

유동 지능에 따른 인지 제어 관련 뇌 활동의 차이 분석*

조 수 현[†]

중앙대학교 심리학과

본 연구는 유동 지능(fluid intelligence)의 개인차에 따라 추론 중의 인지 제어(cognitive control) 기제와 관련한 뇌 활동이 어떻게 조절되는지를 알아보았다. 본 연구에서는 인지적 간섭의 강도가 세 단계로 조작된 유추 추론(analogical reasoning) 과제가 사용되었다. 인지적 간섭(cognitive interference)의 강도가 높은(낮은) 시행에서는 올바른 추론을 위해 간섭 해결을 위한 인지 제어가 더 많이(적게) 필요하였다. 실험 1에서는 인지적 간섭의 강도에 따른 행동적 수행의 변화가 확인되었다. 피험자들은 인지 제어가 많이 필요한 추론 시행의 경우 그렇지 않은 경우와 비교하여 더 많은 오류를 범했으며 문제 풀이 시간도 길었다. 실험 2에서는 기능적 자기 공명 영상 기기(fMRI)를 이용하여 추론 중 간섭을 해결하기 위한 인지 제어 기능이 강하게 요구될 때 유동 지능이 높은 피험자들에게서 활동 수준이 더 크게 증가하는 뇌 영역을 관찰하였다. 유동 지능이 높을수록 유추 추론 시 인지 제어가 강하게 요구될 때, 양반구의 전 대상 피질(anterior cingulate cortex), 시각 피질(visual cortex), 내측 전두극(medial frontal pole), 우반구의 외측 전전두 피질(lateral prefrontal cortex), 중뇌(midbrain)의 복측 피개 영역(ventral tegmental area) 등에서 뇌 혈류 수준이 더 크게 증가하였다. 본 연구에서는 다양한 맥락의 인지 제어 및 추론 시에 활동이 증가하는 것으로 알려진 외측 전전두 피질과 전 대상 피질, 시각 피질이, 추론 중 인지 제어 기제의 작용과도 관련될 뿐 아니라 유동 지능이 높을수록 그 활동 수준의 증가량이 크다는 것이 확인되었다. 한편, 일반적으로 인지 과제 수행 시에 활동 수준이 기저선보다 저하되는(deactivate) 영역에 속하는 내측 전전두 피질(medial prefrontal cortex)은 유동 지능이 높을수록 활동 수준이 덜 억제(less deactivate) 되었다. 이는 정보 처리의 역량이 우수한 피험자는 인지 과제 수행 시에도 뇌의 초기 모드 활동이 지속될 수 있다는 기존의 이론을 뒷받침한다.

주제어 : 유동 지능, 기능성 자기 공명 영상, 추론, 인지 제어, 개인차

* 본 연구는 관정 이종환 장학 재단, 미국 National Institutes of Health, Office of Naval Research로부터 지원 받았다(NIH MH072613, ONR N000140810186). 저자는 연구에 도움을 준 Teena Moody, Leonardo Fernandino, Guido Schauer, Russell Poldrack, Barbara Knowlton 그리고 Keith Holyoak에게 감사한다.

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

유동 지능(fluid intelligence)은 창의적인 사고를 통해 새로운(novel) 문제를 해결할 수 있는 지적 능력을 말한다(Cattell, 1943; 1963). 이와 대비되는 개념으로, 결정적 지능(crystallized intelligence)은 장기 기억 속에 저장된 정보를 인출하여 적용함으로써 문제를 해결할 수 있는 능력이다. 유동 지능은 결정적 지능에 비해 개인차가 크며, 일반적으로 ‘머리가 좋다/나쁘다’는 개념과 더 깊은 관련이 있다. 유동 지능과 결정적 지능은 서로 다른 인지적, 신경학적 기체에 기반한다. 유동적 지능은 결정적 지능에 비해 중년기 이후 인지 기능의 노화에 따라 급격하게 저하된다(Salthouse, 1996). 또한 전두엽의 손상 혹은 파킨슨 병은 유동 지능에만 선택적이고 치명적인 손상을 가져올 수 있다(Duncan, Burgess, & Emslie, 1995) or Parkinson’s disease(Gabrieli, 1996).

지능 검사의 점수는 추론 과제의 행동적 수행과 높은 상관관계를 가진다(Snow et al., 1984). 이 중 유추 추론(analogical reasoning) 능력은 다양한 영역에 걸친 지능, 즉, 언어적, 시공간적, 수학적 지능과 모두 밀접한 관계를 가진다는 것이 다차원 척도화(multi-dimensional scaling)를 통해 확인되었다(Snow et al., 1984; Prabhakaran et al., 1997; 부록 II의 그림 1 참조). 이와 같은 선행 연구를 기반으로 유추 추론 중의 정보 처리 과정은 다양한 영역에 걸친 유동 지능의 구성 요소를 반영할 것으로 기대할 수 있다. 본 연구는 유추 추론 과제를 수행할 때 인지 제어 기제(cognitive control mechanism)를 담당하는 뇌 영역들의 활동이 유동 지능의 개인차에 따라 어떻게 달라지는지를 분석하였다.

유추 추론 중의 인지적 제어 기제의 작용

유추 추론은 두 개의 표상 간의 관계적 구조 (relational structure)의 유사성을 판단하는 사고 과정이다. 예를 들어, 예제 1에 나타난 유추 추론에 필요한 사고 과정은 다음과 같다.

[예제 1] old man : cane :: baby : (?)

- ① mom ② baby walker ③ baby formula
- ④ diaper

예제 1의 유추 추론 문제를 풀기 위해 추론자는 먼저 ‘old man(할아버지)’와 ‘cane(지팡이)’의 관계 즉, 지팡이는 할아버지가 잘 걸을 수 있도록 도와주는 도구라는 단어 간의 ‘관계성’(relation)을 파악해야 한다. 그 다음, 그 관계성을 새로운 표상인 ‘baby(아기)’에 적용하면 ‘baby walker(보행기)’를 정답으로 추론해 낼 수 있다. 관계성을 파악하고 이를 새로운 표상에 적용하는 과정을 ‘관계적 통합’(relational integration)이라 한다. 관계적 통합은 유추 추론의 핵심적인 인지 과정이다(Halford, 1998). 한편, 올바른 유추 추론을 위해서는 불필요한 표상들로부터의 인지적 간섭(cognitive interference)을 해결하는 인지 제어(cognitive control) 과정이 필요하다. 예를 들어, 예제 1의 네 개의 보기 중에서 ‘baby walker(보행기)’를 정답으로 선택하기 위해서는 다른 보기들로부터의 간섭을 극복해야 한다. 특히 예제 1에서와 같이, 다른 보기들이 정답인 ‘baby walker(보행기)’와 비교할 때 ‘baby(아기)’와의 의미적

연합(semantic association)이 강한 경우 인지적 간섭을 억제(inhibition)하기 위해 인지적 제어 기제의 작용이 더 많이 요구된다. 예제 1의 경우, ‘baby(아기)’와 ‘mom(엄마)’ 혹은 ‘baby(아기)’와 ‘baby formula(분유)’ 그리고 ‘baby(아기)’와 ‘diaper(기저귀)’는 ‘baby(아기)’와 ‘baby walker(보행기)’보다 의미적으로 더 강하게 연합이 되어있다. 이러한 경우, 인지 제어 기제를 통해 집행적 주의(executive attention)를 기울이지 않으면, 의미적 연합의 영향으로 인해 오답을 고르는 오류를 범할 수 있다. 따라서 예제 1과 같은 유추 추론에는 인지적 제어 기제가 더 많이 작용하게 된다.

예제 2는 인지적 제어 기제의 작용을 크게 요구하지 않는 유추 추론의 예이다.

[예제 2] center : middle :: exceptional : (?)

- ① sharp ② narrow ③ outstanding
- ④ obvious

이 같은 경우에는 정답과 정답이 아닌 보기들이 ‘exceptional(출중한)’과 의미적으로 연합된 정도가 유사하여 인지적 간섭의 정도가 예제 1에 비해 크지 않다. 예제 2와 같은 경우에는 인지적 간섭을 해결하기 위한 인지 제어 기제의 작용이 필요하지는 않지만 여러 개의 표상 중 정답을 고르기 위한 선택적 주의를 여전히 필요하다.

추가적인 예는 들지 않겠으나, 어떠한 경우에는 정답이, 정답이 아닌 보기들과 비교할 때, 문제에 제시된 단어와 의미적으로 더 강하게 연합되어 인지적 간섭이 최소화되는 유

추 추론 문제도 있을 수 있다. 이러한 경우에는 인지 제어 및 선택적 주의가 다른 경우에 비하여 적게 요구된다.

본 연구에서는 이처럼, 의미적 연합에 의한 인지적 간섭의 정도에 따라 인지적 제어의 작용 강도가 달라지는 세 가지 조건의 유추 추론 시의 뇌 활동을 기능성 자기 공명 영상 장치(fMRI)로 촬영하였다. 자료 분석의 주 목적은 인지 제어 기제가 더 강하게 작용하는 추론 시에 활동하는 뇌 영역들을 관찰하고 유동 지능의 개인차에 따라 인지 제어 기제의 작용을 반영하는 뇌 활동 수준이 어떻게 달라지는지 살펴보는 것이었다.

유추 추론의 인지적 구성 요소와 그 뇌 기반에 대한 기존 연구

유추 추론의 뇌 기반에 대한 기존 연구들은 주로 유추 추론의 ‘관계적 통합’ 과정에 초점을 두었다. 관계적 통합 과정은 두 개 이상의 관계적 표상을 동시에 처리하는 사고 과정으로 정의된다(Halford, 1998). 동시에 통합적으로 처리해야 할 관계적 표상의 개수를 관계적 복잡성(relational complexity)이라 하는데, 이 관계적 복잡성이 증가함에 따라 인지 부하(cognitive load)가 커진다. 관계적 통합은 특히 외측 전두엽의 기능을 필요로 하며 관계적 복잡성이 증가함에 따라 행동적 수행이 저조해지고 외측 전두엽의 활동이 증가하는 것이 관찰되었다(Viskontas et al., 2004; Kroger et al., 2002; Krawczyk et al., 2008; Cho et al., 2007; 2010). 또한 전두엽의 기능이 퇴화된 노인 혹은 전두엽이 아직 완전하게 발달되지 않은 아

동들은 관계적 통합에 어려움을 겪는다는 것이 보고되었다(Waltz et al., 1999; Viskontas et al., 2004; Morrison et al., 2004; Richland et al., 2006). 정상적인 성인이 복잡한 관계적 통합이 요구되는 추론을 하는 동안 뇌를 촬영한 결과, 전전두엽, 두정엽, 측두엽 등의 뇌 영역에서 활동이 증가되었다(Prabhakaran et al., 1997; Christoff et al., 2001; Kroger et al., 2002; Luo et al. 2003; Bunge et al., 2004; Green et al. 2006; Wendelken et al., 2008).

한편, 추론의 인지적 구성 요소로서 인지 제어의 뇌 기제에 대한 연구는 아직 많지 않다. 인지 제어 기제의 핵심 요소 중 하나인 인지적 억제(cognitive inhibition) 과정이 유추 추론에 필요불가결한 요소임이 밝혀진 것도 비교적 최근의 일이다. Hummel과 Holyoak(1997)은 유추 추론의 신경망 모델(Learning and Inference with Schemas and Analogies; LISA)을 개발하였는데 이 모델을 이용한 시뮬레이션 결과에 따르면, 유추 추론 중 관계적 통합을 하기 위해서는 인지적 제어 즉, 억제 기제가 온전하게 기능해야만 1) 목표에 부합하는(goal-relevant) 표상만을 선택적으로 작업 기억에 유지하고, 2) 불필요하거나 간섭을 유발하는 표상들을 작업 기억에서 배제하고, 3) 대비되는 관계적 정보의 올바른 정렬(alignment)과 매핑(mapping)이 가능하다(Hummel & Holyoak, 1997; 2003). 인지적 제어는 비단 추론 뿐 아니라, 모든 정보 처리 과정에 있어 효율적이고 정확한 사고 및 복잡한 문제의 해결을 위해 반드시 필요한 인지 과정이다. 본 연구에서는 유동 지능의 개인차와 유동 지능의 핵심적 요소인 인지 제어 작용 시의 뇌 활동 간의 관계를

알아보고자 한다.

실험 1. 의미적 연합에 의한 간섭의 정도에 따른 유추 추론 과제의 행동적 수행의 변화

실험 1의 목적은 유추 추론 과제의 행동적 수행이 단어 간의 의미적 연합의 정도에 따른 간섭의 강도에 의해 영향을 받는지 알아보기 위함이었다.

방 법

참가자 미국 University of California, Los Angeles(UCLA) 대학교의 인지 심리학 수업을 수강하는 학부생 17명이 실습 시간에 실험에 참가하였다. 피험자들은 모두 영어를 모국어로 사용하였다.

기구 실험 자극은 슈퍼랩(SuperLab) 소프트웨어로 프로그래밍 되었으며 PC 컴퓨터 모니터로 피험자들에게 제시되었다. 반응의 정확도와 반응 시간 등을 종속 변인으로 저장하였다.

과제 및 절차

유추 추론 과제. 피험자들에게 제시된 유추 추론 문제들은 예제 3에 제시된 바와 같이 네 개의 영어 단어로 구성되었다. 추론 문항 바로 아래에는 두 개의 보기가 제시되었고 이 중 하나는 정답 (D), 다른 하나는 오답 (D')이었다. 정답과 오답의 위치에 따른 효과를 방지하기 위하여 정답이 왼쪽에 제시된 경우와 정답이 오른쪽에 제시된 시행의 수가 동일하

였고 그 무선적으로 섞여 제시되었다. 피험자의 과제는 두 개의 보기 중에서 유추 추론을 올바르게 완성하는 정답을 골라서 해당 버튼(왼쪽 단어 선택 시 1, 오른쪽 단어 선택 시 2)을 누르는 것이었다.

[예제 3] A : B :: C : (?)

① D ② D'

C 와 D 혹은 C 와 D' 간의 의미적 연합의 강도는 University of South Florida(USF) word association, rhyme, and word fragment norms (Nelson et al., 1998)에 근거하여 측정되었다. C 와 D 간 그리고 C 와 D' 간의 의미적 연합의 강도 차이 (C 와 D 간 의미적 연합 강도 - C 와 D' 간 의미적 연합 강도)를 의미적 용이 지수(semantic facilitation index, SFI)로 정량화하였다(Morrison et al., 2004). 즉, 의미적 용이 지수는 단어 간의 의미적 연합 관계가 논리 추론을 얼마나 용이하게 하는지를 나타내는 지수이다. 본 연구에서는 이 SFI에 따라 세 가지 실험 조건이 사용되었다. 1) C 와 D 간의 의미적 연합 정도가 C 와 D' 간의 의미적 연합의 정도보다 높은 문항들은 정적(positive) SFI 조건, 2) C 와 D 간의 의미적 연합 정도가 C 와 D' 간의 의미적 연합의 정도와 유사한 문항들은 중립적(neutral) SFI 조건, C 와 D 간의 의미적 연합 정도가 C 와 D' 간의 의미적 연합의 정도보다 낮은 문항들은 부적(negative) SFI 조건으로 분류되었다. 실험 조건 별 예시가 표 1에 제시되었다. 정적 SFI 조건은 C 와 D 간의 의미적 연합 강도가 C 와 D' 간의 의

미적 연합 강도보다 강하기 때문에 단어의 의미에 대한 정보 처리가 논리적 추론을 더 용이하게 하는 실험 조건이다. 따라서, 정적 SFI 조건에서는 단어 간의 의미적 연합 관계가 정답을 고르는 데에 도움이 되는 방향으로 영향을 미치므로 인지 제어 및 선택적 주의가 가장 적게 필요한 실험 조건이라 할 수 있다. 반면, 부적 SFI 조건은 C 와 D 간의 의미적 연합 강도가 C 와 D' 간의 의미적 연합 강도보다 약하기 때문에 단어의 의미에 대한 정보 처리가 논리적 추론에 간섭을 야기하는 실험 조건이다. 따라서 부적 SFI 조건의 문항들을 풀 때 간섭을 극복하기 위한 인지 제어 작용이 가장 많이 필요하다. 중립적 SFI 조건은 C 와 D 간의 의미적 연합 강도가 C 와 D' 간의 의미적 연합 강도와 유사하기 때문에 단어의 의미에 대한 정보 처리가 논리적 추론에 큰 영향을 주지 않는 실험 조건이다. 따라서 중립적 SFI 조건의 문항들은 부적 SFI 조건에서 처럼 강한 간섭이 일어나지는 않지만 정답과 유사한 정도로 연합 강도를 가진 다른 보기를 무시하고 정답을 선택하기 위한 선택적 주의가 여전히 요구된다.

실험에 사용된 모든 추론 문항과 각 문항의 SFI 는 부록의 표 1에 수록되었다. 실험 조건 당 SFI 의 범위는 정적 SFI 조건: 0.152 ~ 0.674; 중립적 SFI 조건: -0.111 ~ 0.112; 부적 SFI: -0.761 ~ -0.122 이었다. 모든 피험자는 각 실험 조건 당 30개(총 90개)의 추론 문항을 풀었다. 반복으로 인한 점화 효과(repetition priming effect)를 배제하기 위하여 모든 단어는 한 번만 사용하였다. 또한 의미적 연합에 의한 효과를 오염시킬 수 있는 다른 인지적 변

표 1. 세 가지 실험 조건 및 예제. 각 예제의 둘째 행에 제시된 두 보기 중 정답을 굵은 글씨로 표기하였으며 단어 간 의미적 연합의 상대적 강도를 화살표의 두께로 표시하였다.

SFI	예제	C	단어 간 의미적 연합의 강도	D or D'
부적	SILVER : METAL :: FORK : ?	FORK		SPOON
	SPOON UTENSIL			UTENSIL
중립적	PEOPLE : MEALS :: CAR : ?	CAR		GAS
	GAS DRIVE			DRIVE
정적	PUPPY : DOG :: CUB : ?	CUB		BABY
	BABY BEAR			BEAR

인 즉, D와 D' 간에 단어의 빈도수(word frequency) 및 구체성(word concreteness)의 차이를 통제하였다. 단어의 빈도수 및 구체성에 대한 기준 역시 University of South Florida, word association, rhyme, and word fragment norms (Nelson et al. 1998)에서 취하였다. 실험에 사용

된 일부 단어는 Sternberg and Nigro(1980) 실험에 사용되었던 문항들에서 발췌하였다.

절차 실험 1에서의 자극 제시 순서는 그림 1과 같았다. 각 시행은 먼저 빈 화면의 정가운데에 +형태의 응시점을 제시하는 것으로 시

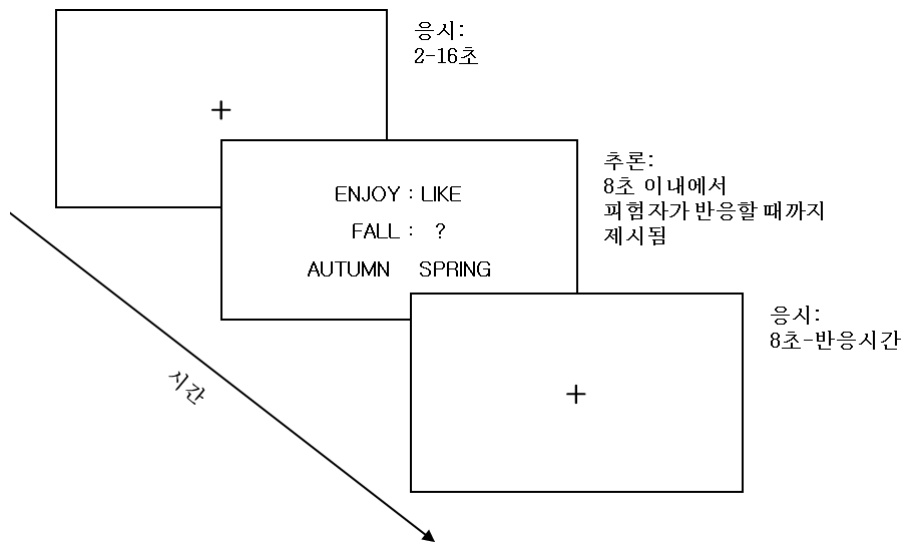


그림 1. 실험 절차

작되었는데 제시 시간은 2-16초 사이로 무선적으로 선정되었다. 시행 간 간격(inter-trial interval)을 이와 같이 들쭉날쭉하게 무선적(random jittering)으로 조절한 이유는 자기 공명 영상 장치를 활용한 실험 2에서 이러한 조작이 필요하기 때문이다(이러한 조작이 필요한 구체적인 이유는 실험 2의 방법에 설명하였다). 두 번째 화면에 유추 문항과 보기들이 제시되었고 피험자들은 8초 이내로 버튼을 누르도록 지시받았다. 반응 수집 1초 후 다음 시행이 시작되었다. 추론의 정확도(올바른 답을 선택한 시행의 수/전체 시행의 수)와 반응 시간을 종속 변인으로 수집하였다.

설계 세 개의 실험 조건의 효과를 분석하기 위하여 피험자 내 반복 측정 설계(within-subject repeated measures design)를 사용하였다.

결과 및 논의

참가자들에게서 수집한 추론의 정확도 및 반응 시간에 대하여 변량 분석(Analysis of Variance, ANOVA)을 수행하였다. 반응 시간의 경우에는 올바르게 푼 시행만을 선택하여 기하학적 평균(geometric mean)을 구하였다.

정확도와 반응 시간 SFI 에 따른 정확도와 반응 시간의 기하학적 평균은 표 2와 같다.

변량분석 결과. 반응시간과 정확도를 종속 변인으로 변량 분석을 통해 분석한 실험 조건의 주 효과(main effect)는 모두 유의미하였다 ($p < .05$). 대응별 비교 결과 정적 SFI와 부적

표 2. SFI에 따른 정확도와 반응 시간의 기하학적 평균 (geometric mean)과 표준 오차

	정적 SFI	중립적 SFI	부적 SFI
반응 시간	3171 ± 125	3195 ± 124	3294 ± 124
정확도	.94 ± .01	.93 ± .01	.89 ± .01

주. 반응 시간의 단위: ms.

SFI 간의 비교 시에만 반응 시간 및 정확도에서 유의미한 차이가 나타났다($p < .05$).

실험 1의 결과는 가설대로 SFI가 피험자들의 유추 추론의 행동적 수행에 영향을 주었음을 의미한다. 즉, 단어 간의 의미적 연합에 의해 유발된 간섭의 정도가 추론의 정확도와 반응 시간에 영향을 주었음을 알 수 있다.

실험 2

실험 2에서는 유추 추론 과정에서 인지 제어 기제의 작용을 뒷받침하는 뇌 영역을 알아보고 유동 지능의 개인차에 따라 뇌 활동이 어떻게 다른지를 알아보기 위해 기능성 자기 공명 영상 기기를 사용하였다.

방법

참가자 미국 University of California, Los Angeles(UCLA) 대학교의 심리학 수업을 수강하는 학부생 및 대학원생 16명(평균 연령: 22.3세, 표준 편차 : 2.4) 이 \$50의 사례비를 받고 실험에 참가하였다. 모든 피험자는 영어를 모국어로 사용하는 학생들이었다. 피험자들은 신경과적 질환이 없고 물질 남용과 관련한 행동적 장애가 없는 이들만을 선발하였다.

기구와 재료 피험자들의 유동 지능을 측정하기 위하여 Raven's Advanced Progressive Matrices (APM)(Raven, 1938; Arthur et al., 1999) 축약형 검사를 사용하였다. 실험에 사용된 유추 추론 문항은 실험 1에서와 동일하였으며 실험 절차 또한 실험 1과 동일하였다.

과제 및 절차 실험 2에서의 자극 제시 순서 역시 그림 1과 같았다. 각 시행은 먼저 빈 화면의 정가운데에 +형태의 응시점을 제시하는 것으로 시작되었는데 제시 시간은 2-16초 사이로 무선적으로 선정되었다. 시행 간 간격(inter-trial interval)을 이와 같이 들쭉날쭉하게 무선적(random jittering)으로 조절한 이유는 사건 관련(event-related) 디자인으로 자기 공명 영상 실험을 할 때에 각 시행 후에 혈류 역동이 기저선으로 되돌아갈 수 있는 시간적 여유를 주되 실험 시간이 지나치게 길어지지 않도록 제한하는 가운데 관심 있는 사건과 관련한 뇌 신호를 완전하게 복원할 수 있도록 하기 위함이다(Dale, 1998).(사건 관련 디자인이 사용된 자기 공명 영상 연구의 또 다른 예는 박태진 외 2008이 있다.) 두 번째 화면에 유추 문항과 보기들이 제시되었고 피험자들은 8초 이내로 버튼을 누르도록 지시받았다. 피험자들이 8초 이전에 반응을 한 경우, 나머지 시간은 빈 화면에 응시점을 제시하는 화면으로 채웠다. 이 화면은 다음 시행의 초기 화면과 동일한 자극으로 피험자들에게는 연속적인 하나의 화면으로 지각되었다. 실험 2는 10분 썩 두 번의 EPI (echoplanar imaging) 회기로 나누어 시행되었다. 각 회기는 45개의 시행으로 구성되었다. 피험자들은 왼쪽의 보기를 정답으로 선택하고자

할 경우 검지로 왼쪽 버튼을 누르고 오른쪽의 보기를 정답으로 선택하고자 할 경우에는 중지로 오른쪽 버튼을 누르도록 지시받았다. 이-프라임 (E-prime) 소프트웨어를 사용하여 PC 컴퓨터로 자극이 제시되었다.

자기 공명 영상 자료 수집 절차. 뇌 영상 자료는 University of California, Los Angeles (UCLA) 대학교의 뇌 매핑 센터에 있는 자기장 세기 3 테슬라(Testla)의 지멘스(Siemens) 알레그라(Allegra) 모델을 사용하여 획득하였다. 뇌산소화도 수준에 의한 뇌 활동(oxygenation level dependent, BOLD) EPI 획득에 사용된 박동 연쇄(pulse sequence)의 변수 값들은 다음과 같이 정하였다: repetition time(TR), 2 s; echo time(TE), 30 ms; flip angle, 90 deg; 33 slices; voxel dimensions; 3.1 x 3.1 x 3.5 mm; field of view(FOV), 200 mm; and matrix, 64 x 64. 처음 두 TR 동안 획득한 뇌 영상 자료는 T1 평형(equilibration)을 위해 분석에 사용하지 않았다. 뇌의 구조를 고해상도로 촬영하기 위해 피험자 당 두 가지 해부학적 영상 자료를 획득하였는데, 첫 번째는 EPI와 동일 평면 상(co-planar)의 T2-가중 맞춤 대역폭 고해상도 사진(T2-weighted matched-bandwidth high-resolution scan)으로서 TR, 5 s; TE, 33 ms; flip angle, 90 deg; 33 slices; voxel dimensions, 1.6 x 1.6 x 3.5 mm, FOV, 200 mm; and matrix, 128 x 128의 변수 값을 사용하였다. 두 번째는 T1-가중 자기화 준비 고속 촬영 변화 반향 영상(T1-weighted magnetization-prepared rapid-acquisition gradient echo, MPRAGE) 으로서 TR, 2.3 s; TE, 2.1 ms; flip angle, 8 deg; 160 slices; voxel

dimensions, 1.3 x 1.3 x 1.0 mm, FOV, 256 mm; and matrix, 192 x 192의 변수 값을 사용하였다.

자기 공명 영상 처리. 영상 전 처리(preprocessing)와 분석은 옥스퍼드의 뇌 기능 영상 센터(Oxford Centre for Functional Magnetic Resonance Imaging of the Brain, FMRIB)에서 개발한 FSL 소프트웨어를 사용하였다(Smith et al., 2004). 공간적 평활(spatial smoothing)은 반치전폭(full-width half-maximum, FWHM) 5 mm의 가우시안 함수(Gaussian kernel)를 사용하였다. 신호 전 처리와 분석은 FSL의 fMRI Expert Analysis Tool(FEAT) version 5.63을 사용하였다. 저주파수의 인위적 신호(low-frequency artifacts)를 제거하기 위해 모든 EPI는 66초 한도 이상으로 시간적으로 필터링 처리되었다. 피험자의 움직임으로 인한 인위적 신호를 제거하기 위하여 모든 EPI 시계열 자료는 Motion Correction using FMRIB's Linear Image Registration Tool(MCFLIRT, Jenkinson et al., 2002)을 이용하여 시계열의 중간 이미지와 정렬되도록 3 차원으로 보정하였다. 인위적 신호 성분을 추가적으로 제거하기 위하여 FMRIB's Multivariate Exploratory Linear Optimized Decomposition into Independent Components(MELODIC) tool(Beckman & Smith, 2004)를 사용하였다. MELODIC을 사용하여 분해된 신호의 성분들의 공간적 시간적 특성을 관찰하여 움직임과 관련되거나 저주파수, 고주파수의 인위적 신호 성분을 제거하였다. 이 과정에서 다듬어진 EPI 시계열은 32개 중 7개였다. MELODIC을 이용한 추가적 잡음 제거 과정을 거친 통계적 분석결과와 이 과정

을 배제한 통계 분석 결과를 비교하였을 때 질적으로 차이가 없었다.

피험자 별로 기능적 뇌 사진을 뇌구조 사진과 정렬하는 과정은 FMRIB's Linear Registration Tool(FLIRT)을 이용하여 3단계로 진행되었다. 기능적 뇌 사진들은 먼저 자유도 7의 아핀 변환(affine transform)으로 T2-가중 맞추기 대역폭 고해상도 사진에 맞추어진 후, 두 번째로 자유도 12의 아핀 변환으로 T1-가중 자기화 준비 고속 촬영 변화 방향 사진에 정렬된 후 마지막으로 자유도 12의 아핀 변환으로 Montreal Neurological Institute(MNI) 152 뇌 표준 원형 구조 사진(standard template anatomical image)에 정렬되었다.

통계 분석. 통계적 가설 검증은 다중 회귀 모형을 사용하였는데 측정된 뇌 신호가 종속 변인이 되고, 각 실험 조건 별로 예측한 뇌 신호(모델)이 독립 변인들로 사용되었다. 뇌 신호 모델은 한 각 시행에서 추론 문제의 제시 시점부터 피험자가 버튼을 누른 순간까지의 자극 제시 모형을 표준(canonical) 이중 감마(double-gamma) 혈류 역동 반응 함수(hemodynamic response function, HRF)와 컨볼브(convolve) 만들었다. 이 다중 회귀 모형에서 각 실험 조건을 열로 뇌 영상 촬영 횟수를 행으로 한 행렬을 실험의 디자인 행렬(design matrix)이라 일컫는다. 실험 조건 간 비교는 선형적인 대조 벡터(linear contrast vector)를 사용한다. 디자인 행렬의 열에는 실험 조건 뿐 아니라, 오류 시행 및 기타 통제하고자 하는 변인들을 추가로 삽입하였다. 본 연구에서는 두 개의 보기 D와 D'간의 단어 사용 빈도수 및

구체성의 차이를 비관심 변인(covariate of non-interest) 으로 디자인 행렬에 추가하였다. 비관심 변인으로 구성된 추가적인 열은 통계적 가설 검증의 대상이 되지 않는 그러한 변인으로 인한 자료의 분산(variance)을 다른 관심 변인의 효과와 섞이지 않도록(covary out) 하는 역할을 한다. 본 연구의 자료 분석에서 주된 목표는 부적 SFI 조건을 중립적, 정적 SFI 조건과 대조하였을 때 뇌 활동을 관찰하는 것이었으며 이러한 뇌 활동이 피험자의 유동 지능과 관련이 있는지를 알아보는 것이었다.

통계 분석의 첫 번째 단계는 FMRIB's Improved Linear Model(FILM)을 사용하여 각 피험자의 각 회귀(session) 별로 실험 조건 간 차이를 분석하는 것이었다. 두 번째 단계는 FMRIB's Local Analysis of Mixed Effects(FLAME) stage 1을 사용하여 각 피험자의 두 회귀의 자료를 통합하여 실험 조건 간 차이를 보는 것이었다. 세 번째 단계에서는 FLAME stage 1+2 (Beckmann, Jenkinson, & Smith, 2003; Woolrich et al., 2004)를 이용하여 모든 피험자의 자료를 하나의 집단으로 통합하였다. 이 세 번째 단계에서는 디자인 행렬에 각 피험자의 실험 조건 간 반응 시간의 차이를 비관심 공변인(covariate of non-interest)으로 삽입하고, 유동 지능 점수를 관심 변인으로 삽입하였다. 이는 유동 지능이 높은 피험자에게서 더 많은 뇌 활동의 변화가 일어난 영역이 어디인지를 검증하는 동시에 실험 조건 간의 반응 시간의 차이로 인한 효과를 배제하기 위함이다.

모든 단일 집단 T 검증 결과 얻은 T 값을 Z 값으로 변환한 후 가우시안 무선 장 이론

(Theory of Gaussian Random Fields, Worsley, 1992)에 입각하여 집락 형성 역치(cluster forming threshold) $Z > 2.3$ 와 집락 역치(cluster threshold) $p < 0.05$ 에 기반하여 통계적 유의미성을 검증하였다.

추가적으로, 기능성 자기 공명 영상 기기를 사용하여 측정된 뇌 활동에 대한 정확한 해석을 위해서는 뇌 활동의 기저선(baseline)을 기준(가상적인 0점)으로 하였을 때의 절대적인 활동 수준이 어떠한지를 확인해야 한다. 예를 들어, 실험 조건 A에서 실험 조건 B 보다 더 높은 뇌 활동이 관찰되었을 때 기저선을 고려한다면 세 가지의 경우가 발생할 수 있다(부록 II의 그림 2 A, B, C 참조). 실험 과제와 관련한 뇌 활동의 변화에 대한 해석은 그것이 기저선보다 높은 수준에서 일어난 변화인지 기저선보다 낮은 수준에서 일어난 뇌 활동인지에 따라 달라진다. 그 이유는 과제 수행 시에 기저선보다 낮은 수준의 뇌 활동이 관찰된 영역은 그 과제와 직접적으로 관계된 기능을 수행한다고 볼 수 없기 때문이다. 따라서 뇌 활동이 기저선을 기준으로 하여 절대적으로 높은 수치인지 낮은 수치인지에 대한 분석은 각 실험 조건의 뇌 활동에 대한 해석에 필수적이다. 따라서, 본 연구의 마지막 분석 단계에서는 추론 중 뇌 혈류 역동을 기저선과 비교하기 위해 모든 실험 조건을 시행 간 휴지 기간(inter-trial resting period)과 양방향으로 대조한 분석(추론 > 기저선, 기저선 > 추론)을 실시하였다.

결과 및 논의

실험 2의 참가자들에게서 수집한 추론의 정확도 및 반응시간에 대하여 변량 분석을 수행하고 개인의 유동 지능과 추론 수행과의 상관 관계를 검증하였다. 반응 시간의 경우에는 올바르게 푼 시행만을 선택하여 기하학적 평균을 사용하였다. 실험 2의 참가자들은 실험 1과 비교할 때 월등히 우수한 수행을 보였는데 이는 실험 2의 참가자들이 대부분 심리학 전공의 대학원생이었기 때문일 것으로 추측해 볼 수 있다.

정확도와 반응 시간 실험 2에서 관찰된 SFI에 따른 정확도와 반응 시간의 기하학적 평균은 표 3과 같다. 제시된 바와 같이 실험 1과 비교할 때 실험 2의 참가자들은 부적 SFI 조건에서 반응 시간이 200ms 이상 빨랐고 정확

표 3. SFI에 따른 정확도와 반응 시간의 기하학적 평균과 표준 오차

	정적 SFI	중립적 SFI	부적 SFI
반응 시간	3012 ± 170	2989 ± 188	2998 ± 174
정확도	.93 ± .01	.92 ± .01	.93 ± .01

주. 반응 시간의 단위: ms.

도도 .04 정도 높았다.

변량분석 결과. 반응시간과 정확도를 종속 변인으로 변량 분석을 통해 분석한 실험 조건의 주 효과는 모두 유의미하지 않았다($p > .1$). 우수한 지적 능력을 가진 실험 2의 피험자들은 부적 SFI 조건에서도 다른 조건과 다르지 않은 우수한 수행을 보였다.

유동 지능 실험 2에 참가한 실험자들의 유동 지능의 원점수는 그림 2에 제시되었다. 참가

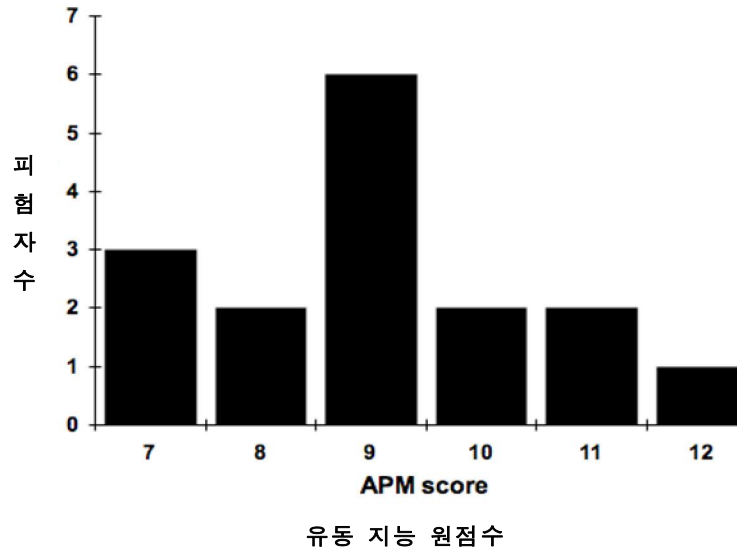


그림 2. 실험 2 참가자들의 유동 지능 측정 결과

자의 평균은 12점 만점에 9.06(표준 편차 1.4)로서 Arthur et al.(1999)에 보고된 일반 대학생의 평균인 7.7(표준편차 2.4) 보다 현저히 높았다.

유동 지능과 행동적 수행의 상관관계 유추 추론의 정확도는 유동 지능 검사 점수와 유의미한 상관관계(Pearson correlation, $r = .50, p < .05$)를 보였다. 이는 유동 지능과 유추 추론의 심리측정학적(psychometric) 연관성에 대한 기존 연구와 일치하는 결과이다(Snow et al., 1984).

뇌 영상 분석 결과

실험 조건 간 뇌 활동 수준 비교. SFI에 따른 실험 조건 간의 뇌 활동 수준의 차이를 알아보기 위하여 다음의 네 가지 대조 벡터, 1) 부적 SFI > 중립적, 정적 SFI, 2) 부적 SFI > 중립적 SFI, 3) 부적 SFI > 정적 SFI, 4) 중립적 SFI > 정적 SFI 를 사용하였다. 개인차를 고려하지 않고 모든 피험자를 하나의 집단으로 하여 평균 뇌 활동 수준을 분석한 결과 네 가지 분석 모두에서 유의미한 실험 조건 간 뇌 활동 수준의 차이가 관찰되지 않았다.

표 4. 실험 조건 간 비교 시, 그 활동 수준의 차이가 유동 지능과 정적 상관을 보인 뇌 영역

대조 벡터	뇌 영역	반구	최대 Z값	복셀의 수	국지 최대값 (Local Maxima)			BA*
					X	Y	Z	
부적 > 중립적, 정적 SFI	혀 이랑(Lingual gyrus)	우	3.31	1570	22	-72	-2	18
	조거 피질 내 영역 (Intracalcarine cortex)	좌, 우	3.29	1226	-2	-86	4	17
	전 대상피질/중전두이랑	좌, 우	3.24	1063	16	14	24	32
	전두극	좌, 우	3.15	692	0	60	16	10
	전 대상 피질	우	3.27	539	4	42	2	32
부적 > 중립적 SFI	외측 후두 피질	좌, 우	3.3	1527	24	-78	26	31
	뇌량(Corpus callosum)	좌, 우	3.14	869	10	-6	26	N/A**
	시상 / 중뇌	우	3.23	810	24	-20	-6	N/A
	전두극	우	3.3	574	38	60	14	10
부적 > 정적 SFI	중 전두 이랑	우	3.15	508	26	26	26	9
	대상 피질 주변 이랑 (Paracingulate gyrus)	좌, 우	3.31	693	6	48	28	9
	외측 후두 피질	좌	3.38	687	-26	-68	18	31, 18
	방추형 이랑(Fusiform gyrus)	우	3.21	488	24	-82	-8	18

주. *B.A는 Brodmann Area의 약자임. **N/A는 해당 없음 (Not Applicable)의 약자임. 위치는 MNI 좌표체계에 따라 제시됨. (단위: mm).

유동 지능과 뇌 활동 수준의 상관관계.
 유동 지능과 뇌 활동 수준이 정적 상관관계를 보인 뇌 영역들과 그 상관관계 계수를 표 3, 그림 3과 4에 제시하였다. 부적 SFI > 중립적, 정적 SFI의 대조 벡터를 이용한 통계 검증 결과, 양반구의 내측 전두극(medial frontal pole), 전 대상 피질(anterior cingulate cortices), 시각 피질(visual cortex), 우반구의 중 전두 이랑(middle frontal gyrus), 하 전두 이랑(inferior frontal gyrus), 중심 전 이랑(precentral gyrus), 상 전두 이랑(superior frontal gyrus), 시상(thalamus), 기저 핵(basal ganglia), 중뇌(midbrain)의 복측 피개 영역(ventral tegmental area, VTA)에서 뇌 활동 수준 증가가 유동 지능과 정적 상관을 보였다

(표 4; 그림 3A; 그림 4A). 부적 SFI > 중립적 SFI의 대조 벡터를 이용한 통계 검증 결과, 우반구의 내측 전두극(medial frontal pole), 상 전두 이랑(superior frontal gyrus), 시상(thalamus), 기저 핵(basal ganglia), 중뇌(midbrain), 양반구의 전 대상 피질(anterior cingulate cortices)과 시각 피질(visual cortices), 좌반구의 중 전두 이랑(middle frontal gyrus)에서 뇌 활동 수준 증가가 유동 지능과 정적 상관을 보였다(표 4; 그림 3B; 그림 4B). 부적 SFI > 정적 SFI의 대조 벡터를 이용한 통계 검증 결과, 양반구의 내측 전두극(medial frontal pole), 상 전두 이랑(superior frontal gyrus), 대상 피질 주변(paracingulate cortices), 시각 피질(visual cortex)에서 뇌 활동

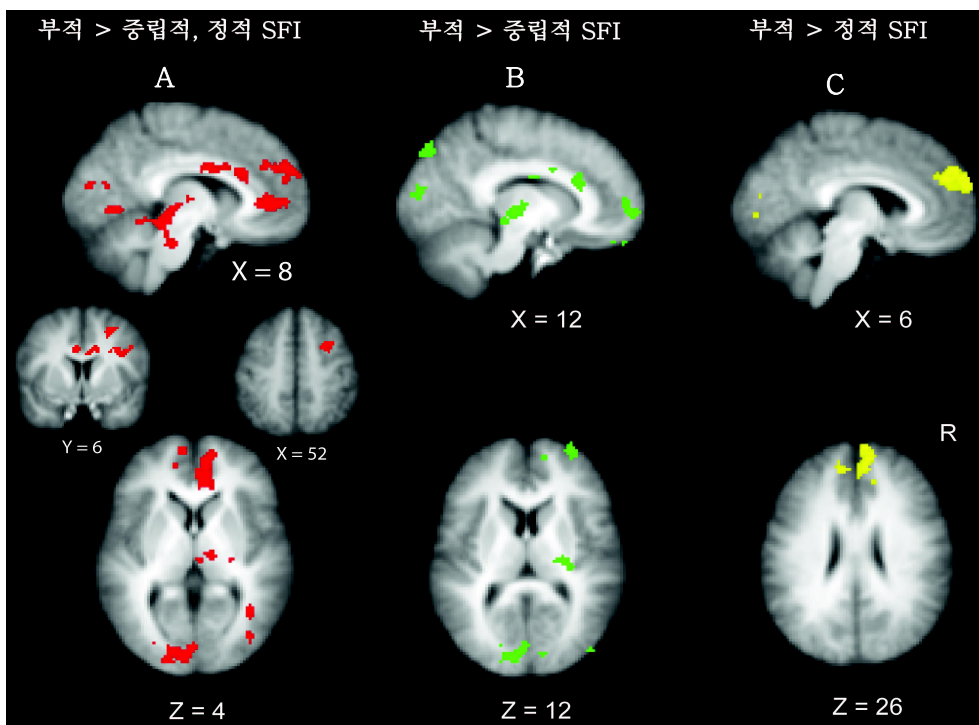


그림 3. 실험 2에서 활동 수준의 증가량이 유동 지능과 정적 상관 관계를 보인 뇌영역들. (A) 부적 > 중립적, 정적 SFI; (B) 부적 > 중립적 SFI; (C) 부적 > 정적 SFI; X, Y, Z 값은 MNI 좌표 체계를 따름.

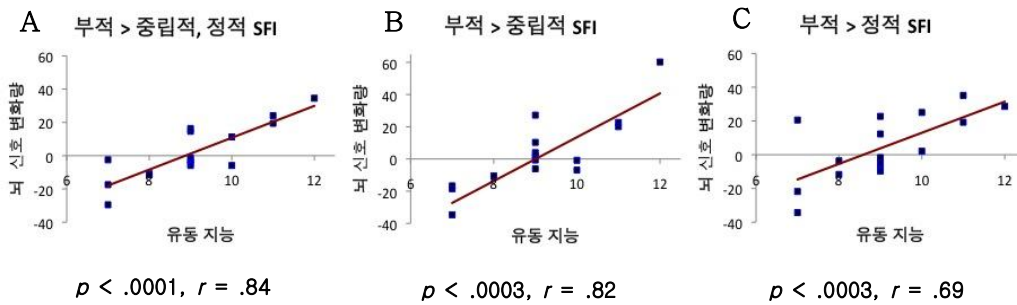


그림 4. 그림 3에 제시된 모든 뇌 영역의 평균적 뇌 신호 변화량과 유동 지능과의 상관 관계. (A) 부정 > 중립적, 정적 SFI; (B) 부정 > 중립적 SFI; (C) 부정 > 정적 SFI

수준 증가가 유동 지능과 정적 상관을 보였다 (표 4; 그림 3C; 그림 4C). (표 4에 제시된 영역 별 최대 Z 값이 뇌 활동의 증가량과 유동 지능 간의 상관관계의 정도를 나타낸다.)

중립적 SFI > 정적 SFI의 대조 벡터를 이용한 통계 검증 결과, 뇌 활동 수준 증가가 유동 지능과 정적 상관을 보인 영역을 관찰되지 않았다. 모든 대조 벡터를 사용한 통계 검증에서 유동 지능과 부정 상관을 보인 뇌 영역은 발견되지 않았다.

실험 조건과 기저선의 비교. 모든 실험 조건을 기저선과 대조하였을 때(모든 실험 조건 > 휴지기) 뇌 활동이 증가한 영역(task-induced activation)은 전전두엽, 전 대상 피질, 두정엽, 후두엽, 중뇌, 시상, 그리고 기저핵 등 피질 하(subcortical) 영역을 포함하였다(그림 5). 이 분석에서 유동 지능 점수를 공변수로 사용하였을 때 후두엽의 한 영역(복셀의 수 = 582; 최대 Z 값 = 3.65; 최대 값의 위치: X = 18, Y = - 58, Z = 30; MNI 좌표 체계)에서 뇌 활동 증가량과 유동 지능과의 정적 상관 관계가 있었다. 이 분석에서 유동

지능과 뇌 활동이 부정 상관관계를 보인 영역은 없었다. 휴지기를 실험 조건과 대조하였을 때(휴지기 > 모든 실험 조건) 뇌 활동이 증가한 영역(deactivation)은 양반구의 내측 전전두엽, 후 대상 피질, 췌기 앞 소엽(precuneus), 하측 두정엽 (inferior parietal lobe), 측두엽, 혀 이랑(lingual gyrus), 외측 후두 이랑(lateral occipital gyrus) 등을 포함하는 영역들이었다. 이 분석에서 유동 지능과 정적, 부정 상관관계를 보인 뇌 영역은 없었다.

그림 5에 나타난 바와 같이 추론을 할 때 인지 제어 작용과 관련하여 뇌 활동 증가량이 유동 지능과 정적 상관을 보인 영역(그림 5의 빨간색 영역)들은 내측 전전두엽을 제외하고는 실험 조건에서 기저선보다 뇌 활동이 증가한 영역(task-induced activation, 그림 5의 노란색 영역)에 속하였다. 이 결과는 유동 지능이 높은 피험자일수록 추론 시에 필요한 인지 제어 작용을 위해 우반구의 중 전두 이랑, 전 대상 피질, 후두엽, 시상, 중뇌 등의 영역을 더 많이 활용하는 것으로 해석할 수 있다. 한편, 내측 전두 피질은 실험 조건에서 기저선보다 뇌 활동이 감소(deactivate)한 영역에 속하였으므로

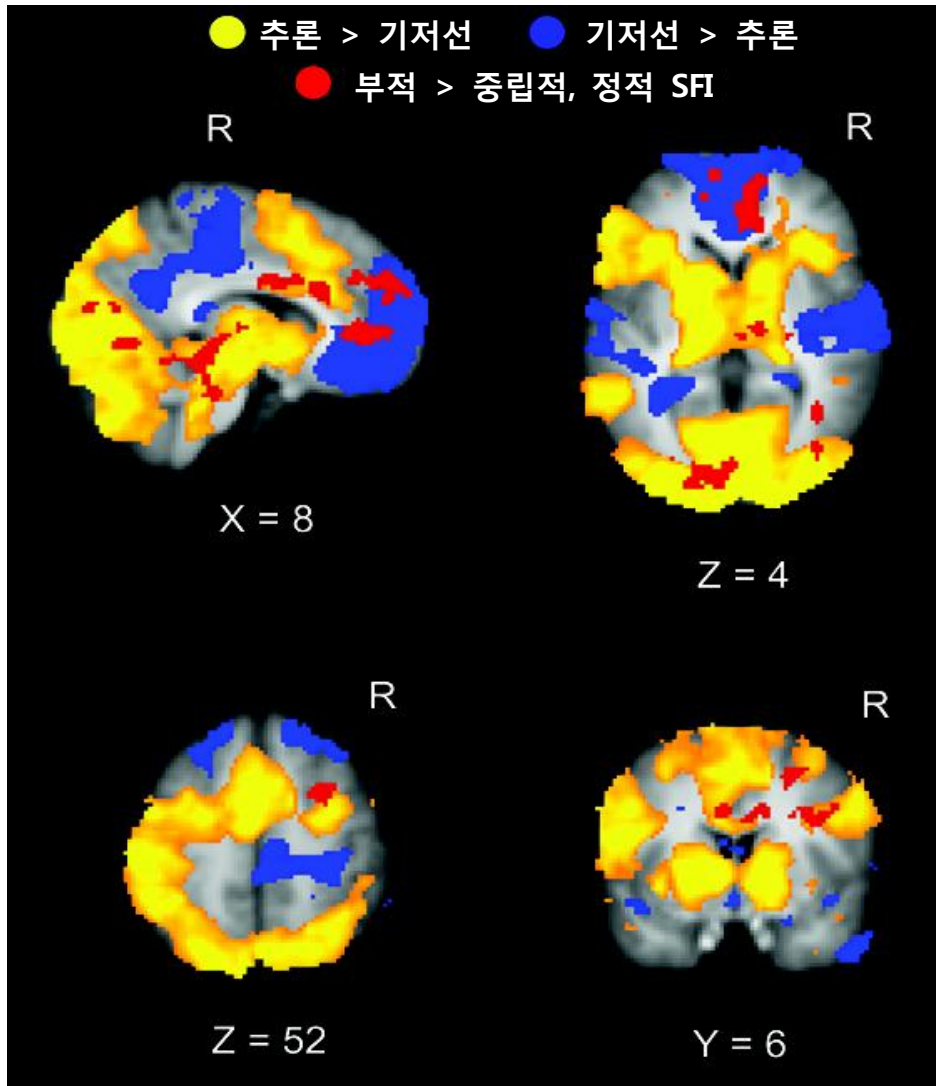


그림 5. 모든 실험 조건을 기저선과 대조 (추론 > 기저선, 기저선 > 추론) 하였을 때의 뇌 활동 (노란색, 파란색 표시 영역)과 그림 3에 제시된 유동 지능의 개인차와 정적 상관을 보인 인지 제어 기제 관련 영역의 비교. R은 우반구를 의미함. X, Y, Z 값은 MNI 좌표 체계를 따름.

그 기능이 추론 시 인지 제어와 직접적인 관련이 있다고 볼 수 없다. 이 영역은 뇌의 초기 상태에서 활동하는 뇌 영역에 속하므로 유동 지능이 높은 피험자의 경우, 인지 과제 수행 시에도 내측 전두 피질과 관련한 초기 모드의

뇌 활동이 어느 정도 지속되었음을 의미한다.

종합논의

본 연구는 유동 지능과 추론 시 인지 제어

작용의 뇌 활동 간의 관계를 기능적 자기 공명 영상을 통하여 알아보았다. 유동 지능의 척도로 Raven's Advanced Progressive Matrices를 사용하였으며 인지 제어 기제의 작용을 필요로 하는 유추 추론 문항을 개발하여 사용하였다. 시행 간 요구되는 인지 제어의 강도를 달리 하기 위해 단어 간 의미의 연합에 의한 간섭의 정도(SFI)를 세 단계로 조작하였다. 유추를 방해하는 간섭의 강도는 부적 SFI > 중립적 SFI > 정적 SFI 조건 순으로 높았다. 부적 SFI 조건에서는 단어 간 의미의 연합 관계가 오답을 지지하기 때문에 정답을 고르기 위해서는 의미에 의한 간섭 해결이 필요하였다. 중립적 SFI 조건에서는 단어 간의 의미의 연합 관계가 오답과 정답을 지지하는 정도가 비슷하여 의미에 의한 간섭을 크지 않았으나 오답을 무시하고 정답에 주의를 기울이기 위한 선택적 주의를 여전히 필요하였다. 정적 SFI 조건에서는 단어의 의미에 의한 연합 관계가 정답을 지지하여 의미에 의한 간섭이 없고 정답 선택이 수월하였다. 실험 1에서는 SFI 조작에 따른 실험 조건 간 행동적 수행의 변화를 확인할 수 있었다. 피험자들은 부적 SFI 조건에서 중립적, 정적 SFI 조건과 비교할 때 더 많은 오류를 범했으며 문제 풀이 시간도 길었다. 실험 2에서는 유추 추론 시 인지 제어 작용이 유발될 때 유동 지능이 높은 피험자들이 더 많이 활용하는 뇌 영역을 관찰하였다. 실험 2의 피험자들은 대부분 심리학 전공 대학원생들로서 유동 지능 점수가 매우 높았으며 부적 SFI 조건에서의 수행이 다른 실험 조건에서와 다르지 않았다(그림 2). 이는 유동 지능이 높은 사람은 인지 제어 기능이 우수하다

는 기존의 연구 결과들과 일치한다(Gray et al, 2003; Kane & Engle, 2002). 또한 모든 실험 조건에서 유추 추론 수행의 정확도가 유동 지능 점수와 정적 상관 관계가 있었는데, 이는 유동 지능과 유추 추론과의 심리측정학적(psychometric) 관계를 뒷받침하는 결과이다(Snow et al, 1984). 유동 지능이 높은 피험자들은 유추 추론 시 인지 제어가 강하게 요구되는 경우 양반구의 내측 전두극, 전 대상 피질, 시각 피질, 우반구의 중 전두 이랑, 하 전두 이랑, 중심-전 이랑, 상 전두 이랑, 시상, 기저핵, 중뇌의 복측 피개 영역에서 더 많은 뇌 혈류 수준 증가가 관찰되었다(표 3; 그림 3A; 그림 4A). 이는 유추 추론 중 간섭을 해결하기 위한 인지 제어 작용을 뒷받침하는 영역들이 기존 연구에서 작업 기억(working memory) 이나 주의 변경(attention shifting) 과제 중 인지 제어 작용이 유발될 때 관찰된 영역들과 공통된 영역이 존재함을 의미한다(Rowe et al. 2000; Shimamura, 2000; Thompson-Schill et al., 2002; Nelson et al., 2003; Nee, Wager, & Jonides, 2007). 이 공통 영역은 특히 외측 전전두엽과 전 대상 피질을 중심으로 한 신경망이라 할 수 있는데 본 연구에서는 이 영역들의 활동 수준이 유동 지능의 개인차에 따라 달라짐을 알 수 있었다. 특히, 개인차를 고려하지 않은 독립 1 집단 평균 T 검증에서는 실험 조건 간의 대조 분석 모두에서 유의미한 차이가 관찰되지 않았음을 고려할 때 유동 지능과 뇌 활동 수준의 높은 상관관계는 더욱 놀라운 결과라 할 수 있다. 이는 인지 제어 기제에 관한 신경 과학 실험에서 개인차를 고려하는 분석 방법의 중요성을 부각시킨다. 유동 지능과 부

적으로 상관관계를 보인 뇌 영역은 관찰되지 않았으며 실험 조건 간의 반응 시간의 차이와 관련된 뇌 영역 또한 발견되지 않았다.

인지 제어가 강하게 요구되는 유추 추론 시에 유동 지능이 높은 피험자들이 더 많이 사용한 뇌 영역들은(내측 전전두 피질 제외) 추론 시에 기저선 보다 뇌 활동 수준이 증가(task-induced activation, or “true” activation)하는 영역에 속하였다. 이 중 전 대상 피질은 고등 인지 기능 및 인지 제어, 오류 탐지 등 다양한 과제 수행 시에 그 활동이 증가하는 것으로 일관되게 보고되고 있다(Kroger et al., 2002; Knauff et al., 2002; Geake & Hansen, 2005; Lee et al., 2006; Fangmeier et al., 2006; Gray et al., 2003; Lee et al., 2006 Jung & Haier, 2007). 시각 피질 역시 많은 추론 연구에서 그 활동 증가가 일관되게 보고되고 있는데 시각적 자극을 사용하지 않은 언어적인 추론 과제 시에도 시각 피질의 활동이 증가하는 것으로 보아 추론 시에 시각적 심상이 사용되고 시각 피질로 주의가 주어지기 때문인 것으로 해석될 수 있다(Goel & Dolan, 2001; Luo et al., 2003; Knauff et al., 2002; Geake & Hansen, 2005; Wandell, 1999). 이 중 피질 하 영역인 중뇌의 복측 피개 영역과 기저핵 영역 역시 유동 지능이 높은 피험자들이 인지 제어 작용이 강하게 요구되는 추론 시에 더 많이 사용하는 영역에 속하였다. 이 영역들은 도파민이 관계된 인지 제어 기제의 구성 요소로서 활발하게 연구되고 있는데 이에 대한 논의는 아래의 “인지 제어의 도파민 가설” 단락에서 다루었다.

반면, 내측 전전두 피질은 추론 시에 뇌 활동이 기저선보다 낮아지는(deactivate) 영역에

속하였다(그림 5). 일반적으로 뇌가 휴지기일 때 그 활동이 더 높은 영역들을 휴지 상태 신경망(resting state network)이라 하는데 이에 대한 논의는 아래에 “내측 전전두 피질과 휴지 상태 신경망” 단락에서 다루었다.

일반 유동 지능(general fluid intelligence)의 뇌 기반(neural basis)

사람들 개개인의 여러 인지 기능 검사 점수는 높은 상관 관계를 가진다. 즉, 특정 검사에서 높은 점수를 받은 사람은 다른 여러 지능 검사에서도 역시 높은 점수가 나오게 마련이라고 한다. 반면에, 특정 인지 기능 검사에서 낮은 점수를 받은 사람은 다른 여러 검사를 수행하였을 때 역시 낮은 점수를 받게 마련이라고 한다. Spearman은 다양한 인지 기능 검사 점수가 서로 높은 상관관계를 가진다는 관찰에 입각하여 지능의 일반 요인(general factor of intelligence, *g* factor) 이론을 제안하였다(Spearman, 1904). 그의 이론에 따르면 지능의 *g* 요인은 다양한 범위의 지능적 활동에 공통적으로 기여하는 요소이다.

지능의 일반 요인이 특정 뇌 영역에 국재(localize)된 것인지 아니면 분산된 여러 뇌 영역들 간의 통합된 기능에 의존하는지에 대하여 신경 과학자들 간에 의견의 차이가 있었다. Duncan은 *g* 요인의 뇌 기반을 알아보기 위하여 양전자 방출 단층 촬영 기기(PET)를 이용하여 *g* 요인과의 상관관계가 높은 인지 과제와 낮은 인지 과제들을 수행할 때의 뇌의 활동을 비교하였다(Duncan et al, 2000). 이 연구에서 *g* 요인과의 상관관계가 높은 인지

과제를 수행할 때에만 외측 전전두엽(lateral prefrontal cortex)의 뇌 활동이 관찰되었다. 이와 같은 결과에 기초하여 던컨은 일반 지능(general intelligence)은 외측 전전두엽에 국재(localize)된 특수 기제(specialized mechanism)에 의해 구현된다고 주장하였다. 그러나 후속 연구들에서 지능의 기제가 외측 전전두엽에 국재되어 있다는 주장에 대해 의문을 제기하였다. 많은 연구들에서 지능의 g 요인이 크게 관계되는 복잡한 인지 과제(예를 들어, 추론, 체스, 수학 문제 해결 등) 수행 시에 잘 고안된 통제 과제와 비교하여 전 대상 피질, 전두엽, 두정엽 그리고 후두엽에 걸친 넓은 영역에서 뇌 활동이 증가하는 것으로 관찰되었다(Kroger et al., 2002; Knauff et al., 2002; Geake & Hansen, 2005; Lee et al., 2006; Fangmeier et al., 2006). Gray의 연구(2003)에서도 유동 지능이 비단 외측 전 전두 피질 뿐 아니라 더 넓은 영역에 걸친 신경망에 의존한다는 주장을 뒷받침하는 결과가 보고되었다. Gray의 연구에서는 3-백(3-back) 과제의 수행과 유동 지능 점수 간의 상관관계가 관찰되었는데 이 상관관계가 외측 전전두엽 뿐 아니라 두정엽의 뇌 활동 수준에 의해 매개된다는 결과가 나타났다. 이와 유사한 또 다른 연구에서도 두정엽의 활동 수준이 개인의 유동 지능과 상관관계가 있었다(Lee et al. 2006). Jung and Haier(2007)은 여러 구조적, 기능적 뇌 영상 연구를 종합하여 지능의 두정엽-전두엽 통합 이론을 제시하였다. 이 이론에 의하면, 지능은 중 전두 피질, 상하 두정엽, 측두엽, 후두엽 및 뇌 피질 간의 신경 연결 다발인 백색질(white matter)을 포함하는 분산된(distributed) 신경망에 기반한다. 최근 Glascher

와 동료들(2009; 2010)은 241명의 국소 뇌 손상 환자들의 뇌 손상 부위와 그들의 지능 지수와의 상관 관계를 분석하였는데 그 연구 결과 역시 일반적 지능이 전두극을 포함한 전두엽과 두정엽 그리고 뇌 수질을 포함하는 분산된 뇌 영역에 의존한다는 이론을 뒷받침한다. 최근의 연구들을 종합해 볼 때 우수한 지능은 비단 외측 전전두엽에 국한된 것이 아니라 뇌의 다양한 영역에 걸친 신경망에 기반한다고 보아야 할 것이다. 본 연구에서도 외측 전전두엽과 두정엽을 포함하는 다양한 뇌 영역에서 유동 지능과 정적 상관관계가 관찰되어 이 같은 가설을 지지한다(그림 3).

내측 전전두 피질(medial prefrontal cortex)과 휴지 상태 신경망(resting state network)

본 연구에서 내측 전두 피질의 활동 수준이 유동 지능과 정적 상관을 보였는데 이 영역은 다른 영역과는 달리 휴지 상태 신경망에 속하는 영역이었다(그림 5). 다시 말해 내 전전두 피질의 활동 수준은 유동 지능이 높을수록 기저선 아래로 저하 되는 정도가 작았다(less deactivation). 휴지 상태의 신경망은 인지 과제를 수행할 때보다 뇌의 휴지기에 그 활동 수준이 높은 신경망들을 총칭하는 용어인데, 내측 전두 피질은 이중 ‘초기 모드 신경망’(default mode network)에 속한다(Raichle et al., 2001; Gusnard et al., 2001a, 2001b). 초기 모드 신경망이란, 특별한 목적을 달성하기 위한 인지 과제가 주어지지 않았을 때, 자발적으로 활동하는 뇌 영역들의 연결망을 의미한다. 휴

지기 혹은 초기 모드에서 뇌가 어떠한 기능을 수행하는지에 대한 명확한 결론이 내려지지는 않았으나 연구자들은 휴지기에도 뇌가 아무것도 하지 않고 쉬는 것이 아니라 자발적으로 활동하고 있다고 주장한다. 초기 모드일 때 뇌는 자신의 과거, 현재, 미래와 관련된 생각(self-directed thought), 자유로운 공상(mind wandering), 일화적 기억 인출(episodic memory retrieval) 등과 관련한 정보처리를 한다고 보고되어 있다. 뇌가 인지 과제를 수행할 때에는 이 초기 상태에서 벗어나 주어진 목적을 달성하기 위한 뇌 영역들을 활성화시키는 반면, 초기 상태에서 활동하는 영역들은 활동 수준이 저하(deactivate) 된다. 이 때, 과제의 인지적 부하(cognitive load)가 적은 경우 초기 상태에서 활동하는 뇌 영역의 활동 수준이 크게 저하되지 않고 과제 수행 중에도 지속될 수 있다(Greicius and Menon, 2004). 마찬가지로, 해당 과제를 수행하는 피험자가 정보 처리 역량이 뛰어난 경우 혹은 해당 과제에 매우 능숙한 경우 이 피험자에게서는 다른 피험자에 비하여 과제 수행 중에 초기 모드 신경망의 활동 수준이 상대적으로 높게 유지(less deactivation) 될 수 있다.

몇몇 지능에 관한 선행 연구들에서 인지 제어의 뇌 기제와 관련하여 내측 전두 피질의 활동을 보고하였는데(Geake & Hansen, 2005; Schmithorst & Holland, 2006; Haier et al., 2003; Parsons & Osherson, 2001), 이러한 결과들에 대한 해석을 올바르게 하기 위해서는 단순히 이 영역이 인지 제어에 관여한다고 결론지을 것이 아니라, 초기 모드의 뇌 활동이 과제 수행 중에 지속되어 나타난 뇌 활동이 아닌지 확인

해 볼 필요가 있다. 내측 전두엽의 활동이 지능과 정적 상관관계가 있었다고 보고한 선행 연구들에서 사용된 인지 과제들 중 소리 내지 않고 동사를 산출하기(silent verb generation) 혹은 수동적으로 비디오 보기(passive video viewing) 등 인지적 부하가 적은 과제의 경우(Schmithorst & Holland, 2006; Haier et al., 2003)는 특히 과제 수행 중 초기 모드의 뇌 활동이 지속(sustained default mode activity)되어 내측 전두엽의 활동 수준이 기저선보다 덜 저하(less deactivation)된 것일 가능성이 높다.

인지 제어(cognitive control)의 도파민 가설(dopamine hypothesis)

본 연구에서 중뇌의 복측 피개 영역(ventral tegmental area)과 기저핵(basal ganglia)의 활동 수준의 증가량이 인지 제어가 필요한 유추 추론 시에 유동 지능과 정적 상관 관계가 있었다. 이들 영역 역시 휴지기와 비교하여 인지 과제 수행 시에 그 활동 수준이 증가하는 영역에 속하였다. 복측 피개 영역에는 신경 전달 물질의 한 종류인 도파민을 방출(release)하는 세포핵(dopaminergic nuclei) 들이 모여 있다. 따라서 본 연구 결과는 중뇌의 복측 피개 영역에 존재하는 도파민 세포핵들이 추론 시의 인지 제어 기능과 관련되며 지능이 높은 경우 도파민을 이용한 세포 간 정보 처리가 더욱 활발해짐을 의미한다. 기존 연구들을 통해 인지 제어를 포함한 상위 인지 기능에 도파민의 역할이 중요하며 복측 피개 영역이 전 전두엽과 양방향의 연결 관계를 가진다는 것이 알려져 있다(Pirot et al. 1992; Braver & Cohen,

2000). 또한 전전두엽과 기저핵의 세포들의 수상 돌기(dendrite)에는 도파민 수용체(receptor)가 많이 있으며 이 영역들의 활동이 작업 기억의 정보 유지, 불필요한 정보 여과 및 간섭 해결에 관여된다고 한다(McNab & Klingberg, 2008).

중뇌의 복측 피개 영역의 세포들은 중추 신경계 내의 도파민의 주요 공급원이며 이 영역의 활동이 기분, 보상 예측(reward prediction), 약물 중독, 스트레스 등과 밀접한 관계가 있다. Braver와 Cohen 및 동료들은 파킨슨 병 환자들의 도파민 수준 저하와 관련한 인지 기능 손상 및 도파민 관련 약물 투여로 인한 인지 기능의 변화를 관찰한 연구 등을 종합하여 도파민이 전전두엽에서 인지 제어 기능을 조절하는 기제로 작용한다는 이론을 제시하였다(Miller, 2000; Braver & Cohen, 2000; Miller & Cohen, 2001, Cohen, Braver & Brown, 2002; Montague, Hyman & Cohen, 2004; Braver, Gray & Burgess, 2007; McNab & Klingberg, 2008). Braver와 동료들의 이론(2007)에 따르면, 중뇌의 복측 피개 영역에서의 일시적인(phasic) 도파민 방출은 목적 달성에 도움이 되는(goal-relevant) 새로운 정보를 선택적으로 전전두엽으로 전달되도록 하는 동시에 간섭(interference)을 야기할 수 있는 불필요한 정보는 전전두엽으로 전달되지 않도록 하는 문지기 역할(gating mechanism)을 한다고 한다. 이 이론에 따르면, 많은 수의 뉴런들에 의한 동시적(synchronous) 도파민의 일시적 방출(phasic burst)은 전전두엽 뉴런들에 조절 반응(regulatory action)을 유발하여 목적 달성에 도움이 되는 새로운 정보를 선택적으로 받아들이고 이를 작업 기억 내에 유지할 수 있도록

한다. 이러한 도파민 방출이 없으면 유용한 새로운 정보가 전전두엽에 전달되지 못하며 작업 기억(working memory) 내의 정보가 지속적으로 유지되지 못하고 곧 소멸(decay)하게 된다. Braver와 동료들에 따르면 유동 지능이 높은 사람들은 수동적인 모드¹⁾(reactive mode)보다는 주도적 모드²⁾(proactive mode)의 인지 제어를 구사하며, 도파민의 일시적 방출은 주도적 모드의 인지 제어를 사용할 때의 정보 처리에 관여한다고 한다. 본 연구 결과에서 인지 제어 기능이 많이 요구되는 유추 추론 시에 지능이 높은 피험자들이 중뇌의 복측 피개 영역의 활동 수준이 높았음은 도파민이 인지 제어 기제의 주요 요소라는 기존 연구 결과들과 Braver의 이론을 뒷받침한다. McNab & Klingberg(2008)의 연구 결과를 토대로 하여 해석한 본 연구의 결과는, Braver의 이론에서 한 걸음 더 나아가, 중뇌로부터 공급되는 도파민이 전전두엽 뿐 아니라 기저핵에 있는 세포들의 활동을 조절하여 작업 기억 및 인지 제어 작용을 원활하게 할 것이라는 발전된 모델을 제시한다.

결론

본 연구에서는 인지 제어 기능을 필요로 하는 추론 시에 유동 지능의 개인차가 행동적

- 1) 수동적 모드는 인지 제어를 필요로 하는 사건에 대한 반응으로서 인지 제어 기제가 작용하는 체제를 말함.
- 2) 주도적 모드는 사건이 일어나기 전에 목표에 부합하는 정보에 선택적으로 주의를 기울이고 처리하는 편향(bias)에 의하여 인지 제어 기제가 미리 작용하는 체제를 말함.

수행과 뇌 활동 수준과 어떠한 관계가 있는지를 알아보았다. 유동 지능이 높은 피험자들은 외측 전두 피질, 전 대상 피질, 후두엽 및 중뇌의 복측 피개 영역, 기저핵 등 인지 제어 기능 관련 영역의 활동 수준이 높아졌으며 유동 지능이 상대적으로 낮은 피험자들에 비해 뇌의 초기 모드 신경망에 속하는 내측 전두엽 영역의 활동이 덜 저하(less deactivate)되었다. 기존의 이론과 연구 결과들을 토대로 할 때, 본 연구는 우수한 유동 지능을 반영하는 인지 제어의 뇌 기제가 일부 연구자들이 주장하듯 외측 전두엽에만 국한된 것이 아니라 전 대상 피질 및 시각 피질 그리고 피질 하 영역을 포함한 다양한 영역에 걸친 뇌 영역들이 유기적으로 함께 활동함에 있다는 것을 시사한다. 또한 본 연구의 실험 결과는 정보 처리 역량이 뛰어난 피험자의 경우 고등 인지 과제의 수행 시에도 뇌의 초기 모드 활동이 부분적으로 지속될 수 있다는 이론을 뒷받침한다.

참고문헌

- Arthur, W., Travis, C., Paul, D. S., & Sanchez-Ku, M. L. (1999). College-sample psychometric and normative data on a short form of the raven advanced progressive matrices test. *Journal of Psychoeducational Assessment*, **17**, 354-361.
- Atherton, M., Zhuang, J., Bart, W. M., Hu, X., & He, S. (2003). A functional MRI study of high-level cognition. I. The game of chess. *Cognitive Brain Research*, **16**: 26-31.
- Baddeley, A. D., & Hitch, G. J. (1974). Working Memory. In *The psychology of learning and motivation*. (Bower, G. A., ed.), pp.47-89, Academic Press: New York.
- Baddeley, A. D. (2000). The episodic buffer: a new component of working memory? *Trends in Cognitive Sciences*, **4**, 417-423.
- Baddeley, A. D. (2003). Working memory: looking back and looking forward. *Nature Reviews Neuroscience*, **4**, 829-839.
- Badre, D., Poldrack, R. A., Pare-Blagoev, E. J., Insler, R. Z., & Wagner, A. D. (2005). Dissociable controlled retrieval and generalized selection mechanisms in ventrolateral prefrontal cortex. *Neuron*, **47**: 907-918.
- Beckmann, C. F., Jenkinson, M., & Smith, S. M. (2003). General multilevel linear modeling for group analysis in FMRI. *Neuroimage*, **20**: 1052-1063.
- Beckmann, C. F., & Smith, S. M. (2004). Probabilistic independent component analysis for functional magnetic resonance imaging. *IEEE Trans on Medical Imaging*, **23**,137-152.
- Braver, T. S., & Cohen, J. D. (2000). On the control of control: the role of dopamine in regulating prefrontal function and working memory. In Monsell, S., Driver, J. (Eds.), *Attention and Performance XVIII*, (pp.713-737). Cambridge, MA: MIT Press.
- Braver, T. S., & Bongiolatti, S. R. (2002). The role of frontopolar cortex in subgoal processing during working memory. *Neuroimage*, **15**, 523-536.
- Braver, T. S., Gray, J. R., & Burgess, G. C.

- (2007). Explaining the many varieties of working memory variation: Dual mechanisms of cognitive control. In Conway, A., Jarrold, C., Kane, M., Miyake, A., Towse, J. (Eds.), *Variation in Working Memory*. Oxford University Press.
- Bunge, S. A., Wendelken, C., Badre, D., & Wagner, A. D. (2005). Analogical reasoning and prefrontal cortex: evidence for separable retrieval and integration mechanisms. *Cerebral Cortex*, **15**, 239-249.
- Cattell, R. B. (1963). Theory of fluid and crystallized intelligence: A critical experiment. *Journal of Educational Psychology*, **54**, 1-22.
- Chen, X., Zhang, D., Zhang, X., Li, Z., Meng, X., He, S., & Hu, X. (2003). A functional MRI study of high-level cognition. II. The game of GO. *Cognitive Brain Research*, **16**, 32-7.
- Cho, S., Holyoak, K. J., & Cannon, T. D. (2007a). Analogical reasoning in working memory: Resources shared among relational integration, interference resolution, and maintenance. *Memory & Cognition*, **35**, 1445-1455.
- Christoff, K., Prabhakaran, V., Dorfman, J., Zhao, Z., Kroger, J. K., Holyoak, K. J., & Gabrieli, J. D. (2001). Rostrolateral prefrontal cortex involvement in relational integration during reasoning. *Neuroimage*, **14**, 1136-1149.
- Cohen, J. D., Braver, T. S., Brown, J. W. (2002). Computational perspectives on dopamine function in prefrontal cortex. *Current Opinion in Neurobiology*, **12**, 223-229.
- Dale, A. M., 1998. Optimal experimental design for event-related fMRI. *Human Brain Mapping*, **8**, 109-114.
- 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**, 7514-7519.
- Duncan, J., Burgess, P., & Emslie, H. (1995). Fluid intelligence after frontal lobe lesions. *Neuropsychologia*, **33**, 261-268.
- Duncan, J., Seitz, R. J., Kolodny, J., Bor, D., Herzog, H., Ahmed, A., Newell, F. N., & Emslie, H. (2000). A neural basis for general intelligence. *Science*, **289**: 457-460.
- Fangmeier, T., Knaufl, M., Ruff, C. C., & Sloutsky, V. (2006). FMRI evidence for a three-stage model of deductive reasoning. *Journal of Cognitive Neuroscience*, **18**, 320-34.
- Gabrieli, J. D. E. (1996). Memory systems analyses of mnemonic disorders in aging and age related disease. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **93**, 13534-13540.
- Geake, J. G., & Hansen, P. C. (2005). Neural correlates of intelligence as revealed by fMRI of fluid analogies. *NeuroImage*, **26**, 555-564.
- Gläscher, J., Tranel, D., Paul, L. K., Rudrauf, D., Rorden, C., Hornaday, A., Grabowski, T., Damasio, H., and Adolphs, R. (2009). Lesion mapping of cognitive abilities linked to

- intelligence. *Neuron*, 61, 681-691.
- Gläscher, J., Rudrauf, D., Colom, R., Paul, L. K., Tranel, D., Damasio, H., and Adolphs, R. (2010). Distributed neural system for general intelligence revealed by lesion mapping. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 107, 4705 - 4709.
- Goel, V. & Dolan, R. J. (2003). Explaining modulation of reasoning by belief. *Cognition*, 87, B11-B22.
- Gray, J. R., Chabris, C. F., & Braver, T. (2003). Neural mechanisms of general fluid intelligence. *Nature Neuroscience*, 6, 316-22.
- Gray, J. R., & Thompson, P. M. (2004). Neurobiology of intelligence: why it matters. *Nature Reviews Neuroscience*, 5, 471-482.
- Green, A. E., Fugelsang, J. A., Kraemer, D. J., Shamosh, N. A., & Dunbar, K. N. (2006). Frontopolar cortex mediates abstract integration in analogy. *Brain Research*, 1096, 125-137.
- Greicius, M. D. & Menon, V. (2004). Default-mode activity during a passive sensory task: uncoupled from deactivation but impacting activation. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16, 1484-92.
- Gusnard, D. A., Akbudak, E., Shulman, G. L., & Raichle, M. E. (2001a). Medial prefrontal cortex and self-referential mental activity: relation to a default mode of brain function. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 98, 4259-4264.
- Gusnard, D. A., & Raichle, M. E. (2001b). Searching for a baseline: functional imaging and the resting human brain. *Nature Reviews Neuroscience*, 2, 685-694.
- Haier, R. J., White, N. S., & Alkire, M. T. (2003). Individual differences in general intelligence correlate with brain function during nonreasoning tasks. *Intelligence*, 31, 429-441.
- Halford, G. S., Wilson, W. H., & Phillips, S. (1998). Processing capacity defined by relational complexity: Implications for comparative, developmental, and cognitive psychology. *Behavioral and Brain Sciences*, 21, 803-865.
- Hummel, J. E., & Holyoak, K. J. (1997). Distributed representations of structure: A theory of analogical access and mapping. *Psychological Review*, 104, 427-466.
- Hummel, J. E. & Holyoak, K. J. (2003). A symbolic-connectionist theory of relational inference and generalization. *Psychological Review*, 110, 220-264.
- Holyoak, K. J. (2005). Analogy. In: Holyoak, K. J., Morrison, R. G. (Eds.), *The Cambridge Handbook of Thinking and Reasoning*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. pp.117-142.
- Jenkinson, M., Bannister, P. R., Brady, J. M., & Smith, S. M. (2002). Improved optimisation for the robust and accurate linear registration and motion correction of brain images. *NeuroImage*, 17, 825-841.
- Jonides, J., Smith, E. E., Marshuetz, C., Koeppe, R. A., & Reuter-Lorenz, P. A. (1998).

- Inhibition in verbal working memory revealed by brain activation. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, **95**, 8410-8413.
- Jonides, J., Marshuetz, C., Smith, E. E., Reuter-Lorenz, P. A., Koeppe, R. A., Hartley, A. (2000). Age differences in behavior and PET activation reveal differences in interference resolution in verbal working memory. *Journal of Cognitive Neuroscience*, **12**, 188-196.
- Jung, R. E., & Haier, R. J. (2007). The parieto-frontal integration theory of intelligence: Converging neuroimaging evidence. *Behavioral and Brain Sciences*, **30**, 135-154.
- Kane, M. J., & Engle, R. W. (2002). The role of prefrontal cortex in working memory capacity, executive attention, general fluid intelligence: An individual-differences perspective. *Psychonomic Bulletin & Review*, **9**, 637-671.
- Knauff, M., Mulack, T., Kassubek, J., Salih, H. R., & Greenlee, M. W. (2002). Spatial imagery in deductive reasoning: a functional MRI study. *Cognitive Brain Research*, **13**, 203-212.
- Knauff, M., Fangmeier, T., Ruff, C. C., & Johnson-Laird, P. N. (2003). Reasoning, models, and images: Behavioral measures and cortical and cortical activity. *Journal of Cognitive Neuroscience*, **15**, 559-573.
- Koehlin, E., Basso, G., Pietrini, P., Panzer, S., & Grafman, J. (1999). The role of the anterior prefrontal cortex in human cognition. *Nature*, **399**, 148-151.
- Konishi, S., Nakajima, K., Uchida, I., Sekihara, K., & Miyashita, Y. (1998). No-go dominant brain activity in human inferior prefrontal cortex revealed by functional magnetic resonance imaging. *European Journal of Neuroscience*, **10**, 1209-1213.
- Krawczyk, D. C., Morrison, R. G., Viskontas, I. V., Holyoak, K. J., Chow, T. W., Mendez, M., Miller, B. L., & Knowlton, B. J. (2008). Distraction during relational reasoning: The role of prefrontal cortex in interference control. *Neuropsychologia*, **46**, 2020-32.
- Kroger, J. K., Sabb, F. W., Fales, C. L., Bookheimer, S. Y., Cohen, M. S., & Holyoak, K. J. (2002). Recruitment of anterior dorsolateral prefrontal cortex in human reasoning: a parametric study of relational complexity. *Cerebral Cortex*, **12**, 477-485.
- Lee, K. H., Choi, Y. Y., Gray, J. R., Cho, S. H., Chae, J. H., Lee, S., & Kim, K. (2006). Neural correlates of superior intelligence: stronger recruitment of posterior parietal cortex. *Neuroimage*, **29**, 578-586.
- Luo, Q., Perry, C., Peng, D., Jin, Z., Xu, D., Ding, G., & Xu, S. (2003). The neural substrate of analogical reasoning: An fMRI study. *Cognitive Brain Research*, **17**, 527-534.
- McNab, F. & Klingberg, T. (2008). Prefrontal cortex and basal ganglia control access to working memory. *Nature Neuroscience*, **11**, 103-107.
- Milham, M. P., Banich, M. T., Webb, A., Barad,

- V., Cohen, N. J., Wszalek, T., & Kramer, A. F. (2001). The relative involvement of anterior cingulate and prefrontal cortex in attentional control depends on the nature of conflict. *Brain Research Cognitive Brain Research*, **12**, 467-473.
- Miller, E. K. (2000). The prefrontal cortex and cognitive control. *Nature Reviews Neuroscience*, **1**, 59-65.
- Miller, E. K., & Cohen, J. D. (2001). An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annual Review of Neuroscience*, **24**, 167-202.
- Montague, P. R., Hyman, S. E. & Cohen, J. D. (2004). Computational roles for dopamine in behavioural control. *Nature*, **431**, 760-767.
- Morrison, R. G., Holyoak, K. J., & Truong, B. (2001). Working-memory modularity in analogical reasoning. In J. D. Moore & K. Stenning (Eds.), *Proceedings of the Twenty-Third Annual Conference of the Cognitive Science Society*, (pp.663-668). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Morrison, R. G., Krawczyk, D. C., Holyoak, K. J., Hummel, J. E., Chow, T. W., Miller, B. L., & Knowlton, B. J. (2004). A neurocomputational model of analogical reasoning and its breakdown in frontotemporal lobar degeneration. *Journal of Cognitive Neuroscience*, **16**, 260-271.
- Nee, D. E., Wager, T. D., & Jonides, J. (2007). Interference resolution: Insights from a meta-analysis of neuroimaging tasks. *Cognitive, Affective, and Behavioral Neuroscience*, **7**, 1-17.
- Nelson, D. L., McEvoy, C. L., & Schreiber, T. A. (1998). The University of South Florida word association, rhyme, and word fragment norms. <http://www.usf.edu/FreeAssociation/>
- Nelson, J. K., Reuter-Lorenz, P. A., Sylvester, C. Y., Jonides, J., Smith, E. E. (2003). Dissociable Neural Mechanisms Underlying Response-Based and Familiarity-Based Conflict in Working Memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, **100**, 11171-11175.
- Nichols, T. E., & Holmes, A. P. (2002). Nonparametric permutation tests for functional neuroimaging: a primer with examples. *Hum Brain Mapping*, **15**, 1-25.
- Parsons, L., M., & Osherson, D. (2001). New evidence for distinct right and left brain systems for deductive versus probabilistic reasoning. *Cerebral Cortex*, **11**, 954-965.
- Pirot, S., Godbout, R., Mantz, J., Tassin, J. P., Glowinski, J., & Thierry, A. M. (1992). Inhibitory effects of ventral tegmental area stimulation on the activity of prefrontal cortical neurons: evidence for the involvement of both dopaminergic and gabaergic components. *Neuroscience*, **49**, 857-865.
- Prabhakaran, V., Smith, J. A., Desmond, J. E., Glover, G. H., & Gabrieli, J. D. (1997). Neural substrates of fluid reasoning: an fMRI study of neocortical activation during performance of the Raven's Progressive Matrices Test. *Cognitive Psychology*, **33**, 43-63.
- Raichle, M. E., MacLeod, A. M., Snyder, A. Z., Powers, W. J., Gusnard, D. A., & Shulman, G. L. (2001). A default mode of brain

- function. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, **98**, 676-682.
- Ramnani, N., & Owen, A. M. (2004). Anterior prefrontal cortex: insights into function from anatomy and neuroimaging. *Nature Reviews Neuroscience*, **5**, 184-194.
- Raven, J. C. (1938). *Progressive matrices: A perceptual test of intelligence*. London: H.K. Lewis.
- Richland, L. E., Morrison, R. G., & Holyoak, K. J. (2006). Children's development of analogical reasoning: insights from scene analogy problems. *Journal of Experimental Child Psychology*, **94**, 249-273.
- Rowe, J. B., Toni, I., Josephs, O., Frackowiak, R. S., & Passingham, R. E. (2000). The prefrontal cortex: response selection or maintenance within working memory? *Science*, **288**, 1656-1660.
- Salthouse, T. A. (1996). The processing-speed theory of adult age differences in cognition. *Psychological Review*, **103**, 403-428.
- Schmithorst, V. J., & S. K. Holland (2006). Functional MRI evidence for disparate developmental processes underlying intelligence in boys and girls. *Neuroimage* **31**, 1366-79.
- Shimamura, A. P. (2000). The role of the prefrontal cortex in dynamic filtering. *Psychobiology*, **28**, 207-218.
- Smith, S. M., Jenkinson, M., Woolrich, M. W., Beckmann, C. F., Behrens, T. E. J., Johansen-Berg, H., Bannister, P.R., De Luca, M., Drobnjak, I., Flitney, D. E., Niazy, R., Saunders, J., Vickers, J., Zhang, Y., De Stefano, N., Brady, J. M. & Matthews, P. M. (2004). Advances in functional and structural MR image analysis and implementation as FSL. *NeuroImage*, **23**(S1), 208-219, 2004.
- Snow, R. E., Kyllonen, P. C. & Marshalek, B. (1984). The topography of ability and learning correlations. In: Sternberg, R.J. (Ed), *Advances in the psychology of human intelligence*, Vol. 2 (pp.47-103). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Spearman, C. (1904). General intelligence, objectively determined and measured. *American Journal of Psychology*, **15**, 201-293.
- Sternberg, R. J. (1977). Intelligence, information processing, and analogical reasoning: The componential analysis of human abilities. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Sternberg, R. J. & Nigro, G. (1980). Developmental patterns in the solution of verbal analogies. *Child Development*, **51**, 27-38.
- Sternberg, S. (1969). The discovery of processing stages: Extensions of Donders' method. *Acta Psychologica*, **30**, 276-315.
- Talairach, J., & Tournoux, P. (1988). *Co-planar stereotaxic atlas of the human brain*. New York: Thieme.
- Thompson-Schill, S. L., Jonides, J., Marshuetz, C., Smith, E. E., D'Esposito, M., Kan, I. P., Knight, R. T., & Swick, D. (2002). Effects of frontal lobe damage on interference effects in working memory. *Cognitive Affective Behavioral Neuroscience*, **2**, 109-120.
- Viskontas, I. V., Morrison, R. G., Holyoak, K. J., Hummel, J. E., & Knowlton, B. J. (2004).

- Relational integration, inhibition and analogical reasoning in older adults. *Psychology and Aging*, **19**, 581-591.
- Wandell, B. A. (1999). Computational neuroimaging of human visual cortex. *Annual Review of Neuroscience*, **22**, 145-173.
- Wager, T. D., & Smith, E. E. (2003). Neuroimaging studies of working memory: a meta-analysis. *Cognitive Affective Behavioral Neuroscience*, **3**, 255-274.
- Wagner, A. D., Pare-Blagoev, E. J., Clark, J., & Poldrack, R. A. (2001). Recovering meaning: left prefrontal cortex guides controlled semantic retrieval. *Neuron*, **31**, 329-338.
- Waltz, J. A., Knowlton, B. J., Holyoak, K. J., Boone, K. B., Mishkin, F. S., de Menezes Santos, M., Thomas, C. R., & Miller, B. L. (1999). A system for relational reasoning in human prefrontal cortex. *Psychological Science*, **10**, 119-125.
- Wendelken, C., Nakhabenko, D., Donohue, S. E., Carter, C. S., & Bunge, S. A. (2008). Brain is to thought as stomach is to ???: Investigating the role of rostrolateral prefrontal cortex in relational reasoning. *Journal of Cognitive Neuroscience*, **20**, 682-693.
- Wharton, C. M., Grafman, J., Flitman, S. S., Hansen, E. K., Brauner, J., Marks, A., et al. (2000). Toward neuroanatomical models of analogy: a positron emission tomography of analogical mapping. *Cognitive Psychology*, **40**, 173-197.
- Woolrich, M. W., Behrens, T. E., Beckmann, C. F., Jenkinson, M., & Smith, S. M. (2004). Multilevel linear modelling for fMRI group analysis using Bayesian inference. *Neuroimage*, **21**, 1732-1747.
- Worsley, K. J., Evans, A. C., Marrett, S. & Neelin, P. (1992). A three-dimensional statistical analysis for CBF activation studies in human brain. *Journal of Cerebral Blood Flow and Metabolism*, **12**, 900-918.
- 박태진, 박선희, 김정희 (2008). 단어, 그림 및 추상패턴의 일화적 부호화 기전: event-related fMRI 연구. *한국심리학회지 인지 및 생물*, 20(3), 123~143.

1 차원고접수 : 2011. 8. 31

수정원고접수 : 2011. 9. 14

최종게재결정 : 2011. 9. 20

The Neural Mechanism of Cognitive Control as a Function of Individual Differences in Fluid Intelligence

Soo Hyun Cho

Choong-Ang University, Department of Psychology

The present study examined how individual differences in fluid intelligence modulates the neural mechanism of cognitive control during reasoning. A four term verbal analogical reasoning task was used with a variation in the degree to which cognitive control was needed to overcome interference from semantic relationships between words. During trials entailing strong cognitive interference, there was a stronger need for cognitive control. In Experiment 1, subjects made more errors and took longer to solve analogies when there was a greater need for cognitive control. In Experiment 2, functional magnetic resonance imaging was used to investigate the relationship between individual differences in fluid intelligence and the neural mechanism of cognitive control. Individuals with a higher fluid intelligence engaged bilateral anterior cingulate cortex, visual cortex, medial frontal pole, right lateral prefrontal cortex, basal ganglia and the ventral tegmental area of the midbrain to a greater extent when the need for cognitive control increased. These results indicate that fluid intelligence modulates the activity of the lateral prefrontal cortex, anterior cingulate cortex and the visual cortex which are commonly activated across various studies of cognitive control and reasoning and that individuals with higher fluid intelligence showed elevated activity levels in these regions. On the other hand, the medial prefrontal cortex which is one of the commonly deactivated regions of the brain showed less deactivation in individuals with higher fluid intelligence. This finding supports previous studies proposing that the default mode activity of the brain may be sustained during task performance in individuals with a high capacity for information processing.

Key words : fluid intelligence, fMRI, reasoning, individual differences, cognitive control

부록 I

실험 1과 2에 사용된 유추 추론 문항과 각 문항의 SFI. 문항의 제시 순서로 인한 오염 효과를 방지하기 위하여 순서를 무선적으로 변경한 두 개의 목록을 만들어 피험자의 반에게는 I 목록을 나머지 반에게는 II 목록을 제시하였다.

목록 I	A	B	C	D	D'	SFI
1	ENJOY	LIKE	FALL	SPRING	AUTUMN	Neg -0.282
2	FACULTY	PROFESSOR	FOREST	TREE	DENSE	Pos 0.615
3	TASTE	MOUTH	TOUCH	SENSES	HANDS	Neut -0.006
4	BREAD	FOOD	BLUE	COLOR	EYE	Neut -0.049
5	CITY	COUNTY	STATE	COUNTRY	HOME	Pos 0.152
6	DANGER	SAFETY	CRY	WEEP	LAUGH	Neut 0.058
7	SWIMMING	SPORT	GUN	SHOOT	WEAPON	Neg -0.217
8	BED	SLEEP	COUCH	POTATO	SIT	Neg -0.149
9	PAUSE	HALT	WAR	BATTLE	PEACE	Neg -0.26
10	UP	DOWN	POOR	RICH	WELFARE	Pos 0.496
11	SMOOTH	ROUGH	CRUEL	MEAN	KIND	Neg -0.399
12	RAPID	SWIFT	DOCTOR	NURSE	PHYSICIAN	Neg -0.339
13	POLISH	SHINE	BEGIN	START	END	Neg -0.146
14	ENGLISH	LANGUAGE	PUZZLE	GAME	PIECE	Neg -0.188
15	STRAIGHT	BENT	FIND	LOSE	SEARCH	Pos 0.378
16	REMAIN	STAY	SPEAK	YELL	TALK	Pos 0.59
17	UNDER	BENEATH	PAL	FRIEND	PEN	Pos 0.432
18	TAP	STRIKE	RECOMMEND	URGE	RESTAURANT	Neut 0
19	OVER	ABOVE	PANTS	CLOTHES	SLACKS	Neut -0.022
20	WILD	TAME	HARD	SOFT	SOLID	Pos 0.53
21	CEILING	FLOOR	FAR	AWAY	NEAR	Pos 0.421
22	SUCCEED	FAIL	REMEMBER	MEMORY	FORGET	Pos 0.341
23	PAY	EARN	DARK	LIGHT	NIGHT	Pos 0.217
24	BAKE	KITCHEN	BUY	STORE	SELL	Neg -0.333
25	ARTICLES	READ	TOYS	CHILDREN	PLAY	Neut -0.066
26	AFTERNOON	EVENING	LUNCH	BAG	DINNER	Pos 0.256
27	STORY	TELL	SONG	MUSIC	SING	Neut 0.082
28	DISCOVER	UNEARTH	DONKEY	MONKEY	ASS	Pos 0.52
29	JOB	CAREER	STREAM	RIVER	FLOW	Pos 0.295

30	CHISEL	CARVE	PAN	POT	COOK	Neg	-0.196
31	TRACTOR	FARM	SHIP	BOAT	OCEAN	Neg	-0.512
32	BRIGHT	SUN	WET	RAIN	DRY	Neg	-0.378
33	QUIET	LOUD	CATCH	THROW	BALL	Neut	0.007
34	MONTH	MAY	SEASON	CHANGE	WINTER	Neut	0.112
35	ALLOW	LET	CUDDLE	BOY	HOLD	Neut	0.028
36	INCH	FOOT	YARD	MILE	GRASS	Neg	-0.212
37	FOOLISH	WISE	EARLY	CLOCK	LATE	Pos	0.493
38	PEOPLE	MEALS	AUTOMOBILE	DRIVE	GAS	Neut	0
39	BACK	FRONT	FACT	POINT	FICTION	Pos	0.216
40	MOTOR	ENGINE	MIDDLE	CENTER	NAME	Neut	0.083
41	PRINCE	KING	PRINCESS	QUEEN	CASTLE	Neut	0.036
42	BICYCLE	RIDE	BASEBALL	HIT	BASKETBALL	Neut	-0.02
43	ARITHMETIC	SUBJECT	HAMMER	TOOL	NAIL	Neg	-0.761
44	SCHOOL	LEARN	MALL	SHOP	WINDOW	Neut	0.066
45	STRANGE	UNUSUAL	FEMALE	WOMAN	MALE	Neg	-0.482

목록 II	A	B	C	D	D'	SFI	
1	LIBERTY	FREEDOM	DEAL	AGREEMENT	CARDS	Neg	-0.233
2	OFTEN	SELDOM	EMPTY	FULL	JAR	Pos	0.584
3	FIRE	BURN	WIND	BLOW	BREEZE	Neut	0.047
4	SLY	FOX	SLOW	TURTLE	FAST	Neg	-0.412
5	LOVE	HATE	CALM	TRANQUIL	ANXIOUS	Neut	-0.032
6	DOOR	OPEN	STAIRS	CLIMB	STEPS	Neut	0.079
7	ONE	DOZEN	STUDENT	CLASS	TEACHER	Neg	-0.216
8	CERTAIN	SURE	SICK	ILL	FEVER	Pos	0.3389
9	GO	COME	INHALE	AIR	EXHALE	Pos	0.33
10	HUGE	TINY	CLEAN	DIRTY	MOP	Pos	0.513
11	TROUT	FISH	PIG	HOG	ANIMAL	Neg	-0.172
12	EGG	CHICKEN	SEED	WEED	BIRD	Neut	0
13	SOUND	HEAR	ROSE	FLOWER	SMELL	Neg	-0.329
14	PLATE	EAT	CUP	SAUCER	DRINK	Neg	-0.369
15	SLED	SNOW	CAR	AUTO	ROAD	Neg	-0.122
16	HIRE	DISMISS	BEST	GOOD	WORST	Pos	0.5
17	FIGHT	SOLDIER	HELP	POLICE	HURT	Neut	-0.027
18	ENTER	LEAVE	FLOAT	LOG	SINK	Pos	0.234

19	SOFA	FURNITURE	ORANGE	YELLOW	FRUIT	Pos	0.174
20	BROAD	NARROW	BLACK	EVIL	WHITE	Pos	0.543
21	PRAISE	DENOUNCE	GROW	GARDEN	SHRINK	Neut	0.039
22	CHUBBY	DUMPY	SLIM	SKINNY	FAT	Neg	-0.204
23	SPOIL	RUIN	FIX	MEND	BREAK	Neg	-0.297
24	PERHAPS	MAYBE	CHAIR	TABLE	SEAT	Neg	-0.205
25	CORN	VEGETABLE	DOLLAR	MONEY	GREEN	Pos	0.25
26	HIGHWAY	VAN	SKY	GROUND	PLANE	Neut	0
27	ASLEEP	AWAKE	LARGE	SMALL	BIG	Pos	0.417
28	PUPPY	DOG	CUB	BEAR	BABY	Pos	0.493
29	SLOWLY	QUICKLY	FEED	HORSE	STARVE	Neut	-0.02
30	OPERATE	MACHINE	ELECT	VOTE	CANDIDATE	Neg	-0.236
31	WRISTWATCH	TIME	NEWSPAPER	INFORMATION	INK	Neut	0.016
32	DEFRAUD	CHEAT	CHILD	ADULT	KID	Neut	0.01
33	EASY	SIMPLE	SHORE	SAND	BEACH	Pos	0.405
34	SILVER	METAL	FORK	SPOON	UTENSIL	Neg	-0.425
35	ACHE	INJURED	SMILE	FROWN	HAPPY	Neut	0.077
36	PART	PORTION	MOTHER	FATHER	MOM	Neg	-0.536
37	CRAWL	TODDLE	WALK	STOP	RUN	Pos	0.449
38	SPREAD	BUTTER	FASTEN	SEATBELT	TIGHT	Neut	0.11
39	RABBIT	MAMMAL	WEST	DIRECTION	NORTH	Neut	-0.007
40	WARM	HOT	COOL	HEAT	COLD	Neut	0.088
41	LITTLE	PETITE	WEAK	FRAIL	STRONG	Neg	-0.536
42	PAGES	BOOK	LETTERS	WORD	MAIL	Neut	-0.111
43	DIAMOND	GEM	PAINTING	ART	PICTURE	Pos	0.177
44	MERRY	GAY	INTELLIGENT	DUMB	SMART	Pos	0.674
45	STEAL	ROB	REAL	GENUINE	FAKE	Neg	-0.364

부록 II

그림 1. 시공간, 언어, 수리 영역에 걸친 여러 인지 능력 검사 상호 간의 상관 관계를 보여주는 다차원 척도화 결과. 정 중앙의 빨간 원 안에는 본 연구에서 지능 검사로 사용된 Raven's Progressive Matrices가 위치하여 가장 많은 지능 검사들과 보편적으로 가장 높은 상관 관계를 가지고 있음을 알 수 있다. 그 주변에 초록색 원으로 표시된 영역에 수리적 유추 검사, 기하학적 유추 검사, 언어적 유추 검사 등 다양한 유추 추론 검사들이 모여 있음을 알 수 있는데 이는 검사 문항의 구체적 내용과 영역을 초월하여 유추 추론 검사들이 서로 높은 상관 관계를 가짐을 알 수 있다. 중앙에 위치한 검사들이 검사의 내용을 초월하여 검사들 간의 상관 관계를 지니는 것과 대조적으로 가장 자리에 위치한 검사들의 경우, 검사의 내용을 중심으로 응집되고 있음을 알 수 있다(Snow et al., 1984).

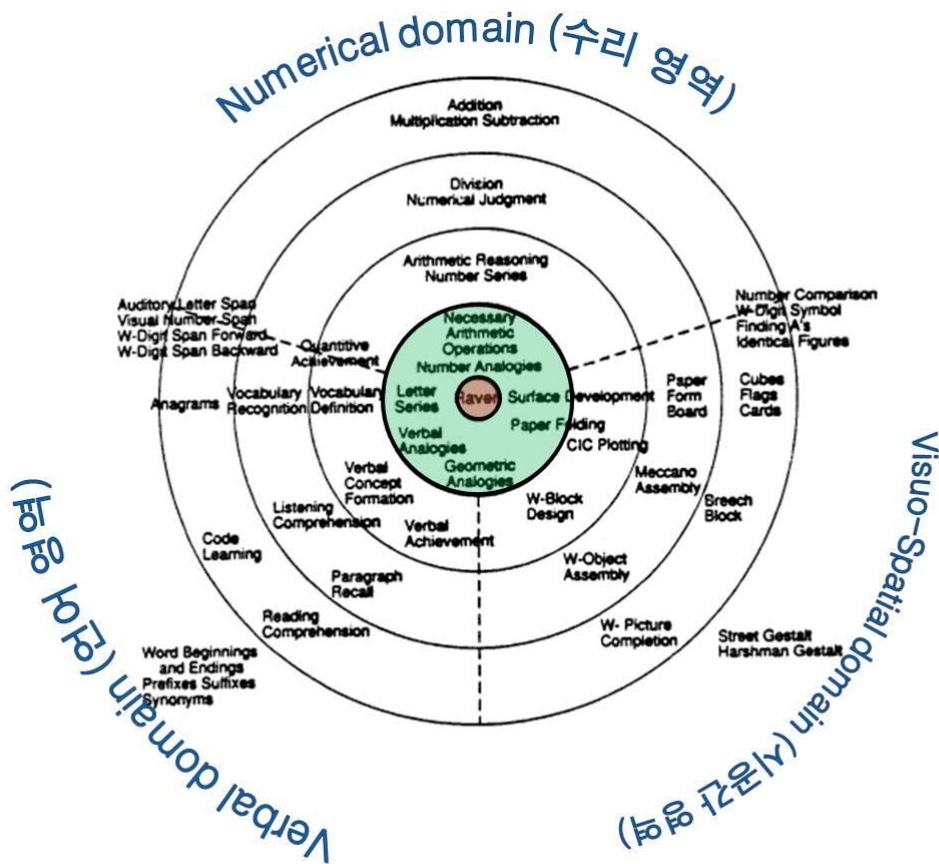


그림 2. 자기 공명 영상 기기로 측정된 실험 조건 간 뇌 활동 수준의 차이를 기저선과 비교하였을 때 가능한 세 가지 경우.

