

좌우 청력 차이에 따른 바이노럴 비트 세기의 변화

Changes in binaural beat strength to the difference of right and left hearing ability

김성찬,¹ 최민주^{1,2†}

(Seong Chan Kim¹ and Min Joo Choi^{1,2†})

¹제주대학교 의공학협동과정, ²제주대학교 의학전문대학원 의학과
(Received January 4, 2020; accepted January 20, 2020)

초 록: 바이노럴 비트는 양이에 도달한 소리의 주파수 차이로 유발된 주관적인 맥놀이 현상이다. 물리적으로 맥놀이의 세기는 주파수가 다른 두 신호의 크기에 영향을 받는다. 따라서 바이노럴 비트는 좌우 청력의 차이에 따라 영향을 받을 것으로 예상된다. 본 연구에서는 청력에 따른 효과를 평가하기 위해, 정상 청력을 가진 34명의 피실험자가 한 쪽 귀에 기준음[440 Hz, 50 dB Sound Pressure Level(SPL)], 반대 측 귀에 주파수가 다른 제시음(450 Hz)을 SPL을 감소하며 들을 때, 주관적으로 느끼는 바이노럴 비트의 세기의 변화를 Semantic Differential Method(SDM) 이용하여 평가하도록 했다. 실험 결과 피실험자가 느끼는 바이노럴 비트의 세기는, 좌우 소리의 SPL 차이가 역치(2.2 dB)보다 크면, 좌우 소리의 SPL 차이가 증가함에 따라 지속적으로 유의하게 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 바이노럴 비트 효과를 최대로 하기 위해 좌우 청력 차이를 적절한 범위(예. 2.2 dB) 이내로 유지하는 것이 필요하다는 것을 시사한다.

핵심용어: 바이노럴 비트, 청력, 맥놀이, 음압 레벨, Semantic Differential Method (SDM)

ABSTRACT: The binaural beat is a subjective beating phenomenon due to the frequency difference of sounds heard in both ears, sensed by the human brain. The beating magnitude physically depends on the amplitudes of the two signals with slight different frequencies. Therefore, the binaural beat strength is expected to be affected by the difference in left and right hearing ability. In this study, 34 healthy subjects without hearing loss were chosen. They hear a pure tone sound (450 Hz) at 10 different Sound Pressure Levels (SPLs) (from 50 dB to 27.4 dB) through the one side of ears, while they hear the reference sound (440 Hz, 50 dB) through the other side of ears. Their subjective assessment using a semantic differential method reveals that the binaural beat strength decreases as SPL differences between the two sides of ears increases, if the difference is greater than 2.2 dB. The result suggests that the hearing loss difference between the two sides of ears should be less than 2.2 dB to maximize binaural beating effects.

Keywords: Binaural beat, Beating, Hearing ability, Sound Pressure Level (SPL), Semantic Differential Method (SDM)

PACS numbers: 43.66.Pn, 43.66.Fe, 43.66.Yw

1. 서 론

맥놀이란 주파수 또는 진동수가 비슷한 두 소리가 중첩이 되었을 때 규칙적으로 소리의 크기가 커

졌다 작아지는 현상이 반복되는 것을 말한다.^[1] 인간의 청각 기관에 주파수가 약간 다른 소리를 양쪽 귀에 들려주면, 뇌는 두 소리의 주파수 차이 해당하는 주파수로 맥놀이 현상을 감지한다.^[2] 바이노럴 비트(binaural beat)는 실제로 존재하지 않는 소리로, 듣는 사람의 청신경을 통하여 느껴지는 제 3의 소리이다.^[2]

바이노럴 비트는 청각 신경을 통해 감지되는 맥놀

†Corresponding author: Min Joo Choi (mjchoi@jeju.ac.kr)
Head, Biomedical Engineering Department, School of Medicine,
Jeju National University, 120 Jejudaeak-ro, Jeju-si 63243, Republic
Korea

(Tel: 82-64-754-3876, Fax: 82-64-702-2687)

“이 논문은 2019년도 한국음향학회춘계학술발표대회에서 발표하였던 논문임.”

이 현상을 이용하여 특정 영역의 뇌파를 유발 시키는데 활용된다.^[3-5] 이러한 효과는 명상이나 치유 프로그램에서 바이노럴 비트가 특정 주파수의 뇌파를 활성화하기 위해 사용되는 근거가 된다.^[6-7]

물리적으로 맥놀이의 세기 또는 크기는, Fig. 1에서 가시화하는 것처럼, 주파수가 다른 두 소리의 신호가 합쳐진 맥놀이 신호에서, envelope의 깊이로 가시화할 수 있다. 맥놀이의 세기는 주파수가 다른 두 소리의 크기가 같을 때 두 소리의 크기에 대비하여 가장 크다[Fig. 1(a)]. 맥놀이를 형성하는 두 소리의 크기의 차가 커질수록 맥놀이의 세기는 상대적으로 감소하게 된다[Fig. 1(b)].

이러한 이유로 주관적으로 감지되는 바이노럴 비트의 세기 역시 양이에 들려주는 소리가 동일한 크기일 때 가장 클 것으로 예상된다. 동일한 크기의 소리를 양쪽 귀에 들려주어도 좌우측 청력이 다르다면, 청각 기관을 통해 느끼는 바이노럴 비트의 세기는 달라질 것으로 추정된다. 최근 바이노럴 비트를

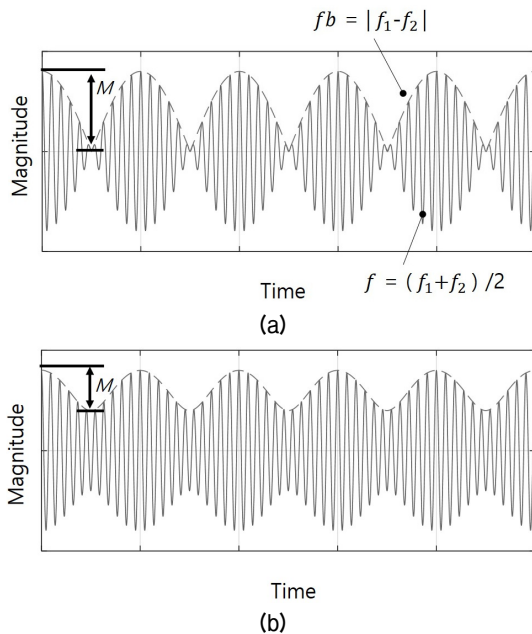


Fig. 1. Typical beating signals constructed with two pure tones whose amplitudes and frequencies are respectively f_1, f_2 and A_1, A_2 , when (a) $A_1 = A_2$ and (b) $A_1 = A_2/2$. Note that the beat frequency (f_b) is the difference of the two frequencies and the oscillating frequency (f) is the mean of the two frequencies. The beat magnitude (M) is defined by the depth of the envelop of the beating.

활용하는 연구 및 기술 개발이 진행되고 있지만,^[8-9] 아직까지 좌우 청력이 바이노럴 비트에 미치는 효과에 대한 연구 결과가 보고된 적이 없다.

본 연구에서는 피실험자에게 들려주는 좌우 소리 자극의 크기를 조절하여 실험적으로 청력 차이를 구현하고, 좌우 청력 차이로 인해 피실험자가 느끼는 바이노럴비트 세기가 얼마나 달라지는 지를 관찰하고자 한다.

II. 실험 방법

바이노럴 비트를 감지하기 위해서는 좌우측 귀에 비트 주파수만큼 차이가 나는 소리를 들려주어야 한다. 본 실험에서는 Fig 2와 같이 헤드폰을 이용하여 피실험자가 좌우측 귀에 실험 목적에 부합하는 제어

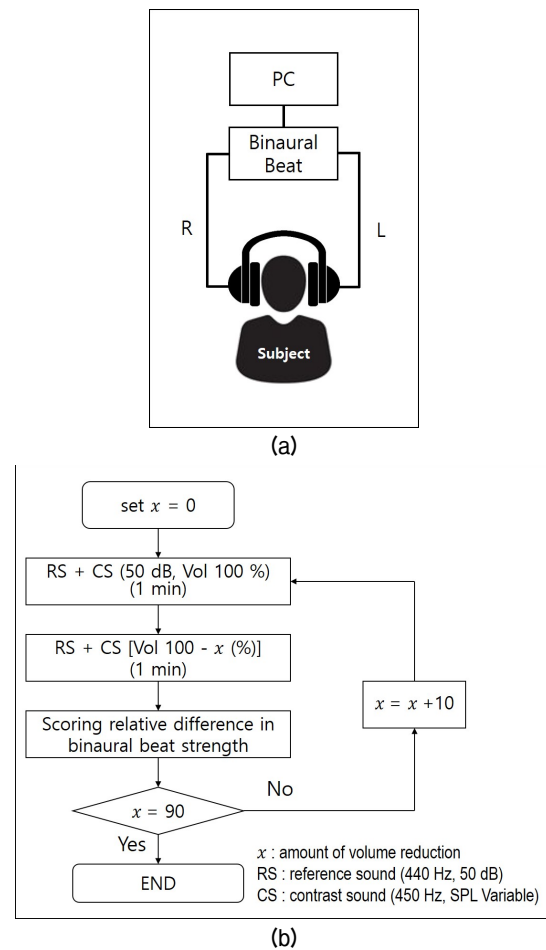


Fig. 2. (a) Experimental environment and (b) procedure.

된 소리를 청취할 수 있도록 했다.^[2] 좌우 청력 차이에 대한 효과를 실험적으로 구현하기 위해 피실험자의 양이에 들려주는 소리의 크기를 조절하며 좌우 소리 크기의 차이를 변화시켰다.

피실험자가 느끼는 바이노럴비트의 세기의 상대적인 변화는 본 연구에서는 의미 분별 척도법(Semantic Differential Method, SDM) 평가 도구를 이용하여 정량적으로 평가했다. 피실험자는 정상 청력을 가진 성인으로 제한했다. 실험을 수행한 공간은 외부의 소음의 영향이 적은 실험 공간에서 수행했다(배경 소음 : 25.3 dB). 본 실험은 제주대학교병원 IRB 심의 및 허가(JEJUNUH 2018-10-010)를 받아 수행했다.

2.1 바이노럴 비트

바이노럴 비트의 효과를 유발하기 위해 한쪽 귀에 크기 및 주파수가 고정된 기준음을 다른 쪽 귀에는 비트 주파수 차이를 가지는 주파수를 가지며 크기가 변하는 제시음을 들려준다.

실험에 사용된 기준음은 음악에서도 기준음으로 사용되며 바이노럴비트가 가장 잘 느껴지는 것으로 알려진 440 Hz의 주파수를 가지는 A4 순음(기준음)을 사용했다.^[2] 반대편 귀에 들려주는 제시음은 주파수 차이를 뇌파의 Alpha 파에 해당하는 10 Hz로 하기 위해 450 Hz로 설정했다.^[5-7,10] 기준음의 크기는 유사한 선행연구에서 사용했던 50 dB로 설정했다.^[11-14] 기준음과 제시음은, 피실험자가 바이노럴 비트를 충분히 감지할 수 있도록, 1 min 동안, 헤드폰을 통해 좌우 귀에 동시에 들려주었다.

2.2 바이노럴 비트 세기 평가

바이노럴 비트는 청각 신경을 통해 느껴지는 주관적인 소리로서 정량적으로 측정이 어려우며 청취자의 의견에 의해 주관적으로 세기를 평가한다. 본 연구에서는, 주관적인 소리의 크기를 평가하기 위한 방법으로, 청감 실험에 자주 사용되는 의미 분별 척도법을 사용하여, 피실험자로 하여금, 주관적으로 느끼는 바이노럴 비트의 세기를 비교 평가하도록 했다.^[15-17]

Fig. 3은 바이노럴 비트의 상대적인 크기의 변화를

Evaluation scales of relative binaural beat strength

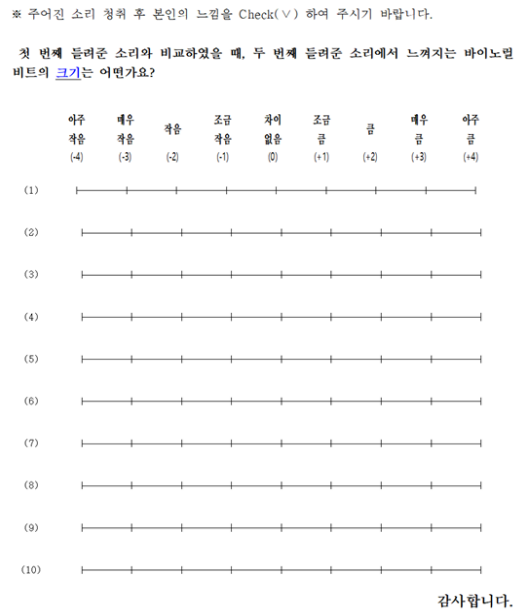


Fig. 3. Evaluation scale to judge relative binaural beat strength used in the study.

평가하기 위해 본 연구에서 고안한 평가 도구이다. 피실험자는 기준음과 동일한 음압 레벨(Sound Pressure Level, SPL)을 가지는 제시음을 1 min 듣고 난 후, Table 1과 같이 제시음의 음압 레벨을 조절하여 1 min 동안 들었을 때, 주관적으로 감지된 두 바이노럴 비트의 세기를 비교하여 상대적인 세기를 9점 척도로 scale에 표기 하도록 했다.

2.3 실험 순서

피실험자에게 바이노럴 비트를 유발하기 위해 PC에 생성된 기준음과 제시음을 헤드폰을 통해 좌우 귀에 들려주었다. 실험 전 피실험자에게 맥놀이의 물리적인 현상에 대해 소개하고, Fig. 1을 활용하여, 혼합되는 두 음의 크기 차이가 비트의 세기에 어떤 영향을 미치는지 도식적으로 설명했다. 실험 전 10분 정도 피실험자에게 준비된 음원을 들려주며 바이노럴 비트에 대한 주관적인 느낌을 경험하도록 했다. 피실험자의 한쪽 귀에 들려주는 소리의 크기를 조절하며 바이노럴 비트의 크기 변화를 감지하도록 하도록 했다.

실험에서 피실험자의 청력 저하는 한쪽 귀에 들려

Table 1. SPL used in the experiment.

	Volume setting (%)	SPL (dB)	Reduction in SPL (dB)
1	100	50.0	0
2	90	48.8	1.1
3	80	47.7	2.2
4	70	46.4	3.5
5	60	45.0	4.9
6	50	43.3	6.6
7	40	41.0	8.9
8	30	38.2	11.7
9	20	34.1	15.8
10	10	27.4	22.5

주는 소리(기준음)의 크기는 고정하고, 반대편 귀에 들려주는 소리(제시음) 크기를 줄이는 방식으로 구현했다.

소리의 크기를 변화해야 하는 제시음의 소리 크기는 Tone Generator¹⁸⁾ 상의 볼륨으로 조절했으며, Noise-book(4820 MHS II, HEADacoustics)을 사용하여 헤드폰에서 나오는 소리의 음압 레벨을 측정했다. 제시음의 크기는 최대 볼륨을 10개의 구간으로 나누어 조절했다. Table 1은 실험에서 사용된 제시음의 볼륨 설정과 측정된 제시음의 음압 레벨 값을 제시하고 있다.

한쪽 귀를 기준으로 실험이 끝나면 반대편 귀를 기준으로 실험을 반복했다(Fig. 2). 기준음을 들려주는 좌우 순서는 무작위로 선택했다.

III. 실험 결과

기준음 대비 제시음의 크기를 감소하면서 좌우 귀에 들리는 소리 크기의 차가 증가할 때, SDM 평가 도구(Fig. 3)를 이용하여, 34명의 피실험자가 느끼는 바이노럴 비트의 세기의 변화를 정리한 결과를 Fig. 4에 도시하고 있다. 수평축은 제시음 음압 레벨의 기준음 대비 감소량을 dB로 표시하고 있으며, 수직축(좌측)은 바이노럴 비트의 상대적인 세기의 변화를 도시한다. 수직축(우측)은 평가 도구 스케일의 0~4 범위를 백분율(0%에서 100%)로 표시한 것이다. 기준음은 좌측과 우측 귀에 들려 줄 때로 구분하여 실

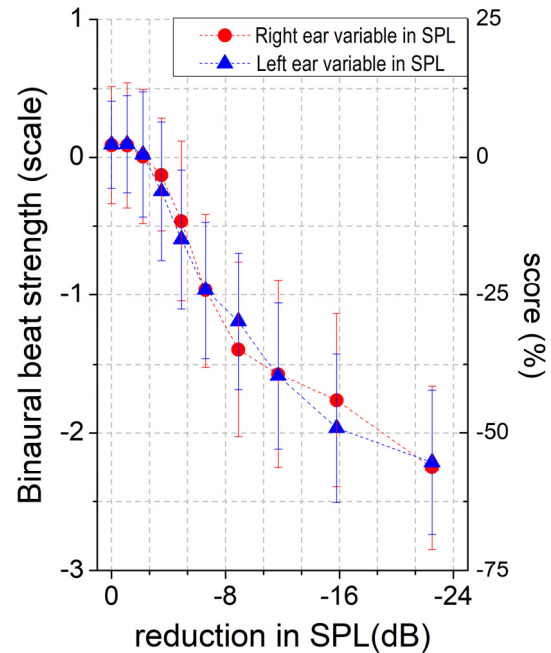


Fig. 4. (Color online) Changes in the subjective binaural beat strength as the SPL of the 450 Hz contrast sound (to either right or left ear) is reduced from 50 dB (N = 34). Note that the other side ear hears reference sound (440 Hz, 50 dB). The right hand side vertical axis represent the percentile score (0 % ~ 100 %) for the scale 0 ~ 4.

험을 반복했으며, Fig. 4에서는 기준음과 반대 측 귀에 들려준 제시음의 위치를 구분하여 표기하고 있다.

바이노럴 비트의 세기는, 예상할 수 있듯이, 기준음과 제시음의 소리 크기의 차이가 없을 때, 즉 좌우 소리의 크기의 차이가 없을 때 가장 큰 것으로 나타났다. 좌우 소리의 크기의 차이가 작을 때에는 초기에는 바이노럴 비트 세기가 비슷하게 유지되지만 좌우 소리의 음압 레벨 차이가 2.2 dB 이상 차이가 나기 시작하면 바이노럴 비트 세기가 유의하게 감소하기 시작한다. 바이노럴 비트 세기의 감소는 좌우 소리의 SPL이 4.9 dB 이상 차이가 날 때 급격하게 감소하는 것으로 나타났다. 좌우 소리의 차이가 8.9 dB 이상에서는 피실험자가 느끼는 상대적인 바이노럴 비트의 세기는 25% 이상 감소하며, 좌우 소리 크기의 차가 증가할수록 바이노럴 비트의 세기는 지속적으로 감소하는 것으로 확인되었다.

실험 중 1~3번째 구간에서 기준음에 비해 제시음의 맥놀이가 평균적으로 0.2%~2.4% 가량 크게 들렸

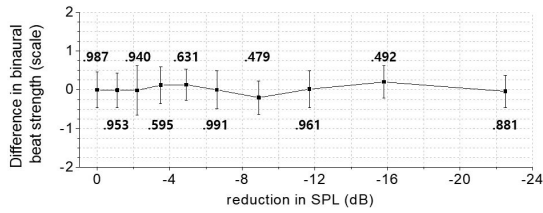


Fig. 5. Mean and standard deviation of the difference in subjective binaural beat strength rated when locations of the ears to which the reference or the contrast sound is heard (N = 34). Note that the provided values represent p value resulting from the t-test on the difference of the right and left ears in binaural beat strength rated at each SPL of the contrast sound.

다고 응답했다(Fig. 4). 좌우 소리의 크기 차이가 없을 때와 1.1 dB일 때 평균 설문 점수가 왼쪽 기준 2.2%, 오른쪽 기준 2.4% 증가했고, 22.5 dB 차이 날 때에는 기준 소리에 비해 바이노럴 비트의 크기가 왼쪽 기준 56.3%, 오른쪽 기준 55.3% 감소한 것으로 응답했다.

기준음 또는 제시음을 들려주는 귀의 위치에 따른 효과는 차이가 크지 않은 것으로 나타났다. Fig. 5는 제시음의 크기를 감소하면서 34명의 피실험자가 평가한 기준음 또는 제시음의 위치 차이에 따른 바이노럴 비트 효과에 대한 차이의 평균 및 표준 편차를 도시하고 있다. Fig. 5에서 도시하듯이 위치에 따른 차이는 평균적으로 SD scale ± 0.25 이내로 나타났다. 변동성은(표준 편차) 평균값의 3배 ~ 4배 정도로 나타났다.

Fig. 5에서 표기된 값은 제시음의 위치(좌측 및 우측)에 따른 차이의 통계적 검증(t-test)결과 계산된 p-value이다. p value 최저 0.479 이상의 값을 보이고 있어, 기준음의 위치에 따른 효과는 없는 것으로 나타났다.

IV. 토 의

본 실험을 통해 좌우 귀에 들려주는 기준음과 제시음의 크기 차이가, 예상할 수 있듯이, 주관적으로 느끼는 바이노럴 비트의 세기를 감소시키고 있음을 관찰했다. 피실험자가 느끼는 바이노럴 비트의 세기는 좌우 소리의 음압 레벨의 차이가 2.2 dB 이하인 경우에는 유의한 변화가 없으나, 그 범위를 벗어나면,

급격히 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 좌우의 청력의 차이는 주관적인 바이노럴 비트의 세기를 감소시키며, 바이노럴 비트의 효과를 최대로 하기 위해서는 좌우 청력 차이가 2.2 dB 이내에서 유지하도록 보정하는 것이 필요하다는 것을 시사한다.

본 연구는 좌우 청력의 차를 좌우의 귀에 들려주는 소리의 크기의 차이로 전환하여 실험적으로 구현했다. 청력의 저하로 인해 유발된 좌우에 들리는 소리의 차로 인해 감지된 주관적인 바이노럴 비트와 좌우에 들려주는 소리의 크기를 인위적으로 조절할 경우에 대한 차이가 있는 지에 대해 알려진 바는 없다. 일반적으로 청력 저하는 소리를 감지하는 신경계의 노화 또는 질병과 연관되어 있기 때문에, 청력 손실로 인해 바이노럴 비트 감지 과정에 영향을 줄 수 있을 것으로 예상된다. 특히, 청력 손실이 있는 쪽의 귀에 기준음을 설정할 경우, 좌우 동일한 크기의 음이 들리는 경우의 음압 레벨이 기준음보다 낮아지므로, 청력 손실이 있는 피실험자가 주관적으로 느끼는 바이노럴 비트의 최대 세기는 감소할 것으로 예상된다. 본 연구에서는 기준음의 위치가 바이노럴 비트의 세기에 영향을 주지 않는 것으로 확인되고 있는데(Fig. 5) 이는 정상 청력을 가진 피실험자를 대상으로 수행한 결과이기 때문이다. 추후 실제 청력이 저하된 피실험자를 대상으로 청력 저하 요인별로 바이노럴 비트에 미치는 영향에 대한 추가적인 연구가 요구된다.

본 연구에서 사용된 기준음 크기는 관련된 선행연구들에서 사용했던 자극의 크기로 설정했다.^[11-14,19-20] 일반적으로 소리의 크기 또는 세기는 심음향학적으로 중요한 요소이다.^[21-22] 피실험자에게 들려주는 기준음의 크기가 바뀐다면 실험 결과에 영향을 줄 것으로 생각된다. 향후 기준음의 소리 크기가 달라질 경우 바이노럴 비트의 세기에 영향을 주는지에 대한 후속 연구가 필요하다.

바이노럴 비트는 주관적인 소리이기 때문에 피실험자간의 개인차가 존재하고 절대적인 기준을 설정하기 어렵다. 이러한 문제점을 최소화하기 위해 본 연구에서 사용된 평가 도구는 바이노럴 비트의 상대적인 차를 평가하도록 했다. 동일한 조건에서 바이노럴 비트에 대한 개인차를 확인하기 위해, 한쪽 귀

에 기준음을, 다른 쪽 귀에 기준음과 같은 크기의 제시음을 2회 들려주면서, 바이노럴 비트 세기의 차이를 표기 하도록 했다. 실험 결과, 소수의 피실험자(12명 기준음 우측 귀, 13명 기준음 좌측 귀)만이 미세하게 다르다고(평가 도구 점수, 평균 0.2점 SD 1.21) 평가했다. 동일한 기준음 및 제시음 조건을 시간차를 두고 들려주었을 때 대부분의 피실험자는 바이노럴 비트의 세기가 동일하다고 평가하고 있으나, 일부 (<40%)가 매우 미세한 차(점수 < 0.3)가 있다고 평가하고 있어, 평가의 신뢰성을 확보하고 있다고 할 수 있다.

바이노럴 비트는 특정 뇌파를 유발하기 위한 용도로 사용이 된다. 임상적인 목적에 따라 뇌파를 유발하기 위해서는 적절한 바이노럴 비트 주파수를 선택해야 한다.^[4,7,10-12] 본 실험에서는 10 Hz의 바이노럴 비트를 사용하여 실험을 진행했다.^[5,7,10] 바이노럴 비트의 활용을 확대하기 위해서는 다양한 주파수 대역의 바이노럴비트에 대한 연구가 필요하다.

아직까지 청력 차이에 따른 바이노럴 비트의 뇌파 동조 정도에 대한 체계적인 연구가 보고된 바 없다. 본 연구 결과를 확장하기 위해, 향후 뇌파 측정을 통해 좌우 청력 차이에 의한 바이노럴 비트의 세기의 변화에 따른 뇌파 동조 현상에 대해 정량적인 관찰이 요구된다.

V. 결 론

본 연구를 통해 좌우의 귀에 들리는 소리의 크기 차이가 증가할수록 청취자가 느끼는 바이노럴 비트의 세기가 감소하는 것을 실험적으로 확인했다. 이러한 결과는 좌우 청력의 차이는 주관적인 느낌인 바이노럴 비트 세기를 감소시킨다는 것을 시사한다. 결론적으로, 바이노럴 비트의 효과를 이용하여 뇌파를 동조하고 특정 영역의 뇌파를 활성화 하고자 할 때, 좌우 청력 차를 2.2 dB 이내로 보정하는 것이 제안된다.

감사의 글

이 논문은 2019학년도 제주대학교 교육 연구 및

학생지도비 지원에 의해서 연구되었음.

References

1. F. B. Stumpf, *Analytical Acoustics* (Ann Arbor, Michigan, 1980), pp. 173-174.
2. G. Oster, "Auditory beats in the brain," *Scientific American*, **229**, 94-103 (1973).
3. L. Stevens, Z. Haga, B. Queen, B. Brady, D. Adams, J. Gilbert, E. Vaughan, C. Leach, P. Nockels, and P. McManus, "Binaural beat induced theta EEG activity and hypnotic susceptibility: contradictory results and technical considerations," *Am. J. Clin. Hypn.* **45**, 295-309 (2003).
4. X. Gao, H. Cao, D. Ming, H. Qi, X. Wang, X. Wang, R. Chen, and P. Zhou, "Analysis of EEG activity in response to binaural beats with different frequencies," *Int. J. Psychophysiol.* **94**, 399-406 (2014).
5. D. Vernon G. Peryer, J. Louch, and M. Shaw, "Tracking EEG changes in response to alpha and beta binaural beats," *Int. J. Psychophysiol.* **93**, 134-139 (2014).
6. C. F. Lavalley, S. A. Koren, and M. A. Persinger, "A quantitative electroencephalographic study of meditation and binaural beat entrainment," *J. Altern. Complement. Med.* **17**, 351-355 (2011).
7. G. Anushka, R. E. Ramdinmawii, and V. K. Mittal, "Significance of Alpha brainwaves in meditation examined from the study of binaural beats," *IEEE ICSC*. 484-489 (2016).
8. J. H. Lim, H. Kim, C. Jeon, and S. Cho, "The effects on mental fatigue and the cognitive function of mechanical massage and binaural beats (brain massage) provided by massage chairs," *Complement. Ther. Clin. Pract.* **32**, 32-38 (2018).
9. Bodyfriend, Inc. "Massage chair for profoming brain massage," Korea Patent, 10-1858928, 2018.
10. N. S. M. Puzi, R. Jailani, H. Norhazman, and N. M. Zaini, "Alpha and Beta brainwave characteristics to binaural beat treatment," *IEEE ICSPA*. 344-348 (2013).
11. R. Padmanabhan, A. J. Hildreth, and D. Laws, "A prospective, randomised, controlled study examining binaural beat audio and pre-operative anxiety in patients undergoing general anaesthesia for day case surgery," *Anaesthesia* **60**, 874-877 (2005).
12. S. A. Reedijk, A. Bolders, and B. Hommel, "The impact of binaural beats on creativity," *J. Front. Hum. Neurosci.* **7**, 786 (2013).
13. S. Kuwada, T. C. Yin, and R. E. Wickesberg, "Response of cat inferior colliculus neurons to binaural beat stimuli: possible mechanisms for sound localization," *Science*, **206**, 586-588 (1979).

14. M. van der Heijden, J. A. Lorteije, A. Plauška, M. T. Roberts, N. L. Golding, and J. G. Borst, "Directional hearing by linear summation of binaural inputs at the medial superior olive," *Neuron*, **78**, 936-948 (2013).
15. D. -S. KIM, H. -J. Chun, and S. -I. Chang, "The subjective response for impulsive sound-focusing on the construction noise," *Trans. of the KSNVE*. **18**, 746-755 (2008).
16. J. K. Lee, J. B. Chai, and H. K. Jang, "Study on the Evaluation of Sound Quality of a Vehicle Interior Noise" *Trans. of the KSNVE*. **15**, 945-953 (2005).
17. J. Kang and M. Zhang, "Semantic differential analysis of the soundscape in urban open public spaces," *Building and Environment*, **45**, 150-157 (2010).
18. T. P. Szynalski, *Online Tone Generator*, <http://www.szynalski.com/tone-generator/>, (Last viewed 10, July 2019).
19. D. A. Blanks J. M. Roberts, E. Buss, J. W. Hall, and D. C. Fitzpatrick, "Neural and behavioral sensitivity to interaural time differences using amplitude modulated tones with mismatched carrier frequencies," *J. Assoc. Res. Otolaryngol.* **8**, 393-408 (2007).
20. I. Siveke, C. Leibold, K. Kaiser, B. Grothe, and L. Wiegrebe, Ida Siveke, *Adjustment of Interaural-Time-Difference Analysis to Sound Level* (Springer, New York, NY, 2010), pp. 325-336.
21. D. A. Laird and K. Coye, "Psychological measurements of annoyance as related to pitch and loudness," *J. Acoust. Soc. Am.* **1**, 158-163 (1929).
22. J. J. Kellaris and R. C. Rice, "The influence of tempo, loudness, and gender of listener on responses to music," *Psychology & Marketing*, **10**, 15-29 (1993).

▶ 최 민 주 (Min Joo Choi)



1985년 2월 : 서울대학교 기계공학과 학사
 1987년 11월 : University of Surrey(영국) 의공학 석사
 1992년 12월 : University of Bath(영국) 의공학 박사
 1988년 3월 ~ 1995년 8월 : 런던 세인트모스 병원 Medical Physicist
 1995년 9월 ~ 1997년 8월 : 서울의대 의공학 교실 브레인폴교수
 1997년 9월 ~ 현재 : 제주대의대 의공학 교실 주임교수
 2019년 9월 ~ 현재 : 분당서울대병원 연구 겸임교수

저자 약력

▶ 김 성 찬 (Seong Chan Kim)



2104년 2월 : 제주대학교 음학과 학사
 2014년 9월 ~ 현재 : 제주대학교 의공학협동과정 석박사통합 과정 수료