

안정 상태 시각 유발 전위에 기반한  
QWERTY 스타일의 정신적 타자기 시스템 구현

연세대학교 대학원  
의 공 학 과  
임 정 환

안정 상태 시각 유발 전위에 기반한  
QWERTY 스타일의 정신적 타자기 시스템 구현

지도 서 종 범 교수

이 논문을 석사 학위논문으로 제출함

2011년 12월 일

연세대학교 대학원

의 공 학 과

임 정 환

# 임정환의 석사 학위논문을 인준함

심사위원 \_\_\_\_\_인

심사위원 \_\_\_\_\_인

심사위원 \_\_\_\_\_인

연세대학교 대학원

2011년 12월 일

## 감사의 글

2008년도에 학부 졸업 논문과 관련하여 연구실을 처음 방문한 것이 엇그제 같은데, 벌써 석사과정을 마무리 짓는 시기가 온 것을 보니 무척이나 감개무량합니다. 지난 시간을 돌이켜보면 즐거운 일도 많았지만 저 자신에 대한 좌절 등 힘들었던 일도 많이 있었습니다. 하지만 그 때마다 많은 분들의 도움을 받아 이렇게 하나의 결실을 맺을 수 있었던 것 같습니다.

무엇보다도 미숙한 저를 위하여 아낌없는 조언과 가르침을 주신, 존경하는 임창환 교수님께 감사의 인사를 드립니다. 교수님의 자상하고 세심한 지도 덕분에 무사히 석사과정을 마칠 수 있었습니다. 주말에도 밤늦은 시간까지 연구하시는 교수님의 열정에 많은 감명을 받았으며 학문과 삶에 대한 교수님의 가르침대로 저 역시도 앞으로 최선을 다하겠습니다. 또한 바쁘신 와중에도 저를 많이 챙겨주시며 미소로 대해주셨던 서종범 교수님과 바쁘신 와중에도 부심을 맡아 주신 윤대성 교수님께도 감사드립니다.

학부와 석사과정 수업을 통하여 학문에 대한 많은 가르침을 주셨던 윤형로 교수님, 이운선 교수님, 이경중 교수님, 김동윤 교수님, 윤영로 교수님, 김영호 교수님, 신태민 교수님, 김한성 교수님, 김경환 교수님, 정병조 교수님, 김지현 교수님, 이상우 교수님, 이용흠 교수님께도 감사드립니다. 연구와 강의로 바쁘신 와중에도 학과를 위하여 항상 노력하시는 모습에 깊은 감명을 받았습니다.

또한 지난 과정 동안 함께 희비애락을 나눈 연구실 식구들에게도 감사드립니다. 느림과 미소의 미학을 몸소 보여준 희제형, 언제나 묵묵히 모든 일에 최선을 다하는 구현왕 영진형, 친절하게 연구 지도를 해주었고 제가 흔들릴 때마다 잡아주었던 사수이자 롤모델인 한정형, 손발이 참 잘 맞았던 도원형(록타르 오가르!), 정말 일 꼼꼼하게 잘했던 왕엄마 재현, 열심히 공부하고 있을 지혜, 군소리 없이 잔심부름 많이 해준 미선, 앞으로 한술밥 많이 먹게 될 창희, 한, 정연과 유사한 연구를 하면

서 많은 이야기를 나눈 착한 종호형, 선애와 신경 공학 연구실, Micro/Nano 시스템 연구실 등 많은 선, 후배님들에게도 감사의 말씀 전하고 싶습니다. 또한 제가 심신이 지칠 때마다 마음의 안식처가 되어준 ASC, JOY 동아리의 여러 회원과 대학교, 고등학교 친구들, 인연이 닿아 알게 된 많은 사람들에게도 고마움을 전하고 싶습니다.

마지막으로 지금까지 학업에 열중할 수 있도록 믿음과 사랑으로 보살펴 주신 가장 소중한 부모님, 믿음직한 동생 영재, 많은 성원 아끼지 않으신 친지 분들, 연구에 집중할 수 있도록 물심양면으로 지원해주신 막내 이모, 이모부, 할머니께 깊은 감사드립니다. 이외에도 미처 자세히 언급하지는 않았지만 많은 도움 주셨던 분들에게 감사의 마음 전하며 이만 줄일까 합니다.

**모두들 진심으로 감사드립니다.**

2011년 12월

임정환

# 차 례

국문 요약

제1장 서론 .....	1
제2장 방법 .....	5
2.1 피험자 및 실험 환경 .....	5
2.2 Visual scanning time 측정 .....	6
2.3 정신적 타자기 시스템 제작 .....	8
2.3.1. 정신적 타자기 제작 .....	8
2.3.2. 깜박임 주파수 선택 .....	12
2.4 정신적 타자기 시스템 검증 .....	13
2.4.1. 오프라인 실험 .....	13
2.4.2. 오프라인 분석 .....	13
2.4.3. 온라인 실험 .....	14
제3장 결과 .....	18
3.1 Visual scanning time .....	18
3.2 정신적 타자기 시스템 검증 결과 .....	19
3.2.1. 오프라인 실험 결과 .....	19
3.2.2. 온라인 실험 결과 .....	23
제4장 고찰 .....	29
4.1 QWERTY 키보드 형태의 문자 배치 .....	29
4.2 Visual scanning time과 시야각의 관계 .....	29
4.3 주파수 선택 .....	30
4.4 정신적 타자기 성능 .....	31
제5장 결론 .....	33
참고 문헌 .....	35
Abstract .....	39

## 그림 차례

그림 2.1 international 10-20 system .....	5
그림 2.2 visual scanning time을 측정하기 위해 사용한 문자 배치도 .....	7
그림 2.3 본 연구에서 제안한 QWERTY 스타일의 문자 배치 .....	9
그림 2.4 정신적 타자기 시스템의 키보드(정면) .....	10
그림 2.5 LED 채널의 전면부(좌)와 후면부(우) .....	10
그림 2.6 LED 컨트롤러 .....	11
그림 2.7 S1 피험자의 깜박임 주파수 배치도 .....	16
그림 2.8 온라인 실험의 한 장면 .....	17
그림 2.9 개선된 시스템의 키보드 .....	17
그림 3.1 두 문자 배치에 대한 visual scanning time .....	18
그림 3.2 두 시야 각에서의 최적의 전극 조합의 데이터를 1~10초의 크기로 나누어 H1, H1+H2의 특징 벡터를 사용하여 분류한 정확도 .....	22
그림 3.3 S1 피험자가 5.6Hz의 주파수로 깜박이는 섬광 자극을 응시했을 때 데이터의 분석 구간의 크기에 따른 SSVEP 반응 변화 .....	22

## 표 차례

표 3.1 오프라인 피험자의 모든 시야각과 전극 조합에서 10초 데이터를 H1+H2 특징 벡터를 사용하여 분류한 결과 .....	21
표 3.2(a) S1 피험자의 온라인 실험 결과(5초 데이터 사용) .....	24
표 3.2(b) S1 피험자의 온라인 실험 결과(6초 데이터 사용) .....	25
표 3.2(c) S1 피험자의 온라인 실험 결과(7초 데이터 사용) .....	26
표 3.2(a) S1 피험자의 온라인 실험 결과(6초 데이터 사용) .....	27
표 3.2(b) S1 피험자의 온라인 실험 결과(6초 데이터 사용) .....	28

## 국 문 요 약

### 안정 상태 시각 유발 전위에 기반한 QWERTY 스타일의 정신적 타자기 시스템 구현

뇌-컴퓨터(기계) 인터페이스 (brain-computer interface: BCI)는 뇌신경계로부터의 신호를 측정, 분석하여 컴퓨터 또는 외부기기를 제어하거나 사용자의 의사, 의도를 외부에 전달하기 위한 기술을 통칭하며, 기존의 연구를 통해 많은 BCI 어플리케이션이 발표 되었다. 그중에서도 사지 마비 환자들이 응시하고 있는 문자를 출력하여 그들의 생각을 표현하는 정신적 타자기 시스템은 대표적인 BCI 어플리케이션 중 하나이다. 이러한 정신적 타자기 시스템에서 시스템의 성능에 영향을 미칠 수 있는 요소 중 하나인 visual scanning time은 사용자가 출력하고자 하는 문자를 찾는데 소모되는 시간을 의미한다. 그런데 대부분의 정신적 타자기 연구들은 사용자가 문자를 응시하는 시간에만 초점을 맞추고 있어 visual scanning time에 대한 연구가 부족한 실정이다.

본 연구에서는 사용자에게 친숙한 문자 배열을 사용하여 사용자가 출력하고자 하는 문자를 빠르게 찾을 수 있는 정신적 타자기 시스템을 구현하였다. 이를 위하여 QWERTY 키보드와 비슷한 문자 배열, 깜박임 자극을 제시해주는 LED 채널, LED 채널의 깜박임 주파수를 조절하는 컨트롤러 등을 제작 및 통합하여 안정 상태 시각 유발 전위(steady-state visual evoked potential: SSVEP)를 기반으로 하는 정신적 타자기 시스템을 개발 하였다. 본 시스템의 검증을 위해 총 7명의 피험자가 연구에 참여하였으며, 기존 연구에서 많이 사용되던 행렬 형태의 문자 배열과 본 연구에서 제시한 QWERTY 문자 배열에서 동일한 영어단어를 눈으로 찾을 때의 시간을 비교하여 QWERTY 문자 배열에서 visual scanning time이 감소하는 것을 증명하였다. 그리고 모든 사람마다 SSVEP 반응을 유도하는 최적의 LED 깜박임

주파수를 찾기 위해 50개의 깜박임 주파수 후보에서 각 피험자마다 SSVEP 반응을 강하게 유도하는 30개의 주파수를 선택하였다. 또한, 본 시스템의 적합성을 알아보기 위해 5명의 피험자를 대상으로 시스템의 서로 다른 주파수로 깜박이는 30개의 문자를 응시하는 동안 측정된 뇌파를 분류하여 각 피험자의 분류 정확도를 계산하는 오프라인 실험을 수행하였다. 이때, 각 개인마다 뇌파 측정에 사용되는 전극의 위치, 시스템과 피험자간의 거리, 분류에 사용되는 특징 벡터, 문자를 응시하는 시간 등을 고려하였다. 그 결과, 최적의 전극 위치가 피험자마다 다르며, 출력하고자 하는 문자를 오래 응시한 데이터를 자극 주파수와 하모닉 주파수의 SSVEP 파워 값을 합한 값을 특징 벡터로 사용하여 분류할 때, 분류 정확도가 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과를 근거로 하여 3명의 피험자를 대상으로 주어지는 단어를 직접 출력하는 온라인 실험을 수행하였으며, 그 결과 한 문자를 6초간 응시하였을 때의 평균 분류 정확도는 86.27%로 본 시스템이 실제적인 응용분야들에 사용 가능한 수준의 시스템임을 검증하였다.

# 제 1 장 서 론

뇌-컴퓨터(기계) 인터페이스 (brain-computer(machine) interface: BCI or BMI, 이후 본문에서는 BCI)는 뇌신경계로부터의 신호를 측정, 분석하여 컴퓨터 또는 외부기기를 제어하거나 사용자의 의사, 의도를 외부에 전달하기 위한 기술을 통칭한다[1]. 특히 BCI는 근위축성측삭경화증 (amyotrophic lateral sclerosis: ALS), 뇌줄기졸중 (brainstem stroke), 척수 손상, 뇌성마비 등의 선천적 혹은 후천적 요인들로 인하여 뇌와 근육 사이의 신경 연결성이 끊어진 사지 마비 환자들이 외부와 소통할 수 있는 인터페이스를 제공할 수 있다는 점에서 매우 큰 사회적, 경제적 파급 효과를 창출할 것으로 기대되고 있다[2, 3].

이러한 BCI 시스템의 구현을 위해 주로 뇌파(electroencephalogram: EEG), 뇌자도(magnetoencephalogram: MEG), 근적외선 분광 장치(near infra-red spectroscopy: NIRS), 기능적 자기 공명 장치(functional magnetic resonance imaging: fMRI) 등을 기반으로 한 비침습적인 측정 방식과 대뇌 피질에 직접 삽입되는 탐침형 전극을 통해 측정되는 단일 신경신호를 기반으로 한 침습적인 방법이 널리 연구되고 있으며[4-6], 최근에는 두 방식의 절충 형태인 두개강내뇌파(electrocorticogram: ECoG)나 국소장전위(local field potential: LFP)를 측정하는 BCI도 연구되고 있다[7, 8].

이 중 침습적인 방식의 경우, 가장 이상적인 BCI 방식으로 동작 속도나 정확도 측면에서 비침습적인 BCI 방식에 비해 우수하고 궁극적으로 구현되어야 할 방식이다. 하지만 현재로서는 이 방식의 시술이 간질(또는 일회성 발작)을 유발할 수 있는 것으로 알려지고 있으며 장기간 전극 이식에 따른 생체 부작용, 시간에 따른 측정 신호의 변화 등의 문제가 여전히 이슈로 남아 있는 상황이다.

한편 비침습적인 방식의 경우, NIRS나 fMRI 등의 뇌혈류 변화를 기반으로 한 방식은 EEG와 MEG 등의 뇌의 신경 전자기 신호를 측정하는 방식에 비해 상대적

으로 긴 시정수를 가지거나 이동성이 극히 떨어지므로 신경계 손상 환자의 개인용 시스템으로 적용하기에는 무리가 있다. MEG 시스템도 역시 이동성이 극히 제한되어 있으며 fMRI나 NIRS와 함께 상대적으로 가격이 비싸다는 단점을 가진다.

반면 EEG의 경우 현재 세계적으로 많은 연구자들에 의해 연구되고 있으며 상대적으로 가장 쉽게 실험과 응용분야에의 적용이 가능하여 이미 많은 BCI 어플리케이션이 발표되고 있다. 대표적으로, 정신적 타자기[9], 마우스 커서 컨트롤[10], 웹브라우저 도우미[11], 휠체어 컨트롤[12] 등의 다양한 BCI 어플리케이션들이 발전되어왔다. 그중에서도 사지 마비 환자들이 응시하고 있는 문자를 출력하여 그들의 생각을 표현하는 정신적 타자기는 가장 많이 연구되고 있는 BCI 어플리케이션 중 하나이다.

대부분의 정신적 타자기 시스템은 빈번히 발생하는 반복 자극 중 특이한 자극이 제시 될 때나, 피험자가 특정 자극에 집중하고 있는 동안 그 자극이 주어질 때 발생하는 사상관련전위 (event-related potential: ERP) 중 하나인 P300을 기반으로 하고 있다[9, 13-15]. 이러한 시스템에서 문자들은 대부분 사각 행렬의 형태로 배열되어 있으며 각각의 문자행이나 문자열이 하나씩 임의적으로 깜박인다. 사용자가 출력하고자 하는 문자를 응시하는 동안 그 문자가 포함된 행이나 열이 깜박일 때, 그 문자가 포함되지 않은 행이나 열에 비해 더 큰 수준의 P300 반응이 발생하게 된다. 이 때 특정 문턱치 이상의 P300이 발생하는 행과 열이 교차하는 지점에 있는 문자를 최종적으로 화면상에 출력하게 된다. 일반적으로 P300 정신적 타자기의 성능을 높이기 위해서 문자행과 열을 여러 번 깜박이게 되는데, 이 경우 문자들이 깜박이는 시간을 최대한 줄이기 위해 문자 배열을 정방행렬에 가깝게 만들게 된다. 하지만 사용자에게는 이러한 행렬 형태의 문자 배열이 익숙하지 않기 때문에 출력하고자 하는 문자를 찾는 것에 어려움을 느낄 수 있으며, 이는 곧 눈으로 문자를 찾는 시간인 visual scanning time의 증가로 이어져 정신적 타자기의 성능에 영향을 미칠 수 있다. 이를 방지하기 위해서는 사각형 행렬 형태의 문자 배열에 익숙해지기 위한 트레이닝이 필요하다.

한편, 기존의 다른 BCI 연구에서는 눈에 일정한 주파수로 깜박이는 깜박임 자극을 제시하였을 때 후두엽의 시각 피질에서 강하게 나타나는 안정 상태 시각 유발 전위(steady-state visual evoked potential: SSVEP)를 기반으로 한 정신적 타자기가 제시 되었다[16-18]. SSVEP 정신적 타자기 시스템에서 각 문자 혹은 특정 명령은 서로 다른 일정한 주파수로 깜박이는 깜박임 자극에 대응되어 있으며 사용자는 자신이 원하는 문자나 명령에 대응되어 있는 깜박임 자극을 응시하게 된다. 이 때 사용자가 바라보는 시각 자극의 깜박임 주파수에 해당하는 파워 값이 증가하게 되는데 이를 이용하여 현재 사용자가 응시하고 있는 문자를 분류한다. SSVEP를 이용한 정신적 타자기의 경우, 후두엽에 부착된 전극을 사용하며 Oz 전극 1개만을 사용해도 측정이 가능하므로 실험이 용이하고, 특정 주파수의 파워 변화가 즉각적이고 분명하게 나타나므로 사용자가 응시하고 있는 자극을 쉽게 분류해 낼 수 있다는 장점이 있다[19]. 또한 동시에 모든 섬광 자극이 깜박여야 하는 SSVEP 정신적 타자기 시스템의 특성상 P300 정신적 타자기 시스템 보다는 문자 배열의 형태에 대한 제한이 비교적 적은 편이다.

하지만 SSVEP 정신적 타자기 시스템을 구축할 때에도 고려해야 할 사항이 있는데, 그것은 바로 대부분의 SSVEP 정신적 타자기 시스템에서 섬광 자극을 제시하기 위해 사용하는 컴퓨터 모니터의 화면 재생률이다. 컴퓨터 모니터를 사용할 경우 섬광 자극의 깜박임 주파수는 화면 재생률의 약수 주파수를 사용해야 하며, 화면 재생률과 동기화 시켜야 정확한 주파수로 깜박이는 섬광 자극을 제시 할 수 있다[20]. 이러한 제약은 SSVEP 정신적 타자기 시스템에서 사용하고자 하는 문자의 개수만큼의 섬광 자극을 제시하기 어렵게 만들 뿐 아니라 사용자에게 친화적인 문자 배열을 하기도 어렵게 한다.

이러한 제약 조건 하에 SSVEP 정신적 타자기 시스템을 구축 하려면, 적은 개수의 섬광 자극 주파수를 사용하거나 모니터가 아닌 LED와 같은 독립적인 섬광 자극을 사용해야 한다. 상기의 사항을 고려하여 기존의 한 연구는 모니터를 통해 제시된 다섯 가지의 서로 다른 깜박임 주파수를 ‘위’, ‘아래’, ‘왼쪽’, ‘오른쪽’, ‘선택’의 다섯 가지 명령에 대응한 마름모꼴 문자 배열의 SSVEP 정신적

타자기 시스템을 제안하였으며[17], 또 다른 연구에서도 모니터에서 제시되는 세 단계의 의사 결정 분지도를 사용하는 SSVEP 정신적 타자기 시스템을 제안 하였다.

LED를 사용하여 깜박임 주파수를 제공할 때에도 고려해야 할 몇 가지 사항이 있다. 첫 째, 모든 사용자마다 SSVEP 반응이 관찰되는 주파수 영역이 다르기 때문에 각 사용자에게 알맞은 주파수 사용이 요구 된다[21]. 둘째, 자극 주파수의 배수인 주파수에서 발생하는 하모닉 SSVEP 반응을 고려하여 배수 주파수의 사용을 피해야한다[11]. 셋 째, 15~25Hz 대역의 주파수를 사용한 경우 간질 발작을 일으킨 사례가 있었던 관계로 해당 주파수 대역 사용은 주의를 해야 한다[22]. 결국 LED를 이용하여 깜박임 주파수를 제공하는 경우, 사용 가능한 주파수 대역폭이 넓지 않기 때문에 가능한 많은 깜박임 주파수 후보군을 확보하기 위해서 좁은 주파수 대역폭을 많은 주파수로 나누는 과정이 필요하다. 우리가 아는 한, 상기에 언급된 SSVEP 정신적 타자기 시스템 구축의 어려움으로 인해 LED를 사용한 SSVEP 정신적 타자기 시스템이 발표 된 적은 없었다.

본 연구에서는 모니터가 아닌 LED의 섬광 자극으로 인해 유도된 SSVEP 반응을 기반으로 한 QWERTY 정신적 타자기 시스템을 구현하였다. 이를 위하여 QWERTY 스타일의 문자가 배열되는 키보드, 각 문자에 대응되는 LED 채널, LED 채널의 깜박임 주파수를 컨트롤 하는 컨트롤러를 제작 및 통합하였다. 시스템 구현에 앞서 7명의 건강한 피험자를 대상으로 QWERTY 형태와 행렬 형태의 문자 배열 상에서 15개의 영어단어에 대한 visual scanning time을 비교하여 QWERTY 키보드 스타일의 문자 배열의 효율성을 정량적으로 입증하였다. 본 시스템을 사용하기 위해 피험자마다 총 50개의 깜박임 주파수 중에서 SSVEP 반응을 강하게 발생시키는 30개의 주파수를 선택하여 배치하였다. 오프라인 실험에서는 피험자와 타자기 사이의 거리, 분류에 사용된 특징 벡터의 종류, 분석에 사용된 데이터의 크기에 따라 분류 정확도가 계산 되었으며, 이 중 가장 안정적인 결과를 보여주는 피험자 1명과 오프라인 실험에 참여하지 않은 2명의 피험자를 포함한 총 3명의 피험자가 온라인 실험에 참여하여 본 시스템의 BCI 시스템으로서의 적합성을 검증하였다.

## 제 2 장 방 법

### 2.1 피험자 및 실험 환경

본 연구를 위해 총 7명의 건강한 피험자가 실험에 참여하였다. 모든 피험자가 정상 시력을 갖고 있었으며, EEG 측정에 영향을 줄 수 있는 신경 및 정신 질환을 겪은 적이 없었다. 피험자는 실험에 대한 충분한 설명을 듣고 실험 동의서를 작성하였으며, BCI의 대상이 되는 사지 마비 환자와 같은 조건으로 실험하기 위해 의자에 앉은 상태에서 최대한 신체를 움직이지 않았다.

모든 실험은 방음이 되는 실험실에서 진행이 되었으며, EEG 멀티-채널 측정 시스템 (WEEG-32, Laxtha Inc., 대전, 한국)을 사용하여 EEG를 측정하였다. 본 연구에서 제시하는 시각 자극에 반응하는 뇌파를 측정하기 위해 그림 2.1과 같은 국제 10-20 시스템에 의거하여 세 개의 전극(Oz, O1, O2)을 사용하였고, 레퍼런스 전극은 오른쪽 귀 뒤에, 그라운드 전극은 왼쪽 귀 뒤에 부착하였다. EEG는 512 Hz의 샘플링 주파수로 측정되었으며, 감도는  $7\mu V$ 이었다.

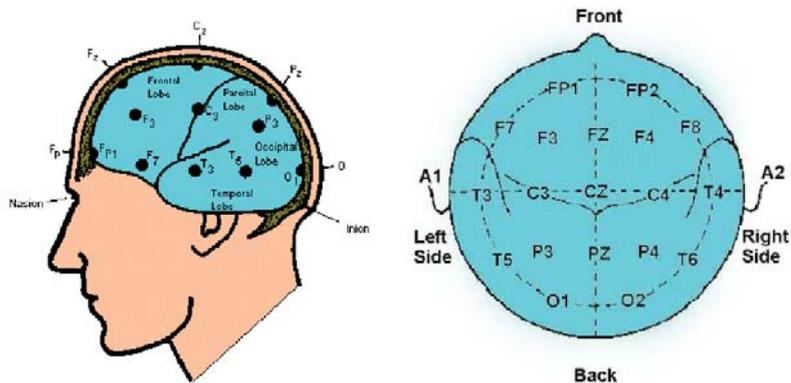
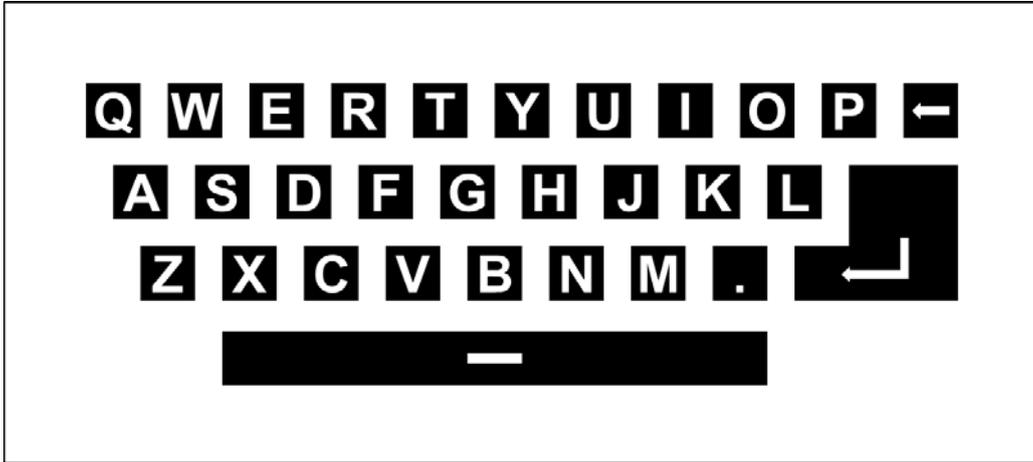


그림 2.1 international 10-20 system (출처: [www.brainmaster.com](http://www.brainmaster.com))

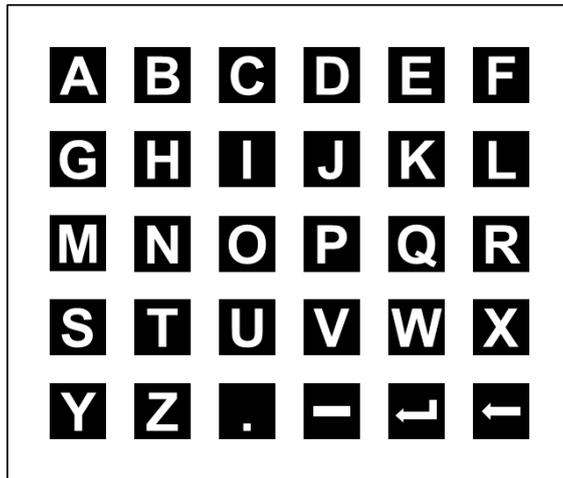
## 2.2 Visual scanning time 측정

정신적 타자기 시스템 제작에 앞서 본 연구에서 제안한 QWERTY 스타일의 문자 배열에서 사용자가 원하는 문자를 찾을 때 사각 행렬 형태의 문자 배열보다 효율적이라는 것을 객관적으로 증명하기 위한 실험을 실시하였다. 이를 위해 실험에 참가한 총 7명의 피험자를 대상으로 모니터에 임의로 제시되는 15개의 영어 단어를 두 가지 각기 다른 형태의 문자 배열에서 눈으로 한 문자씩 찾는 실험을 수행하였다. 이 때 사용한 15개의 영어 단어는 알파벳 A부터 Z까지 포함이 되도록 선정이 되었으며, 각 피험자별 문자 배열마다 측정된 visual scanning time 결과를 t-검정을 이용하여 통계 분석하였다.

그림 2.2는 visual scanning time 측정에 사용한 본 연구에서 제안한 QWERTY 스타일 문자 배열(a)과 대부분의 P300 정신적 타자기 시스템에서 사용되고 있는 문자 배열과 비슷한 5×6 행렬의 문자 배열(b)이다.



(a) QWERTY 스타일의 문자 배치도



(b) 행렬 형태의 문자 배치도

그림 2.2 visual scanning time을 측정하기 위해 사용한 문자 배치도

## 2.3 정신적 타자기 시스템 제작

### 2.3.1. 정신적 타자기 제작

정신적 타자기 시스템은 30개의 문자가 배열되는 타자기 키보드, 각 문자마다 대응되는 30개의 LED 채널, LED 채널의 깜박임 주파수를 컨트롤하는 컨트롤러로 구성이 된다. 먼저, 사용자가 출력하고자 하는 문자를 쉽게 찾을 수 있도록 QWERTY 키보드 스타일과 비슷한 문자 배열의 키보드가 설계 되었다. 그림 2.2는 본 시스템에 사용된 QWERTY 스타일의 문자 배열의 블록 다이어그램으로, A부터 Z까지의 26개의 영어 알파벳과 4개의 특수 문자( '백스페이스' , '구두점' , '엔터' , '스페이스' )를 포함한 30개의 문자가 사용되었다. 각 알파벳 문자들은 가로 2cm, 세로 2cm의 정사각형 모양의 키 안에 배열이 되었으며, 4개의 특수 문자는 타자기와 알파벳 키의 크기에 비례한 크기의 키 안에 배열이 되었다. 각 문자 키들은 이웃한 문자 키들과 수평, 수직 방향으로 1cm 떨어져서 배치가 되었다.

상기에서 기술한 키보드를 도화지, 기름종이, OHP 필름 등을 사용하여 제작하였다. 먼저, 그림 2.3과 같이 디자인한 문자 배치도를 도화지에 그리고 문자 키 모양으로 제거를 한 후, 앞면에는 문자 모양대로 음각한 판을 붙이고, 뒷면에는 지지대를 부착하여 LED 채널을 고정시킬 수 있도록 하였다. 한 문자 마다 4개의 LED로 구성된 채널을 부착하게 되며 LED가 깜박일 때 섬광 자극이 음각된 글자 모양을 통해 투과 될 수 있도록 하였다. 이 때, 문자 음각 판과 LED 채널 사이에 기름종이를 부착하여 LED 채널이 직접적으로 보이지 않음과 동시에 LED의 밝기를 중화시켰다. 최종적으로 타자기를 보호하기 위한 문자 키 모양으로 제거를 또 다른 도화지와 OHP 필름을 최 앞단에 부착하여 그림 2.4와 같이 타자기 키보드를 제작하였다.

LED 채널은 납땀을 용이하게 만들기 위해 제작한 PCB판(가로1.6cm, 세로 2cm)에 4개의 멀티-칩 고휘도 LED(Part Number: DG-82A83C-001 -5/S -3; 밝

기: 6000mcd; 동작 전류: 20mA; 시야각:  $2\theta \ 1/2=60^\circ$  침투 파장: 0.26/0.28nm; 광원 색: 흰색; 렌즈 색: 투명한 무색)를 납땜하여 제작되었다. 총 30개의 LED 채널을 제작하였으며 그림 2.5는 그 중 한 개의 LED 채널의 전면부(좌)와 후면부(우)이다.

그림 2.6은 TMS 320 F2812 DSP 칩(Texas Instruments Inc.)을 사용하여 제작한 LED 컨트롤러이다. 컨트롤러는 ‘code composer studio v4 core edition(Texas Instruments Inc.)’ 프로그램으로 구동이 되며, 이 때 각 30개 LED 채널의 깜박임 주파수를 설정 할 수 있도록 프로그래밍 하였다. LED 채널과 컨트롤러는 케이블로 연결이 되며 탈부착이 용이하도록 제작되었다.

최종적으로, 키보드, 30개의 LED 채널, LED 컨트롤러를 결합하여 본 시스템을 제작하였다.

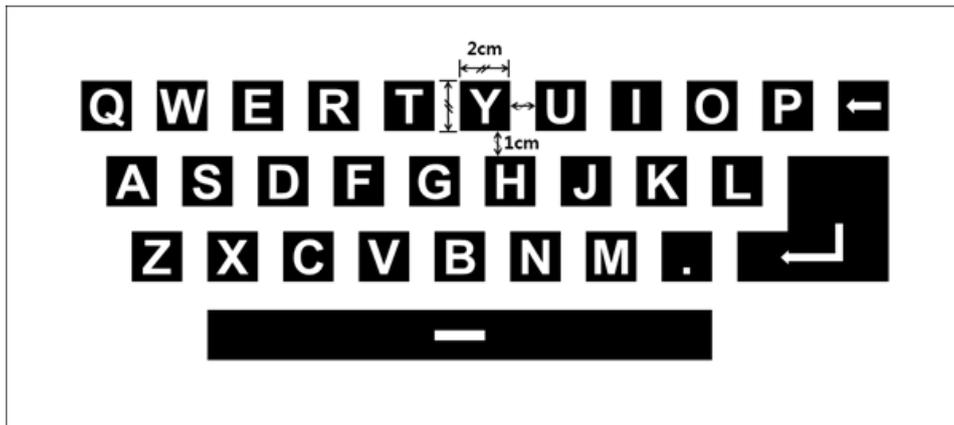


그림 2.3 본 연구에서 제안한 QWERTY 스타일의 문자 배치.



그림 2.4 정신적 타자기 시스템의 키보드(정면)

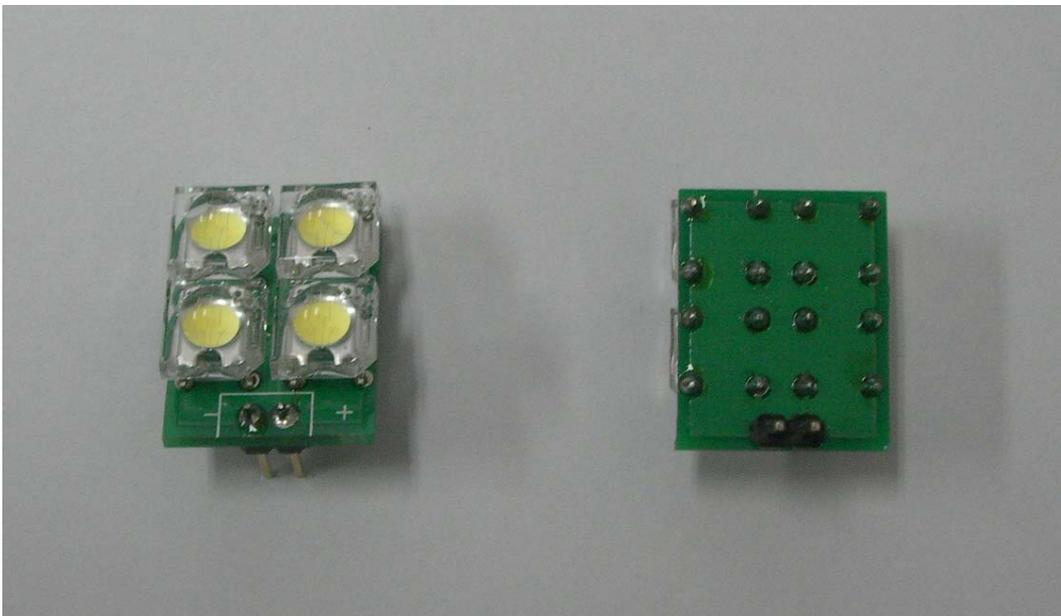


그림 2.5 LED 채널의 전면부(좌)와 후면부(우)

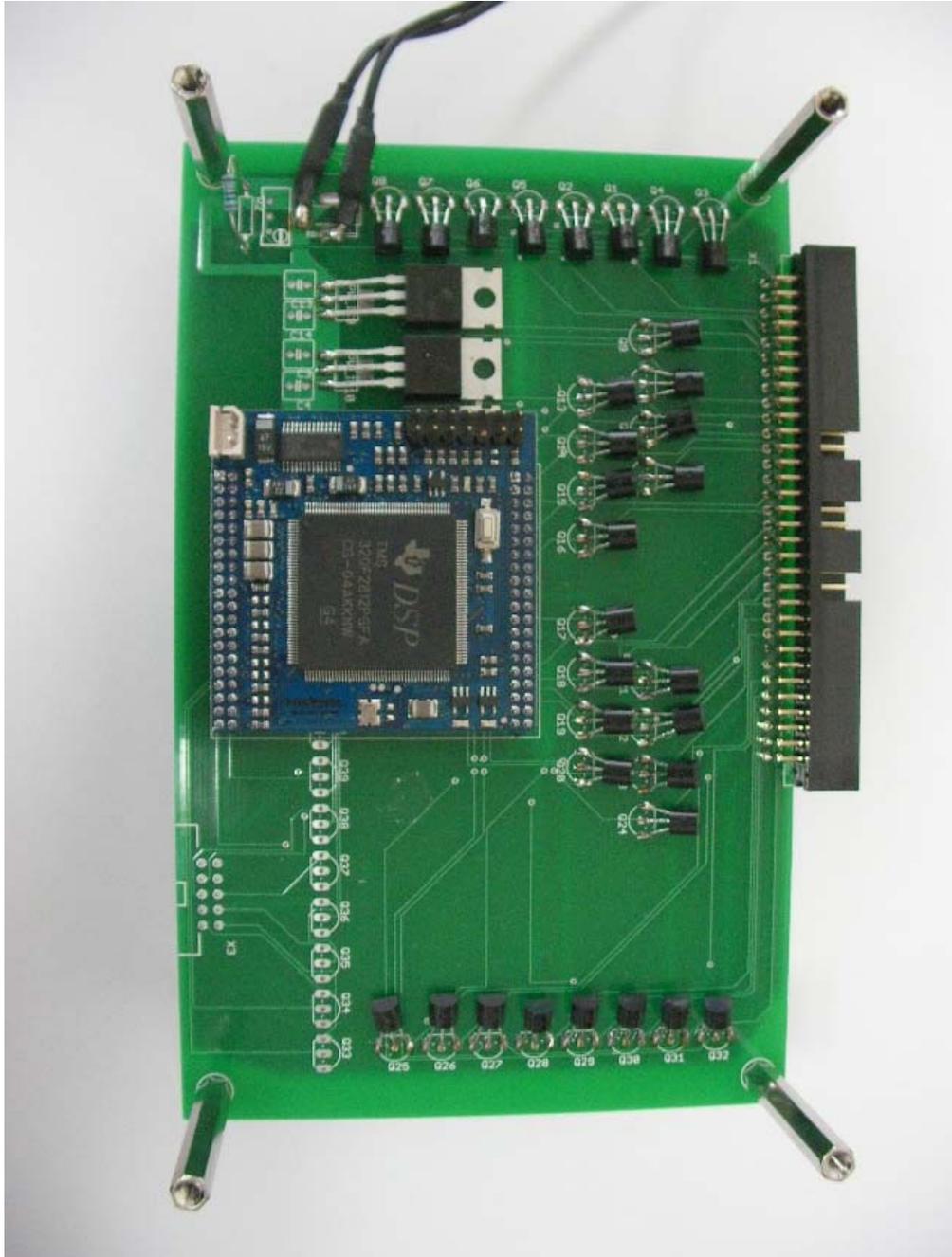


그림 2.6 LED 컨트롤러

### 2.3.2. 깜박임 주파수 선택

LED의 깜박임 주파수를 선택할 때에는 몇 가지 고려해야 할 사항이 있다. 우선 LED와 같은 작은 크기의 섬광 자극을 사용할 경우 5~13Hz의 낮은 주파수 대역의 깜박임 주파수를 사용할 때 강한 SSVEP 반응이 나타나며[23], SSVEP 하모닉 성분을 특징 벡터로 사용할 때에는 자극 주파수의 배수에 해당하는 주파수는 사용할 수 없다[11]. 또한, 모든 사람마다 SSVEP 반응이 강하게 발생하는 깜박임 주파수가 다르기 때문에 각 개인에 맞는 주파수를 선택해야한다[21].

본 연구에서는 상기의 사항을 고려하여 5.0~9.9Hz의 주파수 대역을 0.1Hz로 나누어 만든 총 50개의 깜박임 주파수에서 각 개인마다 SSVEP 반응을 강하게 유도시키는 30개의 주파수를 선택하였다. 각 개인마다 최적의 깜박임 주파수를 찾기 위하여 30개의 LED 채널이 각 5.0~7.9Hz의 주파수로 깜박이게 하고 피험자가 10초씩 각 문자를 응시하게 하였다. 이때 주위 시야에 의한 방해를 최소화하기 위해 가급적이면 이웃한 LED 채널들끼리는 주파수 차이가 크게 벌어지게끔 배치시켰다.

피험자가 문자를 응시하는 동안 Oz, O1, O2의 세 개의 전극을 사용하여 EEG를 측정하였다. 파워 스펙트럼 분석을 통하여 각 피험자마다 50개의 깜박임 주파수 중에 해당 주파수와 하모닉 주파수의 SSVEP 반응이 강하게 발생하게 하는 30개의 깜박임 주파수를 선택하였다.

## 2.4 정신적 타자기 시스템 검증

### 2.4.1. 오프라인 실험

총 5명의 피험자가 오프라인 실험에 참여했으며, 팔걸이의자에 편하게 앉아 이전의 과정에서 각 피험자에게 최적화 된 깜박임 주파수로 깜박이는 LED 채널에 대응되어 있는 문자를 응시하였다. 피험자는 실험자가 무작위의 순서로 지시하는 문자를 10초에 걸쳐 응시하였으며 이 때 Oz, O1, O2 세 개의 전극으로 EEG를 측정하였다. 피험자와 정신적 타자기의 거리에 따른 시스템의 성능 변화를 알아보기 위해 두 거리(44 cm: 시야각 40° , 60 cm: 시야각 30° )에서 실험이 진행되었으며 한 거리의 각 문자마다 두 번씩 응시하여 피험자마다 총 120 trial의 EEG 데이터가 측정되었다.

### 2.4.2. 오프라인 분석

오프라인 분석에서는 오프라인 실험을 통해 측정된 각 피험자마다 120 trial의 EEG 데이터를 이용하여 분류에 사용된 특징 벡터의 종류, 피험자와 타자기 사이의 거리, 분석 데이터의 크기에 따른 분류 정확도를 계산하여 피험자가 본 시스템을 사용하기 위한 최적의 요인을 찾는 과정을 수행하였다.

SSVEP 반응을 특징 벡터로 사용하기 위해서 측정된 EEG 데이터를 고속 푸리에 변환(fast Fourier transform: FFT)하여 0.1Hz 간격의 주파수에 대한 파워 스펙트럼을 계산하였다. 피험자가 응시하고 있는 문자를 분류하는데 필요한 특징 벡터로 활용하기 위해 모든 trial에 대해 세 전극마다 30개의 깜박임 주파수에 대한 SSVEP 파워 값(H1)이 계산되었다. 또한, 하모닉 성분을 특징 벡터로 포함했을 때의 효과를 관찰하기 위해 H1과 각 깜박임 주파수의 두 배의 주파수에서 발생하는

SSVEP 하모닉 파워 값(H2)을 더한 값을 특징 벡터로 사용하였다(H1+H2).

피험자가 응시한 문자를 분류하기 위해 본 연구에서 사용한 분류 알고리즘은 매우 간단한 것으로, 각 두 종류의 특징 벡터(H1, H1+H2)를 사용하여 30개의 깜박임 주파수 중에 가장 큰 SSVEP 파워 값을 갖는 주파수를 찾는 것이다. 이 때 H1과 H1+H2의 두 종류의 특징 벡터를 사용했을 때의 분류 정확도가 각각 계산되었다.

또한, 피험자마다 최적의 분류 정확도를 보이는 전극 조합을 찾기 위해 세 전극으로 만들 수 있는 모든 전극 조합에 대한 분류 정확도를 계산하였다. 상기 기술한 각 시야각마다 60 trial, 총 120trial의 10초간의 데이터에서 추출한 H1+H2 특징 벡터와 분류 알고리즘을 사용하여, 각 시야각과 피험자마다 최적의 분류 정확도를 갖는 전극 조합을 발견하였다.

이렇게 각 피험자별로 찾아낸 최적의 전극 조합에서 측정된 총 120 trial의 각 10초 데이터를 사용하여, 데이터의 크기에 따른 분류 정확도를 구하였다. 한 trial의 데이터를 1~10초로 1초씩 증가된 10개의 데이터로 나누어 특징 벡터로서 각 H1, H1+H2를 사용했을 때의 분류 정확도를 계산했으며, 이 때 제로패딩 기법을 사용하여 파워 스펙트럼을 0.1Hz 간격으로 계산할 수 있도록 하였다.

#### 2.4.3. 온라인 실험

본 연구의 정신적 타자기 시스템을 검증하기 위하여 온라인 실험을 수행하였다. 오프라인 분석 결과 시야각, 특징 벡터의 종류와 관계없이 일정하고 안정된 분류 정확도 결과를 보여줬던 S1 피험자가 온라인 실험에 참여하였다. 오프라인 분석 결과를 토대로 그림 2.7과 같이 각 문자마다 깜박임 주파수를 배치하고 Oz, O2의 두 개의 전극과, 30°의 시야각을 선택하였다. 약 20분간의 연습을 통해 피험자가 자유롭게 자신이 원하는 문자를 출력하도록 한 후, 온라인 실험을 시작하였다.

온라인 실험은 모니터 화면에 제시된 단어를 피험자가 문자를 응시하여 출력하는 것으로, 실험에 사용된 단어는 앞서 visual scanning time 측정에 사용했던 영어 단어와 동일하게 총 68개의 문자로 이루어진 15개의 영어 단어이다. 온라인 실험 결과는 한 문자마다 모니터 화면과 스피커를 통해 피험자에게 실시간으로 피드백이 되었으며 피험자가 원하지 않은 문자가 출력될 때는 '백스페이스' 문자를 응시하여 그 문자를 수정하게 하였다.

그림 2.8은 온라인 실험의 한 장면으로 피험자가 모니터 화면에 제시된 단어를 출력하기 위해 각 문자를 응시하는 동안 두 전극에서 측정된 뇌파를 실시간 분석하여 결과를 화면과 스피커를 통해 피드백해주는 장면이다.

온라인 실험에서는 한 단어를 응시하는 시간을 5, 6, 7초의 세 단계로 나누어 응시하는 시간의 차이에 따른 본 시스템의 성능을 비교하였다. 이를 위해 총 15의 영어단어에 대해 각 단계별 분류 정확도, 정보 전달율(information transfer rate: ITR(비트/분)), 분당문자변역률(the number of decoded letters per minute: LPM(문자/분))을 계산하였다.

분류 정확도의 경우 피험자가 원하지 않는 문자가 출력되어 '백스페이스'를 사용해 수정할 경우, '백스페이스'는 피험자가 의도한대로 출력이 된 것이 되기 때문에 제대로 분류한 것이라고 평가하였으며 분류 정확도  $p$ 는 다음과 같이 계산 되었다.

$$p = \frac{\text{'백스페이스'를 포함하여 바르게 분류된 총 문자의 개수}}{\text{'백스페이스'를 포함하여 총 출력된 문자의 개수}}$$

계산된 분류 정확도를 이용하여 정보전달율 ITR은 다음과 같이 계산 되었다.

$$ITR = \frac{60}{S} \times \log_2 N + p \log_2 p + (1-p) \log_2 \left( \frac{1-p}{N-1} \right)$$

이 때  $S$ 는 1trial을 실행하는데 걸리는 시간,  $N$ 은 시스템의 모든 task의 개수를

의미한다. 본 시스템에서 EEG 측정 후 한 문자를 분류하는데 걸리는 시간은 0.1초 미만이었기 때문에  $S$ 는 피험자가 문자를 응시하는 시간이 되며,  $N$ 은 30,  $p$ 는 상기에서 계산된 분류 정확도를 대입하였다.

분당문자번역률 LPM은 다음과 같이 계산 되었다.

$$LPM = \frac{60}{S} \times p$$

오프라인 실험과 온라인 실험을 하는 동안 피험자들이 본 시스템의 문자 배치가 너무 조밀하고 출력하고자 하는 문자 주변의 문자들의 깜박임으로 인해 집중하기 힘들다는 의견을 제시하였다. 이 의견을 수렴하여 문자간의 간격을 가로, 세로 2.5 cm로 변경하여 그림 2.9와 같이 키보드를 다시 제작하여 시스템을 개선하였다.

개선한 시스템을 검증하기 위해 2명(S6, S7)의 피험자가 참여하였다. 상기와 동일한 방법으로 깜박임 주파수 선택 및 배치를 하였으며, 오프라인 실험을 하지 않고 온라인 실험을 수행하되 한 문자를 응시하는 시간을 6초로 고정시켜 최대한 피험자에게 부하가 걸리지 않도록 하였다. 온라인 실험과 마찬가지로 분류 정확도, ITR, LPM을 계산하여 시스템의 성능을 조사하였다.

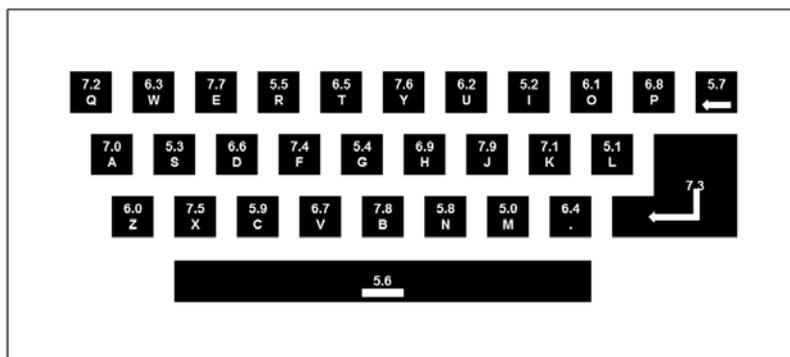


그림 2.7 S1 피험자의 깜박임 주파수 배치도

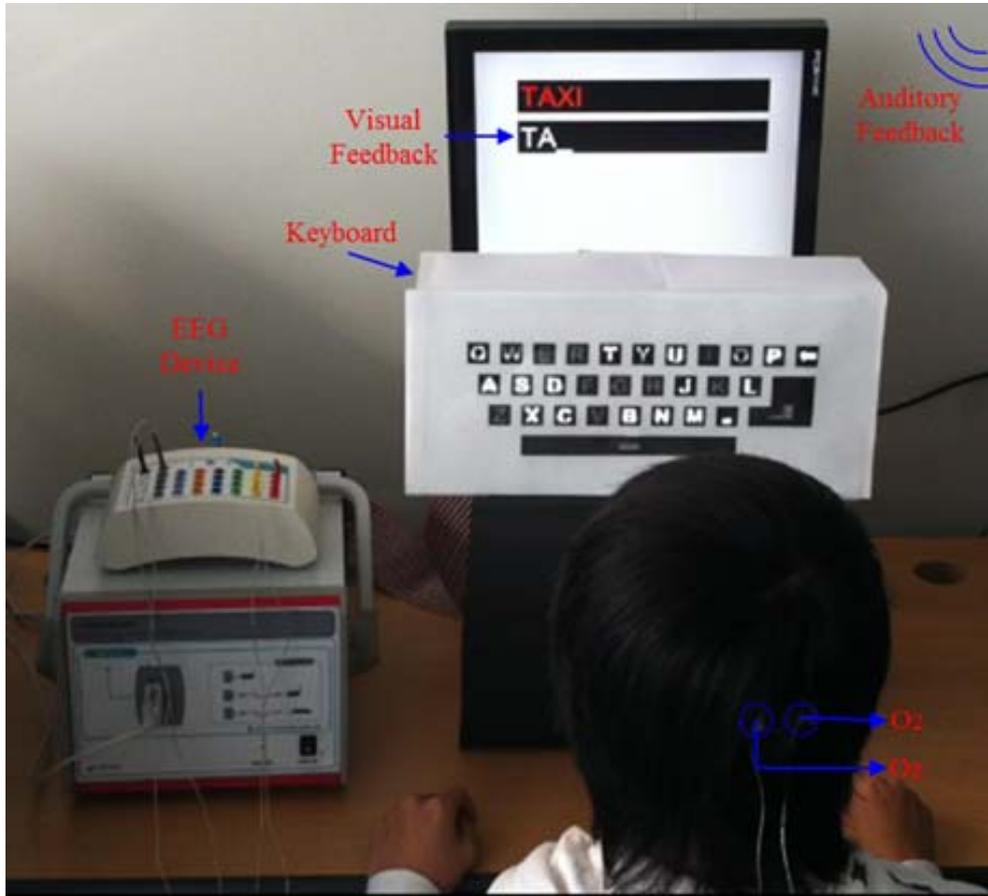


그림 2.8 온라인 실험의 한 장면

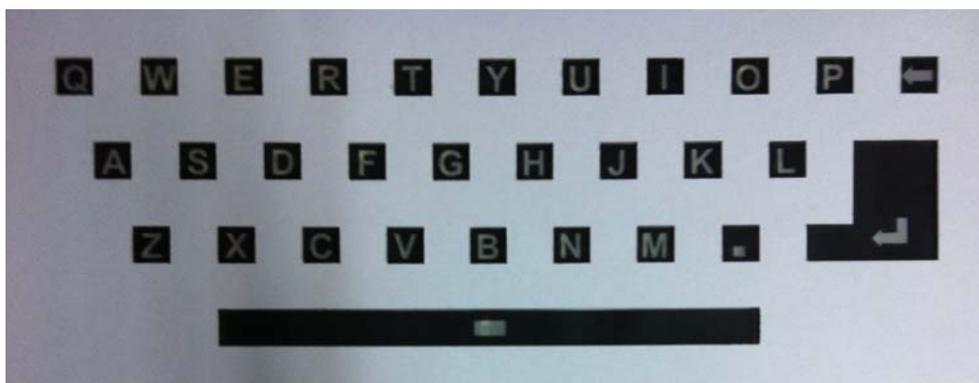


그림 2.9 개선된 시스템의 키보드

## 제 3 장 결 과

### 3.1 Visual scanning time

그림 3.1은 각 피험자의 두 문자 배치에 따른 15개의 영어 단어의 총 visual scanning time을 나타내고 있다. 모든 피험자에게서 기존의 연구[24-26]와 동일하게 사각 행렬 형태의 문자 배치 보다 QWERTY 스타일의 문자 배치에서 visual scanning time이 통계적으로 유의미하게 감소함을 확인할 수 있었다( $p = 0.0002$ ). 이 결과로부터 QWERTY 스타일의 문자 배치에서 피험자가 원하는 문자를 눈으로 찾는 것이 더 용이하다는 것을 객관적으로 확인 할 수 있었다.

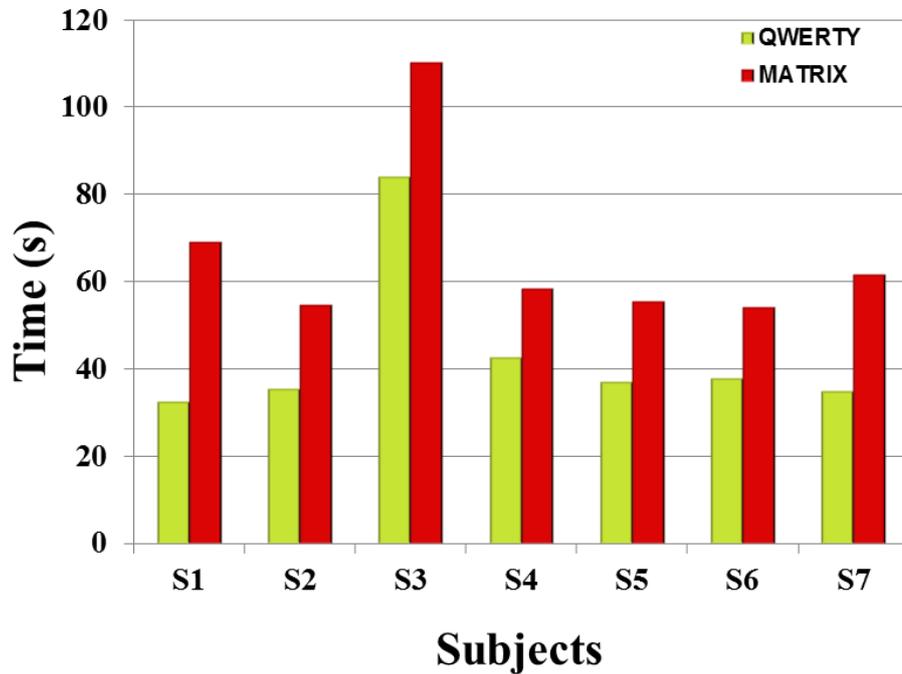


그림 3.1 두 문자 배치에 대한 총 15개의 영어 단어의 총 visual scanning time

## 3.2 정신적 타자기 시스템 검증 결과

### 3.2.1. 오프라인 실험 결과

표 3.1은 5명의 오프라인 피험자의 모든 시야각과 전극 조합의 10초 데이터에서 H1+H2 특징 벡터를 추출하여 분류 정확도를 계산한 결과로, 볼드체의 분류 정확도는 각 피험자의 시야각마다의 최고 분류 정확도를 의미한다. 결과로부터 분류 정확도는 피험자마다 서로 다른 전극 조합과 시야각에 큰 영향을 받지만, 최고 분류 정확도는 시야각이 다르더라도 같은 전극 조합에서 나타남을 확인할 수 있었다. 피험자 별 최적의 전극 조합은 다음과 같다 (S1: Oz, O2, S2: Oz, S3: O2, S4: O2, S5: Oz, O1). S5의 경우 Oz, O1 조합을 사용한 경우와 모든 전극을 사용한 경우의 분류 정확도가 같았지만, 계산 시간의 효율성을 고려하여 전극 수가 적은 Oz, O1 조합을 사용하였다.

그림 3.2는 두 시야 각에서의 최적의 전극 조합의 데이터를 1~10초의 크기로 나누어 H1, H1+H2의 특징 벡터를 사용하여 분류한 정확도를 나타낸 것이다. 그림 3.2(a)는 모든 피험자에 대한 평균 분류 정확도이며 (b)~(f)는 각 피험자의 분류 정확도에 해당한다. 평균 분류 정확도는 시야각이 40°, 30° 일 때, 각 76.67%, 72.33%이었다(데이터 크기: 10초, 특징 벡터: H1+H2).

결과로부터 시야각이나 특징 벡터의 종류에 상관없이 분석하는 데이터의 크기가 클수록 분류 정확도가 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. 이것은 섬광 자극에 눈이 오래 노출 될수록 뇌파가 깜박임 주파수에 변조가 되기 때문에 매우 근거 있는 결과라고 할 수 있다. 그림 3.3은 피험자 S1이 5.6Hz로 깜박이는 자극을 응시했을 때의 데이터를 1~10초의 크기에 따라 분석하여 SSVEP 반응을 확인한 것이다. 결과로부터 섬광 자극을 오래 볼수록 5.6Hz 주파수에 해당하는 SSVEP 반응이 증가하는 것을 볼 수 있으며, 문자를 응시한지 7초가 지나면 자극 주파수의 하모닉 성분인 11.2Hz의 SSVEP 반응이 관찰됨을 알 수 있다.

특징 벡터의 종류에 따른 분류 정확도는 H1을 독립적으로 사용했을 때 보다 H1+H2를 같이 사용한 경우가 더 높았는데, 이는 하모닉 주파수 성분이 분류 정확도를 높이기 위한 추가적인 특징 벡터가 될 수 있음을 확인했던 기존의 연구와 일맥상통한다[11].

시야각의 차이에 따른 분류 정확도는 특징 벡터를 H1+H2로 사용한 경우, 시야각이 30° (타자기와 60cm 거리)일 때 보다는 시야각이 40° (타자기와 44cm 거리)일 때가 더 높았다. 하지만 특징 벡터를 H1만 사용한 경우 두 시야각의 차이에 대한 분류 정확도는 거의 없었다.

그림 3.2(a)의 평균 분류 정확도에서 시야각, 특징 벡터 대한 경향은 S1 피험자를 제외한 나머지 피험자에게서 발견할 수 있었으며, S1 피험자는 시야각, 특징 벡터의 종류와 관계없이 일정하고 안정된 분류 정확도 값을 보였다. 이를 근거로 S1 피험자가 온라인 실험에 참여하게 되었다.

표 3.1 오프라인 피험자의 모든 시야각과 전극 조합의 10초 데이터에서  
H1+H2 특징 벡터를 추출하여 계산한 분류 정확도

피험자	시야각	분류 정확도(%)						
		Oz	O1	O2	Oz, O1	Oz, O2	O1, O2	Oz, O1, O2
S1	30°	80	65	76.67	75	<b>83.34</b>	75	75
	40°	83.34	76.67	<b>86.67</b>	80	<b>86.67</b>	83.33	85
S2	30°	<b>91.66</b>	81.66	73.33	85	88.33	85	86.67
	40°	<b>81.66</b>	58.33	55	73.33	75	63.66	71.67
S3	30°	31.67	18.33	<b>63.33</b>	25	46.66	46.66	40
	40°	26.66	13.33	<b>56.67</b>	21.66	43.33	41.67	36.67
S4	30°	15	33.33	<b>71.67</b>	23.33	41.67	53.33	41.67
	40°	16.67	23.33	<b>71.67</b>	20	55	53.33	33.67
S5	30°	70	63.34	50	<b>73.34</b>	68.34	66.67	<b>73.34</b>
	40°	63.34	56.67	48.34	<b>65</b>	65	60	<b>65</b>

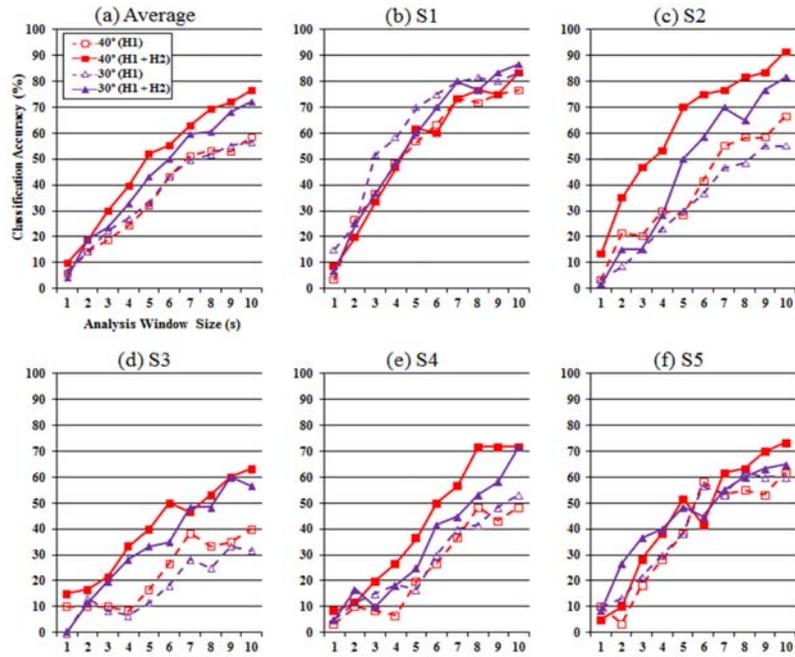


그림 3.2 두 시야 각에서의 최적의 전극 조합의 데이터를 1~10초의 크기로 나누어 H1, H1+H2의 특징 벡터를 사용하여 분류한 정확도

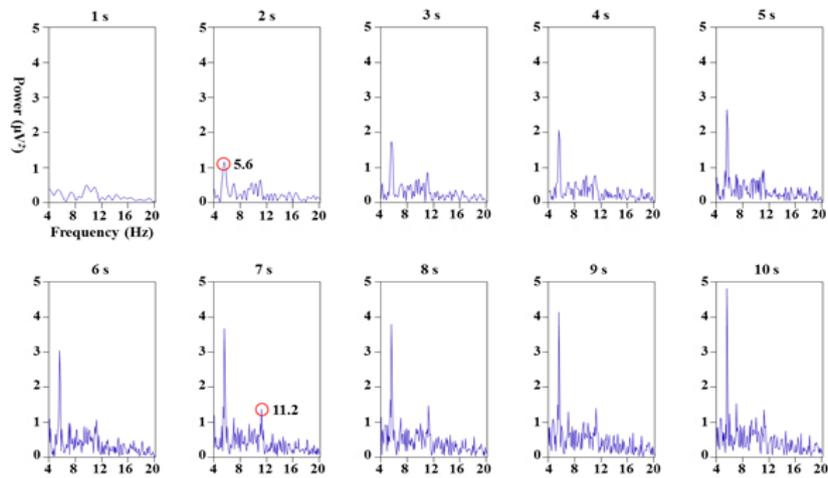


그림 3.3 S1 피험자가 5.6Hz의 주파수로 깜박이는 섬광 자극을 응시했을 때 데이터의 분석 구간의 크기에 따른 SSVEP 반응 변화

### 3.2.2. 온라인 실험 결과

표 3.2는 S1 피험자가 수행했던 온라인 실험 결과를 요약해주고 있다. 표 3.2의 (a), (b), (c)는 한 문자를 각 5, 6, 7초로 응시할 때의 실제 피험자가 출력한 문자, 분류 정확도, ITR, LPM을 보여주고 있다. 결과에 따르면 피험자가 한 문자를 오래 응시 할수록 분류 정확도는 조금씩 증가하였으며(5초: 84.69%, 6초: 86.17%, 7초: 89.53%), 이 현상의 이유는 오프라인 실험 결과 분석한 데이터의 크기가 클수록 분류 정확도가 증가했던 이유와 동일하다. 반면 ITR과 LPM은 응시하는 시간이 감소할수록 증가하였는데(5초: 10.16문자/분, 42.55비트/분, 6초: 8.62문자/분, 36.55비트/분, 7초: 7.64문자/분, 33.55비트/분), 그 이유는 문자를 응시하는 시간이 줄어 분류 정확도가 감소하는 것에 비해 감소된 문자 응시 시간이 시스템의 성능에 더 큰 영향을 미치기 때문이다. 이 결과로부터 정신적 타자기 시스템의 높은 성능을 위해 문자 응시 시간을 주의 깊게 고려해야 한다는 점을 알 수 있었다.

표 3.3(a), (b)는 개선된 시스템 온라인 실험에 참여한 S6, S7에 결과이며, 두 피험자 모두 80% 이상의 높은 분류 정확도를 보여주었다. 이 결과는 30개의 문자에서 한 문자를 택하는 chance level이 3.33%에 불과한 것과 비교하면 충분히 높은 수치이다. 또한 기존 연구에서 제시한, 의사소통을 할 수 있는 최소한의 성능(70%) 이상이므로, 본 시스템이 BCI에 적합한 시스템이라고 할 수 있다[27].

표 3.2(a) S1 피험자의 온라인 실험 결과 (5초 데이터 사용)

단어	5초	
	출력된 결과	맞은 개수 / 총 개수
WOMEN	W <u>U</u> ←P←O <u>M</u> E <u>M</u> ←N	8/11
DESK	DES <u>Q</u> ←K	5/6
WATER	WATER	5/5
HAND	HAND	4/4
MEMORY	<u>L</u> ← <u>L</u> ←MEMORY	8/10
ZONE	ZONE	4/4
BABY	<u>U</u> ←BA <u>W</u> ← <u>R</u> ←BD← <u>Y</u>	8/12
FACE	FACE	4/4
TAXI	TAX <u>L</u> ←I	5/6
JUNE	JUNE	4/4
QUICK	QUICK	5/5
VIDEO	VIDE <u>o</u> ←O	6/7
GOLF	GOLF	4/4
HOUR	<u>T</u> ←HO <u>U</u> G←R	6/8
PENCIL	P <u>Y</u> ←ENCIL	7/8
Total		83/98
Accuracy (%)		84.69
ITR (비트/분)		42.55
LPM (문자/분)		10.16

표 3.2(b) S1 피험자의 온라인 실험 결과 (6초 데이터 사용)

단어	6초	
	출력된 결과	맞은 개수 / 총 개수
WOMEN	WOMEN	5/5
DESK	DES←SK	5/6
WATER	WATER	5/5
HAND	HAND	4/4
MEMORY	MEMORY	6/6
ZONE	ZON <u>Y</u> ←E	5/6
BABY	BAB <u>X</u> ← <u>Z</u> ←Y	6/8
FACE	<u>R</u> ←FACE	5/6
TAXI	TAXI	4/4
JUNE	JUR <u>U</u> ←NE	5/6
QUICK	QUIC <u>Z</u> ← <u>M</u> ←K	7/9
VIDEO	VIA← <u>N</u> ←DEO	7/9
GOLF	GOL <u>G</u> ←F	5/6
HOUR	HOUR	4/4
PENCIL	PEN <u>M</u> ← <u>CZ</u> ←IL	8/10
Total		81/94
Accuracy (%)		86.17
ITR (비트/분)		36.55
LPM (문자/분)		8.62

표 3.2(c) S1 피험자의 온라인 실험 결과 (7초 데이터 사용)

단어	7초	
	출력된 결과	맞은 개수 / 총 개수
WOMEN	WOMEN	5/5
DESK	DES←SK	5/6
WATER	WAG←TER	6/7
HAND	HAND	4/4
MEMORY	MEMORY	6/6
ZONE	ZSR←←ONE	6/8
BABY	BABY	4/4
FACE	FAC←CE	5/6
TAXI	TAXI	4/4
JUNE	M←JUNE	5/6
QUICK	QO←UICK	6/7
VIDEO	VIU←DEO	6/7
GOLF	GOLF	4/4
HOUR	HOUR	4/4
PENCIL	PENI←CIL	7/8
Total		77/86
Accuracy (%)		89.53
ITR (비트/분)		33.55
LPM (문자/분)		7.67

표 3.3(a) S6 피험자의 온라인 실험 결과 (6초 데이터 사용)

단어	6초	
	출력된 결과	맞은 개수 / 총 개수
DESK	DE <u>S</u> GR←←K	6/8
HAND	HAD← <u>S</u> ←NG←D	7/10
ZONE	Z <u>N</u> ←ONE	5/6
BABY	BABY	4/4
FACE	FAC <u>Y</u> H←←E	6/8
TAXI	TAL←XI	5/6
JUNE	JUNE	4/4
GOLF	GOLF	4/4
HOUR	HOUR	4/4
WOMEN	WOMEN	5/5
WATER	WATER	5/5
QUICK	QUICK	5/5
VIDEO	VIDEO	5/5
MEMORY	MEMORY	6/6
PENCIL	PENC <u>I</u> M←L	7/8
Total		78/88
Accuracy (%)		88.64
ITR (비트/분)		38.44
LPM (문자/분)		8.86

표 3.3(b) S7 피험자의 온라인 실험 결과 (6초 데이터 사용)

단어	6초	
	출력된 결과	맞은 개수 / 총 개수
DESK	DN←-ESK	5/6
HAND	HAND	4/4
ZONE	G←-ZONE	5/6
BABY	BS←-AQ←-BY	6/8
FACE	FACE	4/4
TAXI	TAL←-XI	5/6
JUNE	JOA←←-UNE	6/8
GOLF	GOLPO←←-F	6/8
HOUR	A←-HOUR	5/6
WOMEN	WV←-OMEN	6/7
WATER	WQ←-ATER	6/7
QUICK	QUIZ←-CK	6/7
VIDEO	VIVS←←-DEO	7/9
MEMORY	MEMORY	6/6
PENCIL	PEC←-NCIL	7/8
Total		84/100
Accuracy (%)		84.00
ITR (비트/분)		34.95
LPM (문자/분)		8.40

## 제 4 장 고 찰

### 4.1 QWERTY 키보드 형태의 문자 배치

대부분의 정신적 타자기 시스템은 시각 자극에 의해 유도되는 P300이나 SSVEP와 같은 뇌 신호를 이용한다[9, 13-16, 18]. 이러한 시스템에서 한 trial에 소모되는 시간은 사용자가 눈으로 출력하고자 하는 문자를 찾는 visual scanning time과 사용자의 뇌 신호를 유도하여 의도를 파악하기 위해 문자를 응시하는 시간으로 구성된다. 따라서 높은 성능의 BCI 정신적 타자기 시스템을 구현하기 위해서는 상기의 두 요소를 동시에 고려해야 한다. 그런데 타자기 시스템과 관련된 기존의 대부분의 BCI 연구에서는 오직 사용자의 의도를 파악하는 방법에만 초점을 맞추고 있었으며[9, 13-18, 28], 대부분의 BCI 연구자들은 visual scanning time에 영향을 줄 수 있는 문자 배치에 대한 고려는 하지 않고 있다. 이러한 사실에 의거하여 본 연구에서는 사용자에게 익숙한 QWERTY 키보드의 문자 배치를 채택하였으며, 오프라인 실험과 온라인 실험을 통해 본 정신적 타자기 시스템의 사용 가능성을 증명하였다. 또한 QWERTY 형태의 문자 배치가 현재 일반적인 정신적 타자기 시스템에서 사용되는 사각 행렬 형태의 문자 배치보다 visual scanning time을 감소시킬 수 있다는 사실을 확인했다.

### 4.2 Visual scanning time과 시야각의 관계

시야각은 visual scanning time에 영향을 줄 수 있는 중요한 요소 중 하나이다. 시야각이 작아지면 눈동자가 움직이는 거리가 감소하기 때문에 visual scanning

time이 감소 할 수 있다. 하지만 시야각이 너무 작아져서 출력을 목표로 하는 문자 주변에 인접하는 문자들까지 한 눈에 들어온다면 목표로 하는 문자에 집중하여 응시하는 것이 쉽지 않아질 것이다. 본 연구에서 시야각은 피험자로부터 타자기까지의 거리로 조절하였으며(44 cm: 시야각 40°, 60 cm: 시야각 30°), 상기의 추측은 대부분의 피험자들이 30° 보다 40° 의 시야각에서 분류 정확도가 높았던 오프라인 실험 결과로 증명이 되었다. 또한 실험에 참여했던 피험자들이 40° 보다 30° 의 시야각에서 출력하고자 하는 문자를 응시할 때 인접하는 문자들의 방해로 집중이 어려웠다는 의견을 제시했다.

피험자로부터 타자기까지의 거리가 같은 경우, 문자의 크기와 문자간의 간격이 시야각을 조절하는 주요한 요인이 된다. 본 시스템에서는 한 문자의 크기는 실제 QWERTY 키보드의 키의 크기와 비슷하며 문자간의 간격은 경험적으로 선택하였다. 이러한 요소를 고려하여 각 사용자마다 최적의 시야각을 찾아 시스템의 성능을 높이는 후속 연구를 진행할 예정이다.

### 4.3 주파수 선택

SSVEP를 기반으로 한 BCI 시스템의 장점 중의 한 가지는 SSVEP 반응을 유도하기 위한 훈련 과정이 거의 필요 없다는 것이다[20, 29]. 하지만 이 사실이 사용자에게 모든 주파수의 섬광 자극을 제시하였을 때 SSVEP 반응이 발생한다는 것을 의미하는 것은 아니다. 따라서 SSVEP 반응을 기반으로 하는 정신적 타자기 시스템의 성능을 높이기 위해서는 사용자마다 SSVEP 반응이 발생하는 최적의 깜박임 주파수를 선택하는 과정이 필요하다[23]. 상기 사실에 의거하여 본 연구에서는 50개의 깜박임 주파수 후보에서 각 피험자마다 강한 SSVEP 반응을 유도하는 30개의 깜박임 주파수를 선택하였다. 피험자에 따라 선택된 30개의 깜박임 주파수 중 몇 개의 깜박임 주파수는 SSVEP 반응을 강하게 유도하지는 않았다. 하지만 이 문

제점은 깜박임 주파수 후보의 개수가 증가한다면 쉽게 해결될 것이다. 또한 본 연구에서는 크기가 작은 섬광 자극을 제시할 때 낮은 주파수 영역(1~12Hz)을 깜박임 주파수로 사용하는 것이 더 큰 SSVEP 반응을 유도한다는 기존의 연구에 의거하여 5~9.9Hz의 주파수 영역을 깜박임 주파수로 사용하였다[23].

#### 4.4 정신적 타자기 성능

본 논문의 오프라인 결과에서 제시한 모든 피험자의 평균 분류 정확도는 시야각이 40°, 30° 일 때, 각 76.67%, 72.33%이었다(데이터 크기: 10초, 특징 벡터: H1+H2). 이 결과는 chance level인 3.33%에 비해 비약적으로 높으며, 본 시스템이 사용하기 적합한 BCI 시스템을 알려준다. 또한 결과로부터 분류 정확도가 최소 70% 이상이 되게끔 하는 분석 데이터의 최소한의 크기, 시야각이 피험자마다 모두 다양함을 알 수 있었다(S1: 6초, 시야각 40° ; S2: 5초, 시야각 30° ; S4: 8초, 시야각 30° ; S5: 9초, 시야각 30° ). S3 피험자는 그 어떤 데이터 크기에서도 70% 이상의 분류 정확도를 보이지 못했으며, 시야각 30° 에서 10초간 문자를 응시했을 때의 데이터를 H1+H2 특징 벡터를 사용하여 분류했을 때 63.33%의 분류 정확도를 보였다.

온라인 실험에서 S1 피험자의 경우, 문자를 응시하는 시간을 5, 6, 7초로 지정하여 시스템을 사용하였다. 섬광 자극을 응시하는 시간은 유연하게 결정할 수 있는데, 이는 SSVEP를 기반으로 하는 BCI 시스템에서는 사용자가 섬광 자극을 지속적으로 응시하는 동안 파워 스펙트럼을 실시간 분석하여 SSVEP가 발생하는 순간 사용자의 의도를 분류할 수 있기 때문이다. 사실, 이러한 SSVEP를 기반으로 하는 BCI 패러다임의 장점을 이용하여 개발된 BCI 시스템도 이미 여럿 존재한다[16, 17, 23, 28, 30]. 그림 3.3은 온라인 실험에 참가한 S1 피험자가 5.6Hz의 주파수의 섬광 자극을 각 10초간 응시하였을 때의 데이터에 대하여 1~10초로 분석에 사

용되는 데이터의 크기를 다르게 하여 스펙트럼 분석 한 것이다. 그림에서 확인할 수 있다시피 S1 피험자가 문자를 응시한지 2초 후부터 자극 주파수에 해당하는 SSVEP 반응이 뚜렷하게 발생되기 시작한다. 후속 연구에서는 이러한 사실을 이용하여 시스템을 사용하는 각 개인마다 SSVEP 반응이 발생하기 시작하는 최소한의 응시 시간을 찾아 본 시스템의 성능을 향상시킬 예정이다.

## 제 5 장 결 론

본 연구에서는 사용자에게 친숙한 문자 배열을 사용하여 사용자가 출력하고자 하는 문자를 빠르게 찾을 수 있는 높은 성능의 정신적 타자기 시스템을 구현하였다. 이를 위하여 QWERTY 키보드의 문자 배열과 비슷한 문자 배열, 30개의 LED 채널, LED 컨트롤러 등을 제작하여 SSVEP를 기반으로 하는 정신적 타자기 시스템을 직접 개발하였다.

본 시스템의 검증을 위해 총 7명의 피험자가 연구에 참여하였으며, 가장 먼저 기존 연구에서 많이 사용되던 행렬 형태의 문자 배열과 QWERTY 문자 배열에서 동일한 15개의 영어단어를 눈으로 찾을 때의 시간을 비교하여 QWERTY 문자 배열에서 visual scanning time이 감소하는 것을 증명하였다. 그리고 모든 사람마다 SSVEP 반응을 유도하는 최적의 LED 깜박임 주파수를 찾기 위해 50개의 주파수 후보에서 각 피험자마다 SSVEP 반응을 강하게 일으키는 30개의 주파수를 선택하였다. 또한, 본 시스템의 적합성을 알아보기 위해 5명의 피험자를 대상으로 시스템의 서로 다른 주파수로 깜박이는 30개의 문자를 응시하게 하고 이 때 측정된 뇌파를 분류하여 각 피험자의 분류 정확도를 계산하는 오프라인 실험을 수행하였다. 이 때, 각 개인마다 뇌파 측정에 사용되는 전극의 위치, 시스템과 피험자간의 거리, 분류에 사용되는 특징 벡터, 문자를 응시하는 시간 등을 고려하였다. 그 결과, 최적의 전극 위치가 피험자마다 다르며, 출력하고자 하는 문자를 오래 응시한 데이터를 자극 주파수와 하모닉 주파수의 SSVEP 파워 값의 합으로 구성된 특징 벡터로 사용하여 분류할 때 분류 정확도가 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 또한 3명의 피험자를 대상으로 주어지는 단어를 직접 출력하는 온라인 실험을 수행하였으며, 그 결과 한 문자를 6초간 응시하였을 때의 평균 분류 정확도는 86.27%로 본 시스템이 실제 사지마비 환자의 의사소통을 위한 시스템으로 사용이 가능함을 확인하였다.

후속 연구에서는 출력하고자 하는 문자를 빠르고 정확하게 분류하기 위하여 본

시스템에 eye tracker를 접목시키고, 각 사용자에게 최적화된 시스템과 사용자의 거리, 문자의 크기와 시야각을 고려한 시스템을 개발할 예정이다. 또한 사용자가 문자를 응시하는 동안의 뇌파를 실시간 파워 스펙트럼 분석을 통해 분류하여 사용자의 의도를 실시간으로 파악할 수 있도록 시스템을 개선하여 직접 환자에게 적용할 예정이다.

본 연구를 통해 QWERTY 배열의 문자 배열을 채택하고 SSVEP를 기반으로 한 본 시스템이 BCI 어플리케이션으로서 적합함을 확인할 수 있었다. 본 시스템의 개발이 사지마비 환자들이 외부 세계와 의사소통을 할 수 있는 중요한 도구로 활용될 수 있기를 기대한다.

## 참 고 문 헌

- [1] J. R. Wolpaw, N. Birbaumer, D. J. McFarland, G. Pfurtscheller and T. M. Vaughan, "Brain-computer interfaces for communication and control," *Clinical Neurophysiology*, vol. 113, pp. 767-791, 2002.
- [2] C. J. L. Murray, A. D. Lopez, "The global burden of disease: a comprehensive assessment of mortality and disability from diseases, injuries, and risk factors in 1990 projected to 2020," Harvard University Press, 1996.
- [3] G. T. Carter, "Rehabilitation Management in Neuromuscular Disease," *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, vol. 11, pp. 69-80, 1997.
- [4] J. M. Carmena, M. A. Lebedev, R. E. Crist, J. E. O'Doherty, D. M. Santucci, D. F. Dimitrov, P. G. Patil, C. S. Henriquez and M. A. L. Nicolelis, "Learning to control a brain-machine interface for reaching and grasping by primates," *PLoS Biology*, vol. 1, 2003.
- [5] S. Musallam, B. D. Corneil, B. Greger, H. Scherberger and R. A. Andersen, "Cognitive control signals for neural prosthetics," *Science*, vol. 305, pp. 258-262, 2004.
- [6] L. R. Hochberg, M. D. Serruya, G. M. Friehs, J. A. Mukand, M. Saleh, A. H. Caplan, A. Branner, D. Chen, R. D. Penn and J. P. Donoghue, "Neuronal ensemble control of prosthetic devices by a human with tetraplegia," *Nature*, vol. 442, pp. 164-171, 2006.
- [7] E. C. Leuthardt, G. Schalk, J. R. Wolpaw, J. G. Ojemann and D. W. Moran, "A brain-computer interface using electrocorticographic signals in humans," *Journal of Neural Engineering*, vol. 1, pp. 63-71, 2004.

- [8] T. Stieglitz, B. Rubehn, C. Henle, S. Kisban, S. Herwik, P. Ruther and M. Schuettler, "Brain-computer interfaces: an overview of the hardware to record neural signals from the cortex," *Progress in Brain Research*, vol. 175, pp. 297–315, 2009.
- [9] E. W. Sellers, T. M. Vaughan and J. R. Wolpaw, "A brain-computer interface for long-term independent home use," *Amyotrophic Lat. Scler.*, vol. 11, pp. 449–455, 2010.
- [10] G. E. Fabiani, D. J. McFarland, J. R. Wolpaw and G. Pfurtscheller, "Conversion of EEG activity into cursor movement by a brain-computer interface (BCI)," *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 12, pp. 331–338, 2004.
- [11] G. R. Muller-Putz, R. Scherer, C. Brauneis and G. Pfurtscheller, "Steady-state visual evoked potential (SSVEP)-based communication: Impact of harmonic frequency components," *Journal of Neural Engineering*, vol. 2, pp. 123–130, 2005.
- [12] B. Rebsamen, C. Guan, H. Zhang, C. Wang, C. Teo, M. H. Ang Jr. and E. Burdet, "A brain controlled wheelchair to navigate in familiar environments," *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 18, pp. 590–598, 2010.
- [13] J. Jin, P. Horki, C. Brunner, X. Wang, C. Neuper and G. Pfurtscheller, "A new P300 stimulus presentation pattern for EEG-based spelling systems," *Biomed. Tech.*, vol. 55, pp. 203–210, 2010.
- [14] D. J. McFarland, W. A. Sarnacki, G. Townsend, T. Vaughan and J. R. Wolpaw, "The P300-based brain-computer interface (BCI): Effects of stimulus rate," *Clinical Neurophysiology*, vol. 122, pp. 731–737, 2011.

- [15] G. Pires, U. Nunes and M. Castelo-Branco, "Statistical spatial filtering for a P300-based BCI: Tests in able-bodied, and patients with cerebral palsy and amyotrophic lateral sclerosis," *J. Neurosci. Methods*, vol. 195, pp. 270–281, 2011.
- [16] M. Cheng, X. Gao, S. Gao and D. Xu, "Design and implementation of a brain-computer interface with high transfer rates," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 49, pp. 1181–1186, 2002.
- [17] B. Allison, T. L  th, D. Valbuena, A. Teymourian, I. Volosyak and A. Gr  ser, "BCI demographics: How many (and what kinds of) people can use an SSVEP BCI?" *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 18, pp. 107–116, 2010.
- [18] Y. Wang, Y. - Wang and T. - Jung, "Visual stimulus design for high-rate SSVEP BCI," *Electron. Lett.*, vol. 46, pp. 1057–1058, 2010.
- [19] H. - Chang, H. - Deng, P. - Lee, C. - Wu and K. - Shyu, "Real-time control of an SSVEP-actuated remote-controlled car," in *Proceedings of the SICE Annual Conference, 2010*, pp. 1884–1887.
- [20] D. Zhu, J. Bieger, G. Garcia Molina and R. M. Aarts, "A survey of stimulation methods used in SSVEP-based BCIs," *Computational Intelligence and Neuroscience*, vol. 2010, 2010.
- [21] M. A. Lopez-Gordo, A. Prieto, F. Pelayo and C. Morillas, "Customized stimulation enhances performance of independent binary SSVEP-BCIs," *Clinical Neurophysiology*, vol. 122, pp. 128–133, 2011.
- [22] I. Volosyak, D. Valbuena, T. L  th, T. Malechka and A. Gr  ser, "BCI demographics II: How many (and What Kinds of) people can use a high-frequency SSVEP BCI?" *IEEE Transactions on Neural Systems and*

Rehabilitation Engineering, vol. 19, pp. 232–239, 2011.

[23] H. Bakardjian, T. Tanaka and A. Cichocki, "Optimization of SSVEP brain responses with application to eight-command Brain-Computer Interface," *Neurosci. Lett.*, vol. 469, pp. 34–38, 2010.

[24] I. S. Mackenzie, S. X. Zhang and R. W. Soukoreff, "Text entry using soft keyboards," *Behav. Inf. Technol.*, vol. 18, pp. 235–244, 1999.

[25] S. Zhai and P. O. Kristensson, "Interlaced QWERTY – accommodating ease of visual search and input flexibility in shape writing," in *Conference on Human Factors in Computing Systems – Proceedings*, 2008, pp. 593–596.

[26] X. Bi, B. A. Smith and S. Zhai, "Quasi-qwerty soft keyboard optimization," in *Conference on Human Factors in Computing Systems – Proceedings*, 2010, pp. 283–286.

[27] J. Perelmouter and N. Birbaumer, "A binary spelling interface with random errors," *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, vol. 8, pp. 227–232, 2000.

[28] H. Cecotti, "A self-paced and calibration-less SSVEP-based brain-computer interface speller," *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 18, pp. 127–133, 2010.

[29] F. –. Vialatte, M. Maurice, J. Dauwels and A. Cichocki, "Steady-state visually evoked potentials: Focus on essential paradigms and future perspectives," *Prog. Neurobiol.*, vol. 90, pp. 418–438, 2010.

[30] I. Volosyak, H. Cecotti, D. Valbuena and A. Grüsser, "Evaluation of the bremen SSVEP based BCI in real world conditions," in *2009 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics, ICORR 2009*, 2009, pp. 322–331.

## Abstract

### Implementation of a QWERTY-style mental spelling system based on steady-state visual evoked potential (SSVEP)

Lim, Jeong-Hwan

Dept. of Biomedical Engineering

The Graduate School

Yonsei University

Brain-computer interface (BCI) is a non-muscular communication technique that allows users to communicate with the outside world using external devices operated by only their brain activity. In the past decade, a variety of BCI applications have been developed to improve the quality of individuals with serious neurological disorders. In particular, the one most widely applied to the disabled people is an electroencephalography (EEG) - based mental speller which enables them to express their thoughts by only gazing target characters. In the BCI spelling systems, one of the important factors influencing the performance of the system is visual scanning time which is the time needed to visually find the target character. However, most of BCI studies concerning spelling systems have only concentrated on how fast and accurately the BCI systems detect the user's intention. In other words, BCI researchers have rarely considered

the design of keyboard layout which would affect visual scanning time.

Inspired by this fact, we devised a BCI mental spelling system based on steady-state visual evoked potential (SSVEP) adopting the QWERTY keyboard layout that the most users are more familiar with. Both the offline and online experiments were conducted with five and three participants to verify the feasibility of the proposed system. From the results of the present study, it was clearly confirmed that the users could find target characters more quickly with the QWERTY layout than a matrix layout, and classification accuracy was fairly high enough to implement an online mental spelling system. The averaged online experimental results were a typing speed of 8.63 letters per minute with a success rate of 86.27%, corresponding to an information transfer rate of 36.63 bits per minute with size of analysis window is 6s, demonstrating the feasibility of the proposed spelling system. It is expected that this spelling system will be used as communication tool for disabled people.

---

Key words : mental spelling system, QWERTY keyboard layout, BCI, SSVEP, EEG