

藻類제어를 위한 실용적 신기술 : K-water 녹조수상콤바인

신재기* · 김호준 · 김세원 · 정선아 · 문병천¹ · 이상협² · 최재우²

한국수자원공사 K-water 연구원, ¹엠씨이코리아(주), ²한국과학기술연구원 물자원순환연구단

A Practical New Technology of Removing Algal Bloom: K-water GATe Water Combine. Shin, Jae-Ki*, Hojoon Kim, Sea Won Kim, Sun-A Chong, Byong cheun Moon¹, Sanghyup Lee² and Jae Woo Choi² (K-water Research Institute, Korea Water Resources Corporation, Daejeon 305-730, Korea; ¹MCEKOREA Co., Seongnam 464-889, Korea; ²Center for Water Resource Cycle Research, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791, Korea)

Abstract We introduce a technical equipment of GATe (Green (algae)-tide) water combine developed by K-water. The GATe water combine consists of five modules: main body and buoyant, transfer hopper, screen conveyer, sludge remover, and separator of algae and waste. Also a sprinkler, as the pre-treatment step if necessary, is equipped to the device to spread out environmental-friendly algaecide under the circumstance that the level of algal bloom does not reach to the scum-forming condition. The overall module system of this device is very simple. Based on the field test, the device covers surface area of ca. 500,000 m² day⁻¹ during the period from May to July, and treats water volume as much as 500,000 m³ day⁻¹ in spite of some variation depending on the water quality condition. The removal efficiency of the device appeared to be over 90%. In addition, the operating duration of the device was able to expand to cover the period between March and November. We expect this new technology can be used to solve algal bloom problems in drinking water resource and public water area.

Key words: GATe water combine, five modules, new technology, algal bloom, removal efficiency

녹조 (Green (algae)-tide, 綠潮)는 일반적으로 부영양화에 의해 고수온기에 수중에서 녹색을 띠는 부유성 미세조류(planktonic microalgae)가 번성하여 수표면에 고농도로 밀집된 후 스컴(scum) 형태로 나타난다(Shin *et al.*, 2009). 우리나라의 경우 녹조는 장소에 따라 차이는 있지만 여름철 하천과 저수지의 우심수역을 중심으로 장마 직전과 장마 후 1주일 정도 경과되면 어김없이 발생하는 경향을 보이고 있다(Shin, 1998). 일반적으로, 녹조를 형성하는 원인종으로는 속(genus) 수준으로 볼 때

남조류 *Microcystis*, *Anabaena*, *Oscillatoria*, *Aphanizomenon* 등이 해당된다. 또한 이들은 수질 환경조건에 따라 개별 분류군의 특징적 생존전략과 분포양상을 보인다(Shin, 1998; Wetzel, 2001; Kalf, 2002). 대발생 후 영향으로는 미관 저하, 냄새 및 독소물질 배출, 생태계 구조와 기능 저해 등을 들 수 있으며, 이를 경감시키기 위해서 상당한 경제적 비용이 수반되게 된다(Shin *et al.*, 2009).

하천과 저수지에서 녹조현상은 계절적으로 외부(점, 비점오염원)와 내부(바닥층)오염원의 영향을 독립 또는 복합적으로 받기도 하고, 수중 영양상태 및 물리학적 요인에 의해 순차적으로 영향을 받는 결과로 볼 수 있다(Shin *et al.*, 2009). 따라서 녹조가 번성하는 수역을 어

Manuscript received 11 August 2014, revised 29 September 2014, revision accepted 1 October 2014
* Corresponding author: Tel: +82-42-870-7450, Fax: +82-42-870-7499, E-mail: shinjaeki@gmail.com

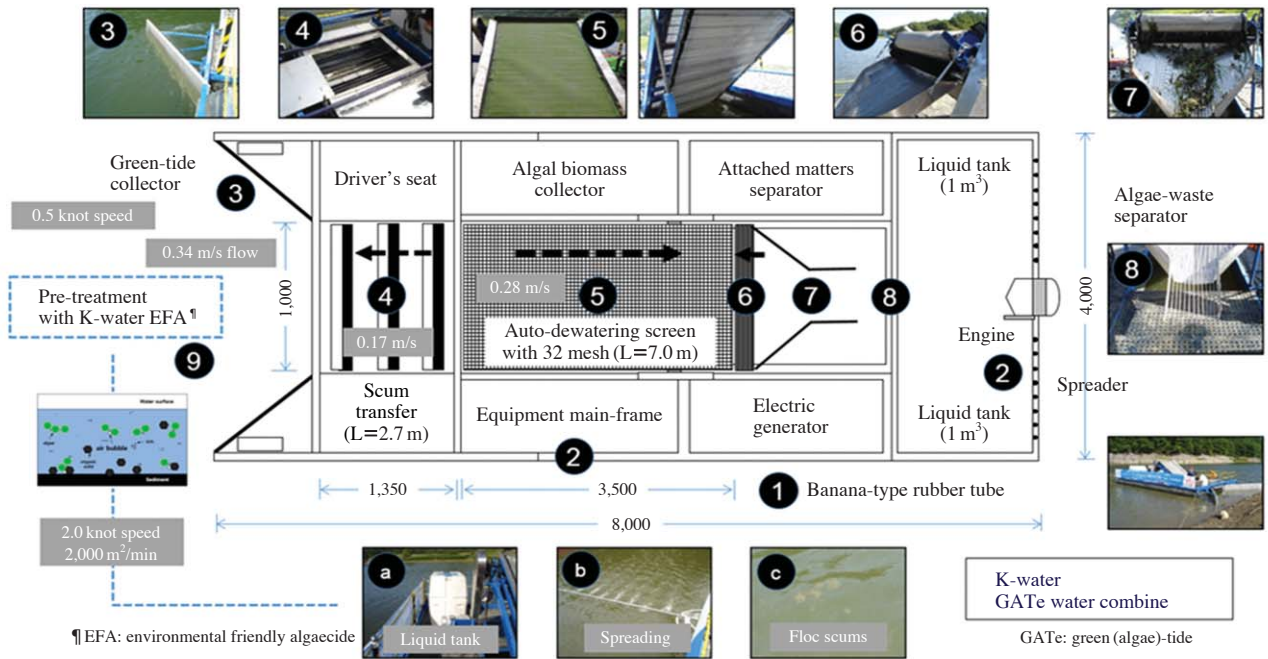


Fig. 1. Illustrative diagram for each module and auxiliary devices of the Green (algae)-tide water combine developed by K-water. ① buoyant manufactured with strong rubber, ② main frame, ③ algae thickener, ④ transfer hopper, ⑤ screen conveyor, ⑥ sludge remover, ⑦ separator of algae and waste, ⑧ algae collector, ⑨ pre-treatment applicator with environmental friendly algacide.

는 정도 설정할 수는 있으나 좀 더 구체화하기에는 복잡한 어려움이 있다. 녹조현상은 유역의 공간개념과 입체적 현상으로 볼 때, 산발적으로 발생하는 것처럼 관찰되지만 국지적으로 이동 확산되면서 나타나는 패턴을 보이게 된다(KWRC, 2007). 특히 부영양 수역에서 수문학적 영향에 밀접한 관련성을 가진다. 따라서 대하천에서는 하류로 갈수록 발달 증식하는 양상을 현저하게 보인다. 반면에 저수지의 경우, 분류는 하천과 유사하나 지류나 만곡부는 영양상태에 따라 불규칙적인 증감 변동 특성을 보이기도 한다(Shin *et al.*, 2009). 이러한 원인으로 인해 조류제어에 이동식 관리기술의 필요성이 요구되었고, 본 기술개발이 추진되었다.

개발된 녹조수상콤바인(K-water GATe Water Combine)은 처리효율 90%, 수처리량 100,000 m³ day⁻¹를 최종목표로 하였다. 기존에 유용한 기술들(USPEA, 1990; Cook *et al.*, 2005)과 함께 우리나라의 상수원과 공공수역의 녹조현상 및 사회문제로 확대된 그 파급영향을 해결하는데 다소 기여할 수 있는 신기술로서 활용되기를 기대한다.

금번에 새롭게 개발된 녹조제거장치는 각 기능별로 구분할 때, 주요 시스템을 구성하기 위한 본체와 부력재, 농축과 채집의 이송호퍼, 여과-탈수의 스크린 컨베이어,

슬러지 제거기 및 수거물질 분리대 등 총 5개 모듈로 구성되어 있다(Fig. 1). 그 외 보조기구로서 엔진, 발전기, 모터 및 수상안전대를 포함하고 있다. 또한 수체가 띠를 이루는 스크성 녹조현상 이하 수준의 상태일 때 사전 전처리를 위하여 필요시 친환경 녹조제거제를 뿌리는 살포기가 별도로 장착되어 있다. 장치 시스템의 총 무게는 1.5톤 정도이다(Table 1).

본 장치의 시스템은 조립 및 해체가 용이하도록 되어 있어 차량으로 운반하여 이동하기가 쉽다. 모듈별 조립과 해체는 각각 2시간, 1시간 정도 소요된다. 따라서 긴급한 현장 상황에 신속한 대응이 가능하다. 그리고 국산화 장치로써 점검 보수가 편리하고, 단시간에 수리 조치할 수 있다. 동절기 비작업 시에는 창고에 보관이 가능하다. 모듈별 세부기술은 다음과 같다.

(Module 1. 본체 및 부력재) 본체의 크기는 4,000 × 8,000 mm이고, 재질은 사각 강관과 강판으로 되어있다(Table 1). 이는 유동성이 있는 수상에서 작업하기 때문에 바람과 선박 운항 시 발생하는 너울 등에 의해 모듈 및 시스템 운영의 안전성과 안정성을 적극 고려한 것이다.

부력재는 지름 800 mm, 길이 9,000 mm이고, 형태는 바나나 모양이며, 재질은 경질의 특수고무로 되어있다.

부력재는 본체의 좌우측에 각각 2개로서 총 4개가 장착되었다(Fig. 1). 또한 한 개의 부력재는 4등분되어 각각의 격실로 나누어져 있고, 그 사이마다 격벽을 갖추고 있다. 그래서 수심이 얇은 곳에서나 예기치 못한 사고로 인해 부분적으로 펌프 등 흠집이 날 경우 그 곳만 에어가 빠져도 장치의 급격한 구조적 변형으로 인해 녹조 제거 작업이나 수상 안전 상에는 별 문제가 없도록 하였다.

이에 대해서는 다각적으로 현장 테스트를 수행하여 보완하였다. 주로 수중 암반과 협잡물(못)의 뾰족한 부분에 의해 야기될 수 있음을 확인하였다. 그리고 작업 전

후의 에어 충전과 배출에 걸리는 소요시간은 10~15분이다. 부력재의 탄력성에 의해 수심이 얇은 곳(약 0.2m)까지 접근하여 작업이 가능하다.

(Module 2. 1차 농축채집 및 이송) 수중에 부유 성장하면서 흩어져 있는 녹조체(colony)를 장치가 천천히 전진하면서 수표면에 1차 농축시킨 후 인위적으로 스크럼화시켜서 채집하고, 뒤쪽에 연결되어 있는 스크린으로 이송하는 호퍼이다(Fig. 1).

농축기구는 장치의 전단부에 V자 구조로 되어있고, 폭은 5,000 mm이다. 스테인레스 재질의 스크린(32 mesh)으로서 수면으로부터 20 cm 깊이의 직각구조를 하고 있다(Fig. 1). 수면으로 떠오르는 녹조 알갱이는 장치가 서서히 전진할 때 모여져서 호퍼의 중심부로 집중된다. 이때 호퍼 내 채집된 물질의 운반속도는 0.17 m s^{-1} 이고, 실제 녹조수상콤바인 장치가 이동하는 속도는 $0.2 \sim < 0.5 \text{ knot}$ 이다(Fig. 1). 또한, 호퍼는 수표면으로부터 높낮이를 조정할 수 있도록 설계 및 제작되어서 경우에 따라서 거둬들이는 양을 조절할 수 있다. 따라서 수질상태에 따라 다소 차이가 있지만, 탄력적으로 조절하여 되도록 많은 양을 한꺼번에 제거할 수 있는 특징

Table 1. Specification of K-water GATe water combine. GATe is the acronym of the greenalgae-tide.

Items	Contents	Remarks
Size (mm)	4,000 (L) × 8,000 (L) × 2,000 (H)	-
Total weight (ton)	ca.1.5	-
Engine (HP)	50	-
Speed (knot)	< 2.0	-
Efficiency (%)	> 90	Before and after
Operation area ($\text{m}^2 \text{ day}^{-1}$)	> 100,000	d=10 hrs
Treatment volume ($\text{m}^3 \text{ day}^{-1}$)	> 100,000	d=10 hrs

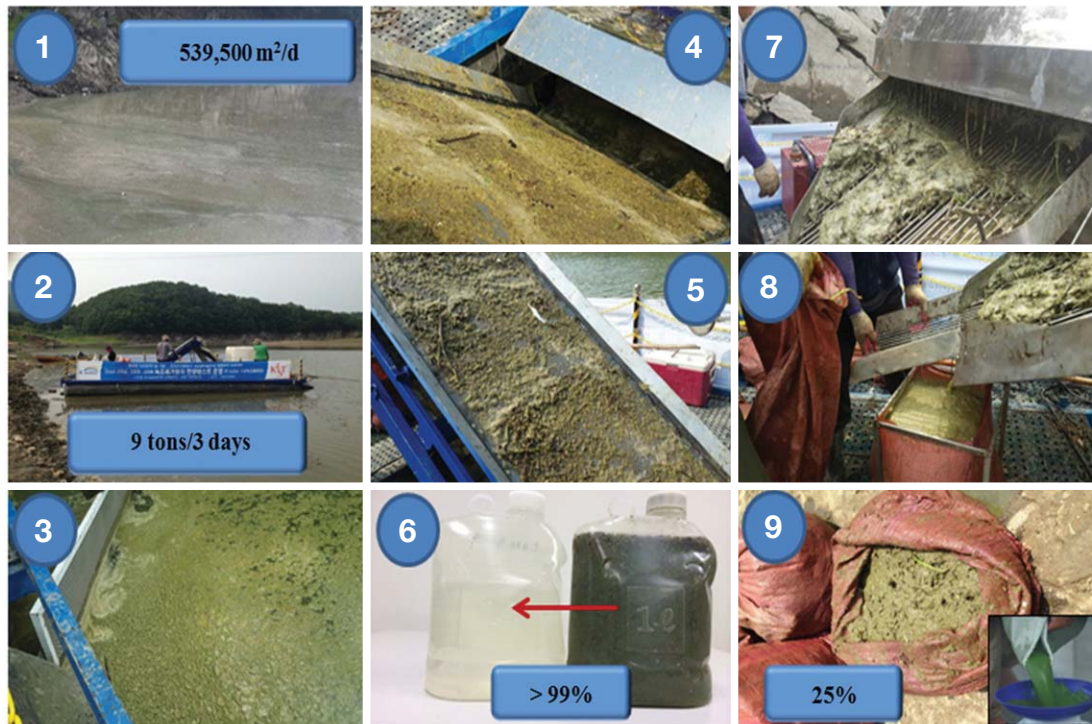


Fig. 2. Photographs showing the elimination process of algal scum from the waterbody by K-water GATe water combine at Chusori station of Sookcheon tributary located in the watershed of Daecheong Reservoir from June to July 2014. ① scum state ② GATE water combine ③ suspended algae thickener ④ transfer hopper ⑤ screen conveyer ⑥ water quality condition before (right) and after (left) application of the device ⑦ remover of attached materials ⑧ separator of algae and waste ⑨ concentrated sludge.



Fig. 3. A photograph showing the elimination of massive algal scum by K-water GATE water combine near the Ugok bridge of the Nakdong River on May 2014.

을 가지고 있다.

(Module 3. 여과 및 탈수) 여과 및 탈수는 스테인레스 재질의 스크린-컨베이어 (L=7,000 mm, W=1,200 mm) 모듈에서 이루어진다 (Fig. 1). 1차 농축되어 호퍼를 통해 이송된 녹조체는 스크린-컨베이어에 연속적으로 전달된다. 옮겨진 녹조체는 스크린 (slope 60°)에 붙어서 0.28 ms^{-1} 의 속도로 상향 이동하게 되고, 이 과정에서 탈수와 2차 농축 과정이 동시에 이루어진다 (Fig. 1).

이 때 스크린에서 물은 잘 빠지고, 녹조체는 안정적으로 부착된다. 그리고 흘러내리는 흘림현상이 없도록 하기 위하여 32 mesh를 적용하였다. 이 크기를 선정한 것은 녹조체가 더욱 성장하여 스크임을 형성할 때면 그 크기가 $500 \mu\text{m}$ 이상이 되기 때문이다 (Shin, 1998). 그 이하의 크기일 때는 녹조제거제를 적정량 사용하여 응집 후 부상시켜 제거하면 손쉽게 처리할 수 있다.

(Module 4. 브러쉬 및 스크래퍼) 스크린-컨베이어 모듈에서 여과 및 탈수 과정을 거쳐 부착된 녹조체는 강화 플라스틱 재질로 된 역세 브러쉬에 의해 제거되고 스크린으로부터 탈리된다 (Fig. 1). 이 때 브러쉬는 많은 양의 농축 부착물 (fouling)을 연속적으로 제거하기 때문에 때에 따라 막힘 (clogging) 현상이 생길 수 있다. 이를 방지하기 위하여 브러쉬를 동시에 연속적으로 긁어서 청소해 주는 스크래퍼 (scraper)의 보조기구가 장

착되어 있다 (Fig. 1).

(Module 5. 녹조체 수집 및 협잡물 분리) 자연 수역에는 녹조체 이외에 탁수물질, 나뭇가지, 병, 캔, 비닐류 등 크고 작은 다양한 협잡물이 포함되어 있다. 그래서 전 과정을 통해 제거된 녹조체는 이물질과 분리되도록 하였고, 자루 (80 kg)에 따로따로 담기게 하였다. 이후 고품질 수준으로 탈수하기 위해 1~3시간 정도 정치가 필요하며, 최종적으로 80 kg 자루에 담긴 양의 25~30%가 남게 된다 (Fig. 2 참조). 이렇게 탈수 처리된 고품질은 퇴비화를 통해 선순환 자연자원으로 활용할 수 있고, 부가적인 비용이 소요되지 않는 장점이 있다.

녹조, 부착조류, 수생식물 등은 수중에서 과잉 번성할 경우 그 후속으로 각종 악영향을 야기할 수 있다. ‘녹조 수상콤바인’ 기술개발은 전술한 바와 같이 고농도의 스크임성 녹조현상을 제어하기 위하여 추진되었다. 그러나 현장에서 직접 시험 운영하는 과정을 통해 녹조와 관련하여 수질과 수생태계에서 일어나는 다양한 문제점을 발견하게 되었고, 즉각적으로 신속하게 해결할 수 있는 잠재력을 가지게 되었다 (Fig. 3). 따라서 장치의 운영기간이 기존에 계획하였던 6월~9월 (4개월)에서 수정된 3월~11월 (9개월)기간으로 확대될 수 있었다.

2014년 5월부터 7월까지 낙동강과 대청호의 현장에서 테스트한 결과, 1일 처리할 수 있는 수표면적은

500,000 m² day⁻¹에 해당하였다. 그리고 장치 적용 전후 처리효율 (Chlorophyll-*a* 농도 기준 7,593 mg m⁻³ vs. 17 mg m⁻³)은 90%를 상회하였고, 수처리량은 수질 상태에 따라 그 차이가 크지만 500,000 m³ day⁻¹은 가능하였다 (Fig. 2 참조). 또한 여름철 녹조현상이 본격화되기 전에 강우와 수온의 점진적 증가에 의해 상류하천의 하상에서 자갈 (epilithic algae)과 흙 표면 (epipellic algae)에 붙어있던 부착조류가 탈리된 후 부유성 스크م 조각형태를 이루게 된다. 상류하천 또는 지류로부터 지속적으로 떠 내려오는 부착조류 스크م까지 실시간 제거할 경우 최소한 1~3 m³ day⁻¹범위로 처리할 수 있었다.

끝으로, 본 기술을 통하여 과학적 측면에서 녹조관리 관련 원천기술 확보와 국가 및 사회적 측면에서 녹조문제를 완화시키는 사전예방 및 사후처리 도구로 이용할 수 있을 뿐만 아니라 환경적 측면에서 총체적 수질개선과 저탄소 정책 실천 등의 다양한 효과가 기대된다. 녹조수상콤바인의 연구용 장치(시제품)를 제작하여 현장 테스트한 결과 현재 상태로도 녹조방제에 사용하기에 별 무리가 없지만, 앞으로 보다 세련된 외형적 형태, 재질 경량화 및 운영 효율성 향상 등 기술적 고도화의 필요성도 제기된다.

적 요

본 연구노트는 K-water가 고안하여 개발한 녹조수상콤바인 장치에 대하여 소개하고자 하였다. 녹조제거장치는 본체와 부력재, 이송호퍼, 스크린 컨베이어, 슬러지 제거기 및 수거물질 분리대 등 총 5개 모듈로 구성되어 있다. 그리고 스크م성 녹조현상 이하일 때 녹조제거제를 전처리할 수 있는 살포기가 별도로 장착되어 있다. 전반적으로 본 장치의 모듈 시스템은 매우 간단하다. 2014년 5월부터 7월까지 낙동강 및 대청호 현장에서 테스트 운영한 결과, 1일 처리할 수 있는 수표면적은 500,000 m² day⁻¹에 해당하였다. 그리고 장치 적용 전후 처리효율은 90%를 상회하였고, 수처리량은 수질 상태에 따라 차이가 있지만 500,000 m³ day⁻¹은 가능하였다. 또한 장

치의 운영기간은 3월~11월(9개월) 동안으로써 기존 계획보다 연장될 수 있었다. 본 장치 및 기술을 통해 상수원과 공공수역의 녹조현상 및 사회문제로 확대된 과급 영향을 해결하는 데 기여할 수 있는 신기술로서 활용되기를 기대한다.

사 사

본 연구개발은 한국수자원공사 K-water연구원의 자체과제 ('12.1~'14.3) 및 한국과학기술연구원 KIST-ORP의 '통합형 녹조관리기술개발' ('14.4~'16.3) 연구비 지원(과제번호 2E24560-14-P021)에 의해 수행되었습니다. 그리고 세심하게 논문을 심사해 주신 위원들께 감사드립니다.

REFERENCES

- Cooke, G.D., E.B. Welch, S.A. Peterson and S.A. Nichols. 2005. Restoration and Management of Lakes and Reservoirs. 3rd Edition. CRC Press Taylor & Francis Group, USA.
- Environmental Protection Agency (USEPA). 1990. The Lake and Reservoir Restoration Guidance Manual. 2nd Edition. EPA-440/4-90-006. Washington, USA. 326p.
- Kalff, J. 2002. Limnology: Inland Water Ecosystems. Prentice-Hall, Inc., New Jersey, USA. 592p.
- Korea Water Resources Corporation (KWRC). 2007. A Study on the Development Mechanisms and Reduction Technology of Water-Bloom in the River-Reservoir System. Interim Report No. KIWE-WERC-2007-03. Daejeon, Korea. 101p.
- Shin, J.K. 1998. Eutrophication and Ecological Characteristics of Algal Population in the Freshwater Zone of the Nakdong River, Korea. Ph.D. Thesis, Inje University. 202p.
- Shin, J.K., H.S. Yi, S.A. Jeong and S.J. Hwang. 2009. Construction of environmental friendly special-purpose ship for the removal of blue-green algae. *Korean Journal of Limnological Society* 42(3): 404-406.
- Wetzel, R.G. 2001. Limnology: Lake and River Ecosystems. 3rd Edition. Academic Press, California, USA. 1006p.