

인공습지 조성에 따른 편익 산정에 관한 연구

정재원·배영혜·이하늘·김수전[†]·김형수

인하대학교 토목공학과

A Study on the Benefit Estimation by Artificial Wetland Construction

Jaewon Jung·Younghye Bae·Ha Neul Lee·Soojun Kim[†]·Hung Soo Kim

Department of Civil Engineering, Inha university, Korea

(Received : 16 January 2020, Revised: 06 February 2020, Accepted: 06 February 2020)

요약

인공습지의 주요한 기능이자 조성된 인공습지의 목적 중 가장 많은 비율을 차지하는 기능은 수질정화 기능이다. 4대강사업 이후 국민들의 수질에 관한 관심과 요구가 증가하였고, 삶의 질 향상으로 인한 수변공간에 대한 활용도가 높아지면서 수질 개선에 대한 필요성은 더욱 증가할 것으로 보인다. 대부분의 인공습지 조성 사업 시 한 가지 목적에만 초점을 맞추는 게 대부분이며, 효과에 관한 연구도 한 가지 기능에 대한 효과를 분석하고 있어 실제 인공습지의 조성의 가치가 저평가 되고 있다. 따라서 인공습지를 조성에 따른 종합적 편익을 산정하기 위해 본 연구에서는 하천변 인공습지 조성에 따른 여러 효과 중 홍수저감 및 수질개선 기능에 대한 효과를 분석하고 이에 따른 편익을 산정하였다. 즉, 하천변에 가상의 인공습지를 설계 및 조성하여, 인공습지 조성 전·후의 비교를 통하여 홍수저감과 수질개선 효과를 산출하였고 이에 따른 편익을 각각 산정하였다.

핵심용어 : 인공습지, 수질개선, 홍수저감, 편익산정

Abstract

The main function of artificial wetlands and the largest proportion of the purpose of artificial wetlands created is water purification. The public's interest and demand for water quality increased after the Four major rivers project, and the need for water quality improvement is expected to increase further as the use of waterfront increased due to the improvement of quality of life. Most of the projects focus on only one purpose, and research on the effects of one function is also being analyzed, which undervalues the actual creation of artificial wetlands. Therefore, in order to calculate the comprehensive benefits of artificial wetlands, the effects of flood reduction and water quality improvement were analyzed in this study among the various effects of artificial wetlands along riversides, and the benefits were calculated accordingly. In other words, the effects of flood mitigation and water quality improvement were calculated by comparing the artificial wetlands before and after the construction of artificial wetlands, and the benefits of each of them were calculated.

Key words : Artificial Wetland, Water Quality Improvement, Flood Mitigation, Benefit Estimation

[†] To whom correspondence should be addressed.

Department of Civil Engineering, Inha university, Korea
E-mail: sk325@inha.ac.kr

- **Jaewon Jung** Inha university, Institute of Water Resources System / Post-Doctoral Researcher (jungjw89@gmail.com)
- **Younghye Bae** Inha university, Department of Civil Engineering / Ph.D. candidate (yhbaebae@gmail.com)
- **Ha Neul Lee** Inha university, Department of Civil Engineering / Master's course (haneul6825@naver.com)
- **Soojun Kim** Inha university, Department of Civil Engineering / Assistant Professor (sk325@inha.ac.kr)
- **Hung Soo Kim** Inha university, Department of Civil Engineering / Professor (sookim@inha.ac.kr)

1. 서 론

습지는 수자원 확보 및 홍수제어, 생태서식처, 조경 및 레크리에이션, 기후조절, 수질정화 및 환경교육 등의 다양한 기능을 지닌다. 인공습지는 이러한 습지의 기능을 목적으로 조성한 습지를 의미하며, 고유의 물순환, 생태, 자연정화, 경관, 심미적 기능 등의 복합적 기능에 의하여 복잡하고 다양한 문제해결에 적당한 기술로 평가받고 있다. 한국을 비롯한 선진국에서는 이러한 인공습지가 도시화, 기후변화 및 생활수준 향상으로 인한 홍수와 가뭄, 하천생태계 변화, 수질오염과 같은 문제를 해결하는 방안으로 제시되고 있다 (Ministry of Environment, 2014).

인공습지의 주요한 기능이자 조성된 인공습지의 목적 중 가장 많은 비율을 차지하는 기능은 수질정화 기능이다. 4대강사업 이후 국민들의 수질에 관한 관심과 요구가 증가하였고, 삶의 질 향상으로 인한 수변공간에 대한 활용도가 높아지면서 수질개선에 대한 필요성은 더욱 증가할 것으로 보인다. 인공습지의 경우 유수의 체류기간이 증가되며 조성된 식재에 의해 수질이 정화되는데, 인, 질소 뿐 아니라 인위적으로 처리가 불가능한 유기 및 입자성 물질 등 오염물질의 저감이 가능하다. 또한 인공습지는 급속한 도시화와 기후변화로 인한 강우량의 증가가 초래하는 홍수의 방어기능을 포함하는데, 인공습지의 저류기능을 통해 유속이 저감되고 침투홍수량을 감소시켜 홍수에 의한 피해를 줄일 수 있다.

이와 같이 여러 목적으로 인공습지가 많이 조성되고 있는데, 특정 기능을 목적으로 하여 인공습지가 조성된다 하더라도 인공적 생태계가 조성되는 습지의 특성상 복합적 기능을 갖게 된다. 따라서 인공습지 조성 시에는 특정 목적만이 아닌 다양한 효과에 대한 통합적 분석이 필요하지만, 현재 대부분의 조성 사업 시 한 가지 목적에만 초점을 맞추는 게 대부분이다. 또한 인공습지 조성 효과에 관한 연구도 한 가지 기능에 대한 효과를 분석하고 있어 실제 인공습지의 조성의 가치가 저평가되고 있다. 따라서 인공습지를 조성에 따른 종합적 편익을 산정할 수 있다면 다목적의 인공습지를 적재적소에 적용할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 하천변 인공습지 조성에 따른 여러 효과 중 가장 추가 되는 홍수저감 및 수질개선 기능에 대한 효과를 분석하고 이에 따른 편익을 산정하였다. 즉, 하천변에 가상의 인공습지를 설계 및 조성하여, 인공습지 조성 전·후의 비교를 통하여 홍수저감과 수질개선 효과를 산출하였고 이에 따른 편익을 각각 산정하였다.

2. 관련 연구 동향

최근 습지의 중요성이 재인식되며 습지의 다양한 기능과 효율적인 활용방안에 관한 다수의 연구가 전세계적으로 진행되고 있다 (Mitsch et al., 2007; Fischer et al., 2009; Emerton and Boss, 2004; Maltby et al., 1996; Maltby et al., 2013; Maltby and Acreman, 2011; Maltby, 1991). 특히 습지는 지

하수 충전, 증발산 및 유출 등 수문학적 순환에 많은 영향을 미치기 때문에 습지의 홍수저감 기능에 관한 연구도 많이 행해져왔다. 하지만 습지의 종류가 많고 그 형태에 따라 미치는 영향이 다르기 때문에 다수의 연구에서는 습지의 홍수저감 기능을 확인하였지만, 일부에서는 영향이 없거나 오히려 홍수량이 증가하여 상이한 연구결과가 나오기도 하였다 (Bullock and Acreman, 2003; Acreman and Holden, 2013).

홍수저감을 위한 인공습지 조성에 관련한 연구로는 천변저류지 조성에 따른 홍수저감 효과에 관한 국내의 다수의 연구가 Kim et al.(2007), Han et al.(2005), Jeong et al.(2009)에 의해 수행되어왔다. 수문모형인 SWAT모형을 이용한 천변저류지의 홍수 저감효과에 관한 연구가 Kim et al.(2008)에 의해 수행되었고, 국외에서는 Anrold et al.(2001)이 SWAT을 이용하여 인공습지의 기능을 평가한 바 있다. 그 외에도 Ahn et al.(2008)은 천변저류지의 최적위치 선정을 위하여 유전자알고리즘을 이용하여 홍수조절 효과를 산정하는 연구를 진행한 바 있다.

인공습지의 기능 중 수질개선 기능에 관한 연구가 국내외적으로 가장 많이 이루어졌다. 대부분의 연구가 조성된 인공습지의 장기간의 모니터링을 통하여 인공습지의 수질정화효율을 평가하는 연구로서 Choi et al.(2006), Park et al.(2012), 혹은 인공습지의 적용을 위하여 시험용 인공습지를 조성하여 결과를 확인하는 연구 Galanopoulos et al.(2013)로 진행되었다. 또한 수질개선의 경우에는 농업용수 혹은 우수유출수의 비점오염원 저감 목적의 연구가 많이 행해졌다 (Ham et al., 2010, Singh et al., 2011). 이러한 인공습지 조성 시의 수질개선 효과를 모형을 통해 예측한 연구동향을 살펴보면, Kim et al.(2010)은 EFDC모형을 사용하여 2002년 조성된 자유수면형 인공습지의 오염물질 제거 효율을 예측하였다. Yoon et al.(2013)은 QUAL2K모형을 이용하여 인공습지 적용 시 탄동천의 전반적인 수질개선 효과를 분석하였다.

이와 같이 습지의 기능에 관한 연구가 다방면으로 이뤄지고 있으며, 모형을 통한 인공습지 조성 효과에 관한 정량적 예측도 진행되어가고 있다. 또한 이러한 요소들에 대한 경제적 가치를 정량화하기 위한 다양한 연구가 수행되었다. 습지의 가치 추정을 위한 방법론으로는 미국 혹은 일본에서 주로 사용하고 있는 레크리에이션 편익산정법인 여행자 비용법(TCM), 조건부 가치측정법(CVM), 일단위 가치측정법(UVM) 등이 있다 (Korea Water Resources Corporation, 1998; Lee et al. 2002). 현재 국내에서는 2008년 국토해양부에서 수행한 '수자원사업의 타당성분석 개선방안 연구'에서 제시하고 있는 다차원 홍수피해 산정방법 및 대체비용법 등을 통해 편익을 산정하는 것이 일반적이다.

Yoo et al.(2010)은 인공습지와 유사한 효과를 갖는 천변저류지 조성에 따른 홍수 조절효과 및 수질개선 효과를 다차원법 및 대체비용법을 통해 산정하였고 선택실험법을 통해 생태적가치를 산정하였다. Kwak et al.(2008)은 천변저류지의 형식 및 조합을 달리하여 케이스별로 홍수조절 효과를 분석하였고 다차원법을 이용하여 이에 따른 피해액 저감액을 산정하였다.

이 외에도 홍수 조절효과를 분석하기 위해 홍수피해액을 산정하고 경제성을 분석한 연구가 Kim et al.(2003)과 Choi et al.(2006)에 의해 수행된바 있다.

수질개선 효과의 정량화를 위한 연구도 상당수 진행되었으며, 주로 공급측면의 접근방식인 대체비용법을 이용하여 분석한 연구가 수행되었다. Yeo et al.(2009)은 낙동강수계의 내성천에 계획한 송리원댐의 댐방류에 의한 수질개선효과를 하수처리시설을 대체시설의 비용으로 적용하여 편익을 산정하였다. Jo(2012)는 대체비용법을 적용하여 농업용 저수지 댐중고 사업에 의한 수질개선 편익을 산정하였다.

그 밖의 습지 기능에 대한 연구도 국내에서 Lee et al.(2002)은 농경지 및 택지로 이용되고 있는 폐천을 습지로 활용하는 경우 발생하는 레크레이션 및 심미적 가치에 대해 평가한 바 있으며, 국외에서도 습지의 가치를 경제적 가치로 산정하는 연구가 지속해서 진행되어오고 있다. Costanza et al.(1997)은 다양한 사례 분석으로 통해 16개의 생태계 유형에 따른 17개의 생태기능 가치를 분석하였고 이를 이용하여 스코틀랜드의 습지에 적용, 연간 제공하는 생태적 기능에 대한 경제적 가치를 산정한 바 있다. Brett et al.(2008)은 습지 인접지역 경작지의 소유주를 대상으로 설문조사를 수행하였고 이를 통해 습지의 크기와 확산에 따라 경작지 소유주들이 느끼는 가치를 분석하였다. Stephen(1996)은 루이지애나주의 해안습지가 파괴됨에 따라서 지역사회가 입는 사회적인 피해를 산정하였다. 또한, 천변저류지의 복원에 대한 가치 평가를 위하여 Lupi et al.(2002)은 미시건 주를 대상으로 습지의 복원으로 얻어지는 경제적인 가치를 분석했으며 Prato et al.(2006)은 일리노이 강을 대상으로 천변저류지의 복원 사업을 가정하여 이로 인한 경제성을 분석하였다. Barbier et al.(1997)은 천변저류지와 같은 습지생태계의 홍수조절, 생물서식지와 같은 생태적기능, 수질정화기능 등 매우 다양한 기능에 대한 기능별 가치들을 크게 사용가치(use value)와 비사용가치(nonuse value)로 나누어 분류한 바 있다.

습지의 여러 가지 기능에 따른 가치를 복합적으로 평가한 연구는 국내외 연구된 사례가 없으며, 본 연구에서는 인공습지를 적용 시 홍수저감 효과와 수질개선 효과의 편익을 분석해보고자 한다.

3. 사용 자료(Database) 및 방법론

본 논문의 연구 흐름은 다음과 같다. 먼저 인공습지의 적용 대상 유역을 선정하고 유역 내에 입지를 결정하여 이에 맞는 인공습지를 설계 및 적용하였다. 인공습지 구성에 따른 홍수저감 효과 및 수질개선효과를 각각 분석하였고, 분석 결과를 바탕으로 편익을 산정하여 인공습지 구성에 따른 효과를 종합적으로 분석하였다.

3.1 인공습지 설계 및 적용

인공습지의 설계 및 적용을 위한 대상유역을 한강수계의 경안천 중권역으로 선정하였다. 경안천의 경우 수도권의 상수원수를 공급하는 팔당호의 한 지류이자 현재 급속한 도시화로

진행되고 있어 하천수의 수질오염 관리에 있어서 중요한 유역이다. 홍수범람위험구역에 속하며 중하류에 인구가 밀집되어 홍수 발생시 피해가 클 것으로 예상되어 치수대책이 필요한 유역이기도 하다. 또한 하천변에는 인공습지를 적용하기에 충분한 논경지가 넓게 분포하고 있어 인공습지를 적용하여 기능을 분석 및 평가하기에 적절한 유역으로 판단된다.

경안천 유역에 인공습지의 입지를 선정하기 위해서 먼저 곤지암천 합류 전 상류부를 대상구간으로 선정하였고, 위성 사진을 통해 인공습지 조성을 위한 충분한 부지가 확보되는지 검토하였다. 최종적으로 경안천하천기본계획(1998) 수립시 하천단면 No.64~69구간의 우안을 습지 조성 위치로 결정하였다(Fig. 1). 이 부지는 현재 생산농지지역으로 분류되어 있으며, 좌안과 하류부에는 일반주거지역이 넓게 분포하고 있어 습지 조성 후에 주거지역의 홍수피해를 감소시킬 뿐 아니라 생태교육 용도로도 활용이 가능할 것으로 판단된다.

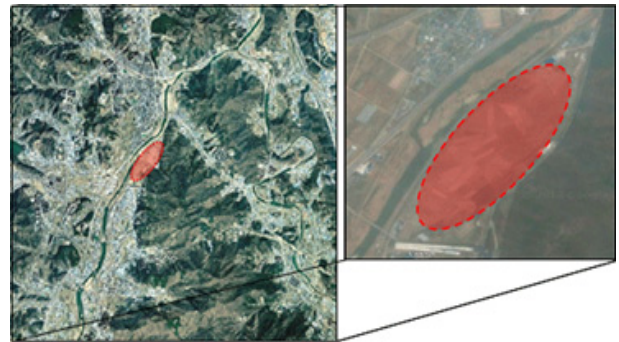


Fig. 1. Construction Location of Artificial Wetlands.

인공습지는 기존 하천 옆에 새로운 하도를 연결하여 자연유하를 활용하는 방식으로 설계하였으며, 초기침강지와 사행화시킨 식생수로로 구성되어 홍수량을 최대한 저류시켜 홍수피해를 줄이도록 설계하였다. 설계 용량의 경우 조성 가능한 부지 면적 조건 내에서 최대의 용량을 갖도록 하였다. 초기침강지의 경우 HEC-RAS 모형의 online storage 기능을 이용하여 깊이는 5m, 총 부피는 617,000 m^3 으로 설계하였으며, 식생수로의 경우 총 연장 1,460m를 사행화하여 설계하였다. 조도계수의 경우 Cowan(1956)의 조도계수 산정을 위한 계수 값을 기준으로 식생이 많고 만곡도가 심한 것으로 가정하여 산정하였다.

3.2 HEC-RAS 모형을 이용한 홍수위 산정 및 저감효과 분석

2011년 발간된 경안천 하천기본계획 보고서에 제시된 빈도별 홍수량을 사용하여 인공습지 조성 전·후 단면에 대하여 홍수위를 분석하였다. 분석 모형으로는 HEC-RAS모형을 이용하였고, 분석 대상 범위는 경안천 국가하천 구간인 용인시 모현면과 광주시 오폭읍의 경계면부터 팔당호 합류점까지 약 22.5km에 해당하는 하도 구간이다. 홍수위분석을 위한 하천단면자료로는 하천단면의 위치와 하상고, 횡단면 좌표, 단면간의 거리, Manning의 조도계수, 단면의 수축 및 확장계수 등과 보와 교량 등의 구조물

이 있으며, 이는 1998년 하천정비기본계획 수립시 구축된 하천 단면자료를 이용하여 모형을 구축하였다.

인공습지 조성 전·후의 홍수범람 양상 비교 분석을 위해서는 각 하천단면에 해당하는 홍수위 결과 값을 빈도별로 입력하였고, TIN파일을 생성하여 보간법에 의하여 홍수범람도를 생성하였다. 지형의 고도를 고려하여 침수유무를 판단하기 위하여 유역 DEM자료의 고도 값보다 큰 홍수위 값을 갖는 부분만 GIS상에 도시하였고, 이를 침수심 범위별로 색깔을 다르게 표시하여 조성 전과 후의 침수심 및 홍수범람양상을 비교하였다.

3.3 인공습지 조성에 따른 수질개선 효과 분석

수질관측자료는 물환경정보시스템에서 제공되는 총 10개의 수질측정소(본류9지점, 곤지암천1지점)의 2009년 1월부터 2013년 12월까지의 월 자료의 평균 값을 사용하였다. 하수종말 처리시설은 유역 내에 총11개(용인, 경안, 광주, 곤지암, 매산, 광동리, 남한산성, 도척, 오폐, 동부, 모현)가 분포하고 있으며 환경부에서 제공하는 방류수질 및 방류하수량 값을 사용하였다.

점오염원의 경우 인구에 의한 생활하수, 가축 등의 사육으로 발생하는 축산폐수, 공장 등 산업활동에 의한 산업폐수 등이 이 범주에 속하며, 비점오염원은 주로 농경지 및 산림지역과 같은 토지이용특성, 대기 중의 먼지에 의하여 유입된다. 본 논문에서는 2011년도 경안천 하천기본계획 수립시 조사된 오염원 자료를 사용하였다.

2011년 경안천 하천기본계획보고서의 생활계, 축산계, 산업계, 토지계, 양식계 오염원으로부터 산정된 배출부하량 자료를 이용하였으며, 중규모 유역으로 나뉘어 있는 부하량 값을 본 논문의 소유역에 맞게 정리하였다. 유역의 크기가 다른 경우 유역의 면적비에 따라 배출부하량을 산정하였다.

QUAL2E모형은 모형에 GIS를 통해 하천도 및 유역도, 수질 측정지점 등을 이용하여 모식도를 구축하였다. 지류는 수질 측정지점이 포함된 곤지암천 지류만을 고려하였다. 수리적 특성이 비슷한 구간인 대구간(Reach)을 소유역 경계에서 나누어주

었고, 각 Reach의 계산 소단위인 소구간(Element)는 약 500m의 동일한 간격으로 나누었다.

경안천 본류와 곤지암천 지류를 나타낸 모식도는 본류의 경우 총 9개 Reach, 94개 Element로 구성되며, 곤지암천 지류의 경우 총 3개의 Reach, 46개의 Element로 구성된다. 하수종말 처리장과 곤지암천을 제외한 지류는 각 소구간의 점오염원으로 인식되며, 수질측정지점의 위치한 소구간을 모식도 상에 표시하였다. 곤지암천 지류의 경우 한 개의 수질측정지점이 위치하고 있으며, 경안천 본류의 7번 대구간(reach7)의 74번 소구간(element 74)에서 합류된다(Fig. 2).

구축된 모식도를 기준으로 하여 유량 및 배출부하량, 수리계수 등을 산정하였다. 유량은 비유량법에 의해 유역 배분하여 사용하고, Reach별 수리계수의 경우 2011년도 경안천 하천기본계획 보고서의 자료를 이용하였다. 선정된 Reach에 포함된 단면들 중 Reach를 대표할 수 있는 대표단면을 선정하여 Reach에서의 유량(Q)의 변화에 따른 속도(V)의 관계식($V=aQ^b$), 유량(Q)의 변화에 따른 수심(H)의 관계식($H=cQ^d$)을 도출한다. 여기서 각 관계식에서의 a(속도계수), b(속도지수), c(깊이계수), d(깊이지수)가 각 Reach을 대표하는 수리계수이다.

QUAL2E 모형의 모의를 위해서는 텍스트 형식의 입력파일을 작성하여야 한다. 위에서 구성된 자료는 모형에서 인식할 수 있도록 ‘표제자료’를 비롯한 ‘제어자료’, ‘대구간 구분 및 길이 자료’, ‘유량증가자료’, ‘계산소구간 자료’, ‘수리자료’, ‘비율 및 계수자료’, ‘초기조건 자료’, ‘중분유입자료’, ‘하천합류점 자료’, ‘수원자료’, ‘점 오염원 및 취수자료’, ‘기상자료’, ‘기타’ 등 입력자료 주제에 맞는 유형으로 필수나 선택적으로 입력된다(국립환경과학원, 2006). 모형을 실행하고 입력파일을 입력하면 출력자료가 마찬가지로 텍스트 형식으로 저장된다.

모의결과가 실측치와 큰 차이를 보이는 경우, 모의결과가 실측치의 오차범위에 들어올 때까지 모형의 반응계수를 조정하여 모형을 보정한다. 이때 반응계수를 범위 내에서 조정하며 결과를 계속 비교하는 시행착오법을 이용하였으며, 오차범위

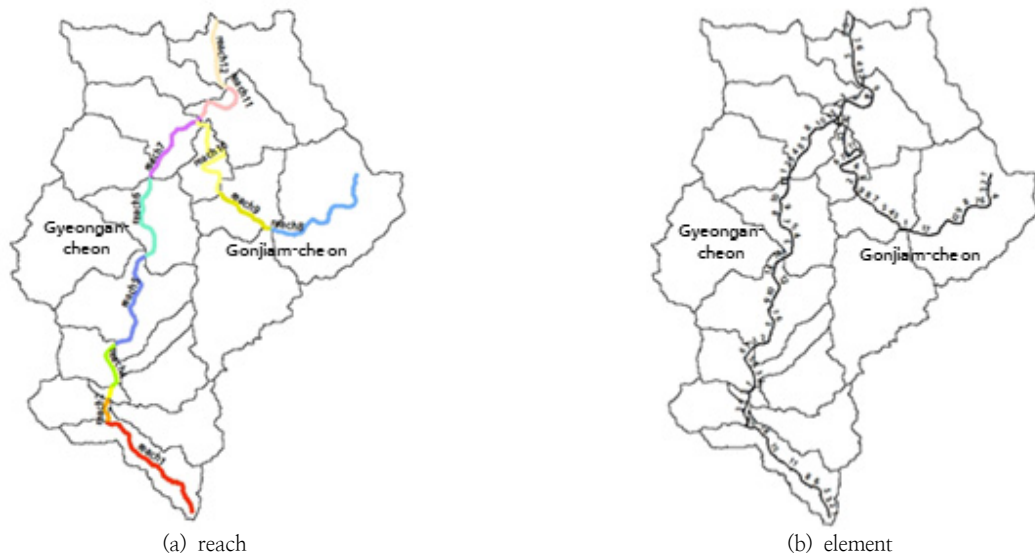


Fig. 2. Schematic Diagram of QUAL2E Model Construction.

Table 1. Water pollution reduction efficiency by facility

Classification		Reduction efficiency(%)		
		BOD	T-N	T-P
Storage type	Detention Pond	34	28	36
	Underground storage facilities	25	24	20
	Artificial wetland	53	37	60
Infiltration type	Permeable pavement	75	83	65
	Infiltration basins	69	58	69
	Infiltration trench	77	62	73
	Infiltration chamber / Infiltration pipes / Infiltration channel	53	72	46
Filtration type	Bioslope	44	42	42
	Bioswale	34	45	51
	Sand filtration / Manufactured filtering system	50	46	54
Bio-retention type	Planter box	75	73	72
	Rain garden / Flow through plant / Tree box filter	54	49	65
Vortex type facilities		16	11	22
screen type facilities		15	9	19
Facility type (Ultra Rapid Coagulation Process-Precipitation method)		80	20	85

는 기술지침에 명시된 20%이내가 되도록 하였다.

인공습지의 수질개선 효과를 확인하기 위하여 위의 1절에 설계된 인공습지와 동일한 인공습지 적용한다고 가정하였다. 인공습지 입지는 경안천 본류의 상류에서 32~34km 내려온 구간이며, Reach7의 element 32~34에 해당한다.

인공습지 처리효율의 경우 실측자료를 사용하는 것이 좋으나 국내에서는 인공습지의 처리효율의 실측자료 및 처리효율의 산정에 관한 자료가 거의 없는 편이다. 본 연구에서는 수질 오염총량관리기술지침(National Institute of Environmental Research, 2014)에서 제시된 비점오염저감시설 삭감부하량 산정 방법과 저감효율을 토대로 인공습지 시나리오 적용 시의 배출부하량을 산정하였다.

다음 Table 1은 시설별 수질오염 저감효율이며, 이 중 저류형 인공습지의 BOD, T-N, T-P 저감효율을 사용하였다. 인공습지 위치보다 상류에 위치한 소구역들의 배출부하량에 저감효율을 적용하였다.

3.4 다차원법을 이용한 홍수피해 저감 편익 산정

홍수피해액 산정을 위해 다차원 홍수피해액 산정방법인 MD-FDA방법을 적용하였다. MD-FDA는 자산조사가 전체 되는 일종의 원단위 방법이지만 침수지역의 지형적 특성을 고려하고 침수면적과 침수심에 따라 피해 정도와 피해율을 달리 적용할 수 있는 분포형 홍수피해 산정방법이다. 행정구역 내에 주거, 산업, 농업 등 지역특성요소의 총 자산가치를 실제 침수된 부분에 대한 자산가치로 환산하고, 지역특성 요소별로 공간적 개체들의 위치정보를 침수심에 따라 종합하여 전체에 대한 비율을 이용하여 침수편입을 산정한다.

인공습지 조성 전과 후의 홍수 빈도별 홍수피해액을 산정하여 그 차이값으로 피해경감액을 계산한다. 각 빈도의 연평균초과확률을 구하고 빈도별 피해경감액에 곱하여 연평균 피해경

감액을 산정한다.

3.5 대체비용법을 이용한 수질개선 편익 산정

인공습지의 경우 오염물질 제거하여 수질을 개선하는 방식이므로 하수처리시설에 의한 수질개선을 대체시설로 선정하여 대체비용법을 적용하였다. 대체비용법은 수질의 가치를 간접적으로 동일한 효과를 가지는 대체시설의 비용을 추정함으로써 객관적인 편익을 산정할 수 있다. 먼저 수질 농도 변화에 따른 수질개선 효과 분석에 각 빈도별 유량을 곱하여 오염물질 저감량을 산정하였다. 같은 저감량을 저감하기 위해 필요한 대체 하수처리시설의 필요시설용량을 산정하기 위해 공공하수처리시설 운영현황(2011)로부터 경안천 11개 하수처리시설의 하수처리량과 시설용량의 관계식을 도출하였다. 또한 하수처리장 건설비 및 유지관리비와 시설용량의 관계식을 도출하여 필요시설용량에 대한 비용 산정하였다. 하수관거 건설비의 경우 국가하수도종합계획(2007)에 따라 하수처리장 건설비의 73.48%로 산정하였다.

인공습지의 내용연수를 50년으로 가정하고 하수처리시설의 사업비 및 운영관리비를 현금화하여 인공습지의 수질개선 편익을 산정하였다. 수자원부문 예비타당성조사 표준지침(5판)(2008)에 따라 운영 30년 동안 5.5%, 이후 20년 동안 4.5% 할인율을 적용하였다. 또한 하수처리시설의 내용연수는 20년이며 10년 지난 후 대수선비로 총 공사비의 43.35%가 재투입되는 것으로 가정하였다.

4. 연구결과 또는 분석결과

4.1 홍수저감 효과 분석결과

HEC-RAS모형을 이용하여 빈도별 홍수량 값을 이용하여 하천단면 No.64~69구간의 우안에 인공습지 조성 전·후 하천

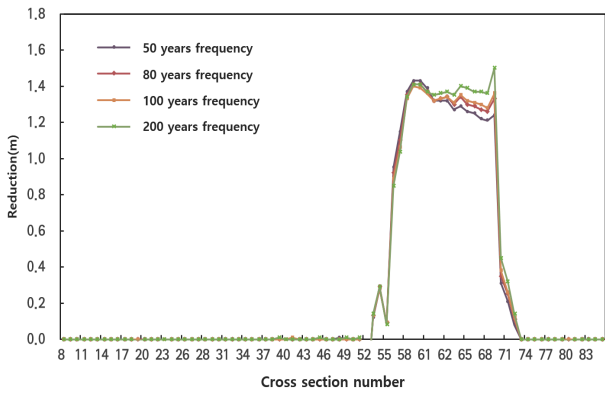


Fig. 3. Reduction of Flood Levels by Artificial Wetlands.

Table 2. Reduction of flood levels by artificial wetlands (Units : m)

Frequency	50	80	100	200
Average	0.25	0.26	0.26	0.26
Maximum	1.43	1.41	1.40	1.50

횡단면별 홍수위를 분석하였다. Fig. 3 및 Table 2를 보면 인공습지 조성 전과 후의 홍수위를 비교한 결과 인공습지 조성 후 평균 0.25~0.26m, 최대 1.4~1.5m 감소함을 보였다.

침수심 0.5m이상인 면적을 범람면적으로 보고 각 빈도별로 인공습지 조성 전과 후의 범람면적을 비교한 결과 80년 빈도일 때 225,000m²로 가장 많이 감소하였고, 50년 빈도, 100년 빈도, 150년 빈도, 200년 빈도 홍수량에 대해서도 범람면적이 각각 202,000m², 219,000m², 183,000m², 168,000m² 감소함을 확인하였다. 또한 침수깊이별로 범람면적을 나누어보면 범람된 부분에서 침수심이 알아짐을 확인할 수 있었다(Fig. 4).

Table 3은 MD-FDA를 이용하여 자산가치를 산정 후 인공습지 조성 전·후의 홍수피해액을 산정한 결과이다. 결과를 보면 인공습지 조성을 통해 홍수피해액이 9.1%~11.5% 가량 감소함을 보였다.

Table 4와 같이 빈도별 홍수피해 경감액에 대해 빈도별 발생확률을 곱하여 연평균 피해경감액을 산정하였고 할인율 및 GDP 디플레이터 값을 고려하여 편익을 산정하였다. 자산가치

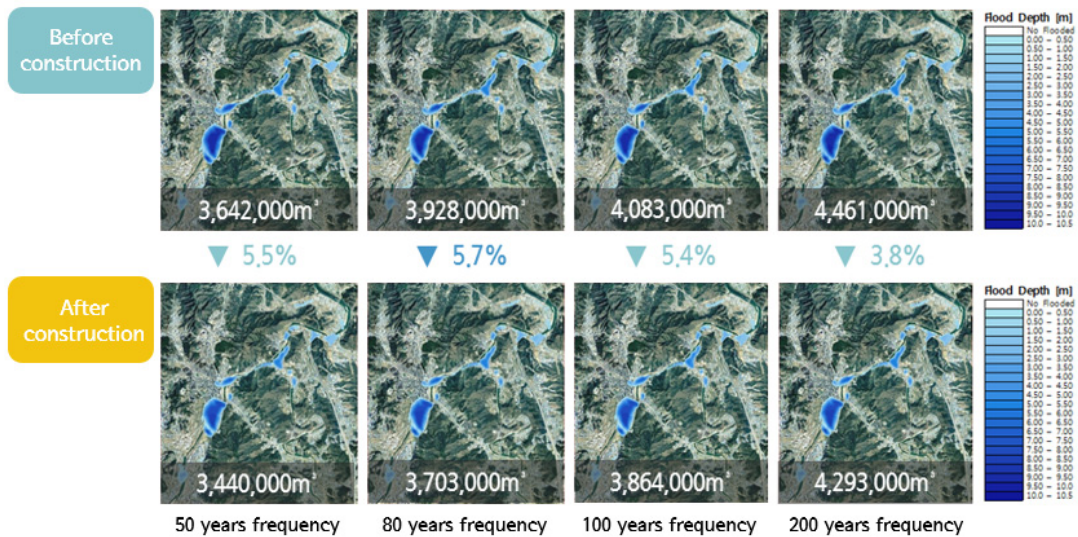


Fig. 4. Comparison of Inundation Map Before and After construction of Artificial Wetlands

Table 3. Flood damage before and after construction of artificial wetland

(Units : one thousand won)

Before construction of artificial wetlands						
Frequency (year)	Human damage	Residential property damage	Agricultural property damage	Industrial property damage	Public facilities damage	Total damage cost
50	76,602	1,582,307	8,5443	118,200,067	202,925,817	322,793,339
80	82,730	1,639,202	9,171	123,543,976	212,075,842	337,350,923
100	85,028	1,680,888	9,569	127,665,881	219,129,638	348,571,005
200	94,220	1,825,743	10,392	137,567,694	236,150,089	375,648,140
After construction of artificial wetlands						
Frequency (year)	Human damage	Residential property damage	Agricultural property damage	Industrial property damage	Public facilities damage	Total damage cost
50	76,602	1,337,047	8,309	106,911,714	183,387,478	291,721,151
80	80,432	1,447,577	8,925	112,295,134	192,695,275	306,527,345
100	81,964	1,463,168	9,320	11,525,948	197,743,960	314,557,896
200	88,858	1,663,037	10,142	122,145,441	212,075,842	335,983,321

Table 4. Estimating the benefit of reducing flood damage

(Units : one million won)

Frequency (year)	Annual average probability of exceeding	Before construction	After construction	Damage reduction cost	Interval mean damage reduction cost	Interval probability	Annual average damage reduction cost	Cumulative Annual Damage Reduction cost
50	0.0200	322,793	291,721	31,072				
80	0.0125	337,350	306,527	30,823	30,948	0.0075	232	232
100	0.0100	348,571	314,557	34,014	32,419	0.0025	81	313
200	0.0050	375,648	335,983	39,665	40,986	0.0017	68	509

분석 기준년도는 2015년 말 기준이며, GDP 디플레이터는 2015년 4/4분기 기준 102.6%, 할인율은 운영 후 30년간 5.5%, 이후 20년간 4.5%를 적용하였다. 인공습지 조성에 따른 홍수피해 경감의 총 편익은 19,983백만원이다.

4.2 수질개선 효과 분석결과

인공습지 조성 시나리오를 적용하여 수질모형을 모의하여 인공습지 조성 전과 후의 BOD, T-N, T-P 항목의 모의 결과를 비교한 결과는 다음 Fig. 5와 같다. 실선이 기존 시나리오의 모의 결과이고 점선이 인공습지 조성 후의 모의 결과이다. 가로축은 모의 구간 상류단으로부터의 거리이다. BOD, T-N, T-P 세 가지 수질항목 그래프 모두에서 인공습지 조성 위치인 30km 부근 이후부터 기존 모의결과 대비 농도 값이 감소함을 확인할

수 있었다. 또한 전 구간에서의 수질오염농도 저감량을 알아본 결과, BOD 0.4mg/L, T-N 0.4mg/L, T-P 0.013mg/L가 저감되었다. 저감율로 봤을 때는 BOD, T-N, T-P가 각각 조성 전 농도 대비 13.9%, 8.4%, 10% 저감되었다.

평균 저감농도에 빈도별 유량을 곱하여 저감량(g/sec)단위로 환산하였다. 해당 저감량을 저감하기 위해 필요한 대체하수처리 시설의 필요시설용량을 산정하기 위해서는 경안천 11개 하수처리 시설의 하수처리량과 시설용량을 통해 도출한 관계식을 적용하였다. 산정된 저감량 및 필요시설용량은 다음 Table 5와 같다.

건설비 및 유지관리비와 시설용량의 관계식을 도출하여 BOD 저감량 기준으로 필요시설용량에 대한 비용을 다음 Table 6과 같이 산정하였다. 총 건설비 및 연간유지관리비를 내용연수를 50년으로 가정하고 현재기준으로 하수처리시설의

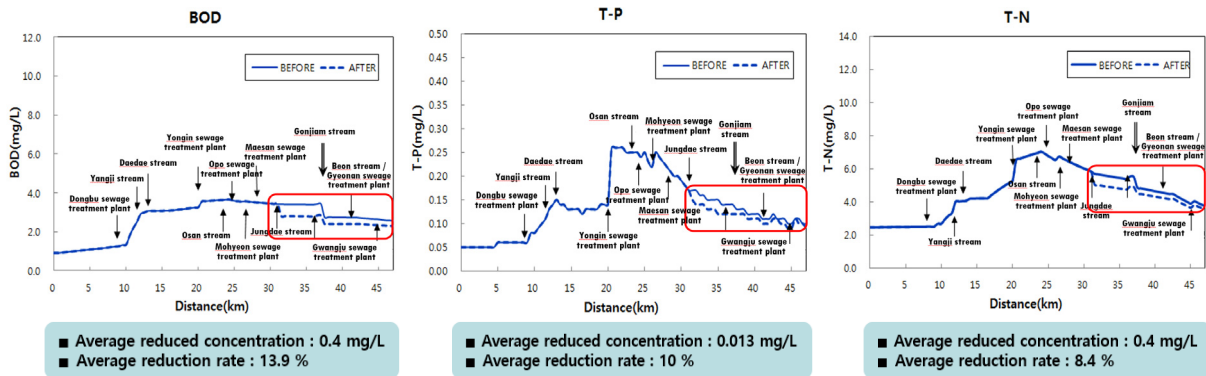


Fig. 5. Comparison of Water Quality Simulation Results Before and After construction of Artificial Wetlands.

Table 5. Reduction of Pollutants and Capacity of Alternative Facilities by frequency

Classification	Reduction(g/sec)				Required facility capacity (1,000 m ³ /day)			
	50	80	100	200	50	80	100	200
BOD	1,352.0	1,464.0	1,524.0	1,696.0	671.5	727.0	756.7	841.9
T-N	1,352.0	1,464.0	1,524.0	1,696.0	4,464.5	4,834.3	5,032.4	5,600.3
T-P	43.9	47.6	49.5	55.1	1,109.4	1,202.9	1,250.9	1,392.3

Table 6. Reduction of Pollutants and Capacity of Alternative Facilities by frequency

(Units : one million won)

Classification	Sewage Treatment Plant Construction Cost	Sewage Pipe Construction Cost	Total construction cost	Annual maintenance fee
50	5,883,129	4,322,923	10,206,052	474,016
80	6,369,514	4,680,319	11,049,833	513,281
100	6,630,078	4,871,781	11,501,859	534,316
200	7,377,026	5,420,639	12,797,666	594,616

Table 7. Estimation of Benefits by Frequency

(Units : one million won)

Classification	Number of facilities required (BOD standard)	Total construction cost	Annual maintenance fee	Total benefit
50	42	1,551,115	71,261	4,124,492
80	45	1,677,745	77,154	4,462,520
100	47	1,745,582	80,311	4,643,606
200	53	1,940,049	89,360	5,162,719

편익을 다음 Table 7과 같이 산정하였다. 운영 30년 동안 5.5%, 이후 20년 동안 4.5% 할인율을 적용하여 현재기준으로 환산하였다. 각 빈도별 발생확률을 고려하여 연간 발생하는 총 편익을 계산하면 인공습지 조성에 따른 수질개선 편익은 67,989백만원이다.

5. 결과 해석 및 결론

최근 다양한 목적으로 인공습지 조성이 이루어지고 있는데, 보통은 한가지 기능의 목적을 가지고 인공습지를 조성하는 경우가 대부분이다. 그러나 인공습지의 기능을 보다 정확히 이해하기 위해서는 여러 가지 기능을 동시에 분석하여 인공습지 조성 효과를 보다 정확하게 추정할 필요가 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 우선적으로 인공습지의 가장 대표적인 기능이라 할 수 있는 홍수제어 및 수질정화 기능의 통합적인 분석을 수행하였다.

인공습지 조성 전과 후의 홍수위를 비교한 결과, 인공습지 조성 후에 빈도별 홍수위가 평균 0.25~0.26m, 최대 1.4~1.5m 감소하였고, 범람면적은 168,000~225,000m² 가 감소하였다. 또한 인공습지 조성 전과 후의 수질을 분석한 결과, 본류 구간 전체에서 수질항목별로 BOD 0.4mg/L, T-N 0.4mg/L, T-P 0.013mg/L가 저감됨을 확인하였다. 또한 인공습지 조성 전과 후의 수질을 분석한 결과, 본류 구간 전체에서 수질항목별 총 저감량은 BOD 0.4mg/L, T-N 0.4mg/L, T-P 0.013mg/L가 저감되어, 조성 전 농도 대비 각각 13.9%, 8.4%, 10%가 저감됨을 확인하였다.

분석 결과에 대해 MD-FDA를 통해 홍수피해액을 산정하였고 대체비용법을 통하여 동일한 수질개선 효과를 갖는 하수처리시설의 하수처리비 및 운영관리비를 통해 수질개선 편익을 산정하였다. 인공습지 조성에 따른 홍수피해 경감으로 19,983백만원, 수질 개선 효과로 67,989백만원으로 총 87,972백만원의 편익이 산정되었다.

본 연구를 통해 인공습지의 홍수저감 효과뿐만 아니라 수질개선 효과를 확인하였으며 정량적인 분석방법을 통해 두 가지 기능에 대한 효과를 분석하여 보았다. 또한 산정된 홍수저감 및 수질개선 효과를 경제적 가치로 환산하여 보다 객관적인 수치로 정량화하였다.

추후 생태적 기능, 레크레이션 기능 등에 따른 기타 편익 산정 방법론 조사를 통해 각 기능의 편익을 추가한다면 인공습지 조성에 따른 편익을 종합적으로 고려할 수 있을 것이다. 또한 인공습지 조성의 소요사업비 및 유지관리비를 산정하여 인

공습지 조성에 대한 경제성분석을 한다면, 실제 인공습지 조성 사업 시 사업의 타당성을 평가하는 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2018년도 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었음. (INHA-57822)

References

- Acreman, M. and Holden, J.(2013), How Wetlands Affect Floods, Wetlands, Vol. 33, pp.773-786.
- Ahn, T.J, Kang, I.W, Baek, C.W(2008), Development of Decision Making Model for Optimal Location of Washland based on Flood Control Effect estimated by Hydrologic Approach, Journal of Korea Water Resources Association, Vol. 41, No. 7, pp.725-735. <http://dx.doi.org/10.3741/JKWRA.2008.41.7.725>
- Barbier, E.B., Mike Acreman, M., and Knowler, D. (1997) Economic Valuation of Wetlands: A Guide for Policy Makers and Planners. Gland, Switzerland: Ramsar Convention Bureau.
- Brett R. Gelso. John A. Fox. Jeffrey M. Peterson (2008) Farmers' Perceived Costs of Wetlands: Effects of Wetland Size, Hydration, and Dispersion. American Journal of Agricultural Economics, ASCE, Vol. 90, No. 1, pp. 172-185.
- Bullock, A., Acreman, M.C.(2003), The role of wetlands in the hydrological cycle, Hydrology and Earth System Sciences, Vol.7, pp.358-389.
- Choi, S.H, Ahn, Y, Kim, H.I(2006), Evaluation of water purification in the constructed wetland, Journal of Korean Society on Water Environment, Korean society of water & wastewater and Korean Society on Water Environment 2006 Joint Symposium, pp.349-356.
- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R.V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutton, P. and van den Belt M. (1997) The value of the world's ecosystem services and natural capital, Nature, No. 387, pp 253-260.

- Cowan, W.L.(1956), Estimating hydraulic roughness coefficients. *Agricultural Engineering*, Vol.37, pp.473–475.
- Emerton, L., Bos, E.(2004), Value. Counting ecosystems as an economic part of water, IUCN, Gland.
- Fischer, B., Turner, R.K., Morling, P.(2009), Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*, Vol. 68, pp.643–653.
- Frank Lupi, Michael D. Kaplowitz, and Jhon P. Hoehn (2005) The economics of wetland ecosystem restoration and mitigation: the economic equivalency of drained and restored wetlands in michigan. *American Journal of Agricultural Economics*, *American Agricultural Economics Association*, Vol. 84, No. 5, pp.1355–1361.
- Galanopoulos, C., Sazakli, E., Leotsinidis, M., Lyberatos G.(2013), A pilot-scale study for modeling a free water surface constructed wetlands wastewater treatment system, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Vol. 1, pp.642–651.
- Ham, J.H., Yoon, C.G., Kim, H.J., Kim, H.C.(2010), Modeling the effects of constructed wetland on nonpoint source pollution control and reservoir water quality improvement, *Journal of Environmental sciences*, Vol. 22, No. 6, pp.834–839.
- Han, KY, Kim, JS, Baek, JG, Park HS(2005), Flood Mitigation Analysis by Flood Plain Storage Basin in River, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Civil EXPO 2005, pp.234–237.
- Jeong, YW, Kim, YD, Park, JH, Yoon, BM(2009), The Reducing Effects Analysis of Floods through Washland Construction in Hwapocheon Basin, *Journal of Korea Water Resources Association*, 2009 Korea Water Resources Association Annual Conference, pp.1489–1493.
- Jo, EH(2012), Estimating Benefit of Water Quality Improvement by Raising Dam Project with Replacement Cost Method, Master's Thesis, Inha University, Incheon, Korea. [Korea Literature]
- Kim, DG, Kyoung, MS, Choi, KS, Kim, HS(2008), Analysis of Flood Level Reduction and Instream Flow by Washland Construction, *Journal of Korea Water Resources Association*, 2008 Korea Water Resources Association Annual Conference, pp.362–366.
- Kim, HS, Kyoung, MS, Kim, SD, Kim, JG, Kim, DG(2007), Review of Washland to improve ecological Flood control of Upo Wetland, *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 40, No. 4, pp.14–19.
- Kim, JS, Yoon, CG, Son, YK, Haam, JH(2010), Water quality prediction for constructed wetland using EFDC, *Journal of Korean Society on Water Environment*, Korean society of water & wastewater and Korean Society on Water Environment 2010 Joint Symposium, pp.115–116.
- Korea Water Resources Corporation(1998), Development of Economic Analysis Model for Water Resources Development : A Study on the Benefit Estimation of Multi-purpose Dam.[Korean Literature]
- Kwak, JW, Kim, DG, Yin, SH, Kim, HS(2008), Washland Constructions and Effectiveness Analysis of Flood Control using MD-FDA, *Journal of Wetlands Research*, Vol. 10, No. 2, pp.69–78.
- Lee, SS, Kim, HS, Jeong, SM(2002), Evaluations of Recreational and Aesthetical Values for the Cut River Considered as a Wetland, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 2, No. 1, pp.127–134.
- Maltby, E.(1991), Wetland management goals: wise use and conservation, *Landscape and Urban Planning*, Vol. 20, pp.9–18.
- Maltby, E., Acreman, M.C.(2011), Ecosystem Services of Wetlands: pathfinder for a new paradigm, *Hydrological Sciences Journal*, Vol.56, No.8, pp.1–19.
- Maltby, E., Acreman, M.C., Blackwell, M., Everard, M., Morris, J.(2013), The challenges and implications of linking wetland science to policy – experience from the UK National Ecosystem Assessment, *Ecological Engineering*, pp.2414.
- Maltby, E., Hogan, D.V., McInnes, R.J.(1996), Functional analysis of European wetland ecosystems, Report to the European Commission, EC DGXII STEP-CT90-0084.
- Ministry of Environment(2012), Results of 2011 Public Sewage Treatment Facility Operation Management.[Korean Literature]
- Ministry of Environment(2014), Guidelines for Constructing and Maintaining Artificial Wetlands.[Korean Literature]
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport(1998), Master plan in Gyeongancheon Stream(supplementation).[Korean Literature]
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2008), Improving Measures of Feasibility Study for Water Resources Projects.[Korean Literature]
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2011), Master plan in Gyeongancheon Stream(revision).[Korean Literature]
- Mitsch, W.J. and Gosselink, J.G.(2007), *Wetlands*, 4th Edition, Wiley.
- National Institute of Environmental Research(2006), Easy-to-know hydraulics and water quality model.[Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research(2014), Technical Guidelines for Total Water Pollution control.[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, *Journal of Wetlands Research*, Vol. 14, No. 4, pp.479–488.

- Singh, G., Kandasamy, J., Shon H.K., Cho, J.(2011), Measuring treatment effectiveness of urban wetland using hybrid water quality — Artificial neural network (ANN) model, *Desalination and Water Treatment*, Vol. 32, pp.284–290.
- Stephen Farber (1996) WELFARE LOSS OF WETLANDS DISINTEGRATION:A LOUISIANA STUDY. *Contemporary Economic Policy*, Western Economic Association International, Vol. 14, No. 1, pp. 92–106.
- Tony Prato, Donald Hey (2006) ECONOMIC ANALYSIS OF WETLAND RESTORATION ALONG THE ILLINOIS RIVER, *Journal of the American Water Resources Association*, ASCE, Vol. 42. No. 1, pp. 126–131.
- Yeo, KD, Yi, CS, Kim, GH, Shim, MP(2009), Estimation of Water Quality Improvement Benefit Using Replacement Cost Approach, *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 42, No. 4, pp. 343–353. <http://dx.doi.org/10.3741/JKWRA.2009.42.4.343>
- Yoo, BK, Kwak, JW, Kim, HS. Kim JG(2010), Effectiveness Analysis of Constructed Washland : (2) Economic Valuation, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 30, No. 1, pp.23–31.
- Yoon, JH, Seo, DI, Seo, MJ, Lee, YS, Jung, HJ(2008), Design of Constructed Wetland for Water Quality Improvement of Tandong-Cheon, Daejeon, *Journal of Korean Society on Water Environment*, Korean society of water & wastewater and Korean Society on Water Environment 2008 Joint Symposium, pp.337–338.