

청각적 oddball 작업 수행 시 난이도에 따른 사건관련 전위 및 감마대역 활동 변화 특성

최정우, 윤 진, 김지현, 김경환
연세대학교 보건과학대학 의공학과

Changes in Event-related Potentials and Gamma-band Activities due to the Difficulty of Auditory Oddball Task

Jeong Woo Choi, Jin Yoon, Chi Hyun Kim, Kyung Hwan Kim

Department of Biomedical Engineering, College of Health Science, Yonsei University
(Received March 16, 2009. Accepted July 8, 2009)

Abstract

The purpose of this study is to observe the change in gamma-band cortical activities (GBAs) due to task difficulty. Event-related potential and gamma-band activity were investigated using electroencephalograms recorded during auditory oddball tasks with two difficulty levels. For more difficult task, the amplitude of P300 decreased and the peak latency of P300 was delayed significantly compared to easier task. The induced GBA decreased considerably during the P300 latency period and the peak latency of the induced GBA was delayed for more difficult task. The results imply that the difficulty-related change in cortical information processing may be implemented as a change in the strength of local neuronal association.

Key words : gamma-band activity (GBA), event-related potential (ERP), P300, auditory oddball task, task difficulty

1. 서론

Oddball 작업의 수행 시 주의(attention), 지각(perception), 의사결정(making decision), 작업 기억(working memory) 등과 같은 다양한 인지활동(cognitive activities) 들이 수반된다. P300은 oddball 작업 수행 시 자극 후 300ms 정도에 parieto-central 영역에서 가장 잘 관찰 되는 양극성(positive) 사건관련 전위(ERP; event-related potential) 요소로서 목표자극의 입력에 따른 작업기억 내 정보 표상(representation)의 변화를 반영하는 것으로 알려져 있다[1]. 물리적으로 자극 종류의 식별을 어렵게 하거나 행동반응을 복잡하게 하는 등의 방법으로 작업난이도를 조절할 수 있으며 P300 요소의 크기(amplitude) 및 잠복기(latency)는 작업의 난이도에 따른 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 선행연구에 의하면 난이도가 어려운 작업일 수록 P300 요소의 크기는 감소하며 잠복기는 지연됨이 관찰되었다[2,3]. 이를 이용하여 난이도

의 변화에 따른 P300 요소 분석을 통해 신경 및 정신과적 질환 환자들의 주의, 작업기억 등과 관련된 신경활동 장애특성을 분석하는 임상적 연구도 수행되어 왔다[4].

oddball 작업을 이용한 대부분의 선행 연구들이 ERP 요소파형, 특히 P300요소의 분석에 관심을 두어왔지만 주파수 분석 방법도 뇌의 정보처리과정을 이해할 수 있는 중요한 방법이 될 수 있다. 특히 감마대역 활동(GBA; gamma-band activity)은 대뇌피질의 정보처리 및 통합에 관여하는 여러 신경세포들의 활동이 감마대역(30-100Hz)에서 서로 비슷한 주기로 동기화되어 연합(binding) 되는 현상을 반영하는 것으로 알려져 있으며 주의(attention), 각성(arousal), 사물인지(object recognition), 언어인지(language perception) 등과 같은 다양한 정보처리 및 인지기능 수행 시 공통적으로 발생하는 것으로 알려져 있다[5,6]. 이러한 GBA의 발생시점 및 크기 정도를 관찰하기 위하여 short-term Fourier transform (STFT) 등을 이용한 시간-주파수 분석 (time-frequency)이 주로 이용된다[7].

본 연구에서는 청각적 oddball 작업을 수행하면서 측정된 사건관련 뇌전위를 기반으로 난이도에 따른 대뇌피질의 정보처리 과정의 변화를 분석하고자 하였다. 특히 난이도를 달리하여 작업을 수

Corresponding Author : 김경환
(220-710) 강원도 원주시 흥업면 매지리 연세대학교 원주캠퍼스 백운관 208호
Tel : +82-33-760-2364 / Fax : +82-33-763-1953
E-mail : khkim0604@yonsei.ac.kr
"본 연구는 교육과학기술부 지역대학우수과목자 지원사업 (과제고유번호: KRF-2007-521-H00008) 및 한국연구재단 일반연구지원사업 기본연구(개인) (과제고유번호: 2009-0072256)의 지원에 의하여 이루어진 것임."

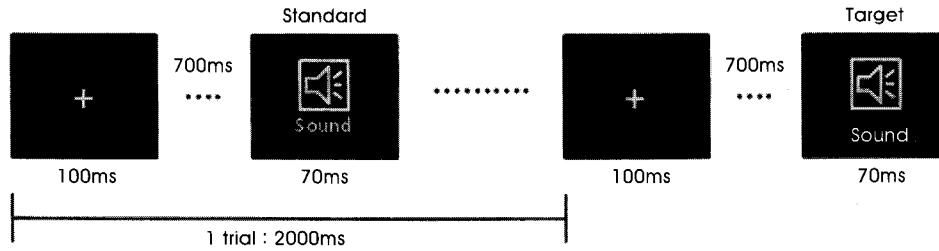


그림 1. 실험에 사용된 자극 제시 방법의 개략도
 Fig. 1. Detailed procedure of stimulus presentation

행할 때 정보처리 과정에 관여하는 신경세포들 혹은 이들의 연합을 반영하는 지표 중 하나인 감마대역 활동 분석을 통하여 난이도에 따라 뇌의 정보처리 과정의 기전이 어떻게 변화하는지에 초점을 맞추어 연구를 수행하였다. 본 저자들의 선행연구에서 시각적으로 제시된 oddball task를 통하여 확인된 난이도에 따른 변화가 청각적으로 자극이 제시된 경우에도 비슷한 양상으로 발생하는지를 확인하여 자극의 modality에 관계없이 공통적으로 나타나는 난이도에 따른 변화를 관찰하고자 하였다. 또한 선행연구들에서 확인된 P300 요소의 분석 결과와 감마대역 활동의 분석 결과를 비교하면서 난이도에 따른 뇌의 순차적 활성 패턴의 특징을 관찰해 보고자 하였다.

II. 이론 및 실험 방법

A. 피험자 및 자극 제시

16명의 피험자(남:9, 여:7)가 실험에 참여하였으며 이들 모두는 신경 및 정신과적 질환경력이 없고 오른손잡이인 대학생들로서 평균 연령은 23.9±1.8세였다. 그림 1은 실험에 사용된 자극 제시 방법의 개략도이다. 주의 집중을 위해 17인치 LCD 모니터로 검은 배경에 노란색 '+' 기호를 제시해 준 후 헤드폰(Sennheiser HD25SP1)을 통해 두 가지의 서로 다른 주파수를 갖는 순음(pure tones)들을 목표자극(target stimulus)과 표준자극(standard stimulus)으로 제시하였다. 각 자극은 70 ms (rising time: 10 ms, falling time: 10 ms) 동안 제시되었고, 자극 간 간격은 2000 ms 였다. 한 회 실험 당 9분 동안 총 270개의 자극이 임의의 순서로 제시되었고, 목표자극과 표준자극의 발생빈도수는 1:4가 되도록 하였으며 목표자극에 대해서만 피험자가 왼쪽 마우스 버튼을 클릭하도록 사전에 지시하였다. 2가지의 난이도를 갖는 oddball 작업 수행을 위하여 표준자극과 목표자극의 주파수 간 차이를 조절하였다. 즉, 쉬운 난이도의 실험 시 표준자극 및 목표자극의 주파수는 각각 1000 Hz, 2000 Hz 였으며 어려운 난이도의 경우 표준자극 및 목표자극의 주파수는 각각 1900 Hz, 2000 Hz로 구별을 어렵게 하였다. 각 난이도별로 2회씩 실험하여 전체 실험시간은 36분이었고, 각 실험 사이에 약 5분의 휴식시간이 주어졌다.

B. EEG 기록

뇌파 측정용 전극모자(EASYCAP, FMS, Munich, Germany)를 사용하여 확장된 10/10 시스템에 따라 배치된 61개 Ag/AgCl 전극으로부터 500 Hz의 샘플링율로 뇌파를 기록 하였다(뇌파 기록 시스템; BrainProducts GmbH, Munich, Germany). 각 전극의 임피던스는 10 kΩ이하로 하였고, 아티팩트의 영향을 줄이기 위해 0.03에서 100 Hz의 대역통과 필터와 60 Hz의 노치 필터를 적용하였다.

C. 전처리 과정 및 평균 ERP요소 분석

평균 ERP 요소는 저주파 성분들로 구성되기 때문에 측정된 뇌파를 20 Hz 저대역 필터링 후 자극제시 시점을 기준으로 -500 ms에서 1000 ms 구간에서의 단일 시행 ERP파형을 추출하였다. 이후 -100 ms에서 +100 ms 구간의 평균값을 각각의 단일시행 ERP 파형에서 빼줌으로써 기준점 (baseline)을 보정하였다. 이 중 한 채널에서라도 ±100 μV 이상의 크기가 관찰된 단일 시행은 아티팩트가 포함된 것으로 간주하여 제외 한 다음 앙상블평균(ensemble average)을 수행하여 평균 ERP파형을 얻었다. 각 피험자들의 평균 ERP파형을 평균한 전체평균 ERP (grand-averaged ERP) 파형을 얻은 후 전체평균 ERP파형의 정점(peak)의 크기와 잠복기(latency) 및 토포그래피(topography) 등을 고려하여 ERP 요소를 정의하였다. P300 요소의 크기가 작업난이도에 따라 유의미한 차이를 보이는지 확인하기 위하여 t-test로 난이도 간 비교 분석하였다[8].

D. 주파수 분석

주파수특성의 시간적 변화를 관찰하기 위하여 short-term Fourier transform을 사용하였다. 본 연구에서는 각 단일시행 파형이 750샘플이었고, 먼저 1~80샘플을 80 point-Hanning window를 사용하여 1024 point로 Fast Fourier Transform한 후 시간영역에서 1샘플씩 window를 이동시키면서 연속적으로 FFT 해줌으로써 시간 영역의 신호를 시간-주파수영역의 신호로 변환하였다. 이후 가로축을 시간, 세로축을 주파수로 하여 시간-주파수영역 그래프로 나타냄으로써 시간에 따른 주파수 특성의 변화를

관찰하기 용이하도록 하였다.

감마대역 활동의 분석은 위상이 동기화된 evoked GBA와 induced GBA 등 두 가지 측면에서 수행 하였다. evoked GBA는 각각의 단일시행 시 자극제시 시점을 기준으로 거의 같은 시간에 발생하는 양상을 보이며 주로 자극제시 후 초기(약 100 ms)에 발견되는 것으로 알려져 있다. 반면 induced GBA는 후기 시간대에 발생하며 각각의 단일시행마다 발생시간이 비교적 크게 변화하는 것으로 알려져 있다. 따라서 모든 단일시행 파형의 평균을 시간-주파수영역으로 변환함으로써 evoked GBA를 분석할 수 있으며 이와 반대로 각각의 단일시행 파형들의 STFT를 구한 후 이의 평균으로부터 induced GBA를 획득할 수 있다[9]. 감마대역 활동 분석에서는 ERP 분석과는 0.03-100 Hz 대역통과 필터링된 raw data를 이용하였고, 감마대역은 30-60 Hz로 설정하였다[10].

III. 결과

A. 행동반응 분석

행동반응에서 난이도 간 현저한 차이가 관찰되었다. 쉬운 난이도에서의 평균 반응시간(평균: 372.65, 표준편차: 132.55 ms)이 어려운 난이도에서의 평균 반응시간(평균: 442.51, 표준편차: 111.47 ms)보다 통계적으로 유의하게 빨랐다($p < 0.0001$). 또한 쉬운 난이도에서의 평균 정답률(평균: 99.94%, 표준편차: 0.24%)

이 어려운 난이도의 평균 정답률(평균: 98.4, 표준편차: 2.65%)보다 유의하게 컸다($p < 0.044$). 이로써 목표자극과 표준자극 간 주파수 차이의 조절을 통한 난이도의 조절이 성공적으로 이루어졌음이 확인되었다.

B. ERP 요소 분석

그림 2 (a)는 두피 전체에 분포된 주요 17개의 전극에서의 전체 평균 ERP파형이다. 그림에서 볼 수 있듯이 P300요소는 난이도에 따라 잠복기에 현저한 차이를 보였기 때문에 분석 시 서로 다른 시간구간을 설정하였다. 먼저 쉬운 난이도에서 P300요소는 약 300~400 ms, 어려운 난이도에서는 약 350~450 ms 에서 central region을 중심으로 한 넓은 영역에서 관찰되었다. 17채널 중 P300 요소가 가장 두드러지게 나타난 채널(Fz, Cz, Pz)에 대해 통계분석을 수행하였고, 그 결과 난이도에 따라 P300 요소의 크기에 현저한 차이가 있음을 발견하였다. 쉬운 난이도에서의 P300요소의 크기가 유의하게 증가하였고 (t-test, $p < 0.02$ at Fz, Cz, and Pz), 잠복기는 유의하게 감소하였다 (쉬운 난이도: 371.63 ± 23.98 ms, 어려운 난이도: 411.31 ± 22.006 ms, $p < 0.001$ at Fz, 쉬운 난이도: 359.5 ± 34.25 ms, 어려운 난이도: 410.75 ± 23.093 ms, $p < 0.001$ at Cz, 쉬운 난이도: 363.75 ± 30.462 ms, 어려운 난이도: 404.63 ± 25.168 ms, $p < 0.001$ at Pz).

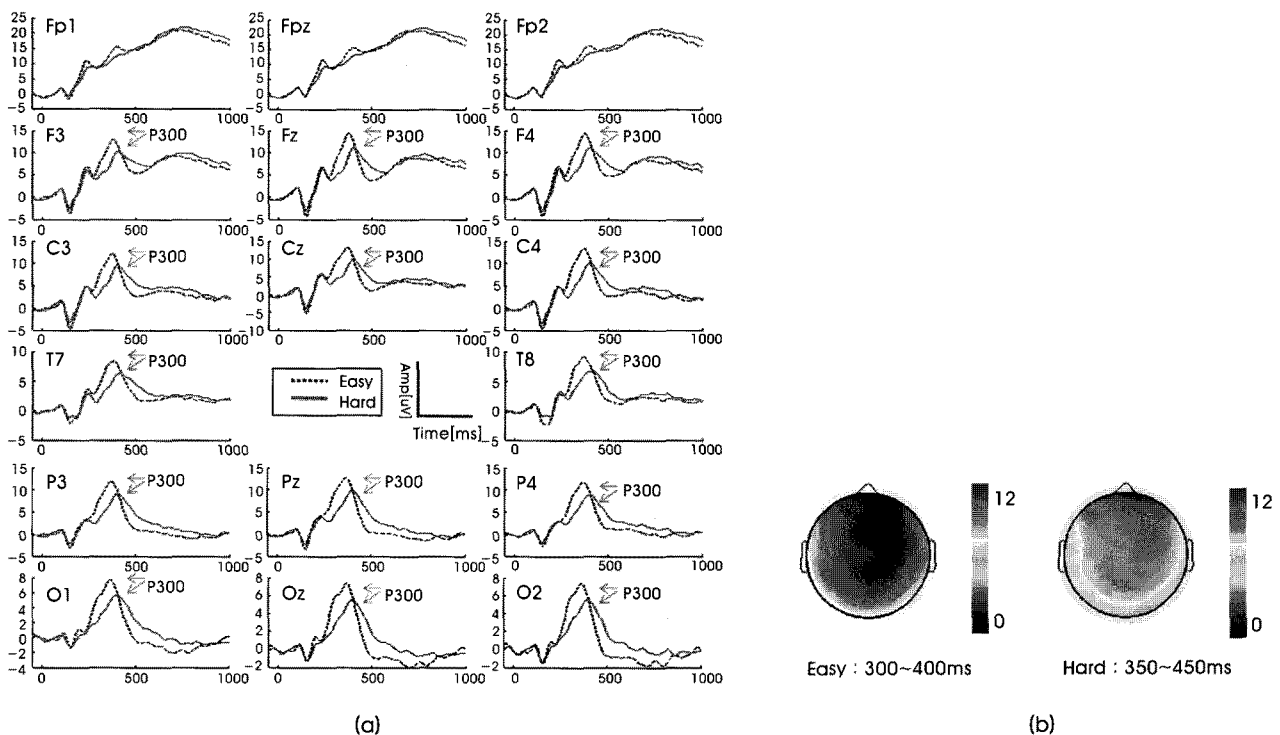


그림 2. (a) 주요 17 채널에서의 평균 ERP 파형. P300 요소 화살표로 표시. (b) P300 요소의 정점 구간에서의 topography. 좌: 쉬운 난이도. 우: 어려운 난이도. Fig. 2. (a) Grand averaged ERP waveforms at the main 17 channels. P300 component is indicated by arrow. (b) Topography at the peak latency of P300 component. Left: Easy task. Right: Hard task

C. Gamma Band Activity 분석

그림 3은 청각적 oddball 작업 수행 시 evoked GBA의 spectral power의 증가를 관찰하기 위한 시간-주파수 분석 결과이다. evoked GBA의 경우 자극 후 초기 100 ms까지 감마 대역 전체에 걸쳐서 spectral power가 급격히 증가하였다. Evoked GBA의 파워는 난이도 간 유의한 차이를 보이지 않았고 ($p=0.949$ at Fz, $p=0.947$ at Cz, $p=0.538$ at Pz), evoked GBA가 정점에 도달하는 잠복기 역시 난이도간에 차이를 보이지 않았다($p=0.487$ at Fz, $p=0.398$ at Cz, $p=0.720$ at Pz).

그림 4는 induced GBA의 시간-주파수 분석 결과이다. 쉬운 난이도의 경우 자극 제시 후 약 200 ms부터 전체 감마 대역에서 강한 spectral power의 증가를 보인 반면, 어려운 난이도의 경우 400 ms 이후에서야 비교적 약한 증가를 보였다. 가장 큰 차이를 보이는 시간-주파수 구간 (200~500 ms, 30~45 Hz)을 기준으로 난이도간 통계적 분석을 수행한 결과, induced GBA 파워는 쉬운 난이도에서의 증가가 어려운 난이도에서의 증가에 비해 유의하게 컸고 ($p<0.001$ at Fz, $p<0.001$ at Cz, $p= p<0.001$ at Pz), frontal, central 영역에서 induced GBA가 정점에 도달하는 쉬운 난이도에 대해 어려운 난이도보다 유의하게 짧았다(쉬운 난이도: 364.94 ± 73.055 ms, 어려운 난이도: 448.31 ± 68.294 ms, $p=0.002$ at Fz; 쉬운 난이도: 370 ± 66.698 ms, 어려운 난이도: 446.56 ± 67.823 ms, $p=0.005$ at Cz).

IV. 고찰 및 결론

본 연구에서는 청각적 oddball 작업 수행 시 사건관련전위 및 감마대역 활동의 분석을 통하여 난이도에 따른 대뇌피질의 정보처리 과정의 변화를 관찰하고자 하였다. 감마대역 파워의 증가는 지각, 기억, 집행 기능 등 고위 뇌기능에 관여하는 binding processing 신경세포 및 신경 네트워크 들 간의 기능적 연결을 반영하는 것으로 알려져 있다[6]. evoked GBA의 유의미한 증가는 쉬운 난이도 조건과 어려운 난이도 조건 모두에서 약 자극 제시 후 100 ms에서 강하게 나타났다. 이는 초기 감각정보 처리 과정으로 판단되며 선행 연구들에서도 동일하게 나타났다[7,11]. 그러나 evoked GBA의 파워 및 정점의 잠복기에 있어서 난이도간에 유의미한 차이점은 없었다. 최근 초기 evoked GBA의 활성화는 기억 내에 저장된 이전의 정보와 새롭게 입력된 정보를 서로 비교하여 이후 판단과정에 활용하기 위한 ‘match’ 과정에 의해 발생한다는 가설이 제시되었다[6]. 이에 따라 본 연구에서 관찰된 evoked GBA가 비교적 빠른 시간 내에 일어나는 입력정보와 저장된 정보 사이의 단순한 match과정에 의해 발생하는 것으로 가정하면 단순히 청각자극에 반응하는 감각영역 내 신경세포들 간의 연합을 반영하는 것으로 유추할 수 있으며 따라서 난이도에 따라 큰 변화를 보이지 않은 결과가 타당한 것으로 판단된다.

Induced GBA의 경우 난이도에 따른 현저한 차이를 보였다. 쉬운 난이도의 경우 자극 제시 후 약 200 ms부터 전체 감마대역에서

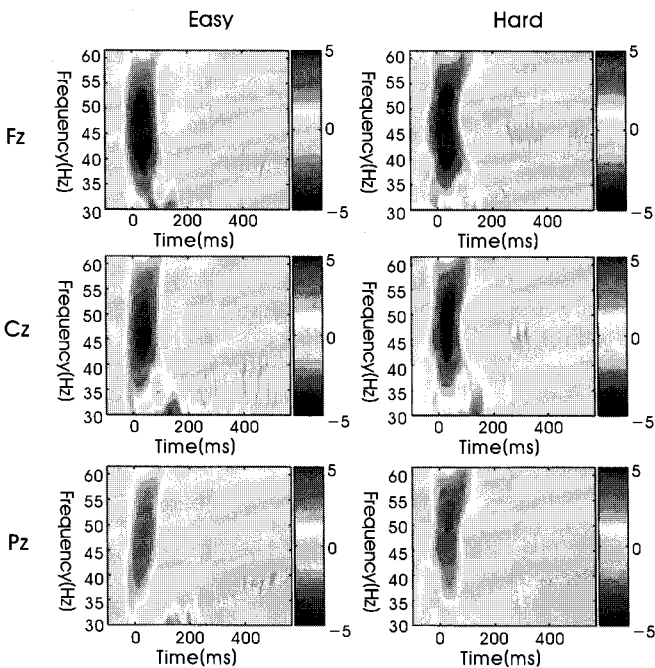


그림 3. 주요 3 채널에서의 evoked GBA의 Time-Frequency 활성화 패턴. 좌: 쉬운 난이도. 우: 어려운 난이도.

Fig. 3. Time-Frequency activation patterns of the evoked GBA at the main 3 channels. Left column: Easy task. Right column: Hard task.

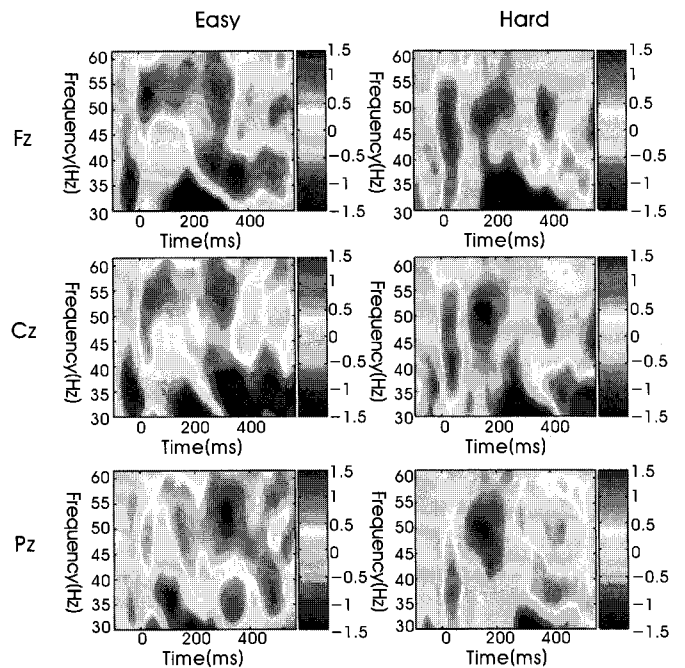


그림 4. 주요 3 채널에서의 induced GBA의 Time-Frequency 활성화 패턴. 좌: 쉬운 난이도. 우: 어려운 난이도.

Fig. 4. Time-Frequency activation patterns of the induced GBA at the main 3 channels. Left column: Easy task. Right column: Hard task.

induced GBA가 강하게 증가한 반면, 어려운 난이도의 경우 400 ms 이후에서야 비교적 약한 증가가 관찰되었다. 또한 정점의 잠복기는 어려운 난이도에서 쉬운 난이도에 비해 통계적으로 유의하게 지연됨이 확인되었다. 이는 어려운 난이도에서 P300 요소의 크기가 감소하고 잠복기도 지연되는 것과 매우 비슷한 양상을 보이는 것으로 판단된다[2,3,12]. 일반적으로 P300 요소는 입력되는 자극에 의하여 작업기억 내 정보가 갱신되는 현상을 반영하는 것으로 해석되고 있으며[1], induced GBA 또한 작업기억과 밀접한 관련이 있다는 사실이 선행연구들을 통해 확인된 바 있다[13]. 즉 oddball 작업 수행 중에 표준자극에서 목표자극으로의 정보 갱신이 일어날 때 어려운 난이도 조건인 경우, 표준자극과 목표자극 간 차이의 식별이 쉬운 난이도에 비해 훨씬 어렵고 이에 따라 정보처리 과정의 지연이 발생하여 P300 및 induced GBA의 유의한 지연이 발생한 것이라 판단된다. 이는 어려운 난이도 조건일 때의 반응 시간이 쉬운 난이도 조건일 때에 비해 유의하게 길었다는 결과와도 같은 맥락으로 이해할 수 있다.

P300 요소와 GBA 모두 난이도에 따른 가장 큰 차이는 300-450 ms에서 발생했는데, 이 구간대의 대뇌 활동은 작업기억 내 정보의 활용(utilization)을 반영하며 이는 주의력(attention)에 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다[6]. 이에 따라 이 구간에서 어려운 난이도에서의 GBA가 쉬운 난이도에 비해 감소한 사실은 어려운 난이도에 대하여 작업기억 내의 이전 정보와 새로운 정보의 비교 과정에 수반되는 신경세포들의 활성화가 정보 활용(utilization) 과정까지 잘 유지되지 못했다는 것을 의미한다고 유추할 수 있다.

또한 이는 시각적인 oddball 작업 수행 시 난이도에 따른 ERP 및 GBA 변화 특성을 관찰, 분석한 본 연구진의 선행 연구에서도 확인할 수 있었다[14]. 이 선행 연구에서는 시각적으로 제시되는 표준 자극과 목표 자극 간의 크기 차이에 변화를 주어 두 자극 간의 식별을 어렵게 함으로써 난이도를 조절하였고, 그에 따라 P300 요소와 크기가 감소하였고, 잠복기가 지연되었으며, induced GBA 파워가 감소하였고, 정점의 잠복기가 지연되는 결과들이 관찰되었다. 이를 통해 시각적으로 입력된 감각 정보가 대뇌에서 처리될 때, 난이도에 의해 대뇌 정보처리 과정의 시간적 특성 및 주파수 특성이 변화함을 확인할 수 있다. 본 논문에서 청각적인 자극을 이용하여 구성된 oddball task에서도 이와 유사한 특징들이 발견된 것은 작업의 난이도에 따른 대뇌 활성화 패턴의 시간적 특성 및 주파수 특성 변화가 자극의 modality에 무관한 공통적 특성을 갖는 것으로 해석할 수 있다.

결론적으로 본 연구에서 청각적 oddball 작업을 수행하면서 얻은 뇌전도의 사건관련 전위 분석과 감마대역 활동 분석을 통해 난이도간에 발생한 차이를 비교해 봄으로써 작업 난이도에 따른 대뇌 피질의 정보처리 특성의 변화에 대해 분석할 수 있었다. 추후 이와 같은 결과들과 대뇌 피질의 여러 영역들 간의 기능적 연결성(functional connectivity)과 인과성(causality)을 분석할 수 있는 방법을 함께 사용하여 대뇌 정보처리 시 기능적 통합 측면에서의 특성을 추가적으로 관찰하고자 한다.

참고문헌

- [1] E. Donchin, M.G.H. Coles, "Is the P300 component a manifestation of context updating?," *Behav. Brain Sci.*, vol. 11, pp.357-374, 1988.
- [2] G. McCarthy, E. Donchin, "A metric for thought: a comparison of P300 latency and reaction time," *Science*, vol. 211, pp.77-80, 1981.
- [3] J. Polich, "Task difficulty, probability, and inter-stimulus interval as determinants of P300 from auditory stimuli," *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.*, vol. 68, No. 4, pp.311-320, 1987.
- [4] J. Polich, "Clinical application of the P300 event-related brain potential," *Phys. Med. Rehabil. Clin. North Am.*, vol. 15, pp.133-161, 2004.
- [5] S.P. Fitzgibbon, K.J. Pope, L. Mackenzie, C.R. Clark and J.O. Willoughby, "Cognitive tasks augment gamma EEG power," *Clin. Neurophys.*, vol. 115, pp. 1802-1809, 2004.
- [6] 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.
- [7] I.G. Gurtubay, M. Alegre, A. Labarga, A. Malanda, J. Iriarte and J. Artieda, "Gamma band activity in an auditory oddball paradigm studied with the wavelet transform," *Clin. Neurophysiol.*, vol. 112, pp.1219-1228, 2001.
- [8] J.H. Kim, J. Yoon and K.H. Kim, "Independent component analysis of the event-related potential during visual oddball tasks with multiple difficulty levels," *J. Biomed. Eng. Res.*, vol. 29, No. 2, pp.73-81, 2008.
- [9] C. Tallon-Baudry, C. Bertrand, "Oscillatory gamma activity in humans and its role in object representation," *Trends Cogn. Sci.*, vol. 3, No. 4, pp. 151-162, 1999.
- [10] J. Yoon, J.W. Choi, J.H. Kim and K.H. Kim, "N400 Event-related potential and gamma band activities during visual perception of Korean/English words," *J. Biomed. Eng. Res.*, vol. 29, No. 6, pp.477-483, 2008.
- [11] G. Stefanics, A. Jakab, L. Bernath, L. Kellenyi and I. Hernadi, "EEG early evoked gamma-band synchronization reflects object recognition in visual oddball tasks," *Brain Topogr.*, vol. 16, pp.261-264, 2005.
- [12] R. Sawaki, J. Katayama, "Difficulty of discrimination modulates attentional capture for deviant information," *Psychophysiology*, vol. 44, No. 3, pp.374-382, 2007.
- [13] C. Tallon-Baudry, O. Bertrand, F. Peronnet and J. Pernier, "Induced gamma-band activity during the delay of a visual short-term memory task in humans," *J. Neurosci.*, vol. 18, pp.4244-4254, 1998.
- [14] 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.