

기능적 자기공명영상을 이용한 수리연산의 대뇌 활성화에 관한 연구

최대섭¹ · 유재욱¹ · 나동규² · 김삼수³ · 조재민¹ · 박의동¹ · 정성훈¹

목적 : 기능적 자기공명영상(fMRI)을 이용하여 수리연산 과제를 수행하는 동안에 활성화되는 뇌 영역을 알아보고자 하였다.

대상 및 방법 : 모두 오른손잡이인 6명의 정상 자원자를 대상으로 하였다. 1.5 T MR기기를 이용하여 EPI BOLD기법으로 fMRI영상을 얻었다. 실험과제의 특성에 따라 실험1과 실험2로 구분하여 시행하였다. 각 실험은 5번의 휴식기와 4번의 활성기로 구성되었으며, 1회의 휴식기와 대조기는 각각 30초였다. 실험1, 2 모두에서 활성기 자극과제로 연산식(예: $(4+5) \times 8 = 72$)을 보여주고 맞는지 틀리는지를 판단하게 하였고, 휴식기 대조과제로 실험1에서는 십자모양을 바라보고 있도록 하였으며, 실험2에서는 같거나 서로 다른 두 가지의 기호(예: ●, ■)를 보여주고 같은지 다른지 판단하도록 하여, 판단과정을 감산하였을 때 나타나는 활성화 영상이 실험1에서 나타난 결과와 어떠한 차이가 있는지 알아보려고 하였다. 영상후처리는 SPM 분석 프로그램을 사용하였고 활성화 신호의 유의수준은 $p < 0.00001$ 로 하였다.

결과 : 실험1에서 양측 하전두회, 전전두영역, 전운동영역, 보조운동영역 및 상두정소엽을 포함한 두정엽내 뇌구를 중심으로 대칭적인 활성화 신호가 나타났다. 실험2에서도 실험1과 동일한 부위에서 활성화 신호가 나타났으나 우반구 전두엽과 두정엽의 활성화는 실험1에 비해 작았으며, 그 정도는 전두엽에서 보다 뚜렷하게 작았다.

결론 : 수리연산과 연관된 대뇌 부위는 좌반구 하전두회와 전전두영역 및 양측 두정엽이며, 우반구 전두엽과 두정엽의 일부는 주의집중 및 판단과 관련이 있는 부위로 추정된다.

서 론

기능적 자기공명영상(functional MR imaging, fMRI)은 특정한 자극을 주거나 특정한 영역의 과제를 수행할 때 활성화되는 뇌영역을 규명하는 기능적 뇌지도화(functional brain mapping) 연구에 매우 유용한 비침습적인 도구의 하나이다. 1990년대 초 감각 및 운동영역의 연구를 시작으로 언어와 기억기능 등의 고등기능의 영상화에 이르기까지 매우 다양한 주제의 연구가 활발히 진행되고 있다.

인간의 고등기능 중의 하나인 수리연산과 관련된 대뇌의 활

성화에 관한 연구는 여러 연구자들에 의해 시행된 바 있다. 수리연산과 관련된 뇌기능의 생리적 지표를 밝히기 위한 최초의 연구는 Lennox (1)에 의하여 수행된 바 있다. 그는 휴식기와 비교해서 연산과제를 수행하는 동안에 경정맥의 혈류에서 산소 농도가 증가함을 발견하였다. Roland와 Friberg (2)는 ¹³³Xenon을 이용하여 피험자들로 하여금 제시된 숫자에서 계속하여 3만큼 감산하는 연산과제를 수행하는 동안 양측 전두엽과 두정엽의 뇌혈류가 증가함을 확인하였다. 최근에는 양전자방출 단층촬영(positron emission tomography, PET)이나 fMRI를 이용하여 수리연산과 관련된 뇌영역을 지도화 하기 위한 연구가 진행되고 있다. 전두엽만을 대상으로 한 Burbaud 등(3)

대한자기공명과학회지 9:16-23(2005)

¹경상대학교 의과대학 진단방사선과학교실, 경상대학교 건강과학연구원

²서울대학교 의과대학 방사선과학교실

³강원대학교 의과대학 방사선과학교실

접 수 : 2005년 2월 16일, 채 택 : 2005년 4월 20일

통신저자 : 유재욱, (660-702) 경남 진주시 철암동 90, 경상대학교병원 진단방사선과

Tel. 82-55-750-8818 Fax. 82-55-758-1568 E-mail: ryoojw@gaechuk.gsnu.ac.kr

의 fMRI 연구에서 피험자로 하여금 숫자를 연속하여 감산하도록 하였을 때, 오른손잡이는 좌측 전두엽이 활성화되었고, 왼손잡이의 경우는 양측 전두엽이 활성화되었다. 이러한 숫자 연산 과정 동안의 반구 편재화 양상은 언어처리 과정과 유사한 결과이다. fMRI를 이용하여 대뇌 전체 영역의 활성화를 확인한 Rueckert 등 (4)의 연구에서 자극과제로 계속하여 7만쯤 숫자를 감산하도록 하고, 대조과제로 1만쯤 숫자를 더해 가도록 하였을 때 대뇌 양반구의 전전두엽(prefrontal area), 전운동영역(premotor area), 두정엽 등의 부위에서 활성화 신호가 나타났다. 이들의 연구결과에서 수리연산은 대뇌의 여러 부위가 관여하는 매우 복잡한 과정임을 보여주고 있으며, 제시하는 자극의 종류나 영상기법의 차이에 따라 연구자들마다 다소 다른 결과들을 보고하고 있어 이에 관한 규명이 완전하지 않은 실정이다.

이에 저자들은 fMRI를 이용하여 수리연산 과정을 수행하는 동안에 활성화되는 뇌영역을 알아보고자 하였다.

대상 및 방법

1. 피험자

신경 및 정신과적 장애가 없는 6명의 정상 성인 자원자를 대상으로 하였으며 남자 2명 여자 4명이었다. 피험자들은 모두 대학에 재학 중인 학생들이었으며, 연령은 20세부터 26세까지 평균 23.4세였다. Oldfield (5)가 개발한 Edinburgh Inventory(EI) Handedness Scale을 이용하여 피험자들의 손잡이를 결정하였으며 모두 오른손 잡이로 결정되었다.

2. 실험방법

실험과제의 특성에 따라 실험 1과, 실험 2로 구분하여 진행하였다.

1) 실험 1

활성기 자극과제로 연산식(예: $(4+5) \times 8 = 72$, $18-10+9=16$, $4+3 \times 4=32$, $4+(45 \div 9)=9$, $6 \times (13-6)=42$, 등)을 보여주고 맞는지 틀리는지를 판단하게 하여, 수식이 맞을 경우 압착공(squeeze ball)을 눌러 신호하게 하였고, 휴식기 대조과제는 십자모양을 바라보고 있도록 하였다. 과제의 제시는 오버헤드 프로젝터를 이용하여 반투명 스크린에 투사하였고, 피험자들의 두부코일에 부착된 거울을 통하여 이를 보도록 하였다.

2) 실험 2

활성기 자극과제는 실험 1과 동일하게 하였고, 휴식기 대조과제는 같거나 서로 다른 두 가지의 기호(예: (●, ■), (◆, ■), (●, ●), (★, ▲), 등)를 보여주고 같은지 다른지 판단하도록 하여, 판단과정을 감산하였을 때 나타나는 활성화 영상이 실험 1에서 나타난 결과와 어떠한 차이가 있는지 알아보고자 하였다.

3. 영상획득방법

1.5 T 초전도 MR기기(GE medical system, Milwaukee, USA)를 이용하여 echo planar image(EPI) BOLD(blood oxygen level dependent) 기법으로 fMRI 영상을 얻었다 (TR/TE 3000/60 msec, flip angle 90°, matrix 64×64, FOV 24×24 cm). 영상은 매 3초마다, 전교련과 후교련을 연결한 AC-PC line을 기준으로 절편간격 없이 5mm 절편두께로 총 20절편의 횡단면 영상을 얻었다. 기능적 영상을 얻을 동안 5번의 휴식기와 4번의 활성기를 번갈아 가면서 시행하였고, 각각의 휴식기와 활성기에 절편 당 10회의 영상을 얻었으며 각 영상 획득 시간은 30초였다. EPI 영상이 평형기(equilibrium state)를 이루기 전의 높은 신호를 보정하기 위해 12초간의 모조영상(dummy scan)을 활성화 영상을 얻기 전에 추가로 얻었으며, 총 스캔 시간은 모조영상을 포함하여 282초가 소요되었다.

4. 데이터 처리

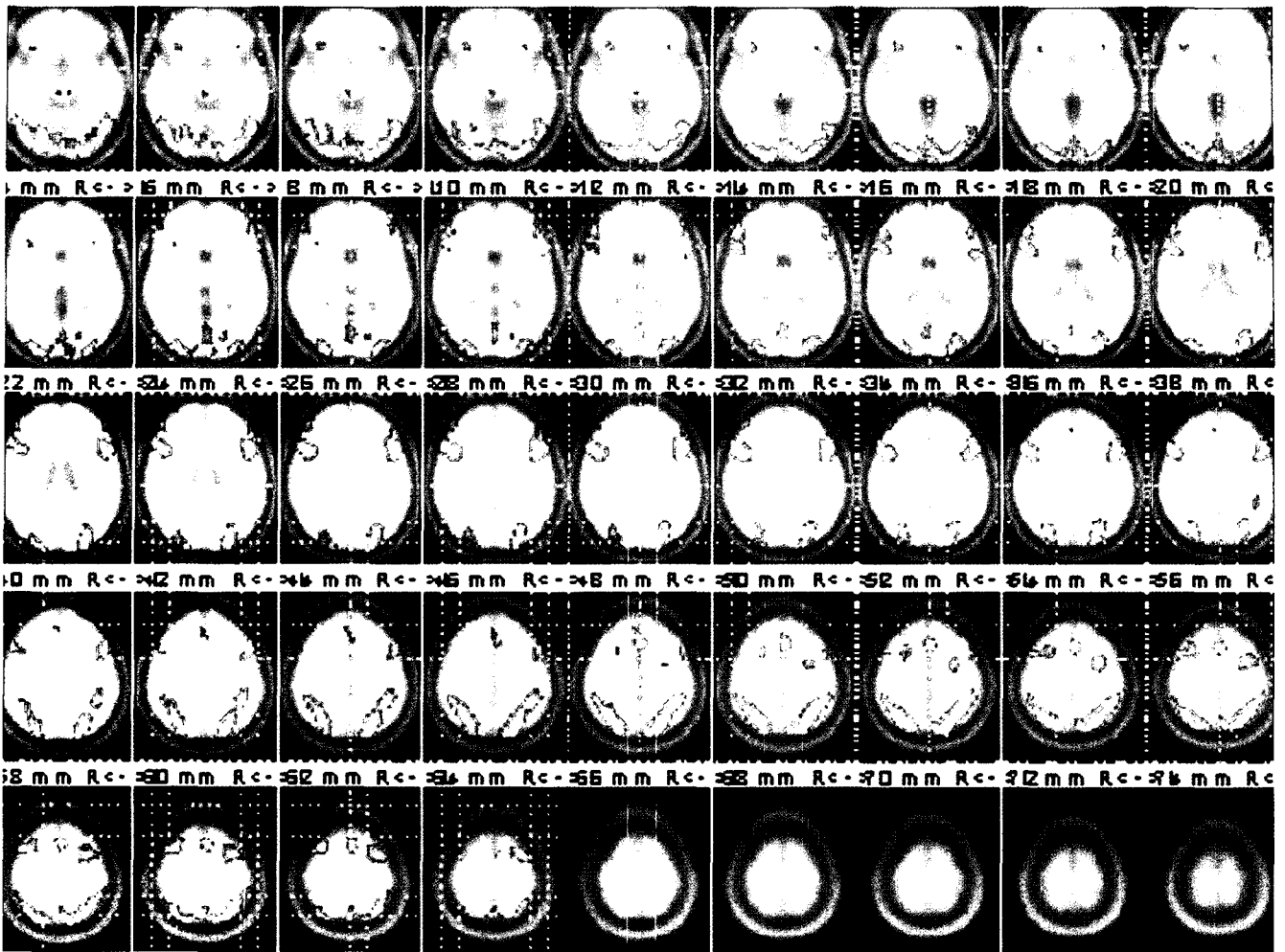
획득된 활성화 영상을 fMRI 분석 소프트웨어인 SPM99 (statistical parametric mapping version 99, The Wellcome Department of Cognitive Neurology, University College London, UK)을 이용하여 분석하였다. 첫 시리즈의 영상을 기준으로 스캔 과정 중의 움직임에 의한 오정렬 (misalignment)을 보정하였고(realignment), 각 피험자의 대뇌에 대한 전체적 표준화(global normalization)를 시행하였다. 신호 대 잡음 비를 높이고, 잡음을 제거하기 위하여 시간 및 공간에 대한 Gaussian filtering 및 high pass filtering을 시행하였다.

이렇게 준비된 각 피험자의 체적영상에 대한 통계분석은 실험 시 자극을 주었던 패턴(stimulation time pattern, 즉, box-car pattern)을 대상으로 일반 선형 회귀분석(general linear regression)을 수행하였고, 유의수준 $p < 0.001$ (uncorrected)을 가지고 t-검정을 수행하였다. 각 개별 피험자의 영상을 확인한 후, 공통적으로 유의한 활성화 영역을 확인하기 위한 집단분석을 시행하였다. 집단분석은 개별 피험자의 자극 조건에 대한 대조영상들(contrast images)을 원 자료로 하는 임의효과분석(random effect analysis)을 이용하였으며, 유의수준 $p < 0.00001$ (uncorrected)에서 활성화 영상을 만들었다. 최종 활성화 영상을 SPM99에 내장된 표준화된 2D 및 3D 영상에 중첩하여 fMRI 영상을 얻었다. fMRI 영상분석은 육안적인 판단을 기준으로 분석하였고, SPM99를 이용한 결과에서 나오는 Talairach 좌표 값을 참고하였다.

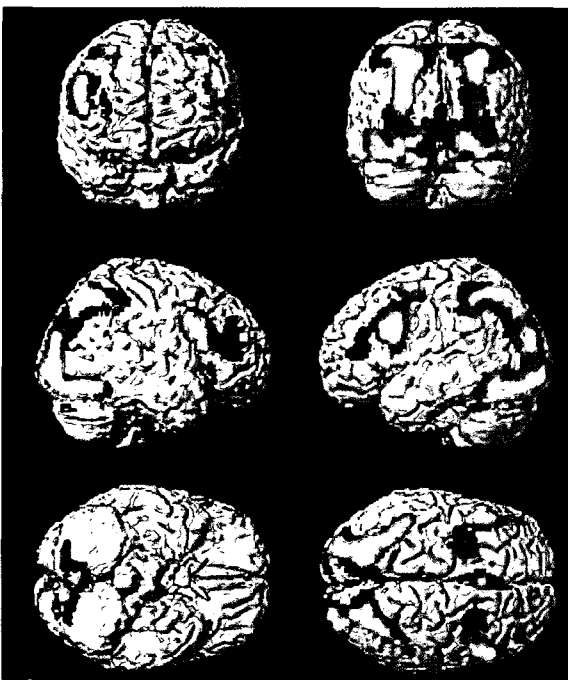
결 과

제시된 수식과 도형의 판단에 있어 피험자들의 정답율은 모두 85%이상이었다.

실험 1에서 연산과 관련된 활성화가 양측 전두엽, 두정엽, 후

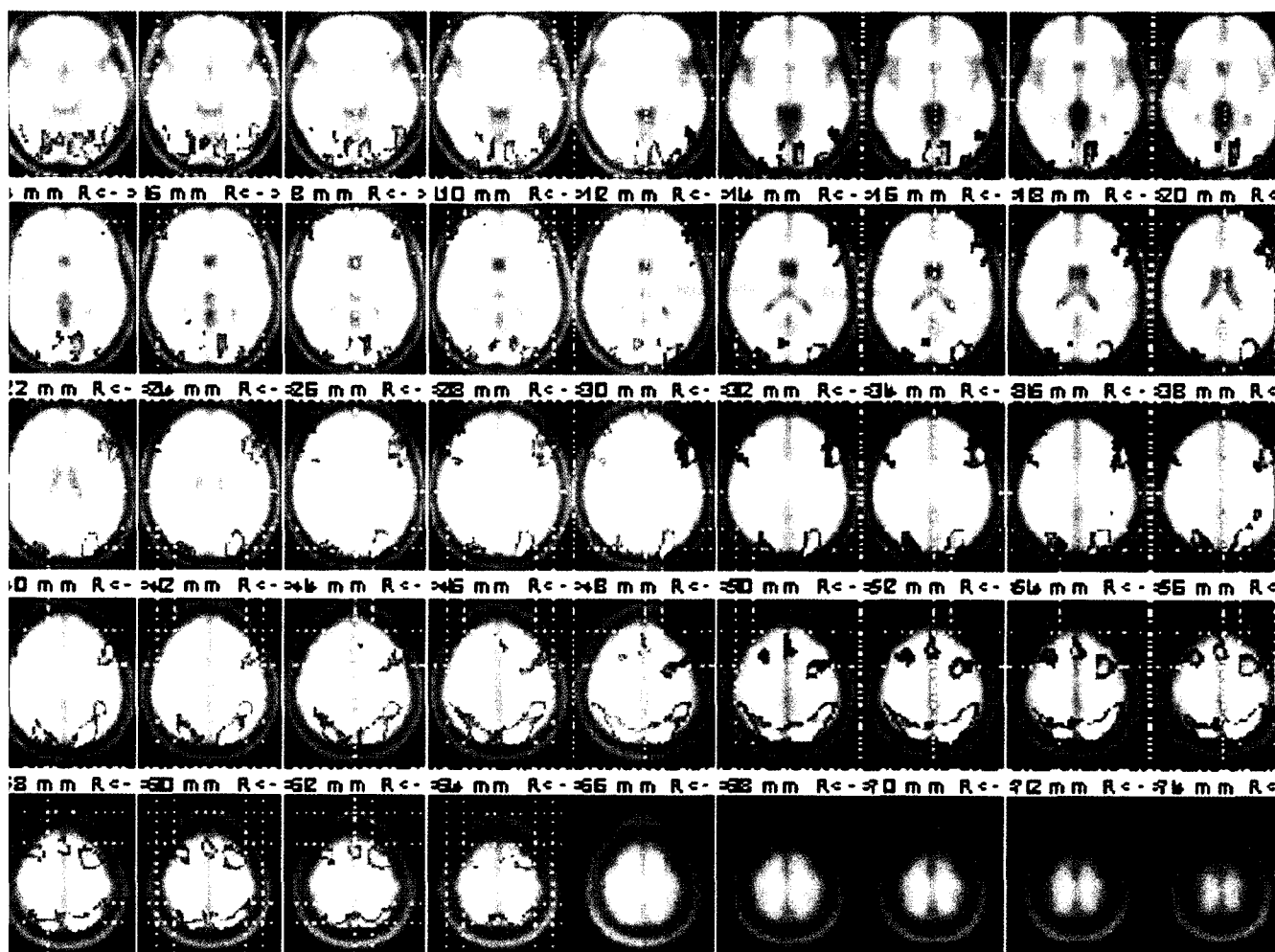


a

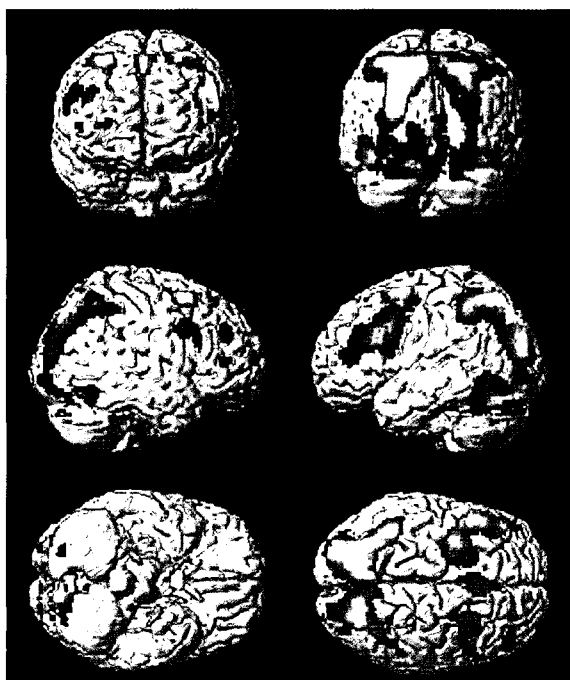


b

Fig. 1. Activated regions in experiment I. Serial axial (a) and 3D images (b) show bilateral symmetrical activated signals in the inferior frontal gyrus and prefrontal, premotor, and supplementary motor areas of both frontal lobes, the intraparietal sulcus including superior parietal lobule of both parietal lobes, and the primary and secondary visual cortices of both occipital lobes.



a



b

Fig. 2. Activated regions in experiment II. Serial axial (a) and 3D images (b) reveal bilateral activated signals in both frontal, parietal, and occipital lobes, which are the same areas shown on the experiment I. Compared with those of the experiment I, the activated signals of the right cerebral hemisphere are decreased.

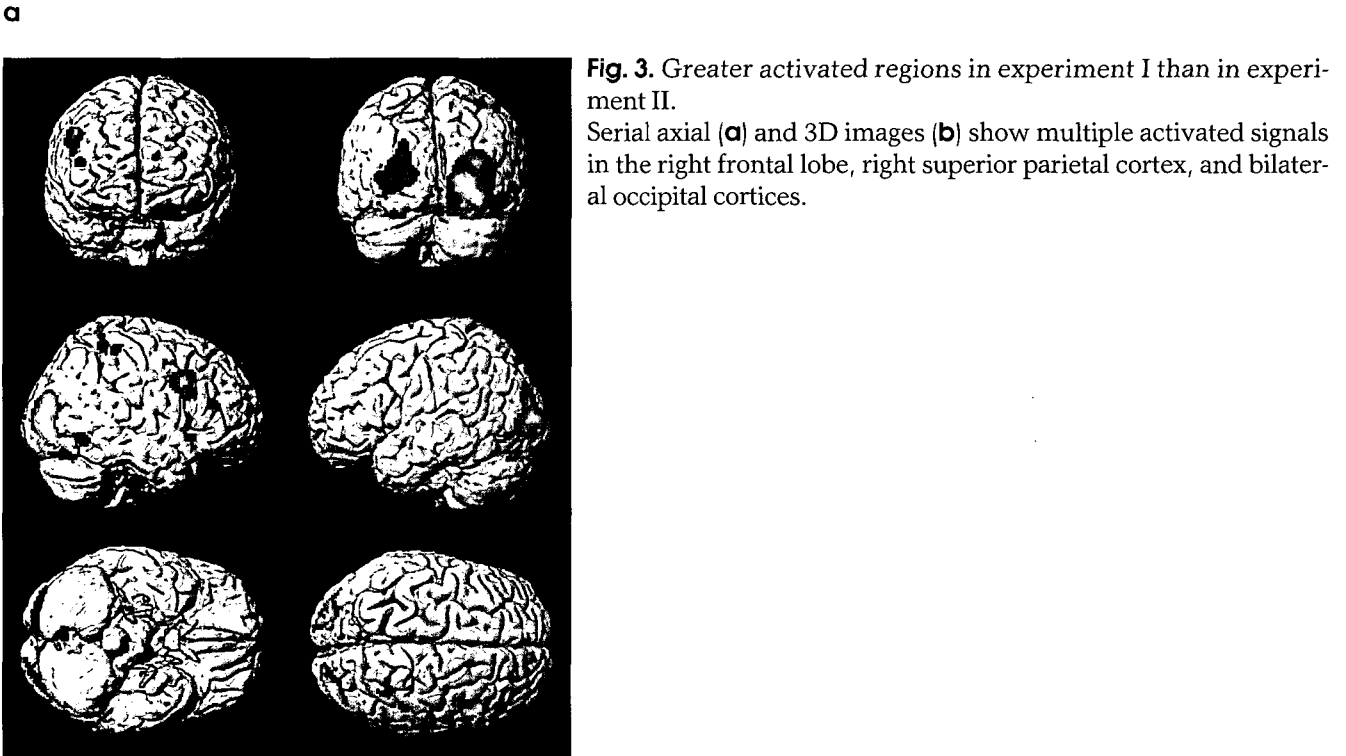
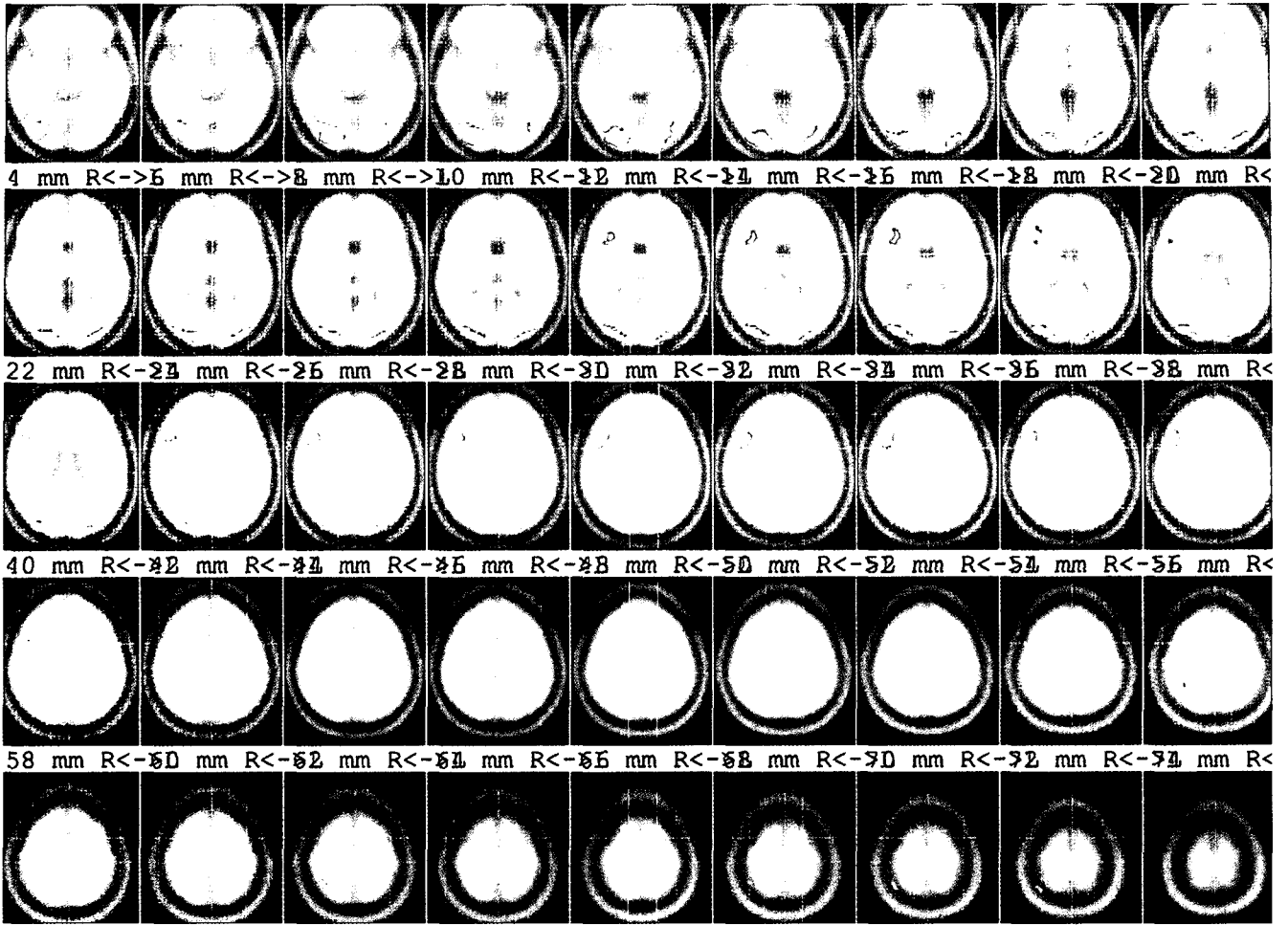


Fig. 3. Greater activated regions in experiment I than in experiment II. Serial axial (a) and 3D images (b) show multiple activated signals in the right frontal lobe, right superior parietal cortex, and bilateral occipital cortices.

두엽의 여러 부위에서 대칭적으로 나타났다 (Fig. 1). 전두엽의 경우 양측 하전두회(BA 44), 전전두영역(BA 9, 10, 46), 전운동영역(BA 6, 8) 및 보조운동영역(BA 6)에서 대칭적으로 활성화 신호가 나타났다. 두정엽의 경우 양측 두정엽내 뇌구(intraparietal sulcus)를 중심으로 상방의 상두정소엽(superior parietal lobule)을 포함하여 대칭적인 강한 활성화 신호를 보였고, 후두엽에서는 1, 2차 시각중추영역에 대칭적인 활성화 신호가 나타났다.

실험 2에서는 실험 1과 동일한 부위에서 활성화 신호가 나타났다. 좌반구의 활성화는 실험 1과 차이가 없었으나, 우반구 전두엽과 두정엽의 활성화는 실험 1에 비해 작았으며, 그 정도는 전두엽에서 보다 뚜렷하게 작았다 (Fig. 2).

실험 1과 실험 2에서 나타난 활성화 영역의 차이를 명확히 하기 위해 실험 1의 활성화 영역에서 실험 2의 활성화 영역을 감산하였을 때 우측 전두엽과 두정엽 및 양측 후두엽에서 활성화 신호가 나타났다 (Fig. 3).

고 찰

최근 PET와 MR기기의 개발에 힘입어 비침습적인 방법으로 수리연산을 포함한 인간의 인지기능을 담당하는 뇌중추를 규명하는 생체를 대상으로 한 연구가 가능하게 되었다. PET에 비하여 MR은 공간 분해능이 우수하고 인체에 방사성 동위원소나 조영제 등의 주입이 필요하지 않으며, 반복적인 검사가 가능하다는 장점이 있다.

fMRI의 원리는 BOLD(blood oxygen level dependent) 효과에 기반을 두고 있다. 특정 과제를 수행하는 동안 이를 관찰하는 대뇌의 활성화가 유도되고, 해당 부위의 국소적 뇌 혈류량이 증가하게 되며, 유입 산소량도 증가하게 된다. 혈류 증가에 따른 혈중 산소 유입량의 증가는 활성화된 뇌 조직이 실제로 필요로 하는 산소량을 능가하기 때문에 결국 뇌조직의 유출정맥내의 옥시헤모글로빈(oxyhemoglobin)의 농도는 증가하고 상대적으로 데옥시헤모글로빈(deoxyhemoglobin)의 농도는 감소하게 된다. 데옥시헤모글로빈은 상자성(paramagnetic) 물질로써 이의 감소는 T2강조영상이나 경사에코(gradient echo)기법의 T2*강조영상에서 신호강도의 증가를 가져온다. 그러나 이러한 신호강도의 증가는 매우 미미하기 때문에 자극과제를 여러 번 반복하여 수행하여야 하는 문제가 있다.

PET나 fMRI를 이용한 기존의 연구에 의하면 연구자들마다 다소의 차이는 있으나 전두엽과 두정엽에서 수리연산과 관련된 의미 있는 활성화가 보고 된 바 있으며, 본 연구에서도 이들의 결과와 일치하는 소견을 보였다. 활성화를 보인 전두엽 중 좌측 하전두회는 언어기능과 관련된 부위로 이는 수리연산이 언어와 밀접한 관계를 가진다는 것을 시사하는 소견이다. 영어와 러시아어를 함께 사용하는 이중화자(bilingual)를 대상으로 한 Dehaene 등의 연구(6)에 의하면 한 언어로 덧셈에 대한 교육과 연습을 시킨 후 평가하였을 때 해당 언어로 제시된 덧셈 식

을 해결하는 능력이 다른 언어로 된 것보다 유의하게 우수한 결과를 보여 수리연산이 언어와 밀접한 관계를 보인다는 결과를 확인하였다. 그러나 덧셈 문제를 제시하고 정답이 아닌 서로 다른 두 가지 수(하나는 정답에 근사한 수, 다른 하나는 정답과 많이 떨어진 수) 가운데 근사치를 선택하게 하는 어렵연산(approximate calculation) 과제의 경우에는 두 언어 간에 차이가 없었다. 이는 수리연산이 언어기능뿐만 아니라 다른 기능과도 관련이 있음을 시사하는 소견이다. 이들은 이를 규명하기 위하여 fMRI를 이용한 실험을 시행하였다. 덧셈 문제를 제시한 후 정답과 정답은 아니나 정답과 비슷한 두 가지 숫자를 제시하고 정답을 고르는 정확연산(exact calculation) 과제를 수행하게 하였을 때 언어기능과 관련된 좌측 하전두회에 강한 활성화가 유도되었고, 정답이 아닌 서로 다른 두 가지 수 가운데 근사치를 선택하게 하는 어렵연산 과제의 경우에는 양측 두정엽이 활성화 되었다. 이들은 이러한 연구결과를 바탕으로 수리연산 과정은 서로 다른 독립적인 두 가지 틀에 의해 이루어진다는 이중판형가설(dual format hypothesis)을 제기하였다. 그 중 하나는 언어와 관련된 판형(language-based format)으로 정확연산을 수행할 때 사용되는 것이고, 다른 하나는 시공간 표상(visuo-spatial representation)에 기초한 판형으로 수의 양적 개념과 관련하여 크기를 비교하거나 어렵연산 시에 활용되는 것이다. 환자들을 대상으로 한 임상연구에서도 이러한 가설을 뒷받침하는 결과들이 보고 되었다. 좌측 두정엽에 손상을 입은 환자들에서 숫자의 크기에 관한 개념은 상실하였지만(예를 들어 2와 4사이에 있는 수가 무엇인지 판단하거나, 9는 10과 5 중에서 어느 것과 더 가까이 있는지 결정하는 능력이 결여됨), 언어에 기반을 둔 곱셈표를 외우는 능력은 어느 정도 보존되어 있었다 (7-9). 반면, 좌반구 손상으로 인하여 실어증이 있었던 환자들에서 숫자의 기계적인 암기 능력을 활용하는 연산에는 장애가 있었지만, 서로 다른 두 숫자 간에 어느 것이 더 크고 작은지, 어느 숫자가 더 근접해 있는지와 같은 양적인 숫자 개념은 어느 정도 보존하고 있었다 (7). 특히 한 실어증 환자에서 2+2가 3인지 4인지 결정하지 못하면서도 9가 3보다 크다는 개략적인 개념은 갖고 있는 사례가 보고 되었다 (10). 이러한 손상환자 사례들은 숫자 처리 과정은 두 가지 상이한 경로로 구성되어 있음을 지지해 주고 있다.

fMRI를 이용한 뇌기능 연구에 있어 적절한 자극과제와 대조과제의 적용은 매우 중요하다. 평가하고자 하는 기능만을 선택적으로 자극하는 과제를 적용하는 것이 정확한 결과의 도출에 필수적이지만 과제의 특성상 그것이 불가능할 경우 적절한 대조과제를 적용하여 원하지 않는 요소들을 효과적으로 감산하는 것도 한 방법이다. 본 연구에서는 자극과제로 연산식을 보여주고 맞는지 틀리는지를 판단하게 하였다. 제시된 과제를 수행하는 과정에는 순수한 연산처리에 관계된 것뿐만 아니라 이를 수행하기 위한 주의를 집중하고 연산의 결과가 맞는지 틀리는지 판단하는 과정이 포함된 자극과제로 볼 수 있다. 실험 1에서는 대조과제로 십자모양을 바라보도록 하였다. 따라서 실험 1의 활성화

최대섭 외

영상에는 연산처리에 관계된 활성화 영역뿐만 아니라 주의집중과 판단과정이 포함된 결과이며, 이전의 다른 연구자들의 결과와 달리 언어기능과 관계된 하전두회 활성화가 좌측으로 편재화(lateralization) 되지 않았다. 실제로 실험 2에서 대조과제로 두 가지의 도형을 제시하고 같은지 다른지를 판단하게 하여, 활성화 영상에서 주의집중이나 판단과 관련된 요소를 제거하여 숫자연산에 관한 부분만 남도록 하였을 때, 실험 1에서 활성화된 영역에서 좌반구 전두엽과 두정엽의 활성화 정도는 변화가 없었지만, 하전두회를 포함한 우반구 전두엽의 활성화는 그 정도가 뚜렷하게 감소하였고, 두정엽의 활성화 정도도 약간 감소하였다. 따라서 우반구 전두엽과 두정엽의 일부는 주의집중이나 판단과정과 관련이 있는 영역으로 생각할 수 있으며, 이는 이전의 다른 연구자들의 결과에서 확인된 바 있다 (11, 12).

본 연구의 결과에서 다른 연구자들의 결과와 차이가 나는 점 중의 하나는 양측 두정엽의 활성화에 있어 두정엽내 뇌구를 중심으로 상방의 상두정소엽으로 편재된 활성화를 보였고, 하방의 각회(angular gyrus)나 상연회(supramarginal gyrus)를 포함한 하두정엽의 활성화가 보이지 않은 것이다. 하두정엽은 전통적으로 수리연산과 관련된 부위로 알려져 있으며 (13), fMRI를 이용한 이전의 연구에서도 대부분 활성화를 보인 부위이다 (4, 6, 14, 15). 이의 원인으로 실험에 사용된 자극과제의 차이를 생각해 볼 수 있다. Stanesco-Cosson 등의 fMRI 연구 (16)에서 자극과제로 1에서 5까지의 작은 수를 사용한 단순 덧셈연산을 하도록 하였을 때 양측 각회의 뚜렷한 활성화가 나타났으나, 6에서 9까지의 큰 수를 사용한 보다 어려운 덧셈연산을 하도록 하였을 때 양측 각회의 활성화가 뚜렷이 감소하였고, 양측 두정엽내 뇌구의 활성화는 증가함을 보고하였다. 본 연구에 사용된 자극과제의 경우 2단계의 계산이 요구되는, 이전의 다른 연구자들이 사용한 것과 비교하여 매우 어려운 과제로 볼 수 있으며, 다른 연구자들의 결과와 차이를 보인 원인 중의 하나로 생각할 수 있다.

또한 본 연구의 결과에서 다른 연구자들의 결과와 달리 양측 후두엽의 활성화가 관찰되었는데 이는 자극의 제시가 시각적인 방법으로 주어진 것에 기인한 것으로 보인다. 실험 1에서 자극과제는 3초에 한번씩 새로운 슬라이드를 보여주었고, 대조과제로 사용한 십자모양은 계속해서 동일한 것을 보여주었기 때문에 시각적 자극의 강도에 차이가 있었고 이 때문에 시각적 자극과 관련된 것이 활성화 영상에서 적절히 감산 되지 않았다. 실제로 실험 2에서 대조과제로 도형들을 자극과제와 동일한 시간 간격으로 제시하였을 때 양측 후두엽의 활성화가 실험 1과 비교하여 뚜렷이 감소하는 소견을 보여 이를 뒷받침하는 결과이라 하겠다.

결론

실험 1에서 수리연산과 관련된 대뇌의 활성화가 하전두회와 전전두영역을 포함한 양측 전두엽과 두정엽의 두정엽내 뇌구에

서 나타났다. 대조과제로 주의집중 및 판단과 관련된 요소를 추가한 실험 2에서는 좌반구의 활성화는 실험 1과 차이가 없었으나, 우반구 전두엽과 두정엽의 활성화는 실험 1에 비해 작았으며, 그 정도는 전두엽에서 보다 뚜렷하게 작았다. 따라서 수리연산과 연관된 대뇌 부위는 좌반구의 하전두회와 전전두영역 및 양측 두정엽이며, 이중 좌반구 하전두회는 언어영역과 동일한 부위이며, 실험 2에서 활성화가 감소된 우반구 전두엽과 두정엽의 일부는 연산과제를 수행하기 위한 주의집중 및 판단과 관련이 있는 부위로 추정된다.

참고문헌

1. Lennox WG. The cerebral circulation: XV. The effect of mental work. Arch Neurol Psychiat 1931;26:725-730
2. Roland PE, Friberg L. Localization of cortical areas activated by thinking. J Neurophysiol 1985;53:1219-1243
3. Burbaud P, Degreze P, Lafon P, et al. Lateralization of prefrontal activation during internal mental calculation: a functional magnetic resonance imaging study. J Neurophysiol 1995;75:2194-2200
4. Rueckert L, Lange N, Partiot A, et al. Visualizing cortical activation during mental calculation with functional MRI. Neuroimage 1996;3:97-103
5. Oldfield RC. The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. Neuropsychologia 1971;9:97-113
6. Dehaene S, Spelke E, Pinel P, Stanesco R, Tsivkin S. Sources of mathematical thinking: behavioral and brain-imaging evidence. Science 1999;284:970-974
7. Dehaene S, Cohen L. Cerebral pathways for calculation: double dissociation between rote verbal and quantitative knowledge of arithmetic. Cortex 1997;33:219-250
8. Delazer M, Benke T. Arithmetic facts without meaning. Cortex 1997;33:697-710
9. Takayama Y, Sugishita M, Akiguchi I, Kimura J. Isolated acalculia due to left parietal lesion. Arch Neurol 1994;51:286-291
10. Cohen L, Dehaene S, Chochon F, Lehericy S, Naccache L. Language and calculation within the parietal lobe: a combined cognitive, anatomical and fMRI study. Neuropsychologia 2000;38:1426-1440
11. Corbetta M, Miezin FM, Dobmeyer S, Shulman GL, Petersen SE. Attentional modulation of neural processing of shape, color, and velocity in humans. Science 1990;248:1556-1559
12. Sarter M, Givens B, Bruno JP. The cognitive neuroscience of sustained attention: where top-down meet bottom-up. Brain Res Brain Res Rev 2001;35:146-160
13. Gerstmann J. Syndrome of finger agnosia, disorientation for right and left agraphia and acalculia. Arch Neurol Psychiat 1940;44:398-408
14. Delazer M, Domahs F, Bartha L, et al. Learning complex arithmetic-an fMRI study. Brain Res Cogn Brain Res 2003;18:76-88
15. Kong J, Wang C, Kwong K, Vangel M, Chua E, Gollub R. The neural substrate of arithmetic operations and procedure complexity. Brain Res Cogn Brain Res 2005;22:397-405

16. Stanescu-Cosson R, Pinel P, van de Moortele P-F, Bihan DL, Cohen L, Dehaene S. Understanding dissociations in dyscalculia: a brain imaging study of the impact of number size on the

cerebral networks for exact and approximate calculation. *Brain* 2000;123:2240-2255

J. Korean Soc. Magn. Reson. Med. 9:16-23(2005)

A Functional MRI Study on the Brain Activation Associated with Mental Calculation

Dae Seob Choi¹, Jae Wook Ryoo¹, Dong Gyu Na², Sam Soo Kim³,
Jae Min Cho¹, Eui Dong Park¹, Sung Hoon Chung¹

¹Department of Diagnostic Radiology, Gyeongsang National University College of Medicine and
Gyeongsang Institute of Health Science

²Department of Radiology, Seoul National University College of Medicine

³Department of Radiology, Kwangwon National University College of Medicine

Purpose : In order to investigate the functional brain anatomy associated with mental calculation, functional magnetic resonance imaging was performed.

Materials and Methods : In six normal right handed subjects, functional MR images were obtained using a 1.5T MR scanner and the EPI BOLD technique. The study included experiment I and experiment II. Each experiment consisted of five resting and four activation periods with each period of 30 seconds. During the activation period of both experiment I and II, calculation equations[an example: $(4 + 5) \times 8 = 72$] were presented and the subjects were instructed to decide true or false of them. During the resting period of experiment I, the subjects were instructed to visually fixate on a crosshair. During the resting period of experiment II, two diagrams (an example: ●, ■) were presented and the subjects were instructed to decide they are same or not. For the post-processing of images, the SPM program was used, with the threshold of significance set at $p < 0.00001$. The activated areas during the tasks were assessed.

Results : In experiment I, the inferior frontal gyrus, prefrontal cortex, premotor area, supplementary motor area, and intraparietal sulcus including superior parietal cortex were activated bilaterally. Although these areas were also activated in experiment II, the activated signals in the right frontal and parietal lobes were lessened.

Conclusion : The left inferior frontal gyrus and prefrontal cortex and bilateral intraparietal sulci were activated during mental calculation. The right frontal and parietal lobes might be related to attention and decision making.

Index words : Magnetic resonance (MR)
Brain function
Mental calculation

Address reprint requests to : Jae Wook Ryu, M.D., Department of Diagnostic Radiology,
Gyeongsang National University Hospital, #90, Chilam-dong, Jinju, Gyeongnam 660-702, Korea.
Tel. 82-55-750-8818 Fax. 82-55-758-1568 E-mail: ryoojw@gaechuk.gsnu.ac.kr