

수정 수문지형학적 방법을 적용한 강천 대체습지의 기능평가

김정욱·이보은*·김재근*·오승현·정재원·이명진·김형수

인하대학교 토목공학과

*서울대학교 생물교육과

Functional Assessment of Gangcheon Replacement Wetland Using Modified HGM

Jungwook Kim·Bo Eun Lee*·Jae Geun Kim*·Seunghyun Oh·Jaewon Jung·Myungjin Lee·Hung Soo Kim

Department of Civil Engineering, Inha University, Incheon, Korea

**Department of Biology Education, Seoul National University, Seoul, Korea*

(Received : 18 July 2017, Revised: 07 August 2017, Accepted: 16 August 2017)

요약

2008년부터 2013년까지 우리나라는 4대강 살리기 사업을 진행하면서 하천준설 및 습지 내 유원지화로 기존의 습지가 축소되거나 훼손되었다. 이에 환경적 측면을 고려해 대체습지를 조성하였으나, 이에 대한 관리가 미흡한 상태이다. 습지의 효율적 관리를 위해서는 먼저 습지의 기능을 평가하고 각 기능에 맞는 관리가 필요하다. 본 연구에서는 4대강 사업으로 조성된 강천습지를 대상으로 수정 HGM 방법을 이용하여 수문학적, 생지화학적, 동·식물서식처 기능을 평가하였다. 기능평가를 위한 변수를 산정하기 위해 4대강 사업 전과 사업 후의 강천습지에 대한 현황과 습지에 대한 자료 및 제원을 문헌조사 및 현장조사 그리고 수리·수문모델링을 통해 획득하였다. 기능평가 결과 4대강 사업 이후 수문학적 기능이 65.5%, 생지화학적 기능이 66.6%, 식물서식처 기능이 75%, 그리고 동물서식처 기능이 108.3%로 4대강 사업 이후 강천습지는 이전에 비해 78.9%의 기능을 수행하는 것으로 분석되었다. 수문학적 기능의 감소는 4대강 사업 이후 지표하 저류의 감소, 그리고 생지화학적 기능 및 식물서식처 기능의 감소는 4대강 사업으로 인해 강천습지 주변의 모래톱이 상당 면적 제거되었기 때문이다. 따라서, 감소한 기능을 보완하기 위해 습지 구역을 확장하고, 다양한 식물을 식재할 필요가 있다. 본 연구에서 사용된 수정 HGM 방법은 기존의 습지로부터 대체습지에 대한 개선 정도를 고려할 수 있으므로 조성된 대체습지를 효율적으로 관리하는데 활용할 수 있다. 또한 습지를 새롭게 조성할 경우 시간에 따른 조성 습지의 기능 변화를 평가하기에 매우 유용할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 동·식물서식처 기능, 생지화학적 기능, 수문학적 기능, 수정 HGM, 습지 기능평가

Abstract

Riverine wetlands were reduced and damaged by dredging of rivers and constructing parks in wetlands by Four Rivers Project from 2008 to 2013. Therefore, replacement wetlands were constructed for the compensation of wetland loss by the government. However, It is not enough to manage replacement wetlands. In order to manage the wetlands efficiently, it is necessary to assess the functions of the wetlands and to manage them according to their functions. Here we performed functional assessments for a replacement wetland called Gangcheon wetland using the modified HGM approach. Hydrological, biogeochemical, animal habitat, and plant habitat functions for the wetland were assessed. To assess the functions, we collected informations for modified HGM approach from the monitored hydrologic data, field survey, published reports and documents for before and after the project, and hydraulic & hydrologic modeling. As the results of the assessment, the hydrological function for the replacement wetland showed 65.5% of the reference wetland, biogeochemical function showed 66.6%, plant habitat function showed 75%, and animal habitat function showed 108.3%. Overall, Gangcheon wetland function after the project was reduced to 78.9% of the function before the project. The decrease in hydrological function is due to the decrease of subsurface storage of water. And the decrease in biogeochemical & plant habitat functions is due to the removal of sandbank around the Gangcheon wetland. To compensate for the reduced function, it is necessary to expand the wetland area and to plant the various vegetation. The modified HGM

* To whom correspondence should be addressed.
Department of Biology Education, Seoul National University, Seoul, Korea
E-mail: caelum1210@naver.com

used in this study can take into account the degree of improvement for replacement wetlands, so it can be used to efficiently manage the replacement wetlands. Also when the wetland is newly constructed, it will be very useful to assess the change of function of the wetland over time.

Key words : Animal & plant habitat function, Biogeochemical function, Hydrological function, Modified HGM, Wetland functional assessment

1. 서 론

습지는 종 다양성 유지, 영양물질 공급, 수위조절 등 환경적, 생태적, 수문학적 측면으로 인간생활에 중요한 역할을 하고 있다. 그러나 도시화와 같은 지속적인 인류의 발전과 개발 활동으로 인해 대부분의 습지가 훼손 및 파괴되었고, 습지의 훼손으로 인해 생태계의 종 풍부도 및 다양성 감소, 홍수와 가뭄으로부터의 피해 증가, 수질오염 등 많은 측면에서 문제가 발생하고 있다(Mitsch and Gosselink, 2007). 우리나라는 홍수저감 및 용수확보 측면에서 4대강 살리기 사업이라는 대규모 하천공사를 진행함에 따라 하천준설 및 습지 내 유원지화로 기존의 습지가 축소되거나 훼손되었다. 이에 환경적 측면을 고려하여 소실된 기존의 습지의 기능을 복원하기 위해 대체습지를 조성하였으나, 이에 대한 관리가 미흡한 실정이다. 따라서, 조성된 습지를 관리하기 위한 습지의 기능평가가 필수적이다.

국외의 경우 습지에 대한 중요성 및 평가 연구가 국내보다 이전에 수행되어 왔으며, 습지 훼손에 따른 대체습지 조성 및 관리연구도 지속적으로 수행되고 있다. Kentula et al.(1993), Cylinder et al.(1995), Admiraal et al.(1997)은 대체습지를 향상(enhancement), 복원(restoration), 창출(creation) 등으로 구분하고 있으며, 국외의 습지 가치평가 연구는 평가 대상이나 방법론에 따라 다양하게 진행되고 있다. 최근에는 습지를 평가할 때 평가의 신뢰성을 높이기 위해 습지의 유형을 분류하여 평가하고 있다(Williams et al., 2010; Cole, 2016). Lin(2006)은 지역에 맞는 변수를 산정하기 위해 산정 방법을 수정하여 제시하였으며, 지역에 적합한 HGM방법을 제시하였다. 국외에서는 대부분 HGM방법으로 생물학적 뿐만 아니라 수문 및 지형학적 측면에서 습지의 기능을 평가하고 있으며, 인공습지의 기능을 유형이 같은 자연습지와 비교하여 평가하고 있다(Hoeltje and Cole, 2007). 이렇듯, 미국과 같은 선진국에서는 풍부한 습지의 수문, 지형, 생태 모니터링 자료를 이용하여 HGM 방법으로 습지의 기능을 체계적으로 평가하고 있다.

국내의 경우 대표적으로 습지의 기능 및 가치 평가의 방법으로 RAM 방법과 수문지형학적 방법을 사용하였으나, 최근 일반기능평가 방법 보다는 수문지형학적 방법을 사용한 습지의 기능평가 수행 연구가 이루어지는 추세이다(Korean Wetlands Society, 2016). 미국과 같이 HGM으로 습지를 관리하기 위한 기능평가방법에 사용하고 있고, HGM 분류체계를 바탕으로 국내에 적용 가능한 습지를 분류하고 유형에 따른 분류 특성을 파악하였다(Koo and

Kim, 2001). 이를 토대로 댐의 습지로서의 기능을 평가하였고(Shin et al., 2009, Kim et al., 2011), 하천습지의 기능을 수문학적, 생지화학적, 식물서식처, 동물서식처 측면으로 평가하였다(Yoon, 2010). 또한, 기후변화가 습지에 미치는 영향을 HGM을 사용하여 평가하기도 하였다(Kim, 2012). 최근에는 HGM이 기존습지와 유사성만 판단하고 습지 기능의 증진을 평가할 수 없어 습지 관리에 어려움이 있는 것을 보완하기 위해 수정 HGM을 제시하고 이를 평가하였다(Kim, 2015; Hong and Kim, 2017). 국내의 경우 국외와 같이 HGM으로 습지의 기능을 평가하고 있지만, 아직까지는 국외에 비해서 습지의 수문, 지형, 생태 모니터링 자료 구축이 부족하기 때문에 국내 실정에 맞게 산정할 수 없는 변수를 제외하고 습지의 기능을 평가하는 추세이다(Kim, 2015; Korean Wetlands Society, 2016; Hong and Kim, 2017).

국내·외 선행연구를 살펴보면 국외의 경우 풍부한 데이터를 토대로 습지의 기능을 정밀하게 평가하고 있다. 국내는 국외 선진국과 같이 습지의 기능을 정밀하게 평가하고 있지만 아직까지는 몇몇 데이터 부족으로 인해 국내 사정에 맞게 기능을 평가하고 있다. 하지만, 데이터 부족으로 인해 몇몇 기능을 평가하지 못한다면 습지의 관리방안을 수립하기 어렵다. 본 연구에서는 특히 수문 모니터링 자료가 부족한 것을 보완하고자 수리·수문 모델링을 통해 부족한 수문자료를 간접적으로 모의하였다. 또한, 문헌조사로 부족한 것을 보완하기 위해 토양 및 생물 현장조사를 실시하였다. 직·간접적으로 확보된 데이터를 토대로 4대강 사업 후 조성된 대체습지를 대상으로 기능평가를 실시하였다. 향후 습지 기능을 보완하거나 유지할 수 있도록 습지 기능의 증진까지 평가 가능한 수정 HGM을 이용하였다. 수정 HGM으로 4가지(수문학적, 생지화학적, 식물서식처, 그리고 동물서식처) 측면으로 기능을 평가하고 기능이 떨어진 부분은 보완하고, 기능이 향상된 부분은 유지하는 관리방안을 제시하였다.

2. 연구방법 및 내용

2.1 대체습지의 정의

대체습지란 인간 활동에 따른 도시화 및 개발에 따라 습지의 훼손과 파괴, 기능 상실을 초래함으로써 이를 방지 및 대책하기 위해 조성되는 습지를 의미한다. 기존의 습지를 관리함에 있어 가장 바람직한 대책은 개발에 따른 습지의 훼손을 막는 것이겠지만, 개발 정도에 따라 훼손이 불가피한 경우도 많이 발생하게 된다. 습지가 훼손될 경우에 대한

보상방법에는 창출 및 복원, 향상 등이 있으며 대표적인 보상 방안으로서 대체습지를 활용할 수 있다(Jung, 2004). 미국의 경우 습지 본연의 기능 손실을 방지하기 위해 습지 훼손에 대한 보상과 완화조치(Compensatory Mitigation)가 습지관련법에 의해 법제화되어 있으며, 습지 상실에 따른 완화조치로 대체습지를 조성할 경우에는 다른 지역에 소재하는 습지보다는 동일 지역 내의 습지로, 이종의 습지 보다는 동종의 습지로 완화조치 하는 것을 우선시 한다. 또한, 대체습지를 새로이 조성하거나 보존하는 것보다는 대체습지를 원래의 습지 상태로 복원하는 것을 더욱 우선시하고 있다.

2.2 HGM방법에서의 습지 기능 분류 및 기능지수 산정식

HGM방법은 습지의 수문, 지형 생태학적 특성을 고려하여 습지의 기능을 평가하는 방법으로 미공병단에서 습지가 수행하고 있는 기능을 평가하기 위해 제안한 방법으로 (Brinson et al, 1995), 현재 국내외에서 일반기능평가에서 HGM방법을 통한 습지 기능평가로 옮겨가는 추세이다. 기존 방법론들은 생태학적 측면에 비중을 두어 습지의 기능을 평가 하였다면, HGM방법은 생태학적 뿐만 아니라 수리·수문 및 지형학적 측면으로도 습지의 기능평가가 수행되고 있다(Hong and Kim, 2017). HGM방법은 습지의 기능을 수문학적 측면, 생지화학적 측면, 식물서식처 측면, 동물서식처 측면으로 분류하고 세부적으로 15가지 기능을 평가하고 있다. 기능마다 영향을 받는 변수값들을 기준습지와 비교를 통해 산정하고 이를 Table 1에 나타나있는 기능지

수 산정식(Index of Function, FCI)에 대입하여 각 기능별 기능평가지수를 산정할 수 있다

2.3 수정 HGM방법

기존의 HGM방법은 기준습지에 대한 기능의 상한 값을 1.0으로 보고 대상습지의 기능을 평가한다. 그러나 대상습지의 기능이 기준습지의 기능보다 우수한 경우에는 기능지수의 상한 값이 1.0으로 고정되어 있어 그 기능을 제대로 평가할 수 없는 문제점이 있다(Kim, 2015). 따라서 본 연구에서는 대상습지가 기준습지보다 우수한 경우를 고려하여 최대 변수값을 2.0까지 부여하여 습지의 기능을 평가하는 수정 HGM방법(MOLIT HRFco, 2013; 2014; Kim, 2015)을 통해 습지의 기능 평가를 실시하였다. 본 연구에서 사용한 수정 HGM 방법은 기능이 우수하다고 알려진 기준습지와 유사성만을 평가하던 기존의 HGM 방법과 달리(Shin et al., 2009; Yoon et al., 2010; Kim et al., 2011; Jin et al., 2013; Yeum and Kim, 2016), 처치 이전의 습지를 기준습지로 선정하여 처치 이후 습지의 기능이 시간에 따라 변화하는 것을 평가할 수 있다(Kim, 2015). 또한, 대상습지에 대한 변수의 상한값을 2.0으로 부여해 줌으로써 대상습지의 우수성을 파악하는 것도 가능하다. 즉, 4대강 사업이라는 대규모 하천정비사업 이후, 강천습지의 시간에 따른 기능 증진 정도를 평가함으로써 대체습지의 기능 변화를 정량적으로 평가할 수 있다. 따라서 본 연구에서의 방법론을 적용한다면, 향후 습지를 조성하거나 개발할 때, 개발 이전의 습지를 기준으로 선정하여 그에 따른 기능

Table 1. Index of Function in HGM

	Function	FCI
Hydrological	Dynamic Surface Water Storage	$\{ [V_{FREQ} \times (V_{INUND} + V_{MICRO} + V_{SHRUB} + V_{BTREE} \text{or } V_{DTREE} + V_{CWD}) / 5]^{1/2} \}$
	Long-Term Surface Water Storage	$(V_{SURWAT} + V_{MACRO}) / 2$
	Energy Dissipation	$[V_{FREQ} \times (V_{MACRO} + V_{MICRO} + V_{DTREE} + V_{CWD}) / 4]^{1/2}$
	Subsurface Storage of Water	$(V_{PORE} + V_{WTF}) / 2$
	Moderation of Groundwater Flow or Discharge	$(V_{SUBIN} + V_{SUBOUT}) / 2$
Biogeochemical	Nutrient Cycling	V_{PROD}
	Removal of Imported Elements and Compounds	$[(V_{FREQ} + V_{SURFIN}) / 2 + V_{SORPT} + V_{BTREE}] / 3$
	Retention of Particulates	$[(V_{FREQ} + V_{SURFIN}) / 2 \times (V_{HERB} + V_{SHURB} + V_{BTREE} + V_{DTREE}) / 4]^{1/2}$
	Organic Carbon Export	$[(V_{FREQ} + V_{SURFIN} + V_{SURFCON}) / 3 \times V_{ORGAN}]^{1/2}$
Plant habitat	Maintain Characteristic Plant Communities	$[V_{COMP} + (V_{DTREE} + V_{BTREE}) / 2] / 2$
	Maintain Characteristic Detrital Biomass	$\{ V_{SNAGS} \times [(V_{CWD} + V_{LOGS}) / 2] + V_{FWD} \} / 3$
Animal habitat	Maintain Spatial Structure of Habitat	$(V_{SNAGS} + V_{MATUR} + V_{STRATA} + V_{CAPS} + V_{PATCH}) / 5$
	Maintain Interspersion and Connectivit	$(V_{FREQ} + V_{SURFCON}) / 2$
	Maintain Distribution and Abundance of Invertebrates	$(V_{SINV} + V_{TERR}) / 2$
	Maintain Distribution and Abundance of Vertebrates	$(V_{FISH} + V_{HERB} + V_{BIRD} + V_{MAMM}) / 4$

Table 2. Comparison of HGM and Modified HGM

		HGM	Modified HGM
commonality	variables	To assess functions of hydrological, biogeochemical, plant habitat, animal habitat aspect and to calculate the function index through index of function calculation formula with variable related on function	
	Procedure of assessment	1. Wetland type classification (reference wetlands and target wetland selection) 2. Variable definition and data collection 3. Calculate the value of the variable 4. Calculate the index of function	
Difference	Value of variables	When it is similar to the reference wetland, give variable the value of 1.0	Granted the value of 2.0 variable which is superior to the reference wetland
	Method of assessment	By evaluating the function of the target wetland, it is judged whether the function is similar to the reference wetland	Evaluate not only the similarity of the functions of target wetlands and reference wetland but also excellence

Table 3. Range of Variable Values in Modified HGM

Variable calculation standard	variables value
When the variable value of the target wetland from the reference wetland is 175% or more, When the condition is superior to the reference wetland	2.0
When the variable value of the target wetland from the reference wetland reaches 125~175% or 125% or more, When the condition performs a better function than reference wetland	1.5
When the variable value of the target wetland from the reference wetland reaches 75~125% or 75% or more, When the condition is similar to the reference wetland	1.0
When the variable value of the target wetland from the reference wetland reaches 25~75%, When the condition is not much different from the reference wetland	0.5
When the variable value of the target wetland from the reference wetland reaches 0~25%, When the condition is much different from the reference wetland	0.1

변화를 보다 명확하게 평가할 수 있을 것으로 판단된다. 기존의 HGM방법과 본 연구에서 사용한 수정 HGM방법을 비교하면 Table 2와 같으며, 수정 HGM방법의 변수값의 범위는 Table 3과 같다. 단, 대상습지의 변수 값 산정 시 기준습지와 유사성이 전혀 없을 경우에 변수값은 0으로 산정된다.

위치하고 있다. 강천보에서 상류 방향으로 하천변을 따라 약 4km 떨어진 지점에 위치하고 있으며, 면적은 약 430,000m² 이나 하중도의 중앙부는 대부분의 공원으로 조성되어 실제 습지는 섬 돌레를 따라서만 일부 존재한다. 강천습지는 4대강 사업을 진행하면서 기존의 하천습지를 하중도 습지 형태로 정비한 대체습지이다(Fig. 1).

3. 적용 및 결과

3.1 대상지역

본 연구의 대상 습지인 강천습지는 경기도 여주시 강천면 일원의 남한강 본류 내에 위치한 대체습지로 한강 6공구에

3.2 강천습지의 수문 및 생태 현황

3.2.1 강천습지의 수문 현황

강천습지의 수문학적 기능을 평가하기 위해 강천습지의 수문학적 현황을 조사·분석하였다. 수문학적 기능을 평가하기 위해서는 강천습지의 유황별 유량, 월류 빈도, 평균 침



Fig. 1. Gangcheon Wetland. Left: Before the Projects (2008), Right: After the Projects (2015)

Table 4. Analysis of flow duration in Gangcheon Wetland

Obs.	days	Flow rate(m ³ /s)							
		5	10	20	30	95	185	275	355
Mok-ge	Before the Projects	1175.2	686.4	443.1	341.7	147.5	92.2	54.9	34.1
	After the projects	1195.3	944.0	595.5	418.3	184.0	127.3	101.9	80.5
Moon-mak	Before the Projects	514.9	312.7	150.2	94.8	17.7	7.4	4.1	2.0
	After the projects	478.2	269.0	126.8	84.6	19.1	9.1	5.1	1.4
Cheong-mi	Before the Projects	146.3	83.7	45.1	30.6	10.1	4.3	1.9	0.7
	After the projects	118.8	70.4	40.5	29.0	9.3	4.5	2.6	0.8

Table 5. Change in average inundation depth, flow velocity, wetland water level fluctuation of Gangcheon wetland

Gangcheon Wetland	Average inundation depth (m)	Flow velocity (m/s)	Water level fluctuation (m)
Before the Projects	2.90	2.55	0.39
After the Projects	3.12	2.17	0.02

수심, 수위, 유속 등을 분석할 필요가 있다. 습지의 경우 수위, 유량 등 직접적으로 조사한 자료가 없기 때문에, 본 연구에서는 수문모형을 이용하여 강천습지의 수문 현황을 분석하였다. 강천습지의 유황 분석은 강천습지 상류에 위치하고 있는 목계, 문막, 청미 수위관측소 자료를 활용하였다. 4대강 사업은 2008년부터 2013년까지 진행된 사업으로 사업 전 분석은 1982년부터 2007년까지의 자료, 사업 후 분석은 2013년부터 2015년까지의 자료를 활용하였다. 강천습지 상류에는 남한강 지류인 청미천과 섬강이 존재하므로 강천습지의 유황분석에 신뢰성을 향상시키기 위해 청미천과 섬강의 유황을 별도로 분석하였다(Table 4).

분석된 유황별 유량은 HEC-RAS 모형에 입력자료로 활용하여, 습지의 평균침수심 및 습지 주변 유속, 그리고 수위변화를 분석하였다. 평균침수심의 경우 유황의 증가로 인해 4대강 사업 전에 비해 사업 후 0.22 m가 증가하였으며 이로 인해 습지 내 침수심과 면적이 증가하였다. 하상 준설로 인해 단면이 변화하여 습지 주변 유속은 0.38 m/s 감소하였고, 이로 인해 조류 및 플랑크톤 농도가 증가하였다. 습지의 수위변화량은 사업 후 0.37 m 감소하였다. 이는 식생 서식환경 유지 등 습지관리에 있어 중요한 요소인 습지 수위변동이 감소하였음을 나타낸다(Table 5).

3.2.2 강천습지의 생태 현황

강천습지는 종다양성이 높고 멸종위기 야생생물, 천연기념물 등 법정보호종이 많이 서식하고 있는 습지이다.(MOLIT

SRCMA, 2009; 2016). 본 연구에서는 강천습지의 식물서식처 및 동물서식처 기능을 평가하기 위해 사업 전과 사업 후의 생물종 현황을 조사하였고 결과를 변수를 산정하는데 활용하였다(Table 6 and 7). 식물상의 경우 사업 전에 비해 사업 후 그 종수가 감소하였는데 이는 강천습지 내부에 유원지가 조성되어 다양한 습지 식물이 잔디밭으로 대체되고 습지 면적이 축소되었기 때문으로 보인다. 다만, 습지 식물이 하중도가장자리를 따라 그 영역을 확장하고 있으며, 하천변에 식생이 안정화되고 있어 점차 그 종수는 회복될 것으로 판단된다. 동물상의 대부분은 하천정비구간, 준설구간, 보 설치구간 등 공사에 따른 물리적 교란을 피해 양호한 환경으로 이동한 뒤 공사가 끝난 후 다시 회복되어 사업 전과 비교하였을 때 전체 종수가 유사하거나 증가하였다. 이는 동물 서식환경이 사업 후 빠르게 회복되었기 때문이다. 향후에도 습지 및 하천 환경이 점차 안정화되고 있어 동물 종수는 지속적으로 유지되거나 증가할 것으로 보인다.

법정보호종은 양서류·곤충류·저서생물류·플랑크톤류는 발견되지 않았다. 식물상의 경우 사업 전 1과 1종(단양쭉부쟁이)에서 사업 후 2과 2종(단양쭉부쟁이, 층층둥굴레), 어류의 경우 사업 전 1과 1종(꾸구리)에서 사업 후 1과 2종(꾸구리, 돌상어)로 증가하였고, 특히 파충류의 경우 사업 전에는 없었던 보호종인 표범장지뱀이 사업 후 추가로 발견되었다. 또한, 포유류의 경우 사업 전과 사업 후 2과 2종(살, 수달), 조류의 경우 사업 전과 사업 후 4과 5종(사업 전 : 원앙, 붉은배새매, 새호리기, 흰목물떼새, 황조롱이;

Table 6. Number of species in Gangcheon wetland

Classification	Terrestrial · Aquatic plants	mammal	birds	amphibians/ reptiles	terrestrial insects	Freshwater Fish	Benthic Macroinvertebrates	Phyto · Zooplankton
Before the Projects	115family 625species	7family 10species	30family 51species	4family 6species/ 2family 4species	45family 101species	8family 31species	36family 53species	47family 103species/ 20family 28species
After the Projects	85family 307species	8family 11species	34family 72species	4family 7species/ 4family 7species	50family 117species	7family 32species	42family 56species	45family 109species/ 25family 39species

Table 7. Number of protected species in Gangcheon wetland

Classification	Terrestrial · Aquatic plants	mammal	birds	reptiles	Freshwater Fish
Before the Projects	1family 1species	2family 2species	4family 5species	-	1family 1species
After the Projects	2family 2species	2family 2species	4family 5species	1family 1species	1family 2species

사업 후 : 큰고니, 호사비오리, 흰꼬리수리, 황조롱이, 흰목물떼새)로 종수가 동일하였다. 법정보호종은 사업 전에 비해 사업 후 전반적으로 종수가 같거나 증가하였다(Table 7). 이는 공사 진행 시 훼손 되었던 강천습지가 사업 후 환경이 안정화되어 사업 전의 환경을 회복하였음을 나타낸다.

3.3 변수 산정 및 기능지수 산정 결과

3.3.1 변수 산정

강천습지에 대한 각각의 기능을 평가하기 위해 선정된 변

수의 값은 공사 전에 수행된 환경영향평가서와 사전환경성검토서, 공사 후에 수행된 사후환경영향조사 데이터 등 문헌과 습지현장조사 결과 그리고 수리수문모델링을 통해 산정하였다. 변수 산정은 4대강 사업 전 강천습지를 기준습지로 하고 4대강 사업 후 강천습지를 대상습지로 하여 기준습지와 대상습지를 비교하여 산정하였다. 다만, 변수를 산정하기 위한 문헌, 현장조사 결과 등이 없는 경우(V_{MICRO} , V_{SURWAT} , V_{MACRO} , V_{PORE} , V_{SORPT} , V_{CAONPY} , V_{GAP} , V_{SINVT})에는 변수산정에서 제외하였다. 본 연구에서 수행한 강천습지의 변수 값 산정 결과는 다음과 같다(Table 8).

Table 8. Value of variable in Gangcheon wetland

Variable	Method of calculation	Result before the project	Result after the project	Value of variable
V_{FREQ}	To analyze the frequency of overbank flow from the channel using HEC-RAS	Once a year	Once a year	1.0
V_{INUND}	To analyze the average inundation depth using HEC-RAS	2.90 m	3.12 m	1.0
V_{BTREE}	To calculate the coverage of tree basal area using aerial photograph or vegetation survey in Gangcheon wetland	7% of total wetland area	3% of total wetland area	0.5
V_{DTREE}	Same method of V_{BTREE}	7% of total wetland area	3% of total wetland area	0.5
V_{SHRUB}	Same method of V_{BTREE}	7% of total wetland area	3% of total wetland area	0.5
V_{REDVEL}	To analyze the velocity using HEC-RAS	2.65 m/s	2.17 m/s	1.0
V_{WTP}	To compare the water level fluctuation using water level data	0.39 m	0.02 m	0.1
V_{PROD}	To calculate the aerial net primary productivity using Degree of Green Naturality	1492	638	0.5
V_{SURFIN}	To calculate the surface inflow using the number of tributaries connected to the wetland	4	4	1.0
V_{HERB}	To calculate the area of herbaceous plants of wetland.	47% of total wetland area	27% of total wetland area	0.5
$V_{SURFCON}$	To calculate the surface inflow using the number of tributaries connected to the wetland	4	4	1.0
V_{ORGAN}	To estimate the organic matter in wetland using primary production of herbaceous species	883	444	0.5
V_{COMP}	To count the vegetation layer of wetland	8	8	1.0
V_{STRATA}	Same method of V_{COMP}	3	3	1.0
V_{PATCH}	To count the number of vegetation in wetland	28	23	1.0
V_{LINVT}	To estimate the distribution and abundance of invertebrates in leaf litter and coarse woody debris using species and protected species	101species/0species	117species/0species	1.0
V_{AQINVT}	To estimate the distribution and abundance of invertebrates in aquatic habitats using species and protected species	53species/0species	56species/0species	1.0
V_{FISH}	To estimate the distribution and abundance of invertebrates in leaf litter and coarse woody debris using species and protected species	32species/1species	32species/2species	1.5
V_{HERP}	To estimate the distribution and abundance of herptiles using species and protected species	10species/0species	14species/1species	1.5
V_{BIRD}	To estimate the distribution and abundance of resident and migratory birds using species and protected species	51species/5species	72species/5species	1.0
V_{MAMM}	To estimate the distribution and abundance of permanent and seasonally resident mammals using species and protected species	10species/2species	11species/2species	1.0

Table 9. Index of Function in Gangcheon Wetlands

Classification	Indicator of Function evaluation	Index of function
Hydrological	Dynamic Surface Water Storage	0.866
	Long-Term Surface Water Storage	-
	Energy Dissipation	1.000
	Subsurface Storage of Water	0.100
	Moderation of Groundwater Flow or Discharge	-
	Average hydrological function index	0.655
Biogeochemical	Nutrient Cycling	0.500
	Removal of Imported Elements and Compounds	0.750
	Retention of Particulates	0.707
	Organic Carbon Export	0.707
	Average biogeochemical function index	0.666
Plant habitat	Maintain Characteristic Plant Communities	0.750
	Maintain Characteristic Detrital Biomass	-
	Average plant habitat function index	0.750
Animal habitat	Maintain Spatial Structure of Habitat	1.000
	Maintain Interspersion and Connectivit	1.000
	Maintain Distribution and Abundance of Invertebrates	1.000
	Maintain Distribution and Abundance of Vertebrates	1.250
	Average animal habitat function index	1.083
Total average function index		0.789

3.3.2 기능지수 산정 결과

3.3.1에서 산정한 변수값을 표 1의 기능지수 산정식(FCI)에 대입하여 4가지 기능(수문학적, 생지화학적, 식물서식처, 동물서식처)을 총 15가지 기능평가 항목으로 기능지수를 산정하였다(Table 9).

평가 항목 중 장기 지표수 저류, 적정 지하수, 특징적인 잔재 생체량의 유지 기능은 조사 자료가 없어 변수값을 산정하지 못해 기능지수를 산정하지 못하였다. 또한 수문학적 기능과 생지화학적 기능은 기능지수 산정 시 필요한 변수에 비해 실제 적용한 변수가 상대적으로 적게 존재한 반면, 동물 서식처 기능은 필요한 변수의 대부분을 적용하여 기능지수를 산출하였다. 기능지수 산정 시 필요한 변수를 많이 적용하여 산출한 기능지수는 그 기능을 반영하는 정확도가 상대적으로 높으므로, 기능지수의 분석 시 이러한 사항들을 고려해야 한다.

기능지수 산정 결과, 4대강 사업 후 강천습지는 사업 전에 비해 수문학적 기능은 단기 지표수 저류 86.6%, 에너지 감쇄 100%, 지표하 저류량 10%로 전체적으로 65.5%의 기능을 수행하는 것으로 분석되었다. 생지화학적 기능은 양분 순환 50%, 이입된 원소와 화합물의 제거 75%, 미립자의 보유 70.7%, 유기탄소 이출 70.7%로 전체적으로 66.6%의 기능을 수행하는 것으로 분석되었다. 식물서식처 기능은 특징적인 식물 군집의 유지 75%로 전체적으로 75%의 기능을 수행하는 것으로 분석되었다. 마지막으로 동물서식처 기능은 서식처의 공간적 구조 유지 100%, 산재와 연결성의 유지 100%, 무척추동물의 분포와 수도 유지 100%, 척추동

물의 분포와 수도 유지 125%로 전체적으로 108.3%의 기능을 수행하는 것으로 분석되었다.

수정 HGM으로 습지의 기능을 평가하였을 때, 4대강 사업 후 강천습지는 사업 전에 비해 78.9%의 기능을 수행하고 있다. 수문학적 기능과 생지화학적 기능, 그리고 식물서식처 기능에서 습지 기능이 감소한 것으로 분석되었으며, 동물서식처 기능에서는 그 기능이 증가한 것으로 분석되었다.

4. 결 론

HGM 방법을 이용한 기능평가에서 기준습지의 선정은 매우 중요한 요소이다. 선정된 기준습지를 기준으로 하여 평가하고자 하는 대상습지의 기능을 상대적으로 평가하여 대상습지의 기능이 기준습지의 기능과 얼마나 유사한지를 평가한다. 그러므로 선정되는 기준습지는 동일한 습지 유형 중에서 습지의 기능이 가장 잘 수행되고 있는 습지가 선정되어야 한다. 본 연구에서는 조성된 습지를 우수한 조건의 기준습지와 비교하여 어느 정도의 습지 기능을 수행하고 있는지를 평가하는 HGM의 원래 목적을 수정하여, 4대강 사업 이후 조성된 대체습지가 사업 전과 비교하여 어떻게 기능하고 있는지를 정량적으로 평가하였다.

4대강 사업 이후 대체습지로 조성된 한강수계의 강천습지를 대상습지로 선정하고, 4대강 사업 이전의 습지를 기준습지로 하여 수문학적, 생지화학적, 식물서식처, 동물서식처 기능으로 습지를 평가하였다. 그 결과, 4대강 사업 이전과 비교하여 이후 강천습지의 기능은 78.9%로 감소하였다.

각 기능 별 기능평가 결과를 분석해보면 다음과 같다.

1. 수문학적 기능지수는 사업 전에 비해 65.5%로 기능이 감소하였다. 수문학적 기능의 감소는 4대강 사업 이후 지표하 저류가 크게 감소한 것에 기인한다. 지표하 저류는 습지 표면 아래 물을 저장하는 공간을 제공할 수 있는 수치를 나타내는 기능을 말한다. 주기적으로 수위변동이 발생하거나 토양포화도의 감소(토양 공극 증가)는 습지 표면 아래 물을 저장할 수 있는 공간을 만들어 줄 수 있어 지표하 저류 기능이 증가하게 된다(USACE, 1995). 수위조절을 통한 수위 변동은 습지 관리에 있어 지속적 유지를 위한 중요한 요소이다 (Van der Valk et al, 1994; Van der Valk, 2005). 본 연구에서는 4대강 사업 이전 토양 공극자료가 없어 변수를 산정하지 못하여 수위 변동으로만 간접적으로 분석하였다. 수위 변동이 사업 이전에 비해 감소하였으므로 습지 표면 아래 물 저장 공간이 감소하여 지표하 저장 능력이 감소했을 것으로 판단된다. 따라서, 수문학적 기능 증진을 위해서는 수위변동과 지표수 저류능력을 장기적으로 모니터링하고, 주기적인 홍수 교란을 일으켜 식생이 서식하는데 좋은 환경을 제공할 수 있도록 관리할 필요가 있을 것으로 판단된다(Wilcox and Nichols, 2008).

2. 생지화학적 기능과 식물서식처 기능은 모두 사업 이전과 비교하여 각각 66.6%, 75%로 감소하였다. 강천습지는 4대강 사업으로 인해 기존의 모래톱 및 주변 지역이 모두 제거되고 하중도 형태로 정비되어, 현재 습지의 면적이 상당히 감소하였을 뿐만 아니라 식물 서식 면적이 감소하였다. 이로 인해 교목 기저면적(V_{BTREE})을 비롯하여 지상부 순 1차 생산량(V_{PROD}), 습지 내 유기물질(V_{ORGAN}), 교목 밀도(V_{DTREE}), 관목 밀도(V_{SHRUB}) 등과 같은 식생과 관련된 변수값들이 4대강 사업 이전에 비해 낮게 산출되어 생지화학적 기능과 식물서식처 기능이 감소하였다(Table 9). 따라서 생지화학적 기능과 식물서식처 기능 증진을 위해 현재 습지 구역을 확장하여 4대강 사업에 의해 제거된 습지 면적을 보완하고, 유원지 내에 잔디 외에 다양한 수종, 초본종의 식재하여 관리할 필요가 있을 것으로 판단된다. 예로, 식재할 수 있는 습지성 목본류로는 아교목류의 왕버들, 버드나무, 신나무 등이 있고, 관목류로는 갯버들, 키버들, 참조팝나무 등이 있다(Korean Wetlands Society, 2016).

3. 동물서식처 기능은 사업 이전과 비교하여 108.3%로 그 기능이 향상되었다. 동물서식처 기능지수는 서식처 특성과 각 분류군의 종 수를 반영하므로, 공사 전과 후의 조사 방법이 동일하다면 공사 전에 비해 다양한 생물이 서식하기에 적합한 환경이 조성된 것으로 볼 수 있다. 또한 기존의 HGM 방법에서 높은 빈도로 기준습지로 선정된 우포늪과 비교하였을 때(MOE, 2006), 저서 무척추동물(33종), 어류(20종), 양서·파충류(11종), 조류(63종), 포유류(12종)의 분포와 수도 변수 모두 1.0~1.5 이상으로 산정되어 비교적 다양한 동물이 서식하는 습지임을 알 수 있다. 따라서 향상된 기능을 유지할 수 있도록 동물이 서식 및 섭식하는 서식지의 유지를 위한 점검 및 관리가 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 수정 HGM 방법을 이용하여 대체습지의 기능을 평가하여 기능 별 관리방안을 제시하였다. 본 연구의 결과를 통해 수정 HGM 방법은 습지 개발 시, 개발 이전의 습지를 기준습지로 하여 개발된 습지를 효율적으로 관리하는데 활용할 수 있다는 것을 알 수 있다. 즉, 본 연구에서 제시한 수정 HGM을 이용하면 습지를 새롭게 조성할 시 조성 이후 모니터링 결과를 조성 초기의 습지를 기준으로 하여 시간에 따른 조성 습지의 기능 변화를 평가하기에 매우 유용할 것으로 판단된다. 다만, 정량적인 기능 평가를 위해서는 각 변수 산정 시 필요한 데이터를 장기간 축적하는 것이 중요할 것으로 보인다.

사 사

이 논문은 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2017R1A2B3005695)

References

- Admiraal, AN, Morris, MJ, Brooks, TC, Olson, JW, and Miller, MV (1997). *Illinois Wetland Restoration and Creation Guide*. Natural History Survey Special Publication.
- Anonymous (1976). The survey concerned with degree of naturalness. In *National Census of Vegetation*. Japan Office of Environment, pp. 7-36.
- Brison, MM (1993). *A Hydrogeomorphic Classification for Wetlands*, U.S. Army Corps of Engineers.
- Cole, CA (2016). Assessment of a judgment-based hydrogeomorphic wetland classification using long-term hydrologic data, *Ecohydrology*, 10, e1761.
- Cylinder, PD, Bogdan, KM, Davis, EM, and Herson, AI (1995). *Wetlands Regulation*. Solano Press Books.
- Hoeltje, S and Cole, CA (2007). Losing Function Through Wetland Mitigation in Central Pennsylvania, USA, *Environmental Management*, 39(3), pp. 385-402.
- Hong, MK and Kim, JG (2017). An analysis of trends in wetland function assessments and further suggestions, *J. of Wetlands Research*, 19(1), pp. 1-15.
- Jin, YH, Li, L, Moon, SK, and Koo, BH (2014). Articles : Functional Assessment of Jilnalnup Wetland by HGM, *J. Korean Env. Res. Tech*, 16(2), pp.13-22[Korean Literature].
- Jung, KJ (2004). *A study on freshwater wetland replacement regulation to 'No net loss of wetland' -Focus on wetland replacement policy-*, Ms Thesis. Seoul National University [Korean Literature].
- Kentula, ME, Brooks, RP, Gwin, SE, Holland, CC, Sherman, AD, and Sifneos, JC (1993). *An Approach to Improving Decision Making in Wetland Restoration and Creation*. C.K. SMOLEY, INC.

- Kim, DG (2012). *Assessment of Dam-Wetland Functions and Value and Impact of Climate Change on Wetland Functions*, Ph.D. Thesis, Inha University[Korean Literature]
- Kim, DG, Shin, HK, Kim, JG, Kim, HS, Yoo, BK, Ahn, KS, and Jang, SW (2011). Functional Assessment of Yongdam Dam-wetland by HGM, *J. of Wetlands Research*, 13(3), pp. 665-675[Korean Literature]
- Kim, TM (2015). *Assessment of Imjin Riverine Wetland Function using Modified Hydrogeomorphic Method*. Ms Thesis. Inha University[Korean Literature]
- Koo, BH and Kim KG (2001). Classifying and Identifying the Characteristics of Wetlands in Korea - Cases on the Inland Wetlands, *J. of The Korea Society of Environmental Restoration Technology*, 4(2), pp. 11-25[Korean Literature]
- Korean Wetlands Society (2016). *Wetlands*, LifeScience, Seoul, Korea. ISBN : 9788961542272[Korean Literature]
- K-water (2009). *Development on Assessment of Value and Functions of Dam-wetland - Focussing on Boryung Dam* [Korean Literature]
- Lin, JP (2006). *A Regional Guidebook for Applying the Hydrogeomorphic Approach to Assessing Wetland Functions of Depressional Wetlands in the Upper Des Plaines River Basin*, *Wetlands in the Upper Des Plaines River Basin*, Wetlands Research Program, US Army Corps of Engineers.
- Ministry of Environment (2004). *Prior Environmental Review Business Manual*[Korean Literature]
- Mitsch, W. J. and Gosselink, J. G. (2007). *Wetlands* 4th ed. Van Nostrand Reinhold, New York.
- MOE (2006). 2006 Intensive Survey on the Wetland Protected Areas : Nakdong River Estuary-Upo Wetland-Moojechi-neup. MOE·NIER[Korean Literature]
- MOLIT (2013). *Study for the Efficient Management of Imjin Riverine Wetland*[Korean Literature]
- MOLIT Han River Flood Control Office (2013). *A Study on River Change Monitoring and Manual Improvement Plan(Ecological Environment)*. 11-1613374-000006-01 [Korean Literature]
- MOLIT Han River Flood Control Office (2014). *A Study on River Change Monitoring and Characteristic Analysis (Ecological Environment)*. 11-1613374-000031-01 [Korean Literature]
- MOLIT Seoul Regional Construction and Management Administration (2009). *Namhan River River Master Plan(supplement) Prior Environmental Review Report* [Korean Literature]
- MOLIT Seoul Regional Construction and Management Administration (2009). *The Han River Restoration Project Environmental Impact Assessment Report*[Korean Literature]
- MOLIT Seoul Regional Construction and Management Administration (2016). *Han River Restoration Project (Area 3-4) Post-Environmental Impact Assessment Investigation Report(2015)* [Korean Literature]
- Shin, HK, Kim, DG, Kim, JG, Kim, HS, Ahn, JH, Yoo, BK, Ahn, KS, and Bark, DH (2009). Study on Assessment of Value and Functions of Dam-wetland(1) -Assessment of Functions by HGM : Focussing on Boryung Dam-, *J. of Wetlands Research*, 11(3), pp. 115-132 [Korean Literature]
- USACE (1995). *A Guidebook for Application of Hydrogeomorphic Assessments to Riverine Wetlands*. Wetlands Research Program Technical Report WRP-DE-11.
- Van der Valk, AG, Squires, L and Welling, CH.(1994). Assessing the Impacts of an Increase in Water Level on Wetland Vegetation, *Ecological Applications*, 4(3), pp. 525-534.
- Van der Valk, AG (2005). Water-level fluctuations in North American prairie wetlands, *Hydrobiologia*
- Wilcox, DA and Nichols, SJ (2008). The effects of water-level fluctuations on vegetation in a Lake Huron wetland, *Wetland*.
- Williams, HM, Miller, AJ, McNamee, RS, and Klimas, CV (2010). *A Regional Guidebook for Applying the Hydrogeomorphic Approach to the Functional Assessment of Forested Wetlands in Alluvial Valleys of East Texas*, Wetlands Regulatory Assistance Program, US Army Corps of Engineers.
- Yeum, J and Kim, T (2016). Improvement of Functional Assessment for Riverine Wetlands using HGM Approach, *J. of Wetlands Research*, 18(4), pp. 378-385 [Korean Literature]
- Yoon, SH (2010). *Assessment of Hwapo Riverine Wetland Function using Hydrogeomorphic Approach*, Ms Thesis. Inha University [Korean Literature]