

음향지수를 활용한 도시공원의 사운드스케이프 특징 분석^{1a}

- 남산 도시자연공원 사례 연구 -

장병우² · 고동욱^{3,4*}

Analysis of Soundscape Characteristics of Urban Park Using Acoustic Indices^{1a}

- A Case Study of Namsan Urban Natural Park, Seoul -

Byung-Woo Chang², Dong-Wook Ko^{3,4*}

요약

도시공원에서 발생하는 생물음향은 도시의 전반적인 소리 다양성을 높여 조화로운 음환경을 조성하고 사운드스케이프의 균형을 유지시킨다. 그러나 현대 사회의 급속한 도시화 과정으로 인해 소음이 증가하면서 도시공원의 음환경이 지속적으로 악화되고 있다. 본 연구에서는 남산 도시자연공원을 대상으로 사운드스케이프를 분석함으로써 도시공원의 음환경을 모니터링할 수 있는 접근법을 제시하고자 하였다. 음향자료는 자율형 녹음장비를 이용하여 서울 남산도시공원의 4개 시설지구에서 2021년 8월부터 1달간 연속으로 수집하여 총 2,784시간의 자료를 획득하였다. 또한 사운드스케이프 변동성, 음향 다양성, 생물음향 발생정도, 그리고 인위적 소리에 의한 교란을 나타내는 음향지수(ACI, ADI, BI, NDSI)를 이용하여 각 지구에서 시간 흐름에 따른 사운드스케이프 특징을 비교하였다. 분석 결과, 생물음향 발생과 관련된 음향지수는 지역 간 차이를 보였으나 그 외 대부분의 지수는 인위적 소리의 영향으로 인해 유사한 패턴을 보였다. 특히, 생물활동이 높은 시간이라도 인간의 활동 또한 많은 시간대에는 지역별 차이가 좁혀졌다. 이를 통해 도시공원의 사운드스케이프 특징 분석을 위해서는 음향지수의 소리 반영 특성을 고려하고, 여러 지수를 함께 활용하는 복합적 접근법이 필요함을 확인하였다. 본 연구결과는 사운드스케이프 기반의 도시생태계 건강성을 평가하는 기초자료를 제공하고 나아가 복잡한 도시공원의 음환경을 모니터링하는 데 활용 가능할 것으로 기대된다.

주요어: 사운드스케이프 생태학, 음향 모니터링, 음환경

1 접수 2024년 4월 24일, 수정 (1차: 2024년 7월 1일, 2차: 2024년 7월 3일), 게재확정 2024년 7월 3일

Received 24 April 2024; Revised (1st: 1 July 2024, 2nd: 3 July 2024); Accepted 3 July 2024

2 국민대학교 일반대학원 산림자원학과 박사과정 Department of Forest Resources, Kookmin University, 77 Jeongneung-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02707, Korea (ipdt419@kookmin.ac.kr)

3 국민대학교 산림환경시스템학과 교수 Department of Forest, Environment, and Systems, Kookmin University, 77 Jeongneung-ro, Seongbuk-gu, Korea (dwko@kookmin.ac.kr)

4 국민대학교 탄소흡수원 특성화 대학원 교수 Forest Carbon Graduate School, Kookmin University, 77 Jeongneung-ro, Seongbuk-gu, Korea (dwko@kookmin.ac.kr)

a 본 연구는 산림청(한국임업진흥원) 산림과학기술 연구개발사업(RS-2024-00404816)의 지원에 의하여 이루어진 것이며, 주저자의 석사학위논문 수정 및 보완하여 발전시킨 논문임.

* 교신저자 Corresponding author: dwko@kookmin.ac.kr

ABSTRACT

The bioacoustics generated in urban parks contribute to the overall sound diversity of a city, creating a harmonious acoustic environment and maintaining the balance of the soundscape. However, due to the rapid urbanization process, the acoustic environment in urban parks is continuously deteriorating due to increased noise. In this study, we present an approach to monitoring the acoustic environment of urban parks by analyzing the soundscape of Namsan Urban Natural Park in Seoul. Acoustic data were collected continuously for one month from August 2021 in four facility districts of the study site using autonomous recording units, and a total of 2,784 hours of sound material were obtained. We also compared soundscape characteristics over time in each district using acoustic indices (ACI, ADI, BI, NDSI) representing soundscape complexity, acoustic diversity, degree of bioacoustics, and anthropogenic disturbance. The results showed that acoustic indices related to bioacoustics varied between districts, but most indices showed similar variation patterns due to the influence of anthropogenic sounds. In particular, regional differences closed during periods of high bird activity but not during periods of high human activity. We suggest that considering both acoustic characteristics and multiple acoustic indices is necessary for managing the soundscape of urban parks. The results of this study are expected to provide essential data for assessing the health of urban ecosystems based on soundscapes and to be used for monitoring the acoustic environment of urban parks.

KEY WORDS: SOUNDSCAPE ECOLOGY, ACOUSTIC MONITORING, ACOUSTIC ENVIRONMENT

서론

자연생태계의 음환경(acoustic environment)은 조류 및 곤충 발생과 같은 생물학적 소리와 빗소리 및 바람과 같은 지구물리학적 현상으로부터 발생한 소리로 구성된다(Marler and Slabberkoom, 2004; Barber *et al.*, 2010). 이와 대조적으로 도시생태계는 인간활동에 의해 발생한 기차, 자동차, 비행기 소리, 기계 작동음 등 인위적인 소음이 주를 이루고 있다(Raimbault and Dubois, 2005; Botteldooren *et al.*, 2006). 도시의 소음공해는 인간뿐만 아니라 도시생물종에게도 악영향을 주고 있다. 도로 교통소음은 높은 소리 강도로 인해 생물종의 의사소통을 교란하여 세력권 방어, 번식 활동, 포식 위험 전달에 필요한 정보를 교환하는데 장애를 일으킨다(Slabbekoorn and Peet, 2003; Parris and Schneider, 2009; Hoskin and Goosem, 2010).

사운드스케이프(soundscape)는 인간 개인 또는 집단이 인지하는 인위적 발생음, 생물들이 만들어낸 소리, 그리고 자연현상에서 발생한 소리를 포함하는 음환경을 의미하며, 나아가 특정 음환경에서 여러 소리가 서로 미치는 영향까지 포괄한다(Krause, 1987; Schafer, 1993; Pijanowski *et al.*, 2011a). 자연생태계의 사운드스케이프는 생물종 사이에 또는 생물종

과 환경 간 상호작용의 결과로 구성되어 생태계의 복잡한 메커니즘을 이해하는데 중요한 요소이다(Farina, 2014). 특히, 야생동물에게 소리는 의사소통, 경쟁, 번식 활동, 그리고 방어의 수단으로 사용되어 생존에 중요한 역할을 한다(Bradbury and Vehrencamp, 1998). 최근 생태학 분야에서는 소리의 중요성을 인식하여 복잡한 생태학적 현상을 청각 정보에 기반하여 해석하고자 하는 사운드스케이프 생태학이 새롭게 대두되었다(Sueur and Farina, 2015).

사운드스케이프의 음원(sound source)은 크게 인위적 소리, 생물학적 소리, 지구물리학적 소리로 범주화되고 이를 각각 anthrophony, biophony, geophony로 명명하고 있다(Krause, 2008; Krause, 2016). 사운드스케이프 생태학에서는 사운드스케이프를 형성하는 주요 음원 간 상호관계와 경관적 맥락에서의 음환경 변화를 탐지한다(Pijanowski *et al.*, 2011a; 2011b). 이를 위해 여러 지역의 음환경을 동시에 관측할 수 있는 음향 모니터링이 사용되고 있으며, 음향 분석법과 연계하여 사운드스케이프 특징을 분석하고 있다. 많은 연구들은 이러한 사운드스케이프 특징을 생물다양성 평가, 환경 변화 감지, 인간의 교란 영향 등 생태적 현황에 대한 통찰력을 제공하는 지표로 주목하고 있다(Sánchez-Giraldo *et al.*, 2021; Schoeman *et al.*, 2022). Krause (1987)는 사운드

스케이프가 생물종에게 이용 가능한 음향 지위(acoustic niche)를 제공하기 때문에 건강한 생태계일수록 소리 발생 시간과 주파수 대역이 중복되지 않을 것이라고 주장하였다. 또한 Pijanowski *et al.* (2011b)은 사운드스케이프 측정을 통해 획득한 생물학적 소리를 정량화하면 생물다양성의 변화를 탐지할 수 있다고 제안하였다.

도시공원은 생물종에게 먹이자원 공급과 번식 및 서식지 기능을 제공하여 다양한 생물이 생활하고 있는 공간이다. 도시는 인위적인 소음이 지배적이지만 도시공원에서 발생한 생물음향은 도시 전반의 음향 다양성을 증진하고 조화로운 음환경 만들어 사운드스케이프의 균형을 유지해준다(Benocci *et al.*, 2021). 그러나 도시개발과 인구증가로 인해 인간의 활동이 빈번해지면서 도시공원으로 많은 소음이 지속적으로 유입되고 있다(Van Renterghem *et al.*, 2020; Uebel *et al.*, 2022). 이는 종의 생존과 연관된 생물음향 활동에 교란을 야기하여 도시 생물다양성 감소를 초래하는 위협 요인으로 작용할 수 있다(Benocci *et al.*, 2021). 따라서 건강한 도시생태계를 조성하기 위해서는 도시공원에서의 음향 모니터링을 통해 음환경 변화를 파악할 필요가 있다.

이러한 중요성에 주목하여 최근 국외에서는 도시개발 정도 및 도시공원의 물리적 환경이 생물음향과 관련된 사운드스케이프에 미치는 영향을 분석하고, 도시생태계의 관리방안을 제안한 연구들이 다수 이루어졌다(Hao *et al.*, 2021; Zhao *et al.*, 2022; Latifi *et al.*, 2023). 국내는 다양한 지역에서 생물음향을 모니터링하고, 이들 변화를 인위적 또는 환경적 요인과 연관지어 분석하는 것을 중심으로 연구되었다. Ki and Sung (2014)은 고속도로 인접지역과 자연지역에 서식하는 북방산개구리(*Rana dybowskii*)의 울음소리 간 유의미한 차이를 분석하여 인위적 소음이 생물종의 번식활동에 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다. Ki and Cho (2014)는 빗공해 및 환경적 요인과 박새(*Parus major*)의 새벽 합창 시작시간 간 상관관계를 분석하였으며, 자연지역보다 빗공해지역에서 일찍 울기 시작하는 것을 확인하여 인위적 요인이 조류에게 미치는 영향을 설명하였다. 이와 같이 국내에서도 생물음향과 관련된 연구가 증가하면서 사운드스케이프 생태학 분야에 대한 관심이 높아지고 있다. 하지만 도시생태계 보호 관점에서 음향에 관련한 정량적 지표를 활용하여 도시공원의 사운드스케이프 특징을 분석한 연구는 초기 단계인 실정이다.

사운드스케이프 특징을 분석하기 위해서는 음환경을 구성하는 음원의 종류와 정량적 발생량을 파악하고, 도출된 패턴을 설명할 수 있는 음향 분석법이 필요하다(Villanueva-Rivera *et al.*, 2011). 전통적인 음향 분석법은 전문가가 녹음된 음향 자료를 직접 청취하여 음원을 분류하고, 실제 음원과의 일치

도를 확인하여 동정하는 방식으로 분석하였다(Bertin-Mahieux *et al.*, 2011). 그러나 이러한 분석법은 분석자 간의 의견 차이, 전문 지식 부족으로 인한 오분류 등 여러 문제점을 발생시켰다. 사운드스케이프 분야의 연구자들은 이러한 문제점을 해결하고, 사운드스케이프 특징을 보다 객관적이면서 효과적으로 분석하기 위해 음향지수를 개발하여 제시하였다(Wilford *et al.*, 2021). 음향지수는 특정 음환경에서 발생한 소리를 주파수 대역, 소리 에너지 등으로 구분하여 사운드스케이프를 특징화하는데 사용되는 정량적 지표이다(Sueur *et al.*, 2014; Towsey *et al.*, 2014). 사운드스케이프 생태학 분야에서는 여러 음향지수를 통해 대용량의 음향자료로부터 음원을 효율적으로 분류하고, 사운드스케이프 특징을 도출하여 이를 기반으로 생물다양성 측정, 환경변화 모니터링 등 다양한 연구에 활용하고 있다.

본 연구에서는 음향지수를 통해 도시공원의 음환경을 모니터링하고, 사운드스케이프 특징을 분석할 수 있는 접근법을 제시하고자 하였다. 이를 위해 서울 남산 도시자연공원의 4개 시설지구(장충지구, 회현지구, 한남지구, 예장지구)에서 음향 모니터링을 실시하였으며, 획득한 음향자료에 4가지 음향지수(ACI, ADI, BI, NDSI)를 적용하였다. 음향지수 분석에서는 생물 및 인간활동 시간대를 고려하여 음향지수마다 시간 변화에 따른 시설지구별 패턴을 분석하고, 생물음향 및 인위적 소리 발생과 관련한 결과를 해석하였다. 또한 각 음향지수 결과를 비교하여 도시공원에서 생물음향과 인위적 소리 변화에 반응성이 높은 음향지수를 도출하고, 도시공원의 음환경 모니터링에 적합한 지수로 제안하였다. 이는 도시공원의 음환경을 모니터링할 수 있는 지표로 활용되어 생태적으로 균형 있는 도시 사운드스케이프 조성 및 관리에 기여할 것으로 기대된다.

연구방법

1. 연구대상지

본 연구에서는 단일 도시녹지 공간 안에서 도시에 인접한 지구별 사운드스케이프 특징 차이를 분석하기 위해 서울시 남산 도시자연공원의 4개 지역에 음향 모니터링 장비를 설치하였다(Figure 1). 남산 도시자연공원(270m)은 전체 면적이 약 290 ha이고 이 중 산지가 84%의 가장 높은 비율로 분포하고 있으며, 그 외 녹지대 및 기타 시설이 나머지 비율을 차지하고 있다. 남산 도시자연공원은 예장지구, 장충지구, 한남지구, 그리고 회현지구로 구분되는 지역이 공원의 진북에서 시계방향으로 분포하고 있다. 이들 지구는 거주지, 교통지역, 상업지역, 녹지 등과 같은 토지이용 유형 간

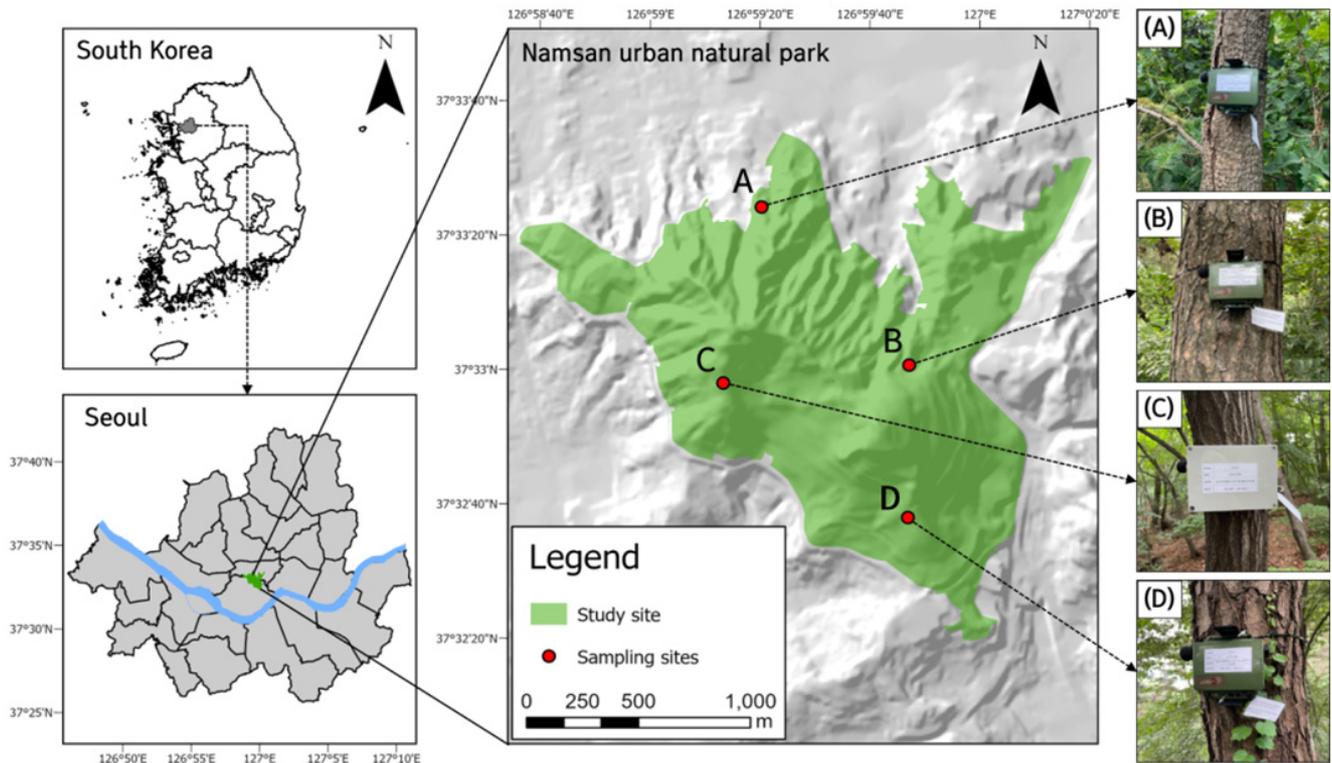


Figure 1. Map showing the study area and sampling sites: (A) is Yejang District, (B) is Jangchung District, (C) is Hoehyeon District, and (D) is Hannam District.

비율 및 면적 차이가 있다. 또한 남산 도시자연공원은 서울시 행정구역의 중심점에 위치하여 고밀도의 개발 지역이 인접하고 있으면서 동시에 남북녹지축으로서 생태적 가치가 높은 공간이다. 따라서 남산 도시자연공원은 단일 공간 안에서 각 지구별로 다른 사운드스케이프 특징이 나타날 수 있어 상호 비교가 적합한 공간으로 판단된다.

2. 음향 모니터링 계획

남산의 각 지구별 음향 모니터링은 2021년 8월 1일부터 8월 31일까지 반복 진행하였다. 일정한 품질의 자료를 획득하기 위해 모든 지구에서 무지향성(omni-directional) 마이크가 장착된 자율형(autonomous) 녹음장비(Song Meter Mini; Wildlife Acoustics, Inc., Maynard, MA)를 동일하게 이용하였다. 녹음장비는 지구별로 독립적인 음향자료 획득을 위해 약 1km 간격으로 충분한 거리를 두고 배치하였으며, 지표면으로부터 높이 1.5m에 고정하였다. 녹음장소는 인근 지역에서 발생한 다양한 소리를 반영하고 수관 울폐로 인한 외부 소리의 차폐를 막기 위해 개방된 공간을 탐색하였다. 또한 해발고도에 따른 녹음 편차를 줄이기 위해 각 지구별 동일 고도(150m)에 설치하였다. 녹음환경은 모노

(mono) 채널의 샘플링 주파수 24,000 Hz, 채널 이득(gain) 18 dB로 설정하고 16 bit의 wav 형식으로 저장하였으며, 녹음은 24시간 연속으로 실시하여 1시간 단위의 음향자료가 수집되도록 설정하였다. 연구기간 동안 1주 간격으로 동일한 시간에 방문하여 배터리와 메모리카드를 교체하였다. 이로 인해 각 지구마다 소모품의 교체시간 불일치에 따른 자료량 차이가 발생하였으나 본 연구에서는 같은 시간에 동시에 발생한 소리 특징을 반영하여 지구별로 비교하고자 하였다. 따라서 녹음시간이 일치하지 않는 자료는 제외하여 총 2,784시간의 음향자료를 획득하였다.

3. 음향지수 분석법

본 연구에서는 사운드스케이프 생태학 분야에서 일반적으로 활용되고 있는 음향지수를 이용하여 남산 도시자연공원의 각 지구별 사운드스케이프 특징을 분석하였다. 음향지수는 다양한 사운드스케이프 연구에서 그 목적에 따라 활발하게 개발되고 있다(Wilford *et al.*, 2021). 생물학적 소리인 biophony를 중점으로 개발된 음향지수는 생물음향의 양적 발생을 반영할 수 있어 생물다양성 평가지표로 활용되고 있다(Pijanowski *et al.*, 2011b; Rajan *et al.*, 2019). 또한,

도시환경 및 계획과 관련된 연구에서는 인간 활동이 만든 anthrophony를 중심으로 한 음향지수를 통해 도시의 사운드스케이프에 미치는 인위적 교란을 분석하고 있다(Joo *et al.*, 2011). 본 연구에서는 biophony와 anthrophony의 특성을 보여주는 음향지수를 선택하고, 소리 분석 전문프로그램인 Kaleidoscope Pro (Wildlife Acoustics, Inc., Maynard, NA)를 활용하여 각 지수의 값을 산출하였다.

사운드스케이프는 특정 시간에 따라 발생 패턴의 차이를 보인다. 따라서 인간과 매미류 및 조류의 합창과 관련된 시간을 구분하여 음향지수를 산출하고 비교하였다. 조류는 생물학적 일주기 리듬(circadian rhythm)에 따라 새벽과 황혼 시간에 활동이 증가하는 것으로 알려져 있다(Hutchinson, 2002; Berg *et al.*, 2006; Dalziell and Cockburn, 2008). 전통적인 조류조사에서도 탐지 확률을 고려하여 조류의 활동이 활발한 일출 전부터 조사를 시작하는 것을 제안하고 있다(Lee *et al.*, 2010). 또한, 본 연구기간은 매미류의 주된 번식 경쟁 시기이므로 울음소리의 발생빈도가 높아 생물음향 발생량에 영향을 줄 수 있다. 특히, 도심지에서 매미류는 일출에 울음소리를 시작하여 일몰에 종료하는 것으로 알려져 있다(Kim and Ki, 2018). 따라서 일출과 일몰 전후에 한해 발생한 소리를 분석하면 매미류 울음소리가 다소 지배적인 주간 시간을 제외하여 매미류 울음소리의 영향을 줄일 수 있을 것이다. 나아가 조류의 새벽 및 황혼 합창시간과도 일치하기 때문에 전반적인 생물음향을 충분히 반영할 수 있을 것으로 사료된다. 이에 본 연구에서는 인간 및 생물활동을 포함하는 24시간(0:00-23:59)과 생물음향과 관련된 생물학적 새벽 합창시간(05:00-08:00), 황혼 합창시간(17:00-20:00)으로 분석 시간대를 구분하였다.

1) 음향복잡도 지수

음향복잡도 지수(Acoustic Complexity Index; ACI)는 소리 세기를 이용하여 생물 소리와 인위적 소리의 본질적인 차이로 인해 나타나는 사운드스케이프 변동성을 정량화하는 음향지수이다(Pieretti *et al.*, 2011). ACI는 식 (1)과 식 (2)의 계산과정으로 산출된다.

$$(1) \quad d_k = |I_k - I_{k+1}|$$

$$(2) \quad ACI = \frac{\sum_{k=1}^n d_k}{\sum_{k=1}^n I_k}$$

ACI 계산에서는 먼저 음향자료를 시간과 주파수 성분(frequency bin)에 따라 분할된 스펙트로그램(spectrogram)

으로 변환하여 소리 세기 값으로 이루어진 행렬 구조를 만든다. 또한 단일 주파수 성분별로 행렬 내 인접한 전체 소리 세기 값(I_k, I_{k+1}) 차이의 절댓값(d_k)을 구한다. 여기서 I_k 는 전체 시간에서 사용자가 구분한 일정시간 간격 중 k 번째 지점에서 발생한 소리 세기의 합을 의미한다. 마지막으로 전체 녹음 시간에서 발생한 모든 소리 세기 값 차이의 절댓값 합계를 소리 세기의 총합으로 나누어 산출한다. ACI는 소리의 진폭 변동과 관련 있어 고유의 소리 패턴을 갖는 생물음향이 많이 발생할수록 높은 값을 보인다(Bradfer-Lawrence *et al.*, 2019). ACI 계산을 위해 사용한 전체 주파수 대역폭은 0 Hz부터 최대 11,000 Hz이며, 최소 소리 지속시간은 5초로 입력하였다.

2) 음향다양성 지수

음향다양성 지수(Acoustic Diversity Index; ADI)는 사운드스케이프를 구성하는 음원 수를 고려하여 음향 종류의 상대적인 다양성을 정량적으로 보여주는 지수이다(Villanueva-Rivera *et al.*, 2011). ADI는 스펙트로그램으로 변환된 음향 자료를 주파수 성분으로 나누고, 임계값 이상의 소리 세기가 나타난 주파수 대역의 출현 수를 찾아 전체 주파수 대역 개수 대비 출현 수 비율을 산출하여 다양성 정도를 계산한다. 이 지수는 생물다양성 측정에서 보편적으로 사용되는 Shannon-Weaver 지수(Shannon and Weaver, 1949)에 기반한 식 (3)을 통해 계산한다.

$$(3) \quad ADI = \sum_{i=1}^s p_i \ln p_i$$

여기서 s 는 전체 주파수 대역의 수, p_i 는 전체 주파수 대역 수 대비 i 번째 주파수 대역의 출현 수 비율을 나타낸다. ADI는 음향신호의 전체 주파수 대역에 걸쳐 소리의 세기 분포가 균등할수록 높은 값을 갖는다(Bradfer-Lawrence *et al.*, 2019). ADI 계산을 위해 주파수 대역폭은 0 Hz부터 최대 11,000 Hz까지 사용하였다. 또한 주파수대역은 1,000 Hz 단위로 분할하고, 소리 세기 임계값은 생물종의 울음소리를 대상으로 분석한 선행연구를 참고하여 -50 dBfs로 설정하였다(Machado *et al.*, 2017).

3) 생물음향 지수

생물음향지수(Bioacoustic Index; BI)는 생물의 소리가 가지고 있는 주파수 대역을 고려하여 생물음향의 풍부도를 나타낸다(Boelman *et al.*, 2007). BI는 전체 주파수 대역에서 최소 소리세기보다 큰 값을 갖는 대역의 스펙트럼 곡선 아래 면적 합으로 계산한다(Boelman *et al.*, 2007). BI 값은

소리세기가 최대인 주파수 대역과 최소 주파수 대역 간 차이가 클수록 높다(Bradfer-Lawrence *et al.*, 2019). BI 계산에 사용한 주파수 대역폭은 일반적인 생물적 소리의 주파수 대역으로 알려진 2,000 Hz에서부터 11,000 Hz까지의 값을 사용하였다(Devos, 2016; Brownlie *et al.*, 2020).

4) 정규화 사운드스케이프 지수

정규화 사운드스케이프 지수(Normalized Difference Soundscape Index; NDSI)는 음환경에서 발생한 생물음향에 대한 인위적 소리의 비율을 파악하여 이들 음원 간 균형을 나타내는 지표이다(Kasten *et al.*, 2012). NDSI는 전력 스펙트럼 밀도(power spectral density) 적분값 산출을 통해 주파수 대역의 소리 에너지 합을 구하여 특정 음환경을 구성하는 생물 소리와 인위적 소리의 분포를 계산한다. 이 지수는 식 (4)를 사용하여 계산한다.

$$(4) \quad NDSI = \frac{\beta - \alpha}{\beta + \alpha}$$

여기서 α 와 β 는 각각 인위적 소리인 anthropophony와 생물적 소리인 biophony에 해당하는 에너지의 합산이다. NDSI는 -1부터 1사이 값의 범위를 가지며, 1에 가까울수록 인위적 소리 발생이 적은 것을 의미한다. NDSI 계산에 사용한 anthropophony 주파수 대역폭은 1,000에서 2,000 Hz의 값을 이용하였으며, biophony 주파수는 2,000에서 11,000 Hz까지

의 범위 값을 사용하였다(Gage *et al.*, 2001; Kasten *et al.*, 2012).

결과 및 고찰

1. 24시간 동안의 음향지수 변동 결과

남산 도시자연공원의 모든 지구에 대해 각 음향지수별 24시간 변동 패턴을 도출하였다(Figure 2). ACI, ADI, 그리고 NDSI 값은 모든 지구에서 자정부터 정오(0:00~12:00)까지 지속적으로 증가하였다. 특히, 매미류 및 조류와 같이 울음소리를 내는 생물종의 활동이 가장 활발한 일출 무렵에 빠른 속도로 증가하였다. 이후 NDSI는 다시 점진적으로 감소하는 패턴을 보였으나 ACI와 ADI는 일정시간 큰 변동이 없었다가 18시경에 감소하는 경향을 보였다. 특히, ADI는 지구별 시간 흐름에 따른 값의 변화가 유사하였으며, 다른 지수에 비해 지구 간 차이도 상대적으로 가장 적었다. 이는 biophony의 영향뿐만 아니라 인간활동이 증가하면서 시설 지구 위치에 관계없이 남산의 전반적인 음향 다양성이 증가된 결과로 판단된다. ACI는 새벽시간에 ADI와 유사한 경향을 보이다가 5시 이후부터 지구 간 차이가 점차 커졌다. 도시환경에서의 Anthropophony는 상대적으로 높은 강도로 단조롭게 발생하지만, 생물은 종 고유의 발성패턴을 가지고

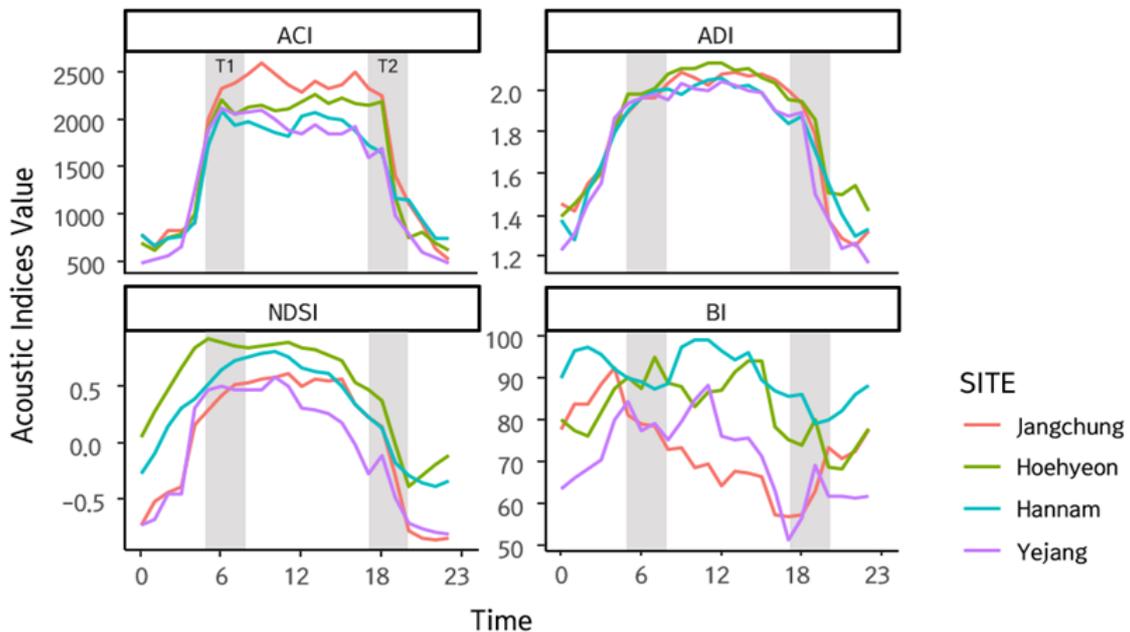


Figure 2. Comparison of diel patterns (24 hours) in mean acoustic indices for each site. The shaded zones, T1 and T2, represent biological chorus at dawn (05:00-08:00) and dusk (17:00-20:00), respectively.

있기 때문에 biophony는 상대적으로 가변적인 특성을 더 많이 보여준다(Wiley and Richards, 1978; Blake and Cross, 2015). 이러한 음원의 특성을 고려하면 토지이용 및 토피피복 형태와 같은 공간적 요인에 의해 지구마다 지배적으로 발생한 소리의 종류가 달라 ACI 차이를 만들어낸 것으로 보인다. NDSI도 ADI, ACI와 증감 패턴은 유사하였으나 지구별로 다소 큰 격차를 보여 가장 많이 발생한 음원이 서로 다른을 나타냈다. BI는 다른 음향지수에 비해 지구간 가장 큰 차이를 보였다. 대다수 지구에서 오후로 갈수록 감소하였으나 시간대별로는 상이하였다. 특히, 정오(12:00)에는 지구별로 최대 12.4%까지 편차가 나타나 지구 간 생물 음향 발생량 차이가 있음을 확인하였다.

음향지수 결과를 종합적으로 고려했을 때, 남산 도시자연공원은 생물종 서식에 중요한 공간으로 판단된다. 남산의 모든 지구에서 ACI 값이 높게 나타난 시간은 생물의 활동이 활발한 새벽 또는 황혼 시간대에 속한다. 이러한 시간적 패턴은 Bradfer-Lawrence *et al.* (2019)의 연구에서 밝힌 높은 ACI 값이 생물종 간의 역동적인 의사소통을 반영한다는 점을 고려하면, 남산 도시자연공원이 복잡한 도시에서 생물종 서식에 필요한 주요 녹지임을 보여준다. 연구기간 동안 BI 값도 새벽 시간대에 높게 나타났다. Latifi *et al.* (2023)에 따르면 도시공원에서 높은 BI 값은 생물종의 다양성 및 풍부도 증가와 상관관계가 있었다. 이러한 결과를 볼 때, 남산 도시자연공원 전역에서 나타난 상당한 생물음향 활동은 남산에 다양한 생물이 서식하고 있음을 말해주고 있다. 또한, 주간시간에 모든 지구가 0보다 큰 NDSI 값이 도출된 것을 통해서도 확인할 수 있었다. 이는 남산 도시자연공원이 biophony 발생 비율이 높은 사운드스케이프 특징을 갖고 있다는 것을 의미하며, 더불어 도시에서 야생동물의 서식처로 기능하고 있음을 보여준다. 그러나 도시는 높은 인구밀도를 가지고 있어 주간간 모두 인간활동이 매우 활발하기 때문에 anthrophony가 상대적으로 많이 발생한다(Sueur *et al.*, 2014). 이러한 소리는 높은 세기와 강도를 가지고 있기 때문에 도시공원에 지속적으로 유입된다면 생물종에게 악영향을 줄 수 있다(Slabbekoorn and Peet, 2003; Parris and Schneider, 2009). 따라서 주기적인 음환경 모니터링을 통해 도시공원에 미치는 외부 소리의 영향을 파악하고, 이를 차폐 및 감소시킬 수 있는 인공 및 식생구조 개선방안을 모색할 필요가 있다.

지구 단위에서의 분석 결과는 남산 도시자연공원이 하나의 연속된 녹지 공간임에도 불구하고 서로 다른 음환경을 가지고 있다는 것을 보여주었다. 이는 남산 도시자연공원 각 시설지구 내부의 교통시설, 녹지 등 토지이용 유형 차이에 의한 영향으로 판단된다. 토지이용 유형은 도시개발 정도, 야생동물 서식처, 인간활동 등이 관련되어 있어 서로 다른

음원을 발생시킨다(Kang, 2006). 남산 도시자연공원의 각 시설지구도 녹음장비의 최대 감지 거리(반경 1km) 안에서 사운드스케이프 구성에 영향을 주는 토지이용 유형의 면적과 비율이 조금씩 다른 것을 확인할 수 있었다(Table 1). 특히, 도시개발에 따라 증가하는 교통시설은 anthrophony를 많이 발생시켜 도시 사운드스케이프 형성에 주된 요인이 될 수 있다(De Coensel *et al.*, 2005). 장충지구는 남산 도시자연공원과 시가화 지역이 접한 경계부 둘레의 순환도로가 포함되며, 공원 안으로 대중교통 도로가 가로지르고 있다. 회현지구에는 공원 내부를 통과하는 대중교통 도로의 출구가 있으며, 순환도로와 함께 남산3호터널의 진입로가 위치하고 있다. 한남지구도 순환도로가 지나가고 남산2호터널 및 3호터널과 연결된 교차로가 근거리에서 위치하여 차량통행량이 높은 지역에 속한다. 마지막으로 예장지구는 남산1호터널의 진입로가 남산 도시자연공원 경계에 바로 인접하고 있다. 이러한 교통시설은 각 지구별 anthrophony의 정량적 차이에 직접적인 원인이 될 수 있으므로 향후 도시공원의 사운드스케이프 특징 분석에 있어서 교통시설의 세부적인 규모 및 종류와 연관된 연구가 필요할 것으로 사료된다. 나아가 토지이용의 면적 비율이 직접적으로 음향지수 변동에 영향을 미친다는 객관적인 근거를 확보하고, 도시의 토지이용과 연관된 사운드스케이프 관리 연구도 필요할 것으로 사료된다. 이는 균형 있는 사운드스케이프 조성을 위한 도시공원 인근지역의 토지이용 관리방안 수립에 기여할 것이다.

Table 1. The area and percentage of land-use type at each site identified in the national digital topographic map and Seoul biotope map.

Site	Land-use type	Area (ha)	Ratio (%)
Jangchung	Traffic facility	57.83	18.4
	Residential	25.36	8.1
	Commercial	12.51	4.0
	Green space	191.85	61.1
Hoehyeon	Traffic facility	78.83	25.1
	Residential	31.70	10.1
	Commercial	30.10	9.6
	Green space	139.87	44.5
Hannam	Traffic facility	81.20	25.8
	Residential	55.31	17.6
	Commercial	22.92	7.3
Yejang	Green space	131.75	42.0
	Traffic facility	81.58	26.0
	Residential	14.19	4.5
	Commercial	77.86	24.8
	Green space	120.98	38.5

본 연구에서는 음향 모니터링 지점별 지형 및 식생밀도에 따라 녹음이 편향되는 문제를 줄이기 위해 고도와 수관 율폐도 조건을 일치시켜 배치하였다. 그러나 음향 모니터링 장비의 설치지점으로부터 도심지까지의 거리는 충분히 고려하지 못하였다. 음향지수 결과는 단일 대형 도시공원 내에서 도시 시간 및 지구별 음환경에 차이가 있음을 보여주었으나 도심지와 가까운 지역일수록 도시소음과 관련된 영향이 나타났다. 예를 들어 예장지구에 설치한 지점은 도심지와 인접한 지역이었으며, 도시소음이 발생할 수 있는 토지이용 유형의 면적 및 비율이 가장 높았다(Table 1). 또한, 음향지수 결과에서는 예장지구와 장충지구 모두 NDSI 값이 비슷하게 낮았지만, BI 결과를 함께 고려하면 예장지구가 인간활동이 활발한 시간(12:00-17:00)에 anthrophony의 영향을 가장 많이 받고 있음을 보여주었다(Figure 2). 이와 같이 도시공원은 인접한 외부 지역의 소리가 지속적으로 유입되는 공간이기 때문에 도심지와 인접한 거리에 따라 음향지수의 결과가 변동할 것으로 추정된다. 따라서 도시공원이 갖는 사운드스케이프 특징을 보다 명확하게 반영하기 위해서는 음향 모니터링 지점과 도시의 주요 소리 발생원 간 거리 조건을 통제할 필요가 있다.

2. 생물활동 시간대에서의 음향지수 변동 결과

본 연구에서는 주간에 높은 인간활동으로 인한 음향 간섭

을 줄이고, 생물음향 발생량을 조명하기 위해 생물활동이 활발한 새벽 합창시간(05:00-08:00) 및 황혼 합창시간(17:00-20:00)에서의 음향지수 변동성을 비교하였다(Figure 3). 모든 지구는 새벽 합창시간에 anthrophony보다 biophony가 더 많이 발생하였다(Figure 3A). 그러나 인간의 활동량이 다소 높아지는 황혼 합창시간에는 지구별 차이가 좁혀지고, 두 음원의 발생량이 역전되어 anthrophony의 영향이 더 큰 것으로 확인되었다(Figure 3B). 이는 남산이 도시생물종의 서식처 기능을 하고 있으나 인접한 그레이인프라 지역으로부터 발생한 인위적 소리 교란을 받고 있음을 보여준다. 이러한 영향은 장기적으로 소리를 기반으로 한 생물활동에 지장을 주기 때문에 도시생태계 보호를 위한 사운드스케이프의 관리가 필요하다는 것을 시사한다.

지구별 사운드스케이프 특징은 새벽 및 황혼 합창시간 모두 회현지구가 음향 다양성이 높으면서 anthrophony 대비 biophony가 가장 많이 발생한 것으로 나타났다. 그러나 음향 복잡성이 높을수록 생물음향의 발생량이 반드시 증가하지는 않았으며, 오히려 두 시간대에 상대적으로 낮은 ACI 값을 보인 한남지구에서 생물음향이 많이 발생하였다. 이는 도시의 음환경에서는 다양한 소리가 복합적으로 발생하여 biophony 및 anthrophony 발생과 ACI 간에 단순한 상관관계를 이루는 것이 아니므로 음향 복잡성과 관련된 특징을 정의하기 어려운 점을 보여준다.

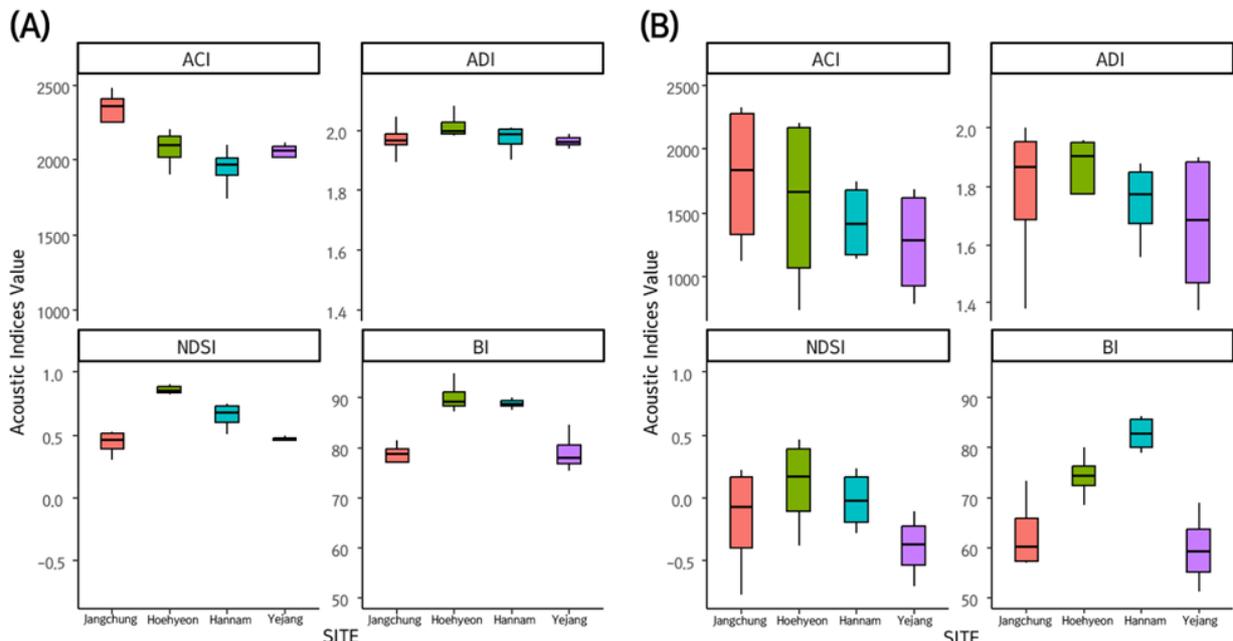


Figure 3. Box plots of the mean value for acoustic indices in each site. (A) is result of biological chorus at dawn, and (B) is result of chorus at dusk.

3. 종합 고찰

본 연구결과는 도시공원의 사운드스케이프 특징 분석을 위해 음향지수의 복합적인 활용이 필요함을 보여주었다. 24 시간 동안의 음향지수 변동에서 다른 음향지수(ACI, BI, NDSI) 결과를 종합하면 지구 간 차이가 있음을 확인할 수 있었으나 ADI만 보았을 때 모든 시설지구가 비슷한 값과 경향을 나타냈다. 생물학적 새벽 및 황혼 합창시간에서도 생물음향이 많이 발생하는 특징적인 시간대임에도 불구하고, 일부 시설지구(장충지구, 회현지구)에서 ACI와 BI 변동성이 반대의 경향을 보여 소수의 지수만으로는 일반적인 음향 복잡성과 생물음향 발생 관계를 설명하기 어려웠다. Zhao *et al.* (2022)의 연구에서도 도시공원의 사운드스케이프 분석을 위해서는 단일 음향지수만 사용하는 것보다 여러 음향지수를 조합하는 것을 권장하였다. 또한 음향지수는 서로 다른 주파수 대역과 시간적 특성을 반영하기 때문에 소수의 지수만 고려하면 사운드스케이프 특징을 제한적으로 표현할 수 밖에 없다(Llusia *et al.*, 2011; Bradfer-Lawrence *et al.*, 2019). 특히, 도시공원은 이미 복잡하고 다양한 음환경을 가지고 있으므로 biophony 및 anthrophony의 양적 발생량과 연관된 BI, NDSI와 같은 음향지수의 활용이 필수적일 것으로 판단된다. 음향지수의 복합적 활용은 도시공원 음환경을 모니터링하고, 생태건강성을 평가할 수 있는 도구로 사용할 수 있을 것이며, 나아가 지속적인 도시 관리 차원에서 사운드스케이프 관리가 필요한 중점지역을 도출하는데 유용할 것으로 사료된다.

REFERENCES

- Barber, J.R., K.R. Crooks and K.M. Fristrup(2010) The costs of chronic noise exposure for terrestrial organisms. *Trends in Ecology & Evolution* 25(3): 180-189.
- Benocci, R., H.E. Roman, A. Bisceglie, F. Angelini, G. Brambilla and G. Zambon(2021) Eco-acoustic assessment of an urban park by statistical analysis. *Sustainability* 13(14): 7857.
- Berg, K.S., R.T. Brumfield and V. Apanius(2006) Phylogenetic and ecological determinants of the neotropical dawn chorus. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 273(1589): 999-1005.
- Bertin-Mahieux, T., D. Eck and M. Mandel(2011) Automatic Tagging of Audio: The State-of-the-Art. IGI Global, Hershey, PA.
- Blake, E.C. and I. Cross(2015) The acoustic and auditory contexts of human behavior. *Current Anthropology* 56(1): 81-103.
- Boelman, N.T., G.P. Asner, P.J. Hart and R.E. Martin(2007) Multi-trophic invasion resistance in Hawaii: bioacoustics, field surveys, and airborne remote sensing. *Ecological Applications* 17(8): 2137-2144.
- Botteldooren, D., B. De Coensel and T. De Muer(2006) The temporal structure of urban soundscapes. *Journal of Sound and Vibration* 292(1-2): 105-123.
- Bradbury, J.W. and S.L. Vehrencamp(1998) *Principles of Animal Communication*. Sinauer, Sunderland, MA.
- Bradfer-Lawrence, T., N. Gardner, L. Bunnefeld, N. Bunnefeld, S.G. Willis and D.H. Dent(2019) Guidelines for the use of acoustic indices in environmental research. *Methods in Ecology and Evolution* 10(10): 1796-1807.
- Brownlie, K.C., R. Monash, J.J. Geeson, J. Fort, P. Bustamante and J.P. Arnould(2020) Developing a passive acoustic monitoring technique for Australia's most numerous seabird, the Short-tailed Shearwater (*Ardenna tenuirostris*). *Emu-Austral Ornithology* 120(2): 123-134.
- Bruni, A., D.J. Mennill and J.R. Foote(2014) Dawn chorus start time variation in a temperate bird community: Relationships with seasonality, weather, and ambient light. *Journal of Ornithology* 155(4): 877-890.
- Dalziel, A.H. and A. Cockburn(2008) Dawn song in superb fairywrens: A bird that seeks extrapair copulations during the dawn chorus. *Animal Behaviour* 75(2): 489-500.
- De Coensel, B., T. De Muer, I. Yperman and D. Botteldooren(2005) The influence of traffic flow dynamics on urban soundscapes. *Applied Acoustics* 66(2): 175-194.
- Devos, P.(2016) Soundecology Indicators Applied to Urban Soundscapes. *Proceedings of INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference*, Institute of Noise Control Engineering, pp. 3631-3638.
- Farina, A.(2014) *Soundscape Ecology: Principles, Patterns, Methods and Applications*. Springer, New York, NY.
- Gage, S.H., B. Napoletano and M.C. Cooper(2001) Assessment of ecosystem biodiversity by acoustic diversity indices. *Journal of the Acoustical Society of America* 109(5): 2430.
- Hao, Z., C. Wang, Z. Sun, C.K. van den Bosch, D. Zhao, B. Sun, X. Xu, Q. Bian, Z. Bai, K. Wei, Y. Zhao and N. Pei(2021) Soundscape mapping for spatial-temporal estimate on bird activities in urban forests. *Urban Forestry & Urban Greening* 57: 126822.
- Hoskin, C.J. and M.W. Goosem(2010) Road impacts on abundance, call traits, and body size of rainforest frogs in northeast Australia. *Ecology and Society* 15(3): 15.
- Hutchinson, J.M.(2002) Two explanations of the dawn chorus compared: How monotonically changing light levels favour a short break from singing. *Animal Behaviour* 64(4): 527-539.
- Joo, W., S.H. Gage and E.P. Kasten(2011) Analysis and interpretation of variability in soundscapes along an urban-rural gradient.

- Landscape and Urban Planning 103(3-4): 259-276.
- Kang, J.(2006) Urban Sound Environment. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Kasten, E.P., S.H. Gage, J. Fox and W. Joo(2012) The remote environmental assessment laboratory's acoustic library: An archive for studying soundscape ecology. *Ecological Informatics* 12: 50-67.
- Ki, K.S. and C.Y. Sung(2014) Bioacoustic change of Dybowski's brown frog by highway Noise. *Korean Journal of Environment and Ecology* 28(3): 273-280. (in Korean with English abstract)
- Ki, K.S. and W. Cho(2014) Effects of light pollution and environmental factors on dawn song initiation time of great tit, *Parus major*. *Korean Journal of Environment and Ecology* 28(4): 411-418. (in Korean with English abstract)
- Kim, Y.J. and K.S. Ki(2018) Environmental factors affecting the start and end of Cicadae calling. *Korean Journal of Environment and Ecology* 32(3): 342-350. (in Korean with English abstract)
- Krause, B.(1987) Bioacoustics, habitat ambience in ecological balance. *Whole Earth Review* 57(472): 14-18.
- Krause, B.(2008) Anatomy of the soundscape: Evolving perspectives. *Journal of the Audio Engineering Society* 56(1/2): 73-80.
- Krause, B.(2016) Wild Soundscapes: Discovering the Voice of the Natural World. Yale University Press, New Haven, CT.
- Latifi, M., S. Fakheran, M. Moshtaghie, M. Ranaie and P.M. Tussi(2023) Soundscape analysis using eco-acoustic indices for the birds biodiversity assessment in urban parks (case study: Isfahan City, Iran). *Environmental Monitoring and Assessment* 195(6): 629.
- Lee, W.S., C.Y. Park, S.J. Rhim, W.H. Hur, O.S. Jeong, C.Y. Choi, Y.S. Park and E.J. Lee (2010) *Wildlife Ecology Management*. Life Science Publishing Co., Seoul.
- Llusia, D., R. Márquez and R. Bowker(2011) Terrestrial sound monitoring systems, a methodology for quantitative calibration. *Bioacoustics* 20(3): 277-286.
- Machado, R.B., L. Aguiar and G. Jones(2017) Do acoustic indices reflect the characteristics of bird communities in the savannas of Central Brazil? *Landscape and Urban Planning* 162: 36-43.
- Marler, P.R. and H. Slabbekoorn(2004) *Nature's Music: The Science of Birdsong*. Academic Press, San Diego, CA.
- Parris, K.M. and A. Schneider(2009) Impacts of traffic noise and traffic volume on birds of roadside habitats. *Ecology and Society* 14(1): 29.
- Pieretti, N., A. Farina and D. Morri(2011) A new methodology to infer the singing activity of an avian community: The Acoustic Complexity Index (ACI). *Ecological Indicators* 11(3): 868-873.
- Pijanowski, B.C., A. Farina, S.H. Gage, S.L. Dumyahn and B. Krause(2011a) What is soundscape ecology? An introduction and overview of an emerging new science. *Landscape Ecology* 26(9): 1213-1232.
- Pijanowski, B.C., L.J. Villanueva-Rivera, S.L. Dumyahn, A. Farina, B. Krause, B.M. Napoletano, S.H. Gage and N. Pieretti(2011b) Soundscape ecology: The science of sound in the landscape. *BioScience*, 61(3): 203-216.
- Raimbault, M. and D. Dubois(2005) Urban soundscapes: Experiences and knowledge. *Cities* 22(5): 339-350.
- Rajan, S.C., K. Athira, R. Jaishanker, N.P. Sooraj and V. Sarojkumar (2019) Rapid assessment of biodiversity using acoustic indices. *Biodiversity and Conservation* 28: 2371-2383.
- Sánchez-Giraldo, C., C.C. Ayram and J.M. Daza(2021) Environmental sound as a mirror of landscape ecological integrity in monitoring programs. *Perspectives in Ecology and Conservation* 19(3): 319-328.
- Schafer, R.M.(1993) *The soundscape: Our Sonic Environment and the Tuning of the World*. Simon and Schuster, New York, NY.
- Schoeman, R.P., C. Erbe, G. Pavan, R. Righini and J.A. Thomas (2022) *Analysis of Soundscapes as an Ecological Tool*. Springer Nature, Cham, Switzerland.
- Shannon, C.E. and W. Weaver(1949) *The Mathematical Theory of Communication*. University of Illinois Press, Urbana, IL.
- Slabbekoorn, H. and M. Peet(2003) Birds sing at a higher pitch in urban noise. *Nature* 424(6946): 267-267.
- Sueur, J. and A. Farina(2015) Ecoacoustics: The ecological investigation and interpretation of environmental sound. *Biosemiotics* 8: 493-502.
- Sueur, J., A. Farina, A. Gasc, N. Pieretti and S. Pavoine(2014) Acoustic indices for biodiversity assessment and landscape investigation. *Acta Acustica united with Acustica* 100(4): 772-781.
- Towsey, M., J. Wimmer, I. Williamson and P. Roe(2014) The use of acoustic indices to determine avian species richness in audio-recordings of the environment. *Ecological Informatics* 21: 110-119.
- Uebel, K., J.R. Rhodes, K. Wilson and A.J. Dean(2022) Urban park soundscapes: Spatial and social factors influencing bird and traffic sound experiences. *People and Nature* 4(6): 1616-1628.
- Van Renterghem, T., K. Vanhecke, K. Filipan, K. Sun, T. De Pessemer, B. De Coensel, W. Joseph and D. Botteldooren (2020) Interactive soundscape augmentation by natural sounds in a noise polluted urban park. *Landscape and Urban Planning* 194: 103705.
- Villanueva-Rivera, L.J., B.C. Pijanowski, J. Doucette and B. Pekin (2011) A primer of acoustic analysis for landscape ecologists. *Landscape Ecology* 26: 1233-1246.
- Wiley, R.H. and D.G. Richards(1978) Physical constraints on acoustic communication in the atmosphere: Implications for

- the evolution of animal vocalizations. *Behavioral Ecology and Sociobiology* 3(1): 69-94.
- Wilford, D.C., J.L. Miksis-Olds, S.B. Martin, D.R. Howard, K. Lowell, A.P. Lyons and M.J. Smith(2021) Quantitative soundscape analysis to understand multidimensional features. *Frontiers in Marine Science*, 8: 672336.
- Zhao, Y., S. Sheppard, Z. Sun, Z. Hao, J. Jin, Z. Bai, Q. Bian and C. Wang(2022) Soundscapes of urban parks: An innovative approach for ecosystem monitoring and adaptive management. *Urban Forestry & Urban Greening* 71: 127555.