 수명이 단축된다는 연구(Warscheid et al., 2000)가 보고된 바 있다. 최근에 이러한 문제로 인해 조류의 이상증식으로 인한 피해에 대한 연구는 많이 진행되어왔지만, 조류의 이상증식을 억제할 수 있는 효율적인 방법에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

이에 본 연구의 목적은 콘크리트 구조물에 심각한 문제점을 야기할 수도 있는 조류의 이상증식을 억제할 필요성을 느끼고, 조류의 성장을 억제할 수 있는 새로운 기능성 모르타르를 개발하는데 있다.

## 2. 이론적 고찰

### 2.1 생물학적 열화

생물학적 열화(biodeterioration)라는 용어를 사용하지는 불과 40여년 밖에 되지 않았지만, 미생물(microorganism)에 의한 유기물의 부패나 무기물의 침식 등과 같은 현상에 관한 연구는 과학적으로나 공학적으로 많이 연구되어왔다. 생물학적 열화(biodeterioration)와 생물학적 분해(biodegradation)는 같은 과정으로 이루어지지만 약간의 차이가 있다. 생물학적 열화(biodeterioration)는 재료가 일반적으로 원하지 않는 부정적인(negative) 형태로 특성이 변하는 것이지만, 생물학적 분해(biodegradation)는 재료가 긍정적인(positive) 형태로 특성이 변하는 것이다.

조류는 신진대사를 통하여 유기산을 발생시키며, 조류의 신진대사를 통해 발생하는 유기산은 대표적으로 젖산, 옥살산, 타르타르산, 글리콜산이 있다. 이러한 유기산은 일반적으로 시멘트계에 강한 침식을 일으키며 일부의 유기산은 무기산에 비견될 만큼 강한

산도를 가지고 있다.

생물학적 열화는 일반적인 물리·화학적 풍화와는 차이가 있다. 생물학적 열화는 물리적 풍화나 화학적 풍화와 같이 개별적으로 발생하는 것이 아니라 미생물의 침투와 같은 물리적 요인과 신진대사를 통한 유기산 발생으로 인한 화학적 요인이 동시에 발생하게 된다. 두 가지 요인이 동시에 발생하기 때문에 물리적 요인과 화학적 요인이 서로 동반 상승효과(synergy)를 가지게 되어 시간이 지남에 따라 구조물은 급격하게 노후화가 된다. 특히 구조물 건설에 대표적인 재료인 콘크리트의 경우, 공극의 존재로 인한 습도의 유지와 미생물의 영양분으로 사용될 수 있는 광물이 풍부하여 미생물의 서식에 좋은 요건을 갖추고 있다.

### 2.2 구리 ion의 살조성

구리는 효소의 활성화에 중요한 물질이기도 하지만 소량으로 조류의 성장을 저해하는 물질 중에 하나로서 필요량 이상 투입될 경우 막의 활성을 저하시키는 물질로 알려져 예로부터 세균을 포함한 미생물의 생육을 억제하는 물질로 알려져 왔다. 구리는 1ppb 이하의 농도로도 해양과 담수조류의 증식을 억제한다고 알려져 있으며(Nielsen et al., 1971; Davey et al., 1973), 조류세포에 부착된 구리는 세포 내로 흡수되어 조류의 생리 기작에 영향을 주고 성장에 중요한 효소중 하나인 SH group에 결합하여 활성을 저하시킨다(Stewart et al., 1974). 또한 구리의 독성은 색소와 지질의 생합성을 방해하고 결과적으로 엽록체가 음전하를 띠게 함으로써 광합성에 영향을 미치기도 한다. 또한 카드뮴이나 아연 같은 물질이 구리와 함께 투여되는 경우 미생물 및 조류의 제거에 상승효과가 있는 것으로 알려져 있다(Wang et al., 1995). Rhie and Lee(1999)은 구리와 Methyglyoxal의 살조성 실험을 실시하였으며 구리는 조류의 세포분열과 광합성을 저지하여 조류의 성장 기작을 방해한다.

### 2.3 수용성 유리

수용성 유리에 조성되는 물질에 따라서 은이나 구리 등의 여러 가지 방법으로 조성할 수 있고 조성되는 물질에 따라 여러 가지 목적으로 이용이 가능하다.

본 연구는 조류 부착을 억제하기 위한 기능성 모르타르 개발을 목적으로 하고 있기 때문에 수용성 유리의 여러 가지 조성들 중에서도 살조성을 가지고 있으면서도 인체에는 무해한 구리 인산염계 유리를 사용하였으며 유리의 조성은 Table 1과 같다.

Table 1. Chemical Composition of Glass Beads

Specimen	Composition
No.1	15Cu <sub>2</sub> O · 15Na <sub>2</sub> O · 5B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 65P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
No.2	15Cu <sub>2</sub> O · 15Na <sub>2</sub> O · 10B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 65P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>

유리 결정을 이루는데 사용되는  $B_2O_3$  외에 수용성 유리를 제작하기 위해 사용된 재료로는 망목 형성 산화물인  $P_2O_5$ 의 공급원으로는  $H_3PO_4$ 를, 구리 이온의 공급원으로는  $Cu_2O$ 를, 알칼리 산화물인  $Na_2O$ 의 공급원으로는  $Na_2CO_3$ 를 각각 사용하였다. 위의 시료들을 일정한 비율로 배합하여 각각 batch를 만들고 알루미늄 도가니에 담아  $800\sim 1200^\circ C$ 의 온도범위에서 용융하였다. 용융액은 냉각수를 돌려 냉각한 구리판에 부어서 급냉시켜 모유리를 제조하였다. 이와 같이 제조된 모유리를 알루미늄 유발에서 건식 분쇄한 후 체가름을 하여 분말 상의 용해 시편으로 제조하였다. 이 때 분말의 입도는  $-40+60$  mesh( $250\sim 425\mu m$ )로 하였다.

### 2.4 부착조류의 성장 특성

부착조류의 성장은 빛, 온도, 탁도, 영양 염류, 유속 등에 의해 결정되며, 특히 종구성의 계절적 변이를 보인다(Shin et al., 2008). 호수의 경우에는 봄에는 규조류, 초여름에는 쌍편모조류 또는 녹조류, 늦은 여름에서 가을에는 남조류 등이 발생하는 것으로 알려져 있다.

## 3. 실험재료 및 방법

### 3.1 조류 성장 억제형 모르타르 제작

조류 성장 억제형 모르타르를 개발하기 위하여 조류의 성장 억제 기능이 있는 구리 ion을 사용하고자 하였다. 그러나 구리 ion을 모르타르에 직접 혼합하기는 힘들며, 비록 혼합한다하여도 구리 ion의 용존 시간이 짧기 때문에 효율성이 떨어진다. 따라서 본 연구에서는 구리 ion이 포함된 인산염계 수용성 유리를 사용하여 모르타르 제작을 용이하게 하였으며 구리 ion의 용출 속도를 조절하여 기능성 모르타르의 장시간 사용이 가능하도록 하였다.

시멘트는 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 잔골재는 강사를 사용하였다. 그리고 잔골재의 수분 함량에 따라 물시멘트비(W/C Ratio)가 달라질 수 있으므로 건조오븐에서 잔골재를 완전 건조하였다. 시편의 크기는  $50mm \times 50mm \times 50mm$ 이며 시편 한 개당 들어간 시멘트, 잔골재, 물의 양은 각각 85g, 208.33g, 41.225g이다. 2종류의 수용성 유리를 각각 시멘트의 양에 일정 비율로 혼합한 후(2%, 5%), 기본 대조군으로 수용성 유리가 포함되지 않은 순수한 모르타르 시편 2개, 성장 억제용 수용성 유리 No.1을 2% 포함한 모르타르 시편 2개, 5% 모르타르 시편 2개를 제작하고, 성장 억제용 수용성 유리 No.2를 2% 포함한 모르타르 시편 2개, 5% 모르타르 시편 2개를 제작하여 총 10개의 모르타르 시편을 제작하였다. 이 때, 제작된 기능성 모르타르의 성능을 평가하기 위하여 사용 적합성에 대한 평가를 위해 27일간의 양생을 거쳐 압축 강도 실험을 수행 하였고, 그 결과 26.64~28.91MPa로 거의

같은 값을 나타내었다. 측정 결과를 살펴볼 때, 모르타르의 강도가 필요한 구조물에서도 조류 생장 제어형 기능성 모르타르의 사용이 가능할 것으로 판단된다.

### 3.2 배지 제작

실제 해수와 담수에서 자라는 조류를 배양시키기 위하여 해수는 경기도 화성시 서신면 제부도에서 채취하였고, 담수는 서울특별시 서대문구 홍제천에서 물을 채취하여 각각의 배지에 모두 2L씩 투입하였다. 이 때, 대조군으로 이용하기 위하여 모르타르 시편이 투입되지 않은 순수한 물만 들어있는 배지를 추가로 2개 더 제작하였다. 배양 시의 조건은 모두 같은 조건으로 조류를 배양하였다. 배지의 총 개수는 Fig. 1과 같이 총 12개를 제작하였으며 각각 해수 6개, 담수 6개의 배지를 제작하였다. 그 중 해수 배지는 각각 기본 대조군인 물 시료만 담긴 배지, 수용성 유리가 혼합되지 않은 순수한 모르타르 시편이 투입된 배지, 수용성 유리 No.1이 2% 혼합된 시편이 투입된 배지, 수용성 유리 No.1이 5% 혼합된 시편이 투입된 배지, 수용성 유리 No.2가 2% 혼합된 시편이 투입된 배지, 수용성 유리 No.2가 5% 혼합된 시편이 투입된 배지로 총 6개를 제작하였으며, 담수 역시 같은 방법으로 총 6개를 제작하였다.

### 3.3 실험 방법

조류 성장 억제 실험의 경우는 수용성 유리를 혼합한 모르타르를 제작하고 2일간의 건조 양생 후 제부도와 홍제천에서 떠온 물이 있는 배지에 투입하였다. 배지는 시편을 투입하기 전 14일간 미리 배양을 시켰으며 모르타르 시편을 투입하기 직전에 시료를 채취하여 초기 시료를 분석하였다. 그리고 시편 투입 후 11일, 21일, 32일, 63일에 물 시료를 채취하여 측정하였다. 시편 투입 후 63일

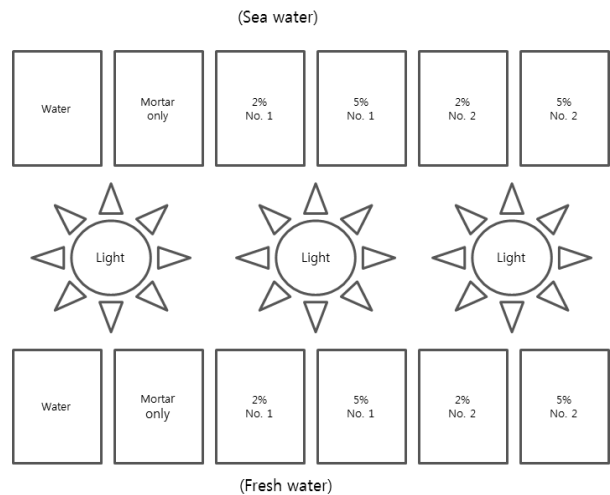


Fig. 1. Experimental Design

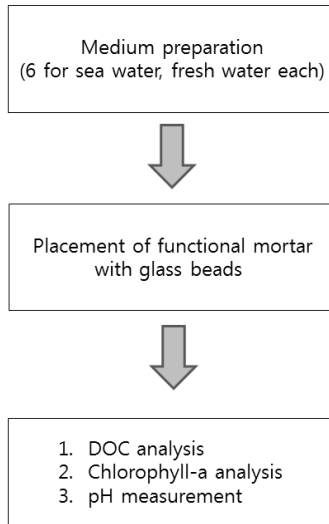


Fig. 2. Experimental Protocols

후의 물 시료는 육안으로 구별하여도 빠른 성장을 보이게 되어 더 이상 모르타르에 혼합된 수용성 유리가 기능을 발휘하지 못한다고 판단하였기 때문에, 모르타르 기능성의 소멸에 대한 진위를 판단하기 위하여 시행하였다. 물 시료는 분석을 위해 각각 300ml씩을 채취하였고, 물 시료의 혼합을 막기 위하여 각각 배지마다 각각의 깔때기(funnel)를 사용하였으며 물 시료를 담은 채수병은 무균 채수병을 이용하여 1회만 사용하였다. 이렇게 채취한 물 시료를 Dissolved Organic Carbon 분석과 Chlorophyll-a 분석을 하였다. 또한 모르타르의 알칼리성이 조류의 성장에 큰 영향을 미칠 수 있기 때문에 실험 기간 동안 배양수의 pH를 측정하였다.

배양시작 시의 조명 및 온도는 광합성의 에너지원으로 태양광을 조명으로 사용하였으며, 온도는 실온으로 하였다. 이는 조류가 실제 자연에서 서식할 때의 환경에 최대한 가깝게 하고자 한 것이다. 그러나 실험당시 이상적인 저온 현상과 계속되는 강우로 인해 태양광의 부족으로 배양액을 투입한 후 32일 후에 실험의 조건에 형광등을 부가적으로 설치하였고 온도를 23°C 이상이 되도록 유지하였다. 본 연구는 정량적인 조류의 성장 억제 정도를 파악하는 것이 아니라 성장 억제형 모르타르의 기능성 유무를 판단하는 것이 목적이기 때문에 동일한 조건의 변경은 대조군과의 비교에 교란이 일어나지 않는다고 판단하였다.

## 4. 실험 결과 분석

### 4.1 배양액의 pH 측정 결과

조류는 여러 가지 억제 요인들이 있다. 그중에서도 pH는 조류에게 강한 영향을 준다. 이에 실제 동일한 실험 조건을 갖춘 배지에

Table 2. Changes in pH

Day	Pure mortar	No.1		No.2	
		2%	5%	2%	5%
0	7.45	7.45	7.45	7.45	7.45
1	11.02	11.09	11.19	11.29	10.96
5	10.32	10.21	10.25	10.29	10.05
10	9.75	9.73	9.71	9.68	9.55
15	9.37	9.41	9.39	9.38	9.24
20	9.19	9.20	9.21	9.21	9.09
25	9.06	9.06	9.05	9.04	8.92
30	8.94	8.94	8.91	8.89	8.79
31	8.92	8.92	8.89	8.87	8.76

모르타르 시편을 투입하여 실제 배양액의 pH가 어느 정도인지 알아 볼 필요가 있었다. 또한 모르타르의 알칼리성이 소멸되는 시간을 측정함으로써 수중 구조물의 자체적인 조류 성장 억제 효과가 지속되는 기간을 알아볼 수 있다.

총 32일 동안 측정하였으며, 측정 결과 순수 모르타르와 기능성 모르타르가 들어있는 배지의 pH는 큰 차이를 보이지 않았다. 또한 2L의 작은 계에서의 pH 변화임에도 불구하고 Table 2에 보이는 것처럼 측정 1일에 pH 11을 넘었던 것이 31일 후에는 약 pH 9까지 감소하였다. 따라서 수중 구조물과 같이 넓은 계에 존재할 경우, 이보다 훨씬 빠르게 감소할 것이다.

### 4.2 용존 유기탄소 분석 결과

용존 유기탄소량을 측정한 결과에서 조류 성장의 억제에 대한 기능성을 정성적으로 판단하기 위하여 순수한 모르타르 시편이 투입된 배지를 기준으로 상대 비교를 하였다. 비교에 사용된 식은 아래와 같으며, 앞으로 모든 그래프에 아래의 식을 이용한 값을 사용하도록 하겠다.

$$\text{상대 값(\%)} = \frac{(\text{각 배지의 측정 값} - \text{순수한 모르타르 배지의 측정 값})}{\text{순수한 모르타르 배지의 측정 값}} \times 100$$

우선 해수에서 순수한 물의 용존 유기탄소량의 상대적 변화를 살펴보면 Fig 3와 같이 초기 측정에서는 순수한 물의 용존 유기탄소가 약간 높게 나타나고 있지만, 양이 아주 적기 때문에 용존 유기탄소량에 큰 차이가 없는 것으로 판단된다. 그러나 1차(11일), 2차(21일), 3차(32일) 분석 모두가 순수한 물의 용존 유기탄소가 순수한 모르타르 시편이 투입된 배지보다 작은 것으로 나타나고 있으며, 이는 순수한 모르타르 시편이 투입된 배지가 순수한 물의 배지보다

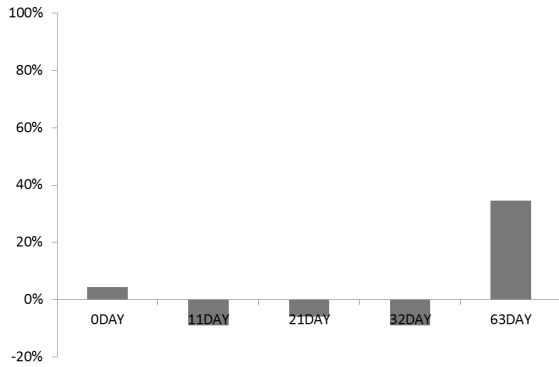


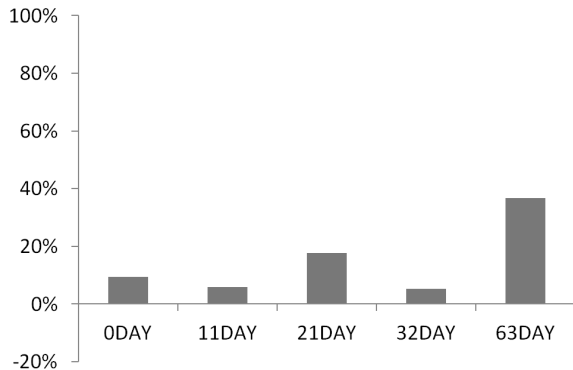
Fig. 3. Relative Changes in DOC in Sea Water Only

Table 3. DOC Concentrations in Sea Water (mg/L)

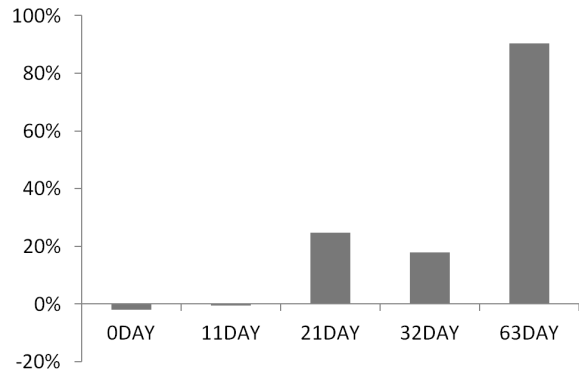
Day	Pure medium	Pure mortar	No.1		No.2	
			2%	5%	2%	5%
0	9.962	9.542	10.43	9.352	9.518	10.02
11	9.594	10.55	11.18	10.49	10.22	10.54
21	9.525	10.12	11.90	12.62	12.56	12.32
32	3.84	4.216	4.435	4.973	4.897	4.915
63	11.31	8.401	11.49	16.00	10.68	14.86

상대적으로 조류의 생장이 억제되고 있는 것으로 보인다. 특히 뒤에 설명할 chlorophyll-a의 결과에서는 이러한 차이가 확연히 나타나는데 이는 순수한 모르타르 시편의 투입으로 인한 알칼리성이 조류의 성장 억제에 대한 주요 원인이라고 판단된다. 앞서 측정된 모르타르 시편이 투입된 배지의 pH 측정에서 초기에 약 11이상의 pH를 나타내고 있으며, 이는 산도에 민감한 조류가 충분히 억제될 수 있는 pH이다. 그러나 시간이 지나면서 점차 배지의 pH가 감소하고 있으며 모르타르의 알칼리성으로 인한 억제가 점차 감소하고 있다. 왜냐하면 Table 3의 순수한 모르타르 시편이 투입된 배지의 분석 값을 보면 초기보다 1차에서는 10.6% 정도 크게 증가하였으나 2차 분석 시에는 약간 감소하였고 특히 3차 분석 시에는 2차 분석보다도 용존 유기탄소의 양이 58.3% 정도 크게 감소하였기 때문이다.

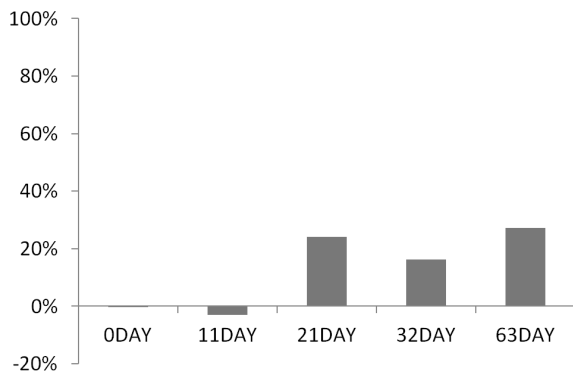
해수에서 조류 성장 억제용 모르타르 시편이 투입된 배지의 경우는 Fig. 4에 보이는 것과 같이 1차에서는 큰 차이를 나타내고 있지 않지만 2차 분석과 3차 분석에서는 모두 용존 유기탄소의 양이 순수한 모르타르 시편이 투입된 배지보다 높게 나타났다. 1차에서는 순수한 모르타르 시편의 배지와 차이가 나타나지 않는 이유는 앞서 설명한 것과 같이 알칼리성이 강한 억제 요인으로



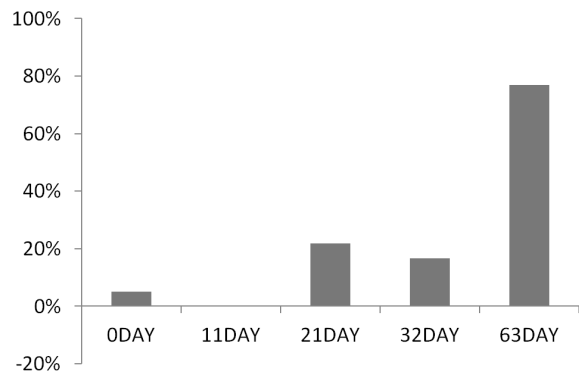
(a) 2% No.1



(b) 5% No.1



(c) 2% No.2



(d) 5% No.2

Fig. 4. Relative Changes in DOC of Functional Mortar in Sea Water

Table 4. DOC Concentrations in Fresh Water (mg/L)

Day	Pure medium	Pure mortar	No.1		No.2	
			2%	5%	2%	5%
0	10.53	10.8	10.07	10.47	10.43	10.51
11	11.95	25.45	29.12	26.09	26.32	26.25
21	11.18	19.17	20.18	22.77	21.05	21.53
32	3.285	3.84	5.861	5.048	5.476	5.935
63	18.07	19.46	11.04	12.3	9.906	9.749

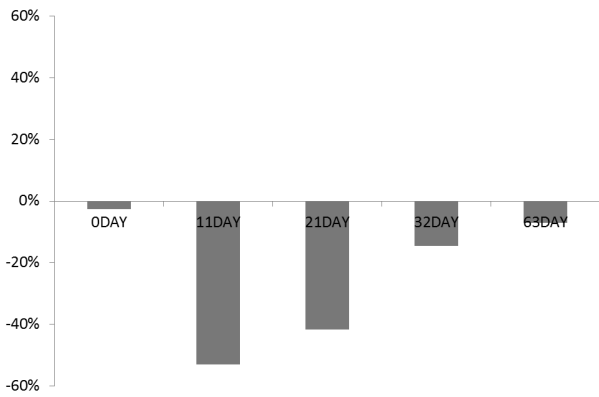


Fig. 5. Relative Changes in DOC in Fresh Water Only

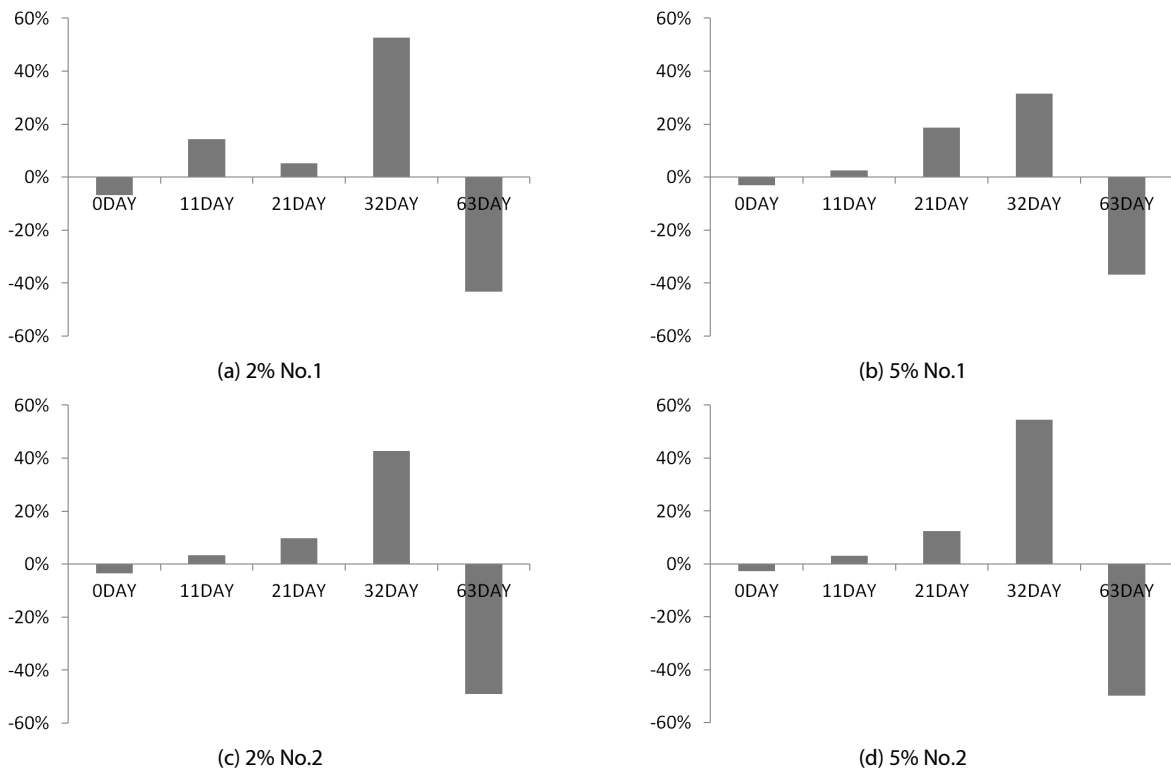


Fig. 6. Relative Changes in DOC of Functional Mortar in Fresh Water

작용하기 때문에 수용성 유리로 인한 성장 억제 효과가 미미하기 때문이다. 그러나 2차 분석에는 용존 유기탄소의 양이 순수한 모르타르 시편의 배지보다 약 17~24% 정도, 3차 분석에서는 5~17% 정도 높게 나타나고 있으며, 전반적으로 순수한 모르타르 시편의 배지보다 용존 유기탄소의 양이 높은 경향을 나타내고 있다. 이를 통하여 조류 성장 억제용 모르타르 시편의 경우 그 기능이 나타나고 있다고 판단할 수 있다.

담수의 경우를 살펴보면, 결과는 Table 4과 같다. 모르타르 시편의 투입으로 인한 강알칼리성의 억제 효과를 살펴보면 Fig. 5와 같이 순수한 모르타르의 배지보다 순수한 물의 배지가 용존 유기탄소의 양이 53.05% 감소하였으며 이를 통하여 알칼리성에 담수 조류가 더욱 민감하게 억제되고 있는 것을 알 수 있다.

성장 억제용 모르타르의 경우는 Fig. 6와 같이 해수의 경우보다도 더욱 억제 효과가 크게 나타났다. 2차의 경우는 5~18%, 3차의 경우는 31~54% 정도 용존 유기탄소의 양이 크게 나타나고 있으며, 전반적으로 순수한 모르타르의 배지보다 용존 유기탄소의 양이 높게 나타나는 경향을 보이고 있다. 그러나 실험을 하면서 4차 측정 시에 해수와 담수 모든 배지에서 조류가 크게 자라있는 것을 육안으로 확인할 수 있었는데, 이는 수용성 유리의 효과가 모두 사라지고 조류의 증식이 활발하게 이루어진 것이기 때문으로 판단 된다.

Table 5. Chlorophyll-a in Sea Water (mg/m<sup>3</sup>)

Day	Pure medium	Pure mortar	No.1		No.2	
			2%	5%	2%	5%
0	15.54	12.90	15.15	11.20	13.48	15.65
11	60.70	12.38	10.04	11.06	10.26	11.02
21	141.29	45.65	7.92	8.86	8.64	7.78
32	382.25	51.81	5.51	5.04	1.28	5.68
63	3215.72	1624.18	850.99	1129.80	802.64	1535.20

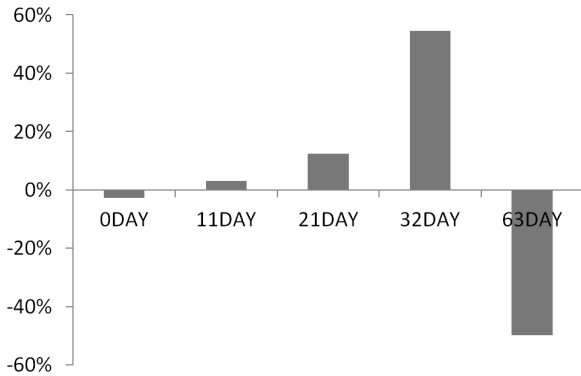


Fig. 7. Relative Changes in Chlorophyll-a in Sea Water Only

### 4.3 Chlorophyll-a 분석 결과

수용성 유리의 성장 억제 정도를 평가하기 위하여 용존 유기탄소의 양과 함께 Chlorophyll-a의 양을 측정하였다. Chlorophyll-a는 엽록소의 일종으로 이는 조류 성장에 필요한 영양분을 공급하기 위해 광합성을 할 때 필요한 물질로 Chlorophyll-a가 줄어들었다는 것은 그만큼 조류의 양이 줄어들었음을 나타낸다.

해수의 경우를 먼저 살펴보면 해수의 Chlorophyll-a의 양은 Table 5와 같다. 그 중에서 Fig. 7에서 보이는 것처럼 순수한 물의 Chlorophyll-a의 양이 순수한 모르타르의 Chlorophyll-a보다 훨씬 크게 나타나고 있으며 3차 분석에서는 약 600%의 증가를 보이고 있다. 이는 용존 유기탄소량에 대한 분석에서 설명하였던 것처럼 강알칼리성이 조류의 성장을 크게 억제하고 있는 것이 원인으로 판단된다.

조류 성장 억제용에 대한 상대적 분석은 Fig. 8에 있으며 2차 분석에서는 60~80%, 3차 분석에서는 약 90% 정도의 chlorophyll-a의 감소를 나타내고 있다. 이를 통하여 조류 성장 억제 모르타르의 앞서 분석한 용존 유기탄소 측정보다도 더욱 명확하게 억제 효과를 판별할 수 있었다.

담수의 결과는 Table 6과 같으며 순수한 물의 상대적인 값은 Fig. 9과 같이 순수한 모르타르 시편이 투입된 배지보다도 크게 증가하였다. 특히 4차 분석에서는 순수한 모르타르의 배지보다도

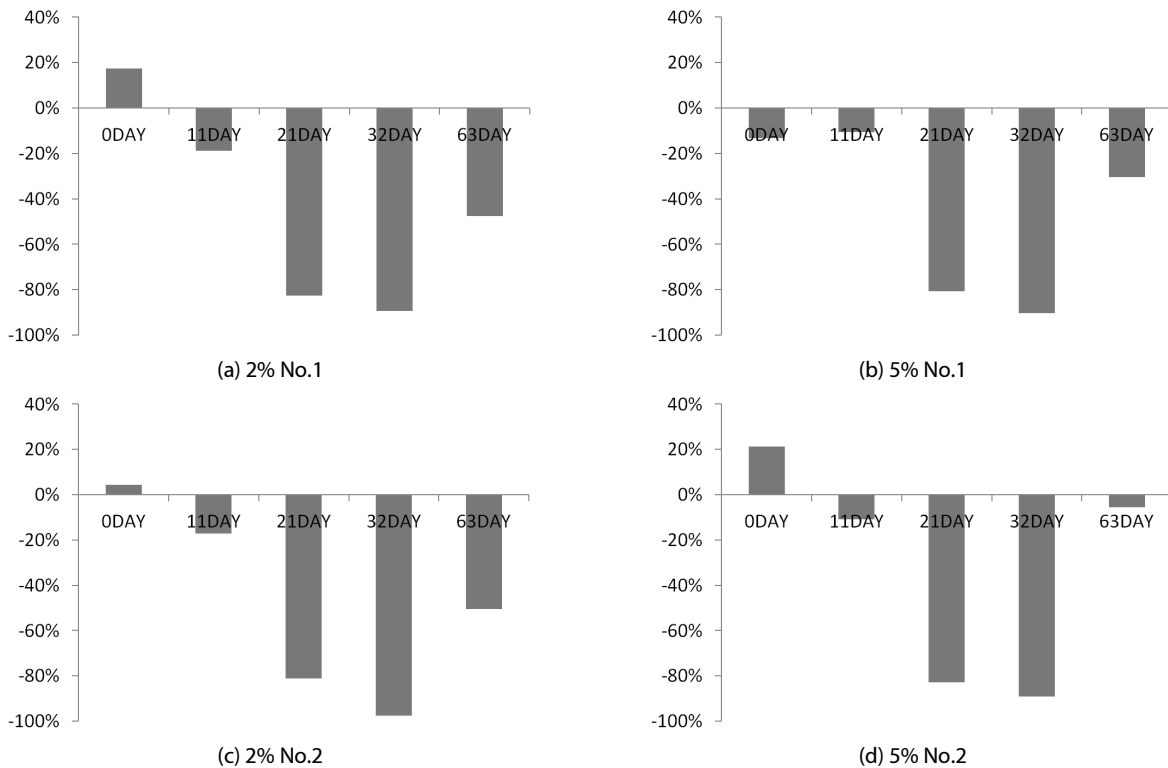


Fig. 8. Relative Changes in Chlorophyll of Functional Mortar in Sea Water

Table 6. Chlorophyll-a in Fresh Water(mg/m<sup>3</sup>)

Day	Pure medium	Pure mortar	No.1		No.2	
			2%	5%	2%	5%
0	133.64	164.02	158.08	157.02	155.10	151.81
11	153.14	7.30	3.21	1.21	1.74	1.01
21	205.14	5.97	1.59	1.40	4.51	1.43
32	259.86	157.14	47.65	37.38	32.61	66.68
63	1614.39	1243.21	716.42	1077.19	1490.35	892.03

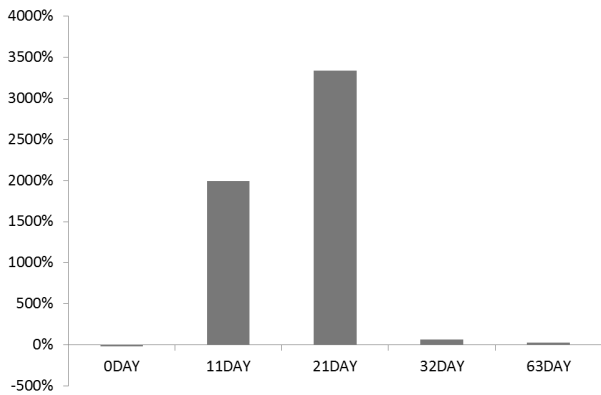
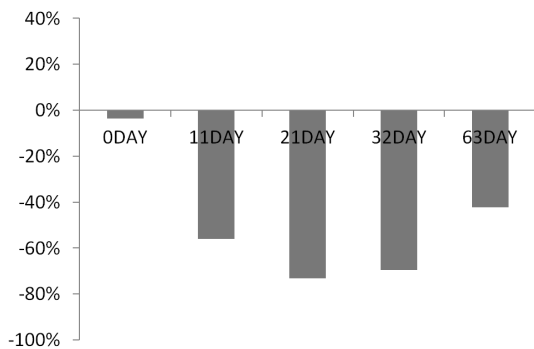
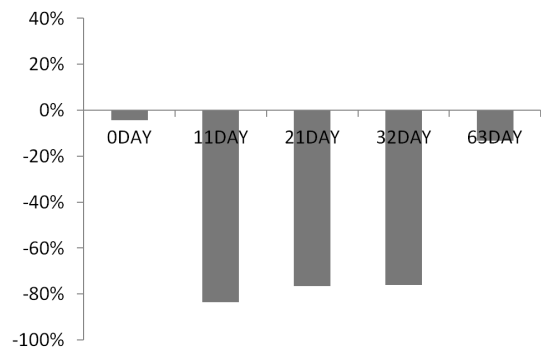


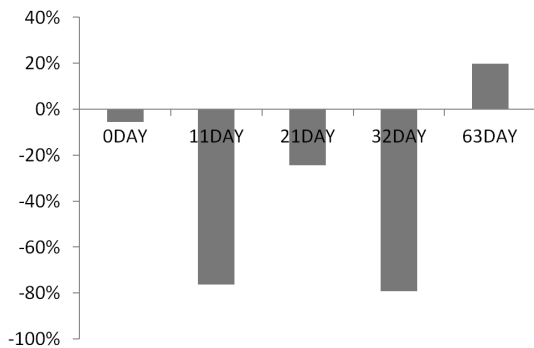
Fig. 9. Relative Changes in Chlorophyll-a in Fresh Water Only



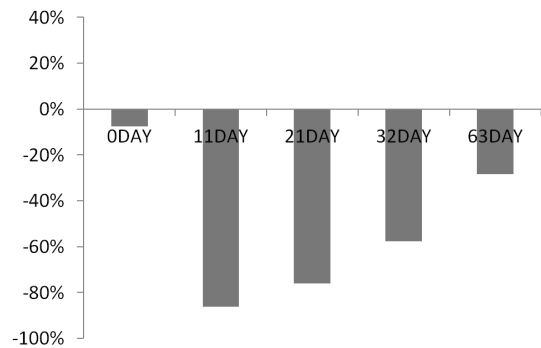
(a) 2% No.1



(b) 5% No.1



(c) 2% No.2



(d) 5% No.2

Fig. 10. Relative Changes in Chlorophyll of Functional Mortar in Fresh Water

약 3000%의 증가를 보였다. 이를 통해 담수 조류가 알칼리성에 크게 민감하다는 것을 명확하게 알 수 있었다.

조류 성장 억제용 모르타르는 Fig. 10에 나타났으며, 2차 분석과 3차 분석에서 모두 음의 값으로 분석되었다. 따라서 조류 성장 억제용 모르타르의 경우는 효과가 있다고 할 수 있다.

그러나 63일 후에 4차로 Chlorophyll-a의 양을 측정해 보았을 때, 성장 촉진용과 억제용 모르타르 모두 크게 증식되었으며, 이는 Tables 5 and 6의 결과 값을 보아도 1차, 2차, 3차의 측정값보다 훨씬 큰 값을 나타내고 있다. 이는 조류 성장 억제용 수용성 유리의 효과가 사라져 조류가 성장하는데 방해받지 않기 때문으로 판단된다.

### 5. 결론

본 연구는 조류로 인해 구조물에 발생가능한 문제점을 보완하고자 실시하였다. 이를 위해 조류의 성장에 필요한 미량금속이 포함된 수용성 유리와 금속 ion이 함유된 수용성 유리를 이용하여 조류 성장을 억제할 수 있는 기능성 모르타르를 개발하였다. 개발된 모르타르의 성능을 평가하기 위해서 용존 유기탄소와 chlorophyll-a의 양을 측정하였으며 분석을 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.



- (1) 순수한 물의 배지 분석 결과, 모르타르의 알칼리성이 가장 크게 작용하고 있는 1차 분석에서 해조류의 경우는 약 10% 정도의 용존 유기탄소의 감소와 400% 정도의 chlorophyll-a의 증가를 보인 반면 담수의 경우는 1차 분석에서 53% 정도의 용존 유기탄소 감소와 2000% 정도의 chlorophyll-a의 증가를 보였다. 이를 통하여 개발된 수용성 유리를 포함한 모르타르의 알칼리성이 조류의 성장을 억제하고 있으며 특히 해조류보다 담수조류가 알칼리성에 매우 민감하다고 할 수 있다.
- (2) 해조류의 경우, 전체적으로 2차 분석 시보다 3차 분석에서 용존 유기탄소의 양은 증가하였고 chlorophyll-a의 양은 감소하였다. 이를 통하여 모르타르의 알칼리성이 사라지고 난 후에 해조류의 성장 억제효과가 꾸준히 나타나고 있으며, 억제 효과가 있음을 판단할 수가 있었다.
- (3) 담수조류의 경우, 2% No.2의 chlorophyll-a와 전체적인 용존 유기탄소 분석에서 2차보다 3차 분석 시에 약간의 생장이 있었는데 이는 알칼리성으로 인한 억제 요인이 제거되면서 조류 성장 억제효과가 감소한 것으로 판단된다. 즉, 알칼리성에 매우 민감한 담수조류의 경우는 성장 억제용 기능성 모르타르의 억제 효과보다 모르타르 자체의 알칼리성으로 인한 억제 효과가 훨씬 크게 나타났는데 이러한 요인이 사라지게 되면서 미미하지만 조류가 증가한 것으로 판단된다.

본 연구에서 수용성 유리를 혼합한 콘크리트 대신 모르타르를 제작한 이유는 아직 수용성 유리의 생산비용이 높아서 기능성 콘크리트 제작 시 혼합재료로 사용하기에는 비용적인 측면에서 현실성이 없기 때문이다. 따라서 이번 연구를 통하여 개발된 조류 성장 억제형 모르타르를 현재 건설된 콘크리트 구조물의 표면에만 스프레이로 사용하는 방법 등을 이용하여 비용 대비 내구성 증진 효율을 높이는 것이 타당한 방법으로 사료된다. 또한, 분석 결과에 나타난 것처럼 4차 측정 시에는 모든 배지에서 조류가 크게 성장하였는데 이는 모르타르 시편이 투입되고 63일 후였다. 따라서 수용성 유리의 크기 및 조성 변화를 통해 용출 속도를 더욱 느리게 하여서

장기적인 사용이 가능하도록 해야 할 것이다. 본 연구에서의 실험은 정지된 물속에서 시행한 실험으로, 실제 현장의 구조물은 흐르는 물속에 존재하므로 이를 고려하여 추후에 더욱 정밀한 실험이 필요할 것으로 판단된다. 또, 부착조류의 시간적 구성 변화를 고려하여 계절별로 유사한 실험을 반복할 필요가 있는 것으로 사료된다.

## 감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2014R1A2A2A01004421; ERC2013-067218).

## References

- Allsopp, D., Seal, K. and Gaylarde, C. (2004). *Introduction to biodeterioration 2nd edition*, Cambridge University Press, p. 2.
- Davey, E. W., Morgan, M. J. and Erickson, S. J. (1973). "A biological measurement of copper complexation capacity of seawater." *Limnology and Oceanography*, Vol. 12, pp. 319-323.
- Nielsen, E. S. and Wium-Anderson, S. (1971). "The influence of Cu on photosynthesis and growth in diatoms." *Physiologia Plantarum*, Vol. 24, pp. 480-484.
- Rhie, K. T. and Lee, K. S. (1999) "The algal phosphorus uptake and growth by copper and methylglyoxal." *Korea Journal Environ. Toxicol*, Vol. 14, pp. 145-153.
- Shin, M. S., Kim, B. C., Kim, J. G., Park, M. S., Jung, S. M., Jang, C. W., Shin, E. G. and Bae, Y. J. (2008) "Seasonal variations of water quality and periphyton in the Cheonggyecheon." *Korea Journal Limnol*, Vol. 41, pp. 1-10.
- Stewart, W. D. P. (1974). *Algal physiology and biochemistry*, University of California Press in Berkeley, pp. 610-635.
- Wang, J., Zhang, M., Xu, J. and Wang, Y. (1995). "Reciprocal effect of Cu, Cd, Zn on a kind of marine alga." *Journal of Water Research*, Vol. 29, No. 1, pp. 209-214.
- Warscheid, Th. and Braams, J. (2000). "Biodeterioration of stone: A Review." *International Biodeterioration & Biodegradation*, Vol. 46, pp. 343-368.