

중다 수준의 과제 전환에 관여하는 뇌신경망: 메타분석*

전 윤 수

김 초 복†

경북대학교 심리학과

과제 전환(task switching)을 이용한 인지적 통제에 관한 최근 연구들은 과제에 포함된 정보처리 유형에 따라 관여하는 뇌 영역이 다름을 확인하였다. 그러나 과제 전환에 빈번히 사용된 과제들 중에는 중다 수준의 정보처리 유형이 포함되더라도 불구하고, 이와 관련된 뇌기능에 대해서는 알려진 바가 없다. 따라서 본 연구는 과제 전환에 관한 기존의 뇌영상 연구들에 대한 메타분석을 통해 중다 수준에서의 과제전환에 더 많은 인지적 자원이 요구됨으로 인해 추가적인 뇌 영역의 활성화가 나타나는지 확인하고자 하였다. 총 38개의 연구(1995년~2011년)에서 사용된 433개의 좌표들을 대상으로 활성화 가능성 추정(activation likelihood estimation)방법을 이용하여 메타 분석 하였다. 분석 결과, 중다 수준 과제전환을 수행할 때 좌우 복외측 전전두 영역(BA 45), 전대상회(BAs 24, 32) 및 좌측 하두정소엽(BA 40)에서 추가적인 활성화가 관찰되었다. 또한 중다 수준과 단일 수준에 공통적으로 관여하는 영역으로 좌반구의 하전두연접과 후두정피질, 전대상회로 나타났다. 이러한 결과는 과제 전환과 관련된 인지적 통제의 뇌 신경망이 정보처리 수준에 따라 달라질 수 있음을 시사한다.

주제어 : 과제전환 패러다임, 인지적 통제, 메타분석, fMRI

* 본 논문은 2012학년도 경북대학교 신입교수정착연구비에 의하여 연구되었음.

† 교신저자 : 김초복, 경북대학교 심리학과, (702-701) 대구광역시 북구 대학로 80
E-mail : ckim@knu.ac.kr

우리는 일상생활에서 다양한 일을 동시에 해야 하는 상황을 자주 접하게 된다. 책을 읽다가 전화를 받는다거나, TV를 보다가 옆 사람과 대화를 하는 것 등이 그 예라고 할 수 있다. 이러한 일상적인 일들을 유연하게 수행하기 위해서는 이전에 수행하던 일(예, 책 읽기와 TV보기)을 잠시 멈추고 현재 하고자 하는 일(예, 전화 받기와 대화하기)에 집중해야 한다. 인지적 통제(cognitive control)는 이렇게 하나의 과제에서 다른 과제로의 전환을 보다 유연하게 할 수 있도록 해 주는 인지적, 인지신경과학적 핵심 기제이다.

인지적 통제는 인간이 목표를 성취할 수 있도록 사고와 행동을 조절하고 계획하는 일련의 과정들을 포함하며(Miller & Cohen, 2001), 집행기능(executive function)이라 불리기도 한다. 이러한 인지적 통제의 인지적, 인지신경과학적 기제를 밝히기 위해 최근에 주로 사용되는 방법 중의 하나가 과제 전환 패러다임(task switching paradigm)이다. 과제 전환은 하나의 과제에서 다른 과제로 전환할 때 관여하는 인지 과정을 연구하는 방법으로, 참가자들은 하나의 과제를 반복적으로 수행하다가 다른 과제로 바꾸어 수행하게 된다. 예를 들면, 하나의 숫자가 제시되었을 때 그 숫자가 홀수인지 아니면 짝수인지를 판단하는 과제를 수행하다가 그 숫자가 '5' 보다 큰지 작은지를 판단하는 과제로 규칙을 전환하여 수행하는 것과 같은 경우이다. 이렇게 하나의 과제에서 다른 과제로 전환 될 때 나타나는 반응 시간의 차이를 전환 비용(switch cost)라고 한다(Jersild, 1927). 전환 비용은 하나의 과제에서 다른 과제로의 전환이 유연하게 진행되도록 각 과제

수행에 필요한 인지적 세트(cognitive set)를 재구성하는 능력(reconfiguration)과 관련 있을 뿐 아니라(Monsell, 2003), 새롭거나 복잡한 과제들을 수행할 때 나타날 수 있는 여러 반응들 사이의 갈등을 최소화시키는 역할과도 관련된다(Botvinick, Braver, Barch, Carter, & Cohen, 2001).

지금까지 과제 전환과 관련된 인지적, 인지신경과학적 증거를 찾기 위해 많은 연구가 수행 되었는데, 특히 연구에 사용된 전환과제의 유형에 따라 다양한 뇌 영역이 관여하는 것으로 보고되었다. 예컨대, Pollman 등(Pollmann, Weidner, Muller, & von Cramon, 2000)은 시각탐지과제를 사용한 연구에서, 전두극피질(frontopolar cortex)이 과제전환에 핵심적인 기능을 한다고 보고한 반면, Derrfuss 등(Derrfuss, Brass, & von Cramon, 2004)은 하전두연접(inferior frontal junction, IFJ) 영역이 과제 전환 시 중요한 역할을 한다고 주장하였다. 이러한 불일치는 이전 연구에 사용되었던 과제의 특성에 따라 다른 것으로 보이며, 이와 관련하여 Meiran과 Marciano(Meiran & Marciano, 2002)은 과제 간 전환이 자극(stimulus), 반응(response), 인지적 세트(cognitive set) 등의 최소 3가지 유형의 체계로 분류된다고 설명하였다. 이후 Kim 등(Kim, Cilles, Johnson, & Gold, 2012)은 뇌 영상 연구들에 대한 메타 분석을 이용해 이와 관련한 직접적인 증거를 발견하였다. 그들은 기존의 과제전환을 이용한 뇌 영상 연구들을 대상으로 과제 전환의 유형을 자극, 반응, 맥락(context, 혹은 인지적 세트, cognitive set)의 세 유형으로 구분하여 각각의 과제 수행 시 관여하는 뇌 영역을 확인하였으며, 외측 전전두피질(lateral prefrontal cortex)에서 영역-선호적

(domain-preferential) 혹은 영역-특수적(domain-selective) 활성화가 나타남을 확인하였다. 구체적으로, 외측 전운동 피질의 부리부분(the rostral portion of the dorsal premotor cortex, pre-PMd)은 자극 전환 과제 수행 시 활성화되었고, 전두극 피질(the frontopolar cortex)은 맥락 전환 과제 수행 시 활성화가 되는 것으로 나타났다. 즉, 전두엽 중에서도 전측 영역이 맥락 전환 과제에 관여하며 상대적으로 후측 영역이 자극 전환 과제에 관여한다는 것을 확인했다. 이러한 발견은 이후 기능적 자기공명영상(functional magnetic resonance imaging)을 이용한 실험 연구를 통해서 다시 한 번 확인되었다(Kim, Johnson, Cilles, & Gold, 2011). 이러한 연구 결과들은 실험에 사용된 과제의 전환 유형에 따라 관여하는 뇌 신경망이 달라질 수 있음을 시사한다.

하지만 많은 연구들에서 사용하는 전환 과제에는 위의 예처럼 하나의 과제를 수행할 때 자극 혹은 반응 수준의 전환만을 요구하는 것이 아니라 두 가지 혹은 그 이상의 정보처리 수준(이하 중다 수준)에서의 전환이 포함되어 있다. 예컨대, Meiran 전환 과제의 경우(Nachshon Meiran, 1996), 제시되는 자극에 따라 응답 규칙이 다른 두 개의 과제를 번갈아 수행하게 되는데 이 과제를 수행하기 위해서는 제시되는 자극이 전환 될 때 자극에 대한 전환 뿐 만 아니라, 반응에 대한 전환 능력 또한 요구된다(예, 화면에 빨간색 화살표가 나타나면 화살표의 방향과 동일하게 응답하고, 초록색 화살표가 나타나면 화살표의 방향과 반대로 응답하는 과제).

그럼에도 불구하고 현재까지 중다 수준의

전환 과제를 수행할 때 관여하는 뇌 영역이 단일 수준의 전환 과제를 수행할 때 관여하는 영역들과 차이가 있는지에 대한 연구가 수행되지 않고 있다. 이에 본 연구자들은 중다 수준의 과제 수행 시 관찰되는 뇌 활성화가 단일 수준의 과제 수행 시 관찰되는 활성화의 단순한 합인 형태로 나타나는지, 아니면 중다 수준의 과제에서 더 많은 인지적 자원이 요구됨으로써 추가적인 영역의 활성화가 발생하는지에 대해 확인해 보고자 하였다. 즉, 이전의 뇌 영상 연구들의 결과들을 중다 수준에서의 과제전환과 단일 수준에서의 과제전환으로 구분하여 메타 분석을 통해 이를 확인해 보고자 하였다. 만약, 중다 수준(예, 자극과 반응 수준)의 과제 전환에 관여하는 뇌 영역들이 단일 수준(예, 자극 혹은 반응 수준)의 과제 전환에 대한 메타 분석 결과로 밝혀진 뇌 영역들에서만 관찰된다면 중다 수준에 대한 뇌 영역은 단일 수준 각각에 관여하는 뇌 영역들의 단순한 합으로 인해 나타나는 결과라고 볼 수 있을 것이다. 그러나 만약 중다 수준의 과제 전환에 관여하는 뇌 영역들이 단일 수준에 관여하는 뇌 영역 이외의 추가적인 영역에서 관찰된다면 이는 중다 수준의 처리를 요구하는 인지적 통제의 기제가 단일수준에 관련된 기제와 서로 다르다는 것을 시사하는 것이다.

이에 본 연구에서는 이전 연구에서 사용된 전환 과제의 유형을 1) 자극(예, 첫 번째 과제에서는 자극이 오른쪽으로 이동하면 오른쪽, 왼쪽으로 이동하면 왼쪽으로 반응, 두 번째 과제에서는 자극이 빨강색이면 왼쪽, 파랑색이면 오른쪽 반응) 또는 반응(예, 첫 번째 과제에서는 빨강색 자극이면 오른쪽, 파랑색 자

극이면 왼쪽으로 반응, 두 번째 과제에서는 빨강색에 왼쪽, 파랑색에 오른쪽 반응) 수준의 전환 과제와 2) 자극과 반응 수준이 동시에 필요한 전환과제로 구분하여 이들에 관여하는 뇌 영역에서 차이가 있는지를 메타분석을 이용하여 확인해 보고자 한다. 단, 이전 연구(Kim, et al., 2012)에서 사용된 과제 전환의 유형 중 맥락 유형의 과제는 단일 수준과 중다 수준으로 각각 구분하기가 어렵기 때문에, 본 연구에서는 자극과 반응 수준의 전환 과제 유형에 대한 연구들만을 포함하였다.

방 법

논문 선택 메타 분석에 포함될 논문을 수집하기 위해 다양한 전자 저널(Medline, PsycInfo, PubMed)을 이용하여 관련 논문들을 검색하였다. 검색된 논문들 중에서 전환 조건(switch condition)이 반복 조건(repeat condition) 혹은 비전환 조건(non-switch condition)보다 더 활성화되는 영역을 보고한 연구만을 포함하였다. 먼저 자극과 반응이 모두 요구되는 과제(이하 자극AND반응)에 사용한 자료들은 1995년에서 2011년 사이에 뇌 영상기법(기능적 자기공명 영상(fMRI) 또는 양전자방출단층촬영법(PET))을 이용한 전환 과제 동안의 뇌 활성화를 보고한 연구들을 바탕으로 하였다. fMRI를 사용한 연구인 경우, 블록 설계(block design)와 사건 관련 설계(event-related design)를 모두 포함시켰다. 본 연구에서는 젊은 성인들에 대한 연구 결과만을 포함시켰으며, 만약 ‘젊은 성인 대 노인’ 혹은 ‘젊은 성인 대 환자 집단’ 간의 비교와 같은 집단 간 비교연구일 경우 젊은 성인들의

결과만을 포함시켰다. 또한 정서와 관련된 자극을 이용한 연구들은 제외하였으며, 관심영역을 사전에 지정한 후 그 영역들만을 대상으로 수행된 연구도 제외하였다. 추가적으로 Talairach 또는 MNI의 표준 체계의 정확한 좌표로 보고된 연구만을 포함시켰다.

한 가지 정보처리 유형의 전환 과제에 대한 자료는 이전 연구인 Kim 등(Kim, et al., 2012)의 메타분석연구에 사용되었던 자료들 중 이전 연구들의 자극 전환 과제와 반응 전환 과제로 분류된 연구(이하 자극OR반응)들의 자료만을 사용하였다. 본 연구의 메타 분석에서 사용된 논문의 목록은 표 1에 제시하였다.

메타 분석 도구 및 분석 절차 국내에서는 fMRI를 이용한 실험연구들은 보고가 되는 반면(예, 김정훈 & 김초복, 2004; 이승복, 연은경, & 윤효운, 2004; 조수현, 2011), 메타분석을 이용한 연구는 아직까지 보고된 바가 없다. 그러나 뇌 영상 연구에 대한 메타분석 연구들은 국제적으로 많이 보고되고 있고, 여러 가지 기법이 개발되어 있다. 그 중 본 연구에서는 활성화 가능성 추정(activation likelihood estimation, ALE) 기법(Laird, et al., 2005; Turkeltaub, Eden, Jones, & Zeffiro, 2002)을 이용한 GingerALE 2.3 프로그램(<http://www.brainmap.org/>)을 사용하여 메타 분석을 수행하였다. 활성화 가능성 추정(ALE) 기법은 복셀(voxel) 기반의 메타분석 방법으로, 많은 뇌 영상 연구들에서 독립적으로 관찰된 뇌 활성화의 공간적 패턴의 신뢰도를 양적으로 평가하는 방법이다(Laird, et al., 2005). 이 기법은 특정 영역에서 관찰된 복셀들의 활성화 확률이 우연수준에 의해 활성화

표 1. ALE 메타 분석에 포함된 정보처리 유형별 전환 연구들의 목록

저자(년도)	참가자수	과제	좌표수
<u>자극OR반응 연구들 중 반응 전환 과제를 사용한 연구</u>			
Barber & Carter (2005)	13	자극-반응 불일치 과제(S-R incompatibility task)	1
Barber & Carter (2005)	13	자극-반응 불일치 과제(S-R incompatibility task)	4
Brass & von Cramon (2004)	14	숫자 변별 과제(digit discrimination)	3
Crone et al. (2006)	20	시각 변별 과제(visual discrimination)	17
Dove et al. (2000)	16	시각 탐지 과제(visual detection)	12
Dreher et al. (2002)	8	글자 변별 과제(letter discrimination)	7
Jancke et al. (2000)	6	손가락 두드리기(finger tapping)	3
Jancke et al. (2000)	6	손가락 두드리기(finger tapping)	5
Luks et al. (2002)	11	숫자 변별과제(digit discrimination)	2
Luks et al. (2002)	11	숫자 변별과제(digit discrimination)	1
Luks et al. (2002)	11	숫자 변별과제(digit discrimination)	2
Nagahama et al. (2001)	6	변형된 위스콘신카드정렬과제(modified WCST)	9
Parris et al. (2007)	22	응답 전환 과제(switch response rules)	11
Pollmann et al. (2000)	11	시각 탐지 과제(visual detection)	5
Pollmann et al. (2006)	20	시각 탐지 과제(visual detection(odd one out))	12
Ravizza & Carter (2008)	14	시각 탐지 과제(visual detection(odd one out))	2
Rogers et al. (2000)	12	시각 변별 과제(ID/ED task)	3
Rogers et al. (2000)	12	시각 변별 과제(ID/ED task)	3
Rushworth et al. (2002)	10	시각 탐지 과제(visual detection)	2
Sohn et al. (2000)	12	단어-숫자 과제(letter-digit task)	3
Zanolie et al. (2008)	18	위치 전환 과제(location rule switch)	11
<u>자극OR반응 연구들 중 자극 전환 과제를 사용한 연구</u>			
Brass & von Cramon (2004)	14	숫자 변별 과제(digit discrimination)	4
Crone et al. (2006)	20	시각 변별 과제(visual discrimination)	2
Gurd et al. (2002)	11	언어 유창성 과제(verbal fluency)	2
Liston et al. (2006)	19	시각 탐지 과제(visual detection)	7
Liston et al. (2006)	19	시각 탐지 과제(visual detection)	2
Liston et al. (2006)	19	시각 탐지 과제(visual detection)	2
Pessoa et al. (2009)	20	시각 탐지 과제(visual detection)	8
Pessoa et al. (2009)	20	시각 탐지 과제(visual detection)	10

Pessoa et al. (2009)	20	시각 탐지 과제(visual detection)	2
Pollmann et al. (2006)	20	시각 탐지 과제(visual detection(odd one out))	5
Ravizza & Carter (2008)	14	시각 탐지 과제(visual detection(odd one out))	5
Rogers et al. (2000)	12	시각 변별 과제(ID/ED task)	3
Rogers et al. (2000)	12	시각 변별 과제(ID/ED task)	6
Rushworth et al. (2002)	10	시각 탐지 과제(visual detection)	2
Serences et al. (2004)	15	주의 전환 과제(attention shift)	5
Serences et al. (2004)	8	주의 전환 과제(attention shift)	2
Vandenberghe et al. (2001)	6	공간 주의 전환 과제(spatial shift of attention)	4
Wilkinson et al. (2001)	12	시각 변별 과제(visual discrimination)	7
Wylie et al. (2006)	13	시각 탐지 과제(visual detection)	11
Wylie et al. (2006)	13	시각 탐지 과제(visual detection)	2
Wylie et al. (2006)	13	시각 탐지 과제(visual detection)	19
Wylie et al. (2006)	13	시각 탐지 과제(visual detection)	4
Zanolie et al. (2008)	18	변형된 시각 변별 과제(modified ID/ED)	4
<u>자극AND반응 전환 과제를 사용한 연구</u>			
Brass & von Cramon (2004)	14	숫자 변별 과제(digit discrimination)	3
Cools et al. (2004)	16	시각 탐지 과제(visual detection)	11
DiGirolamo et al. (2001)	8	숫자 과제(digit task)	68
Dreher & Grafman (2003)	8	글자 변별 과제(letter discrimination)	14
Hyafil et al. (2009)	24	변형된 공간 스트룹 과제(modified spatial Stroop task)	15
Hyafil et al. (2009)	24	변형된 공간 스트룹 과제(modified spatial Stroop task)	8
Woolgar et al. (2011)	17	응답 전환 과제(switch response rules)	18
Rubia et al. (2006)	7	Meiran 전환 과제(Meiran switch task)	7
Ruge et al. (2005)	18	Meiran 전환 과제(Meiran switch task)	2
Ruge et al. (2010)	18	변형된 Meiran 전환 과제(modified Meiran switch task)	6
Schmitz et al. (2006)	12	Meiran 전환 과제(Meiran switch task)	9
Smith et al. (2004)	20	Meiran 전환 과제(Meiran switch task)	10
Sylvester et al. (2003)	14	숫자 조작 과제(Count operation)	14
Yeung et al. (2006)	18	시각 탐지 과제(visual detection)	12

될 수 있는 확률보다 높은지를 판단하여 통계적인 뇌 활성화 지도를 제공하는데, 독립적인 여러 연구들에서 관찰된 활성화 영역들의 공간적 위치의 상관을 평가하는 방법이다. 최대 활성화 되는 각 위치는 10mm의 반치전폭(full-width half-maximum, FWHM)을 가지는 3차원의 가우시안 확률분포(Gaussian probability distribution)를 중심으로 모형화(modeling)되며, 이러한 편평화(smoothing) 과정은 신호 대 잡음비(signal to noise)의 비율을 높여 준다(Eickhoff, et al., 2009; Laird, et al., 2005; Turkeltaub, et al., 2002).

수집된 뇌 영상 연구들은 Talairach 혹은 MNI 좌표체계를 이용하여 뇌 영역을 보고하였는데, 본 연구에서는 이 두 좌표 체계간의 차이를 없애기 위해 Talairach 좌표체계를 기준으로 분석하였다. 이를 위해 MNI 좌표체계를 사용하여 보고된 연구들은 GingerALE 2.3 내의 'Convert Foci' 기능을 이용하여 Talairach 좌표 체계로 변경한 후 분석을 수행하였다. ALE 기법을 적용한 후 작성된 뇌 활성화 지도는 다중 비교로 인해 나타나는 오류를 보정하기 위해 $p < .05$ 수준에서 오발견율(false discovery rate, FDR) 보정 방법을 적용하여 검증하였다. 최종 결과는 MRICron 프로그램(<http://www.cabiat1.com/mricron/>)을 사용하여 Talairach 좌표체계를 기반으로 한 "colinbrain" 표준 뇌 위에 나타내었다.

본 연구에서는 수집된 데이터를 바탕으로 하여 세 번의 메타분석을 수행하였다. 먼저, 자극 전환 과제 수행 시 활성화가 나타나는 뇌 영역과 반응 전환 과제 수행 시 활성화가 나타나는 뇌 영역들을 단순히 합했을 때(이하 자극OR반응 조건) 나타나는 영역을 확인하기

위한 메타 분석을 수행하였다. 이를 위해 표 1에 제시된 반응 전환 과제와 자극 전환 과제의 총 236개의 좌표들(자극 전환: 118개, 반응 전환: 118개)을 통합한 후 이를 분석하였다. 둘째, 자극 전환과 반응 전환이 동시에 요구되는 전환 과제(이하 자극AND반응 조건)를 수행할 때 활성화 되는 뇌 영역을 확인내기 위해 총 197개의 좌표들에 대해 분석하였다(표 1 참조). 마지막으로, 자극AND반응 조건에서 활성화 되는 뇌 영역과 자극OR반응 조건에서 활성화 되는 뇌 영역의 차이와 공통 활성화 영역을 확인하기 위해 이 두 조건 간 직접 비교 분석을 수행하였다.

결 과

ALE 분석으로 관찰된 활성화 영역 및 좌표 등에 대한 결과는 표 2에서 표 5까지 제시하였고, 활성화 영역을 그림 1에 제시하였다. 자극OR반응 조건에 대한 ALE 분석 결과 전두엽에서는 보조운동영역(supplementary motor area; SMA, 브로드만 영역(Brodmann area, BA) 6)과 배외측 전전두엽(DLPFC, BAs 9, 46)에서의 활성화가 관찰되었으며, 그 외에 두정엽의 췌기앞소엽(precuneus, BA 7), 측두엽의 방추상회(Fusiform gyrus, BA 37) 및 시각 피질(visual cortex, BA 18)에서의 활성화가 관찰되었다(표 2). 한편 자극AND반응 조건에 대한 ALE 분석 결과, 전두엽에서는 보조운동영역(BA 6), 배외측전전두엽(BAs 9, 45), 전대상회(anterior cingulate, BA 24)에서의 활성화가 관찰되었으며, 두정엽의 췌기앞소엽(BA 7) 및 일차체감각영역(primary somatosensory, BA 2)에서의 활성화

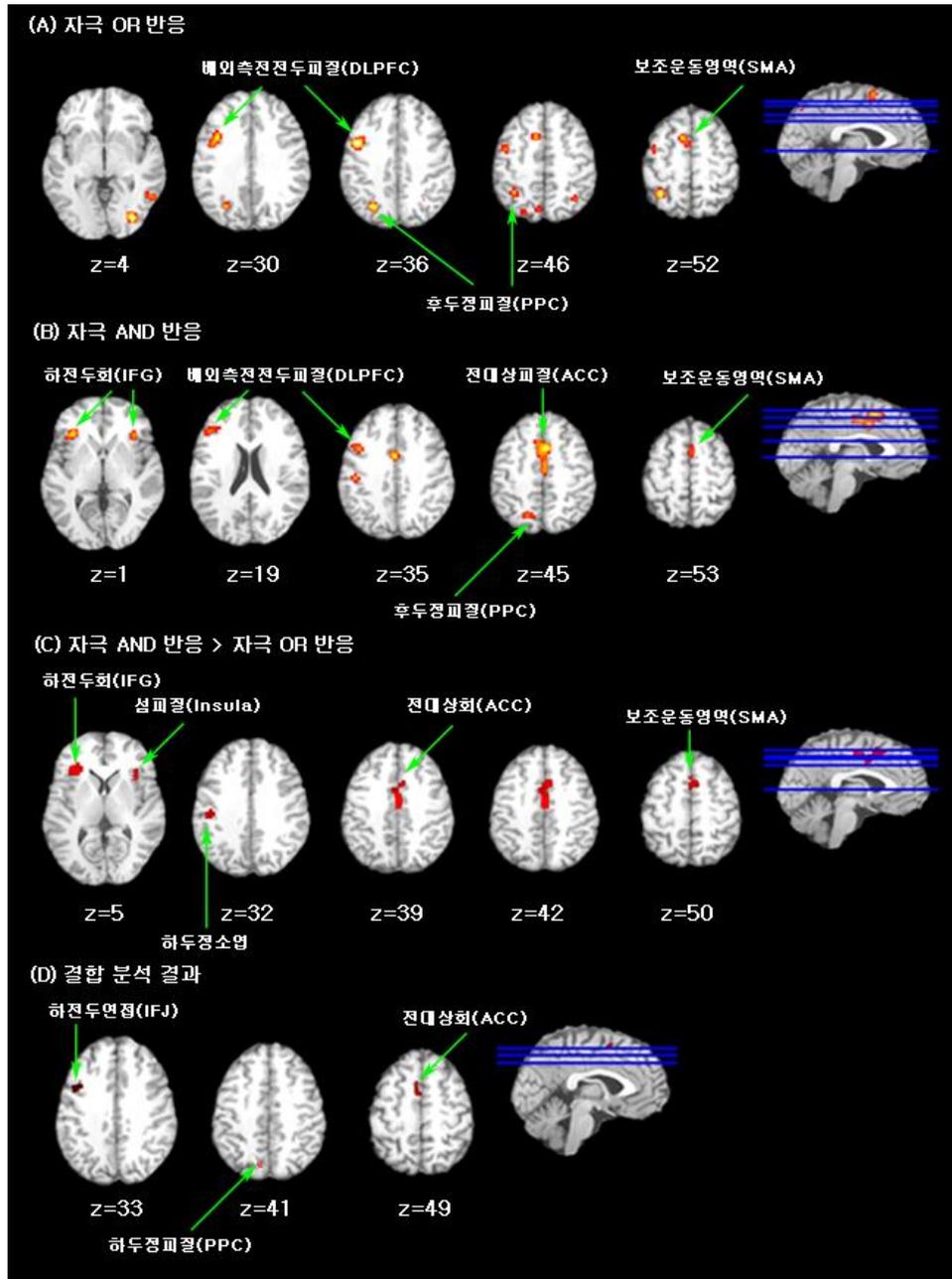


그림 1. ALE 분석 결과 활성화된 뇌 영역들. A, 한 개의 정보처리 유형이 포함된(자극OR반응) 전환 과제 수행 시 활성화 되는 뇌 영역. B, 두 개의 정보처리 유형이 포함된(자극AND반응) 전환 과제 수행 시 활성화 되는 뇌 영역. C, A와 B를 직접 비교했을 때 나타나는 활성화 영역. D, 자극AND반응 전환 과제와 자극 OR반응 전환 과제 수행 시 공통적으로 활성화 되는 뇌 영역.

표 2. 자극 전환 혹은 반응 전환 과제(자극OR반응) 조건에서의 활성화 영역

영역	반구	Talairach 좌표			BA	ALE	복셀 수 (mm ³)
		x	y	z			
중심전회(Precentral Gyrus) / 중전두회(Middle Frontal Gyrus)	좌	-44	2	36	6/9	0.026	3984
상전두회(Superior Frontal Gyrus) / 내측전두회(Medial Frontal Gyrus)	좌	-8	10	48	6	0.020	2728
췌기앞소엽(Precuneus)	좌	-26	-68	34	7	0.026	1696
하후두회(Inferior Occipital Gyrus)	우	32	-80	-4	18	0.024	1440
상두정소엽(Superior Parietal Lobule)	좌	-32	-54	52	7	0.023	1288
방추상회(Fusiform Gyrus)	우	48	-54	-8	37	0.016	984
췌기앞소엽(Precuneus)	좌	-6	-74	42	7	0.012	760
상두정소엽(Superior Parietal Lobule)	우	34	-60	42	7	0.016	736

주. BA는 Brodmann Area의 약자임. 위치는 Talairach 좌표체계에 따라 제시됨(단위: mm).

표 3. 자극 전환과 반응 전환 과제(자극AND반응) 조건에서의 활성화 영역

영역	반구	Talairach 좌표			BA	ALE	복셀 수 (mm ³)
		x	y	z			
상전두엽(Superior Frontal Gyrus) / 대상회(Cingulate Gyrus)	우	4	8	48	6/24	0.020	5640
하전두엽(Inferior Frontal Gyrus)	좌	-30	26	6	45	0.025	1504
중전두회(Middle Frontal Gyrus)	좌	-38	30	26	9	0.016	1200
중심전회(Precentral Gyrus)	좌	-40	8	34	9	0.017	856
췌기앞소엽(Precuneus)	좌	-16	-66	48	7	0.016	856
중심후회(Postcentral Gyrus)	좌	-44	-24	32	2	0.019	776
하측두엽(Inferior Frontal Gyrus)	우	36	24	4	45	0.016	760

주. BA는 Brodmann Area의 약자임. 위치는 Talairach 좌표체계에 따라 제시됨(단위: mm).

가 관찰되었다(표 3). 두 조건을 직접 비교한 ALE 분석 결과, 자극AND반응 조건이 자극OR반응 조건보다 더 활성화되는 영역으로 보조 운동영역(BA 6)과 복외측 전전두영역(BA 45),

전대상회(BAs 24, 32), 그리고 하두정소엽(inferior parietal lobule, BA 40)에서의 활성화가 관찰되었다. 하지만 이와 반대의 경우, 즉 자극OR반응 조건이 자극AND반응 조건보다 유

표 4. 자극 전환과 반응 전환 과제(자극AND반응) 조건에서 자극 전환 혹은 반응 전환 과제(자극OR반응) 조건보다 더 활성화 된 영역

영역	반구	Talairach 좌표			BA	ALE	복셀 수 (mm ³)
		x	y	z			
대상회(Cingulate Gyrus) / 내측전두회(Medial Frontal Gyrus)	우	1	-10	42	24/6	3.897	3496
하전두회(Inferior Frontal Gyrus) / 섬피질(Insula)	좌	-30	26	4	45	3.719	1400
하전두회(Inferior Frontal Gyrus) / 섬피질(Insula)	우	36	16	6	45	3.432	648
하두정소엽(Inferior Parietal Lobule) / 중심후회(Postcentral Gyrus)	좌	-46	-24	29	40/2	3.016	560

주. BA는 Brodmann Area의 약자임. 위치는 Talairach 좌표체계에 따라 제시됨(단위: mm)

의미하게 더 활성화되는 영역은 관찰되지 않았다(표 4).

자극AND반응 조건에서 자극OR반응 조건보다 더 많은 뇌 활성화가 관찰된 것이 과제의 난이도의 영향 때문인지, 즉 자극AND반응 조건의 과제 난이도가 자극OR반응 조건보다 높기 때문인지를 확인하기 위해, 분석에 포함된 연구들에서 제시한 반응시간에 대한 전환 비용을 이용해 추가적인 분석을 수행하였다. 이를 위해 자극AND반응 조건과 자극OR반응 조건에 해당하는 연구들 각각에서 제시된 전환 비용을 사용하였다. 사용된 전체 연구들 중에서, 보고된 행동 실험 결과가 오류율(error rate) 이거나 도표로 제시하여 정확한 값을 보고하지 않은 경우에는 분석에서 제외하여 최종적으로 30개의 행동반응 데이터가 분석에 포함되었다. 두 조건 간 전환 비용의 평균 차이가 있는지 확인하기 위해 독립표본 t 검증을 수행한 결과, 자극OR반응 조건에서의 전환 비용은 52.4 ms(SD=71.42), 자극AND반응 조건에서

의 전환 비용은 103.4 ms(SD=114.20)였다. 수치상으로는 두 집단 간 전환 비용의 차이는 51.1 ms로 차이가 있는 것으로 보이나 통계적으로 유의미한 차이는 없는 것으로 나타났다 [$t(28)=1.49, p=.146$].

자극AND반응 조건과 자극OR반응 조건에 대한 차이 분석에 추가하여, 자극이나 반응 전환 과제를 이용한 연구들과 자극과 반응 전환이 모두 요구되는 과제를 이용한 연구들 사이의 공통적으로 관여되는 뇌 영역을 확인할 수 있는 결합분석(conjunction analysis) 결과를 표 5에 제시하였다. 결합분석은 두 분석 결과(자극AND반응 조건과 자극OR반응 조건)에서 임계치 이상으로 활성화되는 영역들 중 공통적으로 활성화되는 영역을 나타내 준다. 분석 결과, 좌반구의 하전두연접(inferior frontal junction, IFJ, BAs 6, 9), 후두정피질(posterior parietal cortex, PPC, BA 7), 전대상회 및 내전두회(BAs 32, 6)에서의 활성화가 관찰되었다.

표 5. 자극AND반응과 자극OR반응 조건에 대한 결합 분석에 대한 활성화 영역

영역	반구	Talairach 좌표			BA	ALE	복셀 수 (mm ³)
		x	y	z			
중전두회(Middle Frontal Gyrus)	좌	-40	8	34	9/6	0.016	472
전대상회(Anterior Cingulate Gyrus) / 내전두회(Medial Frontal Gyrus)	좌	-4	10	48	32/6	0.014	456
췌기앞소엽(Precuneus)	좌	-8	-70	42	7	0.011	24

주. BA는 Brodmann Area의 약자임. 위치는 Talairach 좌표체계에 따라 제시됨(단위: mm)

논 의

본 연구는 전환과제에 요구되는 정보처리의 수준에 따라 서로 상이한 뇌 신경망이 관여함을 밝힌 선행 연구들을 바탕으로 하여, 중다 수준이 요구되는 과제와 단일 수준이 요구되는 과제에 관여하는 뇌 영역들간의 차이를 확인하기 위해 과제 전환 패러다임을 적용한 이전 연구들에 대한 메타 분석을 수행하였다.

메타 분석 결과 두 가지 이상의 정보처리 유형을 포함하는 과제들에서 과제전환을 할 때, 단일 정보처리 유형을 포함하는 과제전환보다 양측 하전두회, 전대상회를 포함하는 내측전두회 영역, 그리고 좌측 하두정소엽에서 더 활성화되는 것으로 나타났다. 이 영역들 중, 내측전두회외와 하두정소엽 영역들은 단일 수준에서의 과제전환에서도 관찰되었다. 이는 이 두 영역에서는 중다 수준의 과제전환에서 단일 수준의 과제전환보다 더 강한 활성화를 나타내거나 더 넓은 영역이 관여하기 때문인 것으로 판단된다.

본 연구의 결과 중 흥미로운 것은 두 개의 정보처리 유형이 포함된 전환 과제를 수행할 때에 나타난 복외측 전전두영역(즉, 하전두회

영역)이 하나의 정보 처리 유형만 포함된 전환 과제를 수행할 때에는 나타나지 않았다는 점이다. 이러한 결과는 두 개 이상의 정보처리 유형을 포함하는 과제를 처리할 때 관여하는 영역이 단지 각각의 정보처리 유형에 관여하는 영역들의 합으로 이루어지는 것이 아닐 수 있음을 의미한다. 복외측 전전두영역의 활성화는 브로카 영역(Broca's area)의 삼각부(pars triangularis) 부분과 전측 섬엽(anterior insula)이 교차하는 지점에서 관찰되는데, 이 영역은 Kim 등의 이전 메타 연구에서 맥락 전환에 대해 특수하게 나타나는 것으로 보고된 영역이다(Kim, et al., 2012). 이는 두 개의 정보처리 유형이 포함된 전환 과제와 맥락 전환 과제가 동일한 인지적 과정을 공유하고 있는 것은 아닌지에 대한 해석을 가능하게 한다. 두 개의 정보 처리 유형이 포함된 전환 과제와 맥락 전환 과제는 모두 다양한 유형의 전환들이 포함되어 있다. 즉, 두 개의 정보처리 유형이 결합된 전환 과제들은 자극 전환과 반응 전환이 모두 요구되며, 맥락 전환 과제들도 다양한 차원에서의 전환이 요구된다. 다양한 전환이 있다는 것은 하나의 전환이 있을 때 보다 더 많은 갈등들 사이에서 선택이 필요하다는

것을 의미한다. 또한, 다양한 차원에서의 전환이 요구되는 상황에서는 이전에 수행하던 과제의 맥락, 혹은 인지적 틀을 억제하기 위한 과정이 필요할 것이다. 이러한 가능성들과 일치하게, 본 연구에서 수행한 메타 분석 결과로 나타난 복외측 전전두영역의 위치는 여러 가지 경쟁적 대안들 사이에서의 선택과 관련된 영역(Gold & Buckner, 2002; Thompson-Schill, D'Esposito, Aguirre, & Farah, 1997), 그리고 억제적 통제와 관련된 영역들(Badre & Wagner, 2006; D'Esposito, Postle, Jonides, & Smith, 1999; Leung & Cai, 2007)과 유사하다. 따라서, 과제 전환 시 복외측 전전두영역의 역할이 이러한 선택, 억제적 조절 혹은 둘 다와 관련이 있는 지에 대한 추후 연구가 필요할 것이다.

위에서 언급한 복외측 전전두영역의 활성화는 중다 수준에 관여하는 인지적 통제과정의 특성을 나타낸다고 할 수 있다. 그러나 일반적으로 두 가지 이상의 정보 처리 유형을 포함하고 있는 과제들은 한 가지 유형의 정보처리 유형을 포함하고 있는 과제들보다 어려운 경향이 있다. 이는 복외측 전전두영역의 관여가 중다 수준에 요구되는 과제의 난이도가 높기 때문일 수도 있다는 가능성을 제기한다. 또한 과제의 난이도가 높을수록 더 다양한 뇌 영역이 활성화된다는 결과가 이전 연구들에서 확인되었으며, 이는 시각, 청각, 언어 등 다양한 과제와 재료를 대상으로 한 연구들에서 공통적으로 보고되었다(Desai, Conant, Waldron, & Binder, 2006; Gould, Brown, Owen, ffytche, & Howard, 2003; Lewandowska, Piatkowska-Janko, Bogorodzki, Wolak, & Szelag, 2010). 따라서 본 메타 분석 결과가 정보처리 유형으로 인한 것

이 아니라 과제의 난이도 영향인지를 검증할 필요가 있다. 이를 확인하기 위해 수행한 두 조건 간 반응시간에서의 전환 비용의 비교 결과, 조건 간 차이가 나타나지 않았다. 따라서 본 연구에서 관찰한 복외측 전전두영역의 중다 수준 과제전환에 대한 관여는 과제 난이도에 의한 가능성이 매우 낮은 것으로 보인다.

자극 혹은 반응 수준에서의 과제전환과 두 수준이 모두 관여하는 과제전환에 있어 공통적으로 활성화되는 영역을 분석한 결과, 좌측 하전두연접(left inferior frontal junction, IFJ)과 후두정피질(posterior parietal cortex, PPC), 그리고 전대상피질로 나타났다. 하전두연접은 하전두구(inferior frontal sulcus)와 하중심전구(inferior precentral sulcus)의 연접 근처에 있는 전두엽의 후외측 영역으로, 과제와 관련된 과제 틀(task-set)을 새롭게 갱신(updating)하는 과정에 중요한 역할을 하는 것으로 보고되는 영역이다(Sakai, 2008). 후두정피질은 과제 틀의 표상과 관련된 영역으로, 이전 연구에 의하면 자극이 제시된 후 지연 기간 동안 지속적인 신경 활성화를 보인다(Cavina-Pratesi, et al., 2006). 이 두 영역이 과제 전반에 걸쳐 공통적으로 나타나는 것은, 과제 전환 실험에서 참가자들이 과제 수행에 필요한 정보를 유지하는 것 뿐만 아니라 새로운 과제로 전환될 때 그와 관련된 새로운 정보로 갱신하는 과정이 필요하며, 이는 유형과 상관없이 모든 과제 전환에서 필요한 과정이기 때문이라고 해석된다.

이전의 메타 연구(Kim, et al., 2012)에서는 좌측하전두연접과 후두정피질의 두 영역만의 활성화를 보고한 반면, 본 연구에서는 위의 두 영역(하전두연접, 후두정피질) 뿐 아니라

전대상피질에서의 추가적인 활성화가 관찰되었다. 이는 본 연구에서 자극 전환에서 활성화된 영역과 반응 전환에서 활성화된 영역을 단순히 합한 영역을 나타내기 위해 두 유형의 과제에서 활성화된 영역을 통합한 후 분석을 수행했고, 이로 인해 더 넓은 영역에서의 활성화 비교가 이루어졌기 때문으로 보인다.

결론적으로, 다수의 연구에서 사용된 과제 전환 패러다임이 어떠한 정보처리 유형이 포함되었는지에 따라 관여하는 뇌 영역이 달라질 수 있음을 확인은 이전까지 과제 전환 패러다임을 사용하여 수행된 연구들에서 인지적 통제에 관여한다고 보고된 뇌 영역들 중에서 최소한 일부는 과제-특수적인 결과를 포함하고 있음을 시사한다. 특히 이전 연구들에서 사용된 전환 과제들은 두 개 이상의 정보처리 유형을 포함하는 경우가 많음에도 정보처리 유형을 따로 구분해서 수행하지 않았기 때문에 추후 관련 연구에서는 과제에서 포함되는 정보처리 유형에 대한 확인이 필요할 것이다.

참고문헌

김정훈, & 김초복 (2004). 얼굴인식에서 전체 윤곽-국소특징에 대한 선택적 뇌 활성화: fMRI 연구. *한국심리학회지: 인지 및 생물*, 16(3), 337-352.

이승복, 연은경, & 윤희운 (2004). 한국어-영어 이중 언어 문장 의미처리의 신경적 기초: 기능적 자기공명 영상 연구. *한국심리학회지: 인지 및 생물*, 16(1), 61-75.

조수현 (2011). 유동 지능에 따른 인지 제어 관련 뇌 활동의 차이 분석. *한국심리학회*

지: 인지 및 생물, 23(3), 431-463.

Badre, D., & Wagner, A. D. (2006). Computational and neurobiological mechanisms underlying cognitive flexibility. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 103(18), 7186-7191.

Barber, A. D., & Carter, C. S. (2005). Cognitive control involved in overcoming prepotent response tendencies and switching between tasks. *Cerebral Cortex*, 15(7), 899-912.

Botvinick, M. M., Braver, T. S., Barch, D. M., Carter, C. S., & Cohen, J. D. (2001). Conflict monitoring and cognitive control. *Psychological Review*, 108 (3), 624-652.

Brass, M., & von Cramon, D. Y. (2004). Decomposing components of task preparation with functional magnetic resonance imaging. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16(4), 609-620.

Cavina-Pratesi, C., Valyear, K. F., Culham, J. C., Kohler, S., Obhi, S. S., Marzi, C. A., et al. (2006). Dissociating arbitrary stimulus-response mapping from movement planning during preparatory period: evidence from event-related functional magnetic resonance imaging. *The Journal of Neuroscience*, 26(10), 2704-2713.

Cools, R., Clark, L., & Robbins, T. W. (2004). Differential responses in human striatum and prefrontal cortex to changes in object and rule relevance. *The Journal of Neuroscience*, 24(5), 1129-1135.

Crone, E. A., Wendelken, C., Donohue, S. E., & Bunge, S. A. (2006). Neural evidence for

- dissociable components of task-switching. *Cerebral Cortex*, 16(4), 475-486.
- 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.
- Derrfuss, J., Brass, M., & von Cramon, D. Y. (2004). Cognitive control in the posterior frontolateral cortex: evidence from common activations in task coordination, interference control, and working memory. *NeuroImage*, 23(2), 604-612.
- Desai, R., Conant, L. L., Waldron, E., & Binder, J. R. (2006). fMRI of Past Tense Processing: The Effects of Phonological Complexity and Task Difficulty. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 18(2), 278-297.
- DiGirolamo, G. J., Kramer, A. F., Barad, V., Cepeda, N. J., Weissman, D. H., Milham, M. P., et al. (2001). General and task-specific frontal lobe recruitment in older adults during executive processes: a fMRI investigation of task-switching. *Neuroreport*, 12(9), 2065-2071.
- Dove, A., Pollmann, S., Schubert, T., Wiggins, C. J., & von Cramon, D. Y. (2000). Prefrontal cortex activation in task switching: an event-related fMRI study. *Cognitive Brain Research*, 9(1), 103-109.
- Dreher, J. C., & Grafman, J. (2003). Dissociating the roles of the rostral anterior cingulate and the lateral prefrontal cortices in performing two tasks simultaneously or successively. *Cerebral Cortex*, 13(4), 329-339.
- Dreher, J. C., Koechlin, E., Ali, S. O., & Grafman, J. (2002). The roles of timing and task order during task switching. *NeuroImage*, 17(1), 95-109.
- Eickhoff, S. B., Laird, A. R., Grefkes, C., Wang, L. E., Zilles, K., & Fox, P. T. (2009). Coordinate-based activation likelihood estimation meta-analysis of neuroimaging data: a random-effects approach based on empirical estimates of spatial uncertainty. *Human Brain Mapping*, 30(9), 2907-2926.
- Gold, B. T., & Buckner, R. L. (2002). Common prefrontal regions coactivate with dissociable posterior regions during controlled semantic and phonological tasks. *Neuron*, 35(4), 803-812.
- Gould, R. L., Brown, R. G., Owen, A. M., ffytche, D. H., & Howard, R. J. (2003). fMRI BOLD response to increasing task difficulty during successful paired associates learning. *NeuroImage*, 20(2), 1006-1019.
- Gurd, J. M., Amunts, K., Weiss, P. H., Zafiris, O., Zilles, K., Marshall, J. C., et al. (2002). Posterior parietal cortex is implicated in continuous switching between verbal fluency tasks: an fMRI study with clinical implications. *Brain*, 125(5), 1024-1038.
- Hyafil, A., Summerfield, C., & Koechlin, E. (2009). Two mechanisms for task switching in the prefrontal cortex. *The Journal of Neuroscience*, 29(16), 5135-5142.

- Jancke, L., Himmelbach, M., Shah, N. J., & Zilles, K. (2000). The effect of switching between sequential and repetitive movements on cortical activation. *NeuroImage*, 12(5), 528-537.
- Kim, C., Gille, S. E., Johnson, N. F., & Gold, B. T. (2012). Domain general and domain preferential brain regions associated with different types of task switching: A Meta-Analysis. *Human Brain Mapping*, 33(1), 130-142.
- Kim, C., Johnson, N. F., Gille, S. E., & Gold, B. T. (2011). Common and Distinct Mechanisms of Cognitive Flexibility in Prefrontal Cortex. *The Journal of Neuroscience*, 31(13), 4771-4779.
- Laird, A. R., Fox, P. M., Price, C. J., Glahn, D. C., Uecker, A. M., Lancaster, J. L., et al. (2005). ALE meta-analysis: controlling the false discovery rate and performing statistical contrasts. *Human Brain Mapping*, 25(1), 155-164.
- Leung, H. C., & Cai, W. (2007). Common and differential ventrolateral prefrontal activity during inhibition of hand and eye movements. *The Journal of Neuroscience*, 27(37), 9893-9900.
- Lewandowska, M., Piatkowska-Janko, E., Bogorodzki, P., Wolak, T., & Szelag, E. (2010). Changes in fMRI BOLD response to increasing and decreasing task difficulty during auditory perception of temporal order. *Neurobiology of Learning and Memory*, 94(3), 382-391.
- Liston, C., Matalon, S., Hare, T. A., Davidson, M. C., & Casey, B. J. (2006). Anterior cingulate and posterior parietal cortices are sensitive to dissociable forms of conflict in a task-switching paradigm. *Neuron*, 50(4), 643-653.
- Luks, T. L., Simpson, G. V., Feiwell, R. J., & Miller, W. L. (2002). Evidence for anterior cingulate cortex involvement in monitoring preparatory attentional set. *NeuroImage*, 17(2), 792-802.
- Meiran, N. (1996). Reconfiguration of processing mode prior to task performance. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 22(6), 1423-1442.
- Meiran, N., & Marciano, H. (2002). Limitations in advance task preparation: switching the relevant stimulus dimension in speeded same-different comparisons. *Memory & Cognition*, 30(4), 540-550.
- Miller, E. K., & Cohen, J. D. (2001). An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annual Review of Neuroscience*, 24, 167-202.
- Monsell, S. (2003). Task switching. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(3), 134-140.
- Nagahama, Y., Okada, T., Katsumi, Y., Hayashi, T., Yamauchi, H., Oyanagi, C., et al. (2001). Dissociable mechanisms of attentional control within the human prefrontal cortex. *Cerebral Cortex*, 11(1), 85-92.
- Parris, B. A., Thai, N. J., Benattayallah, A., Summers, I. R., & Hodgson, T. L. (2007). The role of the lateral prefrontal cortex and anterior cingulate in stimulus-response association reversals. *Journal of Cognitive*

- Neuroscience*, 19(1), 13-24.
- Pessoa, L., Rossi, A., Japee, S., Desimone, R., & Ungerleider, L. G. (2009). Attentional control during the transient updating of cue information. *Brain Research*, 1247, 149-158.
- Pollmann, S., Dove, A., Yves von Cramon, D., & Wiggins, C. J. (2000). Event-related fMRI: comparison of conditions with varying BOLD overlap. *Human Brain Mapping*, 9(1), 26-37.
- Pollmann, S., Weidner, R., Muller, H. J., Maertens, M., & von Cramon, D. Y. (2006). Selective and interactive neural correlates of visual dimension changes and response changes. *NeuroImage*, 30(1), 254-265.
- Pollmann, S., Weidner, R., Muller, H. J., & von Cramon, D. Y. (2000). A fronto-posterior network involved in visual dimension changes. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12(3), 480-494.
- Ravizza, S. M., & Carter, C. S. (2008). Shifting set about task switching: behavioral and neural evidence for distinct forms of cognitive flexibility. *Neuropsychologia*, 46(12), 2924-2935.
- Rogers, R. D., Andrews, T. C., Grasby, P. M., Brooks, D. J., & Robbins, T. W. (2000). Contrasting cortical and subcortical activations produced by attentional-set shifting and reversal learning in humans. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12(1), 142-162.
- Rubia, K., Smith, A. B., Woolley, J., Nosarti, C., Heyman, I., Taylor, E., et al. (2006). Progressive increase of frontostriatal brain activation from childhood to adulthood during event-related tasks of cognitive control. *Human Brain Mapping*, 27(12), 973-993.
- Ruge, H., Brass, M., Koch, I., Rubin, O., Meiran, N., & von Cramon, D. Y. (2005). Advance preparation and stimulus-induced interference in cued task switching: further insights from BOLD fMRI. *Neuropsychologia*, 43(3), 340-355.
- Ruge, H., Muller, S. C., & Braver, T. S. (2010). Anticipating the consequences of action: An fMRI study of intention-based task preparation. *Psychophysiology*, 47(6), 1019-1027.
- Rushworth, M. F., Hadland, K. A., Paus, T., & Sipila, P. K. (2002). Role of the human medial frontal cortex in task switching: a combined fMRI and TMS study. *Journal of Neurophysiology*, 87(5), 2577-2592.
- Sakai, K. (2008). Task Set and Prefrontal Cortex. *Annual Review of Neuroscience*, 31(1), 219-245.
- Schmitz, N., Rubia, K., Daly, E., Smith, A., Williams, S., & Murphy, D. G. (2006). Neural correlates of executive function in autistic spectrum disorders. *Biological Psychiatry*, 59(1), 7-16.
- Serences, J. T., Schwarzbach, J., Courtney, S. M., Golay, X., & Yantis, S. (2004). Control of object-based attention in human cortex. *Cerebral Cortex*, 14(12), 1346-1357.
- Smith, A. B., Taylor, E., Brammer, M., & Rubia, K. (2004). Neural correlates of switching set as measured in fast, event-related functional magnetic resonance imaging. *Human Brain Mapping*, 21(4), 247-256.

- Sohn, M. H., Ursu, S., Anderson, J. R., Stenger, V. A., & Carter, C. S. (2000). Inaugural article: the role of prefrontal cortex and posterior parietal cortex in task switching. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 97(24), 13448-13453.
- Sylvester, C.-Y. C., Wager, T. D., Lacey, S. C., Hernandez, L., Nichols, T. E., Smith, E. E., et al. (2003). Switching attention and resolving interference: fMRI measures of executive functions. *Neuropsychologia*, 41(3), 357-370.
- Thompson-Schill, S. L., D'Esposito, M., Aguirre, G. K., & Farah, M. J. (1997). Role of left inferior prefrontal cortex in retrieval of semantic knowledge: a reevaluation. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 94(26), 14792-14797.
- Turkeltaub, P. E., Eden, G. F., Jones, K. M., & Zeffiro, T. A. (2002). Meta-analysis of the functional neuroanatomy of single-word reading: method and validation. *NeuroImage*, 16, 765-780.
- Vandenberghe, R., Gitelman, D. R., Parrish, T. B., & Mesulam, M. M. (2001). Functional specificity of superior parietal mediation of spatial shifting. *NeuroImage*, 14(3), 661-673.
- Weidner, R., Pollmann, S., Muller, H. J., & von Cramon, D. Y. (2002). Top-down controlled visual dimension weighting: an event-related fMRI study. *Cerebral Cortex*, 12(3), 318-328.
- Wilkinson, D. T., Halligan, P. W., Marshall, J. C., Buchel, C., & Dolan, R. J. (2001). Switching between the forest and the trees: brain systems involved in local/global changed-level judgments. *NeuroImage*, 13(1), 56-67.
- Woolgar, A., Thompson, R., Bor, D., & Duncan, J. (2011). Multi-voxel coding of stimuli, rules, and responses in human frontoparietal cortex. *NeuroImage*, 56, 744-752.
- Wylie, G. R., Javitt, D. C., & Foxe, J. J. (2006). Jumping the gun: is effective preparation contingent upon anticipatory activation in task-relevant neural circuitry? *Cerebral Cortex*, 16(3), 394-404.
- Yeung, N., Nystrom, L. E., Aronson, J. A., & Cohen, J. D. (2006). Between-Task Competition and Cognitive Control in Task Switching. *The Journal of Neuroscience*, 26(5), 1429-1438.
- Zanolie, K., Teng, S., Donohue, S. E., van Duijvenvoorde, A. C., Band, G. P., Rombouts, S. A., et al. (2008). Switching between colors and shapes on the basis of positive and negative feedback: an fMRI and EEG study on feedback-based learning. *Cortex*, 44(5), 537-547.
- Zanolie, K., Van Leijenhorst, L., Rombouts, S. A., & Crone, E. A. (2008). Separable neural mechanisms contribute to feedback processing in a rule-learning task. *Neuropsychologia*, 46(1), 117-126.

1 차원고접수 : 2013. 08. 14

최종게재결정 : 2013. 09. 10

Neural Mechanisms Involved in Multi-Dimensional Task Switching: A Meta-Analysis

Yunsu Jeon

Chobok Kim

Department of Psychology, Kyungpook National University

Recent studies on task switching have identified that the brain regions involved in cognitive control are different according to the information processing types included in the task. Task switching paradigms used in previous studies has included two or more information processing levels. However, neural mechanisms underlying multi-dimensional task switching has been unknown. In this study, we performed three meta-analyses to test whether the additional brain regions are involved in multi-dimensional task switching compared to uni-dimensional task switching. From 1995 to 2011, a total of 38 switching studies with 433 activation coordinates were analyzed by using the activation likelihood estimation (ALE) method. The result showed that the bilateral ventrolateral prefrontal cortex, the anterior cingulate cortex, and the left inferior parietal lobule were more activated in multi-dimensional switching compared to uni-dimensional switching. An additional conjunction analysis revealed that uni- and multi-dimensional switches commonly recruit the left inferior frontal junction, the posterior parietal cortex, and the anterior cingulate cortex. Our results suggest that neural networks of cognitive control associated with task switching could be different according to the information processing levels.

Key words : task switching paradigm, cognitive control, meta-analysis, fMRI