

# 국내 10개 댐저수지 인공습지의 운영현황 및 개선방안

최광순<sup>+</sup> · 김세원 · 김동섭 · 이요상

한국수자원공사 K-water연구원

## Operating Status and Improvement Plans of Ten Wetlands Constructed in Dam Reservoirs in Korea

Choi, Kwangsoon<sup>+</sup> · Kim, Sea Won · Kim, Dong Sup · Lee, Yosang

K-water Institute

### 요 약

국내 10개 댐저수지 인공습지를 대상으로 수심분포, 유입량 및 유출량, 물흐름분포, 체류시간, 수처리효율, 종횡비, 개방수역/폐쇄수역 구성비 등 습지의 운영현황 및 구조적 형상에 대한 분석을 통해 인공습지의 수질정화기능을 회복시킬 수 있는 개선대책 및 운영방안을 제시하였다. 조사대상 인공습지의 처리수는 하수처리장 방류수 또는 하천수였으며, 처리수의 수질은 외국의 인공습지에 비해 전반적으로 낮은 것으로 나타났다. 특히 처리수의 BOD는 모든 습지에서 3 mg/L 이하로 매우 낮았는데, 이는 하수처리장의 고도처리 및 평수기 저농도 하천수 취입에 기인된 것으로 판단된다. 수처리효율은 TN이 7.6~67.6%(평균 24.9%), TP가 -4.9~74.5%(평균 23.7%)의 범위로 하수처리장 방류수를 처리수로 하는 인공습지에서 높은 값을 보였다. BOD는 -133.3~41.7% 범위로 습지에 따라 큰 차이를 보였으며, 대부분 습지에서 처리효율이 없거나 낮은 것으로 나타났다. 인공습지의 낮은 처리효율은 습지의 부적합한 종횡비, 과도한 개방수역 면적 등의 구조적인 문제와 수위관리 미흡, 초기우수 취입시스템 및 운영관리 미흡, 강우시 모니터링 부재 등의 운영적인 문제에 의한 것으로 나타났다. 그러므로 댐저수지 인공습지가 비점오염 저감시설로서의 역할을 할 수 있기 위해서는 댐저수지 인공습지에 적합한 습지설계 및 운영방안이 필요하다. 또한 습지 운영매뉴얼에 비점오염물질이 유출되는 강우시 모니터링이 반드시 포함되어야 하며, 댐저수지 인공습지의 수처리효율도 강우시 모니터링 자료를 토대로 평가되어야 할 것이다.

**핵심용어** : 인공습지, 댐저수지, 비점오염저감, 설계 및 운영, 모니터링, 강우기

### Abstract

To propose the improvement and management plans to strengthen the pollutant removal efficiency of dam reservoir's constructed wetlands(CWs), the operation status and configuration of CWs (including water depth, operational flow, water flow distribution, residence time, and pollutant removal efficiency, aspect ratio, open water/vegetation ratio etc.) were analyzed in 10 major wetlands constructed in dam reservoirs. The pollutant concentrations in the inflows of the studied CWs were lower than those of American and European constructed wetlands. Especially, organic matter concentrations in all of inflows were below 3 mg/L(as BOD) due to advanced treatment of sewage disposal plant and an intake of low concentration water during dry and normal seasons. The average removal efficiency of total nitrogen(TN) and total phosphorus(TP) for 10 CWs ranged from 7.6~67.6%(mean 24.9%) and -4.9~74.5%(mean 23.7%), respectively, showing high in wetlands treating municipal wastewater. On the other hand, the removal efficiency of BOD was generally low or negative with ranging from -133.3 to 41.7%. From the analysis of the operation status and configuration of CWs, it is suggested that the low removal efficiency of dam reservoir's CWs were caused by both structural (inappropriate aspect ratio, excessive open water area) and operational (neglecting water-level management, lack of facilities and operation for first flush treatment, lake of monitoring during rainy events) problems. Therefore, to enable to play a role as a reduction facility of non-point source(NPS) pollutants, an appropriate design and operation manuals for dam reservoir's CW is urgently needed. In addition, the monitoring during rainy events, when NPS runoff occur, must be included in operation manual of CW, and then the data obtained from the monitoring is considered in estimation of the pollutant removal efficiency by dam reservoir's CW.

**Keywords** : Constructed Wetland, Dam Reservoir, Design and Operation, Monitoring, Nonpoint pollutant removal, Rainy season

<sup>+</sup> Corresponding author : kchoi@kwater.or.kr

## 1. 서론

근래들어 공공수역의 수질관리에 있어 비점오염원에 대한 중요성이 부각됨에 따라 환경부는 비점오염원에 대한 오염기여도 조사를 시작으로 하여 비점오염원 관리요령(MOE, 2000), 비점오염 저감시설의 설치 및 관리운영매뉴얼(MOE, 2008), 수질오염총량관리를 위한 비점오염원 최적관리지침(MOE, 2012) 마련 등 비점오염원 관리에 많은 노력을 하고 있다. 비점오염 저감시설은 설치 대상지역의 토지이용 특성, 물리적 제한요인, 기후 및 유역특성, 유지관리 용이성, 비용의 적정성 등을 종합적으로 고려하여 선정하는데(MOE, 2008), 국내 상수원 댐저수지의 경우는 대부분 상류하천 유입부에 인공습지가 조성·운영되고 있다.

인공습지의 수처리 효율은 습지의 형태, 수심, 물 흐름분포, 식재식물의 종류, 토양환경, 처리수의 특성, 조성지의 입지상황 등 많은 요인에 의해 영향을 받기 때문에(USEPA, 2000), 인공습지를 조성하기 위한 설계 또한 이러한 요인들을 고려하여 조성하여야 한다. 현재 국내 댐저수지의 수질개선을 목적으로 약 90여 개의 인공습지가 조성되어 운영되고 있으나, 많은 인공습지가 관리소홀과 운영경험 미숙 및 부재로 인해 효율적인 운영이 되고 있지 않는 실정이다(YSRSC, 2009). Park et al.(2012)의 보고에 의하면 상수원 댐저수지 상류유역의 수질정화용 인공습지의 수처리효율

이 낮고 일부 수질항목의 수처리효율이 운영기간이 지속되면서 저하되는 것으로 나타났다. 또한, 고농도의 축산 및 하수처리를 목적으로 하는 외국의 인공습지와는 달리 국내 댐저수지 인공습지는 대부분 저농도, 고유량의 처리수 특성을 보임에도 불구하고, 이를 고려한 습지설계 및 운영이 이루어지고 있지 않고 있는 실정이다.

본 연구는 댐저수지 상류 유역의 비점오염물질 및 하수처리장 유출수 처리를 목적으로 조성되어 운영 중인 10개 인공습지를 대상으로 습지의 구조적인 측면과 운영관리 측면에서 문제점을 분석하고 인공습지의 수질정화기능을 강화할 수 있는 대책 및 운영방안을 제시하고자 함에 있다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 조사지 개요

본 연구에서는 국내 댐저수지 인공습지 중 조성면적이 일정 규모(10,000m<sup>2</sup>) 이상이고 운영 자료가 확보되어 있는 10개 인공습지(금강수계 대청댐의 소옥천습지, 낙동강수계 부항댐습지(I)과 회야댐습지, 영산강 및 섬진강수계 주암댐의 북내BioPark, 동북댐의 신평천습지, 길성천습지, 이서천습지, 동북천습지, 내북천습지, 그리고 장흥댐의 움천습지)를 선정하였다(Fig. 1, Table 1).

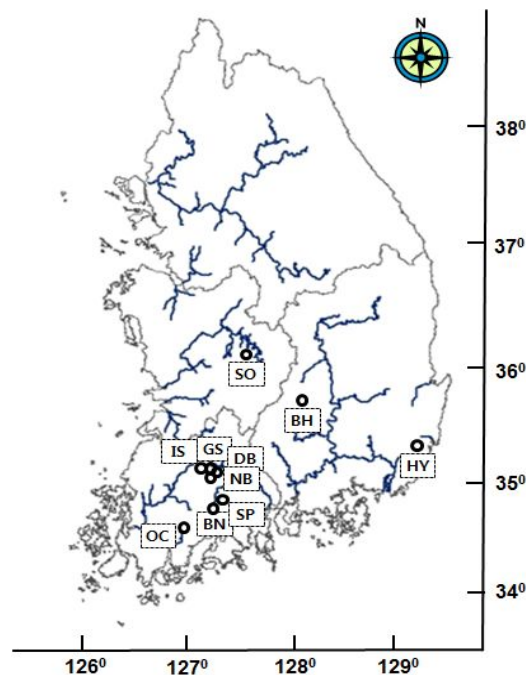


Fig. 1. Map showing the location of the 10 constructed wetlands(CWs) selected in this study. SO; Sookcheon CW, BH; Buhang CW, HY; Hyoiya CW, IS; Iseocheon CW, GS; Gilsungcheon CW, DB; Dongbokcheon CW, NB; Naebukcheon CW, BN; Boknaecheon Bio-Park, SP; Sinpyungcheon CW, OC; Omcheon CW.

Table. 1. Overview of the 10 constructed wetlands(CWs) for improving the water quality of dam reservoirs.

Water system	Dam reservoir	Constructed wetland	Area(m <sup>2</sup> )	Water supply source	Dominant vegetation
Kum River	Daechung	Sookcheon CW	155,000	· municipal wastewater · storm runoff water	<i>Phragmites communis</i> <i>Pistia srratiotes</i> <i>Eichhornia crassipes</i>
Nakdong River	Buhang	Buhang CW	29,986	· stream water · storm runoff water	<i>Phragmites communis</i> <i>Typha angustata</i> <i>Iris pseudoacorus</i>
	Hyoiya	Hyoiya CW	62,500	· stream water · storm runoff water	<i>Phragmites communis</i> <i>Typha angustata</i> <i>Nelumbo nucifera</i>
Youngsan · Seonjin River	Dongbok	Iseochoen CW	36,000	· municipal wastewater · storm runoff water	<i>Nymphoides peltata</i> <i>Zizania latifolia</i> <i>Phragmites japonica</i> <i>Phragmites communis</i>
		Gilsungcheon CW	53,880	· stream water · storm runoff water	<i>Typha angustata</i> <i>Phragmites communis</i> <i>Zizania latifolia</i> , <i>Phragmites japonica</i>
		Dongbokcheon CW	50,000	· stream water · storm runoff water	<i>Nymphaea tetragona</i> <i>Nymphoides peltata</i> <i>Iris pseudoacorus</i> <i>Typha angustata</i> <i>Phragmites japonica</i>
		Naebukcheon CW	50,000	· stream water · storm runoff water	<i>Phragmites communis</i> <i>Typha angustata</i> <i>Phragmites japonica</i>
	Juum	BoknaecheonBioPark	23,092	· municipal wastewater · storm runoff water	<i>Phragmites communis</i> <i>Typha angustata</i> <i>Phragmites japonica</i> <i>Zizania latifolia</i>
		Sinpyungcheon CW	12,360	· municipal wastewater · stream water	<i>Phragmites communis</i> <i>Typha angustata</i>
	Jangheung	Omcheon CW	56,320	· stream water · storm runoff water	<i>Phragmites communis</i> <i>Typha angustata</i>

조사 대상 인공습지의 조성 면적은 23,092~150,000m<sup>2</sup> (mean 57,300m<sup>2</sup>) 범위이며, 모두 지표흐름형(free water surface flow; FWS) 처리방식을 적용하고 있다. 습지내 수생식물로는 갈대(*Phragmites communis*), 애기부들(*Typha angustata*), 달뿌리풀(*Phragmites japonica*), 수련(*Nymphaea tetragona*), 노랑꽃창포(*Iris pseudoacorus*), 줄(*Zizania latifolia*), 물상추(*Pistia srratiotes*), 부레옥잠(*Eichhornia crassipes*), 연꽃(*Nelumbo nucifera*), 노랑어리연꽃(*Nymphoides peltata*) 등이 분포하고 있다 (Table 1). 인공습지 처리수는 주로 하천수와 초기강우 유출수이며, 일부 습지(소옥천습지, 북내BioPark, 신평천습지, 이서천습지)는 하수처리장방류수도 처리대상으로 한다. 하천수 및 초기강우 유출수를 처리하는 인공습지는 대부분 습지 직상류 하천에 보와 유도수로를 설치하여 처리수를 습지내로 유입시키고, 하수처리

장 방류수를 처리하는 습지는 유도수로 또는 하수관로를 설치하여 처리수를 공급하고 있다.

## 2.2 자료수집 및 분석

인공습지의 운영현황 분석을 위한 자료는 관리기관의 운영일지와 연구보고서(YSRSC, 2009; UDI, 2010)에 수록된 자료를 수집하였으며, 일부 습지는 현장 방문조사를 통해 자료를 수집하였다.

수집된 자료를 토대로 인공습지의 운영수심, 유입 및 유출량, 물흐름분포, 체류시간, 처리수 유입특성, 처리효율, 토양환경, 식재식물 관리현황, 모니터링 등에 대한 현황분석을 하였다. 그리고 자료분석을 통하여 인공습지의 구조적 및 비구조적(운영상) 측면에서 문제점을 도출하고 이에 대한 대책방안을 제시하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 수리수문학적 운영특성

##### 3.1.1 운영수심

본 연구의 조사대상 습지의 운영수심은 얇은습지가 0.3~0.4m, 깊은습지가 0.8~1.3m, 그리고 침강지가 1.0~2.0m의 범위로 대부분 당초 설계상 수심대로 운영하고 있는 것으로 나타났으며(Table 2), 북미의

174개 인공습지의 운영수심(0.1~2.0m)과 비슷한 값을 보였다(NADB, 1993). 그러나, 신평천습지는 침강지 수심이 0.4m로 매우 낮게 운영되고 있어 침강지와 1차습지 사이에 웨어 보강이 필요할 것으로 사료된다. 또한 옴천습지는 '13.2월까지 유출부의 stop-log의 각재가 설치되어 있지 않아 유입된 물이 얇은 습지로 유입되지 않고 대부분 수로를 통해 유출되고 있었다. 한편 일부 인공습지는 댐저수지 구역내에 조성되어 홍수기에 수일에서 수십일 침수되는 현상도 있었다.

Table. 2. Operational flow of the 10 dam reservoir constructed wetlands(CWs).

Dam reservoir	Constructed wetland	Water depth(m)			HRT(hr)
		Settling pond	Shallow wetland	Deep wetland	
Daechung	Sookcheon CW	1.1~1.4	0.4	1.2	48
Buhang	Buhang CW	2.0	0.4	1.0	11~36
Hyoiya	Hyoiya CW	ND*	0.3~0.4	ND*	5~6
Dongbuk	Iseochoen CW	1.0	0.3~0.4	0.7~0.8	48~120
	Gilsungcheon CW	1.0~1.2	0.2~0.4	0.4~0.6	24~96
	Dongbokcheon CW	1.0	0.3~0.4	0.7~0.8	48~120
	Naebukcheon CW	1.0	0.3~0.4	0.7~0.8	48~120
Juam	BoknaecheonBioPark	1.0~1.2	0.3	0.4~0.6	48~168
	Sinpyungcheon CW	0.4	0.2~0.4	0.4~0.6	60~105
Jangheung	Omcheon CW	1.0	0.2~0.4	0.8	32

ND\*: No data

##### 3.1.2 유입 및 유출량

조사대상 인공습지의 설계상 처리수의 유입량은 600~74,400 m<sup>3</sup>/day의 범위로 대부분 평수기와 강우시로 구분하여 계획되어 있었다(Table 3). 전반적으로 인공습지의 처리수 취입은 처리수 확보시스템이 구축되어 정상적으로 유입되고 있었으나, 실제 운영시 평균 유입량은 286~20,930 m<sup>3</sup>/day으로 계획유입량에 비해 적었다(Table 3). 특히 길성천습지, 내북천습지, 북

내 BioPark에서 적었고, 길성천습지의 경우는 인공습지의 유지용수가 부족한 시기에는 인근의 지하수를 유입시키고 있었다. 그리고 유입량에 비해 유출량이 현저히 적은 길성천습지와 신평천습지에서 지하침투에 의한 누수가 발생하는 것으로 나타났다. 한편, 동북댐 길성천습지와 주암댐 신평습지는 처리수의 유입량과 유출량에 대한 연속 모니터링시스템이 구축되어 있었다.

Table. 3. Design and operational flow of the 10 dam reservoir constructed wetlands(CWs).

Dam reservoir	Constructed wetland	Design flow (m <sup>3</sup> /day)	Operational Flow(m <sup>3</sup> /day)		
			In	Out	Evaporation & Leakage(%)
Daechung	Sookcheon CW	18,000 (wastewater 12,000)	10,050	7,877	2,713 (21.6)
Buhang	Buhang CW	· normal season: 16,416 · rainy season: 53,568	20,930	ND*	ND*
Hyoiya	Hyoiya CW	· rainy season: 74,400	ND*	ND*	ND*
Dongbuk	Iseochoen CW	· normal season: 10,000 · rainy season: 30,000	6,612	4,555	2,057 (31.1)
	Gilsungcheon CW	· rainy season: 53,880	4,562	1,782	2,780 (60.9)
	Dongbokcheon CW	· normal season: 10,000 · rainy season: 30,000	10,262	9,580	682 ( 6.6)
	Naebukcheon CW	· normal season: 10,000 · rainy season: 30,000	3,516	2,887	629 (17.9)
Juam	BoknaecheonBioPark	·rainy season: 7,402	286	195	91 (31.9)
	Sinpyungcheon CW	· normal season: 600 · rainy season: 800	486	253	233 (47.9)
Jangheung	Omcheon CW	· rainy season: 13,227	10,501	ND*	ND*

%; Evaporation& Leakage/In×100, ND\*: No data

3.1.3 물 흐름 분포

육안관찰을 통한 인공습지의 물흐름 분포를 조사한 결과 전반적으로 유입된 물이 균등하게 흐르지 않는 것으로 나타났다(Table 4). 습지내 중앙수로가 설치되어 있는 습지는 물 흐름이 대부분 중앙으로 치우쳐 흐르고, 수질정화기능에 중요한 역할을 하는 얇은 습지로의 물 유입이 거의 없는 것으로 관찰되었다. 그리고 운영기간이 경과하면서 갈대고체사의 퇴적이 습지의 물 흐름을 저해할 수 있는데(Choi et al.,

2007), 본 연구에서도 습지 내 고사체와 퇴적물이 많이 쌓여 있는 구간의 물흐름이 원활하지 않은 것으로 나타났다. 이는 습지 내 원활한 물 흐름을 위해서는 습지식물의 고사체 관리가 중요함을 시사한다. 조사 대상 인공습지 중 물 흐름이 균등하지 하지 않은 습지에서는 사수역(dead water region) 구간이 습지 전체 면적의 15~55% 차지하는 것으로 나타났다. 반면 대청댐 소옥천습지와 같이 사행구조의 얇은습지에서는 물흐름이 균등하게 분포하는 것으로 나타났다.

Table. 4. The water flow distribution and hydraulic residence time(HRT) of the 10 dam reservoir constructed wetlands(CWs).

Dam reservoir	Constructed wetland	Water flow distribution	HRT(hr)
Daechung	Sookcheon CW	· settling pond and deep wetland : lean to the right or central part · shallow wetland : uniform flow	48
Buhang	Buhang CW	· generally uniform flow · partially dead water region	11~36
Hyoiya	Hyoiya CW	· generally lean to the central part · partially dead water region	5~6
Dongbuk	Iseochoen CW	· generally lean to the central part · about 15% of dead water region	48~120
	Gilsungcheon CW	· generally lean to the central part · normally no flow in shallow wetland	24~96
	Dongbokcheon CW	· generally lean to the central part · about 55% of dead water region	48~120
	Naebukcheon CW	· generally lean to the central part · about 45% of dead water region	48~120
Juum	BoknaecheonBioPark	· partially dead water region · partially lean to the central part	48~168
	Sinpyungcheon CW	· generally not uniform flow · above 50% of dead water region	60~105
Jangheung	Omcheon CW	· generally lean to the central part · normally no flow in shallow wetland	32

3.1.4 체류시간

동일한 습지면적에 유량을 적게 공급하면 체류시간은 길어지고 오염물질과의 접촉기회가 증가하기 때문에 일반적으로 인공습지에서 체류시간과 처리효율의 관계를 보면 체류시간이 길수록 처리효율은 높게 나타난다. 그러나 하천수와 같이 처리수량이 많은 인공습지 경우는 체류시간을 짧게 하여 운영하는데, 이는 유량을 많이 공급하면 처리효율은 낮지만 많은 유량이 처리되기 때문에 오염물질이 제거되는 양은 많아진다. 미국은 일본과 한국에 비해 습지를 넓게 조성할 수 있는 지리적인 여건과 인공습지에 하수처리장 방류수와 같은 고농도의 처리수를 유입시키기 때문에 체류시간을 길게 설계하여 운영된다. 그러나 댐저수지의 수질개선을 목적으로 고유량 저농도의 하천수를 처리하는 일본의 인공습지의 체류시간은 대부분

0.5~10hr 정도로 짧게 운영하고 있다(K-water, 2006). MAFRA and KRC(2004)의 보고에 의하면 저농도 고유량의 농업용저수지를 처리하는 국내 마산저수지에서 체류시간에 따른 수처리효율 조사한 결과 체류시간이 6~48hr에서 효과적인 것으로 나타났다.

10개 댐저수지 인공습지의 설계 시 수리학적 체류시간은 5~168hr의 범위로 습지에 따라 큰 차이를 보였다(Table 4). 하천수를 처리하는 울산의 회야댐습지의 체류시간이 5~6hr으로 가장 짧은 반면, 동북호의 4개 습지와 주암댐의 2개 습지는 평균기 96~168hr, 강우시 24~48hr으로 가장 긴 것으로 나타났다. 그리고 대청댐의 소옥천 습지, 부항댐습지 장흥댐 읍천습지가 평균기 11~48hr으로 나타났다. 그러나 조사 대상습지의 물흐름이 균일하지 않은 것으로 보아 습지내 구간별 체류시간은 매우 상이할 것으로 판단된다.

### 3.2 수처리 효율평가

#### 3.2.1 처리수 수질

10개 인공습지의 처리수의 평균 BOD와 COD는 각각 0.5~2.7 mg/L와 1.6~5.7 mg/L 범위로 유기물농도가 매우 낮은 것으로 나타났다(Table 5). 특히 하수처리장 방류수를 처리수로 하는 소옥천습지와 북내BioPark에서도 처리수의 유기물 농도가 낮은 수준을 보였다. 부유성고형물(SS) 농도는 0.9~15.4 mg/L 범위로 하천수질기준 25 mg/L이내의 수준을 보였으며, 하천수에 비해 하수처리장 방류수의 SS농도가 높았

다. 처리수의 총질소(TN)농도는 0.92~8.91 mg/L의 범위로 하수처리장 방류수가 주요 처리수인 소옥천습지와 북내BioPark에서 높은 값을 보였으며, 그 외 인공습지에서의 TN농도는 3 mg/L 이하 수준을 보였다. 총인(TP) 농도도 0.033~0.264 mg/L의 범위로 소옥천습지(0.133 mg/L)와 북내BioPark(0.510 mg/L)에서 높았고, 다른 습지에서는 0.1 mg/L이하의 값을 보였다. 본 연구의 댐저수지 인공습지의 처리수의 수질농도는 북미의 84개 인공습지(BOD 38.8 mg/L, SS 49.1 mg/L, TN 14.0 mg/L, TP 4.2 mg/L)에 비하면 매우 낮은 수준이다.

Table. 5. Average concentration of influent and outflow water, and the removal efficiency of the 10 dam reservoir constructed wetlands(CWs).

Dam reservoir	Constructed wetland	BOD(mg/L)			TN(mg/L)			TP(mg/L)		
		IN	OUT	%	IN	OUT	%	IN	OUT	%
Daechung	Sookcheon CW	1.2	2.8	-133.	8.26	7.59	8.1	0.133	0.059	55.6
Buhang	Buhang CW	0.5	1.0	-100	2.49	2.30	7.6	0.033	0.027	18.2
Hyoiya	Hyoiya CW	2.4	1.4	41.7	2.13	1.70	20.2	0.069	0.040	42.0
Dongbuk	Iseocheon CW	1.3	1.5	22.2	2.88	1.85	35.8	0.050	0.050	0.0
	Gilsungcheon CW	1.0	1.1	11.1	1.47	1.30	11.6	0.050	0.042	16.0
	Dongbokcheon CW	1.7	1.1	-10.0	2.66	1.78	33.1	0.071	0.062	12.7
	Naebukcheon CW	1.6	2.1	-15.4	1.89	1.65	12.7	0.061	0.064	-4.9
Juam	BoknaecheonBioPark	2.7	2.1	35.3	9.57	3.10	67.6	0.510	0.130	74.5
	Sinpyungcheon CW	0.9	0.8	-31.2	2.77	2.00	27.8	0.090	0.085	5.6
Jangheung	Omcheon CW	2.0	1.8	10.0	ND*	ND*	ND*	0.046	0.038	17.4

※%: removal efficiency, ND\*: No data

#### 3.2.2 수처리효율

많은 연구에서 인공습지의 처리효율은 처리수의 수질농도가 높은 경우 높은 것으로 알려져 있다(Moshiri, 1993; Nakanuma et al., 2002; Kang and Song, 2004; Choi et al, 2008). 고농도의 하수처리장 방류수를 처리수로 하는 미국과 유럽의 인공습지에서 평균 처리효율은 BOD가 76%, SS가 69%, TN이 52%, TP가 51%로 매우 높은 반면 처리수가 하천수 또는 호수수인 일본과 한국의 인공습지 처리효율은 BOD가 10~30%, SS가 36~65%, TN이 20~40%를 보였고, TP는 40% 이내로 계절변동이 심하고 일부습지에서는 습지로부터 인이 용출되어 제거효율이 없는 경

우도 있다.

조사대상 인공습지의 평균 유기물(BOD) 처리효율은 -133.3~41.7%로 습지에 따라 상이하였고 처리효율이 없거나 낮은 것으로 나타났다(Table 5). 전반적으로 유입수의 BOD가 낮은(0.5-1.6 mg/L) 습지(소옥천습지, 부항댐습지, 길성천습지, 이서천습지, 내북천습지)에서 처리효율 없는 것으로 나타났다. 반면 TN 처리효율은 7.6~67.6%(평균 24.9%) 범위를 보였으며, 북내BioPark에서 가장 높았다. TP 처리효율은 -4.9~74.5%(평균 23.7%) 범위를 보였으며, 하수처리장방류수를 처리하는 소옥천습지와 북내BioPark에서 높은 것으로 나타났다.

### 3.3 구조적인 문제점 분석

#### 3.3.1 습지형상 및 구성비율

습지식물과 물의 접촉을 최대화시키고 원활한 물 흐름을 유도하기 위해 인공습지 설계 시 습지의 중/횡비를 최소 2:1로 권장하고 있다(MOE, 2008). 그러나 신평천습지를 포함한 일부 인공습지의 중/횡비는

1이하로 구성되어 유입부와 유출부의 거리가 짧아 단회류(short circuit) 및 사수역이 발생하고 있다(Fig. 2). 이러한 부적합한 습지의 구조적인 문제는 인공습지의 물리화학적 및 생물학적 수질정화기능에 영향을 주어 결국 수처리효율을 저하시키는 요인으로 작용하게 된다.

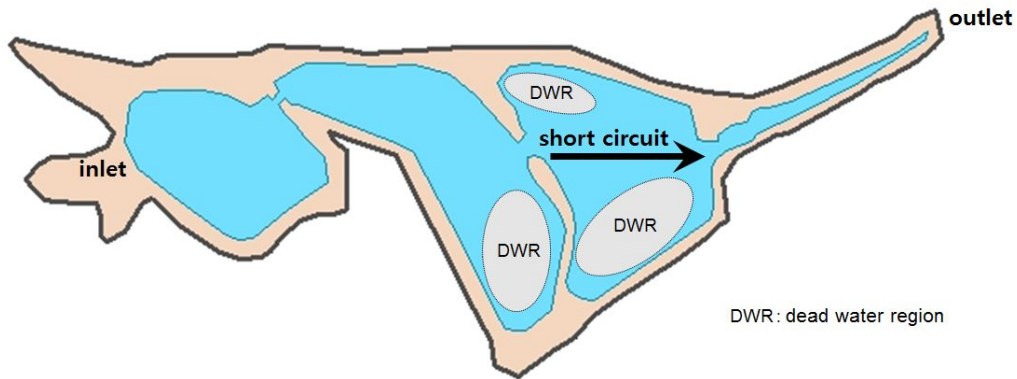


Fig. 2. The occurrence of short circuit and dead water region(DWR) due to the inadequate structural design in Sinpyungcheon CW.

습지내 흐름의 균일화를 위한 수리특성 개선을 위해서는 유량 흐름 패턴을 수평방향에 대해 균등하게 유입 및 유출이 될 수 있도록 상시 관리가 필요하며 고르게 전 지역에 대해 흐름을 균일하게 하는 것이 중요하다(USDA, 2002). 신평천습지와 같이 유하거리가 짧고 물흐름이 균등하지 못한 습지의 경우는 습지 중간에 다수의 개수부(연결수로)를 설치하거나 습지 내부를 여러 개의 구간으로 나누고 각 구간에 물을 공급하는 형태가 물의 흐름을 개선하는데 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 습지 내 물흐름개선을 통한 구조적인 문제해결을 시도한 국내 사례로는 습지 내에 칸막이를 설치하여 유로형태의 수로를 형성하여 물흐름을 개선한 마산저수지 인공습지(Nam, 2003)와 습지 하류부에 유로형태의 흠둑을 설치한 시화호 인공습지(Choi *et al.*, 2010), 그리고 침강지와 얕은습지 사이에 여러 개의 연결수로를 설치한 장흥댐 용문습지와 신평습지 등이 있다.

#### 3.3.2 개방수역(open water)

인공습지에서 개방수역은 식물이 식재되어 있지 않은 구간으로 깊은 못 또는 침강지가 해당되며, 수심이 1.0m이상으로 유지되어 어류 및 야생동물의 서식공간을 제공할 뿐만 아니라 습지내의 산소공급 및

입자성물질의 침전을 유도하는 수질정화기능도 담당한다. 일반적으로 개방수역의 면적은 습지 전체 면적의 20%로 설계하는 것을 권장한다(MOE, 2008). 그러나 소옥천 인공습지는 수심이 1m 이상으로 개방수역에 해당하는 유입부의 1차 및 2차 침강지(1.1~1.4m)와 유출부의 생태침강지(1.5m) 그리고 깊은습지(1.2m)의 면적이 전체 면적의 50% 이상으로 MOE(2008)에서 권장하는 설계기준에 비해 과도하게 조성되었다. 그리고 유입부의 1차 및 2차 침강지는 유입된 처리수의 입자성물질을 저감하기 위한 목적으로 조성하지만, 소옥천 인공습지로 유입되는 처리수는 하수처리장 방류수로 대부분 용존형태임에도 불구하고 과도한 면적으로 침강지가 조성되었다. 또한 하류부의 생태침강지의 경우는 침강지에서 발생한 식물플랑크톤이 여과과정 없이 유출수로 유출된다.

수질정화를 목적으로 조성된 대부분의 인공습지는 높은 농도의 인, 질소가 유입되기 때문에 습지 내부에서의 과도한 식물플랑크톤의 증식을 가져올 수 있으며, 습지내에서의 제거기작 없이 유출구를 통해 직접 유출되어 조류발생에 의한 민원발생 및 습지의 수처리효율을 저하시키는 원인이 될 수 있다. 그러므로 개방수역의 조류발생이 문제가 되는 인공습지의 경우 개방수역 가장자리에 정수식물을 식재하거나, 중앙부

에 부유식물을 식재하여 조류 대발생을 저감할 수 있는 방안시행이 필요할 것으로 사료된다. 또한 하류부 침강지와 유출부 사이에 얇은 습지를 조성 및 정수식물을 식재하거나 또는 여과쇄석 및 여과망을 설치하여 조류 등 부유물을 여과하는 방안도 인공습지의 수처리 효율을 향상시키는데 도움이 될 것으로 본다.

### 3.3.3 누수 및 침수

인공습지는 연중 물이 항상 유지될 수 있도록 유량공급이 이루어져야 하며 과도한 토양침수로 인해 수위가 저하되지 않게 습지바닥에 다짐작업 또는 차수막을 설치해야 한다(MOE, 2008). 또한 인공습지가 침수가 되지 않도록 조성위치를 선정하고 침수를 방지 및 시설의 안정성을 확보하기 위하여 인공습지 설계 시 습지 제방고가 극한 홍수조건에서의 댐저수위보다 60cm 이상을 권장하고 있다(MOE, 2008)

그러나 본 연구의 조사대상 인공습지 중 길성천습지와 신평천 습지에서 심각한 누수현상이 발생하였으며, 또한 소옥천습지, 부항댐습지, 음천습지, 회야댐습지는 댐 저수구역에 조성되어 강우시 댐수위 상승에 의해 일정 기간 침수되는 것으로 나타났다(Table 3). 누수현상이 심한 인공습지는 습지의 유지용수 부족 및 육상식물의 이입에 의한 육상화를 가져와 습지의 기능을 상실하게 된다. 현재 길성천은 갈수기 습지 유지용수로 지하수 관정을 설치하여 공급하고 있으나, 습지의 구조적인 문제를 근본적으로 해결하기 위해서는 누수구역에 대한 모니터링을 통해 대책방안을 수립할 필요가 있다. 한편 침수현상이 나타나는 인공습지는 시설의 안정성문제와 더불어 침수기간 동안 정상적인 습지 운영이 불가능하므로 이에 대한 대책이 필요하다. 침수기간이 장기간(30일이상) 지속되면 식재식물이 고사될 수 있으며 이를 처리하기 위한 처리비용이 발생할 수 있다. 또한 식물고사체와 습지바닥에 퇴적된 유기오염물질이 유출되어 저수지의 오염부하를 가중시킬 수 있다. 그러므로 상습적으로 침수되는 습지는 침수를 방지하기 위해 댐저수지의 운영수위를 조정하거나 또는 인공습지의 제방을 보강하는 등 습지의 운영여부 및 기능에 대한 종합적인 검토가 필요할 것으로 본다.

## 3.4 운영 및 유지관리 개선방향

### 3.4.1 수위관리

인공습지에서 수심은 습지의 수리학적 체류시간(hydraulic residence time; HRT), 대기로부터 수체로의

산소공급, 그리고 식물피복에 영향을 주며 결과적으로 습지의 수질정화기능에도 영향을 미치기 때문에 인공습지 설계 및 운영 시 습지의 수심은 매우 중요하다(USEPA, 2000). 일반적으로 FWS 형태의 인공습지의 경우 0.45m 이하의 수심에서 최적의 수처리효율을 보이나, 습지 내 다양한 생태환경 조성 위하여 0~3m 범위의 수심으로 운영한다(Moshiri, 1993). 또한 USEPA(2000)에 따르면 추운지역의 인공습지의 경우 습지의 물이 얼기 전인 늦가을에 습지의 수심을 50cm까지 상승시켜 운영하는 것을 권장한다. 우리나라의 경우도 인공습지 설계 시 습지의 전체 면적의 50%는 얇은습지(0~0.3m), 30%는 깊은습지(0.3~1.0m), 그리고 20%는 깊은못(1.0~2.0m)으로 구성하도록 권장한다(MAFRA and KRC, 2004; MOE, 2008). 또한 수생식물이 발아하는 봄철에는 생장이 저해되지 않도록 수심을 낮게 하고, 반면 동절기에는 수표면이 동결되지 않도록 깊게 유지하는 등 습지식물의 생육 및 습지생태계의 유지를 고려한 운영수심을 제시하고 있다(MOE, 2008).

본 연구에서 일부 습지는 하류부에 수위조절이 가능한 수문을 설치하여 수위를 조절할 수 있도록 설계되어 있지만, 운영관리 소홀로 인해 유입된 물이 중앙수로와 개방수역으로 집중되고 식물이 식재되어 있는 얇은습지로는 물 공급이 원활치 못한 것으로 나타났다. 이러한 습지 내 수위조절 실패는 습지내 물흐름 분포에 영향을 줄 뿐만 아니라 궁극적으로는 육상화로 인한 습지의 기능이 상실될 수 있으므로 습지의 수질정화기능과 식재식물의 생장을 고려한 수위관리가 필요하다. 특히 유출부에 수문이 설치된 습지는 계절별 및 운영수위별 수문의 각개 개수를 설정하여 운영하는 수위관리 매뉴얼을 작성하면 습지관리자의 업무에 도움이 될 것으로 판단된다.

### 3.4.2 초기우수 취입 시스템 및 운영관리

본 연구대상 인공습지의 조성목적은 대부분 비점오염물질을 저감하는 것임에도 불구하고, 초기우수를 취입할 수 있는 시스템 구축 및 관리가 미흡한 것으로 나타났다. 게다가 일부 습지는 강우시 취입구를 폐쇄시켜 운영을 하지 않은 경우도 있었다. 초기우수는 저유량이지만 고농도의 수질특성을 보이기 때문에 초기우수를 처리하면 비점오염원을 효과적으로 저감할 수 있다. 그러나 이러한 초기우수를 처리하기 위해서는 강우사상에 따라 인공습지로 유입시킬 유입량을 조절할 수 있는 유량조절시스템이 필요하다. 환경부의 인공습지 설치기준에 의하면“인공습지는 초기우



수를 최소 5mm 이상의 강우량을 처리할 수 있도록 하여야 한다(MOE, 2008)”라고 명시되어 있지만, 초기우수 처리를 취입할 수 있는 유량조절시스템 구축 및 운영에 대한 기준은 마련되어 있지 않은 실정이다. 향후 인공습지 설계기준에 초기우수 취입 및 유량조절이 가능한 시설 설치가 필요할 것으로 사료된다.

### 3.4.3 우선 처리대상 오염물질 및 처리목표 설정

조사대상 인공습지 중 소옥천 인공습지를 제외하고 처리대상 오염물질이 선정되어 있지 않은 실정이다. 소옥천 인공습지의 경우 하수처리장 방류수를 처리하며 습지에서 유입된 인부하의 20-30%를 제거하는 것을 목표로 운영되고 있다. 이는 대청댐의 주된 수질오염 물질이 인이기 때문이다. 우리나라 댐저수지의 부영양화 등 수질오염의 주요 원인이 인 유입의 증가로 볼 때 인공습지의 우선 처리대상 오염물질을 인으로 설정하여 운영하는 것이 적절할 것으로 판단된다. 또한 인공습지를 통해 처리하고자 하는 목표설정 정도 필요할 것으로 본다. 대부분 비점오염원 처리를 목적으로 하는 만큼 강우시 비점오염물질의 저감목표를 설정하여 운영할 필요가 있다.

### 3.4.4 강우시 모니터링 강화

댐저수지의 인공습지에 의한 비점오염물질 처리효율을 평가 및 저감량 산정을 위해서는 정기적인 강우시 모니터링을 필수적으로 수행되어야 함에도 불구하고 대부분 모니터링이 수행되고 있지 않은 실정이다. 게다가 일부 습지는 강우시 침수되어 모니터링을 수행할 수 없는 상황이 발생하는 것으로 나타났다. 환경부의 「비점오염저감시설의 설치 및 관리·운영 매뉴얼(MOE, 2008)」의 인공습지 유지관리에 주기적으로 수질오염물질의 유입량, 유출량 및 제거율을 조사하여야 한다”라고 명시되어 있으나, 강우시 조사의 필요성 및 조사방법 등이 명시되어 있지 않다. 인공습지의 모니터링계획 수립 시 정기적인 강우시 조사를 포함시켜 인공습지의 효율평가를 통한 운영관리가 필요하다.

## 4. 결론

비점오염원 및 하수처리장 방류수 처리를 목적으로 조성된 댐저수지 인공습지의 수처리효율은 습지에 따라 큰 차이를 보였으며, 하수처리장 방류수를 처리하는 습지에서 높게 나타났다. 전반적으로 영양염류

에 비해 유기물의 처리효율이 낮았는데, 이는 처리수의 유기물 농도가 매우 낮기 때문으로 판단된다. 일부 인공습지는 구조적인 문제로 인한 수질정화기능이 저하되는 것으로 나타났는데, 이에 대한 개선방안을 수립하여 인공습지의 기능을 회복시킬 필요가 있다. 한편 적절치 못한 수위관리는 수처리효율을 저하시키는 원인이 될 수 있으며, 인공습지의 육상화를 초래할 수 있기 때문에 이에 대한 운영방안이 수립되어야 할 것이다. 그리고 비점오염원 저감을 위한 인공습지의 경우 비점오염물질이 강우시 유출되므로 강우시 모니터링이 반드시 포함되어 운영하여야 하며, 인공습지의 수처리 효율 또한 강우시 자료를 토대로 평가되어야 할 것으로 사료된다. 또한 강우시 초기유출수를 인공습지로 유입시킬 수 있는 취입시스템 및 연속적으로 유량을 측정할 수 있는 시스템을 구축할 필요가 있다.

## References

- Choi, DH, Choi, K, Kim SW, Oh, YT, Kim, DS, Joh, SJ, Park, JC (2007). Water flow distribution and sedimentation characteristics of particle materials in the Sihwa Constructed Wetland, *J. of KSEE*, 29(4), pp. 425-437. [Korean Literature]
- Choi, DH, Choi, K, Kim, DS, Kim SW, Choi, DH, Hwang, IS, Lee, YK, Kang, H (2008). Temporal and spacial distributions of water quality and evaluation of pollutant removal efficiency in the Sihwa constructed wetland, *J. of KSEE*, 30(10), pp. 1013-1020. [Korean Literature]
- Choi, DH, Kang, H, Choi, K (2010). Case study on the improvement of pollutant removal efficiency in Sihwa constructed wetland, *J. of Wetlands Research*, 12(2), pp. 25-33. [Korean Literature]
- Kang, HJ, Song, KY (2004). Water treatment using constructed wetlands and research perspectives in Korea, *J. of Wetlands Research*, 6(2), pp. 57-63. [Korean Literature]
- K-water (2006) *Improvement of Water Purification Ability of the Sihwa Constructed Wetland*, K-water.
- MAFRA, KRC (2004). *Design and Management Points of Constructed Wetland for improving the agricultural water*, Ministry of Agriculture, Fodd and Rural Affairs(MAFRA) and Korea Rural Community Corporation(KRC).
- Moshiri, GA (1993). *Constructed Wetlands for Water*

- Quality Improvement*, CRC Press Inc., Lewis Publishers, London, pp. 35-58.
- MOE (2008). *Manual for Installation, Operation, and Management of Non-point pollutants reduction facilities*, Ministry of Environment(MOE).
- MOE (2012). *Guideline for Non-point Sources Management in TMDL Development Plan*, Ministry of Environment(MOE).
- NADB (1993). *Electronic Database Created by R. Knight, R.Ruble, R. Kadlec, and S. Reed for the U.S. Environmental Protection Agency*, Cincinnati, Ohio.
- Nakamura, K, Chiba, T, Sato, K, Morita, Y, Hosomi, M, Tanaka, S (2002) "A survey of construction wetlands in Japan," in Proceeding of the 8th International Conference on Wetland System for Water Pollution Control, 1, pp. 1128-1132.
- Nam, GS (2003). *Biological purification and bacterial community dynamics of an agricultural reservoir*, Ph.D. Dissertation, Busan University, Busan, Korea. [Korean Literature]
- Park, JS, Kim, KS, Kim, YC, Rhee, KH (2012). Evaluation of treatment efficiencies of water quality for 5 years in constructed wetland to upper region of water source, *J. of Wetlands Research*, 14(4), pp. 479-488. [Korean Literature]
- UDI (2010). *A Study on the Effect Analysis and Improvement Plan of Hyoija Constructed Wetland*, Ulsan Development Institute(UDI).
- USDA (2002). *National Engineering Handbook Part 637: Environmental Engineering, Chapter 3 Wetland Construction*, USDA, Washington, pp. 41-43.
- USEPA (2000). *Design Manual; Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*, U.S. EPA 625/R-99/010, Cincinnati, Ohio, pp. 12-20.
- YSRSC (2009). *Alternative of Optimum Management and Analysis of Removal Efficiency for Treating the Wastewater in Constructed Wetland to Upper Region of Juam Lake*. Yongsan-Somjin River System Commission(SRSC).
- 논문접수일 : 2014년 07월 31일  
○ 심사의뢰일 : 2014년 08월 04일  
○ 심사완료일 : 2014년 08월 18일