

새로운 자극제시방법을 사용한 P300 문자입력기*

P300 speller using a new stimulus presentation paradigm

엄진섭** · 양혜련** · 박미숙** · 손진훈**†

Jin-Sup Eom** · Hye-Ryeon Yang** · Mi-Sook Park** · Jin-Hun Sohn**†

**충남대학교 심리학과/뇌과학연구소

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

Abstract

In the implementation of a P300 speller, rows and columns paradigm (RCP) is most commonly used. However, the RCP remains subject to adjacency-distraction error and double-flash problems. This study suggests a novel P300 speller stimuli presentation—the sub-block paradigm (SBP) that is likely to solve the problems effectively. Fifteen subjects participated in this experiment where both SBP and RCP were used to implement the P300 speller. Electroencephalography (EEG) activity was recorded from Fz, Cz, Pz, Oz, P3, P4, PO7, and PO8. Each paradigm consisted of a training phase to train a classifier and a testing phase to evaluate the speller. Eighteen characters were used for the target stimuli in the training phase. Additionally, 5 subjects were required to spell 50 characters and the rest of the subjects were to spell 25 characters in the testing phase. Classification accuracy results show that average accuracy was significantly higher in SBP as of 83.73% than that of RCP as of 66.40%. Grand mean event-related potentials (ERPs) at Pz show that positive peak amplitude for the target stimuli was greater in SBP compared to that of RCP. It was found that subjects tended to attend more to the characters in SBP. According to the participants' ratings on how comfortable they were with using each type of paradigm on 7-point Likert scale, most subjects responded 'very difficult' in RCP while responding 'medium' and 'easy' in SBP. The result showed that SBP was felt more comfortable than RCP by the subjects. In sum, the SBP was more correct in P300 speller performance as well as more convenient for users than the RCP. The actual limitations in the study were discussed in the last part of this paper.

Keywords : brain-computer interface, brain-machine interface, P300 speller, ERP

요약

P300 문자입력기에 사용되는 대표적인 자극제시방법은 행-열 패러다임(RCP)이다. 그러나 RCP는 근접-혼동 오류와 이중-깜박임 문제를 가지고 있다. 본 연구에서는 RCP가 가지고 있는 두 가지 오류의 원천을 효과적으로 통제하는 하위블록 패러다임(SBP)을 제안하고 검증하였다. 15명의 실험참가자에게 RCP와 SBP를 모두 사용하여 문자를 입력하도록 하였다. 뇌파는 Fz와 Cz, Pz, P3, P4, PO7, PO8에서 측정하였다. 각 패러다임은 분류기를 학습시키기 위한 훈련단계와 문자입력기의 성능을 평가하기 위한 검사단계로 구성되어 있다. 훈련단계에서 18개의 문

* 이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 휴먼인지환경사업본부-신기술융합형 성장동력사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012K001339)

† 교신저자 : 손진훈 (충남대학교 사회과학대학 심리학과 및 뇌과학연구소)

E-mail : jhsohn@cnu.ac.kr

TEL : 042-821-6369

FAX : 042-821-8875

자를 입력하였으며, 검사단계에서 5명은 50개의 단어를 입력하였고 나머지 10명은 25개의 단어를 입력하였다. 정확도를 산출한 결과, SBP의 정확도는 83.73%로 RCP의 정확도 66.40%보다 통계적으로 유의하게 더 높았다. Pz에서 측정된 ERP를 분석하였을 때, 목표자극에 대한 정적 정점의 진폭이 RCP보다 SBP에서 더 크게 나타나 실험 참가자들이 SBP에서 특정 문자에 더 많은 주의를 집중한 것으로 보인다. P300 문자입력기에 대한 사용용이성을 7점 척도로 측정하였을 때, SBP가 RCP보다 더 사용하기 쉬운 것으로 나타났다. 특히 RCP의 사용용이성은 대부분의 실험참가자들이 ‘힘들었다’는 범주에 응답한 반면, SBP의 사용용이성은 모든 피험자들이 ‘보통’ 과 ‘쉬웠다’의 범주에 응답하였다. 전반적으로 SBP가 RCP보다 우월한 것으로 평가되었으며, 논의에 SBP의 한계점에 대해서 기술하였다.

주제어 : 뇌-컴퓨터 인터페이스, 뇌-기계 인터페이스, P300 문자입력기, ERP

1. 서론

Farwell과 Donchin(1988)은 뇌파의 한 형태인 사건 관련전위(event-related potential: ERP)를 이용하여 컴퓨터에 문자를 입력하는 방법을 고안하였는데, 행-열 패러다임(row-column paradigm: RCP)을 이용하여 문자자극을 제시한다. RCP은, 그림 1의 (A)와 같은 6×6의 문자행렬에서, 6개의 행과 6개의 열을 한 번에 하나씩 무선적인 순서로 짧은 시간 동안 반짝이게 제시한다. 6개의 행과 6개의 열을 모두 한 번씩 반짝이는 것을 한 시행으로 하였을 때, 하나의 문자를 입력하기 위해서는 최대 20 시행을 거친다. 사용자는 입력하고 싶은 문자가 반짝이는 횟수를 마음속으로 센다. 사용자가 주의를 집중한 자극에서는 ERP의 한 성분인 P300의 진폭이 크게 산출된다. 각각의 문자가 반짝였을 때의 P300을 관찰하여, 사용자가 입력하기 위해 주의를 집중한 문자가 어떤 것이었는지를 파악한다.

ERP는 잠음 대비 신호의 비율이 낮기 때문에, 신뢰로운 ERP를 얻기 위해서는 자극을 여러 번 제시한 후에 뇌파들을 평균하여 산출한다. 선행연구들은 하나의 문자를 입력하는데 사용한 시행수와 입력의 정확도가 정적인 관계를 가진다는 것을 보여주고 있다(Donchin, Spencer, & Wijesinghe, 2000; Lenhardt, Kaper, & Ritter, 2008). 하나의 문자입력에 사용된 시행수가 적으면 P300의 진폭이 덜 신뢰롭게 산출되며, 사용자가 입력하고자 한 문자와 P300의 진폭을 이용하여 파악한 문자가 서로 다를 가능성이 증가한다. 시행수가 많아질수록, 입력의 정확도는 높아진다. 그러나 시행수가 많아질수록 한 문자를 입력하는데 필요한 시간이 길어진다는 단점이 생긴다.

RCP의 정확도에 관한 연구들이 다수 있다. Sellers와 Krusienski, McFarland, Vaughan, Wolpaw 등(2006)

은 자극 행렬의 크기(3×3, 6×6)와 자극간 제시간격(175ms, 360ms)을 변화시키면서 정확도를 산출하였다. 한 문자당 20시행을 거쳤다. 온라인 상에서 정확도를 산출한 결과, 6×6의 행렬크기와 자극간 제시간격이 175ms일 때의 정확도가 약 80%였다. Nijboer 등(2008)은 8명의 근위축성측색경화증 환자들을 대상으로 실험하였다. 6×6 자극행렬을 사용하고, 20 시행을 거친 결과, 오프라인과 온라인에서 각각 82%와 62%의 정확도를 보였다. Guger 등(2009)은 81명의 정상 성인을 대상으로 실험하였다. 각 문자당 15 시행을 거친 후에, 오프라인으로 정확도를 산출한 결과, 91%의 정확도를 보였다. Townsend 등(2010)은 18명을 대상으로 3 내지 5 시행을 거친 후에 온라인 상에서 정확도를 산출하였다. 이들은 8x9 자극행렬을 사용하였는데, 77.34%의 정확도가 산출되었다. 전체적으로 보았을 때, 행-열 패러다임에서 한 문자당 15시행 이상을 거쳤을 때, 80~90% 수준의 정확도가 있는 것으로 평가된다.

RCP에서 오류를 유발하는 요인은 여러 가지 있을 수 있지만, 주된 요인이 한 가지 있다(Fazel-Rezai, 2007; Fazel-Rezai et al., 2012; Townsend et al., 2010). 입력오류들 중 많은 경우는 목표문자의 주변에 있는 문자들, 특히 목표문자와 같은 행이나 열에 있는 문자들로 잘못 입력된다. 이러한 원인에 의한 문제를 근접-혼란 오류(adjacency-distraction errors)라고 한다. 근접-혼란 오류는 목표문자와 인접해있는 행이나 열이 반짝일 때, 사용자의 주의를 끌어들여 P300 반응을 유발하기 때문에 나타난다(Townsend et al., 2010). Fazel-Rezai(2007)의 연구에서는 오류의 80%가 근접-혼란 오류에 해당하였으며, Townsend 등(2010)의 연구에서는 오류의 약 85%가 이 유형에 해당하였다.

RCP에서 오류의 가능성을 증가시키는 다른 원인이

존재한다. RCP에서는 6개의 행과 6개의 열이 무선적인 순서로 한 번에 하나씩 짧은 시간동안 반짝이는 것이 10회 이상 반복된다. 결과적으로, 목표자극을 포함하고 있는 행 또는 열이 연속해서(또는 짧은 시간간격을 두고) 반짝이는 경우가 반드시 존재하게 된다. 이런 경우에 두 번째로 반짝이는 문자에 주의를 집중하기가 매우 어려워지며, 집중할 수 있다 하더라도 첫 번째 반짝임에 의해 유발된 P300과 두 번째 반짝임에 의해 유발된 P300이 중첩되어 오히려 P300의 진폭이 감소하는 결과를 만들어 낸다(Townsend et al., 2010). 이런 원인에 의한 문제를 이중-반짝임 문제(double-flash problems)라고 한다.

Townsend 등(2010)은 이 두 가지 문제를 제거하기 위하여 체커보드 패러다임(checkerboard paradigm: CBP)을 고안하였다. 그림 1의 (B)와 같이 CBP는 8×9 문자행렬을 이용한다. 8×9 문자행렬에 대해, 동일한 무늬에 포함된 36개 문자들로 가상의 6×6 행렬 두 개(이하 각각을 행렬1과 행렬2로 칭함)를 구성한다. 6×6 행렬을 구성할 때에는 36개의 문자들을 무선적으로 배치한다. 행렬1의 6개 행을 하나씩 반짝이게 제시하고, 행렬2의 6개 행을 하나씩 제시한다. 다시 행렬1의 6개 열을, 그리고 행렬2의 6개 열을 반짝이게 제시한다. 사용자의 관점에서는 8×9 행렬에서 무선적으로 선택된 6개의 문자가 동시에 반짝이는 것이 반복되는 것처럼 보인다. CBP에서는 8×9 문자행렬의 행과 열이 함께 반짝이지 않으므로, 근접-혼란 오류가 감소할 것이며, 구조적으로 이중-반짝임이 나타날 수 없다. Townsend 등(2010)에 의하면, 유사한 조건에서 RCP는 정확도가 77.4%인 반면에 CBP는 정확도 91.5%로 나타났다.

Townsend 등(2010)이 고안한 CBP는 Farwell과

Donchin(1988)이 P300 문자입력기를 고안한 것만큼이나 획기적인 방법이다. 그러나 CBP는 한가지 단점을 가진다. 필요 이상으로 큰 문자행렬을 사용해야만 한다는 점이다. 필요 이상으로 큰 문자행렬은 한 번의 시행에 필요한 문자 반짝임의 횟수를 증가시키며, 결과적으로 문자입력 시간이 증가한다. 6×6 문자행렬을 사용하는 RCP는 한 번의 시행에 필요한 반짝임의 횟수가 12번이지만, CBP에서는 24번이 필요하다.

본 연구에서는 6×6 문자행렬을 사용하면서, 근접-혼란 오류와 이중-반짝임 문제를 해결할 수 있는 새로운 자극제시 패러다임인 하위블록 패러다임(sub-block paradigm: SBP)을 제시하였다. SBP은 그림 2의 (A)와 같이 서로 인접해 있는 6개의 문자들(즉, 2×3 하위블록)을 동시에 반짝이게 한다. 6×6 문자행렬에 포함된 모든 2×3 하위블록을 모두 반짝이게 하기 위해서는 36번의 반짝임이 필요하며, 이 때 각 문자는 모두 6번 반짝이게 된다. 즉, 36번의 반짝임이 1 시행이 된다. SBP는 목표문자와 인접해 있는 문자들이 목표문자와 함께 반짝이게 되는 횟수가 체계적으로 달라진다. 한 번의 시행에서 목표자극이 6번 반짝일 때, 목표자극의 좌우에 있는 2개의 문자는 4번, 상하에 있는 2개의 문자는 3번, 대각선에 있는 문자와 좌우에 한 칸 건너에 있는 문자는 각각 2번, 대각선 옆에 있는 문자들은 한 번 반짝이게 된다.

이러한 방법의 효과는 그림 2의 (B)와 같이 목표자극을 중심으로 목표자극에서 멀리 떨어진 문자일수록 P300의 진폭이 감소하도록 만든다. 근접-혼란 효과의 크기는 목표자극과 떨어진 정도에 따라서 결정되므로, SBP에서는 근접-혼란 효과도 그림 2의 (B)와 유사한 분포를 보일 것이다.

A	B	C	D	E	F
G	H	I	J	K	L
M	N	O	P	Q	R
S	T	U	V	W	X
Y	Z	0	1	2	3
4	5	6	7	8	9

(A)

A	B	C	D	E	F	G	H
I	J	K	L	M	N	O	P
Q	R	S	T	U	V	W	X
Y	Z	Sp	1	2	3	4	5
6	7	8	9	0	.	Ret	Bs
?	,	;	\	/	+	-	Alt
Ctrl	=	Del	Home	UpAw	End	PgUp	Shift
Save	'	F2	LfAw	DnAw	RtAw	PgDn	Pause
Caps	F5	Tab	EC	Esc	email	!	Sleep

(B)

Figure 1. (A) Row-column paradigm. (B) Checker-board paradigm

A	B	C	D	E	F
G	H	I	J	K	L
M	N	O	P	Q	R
S	T	U	V	W	X
Y	Z	0	1	2	3
4	5	6	7	8	9

(A)

A	B	C	D	E	F
G	H	I	J	K	L
M	N	O	P	Q	R
S	T	U	V	W	X
Y	Z	0	1	2	3
4	5	6	7	8	9

(B)

Figure 2. (A) Sub-block paradigm. (B) In SBP, when the target item is 'O', this shows the virtual probability distribution regarding P300 amplitude. Dark color (black) indicates the higher probability for larger P300 amplitude.

P300 문자입력기 사용자가 입력하고자 한 문자를 판단할 때, 다음과 같이 이 분포도를 사용할 수 있다. 먼저 36개의 문자 각각에 대해서, 사용자의 뇌파를 이용하여 그림 2의 (B)와 같은 분포를 작성한다. 다음으로, 36개의 분포도 중에서 이상적인 분포도와 가장 비슷한 분포도를 보이는 문자를 입력 문자로 선택한다. RCP에서는 각 문자가 제시되었을 때의 뇌파만을 이용하여 목표문자를 판단하는 반면, SBP는 목표문자와 주변의 문자들에 대한 뇌파를 모두 이용하므로, 정확도가 더 높을 것이라 생각할 수 있다.

앞서 언급하였듯이, RCP에서 6개의 행과 6개의 열을 하나씩 반씩할 때 이중-반씩임 문제가 반드시 발생한다. 그러나 SBP에서는 36개 하위블록을 하나씩 반씩할 때 이중-반씩임 문제를 효과적으로 통제할 수 있다. 하나의 하위블록이 반씩인 후에, 그 블록에 속한 문자가 적어도 두 번의 반씩임이 지난 후에 반씩이도록 순서를 정하는 것이 가능하다.

본 연구에서는 근접-혼란 효과를 목표문자 확인에 이용하고 이중-반씩임 문제가 발생하지 않도록 설계된 SBP가 RCP보다 더 높은 정확도를 보이는지 실험을 통하여 평가하였다.

2. 방법

2.1. 실험참가자

15명이 실험에 참여하였다. 남자는 8명이었으며, 평균연령은 25.8세였다(range 22-45). 5명은 P300문자입

력기 실험을 참여한 경험이 있었으며, 10명은 P300 문자입력기 실험에 처음 참여하였다. 실험참가자들은 뇌손상 병력이나 시력에 문제가 없는 성인이었다.

2.2. 실험장치

실험참가자로부터 60cm 앞에 놓인 19inch LCD 모니터에 6×6 문자행렬자극을 제시하였다. 각 문자의 폭은 1.1cm, 높이는 1.3cm였으며, 문자와 문자간 간격은 좌우로 5cm, 위아래로 3cm였다. 뇌파를 측정하기 위하여 Fz, Cz, Pz, Oz, P3, P4, PO7, PO8에 전극을 부착하였으며(Krusienski, Sellers, McFarland, Vaughan, & Wolpaw, 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++ v6를 이용하여 제작하였다.

2.3. 실험절차

실험은 총 두 번에 걸쳐서 진행하였다. 한 번은 RCP로, 또 한번은 SBP로 실시하였다. 각 실험은 두 단계로 구성되어 있다. 첫 단계는 훈련단계로 목표문자를 확인하는데 사용하는 판별함수를 추정하기 위한 것이다. 두 번째 단계는 검사단계로, 훈련 단계에서

산출한 분류함수를 사용하여 실험참가자가 입력하려고 한 문자를 판단하였다. 이를 통하여 실험참가자가 입력하려고 한 문자와 판별분석을 통하여 판별한 문자가 일치하는지를 파악하였다.

훈련단계와 검사단계 모두에서, 실험참가자가 입력해야 할 문자를 화면의 상단에 제시하였다. 실험참가자가 해야 하는 일은 입력해야 하는 문자가 반짝이는 횃수를 마음 속으로 세는 것이었다. 훈련단계에서는 36개의 문자들 중 공간적으로 고르게 분포하도록 선택한 18개의 문자를 목표문자로 사용하였다. 검사단계에서는 단어와 숫자열을 사용하였다. P300 문자입력기 실험은 상당한 주의집중이 필요하므로, P300 문자입력기 사용 경험에 따라서 실험길이를 달리하였다. RCP와 SBP를 경험한 적이 있는 5명의 실험참가자는 검사단계에서 총 50개의 문자(10개의 단어와 1개의 숫자열)를 입력하였으며, 실험 경험이 없는 10명의 실험참가자는 검사단계에서 총 25개의 문자(5개의 단어와 1개의 숫자열)를 입력하였다.

RCP에서는 6개의 행과 6개의 열을 무선적인 순서로 한 번에 하나씩 100ms 동안 강한 강도(회색 정상 굵기의 문자에서 흰색 굵은 문자로)로 제시하고 25ms 동안은 보통의 강도로 제시하였다. 결과적으로 125ms 마다 행과 열 중 하나가 계속해서 반짝이는 것처럼 보인다. 하나의 문자를 입력하는 동안에 6개의 행과 6개의 열이 모두 한 번씩 반짝이는 것을 1시행으로 하여 총 9시행을 반복하였다. SBP에서는 36개의 2×3 하위블록 중 하나를 100ms 동안 강한 강도로 제시하였으며, 매 125ms 마다 다른 2×3 하위블록을 강한 강도로 제시하였다. 36개의 하위블록이 한 번씩 반짝이는 것을 1시행으로 하여 총 3시행을 반복하였다. 36개의 하위블록들이 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 중에 한 개를 무선적으로 선택하여 사용하였다.

SBP에서 1시행은 RCP에서 3시행과 동일한 시간이 소요되며, 각 문자가 반짝이는 횃수도 동일하다. 즉, 두 패러다임 모두 하나의 문자를 입력하는데 13.5초가 필요하며, 각 문자는 18회 반짝이게 된다. 하나의 문자를 입력하는 것을 1회기로 하였을 때, 훈련단계에서는 18회기가 필요하였으며, 검사단계에서는 실험참가자에 따라 25회기 또는 50회기가 필요하였다. RCP와

SBP의 실험순서는 실험참가자별로 균형화하였다. 각 패러다임을 익히기 위한 연습시행은 3분 이내였다. 모든 실험이 끝난 후에, 실험참가자에게 각 패러다임을 사용하기가 얼마나 편하였는지를 7점 척도 상에 평가하도록 하였다. 1점은 '매우 어려웠다', 4점은 '보통', 7 점은 '매우 쉬웠다'를 의미한다.

2.4. 분류

훈련단계에서 기록한 뇌파에 대하여 단계적 선형판별분석(SWLDA)를 실시하여 판별함수를 산출한 후, 이 판별함수를 이용하여 검사단계에서 목표문자를 파악하였다. RCP에서 단계적 선형판별분석은 다음의 단계를 거쳐서 수행되었다. 한 문자를 입력하는 회기동안 1개의 행 또는 열이 반짝이는 것이 108번 진행되며, 이 시간동안 8곳의 두피에서 뇌파가 기록된다. 한 개의 행 또는 열이 제시되기 시작한 후 750ms 동안의 뇌파를 잘라내어 하나의 분석단위를 만든다. 한 회기에 8개의 전극마다 108개의 뇌파분석단위가 만들어진다. 한 전극에서 기록된 1개의 분석단위는 150개(.750sec×200Hz)의 값들로 구성되어 있다. 이 분석단위들은 목표자극이 포함된 열 또는 행인 경우와 목표자극이 포함되지 않은 경우로 나뉘어진다. 결과적으로 한 회기당 108×1200의 뇌파행렬이 만들어진다. 훈련단계에서 총 18개 문자를 입력하므로 1944×1200 행렬이 만들어지며, 이 행렬에 대해서 단계적 판별분석을 수행하여 목표자극과 비목표자극을 구별하는 판별함수를 산출하였다.

RCP의 검사단계에서는 각 회기별로 목표자극이 무엇이었는지를 판단한다. 먼저, 36개의 문자 각각에 대하여 각 문자가 반짝였을 때의 18개 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 최종적으로 선택된다. 이 과정을 각 회기마다 반복하여 목표문자를 파악하였다.

SBP에서는 RCP에서 사용한 절차에 한 가지 절차를 추가하였다. 훈련단계에서, 일단 RCP와 동일한 방법을 사용하여 판별함수를 도출하고(이하 1차 판별함수라 부름), RCP의 검사단계와 동일한 방법을 사용하여 훈련단계의 뇌파에 대한 ERP를 산출하였다. 다음으

로, 훈련단계에서 도출한 판별함수를 훈련단계에서 얻은 ERP에 적용하여, 36개의 각 문자가 목표문자일 확률을 계산하였다. 당연하게도, 그림 2의 (B)와 같이 목표문자에 대한 확률이 가장 높으며, 주변으로 멀어질수록 확률값은 낮아진다. 이제 각 문자가 목표문자일 경우의 예상 확률값을 기준으로 관찰된 확률값을 재정리한다. 36개의 확률값을 36×36의 행렬로 만든다. 이 행들 중 하나는 진짜 목표자극에 대한 확률분포를 나타내며, 나머지는 비 목표자극에 대한 확률분포를 나타낸다. 18회기에 대해 동일한 작업을 수행하여 648×36 행렬을 구성한다. 이 행렬에 대해 단계적 선형판별분석을 실시하여 목표자극과 비목표자극을 구분하는 판별함수를 도출한다(이하 2차 판별함수라고 부름).

SBP의 검사단계에서는, RCP와 동일한 방법으로 1차 판별함수를 이용하여 36개 각 문자가 목표문자일 확률을 계산한다. 36개의 확률을 훈련단계에서와 같이 각 문자가 목표문자일 경우에 예상되는 확률분포에 따라 재배열하여 36×36 행렬을 만든다. 이제 각 행(즉, 각 문자)에 대하여 2차 판별함수를 적용하여 각 문자가 목표문자일 확률을 산출하고, 확률이 가장 높은 문자를 목표문자로 선택한다.

2.5. 전송율

문자 입력기의 성능은 1분당 입력가능한 문자의 수로 평가할 수 있다(Furdea et al., 2009). 분당 입력문자수(written symbol rate: WSR)는 시행당 전송되는 비트(B)와 문자전송율(symbol rate: SR)를 통해서 계산할 수 있다(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. SR은 B를 이용하여 다음의 공식 (2)로 계산된다.

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

최종적으로 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 전송율

표 1에 RCP와 SBP에 대한 정확도, 분당비트율, 분당문자입력수가 제시되어 있다. SBP의 정확도는 83.73%로 RCP의 정확도 66.40보다 통계적으로 유의하게 더 높았으며($t(14)=2.87, p<.05$), 정확도의 함수인 분당비트율도 SBP는 16.95로 RCP의 12.08보다 더 높았고($t(14)=3.01, p<.01$), 분당입력문자수도 SBP는 2.23으로 RCP의 1.24보다 더 많았다($t(14)=2.71, p<.05$).

실험참가자별로 정확도를 살펴보았을 때, 15명중 11명은 RCP보다 SBP에서 정확도가 더 높았으며, 3명은 SBP보다 RCP에서 정확도가 더 높았고(4, 6, 12번), 1명은 두 패러다임에서 정확도가 동일하였다(5번). SBP의 정확도가 더 높았던 11명은 SBP를 먼저 실험한 참가자도 있고, RCP를 먼저 실험한 참가자도 있었다. 그러나 RCP의 정확도가 더 높았던 3명은 모두 SBP를 먼저 실험하고, RCP를 나중에 실험한 참가자들이었으므로, 이들 3명은 연습효과로 인하여 RCP의 정확도가 더 높았을 가능성이 있다. 이를 검증하기 위하여, 실험순서와 실험방법, 실험셋을 독립변인으로 하고 정확도를 종속변인으로 하는 라틴방형설계에 의한 변량분석을 실시하였다(Park, 2003). 분석결과 실험순서의 효과가 유의수준에 근접하였다($F(1,26)=3.02, p=.094$). 첫 번째로 실시한 실험의 추정된 정확도 평균은 68.93%였으며, 두 번째로 실시한 실험의 추정된 정확도 평균은 81.43%로, 두 번째로 실시한 실험의 정확도가 더 높은 경향이 있었다.

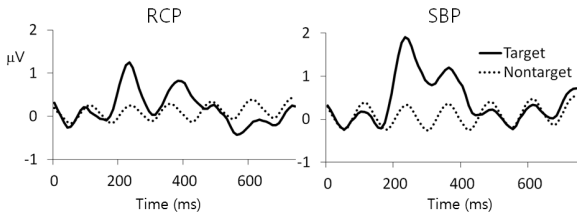


Figure 3. Grand mean ERPs at Pz for each paradigm

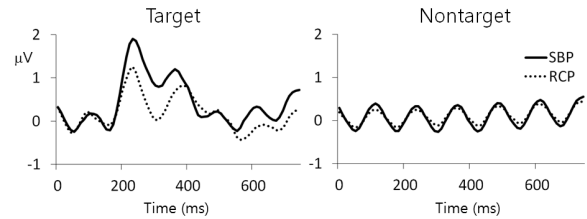


Figure 4. Grand mean ERPs at Pz for target and nontarget

3.2. 사건관련전위

RCP에서 산출한 ERP와 SBP에서 산출한 ERP가 그림 3에 제시되어 있다. 목표자극에 대한 P300은 Pz 영역에서 가장 두드러지므로(Polich, 2007), Pz영역의 ERP만 제시하였다. 두 패러다임 모두에서 목표자극에 대한 정적 정점 (positive peak) 진폭이 비목표자극에 대한 정적 정점 진폭보다 통계적으로 유의하게 더 크게 산출되었다(RCP, $t(14)=5.58, p<.001$; SBP, $t(14)=7.33, p<.001$). 정적 정점은 자극제시후 약 230ms에 나타났다. 그림 4와 같이 두 패러다임에서 산출한 목표자극

의 ERP를 비교하였다. 목표자극에 대한 정적 정점의 진폭은 두 패러다임에서 서로 다른 것으로 나타났는데, SBP의 정적 정점 진폭이 RCP의 정적 정점 진폭보다 통계적으로 유의하게 더 큰 것으로 나타났다($t(14)=2.55, p<.05$).

3.3. 오류분석

RCP와 SBP에서 오류의 유형을 분석하였다. 그림 5에 오류들이 목표자극으로부터 얼마나 떨어져서 발생하였는지가 제시되어 있다. RCP의 경우 총 96개의 오

Table 1. Values of accuracies, bit rates (bits/min) and WSR for the RCP and SBP

Participant	Sequence	RCP			SBP		
		Accuracy	Bit rate	WSR	Accuracy	Bit rate	WSR
1	RCP-SBP	52.00	7.60	0.00	76.00	13.97	0.96
2	SBP-RCP	60.00	9.54	0.00	70.00	12.22	0.28
3	RCP-SBP	28.00	2.76	0.00	96.00	20.99	3.68
4	SBP-RCP	72.00	12.79	0.50	58.00	9.04	0.00
5	RCP-SBP	96.00	20.99	3.68	96.00	20.99	3.68
6	SBP-RCP	88.00	17.89	2.48	84.00	16.51	1.94
7	RCP-SBP	88.00	17.89	2.48	100.00	22.98	4.44
8	SBP-RCP	36.00	4.20	0.00	60.00	9.54	0.00
9	RCP-SBP	60.00	9.54	0.00	80.00	15.21	1.44
10	SBP-RCP	92.00	19.37	3.05	100.00	22.98	4.44
11	RCP-SBP	32.00	3.46	0.00	72.00	12.79	0.50
12	SBP-RCP	88.00	17.89	2.48	80.00	15.21	1.44
13	RCP-SBP	36.00	4.20	0.00	96.00	20.99	3.68
14	SBP-RCP	88.00	17.89	2.48	100.00	22.98	4.44
15	RCP-SBP	80.00	15.21	1.44	88.00	17.89	2.48
Mean		66.40	12.08	1.24	83.73	16.95	2.23
SD		23.68	6.30	1.33	13.91	4.70	1.65

류가 발생하였는데, 그 중 78(81.25%)개가 목표자극이 포함된 행 또는 열에서 발생하였다. SBP의 경우는 총 52개의 오류가 발생하였는데, 그 중 30(57.69%)개가 목표자극과 50%이상 함께 반짝이는 문자에서 발생하였다. RCP의 근접-혼란 오류가 더 높은 경향이 있었다($\chi^2(1)=9.49, p<.01$).

3.4. 사용용이성

RCP와 SBP를 사용하기가 어느 정도 쉬웠는지를 질문하였다. 모든 실험참가자가 RCP보다는 SBP가 쉬웠다고 응답하였다. RCP의 사용용이성 평균은 2.60(SD=1.06)으로 ‘어려웠다’에 해당하는 값을 보였으며, SBP의 사용용이성 평균은 5.20(SD=0.86)으로 ‘조금 쉬웠다’에 해당하는 값을 보였다. 두 평균은 통계적으로 유의한 차이가 있었다($t(14)=10.22, p<.001$).

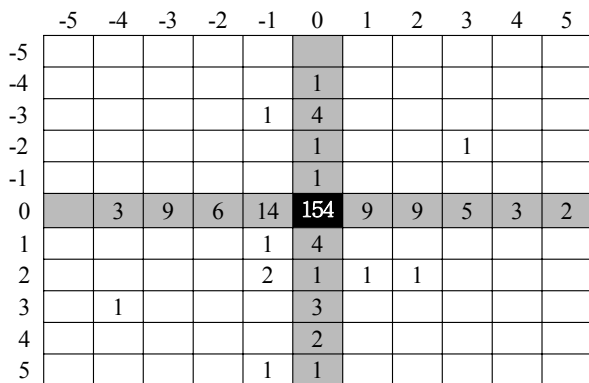
4. 논의

행-열 패러다임을 이용한 P300 문자입력기는 근접-혼란 오류와 이중-반짝임 문제를 가지고 있다. 본 연구에서는 이를 극복하기 위하여 새로운 자극제시 패러다임인 SBP를 제안하고, 정확도를 산출하였다.

RCP와 SBP의 정확도를 산출한 결과, SBP의 정확도가 RCP의 정확도보다 높은 것으로 나타났다. SBP의

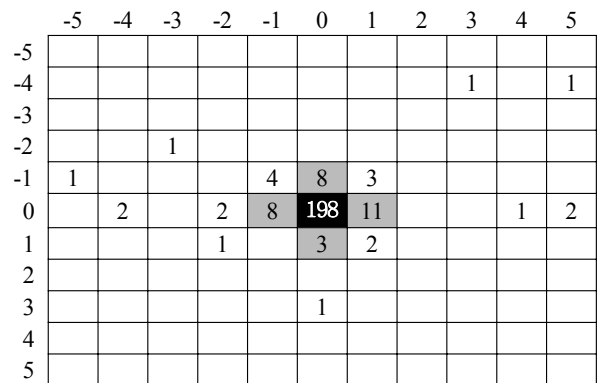
정확도가 더 높은 이유는 근접-혼란 오류와 이중-반짝임 문제를 효과적으로 해결했기 때문일 것이다. 본 연구에서 산출한 RCP의 정확도가 선행연구들보다 다소 낮은 경향이 있다(Guger et al., 2009; Nijboer et al., 2008; Seller et al., 2006; Townsend et al, 2010). 그 이유를 세 가지로 생각해볼 수 있다. 한 가지는 본 연구에서 사용한 시행수가 Seller 등(2006)과 Nijboer 등(2008)의 연구보다 적었기 때문일 수 있다. 시행수가 많을수록 정확도는 높아지는데, 이들 연구에서는 20 시행을 사용하였지만, 본 연구에서는 9시행만을 사용하였다. 두 번째는 연습량이 적었기 때문일 수 있다. 선행연구들에서 연습시행을 얼마나 했는지를 정확하게 제시하지 않고 있기는 하지만, 본 연구에서는 연습시행을 3분 이내로 하였다. 세 번째는 본 연구에서 RCP와 SBP를 반복해서 사용하였기 때문일 수 있다. 그러나 두 번째로 참가한 실험의 정확도가 더 높았으므로, 이것이 낮은 정확도의 원인은 아닌 것으로 생각된다.

두 패러다임에서 목표자극에 대한 ERP를 비교해보았을 때, SBP의 정적 정점이 RCP의 정적 정점보다 진폭이 더 컸다. 진폭이 더 컸다는 것은 다른 조건이 동일할 때, 더 많은 주의를 기울였다는 의미가 된다(Johnson, 1986). 각 패러다임의 사용용이성에 대한 질문 결과에서 SBP가 RCP보다 더 높은 값을 보였다는 것은 목표자극에 주의를 집중하기가 쉬웠다는 것으로



Target selections
Errors occurred within the same row or column

(A)



Target selections
Errors occurred within the same sub-block

(B)

Figure 5. (A) Error distributions for the RCP. (B) Error distributions for the SBP. 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.

해석할 수 있다. SBP의 사용용이성이 더 높게 평가된 이유는 아마도 이중-반짝임 문제가 해결된 결과일 가능성이 높다.

RCP에 대한 오류분석결과는 선행연구들(Fazel-Rezai, 2007; Townsend et al., 2010)과 매우 유사한 패턴을 보였다. 오류의 80% 이상은 목표자극이 포함된 행 또는 열에서 발생하였다. RCP에서 목표자극이 포함된 행 또는 열에 있는 문자들은 목표자극이 반짝인 횟수 중 50%에서 함께 반짝이게 된다. SBP에서 목표자극이 반짝인 시행 중 50%에서 함께 반짝인 자극에 대한 오류율을 분석한 결과, 전체 오류의 약 58%가 이 경우에 해당하였으며, 한 번이라도 목표자극과 함께 반짝인 경우가 있는 것을 포함하면, 약 92%로 증가하였다. SBP가 RCP보다 정확도가 높다는 점과 오류율 분석결과를 종합하면, SBP가 근접-혼란 오류를 효과적으로 통제하기는 하지만, 여전히 근접-혼란 오류가 이 패러다임의 주요 오류임을 보여주고 있다.

동일한 조건에서 SBP의 정확도가 RCP보다 더 높기는 하지만, RCP에 비교하여 한 가지 단점도 가진다. ERP에 포함된 노이즈의 양은 개인차이가 크기 때문에, 일정한 수준의 신호 대 잡음비율을 얻기 위한 시행수도 개인별로 달라진다. RCP의 경우에는 1 시행에 목표문자가 2번 깜빡이므로, 목표자극의 제시회수를 2, 4, 6, 8, 10, 12 등으로 조절가능하다. 그러나 SBP의 경우에는 1 시행에 목표문자가 6번 깜빡이므로, 목표자극의 제시회수를 6, 12, 18 등으로만 조절가능하다. SBP의 원리를 기반으로 하여, 목표자극의 제시회수를 융통성 있게 조절할 수 있는 새로운 패러다임의 개발도 필요할 것이다.

본 연구에서 각 패러다임의 정확도 산출은 실험이 모두 끝난 후에 분석을 통하여 얻어진 것이다. P300 문자입력기가 실제로 사용될 때에는 입력의 결과가 온라인으로 처리가 이루어져야만 한다. 앞으로 SBP가 온라인에서도 효율적이라는 것을 증명할 필요가 있다.

REFERENCES

- 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., Allison, B. Z., Guger, C., Sellers, E. W., Kleih, S. C., & Kubler, A. (2012). P300 brain computer interface: current challenges and emerging trends, *Frontiers in Neuroengineering*, 5, 1-14.
- 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.
- Guger, C., Daban, S., Sellers, E., Holzner, C., Krausz, G., Carabalona, R., Gramatica, F., & Edlinger, G. (2009). How many people are able to control a P300-based brain-computer interface (BCI)?, *Neuroscience Letters*, 462, 94-98.
- 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.
- Johnson, R. (1986). A triarchic model of P300 amplitude, *Psychophysiology*, 23, 367-384.
- Lenhardt, A., Kaper, M., & Ritter, H. J. (2008). An adapted P300-based online brain-computer interface, *IEEE Transactions on Neural System and Rehabilitation Engineering*, 16, 121-130.
- McFarland, D. J., & Wolpaw, J. R. (2003). EEG-based communication and control: Speed-accuracy relationship, *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 28, 217-231.
- Nijboer, F., Sellers, E. W., Mellinger, J., Jordan, M.A., Matuz, T., Furdea, A., Halder, S., Mochty, U., Krusienski, D. J., Vaughan, T. M., Wolpaw, J. R., Birbaumer, N., & Kubler, A. (2008). A P300-based computer interface for people with amyotrophic lateral sclerosis, *Clinical Neurophysiology*, 119, 1909-1916.
- Park, K. B. (2003). *Analysis of Variance and Regression*. Seoul: Hakjisa.
- 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.
- 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.
- 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.

원고접수: 2013.02.01

수정접수: 2013.03.29

게재확정: 2013.03.29