

## 생태계서비스 회복력 향상을 위한 도시 습지 설계 전략\*

- 시스템 사고를 활용하여 -

유수진<sup>1)</sup> · 함은경<sup>1)</sup> · 이정아<sup>2)</sup> · 조동길<sup>3)</sup> · 전진형<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> 고려대학교 대학원 환경생태공학과 · <sup>2)</sup> 건국대학교 경관생태계획연구실  
<sup>3)</sup> 넥서스환경디자인연구원(주) · <sup>4)</sup> 고려대학교 환경생태공학부

## Design Strategies to Enhance Resilience of Ecosystem Services in Urban Wetland\*

- Using System Thinking -

You, Soo-jin<sup>1)</sup> · Ham, Eun-Kyung<sup>1)</sup> · Lee, Jung-a<sup>2)</sup> · Cho, Dong-Gil<sup>3)</sup> and Chon, Jin-hyung<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> Dept. of Environmental Science and Ecological Engineering, Graduate School, Korea University,

<sup>2)</sup> Landscape Ecological Lab, Dept. of Environmental Planning, Konkuk University,

<sup>3)</sup> NEXUS Design Centre,

<sup>4)</sup> Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University.

### ABSTRACT

The wetlands are facing environmental changes such as desiccation that occurs with the passage of time and reduced ecosystem services from wetlands in the city. In order to maintain the ecosystem services provided by wetlands in urban areas, a system thinking about the trade-off phenomenon of ecosystem services occurring as the wetlands undergo environmental changes is needed. Therefore, the purpose of this study is to develop strategies for wetland design using system thinking approach to enhance the resilience of ecosystem services degraded by the desiccation of wetlands and other disturbances. The objectives of this study include the system boundary and variables. Second, analyzing

---

\* 본 연구는 고려대학교 특별연구비(Supported by a Korea University Grant)와 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 지원을 받아 수행된 연구(No. 2017R1A2B4008866)이며 이에 감사드립니다.

**First Author** : You, Soo-jin, Dept. of Environmental Science and Ecological Engineering, Graduate School, Korea University,

Tel : +82-2-3290-3621, E-mail : 11ysj@korea.ac.kr

**Corresponding Author** : Chon, Jin-hyung, Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University,

Tel : +82-2-3290-3621, E-mail : jchon@korea.ac.kr

**Received** : 1 June, 2017. **Revised** : 31 August, 2017. **Accepted** : 28 August, 2017.

the dynamics of wetland design strategy. Third, it analyzes the trade-off phenomenon of ecosystem services in terms of the hydrology, hydric soil, and plants strategies to mitigate these effects. Fourth, wetland basic design to improve the resilience of ecosystem services. A wetland in Abuk-Mountain Neighborhood Park, Miryang-si, Gyeongsangnam-do, has been selected as a case study. Causal loop diagrams(CLDs) are used to analyze feedback in the wetland regime. In summary, hydrology, hydric soil, and plants is suggested as system boundaries to design plan. Design strategies for the wetland focused on robustness, redundancy, rapidity, and resourcefulness as a result of CLD analysis are first proposed in order to effectively maintain the wetland regime over the long term. Secondly, in a section related to hydrology, the CLD results show the trade-offs between provisioning-cultural services and regulating services. In order to control these services, a “water cycling system“has been implemented due to its strength in terms of robustness. The CLDs for hydric soil showed the trade-offs between regulating services and supporting services. An “installation of storm drainage for maintaining water levels”was selected due to the strength offered in terms of redundancy and rapidity. The CLDs for plants showed the trade-offs between provisioning - cultural services and regulating services. In order to control the strategic points, the “planting of indigenous vegetation” was suggested given the strength in terms of redundancy. In this study, a wetland design method is proposed that can improve the resilience of wetland ecosystem services by analyzing the dynamics overtime. The results of this research can theoretically be applied to help restore ecosystem services in wetlands using ecological landscape design. In addition, this study will contribute to reducing maintenance costs by improving wetland resilience.

Key Words : *Robustness, Redundancy, Rapidity, Resourcefulness, Trade-offs of ecosystem services, System thinking, Causal loop diagrams*

## I. 서 론

생태계서비스는 생태계로부터 인간이 받는 재화와 서비스 등의 혜택으로써 하나의 체제(Regime) 속에서 공급서비스(Provisioning service), 조절서비스(Regulating service), 문화서비스(Cultural service), 지원서비스(Supporting service)를 제공한다(MEA, 2003). 구체적으로 공급서비스는 수자원 확보, 조절서비스는 지표수 저장, 용수 이용 및 수질 정화 등의 기능을 제공한다(Hansson *et al.*, 2005; Zedler & Kercher, 2005; Mitsch *et al.*, 2014; Son *et al.*, 2014; Harmáčková & Vačkář, 2015; Semeraro *et al.*, 2015). 지원서

비스는 영양물 제거 및 운반 기능을 제공하고 있으며, 문화서비스의 범주에서 경관 향상 기능, 미적 기능, 생태교육의 기능들을 제공하고 있다(Son *et al.*, 2014).

수처리, 생태복원 및 수변공간 창출을 목적으로 하는 도시내 습지는 생태계서비스 범주 간에 균형 관계가 유지될 때 각각 범주의 기능들이 최대로 발현 될 수 있다(Davies *et al.*, 2011; Lee, 2013; Vidal-Legaz *et al.*, 2013; Ahn *et al.*, 2016). 그러나 시간의 흐름에 따라 식물의 사체가 축적되거나 외부 토양이 유입되어 육화되는 습성천이 현상(Ahn *et al.*, 2016)으로 인해 생태계서비스 범주 간의 균형현상은 변화할 수 있

다. 천이 과정 동안 발생하는 다양하고 복잡한 현상에 의해 습지 시스템은 지속적으로 유지 될 수 없으며 수체공급, 경관 향상, 생태교육, 수질 정화 등의 기능을 상실하게 된다. 따라서 습지로부터 받을 수 있는 생태계서비스는 언제나 일정하게 제공되는 것이 아니라 시간의 흐름에 따라 한 가지 특정 범주의 서비스가 향상되더라도 나머지 범주의 서비스 가치가 줄어들거나 사라지는 Trade-off 현상을 수반하게 된다(Biggs *et al.*, 2012; Ham *et al.*, 2015a; Son *et al.*, 2015). 즉, 습지의 육화 현상에 따라 생태계서비스의 Trade-off 현상은 자연스럽게 발생할 수 있으며, 이용자들이 습지에 기대하는 생태계서비스의 효과가 상실되거나 감소되는 현상으로 이어질 수 있다. 따라서 습지 설계 및 복원 시 생태계서비스의 Trade-off로 인한 생태계서비스 가치의 상실이나 감소를 최소화하면서 습지 생태계의 체제를 안정적으로 유지할 수 있는 능력인 생태계서비스의 회복력(Resilience of Ecosystem Service)을 강화 할 필요가 있다(Biggs *et al.*, 2012; McPhearson, 2015). 회복력과 관련된 연구로, 복잡한 사회생태 시스템이 가지고 있는 인과구조 분석을 통해 생태계서비스의 회복력을 향상시키기 위한 전략을 제시하여 문제를 해결하려는 연구(Rodríguez *et al.*, 2006; Vidal-Legaz *et al.*, 2013), 시스템 사고를 활용하여 생태계서비스 Trade-off 현상의 동태성을 분석한 연구(Ham *et al.*, 2015a) 등이 수행되었다. 또한 회복력의 구성요소인 견고성(Robustness), 중복성(Redundancy), 신속성(Rapidity), 자원동원성(Resourcefulness) 간의 관계를 파악하여 회복력 향상 전략을 제안한 연구 등이 진행되었다(Choi, 2015). 선행연구들은 습지의 생태시스템뿐만 아니라 사회시스템을 통합적으로 분석하였다는 특징이 있다. 그러나 아직까지 문제인식 및 이론고찰 단계에 머물러 있는 실정이며, 습지의 육화 과정에서 나타날 수 있는 생태계서비스 Trade-off 현상과 습지의 설계 기법 간의 동태성에 대한

분석은 미진한 상황이다.

이에 본 연구의 목적은 도시 습지의 생태계서비스 회복력 향상을 위해 시스템 사고를 기반으로 습지의 설계 전략을 도출하는 것이다. 연구의 세부목적은 첫째, 도시 습지의 생태계서비스 Trade-off 현상과 생태계서비스 회복력 향상을 위한 설계 전략 간의 피드백 관계를 파악하는 것이다. 둘째, 습지의 육화 및 예상치 못한 교란에 의해 발생할 수 있는 생태계서비스 Trade-off 현상을 파악하여, 기존 조경분야에서 활용되는 도시 습지 설계기법 중 생태계서비스 Trade-off 현상을 완화 시킬 수 있는 전략을 도출하고, 궁극적으로 적용 가능한 습지 설계안을 제안하고자 하였다. 본 연구의 결과는 도시 습지를 최소한의 노력으로 유지·관리할 방안을 도출하는데 기초 자료로 활용하여 추후 습지 설계 및 복원의 기술 개발 등 실무 분야에 기여할 수 있을 것이다.

## II. 이론적 고찰

### 1. 생태계서비스 회복력

회복력(Resilience)이란 교란으로부터 사회생태시스템이 기존의 상태를 유지하기 위한 역량을 의미하는 개념으로(Holling, 1973), ‘회복’은 ‘시스템의 기능이 제자리로 돌아가는 것’과 ‘교란에 약한 시스템의 구조적 문제를 개선함으로써 더 나은 시스템으로 진화하는 것’을 모두 포함한다(Choi, 2015). 회복력 이론에 따르면 ‘체제(Regime)’란 사회생태시스템이 이전과 동일한 방식의 구조, 기능 및 정체성을 가지고 존재하는 안정된 상태를 의미하고 있다(Scheffer & Carpenter, 2003; Walker & Salt, 2012). 회복력이 낮은 상태에서 교란이 발생하게 될 경우에 기존 시스템은 임계점(Threshold)을 넘게 되며 해당 시점에 ‘체제전환(Regime shift)’이라는 현상이 나타나게 된다(Cumming & Collier, 2005; Rodríguez *et al.*, 2006; Dong *et al.*, 2012; Lee

*et al.*, 2012; Walker & Salt, 2012; Clerici *et al.*, 2014). 교란의 형태는 천이와 같이 시간의 흐름에 따라 자연적으로 발생하거나, 홍수 및 태풍 등 예상치 못한 자연 재해에 의해 갑작스럽게 발생하는 경우로 구분된다(Haessler *et al.*, 2004; Gotts, 2007). 자연자원을 관리하는 의사결정자들은 교란의 형태에 따라 기존의 체제를 유지하기 위한 적응 전략과 체제전환이 된 시스템을 안정적으로 조성하기 위한 전환 전략을 선정하여 대상지의 회복력을 향상시킬 수 있다(Walker & Salt, 2012). 도시 습지가 천이에 의해 육화 될 경우 당초 계획한 공간의 목적 및 설계목표와 상이한 생태계서비스가 발현되기 때문에 습지로부터 받을 수 있는 혜택을 유지하기 위해서는 육화를 완화시켜 습지 체제를 유지하기 위한 전략이 필요하다.

생태계서비스의 회복력과 관련하여 기존에 수행된 연구는 정책과 거버넌스 증진 측면에서 7가지 요소를 제안한 사례가 있다(Biggs *et al.*, 2012). 다양성과 중복성 유지(Maintain Diversity & Redundancy), 연결성에 대한 관리(Manage Connectivity), 느리게 반응하는 변수와 피드백 현상에 대한 관리(Manage Slow Variables & Feedbacks), 복잡한 적응 시스템으로써 사회생태시스템의 이해 향상(Foster an Understanding of Social-Ecological Systems as Complex adaptive Systems), 학습과 실험 장려(Encourage Learning & Experimentation), 참여 확대(Broaden Participation), 다원적 거버넌스 시스템 촉진(Promote Polycentric Governance Systems)과 같은 요소는 사회생태시스템 속에서 생태계서비스의 회복력을 증진시키기 위한 요소이다(Biggs *et al.*, 2012). 선행연구에서는 시스템의 체제전환이 생태계서비스의 Trade-off 현상에 미치는 영향까지 고려하여 생태계서비스의 회복력 향상 전략을 제안하였다. 그러나 생태계서비스 범주 간 동태성에 대한 고려는 부족하였다. 그 밖에 회복력 있는 도시를 조성하기 위해 계획, 관리, 거버넌스 측

면에서 생태계서비스를 제공하기 위한 방안과 도시의 경관관리 방안으로써 생태계서비스를 향상시킬 수 있는 자연자원의 도입방안을 제시한 연구도 진행되었다(Ndubisi, 2014; McPhearson *et al.*, 2015). 또한 견고성, 중복성, 신속성, 자원동원성과 같은 회복력 요소들을 지역개발과 연계하여 지역 시스템의 동태성을 파악한 연구도 수행되었다(Choi, 2015). 특히 Choi(2015)의 연구에서는 지역시스템을 교란시키는 원인을 분석하고 회복력 요소들을 활용하여 시스템의 자기조직화 능력을 향상시켜 줄 수 있는 피드백 구조를 제안하였으며 지역의 견고성을 향상시키기 위해 ‘시스템의 결속력’, 중복성을 향상시켜주기 위해 ‘자원과 인프라의 잉여용량’ 등의 요인이 필요함을 강조하였다(Choi, 2015). 신속성을 향상시키기 위해서는 적절한 ‘관리 시스템’이 구축되어야 하며, 자원동원성은 ‘인적 자원의 역량강화를 위한 훈련 및 협력네트워크’를 통해 향상될 수 있다고 하였다(Choi, 2015). 이에 본 연구에서는 선행연구에서 제시하고 있는 회복력 요소인 견고성, 중복성, 신속성, 자원동원성을 고려하고, 습지 시스템을 변화시키는 원인들을 분석하여 활용하여 도시 습지 생태계서비스 회복력을 향상시킬 수 있는 설계 전략을 도출하고자 한다.

## 2. 생태계서비스 Trade-off

생태계서비스 Trade-off는 ‘생태계서비스와 관련된 정책과 의사를 결정하는 데 있어 특정 범주의 생태계서비스 기능은 향상하는 반면, 나머지 생태계서비스 기능들은 감소하는 불균형 상태’로 정의된다(Rodríguez *et al.*, 2006; Ham *et al.*, 2015a). 생태계서비스의 Trade-off 관계에 대한 연구는 이론적 틀을 제공하는 단계에서 활발히 진행되고 있다(Rodríguez *et al.*, 2006; Agarwala *et al.*, 2014; Cavender-Bares *et al.*, 2015). Kim *et al.*, (1999) 및 Rodríguez *et al.*, (2006)에서는 Trade-off 현상을 부문 간 Trade-off와 시간

간 Trade-off 관계 두 가지로 분류하여 설명하고 있다. 부문 간 Trade-off 현상은 사회생태시스템 속에서 공간 계획과 같은 정책 혹은 사업의 실행으로 인해 특정 한 가지 기능만 효과를 나타내는 것을 말한다(Kim *et al.*, 1999). 예를 들어 개발로 인해 토지이용이 변화될 경우 기존의 토지에서 제공되던 생태계서비스의 형태가 변화하게 되는 등의 현상이다(Dong *et al.*, 2012). 부문 간 Trade-off 현상과 관련된 연구들을 살펴보면 도시내에서 자연자원을 활용한 공간이 개발되었을 때 생태적 기능이 어떻게 훼손되는지에 초점을 두고 있다(Clerici *et al.*, 2014; Dong *et al.*, 2012). 한편 시간 간 Trade-off 현상은 단기적으로는 목표한 전략에 대한 효과를 보았으나 시간의 흐름에 따라 장기적으로 점차 상황이 부정적으로 변화하는 현상을 의미한다(Kim *et al.*, 1999). 시간 간 Trade-off 현상에 대한 연구는 농업지역의 생산물로부터 얻어지는 공급서비스가 시간 경과에 따라 지역 수자원에 영향을 미쳐 조절서비스 및 문화서비스를 감소시키게 되는 현상을 고찰하거나, 산림자원 활용에 따른 지하수위의 변동과 같은 현상을 분석하여 합리적인 자연자원 관리를 위한 토지이용 시뮬레이션 분석을 수행한 사례가 있다(Rodríguez *et al.*, 2006; Vidal-Legaz *et al.*, 2013). 특히 습지는 시간의 흐름에 따라 주변 식생이 생육하여 자연천이가 되는 경우에 수목의 과다 성장으로 인해 육화 현상을 겪게 된다(Mitsch *et al.*, 2014). 이 과정에서 생태계서비스 부문 간 Trade-off 현상이 발생할 수 있으므로, 본 연구에서는 부문 간·시간 간 Trade-off 현상을 동시에 고찰할 수 있는 시스템 사고를 활용하여 습지의 육화과정을 지연시키기 위한 적절한 대안을 제시하고자 하였다.

### 3. 시스템 사고

시스템 사고(System Thinking)는 시스템이 시간의 흐름에 따라 변화하는 행태를 질적인 분석을 통해 추론하는 방법론이다(Kim, 2006). 이

방법론은 복잡한 시스템에서 발생한 문제의 원인을 파악하고, 시스템의 작동메커니즘을 직관적으로 파악하여 시스템을 효과적으로 변화시키기 위한 전략을 발견하는데 용이하다(Kim, 2006; Ham, 2016). 시스템 사고에 대한 분석방법은 시스템의 피드백 관계를 설득력 있게 묘사할 수 있는 인과지도(Causal Loop Diagram)가 주로 활용되고 있다(Kim, 2006). 인과지도는 변수 간의 인과순환관계 분석을 통해 시스템의 피드백 관계에 대한 고찰뿐만 아니라, 정량적 모델링을 위한 변수가 될 수 있다(Kim *et al.*, 2006).

시스템 사고는 경제학자인 Forrester(1961)에 의해 소개된 방법론으로 조경, 생태, 교육, 정치, 행정, 도시계획 등 다양한 분야에서 설계전략 도출 및 의사결정 등을 목적으로 활용되고 있다(Ham, 2016). 조경분야에서는 대상지의 주요 이슈 및 문제점에 대하여 생태계의 기작을 중심으로 공간 계획 및 설계 전략을 도출하는 연구들이 수행되어 왔다(Jeon & Chon, 2014; Lee *et al.*, 2015; Kim *et al.*, 2016). 특히 습지라는 공간은 다양하고 복잡한 시스템으로 구성되어 있기 때문에 시간의 흐름에 따라 변화하게 되는 습지 체제의 동태성에 대해 시스템 사고를 통하여 분석이 가능하다(Jeon & Chon, 2014; Choi, 2015). 또한 생태계서비스의 Trade-off 현상과 같이 기능이 시간의 영향을 받아 변화하는 시스템의 경우 데이터의 수집을 통한 정량적 모델링 분석 이전에 인과지도를 활용한 시스템 해석이 선행되어야 할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 습지의 생태계서비스 회복력을 향상시켜주기 위한 설계 전략 도출을 위하여 시스템 사고에 기반 한 분석을 실행하였다.

## III. 연구방법

### 1. 연구 대상지 현황

도시 습지의 생태계서비스 회복력을 향상시



Figure 1. Study Site

킬 수 있는 방안을 제시하고자 사례 연구를 실시하였다. 지역환경이 습지 시스템을 교란시키는 원인을 분석하고, 견고성, 중복성, 신속성, 자원 동원성을 고려한 설계 전략을 제시하였다. 사례 연구의 대상지는 환경부 자연마당 사업 중 밀양 지역으로 경상남도 밀양시 내일동 일원 아북산 근린공원에 위치한 습지로 선정하였다(Figure 1).

아북산 근린공원 내 습지는 광산절개지에 위치해 있으며 강우 시에는 우수를 집수하고 평상 시에는 자연형 초지로 남아있는 건습지의 형태를 띠고 있다(Ham *et al.*, 2015b). 습지의 면적은 891.0m<sup>2</sup>, 평균수심 0.5m, 체적 446.0m<sup>3</sup>로 구성되어 있다. 이곳은 자연마당 조성사업의 대상지로 생물다양성 증진, 우수를 활용한 효율적인 수자원 관리, 주민 여가생활 함양을 통한 삶의 질 향상을 위해 자연천이로부터 습지 체계를 유지할 수 있는 설계 전략을 도출해야 할 필요가 있는 곳이다(Ham *et al.*, 2015b).

## 2. 연구방법

습지의 생태계서비스 회복력을 향상시키기 위한 설계전략을 도출하기 위해서는 습지 체제 내에서 나타나는 시스템의 동태성을 분석해야 한다. 시스템 영역 설정, 주요 변수 도출, 인과지도 작성의 과정을 가진 시스템 사고는 변수간의 피드백 관계를 고찰함으로써 시스템의 동태성을 분석할 수 있는 유용한 방법론이다(Kim *et*

*al.*, 1999). 시스템 영역은 연구의 대상이 되는 시스템의 내용적 범위를 한정시켜주는 역할을 한다. 시스템 영역 설정 이후 도출되는 주요 변수는 관련 보고서, 데이터 등 과학적 자료를 기반으로 구축하며, 인과지도의 극성을 규정하는 근거가 된다(Kim, 2006). 인과지도는 사회생태 시스템 속에서 나타나는 현상을 해석하여 시스템의 주요변수 간의 인과관계를 화살표(→), 변수 간 관계의 극성을 나타내는 양(+), 음(-), 시간지연(=)으로 도식화한 것이다(High Performance Systems, 1992). 인과지도를 활용하여 시스템의 피드백루프를 발견할 수 있다. 피드백루프는 방향성에 따라 시스템이 한쪽 방향으로 상승하거나 감소하는 강화루프(Reinforcing Loop, R)와 시스템의 상승과 감소가 반복적으로 나타나는 균형루프(Balancing Loop, B)로 형성될 수 있으며 습지 생태계의 육화를 지연시킬 수 있는 효과적인 전략을 발견할 수 있다(High Performance Systems, 1992; Kim, 2006).

본 연구는 생태계서비스 회복력을 향상시키기 위한 습지 설계전략을 제안하기 위하여 네 단계의 과정을 거친다. 첫째, 시스템 영역 설정 및 주요변수를 도출하기 위한 과정으로 아북산 근린공원에 대한 현황 분석 및 주요변수의 조작적 정의를 수행한다. 둘째, 인과지도 작성을 통해 생태계서비스의 Trade-off 현상과 생태계서비스 회복력 향상을 위한 설계 전략 간의 인과

관계를 분석한다. 셋째, 습지의 육화 및 교란에 의해 나타나는 생태계서비스의 Trade-off 현상을 고찰하고, 생태계서비스 회복력을 향상시키기 위한 설계 전략을 제안한다. 넷째, 인과지도 분석결과를 토대로 생태계서비스 회복력 향상을 위한 습지 기본 설계를 제안한다.

#### IV. 결과 및 고찰

##### 1. 시스템 영역 설정 및 주요변수 도출

본 연구에서 사용된 인과지도의 시스템 영역은 습지 체제와 관련된 생태계서비스 Trade-off와 회복력으로 설정하였다. 특히 습지 체제는 습지를 구성하는 주요 요소인 수체(Hydrology), 토양(Hydric soil), 식생(Plants)을 시스템 영역으로 세분화 하였다(National Wetlands Center, 2013). 수체는 지표수, 지하수 등의 수원으로부터 습지내로 유입되는 특성이 있으며, 증발산, 표면유수, 지하유출, 지하수 침투 등의 원인에 따라 소멸되는 구조로 되어 있다. 토양은 침수와 범람이 반복되는 환경에서 형성된 유기질 또는 무기질 상태로 산소가 부족하고 습윤상태를 오랫동안 유지하는 특성이 있다(National Wetlands Center, 2013). 식생은 습지토양에 적응된 식생으로, 혐기화 된 습지토양 환경에 적응하기 위하여 뿌리에 산소를 공급하는 통기조직을 가지고 있다(National Wetlands Center, 2013). 그러나 혐기성 환경에 적응하지 못한 식생은 습지의 환경변화에 영향을 받게 된다(Choi, 2010).

사례연구 대상지인 아북산 근린공원의 지형, 지질, 수리·수문, 토양구조, 지형 습윤지수, 식생 등의 지역현황을 분석하였다. 지형 부분에서 국토정보플랫폼에서 제공되는 1:5,000 수치지도를 분석한 결과 아북산 근린공원은 최저 30m부터 최고 170m까지 표고로 구성되어있으며 국궁장 부지는 78m에서 평탄한 지형을 이루고 있다. 평탄지인 국궁장 인근 납석광산개발지역에 급경사지가 나타나 있으며 이 주변에 건습지가 조성되

어 있다(Ham *et al.*, 2015). 대상지의 지질은 유문 암질 응회암이 대상지 전체에 분포하고 있어 과거 납석광산으로 활용 된 것을 확인할 수 있다(Nexus Design Centre, 2016). 또한 수리·수문과 관련하여 건습지의 현황 및 홍수량이 산정되었다. 분석 결과 근린공원 전체는 12개 유역으로 구분되어 유하하는 것으로 조사되었다. 그 중 건습지 지역의 유역 면적은 0.0138km<sup>2</sup>, 유로연장 0.1300km, 유역평균폭 0.1062km, 형상계수 0.8166, 유로경사 1.5%로 유역의 흐름은 습지에서 저류된 뒤, 서측, 북측, 남측으로 유하하는 것으로 나타났다(Nexus Design Centre, 2016). 홍수량은 밀양관측소(기상청)의 1973년부터 2014년까지 42년 동안의 강우자료를 활용하여 확률 강우량을 산정하였다. 분석결과 30년일 때 0.30m<sup>3</sup>/s, 50년에 0.35m<sup>3</sup>/s, 80년에 0.40m<sup>3</sup>/s, 100년일 때 0.43m<sup>3</sup>/s, 200년의 경우 0.54m<sup>3</sup>/s 으로 나타났으며, 50년 빈도에서 임계시간에 대한 유출체적은 60분에 640ton으로 도출되었다(Nexus Design Centre, 2016). 토양구조는 토양환경지도에 따르면 유효토심이 보통(50~100cm)으로 초본에서 교목까지 식재가 가능 하였다(Rural Development Administration, 2006). 지역 습윤지수 분석 결과 대상지의 배수능력은 보통인 것으로 나타났다(Rural Development Administration, 2006). 식생은 건습지 주변 사면에 아까시나무 군락이 조성되어 있으며 녹지자연도에 따르면 대상지는 6등급과 7등급으로 천이가 진행되고 있었다(Nexus Design Centre, 2016). 특히 아까시나무의 분포로 보아 근린공원 내 토양산성화가 진행되고 있는 것을 예측할 수 있으며, 습지조성을 위한 적절한 식재계획이 필요한 것으로 해석되었다(Lee *et al.*, 2009; Nexus Design Centre, 2016; Ham *et al.*, 2016).

생태계서비스 회복력 향상 전략은 Choi(2015)의 연구에서 제안한 견고성, 중복성, 신속성, 자원동원성으로 선정되었으며 각각의 정의는 다음과 같다. 견고성은 ‘교란 및 충격으로부터 피해

를 견뎌내는 힘'을 의미하며(KRIHS, 2014; Choi, 2015), 중복성은 '교란으로부터 손상된 기능을 대체할 수 있는 중복된 자원 및 전략'을 의미한다(Choi, 2015). 신속성은 '교란에 의해 받은 피해를 차단하는데 걸리는 시간'으로 정의되며(Bruneau *et al.*, 2003), 마지막으로 자원동원성은 '교란에 대응하기 위한 대안 탐색과 의사결정을 위한 인적 네트워크'로 정의된다(Bruneau *et al.*, 2003).

## 2. 생태계서비스 Trade-off와 회복력 사이의 동태성

본 연구에서는 습지의 생태계서비스 Trade-off가 지속적으로 나타나는 현상이 습지 체제의 회복력에 미치는 영향에 대한 동태성 분석을 실시하였다. 분석을 위한 시스템 영역은 습지 체제로 설정되었다. 주요변수는 습지체제의 안정성, 육화, 체제전환, 생태계서비스 Trade-off, 생태계서비스의 회복력으로 선정하여 인과지도를 작성하였다(Figure 2).

분석 결과 안정된 습지에서 생태계서비스의 회복력은 높으며, 생태계서비스의 회복력이 높으면 결국 습지체제의 안전성을 유지하는 강화루프(R1)를 형성하였다. 또한 생태계서비스의 회복력이 높으면 생태계서비스 Trade-off가 감소하고, 생태계서비스 Trade-off가 감소하면 생태계서비스의 회복력이 증가하는 강화루프(R2)를 나타냈다. 한편, 안정된 습지에서 제공되는 생태계서비스는 시간이 지남에 따라 수량, 토사 물질 퇴적, 식물생장 등의 변화를 겪게 되며, 이 과정에서 육화현상이 나타날 수 있다(Rodríguez *et al.*, 2006; Dong *et al.*, 2012; Lee *et al.*, 2012; Walker & Salt, 2012; Clerici *et al.*, 2014; Choi, 2015). 또한 육화현상으로 인해 생태계서비스 Trade-off 현상이 발생 하며, 습지 체제의 안정성이 약화되어 습지가 아닌 다른 체제로 전환되는 균형루프(B)가 나타났다.

이러한 현상은 생태적으로 자연스러워 보일 수 있다. 그러나 아북산 근린공원과 같이 습지의 생태계서비스를 제공받기 위한 목적으로 조

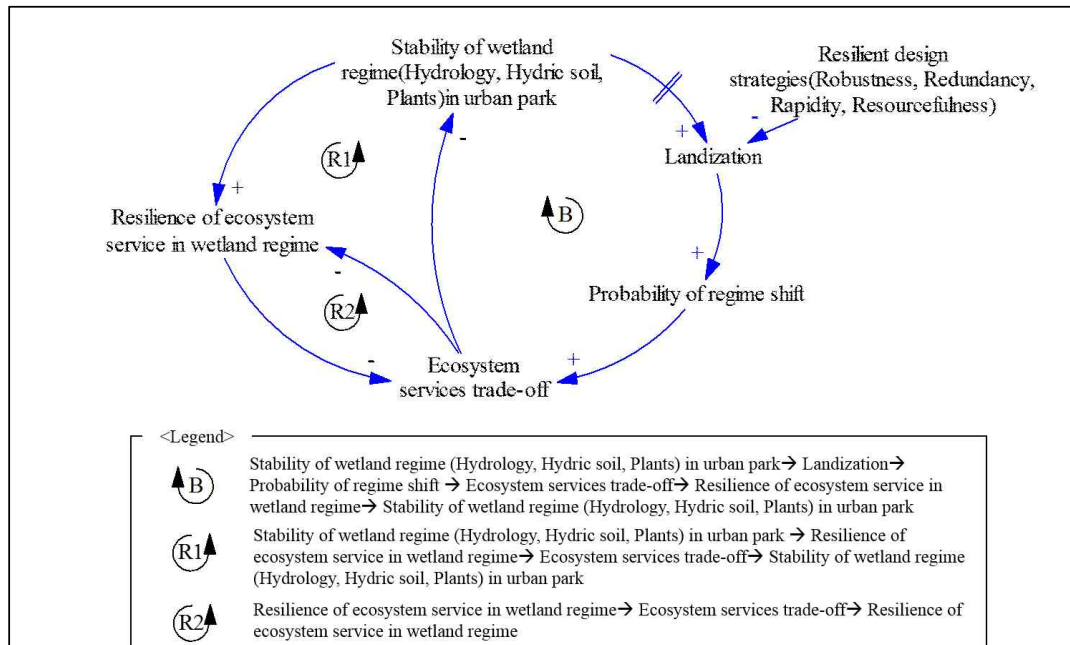


Figure 2. Dynamics of Ecosystem Trade-off and Resilient Design



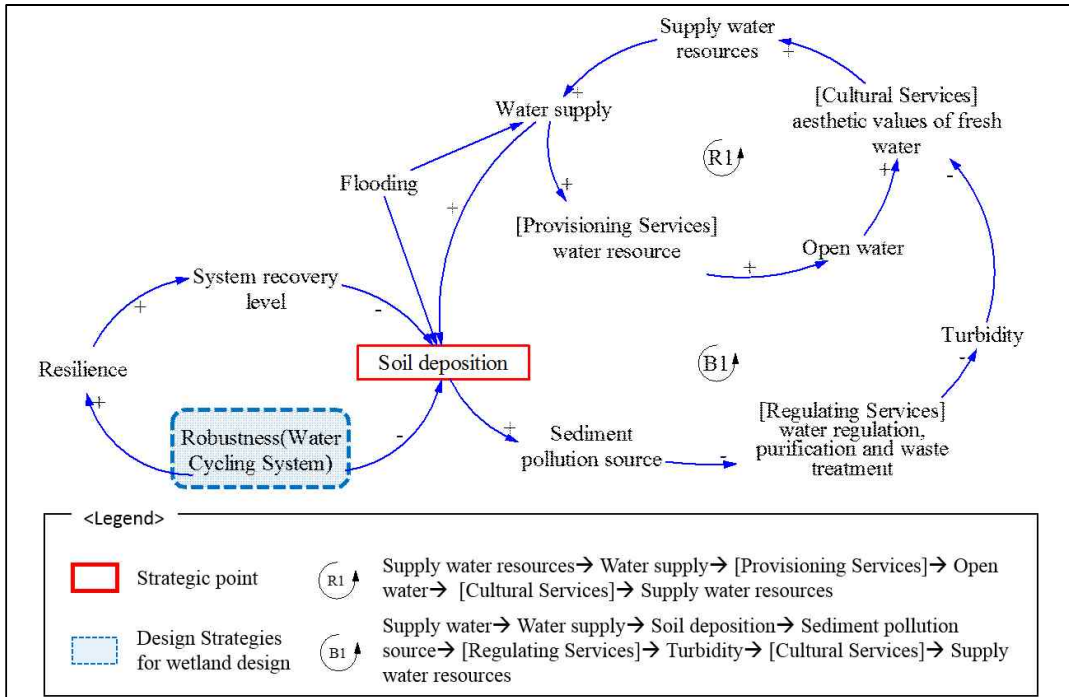


Figure 3. Ecosystem Service Trade-off and Design Strategies in Hydrology Field

성된 습지의 경우 습지가 지속가능하게 유지되기 위한 설계 전략이 필요할 것이다. 이에 대한 대안으로 습지 생태계서비스의 회복력을 향상시킬 수 있도록 견고성, 중복성, 신속성, 자원동원성 전략을 도입해야 할 것이다. 따라서 본 연구에서는 습지 체제를 유지하기 위해 습지를 구성하는 3대 요소인 수체, 토양, 식생의 측면에서 나타날 수 있는 생태계서비스 Trade-off 현상을 분석하고 각각의 생태계서비스 회복력 향상을 위한 습지 설계 전략을 제안하였다.

### 3. 생태계서비스 Trade-off 현상 분석 및 회복력 향상을 위한 설계 전략

구체적인 습지 시스템의 생태계서비스 Trade-off 현상 분석 및 회복력 향상을 위한 설계 전략을 도출하기 위하여 시스템 영역을 수체, 토양, 식생으로 분류하였다. 수체 측면에서 활용된 주요변수는 수체, 토양퇴적, 수경관 등이 있다. 토양 측면의 인과지도에 활용된 주요변수는

수질 정화, 미생물 서식처, 영양염류 등이며, 식생에서 사용된 변수는 수생식물, 침전물, 고사 식물 등으로 선정되었다. 인과지도를 통해 변수 간의 피드백 관계를 고찰함으로써 생태계서비스 Trade-off 현상을 분석하고 생태계서비스 회복력 향상을 위한 설계전략을 도출하였다.

#### 1) 수체

습지의 수체는 토양과 식생, 미생물 등과 상호 유기적인 관계를 가지면서 생지화학적 반응을 나타내는 공간을 의미한다(Choi, 2010). 특히 습지에 물이 공급되고 빠져나가는 과정에서 수체의 체류 시간은 독성 제거 및 영양분 제거 등 수질 향상에 영향을 주는 주요한 설계 기준이다. 습지가 장기적으로 오염되지 않고 체제를 유지되기 위하여 인과지도를 작성하여 어떠한 생태계서비스의 Trade-off 현상이 발생할 수 있는지 예측 하였다(Figure 3).

수체를 공급하는 것은 수량을 유지시킴으로

써 공급서비스를 제공하게 되며 개방수면 폭을 확보하는데 영향을 주어 수경관 향상 및 심미성, 생물다양성을 증가시킬 수 있다. 수경관 향상 및 심미성을 증진시켜주는 것은 생태계서비스 중 문화서비스를 제공하는 것을 의미하며 결과적으로 수체의 공급은 공급서비스와 문화서비스를 증가시키는 강화루프(R1)를 형성하는 것으로 나타났다. 또한 천이 이외에도 홍수 등의 예상치 못한 상황에서 발생하는 교란은 토양을 퇴적시키면서 토사에 의한 오염원을 습지로 유입시킬 가능성이 있다(Lee *et al.*, 2012; Ham *et al.*, 2015c). 이 경우 토양 퇴적에 따른 오염원 유입은 수질 정화 기능 제공에 실패하여 조절서비스를 감소시키는 관계를 나타낸다. 습지의 수체는 공급서비스와 문화서비스를 지속적으로 증가시키는 루프를 형성하지만, 반대로 조절서비스는 지속적으로 감소하게 되는 공급·문화 서비스-조절서비스 간 Trade-off

관계가 나타나게 되는 것이다. 따라서 수체의 생태계서비스 회복력을 향상시키기 위해서는 “토양 퇴적(Soil deposition)”을 조절할 수 있는 습지설계 전략이 필요한 것으로 나타났다.

아북산 근린공원의 수리·수문적 특성은 외부적으로 공원의 서측, 북측, 남측으로 강우 및 배출수가 유하하며, 내부적으로 납석광산지의 급경사지로 강우 및 배출수가 유하하는 것으로 나타났다(Nexus Design Centre, 2015). 또한 지형 습윤지수는 약건지가 아북산 근린공원 면적의 35.65%를 이루고 납석광산 지역을 중심으로 적윤지가 23.92%인 지형적 특성에 따라 “수순환 체계(Water cycling system)”의 도입을 제안할 수 있다(Ham *et al.*, 2015; Nexus Design Centre, 2015). 수순환 체계는 유속조절이 가능하여 토양침식 및 퇴적 작용을 완화시키는데 효과가 있으며(France, 2003; Ham *et al.*, 2015b), 장기적으로 문화서비스까지 제공되는 균형루프

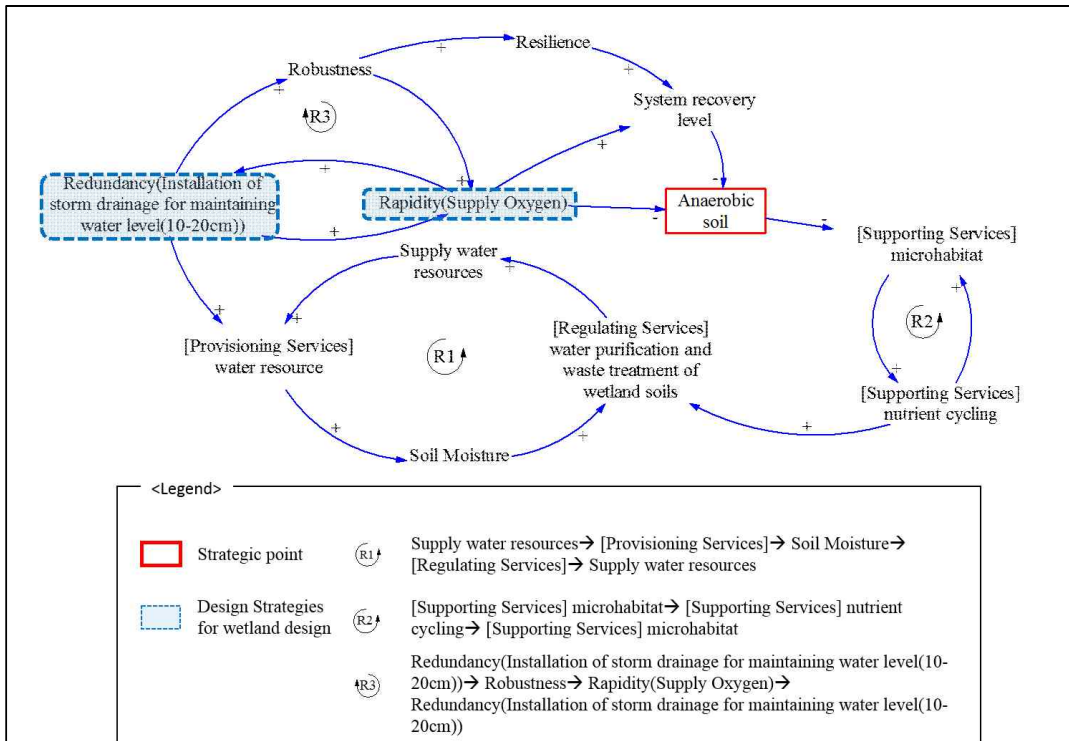


Figure 4. Ecosystem Service Trade-off and Design Strategies in Hydric soils Field

(Figure 3, B1)를 형성하는 것으로 나타났다. 특히 우수의 흐름을 조절할 수 있도록 잔디수로, 빗물저류지, 건습지, 계류습지로 구성된 수순환 체계를 구축하는 것은 토양 퇴적에 따른 육화를 최소화하고 습지체계의 결속력을 높여주어 건 고성을 향상시키는 것으로 나타났다.

## 2) 토양

시간의 흐름에 따른 습지 토양의 생태계서비스 향상 전략을 도출하기 위해 작성된 인과지도는 Figure 4와 같다. 습지 토양은 내륙 토양과 달리 배수가 불량한 특징을 가진 유기질 또는 무기질 토양으로 환경변화에 따른 화학적, 물리적 변화는 육화를 촉진시킬 수 있다(National Wetlands Center, 2013).

수자원을 공급하는 행위는 생태계서비스 중 공급서비스를 향상시키는 역할을 한다. 이때 습지 토양은 오염물질을 제거할 수 있는 자연정화 시스템을 가지고 있는 특징에 따라(Song & Kang, 2005) 수질 정화 기능을 제공하고 조절서비스를 향상시키는 강화루프(Figure 4, R1)를 형성한다. 그러나 습지 토양은 지속적으로 방치될 경우 시간이 경과함에 따라 혐기성 토양으로 변화되는 성질을 가지고 있다(Lee *et al.*, 2010). 습지 토양의 혐기화는 미생물의 서식환경 감소 및 영양염류 순환을 감소시켜 지원서비스가 지속적으로 감소하는 강화루프(R2)를 형성하며, 이로 인해 조절서비스가 감소하게 되는 Trade-off 현상이 나타난다. 특히 습지 토양의 혐기화는 유기물의 분해속도를 저하시키고 퇴적물로부터 인출 및 용출 가속화, 물고기 폐사 등의 원인이 되기 때문에(Choi, 2010) “토양 혐기화(Anaerobic soil)”를 조절할 수 있는 습지 설계 전략이 필요한 것으로 나타났다.

아복산 근린공원 습지에 우수관을 설치할 경우 녹지에서 집수된 물이 습지로 유입되도록 하며 지속적으로 10-20cm의 적정수심을 유지하도록 설계해야 할 것이다(Choi, 2010). 이에 토

양 혐기화를 조절하기 위한 전략으로 중복성과 신속성을 향상시킬 수 있는 설계를 제안하였다. 특히 중복성을 향상시키기 위하여 “10-20cm의 일정수위 유지를 위한 우수관 설치(Installation of storm drainage for maintain water level(10-20cm))”를 제안하여 인과지도를 통해 인과관계를 파악하였다. 일정수위 유지를 위한 우수관은 수순환이 원활하게 되지 않을 경우를 대체하기 위한 시스템으로, 산소공급을 할 수 있는 시간을 증가시켜 토양 혐기화를 감소시켜 지원서비스를 증가시키는 순환 구조를 나타냈다. 즉, “10-20cm의 일정수위 유지를 위한 우수관 설치” 전략은 조절서비스를 향상시키게 되는 인과관계를 형성하여 조절서비스-지원서비스 간 Trade-off 현상을 감소시키는 것을 파악할 수 있었다. 한편 이러한 설계 방법은 우수관의 설치를 통해 습지 수체의 체류시간을 단축시켜주는 인프라의 잉여용량은 증가할 수 있으며, 이것은 중복성을 향상시켜줄 수 있음을 의미한다. 또한 적정 수심을 유지해 줄 뿐만 아니라 습지 수체의 체류시간을 단축시켜 주는 시스템은 신속성을 향상시켜 습지 토양의 침수시간을 줄여 줄 수 있다(Moon, 2005; Song & Kang, 2005). 습지의 수위와 유입수량이 조절되는 과정에서 산소공급이 발생하기 때문에 산소고갈 현상을 완화시켜 습지 토양의 혐기화를 감소시킬 수 있다.

## 3) 식생

습지를 조성하거나 복원하는 등의 설계안에는 습지 주변부 경관과 조화될 수 있도록 습지 내 또는 습지 호안부에 식재하는 사항이 포함된다(The Korean Institute of Landscape Architecture, 2013). 습지 식생의 피드백구조 분석을 통해 생태계서비스 Trade-off 현상을 분석한 결과(Figure 5), 식재를 통해 제공되는 공급서비스는 수경관 향상 및 심미성 증진을 통해 문화서비스를 제공하는 강화루프(Figure 5, R1)를 형성하는 것으로 확인되었다.

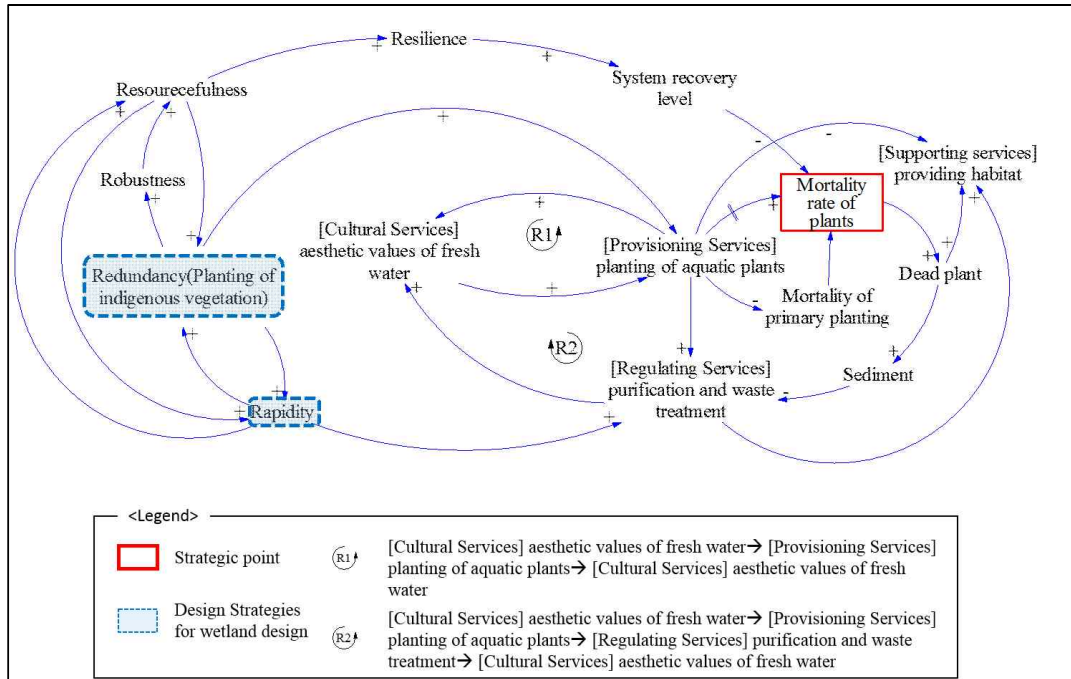


Figure 5. Ecosystem Service Trade-off and Design Strategies in Plants Field

또한 시간의 흐름에 따라 식생의 고사율은 식물사체를 증가시켜 다시 새로운 식물을 식재하게 되는 강화루프(Figure 5, R2)를 형성하게 된다. 한편, 식물의 사체는 토양층에 퇴적물로 축적되어 수질 정화 및 안정화 기능을 의미하는 조절서비스를 저하시키게 된다. 이러한 현상은 공급·문화서비스-조절서비스 간의 Trade-off 현상으로 해석할 수 있으며, 식생의 “고사율(Mortality rate of plants)”을 낮추는 습지 설계 전략이 필요한 것으로 나타났다. 이에 따라 고사율을 조절하여 식물사체의 퇴적으로 인한 수질 문제를 해결할 수 있는 “자생종 식재(Planting of indigenous vegetation)”를 중복적으로 실시하는 것을 제안하였다. 자생종을 충분히 식재함으로써 중복성은 향상될 수 있다.

자생수종을 활용한 식재계획은 습지 조성 이후 새로 유입된 수종의 초기 고사율을 저하시킬 뿐만 아니라 대상지 활착률이 높아 견고성을 향상시킬 수 있다. 또한 수질 정화 속도를 향상시

킴으로서 신속성이 향상될 수 있다. 식생자원을 활용한 다양한 관리 및 운영 프로그램은 자원동원성을 향상시켜 회복력 증진에 기여할 수 있다. 인과지도 분석결과 자생수종을 활용한 식재 계획 전략은 식생의 초기 고사율을 낮춰 식물사체의 퇴적을 감소시키고 조절서비스를 증가시켜 장기적인 측면에서 공급·문화서비스-조절서비스 간 Trade-off 현상을 완화시키는 것으로 나타났다. 식생의 사체를 줄이기 위해서는 우선적으로 초기 식물 고사율을 저감시키고 습지 환경에 우수한 적응력을 가진 자생종 위주로 식재 설계를 진행해야 한다. 그러나 아북산 근린공원의 자생종은 곰솔로 습지 식생과 상이하기 때문에 Gyeongsangnam-do(2014)에서 보고된 밀양시 내륙습지에 자생하는 생물종을 선정하여 제안하였다.

#### 4. 습지 설계

수체, 토양, 식생의 인과지도에서 고찰된 결

과를 바탕으로 습지 설계를 제안하였다.

첫째, 수체 측면에서 분석한 생태계서비스 Trade-off와 설계 전략에 대한 인과지도 분석 결과에 따라(Figure 3) 토양 퇴적 문제로부터 수문을 안정시켜 수체의 견고성을 향상시키기 위하여 아북산 근린공원 내에 다단형태의 계류습지를 조성하였다. 또한 WSED(Water Sensitive Environment Design)을 도입하여 우수 저장, 홍수 조절 등의 효과를 기대할 수 있으며 실질적으로는 습지의 기능 복원을 도모할 수 있다(Figure 6) (Nexus Design Centre, 2016). WSED는 아북산 근린공원 내에 조성되는 0.79ha 소유역의 수순환 시스템을 의미하는 것으로, 저면폭은 10m, 저면장은 15m, 사면경사는 1:1.5, 깊이는 2m로 설계하였다(Nexus Design Centre, 2016). 강우시 우수는 녹지(잔디수로)를 통해 집수되거나 직접 습지

로 유입되어 배수된다. 이때 녹지(잔디수로)를 통해 집수된 우수는 저류습지에 머물러 있다가 다음 단계의 습지로 이동하게 되거나, 우수관에서 직접 다음단계 습지로 이동하여 배수관으로 배출된다(Nexus Design Centre, 2016). WSED의 전반적인 과정은 습지 시스템의 결속력을 높임으로써 견고성을 향상시키는 데에 기여할 수 있을 것이다(Figure 7).

둘째, Figure 4의 분석결과를 활용하여 우수관을 중복 설치하여 생물서식 습지로써의 수원 확보 및 토양 혐기화를 완화시키도록 설계하였다(Figure 7). 방류관은 D=200m이며 임계시간 50분 동안 발생내 수위는 1.20m, 저류용량 180 m<sup>3</sup>, 최대순간방류량은 0.30 m<sup>3</sup>/s, 최대구간방류량은 0.13m<sup>3</sup>/s로 설계하였다(Nexus Design Centre, 2016). 습지 일대에 존재하는 수체의 여과,

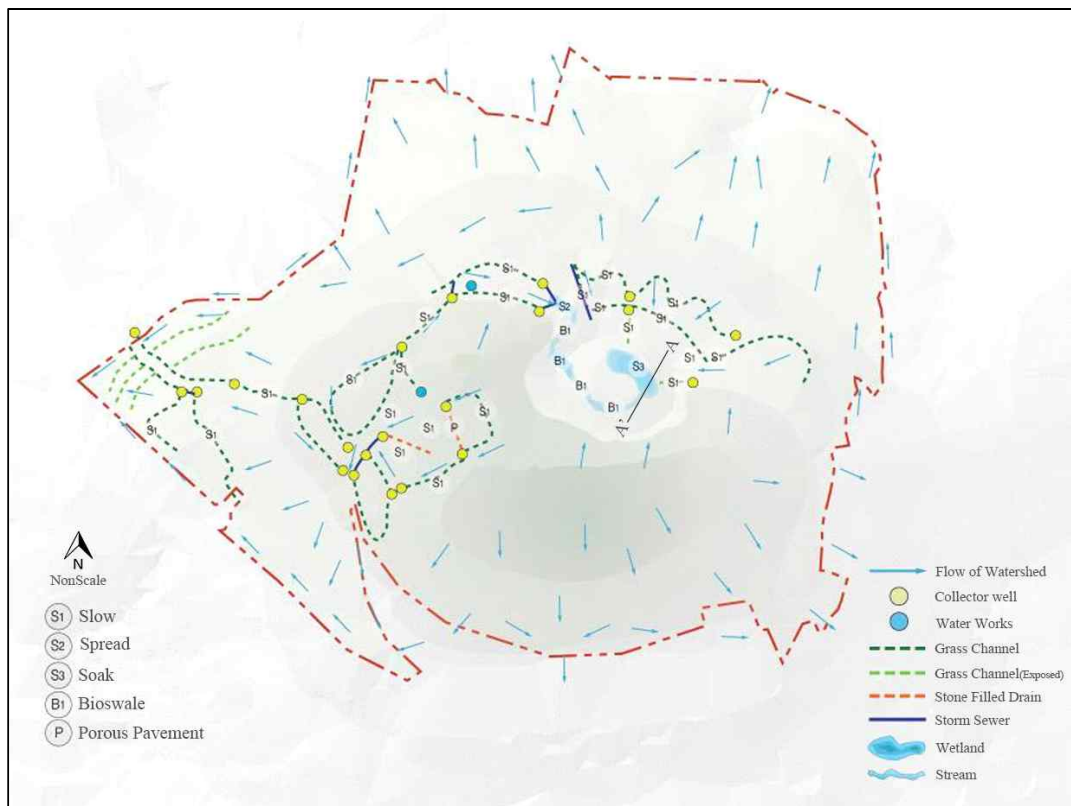


Figure 6. Plan of WSED(Water Sensitive Environment Design)(Nexus Design Centre, 2016)

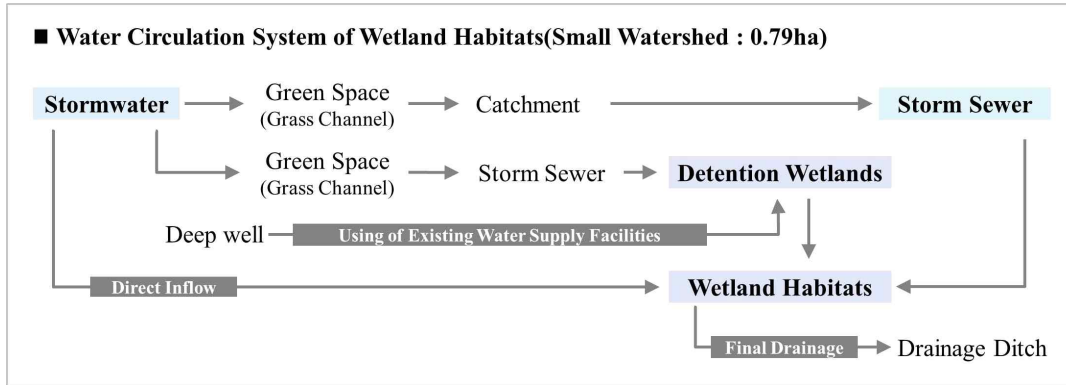


Figure 7. Robustness: Water Cycling System (small watershed: 0.79ha)

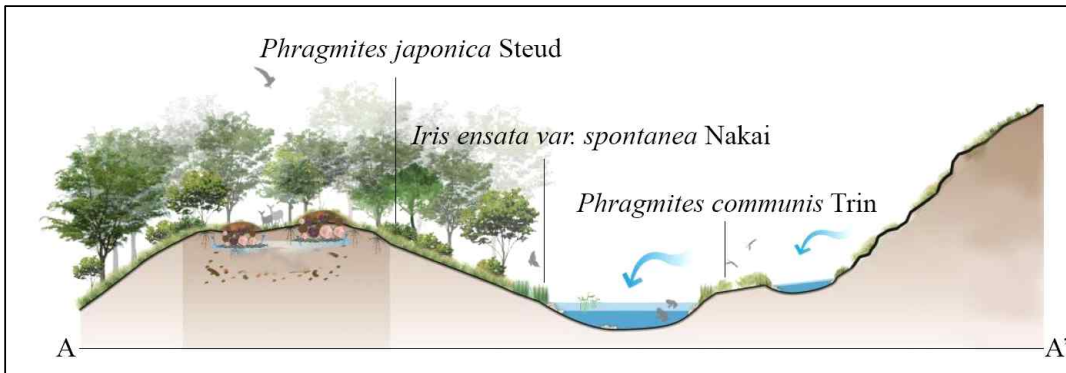


Figure 8. Redundancy and Robustness: Planting of Indigenous Vegetation (Section A-A')

정화 및 분산, 생물 서식 등의 기능을 증진하고자 하였다. 이는 습지 설계를 위한 기반 시설의 중복성을 향상시키고 수체가 채류되는 현상으로부터 신속성을 향상시켜 습지의 육화현상을 완화시킬 수 있다.

셋째, Figure 5의 인과지도 결과를 변형하여 초기 고사율 감소 측면에서 신속성, 견고성을 향상시키기 위하여 습지 일대에 갈대(*Phragmites communis* Trin), 꽃창포(*Iris ensata var. spontanea* Nakai), 달뿌리풀(*Phragmites japonica* Steud) 등 밀양에서 자생하는 식생을 제안하였다(Figure 8). 자생종을 식재하는 것은 자원의 용량을 증가시켜 중복성을 향상시킬 수 있으며 식생 복원을 통해 생물 서식처를 확보하고자 하였다. 이어 습지 설계를 통하여 지역내 능동적 관리자 프로그

램(Adopt program)의 재능기부를 통한 인적 네트워크의 형성을 바탕으로 모니터링 및 생태학습 프로그램 등을 운영하는 것을 제안하였으며, 자원동원성 향상에 긍정적인 영향을 미칠 것으로 기대할 수 있다. 이와 같이 습지 조성을 위해 실시 설계안에서 강조하는 사안들은 습지체제를 유지할 수 있는 방법이 되며 결과적으로 습지의 생태계서비스를 지속적으로 제공하는 방안이 될 것이다.

## V. 결 론

본 연구는 도시 습지의 생태계서비스 회복력을 향상시키기 위하여 적절한 설계 전략을 도출하는 것을 목적으로 하였다. 습지의 설계 전략

은 시스템 사고 측면에서 인과지도 분석을 통해 습지의 생태계서비스 Trade-off 현상에 대한 동태성을 파악하고 습지의 수체, 토양, 식생에 대한 피드백 구조를 고찰하여 도출하였다.

연구의 결과 첫째, 시스템 영역은 습지 체제와 습지 체제를 구성하는 수체, 토양, 식생으로 설정하였으며, 문헌고찰을 통해 인과지도에 활용될 변수를 도출하였다. 둘째, 도시 습지의 생태계서비스 Trade-off 현상과 생태계서비스 회복력 간의 인과지도 분석을 통해 습지 시스템의 동태성을 파악할 수 있었다. 또한 습지 체제 유지를 위한 전략으로써 생태계서비스 Trade-off 현상에 대한 견고성, 중복성, 신속성, 자원동원성 전략을 제안하였다. 셋째, 밀양시 아북산 근린공원 건습지의 생태계서비스 Trade-off 현상을 예측하고 생태계서비스 회복력을 향상시키기 위한 설계 전략을 제시하였다. 수체의 동태성에 대한 인과지도 분석결과 초기 수량유지로 인해 공급서비스와 문화서비스를 제공할 수 있지만, 시간이 지남에 따라 아북산 근린공원 광산절개지에 발생하는 “토양 퇴적”은 일정 시간이 지난 후엔 조절서비스를 감소시키는 Trade-off 현상이 나타날 것으로 예상되었다. 따라서 토양 퇴적을 조절하고 수체의 견고성을 향상시키기 위하여 “수순환 체계”를 제안하였다. 토양의 동태성을 분석한 결과 조절서비스-지원서비스 간의 Trade-off 현상이 발생할 것으로 나타났다. 습지는 본래 수질안정화 기능을 통해 조절서비스를 제공하고 있지만, 대상지와 같이 방치된 습지의 경우 토양의 혐기화가 진행되어 영양염류의 순환 기능을 감소시키는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 “토양 혐기화”에 대한 관리가 필요한 것으로 해석하였으며, 토양 혐기화를 관리하기 위하여 신속하게 산소를 공급하여 토양 혐기화를 지연시킬 수 있는 시설이 중복적으로 설치될 것을 제안하였다. 이에 따라 본 연구에서는 신속성에 “산소 공급”을 제안하였으며, “10-20cm의 일정수위 유지를 위한 우수

관”을 중복하여 설치 할 수 있는 설계기법을 제안하였다. 식생은 습지에 수생식물을 식재함으로써 공급서비스에 영향을 주며 수경관 향상 및 심미성의 증진이라는 측면에서 문화서비스를 향상시키지만, 식물의 사체를 제대로 관리하지 못할 경우 오히려 수질을 악화시켜 조절서비스를 감소시키게 되어 공급·문화서비스-조절서비스 간의 Trade-off 현상을 나타내는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 식물의 “고사율”을 조절하기 위하여 초기 활착률이 높은 자생종을 식재하는 것을 제안하였다. 대상지에 자생종을 식재하는 것은 종에 대한 중복성을 높여줄 수 있으며, 피드백 관계를 통해 신속성, 견고성, 자원동원성까지 향상시켜 주는 것으로 나타났다. 넷째, 수체, 토양, 식생의 인과지도 결과를 바탕으로 수순환 체계를 집중으로 한 다단형태의 계류습지 습지 설계를 제안하였다. 다단형태의 습지에 우수관을 설치하여 수체의 양을 일정하게 유지시켜줄 수 있을 뿐만 아니라 토양 혐기화를 완화시킬 수 있도록 제안하였으며, 마지막으로 습지 일대에 갈대, 꽃창포, 달뿌리풀 및 밀양시 습지 자생종의 식재를 제안하였다. 본 연구에서는 습지 생태계서비스의 Trade-off 현상 및 시스템의 동태성에 대해 고찰해 봄으로써 예상치 못한 교란으로부터 습지 체제를 유지할 수 있는 설계안을 도입하였으며, 생태계서비스의 회복력이 우수한 습지가 될 것으로 기대된다.

본 연구는 장기적으로 습지로부터 창출되는 생태계서비스를 제공받기 위한 설계 전략을 시스템 사고라는 새로운 방법을 활용하여 도출하였다는 것에 의의가 있다. 특히 현재 실무에 적용이 가능한 설계 기법들이 견고성, 중복성, 신속성, 자원동원성과 같은 생태계서비스 회복력 향상 전략과 어떻게 상호작용을 하고 영향력이 있는지 분석할 수 있었다. 계류형 습지, 자생종 식재를 함으로써 견고성을 향상시킬 수 있을 것이다. 우수관 설치, 자생종 식재는 중복성을 향상시킬 수 있는 자원이 되며, 이는 신속성을 향

상시킬 수 있는 설계요소로 도출되었다. 마지막으로 식재에 대한 모니터링 및 관리프로그램을 통해 자원동원성이 향상 될 것이다.

한편, 인과지도 분석 과정에서 수체, 토양, 식생에 따라 생태계서비스 Trade-off 현상이 발생하는 시점이 서로 상이하다는 한계를 가진다. 예를들어 습지 전체 시스템 구조를 규명하거나 습지 체계가 전환되는 임계점, 중복성 향상을 위한 적절한 시설 및 식재의 수량, 신속성 향상을 위한 적정 시간과 같은 정량적인 수치를 제시하지 못하였다. 따라서 향후 연구에서는 습지 전체 시스템 구조를 규명할 수 있는 정량적 모델이 개발되어야 할 것이다. 이러한 후속 연구를 통해 도출된 설계 기법은 생태계서비스 회복력 향상을 위한 습지 조성과 관련된 전과정에서 과학적 데이터에 근거한 구체적인 습지 설계 가이드를 제시해 줄 수 있을 것이다.

## References

- Agarwala, M. · G. Atkinson · B. P. Fry · K. Homewood · S. Mourato · J. M. Rowcliffe · W. Wallace and E. J. Milner-Gulland. 2014. Assessing the Relationship Between Human Well-being and Ecosystem Services: A Review of Frameworks. *Conservation and Society*. 12(4): 437-449.
- Ahn KS · HS Kim and JG Kim. 2016. Wetlands. Seoul: Lifescience. (in Korean)
- Biggs, R. · M. Schlüter · D. Biggs · E. L. Bohensky · S. BurnSilver · G. Cundill · V. Dakos · T. M. Daw · L. S. Evans · K. Kotschy · A. M. Leitch · C. Meek · A. Quinlan · C. Raudsepp-Hearne · M. D. Robards · M. L. Schoon · L. Schultz and P. C. West. 2012. Toward principles for enhancing the resilience of ecosystem services. *Annual Review of Environment and Resources*. 37: 421-448.
- Bruneau, M. · S. E. Chang · R. T. Eguchi · C. C. Lee · T. D. O'Rourke · A. M. Reinhorn · M. Shinozuka · K. Tinerney · W. A. Allace and D. Von Winterfeldt. 2003. A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities. *Earthquake Spectra*. 19(4): 733-752.
- Cavender-Bares, J. · S. Polasky · E. King and P. Balvanera. 2015. A sustainability framework for assessing trade-offs in ecosystem services. *Ecology and Society*. 20(1): 1-17.
- Choi DH. 2010. Study on Improvement of Water Quality in Constructed Wetland Based on Various Mechanisms. Ph.D dissertation, Chungnam University. (in Korean with English summary)
- Choi NH. 2015. A Study on the Components and Systems Archetypes of the Resilience for the New Regional Development Strategy. *Journal of Korean System Dynamics Review*. 16(4): 155-178. (in Korean with English summary)
- Clerici, N. · M. L. Paracchini and J. Maes. 2014. Land-cover change dynamics and insights into ecosystem services in European stream riparian zones. *Ecohydrology & Hydrobiology*. 14(2): 107-120.
- Cumming, G. S. and J. Collier. 2005. Change and identity in complex systems. *Ecology and Society*. 10(1): 29.
- Davies, Z. G. · J. L. Edmondson · A. Heine-meyer · J. R. Leake and K. J. Gaston. 2011. Mapping an urban ecosystem service: quantifying above ground carbon storage at a city wide scale. *Journal of Applied Ecology*. 48(5): 1125-1134.
- Dong, X. · W. Yang · S. Ulgiati · M. Yan and



- X. Zhang. 2012. The impact of human activities on natural capital and ecosystem services of natural pastures in North Xinjiang, China. *Ecological Modelling*. 225: 28-39.
- Forrester, J. 1961. *Industrial dynamics*. Cambridge: MIT Press.
- France, R. 2003. *Wetland Design*. London: W.W. Norton.
- Gotts, N. M. 2007. Resilience, Panarchy, and World-Systems Analysis. *Ecology and Society*. 12(1): 24-38.
- Gyeongsangnam-do. 2014. 2nd Gyeongsangnam-do Wetland Conservation Action Plan. Research report to Gyeongsangnam-do. (in Korean)
- Haeussler, S. · P. Bartemucci and L. Bedford. 2004. Succession and resilience in boreal mixedwood plant communities 15-16 years after silvicultural site preparation. *Forest Ecology and Management*. 199(2-3): 349-370.
- Ham EK · M Kim and J Chon. 2015a. An Analysis of Ecosystem Service's Trade-off through Systems Thinking. *Korean System Dynamics Review*. 16(2): 77-102. (in Korean with English summary)
- Ham EK · KH Song · J Chon and DG Cho. 2015b. Design Strategies for Ecological Restoration Using system Dynamics-Focused on 2015 Miryang-si Jayeon Madang Development Project-. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 43(6): 86-97. (in Korean with English summary)
- Ham EK · YE Choi · M Kim and J Chon. 2015c. A Study on the Water Quality Management of Modular Revetment Structure installed Low-Maintenance Constructed Wetland. *Journal of Wetlands Research*. 17(2): 184-192. (in Korean with English summary)
- Ham EK 2016. *Ecological Design Strategies for Constructed Wetland Considering Ecosystem Services*. MS Thesis, Korea University. (in Korean with English summary)
- Hansson, L. A. · C. Brönmark · P. A. Nilsson and K. Åbjörnsson. 2005. Conflicting demands on wetland ecosystem services: nutrient retention, biodiversity or both?. *Freshwater Biology*. 50(4): 705-714.
- Harmáčková, Z. V. and D. Vačkář. 2015. Modelling regulating ecosystem services trade-offs across landscape scenarios in Třeboňsko Wetlands Biosphere Reserve, Czech Republic. *Ecological Modelling*. 295: 207-215.
- High Performance Systems. 1992. *An Introduction to Systems Thinking*. isee systems.
- Holling, C. S. 1973. Resilience and Stability of ecological system. *Annual review of ecology and systematics*. 4(1): 1-23.
- Jeon DU and J Chon. 2014. System Thinking in the Resilience of the Ecosystem and Eco-tourism of Mt. Gariwang Based on the Controversy around the venue Construction for PyeongChang 2018 Olympic. *Journal of Korean System Dynamics Review*. 15(3): 61-79. (in Korean with English summary)
- Kim DH · TH Moon and DH Kim. 1999. *System Dynamics*. Seoul:Daeyung. (in Korean)
- Kim DH 2006. *System Thinking*. Seoul: Sunhaksa. (in Korean)
- KRIHS. 2014. *A Study on the Examination and Application of the Regional Resilience for Sustainable Development*. KRIHS report.(in Korean)

- Kim M · S You · J Chon and J Lee, 2017. Sustainable Land-Use Planning to Improve the Coastal Resilience of the Social-Ecological Landscape. *Sustainability*. 9(7): 1086-1107.
- Lee HJ · S You and J Chon. 2015. The Management Methods of Multi-Purpose Ecological Reservoir by System Thinking. *Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology*. 18(2): 1-17. (in Korean with English summary)
- Lee IH · SG Lee · HJ Kim · MO Kim · JS An and D Hong. 2012. The dredging of reservoir and projects of water improvement. *Proceeding of Korean Environmental Dredging Society Conference*. pp. 85-94. (in Korean)
- Lee JY · DS Kang and KJ Sung. 2010. Assessment of the Wetland Soil Development in Constructed Wetlands using the Soil Properties of a Reference Wetland *Journal of Wetland Research*. 12(1): 1-14. (in Korean with English summary)
- Lee SD · SH Kim and JS Kim. 2012. Analysis Actual Conditions of Arid Progress and Prevention Management of Hwaem Wetland in Yangsansi. *Korean Journal of Environment and Ecology*. 26(4): 498-511. (in Korean with English summary)
- Lee SM 2013. Development and Application of Assessment Model for Urban Green Ecosystem Services : Focusing on Urban Cemeteries in Seoul. Ph.D dissertation, Dong-Kuk University. (in Korean with English summary)
- Lee SW · JK Byun, DH Ji and YD Kwon. 2009. Soil Physiochemical Properties in Leaf-yellowing Black Locus(*Robinia Pseudo-acacia* L.) Stands. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*. 42(6): 409-414. (in Korean with English summary)
- McPhearson, T · E. Andersson · T. Elmqvist and N. Frantzeskaki. 2015. Resilience of and through urban ecosystem services. *Ecosystem Services*. 12: 152-156.
- MEA: Millennium Ecosystem Assessment. 2003. *Ecosystems and human well-being: a framework for assessment*. World Resources Institute, Washington, DC.
- Mitsch, W. J. · L. Zhang · E. Waletzko and B. Bernal. 2014. Validation of the ecosystem services of created wetlands: two decades of plant succession, nutrient retention, and carbon sequestration in experimental riverine marshes. *Ecological Engineering*. 72: 11-24.
- Moon HS. 2005. The Development Stages of the Circumstances and Characteristics in Wetland-in the Gyeonggi-Do Mountains-. 12(4): 55-67. (in Korean)
- National Wetlands Center. 2013. *Understanding of Wetland*. Gyeongsangnam-do: National Wetlands Center. (in Korean)
- Ndubisi, F. 2014. *Managing Urban Landscape: Maintaining Resilient and Regenerative Places*. *Proceedings of the 4th International Symposium of Science Museum*. pp: 1-11.
- Nexus Design Centre. 2015. *Masterplan of Miryang Jayeon Madang Development Project*. Project report. (in Korean)
- Nexus Design Centre. 2016. *Business plan of Miryang Jayeon Madang Development Project*. Project report. (in Korean)
- Rodríguez, J. P. · T. D. Beard · E. M. Bennett · G. S. Cumming · S. J. Cork · J. Agard · A. P. Dobson and G. D. Peterson. 2006.

- Trade-offs across space, time, and ecosystem services. *Ecology and Society*. 11(1): 28-42.
- Rural Development Administration. 2006. Soil Map. Rural Development Administration
- Scheffer, M. and S. R. Carpenter. 2003. Catastrophic regime shifts in ecosystems: linking theory to observation. *Trends in ecology and evolution*. 18(12): 648-656.
- Semeraro, T. · C. Giannuzzi · L. Beccarisi · R. Aretano · A. De Marco · M. R. Pasimeni · G. Zurlini and I. Petrosillo. 2015. A constructed treatment wetland as an opportunity to enhance biodiversity and ecosystem services. *Ecological Engineering*. 82: 517-526.
- Son JK · MJ Shin · JH Shin · DH Kang and B Kang. 2014. The Functional Selection for the Assessment of Ecosystem Service at Pond Wetland in Agricultural Landscape. *Journal of Wetland Research*. 16(4): 319-325. (in Korean with English summary)
- Son D · H Lee · EJ Lee · KH Cho and D Kwon. 2015. Flora and Vegetation Structure in a 15-Year-Old Artificial Wetland. *Ecology and Resilient Infrastructure*. 2(1): 54-63. (in Korean with English summary)
- Song K and HO Kang. 2005. Nutrient Removal Efficiencies in Marsh- and Pond- type wetland Microcosms. *Journal of Wetland Research*. 7(4): 43-50. (in Korean with English summary)
- The Korean Institute of Landscape Architecture. 2013. *Landscape Architecture Design Criteria*. Seoul: Kimoodang. (in Korean)
- Vidal-Legaz, B. · J. Martínez-Fernández · A. S. Picón and F. I. Pugnaire. 2013. Trade-offs between maintenance of ecosystem services and socio-economic development in rural mountainous communities in southern Spain: A dynamic simulation approach. *Journal of Environmental Management*. 131: 280-297.
- Walker, B. and D. Salt. 2012. *Resilience thinking: sustaining ecosystems and people in a changing world*. Washington: Island Press.
- Zedler, J. B. and S. Kercher. 2005. Wetland resources: status, trends, ecosystem services, and restorability. *Annual Review of Environment and Resources*. 30: 39-74.