

국내 하천/호수에 적용된 조류저감기술의 조사 및 평가 Investigation and Evaluation of Algae Removal Technologies Applied in Domestic Rivers and Lakes

변규덕 · 김가영 · 이인주 · 이새로미* · 박재로* · 황태문* · 주진철[†]

Kyu Deok Byeon · Ga Young Kim · Inju Lee · Saeromi Lee* ·

Jaeroh Park* · Taemun Hwang* · Jin Chul Joo[†]

한밭대학교 건설환경공학과 · *한국건설기술연구원 환경플랜트연구소

Civil & Environmental Engineering, Hanbat National University

*Korea Institute of Civil Engineering & Building Technology, Environmental & Plant Engineering Research Institute

(Received May 16, 2016; Revised May 30, 2016; Accepted June 7, 2016)

Abstract : Commercial 28 algae removal technologies that have been applied in domestic rivers and lakes with green tide were investigated, analyzed and classified. The classification of algae removal technologies was based on the three criteria (i.e., principle, flow rate of water body, and application period). Also, algae removal technologies were evaluated in terms of cost effectiveness, field applicability, effect durability, and eco friendliness. From the analysis results, technologies using physical, chemical, biological, and convergent controls were 32.2%, 25%, 21.4%, and 21.4%, respectively. The 75% of technologies have been applied to stagnant water body (≤ 0.2 m/s). Also, algae harvesting ship with dissolved air flotation, conveyor belt and filtration processes and natural floating coagulant were found to have better field applicability, compared to other technologies. However, proper algae removal technology in specific rivers and lakes should be chosen after the evaluation of long-term pilot scale field test. Also, development of energy and resource recovery technologies from algae biomass is warranted.

Key Words : Algae Biomass, Algae Removal Technologies, Classification, Cost Effectiveness, Field Applicability, Green Tide

요약 : 실제 하천과 호소에서 적용된 상용화된 28개 조류저감기술의 현장적용 자료를 조사하고, 이를 평가(evaluation) · 분석(analysis)하여 분류(classification)하였다. 분류 기준은 공법구분, 적용 수체의 유속, 적용 시점의 3가지 기준에 의해 분류하였으며, 각 조류저감기술은 경제성, 현장 적용성, 효과 지속성, 수생태 안전성을 기준으로 평가를 실시하였다. 공법 원리별로 분류 시 물리적 공법이 32.2%, 화학적 공법이 25%, 생물학적 공법이 21.4%, 복합처리 공법이 21.4%를 차지하였다. 조사된 조류저감기술의 75%는 유속 0.2 m/s 이하의 정체된 호소, 저수지, 소형 하천을 대상으로 적용되었다. 가압부상장치와 컨베이어 벨트 및 탈수장치를 탑재한 이동식 녹조제거선과 광물기반 천연 부유응집제 기술이 타 기술 대비 현장 적용성은 우수한 것으로 조사되었다. 발생현장에 적합한(site-specific) 맞춤형 조류저감기술의 도입은 pilot 규모의 장 · 단기 운전을 통해 효율을 검증 후 최종 도입하는 것이 바람직하다. 또한, 회수된 조류 바이오매스를 생물 자원화를 통해 에너지 회수형 조류저감기술 등의 신속한 개발 및 보급이 필요하다.

주제어 : 조류 바이오매스, 조류저감기술, 분류, 경제성, 현장 적용성, 녹조

1. 서론

최근 우리나라는 기후변화 현상과 비점오염원의 증대에 따른 질소(N), 인(P) 등 영양물질의 지속적인 수계 유입으로 인해 주요 하천 및 호소 등에 연중 조류(algae)가 과다 증식하여 녹조(green tide)가 지속적으로 발생하는 것으로 보고되고 있다.¹⁻⁷⁾ 조류는 1차 생산자로서 생태계의 중요한 역할을 담당하나 수계 내 대량증식을 통해 녹조현상을 일으킨다. 이로 인해 수계 내 탁도가 증가하고, 이취미를 유발해 수질을 저하시켜 정수처리 과정에도 악영향을 미치며, 사멸 시 산소 고갈과 침전물 형성 등 수생태계 내 생물서식 환경 악화, 가축과 인간에게 독성을 나타내기도 한다.^{8,9)}

조류가 성장하는 조건은 수온(water temperature), 광량(light intensity), 영양염류(nutrients), 유속(water velocity), 성층화(stratification) 등 여러 환경 요인들의 영향을 받으며, 특정

조류종에 의해 유발되는 독성물질로 인해 수계의 오염위험이 증가하므로, 녹조를 사전에 예방하고 제거하기 위해 다양한 공법의 조류저감기술이 개발되고 있다.¹⁻¹²⁾ 이러한 녹조를 예방하기 위해서는 위치적 조건에 따라 외부오염원 차단과 내부오염원 제거가 있으며, 외부오염원을 차단하는 공법은 수계로 유입되는 점 · 비점오염원의 유입을 최소화하며 유입 전 영양염류를 제거하여 차단하는 공법이 적용되고, 내부오염원 제거는 수계 내 조류성장을 촉진하는 환경요인들을 교란시키거나 조류를 직접 제거하는 공법이 해당된다.

최근까지 내부오염원 제거를 위한 수계 내 조류발생 원인 물질과 조류의 직접처리를 위한 다양한 조류저감기술이 개발되었으며, 이 기술들은 원리(principle)에 따라 물리적(physical), 화학적(chemical), 생물학적(biological), 복합적(converged) 공법으로 구분할 수 있다.¹⁻¹²⁾ 일반적으로 물리적 공법은 많은 비용과 장치가 요구되고 다량의 바이오매스(bio-

[†] Corresponding author E-mail: jincjoo@hanbat.ac.kr Tel: 042-821-1264 Fax: 042-821-1476

mass) 및 부산물 등이 발생하며, 화학적 공법은 2차 오염 및 수생태계에 대한 직·간접적 피해가 있는 것으로 보고되고 있으며, 생물학적 공법은 현장 적용 시 시공간적 변이와 계절적, 수리적 영향에 따라 조류저감 효율이 큰 영향을 받는 것으로 보고되고 있다.¹⁻⁵⁾ 또한, 대부분의 처리공법들이 일시적/부분적 효과를 거둘 수 있으나 장기간 지속가능하지(sustainable) 않다는 단점이 있으며, 계절적, 수리적 환경인자의 변화가 큰 하천 분류 등에서는 성공적인 적용사례가 드문 것으로 조사되고 있다.³⁻⁷⁾ 따라서 수체 내에서 조류저감 효과가 높으며, 수생태계에 직·간접적 피해가 없으며 조류 성장을 억제할 수 있는 조류저감기술 개발이 필요한 실정이다. 또한, 복잡한 현장에서 현장적용성이 우수한 조류제거를 위해 다양한 조류저감기술의 경제성(cost-effectiveness), 현장 적용성(field applicability), 효과 지속성(effect durability), 수생태 안전성(eco friendliness)을 고려한 현장 맞춤형(site-specific) 조류저감기술에 대한 평가를 통해 조류저감기술 선정 시 활용할 수 있는 의사결정지원시스템이 요구된다.

매년 대규모 녹조 발생과 확산으로 조류경보제 운영, 조류감시선 도입, 조류제거 시설·인력 등의 비용은 지속적으로 증대되었지만, 대부분 한시적으로 시행되는 녹조 관리이며, 운영 효과 대비 높은 비용이 소요되고 있다.^{1-5,10)} 또한, 현재 개발된 기술은 소규모 호소의 녹조저감 효과만 검증되었으며, 대규모 하천에서의 녹조저감 효율에 대한 검증과 관리자가 활용할 수 있는 조류저감기술 편람 및 통합관리매뉴얼 등의 가이드라인 제시는 미비한 실정이다. 따라서 녹조 발생 시기, 수체 규모 및 유속, 오염원의 지속 유입 여부 등에 따라 어떤 조류저감기술을 적용해야 할지에 대한 가이드라인이 제시되어있지 않다.

본 연구는 위에서 언급한 조류저감기술의 문제점을 보완하기 위해 현재 개발되어 있는 국내 조류저감기술을 평가

(evaluation)·분석(analysis) 후 분류(classification)하였다. 조류저감기술 중 현재 실험실 규모에서 개발되었으나 현장적용을 통한 검증이 시행되지 않은 기술은 배제하였으며, 실제 중소형 하천과 호소에서 적용되고 있는 상용화된 기술을 대상으로 객관적 자료를 조사·평가하였고, 평가된 기술에 대해 분석을 통하여 분류 작업을 실시하였다. 분류 기준은 (1) 공법구분(물리적, 화학적, 생물학적, 복합적), (2) 적용 수체의 유속(정체, 흐름) (3) 적용 시점(사전예방, 초기, 대량발생 및 회수)의 3가지 기준에 의해 분류하였다. 또한, 다양한 현장에서 확보된 객관적 자료를 조사해 각 조류저감기술의 경제성, 현장 적용성, 효과 지속성, 수생태 안전성을 고려한 현장 맞춤형 조류저감기술에 대한 평가를 실시하였다. 본 연구를 통해 수행된 조류저감기술 평가·분석·분류를 통해 조류저감기술 활용도를 높이고 다양한 현장에서 적용 가능한 맞춤형 녹조 제어기술의 선정 시 기본 가이드라인 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

2. 최근 조류저감기술 연구 및 개발 동향

매년 녹조의 발생으로 인한 수질악화에 따른 국민 불안과 사회적 논란이 지속되면서 녹조는 핵심 사회문제로 대두되고 있다. 따라서 녹조로부터 안전한 상수 공급과 삶의 질 향상을 위해 환경부-미래부-국토부 등의 정부 부처에서 현재 연구과제를 진행하고 있다.¹³⁾

현재 녹조연구는 6개 기관에서 3개 분야(녹조예측, 녹조사전·사후관리, 정수장 녹조관리) 19개 과제(491.8억 원/4년, 기관별 자체예산)가 추진 중에 있으며, 각 부처에서는 녹조제거 기술의 적용처 및 적용기술 등에 차별성을 두어 사회문제를 공동으로 해결하기 위해 상호협력하고 있다.¹⁴⁾ Fig. 1에 제시되었듯, 환경부에서는 효과적인 조류경보제 운

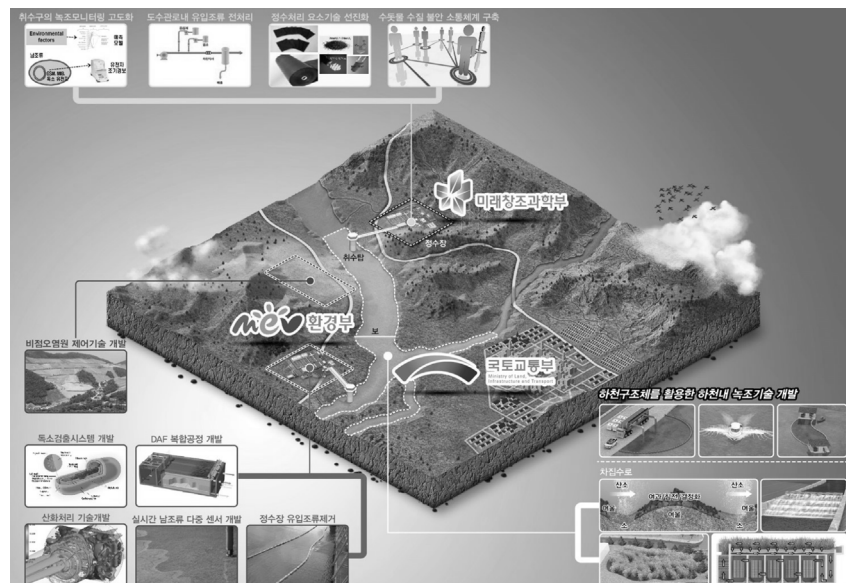


Fig. 1. Scope and content of research & development for algae removal technology.¹⁴⁾

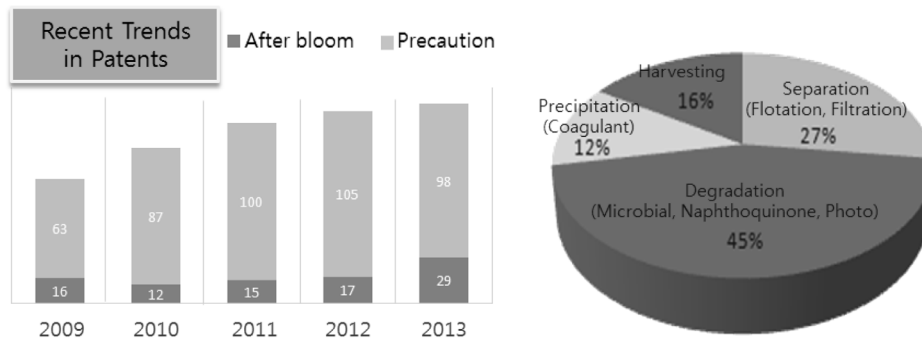


Fig. 2. Recent trends in patents of algae removal technology.¹⁵⁾

영을 위한 실시간 녹조 모니터링 고도화를 위하여 녹조 예측 및 모니터링 시스템 개발·고도화, 녹조의 사전제어로서 주요 비점오염원인 인(P) 제거·관리기술, 효과적 정수처리를 위한 녹조제거 기술개발을 중점적으로 연구하고 있다. 미래부에서는 정수장을 중점으로 취수구부터 정수처리 공정까지 녹조제거를 위한 핵심기술을 개발하는데 목적을 두고 있다. 국토부는 하천, 댐 등에 발생하는 녹조를 대상으로 하천구조체(대형 댐, 보, 하도, 하상 등)를 활용한 녹조관리기술 개발 및 하천설계기준에 조류저감기술을 반영하는 것을 주요 목표로 두고 있다. 현물관리체계가 다원화되어 있으므로, 소관 영역별 개발된 기술의 현장적용성과 녹조제거 효율의 우수성을 확보하기 위해서는 개발 기술의 융합, 현장 상호 검증 등의 부처간 협력이 필수적으로 요구된다.

Fig. 2에 제시되었듯이 녹조제거 기술개발은 대규모 녹조 발생 등이 이슈가 되면서 최근 5년간 증가하는 경향을 보이고 있으나,¹⁵⁾ 실제 현장에 적용되어 활용되고 있는 기술들의 조류저감효율은 기대에 미치지 못하고 있는 실정이다. 현재 개발되어 있는 많은 조류저감기술들은 조류의 식물성,

부유성·단세포성 특징들을 이용한 것으로, 초음파 및 식물추출물 등을 활용한 분해 기술, 응집제 등을 활용한 침강 기술, 부상분리·여과 등을 활용한 분리 기술, 녹조제거 선박 등의 직접회수 등으로 구분할 수 있으며, 최근에는 녹조 대량 발생 후 회수하는 기술 개발보다 녹조를 예방하는 기술 개발이 활발하게 이뤄지고 있다.

하지만 Fig. 3에 요약되었듯이 조류성장은 매우 다양한 환경요인(environmental factor)에 의해 영향을 받으며,^{1~11)} 이는 수문과 기후, 호수 유역 및 형상, 물리적, 화학적 및 생물학적 요인에 따라 조류의 증식과 대량 발생이 결정되기 때문에 발생현장에 적합한 맞춤형 조류저감기술의 도입이 필요함을 의미한다. 그러나, 대부분의 조류저감기술이 단기적 대응안이며, 여전히 현장 적용에 대한 실효성이 낮으며, 발생현장에 적합한 기술에 대한 선택이 어렵다는 문제점이 해결되지 않고 있다. 따라서 현장에서 녹조를 제거하기 위한 대책은 지역적 특성을 고려하여 현장에 적용할 수 있는 적정 조류저감기술의 선정을 필요로 하고 신속한 대처를 위해서는 조류발생에 대한 지속적인 모니터링 및 예측 모델을 이용해 사전에 대처할 필요가 있다.

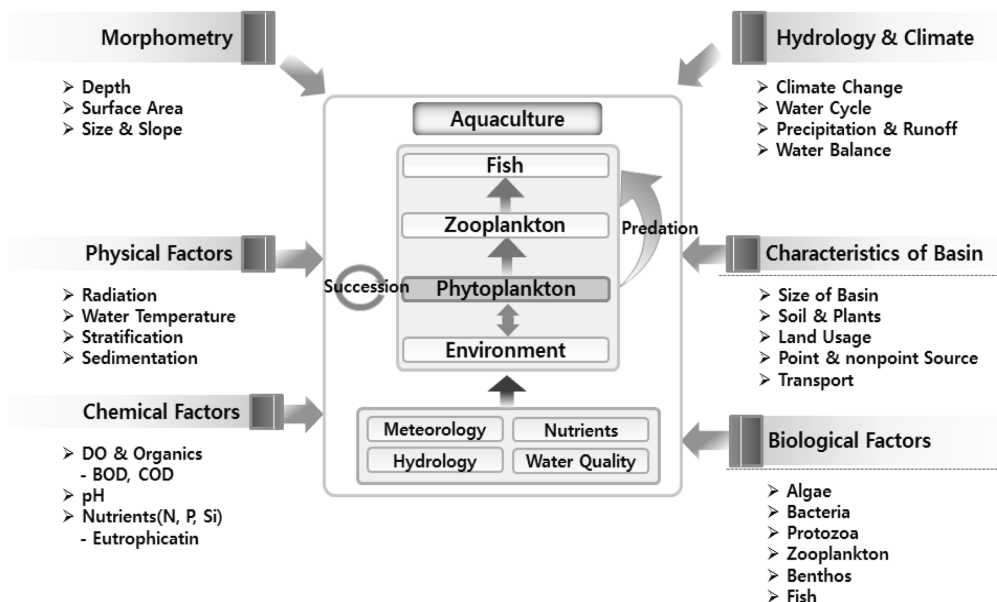


Fig. 3. Primary environmental factors affecting growth of microalgae.⁵⁾

3. 국내 조류저감기술 현황 및 분류

본 연구는 다양한 조류저감기술 가운데 현장적용된 객관적 자료의 확보 및 상용화 되어 있는 28개의 기술에 대해 중점 조사를 진행하였다. 조사된 조류저감기술들은 기술의 원리, 제원, 처리공정, 현장 검증 자료를 평가·분석하여 각 기술을 공법별, 적용 수체 유속별, 녹조발생 시기별로 분류하여 정리하였다(Table 1).

공법별 분류는 수질 및 수생태계 보전에 관한 법률 시행규칙 제 7조에 의거한 [별표 5]를 참고하여 분류하였으며 기술 중 여러 공법을 동시에 사용하는 공법은 복합처리공법으로 분류하였다. 수체유속별 분류는 유속 0.2 m/s를 기준으로 정체(stagnant)와 흐름(flow)으로 분류하였다. 적용시점별 분류는 사전예방단계(precautionary period), 녹조발생 초기단계(initial period), 녹조 대량발생 및 회수단계(bloom & harvesting period)로 3그룹으로 실시하였다. 녹조가 발생하지 않은 수체로 사전예방단계에서 적용되는 기술은 수체의 성층현상을 파괴하여 조류가 증식할 수 있는 환경 조건을 억제하는 기술과 조류 증식에 원인물질이 되는 질소(N), 인(P)과 같은 영양염류를 제거하는 공법이다. 녹조발생 초기단계(initial period)는 어느 정도 조류가 발생하였지만 심각하지 않은 단계로 수체에서 조류를 간단하게 제거할 수 있는 공법이 해당된다. 녹조 대량발생 및 회수단계(bloom & harvesting period)는 조류가 번성하여 녹조 개화에 의해 사람에게 심미적인 불쾌감과 악취를 유발하며 수생태계에 직접적인 악영향을 미칠 수 있는 단계로 대량으로 조류를 회수 및 제거할 수 있는 공법이 적용되었다.

3.1. 국내 조류저감기술의 공법별 분류

본 연구에서 조사된 28개의 조류저감기술을 공법 원리별로 분류 시 물리적 공법이 9개로 32.2%, 화학적 공법이 7개로 25%, 생물학적 공법이 6개로 21.4%, 여러 가지 공법을 동시에 사용하는 복합처리 공법이 6개로 21.4%에 해당되었다(Fig. 4(a)).

물리적 공법은 주로 녹조가 발생하기 전이나 녹조 발생 초기에 사용할 수 있는 기술들이 대부분으로, 가장 많이 쓰이는 기술이 수체의 성층현상을 파괴하여 조류가 증식할 수 있는 환경 조건을 억제하는 기술로써 수체 강제순환, 수중 폭기, 인공희석 등이 이용되고 있다. 그 밖에 조류차단막, 초음파 등의 장·단기적 기술이 사전 예방 단계, 녹조 발생 초기단계에 주로 적용되었다(Fig. 4(b)).

화학적 공법은 보편적으로 사용되고 있는 응집제(Al, Fe, Ca 등)를 대체하여 생물학적 위해성이 없는 광물기반 천연 응집제를 활용한 조류저감기술이 대부분을 차지하며, 녹조 대량발생 및 회수단계에 대규모 녹조현상에 대한 단기적 대응기술에 주로 적용되었다. 응집제를 통한 조류저감기술 개발의 동향은 단순히 조류를 응집시켜 침전·불용화하는 방식에 그치지 않고 응집 후 조류를 수체에서 제거하기 위한 자가부상 응집제 개발 등으로 응집 후 부상에 요구되는

Table 1. Classification of algae removal technologies based on the principle, the flow rate of waterbody, and the application period(1~7,10,11)

No	Algae control technology	Category I	Category II	Waterbody flow rate	Application period
1	Mixed microbial culture	B	Microbial culture	S	○ ●
2	Mixed bacteria culture attached on clay	B		S	○ ●
3	Mixed microbial culture in titanium balls	B/C		S	○ ●
4	Zeolite coagulant with attached microbial culture	B		S	○ ●
5	Biomanipulation with zooplankton	B	Zoo-plankton	S	○ ●
6	Naphthoquinone product	C	Naphtho-quinone	S	● ●
7	Natural coagulant with additional minerals	C	Coagulant	S	● ●
8	Bentonite coagulant with additional minerals	C		S	● ●
9	Natural floating coagulant	C		S	● ●
10	Algae harvesting ship with filtration	P/C	Harvesting ship	S/F	● ●
11	Algae harvesting ship with dissolved air flotation	P/C		S/F	● ●
12	Dissolved air flotation device with skimming	P/C	Micro-bubble	S	● ●
13	Microbubble device	P		S	● ●
14	Microbubble device with ozone	P/C		S	● ●
15	Microbubble device with coagulant & harvesting	P/C		S	● ●
16	Water circulation ship	P	Water circulation	S/F	○ ●
17	Water circulation device with spraying	P		S/F	○ ●
18	Water circulation device with impeller	P		S/F	○ ●
19	Water density current generator	P		S/F	○ ●
20	Surface water circulation device	P		S/F	○ ●
21	Floating artificial wetlands	B	Wetland	S	○ ●
22	Artificial wetlands	B		S	○ ●
23	Pressurized filtration	P	Filtration	S	○ ●
24	Disk filtration with coagulants	C		S	● ●
25	Mobile ultrasonic device	P	Ultra sound	S	○ ●
26	Fixed ultrasonic device	P		S	○ ●
27	Photodegradation device with adsorbents	C	Photo-degradation	S	○ ●
28	Plasma device	C	Plasma	S	○ ●

P : Physical Control S : Stagnant (≤ 0.2 m/s)

C : Chemical Control F : Flow (>0.2 m/s)

B : Biological Control

○ : Precautionary Period

● : Initial Period

● : Bloom & Harvesting Period

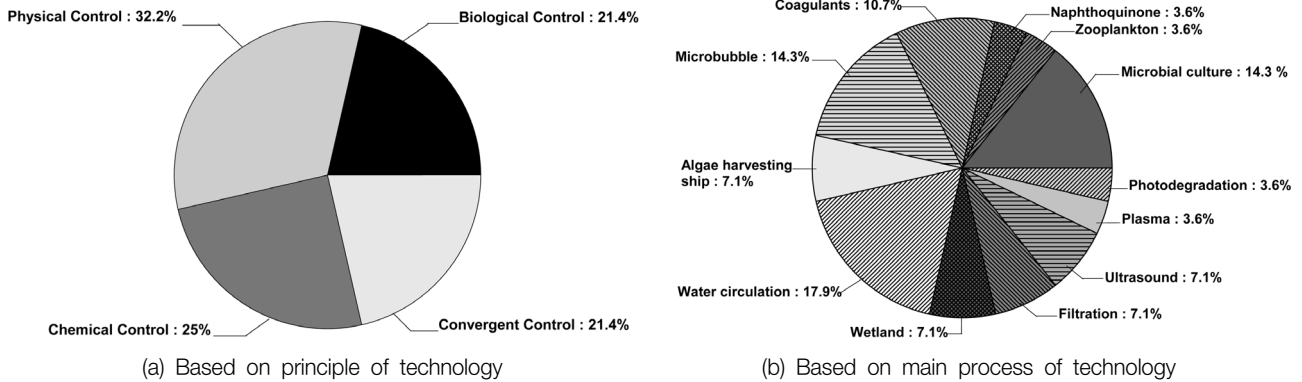


Fig. 4. Classification of algae removal technology based on principle and main process of technology.

별도 장치가 없어도 적용 가능한 기술이 현장에 적용되었다. 또한 최근에는 생물유래 살조물질(naphthoquinone 등), 과산화수소 및 광촉매를 이용한 기술들이 일부 수체에 적용되었다(Fig. 4(b)).

생물학적 처리는 조류가 증식하는데 필요한 영양염류에 대한 경쟁 기술과 먹이사슬을 통해 조류를 섭식하여 제거하는 기술 등이 개발되었다. 조류 증식에 필요한 영양염류를 제거하는 방식은 식생을 이용하여 질소, 인을 제거하는 생태적 기술인 습지나 인공식물섬이 적용되고 있다. 먹이사슬을 이용한 기술은 조류를 섭식하는 동물플랑크톤(zooplankton) 및 담수패류를 이용하는 방식으로 기존에 물벼룩(*Daphnia* sp.)을 풀어놓아 섭식하는 방식이 일부 단점을 갖고 있으므로 수체의 물을 양수하여 물벼룩이 서식하는 반응조 탱크로 주입하여 조류를 섭식·방류하는 방식도 적용되고 있다. 또한 살조 미생물 및 바이러스(virus) 및 원생동물(protozoa)에 의한 섭식 방식도 일부 소규모 현장에서 적용되었다(Fig. 4(b)).

복합처리공법은 물리적, 화학적, 생물학적 공법을 다양하게 융합한 기술로 각 공법의 장점을 융합하여 다양한 조합으로 현장에 적용되고 있다. 이러한 복합처리공법은 물리적 공법의 여과, 화학적 공법의 응집, 생물학적 공법의 분해의 장점을 융합하여 하천 및 호수 현장에 적용되었다. 최근에는, 가압부상장치와 컨베이어 벨트 및 탈수장치를 탑재한 현장가압부상 방식의 이동식 녹조제거선과 응집제 살포 및 부상하는 조류 회수를 동시에 진행하여 조류저감효율을 크게 개선시키고 처리용량을 증진시킬 수 있는 기술이 다수 현장에 적용되고 있다(Fig. 4(b)).

3.2. 국내 조류저감기술의 수체 유속에 따른 분류

조류저감기술의 수체 유속에 따른 분류는 기술 적용 후 조류저감 효과를 구현할 수 있는 수체의 유속에 따라 분류하였다. 수체유속별 분류는 갈수기의 평균 유속 0.2 m/s를 기준으로 S (stagnant)와 F (flow)로 분류하였으며,³⁻⁵⁾ S는 유속이 없는 정체수역으로 주로 호소, 저수지, 소형 하천을 의미하고 F는 비교적 유속이 있는 중대형 하천을 의미한다.

조사된 조류저감기술의 75%는 갈수기의 평균 유속 0.2

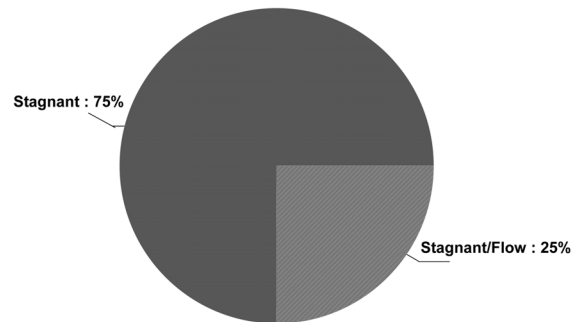


Fig. 5. Classification of algae removal technology based on flow rate of water body.

m/s 이하의 정체된 호소, 저수지, 소형 하천을 대상으로 적용되었으며, 주로 동물플랑크톤, 물벼룩, 살조 미생물 및 바이러스 및 원생동물에 의한 포식을 통한 생물학적 공법과 광물기반 천연 응집제, 생물유래 살조물질 등의 주입에 의한 화학적 공법, 미세기포와 가압부상 및 초음파에 의한 물리적 공법 등이 적용되었다. 이에 반해, 가압부상 방식의 이동식 녹조제거선과 수체 강제순환, 수중 폭기, 여과 등은 유속의 흐름에 크게 영향을 받지 않고 다양한 현장(stagnant/flow)에 적용되었다(Fig. 5).

물의 체류시간이 비교적 긴 유속 0.2 m/s 이하의 정체된 호소, 저수지, 소형 하천의 경우, 조류 성장 kinetics에 필요한 영양염류 물질전달이 용이하므로 조류의 과다성장과 축적이 쉽게 발생하여 녹조가 발생하였으며, 대부분의 조류저감기술은 이러한 유속이 느리고 체류시간이 비교적 긴 정체된 호소, 저수지, 소형 하천을 중심으로 적용되었으나, 일부 기술은 대형 하천 보의 상류 정체수역에 적용된 사례도 보고되고 있다.

3.3. 국내 조류저감기술의 조류발생 시기별 적용에 따른 분류

조사된 조류저감기술의 시기별 분류에 따르면, 녹조 발생 전 예방단계와 초기단계에 적용된 기술이 80%에 해당되고 녹조 대량발생 및 회수단계에 적용된 기술이 20%에 해당된다. 녹조가 발생하지 않은 수체로 사전예방단계에 해당하는

기술은 조류가 증식할 수 있는 환경을 파괴하여 조류의 증식을 방해하는 기술로 수체를 교반하여 성층현상을 파괴하는 기술과 식물, 미생물을 이용하여 조류가 증식하는데 필요한 영양염류를 사전 제거하는 기술 등이 주로 적용되었다.

녹조발생 초기단계는 어느 정도 녹조가 발생하였지만 조류경보 기준 미만으로 수체에서 녹조현상에 기인하는 조류를 간단하게 제거할 수 있는 기술로 수체를 교반하여 성층현상을 파괴하고 초음파 및 플라즈마를 이용해 조류를 분해하는 기술과 식물, 미생물 및 동물성 플랑크톤을 이용하여 조류의 증식 억제 및 섭식을 통하여 제어하는 기술 등이 주로 적용되었다.

녹조 대량발생 및 회수단계는 조류가 번성하여 대발생 단계로 대량으로 조류를 제거 및 회수할 수 있는 공법이 이에 해당한다. 주로 광물기반 천연 응집제를 활용한 조류저감기술이 대부분을 차지하며, 최근에는 생물유래 살조물질, 과산화소수를 이용한 기술들이 일부 수체에 적용되었다. 또한, 현장가압부상 방식의 이동식 녹조제거선과 급속응집부상 및 회수 공법 등이 녹조 대량발생 및 회수단계에 적용되었다.

조류저감기술의 적용시기별 구분은 예방, 초기, 대량발생 및 회수단계로 명확히 구분하기가 난해하므로 Table 1과 같이 중첩하여 분류하였으며, 이러한 조류저감기술의 적용시기별 분류는 Fig. 2에 제시된 녹조제거기술의 출원동향과 동일하게 예방과 초기 대응기술의 비율이 높게 나타났다. 대부분의 예방과 초기 대응기술이 주로 물리적, 생물학적 공법이 적용된 반면, 대량발생 및 회수 대응기술로는 화학적 공법이 대부분을 차지하였다. 즉, 조류가 대량발생 후에는 신속 처리 및 대응할 수 있는 공법으로 다양한 응집제 살포 후 조류 바이오매스를 회수하는 공정이 널리 적용되고 있는 것으로 확인되었으나, 이러한 기술은 현장 적용성은 우수하나 효과 지속성, 수생태 안전성에 일부 논란을 야기하고 있는 것으로 조사되었다.

현재 국내 녹조에 관련된 정책은 녹조가 대량발생 후 녹조를 회수하는데 초점을 두고 있으나, 녹조현상을 초기에 예방·제거하기 위해서는 녹조가 발생 전 예방이나 녹조 발생 초기에 선제적으로 대응하는 것이 더욱 중요하다고 판단된다. 따라서 녹조 발생 전 예방기술과 초기 단계에 적용할 수 있는 기술을 상시 설치·운영할 필요가 있으며, 초분광센서를 장착한 드론·경비행기와 조류감시선을 상시 운영하여 녹조발생 우심지역에 대한 모니터링을 강화하여 녹조의 공간적 분포현황을 정확하게 분석하여 녹조발생에 선제적으로 대응해야 한다.

4. 국내 조류저감기술의 기술평가

다양한 현장에서 확보된 객관적 자료와 조류저감시설을 운영하는 현장 운영자들의 설문조사를 토대로 각 조류저감기술의 경제성, 현장 적용성, 효과 지속성, 수생태 안전성을 주요 지표로 평가하여 Table 2에 요약하였다. 모든 평가 지

Table 2. Rating of algae removal technology in terms of field applicability, economic evaluation, effect durability, and eco friendliness

No	Algae control technology	Field applicability	Economic evaluation	Effect durability	Eco friendliness
1	Mixed microbial culture	●	●	●	●
2	Mixed bacteria culture attached on clay	●	●	●	●
3	Mixed microbial culture in titanium balls	○	●	●	●
4	Zeolite coagulant with attached microbial culture	●	●	●	●
5	Biomanipulation with zooplankton	●	●	○	●
6	Naphthoquinone product	○	○	●	●
7	Natural coagulant with additional minerals	●	●	●	●
8	Bentonite coagulant with additional minerals	●	●	●	●
9	Natural floating coagulant	●	●	●	●
10	Algae harvesting ship with filtration	●	●	●	●
11	Algae harvesting ship with dissolved air flotation	●	●	●	●
12	Dissolved air flotation device with skimming	●	○	○	●
13	Microbubble device	●	○	○	●
14	Microbubble device with ozone	●	○	○	●
15	Microbubble device with coagulant & harvesting	●	○	●	●
16	Water circulation ship	●	●	○	●
17	Water circulation device with spraying	●	●	●	●
18	Water circulation device with impeller	●	●	●	●
19	Water density current generator	●	●	●	●
20	Surface water circulation device	●	●	●	●
21	Floating artificial wetlands	●	●	●	●
22	Artificial wetlands	●	●	●	●
23	Pressurized filtration	●	●	○	●
24	Disk filtration with coagulants	●	○	●	●
25	Mobile ultrasonic device	●	○	○	○
26	Fixed ultrasonic device	○	○	○	○
27	Photodegradation device with adsorbents	●	●	●	●
28	Plasma device	○	○	○	○

○ : Poor
 ● : Fair
 ● : Good

표는 각 지표별 상대평가 후 정량화된 수치(1~5점)로 강제 배분 후 정규분포의 표준화를 통해 Z값을 산정 후 3 그룹(poor, fair, good)으로 각각 분류하였다.

Table 2에 제시되었듯, 가압부상장치와 컨베이어 벨트 및 탈수장치를 탑재한 현장가압부상 방식의 이동식 조류제거선과 응집제 살포와 부상 바이오매스의 회수 기술이 현장 적용성은 가장 우수한 것으로 조사되었으나, 초음파와 플라즈마를 활용한 기술은 비교적 현장 적용성이 좋지 않은 것으로 조사되었다. 경제성 부분에서는 미생물 제제, 일부 광물기반 천연 응집제 및 수류 순환장치 등이 비교적 저비용으로 현장 적용되었으나, 생물유래 살조물질과 가압부상 방식의 이동식 녹조제거선 및 초음파 장치 등은 고비용으로 조사되었다. 살조 및 천적 살포와 같은 녹조제거기술의 효과 지속성은 대부분의 기술들이 적용 후 2주까지는 효과가 지속되었으나, 그 이후로는 미미한 것으로 나타났다. 마지막으로, 수생태 안전성을 고려한 결과 미생물 제제, 광물기반 천연 응집제와 상시 운영되는 수류 순환장치 등은 우수한 반면, 합성 고분자 응집제의 주입과 응집·여과 및 초음파와 플라즈마 기술 등은 금속기반 응집제의 수용체 내 축적 및 스트레스로 인한 수생동물의 회피 등으로 수생태계에 부정적 영향을 끼치는 것으로 조사되었다.

하지만, 조류성장은 수문과 기후, 호수 유역 및 형상, 물리적, 화학적 및 생물학적 요인에 따라 조류의 증식과 대량 발생이 결정되기 때문에 발생현장에 적합한(site-specific) 맞춤형 조류저감기술의 도입이 요구되며, 단순히 경제성, 현장 적용성, 효과 지속성, 수생태 안전성만 고려해서 선정하는 것은 안정적인 조류저감효과를 보장할 수 없다. 따라서 본 기술평가자료는 조류저감기술 선정 시 의사결정에 요구되는 참고자료로 활용하는 것이 바람직하며, 조류저감기술 선정은 실제 현장에 도입하기 전에 현장에서 pilot 규모의 장·단기 운전을 통해 효율을 검증 후 최종 도입하는 것이 바람직하다.

5. 결론

실제 하천과 호소에서 적용된 상용화된 28개 조류저감기술의 현장적용 자료를 조사하고, 이를 분석(analysis)하여 분류(classification)하였다. 분류 기준은 (1) 공법구분(물리적, 화학적, 생물학적, 복합적), (2) 적용 수체의 유속(정체, 흐름) (3) 적용 시점(사전예방, 초기, 대량발생 및 회수)의 3가지 기준에 의해 분류하였으며, 각 조류저감기술은 경제성(cost effectiveness), 현장 적용성(field applicability), 효과 지속성(effect durability), 수생태 안전성(eco friendliness)을 주요 지표로 상대평가 후 정규분포의 표준화를 통해 분류하였다.

공법 원리별로 분류 시 물리적 공법이 9개로 32.2%, 화학적 공법이 7개로 25%, 생물학적 공법이 6개로 21.4%, 여러 가지 공법을 동시에 사용하는 복합처리 공법이 6개로 21.4%를 차지하였다. 조사된 조류저감기술의 75%는 유속 0.2 m/s 이하의 정체된 호소, 저수지, 소형 하천을 대상으로

적용되었으며, 이동식 녹조제거선과 수체 강제순환, 수중 폭기, 여과 등은 유속의 흐름에 크게 영향을 받지 않는 현장에 적용되었다. 가압부상장치와 컨베이어 벨트 및 탈수장치를 탑재한 현장가압부상 방식의 이동식 녹조제거선이 현장 적용성은 가장 우수한 것으로 조사되었으나, 경제성 부분에서는 미생물 제제, 일부 광물기반 천연 응집제 및 수류 순환장치 등이 비교적 저비용으로 현장 적용 가능한 것으로 조사되었다. 녹조발생 억제 효과 지속성 측면에서는 적용 기술들 대부분이 단기간(2주 이내) 효과는 지속되었으나 장기적 효과는 없는 것으로 조사되었다. 발생현장에 적합한(site-specific) 맞춤형 조류저감기술의 도입은 경제성, 현장 적용성, 효과 지속성, 수생태 안전성만 고려해서 선정하는 것 보다, pilot 규모의 장·단기 운전을 통해 효율을 검증 후 최종 도입하는 것이 바람직하다. 또한, 회수된 조류 바이오매스를 바이오 에너지, 식물비료, 퇴비화 등 생물 자원화를 통해 기존 조류저감기술과 차별화된 에너지 회수형 조류저감기술 등의 신속한 개발 및 보급이 필요하다.

Acknowledgement

본 연구는 국토교통부 물관리연구개발사업의 연구비지원(과제번호 15AWMP-B098632-01)에 의해 수행되었습니다.

KSEE

References

1. Shin, J. K., Yi, H. S., Jeong, S. A. and Hwang, S. J. "Construction of environmental friendly special-purpose ship for the removal of blue-green algae," *Korean J. Limnol. Soc.*, **42**, 404~406(2009).
2. Shin, J. K., Kim, H., Kim, S. W., Chong, S. A., Moon, B. C., Lee, S. H. and Choi, J. W., "A practical new technology of removing algal bloom," *Korean J. Limnol. Soc.*, **47**, 214~218(2014).
3. Ministry of Environment, "Algal removal master plan from domestic fresh water,"(2010).
4. Ministry of Environment, "Improvement of algal management strategy through algal expert forum,"(2013).
5. Korea Environment Corporation, "Algae removal technologies for the healthiness of aquaculture,"(2012).
6. Gyeonggi Research Institute, "A Study on the Traveling Route and Control Method of Eutrophication Sources in Han River Basin,"(2015).
7. Oh, H. K., Lee, H. C. and Cha, J. Y., "Estimating the Value of Water Quality Improvement Using the Contingent Valuation Method: A Case Study on Bloom Forming Algae," *J. Environ. Policy and Admin.*, **23**, 115~135(2015).
8. Environmental Protection Agency (USEPA), "The Lake and Reservoir Restoration Guidance Manual," 2nd Edition. EPA-440/4-90-006(1990).

9. Cooke, G. D., Welch, E. B., Peterson, S. A. and Nichols, S. A., "Restoration and Management of Lakes and Reservoirs," 3rd Edition. CRC Press Taylor & Francis Group(2005).
10. Korea Water Resources Corporation, "Engineering Technologies for High Efficiency Green-tide Harvesting System and Microalgal Biomass to Convert Renewable Resources at the Water-Bloom of Rive,"(2014).
11. Ahn, C. Y., Lee, C. S., Choi, J. W., Lee, S. H. and Oh, H. M., "Global Occurrence of Harmful Cyanobacterial Blooms and N, P-limitation Strategy for Bloom Control," *Korean J. Environ. Biol.*, **33**, 1~6(2015).
12. Kim, M. K., Moon, B. R., Kim, T. K., Zoh, K. D. "A Study on Production & Removal of Microcystin, Taste & Odor Compounds from Algal bloom in the Water," *The Korean J. Public Health*, **52**, 33~42(2015).
13. Ministry of Environment, Ministry of Science, ICT and Future Planning, Ministry of Land, Infrastructure, and Transport, "Supply of safe water protecting from green tide,"(2014).
14. KICT, "Technical report of algal removal technologies in field application,"(2015).
15. KIPO, "Recent trends in patents of algae removal technology," (2014).