한국심리학회지 : 임 상
The Korean Journal of Clinical Psychology
2004. Vol. 23, No. 2, 313-326

작업 기억의 신경생리적 기전: 사건관련전위 연구

김 명 선† 권 준 수 김 재 진

성신여자대학교 심리학과 / 서울대학교 의과대학 정신과학교실 / 연세대학교 의과대학 정신과학교실

작업 기억의 인지 과정 단계와 신경생리적 기전을 2-back과제와 사건관련전위를 사용하여 조사하였다. 원, 삼각형 및 정사각형이 자극으로 사용되었으며, 이 중에서 원이 목표 자극이었고, 삼각형과 정사각형이 비목표 자극이었다. 목표 자극인 원은 다시 일치 원과 불일치 원으로 구분되었다. 현재 제시되는 자극이 원이고 2시행 전에도 원이 제시되었을 경우 (일치 원), 피험자에게 버튼을 눌러 반응하는 것이 요구되었다. 그러나 현재 제시되는 자극이 삼각형 혹은 정사각형이거나 (비목표 자극), 현재 제시되는 자극이 원이더라도 2시행 전에 원이 제시되지 않았으면 (불일치 원), 피험자의 반응이 요구되지 않았다. 목표 자극 일치 원과 불일치 원을 비목표 자극에 비하여 유의하게 큰 N100 진폭을 보였다. P300의 경우, 일치 원이 불일치 원과 비목표 자극에 비해 더 큰 진폭과 더 짧은 잠복기를 보였다. 이에 덧붙여, 일치 원은 두정 부위에서 가장 큰 전위를 보인 반면 불일치 원과 비목표 자극은 전두 부위에서 가장 큰 전위를 보였다. 세 유형의 자극 모두 전두 부위에서 유사한 진폭과 잠복기를 가진 서파를 보였다. 이 결과들은 작업 기억에 관여하는 인지 과정의 단계들, 즉 주의 할당, 작업 기억 내용의 최신화 및 추후 시행을 위한 정보의 일시적 보유 등이 사건관련전위의 정점들을 통하여 반영된다는 것을 보여준다. 또한 작업 기억의 신경 회로를 구성하는 전전두엽과 두정엽이 각각 정보의 일시적 보유와 기억 내용의 최신화 과정에 관여한다는 것을 시사한다.

주요어 : 작업 기억, 사건관련전위, 2-back 과제, N100, P300, 서파

† 교신저자(Corresponding Author) : 김 명 선 / 성신여자대학교 심리학과 / 서울시 성북구 동선동 3가 249-1
TEL : 920-7592 / FAX : 920-7132 / E-mail : kimms@sungshin.ac.kr

작업 기억(working memory)은 인지 활동에 필요한 정보를 일시적으로 보유하고 조작하는 체계를 의미하며, 중앙집행기(central executives), 조음회로(articulatory loop) 및 시공간 잡기장(visuospatial sketchpad) 등의 하위 체계들로 구성되어 있다(Baddeley, 1986). 중앙집행기는 주의 과정과 자동적 과정을 지배하고 정보 처리의 조절과 통제 활동에 관여하는 것으로 알려져 있는 한편 조음회로와 시공간 잡기장은 각각 언어 자극과 시공간 자극의 처리에 관여하는 것으로 알려져 있다(Keefe, 2000). 작업 기억은 학습, 추리 및 이해 등과 같은 상위 인지 기능에 중요한 역할을 하며(Baddeley, 1992; Engel, Tuholski & Kane, 1999), 실제로 신경심리검사 수행과 작업 기억 사이에 유의한 정적 상관이 있는 것이 보고되고 있다(Carpenter, Just, & Shell, 1990; Gevins & Smith, 2000).

작업 기억의 신경생리적 기전을 밝히기 위하여 인간과 동물을 대상으로 한 많은 연구들이 실시되었으며, 이 연구들은 일관성 있게 전전두엽(prefrontal cortex)과 하두정엽(inferior parietal cortex)을 연결하는 신경 회로가 작업 기억의 신경생리적 기전이라고 보고하고 있다. 예를 들어 전전두엽에 손상을 입은 환자들에서 작업 기억의 장애가 관찰되고(Frisk & Milner, 1990; Shallice, 1988), 원숭이를 대상으로 한 연구에서는 정보를 일시적으로 보유하고 있는 동안 전전두엽에 위치하는 신경원들의 활동이 증가된다는 것이 보고되었다(Wilson, O'scalaidhe & Goldman-Rakic, 1993).

최근 들어 뇌영상 기법을 사용한 연구들 역시 작업 기억 과제 동안 정보를 일시적으로 보유하고 조작하는 데에 전전두엽이 중요한 역할을 한다는 것을 보고하고 있다(Nystrom, Braver, Sabb, Delgado, Noll & Cohen, 2000; Weinberger, Mattay, Callicott, Kotrla, Santha, Gelderen, Duyn, Moonen & Frank, 1996). 예를 들어 Callicott와 동료들(1998)은 작업 기억의 장애를 보이는 정신분열병 환자와 정상인을 대상으로 기능자기공명영상(functional Magnetic Resonance Imaging; fMRI)을 실시한 결과 정상인에서는 작업 기억 과제를 수행하는 동안 전전두엽(dorsolateral prefrontal cortex)과 두정엽 부위의 활동이 증가되는 반면 정신분열병 환자에서는 전전두엽의 활동이 정상인에 비해 유의하게 감소되어 있는 것을 발견하였다. 이에 덧붙여서 양전자단층촬영(positron emission tomography; PET)을 사용한 연구들도 작업 기억의 과제를 수행하는 동안 전전두엽의 활동이 증가된다는 것을 보고하였다(MacLeod, Buckner, Miezin, Petersen & Raichle, 1998; Owen, Evans & Petrides, 1996). 그러나 비록 뇌영상 기법이 작업 기억에 관여하는 대뇌 부위들에 관한 정보는 제공하지만, 낮은 시간 해상도(temporal resolution)로 말미암아 작업 기억이 어떤 인지 과정의 단계들로 구성되어 있고, 또 각각의 단계에 어떤 대뇌 부위가 관련되는가에 관한 정보는 제공하지 못한다(Gevins 등, 2000). 따라서 작업 기억을 구성하는 일련의 인지 과정들의 대뇌 기전을 밝히고자 한 연구들은 사건관련전위 (event-related potential; ERP)를 주로 사용한다.

사건관련전위는 특정 정보를 내포하고 있는 자극의 제시와 관련하여 초래되는 뇌의 전기적 활동을 의미하며, 정보 처리 과정의 각 단계들을 반영하는 일련의 정점(peak) 혹은 요소(component)들로 구성된다(Hillyard, 1983). 따라서 사건관련전위는 작업 기억의 인지 과정과 이에 관여하는 대뇌 부위들을 밝히는 데에 유용하게 사용될 수 있다. 실제로, 선행 연구들은 사건관련전위가 작업 기억의 신경생리적 기전을 이해하는 데에 매우 유용한 정보를 제공한다는 것을 보고하였다. 예를 들어 Bosch, Mecklinger 및 Friederici(2001)와

Mecklinger와 Pfeifer(1996)는 작업 기억의 과제 동안 사건관련전위를 측정한 결과, 정보를 일시적으로 보유하는 동안 전두 부위와 두정 후두 부위에서 서파(slow wave)가 관찰된다는 것을 보고하였다. Nielsen-Bohlman 과 Knight (1999)는 전전두엽에 손상을 입은 환자와 정상인을 대상으로 시각 작업 기억 동안 사건관련전위를 측정하였다. 전전두엽에 손상을 입은 환자는 정상인에 비하여 감소된 P300a 진폭과 증가된 N400 진폭을 보였다. 이들은 전전두엽의 손상이 전전두엽 부위와 내측두엽 및 두정 부위와의 단절을 초래하고, 이 결과 작업 기억의 장애가 초래한다고 주장하였다. 이에 덧붙여서 Pelosi와 동료들 (2000)은 우울증 환자의 작업 기억을 측정한 결과, 정상인들에 비해 우울증 환자들이 유의하게 감소된 N170과 LPC(late positive component) 진폭을 보였는데, 이는 작업 기억의 한 체계인 중앙집행기가 기능하지 못하는 것을 반영한다고 주장하였다. 비록 사건관련전위를 사용하여 작업 기억을 조사한 선행 연구들은 작업 기억을 구성하는 일련의 인지 단계들과 신경생리적 기전에 관한 유용한 정보를 제공하였지만, 작업 기억 동안 활발한 활동을 보이는 전전두엽과 후방 대뇌피질 영역들(posterior cortical regions)이 각각 어떤 기능적 역할을 담당하는가에 관해서는 일관성 있는 정보를 주지 못하고 있다. 이는 각 연구들에서 사용된 작업 기억의 과제가 다르기 때문인 것으로 여겨진다 (Bosch 등, 2001).

작업 기억을 측정하는 실험 방안으로 n-back 과제가 널리 사용된다. 이 과제는 피험자로 하여금 제시되는 일련의 자극들이 앞서 제시된 자극과 일치 혹은 일치하지 않는가를 판단하여 반응하게 한다(Smith, McEvoy & Gevins, 1999). 예를 들어 2-back 과제의 경우, 피험자는 현재 제시되는 자극이 2 자극 전에 제시된 것과 동일한 것인가를 판단해서 반응해야 하기 때문에 피험자는 적어도 2 시행 동안의 자극 순서를 기억해야 하고, 각 시행마다 현재 자극과 2 자극 전의 자극을 비교해야 한다. Gevins와 Smith(2000)는 2-back 과제와 사건관련전위를 사용하여 작업 기억의 신경생리적 기전을 조사하였다. 현재 제시되는 자극과 2 자극 전에 제시된 자극이 일치할 경우가 일치하지 않는 경우에 비하여 더 큰 N100 진폭과 P300 진폭, 그리고 더 짧은 P300 잠복기(latency)를 보였다. 이 결과는 현재 제시되는 자극과 2 자극 전에 제시된 자극이 일치할 때와 일치하지 않을 때, 주의 할당(attention allocation), 약호화, 정보의 최신화(updating of information) 및 정보 보유 등의 과정에 차이가 있다는 것을 시사한다.

본 연구는 2-back 과제를 사용하여 작업 기억 과정을 사건관련전위를 통하여 측정하였다. 그러나 전형적인 n-back 과제를 다소 수정하여 사용하였다. 작업 기억을 구성하는 인지 과정 단계들을 사건관련전위의 각 정점을 중심으로 살펴보고자 하였다. 특히 123 채널의 고밀도 뇌파를 사용하여 공간 해상도를 높이고자 하였으며, 이를 통하여 작업 기억을 구성하는 각 인지 과정의 신경생리적 기전을 이해하고자 하였다.

방 법

연구 대상

15명의 오른손잡이 정상인(남자: 11명, 여자: 4명)이 실험에 참여하였다. 연구 대상자의 평균 연령은 27세(SD=4.83)이었으며, 과거나 현재 신경과적, 정신과적 병력이 없고, 신체적 질환이 없는 정상인을 연구 대상으로 선정하였다. 연구

대상자들에게 실험에 관한 설명을 한 후 실험 동의서를 작성케 하였으며, 이들에게는 실험 참여에 대한 보수가 지급되었다.

2-back 과제

원, 삼각형 및 정사각형의 도형이 자극으로 사용되었다. 원은 피험자의 반응이 요구되는 목표 자극(target stimulus)인 반면 삼각형과 정사각형은 피험자의 반응이 요구되지 않는 비목표 자극(non-target stimulus)이었다. 그러나 목표 자극인 원은 다시 일치 원(match circle)과 불일치 원(nonmatch circle)으로 구분되었는데, 피험자에게 일치 원에만 반응하는 것을 요구하였다. 즉 현재 제시되는 자극이 원이고, 2 시행 전에도 원이 제시되었을 경우(일치 원), 피험자에게 버튼을 눌러 반응하도록 요구하였다. 반면 현재 제시되는 자극이 삼각형이거나 정사각형인 경우, 또는 현재 제시되는 자극이 원이지만 2 시행 전에 원이 제시되지 않았을 경우 (불일치 원)에는 반응이 요구되지 않았다. 전형적인 n-back 과제는 피험자가 자극 제시의 순서만을 기억하는 것을 요구하지만, 본 연구에서 사용된 2-back 과제의 경우, 피험자가 자극의 제시 순서뿐만 아니라 자극의 유형도 기억하고 있어야 과제를 성공적으로 수행할 수 있다. 111개의 자극이 제시되었으며, 이 중에서 일치 원의 수는 40개이었다.

각 시행은 컴퓨터 모니터의 중앙에 고정점(+)이 제시되면서 시작되었다. 자극은 모니터의 중앙에 500ms 동안 제시되었으며, 수직 시각도(vertical visual angle)는 4.58 ^{0}이었고, 수평 시각도(horizontal visual angle)는 4.30 ^{0}이었다. 자극간 제시 간격은 2초이었다. 연습 시행을 통하여 피험자가 실험 절차를 충분히 이해한 다음, 본 실험을 실시하였다.

뇌파측정 절차

뇌파(EEG)는 Neuroscan EEG synamps와 Scan version 4.0(Neurosoft Inc., USA)을 사용하여 측정하였다. 뇌파의 측정은 절연과 방음이 완비된 실험실에서 이루어졌다. 뇌파는 123 채널에서 측정되었으며, 기준 전극(reference)은 좌, 우 mastoid process에 위치하였고, 눈의 움직임과 깜박거림은 좌측 눈 안각(canthus)에 부착한 전극을 통하여 모니터링 하였다. Impedence는 5 kΩ 미만을 유지하였다.

피험자가 작업 기억의 과제를 수행하는 동안 뇌파는 0.05-100 Hz analog bandpass로 연속적으로 측정되었으며, 표본율(sampling rate)은 1000Hz이었다. 뇌파 측정이 끝난 다음 뇌파를 100ms의 자극 전 기저선(prestimulus baseline)을 포함한 1400ms의 epoch으로 구분하였다. 눈의 움직임 등과 같은 artifact가 포함된 시행은 최종 분석에서 제외되었다. 뇌파를 각 개인에 따라, 그리고 각 자극 유형, 즉 일치 원, 불일치 원 및 비목표 자극에 따라 평균하였으며, 이를 다시 1-30Hz의 bandpass로 filtering 하였다.

사건관련전위와 행동 자료의 분석

세 자극, 즉 일치 원, 불일치 원 및 비목표 자극에 의해 생성된 사건관련전위 모두에서 세 정점이 관찰되었는데, 즉 N100, P300과 서파가 관찰되었다. 각 개인의 사건관련전위와 15명 피험자의 사건관련전위를 전체 평균(grand-average)한 사건관련전위를 눈으로 조사한 후 각 정점에 관한 시간 범위(time window)를 설정하였다. 즉 N100은 자극 제시 후 60-150 ms사이에서 관찰되는 가장 부적인 값으로, P300은 250-450ms사이의 가장 정적인 값으로, 그리고 서파는 600-850ms 사이에

서 관찰되는 가장 정적인 값으로 정의하였다. 각 정점의 진폭은 100ms의 자극제시전 기저선의 평균 전위값을 기준으로, 그리고 잠복기는 자극 제시 후부터 정점이 나타나는 시간으로 정의하였다.

진폭의 분석은 두 단계로 이루어졌다. 첫 번째 단계에서는 123 전극 부위 중에서 가장 두드러진 진폭을 보인 18채널을 선정하여 이를 4개의 영역(region of interest: ROI)으로 나누었다: 즉 전두 영역(Fz, F3, F4, F7, F8), 중앙 영역(Cz, C3, C4, T7, T8), 두정 영역(Pz, P3, P4, P7, P8)과 후두 영역(Oz, O1, O2)으로 나누었다: 각 영역의 평균 진폭을 계산한 후, 이를 ANOVA 반복 측정(repeated measures)의 종속 변인으로 사용하였다: 진폭 분석의 두 번째 단계는 중앙(midline)에 위치하는 전극 부위, 즉 Fz, Cz, Pz, Oz에서 측정한 진폭만을 분석하였다. 잠복기의 분석에서는 4개의 중앙 전극 부위에서 측정한 잠복기만이 사용되었다. 사건관련전위의 진폭과 잠복기는 각각 within-subjects ANOVA, repeated measures로 분석되었는데, ROI 및 전극 부위와 자극 유형이 피험자내 요인이었다. Greenhouse-Geisser epsilon(ε)과 Tukey 사후검사가 실시되었다.

결 과

반응 정확율과 반응 시간

일치 원에 대한 평균 반응 정확율은 93.17% (SD=12.26)이었고 평균 반응 시간은 366.13ms (SD=59.47)이었다.

전체 평균 사건관련전위(Grand-average ERP waveforms)

그림 1은 Cz 부위에서 측정한 세 자극에 대한 전체 평균 사건관련전위이다. 세 자극 모두에서

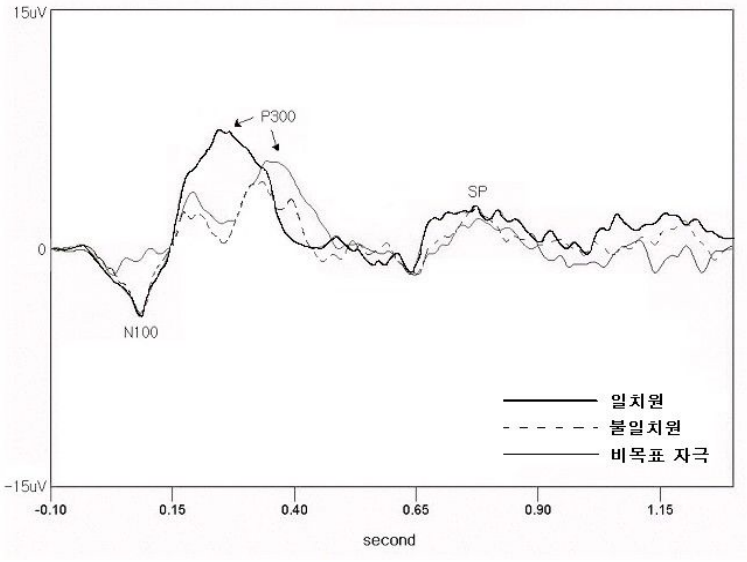

그림 1. Cz에서 측정한 세 자극에 대한 전체 평균 사건관련전위

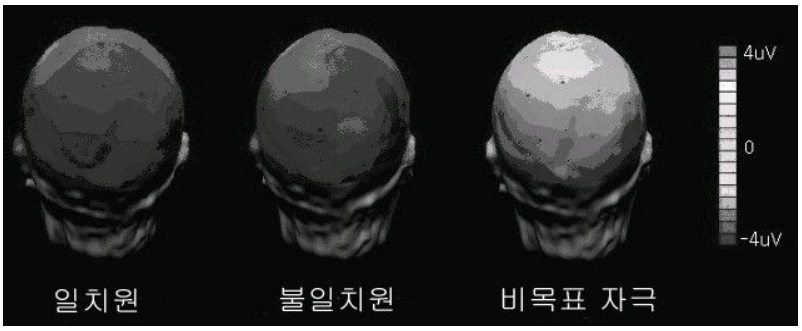

그림 2. N100의 123 채널에서의 전위 분포

N100, P300, 서파가 관찰되었다. N100 진폭은 비목표 자극보다 목표 자극인 원에서 더 크게 관찰되었다. 반면 P300의 진폭은 불일치 원과 비목표 자극보다 일치 원에서 더 증가하였다. P200은 불일치 원과 비목표 자극에서는 관찰되었으나 일치 원에서는 관찰되지 않았다.

그림 2와 3은 각각 123채널에서 관찰된 N100과 P300 전위 분포를 나타낸다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 일치 원과 불일치 원은 비목표 자극보다 더 큰 N100 진폭을 보였다. 그림 3의 P300 전위 분포의 경우 일치 원은 중앙-두정 부위에서 가장 큰 진폭을 보인 반면 불일치 원과 비목표 자극은 중앙-전두 부위에서 큰 전위를 보였다.

N100

세 자극 모두에서 N100이 관찰되었다. 4 ROI에서의 N100 진폭을 분석한 결과, 자극 유형에 따른 유의한 차이는 관찰되었으나, $F(2,84)=5.52$, $p<.01$, ROI에 따른 차이는 관찰되지 않았다. 목표 자극인 원(일치 원과 불일치 원)이 비목표 자극(삼각형과 정사각형)보다 더 큰 N100 진폭을 보였으며 일치 원과 불일치 원은 N100 진폭에서 유의한 차이를 보이지 않았다. 중앙 전극 부위에서 측정한 N100 진폭의 분석 결과는 ROI에 따른 N100 진폭의 분석 결과와 유사하다. 즉 N100 진폭의 유의한 차이는 자극 유형에서만 관찰되

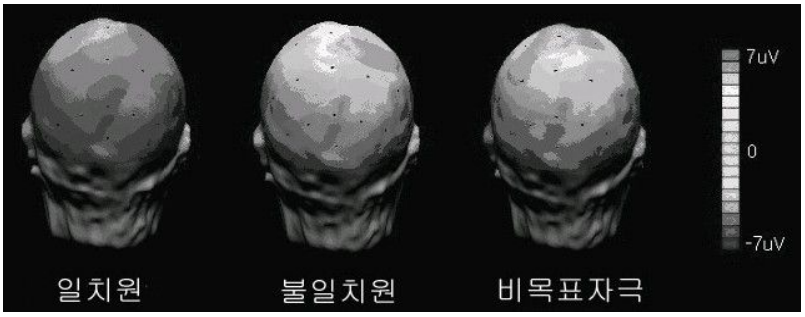

그림 3. P300의 123 채널에서의 전위 분포

었으며, F(2,84)=4.31, p<.05, 전극 부위에 따른 차이는 없었다. 사후 검사는 Cz 부위에서 측정한 N100 진폭이 비목표 자극 보다 목표 자극인 원(일치 원과 불일치 원)에서 더 크다는 것을 보여 주었다 (p<.05).

중앙 전극 부위에서 측정한 N100 잠복기의 분석 결과, 자극 유형이나 전극 부위에 따른 잠복기의 차이는 관찰되지 않았다.

P200

불일치 원과 비목표 자극에서만 P200이 관찰되었고 일치 원에서는 관찰되지 않았다. 중앙 전극 부위에서 측정한 P200 진폭의 분석 결과, 자극 유형, F(1,42)=.35, ns, 및 전극 부위 F(3,42)=1.15, ns, 에 따른 차이는 없었다. 또한 P200 잠복기의 분석 결과, 자극 유형이나 전극 부위에 따른 잠복기의 차이가 관찰되지 않았다.

P300

세 자극 모두 P300을 생성하였다. 4 ROI에서 측정한 P300 진폭에 관한 통계 분석 결과, 자극 유형에 따른 유의한 차이가 관찰되었다, F(2,84)=3.29, p<.05. 중앙 전극 부위에서의 P300 진폭을 분석한 결과 역시 자극 유형에 따른 유의한 차이가 있음을 밝혀 주었다, F(2,84)=2.78, p<.05. 사후 검사 결과 Pz 부위에서 일치 원이 불일치 원이나 비목표 자극보다 더 큰 진폭을 보였다 (p<.05). 일치 원, 불일치 원, 비목표 자극의 평균 P300 진폭은 각각 6.71uV, 4.79uV, 4.89uV이었다. 또한 전극 부위와 자극 유형 사이의 상호 작용 효과가 관찰되었다, F(6,84)=2.51, p<.05. 즉 일치 원은 두정 부위에서 가장 큰 진폭의 P300을 보인 반면 불일치 원과 비목표 자극은 중앙·전두 부위에서 가장 큰 진폭을 보였다.

P300 잠복기의 분석 결과, 자극 유형에 따른 잠복기의 차이가 관찰되었다, F(2,84)=18.09, p<.001. 즉 일치 원이 불일치 원이나 비목표 자극에 비해 짧은 잠복기를 보였다. 표 1은 중앙 전극부위에서 측정한 세 자극의 평균 P300 진폭과 잠복기를 기술하고 있다.

서파

세 자극 모두에서 서파가 관찰되었다. 4개의 ROI와 중앙 부위의 전극에서 측정한 서파의 분석 결과, 전극 부위에 따른 서파의 진폭에 유의한 차이가 있었다, F(3,84)=4.05, p<.01. 즉 서파의 진폭이 전두 부위에서 가장 컸다. 그러나 자

표 1. 중앙 전극 부위에서 측정한 평균 P300 진폭과 잠복기

전극부위	일치 원		불일치 원		비목표 자극	
	진폭(uV)	잠복기(ms)	진폭	잠복기	진폭	잠복기
Fz	6.41(3.63)	276.50(43.08)	5.19(4.76)	342.28(33.64)	5.26(2.44)	355.42(37.04)
Cz	6.71(3.34)	277.30(41.46)	4.89(3.81)	343.33(31.55)	5.13(2.35)	361.64(45.20)
Pz	7.01(3.06)	279.48(48.17)	4.67(3.11)	345.43(32.62)	4.65(2.03)	360.47(43.84)
Oz	6.72(2.96)	278.79(47.09)	4.39(2.94)	341.13(35.63)	4.53(2.05)	360.12(43.91)

( ) 표준편차

극 유형에 따른 진폭 차이는 관찰되지 않았다. 전극 부위나 자극 유형에 따른 서파 잠복기의 차이는 관찰되지 않았다.

논 의

본 연구는 작업 기억을 구성하는 인지 과정의 단계를 2-back 방안과 사건관련전위를 사용하여 조사하였다. 목표 자극으로는 원이, 그리고 비목표 자극으로는 삼각형과 정사각형이 사용되었으며, 목표 자극은 다시 일치 원과 불일치 원으로 구분되었다.

일치 원, 불일치 원 및 비목표 자극에 의해 생성된 사건관련전위는 서로 다른 효과를 보였다. 즉 목표 자극인 일치 원과 불일치 원은 비목표 자극에 비해 더 큰 N100 진폭을 보였다. P200은 불일치 원과 비목표 자극에서는 관찰되었지만 일치 원에서는 관찰되지 않았다. P300의 경우, 일치 원이 불일치 원과 비목표 자극에 비해 더 큰 진폭과 더 짧은 잠복기를 보였다. 그러나 세 자극은 서파의 진폭과 잠복기에서는 유의한 차이를 보이지 않았다. 이 결과들은 목표 자극이 비목표 자극에 비하여 더 큰 P300 진폭과 더 짧은 잠복기를 보인다고 보고한 선행 연구들의 결과와 일치한다(Gevins 등, 2000; McEvoy 등, 2001).

초기 사건관련전위 정점들: N100과 P200

N100은 세 자극 모두에서 관찰되었다. 목표 자극인 일치 원과 불일치 원은 비목표 자극에 비해 더 큰 N100 진폭을 보였다. 일반적으로 N100은 정보 처리 과정의 초기 단계인 선택적 주의의 지표로 이해되고 있다. 예를 들어 Hillyard 등(1973)은 정상인을 대상으로 한 연구에서 주의를 준 자극이 주의를 주지 않은 자극에 비해 더 큰 N100 진폭을 초래한다고 보고하였다. 그리고 주의 장애를 갖는 환자들에서 N100 진폭이 유의하게 감소되어 있다는 것이 보고되기도 하였다(Bender 등, 1999). 따라서 본 연구에서 세 자극이 서로 다른 N100 진폭을 보인 결과는 세 자극에 대한 주의 할당에 차이가 있는 것으로 해석할 수 있다. 다시 말하면 피험자는 비목표 자극보다 목표 자극에 더 많은 주의를 주었으며, 이 결과 목표 자극이 비목표 자극보다 더 큰 N100 진폭을 초래하게 하였다.

P200은 불일치 원과 비목표 자극에서는 관찰되었으나 일치 원에서는 관찰되지 않았으며, 두정-후두 부위에서 가장 큰 전위가 나타났다. 비록 P200이 어떤 기능을 반영하는가에 대해서는 아직 잘 알려져 있지 않지만, 선행 연구들은 P200이 선택적 주의(Hackley 등, 1990) 혹은 특징 탐지 과정(Luck 등, 1994)과 관련되어 있다고 밝히고 있다. 작업 기억에 관한 일련의 연구를 통하여 Begleiter 등(1993; 1995)은 자극 제시 후 170에서 240ms 사이에서 정적 전위를 갖는 정점을 발견하였고, 이 정점을 시각 기억 전위(visual memory potential; VMP)라고 이름하였다. VMP가 비목표 자극에 비해 목표 자극에서 유의하게 적었는데, 이에 근거하여 이들은 VMP가 작업 기억 내에 저장되어 있는 자극 흔적을 반영하며, 현재 제시되는 자극이 저장되어 있는 자극과 일치하면 그 자극에 의해 초래되는 VMP가 감소한다고 주장하였다. 따라서 본 연구에서 일치 원이 불일치 원이나 비목표 자극에 비해 유의하게 감소된 P200의 진폭을 보이는 것으로 미루어 P200이 Begleiter 등이 주장한 VMP과 동일한 것으로 여겨진다.

P300

일치 원에 의해 초래된 P300이 불일치 원과 비목표 자극에 의해 생성된 P300에 비해 더 큰 진폭과 더 짧은 잠복기를 보였다. 이에 덧붙여서 세 자극은 전위 분포에서도 서로 다른 양상을 보였다. 일치 원은 중앙-두정 부위에서 가장 큰 전위를 보인 반면 불일치 원과 비목표 자극은 중앙-전두 부위에서 가장 큰 전위를 보였다.

P300은 여러 다양한 인지 활동과 연관되어 이해된다. 예를 들어 Donchin과 Coles(1988)는 '맥락 최신화 가설(context updating hypothesis)'을 제안하였는데, 즉 작업 기억 내의 신경적 표상(neural representation)이 새로이 제시된 자극과 일치하지 않아 최신화될 경우에만 P300이 생성되며, 최신화되는 정도가 클수록 P300의 진폭이 커진다고 주장하였다.

또한 P300이 의사 결정(decision making)과 관련되어 있다고 밝힌 연구 결과가 있다. Rohrbaugh 등(1974)은 피험자로 하여금 짧은 시간 간격을 두고 제시되는 두 자극 중에서 두 번째 제시되는 자극에 대해서만 결정을 내리게 하는 과제를 실시한 결과 두 번째 제시된 자극에 의해서만 P300이 관찰되었고, 첫 번째 제시된 자극에서는 P300이 나타나지 않았다. 이 결과에 근거하여 이들은 의사 결정자로서의 피험자의 활동이 P300 진폭을 결정하기 때문에 P300이 의사 결정의 과정을 반영한다고 주장하였다. 이에 덧붙여서 Sutton과 Ruchkin(1984)은 P300이 피험자가 느끼는 자극의 가치(value) 혹은 중요성(significance)을 반영한다고 주장하였다. 즉 비목표 자극에 비하여 목표 자극이 피험자에게 더 중요하기 때문에 목표 자극이 비목표 자극에 비하여 더 큰 P300 진폭을 초래한다는 것이다.

본 연구에서 일치 원은 피험자의 의사 결정과 활동 기억 내에 있는 신경적 표상의 최신화를 요구하는 자극이기 때문에 일치 원이 비목표 자극이나 불일치 원에 비해 더 큰 P300 진폭을 초래하였다고 여겨진다. 또한 일치 원은 불일치 원과 비목표 자극과는 다른 전위 분포를 보였다. 비록 P300의 생성지에 관해서는 아직 일치된 견해는 없지만, 두개내 측정(intracortical recording)이나 뇌영상 기법을 사용한 연구들은 두정엽 및 전두엽 등을 P300의 생성지로 주장하고 있다(Smith 등, 1990; McCarthy 등, 1997).

서파

세 자극 모두에서 자극 제시 후 770-790ms 정도의 시점에서 서파가 관찰되었으며, 전두 부위에서 가장 큰 진폭을 보였다. 선행 연구들은 서파가 작업 기억에서 정보의 저장 과정을 반영한다고 보고하였다. 예를 들어 Mecklinger와 Pfeifer(1996)는 피험자에게 사물의 형태나 공간적 위치에 관한 정보를 6800ms 동안 작업 기억 내에 약호화하고 저장한 후 뒤이어 제시되는 자극과 비교하도록 하였다. 공간 위치에 관한 정보가 작업 기억 내에 저장되어 있는 동안에는 두정 부위와 후두 부위에서 서파가 관찰된 반면 사물의 형태에 관한 정보를 저장하고 있는 동안에는 서파가 전두 부위에서 관찰되었다. Gevins 등(1996)은 n-back 방안을 사용하여 작업 기억을 조사한 결과, 일치 자극에서 서파가 두정 부위에서 관찰되었으며, 이 서파가 주의의 유지와 관련되어 있다고 주장하였다. 이에 덧붙여서 Kusak 등(2000)도 자극 제시 후 500-1000ms 사이에 서파가 중앙-두정 부위에서 나타나는 것을 보고하였으며, 이는 작업 기억 내에 있는 정보를 유지하는 것을 반영하는 것이라고 주장하였다. 선행 연구들이 작업 기억 내에 정보를 일시적으로 저장하는 동안 서파가 관찰된다는

것을 일관성 있게 보고하지만, 서파가 관찰되는 부위에 대해서는 연구마다 차이가 있다. 이는 각 연구에서 사용한 자극이나 실험 과제가 서로 다르기 때문인 것으로 여겨진다(Bosch 등, 2001).

본 연구의 결과, 세 자극 모두에서 서파가 관찰되었다. 그리고 세 자극 모두에서 서파의 진폭이 중앙-전두 부위에서 가장 컸으며, 서파의 진폭과 잠복기에서 세 자극 사이에 유의한 차이가 없었다. 이 결과는 서파가 작업 기억 내에 정보를 저장하는 과정과 관련되어 있다는 것을 시사하는데, 왜냐하면 2-back 방안에서 추후 시행을 성공적으로 수행하기 위해서는 자극의 제시 순서를 기억하고 있는 것이 요구되기 때문이다. 다시 말하면 현재의 자극이 무엇이든지 간에 추후 제시되는 일치 원에 대해 성공적으로 반응하기 위해서는 두 시행동안 어떤 자극이 제시되었는가를 기억하고 있어야 한다. 서파가 중앙-전두 부위에서 가장 큰 전위를 보였는데, 이는 작업 기억 동안 전두 부위의 활동이 있다는 것을 시사한다. 이 결과는 작업 기억의 인지 단계 중에서 정보의 저장 단계 동안 전전두엽의 활동이 관찰된다는 뇌영상 연구들의 결과와도 일치한다(Braver 등, 1997).

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다. 즉 일치 원, 불일치 원과 비목표 자극이 사건관련전위에 서로 다른 효과를 초래하였다. 목표 자극, 즉 일치 원과 불일치 원은 비목표 자극 보다 더 큰 N100 진폭을 보였으며, 이는 비목표 자극보다 목표 자극에 더 많은 주의가 주어졌음을 시사한다. P300의 경우, 일치 원이 불일치 원과 비목표 자극에 비해 더 큰 진폭과 더 짧은 잠복기를 보였다. 이는 작업 기억의 내용을 최신화하는 것과 의사 결정 과정 등과 같은 인지 기능이 불일치 원이나 비목표 자극에 비해 일치 원에 더 적극적으로 개입되었다는 것을 시사한다. 세 자극 모두에서 유사한 진폭과 잠복기를 갖는 서파가 관찰되었는데, 이는 추후 시행을 위해 자극 순서에 관한 정보를 작업 기억 내에 저장하는 과정을 반영하는 것으로 여겨진다. 이 결과들은 작업 기억에 관여하는 인지 기능의 단계들이 사건관련전위의 정점들에 의해 반영된다는 것을 시사한다. 즉 N100, P300과 서파는 작업 기억을 구성하는 일련의 인지 과정들, 즉 선택적 주의, 정보의 최신화/의사 결정 및 정보의 일시적 보유 등을 각각 반영하는 것으로 여겨진다. 이에 덧붙여서 본 연구의 결과는 작업 기억의 통제에 관여하는 전전두엽과 두정엽이 각각 정보의 저장과 정보의 최신화/의사결정 과정과 관련되어 있다는 것을 시사한다.

참고문헌

Baddeley, A. (1992). Working memory. Science, 255, 556-559.

Baddeley, A. (1986). Working memory. Oxford: Clarendon press.

Begleiter, H., Porjesz, B., and Wang, W. (1995). Event-related brain potentials differentiate priming and recognition to familiar and unfamiliar faces. Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 94, 41-49.

Begleiter, H., Porjesz, B., and Wang, W. (1993). A neurophysiologic correlate of visual short-term memory in humans. Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 87, 46-53.

Bender, S., Ulrich, S., Jorg, W., Ina, G., Dieter, Z., and Robert, D. O. (1999). A topographic event-related potential follow-up study on 'prepulse inhibition' in first and second episode

patients with schizophrenia. Psychiatry Research: Neuroimaging, 90, 41-53.

Bosch, V., Mecklinger, A., and Friederrici, A.D. (2001). Slow cortical potentials during retention of object, spatial and verbal information. Cognitive Brain Research, 10, 219-237.

Braver, T. S., Cohen, J.D., Nystrom, L. E., Jonides, J., Smith, E. E., and Noll, D. C. (1997). A parametric study of prefrontal cortex involvement in human working memory. Journal of Neuroimage, 5, 49-62.

Callicott, J. H., Ramsey, N. F., Tallent, K., Bertolino, A., Knable, M. B., Coppola, R., Goldberg, T., Gelderen, P., Mattay, V. S., Frank, J. A., Moonen, C. T. W., and Weinberger, D. R. (1998). Functional magnetic resonance imaging brain mapping in psychiatry: methodological issues illustrated in a study of working memory in schizophrenia. Neuropsycho- pharmacology, 18, 186-196.

Carpenter, P. A., Just, M. A., and Shell, P. (1990). What one intelligence test measures: a theoretical account of the processing in the Raven Progressive Matrices Test. Psychological Review, 97, 404-431.

Donchin, E., and Coles, M. G. H. (1988). Is the P300 component a manifestation of context updating? Behavioral Brain Science, 11, 343-356.

Engel, R. W., Tuholski, S., and Kane, M. (1999). Individual differences in working memory capacity and what they tell us about controlled attention, general intelligence and functions of the prefrontal cortex. In A. Miyake, P. Shah (Eds.). Models of working memory: mechanism of active maintenance and executive control. Cambridge: Cambridge University Press.

Frisk, V., and Milner, B. (1990). The relationship of working memory to the immediate recall of stories following unilateral temporal and frontal lobectomy. Neuropsychologia, 28, 121-135.

Gevins, A., and Smith, M. E. (2000). Neurophysiological measures of working memory and individual differences in cognitive ability and cognitive style. Cerebral Cortex, 10, 829-839.

Gevins, A., Smith, M. E., Le, J., Leong, H., Bennett, J., Martin, N., McEvoy, L., Du, R., and Whitfield, S. (1996). High resolution evoked potential imaging of the cortical dynamics of human working memory. Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 98, 327-348.

Hackley, S. A., Woldorff, M., and Hillyard, S. A. (1990). Cross-modal selective attention effects on retinal, myogenic, brainstem and cerebral evoked potentials. Psychophysiology, 27, 195-208.

Hillyard, S. A., and Kutas, M. (1983). Electrophysiology of cognitive processing. American Review of Psychology, 34, 33-61.

Hillyard, S. A., Hink, R. F., Schwent, V. L., and Picton, T. W. (1973). Electrical signs of selective attention in the human brain. Science, 182, 177-180.

Keefe, R. S. E. (2000). Working memory dysfunction and its relevance to schizophrenia. In T. Sharma. P. Harvey (Eds.). Cognition in schizophrenia. Oxford: Oxford University Press, Oxford.

Kusak, G., Grune, K., Hagendorf, H., and Meta, A.

M. (2000). Updating of working memory in a running memory task: an event-related potential study. International Journal of Psychophysiology, 39, 51-65.

Luck, S. J., and Hillyard, S. A. (1994). Electrophysiological correlates of feature analysis during visual search. Psychophysiology, 31, 291-308.

MacLeod, A. K., Buckner, R. L., Miezin, F. M., Petersen, S.E., and Raichle, M.E. (1998). Right anterior prefrontal cortex activation during semantic monitoring and working memory. Neuroimage, 7, 41-48.

McCarthy, G., Luby, M., Gore, J., and Goldman-Rakic, P. (1997). Infrequent events transiently activate human prefrontal and parietal cortex as measured by functional MRI. Journal of Neurophysiology, 77, 1630-1634.

McEvoy, L. K., Pellouchoud, E., Smith, M. E., and Gevins, A. (2001). Neurophysiological signals of working memory in normal aging. Cognitive Brain Research, 11, 363-376.

Mecklinger A., and Pfeifer, E. (1996). Event-related potentials reveal topographical and temporal distinct neural activation patterns for spatial and object working memory. Cognitive Brain Research, 4, 211-224.

Nielsen-Bohlman, L., and Knight, R. T. (1999). Prefrontal involvement in visual working memory. Cognitive Brain Research, 8, 299-310.

Nystrom, L. E., Braver, T. S., Sabb, F. W., Delgado, M. R., Noll, D. C., and Cohen, J. D. (2000). Working memory for letters, shapes and locations: fMRI evidence against stimulus-based regional organization in human prefrontal cortex. Neuroimage, 11, 424-446.

Owen, A. M., Evans, A. C., and Petrides, M. (1996). Evidence for a two-stage model of spatial working memory processing within the lateral frontal cortex: a positron emission tomography study. Cerebral Cortex, 6, 31-38.

Pelosi, L., Slade, T., Blumhardt, L. D., and Sharma, V. K. (2000). Working memory dysfunction in major depression: an event-related potential study. Clinical Neurophysiology, 111, 1531-1543.

Rohrbaugh, J. W., Donchin, E., and Ericksen, C. W. (1974). Decision making and the P300 component of the cortical evoked response. Perception and Psychophysics, 15, 368-374.

Shallice, T. (1988). From neuropsychology to mental structure. Cambridge University Press, Cambridge.

Smith, M. E., McEvoy, L. K., and Gevins, A. (1999). Neurophysiological indices of strategy development and skill acquisition. Cognitive Brain Research, 7, 389-404

Smith, M. E., Halgren, E., Sokolik, M., Baudena, P., Musolino, A., Liegeois-Chauvel, C., Chauvel, P. (1990). Orbital frontal and amygdala volume reductions in obsessive-compulsive disorder. Archives of General Psychiatry, 56, 913-919.

Sutton, S., and Ruchkin, D. R. (1984). The late positive complex: advances and new problems. In R. Karrer, J. Cohen, P. Teuting (Eds.). Brain and information: event-related potentials. New York: New York Academy of Sciences.

Weinberger, D. R., Mattay, V., Callicott, J., Kotrla, K., Santha, A., Gelderen, P.V., Duyn, J., Moonen, A., and Frank, J. (1996). fMRI applications in schizophrenia research.

Neuroimage, 4, 118-126.

Wilson, F. A. O., O'scalaidhe, S. P., and Goldman-Rakic, P. S. (1993). Dissociation of object and spatial processing domains in primate prefrontal cortex. Science, 260, 1955-1958.

원고접수일 : 2003. 8. 6
게재결정일 : 2004. 2. 20

한국심리학회지 : 임 상
The Korean Journal of Clinical Psychology
2004. Vol. 23, No. 2, 313-326

The neurophysiological mechanism of working memory: an event-related potential study

Myung-Sun Kim
Sungshin Women's University

Jun Soo Kwon
Seoul National University College of Medicine

Jae-Jin Kim
Yonsei University College of Medicine

The temporal stages of the cognitive processes and the neurophysiological mechanisms underlying the working memory were investigated using the 2-back task and event-related potential (ERP). Geometric figures such as a circle, triangle and square were used as stimuli. The target stimulus was a circle, while the triangle and square served as nontargets. The target stimulus was further divided into the match target and nonmatch target. If the current stimulus was a circle, and the circle was presented two trials earlier (match circle: MC), the subjects were required to respond. If the current stimulus was a circle, but the circle was either not presented two trials earlier (nonmatch circle: NC), or the current stimulus was either a triangle or a square (nontarget stimulus: NS), subjects were asked not to respond. The target stimulus, i. e., MC and NC produced a significantly higher N100 amplitude than the nontarget stimulus, which indicates that more attention was directed to the target stimulus than to the nontarget stimulus. In terms of P300, the MC than either the NC or NS elicited a greater amplitude and earlier latency. In addition, the P300 was at a maximum at the parietal sites in the MC, while it was at its highest at the frontal sites in the NC or NS. All three types of stimuli produced a positive slow potential with similar amplitudes and latencies. The amplitude of the slow potential was at a maximum at the frontal sites. These results indicate that such temporal stages of cognitive functions underlying the working memory as attention allocation, updating the working memory contents and the retention of sequential information can be reflected toward the ERP components. The results also suggest that the prefrontal and parietal cortex, which are known to be the neural networks of working memory, are associated with the retention process and updating working memory contents, respectively.

Keywords : working memory, event-related potential, 2-back task, N100, P300, slow potential