

## EEG 생체신호 기반 3D 시각피로 측정방법에 대한 타당화 연구\*

Validity examination of the measurement of 3D visual fatigue using EEG

이형철\*\*† · 문경애\*\*\*

Hyung-Chul O. Li\*\*† · Kyung-Ae Moon\*\*\*

광운대학교 산업심리학과\*\*

Department of Industrial Psychology, Kwangwoon University\*\*

한국전자통신연구원\*\*\*

Electronics and Telecommunication Research Institute\*\*\*

### Abstract

Recent development of 3D technologies made it possible that observers perceive 3D depth from two dimensional images. Despite this kind of technological development, when observers watch 3D display they experience 3D visual fatigue that they do not usually experience in real life. It is critical to measure visual fatigue in order to overcome the problem of 3D visual fatigue. The purpose of the present study was to develop a protocol to measure 3D visual fatigue based on an EEG signal and to examine its validity. The first experiment explored the possible ERP components that reflected visual fatigue in 2D and 3D conditions. The second experiment examined whether the feature of the component found in the first experiment was affected by the amount of binocular disparity. Both in Cz and Pz channels, the peak amplitude of P3 component was much lower in 3D rather than in 2D conditions, and it decreased as the amount of binocular disparity increased. The subjective 3D visual fatigue also increased with the amount of binocular disparity. These results imply that the peak amplitude of P3 component at Cz and Pz channels can be used as an index of 3D visual fatigue.

**Keywords :** 3D visual fatigue, biological signal, measurement, validity examination

### 요약

최근의 디스플레이 기술은 2차원 디스플레이에 제시된 영상으로부터 3차원 깊이감을 지각하는 것을 가능하게 하였다. 이러한 디스플레이와 콘텐츠 기술의 발전에도 불구하고, 사용자는 실생활에서 경험하지 않는 시각 피로의 문제를 경험하는데, 이 문제를 해결하기 위해서는 시각피로를 안정적이고 타당하게 측정하는 것이 필요하다. 본 연구의 목적은 EEG(Electroencephalography)신호에 기반한 시각피로 측정의 프로토콜을 개발하고 타당성을 검증하는 것이었다. ERP(Event related potential) 성분 중에서 시각피로를 반영하는 성분을 찾아내기 위해 2D 조건과 3D 조건에서 탐색적 실험을 수행하였고, 탐색적 실험에서 발견된 ERP 성분이 양안시차의 차이에 따라 상이한 특성을 보이는지 검증하기 위하여 확인적 실험을 수행하였다. 실험결과, Cz와 Pz 영역에서 P3 성분의 정점 강도가 2D 조건보다는 3D 조건에서 감소하였으며, 양안시차가 증가할수록 일관되게 P3 성분의

\* 본 연구는 2010년도 한국전자통신연구원진흥원의 연구비 지원과 2010년도 광운대학교 교내연구비 지원에 의하여 수행되었다.

† 교신저자 : 이형철(광운대학교 산업심리학과)

E-mail : hyung@kw.ac.kr

TEL : 02-940-5425

FAX : 02-941-5429

강도가 통계적으로 유의하게 감소하는 것을 확인하였다. 양안시차가 증가함에 따라서 주관적인 시각피로가 통계적으로 유의하게 증가함을 검증하였는데, 이 실험결과는 Cz와 Pz 영역에서의 P3 성분의 정점 강도가 3D 시각피로에 대한 인덱스로 사용할 수 있음을 시사한다.

**주제어 :** 3D 시각피로, 생체신호, 측정, 타당도 평가

## 1. 서론

3D 영화 또는 3D 방송은 인간의 시각기제가 이용하는 다양한 3차원 정보 중에서 2D 디스플레이가 제공하지 못하는 양안시차(binocular disparity)를 제공하여, 사용자가 실감 나는 입체감을 경험하도록 한다. 그런데 일상의 3D 환경에서 인간의 3차원 시각기제는 매우 원활하게 작동하여 특별한 문제를 유발하지 않지만, 3D 영화 또는 3D 방송을 시청할 때에는 개인차가 있기는 하지만 어지러움이나 두통 또는 안구통증과 같은 3D 시각피로(3D visual fatigue)를 경험한다(Lambooy, Ijsselsteijn, Fortuin, & Heynderickx, 2009)<sup>1)</sup>.

현재의 3D 디스플레이 구현방식이 지닌 구조적인 문제점은 인간의 시각기제가 일상의 3D 환경에서 거리 정보를 획득할 때 유용하게 사용하는 수렴(vergence)과 조절(accommodation) 정보가 3D 디스플레이에서 혼란스럽게 입력된다는 것인데, 이런 수렴-조절 불일치 정도는 화면에 제시되는 영상의 시차에 비례한다(Hoffman, Girshick, Akeley, & Banks, 2008). 시각피로의 문제를 해결하기 위해서는 시각피로를 객관적으로 정량화하여 측정하는 것이 필요하다.

주관적 시각피로를 측정하는 방법은 이미 개발된 것이 있는데(Kuze, J. and Ukai, 2008; 이형철, 2010), 특히 이 연구들에 의하면 시각피로가 하나의 요인이 아니라 다수의 하위요인으로 구성되었으며 하위요인별로 주관적인 시각피로를 측정하는 것이 가능하다. 주관적 시각피로 측정은 측정결과가 피험자의 주관이나 눈속임의 영향을 받을 수 있다는 단점이 있으나 매우 안정적이고 손쉽게 시각피로를 측정한다는 장점이 있다. 하지만 국내는 물론이고 국외에도 객관적으로 시각피로를 측정하는 방법은 매우 부족한 실정이다.

객관적 시각피로 측정방법은 몇 가지 제안된 것이 있으나, 경험적인 연구결과에 의하면 측정의 안정성(reliability)에 문제가 있다. 예를 들어, 시각피로가 증가할수록 조절지연시간이 증가한다는 연구결과가 있으나(Emoto, Niida, & Kkana, 2005), 시각피로와 조절지연시간 간의 상관성이 지속적으로 발견되지 않는다. 시각피로가 증가할수록 눈 깜빡임 횟수가 증가하고 동공의 크기가 작아진다는 연구결과가 있지만 이 연구결과 역시 실험 조건과 환경 그리고 과제의 영향을 받는다. ERP(Event related potential) 연구기법 중 아드볼 패러다임(oddball paradigm)을 변형한 3D 아드볼 패러다임(3D oddball paradigm)으로 3D 시각피로를 측정할 수 있다는 가능성이 제기되었다(Li, Kham, & Lee, 2008).

현재까지 안정적으로 시각피로를 측정할 수 있는 객관적인 시각피로 측정방법이 부족하고, 주관적인 시각피로 측정방법이 피험자의 주관이나 속임수의 영향을 받는다는 단점이 있음을 고려할 때 저렴한 비용으로 시각피로를 객관적으로 측정할 수 있는 방법의 개발이 지속적으로 필요하다. 본 연구의 목적은 상대적으로 저렴한 EEG(Electroencephalography)장비를 이용하여 시각피로를 객관적으로 측정할 수 있는 프로토콜을 개발하고 제안된 방법의 타당화 연구를 수행하는 것이다.

기존의 EEG를 이용한 시각피로 측정이 아드볼 패러다임을 이용하기 때문에 실시간으로 시각피로를 측정하기보다 시각피로 유발 후에 사후적으로 측정한다는 단점이 있었고, 특히 시각정보처리에서의 피로보다는 자극에 대한 반응단계에서의 지연시간을 측정하는 측면이 있다. 본 연구는 사전에 3D 자극을 시청할 필요가 없이 곧바로 3D 자극을 관찰하는 동안에 발생하는 시각피로를 실시간으로 측정할 수 있는 프로토콜을 개발하고자 하였다.

1) 3D 시각적 불편감과 이에 대한 측정방법 및 휴먼팩터 연구결과들을 개관한 최근의 논문이니, 관련 분야 연구에 대한 개관을 위해서는 이를 참고하기 바란다.

## 2. EEG 생체신호 기반 시각피로 측정 프로토콜 개발

### 2.1. 실험 1 : EEG 기반 시각피로 측정 프로토콜 구성을 위한 탐색적 연구

#### 2.1.1. 실험 장비 및 설치

##### 가. 실험 장비 및 제원

###### 1) 3D 디스플레이

3D 영상을 제시하기 위해 현대 아이티 46인치 편광식 3D 디스플레이를 사용하였다.

###### 2) EEG 시스템

피험자가 3D 영상을 시청하는 동안에 실시간으로 피험자의 뇌파(EEG)를 측정하였는데, 이때 사용된 시스템은 Brain Product 사의 32개 채널 EEG장비인 Brain Amp이었다(최대표집률(sampling frequency) 5000Hz).

##### 나. 실험 장비 설치

3D 디스플레이는 피험자의 눈높이와 디스플레이의 중앙 높이가 비슷하도록 설치하였다. 피험자는 실험 시작 전에 32개 채널 EEG 캡을 착용하였는데, 이때 EEG 전극과 두피의 저항(impedance level)은 5kΩ 미만이 되도록 하였다. 실험은 디스플레이에서 나오는 불빛 이외의 빛이 통제된 암실에서 시행되었다. 3D 디스플레이와 피험자와의 거리는 실험 조건에 따라서 62.5cm 또는 2m가 되도록 하였다.

#### 2.1.2. 실험 설계

##### 가. 실험 자극

시각도(visual angle)  $0.05^\circ \times 0.05^\circ (10\text{cm} \times 10\text{cm})$  크기의 사각형 자극이  $111.3\text{cd/m}^2$  밝기로 3D 디스플레이 중앙에 제시되었다. 1.6디오퍼터(diopter) 조건에서 자극의 양안시차는  $0.14^\circ$ (화면시차 28.5cm)이었고 배경화면의 밝기는  $59.8\text{cd/m}^2$ 이었다. 일반적인 3차원 공간 지각 상황에서 양안시차는 망막에 형성된 상의 시차를 시각도로 표현하는데 콘텐츠 제작자는 화면에서의 시차(화면시차)를 양안시차와 혼동하여 사용한다. 하지만 동일한 화면시차를 가진 콘텐츠일지라도 관찰 거리에 따라서 양안시차는 변화하므로 여기에서는 혼동

을 피하기 위하여 양안시차와 화면시차를 구분하여 사용하였다.

##### 나. 실험 조건

수렴-조절 불일치가 시각적 피로의 원인으로 알려졌고 수렴-조절 불일치가 클수록 시각적 피로가 클 것으로 기대되기에 자극의 수렴-조절 불일치 유발 요인을 조작하였다.

3D 조건과 비교하기 위하여 양안시차가 없고(이론적으로 수렴-조절 불일치가 없는 조건) 3D 안경을 착용하지 않은 조건, 양안시차는 없지만 3D 안경을 착용한 조건, 그리고 양안시차가 있고 3D 안경을 착용한 조건(이론적으로 수렴-조절 불일치가 존재하는 조건) 등 세 조건에 대하여 피험자의 반응을 측정하였다. 3D 안경을 착용하는 경우에 관찰거리(디스플레이-관찰자의 거리)는 2m로 고정하였고 3D 안경을 착용하지 않는 경우에 관찰거리는 62.5cm로 고정하였다.

세 가지 조건을 수렴-조절 불일치 측면에서 다시 구체화하면 다음과 같다. 1) 양안시차가 존재하지 않고 3D 안경을 착용한 경우에 자극은 관찰자로부터 2m 떨어진 곳에 나타나도록 하고 디스플레이-관찰자 거리도 2m 떨어진 곳에 위치시킴으로써(수렴거리와 조절거리 모두 디오퍼터로 환산할 경우, 0.5디오퍼터 조건) 이론적 수렴-조절 불일치가 0인 조건 : 0.5디오퍼터 조건, 2) 양안시차가 존재하고 3D 안경을 착용한 경우 자극-관찰자 거리)를 62.5cm(수렴거리 1.6디오퍼터), 디스플레이-관찰자 거리를 2m(조절거리 0.5디오퍼터)로 하여 수렴-조절 불일치가 1.1디오퍼터가 발생하는 조건 : 1.6디오퍼터 조건, 3) 양안시차가 존재하지 않고 3D 안경을 착용하지 않는 경우에 자극-관찰자 거리와 디스플레이-관찰자 거리를 모두 62.5cm로 고정하여(수렴·조절 거리 모두 0.5디오퍼터, 수렴-조절 불일치 0디오퍼터) 수렴-조절 불일치가 발생하지 않는 조건 : 통제조건. 이 세 가지 조건을 표로 구성하면 다음과 같다(Table 1 참조).

2) 자극이 3차원 공간에서 차지하는 깊이를 화면시차를 조작함으로써 디스플레이-관찰자 거리와 독립적으로 자극-관찰자 거리를 조작하는 것이 가능하다.

Table 1. Experimental conditions along with stimulus-observer distance and display-observer distance

| display-observer distance / stimulus-observer distance | 1.6D(62.5cm) 2D condition                         | 0.5D(2m) 3D condition                             |
|--|---|---|
| 0.5D(2m)   | impossible  | vergence-accommodation mismatch 0 (0.5D cond.)    |
| 1.6D(62.5cm)   | vergence-accommodation mismatch 0 (control cond.) | vergence-accommodation mismatch 1.1D (1.6D cond.) |

**다. 피험자**

양안시차를 이용하여 3D 자극을 보는 데 문제가 없는 15명이 실험에 참여하였다. 피험자의 평균 연령은 22.8세이었고 총 15명의 피험자 중에서 남자는 9명이고 여자는 6명이었다.

**라. 실험절차**

피험자는 실험에 자발적으로 참여하였으며 실험 도중에 언제든지 피험자가 원하면 실험을 중지할 수 있도록 하였다. 피험자는 실험참여 동의서를 작성한 후에 먼저 3D 자극을 정상적으로 볼 수 있는지 실험에 사용될 자극을 이용하여 검사받았다. 3D 자극을 정상적으로 보는 경우에만 실험에 참여하도록 하였다. 3D 자극을 정상적으로 보는 것이 확인되면 EEG를 측정하기 위해 32개 채널의 저항 수준(impedance level)이 5kΩ 미만이 되도록 전극을 피험자의 머리에 부착하였다. 전극 부착 위치는 전형적인 10-20 방법을 참조하였다.

EEG 전극 부착이 완료되면 피험자는 3D 안경 착용 조건(관찰거리 2m) 또는 3D 안경 미착용 조건(관찰거리 62.5cm) 중 하나의 조건을 할당받고 그 조건을 먼저 마친 후 나머지 조건에 대해 측정 받았다. 3D 안경 착용/미착용 조건은 피험자 간에 역균형화를 하여 가능한 순서효과를 상쇄하였다. 3D 안경 착용 조건의 경우, 대상자극이 관찰자로부터 62.5cm(1.6디오퍼)에 떨어져 제시되는 조건과 2m 떨어진 화면에 제시되는 조건(0.5디오퍼) 두 가지가 있는데, 이는 무선 적으로 제시되었다. 피험자는 세 조건 모두에 대해 각각 100회씩 측정 받아서 총 측정 횟수는 300회가 되었다.

실험이 시작되면 피험자는 화면을 응시하도록 요구

받았고 대상자극은 1초 동안 화면에 제시되었다 사라졌다. 피험자는 대상자극이 화면에 나타났다 사라지면 스페이스 바를 가능한 한 빨리 눌러서 반응할 것을 요구받았다. 자극과 자극 간 제시 간격은 10초를 유지하였다. 피험자가 졸지 않고 자극을 주시하고 있음을 확인하기 위해서, 피험자에게 대상자극이 나타났다 사라지면 스페이스 바를 가능한 한 빨리 눌러서 반응하도록 하였다. 또한 앞선 시행에서 유발된 시각 피로가 그 다음 시행으로 전이되는 것을 방지하기 위해서 자극 간 제시 간격을 10초로 유지하였다(Fig. 1 참조). 또한 한 실험 조건에서의 시각피로가 다음 실험 조건으로 누적되어 전이되는 것을 방지하기 위하여 실험 조건 간에는 10여 분의 휴식 시간을 주었다.

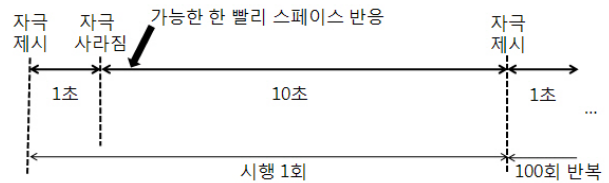


Figure 1. Experimental procedure

**2.1.3. 결과 및 해석**

화면에 제시된 자극에 대한 키보드 반응이 1초 이상 걸린 시행은 분석에서 제외하였으며, 동시에 데이터 제외비율이 10%를 넘는 피험자는 아예 그 피험자의 데이터 전체를 분석에서 제외하였다. 제외된 피험자의 수는 6명이었고, 분석에 사용된 피험자의 평균 연령은 23.7세이었고 총 9명의 피험자 중에서 남자가 6명이고 여자가 3명이었다. 분석에 사용된 피험자의 데이터 중에서 분석에서 제외된 데이터비율은 평균적으로 약 5%였다.

**가. 실험결과 : ERP 분석**

피험자별로 32개 채널 각각에 대하여 획득된 조건별 100회의 데이터에 대해, 분석에서 제외한 시행을 제거하고 나머지 시행에 대하여 조건별 평균 파형을 계산하였다. 피험자의 조건별 파형을 계산한 후에 전체 피험자에 대하여 조건별 전체 평균(grand average) 파형을 계산하였다.

EEG를 측정한 원자료에는 뇌가 아닌 다른 부위(source)에서 발생한 신호가 혼입될 수 있는데, 이런 잡음(artifact)은 뇌파 신호가 매우 미약하기 때문에 자

료에 큰 영향을 끼칠 수 있다. 따라서 혼입을 최소화하기 위한 각종 예방조치를 취하였으나, 전체 자료 중 일부가 오염되는 것은 일반적이다. 따라서 본 연구에서는 이런 잡음(artifact)을 제거하기 위하여 원자료의 신호 범위를  $-100 \sim 100\mu V$ 로 설정하고, 그 이상이나 그 이하의 자료는 잡음으로 처리하여 제거하는 정점-정점측정법(peak to peak measurement)을 사용하여 뇌파가 아닌 신호가 분석에 사용되는 것을 막았다. 또한 ERP신호가 아닌 다른 종류의 신호를 제거하기 위하여 60Hz 대역 필터(notch filter)와 80Hz 대역 저주파 통과 필터(low-pass filter)를 사용하여 예상할 수 있는 오류를 최소화하였다. 또한 ERP신호를 유발한 사건과 무관한 전체 뇌파의 오차를 제거하기 위하여 자극 제시(onset) 이전 200ms 범위의 신호를 이용하여 기저선 수정(baseline correction)을 실시하였다. 분석에 사용된 자료는 개별 피험자 신호에 대한 ERP 성분(component)의 정점(peak) 또는 지연시간(latency)을 측정하여 다음 각 각 정점 또는 지연시간을 평균하여 계산하였다.

세 가지 실험 조건 각각에 대한 피험자들의 전체 평균(grand average) 파형에서 시각적으로 조건 간 ERP성분(component) 차이가 발견되는 채널에 대하여 조건 간 차이가 통계적으로 유의한지 검증하였다.

모든 채널에 대하여 ERP분석을 수행하였는데, 이 중에서 특히 Cz 채널과 Pz 채널에서 N2 성분과 P3 성분

의 실험 조건 간 차이가 시각적으로 확인되었다. N2 파형의 강도가 2D 조건보다는 3D 조건에서 상대적으로 큰 경향을 보였다. 또한 P3 파형의 강도가 2D 조건보다는 3D 조건에서 상대적으로 낮았고, P3 파형의 정점이 나타나는 시간이 2D 조건보다는 3D 조건에서 지연되는 경향을 보였다. 이런 경향성이 통계적으로 유의한지 검증하기 위하여, Cz와 Pz 채널에서 세 조건의 N2와 P3 요인의 강도와 지연시간에 대한 개인별 평균을 계산하고 이를 이용하여 반복측정 변량분석을 실시하였다.

N2와 P3 요인의 강도 분석은 세 가지 방법을 이용하였는데, 첫째 각 요인에서의 정점의 크기를 이용하여 분석하고, 둘째 각 요인의 정점이 나타나는 지연시간을 이용하여 분석하였으며 셋째, 각 요인의 면적을 계산하여 분석에 이용하였다. 정점의 크기를 이용한 분석을 위해 우선 개인별 평균 파형에서 정점의 값을 추출하는 작업이 필요하였다. N2 성분의 정점을 추출하기 위하여 Pz와 Cz 모두 150ms부터 300ms 구간에서 가장 낮은 값을 찾아내었고, P3 성분의 정점을 추출하기 위하여 Pz와 Cz 모두 250ms에서 400ms 구간의 가장 높은 값을 찾아내었다. 정점의 지연시간을 분석하기 위해서 앞에서 찾아낸 개인별 평균의 정점이 발생한 지연시간을 계산하였다. 끝으로 정점 자체가 이웃한 성분(component)에 의해 이동하거나 누락될 수

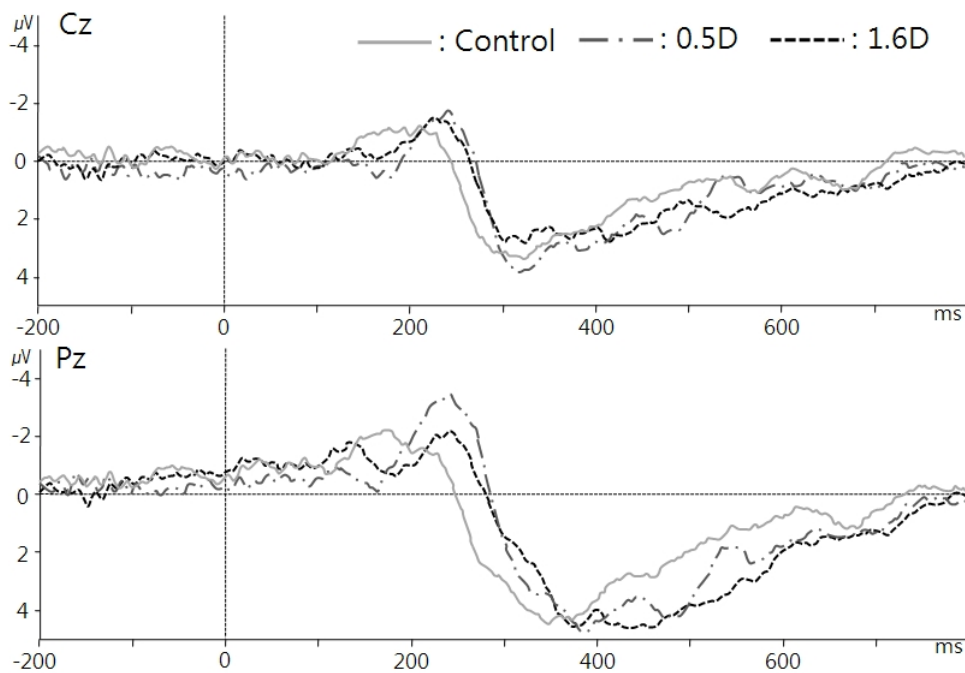


Figure 2. Grand average on Cz(top) and Pz(bottom) bold line : control cond., dotted line : 0.5D cond., thin line : 1.6D cond

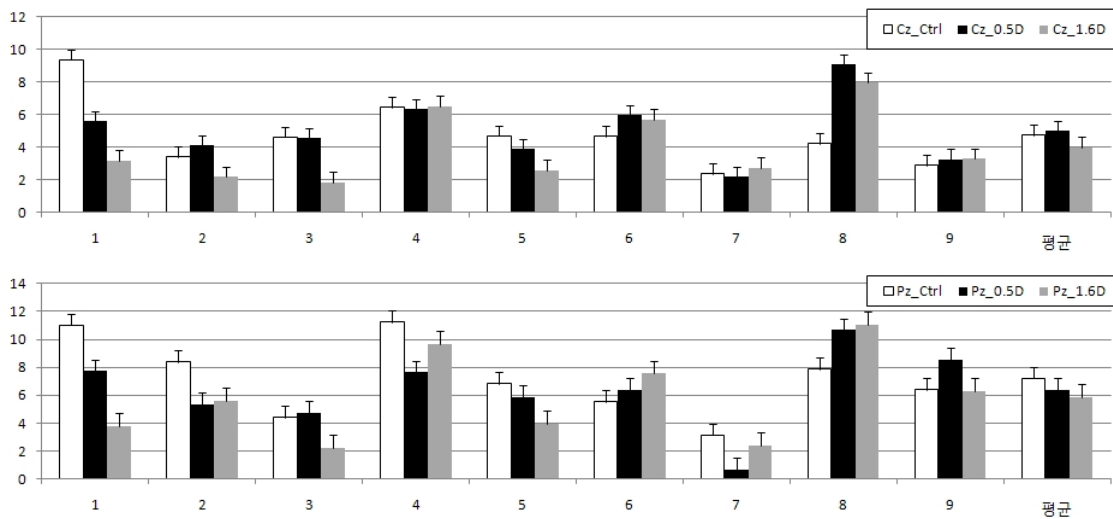


Figure 3. Peak analysis of P3 component on Cz(top) and Pz(bottom)(average in each condition for each 9 subjects and that of total subjects)

있기 때문에 정점의 면적을 분석하였다. N2와 P3 정점의 면적에 대한 분석을 위해서는 앞 단계에서 찾아낸 개인별 평균 정점의 표준편차를 계산하여 정점을 기준으로  $\pm 1$ 표준편차 단위의 면적을 계산하였다.

Cz와 Pz 채널에서의 N2 성분의 정점 강도에 대한 실험 조건 간 차이는 모두 통계적으로 유의하지 않았다. Cz 채널에서의 P3 성분의 정점 강도는 통제조건이나 0.5디오퍼 조건보다 1.6디오퍼 조건에서 더 작았는데, 실험 조건 간 차이는 통계적으로 유의하였다( $F(2,16) = 10.19, p = 0.007$ )(Fig. 3의 위 참조). Pz 채널에서의 P3 성분의 정점 강도는 통제조건보다 0.5디오퍼 조건에서 더 작았고 1.6디오퍼 조건에서는 더 작았는데, 이는 통계적으로 유의하였다( $F(2,16) = 10.03, p = 0.008$ )(Fig. 3의 아래 참조). Cz와 Pz 채널에서의 N2 성분의 정점 강도는 실험 조건 간 통계적으로 유의한 차이가 발견되지 않았지만, 정점 강도에 대한 면적 분석에서는 통계적으로 유의한 차이가 발견되었다. Cz 채널에서 0.5디오퍼 조건의 N2 성분의 정점강도 면적이 통제조건과 1.6디오퍼 조건의 N2 성분의 정점강도 면적보다 통계적으로 유의하게 컸으며( $F(2,16) = 8.19, p = 0.004$ ) Pz 채널에서 통제조건보다 0.5디오퍼 및 1.6 디오퍼 조건에서의 정점 강도 면적이 통계적으로 유의하게 컸다( $F(2,16) = 14.39, p = 0.003$ ). 또한 Cz 채널과 Pz 채널 모두에서 통제조건보다 0.5디오퍼와 1.6 디오퍼 조건에서의 지연시간이 통계적으로 더 유의미하게 느렸다(Cz 채널(Fig. 4 위 참조) :  $F(2,16) = 8.01, p = 0.004$ , Pz 채널(Fig. 4 아래 참조) :  $F(2,16) = 8.12, p =$

0.004).

Cz 채널에서의 0.5디오퍼 조건과 1.6디오퍼 조건의 P3 성분의 정점강도 면적이 통제조건의 P3 성분의 정점강도 면적보다 작았지만, 통계적으로 유의하지는 않았다(Fig. 5 위 참조). 하지만 Pz 채널에서의 0.5디오퍼 조건과 1.6디오퍼 조건의 P3 성분의 정점강도 면적은 통제조건의 P3 성분의 정점강도 면적보다 작았고 통계적으로 유의하였다( $F(2,16) = 17.76, p = 0.0001$ )(Fig. 5 아래 참조). Cz 채널과 Pz 채널 모두에서 P3 성분의 정점 지연시간은 통계적으로 유의한 차이가 발견되지 않았다.

#### 나. 결과 요약 및 해석

Cz와 Pz의 P3 성분은 정점의 강도 측면에서 세 가지 조건 간에 통계적으로 유의한 차이를 보였고, Cz와 Pz의 N2 요인은 지연시간 측면에서 세 가지 조건 간에 통계적으로 유의한 차이를 보였다. 이런 결과는 두 가지 방향으로 해석할 수 있는데, 첫째, N2와 P3 요인의 지연시간 또는 강도에서의 차이가 시각적 피로의 중요한 인덱스로 사용될 가능성이 있다. 둘째, N2와 P3 요인의 조건 간 차이가 세 가지 조건에서의 시각피로의 차이를 반영하기보다는 자극의 특성으로 인한 수렴 눈운동에서의 차이를 반영했을 가능성이 있다. 두 번째 해석은 부연설명이 필요하다. 실험 1에 사용된 실험자극은 세 조건에서 모두 상이한데 3D 안경 0.5디오퍼 조건보다 3D 1.6디오퍼 조건에서 조건 간 ERP 파형에서의 차이가 발생하는 이유는, 0.5디오퍼 조건

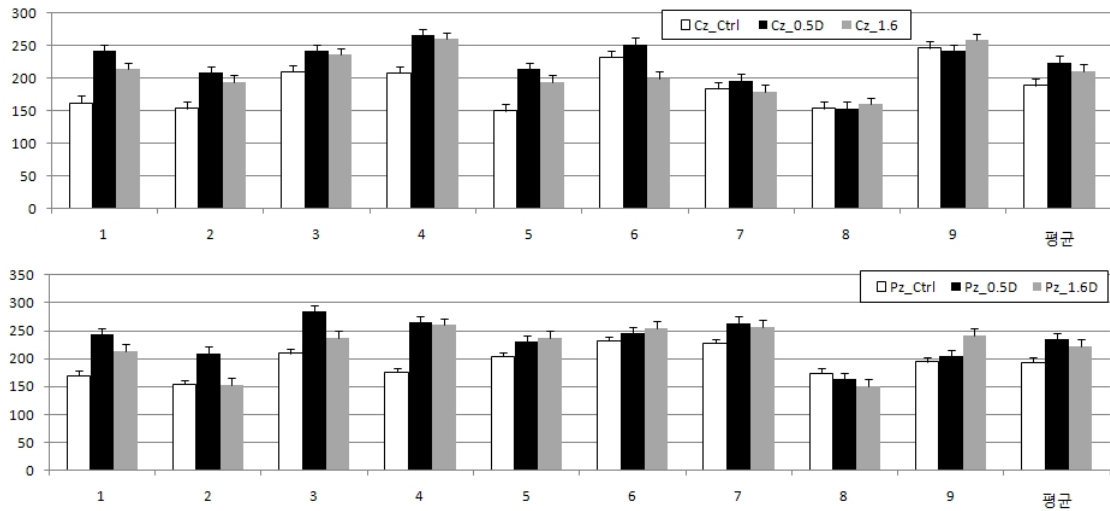


Figure 4. Peak delay analysis of N2 component on Cz(top) and Pz(bottom) (average in each condition for each 9 subjects and that of total subjects)

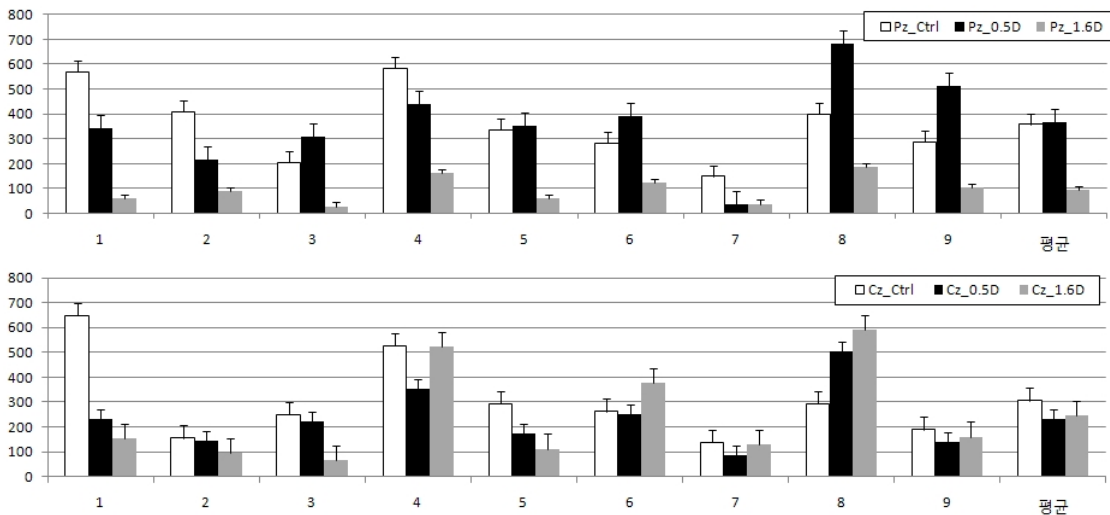


Figure 5. Area analysis of P3 component on Cz(top) and Pz(bottom) (average in each condition for each 9 subjects and that of total subjects)

에서는 수렴 눈운동이 필요 없고(2m 떨어진 곳에 위치한 화면을 응시하는 동안에 자극이 2m 떨어진 화면에 제시되기에), 1.6디오퍼 조건에서는 상대적으로 큰 수렴 눈운동이 요구되기 때문일 수 있다(2m 떨어진 곳에 위치한 화면을 응시하다가 관찰자로부터 62.5cm 떨어진 곳에 제시되는 자극을 응시해야 하기 때문에). 하지만 제한된 9명의 피험자 데이터가 사용되어 본 연구의 결과를 일반화하기에는 제한점이 있으며, 추가 연구가 필요하다.

상당한 양의 눈운동을 하려면 상이한 인지적인 자원이 필요할 수 있고 눈운동 계획 및 실행에 필요한

시간도 있을 수 있기 때문에, P3 성분의 강도에 차이가 발생하고 N2 성분의 정점이 나타나는 시간이 상대적으로 지연될 수 있다. 하지만 통제조건(안경을 착용하지 않고 62.5cm에 제시되는 자극을 관찰하는 조건)보다 0.5디오퍼 조건(안경을 착용하고 2m 떨어진 화면에 제시된 자극을 관찰하는 조건)에서 N2 성분의 정점이 나타나는 시간이 지연되는 것은 동일한 방식으로 설명하기 곤란하다. 왜냐하면 두 조건 모두에서 피험자는 화면을 응시하고 있다가 화면에 제시되는 자극을 보기에 수렴 눈운동이 전혀 필요하지 않기 때문이다. 두 조건 간에 두 가지 차이가 존재하는데, 첫

번째 차이는 3D 안경 착용 여부이고 두 번째 차이는 관찰거리이다. 관찰거리가 짧을 때 더 피곤할 수 있는데, 통제조건(2D 조건 : 관찰거리 65cm 조건)이 0.5디오퍼 조건(관찰거리 2m 조건)보다 관찰거리가 짧기 때문에, 아마도 통제조건보다 0.5디오퍼 조건에서 N2 성분의 정점이 나타나는 시간이 지연되는 것은 3D 안경 착용 여부 때문에 발생한 것이 아닐까 추측된다. 그러나 정확한 원인은 추가 연구가 필요하다.

**2.2. 실험 2 : EEG 기반 시각피로 측정  
프로토콜 구성을 위한 확인적 연구**

실험 1의 뇌파에 대한 ERP 분석에 의하면, 세 가지 실험 조건 사이에 Cz와 Pz 채널의 N2 성분과 P3 성분 지연시간과 강도 측면에서 통계적으로 유의한 결과가 나타났다. 실험 1의 문제점 중 한 가지는 세 조건에서의 N2와 P3 성분의 차이가 시각적 피로보다는 수렴 눈운동에서의 차이일 수 있다는 점이다. 실험 2는 이 해석에서의 문제점을 해결하기 위하여 수렴 눈운동의 차이가 발생하지 않도록 하였으며, 이런 실험 조건 사이에 수렴 눈운동에서의 차이가 발생하지 않는 조건에서 시각피로를 유발할 것으로 기대되는 양안시차(이론적으로 수렴-조절 불일치를 유발)의 조작에 따라 N2와 P3 성분에서 조건 사이에 유의한 차이가 발생하는지를 검증하였다.

**2.2.1. 실험 장비 및 설치**

**가. 실험 장비 및 제원**

- 1) 3D Display, EEG 시스템  
실험 1과 동일하였다.

**나. 실험 장비 설치**

실험 1과 동일하게 피험자는 실험 시작 전에 32채널 EEG 캡을 착용하였는데, 이때 EEG 전극과 두피의 저항은 5kΩ 미만이 되도록 하였다. 3D 디스플레이와 피험자와의 거리는 모든 실험 조건에서 2m가 되도록 동일하게 유지하였다.

**2.2.2. 실험 설계**

**가. 실험 자극**

0.05° × 0.05°(10cm × 10cm) 크기의 사각형 자극이

111.3cd/m<sup>2</sup> 밝기로 3D 디스플레이에 제시되었다. 자극의 양안시차는 0.7디오퍼 조건에서 0.03°(화면시차 5.1cm), 1.0디오퍼 조건에서 0.065°(화면시차 12.9cm), 1.6디오퍼 조건에서 0.14°(화면시차 28.5cm)이었고 배경화면의 밝기는 59.8cd/m<sup>2</sup>이었다.

**나. 실험 조건**

양안시차의 양에 따라 실험 조건을 세 가지로 구분하였다. 세 가지 조건을 수렴-조절 불일치 측면에서 다시 구체화하면 다음과 같다 : 1) 자극-관찰자 거리를 1.43m(수렴거리 0.7디오퍼), 디스플레이-관찰자 거리를 2m(조절거리 0.5디오퍼)로 하여 수렴-조절 불일치가 0.2디오퍼 발생하는 조건 2) 자극-관찰자 거리를 1m(수렴거리 1.0디오퍼), 디스플레이-관찰자 거리를 2m(조절거리 0.5디오퍼)로 하여 수렴-조절 불일치가 0.5디오퍼 발생하는 조건, 3) 자극-관찰자 거리를 62.5cm(수렴거리 1.6디오퍼), 디스플레이-관찰자 거리를 2m(조절거리 0.5디오퍼)로 하여 수렴-조절 불일치가 1.1디오퍼가 발생하는 조건. 이 세 가지 조건을 표로 구성하면 다음과 같다.

Table 2. Experimental conditions along with stimulus-observer distance and display-observer analysis

|                            |                           |                                      |
|----------------------------|---------------------------|--------------------------------------|
|                            | display-observer distance | 0.5D(2m) 3D condition                |
| stimulus-observer distance |                           |                                      |
|                            | 0.7D(1.43m)               | vergence-accommodation mismatch 0.2D |
|                            | 1.0D(1m)                  | vergence-accommodation mismatch 0.5D |
|                            | 1.6D(62.5cm)              | vergence-accommodation mismatch 1.1D |

**다. 피험자**

양안시차를 이용하여 3D 자극을 보는 데 문제가 없는 15명이 실험에 참여하였다.

**라. 실험절차**

실험절차는 실험 조건과 눈운동 통제를 제외하고 기본적으로 실험 1과 동일하였다. EEG 전극 부착이 완료되면 피험자는 디스플레이로부터 2m 떨어진 곳에 착석하고 수렴-조절 불일치가 0.2디오퍼, 0.5디오퍼, 1.1디오퍼인 조건이 무작위로 등장하는 자극을 제



시받았다. 피험자는 세 조건 모두에 대해 각각 90회씩 측정 받아서 총 측정 횟수는 270회가 되었다.

실험이 시작되면 피험자는 화면을 응시하도록 요구 받았고 대상 자극이 등장하기 전에 수렴 눈운동에서의 차이가 발생하지 않도록 하기 위하여 대상 자극이 나타나는 동일한 깊이에 응시점을 제시하였다. 응시점은 5초 동안 제시되었고 응시점이 사라짐과 동시에 대상 자극이 1초간 제시되었다 사라졌다. 피험자는 대상 자극이 화면에 나타났다가 사라지면 스페이스 바를 가능한 한 빨리 눌러서 반응할 것을 요구받았다. 자극과 자극 간 제시 간격은 10초를 유지하였다. 피험자가 졸지 않고 자극을 주시하고 있음을 확인하기 위해서 피험자에게 대상 자극이 나타났다가 사라지면 스페이스 바를 가능한 한 빨리 눌러서 반응하도록 하였다. 또한 앞선 시행에서 유발된 시각피로가 그 다음 시행으로 전이되는 것을 방지하기 위해서 자극 간 제시 간격을 10초로 유지하였다.

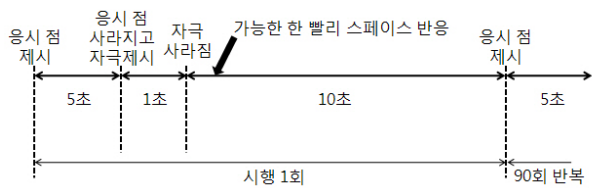


Figure 6. Experimental procedure in Experiment 2

### 2.2.3. 결과 및 해석

화면에 제시된 자극에 대한 키보드 반응이 1초 이상 걸린 시행은 분석에서 제외하였으며, 동시에 데이터 제외비율이 10%를 넘는 피험자는 아예 그 피험자의 데이터 전체를 분석에서 제외하였다. 제외된 피험자의 수는 6명이었고, 분석에 사용된 피험자의 수는 총 9명이었다. 분석에 사용된 피험자의 데이터 중에서 분석에서 제외된 데이터비율은 약 5%이었다.

#### 가. 실험결과 : ERP 분석

피험자별로 32개 채널 각각에 대하여 획득된 조건별 90회의 데이터에 대해, 분석에서 제외된 시행을 제거하고 나머지 시행에 대하여 조건별 평균 파형을 계산하였다. 피험자의 조건별 파형을 계산한 후에 전체 피험자에 대하여 조건별 전체 평균(grand average) 파형을 계산하였다. 기저선 교정(baseline correction), 잡음제거(artifact rejection), 전체 평균(grand average) 방

법은 탐색적 연구와 동일하였다.

세 가지 실험 조건 각각에 대한 피험자들의 전체 평균(grand average) 파형에서 시각적으로 조건 간 ERP요인(component) 차이가 발견되는 채널에 대하여 조건 간 차이가 통계적으로 유의한지 검증하였다. ERP 분석의 경우에 Cz 채널과 Pz 채널에서 N2 성분보다는 P2 성분과 P3 성분이 조건 간 차이가 있는 경향을 보였다. P2 성분과 P3 성분의 강도는 수렴-조절 불일치가 커질수록 작아졌으며, 지연시간은 수렴-조절 불일치가 커질수록 지연되어 나타나는 경향을 보였다.

이런 경향성이 통계적으로 유의한지 검증하기 위하여 Cz와 Pz 채널에서 세 조건의 P2와 P3 성분의 강도와 지연시간에 대한 개인별 평균을 계산하고, 이를 이용하여 반복측정 변량분석을 실시하였다. 분석은 실험 1과 유사하게 세 가지 방식으로 분석하였다. P2 요인의 정점을 추출하기 위하여 Pz와 Cz 모두 150ms부터 250ms 구간에서 가장 높은 값을 찾았고, P3 요인의 정점을 추출하기 위하여 Pz와 Cz 모두 250ms에서 450ms 구간의 가장 높은 값을 찾았다. 정점의 지연시간을 분석하기 위해서 앞에서 찾아낸 개인별 평균의 정점이 발생한 지연시간을 계산하였다.

Cz 채널에서 P2 성분의 정점 강도는 수렴-조절 불일치가 0.2디오퍼터 또는 0.5디오퍼터인 조건보다는 1.1디오퍼터인 조건에서 작은 경향을 보였으나, 0.05 수준에서 통계적으로 유의하지는 않았다( $F(2,16) = 1.91, p = 0.18$ ). P2 성분의 정점 면적 분석에서도 이와 유사한 경향을 보였으나, 통계적으로 유의하지는 않았다( $F(2,16) = 2.08, p = 0.16$ ). Pz 채널에서 P2 성분의 정점강도는 양안시차가 증가할수록, 즉 수렴-조절 불일치가 증가할수록 정점의 강도가 약해졌으며 0.05 수준에서 유의한 효과를 보이지는 않았지만 그 경향성이 매우 강하였다( $F(2,16) = 3.07, p = 0.07$ ). P2 성분의 정점 면적 분석에서는 실험 조건 간 통계적으로 유의한 차이가 발견되었다( $F(2,16) = 4.07, p = 0.04$ ).

Cz와 Pz 채널 모두에서 P3 성분의 정점 강도가 양안시차가 증가함에 따라서 작아지는 경향을 보였으며, 통계적으로 유의하였다(Cz :  $F(2,16) = 3.67, p = 0.049$  (Fig. 8 위 참조), Pz:  $F(2,16) = 8.34, p = 0.003$  (Fig. 8 아래 참조)). P3 성분의 정점 면적 분석에서도 통계적으로 유의한 유사한 경향이 발견되었다(Cz:  $F(2,16) = 6.33, p = 0.01, Pz : F(2,16) = 13.3, p = 0.00$ ). Cz와 Pz 채널에서의 P2와 P3 성분의 정점 지연시간은 양안시차

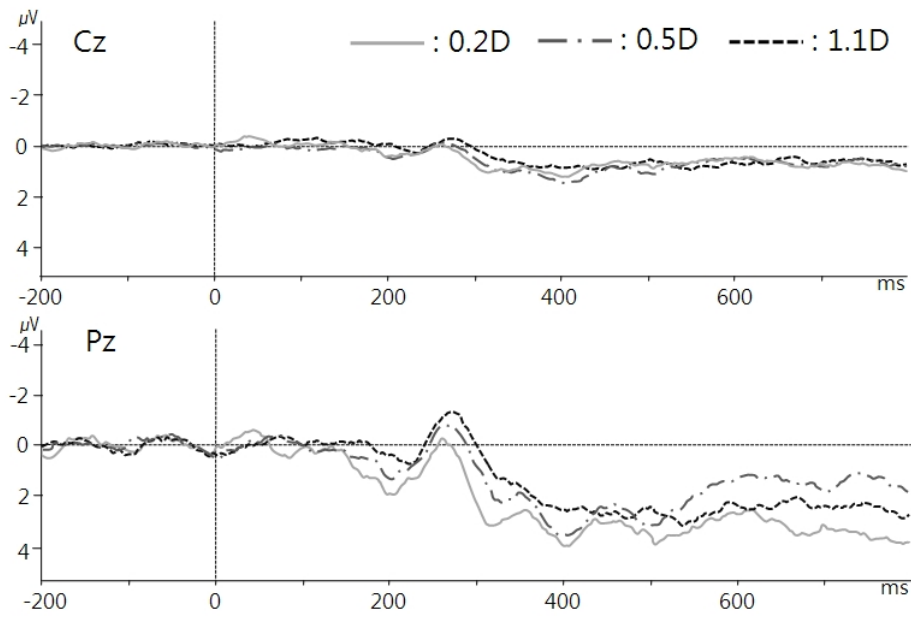


Figure 7. Grand average on Cz(top) and Pz(bottom)

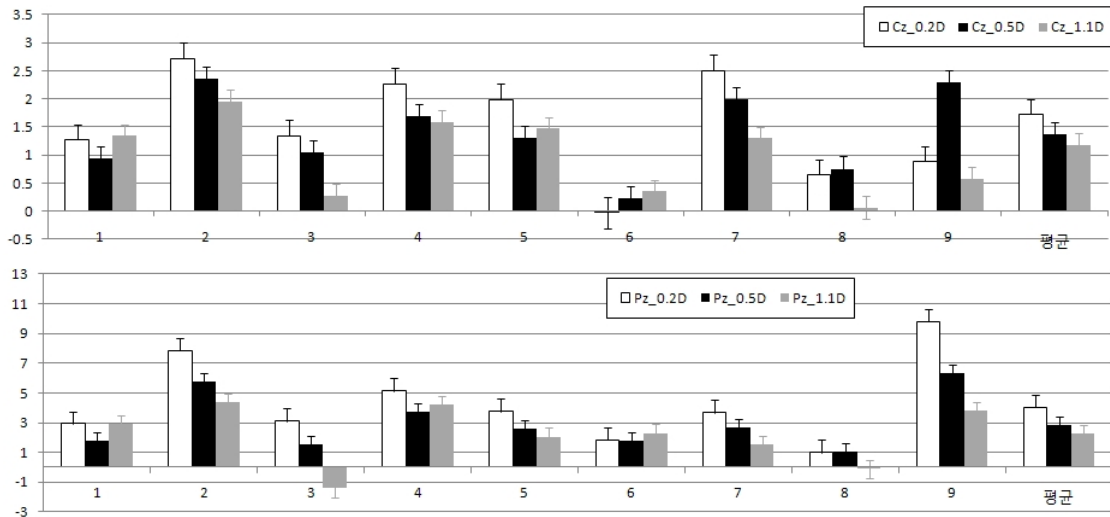


Figure 8. Peak analysis of P3 component on Cz(top) and Pz(bottom)(average in each condition for each 9 subjects and that of total subjects)

가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였으나, 실험 조건 간 통계적으로 유의한 차이는 발견되지 않았다.

**나. 결과 요약 및 해석**

Cz와 Pz의 P3 성분은 정점의 강도와 정점의 면적 분석에서 일관성 있게 세 가지 조건 간에 통계적으로 유의한 차이를 보였다. 양안시차가 증가할수록 P3 성분의 강도는 감소하였고, 특히 양안시차가 가장 큰 수렴-조절 불일치 1.1디오퍼 조건에서는 일관되게 가장 낮은 P3 성분이 관찰되었다. 실험 1에서 발견된 N2

성분의 정점 지연시간은 실험 조건 간에 통계적으로 유의한 차이가 발견되지 않았다. 실험 1에서는 관찰되지 않았던 P2 성분이 Cz와 Pz 영역에서 양안시차가 증가할수록 P2 성분의 정점 강도가 감소하였고 역시 양안시차가 가장 큰 수렴-조절 불일치 1.1디오퍼 조건에서 일관되게 가장 낮은 P2 성분이 관찰되었다. 실험 1에서 P3 성분의 정점 강도가 2D 조건보다는 3D 조건에서 약화되고 동시에 실험 2에서 양안시차가 증가할수록 정점 강도가 약화된다는 일관된 실험결과는 Cz와 Pz 채널에서 P3 성분의 정점 강도가 시각피로를

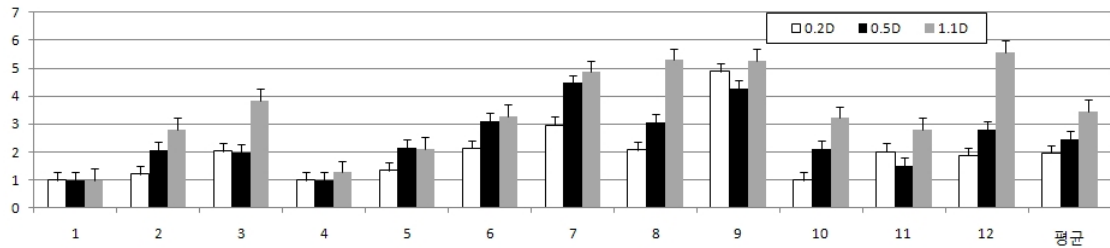


Figure 9. Average of total visual fatigue in Experiment 3(average in each condition for each 12 subjects and the total averages)

측정하는 주요한 인덱스가 될 수 있다는 가능성을 시사한다. 실험 1과 마찬가지로 실험 2의 결과 역시 제한된 피험자의 데이터에 근거하였다는 측면 때문에 일반화에 제한점이 있다. 하지만 실험 1과 실험 2에서 일관되게 Cz와 Pz 채널에서 피로조건에 따라 관찰되는 P3 성분의 강도 변화는 실험 1과 실험 2의 결과가 여전히 개연성이 높은 결과임을 시사한다. 특히 P3 성분의 강도가 피로에 영향을 받는 주의력을 측정하는 성분임을 시사하는 연구결과들(Luck, 2005)을 고려할 때 P3 성분이 시각피로의 중요한 인덱스일 가능성이 크다.

### 3. 실험 3 : 개발된 3D 시각피로도 측정도구의 타당도 검증

실험 1과 2의 결과는 Cz와 Pz 영역에서 관찰되는 P3 성분의 정점 강도가 시각피로를 측정하는 주요한 인덱스가 될 수 있는 가능성을 시사한다. 실험 3은 실험 조건 간 P3 성분의 정점 강도의 차이가 과연 시각적 피로를 반영하는지 그 타당도를 검증하기 위하여 수행되었다. 실험 3에서는 실험 2와 동일한 실험 조건에서 피험자들의 주관적인 시각피로를 측정하였으며, 객관적 측정치에서 차이를 보인 조건에서 주관적 측정 결과 역시 동일하게 통계적으로 유의한 시각피로 차이가 검증되는지 확인하였다.

실험 장비 및 설치, 실험 설계, 실험 절차는 피험자와 자극 제시 횟수를 제외하고 실험 2와 동일하였다. 실험 2에서는 EEG 측정을 한 것에 반하여 실험 3에서는 EEG 측정을 하지 않고 주관적 시각피로를 측정하였다. 주관적 시각피로를 측정하기 위하여 이전에 개발된 시각피로 측정 설문지를 사용하였다(이형철, 2010). 이 설문지는 5개의 역 문항을 포함하여 총 16개 문항으로 구성되었으며 특히 안구 통증, 어지러움, 상 흐림

의 세 하위요인으로 나누어 시각피로를 측정하였다. 양안시차를 이용하여 3D 자극을 보는 데 문제가 없는 12명이 실험에 참여하였고 각 피험자는 각 자극에 대해 3회씩 측정받았다.

#### 3.1. 실험결과

피험자별로 세 가지 실험 조건에서 무선적으로 3회씩 반복측정되어 총 9장의 설문지를 작성하였다. 피험자가 설문지에 성의있게 참가하였는지 등을 파악하기 위하여 5개의 역 문항과 원래 문항의 상관을 계산하였는데, 역 문항 간의 상관관계가 부적으로 통계적으로 유의하게 높게 나타나서 제외하는 것 없이 모든 데이터를 사용하였다.

전체적인 시각피로를 확인하기 위하여 역 문항을 제외한 11개 문항 모두를 대상으로 반복측정 변량분석을 실시한 후, 안구통증, 어지러움, 상 흐림 등과 같은 각 개별 요인들의 시각피로를 자세히 알아보기 위하여 요인에 해당하는 문항별로 별도의 반복측정 변량분석을 실시하였다.

전체 시각피로는 양안시차가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였으며 이는 통계적으로 유의하였다( $F(2, 22) = 15.51, p = 0.00$ )(Fig. 9 참조). 안구통증, 어지러움과 상 흐림 현상 모두 양안시차가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였으며 모두 통계적으로 유의하였다.

#### 3.2. 결과 요약 및 해석

전체 피로와 안구통증, 어지러움, 상 흐림 등 모든 요인에 대해 수렴-조절 불일치 0.2디오퍼터 조건에서의 시각피로가 가장 낮게 나타났으며, 0.5디오퍼터, 1.1디오퍼터 순으로 양안시차가 증가할수록 시각피로도 증가하는 것을 확인하였고, 이는 통계적으로 유의하였다. 앞

선 두 차례의 실험에서 2D 조건보다는 3D 조건에서 그리고 양안시차가 증가할수록 P3 성분의 정점 강도가 감소하였고 부분적으로 N2와 P2 성분이 조건 간 통계적으로 유의한 차이를 보였다. 이러한 조건 간 성분의 차이가 과연 시각적 피로를 반영하는지 그 타당도를 검증하기 위하여 주관적 시각피로를 측정하였는데, 객관적인 측정치에서 차이를 보인 조건에서 통계적으로 유의한 시각피로 차이가 검증되는 것을 확인하였다. 실험 2에 참여한 피험자와 실험 3에 참여한 피험자가 동일하지 못한 것이 본 연구의 제한점이기는 하지만, 양안시차 증가에 따른 시각피로의 증가는 기존 연구에서 일관적으로 관찰되는 것이다(Hoffman 등).

#### 4. 결론

본 연구의 목적은 EEG신호에 기반한 시각피로 측정도구의 프로토콜을 개발하는 것이었다. 기존 연구에 의하면 P100 성분의 지연시간이 시각피로의 인덱스로 사용할 수 있다는 연구결과가 있지만, 이 연구결과는 주관적인 시각피로 측정치에 의해 그 타당성이 검증되지 않았다(Emoto et al., 2005). 또한 3D 아드볼 패러다임(oddball paradigm)에서 P700 성분의 표준조건과 실험 조건에서의 차이파형(difference wave)의 정점 지연시간(peak latency)이 시각피로 인덱스로 사용할 수 있다는 연구결과가 있으나, 자극 제시 후 700msec 이후에 발견되는 ERP성분은 이전의 ERP 연구결과에서 전형적인 성분이 아니다(Li et al., 2008). 본 연구에서는 기존 ERP 연구에서 인지적인 주의 할당의 주요 지표인 P3 성분이 시각피로의 인덱스로 이용될 가능성을 검증하였다. 2D 조건과 3D 조건, 그리고 양안시차에 차이가 있는 실험 조건에서 차별적인 ERP성분을 탐색하였는데, Cz와 Pz 영역에서 일관되게 P3 성분의 정점 강도가 차별적인 신호를 방출하는 것을 확인하였으며, 통계분석결과 실험 조건 간 유의한 차이를 확인하였다. 2D 조건보다는 3D 조건에서, 그리고 양안시차가 증가할수록 P3 성분의 정점 강도가 감소하였다. 그 외 부분적으로 Cz와 Pz 영역에서의 N2 성분과 P2 성분의 실험 조건 간 통계적으로 유의한 차이가 검출되었다. 이런 실험 조건 간 성분의 차이가 과연 시각적 피로를 반영하는지의 타당도를 검증하기 위하여 동일한 실험 조건에 대해 주관적인 시각피로를 측정하였는데 객관적인 측정치에서 차이를 보인 조건에서 통계적으로 유의한 시각피로 차이가 발견되

었다. 이런 연구결과는 Cz와 Pz 영역에서 P3 성분의 정점 강도가 객관적인 시각피로 인덱스로 사용이 가능함을 시사하며, 기존의 P100과 P700 성분에 대한 연구결과와 차별성을 갖는 연구결과이다.

#### REFERENCES

- Emoto, M., Niida, T., & Kkana, E. (2005). Repeated vergence adaptation causes the decline of visual functions in watching stereoscopic television, *Journal of Display Technology*, 1, 328-340.
- Hoffman, D. M., Girshick, A. R., Akeley, K., & Banks, M. S. (2008). Vergence-accommodation conflicts hinder performance and cause visual fatigue, *Journal of Vision*, 8(3), 1~30.
- Kuze, J. & Ukai, K. (2008). Subjective evaluation of visual fatigue caused by motion images, *Displays*, 29, 159-166.
- Lambooy, M., Ijsselsteijn, W., Fortuin, M., & Heynderickx, I. (2009). Visual discomfort and visual fatigue of stereoscopic displays: a review, *Journal of imaging science and technology*, 53(3), 030201~030214.
- Li, H.-C. O. (2010). Human factor research on the measurement of subjective three dimensional fatigue, *Journal of broadcast engineering*, 15(5), 607-616.
- Li, H.-C. O., Kham, K., & Lee, S. (2008). Measurement of 3D visual fatigue using event-related potential: 3D oddball paradigm. Unpublished results presented at the 3D-TV CON'08, Istanbul, Turkey, May 28-30.
- Luck, S. (2005). *An introduction to the event-related potential technique*. The MIT Press.

원고접수 : 2011.10.19

수정접수 : 2011.12.20

게재확정 : 2012.02.20