

단어, 그림 및 추상패턴의 일화적 부호화 기전: event-related fMRI 연구*

박 태 진[†] 박 선 희 김 정 희

전남대학교 심리학과

언어적 자료의 심상화 특성과 비언어적 자료의 언어화 특성이 의도적인 기억 부호화에 미치는 영향을 알아보기 위해 사진-유관 fMRI 연구를 수행하였다. 부호화단계에서 구체어, 대상 그림, 그리고 추상패턴을 의도적으로 학습하도록 요구하면서 fMRI 영상을 구하였고 인출단계에서 재인판단검사를 실시하였다. 재인 수행 결과 그림, 구체어, 추상패턴의 순으로 기억 수행이 우수하였다. 상측 전두회(BA 6), 상측 두정피질(BA 7), 그리고 내측두피질의 세 ROI에서 신호변화율을 분석한 결과, 상측 전두회에서는 추상패턴만이 좌반구보다 우반구에서 더 큰 활성화를 보였고 구체어와 그림은 반구 차이를 보이지 않았으며 추상패턴은 우반구에서 구체어와 그림보다 더 큰 활성화를 보였다. 상측 두정피질에서는 세 학습자료 모두 반구 차이를 보이지 않았고 추상패턴은 구체어와 그림보다 더 큰 활성화를 보였으며, 내측두피질에서는 세 학습자료간 차이와 반구차이가 모두 관찰되지 않았다. 학습자료간 대비를 수행한 결과, 추상패턴은 신호변화율 분석 결과와 유사하게 상측 전두회에서는 구체어와 그림에 비해 우반구에서 더 큰 활성화를 보였고 상측 두정피질에서는 구체어에 비해 양반구에서, 그림에 비해 우반구에서 더 큰 활성화를 보였다. 그러나 내측두피질에서는 학습자료간 대비 결과가 신호변화율 분석 결과와 상이하였는데, 구체어와 그림은 모두 추상패턴에 비해 양반구에서, 그림은 구체어에 비해 우반구에서 더 큰 활성화를 보였다. 전반적으로 구체어와 그림의 활성화패턴은 서로 유사하였으며 추상패턴과는 공통적으로 상이한 활성화패턴을 보였는데, 이러한 결과는 자료-특수 편측성 가설보다는 부호-특수 편측성 가설을 지지하는 것으로서, 기억 부호화의 신경기전이 학습자료의 심상화와 언어화 가능성에 따라 달라진다는 것을 시사하였다.

주요어 : 언어화, 심상화, 기억 부호화, 부호-특수성, fMRI

* 이 논문은 2003년도 전남대학교 연구년교수연구비 지원에 의하여 연구되었음. 상세하고 유익한 심사를 해준 심사위원들에게 감사를 표합니다.

[†] 교신저자 : 박태진, 전남대학교 심리학과, 광주시 북구 용봉동 300
E-mail : tpark@chonnam.ac.kr

일화기억 부호화 도중 전전두피질과 내측두엽이 활성화된다는 것이 최근의 여러 신경영상연구들에 의해 밝혀졌다(예, Nyberg 등, 1996; Buckner 등, 1999; Schacter와 Wagner, 1999; Wagner, 1999; Kirchoff 등, 2000). 이 주제를 다룬 초기 연구들은 주로 언어자료를 사용하여 기억 부호화와 인출에 좌반구와 우반구의 전전두피질이 각각 관여함을 밝혔는데, 이러한 연구들을 기초로 하여 일화기억의 부호화에는 좌반구 전전두피질이, 인출에는 우반구 전전두피질이 관여한다는 HERA (hemispheric encoding-retrieval asymmetry)모형이 제안되었다(Tulving 등, 1994).

그러나 반구 편측성은 부호화와 인출 뿐만 아니라 학습자료의 유형에 따라 달라진다는 사실이 드러났다. 작업기억 연구에서 밝혀진 바에 따르면 공간적 기억과 비공간적 기억은 복측 및 배측 전전두피질에서 반구 편측성을 보인다(Goldman-Rakic, 2000). 이와 유사하게 일화기억 부호화를 다룬 연구들도 학습자료에 따른 전전두피질의 편측성을 보고하였는데, 단어와 같은 언어자료의 부호화 도중에는 좌반구 전전두피질이, 그림과 같은 비언어자료의 부호화 도중에는 우반구 전전두피질이 활성화된다. Wagner, Poldrack 등(1998)은 단어(추상어)와 결 자극의 부호화(의도학습)와 관련된 신경구조물을 비교하였는데, 단어는 좌반구 하측 전전두피질을, 결 자극은 우반구 하측 전전두피질을 활성화시켰음을 보고하였다. McDermott 등(1999)은 단어(구체어; 대상 이름)와 낯선 얼굴을 비교하였는데, 부호화(의도학습)와 인출(재인검사) 도중 모두 외하측 전전두피질(BA 6/44)에서 단어는 좌반구 편측성을

보인 반면, 얼굴은 우반구 편측성을 보였다. 즉 언어자료의 기억은 좌반구가 매개하는 반면 비언어자료의 기억은 우반구가 매개하는데, 학습자료에 따라 이와 같이 나타나는 편측성을 자료-특수 편측성(material-specific laterality) 효과라 한다.

자료-특수 편측성 가설을 지지하는 증거로서 내측두엽이나 전두엽 손상 환자의 선택적 기억장애를 들 수 있다. 좌반구의 해마나 주변 구조의 손상은 언어적 기억결함을 일으키지만 우반구의 해마체 손상은 낯선 얼굴이나 추상적 패턴과 같은 비언어적 기억결함을 일으킨다(Milner, 1968; Ojemann & Dodrill, 1985). 전두엽 손상에 따른 효과는 내측두엽 손상효과만큼은 편측성이 두드러지지 않지만(Milner & Petrides, 1984), 최근의 연구에 따르면 전두엽 역시 일화기억 형성에 중요한 역할을 하며 자료-특수 편측성을 보인다(Kelley 등, 2002).

여러 뇌신경영상 연구들이 자료-특수 편측성 가설을 지지하는 결과를 보고하였는데, 이 가운데 Kelley 등(1998)은 fMRI 연구를 통해 단어(구체어와 추상어를 함께 사용), 명명 가능한 그림, 그리고 낯선 얼굴 각각의 부호화(의도학습) 도중의 활성화를 기저선 과제 도중의 활성화와 비교하였다. 그 결과, 단어는 좌반구 외측 전전두피질, 얼굴은 우반구 외측 전전두피질을 활성화시켰고, 그림은 앞서와 동일한 전전두피질 부위를 양반구 모두에서 동등한 정도로 활성화시켰다. 즉 그림은 우반구 전전두피질은 얼굴과 동등한 정도로 활성화시켰지만 좌반구 전전두피질은 얼굴보다 더 크게 활성화시켰는데, 그림은 얼굴보다 언어적 명명이 더 쉬웠다. 유사한 패턴이 내측두엽에서도

관찰되었다. Milner(1974)에 따르면 우반구 해마 손상은 명명이 어려운 복잡한 시각패턴의 기억 장애를 유발하지만 좌반구 해마 손상은 명명 가능한 비언어적 자료의 기억 장애를 유발한다. 좌반구 내측두엽과 마찬가지로 언어 기억에 전문화된 좌반구 외후측 전전두피질 역시 명명 가능한 비언어적 자극의 기억을 매개하는 것으로 보인다. 좌반구 외후측 전전두피질의 활성화가 자극의 언어적 형태 여부와 무관하게 언어부호의 형성 정도에 달려있으며 이러한 활동이 내적으로 생성된 기억 표상을 반영한다고 보는 관점을 언어화(verbalizability) 가설이라고 한다. Golby 등(2001)은 추상패턴, 낯선 얼굴, 복잡한 장면과 같은 비언어적 자극 그리고 단어(구체어와 추상어를 함께 사용)와 같은 언어적 자극을 부호화(우연학습)할 때 반구 편측성이 어떻게 다른가를 fMRI 연구를 통해 검증하였다. 먼저 각 자극 유형의 언어화 정도를 알아보기 위해 2중 과제를 사용하여 언어적 간섭이 재인지역에 미치는 영향을 조사하였다. 그 결과 언어적 간섭이 추상패턴에 비해 낯선 얼굴과 복잡한 장면의 재인지역에 더 큰 영향을 미쳤는데, 이는 낯선 얼굴과 복잡한 장면의 언어화 정도가 추상패턴보다 더 크다는 것을 확인해주었다. 영상 연구에서는 부호화 도중 전전두엽과 내측두엽의 활성화를 조사하였는데 기저선 조건은 자극이 두 번째 반복되는 조건이었다. 그 결과 상측 전두회(BA 6)에서 단어의 경우 좌반구 편측성이, 패턴의 경우 우반구 편측성이, 얼굴과 장면의 경우 비편측성이 관찰되었는데, 이는 언어화 가설을 지지하는 결과라 할 수 있다.

비언어자료의 언어화 가능성과 유사하게 언

어자료의 심상화 가능성으로부터 언어자료의 기억 부호화에서 우반구 활성화를 예상할 수 있다. 언어자료라 할지라도 심상부호라는 기억표상을 내적으로 생성해낼 수 있는 정도에 따라 우반구 후외측 전전두피질의 활성화가 달라진다고 보는 관점을 심상화(imageability) 가설이라고 한다. Casasanto 등(2001)은 심상화 정도가 높은 언어자료의 기억 부호화에서 비언어자료와 유사하게 우반구 전전두피질의 활성화가 관찰될 것으로 기대하고서 구체어와 추상어의 부호화 도중에 fMRI 활성화를 관찰하였다. 그 결과 재인지역 수행에서 구체어가 추상어보다 우수하였으며, 특히 추상어의 부호화 도중에는 좌반구의 하전전두피질에서 더 큰 활성화가 관찰된 반면 구체어의 부호화 도중에는 하전전두피질의 활성화가 반구 차이 없이 관찰되었는데, 이러한 결과는 심상화 가설을 지지하는 결과라 할 수 있다.

언어화 가설과 심상화 가설에 따르면 좌반구 외측 전전두피질의 활동은 학습자료의 언어화 정도에 따라 달라지지만 우반구 외측 전전두피질의 활동은 학습자료의 심상화 정도에 따라 달라지는데, 이 두 가설을 합쳐서 부호-특수성(code-specificity) 가설이라고 한다 (McDermott 등, 1999). 자료-특수성 가설은 자극의 외적 형식에 따라 반구 편측성이 나타난다고 설명하지만 이 가설은 앞서 살펴본 바와 같이 부호화 특수성 효과를 설명하지 못한다. 반면 부호-특수성 가설은 자극뿐만 아니라 과제 요구에 따라 내적으로 생성된 기억부호에 따라 반구 편측성이 달라진다고 설명함으로써 부호 특수성 효과를 잘 설명한다.

본 연구에서는 일화기억 부호화와 관련된

뇌 신경구조물들이 학습자료에 따라 어떻게 다른지를 밝히고자 하였다. 먼저, 심상화가 가능한 언어자료, 언어화가 가능한 비언어자료, 그리고 언어화가 불가능한 비언어자료를 사용하여 이러한 학습자료의 특성이 기억 부호화와 관련된 뇌 활성화 패턴에 미치는 영향을 조사하였는데, 특히 언어화와 심상화의 효과를 동시에 조작하여 비교함으로써 언어화와 심상화에 기반을 둔 부호-특수성 가설을 평가하고자 하였다. 또한 본 연구에서는 기억 부호화 가운데 의도학습 상황에서 일어나는 기억부호화의 신경기전이 학습자료의 특성에 따라 어떻게 달라지는지 알아보하고자 하였다. 기억부호화를 다룬 여러 연구들이 다양한 우연 학습과제를 사용하였는데(Kohler 등(2000), 의미 판단과제; Kirchoff 등(2000), 실내-실외 판단과제; Johnson 등(2003), 읽기/보기과제; Golby 등(2001), 성별 판단/ 실내-실외판단/대칭-비대칭 판단/문장생성과제), 부호화과정은 부호화 책략에 따라 상이한 시스템에 의해 중재될 가능성이 있다(Grady 등, 1998; Bernstein 등, 2002). 의도학습과제를 사용하여 언어자료와 비언어자료의 부호화과정을 다룬 연구로서 Kelley 등(1998)을 들 수 있는데, 그들은 단어자료로서 구체어와 추상어를 구분하지 않고 함께 사용하였고, 비언어적이며 명명 불가능한 그림자료로서 낯선 얼굴을 사용하였지만 얼굴자극은 비록 낯선 얼굴이라 할지라도 언어적 부호화

책략이 사용될 가능성이 있다(Kelley 등, 1998). 본 연구는 학습자료로서 구체어와 대상 그림, 그리고 추상패턴을 사용하였는데, 구체어는 심상 생성이 용이한 언어자료이고 대상 그림은 언어적 명명이 용이한 비언어자료이며 추상패턴은 명명이 불가능한 비언어자료이다. 이러한 유형의 학습자료들을 사용함으로써 언어자료의 심상화 특성과 비언어자료의 언어화 특성이 의도학습의 부호화기전, 특히 반구 편측성에 미치는 효과를 밝히고자 하였다.

방 법

참가자 오른손잡이이며 신경학적 이상이 없다고 주장한 젊은 성인 14명의 데이터가 최종 결과 분석에 사용되었다. 이들은 모두 실험참가 동의서에 서명하였고 참가비를 받았다.

독립변인 학습자료 유형(단어, 그림, 추상패턴).

실험자료 기억 부호화단계에서는 학습자극으로서 구체어, 대상 그림 및 추상패턴을 각각 60개씩 사용하였고, 인출단계(재인판단검사)에서는 부호화단계에서 사용한 학습자극 180개 외에 비학습자극으로서 세 유형의 학습자극 각각 60개를 추가하여 도합 360개 항목들을 사용하였다. 실험 자료의 예를 그림 1에 제시



그림 1. 실험 자료 예

하였다. 그밖에 부호화단계에서는 초두효과와 최신효과를 통제하기 위해 별도의 충전용 학습자극 6개(구체어, 그림 및 추상패턴 각각 2개씩)를 사용하였고, 인출단계의 연습용 재인 판단검사에서는 부호화단계의 충전용 학습자극 6개 외에 별도의 비학습자극 6개(구체어, 그림 및 추상패턴 각각 2개씩)를 사용하였다. 추상패턴은 Musen 등(1990)이 사용한 것을 기초로 직접 제작하였다.

절차 기억 부호화단계를 먼저 실시한 후 재인판단검사를 실시하였는데, 부호화단계에서는 참가자들에게 추후 기억검사에 대비하여 제시되는 자극들을 최대한 잘 학습하도록 지시하였다(의도학습). 기억 부호화단계는 더미시행(응시점을 10초 제시함), 기저선 시행(응시점을 16초 제시함), 충전용 학습자극 시행 3회, 학습자극 시행 180시행, 충전용 학습자극 시행 3회의 순으로 이루어졌다. 충전용을 포함한 모든 학습자극 시행에서 먼저 응시점을 1.5초 제시한 후 자극을 0.6초 제시하였다(자극간 SOA, 2.1초). 3개 유형의 학습자료들을 혼합하여 제시하되, 동일 유형의 학습자료에 속하는 자극들의 제시 시점이 2(TR=2초였기 때문)의 배수+0.1, 2의 배수+0.2, 2의 배수+0.3, ... 2의 배수+1.9, 2의 배수+0이 되도록 하였는데, 이는 한 volume image를 구성하는 20개 slice들 각각에 대해 각 학습자료조건의 항목들이 균등하게 동시 발생하도록 하기 위한 것이었다. 또한 학습자극 대신 응시점만을 제시하는 시행을 62개 추가하였는데, 이는 개개 혈류역학적 반응을 디콘볼루션(deconvolution)에 의해 분리할 수 있도록 하기 위한 것이었다(Reber 등,

2002). 3개 학습자료조건 각각에서 학습자극 1개 시행과 응시점 1개 시행, 도합 4개 시행으로 1개 소블럭을 구성하여 총 62개 소블럭(충전용 학습 소블럭 2개 포함)을 구성하였다. 각 소블럭 내에서 3개 학습자극 시행과 1개 응시점 시행의 제시순서는 무선적으로 하되 전체 소블럭에 걸쳐 제시 순서를 역균형화시켰다. 인출단계에서는 먼저 연습용 재인판단검사를 실시한 후 본 재인판단검사를 실시하였다. 각 시행마다 먼저 응시점을 0.5초 제시하고 자극을 2.5초 제시하였다. 이때 참가자는 자극이 제시되면 즉시 학습/비학습 판단에 상응하여 마우스의 좌측/우측 키이를 눌러 반응하도록 요구받았다. fMRI 영상은 부호화단계에서만 구하였고 부호화단계 후 약 10분이 경과한 후 다른 실험실에서 재인판단검사를 실시하였다.

fMRI 영상 획득 및 분석 KAIST 뇌과학연구센터의 3.0T MRI 시스템(Oxford magnet, Varian console magnet built up by ISOL)을 사용하여 기억 부호화단계에서 T2*-weighted echoplanar images with BOLD contrast(TR=2.0초, TE=40ms, 20 axial slices, 6mm 두께, flip angle=80°, FOV=22× 22cm, 64×64 pixel matrix)를 한번의 run에서 구하였으며, 영상 절편들은 AC/PC선에 나란하게 위치를 잡았다. 총 소요시간은 560초(마지막 시행의 혈류역학적 반응을 수집하기 위한 17.4초 포함)로서 총 280개의 전체 뇌 volume image(더미시행 포함)를 구하였다. 해부학적 coregistration을 위해 spin echo pulse sequence(TR=3.2초, TE=16ms, flip angle=60°, FOV=22× 22cm, 256×192 pixel matrix)를 사용하여 전체 뇌의 T1영상을 구하였다. 스캐너의

시퀀스는 자극 제시와 동기화되었다.

개인 데이터에서 처음 더미 image 5개를 제외한 나머지 영상들에 대해 SPM2를 사용하여 분석하였는데, realignment, coregistration, normalization, smoothing을 거쳐 GLM에서 canonical haemodynamic response function을 공변인으로 사용하였고 global scaling을 사용하지 않았으며, high-pass filter를 사용하였고 자동회귀모형을 적용하였다. 모수추정치에 대해 계획적 비교를 수행하였는데, 개인 데이터는 고정효과 모델로 분석하였고 집단 데이터는 무선효과 모델로 분석하였다(기저선조건에 대한 대비분석, uncorrected $p < .0001$, cluster size ≥ 10 ; 학습자료조건간 대비분석, uncorrected $p < .001$, cluster size ≥ 5). 또한 부호화 관련 뇌 활성화 영역에서의 활성화 정도가 학습자료에 따라 어떻게 다른지 밝히기 위해 집단 데이터 분석 결과를 바탕으로 ROI(Region of Interest)를 선정하고, 각 개인 데이터에서 ROI에서의 평균 신호강도를 MarsBaR ROI toolbox for SPM(0.41판)을 이용하여 구한 후 이를 변량분석하였다(상세한 내용은 결과에서 기술함).

결 과

행동 수행 결과 재인판단검사 반응에서 학습자료별로 적중-오경보 비율을 구하여(그림 2) 변량 분석한 결과 학습자료의 효과가 유의미하였다 [$F(1, 13) = 43.84$, $MS_e = .01$, $p < .001$]. 학습자료들간 차이를 알아보기 위해 Tukey 검정 ($p < .05$)을 한 결과 모든 쌍 조건들간 차이가 유의미하였는데, 그림, 단어, 추상패턴의 순으로 수행이 우수하였다. 특히 단어보다 그림의

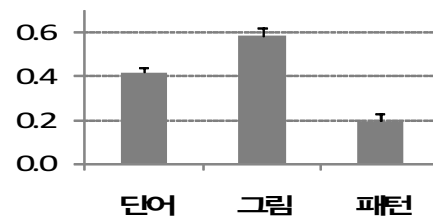


그림 2. 학습자료별 적중-오경보 비율 (오차막대기는 표준오차임)

기억 수행이 더 우수하였는데 이는 전형적인 그림우월효과를 확증하는 결과였다.

fMRI 분석 결과 먼저 기억 부호화 도중 전반적으로 활성화되는 뇌 영역을 알아보기 위해 기저선 조건에 비해 모든 학습자료의 부호화 도중 더 활성화된 뇌 영역을 조사하였다. 그 결과가 <표 1>과 <그림 3>에 제시되었다. 좌반구의 경우 전두피질 영역에서는 상측 전두회(BA 6)와 하측 전두회(BA 44), 두정피질 영역에서는 상측과 하측 두정피질(BA 7과 40), 측두피질 영역에서는 하측과 중측 측두회(BA 37) 및 해마, 그리고 시각피질 영역(BA 19)의 활성화가 관찰되었다. 우반구의 경우 전두피질 영역에서는 하측 전두회(BA 46)와 상측 전두회(BA 6과 8), 두정피질 영역에서는 설전부와 상측 두정피질(BA 7), 측두피질 영역에서는 하측 측두회(BA 37), 그리고 시각피질 영역(BA 19/18)의 활성화가 관찰되었다. 그밖에 양반구에서 상측 전두회(BA 8)의 활성화가 관찰되었다(이상 $p < .0001$ uncorrected, cluster size ≥ 10).

이상에서 관찰된 활성화 영역들을 바탕으로 학습자료별로 활성화 수준상 반구 차이를 조사하기 위한 관심영역(ROI: region of interest)을 다음과 같이 선정하였다. 양반구의 대체로 상

표 1. 기억 부호화 도중 활성화된 뇌 영역 (단어 부호화 + 대상 그림 부호화 + 추상패턴 부호화 - 기저선). ($p < .0001$ uncorrected, cluster size ≥ 10 ; * $p < .0005$ uncorrected)

뇌 영역	z 값	Talairach 좌표			cluster 크기	
		x	y	z		
단어+그림+패턴 좌반구 상측 전두회 (BA 6)	4.42	-36	8	42	103	
	4.38	-32	7	60	30	
	4.31	-46	9	20	24	
	5.29	-32	-54	54	1675	
	4.23	-48	-49	-8	29	
	3.96	-48	-60	0	15	
	3.97	-24	-24	-11	13	
	4.68	-36	-72	5	57	
	우반구 하측 전두회 (BA 46)	5.31	40	28	15	66
		4.45	32	2	44	45
4.38		26	16	49	76	
4.23		2	18	51	37	
4.26		38	9	22	128	
5.42		28	-56	54	2149	
4.81		50	-45	-11	167	
*3.60		32	-24	-9	(21)	
4.51		46	-68	-7	88	
4.32		26	-87	10	118	
양반구 상측 전두회 (BA 8)	4.23	2	18	51	37	

응하는 위치에서 모두 활성화를 보이면서 동시에 전두영역, 두정영역, 내측두영역 각각에서 활성화를 보인 다음 좌표(Talairach 좌표)를 ROI로 선정하였다: 전두영역에서 상측 전두회 (BA 6: 좌반구, $x=-36$, $y=8$, $z=42$; 우반구 $x=32$, $y=2$, $z=44$), 두정영역에서 상측 두정피질(BA 7: 좌반구, $x=-32$, $y=-54$, $z=54$; 우반구, $x=28$, $y=-56$, $z=54$), 내측두영역의 해마(좌반구, $x=-24$, $y=-24$, $z=-11$; 우반구, $x=32$, $y=-24$, $z=-9$). 이때 좌반구에 상응하는 우반구

의 해마 활성화는 $p < .0005$ (uncorrected, cluster size ≥ 10) 수준에서 확인되었다.

집단 데이터 분석에서 구한 ROI를 기준으로 각 참가자별 신호 강도를 다음과 같이 구하였다. 먼저 참가자별로 해당 ROI로부터 10mm 범위 내에서 최대 활성화를 보이면서 동일한 피질 영역 내에 속하는 정점 좌표들을 구한 후($p < 0.01$, cluster size ≥ 5), 이 좌표를 중심으로 한 구형 영역(3mm 반지름)의 평균 신호강도를 세 학습자료조건과 기저선조건 각각에서 구하

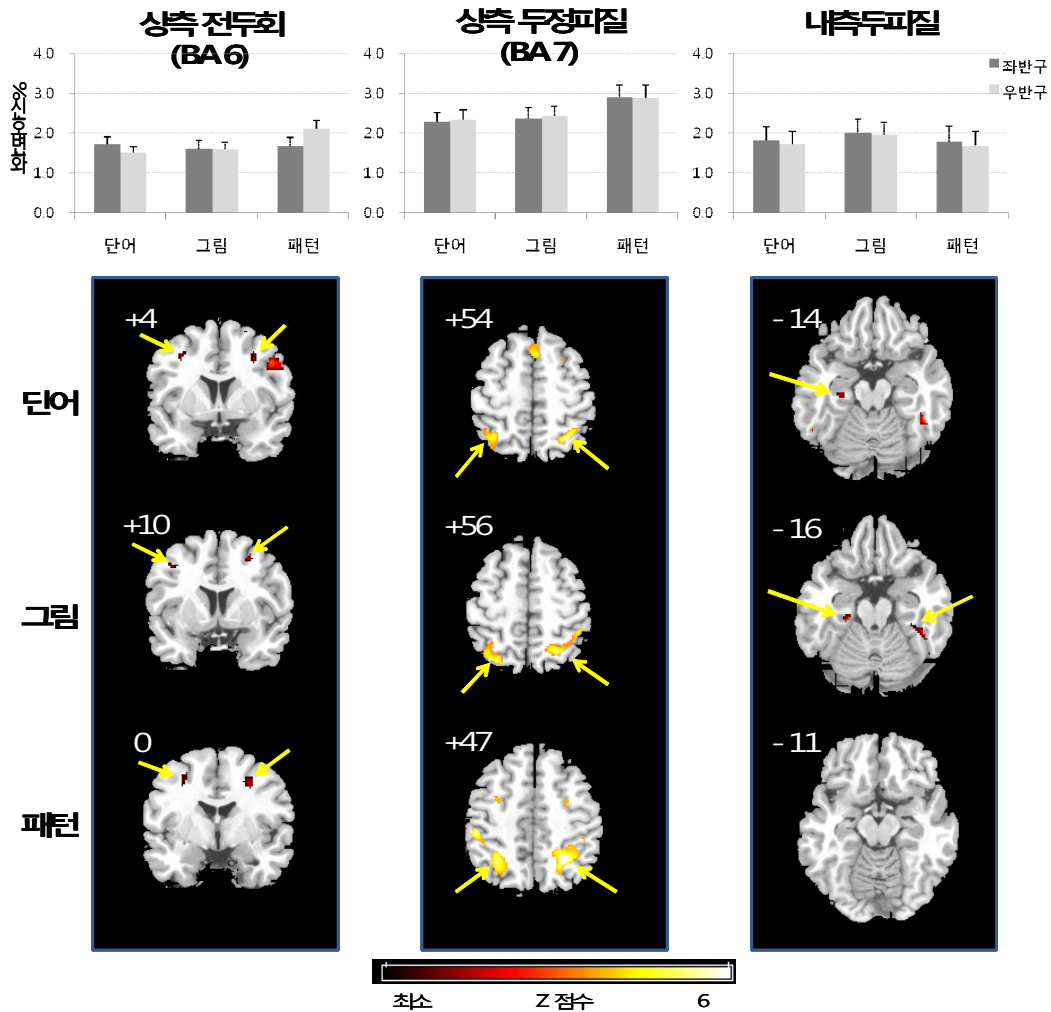


그림 3. ROI별 활성화 수준 및 활성화된 뇌 영역 (상단 그래프에서 오차 막대기는 평균의 표준오차임. 하단 그림에서 숫자는 왼쪽부터 오른쪽으로 각각 Talairach좌표의 y값, z값, y값임.)

였다. 이렇게 구한 각 학습자료조건의 평균 신호강도를 기저선조건의 평균 신호강도로 나눈 신호변화율의 집단값이 <그림 3>의 상단에 제시되었다. 각 참가자의 신호변화율을 가지고 전두영역, 두정영역, 내측두영역별로 학습자료×반구의 변량분석을 수행하였고 상호작용효과가 유의미한 경우 개별비교를 수행하였

다(Tukey 검증, $p < .05$). 그 결과 전두영역에서는 학습자료와 반구의 주효과는 유의미하지 않았고 학습자료와 반구간 상호작용효과는 유의미하였다 [$F(2, 26)=14.94, MS_e=.053, p < .0001$]. 개별비교 결과 반구 차이가 단어와 그림에서는 관찰되지 않았으며 추상패턴에서만 우반구에서 좌반구보다 더 큰 활성화가 관찰

되었다. 또한 추상패턴은 우반구에서 단어와 그림보다 더 큰 활성화를 보였으며 그밖의 다른 비교들은 유의미하지 않았다. 두정영역에서는 학습자료의 주효과가 유의미하였으며 $F(2, 26)=5.31$, $MS_e=.535$, $p<.05$, 반구의 주효과 및 학습자료×반구의 상호작용효과는 유의미하지 않았다. 개별비교 결과 추상패턴이 양반구에서 단어와 그림보다 더 큰 활성화를 보였고 단어와 그림간 차이는 유의미하지 않았다. 내측두영역에서는 학습자료와 반구의 주효과 및 상호작용효과가 모두 유의미하지 않았다.

학습자료별로 각 ROI에서 최대 활성화를 보인 좌표에서의 활성화 뇌 영역을 <그림 3>의 하단에 제시하였다. 이 좌표는 각 학습자료의 부호화 도중 기저선 조건에 비해 더 활성화된 뇌 영역을 분석한 결과(표 2)에 근거한 것이다. <표 2>를 보면 상측 전두회(BA 6)와 상측 두정피질(BA 7)의 경우 세 학습자료 모두 양반구에서 유의미한 활성화를 보였다. 하지만 내측두엽의 경우 단어는 좌반구에서, 그림은 양반구에서 유의미한 활성화를 보인 반면, 추상패턴은 양반구 모두에서 유의미한 활성화를 보이지 않았다($p<.0001$ uncorrected, cluster size ≥ 10). 그밖에 활성화를 보인 뇌 영역을 살펴보면, 단어의 경우 좌반구에서 상측 전두회(BA 9), 각회(angular gyrus) 및 설전부(precuneus; BA 39와 7), 하측 측두회(BA 37), 시각피질(BA 17)이, 우반구에서 하측 전두회(BA 9/46) 상측 전두회(BA 9/8), 각회(BA 39), 후측 대상회(cingulate gyrus; BA 31), 하측 측두회(BA 37/20), 시각피질(BA 18/19)이, 양반구에서 상측 전두회(BA 8)가 유의미한 활성화를 보였다.

그림의 경우 좌반구에서 상측 전두회(BA 8), 각회(BA 39) 시각피질(BA 18/19)이, 우반구에서 하측 전두회(BA 46), 하측 측두회(BA 37), 시각피질(BA 17/18/19)이 유의미한 활성화를 보였다. 추상패턴의 경우 좌반구의 후중심회(postcentral gyrus; BA 2), 중측과 하측 측두회(BA 37/39), 시각피질(BA 18/19)이, 우반구의 하측 두정피질(BA 40), 설전부(BA 7), 시각피질(BA 18/19)이 유의미한 활성화를 보였다.

평균 신호변화율 분석 결과(그림 3의 상단) 추상패턴이 상측 전두회에서 반구 차이를 보인 것을 제외하고는 전반적으로 반구 차이가 관찰되지 않았는데, 이러한 결과는 분석한 신호강도가 특정 ROI에 국한되어 추출되었기 때문일 가능성이 있다. 본 연구에서 수행한 ROI 신호변화율 분석은 특정 뇌 구조물 전체의 신호강도를 조사한 구조적 ROI 분석이 아니라, 특정 인지기능과 관련하여 활성화를 보인 뇌 영역에 국한하여 신호강도를 조사한 기능적 ROI 분석이었다. 즉 [전체 학습자료-기저선]의 집단 분석에 근거하여 ROI를 선정하고, 이렇게 선정한 ROI를 중심으로 일정 범위내의 영역에서 각 참가자별로 최대 활성화를 보인 정점 중심 영역의 신호강도를 추출하였는데, 따라서 ROI 이외의 다른 영역에서는 반구 차이가 관찰될 가능성이 있다. 이러한 가능성을 뒷받침해주는 것이 [부호화조건-기저선조건] 분석 결과로서, 이 결과에서 특히 내측두영역의 경우 단어는 좌반구에서, 그림은 양반구에서 유의미한 활성화를 보임으로써 학습자료에 따라 상이한 반구 편측성을 보였다. 물론 이러한 결과가 특정 유의도 수준에 기인할 가능성을 배제할 수는 없는데, 보다 낮은 유의도

표 2. 기억 부호화 도중 유의미한 활성화를 보인 뇌 영역(학습자료-기저선) ($p < .0001$ uncorrected, cluster size ≥ 10)

	뇌 영역	z 값	Talairach 좌표			cluster 크기		
			x	y	z			
단어	좌반구	상측 전두회 (BA 6/9)	4.51	-34	10	40	34	
		상측 전두회 (BA 6)	4.41	-32	7	60	14	
		상측 전두회 (BA 9)	4.36	-42	31	33	16	
		각회/설전부 (BA 39/7)	4.91	-34	-55	34	256	
		상측/하측 두정피질 (BA 7/40)	4.70	-34	-54	52	198	
		하측 측두회 (BA 37)	4.57	-48	-49	-8	59	
		하측 측두회 (BA 37)	4.20	-44	-63	-7	28	
	해마	4.06	-26	-22	-14	39		
	시각피질 (BA 17)	3.99	-10	-95	3	12		
	우반구	하측 전두회 (BA 9/46)	4.82	53	13	27	216	
		상측 전두회 (BA 9)	4.13	38	17	38	61	
		상측 전두회 (BA 9/8)	3.93	30	29	32	24	
		상측 전두회 (BA 6)	4.19	30	13	58	36	
		상측 전두회 (BA 6)	4.01	32	4	40	24	
		상측/하측 두정피질 (BA 7/40)	5.06	30	-56	54	309	
		각회 (BA 39)	4.69	30	-55	34	111	
		후측 대상피질 (BA 31)	4.20	30	-59	20	33	
		하측 측두회 (BA 37/20)	4.89	50	-45	-10	202	
		시각피질 (BA 18/19)	4.80	44	-74	-8	23	
		양반구	상측 전두회 (BA 8)	4.54	2	20	49	129
좌반구			상측 전두회 (BA 8/6)	4.37	-12	25	43	45
		상측 두정피질/각회 (BA 7/39)	4.66	-32	-63	55	479	
	해마방회 (BA 35)	4.15	-22	-26	-14	31		
	시각피질 (BA 18)	4.72	-40	-82	1	15		
	시각피질 (BA 19)	4.19	-36	-70	7	21		
	우반구	하측 전두회 (BA 46)	4.16	40	26	19	39	
		상측 전두회 (BA 6)	3.85	26	10	46	22	
		상/하측 두정피질 (BA 7/40)	4.75	28	-55	56	460	
		하측 측두회 (BA 37)	4.20	44	-38	-13	49	
		해마방회 (BA 36)	3.84	32	-30	-19		
		시각피질 (BA 18)	4.33	30	-87	-21	21	
		시각피질 (BA 17)	4.33	24	-83	10	65	
		시각피질 (BA 19)	3.87	36	-73	11	15	
	패턴	좌반구	후중심회 (BA 2)	4.97	-50	-27	49	146
			상측 전두회 (BA 6)	3.82	-32	6	40	22
			상측 두정피질/설전부 (BA 7)	4.93	-30	-52	52	753
			중측/하측 측두회 (BA 37/39)	4.33	-46	-58	0	117
			시각피질 (BA 19/18)	4.84	-36	-72	5	79
시각피질 (BA 19)		4.07	-48	-79	13	11		
우반구		상측 전두회 (BA 6)	4.87	30	0	42	27	
		상/하측 두정피질/설전부 (BA 7/40)	5.07	28	-50	47	723	
		하측 두정피질 (BA 40)	4.02	46	-33	40	67	
		설전부 (BA 7)	3.96	26	-68	40	28	
		시각피질 (BA 19/18)	4.16	28	-87	10	64	
		시각피질 (BA 18/19)	4.05	46	-76	-1	29	

표 3. 기억 부호화 도중 학습자료들간 유의미한 활성화 차이를 보인 뇌 영역 ($p < .001$ uncorrected, cluster size ≥ 5 ; $*p > .005$ uncorrected, cluster size ≥ 10)

	뇌 영역	z 값	Talairach 좌표			cluster 크기
			x	y	z	
단어 > 그림	(없음)					
단어 > 패턴	좌반구 해마방회 (BA 36)	*2.88	-20	-32	-13	(13)
	시각피질 (BA 18)	3.42	-10	-92	16	33
	우반구 설부 (BA 17)	3.65	10	-95	3	20
	상측 측두회 (BA 22)	3.55	61	-51	19	11
	해마방회 (BA 34)	3.60	16	-3	-17	5
	해마	*2.89	30	-12	-16	(11)
	시각피질 (BA18)	3.43	6	-68	-7	47
그림 > 단어	좌반구 시각피질 (BA 19)	3.80	-34	-83	17	135
	시각피질 (BA 18)	3.73	-38	-83	1	8
	소뇌	3.73	-30	-44	-21	34
	우반구 해마	3.33	26	-35	-3	13
	시각피질 (BA 19/18)	3.54	32	-89	8	87
그림 > 패턴	좌반구 하측 두정피질 (BA 39)	4.36	-44	-64	42	34
	설전부 (BA 7)	3.31	-6	-74	37	6
	해마방회 (BA 35)	*3.12	-18	-24	-12	(53)
	시각피질 (BA18)	3.56	-10	-92	16	15
	피각	3.26	-22	3	15	7
	우반구 방추회 (BA20)	3.62	38	-38	-15	57
	해마방회 (BA 36)	3.55	28	-17	-25	19
	해마방회 (BA 30)	*2.89	20	-42	-8	(39)
	시각피질 (BA18/17)	3.83	8	-91	16	106
	좌반구 상측 두정피질 (BA 7)	*2.82	-24	-55	60	(90)
패턴 > 단어	상측 두정피질 (BA 40)	3.41	-30	-44	54	14
	시각피질 (BA 19)	3.47	-48	-68	3	27
	시각피질 (BA 18)	3.24	-34	-81	2	5
	우반구 상측 전두회 (BA 6)	*2.99	18	10	49	(213)
	상측 두정피질 (BA 7)	3.42	18	-46	58	59
	좌반구 중심후회 (BA 2)	3.49	-46	-27	40	57
패턴 > 그림	중심후회 (BA 40)	3.21	-38	-32	50	6
	우반구 상측 전두회 (BA 6)	3.95	26	-4	39	153
	상측 두정피질 (BA 40)	3.23	24	-42	50	6
	상측 두정피질 (BA 7)	3.21	20	-56	49	9

수준에서는 양반구 모두에서 활성화가 관찰될 수도 있기 때문이다.

기능적 ROI 분석의 이러한 제한점을 보완하기 위해 학습자료조건들을 직접 비교함으로써 기억 부호화 도중 학습자료들간 유의미한 활성화 차이를 보인 뇌 영역을 알아보고자 하였는데($p < .001$ uncorrected, cluster size ≥ 5), 그 결과가 <표 3>에 제시되었다. 여기서 특히 본 연구의 ROI 관련 영역에서 학습자료들간 활성화 차이가 임의적인 유의도 수준에 따라 달라질 가능성을 배제하기 위해 보다 낮은 유의도 수준에서 분석한 결과를 함께 고려하였다 ($p < .005$ uncorrected, cluster size ≥ 10). 이 결과는 ROI를 중심으로 다음과 같이 요약될 수 있다 (유의도 수준을 표시하지 않은 것은 $p < .001$ 임). 단어는 그림에 비해 어느 영역에서도 더 큰 활성화를 보이지 않았으며, 추상패턴에 비해서는 좌반구 해마방회(parahippocampal gyrus; $p < .005$)와 우반구 해마방회 그리고 우반구 해마($p < .005$)에서 더 큰 활성화를 보였다. 그림

은 단어에 비해 우반구 해마에서 더 큰 활성화를 보였으며, 추상패턴에 비해서는 좌반구 해마방회($p < .005$)와 우반구 해마방회에서 더 큰 활성화를 보였다. 추상패턴은 단어에 비해 우반구 상측 전두회($p < .005$), 우반구 상측 두정피질과 좌반구 상측 두정피질($p < .005$)에서 더 큰 활성화를 보였으며, 그림에 비해서는 우반구 상측 전두회와 우반구 상측 두정피질에서 더 큰 활성화를 보였다.

논 의

본 연구에서는 의도적인 기억 부호화와 관련된 신경기전이 학습자료에 따라 어떻게 다른지 알아보고자 하였다. 이를 위해 심상화가 가능한 구체어(언어자료), 언어화가 가능한 대상 그림(비언어자료), 그리고 언어화가 불가능한 추상패턴(비언어자료)을 사용하여 이러한 학습자료의 특성이 기억 부호화 도중의 뇌 활성화 패턴에 미치는 영향을 규명하였다. 이를

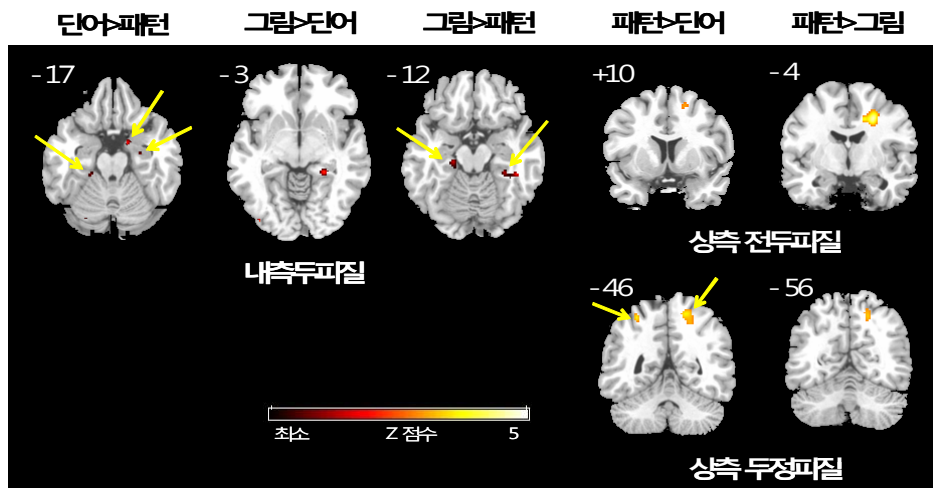


그림 4. 기억 부호화 도중 학습자료들간 활성화 차이를 보인 주요 뇌 영역

위해 부호화단계에서 의도학습을 하도록 한 후 인출단계에서 재인판단을 요구하고서, 사건 유관 fMRI 패러다임을 사용하여 부호화 도중 활성화되는 뇌 영역을 조사하였다. 전두피질, 두정피질, 내측두피질의 세 영역에서 각각 선정된 ROI에서 신호변화율을 분석하고 학습자료간 차이를 보이는 뇌 영역을 규명하여, 학습자료들에 따른 뇌 활성화패턴의 차이 특히 반구 편측성을 비교 분석하였다.

본 연구에서 사용한 비언어적 학습자료 가운데 대상 그림은 언어화가 가능한 반면 추상패턴은 언어화가 불가능한 자료이다. 기존의 여러 연구들에서는 언어화 가능성과 관련된 비언어적 자료로서 유명한 얼굴과 낯선 얼굴을 사용하였는데, 전자는 후자와 달리 언어화가 가능한 자극으로 간주되었다. 그러나 유명한 얼굴과 낯선 얼굴의 비교를 통해 외측 전두피질 영역에서 편측성을 확인하지 못한 연구들(Gorno-Tempini 등, 1998; Simons 등, 2001), 낯선 얼굴에서 좌반구 편측성을 보고한 연구들(Grady 등, 1995; Haxby 등, 1996; Casasanto 등, 2001)이 있었는데, 이는 얼굴자극의 경우 비록 낯선 얼굴이라 할지라도 언어적 부호화 전략을 사용할 가능성이 있기 때문이다(Kelley 등, 1998). 이러한 문제를 고려하여 본 연구에서는 언어화가 가능한 대상 그림과 불가능한 추상패턴을 사용 비교하였다.

재인판단검사 결과 적중률에서 오경보율을 뺀 측정치에 있어 그림, 단어, 추상패턴 순으로 우수하였는데, 그림이 단어보다 더 우수한 기억 수행을 보임으로써 그림우월효과가 확인되었다.

뇌 영상 분석에서, 먼저 학습자료를 구분하

지 않고 기저선 조건에 비해 모든 학습자료의 부호화 도중 활성화된 뇌 영역을 조사하였고, 이를 바탕으로 ROI를 전두피질, 두정피질, 내측두피질의 양반구 각각에서 하나씩 선정하였다: 상측 전두회(BA 6), 상측 두정피질(BA 7), 해마. 각 참가자마다 ROI의 평균 신호강도를 학습자료별로 구하여 다시 기저선 대비 신호변화율을 계산 분석한 결과, 상측 전두회에서 추상패턴의 경우만 우반구에서 좌반구보다 더 큰 활성화가 관찰되었고, 단어와 그림의 경우에는 반구 차이가 관찰되지 않았으며, 추상패턴은 우반구에서 단어와 그림보다 더 큰 활성화를 보였다. 상측 두정피질에서는 추상패턴이 단어와 그림보다 더 큰 활성화를 보였으며 단어와 그림은 서로 차이가 없었고, 반구 차이는 모든 학습자료에서 관찰되지 않았다. 내측두영역에서는 학습자료간 차이나 반구 차이가 모두 관찰되지 않았다.

ROI 신호변화율 분석 결과 단어와 그림의 경우 어느 ROI 영역에서도 반구 차이가 관찰되지 않았는데, 이는 본 연구에서 사용된 단어자료가 심상 형성이 용이한 구체어이며 그림자료 역시 언어적 명명이 용이한 자극이기 때문으로 보인다. 언어화 가설에 따르면 심상화가 용이한 언어자료는 심상부호를 내적으로 생성할 수 있기 때문에 비언어자료와 유사하게 우반구의 활성화를 일으킬 수 있다(Casasanto 등, 2001). 또한 비언어자료라 할지라도 명명 가능한 자료의 경우에는 언어자료와 유사하게 좌반구의 활성화를 일으킬 수 있다(Kelley 등, 1998). 반면 추상패턴의 경우 상측 전두영역에서 반구 차이를 보였는데, 이는 추상패턴이 명명 불가능한 비언어자료인데 기

인한 것으로 보인다(Golby 등, 2001). 이러한 ROI 신호변화율 분석 결과는 전반적으로 심상화 가설과 언어화 가설에 부합되는 결과로서, 자료-특수성 가설보다는 부호-특수성 가설을 더 지지하는 결과라 하겠다.

신호변화율 분석 결과 상측 전두회(BA 6)의 경우 단어와 그림은 양반구 모두에서 활성화 수준상 차이가 없었는데, 이는 단어와 그림 자극을 비교한 기존 연구와는 상이한 결과이다. Golby 등(2001)은 이 영역에서 명명 가능한 그림자극의 부호화보다 단어의 부호화 도중에 더 큰 좌반구 편측성을 관찰하였다. Golby 등(2001)의 연구에서는 단어자료로서 구체어와 추상어를 혼합하여 사용하였고 단어와 그림의 차이를 직접 비교하지 않았기 때문에 구체어만을 사용하여 그림과 직접 비교(나중에 기술함)한 본 연구와는 학습자료의 특성과 비교 방법에 있어 뚜렷한 차이가 있다. 구체어는 심상 형성이 용이한 반면 그림은 명명이 용이하기 때문에, 두 학습자료 모두 부호화 도중 양반구가 함께 활성화되어 반구 차이가 관찰되지 않은 것으로 짐작된다.

한편 상측 두정영역(BA 7)에서 추상패턴은 단어나 그림보다 더 큰 활성화를 보였다. 이 영역은 경계와 정향 단서에 의해 활성화되며(Fan 등, 2005), 주의와 도약안구운동과 관련되거나(Culham & Kanwisher, 2001), 시공간적 주의와 작업기억과 관련된 것으로 알려졌다(Goe & Dolan, 2001). 특히 이 영역은 전전두엽의 집행기능과 함께 시각적 양상에 특수한 주의 체계의 역할을 하는 것으로 짐작된다(Osaka 등, 2004). 이처럼 상측 두정영역과 주의기능 간 관련성으로 미루어 볼 때, 추상패턴은 그

신기성 때문에 단어나 그림에 비해 더 많은 주의를 끌고 상측 두정영역의 활성화를 더 크게 유발한 것으로 짐작된다.

하지만 ROI 신호변화율 분석 결과 내측두영역에서는 학습자료간 차이가 관찰되지 않았는데, 이는 재인판단 수행상 관찰된 학습자료간 차이로 미루어 볼 때 예상하기 힘든 결과이다. 해마나 해마방회를 포함한 내측두피질의 활성화가 성공적 부호화와 관련되어 있음이 이미 여러 연구들에 의해 밝혀졌다(Wagner, Schacter 등, 1998; Brewer 등, 1998). ROI 분석에서 학습자료간 차이나 반구 차이를 밝히지 못한 것은 분석한 신호변화율이 특정 ROI에 국한되어 추출되었기 때문일 수 있다. 본 연구에서는 기능적 ROI 분석을 사용하였는데, 이는 특정 인지기능과 관련된 뇌 영역의 활성화 수준을 밝히는 데에는 적합하지만 특정 뇌 영역 전반의 활성화 수준을 밝힐 수 없다는 한계를 갖고 있다. 따라서 본 연구에서 채택한 ROI 이외의 다른 뇌 영역에서는 반구 차이가 존재할 가능성이 여전히 남아있다. 이러한 가능성을 뒷받침해주는 것이 각 학습자료조건과 기저선간의 대비분석 결과이다. 특히 내측두영역에서 대비 분석결과가 ROI 신호변화율 분석결과와 상이하었는데, ROI 신호변화율 분석에서는 모든 학습자료에서 반구 차이가 관찰되지 않은 반면, 기저선 대비 분석에서는 일부 반구 차이가 관찰되었다. 즉 단어의 경우에는 좌반구에서만 활성화가 관찰된 반면 그림의 경우에는 양반구에서 활성화가 관찰되었고, 추상패턴의 경우에는 어느 반구에서도 활성화가 관찰되지 않았다. 이러한 기저선 대비 결과는 재인 수행에 있어 그림>단어>추상패턴의 순으로 수

행상 차이가 관찰된 결과와 대체로 나란한 것으로 볼 수 있다.

본 연구에서 기능적 ROI 분석의 제한점을 보완할 수 있는 분석 결과가 학습자료조건들을 서로 직접 대비시켜 분석한 결과이다. 기억 부호화 도중 학습자료들간 유의미한 활성화 차이를 보인 뇌 영역을 ROI 중심으로 요약하면 다음과 같다. 상측 전두회(BA 6)의 경우 단어와 그림은 양반구 모두에서 차이가 없었으며 추상패턴은 단어와 그림 모두에 비해 우반구에서 더 큰 활성화를 보였다(우반구, 추상패턴>그림=단어). 상측 두정피질(BA 7)의 경우 추상패턴은 단어에 비해서는 양반구에서 그리고 그림에 비해서는 우반구에서 더 큰 활성화를 보였다(좌반구, 추상패턴>단어; 우반구, 추상패턴>그림=단어). 내측두피질(해마 또는 해마방회)의 경우, 그림은 단어에 비해 우반구에서, 추상패턴에 비해 양반구에서 더 큰 활성화를 보였고, 단어는 추상패턴에 비해 양반구에서 더 큰 활성화를 보였다(좌반구, 그림=단어>패턴; 우반구, 그림>단어>패턴).

학습자료에 따른 반구 편측성과 관련하여 전두영역과 두정영역에서 학습자료조건간 대비분석 결과는 ROI 신호변화율 분석결과와 대체로 유사하였는데, 예외적으로 두정영역에서 추상패턴이 그림보다 신호변화율 분석에 따르면 양반구 모두에서 더 큰 활성화를 보였지만 대비 분석에 따르면 우반구에서만 더 큰 활성화를 보였다. 하지만 내측두영역에서는 학습자료조건간 대비 분석결과가 ROI 신호변화율 분석결과와 매우 상이하였는데, 후자에서는 학습자료간 차이와 반구 차이가 관찰되지 않았지만 전자에서는 그렇지 않았다. 즉 학습자

료조건간 대비에 따르면 단어는 추상패턴에 비해 양반구에서, 그림은 단어에 비해 우반구, 추상패턴에 비해 양반구에서 더 큰 활성화를 보였다. 두 분석 결과가 상이하게 관찰된 이유로서, 학습자료대비간 분석에서 관찰된 활성화 차이가 비교적 작은 voxel에서 나타난 점 ($p < .001$ 유의도 수준의 경우), 최대 활성화된 좌표 위치가 대비마다 상이했던 점, 그리고 임의적 유의도 수준의 적용 결과가 실무울적인 활성화 여부로 해석될 수 있는 점 등을 들 수 있다. 그밖에 뇌 신경영상방법의 민감성 문제를 짐작해볼 수 있는데, 특히 내측두엽의 전측 영역은 fMRI의 대자율 인공물(magnetic susceptibility artefact)에 취약하여 신호대 잡음비(signal-to-noise ratio)가 낮은 것으로 알려져 있고(Ojemann 등, 1997; Strange 등, 2002), 이 때문에 이 영역의 활성화를 분석하는데 흔히 비교적 덜 엄격한 유의도 수준(예, $p > .005$ 또는 $p > .002$ 수준)을 사용하기도 한다(예, Powell 등, 2005; Kelley 등, 1998). 기억 부호화에서 학습자료의 효과를 다룬 여러 fMRI 연구들이 주로 ROI 신호변화율 분석 결과만을 보고하였고 학습자료간 직접 대비를 보고하지 않았는데(예, Kelley 등, 1998; Powell 등, 2005), 이 때문에 본 연구에서 관찰된 상충된 분석결과의 원인을 추론할 수 있는 선행 연구들을 찾기 어렵다.

본 연구의 제한점으로서 다음 사항들을 언급할 수 있다. 첫째, 본 연구의 event-related fMRI 설계에서는 신호탐지의 효율성을 높이기 위해 null event(응시점 제시)를 구획 내에서 무선적으로 삽입하는 방안을 사용하였다(Reber, 2002 참고). 그리고 본 실험과제가 의도학습패러다임이라는 점을 감안하여 null event 조건이

아니라 의도학습 시작 전의 휴식조건을 기저선 조건으로 삼았는데(16초간 기저선 조건의 베타값을 참가자별로 추출하여 검토한 결과 안정적 추세를 확인하였음), null event 조건을 기저선으로 삼지 않은 이유는 앞선 시행들에서 제시된 자극들에 대한 압기 처리가 null event 조건에서도 지속되고 있을 가능성이 있기 때문이다. 하지만 이러한 event-related fMRI 설계가 최적의 설계가 아닐 가능성이 있다. 둘째, 본 연구에서는 심상화가 용이한 구체어, 언어화가 용이한 대상 그림, 그리고 언어화가 어려운 추상패턴을 사용하였는데, 추후 심상화가 어려운 추상어를 포함시켜 비교할 필요가 있을 것이다. 셋째, 본 연구에서 fMRI 영상을 구한 1회 run의 총 소요시간은 560초로서 비교적 길었는데, 많은 fMRI 연구들이 혈류역동적 반응 특성을 고려하여 1회 run을 통상 3분 내지 4분 이내로 구성하였다. 하지만 10분 내외의 run으로 fMRI 영상을 구하는 연구들도 최근 보고되었다(예, Casasanto 등(2001)에서 480초; Powell 등(2005)에서 840초 이상).

본 연구의 주요한 결과를 신호변화를 분석 결과와 학습자료의 대비 분석 결과를 바탕으로 다음과 같이 요약할 수 있다. 심상화가 가능한 단어(구체어)와 언어화가 가능한 그림은 상측 전두회(BA 6)와 상측 두정피질(BA 7) 각각의 좌반구와 우반구에서 동등한 정도의 활성화를 보였으며 이 영역들에서 두 학습자료 간 차이는 관찰되지 않았다. 반면 언어화가 불가능한 추상패턴은 상측 전두회에서 우반구 우세 활성화를 보였으며 단어와 그림에 비해 우반구에서 더 큰 활성화를 보였고, 상측 두정피질에서 반구 차이를 보이지 않았으며 단

어와 그림보다 더 큰 활성화를 보였다. 한편 내측두피질의 경우 신호변화를 분석 결과에서는 세 학습자료 모두 반구 편측성을 보이지 않았지만, 학습자료간 대비 분석 결과에서는 단어와 그림은 추상패턴보다 양반구에서, 그림은 단어보다 우반구에서 더 큰 활성화를 보였다. 전체적으로 볼 때 심상화가 가능한 단어와 언어화가 가능한 그림은 전두영역과 두정영역에서 유사한 활성화패턴을 보였으며 언어화가 불가능한 추상패턴에 비해 전두영역, 두정영역, 그리고 내측두영역 모두에서 공통적으로 상이한 활성화패턴을 보였다. 이러한 결과는 전반적으로 심상화 가설과 언어화 가설에 부합되며, 자료-특수성 가설보다 부호-특수성 가설을 더 지지하는 결과라고 보인다. 결국, 본 연구에서는 기억 부호화의 신경기전이 학습자료에 따라 상이함을 밝히고 이러한 결과를 자료-특수성보다는 부호-특수성에 부합되는 것으로 해석하였다.

참고문헌

- Addis, D. R., & McAndrews, M. P. (2006). Prefrontal and hippocampal contributions to the generation and binding of semantic associations during successful encoding. *NeuroImage*, 33, 1194 - 1206.
- Brewer, J. B., Zhao, Z., Desmond, J. E., Glover, G. H., & Gabrieli, J. D. E. (1998). Making memories: Brain activity that predicts how well visual experience will be remembered. *Science*, 281, 1185-1187.
- Buckner, R. L., Kelley, W. M., & Petersen, S. E.

- (1999). Frontal cortex contributes to human memory formation. *Nature Neuroscience*, 2, 311-314.
- Cameron, K. A., Yashar, S., Wilson, C. L., & Fried, I. (2001). Human hippocampal neurons predict how well word pairs will be remembered. *Neuron*, 30, 289-298.
- Casasanto, D., Kounios, J., Roc, A., Mintzer, D., Maldjian, J., & Detre, J. (2001). Hemispheric effects of concreteness during verbal episodic memory encoding. *Neuroimage*, 13, S644.
- Culham, J. C., Kanwisher, N. G. (2001). Neuroimaging of cognitive functions in human parietal cortex. *Current Opinion in Neurobiology*, 11, 157-163.
- Davis, K. D., Taylor, K. S., Hutchison, W. D., Dostrovsky, J. O., McAndrews, M. P., Richter, E. O., & Lozano, A. M. (2005). Human Anterior Cingulate Cortex Neurons Encode Cognitive and Emotional Demands. *Journal of Neuroscience*, 25, 8402-8406.
- Dolan, R. J., & Fletcher, P. C. (1997). Dissociating prefrontal and hippocampal function in episodic memory encoding. *Nature*, 388, 582-585.
- Fan, J., Bruce, T., McCandliss, D., Fossella, J., Flombaum, J. I., Posner, M. I. (2005). The activation of attentional networks. *NeuroImage*, 26, 471-479.
- Goel, V., & Dolan, R. J., (2001). Functional neuroanatomy of three-term relational reasoning. *Neuropsychologia* 39, 901-909.
- Golby, A. J., Poldrack, R. A., Brewer, J. B., Spencer, D., Desmond, J. E., Aron, A. P., & Gabrieli, J. D. (2001). Material-specific lateralization in the medial temporal lobe and prefrontal cortex during memory encoding. *Brain*, 124, 1841-1854.
- Goldman-Rakic, P. (2000). Localization of function all over again. *Neuroimage*, 11, 451-457.
- Gorno-Tempini, M. L., Price, C. J., Josephs, O., Vandenberghe, R., Cappa, S. F., Kapur, N., Frackowiak, R. S., & Tempini, M. L. (1998). The neural systems sustaining face and proper-name processing. *Brain*, 121, 2103-2118.
- Grady, C. L., McIntosh, A. R., Horwitz, B., Maisog, J. M., Ungerleider, L. G., Mentis, M. J., Pietrini, P., Schapiro, M. B., & Haxby, J. V. (1995). Age-related reductions in human recognition memory due to impaired encoding. *Science*, 269, 218-221.
- Grady, C. L., McIntosh, A. R., Rajah, M. N., & Craik, F. I. M. (1998). Neural correlates of the episodic encoding of pictures and words. *Proceedings of the National Academy of Science USA*, 95, 2703-2708.
- Haxby, J. V., Ungerleider, L. G., Horwitz, B., Maisog, J. M., Rapoport, S. I., & Grady, C. L. (1996). Face encoding and recognition in the human brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 93, 922-927.
- Hunkin, N. M., Mayes, A. R., Gregory, L. J., Nicholas, A. K., Nunn, J. A., Brammer, M.

- J., Bullmore, E. T., & Williams, S. C. R. (2002). Novelty-related activation within the medial temporal lobes. *Neuropsychologia*, *40*, 1456-1464.
- Kelley, W. M., Miezin, F. M., McDermott, K. B., Buckner, R. L., Raichle, M. E., Cohen, N. J., Ollinger, J. M., Akbudak, E., Conturo, T. E., Snyder, A.Z., & Petersen, S. E. (1998). Hemispheric specialization in human dorsal frontal cortex and medial temporal lobe for verbal and non verbal memory encoding. *Neuron*, *20*, 927-936.
- Kelley, W. M., Ojemann, J. G., Wetzell, R. D., Derdeyn, C. P., Moran, C. J., Cross, D. T., Dowling, J. L., Miller, J. W., & Petersen, S. E. (2002). Wada testing reveals frontal lateralization for the memorization of words and faces. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *14*, 116-125.
- Kirchhoff, B. A., Wagner, A. D., Maril, A., & Stern, C. E. (2000). Prefrontal-temporal circuitry for episodic encoding and subsequent memory. *Journal of Neuroscience*, *20*, 6173-6180.
- Kohler, S., Moscovitch, M., Winocur, G., & McIntosh, A. R. (2000). Episodic encoding and recognition of pictures and words: role of the human medial temporal lobes. *Acta Psychologica*, *105*, 159-179.
- Kopelman, M. D., Stevens, T. G., Foli, S., & Grasby, P. (1998). PET activation of the medial temporal lobe in learning. *Brain*, *121*, 875-887.
- McDermott, K. B., Buckner, R. L., Petersen, S. E., Kelley, W. M., & Sanders, A. L. (1999). Set- and code-specific activation in frontal cortex: an fMRI study of encoding and retrieval of faces and words. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *11*, 631-640.
- Milner, B. (1968). Visual recognition and recall after right temporal lobe excision in man. *Neuropsychologia*, *6*, 191-209.
- Milner, B. (1974). Hemispheric specialization: scope and limits. In B. Milner (Ed.), *Hemispheric specialization and interaction*. Cambridge: MIT Press.
- Milner, B., & Petrides, M. (1984). Behavioral effects of frontal lobe lesions in man. *Trends in Neurosciences*, 403-407.
- Musen, G. & Treisman, A. (1990). Implicit and explicit memory for visual patterns. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *16*, 127-137.
- Nyberg, L., Cabeza, R., & Tulving, E. (1996). Pet studies of encoding and retrieval: the HERA model. *Psychonomic Bulletin of Review*, *3*, 135-148.
- Ojemann, G. A., & Dodrill, C. B. (1985). Verbal memory deficits after left temporal lobectomy for epilepsy. Mechanism and intraoperative prediction. *Journal of Neurosurgery*, *62*, 101-107.
- Osaka, N., Osaka, M., Kondo, H., Morishita, M., Fukuyama, H., & Shibasaki, H. (2004). The neural basis of executive function in working memory: an fMRI study based on individual

- differences. *NeuroImage*, 21, 623-631.
- Posner, M. I., & DiGirolamo, G. J. (1998). Executive attention: conflict, target detection, and cognitive control. In: Parasuraman, R. (Ed.), *The Attentive Brain*(pp. 401-423). Cambridge: MIT Press.
- Posner, M. I., & Petersen, S. E. (1990). The attention system of the human brain. *Annual Review of Neuroscience*, 13, 25-42.
- Powell, H. W. R., Koeppe, M. J., Symms, M. R., Boulby, P. A., Salek-Haddadi, A., Thompson, P. J., Duncan, J. S., & Richardson, M. P. (2005). Material-specific lateralization of memory encoding in the medial temporal lobe: Blocked versus event-related design. *Neuroimage*, 27, 231-239.
- Reber, P. J., Siwicz, R. M., Gitleman, D. R., Parrish, T. B., Mesulam, M., & Paller, K. A. (2002). Neural correlates of successful encoding identified using functional magnetic resonance imaging. *Journal of Neuroscience*, 22, 9541-9548.
- Schacter, D. L., Wagner, A. D. (1999). Medial temporal lobe activations in fMRI and PET studies of episodic encoding and retrieval. *Hippocampus*, 9, 7-24.
- Simons, J. S., Graham, K. S., Owen, A. M., Patterson, K., & Hodges, J. R. (2001). Perceptual and semantic components of memory for objects and faces: a pet study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 13, 430-443.
- Stern, C. E., Corkin, S., Gonzalez, R. G., Guimaraes, A. R., Baker, J. R., Jennings, P. J., Carr, C. A., Sugiura, R. M., Vedantham, V., & Rosen, B. R. (1996). The hippocampal formation participates in novel picture encoding: evidence from functional magnetic resonance imaging. *Proceedings of National Academy of Science of the United States of America*, 93, 8660-8665.
- Tulving, E., Kapur, S., Craik, F. I., Moscovitch, M., & Houle, S. (1994). Hemispheric encoding/retrieval asymmetry in episodic memory: positron emission tomography findings. [Review]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 91, 2016-2020.
- Tulving, E., Markowitsch, H. J., Kapur, S., Habib, R., & Houle, S. (1994b). Novelty encoding networks in the human brain: positron emission tomography data. *Neuroreport*, 5, 2525-2528.
- Wagner, A. D. (1999) Working memory contributions to human learning and remembering. *Neuron*, 22, 19-22.
- Wagner, A. D., Poldrack, R. A., Eldridge, L. L., Desmond, J. E., Glover, G. H., & Gabrieli, J. D. (1998). Material-specific lateralization of prefrontal activation during episodic encoding and retrieval. *Neuroreport*, 9, 3711-3717.
- Wagner, A. D., Schacter, D. L., Rotte, M., Koutstaal, W., Maril, A., Dale, A. M., Rosen, B. R., & Buckner, R. L. (1998). Building memories: remembering and

forgetting of verbal experiences as predicted
by brain activity. *Science*, 281, 1188-1191.

1 차원고접수 : 2008. 3. 5.
최종게재결정 : 2008. 8. 7.

Episodic Encoding Mechanism of Words, Pictures and Abstract Patterns: an event-related fMRI Study

Taejin Park

Sunhee Park

Junghee Kim

Department of Psychology, Chonnam National University

To investigate how the mechanisms of memory encoding were influenced by the verbalizability of nonverbal material and the imageability of verbal material, an event-related fMRI study was performed. Subjects were asked to intentionally memorize the mixtures of concrete words, object pictures, and abstract patterns and then perform recognition judgement test. Recognition scores revealed the superior accuracy for pictures and the worst accuracy for abstract patterns. Analyses of signal change ratio at the superior PFC(BA 6), superior parietal lobe(BA 7), and medial temporal lobe revealed right-lateralized frontal activation during abstract pattern encoding, no lateralized frontal activation during word and picture encoding, and higher right-frontal activation during abstract pattern encoding than word and picture encoding. No lateralized parietal activation during encoding was observed on all types of learning materials, and higher bilateral-parietal activation during abstract pattern encoding than during word and picture encoding was observed. No lateralized, nor differential MTL activation during encoding was observed on all types of learning materials. Analyses of contrast among learning materials revealed similar activation patterns at superior PFC and superior parietal lobe but different activation patterns at MTL, showing higher bilateral-MTL activation during word and picture encoding than during abstract pattern encoding as well as higher right-MTL activation during picture encoding than during word encoding. The overall bilateral activation patterns of words were similar to those of pictures, but activation patterns of words and pictures were different from those of abstract patterns. The data support the code-specificity rather than material-specificity hypothesis and indicate that the neural mechanisms of intentional memory encoding were dependent on the types of learning materials.

Key words : verbalizability, imageability, memory encoding, code-specificity, fMRI