



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

음악 선호도 추정을 위한 TRF 기반
뇌파 신경동기화 분석 연구

A Study on Neural Tracking Using Temporal Response
Function for Estimating Music Preference

울산대학교 대학원
의용생체공학과
문정환

음악 선호도 추정을 위한 TRF 기반
뇌파 신경동기화 분석

A Study on Neural Tracking Using Temporal Response
Function for Estimating Music Preference

지도교수 우지환

이 논문을 공학석사학위논문으로 제출함

2023년 12월

울산대학교 대학원
의용생체공학과
문정환

문정환의 공학석사 학위 논문을 인준함

심사위원 구교인(인)

심사위원 우지환(인)

심사위원 김성민(인)

울산대학교 대학원

2023년 12월

[국문 요약]

음악 선호도 추정을 위한 TRF 기반 뇌파 신경동기화 분석

울산대학교 대학원
의용생체공학과
문정환

음악과 신경동기화에 대한 electroencephalography 측정 연구는 주파수, 스펙트로그램, 주파수 위상 등을 추정하는 방향으로 진행되고 있으나 해당 방식은 시간에 따라 변화하는 음악의 특성을 반영하지 못하고 뇌파 반응만을 사용해 분석하기 때문에 복잡하고 변화하는 음악 정보에 대한 뇌의 반응이 반영되지 않는다. 최근 연구에서는 연속적인 음성 자극을 신경 반응에 매핑하여 반응을 추정하는 선형 시불변 시스템이 제시되고 있다.

본 연구에서는 선형 시불변 시스템의 한 종류인 temporal response function(TRF)을 사용하여 선호 음원과 비선호 음원에 대한 뇌파 반응을 추정하였고, 선호도를 평가할 수 있음을 파악하였다. 또한 delta band, theta band, alpha band, beta band로 주파수 대역을 나누어 각 주파수 대역의 뇌파 반응이 선호 음원에 대해 어떻게 반응하는지 분석하였고 envelope과 spectral flux 중 어떤 음악적 특징이 선호도에 강한 동기화를 일으키는 지 확인하였다.

1-30 Hz 대역 및 delta, theta, alpha, beta band의 TRF기반 추정 뇌파에 대한 분석 결과 100-200 ms 시간대에서 선호 음원에 대한 뇌파 반응이 비선호 음원에 대한 뇌파 반응보다 전두엽에서 더욱 강하게 활성화되며 Wilcoxon signed-rank test를 통해 유의한 차이가 있음을 검증하였다. Envelope과 spectral flux의 음악적 특징을 각각 사용하여 TRF한 결과 envelope의 재구성 정확도가 200ms 시간대에서 더 높은 것으로 나왔다.

본 연구를 통해 TRF를 사용해 선호와 비선호 음원이 구별 가능함과 저주파대역과 음원의 envelope이 선호도 분석에 유리함을 입증하였다. 본 연구의 결과를 개인의 음악 선호도 예측, 음악 추천, 시장 전략 수립 등의 방면에서 활용할 수 있을 것이다.

[주제어] Electroencephalography, Temporal response function, Music preference

목 차

[그림 목록].....	
1. 서 론.....	1
1.1. 연구 배경	2
1.2. TEMPORAL RESPONSE FUNCTION (TRF).....	4
1.3. 연구 목표	6
2. 연구 방법	7
2.1. 뇌파 데이터 측정	8
2.1.1. 임상실험 프로토콜	8
2.1.2. 피험자 정보	9
2.2. 뇌파 데이터 분석	10
2.2.1. 뇌파 데이터 전처리.....	10
2.2.2. TRF 특징 선택 및 변수 설정.....	11
2.2.3. STATISTICAL TEST	12
3. 연구 결과	13
3.1. TRF기반 음악 선호도에 따른 뇌파 분석 결과	14
3.2. TRF기반 FREQUENCY BAND별 음악 선호도에 따른 뇌파 분석 결과.....	16
3.2.1. DELTA BAND 결과.....	16
3.2.2. THETA BAND 결과	18
3.2.3. ALPHA BAND 결과.....	20
3.2.4. BETA BAND 결과.....	22
3.3. 음악적 특징에 따른 TRF 뇌파 분석 결과.....	23

3.3.1. SPECTRAL FLUX를 사용한 TRF기반 뇌파 분석 결과.....	23
4. 토의 및 결론.....	25
4.1. 토의 및 결론.....	26
참고 문헌	27
[ABSTRACT]	29
감사의 글	31

[그림 목록]

그림 1. 뇌 신호 측정 방법	3
그림 2. EEG 측정 예시.....	3
그림 3. TEMPORAL RESPONSE FUNCTION 개략도.....	5
그림 4. 뇌파 측정 프로토콜 도식.....	8
그림 5. 자극 음원 정보	9
그림 6. 데이터 전처리 과정의 BAD EPOCH 예시	10
그림 7. 자극 데이터 입력 예시.....	11
그림 8. GLOBAL FIELD POWER.....	12
그림 9. TRF EEG DATA로 그린 TOPOGRAPHY.....	14
그림 10. F4 CHANNEL의 TRF WEIGHT.....	15
그림 11. DELTA BAND 대역의 TRF EEG DATA로 그린 TOPOGRAPHY.....	17
그림 12. THETA BAND 대역의 TRF EEG DATA로 그린 TOPOGRAPHY.....	19
그림 13. ALPHA BAND 대역의 TRF EEG DATA로 그린 TOPOGRAPHY.....	21
그림 14. BETA BAND 대역의 TRF EEG DATA로 그린 TOPOGRAPHY.....	22
그림 15. SPECTRAL FLUX를 사용한 TRF EEG DATA로 그린 TOPOGRAPHY.....	23
그림 16. 자극 재구성 정확도.....	24
그림 17. 각 음악적 특징의 176MS 대역에서의 BOX PLOT.....	24

1. 서론

1.1 연구 배경

음악 선호도란 다양하고 주관적인 특성이 반영되는 음악에 대한 선호 정도로써 장르, 가수, 가사, 문화, 멜로디 등이 반영되며 이에 따라 개인은 자신만의 독특한 음악적 취향과 선호도를 가진다. 즉 음악 선호도는 개인의 성격이 반영된다고 볼 수 있기 때문에 감정 연구, 심리 상담, 음악 치료 등에 활용하기 위해 선호도 결정의 생리학적 과정에 대한 많은 연구가 진행되고 있으며, 최근 brain-computer interface의 급격한 발전으로 해당 영역에 접근이 더욱 쉬워져 연구가치가 상승하고 있다 [1].

기존의 음악 선호도 평가는 설문지나 인터뷰와 같은 주관적 방법으로 평가하였으나 이를 객관적으로 평가하기 위해 심박수, 피부전도도, 뇌 신호 분석 등이 시도되고 있다 [2]. 음악 치료에 활용하기 위해서는 감정 반응 등의 풍부한 정보가 필요하기 때문에 본 연구에서는 객관적 평가 지표 중 가장 다양한 정보를 분석할 수 있는 뇌 신호 분석에 중점을 두고자 한다. 뇌 신호 측정 방법에는 주로 functional magnetic resonance imaging(fMRI) 또는 electroencephalography(EEG) 등을 측정하는 비침습적 방식으로 진행되고 있다 (Figure 1) [3]. fMRI는 자기장을 이용해 혈류와 관련된 변화를 초고속으로 영상화하여 획득하는 기술로 고해상도의 영역정보를 파악할 수 있으나 시간 해상도 및 간접 측정, 접근성 등의 단점으로 인해 실생활 및 연구에서 쉬이 접근하기 어려운 방법이다 [4]. EEG는 두피에 전극을 부착하여 대뇌 피질의 수많은 뉴런들이 동기화되어 흥분할 때 발생한 전기적 활동을 측정하는 방식이다 (Figure 2). EEG는 상대적으로 측정이 용이하며 시간해상도가 높아 시간에 따라 변화하는 음악의 특성을 잘 반영하기 때문에 많은 연구에서 사용되고 있으며 본 연구 또한 EEG data를 사용하여 분석을 진행하였다 [5].

기존의 음악에 대한 감정 및 선호도와 관련된 EEG 분석은 주파수 영역, spectrogram 분석, 주파수 위상분석 등 주파수를 통한 해석을 중심으로 많이 분석되고 있다[6-10]. 그러나 주파수 중심의 분석은 뇌파 정보만을 활용하여 분석하기 때문에 시간에 따른 음악의 변화를 충분히 반영하지 못하므로 뇌파의 반응을 적절히 추정해냈다고 보기 어렵다. 그리하여 최근 연구에서는 음악의 정보를 활용하여 뇌파 특성과의 상관관계를 분석하기 위해 연속적인 음성 자극을 뇌파에 매핑하여 반응을 최적으로 추정하는 수학적 모델링 방식이 시도되고 있다.

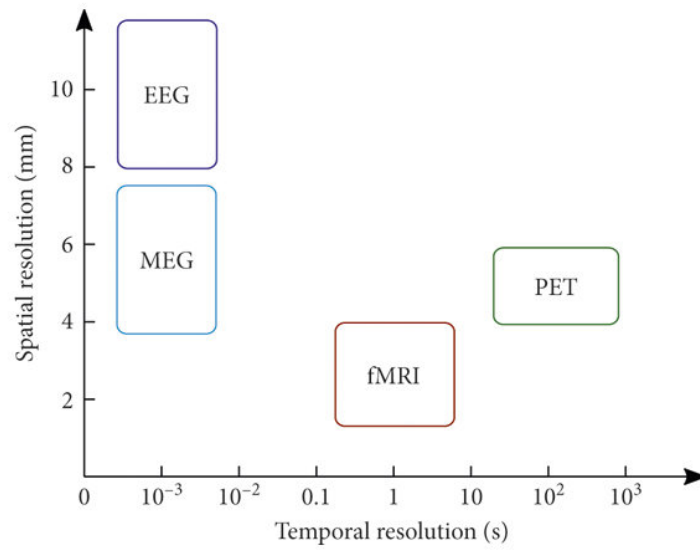


Figure 1. 뇌 신호 측정 방법 (WEIN, Simon et al., 2021)

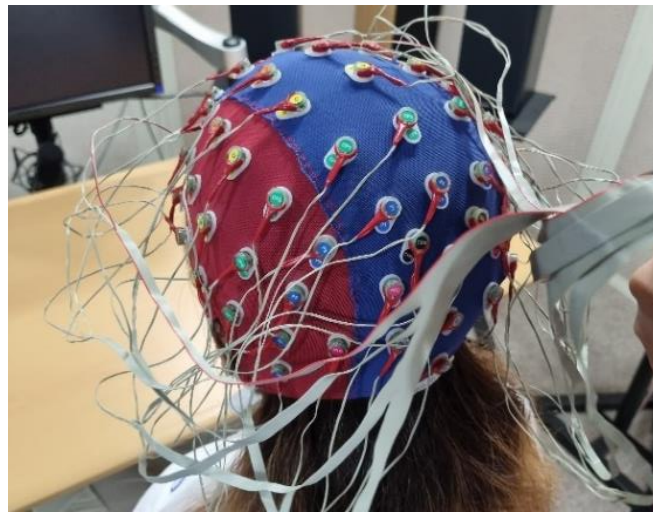


Figure 2. EEG 측정 예시

1.2 시간 응답 함수(Temporal response function)

연속적인 소리 자극에 대해 신경 반응을 추정하는 기술 중 하나인 선형 시불변 시스템은 입력과 출력 간의 시간에 따른 변화를 무시하고 입출력 간의 관계를 설명하는 단순한 수학적 모델 중 하나이다 [11]. 본 연구에서는 선형 시불변 시스템의 종류 중 하나인 temporal response function(TRF) 기반의 접근 방식을 사용했다 [12]. TRF는 시간에 따른 뇌 반응과 자극 특징의 관계를 계산하여 뇌파 반응을 최적으로 예측하는 필터 모델링 기술이다. Ridge regression과 linear convolution을 기반으로 과잉 적합 방지 및 자극 특징과 신경 반응 간 매핑한다.

본 연구에서는 TRF 기법 중 뇌파 반응 추정을 위한 순방향 TRF를 사용하였다. 순방향 모델은 시스템이 정보를 생성하거나 인코딩 하는 방법을 설명하기 때문에 인코딩 모델이라고도 한다 [13]. 일반적으로 순방향 TRF에서 사용되는 접근 방식은 시스템의 출력이 간단한 linear convolution을 통해 입력과 관련되어 있다고 가정하는 것이다. 출력이 N 개의 채널에 의해 모니터링된다는 맥락 하에 시간 $t=1..T$ 및 채널 n 에서 샘플링된 신경 반응 $r(t,n)$, 아직 알 수 없는 채널 별 TRF $w(\tau,n)$ 을 갖는 자극 속성 $s(t)$ 이 컨볼루션으로 구성된다고 가정하면 식(1)과 같은 응답 모델로 표현된다.

$$r(t,n) = \sum_{\tau} w(\tau,n) s(t - \tau) + \varepsilon(t,n) \quad (1)$$

$\varepsilon(t,n)$ 은 모델로 설명되지 않는 각 채널의 잔여 응답이다. 본질적으로 TRF는 진행중인 자극을 진행중인 신경 반응으로 선형 변환하는 것을 설명하는 필터로 TRF $w(\tau,n)$ 는 자극 특징 $s(t)$ 의 발생을 기준으로 특정 범위의 시간 지연에 대한 변환을 설명한다.

TRF $w(\tau,n)$ 는 실제 신경 반응 $r(t,n)$ 과 예측된 반응의 평균 제곱 오차를 최소화하여 추정되며 식(2)와 같이 표현된다.

$$\min \varepsilon(t,n) = \sum_t [r(t,n) - \hat{r}(t,n)]^2 \quad (2)$$

이에 대한 계산 중에서 자기공분산 구조를 지닌 행렬 연산을 사용하여 쉽게 구현할 수 있는 역상관을 사용하여 해결하며 모델에서 자극의 자기공분산 구조를 분리하여 서로 다

른 시점 간의 상관관계를 분리함으로써 시간적 번짐을 최소화한다. 또한 TRF 계산에서 중요한 고려 사항으로 정규화가 있다. 이는 잘못 추정된 경우를 해결하고 과적합을 방지하기 위해 추가 정보를 도입하는 것으로 Tikhonov 정규화 또는 Ridge regression으로 알려진 방법을 사용한다 [14].

$$w = (S^t S + \lambda I)^{-1} S^t r, \quad (3)$$

I 는 단위 행렬이고 λ 는 ridge parameter로 $r(t,n)$ 사이의 상관관계를 최대화하기 위해 교차 검증을 사용하여 해당 변수를 조정할 수 있다.

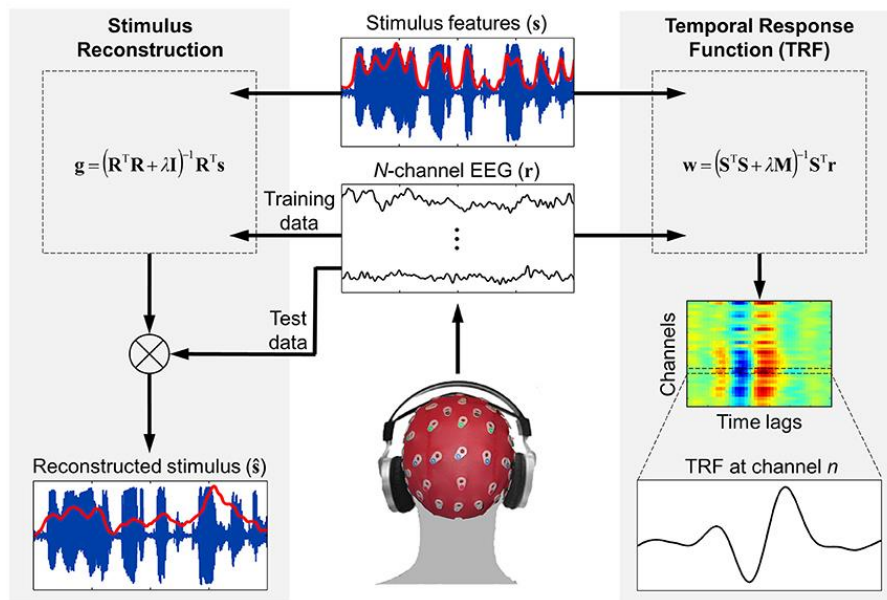


Figure 3. Temporal response function 개략도 (Crosse et al., 2016)

1.3 연구 목표

TRF를 통해 음악에 대한 자연스러운 뇌파 반응을 해석하여 선호와 비선호 음원 간의 뇌파 반응을 구분할 수 있다는 가정하에 음악의 선호도를 뇌파 측정에 따른 TRF 해석을 통해 객관적으로 측정하고자 한다. 게임 선호와 관련하여 특정 주파수 대역이 좋은 예측 변수가 된다는 것과 음악적 특징에 따라 신경동기화 강도가 달라진다는 것에 착안하여 선호도 분석에 용이한 요소를 파악하고자 하였고 본 연구에서는 다음과 같은 목표를 기반으로 연구를 진행하였다 [15].

1. 음악 감상 시 뇌파 반응을 TRF 기반으로 추정하여 음악에 대한 preference와 non-preference를 평가할 수 있음을 검증하였다.
2. 뇌파를 1-30Hz, delta(1-4Hz), theta(4-7Hz), alpha(7-13Hz) 주파수 대역들로 세분화하여 각 대역의 선호도에 따른 반응을 분석하여 선호도 메커니즘 및 파악에 용이한 주파수 대역을 파악하였다.
3. 음악적 특징 중 envelope과 spectral flux를 비교하여 어떤 특징이 선호하는 음악을 들었을 때 강하게 동기화를 일으키는지 파악하였다.

2. 연구 방법

2.1 뇌파 데이터 측정

2.1.1 임상실험 프로토콜

모든 실험과 측정은 KAIST에서 진행되었으며 본 연구는 해당 데이터를 제공받아 진행되었다. 뇌파는 약 65dBA(± 5 dB)의 소음이 통제되는 이중벽 구조의 soundproof booth에서 측정되었다. 모집단계에서 피험자는 각자의 선호 음원 3곡, 비선호 음원 3곡을 선정하도록 했으며 총 60곡의 음원이 선정되어 사용되었다. 피험자는 뇌파를 측정하기 전에 60곡의 음원에 대해 선호도 점수를 평가하도록 진행하였다. 선호도 점수는 리커트 척도에 따라 1-7점을 매겼고, 1점으로 갈수록 비선호, 7점으로 갈수록 선호하는 음원으로 분류하였다. 실험은 4세션으로 나누어져 진행되었으며 각 세션은 30개의 trial이 진행되었다. Trial은 5초의 대기 후 음원 자극이 주어졌으며 자극 제시 후 15초간 대기 후 준비가 되면 다음 trial로 넘어가는 식으로 진행되었다 (Figure 4). 60곡의 음원이 2번씩 랜덤으로 주어져 총 120번 주어지며 음원의 하이라이트 20초를 자극으로 사용하였다. 뇌파 데이터의 수집은 compumedics neuroscan사의 64채널 EEG 측정장비 Curry8을 사용하였고 Ag-AgCl의 전극제질로 이루어져있으며 1000Hz의 sampling rate로 두피 표면의 모든 전극에서 측정하였다.

모든 실험 절차는 연구 윤리 위원회의 승인을 받았다 (KH2022-059). 또한, 자극 및 측정에 관한 데이터 수집은 연구에 참여하는 피험자에게 실험 방법 및 절차를 설명하고 동의를 얻은 후 진행하였다.



Figure 4. 뇌파 측정 프로토콜 도식

2.1.2 피험자 및 자극 정보

본 연구에는 시청각 자극에 영향을 끼치는 장애가 없는 2명의 남성과 8명의 여성 총 10명의 피험자(평균 나이 24.7세)가 자발적으로 참여하였다. 피험자는 사전에 실험에 대한 유의사항을 충분히 들었으며 실험에 사용할 자극용 음원을 선정해왔다. 실험에 사용된 자극은 각기 다른 총 60곡의 음원이며 그 중 20초의 하이라이트를 추출하여 사용하였다. 피험자는 뇌파 측정 전에 60곡에 대해 1-7점의 선호도 점수를 매겼으며 본 연구에서는 6점 이상의 음원을 선호 음원, 2점 이하의 음원을 선호하지 않는 음원으로 분류하여 사용하였다.

Daughtry, Waiting for superman	POP / 록/메탈	양홍원, 아침에	K / 랩/힙합
Charlie Puth, Some type of love	POP	드렁큰 타이거, 너희가 힙합을 아느냐	K / 랩/힙합
Taylor swift, Clean	POP	아이콘, 사랑을 했다	K / 랩/힙합
아이유 이름에게	K / 발라드	리스트 - 초절기교 연습곡 제 4번 마제파	클래식 / 독주곡
드뷔시 달빛	클래식 / 독주곡	조용필 - 킬리만자로의 표범	성인가요/트로트
볼빨간사춘기 별보러갈래	K / 인디음악, 포크/블루스	임영웅 - 어느 60대 노부부의 이야기	성인가요/트로트
아이유 - 마음	K / 포크/블루스	조이 - 좋은 사람 있으면 소개시켜줘	K / 발라드, 국내드라마
아이유 - 밤편지	K / 발라드	조정석 - 아로하	K / 발라드, 국내드라마
악동뮤지션 - DINOSAUR	K / 일렉트로니카	전미도 - 사랑하게될줄 알았어	K / 발라드, 국내드라마
그대가 나를 본다면(반하나)	K / 발라드	바다(BGM-v-crew)	K / 랩/힙합
까르망(장재인)	K / 포크/블루스	시그널(트와이스)	K / 댄스
한편의 영화같았던 우리의 긴(그렉)	K / 발라드	when we disco(박진영)	K / 댄스
Cat&Calmell/Cry	POP	싸이/That That	K / 댄스
Billie Eilish/watch	POP	지코/Boys and Girls	K / 랩/힙합
Kalafina/Kimino Ginno Niwa	J-POP	TWICE/cheer up	K / 댄스
Circles - Post Malone	POP / 랩/힙합	Juice - Lizzo	POP
In Your Eyes - The Weeknd	POP / R&B/Soul	No New Friends - LSD	POP
Lotus Inn - Why Don't We	POP	Rockabye - Clean Bandit	POP
Portishead-Roads	P / 일렉트로니카	김호중 - 고맙소	성인가요/트로트
정문성 전미도 - 사랑이란	국내유지컬	비 - 어디가요 오빠	K / 댄스
다린 - 가을	K / 인디, 포크,블루스	시아준수 - 비단길	K / 발라드
Boss Mode(Knife Party)	P / 일렉트로니카	까만안경(이루)	K / 발라드
Pieces(L'arc-en-ciel)	J-POP	벚꽃엔딩(버스커버스터)	K / 록,메탈
Crush(Pendulum)	P / 일렉트로니카	태양계(성시경)	K / 발라드
Chopin Ballade No.4 in F Minor Op.53, Krystian Zimmerman	클래식	거리에서, 성시경	K / 발라드
Bach Goldberg Variations BWV 988 Aria(Live)	클래식, 독주곡	사랑의 베틀리, 홍진영	성인가요/트로트
김윤아 야상곡	K / 발라드, 록,메탈	뽀빠뽀빠, 티아라	K / 댄스
에디히긴스 Moon and sand	Jazz	가인 카니발	K / 댄스
이병우 돌이킬 수 없는 걸음	국내영화	조엘코리 BED	P / 일렉트로니카
꽃별 비익원리	국내드라마	김태우 사랑비	K / 발라드

Figure 5. 자극 음원 정보

2.2 뇌파 데이터 분석

2.2.1 뇌파 데이터 전처리

뇌파 데이터는 1-30Hz의 밴드패스 필터링을 거친 후 1000Hz의 샘플링 레이트에서 256Hz로 다운 샘플링 되었다. 이후 bad channel을 제거하고 제거한 채널에 대한 데이터 보간이 이루어진 후 각 이벤트에 맞게 epoch을 나누었다. 이후 common average reference를 사용하여 기준 재참조를 하였고 independent component analysis를 통하여 인공물과 눈 움직임을 반자동으로 제거했다. 위의 전처리 과정은 matlab toolbox eeglab을 사용하여 진행하였다 [16]. 전처리 중 bad epoch이 해당 피험자의 데이터 중 전체의 1/4를 넘는 피험자는 이후 과정에서 사용하지 않았으며 총 10명의 피험자 중 8명의 피험자 데이터가 사용되었다.

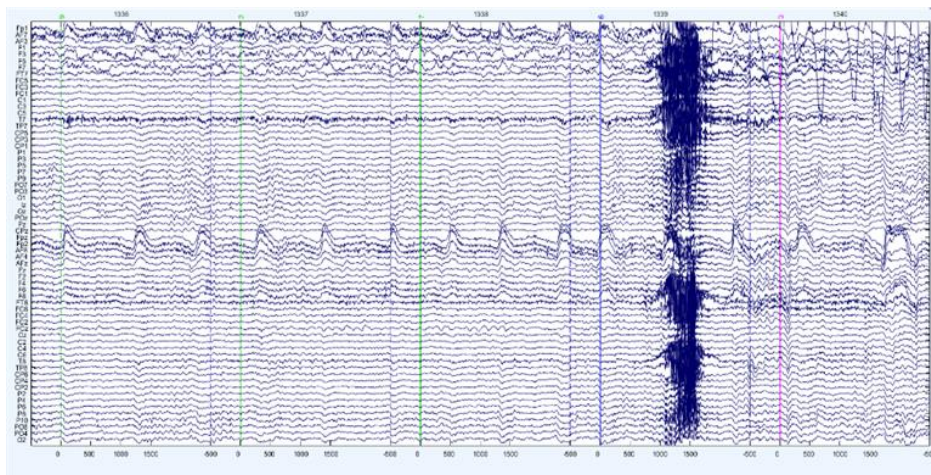


Figure 6. 데이터 전처리 과정의 bad epoch 예시

2.2.2 TRF 특징 선택 및 변수 설정

본 연구에서는 순방향 TRF 기법을 사용하여 뇌파 반응을 추정하였다. 순방향 TRF 는 신호와 비신호 두가지의 조건에 알맞은 음원 자극과 뇌파데이터를 동일한 크기로 넣어 진행하였다. TRF 는 matlab 의 mtrf toolbox 를 사용하여 진행되었다. 음원 자극 데이터는 전체 주파수 대역 및 delta, theta, alpha, beta band 분석시에는 음원 자극의 envelope 을 추출하여 사용하였으며 특징 간 비교시에는 음원 자극의 spectral flux 를 추출하여 사용하였다. 뇌파데이터와 동일한 크기로 만들기 위해 256Hz 로 다운 샘플링 되었다. 이후 뇌파데이터와 음원 자극 데이터는 각각 조건별 합쳐졌으며 이는 동일한 크기로 TRF train 에 입력되었음을 의미한다. 해당 연구에서는 -500~1000 ms 의 time lag 을 사용하였다. Train 이전에 cross validation 을 통해 각 주파수 대역 별로 최적화된 lambda 값을 찾아 훈련에 사용하였다. 해당 과정은 delta band, theta band, alpha band, beta band 의 주파수 대역을 분석할 땐 각 주파수 밴드에 따라 알맞은 대역의 밴드패스 필터링을 진행한 뇌파 데이터를 사용하여 TRF 에 입력되었다.

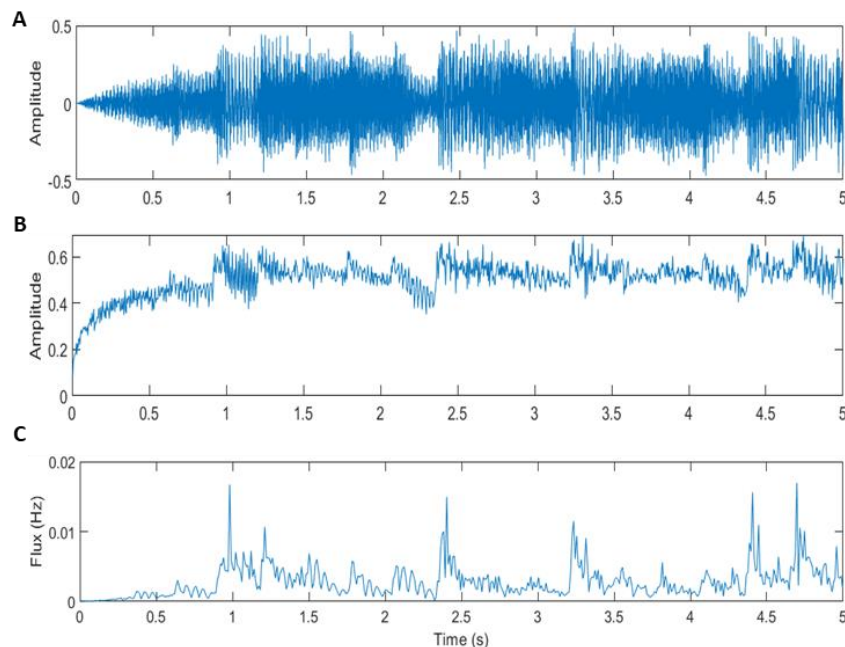


Figure 7. (A)자극데이터 원본 예시. (B)자극 envelope 예시. (C)자극 spectral flux예시

2.2.3 STATISTICAL TEST

통계분석을 진행하기 위해 먼저 global field power(GFP)로 유의미한 시간을 확인하였다. GFP 는 각 시간 지연에서 전체 채널에 걸친 뇌 반응의 파워를 나타내며 GFP 는 모든 피험자 데이터를 채널별로 평균하고 모든 채널의 TRF 분산을 계산하여 추정하였다 (Figure 8). 음성 자극에 대한 반응이 주로 0-500ms 사이에서 나타나기 때문에 GFP 에서 각 컨디션 별로 0-500ms 사이에서 뚜렷한 피크 반응을 보이는 시간을 골랐다 [17]. 최종적으로 74, 156, 176, 266, 305, 508 ms 가 유의미하다고 판단하고 해당 시간들을 기반으로 분석하였다. 해당 시간대역에서 GFP 의 full width at half maximum 에 해당하는 time interval 을 구하였고, TRF 결과에서 해당 time intervals 를 평균하여 topography 및 통계분석에 사용하였다. 이후 선호와 비선호 음악에 따라 뇌파 반응의 유의미한 차이가 있는지 확인하기 위해 비모수 검정법인 Wilcoxon signed rank test 를 통한 통계분석을 진행하였다 [18]. 10 명의 피험자 중 데이터 퀄리티의 문제로 8 명의 피험자 데이터만 사용이 되었다. GFP 를 통해 정한 시간대역에서 두 컨디션에 대해 Wilcoxon signed rank test 를 진행했고, test 결과를 사용하여 z-value 를 계산하였다. TRF 뇌파데이터와 통계 분석 결과를 통해 topography 를 그렸고, 뇌파 데이터는 평균하여 그렸고 통계분석 결과는 p-value 가 0.05 초과인 값들을 0 으로 치환하고 유의미한 차이를 보이는 영역(p -value<0.05)의 z-value 만 표시하였다.

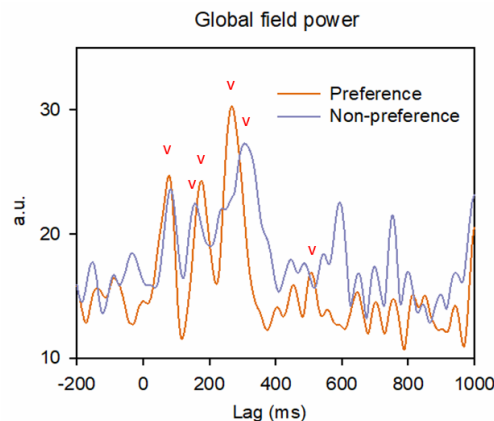


Figure 8. Temporal response function으로 추정한 뇌파 반응의 평균을 통해 구한 global field power

3. 연구 결과

3.1 TRF기반 음악 선호도에 따른 뇌파 분석 결과 (1-30Hz)

통계 분석 결과 피험자 8명에 대해 우측 frontal 및 parietal lobe에서 156ms와 176ms 시간대의 선호 음원에 대한 뇌파 반응이 비선호 음원에 대한 뇌파 반응보다 더 활성화되며 유의미한 통계적 차이가 있음을 확인하였다 (Figure 9). Figure 10은 유의미한 차이가 있다고 판단된 영역인 F4채널의 TRF 그래프를 나타낸 그림과 176ms 대역의 box plot이다.

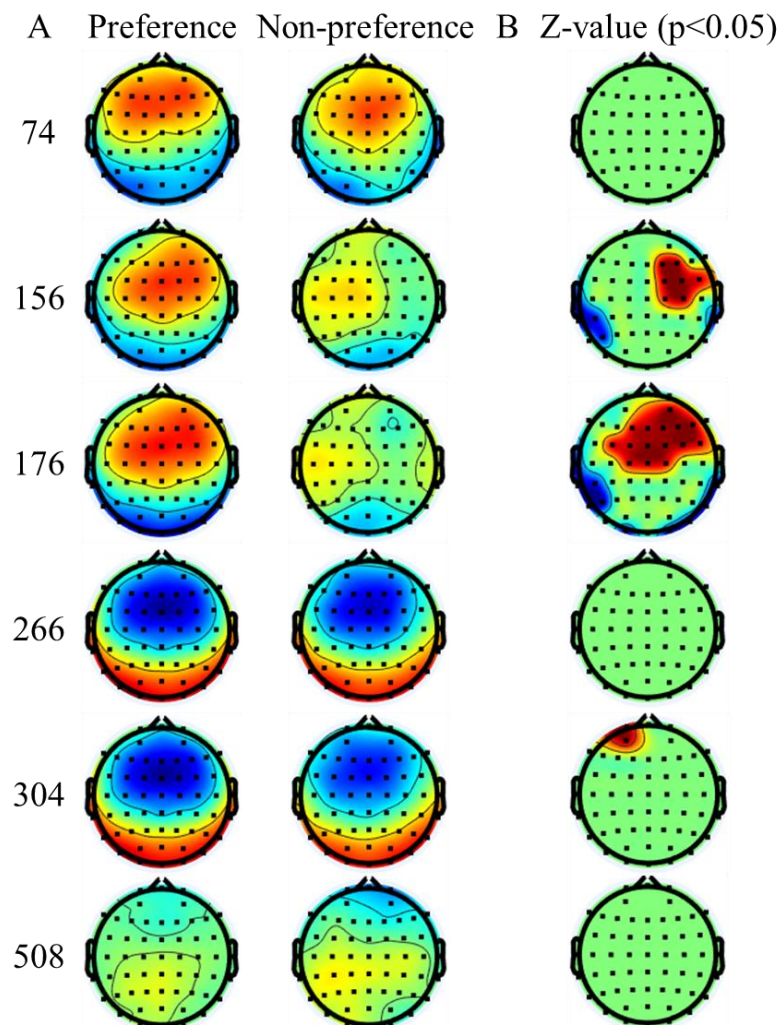


Figure 9. (A) TRF EEG 데이터로 그린 topography. (B) Wilcoxon signed-rank test의 결과로 그린 topography ($p < 0.05$).

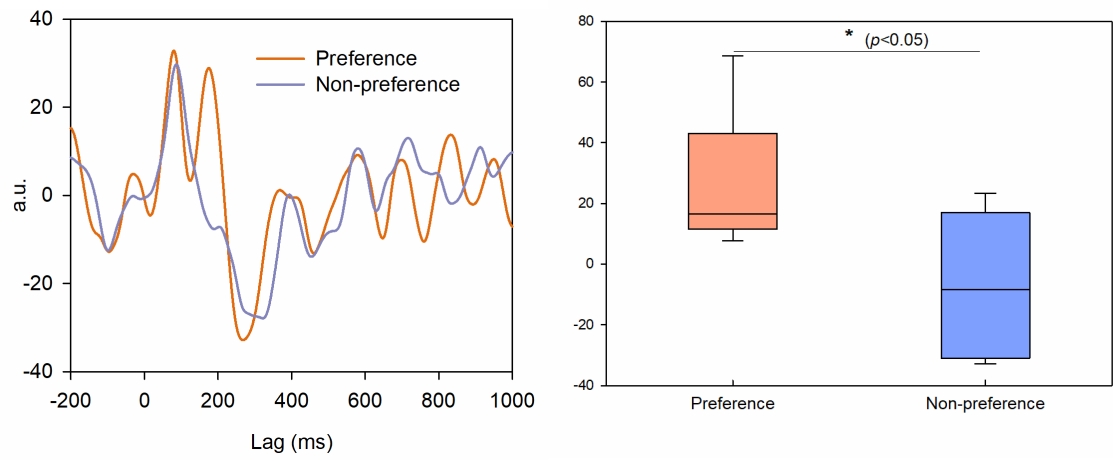


Figure 10. F4채널의 TRF 결과 및 176ms 대역의 boxplot

3.2 TRF기반 FREQUENCY BAND별 음악 선호도에 따른 뇌파 분석 결과

3.2.1 DELTA BAND 결과 (1-4Hz)

Delta band의 분석 결과 frontal과 parietal lobe에서 156ms와 176ms 시간대의 선호 음원에 대한 뇌파 반응이 비선호 음원에 대한 뇌파 반응 보다 더 강하게 활성화되는 것을 볼 수 있으며 유의미한 통계적 차이가 있음을 확인할 수 있었다 (Figure 11). 이는 전체 주파수 대역(1-30Hz)과 비슷한 양상을 보이며 delta band가 선호와 관련되어 있다는 것을 알 수 있다. Delta band는 정신적인 휴식 활동에서 나타나며 보상 처리, 동기 부여에 관여하는 것으로 알려져 있다 [19]. 또한 대규모 신경 집단의 흥분성의 동기화된 리듬 변동을 조절하고 감각 및 반응을 담당하는 뇌 영역 간의 효율적인 신경 통신을 촉진하는 것으로 알려져 있다 [20]. 이는 delta band가 선호도와 관련된 신경 반응을 유도하며 정신적으로 편안한 상태가 되는 노래를 선호하는 것을 시사할 수 있다.

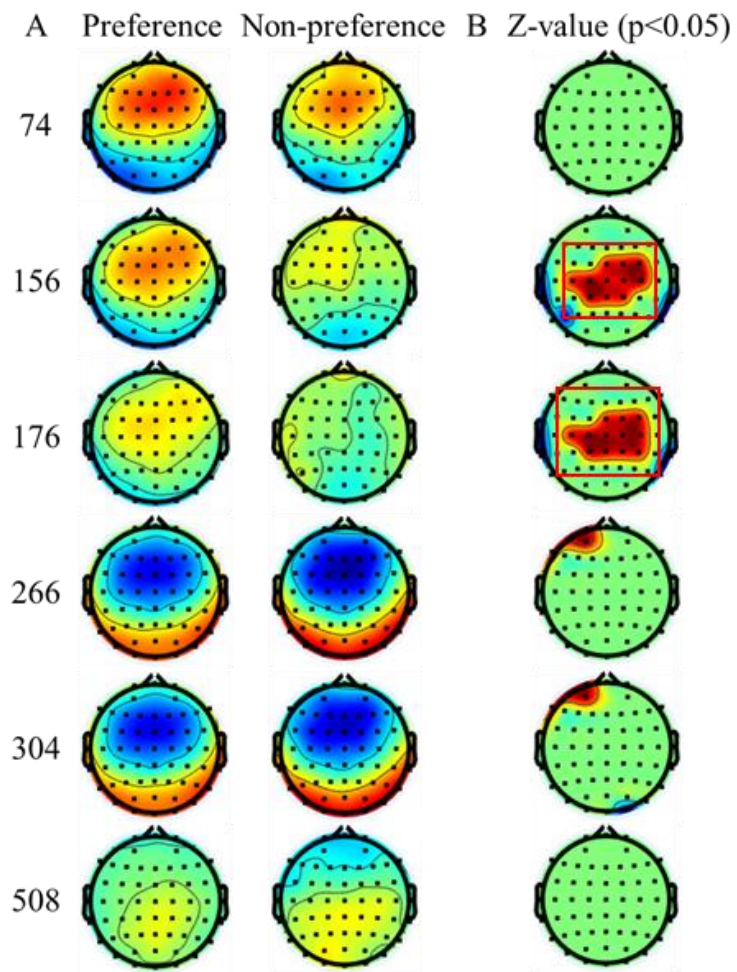


Figure 11. (A) Delta band의 TRF 데이터로 그린 topography.
 (B) Wilcoxon signed-rank test의 결과로 그린 topography ($p < 0.05$).

3.2.2 THETA BAND 결과 (4-7Hz)

Theta band의 분석 결과 frontal lobe에서 156ms와 176ms 시간대의 선호 음원에 대한 뇌파 반응이 비선호 음원에 대한 뇌파 반응 보다 더 강하게 활성화되는 것을 볼 수 있으며 유의미한 통계적 차이가 있음을 확인할 수 있었다 (Figure 12). 이는 전체 주파수 대역(1-30Hz)과 비슷한 양상을 보이며 theta band가 선호와 관련되어 있다는 것을 알 수 있다. Theta band는 기억과 학습활동, 즐거움 등 긍정적 감정 처리에 관여하는 것으로 알려져 있다 [21]. 특히 선호하는 활동을 하거나 선호하는 광고 등을 볼 때 전두엽에서 더 높은 theta 파가 나타났다 [22]. 이는 선호하는 음원은 즐거운 감정, 긍정적인 감정과 높은 연관성이 있음을 시사할 수 있다.

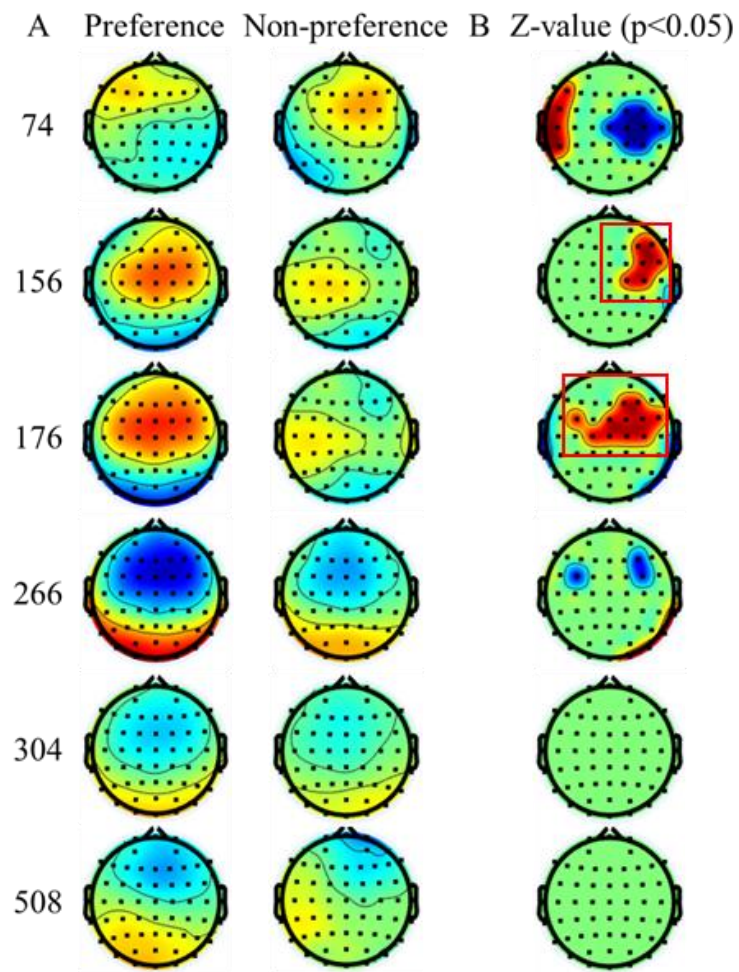


Figure 12. (A) Theta band의 TRF 데이터로 그린 topography.
 (B) Wilcoxon signed-rank test의 결과로 그린 topography ($p < 0.05$).

3.2.3 ALPHA BAND 결과 (7-13Hz)

Alpha band의 분석 결과 frontal lobe에서 0-200ms시간대의 선호 음원에 대한 뇌파 반응이 비선호 음원에 대한 뇌파 반응 보다 더 강하게 활성화되는 것을 볼 수 있으며 유의미한 통계적 차이가 있음을 확인할 수 있었다 (Figure 13). 이는 전체 주파수 대역(1-30Hz)과 비슷한 양상을 보이며 alpha band가 선호와 관련되어 있다는 것을 알 수 있다. Alpha band는 안정적인 상태에서 나타나며 기억, 정서적 활동에 관여하며 즐거움과 같은 다양한 감정과 관련되어 전두엽에서 주로 반응이 나타난다 [23]. 선행 연구들에서 슬픈 음악에 대한 전두엽 비대칭이 제시되었으나 본 연구에서는 그러한 차이가 나타나지 않는 것을 보아 선호도는 안정적인 상태 및 즐거움, 긍정적 감정과 연관이 있지만 슬픔과는 연관이 적음을 제시할 수 있다 [24].

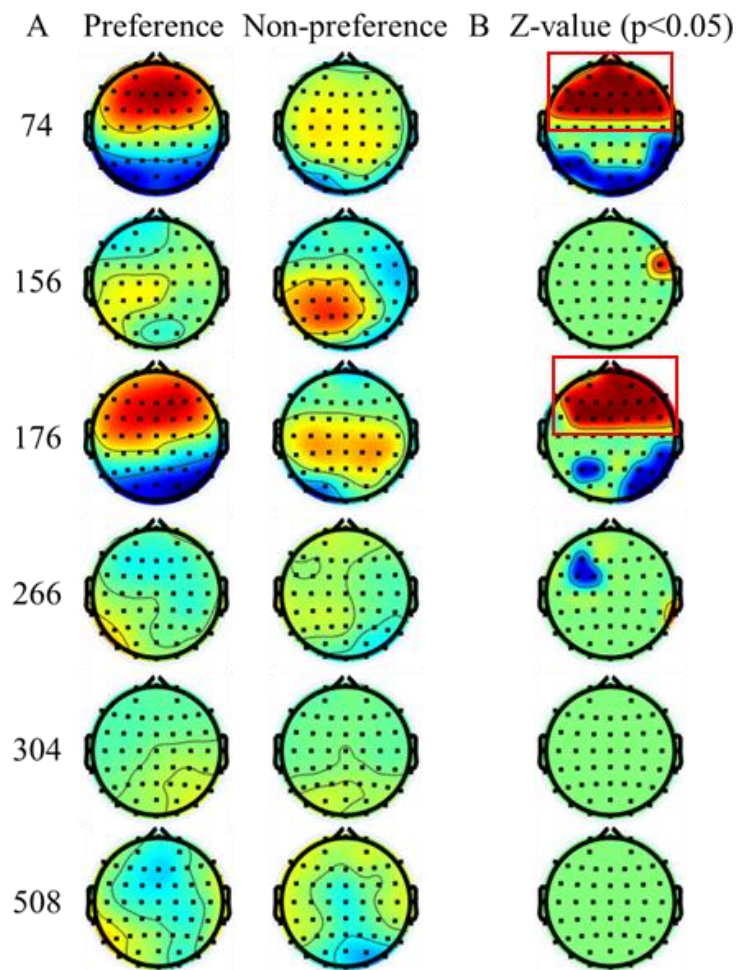


Figure 13. (A) Theta band의 TRF 데이터로 그린 topography.
 (B) Wilcoxon signed-rank test의 결과로 그린 topography (p<0.05).

3.2.4 BETA BNAD 결과 (13-30Hz)

Beta band의 분석 결과 300ms시간대의 occipital lobe에서 유의미한 차이가 있음을 확인할 수 있었으나 occipital lobe는 주로 시각 활동과 연관이 있으며 전체 주파수 대역 (1-30Hz)과도 다른 양상을 보이기 때문에 beta band가 선호와 관련이 적음을 제시할 수 있다 (Figure 14). Beta band는 주로 주의력 및 인지 과정, 음악적 리듬 및 템포와 관련이 있는 것으로 알려져 있으며 본 연구에서도 청각 활동 및 템포에 대한 반응이 주로 나타난 것으로 보인다 [25].

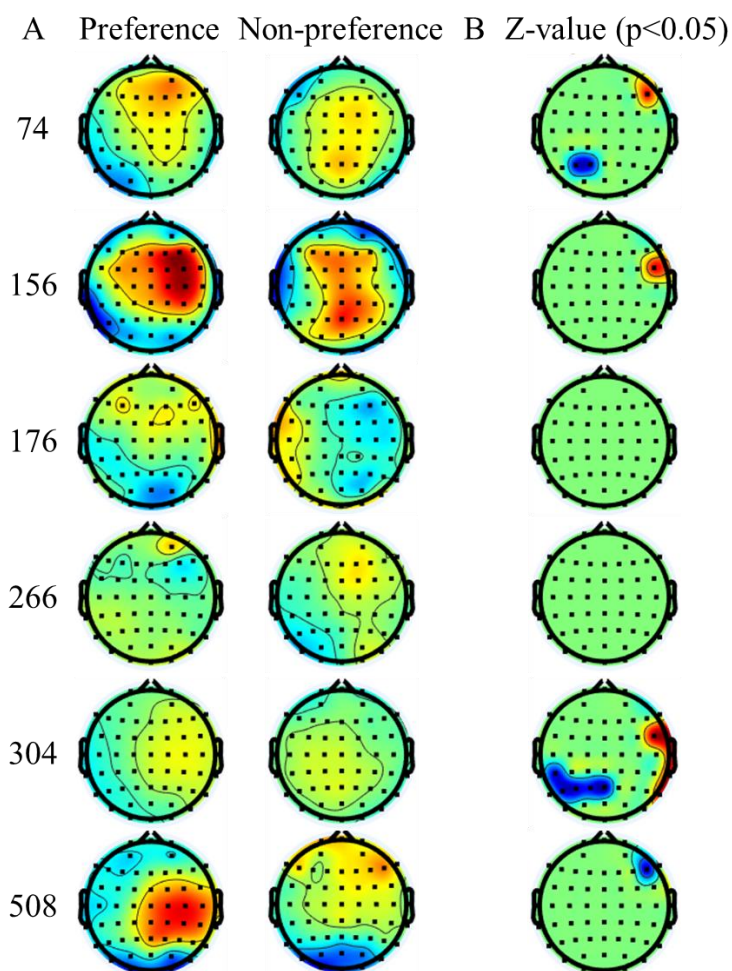


Figure 14. (A) Beta band의 TRF 데이터로 그린 topography. (B) Wilcoxon signed-rank test의 결과로 그린 topography ($p < 0.05$).

3.3 음악적 특징에 따른 TRF 뇌파 분석 결과

3.3.1 SPECTRAL FLUX를 사용한 TRF기반 뇌파 분석 결과

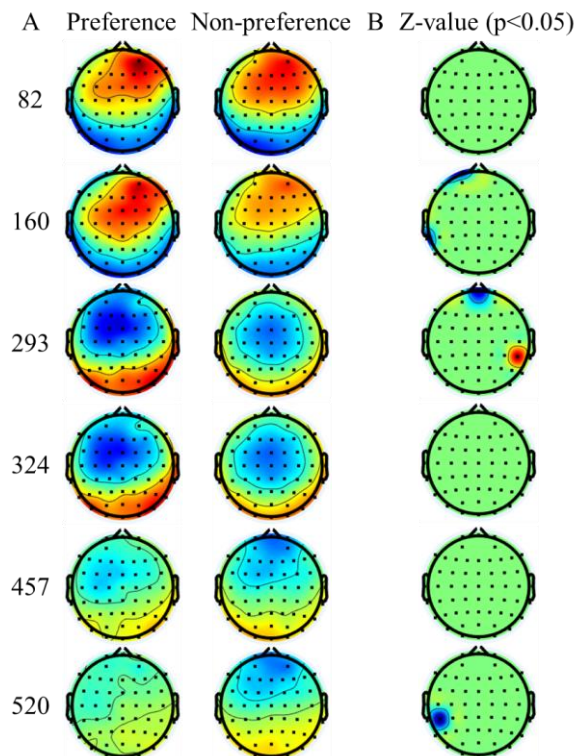


Figure 15. (A) Spectral flux를 사용한 TRF 데이터로 그린 topography. (B) Wilcoxon signed-rank test의 결과로 그린 topography ($p < 0.05$).

음악적 특징에 따라 신경동기화의 정도가 달라질 수 있고 그 중 spectral flux가 신경 동기화에 강하게 동조한다는 선행 연구가 있다 [17]. 그에 기반하여 TRF를 통해 선호도를 분석할 시 어떤 음악적 특징이 선호도에 강하게 동기화하는지 알아보하고자 음악적 특징인 envelope과 spectral flux를 사용한 TRF결과에 대해 비교하였다. Spectral flux 특징을 사용하여 음악에 대한 뇌파 반응을 구한 결과를 topography로 확인한 결과 유의미한 구간을 확인할 수 없었다 (Figure 15). 또한 선호 음원에 대한 뇌파 반응과 각 음악적 특징을 사용해 TRF한 결과를 기존 EEG 뇌파와의 correlation을 구해 각 특징의

정확도를 구했다 (Figure 16). 위의 주파수 대역 분석 결과에서 유의미한 시간대로 가장 많이 나왔던 176 ms 시간대역에 대해 Wilcoxon signed-rank test 통계분석을 진행하였다. 통계분석 결과 176ms에 대해 유의수준 0.05수준에서 유의미한 차이가 있다고 나왔다 (Figure 17). Envelope의 결과가 spectral flux보다 높게 나와 선호도 분석에 envelope을 사용하는 것이 유리함을 제시할 수 있다.

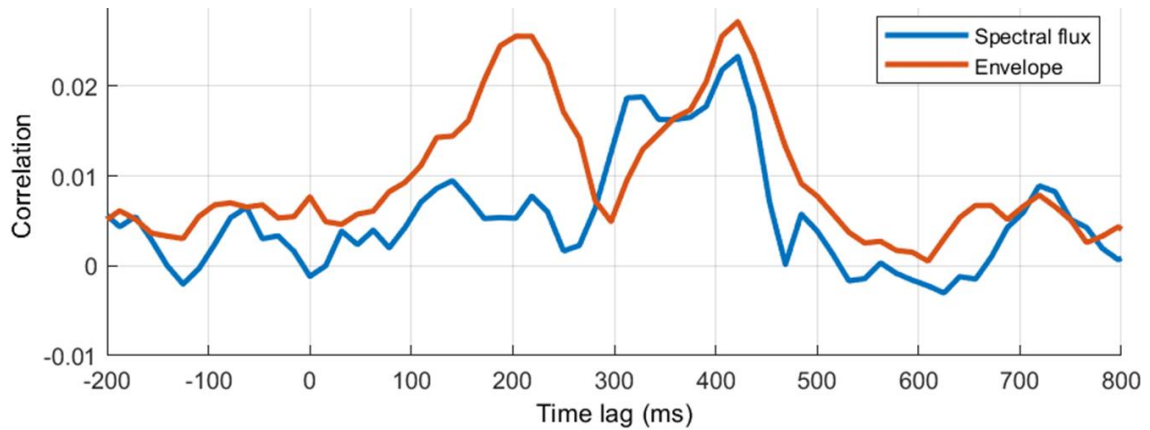


Figure 16. 자극 재구성 정확도

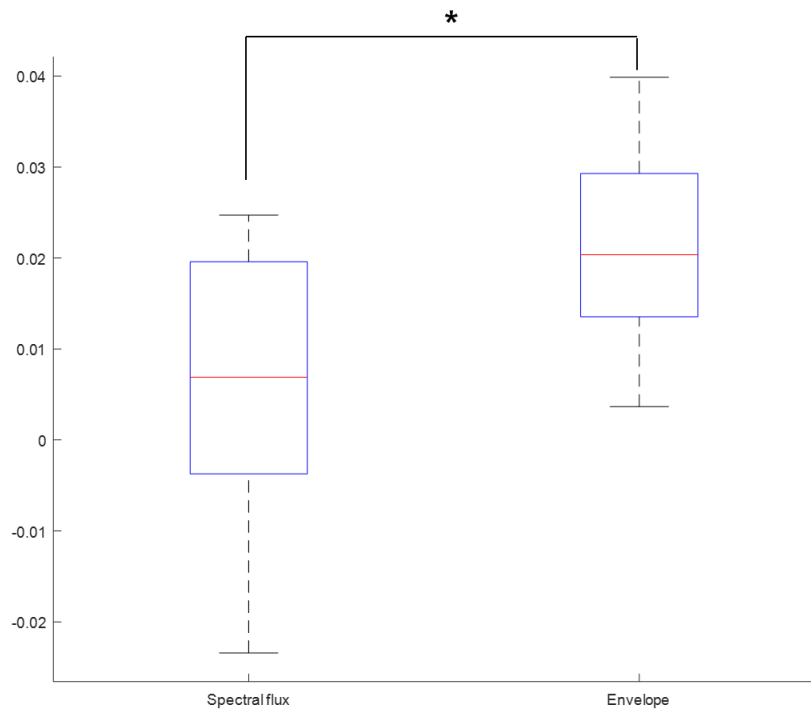


Figure 17. 176ms 대역의 data boxplot (*: $p < 0.05$)

4. 토의 및 결론

4.1 토의 및 결론

본 연구에서는 TRF방식을 사용하여 음악 감상 시 개인의 선호도에 따른 뇌파 반응을 추정하였다. 피험자가 직접 선정한 연속적인 음악 자극을 사용함으로써 보다 실제에 가까운 선호도에 따른 뇌파 반응을 측정할 수 있었고 해당 결과를 통해 음악 선호도를 객관적으로 평가할 수 있음을 검증하였다.

연구 결과 선호 음원에 대한 뇌파 반응은 200ms 부근의 early stage에서 theta band, delta band, alpha band의 복합적인 반응이 나타났고 공통적으로 감정을 처리하는 frontal lobe의 반응에서 선호하지 않는 음원보다 활성화됨을 확인함으로써 즐거움과 긍정적인 감정 반응과 높은 관련성이 있음을 확인할 수 제시할 수 있었다 [26]. 추가적으로 envelope와 spectral flux 두 가지 음악적 특징을 비교하였으며 선호도에 유의미한 시간대역에서 envelope의 correlation 값이 더 높게 나온 것을 확인할 수 있었다. 향후 분석 또는 예측에서 저주파대역과 음원의 envelope를 사용한다면 선호도 분석에 유리할 것으로 생각된다.

음악 선호도에 따른 뇌파 반응 분석 선행 연구 중에서 고주파 대역을 중요시하는 결과들이 있으나 본 연구에서는 저주파 대역이 고주파 대역보다 선호도 분류에 있어서 더 의미할 것이라는 차이점을 보였다.

그러나 위 결과 중 theta와 alpha band의 경우 청각유발전위와 연관이 있을 수 있기 때문에 해석에 유의해야 한다. 시간대역에 대한 결과는 충분히 유의미하다고 판단되나 영역의 경우 전두엽과 후두엽의 대칭적인 반응이 내부 source가 하나에서 비롯되기 때문에 나온 반응일 수 있다. 또한 피험자 수가 적기 때문에 해석에 유의할 필요가 있다.

본 연구를 통해 음악 선호에 관한 EEG 반응을 알아낼 수 있었고 향후 추가적인 분석을 통해 전기생리학적 방면에서의 선호도 반응 분석을 더욱 진행할 예정이다. 또한 머신러닝 모델을 통해 선호도 예측 정확도를 구해보고자 한다. 본 결과를 이용하여 개인의 음악 선호도 예측, 음악 심리 치료, 음악 추천, 시장 전략 수립 등의 방면에서 활용할 수 있을 것을 기대한다.

참고 문헌

1. Baumgartner, T., M. Esslen, and L. Jäncke, *From emotion perception to emotion experience: Emotions evoked by pictures and classical music*. International journal of psychophysiology, 2006. **60**(1): p. 34-43.
2. Koelsch, S. and L. Jäncke, *Music and the heart*. European heart journal, 2015. **36**(44): p. 3043-3049.
3. Pereira, C.S., et al., *Music and emotions in the brain: familiarity matters*. PLoS One, 2011. **6**(11): p. e27241.
4. Lee, K.-M., *기능적 자기공명영상의 임상적 활용*. J Korean Neurol Assoc, 2001. **19**.
5. 홍승봉 and 정기영, *뇌파의 전기생리학*. 대한신경과학회지, 2003. **21**(3): p. 225-238.
6. Hadjidimitriou, S.K. and L.J. Hadjileontiadis, *Toward an EEG-based recognition of music liking using time-frequency analysis*. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2012. **59**(12): p. 3498-3510.
7. Pan, Y., et al. *Common frequency pattern for music preference identification using frontal EEG*. in *2013 6th international IEEE/Embs conference on neural engineering (Ner)*. 2013. IEEE.
8. Er, M.B., H. Çığ, and i.B. Aydilek, *A new approach to recognition of human emotions using brain signals and music stimuli*. Applied Acoustics, 2021. **175**: p. 107840.
9. Mahmood, D., et al., *The effect of music listening on EEG functional connectivity of brain: A short-duration and long-duration study*. Mathematics, 2022. **10**(3): p. 349.
10. Handy, T.C., *Event-related potentials: A methods handbook*. 2005: MIT press.
11. Wu, M.C.-K., S.V. David, and J.L. Gallant, *Complete functional characterization of sensory neurons by system identification*. Annu. Rev. Neurosci., 2006. **29**: p. 477-505.
12. Crosse, M.J., et al., *The Multivariate Temporal Response Function (mTRF) Toolbox: A MATLAB Toolbox for Relating Neural Signals to Continuous Stimuli*. Front Hum Neurosci, 2016. **10**: p. 604.
13. Haufe, S., et al., *On the interpretation of weight vectors of linear models in multivariate neuroimaging*. Neuroimage, 2014. **87**: p. 96-110.
14. Tikhonov, A.N. and V. Arsenin, *Solutions of ill-posed problems*. (No Title), 1977.
15. Abujelala, M., et al., *Brain-EE*, in *Proceedings of the 9th ACM International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*. 2016. p. 1-5.
16. Delorme, A. and S. Makeig, *EEGLAB: an open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis*. Journal of neuroscience methods, 2004. **134**(1): p. 9-21.
17. Weineck, K., O.X. Wen, and M.J. Henry, *Neural synchronization is strongest to the spectral*

- flux of slow music and depends on familiarity and beat salience.* Elife, 2022. **11**.
18. Woolson, R.F., *Wilcoxon signed-rank test.* Wiley encyclopedia of clinical trials, 2007: p. 1-3.
 19. Knyazev, G.G., *Motivation, emotion, and their inhibitory control mirrored in brain oscillations.* Neurosci Biobehav Rev, 2007. **31**(3): p. 377-95.
 20. Stefanics, G., et al., *Phase entrainment of human delta oscillations can mediate the effects of expectation on reaction speed.* J Neurosci, 2010. **30**(41): p. 13578-85.
 21. Sammler, D., et al., *Music and emotion: electrophysiological correlates of the processing of pleasant and unpleasant music.* Psychophysiology, 2007. **44**(2): p. 293-304.
 22. Ohme, R., et al., *Application of frontal EEG asymmetry to advertising research.* Journal of Economic Psychology, 2010. **31**(5): p. 785-793.
 23. Liang, Z., H. Liu, and J.N. Mak. *Detection of media enjoyment using single-channel EEG.* in *2016 IEEE biomedical circuits and systems conference (BioCAS).* 2016. IEEE.
 24. Schmidt, L.A. and L.J. Trainor, *Frontal brain electrical activity (EEG) distinguishes valence and intensity of musical emotions.* Cognition & Emotion, 2001. **15**(4): p. 487-500.
 25. Grahn, J.A. and M. Brett, *Rhythm and beat perception in motor areas of the brain.* Journal of cognitive neuroscience, 2007. **19**(5): p. 893-906.
 26. Berridge, K.C. and M.L. Kringelbach, *Pleasure systems in the brain.* Neuron, 2015. **86**(3): p. 646-64.

[Abstract]

A Study on Neural Synchronization Analysis Based on Temporal Response Function for Estimating Music Preference

Moon Jung-Hwan

Supervisor: Woo Ji-Hwan

Department of Biomedical Engineering

University of Ulsan

Electroencephalography (EEG) studies on music and neural synchronization is being conducted in the direction of estimating frequency, spectrogram, and frequency phase, but the method does not reflect the information of music that changes over time and does not reflect the response to complex and rich music because it analyzes only using brainwave responses. A linear time-varying system that estimates the response by mapping continuous voice stimuli to neural responses has been proposed in recent research.

In this study, we used the temporal response function (TRF) for estimating EEG responses to preference and non-preference music and found that preference can be evaluated. We also divided frequency bands into delta and theta bands for analyzing EEG responses in each frequency band to the preference music. And also, we identified which musical features, envelope and spectral flux, produced the strongest synchronization of preferences.

The analysis of TRF-based estimated EEG in the 1–30 Hz band and delta, theta,

alpha, beta bands showed that the EEG response to the preferred music was more strongly activated in the frontal lobe than the EEG response to the non-preference music in the 100–200 ms time interval, and a significant difference was verified using the Wilcoxon signed rank test. TRF using musical features of envelope and spectral flux, respectively, showed that the reconstruction accuracy of envelope was higher in the 200 ms time interval.

This study demonstrates that TRF can be used to distinguish between preferred and non-preferred music, and that low-frequency bands and envelope of music are advantageous for preference analysis. The results of this study can be used for predicting individual music preferences, music recommendations, and market strategies.

Keyword: Electroencephalography, Temporal response function, Music preference

감사의 글

석사 과정을 무사히 마치며 본 석사학위논문이 있기까지 도움 주신 모든 분들께 감사의 마음을 전하고자 합니다.

먼저 부족한 저를 여러 해 동안 열심히 지도해주신 우지환 교수님께 감사드립니다. 학부 2 학년이 끝날 즈음 연구실에서는 무엇을 하는지 궁금하였고 호기심에 가득 차 상담을 드렸을 때, 우지환 교수님께서 흔쾌히 학부연구생을 허락해 주셨기에 연구실 생활을 시작할 수 있었습니다. 학부 2 년 대학원 2 년 도합 4 년을 연구실에서 지내면서 정말 많이 배운 것 같습니다. 항상 연구에 많은 관심을 가져 주시면서 따듯하고 날카로운 연구 지도, 격려, 충고를 해 주셨기 때문에 연구를 할 때 가져야 할 통찰력에 대해 조금이나마 배우고 뒤늦게나마 한 사람의 몫을 하는 연구자가 되어 졸업을 할 수 있게 된 것 같습니다. 또한 삶의 태도에 대해서 항상 좋은 말씀을 해 주셔서 제 삶에 대해 많이 고찰해볼 수 있었습니다. 한 명의 연구자, 한 명의 사회인으로서 성장할 수 있도록 많은 것을 지도해주신 우지환 교수님께 다시 한번 감사드립니다.

또한 자랑스러운 의공학도가 될 수 있도록 많은 가르침을 주신 의공학과 교수님들께도 감사드립니다. 의공학에 대해 애정을 가질 수 있도록 전공에 대해 항상 열정적으로 가르쳐 주신 지영준 교수님, 새로운 전공 지식을 알려주시기 위해 노력하시고 항상 따듯하게 격려해주신 구교인 교수님, 체계 필요한 것들에 대해 항상 많이 알려주시고 친근하게 격려해주신 김성민 교수님께 감사드립니다. 그리고 흔쾌히 연구를 허락해주시고 언제나 좋은 조언을 남겨 주시는 이경면 교수님과 강수진 교수님께 감사드립니다.

그리고 함께 공부하고 연구하며, 때론 의지하며 많은 배움을 얻어가고 때론 같이 인생을 즐긴 언제나 힘이 되어준 CNE 연구실 식구들과 졸업생분들께도 감사의 마음을 전합니다. 연구실 생활 전반에 많은 충고와 격려를 주신 나영민 선배님과 김기훈 선배님, 언제나 의지할 수 있는 주효성 선배님, 물어볼 때마다 항상 따듯하게 알려주고 같이 고민해주는 Trang 과 Quan, 처음 낯선 환경에 적응할 수 있도록 많은 도움을 준 김동석과 전민재, 후배지만 가끔 배움을 얻어 가며 연구실에 따듯함 한 스푼 추가해준 한지윤과 정수민, 이주경에게 다시 한번 감사의 마음을 전합니다.

항상 저를 믿어 주시고 응원해주신 부모님과 형에게 너무 감사드립니다. 언제나 자랑스러운 아들이 될 수 있도록 노력하겠습니다.

연구와 진로에 대해 항상 같이 고민해주고 의지할 수 있도록 도와준 윤수정과 의공학과 권유진, 장우석, 언급하지 못한 모든 선후배들께도 감사드립니다.

마지막으로 지금의 제가 있기까지 많은 도움을 주신 모든 분들께 감사드립니다. 항상 응원해주시는 것에 대해 감사드리며 아직 부족하지만 계속 정진하여 몇몇한 의공학도가 되도록 하겠습니다. 다시 한번 모든 분들께 감사의 인사를 올리며 글을 마무리하겠습니다. 감사합니다.