

긍정, 부정 감정 유발 시각자극에 의한 감마-대역 신경동기화 증가

여동훈 · 최정우 · 김경환

연세대학교 보건과학대학 의공학과

Increased Gamma-band Neural Synchrony by Pleasant and Unpleasant Visual Stimuli

Donghoon Yeo, Jeong Woo Choi and Kyung Hwan Kim

Department of Biomedical Engineering, College of Health Science, Yonsei University
(Manuscript received 22 February 2018 ; revised 18 April 2018 ; accepted 22 April 2018)

Abstract: It is known that gamma-band activity (GBA) and phase synchrony (GBPS) are induced by emotional visual stimuli. However, the characteristics of GBA and GBPS according to different emotional states have not been identified. The purpose of this study is to investigate the changes in gamma-band neuronal synchronization induced by positive and negative emotional visual stimuli using electroencephalograms (EEGs). Thirteen healthy male subjects have participated in the experiment. The induced spectral power in gamma-band was the highest for negative stimuli, and the lowest for neutral stimuli in 300-2,000 ms after the stimulus onset. The inter-regional phase synchronization in gamma-band was increased in 500-2,000 ms, mainly between the bilateral frontal regions and the parieto-occipital regions. Larger number of significant connections were found by negative stimuli compared to positive ones. Judging from temporal and spatial characteristics of the gamma-band activity and phase synchrony increases, the results may imply that affective visual stimuli cause stronger memory encoding than non-emotional stimuli, and this effect is more significant for negative emotional stimuli than positive ones.

Key words: emotion, electroencephalograms (EEGs), event-related potential (ERP), gamma-band activity (GBA), gamma-band phase synchrony (GBPS)

1. 서 론

자극에 의해 유발된 감정에 따른 뇌 반응을 연구하는 데 좋은 연구 방법 중 하나는 사건관련전위(event-related potential, ERP)라고 할 수 있다. ERP는 특정 자극에 의해 유발되는 뇌전위(electroencephalograms, EEGs)이며 [1], ERP 연구를 통해 특정 자극에 대한 반응으로 유발되는 뇌전위를 관찰 할 수 있다. 따라서 ERP 연구를 통해

감정 유발 자극에 대한 뇌 반응을 관찰할 수 있다.

감정 유발 시각자극에 대한 ERP 반응은 잘 알려져 있으며[2], 크게 300 ms 이전의 초기 요소와 300 ms 이후의 후기 요소로 구성되어 있다. 초기 요소는 부정적(unpleasant) 감정을 유발하는 시각 자극에 의해서 주의 이동(attentional orientation)이 일어남에 따라 발생하는 것으로 알려져 있다. 후기 요소는 자극적인(arousing) 시각 자극에 대한 기억 부호화(memory encoding) 과정과 관련이 있는 것으로 알려져 있다.

외부 자극에 따른 뇌활동 동기화의 시간-주파수 특성을 분석하는 event-related spectral perturbation (ERSP) 분석은 시간에 따른 주파수 대역 별 활동을 관찰함으로써 ERP와는 다른 관점에서 감정정보처리 과정을 분석할 수 있다. 특히, 뇌파의 delta (1-4 Hz), theta (4-8 Hz), alpha (8-12 Hz), beta (13-30 Hz), gamma (30 Hz 이상) 등의 여

Corresponding Author : Kyung Hwan Kim
Department of Biomedical Engineering, Yonsei University,
1, Yeonsedae-gil, Heungeop-myeon, Wonju-si, Gangwon-do,
Korea

Tel: +82-33-760-2364

E-mail: khkim0604@yonsei.ac.kr

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원 (18CTAP-C129722-02)에 의해 수행되었습니다.

러 주파수 대역 활동들은 정보처리 과정의 서로 다른 특성을 반영한다고 알려져 있다. 감정 유발 시각자극에 대한 뇌 반응은 시각정보 처리를 포함한 복합적인 대뇌정보처리과정이 포함될 수 있으므로 다양한 측면에서 신경계활동을 관찰할 필요가 있다.

감정 유발 시각자극에 대한 연구에서는 대체로 감정 유발 시각자극에 의해 감마대역활동(γ -band activity, GBA)이 증가한다고 보고하고 있다[3-8]. 그러나 감정 유발 조건을 긍정, 부정으로 세분화하여 GBA 변화를 관찰한 다수의 연구결과들은 서로 일치하지 않는다. 선행 연구 결과들이 일치하지 않는 것은 제시되는 시각 자극의 형태, 색깔, 시각 자극 내의 물체의 크기, 방향 등의 시각적 특성이 불일치 하기 때문으로 생각된다. Muller 등의 연구[3]와 Keil 등의 연구[4]에서는 긍정 감정 유발 시각자극에 대한 GBA가 부정 감정 유발 시각자극에 대한 GBA에 비해 더 컸다. 각 연구에서는 전두-측두 영역과 측두-후두 영역에서 긍정 및 부정 감정 조건 간 차이를 보였다. 반면 Güntekin 등의 연구[9]와 Oya 등의 연구[5]에서는 부정 감정 유발 자극에 대한 GBA가 긍정 감정 유발 자극의 GBA에 비해 더 컸다. 각 연구에서는 후두부 및 편도체에서 긍정 및 부정 감정 조건 간 차이를 확인했다.

한편, 위상동기화(phase synchronization) 분석을 이용하면 ERP 분석과 ERSP 분석을 통해서도 획득하기 어려운 넓은 범위(large-scale)의 뇌 영역 간 상호 작용 정보를 획득할 수 있다. 지역적인 뇌활동의 동기화 특성을 관찰하는 ERSP 분석과는 다르게 위상동기화 분석은 멀리 떨어진 서로 다른 뇌 영역 간의 상호작용을 관찰하는 것에 목적이 있기 때문이다[10].

감정 유발 시각자극에 의한 신경활동 위상동기화 관련 연구들은 서로 일치하지 않는 결과를 보인다. 이는 선행 연구마다 사용하는 자극의 형태, 색깔, 물체의 크기 등 시각 자극의 특성의 차이에 기인하는 것으로 생각된다. Martini 등은 부정 및 중립 감정 유발 시각자극에 대하여 초기 시간(0-250 ms)에서는 부정 감정 유발 자극에 의해 두정-후두 영역 간의 감마대역 위상동기화(γ -band phase synchronization, GBPS)가 강해진다는 것을 관찰하였으나, 후기 시간(500-750 ms) 구간에서는 중립 감정 유발 시각자극에 의한 측두-후두 영역 간의 GBPS가 강해지는 것을 관찰했다고 보고하였다[11]. 반면 Matsumoto 등의 연구에서는 후기시간(350-450 ms)에서 부정 감정 유발 자극을 관찰 할 때 중앙-두정-후두 영역 간의 GBPS가 강해진다는 것을 확인하였다[7].

본 연구의 목적은 긍정, 부정 감정 유발 시각자극을 관찰할 때 유도되는 지역적, 영역 간 신경동기화 특성을 확인하고, 그 발생 메커니즘을 규명하는 것이다. 지금까지의 관련

선행 연구 결과에서 긍정, 부정 감정 유발 시각자극에 대한 GBA 및 GBPS에 대한 결과들은 서로 상충되어 여전히 논란의 여지가 있으며, 발생 메커니즘이 규명되지 않았다. 본 연구에서는 감정 유발 시각자극에 의해 유도되는(induced) GBA와 GBPS는 기억 부호화 과정을 반영한다고 가정하였다. 이는 300 ms 이후의 후기 시간대의 뇌활동은 기억 부호화 과정과 관련이 있다는 사실과, GBA는 자극과 관련된 기억을 비교하는 과정을 반영한다는 Herrmann의 모델에 기반한 것이다[12]. 또한, 부정 감정 유발 자극이 긍정 감정 유발 자극보다 큰 지역적, 영역 간 감마대역 신경동기화를 일으키고, 긍정 감정 유발 자극이 중립 감정 유발 자극 보다는 큰 지역적, 영역 간 감마대역 신경동기화를 일으킬 것으로 예상하였다. 이는 부정적인 감정을 유발하는 자극이 더 강한 기억 부호화를 유도할 것으로 예상할 수 있기 때문이다.

II. 연구 방법

1. 피험자

신경과 및 정신과 관련 질환 경력이 없는 건강한 남성 피험자 13명이 실험에 참가하였다(23.16 ± 1.99 세). 모든 피험자들은 정상 범주의 시력 혹은 교정을 통한 정상 범주의 시력을 보유하고 있었다. 실험 시작에 앞서 피험자들에게 실험에 관한 사항에 대해 숙지 시켰으며, 피험자들은 실험에 관한 동의서를 제출하였다. 이 연구는 연세대학교 원주캠퍼스 기관생명윤리심의위원회(Institutional Review Board)로부터 승인 받았다(승인번호: 2011-21).

2. 실험 방법

시각 자극은 긍정적, 부정적 감정을 유발하는 사진과 감정을 유발하지 않는 중립적인 내용을 담고있는 사진으로 구성하였다. 사진은 International Affective Picture System (IAPS)[13]으로부터 제공받았다. IAPS 데이터셋은 많은 선행 연구에서 감정유발 시각자극으로 활용되고 있어 대부분 해외에서 수행된 다양한 선행 연구들과 직접적으로 비교할 수 있는 장점이 있다. 피험자의 성비 구성에 따라 IAPS 데이터베이스의 남성이 보고한 valence, arousal 점수에 근거하여 긍정적 감정을 유발하는 사진 100장(valence: 6.92 ± 0.56 , arousal: 5.52 ± 0.75), 부정적 감정을 유발하는 사진 100장(valence: 2.48 ± 0.45 , arousal: 5.66 ± 0.72), 감정을 유발하지 않는 사진 200장(valence: 4.97 ± 0.51 , arousal: 3.65 ± 1.04)을 선택하였다(그림 1 (a)). 독립 표본 t 검정을 이용하여 유발 감정 조건 범주에 따른 시각 자극의 valence, arousal 점수를 통계적으로 비교하였으며, 본페로니 수정을 적용하여 다중비교 문제를 해결하였다. 또한, 긍정적, 부정적 감정을 유발하는 시각 자극은 모두 중립자극에 비해 arousal 수

치가 높으므로 이들은 감정을 유발하는 자극으로 범주화 할 수 있다. 따라서 감정을 유발하는 자극의 수와 중립 자극의 수를 맞추기 위해서 중립 자극물의 양이 긍정적, 부정적 자극물을 합친 양과 같게 설정하였다.

한 피험자에게 시행한 실험은 총 네 블록으로 나누어 진행되었다. 한 블록의 진행 시간은 12.11 ± 0.25 분이었으며 각 블록 진행 후 5분간 휴식 시간이 제공되었다. 한 블록은 총 100개의 시행(trial)으로 구성되었으며, 긍정, 부정, 중립 감정 유발 시각자극을 각각 25, 25, 50 개 제시했다. 또한, 감정 범주(긍정, 부정, 중립)에 따라 사진 자극은 의사-랜덤(pseudo-random)한 순서로 번갈아 제시하였다. 유발하고자 하는 감정이 앞서 제시된 시각 자극에 의해 유발된 감정에 의해 영향을 받는 부작용을 완화하기 위해 감정을 유발하지 않는 사진은 항상 감정을 유발하는 사진 자극 사이에 제시되도록 순서를 설정했다. 한 시행 내의 실험 진행은 그림2의 시간 순서로 구성되었다. 사진 자극이 제시된 시간은 총 2,000 ms였으며, 이 구간을 이번 연구의 관심 시간 영역으로 설정했다.

사진 자극이 제시되기 이전 1,000 ms 동안에는 fixation mark (+)를 제시하여 기저선(baseline) 시간을 확보하였다. 사진 자극 제시 이후 2,000 ms 동안은 사진에 대한 호불호(like or dislike)의 의도를 유지하도록 지시하였다. 의도 유지 시간 구간 이후 2,000 ms 동안에는 피험자가 자극에 대한 호불호 여부를 응답했다. 이를 통해 긍정 감정을 유발하는 시각 자극을 제시했을 때 사진을 싫어한다고 응답한 경우와 부정 감정을 유발하는 시각 자극을 제시했을 때 사진을 좋아한다고 응답한 경우 그 시행들은 분석에서 제외하였다. 이는 자극에 대한 주관적 선호도가 유발하고자 하는 감정을 일으키지 않는 원인이 될 수 있기 때문이다.

3. 뇌전위 기록 및 전처리

확장된 10-20 시스템에 따라 64채널 Ag/AgCl 전극용 모자(actiCAP, Brain Products, GmbH, Munich, Germany)를 사용하여 500 Hz의 샘플링율로 뇌전위를 기록했다. 뇌전위 기록 시, 전극 임피던스는 10 kΩ 이하로 유지했다. 레퍼

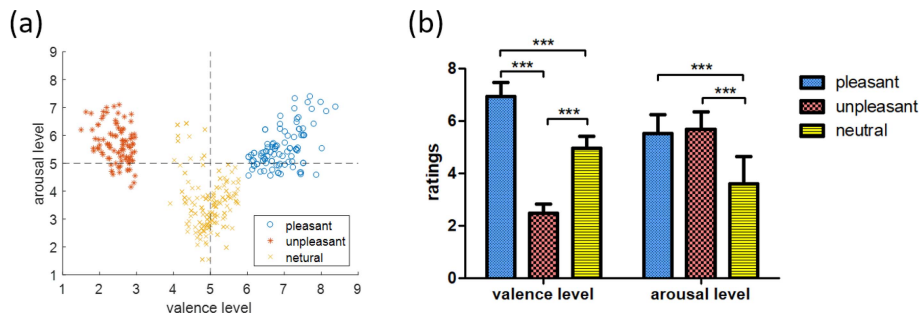


그림 1. (a) 사진 자극의 감정 범주에 따른 valence-arousal 점수 분포 (b) 시각 자극의 유발 감정 범주에 따른 valence, arousal 점수의 통계적 비교 (***: $p < 0.0001$, 본페로니 수정).

Fig. 1. (a) Distribution of valence-arousal scores for visual stimuli according to emotion categories (b) Statistical comparison of valence and arousal level between categories of emotion of visual stimuli (***: $p < 0.0001$, Bonferroni corrected).

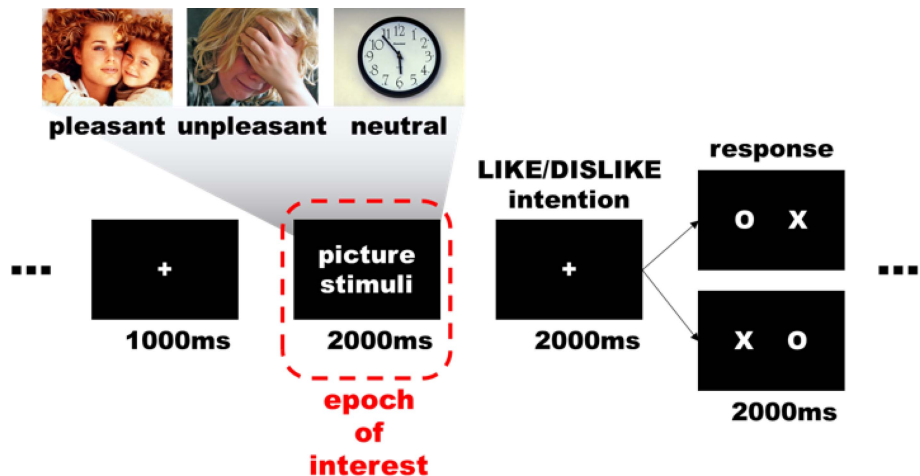


그림 2. 실험 진행 시간 순서.

Fig. 2. Experimental task procedure.

런스 전극은 FCz 채널 위치에 부착했고, 접지 전극은 AFz 채널 위치에 부착했다. 0.03-100 Hz의 대역통과필터와 60 Hz의 노치필터를 사용했다.

뇌전위 전처리 과정은 EEGLAB을 이용해 수행했다[14]. 머리카락 전극이 움직여 신호 드리프트(drift)가 발생하였거나 일시적으로 노이즈가 유입된 시행(trial)은 제거해주었다. 시행(trial) 제거 이후 남은 시행의 개수는 긍정, 부정, 중립 감정 유발 시각자극에 대해 각각 89.05 ± 13.88 , 88.37 ± 7.50 , 187.63 ± 14.56 개였다. 눈 움직임이나 근전도 등의 정형화된(stereotyped) 아티팩트는 독립 성분 분석(independent component analysis, ICA)을 이용하여 제거했다[15]. 이후 뇌전위 신호는 평균 기준(average reference)으로 re-reference 처리하였다.

4. GBA 분석 방법

연속 웨이블릿 변환을 이용해 뇌전위 주파수 성분의 시간 변화(event-related spectral perturbation, ERSP)를 관찰하였다[16]. 마더 웨이블릿(mother wavelet)은 complex Morlet wavelet을 사용하였으며, 주파수 대역은 1 Hz 단위로 1 Hz에서 100 Hz까지로 설정하였다. 연속 웨이블릿 변환의 cycle 수는 1 Hz에서는 4 cycle, 100 Hz에서는 8.75 cycle이 되도록 관심 주파수 대역에 따라 선형적으로 증가시켰다[14]. 이 방법은 높은 주파수 해상도로 고주파수 대역의 성분을 관찰할 수 있게 해줄 뿐만 아니라, 시간 주파수 맵에서 주파수 축을 선형 스케일로 시각화 하기에 적합한 방법이다[14]. 모든 단일 시행(single-trial) 시간 주파수 맵을 계산한 뒤 시행 평균(trial average)을 취하여 유도(induced) GBA를 계산하였다[12]. 기저선(baseline) 구간은 -250 ms에서 0 ms 사이로 설정하였으며, 모든 주파수에서 기저선 파워의 평균 값을 모든 시간에 대해 빼고 나눠서 시간 주파수 맵의 상대적 파워 변화값을 계산했다.

관심 시간-주파수 구간은 세 감정유발 조건 간 상대적 파워 변화 차이가 두드러지는 시간-주파수 구간을 시각적으로 선별하여 정했다. 감마대역 상대적 파워 변화를 보이는 양극 전두영역과 두정-후두영역 채널(F7, F8, P3, Pz, P4)의 GBA를 평균하여 세 감정 조건 간 차이를 비교하였다. 일원 반복측정 분산분석을 이용해 해당 시간-주파수 구간의 평균 파워를 비교하였다. 개체-내 요인(within-subject factor)은 감정 유발 조건이었다. 구형성 가정을 만족하지 못하는 경우 Greenhouse-Geisser ($\epsilon \leq 0.75$ 인 경우) 혹은 Huynh-Feldt ($\epsilon > 0.75$ 인 경우) 수정을 이용해 자유도를 수정하였다[17]. 이후 t-test를 이용하여 서로 다른 감정 유발 조건 간 GBA의 차이를 통계적으로 비교하였으며, 본페로니 수정을 통해 다중 비교 문제를 해결하였다.

5. GBPS 분석 방법

감마대역 위상동기화 분석을 수행하기 위해 phase locking value (PLV)를 이용했다[18]. 1024차 finite impulse response 대역 통과 필터(35-55 Hz)를 이용하여 신호를 영위상(zero-phase) 디지털 필터링 처리 하여 단일 시행 뇌전위 신호의 감마 대역 성분을 추출하였으며, 그 후 힐버트 변환을 이용하여 순간 위상을 계산했다. 시간 t에 대하여 전극 j와 전극 k 간의 PLV 값은 다음과 같은 식을 통해 계산되었다.

$$PLV_{j,k}(t) = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=1}^N \exp[i\{\theta_{j,n}(t) - \theta_{k,n}(t)\}] \right|$$

여기서 N은 전체 시행개수를 의미하며, n은 특정한 시행을 의미한다. 또, $\theta_{j,n}(t)$ 는 전극 j의 n 번째 시행의 시간 t에서의 순간 위상을 의미한다.

공간적으로 가까운 전극에서는 부피전도(volume conduction) 현상으로 인해 유사한 형태의 뇌전위 파형이 관찰되며, 이 때문에 공간적으로 이웃한 전극 간 trivial phase synchrony가 관찰될 수 있다[18]. 이러한 현상을 최소화 하기 위해 64개 EEG 채널 중 인접하지 않은 21개 채널(Fp1, Fpz, Fp2, F7, F3, Fz, F4, F8, C3, Cz, C4, T7, T8, P7, P3, Pz, P4, P8, O1, Oz, O2)에 대해 분석을 수행했다.

이중 문턱치(double-threshold) 방법을 이용해 위상동기화 수치가 유의하게 큰 전극쌍을 알아내고자 했다[19]. 첫 번째 문턱치는 surrogate 데이터의 PLV 수치 분포를 통해 획득하였다[18]. Surrogate 데이터는 각 전극 쌍에 대하여 random trial shuffling을 200회 수행하여 획득하였으며, PLV 수치 분포의 상위 10%에 해당하는 PLV 값을 첫 번째 문턱치로 활용했다. 두 번째 문턱치는 자극 이전 기저선(baseline) 구간 내의 PLV 수치 분포를 통해 획득하였다. 기저선 구간의 PLV 수치 분포를 획득한 뒤 상위 10%에 해당하는 PLV 값을 두 번째 문턱치로 활용하였으며, 이를 통해 자극 제시 후 전극 쌍 간의 기능적 연결성 수치가 기저선 구간 내의 기능적 연결성 수치에 비해 유의하게 증가하였는지 확인했다.

III. 결 과

1. 감정 유발 시각자극의 valence, arousal 값에 관한 통계적 비교

그림 1. (b)와 표 1은 긍정, 부정, 중립 감정 유발 시각자극의 valence, arousal 값을 통계적으로 비교한 결과를 나타내고 있다.

세 감정 범주에 대하여 valence 값을 비교했을 때, 일원 분산분석을 이용한 결과 적어도 하나의 감정 범주는 유의하게 다른 valence 값을 가지는 것을 알 수 있었다($F(2,397) = 2438.63$,

표 1. 자극의 감정 범주 간 valence, arousal 점수 비교.

Table 1. Comparison of valence, arousal levels between emotion categories of stimuli.

Comparison of	valence	arousal
Pleasant and unpleasant	$t(198) = 69.78^{***}$	$t(198) = -1.60$
Pleasant and neutral	$t(198) = 33.33^{***}$	$t(198) = 16.85^{***}$
Unpleasant and neutral	$t(298) = -48.20^{***}$	$t(298) = 18.39^{***}$

***: $p < 0.0001$.

$p < 0.0001$). 사후분석을 통해 긍정, 중립, 부정의 순서대로 valence의 값이 유의한 차이를 보였다는 것을 알 수 있었다(그림 1. (b), 표 1).

또한, 세 감정 범주에 대하여 arousal 값을 비교했을 때, 일원 분산분석을 이용한 결과 적어도 하나의 감정 범주는 유의하게 다른 arousal 값을 가지는 것을 알 수 있었다($F(2,397) = 263.58, p < 0.0001$). 사후 분석을 통해 긍정, 부정 감정 간에는 arousal 수치의 차이가 없었으나, 긍정, 부정 감정 유발 자극은 중립 자극에 비해서 유의하게 큰 arousal 수치를 보였다는 것을 확인하였다(그림 1. (b), 표 1).

2. GBA

그림3은 긍정, 부정, 중립 감정 유발 시각자극에 대한 유도 감마 대역 활동(induced gamma-band activity)이다.

그림 3. (a), (b)는 각각 GBA의 ERS/ERSP 맵과 시간적변화 곡형이다. 그림 3. (c)에서는 긍정, 부정, 중립 감정 유발 시각 자극에 대한 300-2,000 ms 시간 구간의 GBA를 두피표면 상에 표시하였다. 그림 3. (d)는 긍정, 부정, 중립 감정 유발 자극에 대한 GBA의 통계적 비교결과를 도시하고 있다.

반복측정 분산분석 결과 감정 유발 조건에 대한 주 효과(main effect)가 통계적으로 유의했다($F(2,24) = 9.629, p < 0.001$). 대응표본 t 검정을 이용하여 감정 유발 조건 간 감마대역활동 차이를 확인한 결과 감정 유발 시각자극이 감정을 유발하지 않는 시각 자극에 비해 유의하게 큰 감마 대역 활동을 보였다. 특히, 긍정적 감정 유발 시각자극 보다 부정적 감정 유발 시각자극에 의한 GBA가 유의하게 컸다($t(12) = 3.2965, p = 0.019$). 또, 중립 감정 유발 시각자극 보다 부정적 감정 유발 시각자극에 의한 GBA가 유의하게 컸다($t(12) = 3.533, p = 0.012$). 그러나 중립 감정 유발 시각자극과 긍정 감정 유발 시각자극에 의한 GBA 간에는 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다($t(12) = 1.679, p = 0.357$).

3. GBPS

그림4는 두피면 상에 표시한 긍정, 부정, 중립 감정 유발 시각자극에 대하여, 0-2,000 ms 시간 구간에서 500 ms 단위로 감마 대역(35-55 Hz)의 영역 간 위상 동기화 변화를 나타낸 것이다. 빨간색 실선으로 유의한 연결을 표시하였으며, 각 두피면 좌측 상단에 유의한 연결 개수를 표시하였다. 500-

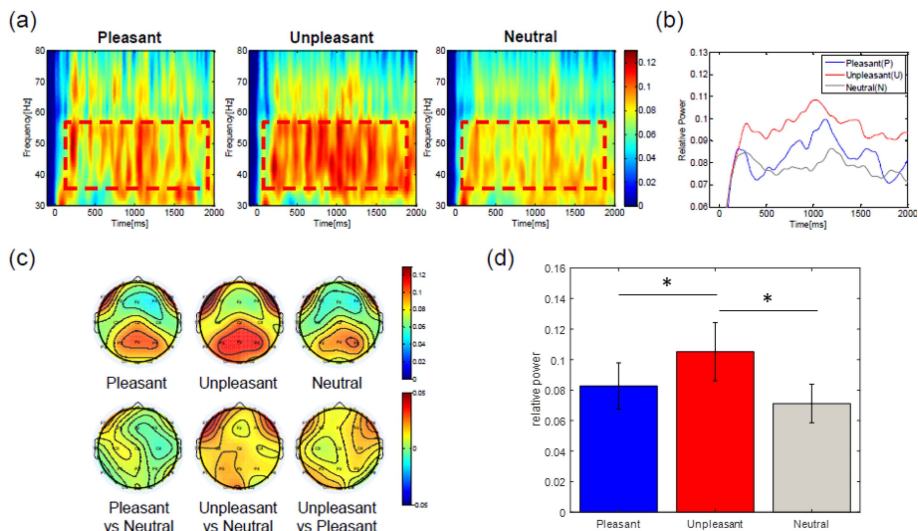


그림 3. (a) 모든 전극에 대해 평균한 유도된(induced) 감마 대역 활동의 시간 주파수 표현 (b) 35-55 Hz 주파수 구간 내 평균 감마 대역 상대적 파워 변화 시계열 (c) 두피면 상에 표시한 자극 후 300-2000 ms 시간 구간 평균 감마 대역 상대적 파워 변화 (d) 대응표본 t 검정을 이용한 감마대역 활동의 통계적 비교(*: $p < 0.05$, Bonferroni 수정).

Fig. 3. (a) Time-frequency representation of the induced gamma band activity averaged over all electrodes (b) Average gamma-band within the frequency range of 35-55 Hz (c) Topographical representation of relative power changes of GBA in 300-2,000 ms (d) Statistical comparison of GBA using paired t-test (*: $p < 0.05$, Bonferroni corrected).

2,000 ms의 시간 대역에서 영역 간 동기화가 증가했다. 주로 전두영역과 두정-후두영역 사이의 연결성이 증가되었으며, 긍정 감정 유발 시각자극보다 부정 감정 유발 시각 자극에 의해 더 많은 수의 유의한 연결이 관찰되었다.

IV. 고 찰

본 연구에서는 다채널 뇌전위 측정을 통해 긍정, 부정, 중립 감정을 유발하는 시각 자극에 의한 신경동기화 변화를 관찰하였다. 자극 제시 후 300-2,000 ms 시간 구간에서 감정 유발 시각 자극에 대해 양 가측 전두영역 및 두정-후두영역의 유도(induced) 감마 대역 활동과 위상 동기화 수치가 증가하였다. 긍정, 부정, 중립 감정 유발 조건은 모두 감마 대역 신경동기화를 증가시켰지만, 각 감정 조건에 따라 증가 정도가 달랐다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 부정 감정 유발 시각자극에 의한 GBA가 가장 컸으며, 그 뒤로 긍정, 중립 조건 순서였다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 긍정 조건에 비

해 부정 조건에서 더 많은 위상동기화 연결성을 보였다.

감정 유발 시각자극 관련 선행 연구에서는 자극 제시 후 초기 시간(60-90 ms)과 후기 시간(300 ms 이후)에서의 감마 대역 활동에 대해 구별하여 보고하고 있다[4,6,7,11]. 초기 시간 대역의 유발(evoked) 감마 대역 활동은 시각 자극에 대한 감각적 식별(sensory perception)을 반영하는 활동으로 알려져 있으며, 시각적 특징(feature)에 민감하게 반응한다고 알려져 있다[6]. 반면 후기 시간 대역의 유도(induced) 감마 대역 활동은 자극의 내용을 파악하여 의식적으로 인지하는 과정과 관련되어 있다고 알려져 있다[20-22]. 따라서, 긍정, 부정 감정 유발 시각자극 모두 감정적으로 자극적인(arousing) 내용을 담고 있기 때문에 제시된 사진의 내용을 인지하는 과정에 영향을 준 것으로 보인다[23-25].

특히 300-2,000 ms 에서 감정 유발 시각자극에 의해 더 큰 감마대역 신경동기화가 관찰된 결과는 기억 부호화 과정과 관련이 있을 것으로 보인다. 본 연구의 감마대역 신경동

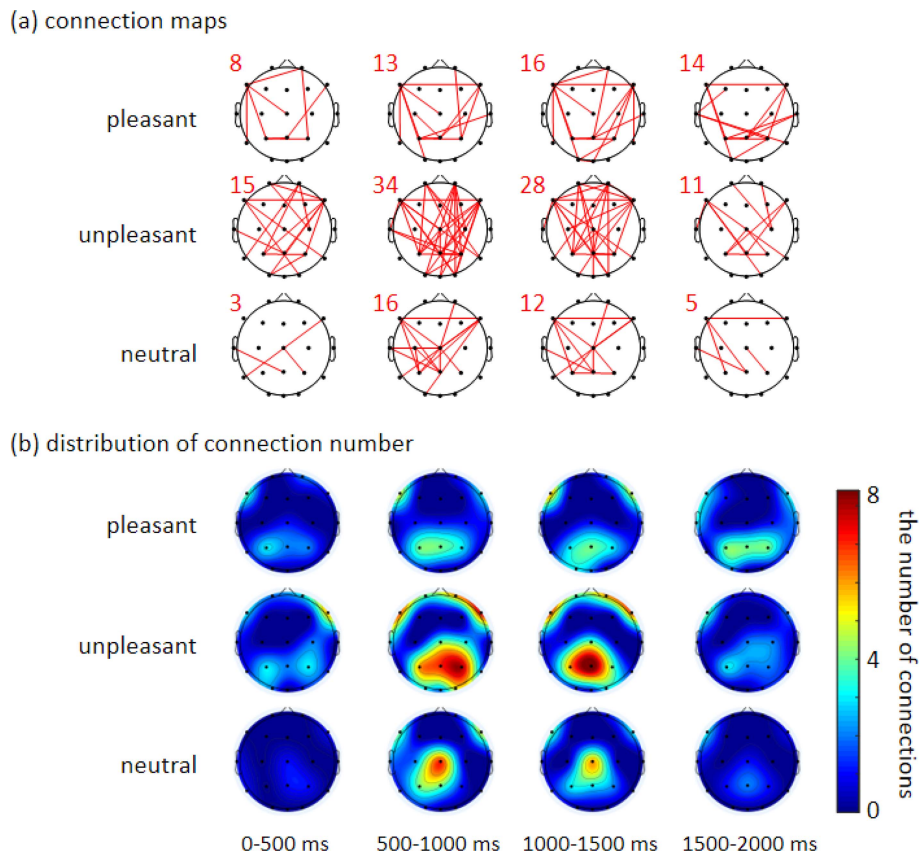


그림 4. 0-2,000 ms 시간 구간에서 500 ms 간격으로 감마 대역(35-55 Hz)의 영역 간 위상 동기화 변화를 두피면 상에 표시한 것 (a) 유의하게 동기화된 전극 쌍을 빨간색 실선으로 표시하였으며, 각 두피면상 그림 좌측 상단에 유의하게 동기화된 전극 쌍의 개수를 표시한 것 (b) 각 전극 위치 별 유의한 연결 개수를 두피면 상에 표시한 것.

Fig. 4. The changes of phase synchronization in the gamma-band (35-55 Hz) at intervals of 500 ms in 0-2,000 ms are indicated on the scalp surface. (a) Significantly synchronized electrode pairs are indicated by solid red lines, and the number of electrode pairs significantly synchronized is marked on the upper left corner of each topography. (b) The number of significant connections for each electrode is indicated on the scalp surface.

기화 증가는 후기 사건관련전위 요소인 late positive potential (LPP)[2]의 감정 유발 시각자극에 대한 반응과 유사한 점이 있다. LPP는 자극이 감정적으로 자극적(arousing) 때 증가하며 약 300-900 ms의 긴 시간 동안 지속되는 특징을 보인다[2]. 다수의 감정 관련 ERP 연구에서 긍정 감정 유발 자극에 비해 부정 감정 유발 자극에 대한 LPP가 더 크다는 사실이 확인되었다[26-31]. 이는 강한 각성을 유도하는 부정적 자극에 대해 더 강한 기억 부호화(memory encoding) 과정이 일어나기 때문으로 알려져 있다[2]. 또한 감마대역 신경동기화 증가 역시 기억 부호화와 깊은 관련이 있는 것으로 알려져 있다[32-36]. 선행 연구에 따르면 기억 부호화 과정에서 일어나는 감마대역 신경동기화 증가는 대뇌 피질과 해마 사이의 순간적인 상호작용을 통한 시냅스 가소성 변화를 반영한다[35], [37-39]. 다만, LPP의 시간대가 보통 자극 후 900 ms까지 지속되는 반면 본 연구 결과의 GBA는 2,000 ms까지 지속되고 있다는 점은 LPP의 시간적 특징과 차이점을 보인다. 이것은 우선 본 연구에서 수행한 실험에서는 감정적 시각자극을 제시하기만 한 것이 아니라 이에 대한 판단 결과를 기억 내에 유지하라고 제시하였기 때문일 수 있다. 또한, 감정 유발 시각자극에 의해 motivational relevance가 강한 시각 자극 내 주의가 집중적으로 가해지고 그 상태가 유지되기 때문으로 생각된다[40]. 종합하면, 중립적 시각자극에 비해 강한 감정을 유발하는 시각자극은 더 강한 기억 부호화 과정을 일으켰고, 또 부정 감정 유발 시각자극이 긍정 감정 유발 시각자극에 비해 더 강한 기억 부호화 과정을 일으켰다고 추정할 수 있다.

감정 유발 시각자극에 의한 감마대역 신경동기화 증가가 부호화 과정과 관련이 있을 수 있다는 주장에 대한 또 다른 근거는 양 가측 전두 영역과 두정 영역이 공통적으로 활성화된다는 점에서도 확인할 수 있다[41]. 정서 기억 형성 과정에는 시각 피질, 전전두엽, 그리고 두정엽이 관여하며, 감정 유발 자극에 대한 지각 처리, 의미 정교화(semantic elaboration), 주의(attention) 정도를 증진시키기 위해 편도체가 위 영역들과 상호작용 한다는 사실이 알려져 있다[41,42]. EEG의 공간 해상도의 한계 때문에 감마대역 신경동기화 증가에 관여하는 정확한 대뇌 영역을 직접 언급하기에는 어려움이 있다. 하지만, 본 연구의 감정 유발 시각자극에 의한 양 가측 전두 영역과 두정 영역의 감마 대역 신경동기화 증가 결과는 시각 피질, 전전두엽, 두정엽이 정서 기억 형성 과정에서 중요한 역할을 한다는 사실과 관련이 있을 것으로 생각된다.

본 연구는 두 가지 한계점이 있다. 먼저 실험에서 남성 피험자만 표본으로 모집되었다는 점이다. 감정 정보 처리 과정은 성별에 따른 명백한 차이를 보이기 때문에[43] 두 성별 모두를 포함시키기 보다 우선 한 성별에 대한 특성을 명

확히 규정하고, 추후 성별 간 비교에 관한 연구로 확대하고자 한다. 두 번째 한계점은 본 연구의 결과를 GBA 및 GBPS 변화가 기억 인코딩을 표상하고 있다는 가정 하에 해석하고 있으나 실제로 피험자가 주어진 사진 자극에 대해 기억 인코딩을 하였는지 여부를 확실히 알 수는 없다는 점이다. 하지만, 이와 관련된 많은 선행연구들이 있고[2,33-39], 본 연구에서 사용한 감정적으로 강한 자극은 자동적으로 기억 인코딩 과정을 유도할 것으로 기대된다.

V. 결 론

본 연구에서는 긍정, 부정, 중립 감정 유발 시각자극을 관찰 할 때 유도되는 지역적, 영역 간 신경동기화의 변화를 관찰하였다. 후기 시간(300-2,000 ms) 에서 감정 유발 시각 자극에 대해 양 가측 전두영역 및 두정-후두영역의 유도(induced) 감마 대역 활동 증가 및 위상동기화 증가를 확인했다. 감마 대역 활동과 위상 동기화가 현저히 증가하는 위치 및 시간이 기억 인코딩 관련 뇌활동이 발생할 것으로 기대되는 시간 및 위치와 유사하다고 판단하였다. 또한, 부정 감정 유발 시각자극이 긍정 감정 유발 시각자극에 비해 더 큰 신경동기화를 일으킨 것은 부정 감정 유발 시각자극이 긍정 감정 유발 시각자극에 비해 더 강한 기억 부호화 과정을 일으켰기 때문인 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] D. H. Blackwood and W. J. Muir, "Cognitive brain potentials and their application.," *Br. J. Psychiatry. Suppl.*, no. 9, pp. 96-101, 1990.
- [2] J. K. Olofsson, S. Nordin, H. Sequeira, and J. Polich, "Affective picture processing: An integrative review of ERP findings," *Biol. Psychol.*, vol. 77, no. 3, pp. 247-265, 2008.
- [3] M. M. Muller, A. Keil, T. Gruber, and T. Elbert, "Processing of affective pictures modulates right-hemisphere gamma band activity," *Clin. Neurophysiol.*, vol. 110, pp. 1913-1920, 1999.
- [4] A. Keil, M. M. Müller, T. Gruber, C. Wienbruch, M. Stolarova, and T. Elbert, "Effects of emotional arousal in the cerebral hemispheres: A study of oscillatory brain activity and event-related potentials," *Clin. Neurophysiol.*, vol. 112, no. 11, pp. 2057-2068, 2001.
- [5] H. Oya, H. Kawasaki, M. A. Howard, and R. Adolphs, "Electrophysiological responses in the human amygdala discriminate emotion categories of complex visual stimuli.," *J. Neurosci.*, vol. 22, no. 21, pp. 9502-9512, 2002.
- [6] A. Keil, M. Stolarova, S. Moratti, and W. J. Ray, "Adaptation in human visual cortex as a mechanism for rapid discrimination of aversive stimuli," *Neuroimage*, vol. 36, no. 2, pp. 472-479, 2007.
- [7] A. Matsumoto, Y. Ichikawa, N. Kanayama, H. Ohira, and T. Iidaka, "Gamma band activity and its synchronization reflect

- the dysfunctional emotional processing in alexithymic persons,” *Psychophysiology*, vol. 43, no. 6, pp. 533-540, 2006.
- [8] M. Garcia-Garcia, J. Yordanova, V. Kolev, J. Domínguez-Borràs, and C. Escera, “Tuning the brain for novelty detection under emotional threat: The role of increasing gamma phase-synchronization,” *Neuroimage*, vol. 49, no. 1, pp. 1038-1044, 2010.
- [9] B. Güntekin and E. Tülay, “Event related beta and gamma oscillatory responses during perception of affective pictures,” *Brain Res.*, vol. 1577, pp. 45-56, 2014.
- [10] F. Varela, J. P. Lachaux, E. Rodriguez, and J. Martinerie, “The brainweb: phase synchronization and large-scale integration,” *Nat. Rev. Neurosci.*, vol. 2, no. 4, pp. 229-239, 2001.
- [11] N. Martini, D. Menicucci, L. Sebastiani, R. Bedini, A. Pingitore, N. Vanello, M. Milanese, L. Landini, and A. Gemignani, “The dynamics of EEG gamma responses to unpleasant visual stimuli: From local activity to functional connectivity,” *Neuroimage*, vol. 60, no. 2, pp. 922-932, 2012.
- [12] C. S. Herrmann, M. H. J. Munk, and A. K. Engel, “Cognitive functions of gamma-band activity: Memory match and utilization,” *Trends Cogn. Sci.*, vol. 8, no. 8, pp. 347-355, 2004.
- [13] P. J. Lang, M. M. Bradley, and B. N. Cuthbert, “International Affective Picture System (IAPS): Technical Manual and Affective Ratings,” *NIMH Cent. Study Emot. Atten.*, pp. 39-58, 1997.
- [14] A. Delorme and S. Makeig, “EEGLAB: An open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis,” *J. Neurosci. Methods*, vol. 134, no. 1, pp. 9-21, 2004.
- [15] T. P. Jung, S. Makeig, C. Humphries, T. W. Lee, J. McKeown, Martin, V. Iragui, and T. J. Sejnowski, “Removing electroencephalographic artifacts by blind source separation,” *Psychophysiology*, vol. 37, no. 2, pp. 163-178, 2000.
- [16] C. Tallon-Baudry and O. Bertrand, “Oscillatory gamma activity in humans and its role in object representation,” *Trends Cogn. Sci.*, vol. 3, no. 4, pp. 151-162, 1999.
- [17] T. W. Picton, “Guidelines for using human event-related potentials to study cognition: Recording standards and publication criteria,” *Psychophysiology*, vol. 37, no. 2, pp. 127-152, 2000.
- [18] J. P. Lachaux, E. Rodriguez, J. Martinerie, and F. J. Varela, “Measuring phase synchrony in brain signals,” *Hum. Brain Mapp.*, vol. 8, no. 4, pp. 194-208, 1999.
- [19] K. H. Kim, J. Yoon, J. H. Kim, and K. Y. Jung, “Changes in gamma-band power and phase synchronization with the difficulty of a visual oddball task,” *Brain Res.*, vol. 1236, pp. 105-112, 2008.
- [20] S. Karakaş and E. Başar, “Early gamma response is sensory in origin: A conclusion based on cross-comparison of results from multiple experimental paradigms,” *Int. J. Psychophysiol.*, vol. 31, no. 1, pp. 13-31, 1998.
- [21] E. Başar, “Multiple oscillations and phase locking in human gamma responses: An essay in search of Eigenvalues,” *NeuroQuantology*, vol. 10, no. 4, pp. 606-618, 2012.
- [22] B. Güntekin and E. Başar, “A review of brain oscillations in perception of faces and emotional pictures,” *Neuropsychologia*, vol. 58, no. 1, pp. 33-51, 2014.
- [23] H. T. Schupp, B. N. Cuthbert, M. M. Bradley, C. H. Hillman, A. O. Hamm, and P. J. Lang, “Brain processes in emotional perception: Motivated attention,” *Cogn. Emot.*, vol. 18, no. 5, pp. 593-611, 2004.
- [24] L. Pessoa, “On the relationship between emotion and cognition,” *Nat. Rev. Neurosci.*, vol. 9, no. 2, pp. 148-58, 2008.
- [25] J. R. Zadra and G. L. Clore, “Emotion and perception: The role of affective information,” *Wiley Interdiscip. Rev. Cogn. Sci.*, vol. 2, no. 6, pp. 676-685, 2011.
- [26] C. Zhu, W. He, Z. Qi, L. Wang, D. Song, L. Zhan, S. Yi, Y. Luo, and W. Luo, “The time course of emotional picture processing: an event-related potential study using a rapid serial visual presentation paradigm,” *Front. Psychol.*, vol. 6, no. July, pp. 1-10, 2015.
- [27] Y. X. Huang and Y. J. Luo, “Temporal course of emotional negativity bias: An ERP study,” *Neurosci. Lett.*, vol. 398, no. 1-2, pp. 91-96, 2006.
- [28] T. A. Ito, J. T. Larsen, N. K. Smith, and J. T. Cacioppo, “Negative information weighs more heavily on the brain: The negativity bias in evaluative categorizations,” *J. Pers. Soc. Psychol.*, vol. 75, no. 4, pp. 887-900, 1998.
- [29] S. Frühholz, T. Fehr, and M. Herrmann, “Early and late temporal-spatial effects of contextual interference during perception of facial affect,” *Int. J. Psychophysiol.*, vol. 74, no. 1, pp. 1-13, 2009.
- [30] V. S. Johnston, D. R. Miller, and M. H. Burleson, “Multiple P3 s to emotional stimuli and their theoretical significance,” *Psychophysiology*, vol. 23, no. 6, pp. 684-693, 1986.
- [31] T. A. Ito, J. T. Cacioppo, and P. J. Lang, “Eliciting affect using the international affective picture system: trajectories through evaluative space,” *Personal. Soc. Psychol. Bull.*, vol. 24, no. 8, pp. 855-879, 1998.
- [32] P. B. Sederberg, M. J. Kahana, M. W. Howard, E. J. Donner, and J. R. Madsen, “Theta and gamma oscillations during encoding predict subsequent recall,” *J. Neurosci.*, vol. 23, no. 34, pp. 10809-10814, 2003.
- [33] P. B. Sederberg, A. Schulze-Bonhage, J. R. Madsen, E. B. Bromfield, D. C. McCarthy, A. Brandt, M. S. Tully, and M. J. Kahana, “Hippocampal and neocortical gamma oscillations predict memory formation in humans,” *Cereb. Cortex*, vol. 17, no. 5, pp. 1190-1196, 2007.
- [34] D. Osipova, A. Takashima, R. Oostenveld, G. Fernandez, E. Maris, and O. Jensen, “Theta and Gamma Oscillations Predict Encoding and Retrieval of Declarative Memory,” *J. Neurosci.*, vol. 26, no. 28, pp. 7523-7531, 2006.
- [35] M. Gärtner and M. Bajbouj, “Encoding-related EEG oscillations during memory formation are modulated by mood state,” *Soc. Cogn. Affect. Neurosci.*, vol. 9, no. 12, pp. 1934-1941, 2013.
- [36] D. B. Headley and D. Paré, “In sync: gamma oscillations and emotional memory,” *Front. Behav. Neurosci.*, vol. 7, no. November, pp. 1-12, 2013.
- [37] J. Fell and N. Axmacher, “The role of phase synchronization in memory processes,” *Nat. Rev. Neurosci.*, vol. 12, no. 2, pp. 105-118, 2011.
- [38] N. Axmacher, F. Mormann, G. Fernández, C. E. Elger, and J. Fell, “Memory formation by neuronal synchronization,” *Brain Res. Rev.*, vol. 52, no. 1, pp. 170-182, 2006.
- [39] E. Nyhus and T. Curran, “Functional role of gamma and theta oscillations in episodic memory,” *Neurosci. Biobehav. Rev.*, vol. 34, no. 7, pp. 1023-1035, 2010.
- [40] N. Kahlbrock, M. Butz, E. S. May, and A. Schnitzler, “Sustained gamma band synchronization in early visual areas

- reflects the level of selective attention,” *Neuroimage*, vol. 59, no. 1, pp. 673-81, 2012.
- [41] V. P. Murty, M. Ritchey, R. A. Adcock, and K. S. LaBar, “fMRI studies of successful emotional memory encoding: A quantitative meta-analysis,” *Neuropsychologia*, vol. 48, no. 12, pp. 3459-3469, 2010.
- [42] K. S. LaBar and R. Cabeza, “Cognitive neuroscience of emotional memory,” *Nat. Rev. Neurosci.*, vol. 7, no. 1, pp. 54-64, 2006.
- [43] M. M. Bradley, M. Codispoti, D. Sabatinelli, and P. J. Lang, “Emotion and Motivation II: Sex Differences in Picture Processing,” *Emotion*, vol. 1, no. 3, pp. 300-319, 2001.