수생식물에 의한 소류지 수질개선 분석 및 예측

Analysis and Prediction on Water Quality Improvements by Aquatic Plants in a Storage

김응석* · 심규범** · 정건희*** · 최현일****

Kim, Eung Seok · Sim, Kuy Bum · Chung, Gunhui · Choi, Hyun Il

Abstract

The different types of influent pollutants due to the urbanization has exceeded the self-purification capacity in storage, and the water quality degradation and ecosystem destruction have been the main concerns in the urban area. Since the selected Garakbawi storage was the leisure area of the local residents, located in Asan-si Tangjung-Myeon where is the newly urbanized area, this study has analyzed the degree of water quality improvement by using eco-friendly aquatic plants. For the qualitative analysis on the water quality improvement abilities of the aquatic plants, the required water surface area was estimated by literatures on the pollutant load removal efficiency with respect to the water quality scenarios such as 10%, 25%, and 30% improvements of TN and TP, which are known as the main reason of eutrophication. This study has also implemented WASP7 model under the above water quality improvement scenarios to predict water pollutant concentrations on the inlet and outlet points of the storage in 2013. The WASP7 simulation results show that the water quality concentrations were improved at the outlet of the storage as about 13.4% of TN and 14.81% of TP under the 10% water quality improvement scenario, as about 22% of both TN and TP under the 25% water quality improvement scenario, and as about 25% of both TN and TP under the 30% water quality improvement scenario, respectively. It would be concluded that the construction of an artificial floating island in Garakbawi storage is not only a good eco-friendly approach for water quality improvements but also the most efficient restoration method.

Key words : Aquatic plants, storage, WASP model, Water quality prediction, TN, TP

요 지

최근 신도시의 개발에 따라 다양한 오염원이 소류지에 유입되면서 소류지의 자정능력으로는 수질회복이 어려우며 이로 인한 수질악화 및 생태계의 파괴가 우려되고 있다. 대상지역인 가락바위 소류지의 경우 아산시 탕정면의 신도시 개발지역에 위치하고 있으며 인근주민의 휴식장소 등을 제공하고 있어, 자연친화적인 방법인 수생식물을 이용한 수질개선을 효과를 분석하였다. 수생식물의 정량적인 수질오염 저감능력을 확인하기 위하여, 문헌조사의 결과를 바탕으로 가락바위 소류지의 부영양화에 직접적으로 영향을 주는 인자인 TN 및 TP의 농도를 각각 10%, 25%, 30% 저감시킬 수 있는 수생식물의 필요 수면적을 산정하였다. 또한 소류지의 유입부 지점과 유출부 지점에서 2013년 수질상태를 예측하기 위하여 제시된 수질오염 저감 시나리오에 따라 WASP7모형을 모의하였다. 유출부에서의 수질예측결과 10%수질오염 저감시 TN의 경우 13.4%, TP의 경우 14.81% 수질오염을 저감할 수 있었으며, 25%수질오염 저감시 TN 및 TP에서 약 22% 정도, 그리고 30%수질오염 저감시 TN 및 TP에서 약 25%정도 수질오염 농도를 저감할 수 있었다. 본 연구결과를 기초로, 향후 인공식물섬을 설치한다면, 자연친화적으로 가락바위 소류지의 수질을 개선할 뿐만 아니라 생태계복원에도 크게 기여할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 수생식물, 소류지, WASP 모형, 수질예측, TN, TP

1. 서 론

담수 생태계의 부영양화 현상은 다양한 요소에 의해 결정되며(Wetzel, 1983), 특히 영양염류의 유입으로 인한 독성

남조류의 과다 번성은 생태학적인 관점뿐만 아니라 사회적으로도 많은 문제점을 야기하고 있다(농림부, 2005). 이러한 영양염류는 호수 및 저수지에 지속적으로 유입되어 수체 내에 축적되면, 부영양화를 야기하여 호수의 이용성을 크게 떨어뜨

*정회원. 선문대학교 토목공학과 부교수(E-mail : hydrokes@sunmoon.ac.kr)
Member. Professor, Department of Civil Engineering, Sunmoon University

**정회원. 선문대학교 토목공학과 박사과정
Member. Ph.D Candidate, Department of Civil Engineering, Sunmoon University

***교신저자. 정회원. 호서대학교 토목공학과 조교수(Tel: +82-41-540-5794, Fax: +82-41-540-5790, E-mail: gunhui@hoseo.edu)
Corresponding Author. Member. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Hoseo University

****정회원. 영남대학교 건설시스템공학과 부교수
Member. Professor, Department of Civil Engineering, Yeungnam University

린다(대한주택공사, 2007). 부영양화의 원인물질인 인 및 질소 등의 영양염류를 제거하기 위해 화학적, 기계적 방법이 이용되고 있지만 일반적으로 많은 비용이 소요되고, 호소의 위치 및 특성에 따라 방법적용이 제한되는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 수생식물 및 습지를 이용한 생태계 복원 및 자연친화적 수질정화 방법이 사용되고 있다.

수생식물을 이용한 수질정화 방법에 관한 연구를 살펴보면, 나규환 등 (1996)은 수생식물 중 국내에서 흔히 자생하거나 식용으로 재배되고 있는 미나리를 이용하여 부영양화 유발물질인 질소와 인의 제거에 중점을 두어 조사를 하였다. 권예량 등 (2003)은 정체수역인 연못에서 수생식물에 의한 수처리효율을 조사하고 실험실규모 실험을 통하여 정수식물종별 영양염류 제거특성을 파악하였다. 농업용수 수질측정망 조사 보고서(농림부, 2007)에 의하면 2006년도 이후에는 토지계에 의한 비점오염원의 비중이 높아지면서 지속적으로 호소의 수질이 악화 되는 것으로 나타났다. 따라서 자연정화 방법인 인공습지 및 인공식물섬 등을 조성하여 오염물질을 저감하는 방법에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다(김형중, 1997; 박혜경, 2006; 유경아, 2007; 최돈혁, 2010). 안태석 (2005)은 갈대 및 달뿌리풀의 경우 인공습지를 조성하여 수질오염 농도를 저감하였다. 최면재 등(2007)은 팔당호 경안천 수역에 인공 설치된 수초재배섬(인공식물섬) 조성 이후 식재된 수생식물의 서식면적 및 종의 변화를 조사하고, 이에 따른 성장속도와 성장시기에 따른 영양물질 함량 변동 그리고 수생식물 지상부 제거에 따른 영양물질 제거량 등을 분석하여 수초재배섬의 관리 방안을 제시하였다. 또한 김형중(2009)은 자연정화 방법에서 식물의 역할과 적용방안에 대하여 고찰하였다. 수생식물을 이용한 정화방법 중 식물정화조를 설치하여 수질오염을 저감하는 방법도 제시되었다. 이를 위하여 박종선 등(2002)은 미나리를 이용한 오염수 중의 중금속 성분에 대한 정화효과, 식물체중의 축적 및 이행관계를 검토하였고, 김영철 등 (2003)은 부레옥잠 처리지를 설치하여 산화지와 연결 후 질소 제거에 대하여 분석 및 평가하였다.

이와 같이, 문헌조사결과 각종 수생식물을 이용하여 수질오염을 저감하는 연구가 활발히 진행되어 왔으나 대부분 수생식물을 재배하여 재배조 설치 후의 수질오염 저감정도를 분석하거나, 인공습지 등을 호소 주변에 설치하여 오염물질의 유입자체를 줄이는 연구가 대부분이며, 수생식물의 수질오염 저감능력에 따른 장래 수질예측에 관한 연구가 미비한 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 기존 문헌의 결과인 수생식물 적용에 따른 오염물질 부하량 제거효율을 바탕으로, 충청남도 아산시 탕정면 명암리에 위치하는 가락바위 소류지

를 대상으로 오염원 저감비용에 따라 요구되는 수생식물이 차지하는 수표면적을 분석하였다. 또한 가락바위 소류지의 오염원 유입부와 유출부 2개 지점을 선정하여, WASP7모형을 이용하여 수질오염 저감비용에 따른 2013년의 수질예측을 실시하였다.

2. 연구방법

2.1 수생식물을 이용한 부하량 제거효율 검토

본 연구에서는 수생식물을 이용한 오염원의 제거효율을 검토하기 위하여 기존 문헌의 결과를 중심으로 조사하였다. 식생을 이용한 정화법에서는 식물을 이용하여 입상상 영양염류의 침전흡착, 인의 불활성화 작용, 토양 내 서식하는 탈질균에 의한 아질산성 질소 및 질산성 질소의 탈질작용 등을 통해 영양염류를 제거한다. 즉, 식생정화법은 토양 내 뿌리를 두고 줄기와 잎은 수표면 위에 노출되는 식물로 식재되며, 침수된 줄기와 뿌리는 많은 수처리 반응에 관여하는 부착 미생물의 성장을 위한 넓은 표면을 제공하고 식물 사체의 축적으로 다양한 오염물질 흡착을 위한 흡착제 역할을 하며 미생물에 의한 탈질 반응시 탄소원의 역할을 수행한다. 또한, 식생은 대기와 침전물, 미생물간의 산소, 질소 전달의 매개역할을 수행하고, 지하의 조직들은 탄소와 질소를 위한 저장소 역할을 한다. 본 연구에서는 수생식물을 이용한 수질정화작용 결과를 가락바위 소류지에 적용하기 위하여 기존 문헌 결과를 단위면적당으로 환산하였다. 또한, 다양한 수생식물 및 적용방법에 따른 각 문헌에 적용되었던 수생식물의 단위면적당 TN, TP의 제거효율을 Table 1과 같이 나타내었다. 문헌조사의 결과 TN의 경우 0.0023~0.003014 kg/m²/day, TP의 경우 0.000211~0.000348 kg/m²/day의 단위면적당 부하량 제거효율을 나타내었다.

2.2 WASP7 모형

본 연구에서는 국내외 호소의 수질모의에 광범위하게 적용되고 있는 모형들 중 미국 EPA에서 1981년에 개발한 3차원 수질모델인 WASP(Water Quality Analysis Simulation Program)를 적용하여 수질을 예측하였다. WASP은 호소, 하천, 저수지등 다양한 수체에 적용이 가능하다. 수체의 특성에 따라 종적, 횡적, 연직방향으로 구획분할이 가능하며 바닥 퇴적층의 영향을 고려할 수 있다. 짧은 시간간격 사이의 수질 변화 분석에 용이하다는 장점이 있으며 조류를 중심항목으로 수질을 예측하므로, 정체현상에 따른 부영양화가 되기 쉬운 호수는 조류의 성장이나 질소와 같은 무기 영양물질과 플랑크톤의 변화 양상이 BOD나 DO농도 보다 중요하기 때문에

Table 1. Literature Survey of the Pollutant Load Removal Efficiency using Aquatic Plants

적용문헌	수생식물	수생식물 적용 방법	단위면적당 부하량 제거효율	
			TN (kg/m ² /day)	TP (kg/m ² /day)
전만식 등 (1999)	부레옥잠	폐수를 지하수로 10배 희석한 인공배지	0.0023	0.000211
신정이 등 (2001)	갯버들	수경재배	0.002986	0.0000685
박현진 (2001)	갈대, 달뿌리풀	인공습지	0.003014	0.000348

WASP은 다른 수질 모델들에 비하여 호수의 수체에 적용하기 적합하다고 할 수 있다(USEPA, 2008). WASP은 수계에 대해 요소별(elements)로 구획(segment)분할이 가능한 Box 모델이며, 각 요소를 하나의 Box로 간주하며 필요에 따라 수평방향과 수직방향의 배열을 통해서 1차, 2차, 3차원 모델로 확장할 수 있다.

WASP7 모델은 수체의 거동을 모의하는 DYNHYD(hydrodynamics program)과 부영양화 모델인 EUTRO(Eutrophication) 모듈, 독성물질 모델인 TOXI(Toxicants) 모듈로 구성되어 있으며 본 연구에서는 EUTRO 모듈을 이용하여 가락바위 소류지의 수질을 예측하였다.

3. 적용 및 결과

3.1 대상지역

본 연구의 대상지역인 가락바위 소류지는 충청남도 아산시 탕정면 명암리에 위치하고 있으며, 곡교천 지류인 명암천에 위치하고 있다. 소류지의 상류쪽으로 탕정산업단지와 장목천이 위치하고 있으며 산업단지에서의 방류수가 먼저 폐수처리장으로 유입된 후, 폐수처리장의 방류수가 장목천으로 들어와 가락바위 소류지로 유입되고 있다. 가락바위 소류지의 방류수는 명암천으로 유입되고 있으며 소류지 주변에 아산 탕정 신도시가 위치하고 있다. 가락바위 소류지의 수질 측정은 총 4개의 지점에서 시행하였으며, 지점 1은 장목천 합류부로 가락바위 소류지로 유입되는 지점이며, 지점 2는 가락바위 소류지 중심, 지점 3은 가락바위 소류지에서 유출부이며 지점 4는 유출되어 수질측정이 이루어지고 있는 지점인 명암천의 부리기교 지점이다. 다음 Fig. 1은 가락바위 소류지의 유출수가 명암천으로 유입되는 지점을 기준으로 한 유역도 및 가락

바위 소류지의 수질측정 지점을 나타내었다.

3.2 WASP 모델 구축 및 검 · 보정

본 연구에서는 연구대상지역인 가락바위 소류지의 수질을 예측하기 위하여 WASP7모형을 선정하여 수질모형을 구축하였다. 수질모의를 위한 입력자료 중 가장 우선시 되는 구획분할은 다음 Fig. 2와 같이 4개의 Segments로 구분하였으며 모의하는 수질변수의 수는 부영양화에 가장 영향을 많이 끼치는 TN, TP로 2개의 수질변수로 모의 하였다. 모의 시간간격은 1시간으로 하였으며 출력시간간격은 1일로 하였다.

각 구획별 수직적인 위치, 형태, 체적을 다음 Table 2와 같이 입력하였으며, 산업단지에서 방출되어지는 유출량은 하루 평균 50,000~70,000 m³/day이므로 하루 평균 기준을 중간값인 60,000 m³/day으로 가정하였다. 경제조건으로는 아산시 산업단지에서 폐수처리장을 통해 방출되어 장목천(Segment 1)으로 유입되는 부분을 Boundary 1, 장목천에서 가락바위 소류지(Segment 2, 3)로 유입되는 부분을 Boundary 2, 가락바위 소류지에서 유출되는 부분을 Boundary 3, 마지막으로 명암천(Segment 4)을 통해 유출되는 부리기교 부분을 Boundary 4로 정하였다.

WASP7 모형을 보정하기 위하여 2012년 1월~8월 지점1(장목천 합류구) 및 지점2(가락바위 소류지)의 수질측정 자료인

Fig. 2. Definition of Garakbawi Storage Segments

Fig. 1. Watershed including Garakbawi Storage and Water Quality Measurement Points

Table 2. Input Data for Water Quality Model in WASP7

Segment. NO	Numerical Position·Shape	Length(m)	Width(m)	Depth(m)	Volume(m ³)
1	epilimnion(표수층)	500	3	0.3	450
2	epilimnion(표수층)	163.5	56	1.75	40,202
3	epilimnion(표수층)	163.5	56	1.95	33,854
4	epilimnion(표수층)	300	3	0.3	270

Table 3. Measured and Calculated Water Qualities in Garakbawi Storage

날짜	지점 3번 수질측정자료 ①		WASP 수질모의 결과 ②		[① - ②] 차이 값		오차 (%)	
	TN	TP	TN	TP	TN	TP	TN	TP
2012-01-16	2.3	0.280	2.5	0.269	0.25	0.011	8.70	3.93
2012-01-25	2.2	0.384	2.4	0.355	0.27	0.029	9.09	7.55
2012-02-01	2.0	0.357	2.2	0.352	0.30	0.005	0.00	1.40
2012-02-06	2.5	0.094	2.5	0.166	0.09	0.072	0.00	76.60
2012-02-13	2.3	0.146	2.5	0.123	0.30	0.023	8.70	15.75
2012-02-20	6.1	0.244	5.4	0.211	0.61	0.033	11.48	13.52
2012-02-27	3.4	0.217	4.2	0.212	0.86	0.005	23.53	21.77
2012-03-05	3.8	0.200	3.9	0.193	0.16	0.007	2.63	3.50
2012-03-12	3.7	0.175	3.9	0.170	0.27	0.005	5.41	2.86
2012-03-20	6.7	0.282	6.3	0.250	0.35	0.032	5.97	11.35
2012-03-26	2.7	0.145	4.0	0.170	1.30	0.025	48.15	17.24
2012-04-02	3.1	0.162	3.2	0.147	0.16	0.015	3.23	9.26
2012-04-09	2.7	0.148	3.0	0.140	0.34	0.008	11.11	5.41
2012-04-16	1.3	0.089	1.8	0.091	0.57	0.002	38.46	2.25
2012-04-23	2.8	0.163	2.7	0.135	0.09	0.028	3.57	17.18
2012-04-30	1.2	0.134	1.8	0.130	0.61	0.005	50.00	2.99
2012-05-07	1.5	0.192	1.6	0.168	0.18	0.024	6.67	12.50
2012-05-16	1.7	0.212	1.9	0.197	0.21	0.015	11.76	7.08
2012-05-21	2.3	0.070	2.3	0.104	0.06	0.034	0.00	48.57
2012-05-30	3.5	0.092	4.0	0.099	0.48	0.007	14.29	7.61
2012-06-04	4	0.056	5.1	0.085	1.12	0.029	27.50	51.79
2012-06-11	4.5	0.214	4.4	0.108	0.08	0.106	2.22	49.53
2012-06-18	5.4	0.326	4.5	0.155	0.91	0.171	16.67	52.45
2012-06-27	3.3	0.355	3.5	0.147	0.23	0.208	6.06	58.59
2012-07-02	2.2	0.165	4.3	0.140	2.13	0.025	95.45	15.15
2012-07-09	1.2	0.363	2.3	0.250	1.12	0.113	91.67	31.13
2012-07-16	2.3	0.186	2.2	0.242	0.08	0.056	4.35	30.11
2012-07-23	2.4	0.132	2.2	0.219	0.23	0.087	8.33	65.91
2012-07-30	2.6	0.14	2.3	0.219	0.35	0.079	11.54	56.43
2012-08-08	2	0.127	2.1	0.148	0.05	0.021	5.00	16.54
2012-08-13	1.4	0.161	1.7	0.144	0.33	0.017	21.43	10.56
2012-08-20	1.6	0.07	1.4	0.185	0.15	0.115	12.50	164.29
2012-08-29	2.1	0.057	1.9	0.129	0.21	0.072	9.52	126.32
평균	2.78	0.19	3.04	0.18	0.44	0.04	17.42	30.82

(a) TN

(b) TP

Fig. 3. Comparison of TN and TP Concentration in Garakbawi storage

Table 3을 이용하여 모형을 수행하였으며 가락바위 소류지의 수질측정자료와 모형을 통한 지점3(가락바위 소류지)의 수질 자료를 비교하여 Fig. 3과 같이 모형을 보정하였다. 지점3의 수질측정 자료와 모의를 통한 수질농도를 비교한 결과 평균 TN의 차이가 0.5미만, TP의 경우 0.04의 차이로 나타났으며 수질측정망 기준으로 오차를 분석한 결과 TN은 약 17%, TP는 약 30%로 나타났다.

3.3 수생식물에 의한 수질오염원 저감

본 연구에서는 문헌조사 결과를 바탕으로 가락바위 소류지의 수위가 상시수위인 22 m일 경우, 수표면적이 42,318 m² (0.042318 km²)라고 가정하여 수질오염원 저감효과를 계산하였다. 가락바위 소류지의 하루 평균 유입량은 60,000 m³/day이며, 평균 질소(N) 농도 4.4 g/m³, 평균 인(P) 농도는 0.3g/m³이다. 유량과 수질인자를 이용하여 가락바위 소류지의 유입부하량을 계산하였으며 계산 결과 질소의 유입부하량은 264 kg/day이며, 인의 유입부하량은 18 kg/day로 나타났다. 또한 각 문헌조사별 질소와 인의 단위면적당 부하량을 계산하여 가락바위 소류지에 10%~30%의 오염원을 저감하였을 경우 수생식물이 수면적을 차지하는 면적을 산정하였다.

정만식 등 (1999)의 부레옥잠을 이용한 제거효율을 가락바위 소류지에 적용한 결과 수면적에 약 0.0287 km²이상 차지하였을 경우 25%의 부하량을 저감할 수 있었다. 신정인 등 (2001)의 경우 갯버들을 수경재배하여 부하량을 산정하였다. 문헌 결과 TP가 10% 오염원 저감 시 가락바위 소류지의 수면적에 약 0.0263 km²을 차지하였다. 박현진 (2001)의 경우 갈대와 달뿌리풀을 이용한 제거효율을 가락바위 소류지에 적용하였다. 적용결과 단위면적당 0.003014 kg/m²/day의 질소를 저감할 수 있었으며 인의 경우 0.000348 kg/m²/day의 제거효율을 나타내었다. 또한 수면적의 약 0.0263 km²의 갈대 및 달뿌리풀을 적용하였을 경우 30%의 부하량을 저감할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 문헌 10%, 25%, 30% 수질 오염 저감 시 향후 수질을 예측하였다. 선택된 문헌조사별 수생식물에 따른 부하량 제거 효율을 이용하여 가락바위 소류지에 적용한 결과 Table 4와 같이 나타내었다.

3.4 수질개선에 따른 장래수질 예측

본 연구에서는 3.3절의 문헌결과를 바탕으로 수생식물에 따른 수질오염 저감능력을 평가하였다. Table 4의 문헌조사의 결과를 가락바위 소류지에 적용한 결과 신정인 등 (2001)의

경우 10%, 전만식 등 (1999)의 경우 25%, 박현진 (2001)의 경우 30%의 수질오염 저감을 보였으며, 수질오염 저감에 따른 수질을 예측하기 위하여 WASP 모형에 적용하여 수질을 예측하였다. 수질자료는 2012년 1월부터 8월까지의 수질자료와 2010년, 2011년도 2개년의 9월부터 12월 자료를 이용하여 구축하였으며, 이를 바탕으로 향후 미래에 대한 수질을 예측하기 위하여 2013년 수질을 모의하였다.

수질예측을 하기 위해 지점 1인 장목천 합류부와 유출부인 지점3의 명암천 유출구 지점과 비교 하였다. 오염원이 지점 1을 통하여 가락바위 소류지에 유입되고 지점 3을 통해 유출되기 때문에 두 개의 지점을 비교 분석하였다. 지점 1의 경우 현재수질상태를 입력하였으며 지점 3의 경우 현 수질상태에서 수생식물의 수질오염원 저감능력을 고려하여 저감된 수질오염 농도에 대해 모의하였다. 분석결과 TN의 경우 1월부터 8월까지의 감소하는 경향을 보였으나 9월부터 증가하는 추세를 보였다. TP의 경우도 마찬가지로 1월부터 8월까지의 감소하는 경향을 보였으나 9월부터 증가하는 추세를 보였다. 이는 2010년과 2011년 2개년 자료의 수질농도가 2012년 보다 월등히 높은 것에 기인한다.

신정인 등 (2001)의 결과를 바탕으로 현 수질오염상태를 10% 저감시 TN의 경우 유입부 지점인 Segment 1에서는 1.91 mg/L~11.65 mg/L의 범위를 보였으며 평균 6.19 mg/L의 수질상태를 보였다. 유출부 지점인 Segment 3의 경우 1.26 mg/L~10.83 mg/L의 범위를 보였으며 평균 5.36 mg/L의 수질상태를 보였다. Segment 1과 3의 수질을 비교한 결과 0.83 mg/L의 차이를 보이며 평균 13.4%의 수질오염농도 저감능력을 보였다. 또한 현 수질오염상태를 10% 저감시 TP의 경우 유입부 지점인 Segment 1에서는 0.09 mg/L~0.45 mg/L의 범위를 보였으며 평균 0.27 mg/L의 수질상태를 보였다. 유출부 지점인 Segment 3의 경우 0.05 mg/L~0.42 mg/L의 범위를 보였으며 평균 0.23 mg/L의 수질상태를 보였으며 Segment 1과 3의 수질을 비교한 결과 0.04 mg/L의 차이로 평균 14.81%의 수질오염 저감능력을 보였다. 전만식 등 (1999)의 결과를 바탕으로 현 수질오염상태를 25% 저감시 Segment1에서의 TN과 TP 모두 10% 저감시와 마찬가지로 동일한 결과를 보여주었다. 이러한 이유는 구축된 수질자료가 가락바위 소류지로 들어오기전 상태이기 때문에 유입부 지점에서의 수질자료는 동일한 결과를 보인 것으로 판단된다. TN의 Segment 3에서의 경우 1.15 mg/L~9.67 mg/L의 범위를 보였으며 평균 4.81 mg/L의 수질상태를 보였다. Segment1과

Table 4. Water Plant Cultivated Area Required to Remove the Pollutant Loads in the Garakbawi Storage

구분	수생식물	수생식물 적용 방법	단위면적당 부하량 제거효율		오염원 저감비율에 따른 수생식물이 차지하는 저수지 수면적 (km ²)							
			TN	TP	30%		25%		20%		10%	
			(kg/m ² /day)		TN	TP	TN	TP	TN	TP	TN	TP
문헌 2-3	부레옥잠	폐수를 지하수 회식 10배	0.0023	0.000211	0.0344	0.0256	0.0287	0.0213	0.0231	0.0171	0.0115	0.0085
문헌 4-2	갯버들	수경재배	0.002986	0.0000685	0.0265	0.0787	0.0221	0.0656	0.0177	0.0525	0.0088	0.0263
문헌 5-1	갈대 달뿌리풀	인공습지	0.003014	0.000348	0.0263	0.0155	0.0219	0.0129	0.0175	0.0104	0.0117	0.0052

Table 5. Water Quality Predictions in Year 2013 using the Different Water Quality Improvement Scenarios

날짜	10% 수질오염 저감시 수질예측				25% 수질오염 저감시 수질예측				30% 수질오염 저감시 수질예측			
	Segment 1		Segment 3		Segment 1		Segment 3		Segment 1		Segment 3	
	TN (mg/L)	TP (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)
2013-01-16	2.90	0.27	2.47	0.25	2.90	0.27	2.22	0.22	2.90	0.27	2.13	0.22
2013-01-25	3.30	0.18	2.59	0.15	3.30	0.18	2.34	0.14	3.30	0.18	2.26	0.13
2013-02-01	3.00	0.17	2.28	0.13	3.00	0.17	2.07	0.12	3.00	0.17	2.00	0.11
2013-02-06	4.40	0.35	2.52	0.21	4.40	0.35	2.34	0.19	4.40	0.35	2.28	0.19
2013-02-13	4.90	0.23	3.37	0.21	4.90	0.23	3.08	0.19	4.90	0.23	2.98	0.18
2013-02-20	4.60	0.29	3.62	0.23	4.60	0.29	3.27	0.21	4.60	0.29	3.16	0.20
2013-02-27	8.50	0.29	6.53	0.23	8.50	0.29	5.90	0.21	8.50	0.29	5.69	0.20
2013-03-05	7.84	0.28	6.26	0.22	7.84	0.28	5.65	0.20	7.84	0.28	5.45	0.19
2013-03-12	7.10	0.26	5.78	0.21	7.10	0.26	5.22	0.19	7.10	0.26	5.04	0.18
2013-03-20	4.27	0.19	4.58	0.20	4.27	0.19	4.05	0.18	4.27	0.19	3.88	0.17
2013-03-26	4.04	0.19	3.05	0.19	4.04	0.19	2.77	0.17	4.04	0.19	2.67	0.16
2013-04-02	3.89	0.17	3.04	0.17	3.89	0.17	2.75	0.15	3.89	0.17	2.65	0.14
2013-04-09	4.74	0.29	3.09	0.19	4.74	0.29	2.85	0.18	4.74	0.29	2.76	0.17
2013-04-16	3.27	0.17	2.35	0.11	3.27	0.17	2.14	0.10	3.27	0.17	2.07	0.10
2013-04-23	3.89	0.22	3.21	0.19	3.89	0.22	2.89	0.17	3.89	0.22	2.78	0.16
2013-04-30	4.86	0.12	3.20	0.18	4.86	0.12	2.94	0.16	4.86	0.12	2.86	0.15
2013-05-07	3.98	0.22	2.97	0.15	3.98	0.22	2.69	0.14	3.98	0.22	2.60	0.13
2013-05-16	3.72	0.19	3.09	0.14	3.72	0.19	2.78	0.13	3.72	0.19	2.68	0.12
2013-05-21	4.28	0.15	3.29	0.10	4.28	0.15	2.96	0.09	4.28	0.15	2.85	0.09
2013-05-30	10.08	0.09	9.37	0.06	10.08	0.09	8.40	0.05	10.08	0.09	8.07	0.05
2013-06-04	5.00	0.10	4.26	0.07	5.00	0.10	3.83	0.06	5.00	0.10	3.69	0.06
2013-06-11	4.24	0.09	3.32	0.06	4.24	0.09	3.00	0.06	4.24	0.09	2.89	0.06
2013-06-18	6.57	0.09	5.75	0.05	6.57	0.09	5.17	0.05	6.57	0.09	4.97	0.05
2013-06-27	4.02	0.22	3.23	0.18	4.02	0.22	2.91	0.16	4.02	0.22	2.80	0.16
2013-07-02	4.33	0.29	3.61	0.24	4.33	0.29	3.25	0.21	4.33	0.29	3.13	0.21
2013-07-09	3.34	0.34	2.62	0.30	3.34	0.34	2.37	0.27	3.34	0.34	2.28	0.26
2013-07-16	3.44	0.28	2.78	0.23	3.44	0.28	2.51	0.21	3.44	0.28	2.42	0.20
2013-07-23	2.51	0.42	1.86	0.36	2.51	0.42	1.69	0.33	2.51	0.42	1.63	0.31
2013-07-30	2.64	0.40	1.97	0.36	2.64	0.40	1.78	0.32	2.64	0.40	1.72	0.31
2013-08-08	2.82	0.24	2.20	0.20	2.82	0.24	2.00	0.18	2.82	0.24	1.93	0.17
2013-08-13	2.06	0.24	1.45	0.21	2.06	0.24	1.32	0.19	2.06	0.24	1.28	0.18
2013-08-20	1.91	0.13	1.26	0.10	1.91	0.13	1.15	0.09	1.91	0.13	1.12	0.08
2013-08-29	3.56	0.23	2.63	0.19	3.56	0.23	2.37	0.17	3.56	0.23	2.29	0.16
2013-09-05	8.14	0.25	7.59	0.23	8.14	0.25	6.78	0.21	8.14	0.25	6.50	0.20
2013-09-12	8.29	0.30	7.73	0.28	8.29	0.30	6.90	0.25	8.29	0.30	6.62	0.24
2013-09-19	8.43	0.35	7.86	0.32	8.43	0.35	7.02	0.29	8.43	0.35	6.74	0.28
2013-09-26	8.58	0.40	8.00	0.37	8.58	0.40	7.14	0.33	8.58	0.40	6.85	0.32
2013-10-03	8.72	0.45	8.13	0.42	8.72	0.45	7.26	0.37	8.72	0.45	6.97	0.36
2013-10-10	9.45	0.45	8.78	0.42	9.45	0.45	7.84	0.37	9.45	0.45	7.52	0.36
2013-10-17	10.19	0.45	9.46	0.42	10.19	0.45	8.45	0.37	10.19	0.45	8.11	0.36
2013-10-24	10.92	0.44	10.15	0.41	10.92	0.44	9.06	0.37	10.92	0.44	8.70	0.35
2013-10-31	11.65	0.44	10.83	0.41	11.65	0.44	9.67	0.37	11.65	0.44	9.29	0.35
2013-11-07	11.24	0.40	10.52	0.38	11.24	0.40	9.39	0.34	11.24	0.40	9.02	0.33
2013-11-14	10.84	0.37	10.14	0.35	10.84	0.37	9.05	0.31	10.84	0.37	8.69	0.30
2013-11-21	10.43	0.33	9.76	0.31	10.43	0.33	8.71	0.28	10.43	0.33	8.36	0.27
2013-11-28	10.02	0.30	9.37	0.28	10.02	0.30	8.37	0.25	10.02	0.30	8.03	0.24
2013-12-05	9.66	0.27	9.02	0.25	9.66	0.27	8.05	0.22	9.66	0.27	7.73	0.21
2013-12-12	9.66	0.27	9.02	0.25	9.66	0.27	8.05	0.22	9.66	0.27	7.73	0.21
2013-12-19	9.66	0.27	9.02	0.25	9.66	0.27	8.05	0.22	9.66	0.27	7.73	0.21
2013-12-26	9.66	0.27	9.02	0.25	9.66	0.27	8.05	0.22	9.66	0.27	7.73	0.21
평균	6.19	0.27	5.36	0.23	6.19	0.27	4.81	0.21	6.19	0.27	4.63	0.20
최대	11.65	0.45	10.83	0.42	11.65	0.45	9.67	0.37	11.65	0.45	9.29	0.36
최소	1.91	0.09	1.26	0.05	1.91	0.09	1.15	0.05	1.91	0.09	1.12	0.05

(a) 10%수질오염 저감시 2013년 수질모의(TN)

(b) 10%수질오염 저감시 2013년 수질모의(TP)

(c) 25%수질오염 저감시 2013년 수질모의(TN)

(d) 25%수질오염 저감시 2013년 수질모의(TP)

(e) 30%수질오염 저감시 2013년 수질모의(TN)

(f) 30%수질오염 저감시 2013년 수질모의(TP)

Fig. 4. Water Quality Prediction in Year 2013 using different Water Quality Improvement

3의 수질을 비교한 결과 1.38 mg/L의 차이를 보이며 평균 22.29%의 수질오염 저감능력을 보였다. 또한 TP의 경우 Segment3에서 0.05 mg/L~0.37 mg/L의 범위를 보였으며 평균 0.21 mg/L의 수질상태를 보였다. Segment1과 3의 수질을 비교한 결과 0.06 mg/L의 차이를 보이며 평균 22.22%의 수질오염 저감능력을 보였다. 박현진 (2001)의 결과를 바탕으로 현 수질오염상태를 30% 저감시 Segment1에서의 TN과 TP 모두 10% 저감시와 마찬가지로 동일한 결과를 보여주었다. 이러한 이유는 25%저감시의 결과 동일한 것으로 판단된다. TN의 가락바위 소류지의 유출부 지점인 Segment 3에서의 경우 1.12 mg/L~9.29 mg/L의 범위를 보였으며 평균 4.63 mg/L의 수질상태를 보였다. Segment1과 3의 수질을 비교한 결과 1.56 mg/L의 차이를 보이며 평균 25.20%의 수질오염 저감능력을 보였다. 또한 TP의 경우 Segment3에서 0.05 mg/L~0.36 mg/L의 범위를 보였으며 평균 0.20 mg/L의 수질상태를 보였다. Segment1과 3의 수질을 비교한 결과 0.07 mg/L의 차이를 보이며 평균 25.93%의 수질오염 저감능력을 보였다. 문헌조사의 결과를 바탕으로 가락바위 소류지에 적용한 결과를 Table 5와 Fig. 4에 나타내었다.

4. 결 론

본 연구에서는 충청남도 아산시에 위치한 가락바위 소류지를 대상으로 식생정화기법을 이용한 수질정화능력을 평가하기 위하여, 기존의 연구에서 제시된 오염원 저감비율에 따라

요구되는 수생식물이 차지하는 저수지 수면적을 산정하였다. 분석결과 갈대 및 달뿌리풀을 이용하여 가락바위 소류지의 수면적에 약 62%를 식생하였을 경우 30%의 부하량을 저감할 수 있었으며, 부레옥잠의 경우 수면적에 약 67%를 식생하면 25%의 부하량을 저감할 수 있었다. 또한 갯버들을 적용하였을 경우 10%의 부하량을 저감할 수 있었다.

또한 본 연구에서는 WASP7을 이용하여 가락바위 내부와 외부에 선정된 4개 지점을 대상으로 수질예측 하였으며, 유입부 지점인 Segment 1과 가락바위 소류지의 유출부지점인 Segment 3을 비교 분석하였다. 문헌조사의 결과를 바탕으로 TN, TP에 대하여 10%, 25%, 30% 수질 농도 저감시 2013년 수질을 예측하였다. 유입부 지점인 Segment 1은 가락바위 소류지로 유입되기 전 수질오염 저감능력이 반영되지 않은 상태이기 때문에, 저감효과에 관계없이 동일한 수질상태를 보였다. 수질오염 저감능력을 판단하기 위하여 Segment 1과 3을 비교 분석한 결과, Segment 3에서 10% 수질농도 저감시, TN의 경우 약 13.4%, 그리고 TP의 경우 14.81%의 수질오염 저감능력을 보였다. 25% 수질농도 저감시, TN의 경우 평균 약 22.29%, 그리고 TP의 경우도 평균 약 22.22%의 저감능력을 보였다. 30%의 수질농도 저감시, TN의 경우 평균 약 20.1%의 저감율을 보였으며, TP의 경우도 마찬가지로 평균 약 20.2%의 저감율을 보였다.

기존 연구결과를 종합하여 판단할 때, 가락바위 소류지의 경우 수심이 약 2-4 m정도이기 때문에 인공습지보다는 부레옥잠 등을 이용한 인공섬을 조성하여 수질을 정화하는 방안

이 적절하다고 사료된다. 인공섬 설치 단가는 약 240,000원/m²이며 가락바위 소류지의 수표면적이 상시수위 22m일 때 수표면적이 42,318 m²이며 약 60%를 설치하였을 경우 약 10억 원 정도가 소요될 것으로 판단된다. 향후 여러 수생식물 등을 통한 연구 및 정량적인 기준이 수립된다면 친화적으로 소류지의 수질을 개선할 뿐만 아니라 생태계복원에도 크게 기여할 것으로 판단된다.

감사의 글

“이 논문은 2013년도 호서대학교의 재원으로 학술연구비 지원을 받아 수행된 연구임(2013-0084)”.

References

- An, T.S. (2005) Tangjung T/C General Regional Industrial Complex Changes secondary impact assessment services for artificial wetlands plan, *Kangwon National University*.
- Choi, D.H., Kang, H., and Choi, K.S. (2010) Case Study on the Improvement of Pollutant Removal Efficiency in Sihwa Constructed Wetland, *Korean Wetlands Society*, Vol. 12, No. 2, pp. 25-33.
- Choi, M.J., Byeon, M.S., Park, H.K., Jeon., N.H., Yoon, S.H., and Kong, D.S. (2007) The Growth anti Nutrient Removal Efficiency of Hydrophytes at an Artificial Vegetation Island, Lake Paldang, *Korean Society of Water Quality*, pp. 83-92.
- Jun, M.S. and Kim, B.C. (1999) Nutrient Removal Potential of water Hyacinth Cultured in Nutrient-enriched Water and Swinery Wastewater, *Korean Society of Environmental biology*, Vol. 17, No. 1, pp. 117-124.
- Kim, Y.C., Jeong, H.Y., and Lee, J.W. (2003) Evaluation of the Nitrogen Reduction in Water Hyacinth Ponds Coupled with Waste Stabilization Ponds, *Korean Society of civil Engineers*, Vol. 23, No. 5B, pp. 425-436.
- Kim, H.J. (2009) Water Quality Improvement by Planted Natural Purification Method, *The Korean Society of Weed Science*, Vol. 29, No. 1, pp. 3-9.
- Kim, H.J., Lim, Y.H., and Yoon, C.K. (1997) Natural Treatment of Wastewater from Industrial Complex in Rural Area by Subsurface Flow Wetland System, *Korean journal of environmental agriculture*, Vol. 16, No. 2, pp. 170-174.
- Kown, A.R. and Park, C.H. (2003) A Study on Water Quality Remediation using Aquatic Plants, *Korean Society of Environ. Engineers*, Vol. 25, No. 4, pp. 415-420.
- Korea National Housing Corporation (2007) Paju Unjeong basin Water circulation system Water Conservation Comprehensive report measures.
- Ministry of Agriculture and Forestry (2005) Development of Management Strategies and Techniques to Control Nuisant Algal Blooms in Korean Agricultural Reservoirs.
- Ministry of Agriculture and Forestry., Korea Rural Community Corporation (2007) Agricultural water quality monitoring survey report.
- Park, J.S., Shin, J.D., Han, S.S., and Yoon, D.J. (2002) Phytoremediation Technology with Using Water Celery (*Oenanthe stolonifer* DC.) to Clean up Heavy Metals in the Contaminated Wastewater, *Korean Journal of Environmental Agriculture*, Vol. 21, No. 2, pp. 122-129.
- Park, H.J. (2001) Application of Subsurface Flow Constructed Wetland to Wastewater Treatment, *Department of Environmental Science Graduate School Kangwon National University Master's degree*.
- Park, H.K., Byeon, M.S., Choi, M.J., Jeon., N.H., You, K.A., and Kong, D.S. (2006) The Effect of Artificial Vegetation Island on Water Quality, *Korean Society of Water Quality*, pp. 83-92.
- Ra, K.H., Kwon, S.H., and Lee, J.H. (1996) Aquatic Plants for Wastewater Treatment, *Korean Society of Environmental Health*, Vol. 22, No. 3, pp. 49-55.
- Sin, J.I., Cha, Y.I., and Park, S.S. (1985) A Study on the Nutrient Removal Efficiency of Riparian Vegetation for Ecological Remediation of Natural Streams, *Korean society of Environ. Engineers*, Vol. 23, No. 7, pp. 1237-1240.
- USEPA (2008) Water Quality Analysis Simulation Program User's Manual Version 6.
- Wetzel, R.G. (1983) Limnology, 2nd ed. Saunders College Publishing, Philadelphia. pp. 860.
- You, K.A., Park, H.K., Byeon, M.S., Jeon., N.H., Choi, M.J., and Yoon, S.H. (2007) Zooplankton Dynamics in Artificial Vegetation Island of Lake Paldang, *Korean Society of Water Quality*, pp. 492-501.

© Received October 29, 2013

© Revised November 1, 2013

© Accepted November 21, 2013