회전브러쉬와 혼탁방지막을 활용한 수륙양용형 Scrub/흡입 준설장치의 개발과 현장적용

Development and Field Application of an Amphibious Scrubbing/Suction Dredging Machine with Cylindrical Rotating Brush and Turbidity Barrier

주진철[†] · 김원태* · 김현승* · 김현설* · 송호면**

Jin Chul Joo[†] · Wontae Kim* · Hyunseung Kim* · Hyunseol Kim* · Ho Myun Song**

한밭대학교 건설환경공학과 · *(주)원준설 · **한국건설기술연구원 환경플랜트연구소

Hanbat National University, Civil & Environmental Engineering

*One dredging Co. · **Korea Institute of Civil Engineering & Building Technology

(Received August 10, 2017; Revised August 18, 2017; Accepted August 25, 2017)

Abstract : An amphibious scrubbing/suction dredging machine with cylindrical rotating brush, housing, and turbidity barrier was newly-developed to remove both sediments with about 10 cm thickness and periphyton attached on various structures in urban water-circulating systems through the scrubbing, suction, and dredging processes. Based on the field application and long-term monitoring, the increase in both suspended solids (SS) and turbidity of water during the scrubbing, suction, and dredging processes was negligible ($p>0.05$). In some cases, the turbidity of water initially increased, however, the turbidity was stabilized within 20 minutes from the start of dredging processes. The concentration changes in TN and TP of water were not statistically different ($p>0.05$) before and after the scrubbing, suction, and dredging processes, indicating that benthic nutrients released from sediments were not significantly diffused, and were not supposed to cause significant water pollution. Also, water treatment facilities along with an amphibious scrubbing/suction dredging machine could be more effective since the removal of contaminant loadings through the scrubbing, suction, and dredging processes was much greater than that through simple coagulation/precipitation processes. Finally, GPS-based realtime tracking and operation program have been developed and applied in various urban water-circulating systems, and development of driver cooperative autonomous driving system is in progress to eliminate the need for manual driving of an amphibious scrubbing/suction dredging machine.

Key Words : Urban Water-Circulating System, Suspended Solids, Turbidity, Sediments, Nutrients, Cylindrical Rotating Brush, Driver Cooperative Autonomous Driving System, Amphibious Scrubbing/Dredging Machine

요약 : 도시물순환시스템 내 10 cm 내외로 퇴적된 오염물질과 자갈이나 다양한 구조물에 부착된 부착조류와 협잡물을 쓸어 내어(scrubbing) 제거가 가능하며, 오염물질이 주변으로 방출·확산되어 수체의 2차 오염을 방지할 수 있는 덮개(housing)와 혼탁 방지막(turbidity barrier)이 설치된 회전 브러쉬(rotating brush)를 활용한 저혼탁 scrub/흡입(suction)방식의 수륙양용형 퇴적토 준설장치를 개발하였다. 현장적용 검증을 통해, 저수위와 고수위에서 저혼탁 scrub/흡입 준설장치를 이용해 준설 중 수체 내 부유물질(SS)과 탁도(turbidity)의 증가는 매우 미미하며($p>0.05$), 일부 부유물질로 인해 발생한 탁도도 준설 후 20분 이내에 빠르게 안정화되는 것으로 조사되었다. 총질소(TN)와 총인(TP)의 농도도 준설 전, 준설 중과 준설 후에 농도 변화가 시간대별 및 수심별로 통계학적으로 유의한 의미는 없는 것으로 조사되어($p>0.05$), scrub/흡입 준설을 통해 호수 저면에 축적된 영양염류가 확산되어 수체오염을 유발하지 않는 것으로 조사되었다. 또한, 저혼탁 scrub/흡입 준설장치의 직접 준설을 통한 오염물질 제거량이 수처리시설의 운영을 통한 오염물질 제거량 대비 높은 것으로 산정되어, 수처리시설과 저혼탁 scrub/흡입 준설의 연계 적용이 도시물순환시스템의 수질관리에 효율적인 것으로 평가되었다. 최근에는 GPS 기반 실시간 scrub/흡입 준설장치의 추적 및 유지관리 프로그램을 개발해 등록하고 다양한 도시물순환시스템에 현장 적용하였으며, 추가적으로 준설장치 운전자를 보조 또는 제한된 환경에서 스스로 운전하는 협력형 주행시스템(driver cooperative autonomous driving system)의 개발을 현재 진행 중이다.

주제어 : 도시물순환시스템, 부유물질, 탁도, 퇴적물, 영양염류, 회전 브러쉬, 협력형 주행 시스템, 수륙양용형 scrub/흡입 준설 장치

1. 서론

구도심의 재생 또는 신도시를 개발 시 도시 어메니티(amenity) 증진을 위해 인공호수, 저류지, 실개천 등이 연계된 도시물순환시스템(urban water-circulating system or blue network)은 저탄소 친수·녹지공간으로서 시민의 휴식 및 문화 공간, 도심열섬현상(urban heat island) 완화, 재해방지, 생물서식공간(biotope) 제공 등의 기본적인 기능 이외에도

탄소배출 감소, 우수 저류공간 확보, 지하수위 유지, 비상용수 확보, 대기오염물질의 집진 제거, 습지보전 및 생물종 다양성 확보 등의 부가적인 기능을 수행할 수 있기 때문에 1990년대 이후 도시물순환시스템의 보급이 널리 확산되고 있다.¹⁻⁴⁾

그러나, 일부 도시물순환시스템은 계획·설계 당시 수질 및 수생태계 보전에 대한 구체적인 검토 없이 시공됨으로써 오·폐수 등의 점오염원 유입, 강우에 의한 유역 내 비점

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

오염원 유입, 대기 중의 분진 및 오염물질 유입, 퇴적으로부터의 오염물질 용출 등으로 인해 시민에게 안전하고 생태적으로 건전한 양질의 수질 확보가 어려운 실정이다.¹⁻⁴⁾ 비록 수처리시설(water treatment facilities)이 설치되어 있어도 체계적으로 운영되지 않거나 유지관리가 미흡하여 상당수의 도시물순환시스템은 조류(algae)의 과도한 성장으로 인한 녹조현상(green tide)과 부착조류(periphyton)의 지속적 발생 및 탈리로 인해 수체 내 투명도의 저하 및 착색, 악취 등으로 심미적 불쾌감을 유발할 정도의 심각한 부영양화(eutrophication) 상태에 이르게 되어 지속적으로 민원이 발생하는 것으로 보고되고 있다.¹⁻⁸⁾

대부분의 도시물순환시스템이 준폐쇄성 공간이라는 구조적 특성 때문에 일단 오염원이 유입되면 축적되어 부유성/부착성 조류의 과도한 성장을 유발하며, 자연형 하천에 비해 유속이 매우 낮은 정체수역(stagnant zone)이므로 자체정화 능력이 없는 것으로 보고되고 있다.¹⁻⁶⁾ 또한, 도심에 위치한 특성으로 대기분진의 강하, 수목 잔재물 및 낙엽의 지속적 퇴적, 이용 시민들에 의한 음식물 및 쓰레기 투기 등의 다양한 오염원이 지속적으로 유입되고 있다. 따라서, 부유성/부착성 조류 및 수생 동식물의 사체, 토사, 수목 잔재물 및 낙엽 등의 오염물질이 연간 10~20 cm 내외로 퇴적되는 것으로 조사되어 수질악화 및 주민 민원의 주요 원인이 되어 오염물질의 주기적인 준설(dredging)이 요구된다.

국내에는 하천, 호수, 연안의 오염퇴적물을 준설하여 처리하기 위해 다양한 기술들이 개발되어 수년간 4대강 준설, 농업용 저수지 준설, 마산항, 인천항 등의 연안준설 등에 사용되어왔다. 하지만 이러한 기술들은 대부분 커터(cutter), 스크류(screw), 버킷(bucket), 흡입(suction) 등의 장치를 운용하여 장기간 오랫동안 압밀되어 두텁게 쌓여있는 퇴적물을 파쇄하여 흡입하기에 적합하도록 개발되어 있는 것으로 조사되었다.⁹⁾ 따라서 신도시 및 도시 재생사업 시 구축된 평균 수심 1.0 m 내외 폐쇄형 인공호수, 수로 등에 얇게 형성된 퇴적토와 부착조류 및 협잡물을 준설하기에는 제원과 방식이 부적합하며, 도시물순환시스템의 폐쇄형 인공호수, 수로 등은 차수막(geomembrane) 위에 인위적으로 자갈과 모래 등을 투입하여 조성된 얇은 층으로 이는 대형 준설선을 활용한 준설 시에 저면이 손상되어 차수막과 지지층을 파손시킬 우려가 있다. 따라서, 평균 수심 1.0 m 내외의 도시물순환시스템의 퇴적물과 잔재물을 주기적으로 수거하고, 바닥에 포설된 자갈과 모래 등에 부착된 부착조류의 효율적 제거가 가능하며, 준설 시 오염물질이 주변으로 방출·확산되어 오염물질의 부유로 인한 혼탁 및 2차 오염을 방지할 수 있는 컴팩트형 저혼탁(low turbidity) 준설공법이 요구된다.

따라서 본 연구에서는 평균 수심 1.0 m 내외의 도시물순환시스템 내 10 cm 내외로 얇게 퇴적된 오염물질, 또는 자갈 속이나 바위 등의 부착조류와 협잡물을 쓸어내어(scrubbing) 제거가 가능하며, 준설 시 오염물질이 주변으로 방출·확산되어 수질의 혼탁 및 2차 오염을 방지할 수 있는

뒷개(housing)와 혼탁 방지막(turbidity barrier)이 설치된 회전 브러쉬(rotating brush)를 활용한 저혼탁 scrub/흡입(suction) 방식의 퇴적토 준설장치(dredging machine)의 원리와 개발 과정 및 GPS 기반 유지관리방안에 대해서 구체적으로 기술하고자 한다. 또한, 도시물순환시스템 내 회전브러쉬를 활용한 수륙양용형 저혼탁 scrub/흡입방식의 퇴적토 준설 공법을 현장 적용하여, G시의 호수공원에서 (1) 준설 시 오염물질의 확산 방지 효과, (2) 오염물질의 제거 효율 등을 평가하였다.

2. 원리와 개발과정

본 연구에서 개발된 회전브러쉬를 활용한 저혼탁 scrub/흡입 준설장치는 도시물순환시스템에 얇게 퇴적된 오염물질과 부착조류를 수질의 혼탁 및 2차 오염 없이 제거하기 위해서 핵심기술인 밀착해서 쓸어내는 기능의 브러쉬(scrubbing brush), 브러쉬 뒷개(brush housing), 뒷개 주위의 혼탁방지막(turbidity barrier), 배사 펌프(dredging pump), 브러쉬 회전수와 펌프 유압이 조절 가능한 제어부(control panel)와 무한궤도가 장착된 이동장치(moving apparatus)를 연계해서 개발하였다. 위의 핵심기술의 조합을 통해 도시물순환시스템의 현장조건에 따라 다양한 조합 및 적용이 가능하도록 설계 및 제작하였다.

Table 1에는 회전브러쉬를 활용한 저혼탁 scrub/흡입 준설장치의 핵심기술과 원리에 대해서 요약하였다. 본 기술은 폴리에틸렌(polyethylene) 재질의 브러쉬를 특수돌기의 원통형으로 제작, 브러쉬를 저면에 밀착 회전시켜 저면바닥의 손상을 최소화하고, 자갈 및 조대물질 등의 변형없이 경사면에서도 쓸어내며 퇴적물의 scrub/흡입 준설이 가능한 기술이다. 또한, 원통형 회전 브러쉬와 브러쉬 회전모터를 반원형 저면에 밀착된 브러쉬 뒷개 내부에 설치하여 브러쉬 회전 시 오염물질이 주변으로 방출·확산되는 2차 오염을 방지할 수 있으며, 브러쉬가 회전 시 자갈 또는 기타 물질이 펌프로 유입되지 않도록 보호 차단망(protection screen)을 설치하였다. 이외에 브러쉬를 회전시켜 퇴적물을 흡입 준설하는 부분과 유압펌프와 속도를 조절할 수 있는 부유형 운전 부위(driver's compartment)가 수위에 대응(water-level response)해 분리가 되어 다양한 수심에 적용이 가능하며, 무한궤도를 갖추고 유압펌프와 모터가 장착된 이동장치(moving apparatus)를 활용해 수심 0.5 m~7 m까지 적용 가능하다. 또한, 수변 구조물로 인해 준설선이 진입이 불가능한 협소하고 복잡한 수역도 진입을 가능하게 하는 수륙 양용형 준설장치(amphibious dredging machine)에 해당한다.

Fig. 1은 Table 1에 기술한 핵심기술을 조합하여 제작된 회전브러쉬와 혼탁방지막을 활용한 저혼탁 scrub/흡입 준설장치의 전경 사진이다. 본 준설장치를 활용해 도시물순환시스템의 저면에 축적된 퇴적물과 부착조류의 효율적 준설을 위해 흡입펌프 위치, 브러쉬 하우징 공동 발생 예방을 최

Table 1. Key components of the amphibious scrubbing/suction dredging machine with cylindrical rotating brush and turbidity barrier

	Cylindrical rotating brush	Brush housing	Turbidity barrier
Pictorial view
Specifications	<ul style="list-style-type: none"> Cylindrical rotating polyethylene brush Scrub sediments, periphyton, plants etc 	<ul style="list-style-type: none"> Anti-corrosion steel brush housing Cover the brush & prevent the diffusion of contaminants 	<ul style="list-style-type: none"> Anti-corrosion steel suction casing Cover the brushing area & dredge sediments, periphyton, plants etc.
	Water-level response operating system	Light-weight crawler	Amphibious machine
Pictorial view
Specifications	<ul style="list-style-type: none"> Water-level response driver's compartment Dash board with hydraulic pressure, fuel level, chronometer & engine RPM 	<ul style="list-style-type: none"> Light-weight crawler Distribute the weight, and minimize the ground pressure 	<ul style="list-style-type: none"> Amphibious scrubbing/suction dredging machine Move, scrub, suction and dredge in complex environments

(a) Pictorial view of an amphibious scrubbing/suction dredging machine

(b) Field application with both low (≥ 0.5 m) and high (≤ 7.0 m) water levels

Fig. 1. The amphibious scrubbing/suction dredging machine applied in both low and high water levels.

소화하여 기술개발을 진행하였다. 또한, 혼탁방지막을 설치하여 오염물질의 방출·확산을 억제하여 수질의 2차 오염을 억제하고, 호소수 대비 퇴적물의 흡입효율을 증대시켜 펌프

의 효율저하를 방지하였다.

Table 2는 제작된 회전브러쉬를 활용한 저혼탁 scrub/흡입 준설장치의 주요 제원과 작업효율을 나타낸다. 수질관리

Table 2. Technical specifications of the amphibious scrubbing/suction dredging machine and components

Properties	Values
Amphibious scrubbing/suction dredging machine	
Length (m)	2.4
Width (m)	1.9
Height (m)	2.5
Weight (kg)	2,400
Working efficiency	
Working depth (m)	0.3 ~ 7.0
Working width (m)	1.0 ~ 2.0
Working speed (m/min)	0.5 ~ 1.5
Brush	
Material	Polyethylene
Size (mm)	$\phi 1000 \times 1800$
Motor	20 hp $\times$ 600 rpm $\times$ 1
Engine	125 hp $\times$ 2000 rpm $\times$ 1
Propulsion	Propeller & tire wheel drive
Dredging pump	
Capacity (m ³ /min)	12
Intake	$\phi 100$ mm $\times$ 1
Output	$\phi 100$ mm $\times$ 1

가 필요한 현장으로 준설장치를 분리 또는 조립하여 운반 후 다양한 수위에서 scrub/흡입/준설을 통해 퇴적물을 배출하며, 최종 준설토를 침전시킨 후 상등액은 다시 도시물순환시스템으로 유입 또는 방류하고, 침전 준설토는 탈수 및 건조 후 녹화토로 재이용하였다.

본 연구에서 개발한 회전브러쉬를 활용한 저혼탁 scrub/흡입 준설장치를 적용하여 수질 및 수생태계 관리를 적용하는 곳은 G시 호수공원, I시 센트럴 파크, 주운수로, S시 중앙호수공원, A시 호수 등이 있으며(Fig. 2), 현장 적용을 통해 호수저면 차수층의 손상 없이 저면에 얇게 퇴적된 오염물을 효율적으로 끌어내어(scrub) 제거할 수 있었다. 또한, 일반적인 도시물순환시스템의 평균 수심인 1.0 m 내의 이하의 0.5 m의 저수심과 7.0 m의 고수심에서도 지지대를 중심으로 퇴적물을 scrub/흡입/준설하는 부분과 부유형 운전 부위가 분리되어 수위에 무관하게 저면 퇴적물의 저혼탁 scrub/흡입 준설을 효율적으로 실시하였다. 또한, 본 준설 공법은 궤도를 이용해 수륙양용(amphibious)으로 적용이 가능하며, 회전브러쉬가 경사진 저면, 구조물이 있는 복잡한 수역 및 수생식물이 서식하는 지역에서도 효과적으로 scrub/흡입 준설을 실시할 수 있었다.

Fig. 2. Various field applications of the amphibious scrubbing/suction dredging machine.

Small man-made ponds	S city museum pond	I city Michuhall pond
Large natural lakes	A city lake	A city lake

Fig. 2. Continued

3. 평가 내용 및 방법

본 연구에서 개발된 회전브러쉬를 활용한 저혼탁 scrub/흡입 준설장치를 G시 호수공원에 적용하여 (1) 준설 시 오염물질 확산 방지 효율, (2) 직접 준설제거량 산정 및 수처리시설 대비 제거효율 등을 평가하였다. 현장검증 장소는 일반적인 도시물순환시스템의 평균 수심인 1.0 m 내외의 저수위 지점과 G시 호수공원에서 가장 깊은 수심인 3.0 m 내외의 고수위 지점으로 구분하여, 저혼탁 scrub/흡입 준설 장치의 반경 50 cm 이내 되는 지점의 수심별 수질변화를 준설 전($t=0$ 분), 준설 중($t=10$ 분), 준설 후($t=20, 30, 40, 50, 60$ 분) 10분 단위로 60분까지 모니터링 하였다. 저수위와 고수위의 각 수심 프로파일(저수위: 5, 10, 25, 50, 75, 100 cm, 고수위: 5, 30, 50, 100, 150, 300 cm)의 6 지점에서 SS (suspended solids), 탁도(turbidity), 총질소(total nitrogen, TN), 총인(total phosphorous, TP)을 2014년 7월과 10월에 각각 측정하였다.

수질의 측정 및 분석은 공정시험법에 의거해 수질검사 대행 전문기관에 의뢰해 분석을 실시하였으며, 현장에서 수평형 반동채수기와 2 L 무균 채수병을 이용해 채수하여 실험실로 신속히 운반 후 SS는 유리섬유 거름종이법, 탁도는 탁도계, TN은 자외선 흡광광도법, TP는 아스코르빈산 환원법으로 분석하였다. 분석된 수질자료의 통계분석은 ‘동일 시간에 각 수질인자의 수심 프로파일별 값이 통계학적 유의한 수준($\alpha=0.05$)에서 서로 다르지 않다’인 귀무가설($H_{0,1}: \mu_{\text{depth},1} = \mu_{\text{depth},2} = \mu_{\text{depth},3} \dots \mu_{\text{depth},6}$)과 ‘동일 수심에서 각 수질인자의 준설 전, 준설 중, 준설 후의 값이 통계학적 유의한 수준($\alpha=0.05$)에서 서로 다르지 않다’인 귀무가설($H_{0,2}: \mu_{\text{time},0} = \mu_{\text{time},10} = \mu_{\text{time},20} \dots \mu_{\text{time},60}$) 설정 후, 통계프로그램

SPSS (ver. 22.0)을 이용하여 ANOVA 분석을 실시하였다. ANOVA 분석 결과에 따라 수심별 또는 준설 전과 후의 통계학적 차이가 발생한 경우, Scheff 검정법을 이용하여 사후검정을 실시하였다.

4. 결 과

4.1. 저혼탁 scrub 흡입 통한 준설 시 오염물질 확산 평가

4.1.1. 저수위 수질분석결과

호수 내 저수위에 해당되는 지점의 준설 전, 준설 중, 준설 후의 전경과 수질변화는 Fig. 3과 4에 각각 제시하였다 (7월 자료만 제시함). 수질모니터링 결과, 저수위에서 준설에 따른 오염물질 확산에 따른 수질변화는 동일 수심에서 준설 전, 준설 중, 그리고 준설 후 60분 동안 미미하며($p>0.05$), 동일 시간에 수심별 수질변화도 통계학적으로 유의한 의미는 없는 것($p>0.05$)으로 조사되었다. 따라서 저수위에서 저혼탁 scrub/흡입 준설장치를 이용해 준설 중 부유물질과 탁도의 증가는 미미한 것으로 판단된다. 호수 내 조류과다성장의 주요 원인물질인 영양염류 중 총질소와 총인의 농도도 동일 수심에서 준설 전, 준설 중 그리고 준설 후에 농도 변화가 통계학적으로 유의한 의미는 없는 것으로 조사되고($p>0.05$), 동일 시간에 수심별 농도의 차이도 통계학적으로 유의한 의미는 없는 것($p>0.05$)으로 조사되어, 호수 저면에 축적된 영양염류가 준설 중 확산되거나 수체오염을 유발하는 효과는 미미한 것으로 조사되었다. 결론적으로, 저수위에서 저혼탁 scrub/흡입 준설장치를 활용해 부착된 조류와 퇴적물을 수체로부터 준설 시 2차 오염을 유발하지 않고 효율적으로 제거할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 3. Applications of the amphibious scrubbing/suction dredging machine at low water level of G city lake park (≤ 1.0 m).

Fig. 4. Concentration changes in suspended solids (SS), turbidity, total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) after scrubbing/suction/dredging processes at low water level of G city lake park (≤ 1.0 m).

4.1.2. 고수위 수질분석결과

저혼탁 scrub/흡입 준설장치를 이용해 고수위에 해당하는 지점도 저수위와 동일한 방법으로 수질 측정(Fig. 5)과 통계 분석을 실시하였다(7월 자료만 제시함). 고수위에 해당되는 호수 내 준설지점에서 준설전, 준설 중 그리고 준설 후의 수심별 수질변화는 Fig. 6에 제시하였으며, 저수위의 실험 결과와 유사하게 동일 수심에서 준설 전, 준설 중, 그리고 준설 후 60분 동안 수질변화는 미미하며($p>0.05$), 동일 시간에 수심별 농도 차이도 통계학적으로 유의한 의미는 없

는 것($p>0.05$)으로 조사되었다. 또한, 준설 중 부유물질로 인해 발생한 탁도도 준설 후 20분 이내에 빠르게 안정화되는 것으로 Fig. 6에 제시되었다.

영양염류(총질소, 총인)의 수중 농도도 동일 수심에서 준설 전, 준설 중 그리고 준설 후에 농도 변화가 통계학적으로 유의한 의미는 없는 것으로 조사되고($p>0.05$), 동일 시간에 수심별 농도의 차이도 통계학적으로 유의한 의미는 없는 것($p>0.05$)으로 조사되었다. 따라서 고수위에서도 호수 저면에 축적된 영양염류가 준설 중 확산되거나 수체

Fig. 5. Applications of the amphibious scrubbing/suction dredging machine at high water level of G city lake park (≥ 3.0 m).

Fig. 6. Concentration changes in suspended solids (SS), turbidity, total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) after scrubbing/suction dredging processes at high water level of G city lake park (≥ 3.0 m).

의 오염을 유발하는 부정적인 영향은 크게 고려할 필요가 없는 것으로 조사되었다. 7월과 10월에 저수위와 고수위의 수질측정 및 통계분석 결과, 저혼탁 scrub/흡입 준설장치는 수심에 무관하게 도시물순환시스템 내 10 cm 내외로 얇게 부착된 조류와 퇴적물을 호수 저면으로부터 오염물질의 방출·확산에 대한 염려없이 효과적으로 제거할 수

있음을 확인할 수 있었다.

4.2. 저혼탁 scrub/흡입 준설을 통한 오염물질 제거량 산정

저혼탁 scrub/흡입 준설장치의 준설에 따른 저면의 오염물질 제거효율은 퇴적된 저면을 준설을 통해 흡입 후 배출

Table 3. Comparison of removed contaminant amounts between the amphibious scrubbing/suction dredging machine and the water treatment facilities with coagulation and dissolved air flotation applied in G city lake park during 2014

Removed contaminant amounts (kg)		Suspended solids (SS)	Total phosphorous (T-P)	Note
Amphibious scrubbing/suction dredging machine	Sum	84,565	34.67	Treated area
	July	56,043	20.65	22,980 m ²
	November	28,522	14.02	20,120 m ²
Water treatment facilities with coagulation and dissolved air flotation	Sum	365	3.93	Treated amount
	July	248	2.41	12,050 m ³
	November	117	1.52	7,800 m ³

시에 배출수의 SS와 TP의 농도(C)를 측정하여 배출유량(Q)을 고려해 오염물질 제거량(removed contaminant amounts)을 산정하였다. 또한, 다양한 도시물순환시스템의 준설 전 수질 농도를 현장에서 측정하여 준설을 통해 흡입 후 배출되는 배출수의 농도에서 보정하여 산정을 통해 단위면적 당 오염물질 제거량(kg/m²)을 산정하였다.

산정결과 Table 3에 정리되었으며, 타 준설공법 대비 고형물/액체(solid/liquid)의 비(ratio)가 높아 비교적 고농도의 준설수를 배출하여 수체로부터 오염물질인 SS, TP의 제거를 효과적으로 할 수 있음을 알 수 있다. 특별히 G시 호수공원은 수질관리를 위해 유입수 및 호수 내 순환수에 PACs (poly aluminum chlorides)을 응집제로 주입하여 침전 및 가압부상을 통해 4,000 m³/d의 수처리시설을 간헐적으로 운영하고 있다. 따라서 7월과 11월의 수처리시설의 응집/침전/

(a) Graphical user interface and contents of GPS-based management program applied to G city lake park

(b) Graphical user interface and contents of GPS-based management program applied to S city lake park

Fig. 7. GPS-based management program of the amphibious scrubbing/suction dredging machine for various urban water-circulating (blue-network) systems.

가압부상을 통한 오염물질 제거량 대비 저혼탁 scrub/흡입 공정을 통한 준설 오염물질 제거량을 비교한 결과, 저혼탁 scrub/흡입을 통한 직접 준설 오염물질 제거량이 수처리시설의 운영을 통한 응집/침전/가압부상의 오염물질 제거량 대비, SS의 경우 232배, TP의 경우 8.8배 이상의 우수한 오염물질 제거율인 것으로 산정되었다. 이를 통해, 수처리시설의 단독 적용 보다는 수처리시설과 저혼탁 scrub/흡입 준설의 혼합 및 연계 적용 시 도시물순환시스템 내 오염물의 효과적 제거가 가능하고, 부유성 및 부착성 조류의 과다성장을 예방할 수 있으며, 도시물순환시스템 내 수질관리 비용을 크게 절감시킬 수 있다고 판단된다.

4.3. GPS 기반 저혼탁 scrub/흡입 준설 운영 및 유지관리 프로그램 개발

도시물순환시스템 내 준설현황과 준설이력 등의 조회와 유지관리를 위한 GPS (global positioning system) 기반 실시간 저혼탁 scrub/흡입 준설장치 추적 및 유지관리 프로그램을 개발하였다. 준설장치에 부착된 오차범위 50 cm 이내의 GPS 센서를 활용해 주변 환경과 도시물순환시스템 내 구조물을 인식하고, 준설장치의 위치를 실시간으로 추적이 가능하다. Fig. 7에 제시된 것처럼 도시물순환시스템의 크기와 특징별 도시물순환시스템의 지도(map) 위에 그리드(grid)를 구축하고 준설장치의 실시간 위치 및 진행속도, 준설펌프 및 엔진 등의 운전조건, 준설물량, 현재 또는 과거의 작업이력, 운전자 정보, 기상 조건 등의 실시간 조회가 가능하며, 도시물순환시스템 관리자의 편의를 위해 구간별 작업이력 조회, 기간별 총 준설물량과 준설구역과 비준설구역의 차별화된 그리드 색깔을 통해 작업내역과 운전조건을 쉽게 확인이 가능하다. 현재는 자율주행형 무인기반 준설장치의 개발을 위해 우선 원격조정(remote control)을 통한 준설장치의 조향과 속도 및 준설펌프 제어가 가능한 원격제어시스템을 개발 중이며, 향후 상황인식(context awareness) 및 판단(decision-making)을 통해 준설장치의 운전자를 보조하거나 제한된 환경에서 스스로 운전하는 협력형 주행 시스템(driver cooperative autonomous driving system)을 개발할 예정이다.

5. 결론 및 고찰

대부분의 도시물순환시스템이 준폐쇄성 공간으로 다양한 오염원의 지속적 유입과 축적으로 인해 부유성/부착성 조류의 과다한 성장을 유발하며, 자연형 하천 대비 유속이 매우 낮은 정체수역으로 조류 및 수생 동식물의 사체, 토사, 수목 잔재물 및 낙엽 등의 오염물질이 연간 10~20 cm 내외로 퇴적되어 오염물질의 주기적인 준설이 요구된다. 본 연구에서는 도시물순환시스템 내 10 cm 내외로 얇게 퇴적된 오염물질, 또는 자갈이나 다양한 구조물에 부착된 부착조

류와 협합물을 쓸어내어(scrubbing) 제거가 가능하며, 준설 시 오염물질이 주변으로 방출·확산되어 수질 혼탁 및 2차 오염을 방지할 수 있는 틈개와 혼탁 방지막이 설치된 회전브러쉬를 활용한 수륙양용형 scrub/흡입방식의 퇴적토 준설장치를 개발하였다.

저수위와 고수위에서 저혼탁 scrub/흡입 준설장치를 이용해 준설 중 부유물질(SS)과 탁도(turbidity)의 증가는 매우 미미하며($p>0.05$), 일부 부유물질로 인해 발생한 탁도도 준설 후 20분 이내에 빠르게 안정화되는 것으로 조사되었다. 또한, 호수 내 조류 과다성장의 주요 원인물질인 영양염류 중 총질소(TN)와 총인(TP)의 농도 변화도 준설 전, 준설 중 그리고 준설 후에 농도 변화가 시간대별로 그리고 수심별로 통계학적으로 유의한 의미는 없는 것으로 조사되어($p>0.05$), 호수 저면에 축적된 영양염류가 준설 중 확산되거나 수체오염을 유발하지 않는 것으로 조사되었다. 저혼탁 scrub/흡입의 직접 준설을 통한 오염물질 제거량이 수처리시설의 운영을 통한 오염물질 제거량 대비(SS의 경우 232배, TP의 경우 8.8배) 매우 높은 것으로 산정되어, 수처리시설의 단독 적용 보다는 수처리시설과 저혼탁 scrub/흡입 준설의 연계 적용 시 도시물순환시스템 내 오염물의 효과적 제거가 가능하고, 부유성 및 부착성 조류의 과다성장을 예방하며, 도시물순환시스템 내 수질관리 비용을 크게 절감시킬 수 있다고 판단된다.

마지막으로 도시물순환시스템 내 준설현황과 준설이력 등의 조회와 유지관리를 위한 GPS (global positioning system) 기반 실시간 저혼탁 scrub/흡입 준설장치 추적 및 유지관리 프로그램을 개발을 통해 다양한 정보의 실시간 조회가 가능하며, 그리드 기반 관리를 통해 구간별 작업이력 조회, 기간별 총 준설물량과 준설구역과 비준설구역의 작업내역과 운전조건을 쉽게 확인이 가능하였다. 향후, 준설장치의 운전자를 보조하거나 제한된 환경에서 스스로 운전하는 협력형 주행 시스템(driver cooperative autonomous driving system)의 개발을 지속할 계획이다.

KSEE

References

1. Song, H. M., Optimal water quality management for Ilsan lake, KICT, pp. 20~60(1997).
2. Land Housing Institute, A guide for construction of lake and pond with ecological concept, LHI(2003).
3. Joo, J. C., Design and management of urban water-circulating systems in Gwangju-Chonnam innovation city, KICT, pp. 2~40(2009).
4. Choi, J. S. and Lee, J. M., A study on introduction plan of water circulation facilities considering site-condition, LHI, pp. 11~48(2016).
5. 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 River, K-water(2014).

6. Kim, M. K., Moon, B. R., Kim, T. K. and 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).
7. Zhou, J. J. and Lim, B. S., "Characteristics of Water Quality Change of Urban River according to Installation of Interceptors and Wastewater Treatment Plant," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **36**(12), 813~820(2014).
8. Byeon, K D., Kim, G. Y., Lee, I., Lee, S., Park, J., Hwang, T. and Joo, J. C. "Investigation and Evaluation of Algae Removal Technologies Applied in Domestic Rivers and Lakes," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **38**(7), 387~394(2016).
9. Park, J. B. and Kim, S. J., "The Present Status of Dredging for Domestic Contaminated Sediment," *The Korean J. Civil Eng.*, **55**(4), 58~65(2007).