

융합 사고와 화학문제풀이 과정에서의 두뇌 활성화 양상과 기능적 연결성

권승혁 · 오재영 · 이영지 · 엄중태 · 권용주*

한국교원대학교 생물교육과

(접수 2015. 11. 12; 게재확정 2016. 3. 16)

Brain Activation Pattern and Functional Connectivity during Convergence Thinking and Chemistry Problem Solving

Seung-Hyuk Kwon, Jae-Young Oh, Young-Ji Lee, Jeung-Tae Eom, and Yong-Ju Kwon*

Department of Biology Education, Korea National University of Education, Chungbuk 28173, Korea.

*E-mail: kwonju@gmail.com

(Received November 12, 2015; Accepted March 16, 2016)

요 약. 본 연구는 창의적 문제해결능력의 향상에 필수적인 융합 사고의 특성을 알아보기 위해 기능적 자기공명영상을 이용하여 창의적 문제해결에 기반한 융합 사고와 화학문제풀이를 하는 동안의 두뇌 활성화 영역과 기능적 연결성을 알아보았다. 이를 위하여 시각 기반의 융합 사고 유발 과제와 화학문제풀이 과제를 개발하고 고등학생 17명을 대상으로 적용하여 과제 수행 동안의 두뇌활성영상을 분석하였다. 연구 결과, 융합 사고 시에는 두뇌 좌측의 상전두이랑, 중전두이랑, 하전두이랑, 내측전두이랑, 전대상이랑, 췌기전소엽, 미상핵에서 두뇌 우측의 췌기소엽, 미상핵에서 활성이 나타났다. 화학 문제풀이에서는 두뇌 좌측의 중전두이랑, 내측전두이랑, 미상핵, 미상핵꼬리에서 두뇌 우측의 중전두이랑, 허이랑, 미상핵, 미상핵꼬리, 시상, 소뇌정상에서 활성이 나타났다. 기능적 연결성분석 결과 융합 사고 시에는 각 활성화 영역들이 모두 기능적 연결망을 형성하고 있는 것으로 나타났으며 이와 대조적으로 화학문제풀이 시에는 우측 중전두이랑, 좌우측미상핵꼬리, 소뇌정상만이 기능적 연결망을 형성한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 고등학생들이 융합 사고 시에 논리적 사고, 작업기억활성, 계획, 상상, 언어화, 학습동기 유발이 일어나며 이러한 기능들이 과제를 수행하는 동안 서로 밀접하게 동조하고 있음을 보여준다. 반면 화학문제풀이 시에는 논리적 사고와 계획, 비교, 학습동기유발의 기능들을 수행하지만 각영역들이 동시에 활발히 작용하지 못하는 것을 보여준다. 이러한 결과는 융합 사고에 대한 구체적인 정보를 제공할 수 있을 것이다.

주제어: 융합 사고, 두뇌 활성화 패턴, 기능적 연결성, 기능적 자기공명영상, 화학문제풀이

ABSTRACT. The purpose of this study was to investigate brain activation pattern and functional connectivity during convergence thinking based creative problem solving and chemistry problem solving to identify characteristic convergence thinking that is backbone of creative problem solving using functional magnetic resonance imaging(fMRI). A fMRI paradigm inducing convergence thinking and chemistry problem solving was developed and adjusted on 17 highschool students, and brain activation image during task was analyzed. According to the results, superior frontal gyrus, middle frontal gyrus, inferior frontal gyrus, medial frontal gyrus, cingulate gyrus, precuneus and caudate nucleus body in left hemisphere and cuneus and caudate nucleus body in right hemisphere were significantly activated during convergence thinking. The other hand, middle frontal gyrus, medial frontal gyrus and caudate nucleus in left hemisphere and middle frontal gyrus, lingual gyrus, caudate nucleus, thalamus and culmen of cerebellum in right hemisphere were significantly activated during chemistry problem solving. As results of analysis functional connectivity, all of areas activated during convergence thinking were functionally connected, whereas scanty connectivity of chemistry problem solving between right middle frontal gyrus, bilateral nucleus caudate tail and culmen. The results show that logical thinking, working memory, planning, imaging, language based thinking and learning motivation were induced during convergence thinking and these functions and regions were synchronized intimately. Whereas, logical thinking and inducing learning motivation functioning during chemistry problem solving were not synchronized. These results provide concrete information about convergence thinking.

Key words: Convergence thinking, Brain activation pattern, Functional connectivity, fMRI, Chemistry problem solving

서 론

21세기 지식기반 사회에서 현실에 직면하게 되는 문제들을 해결하기 위해서는 어느 한 영역에의 한정된 지식

이 아니라 다차원적인 지식이 요구되고, 다양한 교과들로부터 필요한 지식과 기능을 공급받아 교과들 사이의 연관성을 이해하며, 직접 적용해 볼 수 있는 기회를 충분히 가져야 한다.¹ 이에 국가적 차원에서도 2009 개정 교육과

정부에서 강조하기 시작한 융합 인재 교육(STEAM)을 통해 지식을 왜 배우고 어디에 사용하는지를 이해하여 학생들의 실생활 문제 해결 능력을 배양하는 목표를 설정하고 있다.

미국에서 시작된 STEM 교육은 양질의 이공계 인력의 확보 및 융합적 소양의 함양을 위해 기존의 수학과 과학 교육에 공학적 접근 방법 및 융합적 소양 증진 수업 전략을 중시하며, STEAM 교육은 이에 더하여 창의성과 혁신의 중요성을 내세우며 예술 또는 디자인을 강조하는 것으로 나타나고 있고, 우리나라의 융합인재교육은 양질의 이공계 인력 확보와 더불어 학생들의 수학 및 과학에 대한 태도 증진을 위해 창의적 설계와 감성적 체험을 중시하는 형태로 나타나고 있다.² 융합은 다양성을 전제하고 있으며 그것이 창의성을 발현해주는 기초이다.³

다양한 융합인재교육 프로그램과 수업 모형 등을 개발하여 적용한 문헌들을 살펴보면, 통합적이면서 유연한 사고로 문제에 접근하고 다양한 탐색 활동과 제작 활동을 통해 아이디어를 습득한 뒤 자신의 아이디어를 산출하도록 독려하여 창의적으로 문제를 해결하는 능력을 향상시킨 연구가 있다.⁴ 또한 여기서 더 나아가 융합인재교육 프로젝트 학습은 문제해결을 해 나가는 과정 속에 학생들이 새로운 문제해결방법을 생각하고 아이디어에 그친 이전 연구와 달리 이것을 실제 산출물로 구현하는 과정을 수행하여 창의적 문제해결력에 긍정적인 영향을 보고하고 있다.^{5,6}

그러나, 이러한 융합 사고향상을 위한 교육 프로그램들의 각 프로그램마다 적용하는 지식과 방법, 절차가 다르다. 이렇게 여러 형태의 프로그램은 교육 현장으로의 적용을 위한 선택권을 제공한다는 측면에서 장점이지만, 융합교육의 현장 적용의 실태에 대한 연구⁷에 따르면 쉽고 일관된 학습모형의 부재로 실제 적용은 활발히 이루어지지 못하고 있다. 따라서 기존 융합학습의 한계를 넘어서기 위해서는 융합학습 프로그램의 핵심인 융합 사고에 대한 체계적인 규명이 필수적일 것이다.

융합 사고에서 융합(Convergence)의 사전적 정의는 '둘 이상의 사물을 서로 섞거나 조화시켜 하나로 합함'이다.⁸ 이는 둘 이상의 대상이 합쳐진다는 의미에서 연합, 통합, 조합 등의 용어와 비슷하지만, 하나로 합쳐 전혀 새로운 것이 된다는 'Convergence'의 의미가 융합과 다른 용어를 구분하는 기준이 될 수 있다. 그리고 과학교육에서 융합 사고는 문제해결이라는 목표를 가지며 자연에 대한 지식을 대상으로 하고 있다.^{9,10} 그리고 융합 중심의 과학교육에서는 과학적 지식과 함께 공학적 지식을 적용하여 학습자가 실제 문제 해결을 경험해야 함을 강조하고 있다.^{11,12,13} 이상의 과학 및 과학교육에서의 융합 관련 연구들 종합해 볼 때, 융합 사고란 '문제해결을 위해 자연을 대상으로 과

학 및 공학지식을 탐구하고 통합하여 새로운 대안을 설계하고 실제로 구현하여 응용하는 정신활동'이라 할 수 있다.

융합 사고에 대한 구성 요소, 과정, 특성등에 대한 연구는 거의 찾아보기 힘들지만, 융합사고에 대한 권승혁 등의 연구¹⁴는 앞서 정리한 융합 사고 정의와 맥을 같이 하고 있다. 이 연구에서는 융합 사고의 실체를 규명하기 위해 새의 비행과 날름의 발명을 융합한 레오나르도 다 빈치의 노트에 기반하여 융합 사고의 과정을 제안하였다. 이 연구에서는 융합 사고의 과정을 '탐색 - 설계 - 구현'으로 제시하고 융합 사고는 과학과 공학 등 다양한 정보의 탐색과 독창적인 대안의 설계와 현실화가 연속적이며 반복적으로 진행되는 과정으로 밝히고 있다.

그러나 위 모형에서의 융합 사고는 레오나르도 다 빈치가 수행한 사고로서 실제 학생들이 어떠한 사고를 수행하는지에 대한 추정이 가능할 뿐 이를 그대로 학생들이 수행하는 사고의 과정으로 간주하는 데에는 무리가 있다. 서술, 그림, 언어적 보고와 같은 행동적 반응을 통한 사고의 확인은 실제 학생들이 사고하는 현상을 기술하는데 한계를 지니고 있다.^{15,16} 이에 기존의 방법의 한계를 넘기 위해 최근 기능성 자기 공명 영상(functional Magnetic Resonance Imaging, fMRI)과 같은 뇌과학적 접근을 통한 연구들이 수행되고 있다.

인간의 모든 사고와 행동을 결정하는 것은 바로 두뇌이다. 따라서, 최근 인지 활동 연구에 있어 fMRI와 같은 뇌기능 영상화 도구의 발달은 매우 유용하게 사용되고 있다. fMRI는 높은 시간 해상도와 공간 해상도를 가지고 있으며 인체에 무해한 장점을 지니고 있다. 무엇보다 fMRI에 기반한 두뇌 기능 분석을 통해 피험자가 특정 사고를 수행할 때 기능을 하는 두뇌 영역과, 영역들 간의 기능적 연결성을 규명할 수 있다. 이 정보를 토대로 피험자의 사고를 두뇌 수준에서 확인할 수 있기에¹⁷ 기존의 지필형태 측정의 제한점을 극복할 수 있다.

아직 융합 또는 STEAM을 대상으로 fMRI를 이용하여 연구한 사례는 전무하다. 하지만 과학교육분야에서 fMRI를 이용한 연구를 살펴보면 fMRI 연구 방법을 적용하여 과학 탐구 시의 두뇌 활성화와 학습 전후의 변화를 두뇌 수준에서 파악할 수 있고,¹⁸ fMRI를 이용하여 파악한 학습자의 특성을 토대로 수업 모형과 전략을 개발하고 그 효과를 확인할 수 있다.^{19,20} 따라서 fMRI를 통한 융합 사고의 두뇌 활성화 연구를 통하여 과학교육에서의 융합 사고력 증진을 위한 핵심적인 정보를 제공할 수 있을 것이다.

한편, 학생들이 이용하는 화학교과내용의 학습방법 중에는 강의와 문제풀이가 있다. 그런데 특히 이러한 문제풀이 위주의 학습은 교사들의 수업 방법이나 학생들의 학

습 활동 형태를 지식 전달과 암기 위주로 흐르게 한다.²¹ 평가를 위한 문제풀이시에는 학생들은 귀납, 귀추, 연역의 논리적 사고에 기초하여 문제와 관련된 개념을 떠올리고 다른 개념과의 관계를 파악하여 문제를 해결한다.^{22,23} 이와 같은 문제풀이과정은 교과 내용 중 생활 속에서 접하게 되는 다양한 지식 사이에서 관계를 찾아 주어진 해결한다는 측면에서 융합 사고 과정과 비슷하다. 하지만 다양한 분야의 지식을 대상으로 한다는 점, 그리고 창의적인 대안을 생성하고 이를 현실화한다는 점에서 융합 사고와 문제풀이 사고는 차이가 난다.

따라서, fMRI를 이용하여 융합 사고의 특징을 두뇌 수준에서 밝힌다면 학생들이 융합 관련 수업을 통해 경험하는 융합 사고의 효과를 확인할 수 있을 것이다. 더불어 현재 학생들이 학습에서 많이 수행하고 있는 화학 문제풀이 사고와 비교한다면 그 결과를 이용하여 문제풀이와 차이점을 명확히 하는 융합 사고 유발의 적절한 전략을 개발하여 학생들에게 올바른 교육 프로그램을 제공할 수 있을 것이다.

이에, 본 연구에서는 fMRI를 이용하여 융합 사고와 화학 문제 풀이 사고의 두뇌 활성을 규명하고, 융합 사고와 화학 문제 풀이 사고의 두뇌 기능적 연결성 차이를 규명하고자 한다.

연구 방법 및 절차

연구 대상

본 연구의 목적은 학생들이 주어진 문제 상황을 해결하기 위한 융합 사고 과정의 두뇌 활성화와 화학 문제를 해결 할 때의 인지적 사고를 비교하는 것이다. 이를 위해 연구 대상으로 중부권 소재의 C 고등학교 2학년 남학생 17명 (M=16.98, SD=0.33)을 표집하였다. 한편 오른손잡이인지 왼손잡이인지 또는 양손잡이인지에 따라 인지 활동과 두뇌 영역의 관계에서 편측성(Laterality)이 나타난다. 따라서 표집 과정에서 오른손잡이를 표집하였으며 이들을 대상으로 손우세성 검사(Edinburgh test)²⁴를 수행한 결과 모두 오른손잡이임을 확인하였다. 정신과 치료 병력, 폐쇄 공포증 여부, 약물 복용 여부, 체내 금속 물질의 삽입 여부 등을 조사한 결과 신경학적 이상없이 건강하였다. 또한 연구 기관 내 연구생명윤리위원회의 사전 심사 및 승인 받았으며 연구 대상 및 보호자는 연구자와 한국기초과학지원연구원 fMRI 연구팀에서 제시한 연구참여동의서에서 명하였다.

fMRI 측정 과제 개발

먼저 융합 사고의 유발 과제는 선행연구¹⁴에서 제시한

융합 사고 과정 모형의 ‘탐색-설계-구현’의 세 단계를 따라 수행하도록 하였다. 먼저 주어진 문제 상황을 예방하기 위한 탐색을 수행하고, 탐색한 결과와 일상생활 속 경험 그리고 화학교과의 지식을 활용하여 독창적인 창작물을 설계한다. 그리고 설계한 창작물을 구현하는 사고를 유발하는 융합 과제를 개발하였다. 과제는 과학교육학 박사학위를 소지한 전문가 2인이 생물 및 공통과학 전공의 현직 교사 2인과 함께 정기적인 세미나를 통해 4개 주제의 융합 사고 예비과제를 선정하였다. 각 주제는 ‘늑손 못’, ‘얼음이 녹아버린 물병’, ‘전기가 끊긴 냉장고’, ‘비린내가 심한 생선’이다.

‘늑손 못’주제에서는 상온에서 녹이 많이 쓴 못의 그림을 제시하였으며 ‘비린내가 심한 생선’주제에서는 생선을 들고 코를 막으며 인상을 쓰고 있는 사람의 사진을 제시하였다. 이 두 가지의 주제에서는 산화-환원 반응에 대한 지식을 토대로 공학 지식과 융합하여 독창적으로 문제를 해결하는 사고를 유발한다. ‘얼음이 녹아버린 물병’주제는 더운 날씨에 얼음에서 물로 녹아버린 물병을 들고 더워하는 그림을, ‘전기가 끊긴 냉장고’주제는 음식이 든 냉장고의 전원이 끊어진 그림을 제시하였다. 이 두 가지 주제에서는 물질의 상태변화에 대한 지식을 토대로 공학 지식과 융합하여 독창적으로 문제를 해결하는 사고를 유발한다.

실제 학생들의 문제풀이의 사고를 확인하기 위해서는 학생들에게 실제 현장에서 접하는 문제를 제시해야 하며, 그 문제가 학생 교육 수준에 적합하고 개념의 이해 확인 및 개념 사이의 관계 파악을 유도해야 한다.²⁵ 이에 학생들이 실제 학습 시 접하는 화학 문제를 선정하기 위해 표집된 피험자들의 학교에서 운영되고 있는 과학교육과정을 파악해본 결과, 고등학교 1학년때 과학 교과목의 이수를 확인하였다. 따라서 1학년 과학 교과목의 전과정이 출제 범위인 고등학교 2학년 3월 전국연합학력평가의 지난 3년간의 문항 중, 개념뿐 아니라 수리계산, 비교 등의 방식으로 개념 확인과 개념 사이의 관계파악을 모두 유발하는 8개의 화학 문제를 예비 과제로 결정하였다. 아울러 융합 사고와 문제풀이 사고의 수행이 서로 영향을 주지 않도록 서로 관련이 없는 교과내용을 선정하였다.

시각적 정보 형태만으로 제시되는 fMRI 내에서 적절한 시간과 난이도, 활발한 사고 유발의 수월성 등을 고려하여 본과제를 선정하였다. 실제 본과제를 선

정하기 위해 융합 사고 유발 과제들과 화학 문제풀이과제는 실제 MRI내에서 경험하게 되는 상황과 유사한 과제 제시 형태로 수정, 보완하여 중부권 소재 K고등학교 2학년 남학생 26명에게 예비투입하였다. 그리고 그 결과를 바탕으로 과학교육 전문가 2인과 현직교사 2인과 함께 fMRI의 최대 측정 시간인 30초보다 학생 수준에서 빠르게 해결할

Table 1. The result of pre-test for convergence thinking tasks

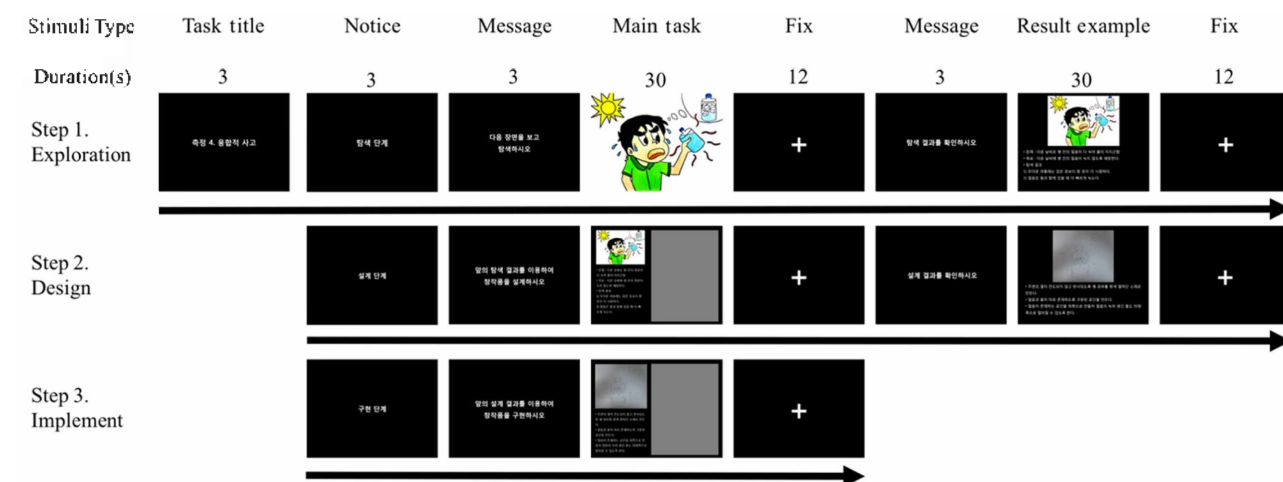
Task subject	Convergence thinking steps		
	Exploration	Design	Implement
Rusty nail	E	F	F
Thermos	E	E	E
Unplugged refrigerator	P	G	F
Remove fish smell	P	F	F

E: excellent, G: good, F: fair, P: poor

수 있는 문제나 너무 어려워 접근하기조차 힘든 문제는 제외하고 난이도가 적절한 1개 주제의 융합 사고 과제와 3개의 문제풀이과제를 선정하였다. 특히 융합 사고 유발 과제는 제한 시간동안 각 단계를 30초동안 진행한 후 5분 동안 시뮬 형태로 작성하게 하여 ‘탐색’, ‘설계’, ‘구현’의 모든 단계에서 사고가 일어나 유발될 수 있는지 점검하였다. 서술된 사고를 3명의 연구자가 검토 후 사고가 유발된 정도를 4단계로 평가하였다. 그 결과, 4가지 주제 중 융합 사고가 충분히 유발될 수 있는 ‘언어가 녹은 불병’ 주제를 선정하였다(Table 1).

선정된 피험자들 중에는 융합 사고에 익숙하지 않으며,

(A)



(B)



Figure 1. fMRI task paradigm for convergence thinking: (A) Procedure of fMRI stimuli, (B) Main task stimuli of step1. Exploration (left), step2. Design (center), step3. Implement (right).

fMRI 측정이 처음인 경우가 대부분이었다. 따라서 학생들이 MRI 내에서 충분히 활발한 사고를 할 수 있도록 예비과제를 제작하고 사전 교육 및 훈련을 실시하였다. 앞서 선정된 본 과제 외에 사고 유발이 두번째로 수월한 ‘녹은 물’ 주제를 이용하여 연습 과제를 제작하였다. 융합 사고의 과정은 학생들에게 익숙하지 않기 때문에 예비과제를 본 과제 투입 시간과 마찬가지로 3회 반복 투입하여 융합 사고의 유발에 익숙할 수 있도록 훈련하였다. 또한 본과제로 선정되지 않은 화학문제 5개 중 3개를 선정하여 앞서 선정된 융합 사고 예비과제와 함께 본 과제의 시간과 제시 방법이 동일한 형태로 변환하여 fMRI 연습용 과제를 제작하였다. 그리고 fMRI와 유사하게 제작된 연습용 장비(Mock-up) 내에서 fMRI 연습용 과제를 수행하는 방식으로 연습하여 피험자들에게 낯선 수 있는 측정 환경에 익숙하게 하고 제시되는 과제에서 유발되는 사고에 집중하도록 하였다.

fMRI 측정 과제 제시 과정

융합 사고와 문제풀이의 사고 시 유발되는 두뇌 활성 영역과 기능적 연결성을 분석하기 위해 과제 제시 방법으로는

블록 디자인(Blocked designs) 방법을 이용하여 fMRI 패러다임을 설계 하였다.²⁵ 먼저 융합 사고를 위한 과제는 Fig. 1(A)와 같이 총 6가지의 블록으로 이루어져 있다. 현재 과제를 알려주는 과제명(Task title) 블록, 현재 단계를 알려주는 알림(Notice) 블록, 수행해야 할 작업을 알려주는 시시문(Message) 블록, 융합 사고의 단계인 탐색, 설계, 구현의 사고를 수행하는 본과제(Main task) 블록, 기저상태(Fix) 블록 그리고 결과 예시(Result example) 블록이다.

fMRI 분석을 통해 1차적으로 나타나는 활성 정보는 의식적인 사고뿐 아니라 신체의 기본적인 생리적인 항상성을 조절하고 심장박동이나 호흡에 의한 혈액과 신체의 움직임도 포함된다. 따라서 기저상태 블록을 통해 과제와 관련된 생각을 하지 않고 시선을 화면 중앙의 십자표시에 고정시키는 기저상태(Baseline)의 활성을 측정하고 본과제 블록의 과제 수행상태에서 기저상태의 활성을 제거하는 인지적 감산방식을 적용하였다.

한편, 세 단계가 연속적으로 이루어지는 융합 사고의 과정이 정상적으로 원활히 진행되기 위해서는 각 단계의 사고가 어느정도 이루어져야 한다. 탐색 단계에서의 사고가 정상적으로 이루어져야 설계 단계를 진행할 수 있으며, 구현단계 또한 설계단계의 사고 결과에 기반한다. 측정 도중에 일정 수준 이상의 사고 진행 여부를 파악할 수 없는 측정 방법의 제한을 극복하기 위해 탐색과 설계 단계에서는 결과 예시 블록을 통해 예시결과를 30초간 참고하게 하여 다음 단계의 사고를 원활히 수행할 수 있도록 하였다. 그

리고 이 과정에서의 두뇌 활성은 분석에서 제외하였다.

피험자들은 본과제 블록에서 30초간 융합 사고를 수행하게 된다. 먼저 Fig. 1(B)의 원편에 나타난 탐색단계의 본과제에서는 더운 날 얼음이 남겨있던 불병 속의 얼음이 녹아서 물을 못 마시는 장면을 그림으로 묘사하였다. 이 상황을 제시하면 피험자들은 훈련받은 대로 문제를 파악하고 목표를 정하고 관련 화학 지식과 경험을 생각한다. 다음 Fig. 2(B)의 중앙에 있는 설계 과제는 자신의 생각과 앞서 안내한 탐색 단계의 결과 예시를 참고하여 얼음이 녹는 것을 예방할 수 있는 독창적인 불병을 고안한다. 이 과정에서 불병 제작의 조건을 정하고, 모양과 재료, 크기를 결정한다. 이 과정에서 불병의 구체적인 정보를 토대로 머릿속에서 이미지를 구성하게 되는데, 이 때 피험자의 시선이 제시된 글과 그림에 놓이게 되면 원활한 상상이 방해가 된다. 따라서 오른쪽에 회색 영역을 두어 이 영역에 시선을 두면서 고안한 불병을 이미지화 한다. 마지막으로 Fig. 1(B)의 오른쪽의 구현단계는 앞서 자신이 설계한 결과와 마찬가지로 제시되었던 설계 결과 예시를 참고하여 자신이 생각한 보냉병을 실제로 제작하고 사용하기 그 결과에 대한 상상과 함께 어떠한 기준으로 평가할 것인지 생각하게 된다.

화학 문제풀이를 위한 fMRI 과제는 이일선 등¹⁹의 연구에서 사용된 생명과학문제풀이 과제와 유사한 형식으로 수정 개발하였다(Fig. 2). 문제를 보고 답을 정한 다음, 버튼을 이용하여 답을 입력하고, 입력한 답이 맞는지 여부를 알려주는 과정으로서 총 6가지의 블록으로 이루어져 있

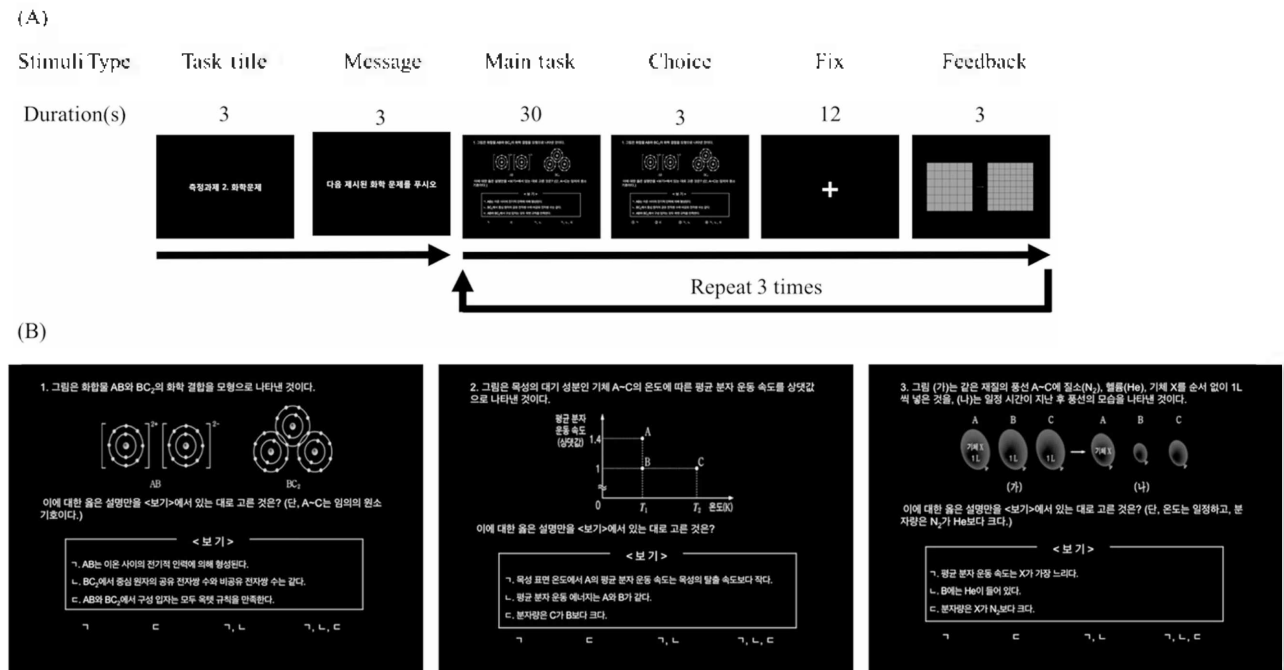


Figure 2. fMRI task paradigm for chemistry problem solving: (A) Procedure of fMRI stimuli, (B) Main task stimuli of 3 Problems.

다. 가능한 온전히 문제풀이만의 두뇌활성을 알아보기 위하여 문제를 풀고 답을 정하는 두뇌 활성과 1번부터 4번 사이에 정답에 해당하는 버튼을 누르는 두뇌 활성을 구분할 필요가 있다. 이에 본과제 장면에서는 문제가 제시 되는 형식은 일반적인 문제와 똑같지만 번호를 지워 버튼을 누를 수 없게 하였고, 선택(Choice) 블록에서 번호를 제시하여 3초 이내에 답을 선택하게 하였다. 실제 학생들이 화학 문제를 푸는 과정을 최대한 그대로 구현하기 위하여 위와 같이 정답을 선택하게 하였으며 피드백(Feedback) 블록에서 정답 여부를 확인하게 하였다. 격자의 간격이 좁아지면 정답으로 인식하고, 그렇지 않을 경우에는 오답으로 인식하게 사전에 안내를 하였다. 두뇌 활성에 기반한 학습동기관련 선행연구¹⁹⁾에 따르면 문제를 맞고 틀렸는지의 여부가 두뇌 활성에 영향을 미치므로 피험자에게 알려주지 않은 상태에서 모든 피험자가 동일한 피드백을 받도록 하였다. 피드백 후에는 다시 본과제 블록으로 돌아가 두번째 문제를 풀게 되며 이러한 과정을 총 3회 반복하게 하였다.

융합 사고 과제와 화학문제풀이 과제는 연속해서 진행되었으며 총 측정 소요 시간은 387초(129 scans)였다. 측정 후 신체 이상 여부 및 과제 진행 여부에 대한 면담을 수행하였고 이상 없음을 확인하였다. 또한 실제로 융합 사고를 수행하였는지와 문제를 풀었는지 확인하기 위해 fMRI 측정 과제를 다시 보여주고 종이에 사고의 내용을 서술하게 함으로써 수행한 사고를 확인하고, 문제 풀이 결과 또한 다시 보고하게 하였으며 측정에 참여한 17명 모두 안내한대로 융합 및 문제풀이 과제를 수행한 것으로 확인하였다.

fMRI 측정 자료 수집 및 결과 분석

fMRI 영상은 한국기초과학지원연구원 오창본원의 Human MRI 연구동에 설치되어 있는 3.0T MR scanner (Philips Achieva 3.0 TX)를 이용하여 측정하였다. 피험자가 장비 내에 위치 후 해부학적 영상을 촬영하고, 이어서 기능적 영상을 촬영하였다. 해부학적 영상은 MPRAGE 시퀀스를 이용하여 시상면(Sagittal)으로 촬영하였으며 전교련에서 후교련(AC-PC, Anterior Commissure-Posterior Commissure)에 평행하게 절편의 위치를 정한 후 아래에서부터 여섯번째 절편에 AC-PC평면을 통과하도록 절편의 위치를 설정하였다. 기능적 자기공명영상의 수집은 Gradient Echoplanar Imaging (EPI) 시퀀스를 사용하여 이루어졌다. 영상 범위(FOV)는 200 mm, 반복시간(TR)은 3,000 ms, 에코 시간(TE)은 35 ms, 영상 절편수 30장, 각 영상 절편 두께는 4 mm였다.

수집된 fMRI 영상 자료는 Matlab 2015 상에서 실행된 SPM12(<http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/>)의 분석 도구를 사

용하여 전처리와 후처리를 수행하였다. 전처리는 활성영상의 재배열(Realignment), 해부학적 영상과 활성영상의 상관정렬(Coregistration), 영상정보를 기반으로 두뇌의 각 구역을 구분하는 분절화(Segmentation), 집단 분석을 위한 동아시아인의 표준 뇌공간으로의 표준화(Normalization) 과정을 거쳐 각 피험자의 개별적 EPI영상을 표준MNI(Montreal Neurology Institute) 좌표로 변형하였다. 6 mm FWHM Gaussian kernel을 사용하여 공간적 편평화(Spatial smoothing)를 통해 신호 대 잡음비(Signal to noise ratio)를 높였다.

fMRI 패러다임에서 본과제 블록과 기저상태 블록에 해당하는 각 부피소의 활성 수치를 비교하여 일반 선행 모형(GLM)을 구성하여 각 피험자의 두뇌 활성을 확인하였다. 이와 같은 인지적 감산²⁶⁾을 통해 개인별 대조 영상(Contrast image)을 얻은 후 개인차를 무선 변수로 고려한 무선 효과 분석법을 적용한 집단 분석(Group level analysis)을 수행하였다. 또한 각 사고 과정의 두뇌 활성에서 나타나는 상대적 차이를 확인하기 위해 각 사고 과정의 평균 대조 영상을 이용하여 단일 표본 T검증을 통한 상호감산을 실시하였다. 유의수준 p값은 0.01로 적용하였으며, 범위역치(Extent threshold) 값은 5로 적용하였다. 이러한 과정으로 얻어진 두뇌 영역의 MNI 좌표를 기반으로 두뇌의 각 활성 부위를 산출하였다.

두뇌의 기능적 연결은 공간적으로 떨어진 신경 생리학적 사건들 사이의 시간적 상관으로 정의된다.²⁷⁾ 이를 위해 각 사고와 관련 있는 주요 활성 영역을 확인한 후 활성 영역의 시간에 따른 변화값을 추출하였다. 그리고 각 영역의 BOLD (Blood Oxygen Level Dependent)값 사이의 상관 분석을 통해 통계적으로 유의미하게 상관관계가 나타난 영역들과 그 사이의 연결을 융합 사고 그리고 화학문제풀이의 기능적 연결망으로 추출하여 각 과제에서의 지역간 연결성을 확인하였다.

연구 결과 및 논의

융합 사고 시의 두뇌 활성

융합 사고 시의 두뇌 활성을 확인하기 위해 융합 사고 과제 수행 시의 두뇌 활성과 휴식기의 두뇌 활성 사이에서 인지적 감산법을 수행하였다. 활성이 나타난 영역 중 활성의 유의수준이 $p < 0.01$ 이면서 5부피소(voxel, 1 voxel = 3 mm * 3 mm * 3mm) 이상인 영역을 추출하였다(Fig. 3). 그리고 활성 영역의 이름과 브로드만영역 번호, 좌우반구, 활성영역좌표, Z값을 제시하였다(Table 2).

분석 결과, 융합 사고 시 좌측 전두엽의 상전두이랑(Superior frontal gyrus), 중전두이랑(Middle frontal gyrus), 하전두이랑(Inferior frontal gyrus), 내측전두이랑(Medial frontal gyrus)

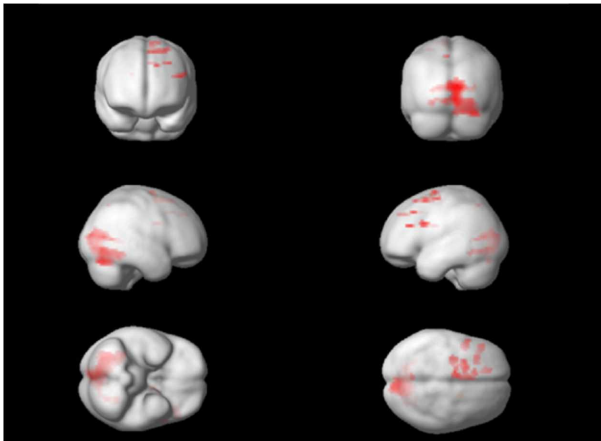


Figure 3. Brain activation pattern during convergence thinking.

Table 2. Brain activation regions during convergence thinking.

Regions	BA (L/R)	Coordinates			Z-value
Frontal lobe					
Superior frontal gyrus	6 L	-21	10	58	3.55
Middle frontal gyrus	6 L	-30	-8	61	3.54
Middle frontal gyrus	8 L	-30	25	43	3.67
Middle frontal gyrus	46 L	-45	31	25	2.92
Inferior frontal gyrus	44 L	-48	10	28	3.17
Medial frontal gyrus	8 L	-12	34	40	2.70
Parietal lobe					
Precuneus	7 L	-6	-65	52	2.93
Occipital lobe					
Cuneus	30 R	9	-71	10	5.64
Limbic lobe					
Anterior cingulate gyrus	32 L	-6	16	43	2.78
Sub-lobar					
Caudate body	-L	-12	-2	25	2.92
Caudate body	-R	18	4	28	2.69

에서 활성이 나타났다. 또한 좌측 두정엽의 뺨기전소엽(Precuneus)과, 우측 후두엽의 뺨기소엽(Cuneus), 변연엽의 전대상이랑(Anterior cingulate gyrus)에서도 활성이 나타났다. 대뇌의 피질하영역에서는 좌우측의 미상핵체(Caudate nucleus body)에서 활성이 나타났다.

상전두이랑과 중전두이랑, 내측전두이랑에 걸쳐 활성이 보고된 곳은 브로드만 6번 영역과 8번 영역으로 해당 영역은 전통적으로 전운동영역과 보조 운동영역인 것으로 알려져 있다. 그러나 연속적인 움직임과 그 계획에 기능을 수행하는 것으로 알려진 과거의 연구와 달리 최근에는 신체 움직임의 상상, 작업 기억, 의사 결정 등의 역할을 수행하는 것으로 밝혀졌다.²⁸⁻³¹ 특히 하노이의 탑 과제와 같은 문제 해결 과제 수행 시 그 수행 방법을 계획하는데 깊이 관여한다고 보고된다.^{31,32} 피험자들은 융합 사고 과제에서 분

제를 해결하는 과정을 상상하고 이를 해결하기 위한 아이디어를 구현하기 위해 직접 제작하고 사용하는 사고를 수행한다. 따라서 브로드만 6번과 8번 영역은 이에 융합 사고에서 목표에 도달하기 위한 계획 수립과 대안을 설계하고 이를 구현하는 사고에 중요한 역할을 수행한 것으로 볼 수 있다. 또한 이 두 영역은 각각 인역적 사고와 귀납적 사고에 깊이 관여하는 것으로 알려져 있다.³³⁻³⁵ 융합 사고 과제에서는 이 두 가지 사고가 끊임 없이 일어난다. 탐색과 실행단계에 걸쳐 주어진 정보와 경험에서 문제를 정리하고 조건을 설정하는 귀납적 사고와 알고 있는 지식과 정리된 문제에 대한 정보를 토대로 설정한 대안이 문제를 해결할 수 있는지 결과를 예상하는 연역적 사고를 수행한다. 상전두이랑과 중전두이랑에 걸친 활성은 융합 사고가 이러한 사고의 수행함을 뒷받침한다. 따라서 융합 사고 시에는 귀납적 사고와 인역적 사고에 기반하여 문제해결의 과정을 계획하고 상상하는 사고를 수행한다고 할 수 있다.

융합 사고 시 활성이 보고된 영역 중 중전두이랑의 브로드만 46번 영역은 배외측전두피질(Dorsal lateral prefrontal cortex)이다. 이 영역은 주의 집중과 작업 기억의 유지, 인지적 유연성에 핵심적인 역할을 하는 것으로 알려져 있다.^{30,36,37} 특히 단일한 대상이 아닌 복수의 정보들을 작업 기억 내에 유지하고, 이를 다루는데 중요한 역할을 하며 이러한 이유로 융합 사고 과제에서 과정의 전체적인 사고의 계획과 수행에 영향을 주었을 것이라 볼 수 있다. 또한 해당 영역은 사회적 인식에 중요한 역할을 하는데, 자신 또는 다른 사람들과 관련되어 주어진 상황에서의 의도와 목적 등을 추론하는데 중요한 역할을 한다.^{38,39} 융합 사고의 과정 중 특히 문제를 이해하고 공감하며, 주어진 조건에서 적절한 대안을 마련하고, 대안의 효과를 평가하는데 핵심적인 탐색 단계에서 배외측전두피질이 중요하게 작용했을 것으로 추론할 수 있다. 따라서 융합 사고에서는 다양한 개념들을 유지하고 처리하기 문제 상황에서 의도와 목적을 추론하는 사고가 수행된다고 할 수 있다.

하전두이랑은 언어관련 기능을 수행하는 것으로 알려진 브로카 영역(Broca's area)이 위치한 영역이다. 자신의 생각을 유창하게 언어화하는 기능을 수행하는 곳으로 이 부분의 활성은 융합 사고가 내적으로 언어화되어 수행되었음을 뜻한다. 더불어 해당 영역은 최근 연구들에서 새로운 아이디어를 생각해내거나, 일상적으로 이용하는 사물의 기발한 용도를 생각해내는 창의성 및 발산적 사고를 수행한 때 핵심적으로 활성이 나타나는 영역이기도 하다.⁴⁰ 따라서 본 영역의 활성 결과를 통해 융합 사고 시는 내적 언어로서 진행되며 창의적이고 발산적인 사고의 수행이 일어났다고 볼 수 있다.

후두엽에서 보고된 활성화는 췌기소엽과 췌기전소엽으로 췌기소엽은 양반으로부터 투사되는 시각 정보의 처리에 기여하며 이에 시각정보처리를 위한 작업기억에 기여한다.³⁹ 그리고 췌기전소엽은 췌기소엽으로부터 정보를 전달받아 심상회전, 시각적 패턴처리, 시각 정보의 논리적 처리 등 시공간적(Visuospatial) 정보의 처리를 담당한다.^{11,12} 더불어서 운동의 상상, 안구 운동, 단어나 문장의 이해, 그리고 목표지향적인 집행기능에 연관되어 있다.³¹ 따라서 췌기소엽과 췌기전소엽은 시각적으로 제시되는 융합 사고의 과제 수행 시, 안구 운동 및 시각 정보의 처리를 통해 외부의 정보를 처리하는데 중요한 역할을 담당한다. 또한 문제 상황과 복표를 시각적으로 사고하고, 설계 과정에서 창작물의 고안 과정을 심상화하고, 실제 구현하는 과정을 예상하는 장면에 기반한 융합 사고 전면에 중요한 역할을 한 것으로 보인다.

전대상어량은 전통적으로 인지활동이나 운동의 '억제'에 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다.⁴³ 하지만 최근 연구들은 인화적 기억,⁴⁴ 미래계획기억^{45,46}에 중요한 역할을 하며, 이와 같은 맥락에서 주의 조절에도 중요한 역할을 하고 있다. 또한 귀납적, 연역적 사고에서도 활성이 보고되고 있다.^{31,35} 융합 사고 과정은 과제 수행 동안 끊임 없이 피험자의 과학적, 공학적 지식으로부터의 인출을 수행하며 과거의 경험을 회상케 한다. 그리고 이 과정에서 화면에 제시되는 정보와 사신의 작업 기억 사이에서 주의 전환을 반복한다. 이러한 과정에서 전대상어량이 중요한 역할을 하는 것으로 보여진다.

피질하영역에서 활성이 보고된 시상핵체는 인접한 조가비핵(Putamen)과 더불어서 도파민 수용체가 많은 조직이며 장기기억의 형성과 관련된 해마와 직접적인 연결로 학습동기형성에 중요한 역할을 한다.¹⁹ 따라서 시상핵체의 높은 활성으로 미루어 보아 융합 사고의 수행 과정에서 학습동기가 유발되고 있으며 이는 과제 수행과 관련된 기억의 형성에 영향을 줄 수 있을 것이다.

화학 문제풀이 시의 두뇌 활성

화학 문제풀이 시 두뇌 활성을 분석한 결과 전두엽에서는 좌측 중전두이랑과 내측전두이랑, 우측 중전두이랑에서 활성이 나타났다. 후두엽에서는 우측 히어랑(Lingual gyrus), 피질하 영역에서는 좌우측 시상핵체와 시상핵꼬리(Caudate tail), 우측 시상(Thalamus)에서 그리고 소뇌 우반구 앞쪽의 소뇌 정상(Culmen)에서 활성이 나타났다(Fig. 4, Table 3).

화학 문제풀이 시에도 융합 사고 시의 두뇌 활성과 마찬가지로 중전두이랑과 내측전두이랑에서 활성이 나타났다. 앞서 서술한대로 이 두 영역은 일련의 계획, 연역적 사고에 핵심적인 역할을 수행한다. 화학 문제풀이는 문제와

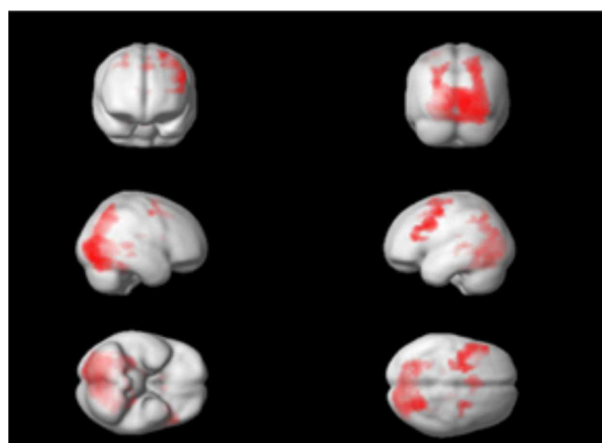


Figure 4. Brain activation pattern during chemistry problem solving.

Table 3. Brain activation regions during chemistry problem solving

Regions	BA (L/R)	Coordinates			Z-value
Frontal lobe					
Middle frontal gyrus	6 L	-39	-5	52	4.73
Middle frontal gyrus	6 R	27	-2	49	3.90
Medial frontal gyrus	6 L	-3	13	49	4.53
Occipital lobe					
Lingual gyrus	18 R	12	-74	-8	6.01
Sub-lobar					
Caudate body	L	-6	10	13	3.22
Caudate body	R	9	10	13	2.96
Caudate tail	L	-27	-35	7	5.29
Caudate tail	L	-18	-32	19	3.50
Caudate tail	R	30	-35	7	5.30
Thalamus	R	15	-17	19	3.00
Cerebellum					
Culmen	R	6	-38	-29	2.96

보기에 제시된 글과 그림의 정보를 토대로 이를 기준에 알고 있는 지식과 비교하여 참인 선인적 지식을 도출하는 연역적 사고가 일어난다. 그리고 이러한 일련의 사고의 절차가 계획된다. 따라서 중전두이랑과 내측 전두이랑의 활성은 문제 풀이 시 진행되는 논리적 사고와 문제 풀이의 계획이 수행됨을 뒷받침한다. 선행 연구⁴⁶에 따르면 우측 중전두이랑은 앞서 서술한 기능 외에 두 가지의 그림과 패턴의 차이를 파악하여 동일여부를 확인하는 그림변별 과제(Same-different discrimination) 수행 시 높은 활성이 나타난다고 한다. 화학 문제풀이의 경우 문제에서 제시되는 복수의 화학결합모형 그림 간의 관계 파악, 기체 분자의 운동 속도를 표시하기 위한 풍선 그림 간의 관계 파악이 이루어진다. 우측 중전두이랑의 활성은 문제풀이 시 문제 정보 파악을 위한 그림의 비교에 기여했음을 알 수 있다.

피질하영역에서는 융합 사고 시의 결과와 마찬가지로 미상핵체의 활성이 나타났다. 그리고 추가로 미상핵꼬리와 시상의 활성이 나타났다. 미상핵꼬리는 미상핵체와 마찬가지로 도파민 기반의 동기보상반응에 핵심 영역이다. 시상은 각종 정보가 감각기관에서 두뇌의 피질과 피질하영역 사이에서 교환될 때 거치는 영역으로 각성 상태와 관련이 높으며, 해마와 기능적으로 연결되어 기억 형성에 기여한다.⁴⁷ 앞의 융합 사고의 분석 결과와 달리 화학문제풀이 과제에서는 단어의 시각적 인식에 관여하는 해이랑에서 유의미한 활성이 나타났으며 췌기소엽과 췌기전소엽의 활성은 나타나지 않았다. 시각적 심상화나 목표지향적인 시각정보의 처리보다는 단어에 기반한 의미 처리가 활발히 이루어졌을 뜻한다. 따라서 미상핵체와 미상핵꼬리, 해이랑의 유의미한 활성은 화학 문제풀이 시에는 단어 중심의 시각적 형태로 유입된 과제 정보가 두뇌의 여러 피질과 피질하영역들을 가치며 교환이 이루어졌으며, 이 과정에서 문제풀이 활동을 통해 융합 사고와 마찬가지로 학습동기 유발이 이루어졌음을 뜻한다고 볼 수 있다.

활성이 보고된 우측 소뇌의 소뇌정상에 대해 알려진 바는 거의 없다. 일반적으로 소뇌는 세밀한 운동이나 안구 운동을 통제한다고 알려져 있다. 하지만 한 연구⁴⁸에서 소뇌정상은 손가락 운동과 문자의 개수를 세는 이중 과제 수행 시에 유의미한 활성이 나타나며, 기존에 알려진 것과

달리 운동 뿐만 아니라 작업기억과 집행 기능, 언어 등 고차원적인 능력의 발현에 역할을 한다고 제안되고 있다.⁴⁹ 따라서 제시된 문제의 언어적 해석과 처리의 과정에서 소뇌정상이 그 기능을 수행한 것으로 볼 수 있다.

융합 사고와 화학 문제풀이의 기능적 연결성

화학지식에 기반한 융합 사고의 두뇌 활성 영역들과 화학 문제풀이의 두뇌 활성영역들을 대상으로 혈액의 산소 포화도의 시간변화에 근거한 상관도를 분석한 결과는 Fig. 5와 같다. 융합 사고에서는 좌측의 상전두이랑, 중전두이랑, 하전두이랑, 내측전두이랑, 췌기전소엽, 선대상이랑, 미상핵체가 유의미한 연결성을 지닌 것으로 나타났으며 우측에서는 췌기소엽, 미상핵체가 유의미한 연결성을 가진 핵심영역으로 나타났다. 그리고 화학 문제풀이의 두뇌 활성영역들 중에서는 좌측의 미상핵체, 우측의 중전두이랑, 미상핵체, 소뇌정상이 유의미한 연결성을 지닌 영역으로 나타났다.

융합 사고의 두뇌 활성화 측면에서 기능적으로 동시에 활성화할 이루는 연결성을 살펴보면 가장 많은 연결을 형성한 영역은 하전두이랑(IFG BA44)이다. 하전두이랑은 좌반구의 상전두이랑(BA6), 중전두이랑(BA8, 46), 내측전두이랑(BA8), 췌기전엽(BA7)과 우측 미상핵체와 기능적 연결을 형성하고 있다. 하전두이랑은 언어적 처리뿐 아니라

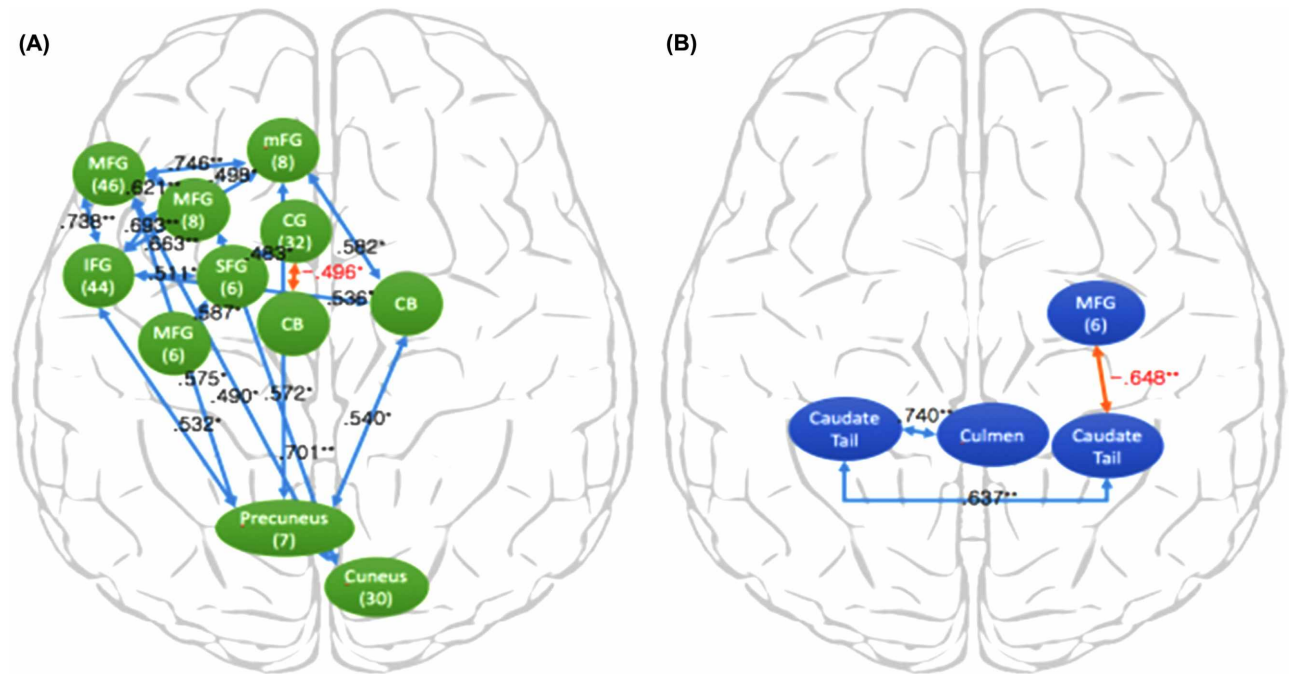


Figure 5. Brain connectivity during (A) convergence thinking, (B) chemistry problem solving (SFG : Superior Frontal Gyrus, MFG : Middle Frontal Gyrus, IFG : Inferior Frontal Gyrus, mFG : medial Frontal Gyrus, CG : Cingulate Gyrus, CB : Caudate nucleus Body.; *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$; Blueline : Positive correlation, Orange line : Negative correlation).

독창적인 아이디어를 생성할 때 중요하게 작용하는 것으로 알려져 있는데, Benedek 등⁵⁰은 언어적 정보를 연속적으로 인출하고 판단하는 과정에서 언어적 처리를 담당하는 하전두이랑과 집행 기능을 수행하는 중전두이랑이 동조하여 역할을 수행하는 것으로 보고하고 있다.

한편, 두 번째로 많은 연결을 형성하고 있는 중전두이랑(BA46)은 하전두이랑 외에도 우측에 위치한 췌기소엽(BA30)과 좌측 췌기전소엽, 우측 중전두이랑과 내측전두이랑과 기능적 연결을 형성하는 것으로 나타났다. Volz 등^{51,52}은 불확실한 상황에서 의사결정을 할 때, 중전두이랑의 활성이 보고되었으며 학습의 동기보상과 연관된 도파민 회로가 동기화가 이루어 진다고 보고하고 있다. 또한 배외측전전두피질과 미상핵체 또한 두뇌 동기보상회로의 중요한 구성 영역과 구조이다. 중전두이랑과 우반구의 내측전두이랑과 하전두이랑, 전대상이랑과 연결성이 나타난 것으로 보아 답이 정해지지 않은 융합 사고의 수행이 피험자의 학습 동기의 유발과 관련되어 있다고 할 수 있다. 전대상이랑의 경우 억제, 조절이라는 기능이 수행되고 있음이 미상핵체와의 부적인 상관관계로 나타난 것으로 보인다.

하전두이랑, 중전두이랑과 마찬가지로 많은 연결성을 가진 것으로 나타난 췌기전소엽은 신경두정엽과 전전두엽을 연결하는 허브의 역할을 한다고 알려져 있다.⁵³ 특히 본 연구의 결과에서도 연결성이 나타난 브로드만 46번 영역과 8번 영역과 물리적으로 연결되어 있어 집행 기능과 작업기억에 중요한 역할을 하는 것으로 보고되고 있다.⁵⁴ 그 외에도 시상, 조가비핵 등 피질하영역의 다양한 영역과 연결망을 이루고 있는데, 본 과제에서 연결성이 나타난 미상핵체도 그 중 하나이다. 본 연구에서는 직접적인 연결성은 나타나지 않았지만 핵심 영역으로 나타난 췌기소엽과의 연결성도 보고되고 있다.

반면, 화학 문제풀이의 두뇌 활성을 대상으로 수행한 연결성 분석 결과, 융합 사고와 비슷한 범위의 활성이 나타났던 결과와 달리 화학 문제풀이의 연결성은 그 핵심 영역과 연결의 양상이 비교적 약한 것으로 나타났다. 좌우측 미상핵피리와 소뇌 우반구의 소뇌정상, 그리고 우측 중전두이랑 사이의 4개영역에서 3개의 연결성만 나타났다. 이는 11개 영역에서 18개의 연결성이 나타난 융합 사고의 기능적 연결성과 연결 정도에서 큰 차이가 나는 결과이다.

미상핵피리와 중전두이랑의 연결성은 문제 풀이를 수행하는 과정에서 문제에 주어진 정보를 비교하고 판단하는 사고가 동기보상과 밀접하게 연관되어 있음을 뜻한다. 이 두 영역 사이의 연결성을 보고한 Wallace 등⁵⁵에 따르면 도파민 수준과 수행능력의 관계는 도파민의 수준이 증가

할수록 작업 기억 능력 또한 증가하다 일정 수준 이하에서는 다시 감소하는 inverted-U의 양상을 보인다고 알려져 있다. 인과관계의 추정이 불가능한 본 연구만으로는 한계가 있지만 선행연구로 비추어볼 때 두 영역 사이의 부적인 상관관계는 문제풀이에 형성된 높은 동기보상 민감성이 작업기억에 기여하는 중전두이랑의 활성을 억제 한 것으로 볼 수 있을 것이다.

한편 소뇌정상과 미상핵피리의 기능적 연결성은 아직 많이 연구되어 있지 않은 상황이다. 그러나 Robinson등의 연구⁵⁶에서는 두 영역 사이의 해부학적 연결성을 보고하고 있는 점과 이미 알려진 두 영역의 기능으로 볼 때, 문제 풀이 시의 안구 운동, 언어처리 등의 기능과 학습 동기의 유발이 서로 연합하고 있다고 추측할 수 있다.

따라서, 융합 사고를 수행하는 두뇌의 기능적 연결성은 시공간정보처리를 수행하는 후두엽과, 고차원적인 사고를 관장하는 전전두엽, 동기유발과 학습에 핵심적인 역할을 하는 피질하영역이 서로 긴밀히 동조되고 있음을 보여준다. 그리고 화학 문제풀이를 수행하는 두뇌의 기능적 연결성은 문제풀이 활동과 동기 및 보상의 민감성에 집중되어 연합하고 있음을 보여준다.

결 론

본 연구는 창의적 문제해결능력의 핵심적인 능력인 융합 사고를 두뇌 수준에서 체계적으로 밝히고자 하였다. 이를 위해 기능적 자기공명영상을 통해 융합 사고시의 두뇌 활성을 알아보고 그 기능적 연결망을 확인하였다. 그리고 우리나라의 고등학생들이 화학과목의 학습을 위해 일반적으로 수행하고 있는 화학 문제풀이 시의 두뇌 활성과 비교하였다. 본 연구 결과를 통해 내릴 수 있는 결론은 다음과 같다.

첫째, 고등학생들이 융합 사고를 수행할 때는 대뇌 좌반구의 상전두이랑, 중전두이랑, 하전두이랑, 내측 전두이랑, 전대상이랑, 췌기전소엽, 대뇌 우반구의 췌기소엽, 좌우측 미상핵체에서 활성이 나타났다. 그리고 각 영역들은 서로 긴밀하게 연결망을 형성하고 있다. 각 영역들은 서로 구조와 기능적으로 연결되어 융합 사고 유발 과제를 해결하면서 귀납적 사고와 연역적 사고와 같은 논리적 사고, 발산적 사고, 심리화 사고, 계획 사고를 수행한다. 또한 사고의 진행 과정에서 언어화를 통해 정보를 장면과 기억 속의 정보를 탐색하고 구체적인 지식을 형성해 나간다. 그리고 이러한 과정에서 학습 동기가 유발되며 목적 지향적인 사고의 수행을 촉진한다. 이러한 결과는 융합 사고를 학제간 또는 과목간 지식의 융합으로 설명하는 기존의 한계를 벗어나, 논리적 사고를 기반으로 문제를 파

악하고 다양한 지식을 떠올리며 계획을 세워 진행하고 평가하는 사고로 이루어져 있다는 정보를 제시한다는 점에서 중요하다고 할 수 있다.

둘째, 고등학생들이 화학 문제풀이를 수행할 때는 대뇌 좌반구의 중전두이랑과 내측전두이랑, 우반구의 중전두이랑과 헤이랑, 좌우측의 미상핵체와 미상핵꼬리, 시상, 소뇌 우반구의 소뇌정상에서 활성이 나타났다. 그리고 우측 중전두이랑과 좌우측의 미상핵꼬리, 소뇌정상이 연결망을 형성하여 핵심적인 역할을 수행하는 것으로 나타났다. 고등학생들은 화학문제풀이 시에 연역적 사고, 두 대상 사이에 공통점과 차이점을 파악하는 사고, 그리고 학습동기의 유발이 나타난다. 하지만 이들이 실제로 형성하는 연결성은 동기보상체계에 한정되었으며, 중전두엽과는 부적 상관관계를 보였다. 이는 화학문제를 푸는동안 두뇌 각 영역이 높게 연합되거나 동조되지 못하고 각각 기능을 수행하는 것을 뜻한다. 따라서 문제 풀이의 사고가 다양한 사고를 유의미하게 연결지어 유발하지 못하는 것으로 볼 수 있다.

셋째, 화학문제풀이에 비해 융합 사고 시에 다양한 사고에 기여하는 두뇌의 영역들이 풍부한 기능적 연결성을 보인다. 융합 사고 시의 두뇌 활성 영역의 각각이 모두 기능적 연결망에 속한 반면, 화학문제풀이 시에 나타난 활성 영역 중에는 일부의 영역만이 연결망을 형성한다. 이는 두 과제 모두 주어진 시각 기반의 정보와 기존에 알고 있는 지식을 통해 주어진 문제를 해결하는 과정을 거치지만 융합 사고를 수행할 때의 사고의 종류와 두뇌 사이의 정보 교환이 화학문제풀이를 수행할 때 보다 훨씬 활발함을 뜻한다.

이와 같은 결론을 통해 제안할 수 있는 교육적 함의는 다음과 같다.

첫째, 학생들의 화학지식기반 융합 사고력 향상에 구체적으로 도움을 줄 수 있는 교수-학습 프로그램의 개발이 가능할 것이다. 본 연구를 통해 학생들이 융합 사고 시 수행하는 두뇌 영역들을 알 수 있었다. 이러한 영역들의 사용을 촉진시키고 영역들 간의 연계를 강화시킬 수 있는 전략을 교수-학습 프로그램에 적용할 수 있을 것이다. 예를 들어 융합 사고의 과정 중 탐색 단계의 학습 전략을 세우는데 융합 사고 과제에서 활성이 나타난 하전두이랑과 중전두이랑, 상전두이랑, 미상핵체의 연결망 결과를 활용할 수 있다. 해당 영역은 심리화 사고, 계획 사고, 귀납적 사고, 귀추적 사고, 이미지 심상화, 목표와 관련된 학습동기유발의 기능을 하고 이러한 사고가 언어화에 기반하여 이루어진다. 따라서 문제 상황에 대한 화학적 개념과 일상 생활의 경험, 공학적 사례 등의 관련 정보를 탐색하고 동기유발을 위해 목표를 설정하는 연속된 활동을 통해 융

합 사고력 향상을 꾀할 수 있을 것이다. 특히 융합 지식의 구성 시에는 개념도 또는 마인드맵과 같이 글과 그림이 연합된 형태로 수행하게 하여 융합 사고의 두뇌 네트워크를 자극할 수 있을 것이다.

둘째, 학생들의 융합 사고 능력 또는 상태를 진단하기 위한 평가 도구의 개발이 가능할 것이다. fMRI를 통한 두뇌 활성 분석을 통해 융합 사고의 두뇌 영역을 대상으로 각 영역의 활성 정도와 네트워크를 구성하는 연결의 개수와 연결의 강도를 도출할 수 있다. 이러한 정량적인 데이터를 구성 요소로 하여 융합 사고력 지수의 산출식을 구성하고 검증하여 두뇌활성기반 융합 사고력을 평가할 수 있는 도구의 개발이 가능할 것이다. 아울러 두뇌 연결 네트워크를 통해 규명된 융합 문제해결 시 수행되는 인지적인 사고들을 바탕으로 행동 및 언어관찰, 지필 검사 방식의 융합 사고력 평가 도구의 개발도 가능할 것이다. 이러한 평가 도구를 통해 융합 사고를 구성하는 사고의 특성을 파악하여 학습자에 맞추어 처치할 수 있는 정보를 파악할 수 있을 것이다.

Acknowledgments. 이 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2014R1A1A 2059024).

REFERENCES

1. Na, J. H. *Journal of International Association for the Gifted and Talented* **2005**, *4*, 25.
2. Sim, J. H.; Lee, Y. R.; Kim, H. K. *Journal of the Korean Association for Science Education* **2015**, *35*, 709.
3. Kim, D. H.; Kim, M. C.; Lee, W. W. *The Korean Sociological Association* **2013**, 759.
4. Kim, G. S.; Choi, S. Y. *Journal of Korean Elementary Science Education* **2012**, *31*, 216.
5. Kim, M. G.; Choi, S. Y. *Journal of Science Education* **2013**, *37*, 562.
6. Byeon, J. H.; Lee, I. S.; Kwon, Y. J. *Biology Education* **2012**, *40*, 327.
7. Lim, S. M.; Kim, Y. S.; Lee, T. S. *Journal of Science Education* **2014**, *38*, 133.
8. Choi, J. C. *Consilience*; Eum: Seoul, Korea, 2012.
9. Yang, J. M.; Noh, J. H. *Policy Report: An International Comparative Study of the Interdisciplinary Research Programs*; National Research Foundation of Korea: Seoul, **2006**, 5.
10. Wilson, E. O. *Consilience: The Unity of Knowledge*; Random House: New York, U.S.A., 1998; p 8.
11. Kwon, H. S.; Park, K. S. *Journal of Science Education* **2009**, *33*, 207.
12. Beer, R. D.; Quinn, R. D.; Chiel, H. J.; Ritzmann, R. E. *Communications of the ACM* **1997**, *40*, 30.
13. Sanders, M. *The Technology and Engineering Teacher* **2009**,

- 68, 20.
14. Kwon, S. H.; Eom, J. T.; Lee, Y. J.; Kwon, Y. J. *Journal of Learner-Centered Curriculum and Instruction* **2015**, *15*, 447.
 15. Shin, D. H.; Kwon, Y. J. *Journal of Korean Elementary Science Education* **2007**, *26*, 49.
 16. Ansari, D.; Coch, D. *Trends in Cognitive Sciences* **2006**, *10*, 146.
 17. Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. *Functional Magnetic Resonance Imaging (2nd Edition)*: Sinauer: MA, U.S.A., 2009: Vol. 1.
 18. Lee, J. K.; Kwon, Y. J. *Journal of Science Education* **2012**, *21*, 1.
 19. Lee, I. S.; Byeon, J. H.; Kwon, Y. J. *Biological Education* **2012**, *40*, 109.
 20. Cho, H. R.; Lee, I. S.; Kwon, Y. J. *Biological Education* **2014**, *42*, 342.
 21. Hong, M. J.; Chung, H. S. *Journal of Science Education* **2006**, *30*, 65.
 22. Kim, E. J. *Journal of Korean Elementary Science Education* **2006**, *25*, 179.
 23. Lee, J. H.; Shin, D. H. *Learner-Centered Curriculum and Instruction* **2013**, *13*, 425.
 24. Oldfield, R. C. *Neuropsychologia* **1971**, *9*, 97.
 25. Yoo, S. S. *Experiment of Functional Magnetic Resonance Imaging (for Practice Application)*: Euihakmunhwasa: Seoul, 2001: 35.
 26. Friston, K. J.; Price, C. J.; Fletcher, P.; Moore, C.; Frackowiak, R. S. J.; Dolan, R. J. *NeuroImage* **1996**, *4*, 97.
 27. Friston, K. J.; Frith C. D.; Liddle P. F.; Frackowiak R. S. J. *Journal of Cerebral Blood Flow and Metabolism* **1993**, *13*, 5.
 28. Malouin, F.; Richards, C. L.; Jackson P. L.; Dumas, F.; Doyon, J. *Human Brain Mapping* **2003**, *19*, 47.
 29. Boecker, H.; Ceballos-Baumann, A. O.; Bartenstein, P.; Dagher, A.; Forster, K.; Haslinger, B.; Brooks, D. J.; Schweiger, M.; Conrad, B. *Neuroimage* **2002**, *17*, 999.
 30. Ranganath, C.; Johnson, M. K.; D'Esposito, M. *Neuropsychologia* **2003**, *41*, 378.
 31. Fincham, J. M.; Carter, C. S.; van Veen, V.; Stenger, V. A.; Anderson, J. R. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **2002**, *99*, 3346.
 32. Crozier, S.; Sirigu, A.; Lehericy, S.; van de Moortele, P. F.; Pillon, B.; Grafman, J.; Agid, Y.; Dubois, B.; LeBihan, D. *Neuropsychologia* **1999**, *37*, 1469.
 33. Reverberi, C.; Cherubini, P.; Rapisarda, A.; Rigamonti, E.; Caltagirone, C.; Frackowiak, R. S. J.; Macaluso, E.; Paulesu, E. *Neuroimage* **2007**, *38*, 752.
 34. Knauff, M.; Mulack, T.; Kassubek, J.; Salih, H. R.; Greenlee, M. W. *Cognitive Brain Research* **2002**, *13*, 203.
 35. Goel, V.; Gold, B.; Kapur, S.; Houle, S. *Neuroreport* **1997**, *8*, 1305.
 36. Zhang, J. X.; Leung, H.-C.; Johnson, M. K. *Neuroimage* **2003**, *20*, 1531.
 37. Huettel, S. A.; McCarthy, G. *Neuropsychologia* **2004**, *42*, 379.
 38. Deppe, M.; Schwindt, W.; Kugel, H.; Plassmann, H.; Kenning, P. J. *Neuroimaging* **2005**, *15*, 171.
 39. Cummings, J. L.; Miller, B. L. *The Human Frontal Lobes: Functions and Disorders*: The Guilford Press: New York, U.S.A. 2007: p 345.
 40. Wu, X.; Yang, W.; Tong, D.; Sun, J.; Chen, Q.; Wei, D.; Zhang, Q.; Zhang, M.; Qiu, J. *Human Brain Mapping* **2015**, *36*, 2703.
 41. Crockford, D. N.; Goodyear, B.; Edwards, J.; Quickfall, J.; el-Guebaly, N. *Biological Psychiatry* **2005**, *58*, 787.
 42. Catalan, M. J.; Honda, M.; Weeks, R. A.; Cohen, L. G.; Hallett, M. *Brain* **1998**, *121*, 253.
 43. Woodward, T. S.; Ruff, C. C.; Ngan, E. T. C. *Brain Research* **2006**, *1068*, 161.
 44. Fujii, T.; Okuda, J.; Tsukiura, T.; Ohtake, H.; Suzuki, M.; Kawashima, R.; Itoh, M.; Fukuda, H.; Yamadori, A. *Neuroscience Research* **2002**, *44*, 429.
 45. Okuda, J.; Fujii, T.; Yamadori, A.; Kawashima, R.; Tsukiura, T.; Fukatsu, R.; Suzuki, K.; Ito, M.; Fukuda, H. *Neuroscience Letters* **1998**, *253*, 127.
 46. Hirsch, J.; Moreno, D. R.; Kim, K. H. *Journal of Cognitive Neuroscience* **2001**, *13*, 389.
 47. Stein, T.; Moritz, C.; Quigley, M.; Cordes, D.; Haughton, V.; Meyerand, E. *American Journal of Neuroradiology* **2000**, *21*, 1397.
 48. Wu, T.; Liu, J.; Hallett, M.; Zheng, Z.; Chan, P. *Neuroimage* **2013**, *65*, 466.
 49. Van Overvalle, F.; Baetens, K.; Mariën, P.; Vandekerckhove, M. *Neuroimage* **2014**, *86*, 554.
 50. Benedek, M.; Jauk, E.; Fink, A.; Koschutnig, K.; Reishofer, G.; Ebner, F.; Neubauer, A. C. *Neuroimage* **2014**, *88*, 125.
 51. Volz, K. G.; Schubotz, R. I.; Cramon, von, D. Y. *Neuroimage* **2004**, *21*, 848.
 52. Volz, K. G.; Schubotz, R. I.; Cramon, von, D. Y. *Neuroimage* **2003**, *19*, 271.
 53. Margulies, D. S.; Vincent, J. L.; Kelly, C.; Lohmann, G.; Uddin, L. Q.; Biswal, B. B.; Villringer, A.; Castellanos, F. X.; Milham, M. P.; Petrides, M. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **2009**, *106*, 20069.
 54. Bullmore, E.; Sporns, O. *Nature Reviews Neuroscience* **2009**, *10*, 186.
 55. Wallace, D. L.; Vytlačil, J. J.; Nomura, E. M.; Gibbs, S. E. B.; D'Esposito, M. *Frontiers in Human Neuroscience* **2011**, *5*, 32.
 56. Robinson, J. L.; Laird, A. R.; Glahn, D. C.; Blangero, J.; Sanghera, M. K.; Pessoa, L.; Fox, P. M.; Uecker, A.; Friebs, G.; Young, K. A.; Griffin, J. L.; Lovallo, W. R.; Fox, P. T. *Neuroimage* **2012**, *60*, 117.