

다중 난이도를 갖는 시각적 Oddball 작업 수행 시 사상관련전위의 독립요소분석

김자현, 윤진, 김경환

연세대학교 보건과학대학 의공학부

Independent Component Analysis of the Event-Related Potential during Visual Oddball Tasks with Multiple Difficulty Levels

Ja Hyun Kim, Jin Yoon, Kyung Hwan Kim

Department of Biomedical Engineering, College of Health Science, Yonsei University

(Received July 31, 2007. Accepted January 18, 2008)

Abstract

The purpose of this study is to observe the brain activity patterns during visual oddball tasks with two difficulty levels by the analysis of high-density event-related potential (ERP). Along with conventional statistical analysis of averaged ERP waveforms, we applied independent component analysis (ICA) for the individual, single-trial analysis and verified its effectiveness. We could identify multiple ERP components such as early visual components (P1, N1), and two components which seem to be important task-related components and showed difficulty-dependent variability (P2, P300). The P2 was found around central region at 180 ~ 220 ms, and the P300 was found globally at 300 ~ 500 ms poststimulus. As the task became difficult, the P2 amplitude increased, and the P300 amplitude decreased. After single-trial ERPs were decomposed into multiple independent components (ICs), several ICs resulting from P2 and P300 sources were identified. These ICs were projected onto scalp electrodes and the projected ICs were statistically compared according to two task difficulties. For most subjects, the results obtained from single-trial/individual analysis using ICA gave the tendencies of amplitude change that are similar to the averaged ERP analysis for most subjects. The temporal pattern and number of ICs corresponding to μ rhythm was not dependent on the task difficulty. It seems that the motor response was not affected by the task difficulty.

Key words : event-related potential (ERP), visual oddball task, multiple task difficulty, independent component analysis (ICA), individual analysis

1. 서론

Oddball 작업 (oddball task)은 높은 빈도로 제시되는 표준 자극 (standard stimulus)과 낮은 빈도로 제시되는 목표자극 (target stimulus)이 임의의 순서로 제시될 때 목표자극에만 선택적으로 반응하도록 하는 작업으로 수행 시 제시된 자극 형태를 판별하는 개념형성 과정과 기억에 의거하여 목표자극 여부를 판단하는 계산 및 의미 처리과정을 거친 후 자극에 대해 반응하거나 혹은 반응을 자제하는 행동과정 등 여러 단계의 정보처리 과정을 포함하게 된다. Oddball 작업 수행 시 발생하는 사상관련전위 (event-related potential, ERP)로는 central과 parietal 영역에서 300 ~

500 ms에 관찰되는 강한 양극성 파형인 P300이 가장 널리 알려져 있으며 이는 인지, 기억, 지각능력, 주의집중 등과 밀접한 관계가 있는 것으로 파악되고 있다[1-4].

Oddball 작업 수행 시 목표자극이 제시되는 빈도수, 간격, 자극의 형태, 반응 방법 등에 따라 작업난이도가 달라지며 P300의 크기(amplitude) 및 발생시간(latency)도 영향을 받는다고 한다. 물리적으로 자극종류의 식별을 어렵게 하거나 행동반응을 복잡하게 하는 등의 방법으로 작업을 변형시킴으로써 작업난이도를 높일 수 있고 이에 따라 처리과정에 필요한 노력과 자원이 더 많이 동원된다[5]. 이 결과 목표자극에 대한 반응시간이 길어지고 오답률이 증가하는데, 이는 자극형태 판별에 영향을 주어 목표자극에 속하는지 또는 특별 의미범주에 속하는지 결정하는데 방해하기 때문으로 생각할 수 있다[5,6]. Polich 등은 주파수가 다른 단음의 청각자극을 이용한 청각적 oddball 작업 수행 시 표준자극과 목표자극의 주

본 연구는 의료기기 기술개발사업인 인체기능 및 대사영상화 신기술 개발 연구 센터의 연구비 지원으로 수행되었음 (02-PJ3-PG6-EV07-0002).

Corresponding Author : 김경환

강원도 원주시 흥업면 매지리 연세대학교 원주캠퍼스 백운관208호 (220-710)

Tel : 82-33-760-2364/ Fax : 82-33-763-1953

E-mail : khkim0604@yonsei.ac.kr

파수 차이를 크게 하여 소리를 쉽게 구분할 수 있을 때에 비해 주파수 차이가 작아 구분이 어려울 때 P300의 크기가 감소하고 발생시간이 늦어짐을 관찰하였다[7,8]. 시각적 oddball 수행 시에도 목표 자극과 표준자극의 크기 차이를 변화시켜 난이도를 조절한 결과 난이도 증가에 따른 P300 크기 감소 및 발생시간 지연이 관찰되었다[6]. 이와 같은 연구결과들은 난이도 증가에 따라 자극형태를 파악하는데 어려움이 커지고 기억검색 작용, 인지과정과 같은 내부 연산이 과부하된 결과가 P300에 반영됨을 의미하는 것으로 해석되고 있다[5]. 또한 정상인과 치매환자에 대하여 작업난이도를 변화시키면서 oddball 작업을 수행시킨 결과 P300 크기 및 발생시간의 차이가 정상인과 치매환자에 대해 다르게 나타남을 확인하였다[9]. 따라서 작업난이도를 변화시키면서 oddball 작업을 수행할 때 발생하는 ERP 요소 P300을 관찰하는 것은 작업난이도 변화에 따른 단기 기억, 주의집중 등의 인지기능의 변화를 이해하는데 도움이 될 것이며 추후 신경질환에 따른 인지과정의 변화를 관찰함으로써 임상적으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

Oddball 작업 수행 시 발생하는 ERP의 분석을 위해서 가장 널리 사용되는 방법은 전체 시행에 대한 평균 ERP 파형을 계산하여 이의 시공간적인 분포를 확인하고, 통계적 가설검증을 수행하는 방법이다. 그러나, 평균된 ERP 파형은 개별 반응 시의 파형 및 반응시간의 변화를 반영할 수 없고 리듬 파형 등 시간적 평균연산에 의해서 생략되는 정보들은 파악할 수 없다. 또한, 개인별 차이에 따라 작업 수행능력, 각성상태, 주의집중 정도 등 뇌 활성화에 영향을 미치는 여러 요소들의 차이로 인하여 평균 ERP 분석방법을 이용한 접근은 뇌의 동적인 반응을 반영하는데 명백한 한계를 갖는다[10]. 이에 따라 단일시행 ERP(single-trial ERP)의 분석을 위한 여러 방법들이 제안되고 있다[10,11].

독립요소분석(independent component analysis, ICA) 알고리즘은 블라인드 신호분리(blind source separation) 문제를 해결하기 위한 방법 중 하나이며 이를 이용하면 어떤 사전 정보 없이 선형적으로 혼합된 신호로부터 알려지지 않은 신호원을 구해낼 수 있다. ICA 알고리즘을 단일시행 ERP 파형에 적용시키면 평균 ERP 파형보다 더 많은 동적인 뇌 반응 정보를 관찰할 수 있는데, 이는 ICA에 의하여 시간적으로 독립적인 반응을 보이는 요소들로 분리시키는 것이 가능하기 때문이다[10-13]. 또 ICA를 통하여 각 독립 요소들의 시간에 따른 파형과 두피면 상의 분포로 실험설계에 따른 뇌의 활성화 패턴 상의 차이를 관찰하는 것이 가능하다[10].

본 논문의 목적은 기존의 방법인 평균 ERP 파형분석의 통계적 분석과 ICA를 이용한 개인별 ERP 분석결과를 비교하여 제시함으로써 난이도 변화에 따른 시각적 oddball 작업 수행 시 뇌 활성화의 유사점 및 차이점을 분석하고자 하는 것이다. 측정된 61 채널 뇌파로부터 개인별로 ICA를 적용하여 독립요소들로 분해한 후 우선 안전도(electrooculogram, EOG)와 근전도(electromyogram, EMG)에 해당하는 독립요소들을 제거하였다. 이후 종래의 평균 ERP를 계산한 후 여러 개의 ERP 요소파형을 시공간적 특성에 따라 규명하여 작업난이도에 따른 차이를 통계분석으로 비교하였다.

또한 평균 ERP 분석에서 확인된 ERP 요소파형과 각 독립요소의 시공간적 특성을 비교하여 ERP 요소들에 해당되는 독립요소들을 선택하여 이들에 대하여 작업난이도에 따른 차이를 통계적으로 비교하였다. 주로 평균 ERP 분석에서 난이도에 따른 중요한 차이를 보이는 P2 및 P300 요소에 대한 분석을 중심으로 여러 명의 피험자들에게서 비슷한 특성을 갖는 독립요소들을 찾을 수 있는 지 여부와 이러한 개인별 분석결과가 평균 ERP 분석에서 얻은 다수피험자에 대한 결과와 일치하는 지를 확인하는 것을 주요한 목적으로 설정하였다.

II. 실험 방법

A. 다중 난이도를 갖는 oddball task 제시

실험에 참가한 피험자는 총 17명으로 남 9명, 여 8명이고, 평균 연령은 23.9 ± 1.8 세이었다. 이들은 모두 과거 신경과적 혹은 정신과적 질환 경력이 없는 건강한 사람들이며 오른손잡이다. 그림 1(a)과 같이 사용된 시각자극은 검정배탕 위 중앙에 그려진 노란색 구형이며 구형의 직경은 2.8 cm, 3.6 cm, 4.0 cm이었다. 자극은 자극제시용 소프트웨어(Presentation, Neurobehavioral systems, Berkeley, CA)를 이용하여 17" LCD 모니터를 통하여 제시하였다. 그림 1(b)는 자극제시 방법을 도시한 것이다. 지속적으로 모니터에 주의 집중하도록 '+' 형태를 갖는 고정기호(fixation mark)를 자극제시 전 800 ms로부터 100 ms 동안 보여주었으며, 이후 80 ms 동안 시각자극을 제시하였다. 그 외 구간에는 검정색화면(blank)을 보여주었다. 자극 간 간격은 2000 ms로 고정하였으며 표준자극과 목표자극의 발생 빈도가 4:1이 되도록 임의의 순서로 제시되었다. 표준자극과 목표자극의 크기 차이를 조절함으로써 시

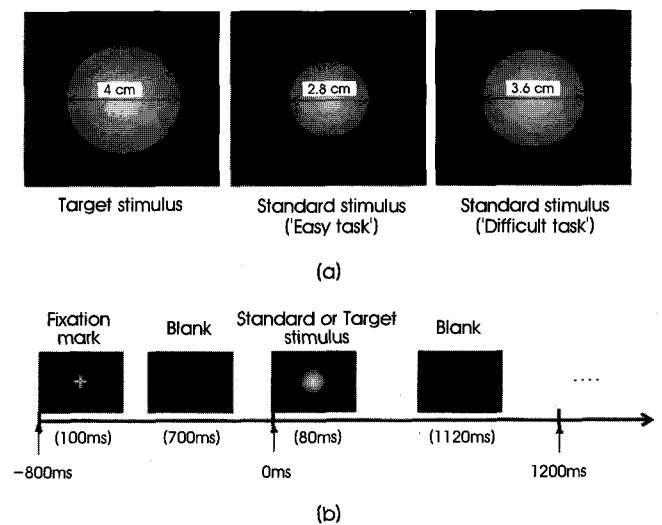


그림 1. (a) 목표자극 및 표준자극. 표준자극의 크기를 변화시켜 난이도 수준을 조절하였다. (b) 실험 설계.

Fig. 1. (a) Target and standard stimuli. The size of standard stimuli is changed for each difficulty level (easy and difficult). (b) Experimental design.

각적으로 식별하기 위한 난이도를 조절하였다. 목표자극은 직경 4 cm로 고정하였으며 표준자극의 직경의 직경을 각각 2.8 cm 및 3.6 cm로 변화시킴으로써 쉬운 작업 (easy task)과 어려운 작업 (difficult task)을 구성하였다. 실험은 각 난이도별로 2회씩 실시하여 총 4회 수행되었고 1회 실행 시 총 270개의 자극이 제시되며 시간은 약 9분 12초이었다. 실험과 실험 사이에는 5분 이상의 휴식을 취하도록 하였다. 피험자에게는 화면에 목표자극이 제시되면 즉시 마우스 왼쪽버튼을 눌러 반응하도록 지시하였고 누른 시점은 반응시간으로 기록되었다. 실험 시작 전에는 편안한 자세로 검정 화면 중앙을 응시하도록 하여 5분간 안정상태의 뇌파를 측정하였다.

B. 뇌파 기록방법

64개 Ag/AgCl 전극이 부착되어 있는 뇌파측정용전극모자 (EASYCAP, FMS, Munich, Germany)를 사용하여 확장된 10/10 시스템에 따라 60개의 전극으로부터 EEG 신호를 500 Hz의 샘플링율로 기록하였다. 10/10 시스템은 전형적인 10/20 시스템에서 확장된 것으로 두피면을 구면으로 가정한 후 정면에 위치한 nasion에서 후두부에 위치한 inion까지 10%씩 증가하는 지점과 좌측 preauricular 지점에서 우측 preauricular 지점까지 10%씩 증가하는 지점에 전극을 배치되도록 한다[15]. 기준전극은 양 귀를 사이에 두고 접지는 Fpz와 Fz 사이에 위치시켰다. 추가로 오른쪽 눈 밑에 전극을 부착하여 안구운동에 의한 발생하는 EOG를 측정하였다. 아티팩트의 영향을 줄이기 위하여 0.03 ~ 100 Hz의 대역 통과필터와 60 Hz의 노치필터를 적용하였다. 전도성 젤을 이용하여 모든 전극의 임피던스 크기는 10 kΩ 이하가 되도록 했다.

III. ERP 분석 방법

A. 뇌파신호의 전처리 방법

측정된 뇌파로부터 평균 ERP 파형을 구하고 ICA를 수행하기에 앞서 다음과 같은 전처리 과정을 수행하였다. 우선 EOG 채널과 측정된 60 채널 뇌파에 50 Hz의 저역통과필터를 적용시킨 후 각 실험조건에서 측정된 다채널 뇌파를 자극제시 시점을 기준으로 -100 ms에서 1000 ms 구간에서 잘라 단일시행 ERP들을 얻고 이들을 연속하여 연결시킴으로써 ICA를 수행하기 위한 입력 데이터를 구성하였다. 매 구간 baseline은 -100 ~ 100 ms 구간의 평균값을 이용하여 보정하였다. 아티팩트 제거를 위하여 우선 단일시행 ERP들 중에서 크기가 100 μV 이상인 신호가 관찰되는 구간과 드리프트(drift)나 고주파 잡음으로 오염된 정도가 심한 구간을 제외하였다. 다음으로 이후에 설명할 ICA 알고리즘을 이용하여 추가로 EOG와 EMG 아티팩트를 제거하였다[11].

B. ICA에 의한 잡음제거 및 단일 ERP 분석

측정된 ERP x 와 신호원 s 의 관계는 $x = As$ 와 같이 선형적인 혼합 (linear mixture)의 관계로 가정할 수 있다. 여기서 A는 알려

지지 않은 mixing matrix로 여러 신호원이 두피에 어떻게 혼합되어 전달되는가를 나타낸다. 이 때 신호원의 추정치 \hat{s} 는 mixing matrix의 역행렬에 해당하는 unmixing matrix W 를 추정함으로써 $\hat{s} = u = Wx$ 와 같이 얻을 수 있다. W 를 구하는 과정은 Bell과 Sejnowski가 제안한 infomax 알고리즘에 의해 수행되었다 [10,11,14]. 이는 u 에 역변환가능 비선형성 (invertible nonlinearity) $g(\cdot)$ 를 가한 결과인 $y = g(u)$ 의 결합 엔트로피 (joint entropy)를 최대화함으로써 각각의 요소들간의 상호정보 (mutual information)를 최소화하기 위한 W 를 구하는 방식으로 수행된다. 특정한 독립요소, 즉 특정 신호원의 공간적 활성화 형태(즉, topography)는 혼합행렬의 역행렬 W^{-1} 의 각 행으로부터 구할 수 있다[14]. 특정 독립요소가 두피면에 반영되는 과정은 혼합행렬을 이용하여 독립요소를 두피면 전극 위치에 투영(projection) 시킴으로써 구할 수 있다.

개인별로 ICA 알고리즘을 이용하여 61채널의 뇌파를 총 61개의 독립요소들로 분리한 후 그 중에서 주요 ERP 요소들의 신호원에 해당하는 독립요소, μ 리듬에 해당하는 독립요소, EOG와 EMG 아티팩트에 해당하는 독립요소들을 규명하였다. 독립요소 분리는 100개의 epoch에 해당하는 61채널 뇌파로부터 수행되었다. 그림 2는 대표적인 독립요소 종류와 판별 기준이 되었던 독립요소들의 topography, 파형, 파워 스펙트럼을 나타낸 것이다. 그림 2의 첫 번째 행은 평균 ERP에서 발견되는 주요 신호원인 P300에 해당하는 것으로 판단된 독립요소의 예이다. 주요 신호원의 독

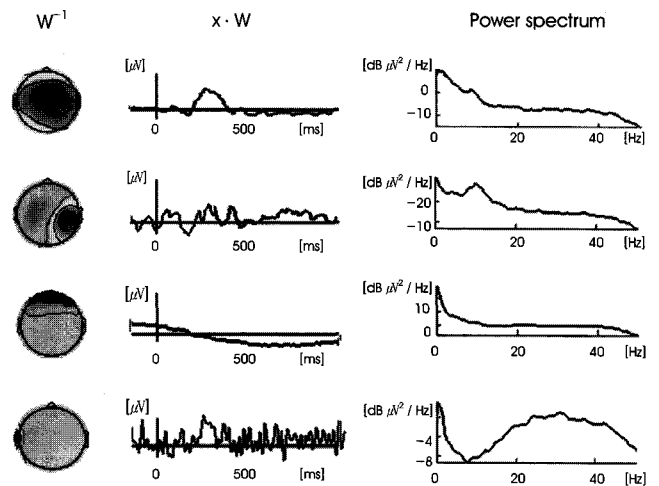


그림 2 주요한 신호원 및 아티팩트에 해당하는 대표적인 독립요소들. 1열: 두피면에 반영된 크기와 분포를 보여주는 topography. 2열: 단일시행 ERP로부터 추출된 독립요소 성분. 3열: 단일시행 ERP로부터 추출된 독립요소 성분의 스펙트럼.

Fig. 2 Several representative independent components corresponding to major signal sources and artifacts. 1st column: topography showing the contribution of each IC on each position on scalp. 2nd column: temporal variation of IC's extracted from single-trial ERPs. 3rd column: power spectra of IC's extracted from single-trial ERPs.

립요소는 topography 상에서 특정영역의 활성화가 관찰되는가와 단일시행 파형에서 특정 시간대에 극점 (peak)을 보이는 지의 여부로부터 파악하였다. 두 번째 행은 μ 리듬에 해당되는 독립요소의 예로써 topography 상에서 central 영역 또는 후두부에서 활성화가 관찰되는가, 반응시간 전후에 단일시행 파형에서 리듬에 의한 동요가 감소되는가, 10 Hz 전후 파워 스펙트럼의 크기가 큰가를 확인함으로써 파악할 수 있었다. 아티팩트는 크게 눈의 깜박임과 근육의 움직임에 의해 발생된 것으로 구분할 수 있다. 세 번째 행은 EOG에 해당하는 독립요소의 대표적인 예로써 topography에서 활성화 영역이 안구를 포함한 전두부이고 단일시행 파형에서 눈의 움직임으로 자극제시 전 안정되지 않은 부분이 관찰되는가와 자극제시 후 눈의 깜박임의 영향을 받은 부분이 관찰되었는가가 판단 기준이었다. 네 번째 행은 좌측 temporal 영역에서 발생된 EMG에 해당하는 독립요소의 예이다. EMG 아티팩트를 판단한 기준은 topography 상에서 temporal, frontal, occipital 영역의 국소부위 활성화가 관찰되는가, 단일시행 파형들에서 EMG 영향으로 인한 고주파 성분들로 오염되었는가, 15 Hz 이상의 파워 스펙트럼 크기가 큰가 이었다. 주요 신호원에 해당하는 독립요소가 두피면에 반영되는 크기는 혼합행렬 W를 이용하여 전극표면 위로 투영시킨 후 독립요소의 활성화 크기가 작업난이도에 따라 차이가 있는가를 관찰하였다. 이때 개인별로 ERP 요소의 신호원으로 선정된 독립요소가 다수일 경우 이것들을 전극으로 투영시킨 값의 합을 이용하였다.

C. 평균 ERP 분석

전처리 과정을 거친 단일시행 ERP 파형들을 자극 종류별로 자극제시시점을 기준으로 -100 ~ 1000 ms 구간을 정렬시켜 이상불 평균을 수행함으로써 평균 ERP 파형을 얻었다. 평균 ERP 파형들로부터 중요한 요소파형을 파악하기 위하여 global field plot (GFP)을 얻었다. 이는 모든 전극의 평균 ERP 파형을 제공한 후 자극제시 시점을 기준으로 합함으로써 얻어진다[16]. GFP의 크기가 현저히 크게 관찰된 시간구간들을 찾은 다음 topography로부터 평균 ERP 크기가 큰 영역을 찾은 후 발생시간과 극성을 확인하여 ERP 요소파형들을 정의하였다. 정의된 평균 ERP 요소들의 크기가 작업난이도에 따라 유의미한 차이가 있는가는 통계적으로 비교하였다.

IV. 결과

작업난이도에 따라 목표자극에 대한 반응시간과 목표자극의 식별 시의 오답률을 비교한 결과 반응시간은 작업이 쉬울 때보다 어려울 때 더 길었으며 오답률은 작업난이도가 증가함에 따라 크게 증가하였다. 쉬운 작업에 대한 반응시간은 414.03 ± 91.06 ms, 어려운 작업에 대한 반응시간은 475.68 ± 101.87 ms이었으며 이들 사이의 차이는 t-test 결과 통계적으로 유의미한 것으로 판단되었다 ($t=5.613, p<0.001$). 오답률은 작업난이도가 쉬울 때 0.43%이

고 어려울 때 12.04%이었다.

그림 3 (a)는 17명의 피험자의 쉬운 작업과 어려운 작업 목표자극조건에 대한 평균 ERP 파형을 17개 주요전극에서 도시한 것이며 그림 3 (b)는 60개 전극의 평균 ERP 파형을 각각 제공한 후 모두 합하여 얻은 GFP 그래프이다. 평균 ERP 파형과 GFP 그래프는 ICA 알고리즘을 이용하여 아티팩트에 해당하는 요소들을 제거한 후 도시하였다. 그림 4의 (a)와 (b)는 눈의 깜박임 및 안구 움직임에 의한 EOG와 근육의 활동으로 인한 EMG의 영향으로 발생한 아티팩트들에 해당하는 대표적인 독립요소들을 나타낸다. 앞에서 서술하였듯이 EOG 및 EMG 아티팩트에 해당하는 독립요소의 선정은 각각의 독립요소들의 topography와 시간적인 변화 양상을 기반으로 이루어졌다. 그림 4 (a)의 독립요소는 전형적인 EOG 파형의 형태와 매우 유사하며 topography로부터 이 독립요소의 신

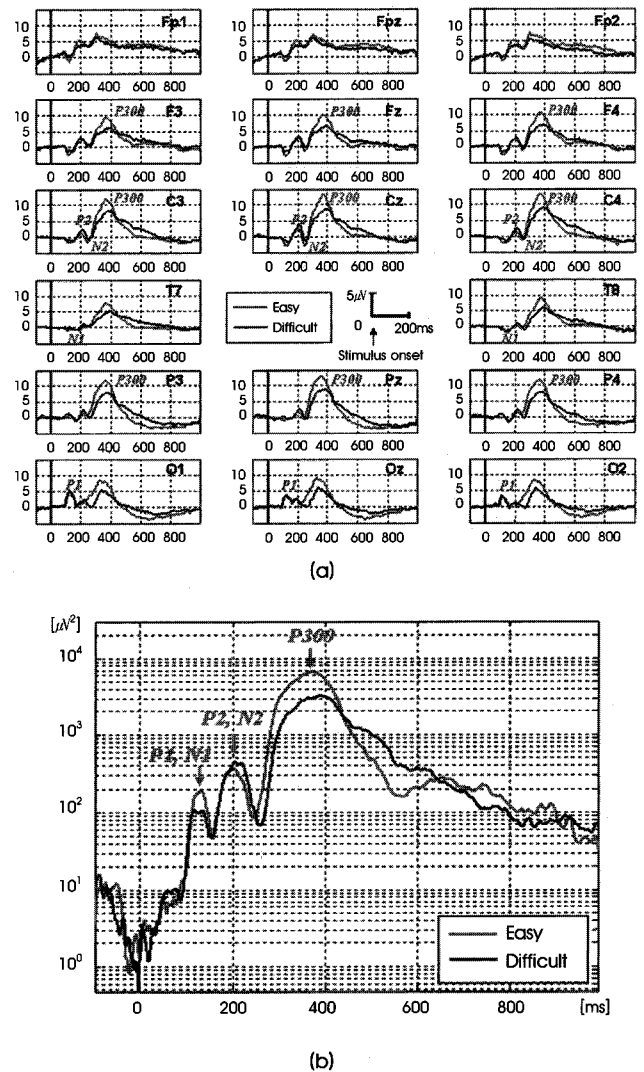


그림 3. (a) 전체 피험자에 대한 목표자극의 평균 ERP 파형. (b) GFP 그래프. Fig. 3. (a) Grand averaged ERP waveforms for target stimuli. (b) GFP obtained from 17 subjects

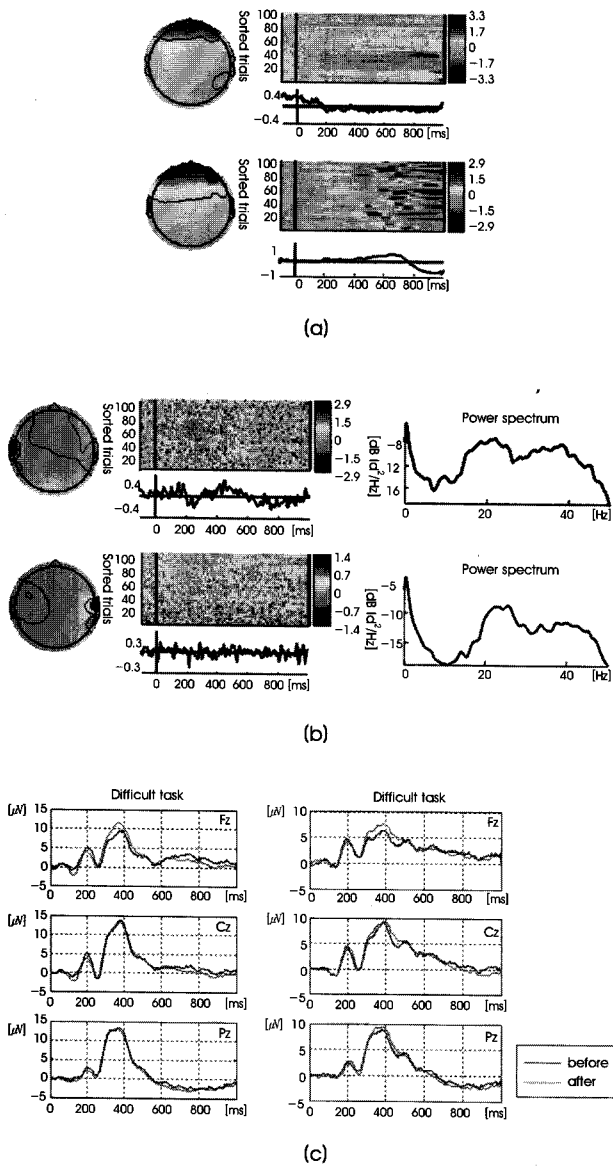


그림 4. 아티팩트로 규명된 독립요소 및 이들 독립요소를 제거하기 전/후의 평균 ERP 파형. (a) 1열: EOG에 해당하는 독립요소의 topography, 2열: 자극제시 시점을 기준으로 배열된 단일시행 파형 및 평균파형. (b) 1열: EMG에 해당하는 독립요소의 topography, 2열: 자극제시 시점을 기준으로 배열된 단일시행 파형 및 평균파형, 3열: 파워스펙트럼. (c) 아티팩트 제거 전/후의 전체피험자의 평균 ERP 파형.

Fig. 4. Independent components that were identified as artifacts and comparison of the averaged ERP waveforms before and after removal of these independent components. (a) Topography, a colored image of a collection of single-trial data sorted on an onset time, averaged waveform, and power spectrum of EOG independent components. (b) Topography, a colored image of a collection of single-trial data sorted on an onset time, averaged waveform, and power spectrum of EMG independent components. (c) Grand averaged ERP waveforms before and after removal of EOG and EMG artifacts.

호원의 위치가 전반부를 중심으로 분포하여 눈 깜빡임 및 안구움직임에 의한 EOG 아티팩트에 기인하는 것으로 판단하였다. 마찬가지로 그림 4 (b)의 독립요소는 파형의 스펙트럼이 상대적으로 고주파 대역 (약 15 Hz 이상)을 중심으로 분포하며 신호원의 위치가 측두엽 근처를 중심으로 분포하는 것으로부터 측두근육 (temporal muscle)의 활동으로 인한 EMG 아티팩트에 해당하는 독립요소로 판단하였다. 이러한 EOG 및 EMG 아티팩트에 해당하는 독립요소들은 모든 피험자에서 공통으로 발견할 수 있었다. 그림 4의 (c)는 EOG 및 EMG 아티팩트를 독립요소 제거에 의하여 제거한 후의 평균 ERP 파형을 도시하고 있다. 아티팩트 제거 이전과 비교하였을 때 전두부에 위치한 전극 Fz에서 안전도의 영향으로 상승되었던 전위가 EOG에 해당하는 독립요소 제거 후 감소된 것을 확인할 수 있었다. 그밖에 근전도의 영향에 의한 고주파 성분은 근전도에 해당하는 독립요소 제거 후 크게 감소함을 확인할 수 있다.

그림 3에 나타난 평균 ERP 파형의 시간적, 공간적 패턴을 GFP와 topography에 기반하여 분석함으로써 중요한 ERP 요소파형으로 5개의 극점 (peak)을 찾을 수 있었다. P1은 110 ~ 150 ms에 occipital 영역에서, N1은 약 160 ~ 180 ms에 temporal 영역에서, P2는 약 180 ~ 220 ms에 central 영역에서, N2는 약 240 ~ 260 ms에 central 영역에서, P300은 약 300 ~ 500 ms에 frontal, central, parietal 영역에서 관찰되었다.

초기 시각자극처리를 나타내는 첫 번째 요소 P1과 두 번째 요소 N1은 약 130 ms와 170 ms에서 각각 후두부와 temporal 영역을 중심으로 관찰할 수 있었다. 작업난이도간 비교는 요소 P1의 경우 전극 O1과 O2, 요소 N1의 경우 전극 T7과 T8에서의 평균 크기를 사용하였다. 목표자극에 대한 작업난이도에 따라 P1 및 N1을 비교한 결과 유의미한 차이가 없었다 ($p > 0.05$).

후기 자극 지각처리과정 및 반응과정을 나타내는 세 번째 요소 P2는 약 200 ms에 frontal과 central 영역에서 관찰되었고 네 번째 요소 N2는 약 250 ms에 central 영역에서 관찰되었다. 작업난이도간 비교는 전극 Cz의 평균 크기를 사용하였다. 요소 P2는 난이도가 낮을 때보다 높을 때 전극 Cz에서 유의미하게 컸다 ($t = 5.078$, $p < 0.001$). 요소 N2는 작업난이도에 따른 유의미한 차이가 없었다 ($t = -0.700$, $p > 0.495$).

자극범주 판별 및 인지과정을 나타내는 다섯 번째 요소 P300은 약 380 ms에 강하게 frontal, central, parietal 영역의 중앙을 중심으로 넓게 관찰되었다. 작업난이도간 P300 크기 비교는 전극 Fz, Cz, Pz에서의 각 평균크기를 사용하여 수행되었다. P300의 크기는 작업난이도가 쉬울 때가 어려울 때보다 유의미하게 컸다 (Fz: $t = 2.40$, $p < 0.033$, Cz: $t = 3.21$, $p < 0.007$, Pz: $t = 3.55$, $p < 0.004$). 또한, 반복 측정 분산분석으로 전극간 P300의 크기 차이를 비교하면 작업난이도가 쉬울 때에서 central과 parietal 전극에 비해 frontal 전극이 유의미하게 작았으나 ($F(16, 48) = 3.731$, $p < 0.048$), 작업난이도가 어려울 때에는 전극간 차이가 관찰되지 않았다 ($F(16, 48) = 2.277$, $p > 0.164$). 작업난이도에 따른 P300의 발생시

표 1. P2와 P300에 해당하는 독립요소 (IC_P2, IC_P300)의 수 (개인별 분석)

Table 1. The number of independent components that correspond to P2 and P300 (individual analysis).

| ICs | Task condition | Subject# | | | | | | | | | | | | | | | | | Total (EA) |
|---------|----------------|----------|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------------|
| | | #1 | #2 | #3 | #4 | #5 | #6 | #7 | #8 | #9 | #10 | #11 | #12 | #13 | #14 | #15 | #16 | #17 | |
| IC_P2 | Easy task | 1 | 1 | 2 | 3 | 2 | 2 | 2 | 4 | 1 | 3 | 3 | 2 | 5 | 3 | 4 | 2 | 2 | 42 |
| | Difficult task | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 4 | 2 | 3 | 2 | 2 | 3 | 1 | 3 | 2 | 4 | 3 | 2 | 39 |
| IC_P300 | Easy task | 3 | 3 | 1 | 6 | 4 | 3 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 3 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 62 |
| | Difficult task | 1 | 3 | 3 | 7 | 6 | 6 | 5 | 4 | 1 | 3 | 2 | 3 | 5 | 5 | 3 | 6 | 4 | 67 |

간을 통계분석한 결과 전극 Pz에서 작업이 쉬울 때 보다 어려울 때 유의미하게 발생시간이 길었다(Fz: $t=-1.81, p<0.091$, Cz: $t=-1.90, p<0.077$, Pz: $t=-3.36, p<0.004$).

ICA을 이용하여 작업난이도에 따라 유의미한 차이를 보였던 ERP 요소 P2, P300에 해당하는 독립요소들을 개인별로 topography와 시간적 변화 특성에 기반하여 선정하였다. 표 1에 개인별로 선정된 P2와 P300에 해당하는 독립요소의 수가 제시되어 있다. P2와 P300에 해당하는 주요 독립요소는 모든 피험자에서 관찰되었으며 평균적으로 각각 3.6개 및 3.8개가 관찰되었다. 전체 1037개의 독립요소들 중에서 P2에 해당하는 독립요소는 쉬운 작업 및 어려운 작업에 대하여 각각 42, 39개였으며 P300에 해당하는 독립요소는 각각 62, 67개로 작업난이도에 따라 큰 차이를 보이지 않았다. 단일시행 ERP로부터 P2 및 P300 성분들을 추출하였고 피험자별로 난이도에 따른 차이가 발생하는지를 통계분석으로 관찰하였다. P2에 해당하는 독립요소들을 전극으로 투영시킨 경우에

는 매 단일시행 파형의 180 ~ 220 ms 구간마다 얻어진 평균값을 사용하였으며, P300에 해당하는 독립요소들을 전극으로 투영시킨 경우에는 개개의 단일시행 파형의 300 ~ 500 ms 구간에서의 평균값을 사용하였다.

표 2는 각 피험자별로 단일시행 ERP로부터 추출된 P2, P300 성분을 작업난이도에 따라 비교한 결과이다. P2에 해당하는 독립요소가 180 ~ 220 ms에 두피면에 반영된 크기를 비교하였을 때 17명 중 9명의 피험자들에게서 평균 ERP 분석결과와 일치하는 난이도 증가에 따른 크기의 증가가 관찰되었다. 이 중 통계적으로 유의미한 증가를 보이는 피험자의 비율은 전극 Cz 및 Pz에서 55.6% (9명 중 5명)이었다. P300에 해당하는 독립요소들의 경우 두피면으로 투영시킨 결과를 300 ~ 500 ms에서 비교한 결과 거의 모든 피험자들로부터 (Pz: 17명 중 15명, Cz: 17명 중 14명) 난이도 증가에 따른 크기 감소가 관찰되었다. 이 중 통계적으로 유의미한 크기 감소를 보인 피험자는 전체 피험자 중 Cz에서 64.3% (14명 중

표 2. P2와 P300에 해당하는 독립요소 (IC_P2, IC_P300) 크기 통계분석 (t-test) 결과 (개인별 분석, $t>0$: 쉬운 작업일 때 더 큰 것, $t<0$: 어려운 작업일 때 더 큰 것, 굵은 글씨체: $p < 0.05$).

Table 2. Statistical analysis of independent components accounting for P2 and P300 (individual analysis, $t>0$: larger for easy task than for difficult task, $t<0$: larger for difficult than for easy task, bold letter: $p < 0.05$).

| ICs_P2 | | | | | | | |
|----------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|
| Elect. | Fz | | Cz | | Pz | | T-test |
| | t | p | t | p | t | p | |
| Subject# | | | | | | | |
| #1 | 2.355 | 0.022 | 2.389 | 0.021 | 2.396 | 0.020 | |
| #2 | -0.472 | 0.638 | -0.515 | 0.607 | -0.209 | 0.835 | |
| #3 | 0.483 | 0.630 | 0.606 | 0.546 | 0.697 | 0.488 | |
| #4 | -1.872 | 0.064 | -0.573 | 0.568 | 1.137 | 0.258 | |
| #5 | 0.447 | 0.656 | -0.475 | 0.636 | -0.499 | 0.619 | |
| #6 | -4.537 | 0.000 | -4.137 | 0.000 | -3.527 | 0.001 | |
| #7 | -4.166 | 0.000 | -3.047 | 0.003 | -3.714 | 0.000 | |
| #8 | -0.264 | 0.792 | -0.004 | 0.997 | 0.318 | 0.751 | |
| #9 | 1.133 | 0.261 | 1.008 | 0.317 | 0.130 | 0.897 | |
| #10 | -1.654 | 0.101 | 2.169 | 0.032 | 3.970 | 0.000 | |
| #11 | -3.651 | 0.000 | -3.505 | 0.001 | -3.449 | 0.001 | |
| #12 | 1.526 | 0.130 | 3.161 | 0.002 | -0.590 | 0.556 | |
| #13 | 1.280 | 0.203 | 1.245 | 0.216 | 1.184 | 0.239 | |
| #14 | 0.379 | 0.706 | -1.024 | 0.308 | -2.717 | 0.008 | |
| #15 | -1.701 | 0.092 | -2.315 | 0.023 | -0.674 | 0.502 | |
| #16 | -3.219 | 0.002 | -3.309 | 0.001 | -3.014 | 0.003 | |
| #17 | 1.280 | 0.203 | 1.526 | 0.130 | 0.534 | 0.595 | |

| ICs_P300 | | | | | | | |
|----------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|
| Elect. | Fz | | Cz | | Pz | | T-test |
| | t | p | t | p | t | p | |
| Subject# | | | | | | | |
| #1 | 1.927 | 0.057 | 1.951 | 0.050 | 0.967 | 0.048 | |
| #2 | -2.906 | 0.004 | -3.505 | 0.001 | -3.413 | 0.001 | |
| #3 | 3.749 | 0.000 | 4.355 | 0.000 | 4.592 | 0.000 | |
| #4 | 0.313 | 0.755 | 3.908 | 0.000 | 4.529 | 0.000 | |
| #5 | 0.969 | 0.335 | 0.952 | 0.343 | 0.828 | 0.410 | |
| #6 | 9.913 | 0.000 | 9.273 | 0.000 | 9.582 | 0.000 | |
| #7 | 1.835 | 0.069 | 3.191 | 0.002 | 2.579 | 0.011 | |
| #8 | 0.952 | 0.343 | 0.820 | 0.414 | 1.480 | 0.142 | |
| #9 | 0.586 | 0.560 | 0.188 | 0.852 | -0.263 | 0.794 | |
| #10 | -0.715 | 0.476 | 4.397 | 0.000 | 8.582 | 0.000 | |
| #11 | 1.190 | 0.237 | 1.766 | 0.080 | 2.599 | 0.011 | |
| #12 | 0.227 | 0.821 | 2.497 | 0.014 | 3.125 | 0.002 | |
| #13 | -4.397 | 0.000 | -3.040 | 0.003 | -2.363 | 0.020 | |
| #14 | -1.560 | 0.122 | -0.166 | 0.869 | 0.051 | 0.960 | |
| #15 | 4.705 | 0.000 | 4.798 | 0.000 | 5.155 | 0.000 | |
| #16 | 15.562 | 0.000 | 19.240 | 0.000 | 21.805 | 0.000 | |
| #17 | 3.513 | 0.001 | 1.821 | 0.071 | -0.398 | 0.692 | |

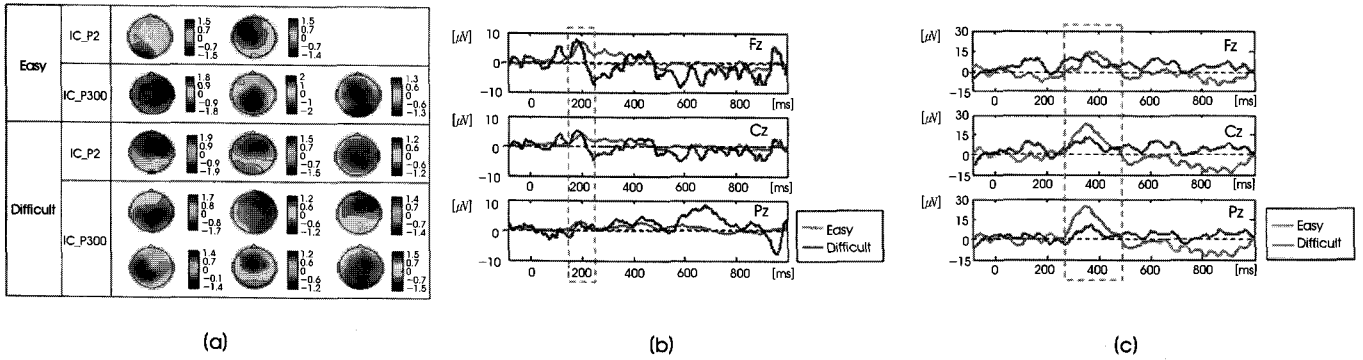


그림 5. 16번째 피험자에 대한 P2 및 P300의 신호원에 해당하는 독립요소들의 작업난이도에 따른 비교. (a) P2 및 P300에 해당하는 독립요소들의 topography. (b) P2에 해당하는 독립요소들의 Fz, Cz, Pz로의 투영결과. (c) P300에 해당하는 독립요소들의 Fz, Cz, Pz로의 투영결과.

Fig. 5. Independent components accounting for P2 and P300 were compared between two task difficulties (Subject 16). (a) Topography of P2 and P300 independent components for easy and difficult task. (b) Amplitudes of P2 independent components projected onto the scalp electrodes Fz, Cz, Pz. (c) Amplitudes of P300 independent components projected onto the scalp electrodes Fz, Cz, Pz.

9명), Pz에서 66.7% (15명 중 10명)이었다.

그림 5 (a)는 16번째 피험자에 대한 P2 및 P300의 신호원에 해당하는 독립요소들의 topography이다. 그림 5 (b)는 P2에 해당하는 독립요소들을 Fz, Cz, Pz로 투영시킨 결과를 쉬운 작업과 어려운 작업에 대해 비교하여 나타낸 그림이다. 이 피험자의 경우 쉬운 작업의 경우 2개, 어려운 작업의 경우 3개의 독립요소들을 전극 위로 투영시켰을 때 단일시행 파형의 임의의 한 구간에서 180 ~ 220 ms에 양극성을 관찰할 수 있었다. 그림 5 (c)는 동일한 피험자에 대하여 P300에 해당하는 독립요소들을 그림 5 (b)와 동일한 방법으로 나타낸 그림이다. 쉬운 작업의 경우 3개, 어려운 작업의 경우 6개의 독립요소들을 전극 위로 투영시켰을 때 단일시행 파형의 임의의 한 구간에서 280 ~ 500 ms에 강한 양극성을 보이며 작업난이도간 차이도 관찰할 수 있었다.

그림 6은 μ 리듬에 해당하는 독립요소들이다. 단일 피험자마다 난이도별로 찾아진 독립요소들의 단일시행 파형은 반응시간 400 ~ 500 ms에 알파파가 감소하거나 차단되는 경향을 보였으며 파워 스펙트럼 크기는 10 Hz 대역에서 차이가 없었다. μ 리듬에 해당되

는 독립요소들이 관찰된 피험자는 17명 중 13명이었다. μ 리듬에 해당되는 것으로 판단된 독립요소의 수는 쉬운 작업 및 어려운 작업에 대하여 각각 31, 32개로 작업난이도별 개수의 차이는 거의 없었다.

V. 고찰

작업이 어려울 때는 쉬울 때보다 목표자극에 대한 반응시간이 유의하게 더 길었고 오답률도 더 컸다. 이는 시각자극을 이용하여 oddball 작업을 수행할 때 작업난이도의 차이를 둔 선행연구 결과들과 일치한다[2,6-9].

평균 ERP에서 발견된 극점 중 P1, N1과 N2는 작업난이도가 쉬울 때와 어려울 때 유의미한 차이를 보이지 않았으며 유의미한 차이를 보인 극점들은 P2와 P300이었다. 작업난이도에 따라 차이를 보인 첫 번째 요소 P2는 frontal, central 영역에서 약 200 ms에 양극성을 띄며, 난이도가 쉬울 때 보다 어려울 때 유의미하게 컸다. 선행연구에 의하면 oddball 작업 시 목표자극이 제시되었을 때 암

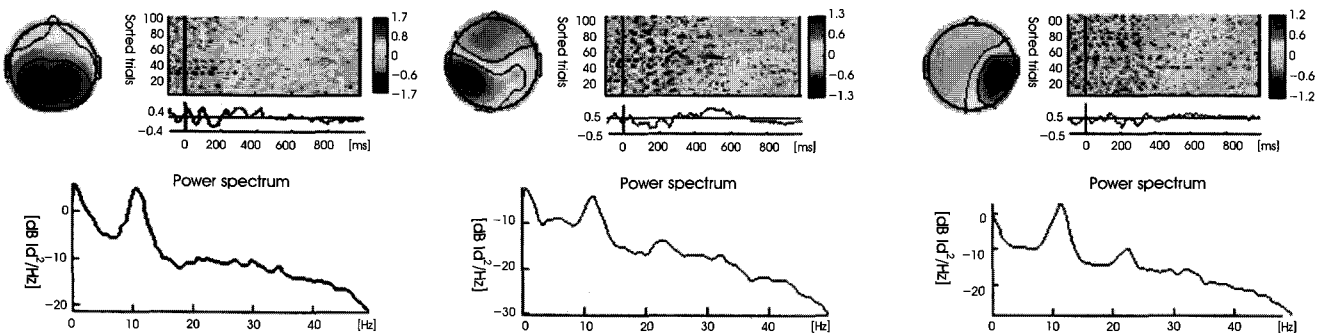


그림 6. μ 리듬에 해당하는 독립요소들의 topography, 자극제시 시점을 기준으로 배열된 단일시행 파형 및 평균파형 및 파워 스펙트럼.

Fig. 6. Spatiotemporal activation patterns and power spectra of the independent components corresponding to μ rhythm

목적으로 제시 수를 셈하는 것보다는 키를 누름으로써 행동반응 보일 경우에 P2의 크기가 더 컸던 결과로부터 P2가 제시된 자극종류를 평가하여 반응을 보이는 작용과 관련 있다고 하였다. 또 다른 연구에서는 목표자극보다 빈번하게 보여주는 표준자극에 대해 P2의 크기가 컸으며, 이는 P2가 인지작용보다는 지각작용을 반영하는 것이라 하였다[17,18]. 이러한 선행 결과들로부터 작업난이도가 높을 때 P2가 큰 것은 표준자극과 행동반응을 보여야 하는 목표 자극의 구별이 어려울수록 지각정보를 파악하는 작용이 강화되었기 때문으로 추정된다.

P300은 frontal, central, parietal 영역에서 약 400 ms에 강한 양극성을 띄며 작업난이도가 높을 때 크기가 감소하였으며 발생시간은 증가하였다. 이는 작업난이도를 조절하여 oddball 작업을 결과를 관찰한 선행연구결과들과 일치한다[6-8]. 작업난이도가 커지면 표준자극으로부터 목표자극을 분별하기 어려워지며 자극종류 식별에 대한 집중도가 커지고 그에 따라 기억회상작용의 약화된다고 한다[5]. 또한, 작업난이도가 커질수록 자극을 판별하는 노력의 정도가 커져 목표자극에 속하는지 또는 특별한 의미적 범주에 속하는지를 결정하는데 방해를 받고 처리과정 시스템에서 정보 이동의 구조와 내용이 변형되는 것으로 추정된다고 한다[5]. 따라서, 표준자극과 목표자극의 크기차이가 작아져 자극종류를 판별하는데 더 많은 노력이 들기 때문에 약화된 주의집중력 및 기억회상작용이 P300의 크기 감소와 발생시간 지연과 관련된 것으로 판단된다.

ICA 알고리즘을 이용하여 개인별로 평균을 취하지 않은 단일시행 ERP 파형들을 독립요소들로 분리시킨 후 개개의 단일시행들의 시간에 따른 파형의 형태와 크기, 두피면의 분포 및 주파수 영역에서의 크기 등 작업사건과 관련된 뇌 활성화를 관찰할 수 있었다. 개인별로 ERP 요소 P2와 P300의 신호원으로 판단되는 독립요소들을 두피면 전극으로 투영시킨 후 작업난이도간 차이를 통계적으로 분석하였다. 규명된 주요 독립요소들을 두피면 전극으로 투영시켰을 때 전극에 반영된 크기는 독립요소 개수보다는 독립요소 활성 크기에 의해 결정되기 때문에 독립요소 판별기준에 부합되면 개수에 제한을 두지 않았다. 그 결과 전극 Pz로 P2의 신호원으로 판단되는 독립요소들을 투영시켰을 때 상당수의 피험자에게서 평균 ERP 분석에서와 마찬가지로 독립요소의 크기가 작업이 쉬울 때보다 어려울 때 증가하였으며 이 중 과반수에게서 통계적으로 유의미한 차이를 확인할 수 있었다. P300의 신호원에 해당하는 독립요소에 대해서는 대부분의 피험자들에게서 작업난이도 증가에 따른 크기 감소가 관찰되었으며 이 중 상당수가 통계적으로도 의미 있는 차이에 해당하였다. 이는 작업난이도에 따른 반응의 개인차가 있으며 지각기능을 반영하는 P2에 해당하는 독립요소보다는 인지기능 및 기억회상작용과 관련된 P300에 해당하는 독립요소의 단일시행 파형이 작업난이도에 따른 뇌 활성화의 차이를 더 잘 반영한다고 할 수 있다.

규명된 독립요소 중에는 평균 ERP 파형에서는 관찰할 수 없었던 μ 리듬에 해당하는 요소를 관찰할 수 있었다. μ 리듬은 8 ~ 13

Hz 정도의 주파수 범위에서 파워 스펙트럼이 크며 감각운동피질에서 관찰되나 움직임을 계획하거나 실제로 움직일 때에는 억제되는 것으로 알려져 있으며, 이는 보거나 들은 지각작용을 행동반응으로 연결시키는 거울뉴런(mirror neuron)의 작용에 따른 운동 및 체성감각 영역의 반응을 반영하는 것이라고 알려져 있다[19]. 작업난이도별로 비교했을 때 μ 리듬에 해당하는 독립요소들은 모두 평균 반응시간 400 ~ 500 ms에 약 10 Hz 대역 리듬의 크기가 줄어들거나 억제되었고 파워 스펙트럼의 크기 차이가 없었다. 이로써, 행동반응을 하기 위한 과정 및 작업은 작업난이도와 무관하게 비슷한 정도로 발생되었음을 알 수 있다.

P300에 해당하는 독립요소의 경우에는 300 ~ 500 ms 구간의 파형 크기가 일반적으로 작업난이도가 어려울 때 작아지는 성향을 보였다. 단일피험자 내 P300 독립요소의 단일시행 파형이 개개의 단일시행마다 크기가 일정치는 않지만, 전반적으로 작업난이도의 영향이 단일시행 파형에 반영된 것으로 판단된다. 일반적으로 P300은 인지 및 기억작용, 주의집중력 등을 가름하는 척도로 여겨지며 임상적으로 치매환자의 뇌기능 진단 또는 약물 상태 반응 등 환자를 평가하거나 치료 효과를 관찰하는데 많이 사용된다고 한다[2,3]. 따라서, oddball 작업으로 얻은 단일시행 ERP 파형을 ICA 알고리즘을 이용하여 P300에 해당하는 독립요소 분석을 통한 ERP 분석을 수행할 경우 개인별 뇌기능 파악이 중요한 임상적 응용에 있어 유용할 것으로 생각된다.

VI. 결론

본 연구에서는 표준자극과 목표자극의 크기차이를 조절하여 난이도가 다른 oddball 작업을 수행할 때 뇌 활성화를 ERP 요소분석과 ICA를 이용하여 관찰할 수 있었다. 평균 ERP 요소 중 P2는 작업이 쉬울 때보다 어려울 때 유의미하게 크기가 컸으며 요소 P300은 작업이 쉬울 때 유의미한 크기가 컸다. ICA 알고리즘을 이용하여 규명된 독립요소 중 P2와 P300에 해당하는 신호원의 크기를 개인별로 작업난이도간 차이를 단일시행 파형 크기로 비교하였을 때 P300에 해당하는 독립요소의 경우 작업난이도가 낮을수록 크기가 유의미하게 크게 나타난 피험자수가 과반수 이상이었다. Oddball 작업 수행 시 개인별로 작업수행 능력을 평가하는데 있어 ICA를 이용하여 얻은 P300 독립요소의 단일시행 파형을 활용한다면 유용할 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] J. Polich, The Scripps Research Institute, CA, USA, "Neurophysiology of P3a and P3b: A theoretical overview," *Kjellberg Press*, 2004, pp.15-32.
- [2] J. Polich, J. Corey-Bloom, "Alzheimer's disease and P300: Review and evaluation of task and modality," *Curr. Alzheimer. Res.*, vol. 2, no. 3, pp. 515-525, 2005.
- [3] J. Polich, "Clinical application of the P300 event-related brain

- potential," *Phys. Med. Rehabil. Clin. N. Am.*, vol. 15, no. 1, pp. 133-161, 2004.
- [4] J. Polich, J.E. Alexander, L.O. Bauer, S. Kuperman, S. Morzorati, S.J. O'Connor, B. Porjesz, J. Rohrbaugh and H. Begleiter, "P300 topography of amplitude/latency correlations," *Brain Topogr.*, vol. 9, no. 4, pp. 275-282, 1997.
- [5] A. Kok, "On the utility of P3 amplitude as a measure of processing capacity," *Psychophysiology.*, vol. 38, no. 3, pp. 557-577, 2001.
- [6] R. Sawaki, J. Katayama, "Difficulty of discrimination modulates attentional capture for deviant information," *Psychophysiology.*, vol. 44, no. 3, pp. 374-382, 2007.
- [7] G.F. Hagen, J.R. Gatherwright, B.A. Lopez and J. Polich, "P3a from visual stimuli: Task difficulty effects," *Int. J. Psychophysiol.*, vol. 59, no. 1, pp. 8-14, 2006.
- [8] J. Polich, M.D. Comerchero, "P3a from visual stimuli: typicality, task, and topography," *Brain Topogr.*, vol. 15, no. 3, pp. 141-152, 2003.
- [9] J. Polich, L.D. Hoffman, "Alzheimer's disease and P300: evaluation of modality and task difficulty," *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol. Suppl.*, vol. 1998, pp. 527-536, 1998.
- [10] T-P. Jung, S. Makeig, M. Westerfield, J. Townsend, E. Courchesne and T.J. Sejnowski, "Analysis and visualization of single-trial Event-related potentials," *Hum. Brain Mapp.*, vol. 14, no. 3, pp. 166-185, 2001.
- [11] T.-P. Jung, S. Makeig, C. Humphries, T.-W. Lee, M.J. McKeown, V. Iragui and T.J. Sejnowski, "Removing electroencephalographic artifacts by blind source separation," *Psychophysiology.*, vol. 37, no. 2, pp. 163-78, 2000.
- [12] S. Debener, S. Makeig, A. Delorme and A.K. Engel, "What is novel in the novelty oddball paradigm? Functional significance of the novelty P3 event-related potential as revealed by independent component analysis," *Brain Res. Cogn. Brain Res.*, vol. 22, no. 3, pp. 309-321, 2005.
- [13] S. Makeig, T.-P. Jung, A.J. Bell, D. Ghahremani and T.J. Sejnowski, "Blind separation of auditory event-related brain responses into independent components," *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.*, vol. 94, no. 20, pp. 10979-10984, 1997.
- [14] T.-W. Lee, M. Girolami, A.J. Bell and T.J. Sejnowski, "A unifying information-theoretic framework for independent component analysis," *Comput. Math. Appl.*, vol. 39, no. 11, pp. 1-21, 2000.
- [15] V. Jurcak, D. Tsuzuki, I. Dan, "10/20, 10/10, and 10/5 systems revisited: Their validity as relative head-surface-based positioning systems," *NeuroImage.*, vol. 34, no. 15, pp. 1600-1611, 2007.
- [16] T.-W. Picton, S. Bentin, P. Berg, E. Donchin, S.A. Hillyard, J.R. Johnson, G.A. Miller, W. Ritter, D.S. Ruchkin, M.D. Rugg and M.J. Taylor, "Guidelines for using human event-related potentials to study cognition: Recording standards and publication criteria," *Psychophysiology.*, vol. 37, no. 2, pp. 127-152, 2000.
- [17] F.P. Geoffrey, "An ERP index of task relevance evaluation of visual stimuli," *Brain Cogn.*, vol. 56, no. 1, pp. 5-13, 2004.
- [18] J. Polich, J.E. Alexander, L.O. Bauer, S. Kuperman, S. Morzorati, S.J. O'Connor, B. Porjesz, J. Rohrbaugh and H. Begleiter, "P300 topography of amplitude/latency correlations," *Brain Topogr.*, vol. 9, no. 4, pp. 275-282, 1997.
- [19] J.A. Pineda, "The functional significance of μ rhythms: Translating "seeing" and "hearing" into "doing", "*Brain Res. Brain Res. Rev.*, vol. 50, no. 3, pp. 57-68, 2005.