

이중과제 수행시의 간섭효과에 수반되는 신경기반: 산술연산과 기억인출간의 상호작용*

이 병택†

서울대학교 심리과학연구소

이 경 민

서울대학교 인지과학 협동과정

Lee와 Kang (2002)은 이중과제 수행동안 음운회로의 시연이 곱셈 수행을 유의하게 지연시키지만 뺄셈의 수행을 지연시키지는 못함을 보여주었다. 반면 심상을 유지하는 것은 뺄셈 수행을 지연시키지만 곱셈의 수행에는 영향을 미치지 않았다. 이 결과는 산술연산이 작업기억의 하부체계 특정한 방식으로 관련있음을 보여준다. 본 연구의 목적은 기능자기공명영상기법을 이용하여 Lee와 Kang이 얻은 결과의 신경기반을 검토하는 것이었다. 이 목적을 위해 억제를 요구하는 이중과제 조건과 억제를 요구하지 않는 이중과제 조건에서의 뇌활성화 양상을 비교하였다. 두 조건이 모두 이중과제 조건이었음에도 불구하고 간섭조건이 비간섭조건에 비해 더 활성화되는 영역들이 관찰되었다. 더 중요한 사실은 음운억제조건에서 우측 하전회(inferior frontal gyrus), 좌측 각회(angular gyrus), 그리고 하정소엽(inferior parietal lobule) 등의 영역이 활성화 된 것에 비해, 시각억제조건에서 활성화된 영역은 우측 상측두회(superior temporal gyrus)와 전대상회(anterior cingulate gyrus)였다. 억제조건에서의 결과와 달리 음운 비억제 조건에서 활성화된 영역은 우내측 전두회(medial frontal gyrus), 좌측 중전두회(middle frontal gyrus)와 양측의 내측전두회(medial frontal gyri)였으며, 시각 비억제 조건에서는 전대상회, 그리고 해마이랑(parahippocampal gyrus)의 영역이 활성화되었다. 이러한 결과는 처리 부호를 공유할 때 야기되는 간섭을 억제하는 것의 신경기반이 과제의 양상에 의존적임을 보여준다.

주제어 : 산술연산, 작업기억, 간섭, 억제, 기능자기공명영상

* 본 연구는 산업자원부 뇌신경정보학 연구사업 (과제번호 10023930-2006-03)의 지원을 받아 수행되었음.

† 교신저자: 이병택, 서울대학교 사회과학대학 심리학과 내 심리과학연구소
연구세부분야: 심리학, E-mail: byeongtaek.lee@gmail.com

서 론

고등 인지 기술의 하나로 산술연산을 꼽을 수 있다. 산술연산이 하나의 전략 혹은 한가지 유형의 표상만으로 가능하지 않음을 보여주는 많은 증거가 있다 [1, 2]. Dehaene 등 [2]에 따르면 산술연산은 세 가지 유형의 심성부호를 이용하여 수행되는데, 산술연산의 종류에 따라 그 처리과정이 질적으로 달라진다. 그들은 수리연산을 위해서는 양적 표상, 시각-숫자 형태 표상, 그리고 청각-언어 부호 체계가 필요하다는 삼중 부호론을 주장하였다. 예를 들어, 곱셈은 청각 언어 숫자 부호를 사용하는 언어적 기억 과제로 간주되며, 뺄셈은 아날로그 양적 표상을 사용하여 수행된다 [3]. Dehaene의 단원모형과 달리, McCloskey [4]는 하나의 추상적 수 표상을 가정하였다. Dagenbach와 McCloskey [5]는 각 유형의 산술연산이 그에 수반되는 각 처리과정들에 의해 구분된다고 주장하였다. 이 모델은 수행이 저하되는 연산과 그렇지 않은 연산간의 해리가 뇌손상환자에게서 일관되게 관찰되지 않는다는 사실에 의해 지지되었다.

그러나 그 후의 연구들은 곱셈과 뺄셈같은 산술 연산에 기저하는 신경기반이 서로 구분된다는 증거를 내 놓았다. 예를 들어, 특정 연산을 수행하는데 문제가 있는 뇌손상 환자들이 보고된 바 있으며, 이들의 사례는 각기 다른 유형의 연산간의 해리가능성을 시사한다 [6, 7, 8]. 더욱이 Chochon, Cohen, van de Moortele와 Dehaene [9]은 뇌손상환자가 아닌 일반인을 대상으로 한 뇌영상 연구에서 연산 유형의 해리가능성을 시사하는 증거를 얻었다. 그들에 따르면, 곱셈을 수행하는 동안의 활성화 영역은 뺄셈 수행시의 활성화 영역과 구분되는데, 이 발견은 Lee [10]에 의해 다시 검증된 바 있다. Lee의 연구에서 곱셈 연산동안 활성화된 영역은 좌측 각회 (angular gyrus), 상전두회 (superior frontal gyrus, SFG), 우측의 설상회 (lingual gyrus), 양측중심전회 (precentral gyri), 대상회의 중간선부분 (midline anterior cingulate), 및 췌기앞부분 (precuneus)인데 반해, 뺄셈조건에서의 활성화 영역은 양측의 두정간구 (intraparietal sulci), 상전두회 (SFG), 하전회 (inferior frontal gyri, IFG), 및 우측의 하측 두회 뒷부분 (posterior inferior temporal gyrus, ITG)이었다.

이 결과에 근거하여 Lee와 Kang [11]은 간단한 행동 실험을 수행한 바 있는데, 이 실험은 산술연산과 작업기억간의 관계를 음운억제 혹은 시공간 억제를 요구하

는 이중과제를 사용하여 검토하는 것이었다. 그들의 실험에서 피험자들은 비단어 혹은 그림을 기억하도록 요구받았으며, 동시에 산술 연산 문제를 수행해야 했다. 이중과제를 사용하는 다른 연구들에서와 같이 이 과제를 성공적으로 수행하기 위해서는 중앙집행부가 각각의 단일과제들의 경합에 따른 자원의 할당을 적절히 조정할 수 있어야 했다. 그러나 산술처리에 사용되는 심성부호가 기억과정에 사용되는 부호와 서로 다른 성질을 가질 때는 자원에 대한 경합이 일어나지 않으며, 두 처리 과정에 요구되는 심성부호가 동일한 성질을 가질 때에만 경합이 일어날 것이다.

이 가설은 곱셈 혹은 뺄셈과 음운시연을 동시에 수행할 때, 곱셈의 수행은 저하되지만 뺄셈의 수행은 지연되지 않는 결과로, 혹은 곱셈이나 뺄셈을 수행하며 동시에 그림을 기억할 때, 뺄셈의 수행만이 지연되는 결과로 입증되었다. 이 결과를 근거로 Lee와 Kang은 산술연산이 하부체계 특정한 방식으로 작업기억에 관련있으며, 간섭은 단지 특정 조합의 이중과제에서 발생한다고 주장하였다.

Lee와 Kang의 발견은 몇 가지 이론들과 잘 어울리는 것으로 보인다. 첫째, 하부체계 한정적 간섭의 개념은 작업기억의 다중성분설 [12]과 일맥상통한다. 다중성분설이란 작업기억의 중앙집행부가 음운회로나 시공간그림철과 같은 노에 기관을 조절한다는 것이다. 구체적으로 뺄셈에서의 심상부호의 사용은 이 산술연산이 시공간그림철에 좀 더 적절한 처리임을 시사한다. 한편 지식의 인출과 관련된 것으로 가정된 곱셈은 좀 더 음운회로를 사용하는 과제라고 할 수 있다. 따라서 비단어의 되뇌기와 곱셈은 모두 음운회로를, 그리고 시각 자극의 유지와 뺄셈의 동시 수행은 시공간 그림철을 사용하게 되어 동일한 자원의 공유하려는 데서 비롯되는 간섭이 유발될 것이다. 성공적인 과제 수행을 위해서는 이러한 간섭이 적절히 억압되어야 한다. 둘째, 용량 제약 억제 가설 [13, 14]은 심성부호를 공유할 때의 자원의 경합 문제를 잘 설명할 수 있다. 이 가설에 따르면, 효율적인 작업기억은 비관련 정보를 억제하여 적절 정보의 선택과 파지를 용이하게 한다. Engle [14]은 억제가 작업기억의 자원을 요구하기 때문에, 작업기억 용량에 의존적이라고 주장하였다. Lee와 Kang은 이러한 간섭이 동시 수행되는 두 과제가 심성부호를 공유할 때 발생한다는 점에서 용량 제약 억제 가설을 더욱 정교화한 것이라 할 수 있다.

본 연구에서 우리의 관심은 수리 인지에 관한 단원적인 처리와 관련된 간섭효

과의 신경기반을 탐구하는 것이다. 이 목적을 위해, 기능자기공명영상기법을 사용하여 이중과제 상황에서 발생하는 간섭과 이를 억제하는 과정에 기저하는 신경기반을 검토하고자 한다. 산술연산 유형에 독립적이면서 기억해야할 항목의 양상(modality)에도 독립적이면서 오직 경합하는 정보들의 조절에만 관여하는 뇌 영역이 있다면, 그 영역은 모든 유형의 간섭조건에서 활성화될 것이다. 대표적인 후보 영역은 아마도 다양한 작업기억 과제를 사용한 연구들에서 작업기억의 위치라고 밝혀진 배외측전두피질(DLPFC)과 대상피질(ACC), 하정소엽(IPL) 등의 영역일 것이다. 그러나 간섭이 심성부호의 공유 여부에 의존적이라면 기존에 알려진 작업기억 영역들 가운데 각기 다른 영역들이 음운간섭조건과 시각간섭조건에 각각 간섭조건에서 활성화될 것이다.

다른 한편, 간섭이 발생하지 않는 이중과제 조건에서는 참가자들에게 단순한 기억항목의 인출이 더욱 강조된다. 기억의 인출에 주로 관여하는 영역은 배내측 전두 피질(ventral prefrontal cortex)로 알려져 있는데 [15], 따라서 간섭조건에 비해 비간섭조건에서는 이 영역의 활성화 수준이 높을 것이다. 이와 같이 본 연구는 이중과제 그 자체 보다는 경합하는 정보들로부터 야기되는 간섭과 억제에 수반되는 신경 기반에 대해 우리에게 통찰을 줄 수 있을 것이다.

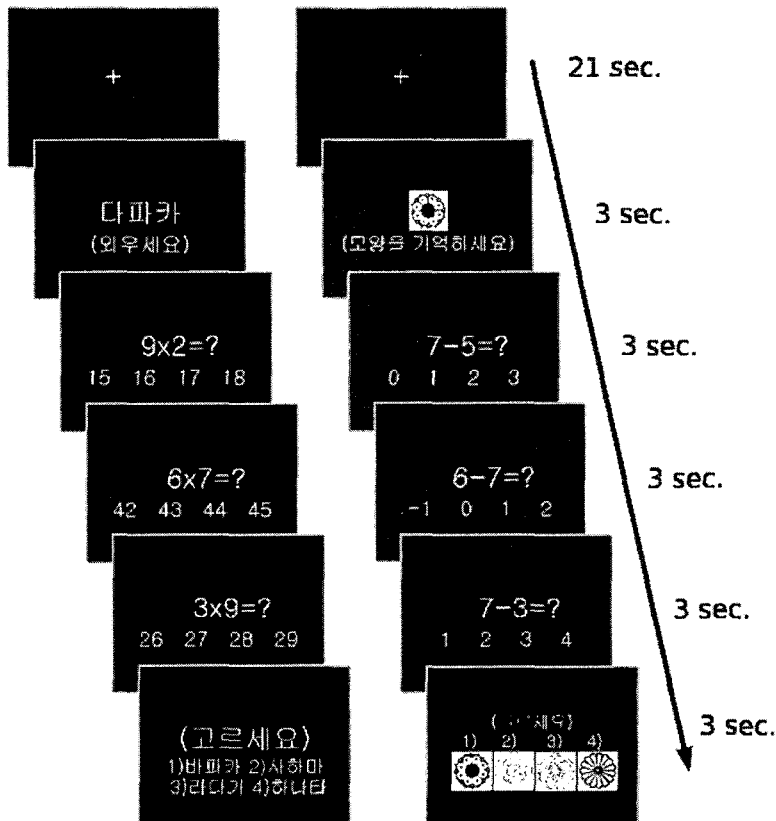
방 법

참가자

10명의 학부생(여자 6명, 남자 4명, 평균 연령: 25.1세, 범위: 21-35세)이 서울대학교 병원의 윤리위원회 지침과 헬싱키 선언에 준하여 참여하였다. 이들은 신경적 문제가 없었으며 모두 오른손잡이였다. 이들은 자발적으로 참여하였으며, 실험참가 전 실험참가에 관한 동의서를 받았다. 또한 참여에 대한 댓가로 실험 후 2만원을 지급받았다.

재료 및 과제

본 연구에 사용된 재료와 과제는 Lee와 Kang [11]의 것을 자기공명영상 장치 환경에 맞도록 수정한 것이었다. 한 회기 내에서 각각의 연산 시행은 스크린 중앙에 응시 신호를 제시함으로써 시작되었다. 그 후 기억해야 할 항목이 추상적 그림 혹은 비단어로 제시되었으며, 뒤이어 산술 연산 문제가 제시되었다. 참가자는 제시된 산술 연산 문제에 답한 후, 시행의 처음에 제시된 그림 혹은 비단어의 재인검사가



〈그림 1〉 실험에 사용된 자극의 예. 왼쪽 그림은 곱셈 수행 동안 비단어를 기억토록 한 이중과제 조건의 예이며, 오른쪽 그림은 뺄셈과 그림의 기억을 동시에 요구한 이중과제 조건의 예. 두 조건 모두 간섭 조건에 해당한다

시행되었다. 산술 문제는 뺄셈 혹은 곱셈의 두 가지 유형이 제시되었으며, 각각의 산술 문제는 두 개의 한 자리 숫자로 구성되었다. 각 숫자는 곱셈과 뺄셈 조건 각각에서 동일 빈도로 제시되도록 조절되었다. 하나의 시행에 동일한 유형의 산술 연산 문제가 두 번 제시되었다. 동일 조건의 세 번의 시행으로 하나의 구획이 구성되었으며, 여섯 구획으로 하나의 회기가 구성되었다. 여섯 구획 각각은 곱셈과 음운시연, 뺄셈과 음운시연, 곱셈과 시각파지, 뺄셈과 시각파지, 곱셈 단독, 뺄셈 단독 조건이었다. 모든 참가자는 세 번의 회기를 경험하였다.

그림 1은 간섭조건의 예를 보여준다. 그림 1의 왼쪽 그림은 추상적 그림을 기억하는 동안 뺄셈을 수행하는 시각 억제조건의 예를 보여주며, 오른쪽 그림은 음운 억제 조건의 예이다. 음운 억제조건에서 참가자들은 비단어를 마음속으로 되뇌어야 했고, 동시에 산술 연산을 수행해야 했다. 일련의 산수 문제를 해결한 후, 시행 초기에 제시된 비단어 혹은 그림의 재인검사가 이루어졌다. 이 조건들 가운데, 곱셈-음운시연 조건, 그리고 뺄셈-시각파지 조건은 산술연산과 기억의 내용이 심성부호를 공유한다고 가정되었기 때문에 간섭조건으로 간주되었다. 반면 뺄셈-음운시연조건 그리고 곱셈-시각파지의 조건은 간섭이 발생하지 않는다고 가정되었기에 비억제 조건으로 간주되었다. 이러한 조건 외에 통제조건으로 단일과제조건을 두었다. 이 조건에서는 시행 처음에 그림이나 비단어열을 제시하지 않기 때문에 부가적인 기억인출이 요구되지 않았으며, 이 점을 제외하고는 모든 절차가 이중과제 조건의 그것과 동일하였다.

기능자기공명영상 절차

서울대학교 병원에 설치된 1.5T GE Signa MR 스캐너와 표준 GE quadrature head coil을 이용하여 뇌영상을 촬영하였다. 머리 움직임을 줄이기 위해 피험자의 머리 아래에 머리받침을 두었다. AC-PC 라인을 결정한 후, 구조 이미지를 촬영하였으며 (500ms TR, 12 ms TE, 240mm FOV, 256 x 256 matrix size, 20 oblique slices, 1.875 x 1.875 x 5.0 mm³ voxel), 동일 수직축의 위치에서 T2* 가중기능영상이 interleaved EPI gradient echo sequence를 사용하여 얻어졌다(64 x 64 matrix size, 60 ms TE, 3000ms TR, 3.75 x 3.75 x 5.0 mm³ voxel).

참가자들은 스캐너 내부에 설치된 거울을 통해 스크린을 보았다 이들에게는 두 개의 수로 구성된 곱셈 또는 뺄셈을 하는 동안 그림 혹은 비단어를 기억하도록 지시가 주어졌다. 계산 후에 이전에 제시된 그림이나 비단어를 재인하도록 요구받았다. 예를 들어 뺄셈-음운시연 조건에서 참가자들은 '카다나파'를 기억하면서 동시에 '8-3 = ?'과 같은 문제에 답하도록 요구받았다. 움직임에 의한 혼입요인을 피하기 위해 소리내지 않고 기억하도록 요구받았다. 일련의 산술연산문제에 답한 후 참가자들은 네 가지의 답안 가운데 정확한 비단어 '카다나파'를 선택해야 했다.

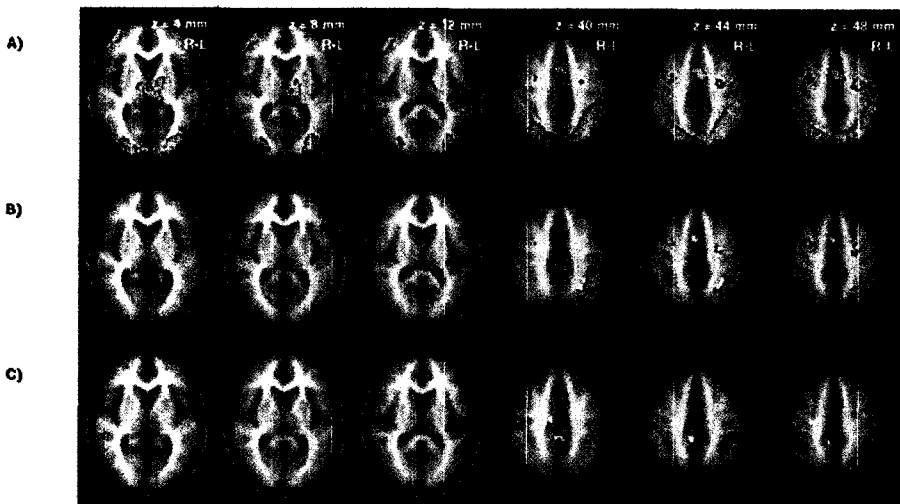
자료분석

뇌영상자료는 FSL(Analysis Group, FMRIB, Oxford)을 사용하여 분석되었다. 각 구획에서 얻어진 113장 가운데 안정된 신호의 영상자료만을 포함시키기 위해 처음 네 장의 영상은 분석에서 제외하였다. 얻어진 기능영상자료는 슬라이스간 획득시간 차이와 움직임 혼입변인에 의한 문제를 배제하기 위해 보정되었으며 그 후 공간 정규화와 편평화가 이루어졌다(FWHM: 7mm). 이러한 전처리가 완료된 후 각 개인별 자료에 대한 통계분석이 이루어졌고, 그 후 FLAME(FMRIB's Local Analysis of Mixed Effects) [16, 17]을 이용하여 집단분석이 이루어졌다. 본 연구에서 통계적 역치는 $p < .05$ 수준으로 정하여졌고(다중비교에 대해서 보정되지 않음, 유의한 군집의 크기에 대한 역치는 각각의 voxel이 8mm^3 의 크기를 갖는 20개의 voxel들로 정해졌다

곱셈-음운시연조건에서 활성화된 영역은 뺄셈에 비해 활성화수준이 높은 곱셈 조건의 영역과 시각파지조건에 비해 더 활성화된 음운시연조건의 영역을 구한 후, 두 조건에서 동시에 활성화된 영역으로 정하였다. 뺄셈-시각파지조건에서 활성화된 영역은 곱셈에 비해 더 활성화된 뺄셈조건의 활성화영역과 음운시연조건에 비해 더 활성화된 시각파지조건의 활성화영역을 구한 후 두 영역의 공통된 영역을 이 조건의 활성화영역으로 삼았다. 곱셈-시각파지조건과 뺄셈-음운시연조건의 활성화영역도 마찬가지로 방법으로 결정되었다.

결 과

본 연구의 가설은 활성화영역이 각 억제유형에 한정적이라는 것이었다. 이 가설을 검증하기 위해 우리는 휴지기간에 비해 활성화수준이 높은 이중과제조건에서의 활성화영역을 발견하는 것을 분석의 출발점으로 삼았다(그림 2A). 그림 2A에서 알 수 있듯이 대상회 (anterior cingulate gyrus), 양측의 뇌전회 (inferior frontal gyri), 중전두회 (middle frontal gyri), 그리고 좌측의 설상회 (lingual gyrus)를 포함하는 하정소엽 (inferior parietal lobule), 시상 (thalamus), 우측전방뇌섬엽 (insula)에 걸치는 넓은 영역이 휴지조건에 비해 이중과제조건에서 더욱 활성화되었다



〈그림 2〉 이중과제 조건과 간섭/비간섭 조건에서의 활성화 영역. 위의 그림들(A)은 휴지기과 이중과제 조건간의 비교에서 얻어진 뇌활영화 영역을 보여준다. 빨간색으로 표시된 영역은 이중과제 조건에서의 활성화 수준이 높은 부분이다.中间的 그림들(B)은 이중과제조건에서 활성화된 영역들을 암묵적 차폐지도로 이용한 상태에서, 단일과제조건에 비해 이중과제조건에서 더욱 활성화된 영역을 보여준다. 빨간색은 이중과제 조건에서의 활성화 수준이 단일과제 조건에 비해 높은 영역을 나타내며, 파란색은 단일과제 조건의 활성화 수준이 더욱 높은 영역이다. 마지막으로 아래의 그림들(C)은 간섭조건과 비간섭조건간 비교시의 활성화 영역을 보여준다. 빨간 색은 간섭조건에서 더욱 활성화된 영역을 가리킨다. 모든 그림들에서 활성화된 영역은 $p < .05$ 의 역치에서 20개 이상의 부피점을 갖는 곳이다.

〈표 1〉 휴지기에 비해 이중과제 조건에서 더욱 활성화된 영역

조건	x	y	z	k	BA	z	영역
	58	12	24	425	44	4.36	Inferior Frontal Gyrus
	40	64	4	1274	10	4.51	Middle Frontal Gyrus
	46	0	56	499	6	6.35	Middle Frontal Gyrus
	32	20	0	36	47	2.73	Insula
이중과제	16	-12	2	31	-	2.19	Thalamus
휴지기	-14	-30	2	1175	27	4.97	Thalamus, Pulvinar
	0	2	46	1000	24	4.88	Anterior Cingulate Gyrus
	-40	-56	56	14779	40	7.86	Inferior Parietal Lobule
	-38	48	32	292	46	6.85	Middle Frontal Gyrus
	-54	14	26	897	44	4.45	Inferior Frontal Gyrus

주. 좌표는 NI 좌표계에 따르며, BA는 브로드만영역 (Brodmann area)을 뜻한다. 양의 좌표는 우반구를 표시한다. 유의한 역치는 $p < .05$ (중다비교에 대해 비보정이었고, 20개 이상의 연속된 부피점들 160 mm^3)을 갖는 활성화군만을 유의한 영역으로 간주하였다.

〈표 2〉 휴지기에 비해 이중과제 조건에서 더욱 활성화된 영역 가운데, 단일 과제 조건과 이중 과제 조건의 비교에서 각기 더욱 활성화된 영역의 좌표

조건	x	y	z	k	BA	z	영역
	44	44	8	20	45	2.28	Inferior Frontal Gyrus
	42	-60	-26	45	37	2.85	Fusiform Gyrus
이중과제	32	6	42	41	6	2.69	Precentral Gyrus
단일과제	4	6	46	154	32	2.92	Anterior Cingulate Gyrus
	2	-78	-14	62	18	2.79	Lingual Gyrus
	-32	-46	44	290	40	3.88	Inferior Parietal Lobule
	-30	-18	60	235	6	2.99	Precentral Gyrus
단일과제	-44	-60	44	29	40	2.91	Inferior Parietal Lobule
이중과제							

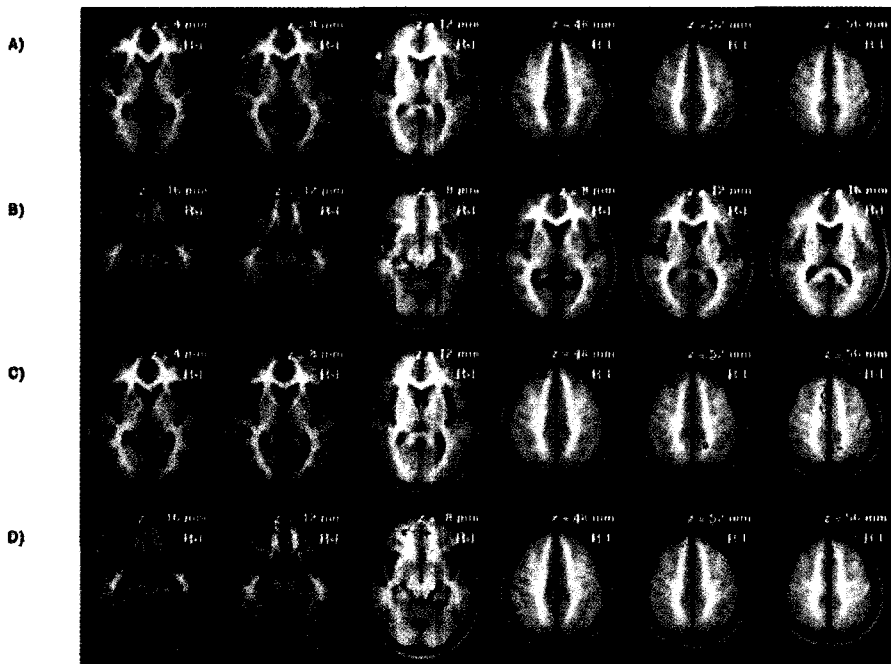
주. 좌표는 NI 좌표계에 따르며, BA는 브로드만영역 (Brodmann area)을 뜻한다. 양의 좌표는 우반구를 표시한다. 유의한 역치는 $p < .05$ (중다비교에 대해 비보정이었고, 20개 이상의 연속된 부피점들 160 mm^3)을 갖는 활성화군만을 유의한 영역으로 간주하였다.

둘째 이 결과를 암묵적차폐지도 (implicit masking map)로 이용하여 이중과제조건에서 활성화된 영역들 가운데 단일과제조건에서 보다 활성화수준이 높은 영역을 찾았다(그림 2B). 이러한 차폐지도의 사용을 통해 단순히 이중과제조건이 단일과제조건에서의 수행에 비해 높은 활성화수준을 보이는 영역을 찾는 것에서 벗어나 기저수준 이상의 활성화를 보인 영역들 가운데 이중과제조건에서의 활성화수준이 단일과제조건에서의 활성화수준보다 높은 영역을 찾는 것이 가능해졌다. 단일과제조건에서 더 활성화된 영역이 좌측하정소엽 (BA40)에 국한되는데 비해 이중과제조건에서 더 활성화된 영역은 우측의 하전회 (IFG, BA45), 방추회 (fusiform gyrus BA 37), 대상피질 (ACC, BA32), 설상회 (lingual gyrus, BA18), 좌측의 하정소엽 (inferior parietal lobule, BA40), 및 양측중심전회 (precentral gyri, BA6)에서 관찰되었다. 활성화 영역의 정확한 좌표는 표 2에 제시되어있다. 이 결과는 단일과제조건에 비해 이중과제조건에서 더욱 활성화되는 영역이 휴지기에 비해 이중과제조건에서 더욱 활성화된 영역과 많은 부분 중복되고 있음을 보여준다.

셋째 이중과제조건 내에서 부호공유에 의한 간섭효과를 검토하기 위해 이전의 이중과제조건에서 유의하게 활성화된 영역결과를 암묵적 차폐지도로 이용하여 비간섭조건에 비해 간섭조건에서 더욱 활성화된 영역을 찾았다. 구체적으로 곱셈-음운시연조건 그리고 뺄셈-시각파지조건은 각각의 성분과정에서 처리부호를 공유한다고 가정되었고 이러한 심성부호의 공유가 간섭을 야기시킬 것이라고 예측되었다. 반면 뺄셈-음운시연이나 곱셈-시각파지의 이중과제조건은 각각의 성분과제가 심성부호를 공유하지 않으며 따라서 간섭을 일으키지 않을 것이다. 이 가설을 검증하기 위해 간섭조건과 비간섭조건을 비교하였다. 이 분석에서 우리의 관심은 단순히 간섭조건에서 활성화되는 영역을 확인하는 것이 아니라, 이중과제조건에서 활성화된 영역 가운데 간섭조건에서 활성화되는 영역을 찾는 것이었다. 이 제약을 만족시키기 위해 단일과제조건에 비해 활성화 수준이 높은 이중과제조건에서의 활성화 지도를 암묵적차폐지도로 삼아 간섭조건과 비간섭조건 간의 비교에 적용하였다. 전체적인 활성화패턴은 그림 2C에 제시되어 있는데 비간섭 조건보다 간섭조건에서 더 활성화된 영역은 우측의 중측두회 (middle temporal gyrus, BA21), 양측중심전회 (precentral gyrus, BA43), 하전회 (IFG, BA45), 대상피질 (ACC, BA24), 상전두회 (SFG, BA5), 및 앞췌기 (precuneus, BA 7)였다. 반면 비간섭조건에서 활성화된 영역은 관찰

되지 않았다. 이 결과는 그림 2C에 제시되어 있으며 정확한 좌표는 표 2에 제시되어 있다.

마지막으로 우리는 각 유형의 간섭에 국한되는 영역을 분리해내고자 하였다. 산술연산의 삼중부호설에 따르면, 음운시연과 곱셈, 또는 시각파지와 뿔셈은 공통의 심성부호를 가지며, 따라서 공통의 회로를 구성할 개연성이 높다. 반면, 음운시연



〈그림 3〉 유형별 이중과제 조건에서의 활성화 영역. A)의 그림은 시각파지조건에 비해 음운시연조건에서 더욱 활성화 된 영역과 곱셈 조건이 뿔셈 조건에 비해 더욱 활성화된 영역의 교차 영역을 표시하여 준다. 그림 B)는 음운시연조건에 비해 시각파지조건에서 더욱 활성화된 영역과 곱셈조건에 비해 뿔셈조건에서 더욱 활성화된 영역간의 교차 활성화 영역을 보여준다. 그림 C)와 D)는 모두 비간섭 조건으로 각각 시각파지조건에 비해 음운시연조건에서 활성화 수준이 높았던 영역과 곱셈조건에 비해 뿔셈조건에서 활성화 수준이 높았던 영역간의 교차영역, 그리고 음운시연조건에 비해 시각파지조건에서 활성화 수준이 더 높았던 영역과 뿔셈조건에 비해 곱셈조건에서 활성화 수준이 더 높았던 영역의 교차 활성화 영역을 보여준다. 모든 그림에서 활성화된 영역의 기준은 $p < .05$ 의 역치에서 20개 이상의 부피점을 갖는 곳으로 결정되었다.

과 뿔셈, 또는 시각파지와 곱셈은 각각의 성분과제에 의해 요구되는 심성 부호에 의한 갈등이 없다고 가정되어 간섭의 발생과 이에 따른 억제 of 필요성이 가정되지 않는다. 따라서 이들 조건에서는 산술연산 과제 동안 기억의 인출과정이 주로 요구된다. 우리가 실험을 통해 얻은 결과는 첫째, 곱셈-음운시연 조건에서는 그림 3A에서 볼 수 있듯이, 우측의 하전회 (IFG, BA44, BA45), 중전두회 (middle frontal gyrus, BA 46), 중측두회 (middle temporal gyrus, BA39), 좌측의 각회 (angular gyrus, BA 9), 하정소엽 (IPL, BA40), 및 양측중심후회 (postcentral gyri)의 영역이 활성화되었다. 또한 다른 간섭 조건인 뿔셈-시각파지 조건에서는 우측의 상측두회 (superior temporal gyrus, BA 22), 대상피질 (ACC, BA 32), 및 좌측의 전장 (claustrum)에서의 활성화가 관찰되었다(그림 3B). 그러나 뿔셈-음운시연 조건에서는 우측의 가로측두이랑 (transverse temporal gyrus, BA41), 내측전두회 (medial frontal gyrus, BA 6), 좌측의 앞췌기 (precuneus, BA 7) 및 중전두회 (middle frontal gyrus, BA 10)의 활성화가 관찰되었다 (그림 3C). 또 다른 비간섭 조건인 곱셈-시각파지 조건에서는 우측의 내전두회 (medial frontal gyrus, BA 10), 대상피질 (ACC, BA 42, BA11), 좌측의 내측전두회 (medial frontal gyrus, BA 10), 중전두회 (middle frontal gyrus, BA 11), 및 해마이랑 (parahippocampal gyrus, BA20)의 활성화가 관찰되었다(그림 3D). 각 비교조건에서 관

〈표 3〉 표 2의 영역들 가운데 비간섭조건에 비해 간섭조건에서 더욱 활성화된 영역

조건	x	y	z	k	BA	z	영역
간섭 비간섭	58	-34	0	51	22	2.18	Middle Temporal Gyrus
	54	-14	12	26	43	2.08	Precentral Gyrus
	42	44	6	25	45	2.25	Inferior Frontal Gyrus
	46	-28	-12	40	-	2.12	No GM
	10	-14	38	85	24	2.52	Anterior Cingulate Gyrus
	10	4	58	77	6	2.26	Superior Frontal Gyrus
	6	-40	46	233	7	2.46	Precuneus

주. 좌표는 NI 좌표계에 따르며, BA는 브로드만영역 (Brodmann area)을 뜻한다. 양의 좌표는 우반구를 표시한다. 유의한 역치는 $p < .05$ (중다비교에 대해 비보정이었고 20개 이상의 연속된 부피점들 160 mm^3)을 갖는 활성화군만을 유의한 영역으로 간주하였다.

찰된 영역의 정확한 좌표는 표 4에 기술되어 있다.

〈표 4〉 간섭조건과 비간섭 조건의 각 유형별 조건에 관련된 활성화 영역

Condition	x	y	z	k	BA	z	Region
	58	26	8	403	45	3.53	Inferior Frontal Gyrus
	64	16	16	23	44	2.35	Inferior Frontal Gyrus
(음운시각)	40	56	0	38	46	2.20	Middle Frontal Gyrus
&	40	-68	30	109	39	2.43	Middle Temporal Gyrus
(곱셈빨셈)	-32	-64	34	139	19	2.64	Angular Gyrus
	-46	-52	52	166	40	2.78	Inferior Parietal Lobule
	-54	-32	56	49	40	2.34	Postcentral Gyrus
(시각음운)	52	-8	-10	147	22	2.77	Superior Temporal Gyrus
&	8	-46	-22	42	-	2.45	No GM
(곱셈빨셈)	0	42	8	75	32	2.34	Anterior Cingulate Gyrus
	-32	-6	-6	85	-	2.62	Clastrum
	46	-30	10	21	41	2.16	Transverse Temporal Gyrus
(음운시각)	6	-4	58	174	6	2.84	Medial Frontal Gyrus
&	8	12	52	24	6	2.46	Medial Frontal Gyrus
(빨셈곱셈)	-18	-52	48	28	7	2.14	Precuneus
	-34	60	4	24	10	2.40	Middle Frontal Gyrus
	18	50	-8	179	10	2.65	Medial Frontal Gyrus
(시각음운)	24	42	6	36	42	2.55	Anterior Cingulate
&	-6	34	-6	104	11	2.58	Anterior Cingulate
(곱셈빨셈)	-10	50	-8	84	10	2.85	Medial Frontal Gyrus
	-26	34	-18	68	11	2.38	Middle Frontal Gyrus
	-28	-20	-22	26	20	2.85	Parahippocampal Gyrus

주 좌표는 NI 좌표계에 따르며, BA는 브로드만영역 (Brodmann area)을 뜻한다. 양의 좌표는 우반구를 표시한다. 유의한 역치는 $p < .05$ (중다비교에 대해 비보정)이었고, 20개 이상의 연속된 부피점들 160 mm^3 을 갖는 활성화군만을 유의한 영역으로 간주하였다.

논 의

본 연구의 목적은 Lee와 Kang [11]에 의해 밝혀진 산술연산 기술과 외재적 기억을 요구하는 이중과제 상황에서 과제특정적 간섭의 신경기반을 탐구하는 것이었다. 본 연구로부터 얻어진 결과는 크게 두 가지로 요약될 수 있다. 첫째, 단일과제 조건에 비해 이중과제 조건에서 더 활성화된 영역은 배외측 전전두피질 (DLPFC) 과 두정엽 (parietal lobe)을 포함하는 광범위한 영역에 걸쳐 분포되어 있다. 이 영역은 많은 작업기억 연구들에 의해 심성자원 조절, 작업기억 중앙집행부의 국소부위로 보고된 바 있다. 따라서 이 결과는 이중과제를 사용했던 기존 연구들로부터 얻어진 결과의 재확인이라고도 할 수 있다. 다른 한편, 이중과제 조건과 단일과제 조건간의 비교로부터 얻어진 결과는 두 과제가 모두 심성부호를 공유하느냐에 관계없이 이중 과제를 구성하는 각각의 과제들을 조절하는데 요구되는 처리부담을 반영한다고 할 수 있다.

더욱 흥미로운 발견은 간섭 조건과 비간섭 조건간의 비교로부터 얻어졌다. 본 연구에서 심성부호의 공유가 일어나는 조건은 곱셈-시각과지, 혹은 뺄셈-음운시연을 동시에 수행하는 경우보다 곱셈-음운시연, 혹은 뺄셈-시각과지를 동시에 하는 경우이다. 그런데 본 연구에서는 간섭조건에 비해 비간섭조건에서 더욱 활성화된 영역이 관찰되지 않았고, 반면 비간섭조건에 비해 간섭조건에서 우측의 중측두회 (middle temporal gyrus), 양측중심전회 (precentral gyri), 상전두회 (superior frontal gyri), 앞췌기 (precunei), 하전회 (IFG) 및 대상피질 (ACC) 등의 영역에서 활성화가 관찰되었다. 이러한 사실은 이중과제조건에서 관찰된 활성화영역이 주로 간섭조건에서의 효과에 기인했음을 시사한다.

실험 결과를 개괄해 보면, 간섭조건에서 주로 활성화되는 영역은 작업기억 영역에 걸쳐져 있는 것으로 보인다. 특히, 우측의 하전회 (IFG)와 대상피질 (ACC)은 단일과제조건에 비해 이중과제 조건에서 더욱 활성화된 영역이기도 하다. 간섭의 발생이 정보의 양상과 공유 자원에 대한 경합에 의존적이라는 점을 고려할 때, 이것은 신경적인 수준에서 간섭으로부터의 회피, 혹은 간섭의 역제가 우측의 하전회 (IFG)와 대상피질(ACC)의 활성화에 수반된다는 점을 시사한다.

마지막으로, 음운억제와 시각억제를 분리하기 위해 우리는 간섭조건을 다시 곱

셈-음운시연의 음운억제 조건과 뺄셈-시각파지의 시각억제 조건으로 나누었다. 우리는 비간섭 조건 역시 뺄셈-음운시연조건 그리고 곱셈-시각파지 조건으로 나누었다. 예측했던 바와 같이, 음운억제 조건에서는 fronto-parietal 네트워크의 활성화가 관찰되었고, 시각억제 조건에서는 대상피질 (ACC)과 상측두회 (superior temporal gyrus) 및 전장 (claustrum)의 활성화가 관찰되었다. 이처럼 기억인출에서의 갈등은 곱셈계산 동안 단어인출에 수반되는 fronto-parietal 네트워크에서 해소되는 것으로 보이며, 뺄셈계산 동안의 심상 재인으로 인한 간섭은 대상피질 (ACC)과 상측두회 (STG)의 영역에서 해소되는 것으로 보인다. 반면, 비억제 조건에서는 억제의 필요성 없이 주로 기억인출만이 요구되는데, 이러한 기억인출의 국소부위는 배내측 전두두 피질 (ventral prefrontal cortex)로 알려져있다 [15]. 이러한 사실은 곱셈-시각파지와 뺄셈-음운시연의 두 비간섭조건에서 모두 내측 전두회 (medial frontal gyrus)가 활성화됨을 보여준 우리의 발견과 일치하는 것으로 보인다. 따라서 비간섭조건에서 활성화된 영역이 내측 전두회라는 사실은 이들 영역이 억제와 같은 작업기억 고유의 기능보다는 기억인출과 같은 기능에 관련됨을 입증하는 것이다.

전체적으로 우리의 발견은 삼중부호 가설에 의해 잘 설명될 수 있다. 삼중부호 가설에 따르면, 특정 산술연산은 작업기억을 하부체계 특정적인 방식으로 요구하는데, 곱셈은 음운회로와, 그리고 뺄셈은 시공간 그림철과 밀접하게 관련된다. 이 가설에 따르면, 특정 조건이 이중과제 상황이라고 하더라도, 이중과제 내의 각각의 과제가 심성부호를 공유하지 않는다면 간섭을 야기시키지 않는다. 비간섭 조건에서 덜 활성화된 영역들은 간섭이 없는 이중과제 상황의 예로 간주될 수 있었다. 그러므로 우리의 결과는 인간의 수리 연산 인지에 관한 삼중 부호 이론의 증거를 신경적 수준에서 제공한 것이라 할 수 있다.

삼중부호 이론을 지지하는 본 연구의 결과는 보다 일반적인 수준에서 작업기억의 신경기반을 찾고자 하는 시도에 시사점을 갖고 있다. 많은 연구들은 다양한 과제를 사용하여 작업기억의 중앙집행부에 초점을 맞추어 왔다. 특히, 부적절 정보의 억제는 중앙집행부의 주요한 기능으로 간주되어왔다 [18]. Baddeley와 Hitch [19]의 작업기억 성분설이 제안된 이래로, 많은 연구들은 작업기억의 구성성분으로 제안된 음운회로, 시공간그림철 및 중앙집행부의 증거를 찾고자 노력하였다. 기능적인 접근의 한계를 극복하기 위해, 본 연구를 포함한 많은 연구들은 작업기억의 신경

적 기반을 찾고자 시도하였다. 이러한 노력의 결실로, 각기 다른 뇌 영역이 언어적 작업기억과 시공간 작업기억에 기저함이 밝혀졌다 [20, 21, 22]. 이러한 일련의 연구는 선택 [23]이나 억제 [24]와 같은 작업기억의 기능, 혹은 추리 [25], 수리 연산 [2, 10]과 기타 다른 고등 인지 처리 등의 과제영역으로 확장되었다.

본 연구는 이중과제 패러다임을 사용하여 수리연산 영역에서의 작업기억의 신경적 기반을 찾고자 하는 또 하나의 시도라고 할 수 있다. 비록 다른 연구들에서의 과제가 산술 기술을 요구하기는 하였지만, 본 연구의 결과는 그 연구들에서 얻어진 결과를 반복검증하기도 하였다. 특히, 음운 이중과제가 전두엽-두정엽 경로를 요구한다는 결과는 본 연구의 음운억제 조건의 결과와 일치한다고 할 수 있다. 더욱 중요한 점은, 간섭이 발생하는 조건이 단순히 여러 처리가 동시에 수행되기 때문만은 아니라는 점이다. 이중과제상황이지만 간섭이 발생하지 않는 조건에서의 활성화 양상이 간섭조건에서의 활성화 양상과 다르다는 점이 이러한 주장의 근거가 될 수 있다.

한편, 본 연구는 기존의 연구들에서 밝혀진 사실과 미묘한 차이점도 동시에 갖는다. 대표적인 것이, 곱셈에 필요한 음운처리가 주로 좌측의 하전회 (IFG)로 알려진 데 반해, 본 연구에서는 양측의 하전회의 활성화가 관찰되었다. 이러한 차이는 본 연구에서 얻어진 결과가 단순한 수리 연산이 아닌 이중과제 상황에서 얻어졌기 때문일 수 있다. 아직까지 다양한 좌측 영역에 대응하는 우측 반구 영역의 기능이 명확히 밝혀진 바가 드물다. 본 연구의 결과는 과제의 처리 부담이 보다 클때, 우반구의 사용이 수반됨을 시사한다. 다만 이러한 설명은 우반구의 사용과 처리 부담의 인과적 관계에 관해 어떠한 함의도 가지고 있지 않다. 후속 연구에서는 이러한 문제까지 포괄하여 뇌활성화 양상이라는 측면에서 이중과제 상황에서의 산술연산 과정이 단순한 산술연산처리와 어떠한 차이를 갖는지를 규명하는 것이 필요할 것이다.

비간섭조건에 비해 간섭조건에서 높은 활성화가 관찰된 전대상회 (ACC)의 결과도 흥미롭다. 전대상회는 Garavan 등 [26]에 의하면 자동화된 처리의 억제와 밀접한 관련을 갖는 곳이다. Fan 등 [27]은 전대상회 단독 보다는 전대상회와 후대상회 (posterior cingulate cortex)와의 네트워크를 통해 반응단계에서 일어나는 갈등을 감시하는 것이 가능하다고 주장하였다. 한편으로, Osaka 등 [28]은 전대상회가 주의를 조절하는 곳이라 주장하였다. 이러한 연구들을 종합할 때, 이 영역이 작업기억의 중

양집행부와 밀접한 관련을 갖는 것은 분명한 것으로 보인다. 그럼에도 불구하고 각 연구들에서 다양한 기능을 전대상회와 연결시키는 것으로 미루어 볼 때, 중앙집행부의 어떤 기능이 이 영역에 직접 수반되는지는 아직까지 불확실한 것으로 보인다. 본 연구의 결과는 이러한 논란 속에서 전대상회가 간섭의 억제에 수반되는 주의 조절과 밀접한 관련을 지님을 시사한다.

결론적으로, 본 연구는 간섭이 발생하는 조건이 다중 처리 성분이 공통의 부호를 차지하기 위해 경쟁하는 특수한 상황에 국한됨을 보여주었다. 비록 참가자들이 동시에 여러 종류의 처리 과정을 수행한다 할 지라도 각각의 과제가 심성부호를 공유하지 않는다면, 간섭이 발생하지 않는다. 본 연구가 가지는 의의는 작업기억의 단원론적 체계를 지지하는 증거를 제공했다는 점과, 또한 간섭의 억제와 같은 중앙집행부의 기능에 대한 새로운 시각을 제공했다는 점이다.

참고문헌

- [1] Cohen, L., & Dehaene, S. (1996). Cerebral networks for number processing: evidence from a case of posterior callosal lesion. *NeuroCase*, 2, 155-174.
- [2] Dehaene, S., Spelke, E., Pinel, P., Stanescu, R., & Tsivkin, S. (1999). Sources of Mathematical Thinking: Behavioral and Brain-Imaging Evidence, *Science*, 284, 970-974.
- [3] Dehaene, S. (1992). Varieties of numerical abilities, *Cognition*, 44, 1-42.
- [4] McCloskey, M. (1992). Cognitive mechanisms in numerical processing: evidence from acquired dyscalculia. *Cognition*, 44, 107-157.
- [5] Dagenbach, D., & McCloskey, M. (1992). The organization of arithmetic facts in memory: evidence from a brain-damaged patient. *Brain and Cognition*, 20, 345-366.
- [6] Anderson, S. W., Damasio, A. R., & Damasio, H. (1990). Troubled letters but not numbers. Domain specific cognitive impairments following focal damage in frontal cortex, *Brain*, 113, 749-766.
- [7] Ashcraft, M. H. (1992). Cognitive arithmetic: a review of data and theory. *Cognition*,

44, 75-106.

- [8] Cipolotti, L., Warrington, E. K., & Butterworth, B. (1995). Selective impairment in manipulating arabic numerals, *Cortex*, 31, 73-86.
- [9] Chochon, F., Cohen, L., van de Moortele, P. F., & Dehaene, S. (1999). Differential contributions of the left and right inferior parietal lobules to number processing. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 11, 617-630.
- [10] Lee, K. (2000). Cortical areas differentially involved in multiplication and subtraction: a functional magnetic resonance imaging study and correlation with a case of selective acalculia. *Annals of Neurology*, 48, 657-661.
- [11] Lee, K. & Kang, S. (2002). Arithmetic operation and working memory: differential suppression in dual tasks. *Cognition*, 83, 3, B63-B68.
- [12] Baddeley, A. (1993). Working memory or working attention? In A. Baddeley & L. Weiskrantz (Eds.), *Attention: Selection, awareness and control* (pp. 152-170). Oxford: Clarendon Press.
- [13] Hasher, L., & Zacks, R. T. (1988). Working memory, comprehension, and aging: A review and a new view. In G. H. Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation*, 22, 193-225. San Diego, CA: Academic Press.
- [14] Engle, R. W. (1996). Working memory and retrieval: An inhibition-resource approach. In J. J. Richardson (Ed.) *Working memory and human cognition* (pp. 89-119). New York: Oxford University Press.
- [15] Sohn, M-H., Goode, A., Stenger, V. A., Carter, C. S., & Anderson, J. R. (2003). Competition and representation during memory retrieval: Roles of the prefrontal cortex and the posterior parietal cortex. *Proceedings of National Academic Sciences*, 100, 7412-7417.
- [16] Beckmann, C., Jenkinson, M., & Smith, S. M. (2003). General multi-level linear modelling for group analysis in FMRI. *NeuroImage*, 20, 1052-1063.
- [17] Woolrich, M. W., Behrens, T. E. J., Beckmann, C. F., Jenkinson, M., & Smith S. M. (2004). Multi-level linear modelling for FMRI group analysis using Bayesian inference. *NeuroImage*, 21, 1732-1747.

- [18] Zacks, R. T., & Hasher, L. (1994). Directed ignoring: inhibitory regulation of working memory, In D. Dagenbach & T. H. Carr (Eds.), *Inhibitory processes in attention, memory, and language* (pp. 241-264). San Diego, CA: Academic Press.
- [19] Baddeley, A., & Hitch, G. J., (1974). Working memory, In G. Bower (Ed.), *Recent Advances in Learning and Motivation* (pp. 47-90), New York: Academic Press.
- [20] Jonides, J., Smith, E. E., Koeppe, R. A., Awh, E., Minoshima, S., & Mintun, M. A. (1993). Spatial working memory in humans as revealed by PET. *Nature*, 363, 623-625.
- [21] Paulesu, E., Frith, C. D., & Frackowiak, R. S. (1993). The neural correlates of the verbal component of working memory. *Nature*, 362, 342-345.
- [22] D'Esposito, M., Detre, J. A., Alsop, D. C., Shin, R. K., Atlas, S., & Grossman, M. (1995). The neural basis of the central executive system of working memory. *Nature*, 378, 279-281.
- [23] Jiang, Y. (2004). Resolving dual-task interference: an fMRI study. *NeuroImage*, 22, 748-754.
- [24] Gruber, O. (2000). Effects of domain-specific interference on brain activation associated with verbal working memory task performance. *Cerebral Cortex*, 11, 1047-1055.
- [25] Newman, S. D., Just, M. A., & Carpenter, P. A. (2002). The synchronization of the human cortical working memory network. *NeuroImage*, 15, 810-822.
- [26] Garavan, H., Ross, T. J., Murphy, K., Roche, R. A. P., & Stein, E. A., (2002). Dissociable Executive Functions in the Dynamic Control of Behavior: Inhibition, Error Detection, and Correction. *NeuroImage*, 17, 1820-1829.
- [27] Fan, J., Flombaum, J. I., McCandliss, B. D., Thomas, K. M., & Posner, M. I. (2003). Cognitive and Brain Consequences of Conflict. *NeuroImage*, 18, 42-57.
- [28] Osaka, M., Osaka, N., Kondo, H., Morishita, M., Fukuyama, H., Aso, T., & Shibasaki, H. (2003). The neural basis of individual differences in working memory capacity: an fMRI study. *NeuroImage*, 18, 789-797.

1 차원고접수 : 2007. 4. 24

최종게재승인 : 2007. 6. 20

(Abstract)

Neural Basis Involved in the Interference Effects During Dual Task: Interaction Between Calculation and Memory Retrieval

Byeong-Taek Lee

The Institute of Psychological Science
Seoul National University

Kyoung-Min Lee

Interdisciplinary Program in Cognitive Science
Seoul National University

Lee & Kang (2002) showed that simultaneous phonological rehearsal significantly delayed the performance of multiplication but not subtraction, whereas holding an image in the memory delayed subtraction but not multiplication. This result indicated that arithmetic function is related to working memory in a subsystem-specific manner. The aim of the current study was to examine the neural correlates of previous finding using fMRI. For this goal, dual task conditions that required suppression or no suppression were manipulated. In general, several areas were more activated in the interference conditions than in the less interference conditions, although both conditions were dual condition. More important finding is that the specific areas activated in the phonological suppression condition were right inferior frontal gyrus, left angular, and inferior parietal lobule, while the areas activated in the other condition were mainly in the right superior temporal gyrus and anterior cingulate gyrus. Furthermore, the areas activated in the phonological or visual less suppression condition were right medial frontal gyrus, left middle frontal gyrus, and bilateral medial frontal gyri, anterior cingulate cortices, and parahippocampal gyri, respectively. These results revealed that sharing the processing code invokes interference, and its neural basis.

Keywords : arithmetic skill, working memory, interference, suppression, functional magnetic resonance imaging