

NPS-WET 습지 모델링을 이용한 습지 증설에 따른 수질개선 효과 분석

박종석·이경훈[†]·한창화

전남대학교 토목공학과

Analysis of Water Quality Improvement Effects on Wetland Expansion using NPS-WET Model

Jongseok Park·Kyoungsoon Rhee[†]·Changhwa Han

Department of Civil Engineering, Chonnam National University, Korea

(Received : 25 July 2017, Revised: 28 September 2017, Accepted: 29 September 2017)

요약

본 연구는 바이오파크 유역 내 인공습지에 대하여 습지규모와 수질개선효과의 관련성을 분석하여, 최적의 습지규모 설계를 위한 기초 자료를 제공하기 위하여 수행되었다. 본 연구를 통해 인공습지에 대한 합리적인 규모 설계 및 운영에 기여할 것으로 판단되며, 연구결과를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다. 인공습지의 0-100 % 증설범위의 설계별 시나리오 분석결과, '기존규모 대비 75 % 증설'의 경우, '기존규모의 현 상태 운영' 설계 기준과 비교하여 수질이 BOD5는 66.7 %, TSS는 69.9 %, T-N은 64.7 %, T-P는 85.5 %, Chl-a는 51.8 % 만큼 개선되어 가장 양호한 효과를 보여주었으며, 특히 4계절 중 여름철에 Chl-a를 제외한 수질항목에서 효과가 크게 나타나는 경향이였다. 그리고 설계규모와 수질개선 효과간 정비례관계가 성립되지 않은 것으로 나타났다.

핵심용어 : 비점오염원, 수질 모델링, 습지, 수질개선

Abstract

This study was designed to provide basic information for an effective wetland design by analyzing the correlation between wetland size and water quality improvement effect in regard to an artificial wetland inside the Biopark Basin by means of applying the modelling technique. It is expected that this study will contribute to a rational design, operation and management of the artificial wetland in the basin. The following conclusions are obtained through the results and discussion of this study. The results of respective design scenarios that expanded the size of the artificial wetlands in the range of 0-100 % showed that when the wetland is 'expanded 75 % compared with the existing size', water quality improved best compared with the design criteria of 'the current operation of the existing size'. The improved data are: 66.7 % in BOD5, 69.9 % in TSS, 64.7 % in T-N, 85.5 % in T-P and 51.8 % in Chl-a. In particular, with the exception of Chl-a, water quality improvement stood out in the quality items in summer among the four seasons. And that there is no direct relationship between facility scale and water quality improvement.

Key words : non-point source, water quality modeling, wetland, water quality improvement

1. 서론

산업화와 인구의 증가로 인한 환경오염은 현재 시급히 해결해야 할 과제로 대두되고 있는 실정이며(Kim et al., 2012), 보다 깨끗한 물 공급의 욕구가 증대되어 상수원과 하천 수질의 향상을 위해 꾸준한 노력에도 불구하고 하천의 자정능력이 저하되고 수질 오염현상이 날로 심화되고 있다(Park et al., 2012). 이러한 오염의 원인으로는 다양한 점오염원(Point source pollution)과 강우 시 유출되는 비점

오염원(Non-Point source pollution)을 들 수 있으며, 특히 문제가 되고 있는 것은 정체성 수역에서 부영양화의 주원인물질로 알려져 있는 과다한 영양물질이라 할 수 있다(Choi et al., 2005; Choi et al., 2002; Choi et al., 2008). 이와 같이 정체성 수역의 수질을 관리하기 위하여 각종 오염저감 대책이 수립되어 추진되고 있으며, 특히 자연정화기능을 활용한 수질개선기법으로 인공습지에 관한 연구가 활발히 진행 중이다(Kang et al., 2011; Park and Kang, 2011; Rhee et al., 2011; Lee and Cho, 2011; Park et al., 2012; Chun et al., 2014; Kim et al., 2017).

환경부에서도 하천 및 호소의 수질을 개선하기 위하여 수처리 효율이 높고 대민 친화적 시설인 인공습지의 적용을

[†] To whom correspondence should be addressed.
Department of Civil Engineering, Chonnam National university, Korea
E-mail: water@jnu.ac.kr

증가하고 있는 실정이다. 인공습지는 자연상태의 습지가 보유하고 있는 정화능력을 인위적으로 향상시켜 오염물질을 저감하는 시설로서 유량 및 수질 변화에 대한 적용력이 높아 폭 넓은 범위의 수리부하에서도 운영이 가능하기 때문에 비점오염원 관리에 유용하며, 도시의 비점오염물질 저감, 농업배수, 축산폐수 등 다양한 분야에 적용되고 있다(Lee et al., 2011). 인공습지에서의 주된 질소제거 기작은 질산화/탈질로 판단되며, 인공습지에서 산소공급 상태에 따라 질소제거의 제한요소가 달라진다. 즉, 인공습지내 산소공급이 충분한 경우 유기물 부족으로 인한 탈질이 제한요소가 되며, 인공습지내 산소공급이 부족할 경우 질산화가 질소제거의 제한요소가 된다. 인공습지내 질산화를 높이기 위하여 습지내 수위조절과 산화환원 전위 변동을 통하여 유기물과 질소 제거효율을 높일 수 있다. 그리고 인의 제거는 주로 기질층내 흡착, 침전 등에 의해 제거되며, 기질층 흡착에 있어 주로 Ca와 Al이 주된 인자로 작용한다(Ko et al., 2010).

미래의 수질관리 성공여부는 비점오염원의 효율적인 관리 여부가 큰 변수로 작용할 것으로 판단된다. 따라서 하천 유역의 수질관리를 위해서는 토지이용과 지역특성을 고려한 비점오염원 부하량의 합리적인 조사, 오염부하량 절감을 위한 관리기술의 개발, 비점오염원 관리정책의 개발 등이 필요하다. 하지만 지난 수년간 주암호 등 영산강수계 물관리 종합대책을 수립하여 하수처리장 방류수를 재처리하고 비점오염원을 처리하기 위한 인공습지를 주암호 및 동북호 상류지역에 많이 조성하였으나, 관리 소홀과 습지 운영방안의 미숙 등으로 인해 효율적으로 운영이 되지 않고 있다고 하였다(Seo et al. 2011a; Seo et al., 2011b).

수계오염총량관리기술지침에 의하면 수질모델링에 관한 조항을 포함하고 있으나 수질모델의 선정과 방법에 대한 개론적인 내용만 서술하고 있다. 시·공간적으로 변화하는 오염 부하량과 다양한 오염저감 대책에 따른 오염 부하량을 예측할 뿐만 아니라 오염물질 배출원이 목표수질 설정에 미치는 영향 등을 분석하기 위해 모델링에 대한 정립이 필요하며 이는 유역 오염총량관리의 적용을 위해 필수적인 요소이다. 유역단위 수질모델링으로는 ANSWERS, SWRRB, HSPF, AGNPS,

SWAT 등이 있다. 유역의 오염총량관리를 위한 모형으로 미국 농무성에서 개발한 SWAT 모형과 미국 환경청에서 개발한 HSPF 모형이 각각의 목적에 따라 이용되고 있다.

본 연구에서는 복내 바이오파크 인공습지 유역의 효율적인 오염원 관리를 위해 오염총량관리 모형인 BASINS/HSPF를 이용하여 유역의 오염원, 수리수문, 기상, 지형 등의 자료 구축 후NPS-WET 모형을 이용하여 습지 증설 시나리오에 따른 유역 내 수질개선 효과를 분석하였다.

2. 연구방법

2.1 모형 선정 및 특징

현재 널리 사용되는 습지 모델은 질소와 탄소 순환에 있어서 미생물 성장의 중요성이 명확히 반영되지 않았다. 미생물의 대사 작용과 성장을 모의하지 않고 질산화와 탈질산화 같은 반응을 오직 초기농도에만 의존한다고 가정함으로써, 이러한 모델은 종종 오염원의 저감을 부적절하게 해석하기도 한다(King et al., 1997). 또한 다른 복잡한 모델들은 광범위한 입력자료를 필요로 하는 미생물의 역학관계를 명확하게 모델링하지 못하고 공학적 적용에 있어서 실제적이지 못하다(Buchberger and Shaw, 1995; Kadlec and hammer, 1988).

습지 모델은 습지에서 일어나는 각각의 반응에 대해 모의를 할 필요가 있지만, 이를 위한 실측자료를 얻기가 힘들다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 농어촌연구원은 습지 내 영양물질의 변화를 해석하고 효과적인 비점오염원 제어용 인공습지의 설계를 주목적으로 하는 NPS-WET 모형을 개발하였다. NPS-WET 모형은 습지 내 총속영양 및 독립영양 미생물 모의를 통해 영양물질의 시·공간적 변화를 해석하고, 식생의 성장 및 고사에 의한 영양물질 거동과 이에 따른 탄소질 형태 변화, 퇴적층 및 지하수의 탄소질, 식생, 영양물질 변화 등을 해석할 수 있다. 또한 수질개선 효과 달성을 위한 인공습지의 적정 설계인자를 분석하거나 도출하는 것이 가능하여, 습지와 유수지의 배치 모의를 통해 비점

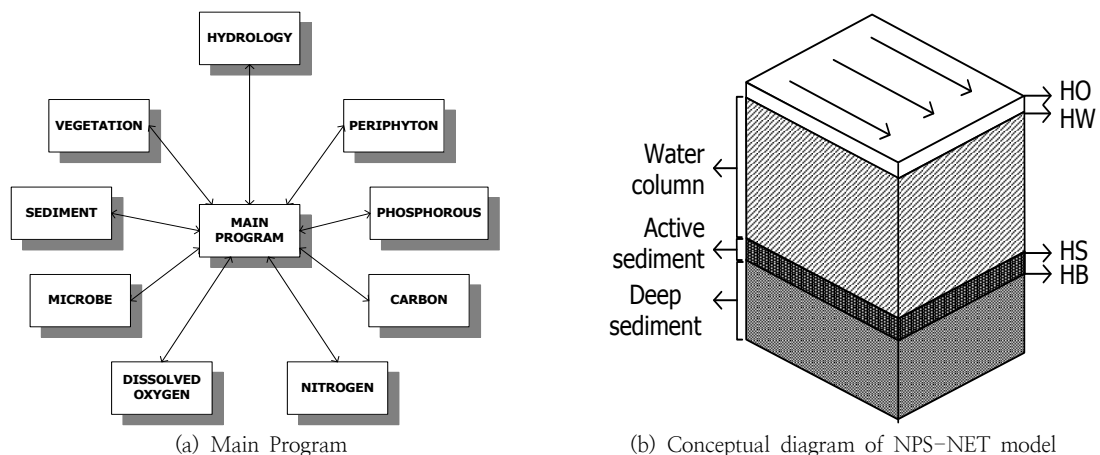


Fig. 1. Main structure of NPS-WET.

오염제어를 위한 습지구조를 반영할 수 있다(Rural Research Institute, 2007). NPS-WET 모형은 수리, 식생, 부착조류, Sediment, 인, 미생물, 탄소, DO 및 질소의 순환을 모의할 수 있는 9개의 부모형(Sub-model)으로 이루어져 있으며, 이들 부모형의 일부는 독립적으로 구동이 가능하고, 다른 일부는 몇 개의 부모형이 연계하여 구동할 수 있도록 되어있다(Fig. 1(a)). 탄소, DO 및 질소는 미생물의 활동과 밀접한 연관이 있으며, 이를 위해 미생물 부모형과 연계하여 구동된다. 그리고 입자성 물질의 물리적 제거와 관련되는 인은 Sediment 부모형과, 식생 및 부착조류는 수리 부모형을 제외한 모든 부모형과 연계하여 모의된다. 한편, NPS-WET 모형은 인공습지를 하나의 완전혼합반응조(CSTR; Continuously Stirred Tank Reactor)이며, 수직방향으로 수체층(W), 바닥 Sediment층(B), 그리고 깊은 Sediment층(DS)의 3개 층(layer)으로 가정한다(Fig. 1(b)).

2.2 대상유역

북내 바이오파크(E 127.9° 28.2', N 34.59° 8.7')는 북내 하수종말처리장 방류수와 농경지 비점오염 강우수를 처리하기 위해 2002년 12월에 전남 보성군 북내면 북내리에 설치되었다. 총 부지면적은 23,092 m²(습지면적 : 13,655 m²)의 자유수면형(FWS, 수생식물정화) 습지시스템으로서, 처리용량은 7,407 m³/일로 체류시간은 약 7일 이상으로 운영되고 있다. 인공습지의 구성시스템은 침강저류지, 제1습지,

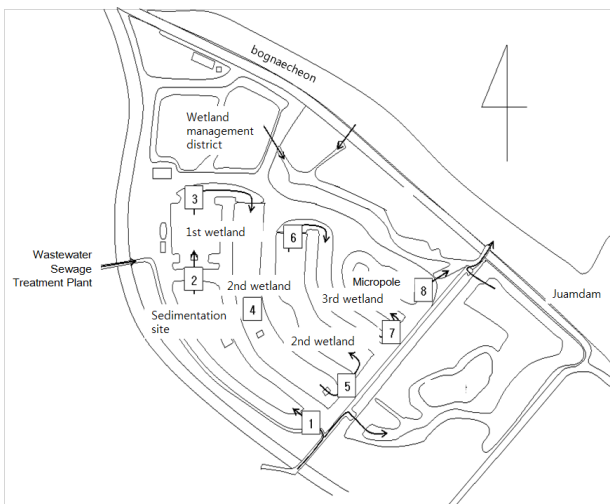


Fig. 2. The configuration system of wetland.

제2습지, 제3습지 및 마이크로폴로 구성되어 있으며, 하천수가 별도 유입되는 창포광장이 2004년 12월에 추가로 설치되어 운영 중이다. 북내 바이오파크의 구조적 특성은 침강저류지, 습지연못구간 및 마이크로폴로 구성되어 있다. 침강저류지는 면적이 약 2,515 m²로서 유입수의 고형물 침전을 위해 설치하였으며, 식생에 의한 오염물의 침전 및 흡수와 질소 및 인 처리를 위해 3단계의 습지와 4개의 연못으로 구성되어 있고, 습지말단부에 산소공급 및 재부유방지를 위해 마이크로폴을 설치하였다.

2.3 모형구축

2.3.1 입력자료

NPS-WET을 이용하여 각 인공습지를 통해 배출되는 유출수의 연중변화를 모의하기 위해 HSPF 모형의 유출량 값을 입력하여 모형을 구축하였으며 검·보정을 위한 실측자료는 2012년에 측정된 분석 데이터를 토대로 검·보정을 하였다. 습지 자료는 영산강 물환경연구소의 자료를 활용하였으며, 기상 자료는 기상청 자료를 활용하였다.

2.3.2 NPS-WET 모형

NPS-WET 모형의 System Control은 대상 습지의 넓이와 최대수심, 경사도, 등을 입력하며, 최종 출력되는 시뮬레이션 값의 항목과 모의 시간 및 모의간격을 설정한다. Hydrology 모듈의 경우 유량의 Input data를 Time series 별로 입력하고 습지 운영자료(환경부, 영산강 물환경연구소)를 토대로 유출량을 입력하여 1년간(2012년)의 습지내의 유량 유출변화를 모의하였다.

NPS-WET 모형의 수질자료는 유기물의 파악하기 위해 Oxygen, Carbon, Sediment 입력과 영양물질을 파악하기 위해 Nitrogen, Phosphorous 등의 모듈이 구성되어 있다. Oxygen의 경우 HSPF 모형의 DOX 값을, Carbon의 경우 TOX, Sediment모듈의 경우 TSS 값의 Input data로 Time series별로 입력하였다. 영양물질인 Nitrogen의 경우 TAM, NO₃, ORN의 합산을 입력하였으며, Phosphorous의 경우 PO₄와 ORP를 합산하여 입력하였다.

2.3.3 유량 및 수질 검·보정

모형의 보정은 모형의 초기조건과 매개변수를 유역의 조건에 맞도록 일치시키는 과정으로 계산된 값과 측정된 값이

Table 1. Input data and source of NPS-WET model

data	source	data characteristics
wetland	Ministry of Environment	size, depth, annual operating data, distributed vegetation
weather	Meteorological Administration	precipitation, mean temperature, relative humidity, uniformity, wind speed, cloudiness, etc.
flow	HSPF model flow data	subbasin reach 9
water quality	HSPF model flow data	subbasin reach 9
verification and calibration	Ministry of Environment	flow, water quality

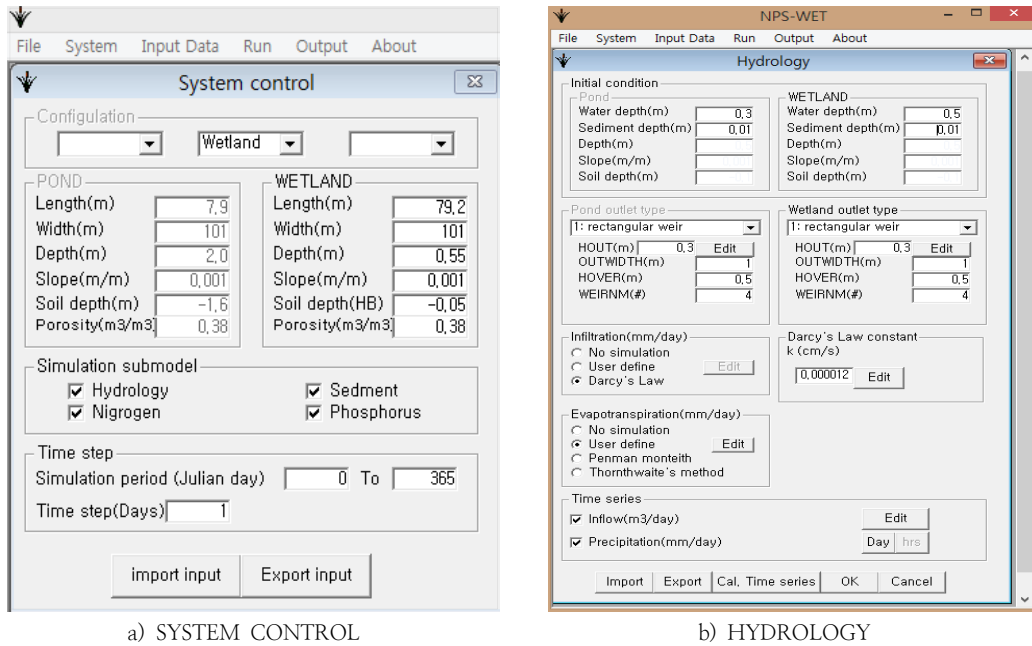


Fig. 3. Input of basic data of NPS-WET model.

가장 잘 일치할 때의 매개변수 값을 추정하는 것이다. 보정기간 동안 반복적인 모델의 매개변수를 수정하고 모의 실행을 통하여 과다 또는 과소 예측된 모의 결과가 실제 관측값과 최대한 근접하게 될 수 있도록 하였으며, 검증을 통해 보정기간에 맞춰진 모델 매개변수들의 타당성을 평가하였다. 유량 보정을 위하여 복내천 유역 HSPF 모델 구축 시 구분한 19개의 소유역 중 총량 유량측정망 지점(RCH 10-동북 A; 전라남도 화순군 동북면 연둔리)에서 검·보정을 실시하였으며, 보정기간은 2012년, 검증기간은 2011년으로 지정해서 모델의 보정 및 검증을 수행하였다.



Fig. 4. Flow validation and calibration point.

유량 보정 및 검증시 실측값에 대한 모의 결과의 적절성을 평가하기 위하여 결정계수(Coefficient of Determination; R^2), NSE(Nash and Sutcliffe), 백분율 오차를 산정하였다.

결정계수(R^2)는 식 (2.1)로 구할 수 있으며, 0~1.0 범위의 값을 가지며, 1.0에 가까울수록 실측치와 모의치의 상관성이 높다는 것을 의미한다. 하지만 결정계수는 단지 무작위 오차만을 평가하는 것으로 오차의 정도, 즉 모델의 모의치가 실측치의 변동성을 예측하는 가능성의 정도를 나타내기 위해서 NSE와 백분율 오차를 같이 사용하였다. NSE 값은 식 (2.2)와 같이 계산 할 수 있으며, 모델의 모의 값이 완벽할 경우 1에 가까워지고, 모의값이 단순히 실측값의 평균치에 지나지 않을 경우 0에 가까워진다. 백분율 오차는 실측값과 모의 값을 수학적으로 비교하기 위한 통계치로서 식 (2.3)과 같으며, 동일한 결과가 예상되는 반복 측정에 대한 신뢰성을 나타내는 양적 지표로 사용된다. 모든 실측치와 모의치가 일치한다면 백분율 오차 값은 0을 나타낼 것이다.

$$R^2 = \frac{1}{n} \times \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - M_p) \times (O_i - M_o)}{(\bar{O}_i - \bar{O}_s)^2} \tag{2.1}$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \tag{2.2}$$

$$\text{백분율 오차} = \frac{\left| \sum_{i=0}^n O_i - \sum_{i=0}^n P_i \right|}{\sum_{i=0}^n O_i} \times 100 \tag{2.3}$$

Table 2. Model efficiency range and confidence interval for validation of HSPF model

Criteria	Very good	Good	Fair	Poor
R2	> 0.80	0.80~0.70	0.70~0.60	< 0.60
NSE	0.90~0.80	0.80~0.70	0.70~0.60	0.60~0.50
% difference	< 10	10~15	15~25	-

여기서, P_i 는 예측값, O_i 는 실측값, n 은 데이터수, \bar{O}_i 는 실측값의 평균이다.

HSPF 모델의 유량 보정 시 총유출량과 침투유량에 대하여 변위가 큰 변수부터 수정하였으며, 유출에 큰 영향을 주는 인자를 바탕으로 본 연구에서는 LZSN 9.2, UZSN 1.49, INFILT 0.19, AGWRC 0.98, DEEPFR 0.5, INTFW 5.83, IRC 0.5, KVAR 1.5를 매개변수 값으로 사용하였다.

수질보정은 영산강물환경연구소에서 측정한 오염총량관리 단위구역 말단의 수질자료를 이용하였으며, 보정항목은 수온, DO, BOD, T-N, T-P, Chl-a 등 6개 항목을 대상으로 하였다.

수질의 보정 및 검증 시 사용된 관측 자료가 대부분 비강우시에 측정된 값이기 때문에 비강우시에 측정된 관측값 위주로 보정을 실시하였으며, 강우시 산정된 모의값은 HSPF 모델에서 나온 결과 값이 맞다는 전제하에 모델을 구동하였다. 수질 검·보정지점은 유량 검·보정지점과 동일한 동북 A 지점에서 시행하였으며 검·보정기간 또한 유량 검·보정기간과 동일한 보정기간은 2012년, 검증기간은 2011년으로 지정하여 수행하였다.

수질의 보정 및 검증 시 실측값에 대한 모의 결과의 적절성을 평가하기 위해서 BASINS/HSPF Training Lecture NO. 15의 "Watershed Model Calibration and Validation: Issues and Procedures"에 수록되어 있는 수질 항목별 백분율 오차 신뢰구간과 모든 관측지점에서 수질 항목별 실측값과 모의값 농도 비율(O/S)의 평균 및 범위를 이용하였다. 그리고 RMSE는 식(2.5)으로 구할 수 있으며, 예측 시 나타나는 오차를 제공한 후, 평균한 값의 제공근을 의미하는 것으로 0에 가까울수록 정밀도가 높아 모의치가 실측치를 잘 반영한다는 것을 의미한다. 모든 실측치와 모의치가 일치한다면 백분율 오차 값은 0을 나타낸다. 백분율 오차 값은 식 (2.4)로 계산 가능하다. 과거 10년 이상 동안 HSPF 모델의 적용사례와 연구 자료를 바탕으로 Donigian(2000)이 제시한 일반적인 모델 효율의 범위와 신뢰 구간을 바탕으로 모델의 보정을 수행하였다.

$$\text{백분율오차} = \frac{\left| \sum_{i=0}^n O_i - \sum_{i=0}^n S_i \right|}{\sum_{i=0}^n O_i} \times 100 \quad (2.4)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \quad (2.5)$$

Table 3. Average and range of measured and simulated concentration ratios(O/S) by water quality items

Constituent	Average	Range
Dissolved Oxygen	0.99	0.90~1.06
Ammonia as N	0.93	0.73~1.18
Nitrite-Nitrate as N	0.99	0.83~1.21
Organic Nitrogen	0.91	0.80~1.20
Total Nitrogen	0.91	0.83~0.97
Orthophosphate as P	1.33	0.91~1.90
Organic Phosphorus	1.35	1.18~1.62
Total Phosphorus	1.40	1.10~1.82
Total Organic Carbon	0.89	0.71~1.06

HSPF 모델에서 수질을 보정할 때 수온, DO를 먼저 보정한 후 BOD, T-N, T-P, Chl-a에 대하여 보정을 수행하였다. 수온에 영향을 미치는 주요변수로는 PERLND, IMPLND Section의 PSTEMP module과 IWATGAS module, REACHES Section 내 HICHTH module의 KATRAD, KCOND, KEVAP, CFSAX가 일반적으로 가장 중요한 매개변수이다. 그 중 CFSAX는 하천에 도달하는 실질적인 태양복사에너지를 양을 결정하는 역할을 하기 때문에 비교적 민감도가 큰 것으로 나타났다. DO와 BOD 관련 매개변수로는 RCHRES Section에서 OXRX module 내의 매개변수가 많이 사용되고 있으며, 일부 NUTRIX module의 매개변수인 CVBO, CVBPC, CVBPN도 사용되고 있다. T-N과 T-P 보정을 위해서는 PERLND Section의 PQUAL module에서 수질항목별 초기값 또는 축적을 입력에 대한 부분과 RCHRES Section의 NUTRX module 내에 제시되어 있는 매개변수를 조정하여 관측치와 모의치 간의 차이를 감소시켰다. 마지막으로 Chl-a의 경우 RCHRES Section의 PLANK module에 있는 매개변수를 중심으로 보정을 수행하였으며, Chl-a는 일사량, 수온, 영양물질에 따라 크게 변화하는 항목으로 DO, BOD, T-N, T-P의 보정을 위한 매개변수에도 민감한 것으로 나타났다.

2.4 시나리오

북내 바이오파크 인공습지의 효율적인 운영관리를 위해 NPS-WET 모델을 이용하여 Table 4와 같은 설계 시나리오를 설정하여 모의하였다. 북내 바이오파크는 총 부지면적 23,092 m²(습지면적 : 13,655 m²)에 자유수면형(FWS, 수생 식물정화) 습지시스템으로서, 처리용량은 7,407 m³/일로 체류시간은 약 7일 이상으로 운영되고 있다. 우선 FS0은 현재 운영 중인 상태이며, FS1의 경우 증설 없이 100 % 사용

Table 4. NPS-WET model scenario design

NO.	Scenario Content
FS0.	Existing facilities(60% utilization rate)
FS1.	Existing facilities
FS2.	25% increase in current size
FS3.	50% increase in current size
FS4.	75% increase in current size
FS5.	100% increase in current size

할 경우를 가정하였다. FS2, FS3, FS4, FS5는 현 상태에서 각각 25%, 50%, 75%, 100%로 증설될 경우를 가정하여 시나리오를 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 검보정 결과

3.1.1 HSPF 유량 검·보정

동북A(화순군 동북면 연둔리)에서 보정 및 검증을 수행한 결과, 보정기간인 2012년의 NSE 0.84로 “Very Good”, 백분율 오차 -1.95로 “Very Good”을 나타냈고, 검증기간인 2011년의 NSE는 0.85로 “Very Good” 백분율 오차는 -1.64로 “Very Good”으로 나타났다. Fig. 5는 동북 A 유역의 유량에 대한 검보정 결과를 나타낸 것이며 모의결과,

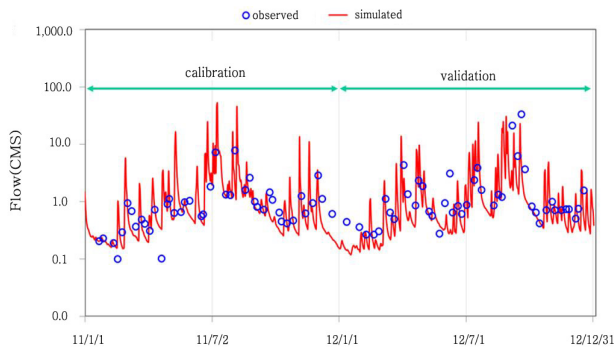


Fig. 5. Result of flow calibration(Dongbok A).

모의치가 실측치를 잘 반영하는 것을 확인할 수 있었다. 여름철 강우가 집중되는 시기인 6월초부터 8월말에 걸친 장마로 인한 유출량의 증가를 확인할 수 있었다.

3.1.2 HSPF 수질 검·보정

동북 A 지점의 수온, DO, BOD, T-N, T-P, Chl-a 등 6개 수질항목에 대하여 보정(2012년) 및 검증(2011년)을 수행하였으며, 그 결과를 Table 5와 같다. 6개의 수질항목을 백분율 오차로 평가한 결과 모든 항목에 걸쳐 대부분 “Very good” ~ “Good”으로 판정되었다.

수온은 보정기간에서 백분율 오차 4.59, O/S 0.96, RMSE는 1.25로 산정되었고, 검증기간의 백분율 오차 -4.91, O/S 0.95, RMSE는 1.36으로 나타났다. DO의 경우 보정기간의 백분율 오차 1.48, O/S 0.99, RMSE는 0.19로 분석되었고, 검증기간에는 백분율 오차 -1.83, O/S 0.98, RMSE는 0.19로 나타났다. BOD는 보정기간에서 백분율 오차 -12.77, O/S 0.89, RMSE 5.23이었고, 검증기간에는 백분율 오차 -7.47, O/S 0.93, RMSE 4.56으로 산정되었다. 영양염류와 Chl-a의 모의결과를 보면 T-N은 보정기간에서 백분율 오차 2.71, O/S 0.97, RMSE 0.68으로 산정되었고, 검증기간의 백분율 오차 -1.13, O/S 0.99, RMSE는 0.74로 나타났다. T-P의 경우 보정기간의 백분율 오차 -12.80, O/S 0.89, RMSE는 4.85로 분석되었고, 검증기간에는 백분율 오차 -5.00, O/S 0.95, RMSE는 4.85로 나타났다. 또한 Chl-a는 보정기간에서 백분율 오차 -5.28, O/S 0.95, RMSE 1.02이었고, 검증기간에는 백분율 오차 -6.00, O/S 0.94, RMSE 1.06으로 산정되었다.

3.1.3 NPS-WET 유량 검·보정

NPS-WET 모델을 이용하여 각 인공습지를 통해 배출되는 유출수의 연중변화를 모의하였으며, 그 결과는 Fig. 6과 같다. 모의결과 실측치와 모의치가 비교적 일치하는 것을 확인할 수 있다. 한편, 초기 모의치 값이 0으로 나온 이유는 초기 안정화 기간 동안 습지내로 유량이 모이는 기간이다.

Table 5. Result of water quality validation and calibration(Dongbok A)

WT (°C)	Validation			Calibration			DO (mg/L)	Validation			Calibration		
	%diff	O/S	RMSE	%diff	O/S	RMSE		%diff	O/S	RMSE	%diff	O/S	RMSE
	4.91	0.95	1.36	4.59	0.96	1.25		-1.83	0.98	0.19	1.48	0.99	0.19
	very good			very good				very good			very good		
BOD (mg/L)	Validation			Calibration			T-N (mg/L)	Validation			Calibration		
	%diff	O/S	RMSE	%diff	O/S	RMSE		%diff	O/S	RMSE	%diff	O/S	RMSE
	-7.47	0.93	4.56	-12.77	0.89	5.23		-1.13	0.99	0.74	2.71	0.97	0.68
	very good			very good				very good			very good		
T-P (mg/L)	Validation			Calibration			Chl-a (mg/L)	Validation			Calibration		
	%diff	O/S	RMSE	%diff	O/S	RMSE		%diff	O/S	RMSE	%diff	O/S	RMSE
	-5.00	0.95	4.85	-12.80	0.89	5.36		-6.00	0.94	1.06	-5.28	0.95	1.02
	good			very good				good			good		

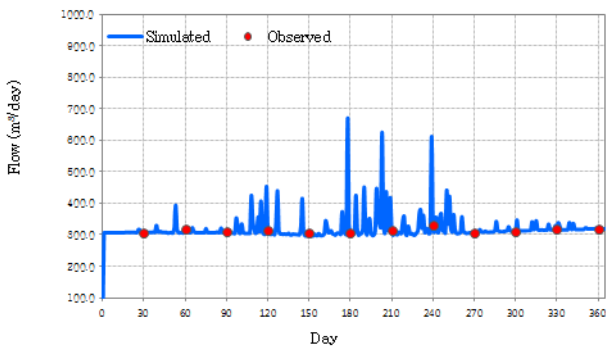


Fig. 6. Result of flow calibration.

3.1.4 NPS-WET 수질 검·보정

복내 바이오파크 인공습지의 수질모의결과는 Fig. 7~Fig. 11과 같으며 모의결과 실측치과 모의치가 유사한 경향으로 나온 것으로 모의되었다. BOD5의 경우 연간 모의값이 대부분 일정한 수치를 유지하는데 이는 습지내의 식생과 미생물의 생성과 분해에 의해 유기물질들이 일정량 존재하기 때문인 것으로 판단된다.

또한 Chl-a를 제외하고 대부분의 항목에서 여름철에 비교적 수질정화효과가 크게 나타났으며, 이는 식생과 조류가 번성하여 인을 비롯한 영양물질의 흡수가 활발한 한편, 분해 작용에 관여하는 미생물의 활동 또한 활발해지기 때문인 것으로 판단된다. 또한 여름철 집중강우시 유입되는 유량으로 인하여 어느 정도 희석효과가 작용한 것으로도 판단된다.

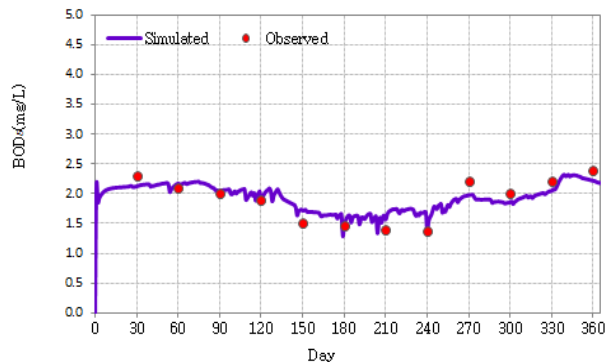


Fig. 7. Result of BOD calibration.

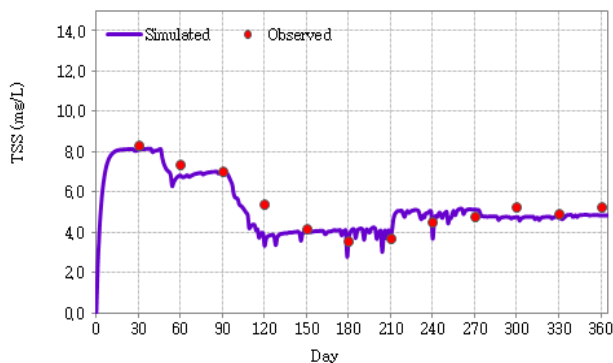


Fig. 8. Result of TSS calibration.

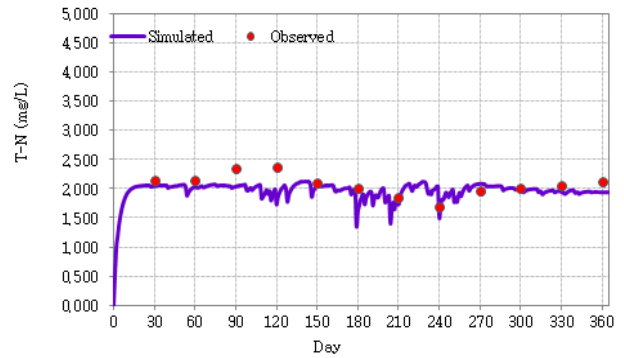


Fig. 9. Result of TN calibration.

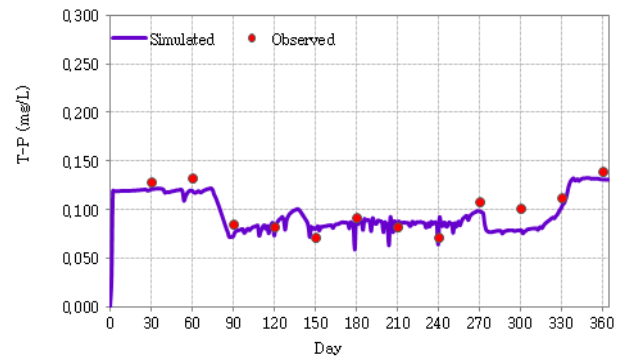


Fig. 10. Result of TP calibration.

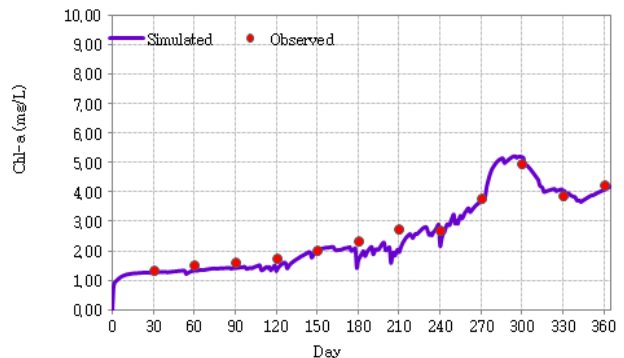


Fig. 11. Result of Chl-a calibration.

SS의 경우 습지 내 유입초기 유속의 급격한 저하로 인한 퇴적작용뿐만 아니라, 습지 내 식생밀도로 인한 정체 및 여과효과도 기대할 수 있다. 따라서 여름철 식물생장의 증가와 함께 습지식물의 밀도가 높아질수록, 여과효과 또한 크게 나타나는 것으로 판단된다.

3.2 시나리오 분석 결과

NPS-WET 모델을 이용하여 각 수질 항목에 따른 시나리오 분석결과 Fig. 12~Fig. 16과 같이 나타났다.

유입수질의 1년 평균값을 이용하여 BOD5 처리효율을 분석한 결과 Fig. 11에 따르면 ‘현 상태 그대로 사용’(FS0)의 유입수질 3.1 mg/L을 기준으로 ‘습지를 100 % 사용할 때’(FS1)의 유입수질은 1.5 mg/L로 나타나 51.6 % 저감하는 것으로 나타났다. 그리고 ‘현재 규모 25 % 증설’(FS2)의

유입수질은 1.5 mg/L로 나타나 51.6 % 저감하는 것으로 나타났으며, '현재 규모 50 % 증설'(FS3)의 유입수질은 1.4 mg/L로 나타나 54.8 % 저감하는 것으로 나타났다. '현재 규모 75 % 증설'(FS4)의 유입수질은 1.0 mg/L로 나타나 67.7 % 저감하는 것으로 나타났으며, 이때 BOD5 처리효율이 가장 높게 나타났다. 마지막으로 '현재 규모 100 % 증설'(FS5)의 유입수질은 1.8 mg/L로 나타나 41.9 % 저감하는 것으로 나타났다. '현재 규모 100 % 증설'(FS5)의 경우 오히려 BOD5 처리효율이 상대적으로 낮게 나타났다. 계절별로 보면 여름철에 농도가 감소하는 경우가 보이는데 이는 여름철 강우에 의한 희석효과와 식생에 의한 유기물과 영양물질의 분해효과에 기인한 것으로 판단된다.

유입수질의 1년 평균값을 이용하여 TSS 처리효율을 분석한 결과 '현 상태 그대로 사용'(FS0)의 유입수질 9.3 mg/L을 기준으로 '습지를 100 % 사용할 때'(FS1)의 유입수질은 4.0 mg/L로 나타나 57.0 % 저감하는 것으로 나타났다. 그리고 '현재 규모 25 % 증설'(FS2)의 유입수질은 3.8 mg/L로 나타나 59.1 % 저감하는 것으로 나타났으며, '현재 규모 50 % 증설'(FS3)의 유입수질은 3.6 mg/L로 나타나 61.3 % 저감하는 것으로 나타났다. '현재 규모 75 % 증설'(FS4)의 유입수질은 2.8 mg/L로 나타나 69.9 % 저감하는 것으로 나타났으며, 이때 TSS 처리효율이 가장 높게 나타났다. 마지막으로 '현재 규모 100 % 증설'(FS5)의 유입수질은 4.8 mg/L로 나타나 48.9 % 저감하는 것으로 나타났다. '현재

규모 100 % 증설'(FS5)의 경우 FS4 보다 TSS 처리효율이 상대적으로 낮게 나타났다. 계절별로 보면 겨울철인 1월초부터 2월말까지 농도가 증가하는 것으로 나타났으며, 여름철에 농도가 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 여름철 식물생장의 증가와 함께 습지식물의 밀도가 높아질수록 여과 효과 또한 크게 나타나는 것으로 판단된다.

유입수질의 1년 평균값을 이용하여 T-N 처리효율을 분석한 결과 '현 상태 그대로 사용'(FS0)의 유입수질 2.970 mg/L을 기준으로 '습지를 100 % 사용할 때'(FS1)의 유입수질은 1.578 mg/L로 나타나 46.9 % 저감하는 것으로 나타났다. 그리고 '현재 규모 25 % 증설'(FS2)의 유입수질은 1.503 mg/L로 나타나 49.4 % 저감하는 것으로 나타났으며, '현재 규모 50 % 증설'(FS3)의 유입수질은 1.422 mg/L로 나타나 52.1 % 저감하는 것으로 나타났다. '현재 규모 75 % 증설'(FS4)의 유입수질은 1.047 mg/L로 나타나 64.7 % 저감하는 것으로 나타났으며, 이때 T-N 처리효율이 가장 높게 나타났다. 마지막으로 '현재 규모 100 % 증설'(FS5)의 유입수질은 1.899 mg/L로 나타나 36.1 % 저감하는 것으로 나타났다. '현재 규모 100 % 증설'(FS5)의 경우 오히려 T-N 처리효율이 상대적으로 낮게 나타났다. T-N의 경우 일정 수준의 효과는 있으나 다른 항목에 비하여 계절별 변화가 없는 것으로 나타났다.

유입수질의 1년 평균값을 이용하여 T-P 처리효율을 분석한 결과 '현 상태 그대로 사용'(FS0)의 유입수질 0.351 mg/L을

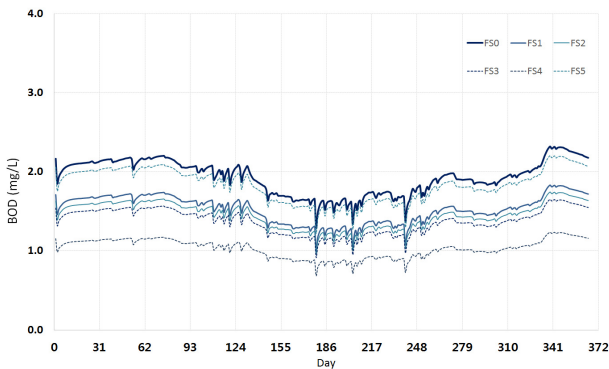


Fig. 12. Results of BOD scenario application.

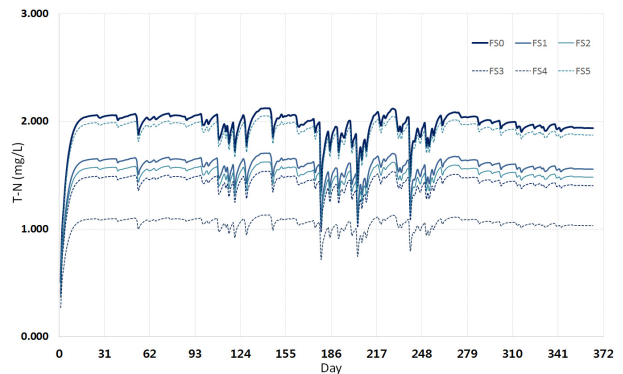


Fig. 14. Results of TN scenario application.

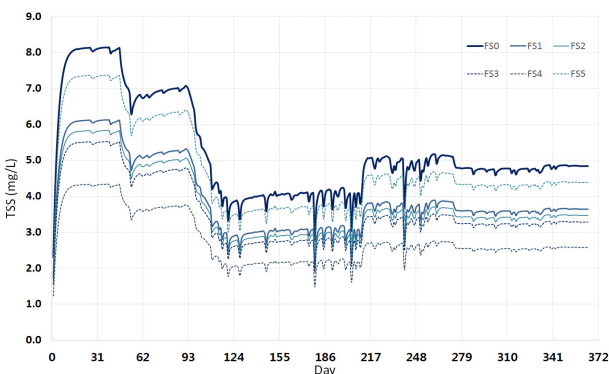


Fig. 13. Results of TSS scenario application.

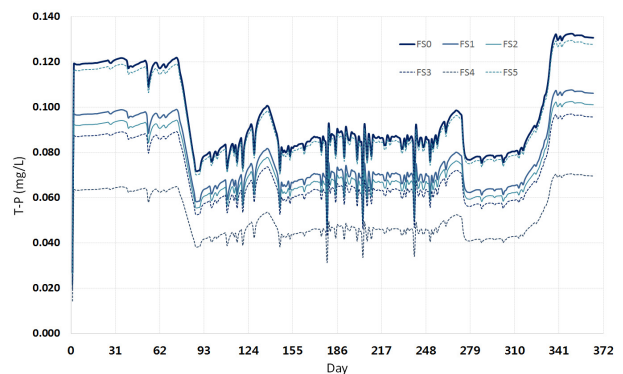


Fig. 15. Results of TP scenario application.

Table 6. The average value of influent water quality and treatment efficiency of scenario

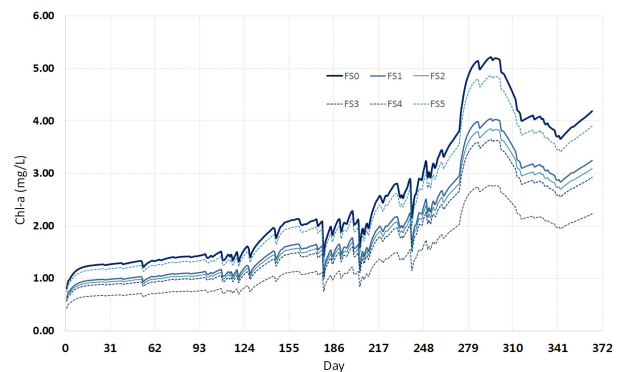
Mean	BOD5	TSS	T-N	T-P	Chl-a
influent	3.1	9.3	2.970	0.351	3.1
FS1	1.5	4.0	1.578	0.078	1.9
FS2	1.5	3.8	1.503	0.074	1.9
FS3	1.4	3.6	1.422	0.070	1.8
FS4	1.0	2.8	1.047	0.051	1.3
FS5	1.8	4.8	1.899	0.094	2.3
Treatment efficiency	BOD5	TSS	T-N	T-P	Chl-a
FS1	51.6 %	57 %	46.9 %	77.8 %	38.7 %
FS2	51.6 %	59.1 %	49.4 %	78.9 %	38.7 %
FS3	54.8 %	61.3 %	52.1 %	80.1 %	41.9 %
FS4	67.7 %	69.9 %	64.7 %	85.5 %	58.1 %
FS5	41.9 %	48.4 %	36.1 %	73.2 %	25.8 %

기준으로 ‘습지를 100 % 사용할 때’(FS1)의 유입수질은 0.078 mg/L로 나타나 77.8 % 저감하는 것으로 나타났다. 그리고 ‘현재 규모 25 % 증설’(FS2)의 유입수질은 0.074 mg/L로 나타나 78.9 % 저감하는 것으로 나타났으며, ‘현재 규모 50 % 증설’(FS3)의 유입수질은 0.070 mg/L로 나타나 80.1 % 저감하는 것으로 나타났다. ‘현재 규모 75 % 증설’(FS4)의 유입수질은 0.051 mg/L로 나타나 85.5 % 저감하는 것으로 나타났으며, 이때 T-P 처리효율이 가장 높게 나타났다. 마지막으로 ‘현재 규모 100 % 증설’(FS5)의 유입수질은 0.094 mg/L로 나타나 73.2 % 저감하는 것으로 나타났다. ‘현재 규모 100 % 증설’(FS5)의 경우 오히려 T-P 처리효율이 상대적으로 낮게 나타났다. T-P의 경우 TSS와 비슷한 경향을 보이는데 이는 TSS에 흡착되어 존재되는 PO₄-P에 기인한 것으로 판단된다. 계절별로 살펴보면 12월초부터 3월말인 겨울철에 농도가 증가하는 것으로 나타났으며, 가을철에 농도가 감소하는 것으로 나타났다.

유입수질의 1년 평균값을 이용하여 Chl-a 처리효율을 분석한 결과 ‘현 상태 그대로 사용’(FS0)의 유입수질 3.1 mg/L을 기준으로 ‘습지를 100 % 사용할 때’(FS1)의 유입수질은 1.9 mg/L로 나타나 38.7 % 저감하는 것으로 나타났다. 그리고 ‘현재 규모 25 % 증설’(FS2)의 유입수질은 1.9 mg/L로 나타나 38.7 % 저감하는 것으로 나타났으며, ‘현재 규모 50 % 증설’(FS3)의 유입수질은 1.8 mg/L로 나타나 41.9 % 저감하는 것으로 나타났다. ‘현재 규모 75 % 증설’(FS4)의 유입수질은 1.3 mg/L로 나타나 58.1 % 저감하는 것으로 나타났으며, 이때 Chl-a 처리효율이 가장 높게 나타났다. 마지막으로 ‘현재 규모 100 % 증설’(FS5)의 유입수질은 2.3 mg/L로 나타나 25.8 % 저감하는 것으로 나타났다. ‘현재 규모 100 % 증설’(FS5)의 경우 오히려 Chl-a 처리효율이 상대적으로 낮게 나타났다.

Table 6은 유입수질의 1년 치 평균값을 이용하여 처리효율을 분석한 결과를 나타낸 것이다.

시나리오 분석 결과 ‘현 상태 그대로 사용’(FS0)의 유입수질을 기준으로 하였을 경우, BOD5, TSS, T-N, T-P,

**Fig. 16.** Results of Chl-a scenario application.

Chl-a 모두 ‘현재 규모 75% 증설’(FS4)에서 수질개선 효과가 가장 높은 것으로 나타났다. 하지만 ‘현재 규모 100% 증설’(FS5)에서는 오히려 수질개선 효과가 상대적으로 낮게 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로 습지 설계시 NPS-WET 모형을 활용할 경우 효율적인 습지 규모를 결정할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 인공습지의 설계규모와 수질개선 효과 간의 상관성 검토를 위해 바이오파크 유역 내 인공습지를 대상으로 습지운영모델인 NPS-WET를 이용한 설계 시나리오의 실험적 사례를 분석한 것으로서, 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 인공습지의 0-100 % 증설범위의 설계별 시나리오 분석결과, ‘기존규모 대비 75 % 증설’의 경우, ‘기존규모의 현 상태 운영’ 설계 기준과 비교하여 수질이 BOD5는 66.7 %, TSS는 69.9 %, T-N은 64.7 %, T-P는 85.5 %, Chl-a는 51.8 % 만큼 개선되어 가장 양호한 효과를 보여 주었으며, 특히 4계절 중 여름철에 Chl-a를 제외한 수질항목에서 효과가 크게 나타나는 경향이였다.

2) 기존 규모대비 100 % 증설의 경우, ‘기존규모의 현 상태 운영’ 설계 기준과 비교하여 수질개선 효과는 오히려 낮

아져, 설계규모와 수질개선효과 간 정비례관계가 성립되지 아니함이 확인되었다. 이러한 원인은 바이오파크 유역 내 유입되는 유량이 한정되어 있기 때문에 습지 증설로 인한 수질정화효과가 바이오파크 전체 유역으로 봤을 때 크지 않은 것으로 판단된다. 따라서 습지를 설계할 때 습지의 유입량을 고려하여 최적의 규모를 조성해야 할 것이다.

3) 본 연구는 인공습지 설계규모와 수질개선 효과를 분석하는데 초점을 맞추고 있기 때문에, 기존 습지시스템에서 벗어나거나 아직 설치되지 않은 주변 시설 및 경계조건 등에 대한 정의에 있어 정확성이 다소 낮을 수 있다. 또한 분석 수질의 연중 수질변화가 반영되지 않았다. 향후 NPS-WET 모형의 적용에 있어서 유입수 유량, 수질, 식생 등 습지시스템의 조건을 상세하게 정의할 경우 분석된 결과값에 대한 신뢰성이 확보될 수 있을 것이다.

References

- Buchberger, S. G. and Shaw, G. B(1995). An Approach Toward Rational Design of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment, *Ecological Engineering*, 4, pp. 249–275.
- Chun SY, Kim JT, Lee IK, Chang SW(2014). A Study of Non-point Source Reduction Efficiency by Constructed Wetland installed in Flood Pumping Station, *J. of Environmental Impact Assessment*, 23(1), pp. 66–74. [Korean Literature]
- Gang SW, Soe DC, Choi IW, Lee JB, Lim BJ, Park JH, Kim KS, Kim SD, Heo JS, Cho JS(2011). Characteristics of Nutrient Uptake by water Plants in Free water Surface Constructed Wetlands of Treating Non-point Source Pollution, *Korean J Environ Agric*, 30(3), pp. 304–309. [Korean Literature]
- Kadlec, R. H. and Hammer, D. E(1988). Modeling Nutrient Behavior in Wetlands, *Ecological Modeling*, 40, pp. 37–66.
- Kim PJ, Han EY, Kim YC(2017). A Case Study Stormwater Treatment by Channel-Type Wetland Constructed on the Flood Plane of the Stream, *J. of Wetlands Research*, 19(1), pp. 80–89. [Korean Literature]
- King, A. C., Mitchell, C. A., and Howes, T(1997). Hydraulic Tracer Studies in a Pilot Scale Subsurface Flow Constructed Wetland, *Water Science and Technology*, 35(5), pp. 189–196.
- Ko DH, Chung YC, Seo SC(2010). Removal Mechanisms for Water Pollutant in Constructed Wetlands: Review Paper, *J. of KSEE*, 32(4), pp. 379–392. [Korean Literature]
- Lee SH, Cho YC(2011). A Study on Water Quality Improvement of Hoeya Dam Reservoir Using Ecological Constructed Wetland, *J. of KSWST*, 13(3), pp. 489–497. [Korean Literature]
- Lee JY, Kang CG, Gorme JB, Kim SS, Kim LH(2011). Development of Small HSSF Constructed Wetland for Urban Green space, *J. of KSWST*, 13(2), pp. 199–208. [Korean Literature]
- Park JS, Kang JH(2011). Nitrification and Denitrification of Plants and Pebbles Purification System, *J. of KSWST*, 19(2), pp. 77–85. [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 KSWST*, 14(4), pp. 479–488. [Korean Literature]
- Rhee HP, Jung KW, Lee BS, Ham JH, Son YK(2012). Analysis of Water-quality Improvement Efficiency of Constructed Wetland Using NPS-WET Model, *J. of Korean Society on Water Environment*, 28(2), pp. 320–331. [Korean Literature]
- Rural Research Institute(2007). Development of water quality improvement method by artificial wetland, Korea Rural Community Corporation Research Report. [Korean Literature]
- Seo, DC, Kang SW, Lim BJ, Park JH, Kim KS, Lee JB, Kim H, Heo JS, Chang NI, Sung HH, Cho JS(2011b). Evaluation of aquatic ecological characteristics in Sinpyongcheon constructed wetlands for treating non-point source pollution, *Korean J. Soil Sci. Fert*, 44, pp. 263–270. [Korean Literature]
- Seo, SW, Kang SW, Kim H, Han MJ, Lim BJ, Park JH, Kim KS, Lee YJ, Choi IW, Heo JS, and Cho JS(2011a). Evaluation of treatment efficiencies of pollutants in Boknae bio-park constructed wetlands, *Korean J. Soil Sci. Fert*, 44, pp. 263–270. [Korean Literature]