

농업용 저수지 수질개선을 위한 국내 인공습지 설계 및 시공실태 조사

김영철 · 최혜선* · 김이형**

한서대학교 인프라시스템학과

*공주대학교 사회환경공학과

Investigation on Design Aspects of the Constructed Wetlands for Agricultural Reservoirs Treatment in Korea

Youngchul Kim · Hyeseon Choi* · Lee-Hyung Kim**

Dept. of Infra-System Engineering, Hanseo University, Korea

**Dep. of Civil & Environmental Engineering, Kongju National University, Korea*

(Received : 15 March 2021, Revised : 13 May 2021, Accepted : 24 May 2021)

요약

인공습지는 농업용 저수지의 수질개선을 위하여 많은 곳에 적용되고 있다. 인공습지는 수심분포, 유입량 및 유출량, 물흐름 분포, 체류시간, 수질 처리효율, 종횡비, 개방수역/폐쇄수역 구성비 등이 중요한 설계인자이다. 특히, 인공습지 높은 효율 증대를 위해서는 취입보 형식, 유입보, 인입수로 길이, 셀(Cell) 형태, 셀 연결 형태 등의 설계는 매우 중요하다. 본 연구는 농업용 저수지에 조성되어 운영중인 23개 인공습지의 현장조사를 통하여 설계시 고려하여야 할 인자 및 효율적 운영방안을 제시하고자 수행되었다. 인공습지 중에서 비정상적 운영이 나타나는 습지는 수위센서 미작동, 취입보 내부의 유사퇴적 및 기계식 수문틀의 협잡물 문제가 중요한 원인으로 나타났다. 또한, 인입수로의 길이가 길어질수록 취입보 하류부와 상류부의 생태적 단절구간이 늘어나는 것도 문제점으로 분석되었다. 습지 대부분은 2~5개의 셀로 조성되었으며 셀의 크기가 지나치게 클 경우 수리학적 효율이 떨어지고 관리가 어려운 것으로 평가되었다. 작은 규모의 습지에 많은 셀이 존재하는 경우 큰 수두손실로 인하여 적절한 유수흐름이 나타나지 않는 것으로 평가되었다.

핵심용어 : 인공습지, 인공습지 설계, 셀, 연결수로, 인입수로

Abstract

To improve the water quality of agricultural reservoirs, constructed wetlands are applied in many places. These are technologies that establish ecosystems and important design factors include water depth distribution, inflow and outflow, water flow distribution, hydraulic residence time, water quality treatment efficiency, aspect ratio, and the distribution of open water and covered water surfaces. For high efficiency during the operation of a constructed wetland, the design needs to be optimized and this requires consideration of the different types and length of the intake dam as well as the type and connection of wetland cells. Therefore, this study was conducted to investigate and suggest factors that needs to be considered during the design and for efficient operation measures through field surveys of 23 constructed wetlands that have been established and operated in agricultural reservoirs. Results of the field investigation shows that several sites were being operated improperly due to the malfunctioning or failure of the water level sensors, sedimentation in the intake dam, and clogging of the mechanical sluice frames. In addition, it was found that as the length of the inlet channel increases, the ecological disconnection between the intake dam upstream and the wetland outlet downstream also increases and was identified as a problem. Most of the wetlands are composed of 2 to 5 cells which can result to poor hydraulic efficiency and difficulty in management if they are too large. Moreover, it was found that the flow through a small wetland can be inadequate when there are too many cells due to excessive amounts of headloss.

Key words : Constructed wetland, Constructed wetland design, Cell, Connection channel, Inflow channel

*To whom correspondence should be addressed.

Department of Civil and Environmental Engineering, Kongju National University, Korea
E-mail: leehyung@kongju.ac.kr

• Youngchul Kim Dept. of Infra-System Engineering, Hanseo University, Korea / Professor (ykim@hanseo.ac.kr)
• Hyeseon Choi Dep. of Civil & Environmental Engineering, Kongju National University, Korea / PhD (hyeseon27@kongju.ac.kr)
• Lee-Hyung Kim Dep. of Civil & Environmental Engineering, Kongju National University, Korea / Professor (leehyung@kongju.ac.kr)

1. 서 론

우리나라 연평균 이용 가능한 수자원량은 760억 m^3 으로 수자원 총량 1,323억 m^3 의 57%이며, 나머지는 증발산 등으로 손실된다(MOLIT, 2016; Park et al., 2020). 수자원 이용을 살펴보면 농업용수 48%, 생활용수 23%, 하천유지용수 23%, 공업용수 6%로 농업용수가 큰 비중을 차지하고 있다. 우리나라 농업용수는 저수지와 담수호와 같은 호소가 전체 수혜면적의 약 76.2%에 용수를 공급하고 있기에 저수지와 담수호의 수질관리가 중요하다(Shin and Lee 2012; Cho et al., 2019). 일반적으로 농업용 호소는 폐쇄성 또는 준폐쇄성 수역이라는 구조적인 특성 때문에 하천에 비하여 자체 정화 능력이 약하다. 저수지나 호소로 유입된 오염물질은 침전되어 퇴적물을 형성하거나 용존성으로 수중에 존재하면서 광합성 반응에 의한 식물성 플랑크톤의 증식, 세균에 의한 오염물질의 분해, 어류에 의한 동물성 플랑크톤의 포식 등에 기여한다. 일반적으로 수리학적 체류시간이 약 5일 이상이 되면 식물성 플랑크톤의 증식이 활발해져 소규모의 호소와 저수지의 수질은 쉽게 변화하게 된다(Hwang et al. 2007; Oh et al., 2020).

국내 농업용 호소의 주요 오염원은 토지계 배출 비점오염원이 약 50%, 생활계가 27%, 축산계가 23%를 차지하고 있다(MARFA, 2017; Kim et al., 2018). 유역의 농업활동과 불투수면적의 증가는 난분해성 물질 증가, 토양 침투량 및 기저유출량 감소, 하천 건천화, 물순환 체계 왜곡 등의 문제를 발생시키면서 수질오염 및 수생태계 훼손의 주요 원인으로 작용하고 있다(Yu et al., 2015; Fonseca et al., 2018; Choi et al., 2019). 농업용 저수지는 인근 유역의 농경 활동에서 발생하는 영양염류에 의한 부영양화 및 녹조발생 우려가 높은 수자원에 해당한다(Gu et al., 2016). 농어촌공사 관할 저수지의 수질측정망의 분기별 자료(2021년 04월 기준)를 기준으로 수질 등급별 저수지 현황을 살펴보면 매우 좋음 228개소(24.1%), 좋음 250개소(26.5%), 약간좋음 191개소(20.2%), 보통 110개소(11.6%), 약간 나쁨 72개소(7.6%), 나쁨 66개소(7.0%), 매우 나쁨 28개소(3%)로 나타나고 있다.

농업용저수지의 물이 농업용수로 사용되기 위해서는 4등급 이내를 호소 수질등급을 만족하여야 한다. 그러나 전국 저수지의 약 17%가 4등급 이하의 수질을 보이면서 농업용수 사용에 어려움에 겪고 있다(Kim, 2010; KRC, 2017). 농업용수의 수질개선을 위해서는 자연정화기능을 가진 인공습지가 보편적으로 적용되고 있다. 한국농어촌공사는 1997년부터 농업용 저수지 수질개선 사업을 통하여 약 20여개 이상의 사업지구에서 대규모 인공습지를 조성하여 운영·관리하고 있다.

인공습지는 침전, 여과, 흡착, 미생물분해, 식물에 의한 정화 등 자연 상태의 습지가 보유하고 있는 정화능력을 인위적으로 향상시켜 오염물질을 저감하는 시설로 상류에서 발생된 생활하수, 축산폐수 등의 점오염원과 도로, 농경지 등에서 강우시 발생하는 비점오염원의 오염물질 저감이 가능하다(Gavin et al., 2004; Lee et al., 2009; Choi, 2021). Vymazal (2017)은 인공습지를 통하여 평균 1,057kgN/ha/yr의 질소 저감이 가능

하다고 제시하고 있으며, Kasak(2018)도 농업지역에서 발생되고 있는 연간 1,375kgN/ha/yr의 질소 저감이 가능하다고 제시하고 있다(Vymazal, 2017; Kasak et al., 2018). 유럽, 북미, 아시아 및 호주에서 농업용수를 처리하기 위하여 조성된 습지에서는 130~155kgPha/yr가 제거되는 것으로 보고되고 있다(Vymazal, 2016; Land et al., 2016). 인공습지는 수질개선 뿐만 아니라, 생물서식처 제공, 생물 다양성 증대, 자연생태계 복원 등의 기능을 수행한다(Masi et al., 2018; Kang, 2019). 인공습지는 친수 공간 조성을 통한 지역주민과 시민의 휴식 및 자연체험 학습의 장을 마련하는 등 부가적인 가치가 큰 시설이다(Ko et al., 2010; MOE, 2017).

인공습지는 생태계를 구축하는 기술로 수심분포, 유입량 및 유출량, 물흐름 분포, 체류시간, 수질 처리효율, 종횡비, 개방수역/폐쇄수역 구성비 등이 중요한 설계인자이다(Choi et al., 2014). 그러나 인공습지 설계시 과도한 소요면적과 생태학적 및 수문학적 요소가 아닌 토목설계인자로 인하여 수질저하 및 낮은 생태성 등이 지속적으로 문제가 되고 있다. 특히 습지의 부적절한 형상비, 과도한 개방수역 면적, 수위관리 미흡, 초기우수 취입시스템 및 운영관리 미흡 등은 시설의 효율과 유지관리에 큰 영향을 끼친다. 따라서, 본 연구는 전국에 분포하는 농업용 저수지의 수질개선을 위해 설치된 인공습지의 현장조사를 통하여 수질 정화기능의 구조적 문제점을 분석하고 습지 설계 및 운영시 고려하여야 할 사항을 제시하고자 수행되었다.

2. 연구방법

2.1 현장조사 지점 현황

국내 대규모 습지는 2003년에 감돈 저수지 수질개선사업지구(전라남도 무안군)에 시범사업의 일환으로 인공습지가 조성된 이후 현재까지 개소수가 크게 증가하였다. 본 연구에서는 저수지의 특성, 지역적 분포 및 설치된 공정의 대표성, 접근성과 운영년수 등을 고려하여 11개 사업지구에 조성된 23개 인공습지에 대하여 실태조사를 수행하였다(Fig. 1). 인공습지의 지역별 분포는 경기지역 4개, 충청지역 10개, 호남지역 5개, 영남지역 4개소이다. 대상 인공습지는 2003년부터 2016년에 걸쳐 준공된 시설이며 인공습지, 침강지, 고효율 습지 등의 형태로 조성되어 있다(Table 1). 습지의 유역면적은 481~3,025ha, 인공습지 면적 0.51~4.37ha로 나타났으며, 유역면적 대비 습지면적 비율(Surface area/Catchment area, SA/CA)은 0.11~0.43%의 범위로 평균 0.28%로 나타났다.

2.2 현장조사 방법

인공습지는 다양한 생태계서비스 기능, 즉 수질정화기능, 물순환기능, 생태적기능, 문화적기능 등을 가진 자연기반해법(Natural Based Solution, NBS)이기에 설계단계부터 융합적 설계인자가 반영되어야 한다. 설계의 적절성 및 설계요류와 관련된 문제점의 도출은 시공과 유지관리문제와도 서로 관련이

Table 1. Characteristics of the stream water quality improvement project sites investigated in this study

Location (Province/City, County)		Initial of location	Constructed year	Name of wetland	Characteristics of wetland		
					Watershed area(ha)	Wetland area(ha)	No. of cell
Gyeonggi	Hwasung	HD	2014	HD-1	628	1.96	4
				HD-2		0.76	4
	Uiwang	UU	2015	UU-1	1,555	1.26	4
				UU-2		0.94	3
Chungnam	Hongsung	HHD	2009	HHD-1	1,345	3.30	4
				HHD-2		1.33	3
				HHD-3		0.68	2
	Seosan	SSA	2012	SSA-H	1,936	-	-
				SSA-1		3.04	4
				SSA-2		2.82	5
	Asan	AD	2013	AD-1	2,097	0.88	3
				AD-2		4.37	4
		AS	2014	AS-1	481	1.97	5
				AS-2		0.51	5
Jeonbuk	Gochang	GG	2011	CG-1	3,025	4.33	5
				CG-2		3.08	5
Jeonnam	Muan	MG	2003	MG-1	1,001	2.79	5
				MG-2		1.09	5
	Hampyung	HW	2009	HW-1	1,308	2.38	4
Gyeongbuk	Uisung	UG	2009	UG-1	1,295	3.07	5
				UG-2		0.59	3
	Chilgok	CH	2016	CH-1	956	1.14	5
				CH-2		1.52	4

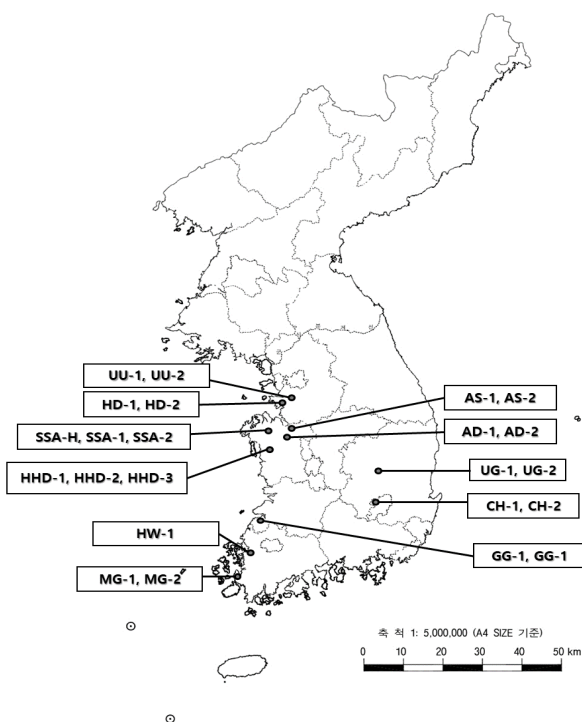


Fig. 1. Location of constructed wetlands for this study.

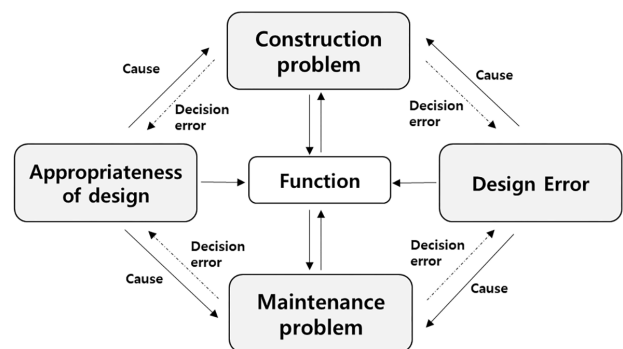


Fig. 2. Deduction of wetland problems from field investigation trip.

있기에 정확한 진단을 위해서는 Fig 2와 같이 유기적인 분석 작업이 필요하다. 부적절한 설계 및 설계상 오류는 시공 및 추 후 유지관리문제의 원인이 될 수 있으며 반대로 설계상에는 하자가 없으나 시공상 하자나 유지관리 노력의 부족에 의해 발생된 시설의 기능적 문제를 설계 문제로 판단하거나 오인하는 경우가 있을 수 있으므로 현장방문 조사시 정확히 구분하여 진단해야 한다. 따라서 본 연구에서는 기 조성된 인공습지의 설계 및 운영 적절성을 평가하고자 하였으며 Fig. 3과 같은 절차를 통하여 수행되었다. Fig. 3은 수질개선 사업지구 현장

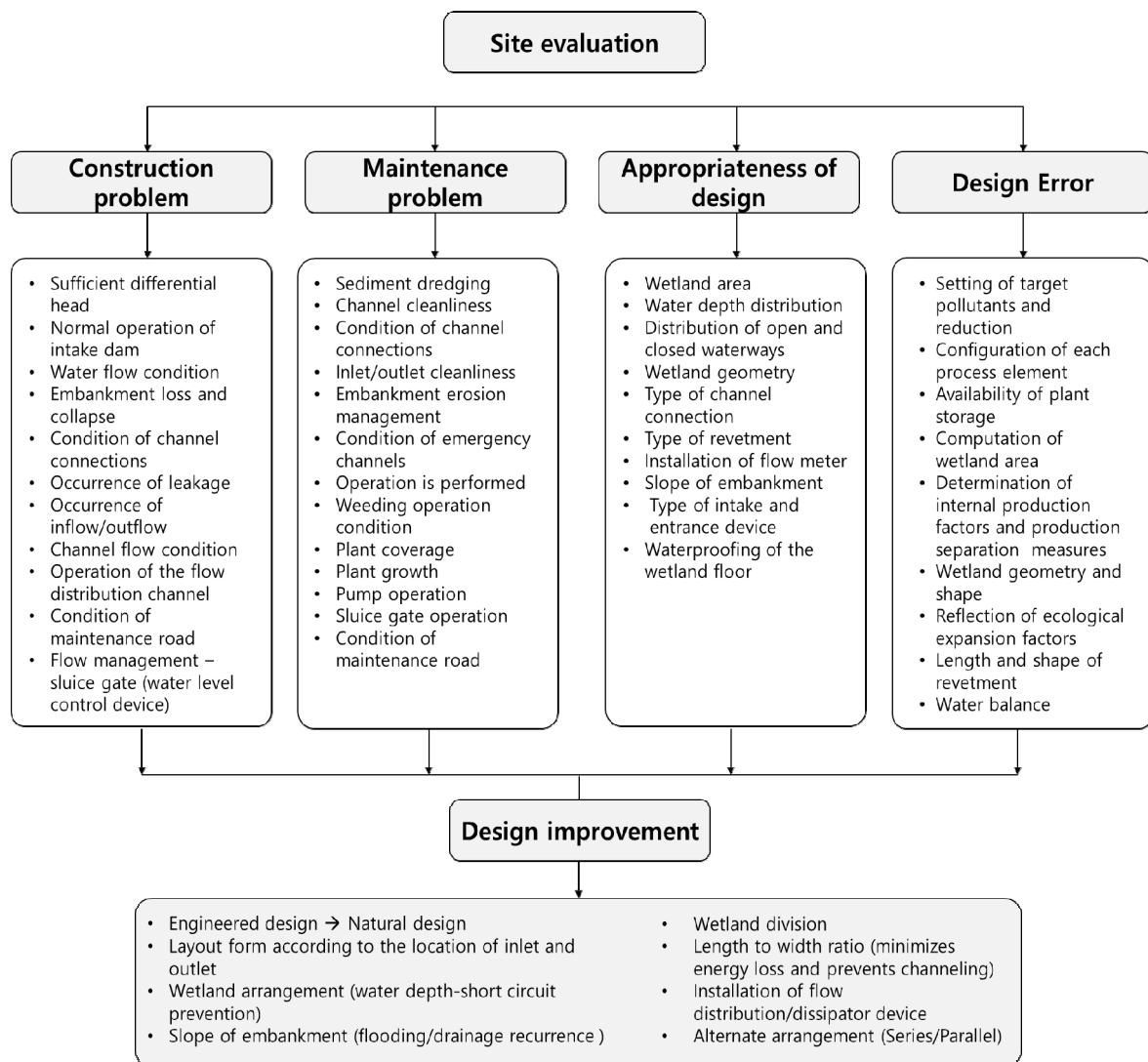


Fig. 3. Brief contents conducted in the field investigation.

조사시 시공문제, 유지관리문제, 설계의 적절성, 설계상 오류 문제를 파악하기 위한 절차이다. 현장 조사시 체크리스트를 통하여 인공습지의 운영수심, 유로흐름, 유지관리 현황 등에 대해 분석을 수행하였다. 또한, 인공습지의 취입보 형식, 유입보, 인입수로 길이, 셀(Cell) 형태, 셀 연결 형태 등에 대한 조사를 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 취입보

3.1.1 취입보의 적절성 평가

취입보는 취수량을 조절할 수 있어야 하며, 취수보 내부에 퇴적되는 퇴적물을 배출시킬 수 있는 구조로 설계된다. 취입량은 취입보와 함께 습지 유입구에 수문을 설치하여 취입량을 조절하거나 차단할 수 있는 구조로 설치된다. Table 2는 현장 조사시 습지별 적용된 취입보 형태를 정리하여 나타낸 것이다. 조사 결과 전체 23개소 습지시설 중 약 30% 정도가 기계식

유압형 가동보, 콘크리트보 21.7%, 고무가동보 17.4%, 권상형 가동보가 13% 설치되어 있는 것으로 조사되었다. 게이트 형 수문보는 8.7%로 나타났으며, 나머지 8.7%는 하수처리장 방류수를 처리를 위한 습지로 별도의 취입보 없이 습지와 직결되어 있는 것으로 나타났다. HW-1, CH-2, UG-1, UU-2, HD-1, HD-2, SSA-1, SSA-2, AS-1 및 AS-2는 기계식 가동 취입보 형태를 보이는 것으로 조사되었다. 가동보의 각도조절에 의해 수위조절이 가능한 구조로 취입유량을 관리하고 있는 것으로 조사되었으며, 취수에 문제가 없는 것으로 나타났다. 국내 대규모 습지 중 처음으로 내 적용된 CH-1을 제외한 2010년 이전에 설치된 습지 MG-1, MG-2, CH-1, UG-2, HHHD-3은 콘크리트 형태의 취수보를 적용하고 있는 것으로 조사되었다. 이와 같은 콘크리트 형태의 취수보는 구조적으로 가장 간단한 형식로서 처리대상 하천의 유황에 따라 수문을 조절하여 습지로 유입되는 유량을 관리하여 취수하나, 콘크리트 보에서 퇴적물이 매우 빠르게 쌓여 적정 취수위 확보를 위해 별도 수문 설치 및 주기적인 유지관리를 통하여 퇴적물을 제거해주어야 하는 것으로 분석되었다. GG-1, GG-2 및

Table 2. Details of the applied intake dams

No.	Name of Wetland	Type	Water intake control	Discharge
1	MG-1	Concrete	○	○
	MG-2	Concrete	○	○
2	HW-1	Mechanical(Rotary)	○	○
3	GG-1	Rubber	○	○
	GG-2	Rubber	○	○
4	CH-1	Concrete	○	○
	CH-2	Mechanical oil pressure type	○	○
5	UG-1	Mechanical oil pressure type	○	○
	UG-2	Concrete	×	○(temporary)
6	UU-1	Directly connected	×	×
	UU-2	Mechanical wire type	○	○
7	HD-1	Mechanical oil pressure type	○	○
	HD-2	Mechanical oil pressure type	○	○
8	SSA-H	Directly connected	×	×
	SSA-1	Mechanical wire type	○	○
	SSA-2	Mechanical wire type	○	○
9	HHD-1	Gate type	○	○
	HHD-2	Gate type	○	○
	HHD-3	Concrete	○	○
10	AD-1	Rubber	○	○
	AD-2	Rubber	○	○
11	AS-1	Mechanical oil pressure type	○	○
	AS-2	Mechanical oil pressure type	○	○

AD-2는 고무 가동보 형태로 적용되고 있으며, 취수 조절이 가능한 것으로 분석되었다. GG-1, GG-2 및 AD-2에 적용된 고무 가동보는 하천수위가 일정 수준이상으로 상승하면 배후지의 범람을 방지하기 위하여 자동으로 바람이 빠지면서 전도되는 것으로 나타났다. 따라서, 고무 가동보는 수위가 미리 정해진 수위 이상으로 상승할 경우 전도되어 본류하천의 유량을 바이패스 시키기에 높낮이에 의한 수위조절 기능은 어려운 것으로 평가되었다. 취입보 형식별 가동현황을 조사한 결과, 대부분의 취입보는 정상적으로 가동 중이었으나 형식별로 1개소 시설 정도가 기계적인 문제로 인하여 정상적으로 작동하지 않은 것으로 평가되었다. 전체 23개소 습지시설 중 3개소 정도가 비정상 작동하는 것으로 나타났으며 비정상 작동상태의 원인으로는 지속적인 가뭄으로 인한 수위 센서의 미작동, 취입보 내부에 과도한 유사퇴적 및 기계식 수문틀에 협잡물 걸림문제 등으로 나타났다. 따라서, 유로경사가 큰 유입하천(계곡형 저수지)에는 콘크리트 보를 적용하고, 수두확보가 어렵고 유로경사가 작고 큰 하천, 배후지 범람위험이 큰 지역에는 고무 가동보를 설치하는 것이 적절할 것으로 판단된다. 또한, 유로경사 중간, 제방고가 높은 소규모 하천의 경우 권상형 가동보와 콘크리트 보와 연계 설치가 필요하다. 수위변동이 심한 하천 및 습지로 유입되는 유량을 비교적 세

밀하게 조절할 필요가 있는 지점에서는 유압식 가동보 및 회전식 가동보가 적절하며, 게이트형의 경우 유로경사가 완만한 지역으로 홍수시 즉각적인 수문조작이 가능한 지점에 적절한 것으로 평가되었다.

3.2 인입수로

3.2.1 인입수로 길이

인입수로는 취수보나 양수기에 의해 취수한 하천수, 호내수, 침강지 정체수를 습지 선단의 침사지까지 운송하는 관거 또는 수로를 지칭한다. 사업지구 인입수로의 형식은 크게 암거형과 개수로 형태로 조사되었으며, 각 습지의 인입수로 형식 및 수로길이의 적절성 평가를 수행한 결과는 Table 3과 같다. SSA-H와 SSA-1의 수로는 개수로형태로 나타났으며, 개수로를 통해 처리수의 이동이 이루어지며, 수생식물과 여재를 통해 이동과정에서 수질정화 효과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 현장조사 결과 10m 이하의 인입수로는 도로관통 취수보와 습지가 연결되어 있는 형태로 나타났으며, 10m 이상의 경우 수두확보를 위해 취수보 설치위치에 따라 인입수로 거리가 상이한 것으로 나타났다. 인공습지의 인입수로의 길이는 10m 이하 7개(31.8%), 50m 미만 7개(31.8%), 100m 미만 2개(9.1%),

Table 3. Characteristics of inflow channel type and channel length

No.	Name of wetland	Channel type	Inflow channel length	Channel shape
1	MG-1	Culvert	10m	Box
	MG-2	Culvert	60m	Circular*
2	HW-1	Culvert	220m	Circular
3	GG-1	Culvert	15m	-
	GG-2	Culvert	10m	-
4	CH-1	Culvert	15m	Circular
	CH-2	Culvert	50m	Circular
5	UG-1	Culvert	30m	Circular
	UG-2	Culvert	10m	Circular
6	UU-1	-	Directly connected	Circular
	UU-2	Culvert	10m	Circular
7	HD-1	Culvert	5m	Circular
	HD-2	Culvert	50m	Circular
8	SSA-H	Open	120m	U type open
	SSA-1	Open	130m	U type open
	SSA-2	Culvert	150m	U type open
9	HHD-1	Culvert	310m	U type open
	HHD-2	Culvert	230m	U type open
	HHD-3	Culvert	10m	U type open
10	AD-1	Culvert	90m	U type open
	AD-2	Culvert	15m	U type open
11	AS-1	Culvert	45m	U type open
	AS-2	Culvert	10m	U type open

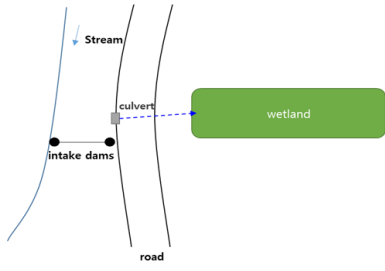
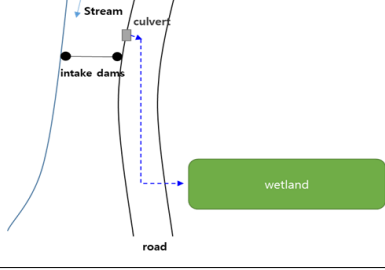
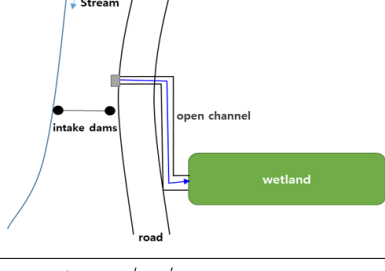
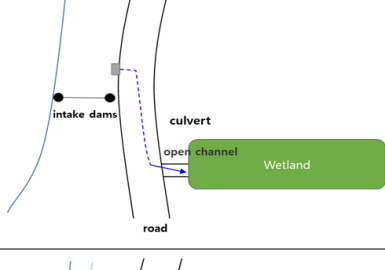
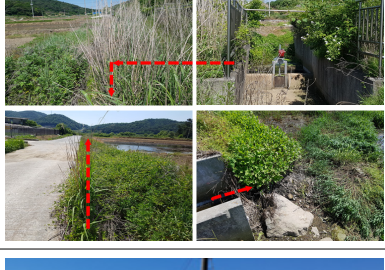
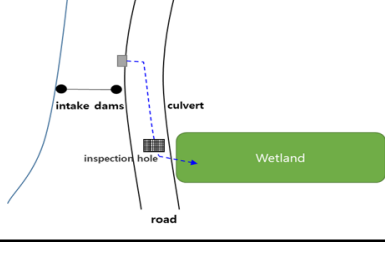
※ In all projects except MG project, which is a pilot project, the shape of the water intake port is constructed in a circular shape.

300m 미만 5개(22.7%), 300m 이상 1개(4.5%) 시설로 조사되었으며, 취수보와 습지 선단의 유입구 사이의 이격거리를 보이는 것으로 나타났다. 대부분의 인입수로 길이는 50m 미만으로 조사되었는데 이는 인입수로의 길이가 길어질수록 수두손실이 증가되기에 짧은 범위에서 설계된 것으로 판단된다. 인입수로의 길이가 길어질수록 관거 점검의 어려움, 막힘 문제 발생 등 유지관리의 어려움이 가중되며, 취입보 하류부와 상류부의 생태적 단절구간이 증가되기에 수두확보에 적합한 형식의 취입보를 선정하고 인입수로의 길이를 최대한 단축해야 하는 것으로 분석되었다. 따라서, 인입수로 설계시 수두확보에 적합한 형식의 취입보를 선정하여 인입수로의 길이를 최대한 단축시키고 가급적 U자 개수로 형태로 설치하고 설치가 어려운 구간에서는 부분적 개수로나 점검구를 설치하여 유지보수 및 수문관측이 용이하도록 설계해야 한다. 또한, 인입수로의 길이는 최대 50m를 초과하지 않도록 하고 불가피한 경우 점검부와 부분개수로 형태로 설계해야 한다(단, 양수 취입 방식일 경우 길이 제한 적용되지 않음). 저수지 유입부 유역특성이 수두확보의 어려움, 취수보 설치시 인근 지역의 침수 우려, 인입수로가 지나치게 길어지는 구간 등에서는 양수 취입 방식을 고려해야 한다.

3.2.2 인입수로의 설치사례

Table 4는 인입수로 형태의 적용현황을 보여주고 있다. GG-1 습지는 고무 가동보를 설치한 사업지구이며 인입수로는 제방도로 직하부를 통하여 암거형태로 습지선단 침사지와 연결되어 있고 수로의 길이는 약 15m로 나타났다. HHD-1 습지에 설치된 인입수로는 암거형으로 수두확보를 위하여 상당히 먼 거리인 300m 이상 이격된 게이트 수문형 취수보와 연결되어 있는 것으로 조사되었으며, 수로는 마을 민가도로 및 제방도로에 연하여 시공된 것으로 나타났다. SSA-1 습지는 약 130m 길이의 인입수로와 연결되어 있으며, U자형 개수로의 수로의 형태로 유로 흐름상태 및 막힘 여부를 육안으로 확인이 가능하고, 퇴적물과 협잡물 청소가 매우 쉬어 유지관리가 매우 용이한 것으로 나타났다. MG-3 습지의 인입수로는 부분적으로 개수로 및 암거로 구성되어 있는 것으로 나타났으며, 취수보에서 침사지 직전의 도로까지는 개수로의 형태로 도로통과 구간은 암거로 시공되어있는 것으로 나타났다. AD-1 습지의 경우에는 취입보와 습지를 연결하는 45m 길이의 인입수로에 점검구가 설치되어 수로에서의 흐름 상태를 점검하고 막힘 등의 문제가 발생할 경우 청소가 가능한 구조로 나타났다.

Table 4. Characteristics of inflow channel type and applications

Characteristic	Name of wetland	Inflow channel type	Applied cases
Inlet dam and wetland connection: culvert through road	GG-1		
Over 300m length of inflow flow channel	HHD-1		
Inlet dam and wetland connection: U-shaped open channel	SSA-1		
Inlet dam and wetland connection: culvert + open channel	MG-3		
Inlet dam and wetland connection: culvert + inspection hole installation	AD-1		

3.3 사업지구의 셀 연결방법 및 셀 특징

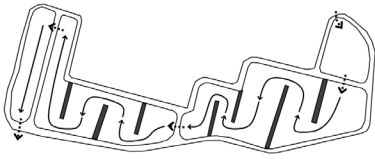
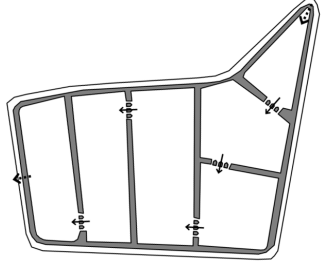
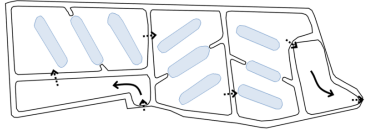
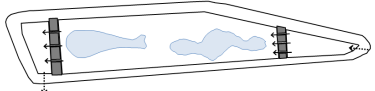
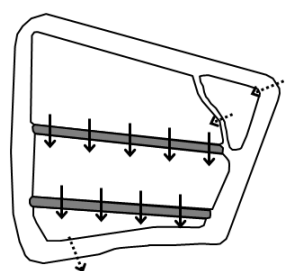
3.3.1 습지 개별 셀의 연결방법

습지에서 셀과 셀을 연결하는 가장 단순한 방법은 수평흐름이다. 그러나 현장조사를 통하여 습지의 개별 셀의 연결은 관형반응기(수평) 흐름유도 격벽의 설치, 독립된 셀에 깊은 습지/얕은 습지의 반복 종적배치, 월류벽과 깊은 습지/얕은 습지의 횡적배치, 월류벽을 통한 셀의 분할로 총 5가지 방법으로 구분

되는 것으로 나타났다(Table 5).

관형반응기(수평) 흐름유도 격벽 설치의 경우 습지 연결 전 제조건은 각 습지의 장폭비가 2:1~4:1 이상이 되어야 하며 유량이 상시적으로 일정하게 유입되어야 하는 시설로 HW 및 GG-2 습지가 해당된다. 이러한 셀 연결방법은 유량이 일정하게 유입되지 않을 경우 우수흐름에 사용되는 않는 공간(사수지역) 발생이 과다해지며, 사수대(dead zone)에 퇴적량 증가로 육화가 빠르게 진행될 수 있다. 수심이 얕은 사수대에 대량의

Table 5. Characteristics of the wetland cell-connection and corresponding applications

Types	Method	Descriptions	Cases of wetland	Applied cases
1	Installation of a curtain wall for tubular reactor (horizontal) flow	• simple type connecting cells to cells for horizontal flow • widely using on water treatment system to minimize short circuits by excluding mixed flows (Metcalf and Eddy, 1991)	HW, GG-2	
2	Installation of a curtain wall for water flow (transform)	• same structure as the tubular reactor (horizontal) flow with a curtain wall • however, install the connection channels (structures) on a curtain wall that can separate or independent cells	AS-1	
3	Longitudinal Installation of deep wetland/shallow wetlands in independent cells	• same type with installation of a curtain wall for water flow (transform) • however, improved hydraulic flow by longitudinally placing deep wetlands inside the cell	GG-1	
4	Placement of overflow wall and deep wetland/shallow wetland in a row	• structure to move water flow through the entire upper surface of the wall separating the cell from the cell • arrange shallow wetlands and deep wetlands to the flow direction	UG-2	
5	Cell division through overflow wall	• connect individual cells and cells in the form of full-width or wide-width wear	CH-2	

사상성 조류가 증식하여 수위저하로 육화될 경우 조류의 사멸로 수질악화 및 악취문제가 발생할수 있다. 따라서 유량변동이 매우 극심한 지역의 습지 설계시 수위관리 적용은 어려울 것으로 판단된다.

수류유도 격벽 설치(변형) 구조는 전체 습지뿐만 아니라 셀별 수문의 설치로 수위관리가 가능한 구조이며 AS-1 습지가 해당된다. 그러나 수류유도 격벽의 설치(변형) 방식은 정체수층(사수지역) 발생이 과다하여 관형반응기(수평) 흐름유도 격벽의 설치와 동일한 문제가 발생된다. 이러한 구조는 하천유량이 작은 건기시 습지바닥이 노출되거나 수위가 낮게 유지되어 사상성 조류번식이 쉬운 것으로 평가되었다. 따라서, 유량의 변동폭이 적고 수위관리가 가능한 곳에 적용이 가능한 구조로 판단된다.

정형화된 습지의 동일한 셀 내부에서 깊은 습지와 얇은 습지의 반복적인 종적배치는 단화로 및 채널링(channeling)을 방지하여 수리학적 효율을 향상시킨다. 대표적 종적배치 구조는 GG-1이며 깊은습지와 얇은습지를 흐름방향과 직각으로 반복하여 배치함으로써 수리학적 효율을 향상시켰다. 습지를 유하하는 흐름의 배분과 혼합은 오염물질 제거 극대화, 여과 및 침전 등과 같은 물리적 제거기능 등의 개선효과가 발휘되는 것으로 평가되었으며, 갈수기 습지 유량 부족시 습지 내부 서식 생물체의 피난처 기능을 수행할 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 월류벽과 깊은 습지와 얇은 습지의 종적배치는 횡적배치와 다르게 수리학적 효율상승을 기대하기 어렵고, 수류흐름을 습지의 중앙부로 집중시켜 수리학적 체류시간을 단축시키는 것으로 평가되었다. 하절기 깊은 습지부에 성층화 발생시 밀도

류로 인하여 수리학적 체류시간이 단축되는 것으로 분석되었다. 그러나 이러한 배치는 유량변동이 심한 습지에서 연속적인 유수흐름 및 공간 확보를 가능하게 하는 효과가 있는 것으로 평가되었다. 즉, 습지와 습지요소 사이의 월류하는 형태의 구조는 유입 유량 증가시 자연적인 저류효과를 기대할 수 있는 것으로 나타났다.

월류벽을 통한 셀의 분할은 유입 유량이 비교적 일정한 사업 지구에 적용가능하며 CH-2 습지가 이러한 사례에 해당한다. 유량변동이 심하고, 습지 유입 유량이 매우 적은 경우 개별 습지의 흐름이 단절되기에 정체구역 발생, 물고임 현상 및 녹조 발생 등의 문제점이 발생한다. 상시 유입 유량과 부지 면적 대비 유량은 습지의 개별 셀의 연결방법에 큰 영향을 끼친다. 따라서 상시 유입유량과 부지 면적 대비 유량은 습지의 개별 셀 연결시 가장 먼저 고려해야 할 인자로 판단된다.

3.3.2 습지 셀 간 연결수로 형태

습지 연결수로 유형은 월류형과 개수로형으로 구분할 수 있으며 월류형은 침투기능을 갖는 월류형과 침투와 월류가 동시에 일어날 수 있는 연결 구조로 구분가능하다. 연구대상 습지의 셀 간 연결수로 형태는 9가지 형태로 분류되었다. 이 중에서 습지 셀 간 연결 연구는 침사지→습지, 습지 셀→셀, 습지 셀→배출연못의 연결수로 형태에서 수행되었다(Table 6, Table 7). 월류형은 오리피스형, 전폭 웨어형, 사석제방 월류형, 콘크리트 물넘이형 및 방류통형으로 나뉘며, 개수로형은 암거형 및 U 자 콘크리트관 수로형으로 구분되었다. 대표적

월류형 오리피스형은 UG-1이며, HHD-1은 전폭웨어형, GG-2는 침투월류형 I, HW-1은 침투월류형 II. CH-1은 사석제방 월류형, SSA-1은 암거 통수형, AS-2는 콘크리트 물넘이형, HD-1은 방류통형, UG-2는 개수로 수위조절용으로 나타났다. 일반적으로 월류형은 유역면적이 크고 상시적으로 기저유량이 발생하는 지구가 아니면 셀 간의 유수흐름이 단절될 수 있는 것으로 평가되었다. 그러나 유역이 크고 전기시에도 일정 수중 이상의 기저유량이 흐르는 하천수 처리시에는 연결 수로의 형태에 상관없이 습지의 유수흐름은 양호한 것으로 나타났다. 전폭웨어형은 유량분배나 습지 셀 전 구역에서 흐름을 유지시킬 수 있는 장점이 있으므로 비교적 일정한 유량이 유지되는 대형 하천이나 하수처리장 방류수 처리 및 침강지의 물을 습지로 연속적으로 순환시킬 경우에 적용이 가능한 것으로 나타났다. 침투와 월류가 동시에 일어날 수 있는 연결구조는 습지로 유입되는 유량의 큰 변화에도 유수흐름을 확보하는데 매우 유리한 구조이다. 따라서 유량변동이 매우 큰 소규모 유역에 설치되는 습지에는 침투월류형 I, II와 같은 연결수로가 적당한 것으로 나타났다.

3.3.3 사업지구의 셀 특징

인공습지 내 셀은 한 개의 습지가 과도하게 클 경우 제조작업 및 보수공사 등과 같은 유지관리가 지나치게 어렵기 때문에 셀과 셀을 나누어 제방을 유지관리용 도로나 접근로로 활용한다. 이러한 이유로 셀 설계시 수리학적 흐름에 미치는 영향과 합리적인 관리지점 수를 고려하여 결정해야 한다. 연구

Table 6. Connection channels between wetlands cells

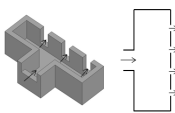
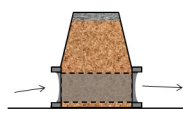
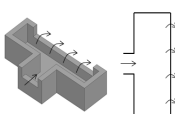
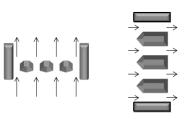
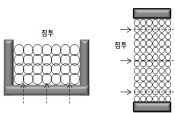
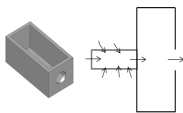
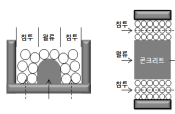
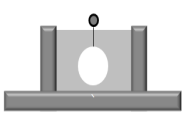
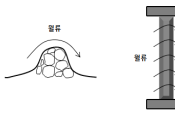
Types	Schematic diagram and photos		Types	Schematic diagram and photos	
Orifice type			Culvert type		
Full-crest weir type			Concrete overflow type		
Infiltration and overflow type I			Perforated well type		
Infiltration and overflow type II			Gate type with level control		
Gravel bed overflow type					

Table 7. Connection channels between wetlands cells

No.	Wetlands	Sedimentation tank-wetland	Cell-Cell	Cell-Pond
1	MG-1	Full-crest weir type	Orifice type	Orifice type
	MG-2	Full-crest weir type	Orifice type	Orifice type
2	HW-1	Infiltration and overflow type II	Infiltration and overflow type II	Infiltration and overflow type II
3	GG-1	Infiltration and overflow type I	Infiltration and overflow type I	Infiltration and overflow type I
	GG-2	Infiltration and overflow type I	Infiltration and overflow type I	Infiltration and overflow type I
4	CH-1	Culvert type	Gravel bed overflow type	Gravel bed overflow type
	CH-2	Culvert type	Gravel bed overflow type	Gravel bed overflow type
5	UG-1	Orifice type	Orifice type	Gate type with level control
	UG-2	Orifice type	Orifice type	Gate type with level control
6	UU-1	Full-crest weir type	Full-crest weir type	Full-crest weir type
	UU-2	Infiltration and overflow type I	Infiltration and overflow type I	Infiltration and overflow type I
7	HD-1	Perforated well type	Perforated well type	Culvert type
	HD-2	Perforated well type	Perforated well type	Perforated well type
8	SSA-H	-	-	-
	SSA-1	Full-crest weir type	Culvert type	Culvert type
	SSA-2	Full-crest weir type	Culvert type	Culvert type
9	HHD-1	Full-crest weir type	Culvert type	Culvert type
	HHD-2	Full-crest weir type	-	Culvert type
	HHD-3	-	-	-
10	AD-1	Gravel bed overflow type	-	Gate type with level control
	AD-2	Infiltration and overflow type I	Gate type with level control	Infiltration and overflow type I
11	AS-1	Concrete overflow type	Concrete overflow type	Concrete overflow type
	AS-2	Concrete overflow type	Concrete overflow type	Concrete overflow type

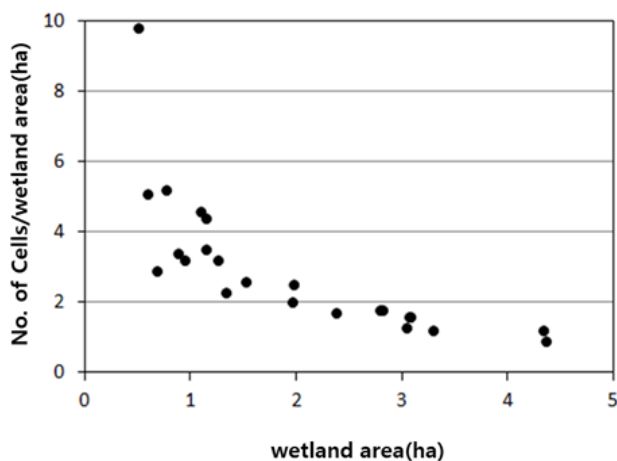


Fig. 4. Number of cells per unit area with respect to the wetland area.

대상습지의 셀 면적은 AD-2의 단일 셀 크기가 1ha로 가장 큰 규모이며, 가장 작은 셀 면적은 0.1ha의 AS-2로 나타났다. 사업지구별로 습지를 구성하고 있는 셀 수는 2개에서 최대 5개로 분석되었으며 평균 셀 수는 3.96개로 분석되었다 (Fig. 4). 습지의 규모가 증가할수록 셀의 크기가 감소하고 있는 것으로 분석되었다. 습지를 구성하고 있는 셀의 크기가 지나치게 클 경우 수리학적 효율이 떨어지고 유지관리가 어렵게

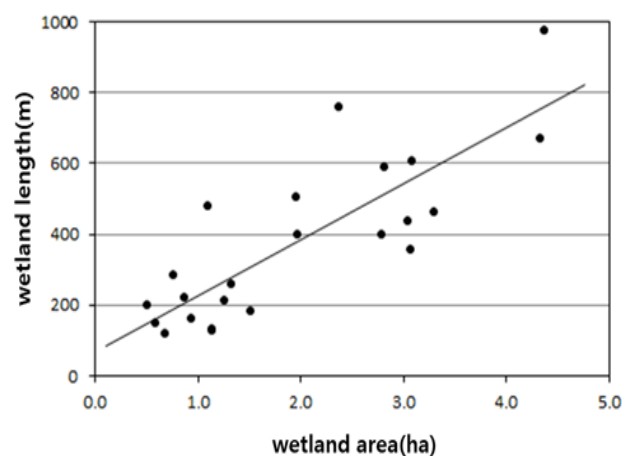


Fig. 5. Relationship of wetland areas and flow distances.

되는 문제가 발생이 되고 작은 규모의 습지에 지나치게 많은 셀로 분할하게 되면 수두손실이 커져서 적절한 유수흐름을 기대하기 어려운 것으로 조사되었다. 따라서 습지 셀의 최대 크기 및 규모 별 셀 수에 관한 설계기준의 제시가 필요한 것으로 분석되었다.

오염물질 제거를 위해 셀의 수뿐만 아니라 전체 습지의 유하 길이도 중요하다. 농업용수 수질개선 조사설계 매뉴얼(KRC,

2004)에 따르면 식생습지의 유하거리를 100m 이내로 설계할 것을 권장하고 있다. 사업지구 습지 유하거리를 산출한 결과 매뉴얼에서 제안하고 있는 설계기준을 만족하고 있는 사업지구는 1개소도 없는 것으로 평가되었다. 전체 사업지구 평균 유하거리는 377m였으며 최저 120m, 최대 970m에 이르는 것으로 나타났다. 유하거리가 길어지면 오염물질의 처리기회가 증가하지만 수두손실이 증가하여 습지내부 흐름이 원활하지 못하고 저류효과가 발생하여 습지의 종점에 도달하지 못하고 중간에 범람하여 유출이 발생한다. Fig. 5는 습지의 규모에 따른 유하거리를 도시한 것이다. 습지크기가 증가할수록 유하거리도 증가하는 경향을 보여주고 있다. 설계 매뉴얼에서 제시하고 있는 수치인 100m와는 매우 큰 차이를 보이고 있다. 이와 같은 결과는 조성된 대부분의 습지가 규모에 관계없이 단일체형의 습지로 시공되었기 때문이다.

4. 결 론

농업용 저수지의 4등급 이상의 수질등급을 요구하면서 수질 개선을 위한 인공습지가 다양하게 적용되고 있다. 본 연구에서는 농업용 저수지 수질개선을 목적으로 조성된 인공습지의 설계 및 시공실태 조사를 통하여 설계와 운영시 고려하여야 할 사항을 도출하였다.

1) 인공습지 인입수로 설계시 중요하게 고려할 사항은 수두 확보에 적합한 형식의 취입보 선정과 인입수로의 길이 및 형상으로 평가되었다. 인입수로의 길이는 최대한 짧게 설계하고 가능한 U자 형태의 개수로가 타당하게 평가되었다. 개수로 설치에 어려운 구간에서는 부분적 개수로나 점검구를 설치하여 유지보수 및 수문관측이 용이하도록 설계하여야 한다.

2) 취입보 설계시 유로경사가 큰 유입하천(계곡형 저수지)과 배후지 범람의 위험이 적은 곳에서는 콘크리트 보가 적절한 것으로 평가되었다. 수두확보가 어렵고 유로경사가 작은 하천과 콘크리트 보와 같은 고정형 취입보 설치로 배후지 범람위험이 큰 지역에서는 고무 가동보가 타당하게 평가되었다. 유로경사가 중간 정도이며 제방고가 높은 소규모 하천에서는 콘크리트 보와 연계하여 설치가 가능한 권상형 가동보 설치가 타당하게 나타났다. 수위변동이 심한 하천에서 습지 유입 유량의 세밀한 조절이 필요한 곳에서는 유압식 가동보가 타당하게 나타났다. 유로경사가 완만한 지역으로 홍수시 즉각적인 수문조작이 가능한 민가 지역에서는 게이트 형 수문이 적절한 것으로 평가되었다.

3) 습지 내 유하거리가 길어지면 오염물질 처리기회는 증가하지만 수두손실과 정체현상이 발생하면서 다양한 문제를 발생시킨다. 따라서 일정 규모 이상의 습지 설계시 복수체형 설계가 타당하며 200m 내외의 유하거리가 적절한 것으로 평가되었다.

4) 습지의 셀 연결방법 및 셀과 연결수로의 형태는 적절한 수리 흐름 및 가동을 위하여 중요한 요소이다. 습지의 최적화된 운영을 위해서는 비강우시 기저유량과 셀과 수로의 생태적 및 수리학적 기능을 고려하여 연결방법과 형태를 설계에 반영

하여야 한다.

5) 습지를 구성하고 있는 셀의 크기가 지나치게 클 경우 수리학적 효율이 떨어지고 유지관리가 어렵다. 작은 규모의 습지가 많은 셀로 분할하게 되면 큰 수두손실로 인하여 적정 유수 흐름이 나타나지 않기에 습지 설계시 셀의 최대 크기와 셀 수의 선정이 중요하게 평가되었다.

References

- Cho, H.S., Cho, H.J., Cho, K.H. 2019. Effects of Hydrogeomorphology and Watershed Land Cover on Water Quality in Korean Reservoirs. *Ecology and Resilient Infrastructure*, 6(2), 79–88. [doi:10.17820/eri.2019.6.2.079]
- Choi, K.S., Kim, S.W., Kim, D.S., Lee, Y.S. 2014. Operating Status and Improvement Plans of Ten Wetlands Constructed in Dam Reservoirs in Korea. *J. of wetlands Research*, 16(3), 431–440.
- Choi H.S., Hong J.S., Jeon M.S., Geronimo F.K.F and KIM L.H. 2019. Assessment of Water Circulation and Hydro-characteristics with LID techniques in urbanized areas. *Journal of Wetlands Research*. 21(3), 191–198. [doi:10.17663/JWR.2019.21.3.191]
- Choi H.S. 2021. Ecological Value Analysis and Development of a Comprehensive Evaluation Index for Constructed Wetlands. Ph. D. dissertation Kongju National University, Cheonan, Korea.
- Fonseca A., Boaventura R.A., Vilar V.J. 2018. Integrating water quality responses to best management practices in Portugal. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(2), 1587–1596. [DOI:10.1007/s11356-017-0610-1]
- Gavin F.B., Carsten M., Mohammad S.F., Jeong, Y.S. 2004. Efficiency of a Constructed Wetland in Removing Contaminants from Stormwater. *Wetlands*, 24(2), 459–466 [DOI:10.1672/0277-5212(2004)024[0459:EOACWI]2.0.CO;2]
- Gu, Q., Zhang, Y., Ma, L., Li, J., Wang, K., Zheng, K., Sheng, L. 2016. Assessment of reservoir water quality using multivariate statistical techniques: a case study of Qiandao Lake, China. *Sustainability*, 8(3), 243. [doi:10.3390/su8030243]
- Hwang, S.J., Lee, S.W., Son, J.Y., Park, G.A., Kim, S.J. 2007. Moderating effects of the geometry of reservoirs on the relation between urban land use and water quality. *Landscape and Urban Planning*, 82(4), 175–183. [doi:10.1016/j.landurbplan.2007.02.007]
- Kang, H. 2019. Analysis of the Causes of Flow Stagnation and Water Pollution in Yeouido Saetgang River. *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, 39(1), 25–32. [DOI:10.12652/Ksce.2019.39.1.0025]
- Kasak, K., Kill, K., Pärn, J., Mander. 2018. Efficiency of a

- newly established in-stream constructed wetland treating diffuse agricultural pollution. *Ecological Engineering*, 119, 1–7. [doi: 10.1016/j.ecoleng.2018.05.015]
- Kim, B.K., Park J.S., Won H.J., Kim., Y.Y. 2018. Long-term performance of secondary dam installed for water purification of reservoir. *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 19(10), 668–676. [DOI:10.5762/KAIS.2018.19.10.668]
- Kim, I.H. 2010. Agricultural appeal water quality management system. *Magazine of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 52(2), 2–9.
- Ko, D.H., Jung, Y.C., Seo, S.C. 2010. Removal Mechanisms for Water Pollutant in Constructed Wetlands: Review Paper. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 32(4), 379–392.
- Korea Rural Community Corporation(KRC). 2004. Manual for designing and managing constructed wetlands to improve agricultural water quality. Korea Rural Community Corporation.
- Korea Rural Community Corporation(KRC), 2017. Derivation of design elements and factors for each agricultural water quality improvement method. Korea Rural Community Corporation.
- Land, M., Granéli, W., Grimvall, A., Hoffmann, C. C., Mitsch, W. J., Tonderski, K. S., Verhoeven, J. T. (2016). How effective are created or restored freshwater wetlands for nitrogen and phosphorus removal? A systematic review. *Environmental Evidence*, 5(1), 1–26. [doi:10.1186/s13750-016-0060-0]
- Lee, C.G., Fletcher, T.D., Sun, G., 2009. Nitrogen removal in constructed wetland systems. *Engineering in Life Sciences*, 9(1), 11–22. [DOI:10.1002/elsc.200800049]
- Masi, F., Rizzo, A., Regelsberger, M., 2018. The role of constructed wetlands in a new circular economy, resource oriented, and ecosystem services paradigm. *Journal of environmental management*, 216, 275–284. [DOI:10.1016/j.jenvman.2017.11.086]
- Metcalf, L., Edd, H.P., Tchobanoglous, G. 1991. *Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse* (Vol. 4). New York: McGraw-Hill.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) 2016. *Water Vision 2020(2001–2020) 3rd revised plan*. 7–131.
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA), Korea Rural Community Corporation, 2017 *Agricultural Water Monitoring Results*. 69–71, Korea Rural Community Corporation, 2017.
- Ministry of Environment (MOE). 2017. *The 2nd Basic Water Environment Management Plan (2016–2025)*, Ministry of Environment. [Korean Literature]
- Oh, S. G., Lee, J. Y., Jung, J. W., Song, J. T., You, S. Y., & Lee, J. C. (2020). Water Quality Characteristics for Agricultural Reservoirs in Yeongsan River Basin. *J. of the Korean Society for Environmental Technology*, 21(1), 15–23. [doi:10.26511/JKSET.21.1.3]
- Park, C.K., Hwang J.S., Seo, Y.W. 2020. Improvement of agricultural water demand estimation focusing on paddy water demand. *Journal of Korea Water Resources Association*, 53(11), 939–949. [DOI:10.3741/JKWRA.2020.53.11.939]
- Shin, E.C., Lee J.K. 2012. Safety management improving way of small agricultural reservoir. *Journal of the Korean Geosynthetic Society*, 11(3), 53–58. [DOI:10.12814/jkgss.2012.11.3.053]
- Yu, G.G., Choi, J.Y., Hong, J.S., Moon, S.Y., Kim, L.H. 2015. Development and evaluation of bioretention treating stormwater runoff from a parking lot. *Journal of Wetlands Research*, 17(3), 221–227. [DOI:10.17663/JWR.2015.17.3.221]
- Vymazal, J. 2016. The use of constructed wetlands for treatment of drainage from agricultural fields. *Vodni hospodářství (Water Management)*, 66 (2016), 5–7. (in Czech)
- Vymazal, J. 2017. The use of constructed wetlands for nitrogen removal from agricultural drainage: a review. *Scientia agriculturae bohemia*, 48(2), 82–91.