

부영양 신갈지에서 천연물질 혼합제 (PMC)의 수질개선능: 현장수온의 영향

변정환¹ · 황수옥² · 문선기³ · 황순진⁴ · 김백호^{5,*}

(¹한양대학교 환경과학과, ²한국수자원공사, ³(주)엠씨이코리아,
⁴건국대학교 환경과학과, ⁵한양대학교 생명과학과)

Effect of Temperature on Water Quality Improvement of Natural Plant-Mineral Composites (PMC) in a Eutrophic Lake, Lake Shingal, Korea. *Byun, Jung-Hwan¹, Su-Ok Hwang², Sun-Ki Mun³, Soon-Jin Hwang⁴ and Baik-Ho Kim^{5,*}* (¹Department of Environmental Science, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea; ²K-waters, Korea Water Resources Corporation, Gwacheon, Gyeonggi 427-100, Korea; ³MCE-Korea Co., Seongnam-si, Gyeonggi 463-712, Korea; ⁴Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea; ⁵Department of Life Science, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea)

We examined the effect of different field temperatures on water quality improvement (WQI) of natural domestic plant-mineral composites (PMCs). This method was previously used by Kim *et al.* (2011), to monitor the restoration of water quality of a eutrophic lake, Lake Shingal (Korea). Results indicate that PMCs on phytoplankton, BOD and phosphorus showed more than 70% WQI below 20°C, and less than 40% WQI over 25°C, respectively. The WQIs of PMCs on blue-green algae were gradually decreased with the increase of temperature, whilst diatoms exhibited more than 90% higher WQIs, regardless of water temperature. Additionally, the WQIs on bacterial biomass and total nitrogen were low at all temperatures. These results collectively indicate that water quality improvement activity of plant-mineral composites was dependent on the water temperature, and that the field application of above chemical during temperatures over 25°C, would be less effective in treating a cyanobacteria bloom dominated by *Microcystis aeruginosa*, than by diatoms.

Key words : eutrophic lake, natural plant-mineral composite, water quality improvement, field temperature

서 론

부영양 수체의 수질개선을 위하여 다양한 물리적, 화학

적, 생물학적 기술들이 개발되어 왔으나 (Reyssac and Pletikisic, 1990; Yamamoto *et al.*, 1998; Sige, 1999), 효과가 일시적이고 반복처리가 불가피하여 생태계의 새로운 교란인자로 작용할 가능성이 높아 최근에는 보다 친

* Corresponding author: Tel: +82-2-2220-0960, Fax: +82-2-2220-0960, E-mail: tigerk@hanyang.ac.kr

환경적이고 생태독성이 낮은 기술이 요구되고 있다.

수질악화는 해양이나 담수에서 빈번하게 발생하는 적조나 녹조와 같은 내재성 유기물과 외부로부터 정체성 수계에 지속적으로 유입되는 외재성 유기물 축적이 주된 원인이다. 결국 부영양 수체의 수질개선은 수중내 입자성 물질(식물플랑크톤이나 부유물질)과 용존성 물질(질소나 인)을 동시에 제어하여야 할 것이다.

지금까지 조류 성장을 억제하기 위하여 친환경적인 방법으로 식물체에 포함된 tannin과 phenolic compounds 같은 allelochemical이나(Rice, 1984; Inderjit *et al.*, 1995), 많은 공극을 비롯하여 여러가지 양이온을 포함하고 있어 입자성 및 용존성 물질에 대해 강한 흡착능을 보이는 광물 등이 각각 이용되어 왔다(Na *et al.*, 1998; Kim, 2000; Kam *et al.*, 2003; Cooke *et al.*, 2005). 그러나 이처럼 성질이 서로 다른 두 가지 이상의 천연물질을 혼합하여 사용한 예는 보편화되어 있지 않다.

저자들은 두 가지 이상의 천연물질을 단순 추출법으로 추출하여 적절한 비율로 혼합한 이른바 천연물질 혼합제(plant-mineral composites, PMC)를 개발하여 실내(Lee *et al.*, 2011) 또는 야외실험(Kim *et al.*, 2011)에서 최적화 실험을 시도한 바 있다. 최적화 요인으로는 주로 PMC 처리농도, 빛, pH, 수심, 조류종 등을 대상으로 실시하였으나(Lee *et al.*, 2011), 매 실험마다 실험시기와 수체가 서로 조건에 실시하였기 때문에(Kim *et al.*, 2011), 실제 동일한 수체에서 환경변화(수온, 수심, 유속 등)가 PMC의 수질개선능에 어떠한 영향을 미칠지 정확하게 설명하기 어렵다.

일반적으로 수처리 과정에서 응집제의 효율은 환경인자들에 의해 크게 영향을 받기 때문에 정확한 특성을 파악하기 위해서는 다양한 수체보다 동일한 수체에서 다양한 환경구배에 따라 응집제의 성질을 파악하는 것이 중요하다(Letterman *et al.*, 1999; Pernitsky and Edwald, 2006; Kim and Lawler, 2008; Kim *et al.*, 2008). 특히 영양물질이 풍부한 부영양호에서 식물플랑크톤의 성장은 대개 수온 증가와 높은 상관성을 나타내지만(Wade *et al.*, 2002), PMC를 처리한 다음 이들이 수중내 입자성 또는 용존성 물질과의 반응속도가 증가할 것인지는 미지수다. 이러한 연구는 PMC 처리농도나 처리시간의 결정에 있어 매우 중요하며 생태계 교란이나 경제성에도 관련될 것으로 판단된다.

본 연구는 부영양호 신갈지에서 PMC의 수질개선능에 현장수온이 어떠한 영향을 미치는지 동일한 지점에서 수온이 감소하는 동안에 현장실험을 진행하고, 장소와 수온이 서로 다른 조건에 실시한 선행연구(Kim *et al.*, 2011)와 PMC 수질개선능을 비교하였다.

재료 및 방법

1. 실험장소

신갈지는 경기도 용인시에 위치하며 경부고속도로와 인접하고 유역 내에 거주, 골프장 및 공장 등 점오염원과 택지 및 도시개발에 따른 비점오염원이 증가하고 있으며, 강우시 토사 및 영양물질 등 많은 유기물이 유입되고 있다(Fig. 1). 상류 유입부는 신갈천, 지곡천이 합류되며 하수처리장 배출구와 연결되면서 수질오염 및 악취 등의 문제를 야기하고 있다. 저수지에는 주로 토종 붕어나 잉어를 포함한 베스와 블루길 등이 서식하고 낚시관련 시설물이 설치되어 있으며, 매년 남조류에 의한 대발생이 일어나고 있다(Seo *et al.*, 2012).

2. 천연 식물-광물 혼합물질 제조

실험에 사용한 천연 식물-광물 혼합제(PMC)은 자연수 또는 폐수의 유기물(조류포함)을 제거하기 위하여 Kim *et al.* (2010)에 의하여 개발되었다. 이들은 크게 광물과 식물 성분으로 구분되는데 광물원료는 제올라이트(Zeolite), 황토(Loess), 맥반석(Quartz porphyry), 규산염(Silicate minerals), 견운모(Sericite) 등 5가지가 사용되었으며, 각각의 원료를 100 mesh 이상으로 분쇄한 후 광물재료와 천연응집제를 물에 넣어 고압챔버 내에서 200~250°C의 온도로 2~3시간 동안 가열한 후 완전히 식혀 광물가루는 가라앉히고 상층부의 농축액만 추출하여 사용하였다. 각 재료의 배합비는 제올라이트 30%, 황토 20%, 맥반석 10%, 규산염 10%, 견운모 10%, 정수장 슬러지 20%이다. 식물원료는 밤나무(*Castanea crenata*), 상수리나무(*Quercus acutissima*), 녹차나무(*Camellia sinensis*), 소나무(*Pinus densiflora*), 물푸레나무(*Fraxinus rhynchophylla*) 등 5가지가 사용되었으며, 각각의 원료를 길이는 5 cm 이내로 절단 후 잎과 줄기를 채취하여 초고온 초음파 열탕기에 넣어 10시간 가열하여 농축하여 추출하였다. 재료의 배합은 밤나무 30%, 상수리나무 30%, 녹차 20%, 솔잎 10%, 물푸레나무 10%이다. 이렇게 제조한 식물원료와 광물원료를 물과 1:1:2의 비율로 혼합하여 1시간 정도 교반하여 냉암소에 보관하였다. 이는 선행연구인 Kim *et al.* (2011)에 사용된 식물-광물원료에 응집력을 증가시키고, 유기물 제거 및 항균작용을 하는 광물원료인 규산염, 견운모 등 2가지와 식물원료인 물푸레나무, 소나무잎 등을 첨가하여 최종적으로 천연물질 혼합제(PMC)을 제조하였다.

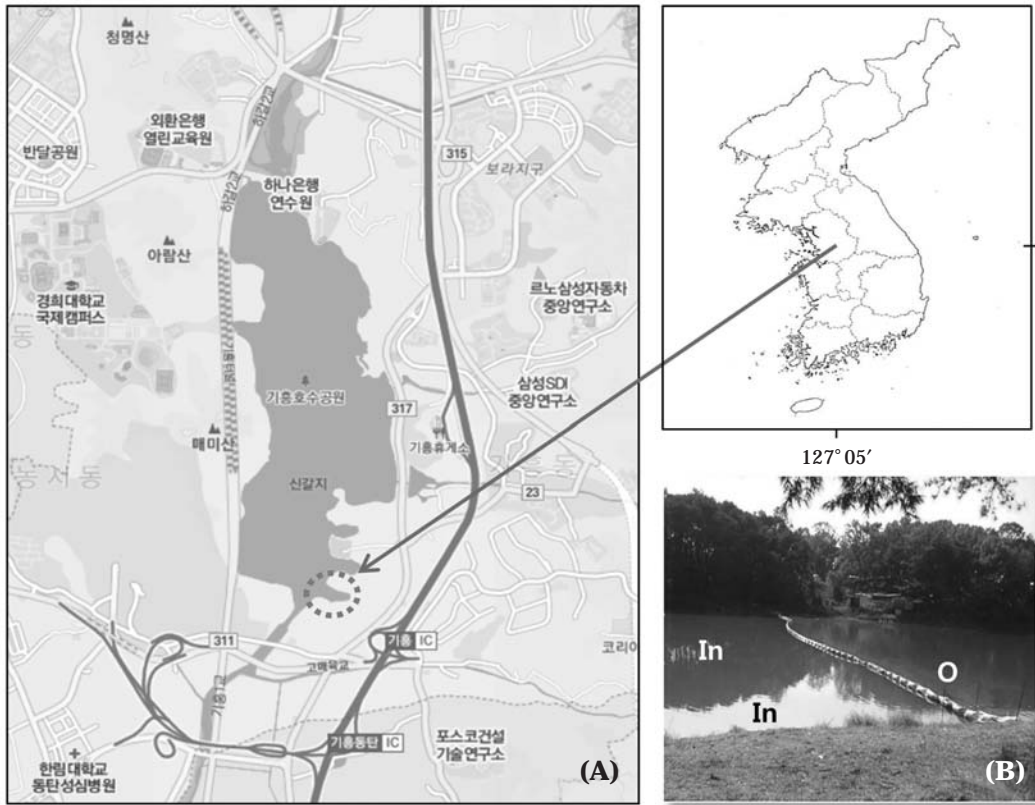


Fig. 1. Map (A) and photo (B) showing the experimental station in eutrophic Lake Shingal, Korea. In and O; the inner and outer sites of experiment.

Table 1. Experimental designs of plant-mineral composites (PMCs) improving water quality in Lake Shingal, Gyeonggi, Korea.

Parameters	Characters
GPS position	37° 13'31.00"N; 127° 05'53.00"E
Surface area (km ²)	5.3
Total water volume (m ³)	1.7 × 10 ⁸
Mean water depth (m)	10
Experimental volume (m ³)	5,000
Experimental periods	1 st EXP: 2012.10.12 ~ 16 (temperature: 17.6 ~ 17.5) 2 nd EXP: 2012.10.26 ~ 30 (temperature: 15.1 ~ 14.1) 3 rd EXP: 2012.11.11 ~ 15 (temperature: 8.4 ~ 7.7)

3. 실험디자인

실험은 경기도 용인시에 위치한 신갈지의 전체 수체에 서 현장적용을 할 수 있도록 연안 부근에 실험군(약 5,000 t)을 만들고 빛이 제한되지 않은 지점을 선정하여 대상지역의 수심과 지역특성을 고려한 테프론 재질의 물막이용 펜스를 설치하였다(Table 1). 펜스는 아래 부분에 무거운 추를 매달아 바닥에 충분히 밀착시켜 물의 교동을 최소화 하였다. 바람의 영향으로 탁도성 물질 및 생물적 요

인의 쓸림 현상을 감안하여 채집장소는 펜스 안쪽에 2개 지점과 밖에 2개 지점을 각각 선정하여 이들의 평균값을 이용하였다.

현장실험은 2012년 10월부터 11월까지 실시하였으며, 1차 실험은 10월 12~16일까지, 2차 실험은 10월 26~30일까지, 3차 실험은 11월 11~15일까지 총 3회에 걸쳐 수행하였다. 각 실험이 종료되면 물막이 펜스를 걷어 자연스럽게 방치하였다. PMC 처리는 모든 실험에서 Lee *et al.* (2011)에 따라 최종농도 0.5 mg L⁻¹씩 처리하였다. 먼

저, PMC 원액 (10 g L^{-1})을 수돗물과 혼합하여 최종농도를 0.5 mg L^{-1} 가 되도록 제조하였다. 선박을 이용하여 희석된 PMC를 분무용 분사기로 실험군(펜스 안쪽)에 균일하게 살포하였다. PMC 처리 후 응집부상된 부유물질은 송풍기나 수거용 그물을 이용하여 한쪽 방향으로 모은 다음 흡입기를 이용하여 수집포에 넣고 여과된 물은 다시 환원하였다. PMC 처리 전후의 수질변화를 비교하기 위하여 각 실험마다 처리 3일전, 처리 1일전, 처리 6시간 후, 처리 24시간 등으로 구분하여 환경요인(수온, pH, 용존산소, 전기전도도, 탁도, 총 질소, 총 인, Chl-*a*, SS, BOD, COD)과 생물요인(식물플랑크톤, 박테리아)를 조사하였다. 환경요인 중 현장에서 야외용 측정기로 측정하기 어려운 항목들은 Van-Dorn 채수기로 채수하여 아이스박스에 넣고 실험실로 운반하여 분석하였다.

4. 환경 및 생물요인 분석

각 실험에서 수온, pH, 용존산소, 탁도는 portable multi-parameter (HORIBA u50, Japan)로 직접 측정하였고 나머지 항목은 채수 후 실험실로 운반하여 분석하였다. 먼저 환경요인은 전체적으로 Standard method (APHA, 1995)에 따라 시행하였는데, 엽록소(Chl-*a*)는 현상수 500 mL를 GF/F (Whatman $1.2 \mu\text{m}$ porosity, England) filter로 여과하여 90% acetone 10 mL을 넣어 24시간 동안 냉암소에서 추출한 후 20분간 원심분리기로 분리하고 상층액을 취하여 범용분광광도계 (UV VIS Spectrometer, SHIMADZU, Japan)를 사용하여 다중파장에서 측정하여 계산하였다. 부유물질(SS)는 미리 100°C dry oven에서 건조하여 무게를 잰 GF/F filter를 이용하여 일정량의 시료를 여과하고 다시 100°C dry oven에서 24시간 건조시킨 후 측정된 무게의 차이를 계산하였다. 한편 생물학적산소요구량(BOD)은 Winkler법에 따라 채수한 시료를 BOD병에 넣고 20°C incubator에서 5일 동안 암조건에서 배양하여 채수 당일 고정된 시료과의 O_2 농도의 차이를 이용하여 계산하였다. 화학적산소요구량(COD_{Mn})은 알칼리성 과망간산칼륨법에 따라 측정하였다. 총질소(TN)는 cadmium reduction 법, 총인(TP)은 persulfate 분해 후 ascorbic acid법으로 각각 측정하였다 (APHA, 1995).

생물요인 중 박테리아는 채수한 시료를 250 mL 폴리에틸렌 채집병에 시료를 넣고 Glutar aldehyde 용액으로(최종농도 1%) 고정하여 실험실로 옮긴 다음 DAPI staining method로 계수하였다. 식물플랑크톤 동정과 계수는 채수한 시료를 250 mL 폴리에틸렌 채집병에 시료를 넣고, Lugol 용액으로(최종농도 1%) 고정하여 실험실로

운반하였다. 운반한 시료는 12시간 이상 침전시킨 후 정량분석을 위해 고정된 시료 중 1 mL를 Sedgwick-Rafter Chamber에 넣고 3분 이상 안정시킨 후 광학현미경 100배 (Nikon eclipse E600, Japan)에서 계수하였다. 식물플랑크톤의 동정은 광학현미경 400~1,000배 (Nikon eclipse E600, Japan)를 이용하여 종 수준까지 하였고, 동일 속에서 뚜렷한 식별형질의 차이를 보이지 않는 종은 미동정 처리하였다.

각 실험을 진행한 후 PMC의 수질개선능(WQI, water quality improvement)은 다음과 같은 식으로 계산하였다.

$$\text{WQI}(\%) = (1 - T/C) \times 100$$

위 식에서 C는 PMC 처리 전, T는 PMC 처리 후 측정치를 각각 의미한다.

결과 및 고찰

1. 환경요인 변화

PMC 처리 후 환경요인은 1차, 2차, 3차 실험에서 모두 요인에 따라 증가 및 감소 현상을 나타냈다 (Table 2, Fig. 2). PMC의 수질개선능은 1차 실험(수온 18°C)에서 pH (WQI 9.8%), DO (-0.8%), COD (41.4%), BOD (80.6%), 총질소 (2.6%), 총인 (57.6%), 탁도 (80.3%), SS (74.2%), Chl-*a* (87.4%) 등으로 나타났다. 2차 실험(수온 15°C)은 pH (7.6%), DO (-19.4%), COD (55.2%), BOD (68.4%), 총질소 (4.7%), 총인 (67.5%), 탁도 (89.9%), SS (79.1%), Chl-*a* (92.3%) 등으로 각각 나타났으며, 3차 실험(수온 8°C)은 pH (8.1%), DO (-1.5%), COD (44.2%), BOD (24.0%), 총질소 (3.7%), 총인 (54.1%), 탁도 (76.7%), SS (72.0%), Chl-*a* (83.6%) 등으로 나타났다.

PMC 처리 결과 수온의 차이를 보였던 1, 2, 3차 실험에서 탁도, SS, Chl-*a* 등은 모두 70% 이상의 높은 감소를 보였다. 이는 PMC가 온도에 크게 영향을 받지 않는다는 것을 의미하며, 예로서 PMC에 포함된 Si 성분은 이미 수온변화에 영향을 크게 받지 않는 것으로 보고된 바 있다. 일반적으로 응집제에 Si를 첨가하면 탁도제거율이 증가하며, 낮은 수온으로 인하여 플러키가 형성되지 않을 경우에도 Si를 첨가하면 비교적 큰 플러키를 유도할 수 있다 (Yoo and Yoon, 2004).

한편 PMC 처리 후 수체내 총질소보다 총인이 상대적으로 높은 감소를 보였는데 이는 선행연구 결과와 일치하며 (Kim *et al.*, 2011), PMC 성분 중 주로 Al에 의한 흡착

Table 2. Changes in chemical and biological parameters before and after the treatment of plant-mineral composites in Lake Shingal, Gyeonggi, Korea.

Parameters	1 st EXP		2 nd EXP		3 rd EXP	
	Before	After	Before	After	Before	After
Water temp. (°C)	17.6±0.1	17.5±0.6	14.1±0.0	15.1±0.6	7.7±0.1	8.4±0.6
pH	8.8±0.1	7.9±0.0	7.7±0.0	7.1±0.0	7.8±0.0	7.2±0.0
Turbidity (NTU)	32.5±1.35	6.4±0.43	29.33±1.31	2.95±0.13	7.3±0.15	1.7±0.14
DO (mg L ⁻¹)	10.04±0.1	10.13±0.04	8.01±0.06	9.56±0.26	9.38±0.08	9.52±0.09
BOD (mg L ⁻¹)	2.86±0.55	0.6±0.09	1.67±0.13	0.53±0.05	2.03±0.18	1.54±0.06
COD (mg L ⁻¹)	9.48±1.33	5.85±0.40	4.85±0.07	2.18±0.05	6.85±0.09	3.83±0.24
SS	25.93±8.05	6.7±0.44	11.75±0.49	2.45±0.58	4.2±0.21	1.93±0.05
Chl- <i>a</i> (µg L ⁻¹)	49.93±13.74	7.57±1.23	8.81±0.59	0.68±0.24	3.52±0.14	0.58±0.06
TN (mg L ⁻¹)	3.005±0.089	2.928±0.04	4.31±0.056	4.108±0.034	3.815±0.025	3.673±0.036
TP (µg L ⁻¹)	0.212±0.005	0.09±0.003	0.081±0.004	0.026±0.003	0.052±0.002	0.025±0.001
Bacteria (10 ⁶ cells mL ⁻¹)	55.53±1.56	45.3±1.57	45.1±0.65	39.08±1.66	13.03±0.38	8.91±0.34
Phytoplankton (10 ³ cells mL ⁻¹)	219.42±15.91	43.88±1.89	92.25±10.71	5.84±0.51	17.64±0.9	0.93±0.11

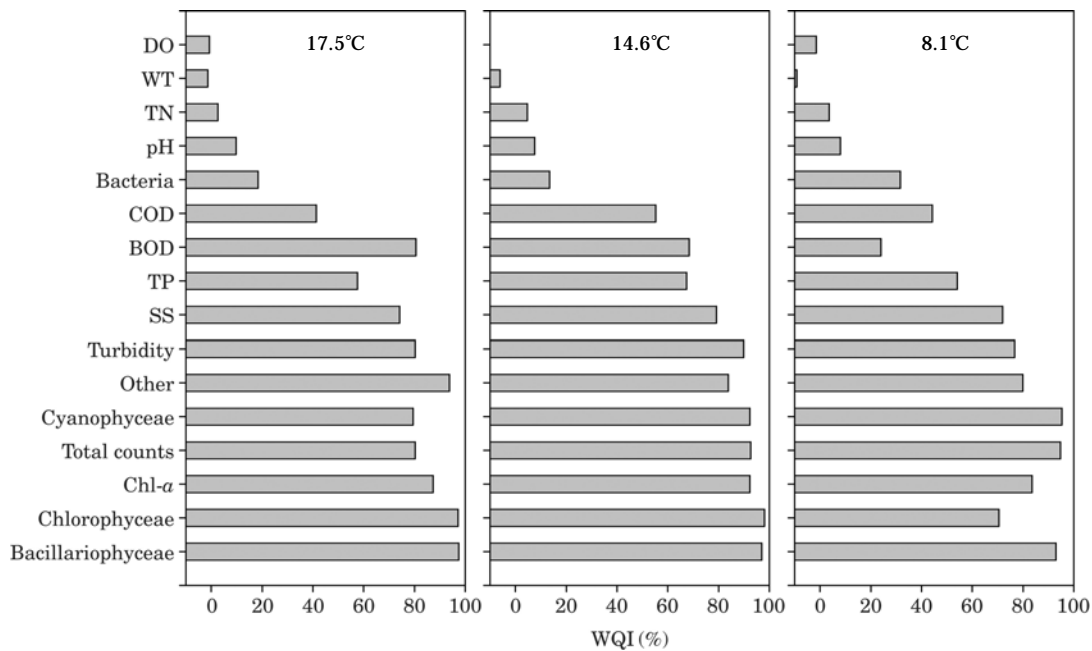


Fig. 2. Water quality improvement (%) of plant-mineral composites in three field experiments in eutrophic Lake Shingal, Korea.

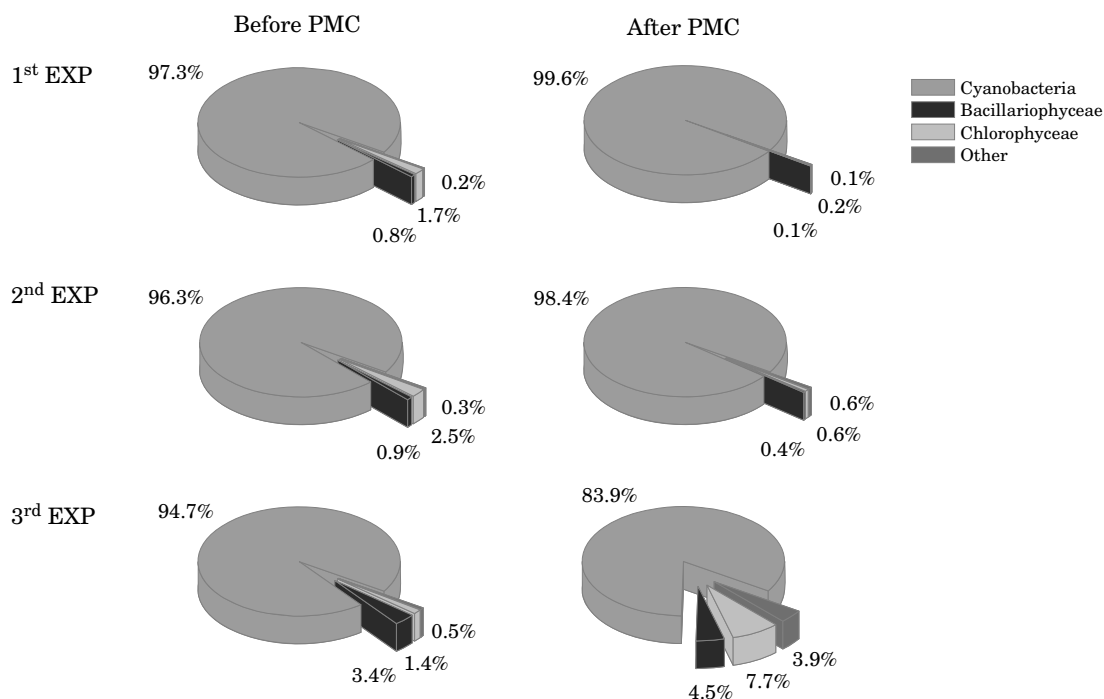
효과로 판단된다(Jekins *et al.*, 1971; Chung and Yu, 2006). 인은 질소에 비해 조류의 성장에 크게 기여하는 바(Schindler *et al.*, 1971; Schindler, 1974; Edmondson and Lehman, 1981) 수질개선시 반드시 제거할 필요가 있는 요인이므로 PMC는 부영양호의 수질개선에 매우 적합하다는 것을 입증해 준다.

2. 생물요인 변화

PMC 처리 후 생물요인 변화를 살펴보면, 먼저 박테리아 현존량의 수질개선효과는 각각 1차 18.4%, 2차 13.4%, 3차 31.6%로 나타났고, 식물플랑크톤은 1차 80.3%, 2차 92.6%, 3차 94.7% 등으로 나타났다(Table 2, Fig. 2). 식물플랑크톤의 경우 온도와 상관없이 모든 실험에서 80%

Table 3. Changes in chemical and biological parameters before and after the treatment of plant-mineral composites (PMCs) in Lake Shingal, Gyeonggi, Korea.

Phytoplankton	1 st EXP		2 nd EXP		3 rd EXP	
	Before	After	Before	After	Before	After
Cyanophyceae						
<i>Microcystis aeruginosa</i>	140000±9166	26900±1587	52350±4591	3480±278	10070±298	440±72
<i>Microcystis</i> sp.	73400±6264	16800±1284	36450±5198	3250±200	6625±503	340±116
Bacillariophyceae						
<i>Melosira varians</i>	32±14.8	6±3	19±5.3	1±0.8	10±5.9	
<i>Nitzschia palea</i>	1787±226.4	39±4.4	855±65.8	24±10.8	590±46.3	42±4
Chlorophyceae						
<i>Chlamydomonas globosa</i>	146±18.8	13±2.9	103±13.6	3±1.5		
<i>Coelastrum microporum</i>	1232±127	48±21.5	1120±109.9	16±12.4	112±42.3	16±12
<i>C. reticulatum</i>	1624±208.2		833±285.1			
<i>Oocystis borgei</i>	202±18.1		68±25			
<i>Pandorina morum</i>			48±23.7			
<i>Pediastrum tetras</i>	32±17.5	2±1.5	24±11.9	8±6.2	24±10.7	8±6
<i>P. duplex</i> var. <i>reticulatum</i>	320±49.6		32±24.8		48±21.5	
<i>P. duplex</i> var. <i>gracilimum</i>	64±49.6		64±28.6			
<i>P. simplex</i> var. <i>stumii</i>				16±12.4		
<i>Scenedesmus aculeolatus</i>	16±12.4					
<i>S. obtusus</i>	96±42.9	41±15.5			56±21.2	48±23
<i>S. quadricauda</i> var. <i>insignis</i>	32±24.8			2±1.5	4±1.6	
<i>S. quadricauda</i>			32±14.3			
Others						
<i>Cryptomonas ovata</i>	424±95.8	26±3.7	248±25.7	40±2.8	98±44.7	36±7
<i>Trachelomonas</i> sp.	8±2.2	1±0.8	1±0.8			

**Fig. 3.** Relative composition of phytoplankton communities before and after treatment of plant-mineral composites in three field experiments in eutrophic Lake Shingal, Korea.

이상의 높은 수질개선효과를 보였으며, 이는 선행연구 결과와 비슷하다 (Lee *et al.*, 2011). 한편 박테리아 현존량의 저감은 식물플랑크톤에 비해 상대적으로 현저하게 낮았는데, 이는 응집제 처리시 박테리아가 식물플랑크톤 보다 영향을 덜 받는다는 결과와 일치된다 (Han *et al.*, 2012).

실험기간 동안 총 현존량의 90% 이상을 차지하였던 남조강이었으며 이중 특히 *Microcystis aeruginosa*가 가장 우점하였고, PMC의 수질개선효과는 1차 79.0%, 2차 89.0%, 3차 94.4%로서 수온감소에 역으로 증가하였다. 비슷한 연구로서 식물추출물로 이용한 조류제어 실험에서 *M. aeruginosa* 밀도가 10^4 cell mL⁻¹에 비해 10^6 cell mL⁻¹에서 오히려 제어효과가 감소한다고 알려져 있다 (Lim *et al.*, 2000). 다만 이러한 결과가 단순히 조류 밀도(유기물 농도)에 의한 것인지 동시에 상대적으로 낮은 PMC 농도(용량)때문인지 아직은 분명하지 않기 때문에 남조 *M. aeruginosa* 밀도와 PMC 농도간의 관계에 대한 추가적 연구가 필요하다.

PMC 처리에 따른 식물플랑크톤 강(class) 수준에서 현존량 변화를 살펴보면, 1차 실험에서는 규조 97.5%, 녹조 97.2%, 기타(갈색편모조+유글레나) 93.8%, 남조 79.0% 등으로 규조가 가장 뚜렷하게 감소하였으며, 2차 실험에서는 녹조 98.1%, 규조 97.1%, 남조 89.0%, 기타 83.9% 등으로 녹조가 가장 효과적으로 감소하였다. 한편 3차 실험에서는 남조 94.4%, 규조 93.0%, 기타 79.9%, 녹조강 70.2% 등으로 남조가 가장 높았다 (Table 3, Fig. 3). 결국 수온에 상관없이 모든 분류군에서 70% 이상의 뚜렷한 감소를 보였으며, 특히 규조류가 가장 효과적으로 제어되었다. 이 결과는 PMC가 남조에 대해 가장 효과적이라는 선행 연구 (Lee *et al.*, 2011)와는 차이를 보인 결과로서 단순한 실험장소와 시기 등의 차이인지 추후 연구가 필요하다.

3. 수온의 영향

수온이 서로 다른 조건에서 PMC 처리에 따른 수질개선효과를 항목별로 정리하였다 (Fig. 4). BOD의 경우 수질개선효과가 24~79%의 범위로 수온의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 수온(7°C)이 가장 낮았던 3차 실험에서 BOD의 수질개선능도 가장 낮았으나 수온(17°C)이 가장 높았던 1차 실험에서 가장 높은 수질개선능을 나타냈다. 수온과 BOD의 상관은 매우 높았다 ($r^2=0.996$, $P < 0.05$). COD (WQI, 38~55%), TN (2.6~4.7%), TP (53~68%) 등은 수온의 변화에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

선행연구 (Kim *et al.*, 2011)와 비교하면, BOD는 수온의

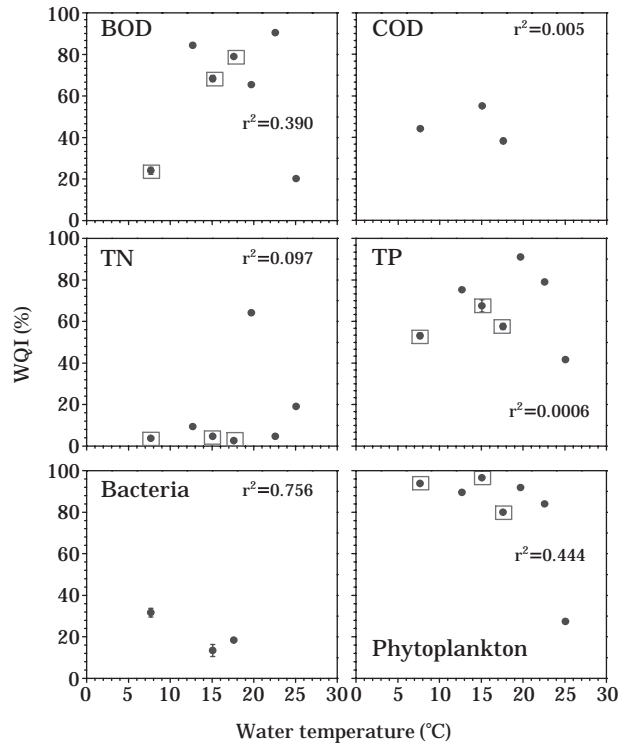


Fig. 4. Water quality improvement (%) of plant-mineral composites (PMC) on several parameters with water temperature. Except for each three quadrates in all figures, all data were applied with the permission of Kim *et al.* (2011). PMC was always treated with same concentration (0.05 ppm).

증감에 따라 WQI가 강하게 영향을 받았는데 수온이 10°C 이하로 감소하면 WQI도 감소하지만, 반대로 수온이 25°C 이상 증가할 경우에도 WQI는 감소하는 특성을 보여, PMC의 효과가 일정한 범위 (10~23°C)에 제한됨을 시사해주었다. TP와 식물플랑크톤은 25°C 미만에서는 저수지 영양상태나 다른 환경조건에 상관없이 80% 이상의 높은 WQI를 나타낸 반면, TN은 유의성은 없으나 20°C 이상의 높은 수온에서 WQI가 증가할 것으로 판단되었다.

생물요인의 경우 박테리아는 13~32%의 범위로 낮은 비교적 수질개선효과를 보였으나 수온과는 높은 음의 상관 ($r^2=0.756$, $P < 0.05$)를 보였으며, 총 식물플랑크톤 현존량은 80~97%로 매우 높은 수질개선효과를 보였으나 수온변화에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다 ($r^2=0.326$, $P > 0.5$).

또한 실험장소는 각각 다르지만 다양한 수온에서 실시한 연구에서 (Lee *et al.*, 2011) 남조 *M. aeruginosa*가 우점한 현장수를 서로 다른 수온 (10, 20, 30°C)에 넣고, 같은

농도의 PMC를 투여한 결과, 10, 20°C에서는 엽록소에 대하여 모두 74%를 보인 반면 30°C에서는 50.1%였다. PMC에 포함된 광물성분들(황토, 맥반석)은 대개 수온증가에 따라 응집력이 증가한다고 알려져 왔으나(Black, 1960; Morris and Knocke, 1984), pH가 7 이상으로 증가할 경우 더 많은 응집제가 요구하여 비경제적이다(Stumm and Morgan, 1996; Letterman *et al.*, 1999; Lim and Kim, 2009). 3차례 실험에서 수온은 모두 20°C 미만이었으나 현장수 pH는 7에 가까워 이들의 기능에는 큰 영향을 주지 않았을 것으로 판단된다. 결국 수온증가는 PMC 투여 농도의 증가를 요구하기 때문에 생태독성이나 안전성에서 부정적이며 여름철 현장수온이 더욱 높을 경우 비효과적일 것으로 판단되었다.

이상을 종합하면, PMC는 수온이 높을수록 식물플랑크톤 제어능은 감소하였으며, 규조에 대한 수질개선능은 증가하였다. 따라서 고온기 동안 남조류가 우점하는 조류대발생의 경우, 임계이상의 수온에서 PMC 처리농도 및 방법에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 판단되었다.

적 요

부영양호 신갈지의 수질개선을 위하여 이미 개발된 천연물질 혼합제 (PMC)의 수질개선능 (WQI)에 수온변화가 어떠한 영향을 미치는지 현장실험을 실시하였다. 실험결과 식물플랑크톤, BOD, 총인 등은 20°C 이하에서는 70% WQI 이상을 보였으나 25°C 이상에서는 40% WQI 이하로 오히려 감소하였다. 한편 수온의 증가에 따라 남조류에 대해서는 WQI는 감소하였고, 규조류는 수온변화에 상관없이 90% 이상 높은 WQI를 나타냈으며, 박테리아와 총질소는 수온과 상관없이 매우 낮은 WQI를 보였다. 이상의 결과들은 PMC의 수질개선능이 수온과 밀접한 관계를 가지며, 25°C 이상의 고온기에 *Microcystis aeruginosa*가 우점하는 남조대발생보다 겨울철 저온기에 우점하는 규조류에 더 효과적일 것으로 판단되었다.

인 용 문 헌

- APHA. 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater (19th ed). American Public Health Association, Washington DC.
- Black, A.P. 1960. Basic mechanisms of coagulation. *Journal of American Water Works Association* **52**: 492-495.
- Chung, Y.I. and J.G. Yu 2006. Geotechnical properties of water treatment plant sludge. *Journal of Korean Society on Water Environment* **14**: 17-25.
- Cooke, G.D., E.G. Welch, S.P. Peterson and P.R. Newroth. 2005. Restoration and management of lakes and reservoirs (3rd ed.), p.548, Lewis. Boca Raton.
- Edmonson, W.T. and J.T. Lehman. 1981. The effect of changes in the nutrient income on the condition of lake Washington. *Limnology and Oceanography* **26**: 1-29.
- Han, S.W., M.H. Chun, J.M. Park, D.H. Kang and L.S. Kang. 2012. Effect of microbial activity by using the coagulants in the biological treatment process. *Journal of KSEE* **34**: 16-22.
- Inderjit Dakshini, K.M.M. and F.A. Einhellig. 1995. ACS Symposium Series. American Chemical Society, Washington DC.
- Jekins, D., J.F. Ferguson and A.B. Mener. 1971. Chemical processes for phosphate removal. *Water Research* **5**: 369-389.
- Kam, S.K., J.Y. Hong, C.G. Hu and M.G. Lee 2003. Adsorption characteristics of Cd (II) and Cu (II) by zeolites synthesized from Hwangto. *Journal of the Environmental Sciences* **12**: 817-824.
- Kim, S.J. 2000. Removal of Red Tide Organisms, 2 Flocculation of red tide organisms by using loess. *Journal of Korea Fisheries Society* **33**: 455-462.
- Kim, B.H., J.H. Lee, K.H. Kim, Y.H. Yu and S.J. Hwang 2010. Algal growth inhibition activity of domestic plants and minerals using simple extraction method. *Korean Journal of Limnological Society* **43**: 221-231.
- Kim, B.H., J.H. Lee, C.H. Park, D.Y. Kwon, H.J. Park, B.C. Mun, B.J. Mun, I.C. Choi, N.Y. Kim, H.N. Min, M.H. Park and S.J. Hwang 2011. Effects of plant-mineral composite (PMC) on the water quality, plankton community and microcystin-LR in eutrophic waters. *Korean Journal of Limnological Society* **44**: 347-357.
- Kim, J. and D.F. Lawler. 2008. Influence of particle characteristics on filter ripening. *Separation Science and Technology* **43**: 1583-1594.
- Kim, J., J.A. Nason and D.F. Lawler. 2008. Influence of surface charge distributions and particle size distributions on particle attachment in granular media filtration. *Environmental Sciences Technology* **42**: 2557-2562.
- Lee, J.H., B.H. Kim, B.C. Mun and S.J. Hwang 2011. Optimization test of plant-mineral composites to control nuisance phytoplankton aggregates in eutrophic reservoir. *Korean Journal of Limnological Society* **44**: 31-41.
- Letterman, R.D., A. Amirtharajah and C.R. O'melia. 1999. Coagulation and flocculation in water quality and treatment, 5th ed. 6.9-6.61, American Water Works Associa-

- tion, Denver.
- Lim, B.J., W.H. Jeong, M.S. Byeon and S.O. Jun. 2000. Inhibitory effect of *Microcystis aeruginosa* (Cyanophyceae) growth by plants *in vitro*. *Korean Journal of Limnological Society* **33**: 136-144.
- Lim, J.C. and J.G. Kim. 2009. A study on the improvement of water treatment efficiency by coagulant overdosing in high pH raw water. *Journal of Korean Society on Water Quality* **24**: 153-154.
- Morris, J.K. and W.R. Knocke. 1984. Temperature effects on the use of metal-ion coagulants for water treatment. *Journal American Water Works Association* **76**: 74-79.
- Na, G.H., J.B. Nam, K.D. Park and J.A. Lee 1998. Experimental elimination of blue-green algae *Microcystis* sp. by loess suspension in column test. *Journal of Korean Society on Water Quality* **14**: 399-404.
- Pernitsky, D.J. and J.K. Edzwald. 2006. Selection of alum and polyaluminum coagulants: principles and applications. *Journal of Water Supply Research Technology AQUA* **55**: 121-141.
- Reyssac, S.J. and M. Pletikoscic. 1990. Cyanobacteria in fish ponds. *Aquaculture* **88**: 1-20.
- Rice, E.L. 1984. Allelopathy, 2nd ed. Academic press Inc., Orlando, Florida.
- Schindler, D.W. 1974. The effect of changes in the nutrient income on the condition. *Science* **184**: 897-899.
- Schindler, D.W., F.A.J. Armstrong, S.K. Holmgren and G.J. Brunskill. 1971. Eutrophication of Lake 227, experimental lakes area, Northwestern Ontario, by addition of phosphate and nitrate. *Journal of Fisheries Research Board of Canada* **28**: 1763-1781.
- Seo, Y.H., T.H. Kim, I.S. Choi and J.M. Oh. 2012. Inner productivity estimation of sediment in Gi-Heung reservoir. *Journal of Korean Society on Water Quality* **28**: 724-725.
- Shin, G.W., Y.D. Choo, K.Y. Kim, H.D. Ryu and S.I. Lee. 2012. Evaluation of lanthanum (III)-loess composite as an adsorbent for phosphate removal. *Journal of KSEE* **33**: 143-148.
- Sigee, D.C., R. Glenn, M.J. Andrews, E.G. Bellinger, R.D. Butler, H.A.S. Epton and R.D. Hendry. 1999. Biological control of cyanobacteria: principles and possibilities. *Hydrobiologia* **395/396**: 161-172.
- Stumm, W. and J.J. Morgan. 1996. Aquatic Chemistry, 3rd ed. Wiley Interscience, New York.
- Wade, A.J., P. Durand, V. Beaujouan, W.W. Wessel, K.J. Raat, P.G. Whilthead, D. Butterfield, K. Rankinen and A. Lepisto. 2002. A nitrogen model for European catchments: INCA, new model structure and equation. *Hydrology and Earth System Sciences* **6**: 559-582.
- Yamamoto, M., H. Murai, A. Takeda, S. Okunishi and S. Morisaki. 2005. Bacterial flora of the biofilm formed on the submerged surface of the reed *Phragmites australis*. *Microbes and Environments* **20**: 14-24.
- Yoo, E.S. and I.M. Yoon. 2004. The study of Si-Al coagulant development and characteristics for wastewater treatment of tire recycling industry. *Journal of KSEE* **26**: 1-6.

(Manuscript received 6 April 2013,

Revised 16 May 2013

Revision accepted 5 June 2013)