

기후변화에 따른 도시하천의 야생조류 서식환경 변화 연구[†]

- 탄천 생태·경관보전지역을 사례로 -

A Study on Changes in Habitat Environment of Wild Birds in Urban Rivers according to Climate Change[†]
- A Case Study of Tancheon Ecological and Landscape Conservation Area -

한정현*, 한봉호**, 곽정인***

*서울시립대학교 조경학과 박사과정, **서울시립대학교 조경학과 교수, *** (재)환경생태연구재단 연구원

Han, Jeong-Hyeon*, Han, Bong-Ho**, Kwak, Jeong-In***

*Ph.D. Candidate, Dept. of Landscape Architecture, University of Seoul

**Professor, Dept. of Landscape Architecture, University of Seoul

***Researcher, Environmental Ecology Research Foundation

Received: January 24, 2024

Revised: February 12, 2024 (1st)
February 28, 2024 (2nd)

Accepted: March 04, 2024
3인익명 심사필

Corresponding author :

Bong-Ho Han
Professor,
Dept. of Landscape Architecture,
University of Seoul,
Seoul 02504, Korea
Tel.: +82-2-6490-5521
E-mail: hanho87@uos.ac.kr

국문초록

본 연구의 목적은 생태적 기능이 크게 요구되는 보호지역의 도시하천에서 기후변화로 나타나는 야생조류 서식환경 변화를 알아보고자 하였다. 앞으로 도시하천 생태계를 보호하고 생물다양성을 위한 지속가능한 도시하천의 건강성을 유지할 수 있는 관리지표로 활용되고자 하였다. 대상으로 선정된 탄천 생태·경관보전지역은 기후변화의 영향을 받고 있었다. 우리나라 사계절은 뚜렷한 온대성기후이나 서울 연평균기온은 40년간 2.4~2.8°C 상승하였다. 겨울철 기온이 점차 상승하는 경향이였다. 6-8월에 집중되었던 강수량은 현재는 국지성 집중호우와 여러 달의 균일한 강수 패턴으로 변하고 있었다. 기후변화는 불규칙적이고 비예측적으로 불확실한 특성을 보여주고 있다. 불확실성을 가진 기후변화는 도시 하천생태계에 다양한 영향으로 나타났다. 수면과 퇴적지 면적 감소는 하천 형태 변화와 육역화로 진행되었다. 식물은 교란과 식생 단순화로 나타났다. 국가 기후변화생물 지표종 출현, 외래목본식물 발달, 건조지성 자생초본식물종 변화와 습윤지성 식생이 발달되었다. 야생조류는 겨울철 여름철새의 출현, 철새의 텃새화로 나타났다. 또한 철새의 종 변화와 개체수 감소도 일어났다. 불규칙성과 비예측적 특성의 기온과 강수량 변동은 하천생태계를 연결하는 수문환경, 식물생태, 야생조류에 직·간접적 영향을 주고 있음이 판단되었다. 본 연구의 결과는 기후변화가 야생조류 서식환경에 어떤 영향을 주는지에 대해 분석하여 도시 내 환경·생태적 기능이 작동할 수 있는 하천 생태·경관보전지역 관리지표로 활용되고자 하였다. 향후 도시하천의 건강성 향상과 생물 다양성 기반조성을 위한 생태계서비스 차원의 기초연구로 참고할 가치가 높을 것으로 판단되었다.

주제어: 기온상승, 겨울철새, 강수량 변동, 도시환경, 생물다양성

ABSTRACT

The purpose of this study was to find the changes in the habitat of wild birds caused by climate change in urban rivers and protected areas that greatly require ecological functions. In the future, this study can be used as a management index to protect the urban river ecosystem and maintain the health of sustainable urban rivers, thereby ensuring biodiversity. The Tancheon Ecological and Landscape Conservation Area, selected as a target site, has been affected by climate change. The four seasons of Korea have a distinct temperate climate, but the average annual temperature in Seoul has risen by 2.4~2.8°C over the last 40 years. Winter temperatures tended to gradually increase. Precipitation, which was concentrated from June to August, is now changing into localized torrential rain and a uniform precipitation pattern of several months. Climate change causes irregular and unforeseen features. Climate change has been shown to have various effects on urban river ecosystems. The decrease in the area of water surface and sedimentary land impacted river shape change and has led to large-scale terrestrialization. Plants showed disturbance, and the vegetation was simplified. The emergence of national climate change indicator species, the development of foreign herbaceous plants, the change of dry land native herbaceous species, and wet intelligence vegetation were developed. Wild birds appeared in the territory of winter-summer migratory. In addition, species change and the populations of migratory birds also occurred. It was judged that fluctuations in temperature and precipitation and

[†]본 논문은 주저자의 2022년도 서울 시립대학교 대학원 석사학위논문 / 학술대회 논문 일부를 수정·보완하여 발전시켰습니다.

non-predictive characteristics affect the hydrological environment, plant ecology, and wild birds connecting with the river ecosystem. The results of this study were to analyze how climate change affects the habitat of wild birds and to develop a management index for river ecological and landscape conservation areas where environmental and ecological functions in cities operate. This study can serve as a basic study at the level of ecosystem services to improve the health of urban rivers and create a foundation for biodiversity.

Keywords: Temperature Rise, Winter Bird, Precipitation Variation, Urban Environment, Biodiversity

1. 서론

IPCC 6차 평가보고서에 따르면 지구의 기후시스템이 변화하고 있고 전례 없는 속도로 온난화가 진행되어 극한 기후 현상이 증가하고 있다고 발표하였다. 기후변화로 인한 현상은 세계 곳곳에서 나타나 인류에 큰 피해를 주고 있다. 북유럽은 폭풍과 우박이 떨어지고 남유럽은 폭염과 산불 재앙이 일어나고 있다. 이탈리아와 인도 등 아시아 지역은 홍수와 폭염으로 전 인류가 기후변화를 실체적으로 체감하고 있다. 아이치 타겟 이후 쿤밍-몬트리올 글로벌 생물다양성 프레임워크(GBF) 실천목표에서도 기후변화 영향을 최소화하고자 생물다양성을 위한 전 지구적 전략계획을 수립하였다. 우리나라도 기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장기본법을 마련하고 기후위기 적응 대책을 분야별로 수립하였다. 또한 국가 지속가능발전목표(K-SDGs)를 실현코자 탄소중립 그린도시를 조성하고 온실가스 감축과 기후적응을 위한 순환경제사회로 전환하고 있다.

우리가 살고 있는 도시의 하천은 인간생활에 필수적인 공간이며, 인간을 포함한 생물의 생활공간이다. 또한 하천 생태계를 구성하는 이동통로이고 도시생태계 순환의 공간(박국숙, 2015)으로 만날 수 있는 생태적 공간이다. 도시 하천은 도시열섬 현상을 완화시켜 미기후 조절기능과 생물 서식공간으로서의 생태적 기능, 산책로 제공과 같은 레크리에이션 기능 등 다양한 혜택을 제공하고(신동훈 등, 2003) 이수, 치수의 기능뿐 아니라 생태적 기능을 수행한다. 우리나라의 하천은 기후 특성상 여름철에 발생하는 홍수의 피해가 크고 가을, 겨울, 봄에는 유량이 극도로 감소하기 때문에 도시 내 증소하천은 갈수량과 홍수량을 모두 소통시킬 수 있는 특이한 단면구조를 가지고 있다(이민욱, 2007). 그러나 집중호우가 쏟아지면 도심 침수로 이어져 교통통제와 다양한 피해를 주고 있다. 국내에도 기후변화에 의한 이상강우에 따른 홍수 및 태풍 피해, 가뭄, 이상기온 등이 자주 발생하여 인간의 활동뿐만 아니라 생태계에도 많은 영향을 미치고 있다(박명옥, 2012). 그 결과 도시하천은 생물 서식, 수질 자정, 친수성 등 귀중한 환경적 기능을 상실하게 되었다(조현길과 안태원, 2006). 기후변화에 따른 연평균 기온의 상승과 강수량의 증가로 식물계절의 시기가 변하였고, 식물과 동물 모두 분포와 종조성의 변화가 나타났다(환경부, 2006). 생태계와 서식지 그리고 생물 자연 특성의 분포를 조정하는 자연 속성이 근본적으로 변화할 가능성도 있었다. 많은 보호지역이 영향을 받을 것이고, 생물종과 생태계가 유실될 것이다(IUCN WCPA, 2008).

야생조류 서식환경은 일반적으로 물, 먹이, 은신처, 인간의 영향을 받는다. 그러나, 서식환경이 도시하천이나 철새 도래지와 같은 특수한 환경은 기후 및 기상에도 영향을 받을 수 있다. 기온상승과 강수패턴의 변화는 물길 변화, 수면 면적 감소, 퇴적형태 변화(김수진, 2011; Defra, 2012)와 높아지는 하상계수(손태석, 2011)가 예측되었다. 식생은 종 구성 변화와 서식지 교란, 생태계 야생교란생물의 교란종 증가, 남부수종 출현, 도시환경수종 발생(곽정인, 2011; Defra, 2012; 김혜원, 2020) 등으로 예측되었다. 야생생물은 종수와 개체수의 감소, 철새 종 구성의 변화, 생물종 계절성 변화(IUCN WCPA, 2008; Defra, 2012; IPCC, 2014; 홍승범 등, 2019)가 예측되었다. 선행연구를 통해 고찰한 기후변화는 야생조류 서식환경에 직·간접적 영향을 주고 있었다. 지금까지 대부분 기후변화 예측 연구 중점으로 박새, 구상나무와 같은 단일 생물종에 대한 연구가 중점으로 이루어졌으나 야생조류 서식환경의 하천생태계 전반에 걸친 변화 양상을 도출한 적은 없었다. 선행연구를 통해 하천생태계에 기후변화의 현상이 발생된 것과 발생 예측되는 것을 도출하여 보호지역에서 일어나는 현상을 연도별로 분석하여 기후변화와 그 현상 간의 유의미한 관계를 찾고자 하였다. 본 연구에서 기후변화로 인한 도시하천 생태계 변화 전반을 연구하기는 어려웠다. 하천생태계의 변화상을 수문환경, 식물생태, 야생조류로 한정하여 기후변화의 영향을 알아보는 연구를 수행하고자 한다.

본 연구의 목적은 보호지역으로 지정되어 관리하고 있는 도시하천 중 야생조류 서식환경 변화 추이를 기후변화와 연계하여 살펴본 후 앞으로 예측되는 기후변화 특성에 따른 추이를 반영할 수 있는 하천 생태·경관보전지역 관리지표로 활용될 수 있는 기초 연구로 참고가 되고자 하였다(그림 1 참조).

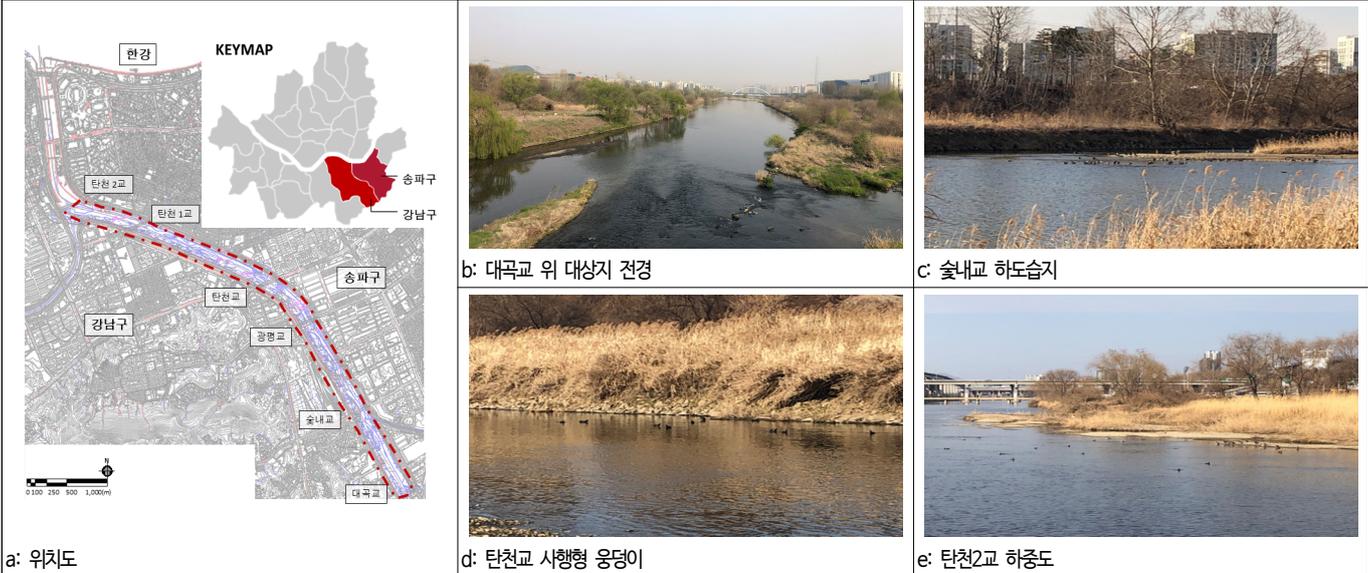


그림 1. 탄천 생태·경관보전지역 위치도

2. 연구범위

2.1 연구 대상지

본 연구는 서울특별시 탄천 생태·경관보전지역 중 대곡교-탄천 2교 구간에서 수행하였다. 면적은 1,151,466m²이며 길이는 6.7km, 평균하폭은 240m이다(<https://www.me.go.kr/index.htm>). 서울의 보호지역으로 지정된 곳 중 대상지 구간의 대곡교 지점은 넓은 면적의 퇴적지가 조성되었고 버드나무 식생이 발달하였다. 숭내교와 광평교 부근은 유속이 빠르며 모래가 발달하였고, 숭내교 내 하도 습지는 철새의 서식지와 휴식처로 이용되고 있었다. 탄천교를 지나 탄천 1교는 유속이 느려지고 사행형 웅덩이가 발달하였다. 일부 구간에 넓은 면적의 퇴적지형이 있어 건조지성 초본식생이 발달하였다. 이 구간은 인간의 간섭이 어려운 구간으로 철새의 은신처 역할을 수행하고 있었다. 하류의 탄천 2교를 지나면 퇴적된 하중도에 많은 철새들이 휴식과 은신처로 이용하고 있었고 건조지성 식생이 잘 발달되어 있었다. 본 대상지는 2002년 4월 15일 철새도래지로 지정되어 다른 도시하천보다 우수한 생태계와 풍부한 종 다양성이 있는 생태적 기능이 뛰어난 곳이다. 탄천 생태·경관보전지역은 다른 도시하천에 비하여 수로와 둔치 부분이 비교적 유지가 잘되어 있고 인간 간섭의 영향을 최소한으로 받는 유일한 장소이다.

보호지역은 생태계서비스와 생물자원의 가장 중요한 공급처이며 기후변화를 완화시키기 위한 전략의 핵심 요소(Dudley, 2008)로 자연생태계 기능을 유지하고 생물종의 피난처 역할을 하며 인위적 영향을 받은 육상·해상에서 생존할 수 없는 생태계 유지를 위해 중요한 역할을 하고 있다(김보현, 2010). 대상지는 서울의 보호지역으로 지정된 곳 중 육상생태계와 육수생태계 두 곳의 생태적 특성을 가진 곳으로 기후변화의 영향이 가장 잘 나타날 것으로 판단되어 대상지로 선정하였다.

2.2 연구 대상

연구 대상의 항목은 기후 및 기상, 수문환경, 식물생태, 야생조류로 선정하였다. 야생조류 서식 특성은 물, 먹이, 은신처, 인간 영향뿐 아니라 도시하천, 철새도래지의 특수한 환경도 고려하여 항목을 선정하였다. 기후 및 기상과 수문환경은 산업화의 영향을 받았을 것으로 판단되는 1980년-2020년 범위로 설정하였다. 식물생태와 야생조류는 기후변화로 인해 영향을 받았을 것으로 판단되는 보호지역으로 지정된 전·후 범위를 설정하였다. 영국의 생태계 분야 기후변화 리스크 항목 선정은 분포영역 이동, 생물 계절학적인 변화 및 이동, 외래종의 침입증가, 생태수문학적 서식지 변화, 극한 현상에 의한 서식지 교란 등이 온도와 강수 변화로 생물다양성과 주요 생물종의 감소 또는 증가, 서식지 유실 등이 일어난다고 하였다(Defra, 2012). 기후변화는 기온과 강수와 같은 기본 기상인자의 변화로 나타나며 이는 산림 식생대, 수종분포 등 식생 측면에서도 다양한 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다(Fang and Lechowicz, 2006).

2.3 조사분석

2.3.1 기후 및 기상 데이터 분석

기후 및 기상은 기온과 강수량, 강수패턴 현황은 기상자료 개방포털의 연도별 평균기온과 평균 강수량을 활용하였다(표 1 참조). 기온은 연도별 평균 기온 변화를 조사하여 평균기온, 최저기온, 최고기온과 계절별 평균기온, 최저기온, 최고기온과 월별 최저기온, 최고기온 일수, 온량지수를 조사 분석하였다. 강수량은 연도별 평균 강수량을 조사하였다. 강수패턴은 홍수기(7-9월)와 갈수기(3-6월), 강수일수, 일 최대강수량, 1시간 최대 강수량 변화를 조사하여 산출하였다.

2.3.2 수문환경 분석

하상계수 현황은 송파(AWS 403) 지점 월별 평균 강수량으로 최대유량을 최소유량으로 나누어 조사하였다. 수위 현황은 물환경정보시스템(<https://water.nier.go.kr>)의 서울시(대곡교) 연도별 수위변화를 조사하였다. 수면 현황은 문헌자료를 토대로 수면 면적 산출과 현장조사 통한 현존식생도를 작성하여 면적을 산출하여 면적 대비 비중의 변화상을 살펴 종합 분석하였다. 퇴적현황은 문헌자료와 현존식생도를 통한 면적 대비 비중 변화상과 국토정보플랫폼(<https://map.ngii.go.kr>) 항공사진을 조사하여 형태와 면적 변화를 종합 분석하였다. 하천 제원과 수리수문 조건 변화도 하천생태계에 영향을 주겠으나 본 연구의 한계로 기후변화에 따른 연구로 한정하였다.

2.3.3 식물생태 조사

식물은 문헌조사와 현장조사로 분석하였다. 문헌자료는 서울시 우수 생태계지역 정밀조사 연구, 탄천 생태경관보전지역 일반생태변화관찰 및 관리대책 연구, 생태·경관보전지역 정밀변화관찰 연구를 활용하였다. 현장조사는 2020년 5월 22일, 9월 20일 식물상과 현존식생을 조사하였다. 현장조사를 토대로 식물상을 작성하고 현존식생은

표 1. 조사 분석 방법

구분		환경생태요소	조사분석
기후·기상		기온	기상자료 개방포털, 서울시 연도별 평균기온, 온량지수, 최저기온, 최고기온, 계절별기온
		강수량	기상자료 개방포털, 서울시 연도별 평균강수량, 일 최대 강수량, 1시간 최대 강수량
		강수패턴	기상자료 개방포털, 서울시 연도별 홍수기, 갈수기, 강수일수
하천 생태계	수문환경	수위	물환경정보시스템, 서울시(대곡교)의 연도별 수위
		하상계수	기상자료 개방포털, 송파(AWS 403) 연도별과 월별 강수량, 연도별 하상계수
		유량	물환경정보시스템, 대곡교 연도별 유량
		수면	문헌조사: 서울특별시(2001) 서울시 우수 생태계지역 정밀조사, 서울특별시(2007) 탄천 생태·경관보전지역 일반생태변화관찰 및 관리대책 연구, 서울특별시(2013) 생태·경관보전지역 정밀변화관찰 연구 현장조사: 현존식생도 작성
		퇴적지	문헌조사: 서울특별시(2001) 서울시 우수 생태계지역 정밀조사, 서울특별시(2007) 탄천 생태·경관보전지역 일반생태변화관찰 및 관리대책 연구, 서울특별시(2013) 생태·경관보전지역 정밀변화관찰 연구 현장조사: 현존식생도 작성, 국토정보정보플랫폼(항공사진)
	식물생태	식물상	문헌조사: 서울특별시(2001) 서울시 우수 생태계지역 정밀조사, 서울특별시(2007) 탄천 생태·경관보전지역 일반생태변화관찰 및 관리대책 연구, 서울특별시(2013) 생태·경관보전지역 정밀변화관찰 연구 현장조사: 식물상 작성
		현존식생	문헌조사: 서울특별시(2001) 서울시 우수 생태계지역 정밀조사 서울특별시(2007) 탄천 생태·경관보전지역 일반생태변화관찰 및 관리대책 연구 현장조사: 현존식생도 변화 분석
	야생조류	계절별 야생조류	문헌조사: 서울특별시(2001) 서울시 우수 생태계지역 정밀조사, 서울특별시(2007) 탄천 생태·경관보전지역 일반생태변화관찰 및 관리대책 연구, 서울특별시(2013) 생태·경관보전지역 정밀변화관찰 연구 현장조사: Line-transect, 정점조사
		채이길드별 야생조류	문헌조사: 서울특별시(2001) 서울시 우수 생태계지역 정밀조사, 서울특별시(2007) 탄천 생태·경관보전지역 일반생태변화관찰 및 관리대책 연구, 서울특별시(2013) 생태·경관보전지역 정밀변화관찰 연구 현장조사: 채이길드 분석

목본류와 초본류 우점종을 대상으로 유형화하였다. Arc-View 프로그램으로 유형별 면적과 비율을 산정하였다. 식물상 종합은 문헌조사와 현장조사 자료를 토대로 총 종수(과, 종, 변종, 품종)와 특성별 출현종(자생종, 생태계교란 야생식물, 국가 기후변화 생물지표종, 귀화종)으로 구분하여 분석하였다. 현존식생은 2001년과 2007년 문헌자료와 현존식생도 유형을 같게 하여 연도별로 비교·분석하였다. 여러 차례 정비 사업으로 인해 인위적 식재수종이 하천 생태계에 영향을 주겠으나 본 연구에서는 식물상과 현존식생에 대한 연구로 한정하였다.

2.3.4 야생조류 조사

식물생태와 동일하게 문헌조사와 현장조사로 분석하였다. 문헌자료를 통한 야생조류 출현현황은 서울시 우수 생태계지역 정밀조사 연구와 탄천 생태·경관보전지역 일반변화관찰 및 관리대책 연구의 야생조류 출현현황이다. 현장조사는 2015년의 1차례 조사와 2020년 4월 15일, 5월 22일, 8월 24일, 10월 30일과 2021년 1월 9일 총 6회 조사 시행 후 비교·분석하였다. 조사는 Line-transect과 정점조사 방법에 따라 대상지의 수면, 둔치, 제방 등을 일정 경로로 따라 걸으며 좌우 25m에 출현하는 야생조류를 육안 및 쌍안경 등을 이용하여 관찰하고 울음소리, 나는 모양으로 종명과 개체수, 주요 행동들을 파악하였다. 하천 내 다양한 생물들도 기후변화로 영향을 받겠으나 철새도래지로 보호지역으로 지정된 지정 전·후의 야생조류에 대한 연구로 한정하였다.

2.3.5 기후변화에 따른 하천생태계 영향

기후변화로 변화되는 생태계 경향을 표 2와 같이 고찰한 후 분석항목과 예측결과를 토대로 대상지에 나타나는 영향 관계를 조사·분석하였다. 예측결과를 바탕으로 생태·경관보전지역 지정 전·후의 문헌조사와 현지조사를 토대로 기후 및 기상, 수문환경, 식물생태, 야생조류의 변화상을 분석하였다. 기후 및 기상 데이터 분석은 Microsoft Eexcel 2010를 활용하여 서울시 40년간 기온, 강수량, 강수 패턴의 연도별 변화상을 조사하여 기후변화의 특성과 경향성을 알아보고자 하였다. 수문환경은 하천생태계가 기후변화의 직접적 영향을 받을 것으로 판단되는 하상계수, 수위, 수면, 퇴적지를 조사하였다. 하상계수와 수위는 Microsoft Eexcel 2010를 활용하여 기후 및 기상 데이터 상

표 2. 기후변화로 인한 하천생태계 변화의 분석항목과 예측결과

구분	분석항목	예측결과	출처	연구항목
수문환경	하상계수	· 유역의 침식증가와 강수패턴의 변화로 하상계수 높아짐 · 자연하천의 여울과 소의 감소와 파괴	Shon, T. S.(2011) Han River Basin Management Committee(2010)	· 하상계수 변화 · 수위 변화 · 수면과 퇴적지 변화 · 문헌조사 · 현장조사
	수위	· 강수량과 강수패턴 변화에 의한 수위 증가	Kang, S. H.(2007) Han River Basin Management Committee(2010)	
	수면 및 퇴적지	· 강수패턴의 변화에 의한 물길 변화, 가뭄 발생빈도 증가에 의한 육역화 발생 · 홍수위험성과 취약성 증가 · 수량의 감소에 따른 수면 면적 감소 · 퇴적형태 변화와 면적 감소	Kim, S. J.(2011) Defra.(2012) Shon, T. S.(2011) Han River Basin Management Committee(2010)	
식물생태	식물상	· 종 구성의 변화와 서식지 교란 · 생태계야생교란생물의 교란종 증가	Kim, H. W.(2020) Hong, S. B. et al.(2019) Kwak, J. I.(2011) Defra.(2012)	· 식물상 현황과 변화 · 현존식생 현황과 변화
	현존식생	· 귀화종 확산과 남부수종 출현 · 생육불량과 식물의 고사, 개화시기 변화 · 외래종의 유입과 도시환경수종 발생	Lim ea al.(2017) Thackeray et al.(2016)	
야생조류	종수	· 종 수의 감소	Hong, S. B. et al.(2019) IPCC(2014) Defra.(2012) IUCN WCPA(2008) Kim, I. G.(2008)	· 야생조류 계절별 종수 변화 · 개체수 변화
	개체수	· 개체수의 감소		
	종 구성	· 하천에 서식하는 철새 종 구성 변화 · 생물종 계절성 변화		

관성에 대해 분석하였다. 수면은 현존식생도를 Arc-View 프로그램으로 작성하여 면적 대비 비중의 변화를 기후 및 기상 데이터 분석과 비교 분석하였다. 퇴적지는 문헌조사와 현지조사를 통해 현존식생도를 작성하여 면적 산출하고 항공사진을 통해 연도별 형태와 면적 변화를 분석하였다. 이후 기후 및 기상 데이터 상관성에 대해 분석하였다. 식물생태는 식물상과 현존식생을 문헌조사와 현존식생조사로 수행하였다. 현존식생조사 후 현존식생도는 Arc-View 프로그램으로 작성하여 유형별 면적 및 비율을 산정하고 Microsoft Excel 2010를 활용하였다. 이후 연도별 식물상과 현존식생변화를 기후 및 기상 데이터와 수문환경 간 상관성을 종합 분석하였다. 야생조류는 문헌조사와 현장조사를 병행하였다. 현장조사 후 Microsoft Excel 2010를 활용하여 계절별, 채이 길드별, 서식 유형별, 우점도로 구분하였다. 이후 기후 및 기상 데이터와 수문환경, 식물생태 상관성을 연도별로 분석하여 판단하였다. 이후 도시하천의 야생조류 서식환경과 기후변화의 직·간접적인 영향과의 상관성을 파악하여 종합하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 기후 및 기상 특성

3.1.1 기온

서울 40년간 평균기온은 1980년 10.8℃, 1989년 13℃, 1994년 13.5℃, 2015년 13.6℃로 점차 상승의 경향이였다. 산업화가 시작된 1980년과 2015년 평균기온 간 2.8℃ 기온차가 있었다. 일정한 규칙을 가지고 기온 상승이 일어나는 것은 아니었고 기후변화에 따라 매년 기온의 변동 폭은 크고, 불규칙한 형태로 평균기온에 영향을 주는 것으로 판단되었다(그림 2 참조).

철새도래지로 보호지역이 지정된 후 대상지 철새 개체수를 분석한 결과 계절별 최저기온과 최고기온이 평균기온 변동에 상관성이 나타났다. 계절과 해당 년도 간 변동 폭에 있어 일정한 규칙은 보이지 않았으나 최저기온은 겨울철 크게 나타나는 경향이였다(그림 3, 4 참조). 겨울철 최고기온은 뚜렷한 상승 경향이였고 여름철도 점차 상승하는 경향이였다. 계절별 기온 변화는 불확실하고 예측할 수 없는 불규칙한 변화를 보여주고 있었다.

온량지수는 식물이 성장하기 위한 기준 온도로 식물 생리적 현상과 밀접한 관련이 있다. 40년간 온량지수를 살펴보면 1980년 95.1℃에서 1983년 108.2℃, 1986년 96.7℃, 1994년 117.5℃로 증감을 반복하였고 이후 일정한 지수를 유지하였다. 가장 높은 온량지수는 2016년 119.5℃이었다. 대상지 온량지수는 1980년-1986년 온대 중부림, 1987년-1997년 온대 남부림 산림대, 1997년 이후는 난온대림 산림대로 변하는 경향이였다.

본 대상지의 하천생태계에 직접적 영향은 겨울철 기온 상승과 온량지수의 변화로 판단되었다(그림 2-5 참조). 하천생태계 영향 예측결과에서 기온상승은 식물 개화시기에 영향을 주고 서식처로 살아가는 야생조류에도 영향이 미치는 것이 도출되었다. 겨울철 기온상승은 겨울철새 종 구성과 개체수 변화에 직접적 영향을 줄 것으로 판단되었다. 또한 난온대림 산림대 변화는 식물의 개화시기와 남부수종 출현 등 생물 서식처 변화로 야생조류에 간접적 영향을 줄 것으로 판단되었다.

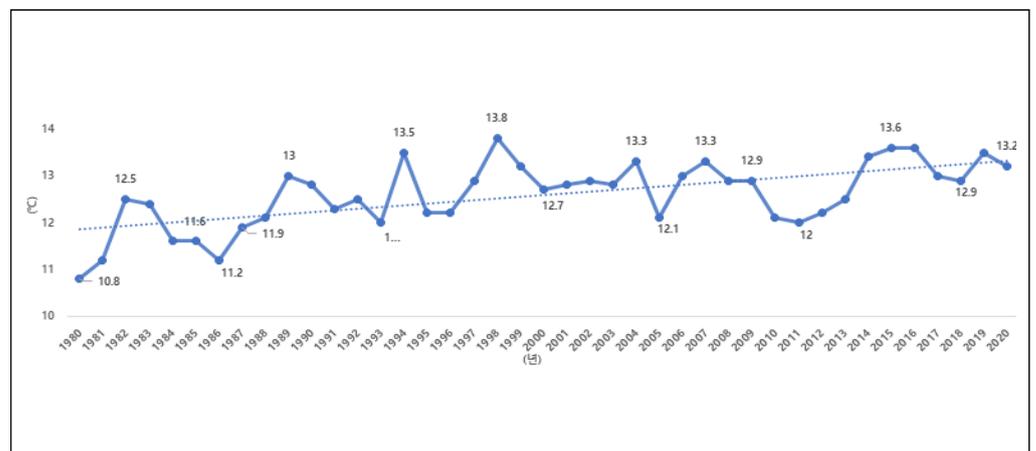


그림 2. 서울시 1980년-2020년 평균기온 현황
 자료: 기상자료 개방포털(<https://data.kma.go.kr>) 재구성
 범례: —●— 평균기온, 추세선

일로 강우일수가 가장 적었다. 일 최대강수량 300mm 이상 내린 해는 1998년과 2011년이다. 1시간 최대강수량은 2001년 99.5mm로 집중호우가 쏟아졌다(그림 6 참조). 이상기후로 인한 강수량 변동은 기온과 마찬가지로 비예측적이며 불규칙하게 내려 강수량을 예측할 수 없었다.

홍수기 평균 강수량은 1980년-1990년 826.7mm, 1991년-2000년 894.7mm, 2001년-2010년 1,045.1mm, 2011년-2020년 772.6mm이었다. 40년간 가장 적은 강수량은 2015년 324.9mm이었고 2014년-2016년에는 연속적으로 강수량이 급감하여 내렸다. 2010년 초반까지 평균 강수량은 증가세였으나 2011년-2020년은 급격하게 감소하였다. 대곡교는 매년 홍수주의보가 내려졌다. 홍수주의보는 5.50m으로 계획홍수량의 50%가 기준이다. 2007년과 2009년에는 계획홍수위 8.46m를 넘었다. 갈수기 평균 강수량은 1980년-1990년 390.9mm, 1991년-2000년 400.1mm, 2001년-2010년 408.7mm, 2011년-2020년 354.7mm로 점차 증가하다 감소하는 경향이였다. 다른 년도의 갈수기보다 많은 강수량은 1991년-2000년에 내렸고 2011년에 들어서는 감소하는 경향이였다. 홍수기와 갈수기에서 불규칙성과 비예측적 기후변화의 불확실성 특성이 나타났다. 본 대상지 하천생태계에 직접적 영향은 강수량과 강수 패턴 변화로 판단되었다. 간접적 영향은 수문환경과 식물생태, 야생조류에 영향을 줄 것으로 판단되었다.

3.2 수문환경

3.2.1 하상계수 및 수위

대상지 1980년 하상계수는 1:66으로 완만한 경사였다. 이후 2012년에 1:581로 가장 높았고 2016년 1:358, 2020년 1:146로 하상계수는 높아지는 추세이었다. 평균 강수량이 2012년 1,646.3mm이고 2016년 991.7mm, 2020년 1,651.1mm이었다. 기후변화로 인한 강수량의 변화는 하천 유량 변화에 직접적인 영향을 미치며 강우편중 및 강우강도 증가는 유역의 침식도를 증가시킨다(한강유역관리위원회, 2010). 강수량 변동은 하상계수와 직접적 관련성은 없었다. 그러나 일 최대 강수량과 1시간 최대 강수량의 강수 패턴 변화로 영향을 준 것으로 판단되었다. 게릴라성 폭우에 도시하천은 침수된다. 대상지 내 대곡교도 장마철 집중호우로 수위가 급격히 높아져 둔치뿐 아니라 제방 사면까지 단시간에 침수되는 현상이 벌어진다. 집중호우와 인위적 하천 준설작업은 하천 형태를 급격하게 변화시키고 퇴적지 면적 감소, 여울과 소 훼손 등은 하상계수를 높일 수 있다. 기후변화로 인한 강수 패턴 변화는 갈수기가 길어져 하천 수량이 부족하여 수면 면적 변화를 야기한 것으로 판단되었다(그림 7 참조). 본 대상지 수문환경의 직접적 영향은 강수량과 강수 패턴의 변화로 하상계수가 높아지고 일시적 침수가 발생하는 것으로 판단되었다. 간접적 영향은 높은 하상계수와 침수로 인해 수생식물의 변화, 교목과 하부식생의 쓰러짐이 발생하고 서식지 파괴와 훼손은 야생조류의 종 구성과 개체수 변화를 줄 것으로 판단되었다.

3.2.2 수면 및 퇴적지

수면은 전체면적 중 비중으로 분석한 결과 2001년 26%, 2006년 21.5%, 2020년 봄철 22.8%로 크게 변화되지 않았으나 면적 변동은 불규칙하게 나타났다. 기온상승과 강수량 변동에 의해 불규칙적으로 변화하는 경향이였다. 대상지는 하류 지형으로 퇴적지가 발달된 곳으로 연도별 퇴적지 면적 감소와 증가의 반복은 사행하천에서 보이는 일반적인 특성이다. 1980년 퇴적지는 여러 조각형태로 넓은 면적이 있었으나 2015년에 들어 형태 변화와 면적이

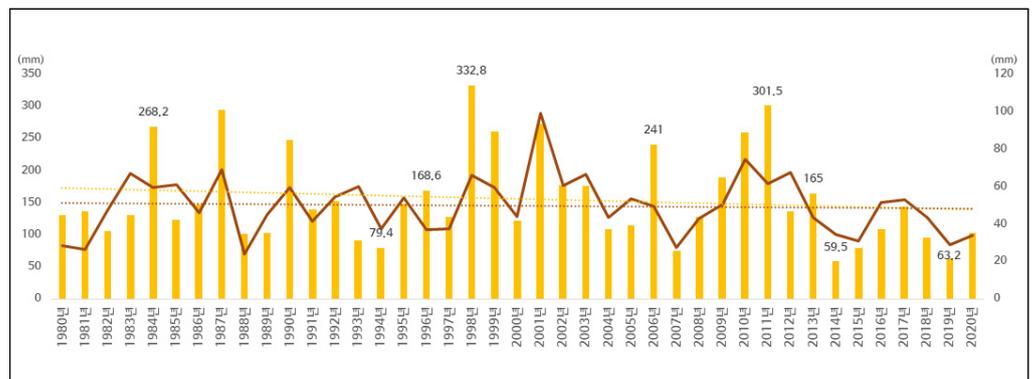


그림 6. 서울시 1980년-2020년 일 최대 강수량과 1시간 최대 강수량

자료: 기상자료 개방포털(<https://data.kma.go.kr>) 재구성

범례: 일 최대 강수량 1시간 최대 강수량 선형(일 최대 강수량) 선형(1시간 최대 강수량)

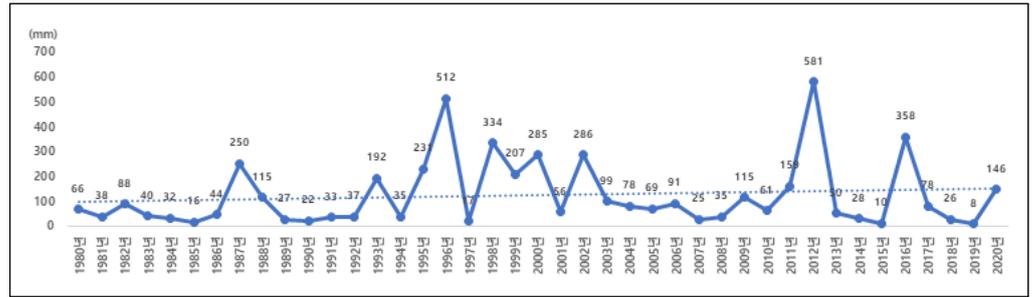


그림 7. 탄천 생태·경관보전지역 하상계수 현황
 자료: 기상자료 개방포털(<https://data.kma.go.kr>, 송파 AWS 403) 재구성
 범례: — 하상계수 추세선

감소하였다. 퇴적지 면적이 눈에 띄게 줄었음을 알 수 있었다(표 3 참조). 가뭄과 갈수기 변화는 수면 면적의 감소를 가져왔다. 또한 집중호우로 인한 퇴적지 소실과 도시화로 인한 육역화 진행은 퇴적지 면적 감소를 가져왔다. 수면과 퇴적지 변화의 직접적 영향은 강수량과 강수 패턴 변화로 수면과 퇴적지의 면적 감소로 나타남이 판단되었다. 퇴적지는 야생조류의 서식지만으로 휴식과 은신처 역할을 해주는 곳이다. 간접적 영향은 수면과 퇴적지를 기반으로 하는 물떼새류와 할미새류에게 영향을 주어 종 구성과 개체수 변화가 있을 것으로 판단되었다.

3.3 식물생태

3.3.1 식물상

식물은 고정된 장소에서 환경의 영향을 받아 변화해 간다. 인위적 간섭에도 영향을 받는다. 대상지의 식물상은 2001년 34과 107종, 2006년 57과 227종 14변종으로 과와 종수가 증가하였다. 2013년 65과 258종, 2020년 66과 211종으로 과와 종수에 큰 변화가 나타나지 않았다(표 4 참조). 그러나 2001년에 비해 종수와 과수에 큰 폭의 변동이 있었고 건조지성 식물과 국가 기후변화 생물지표종이 증가하였다. 식물상 증가는 하천 육역화 진행과 도시화로 인한 외래식물 유입, 남부수종 유입 등으로 증가하였다. 기온상승은 고산대와 아고산대에 고립되어 분포하는 종, 분포 범위가 좁거나 분포의 한계선에 자라는 종, 섬에 자라는 종, 기후변화에 민감한 종, 이동 속도가 느린 종 등에

표 3. 탄천 생태·경관보전지역 퇴적지 현황

구분	1997년	2001년	2006년	2020년	
				봄철	가을철
면적	135,746m ²	89,965.9m ²	99,516.12m ²	19,810.5m ²	27,885.2m ²
비중	10.34%	6.4%	7.1%	1.37%	1.93%

표 4. 탄천 생태·경관보전지역 식물상 현황

항목	구분	2001년	2006년	2013년	2020년	
총 종수	과	34과	57과	65과	66과	
	종	107종	227종	258종	211종	
	변 종	18종	14종	15종	25종	
	품 종	-	1종	2종	3종	
특성별 출현종	자생종	습지성	16	35	25	19
		건조지성	60	117	160	157
	생태계교란야생식물	5종	6종	6종	8종	
	국가기후변화 생물지표종	-	1종	1종	3종	
	귀화종	목본	-	2종	2종	2종
		초본	41종	40종	52종	42종
합계		총 34과 107종 18변종 125종류(taxa)	총 57과 227종 14변종 1품종 242종류(taxa)	총 65과 258종 15변종 2품종 275종류(taxa)	총 66과 211종 25변종 3품종 239종류(taxa)	

큰 영향을 미치게 된다(공우석 등, 2014). 생태계 교란야생생물은 2001년 5종, 2006년과 2013년 6종, 2020년 8종으로 가시박, 환삼덩굴, 단풍잎돼지풀, 돼지풀, 미국쑥부쟁이, 도깨비가지, 가지상추, 서양당귀나마가 출현하였다. 국가 기후변화 생물지표종 광대나물, 계요등, 자주괴불주머니와 가죽나무, 민주엽나무, 귀룽나무 등이 출현하였다. 기후변화에서 강수량의 변화, 건조화 등이 생태계에 미치는 영향이 구체적으로 밝혀진 바는 없으나 기후의 변동이 서로 유기적인 상관관계를 갖고 있음을 볼 때 종 구성의 변화, 귀화종의 확산 등 식생 변화를 가져올 것으로 판단하였다(곽정인, 2011). 주요 출현 종 가죽나무, 중국굴피나무(식재), 민주엽나무, 귀룽나무, 사위질빵, 유채, 미국가막사리, 선개불알풀, 긴병꽃풀 등은 남부지방의 온화하고 따뜻한 기후에서 생육 가능한 식물들이었다. 본 대상지 식물상의 직접적 영향은 기온상승으로 국가 기후변화 생물지표종과 남부지방 출현종, 건조지성 식물 증가와 강수량과 강수 패턴 변화로 외래식물과 생태계교란식물 유입으로 판단되었다. 간접적 영향은 서식지 변화로 야생조류 종 구성과 개체수 변화뿐 아니라 하천생태계 전반에 영향을 줄 것으로 판단되었다.

3.3.2 현존식생

대상지 전체면적 1,151,466m²(환경부 지정기준)중 종 구성 변화는 자생목본식물군락, 자생초본식물군락, 외래목본식물군락은 연도별 증가하였다. 외래초본식물은 2001년 38.3%, 2006년 25.3%, 2020년 봄철 4.9%, 가을철 14.49%로 인위적 간섭에 의한 관리로 감소하는 경향이였다(그림 8 참조).

기후변화의 영향은 종 구성의 변화로 자생목본식물군락, 자생초본식물군락, 외래목본식물군락이 증가하였고 외래초본군락은 감소하였다. 건조지성 자생종은 개밀, 쑥, 참새귀리, 혼생초본 등 건조지성 식물이 증가하였다. 습윤지성 자생종은 버드나무와 갈대, 물억새, 갈풀, 달뿌리풀, 황새귀리, 꽃마리, 꽃창포 등 출현하였다. 버드나무속은 높은 산포력과 발아율, 빠른 초기 생장속도, 침수에 대한 높은 저항력, 하천변의 나지에 빠르게 정착하여 군락을 발달시키는 온대습지의 선구식생(이팔홍, 2002)이다. 물억새는 강수량 감소와 강수 패턴 변화로 수면 면적 감소의 영향을 받아 2001년 3.2%, 2006년 13.6%, 2020년 7.68%로 나타났다. 2020년 봄철에는 유채도 관찰되었다. 주로 남부지방에 출현하는 종으로 둔치 가장자리에 출현한 것으로 도시하천 기온상승과 유기물질 증가, 종자 유입으로 판단되었다. 건조지성 식물과 습윤지성 식물은 강수량 변동과 강수 패턴 변화로 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 외래종 아까시나무, 은사시나무, 중국굴피나무, 가죽나무, 가시박, 단풍잎돼지풀, 환삼덩굴 등이 높은 면적을 차지하였다. 식재종은 아까시나무, 은사시나무, 중국굴피나무는 환경에 적응하며 많은 면적으로 번성하였다. 하천의 수면 면적은 줄어들고 유역화가 계속 진행됨으로 인해 하천생태계가 바뀌고 있음이 판단되었다. 보호지역의 관리지침에 따른 생태계교란야생식물은 인위적 관리에 의해 면적은 감소하였으나 종수는 매년 점차 증가하였다. 본 대상지 현존식생에 직접적 영향은 목본식물군락 발달, 건조지성 식물 발달, 물억새와 유채 출현으로 판단되었다. 간접적 영향은 서식지 환경 변화로 인한 야생조류 종 구성과 개체수 변화와 하천 유역화 진행 속도에 영향을 줄 것으로 판단되었다.

3.4 야생조류

3.4.1 야생조류 현황

야생조류는 이동성이 있는 생물로 도시환경 변화 지표종이다. 도시 건강성을 측정할 수 있는 척도로 대상지의 야생조류 출현종수와 개체수는 매년 변화하였다. 봄철은 2001년 총 15종 143개체, 2015년 총 19종 307개체, 2020년 총 26종 763개체로 종수와 개체수가 꾸준히 증가하였다. 여름철은 2001년 총 15종 325개체, 2007년 총 10종

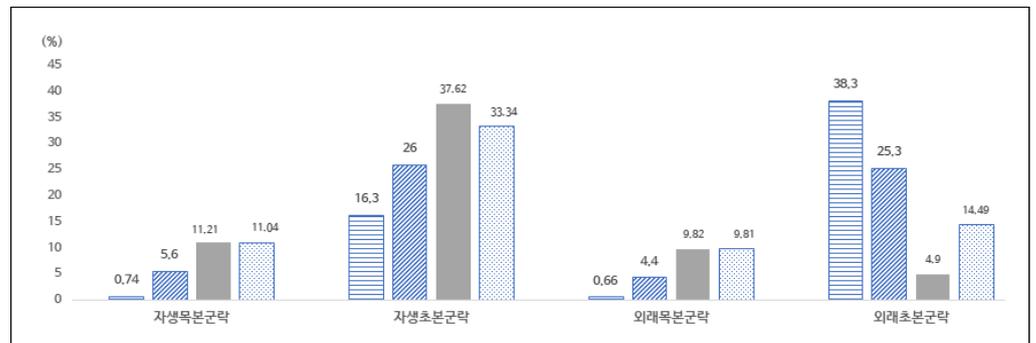


그림 8. 탄천 생태·경관보전지역 현존식생 현황
 범례: 2001년 2006년 2020년 봄철 2020년 가을철

314개체, 2020년 총 30종 1,402개체로 종수와 개체수가 감소된 것을 볼 수 있었다. 가을철은 2001년 총 26종 2,270개체, 2015년 총 17종 241개체, 2020년 총 35종 1,106개체로 종수와 개체수 증감이 불규칙하였다. 겨울철은 2001년 총 25종 5,164개체, 2007년 총 14종 3,480개체, 2020년 총 44종 2,151개체로 종수와 개체수 증감이 불규칙하였다. 2001년 최저기온은 -12°C , 2007년 -11°C , 2020년 -18.6°C 로 기온의 변동이 큰 경향이었다. 대상지 오리류 주요종 출현 현황을 보면 2001년은 쇠오리(47.5%), 흰뺨검둥오리(15.1%), 고방오리(11.9%), 청둥오리(9.5%)가 우점종이었고 2007년은 고방오리(25.7%), 쇠오리(23.7%), 흰뺨검둥오리(20.7%), 청둥오리(17.4%) 순이었다. 2020년 청둥오리(17.6%), 물닭(17.2%), 붉은머리오목눈이(12.6%), 중대백로(7.5%), 흰뺨검둥오리(5.3%)가 우점종으로 나타났다. 2002년 탄천 생태·경관보전지역 지정 시기에 출현하였던 쇠오리, 청둥오리, 흰뺨검둥오리, 넓적부리, 홍머리오리 등 오리과 주요종과 개체수 변동이 나타나고 있었다(그림 9 참조).

국립생태원(2020)은 기후변화에 철새가 적응할 수 없게 되면 적합한 기후환경을 갖는 서식지를 찾아 이동하는 것은 생물계절학적 변화가 일어났음을 알리는 현상이라고 하였다. 최근 겨울철과 여름철 계절에 맞지 않는 철새의 출현과 개체수 변동이 눈에 띄게 나타났다. 겨울철 출현하는 여름 철새(SV)는 왜가리, 쇠백로, 중대백로, 해오라기, 밀화부리 등이다. 왜가리는 지속적으로 관찰되고 있고 텃새화 되었음을 알 수 있었다. 여름철 출현종 흰뺨검둥오리와 청둥오리도 텃새화 되고 있었다. 원앙과 민물가마우지는 대상지에서 2015년부터 관찰되기 시작하였다.

계절 불일치로 출현하는 민물가마우지와 중대백로는 기후변화에 직·간접적 영향을 받는 지표종으로 판단되었다. 우리나라에서 민물가마우지가 관찰된 것은 1999년 약 269마리, 2015년 약 9,280마리로 늘어났고 최근 서식지 환경 변화로 번식지가 증가하는 추세이다(환경부, 2015). 민물가마우지는 겨울철 월동한 후 중국 등지로 북상하는 겨울철 새로 대상지에서 2020년 여름철 386개체가 관찰되었다. 여름철 조류의 27.5% 우점도를 차지하였다. 대상지의 민물가마우지 생활사는 오전 먹이활동과 휴식을 위해 은신처인 밤섬에서 일어나 한강을 통과하여 대상지로 이동하는 것이 관찰되었다. 조사한 2020년 8월 24일은 평균기온 27.8°C , 최저기온 23.7°C , 최고기온 32°C 으로 서식환경의 변화가 일어났음을 판단되었다. 국립환경과학원(2013)에서 중대백로는 서식지의 건강성을 평가하기에 좋은 생물학적 지표종으로 알려져 있고, 이들의 번식 성공과 서식 여부가 주변 환경의 변형이나 오염정도에 매우 민감한 종이라 하였다. 중대백로는 우리나라 전국에 번식하는 여름철새이다. 집단으로 번식하는 백로와 조류로 보통 4월 초에 도래하여 산림의 교목 및 관목에서 단일종 또는 여러 종이 함께 혼성으로 집단 번식한 후 10월경에 월동지인 동남아지역으로 이동하지만, 소수의 집단은 월동하기도 한다(이상기, 2013). 대상지에서 2013년 1개체와 2021년 겨울 대곡교 부근에서 162개체가 관찰되었다. 겨울철 조류의 7.5% 우점도를 차지하였다. 조사한 1월 9일은 평균기온 -12.2°C , 최저기온 -16.6°C , 최고기온 -7.5°C 이었다. 중대백로는 소수 집단으로 월동하는 특징을 가졌지만 대상지에서 관찰된 중대백로가 소수의 집단으로 월동하였는지는 확실치 않았다. 본 대상지 야생조류에 기후변화로 인한 직접적 영향은 계절 불일치 종 출현과 국가 기후변화 생물지표종 출현으로 판단되었다. 간접적 영향은 서식지 변화로 인해 오리류 개체수 변동과 철새 종 구성 및 개체수 변화에 영향을 줄 것으로 판단되었다(그림 10, 표 5, 6 참조).

3.5 기후변화에 따른 하천생태계 영향 고찰

3.5.1 하천생태계 변화

도시 하천생태계는 불확실성을 가지고 불규칙적이고 비예측적 기후 및 기상 변동에 따라 끊임없이 변화하였다

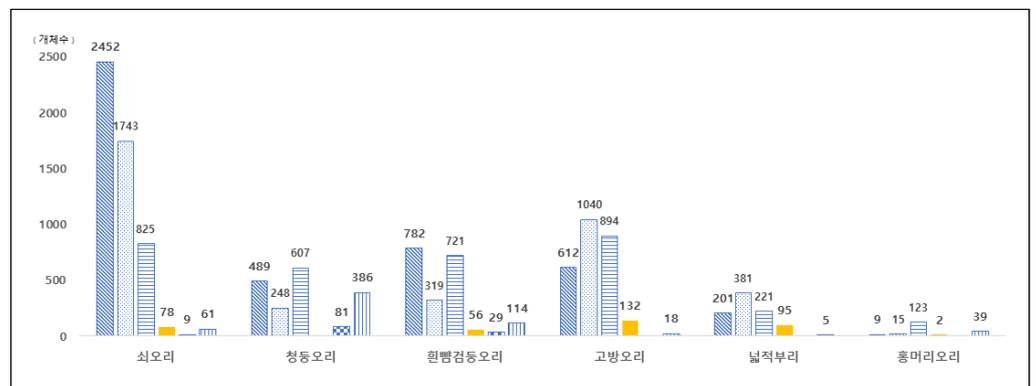


그림 9. 탄천 생태·경관보전지역 오리과 주요종 출현현황

범례: 2001년 2004년 2007년 2013년 2020년 2020년

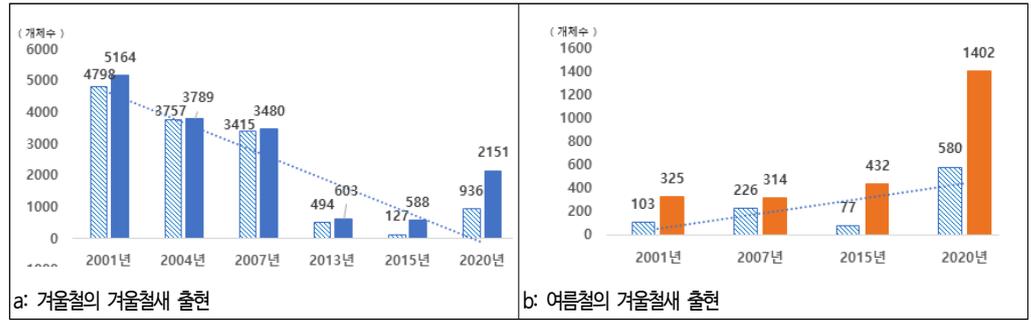


그림 10. 계절별 겨울철새 변화상

범례: WW 출현 개체수 (blue hatched bar), 겨울철 총 개체수 (solid blue bar), 여름철 총 개체수 (orange bar), 추세선 (dotted line)

표 5. 여름철의 여름철새(SV)와 겨울철새(WV)

채이 길드	과	종명	서식 유형	개체수			
				2001년	2007년	2015년	2020년
공중	파랑새과	파랑새	SV				4
	제비과	제비	SV	4			
물가	백로과	왜가리	SV	82	46	9	30
		중대백로	SV	20	7		67
		소백로	SV	10	11	21	64
	도요새과	깝작도요	SV	4	7		
	물떼새과	꼬마물떼새	SV		1		
	피꼬리과	개개비	SV			2	
	물총새과	물총새	SV	1			3
	할미새과	노랑할미새	SV	1			
알락할미새		SV	3				
수관	피꼬리과	피꼬리	SV	2			7
	두견이과	빠꾸기	SV				2
관목	후투티과	후투티	SV				1
합 계				9종 124개체	5종 72개체	3종 32개체	8종 179개체
물가	가마우지과	민물가마우지	WW			5	386
	오리과	원앙	WW			2	2
수면	오리과	청둥오리	WW		76	25	39
		흰뺨검둥오리	WW	103	150	45	153
합 계				1종 103개체	3종 226개체	4종 77개체	4종 580개체

(그림 11 참조). 수문환경의 수면 면적은 2001년 26.1%, 2007년 21.5%, 2020년 21.52%로 감소하였고, 퇴적지 면적도 2001년 6.4%, 2007년 7.1%, 2020년 1.93%로 증가와 감소를 반복하였다.

식물생태의 식물상은 연도별로 불규칙하게 증가하였다. 전체적으로 건조지성 외래목본식물 발달과 건조지성 초본식물군락 중 변화가 나타났다. 주요종 버드나무, 능수버들, 산뽕나무 등 자생목본식물군락과 아까시나무, 은사시나무, 중국굴피나무 등 외래목본식물군락이 출현하였다. 출현종 중 사위질빵, 미국가막사리, 선개불알풀, 가죽나무, 중국굴피나무(식재), 유채, 민주엽나무, 다래나무, 긴병꽃풀 등 남부지방에서 생육되는 종이 대상지에 서식하고 있었다. 또한 갈대, 물억새, 갈풀, 참새귀리 등 자생초본군락 출현과 갈대와 억새 면적 증가도 보였다. 일부는 습윤지성 식생 발달과 함께 하부식생의 쓰러짐 발생, 교목의 뿌리 뽑힘 등이 나타났다. 귀화종은 연도별 증가이 2013년을 제

표 6. 겨울철의 여름철새(SV)와 겨울철새(WV)

채이 길드	과	종명	서식 유형	개체수						
				2001년	2004년	2007년	2013년	2015년	2021년	
물가	백로과	왜가리	SV	43	25	12	5	-	11	
		쇠백로	SV	-	1	-	1	-		
		중대백로	SV	-	-	-	1	-	162	
		해오라기	SV	-	-	-	-	1	-	
	도요새과	갑작도요	SV	-	-	-	1	-	1	
수간	되새과	말화부리	SV	-	-	-	-	-	1	
합 계				1종 43개체	2종 26개체	1종 12개체	4종 8개체	1종 1개체	4종 175개체	
맹금류	수리과	참매	WV	1			1			
	수리과	말뚝가리	WV	3	1		2	1	5	
물가	가마우지과	만물가마우지	WV				4	2	80	
	오리과	원앙	WV						2	
	갈매기과	재갈매기	WV		3		7	1	1	
	할미새과	백할미새	WV	14		2	1	4	6	
수면	논병아리과	뿔논병아리	WV						4	
	오리과	큰기러기	WV							14
		황오리	WV	7						
		홍머리오리	WV	9	15	123	2			39
		청머리오리	WV	4			3			4
		알락오리	WV	23	3					15
		쇠오리	WV	2,452	1,743	825	78	9		61
		청둥오리	WV	489	248	607		81		386
		흰뺨검둥오리	WV	782	319	721	56	29		114
		고방오리	WV	612	1,040	894	432			18
		넓적부리	WV	201	381	221	95			5
		흰죽지	WV	2		10	15			41
		당기흰죽지	WV			2	13			40
		흰비오리	WV							1
비오리	WV	54	4	10	33			52		
수관	지빠귀과	개똥지빠귀	WV	145						
	되새과	되새	WV				36		46	
		콩새	WV						2	
관목	멧새과	쑥새	WV				1			
	되새과	검은머리 방울새	WV				15			
합 계				15종 4,798개체	10종 3,757개체	10종 3,415개체	17종 494개체	7종 127개체	21종 936개체	



그림 11. 단천 생태·경관보전지역 연도별 변화상
 자료: 국토정보플랫폼 항공사진(<https://map.ngii.go.kr>) 재구성

외하고 비슷하게 출현하였다. 주요 종은 미국가막사리, 선개불알풀, 오리새, 왕포아풀, 유채 등이었다. 생태계야생교란생물은 2001년 5종, 2006년과 2013년 6종, 2020년 8종으로 가시박, 환삼덩굴, 단풍잎돼지풀, 돼지풀, 미국쭈부쟁이, 도깨비가지, 가시상추, 서양등골나무가 출현하였다.

야생조류 종수와 개체수는 감소하였다. 여름철새는 증가하였고 겨울철새는 감소하고 있었다. 계절별 철새 종 변화도 나타났다. 여름철 민물가마우지와 원앙이 관찰되었고 겨울철새의 텃새화도 나타났다. 겨울철 중대백로와 밀화부리가 대상지에서 관찰되었다. 맹금류의 출현은 2001년 황조롱이, 참매, 큰말뚝가리가 관찰되었고 2007년은 관찰되지 않았다. 이후 2020년 말뚝가리와 황조롱이가 출현하였다. 맹금류 종수와 개체수 모두 감소하고 있었다.

3.5.2 기후변화 영향에 따른 하천생태계 해석

도시하천의 야생조류 서식환경 변화를 기후변화에 따른 하천생태계 이론적 고찰을 통해 예측결과와 종합하여 분석하였다(표 2 참조). 현재 우리나라 기후 및 기상 변동 폭은 기온상승과 강수량 감소, 강수 패턴의 변화로 불규칙적이고 비예측적으로 발생하고 있었다. 서울 40년간 수문환경을 분석한 결과 하상계수와 수면, 퇴적지가 변하고 있었다(그림 12 참조). 강수량과 강수패턴의 변화는 집중호우로 나타나 사행하천의 여류와 소 훼손, 유속 증가로 하상계수를 높였고 하천 형태를 변화하였다. 기온상승으로 수면과 퇴적지 면적 감소는 하천 육역화로 나타났다. 수면면적 감소는 물새류 서식환경 변화를 가져와 개체수 감소로 나타났고 육역화 진행은 야생조류 종 구성의 변화를

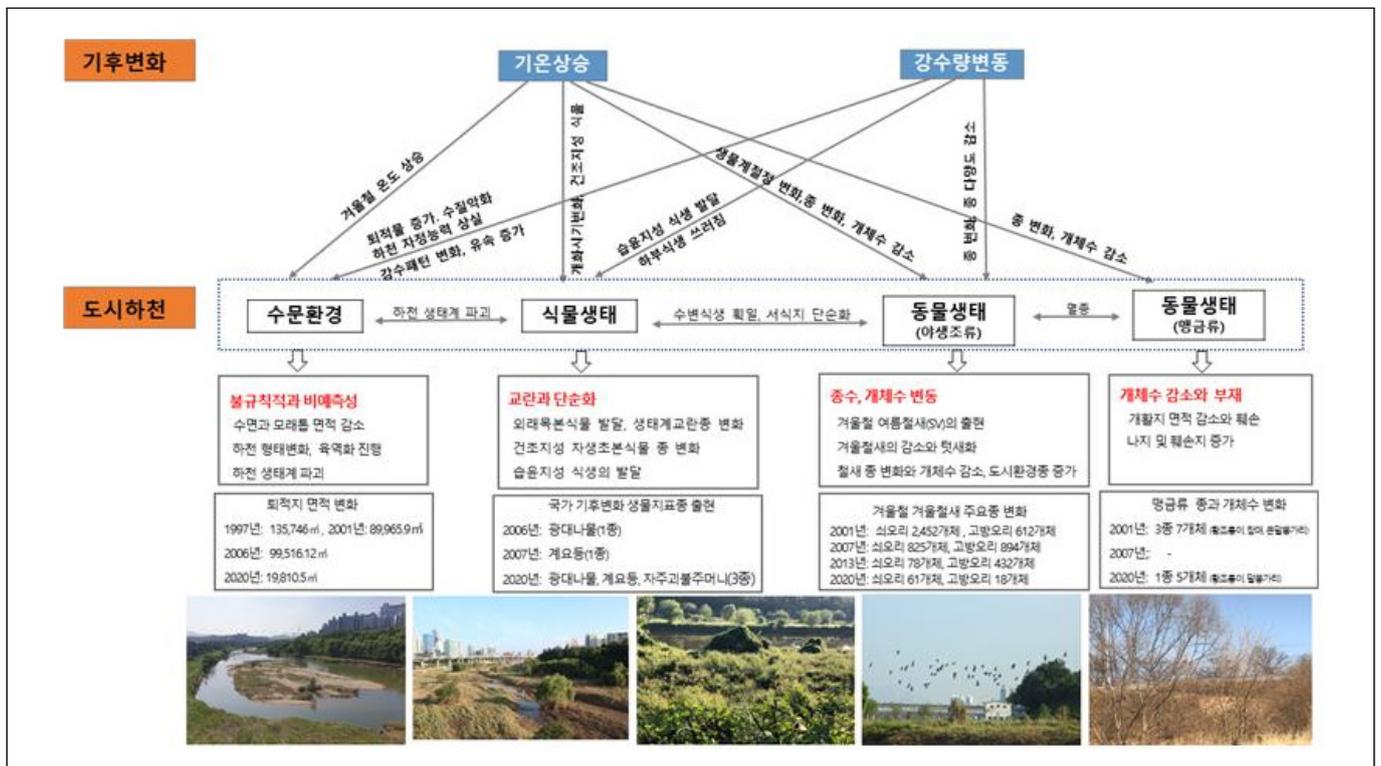


그림 12. 단천 생태·경관보전지역의 하천생태계

가져왔다. 야생조류 서식기반으로 휴식과 은신처 역할을 하는 퇴적지의 면적 감소는 야생조류 개체수에 영향을 주었다. 수문환경 요인들이 항상 규칙적으로 변화되는 것은 아니었지만 기후변화의 영향을 받아 불규칙성과 비예측성이 불확실하게 나타나고 있었다.

식물은 고정된 자리에서 끊임없이 변하는 환경 영향을 받고 성장하므로 기후 및 기상뿐만 아니라 수문환경도 밀접한 관련이 있었다. 대상지 식물상은 종수 증가는 불규칙하고 과수와 귀화종은 점차 증가하였다. 하천 육역화와 도시화 진행은 하천 경계부의 경작이나 귀화종 유입, 남부지방 출현종, 건조지성 식물 발달, 버드나무류 증가로 식물상이 다양해졌다. 목본식물군락의 증가는 하천의 육역화 진행을 빠르게 하고 야생조류의 채이길드와 우점종 변화를 가져왔다. 기온상승은 국가 기후변화 생물지표종 광대나물, 계요등, 자주괴불주머니의 출현, 건조지성 자생종 면적 증가, 온량지수 상승은 산림대 변화로 난온대림의 남부수종 식물이 출현하였다. 강수량과 강수 패턴 변화로 대상지 내 일시적 침수가 주기적으로 발생하여 습윤지성 식물 발달도 나타났다. 기후변화의 영향으로 식물생태는 단순화된 식생과 생태계교란이 일어나 도시하천의 서식환경을 변화하여 야생조류 중 구성과 개체수 변화뿐 아니라 하천생태계 전반에 영향을 주었다.

야생조류는 다른 생물과 달리 이동 특성을 가지고 있다. 서식환경 변화는 야생조류에 직접적 영향을 주는 것으로 판단되었다. 개체수가 봄과 여름은 증가하였고 가을과 겨울은 감소와 증가를 반복하는 경향으로 나타났다. 기온 상승은 겨울철에 중대백로(SV) 관찰과 여름철에 민물가마우지(WV)의 관찰로 계절 불일치 중 출현을 가져왔다. 중대백로는 국가 기후변화 생물 지표종이다. 겨울철 온도상승은 오리과의 주요 출현종 쇠오리, 청둥오리, 흰뺨검둥오리, 고방오리, 넓적부리, 홍머리오리의 개체수 감소로 나타났다. 최근에는 물닭이 출현하였다. 개체수 변화와 새로운 종 출현은 겨울철 온도상승과 직·간접적 영향을 받아 물의 어느 점과 상관성이 있을 것으로 판단되었다. 강수량 감소는 수면성 오리류 감소로 나타났다. 강수 패턴 변화는 모래톱에 서식하는 물떼새류와 할미새류의 개체수 감소와 2000년 관찰되었던 황오리와 개똥지빠귀의 미출현으로 나타났다. 또한 개활지 감소와 나지의 발생은 맹금류 서식환경을 변화시켜 개체수 감소를 가져왔다. 하천의 육역화와 도시화 진행은 식물생태에 영향을 주었고 야생조류의 도시환경종의 개체수 증가로 나타났다. 야생조류 서식환경은 예측결과와 같이 기후변화로 인한 하천생태계 변화가 나타나고 있었다. 야생조류 서식환경은 기후변화와 밀접한 관련성이 있는 것으로 판단되었다. 하천생태계는 육수생태계와 육상 생태계가 유기적으로 연결되어 있어 생태계 간 상호 복잡한 영향을 받고 있음이 판단되었다.

4. 결론 및 시사점

본 연구는 보호지역의 도시하천에서 야생조류 서식환경 변화가 기후변화 영향으로 변화하는 것인지 알아보고 그에 따른 관계성을 고찰하여 도시하천의 건강성 지표로 활용하고자 연구를 수행하였다. 도시하천 건강성 지표는 이동성이 있어 환경 변화에 즉각적으로 반영하는 야생조류의 서식환경으로 설정하였다. 야생조류 서식환경은 하천생태계 기반의 수문환경, 식물생태 항목으로 도출하고, 환경 변화의 영향은 야생조류 중 구성과 개체수 변화로 도시하천의 건강성 지표로 측정하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다. 첫째, 서식환경 기반의 수문환경은 하상계수, 수위, 수면, 퇴적지로 분석하였다. 이상기후 현상은 하상계수를 높이고 일시적 침수로 나타났다. 높은 하상계수와 침수로 인해 수생식물 변화, 교목과 허부식생 쓰러짐, 서식지 파괴와 훼손은 야생조류 중 구성과 개체수 변화로 나타났다. 수면 면적과 퇴적지 감소는 기온상승과 강수량 감소, 강수 패턴 변화로 하천 형태를 변화시켰다. 야생조류의 휴식과 은신처 역할을 하는 모래톱에 서식하는 물떼새류와 도요새류의 개체수 감소와 황오리와 개똥지빠귀 등 출현종에 영향을 초래하였다. 불규칙성과 비예측성 특징을 가진 기후변화는 기반환경에 영향을 주어 야생조류 서식환경 변화에 직·간접적 영향을 주었음이 판단되었다.

둘째, 야생조류 서식처의 역할을 수행하는 식물생태는 끊임없이 변하는 환경 영향을 받아 교란식물의 발달과 단순식생으로 변화되었다. 식물생태는 식물상과 현존식생으로 분석하였다. 수면과 퇴적지 면적의 감소에도 종수는 증가하였다. 식물상 증가는 하천 경계부의 경작, 귀화종 유입과 하천 육역화 진행으로 버드나무류의 목본식물 증가에도 영향을 주었다. 기온상승은 온량지수를 높여 가죽나무, 민주엽나무, 귀룽나무 등 남부지방 수종이 대상지에 생육하였다. 광대나물, 계요등, 자주괴불주머니의 국가 기후 변화 생물지표종 출현, 외래목본식물 발달되었다. 강수량 감소는 건조지성 식물 발달과 강수 패턴 변화는 둔치를 주기적으로 범람하였다. 주기적 범람은 습윤지성 식물 발달, 교목과 허부식생 쓰러짐 현상이 나타났다. 생태계교란식물 면적 확대는 토양수분 유지가 되지 않아 발생하였다. 기후변화로 인한 수문환경 변화는 하천 육역화 진행과 함께 직·간접적으로 식물생태에 영향을 주었음이 판단되었다.

셋째, 서식환경 변화로 인해 국가 기후변화 생물지표종의 출현과 계절별 야생조류 출현시기가 변화하였다. 기온상

승으로 생물계절학적 변화는 만물가마우지(WV)와 중대백로(SV)의 출현으로 나타났다. 2002년 탄천 생태·경관보전지역 지정의 오리와 주요종 쇠오리, 청둥오리, 흰뺨검둥오리, 넓적부리, 홍머리오리 등 개체수 변동이 나타났다. 강수량과 강수 패턴의 변동은 오리와 쇠오리, 고방오리, 넓적부리, 홍머리오리 등 수면성 오리류의 급격한 개체수 감소와 종 변화로 나타났다. 2020년 겨울철 대상지 우점종은 청둥오리, 물닭, 붉은머리오목눈이, 중대백로, 흰뺨검둥오리 순으로 나타났다. 원양과 만물가마우지는 2015년부터 대상지에서 관찰되기 시작하였다. 기후변화가 심각해지는 최근 흰뺨검둥오리와 청둥오리의 텃새화, 원양과 물닭의 출현은 온도상승이 직·간접적 영향을 주었을 것으로 판단되었다. 야생조류 출현종수와 개체수는 매년 변화였고 도시 환경중 증가와 차이길드별 종 구성 변화로 나타났다. 서식환경의 변화는 야생조류에 영향을 주어 종 구성과 개체수 변동에 직·간접적 영향을 주었음이 판단되었다.

넷째, 야생조류 서식환경은 기후변화의 불규칙성과 비예측성 변동의 불확실한 영향을 받아 직·간접적으로 변화된 것으로 판단되었다. 기후변화로 인해 수문환경의 하상계수와 수위 변화는 식물생태의 변화를 가져왔다. 수면과 퇴적지 면적 감소는 하천 형태를 변화하여 하천에 서식하는 식물중 변화와 야생조류 개체수 감소를 가져왔다. 육역화로 인해 버드나무류의 증가는 서식지 변화로 야생조류의 종 구성과 개체수 변화로 나타났다. 목본식물군락 면적 증가는 차이길드와 영소길드의 변화로 수간과 수관에서 서식하는 딱따구리류와 박새류가 출현되었다. 수문환경과 식물생태, 야생조류의 하천 생태계는 유기적으로 연결되어 있음을 알 수 있었다. 야생조류의 서식환경 변화는 기후변화의 직·간접적 영향을 받아 수문환경 변화, 식물생태 변화, 야생조류 변화로 순차적 영향을 받는 것으로 판단되었다. 본 연구는 기후변화로 인한 야생조류 서식환경 변화로 도시하천의 생물 다양성과 건강성 향상을 위한 생태계서비스 차원의 환경생태 기초연구로 참고할 가치가 높을 것으로 판단된다. 또한 보호지역의 환경·생태적 기능을 충분히 할 수 있도록 하천 생태·경관보전지역 관리지표로 활용되고자 하였다.

본 연구의 한계는 하천 재원과 수리·수문 분석이 포함되지 않았고 대상지 내 여러 차례 정비 사업으로 인한 인위적 식재수종, 하천에 살고 있는 다양한 생물에 대한 연구가 포함되지 않은 한계점을 가지고 있다. 향후 하천생태계의 체계적인 관리를 위해서 보다 종합적인 연구가 이루어져 하천의 관리방안 수립에 활용해야 할 것이다.

References

1. Defra(2012) Climate Change Risk Assessment for the Biodiversity and UK.
2. Dudley(2008) Guidelines for Applying Protected Area Management Categories, Gland, Switzerland: IUCN, 3-35.
3. Fang, J. and M. J. Lechowicz(2006) Climatic limits for the present distribution of beech (*Fagus L.*) species in the world. *Journal of Biogeography* 33(10): 1804-1819.
4. Han River Basin Management Committee(2010) Climate Change Impact and Control Measures of Aquatic Ecosystems, Han River Basin Management Office. pp. 283.
5. Hong, S. B., H. M. Jeong, M. S. Shin, J. Y. Kim and I. Y. Jang(2019) Risk assessment of temperature increase for wetland flora in South Korea. *Journal of Climate Change Research* 10(4): 309-1316.
6. IPCC(2014) Climate Change 2014: Synthesis Report, Contribution of Working Group I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, 1-151.
7. IUCN WCPA(2008) Guidelines for Applying Protected Area Management Categories. 한국보호지역포럼(역), 보호지역 카테고리 적용을 위한 가이드라인. 서울: 한국보호지역포럼, 2010.
8. Jo, H. K and T. W. Ahn(2006) Environmental characteristics and nature-friendly planning strategies for an urban stream - The case of Chuncheon's Gongji stream -. *Journal of the Korean Landscape Society* 34(3): 1-11.
9. Kang, S. H.(2007) The Assessment of Urban Stream Ecosystem for Ecological Management - On the Case of Cheonggye-cheon -, Ph.D. Thesis at Sangmyung University Graduate School. pp. 193.
10. Kim, B. H.(2010) Enhancing Management System of the Protected Areas in Korea, Ph.D. Thesis at Seoul National University Graduate School. pp. 53.
11. Kim, S. J.(2011) Impact of Climate Change on Water Resources and Ecological Habitat in a River Basin. Ph.D. Thesis at Inha University Graduate School. pp. 122.
12. Kim, I. G.(2008) Study on the Development of Wildbirds Habitat-Models in Urban Stream - A Case Study of Three Streams in Daejeon Metropolitan City -. Master's Thesis at Chungnam National University. pp. 144.

13. Kim, H. W.(2020) Changes of the Flowering Time of Trees in Spring by Climate Change in Seoul, South Korea. Master's Thesis at Ewha Woman's University Graduate School. pp. 57.
14. Kong, W. S., O. K. Kun, S. G. Lee, H. N. Park and S. H. Cho(2014) Distribution of high mountain plants and species vulnerability against climate change. *Journal of Environmental Impact Assessment* 23(2): 119-136.
15. Kwak, J. I.(2011) A Study on Vegetation Structure Characteristics and Ecological Succession Trends of Seoul Urban Forest, Korea. Ph.D. Thesis at Seoul National University Graduate School. pp. 339.
16. Lee, M. W.(2007) A Study on the Satisfaction of Hydrophilic Space Facility in Natural Stream in Urban Areas: Focused on the Natural Stream Cases of Seoul. Master's Thesis at Hanyang University Graduate School of Urban Studies. pp. 135.
17. Lee, P. H.(2002) Growth Characteristics and Community Dynamics of Riparian Salix in South Korea. Ph.D. Thesis at Kyungang National University. pp. 64.
18. Lee, S. G.(2013) An Integrated Study on the Population Change of Korean Egrets Species in Damaged Habitats and Their Conservation Strategies. Ph.D. Thesis at Dankook University. pp. 14.
19. Lim, C. H., S. H. Kim, Y. Choi, M. C. Kafatos, W. K. Lee(2017) Estimation of the virtual water content of main crops on the Korean Peninsula using multiple regional climate models and evapotranspiration methods. *Sustainability* 9(7): 1172.
20. Park, K. S.(2015) Improving Method for the Wildbird Habitat in Urban River- For Seongnaecheon in Seoul -A Case of Seongnaecheon(Stream) in Seoul. Master's Thesis at Seoul National University Graduate School. pp. 111.
21. Park, M. O.(2012) Study on Physical Characteristics Variation of Fish Habitat by Influence of Climate Change. Ph.D. Thesis at Dongshin University Graduate School. pp. 192.
22. Shin, D. H., T. S. Roh, H. Y. Oh and G. S. Lee(2003) Floral change in the urban stream after natural stream work. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 23(2): 67-73.
23. Shon, T. S.(2011) The Climate Change Impacts Assessment on Water Resources and Environment in South Korea. Ph.D. Thesis at Pusan National University Graduate School. pp. 219.
24. Thackeray, S. J., P. A. Henrys, D. Hemming, J. R. Bell, M. S. Botham, S. Burthe, P. Helaouet, D. G. Johns, I. D. Jones, D. I. Leech and E. B. Mackay(2016) Phenological sensitivity to climate across taxa and trophic levels. *Nature* 535(7611): 241-245.
25. Ministry of Environment(2006) Winter Bird Simultaneous Sensors, Ministry of Environment. pp. 125.
26. Ministry of Environment(2015) Guidelines for River Restoration, Ministry of Environment. pp. 98.
27. National Institute of Ecology(2020) Assessment of Climate Change Risk for Ecosystems, National Institute of Ecology. pp. 15.
28. National Academy of Environmental Sciences(2013) White Egrets and Herons in Korea, National Academy of Environmental Sciences. pp. 40.
29. Seoul Metropolitan City(2001) A Study on the Study of the Ecological Area of the Seoul Metropolitan Government, Report to Seoul Metropolitan City.
30. Seoul Metropolitan City(2007) A Study on the Measures for Observation and Management of Ecological Changes in Tancheon Ecological Landscape Conservation Area, Report to Seoul Metropolitan City.
31. Seoul Metropolitan City(2013) A Study on the Precise Change of Ecological Landscape Conservation Area, Report to Seoul Metropolitan City.
32. Ministry of Environment (<https://www.me.go.kr>)
33. Meteorological Data Opening Portal of Korea Meteorological Administration (<https://data.kma.go.kr>)
34. National Land Information Platform (<https://map.ngii.go.kr>)
35. Water Environment Information System (<https://water.nier.go.kr>)