

목격 여부에 따른 배가쪽 이마앞 영역의 활성화 차이: Functional Near-Infrared Spectroscopy Study 연구

함근수¹ · 김기평¹ · 정호진¹
유성호²

¹국립과학수사연구원 법심리과

²서울대학교 의과대학
법의학연구소 법의학교실

Received: November 9, 2018
Revised: November 27, 2018
Accepted: November 27, 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
Institute of Forensic Medicine and
Department 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

Increased Ventrolateral Prefrontal Cortex Activation during Accurate Eyewitness Memory Retrieval: An Exploratory Functional Near-Infrared Spectroscopy Study

Keunsoo Ham¹, Ki Pyoung Kim¹, Hojin Jeong¹, Seong Ho Yoo²

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

We investigated the neural correlates of accurate eyewitness memory retrieval using functional near-infrared spectroscopy. We analyzed oxygenated hemoglobin (HbO₂) concentration in the prefrontal cortex during eyewitness memory retrieval task and examined regional HbO₂ differences between observed objects (target) and unobserved objects (lure). We found that target objects elicited increased activation in the bilateral ventrolateral prefrontal cortex, which is known for monitoring retrieval processing via bottom-up attentional processing. Our results suggest bottom-up attentional mechanisms could be different during accurate eyewitness memory retrieval. These findings indicate that investigating retrieval mechanisms using functional near-infrared spectroscopy might be useful for establishing an accurate eyewitness recognition model.

Key Words: Memory; Recognition; Spectroscopy, near-infrared; Prefrontal cortex; Cognitive neuroscience

서 론

최근 들어, 목격자들의 진술의 진위 여부를 평가하기 위해 이들의 신경생리학적 반응(예, 뇌파)을 조사하여 목격자 기억을 평가하려는 시도가 증가하고 있다. 기억 복귀(memory reinstatement) 모델[1]에 의하면 부호화를 할 때 활성화되었던 두뇌의 활성화 패턴은 저장되며, 그 정보를 인출할 때

재활성화된다. 이 관점에서 목격하지 않은 장면들에 대한 정보들은 두뇌에 저장되어 있지 않기 때문에, 목격하지 못한 정보를 처리할 때의 두뇌 활성화 패턴은 목격한 장면을 인출할 때 발생하는 두뇌의 활성화 정도와 다를 것이라 예측할 수 있다. 본 연구에서는 목격한 자극과 목격하지 않은 자극을 사용해서 목격한 장면 또는 목격하지 못한 장면과 관련 있는 기억 단서에 의해 발생하는 두뇌 활성화의 차이를 조사하고, 이 결

과를 추후 수사 장면에서 목격자 기억을 평가하는 데에 활용 가능한 인지신경과학적인 기법 개발을 위한 토대를 마련하고자 하였다.

기존의 법과학 분야에서 신경생리학적 반응을 분석하여 목격자들의 기억을 조사한 연구들은 측정이 간편한 뇌파를 사용해왔다[2-4]. 예를 들어, Lefebvre 등[4]은 여러 시행의 뇌파를 평균화하여 계산되는 사건관련전위(event-related potentials, ERPs)를 조사하여 범인을 식별할 수 있다는 것을 보여주었고, Ham 등[3]은 동영상을 통해 차량 번호를 목격한 후 0-9의 숫자를 제시했을 때 목격한 번호에 선별적으로 반응하는 ERP 양상을 조사했다. Ham 등[2]의 후속 연구에서는 단일 시행의 뇌파 자료를 기계 학습 알고리즘을 적용해 분석했을 때 목격 여부를 우연 수준 이상으로 분류할 수 있다는 것을 발견했다. 이런 연구들은 목격자들의 두뇌 반응을 조사하는 것이 기억 정보를 수집하는 대안적 방법이 될 수 있음을 보여주는 예라고 볼 수 있다[5]. 그러나 뇌전도(electroencephalogram, EEG)는 자료를 얻기 위해서 차폐 시설이 마련된 곳에서 검사를 진행해야 하며, 전도성 젤을 주입하고 전극을 부착하는 시간이 1시간 정도 소요되어 참여자가 피로를 호소할 가능성이 있다. 무엇보다 EEG는 머리의 움직임과 같은 외부 잡음에 취약하고, 기억 여부에 따라 차별적으로 반응하는 두뇌 영역을 국소화(localization)하는데 한계가 있다. EEG는 두뇌의 순간적인 전위 변화를 탐지(detector)하는 데 민감한, 다시 말해 시간해상도가 높은 도구라는 것은 분명하지만, 여러 두뇌 영역의 활성화 양상을 살펴보는 것이 어렵다는 단점이 있다. 앞에서 언급한 기억 복귀 모델[1]을 고려해본다면, 정확한 기억의 인출 여부를 조사할 때 뇌파보다 두뇌의 활성화 양상을 조사하는 인지신경과학적 측정 기법이 더 효과적인 도구일 가능성이 있다.

이에 본 연구에서는 기능적 근적외선분광기(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)를 이용하여 목격 여부에 따라 활성화에서 차이를 보이는 두뇌 영역을 조사하고자 한다. fNIRS는 Modified Beer-Lambert 법칙[6]에 기반하여 두 파장(예, 790 nm, 850 nm) 대역의 레이저를 통해 두뇌의 혈액 내 산소 포화도를 측정하여 실시간으로 영상화된 대뇌 활성화 수준을 조사할 수 있는 방법이다. fNIRS를 통해 측정할 수 있는 oxygenated hemoglobin (HbO₂)와 deoxygenated hemoglobin (Hb)의 농도는 대표적인 신경영상기법인 기능적 자기공명영상(functional magnetic resonance imaging, fMRI)에서 두뇌 활성화 지표로 사용하는 blood oxygen-level-dependence 신호와 상관이 높다고 알려져 있다[7]. 또한 기존의 fMRI 연구와 유사한 실험 과제를 사용했을 때 비슷한 결과가 관찰되었다는 연구 결과도 보고되었다[8]. fNIRS는 장비의 휴대가 용이한 것 외에도, 비침습적이고 비교적 환경의 제약 없이 대뇌 피질의 활성화를 측

정할 수 있다는 장점이 있다. 이런 점에서 fNIRS는 측정 범위가 피질 영역으로 제한되지만, 운반이 가능한 fMRI로 주목받고 있는 두뇌 활성화 측정 도구이다[9]. 이 외에도 fNIRS는 뇌파에 비해 머리 움직임과 같은 외부 잡음에 상대적으로 강건(robust)하다는 이점이 있다. 또한 fMRI나 양전자 방출 컴퓨터 단층 촬영기(positron emission tomography)와 같은 다른 신경영상기법과 비교했을 때, fNIRS는 공간해상도는 낮지만 시간해상도가 상대적으로 높아 두뇌의 활성화를 실시간으로 측정하는데 유리하다[9]. fNIRS를 통해 측정되는 HbO₂나 Hb의 속성과 분석 방법에 대해 연구가 진행되고 있는 단계이기 때문에[10], 법과학 분야에서 이 기법을 응용한 연구는 거의 없다. fNIRS는 뇌파와 같이 측정 전에 번거로운 준비 과정이 필요 없고, 폐쇄된 공간에서 측정이 이뤄지는 fMRI와 다르게 개방된 공간에서 실시할 수 있다는 점에서 다양한 영역에서 활용할 수 있을 것으로 생각한다.

기존에 fMRI를 통해 목격자 기억의 인출 기제를 조사한 연구를 살펴보면, Abe 등[11]은 성공적인 인출에 있어 자극을 부호화했던 감각 피질 외에도 이마앞엽(prefrontal lobe) 영역이 중요하다는 것을 보여주었다. 기억 인출과 관련해서 이마앞엽 영역은 기능적으로 두 영역으로 구분된다. 뒤가쪽 이마앞 피질(dorsolateral prefrontal cortex, DLPFC)은 하향식(top-down) 주의 기제를 통해 목표 지향적 인출을 돕고, 배가쪽 이마앞 피질(ventrolateral prefrontal cortex, VLPFC)은 상향식(bottom-up) 주의 기제를 통해 기억 단서에 주의를 할당하고 인출을 돕는다고 알려져 있다[12]. 기억과 관련된 연구를 살펴보면, Schaeffer 등[13]의 fNIRS 연구에서는 두 단어 자극 간 연합을 정확하게 분류할 때 잘못 분류할 때보다 DLPFC의 활성화 수준이 높은 것이 발견되었다. Kim과 Cabeza [14]는 부호화 당시 VLPFC의 활성화 수준이 이후 성공적인 인출을 예측한다는 것을 발견했다. 이 연구 결과와 VLPFC가 정확한 기억 인출과 관련 있다는 Abe 등[11]의 연구 결과를 함께 고려해본다면 이 영역의 활성화를 조사하는 것이 목격자들의 기억 정보의 정확성을 판단하는데 유용한 방법일 수 있다. 종합해보면, 목격자들이 회상(recall)이나 재인(recognition)을 하는 동안 이마앞엽 영역의 활성화를 조사하는 것이 목격 여부의 판단에 도움이 될 것으로 생각된다.

본 연구는 목격자들의 기억이 중요한 정보를 제공해줄 수 있는 수사 상황에서 목격 여부를 구분할 수 있는 두뇌 영역을 조사하고, fNIRS의 활용 방안을 알아보고자 하였다. 실험을 통해 목격한 물건과 목격하지 않은 물건에 따라 활성화 수준의 차이를 보이는 두뇌 영역들을 규명함으로써 정확한 목격자 기억의 인출과 관련된 신경학적 기제를 이해하고자 한다.

재료 및 방법

1. 참가자

본 연구의 참가자(n=29; 남자 9명, 여자 20명)들은 대학교의 온라인 커뮤니티에 모집 공고를 통해 자발적으로 참가 의사를 밝힌 사람들을 모집했으며, 이들의 평균 연령은 21.68 ± 1.73세였다. 본 연구의 기억 과제를 수행하는데 지장이 없는 참가자들을 선별하기 위해 Wechsler Adult Intelligence Scale-Revised (WAIS-R)의 숫자의우기 검사를 통해 참가자들의 작업기억 능력을 평가했으며, 제외 기준에 해당되는 참가자는 없었다(범위, 14-27). 마지막으로 fNIRS 분석 과정에서 10명이 제외되어(fNIRS 측정과 전처리 참고) 최종적으로 19명(남, 4명; 여, 15명)의 자료를 분석했다. 본 연구에서는 남, 여 차이는 없을 것으로 가정하였다. 본 연구는 국립과학수사연구원 생명윤리심의위원회의 승인을 받고 그 절차를 따라 진행되었다(승인번호: 906-180118-HR-002-02).

2. 실험 자극 및 재인 과제

본 연구에서 기억의 부호화를 위해 사용한 절도 범죄 재연 동영상과 재인 과제는 뇌파를 이용해 목격 여부를 분류한 선행 연구[2]에서 사용한 것과 거의 동일했다(Fig. 1). 동영상은 2분 30초 분량으로 세 남자가 가정집에 침입하여 금품들과 현금을 훔치고 보석상에 판매하는 내용이었다. 모든 참가자들은 실험 후 면담에서 이 동영상을 한 번도 본 적이 없다고 보고했다.

절도 범죄 재연 동영상에서 참가자들이 분명히 목격했을

것으로 추정되는 9개의 물건(보석함, 만 원 봉투, 금시계 등)을 목격 자극으로 선정했다. 동영상에서 볼 수 있었던 물건에 대한 사진 자극을 사용한 선행 연구[2]와 달리, 본 연구에서는 세 어절의 단어를 이용하여 실험 자극을 구성했다(예, 빨간 하트 보석함, 흰색 만원 봉투). 비목격 자극은 목격 자극에서 색이 변형된 유형(예, 검정 하트 보석함, 노란색 만원 봉투)과 모양 또는 형태가 변형된 유형(예, 빨간 사각 보석함, 흰색 5만원 봉투)으로 구성되었다. 즉, 목격 자극은 9개, 비목격 자극이 18개로, 총 27개의 실험 자극을 재인 과제에 사용했다. 재인 과제는 3개의 구획(block)으로 구성되었으며, 매 구획마다 9개의 실험 자극(목격자극 3개, 비목격자극 6개)이 반복 제시되었다. 각 자극은 2번 이상 연속해서 반복 제시되지 않도록 제시 순서를 무선휘(pseudo-random) 했다.

실험 자극들은 Matlab 2017b (MathWorks, Natick, MA, USA)에서 구현되는 Psychtoolbox-3을 이용하여 제시되었다[15,16]. 이 실험 자극들의 글자 크기는 40 포인트로 설정되었으며, 24인치 모니터에서 1,280×1,024 픽셀 크기로 화면의 정 중앙에 제시되었다. 먼저, 참가자가 화면의 정 가운데에 주의를 기울이도록 하기 위해 고정점(+)이 1초 동안 제시되었고 그 후 기억 단서가 화면 중앙에 1초 동안 제시되었다. 뒤이어 빈 화면(blank)이 2초 동안 나타났으며 이 시간 동안 참가자들은 해당 물건을 동영상에서 목격했으면 왼손 검지를 이용하여 키보드의 'z'키를, 목격하지 않았으면 오른손 검지를 이용하여 '/'버튼을 최대한 빠르고 정확하게 누르도록 안내 받았다.

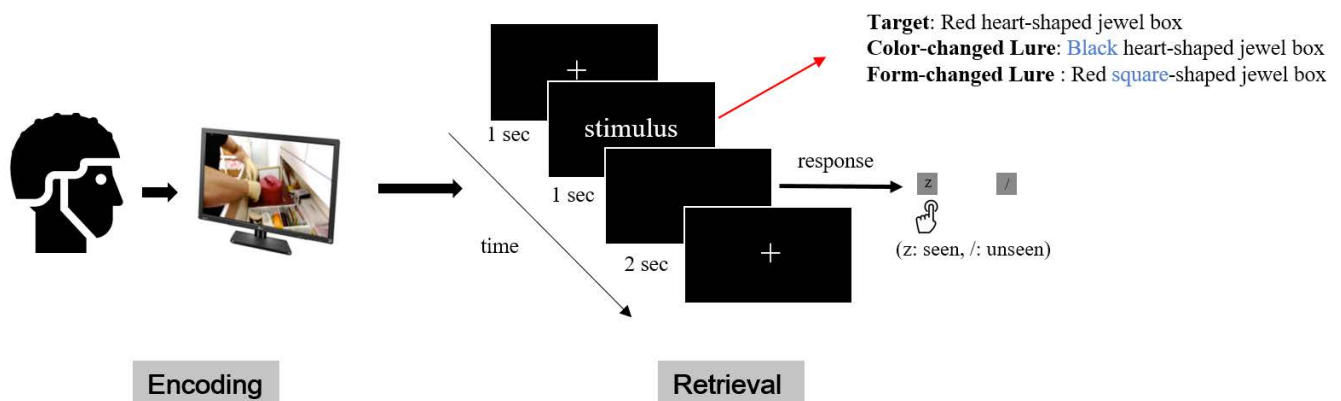


Fig. 1. Schematic of the experimental design. Participants watched mock-crime video and performed recognition task about 1 hour later. Three-word stimulus was presents as a memory cue for which a response was selected from two alternatives (seen or unseen). Participants could witness the stimulus in target condition appeared in mock-crime video, but couldn't witness the stimulus in other conditions (color-changed lure and form-changed lure).

3. 실험 절차

참가자들은 실험을 진행하기에 앞서 면담실에서 본 실험에 대해 간략하게 설명을 듣고 서면으로 동의서를 작성했다. 실험자는 본 실험이 절도 범죄 사건의 해석과 관련 있는 실험이라 안내했으며, ‘기억’과 관련된 표현은 사용하지 않았다. 이는 참가자들이 실험 과정 동안 의식적으로 실험 장면에서 목격한 동영상과 관련 있는 내용을 시연(rehearsal)하는 것을 방지하기 위한 것이었다. 실험 안내를 마친 후 참가자는 방음시설이 마련된 실험실로 이동하여 절도 범죄가 재연된 동영상을 보았다. 이후 약 30분 동안 정신과적 장애 여부를 판단하기 위해 한국판 Mini-International Neuropsychiatric Interview [17]와 자기보고식 설문지를 작성했다. 다음으로 fNIRS를 측정하는 장비를 착용한 후 재인 과제를 수행했다. 참가자들은 모니터에서 60 cm 떨어진 의자에 앉아 과제를 수행했다. 실험이 종료된 후 참가자들에게 본 실험은 fNIRS를 이용하여 기억 여부에 따른 두뇌 활성화의 차이를 조사하는 것이라고 설명을 해주었다.

4. fNIRS 측정 및 분석

이마앞 영역의 fNIRS 자료는 NIRSIT (OBELAB, Seoul, Korea) 장비를 이용하여 수집되었다. NIRSIT은 780 nm와 850 nm 대역의 레이저를 발생시키는 소스(source)와 이 레이저를 탐지하는 광전극(optode) 쌍이 204개가 있지만, 본 연구는 광전극 간 간격이 3 cm인 48개의 쌍에서 측정된 빛의 세기(light intensity)만을 사용했다(Fig. 2). 참가자들은 NIRSIT 장비를 국제 10-20 시스템에 따른 위치에 맞게 착용하고 실험을 진행했으며 표본율은 8.138 Hz였다.

fNIRS의 자료를 분석하기에 앞서 기본적인 전처리는 MATLAB R2018a (MathWorks)를 통해 수행되었다. 먼저, 머리카락으로 인한 신호 간섭이 심하거나 부착이 제대로 안된 광전극을 분석에서 제외하기 위해 Shin 등[18]의 연구에서 적용한 기준을 사용했다. 구체적으로 빛의 세기가 10보다 낮거나 변량 계수(coefficient of variance, $100 \times \frac{\sigma}{\mu}$)가 40보다 높은 채널들은 후속 분석에서 포함시키지 않았다. 이때 분석에서 사용되는 전체 48개의 채널 중 제외되는 채널이 8개(20%) 이상인 참가자 3명의 자료는 온전한 이마앞 영역의 활성화 패턴을 계산할 수 없다고 판단하여 분석에서 제외시켰다. 또한 적중 조건이나 정확 기각 조건 중 한 조건이라도 시행 수가 15개 미만인 참가자들의 7명의 자료도 신뢰할 만한 뇌활성화 패턴을 반영하기 어렵다고 판단하여 분석에서 제외했다.

다음으로 fNIRS 신호의 잡음 제거와 자료 분석은 Matlab에서 구현된 뇌영상 분석 프로그램인 Statistical Parametric

Mapping 12 (<http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/>)를 fNIRS 분석에 맞게 설계한 spm_fNIRS를 통해 수행되었다[8]. 먼저, fNIRS를 통해 측정된 빛의 세기를 두 개의 파장(780 mm, 850 mm)마다 광학 밀도(optical density)로 변환한 후 Modified Beer-Lambert 법칙[6]에 기반하여 HbO₂와 Hb의 농도를 계산했다. 이후 각 참가자마다 표준화된 두뇌 형판(Montreal Neurological Institute template)의 좌표가 입력되어 있는 광전극의 위치를 고려하여 각 채널마다 계산된 HbO₂와 Hb의 농도를 이마앞 영역에 맞게 표상하는 과정을 진행했다. 다음으로 측정 중 발생하는 머리 움직임과 같은 잡음을 Scholkmann 등[19]이 제안한 알고리즘을 통해 제거하는 절차를 수행했다. 이후 호흡과 심장박동과 관련된 잡음을 제거하기 위해 band-stop filter를 적용한 후[20], 과제 수행과 관련 없는 주파수 대역의 신호를 제거하고자 1/64 Hz 대역을 초과하는 신호만 여과하는 high-passfilter를 적용했다.

이렇게 전처리를 마친 fNIRS 자료를 이용하여 목격 여부에 따른 차이 검증을 진행하는 과정은 Tak 등 [8]이 제안한 방법을 이용하여 수행되었다. 이때 Hb는 HbO₂에 비해 신호대 잡음비가 낮아 실제 피질의 활성화를 반영하는 데 어려움이 있다고 알려져 있기 때문에, 본 연구에서는 HbO₂의 자료만을 갖고 통계 분석을 진행했다. 통계 분석은 참가자들마다 적중 시행과 정확 기각 시행의 조합으로 이뤄진 2개의 회귀원(regressor)를 포함한 일반 선형 모형(General Linear Model) 분석을 수행했다. 여기서 적중 시행은 목격 자극을 봤다고 정확하게 반응한 시행이고 정확 기각 시행은 비목격 자극을 보지 못했다고 정확하게 반응한 시행이었다. 각 시행

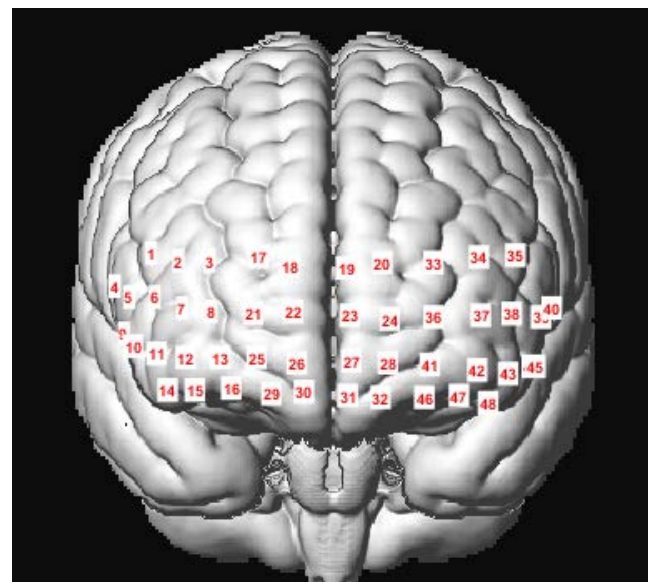


Fig. 2. Schematic of functional near-infrared spectroscopy probes and optode locations registered to the Montreal Neurological Institute brain template across prefrontal cortex.

별로 기억 단서 제시 시점을 기준으로 혈류 역학 반응 함수(hemodynamic response function)를 이용하여 적분했으며, 이를 통해 각 시행 조건별로 활성화되는 이마앞 영역에 대한 대비 영상(contrast image)을 계산했다. 이 대비 영상을 이용하여 제2수준 그룹분석(2nd level group analysis)에서 적중 시행과 정확 기각 조건에서 활성화 수준의 차이를 보이는 이마앞 영역을 검증했다.

결 과

1. 행동 결과

본 연구의 분석 대상자($n=19$)들의 재인 과제 정확률은 평균 $77.97 \pm 9.96\%$ 로 나타났다. 목격 자극과 비목격 자극을 구분하여 적중률과 정확 기각률을 구분해서 살펴보면, 목격 자극에 대한 적중률($69.20 \pm 9.57\%$)은 비목격 자극에 대한 정확 기각률($82.36 \pm 12.53\%$)보다 유의미하게 낮았다($t(18) =$

-4.50 , $P < 0.01$). 반응 시간을 살펴봤을 때, 적중 시행(496.7 ± 92.5 msec)은 정확 기각 시행(583.9 ± 154.5 msec)보다 반응 버튼을 누르는 속도가 빠른 것으로 나타났다($t(18) = -2.68$, $P < 0.05$).

2. fNIRS 분석 결과

목격 자극을 봤다고 정확하게 반응한 적중 조건과 비목격 자극을 보지 못 했다고 정확하게 반응한 정확 기각 조건에서 유의미한 차이(uncorrected $P < 0.005$)를 보이는 이마앞 영역들이 Table 1에 제시되어 있다.

적중 조건에서 정확 기각 조건보다 활성화 수준이 더 높은 이마앞 영역을 검증했을 때, 좌/우반구의 VLPFC의 활성화 수준이 유의미하게 높은 것으로 나타났다(Fig. 3). 적중 조건보다 정확 기각 조건에서 유의미하게 높은 활성화 수준을 나타낸 이마앞 영역은 나타나지 않았다.

Table 1. Brain regions showing differences in activation between hit and correct rejection condition

	Cluster size ^{a)}	T ^{b)}	MNI coordinates (mm)		
			X	Y	Z
Hit>correct rejection					
Left VLPFC	10	3.68	-32	37	1
Right VLPFC	27	3.60	51	32	1
Hit<correct rejection	NA	NA	NA	NA	NA

MNI, Montreal Neurological Institute; VLPFC, ventrolateral prefrontal cortex; NA, not applicable.

^{a)}The number of voxel in the cluster; ^{b)}Uncorrected $P < 0.005$ at voxel level, critical value (T)=2.88.

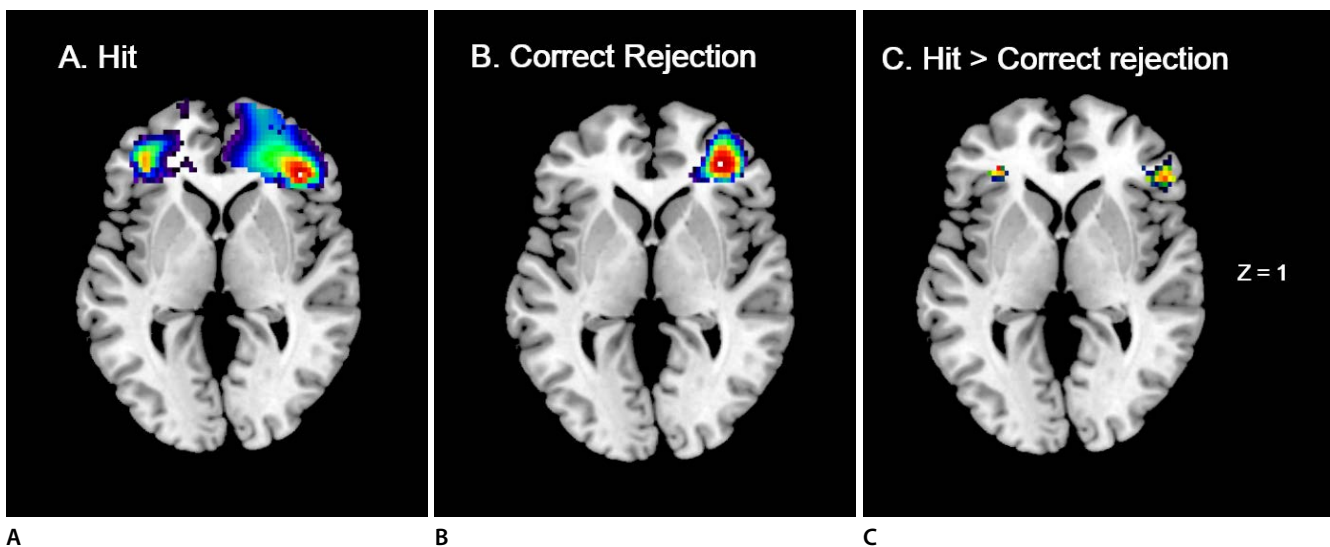


Fig. 3. Bilateral ventrolateral prefrontal cortex (VLPFC) showing significant activation differences between the hit and correct rejection conditions. Significantly activated voxels in the hit condition (A) and correct rejection condition (B). (C) Compared to the correct rejection condition, voxels in bilateral VLPFC showed higher activation in the hit condition (uncorrected $P < 0.005$).

고 찰

본 연구는 동영상을 통해 목격한 장면과 관련된 기억 단서에 대한 이마앞 영역의 활성화를 조사하여 목격 여부를 타당하게 평가할 수 있는지를 알아보기 위해 수행되었다. 기존의 법과학 분야에서 목격자 기억을 조사하는 데 사용되었던 뇌파 대신[2,4], 두뇌 활성화를 비교적 높은 시간해상도를 갖고 측정할 수 있는 장비로 주목 받고 있는 fNIRS를 사용하여 목격 여부에 따라 활성화의 차이를 보이는 두뇌 영역을 검증했다.

연구 결과, 목격 여부에 따라 기억 단서에 의해 유발되는 활성화 수준은 양쪽 반구의 VLPFC의 일부 영역에서 유의미하게 다른 것으로 나타났다. 구체적으로, 목격한 자극이 제시되었을 때 VLPFC의 활성화 수준이 더 높았다. 이와 같은 분석 결과는 Abe 등[11]의 실험에서 제시된 단어를 정확하게 재인했을 때 활성화 수준이 높은 두뇌 영역 중 하나로 VLPFC가 보고된 결과와 맥락을 같이 한다. VLPFC는 기억 인출 과정에서 필요한 주의 자원을 할당하고 기억 단서와 관련 있는 정보들을 탐색하는 것을 돕는다는 것을 고려해보면[12], 이러한 차이는 목격했던 물건에 대한 기억 정보의 탐색과 관련된 정보처리의 유무에 따라 발생했을 가능성이 높다. 반면, 하향식 주의 기제를 통해 목표 지향적 기억 인출과 관련 있는 DLPFC에서는 이러한 차이가 관찰되지 않았다. 이러한 결과는 본 연구의 과제 속성과 관련이 있는 것으로 생각된다. 즉 참가자들이 기억 단서를 접하고 목격 여부를 판단했기 때문에 자극에 의해 유발된 기억 인출 기제(상향식)가 활성화됐을 것으로 추측된다. 이는 목격자들에게 기억 단서를 제시하고 목격 여부를 판단하는 과제를 요구했을 때는 상향식 주의 처리와 관련 있는 신경생리학적 지표들을 조사하는 것이 유용할 수 있음을 시사하는 결과이다.

본 연구에서 fNIRS를 사용하여 이마앞 영역의 활성화를 조사하여 목격 여부를 평가할 수 있는지를 조사해서 VLPFC 활성화에서 차이가 있다는 결과를 얻었다고 할지라도, 본 연구는 몇 가지 한계점들이 있다. 가장 먼저, 본 연구에서 사용된 fNIRS 장비의 특성상 이마앞 영역의 활성화만을 측정했다는 것이다. 기억 인출과 관련 있는 선행 연구들에 따르면, 이마앞 영역 외에도 마루엽(parietal lobe)과 해당 자극을 부호화한 감각 피질 또한 기억 인출에 관여한다[1]. 특히 마루엽 영역은 이마앞 영역과 함께 인출에 관여하는 주의 조절에서 중요한 기능을 한다고 알려져 있다[21]. 따라서 이런 두뇌 영역들의 활성화 정도를 함께 조사하지 못한 것은 아쉬운 점이다. 아직까지 피질 전체의 활성화를 측정할 수 있는 fNIRS 장비가 시중에 시판되지 않고 있다. 추후 fNIRS 자료 처리 기술과 알고리즘이 향상된다면, 전체 피질 영역의 활성화 분포를 간편하게 측정할 수 있을 것으로 기대한다.

두 번째 한계점은 이미지를 시각적으로 목격한 내용을 단

어로 전환하여 제시했다는 것이다. 본 연구에서는 현실적으로 수사 장면에서 물적 증거가 확보되지 않았을 때를 고려하여 단어 자극에 대한 반응을 조사하여 목격 여부를 평가했으나, 기억 복귀 모델[1]을 고려한다면 이미지로 부호화된 기억은 이미지를 통해 재인을 할 때 보다 정확하게 목격 여부를 추론할 수 있을 것으로 생각한다. 추후 연구에서 이미지로 부호화가 이뤄진 자극에 대해 이미지로 재인할 때 단어로 재인할 때 활성화 양상의 차이를 조사하는 것도 목격자들의 기억 인출 기제를 이해하는데 유용한 주제가 될 것이다.

이런 한계점에도 불구하고 본 연구는 기존의 뇌파 연구[2-4]와 달리, 기억 여부를 식별하는 두뇌 영역을 시각화해서 보여줄 수 있는 fNIRS 장비를 처음으로 법과학의 주제에 적용했다는 데 의의가 있다. 뇌파 검사와 비교했을 때 fNIRS 검사는 차폐 시설이 필요 없고, 검사 대상자의 움직임에 비교적 영향을 덜 받기 때문에, 분석 방법과 절차의 개선을 통해 현장에서 활용 가능한 목격자 기억 감정 기법을 개발할 수 있을 것이다. 일화 기억 인출에 대한 회복 모델[1]을 고려해본다면 뇌 전체의 활성화 패턴을 조사하여 목격 여부를 평가하는 것이 기억의 본질에 맞는 접근 방법일 가능성이 있다. 또한 기억 단서와 관련된 정보를 탐색하는 VLPFC의 활성화 정도가 목격 여부에 따라 다르게 나타난다는 것을 확인함으로써, 목격자들의 기억 정보 탐색 기제를 추론할 수 있음을 보여주었다는 데 학술적 의미가 있다. 즉 추후에 목격자들을 대상으로 신경영상기법을 적용하여 기억을 조사할 때, VLPFC의 활성화를 조사하는 것이 효과적일 수 있음을 확인했다.

추후 연구에서는 인출에 따른 활성화 패턴이 자극 양상(예, 사진)과 무관한지를 조사해볼 필요가 있을 것이다. 목격 장면에 대한 부호화가 개념적으로 이뤄졌다면, 제시되는 자극의 형태와 무관하게 목격 여부에 따라 이마앞 영역의 활성화 차이가 일관될 것이라 예측할 수 있다. 이 외에도 시간 간격을 두고 이마앞 영역의 활성화 패턴의 유사성을 확인한다면, 기억 복귀 모델[1]에 부합하는 목격자 기억 정확성 평가 모델을 확립할 수 있을 것이다. 또한 다양한 범죄 사건에서 차별적인 반응을 보이는 이마앞 영역을 조사하거나, 실용적인 측면에서 목격 여부를 분류할 수 있는 통계적인 알고리즘을 조사하는 것도 유용할 것이다. 추후에는 뇌파 측정치도 함께 고려하여 목격 여부를 판단한다면, 목격자 기억을 추론할 수 있는 인지 신경과학적 평가 모델을 개발할 수 있을 것으로 기대한다.

ORCID: Keunsoo Ham: <https://orcid.org/0000-0002-7796-5009>; Ki Pyoung Kim: <https://orcid.org/0000-0002-8334-1307>; Hojin Jeong: <https://orcid.org/0000-0003-0672-6112>; Seong Ho Yoo: <https://orcid.org/0000-0001-5294-0596>

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

1. Davachi L, Danker JF. The cognitive neuroscience of episodic memory. In: Ochsner KN, Kosslyn SM, eds. *The Oxford handbook of cognitive neuroscience*. Vol. 1. New York: Oxford University Press; 2013. p. 375-88.
2. Ham K, Kim KP, Jeong H, et al. The assessment of eyewitness memory using electroencephalogram: application of machine learning algorithm. *Korean J Leg Med* 2018;42:62-70.
3. 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.
4. Lefebvre CD, Marchand Y, Smith SM, et al. Determining eyewitness identification accuracy using event-related brain potentials (ERPs). *Psychophysiology* 2007;44:894-904.
5. Schacter DL, Loftus EF. Memory and law: what can cognitive neuroscience contribute? *Nat Neurosci* 2013;16:119-23.
6. Yamashita Y, Maki A, Ito Y, et al. Noninvasive near-infrared topography of human brain activity using intensity modulation spectroscopy. *Opt Eng* 1996;35:1046-50.
7. Lloyd-Fox S, Blasi A, Elwell CE. Illuminating the developing brain: the past, present and future of functional near infrared spectroscopy. *Neurosci Biobehav Rev* 2010;34:269-84.
8. Tak S, Uga M, Flandin G, et al. Sensor space group analysis for fNIRS data. *J Neurosci Methods* 2016;264:103-12.
9. Ferrari M, Quaresima V. A brief review on the history of human functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) development and fields of application. *Neuroimage* 2012;63:921-35.
10. Tak S, Ye JC. Statistical analysis of fNIRS data: a comprehensive review. *Neuroimage* 2014;85 Pt 1:72-91.
11. Abe N, Okuda J, Suzuki M, et al. Neural correlates of true memory, false memory, and deception. *Cereb Cortex* 2008;18:2811-9.
12. Cabeza R. Role of parietal regions in episodic memory retrieval: the dual attentional processes hypothesis. *Neuropsychologia* 2008;46:1813-27.
13. Schaeffer JD, Yennu AS, Gandy KC, et al. An fNIRS investigation of associative recognition in the prefrontal cortex with a rapid event-related design. *J Neurosci Methods* 2014;235:308-15.
14. Kim H, Cabeza R. Differential contributions of prefrontal, medial temporal, and sensory-perceptual regions to true and false memory formation. *Cereb Cortex* 2007;17:2143-50.
15. Brainard DH. The psychophysics toolbox. *Spat Vis* 1997;10:433-6.
16. Pelli DG. The VideoToolbox software for visual psychophysics: transforming numbers into movies. *Spat Vis* 1997;10:437-42.
17. Yoo SW, Kim YS, Noh JS, et al. Validity of Korean version of the mini-international neuropsychiatric interview. *Anxiety Mood* 2006;2:50-5.
18. Shin J, Kwon J, Choi J, et al. Performance enhancement of a brain-computer interface using high-density multi-distance NIRS. *Sci Rep* 2017;7:16545.
19. Scholkman F, Spichtig S, Muehlemann T, et al. How to detect and reduce movement artifacts in near-infrared imaging using moving standard deviation and spline interpolation. *Physiol Meas* 2010;31:649-62.
20. Oostenveld R, Fries P, Maris E, et al. FieldTrip: Open source software for advanced analysis of MEG, EEG, and invasive electrophysiological data. *Comput Intell Neurosci* 2011;2011:156869.
21. Wagner AD, Shannon BJ, Kahn I, et al. Parietal lobe contributions to episodic memory retrieval. *Trends Cogn Sci* 2005;9:445-53.