

뇌-컴퓨터-인터페이스를 위한 EEG 기반의 피험자 반응시간 감지

(EEG-based Subjects' Response Time Detection for Brain-Computer-Interface)

신승철[†] 류창수^{**} 송윤선[†] 남승훈^{***}

(Seung-Chul Shin) (Chang-Soo Ryu) (Yoonseon Song) (Seung-Hoon Nam)

요약 본 논문에서는 인지적 긍정/부정 선택 과제의 수행 시 뇌파를 이용하여 피험자의 반응시간 RT(response time)를 예측하는 방법에 관하여 기술한다. 실험 task에서 피험자는 시각적 자극에 대한 반응, 문제의 해석, 손 움직임의 조절, 손동작 등과 관련된 뇌활동을 한다. 이와 같은 피험자의 정신상태의 변화를 CT(cut time), ST(selection time), RP(repeated period) 등을 정의하여 모델링하고, 선택시간 ST를 감지하여 피험자의 반응시간 RT를 예측한다. ST를 감지하기 위하여 측정된 뇌파로부터 α , β , ν 파를 분리하고, 공간적인 관계를 고려하여 설정한 4쌍의 전극들로부터 3가지의 특징들을 추출한다. 추출한 특징들을 분석하여 각 피험자별로 나타나는 상세 규칙(specific rule)과 공통적인 특징들로 구성된 일반 규칙(meta rule)들을 설정한다. 8명의 피험자를 대상으로 설정한 규칙들을 적용하여 평균 83%의 ST 감지 성공률을 보이고, ST 감지 이후 약 0.73초에서 RT가 나타나는 것을 보인다. 설정한 규칙들의 타당성을 검증하기 위하여 8명 중 2명의 피험자에 대해서 재실험을 하고, 이들 데이터에 적용한 결과를 보인다. 본 논문에서 제안한 방법을 기존의 인지적인 정신상태 판별을 위한 방법들이나 왼손/오른손 동작구분 방법들과 결합하여 사용할 경우 BCI를 위한 기반 기술로 활용될 것으로 기대한다.

키워드 : 뇌파, 정신 프로세스, 선택시간, 반응시간, 감지규칙, 긍정/부정 판별

Abstract In this paper, we propose an EEG-based response time prediction method during a yes/no cognitive decision task. In the experimental task, a subject goes through responding of visual stimulus, understanding the given problem, controlling hand motions, and hitting a key. Considering the subject's varying brain activities, we model subjects' mental states with defining CT (cut time), ST (selection time), and RP (repeated period). Based on the assumption between ST and RT in the mental model, we predict subjects' response time by detection of selection time. To recognize the subjects' selection time ST, we extract 3 types of feature from the filtered brain waves at frequency bands of α , β , ν waves in 4 electrode pairs combined by spatial relationships. From the extracted features, we construct specific rules for each subject and meta rules including common factors in all subjects. Applying the ST detection rules to 8 subjects gives 83% success rates and also shows that the subjects will hit a key in 0.73 seconds after ST detected. To validate the detection rules and parameters, we test the rules for 2 subjects among 8 and discuss about the experimental results. We expect that the proposed detection method can be a basic technology for brain-computer-interface by combining with left/right hand movement or yes/no discrimination methods.

Key words : EEG, Mental Process, Selection Time, Response Time, Detection Rules, YES/NO Discrimination

[†] 정회원 : 한국전자통신연구원 인체정보처리팀
scshin@etri.re.kr
yssonng@etri.re.kr
^{**} 비회원 : 한국전자통신연구원 인체정보처리팀
csryu@etri.re.kr

^{***} 종신회원 : 한국전자통신연구원 인체정보처리팀
nsh63238@etri.re.kr
논문접수 : 2002년 4월 30일
심사완료 : 2002년 9월 2일

1. 서론

1929년 독일의 정신과 의사 Hans Berger가 사람의 두피로부터 뇌전위를 처음으로 측정하여 이래 인간의 뇌에 대한 많은 연구가 진행되어 오고 있다[1]. 뇌의 활동을 측정하는 방법에는 크게 침습적(invasive) 방법과 비침습적(non-invasive) 방법이 있다. 침습적 방법에서는 뇌 속에 작은 바늘 전극을 삽입하여 이 전극을 통하여 전달되는 뇌 전위를 측정한다. 뇌의 각 부위의 기능을 파악하기 위한 동물 실험[2]이나 전신불구의 심한 장애 환자들의 의사소통을 목적으로 하는 연구에서 주로 시행되고 있다[3,4]. 비침습적 방법은 침습적 방법과는 달리 뇌 속에 침을 심지 않으므로 덜 위험적이다. 정신질환 환자들이나 일반인들을 대상으로 한 실험에서 주로 사용된다. 두피에 전극을 붙이고 뇌 전위를 측정하는 EEG(electroencephalography), 뉴런 활동에 의해 유발되는 자기장을 검출하는 MEG(magnetoencephalography), 핵자기 공명을 이용한 fMRI(functional magnetic resonance image), 적외선을 이용하는 방법, 방사성 동위원소를 이용하는 PET(positron emission tomography) 등과 같은 방법들이 있다. 이들 중 EEG를 측정하는 방법이 다른 방법들에 비하여 비용이 적게 들고 손쉽게 할 수 있으므로 널리 이용되고 있다.

EEG를 이용하여 뇌의 기능과 뇌 속에서 일어나는 정신작용의 과정을 규명하고자 하는 연구는 1997년 Kirakup 등에 의해 마인드 스위치(mind switch)[5]가 개발됨으로 인하여 많은 주목을 받게 되었다. 그리고, 현재까지도 세계 각처에서 이에 관한 연구가 진행되어 오고 있다. 인간의 감성에 관련된 뇌 활동을 고찰하는 감성과학 분야가 그 한 예이다. 이 분야에서는 주로 인간의 오감에 어떤 자극을 가했을 때 유발되는 뇌 활동을 규명한다[6,7]. 다른 한 방향은 EEG 바이오피드백(biofeedback) 분야이다. 여기에서는 피검자의 뇌파를 피드백하여 보여줌으로써 피검자의 각성 상태를 안정하게 한다거나 정신질환 환자들을 치료하는 방법, 특정한 뇌파의 유도를 통한 오락용 프로그램의 개발 등에 관한 연구를 진행하고 있다[8,9]. 또 다른 한 방향은 인간의 인지과정에서 일어나는 정신작용을 뇌파를 이용하여 해석해 보려는 시도이다. EEG 바이오피드백 분야에서는 주로 특정 영역에서의 뇌파의 변화를 이용하여 환자의 치료나 오락용 제품에의 응용을 위한 연구를 수행하지만, 이 분야에서는 주어진 실험 환경에서 인간의 뇌 속에서 일어나는 정신적인 프로세스를 밝히고자 하는 것이다. 참고 문헌[10,11,12,13,14]에서 이와 같은 내용들을 찾아볼 수 있다.

Anderson 등[10]은 4명의 피험자를 대상으로 이들의 기저상태(baseline)의 뇌파와 정신적인 곱셈과제(mental multiplication task)를 수행하고 있을 때의 뇌파를 분별하고자 하였다. 실험 세션들을 통하여 획득한 각 상태에서의 1초 동안의 뇌파를 사용하여 4가지 방법으로 두 상태를 분별한다. 사지가 마비된 사람들이 EEG를 이용하여 휠체어와 같은 기구를 조정하는 데 응용하고자 하였다. Schlegel 등[11]은 제시된 시각자극에 반응하여 피험자가 왼손 또는 오른손을 움직이도록 하는 실험을 하였다. 왼손과 오른손 동작을 판별하기 위하여 손동작이 감지된 순간부터 이전 1초 동안의 뇌파 신호에 대하여 다양한 방법을 적용하였다. 적응 AR 모델(adaptive auto-regressive model)의 계수를 이용한 방법이 가장 높은 분별 성공률을 보였다. Pfruscheller 등[12]은 실제 손동작 대신에 손동작을 상상하는 task를 수행할 때 유발되는 뇌파에 대한 분석을 하였다. 왼손과 오른손의 움직임 상상을 구별하기 위하여 ERD(event related desynchronization)를 정의하고, 이를 3명의 피험자 데이터에 적용한 결과를 보인다. 분석에서 사용한 신호는 cue 자극(stimulus)이 제시된 0.25초 후부터 1.25초까지의 C3, C4, Pz에서의 뇌파이다. Cue 자극이 제시된 후 1.25초에서 피험자가 반응한다는 것을 가정하고 있다. 참고 문헌 [13]에서는 피험자의 반응시간 이전의 뇌파 신호의 트렌드를 각 클래스에 대응시켜 긍정 또는 부정의 정신상태 판별뿐만 아니라 그 정도까지도 나타내곤 하였다. 그러나, 판단하고자 하는 클래스의 수에 비하여 추출한 특징의 개수가 상대적으로 부족하여 좋지 못한 결과를 보인다. Kim 등[14]에서는 인지적 긍정/부정 과제의 수행 시 유발된 피험자의 뇌파 데이터에 대하여 다루고 있다. 피험자의 반응시간(RT, response time) 근처 1초 동안의 데이터를 분석한 결과에 관하여 기술하고 있다.

기존의 논문들[11,12,14]에서의 공통점은 피험자의 반응시간을 직접 또는 간접적으로 알고 있다고 가정한 것이다. 따라서, 이와 같은 방법들을 실시간 BCI(brain computer interface)에서 사용하기 위해서는 반드시 RT를 알아야만 한다. 그러나, 피험자의 반응시간을 파악하는 것은 정신상태를 판별하는 것만큼이나 어렵고 복잡한 문제로 사료된다. 본 논문에서는 기존의 논문들에서 알려져 있다고 가정하고 있는 반응시간 RT를 감지하는 방법에 대하여 기술한다. 먼저, RT를 추정하기 위하여 실험 task를 수행중인 피험자의 정신상태의 변화에 대한 모델을 구한다. 이 모델에서 인지적 판단이 끝나는 시점을 선택시간(ST, selection time)으로 규정하고 이

를 감지하여 반응시간을 예측한다. 제안한 방법을 기존의 정신상태 판단을 위한 방법들과 결합하여 사용할 경우 실시간으로 인지적 정신상태 판별을 수행하는 BCI 시스템을 구현할 수 있을 것으로 기대한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 뇌파를 측정할 수 있는 실험 환경과 실험 프로토콜에 관하여 기술하고, task를 수행중인 피험자의 뇌 활동에 대한 모델을 구한다. 3장에서는 선택시간 ST 감지를 위한 특징 추출방법에 대하여 설명하고, 4장에서는 추출한 특징들을 이용한 피험자별 상세규칙과 피험자들 사이에서 공통적으로 나타나는 특징을 표현한 일반규칙에 관하여 기술한다. 5장에서는 설정한 규칙들을 실험 데이터에 적용한 경우 선택시간 ST의 감지 결과에 대하여 설명하고, 6장에서 이에 대한 토의 내용을 기술한다. 끝으로 7장에서 결론을 맺는다.

2. 뇌파의 측정 및 실험 프로토콜

2.1 뇌파 측정 환경

인지적 정신상태의 판별을 위하여 본 연구에서 수행한 뇌파 측정의 실험 장면을 그림 1에서 보인다. 그림 1(a)에서 보이는 바와 같이 피험자 앞에 설치되어 있는 컴퓨터 모니터를 통하여 자극(문제)이 제시된다. 피험자는 이 자극에 대하여 긍정적으로 생각하면 YES 키를 부정적으로 생각하면 NO 키를 선택한다. 모니터 화면과 피험자와의 거리는 약 50cm 정도이고, 편한 자세로 앉은 상태에서 실험을 한다. 피험자의 뇌파는 그림 1(b)의 오른쪽에 보이는 뇌파 수집기(DAS, data acquisition system)를 통하여 컴퓨터에 저장된다. 뇌파 수집기로는 ㈜락사에서 개발한 LXDAS_RS232를 사용하였다. 이 시스템에서는 BIOPAC사의 EEG100B 증폭기의 출력을 입력으로 받도록 설계되어 있다. 그림 1(b)의 왼쪽에 보

이는 모니터 화면은 실험자(operator)용 운영 화면이다. 이 화면을 통하여 실험자는 피험자의 뇌파 상태를 관측할 수 있고, 또한 실험에 필요한 메시지를 피험자에게 전달할 수도 있다. 이러한 시스템은 피험자가 있는 방음실 외부에 위치한다.

2.2 실험 자극(문제)

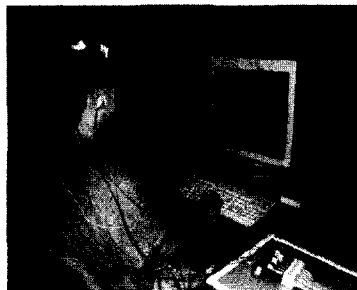
피험자에게 제시되는 자극(문제)은 3 가지 유형으로 구성되어 있다. 유형 1에서는 왼쪽과 오른쪽에 나열된 글자들이 서로 일치하는가를 판단하는 문제들로 구성되어 있고, 유형 2에서는 두 낱말들 간의 상호 관계를 묻는 문제들로 구성되어 있다. 유형 3에서는 인지적인 판단을 요구하는 서술형 문장들로 구성되어 있다. 이러한 문제들은 전국 표준화 지능진단 검사[15]에서 선택한 것들이다. 유형 1, 2, 3의 문제 예를 아래에서 보인다. 그림 2에서는 실제로 모니터 화면을 통하여 피험자에게 제시되는 유형 1의 한 예를 보인다.

유형 1과 유형 2에 해당하는 문제를 각각 6문항씩 선정하고, 유형 3에 속하는 문제를 12문항 선정하여 총 24 문제로 세션(session)을 구성한다. 각 문제는 10초 동안

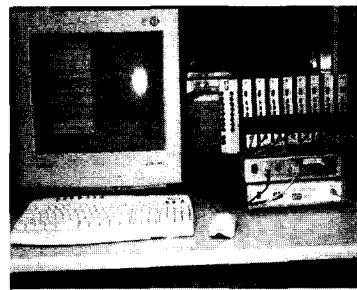
- 유형 1: "곡류땃갓 --- 곡물땃갓"
NO REJECT YES
- 유형 2: "약 : 질병 --- 기쁨 : 유전"
NO REJECT YES
- 유형 3: "당신의 귀는 2개 입니다."
NO REJECT YES
"만유인력의 법칙을 발견한 사람은 갈릴레이입니다."
NO REJECT YES



그림 2 피험자 화면에 제시되는 문제의 한 예 (유형 1)



(a) 피험자의 실험 장면



(b) 뇌파 측정 장비 및 실험자 운영 화면

그림 1 인지적 정신상태의 뇌파 측정을 위한 실험

피험자용 화면에 제시되고, 이 동안에 피험자는 YES, NO, REJECT에 해당되는 키를 눌러서 답을 표시하게 된다. YES 키는 키보드 상의 [“] 버튼을 이용하고, NO 키는 [A]를, REJECT 키는 [SPACE BAR]를 이용한다.

2.3 뇌파의 측정

피험자의 뇌파는 총 8개의 전극을 통하여 측정한다. 전극은 국제 표준 규격인 10-20 시스템[16]에 맞추어 Fp1, Fp2, F3, F4, Fz, C3, C4, Cz의 위치에 부착하였다. 이마 가운데에 접지(ground)를 위한 전극을 부착하였으며, 양 귀볼에 기준(reference) 전극을 각각 부착하였다. 전극의 각 위치는 그림 4(b)에 나타나있다. 본 실험에서는 주로 피험자의 정신적인 사고(思考)와 관련된 뇌파의 변화를 관측하고자 하므로 전두엽을 중심으로 전극들을 배치하여 부착한다.

두피에 부착한 전극을 통하여 전달되는 뇌파 전위(voltage)는 DAS를 통하여 128Hz로 샘플링되어 실험자의 컴퓨터 화면에 나타나고, 동시에 기억장치에 저장된다. DAS에서는 ADC(analog-to-digital converter), 증폭, 필터링, 직렬 데이터 전송 등의 일련의 과정을 통하여 아날로그 전압 형태의 뇌파를 디지털 신호로 변환하여 컴퓨터로 전송한다. 뇌파에 혼합되는 전원 noise를 제거하기 위하여 60Hz notch 필터를 사용한다. 그림 3에서는 각 전극 위치에서 측정한 뇌파 신호의 한 예를 보인다.

그림 3에서 보이는 바와 같이, 측정한 뇌파 신호로부터 눈의 깜박임과 눈동자의 굴림 등에 의하여 발생하는 근안전도(EOG)와 호흡과 근육의 움직임 등에 의해서 유발되는 근전도(EMG)의 영향은 쉽게 관찰할 수 있다. 그러나, 이를 통하여 피험자의 어떤 정신적인 프로세스

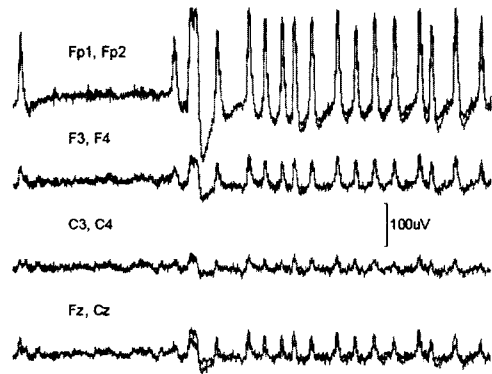


그림 3 측정한 뇌파 신호의 예 (Fp1, F3, C3, Fz: 파랑색, Fp2, F4, C4, Cz: 빨강색)

과정을 직접적으로 파악하기는 매우 어렵다. 따라서, 이와 같은 뇌파 신호를 다른 물리적인 값으로 변환하거나 필터링 등을 통하여 특징을 추출하고, 이들을 이용하여 정신상태의 판별을 한다.

2.4 실험에서 주어진 Task

본 실험에서의 실험 task의 내용을 시간적으로 나타내면 그림 4와 같다. Task는 다음과 같은 순서로 진행된다.

1. 실험 준비를 위한 Fixation statement I이 2초 동안 화면에 제시된다.
2. 2초 동안의 준비과정이 끝나면 피험자 화면에 문제가 제시된다. 피험자는 10초 동안에 YES, REJECT, NO에 해당하는 키를 눌러서 문제에 대한 반응을 한다.
3. 10초 동안의 문제제시가 끝나면, 자극(문제) 간의 구별을 위하여 Fixation statement II가 2초 동안 화면에 나타난다.
4. 1에서 3까지의 과정을 유형 1, 2, 3의 24 문항에 대하여 수행한다.

만약, 과정 2에서 피험자가 주어진 10초 이전에 반응을 하면, 키가 눌러진 순간을 RT로 기록하고 RT 이후부터 나머지 10초까지 시간에는 Fixation statement II가 제시된다. Fixation statement I에서는 '문제가 제시됩니다'라는 문장이 화면에 보이고, Fixation statement II에서는 '잠시 기다려 주십시오'라는 문장이 화면에 나타난다. 그림 4(a)에서는 문제가 제시된 후 8초가 경과했을 때 피험자가 YES 또는 NO에 해당하는 키를 선택한 경우를 보인다. 실제 실험에서는 예비실험을 통하여 피험자들이 실험 프로토콜에 어느 정도 익숙해지도록 하였다.

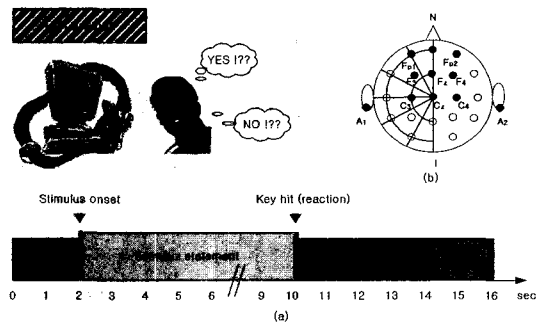


그림 4 실험에서 주어진 task (a) 실험 세션의 타이밍도(Timing of test session) (b) 국제 표준 10-20 시스템에 의거하여 부착한 전극의 배치도

2.5 피험자의 정신상태의 변화 추정

실험 task에 있어서 준비과정(Fixation statement I) 2초 후의 피험자의 상황을 한번 살펴보자. 우선, 컴퓨터 모니터를 통하여 문제가 제시되므로 피험자는 시각자극(visual stimulus)을 받게 된다. 그리고, 이 시각자극이 지속되면서 문제의 내용을 파악하고, 동시에 혹은 이후에 문제의 답을 찾기 위한 인지적인 정신작용이 뒤따를 것이다. 문제의 답을 결정할 후에는 해당하는 키를 정확하게 누르기 위한 뇌활동이 활성화 되고, 이러한 뇌활동으로 손 움직임을 조절하여 키를 누르는 손 동작으로 이어질 것이다. 이와 같은 뇌활동 즉, 정신상태의 변화하는 과정을 추정하여 그림 5에서 보인다.

본 논문에서는 그림 5에서와 같은 과정이 복합적으로 피험자의 뇌 속에서 일어날 것이라는 가정을 한다. 그리고, 피험자가 어떤 반응(response)을 하기 위하여 판단을 내리는 시간구간, 즉 정신적 프로세스(mental process) 과정의 마지막 시점부근을 선택시간(ST, selection time)으로 정의하고 이를 포착하는 것을 목표로 한다. (자세한 설명은 4장에서 보인다.) 인간이 자극에 반응하는 시간은 개인에 따라 약간의 차이가 있으나, 거의 일정하게 나타난다는 것이 알려져 있다[17]. 따라서, 선택시간 ST를 감지한다면 이 시간 이후 수 초 내에서 RT가 일어날 것임을 예측할 수 있다. 이와 같이 어떤 반응을 하기 전에 인간의 생각을 미리 컴퓨터에 전달함으로써 BCI에 활용할 수 있게 된다.

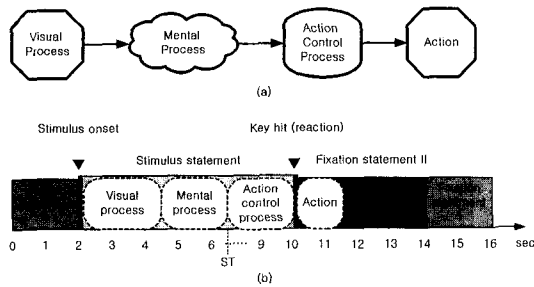


그림 5 Task 수행 시 피험자의 정신상태 (a) 변화 추정도 (b) 시간축에서의 변화 과정

3. 선택시간 감지를 위한 특징 추출

앞 장에서 보인 바와 같이 DAS를 통하여 측정된 뇌파 신호만을 보고서는 선택시간 ST를 감지하기가 거의 불가능하다고 판단하여 3가지의 특징들을 추출한다. 이들 특징들은 좌뇌와 우뇌의 활동을 비교할 수 있는 값들로 구성된다. 좌우 뇌의 활동을 관찰하기 위하여 우

선, 부착한 8개 전극의 공간적인 위치를 고려하여 (Fp1, Fp2), (F3, F4), (C3, C4), (Fz, Cz)와 같은 전극 쌍들을 구성한다. 전극 쌍에서의 뇌파 신호를 대역통과필터(BPF, band pass filter)를 통과시켜 위상의 차이, 동기 정도의 차이, 신호 크기의 차이 등을 확인하고 이들을 정량적인 값으로 표현하여 특징으로 추출한다. 이 특징 값들을 비교함으로써 좌우 뇌활동을 관찰한다. 특징 추출의 전체적인 과정을 그림 6(a)에서 보인다.

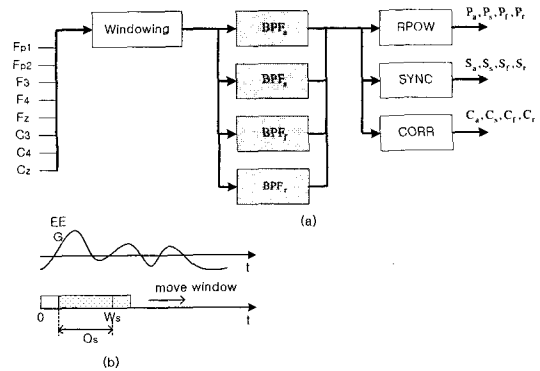


그림 6 특징 추출과정 (a) 블록 다이어그램 (b) 윈도우의 설정 및 이동

특징 추출과정에서는 뇌파 신호를 절단(truncation)하기 위하여 $W_s=0.5$ 초(128 샘플) 크기의 Hamming 윈도우를 사용하고, 0.125초마다 윈도우 크기 75%의 오버랩($O_s=0.75W_s$)으로 윈도우를 이동시켜 뇌파 신호를 받아들인다. 그림 6(b)에서 이 과정을 보인다. 대역통과 필터들은 4차의 Butterworth 필터로 설계되어 Direct Form-II의 형태로 소프트웨어적으로 구현된다. 이들 BPF(BPF_α , BPF_{β_s} , BPF_{β_f} , BPF_γ)로부터 각각 alpha(α), slow-beta(β_s), fast-beta(β_f) 및 gamma(γ) 파주파수 영역에 해당되는 뇌파 신호를 걸러낸다. 표 1에서 이들 필터들의 통과 주파수 대역을 나타낸다. 그림 7에서는 피험자가 눈을 뜨고 있을 때(eye open)와 눈을 감고 있을 때(eye closed)의 뇌파 신호에 대하여 각각 필터링한 결과를 보인다. (본 실험에서는 피험자의 기저신호를 확보하기 위하여 eye open 상태와 eye closed 상태에서 각각 60초 동안의 뇌파를 측정하였다. 이 중에서 30~40초 사이의 Fp1, Fp2 신호를 그림 7에서 보인다.) α

표 1 BPF 필터의 통과 주파수 대역

BPF	BPF_α (α)	BPF_{β_s} (β_s)	BPF_{β_f} (β_f)	BPF_γ (γ)
Hz	8 ~ 12	13 ~ 19	20 ~ 30	31 ~ 50

파의 세기를 관찰해 보면, 피험자가 눈을 감고 있을 때 더 크게 나타나는 것을 볼 수 있다.

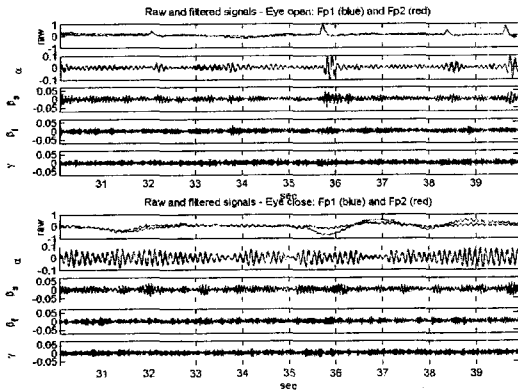


그림 7 필터링된 뇌파신호 예 (a) 눈을 뜬 상태 (b) 눈을 감은 상태

BPF를 통과한 신호들은 RPOW, SYNC, CORR 계산 모듈로 입력된다. 이 계산 모듈에서는 최종 특징들인 각 주파수별 상대전력(relative power, P_a, P_s, P_t, P_r), 동기율(synchronization rate, S_a, S_s, S_t, S_r), 상관관계(cross-correlation, C_a, C_s, C_t, C_r) 값들을 계산하여 출력한다. 임의의 한 전극 쌍(예: C3, C4)에서 측정된 뇌파를 (x, y) 로 두자. 그리고, x_t 과 y_t 이 하나의 BPF(예: BPF_s)를 거쳐서 나온 신호를 x, y 라고 두자. 그러면, 해당 주파수 대역에서의 상대전력, 동기율, 상관관계 값들은 다음과 같이 계산된다.

Relative Power (Asymmetry Ratio): 이 값은 대상으로 하는 전극 쌍에서의 두 뇌파 신호의 상대전력을 나타내며 식 (1)과 같이 정의된다.

$$P_{xy} = \frac{P_x - P_y}{P_x + P_y} \quad (1)$$

여기에서 $P_x = \sum_{n=1}^N |x_n|^2, P_y = \sum_{n=1}^N |y_n|^2$ 이다. N은 설정한 윈도 크기 W_s 내에서의 샘플의 개수를 나타내고, $-1 \leq P_{xy} \leq 1$ 을 만족한다. x_n 과 y_n 은 각각 x와 y의 n번째의 원소를 가리킨다. P_a, P_s, P_t, P_r 은 각각 $\alpha, \beta_s, \beta_t, \gamma$ 대역에서의 값을 나타낸다.

Synchronization Rate: 이 값은 두 신호의 동기성을 나타내는 특징으로서, 각 전극 쌍에 있어서 주파수 대역별로 식 (2)와 같이 정의된다.

$$S_{xy} = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^L \eta(W_i^{xy}) - 1 \quad (2)$$

여기서 $\eta(W_i^{xy})$ 는 W_i^{xy} 시간구간 내에서의 샘플의 개수를 나타낸다. W_i^{xy} 는 그림 8에서 보이는 바와 같이 두 신호에서 기울기의 부호가 일치되는 i-번째 구간을 나타내고, L은 W_s 내에서 이러한 구간의 총 개수를 나타낸다. (그림 8의 W_i 에서는 xy 표기를 생략함.) 식 (2)에서 보면 S_{xy} 의 값은 0과 1사이의 값을 2배하고 1을 빼서 $-1 \leq S_{xy} \leq 1$ 을 만족하도록 정규화 되고, 각 주파수 대역별로 S_a, S_s, S_t, S_r 와 같이 표기한다.

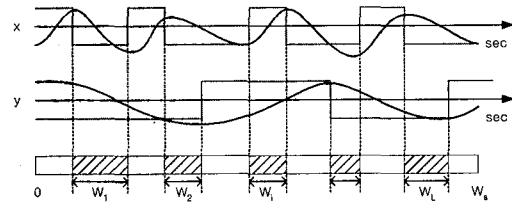


그림 8 동기율(synchronization rate) 계산을 위한 설명

Cross-Correlation: 이 값은 두 신호의 부호뿐만 아니라 상대적인 크기도 고려한 특징으로서, 식 (3)과 같이 정의된다.

$$C_{xy} = \frac{1}{\|x\| \cdot \|y\|} \sum_{n=1}^N x_n y_n \quad (3)$$

식 (3)에서 보면, 각 신호들의 norm의 곱으로 나뉘어져 C_{xy} 가 -1과 1 사이의 값으로 정규화된 것을 알 수 있다. P_{xy} 및 S_{xy} 의 경우와 마찬가지로 각 주파수 대역에 대하여 C_a, C_s, C_t, C_r 과 같이 표기한다.

그림 9에서는 한 피험자의 데이터에 대하여 추출한 특징들을 보인다. 파란색 혹은 세로 선은 피험자가 키를 누른 반응시간 RT를 나타내고, 각 주파수별 특징들은 색깔을 달리하여 보인다. 그림 9에서 보면, P_{xy}, S_{xy} ,

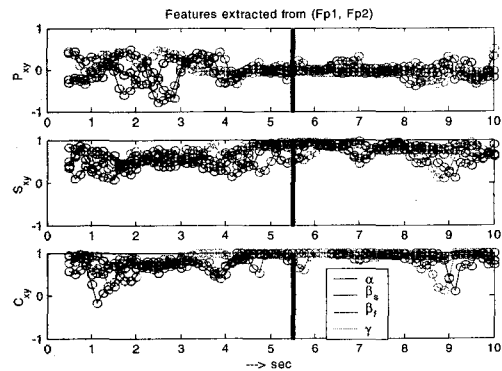


그림 9 한 피험자 데이터에 대한 특징들

C_{xy} 의 값이 RT 이후에 거의 일정하게 나타나는 부분이 있음을 알 수 있다. 또한, S_{xy} 와 C_{xy} 의 값이 대부분 0보다 큰 값으로 유지되는 것을 볼 수 있다. 4장에서는 이와 같은 특징들을 정리하여 피험자별 상세 규칙을 구성한다.

4. 선택시간 ST 감지 규칙들

Time-locked된 시각 또는 청각 자극과 같은 사건(event)에 의해 발생하는 ERP(event related potential)의 경우에는 대부분의 피험자들에서 어떤 공통적인 특징들을 쉽게 발견할 수 있다[18]. 그러나, 본 연구에서와 같은 인지적 판단을 요구하는 task에서는 피험자마다 각기 다양한 뇌파 특성을 나타내므로 공통적인 특징들을 파악하기가 매우 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 모든 피험자에 대한 공통적 특징을 찾기에 앞서, 피험자별로 나타나는 특징들을 분석하고 이를 바탕으로 공통적인 요소들을 찾고자 한다.

본 장에서는 선택시간 ST를 감지하기 위한 규칙들로서 대상 피험자 각각에 대한 상세 규칙(specific rule)과 피험자 사이에서 공통적으로 나타나는 일반 규칙(meta rule)에 대하여 기술한다.

4.1 피험자별 상세 규칙과 파라미터

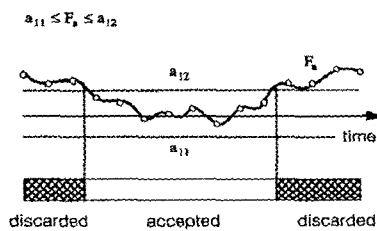
정신적인 프로세스 과정이 끝나는 시점인 선택시간 ST를 감지하기 위하여 '피험자의 선택시간 ST를 반응

시간 RT 이전 약 2초 내에서 발생한다'는 가정을 한다. 피험자마다 약간의 차이가 있을 것이나, 긍정/부정에 대한 판단이 끝난 후에 손으로 키를 누르는 동작은 대략 2초 이내에서 이루어진다고 가정하는 것이다. 이와 같은 가정 하에서 선택시간 ST를 감지하기 위하여 3장에서 추출한 특징들로부터 각 피험자별 규칙 그룹(rule group) A, B, C, D를 정의한다. 그룹 A는 각 특징들의 크기에 관련된 규칙이고, 그룹 B는 각 특징들의 순간적인 변화폭에 대한 규칙이다. 그룹 C는 서로 다른 두 주파수 대역에서 추출한 특징들 사이의 변화형태에 관한 규칙이고, 그룹 D는 그룹 C에서와 비슷하게 정의되나 두 특징들 사이의 대소관계를 포함하는 규칙이다. 각 규칙 그룹들에 대하여 그림 10에서 예를 들어 보인다.

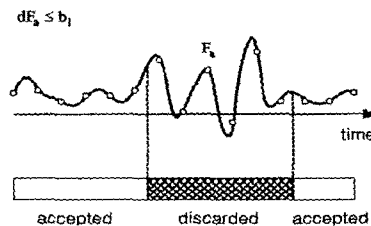
RULE GROUP A: 이 규칙 그룹에서는 각 특징들의 크기에 대한 제약을 규정한다. 임의의 한 특징 계산 모듈(RPOW, SYNC, CORR)에서의 출력 신호들을 F_a, F_b, F_c, F_d 와 같이 두면, 이들의 크기는 다음과 같은 파라미터 값으로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} a_{11} &\leq F_a \leq a_{12} \\ a_{21} &\leq F_b \leq a_{22} \\ a_{31} &\leq F_c \leq a_{32} \\ a_{41} &\leq F_d \leq a_{42} \end{aligned}$$

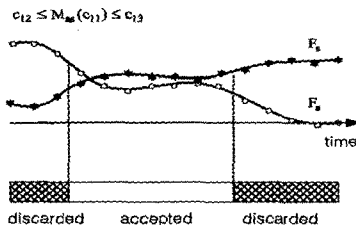
여기에서 상수 a_{ij} 는 $-1 \leq a_{ij} \leq 1, i=1,2,3,4, j=1,2$ 의 조건을 만족하는 값으로 설정된다. 그림 10 (a)에서는 $a_{11} \leq f_a \leq a_{12}$ 의 규칙을 만족하는 구간(accepted)과 만족



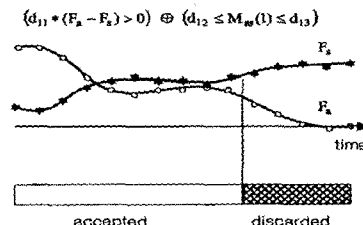
(a) amplitude-related rules



(b) slope-related rules



(c) difference-related rules



(d) difference and relative max-min related rules

그림 10 규칙 그룹 A, B, C, D에 대한 설명

하지 않아서 무시되는 구간(discarded)의 예를 보인다.

RULE GROUP B: 여기에서는 각 특징들의 순간적인 변화폭에 대한 규칙들을 정의한다.

$$\begin{aligned} dF_a &\leq b_1 \\ dF_s &\leq b_2 \\ dF_f &\leq b_3 \\ dF_r &\leq b_4 \end{aligned}$$

여기에서 $dF_x = |F_x(k) - F_x(k-1)|$, $x \in \{a, s, f, r\}$ 이고, k 는 windowing에 관한 인덱스(index)를 나타낸다. $F_x(k)$ 는 현재 windowing 인덱스에서의 특징 값이고, $F_x(k-1)$ 는 한 스텝 이전의 특징 값이다. 그리고, 파라미터 b_i 는 $0 \leq b_i \leq 2, i = 1, 2, 3, 4$ 을 만족한다. 이 규칙 그룹에서 하한 경계의 값을 파라미터로 설정하지 않은 것은 특징들의 유형을 분석한 결과 설정할 필요성이 거의 없었기 때문이다.

RULE GROUP C: 서로 다른 두 특징들 사이의 변화추이에 대한 규칙들을 정의한다.

$$\begin{aligned} c_{12} &\leq M_{as}(c_{11}) \leq c_{13} \\ c_{22} &\leq M_{af}(c_{21}) \leq c_{23} \\ c_{32} &\leq M_{ar}(c_{31}) \leq c_{33} \\ c_{42} &\leq M_{sf}(c_{41}) \leq c_{43} \\ c_{52} &\leq M_{sr}(c_{51}) \leq c_{53} \\ c_{62} &\leq M_{fr}(c_{61}) \leq c_{63} \end{aligned}$$

여기에서

$$M_{xy}(c_{ni}) = \frac{1}{c_{ni}} \sum_{i=0}^{c_{ni}-1} |F_x(k-i) - F_y(k-i)|, \text{ 이고, } x, y \in \{a, s, f, r\}, x \neq y$$

파라미터 $c_{ni}, n = 1, 2, \dots, 6$ 은 0 또는 자연수로 설정되는 값으로서 두 특징들 사이에서 일정한 유형이 지속되는 구간을 지정한다. 예를 들어 $0 \leq M_{xy}(3) \leq 0.5$ 와 같은 경우는 α -파와 β -파의 차이의 절대값이 $[k-2, k]$ 동안에 0과 0.5 사이로 유지되는 것을 의미한다. $0 \leq c_{ni} \leq 2, n = 1, 2, 3, 4, 5, 6, j = 2, 3$ 의 조건을 만족한다.

RULE GROUP D: 서로 다른 두 특징들 사이의 대소 및 변화추이에 대한 규칙을 정의한다.

$$\begin{aligned} (d_{11} * (F_a - F_s) > 0) \oplus (d_{12} \leq M_{as}(1) \leq d_{13}) \\ (d_{21} * (F_a - F_f) > 0) \oplus (d_{22} \leq M_{af}(1) \leq d_{23}) \\ (d_{31} * (F_a - F_r) > 0) \oplus (d_{32} \leq M_{ar}(1) \leq d_{33}) \\ (d_{41} * (F_s - F_f) > 0) \oplus (d_{42} \leq M_{sf}(1) \leq d_{43}) \\ (d_{51} * (F_s - F_r) > 0) \oplus (d_{52} \leq M_{sr}(1) \leq d_{53}) \\ (d_{61} * (F_f - F_r) > 0) \oplus (d_{62} \leq M_{fr}(1) \leq d_{63}) \end{aligned}$$

여기에서 $M_{xy}(1) = M_{xy}(c_{ni} = 1)$, $x, y \in \{a, s, f, r\}$, $x \neq y$ 이고, \oplus 는 OR 논리를 나타낸다. 파라미터 d_{ni} 는 $0 \leq d_{ni} \leq 2, n = 1, 2, 3, 4, 5, 6, j = 2, 3$ 의 조건을 만족한다. 두 특징 사이의 대소관계는 $d_{ni} = \pm 1, n = 1, 2, \dots, 6$ 에 의하여 결정된다. 만약, d_{11} 의 값이 -1 로 설정된다면, $F_a \geq F_s$ 와

같이 되어 F_a 가 F_s 보다 크게 나타나는 구간이 포함되는 것을 알 수 있다. 이와 같은 규칙 그룹의 설정은 특징 트렌드에 대한 자세한 관찰과 수차례의 경험을 바탕으로 구성하였다. (각 그룹과 관련된 심리적, 신경학적, 정신생리학적 특징에 대한 고찰은 본 논문에서 다루지 않는다.)

이상의 각 규칙 그룹에서 정의한 파라미터 값은 다음과 같은 행렬로 표시할 수 있다.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \\ a_{41} & a_{42} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \\ d_{41} & d_{42} & d_{43} \\ d_{51} & d_{52} & d_{53} \\ d_{61} & d_{62} & d_{63} \end{bmatrix}$$

각 규칙 그룹에서 정의한 파라미터 값을 적절히 선택함으로써 그림 9에서 보이는 특징 데이터로부터 각 피험자들에 대한 선택시간 ST를 감지할 수 있게 된다. 각 파라미터들의 디폴트 값은 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ -1 & 1 \\ -1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 2 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 2 \\ 1 & 0 & 2 \\ 1 & 0 & 2 \\ 1 & 0 & 2 \\ 1 & 0 & 2 \\ 1 & 0 & 2 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 2 \\ 1 & 0 & 2 \\ 1 & 0 & 2 \\ 1 & 0 & 2 \\ 1 & 0 & 2 \\ 1 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

표 2에서는 (Fp1, Fp2) 전극 쌍에서의 cross-correlation에 관계된 파라미터 값을 피험자별로 나타낸다. 표 2에서 설정한 파라미터 행렬, A, B, C, D를 살펴 보면, 4명의 피험자(LHH, PST, ODG, LWW)에 대하여 디폴트 값으로 설정되어 있는 파라미터들이 회색으로 칠해져 있는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 파라미터들은 ST 감지에 별 영향을 끼치지 않는 것들로 파악할 수 있으며, 특징 행렬로부터 제거하여 행렬의 크기를 줄일 수 있다. 4명의 피험자 데이터를 살펴보면, LHH와 PST의 경우에는 EOG의 영향이 전체 뇌파 파형에 걸쳐 나타난다. 최대 전위값이 2V 정도의 EOG 성분이 1초에 한번 정도로 매 10초 실험 데이터에서 보인다. 반면, ODG 데이터의 경우에는 10초 동안의 뇌파 파형에 1~2번의 EOG가 나타나고, 최대 전위의 크기도 0.5V 정도의 작은 값을 나타낸다. LWW 데이터는 이들의 중간 정도에 해당한다고 볼 수 있다. EOG의 영향에 대해 둔감한 결과를 얻기 위하여 이와 같이 임의의 데이터 집합을 선택하였다.

4.2 선택시간 ST 감지를 위한 Meta Rules

이상에서 기술한 각 피험자별 특징인 상세 규칙

표 2 (Fp1, Fp2) 전극 사이에서의 cross-correlation에 관계된 파라미터 값

A, B			LHH			PST			ODG			LWW		
a1	a12	b1	0.8	1	2	0.9	1	2	0.4	1	0.4	0.2	1	0.2
a2	a22	b2	0.7	1	2	0.5	1	2	0.1	1	0.4	-0.1	0.9	0.5
a3	a32	b3	-0.1	1	2	0.4	1	2	-0.5	0.7	0.5	-0.4	1	0.6
a4	a42	b4	-1	1	2	0.4	1	2	-0.1	1	2	-0.2	0.7	0.3

C			LHH			PST			ODG			LWW		
c11	c12	c13	1	0	0.3	4	0.01	2	1	0	2	1	0	2
c21	c22	c23	1	0	2	2	0.4	2	1	0	2	1	0	2
c31	c32	c33	1	0	2	1	0	2	1	0	2	1	0	2
c41	c42	c43	1	0	2	1	0	2	1	0	2	1	0	2
c51	c52	c53	1	0	2	1	0	2	1	0	2	1	0	2
c61	c62	c63	3	0.1	2	3	0.1	2	3	0	0.5	1	0	2

D			LHH			PST			ODG			LWW		
d11	d12	d13	1	0	2	1	0	2	1	0	2	1	0	2
d21	d22	d23	1	0	2	1	0	2	1	0	2	1	0	2
d31	d32	d33	1	0	2	1	0	2	1	0	2	1	0	2
d41	d42	d43	1	0	2	1	0	2	1	0	0.4	1	0	0.5
d51	d52	d53	1	0	2	1	0	2	1	0	2	-1	0	0.7
d61	d62	d63	1	0	2	1	0	2	1	0	2	1	0	2

(specific rules)과 더불어 피험자들에게서 공통적으로 나타나는 특징들을 이용하여 선택시간 ST를 감지한다. 피험자들 사이에서의 공통적인 특성은 실험과정 동안에 나타난 피험자들의 전반적인 움직임(눈 움직임, 손발의 움직임, 입이나 얼굴표정의 변화, 목운동 등)이나 자극에 대한 반응 패턴(자극에 반응하기까지 평균적으로 얼마의 시간이 걸리는가) 등에 대한 정보로서 피험자들의 뇌파 데이터를 분석하여 얻는다. 본 논문에서는 선택시간 ST를 감지하기 위하여 피험자들의 시각자극 처리 프로세스에 관련된 CT와 정신작용 프로세스의 지속성에 관련된 RP를 공통적인 특성으로 이용한다.

CT(Cut Time)

실험으로부터 얻은 뇌파를 분석해 보면, 대부분의 피험자 데이터에서 YES/NO 키를 누르기까지 수 초의 시간이 소요되었음을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 피험자가 제시된 문제를 읽고 문제의 내용을 해석하는 데 시간이 필요했던 것으로 파악된다. 본 논문에서는 이 시간을 CT로 정의하고, CT 이후에 정신작용 프로세스(mental process) 과정이 진행되고, 이 프로세스의 마지막 부근에서 ST가 나타난다고 간주한다. 이렇게 함으로써 선택시간 ST를 감지하는 데 CT까지의 뇌파 신호를 무시할 수 있으므로 false alarm error[18]를 줄일 수 있고, 감지기에 부파되는 부하 또한 줄일 수 있다. 그림 11에서는 CT와 ST 및 RT의 관계를 시간축 상에서 보인다. 그러나, 실제로 각 프로세스가 끝나는 시점을 정

확하게 정의할 수 없고 피험자마다 문제의 난이도에 따라 각기 약간의 차이가 있으므로, CT, ST, RT의 시간들은 어떤 구간 내에 존재한다고 보는 것이 타당하다고 생각한다. 본 연구에서는 문제가 제시된 후 약 1~3초 정도로 CT를 설정하였다. 표 3에서는 피험자 4명(LHH, PST, ODG, LWW)에 대한 CT를 보인다.

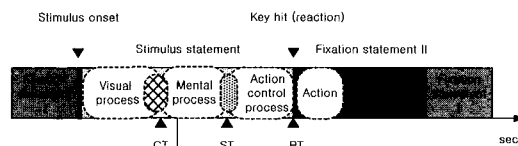


그림 11 CT, ST, RT 상호간의 관계

표 3 피험자별 CT

Subject	LHH	PST	ODG	LWW
CT (sec)	2.5	2.0	2.0	2.0

RP(Repeated Period)

피험자의 실험 데이터를 여러 번 분석한 결과, 반응시간 RT 이전 약 1~3초 내에서 피험자별 상세 규칙을 만족하는 패턴이 일정기간 동안 나타나는 것을 관측할 수 있었다. 본 논문에서는 이 구간을 RP로 정의하고, 피험자가 문제를 시각자극으로 받아들여 내용에 대한

해석을 끝낸 후에 참인지 거짓인지를 판단하는 데에만 걸린 시간으로 간주한다. RP 값 또한 피험자별, 문제별로 각각 달리 설정하는 것이 타당하겠으나, 이 값들을 정확하게 알 수 없으므로 본 논문에서는 경험적으로 얻은 값인 $RP=0.75$ 초(6 샘플)로 설정한다. 따라서, 그림 11에서와 같이 일정한 패턴이 RP 동안 지속된 시점이 피험자의 선택시간 ST가 된다.

선택시간 ST의 감지 과정을 그림 12에서 보인다. 그림 6에서 추출된 특징들은 상세 규칙 그룹들의 입력이 된다. Meta 규칙들과 상세 규칙들은 AND 논리로 결합되어서 현재 시간에 입력된 특징들이 이들 조건들을 모두 만족하게 될 때 현시점이 ST로 판단된다.

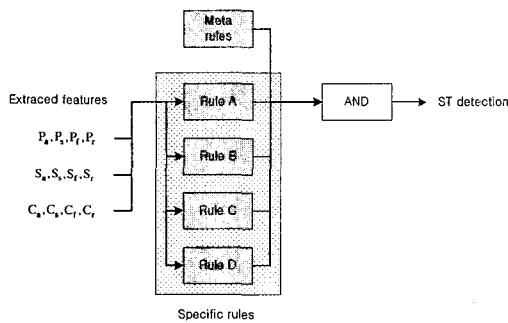


그림 12 선택시간 ST 감지 과정

5. 선택시간 ST 감지 결과

본 장에서는 이상에서 기술한 일반 규칙과 각 피험자별로 설정한 상세 규칙들을 8명의 피험자(LHH, PST, ODG, LWW, KDC, KGB, KYT, PMH)에 적용하여 선택시간 ST를 감지한 결과에 대하여 기술한다.

5.1 감지 결과 및 분석

그림 13에서는 피험자 LHH가 NO라고 응답한 데이터에 대하여 규칙들을 적용하여 ST를 감지한 결과를 보인다. LHH의 반응시간 RT는 파란색 굵은 세로 선으로 표시되어 있고, CT는 녹색 세로 선으로 표시되어 있다. 그리고, RT 이전 2초 내에서 감지된 ST는 빨강색 삼각형으로 표시되어 있고, 이 범위를 벗어난 경우(false alarm error)에는 녹색 삼각형으로 표시되어 있다.

그림 13의 문제 1n의 경우를 보면, 정신적 프로세스가 시작되어 RP 기간 동안 지속된 시점을 ST로 감지하였고, ST 이후 약 0.45초에서 피험자가 NO 키를 눌렀음을 알 수 있다. 문제 2n의 경우에는 피험자가 ST 이후에 반응하기까지 걸린 시간이 약 1초 정도 걸린 것을 볼 수 있다. 문제 4n에서는 피험자가 응답시간

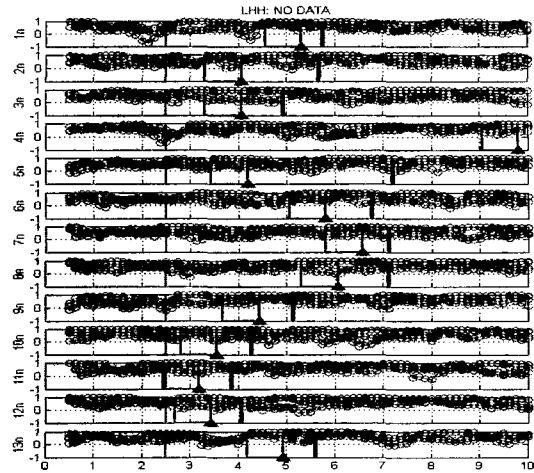


그림 13 선택구간 ST의 감지 결과 예

10초 내에 YES/NO를 선택하지 못하고, 10초 이후에 반응을 한 것을 볼 수 있다. 이와 같은 경우는 유용한 데이터 집합에서 제외시켰다. 문제 5n에서는 피험자의 반응시간 RT보다 약 3초 전 시간에 ST가 감지된 것을 볼 수 있다. 본 논문에서는 ST가 RT 이전 2초 내에서 발생한다고 가정하였으므로, 이 같은 경우는 false alarm error에 해당한다. 즉, 피험자가 선택을 하지 않았는데도 NO를 선택한 것으로 잘못 판단한 것이다.

표 4에서는 각 피험자별로 YES를 선택한 경우와 NO를 선택한 경우의 데이터에 대하여 평균 감지 성공률(P_b)과 이때의 ST와 RT 사이의 평균 시간(T_{rs})을 나타낸다.

표 4 피험자별 평균 감지 성공률(%) 및 RT까지의 예상 시간(초)*

Subject	CT	P_b (Y)	P_b (N)	P_b (Ave)	T_{rs} (Y)	T_{rs} (N)	T_{rs} (Ave)	HD
KDC	2.5 sec	92.9	88.9	91.3	0.658	0.815	0.718	RH
KGB	2.5 sec	75.0	81.0	78.3	0.636	0.782	0.709	RH
KYT	2.5 sec	90.9	81.8	86.4	0.778	0.669	0.726	RH
LHH	2.5 sec	81.8	91.7	87.0	0.536	0.813	0.689	RH
LWW	2.0 sec	77.8	72.7	75.0	0.722	0.717	0.719	RH
ODG	2.0 sec	83.3	77.8	81.0	0.667	0.862	0.747	RH
PMH	2.5 sec	90.9	75.0	82.6	0.609	0.820	0.709	RH
PST	2.0 sec	83.3	83.3	83.3	0.723	0.847	0.785	RH
Ave.		83.6	81.6	83.1	0.666	0.791	0.726	

* : T_{rs} , Y: YES data, N: NO data, Ave: average, HD:

hand, RH: right hand

표 4에서 보면, 평균 ST 감지 성공률이 83.1% 정도임을 알 수 있고, 최대 92.9%, 최소 72.7%로 나타난 것을 볼 수 있다. 또한, ST가 감지된 후 평균 0.726초 이후에 RT가 나타난다는 것을 알 수 있다. 본 연구의 실험에서는 NO 키를 왼손 검지 손가락으로 누르고, YES 키는 오른손 검지 손가락을 눌러서 반응을 하도록 통제하였다. 그 결과 표 4에서 피험자 LHH와 PST 및 ODG의 결과를 보면, YES 반응(오른손)을 할 때의 시간이 NO 반응(왼손)을 할 때보다 약 0.1~0.3초 정도 작다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 타 논문들[17]에서도 나타나는 결과로서 오른손 잡이의 경우에는 오른손 반응이 왼손 반응보다 약간 빠르고, 왼손 잡이의 경우에는 상대적으로 왼손의 반응이 빠르게 나타난다는 것을 입증한다. 또한, 평균 ST 값 (Ave)을 보면, 피험자가 판단을 한 후에 키 입력이 감지되기까지는 피험자마다 약간씩 차이가 있으나 대략 0.6~0.8초 정도 걸린다는 것을 알 수 있다. 따라서, 선택시간 ST가 감지되면 약 0.6~0.8초 후에 RT가 나타날 것임을 예측할 수 있다.

표 4에서의 결과는 Fp1과 Fp2의 CORR에 관계된 규칙뿐만 아니라, RPOW와 SYNC에 관계된 규칙들도 일부 이용하였다. 이들에 대하여 설정한 파라미터 값들은 생략한다.

5.2 설정한 파라미터 값들에 대한 범용성 검증

본 장에서는 이상에서 설정한 각 피험자별 파라미터 값들이 얼마나 타당성이 있는가를 검증한다. 이를 위하여 피험자 LHH와 PST에 대하여 6개월 이상의 기간을 두고 같은 실험을 반복하였다. 표 5에서 그 결과를 보인다.

표 5 파라미터 값들에 대한 범용성 검증

Subject	CT	P _b (Y)	P _b (N)	P _b (Avc)	T _{RS} (Y)	T _{RS} (N)	T _{RS} (Avc)	HD
LHH	2.5 sec	81.8	91.7	87.0	0.536	0.813	0.689	RH
LHHR	2.0 sec	78.6	70.0	75.0	0.767	0.757	0.763	RH
PST	2.0 sec	83.3	83.3	83.3	0.723	0.847	0.785	RH
PSTR	2.0 sec	23.1	72.7	45.8	0.804	1.076	1.002	RH

먼저, 피험자 LHH에 대한 실험 결과를 보자. 처음 실험에서는 그림 2에서와 같이 YES 응답에 대해서는 왼손으로 키를 누르고, NO 응답에 대해서는 오른손으로 키를 누르게 하였다. 재실험에서는 YES/NO의 위치를 임의로 나타나게 하여 피험자가 같은 응답에 대하여 좌우 손동작이 모두 나타나게 하였다. 이렇게 한 이유는 피험자의 주의를 좀더 유도하고, 나아가 왼손과 오른손

동작의 영향을 파악하기 위해서였다. 새로 획득한 데이터(LHHR)의 분석에서는 표 2에서의 LHH에 대한 파라미터 값들을 그대로 적용하였다. 그러나, 예비실험을 통하여 분석한 결과, 피험자의 반응시간이 이전 실험에 비하여 좀더 빠르게 나타났으므로 CT를 2.5초에서 2.0초로 조정하였다. 이는 피험자가 같은 실험을 이전에 한번 해 보았기 때문에 문제에 답하는 시간이 처음보다 짧게 나타났을 것으로 판단한다.

분석 결과에서는 평균 75% 정도의 ST 감지 성공률을 보였다. 이 실험에서는 YES/NO 키의 위치가 임의로 주어지므로 양손에서 키를 누르는 속도는 크게 차이가 나지 않는 것을 볼 수 있다. (표 5에서 T_{RS}(Y)와 T_{RS}(N)을 비교하면 0.01초의 차이가 있음을 알 수 있다.) 이 결과에서 보면, CT 시간만을 약간 짧게 하고, 나머지 규칙들은 그대로 적용하여 75%의 감지 성공률을 보인다는 것은 설정한 파라미터 값들이 시간적인 요소와는 독립적으로 어느 정도 범용성을 가지고 있다고 생각된다. 또한 T_{RS}(Ave)의 평균값을 두 실험에서 비교해 보면, 재실험에서의 경우가 약 80msec 정도 더 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 재실험의 경우에는 문제의 답을 판단한 후에 YES와 NO에 대한 반응 버튼이 어느 쪽에 있는가를 확인하는 시간이 더 필요했던 것으로 판단된다.

피험자 PST의 재실험에서는 화면에 제시되는 문제에서 YES와 NO의 위치를 바꾸어 제시하였다. 따라서 피험자는 YES 응답에 대하여 오른손으로, NO 응답에 대해서는 왼손으로 반응하도록 하였다. 재실험 데이터(PSTR)에 표 2에서의 PST에 해당되는 파라미터 값을 그대로 적용했을 때 나타난 결과를 표 5에서 보인다. 여기에서 보면, NO 응답 데이터에 대해서는 72.7%의 감지 성공률이 나타나지만, YES 응답 데이터에 대해서는 좋지 못한 결과가 나타나는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 피험자 PST에 대하여 설정한 파라미터 값들이 좀더 수정 보완하여 최적화할 필요가 있음을 말해 준다.

이상의 결과에서 보면, 본 논문에서 설정한 규칙들이 어느 정도 범용성을 가지고 있음을 알 수 있다. 그러나, 감지 성공률을 향상시키기 위해서는 좀더 많은 실험을 통하여 파라미터들을 최적화하는 것이 필요하고 다양한 특징들을 고려해야 함을 알 수 있다.

6. Discussion

문제의 유형별 분석:

실험과정에서 피험자에게 제시된 문제를 살펴보면, 유형 1, 2, 3에서 각각 차이가 있음을 알 수 있다. 유형 1

은 단순히 좌우 항에 제시된 글자들의 형태가 같은 가
를 판단하는 문제이고, 유형 2는 두 단어 사이의 관계를
묻는 질문이며, 유형 3은 어떤 사실이 옳고 그른가를 판
단하는 문제이다. 따라서, 엄밀하게 말하면 이 세가지
유형은 각각 따로 분리되어 분석될 수도 있을 것이다.
이러한 경우, 각 유형별 결과로부터 새로운 사실들을 얻
을 수 있을 것으로 사료된다. 그러나, 본 논문에서는 실
험 데이터의 부족으로 인하여 이들에 대한 상세한 분석
은 하지 않았다.

Fixation statement II:

본 연구에서는 한 문제에 대한 수행 시간을 14초로
고정하여 실험을 하였다. 그러나, 실험을 마친 피험자들
을 대상으로 실시한 설문조사에서 보면, 피험자가 YES/
NO 선택을 빨리 한 경우에는 다음 문제가 제시될 때까
지의 시간이 너무 길어서 지루했다는 응답이 많이 나타
났다. 따라서, 차기 실험에서는 이 문제를 보완하고자
한다.

CT와 RP:

본 연구에서는 CT 이전 시간에는 피험자가 제시된
문제를 읽고 있어서 긍정/부정 판단의 정신적 프로세스
는 일어나지 않는다고 가정하였다. 그리고, 피험자 데이
타의 분석 결과로부터 문제가 제시된 후 1~3초 정도로
CT를 정하였다. 또한, 분석 작업을 간단하게 하기 위하
여 RP를 고정시켜 감지 성공률을 관찰하였다. 그러나,
이 값들은 피험자마다 또 문제의 난이도에 따라 문제를
분석하고 파악하는 데 걸리는 시간이 다를 것이므로 각
기 다르게 설정하는 것이 타당하다고 본다.

실시간 감지 방법:

본 논문에서 제안한 방법을 실시간 RT를 감지하기
위하여 사용할 경우에는 다음과 같은 순서로 진행된다.
우선, 해당 피험자에 대하여 예비실험을 수행한다. 예비
실험에서 획득한 뇌파 데이터로부터 피험자에 관련된
Meta 규칙과 상세 규칙에서의 파라미터 값들을 추출하
고, RT와 ST 사이의 평균시간을 계산한다. 실제 실험
에서는 추출한 파라미터 값들을 기반으로 ST를 감지하
고 RT를 예측한다. 그러나, 이 방법에서의 문제점은 예
비실험 과정을 통하여 획득할 수 있는 피험자 정보에는
한계가 있다는 것이다. 따라서 감지 성공률을 향상시키
기 위해서는 상세 규칙에서의 파라미터들을 적절하게
설정해야 할 뿐만 아니라, 많은 수의 Meta 규칙을 확보
하는 것이 필요하다고 생각된다. 다른 한 방법으로는,
유사한 특성을 보이는 피험자들을 하나의 그룹으로 만
들어 이를 데이터베이스화하여 새로운 어떤 피험자 A에
대한 실험 시 이 데이터베이스에 저장되어 있는 그룹

중에서 피험자 A와 가장 유사한 그룹에 대한 규칙들을
이용할 수 있을 것이다. 유사한 그룹을 정의하는 데는
각 피험자별로 설정한 상세 규칙의 파라미터 값들에 대
하여 거리 개념을 도입하여 구한 similarity distance를
사용할 수 있다. 이 값을 통하여 피험자 규칙들 상호간
에 어느 정도의 유사성을 가지고 있는가를 파악한다.

표 6에서는 표 2에 주어진 파라미터 값들의 평
균거리를 이용하여 계산한 similarity distance의 한 예
를 보인다. 파라미터 값들이 완전히 일치하면 1이 되고,
일치하는 정도가 작을수록 0에 가깝게 된다. 표 6에서
보면, LHH와 PST, LWW와 ODG의 규칙들이 각각 다
른 규칙들의 조합보다 상대적으로 유사성이 크게 나타
나는 것을 알 수 있다. 따라서, (LHH, PST), (ODG,
LWW)와 같은 두 유형의 피험자 그룹을 나눌 수 있다.
이와 같은 유형들을 실시간 ST 감지 및 YES/NO 판별
을 위하여 적절히 사용한다면 감지 및 판별에서의 부하
를 상당히 줄일 수 있을 것으로 기대한다.

표 6 각 피험자 규칙들에 대한 similarity distance 예

	LHH	PST	ODG	LWW
LHH	1	0.8813	0.0785	0.2087
PST		1	0.0690	0.2030
ODG			1	0.4106
LWW				1

7. 결론

본 논문에서는 피험자의 뇌파를 이용하여 피험자가
반응하는 시점인 RT를 알아내는 방법에 대하여 기술하
였다. RT 시점을 예측하기 위하여 실험 task에서 피험
자에게 주어지는 자극과 정신상태를 추정하여 모델링하
고 선택시간 ST를 정의하였다. 선택시간 ST를 감지하
기 위하여 각 피험자별로 나타나는 특징들을 상세 규칙
으로 설정하고, 실험에 참가한 피험자들 사이에서 공통
적으로 나타나는 특징들을 일반 규칙으로 설정하였다.
이러한 규칙들에서 CT, ST, RP와 같은 개념을 새롭게
도입하여 사용하였다. 설정한 규칙들을 적용하여 분석한
결과로부터 평균 83%의 ST 감지 성공률을 얻었고, ST
에서 RT까지의 시간은 평균적으로 0.73초 정도 걸린다
는 사실을 밝혔다. 또한, 실험과정에서 나타난 왼손 잡
이와 오른손 잡이의 차이를 확인하였으며, 제실험을 통
하여 설정한 규칙들이 어느 정도 타당성을 보임을 입증
하였다.

본 논문에서 제안한 방법은 여러 피험자의 많은 데이
타의 분석 결과를 바탕으로 하고 있으며, 피험자의 인지

적 정신 프로세스가 진행되는 과정을 파악하였다. 따라서, 이 결과를 이미 많은 결과가 보고된 왼손/오른손의 구별이나, 긍정/부정의 인지적 판단을 하는 방법들과 결합하여 사용할 경우 RT에 대한 정보 없이 왼손과 오른손의 구별이나 YES/NO 응답을 예측할 수 있게 된다. 이러한 연구 결과는 BCI 연구에서 기초 기술로 활용될 것으로 생각한다.

참 고 문 헌

- [1] J. L. Andreassi, *Psychophysiology - Human behavior & physiological response*, Second Edition, Lawrence Erlbaum Associates, Publishers, Hillsdale, New Jersey, 1989.
- [2] R. E. Isaacs, D. J. Weber, and A. B. Schwartz, "Work Toward Real-Time Control of a Cortical Neural Prosthesis," *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, vol. 8, no. 2, pp. 196-198, June 2000.
- [3] E. Donchin, K.M. Spencer, and R. Wijesinghe, "The Mental Prosthesis: Assessing the Speed of a P300-Based Brain-Computer Interface," *IEEE Transaction on Rehabilitation Engineering*, vol. 8, no. 2, pp. 174-179, June 2000.
- [4] P. R. Kennedy, R. R. E. Bakay, M. M. Moore, K. Adams, and J. Goldwaithe, "Direct Control of a Computer Form the Human Central Nervous Systems," *IEEE Transaction on Rehabilitation Engineering*, vol. 8, no.2, pp.198-202, June 2000.
- [5] L. Kirkup, A. Searle, and A. Craig, "EEG-based system for rapid on/off switching without prior learning," *Medical Biological Engineering Computing*, vol. 35, pp. 504-509, 1997.
- [6] 황재호, "생체신호처리에 의한 인간 감성 파라미터 추출-피검자 영상제시물 직접 선정기법에 의하여", *한국감성과학회지*, vol. 4, no. 1, pp. 61-67, August 2001.
- [7] 강동기, 김동준, 김홍환, 고한우, "뇌파를 이용한 4가지 감정 분류에 관한 연구", *한국감성과학회 추계학술대회논문집*, pp. 87-90, 2001.
- [8] I. R. Fasel, K. D. Bollacker, and J. Ghosh, "A neural network based classifier and biofeedback device for improving clarinet tone-quality," *International Joint Conference on Neural Networks*, vol. 3, pp. 1924-1928, 1999.
- [9] O. Jafarova and M. Shtark, "Computer biofeedback: trends of development," *Proceedings of 4th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE-98*, vol. 1, pp. 162-164, 1998.
- [10] C. W. Anderson, E. A. Stolz, and S. Shamsunder, "Multivariate Autoregressive Models for Classification of Spontaneous Electroencephalographic Signals During Mental Tasks," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. 45, No. 3, March 1998.
- [11] A. Schloegl, B. Schack, G. Florian, K. Lugger, M. Pregenzer, and G. Pfurtscheller, "Classification of single trial EEG: A comparison of different parameters," *TM, Graz University*, Austria, 1996.
- [12] G. Pfurtscheller, Ch. Neuper, D. Flotzinger, and M. Pregenzer, "EEG-based discrimination between imagination of right and left hand movement," *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, 103, pp. 642-651, 1997.
- [13] 신승철, "뇌파기반 휴먼-컴퓨터 인터페이스를 위한 인지적 정신상태의 분별", *대한전자공학회 하계종합학술대회논문집-V*, 24권, 1호, pp. 61-64, 2001.
- [14] M. J. Kim, S. C. Shin, Y. S. Song, C. S. Ryu, "Yes/No Discrimination with Spatio-Temporal Characteristics of EEG", *Proceedings of IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, Istanbul, Turkey, Oct. 25-28, 2001.
- [15] 경북대학교 사범대학 교육심리학 연구실, *전국 표준화 지능진단 검사 (고등학교-성인용, 15세-성인용)*, 중앙적성출판사, 1985.
- [16] E. Basar, *Brain Function and Oscillations, Volume 1: Brain Oscillations - Principle and Applications*, Springer-Verlag, 1998.
- [17] 최지연, 이경화, 정희운, 김기홍, 김현민, 손진훈, "연령별 긍/부정 판단 과제시의 뇌파 특성", *한국감성과학회 추계학술대회논문집*, pp. 255-259, 2001.
- [18] M. G. H. Coles, G. Gratton, and M. Fabiani, "Event-related brain potentials" in the book, *Principles of psychophysiology-Physical, social, and inferential elements, Chapter 13*, Edited by J. T. Cacioppo and L. G. Tassinary, Cambridge University Press, 1990.
- [19] T. Shibata, I. Shimoyama, T. Ito, D. Abba, H. Iwasa, K. Koseki, N. Yamamouchi, T. Sato, and Y. Nakajima, "Event-related dynamics of the gamma-band oscillation in the human brain: information processing during a GO/NOGO hand movement task," *Neuroscience Research*, vol. 33, pp. 215-222, 1999.



신 승 철

1992년 경북대학교 전자공학과 졸업(학사). 1995년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(석사). 2000년 한국과학기술원 전자전산학과 졸업(박사). 2000년 ~ 현재 한국전자통신연구원 인체정보처리팀 선임연구원. 관심분야는 EEG/ECG 신호처리, HCI, 제어계측



류 장 수

1985년 서울대학교 물리학과 졸업(학사). 1993년 서울대학교 물리학과 졸업(박사). 1993년 ~ 1995년 고려대학교 물리학과 연수연구원. 1995년 ~ 현재 한국전자통신연구원 반도체 원천기술연구소 선임연구원. 관심분야는 생체신호 분석, 인간-컴퓨터 상호작용, 뇌-컴퓨터 인터페이스 등



송 윤 선

1990년 한국과학기술대학교 전산공학과 졸업(학사). 1992년 한국과학기술원 전산공학과 졸업(석사). 1992년 ~ 현재 한국전자통신연구원 인체정보처리팀 선임연구원. 관심분야는 EEG 신호처리, HMM, 신경회로망, BCI



남 승 훈

1998년 인제대학교 의공학과 졸업(학사). 2000년 인제대학교 의공학과 졸업(석사). 2001년 ~ 현재 한국전자통신연구원 연구원. 관심분야는 BCI, Biosignal Processing