한국조경학회지 54(5): 1~11, 2026. 10.
J. KILA Vol. 54, No. 5, pp. 1~11, October, 2026
pISSN 1225-1755 eISSN 2288-9566
https://doi.org/10.9715/KILA.2026.54.5.001

어린이공원 내 자연음이 대학생의 뇌파 변화와 스트레스 회복에 미치는 영향†

Effects of Nature Sounds in Children's Parks on EEG Changes and Stress Recovery among University Students†

염정헌*, 김하은, 김한섭*****
*강원대학교 환경조경학과 부교수, **강원대학교 환경조경학과 석사과정, ***국립강릉원주대학교 환경조경학과 석사

Yeum, Jung-Hun*, Kim, Ha-Eun, Kim, Han-Seop*****
*Associate Professor, Dept. of Environmental Landscape Architecture, Kangwon National University
**Master's Student, Dept. of Environmental Landscape Architecture, Kangwon National University
***Master, Dept. of Environmental Landscape Architecture, Gangneung-Wonju National University

Received: July 4, 2026
Revised: August 3, 2026 (1st)
August 16, 2026 (2nd)
Accepted: August 18, 2026
3인익명 심사필

Corresponding author :
Jung-Hun Yeum
Associate Professor
Dept. of Environmental Landscape Architecture,
Kangwon National University,
Gangneung 25457, Korea
Tel.: +82-33-640-2479
E-mail: zelkovayeum@kangwon.ac.kr

†이 성과는 정부 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2024-00339194).

국문초록

본 연구는 도시공원에서 실제로 수집한 자연음이 대학생의 스트레스 완화에 미치는 영향을 EEG 기반 생리 반응을 통해 분석하고자 하였다. 연구 대상지는 강릉시 어린이공원이며, 현장에서 수집한 바람소리, 빗소리 및 새소리를 청각 자극원으로 활용하였다. 총 25명의 대학생을 대상으로 통제된 실내 환경에서 청각 자극 전후의 뇌파를 측정하였으며, QEEG-64를 이용하여 8개 채널의 뇌전도(electroencephalography, EEG) 신호를 수집하였다. 주파수 대역별 상대 파워값과 함께 RAB, RAHB 및 RST 지수를 분석하였으며, 전극 위치별 상대 알파파 분석 및 Brain mapping을 통해 청각 자극 이후 상대 알파파 활성 정도를 확인하였다. 분석 결과, 모든 자연음 조건에서 상대 알파값과 상대 세타값은 증가하고, 상대 베타값과 상대 감마값은 감소하는 경향을 나타냈다. 특히 상대 알파값은 빗소리(t = −2.740, p = 0.011)와 새소리(t = −2.848, p = 0.009)에서 유의하게 증가하였으며, 상대 베타값은 빗소리(t = 2.542, p = 0.018)에서 유의하게 감소하였다. RAB, RAHB 및 RST 지수값은 모든 자연음 조건에서 유의하게 증가하였으며, RAB의 평균 증가폭은 빗소리(0.305), 새소리(0.299), 바람소리(0.255) 순으로 나타났다. RST의 경우, 사전 측정값 대비 증가한 참여자 비율이 바람소리 88%, 빗소리 92%, 새소리 92%로 가장 높은 일관성을 보였다. 전극 위치별 분석 결과, 두정엽에서의 상대 알파값이 가장 높게 나타났으며, 사전 대비 변화량은 측두엽에서 가장 큰 것으로 확인되었다. 좌우 반구 간 상대 알파값 차이는 감소하는 경향을 보여 보다 균형적인 뇌 활성 상태가 형성될 가능성을 시사하였다. 본 연구는 도시공원에서 실제 집음한 자연음을 활용하여 청각 자극에 따른 생리적 스트레스 완화 효과를 EEG 분석을 통해 검증한 시범 연구라는 점에서 의의가 있다. 특히 주파수 대역별 상대 파워값, 스트레스 관련 EEG 지수(RAB, RAHB, RST), 전극 위치별 상대 알파값, Brain mapping 등을 종합적으로 분석함으로써 자연음 노출에 따른 변화 경향을 다각적으로 제시하였다. 연구 결과는 도시공원의 청각적 치유 기능을 고려한 계획 및 관리뿐만 아니라 녹색처방 기반 건강증진 정책을 위한 기초 자료로서 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

주제어: 도시공원, 자연 소리경관, 청각 자극, EEG 분석, 스트레스 회복

ABSTRACT

This study examined the effects of nature sounds recorded in urban parks on stress reduction in university students using electroencephalographic (EEG) responses. Wind sounds, rain sounds, and bird sounds recorded in children's parks in Gangneung, South Korea, were used as auditory stimuli. EEG signals were measured in 25 university students before and after auditory stimulation under controlled indoor conditions using an eight-channel of QEEG-64 system. Relative power across frequency bands and the RAB, RAHB, and RST were analyzed. Relative alpha activity at individual electrode positions and brain mapping were also examined to assess relative alpha activity following auditory stimulation. The results showed that relative alpha and theta power tended to increase, whereas relative beta and gamma power tended to decrease across all nature sound conditions. In particular, relative alpha power increased significantly following exposure to rain sounds (t = −2.740, p = 0.011) and bird sounds (t = −2.848, p = 0.009), while relative beta power decreased significantly following exposure to rain sounds (t = 2.542, p = 0.018). RAB, RAHB, and RST increased

significantly across all nature sound conditions. The mean increase in RAB was greatest for rain sounds (0.305), followed by bird sounds (0.299) and wind sounds (0.255). For RST, the proportion of participants showing an increase from pre-exposure levels was 88% for wind sounds and 92% for both rain sounds and bird sounds, showing the highest consistency among the analyzed EEG indices. Analysis by electrode position showed that relative alpha activity was highest in the parietal region, whereas the greatest change from pre-exposure levels was observed in the temporal region. Interhemispheric differences in relative alpha activity also tended to decrease, suggesting the possibility of a more balanced pattern of brain activity. This pilot study investigated the physiological stress-reducing effects of auditory stimulation using nature sounds recorded directly in urban parks through EEG analysis. In particular, frequency-specific relative power, stress-related EEG indices (RAB, RAHB, and RST), electrode-specific relative alpha power, and brain mapping were comprehensively analyzed to characterize changes associated with exposure to nature sounds from multiple perspectives. The findings may serve as baseline information for urban park planning and management that considers the auditory healing functions of urban parks, as well as for health promotion policies based on green prescriptions.

Keywords: Urban Park, Nature Soundscape, Auditory Stimulation, EEG Analysis, Stress Reduction

1. 서론

1.1 연구 배경 및 목적

현대 사회는 경쟁 심화, 사회적 불확실성 등으로 인해 만성적 스트레스에 구조적으로 노출되어 있으며, 특히 대학생은 학업, 진로, 사회적 관계 및 경제적 부담이 중첩되는 대표적인 스트레스 취약 집단으로 보고된다. Auerbach et al.(2018)은 WHO World Mental Health International College Student Project를 통해 대학생 집단에서의 정신건강 문제가 높은 수준으로 나타나고 있음을 보고하였으며, COVID-19 펜데믹은 대학생의 스트레스와 정신건강 저하에 영향을 미친 것으로 보고되었다(Prowse et al., 2021). 이러한 결과는 대학생을 고위험 스트레스 집단으로 보고, 일상생활 속에서 접근 가능한 예방적 회복 환경을 모색할 필요성을 뒷받침한다.

예방적 보건 측면에서 도시공원과 녹지는 신체적·정신적 건강을 증진하는 중요한 도시 인프라로 기능한다. 녹지에 대한 접근과 건강 간의 관계를 종합한 메타분석에서는 녹지의 이용이 사망 위험 저감, 심박수·혈압·코르티솔 감소 등 다양한 건강지표와 관련된 것으로 보고하고 있으며(Twohig-Bennett and Jones, 2018), 자연 노출은 스트레스 완화, 기분 개선, 신체활동 증진 및 사회적 접촉을 통해 건강에 기여하는 것으로 논의되어 왔다(Hartig et al., 2014). 또한, COVID-19 시기에는 생활권 녹지 및 수변공간 접근성이 정신건강 보호 요인으로 작용할 수 있다는 것이 보고된 바 있다(Pouso et al., 2021). 이는 도시공원이 단순한 여가공간을 넘어 일상 기반의 스트레스 완충 및 건강 회복을 지원하는 공중보건 기반시설로 재인식될 필요가 있음을 시사한다.

최근에는 자연 공간의 치유 효과를 검증하는 연구가 다수 수행되고 있으며, 산림, 정원, 자연 기반 치유 프로그램의 효과 검증은 만족도, 기분상태 및 스트레스 지각 관련 설문 평가뿐만 아니라 EEG, 코르티솔, 심박변이도, 맥파 등 생리지표를 활용한 객관적 평가로 확대되고 있다(Ulrich et al., 1991; Hartig et al., 2014; Twohig-Bennett and Jones, 2018). 이들 생리지표는 각각 중추신경계, 내분비계, 자율신경계의 반응을 객관적으로 평가할 수 있어 스트레스 및 회복 효과를 정량적으로 검증하는 대표적인 도구로 활용되고 있다.

따라서 본 연구는 어린이공원에서 실제로 집음된 자연음이 대학생의 스트레스 완화에 긍정적인 영향을 미칠 것이라는 가설을 설정하고, 다른 감각적 영향을 최소화한 실내 실험 환경에서 청각 자극에 따른 EEG 반응을 분석하였다. 이를 통해 도시공원 자연음 노출 이후 나타나는 스트레스 완화 효과와 연관된 EEG 변화를 탐색적으로 확인하고, 향후 도시공원의 치유 기능 중 청각적 요소에 대한 계획 및 관리 필요성을 제시하고자 하였다.

1.2 이론적 고찰

1.2.1 청각적 치유 효과 관련 연구

도시녹지의 회복효과를 설명하는 과정에서 청각환경, 즉 사운드스케이프는 시각경관과 함께 인간의 회복 경험을

구성하는 중요한 환경요소로 인식되고 있다. 사운드스케이프는 단순한 소음 수준이 아니라 특정 장소에서 인간이 지각하고 경험하는 음향환경을 의미하며, 최근에는 도시공원의 건강증진 기능을 설명하는 핵심 요소로 주목받고 있다. 자연음 노출 연구에서는 새소리, 물소리 및 바람소리와 같은 자연음이 도시소음보다 스트레스 회복을 촉진하는 것으로 보고되었으며(Alvarsson et al., 2010), 자연음의 건강효과를 종합한 메타연구에서도 자연음이 긍정적 정서를 증진하고 스트레스와 불쾌감을 감소시키는 것으로 나타났다(Buxton et al., 2021).

도시의 자연환경을 대상으로 한 연구에서도 자연음은 주의회복과 심리적 회복에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다. Zhang et al.(2017)은 도시의 자연음이 교통소음이나 기계음보다 회복환경 인식과 주의회복 효과를 향상시킨다고 보고하였으며, Ratcliffe et al.(2013)은 새소리가 주의회복과 스트레스 회복에 기여하는 중요한 청각자극임을 보고한 바 있다.

국내에서는 조경 및 환경 분야를 중심으로 도시공원과 치유공간의 청각환경을 계획에 반영하려는 연구가 지속적으로 수행되고 있다. 안득수(2015)는 정신병원 치유정원을 대상으로 물소리, 새소리, 풍경소리 및 음악소리 등을 활용한 음경관 설계 방향을 제시하였으며, 장병우와 고동욱(2024)은 남산 도시자연공원을 대상으로 음향지수를 활용하여 도시공원의 사운드스케이프 특성을 분석하였다. 현재호와 연평식(2024)은 산림음의 비가청 고주파 성분 노출 후 알파파 증가를 확인하여 자연음의 생리적 효과를 EEG 기반으로 해석할 수 있는 가능성을 제시한 바 있다. 그러나 기존 연구는 대부분 설문조사, 음향지수 또는 사운드스케이프 평가에 초점을 두고 있으며, 실제 도시공원에서 수집한 자연음을 통제된 실험 환경에서 청각 자극원으로 제시한 후, 생리적 변화 특성에 기반하여 스트레스 완화 효과를 정량적으로 규명한 연구는 상대적으로 제한적이다. 특히, 조경 분야에서는 도시녹지 내 소리 경관의 특성과 생리적 반응 간의 관계에 대한 기초 자료가 부족한 실정이다. 청각적 요소가 도시녹지의 치유 기능을 구성하는 하나의 요인이 될 수 있다는 활용성을 고려한다면, 자연음을 포함한 긍정적 청각 자극에 대한 생리적 반응을 정량적으로 분석하는 연구가 지속적으로 이루어질 필요가 있다.

1.2.2 EEG 측정 및 분석 연구

특정 자극에 의한 생리적 지표로 활용되고 있는 EEG는 뇌의 전기적 활동을 비침습적으로 실시간 측정할 수 있으며, 높은 시간 해상도를 바탕으로 자극에 대한 뇌 반응을 정량적으로 분석할 수 있다는 장점 때문에 다양한 연구 분야에서 활용되고 있다. 의료 분야에서는 뇌전증 및 수면장애와 같은 신경계 질환의 진단뿐 아니라 우울, 불안, 스트레스 및 인지기능을 평가하는 방법으로 활용되고 있으며(Craik et al., 2019; Attar, 2022), 운동 분야에서도 EEG는 운동 수행능력, 집중도, 피로, 회복 및 정신적 스트레스에 따른 뇌 활성 변화를 평가하는 주요 도구로 활용되고 있다(Hatfield and Hillman, 2001; 유성종, 2009; Cheron et al., 2016). 이와 함께 산림 치유 프로그램 운영 후, EEG 및 맥파를 활용한 생리적 회복 효과를 검증하려는 연구가 수행된 바 있으며, 김민수와 염정헌(2024)은 산림 산책 전후의 뇌파와 맥파를 분석하여 집중도, 두뇌활동, 두뇌스트레스, 심장건강도 및 자율신경 건강도의 변화를 평가함으로써 산림환경의 치유효과를 검토하였다. 또한 송인준 등(2022)은 국내 산림치유 연구를 체계적으로 분석한 결과, EEG, 심박변이도(HRV), 혈압 및 맥박 등 다양한 생리 지표가 산림치유 효과를 평가하는 주요 지표로 활용되고 있음을 보고하였고, 길태규 등(2023) 역시 국내 산림치유 프로그램 연구를 종합적으로 검토하여 산림환경 노출이 스트레스 감소와 생리적·심리적 건강 증진에 긍정적인 영향을 나타낸다고 제시하였다. 그러나 생리적 스트레스 완화를 위한 EEG 평가를 생활권 도시공원을 대상으로 수행한 탐색적 연구는 여전히 제한적인 실정이며, 치유공간으로서 도시녹지의 기능에 대한 사회적 관심이 증대되는 시점에서 생리지표 관련 기초 연구가 필요한 시점이다.

2. 재료 및 연구방법

본 연구에서는 도시공원의 사운드스케이프를 구성하는 자연음 확보를 위해 대표적 관광도시인 강릉시 내 어린이공원 중 거점 녹지와의 거리가 가까운 12호, 34호, 45호를 대상으로 하여, 공원별 3일간 집음을 실시하였다. 집음된 자료는 Adobe Audition을 이용하여 생물음(biophony), 무생물음(geophony), 인위적 소리(anthrophony)로 분류하였다(Pijanowski et al., 2011). 차량 통행음, 공사소음 및 대화음 등 인위적 소음은 제외하였으며, 최종적으로 생물음에서는 새소리, 무생물음에서는 바람소리와 빗소리를 선정하였다. 파형(waveform) 분석 및 청취 등을 통해 공원별 소리 유형이 명확하게 집음 된 구간을 선정하였으며, 특히 새소리의 경우, 수집된 음원 중 06:00–08:00 사이의 소리를 활용하였는데, 이는 조류의 발성 활동이 가장 활발한 시간대를 고려하였다(Bibby et al., 2000; Sueur et al., 2014). 파형과 스펙트로그램(spectrogram) 분석은 각 음원의 절대적인 음압 수준을 평가하기 위한 것이 아니라, 녹음된 청각 자극원의 상대적인 시간적·주파수적 특성을 비교하기 위한 보조적 분석으로 수행하였다. 청각

자극원 기반의 EEG 측정은 총 25명의 대학생(일부 대학원생 포함)을 모집하여 진행하였다. 소규모 사전 측정을 통해 개인별 컨디션 등에 따른 개인차가 존재함을 확인하였고, 사전-사후 측정값에 대한 변화 정도를 파악하고자 하였기 때문에, 실험군만을 설정한 후, 측정값에 대한 z-score 값을 통해 이상치를 제외하는 방식을 선택하였다. 실험 환경은 2.5m(W) × 2.5m(L) × 2.2m(H) 사이즈의 실내 booth를 설치하여 외부 환경 변수를 통제하고자 하였으며, 청각 외 다른 자극의 영향을 최소화하여 측정하였다(Figure 1 참조). 사전 측정은 3분 동안 진행하였고, 대학생들의 자연음 노출 전 일정 수준의 인지적 부담(Al-Shargie et al., 2016)을 부여하기 위해 전공 시험을 5분간 푼 후 측정하였다. 청각 자극 프로토콜은 공원별, 소리 유형별(바람소리, 빗소리, 새소리)로 진행하였다. 각 소리 유형별 30초를 자극하였으며, 각 소리 간 5초 동안의 무음을 삽입하였다. 이는 참여자에게 자극의 제시 위치와 시간적 조건을 동일하게 적용하기 위한 것이며(Korte et al., 2025), 무음 구간은 선행 자극의 생리적 영향을 완전히 소거할 수는 없으나 선행연구(Ueno and Shimada, 2023)에서 제시된 자극 구간을 구분할 수 있는 효율적 시간대를 활용하였다. 뇌파 측정은 청각 자극 전 과정에서 측정되었고, QEEG-64(LAXTHA, Korea) 장비를 사용하여 수행되었다. 수집된 EEG 신호는 TeleScan 소프트웨어를 이용해 전송 및 분석하였다. 전극은 Fp1, Fp2, F3, F4, T7, T8, P3, P4 등 총 8개 위치에 부착하였다. 기본적인 뇌파는 이완 및 안정된 각성 상태와 관련된 상대 알파(Relative Alpha, 8-13Hz) 값과 주의·각성 및 인지활동과 관련된 상대 베타(Relative Beta, 13-30Hz) 값을 중심으로 분석하였으며, 베타값의 변화를 세부적으로 분석하기 위해 안정적인 주의 상태와 관련된 SMR(Sensorimotor Rhythm, 12-15Hz), 능동적 집중과 관련된 RMB(relative middle beta, 15-20Hz), 높은 각성과 긴장에 관련된 RHB(relative high beta, 20-30Hz)를 분석하였다. 또한 뇌파 변화를 지수화하여 효율적으로 파악하기 위해 RAB(ratio of alpha to beta), RAHB(ratio of alpha to high-beta), RST(ratio of SMR to theta) 등을 분석하였다. RAB와 RAHB의 증가는 각각 베타 및 하이베타파에 비해 알파파 활동이 상대적으로 우세해진 것으로 이완과 긴장 완화 방향의 변화를 의미하며, RST의 증가는 세타파에 비해 SMR파의 활동이 우세해진 것으로 안정적인 주의 상태의 강화를 의미한다. 이와 함께 전극별 상대 알파값의 변화 특성을 분석하였고 Brainmap 프로그램을 통해 시각화하였다. 샘플의 정규성은 Shapiro-Wilk 검정을 통해 확인하였으며, 추가적으로 일부 변수의 왜도(skewness) 및 첨도(kurtosis)를 함께 검토하였다. 사전과 사후의 변화는 대응표본 t-test를 통해 통계 분석하였다. 본 연구는 대학 IRB(Institutional Review Board)의 사전 승인(GWNUIRB-2024-33)을 받고 수행하였다.

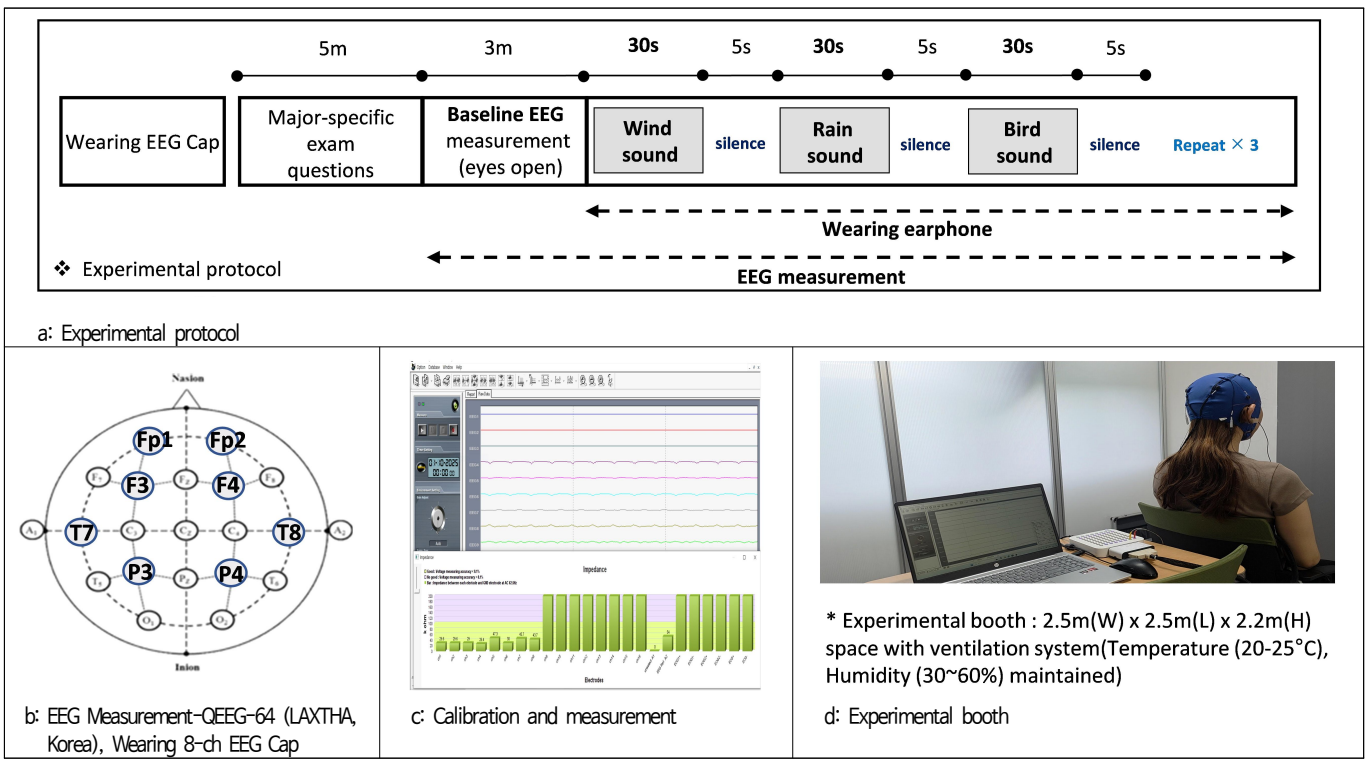


Figure 1. Auditory stimulus measurement protocol

3. 결과 및 고찰

3.1 어린이공원 내 자연음 분석

최종 선정된 청각 자극원은 파형과 스펙트로그램을 이용하여 음향 특성을 비교·분석하였다(Figure 2 참조). 스펙트로그램 분석 결과, 바람소리는 약 −3dB 부근의 신호가 주로 4kHz 이하에서 나타났으며, 시간에 따라 진폭이 완만하게 변화하는 연속적인 음향 특성을 보였다. 빗소리는 약 −18dB 부근의 신호가 약 9kHz까지 비교적 균질하게 분포하여 넓은 주파수 대역에 걸쳐 지속적인 특성을 나타냈다. 반면 새소리는 −18dB보다 큰 신호가 약 10kHz까지 반복적으로 분포하였으며, 특정 주파수 대역에서 짧은 음절(call)이 반복되는 간헐적·분절적 패턴이 뚜렷하게 확인되었다. 이러한 특성은 바람과 비가 연속적인 무생물음(geophony)의 음향 구조를 나타내는 반면, 새소리는 생물음(biophony)으로서 주파수 집중성과 시간적 반복성이 뚜렷한 음향 구조를 가진다는 기존 연구와 일치하였다(Catchpole and Slater, 2008; Pijanowski et al., 2011).

3.2 뇌파 유형별 상대 파워값 분석

대응표본 차이값에 대한 정규성은 Shapiro−Wilk 검정과 왜도(skewness), 첨도(kurtosis)를 함께 검토하여 확인

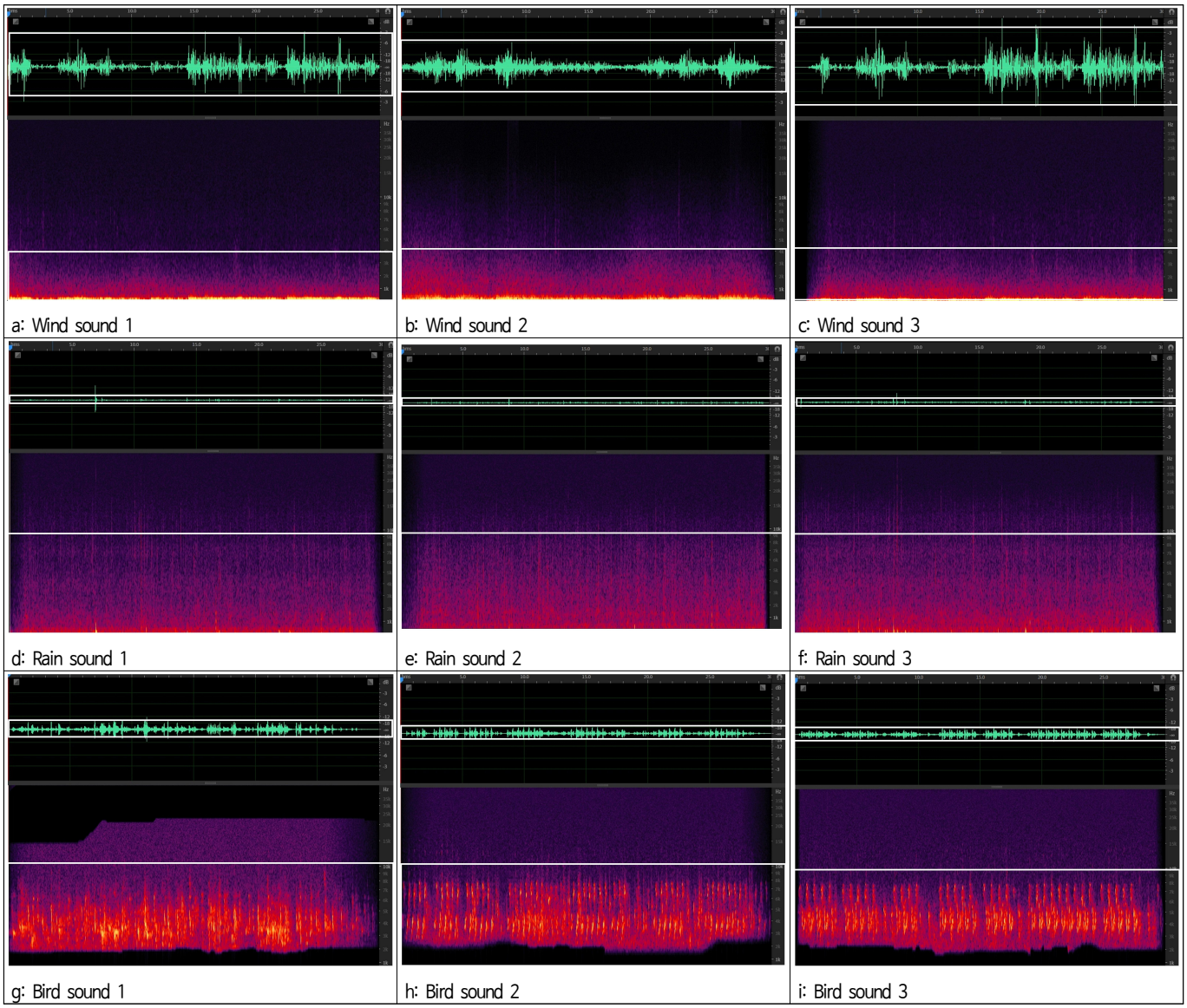


Figure 2. Waveforms and spectrograms of the wind, rain, and bird sound stimuli

하였다. 일부 변수에서 Shapiro-Wilk 검정 결과가 유의하게 나타났으나, 왜도와 첨도 값은 전반적으로 허용 가능한 범위 내에 분포하여(Hong et al., 2003), 대응표본 분석을 수행하는 데 큰 문제가 없는 것으로 판단하였다.

파워스펙트럼 유형별 사전값 대비 사후값의 변화율(%)을 분석한 결과(Figure 3 참조), 상대 세타값과 상대 알파값은 모든 자연음에서 증가하였으며, 상대 베타값과 상대 감마값은 전반적으로 감소하는 경향을 나타냈다. 상대 알파값은 모든 자연음에서 증가하였으며, 특히 빗소리(t = −2.740, p = 0.011)와 새소리(t = −2.848, p = 0.009)에서 통계적으로 유의한 증가가 확인되었다. 상대 베타값은 사전 측정값에 비해 전반적으로 감소하였으며, 빗소리(t = 2.542, p = 0.018)에서만 통계적으로 유의한 차이가 나타났다.

베타파를 세부 대역으로 구분하여 분석한 결과, SMR파는 모든 자연음에서 증가하였으며 증가폭 또한 가장 크게 나타났다. 반면 상대 하이베타파는 모든 자연음에서 감소하는 경향을 보였으며, 새소리를 제외한 조건에서 통계적 유의성이 확인되었다. 상대 미들베타파 역시 모든 자연음에서 감소하는 경향을 나타냈으나 통계적으로 유의한 차이는 확인되지 않았다.

일반적으로 알파파 증가는 심리적 안정과 이완 상태를, 베타파, 특히 하이베타파의 증가는 긴장과 스트레스 상태

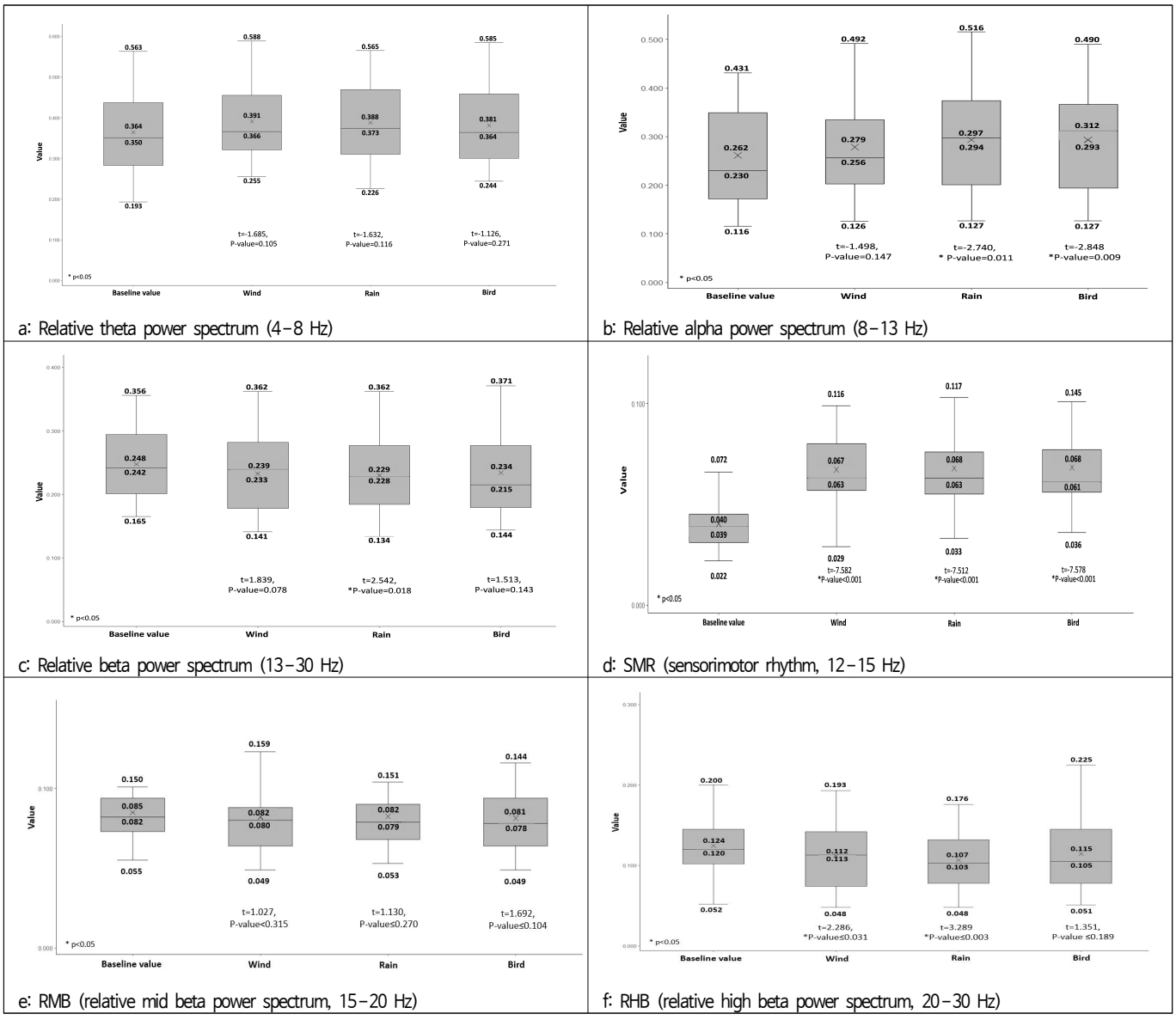


Figure 3. Power spectral analysis centering the relative alpha and beta band activity by nature sound type in the park
Legend: × Mean, — Median
Normality test. Shapiro-Wilk [RA (pre-post): Wind (0.916), Rain (0.029), Bird (< 0.001), RB (pre-post): Wind (0.370), Rain (0.158), Bird (0.224)], Skewness & Kurtosis [RA (pre-post): Wind (-0.44, 0.36), Rain (-1.21, 2.06), Bird (-1.34, 1.01), RB (pre-post): Wind (-0.19, 0.97), Rain (0.57, 0.59), Bird (0.57, 0.01)]

를 반영하는 대표적인 지표로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서 확인된 상대 알파파의 증가와 상대 베타 및 하이베타파의 감소는 자연음 노출이 심리적 이완과 스트레스 감소에 긍정적인 영향을 미쳤음을 시사한다. 이러한 결과는 자연음이 생리적 스트레스 회복을 촉진하고 심리적 안정감을 향상시킨다고 보고한 Annerstedt et al.(2013)의 연구 결과와 연계되며, 도시공원에서 새소리가 회복감과 환경 선호도를 향상시킨다고 보고한 Zhao et al.(2020)의 결과와도 유사한 경향을 나타낸다.

3.3 EEG 변화 관련 주요 지수 분석

EEG 변화에 대한 주요 지수 RAB, RAHB, RST에 대한 종합 분석(Table 1, Figure 4 참조)을 실시하였다. RAB에 대한 대응표본 t-test 결과, 모든 자연음 조건에서 사후 평균값이 사전보다 유의하게 증가하였으며, 바람소리(t = −3.721, p = 0.001), 빗소리(t = −4.312, p 〈 0.001), 새소리(t = −3.704, p = 0.001) 모두 통계적으로 유의한 차이를 나타냈다. 평균 증가폭은 빗소리(0.305)가 가장 컸으며, 이어 새소리(0.299), 바람소리(0.255) 순으로 나타났다. Boxplot 분석에서도 세 자연음 조건 모두 사후 중앙값과 사분위 범위가 전반적으로 상향 이동하는 양상이 확인되었다. 또한 RAB가 증가한 참여자 비율은 바람소리와 빗소리에서 각각 76%, 새소리에서 72%로 나타나 대부분의 참가자가 자연음 노출 후 동일한 방향의 변화를 보였다. RAB는 상대적인 알파 활성 증가와 베타 활성 감소를 동시에 반영하는 지표로, 값의 증가는 심리적 이완과 스트레스 감소를 의미하는 것으로 알려져 있다(Klimesch, 1999; Wen and Aris, 2020). 따라서 본 연구에서 확인된 RAB의 증가는 자연음 노출 이후 전반적인 각성 수준의 완화와 보다 안정된 생리적 상태에 부합하는 EEG 반응이 나타났음을 시사한다.

RAHB 역시 모든 자연음 조건에서의 사후 평균값이 증가하였다. 대응표본 t-test 결과 바람소리(t = −3.973, p 〈 0.001), 빗소리(t = −4.495, p 〈 0.001), 새소리(t = −3.650, p = 0.001) 모두에서 사전 대비 사후 변화가 통

Table 1. Paired-sample t-test analysis of RAB, RAHB and RST changes (pre-post) by sounds

Division		Paired difference				t-value	Degrees of freedom	Significance probability
		Mean	Standard deviation (SD)	95% confidence interval of the difference				Two-tailed probability
				Lower Limit	Upper Limit			
RAB	Wind (pre-post)	−0.255	0.343	−0.396	−0.114	−3.721	24	0.001**
	Rain (pre-post)	−0.305	0.353	−0.450	−0.159	−4.312	24	〈 .001***
	Bird (pre-post)	−0.299	0.403	−0.465	−0.132	−3.704	24	0.001**
RAHB	Wind (pre-post)	−0.8637	1.08696	−1.3124	−0.415	−3.973	24	〈 .001***
	Rain (pre-post)	−1.0108	1.12427	−1.4748	−0.5467	−4.495	24	〈 .001***
	Bird (pre-post)	−0.9129	1.25077	−1.4292	−0.3966	−3.65	24	0.001**
RST	Wind (pre-post)	−0.0691	0.07583	−0.1004	−0.0378	−4.559	24	〈 .001***
	Rain (pre-post)	−0.0697	0.06674	−0.0972	−0.0421	−5.221	24	〈 .001***
	Bird (pre-post)	−0.0813	0.08623	−0.1169	−0.0457	−4.717	24	〈 .001***

**p 〈 0.01, ***p 〈 0.001

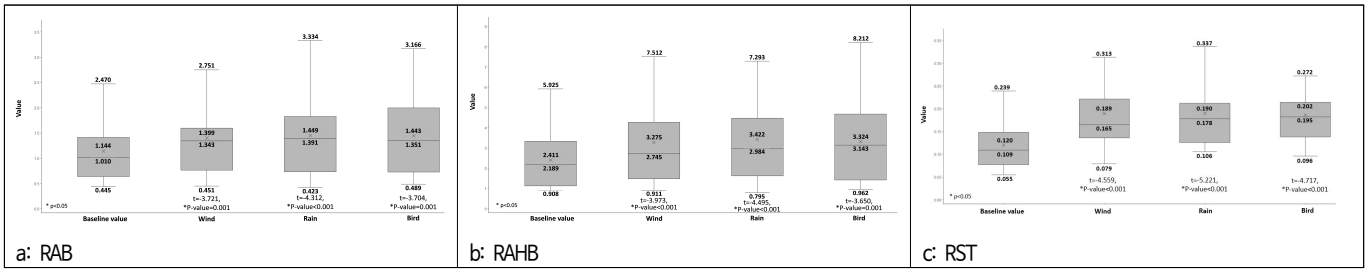


Figure 4. Boxplots of RAB, RAHB, and RST values by nature sound type in the park
Legend: × Mean, — Median

계적으로 유의하였으며, 증가폭은 빗소리에서 가장 크게 나타났다. Boxplot 분석에서도 모든 자연음 조건에서 중앙값이 전반적으로 상승하고 분포가 상향 이동하는 양상을 보여 대부분의 참가자에서 동일한 방향의 변화가 나타났음을 확인할 수 있었다. 실제로 RAHB가 증가한 참여자 비율은 바람소리 80%, 빗소리 76%, 새소리 68%로 나타났다. RAHB는 알파 활성 증가와 함께 스트레스 및 불안과 관련된 하이베타 활성의 상대적 감소를 반영하는 지표로, 값의 증가는 긴장과 과각성 상태의 완화를 의미한다(Engel and Fries, 2010).

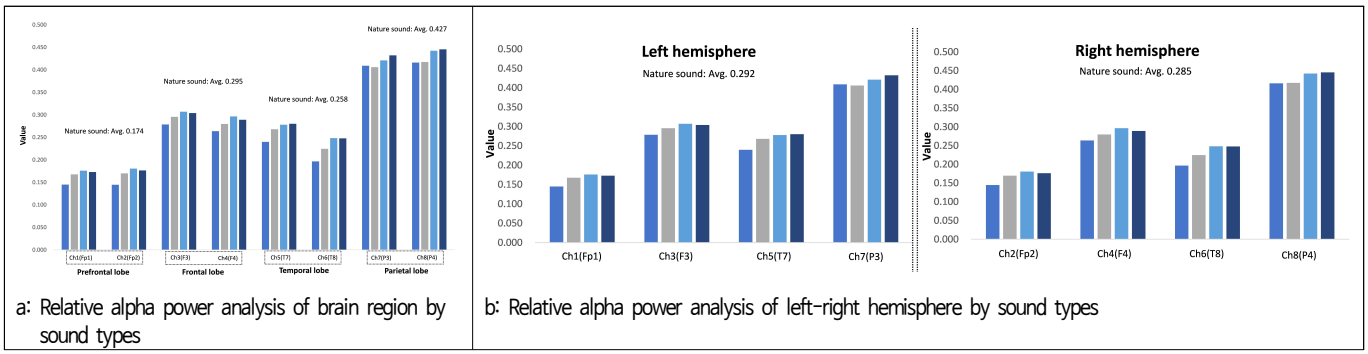
RST는 감각운동리듬(SMR)과 세타 활동의 상대적 균형을 반영하는 지표로서 선택적 주의와 안정된 각성 상태를 평가하는 데 활용된다(Lubar, 1991; Arns et al., 2014). RST에 대한 분석 결과, 모든 자연음 조건에서 사후 평균값이 증가하였다. 대응표본 t-test 결과, 바람소리($t = -4.559$, $p < 0.001$), 빗소리($t = -5.221$, $p < 0.001$), 새소리($t = -4.717$, $p < 0.001$) 모두에서 통계적으로 유의한 차이가 확인되었으며, 평균 증가폭은 새소리(0.081)가 가장 크게 나타났다. Boxplot 분석에서도 세 자연음 조건 모두 중앙값이 상승하고 전체 분포가 상향 이동하는 양상을 보여 자연음 노출 후 RST가 전반적으로 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 특히 RST가 증가한 참여자 비율은 바람소리 88%, 빗소리 92%, 새소리 92% 등이었고, 가장 높은 일관성을 나타냈다. 이러한 결과는 자연음 노출 이후 안정된 각성 및 주의 상태와 관련된 EEG 반응이 나타났음을 시사한다.

자연음 노출 후 RAB, RAHB 및 RST의 증가는 자연음이 심리적 이완을 유도하면서 전반적인 스트레스 감소(RAB), 과각성 완화(RAHB) 및 안정된 주의 상태 유지(RST) 등에 긍정적인 영향을 미친 것으로 해석될 수 있다.

3.4 전극별 상대 알파값의 변화 특성

청각 자극 이후 채널별 상대 알파값을 분석한 결과(Figure 5, 6 참조), 두정엽(P3, P4)에서 가장 높은 값을 나타냈다. 자연음(바람, 빗소리, 새소리)의 평균 상대 알파값은 전전두엽(Fp1, Fp2) 0.174, 전두엽(F3, F4) 0.295, 측두엽(T7, T8) 0.258, 두정엽(P3, P4) 0.427 등이었고, 두정엽에서의 알파파 활성 정도가 가장 높은 것으로 확인되었다. 이는 두정엽의 알파파 활동이 외부 정보의 선택적 처리 및 안정된 각성 상태와 관련되는 것으로 보고되어 있어(Klimesch, 1999), 본 연구 결과도 이러한 특성과 관련된 반응일 가능성이 있다.

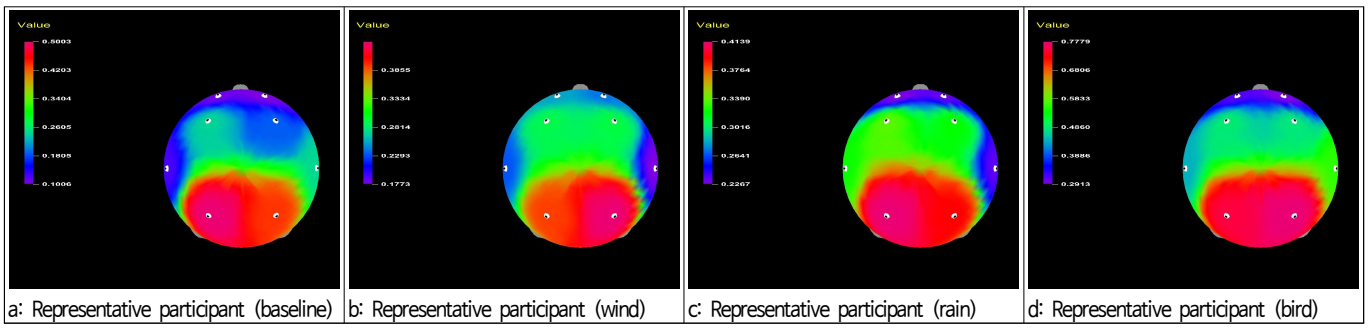
반면, 사전 대비 상대 알파값의 변화량은 측두엽에서 가장 크게 나타났으며(0.040), 다음으로 전전두엽(0.029), 전두엽(0.024), 두정엽(0.015)의 순으로 확인되었다. 측두엽은 청각 정보의 처리와 해석을 담당하는 대표적인 영역



a: Relative alpha power analysis of brain region by sound types

b: Relative alpha power analysis of left-right hemisphere by sound types

Figure 5. Relative alpha power by electrode location, brain region and left-right hemisphere
Legend: Baseline Wind Rain Bird



a: Representative participant (baseline)

b: Representative participant (wind)

c: Representative participant (rain)

d: Representative participant (bird)

Figure 6. Example brain map of a participant with relative alpha EEG values approximating the group mean

으로 알려져 있으며, 자연음 자극에 의해 알파파 활동이 증가한 것은 청각 자극에 대한 선택적 주의와 불필요한 정보의 억제 과정과 관련된 반응일 가능성을 시사한다(Foxe and Snyder, 2011; Weisz et al., 2011). 부위별 상대 알파값의 변화 양상은 전체 평균값에 근사한 참여자의 brain mapping을 통해 예시적으로 제시하였다.

또한, 청각 자극 이후 상대 알파값은 좌반구(0.292)가 우반구(0.285)보다 다소 높았으며, 사전 측정값(좌반구 0.268, 우반구 0.255)과 비교하면 좌우 반구 간 차이는 0.013에서 0.008로 감소하였다. 이는 자연음 청각 자극 이후 좌우 반구 간 알파파 활성의 불균형이 완화되었을 가능성을 시사하며, 알파파 활동의 균형적 증가는 정서적 안정과 스트레스 감소를 반영하는 지표라는 선행 연구의 결과와도 부합된다(Davidson, 2004).

4. 결론

본 연구는 도시공원에서 실제로 수집한 자연음이 대학생의 스트레스 완화에 미치는 영향을 EEG 기반 생리 반응을 통해 분석하였다. 강릉시 어린이공원에서 수집한 바람소리, 빗소리 및 새소리를 청각 자극원으로 활용하였으며, 통제된 실내 환경에서 청각 자극 전후의 뇌파 변화를 비교하였다.

분석 결과, 모든 자연음 조건에서 자극 후 상대 알파파와 상대 세타파는 증가하고, 상대 베타파와 상대 감마파는 감소하는 경향을 보였다. 특히 상대 알파파의 활성화와 RAB, RAHB, RST값의 증가는 자연음 노출이 스트레스 완화, 과각성 감소 및 안정된 주의 상태 형성과 관련될 가능성을 시사하였다. 이 중 RST는 모든 자연음 유형에서 사후값이 증가한 참가자의 비율이 높게 나타나, 자연음 노출에 대해 비교적 일관된 반응 양상을 보였다.

전극 위치별 분석에서는 청각 자극 이후 상대 알파값이 두정엽에서 가장 높게 나타났으며, 사전 대비 변화량은 측두엽에서 가장 크게 확인되었다. 이는 자연음 자극에 따른 이완 반응이 전반적인 뇌 활성 변화와 함께 청각 정보 처리 영역에서도 두드러졌음을 의미한다. 또한 brain mapping 결과, 청각 자극 이후 상대 알파 활성의 공간적 변화가 확인되었고, 좌우 반구 간 상대 알파값 차이가 감소하는 경향을 보여 보다 균형적인 뇌 활성 상태가 형성될 가능성을 시사하였다.

본 연구는 기존의 도시공원 및 녹지에서의 스트레스 완화 관련 평가 연구가 만족감 및 심리적 회복 평가 등 설문조사에 의존하였던 것과 달리, 도시공원에서 실제 집음한 자연음을 활용한 EEG 기반 생리 반응 분석을 탐색적으로 검토했다는 점에서 의의가 있다. 또한, 주파수 대역별 상대 파워값, 스트레스 관련 EEG 지수(RAB, RAHB, RST), 전극 위치별 상대 알파파 활성 분석 및 Brain mapping을 함께 적용함으로써 자연음 노출에 따른 신경 생리적 변화를 다각적으로 제시하였다. 조경계획적 측면에서 보면, 도시공원 내 사운드스케이프 특성 분석과 연계하여 어린이공원 내 자연음이 스트레스 완화와 심리적 회복을 지원하는 환경요소로 활용될 가능성을 시사하였다. 향후 새소리, 물소리 등의 자연음이 EEG 변화에 긍정적이라는 전제하에 치유 공간 구성 시, 다양한 조류의 청음을 목적으로 하여 생태적 지위를 고려한 식재 구조 및 종 구성을 검토할 수 있으며, 물소리를 들을 수 있는 수 공간 설치 및 음향시설 설치를 통한 유사 환경 구현도 검토해 볼 수 있을 것으로 판단된다.

다만 본 연구는 표본 규모가 다소 제한적이고 특정 연령층을 대상으로 수행되었다는 한계가 있다. 또한 어린이공원의 사운드스케이프를 구성하는 자연음 중 세 가지 음원으로 한정하여 분석하였다는 점에서 연구의 범위가 제한되었다. 향후에는 다양한 연령층과 녹지 유형을 대상으로 하여 표본 수를 확대하는 것이 필요할 것으로 판단되며, 계절에 따른 자연음의 변화, 음압 수준, 자연음의 구성 비율 등을 고려하는 연구와 인공음 대비 자연음이 생리적 반응에 미치는 차별적 영향 분석 등의 후속 연구가 요구된다. 아울러 시각 및 후각 등 다른 감각 요소와의 비교와 복합 감각 자극에 따른 생리적 반응을 종합적으로 분석함으로써 도시녹지의 치유 효과를 보다 체계적으로 규명할 필요가 있다고 판단된다.

References

1. 길태규, 정아영, 이범, 이정재, 오양순, 박건우(2023) 산림치유 프로그램 및 효과에 대한 국내 논문 고찰. Journal of Cognitive Intervention and Digital Health 2(1): 30-39.
2. 김민수, 염정헌(2024) 산림 산책 전후 뇌파 및 맥파 분석을 통한 치유효과 검증 연구. 한국환경과학회지 33(4): 249-256.
3. 송인준, 이가영, 송초롱(2022) 산림치유 프로그램의 효과를 검증한 국내연구의 동향 분석. 한국산림과학회지 111(4): 651-666.
4. 안득수(2015) 정신병원 치유정원의 음경관 디자인을 위한 소리효과 분석: 심리적 및 생리적 효과를 중심으로.

한국조경학회지 43(1): 82-95.
5. 유성종(2009) 감각운동프로그램이 정신지체 청소년의 주의집중력과 뇌파변화에 미치는 영향. 한국특수체육학회지 17(1): 189-205.
6. 장병우, 고동욱(2024) 음향지수를 활용한 도시공원의 사운드스케이프 특징 분석: 남산 도시자연공원 사례 연구. 한국환경생태학회지 38(4): 405-415.
7. 현재호, 연평식(2024) 비가청 주파수 대역을 포함한 산림음이 뇌파에 미치는 영향 연구. 의공학회지 45(6): 310-320.
8. Al-Shargie, F., M. Kiguchi, N. Badruddin, S. C. Dass, A. F. M. Hani and T. B. Tang(2016) Mental stress assessment using simultaneous measurement of EEG and fNIRS. Biomedical Optics Express 7(10): 3882-3898.
9. Alvarsson, J. J., S. Wiens and M. E. Nilsson(2010) Stress recovery during exposure to nature sound and environmental noise. International Journal of Environmental Research and Public Health 7(3): 1036-1046.
10. Annerstedt, M., P. Jönsson, M. Wallergård, G. Johansson, B. Karlson, P. Grahn, Å. M. Hansen and P. Währborg(2013) Inducing physiological stress recovery with sounds of nature in a virtual reality forest: Results from a pilot study. Physiology & Behavior 118: 240-250.
11. Arns, M., H. Heinrich and U. Strehl(2014) Evaluation of neurofeedback in ADHD: The long and winding road. Biological Psychology 95: 108-115.
12. Attar, E. T.(2022) Review of electroencephalography signals approaches for mental stress assessment. Neurosciences Journal 27(4): 209-215.
13. Auerbach, R. P., P. Mortier, R. Bruffaerts, J. Alonso, C. Benjet, P. Cuijpers, K. Demyttenaere, D. D. Ebert, J. G. Green, P. Hasking, E. Murray, M. K. Nock, S. Pinder-Amaker, N. A. Sampson, D. J. Stein, G. Vilagut, A. M. Zaslavsky and R. C. Kessler(2018) WHO world mental health surveys international college student project: Prevalence and distribution of mental disorders. Journal of Abnormal Psychology 127(7): 623-638.
14. Bibby, C. J., N. D. Burgess, D. A. Hill and S. H. Mustoe(2000) Bird Census Techniques (2nd ed.). Academic Press.
15. Buxton, R. T., A. L. Pearson, C. Allou, K. Fristrup and G. Wittemyer(2021) A synthesis of health benefits of nature sounds and their distribution in national parks. Proceedings of the National Academy of Sciences 118(14): e2013097118.
16. Catchpole, C. K. and P. J. B. Slater(2008) Bird Song: Biological Themes and Variations. Cambridge University Press.
17. Cheron, G., G. Petit, J. Cheron, A. Leroy, A. Cebolla, C. Cevallos, M. Petieau, T. Hoellinger, D. Zarka, A. M. Clarinval and B. Dan(2016) Brain oscillations in sport: Toward EEG biomarkers of performance. Frontiers in Psychology 7: 246.
18. Craik, A., Y. He and J. L. Contreras-Vidal(2019) Deep learning for electroencephalogram (EEG) classification tasks: A review. Journal of Neural Engineering 16(3): 031001.
19. Davidson, R. J.(2004) What does the prefrontal cortex "do" in affect: Perspectives on frontal EEG asymmetry research. Biological Psychology 67(1-2): 219-233.
20. Engel, A. K. and P. Fries(2010) Beta-band oscillations: Signalling the status quo? Current Opinion in Neurobiology 20(2): 156-165.
21. Foxe, J. J. and A. C. Snyder(2011) The role of alpha-band brain oscillations as a sensory suppression mechanism during selective attention. Frontiers in Psychology 2: 154.
22. Hartig, T., R. Mitchell, S. de Vries and H. Frumkin(2014) Nature and health. Annual Review of Public Health 35: 207-228.
23. Hatfield, B. D. and C. H. Hillman(2001) The psychophysiology of sport: A mechanistic understanding of the psychology of superior performance. In R. N. Singer, H. A. Hausenblas, and C. M. Janelle, eds., Handbook of Sport Psychology (2nd ed.). Wiley. pp. 362-386.
24. Hong, S., M. L. Malik and M. K. Lee(2003) Testing configural, metric, scalar, and latent mean

invariance across genders in sociotropy and autonomy using a non-Western sample. Educational and Psychological Measurement 63(4): 636-654.
25. Klimesch, W.(1999) EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: A review and analysis. Brain Research Reviews 29(2-3): 169-195.
26. Korte, S., M. Jaeger, M. Rosenkranz and M. G. Bleichner(2025) From beeps to streets: Unveiling sensory input and relevance across auditory contexts. Frontiers in Neuroergonomics 6: 1571356.
27. Lubar, J. F.(1991) Discourse on the development of EEG diagnostics and biofeedback for attention-deficit/hyperactivity disorders. Biofeedback and Self-Regulation 16(3): 201-225.
28. Pijanowski, B. C., L. J. Villanueva-Rivera, S. L. Dumyahn, A. Farina, B. L. Krause, B. M. Napoletano, S. H. Gage and N. Pieretti(2011) Soundscape ecology: The science of sound in the landscape. BioScience 61(3): 203-216.
29. Pouso, S., Á. Borja, L. E. Fleming, E. Gómez-Baggethun, M. P. White and M. C. Uyarra(2021) Contact with blue-green spaces during the COVID-19 pandemic lockdown beneficial for mental health. Science of the Total Environment 756: 143984.
30. Prowse, R., F. Sherratt, A. Abizaid, R. L. Gabrys, K. G. Hellemans, Z. R. Patterson and R. J. McQuaid(2021) Coping with the COVID-19 pandemic: Examining gender differences in stress and mental health among university students. Frontiers in Psychiatry 12: 650759.
31. Ratcliffe, E., B. Gatersleben and P. T. Sowden(2013) Bird sounds and their contributions to perceived attention restoration and stress recovery. Journal of Environmental Psychology 36: 221-228.
32. 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.
33. Twohig-Bennett, C. and A. Jones(2018) The health benefits of the great outdoors: A systematic review and meta-analysis of greenspace exposure and health outcomes. Environmental Research 166: 628-637.
34. Ueno, F. and S. Shimada(2023) Inter-subject correlations of EEG reflect subjective arousal and acoustic features of music. Frontiers in Human Neuroscience 17: 1225377.
35. Ulrich, R. S., R. F. Simons, B. D. Losito, E. Fiorito, M. A. Miles and M. Zelson(1991) Stress recovery during exposure to nature and urban environments. Journal of Environmental Psychology 11(3): 201-230.
36. Weisz, N., T. Hartmann, N. Müller, I. Lorenz and J. Obleser(2011) Alpha rhythms in audition: Cognitive and clinical perspectives. Frontiers in Psychology 2: 73.
37. Wen, T. Y. and S. M. Aris(2020) Electroencephalogram (EEG) stress analysis on alpha/beta ratio and theta/beta ratio. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science 17(1): 175-182.
38. Zhang, Y., J. Kang and J. Kang(2017) Effects of soundscape on the environmental restoration in urban nature environments. Noise and Health 19(87): 65-72.
39. Zhao, W., H. Li, X. Zhu and T. Ge(2020) Effect of birdsong soundscape on perceived restorativeness in an urban park. International Journal of Environmental Research and Public Health 17(16): 5659.