

생태적 수질정화시설로서 댐 저수지 인공습지의 구조 적정성 평가방안

반권수

한국수자원공사 환경본부 차장

A Study on Evaluation Method for Structural Suitability of Constructed Wetlands in Dam Reservoirs as an Ecological Water Purification System

Bahn, Gwon-Soo

Senior Manager, Dept. of Water Environmental Management, K-water

ABSTRACT

Many constructed wetlands have been installed in dam reservoirs nationwide for ecological purification of watershed pollutants, but aging and reduced efficiency are becoming issues. To improve the management of constructed wetlands, an objective evaluation of structural suitability is required. This study evaluated 39 constructed wetlands of 15 dams. First, through focus group interview(FGI), survey analysis, and analytic hierarchy process(AHP), eight evaluation items in the physical and vegetative aspects were selected and the evaluation criteria applied with weights were prepared. Second, as a result of the structural suitability evaluation, the average score of the overall constructed wetlands was 80.8, with 10 sites rated as 'good grade(91~100)', 22 sites rated as 'normal grade(71~90)' and 7 sites rated as 'poor grade(70 or less)'. The average score of physical structure evaluation was 52.6, with 14 sites rated as 'good', 21 sites as 'normal' and 4 sites as 'poor'. The suitability of location was good level in most constructed wetlands, but the water supply system, depth of water, ratio of length-to-width, and slope of flow channel were evaluated as 'normal' or less in constructed wetlands of 50% or more. Therefore, it was found that overall improvement was necessary for stable flow supply and flow improvement in the constructed wetland. The average score of vegetative structure evaluation was 28.2, and about 84% of them were identified as 'normal' or lower. As a result of analyzing the Spearman's correlation coefficient between the physical structure evaluation score and the vegetation structure evaluation score, there was a significant correlation($r = 0.728$, $p < 0.001$), and it was found that each evaluation factor also influences each other. As a result of the case review of 6 constructed wetlands, the appropriateness of the evaluation results was confirmed, and it was found that the location, flow rate supply, and type of wetland had a great influence on the efficiency and operation of the wetland. Through this study, it will be possible to derive structural weaknesses of constructed wetlands in dam reservoirs as a nature-based solution, to prepare types and practical alternatives for improved management of each constructed wetland in the future, and to contribute to enhancing various environmental functions.

Key Words: AHP Analysis, Green Infrastructure, Non-Point Source, Watershed Management, Nature Based Solution

Corresponding author: Gwon-Soo Bahn, Senior Manager, Dept. of Water Environmental Management, K-water, Daejeon 34350, Korea, Tel.: +82-42-629-5388, E-mail: populus76@kwater.or.kr

국문초록

유역 오염원의 생태적 정화를 위해 전국적으로 댐 저수지 내 인공습지를 많이 설치하여 운영 중이나 노후화와 효율 저하 문제가 지속적으로 제기되고 있으며 실효성 있는 관리 개선을 위해 우선적으로 구조적 적정성에 대한 객관적 평가가 필요하다. 본 연구에서는 15개 댐의 39개 인공습지를 대상으로 하였고 문헌조사, FGI 등을 통해 물리적, 식생 구조를 고려한 입지 적정성, 유량공급 시스템, 수심, 유로 길이 대 폭비, 경사도, 식재 종수, 피복도, 식생 건전성 등 8개 평가항목을 도출 후 설문, AHP 분석을 통해 산정한 가중치를 적용하여 평가기준을 제시하였다. 인공습지 구조에 대한 평가결과, 전체 평가점수는 평균 80.8점이었으며 ‘양호(91~100점)’ 등급은 10개소, ‘보통(71~90점)’ 등급은 22개소, ‘미흡(70점 이하)’ 등급은 7개소로 확인되었다. 물리적 구조의 평가점수는 만점 62.4점 중 평균 52.6점으로 ‘양호’ 등급은 14개소, ‘보통’ 등급은 21개소, ‘미흡’ 등급은 4개소로 확인되었다. 입지 적정성의 평가점수는 만점 20.2점 중 평균 18.9점으로 대부분의 인공습지에서 양호한 수준이었으나 유량공급 시스템, 수심, 길이 대 폭비, 유로 경사도는 50% 이상의 인공습지에서 ‘보통’ 이하 등급으로 평가되어 습지 내 안정적인 유량 공급, 흐름 향상을 위해 전반적인 구조 개선이 필요한 것으로 나타났다. 식재 수종, 식생 피복도, 식생 건전성 등 식생 구조 항목의 평가점수는 만점 37.6점 중 평균 28.2점으로 ‘양호’ 등급은 6개소, ‘보통’ 등급은 18개소, ‘미흡’ 등급은 15개소로 약 84%가 ‘보통’ 이하 등급으로 확인되었다. 물리적 구조 평가점수와 식생 구조 평가점수의 Spearman 상관계수를 분석한 결과, 유의미한 상관관계가 있었으며($r = 0.728, p < 0.001$), 각 세부 평가인자들 간에도 영향을 미치는 것으로 나타났다. 인공습지 6개소의 현장 사례 검증 결과 평가결과와 적정성을 확인할 수 있었고 입지, 유량 공급, 습지의 형태 등이 습지의 효율과 운영에 큰 영향을 미치고 있는 것으로 나타났다. 본 연구를 통해 자연기반 해법으로서 댐 저수지 내 인공습지 전반의 구조적 취약 요소를 도출하고 향후 인공습지별 관리개선을 위한 유형과 실천적인 대안을 마련하여 인공습지의 효용성을 높이고 다양한 환경적 기능을 증진하는데 기여할 수 있을 것이다.

주제어: AHP분석, 그린인프라, 비점오염원, 유역관리, 자연기반해법

1. 서론

유역관리에 있어서 오염물질 배출지점, 경로, 배출량 등이 특정화된 점오염원과 다르게 비점오염원은 이들 요소들이 광범위하게 분포·배출되어 관리가 상대적으로 어렵다. 전 세계적인 기후변화는 강우 패턴 변화에 큰 영향을 미치고 유출에 큰 변화를 초래하며(Mendlik and Gobiet, 2016), 이러한 현상들은 비점오염원 관리에 어려움을 더하고 있다(Park *et al.*, 2019).

국내에서도 기후변화 및 산업구조 변화 등에 따라 유역관리 정책이 점오염원에서 비점오염원 관리 중심으로 전환되고 있다(MOE, 2020; Hong *et al.*, 2021). 유역에서 직접 또는 기저 유출로 하천, 호소에 유입되는 비점오염원을 친환경적으로 저감시키기 위한 대책으로 자연기반해법(nature-based solutions)의 중요성이 높아지고 있으며 이의 일환으로 습지와 수변림과 같은 그린인프라 기법이 중요시되고 있다(Jobin *et al.*, 2004; Dwire and Lowrance, 2006; Bahn and An, 2020). 습지, 수변림은 자연의 힘과 구조를 활용함으로써 gray infrastructure를 보완하고 더 적은 비용으로 서비스를 제공하면서 더 큰 인센티브를 줄 수 있는 그린인프라 시스템이다(Browder *et al.*, 2019).

습지는 동식물 부양체제와 환경의 기능을 유지하는데 광범위한 역할을 수행해 왔으며 수자원의 조절, 토양침식의 방지, 각종 오염물질의 정화, 조류 및 어패류의 서식처로서의 역할과 동시에 인간 여가활동의 주된 장소로서 기능을 가진다(Adamus and Stockwell, 1993). 습지의 종류는 자연습지, 복원습지, 조성습지, 그리고 인공습지(constructed wetland)로 분류할 수 있는데(Gerberg *et al.*, 1996) 인공습지는 자연습지의 다양한 기능 중에서 수질정화 기능을 강화하여 인위적으로 조성한 수처리 시스템으로서 주로 생활하수, 축산폐수, 농업 및 광산 배수를 처리하는 목적으로 1960년대부터 미국과 유럽에서 설치, 운영되어 왔다(EPA, 2000).

제3차 전국내륙습지 기초조사에 따르면 국내에서 전체 습지는 약 2,500곳이며 이 중 290곳 정도가 인공습지로 전체 습지면적 중 약 3% 정도를 차지하고 있다(MOE, 2015). 댐 저수지의 부영양화 및 탁수 등 비점오염원으로 인한 수질관리의 필요성이 높아져 주로 댐 상류하천 유입부를 중심으로 인공습지 조성이 활발하게 이루어져 왔다. 국내에서 댐 저수지 내 인공습지는 2009년 기준 전국적으로 약 90여개 이상이 조성된 것으로 추산되었으며(YSRWMC, 2009) 이후로도 증가 추세에 있다. 특히, 농업용 저수지를 제외하고 대형 다목적댐 및 용수댐 저수

지 내에 조성된 수질정화용 인공습지는 2000년 초반부터 댐 건설 당시 환경영향평가 협의에 따라 설치되기 시작하였으며 현재 전국적으로 총 15개 댐에 39개소가 운영 중이다(K-water, 2021).

인공습지는 생태계를 구축하는 기술로 습지의 형태, 수심, 물흐름 분포, 식재 수종, 입지 상황 등 많은 요인의 영향을 받는다(EPA, 2000; Choi *et al.*, 2014). 따라서 댐 저수지 내 인공습지의 설계 및 조성시에도 이러한 요인들을 고려하여야 하나 설계시 수문, 수질, 생태적인 요소가 아닌 단순 경관, 친수, 토목설계 위주의 조성으로 수질 저하 및 낮은 생태성 등(Choi and Bahn, 2007; Kim *et al.*, 2021)과 관리 소홀, 운영경험 미숙 및 부재가 효율적인 운영을 저해함이 지적된 바 있다(YSRWMC, 2009). 특히, 국내 대형 다목적댐 및 용수댐 저수지 내에 조성된 수질정화용 인공습지들은 비점오염저감시설 설치 및 관리·운영에 대한 기술이 보편화되기 이전에 설치되고 노후화된 곳이 다수로 수질정화 효율이 낮고 일부 수질항목은 운영기간이 지속되면서 효율이 저하되는 것으로 나타나(Park *et al.*, 2012; Choi *et al.*, 2014) 전반적인 기능 점검과 더불어 관리 개선방안을 마련할 시기가 도래하였다.

댐 저수지 내 인공습지의 실효성 있는 관리 개선방향 도출을 위해서는 생태적 수질정화 시스템으로서 작동해야 할 습지 구조에 대해 객관적이고 상대적인 진단, 평가가 우선되어야 한다. 기존에 인공습지와 관련된 연구는 주로 수질정화 효과 분석 및 운영현황에 대한 연구 위주로 진행되었으며(Choi and Bahn, 2007; Kim and Lee, 2011; GRWMC, 2017; Cho *et al.*, 2021), 인공습지의 구조와 관련된 연구는 주로 설계인자가 수질정화 효율에 미치는 영향 분석과 최적화된 설계 기법, 모형의 제시 위주로 진행되었다(Choi and Kwon, 2002; Ham *et al.*, 2005; Park and Kim, 2017). 그리고 Son *et al.*(2015)은 조성 후 15년 경과된 수질정화용 인공습지에서 식물상과 식생 구조를 분석하여 식생 천이 및 군집의 육상화에 대한 관리 필요성을 제시하였으며 Kim *et al.*(2021)은 농업용 저수지 내 설치된 기존 인공습지의 설계 및 시공 실태를 연구하며 수질정화 기능을 위한 설계 요소별 적정 제원에 대해 제시하였다. 그러나 전국적으로 노후화되고 방대하게 분포하는 댐 저수지 내 인공습지들의 관리개선을 위해 구조적인 특성과 적정성을 종합적으로 평가하는 방법론과 평가결과를 통해 개선방안을 도출하는 연구는 시도된 바가 없다.

본 연구에서는 전국의 다목적댐 및 용수댐 저수지 내에 설치되어 관리 중인 주요 인공습지들을 대상으로 구조적 특성과 적정성에 대한 수준을 평가하고자 하였다. 인공습지 설치의 고유 목적인 자연정화 기능을 위한 물리적, 식생 측면의 주요 영향지표를 도출하고 평가기준안을 마련하여 현 수준에 대해 시범적인 평가를 시행하였다. 이를 통해 향후 댐 저수지 내 인공습

지의 관리개선을 위한 유형을 설정하고 습지별로 구체적인 개선방안을 마련하는데 활용되어 인공습지의 효용성을 높이고 자연기반해법의 그린인프라로서 다양한 환경적 기능을 창출하는데 기여할 수 있을 것이다.

II. 연구범위 및 방법

1. 연구범위

댐 저수지 내 인공습지는 강우시 상류 농경지, 축사 등으로부터 유입되는 비점오염원을 저감하기 위해 1997년부터 남강 다목적댐과 일부 농업용 댐을 대상으로 처음 조성되기 시작하였다. 이후 정부부처, 공공기관 및 지자체 등이 다양한 목적으로 지속적으로 인공습지를 조성하여 현재까지 크게 증가하고 전국적으로 광범위하게 산재하고 있다.

본 연구의 공간적 범위는 댐의 특성, 수계별 분포, 관리주체에 따른 자료 구득 및 현장 접근성 등을 고려하여 국내 주요 다목적댐 및 용수댐 15개소에 조성된 총 39개소의 인공습지를 대상으로 구조를 평가하였다. 수계별로는 한강 수계 2개 댐의 3개소, 금강 수계 1개 댐의 2개소, 영산강 수계 3개 댐의 5개소, 낙동강 수계 9개 댐의 29개소를 대상으로 하였다. 댐별 각 인공습지의 명칭은 표준화된 기준이 없으며 대부분 조성된 지역의 지명에 따라 다양하게 명명하고 있으나 본 연구에서는 전국에 산재된 다수 인공습지의 효율적인 구분을 위해 각 댐명의 영문 이니셜과 번호를 조합하여 각 습지의 명칭을 표기하였다(Figure 1 참조).

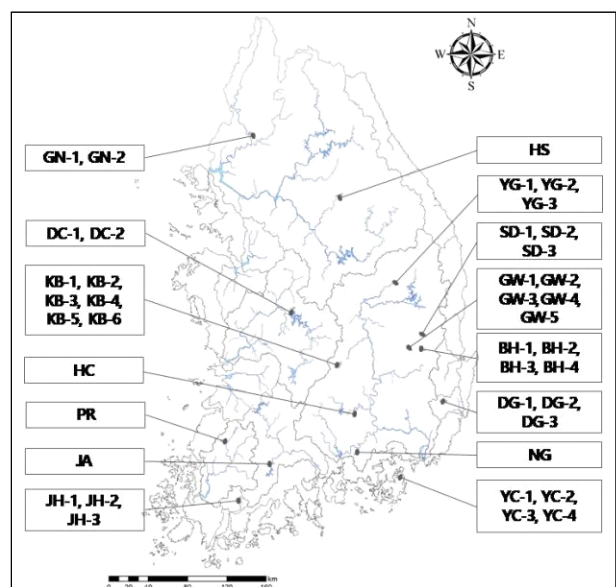


Figure 1. Location of constructed wetlands for this study

Legend: The name of the constructed wetland was written by adding a number to the initial of the dam name.

시간적 범위는 2019년 5월부터 2020년 12월까지 관련 문헌 및 현장 조사를 진행하였으며 2021년 12월까지 설문 및 조사 자료 분석 등을 진행하였다. 내용적 범위로는 댐 인공습지의 현황 조사 및 구조 평가 분석을 시행하고 이를 토대로 인공습지의 효율적인 운영을 위한 관리개선 방향을 제시하였다.

2. 연구방법

본 연구는 댐 저수지 인공습지 설치 현황 조사, 습지구조 평가항목 도출 및 기준 설정, 현장 조사 및 평가, 사례 검증 및 관리 개선방향 제안 순으로 진행되었으며 세부적인 연구흐름은 Figure 2와 같다.

1) 댐 저수지 인공습지 현황 조사

국내 15개 댐에 조성된 39개 인공습지의 구조적 평가를 위해 인공습지별 준공도면, 준공보고서 등의 문헌과 현장 담당자와의 인터뷰 등을 통해 각 인공습지의 위치 및 입지여건, 조성 시기, 습지면적, 유역면적, 수처리 용량, 식재현황 등의 기초자료를 수집하였다.

2) 인공습지 구조 평가항목 선정 및 기준 설정

인공습지의 고유 기능에 영향을 미치는 다양한 인자를 도출하기 위해 최근 10년간의 선행연구 및 비점오염저감시설 관련 설계조성·운영 가이드라인 등 문헌 10여 편 이상에서 제시된 항목들에 대해 언급된 빈도, 중요도 등을 감안하여 구조 평가를 위한 주요 인자들을 도출하여 평가 모형을 구축하였다. 평가 모형 구축 과정에 전문가 그룹을 통한 집단심층면접(focus group interview, FGI)을 실시하였다(Hong *et al.*, 2014; Bahn *et al.*, 2021). FGI는 댐 유역 수질, 수생태계 관련 실무경력이 10년 이상이고 연구경험이 풍부한 전문가 6인을 대상으로 진행

하였다.

도출된 인자는 인공습지의 특성, 설치 목적에 따라 다양한 수준이 적용될 수 있으므로 객관적인 평가인자로 적용에 앞서 인자별 가중치 설정이 필요하다. 본 연구에서는 다기준 의사결정방법의 하나인 계층분석과정(analytic hierarchy process, AHP)을 적용하였다(Saaty, 1980; 2001). AHP 기법은 의사결정의 목표 또는 평가기준이 다수이며 복합적인 경우, 이를 계층화하여 주요 요인과 세부 요인들로 분류하고 이러한 요인들을 쌍대 비교(pairwise comparison)를 통해 중요도를 산출하는 분석 방법으로서 다양한 분야의 의사결정 과정에서 널리 사용되고 있다(Kim and Kang, 2008). AHP 분석을 위한 설문 조사는 환경, 생태분야의 업무경험이 5년 이상인 관련분야 전문가 25명을 대상으로 온라인으로 진행하였다. 설문 대상자의 성비는 남성 17명, 여성 8명, 종사분야는 계획설계 분야 4명, 교육연구 분야 8명, 공공분야 13명, 전공은 조경·생태복원 14명, 환경공학 8명, 생태학 2명, 기타 1명 등으로 구성되었다(Table 1 참조).

AHP 분석으로 도출한 구조평가 모형에 평가인자별 가중치를 적용한 최종 배점을 설정한 후, 관련문헌에서 제시되어 있는 인자별 적정기준을 참고하고 FGI의 검증으로 수준을 차등화하는 평가기준을 설정하였다. 평가인자별로 100점 만점 기준, '우수(100점)', '보통(80점)', '미흡(60점)' 3개 수준으로 점수를 차등 평가한 후 인자별 가중치를 적용하여 최종 평가점수를 산정토록 하는 기준을 제시하였다.

3) 인공습지 구조 평가

AHP 평가를 통해 도출된 평가기준을 적용한 체크리스트를 활용하여 39개 인공습지를 평가하였다. 먼저 파악된 인공습지별 설계도서를 참고하고 현장조사를 병행하여 설치, 운영 중인 현 구조에 대해 평가를 실시하였다. 현장조사 시에는 객관적인 평가를 위해 3인 이상의 조사원이 댐별 인공습지 현장을 동시

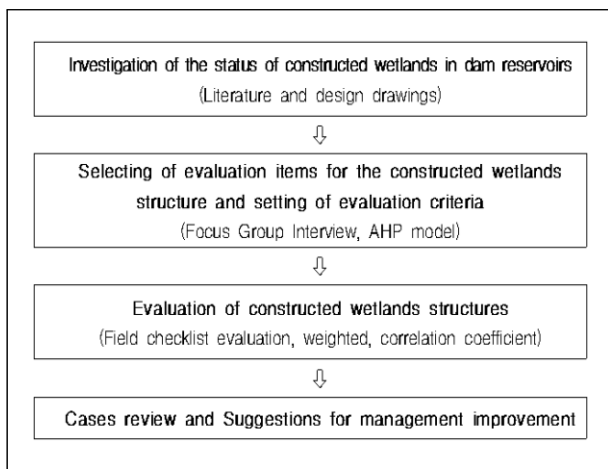


Figure 2. Research process

Table 1. Characteristics of respondents

Category		Number of respondents
Sex	Man	17
	Woman	8
Work	Design	4
	Research	8
	Public institutions	13
Major	Landscape, eco-restoration	14
	Environment	8
	Biology, ecology	2
	Etc.	1

에 방문하여 평가 후 등급을 결정하였다.

또한 인공습지의 물리적 구조 평가점수와 식생 구조 평가점수 간의 관계성과, 각 평가인자 간의 관계성을 살펴보기 위해 상관관계 분석을 실시하였다. 인공습지별 평가점수가 정규분포를 따르고 있지 않았으며 평가항목별 수준 평가에 따른 서열척도가 형성되므로, Pearson 적률상관계수(Pearson product-moment correlation coefficient) 대신에 척도의 성질을 반영하기 위해 Spearman 등위상관계수(Spearman rank order correlation coefficient)를 적용하였다(Seol, 2019). 상관계수는 -1에서 1까지의 수치로 나타나며 1 또는 -1에 가까울수록 뚜렷한 상관관계를 보이며 0에 가까울수록 상관관계가 낮음을 나타낸다(Cha and Kim, 2018). 상관분석은 Jamovi 1.0 통계 프로그램을 이용하였으며 통계적 유의수준은 $p < 0.05$ 수준으로 설정하였다.

4) 사례 검증 및 관리 개선방향 제안

39개 인공습지에 대한 평가 결과, 상위 점수와 하위 점수별 인공습지 각 3개소씩, 총 6개소를 사례로 세부 현황 및 평가결과를 비교하고 향후 관리 개선방향을 제시하였다. 구조 평가결과에서 도출된 주요 인자별 수준을 참고하고 기수집한 설계도서, 현장 조사 및 운영 담당자와의 인터뷰 등을 통해 관리 개선방향을 제시하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 댐 저수지 내 인공습지 현황

15개 댐에 조성된 39개 인공습지의 현황을 조사한 주요 결과는 Table 2와 같다. 1997년부터 2016년까지 준공되었으며 모두 자유수면형(free water surface, FWS) 인공습지로 확인되었다. 습지의 유역면적은 62.5~82,104ha, 인공습지 면적은 0.1~3.5ha, 수처리 용량은 15~40,600m³/day로 다양한 범위로 나타났다. 습지로 유입되는 유량의 체류시간(hydraulic residence time, HRT)은 4~96hr로 확인되었다.

댐 저수지의 인공습지들은 대부분 댐의 계획홍수위(flood water level, FWL) 이하 수몰 지역에 입지하고 있었다. 댐의 계획홍수위는 100년 또는 200년 빈도의 강우 시 댐이 안정적인 운영을 위해 제한해야 하는 수위이며 댐 건설 시 수몰 지역의 보상선 결정의 기준이 되는 수위이다(K-water, 2011). 실제 인공습지 조성을 위해서는 넓은 면적이 필요하며 유역면적의 1% 이상으로 하는 것이 바람직하나(MOE, 2016), 이러한 부지 확보에는 막대한 예산이 소요되며 사유지에 대한 매수도 주민 설득 과정 등의 절차로 현실적인 어려움이 크므로 댐 관리기관과 지자체들은 대부분 수몰지 내 국공유지인 홍수터를 활용해 왔다. 홍수터들은 주로 댐으로 유입되는 지천의 합류부에 넓게

형성되는 충적지로서 취락이 발달하여 다양한 토지이용이 이루어지며 상류로부터 유입되는 농, 축산 등 비점오염원의 유출 부하량이 높아 유역의 수질 보전 측면에서 집중적인 관리가 필요한 지역이다(GRWMC, 2020; Bahn *et al.*, 2021).

인공습지의 통상적인 수처리 체계 구성은 하천 또는 오염원으로부터 처리수가 침강지로 유입된 후 격벽 또는 물넘이를 통해 수생식물이 식재된 깊은 습지, 얇은 습지를 거치고 마지막으로 침전지를 통해 유출되며(MOE, 2016), 습지별로 적용 공법, 설계결과에 따라 다소 차이는 있었으나 대부분 유사한 체계로 확인되었다. 그러나 HS, JA, BH-2, GW-1, YC-3, YC-4, HC 등 7개 인공습지는 별도의 침강지, 침전지가 없으며 얇은 수심과 깊은 수심에 대한 구분 없이 일체형의 저류 연못 또는 수로형으로 설치되어 있었다. 이는 국내에서 인공습지를 포함한 비점오염저감 시설에 대한 설계 및 관리 운영 지침이 2000년대 후반 이후 수립되었고 댐 저수지 내 설치된 인공습지의 대부분이 다양한 공법과 기술이 보편화되기 이전에 설치된 곳이 다수임에 따른 현상으로 판단되었다.

습지 내 처리수 공급은 대부분 댐 저수지에 유입되는 하천에 취수용 보 또는 수문을 설치하였으며 DC-1, DC-2, JH-1, JH-2, DG-1, DG-3, HC, NG 등 8개 인공습지는 마을 하수처리장 방류수, 농업용 수로를 통한 용수 공급으로 운영 중이었다. 인공습지 내 식재수종은 1~9종으로 수질정화식물로 보편적으로 활용되는 갈대(*Phragmites australis* Trin.), 갯버들(*Salix gracilistyla*), 애기부들(*Typha angustifolia*), 꽃창포(*Iris ensata*) 등이 가장 많은 빈도로 식재되어 있었다.

2. 인공습지 구조 평가항목 도출

1) AHP 구조모형 설정 및 평가인자 선정

연구의 목적인 댐 저수지 내 인공습지의 관리개선을 위한 구조 평가에 초점을 맞추어, Figure 3과 같이 다단계 계층구조로 평가인자 우선순위 결정 모형을 설정하였다.

댐 저수지 내 인공습지는 자연습지를 모방하여 다양한 물리적, 화학적, 생물학적 작용을 독립적 또는 복합적인 과정을 통하여 최선의 수질개선 효과를 얻을 수 있도록 한 시스템임을 감안하여 균형 있는 평가를 위해 제1계층은 물리적 구조와 식생 구조 두 가지 측면에서 접근하였다. 제2계층은 최근 10년간의 선행연구 및 비점오염저감시설 관련 설계조성·운영 가이드라인 등 문헌 10여 편 이상에서 제시된 항목들에 대해 언급된 빈도, 중요도 등을 감안하고 최종적으로 댐 유역 수질, 수생태계 관련 전문가 6인을 대상으로 한 FGI를 통해 총 8개의 주요 평가인자를 도출하여 분류하였다.

물리적 구조 관련 평가인자는 입지 적정성, 유량공급 시스템, 습지 수심, 유로의 길이 대 폭비, 유로의 경사도 등 5개 인자를

Table 2. Characteristics of the constructed wetlands sites in this study

Basin	Dam	Name of wetland	Constructed year	Characteristics of wetland				
				Type	Watershed area (ha)	Wetland area (ha)	Water treatment quantity (m ³ /day)	HRT(hr)
Han river	Gunnam	GN-1	2011	FWS	304.0	1.0	7,482	17.0
		GN-2		FWS	304.0	1.4	6,410	24.0
	Hoengseong	HS	2011	FWS	580.0	0.4	ND	ND
Geum river	Daecheong	DC-1	2004	FWS	3,691.2	1.3	12,000	12.0
		DC-2	2011	FWS	1,702.4	3.5	18,000	48.0
Yeongsan river	Juam	JA	2001	FWS	1,848.5	0.2	30	ND
	Jangheung	JH-1	2003	FWS	3,320.9	1.2	10,556	32.9
		JH-2		FWS	1,594.5	0.8	16,910	36.5
		JH-3		FWS	5,697.0	1.3	11,536	29.0
	Pyungrim	PR	2007	FWS	8,165.5	3.4	8,000	ND
Nakdong river	Yeongju	YJ-1	2016	FWS	1,496.2	0.4	40,600	12.0
		YJ-2		FWS	3,494.1	0.2	1,068	12.0
		YJ-3		FWS	5,821.7	0.1	1,038	12.0
	Seongduk	SD-1	2014	FWS	82,104.9	0.3	2,309	24.0
		SD-2		FWS	82,104.9	0.6	2,291	24.0
	Bohyeonsan	BH-1	2014	FWS	35,747.9	0.1	739	6.0
		BH-2		FWS	35,747.9	0.1	590	4.0
		BH-3		FWS	35,747.9	0.1	809	7.0
		BH-4		FWS	35,747.9	0.7	4,216	11.0
	Gimcheon Buhang	KB-1	2014	FWS	44,972.4	2.5	29,376	12.0
		KB-2		FWS	44,972.4	0.2	691	24.0
		KB-3		FWS	44,972.4	0.2	691	-
		KB-4		FWS	44,972.4	0.2	605	24.0
		KB-5		FWS	44,972.4	0.7	2,074	24.0
		KB-6		FWS	44,972.4	0.7	2,074	ND
	Gunwi dam	GW-1	2010	FWS	17,190.4	0.3	ND	ND
		GW-2		FWS	17,190.4	0.2	ND	ND
		GW-3	2011	FWS	17,190.4	0.2	ND	ND
		GW-4		FWS	17,190.4	0.2	ND	ND
		GW-5		FWS	17,190.4	0.1	ND	ND
	Yeoncho	YC-1	2006	FWS	62.5	0.4	15,552	6.5
		YC-2		FWS	62.5	1.8	16,416	35.0
		YC-3		FWS	62.5	0.6	7,776	37.0
		YC-4		FWS	62.5	0.2	7,776	15.0
	Daegok	DG-1	2005	FWS	241.0	0.4	1,032	24.0
		DG-2		FWS	241.0	1.5	6,362	24.0
		DG-3		FWS	241.0	2.3	8,786	24.0
	Hapcheon	HC	2001	FWS	3,625.3	0.1	150	36.0
	Namgang	NG	1997	FWS	4,596.6	0.1	15	96.0

Table 2. Continued

Basin	Dam	Name of wetland	Characteristics of wetland	
			Composition of flow system	Dominant vegetation
Han river	Gunnam	GN-1	S→SP1→W→SP2→R	<i>Pennisetum alopecuroides</i> , <i>Typha Orientalis</i> , <i>Phragmites australis</i> , <i>Miscanthus sinensis</i>
		GN-2	S→SP1→W→SP2→R	<i>Phragmites australis</i> , <i>Salix gracilistyla</i> , <i>Miscanthus sacchariflorus</i> , <i>Pennisetum alopecuroides</i> , <i>Lythrum salicaria</i>
	Hoengseong	HS	S, AW→W→R	<i>Phragmites australis</i> , <i>Iris ensata</i> , <i>Phalaris arundinacea</i> , <i>Hemerocallis fulva</i> , <i>Typha orientalis</i> , <i>Lythrum salicaria</i> , <i>Oenanthe javanica</i>
Geum river	Daecheong	DC-1	S, STW→SP→W→R	<i>Phragmites australis</i> , <i>Typha angustifolia</i> , <i>Oenanthe javanica</i> , <i>Persicaria thunbergii</i> , <i>Acorus calamus</i> , <i>Salix gracilistyla</i> , <i>Miscanthus sacchariflorus</i>
		DC-2	STW, MW→SP1→DW→SW→PMB→SP2→R	<i>Phragmites australis</i> , <i>Iris ensata</i> , <i>Iris pseudacorus</i> , <i>Nymphoides peltatum</i> , <i>Phragmites japonica</i> , <i>Typha orientalis</i> , <i>Nymphaea tetragona</i> , <i>Miscanthus sacchariflorus</i> , <i>Acorus calamus</i>
Yeongsan river	Juam	JA	S→W→R	<i>Oenanthe javanica</i> , <i>Iris ensata</i> , <i>Phragmites australis</i> , <i>Nelumbo nucifera</i>
	Jangheung	JH-1	S→SP→SW, STW→DW→R	<i>Phragmites australis</i> , <i>Typha orientalis</i>
		JH-2	S, STW→SP→SW→DW→R	<i>Phragmites australis</i> , <i>Typha orientalis</i>
		JH-3	S→SP→SW→DW→R	<i>Phragmites australis</i> , <i>Typha orientalis</i>
	Pyungrim	PR	S→SP1→W→SP2→R	<i>Nymphaea tetragona</i> , <i>Typha latifolia</i> , <i>Iris pseudacorus</i> , <i>Miscanthus sacchariflorus</i> , <i>Zizania latifolia</i>
Nakdong river	Yeongju	YJ-1	S→SP1→SW→DW→SP2→R	<i>Salix chaenomeloides</i> , <i>Phragmites australis</i> , <i>Miscanthus sacchariflorus</i> , <i>Iris setosa</i> , <i>Typha angustifolia</i> , <i>Nymphoides indica</i> , <i>Zizania latifolia</i>
		YJ-2	S→SP1→SW→DW→SP2→R	<i>Salix chaenomeloides</i> , <i>Salix gracilistyla</i> , <i>Phragmites australis</i> , <i>Iris ensata</i> , <i>Miscanthus sacchariflorus</i> , <i>Typha angustifolia</i> , <i>Nymphoides indica</i>
		YJ-3	S→SP1→SW→DW→SP2→R	<i>Salix chaenomeloides</i> , <i>Salix gracilistyla</i> , <i>Phragmites australis</i> , <i>Iris ensata</i> , <i>Miscanthus sacchariflorus</i> , <i>Typha angustifolia</i> , <i>Nymphoides indica</i>
	Seongduk	SD-1	S→SP1→SW→DW→SP2→R	<i>Phragmites australis</i> , <i>Juncus effusus</i> , <i>Miscanthus sacchariflorus</i> , <i>Aster koraiensis</i> , <i>Typha angustifolia</i> , <i>Nymphoides indica</i>
		SD-2	S→SP1→SW→DW→SP2→R	<i>Phragmites australis</i> , <i>Juncus effusus</i> , <i>Miscanthus sacchariflorus</i> , <i>Aster koraiensis</i> , <i>Typha angustifolia</i>
	Bohyeonsan	BH-1	S→SP1→SW→DW→SP2→R	<i>Phragmites australis</i> , <i>Iris ensata</i> , <i>Miscanthus sacchariflorus</i> , <i>Typha angustifolia</i>
		BH-2	S→W→R	ND
		BH-3	S→SP1→SW→DW→SP2→R	<i>Phragmites australis</i> , <i>Iris ensata</i> , <i>Miscanthus sacchariflorus</i>
		BH-4	S→SP1→SW→DW→SP2→R	<i>Phragmites australis</i> , <i>Iris ensata</i> , <i>Miscanthus sacchariflorus</i> , <i>Typha angustifolia</i>
	Gimcheon Buhang	KB-1	S→SP1→DW→SW→SP2→R	<i>Phragmites australis</i> , <i>Acorus calamus</i> , <i>Salix gracilistyla</i>
		KB-2	S→SP1→DW→SW→SP2→R	<i>Phragmites australis</i> , <i>Acorus calamus</i> , <i>Salix gracilistyla</i>
		KB-3	S→SP1→DW→SW→SP2→R	<i>Phragmites australis</i> , <i>Acorus calamus</i> , <i>Salix gracilistyla</i>
		KB-4	S→SP1→DW→SW→SP2→R	<i>Acorus calamus</i>
		KB-5	S→SP1→DW→SW→SP2→R	<i>Phragmites australis</i> , <i>Acorus calamus</i> , <i>Salix gracilistyla</i>
		KB-6	S→SP1→DW→SW→SP2→R	<i>Phragmites australis</i> , <i>Acorus calamus</i> , <i>Salix gracilistyla</i>
	Gunwi dam	GW-1	S→Swale→R	<i>Salix gracilistyla</i>
		GW-2	S→SP→W→R	<i>Phragmites australis</i> , <i>Typha orientalis</i> , <i>Miscanthus sacchariflorus</i> , <i>Nymphaea tetragona</i>
		GW-3	S→SP→W→R	<i>Phragmites australis</i> , <i>Typha orientalis</i> , <i>Miscanthus sacchariflorus</i> , <i>Nymphaea tetragona</i>
		GW-4	S→SP→W→R	<i>Phragmites australis</i> , <i>Iris ensata</i> , <i>Miscanthus sacchariflorus</i>
		GW-5	S→W→R	<i>Phragmites japonica</i>
	Yeoncho	YC-1	S→SP→W→R	<i>Phragmites australis</i> , <i>Miscanthus sacchariflorus</i> , <i>Iris pseudacorus</i> , <i>Typha angustifolia</i>
		YC-2	S→SP→W→R	<i>Phragmites australis</i> , <i>Miscanthus sacchariflorus</i> , <i>Iris pseudacorus</i> , <i>Typha angustifolia</i>
		YC-3	S→W→R	<i>Phragmites australis</i> , <i>Miscanthus sacchariflorus</i> , <i>Iris pseudacorus</i> , <i>Typha angustifolia</i>
		YC-4	S→W→R	<i>Phragmites australis</i> , <i>Miscanthus sacchariflorus</i> , <i>Iris pseudacorus</i> , <i>Typha angustifolia</i>
	Daegok	DG-1	AW→SP→W→R	<i>Phragmites australis</i>
		DG-2	S→SP→W→R	<i>Phragmites australis</i> , <i>Typha orientalis</i>
		DG-3	AW→SP→W→R	<i>Phragmites australis</i> , <i>Typha orientalis</i>
	Hapcheon	HC	STW→W→R	<i>Iris pseudacorus</i> , <i>Oenanthe javanica</i>
	Namgang	NG	MW→SP→SW→R	<i>Oenanthe javanica</i>

Legend: FWS: free water surface, ND: no data, HRT: hydraulic residence time.

S: stream, AW: agricultural waterway, STW: sewage treatment wastewater, MW: municipal wastewater, SP: settling pond, SW: shallow wetland, DW: deep wetland, PMB: porous media box, R: reservoir.

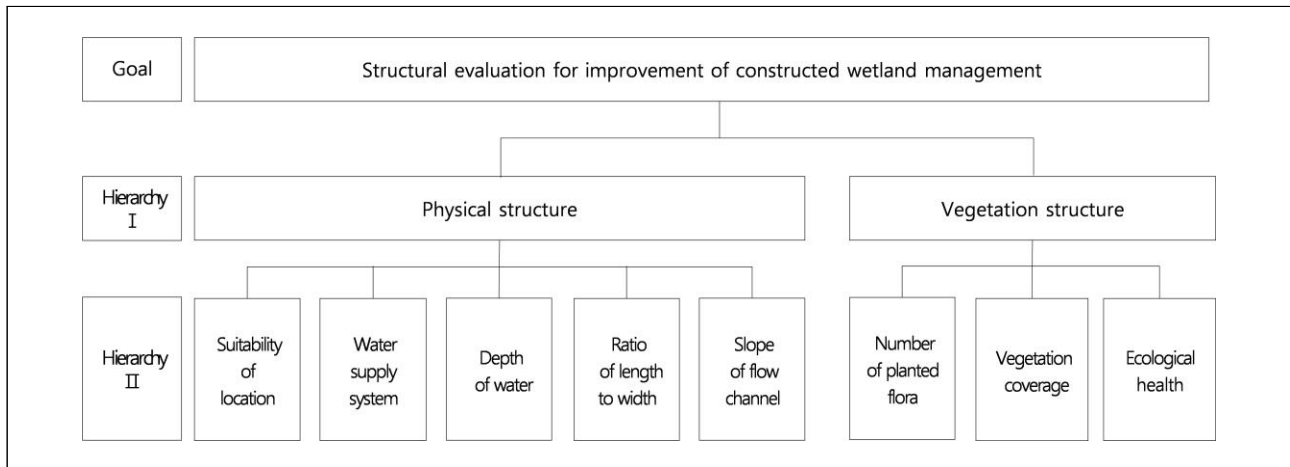


Figure 3. AHP model for deriving weights for structural evaluation of constructed wetland

선정하였다. 식생 구조 관련 평가인자는 식재 종수, 식생 피복도, 식생 건전성 등 3개 인자를 선정하였다.

입지 적정성은 인공습지의 조성 지점이 댐 상시만수위보다 높아 침수 등으로부터 안정적인 환경임을 의미한다. 인공습지의 안정적인 기능 유지와 유지관리의 편의성을 위해 입지 조건이 필수적이며 하천 제외지 또는 댐 수몰지 내에는 홍수 시 잦은 침수로 인해 습지의 사면 및 식생 등이 손상되고 이를 복구하는데 많은 비용이 발생하므로 가급적 지양하여야 한다(MOE, 2016). 그러나 국내에서 댐 인공습지의 경우 대부분 부지 확보의 용이성을 위해 댐의 계획홍수위 이하 수몰예정지 내 국공유지를 활용하여 조성되어 왔다. 본 연구에서는 입지적정성의 기준 높이를 정상적인 댐 운영조건에서 올라갈 수 있는 최대수위이며 용수공급과 수력발전, 하천유지 유량 등 정상적인 저수지 조작을 할 수 있는 저류용량의 상한선인 상시만수위(K-water, 2011)를 기준으로 하였다.

유량공급 시스템은 습지 내 연중 항상 물이 있을 수 있도록 취수보 설치 및 적절한 유입·출부 설치 등 별도의 유량공급 대책이 마련되어 있음을 의미한다. 인공습지는 수생식물의 자연적인 정화 기능을 응용한 시스템으로서 수생식물의 양호한 활착과 생육을 위해 일정한 수역을 형성할 수 있도록 평상시 원활한 물 공급이 유지되어야 한다. 그리고 초기 강우 시 오염물질을 효과적으로 유입시켜 습지를 거쳐 후 유출될 수 있도록 적절한 유량공급 시스템이 전제되어야 한다(Choi *et al.*, 2014; MOE, 2016; Kim *et al.*, 2021).

습지 수심은 다양한 생태환경 조성과 유지관리를 위해 습지 전체면적 중 얇은 습지(0~0.3m)의 면적이 충분히 확보되어 있음을 의미한다. 인공습지의 수심은 처리효율, 수생 식물의 생장, 용존산소 농도 등을 고려할 때, 평균 0.3m 정도가 유리하지만 반면에 정체 시 조류의 발생, 인공습지 내 수온의 상승 등 다양한 문제가 유발될 수 있으므로 수생식물의 다양성, 자유수

표면 확보, 침강성 확보 등을 위해 얇은 습지(0~0.3m) 50%, 깊은 습지(0.3~1.0m) 30%, 깊은 연못(1~2m) 20% 등 다양한 수심으로 설계할 수 있다(MOE, 2016). 본 연구의 대상 인공습지들은 형상, 규모가 다양하고 개별 인공습지 내에서도 깊은 습지, 얇은 습지 등으로 수심을 구분하지 않고 조성된 곳이 많아 얇은 습지의 면적 비율을 대상으로 하였다.

유로의 길이 대 폭비는 습지 내부에 일정한 유수의 흐름을 형성하며 오염원을 여과하기 위해 적절한 장폭비를 갖추어야 함을 의미한다. 인공습지는 규모가 크고 불규칙한 형상, 유로의 거리가 길수록 높은 처리 능력을 기대할 수 있는데 흐름이 발생하지 않는 사수역이 발생할 경우 처리효율의 저하가 발생할 수 있다. 유로의 길이 대 폭비를 확보하는 것은 수리학적으로는 단회로(Short circuiting)나 사수역을 최소화하기 위한 것으로 습지 내 수로에 적절한 물넘이를 설치하고 굴곡이 많은 흐름을 형성할 수 있도록 길이 대 폭비를 최소 2:1 이상으로 조성함이 바람직하다(MOE, 2016).

유로 경사도는 인공습지 내부에서 자연적인 수두차로 유수의 흐름을 형성하며 오염원을 여과하기 위해 유입부에서 유출부에 이르기까지의 적절한 단차가 형성되어야 함을 의미한다. 인공습지 내에 침강지 등과 같은 전처리시설과 다양한 형태의 물넘이가 설치되며 유입구에서 유출구까지 강우 유출수의 유입과 유출이 원활하게 이루어지기 위해 유로 경사도는 0.5~1% 범위 내로 설정토록 권장되고 있다(MOE, 2016).

식재 종수는 인공습지 내 생태계의 상호작용 및 먹이사슬로 수질정화가 촉진되도록 정수식물, 침수식물, 부엽식물 등의 수생식물이 조화롭게 도입됨을 의미하며 5종부터 7종까지의 다양한 식물의 식재가 권장되고 있다.

식생 피복도는 습지 표면을 뒤덮고 있는 식생의 피복면적 비율을 의미하며 습지에서 50% 이상 식생피복이 이루어지지 않았을 경우 수질정화 효율에 지장이 있으며 반면 식생밀도가 너

무 클 경우에도 물의 흐름에 장애가 발생할 수 있다(MOE, 2016).

식생 건전성은 인공습지의 최종 조성시에 식재한 정화 식물들이 양호하게 활착, 분포할 수 있도록 위해중, 이입종 등의 침입이 최소화되어야 함을 의미한다. 위해중, 이입종 등은 수생식물의 성장을 방해하고 육역화, 교란 등을 야기하여 인공습지의 정상적인 수질정화 기능을 저하시키고 점진적으로 습지 환경에서 서식하는 야생동물들의 서식에도 불리하게 작용될 수 있다(Son *et al.*, 2015).

2) 설문조사 및 평가인자별 기준 설정

댐 저수지 내 인공습지의 구조 평가 시 평가인자별 가중치를 고려한 배점 기준을 산정하기 위해 설문조사를 통해 각 인자별 중요도에 대한 AHP 분석을 시행하였다. 선정된 평가 인자별 설문 결과에 따른 쌍대비교 행렬을 작성하고 표준화 행렬 과정으로 각 인자의 가중치를 Table 3과 같이 산정하였다.

물리적 구조와 식생 구조의 중요도에 대한 가중치 산정 결과 물리적 구조(0.625)가 식생 구조(0.375)보다 높게 나타나 인공습지의 관리 개선에 형태, 수리적 조건 등이 더 중요한 것으로 확인되었다.

물리적 구조의 하위 평가인자 간 상대적 중요도를 평가한 결과, 입지 적정성(0.323)이 가장 높게 나타났으며 수심(0.125)이 가장 낮게 나타났다. 이는 댐 저수지 내 인공습지 대부분을 계곡홍수위 이하 부지인 홍수조절용지에 설치함에 따라 홍수기 침수 시 습지 시스템으로서 유지에 제약이 있을 수 있으며 댐에 유입되는 오염원의 효과적인 정화작용을 위해 설치 위치의 적정성이 전제되어야 함을 의미한다. 물 공급시스템(0.234)은 두 번째로 높게 나타났는데 습지 내 연중 항상 물이 있을 수 있도록 지속적인 유량 공급이 우선되어야 하므로 취수보 등 설치 여부 및 유입출부의 적정성 확보가 중요함을 의미한다.

식생 구조의 하위 평가인자 간 상대적 중요도를 평가한 결

과, 식생 건전성(0.390)이 가장 높게 나타났으며 식재 종수(0.238)가 가장 낮게 나타났다. 식생 건전성의 취약성은 습지 고유 기능을 유지하기 위한 식생의 보존 여부와 천이에 따른 육화 진행 시 기능의 변형을 유발하므로 중요한 인자로 평가되었다. 식생 피복도(0.372)는 두 번째로 높게 나타났는데 수생식물의 지속가능한 생육이 수질정화 기능과 생물서식처로서 중요한 영향을 미침을 시사한다.

평가인자별 최종 가중치는 물리적 구조 및 식생 구조별 중요성 가중치에 하위 평가인자별 중요성 가중치를 각각 적용하여 산정하였다. 물리적 구조 관련 평가인자는 입지 적정성(0.202), 유량공급 시스템(0.146), 유로 경사도(0.109), 길이 대 폭비(0.089), 수심(0.078) 순으로 나타났다. 식생 구조 관련 평가인자는 식생 건전성(0.146), 식생 피복도(0.140), 식재 수종(0.089) 순으로 나타났다.

일관성 지수(CR) 산정 결과, 물리적 구조와 식생구조의 하위 평가인자들의 가중치의 일관성 비율(CR)은 각각 0.0582, 0.0116으로 유의 수치인 0.1보다 낮게 산정되어 일관성을 확보한 것으로 나타났다.

앞서 도출된 평가인자와 가중치를 적용하여 Table 4와 같이 인공습지 구조 평가 기준을 제시하였다. 본 연구에서 제시한 평가기준은 댐 저수지 내 인공습지 구조의 객관적인 수준 평가를 통해 개선 우선 순위와 최적의 관리개선 방향 도출을 위한 실용적인 평가기준이라는데 의의가 있다. 기존 비점오염저감시설의 설치 및 관리·운영 매뉴얼(MOE, 2016)에 제시되어 있는 인공습지의 설계와 유지관리에 관한 체크리스트는 개별적인 인공습지의 계획, 관리 시에는 참고가 가능하나 전국적으로 산재된 인공습지의 구조적 적정성을 상대적으로 평가하기에는 활용적 측면에서 한계가 있다.

항목별 평가기준은 비점오염저감시설의 설치 및 관리·운영 매뉴얼(MOE, 2016)에 제시된 적정 기준을 참고하고 포커스 그룹 의견을 수렴하여 수준을 차등화할 수 있도록 등급을 세분

Table 3. Relative weight by sub index

Hierarchy 1		Hierarchy 2			
Category	Weight	Factors of appraisal	Weight	Final weight	Ranking
Physical structure	0.625	Suitability of location	0.323	0.202	1
		Water supply system	0.234	0.146	2
		Depth of water	0.125	0.078	5
		Ratio of length to width	0.143	0.089	4
		Slope of flow channel	0.175	0.109	3
Vegetation structure	0.375	Number of planted flora	0.238	0.089	3
		Vegetation coverage	0.372	0.140	2
		Ecological health	0.390	0.146	1

Table 4. Standard score criteria for structural evaluation of constructed wetland

Category	Weighted score	Factors of appraisal	Actors of appraisal	Standard score criteria		Weighted score
Physical structure	62.5	Suitability of location	Areas higher than the dam's water level ¹⁾ (frequency of flooding)	once/10year	100	20.2
				once/year	80	16.2
				2 or more times/year	60	12.1
		Water supply system	Adequacy of weir, inlet and outlet	Good	100	14.6
				Average	80	11.7
				Poor	60	8.8
		Depth of water	Area ratio of shallow wetlands(0.0~0.3 m) *50% or more ²⁾	50~60%	100	7.8
				30~50%	80	6.2
				< 30%, > 60%	60	4.7
		Ratio of length to width	At least 2:1 ³⁾	2:1 or more	100	8.9
				1.5:1~1.9:1	80	7.1
				Less than 1.5:1	60	5.3
		Slope of flow channel	0.5~1.0% ⁴⁾	0.5~1.0%	100	10.9
				1.0~1.5%	80	8.7
				< 0.5%, > 1.5%	60	6.5
Vegetation structure	37.5	Number of planted flora	5~7 species ⁵⁾	≥ 7	100	8.9
				5 ~ 6	80	7.1
				≤ 4	60	5.3
		Vegetation coverage	At least 50% of the wetland surface area ⁶⁾	50~60%	100	14.1
				40~50%	80	11.3
				< 40%, > 60%	60	8.5
		Ecological health	Emergence of endangered species and migrant species	Good	100	14.6
				Average	80	11.7
				Poor	60	8.8

Legend: 1)~6): The standard criteria and recommendations for each factor were applied in the 『Manual for Installation, Management and Operation of Non-Point Pollution Reduction Facilities』 (MOE, 2016).

화하여 설정하였다. 각 평가인자별 100점 만점으로 하고 배점 기준 등급에 따라 등급 간 확연한 득점 차이를 두고자 하였는데 하위등급과 상위등급 간의 비율을 균등하게 점수화하는 등 비간격의 경우 하나의 평가인자에 의한 편향된 결과가 나올 수 있으므로 각 평가인자의 배점을 '우수'(100점), '보통'(80점), '미흡'(60점)으로 등간격으로 점수화하였다. 유량공급 시스템, 식생 건전성의 경우, 비점오염저감시설의 설치 및 관리·운영 매뉴얼(MOE, 2016)에 정량적인 적정 기준이 제시되어 있지 않으며 습지별 입지 여건, 계절적 요인, 관리 방식, 노력도 등에 따라 다양하게 나타날 수 있으므로 현장 평가 시 전수조사를 통해 수준을 평가하고자 하였다. 본 평가표에 따라 현장 평가

후 득점한 결과에 앞서 도출한 가중치를 적용하여 최종 점수를 산정하였다.

3. 인공습지 구조 평가

인공습지 구조 평가 기준표를 활용하여 39개 인공습지의 구조에 대한 객관적인 평가를 위해 먼저 파악된 인공습지별 설계 도서를 기준으로 현장 상태에 대한 조사를 병행하였다. 현장 조사 시에는 인공습지 관련 업무 경험자 3~5인이 동시에 대상지를 방문하였다. 특히 물공급 시스템, 습지 수심 및 식생 피복도, 건전성 등과 같이 현장에서 육안으로 확인이 필요하며 조

사자 관점에 따라 불일치할 수 있는 항목들의 점수는 절충하여 항목별 평가 등급을 결정하였다. 인공습지별 평가점수에 가중치를 적용한 최종 평가 결과는 Table 5와 같으며 인공습지 구조의 적정성 수준은 항목별 총배점을 백분위 점수로 환산하여 '양호(91~100점)', '보통(71~90점)', '미흡(70점 이하)'으로 3

개 등급화하여 Figure 4와 같이 제시하였다.

39개 인공습지 전체의 평가점수는 평균 80.8점이었으며 YC-1이 96.44점으로 가장 높았으며 GN-2가 61.78점으로 가장 낮았다. '양호' 등급은 10개소, '보통' 등급은 22개소, '미흡' 등급은 7개소로 74%의 인공습지가 '보통' 이하 등급으로 평가되

Table 5. Evaluation results for each constructed wetland

Name of wetland	Total (ranking)	Physical structure						Vegetation structure			
		Sub total	Suitability of location	Water supply system	Depth of water	Ratio of length to width	Slope of flow channel	Sub total	Number of planted species	Vegetation coverage	Ecological health
GN-1	73.74(29)	49.40	16.16	8.76	4.68	8.90	10.90	24.34	7.12	8.46	8.76
GN-2	61.78(39)	37.44	12.12	8.76	4.68	5.34	6.54	24.34	7.12	8.46	8.76
HS	63.56(37)	37.44	12.12	8.76	4.68	5.34	6.54	26.12	8.90	8.46	8.76
DC-1	89.00(13)	54.32	12.12	14.60	7.80	8.90	10.90	34.68	8.90	14.10	11.68
DC-2	94.16(3)	59.48	20.20	11.68	7.80	8.90	10.90	34.68	8.90	14.10	11.68
JA	90.60(8)	56.56	20.20	8.76	7.80	8.90	10.90	34.04	5.34	14.10	14.60
JH-1	91.74(7)	60.62	20.20	14.60	7.80	7.12	10.90	31.12	5.34	14.10	11.68
JH-2	90.60(8)	59.48	20.20	11.68	7.80	8.90	10.90	31.12	5.34	14.10	11.68
JH-3	92.48(4)	58.44	20.20	14.60	7.80	7.12	8.72	34.04	5.34	14.10	14.60
PR	94.18(2)	58.36	16.16	14.60	7.80	8.90	10.90	35.82	7.12	14.10	14.60
YJ-1	87.38(14)	55.52	20.20	11.68	7.80	7.12	8.72	31.86	8.90	11.28	11.68
YJ-2	87.38(14)	55.52	20.20	11.68	7.80	7.12	8.72	31.86	8.90	11.28	11.68
YJ-3	74.56(27)	48.44	20.20	11.68	4.68	5.34	6.54	26.12	8.90	8.46	8.76
SD-1	86.96(16)	56.88	20.20	14.60	6.24	7.12	8.72	30.08	7.12	11.28	11.68
SD-2	82.92(19)	52.84	16.16	14.60	6.24	7.12	8.72	30.08	7.12	11.28	11.68
BH-1	89.02(12)	60.62	20.20	14.60	7.80	7.12	10.90	28.40	5.34	8.46	14.60
BH-2	65.84(36)	37.44	12.12	8.76	4.68	5.34	6.54	28.40	5.34	8.46	14.60
BH-3	89.66(11)	58.44	20.20	14.60	7.80	7.12	8.72	31.22	5.34	11.28	14.60
BH-4	85.18(17)	56.88	20.20	14.60	6.24	7.12	8.72	28.30	5.34	11.28	11.68
KB-1	84.04(18)	55.74	20.20	11.68	6.24	8.90	8.72	28.30	5.34	11.28	11.68
KB-2	70.26(33)	47.70	20.20	8.76	4.68	5.34	8.72	22.56	5.34	8.46	8.76
KB-3	82.26(20)	53.96	20.20	11.68	6.24	7.12	8.72	28.30	5.34	11.28	11.68
KB-4	63.56(37)	41.00	12.12	8.76	4.68	8.90	6.54	22.56	5.34	8.46	8.76
KB-5	82.26(20)	53.96	20.20	11.68	6.24	7.12	8.72	28.30	5.34	11.28	11.68
KB-6	77.56(23)	49.26	20.20	8.76	6.24	5.34	8.72	28.30	5.34	11.28	11.68
GW-1	72.04(30)	49.48	20.20	8.76	4.68	7.12	8.72	22.56	5.34	8.46	8.76
GW-2	71.42(31)	48.86	20.20	8.76	6.24	7.12	6.54	22.56	5.34	8.46	8.76
GW-3	76.64(24)	51.26	20.20	8.76	4.68	8.90	8.72	25.38	5.34	11.28	8.76
GW-4	73.82(28)	51.26	20.20	8.76	4.68	8.90	8.72	22.56	5.34	8.46	8.76
GW-5	68.08(34)	45.52	20.20	8.76	4.68	5.34	6.54	22.56	5.34	8.46	8.76
YC-1	68.08(34)	45.52	20.20	8.76	4.68	5.34	6.54	22.56	5.34	8.46	8.76
YC-2	96.44(1)	62.40	20.20	14.60	7.80	8.90	10.90	34.04	5.34	14.10	14.60
YC-3	91.96(5)	60.84	20.20	14.60	6.24	8.90	10.90	31.12	5.34	14.10	11.68
YC-4	91.96(5)	60.84	20.20	14.60	6.24	8.90	10.90	31.12	5.34	14.10	11.68
DG-1	78.08(22)	49.88	20.20	8.76	4.68	5.34	10.90	28.20	5.34	14.10	8.76
DG-2	90.60(8)	59.48	20.20	11.68	7.80	8.90	10.90	31.12	5.34	14.10	11.68
DG-3	76.00(25)	53.44	20.20	8.76	4.68	8.90	10.90	22.56	5.34	8.46	8.76
HC	71.00(32)	45.52	20.20	8.76	4.68	5.34	6.54	25.48	5.34	8.46	11.68
NG	75.56(26)	53.00	20.20	8.76	7.80	5.34	10.90	22.56	5.34	8.46	8.76
Mean ± SD	80.8 ± 10.1	52.6 ± 6.81	18.9 ± 2.83	11.2 ± 2.55	6.2 ± 1.36	7.3 ± 1.12	9.06 ± 1.70	28.2 ± 4.20	6.12 ± 1.34	11.0 ± 2.40	11.1 ± 2.14

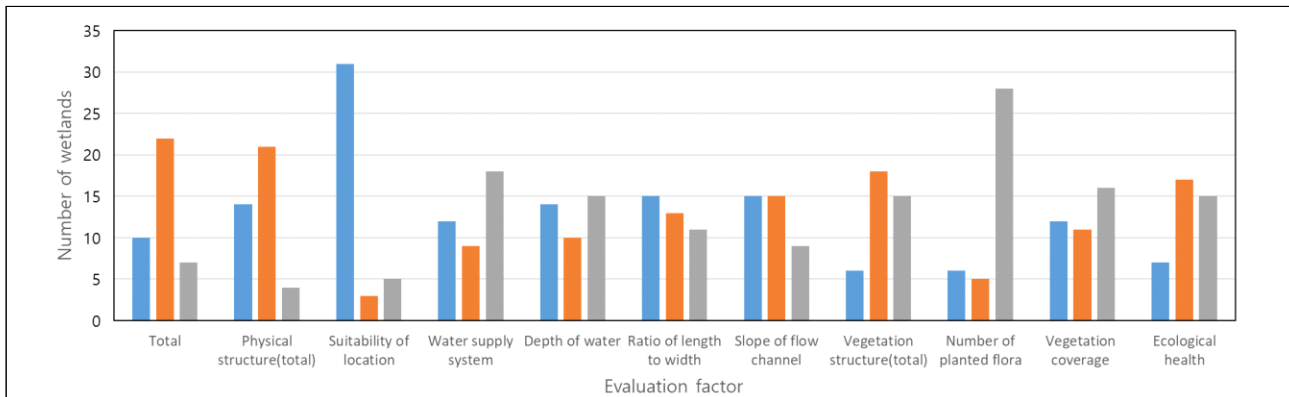


Figure 4. Number of constructed wetlands by evaluation factors and grade

Legend : ■ Good ■ Fair ■ Poor

어 생태적 정화 기능시설로서 제약이 있는 것으로 나타났다.

물리적 구조 평가의 평균점수는 52.6점이었으며 YC-2가 종합평가점수와 유사하게 62.4점으로 가장 높았고 GN-2, HS, BH-2가 37.44점으로 가장 낮았다. 물리적 구조의 '양호' 등급은 14개소, '보통' 등급은 21개소, '미흡' 등급은 4개소로 확인되었다. 물리적 구조의 세부항목 중 입지 적정성의 경우 평균점수는 18.9점으로 GN-1, GN-2, HS, DC-1, PR 등 8개소를 제외한 대부분의 인공습지에서 양호한 수준으로 나타났다. 그러나 유량공급 시스템, 수심, 길이 대 폭비, 유로 경사도의 평균점수는 각각 11.2점, 6.2점, 7.3점, 9.06점으로 50% 이상의 인공습지에서 '보통' 이하 등급으로 나타났다. 이는 AHP 분석 시 물리적 구조 분야에서 입지 적정성의 중요도 가중치가 가장 높게 나왔음을 감안할 때 댐 저수지 내 인공습지들의 계획, 설계 단계 시 대체로 이러한 입지 적정성은 충족을 한 것으로 판단되나 습지가 효율적으로 정화 기능을 수행하기 위한 수리, 수문 설계 등은 미흡한 것으로 판단되며 이에 대한 개선이 시급함을 시사한다.

식생 구조 평가의 평균점수는 28.2점이었으며 PR이 35.82점으로 가장 높았고 DG-3, NG, GW-1, GW-2, GW-4, KB-2 등 9개 습지가 22.56점으로 가장 낮았다. 식생 구조의 '양호' 등급은 6개소, '보통' 등급은 18개소, '미흡' 등급은 15개소로 확인되었다. 식생 구조의 세부항목 중 식재 수종, 식생 피복도, 식생 건전성의 평균점수는 각각 6.12점, 11.0점, 11.1점이었으며 약 84%가 '보통' 이하 등급으로 확인되어 전반적으로 개선이 필요한 것으로 나타났다.

물리적 구조 평가점수와 식생 구조 평가점수 간의 상관관계

를 분석하였으며 그 결과는 Table 6과 같다. 먼저 Shapiro-Wilk 검증을 통해 정규분포성을 검증한 결과, 물리적 구조 평가점수와 식생 구조 평가점수들의 p -value는 각각 0.016, 0.007로 정규분포를 따르고 있지 않았으며($p < 0.05$) 평가항목별 수준 평가에 따른 서열척도임을 고려하여 Spearman 등위상관계수(Spearman rank order correlation coefficient)를 적용하였다. 상관계수를 분석한 결과 통계적으로 유의미한 상관관계를 보였으며($r = 0.728$, $p < 0.001$), 물리적 구조의 평가점수가 높을수록 식생 구조의 평가점수도 대체로 높은 경향을 보였다.

물리적 구조와 식생 구조의 세부 평가인자 간의 상관관계를 분석하였으며 그 결과는 Table 7과 같다. 물리적 구조의 각 평가인자 점수들 간의 상관관계 분석 결과, 입지 적정성은 다른 인자들과 어떠한 유의미한 상관관계가 나타나지 않았으나($p > 0.05$) 유량 공급 시스템과 습지 수심간($r = 0.665$, $p < 0.001$), 습지 수심과 유로 경사도간($r = 0.576$, $p < 0.001$), 길이 대 폭비와 유로 경사도간($r = 0.588$, $p < 0.001$)은 유의미한 상관관계가 있었다. 이는 인공습지의 설치 시 기능적인 안정성 확보를 위해 입지 선정이 절대적으로 중요한 요소이나 수리적인 기능 유지와 성능 확보를 위해 습지의 물리적인 형상, 제원이 조화롭게 고려되어야 함을 시사한다. 식생 구조의 각 평가인자들 간의 상관관계 분석 결과, 식재 종수($p > 0.05$)를 제외하고 식생 피복도, 식생 건전성 간의 상관계수도 유의미한 상관관계($r = 0.593$, $p < 0.001$)가 있었다.

물리적 구조의 각 평가인자들과 식생 구조의 각 평가인자들 간의 상관관계를 분석한 결과, 유량 공급 시스템과 식생 피복

Table 6. Correlation matrix for physical structure and vegetation structure

Category	Physical structure	Vegetation structure
Physical structure	1	
Vegetation structure	0.728***	1

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$.

Table 7. Correlation matrix for structural evaluation factors

Evaluation factor	Suitability of location	Water supply system	Depth of water	Ratio of length to width	Slope of flow channel	Number of planted species	Vegetation coverage	Ecological health
Suitability of location	1							
Water supply system	0.099	1						
Depth of water	0.223	0.665***	1					
Ratio of length to width	0.001	0.338*	0.355*	1				
Slope of flow channel	0.200	0.405*	0.576***	0.588***	1			
Number of planted species	-0.456**	0.180	0.109	-0.021	-0.059	1		
Vegetation coverage	0.188	0.630***	0.674***	0.498**	0.641***	0.023	1	
Ecological health	0.062	0.675***	0.710***	0.253	0.334*	-0.049	0.593***	1

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$.

도($r = 0.630$, $p < 0.001$), 식생 건전성($r = 0.675$, $p < 0.001$) 간 유의미한 상관관계가 있었다. 습지 수심과 식생 피복도와($r = 0.674$, $p < 0.001$), 식생 건전성($r = 0.710$, $p < 0.001$) 간 유의미한 상관관계가 있었으며 유로 경사도와 식생 피복도($r = 0.641$, $p < 0.001$) 간도 유의미한 상관관계가 나타났다(Table 7 참조). 즉, 최초 인공습지 조성 시에 도입하는 식물종 이외에 습지 내 유량 공급, 수심 형성, 수로 형상, 유로 경사도 등의 수리적인 조건이 식생 피복도와 육역화, 이입종 증가 등의 변화에 영향을 미쳐 인공습지 내 식물들의 수질정화 기능에도 영향을 줄 것으로 판단된다. 단, 인공습지별 유역 특성, 강수량, 오염물질 유입량 조건 및 운영, 유지관리 방식, 수준 등에 따라서도 식생 구조와 수질정화효율이 다양하게 나타날 수 있으므로 지속적인 모니터링이 필요하다.

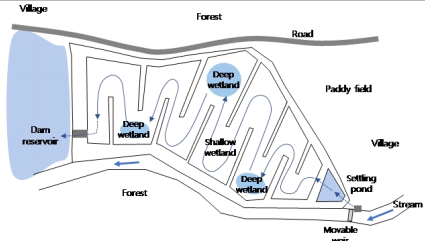
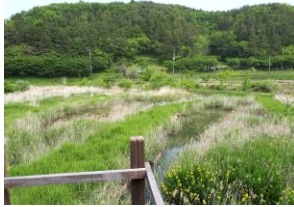
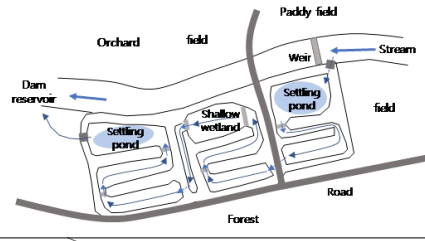

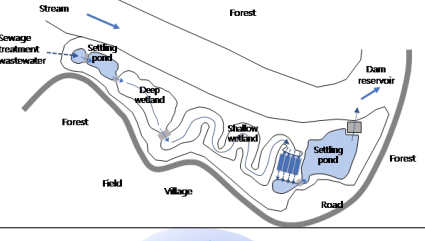

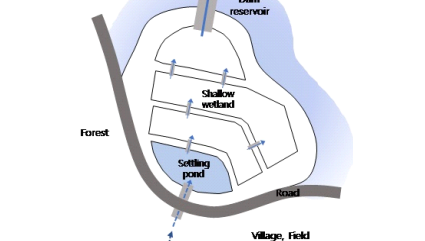

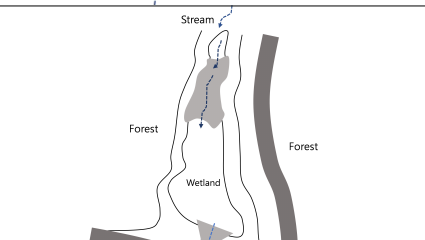

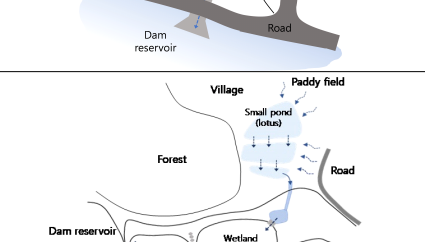
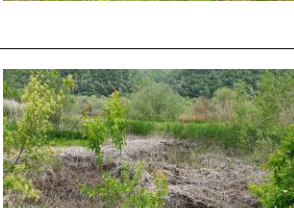
4. 현장 사례 검증 및 개선방안 제언

댐 저수지 내 인공습지 구조평가 결과의 적정성을 확인하고 이에 따른 관리개선 방향을 도출하기 위해 현장 검증을 시행하였다. 현장 검증은 종합평가 점수 상위와 하위의 인공습지 중 현장 접근 및 확인이 용이한 대상지를 일부 선별하여 연초댐 YC-2, 평립댐 PR, 대청댐 DC-2, 김천부항댐 KB-2, 보현산댐 BH-2, 황성댐 HS 등 6개소를 대상으로 하였다. Table 8과 같이 각 인공습지의 주변 현황 및 구성을 모식화하고 개선방향을 제시하였다.

연초댐의 YC-2 인공습지는 경남 거제시 연초면 명동리에 위치하며 2006년에 댐 저수지 내 수질개선을 위해 설치되었다. 주변 마을과 상류 농경지에서 배출되는 오염원이 유입되

는 하천 합류부와 연결하는 지점에 위치하고 있다. 하천에서 가동보로 물을 취수하여 침강지, 얕은 습지, 깊은 습지를 단회로 형태로 통과 후 저수지로 방류되는 인공습지로 면적은 1.8ha이며, 처리유량은 16,416m³/day로 총 체류시간은 35hr로 설계되었다. 인공습지 내에 식재된 수종은 갈대(*Phragmites australis* Trin.), 물억새(*Miscanthus sacchariflorus*), 노랑꽃창포(*Iris pseudacorus*), 애기부들(*Typha angustifolia* L.) 등 4종이다. 평가결과 물 공급 체계, 수심 등 물리적 구조가 전반적으로 우수하였는데 가동보를 통해 수위 변동에 따른 유량 조절이 용이하며 습지 셀 간의 물넘이와 유출부에 수위조절용 스톱로그가 설치되어 수심 유지에도 유리한 구조였다. 인공습지에 식재된 종의 수는 권장 수량인 5종보다 적었으나 식생의 분포와 밀도가 양호하여 가장 높은 점수로 평가되었다. 그러나 이처럼 단회로로 얕은 습지와 깊은 습지의 반복적인 흐름을 유도하는 격벽이 설치된 습지에서 일정한 유량 공급이 이루어지지 않을 경우 유수 흐름이 없는 사수역과 퇴적량 과다로 육화가 진행될 수 있으며 수질이 악화될 수 있다(Kim *et al.*, 2021). 실제로 YC-2 인공습지에서도 2018년 측정된 수질정화 효율이 BOD 7.5%, T-N 11.4%, T-P 1.32% 수준이었는데(K-water, 2018) 수질오염총량관리기술지침(NIER, 2019) 등에서 제시된 인공습지의 일반적인 저감효율이 BOD 53%, T-N 37%, T-P 60% 수준임을 감안할 때 저조한 것으로 확인되었다. 현장 조사 및 운영 담당자들과의 인터뷰 결과, 이를 개선하기 위해서는 인공습지의 구조적 대책보다 초기 강우 시 유량을 충분히 유입시킬 수 있도록 정교한 수문 운영이 필요하며 주기적인 퇴적토 준설, 식생 고사체 제거 등 운영, 관리 방식의 개선이 더 필요할 것으로 판단되었다.

Table 8. On-site investigation results and strategies for improving artificial wetlands management

Name of wetland	Schematic plan of wetland system	Site view	Characteristic and improvement strategy
YC-2			<ul style="list-style-type: none"> Water intake from stream through movable weir Installation of a curtain wall for horizontal flow Requires hydrogate operating manual, sediment dredging and removal of dead vegetation
PR			<ul style="list-style-type: none"> Water intake from stream through weir Risk of flooding during the flood season (normal water level) Installation of a curtain wall for horizontal flow Requires embankment, hydrogate operating manual, sediment dredging and removal of dead vegetation
DC-2			<ul style="list-style-type: none"> Inflow of sewage treatment effluent and village sewage Horizontal flow + porous media box flow Requires inflow from stream
KB-2			<ul style="list-style-type: none"> Direct inflow from stream, ditch Cell division through overflow wall Requires settling pond dredging, expansion of overflow, and diversification of water depth
BH-2			<ul style="list-style-type: none"> Direct inflow from stream, no pollutants Placement of overflow wall and wetland in a row Conservation as a natural wetland (riffles and pools)
HS			<ul style="list-style-type: none"> Direct inflow from village and farmland No settling pond, insufficient horizontal flow Requires settling pond dredging, expansion of overflow, and diversification of water channel and depth

평립댐의 PR 인공습지는 전남 장성군 삼계면 수산리에 위치하며 2007년에 댐 건설 당시 수질보전과 환경영향 완화대책의 일환으로 위해 설치되었다. YC-2 인공습지와 유사하게 주변 마을과 상류 농경지에서 배출되는 오염원이 유입되는 하천 합류부와 연결하는 지점에 위치하고 있다. 하천에 보를 통해 물을 취수하여 침강지, 얇은 습지, 깊은 습지, 침전지를 단회로 형태로 통과하여 저수지로 방류되는 인공습지로 면적은 3.4ha이며 처리유량은 8,000m³/day로 설계되었다. 인공습지 내에 식재된 수종은 수련(*Nymphaea tetragona*), 왕부들(*Typha latifolia*), 노랑꽃창포, 물억새, 줄(*Zizania latifolia*) 등 5종이다. 평가결과 인공습지의 제방 높이와 유출부의 높이가 각각 EL. 107.3m, EL. 106.7m로 댐의 상시만수위인 109.7m보다 낮아 대규모 홍수 시에 침수의 위험이 있기는 하나 보를 통해 일정한 유량이 유입될 수 있는 구조였으며 YC-2 인공습지와 유사하게 단회로로 습지의 흐름을 양호하게 유도하는 격벽이 설치되어 우수하게 평가되었다. 2019년 측정된 수질정화 효율이 BOD 3.0%, T-N 17.0%, T-P 13.0%, SS 46.0%로 연초댐의 YC-2 인공습지보다는 양호하였으나 마찬가지로 일반적인 문헌에서 제시하는 수질정화효율보다는 저조하였다. PR 인공습지의 경우도 습지 경계부 제방 설치를 통해 홍수기 침수에 대한 안정성을 보장하고 유량 공급 조절, 주기적인 퇴적토 준설, 식생 고사체 제거 등 운영, 관리 방식의 개선이 필요할 것으로 판단되었다.

대청댐의 DC-2 인공습지는 충북 옥천군 군북면 지오리에 위치하며 2011년 대청호에 유입되는 서화천 유역의 녹조 저감과 수질개선을 위해 설치되었다. 인근의 옥천군 하수처리장 방류수와 마을 하수를 유입시켜 침강지, 얇은 습지, 깊은 습지, 여재 접촉조, 침전 저류조를 통해 댐으로 방류되는 인공습지로 면적은 3.5ha이며, 처리유량은 18,000m³/day로 총 체류시간은 48hr로 설계되었다. 인공습지 내에 식재된 수종은 갈대, 꽃창포(*Iris ensata*), 노랑꽃창포, 노랑이리연꽃(*Nymphoides peltatum*), 달뿌리풀(*Phragmites japonica*), 부들(*Typha orientalis*), 수련, 물억새, 창포(*Acorus calamus*) 등 9종이다. 평가결과 인공습지 내부의 물리적 구조와 식생 구조의 전반적인 수준은 양호하였으나 유입 유량의 90% 이상을 하수처리장 방류수에 의존하고 있어 인접한 하천 본류의 수질정화 기여에 제약이 있는 것으로 확인되었다. YC-2, PR 인공습지와 유사하게 단회로로 깊은 습지, 얇은 습지를 통과하는 구조이나 흐름 유도를 위한 격벽은 최소화하고 여재 접촉조 공정을 추가하여 습지 내 식물에 의한 생물학적 작용 외에 물리, 화학적 과정을 조합하고 있었다. DC-2 인공습지에서는 YC-2, PR에 비해 퇴적토 준설, 여재 접촉조 세척 및 식생 고사체 제거 등의 관리가 지속적으로 이루어지고 있었으며 2017년에 측정된 수

질정화 효율이 BOD 11.0%, COD 19.0%, T-N 13.0%, T-P 52.0%, SS 22.0%로 비교적 양호한 수준의 수질정화 기능을 유지하고 있었다. 따라서 장래 하천 본류 유량을 유입시키기 위한 유입부의 구조적 개선을 시행하고 지속적인 관리 노력을 통해 인공습지로서 효용성이 증진될 수 있을 것으로 판단되었다.

김천부항댐의 KB-2 인공습지는 경북 김천시 부항면 지좌리에 위치하며 2014년에 댐 건설 당시 수질 보전과 환경영향 완화대책의 일환으로 설치되었다. 인근의 계곡부 및 마을에서 유출되는 구거의 물을 침강지로 유입시킨 후 월류벽을 통한 셀 단위의 습지를 통해 저수지로 유입시키는 소규모 인공습지로 면적은 0.2ha이며, 처리유량은 691m³/day, 체류시간은 24hr로 설계되었다. 인공습지 내에 식재된 수종은 갈대, 창포, 갯버들(*Salix gracilistyla*) 등 3종이다. 평가결과 물리적 구조와 식생 구조가 전반적으로 미흡하였는데 인공습지에 계곡부 유량의 의존도가 높아 강우 시와 평상시의 유입 유량 차이로 인해 일정한 수심 유지에 제약이 있었다. 침강지를 제외한 습지 구간에서 육역화가 진행되어 수생식물의 생육 및 정화기능 작용도 불가능한 상태로 확인되었다. Kim et al.(2021)은 월류벽을 통한 셀의 분할 방식은 유입 유량이 비교적 일정한 대상지에 적합하며 유량 변동이 심하고 유입 유량이 매우 적은 개별 습지에 흐름이 단절되기에 정체구역 발생, 물고임 현상 및 수질 악화 등의 문제가 발생한다고 지적한 바 있다. 따라서 KB-2 인공습지의 경우 주변에 거주하는 가구 수 및 레저활동 증가로 비점오염원 증가가 우려되므로 이를 저감하기 위한 습지의 전체적인 구조 개선이 필요한 것으로 판단되었다. 침강지를 준설하고 월류벽의 물넘이를 확대하여 습지 구간으로의 유량 공급을 증가시키고 셀 내부에서 깊은 습지와 얇은 습지를 반복적으로 배치하여 수리학적 효율을 향상시켜야 할 것이다. 이를 통해 습지 내 흐름을 적정히 배분하여 오염물질 제거, 여과 및 침전 등의 물리적 효과는 물론 갈수기 유량 부족 시 습지 내 생물들의 피난처 기능도 수행 가능할 것이다.

보현산댐의 BH-2 인공습지는 경북 영천시 화북면 용소리에 위치하며 2014년에 댐 건설 당시 수질 보전과 환경영향 완화대책의 일환으로 설치되었다. 댐 저수지에 유입되는 계곡부 소하천의 합류부에 설치된 소규모 저류형 인공습지로 면적은 0.1ha, 처리유량은 590m³/day, 총 체류시간은 4hr로 설계되었다. 인공습지 내에 별도 식물은 식재되지 않았다. 평가결과 물리적 구조와 식생 구조가 모두 전반적으로 타 인공습지에 비해 미흡하였으며 정상적인 기능 유지에 제약이 큰 것으로 확인되었다. 댐의 상시만수위인 EL. 236.0m 이하인 높이에 인공습지가 위치하고 있어 홍수기에 잦은 범람이 이루

어지며 소하천의 직하류부에 습지의 물넘이를 설치하여 물넘이, 호안, 식생 등의 유실 또한 잦은 것으로 확인되었다. 그리고 현재 인공습지의 상류에 비점오염원을 유발하는 민가, 농경지, 축사 등의 분포가 미미하여 수질정화를 위한 인공습지로서 유지 필요성이 낮은 것으로 판단되었다. 이는 댐 건설 이후 변화된 유역의 토지 이용과 입지 여건 등을 고려하여 인공습지들의 전반적인 관리방향의 전환이 필요함을 시사한다. 따라서 BH-2 인공습지의 경우, 수질정화 기능보다는 생물서식처로서 자연습지 기능을 강화할 수 있도록 인위적인 물넘이를 개선하고 이에 대한 주기적인 모니터링이 필요할 것이다.

형성댐의 HS 인공습지는 강원 횡성군 갑천면 포동리에 위치하며 2011년에 댐 저수지 내 수질보전을 위해 설치되었다. 인근의 농경지 배출수를 유입시켜 인공습지를 통해 저수지로 방류하는 구조로 면적은 0.4ha이며 처리유량과 체류시간에 대한 설계자료는 확인할 수 없었는데 인공습지를 설치할 당시 구체적인 목표 수질, 정화효율을 염두에 두지 않았기 때문에 판단되었다. 인공습지 내에 식재된 수종은 갈대, 꽃창포(*Iris ensata*), 흰갈대(*Phalaris arundinacea*), 원추리(*Hemerocallis fulva*), 부들, 부처꽃(*Lythrum salicaria*), 미나리(*Oenanthe javanica*) 등 7종이다. 평가결과 BH-2 인공습지와 유사하게 물리적 구조와 식생 구조가 모두 미흡하였으며 현재 습지 내부에 유량 공급이 제대로 이루어지고 있지 않아 전반적으로 육역화가 진행되고 있었다. 홍수기 댐 수위 상승 시 잦은 침수가 진행, 마을 농경지 배출수에 대한 유입 유량 의존 및 침강지의 부재 등이 주된 문제점으로 확인되었다. 습지 내 셀의 배치와 월류부도 다양한 흐름을 유도할 수 없는 구조로 나타났다. 주변 토지이용 현황과 입지적인 특성을 고려 시 수질정화 기능을 높이기 위한 구조적인 개선이 필요할 것으로 판단되었다. 이를 위해서는 홍수기 침수를 예방하기 위한 습지 제방을 설치하고 인공습지와 인접하여 주민이 운영 중인 연재 배치를 침강지 기능을 할 수 있도록 개량하고 주변 농경지로부터 배출수 관로 증설을 통해 일정한 유량 공급이 우선되어야 할 것으로 판단된다. 그리고 습지 내부에서 다양한 수심과 흐름이 형성될 수 있도록 물넘이용 격벽과 깊은 습지, 얕은 습지를 배치하는 방안도 필요할 것이다.

Choi *et al.*(2014)과 Kim *et al.*(2021)의 연구에서 인공습지의 정화 효율 향상을 위해서 물 유입을 위한 보의 형식, 인입수로 또는 관로의 형식, 셀의 형태, 셀의 연결 방식에 대한 설계가 중요하다고 하였는데 본 연구의 6개 인공습지에 대한 현장 검증 결과에서도 입지 적정성, 유량 공급 방식, 습지의 형태 등이 습지의 효율과 운영에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그리고 식생 종수, 피복도, 식생 건전성 등 식생 구

조도 중요한 요소이나 물리적 구조와 운영, 유지관리 방식에 따라 영향을 많이 받는 것으로 판단되었다. 수생식물의 정화기작을 기반으로 하는 인공습지의 특성상 안정적인 유량 공급과 수심 형성이 식물의 활착과 생육에 큰 영향을 미치기 때문이다. 댐 유역의 수질 보전을 위한 자연시설로서 인공습지의 정상적인 기능을 기대하기 위해서 평가 결과를 참고하여 취약 요소에 대한 구체적인 개선방안이 필요하며 공통적인 개선방향을 종합적으로 제시하고자 한다.

첫째로, 댐 저수지 내 인공습지 시스템이 자연정화시설로서 온전하게 작동하기 위해서는 물리적인 안전성이 유지되어야 하므로 최소한 상시만수위 이상인 장소에 설치하고 불가피하게 설치될 경우, 홍수기 습지의 침수 및 역류 예방을 위한 제방과 수문 설치가 고려될 수 있을 것이다. 그리고 댐 저수지에 유입되는 하천 직하류의 인공습지 설치의 홍수기 잦은 유실로 정상적인 작동과 습지 구조의 유지가 불가능하며 하천의 종적인 연속성 측면에서도 단절 효과를 유발할 수 있으므로 가급적 지양해야 할 것이다.

두 번째로, 인공습지가 유역의 오염원을 효과적으로 정화하기 위해서는 유입 유량을 충분하게 확보해야 하는데 하천수를 유입하는 경우 수두차 형성에 적합한 취수용 보를 활용하고 인입수로는 길이를 최대한 짧게 설치하되 유지보수, 관측 및 생태적 기능을 고려하여 개수로 형태로 설치되어야 할 것이다. 또한 습지 유입과 더불어 최종 방류량과 체류시간을 설정하기 위한 수위조절시설 설치도 필요하다(Kim and Lee, 2011).

세 번째로, 인공습지 내부의 물 흐름 개선을 위해 유입 유량 정도에 따른 셀의 배치와 흐름 격벽, 수심 다양화 및 개방수역 확보가 필요하다. 습지 내 유하거리는 수두 손실과 정체현상에 영향을 미칠 수 있으므로 복수계열의 설계가 적합하며(Kim *et al.*, 2021), 정상적인 유량 확보 이후 습지 내 물 흐름이 균일하게 하기 위해서는 식생대로 물 흐름을 분배할 수 있도록 격벽, 수로 등의 설치가 세부적으로 필요할 것으로 판단된다. 그리고 Ham *et al.*(2005)과 Kim *et al.*(2011)의 연구에서 침강지 또는 인공습지만으로 조성하는 것보다 인공습지와 침강지를 조합하는 것이 효율이 높고 조합하는 경우 침강지, 인공습지의 순으로 조성하는 것이 정화효율이 높다고 제시한 바와 같이 댐 저수지 내 인공습지 설치 시에도 가급적 침강지를 설치해야 할 것이다.

네 번째로, 인공습지 내 토양과 식생의 주기적인 관리가 필요하다. 조성 후 장기간 운영 중인 인공습지의 경우 유량 공급 불균형, 정체 수역 발생 등에 따라 토양이 혐기화되고(Kim and Lee, 2011) 퇴적토가 누적되면서 수리학적 흐름을 방해하여 수질정화 효율이 저하되는 경우가 많다. 이를 개선하기 위해서는 계절별 습지 수위조절을 통해 대기로부터 산소 공급을

촉진시켜 토양의 자연산화를 유도하는 방안이 있다. 이러한 토양 환경 개선은 수질정화 효율과 더불어 수생 식물의 성장에도 긍정적인 영향을 줄 수 있을 것으로 판단된다. 아울러, 장기간 운영된 인공습지 내 식생은 성장과 사멸이 반복됨에 따라 습지 내 많은 유기물이 농축되고 오염물질이 포화되면서 수질정화 효율이 현저하게 감소시키는 원인이 될 수도 있으므로 주기적인 고사체 제거를 시행하고 적정 밀도와 피도를 유지할 수 있도록 관리가 필요할 것이다.

다섯 번째로, 설계 및 운영, 유지관리 개선을 위한 구체적인 매뉴얼 정립과 모니터링이 수반되어야 할 것이다. 현재 국내에서 활용되는 각종 설계 및 관리기준에는 서언적인 방안만을 제시하고 있으며 인공습지 설계 시에도 보편적인 내용만을 관행적으로 사용하고 있다(Cho *et al.*, 2018). 습지의 수문조작시설을 직관적이고 정밀하게 운영, 관리하기 위한 매뉴얼을 마련하여 강우 초기에 습지의 침수 및 범람을 예방하고 오염부하를 효율적으로 저감해야 할 것이다. 그리고 인공습지 내 시설과 토양 및 식생을 포함한 전반적인 생태계 관리에 대한 유지관리 방안도 강구하여 생태계서비스 측면의 다양한 기능을 증진하는 노력도 필요할 것이다.

아울러 댐 건설 이후 오랜 기간이 경과하면서 상류 유역의 토지이용 변화에 따라 오염원 배출 양상과 관리 여건 등도 계속 변화하고 있다. 이는 최초 인공습지를 도입할 당시의 목적, 기능 및 제원 등이 현재도 유효한지에 대한 점검과 이를 토대로 향후 댐별 인공습지의 용도와 관리방향을 재설정할 필요가 있음을 시사한다. 예를 들어 비점오염원 발생 빈도가 높은 지역에 입지한 인공습지의 경우 수질정화 기능을 강화할 수 있도록 구조적인 개선을 시행하고 반대로 수질 개선 필요성이 낮아진 경우 생물서식처 기능을 중심으로 이용 수요, 주변 자원과 연계한 생태교육, 탐방공간으로서 기능을 강화하는 등 다양한 습지에 대한 관리유형 마련이 필요할 것이다.

IV. 결론

그간 댐 건설 시 또는 운영 단계에서 유역의 비점오염원을 정화하고 수질 보전을 위해 저수지 내 홍수터 등에 다양한 인공습지를 조성하여 운영해 오고 있으나 부지 확보가 용이한 장소, 유입 지천 합류부 등 위주에 주로 설치되다 보니 계절별 유량 변동과 침수 우려가 커 인공습지로서 기능을 최적화하기에 구조적으로 불리한 측면이 있었다. 또한 개별적인 환경 보전시설이 아닌 댐의 치수, 이수적 운영과 연동되어야 하는 복잡성과 안전성이 요구되는 부대시설로서 운영, 관리 시에 정교하고 높은 수준의 기술과 경험을 필요로 한다. 따라서 강우 시 불특정한 유입, 입지적 특성과 형상, 제원 등에 대해 일반적인 도시나 농촌지역에 설치되는 인공습지와는 다른 방식의 구조적 특

성과 운영 전략이 마련되어야 할 것이며 이에 앞서 댐 저수지 내 인공습지 전반의 현황과 구조적 적정성에 대한 객관적인 진단이 필요하다.

본 연구에서는 전국 15개 주요 댐의 39개 인공습지를 대상으로 물리적, 식생 측면을 고려한 구조의 적정성 평가를 실시한 결과 전체적으로 '양호' 등급의 인공습지 수는 10개소이며 29개소는 '보통' 이하 등급으로 평가되어 생태적 정화 기능시설로서 제약이 있는 것으로 나타났다. 특히 물리적 구조의 5개 평가항목 중 입지 적정성은 대부분 양호하였으나 유량공급 시스템, 수심, 길이 대 폭비, 유로 경사도는 50% 이상의 인공습지에서 '보통' 이하 등급으로 평가되어 개선 필요성이 큰 것으로 판단된다. 식재 수종, 식생 피복도, 식생 건전성 등 3개 항목을 평가한 식생 구조의 경우도 33개소가 '보통' 이하 등급이었는데 물리적 구조의 평가점수와 식생 구조의 평가점수 간 상관관계가 유의미한 수준으로 나타났으며 물리적 구조의 평가인자들과 식생 구조의 평가인자들 간에도 상관관계가 확인되어 물리적 구조의 우선적인 개선과 운영관리 노력을 통해 식생의 수질정화 기능과 생태적 기능 향상도 도모할 수 있을 것으로 판단된다.

인공습지 6개소를 사례로 한 현장검증 결과 평가결과의 적정성을 확인할 수 있었는데 일부 습지는 구조적으로 적정함에도 불구하고 수처리 효율이 낮았다. 이는 일정한 유량 공급, 습지 내 흐름 개선 등을 위한 수문 운영의 고도화와 습지 내 퇴적토 준설, 식물 고사체 제거 등 정기적인 유지관리도 중요함을 시사한다. 특히 홍수기, 갈수기 시 댐 운영과 연동하여 저수지 내 인공습지의 정상적인 수환경이 유지될 수 있도록 유량공급 제어 시스템이 갖춰져야 하며 이러한 수문 조건에 맞춰 흐름, 정화기능이 작동되도록 물리적, 식생 구조의 개선이 이루어져야 할 것이다.

본 연구는 전국적으로 방대하게 산재하고 노후화된 댐 저수지 내 인공습지들의 구조적 특성을 표준화된 평가기준을 적용하여 최초로 평가한 사례로서, 취약 요소를 도출하고 향후 인공습지별 관리개선을 위한 유형과 실천적인 대안 마련을 위한 기초연구를 시행하였는데 의의가 있다. 이를 통해 생태적 유역관리를 위한 자연기반해법으로서 인공습지의 효율성을 높이고 다양한 환경적 기능을 증진하는데 기여할 수 있을 것이다. 단, 인공습지별 구체적인 개선방안은 유역의 토지이용, 오염원 배출부하량 변화 및 생태, 문화적 여건 등을 고려하여 습지로서의 기능 및 유형을 재설정하고 비점오염 물질이 강우 시에 유출되므로 반드시 강우 시 수처리 효율에 대한 실측 모니터링을 통해 계절별, 유역별 수문 여건에 맞는 정화효율 목표 설정도 수반되어야 할 것이다. 또한 향후에는 인공습지의 수질정화기능과 생태적 기능을 조화롭게 고려한 운영, 유지관리 매뉴얼을 수립하고 댐 유역에 다양하게 산재하는 인공습지의 생태계서비스, 탄소흡수원으로의 기능 등에 대해서도 다양한 연구가 필요할 것이다.

References

1. Adamus, P. R. and L. T. Stockwell(1993) A Method for Wetland Functional Assessment: Critical Review and Evaluation Concepts, US Dept. Transportation, Fedral Highway Administration.
2. Bahn, G. S. and B. C. An(2020) Analysis of environmental purification effect of riparian forest with poplar trees for ecological watershed management: A case study in the floodplain of the dam reservoir in Korea, *Sustainability* 12(17): 6871.
3. Bahn, G., M. Cho, J. Kang and L. Kim(2021) Study on the selecting of suitable sites for integrated riparian eco-belts connecting dam floodplains and riparian zone-case study of Daecheong reservoir in Geum-river basin, *Journal of Wetlands Research* 23(4): 327-341.
4. Browder, G., S. Ozment, I. Rehberger Bescos, T. Gartner and G. M. Lange(2019) Integrating Green and Gray: Creating Next Generation Infrastructure, World Bank and World Resources Institute.
5. Cha, J. W. and J. Y Kim(2018) Analysis of fine dust correlation between air quality and meteorological factors using SPSS, *Journal of Information and Communication Convergence Engineering* 22(5): 722-727.
6. Cho, H. B., Y. J. Kim and D. J. Park(2018). Hydraulic management for artificial wetland in a Yeongju dam, In *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*(pp. 472-476).
7. Cho, H. J., E. J. Lee, C. M. Moon and J. K. Lee(2021) Characteristics of operation and management of artificial wetland in Geumgang watershed, *Journal of the Korean Society for Environmental Technology* 22(4): 244-249.
8. Choi, I. K. and S. K. Kwon(2002) Design model of constructed wetlands for water quality management of non-point source pollution in rural watersheds, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 44(5): 96-105.
9. Choi, J. and Y. Bahn(2007) Improving artificial wetlands for nonpoint source pollution control, *KEI Research Report* 2007(6): 1-145.
10. Choi, K. S., S. W. Kim, D. S. Kim and Y. Lee(2014) Operating status and improvement plans of ten wetlands constructed in dam reservoirs in Korea, *Journal of Wetlands Research* 16(3): 431-440.
11. Dwire, K. A. and R. R. Lowrance(2006) Riparian ecosystems and buffers-multiscale structure, function, and management: Introduction, *Journal of the American Water Resources Association* 42(1): 1-4.
12. Gerberg, R. M., B. V. Elkins, S. R. Lyon and C. R. Goldman(1996) Role of aquatic plants in wastewater treatment by artificial wetland, *Water Research* 20: 363-368.
13. Geum River Watershed Management Committee(GRWMC)(2017) Research on the Operation Status of Non-Point Reduction Artificial Wetlands and Management Methods 4: 1-161.
14. Geum River Watershed Management Committee(GRWMC)(2020) A Study on the Agricultural Impact and Management Plan of the Daecheong Reservoir: Research Report.
15. Ham, J. H., C. G. Yoon, W. S. Koo, H. C. Kim and H. B. Shin(2005) The effect of physical design parameters on the constructed wetland performance, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 47(5): 87-97.
16. Hong, E. M., G. J. Im and D. J. Kim(2021) Introduction of nonpoint pollution generation and management plans in Gangwon province, water for future, *Korea Water Resources Association* 54(2): 46-51.
17. Hong, J. P., J. W. Lee, O. H. Choi, J. D. Son, D. G. Choi and D. M. An(2014) A study on land acquisition priority for establishing riparian buffer zones in Korea, *Journal of the Korean Society for Environmental Restoration Technology* 17(4): 29-41.
18. Jobin, B., L. Belanger, C. Boutin and C. Maisonneuve(2004) Conservation value of agricultural riparian strips in the Boyer river watershed, Quebec(Canada), *Agriculture, Ecosystems & Environment* 103: 413-423.
19. Kim, G. S and S. W. Kang(2008) An analysis on the factor for the economic cooperation in the Yellow-Sea region using AHP, *Journal of Distribution and Management Research* 11(4): 133-149.
20. Kim, H. J., J. H. Haam, D. H. Kim and D. B. Hong(2011) Characteristics of water quality improvement by type of constructed wetlands, In *Proceedings of the Korean Society of Agricultural Engineering Conference*, p. 209.
21. Kim, S. W. and S. Y. Lee(2011) Efficient operation management plan for coconstructed wetlands in dam basins, *Water for Future* 44(12): 80-85.
22. Kim, Y., H. Choi and L. H. Kim(2021) Investigation on design aspects of the constructed wetlands for agricultural reservoirs treatment in Korea, *Journal of Wetlands Research* 23(2): 189-200.
23. Korea Water Resources Corporation(K-water)(2011) Water Glossary.
24. Korea Water Resources Corporation(K-water)(2021) Dam Operation Manual.
25. Mendlik, T. and A. Gobiet(2016) Selecting climate simulations for impact studies based on multivariate patterns of climate change, *Climatic Change* 135: 381-393.
26. Ministry of Environment(MOE)(2015) The 3rd National Inland Wetland Basic Survey Report.
27. Ministry of Environment(MOE)(2016) Manual for Installation, Management and Operation of Non-Point Pollution Reduction Facilities.
28. Ministry of Environment(MOE)(2020) The 3rd Comprehensive Measures for the Management of Rainfall Runoff Nonpoint Pollution Sources.
29. National Institute of Environmental Research(NIER)(2019) Total Wate Pollution Load Management Guideline.
30. Park, J. H., J. Ryu, D. S. Shin and J. K. Lee(2019) The effective approach for non-point source management, *Journal of Wetlands Research* 21(2): 140-146.
31. Park, J. S., K. S. Kim, Y. C. Kim and K. H. Rhee(2012) Evaluation of treatment efficiencies of water quality for 5 years in constructed wetland to upper region of water source, *Journal of Wetlands Research* 14(4): 479-488.
32. Park, K. and Y. Kim(2017) Evaluation of various nutrients removal models by using the data collected from stormwater wetlands and considerations for improving the nitrogen removal, *Journal of Wetlands Research* 19(1): 90-102.
33. Saaty, T. L.(1980) *The Analytic Hierarchy Process*, New York: McGraw pp. 3-35.
34. Saaty, T. L.(2001) *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process*(2nd ed.), Pittsburgh: RWS Publications, p. 84.
35. Seol, H. S.(2019) *Understanding and Application of Jamovi Statistical Program*, Seoul: Hakjisa, pp. 1-312.
36. Son D., H. Lee, E. J. Lee, K. H. Cho and D. Kwon(2015) Flora and vegetation structure in a 15-year-old artificial wetland, *Ecology and Resilient Infrastructure* 2(1): 54-63.
37. U. S. Environmental Protection Agency(EPA)(2000) *Manual: Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewater*, EPA, 625/R-99/010, Cincinnati, OH: EPA, pp. 12-20.
38. Yongsan-Seomjin River Watershed Management Committee (YSRWMC)(2009) *Alternative of Optimum Management and Analysis of Removal Efficiency for Treating the Wastewater in Constructed Wetland to Upper Region of Juam Lake*.

Received : 9 February, 2022

Revised : 23 February, 2022 (1st)

Accepted : 23 February, 2022

3인익명 심사필