

초기 수학 능력 발달과 인지 전략 변화 관련 종단적 뇌 활동 변화 분석*

조 수 현*

중앙대학교 심리학과

초등학교 저학년 시기에 습득하는 기초 수학 능력은 청소년기와 성인기 수학 능력의 근간이 된다. 기억에 기반한 효율적인 인지 전략(cognitive strategy)의 사용은 초기 학령기의 수학 문제 풀이 능력의 향상에 가장 크게 기여하는 요소이다. 본 연구는 초등학교 2학년에서 3학년까지 일 년 동안 수학 능력 발달과 관련된 뇌 활동의 변화를 기능적 자기 공명 영상(fMRI)을 이용하여 종단적으로 분석하였다. 연구 결과, 2학년과 비교하여 3학년 시기에 아동들의 문제 풀이의 정확도와 속도가 모두 향상되었다. 이학년 시기에 수행이나 전략 사용 면에서 발달 수준이 더 저조했던 아동들이 일 년 후 수행이나 전략 사용 면에서 더 큰 향상을 보였다. 뇌 활동 분석을 통해 아동의 수학 문제 해결 능력의 발달과 관련하여 해마 및 그 주변 영역을 포함하는 내측 측두엽(medial temporal lobe), 외측 전전두엽(lateral prefrontal cortex)과 이를 포함한 전두-두정 주의 신경망(fronto-parietal attention network), 복측 시각 피질(ventral visual stream) 영역의 중요성을 확인하였다. 이는 수학적 지식이 안정적인 기억 표상으로 저장되고 인출되는 과정에 연합 학습(associative learning)과 의미적 기억(semantic memory) 과정에 중추적 역할을 하는 내측 측두엽과 하향식 주의/인지 통제 체계(top-down attention/cognitive control system)의 역할이 중요함을 시사한다. 또한 복측 시각 피질의 활동은 숫자와 기호들을 신속하게 재인(recognize)하여 효율적으로 처리할 수 있도록 하여 문제 풀이 속도의 향상에 기여하는 것으로 해석할 수 있다.

주제어 : 기억, 수학, 기능성 자기 공명 영상, 아동, 종단 연구

* 본 연구는 한국 연구 재단으로부터 지원받았다(2012S1A5A8022042). 저자는 연구에 도움을 주신 Dr. Vinod Menon에게 감사한다.

† 교신저자 : 조수현, 중앙대학교 심리학과, (156-756) 서울특별시 동작구 흑석동 221번지
E-mail : soohyun@cau.ac.kr

국민의 수학적 소양은 국가 경쟁력에 지대한 영향을 미친다. OECD 보고에 의하면 국민의 수학/과학 수행 수준이 0.5 표준편차만큼 향상할 때 1인당 GDP가 0.87% 증가한다고 한다(OECD, 2010). 반대로, 국민의 저조한 산술 능력(low numeracy)는 국가에 큰 경제적인 부담을 초래한다. 영국에서 발표된 한 연구에 따르면, 영국 국민의 산술 능력 부진으로 인해 발생하는 국가적인 비용은 연간 24억 유로라 한다(Gross et al., 2009). 저조한 산술 능력은 비단 국가적 차원 뿐 아니라 개인 차원에서도 생활에 큰 장애를 초래한다. 수학적 능력이 부족한 사람들은 글을 읽지 못하는 사람과 비교하여서도 소득이 적고, 병에 걸리거나 법적인 문제를 경험할 확률이 더 높았다(Parsons et al., 2005; Butterworth et al., 2011).

국민의 수학적 소양 향상을 도모하고 수학적 학습 장애에 대한 조기 진단과 효과적 개입(intervention) 프로그램을 구축하기 위해서는 초기 아동기에서부터 수학 능력이 발달하는 과정을 이해하는 것이 선행되어야 한다.

초등학교 저학년 시기에는 수학 능력의 기초가 되는 수학적 지식을 습득하고 이를 문제 풀이에 적용하는 훈련을 해야 한다. 이 시기에 초등학생들은 수 개념 습득과 더불어 셈하기(counting), 덧셈(addition), 뺄셈(subtraction) 등 기본적인 연산을 연습한다. 초등학교 저학년 학생들이 연산을 처음 배울 때 가장 먼저 사용하는 초보적인 인지적인 전략은 숫자열(counting sequence) 혹은 손가락을 이용한 셈하기(finger counting)이다(Geary et al., 2004; Shrager & Siegler, 1998; Siegler & Shrager, 1984; Groen & Parkman, 1972; Ashcraft 1982; Siegler, Shipley

et al. 1995). 예를 들어, '4+3'에 대한 답을 얻기 위해 왼손으로 손가락 네 개를 펴고, 오른손으로 손가락 세 개를 편 후, 편 손가락의 개수를 세는 방법이 손가락을 이용한 셈하기의 한 방법이다. 숫자열을 이용하여 말로 셈하기(verbal counting)는, 예를 들어, '4+3'에 대한 답을 구할 때, '4' 다음에 오는 숫자들을 차례대로 세 개를 연달아 '5, 6, 7'이라고 읊으면, 마지막에 도달한 '7'이 답이 되는 전략을 말한다. 숫자열을 이용한 셈하기 전략은 인지 발달 단계에 따라 여러 가지 양식으로 나타난다. 숫자열과 손가락 펴기를 동시에 이용하는 방법, 숫자열을 읊으며 손가락을 쳐다보며 문제를 푸는 방법, 숫자열 만을 사용하는 방법 등이 그 예이다. 셈하기보다 진보된 또 다른 인지 전략의 예로는 분해하기(decomposition)가 있다. 분해하기 전략을 사용하는 아동은 어려운 문제를 분해하여 보다 쉬운 문제로 변형하여 기억 인출과 셈하기를 복합적으로 사용하는 것을 말한다(예를 들어, '8+7' = '8+(2+5)' = '(8+2)+5 = 15'). 정상적으로 발달하는 아동의 경우, 기억 기반 문제 해결에 앞서 수년 동안 다양한 인지 전략을 섞어 사용하는 모습을 보인다(Siegler and Shrager 1984; Geary et al., 1994). 반복적인 문제 풀이를 통해 특정 문제에 대한 답이 수학적 지식으로 장기 기억에 저장되면 기억에 기반한 문제 풀이가 가능해진다(Geary et al., 2004; Groen and Parkman 1972; Ashcraft 1982; Siegler and Shrager 1984; Siegler, Shipley et al. 1995). 선행 연구에 따르면, 평균적으로 초등학교 2학년 아동들은 한 자리 수에 대한 덧셈을 비교적 정확하게 할 수 있으나 문제 해결 시 효율적인 인출 전략

의 사용 면에서는 미숙하다고 한다(Jordan et al., 2003). 이학년에서 삼학년 사이의 기간 동안 대부분의 초등학생들은 점차적으로 비효율적이고 인지 자원을 많이 소모하는 절차적 책략에서 벗어나 점차 기억 인출 책략을 통하여 정확하고 신속하게 문제를 해결할 수 있게 된다. 이 기간 동안의 인지·행동적 변화는 문제 해결의 정확도의 향상보다는 문제 해결 속도의 증가 및 보다 효율적인 인지 책략의 사용으로 집약될 수 있다(Jordan et al., 2003). 이와 같은 맥락을 고려할 때, 아동의 문제 풀이 시 사용하는 인지 책략은 인지 발달 수준을 나타내는 중요한 지표가 된다.

기억 인출을 통한 효율적 문제 해결은 인지 통제(cognitive control) 기능의 발달에 의존한다. 인지 통제 기능은 문제 풀이 중 간섭을 배제하고, 부적절한 정보가 작업 기억(working memory) 용량을 소모하지 않도록 하며, 역기능적 반응 경향성(response tendency)을 억제하는 등의 역할을 한다. 따라서 아동은 인지 통제 기능을 잘 구사할 수 있게 됨에 따라 자신이 기억하고 있는 정답을 정확하게 인출하는 이른바 ‘통제된 기억 인출’(controlled memory retrieval)을 통한 문제 해결을 할 수 있게 된다(Kaufmann, 2002; Kaufmann et al., 2004; Passolunghi & Siegel 2004; Barrouillet & Lepine 2005; Badre et al., 2007). 정답 인출을 통한 신속하고 정확한 연산은 (작업 기억의 자원 소모를 줄여줌으로써) 단계적인 연산을 요하는 보다 복잡한 수학 문제 풀이를 용이하게 하는 중요한 발달 과업이다(Geary et al., 1991; 2004; 2012).

아동기에는 짧은 기간 동안 다양한 변화가

매우 역동적으로 일어나기 때문에 짧은 간격을 두고 종단적으로 변화를 추적해야 정밀한 발달 과정을 연구할 수 있다(Karmiloff-Smith, 1981; 2010). 본 연구는 수학 학습의 기초를 다지는 초등학교 2학년 학생 21명을 일 년 간격을 두고 3학년이 되기까지 두 차례에 걸쳐 종단적으로 추적하였다. 수학 학습 발달과 관련한 인지·행동적 변화로서 인지 책략과 수행의 변화를 관찰하였고, 이러한 변화와 관련된 뇌 활동의 변화를 기능적 자기 공명 영상(functional magnetic resonance imaging, fMRI) 기기를 이용하여 관찰하였다. 본 연구의 목표는 초등학교 학생들의 수학 발달 관련 인지·행동적 변화와 그에 따른 뇌 활동의 변화를 종단적으로 관찰하여 기초 수학 학습 능력의 발달에 대한 뇌-인지 모형의 기초를 마련하는 것이었다.

이미 소개한 바와 같이 초등학생의 수학 학습 능력의 발달에 대한 행동적 연구는 방대하나 뇌 영상 기법을 이용한 연구는 아직 많이 이루어지지 못하였다. 한편, 성인 피험자를 대상으로 한 뇌 영상 연구들에서는 수학적 정보 처리와 관련하여 전전두엽(prefrontal cortex), 두정 내 구(intraparietal sulcus), 각 이랑(angular gyrus) 등의 후측 두정엽(posterior parietal cortex), 방추형 이랑(fusiform gyrus) 등 복측 시각 피질(ventral visual cortex)이 중추적인 역할을 하는 영역으로 인식되고 있다(Butterworth et al., 2011). 성인의 수학적 정보 처리에 대한 Butterworth와 동료들(2011)의 개관 논문에 의하면, 전전두엽은 새로운 수학적 지식과 절차의 습득, 방추형 이랑은 숫자와 같은 시각적 상상의 처리, 두정 내 구는 양적 표상에 대한

정보 처리, 각 이랑은 수학적 지식의 인출에 관계되는 것으로 추측된다.

아동 대상 연구로서 본 연구와 유사한 실험 과제를 사용하여 초등학교 2-3학년 학생의 수학 능력 관련 뇌 활동을 횡단적으로 (cross-sectionally) 연구한 선행 연구에 따르면 (Rosenberg-Lee et al., 2011), 2학년보다 3학년 학생들은 수학 문제 풀이의 정확도가 높고 문제 풀이 시간이 더 짧았으며, 수학 문제를 풀 때 상측, 외측 전전두엽(dorsolateral prefrontal cortex), 상측 두정엽(superior parietal lobe)과 각 이랑(angular gyrus)을 포함하는 후측 두정엽, 혀 이랑(lingual gyrus)을 포함하는 복측 시각 피질의 활동성이 더 높았다. 저자들은 상측, 외측 전전두엽의 활동성이 증가한 것은 고등 인지(high level cognition)와 인지 통제 기능의 증진을 반영하는 것으로 해석하였다. 또한, 후측 두정엽의 두정 내 구 영역은 숫자와 양적 표상의 저장과 처리를 담당하는 영역으로 3학년 학생들의 두정 내 구 영역이 점차 더 기능적으로 성숙하였다고 해석하였다. 또한 복측 시각 피질 영역은 시각적 형상(visual form)과 물체(visual object)를 신속하게 지각하고 인식하는 역할을 하는 영역으로, 이 영역의 활동성이 증가한 3학년 학생들이 숫자와 수식을 더 신속하게 재인할 수 있음을 짐작할 수 있다고 해석하였다(Allison et al., 1994; McCandliss et al., 2003; James et al., 2005; Vinckier et al., 2007; Reinke et al., 2008). 그러나 이 선행 연구는 횡단적인 실험 설계를 사용하였기 때문에 각 피험자들의 수학 능력의 변화를 참되게 추적하지 못한 한계를 지닌다. 또한 이 연구에서 나타난 학년의 효과는 구체적으로 어떠한 인

지·행동적 변화와 관계되는지가 분명하지 않다. 즉, 그들이 보고한 학년의 효과는 수행의 향상, 훈련의 누적, 기억 과정의 성숙 및 인출 전략의 변화 등 여러 발달적 변화가 복합적으로 반영된 결과일 것이므로, 각각의 발달적 요인과 세부적인 뇌 활동의 변화 간의 관계성을 구별하여 제시하지 못하였다. 따라서 본 연구는 학년이 증가함에 따른 뇌 활동의 변화가 구체적으로 어떠한 인지·행동적 변화를 반영하는지 알기 위해, 학년의 증가 뿐 아니라 수행의 향상과 인출 전략의 사용 증가와 관련한 뇌 활동성의 변화를 개별적으로 분석하여 제시하였다.

아동기에 초점을 두지는 않았지만, 아동기부터 후기 청소년기까지(8세부터 19세까지) 연령의 증가에 따른 암산 관련 뇌 활동의 변화를 관찰한 한 연구에 따르면, 연령이 증가할수록 좌반구 후측 두정엽과 상위 시각 피질(high level visual cortex)의 일부인 외측 후두측 두정엽(lateral occipito-temporal cortex)의 활동이 증가한 반면, 전전두엽(prefrontal cortex)과 해마(hippocampus)의 활동성이 감소하였다(Rivera, Reiss, Eckert, & Menon, 2005). 이는 연령이 증가함에 따라 기본적인 연산이 자동화되어 연합 학습(associative learning)/의미적 기억 체계(semantic memory system)의 관여도가 낮아지고, 작업 기억이나 인지 통제 기능에 대한 의존도가 낮아지는 것으로 해석할 수 있다. 또한 상위 시각 피질의 성숙한 활동으로 인하여 수식에 대한 효율적인 처리가 가능해짐을 나타내는 결과로 해석할 수 있다. 그러나 이 연구에서와 같이 넓은 범위의 연령대에 걸친 피험자(집단) 간의 차이를 분석하는 것은 짧은

기간 동안 피험자 내(within-subject)에서 일어나는 역동적인 발달적 변화들을 관찰하기 어렵다는 한계를 지닌다. 본 연구는 2학년부터 3학년까지 초기 학령기에 초점을 두어 초기 수학 발달 과정을 피험자 내 설계로 정밀하게 추적할 수 있는 종단 연구 방법에 기반하여 선행 연구들의 단점을 보완하였다.

종단 연구는 아니었지만, 초등학교 저학년 아동을 대상으로 기억에 기반한 수학 문제 해결 능력의 향상과 관련한 뇌 활동의 변화를 분석한 선행 연구에 따르면, 인출 책략을 사용한 문제 해결 능력이 향상됨에 따라 해마와 그 주변 피질 등 내측 측두엽, 방추형 이랑, 혀 이랑 등의 복측 시각 피질, 각 이랑 등의 후측 두정엽과 외측 전전두엽의 활동성이 증가하였다(Cho et al., 2011; 2012).

여러 선행 연구 결과를 종합적으로 고려할 때 본 연구에서 다음과 같은 결과가 나타날 것으로 예상하였다. 덧셈과 같은 기본 수학 학습은 반복적으로 문제와 답이 연합되어 형성된 수학적 지식(arithmetic fact)의 누적에 의존한다. 연합 학습을 통한 지식의 저장은 해마와 해마 주변 피질(parahippocampal cortex)의 활동성 증가와 관계될 것으로 예상하였다. 인출 책략 사용의 증가는 정확하고 효율적으로 표상을 인출하기 위한 하향식 주의/인지 통제(top-down attention/cognitive control) 기능을 필요로 하므로 외측 전전두엽 및 이를 포함하는 전두-두정 주의 신경망의 활동성 증가와 관계될 것으로 예상하였다. 정확도의 향상 및 문제 풀이 속도의 증가와 같은 수행의 향상은 복합적인 요인으로 인해 나타나는 현상이므로 이와 관련한 뇌 활동성의 변화를 구체적으로

모두 예측하기는 어렵지만, 선행 연구 결과를 고려할 때, 숫자와 수학적 기호를 빠르게 채인하고 처리함에 따른 문제 풀이 속도의 증가는 복측 시각 피질 등 상위 시각 피질의 활동성 증가와 관계될 것으로 예상하였다.

방 법

참가자 미국 캘리포니아 주 팔로 알토 지역 근처 초등학교 학생 21명이 일년의 간격을 두고 두 차례(2학년 재학 중 1차 실험, 3학년 재학 중 2차 실험) 실험에 참가하였다. 일차 실험 시 참가자들의 평균 연령은 7.64(범위 = 7.1 - 8.3년, 표준편차 = .38)였으며 이 중 여자는 9명이었다. 모든 피험자는 1회 실험 시 \$50의 사례비를 받고 실험에 참가하였다. 모든 피험자는 영어를 모국어로 사용하거나 영어로 의사소통이 원활한 학생들이었다. 피험자들은 신경과적 질환이 없고 물질 남용과 관련한 행동적 장애가 없는 학생들만을 선발하였다.

기구와 재료 참가자들은 세 가지의 인지 기능 측정 지필 검사(지능 검사, 학습 성취도 검사, 수학 문제 풀이 책략 측정 검사)를 받았으며 뇌 기능 촬영 중 수학 문제를 풀이 과제를 수행하였다.

수학 문제풀이 책략 측정 검사(Math Strategy Assessment Test). 초등학생들이 한 자리 덧셈 문제(예를 들어, $2 + 4 = ?$)를 풀 때 사용하는 인지 책략을 측정하기 위하여, 문제 풀이 시간, 자기 보고(self report) 및 실험자의 관찰을 조합하여 검사하는 표준화된 방

범을 사용하였다(Geary et al., 2004; Wu et al., 2008). 덧셈 문제들은 총 18개로 컴퓨터 모니터에 제시되었으며 2부터 9까지의 숫자 중 두 개를 무선적으로 선택하여 덧셈 문제를 구성하였다. 두 숫자의 합은 6부터 17까지의 범위에 속하였다. 동일한 숫자 두 개를 더하는 문제(예를 들어, $4 + 4 = 8$)는 제외하였다. 덧셈 문제를 구성할 때 0, 1을 더하거나 동일한 숫자끼리 더하는 문제는 문제 풀이 책략에 개인차가 크지 않다는 기존 연구 결과를 고려하여 제외하였다(Siegler, 1987). 초등학생들은 화면에 제시된 문제를 보고 자신이 생각하는 답을 구두로 보고한 후 이어서 답을 구하기 위해 사용한 책략을 보고하였다. 책략은 ‘기억 인출(retrieval)’, ‘손가락으로 숫자를 대신하여 손가락 수를 셈(finger counting)’, ‘문제를 보다 쉬운 문제로 분해(decompose)하여 인출과 셈을 병행, 복합적 책략(mixed strategy), 기타(other) 등으로 분류되었다. 매 시행마다 문제 제시 시점부터 구두 반응이 일어난 시점까지의 시간을 문제 풀이 시간(반응 시간)으로 기록하였다. 전체 시행 중, 각 학생이 기억 인출을 이용하여 문제를 정확하게 푼 비율을 ‘인출 비율’이라 정의하였다. 아동의 자기 보고와 실험자의 기록간의 일치도는 97%였으며 아동의 자기 보고와 실험자의 기록이 불일치하는 3%의 사례에 대해서는 실험자의 기록에 따라 분류하였다. 반응 시간이 지나치게 짧거나(1 percentile 미만) 긴(99 percentile 초과) 시행은 분석에서 제외되었다.

fMRI 촬영 중 행동 과제. 뇌 영상 촬영을 하는 동안 실험은 네 가지 조건이 무선적인

순서의 블록(block)으로 진행되었다. 각 블록은 연이어 제시되는 45개의 동일 조건 시행들로 구성되었다. 이와 같은 블록 fMRI 디자인(block fMRI design)을 사용한 이유는 블록 디자인이 사건 관련 fMRI 디자인(event-related fMRI design)과 비교할 때 실험 조건 간의 뇌 활동 신호의 차이를 탐지하는 더 효율적인 방법이기 때문이다(Friston et al., 1999). 각 시행의 제시 시간은 문제 풀이 시간 5초, 시행 간 간격 500 ms로 총 5.5 초였다. 각 블록의 제시 시간은 한 블록 당 시행이 4개인 경우 22.5초, 한 블록 당 시행이 5개인 경우 27 초였다. 실험 조건에는 1) 덧셈 조건, 2) ‘+1 덧셈’ 조건(이하 통제 조건), 3) 숫자 찾기(number identification) 조건, 4) 기저 조건이 포함되었다. 각 조건에는 18개의 시행이 포함되었고 각 블록은 4번씩 무선적인 순서로 반복되어 총 72시행을 실시하였다. 덧셈 조건에서는 수학 책략 측정 검사에서와 유사한 덧셈 문제를 풀었다. 단, 뇌 영상 촬영 중 움직임을 최소화하기 위하여 구두 반응을 요하지 않는 참/거짓 판단하기(verification)의 형태로 수학 문제가 제시되었다. 예를 들어, 학생들은 ‘ $5 + 4 = 9$ ’와 같은 형태의 덧셈 식이 참인지 아닌지를 판단하였다. 좌향의 두 숫자 중 하나는 2 부터 9 사이, 다른 하나는 2 부터 5 사이였다. 더하는 숫자의 범위를 이와 같이 제한한 이유는 문제 제시 시간 5초 이내에 2, 3학년 학생들이 문제를 풀 수 있도록 하기 위함이었다(Ashcraft et al., 1984; Geary & Brown, 1991). 수학식이 참이라고 판단한 경우에는 1번 버튼을, 거짓이라고 판단한 경우에는 2번 버튼을 누르도록 하였다. 제시된 시행의 절반은 참이었고 나머지 절반

은 거짓인 식이었다. 수식이 거짓인 경우, 오답과 정답의 차이는 ± 1 or ± 2 였다(Ashcraft & Battaglia, 1978). ‘+1 덧셈’ 조건(이하 ‘통제’ 조건)은 2-9 까지의 숫자에 1을 더하는(예를 들어, ‘6+1=7’) 덧셈 식을 제시하고 참인지 아닌지 판단하도록 하였다. 통제 조건은 덧셈 조건에 대하여 감각 정보 처리 및 운동 반응을 동일하게 맞추는 동시에 수학 문제 풀이에 대한 난이도만 낮게 조정하여 덧셈 조건에 잘 대응되는(tightly matched) 최적의 통제 조건이라 할 수 있다. 숫자 찾기 조건은 숫자와 기호로 구성된 다섯 캐릭터의 행(예를 들어, 4 0 5 @ 7)중 숫자 5가 있는지 아닌지를 판단하도록 하였다. 본 연구에서는 숫자 인지 조건은 분석에서 제외하였다. 기저 조건에서는 피험자들이 화면 중앙에 제시된 십자 표시를 응시하며 휴식하였다.

자극 제시 및 행동 자료 수집 수학 문제 풀이 과제의 실험 자극은 이-프라임(E-Prime, Psychology Software Tools, Inc.) 소프트웨어로 제작되었으며 fMRI 기기와 연결된 프로젝션 장치를 이용하여 피험자에게 제시되었다. 반응의 정확도와 반응 시간 등을 종속 변인으로 저장하였다.

fMRI 자료 수집 뇌 영상은 자기장 세기 3 테슬라(Tesla)의 General Electrics(GE) Signa 기기(General Electric, Milwaukee, WI)를 이용하여 수집하였다. 앞 맞교차-후 맞교차(anterior commissure-posterior commissure)를 연결한 가상의 평면과 평행하도록 총 29개의 수평 절편(절편 두께 4.0 mm, 절편 간격 0.5 mm)을 획

득하였다. T2* weighted gradient echo spiral in-out pulse sequence(Glover & Lai, 1998)를 이용하여 2초 마다 전체 뇌의 구조와 활동성을 나타내는 전체 뇌 3차원 영상(whole brain 3D volume, 이하 볼륨)을 저장하였다. 영상 촬영과 관련한 파라미터는 다음과 같다(TR = 2 s, TE = 30 ms, flip angle = 80°, 1 interleave, field of view = 20 cm, matrix size = 64 x 64, in-plane spatial resolution = 3.125 mm).

fMRI 자료 분석

전처리 분석(preprocessing). fMRI 자료는 SPM8(<http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm>) 소프트웨어를 이용하여 분석하였다. 촬영 시작 후 획득한 최초 다섯 개의 볼륨은 T1 평형(equilibration)을 위해 분석에 사용하지 않았다. 한 회기에 획득한 시계열 뇌 볼륨은 촬영 동안 피험자의 미세한 움직임으로 인한 오류를 보정하기 위해 재정렬(realign)하고 공간적 평활(temporal smoothing)을 위해 반치전폭(full-width half-maximum, FWHM) 4 mm의 가우시안 함수(Gaussian kernel)를 사용하였다. 추가적으로, 영상 촬영 중 피험자의 과도한 움직임으로 인한 신호 변화를 추가적으로 보정하기 위하여 ArtRepair 소프트웨어를 사용하였다(<http://spnl.stanford.edu/tools/ArtRepair/ArtRepair.htm>). 마지막으로, 각 뇌 영상은 Montreal Neurological Institute(MNI) 152 뇌 표준 원형 구조 사진(standard template anatomical image)에 정렬되고 공간적 평활(spatial smoothing)에는 반치전폭(full-width half-maximum, FWHM) 4.5 mm의 가우시안 함수(Gaussian kernel)를 사용하였다. (두

차례에 걸친 공간적 평활 과정은 최종적으로 6 mm의 가우시안 함수를 사용한 것과 같은 결과이다.) 저주파수 신호를 제거하고 고 주파수 신호를 선택적으로 보존하는 high-pass filter (0.5 cycles/min)를 사용하여 신호를 처리하였다.

실험 조건 간 뇌 활동성 차이 분석. 실험 조건과 관련한 뇌 활동은 일반 선형 모델 (general linear model)에 입각한 다중 회귀 (multiple regression) 모형을 이용하여 분석하였다. 각 실험 조건의 뇌 신호에 대한 예측 모델은 boxcar 함수와 전형적인 혈류 역동 반응 함수 (canonical hemodynamic response function)를 컨볼브(convolve) 하여 만들었다. 이 다중 회귀 모형에서 각 실험 조건을 열(column)로 뇌 영상 촬영 횟수를 행(row)으로 한 행렬을 실험의 디자인 행렬(design matrix)이라 일컫는다. 실험 조건 간 비교는 선형적인 대조 벡터(linear contrast vector)를 사용하였다. 통계 조건과 비교하여 덧셈 조건에서 뇌 활동성이 증가한 뇌 영역을 찾기 위한 다중 회귀 분석에서는 각 피험자 별로 ‘덧셈 조건 - 통제 조건’의 대조 벡터를 사용하여 뇌 신호 예측 모델이 실제로 관찰된 뇌 신호를 통계적으로 유의하게 예측하는 부피소(voxel)들을 찾았다. 기저 조건과 비교하여 각 실험 조건에서 뇌 활동성이 증가한 뇌 영역을 찾기 위한 다중 회귀 분석에서는 각 피험자 별로 ‘실험 조건 - 기저 조건’의 대조 벡터를 사용하였다. 각 부피소의 신호가 모델을 예측하는 정도를 나타내는 회귀 계수 영상(con* image)을 모아 단일 집단 대응 표본 T 검증을 하였다. 인출 책략의 사용 증

가 및 수행의 향상에 따라 활동성이 증가하는 뇌 영역을 찾기 위하여 기억 인출 책략 사용 증가량 및 수행의 향상 정도를 공변인으로 사용한 분석을 실시하였다. 유의미한 활성화 군집(activation cluster)에 대한 통계 검증을 위해 매트랩(Matlab) 프로그램을 이용하여 몬테 카를로 시뮬레이션(Monte Carlo simulation)을 하였다 (Forman et al., 1995; Ward, 2000). 개별 부피소의 유의미한 활성화 수준에 대한 역치(voxel-wise height threshold)는 $p < 0.01$, 유의미한 활성화 군집(activation cluster)에 대한 역치는 $p < 0.01$ 였다. 모든 해부학적 위치는 MNI 좌표 체계에 따라 표기하였다. 모든 뇌 활동 분석 결과에 대한 결과는 표 2 - 표 4에 정리하였으며 각 표에 나타난 최대 T 값을 나타낸 부피소의 위치에 대한 해부학적 명칭은, FSLview 소프트웨어의 해부학 지도 도구에서 제공되는 Harvard-Oxford cortical structural atlas, Juelich histological map 과 MRICroN의 AAL(automated anatomical labeling)과 Brodmann atlas를 참조하여 결정되었다(Eickhoff et al., 2005; Desikan et al., 2006; Tzourio- Mazoyer et al., 2002).

결 과

행동적 수행 분석 결과

A. 수학 문제풀이 책략 측정 검사 수행 결과. 수학 문제풀이 책략 측정 검사에서 각 아동이 올바르게 푼 문제의 총 개수 중 기억 인출 책략을 사용한 시행의 수를 ‘인출 비율’로 정의하였다. 이학년(1차 실험) 재학 시에 측정된 인출 비율과 2학년부터 3학년 사이의

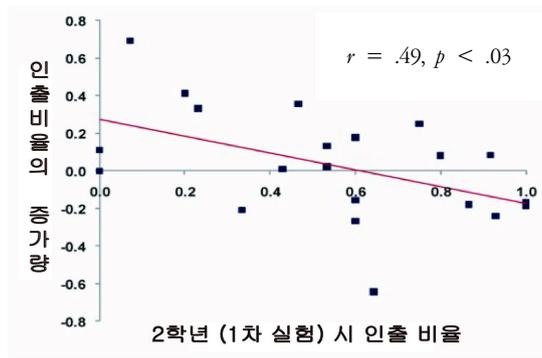


그림 1. 이학년(1차 시험) 시에 측정된 인출 비율(가로 축)와 2학년부터 3학년(2차 시험) 동안 인출 비율의 증가량(세로 축)간의 상관관계. 이학년 재학 시 인출 비율이 낮았던 학생일수록 일 년 간 인출 비율의 향상 정도가 컸다($r = .49, p < .03$).

인출 비율의 향상 정도(3학년 재학 시 인출 비율 - 2학년 재학 시 인출 비율) 간에 유의미한 부적 상관관계가 있었다. 즉, 2학년 재학 시 측정된 인출 비율이 낮았던 학생일수록 일 년 간 인출 비율의 향상 정도가 컸다(그림 1, $r = .49; p < .03$).

B. fMRI 촬영 중 행동 수행 분석 결과.

fMRI 촬영 중 행동 수행에 대한 2원 분산 분석 결과(2 way analysis of variance), 수학 문제 풀이의 정확도와 반응 시간에 대한, 시간(3학년 vs. 2학년)과 실험 조건(덧셈 vs. 통제 조건)의 주효과(main effect)는 모두 유의미하였다(표

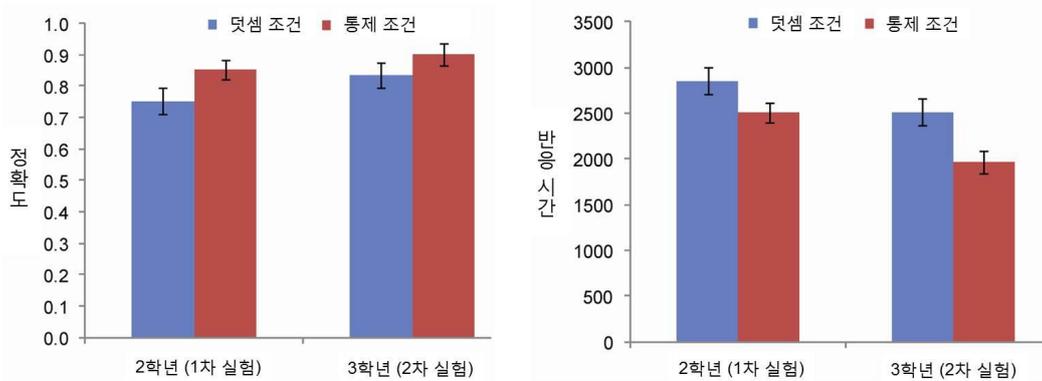


그림 2. 이학년(1차 시험)과 삼학년(2차 시험) 시의 fMRI 실험 중 덧셈과 통제 조건의 수행. 문제 풀이의 정확도(왼편 그림)와 반응 시간(오른편 그림)에 대한, 시간(3학년 vs. 2학년)과 실험 조건(덧셈 vs. 통제 조건)의 주효과는 모두 유의미하였다(표 1; $ps < .05$). 시간과 실험 조건 간의 2원 상호 작용은 유의미하지 않았다(표 1; $p > .05$). 덧셈 조건과 통제 조건 모두에서 2학년 재학 시 보다 3학년 재학 시에 정확도가 더 높고, 반응 시간이 더 짧았다.

표 1. 이학년 (1차 실험)과 삼학년 (2차 실험) 시의 fMRI 실험 중 덧셈 조건과 통제 조건의 수행에 대한 반복 측정 분산 분석 결과

| 종속변인 | 관심 효과 | 통계 검증 결과 |
|--------|-----------------|--|
| 수행 정확도 | 시간의 주효과 | $F(1, 20) = 4.33, MS_e = .02, p = .05^*$ |
| | 실험 조건의 주효과 | $F(1, 20) = 11.04, MS_e = .01, p = .003^{**}$ |
| | 시간 x 실험 조건 상호작용 | $F(1, 20) = .84, MS_e = .01, p = .37$ |
| 반응 시간 | 시간의 주효과 | $F(1, 20) = 9.59, MS_e = .42, p = .006^{**}$ |
| | 실험 조건의 주효과 | $F(1, 20) = 15.06, MS_e = .27, p = .001^{***}$ |
| | 시간 x 실험 조건 상호작용 | $F(1, 20) = 1.41, MS_e = .15, p = .25$ |

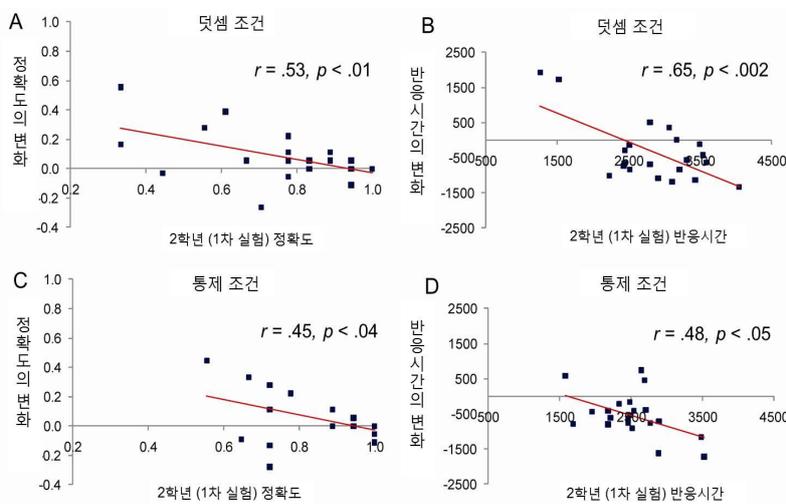


그림 3. 이학년(1차 실험) 시의 수행 수준과 일 년 후 수행 향상 정도와의 상관관계. 이학년 재학(1차 실험) 시의 수행 수준과 일 년 후 수행의 향상 정도와의 상관관계 분석 결과, 덧셈 조건(그림 3A, 3B) 과 통제 조건(3C, 3D) 모두에서 2학년 재학(1차 실험) 시에 수행이 더 저조했던 참가자가 일 년 후 수행 향상 정도가 높았다 (정확도: 그림 3A, 3C; 반응 시간: 그림 3B, 3D).

1; 그림 2; $p_s < .05$). 2학년에서보다 3학년 재학 시에 모든 실험 조건에서 수행의 정확도가 더 높고, 반응 시간이 더 짧았다(그림 2). 두 종속 변인에 대한 시간과 실험 조건 간의 2원 상호 작용(2 way interaction)은 모두 유의미하지 않았다(표 1; 그림 2; $p_s > .05$).

이학년 재학(1차 실험) 시의 수행(정확도, 반응시간) 수준과 일 년 후 수행의 향상 정도 간의 상관관계 분석 결과, 덧셈 조건(그림 3A, 3B)과 통제 조건(그림 3C, 3D) 모두에서 2학년 재학(1차 실험) 시에 수행이 더 저조했던 아동이 일 년 후 수행의 향상 정도가 높았다(그림 3).

fMRI 분석 결과 독자의 이해를 돕기 위해 [fMRI 분석 결과]에서 각 분석의 결과와 함께 활성화된 뇌 영역의 기능에 대한 간략한 설명을 덧붙였다. 각 뇌 영역의 기능에 대한 자세한 설명과 참고 문헌은 [논의]에 제시하였다.

A. 시간과 실험 조건 간 2원 분산 분석 결과. 학년의 증가에 따른 뇌 활동의 변화를 관찰하기 위해 시간의 주효과를 분석하였다. 초등학교 저학년 학생들이 성취 수준에 맞춘 적절한 난이도의 덧셈 문제를 푸는 것과 관련한 뇌 활동을 관찰하기 위해 실험 조건의 주효과를 분석하였다. 이 때, 덧셈 문제를 풀 때 발생하는 뇌 활동과 문제 풀이와 관련한 기본적인 감각·운동(sensorimotor) 반응 관련 뇌 활동을 구별하여 분리할 수 있도록 덧셈 조건에 잘 맞추어진 통제 조건을 사용하였다. (통제 조건에서는 아동들 대부분이 쉽게 풀 수 있는 매우 낮은 난이도의 덧셈 문제를 제시하였다.) 또한, 학년의 증가에 따라 덧셈 문제 풀이 중

뇌 활동이 증가되는 영역을 찾기 위해 시간과 실험 조건 간의 상호작용 효과를 분석하였다. **시간**(1차, 2차 실험)과 **실험 조건**(덧셈, 통제 조건) 간 2원 분산 분석 결과, 시간과 실험 조건 간의 2원 상호작용 효과(그림 4A, 표 2)와 시간의 주효과(그림 4B, 표 2)가 유의미하였다. 시간과 실험 조건 간의 2원 상호 작용 효과 즉, 2학년과 비교하여 3학년 재학 시에, (통제 조건과 비교하여) 덧셈 조건에서 유의미하게 뇌 활동이 증가한 뇌 영역은 좌반구 전측 측두엽(anterior temporal lobe)이었다(그림 4A). (전측 측두엽은 다양한 의미적 기억과 관계되는 것으로 보고되고 있는 영역이다.) 시간의 주효과 즉, 2학년과 비교하여 3학년 재학 시에 유의미하게 뇌 활동이 증가한 뇌 영역은 양반구 전두극(frontal pole)을 포함한 전전두엽, 좌반구 내측 측두엽(medial temporal lobe)에 위치한 해마와 해마 주변 피질, 후측 두정엽의 각 이랑, 전 중심 이랑(precentral gyrus), 섬엽(insula) 등이었다(그림 4B). (내측 측두엽의 해마와 해마 주

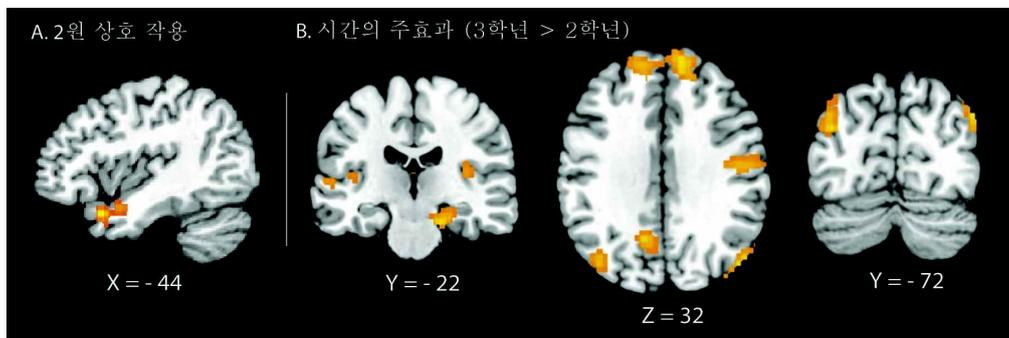


그림 4. 뇌 영상 자료에 대한 시간과 실험 조건 간 2원 분산 분석 결과. 시간과 실험 조건 간의 2원 상호 작용 효과(A), 시간의 주효과(B)가 유의미하였다. 이학년과 비교하여 3학년 재학 시에, (통제 조건과 비교하여) 덧셈 조건에서 뇌 활동이 증가한 뇌 영역은 좌반구 전측 측두엽이었다(그림 4A). 시간의 주효과 즉, 2학년과 비교하여 3학년 재학 시에 뇌 활동이 증가한 뇌 영역은 좌반구 해마와 해마 주변 피질, 후측 두정엽의 각 이랑 등 이었다(그림 4B).

표 2. 시간(1차, 2차 실험)과 실험 조건(덧셈, 통제 조건) 간의 2원 상호 작용 및 시간의 주효과를 나타낸 뇌 영역의 위치와 활성화 수준

| 대조 벡터 | 뇌 영역 | 최대 T 값 | 부피소의 수 | 국소 최대값 (Local Maxima) (MNI 좌표, mm) | | | BA* | |
|-------|--|---------------|--------|--|---------------|------|-------|--------|
| | | | | X | Y | Z | | |
| | | | | 2차 실험 (덧셈 - 통제 조건) | Temporal Pole | 4.76 | | 135 |
| > | 1차 실험 (덧셈 - 통제 조건) | Planum Polare | 3.52 | | -42 | 2 | -22 | 38, 20 |
| | Visual cortex V2, V1 | 3.93 | 174 | -18 | -100 | 4 | 17 | |
| 2차 실험 | Superior Parietal Lobule | 3.15 | 335 | 34 | -56 | 62 | 7 | |
| > | Lateral Occipital Cortex (superior division), Superior Parietal Lobule | 3.12 | | 24 | -60 | 62 | 7 | |
| 1차 실험 | Superior and Inferior Parietal Lobule | 3.12 | | 46 | -44 | 62 | 40, 2 | |

주. *B.A는 Brodmann Area의 약자임. **N/A는 해당 없음 (Not Applicable)의 약자임.

변 피질 영역은 연합 학습의 증추로서, 의미적, 일화적(episodic) 기억 표상의 형성과 저장에 필수적이다. 후측 두정엽의 각 이량은 반복적 계산 훈련 후 활동성이 증가하는 영역이다. 자세한 해석은 논의에 제시하였다.)

B. 인출 비율의 증가량을 공변인(covariate)으로 사용한 시간과 실험 조건 간의 2원 분산 분석 결과. 인출 비율의 증가량을 공변인으로 사용하여, 시간과 실험 조건 간의 이원 분산 분석을 실시하였다. 이 분석을 실시한 이유는 3학년이 되어 (통제 조건에 비해) 덧셈 조건에서 인출 책략의 사용 비율이 더 크게 증가하였을 때 활성화되는 뇌 영역을 찾기 위함이다. 분석 결과, 일 년 동안 인출 비율이

크게 증가한 피험자들에게서 (통제 조건과 비교하여) 덧셈 조건에서 상측 전두-두정 주의 신경망(dorsal fronto-parietal attention network)의 활동성이 유의미하게 증가하였다. 이 신경망에는 중 전두 이랑(middle frontal gyrus, MFG), 두정 내 구(intraparietal sulcus, IPS), 상측 두정엽(superior parietal lobe), 내측 상 전두 이랑 (medial SFG), 전 중심 이랑이 포함되었다(그림 5, 표 3). (좌 중 전두 이랑 (L MFG), 우 중 전두 이랑(R MFG), 좌 두정 내 구(L IPS), 좌 상측 두정엽(L SPL)은 모두 전두-두정 주의 신경망의 일부로서 시각적으로 주어진 정보에 하향식 선택 주의를 줄 때 활동성이 증가하는 영역들이다. 자세한 해석은 논의에 제시하였다.)

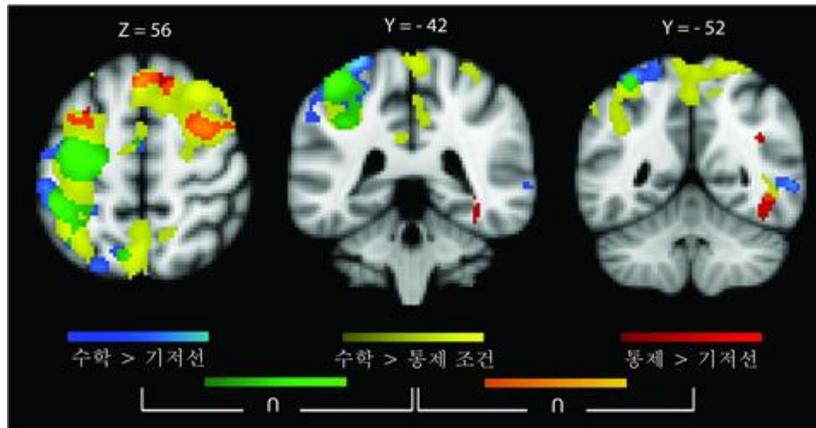


그림 5. 인출 비율의 증가를 공변인으로 한 분산 분석 결과. (통제 조건과 비교하여) 덧셈 조건에서 뇌 활동의 증가량이 인출 비율과 상관관계를 나타낸 뇌 영역이 노란 스케일로 표시되었다. 사후 분석 결과, (기저선과 비교하여) 덧셈 조건과 통제 조건에서 뇌 활동의 증가량이 인출 비율과 상관관계를 보인 영역이 각기 빨간색과 파란색 스케일로 표시되었다. 노란색과 파란색 스케일로 표시된 영역 간의 교집합은 초록색, 노란색과 빨간색으로 표시된 영역 간의 교집합은 주황색 스케일로 표시하였다.

이와 같은 결과가 나타난 이유는 각 실험 조건에서 유발된 뇌 활동성의 변화가 각기 인출 비율의 증가와 어떠한 체계적인 관계성을 지니기 때문일 것이다. 각 실험 조건에서의 뇌 활동성과 인출 비율의 증가가 어떠한 관계를 가지는지 이해하기 위해 사후 분석을 실시하였다. 따라서 앞서 보고한 뇌 영역 중 좌 중 전두 이랑, 우 중 전두 이랑, 좌 두정 내구, 좌 상측 두정엽에 대하여 관심 영역(region of interest, ROI) 분석을 실시하였다(부록 그림 1). 그 결과, 2학년과 비교하여 3학년 재학 시, (기저선과 비교한) 덧셈 조건의 뇌 활동의 증가량은 인출 비율의 증가와 정적 상관이 있었고, 통제 조건의 뇌 활동의 증가량은 인출 비율의 증가와 부적 상관관계가 있었다(부록 그림 1). 이러한 결과는 다음과 같이 해석할 수 있다. 일 년 동안 인출 비율의 증가량이 높았던 아동일수록 ‘어려운’ 문제를 풀 때는 하향

식 주의와 인지 통제 기능을 더 잘 활용한 한편, 쉬운 문제를 풀 때는 하향식 주의와 인지 통제 기능이 별로 필요하지 않았던 것으로 해석할 수 있다.

인출 비율의 증가량을 공변인으로 사용한 세 가지 분석의 결과를 그림 5에 빨간색, 노란색, 파란색 스케일로 표시하였다. 각 결과들 간에 겹치는 영역은 주황색, 초록색 스케일로 표시하였다.

C. 수행 향상에 따른 뇌 활동의 변화. 이 학년에서 3학년이 되기까지 문제 풀이의 정확도가 많이 향상하였을수록 (통제 조건과 비교하였을 때) 덧셈 조건에서 양반구의 내측 측두엽(해마와 해마 주변 피질), 방추형 이랑과 혀 이랑을 포함하는 복측 시각 피질, 외측 후두측두엽, 소뇌 등의 영역에서 뇌 활동이 더 많이 증가하였다(그림 6, 표 4). 이학년에서 3

표 3. 덧셈 조건에 대한 시간의 주효과, 통제 조건에 대한 시간의 주효과, 실험 조건과 시간의 2원 상호 작용 효과가 인출 비율의 증가량과 정적 상관을 나타낸 뇌 영역과 활동 수준

| 대조 벡터 | 뇌 영역 | 최대 T 값 | 부피소의 수 | 국소 최대값 (MNI 좌표, mm) | | | BA |
|---|---|--------|--------|------------------------|-----|-----|----------|
| | | | | X | Y | Z | |
| 2차 실험 (덧셈 - 통제 조건) > 1차 실험 (덧셈 - 통제 조건) | Frontal Pole | 8.07 | 1243 | -28 | 56 | 24 | 9/46 |
| | Superior Frontal Gyrus, Para-cingulate Gyrus | 6.51 | 8607 | 2 | 30 | 46 | 8 |
| | Precentral Gyrus | 6.33 | 4455 | -32 | -8 | 62 | 6 |
| | Lateral Occipital Cortex (inferior division) | 5.1 | 257 | -44 | -88 | 0 | 18, 19 |
| | Caudate nucleus | 4.95 | 3366 | 20 | 12 | 12 | N/A |
| | Cingulate Gyrus(posterior division) | 4.74 | 3250 | -6 | -28 | 36 | 23 |
| | Supramarginal Gyrus(anterior division) | 4.56 | 234 | -62 | -30 | 42 | 2, 40 |
| | Inferior Temporal Gyrus(temporooccipital part) | 3.56 | 133 | 48 | -56 | -4 | 37 |
| | Inferior parietal lobule, Lateral Occipital Cortex(superior division) | 3.36 | 178 | 42 | -60 | 44 | 39 |
| | Temporal Occipital Fusiform Cortex, Cerebellum | 3.26 | 232 | -30 | -66 | -22 | 19 |
| 2 차 실험 통제 조건 > 1차 실험 통제 조건 | Occipital Fusiform Gyrus, Lingual Gyrus | 5.35 | 1728 | -12 | -88 | -20 | 18 |
| | Frontal Pole | 4.31 | 1192 | 24 | 50 | 22 | 9, 46, 8 |
| | Cuneal Cortex, Visual cortex V2 | 4.29 | 150 | 14 | -74 | 24 | 18 |
| | Superior Frontal Gyrus | 4.12 | 1867 | 6 | 42 | 38 | 8, 9, 6 |
| | Caudate nucleus | 4.10 | 226 | 14 | 18 | 4 | 25, 11 |
| | Middle Frontal Gyrus | 3.77 | 526 | -36 | 30 | 38 | 8, 46, 9 |
| | Thalamus | 3.61 | 139 | -2 | 0 | 10 | N/A |
| | Temporal Occipital Fusiform Cortex | 3.53 | 152 | 38 | -46 | -18 | 37 |
| 2 차 실험 덧셈 조건 > 1차 실험 덧셈 조건 | Superior Frontal Gyrus | 3.44 | 139 | -20 | 6 | 66 | 6 |
| | Precentral Gyrus | 6.14 | 3995 | -32 | -16 | 64 | 4, 6 |
| | Superior Parietal Lobule, Postcentral Gyrus | 5.93 | | -44 | -40 | 58 | 40, 2 |
| | Precentral Gyrus, Superior Frontal Gyrus | 5.63 | | -26 | -10 | 72 | 6 |
| | Precentral Gyrus | 4.69 | 284 | -54 | 0 | 36 | 6 |
| | Inferior Frontal Gyrus | 3.35 | | -58 | 16 | 24 | 9, 44 |
| | Precentral Gyrus, Inferior Frontal Gyrus (pars opercularis) | 2.93 | | -58 | 6 | 26 | 6, 9, 44 |
| | Middle Temporal Gyrus, temporooccipital part | 3.73 | 137 | 58 | -52 | 0 | 21, 37 |
| | Middle and Inferior Temporal Gyrus (temporooccipital part) | 3.34 | | 48 | -58 | -2 | 37 |
| | Middle Temporal Gyrus (temporooccipital part) | 3.2 | | 62 | -60 | -2 | 37 |

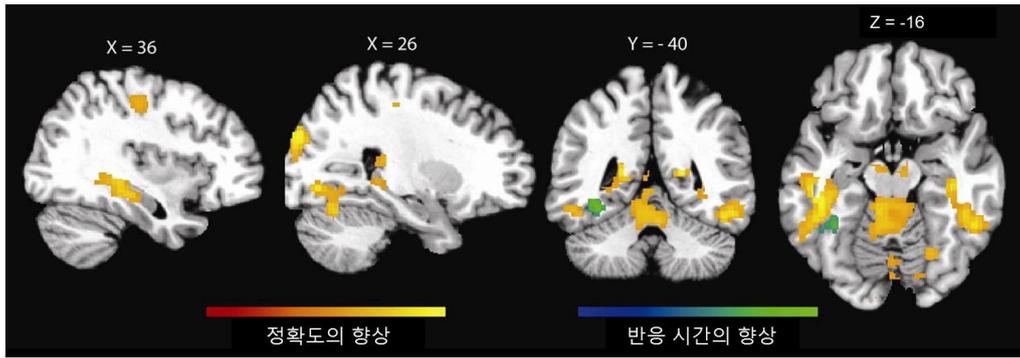


그림 6. 수행 향상에 따른 뇌 활동의 변화. 정확도의 향상에 따라 뇌 활동이 증가한 영역은 빨강-노랑 색 척도에 따라 표시되었으며, 문제 풀이 속도의 증가에 따라 뇌 활동이 증가한 영역은 파랑-초록 색 척도에 따라 표시되었다. 부피소의 T 점수가 클수록 빨강-노랑 척도에서는 노란색, 파랑-초록 척도에서는 초록색에 가까운 색으로 표시되었다.

표 4. 수행(정확도, 문제 풀이 속도)의 향상과 덧셈 조건에서의 뇌 활동의 증가가 정적인 상관관계를 나타낸 뇌 영역의 위치와 활성화 수준

| 공변인 | 뇌 영역 | 최대 T 값 | 부피 소의 수 | 국소 최대값 (MNI 좌표, mm) | | | BA |
|-----------|---|--------|---------|---------------------|-----|-----|--------|
| | | | | X | Y | Z | |
| 정확도의 향상 | Occipital Pole, Visual cortex V2 | 6.43 | 819 | -20 | -96 | 16 | 18, 17 |
| | Occipital Pole | 5.39 | 1591 | 22 | -90 | 30 | 18, 19 |
| | Hippocampus cornu ammonis, Temporal Lobe | 5.02 | 543 | 40 | -28 | -12 | 20 |
| | Inferior Temporal Gyrus (posterior division), Temporal Fusiform Cortex (posterior division) | 4.95 | 510 | -44 | -32 | -18 | 20 |
| | Precuneous Cortex | 4.78 | 452 | -14 | -44 | 8 | 29 |
| | Middle Temporal Gyrus (posterior division) | 4.76 | 253 | 46 | -30 | -6 | 21, 22 |
| | Temporal Occipital Fusiform Cortex | 4.20 | 288 | 48 | -46 | -20 | 37, 20 |
| | Cerebellum | 4.10 | 1069 | 14 | -36 | -24 | 30 |
| | Thalamus | 4.06 | 309 | 2 | -6 | 2 | N/A |
| | Lateral Occipital Cortex (inferior division) | 3.88 | 250 | -52 | -64 | 10 | 37 |
| 반응 시간의 향상 | Postcentral Gyrus | 3.48 | 199 | 42 | -18 | 48 | 3, 4 |
| | Middle Frontal Gyrus | 3.38 | 138 | -36 | 26 | 48 | 8, 9 |
| | Temporal Occipital Fusiform Cortex | 4.12 | 140 | -38 | -48 | -12 | 37 |

학년이 되기까지 반응 시간의 많이 감소되었을수록(즉, 문제풀이 속도가 더 향상되었을수록) 좌반구 방추형 이랑의 뇌 활동이 더 증가하였다(그림 6, 표 4). (이 중 측두엽은 기억 과정 및 기억 표상의 형성과 저장에 폭넓게 관여되며, 방추형 이랑, 혀 이랑을 포함하는 복측 시각 피질과 외측 후두-측두엽은 상위 시각 피질의 일부로서 시각적 물체와 상징을 신속하게 재인하는 데에 관여되는 영역이다. 자세한 해석은 논의에 제시하였다.)

논 의

본 연구는 수학 학습의 기초를 다지는 초등학교 2학년 학생 21명을 일 년 간격을 두고 3학년이 되기까지 두 차례에 걸쳐 종단적으로 관찰하였다. 수학 문제 풀이 능력의 발달에 따른 수행 향상, 인지 책략 변화를 추적하였으며 뇌 활동의 변화를 기능적 자기 공명 영상 기기를 이용하여 연구하였다.

행동 자료 분석 결과 수학 문제 풀이의 행동적 수행의 변화를 관찰한 결과, 2학년 아동이 3학년이 되었을 때 정확도와 문제 풀이 속도가 모두 향상되었으며(그림 2), 2학년 때 수행이 더 저조했던 아동이 일 년 동안 수행의 향상 정도가 더 컸다(그림 3). 수학 문제 풀이를 위해 사용하는 인지 책략의 변화를 관찰한 결과, 2학년 때 수학 문제 풀이 책략 중 기억 인출의 비율이 낮았던 아동이 일 년 동안 인출 비율 향상 정도가 더 컸다(그림 1).

뇌 활동 자료 분석 결과

A. 시간과 실험 조건 간 2원 분산 분석 결과. 수학 문제 풀이 중 뇌 활동의 변화를 관찰한 결과, 2학년과 비교하여 3학년 재학 시에, (통제 조건과 비교하여) 덧셈 조건에서 뇌 활동이 증가한 영역(즉, 시간과 실험 조건 간의 상호 작용)은 좌반구 전측 측두엽이었다(그림 4). 전측 측두엽은 의미적 기억 과정에 관련된 영역이므로 (2학년과 비교할 때) 3학년 학생들이 수학적 지식의 저장과 인출을 더 활발하게 하고 있는 것으로 이해할 수 있다 (Martin & Chao, 2001; Visser et al., 2010; 그림 4). 이학년과 비교하여 3학년 재학 시에 활동이 증가한 뇌 영역(시간의 주효과)은 내측 측두엽의 해마와 해마 주변 피질 영역과 후측 두정엽의 각 이랑 등이었다(그림 4). 해마는 연합 학습의 중추적 기체로서, 의미적, 일화적 (episodic) 기억 표상의 형성과 저장에 필수적이며 해마 주변 피질 역시 기억 과정에 폭넓게 관여하는 영역이다(Squire et al., 2004; Suzuki et al., 2007). 후측 두정엽의 각 이랑은 성인 피험자들이 장기간, 복잡한 산술 훈련 후 활동성이 증가하는 것으로 보고되었다(Ischebeck et al., 2006; Grabner et al., 2009). 이러한 결과를 종합하면, 반복된 연합 학습 훈련을 통해 수학적 지식이 형성, 저장됨에 따라 의미적 기억과 관련된 내측 측두엽(해마와 주변 피질)과 전측 측두엽의 활동성이 증가하며, 각 이랑의 활동성 증가는 일 년 동안 누적된 계산 훈련 효과를 반영하는 결과로 해석할 수 있다.

B. 인출 비율의 증가량을 공변인으로 사용한 분석 결과. 인출 비율의 증가를 공변인으로 사용한 분석 결과, 일 년 동안 인출 비

율이 더 많이 증가한 피험자들에게서 (통제 조건과 비교하여) 덧셈 조건에서 외측 전전두엽과 상측 전두-두정 주의 신경망에서 뇌 활동의 증가량이 더 컸다(그림 5). 외측 전전두엽은 작업 기억, 통제된 기억 인출, 문제 해결과 같은 고등 인지에 관여되는 영역으로 아동의 기억 기반 수학 문제 해결 능력의 향상에 도 외측 전전두엽이 기여하는 것으로 해석할 수 있다(D'Esposito et al., 1999; Badre et al., 2002; 2005; 2007; Wager et al., 2003). 전두-두정 주의 신경망은 시각적으로 주어진 정보에 하향식으로 선택적 주의를 주어 정보를 처리할 때 관여되는 영역들이며, 인지 통제 기능에도 중추적 역할을 한다(Corbetta & Shulman, 2002; Ciaramelli et al., 2010; Whitney et al., 2012). 이러한 결과는, 인출 비율이 많이 증가한 아동이 문제 풀이를 할 때 정확한 수학적 지식의 인출을 위해 하향식 주의 신경망을 더 많이 사용한 것으로 해석할 수 있다. 한편, 이 신경망의 일부인 두정 내 구 영역은 양적 표상(quantity representation)과 내적 수 표상(mental number line)이 저장되어 있는 곳으로 밝혀지고 있다(Eger et al., 2003; Dehaene et al., 2003; 2004; Pinel et al., 2001; Piazza et al., 2004; Dormal et al., 2011). 이러한 결과는, 인출 비율이 많이 증가한 아동이, 하향식 주의 신경망의 일부이며 수 표상의 중추인 두정 내 구를 더 많이 사용한 것으로 해석할 수 있다.

C. 수행 향상에 따른 뇌 활동의 변화. 정확도와 문제 풀이 속도의 향상과 관련한 뇌 활동 분석 결과, 2학년에서 3학년이 되기까지 정확도와 문제 풀이 속도가 많이 향상하였을

수록(통제 조건과 비교하였을 때) 덧셈 조건에서 내측 측두엽, 외측 후두-측두엽, 복측 시각 피질과 소뇌에서 뇌 활동이 더 많이 증가하였다. 수행 향상은 다양한 요인이 복합적으로 작용하여 나타난 결과라고 생각할 수 있다. 이 중 내측 측두엽의 활동성 증가는 연합 학습과 의미적 기억 표상의 형성과 저장 기능의 증진을 반영하는 것으로 해석할 수 있다(Squire et al., 2004; Suzuki et al., 2007). 또한, 방추형 이랑을 포함하는 복측 시각 피질과 외측 후두-측두엽 영역의 활동성 증가는 시각적 물체와 상징을 신속하게 재인하는 데에 관여되는 영역으로서 숫자와 수학 기호를 신속하게 재인하고 수식을 효율적으로 처리할 수 있는 능력의 향상을 반영하는 것으로 해석할 수 있다(Allison et al., 1994; McCandliss et al., 2003; James et al., 2005; Vinckier et al., 2007; Reinke et al., 2008; Chan et al., 2009). 종합해보면, 이러한 결과는 연합 학습에 기반한 의미적 기억 체계를 많이 활용하고 숫자와 수학적 기호의 효율적 처리가 수학 문제 풀이 수행의 향상에 기여함을 의미한다.

선행 연구 결과와의 비교, 통합 본 연구는 수학 정보 처리 관련 선행 연구의 결과를 뒷받침하는 동시에 아동의 수학 학습 능력의 발달과 관련한 개별 인지 과정과 그 뇌 기반에 대한 더 심층적인 정보를 제공한다. 첫째, 본 연구에서는 Rosenberg-Lee et al. (2011)과 Rivera et al.(2005)의 횡단 연구와 일치하는 뇌 영역에서 활동성이 증가함을 확인하였을 뿐 아니라, 나아가 그 영역들 각각이 어떠한 인지·행동적 변화와 관계되는지를 피험자 내 설계로 확

인할 수 있었다. 본 연구와 Rosenberg-Lee et al.(2011)의 결과 간의 차이점은, 본 연구에서의 시간의 주효과 분석에서 상측, 외측 전전두엽, 두정 내 구와 복측 시각 피질 영역이 유의미한 활동성 증가를 보이지 않았다는 점이다. Rosenberg-Lee et al.(2011)의 횡단 연구에서는 각 학년 당 45명의 아동을 피험자 간 설계로 연구한 데에 반해 본 연구에서는 21명의 아동을 대상으로 피험자 내 설계를 사용하였기 때문에 개인차 변인의 영향이 더 컸을 가능성이 높다. 다시 말해, 많은 수의 아동을 대상으로 전체적인 발달적 변화를 살펴보면, 대다수의 아동이 학년의 증가에 따라 수행이 증가하고 인출 비율이 증가하는 것을 확인할 수 있으나, 적은 수의 표본 집단을 사용할 경우, 소수의 아동의 특이 사항이 더 부각되어 결과에 영향을 미칠 가능성이 높아진다. (실제로 본 연구의 피험자 중에는 일반적인 발달적 변화 패턴에서 벗어나거나 일 년 동안 별다른 변화를 보이지 않은 소수의 아동이 섞여 있었다.) 그러나, 본 연구에서도 상측, 외측 전전두엽, 두정 내 구와 복측 시각 피질 영역은 각기 인출 비율의 증가와 수행의 향상 관련하여 활동성이 증가한 것으로 확인되어 두 연구 간의 불일치에 대한 우려를 해소해 준다. 나아가, 이 같은 결과는 Rosenberg-Lee et al.(2011)의 연구에서 학년의 효과를 보인 다양한 뇌 영역들이 각기 어떠한 인지 발달 변화와 관계되는지에 대한 더 자세한 설명을 제공한다. 또한, 본 연구에서 관찰한 인출 비율의 효과는 Cho et al.(2011; 2012)의 횡단 연구에서 인출 비율의 증가와 관련하여 뇌 활동 및 연결된 활동성(functional connectivity)이 증가한 영역들(외측

전전두엽, 해마, 후측 두정엽 및 복측 시각 피질 영역)과도 매우 유사하다. 본 연구를 포함하여 서로 다른 연구에서 수학 능력과 관련하여 보고된 전전두엽 혹은 후측 두정엽 내의 세부적 위치 간에는 다소 차이가 있으나, 이는 피험자의 특성, 실험적 맥락 및 분석 방법 차이 등 복합적인 요인들에 기인할 것으로 생각한다.

본 연구와 여러 연구 간의 공통된 결과를 종합하면, 수학 정보 처리와 관련한 주요 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다. 첫째, 기초 수학 능력의 발달은 반복적 연합 학습에 의한 수학적 지식의 저장과 인출을 기초로 한다. 이러한 인지 과정은 해마와 그 주변 피질 영역을 포함하는 내측 측두엽의 기능과 밀접한 연관이 있다. 둘째, 기억 인출에 기반한 수학적 문제 해결은 외측 전전두엽과 두정 내 구, 상측 두정엽 등의 활동성 증가와 관계되며 이는 하향식 주의 및 인지 통제 기능의 향상을 반영한다. 셋째, 수행의 향상은 수학적 지식의 저장, 훈련의 양, 인출 비율의 증가 등 복합적인 요인으로 인해 나타나는 현상일 것이다. 이 중 수행과 관련한 복측 시각 피질과 외측 후두-측두엽의 활동성의 증가는 숫자와 수식을 신속하게 재인하는 것이 빠르고 정확한 문제 풀이에 기여하는 것으로 해석할 수 있다.

수학적 정보 처리 능력의 발달 관련 뇌-인지 모형 본 연구와 선행 연구의 결과를 종합하여 아동의 수학적 문제 해결 능력의 향상에 기여하는 뇌 영역과 각각의 영역의 기능적 공헌에 대한 기초적인 뇌-인지 모형을 구축할

수 있다(그림 7).

첫째, 초기 학령기 아동의 기억 기반 수학적 문제 해결 능력의 발달과 관련하여 해마 및 해마 주변 피질 영역의 활동성이 증가한다. 해마 및 해마 주변 피질 영역은 연합 학습 기제이자 의미적 기억 체계로서 수학적 지식의 부호화와 저장에도 관여하며, 기억 기반 수학적 문제 해결 능력의 발달과 함께 그 관여도가 증가한다(Squire et al., 2004; Suzuki et al., 2007). 본 연구와 선행 연구의 결과를 고려할 때, 수학적 문제 해결 능력이 발달하는 초기에는 해마와 해마 주변 피질 영역의 활동성이 증가하였다가 연령이 증가하면서 수학적 정보 처리가 점차 더 자동화되고 수학적 지식이 공고화(consolidate)됨에 따라 해마와 그 주변 피질의 관여도가 다시 감소할 것으로 추정된다(Rivera et al., 2005; Tse et al., 2007).

둘째, 초기 학령기 아동의 기억 기반 수학적 문제 해결 능력의 발달과 관련하여 전두-두정 주의 신경망 영역의 활동성이 증가한다. 전두-두정 주의 신경망은 시각적으로 주어진 정보에 하향식으로 선택적 주의를 주거나, 간

섭을 배제한 통제된 기억 인출 등 고등 인지 기능을 수행할 때 관여된다. 아동들의 기억 기반 수학 학습 과정에도 전두-두정 주의 신경망의 역할이 중요하다(Corbetta & Shulman, 2002; Ciaramelli et al., 2010; Whitney et al., 2012). 또한, 전두-두정 주의 신경망의 일부인 두정 내 구는 수와 양에 대한 표상이 저장되어 있을 것으로 추정되는 영역으로 연령의 증가에 따라 수학적 정보 처리의 중추적 기제로 성숙하게 된다(Eger et al., 2003; Dehaene et al., 2003; 2004; Pinel et al., 2001; Piazza et al., 2004; Dormal et al., 2011).

셋째, 초기 학령기 아동의 기억 기반 수학적 문제 해결 능력의 발달과 관련하여 복측 시각 피질과 외측 후두-측두엽을 포함하는 상위 시각 피질의 활동성이 증가한다. 이들 영역은 시각적 물체와 글자 등을 신속하게재인 하는 데 기여하는 영역으로서 숫자와 수학적 기호의 효율적 처리에도 이 영역이 중요함을 알 수 있다(Allison et al., 1994; McCandliss et al., 2003; James et al., 2005; Vinckier et al., 2007; Reinke et al., 2008; Chan et al., 2009). 본 연구

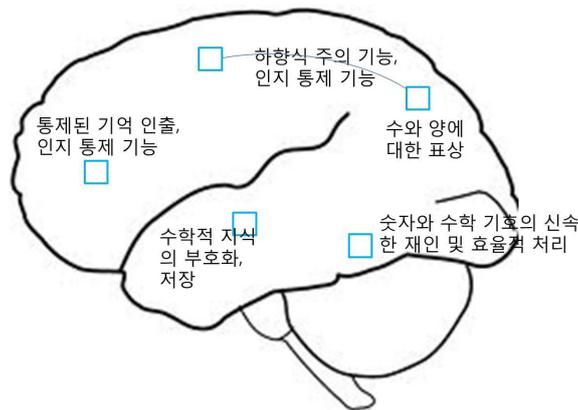


그림 7. 아동의 수학적 정보 처리의 발달에 기여하는 주요 뇌 영역과 기능

와 선행 연구를 고려할 때, 이 영역은 연령이 증가할수록 활동성이 높아질 것으로 예상된다 (Rivera et al., 2005).

넷째, 초기 학령기 아동의 기억 기반 수학적 문제 해결 능력의 발달과 관련하여 외측 전전두엽 영역의 활동성이 증가한다. 중, 하전두 이랑을 포함하는 외측 전전두엽 영역은 전두-두정 주의 신경망의 일부일 뿐 아니라, 고등 인지 처리와 작업 기억 및 인지 통제에 폭넓게 관여되는 영역으로서 아동의 기억 기반 수학적 문제 해결 시 간섭을 배제하고 저장된 수학적 지식을 정확하게 인출하는 데에 관여된다 (Badre et al., 2002; 2005; 2007; D'Esposito et al., 1999; Wager et al., 2003). 연령이 증가함에 따라, 기본적인 연산 혹은 과 학습된(overlearned) 수학적 지식의 인출은 점차 자동화되어 외측 전전두엽의 역할은 점차 감소될 것으로 예상된다 (Rivera et al., 2005).

수학적 발달 장애에 대한 진단과 개입 수학적 정보 처리를 구성하는 개별 인지 과정과 관련 뇌 구조/활동성의 변화에 대한 이해는 궁극적으로 수학적 발달 장애(dyscalculia)에 대한 진단과 개입을 위한 기초 자료가 된다. 수학적 발달 장애의 임상적 진단 요건은 정상적인 지능을 가진 아동이 수학적 성취도가 매우 저조하여 학업과 일상 생활에 지장을 초래하는 경우로서 다소 애매하게 정의되어 있다 (Butterworth et al., 2011). 인지 심리학자들은 수학적 발달 장애를 초래하는 구체적이고 다양한 인지·행동적 요인과 이와 관련된 뇌 발달상의 특이점을 찾기 위해 노력하고 있다. 수학적 발달 장애를 가진 아동은 수와 양에 대한

판단이 미숙하며, 반복된 연습에도 불구하고 기본적인 수학적 연산에도 지속적인 어려움을 보인다 (Geary, 1993, Piazza et al., 2010). 수학적 발달 장애를 가진 아동의 인지·행동적 장애와 관련한 뇌 구조/활동상의 특이점에 대한 연구는 각 아동의 필요에 맞춘 교육적 개입 프로그램을 구성할 수 있는 기반이 될 것이다. 예를 들어, 수와 양의 많고 적음에 대한 직관적 감각이 떨어지는 아동에게 수, 양 감각을 키우는 훈련을 통해 수학적 성취도를 향상시킬 수 있는지를 검증하기 위한 연구들이 진행 중이며 (Kucian et al., 2011), 이는 후측 두정엽의 구조와 활동성의 증가를 가져올 것으로 예상된다 (Price et al., 2007). 또한, 반복적 연습에도 불구하고 연산을 잘 하지 못하는 아동의 경우, 숫자 등 시각적 표상에 대한 처리의 효율성이 문제인지, 수학적 지식에 대한 기억 표상의 형성에 문제가 있는지, 통제된 기억 인출에 문제가 있는지 등 그 원인을 구별하여야 각 아동의 필요에 맞추어 도움을 주는 것이 가능해진다. 정리하면, 장애에 대한 정확한 행동적 진단과 이와 관련한 뇌 구조와 활동상의 문제점을 발견하는 것이 각 아동의 필요에 맞춘 목표 지향(targeted)적 개입을 위한 선행 조건이다.

본 연구의 제한점 본 연구는 아동의 수학적 발달 과정에 대한 종단적 뇌 변화에 초점을 두고 있다. 이 주제에 대하여 아직 많은 연구가 이루어지지 못한 상황이기 때문에 본 연구에서 관찰된 일부 뇌 영역에 대하여 명확한 해석을 내리지 못한 제한점이 있다. 첫째, 시간의 주효과를 보인 주요 영역 중 섬엽은 매우

다양한 인지, 행동, 감성적 과제와 관련하여 보고되는 뇌 영역이다. 예를 들어 섬엽은 미각 정보 처리, 인지적 모드(cognitive mode) 간의 전환 그리고 혐오적 감정과 관계된다고 보고되고 있다(Sridharan et al. 2008; Wicker et al., 2003). 그러나 수학적 정보 처리와 관련한 섬엽의 역할에 대해서는 명확한 이론이 부재하다. 둘째, 인출 비율의 증가를 공변인으로 사용한 분석에서 활성화된 내측 상 전두 이랑은 자신과 관련한 생각, 기억, 인지 통제 등 매우 다양한 인지, 행동적 과제와 관련하여 보고되는 뇌 영역이다. 그러나 마찬가지로, 수학적 정보처리와 관련한 내측 상 전두 이랑의 역할에 대한 명확한 이론이 부재하다. 셋째, 시간의 주효과와 인출 비율의 증가를 공변인으로 사용한 분석에서 나타난 전 중심 이랑은 매우 다양한 인지, 행동적 맥락에서 활성화되는 영역이며 일차 운동 피질이 위치한 영역이다. 일부 논문에서는 초기 수학 학습 과정에서 손가락을 사용하여 계산을 했던 경험이 흔적으로 남아 이후 암산을 할 때에도 손가락과 관련된 운동 피질 영역이 활성화되는 것으로 추측하고 있다. 그러나 이 가설은 폭넓은 공감대를 형성하지 못하였다. 넷째, 정확도의 향상과 관련하여 소뇌의 활동성이 증가하였다. 소뇌가 운동 기능을 주로 담당한다는 기존의 관점에서 벗어나 소뇌가 인지에 폭넓게 관여하며 특히 학습과 인지 훈련에 기여한다는 연구 결과가 증가하고 있으나 수학적 정보처리와 관련한 소뇌의 역할에 대한 명확한 이론이나 가설이 부재하다. 따라서, 수학적 정보처리와 관련한 이론의 부재로 인해 명확한 해석을 내리기 어려운 섬엽, 내측 상 전두 이랑, 전 중

심 이랑, 소뇌 등 영역들에 대하여 해석을 보류하기로 한다.

결 론

본 연구는 초등학교 2학년 학생들이 3학년이 되기까지 두 차례에 걸쳐 수학 학습 관련 인지·행동적 발달과 뇌 활동의 변화를 종단적으로 추적하였다. 학년의 증가에 따른 인지·행동적 변화로서, 인지 책략 변화 및 수행의 향상을 관찰하였고, 그와 관련한 뇌 활동의 변화를 관찰하였다. 본 연구는 초기 수학 학습 능력의 발달과 관련한 기존의 횡단 연구의 결과를 종단 연구를 통해 재확인하는 동시에 수학 발달에 기여하는 각각의 뇌 영역이 구체적으로 어떠한 인지·행동적 변화와 관련되는지를 새로이 확인할 수 있었다. 수학적 문제 해결 능력 향상은 내측 측두엽의 연합 학습/의미적 기억 체계, 전두-두정 주의 신경망, 두정 내 구에 위치한 수 표상 체계와 복측 시각 피질 등을 포함하는 상위 시각 체계의 활동성 증가와 관련되었다.

종합하면, 수학적 문제 해결 능력이 향상됨에 따라 후측 두정엽과 상위 시각 피질과 같이 활동성이 꾸준히 증가할 것으로 예상되는 영역들이 있는 반면, 의미적 기억 체계와 전두엽 영역들과 같이 초기 학습 단계에서는 그 관여도가 증가하였다가 수학적 지식이 점점 공고화되고 문제 풀이가 자동화되어(인지 통제 기능을 요하지 않게 됨에 따라) 관여도가 감소할 것으로 예상되는 영역들이 있다. 후자의 경우에서와 같이 비선형적인 변화를 보일 것으로 예상되는 영역들에 대하여서는

짧은 시간 단위로 조밀하게 추이를 관찰하는 후속 연구가 필요하다. 또한 후속 연구에서는 아동의 수학 발달과 관련하여 개별 뇌 영역들의 해부학적 구조의 변화와 영역 간의 기능적, 해부학적 연결성의 변화에 대한 분석을 통해 보다 발전된 이론을 구축하는 것이 필요하다.

참고문헌

- Allison, T., McCarthy, G., Nobre, A., Puce, A., & Belger, A. (1994). Human extrastriate visual cortex and the perception of faces, words, numbers and colors. *Cerebral Cortex*, 5 (5), 544-554.
- Ashcraft, M., Fierman, B., et al. (1984). The production and verification tasks in mental addition - An empirical comparison. *Developmental Review*, 4 (2), 157-170.
- Ashcraft, M. H. (1982). The Development of Mental Arithmetic - a Chronometric Approach. *Developmental Review*, 2 (3), 213-236.
- Ashcraft, M. H., & Battaglia, J. (1978). Cognitive arithmetic: Evidence for retrieval and decision processes in mental addition. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning & Memory*, 4 (5), 527-538.
- Badre, D., & Wagner, A. D. (2002). Semantic retrieval, mnemonic control, and prefrontal cortex. *Behav. Cogn. Neurosci. Rev*, 1 (3), 206-218.
- Badre, D., Poldrack, R., et al. (2005). Dissociable controlled retrieval and generalized selection mechanisms in ventrolateral prefrontal cortex. *Neuron*, 47 (6), 907-918.
- Badre, D., & Wagner, A. D. (2007). Left ventrolateral prefrontal cortex and the cognitive control of memory, *Neuropsychologia*, 45 (13), 2883-2901.
- Barrouillet, P., & Lepine, R. (2005). Working memory and children's use of retrieval to solve addition problems. *Journal of Experimental Child Psychology*, 91 (3), 183-204.
- Butterworth, B., Varma, S., & Laurillard, D. (2011). Dyscalculia: From Brain to Education. *Science*, 332 (6033), 1049-1053.
- Chan, S., Tang, S., Tang, K., Lee, W., Lo, S., & Kwong, K. (2009). Hierarchical coding of characters in the ventral and dorsal visual streams of Chinese language processing. *NeuroImage*, 48 (2), 423-435.
- Cho, S., Ryali, S., Geary, D. C., & Menon, V. (2011). How does a child solve 7 + 8?: Decoding brain activity patterns associated with counting and retrieval strategies. *Developmental Science*, 14, 989-1001.
- Cho, S., Metcalfe, A. W. S., Young, C. B., Ryali, S., Geary, D. C., and Menon, V. (2012). Hippocampal-Prefrontal Engagement and Dynamic Causal Interactions in the Maturation of Children's Fact Retrieval. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 24 (9), 1849-66.
- Ciaramelli, E., Grady, C., Levine, B., Ween, J., & Moscovitch, M. (2010). Top-Down and Bottom-Up Attention to Memory Are Dissociated in Posterior Parietal Cortex: Neuroimaging and Neuropsychological Evidence.

- The Journal of Neuroscience*, 30 (14), 4943-4956.
- Corbetta, M., & Shulman, G. L. (2002). Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain. *Nat. Rev. Neurosci*, 3 (3), 215-229.
- Dehaene, S., Piazza, M., Pinel, P., & Cohen, L. (2003). Three parietal circuits for number processing. *Cogn Neuropsychol*, 20 (3-6), 487-506.
- Dehaene, S., Molko, N., Cohen, L., & Wilson. A. J. (2004). Arithmetic and the brain. *Current Opinion in Neurobiology*, 14 (2), 218-224.
- Desikan, R. S., Ségonne, F., Fischl, B., Quinn, B. T., Dickerson, B. C., Blacker, D., Buckner, R. L., Dale, A. M., Maguire, R. P., Hyman, B. T., Albert, M. S., & Killiany, R. J. (2006). An automated labeling system for subdividing the human cerebral cortex on MRI scans into gyral based regions of interest. *Neuroimage*, 31 (3), 968-980.
- D'Esposito, M., Postle, B. R., Jonides, J., & Smith, E. E. (1999). The neural substrate and temporal dynamics of interference effects in working memory as revealed by event-related functional MRI. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 96 (13), 7514-7519.
- Dormal, V., Andres, M., & Pesenti, M. (2011). Contribution of the right intraparietal sulcus to numerosity and length processing: An fMRI-guided TMS study, *Cortex*, 48 (5), 623-529.
- Eger, E., Sterzer, P., Russ, M. O., Giraud, A. L., & Kleinschmidt, A. (2003). A supramodal number representation in human intraparietal cortex. *Neuron*, 37 (4), 719-726.
- Eickhoff S. B., Stephan, K. E., Mohlberg, H., Grefkes, C., Fink, G. R., Amunts, K., & Zilles, K. (2005). A new SPM toolbox for combining probabilistic cytoarchitectonic maps and functional imaging data. *Neuroimage*, 25 (4), 1325-1335.
- Forman, S. D., Cohen, J. D., Fitzgerald, M., Eddy, W. F., Mintun, M. A., & Noll, D. C. (1995). Improved assessment of significant activation in functional magnetic resonance imaging (fMRI): Use of a cluster-size threshold. *Magnetic Resonance in Medicine*, 33 (5), 636-647.
- Friston, K. J., Zarahn, E., Josephs, O., Henson, R. N. A., & Dale, A. M. (1999). Stochastic designs in event-related fMRI. *Neuroimage*, 10 (5), 607-619.
- Geary, D. C. (1993). Mathematical disabilities: Cognitive, neuropsychological and genetic components. *Psychological Bulletin*, 114(2), 345-362.
- Geary, D. C. (1994). *Children's mathematical development: Research and practical applications*. Washington, DC: American Psychological Association.
- Geary, D. C., Bow-Thomas, C. C., Liu, F., & Siegler, R. S. (1996). Development of arithmetical competencies in Chinese and American children: Influence of age, language, and schooling. *Child Development*, 67 (5), 2022-2044.
- Geary, D. C., & Brown, S. (1991). Cognitive

- addition-Strategy choice and speed-of-processing differences in gifted, normal and mathematically disabled-children. *Developmental Psychology*, 27 (3), 398-406.
- Geary, D. C., Hoard, M. K., Byrd-Craven, J., & DeSoto, C. M. (2004). Strategy choices in simple and complex addition: Contributions of working memory and counting knowledge for children with mathematical disability. *Journal of Experimental Child Psychology*, 88 (2), 121-151.
- Glover, G. H., & Lai, S. (1998). Self-navigated spiral fMRI: Interleaved versus single-shot. *Magnetic Resonance in Medicine*, 39 (3), 361-368.
- Grabner, R. H., Ansari, D., Koschutnig, K., Reishofer, G., Ebner, F., & Neuper, C. (2009). To retrieve or to calculate? Left angular gyrus mediates the retrieval of arithmetic facts during problem solving. *Neuropsychologia*, 47 (2), 604-608.
- Groen, G. J., & Parkman, J. M. (1972). A chronometric analysis of simple addition. *Psychological Review*, 79 (4), 329-343.
- Gross, J., Hudson, C., & Price, D. (2009). *The Long Term Costs of Numeracy Difficulties. London (UK): Every Child a Chance Trust and KPMG.*
- Ischebeck, A., Zamarian, L., Egger, K., Schocke, M., & Delazer, M. (2006). Imaging early practice effects in arithmetic. *Neuroimage*, 36 (3), 993-1003.
- James, K. H., James, Y., Jobard, G., Wong, A. C. N., & Gauthier, I. (2005). Letter processing in the visual system: Different activation patterns for single letters and strings. *Cognitive, Affective, & Behavioural Neuroscience*, 5 (4), 452-466.
- Jordan, N. C., Hanich, L. B., & Kaplan, D. (2003). Arithmetic fact mastery in young children: a longitudinal investigation. *J. Exp. Child Psychol*, 85 (2), 103-119.
- Kucian K., Grond U., Rotzer S., Henzi, B., Schönmann, C., Plangger, F., Gälli, M., Martin, E., von Aster, M. (2011). Mental number line training in children with developmental dyscalculia. *Neuroimage*, 57 (3): 782-95.
- Karmiloff-Smith, A. (1981). Getting developmental differences or studying child development? *Cognition*, 10, 151-158.
- Karmiloff-Smith, A. (2010). Neuroimaging of the developing brain: Taking “developing” seriously. *Human Brain Mapping*, 31 (3), 934-941.
- Kaufmann, L. (2002). More evidence for the role of the central executive in retrieving arithmetic facts-A case study of severe developmental dyscalculia. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 24 (3), 302-310.
- Kaufmann, L., Lochy, A., Drexler, A., & Semenza, C. (2004). Deficient arithmetic fact retrieval-storage or access problem? A case study. *Neuropsychologia*, 42 (4), 482-496.
- Martin, A., & Chao, L. (2001). Semantic memory

- and the brain: structure and processes. *Current Opinion in Neurobiology*, 11 (2), 194-201.
- McCandliss, B. D., Cohen, L., & Dehaene, S. (2003). The visual word form area: Expertise for reading in the fusiform gyrus. *Trends in Cognitive Science*, 7 (7), 293-299.
- OECD, The High Cost of Low Educational Performance: The Long-Run Economic Impact of Improving Educational Outcomes (OECD, Paris, 2010).
- Parsons, S., & Byner, J. (2005). *Does Numeracy Matter More?*. National Research and Development Centre for Adult Literacy and Numeracy. London: Institute of Education.
- Passolunghi, M. C., & Siegel, L. S. (2004). Working memory and access to numerical information in children with disability in mathematics. *Journal of Experimental Child Psychology*, 88 (4), 348-367.
- Piazza, M., Izard, V., Pinel, P., Le Bihan, D., & Dehaene, S. (2004). Tuning curves for approximate numerosity in the human intraparietal sulcus. *Neuron*, 44 (3), 547-555.
- Piazza, M. (2010). Neurocognitive start-up tools for symbolic number representations. *Trends Cogn Sci*, 14 (12), 542-551.
- Piazza, M., Facoetti, A., Trussardi, A. N., Berteletti, I., Conte, S., Lucangeli, D., Dehaene, S., & Zorzi, M. (2010). Developmental trajectory of number acuity reveals a severe impairment in developmental dyscalculia. *Cognition*, 116 (1), 33-41.
- Pinel, P., Dehaene, S., Riviere, D., & Le Bihan, D. (2001). Modulation of parietal activation by semantic distance in a number comparison task. *NeuroImage*, 14 (5), 1013-1026.
- Price, G. R., Holloway, I., Rasanen, P., Vesterinen, M., & Ansari, D. (2007). Impaired parietal magnitude processing in developmental dyscalculia. *Current Biology*, 17 (24), R1042-R1043.
- Reinke, K., Fernandes, M., Schwindt, G., O'Craven, K., & Grady, C. L. (2008). Functional specificity of the visual word form area: General activation for words and symbols but specific network activation for words. *Brain and Language*, 104 (2), 180-189.
- Rivera, S. M., Reiss, A. L., Eckert, M. A., & Menon, V. (2005). Developmental changes in mental arithmetic: Evidence for increased functional specialization in the left inferior parietal cortex. *Cerebral Cortex*, 15 (11), 1779-1790.
- Rosenberg-Lee, M., Barth, M., & Menon, M. (2011). What difference does a year of schooling make? Maturation of brain response and connectivity between 2nd and 3rd grades during arithmetic problem solving. *NeuroImage*, 57 (3), 796-808.
- Siegler, R. S. (1987). The perils of averaging data over strategies: An example from children's addition. *Journal of Experimental Psychology: General*, 116 (3), 250-264.
- Siegler, R. S., Shipley, C., Simon, T. J., & Halford, G. S. (1995). Variation, selection, and cognitive change. *Developing cognitive competence: New*

- approaches to process modeling*, 31- 76.
- Siegler, R. S., & Shrager, J. (1984). Strategy choice in addition and subtraction: How do children know what to do?. *Origins of cognitive skills*, 229-293.
- Squire, L. R., Stark, C. E., & Clark, R. E. (2004). The medial temporal lobe. *Annual Review of Neuroscience*, 27, 279-306.
- Sridharan, D., Levitin, D., & Menon, V. (2008). A critical role for the right fronto-insular cortex in switching between central-executive and default-mode networks. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 105 (34), 12569-12574.
- Suzuki, W. A. (2007). Making new memories: The role of hippocampus in new associative learning. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1097 (1), 1-11.
- Tzourio-Mazoyer, N., Landeau, B., Papathanassiou, D., Crivello, F., Etard, O., Delcroix, N., Mazoyer, B., & Joliot, M. (2002). Automated anatomical labeling of activations in SPM using a macroscopic anatomical parcellation of the MNI MRI single-subject brain. *Neuroimage*, 15 (1), 273-289.
- Vinckier, F., Dehaene, S., Jobert, A., Dubus, J. P., Sigman, M., & Cohen, L. (2007). Hierarchical coding of letter strings in the ventral stream: dissecting the inner organization of the visual word-form system. *Neuron*, 55 (1), 143-156.
- Visser, M., Embleton, K. V., Jefferies, E., Parker, G. J., & Ralph, M. A. (2010). The inferior, anterior temporal lobes and semantic memory clarified: novel evidence from distortion-corrected fMRI. *Neuropsychologia*, 48 (6), 1689-1696.
- Wager, T. D., & Smith, E. E. (2003). Neuroimaging studies of working memory: a meta-analysis. *Cognitive Affective Behavioral Neuroscience*, 3 (4), 255-274.
- Ward, B. D. (2000). Simultaneous inference for fMRI data. *AFNI 3dDeconvolve Documentation*, Medical College of Wisconsin, Milwaukee, WI.
- Whitney, C., Kirk, M., O'Sullivan, J., Lambon Ralph, M. A., & Jefferies, E. (2012). Executive semantic processing is underpinned by a large-scale neural network: Revealing the contribution of left prefrontal, posterior temporal, and parietal cortex to controlled retrieval and selection using TMS. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 24 (1), 133-147.
- Wicker B, Keysers C, Plailly J, Royet JP, Gallese V, Rizzolatti G (2003). Both of us disgusted in My insula: the common neural basis of seeing and feeling disgust. *Neuron* 40 (3): 655-64.
- Wu, S., Meyer, M., Maeda, U., Salimpoor, V., Tomiyama, S., Geary, D. C., et al. (2008). Standardized assessment of strategy use and working memory in early mental arithmetic performance. *Developmental Neuropsychology*, 33 (3), 365-393.

1 차원고접수 : 2013. 02. 18

수정원고접수 : 2013. 04. 19

최종게재결정 : 2013. 05. 09

Longitudinal Changes in Brain Activity Related to Maturation of Children's Arithmetic Skills and Cognitive Strategy Use

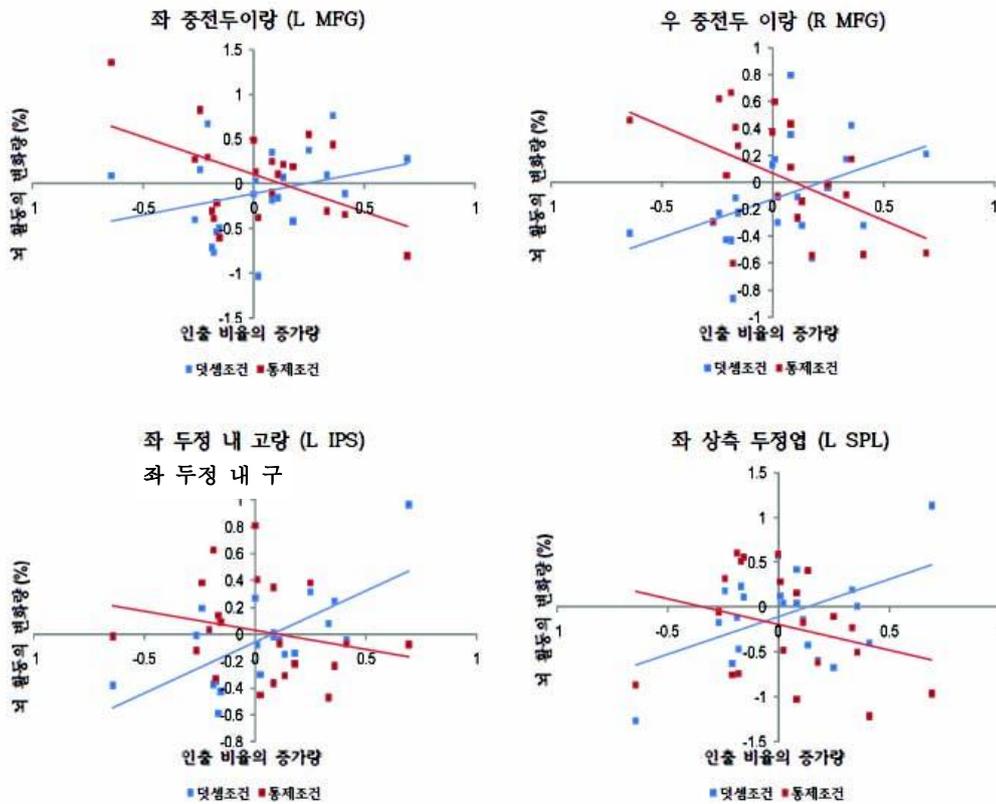
Soo Hyun Cho

Department of Psychology, Chung-Ang University

Acquisition of basic mathematical skills during early elementary school years serves as a critical foundation for mathematical development in adolescence and adulthood. The present study examined longitudinal changes in children's behavior and brain activity during mathematical problem solving. Over a 1 year interval, children became more accurate and faster at math problem solving. Children who performed worse at 2nd grade showed greater performance improvements at 3rd grade. Children who were lower in retrieval use for problem solving showed greater increase in retrieval use after a year. We found significant over-additive increases in activation from 2nd to 3rd grade for Addition vs. Control problem solving in the anterior temporal cortex important for semantic memory. Individuals with greater increase in retrieval use had greater activation increase in the lateral prefrontal cortex and the fronto-parietal attention network. Performance improvements were positively correlated with activation increases mainly in the medial temporal lobe and the ventral visual stream. These findings indicate that the development of mathematical problem solving is dependent on the contribution of the fronto-parietal top-down attention and medial temporal lobe memory systems. In addition, higher order visual cortex in the ventral visual stream known to be important for visual symbol recognition seems to contribute to accurate and efficient math problem solving.

Key words : memory, math, fMRI, children, longitudinal study

부록



부록 그림 1. 관심 영역(region of interest, ROI)에서의(기저선과 비교한) 덧셈(파란색)과 통제(빨간색) 조건에서의 뇌 활동의 변화량(세로축)과 인출 비율의 증가량(가로축) 간의 관계. 시간과 실험 조건 간의 2원 상호 작용 분석 시 인출 비율의 증가량을 공변인으로 사용한 분석에서 좌 중 전두 이랑(L MFG), 우 중 전두 이랑(R MFG), 좌 두정 내 구(L IPS), 좌 상측 두정엽(L SPL)에 대하여 관심 영역 사후 분석을 하였다. 그 결과, 덧셈 조건에서는 인출 비율의 증가량과 정적 상관, 통제 조건에서는 인출 비율의 증가량과 부적 상관이 나타났다. 이 영역들 중 좌 중 전두 이랑(L MFG), 우 중 전두 이랑(R MFG), 좌 두정 내 구(L IPS), 좌 상측 두정엽(L SPL)은 모두 전두-두정 주의 신경망의 일부로서 시각적으로 주어진 정보에 하향식으로 선택 주의를 줄 때 활동성이 증가하는 영역들이다.

부록 그림 1 보충 설명: 덧셈 조건에서는 대부분의 아동 피험자들이 노력해서 풀어야 하는 난이도의 수학 문제들을 제시하였다. 따라서 덧셈 조건에서 인출 비율의 증가량과 뇌 활동성의 변화 간에 정적 상관이 나타난 것은, ‘어려운’ 문제를 풀 때, 일 년 동안 인출 비율의 증가량이 높았던 아동들이 하향식 주의와 인지 통제 기능을 담당하는 뇌 영역을 더 많이 활용한 것으로 해석할 수 있다. 한편, 통제 조건에서는, 대부분의 아동들이 큰 어려움 없이 쉽게 풀 수 있는 문제들이 제시되었다. 이러한 ‘쉬운’ 문제를 풀 때는 하향식 주의와 인지 통제 기능이 많이 필요하지 않다. 일 년 동안 인출 비율의 증가량이 높았던 아동의 경우에는 더더욱, 쉬운 문제를 풀 때 하향식 주의와 인지 통제 기능의 필요성이 더 많이 감소한 것으로 해석할 수 있다.