

시선응시 방법과 시각도가 P300 문자입력기의 정확도에 미치는 영향*

The effects of the methods of eye gaze and visual angles on accuracy of P300 speller

엄진섭** · 손진훈**†

Jin-Sup Eom** · Jin-Hun Sohn**†

충남대학교 심리학과/뇌과학연구소**

Department of Psychology, Brain Research Institute, Chungnam National University**

Abstract

This study was to examine how visual angle of matrix corresponding to the physical properties of P300 speller and eye gaze corresponding to the user's personal characteristics influence on the accuracy of P300. Visual angle of the matrix was operated as the distance between the user and the matrix and three groups were composed: 60 cm group, 100 cm groups, and 150 cm group. Eye gaze methods was consisted three conditions. Head moving condition was putting eye gaze using head, pupil moving condition was moving pupil with the head fixed, while the eye fixed condition is to fix the eye gaze at the center of the matrix. The results showed that there was significant difference in the accuracy of P300 speller according to the eye gaze method. The accuracy of the head moving condition was higher than the accuracy of pupil moving conditions, accuracy of pupil moving conditions was higher than the accuracy of the eye fixed conditions. However, the effect of visual angle of matrix and interaction effect were not significant. When P300 amplitude of target character was measured depending on how you stare at the target character, P300 amplitude of the head moving condition was greater than P300 amplitude of the pupil moving condition. There was no significant difference in the error distribution in head moving condition and pupil moving condition, while there was a significant difference between two eye gaze conditions and fixed gaze condition. The error was located at the neighboring characters of the target character in head moving condition and pupil moving condition, while the error was relatively distributed widely in fixed eye condition, error was occurred with high rate in characters far away from the center of matrix

Key words: brain-computer interface, P300 speller, ERP, eye gaze, visual angle

요약

본 연구에서는 P300 문자입력기의 물리적 특성에 해당하는 문자판의 시각도와 사용자의 개인적 특성에 해당하는 시선응시 방법이 P300 문자입력기의 정확도에 미치는 영향을 검증하였다. 문자판의 시각도는 사용자와 문자판 간의 거리로 조작하였으며, 60 cm 집단과 100 cm 집단, 150 cm 집단으로 구성하였다. 시선응시방법은 세 조건으로 반복측정하였다. 머리 조건은 머리를 움직여서 시선을 두는 조건이었으며, 눈동자 조건은 머리는 고정한

※ 이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 휴먼인지환경사업본부-신기술융합형 성장동력사업(No. 2013K000332) 과 한국과학기술재단(No. 2013055508)의 지원을 받아 수행된 연구임.

† 교신저자 : 손진훈 (충남대학교 사회과학대학 심리학과 및 뇌과학연구소)

E-mail : jhsohn@cnu.ac.kr

TEL : 042-821-6369

FAX : 042-821-8875

채 눈동자를 움직여서 시선을 두는 조건이었고, 시선고정 조건은 시선을 문자입력기의 중앙에 고정시킨 조건이었다. 이요인설계에 의한 실험결과, 문자입력의 정확도가 시선응시방법에 따라 유의한 차이가 있었다. 머리 조건의 정확도가 눈동자 조건의 정확도 보다 높았으며, 눈동자 조건의 정확도가 시선고정 조건의 정확도 보다 높았다. 그러나 문자판의 시각도와 상호작용효과는 모두 유의하지 않았다. 시선응시방법에 따라 목표문자의 P300 진폭을 측정 한 결과, 머리조건의 P300이 눈동자 조건의 P300보다 더 컸다. 머리조건과 눈동자 조건 간에는 오류분포에서 큰 차이가 없었지만, 시선고정 조건은 나머지 두 조건과 큰 차이를 보였다. 머리조건과 눈동자 조건에서는 오류가 주로 목표문자와 인접한 문자에서 나타난 반면, 시선고정 조건은 오류가 상대적으로 넓게 분포하였으며, 문자판의 중심에서 멀리 떨어져 있는 문자들에서 오류가 많이 발생하였다.

주제어: 뇌-컴퓨터 인터페이스, P300 문자입력기, ERP, 시선, 시각도

1. 서론

P300 문자입력기는 뇌파를 이용하여 컴퓨터 모니터에 문자를 입력하는 장치이며, 이 장치를 이용하여 전신마비 환자들이 외부 세상과 의사소통할 수 있다. Farwell과 Donchin(1988)이 P300 문자입력기를 개발한 이후 약 20년 동안은 큰 관심을 받지 못하였으나, 최근 컴퓨터의 급속한 발전과 인간-기계 상호작용에 대한 필요성이 증가하면서 P300 문자입력기에 대한 연구가 국내외에서 활발히 진행되고 있다.

전형적인 P300 문자입력기는 Figure 1과 같은 6×6 문자판의 문자들이 행 또는 열 단위로 무선적인 순서로 깜빡이며, 각 문자가 6~30회 깜빡이면 한 문자가 입력된다. 사용자는 입력하고 싶은 문자가 깜빡인 횟수를 마음속으로 세면된다. 주의가 집중된 자극(즉, 깜빡인 횟수를 센 문자)에 대해서는 P300이라고 부르는 뇌파가 발생한다. P300 문자입력기는 사용자의 뇌파를 분석하여 주의가 집중된 문자를 판별한다.

P300 문자입력기에 관한 선행연구들은 대부분 입력 정확도에 관한 것들이다. P300 문자입력기의 정확도에 영향을 미치는 요인들이 있으며, 문자입력기의 특성에 관한 요인들과 사용자의 특성에 관한 요인들로 나눌 수 있다.

P300 문자입력기의 특성들 중 가장 강력한 요인은 시행수이다(Donchin, Spencer, & Wijesinghe, 2000; Lenhardt, Kaper, & Ritter, 2008). 시행수는 한 문자를 입력하기 위해 한 문자 당 깜빡인 횟수를 말한다. 깜빡인 횟수가 증가할수록 더 신뢰로운 P300이 추출되며, 사용자가 입력하려는 문자를 판별하기가 쉬워진다. 그러나 시행수

가 많아지면, 한 문자 입력하는데 걸리는 시간이 증가한다는 단점을 가진다.

문자판의 형태와 문자를 반짝이는 방식에 관한 연구들이 다수 있다. Townsend 등(2010)은 체커보드 패러다임(checkerboard paradigm)이 전통적인 행렬패러다임보다 정확도가 높다고 보고하였다. Fazel-Rezai와 Abhari(2009)이 고안한 영역기반 패러다임(region-based paradigm)도 행렬패러다임보다 정확도가 높다고 보고되었다. Eom 등(2013)은 하위블럭 패러다임이 행렬패러다임보다 정확도가 높다는 것을 보여주었다.

뇌파를 분석하여 사용자가 입력하고자 한 문자를 판별하는 방법에 따라서 정확도가 달라진다. Krusienski 등(2006)은 문자를 판별하는 다섯 가지 방법을 비교하였는데, SWLDA(stepwise linear discriminant analysis)와 FLD(Fisher's linear discriminant)의 정확성이 가장 높았다. Manyakov와 Chumerin, Combaz, Van Hulle(2011)은 마비환자들을 데리고 7가지의 판별방법을 비교한 결과 BLDA(Bayesian linear discriminant analysis)와 nSVM(Gaussian kernel support vector machine)이 가장 정확하였음을 보고하였다.

자극제시 시간도 정확도에 영향을 미친다. Lu와 Speier, Hu, Pouratian(2013)의 연구에서는 문자들이 깜빡이는 시간과 자극간 제시간격(interstimulus interval: ISI)가 길수록 정확도가 높아지는 것으로 나타났다. 그러나 Sellers 등(2006)의 연구에서는 ISI가 175 ms일 때가 350 ms일 때보다 정확도가 더 높다고 보고하였다.

문자판의 시각도(visual angle)가 입력정확도에 영향을 미칠 가능성이 있다. 사용자 눈의 망막 상에 맺힌 문자판에서 문자들 간의 간격이 좁을수록 근접-혼란

오류(adjacency-distraction errors)가 발생할 가능성이 높다(Fazel-Rezai, 2007; Townsend et al., 2010). 근접-혼란 오류는 목표문자의 주변에 있는 문자들로 잘못 입력되는 오류를 말하는 것으로, 목표문자와 인접해있는 문자들이 반짝일 때 사용자의 주의를 끌어들이어 P300 반응을 유발하기 때문에 나타난다(Townsend et al., 2010). 망막 상에 맺힌 문자판의 크기는 물리적인 문자판의 크기와 사용자의 눈과 문자판 간의 거리에 의해서 결정된다.

본 연구의 첫 번째 목적은 문자판의 시각도가 문자 입력의 정확도에 미치는 영향을 검증하는 것이다. 동일한 문자판을 사용하는 경우, 사용자와 문자판 간의 거리가 멀수록(즉, 시각도가 작을수록) P300 문자입력기의 정확도가 감소할 것이며, 가까울수록(즉, 시각도가 클수록) 정확도가 높아질 것이라고 예측할 수 있다.

사용자의 특성 또한 정확도에 영향을 미친다. 건강한 사람들과 전신마비환자에 대해 P300 문자입력기의 정확도를 함께 측정한 연구들이 있다(Hoffmann et al., 2008; Sellers & Donchin, 2006; Townsend et al., 2010). 이 연구들은 모두 건강한 사람들의 정확도가 마비환자들의 정확도 보다 높다는 것을 보여주고 있다. 건강한 사람들과 마비환자들 간의 정확도 차이는 팔과 다리의 마비 보다는 시선의 움직임이 얼마나 자유로운가에 그 원인이 있을 것이다.

Brunner 등 (2010)은 눈동자를 움직일 수 있는 능력이 문자입력기의 정확도에 미치는 영향을 검증하였다. 문자를 입력할 때 시선을 움직일 수 있는 조건과 시선을 모니터 중앙에 고정된 조건을 비교한 결과, 시선을 움직일 수 있는 조건의 정확도가 더 높았다. 즉, 시선을 움직일 수 있는 능력이 P300 문자입력기의 정확도에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

시선을 움직이는 방법에는 두 가지가 있다. 한 가지는 머리를 고정한 상태에서 눈동자를 움직이는 방법이 있고, 다른 한 가지는 눈동자를 고정한 상태에서 머리를 움직이는 방법이 있다. Brunner 등 (2010)의 연구에서는 어떤 방법을 사용하였는지 명시하지는 않았다.

본 연구의 두 번째 목적은 시선을 움직이는 방법에 따라 P300 문자입력기의 정확도가 달라지는지 검증하는 것이다. 문자판의 크기가 작거나 사용자와 문자판 간의 거리가 멀다면, 시선을 움직이는 두 가지 방법

간에 정확도의 차이가 크지 않을 것이다. 그러나 문자판의 크기가 크거나 사용자와 문자판 간의 거리가 가깝다면, 머리를 움직이는 방법이 눈동자를 움직이는 방법보다 정확도가 높을 것으로 예상된다. 머리를 움직여서 시선을 처리할 수 있는 범위가 눈동자를 움직여서 시선을 처리할 수 있는 범위보다 넓기 때문이며, 머리를 움직이는 것이 눈동자를 움직이는 것보다 피로도가 낮을 것으로 예상되기 때문이다.

2. 방법

2.1. 실험참가자

27명이 실험에 참여하였다. 남자는 14명이었으며, 평균연령은 25.2세였다(range 20-48세). 실험참가자들은 뇌손상 병력이나 시력에 문제가 없다고 보고하였다.

2.2. 실험장치

실험참가자 앞에 놓인 19 inch LCD 모니터에 Figure 1의 sub-block paradigm과 같은 6×6 문자행렬자극을 제시하였다. 각 문자의 폭은 1.1 cm, 높이는 1.3 cm였으며, 문자와 문자 간 간격은 좌우로 5 cm, 위아래로 3 cm였다. 실험참가자와 모니터 간의 거리가 60 cm인 경우에 6×6 문자행렬의 수평시각도는 29.8°였고 수직시각도는 20.7°였다. 실험참가자와 모니터 간의 거리가 100 cm인 경우에 6×6 문자행렬의 수평시각도는 18.2°였고 수직시각도는 12.6°였다. 실험참가자와 모니터 간의 거리가 150 cm인 경우에 6×6 문자행렬의 수평시각도는 12.2°였고 수직시각도는 8.4°였다.

뇌파를 측정하기 위하여 Fz, Cz, Pz, Oz, P3, P4, PO7, PO8에 전극을 부착하였으며(Krusienski et al., 2008), 이마에 접지전극을, 양쪽 귓볼에 기준전극을 부착하였다. 뇌파는 Grass Model 12 Neurodata Acquisition System (Grass Instruments, Quincy, MA, USA)을 사용하여 0.3-30Hz 대역역과시킨 후 20000배 증폭시켰으며, MP150(BioPac Systems Inc., Santa Barbara, CA, USA)을 사용하여 200Hz의 표본율로 컴퓨터에 저장하였다. 자극의 제시와 뇌파의 저장 프로그램은 Visual C++ v6을 사용하여 제작하였다.

눈동자의 움직임을 관찰하기 위하여, iView X RED (SensoMotoric Instruments GmbH, Teltow, Germany) 시스템을 사용하였으며, 머리의 움직임은 웹캠으로 관찰하였다.

2.3. 실험절차

27명의 실험참가자 중 9명은 참가자와 모니터 간의 거리가 60 cm인 조건(60 cm 집단)에서, 다른 9명은 100 cm인 조건(100 cm 집단)에서, 나머지 9명은 참가자와 모니터 간의 거리가 150 cm인 조건(150 cm 집단)에서 실험하였다.

각 실험집단에서 총 세 번에 걸쳐서 실험을 진행하였다. 한 번은 모니터 중앙에 있는 문자인 O, P, U, V의 가운데 지점에 시선을 고정된 채로 문자를 입력하였으며(시선고정 조건), 또 한 번은 머리는 고정된 채로 눈동자를 움직여서 입력할 문자에 시선을 두었으며(눈동자 조건), 마지막 한번은 눈동자는 고정된 채로 머리를 움직여서 입력할 문자에 시선을 두도록 하였다(머리 조건).

실험은 한 번의 훈련단계와 세 번의 검사단계로 구성되어 있다. 훈련단계는 목표문자를 확인하는데 사용하는 판별함수를 추정하기 위한 것이다. 검사단계는 참가자가 문자를 입력하는 단계로, 훈련 단계에서 산출한 분류함수를 사용하여 참가자가 입력하려고 한 문자를 실시간으로 판단하여 모니터에 출력한다. 훈련단계에서 문자판을 볼 때에는 머리를 움직여 시선을 두는 방법을 사용하였다. 이 방법이 각 문자에 대한 ERP가 가장 신뢰롭게 측정될 것이라 예상하였기 때문이다.

훈련단계에서는 실험참가자가 입력해야 할 문자를 화면의 상단에 제시하였다. 실험참가자가 해야 하는

일은 입력할 문자가 반짝이는 횟수를 마음속으로 세는 것이다. 훈련단계에서는 36개의 문자들 중 공간적으로 고르게 분포하도록 선택한 18개의 문자를 목표 문자로 사용하였다. 훈련단계를 시작하기 전에 6개 문자에 대해 연습을 실시하였다.

검사단계에서는 6개의 단어와 숫자열을 사용하였다. 입력해야 할 단어를 참가자에게 알려주고 입력하도록 하였다. 입력오류가 있을 경우에는 수정하지 말고 계속해서 다음 문자를 입력하도록 지시하였다. 검사단계를 시작하기 전에 두 개의 단어에 대해 연습을 실시하였다.

본 연구에서는 하위블럭패러다임(SBP, Eom et al., 2013)을 이용하여 문자를 입력하였다. SBP에서는 36개의 2×3 하위블럭 중 하나를 100 ms동안 강한 강도로 제시하였으며, 매 125 ms마다 다른 2×3 하위블럭을 강한 강도로 제시하였다. 한 문자를 입력할 때, 36개의 하위블럭이 한 번씩 반짝이는 것을 두 번 반복하였다. 36개의 하위블럭들이 반짝이는 순서는 미리 정해져 있는데, 한 블록이 반짝인 후 그 블록에 속한 어떤 문자가 다시 반짝이기 전에 적어도 두 개의 다른 블록이 반짝이도록 만들어진 순서이다. 이러한 순서를 10개 만들었으며, 각 시행이 시작될 때, 10개의 순서들 중 하나를 무선적으로 선택하여 사용하였다. 하나의 문자를 입력할 때, 문자판이 반짝인 시간은 9초였으며, 3초 후에 다음 문자를 입력하기 위한 문자판 반짝임이 시작 시작하였다. 3초 동안에 참가자가 입력하려고 한 문자를 판별하여 모니터에 출력하였다.

시선고정 조건과 머리 조건에서는 안구운동추적기를 관찰하여 눈동자를 움직이지 못하도록 통제하였으며, 눈동자 조건에서는 웹캠을 관찰하여 머리를 움직이지 못하도록 통제하였다. 시선고정 조건과 눈동자 조건, 머리 조건의 실험순서는 실험참가자별로 균형화하였다.

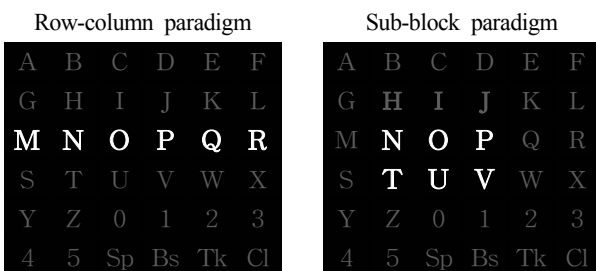


Figure 1. 6×6 matrix of alphanumeric characters

2.4. 판별

훈련단계에서 기록한 뇌파에 대하여 단계적 선형판별분석(SWLDA)를 실시하여 판별함수를 산출한 후, 이 판별함수를 이용하여 검사단계에서 실시간으로 목표문자를 파악하였다. 단계적 선형판별분석은 다음의

단계를 거쳐서 수행되었다. 한 문자를 입력하는 동안 2×3 하위블록이 반짝이는 것이 72번 진행되며, 이 시간동안 8곳의 두피에서 뇌파가 기록된다. 한 개의 2×3 하위블록이 반짝이기 시작한 후 750 ms 동안의 뇌파를 잘라내어 하나의 분석단위를 만든다. 하나의 문자를 입력할 때마다 8개의 전극마다 72개의 뇌파분석단위가 만들어진다. 한 전극에서 기록된 1개의 분석단위는 150개(0.750sec×200Hz)의 값들로 구성되어 있다. 이 분석단위들은 목표자극이 포함된 2×3 하위블록인 경우와 목표자극이 포함되지 않은 경우로 나누어진다. 결국 하나의 문자를 입력할 때마다 72×1200의 뇌파행렬이 만들어진다. 훈련단계에서 총 18개 문자를 입력하므로 1296×1200 행렬이 만들어진다. 이 행렬에 대해서 단계적 판별분석을 수행하여 목표자극과 비목표자극을 구별하는 판별함수를 산출하였다.

검사단계에서는 각각의 문자입력이 끝나면 곧바로 목표자극이 무엇이었는지를 판단한다. 먼저, 36개의 문자 각각에 대하여 각 문자가 반짝였을 때의 12개 뇌파분석단위들을 평균하여 36개 문자 각각에 대한 ERP를 산출하였다. 이 ERP들은 36×1200의 행렬을 구성한다. 36개의 행에 대하여 훈련단계에서 도출한 판별함수를 적용하여 각 행(즉, 각 문자가)이 목표문자일 확률을 산출한다. 36개의 문자 중 목표문자일 확률이 가장 높은 문자가 입력 문자로 선택된다.

2.5. 문자입력기의 성능

문자 입력기의 성능은 1분당 입력가능한 문자의 수로 평가된다(Furdea et al., 2009). 분당 입력문자수(written symbol rate: WSR)는 시행 당 전송되는 비트(B)와 문자전송률(symbol rate: SR)를 통해서 계산된다(McFarland & Wolpaw, 2003). B는 다음의 공식 (1)로 계산된다(Pierce, 1980).

$$B = \log_2 N + P \log_2 P + (1 - P) \log_2 \left(\frac{1 - P}{N - 1} \right) \quad (1)$$

위 공식에서 N은 전체 문자의 개수이며, P는 목표자극이 정확하게 분류될 확률이다. 비트율(bit rate)은 B에 분당 시행수를 곱하여 계산한다. SR은 B를 이용하여 다음의 공식 (2)로 계산된다.

$$SR = \frac{B}{\log_2 N} \quad (2)$$

WSR은 아래의 공식 (3)으로 계산된다.

$$WSR = \begin{cases} \frac{2SR - 1}{T} & SR > 0.5 \\ 0 & SR \leq 0.5 \end{cases} \quad (3)$$

T는 한 시행에 걸리는 시간을 분단위로 표시한 값이다. SR이 0.5보다 작다는 것은 문자를 정확하게 입력하는 빈도보다 오류빈도가 더 많다는 것을 의미한다. 실제 상황에서는 오류를 수정해야하며, 오류를 수정하기 위해서는 한 번의 문자 입력(지우기)을 추가로 해야 한다. SR이 0.5보다 작은 경우에는 오류가 없는 문장을 만들 수 없으므로, WSR은 0의 값을 가지게 된다.

3. 결과

3.1. 정확도와 분당 입력 문자수

Table 1에 각 실험조건에 대한 정확도, 분당 비트율, 분당 문자입력수가 제시되어 있다. 60 cm 집단에서 머리 조건의 평균 정확도는 85.33(±12.00)%였으며, 눈동자 조건은 80.44(±9.89)%였고, 시선고정 조건은 12.44(±7.60)이었다. 100 cm 집단에서 머리 조건의 평균 정확도는 83.56(±13.48)%였으며, 눈 조건은 79.56(±18.38)%, 시선 고정 조건은 9.78(±6.04)%였다. 150 cm 집단에서 머리 조건의 평균 정확도는 79.11(±12.29)%였으며, 눈 조건은 72.89(±13.58)%, 시선고정 조건은 10.67(±9.17)%였다.

거리 집단과 시선 조건에 따라 평균정확도에 차이가 있는지 검증하기 위하여 3(피험자간)×3(피험자내) 혼합설계에 의한 반복측정변량분석을 실시하였다. 반복측정이 포함된 효과는 Greenhouse-Geisser ϵ 을 이용하여 교정한 확률로 평가하였다. 분석결과, 시선 조건의 주효과만 유의하였으며($F(2,48) = 462.765, p < .001$), 거리 집단의 주효과와 거리 집단과 시선 조건의 상호작용효과는 유의하지 않았다(각각 $F(2,24) = 0.787, p > .05$; $F(4,48) = 0.375, p > .05$). 어떤 시선 조건들 간에 차이가 있는지 확인하기 위하여 사후검증을 실시하였다. 사후검증 방법은 Fisher의 LSD 방법을 사용하였다. 이 방법은 실

Table 1. Means of accuracies (%), bit rates (bits/min) and WSR (selections/min)

Group	Head moving condition			Pupil moving condition			Fixed gaze condition		
	Accuracy	Bit rate	WSR	Accuracy	Bit rate	WSR	Accuracy	Bit rate	WSR
60 cm	85.33 (12.00)	19.50 (4.66)	2.54 (1.80)	80.44 (9.89)	17.48 (3.62)	1.76 (1.40)	12.44 (7.60)	0.85 (0.97)	0.00 (0.00)
100 cm	83.56 (13.48)	18.94 (5.24)	2.42 (1.87)	79.56 (18.38)	17.64 (6.19)	2.14 (1.83)	9.78 (6.04)	0.57 (0.48)	0.00 (0.00)
150 cm	79.11 (12.29)	17.11 (4.42)	1.71 (1.60)	72.89 (13.53)	15.00 (4.51)	1.08 (1.37)	10.67 (9.17)	0.70 (0.78)	0.00 (0.00)

Note: Standard deviations are in parentheses

험조건이 세 수준일 때 1종 오류가 적절히 통제된다 (Kirk, 2013, pp, 164-165). 머리조건과 눈동자 조건의 평균차이가 유의하였으며($p < .05$), 머리 조건과 시선고정 조건의 평균차이도 유의하였고($p < .001$), 눈동자 조건과 시선고정 조건의 평균차이도 유의하였다($p < .001$).

60 cm 집단에서 머리 조건의 평균 분당 입력 문자 수는 $2.54(\pm 1.80)$ 이었으며, 눈동자 조건은 $1.76(\pm 1.40)$, 시선고정 조건은 $0.00(\pm 0.00)$ 이었다. 100 : 집단에서 머리 조건의 평균 분당 입력문자수는 $2.42(\pm 1.87)$ 이었으며, 눈동자 조건은 $2.14(\pm 1.83)$, 시선고정 조건은 $0.00(\pm 0.00)$ 이었다. 150 cm 집단에서 머리 조건의 평균 분당 입력문자수는 $1.71(\pm 1.60)$ 이었으며, 눈동자 조건은 $1.08(\pm 1.37)$, 시선고정 조건은 $0.00(\pm 0.00)$ 이었다.

거리 집단과 시선 조건에 따라 평균 입력문자수에 차이가 있는지 검증하기 위하여 3(피험자간) \times 3(피험자내) 혼합설계에 의한 반복측정변량분석을 실시하였다. 분석결과, 시선 조건의 주효과만 유의하였으며($F(2,48) = 29.344, p < .001$), 거리 집단의 주효과와 거리 집단과 시선 조건의 상호작용효과는 유의하지 않았다(각각 $F(2,24) = 0.625, p > .05; F(4,48) = 0.864, p > .05$). 실험조건들 간의 평균차이를 확인하기 위하여 Fisher의 LSD 방법을 사용한

사후검증을 실시하였다. 머리조건과 눈동자 조건의 평균차이가 유의하였으며($p < .05$), 머리 조건과 시선고정 조건의 평균차이도 유의하였고($p < .001$), 눈동자 조건과 시선고정 조건의 평균차이도 유의하였다($p < .001$).

3.2. 사건관련전위

거리 집단에 따라 P300 문자입력기의 정확도가 다르지 않으므로, 거리 집단을 합하여 사건관련전위 (event-related potential: ERP)를 산출하였다. 목표문자에 대한 P300 진폭은 Pz 영역에서 가장 두드러지므로 (Polich, 2007), 시선 조건에 따라 Pz에서 측정된 ERP만을 Figure 2에 제시하였다. 세 조건 모두 목표문자에 대한 정적 정점 (positive peak)이 비목표문자에 대한 정적 정점보다 유의하게 더 큰 것으로 나타났다(머리 조건 $t(26) = 12.296, p < .001$; 눈동자 조건, $t(26) = 13.396, p < .001$; 시선 고정 조건, $t(26) = 6.495, p < .001$).

Figure 3에 Pz와 Oz에서 측정된 목표자극에 대한 ERP가 제시되어 있다. Pz에서 측정된 P300 진폭이 목표자극에 대한 인지 반응을 가장 잘 나타내 주기 때문에, 머리 조건과 눈동자 조건 간에 P300 진폭의 평

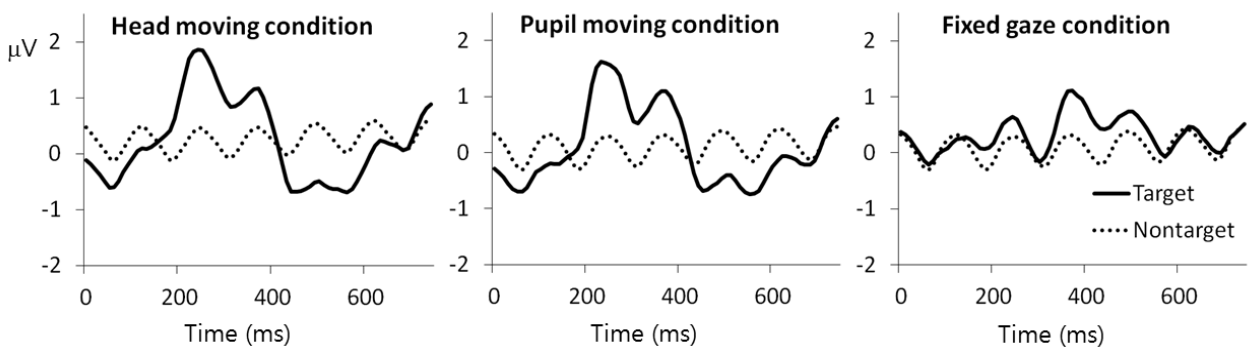


Figure 2. Grand mean ERPs at Pz for each condition

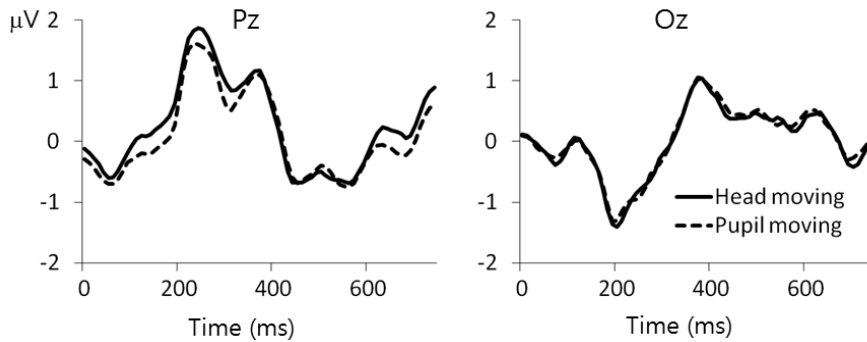


Figure 3. Grand mean ERPs for target characters

균이 서로 다른지 검증하였다. Oz에서 측정된 시각유발전위(visual evoked potential: VEP, 50~250 ms)는 시각 활동과 관련이 높기 때문에(Brunner et al., 2010), 머리 조건과 눈동자 조건 간에 VEP의 진폭이 다른지 검증하였다.

Pz에서 측정된 P300 진폭은 머리 조건의 평균이 눈동자 조건의 평균보다 유의하게 더 컸다($t(26)=2.277, p<.05$). Oz에서 측정된 VEP 진폭의 평균은 머리 조건과 눈동자 조건에서 유의하게 다르지 않았다($t(26)=-0.219, p>.05$).

3.3. 오류분석

거리 집단에 따라 평균 정확도가 다르지 않았으므로, 거리 집단을 모두 합한 후, 시선 조건에 따라서 오류유형을 분석하였다. Figure 4에 오류가 목표문자로

부터 얼마나 떨어져 발생하였는지가 제시되어 있다. 머리 조건의 경우 총 117개의 오류가 발생하였는데, 그 중 87(74.36%)개가 목표문자가 포함된 하위블럭에서 발생하였다. 눈동자 조건의 경우는 총 152개의 오류가 발생하였는데, 그 중 118(77.63%)개가 목표문자가 포함된 하위블럭에서 발생하였다. 시선 고정 조건의 경우는 총 603개의 오류가 발생하였는데, 그 중 286(47.43%)개가 목표문자가 포함된 하위블럭에서 발생하였다.

각 시선조건에서 문자별 오류율이 Figure 5에 제시되어 있다. 6×6 문자판의 중심으로부터 멀어질수록 오류율이 증가하는지 검증하기 위하여, 중심에 인접해있는 4개의 문자(인접 수준)와 중심에서 한 칸 건너에 있는 12개 문자(한 칸 수준), 중심에서 두 칸 건너에 있는 20개 문자(두 칸 수준)들 간에 오류율이 다른지 검증하였다.

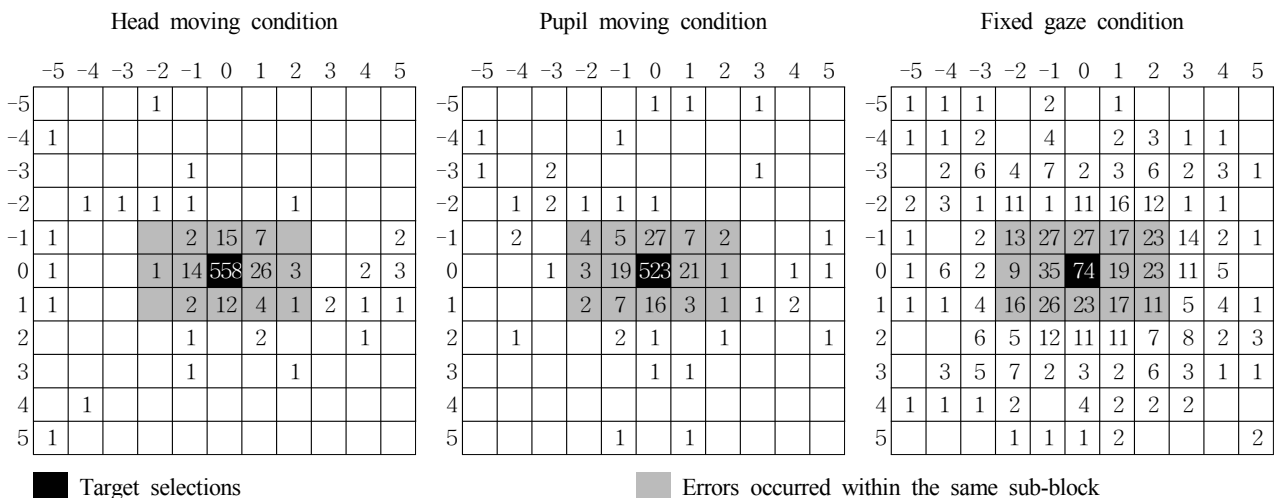


Figure 4. distributions for each condition. All target items have been centered in each matrix; the number in the black cell is the number of correct selections for each paradigm. Numbers in other cells represent the number of errors occurring in each cell relative to the target location.

Head moving condition						Pupil moving condition						Fixed gaze condition					
A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F
12.96			18.52	16.67		22.22			22.22	12.96		92.59			100.00	98.15	
G	H	I	J	K	L	G	H	I	J	K	L	G	H	I	J	K	L
	0.00	22.22			25.93		11.11	31.48			18.52		100.00	87.04			100.00
M	N	O	P	Q	R	M	N	O	P	Q	R	M	N	O	P	Q	R
		13.58		14.81	16.67			24.69		22.22	24.07			58.02		92.59	98.15
S	T	U	V	W	X	S	T	U	V	W	X	S	T	U	V	W	X
	25.93	11.11	14.81	11.11			25.93	29.63	14.81	14.81			96.30	74.07	77.78	92.59	
Y	Z	0	1	2	3	Y	Z	0	1	2	3	Y	Z	0	1	2	3
		25.93	3.70		40.74			18.52	22.22		33.33			100.00	96.30		100.00
4	5	Sp	Bs	Tk	Cl	4	5	Sp	Bs	Tk	Cl	4	5	Sp	Bs	Tk	Cl
	11.11						22.22						92.59				

Figure 5. Error rates (%) for each character

머리 조건에서 인접 수준의 평균 오류율은 13.17 (± 1.88)%, 한 칸 수준의 평균은 14.81(± 10.48)%, 두 칸 수준의 평균은 20.37(± 10.14)%였다. 일원변량분석 결과, 수준에 따른 오류율은 유의한 차이가 없었다 ($F(2,14) = 0.854, p > .05$). 눈동자 조건에서는 인접 수준의 평균이 23.04(± 7.55)%, 한 칸 수준의 평균이 20.90 (± 6.82)%, 두 칸 수준의 평균이 22.22(± 6.14)%로 일원 변량분석 결과, 수준에 따른 오류율은 유의한 차이가 없었다($F(2,14) = 0.131, p > .05$). 그러나 시선고정 조건 에서는 인접 수준의 평균이 69.96(± 10.50)%, 한 칸 수 준의 평균이 94.97(± 4.63)%, 두 칸 수준의 평균이 97.35 (± 3.36)%로 일원변량분석 결과, 수준에 따른 오류율에 유의한 차이가 있었다($F(2,14) = 28.844, p < .001$). Fisher의 LSD 방법을 사용한 사후검증결과, 중심에 인접 수 준의 오류율(69.96 ± 10.50)이 한 칸 수준과 두 칸 수 준의 오류율보다 낮았다.

4. 논의

P300 문자입력기의 시각도와 문자판을 응시하는 방 법이 문자입력의 정확도에 미치는 영향을 검증하였 다. 문자판을 응시하는 방법에 따라서 문자입력의 정 확도가 달라지는 것으로 나타났다. 머리를 움직여 문 자를 응시하는 방법의 정확도(82.67%)가 눈동자를 움 직여 문자를 응시하는 방법의 정확도(77.62%)보다 약 5% 더 좋은 것으로 나타났으며, 시선을 문자판의 중 앙에 고정한 방법의 정확도는 약 10%에 불과하였다. 분당 입력 문자수의 경우에도 머리조건의 평균이 눈 동자 조건의 평균보다 더 많았으며, 시선고정 조건은 모든 사람이 0의 값을 보였다.

머리 조건의 정확도와 분당 입력 문자수가 눈동자 조건 보다 더 좋은 이유를 ERP 분석을 통해서 추론해 볼 수 있다. Pz에서 측정된 P300 진폭은 머리 조건의 평균이 눈동자 조건의 평균보다 더 컸다. P300 진폭은 주의집중과 밀접한 관련이 있으므로(Johnson, 1986), 실험참가자가 눈동자 조건보다 머리 조건에서 목표자 극이 반짝이는 횟수를 세는 것이 더 쉬웠을 것으로 판단된다. Oz에서 측정된 VEP 진폭은 머리조건의 평 균과 눈동자 조건의 평균이 유의하게 다르지 않았다. 이것은 머리 조건과 눈동자 조건 모두 눈의 중심좌에 목표자극이 위치하도록 움직이는 것이 가능했다는 것 을 의미한다. 결과적으로, 머리 조건과 눈동자 조건 모두 시각 피질 수준에서는 동일한 정도로 정보가 전 달되지만, 주의집중 수준에서 차이가 있는 것으로 생 각된다.

머리 조건이 눈동자 조건보다 정확도가 더 높으므 로, 머리를 조금이라도 움직일 수 있는 마비환자들에 게는 머리를 쉽게 움직일 수 있는 장치를 부착하여 P300 문자입력기를 사용하게 하는 것이 도움이 될 것 이다. 시선고정 조건의 정확도는 매우 낮으므로, 실용 적으로 사용하기가 어려울 것이다. Brunner 등(2010)이 제안한 바와 같이, 시선을 움직일 수 없는 마비환자들 에게는 청각을 이용한 문자입력기가 더 큰 도움이 될 것이다(Schreuder, Blankertz, & Tangermann, 2010).

P300 문자입력기는 시선을 움직일 수 있는 마비환 자들에게만 사용할 수 있으므로, 눈동자의 움직임과 뇌파를 함께 이용하여 문자를 입력한다면 훨씬 더 좋 은 결과를 보일 수 있을 것이다. 몇몇 연구자들이 이 러한 시도를 하였으며(Lee, Yu, & Kim, 2012; Usakli et al., 2010), 향상된 정확도를 보고하고 있다.

머리 조건의 정확도는 Brunner 등(2010)의 결과⁶⁾와 비슷하지만, 시선고정 조건의 경우에는 본 연구의 정확도가 훨씬 낮은 수준이다. 이러한 결과는 시선의 통제방법에 따른 차이일 가능성이 높다. 본 연구에서는 실험자가 안구운동추적기를 관찰하여 시선을 움직이지 못하게 통제한 반면, Brunner 등(2010)에서는 시선이 300 ms가 넘는 시간동안 2.8° 이상 벗어나는 것을 통제하였다. 따라서 300 ms 이내로 시선을 움직이는 것은 가능하며, 이것이 결과의 차이를 유발한 것으로 보인다. 시선고정 조건에 대한 오류분포는 Brunner 등(2010)의 결과와 유사한 형태로 나타났다.

예상과는 달리, P300 문자입력기의 정확도와 분당 입력문자수의 평균이 시각도에 따라 통계적으로 유의하게 다르지 않았다. 머리 조건과 눈동자 조건을 합하였을 때, 60 cm 집단의 평균 정확도는 82.89%였으며, 100 cm 집단은 81.56%, 150 cm 집단은 76.00%였다. 통계적으로 유의한 차이가 없었던 이유 중 한 가지는 통계적 검증력이 약했기 때문인 것으로 파악된다.

응시방법은 피험자내 설계를 사용하였으며, 머리 조건과 눈동자 조건의 평균차이인 5%는 통계적으로 유의하였다. 그러나 거리 집단은 피험자간 설계를 사용하였으며, 60 cm 집단과 150 cm 집단 간의 평균차이인 5%는 통계적으로 유의하지 않았다. 피험자내 설계가 피험자간 설계보다 검증력이 더 높아서(Kirk, 2013), 이러한 차이가 발생한 것으로 보인다. 추후 검증력이 더 높은 실험설계를 통하여 시각도의 효과를 다시 검증해 볼 필요성이 있다.

REFERENCES

- Eom, J.S., Yang, H. Y., Park, M. S., & Sohn, J. H. (2013). P300 speller using a new stimulus presentation paradigm, *Korean Journal of the Science of Emotion & Sensibility*, 16, 107-116.
- Brunner, P., Joshi, S., Briskin, S., Wolpaw, J. R., Bischof, H., & Schalk, G. (2010). Does the 'P300' speller depend on eye gaze?. *Journal of neural engineering*, 7(5), 056013.
- Donchin, E., Spencer, K. M., & Wijesinghe, R. (2000). The mental prosthesis: Assessing the speed of a P300-based brain-computer interface, *IEEE Transactions on rehabilitation engineering*, 8, 174-179.
- Farwell, L. A., & Donchin, E. (1988). Talking off the top of your head: Toward a mental prosthesis utilizing event-related brain potentials, *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, 70, 510-523.
- Fazel-Rezai, R. (2007). Human error in P300 speller paradigm for brain-computer interface, *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*, 2516-2519.
- Fazel-Rezai, R., & Abhari, K. (2009). A region-based P300 speller for brain-computer interface. *Electrical and Computer Engineering, Canadian Journal of*, 34(3), 81-85.
- Furdea, A., Halder, S., Krusienski, D. J., Bross, D., Nijboer, F., Birbaumer, N., & Kubler, A. (2009). An auditory oddball (P300) spelling system for brain-computer interfaces. *Psychophysiology*, 46, 617-625.
- Hoffmann, U., Vesin, J. M., Ebrahimi, T., & Diserens, K. (2008). An efficient P300-based brain - computer interface for disabled subjects. *Journal of Neuroscience methods*, 167(1), 115-125.
- Johnson, R. (1986). A triarchic model of P300 amplitude, *Psychophysiology*, 23, 367-384.
- Kirk, R. E. (2013). *Experimental design 4th ed.* SAGE publications, Inc.
- Krusienski, D. J., Sellers, E. W., Cabestaing, F., Bayoudh, S., McFarland, D. J., Vaughan, T. M., & Wolpaw, J. R. (2006). A comparison of classification techniques for the P300 Speller. *Journal of neural engineering*, 3(4), 299.
- Krusienski, D. J., Sellers, E. W., McFarland, D. J., Vaughan, T. M., & Wolpaw, J. R. (2008). Toward enhanced P300 speller performance, *Journal of Neuroscience Methods*, 167, 15-21.
- Lee, B., Yu, J., & Kim, D. (2012). P300 speller using matrix group based on multi-bio signals, *Journal of KIISE : Software and Applications*, 39, 812-817.
- Lenhardt, A., Kaper, M., & Ritter, H. J. (2008). An adapted P300-based online brain-computer interface,

6) Brunner 등(2010)은 90%이상의 높은 정확도를 보고하고 있다. 그러나 Brunner 등(2010)은 문자 당 30회 제시한 반면 본 연구는 문자 당 12회 제시하였다. 제시횟수를 동일하게 하였을 경우, 비슷한 결과가 산출된다.

IEEE Transactions on Neural System and Rehabilitation Engineering, 16, 121-130.

원고접수: 2014.06.16

수정접수: 2014.06.27

게재확정: 2014.06.30

Lu, J., Speier, W., Hu, X., & Pouratian, N. (2013). The effects of stimulus timing features on P300 speller performance. *Clinical Neurophysiology*, 124(2), 306-314.

Manyakov, N. V., Chumerin, N., Combaz, A., & Van Hulle, M. M. (2011). Comparison of classification methods for P300 brain-computer interface on classification methods. *Computational intelligence and neuroscience*, 2011, 2.

McFarland, D. J., & Wolpaw, J. R. (2003). EEG-based communication and control: Speed-accuracy relationship, *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 28, 217-231.

Pierce, J. R. (1980). *An introduction to information theory*. New York: Dover Publications.

Polich, J. (2007). Updating P300: An integrative theory of P3a and P3b, *Clinical Neurophysiology*, 118, 2128-2148.

Schreuder, M., Blankertz, B., & Tangermann, M. (2010) A new auditory multi-class brain-computer interface paradigm: spatial hearing as an informative cue. *PLoS One* 5.

Sellers, E. W., Krusienski, D. J., McFarland, D. J., Vaughan, T. M., & Wolpaw, J. R. (2006). A P300 event-related potential brain-computer interface (BCI): The effects of matrix size and inter stimulus interval on performance, *Biological Psychology*, 73, 242-252.

Sellers, E. W. & Donchin, E. (2006). A P300 brain-computer interface: Initial tests by ALS patients, *Clinical Neurophysiology*, 117, 538-548.

Townsend, G., LaPallo, B. K., Boulay, V.B., Krusienski, D.J., Frye, G.E., Hauser, C.K., Schwartz, N.E., Vaughan, T.M., Wolpaw, J.R., & Sellers, E.W. (2010). A novel P300-based brain-computer interface stimulus presentation paradigm: Moving beyond rows and columns, *Clinical Neurophysiology*, 131, 1109-1120.

Usakli, A. B., Gurkan, S., Aloise, F., Vecchiato, G., & Babiloni, F. (2010). On the use of electrooculogram for efficient human computer interfaces. *Computational intelligence and neuroscience*, 2010, 1.