

무선열 생성과제에서 반응후보 수에 따른 뇌활성화 양상

이 병 택¹⁾

김 청 택^{1),2)*}

¹⁾서울대학교 심리과학 연구소

²⁾서울대학교 심리학과

본 연구에서는 무선열 생성과제 수행동안 반응 후보 수의 많고 적음에 수반되는 뇌활성화 양상의 차이를 살펴보고자 하였다. 반응후보의 수가 크거나 적고의 관계없이 단순 세기 조건에 비해 항상 활성화 수준이 높았던 영역은 전대상회 (ACC), 하전두회 (IFG), 하두정 소엽 (IPL) 및 상측두회 (STG) 등의 영역이었다. 반응후보의 다수조건과 소수조건을 직접 비교했을 때, 소수조건에 활성화 수준이 높았던 영역은 측-후두엽 네트워크와 전대상회, 중심후회 등을 포함하는 매우 넓은 영역이었음에 비해 다수조건에서 활성화 수준이 높았던 영역은 내전회 (medial frontal gyrus), 상두정 소엽과 상측두회를 포함하는 좀 더 좁은 영역에 국한되었다. 이러한 결과를 토대로 본 연구는 무선열 생성과정을 기존의 작업기억 용량 가설만으로 설명하는 것은 곤란하며, 그보다는 처리 전략 등의 다른 가설의 가능성을 논의하였다.

주제어 : 무선열 생성, 부챗살 효과, 기능자기공명영상, 용량설, 처리전략

* 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

서론

오늘날 정보처리 패러다임의 연구에서 복잡한 인지과제 수행을 설명하는데 가장 자주 동원되는 개념 가운데 하나는 작업기억이다. 작업기억은 여러 인지 과제 수행에 핵심적인 역할을 한다고 간주되어 왔으며, 이 과정에 '제한 용량'의 요인이 과제 수행을 제한하는 것으로 가정되었다. 한 가지 역설적으로 보이는 사실은 노력이 전혀 들지 않는 것처럼 보이는 무선열 생성 과제에서도 작업기억의 역할이 중요하다는 점이다(Baddeley, 1966). 무선열 과제란 사람들에게 특정 개수의 숫자들 세트 가운데 임의의 수를 하나씩 선택하는 복원추출 상황을 요구하는 것이다. 아무 숫자나 선택해도 되기 때문에 노력이 들 것 같지 않음에도 불구하고 여러 선행연구들은 이 과제가 매우 주의자원을 소모함을 입증하였다(Baddeley, 1966; Wagenaar, 1972; Robertson, Hazlewood, & Rawson, 1996; Jahanshahi, Saleem, Ho, Dirnberger, & Fuller, 2006; Brown, Soliveri, & Jahanshahi, 1998; Ahn, 1999). 따라서 무선열의 생성과정도 작업기억 용량에 따라 달라질 것이라는 추론이 가능해진다.

Tunc(1964)에 따르면 사람들이 생성하는 무선열의 무선성에 영향을 주는 요인들로는 생성 속도라든지 혹은 생성시의 반응 후보수(set size)를 들 수 있으며, 이는 후속 연구들을 통하여 검증된 바 있다(Towse & Mclachlan, 1999; Warren & Morin, 1965; Wiegiersma, 1975). 특히 반응후보 수의 증가에 따른 생성된 무선열의 무선성 감소에 대해 Baddeley나 Warren과Morrin은 사람들의 작업기억 용량의 제한 때문이라고 주장하였다.

작업기억 용량과 무선열 생성과제 수행간의 관계는 유달내, 이병택, 조명환(2003)의 개인차 연구에서 더욱 직접적으로 관찰된 바 있다. 유달내 등은 작업기억 용량이 작은 저폭 집단이 무선열 생성과제 동안 생성하는 무선열이 덜 무선적임을 관찰하였다. 그들에 따르면 저폭 집단의 무선열이 덜 무선적이었던 까닭은 이들이 특정 숫자열의 반복을 잘 회피하지 못하기 때문으로, 이러한 억제기체에서의 효율성의 차이가 저폭집단과 고품 집단의 무선성의 차이를 가져온다고 주장하였다. 그들의 이러한 주장은 부적절 정보의 억제가 일반적인 작업기억 용량의 제한을 받는다는 Rosen과 Engle(1997)의 주장을 재확인한 것이라 할 수 있다.

근래에는 무선열 생성과제 수행 동안의 신경 기반을 찾으려는 시도가 활발해졌

다. 예컨대, 전두엽 부분의 손상을 입은 파킨슨씨병 환자나 알츠하이머병 환자들의 경우 정상인에 비해 생성한 무선열의 무선성이 낮음을 관찰한 연구(Spatt, & Goldenberg, 1993)라든지, 혹은 일반인들을 대상으로 경두개 자기자극(Transcranial magnetic stimulation) 기법을 사용하여 등외측 전전두엽(DLPFC) 부위를 자극하여 그 기능을 일시적으로 마비시켰을 때, 이들이 생성한 무선열의 무선성이 낮아짐을 확인한 Jahanshahi와 Dirnberger(1999)의 연구를 그 예로 들 수 있다. Jahanshahi, Profice, Brown, Ridding, Dirnberger 및 Rothwell(1998)은 좌측 등외측 전전두엽의 기능이 주로 자동적으로 활성화된 정보 혹은 습관적 반응의 억제이기 때문에 이 부위의 마비가 무선성을 저하시킨다고 주장하였다.

기존의 환자 대상의 신경심리적연구 외에도 최근에는 뇌영상기법과 같은 비침습적 기법을 사용하여 무선열 생성과제 수행동안의 신경기반을 탐색하려는 시도들이 있어왔다. 이들 연구는 신경심리 연구들과 마찬가지로 전두엽이 무선열 생성과제에 주요한 영역임을 보여주었다. 특히 Jahanshahi, Dirnberger, Fuller, 및 Frith(2000)는 무선열 생성조건을 단순 세기 조건과 비교했을 때 췌기 앞부분(precuneus), 두정엽, 좌측 등외측 전전두엽, 소뇌, 전대상회, 하전두회(inferior frontal gyrus), 치상핵(dentate nucleus)을 포함하는 광범위한 영역이 네트워크를 이루어 활성화됨을 보였다. 정확히 동일한 영역을 보고한 것은 아니지만, Daniels, Witt, Wolff, Jansen, 및 Deuschl(2003) 또한 등외측 전전두엽, 외측 전운동피질, 전대상회, 외측 두정엽과 상측 두정엽 피질이 무선열 생성과 관련있다고 보고한 바 있다.

기존의 무선열 생성과제 연구들이 관찰한 결과는 Smith와 Jonides(1999)가 작업기억의 중심 영역이 등외측 전전두엽 영역 뿐만 아니라 전대상회라고 주장했던 점이나, 혹은 Milham, Erickson, Banich, Kramer, Webb, Wszalek 및 Cohen(2002)은 전대상회, 전보조 운동영역(presupplementary motor area; preSMA), 중전두회 (middle frontal gyrus), 하전두회, 상두정엽 및 내두정엽, 시각 피질 등의 영역 등이 주의통제에 관여한다는 주장에 비추어 볼 때, 작업기억의 신경적 기반을 밝히려는 연구에서의 결과와 일치하는 것으로 보인다.

이 영역들 가운데, 특히 전전두엽 피질과 전대상회는 작업기억의 기능과 관련하여 주목받았다. Garavan, Ross, Murphy, Roche, 및 Stein(2002)은 일반적으로 억제와 같은 중앙집행부의 기능은 전전두엽 피질과 밀접한 관련이 있지만, 빠른 반응 혹은

자동화된 반응 등을 억제해야 할 경우 전대상회가 더욱 관련있음을 제안하였다. 전전두엽 가운데서 특히 좌측의 하전두회(inferior frontal gyrus) 영역은 동시과제 상황에서 발생하는 간섭과 이의 억제에 수반되는 것으로 알려졌다(이병택과 이경민, 2007). 한편 전대상회는 좀 더 효율적인 주의-조절(attention-regulating) 체계의 역할을 하는 것으로 알려진 바 있다(Osaka, Osaka, Kondo, Morishita, Fukuyama, Aso 및 Shibasaki, 2003).

이러한 여러 연구들의 결과로부터 전전두엽과 전대상회가 작업기억의 억제와 관련있음을 알 수 있다. 그러나 이들 연구의 결과가 용량과 억제의 관계를 직접 고려한 것이 아니기 때문에, 작업기억의 용량과 관련하여 억제에 수반되는 영역에 관한 어떠한 결론을 내리는 것은 이 시점에서 곤란하다. 이러한 논의는 무선열 생성과제의 연구에서도 마찬가지로 적용된다. 무선열 생성과제가 다양한 인지적 기능을 요구하며, 또한 다양한 영역들이 이들 인지적 기능에 수반됨을 가정하는 것이 합리적이지는 않지만, 이들 각각의 영역이 어떠한 인지적 기능에 각기 사상되는 지를 밝혀야 하는 문제가 남아있다.

본 연구에서는 무선열 생성과제에서 반응 후보의 수를 조작하여 반응 후보의 수가 적은 소수조건과 그 수가 많은 다수조건에서의 뇌활성화 양상을 비교했을 때, 작업기억 용량과 관련하여 등외측 전전두엽, 전대상회 및 뇌전회와 다른 영역간의 차별적인 활성화가 발생하는지를 살펴보고자 하였다. 반응후보의 수를 조작하게 되면 반응 후보수의 효과, 즉 부챗살 효과(fan effect; Anderson, 1974)라는 잘 알려진 현상을 관찰하게 되는데, 이는 특정 기억 항목에 대해 경합하는 연합의 수가 증가할 수록 기억검사에서 반응시간이 증가하거나 오류율이 증가하는 것을 일컫는다. 따라서 반응 후보의 수가 증가하는 것은 작업기억의 용량을 많이 필요로 하는 것과 밀접한 관련을 갖는다고 할 수 있다.

다만 무선열 생성과제는 전통적인 부챗살 효과의 연구와는 달리 장기기억을 요구하지 않지만, Tune(1964)의 주장과 같이 반응후보의 수와 작업기억 용량간의 정적 상관을 가정한다는 공통점을 갖는다. 따라서 무선열 생성과제 수행동안 작업기억 용량의 부담만을 가정한다면, 반응후보의 수가 많은 다수 조건에서는 기존 작업기억의 주요 영역들의 활성화가 관찰될 것이다. 반면 반응 후보의 수가 적은 소수 조건에서의 활성화 영역은 다수조건과 동일하지만, 다만 그 강도가 약할 것이라 기대

된다.

그러나 작업기억 용량 그 자체가 아닌, 무선열 생성과제 수행 동안의 처리 전략을 고려한다면 전혀 다른 예측이 가능하다. 구체적으로 기술하자면, 소수 조건에서 피험자들은 동일한 패턴을 생성할 더 많은 기회를 갖게 되지만, 무선열을 생성하는 과제의 특성상 이러한 유사한 패턴의 생성을 피해야 한다. 이러한 동일 패턴 사용의 억제는 작업기억 용량을 더 많이 요구할 것이고, 따라서 억제와 관련된 영역, 즉, 좌측 하전두회와 억제기제의 사용에 필요한 용량의 배분에 관여할 것으로 기대되는 전대상회에서의 활성화가 기대된다. 반면 반응후보의 다수 조건에서는 다양한 패턴의 생성과 같은 억제의외의 좀 더 일반적인 작업기억 기능과 관련된 영역에서의 활성화가 관찰될 것이다.

방 법

참가자

서울대학교 홈페이지를 통해 모집된 건강한 남녀 16명(남자 9명, 여자 7명)이 실험에 자발적으로 참가하였으며, 이들은 실험 참가의 댓가로 2만원을 지급받았다. 참가자들의 평균 연령은 25.0세로 모두 오른손잡이였고, 신경계 질환의 과거력이 없었다.

자극재료 및 절차

총 시행시간은 426초로, TR 3초였다. 실험의 각 조건은 1부터 4까지 네 개의 수를 이용하여 무선열을 생성하는 소수조건, 0부터 9까지의 열 개의 수를 이용하는 다수 조건이 있었다. 한편, 1부터 4까지의 수를 차례대로 반복하도록 하는 세기(counting) 조건을 추가로 두어, 이를 통제조건으로 삼았다. 단순 세기 조건은 무선열 생성과제와 비교했을 때, 반복의 회피/억제, 다양한 전략의 선택 등을 위한 노력이 최소화된다고 할 수 있고, 이러한 점에서 무선열 생성과제의 적절한 통제조건이라

고 할수 있다. 구체적인 반응후보 수의 결정은 반응 후보의 수가 두 개에서 여덟 개 까지일 때와 비교해서 열 개일 때 자신의 반응 분포를 일정하게끔 유지하려는 시도가 가장 비효과적임을 보였던 Wiegiersma(1975)의 결과를 고려한 것이다.

각 조건은 반투명 스크린을 통하여 제시되는 단서에 따라 102초씩 진행되었으며, 전체 시행 시간 중 최초와 마지막 30초, 그리고 각 실험 조건간 30초의 간격을 두었다. 이 간격 시간 동안 '-' 신호를 쳐다보는 기저 상태를 설정하였다. 각 실험조건에서는 다수 조건 ('L' 단서), 소수 조건 ('S' 단서), 세기 조건 ('I' 단서)을 뜻하는 단서가 초당 1회씩 깜박였고, 이 속도에 맞춰 하나씩의 난수를 생각하여 생성하거나 혹은 1부터 4까지의 숫자를 차례로 셈하도록 하였다. 각 실험조건의 순서는 참가자에 따라 무선화되었다.

머리 흔들림으로 인한 인공음영의 생성을 피하기 위해 촬영시 머리를 움직이지 말도록 지시하였다. 또한 말하는 동안의 머리 움직임을 통제하기 위해 생성하는 무선열을 소리내어 말하지 않고 생각만 하도록 지시하였다. 이러한 제한 때문에 참가자들이 생성한 무선열을 기록할 수 없었다.

MRI 촬영은 Signa 1.5T 기기(General Electric)을 이용하였으며, echo planar imaging (EPI)을 구현한 gradient echo sequence를 사용하였다. 이미지 획득에 사용한 조건은 다음과 같았다 TR 3000 ms, TE 60 ms, flip angle 90도, number of slices 20 without gap, slice thickness 5.0 mm, matrix size 64 x 64; field of view 240 x 240 mm, inplane resolution 3.75 x 3.75 mm. 촬영 평면은 AC-PC(anterior commissure - posterior commissure) 선과 평행하도록 위치시켰다. EPI 이미지의 정규화를 위해 T1 이미지들을 얻었으며, 이 때의 조건은 TR 500 ms, TE 12 ms, matrix size는 256 x 256이었다.

16명의 참가자들로부터 나온 뇌영상 자료들을 FSL(Analysis Group, FMRIB, Oxford)을 이용하여 표준화된 공간에 정규화시키고 활성화 영역을 측정하였다. 각 참가자의 결과를 토대로 집단분석을 실시하였으며, voxel당 $p < .025$ 의 역치(다중비교에 대한 비보정)를 통과한 부피점을 선택한 후, 이들 가운데 연속된 활성화 영역의 크기가 8 mm^3 크기의 부피점 20개 이상인 경우를 유의한 활성화 영역으로 삼았다. 이와 같은 역치는 2중 오류의 발생을 최소화하기 위해 무선열 생성조건의 결과가 기존 결과를 반복할 수 있는 지를 고려하면서 동시에 1중 오류의 발생을 통제하는 수준을 고려하여 정하여졌다.

결 과

무선열 수행 동안의 활성화 영역을 알아보기 위해 다수조건에서의 활성화 수준과 통제조건에서의 활성화 수준의 비교와 소수조건에서의 활성화 수준과 통제조건에서의 활성화 수준을 비교한 후(표 1과 표 2), 이들 두 비교에서의 공통된 활성화 영역을 살펴보았다(표 3). 두 비교에서 공통적으로 활성화 영역은 전대상회, 중전두회, 하전두회, 및 상측두회, 하두정소엽 (inferior parietal lobule) 등이었다. 그림 1은 다수 조건과 세기 조건(빨간색), 그리고 소수 조건과 세기 조건의 비교(파란색)를 통해 얻어진 활성화 영역을 나타내고 있다. 이 그림에서 특히 두 비교들의 공통 영역(초록색)은 반응 후보수의 많고 적음에 관계없이 무선열 생성 과정에 수반되는 영역이라고 할 수 있다.

한편, 무선열 생성조건에서의 활성화 수준이 단순 세기 조건에 비해 높았던 영역들 가운데, 다수조건에서의 활성화 수준이 소수조건에서의 활성화 수준에 비해 높

표 1. 다수조건에서의 활성화 수준이 통제조건에 비해 높았던 영역과 그 좌표

Side	Coordinates			k	z	BA	Region
	x	y	z				
R	70	-32	16	30	3.99	22	Superior temporal gyrus
R	50	8	42	24	2.32	6	Middle frontal gyrus
R	6	-12	8	49	2.72	0	Thalamus
L	-6	16	50	123	3.12	6	Medial frontal gyrus
L	-28	0	52	365	3.36	6	Middle frontal gyrus
L	-34	-56	38	26	2.63	40	Inferior parietal lobule
L	-46	10	34	56	2.88	44	Inferior frontal gyrus
L	-56	-30	38	195	2.70	40	Inferior parietal lobule
L	-64	-10	-2	117	4.81	22	Superior temporal gyrus

BA는 Brodmann Area의 약자, z는 z-score의 약자이며, k는 활성화 군집의 크기를 부피점의 수로 나타낸다. 각 영역의 좌표는 MNI 좌표를 기준으로 표기하였다.

표 2. 수조건에서의 활성화 수준이 통제조건에 비해 높았던 영역과 그 좌표

Side	Coordinates			k	z	BA	Region
	x	y	z				
R	68	-18	14	60	2.82	43	Postcentral gyrus
R	62	-18	42	80	2.98	6	Precentral gyrus
R	44	16	44	102	5.04	9	Precentral gyrus
R	38	-76	-18	60	3.12	19	Fusiform gyrus
R	24	-18	-16	44	2.49	35	Parahippocampal gyrus
R	16	-64	56	114	2.97	7	Precuneus
R	12	-74	30	34	2.83	7	Cuneus
R	2	-8	2	79	3.53	-	Thalamus
L	-4	20	38	274	3.21	32	Anterior cingulate gyrus
L	-12	-70	50	34	4.02	7	Precuneus
L	-10	22	56	27	2.88	8	Superior frontal gyrus
L	-30	-2	52	509	4.17	6	Middle frontal gyrus
L	-36	-38	56	106	3.63	40	Postcentral gyrus
L	-54	-10	40	848	4.68	4	Precentral gyrus
L	-52	12	28	124	3.53	9	Inferior frontal gyrus
L	-64	-8	0	104	4.92	22	Superior temporal gyrus

BA는 Brodmann Area의 약자, z는 z-score의 약자이며, k는 활성화 군집의 크기를 부피점의 수로 나타낸다. 각 영역의 좌표는 MNI 좌표를 기준으로 표기하였다.

표 3. 다수조건과 소수조건이 세기 조건에 비해 공통적으로 활성화 수준이 높았던 영역의 좌표

Side	Coordinates			k	z	BA	Region
	x	y	z				
L	-6	14	48	101	2.90	32	Anterior cingulate gyrus
L	-28	0	52	323	3.36	6	Middle frontal gyrus
L	-36	-54	38	20	2.60	40	Inferior parietal lobule
L	-48	10	32	23	2.49	44	Inferior frontal gyrus
L	-56	-30	38	136	2.70	40	Inferior parietal lobule
L	-64	-10	-2	67	4.08	21	Superior temporal gyrus

BA는 Brodmann Area의 약자, z는 z-score의 약자이며, k는 활성화 군집의 크기를 부피점의 수로 나타낸다. 각 영역의 좌표는 MNI 좌표를 기준으로 표기하였다.

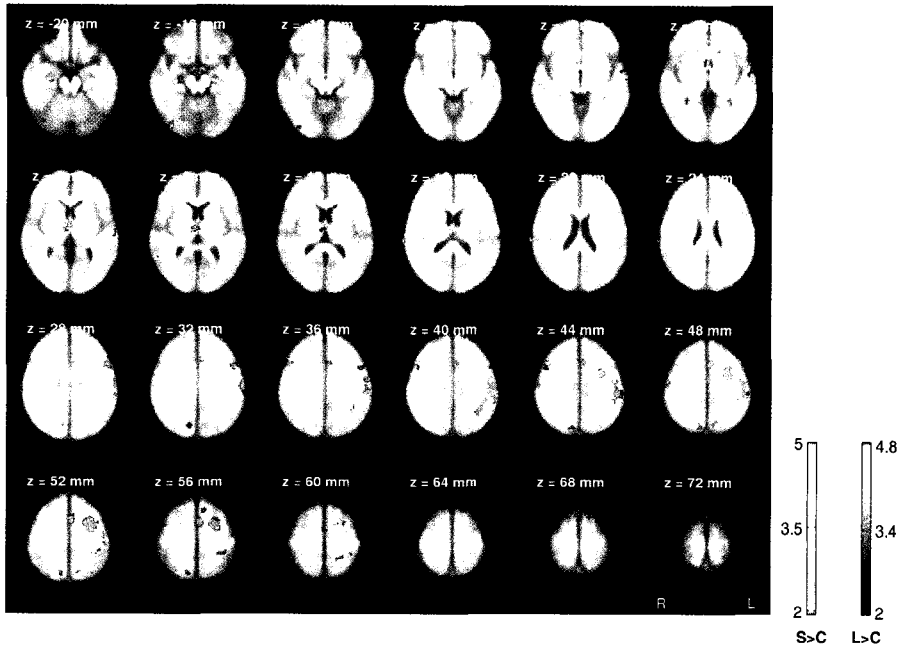


그림 1. 다수조건과 소수조건이 모두 세기 조건에 비해 활성화 수준이 높았던 영역 빨간색으로 표시된 영역은 세기 조건에 비해 소수 조건에서 더욱 활성화 수준이 높았던 영역을 가리키며, 파란색의 영역은 세기 조건에 비해 다수 조건에서 활성화 수준이 더 높았던 영역을 가리킨다. 초록색으로 표시된 영역은 두 비교에서 공통적으로 활성화된 영역을 가리키며, 우측의 그림은 신호 크기의 지표를 z-score로 나타낸 것이다. 활성화 여부의 결정 기준은 $p < .025$ 의 역치에서 20개 이상의 부피점을 갖는 지의 여부였다.

있던 영역은 상두정 소엽, 내측 전두회(medial frontal gyrus), 상측두회, 시상, 미상핵, 설상회, 하두정 소엽 등이었다(그림 2의 빨간색). 반면 다수조건에 비해 소수조건에서 더욱 활성화 수준이 높았던 영역은 하두정 소엽, 방추형 이랑(fusiform gyrus), 해마 방회(parahippocampal gyrus) 등을 포함하는 측-후두엽 네트워크, 전대상회, 하전두회, 하후두회 등의 넓은 영역이었다(그림 2의 파란색). 정확한 활성화 영역의 좌표를 표 4에 제시하였다.

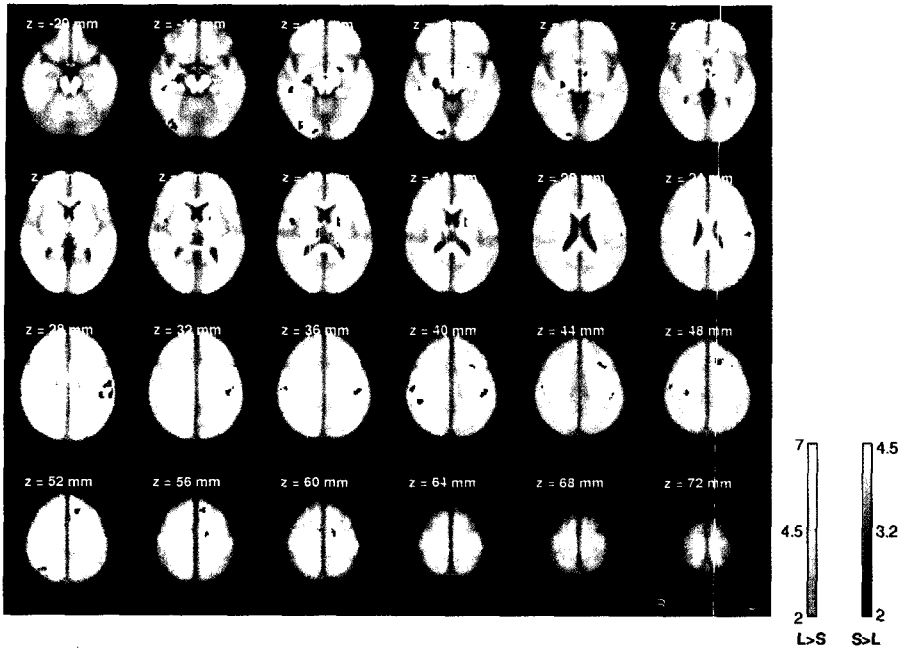


그림 2. 다수조건과 소수조건을 직접 비교하였을 때의 그림

빨간색으로 표시된 영역은 세기 조건에 비해 무선열 생성조건에서 더욱 활성화된 영역들 가운데 다수조건에서의 활성화 수준이 소수 조건에 비해 더욱 높은 부분을 가리키며, 파란색으로 표시된 영역은 세기 조건에 비해 무선열 생성조건에서의 활성화 수준이 높았던 영역들 가운데 소수조건에서의 활성화 수준이 다수 조건에 비해 높았던 영역을 가리킨다. 우측의 그림은 신호 크기의 지표를 z-score로 나타낸 것이다. $p < .025$ 의 역치에서 20개 이상의 부파절을 갖는 영역들을 활성화 영역으로 간주하였다.

표 4. 다수조건과 소수조건 무선열 생성 조건에서 활성화된 영역들 가운데, 다수조건과 소수조건 비교에 따른 활성화 영역

Side	Coordinates			k	z	BA	Region
	x	y	z				
다수조건 > 소수조건							
R	44	-66	54	48	2.55	7	Superior parietal lobule
L	-18	-32	14	347	6.95	-	Thalamus
R	6	-2	60	36	4.07	6	Medial frontal gyrus
L	-4	-80	-14	31	3.58	18	Lingual gyrus
L	-10	-16	24	38	2.41	-	Caudate
L	-48	2	-8	29	2.69	22	Superior temporal gyrus
소수조건 > 다수조건							
R	68	-24	26	22	3.74	2	Postcentral gyrus
R	54	-18	38	54	2.75	3	Postcentral gyrus
R	52	-28	-14	51	2.73	20	Middle temporal gyrus
R	48	-38	42	33	2.43	40	Inferior parietal lobule
R	44	0	10	38	2.67	13	Insula
R	36	-76	-16	76	4.31	19	Fusiform gyrus
R	26	-14	-12	218	3.56	-	Parahippocampal gyrus
R	30	-28	50	22	2.38	3	Postcentral gyrus
R	14	-92	-12	76	4.26	18	Inferior occipital gyrus
L	-6	-8	-2	21	3.57	-	Thalamus
L	-14	24	50	194	4.03	32	Anterior cingulate gyrus
L	-16	-10	60	32	3.00	6	Sub-gyral
L	-20	-2	-12	23	2.41	34	Parahippocampal gyrus
L	-20	4	16	40	3.45	34	Lentiform nucleus
L	-34	14	42	51	4.13	44	Inferior frontal gyrus
L	-56	-16	28	216	3.74	9	Precentral gyrus
L	-60	-28	28	20	2.55	40	Inferior parietal lobule

BA는 Brodmann Area의 약자, z는z-score의 약자이며, k는 활성화 군집의 크기를 부피점의 수로 나타낸다. 각 영역의 좌표는 MNI 좌표를 기준으로 표기하였다.

논 의

본 연구에서 관찰된 주요 결과를 세 가지로 요약하면 다음과 같다. 첫째, 피험자들이 무선열을 생성하는 동안 주로 활성화되는 영역은 기존 작업기억 연구에서 널리 알려진 전대상회, 하전두회, 하두정 소엽 등이었다. 이 결과는 무선열 생성과제가 작업기억에 수반된다는 행동기반의 연구들 뿐만 아니라 신경기반을 찾으려 했던 신경심리학적 연구결과를 재확인하는 것이라 할 수 있다. 둘째, 반응후보의 다수 조건에 비해 소수 조건에서 더욱 활성화된 부위는 전대상회, 하전두회를 비롯한 전두엽 영역과 하두정 소엽, 방추형 이랑, 헤마 방회 등을 포함하는 측-후두엽 네트워크(temporo-occipito network) 등이었으며, 반면 다수 조건에서 더욱 활성화된 영역은 내측 전두회, 상두정 소엽, 상측두회 등의 영역이었다.

이 결과들 가운데 가장 흥미로운 것은 소수 조건에서 전대상회와 하전두회 등의 영역이 다수 조건에 비해 더욱 활성화되었다는 사실이다. 이 결과가 흥미로운 까닭은 일반적으로 반응후보수의 효과는 반응후보의 수가 클수록 더욱 많은 자원을 요구하는 것으로 알려져 있고(Cantor & Engle, 1993), 따라서 작업기억 용량의 배분과 관련된 전대상회에서의 활성화가 관찰된 본 연구의 결과는 이러한 상식과 반대로 보이기 때문이다. 이 사실은 억제기제의 사용과 관련하여 설명이 가능한데, 억제기제의 사용이 작업기억 용량을 소모하는 기제로 알려져 있다(Rosen & Engle, 1997). 소수조건에서 더욱 활성화된 영역 가운데 하전두회는 이병택, 이경민(2007)에 따르면 갈등상황이 발생했을 때, 이의 해소와 관련된 영역이다. 따라서 이 결과는 다수조건에 비해 소수조건에서 더욱 많은 간섭 혹은 갈등 상황이 발생했을 가능성을 시사하며, 이러한 가능성은 소수조건에서 더욱 적은 수의 반응 후보만을 이용하여 같은 시간 동안 무선열 생성과제를 수행하는 동안 반복을 피해야 하는 상황의 발생빈도가 높다는 사실과 밀접한 관련을 갖는 것으로 보인다. 전대상회의 활성화는 억제기제의 사용에 수반되는 작업기억 용량의 배분과 관련있는 것으로 보인다.

이러한 설명은 부채살효과(fan effect)를 단순히 작업기억용량으로 설명하려는 기존의 접근(Bunting, Heitz, 2004) 을 좀 더 정교화한 것으로 이해할 수 있다. 비록 무선열 생성과제가 아닌 문장쌍 대조과제에서 얻어진 결과이긴 하지만, 근래 수행된 부채살 효과의 신경적 기반에 관한 연구(D'Arcy, Ryner, Richter, Service, & Connolly, 2004)

에 따르면 부채살 효과는 주로 좌측 등외측 전전두엽과, 하두정 소엽의 영역과 관련있는 것으로 보인다. 이러한 결과는 본 연구의 다수조건에서의 결과와 부분적으로 일치하는 것이다. 이런 점에서 부채살 효과를 단순히 작업기억용량으로 설명하는 것 보다는, 이들 영역이 주로 기억 인출과 관련된 작업기억의 기능과 밀접한 관련이 있다고 설명하는 것이 좀 더 타당한 것으로 보인다.

본 연구에서 발견한 사실들 가운데, 방추 이랑, 해마 방회와 같은 후측두엽에서의 활성화가 소수 조건에서 관찰되었다는 사실도 주목할 만하다. 이 영역들은 얼굴의 표상(Kanwisher, McDermott, & Chun, 1997)이라든지, 혹은 장소의 기억(Epstein, Harris, Stanley, & Kanwisher, 1999)에 수반되는 것으로 알려진 곳이다. 따라서 소수조건에서 피험자들은 단순히음운적인 부호를 이용하여 무선열 과제를 수행했다기보다는 과제 수행시에 좀 더 시각적인 심상을 이용하는 전략을 사용했을 가능성을 시사한다. 다만 이러한 설명은 아직까지 하나의 가설일 뿐, 후속 연구를 통해 좀 더 직접적으로 검토되어야 할 것이다.

다수 조건에서 활성화된 영역은 상두정 소엽, 혹은 내측 전두회와 같은 영역이었다. 이 영역들 가운데 내측 전두회의 영역은 배측의 전전두엽이 기억의 인출과 밀접한 관련을 가짐(Sohn, Goode, Stenger, Carter, & Anderson, 2003)을 고려할 때, 피험자들이 다수조건에서 좀더 기억인출에 의존적인 전략을 이용하여 무선열을 생성했을 가능성을 시사한다.

다수 조건에서의 활성화 수준이 높았던 영역 가운데, 기저핵(basal ganglia)의 일부분인 미상핵(caudate nucleus)이 관찰된 것도 흥미롭다. 이 영역은 운동학습이나(Baker, Rogers, Owen, Frith, Dolan, Frackowiak, & Robbins, 1996; Dagher, Owen, Boecker, & Brooks, 1999) 혹은 운동억제(Aron, Schlaghecken, Fletcher, Bullmore, Eimer, Barker, Sahakian, & Robbins, 2003)와 관련있는 것으로 알려져 있다. 따라서 다수조건에서 피험자들은 소수조건에 비해 기학습된 절차적 지식 등을 활용하여 무선열을 생성했을 가능성을 시사한다. 비록 하나의 가능성이지만 기존지식의 인출이 주로 절차적 지식과 결합된 형태로 이루어졌을 가능성이 있고 대표적인 예로 전화번호의 인출 등을 들 수 있을 것이다. 다만 이러한 설명이 사후해석에 전적으로 의존한 것이기 때문에 무선열 생성과정의 전략적인 측면은 후속 연구를 통해 이루어져야 할 것이다.

한 가지 흥미로운 점은 전대상회와 하두정소엽의 경우 소수조건과 다수조건에서

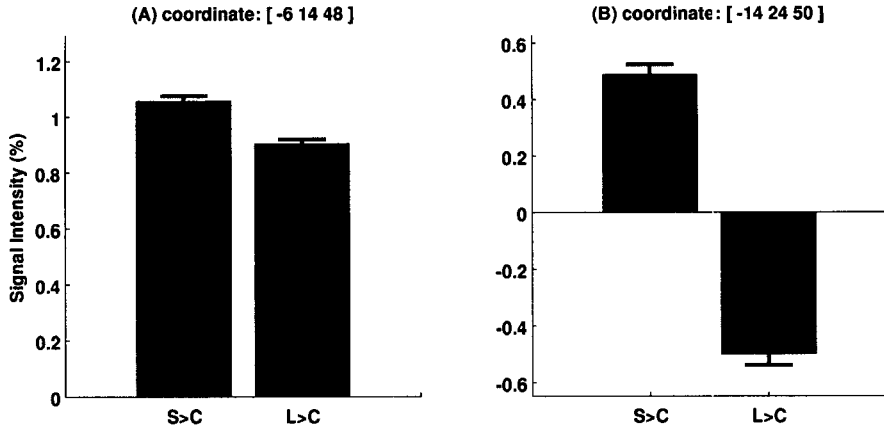


그림 3. ACC의 활성화 영역 가운데, 다수조건과 소수조건 모두에서 통제조건에 비해 활성화된 좌표에서의 신호 크기(A)와, 다수조건에 비해 소수조건에서 더욱활성화된 좌표에서의 신호크기(B). 각 그림에서 각 좌표는 MNI 공간상의 위치.

모두 공통적으로 활성화된 영역으로 관찰되었으며(그림 3A 참고, 동시에 소수조건과 다수조건을 비교했을 때 소수조건에서 더욱 활성화된 것으로 나타났다(그림 3B). 이때 각 비교조건에서 활성화된 정확한 위치는 동일하지 않았다. 이러한 사실에 대한 한 가지 설명은 전대상회가 다수조건에서도 활성화되었지만 소수조건이 이보다 유의하게 더 활성화되었다는 것이다. 그러나 이러한 설명은 옳지 않은데 그림 3B에서 볼 수 있듯이 전대상회 영역 내에서도 특정 위치에서는 다수조건에서의 활성화 수준이 통제조건에 비해 유의하게 높지 않음을 알 수 있다. 따라서 다수조건의 경우 전대상회 혹은 하두정소엽의 활성화영역이 소수조건에 비해 좁았다고 해석하는 것이 더욱 적절할 것이다.

본 연구는 작업기억 연구와 관련하여 기존의 전통적인 인지심리학적 방법론을 통해 얻어진 무선열 생성 과정의 연구를 뇌기능영상 기법을 통해서 발전시킬 수 있음을 보여준다. 특히 반응 후보수의 통제를 통해, 이러한 조작이 단순한 작업기억 용량설로 설명하는 것에 비해 활성화 영역을 설명하는데 유리함을 보여주었다. 다만 본연구는 실험과 동시에 반응 결과를 얻을 수 없었다는 문제점을 갖고 있다. 이 문제점으로 인해 실험의 예기치 못한 효과를 최소화하기 위해 기존 행동 실험의 여

러 가지 조변수(parameter)를 가능한 한 그대로 유지해야 했다. 결과적으로 단순히 행동 결과와 뇌활성화 양상간의 직접적인 관련을 살피는 것이 가능치 않다는 점 뿐만 아니라, 영상 신호의 효과에 악영향을 미쳤을 가능성이 크다. 후속 연구에서는 이러한 문제점에 대한 보완책을 가지고, 무선열 생성과제 수행에서의 특정 처리전략의 채택이 뇌활성화 양상에 어떻게 영향을 미치는 지 등의 주제가 다루어질 수 있을 것이다.

참고문헌

- 안중찬 (1999). 작업기억 다중성분설에 근거한 덩이글 읽기에서 정합적 연역 추리의 개인차. 미발표 서울대학교 석사학위논문
- 유달내, 이병택, 조명한 (2003). 작업기억 용량에 따른 무선열 생성과제 수행에서의 개인차. *한국심리학회지: 실험*, 15 (2), 143-159.
- 이병택, 이경민 (2007). 이중과제 수행시의간섭효과에 수반되는 신경기반: 산술연산 과 기억인출간의 상호작용. *인지과학*, 18 (2), 159-178.
- Anderson, J. R. (1974). Retrieval of propositional information from long-term memory. *Cognitive Psychology*, 5, 451-474.
- Baddeley, A. D. (1966). The capacity for generating information by randomization. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 18, 119-129.
- Brown, R. G., Soliveri, P., & Jahanshahi, M. (1998). Executive processes in Parkinson's disease-Random number generation and response suppression. *Neuropsychologia*, 36, 1355-1362.
- Bunting, M. F. Conway, A. R. A. R. P. (2004). Individual Differences in the Fan Effect and Working Memory Capacity, *Journal of Memory and Language*, 51, 604-622.
- Cantor, J. & Engle, R. W. (1993). Working-memory capacity as long-term memory activation: An individual-differences approach. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 19, 1101-1114.
- Daniels, C., Witt, K., Wolff, S., Jansen, O., & Deuschl, G. (2003). Rate dependency of the

- human cortical network subserving executive functions during generation of random number series—a functional magnetic resonance imaging study. *Neuroscience Letters*, 345, 25-28.
- D'Arcy, R.C., Ryner, L., Richter, W., Service, E., & Connolly, J.F. (2004). The fan effect in fMRI: left hemisphere specialization in verbal working memory. *Neuroreport*, 15, 1851-1855.
- Epstein, R., Harris, A., Stanley, D., & Kanwisher, N. (1999). The parahippocampal place area: Recognition, Navigation, or Encoding?, *Neuron*, 23, 115-125.
- Garavan, H., Ross, T. J., Murphy, K., Roch, R. A. P., & Stein, E. A. (2002). Dissociable Executive Functions in the Dynamic Control of Behavior: Inhibition, Error Detection, and Correction. *NeuroImage*, 17 (4), 1820-1829.
- Jahanshahi, M., & Dirnberger, G. (1999). The left dorsolateral prefrontal cortex and random generation of response: studies with transcranial magnetic stimulation. *Neuropsychologia*, 37, 181-190.
- Jahanshahi, M., & Dirnberger, G., Fuller, R. & Frith, C. D. (2000). The role of the dorsolateral prefrontal cortex in random number generation: A study with positron emission tomography. *NeuroImage*, 12, 713-725
- Jahanshahi, M., Saleem, T., Ho, A. K., Dirnberger, G., & Fuller, R. (2006). Random number generation as an index of controlled processing, *Neuropsychology*, 20, 391-399.
- Jahanshahi, M., Profice, P., Brown, R. G., Ridding, M. C., Dirnberger, G., & Rothwell, J. C. (1998). The effects of transcranial magnetic stimulation over the dorsolateral prefrontal cortex on suppression of habitual counting during random number generation. *Brain*, 121, 1533-1544.
- Kanwisher, N., McDermott, J., Chun, M. M. (1997). The fusiform face area: a module in human extrastriate cortex specialized for face perception. *Journal of Neuroscience*, 17, 4302-4311.
- Milham, M. P., Erickson, K. I., Banich, M. T., Kramer, A. F., Webb, A., Wszalek, T., & Cohen, N. J. (2002). Attentional control in the aging brain: insights from an fMRI study of the Stroop task. *Brain and Cognition*, 49, 277-296.

- 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 (3), 789-797.
- Robertson, C., R. Hazlewood, R., & Rawson, M. D. (1996). The effects of Parkinson's disease on the capacity to generate information randomly, *Neuropsychologia*, 34, 1069-1078
- Rosen, V. M., & Engle, R. W. (1997). The role of working memory capacity in retrieval. *Journal of Experimental Psychology: General*, 126, 211-227.
- Smith, E. E., & Jonides, J. (1999). Storage and Executive Processes in the Frontal Lobes, *Science*, 283, 1657-1661.
- 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.
- Spatz, J., & Goldenberg, G. (1993). Components of random generation by normal subjects and patients with dysexecutive syndrome. *Brain and Cognition*, 23, 231-242.
- Tune, G. S. (1964). A brief survey of variables that influence random generation. *Perceptual and Motor Skills*, 18, 705-710.
- Wagenaar, W. A. (1972). Generation of random sequences by human subjects: A critical survey of literature. *Psychological Bulletin*, 77, 65-72.
- Wiegiersma, S. (1976). Response Generation: Type of Analysis and the Limited Capacity Hypothesis. *Acta psychologica*, 40, 331-342.

1 차원고접수 : 2007. 10. 18

2 차원고접수 : 2008. 1. 17

최종게재승인 : 2008. 2. 11

(Abstract)

Brain Activation Associated with Set Size During Random Number Generation

Byeong-Taek Lee¹⁾

Cheongtag Kim^{1),2)}

¹⁾Institute of Psychological Science, Seoul National University

²⁾Department of Psychology, Seoul National University

This study aimed to investigate the preferential brain activations involved in the set size during random number generation (RNG). The RNG condition gave more increased activations in the anterior cingulate cortex (ACC), inferior frontal gyrus (IFG), inferior parietal lobule (IPL), and superior temporal gyrus (STG) than the simple counting condition, which was a control condition. When the activations were compared by the small set size condition versus the large set size condition, broad areas covering temporo-occipital network, ACC, and postcentral gyrus were more highly activated in the small set size condition than in the large set size condition, while responses of areas including medial frontal gyrus, superior parietal lobule, and lingual gyrus were more increased in the large set size condition than in the small set size condition. The capacity hypothesis of working memory fails to explain the results. On the contrary, strategy selection hypothesis seems to explain the current observations properly.

Keywords : random number generation, fan effect, fMRI, capacity hypothesis, strategy selection