

뇌파를 이용한 목격자 기억의 평가: 기계학습의 적용

함근수¹ · 김기평¹ · 정호진¹
유성호²

¹국립과학수사연구원 법심리과

²서울대학교 의과대학 법의학연구소,
서울대학교 의과대학 법의학교실

Received: February 2, 2018

Revised: March 23, 2018

Accepted: May 19, 2018

Correspondence to

Keunsoo Ham

Psychological Forensics Division,
National Forensic Service, 10

Ipchun-ro, Wonju 26460, Korea

Tel: +82-33-902-5355

Fax: +82-33-902-5923

E-mail: ksham@korea.kr

Co-correspondence to

Seong Ho Yoo

Department of Forensic Medicine,

Institute of Forensic Medicine,

Seoul National University College of

Medicine, 103 Daehak-ro, Jongno-gu,

Seoul 03080, Korea

Tel: +82-2-740-8360

Fax: +82-2-902-8340

E-mail: yoosh@snu.ac.kr

The Assessment of Eyewitness Memory Using Electroencephalogram: Application of Machine Learning Algorithm

Keunsoo Ham¹, Ki Pyeong Kim¹, Hoin Jeong¹, Seong Ho Yoo²

¹Psychological Forensics Division, National Forensic Service, Wonju, Korea, ²Department of Forensic Medicine, Institute of Forensic Medicine, Seoul National University College of Medicine, Seoul, Korea

This study was conducted to investigate whether memory accuracy can be assessed by analyzing electrophysiological responses (i.e., electroencephalography [EEG]) for retrieval cues related to the witnessed scene. Specifically, we examined the different patterns of EEG signals recorded during witnessed (target) and unwitnessed (lure) stimuli using event-related potential (ERP) analysis. Moreover, using multivariate pattern analysis, we also assessed how accurately single-trial EEG signals can classify target and lure stimuli. Participants watched a staged-crime video (theft crime), and the EEG signals evoked by the objects shown in the video were analyzed (n=56). Compared to the target stimulus, the lure stimulus elicited larger negative ERPs in frontal brain regions 300 to 500 milliseconds after the retrieval cue was presented. Furthermore, the EEG signals observed 450 to 500 milliseconds after the retrieval cue was presented showed the best classification performance related to eyewitness memory, with the mean classification accuracy being 56%. These results suggest that the knowledge and techniques of cognitive neuroscience can be used to estimate eyewitness memory accuracy.

Key Words: Memory; Recognition; Electroencephalography;

Event-related potentials; Machine learning; Cognitive neuroscience

서 론

목격자 기억은 범죄 수사 또는 범죄 관련 단서의 사실 여부를 판단하는 것과 같은 다양한 수사 맥락에서 중요한 정보들의 원천이다. 목격자들의 기억은 종종 진술의 형태로 얻어지는데, 그 진술 내용이 항상 정확하지는 않다[1]. 목격자가 의도적으로 거짓말을 하지 않더라도, 불완전한 기억 인출로 인해

부정확한 진술을 하는 경우도 있기 때문이다. 이때, 진술뿐만 아니라 목격한 장면과 관련된 정보 처리가 이뤄지는 두뇌의 신경생리학적 측정치를 조사할 수 있다[2]. 국내외에서 이미 두뇌의 신경생리학적 측정치(예, 뇌파)를 분석하여 진술 내용을 평가하려는 시도를 하고 있는데, 특히 진술의 참거짓 여부를 평가하는 연구들이 많이 수행되었다[3,4]. 한편, 기억 처리 과정에 관여하는 신경 실질(correlates)과 관련된 신경생리학

적 반응들은 연구가 되어져 왔으나[5], 이러한 지식들을 응용하여 수사 장면에서 활용 가능한 기법에 대한 연구는 거의 없다.

본 연구는 목격한 장면과 관련된 기억 단서에 대한 신경생리학적 반응(예, electroencephalogram, EEG)을 분석하여 검사 대상자의 목격 여부를 평가하고, 기억 정확성을 추론하기 위한 잠재적인 기법들을 탐색하고자 하였다.

목격자의 기억 회상과 관련해서, 부호화 후 저장된 기억의 인출과 관련있는 대표적인 정보 처리는 친숙성(familiarity)과 의도적 회상(recollection)이다[6]. 친숙성과 의도적 회상은 재인의 이중 처리 모델[7]에서 제안된 것으로, 친숙성은 ‘안다(know)’와 관련있는 재인 정보 처리로 자극의 익숙함에 기반해서 자동적이며 빠르게 이루어지지만, 세부적이지 못하다. 반면, 의도적 회상은 ‘기억한다(remember)’와 관련 있는 재인 정보 처리로, 의도적이며 느리게 이루어지지만, 세부적인 정보의 탐색과 인출이 포함되는 재인이다. 목격하지 않은 기억 단서에 비해 목격한 기억 단서에 대해서는 친숙성이나 의도적 회상을 반영하는 정보처리가 이루어질 것이다. 따라서 이러한 정보처리의 기저에 있는 두뇌의 신경생리학적 반응을 탐색한다면 해당 단서에 대한 목격 여부의 추론도 가능할 것이다.

대뇌의 신경생리학적 측정치 중 사건 관련 전위(event-related potentials, ERPs)는 두뇌에서 순간적으로 이루어지는 정보처리를 추론하는 데 사용되는 분석 기법 중 하나이다. 친숙성과 의도적 회상 정보 처리를 반영하는 ERP 성분으로 각각 전두 부정 400 (frontal negativity 400; FN400) 성분과 후기 양적 성분(late positive complex, LPC) 성분이 알려져 있다[8]. FN400 성분은 자극 제시 후 약 300-500 msec 구간에서 전두 영역에 관찰되는 ERP 성분이다. 이는 과거에 경험한(혹은 학습한) 자극에 비해 새롭게 접한 자극에 대해 더 큰 부정 파형을 보이는 양상을 보인다[9]. 이러한 효과는 단순한 단어 자극뿐만 아니라[5], 사진[10]이나 얼굴[11]과 같은 복잡한 시각 자극을 이용한 연구에서도 보고되었다. FN400 성분이 친숙성에 기반한 자극의 구분을 반영한다고 여겨지는 이유는 이 성분이 새로운 자극과 학습한 자극들은 구분해주지만, 새롭게 접했지만 학습한 자극과 유사하게 구성된 자극은 구분하지 못하기 때문이다[12]. 한편, 두정엽 부근에서 500-800 msec 구간에서 관찰되는 LPC 성분은 기억 단서에 대한 의도적 회상을 반영한다고 알려져 있다. 이 성분은 지각적 유사성과 무관하게 학습한 자극에 대해서만 더 큰 정적 파형을 보이며[12], 자극의 변별을 잘 하는 개인일수록 학습 여부에 따라 LPC의 전위차가 더 크게 나타난다[10].

목격 여부에 따라 기억 단서에 대한 정보처리가 다르게 이루어지고, 이러한 정보처리가 ERP 성분을 통해 반영된다면, 이들 ERP 성분을 조사하여 목격 여부를 추론할 수 있을 것이

다. 그러나 대부분의 연구가 통제된 실험실에서 수행된 연구이기 때문에, 현장에서 목격자 기억의 정확성을 평가하기 위해 활용하는 데는 몇가지 제한이 따른다.

먼저, 목격 단서를 제시했을 때 이루어지는 정보처리 과정이 실험실에서 수행되는 기억 과정과 동일하지 않을 수 있다. 현실 세계에서 목격 단서는 단순하게 한 어절로 구성된 단어 자극이 아니다. 특정 물건의 색상, 크기, 혹은 형태와 같은 복잡한 정보의 일부 혹은 전체에 대한 정보가 필요하기 때문에 복잡하다. 따라서 기억 단서에 대한 두뇌의 반응이 비교적 단순한 자극을 사용한 실험실 연구와 다른 방향으로 나타날 가능성도 있다. 예를 들어, 참여자들이 도주하는 차량의 번호를 재인하는 연구[13]에서 중앙 부근의 채널(CZ)에서 300-500 msec 구간의 진폭의 평균은 오재인이 이루어질 때에 비해 정확한 재인이 이루어질 때 더 낮았다. 이는 정확 재인이 더 큰 정적 진폭을 유발한다는 선행 연구[10]와 상반되는 결과로 통제된 실험에서 얻어진 결과를 현장에 응용할 때 주의가 필요함을 시사하는 한 예이다.

ERP 활용의 두 번째 제한점은 개인마다 관찰되는 뇌파의 패턴이 다르다는 점을 고려하지 않는다는 것이다. ERP 성분들은 다수의 개인들로 구성된 집단에서 자극 유형에 따라 비교적 일관되게 차이를 보이는 뇌파의 패턴이다. 다수의 개인에게서 유사한 ERP 성분이 관찰된다고 해서 그 ERP 성분이 모든 개인에게 동일하게 관찰된다는 보장을 할 수 없다는 것이다. 또한 개인마다 어떤 영역에서, 혹은 어느 시간대에 발생한 뇌파를 이용하여 자극들을 분류할 것인가를 결정하는데 있어서 실험자의 주관적 개입될 가능성이 높다.

본 연구는 위에서 언급한 제한점을 극복하기 위해 기억 단서에 대한 뇌파 신호(EEG)를 분석하여 기억 정확성을 평가할 수 있는지를 조사하고자 하였다. 이를 위해 기계 학습(machine learning) 알고리즘[14]을 이용하여 실제 목격한 물건에 대한 기억 단서에 대한 EEG 신호와 목격하지 않은 물건에 대한 기억 단서에 대한 EEG 신호가 구분되는지 확인하고자 했다. 또한 EEG 신호로 목격 여부를 얼마나 정확하게 분류할 수 있는지를 검증하고자 했다.

앞에서 살펴본 것처럼, 단일 채널에서 기록된 뇌파를 통해 계산되는 ERP를 기억 정확성 평가에 사용하는데 한계점이 존재하기 때문에, 본 연구는 다수의 채널에서 기록된 뇌파의 활동 패턴 차이를 고려하는 다변량 패턴 분석(multivariate pattern analysis, MVPA) 접근법[15]을 사용했다. 이 기법은 조건별로 관찰되는 뇌파 패턴을 분류기(classifier)에 학습시킨 후, 새로운 자극이 주어졌을 때 학습한 분류 패턴을 토대로 그 새로운 자극이 어떤 조건에 속하는지 분류하는데 초점을 맞춘다[15]. MVPA 기법은 두뇌의 공간적 활성화 패턴을 정밀하게 관찰할 수 있는 뇌영상 자료에 처음 시도되었으나[16], 최근 들어 뇌파 자료에도 응용되기 시작했다[15].

MVPA 기법은 자극 재료의 목적 여부에 따라 차이를 보이는 뇌파 패턴을 확인하여 직접적으로 목적 여부를 평가하기 때문에 목적자 기억 정확성 평가에 있어 활용 가치가 높을 것이라 기대한다. 이 기법을 사용한 선행 연구들은 부호화 당시 기록된 뇌파 패턴을 이용하여 후속적으로 인출이 이루어지는 재인의 성공 여부를 59.6% 예측할 수 있다고 보고했으며 [17], 검사대상자가 얼굴을 보는 것인지, 물건을 보는 것인지를 60% 이상 정확하게 분류할 수 있음을 보여주었다[18].

본 연구는 참가자들에게 절도 범죄를 재현한 동영상상을 보여주었다. 그리고 이 동영상에서 나타난 목표(target) 단서와 동영상에서 나타나지 않은 비목표(lure) 단서가 제시되었을 때 관찰되는 뇌파에 MVPA 분석 기법을 적용하여 실제 참가자들이 목격한 자극들을 얼마나 정확하게 분류할 수 있는지를 알아보고자 했다. 추가적으로 어떤 시간대의 뇌파의 분류 정확률이 가장 높은지를 탐색했다. 이를 통해 현장에서 활용 가능한 인지신경과학적 법인지검사 기법을 개발하는 데 궁극적인 목적이 있다.

재료 및 방법

1. 참가자

본 연구는 국립과학수사연구원 생명윤리심의위원회(IRB)의 승인을 받고 진행되었다. 참가자들은 신체적인 장애가 없고, 나안시력이나 교정시력이 1.0 이상인 사람들을 모집했다. 온라인 모집 공고를 통해 69명(남자 28명, 여자 41명)이 참여했으며, 이들의 평균 연령은 22.17 ± 2.20 세였다. 참가자들의 정신병적 병력은 한국판 Mini-International Neuropsychiatric Interview (MINI) [19]를 통해 평가되었고, 이 중 정신과적 병력을 경험하는 것으로 의심되는 3명의 참가자가 분석에서 제외되었다. 추가적으로 재인 과제 수행이 우연 수준($d < 0.5$)이거나 이보다 저조한 참가자 3명을 제외했다. 기억 능력을 평가하기 위해 WAIS-R의 숫자 외우기 검사를 사용했고, 경계선 이하의 수행을 보인 참가자들은 없었다(범위: 14-27). 이러한 절차는 모니터를 통해 자극을 보면서 반응 버튼을 눌러야 하는 실험을 하는 데 있어 신체적으로 제약(예, 시력이 나쁨)이 있거나 기억 능력이 저조한 참가자들을 분석 과정에서 제외하기 위한 목적도 포함했다. 마지막으로 뇌파 처리 과정에서 7명의 참가자가 제외되어(뇌파 기록과 전처리 참고) 최종적으로 56명의 자료를 분석했다.

2. 실험 자극 및 재인 과제

본 연구에서 실험 자극 선정을 위해, 절도 범죄 재연 프로그램[20]의 일부를 재편집하여 나레이션 형태의 소리 자극을

제거한 동영상상을 사용했다. 이 동영상상은 세 명의 남성이 한 가정집에 침입하여 보석과 현금을 비롯한 물품들을 절도하고 보석상에 판매하는 장면으로 구성되어 있다. 이 동영상은 약 2분 30초 분량이었다. 모든 실험 절차를 마친 후 참가자들에게 실험 자극으로 사용된 동영상상을 시청한 경험이 있는지 물어보았고, 모든 참가자들이 해당 동영상상을 본 적이 없다고 보고하였다.

재인 과제에서 사용할 실험 자극은 동영상상에 나타난 물건들 중 참가자들이 어느 정도 분명하게 목격했을 것으로 생각되는 6개의 물건(목걸이, 현금, 장갑, 반지, 시계, 가방)을 선정한 후, 실제 동영상에 나타난 물건(목표 자극) 외에, 색상과 모양을 변형한 물건(비목표 자극) 2개씩을 추가했다. 즉, 목표 자극이 6개, 비목표 자극이 12개로, 총 18개의 자극이 실험에 사용되었다. 색상을 변형시킨 비목표 자극은 pixlr(<https://pixlr.com/editor/>)에서 목표 자극의 채도와 색도를 변형시킨 자극을 사용했다. 형태를 변형한 비목표 자극은 Google 검색 엔진에서 일부 자극을 선정해 사용했다.

재인 과제는 2개의 구획(block)으로 구성되었으며, 매 구획마다 9개의 실험 자극(목표 자극 3개, 비목표 자극 6개)이 제시되었다. 각 자극은 총 10번씩 무선적으로 반복 제시되었으며, 한 구획은 총 90번의 시행으로 구성되었다.

실험 자극의 제시는 Stim2 (Compumedics, Neuroscan, Abbotsford, VIC, Australia) 프로그램을 이용하여 구현되었다. 모든 실험 자극은 24인치 LCD 컴퓨터 모니터에서 $1,280 \times 1,024$ 픽셀 크기로 제시되었고, 참가자의 수평 시야각 4° , 수직 시야각 3° 를 넘지 않았다. 먼저, 참가자의 집중을 유도하기 위한 고정점(+)이 화면 중앙에 500 msec동안 제시되었다. 이후 기억 단서(물건)가 화면 중앙에 400 msec동안 제시되었고, 참가자들은 기억 단서가 사라진 후 빈 화면(blank)이 제시되는 1,600 msec동안 해당 물건을 동영상에서 봤는지 여부에 따라 각기 다른 2개의 반응 버튼 중 하나를 최대한 빠르고, 정확하게 누르도록 안내 받았다.

3. 실험 절차

본 연구의 실험 절차는 Fig. 1에 요약되어 있다. 참가자들은 실험실에 도착한 후 면담실에서 본 실험이 절도 범죄 사건의 해석과 관련된 것이라는 설명을 듣고, 서면으로 동의서를 작성하였다. 참가자에게 실험에 대한 설명 과정에서 기억과 관련된 표현은 언급되지 않았다. 그 후 방음시설이 된 실험실로 이동하여 절도 범죄 장면이 재연된 동영상상을 보았다. 동영상상을 본 후 MINI 면담과 자기보고식 설문지 작성이 무작위 순서로 진행되었으며, 이 과정은 약 30분 정도의 시간이 소요되었다.

이후 참가자들은 차폐 시설이 된 뇌파검사실로 이동하여 뇌파검사에 대한 기본적인 설명을 듣고, 전극이 부착된 모

자를 착용했다. 뇌파 검사를 위한 기본적인 준비 절차를 마친 후, 참가자들은 보다 수월한 과제 진행을 위해 연습 과제를 수행했다. 연습과제에서 참가자들은 모니터에 알파벳 ‘T’가 제시될 때 목표 반응 버튼을 누르도록 지시 받았다. 연습과제의 수행률이 80% 이상일 때 본 과제로 진행되었으며, 이 조건을 충족시키지 못한 참가자들은 조건을 충족시킬 때까지 연습과제를 수행했다. 연습 과제를 마친 후, 참가자들은 본 실험을 수행했다. 참가자들은 모니터에서 50 cm 떨어진 의자에 앉아 과제를 수행했다. 실험이 종료된 후, 참가자들은 실험의 본래 목적인 기억과 뇌파 등에 대한 설명을 들었다.

4. 뇌파 기록과 전처리

뇌파 신호는 차폐와 방음이 이루어진 실험실에서 국제 10-20 시스템에 따른 32개의 전극 부위에서 기록되었다. 참조 전극은 좌, 우 유양 돌기(mastoid) 뒤에 부착되었으며, 눈 움직임을 기록하기 위해 수직 안전도(vertical electrooculogram, VEOG) 측정 전극 2개를 오른쪽 눈 상측부와 하측부에 부착했다. 뇌파를 기록하는 동안 VEOG의 전극저항(impedance)은 10 K Ω 이하를 유지했으며, 그 외의 나머지 채널의 전극저항은 5 K Ω 이하를 유지하였다.

뇌파 자료의 획득과 분석을 위해 Neuroscan Synamp와 Curry 7 (Compumedics, El Paso, TX, USA)을 사용했

다. 뇌파는 0-100 Hz 대역의 신호가 기록되었으며, 표본률(sampling rate)은 1000 Hz였다. 실험 종료 후, 연속적으로 기록된 뇌파 신호 중 1-30 Hz 대역의 신호만 여과했다(bandpass filtering). 그리고 실험 중 움직임이나 근육 긴장으로 인해 발생하는 잡음(artifact)이 나타난 구간을 지정하여 분석에서 제외했으며, 눈 깜빡임으로 인한 잡음을 주성분 분석(principle component)을 이용하여 제거했다. 전처리를 마친 뇌파는 목표 자극과 비목표 자극 시행의 기억 단서 제시 전 200 msec부터 제시 후 1,000 msec까지 구간(epoch)으로 구분되었고, $\pm 50\mu V$ 를 초과하는 구간은 잡음이 포함되어 있다고 판단되어 분석에서 제외시켰다. 참가자들이 어느 정도 분명하게 봤을 것으로 생각되는 실험 자극을 사용했지만, 이들이 해당 물건을 목격하지 못했을 가능성을 고려하여 참가자들의 목표 자극을 정확하게 재인한 시행(적중)과 비목표 자극을 정확하게 기각한 시행(정확 기각) 시행만 후속 분석에 사용하였다.

이러한 뇌파 자료 처리 과정에서 한 참가자는 뇌파 실험 중 몸을 심하게 움직여 분석이 불가능하여 제외되었으며, 나머지 참가자들 중 각 시행 조건마다 ERP를 계산하거나 분류 모델을 학습시키기에 적은 시행 수($n < 30$)를 보이는 참가자 7명이 제외되어, 총 56명의 자료가 뇌파 분석에 사용되었다.

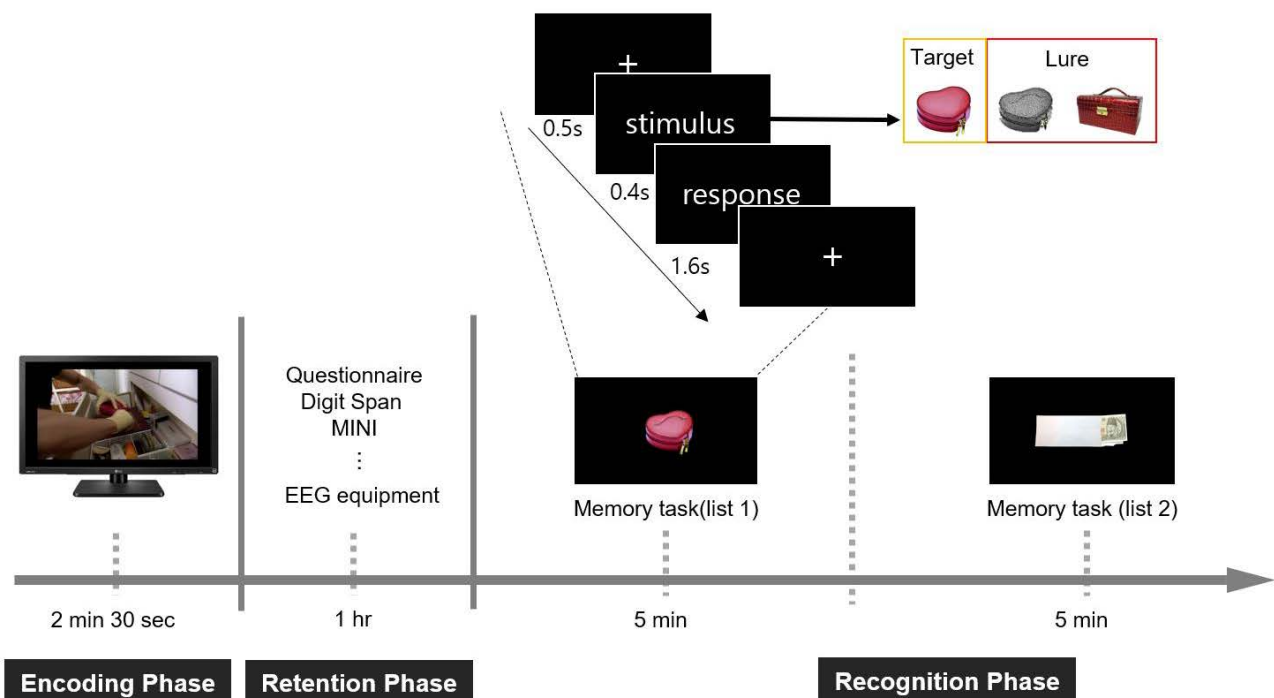


Fig. 1. The procedure and recognition task in this study. MINI, Mini-International Neuropsychiatric Interview; EEG, electroencephalography.

5. 뇌파 분석

(1) ERP 분석

뇌파의 패턴 분석을 수행하기에 앞서, 선행 연구에서 정확한 재인과 관련 있다고 알려진 ERP 성분(FN400, LPC)이 범죄 장면과 관련된 물건을 재인할 때도 나타나는지 확인하기 위하여 ERP 분석을 수행했다. 단변량 뇌파 분석은 EEGLAB 14.0 [21]을 이용하여 수행되었다. 먼저, 참가자마다 모든 적중 시행과 정확 기각 시행의 전위들을 평균하여 ERP를 산출했다. 이후 각 시행 유형마다 자극 제시 후 300-500 msec (FN400), 500-800 msec (LPC)의 구간의 전위를 전체 평균(grand average)한 진폭을 통계분석에 사용하였다.

통계 분석은 30개 채널 각각에 대해 이루어졌으며, 적중 시행과 정확 기각 시행에서 유의미한 차이를 보이는지를 검증했다. 이때 다수의 채널($n=30$)에 대해 통계 검증이 개별적으로 이루어지기 때문에 발생하게 되는 1종 오류의 확률을 감소시키기 위해 false discovery rate (FDR) [22] 기법을 적용하여 교정된 P값을 계산하고, $P<0.05$ 를 초과하는 뇌파 채널들을 확인하였다.

(2) 다변량 패턴 분석(MVPA)

본 연구는 각 시행 유형(적중, 정확 기각)에 따른 뇌파에 대한 분류 모델을 학습과 분류 정확률 평가를 위해 Decoding Deciding ToolBox (DDTBOX) [15]를 이용하였다. 먼저, 각 참가자마다 적중 시행과 정확 기각 시행에서 관찰되는 뇌파의 시공간적(temporalspatial) 특징들을 추출하였다. 모든 뇌파 채널마다 자극 제시 전 -200 msec에서 시작하여 자극 제시 후 1,000 msec까지 총 1,200 msec의 범위를 50 msec씩 이동하면서, 각 시간 구획(50 msec)마다 시공간적 패턴 벡터를 계산했으며, 이를 support vector machine (SVM)을 이용한 분류 학습 및 성능 평가에 사용했다. SVM을 이용한 모델 학습 및 분류는 LIBSVM [14]을 통해 수행되었다. SVM은 관측된 자료들을 활용하여 새로운 자료가 주어졌을 때 이 자료가 어느 범주에 속하는지 판단하는 분류 모델이다. 구체적으로, 학습용 자료 집합들을 가장 잘 구분할 수 있는 초평면(hyperplane)을 선택하고, 주어진 자료와 초평면 간 거리에 기반하여 자료를 분류한다. 본 연구는 선형 SVM 커널을 이용하여 분류 알고리즘을 구성했다.

SVM을 이용한 분류 분석에서 개별 참가자마다 뇌파 자료의 90%는 분류기 학습에 사용되었고, 나머지 10%의 자료가 성능 평가에 사용되었다. 분류기의 성능 평가는 10겹(10-fold) 교차 타당성 검증을 통해 이루어졌다. 구체적으로, EEG 자료를 무선적으로 10개의 부분 자료(subset)들로 구분하여, 그 중 9개의 부분 자료를 이용하여 분류기를 학습시킨 후 나머지 하나의 부분 자료에 대한 분류 정확성을 평가하는

데, 10번에 걸쳐 학습과 분류 작업에 사용되는 자료를 교차해 가면서 분류 성능을 평가했다. 이러한 교차타당성 검증이 10번 반복되었으며, 매 검증 작업마다 학습 자료(90%)와 성능 평가 자료(10%)가 무선적으로 추출되었고, 각 타당성 검증 작업에서 계산된 분류 정확률을 평균화하여 분류 정확률을 계산했다.

각 시간 구획마다 분류 정확률이 우연 수준(50%)보다 높은지 확인하기 위하여, 대응 표본 t-검증을 수행하였다. 이때 경험적인 우연 정확률을 계산하기 위해, 분석에서 사용된 뇌파 자료의 조건 명칭을 무선적으로 재할당한 후(예, 각각의 기억 단서가 무선적으로 목표 혹은 비목표 단서로 할당), 앞선 패턴 분석과 동일한 절차로 분류 정확률을 계산하였다. 이렇게 경험적으로 분류 정확률을 사용하는 것이 이론적 우연 수준(50%)을 이용하여 SVM 모델의 분류 정확률을 평가하는 것보다 엄격하다고 알려져 있다[15]. 또한 다수의 시간 구획($n=24$)마다 통계 검증이 이루어지기 때문에 발생할 수 있는 다중 비교로 인한 1종 오류의 확률을 감소시키기 위해, FDR-corrected P값을 계산하고, $P<0.05$ 를 초과하는 분류 정확률을 보이는 시간 구획을 살펴보았다.

결 과

1. 행동 결과

본 연구의 분석 대상자($n=56$)들의 정확률은 평균 $83.21 \pm 10.90\%$ 로 나타났다. 구체적으로, 적중률과 정확 기각률을 비교했을 때, 적중률이 $88.12 \pm 11.77\%$, 정확 기각률 $80.78 \pm 13.67\%$ 보다 유의미하게 높았다($t(55)=3.57$, $P<0.01$). 반응 시간을 살펴보았을 때, 참가자들은 정확 기각 시행(773.80 ± 116.36 msec)보다 적중 시행(714.79 ± 110.61 msec)에서 반응 버튼을 누르는 속도가 빨랐다($t(55)=-5.35$, $P<0.01$).

2. 뇌파 분석 결과

(1) ERP 결과

Fig. 2A는 적중 시행과 정확 기각 시행에서 기억 단서가 제시된 후 -200 msec에서 1,000 msec의 전위를 평균화한 것이다. 먼저, 300-500 msec 구간에서 적중 시행과 정확 기각 시행에서 차이가 나타나는지를 검증한 결과, 14개(F2, F7, FZ, FCZ, C3, CZ, CP3, CPZ, CP4, TP8, P3, P4, P8, PZ)의 채널에서 두 시행 유형 간 유의미한 차이를 보였다(FDR-corrected $P<0.05$) (Fig. 2B). 특히, 전두엽 영역에서 적중 시행에 비해 정확 기각 시행에서 더 큰 부정 전위를 보였다.

다음으로 500-800 msec 구간에서 차이를 보이는 채널들을 살펴봤을 때, 15개(FP2, F3, F4, F7, FC3, FC4, CP3,

CP4, TP8, P3, P4, P7, P8, O1, OZ)의 채널에서 두 시행 유형 간 차이를 보이는 것이 관찰되었다(FDR-corrected $P < 0.05$) (Fig. 2C). 그러나 우측 두정엽(P4, P8) 영역에서는 적중 시행에서 정확 기각 시행에 비해 전위가 높았던 반면, 좌측 두정엽(P3, P7) 영역에서는 정확 기각 시행의 전위가 더 높아, 두 반구 간에 다소 다른 양상을 보였다.

(2) MVPA 결과

본 연구의 주요 목적인 기억 단서 제시 전후의 뇌파에 대해

선형 SVM을 이용하여 시행 유형을 분류한 결과에 대한 요약이 Fig. 3과 Table 1에 제시되어 있다. 분류 정확률을 살펴보면, 자극 제시 후 정확률이 점점 증가하다가 450–500 msec 구간에서 가장 높았으며, 이후 감소하는 모습을 보였다. 적중 시행과 정확 기각 시행을 유의미하게 구분하는 구간은 350–400 msec (평균 $55.1 \pm 5.75\%$)와 450–500 msec (평균 $56.26 \pm 5.52\%$)로 나타났다(FDR-corrected $P < 0.05$).

이 외에도 개인 참가자별로 분류 정확률을 살펴보았을 때, 분류 정확률에서 60%이상 적중 시행과 정확 기각 시행을 구

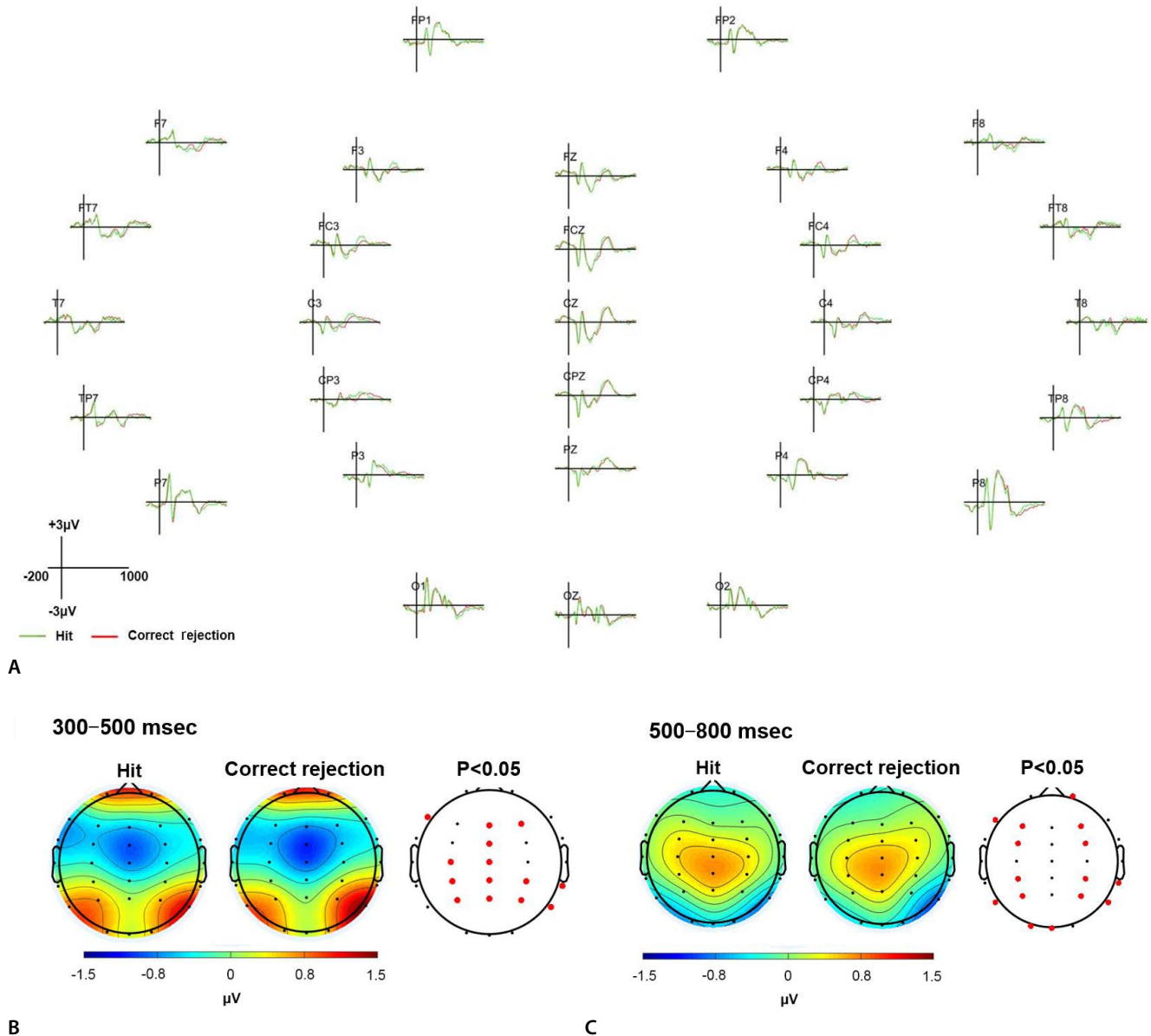


Fig. 2. The event-related potentials (ERP) of hit and correct rejection condition. **(A)** The ERP of hit (green) and correct rejection (red) condition at thirty electroencephalography (EEG) channels. The topographic maps of mean EEG variation and channels (red dot) significantly different in hit and correct rejection conditions 300 to 500 milliseconds **(B)** and 500 to 800 milliseconds **(C)** after retrieval cue.

분한 참가자 수가 가장 많은 시간 구획은 400–450 msec ($n=13$, 23.21%)으로 나타났다. 분류 정확률의 최대값과 최소 값을 살펴보면, 최대값이 가장 높았던 구간은 150–200 msrv 구획으로, 73.75%를 나타낸 참가자가 있었으며, 최소

값이 가장 높았던 구간은 450–500 msec 구획으로 45.88%를 보인 참가자가 관찰되었다. 모든 시간 구획대의 분류 정확률을 평균했을 때, 평균 분류 정확률이 가장 높은 참가자는 55.21%였으며, 가장 낮은 참가자는 50.64%로 나타났다.

Table 1. The results of SVM classification after retrieval cue presentation

Time window (msec)	Mean \pm SD	Ratio of classification accuracy above 60%, n (%)	Individual maximum value	Individual minimum value
0–50	52.44 \pm 5.52	7 (12.5)	64.33	40.63
50–100	51.63 \pm 5.78	5 (8.93)	66.00	37.00
100–150	51.90 \pm 6.85	5 (8.93)	73.33	40.50
150–200	52.84 \pm 7.24	7 (12.5)	73.75 ^{b)}	37.67
200–250	51.54 \pm 6.02	6 (10.71)	64.17	37.17
250–300	53.33 \pm 5.44	6 (10.71)	68.00	42.00
300–350	53.63 \pm 5.81	7 (12.5)	66.60	43.10
350–400	55.19 \pm 5.75 ^{a)}	12 (21.43)	68.17	42.25
400–450	54.45 \pm 6.79	13 (23.21) ^{b)}	71.00	38.75
450–500	56.26 \pm 5.52 ^{a),b)}	12 (21.43)	71.38	45.88 ^{b)}
500–550	54.27 \pm 6.09	11 (19.64)	71.25	42.88
600–650	54.89 \pm 5.72	9 (16.07)	68.13	44.00
650–700	54.45 \pm 5.86	6 (10.71)	65.25	41.33
700–750	53.23 \pm 6.16	4 (7.14)	68.88	35.25
750–800	52.13 \pm 5.82	9 (16.07)	61.75	38.00
800–850	53.17 \pm 5.29	9 (16.07)	64.75	43.00
850–900	52.49 \pm 6.95	5 (8.93)	66.25	36.83
900–950	52.03 \pm 5.23	3 (5.86)	63.60	40.17
950–1,000	52.02 \pm 5.44	6 (10.71)	62.90	35.67

SVM, support vector machine.

^{a)}False discovery rate-corrected $P<0.05$; ^{b)}Maximum value of each column.

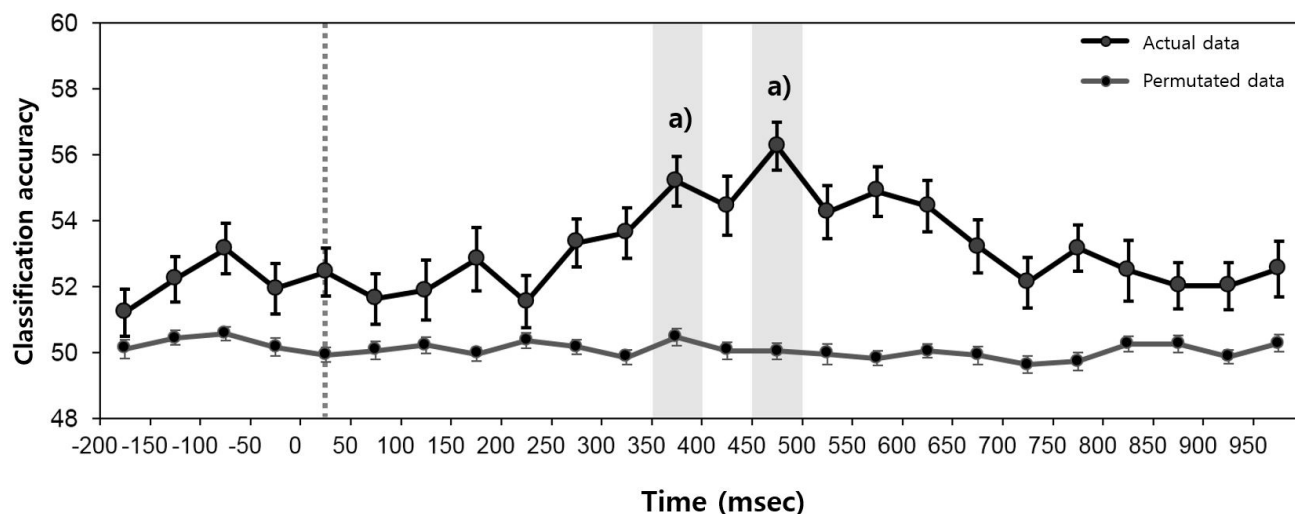


Fig. 3. Support vector machine classification accuracy according to time windows (50 msec; –200 to 1,000 msec). ^{a)}False discovery rate-corrected $P<0.05$.

고 찰

본 연구는 목격한 장면과 관련된 기억 단서에 대한 뇌파를 분석하여 목격 여부를 평가하는 데 활용하기 위해 수행되었다. 특히, 뇌파를 이용하여 목격자 기억을 평가하는 데 있어서, 목표 자극과 비목표 자극 간 ERP 진폭 차이를 검증하는 기억 정확성 추론 방법[13] 사용하는 대신, MVPA 분석을 이용하여 뇌파 패턴이 실제 목격한 것과 목격하지 않은 것을 얼마나 정확하게 분류할 수 있는지를 평가했다.

먼저, 본 연구의 주요 결과는 기억 단서 제시 후 350-400 msec와 450-500 msec의 뇌파가 목격 자극과 비목격 자극을 유의미하게 구분했다는 것이다. 이 결과는 본 연구의 ERP 결과와 함께 논의해볼 필요가 있다. ERP 분석 결과, 이 시간 구획에서 친숙성을 판단하는 정보처리의 활성화를 의미하는 FN400 성분이 관찰된다는 것이 확인됐다. FN400은 전두엽 영역에서 새로 경험한 자극에 대해 더 큰 부정 전위를 보이는 데[8], 본 연구에서도 이러한 패턴이 관찰되었다. 본 연구에서 사용된 비목표 자극은 목표 자극에서 색이나 형태만 변형된 것임을 고려해보면, 다양한 단어를 사용한 이전 연구 결과[5]와 같이 목표 자극과 비목표 자극 간에 큰 전위 차이를 보이지 않았지만, 기억 단서에 대한 뇌파가 실제 목격 여부에 따라 다르게 나타날 수 있음을 보여준다. 또한 기억 단서 제시 후 300-500 msrv 구간에서 목표-비목표 자극의 구분과 관련된 정보 처리가 이루어지고 있음을 보여주는 것이다. 이는 친숙성 관련 정보처리가 목격자들의 기억 평가에 중요할 수 있음을 시사한다. 따라서 이 구간에서 분류 정확률이 가장 높았다는 것을 고려해서, 친숙성의 판단과 관련 있는 정보처리에 초점을 맞춰 목격 여부를 추론하는 것이 효과적일 수 있음을 시사한다.

한편, 단서 제시 후 500-800 msrv 구간의 뇌파는 적중 시행과 정확 기각 시행을 유의미하게 구분하지 못했다. 일반적으로, 기억 단서 제시 후 500-800 msec에는 해당 단서와 관련된 정보를 탐색하고 평가하는 의도적 회상 관련 정보처리가 이루어지는데, 이러한 정보처리는 LPC 성분을 통해 추론할 수 있다고 알려져 있다[8]. 본 연구에서 ERP 분석 결과 15개의 채널에서 적중 시행과 정확 기각 시행에서 유의미한 전위차를 보이는 것이 관찰되었지만, 이는 선행 연구와 다소 상반되는 결과였다. 즉, 두정엽 영역에서 정확 기각 시행에 비해 적중 시행에서 더 큰 정적 전위를 보이는 선행 연구[10]와 달리, 본 연구에서는 우반구에서만 이와 같은 패턴이 관찰되었을 뿐, 좌반구에서는 오히려 반대의 양상이 관찰되었다. 이에 대한 설명으로, 대부분의 참가자가 이 시간 구간에서 자극에 대한 행동적 반응을 했다는 점을 고려해보면, 반응 판단과 관련된 정보처리나 반응 버튼을 누르는 데 필요한 운동 관련 정보처리(예, movement-related potentials) [23]가 의도적

회상과 혼재되어 발생했을 가능성이 있다. 또한 움직임과 관련된 ERP 성분이 두정엽에서 가장 큰 진폭을 보이는 ERP 성분(P300)과 높은 관련성을 보여주기 때문에[24], 두정엽에서 관찰되는 LPC에도 영향을 미쳤을 가능성이 있다. 따라서, 추후 연구에서는 기억 단서 제시 후 일정 시간 경과 후 버튼을 누르도록 지시함으로써, 기억 단서에 의해 유발되는 뇌파만을 이용했을 때의 분류 정확률을 살펴볼 필요가 있을 것이다.

비록 본 연구에서 MVPA 기법을 이용한 뇌파 분석 방법을 적용하여 기억 정확성을 평가하려는 시도를 했지만, 결과의 해석과 일반화를 제한하는 몇 가지 한계점들이 있다.

가장 먼저, 본 연구에서 평균적으로 분류 정확률이 가장 높았을 때조차 정확률이 56.26%로 현장에서 활용할 만큼 분류 정확률이 높게 나타나지는 않았다는 것이다. 개별 참가자 별로 살펴봐도 60% 이상 정확하게 분류가 이루어진 비율이 최대 23%에 불과했다. 이는 본 연구에서 분류에 사용된 실험 자극들이 서로 유사해서 나타난 결과일 수도 있고, 분류 기법인 SVM의 정교성이 부족해서 나타난 결과일 수도 있다. 이전에 SVM을 적용한 MVPA 연구[17,18]에서 분류 정확률이 55-65% 수준에 머물러 있다는 것을 고려해보면, SVM 기법의 정교성이 상대적으로 낮을 가능성을 고려해야 한다. 즉, SVM 기법 외에 보다 다양한 기계학습 알고리즘을 활용함으로써 분류 정확률을 높일 수 있는 방법들을 고려해야만 할 것이다. 예를 들어, 최근의 한 연구[25]는 딥러닝 알고리즘 중 하나인 컨벌루션 뉴런 네트워크(convolutional neural network)를 이용하여 부호화가 이루어질 때 뇌파로 인출 성공 여부를 72% 정확하게 예측할 수 있다는 것을 보여주었다. 이전에 주로 사용되었던 다른 분류 기법(예, 선형 판별 분석, SVM) 등을 이용했을 때 분류 정확률은 52-61%에 불과했었다. 위에서 설명한 연구 결과를 토대로, 보다 정교한 기계학습 알고리즘을 활용한다면, 현장에서 뇌파를 이용하여 목격자들의 기억을 정확하게 추정할 가능성을 높일 수 있음을 보여준다.

두 번째 제한점은 그림 자극을 활용하여 목격 여부를 평가했다는 것이다. 본 실험과 같이 실제 수사 장면에서 물적 증거가 존재할 경우 이를 목격자에게 보여주는 동안 기록된 뇌파에 SVM을 활용하여 목격 여부를 평가하는 데 활용할 수 있지만, 존재하지 않는 경우에는 목격자들의 진술을 평가하는 데 한계로 작용할 것이다.

이러한 제한점에도 불구하고 본 연구는 실제 수사 장면과 유사한 환경에서 뇌파를 활용하여 목격자의 사건 관련 목격 내용의 기억 정확성을 평가할 수 있는 잠재적인 기법을 확인했다는 데 의의가 있다. 또한 목격 여부에 따른 뇌파 패턴의 차이를 검증하는데 그치지 않고, 뇌파를 이용해 목격 여부를 분류했다는 것은 향후 목격자들의 기억을 평가하는 기법을 개발하는 데 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다. 이

외에 분류 정확률이 높았던 뇌파 구간(300–500 msec)을 확인함으로써, 목격자들에게서 발생하는 다양한 기억 정보 처리 중 친숙성 관련 정보처리가 기억 평가에 중요하게 작용할 수 있음을 보여주었다는 데 학술적 함의가 있다.

추후 연구에서는 변형된 자극의 사용(예, 그림 자극 대신 목격자 진술에 포함된 단어 사용) 또는 다양한 SVM 분류 방법(예, 비선형적 커널)을 적용하거나[14], Sun 등의 연구[25]에서 사용했던 딥러닝 기법과 같이 정교한 기계학습 알고리즘을 적용하여 자료를 분류해볼 필요가 있다. 이런 기법을 응용하여 뇌파를 이용해 정확하게 목격자 기억을 분류하는 방법을 탐색할 필요가 있을 것이다.

한편, 정확한 기억 인출과 관련 있는 또 다른 생리학적 지표(예, 주파수) 등을 이용하여 기억 정확성을 평가하는 데 활용하려는 시도도 필요할 것이다. 예를 들어, 단서 회상 과제에서 전두 영역의 빠른 세타파(5–7.5 Hz)와 느린 세타파(3–5 Hz)가 성공적인 인출이 이뤄질 때 오히려 감소하는 것을 보고한 연구가 있다[26]. 이와 같이 뇌파의 전위뿐만 아니라 주파수와 같은 다양한 신경생리학적 측정치들도 함께 고려한 분류 모델을 설계한다면, 목격자들의 기억을 더 타당하고 신뢰롭게 추정할 수 있는 평가 기법을 개발할 수 있을 것이다.

Conflicts of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

Acknowledgments

This work was supported by National Forensic Service (2017-Psychology-01), Ministry of the Interior and safety, Republic of Korea.

References

- Wells GL, Memon A, Penrod SD. Eyewitness evidence: improving its probative value. *Psychol Sci Public Interest* 2006;7:45-75.
- Schacter DL, Loftus EF. Memory and law: what can cognitive neuroscience contribute? *Nat Neurosci* 2013;16:119-23.
- Lefebvre CD, Marchand Y, Smith SM, et al. Determining eyewitness identification accuracy using event-related brain potentials (ERPs). *Psychophysiology* 2007;44:894-904.
- Lefebvre CD, Marchand Y, Smith SM, et al. Use of event-related brain potentials (ERPs) to assess eyewitness accuracy and deception. *Int J Psychophysiol* 2009;73:218-25.
- Rugg MD, Mark RE, Walla P, et al. Dissociation of the neural correlates of implicit and explicit memory. *Nature* 1998;392:595-8.
- Yonelinas AP. Receiver-operating characteristics in recognition memory: evidence for a dual-process model. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn* 1994;20:1341-54.
- Yonelinas AP. The nature of recollection and familiarity: a review of 30 years of research. *J Mem Lang* 2002;46:441-517.
- Rugg MD, Curran T. Event-related potentials and recognition memory. *Trends Cogn Sci* 2007;11:251-7.
- Curran T. Effects of attention and confidence on the hypothesized ERP correlates of recollection and familiarity. *Neuropsychologia* 2004;42:1088-106.
- Curran T, Cleary AM. Using ERPs to dissociate recollection from familiarity in picture recognition. *Brain Res Cogn Brain Res* 2003;15:191-205.
- Curran T, Hancock J. The FN400 indexes familiarity-based recognition of faces. *Neuroimage* 2007;36:464-71.
- Curran T. Brain potentials of recollection and familiarity. *Mem Cognit* 2000;28:923-38.
- Ham K, Pyo C, Jang T, et al. Estimation of eyewitness identification accuracy by event-related potentials. *Korean J Leg Med* 2015;39:115-9.
- Chang CC, Lin CJ. LIBSVM: a library for support vector machines. *ACM Trans Intell Syst Technol* 2011;2:1-27.
- Bode S, Feuerriegel D, Bennett D, et al. The Decision Decoding ToolBOX (DDTBOX): a novel multivariate pattern analysis toolbox for event-related potentials. *bioRxiv* 2017 Jun 12 [Epub]. <https://doi.org/10.1101/153189>.
- Haxby JV, Gobbini MI, Furey ML, et al. Distributed and overlapping representations of faces and objects in ventral temporal cortex. *Science* 2001;293:2425-30.
- Noh E, Herzmann G, Curran T, et al. Using single-trial EEG to predict and analyze subsequent memory. *Neuroimage* 2014;84:712-23.
- Nemrodov D, Niemeier M, Mok JN, et al. The time course of individual face recognition: a pattern analysis of ERP signals. *Neuroimage* 2016;132:469-76.
- Yoo SW, Kim YS, Noh JS, et al. Validity of Korean version of the mini-international neuropsychiatric interview. *Anxiety Mood* 2006;2:50-5.
- On-Site Tracking Siren. No. 372 [TV]. Busan: Korea New Network Corporation; 2011.
- Delorme A, Makeig S. EEGLAB: an open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis. *J Neurosci Methods* 2004;134:9-21.
- Benjamini Y, Hochberg Y. Controlling the false discovery rate: a practical and powerful approach to multiple testing. *J Royal Stat Soc Series B Methodol* 1995;57:289-300.
- Hallett M. Movement-related cortical potentials. *Electromyogr Clin Neurophysiol* 1994;34:5-13.
- Kok A. Overlap between P300 and movement-related-potentials: a response to Verleger. *Biol Psychol* 1988;27:51-8.
- Sun X, Qian C, Chen Z, et al. Remembered or forgotten?: an EEG-based computational prediction approach. *PLoS One* 2016;11:e0167497.
- Pastotter B, Bauml KT. Distinct slow and fast cortical theta dynamics in episodic memory retrieval. *Neuroimage* 2014;94:155-61.