

Research Paper

한강 주요 하천의 겨울철 조류상 변화 장기 모니터링: 기존 생물다양성과 계통적 생물다양성 평가 및 비교

윤성호* · 홍미진* · 최진환* · 이후승** · 유정철*

경희대학교 생물학과·한국조류연구소*, 한국환경정책·평가연구원**

Wintering Avifauna Change Long-term Monitoring in Major Watershed Tributaries in Han River: Fundamental and Phylogenetic Biodiversity Assessment and Comparison

Seongho Yun* · Mi-Jin Hong* · Jin-Hwan Choi* · Who-Seung Lee** · Jeong-Chil Yoo*

Department of Biology and Korea Institute of Ornithology, Kyung Hee University*
Korea Environment Institute**

요약: 개체수와 종수에 기초한 기존 생물다양성 평가와 달리, 계통적 다양성 평가는 계통유전적 다양성 및 생태적 다양성도 평가할 수 있다. 본 연구에서는 서울특별시 철새보호구역으로 지정되어 다년간의 생태모니터링이 용이한 한강의 주요 하천인 중랑천, 청계천 및 안양천의 지난 9년간의 겨울철 조류상 장기 모니터링 결과를 이용하여 기존의 다양성 평가와 계통적 다양성 평가를 각각 수행한 뒤 각 결과가 내포하는 정보에 대해 고찰했다. 분석결과 중랑천과 안양천은 전반적으로 조류 개체수가 시계열적으로 감소한 반면 청계천은 개체수 변동이 없었다. 종 풍부도는 청계천에서 시간에 따라 소폭 상승한 반면, 중랑천과 안양천은 연도별로 차이가 없었다. 기존 종 다양도는 안양천을 제외한 중랑천과 청계천에서 시간에 따라 증가했는데, 계통적 종 다양도는 청계천에서만 증가하는 추세를 보였다. 이러한 생물다양성 평가 지수의 변동은 각 조사구역 내에서 발생한 공사 등의 인위적 요인에 의한 것으로 판단되며, 종 다양도와 계통적 종 다양도는 같은 결과를 반영하지 않는다는 것을 보여준다. 따라서 본 연구는 생물다양성 평가에 있어 유전 및 생태적 관점과 같은 다양한 시각에서 고려할 필요가 있음을 시사한다.

주요어: 종 풍부도, 종 다양도, 계통적 다양도

Abstract: Information on biodiversity plays an important role in conservation planning for ecosystem. As existing biodiversity indices are calculated and predicted only based on the number of individuals and species, it is difficult to explain aspects of genetic and ecological diversity.

First Author: Seongho Yun, Tel: +82-2-961-0727, E-mail: hannury2002@khu.ac.kr, ORCID: 0000-0002-1608-729X
Corresponding Author: Who-Seung Lee, Tel: +82-415-7323, E-mail: wslee@kei.re.kr, ORCID: 0000-0002-2203-6616
Co-Authors: Mi-Jin Hong, Tel: +82-2-961-0727, E-mail: sea-story77@hanmail.net, ORCID: 0000-0001-6897-1506
Jin-Hwan Choi, Tel: +82-2-961-0727, E-mail: lassie81@hanmail.net, ORCID: 0000-0002-1020-8281
Jeong-Chil Yoo, Tel: +82-2-961-0849, E-mail: jcyoo@khu.ac.kr, ORCID: 0000-0003-0173-3516

Received: 12 March, 2021. Revised: 4 June, 2021. Accepted: 7 June, 2021.

Phylogenetic diversity can indirectly evaluate ecological diversity as well as genetic diversity overlooked by existing biodiversity assessments. In this study, typical metrics of biodiversity (e.g., species diversity, species richness, etc.) and phylogenetic diversity were evaluated together using a long-term monitoring data of winter birds in Jungrang, Cheonggye and Anyang stream where are designated as Seoul migratory bird reserves. Then discussed the meaning of each assessment result. In Jungrang and Anyang stream, the number of individuals generally decreased over time, whereas in Cheonggye stream, there was no significant change. In addition, species abundance increased over time slightly in Cheonggye stream, while there was no significant change in Jungrang and Anyang stream. Species diversity temporally increased in Jungrang and Cheonggye stream, excluding Anyang stream, but phylogenetic diversity showed a tendency to increase only in Cheonggye stream. These changes in the biodiversity assessment indices are thought to be due to anthropogenic disturbances such as construction that occurred within each site, and it was shown that species diversity and phylogenetic diversity do not always lead to the same assessment results. Therefore, this study suggests that biodiversity assessment needs to be considered from various contexts such as genetic and ecological perspectives.

Keywords : Species Richness, Species Diversity, Phylogenetic Diversity

I. 서론

생물다양성은 생태계의 질과 기능을 평가하는 데 매우 중요한 역할을 함은 물론, 지역 개발 및 생태계 보전을 위한 계획 수립의 기준점으로 이용되기도 한다(Wilson et al. 2005). 군집생태학에서의 전통적인 생물다양성 평가는 지역 내 분포하고 있는 종의 수와 개체수를 이용하여 종 풍부도와 종 다양도 등을 확인하는 방법을 주로 이용해 왔다(Lawton et al. 1998; Clarke and Warwick 2001; Gotelli and Colwell 2001; Jost 2006). 그러나 이 방법들은 기본적으로 종수 및 개체수만을 이용하여 평가하는 산술적인 개념을 바탕으로, 조사된 공간에서의 서로 다른 종이 얼마나 존재하는가에 주된 초점을 둔다. 따라서, 서로 다른 종으로 구성되었지만 같은 종 다양도를 지니는 지역 간 비교를 하게 될 경우, 두 지역 간에 나타날 수 있는 환경적 이질성, 유전적 다양성 및 계통진화적 중요도 등에 대한 평가 및 비교가 어렵다는 단점이 있다. 이에 따라 생물다양성 보전에 중점을 둔 여러 연구에서는 이러한 전통적인 생물다양성 평가 지수의 효용성에 대하여 의문을 제기해왔다(Crozier 1997; Bonn and Gaston 2005; Fleishman et al. 2006;

Devictor et al. 2010; Davies and Cadotte 2011).

최근 생물다양성 평가의 고도화를 위한 방안으로 계통적 다양성(phylogenetic diversity; PD)을 함께 평가하는 연구 사례가 점차 증가하고 있다(Leonard et al. 2006; Gerhold et al. 2008; Pavoine et al. 2009; Chao et al. 2010; Huang et al. 2020). Faith(1992)에 의해 제안된 계통적 다양성은 계통수에서 주어진 일련의 분류군들을 포함하는데 요구되는 모든 계통적 거리의 총 길이의 합으로 정의된다. 모든 생물종들은 종분화가 일어난 진화적 시점이 다르므로, 서로 분화된 시기가 짧은 종들일수록 비슷한 유전적 특징을 지니고 있으며, 반대로 분화된 시기가 큰 차이를 보이는 종일수록 그만큼 오랜 시간 동안 유전적인 차이가 발생할 가능성이 크다. 계통적 다양성 평가는 이러한 진화적 분화 시점을 이용하여 단순히 지역 내 종수 및 개체수를 이용한 종 다양도만을 평가하는 것이 아니라, 계통진화적 종의 생활사적 특성(life-history traits)의 다양성을 평가할 수 있도록 해준다. 또한 계통도 상의 중간 거리 차이는 종의 차이, 즉 생태적 지위(ecological niche)의 차이를 고려한 평가방법으로 유용하게 활용될 수 있다(Faith 1992).

현재 우리나라에서 시행되고 있는 국가생물다양성 전략 및 환경영향평가 등과 같은 생물다양성 평가와 관련된 정책에선 생물의 종수 및 개체수 위주의 평가를 수행하기 때문에 기존 생물다양성 평가는 가능하지만, 유전 및 생태적 다양성에 대한 평가 기법 및 이행 기반이 마련되어 있지 않다(Kwon et al. 2006). 또한, 생물다양성협약(Convention on Biological Diversity, CBD)은 종 다양성 뿐 아니라 유전적, 생태적 다양성에 대한 평가 또한 수반되어야 한다고 권고하고 있다(CBD 2010). 특히 최근 생물다양성과학 기구(IPBES)에서는 계통적 다양성을 생물다양성 평가지표 중 하나로 제시하였고(IPBES 2019), IUCN(세계자연보전연맹)에서는 계통적 다양성 평가의 지표화를 위한 태스크포스(TF)를 운영중에 있다. 따라서 국내에선 다양한 생물다양성 모니터링 사업 및 연구 분야에서 추가적으로 유전적, 생태적 다양성을 평가할 수 있는 방법과 각 다양성 평가 결과가 어떤 의미를 갖고 상호 보완할 수 있는지에 대한 기초적인 연구가 필요 할 것으로 여겨진다.

본 연구에서는 기존 생물다양성 평가와 계통적 다양성 평가 방법을 함께 적용함에 있어 한강의 주요 하천인 중랑천, 청계천 안양천의 지난 9년간 겨울철 조류 군집을 대상으로 개체수, 종 풍부도 및 다양도 등의 각 생물다양성 평가 지수를 확인 및 비교해보고자 한다. 본 조사지역은 서울특별시에서 2006년부터 철새 보호 구역으로 지정됐으며, 서울특별시청 주관 하에 인위적 생태 교란이 제한되기 때문에 본 조사지역으로 선정했다. 또한, 기존 생물다양성과 계통적 다양성이 내포하고 있는 정보의 특성에 대해 고찰해보고자 한다.

II. 연구방법

1. 연구지역

본 연구는 한강의 주요 하천인 중랑천, 청계천 및 안양천의 하류부를 대상으로 수계 및 수변과 인접한 산책로로 조사지역을 한정하여 진행했다(Figure 1). 중랑천 조사지역은 한강 합류부에서부터 청계·중랑천 합류부를 지나 전봉 빛물펌프장(가람교)까지 이르는 구

간이며 거리는 약 3.3km, 구역 면적은 약 591,407m²이다. 또한 하천이 남서 방향으로 흐르며 중랑천의 남단 하류부는 한강 본류와 맞닿고 있다. 청계천 조사지역은 청계천·중랑천 합류부부터 고산자교 사이 구간이며 거리는 약 2.0km, 구역 면적은 약 361,316m²이다. 본 하천은 남쪽 방향으로 흐르며, 하류부가 중랑천 조사지역 상류부와 맞닿고 있다. 마지막으로 안양천 조사지역은 오목교부터 목동교 사이 구간으로 지정되어 있으며, 구역의 총길이는 약 1.0km, 구역 면적은 약 318,800m²이다. 안양천은 한강 본류의 남쪽에 위치하여, 다른 두 구역의 하천과 달리 북쪽 방향으로 흐르는 하천이며, 또한 다른 두 조사지역보다 수역 폭이 넓다. 세 조사지역은 공통적으로 수변에 초지가 인접해 있으며, 초지 너머로 인근 시민들의 통행을 위한 산책로가 조성되어 있다.

2. 조류 현황 조사

조류 조사는 중랑천과 청계천의 경우 2006-2007년부터 2019-2020년, 안양천은 2011-2012년부터 2019-2020년까지 매년 11월 마지막 주부터 매주 1회, 11주 동안 실시돼 다음해 2월 첫째 주까지 진행됐다. 본 연구에서는 동일한 시기의 생물다양성을 비교하기 위하여 세 조사지역의 2011년 11월부터 2020년 2월까지의 조사 결과만을 이용하였다. 조류 이동에 의한 편향을 제거하기 위해, 같은 날 각 조사지역에 배정된 전문 조류 조사원들이 오전 8시부터 동시에 조류 조사를 수행했다. 각 조사자들은 10배율 쌍안경과 60배율 필드 스코프를 이용하여 선조사법(line census)과 정점조사법(point census)을 병행하면서 각 지역에서 관찰된 조류의 종명과 개체수를 기록하였다(Bibby et al. 2000). 추가적으로 청계천과 중랑천의 경우, 서로 인접해있어 중복 조사를 방지하기 위한 방안이 필요했으며, 이를 위해 인접한 지점에서 동시에 조사를 수행했다.

3. 생물다양성 평가 및 통계 분석

생물다양성 평가 지수는 각 조사지역과 조사가 진행된 날짜별로 구분하여 계산하였다. 본 연구에서는 기존 생물다양성 평가에 주로 이용되는 3가지 지수

(개체수, 종풍부도, 종다양도) 와 더불어 계통적 다양도 지수로 총 4가지의 평가 지수가 이용됐다. 개체수는 각 조사별 관찰되는 조류 개체수의 총합으로 평가했으며, 종 풍부도는 각 조사별 관찰되는 조류 종의 수로 평가했다(Davies and Cadotte 2011). 종 다양도는 조사지역 내 종 예측의 어려움을 표현하는 엔트로피의 정량화 지수인 Shannon-Weaver 종 다양도 지수가 이용됐으며 계산식은 아래와 같다(Shannon and Weaver 1949).

Shannon-Weaver의 종 다양도(H'):

$$H' = -\sum p_i \ln(p_i) \quad (1)$$

p_i = 전체 출현 개체수 중 i 번째 종이 차지하는 비율

마지막으로 계통적 생물다양도(Phylogenetic diversity, 이하 PD)는 집단 내에서 관찰된 종들의 계통 분화 시간의 총합, 즉 조사구역 내에서 관찰되는 종 계통도 상의 모든 간선 길이의 합으로 나타낼 수 있다(Faith 1992). 이를 평가하기 위해, 계통거리 데이터베이스(BirdTree; <http://www.birdtree.org>)를 이용하여 조사지역 내에서 관찰되는 종들의 계통적 정보를 획득하였다. 본 연구에서는 Hackett et al. 2008의 조류 계통 분류 데이터베이스를 토대로 구축된 'Hackett All Species: a set of 10,000

trees with 9993 OTUs each' 조건으로 총 500개의 표본 계통수를 확보하였다. 이를 BEAST v2.6.3의 TreeAnnotator를 통해 합의계통수(consensus tree)를 생성한 뒤 PD를 계산하였다(Ricklefs and Jønson 2014, Figure 2).

기초 및 계통적 생물다양성 지수의 연간 변동 추이를 확인해보기 위해 선형 회귀 모델을 이용하였다. Shapiro-Wilk 정규성 검정을 통해 각 분석에 대한 정규성을 확인하였으며, 각 조사지역 별 조류 개체수의 정규화를 위해 로그 치환을 시행하였다. 각 생물다양성 지수와 통계분석은 R 3.5.0(R Core Team 2017)을 이용하여 계산했으며, 계통수 분석은 *picante* 패키지(Kembel et al. 2010)를 이용하여 산출되었다.

III. 결과

2011-2012년부터 2019-2020년 월동기인 11월 말부터 2월 초까지 실시된 조류 조사에서 관찰된 각 조사지역의 조류의 총 종수는 중랑천 78종, 청계천 61종, 안양천 57종이었으며, 조사차수별 나타난 평균 종수(±표준편차)는 중랑천에서 25(±3.9)종, 청계천에서 16(±3.6)종, 안양천에서 19(±3.5)종으로 나타났다. 연간 조사차수별 관찰되는 종수의 변화 추이를

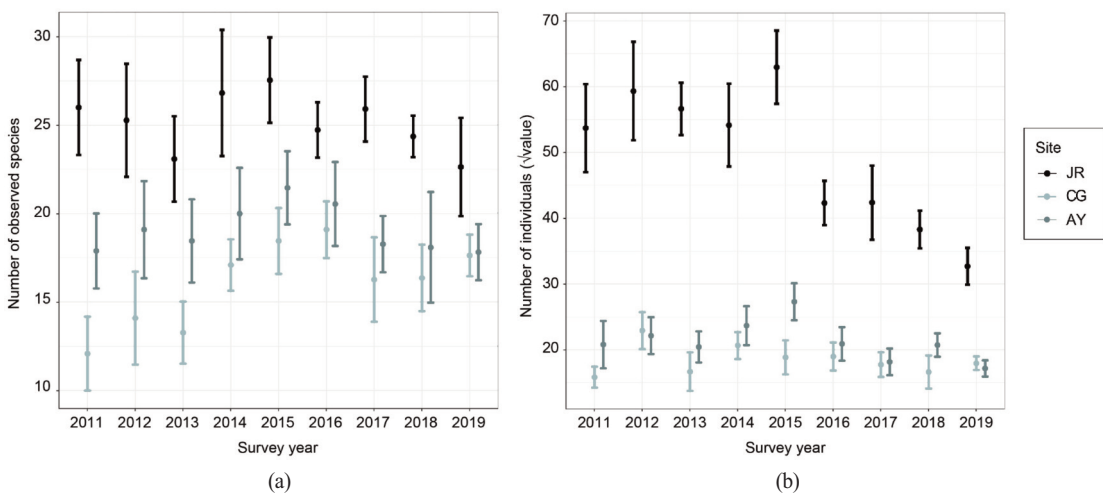


Figure 3. Total number of avian species (a) and number of individuals (b) of three reserves following survey years. Points represent mean number of observed species and mean number of avian individuals, and vertical lines indicate these confidential intervals in the study site of total surveys during the survey year.

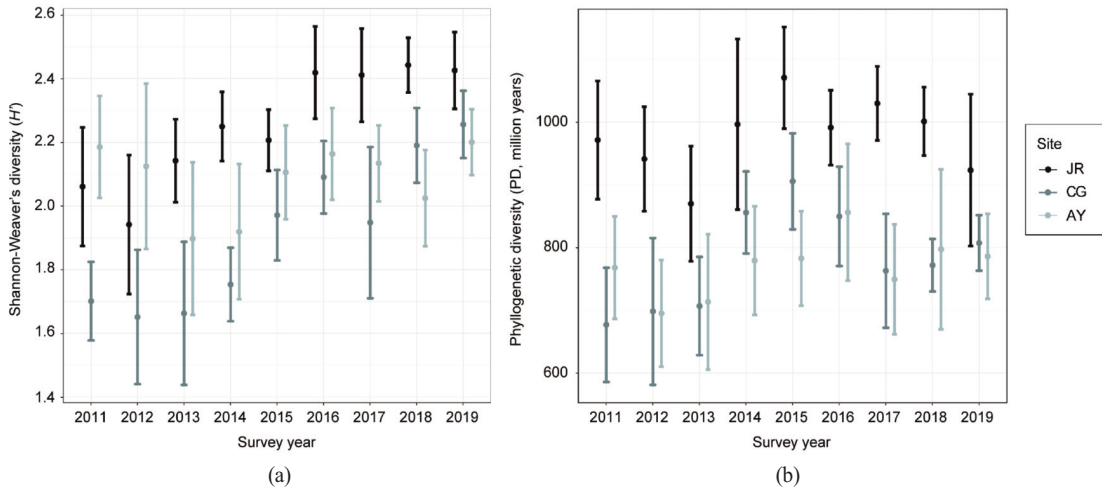


Figure 4. Measures of species diversity indices following survey years, with three study area comparison: (a) Simpson's species diversity (H') and (b) phylogenetic diversity (PD). Points represent mean number of H' , and PD respectively, and vertical lines indicate these confidential intervals in the study site of total surveys during the survey year.

보면, 청계천에서 유의한 증가 패턴을 보였으나, 다른 두 구역은 조사기간 동안 종수의 유의한 변동이 발생하지 않았다(선형회귀모델: 중랑천: $r^2=0.02$, $F_{1,98}=1.97$, $P=0.16$; 청계천: $r^2=0.21$, $F_{1,98}=25.61$, $P<0.001$; 안양천: $r^2=0.002$, $F_{1,98}=0.24$, $P=0.62$, Figure 3(a)).

전체 조사기간 동안 관찰된 조류 종별 최대개체수의 합은 중랑천 5,452($\pm 1,732.9$)개체, 청계천 852(± 213.4)개체, 안양천 1,174(± 326.1)개체로 나타났으며, 조사차수별 관찰된 조류의 총 개체수는 중랑천 2,574($\pm 1,297$)개체, 청계천 355(± 146.1)개체, 안양천 472(± 204.3)개체로 나타났다. 연간 조사차수별 관찰개체수의 변동 패턴을 보면, 청계천을 제외한 중랑천과 안양천에서 연간 유의한 감소 패턴이 나타남을 알 수 있었다(선형회귀모델: 중랑천: $r^2=0.35$, $F_{1,98}=53.8$, $P<0.001$; 청계천: $r^2=0.02$, $F_{1,98}=1.78$, $P=0.19$; 안양천: $r^2=0.06$, $F_{1,98}=6.48$, $P=0.01$, Figure 3(b)).

종 다양도 지수(H')의 경우, 연간 평균 중랑천 2.3(± 0.27), 청계천 1.9(± 0.32), 안양천 2.1(± 0.27)로 나타났으며, 안양천을 제외한 중랑천과 청계천에서 시기에 따른 유의한 종 다양도 지수의 증가 패턴이 나타났다(선형회귀모델: 중랑천: $r^2=0.35$, $F_{1,98}=51.8$,

$P<0.001$; 청계천: $r^2=0.41$, $F_{1,98}=68.09$, $P<0.001$; 안양천: $r^2=0.01$, $F_{1,98}=0.78$, $P=0.38$, Figure 4(a)).

계통적 종 다양도 지수(PD)는 기초 종 다양도 지수와 달리, 중랑천과 안양천에서는 시간에 따른 계통적 다양도의 변화가 나타나지 않았으나, 청계천에서만 시간에 따른 계통적 다양도 사이에 약한 양의 선형관계를 보였다(선형회귀모델: 중랑천: $r^2=0.01$, $F_{1,98}=0.83$, $P=0.37$; 청계천: $r^2=0.08$, $F_{1,98}=8.054$, $P=0.01$; 안양천: $r^2=0.03$, $F_{1,98}=2.75$, $P=0.1$, Figure 4(b)).

IV. 고찰 및 결론

전체적으로 한강의 주요 하천인 중랑천, 청계천 및 안양천에 도래하는 월동조류의 시계열적인 생물다양성 평가 결과는 하천(지역)에 따라 상이하였으며, 그 차이는 평가지수에 따라 다양하게 나타났다. 중랑천의 경우 개체수가 매년 지속적으로 감소하였는데, 이에 영향을 미친 것으로 추정되는 요인은 수변 환경에 직접적인 영향을 주는 하천에서의 인위적 공사로 판단된다. 참고로 2016-2017년에는 중랑천을 가로지르는 응봉교 확장 공사를 위한 물막이 공사가 함께 시행되었으며, 이로 인하여 중랑천에서의 조사결과 흰죽지 *Aythya ferina*, 땀기흰죽지 *Aythya fuligula*,

청둥오리 *Anas platyrhynchos*와 같은 주요 수조류의 개체수가 급격하게 감소하였다. 하천 물막이 공사는 하천의 유량 감소와 하천 바닥의 노출을 야기하는데, 이러한 환경 변화는 수조류의 개체수 감소와 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다(Dugger & Feddersen 2009). 반면 개체수 변동 추이와는 달리, 중랑천의 조류 중 풍부도는 유의한 변화를 보이지 않았다. 장거리 이주 철새들은 서식지에 대한 충실도가 높은 것으로 알려져 있는데(Greenwood 1980; Anderson et al. 1992; Robertson & Cooke 1999), 이 때문에 공사로 인한 서식지 손실이 발생함에 따라 물리적인 공간 제한으로 중랑천을 이용하는 개체수는 감소하였지만, 기존에 관찰되던 종수는 어느 정도 유지된 것으로 보인다.

청계천의 경우, 연도별 뚜렷한 개체수의 변동은 관찰되지 않았으나 종 풍부도는 매년 증가하는 경향을 보였다. 청계천은 유량이 적어 흑한에 의한 결빙이 잦으며(Korea Meteorological Administrator 2017), 얇은 수심과 좁은 하폭 등의 환경적 제약으로 인하여(Kang 2008) 청계천으로 많은 개체들이 유입되기는 어려웠으므로 개체수의 변동이 크지 않았던 것으로 판단된다(Riffell et al. 2001). 또한, 중랑천 하류부 수계 및 수변 전반에 걸친 인위적 공사 등이 빈번히 발생하여 중랑천 내 조류 전반이 이용할 수 있는 공간의 이용이 제한되곤 하였다. 이로 인해, 서식지로 이용 가능한 공간이 중랑천에 비하여 상대적으로 부족한 지역임에도 불구하고 인근의 청계천 가능성이 커져 종 풍부도가 증가한 것으로 사료된다. 하천 유량 변화나 결빙상태 그리고 공사수행이 하천 내 도래하는 조류의 서식장소에 미치는 영향 등에 대해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

안양천의 경우, 조사기간 동안 조류 개체수가 매년 감소하였는데 이는 인위적인 방해요인이 주된 영향을 미친 것으로 사료된다. 안양천 조사지역 내에서 낚시 행위나 산책로를 벗어나 수변을 따라 산책을 하는 등의 인위적 방해요인이 지속적으로 발생하였으며, 조사구간과 인접한 목동고 하류부 부근에서 물막이 공사 및 중장비를 이용한 수변 공사가 빈번하였다(personal observation). 더욱이 2019-2020년부터

조사지역 내 호안 공사가 진행되어, 전년 대비 개체수의 감소에 주요 요인으로 작용한 것으로 판단된다. 특히 안양천은 수변에서 식물의 종자 등을 섭식하는 홍머리오리 *Anas penelope*가 빈번하게 관찰되던 곳이었으나 인공호안 공사로 그 개체수가 급격하게 감소한 것으로 생각된다. 안양천의 종 풍부도는 중랑천과 마찬가지로 연간 유의한 변동이 나타나지 않았는데, 이 또한 장거리 이주 철새의 월동 서식지 충실도가 높은 것이 주요 요인으로 판단된다.

월동조류에 대한 종 다양도는 안양천을 제외한 중랑천과 청계천에서 2014년도 이후 지속적으로 증가하고 있음이 확인되었다. 일반적으로 종 다양도는 관찰되는 종수와는 양의 상관관계를 가지며, 관찰되는 개체수와는 음의 상관관계를 갖는다(Magurran & McGill 2010). 하지만 안양천의 경우, 실제 관찰되는 종수의 유의한 변동은 없었고, 전체 개체수의 급격한 감소 패턴이 나타났음에도 불구하고 종 다양도는 증가하는 패턴을 보였다. 또한, 중랑천과 청계천에서 종 다양도가 증가했으나, 그 이유가 개체수의 감소로 인한 영향으로 나타난 변동이라고 볼 수 있다. 이러한 Shannon-Weaver의 종 다양도 계산식은 단순히 조사지역 내 종의 상대적 예측 가능성만을 판단하기 때문에 생태계의 질을 평가하는 지수로서는 한계가 있다고 볼 수 있다(e.g., Faith 1992).

한편, 계통적 다양도 지수 평가 결과는 청계천과 안양천에서 앞선 종 다양도 지수의 결과와 같은 양상을 보였으나, 중랑천의 경우 종 다양도의 증가와 달리 계통적 다양도는 유의한 변화를 보이지 않았다. 기본적으로 두 다양도 지수 모두 공통적으로 종수를 평가 변수로 이용하므로 서로 양의 상관관계를 갖는다(Rodrigues et al. 2005; Flynn et al. 2011; Safi et al. 2011; Cadotte & Davies 2016; Voskamp et al. 2017). 그러나 계통적 다양도는 얼마나 계통학적으로 멀리 떨어진 개체들이 해당 군집으로 새로 유입되거나 군집에서 제외되는가에 따라 변화의 폭이 달라지기 때문에 종 예측의 어려움을 엔트로피의 양적 평가로 나타내는 Shannon-Weaver의 종 다양도와는 서로 다른 결과를 나타낼 수 있다(Davies & Buckley 2011). 본 연구의 중랑천과 같이 종 다양도 지수는 중

가하지만 계통 다양도 지수는 변화가 없는 경우는, 크게 두가지 경우로 나누어 고려해 볼 수 있다. 첫째로 종수의 변화가 없이 중랑천 군집 내 종별 개체수가 균등해지거나 우점종이던 종의 개체수가 감소하는 경우이다. 실제로 중랑천에서 군집 내 종수는 시간이 지나도 큰 변화가 없는 패턴을 보였으나, 조류 개체수는 시간이 지날수록 점차 감소하는 추이를 보였다. 두 번째로 군집 내 새로이 유입된 종이 기존 군집내 종들과 근연종일 경우이다. 새로이 출현하는 종들이 군집 내 기존 종들과 유전적으로 가까운 종일 경우, 전체 군집 내 유전적 다양성에 미치는 영향이 미미할 수 있다. 실제로 최근 몇 년간 중랑천에서 대표 우점 조류인 흰죽지, 멧기흰죽지와 근연종인 미국흰죽지 *Aythya americana*와 적갈색흰죽지 *Aythya nyroca* 등 *Aythya* 속에 속하는 종의 도래가 빈번하게 확인되었다. 하지만, 다년간의 종수 및 개체수의 변동에 대한 외부 환경적 통제가 이루어지지 않았기 때문에 이러한 결과에 대한 구체적인 추론의 어려움이 있다. 그러나 이를 통해 확실히 설명할 수 있는 점은 종수라는 같은 공변량을 지니고 있는 종 다양도와 계통적 다양도는 같은 군집을 설명할 때 서로 다른 결과를 보여 줄 수 있다는 점이다.

이러한 계통적 다양도 지수는 결과적으로 종 출현의 희소성과는 관계없이 얼마나 오래전에 진화해서 고유의 진화계통 분기를 가지고 있는지에 주요 초점을 맞춘 지수이다. 이러한 특징 때문에 오늘날 희소성에 초점을 둔 멸종위기종 및 법정 보호종 등의 특정종을 중점으로 한 환경영향평가나 모니터링 조사에 적합하지 않다. 예를 들어, 재두루미, 두루미의 법정보호종으로 구성된 군집보다 참새, 두루미로 구성된 군집이 더 높은 계통학적 다양한 가치를 갖는다고 볼 수 있다. 그 대신 이러한 계통적 다양도 평가는 군집의 유전적 가치 및 간접적으로 생태적 지위의 다양도를 평가하는데 기존 다양도 지수보다 도움이 될 수 있다.

본 연구는 한강 주요 하천 하류부의 겨울철 조류상에 대한 장기간의 생물다양성 평가 결과를 보여주었으며, 또한, 기존 생물다양성 평가 및 계통적 생물다양성 평가의 결과가 서로 상이할 수 있음을 나타냈다.

그러나, 특정 지역 내 생물다양성 평가는 평가 대상의 먹이 자원 유무와 더불어, 인근 환경의 변화 및 천적의 출현 등에 의한 영향을 직접적으로 받을 수 밖에 없다. 따라서 추후 본 조사지역 내 수조류에 직접적인 영향을 줄 수 있는 환경 변화와 생물다양성 평가 결과 사이의 관계를 파악하는 것이 필요할 것으로 판단된다. 본 연구 결과는 생물다양성협약이 권고하는 “중, 생태 및 유전학적 측면을 전부 아우르는 생물다양성 평가”를 따르는 국내 모니터링 연구의 한 사례가 될 수 있으며, 다양한 평가기법의 활용을 통한 이와 같은 다각적인 모니터링 연구 사례의 누적은 국내 자연환경 보전 및 관리 정책 결정과 환경영향평가의 고도화에 새로운 시각을 제공해 줄 수 있을 것으로 판단된다.

사사

이 연구는 2020년도 KEI연구과제(RE2020-05) “생태정보학적 생물다양성 평가기술 개발(II)” 지원으로 연구되었습니다.

References

- Anderson MG, Rhymer JM, Rohwer FC. 1992. Philopatry, dispersal, and the genetic structure of waterfowl populations. In: Batt BDJ, Afton AD, Anderson MG, Ankney CD, Johnson DH, Kadlec JA, Krapu GL, editors. Ecology and management of breeding waterfowl. University of Minnesota Press, Minneapolis. pp. 365-395.
- Bibby CJ, Burgess ND, Hill DA, Mustoe S. 2000. Bird census techniques, 2nd ed. Academic Press, London.
- Bonn A, Gaston KJ. 2005. Capturing biodiversity: selecting priority areas for conservation using different criteria. Biodiversity and Conservation 14: 1083-1100.

- Cadotte MW, Davies TJ. 2016. Phylogenies in ecology: a guide to concepts and methods. Princeton University Press, New Jersey.
- CBD. 2010. COP 10 decision X/2, the strategic plan for biodiversity 2011-2020 and the Aichi biodiversity targets. Convention on Biological Diversity, Montreal.
- Chao A, Chiu C-H, Jost L. 2010. Phylogenetic diversity measures based on Hill numbers. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 365(1558): 3599-3609.
- Clarke K, Warwick R. 2001. A further biodiversity index applicable to species lists: variation in taxonomic distinctness. *Marine Ecology Progress Series* 216: 265-278.
- Crozier R. 1997. Preserving the information content of species: genetic diversity, phylogeny, and conservation worth. *Annual Review of Ecology and Systematics* 28: 243-268.
- Davies TJ, Buckley LB. 2011. Phylogenetic diversity as a window into the evolutionary and biogeographic histories of present-day richness gradients for mammals. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 366(1576): 2414-2425.
- Davies TJ, Cadotte MW. 2011. Quantifying biodiversity: does it matter what we measure? In: Zachos FE, Habel JC, editors. *Biodiversity hotspots*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. pp.43-60.
- Devictor V, Mouillot D, Meynard C, Jiguet F, Thuiller W, Mouquet N. 2010. Spatial mismatch and congruence between taxonomic, phylogenetic and functional diversity: the need for integrative conservation strategies in a changing world. *Ecology Letters* 13(8): 1030-1040.
- Dugger BD, Feddersen JC. 2009. Using river flow management to improve wetland habitat quality for waterfowl on the Mississippi River, USA. *Wildfowl* 59: 62-74.
- Faith D. 1992. Conservation evaluation and phylogenetic diversity. *Biological Conservation* 61(1): 1-10.
- Fleishman E, Noss RF, Noon BR. 2006. Utility and limitations of species richness metrics for conservation planning. *Ecological Indicators* 6(3): 543-553.
- Flynn DF, Mirotnick N, Jain M, Palmer MI, Naeem S. 2011. Functional and phylogenetic diversity as predictors of biodiversity ecosystem function relationships. *Ecology* 92(8): 1573-1581.
- Gerhold P, Pärtel M, Liira J, Zobel K, Prinzing A. 2008. Phylogenetic structure of local communities predicts the size of the regional species pool. *Journal of Ecology* 96(4): 709-712.
- Gotelli NJ, Colwell RK. 2001. Quantifying biodiversity: procedures and pitfalls in the measurement and comparison of species richness. *Ecology Letters* 4(4): 379-391.
- Greenwood PJ. 1980. Mating systems, philopatry and dispersal in birds and mammals. *Animal Behaviour* 28(4): 1140-1162.
- Hackett SJ, Kimball RT, Reddy S, Bowie RC, Braun EL, Braun MJ, Chojnowski JL, Cox WA, Han K-L, Harshman J, Huddleston CJ, Marks BD, Miglia KJ, Moore WS, Sheldon FH, Steadman DW, Witt CC, Yuri T. 2008. A phylogenomic study of birds reveals their evolutionary history. *Science* 320(5884): 1763-1768.
- Huang M, Liu X, Cadotte MW, Zhou S. 2020. Functional and phylogenetic diversity explain different components of diversity

- effects on biomass production. *Oikos* 129 (8): 1185-1195.
- IPBES. 2019. Summary for Policymakers of the Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. p. 56.
- Jost L. 2006. Entropy and diversity. *Oikos* 113(2): 363-375.
- Kang SH. 2007. The assessment of urban stream ecosystem for ecological management: on the case of Cheonggye-cheon. Dissertation for the degree of Philosophy. Sangmyung University, Seoul.
- Kembel SW, Cowan PD, Helmus MR, Cornwell WK, Morlon H, Ackerly DD, Blomberg SP, Webb CO. 2010. Picante: R tools for integrating phylogenies and ecology. *Bioinformatics* 26(11): 1463-1464.
- Korea Meteorological Administration. 2017. Report on climate change forecast for Paris agreement in Seoul.
- Kwon Y, Rho T, Lee H, Choung H. 2006. An approach to introduce biodiversity components in the environmental assessment system in Korea. Korea Environment Institute, Seoul. [Korean Literature]
- Lawton JH, Bignell DE, Bolton B, Bloemers G, Eggleton P, Hammond PM, Hodda M, Holt R, Larsen T, Mawdsley N, Stork N, Srivastava D, Watt A. 1998. Biodiversity inventories, indicator taxa and effects of habitat modification in tropical forest. *Nature* 391(6662): 72-76.
- Leonard D, Clarke KR, Somerfield PJ, Warwick RM. 2006. The application of an indicator based on taxonomic distinctness for UK marine biodiversity assessments. *Journal of Environmental Management* 78(1): 52-62.
- Magurran AE, McGill BJ. 2010. *Biological diversity: frontiers in measurement and assessment*. Oxford University Press. Oxford.
- Pavoine S, Love MS, Bonsall MB. 2009. Hierarchical partitioning of evolutionary and ecological patterns in the organization of phylogenetically-structured species assemblages: application to rockfish (genus: *Sebastes*) in the Southern California Bight. *Ecology Letters* 12(9): 898-908.
- R Core Team. 2017. *R: A language and environment for statistical computing*.
- Ricklefs RE, Jönsson KA. 2014. Clade extinction appears to balance species diversification in sister lineages of Afro-Oriental passerine birds. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111(32): 11756-11761.
- Riffell SK, Keas BE, Burton TM. 2001. Area and habitat relationships of birds in Great Lakes coastal wet meadows. *Wetlands* 21(4): 492-507.
- Robertson GJ, Cooke F. 1999. Winter philopatry in migratory waterfowl. *Auk*. 116(1): 20-34.
- Rodrigues A, Brooks TM, Gaston K. 2005. Integrating phylogenetic diversity in the selection of priority areas for conservation: does it make a difference? In: Purvis A, Gittleman JL, Brooks TM, editors. *Phylogeny and conservation*. Cambridge University Press, Cambridge. pp. 101-119.
- Safi K, Cianciaruso MV, Loyola RD, Brito D, Armour-Marshall K, Diniz-Filho JAF. 2011. Understanding global patterns of mammalian functional and phylogenetic diversity. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 366 (1577): 2536-2544.
- Shannon CE, Weaver W. 1949. *The mathematical Theory of Communication*. University of

- Illinois Press Urbana.
- Voskamp A, Baker DJ, Stephens PA, Valdes PJ, Willis SG. 2017. Global patterns in the divergence between phylogenetic diversity and species richness in terrestrial birds. *Journal of Biogeography* 44(4): 709-721.
- Wilson KA, Westphal MI, Possingham HP, Elith J. 2005. Sensitivity of conservation planning to different approaches to using predicted species distribution data. *Biological Conservation* 122(1): 99-112.