

생명 현상에 대한 과학적 가설 생성과 수리 연산에서 나타나는 두뇌 활성화: fMRI 연구

권용주 · 신동훈* · 이준기 · 양일호

한국교육대학교

Brain Activation in Generating Hypothesis about Biological Phenomena and the Processing of Mental Arithmetic: An fMRI Study

Kwon, Yongju · Shin, Donghoon* · Lee, Junki · Yang, Ilho

Korea National University of Education

Abstract: The purpose of this study is to investigate brain activity both during the processing of a scientific hypothesis about biological phenomena and mental arithmetic using 3.0T fMRI at the KAIST. For this study, 16 healthy male subjects participated voluntarily. Each subject's functional brain images by performing a scientific hypothesis task and a mental arithmetic task for 684 seconds were measured. After the fMRI measuring, verbal reports were collected to ensure the reliability of brain image data. This data, which were found to be adequate based on the results of analyzing verbal reports, were all included in the statistical analysis. When the data were statistically analyzed using SPM2 software, the scientific hypothesis generating process was found to have independent brain network different from the mental arithmetic process. In the scientific hypothesis process, we can infer that there is the process of encoding semantic derived from the fusiform gyrus through question-situation analysis in the pre-frontal lobe. In the mental arithmetic process, the area combining pre-frontal and parietal lobes plays an important role, and the parietal lobe is considered to be involved in skillfulness. In addition, the scientific hypothesis process was found to be accompanied by scientific emotion. These results enabled the examination of the scientific hypothesis process from the cognitive neuroscience perspective, and may be used as basic materials for developing a learning program for scientific hypothesis generation. In addition, this program can be proposed as a model of scientific brain-based learning.

Key words: biological phenomena, generating hypothesis, mental arithmetic, brain activation, brain-based learning, fMRI.

I. 서론

과학적 가설 생성 활동이 과학적 사고 활동 중에서 가장 핵심적인 지식 생성 활동이라는 것은 주지의 사실이다(강은미 등, 2006; 신동훈과 권용주, 2006; 정용재와 송진웅, 2006; Lawson, 1995). 따라서 과학적 가설 생성 활동과 관련된 사고 과정에 대한 다양한 연구들이 진행되어 왔고(권용주 등, 2006; 박종원, 2000; Klahr & Dunbar, 1988; Lawson, 1995), 특히 과학 교육학적 입장에서 가설 생성 활동을 위한 다양한 탐구활동 프로그램 개발이 활발하게 이루어져왔다

(강은미 등, 2006; 정진수 등, 2005).

이러한 과학적 가설 생성과 관련된 선행연구들을 살펴보면, 과학적 가설의 정의와 생성에 관한 과학 철학적 분석 연구들(권용주 등, 2003; 박종원, 2000; Hanson, 1958; Lawson, 1995; 2002), 귀추적 사고 과정과 가설 생성 과정의 특징에 대한 연구들(박은미와 강순희, 2006; 오필석과 김찬중, 2005; 정용재와 송진웅, 2006), 다양한 과학적 현상에서 과학적 가설 생성 과정에 대한 연구들(권용주 등, 2003; 김연수 등, 2005; Lawson, 2002), 과학적 설명 형태로서의 가설과 다른 설명 유형과의 관계에 대한 연구들(권용

* 교신저자: 신동훈(shin2619@paran.com)

** 이 논문은 한국과학재단의 지원에 의하여 연구된 결과의 일부임(R01-2005-000-11024-0)

*** 2006.12.14(접수) 2007.01.29(1심통과) 2007.02.12(2심통과) 2007.02.14(최종통과)

주 등, 2006b; 이해원 등, 2005), 과학적 가설 생성에서 나타나는 과학적 감성의 유형과 생성과정에 대한 연구들(신동훈과 권용주, 2006), 예비교사나 초, 중등 학생들의 과학적 가설 생성 능력 향상을 위한 탐구 프로그램 개발 연구(강은미 등, 2006; 정진수 등, 2005), 과학적 가설 생성 능력을 측정하기 위한 측정 도구 개발(정진수, 2006)과 같은 인지심리학적 연구들이 주로 진행되어왔다.

이러한 인지심리학적 선행연구들은 학생들의 과학적 가설 생성 활동을 위한 다양한 정보를 제공하기는 하지만, 두뇌활동에 대한 실제적(authentic) 정보를 제공하지 못하는 근본적인 한계가 존재한다(신동훈과 권용주, 2006). 왜냐하면 모든 과학적 가설 생성 활동은 인간의 두뇌에서 1차적으로 일어나고 언어나 행동 등을 통해 2차적으로 나타나는데, 인지심리학적 연구는 이러한 2차적 추정을 통한 간접적 연구이기 때문이다(Ansari & Coch, 2006). 따라서 과학적 가설 생성 활동에 대한 두뇌의 1차적인 정보를 직접 분석할 수 있다면, 과학적 가설 생성에 대한 보다 근본적인 이해가 가능할 것이다. 이러한 관점을 바탕으로 최근에 과학적 가설 생성에 대한 두뇌 기작의 특성을 파악하는 신경 생리학적 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 과학교육학에서 이러한 신경생리학적 연구는 뇌파(EEG)와 기능성 자기 공명 영상(functional magnetic resonance imaging; fMRI)을 활용한 연구들이 대부분이었다. 왜냐하면 이러한 연구방법들은 정상적인 피험자들을 대상으로 연구 할 수 있고, 피험자들에게 아무런 해를 끼치지 않는 것으로 알려져 있기 때문이다(신동훈과 권용주, 2006; 유승식, 2001; Huettel *et al.*, 2004). 대표적인 연구로는 Kwon *et al.* (2004)의 대학생들의 가설 생성시 나타나는 사고 과정의 경향성을 뇌파(EEG)의 상관관계를 이용하여 조사한 연구와 Jin *et al.* (2006)의 생물학 가설 생성 과정에서 나타나는 뇌파를 상호 정보 분석법을 이용하여 가설 생성의 두뇌 특성을 조사한 연구를 들 수 있다. 언어를 이해하는데 관여하는 두뇌 부위(Wernicke area)와 언어를 생성하는데 관여하는 두뇌 부위(Broca area)가 완전히 다른 영역이듯이(남기준과 김동휘, 2002; Gazzaniga *et al.*, 2002), 이러한 신경생리학적 연구들은 과학적 가설 생성 과정이 두뇌의 특정부분들을 사용하는 영역 특이적(domain-specific) 활동이라는 것을 강력히 시사하고 있다.

과학적 가설 생성시 나타나는 두뇌의 특성에 대한 이러한 신경학적 연구뿐만 아니라, 학습으로 인하여 두뇌의 활성이 어떻게 변화하였는지를 알아보는 두뇌

가소성에 대한 신경학적 연구들도 이루어졌다. 예를 들어, 권용주 등(2006a)이 초등 예비교사들의 생물학 가설 생성 학습 진후에 나타나는 두뇌 활성화 차이를 19개의 진극을 사용하여 두피에서 뇌파를 수집하여 각 주파수별로 'Coh-상관도'와 'Cor-상관도' 값을 이용하여 분석한 연구와 Kwon *et al.*(2006)이 동일한 상황에서 대학생들의 두뇌 활성화 상태를 fMRI를 이용하여 두뇌의 가소성을 조사한 연구들이 주목할 만하다. 이러한 신경생리학적 선행 연구들에서는 가설 생성 학습이 가설 수용 학습보다 피험자들의 두뇌 활성을 더 많이 촉진하는 것으로 나타나 경험과 학습이 두뇌를 만들어 간다는 생각(Gazzaniga *et al.*, 2002)을 더욱 공고하게 만들었다. 또한 이러한 신경생리학적 연구는 특정 학습의 효과를 간접적인 검사지가 아니라 피험자의 두뇌 활성화를 직접 측정하여 연구하였으므로 방법론적으로 큰 의의가 있다고 할 수 있다.

과학적 가설 생성과 관련된 이러한 신경생리학적 선행 연구들은 두뇌 활동의 특성을 동일한 피험자의 기저 조건(fix)을 감산하여 분석하였거나(이준기 등, 2006), 특정한 학습 전후를 비교하는 연구들이(Kwon *et al.*, 2006) 대부분이었다. 그러므로 과학적 가설 생성의 두뇌 기작이 일반적인 논리과정의 두뇌 기작과 비교하여 충분히 논의되지 못한 점이 한계로 작용한다.

예를 들어 논리적 추론 과정인 과학적 가설 생성 과정(Lawson, 1995)과 가장 논리적인 사고라고 알려진 수리 연산 과정(Menon *et al.*, 2000; Rivera *et al.*, 2005)과 어떻게 다른가? 란 의문에 대해서는 확실한 설명을 하지 못하고 있다. 이러한 상황에서 만약 과학적 가설 생성 과정이 논리적인 수리 연산 과정과 다른 영역 특이적 활동임을 밝혀낸다면, 과학적 가설 생성 과정에 대한 심층적인 이해가 가능할 것이다. 또한 과학적 가설 생성을 잘 하는 학생들과 수리 연산을 잘 하는 학생들의 차이점을 밝힐 수 있고, 나아가 과학 영재와 수학 영재의 차이점을 두뇌 과학적 측면에서 해석할 수 있을 것이다.

그러므로 이 연구의 목적은 피험자들이 사칙 연산과 같은 수리 과제를 수행할 때와 생명 현상에 대한 과학적 가설을 생성할 때의 두뇌 활성화 차이를 fMRI를 이용하여 규명하여, 과학적 사고과정에서 핵심적 역할을 담당하는 과학적 가설 생성 과정을 두뇌 활성화 수준에서 이해하는 것이다. 이러한 연구 결과는 과학 교육학 분야에서 과학적 가설 생성을 가능하게 하는 여러 탐구 활동 프로그램 개발의 토대가 될 수 있으며, 이러한 활동 프로그램이 두뇌의 과학적 가설 생성 능력 향상 여부를 비교할 수 있는 준거를 마련하는데 크게 도움이 될 것으로 기대한다.

II. 연구 절차 및 방법

1. 연구 절차

이 연구의 목적은 생명 현상에 대해 피험자들이 과학적 가설을 생성할 때와 사칙 연산과 같은 수리 과제를 수행할 때의 두뇌 활성화 차이를 fMRI를 이용하여 규명하는 것이다. 이러한 fMRI 연구를 위해서는 먼저 연구목적에 부합되는 연구 대상자를 모집하고, 적합한 과제를 개발하는 과정이 선행되어야 한다. 그리고 과학적 가설 생성과 수리 연산을 위한 실험설계를 고안하고 전문가들로부터 타당성을 검증받은 후 fMRI 실험에 적합한 연구 대상자를 선정하였다. 그 다음, fMRI를 이용하여 피험자들이 과제를 수행하는 동안의 두뇌 영상을 측정하였다. 영상 측정이 끝난 후에는 설문지와 심층 면접을 통하여 측정실 안에서의 사고 내용에 대한 언어적 보고 자료를 수집하였다. 획득한 fMRI 영상 자료는 전처리과정을 통하여 통계적 처리과정에 사용할 피험자 자료를 선택하였다. 통계적 처리가 끝난 후 얻어진 연구결과를 연구자들이 분석하여 과학적 가설 생성과 수리 연산 사고 과정의 두뇌 활성화 차이를 분석하였다. 이러한 연구 절차를 모식적으로 나타내면 Fig. 1과 같다.

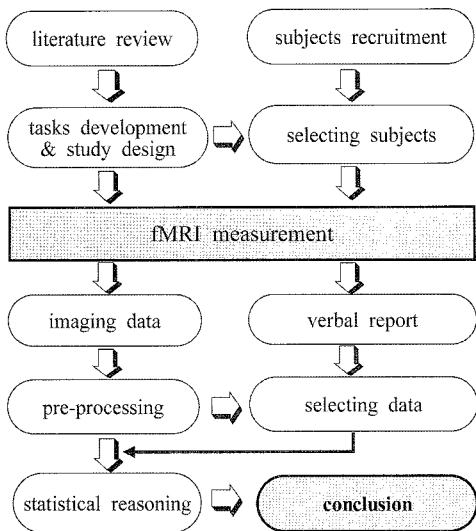


Fig. 1 Procedure of the fMRI study

2. 연구 대상

fMRI 실험을 위한 연구 대상자로는 먼저 신체적으로 건강하고 정신 병력이 없는 사람이어야 한다. 또한 이 연구에서 측정할 두뇌 활동의 내용은 과학적 가설 생성과 수리 연산이므로 이러한 사고 활동이 가능한

사람이어야 한다. 특히 수리 연산의 경우 매우 빠른 암산 능력을 가진 사람들은 제외하였다. 왜냐하면 일정한 시간 동안 수리 연산 과정을 수행해야 하므로 너무 빨리 사고를 진행하면 여분의 시간에 다른 사고 과정이 들어갈 가능성이 매우 크기 때문이다. 그리고 과학적 가설 생성은 사전지식과 가설 생성 경험 등에 영향을 받을 수 있으므로(권용주 등, 2003) 연구대상자를 자연계열에 국한시키지 않고 인문계열에서도 모집하여 과학적 가설 생성의 보편적 타당성을 확보하였다. 이러한 여러 조건들을 모두 충족시키는 연구 대상자는 모두 16명이었다. 최종 연구 대상자들 중 과학을 전공한 사람과 어문학을 전공한 사람이 각각 8명씩이었다. 과학을 전공한 사람들 중 과학교육학 박사학위를 가지고 있는 사람은 3명, 생물학 관련 이학박사 학위를 가지고 있는 사람은 3명이었고, 과학교육학 박사과정을 다니고 있는 대학원생들은 2명이었다. 어문학을 전공한 사람들 중 4명은 국어교육학 박사학위를 가지고 있고, 3명은 국어교육 박사과정, 나머지 1명은 한문교육 박사과정을 다니고 있는 대학원생들이었다. 이들은 모두 오른손잡이 남자였고, 나이는 38.44 ± 4.52 이었다. 이들은 모두 연구자들과 한국과학기술원 fMRI 연구소 측에서 제시한 연구 참여 동의서에 서명함으로써 자발적인 연구 참여 의사를 확실하게 표명하였다.

3. 과제 개발

과학적 가설을 생성하기 위한 과제를 fMRI 장치 안에서 제시하여야 되기 때문에, 생명현상에 관한 시각적인 자료로 한정하였다. 이 자료들은 동물과제 4개와 식물과제 4개로 구성하였으며, 생물교육 전문가 3인과 생물교사 3인에게 생명현상에 대한 과학적 가설 생성 과제로서의 타당도를 검증받았다.

가설은 인과적 의문에 대한 잠정적 설명의 한 형태이기 때문에, 제시된 그림만으로는 가설 생성을 유도하지 못할 가능성이 존재한다. 왜냐하면, 동일한 인과적 의문에 대해서도 피험자들은 가설, 추측, 예측, 목적론적 설명의 형태로 과학적 설명을 다양하게 시도할 수 있기 때문이다(권용주 등, 2006b). 따라서 제시할 그림의 상단에 인과적 의문을 생각할 수 있는 텍스트와 가설을 생성하게끔 하는 지시 텍스트를 제시하였다. 예를 들어, 개구리 수컷의 우는 모습 사진 상단에 ‘개구리는 울 때 울음주머니가 부풀어 오른다’라는 문구와 ‘어떤 원인과 과정으로 인해 부풀어 오르는가?’라는 문구를 넣어 제시한 생명현상에 관해 피험자들이 동일한 인과적 의문을 갖게 하고, 이 의문에

대해 과학적 가설을 생성하도록 유도하였다. 이러한 가설 생성 과제 8개의 텍스트를 제시하면 Table 1과 같다.

수리 연산 과제는 제시된 30초 동안 암산할 수 있는 내용이어야 하지만, '40×2'와 같은 너무 빨리 계산이 끝나는 문제도 다른 사고의 유입이 추가로 일어날 수 있기 때문에 곤란하다. 또한 너무 어려운 연산 문제도 피험자들이 계산과정에서 포기할 수 있기 때문에 적당하지 않을 수 있다. 그래서 연구자들은 피험자들이 훈련과정에서 어렵다고 이야기한 나눗셈 문제는 제외하고, 평균 30초 정도 걸리는 수리 연산 문제 8개를 개발하였다. 과학적 가설 생성 과제와의 변인 통제를 위해 과제 그림 위쪽에는 가설 생성 과제와 마찬가지로 지시 텍스트를 삽입하였다. 이렇게 개발된 최종적인 수리 연산과제는 Table 1과 같다.

4. 실험 설계

과학적 가설을 생성하는 과정은 두뇌에서 순간적으로 일어나는 사고 활동이 아니라, '의문 상황 관찰', '의문 상황 분석', '경험상황 동정', '원인적 설명자 동정', '가설적 설명자 차용', '가설 생성' 이라는 여러 단계를 거치는 연속적인 사고 과정으로 알려져 있다(권용주 등, 2003; 정진수 등, 2005). 또한 수리 연산을 위한 사칙 연산 과제도 순간적으로 일어나는 것이 아니라 순서에 의해서 일정한 시간 동안 일어나는 사고 활동이다(진진욱과 신현용, 2006). 그러므로 이러한 두 사고 과정을 측정하기 위해서는 사건 관련

디자인(event-related design)보다 블록 디자인(block design)이 더 적합한 실험설계 방법이라고 할 수 있다(신동훈과 권용주 등, 2006; 유승식, 2001; Huettel et al., 2004, Kwon et al., 2006). 따라서 이 연구에서는 블록 디자인을 사용하여 Fig. 2와 같은 실험설계를 하였다. 생명 현상에 관한 가설 생성과 수리 연산에는 각각 30초의 시간을 주었으며, 과제의 수는 각각 8개이었으므로 이 실험은 전체 16개의 과제로 구성되었다. 중간 단계에서는 기저 조건(fix)을 12초 배치하여 다음 단계의 사고를 위한 휴식기를 두었다. 과제의 구성은 과학적 가설 생성 과제와 수리 연산 과제를 Fig. 2와 같이 교대로 배치하여 연속적인 사고로 인한 두뇌의 피로 현상을 줄이려고 하였다. 그러므로 한 피험자가 전체 과제를 측정하는데 걸린 시간은 684초이었다.

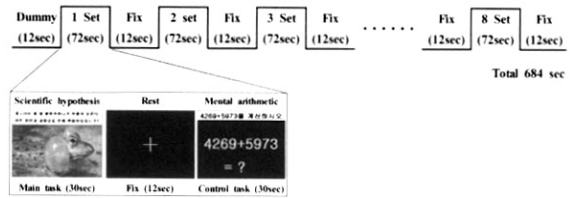


Fig. 2 Experiment design of the fMRI study

5. 자료 수집

과학적 가설 생성과 수리 연산시 두뇌 활성화 상태를 측정하기 위하여 한국과학기술원 fMRI 연구동에

Table 1 Text of tasks on the scientific hypothesis and mental arithmetic.

No	Type of tasks	
	Scientific hypothesis	Mental arithmetic
1	The vocal sac get big when a frog is crying. What causes and processes generate this phenomenon?	Calculate this expression 4269+5973
2	This species of a mushroom is melting naturally on the time. What causes and processes generate this phenomenon?	Calculate this expression 1378+9265
3	This is the cast-off skin of a snake. What causes and processes generate this phenomenon?	Calculate this expression 6323-3249
4	This species of a plant maintain white although it is an adult. What causes and processes generate this phenomenon?	Calculate this expression 98×27
5	This species of a fish swim always turn over. What causes and processes generate this phenomenon?	Calculate this expression 47×54
6	The diseased rice has a black thing on one's end. What causes and processes generate this phenomenon?	Calculate this expression 36×65
7	This monkey is an albino species. What causes and processes generate this phenomenon?	Calculate this expression 4937-2469
8	This species of a mushroom light in the night. What causes and processes generate this phenomenon?	Calculate this expression 9763-3898

있는 장비를 사용하였다. 이 fMRI 장치의 규격은 ISOL 3.0 Tesla MRI scanner이었다. MRI 영상은 head coil을 사용하여 EPI을 구현한 gradient echo sequence로 얻었다. 각 영상 절편은 5mm 이었으며 그 사이의 간격은 주어지지 않았다. 반복시간(TR)은 3000 msec, 에코시간(TE)은 35ms로 하였으며, 매트릭스는 64×64, 영상범위(FOV)는 220×220 mm, axial 방향으로 30장의 슬라이스를 얻었으며, 아래에서 6번째 슬라이스 평면이 전교련-후교련(AC-PC)선과 평행하게 위치하도록 조절하였다. 이와 같은 fMRI 측정상황에서 T1 해부학적 영상과 과제 수행시 나타나는 기능적 영상을 수집하였다.

피험자들은 fMRI 촬영 후, 자신이 생성한 과학적 가설 및 수리 연산의 진행여부를 설문지에 기록하였다. 연구자들은 설문지를 분석하여 불명확한 부분과 의심스러운 부분은 심층면접을 통해 자료의 정확성을 보완하였다.

6. fMRI 영상 자료 분석

수집한 fMRI 영상 자료를 분석하기 위해서는 피험자들이 fMRI 장치 안에서 과학적 가설 생성과 수리 연산 과정이 이루어진 경우만을 선택하여야 된다. 이러한 선별 작업은 설문지와 심층면접을 통해 수집한 언어적 보고 자료를 사용하여 이루어진다. 이렇게 선별된 자료들만 최종적인 fMRI 영상 분석에 사용하였다.

fMRI 영상 원자료는 피험자의 머리를 고정했다 하더라도 조금씩은 움직일 수 있고, 머리 모양이나 크기가 피험자들에 따라 조금씩 다르기 때문에 이를 재조정하고 표준화하는 작업을 하여야 한다(신동훈과 권용주, 2006; 유승식, 2001). 이러한 작업 과정을 전처리 과정(pre-processing)이라고 하며, MATLAB (Mathworks, Inc., USA) 환경에서 구현되는 SPM (statistical parameter mapping, welcome department of cognitive neurology, London, UK)이라는 특수한 프로그램을 이용하여 처리하였다. 전처리 과정은 재조정(realignment) → 상관정렬(coregistration) → 표준화(normalization) → 편평화(smoothing) 과정을 거쳐 수행되었다(김연희, 2001; 신동훈과 권용주, 2006; Huettel *et al.*, 2004; Veltman *et al.*, 2001).

이와 같은 전처리 과정이 끝난 후, 각 피험자별로 선형모델을 구성한 다음, 동일한 대조조건을 가진 영상을 대상으로 개인차를 무선변수로 고려한 무선효과 분석(random-effects analysis)을 사용하여 집단 분석을 하였다. 이 방법은 통계적 검증력을 높일 수 있어

서 결과를 일반화하는데 적합하다고 알려져 있다(신동훈과 권용주, 2006; 유승식, 2001; Huettel *et al.*, 2004). 보통의 fMRI 연구가 10명 내외의 피험자를 통해 이루어지지만, 이 연구에서는 피험자가 16명이 고, 한 피험자가 8개의 과제를 진행하므로 실제적으로 128명의 자료가 통계적 분석에 이용되는 것과 같은 효과를 얻을 수 있어 통계적 검증력이 높다고 할 수 있다. 이러한 통계적 처리는 SPM basic model에 있는 단일표본(one sample) T-검증을 사용하였다.

최종적인 실험 결과는 다중 비교(multiple comparison) 유의 수준 p 값을 보정하지 않은 0.001로 정하고(uncorrected, $p < 0.001$), 범위 역치값은 동시에 연속적으로 20개 이상의 부피소(voxels)로 이루어진 덩이소(cluster)를 유의미한 덩이소로 간주하였다. 이렇게 분석된 활성화된 두뇌 영역의 좌표는 SPM 표준 공간인 MNI(Montreal Neurological Institute) 좌표에서 Talairach 좌표(Talairach & Tournoux, 1988)로 변환하여 구체적인 두뇌 활성화 영역을 추론하였다(강혜진 등, 2005; 신동훈과 권용주, 2006; Veltman *et al.*, 2001).

Ⅲ. 연구 결과 및 논의

1. 언어적 보고 분석

피험자들이 과학적 가설 생성과 수리 연산을 fMRI 장치 안에서 성공적으로 수행했을 때, 측정된 영상자료가 의미 있는 것이므로 fMRI 측정 후 설문지와 심층면접을 통하여 실제적인 사고 여부를 조사하였다. 과학적 가설은 하나 이상의 가설 지식을 생성한 경우는 ○로 표시하였으며, 어떠한 가설도 생성하지 못한 경우는 ×로 표시하여 Table 2에 정리하였다. 예를 들어 첫 번째 과제에서는 ‘압력 차이 때문에 울음 주머니가 부풀어 오를 것이다’, ‘막의 탄력성 때문에 울음 주머니가 부풀어 오를 것이다’ 등의 가설들이 생성되었다.

수리 연산 과제에서도 정답과는 상관없이 연산과정을 충분히 수행하였으면 ○, 수행하지 못한 경우는 ×로 표시하여 Table 2에 함께 정리하였다. 과학적 가설 생성 과제의 경우, 5번과 8번 피험자가 8개의 과제 중 1과제에 대한 가설을 생성하지 못한 것으로 나타났다. 수리 연산 과제의 경우, 8번과 13번 피험자가 8개의 과제 중 1과제에 대한 암산을 못한 것으로 나타났다. 그러나 전체적으로 보았을 때는 실제적인 사고가 98.4%에 이르므로 측정된 피험자들의 fMRI 영상 자료 전체를 통계적 분석 대상으로 하였다.

Table 2

Results of verbal reports (questionnaire & in-depth interview) of all subjects after fMRI scanning.

subjects	1		2		3		4		5		6		7		8		Ratio (%)	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
1	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	100	100
2	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	100	100
3	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	100	100
4	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	100	100
5	x	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	87.5	100
6	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	100	100
7	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	100	100
8	o	o	o	o	o	o	x	o	o	o	o	o	o	o	o	x	87.5	87.5
9	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	100	100
10	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	100	100
11	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	100	100
12	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	100	100
13	o	x	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	100	87.5
14	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	100	100
15	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	100	100
16	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	100	100
Ratio(%)	93.7	93.7	100	100	100	100	93.7	100	100	100	100	100	100	100	100	93.7	98.4	98.4

Note. Whether subjects success actual thinking process during the fMRI scanning.

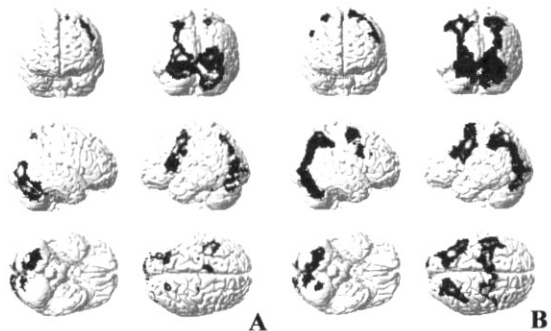
A: generating process of scientific hypothesis, B: processing of mental arithmetic.

2. 과제별 두뇌 활성화 영역

생명 현상에 대한 과학적 가설 생성 과제와 수리 연산 과제를 수행하고 있을 때, 피험자들의 두뇌 활성화 영역 추론을 위해 Talairach 좌표를 구한 후, 그 결과를 Table 3에 정리하였다. 두뇌 활성화 영역은 전두엽, 두정엽, 측두엽, 변연계 및 피질하 영역으로 나누어 기술하였으며, 두뇌의 기능 연구에는 일반적으로 브로드만 영역(Brodmann area; BA)을 많이 사용하므로(신동훈과 권용주, 2006; Gazzaniga *et al.*, 2002), BA 영역을 별도로 표시하였다. 또한 이러한 좌표값을 Fig. 3과 같이 입체적인 뇌매핑(rendering)으로 나타내어 두뇌의 실제 영역을 육안으로 쉽게 확인할 수 있도록 하였다. 원래의 그림은 활성화 정도에 따라 다양한 색깔로 표현되지만, 학술지 사정으로 흑백으로 전환하여 나타내었다. Fig. 3에서 A는 과학적 가설을 생성할 때, B는 수리 연산을 진행하고 있을 때의 입체적인 뇌매핑 사진을 나타낸다.

(1) 전두엽

생명 현상에 대한 과학적 가설 생성시 피험자들의 전두엽 영역의 활성화는 중전두이랑(middle frontal gyrus)과 중심전이랑(precentral gyrus), 내전두이랑(medial frontal gyrus), 상전두이랑(superior frontal gyrus)에



A: The generating process of scientific hypothesis
B: The processing of mental arithmetic.

Fig. 3 Surface rendering of brain areas that showed significant activation during the processing of each task

서 나타났다. 이들 영역은 BA 6번 영역에 거의 위치하고 있으며, 일부가 BA 9번 영역에 걸쳐있다(Table 3과 Fig. 3-A 참조). BA 6번 영역은 Kwon *et al.* (2006)의 과학적 가설 생성 과정에서도 나타났다. 이러한 사실은 이 영역이 복잡한 일련의 운동을 계획하고 집행하는 정보처리를 담당하는 역할 뿐만 아니라 (이원택과 박정아, 1996; Snell, 2001), 단어를 생성하거나 머릿속으로 뭔가를 부호화하는 과정, 즉 의미적

Table 3
Activated brain area of 2 tasks (p<0.001, uncorrected; k >20 voxels)

Type of tasks	Brain area	Side(BA)	Scientific hypothesis				Mental arithmetic					
			Talairach-coordi.(mm)			z-score	Voxels	Talairach-coordi.(mm)			z-score	Voxels
			x	y	z			x	y	z		
Frontal lobe												
Middle frontal gyrus	L(6)	-38	5	53	4.79	1959						
	L(9)	-44	13	32	4.71							
	R(9)						38	25	25	3.54	26	
	R(9)						46	9	33	3.81	262	
Inferior frontal gyrus	R(9)						42	5	27	3.73		
Precentral gyrus	L(9)	-36	8	40	4.75							
	R(6)	24	-15	50	3.82	71						
Middle frontal gyrus	R(6)	28	-9	45	3.39							
	L(6)						-42	0	41	5.96	5535	
Medial frontal gyrus	L(6)	-12	1	61	4.08	139	-14	3	61	5.28		
Superior frontal gyrus	L(6)	-8	9	55	3.93							
Parietal lobe												
Precuneus	L(19)	-30	-70	35	4.93	491						
	L(7)	-22	-58	49	4.92							
Superior parietal lobule	L(7)	-32	-57	56	4.43		-28	-62	47	6.34	13700	
	L(7)						-30	-61	55	6.27		
	R(7)	24	-57	58	5.47	97	28	-58	51	5.65		
Temporal lobe												
Fusiform gyrus	R(37)	38	-48	-19	6.44	7455						
	R(20)	30	-46	-20	6.01							
	L(20)	-34	-40	-20	4.09	39						
	L(37)	-36	-51	-14	3.65	43						
Inferior temporal gyrus	L(37)	-46	-53	-2	3.44	25						
Superior temporal gyrus	L(22)	-44	-39	2	3.62	36						
Caudate tail	R	34	-29	-4	4.23	90						
Sub-lobar												
Insula	R	44	-27	0	3.67							
Thalamus (pulvinar)	L						-26	-25	7	3.97	52	

BA: Brodmann area, L: Left, R: Right, Talairach-coordi.: Talairach coordinates.

처리과정(semantic processing)이 일어나는 영역(Green *et al.*, 2006) 입을 나타내는 것이다. 그러므로 이 영역의 활성화는 과학적 가설 생성 과정 중에서 정진수 등(2005)이 밝힌 '경험 상황 표상'과 '설명자 표상' 과정과 관련된 사고 과정으로 판단할 수 있을 것이다. 이러한 해석은 이준기 등(2006)이 생물교사들을 대상으로 한 연구에서도 유사하게 제시되고 있다.

수리 연산 과제에서 전두엽 영역의 활성화는 좌뇌의 내전두이랑(medial frontal gyrus)이 가장 넓게 나타났다. 활성화된 부피소(voxels)의 수는 5,535개에 달하며, BA 6번에 해당하는 부위이다. 또 다른 부위로는 BA 9번 영역인 우뇌의 중전두이랑(middle frontal

gyrus)이 활성화되었다(Table 3과 Fig. 3-B 참조). 수리연산이 일어날 때 두뇌 활성화 영역을 조사한 Menon *et al.* (2000)의 연구에서도 BA 6번 영역이 활성화되는 것으로 나타났고, 수리 연산이 맞았을 경우와 틀렸을 경우의 두뇌 활성화 차이를 조사한 Menon *et al.* (2002)의 연구에서는 두 경우 모두 BA 9번 영역이 활성화 되는 것으로 보아 수리 연산 과제의 두뇌 활성화 영역은 BA 6번과 9번 영역이 중요한 역할을 담당하는 영역으로 추론할 수 있다.

(2) 두정엽

과학적 가설 생성 과제에서는 좌뇌 췌기전소엽(pre-

cuneus; BA 19)과 상두정소엽(superior parietal lobule; BA 7)의 일부분만이 활성화되어, 491개의 부피소가 덩이소를 이루어 분포하고 있다(Table 3과 Fig. 3-A 참조). 이러한 두정엽 영역은 후두엽의 시각피질로부터 들어온 내적 심상(mental imagery) 정보를 후두-두정 경로(occipito-parietal pathway)로 통하여 전달 받은 후 사고의 진행과정 동안 이를 유지하는 시각적 작업기억(working memory)의 역할을 수행한다고 알려져 있다(Gazzaniga *et al.*, 2002; Naghavi & Nyberg, 2005). 그러므로 과학적 가설 생성 과정에서 시각적 과제에 의한 시각 정보처리의 과정으로서 췌기 전소엽과 상두정소엽이 활성화된 것으로 생각할 수 있다.

수리 연산 과제에서는 좌뇌 상두정소엽(superior parietal lobule; BA 7)이 13,700 부피소로 가장 넓게 활성화되고 있으며 우뇌 상두정소엽도 일부 활성화되었다. 그러나 시각피질에 해당되는 부위는 활성화되지 않은 것으로 나타났다. 이는 과학적 가설 생성 과제에 비해 시각적 정보 처리량이 적기 때문인 것으로 생각된다(Fig. 2 참조). 수리 연산 처리 과정에 대한 두뇌활성화 연구에서도(Rivera *et al.*, 2005; Menon *et al.*, 2000) 전두엽과 함께 이 부위가 매우 활성화되는 것으로 보아 수를 계산하는 기능적 과정에 매우 밀접한 관련이 있는 영역으로 해석할 수 있다.

(3) 측두엽

측두엽 영역은 과학적 가설 생성 과제에서만 활성화 영역이 나타났고, 수리 연산 과제에서는 활성화 영역이 전혀 나타나지 않았다(Table 3과 Fig. 3 참조). 측두엽의 양측 방추이랑(fusiform gyrus; BA 37, 20)이 매우 활성화 되었으며, 상측두이랑(superior temporal gyrus; BA 22)과 하측두이랑(inferior temporal gyrus; BA 37)도 부분적으로 활성화되었다. 가장 활성화 영역이 큰 방추이랑은 옷거나 우는 사람 얼굴의 인식이나 동물의 얼굴, 물체의 상세 관찰 등에서 많이 활성화 된다고 알려져 있다(Smith, 2005; 이준기 등, 2006). 강혜진 등(2005)은 연합기억과제의 특성을 알아보는 연구에서 그림-위치 연합 기억 과제 중 부호화하는 과정에서 활성화되는 영역의 하나로 방추이랑(BA 37)을 제시하였다. 또한 남기춘과 김동휘(2002)는 방추이랑과 하측두이랑이 한자와 같은 복잡한 형태정보에서 의미를 이끌어내는 처리과정이 이루어지는 영역으로 추측하고 있다. 그러므로 측두엽의 이러한 영역들은 과학적 가설 생성 과정에서 의문 상황을 분석 처리하여 그 의미를 이끌어내는 과정이 이루어지는 곳이라고 판단할 수 있다.

(4) 피질하 영역

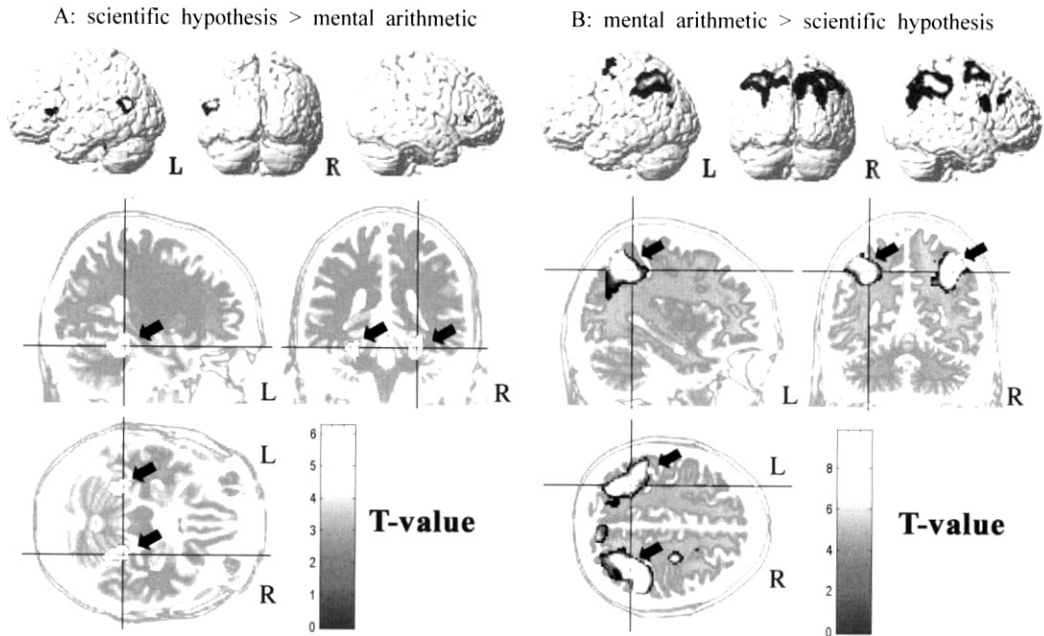
피질하(sub-lobar) 영역은 과학적 가설 생성 과제에서 우측 뇌섬엽(insula)이 활성화되었고, 수리 연산과제에서는 좌측 시상배개(pulvinar)가 활성화되었지만, 활성화된 부피소는 52개로 한 덩이소를 구성하고 있다. 과학적 가설을 생성할 때 나타나는 과학적 감성을 연구한 신동훈과 권용주(2006)의 연구에서 인지적 생성 과정에서 우측 뇌섬엽의 활성이 일어났다고 보고되었고, 또한 뇌섬엽은 애인의 사진을 볼 때(Bartels & Zeki, 2004), 갈등 상황을 만났을 때(Kemmotsu *et al.*, 2005), 과거의 감성을 회상할 때(Sharot *et al.*, 2004) 등에서 활성화 된다고 알려져 있다. 이와 같은 연구 결과들을 고려할 때, 과학적 가설 생성 과정은 인지적인 사고과정 뿐만 아니라, 인지적인 감성 생성 과정도 동시에 나타나는 것으로 생각할 수 있다.

3. 과제별 두뇌 활성화 영역의 차이

생명현상에 대한 과학적 가설 생성 과제와 수리 연산 과제를 수행하는 동안 피험자들의 두뇌 활성화 영역은 여러 부위에서 활성 영역의 크기와 강도에서 뚜렷한 차이가 나타났다. 보다 뚜렷한 차이를 조사하기 위하여 과학적 가설 생성 과제의 두뇌 활성화 영역에서 수리 연산 과제의 두뇌 활성화 영역을 직접 감산하고, 또 반대 조건으로도 감산하여 입체적인 뇌 매핑(rendering)과 단면도(section)를 Fig. 4에 나타내었다. Table 3과 Fig. 3과 4를 비교하여 이러한 차이점을 분석하였다.

과학적 가설 생성 과정이 수리 연산 과정과 비교하여 가장 큰 차이점은 Fig. 4의 A에 나타난 바와 같이 좌뇌의 방추이랑(fusiform gyrus; -30, -45, -13)이다. 앞에서 논의한 바와 같이 이 영역들은 과학적 가설 생성 과정에서 제시된 의문 상황을 분석 처리하여 그 의미를 이끌어내는 과정이 이루어지는 곳이라고 종합적으로 판단할 수 있었다. 반면에 수리 연산 처리 과정에서는 이러한 의미를 이끌어내는 과정이 필요 없는 기능적인 절차적 과정만 일어나므로 측두엽의 활성이 나타나지 않은 것으로 추론할 수 있다.

측두엽의 방추이랑과 더불어 특징적인 차이점은 전두엽의 BA 6번 영역이다. BA 6번 영역은 O'Boyle *et al.* (2005)의 연구에서는 머릿속으로 도형을 회전하는 경우에도 활성화되고, 과학적 가설 생성 과정(신동훈과 권용주, 2006; Kwon *et al.*, 2006), 언어 정보 처리 과정(남기춘과 김동휘, 2002), 머릿속으로 된가를 수행하는 부호화 과정(Heum *et al.*, 2004) 등에서도 활성화 되는 것으로 보아 고차원적인 인지기능



Talairach-coordinates: A (L: -30, -45, -13, R: 28, -36, -17), B (L: -32, -50, 47, R: 34, -52, 45) L: Left, R: Right

Fig. 4 Surface rendering and section image of brain areas on the each task subtracting

에 아주 중요한 영역으로 생각된다. 즉 이끌어내진 어떤 의미를 부호화하는 과정이 일어날 때 활성화되는 것으로 추론할 수 있다. 그러므로 과학적 가설 생성 과정에서 의문 상황 분석으로 측두엽에서 이끌어내진 의미가 전두엽에서 부호화하는 과정이 일어난다고 생각할 수 있다.

수리 연산과정이 과학적 가설 생성과 비교하여 큰 차이점은 Fig. 4의 B에 나타난 바와 같이 상두정소엽(superior parietal lobule; -32, -50, 47)과 하두정소엽(inferior parietal lobule; 34, -52, 45)이다. 수를 계산하는 과정에서는 전두엽과 두정엽이 독특한 역할을 담당한다는 Menon *et al.* (2000)의 연구 결과와 수계산 처리과정의 훈련 효과를 조사한 Schmithorst *et al.* (2004)의 연구에서 음악가나 음악가가 아닌 사람이나 모두 좌뇌의 하전두이랑(inferior frontal gyrus; BA 9)이 활성화된다는 연구 결과들을 고려할 때, 이 연구의 결과에서도 전두엽의 6번, 9번 영역과 두정엽 사이에 매우 긴밀한 연관기능이 있는 것으로 생각할 수 있으며, 주로 절차적 지식의 처리가 이루어지는 곳(Rivera *et al.*, 2005)이라고 추론할 수 있다.

어린이와 어른의 연산과제에 있어서 두뇌 활성화 영역의 차이를 연구한 Kawashima *et al.* (2004)에 의하면, 유의미한 차이는 없다고 보고 하였다. 그리고 수리 연산을 처리할 때 연령에 따른 두뇌 활성화의

차이를 연구한 Rivera *et al.* (2005)에 의하면, 나이가 들수록 좌측 하두정엽의 활성화가 약간 증가하며, 전두엽의 활성화는 떨어진다고 하였다. 그러므로 수리 연산에 따른 뇌의 전체적인 발달적 변화는 없다고 생각할 수 있다. 그러나 권용주 등(2006a)의 연구 결과에 의하면 과학적 가설 생성 학습을 지속적으로 한 후에 예비 교사들의 두뇌 활성화에 큰 변화를 미치는 것으로 나타나고 있다. 이 연구의 결과가 이준기 등(2006)과 Kwon *et al.* (2006)의 연구에서 보고된 과학적 가설 생성시의 두뇌 활성화 영역과 조금 다르게 나타나고, 수리 연산 과제를 생성할 때의 두뇌 활성화 영역은 Menon *et al.* (2000)의 선행 연구와 거의 유사하게 나타난 이유는 이러한 관점으로 해석할 수 있다. 즉 과학적 가설 생성은 피험자들의 나이나 전공, 과학적 가설을 생성해 본 경험의 차이 등에 의해 영향을 받지만, 수리 연산 과정은 이러한 변인에 많은 영향을 받지 않은 것으로 생각할 수 있다. 실제로 과학적 가설 생성은 '의문상황 탐색'이나 '유사경험 탐색', '원인적 설명자 동정' 등에서 피험자의 사전지식과 경험에 많은 영향을 받지만(권용주 등, 2003; 정진수 등, 2005; Kwon *et al.*, 2006), 수리 연산 과정은 피험자의 사전경험보다는 절차적 과정의 숙련도에 더 많은 영향을(진진욱과 신현용, 2006; Rivera *et al.*, 2005) 받는 것으로 판단할 수 있다.

과학적 가설 생성과 수리 연산 사이의 두뇌 활성화 차이점을 분석한 지금까지의 결과를 고려하면, 과학적 가설 생성과정은 수리 연산 과정과는 다른 독특한 두뇌 부위를 사용하는 것으로 생각할 수 있다. 즉 수리 연산과 같은 계산을 잘 하는 학생이 반드시 과학적 가설을 잘 생성한다고 할 수는 없는 것이다. 그러므로 인간의 여러 지능 중에서 수리지능(logical-mathematical intelligence)과 자연탐구지능(naturalistic intelligence)이 따로 구별되었듯이, 과학적 가설을 생성하는 기작도 두뇌에서 독립적인 네트워크를 구성하고 있는 것으로 추론할 수 있을 것이다. 그러므로 학생들이 과학적 가설을 생성하도록 하는 학습 프로그램의 개발과 적용은 과학 탐구 능력 향상이라는 관점뿐만 아니라 두뇌의 발달적 변화 측면에서도 지속적으로 필요한 연구들이다.

IV. 결론 및 교육적 활용

이 연구에서는 생명 현상에 대한 과학적 가설 생성 과정과 수리 연산 처리 과정의 차이점을 피험자 16명의 두뇌 활성화 변화 양상을 fMRI를 이용하여 조사하였다. 이 연구의 결과를 통하여 얻을 수 있는 결론은 다음과 같다.

첫째, 과학적 가설 생성 과정은 수리 연산 과정과 다른 두뇌 기작을 가지고 있다. 특히 측두엽의 방추이랑(fusiform gyrus)에서 의문 상황 분석으로 이끌어내진 의미가 전두엽의 BA 6번 영역에서 부호화하는 과정이 일어난다고 생각할 수 있다. 수리 연산 과정에서는 측두엽에서의 활성이 나타나지 않는다. 즉, 과학적 가설 생성 과정에서 의문 상황 분석으로 측두엽에서 이끌어내진 의미가 전두엽에서 부호화하는 과정이 일어난다고 생각할 수 있다.

둘째, 수리 연산 과정은 전두엽과 두정엽이 연합되어 활성화 되는 특성이 있다. 특히 전두엽의 BA 6번과 9번 영역과 두정엽의 상두정소엽(superior parietal lobule)이 수리 연산 과정의 절차적 지식에 관여하는 핵심적인 영역으로 판단할 수 있다.

셋째, 과학적 가설 생성 과정은 과학적 감성 생성 과정을 동반하는 특징을 가지고 있다. 이는 두뇌의 작용이 이성과 감성의 조화 속에 이루어진다는 것을 의미하며, 과학적 사고 과정에서도 과학적 감성을 애써 무시할 것이 아니라, 감성의 교육학적 역할에 대해 재고해야 할 것이다.

넷째, 선행 연구들과 비교하였을 때, 과학적 가설 생성은 피험자들의 나이와 사전지식, 과학적 가설을 생성해 본 경험 등의 차이에 의해 영향을 받는 것으

로 나타났다. 그러므로 학습자 개인에 대한 심층적인 이해는 인지적 연구만이 아니라 두뇌 과학적 측면과 더불어 진행될 때만이 가능할 것이다.

이러한 결론들은 생명 현상에 대한 과학적 가설 생성 과정이 수리 연산 과정과 다른 독립적인 두뇌 네트워크를 가지고 있는 영역 특이적 활동임을 나타내는 것이다. fMRI를 활용한 이러한 연구 결과들은 과학적 가설 생성 과정을 인지심리학적 방법뿐만 아니라, 신경학적 방법으로 고찰할 수 있도록 하였으며, 과학적 가설 생성 학습 프로그램 개발을 위한 두뇌-기반적 단서를 제공하는 것이다. 그리고 개발한 교수-학습 프로그램이 두뇌의 과학적 가설 생성 능력의 향상 여부를 비교할 수 있는 준거를 마련하는데 큰 도움이 될 것이다. 또한 과학적 가설 생성 학습은 탐구 능력 향상뿐만 아니라 두뇌의 발달적 변화를 유도할 수 있는 장점이 있으므로 두뇌-기반 교수 학습의 전형으로 제안할 만하다.

국문 요약

이 연구의 목적은 과학적 가설 생성 과정의 두뇌 활성화 특성을 수리 연산 과정과 비교하여 3.0T fMRI를 이용하여 규명하는 것이다. 이를 위하여 16명의 건강한 남자 피험자가 실험에 자발적으로 참여하였으며, 과학적 가설 생성 과제와 수리 연산 과제를 684초 동안 수행하여 fMRI 영상을 측정하였다. 측정 후 언어적 보고 자료를 수집하여 fMRI 영상 자료의 신뢰도를 확보하였다. 언어적 보고의 분석 결과 수집한 fMRI 영상 자료 전부를 통계적 분석 대상 자료에 포함시켰다. SPM2 프로그램을 이용하여 통계적으로 분석한 결과, 과학적 가설 생성 과정은 수리 연산 과정과 다른 독립적인 두뇌 네트워크를 가지고 있는 것으로 나타났다. 과학적 가설 생성 과정에서는 측두엽의 방추이랑(fusiform gyrus)에서 의문 상황 분석으로 이끌어내진 의미가 전두엽에서 부호화하는 과정이 일어난다고 할 수 있다. 수리 연산 과정은 전두엽과 두정엽의 연합된 영역이 중요한 역할을 하며 기능적 숙련도는 두정엽 영역이 관여하는 것으로 생각된다. 또한 과학적 가설 생성 과정에서는 과학적 감성의 생성도 동반하는 것으로 밝혀졌다. 이러한 연구 결과는 과학적 가설 생성 과정을 두뇌 과학적 측면에서 고찰할 수 있도록 하였으며, 과학적 가설 생성 학습 프로그램 개발을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다. 또한 과학적 가설 생성 학습 프로그램은 두뇌-기반 학습의 한 전형으로 제안할 수 있다.

참고 문헌

강은미, 신동훈, 권용주(2006). 과학 지식 생성 학습을 통한 초등학생들의 가설 지식 생성 능력의 발달. *초등과학교육*, 25(3), 257-270.

강해진, 강은주, 이정모, 나동규, 나덕렬, 이동수(2005). 연합기억과제의 특성과 해마 활성화에 대한 fMRI 연구. *한국심리학회지: 실험*, 17(4), 477-498.

권용주, 박지영, 신동훈(2006a). 가설생성 학습 후에 나타난 초등 예비교사의 뇌파 변화. *초등과학교육*, 25(2), 159-166.

권용주, 정진수, 강민정, 김영신(2003). 과학적 가설 지식의 생성 과정에 대한 바탕이론. *한국과학교육학회지*, 23(5), 458-469.

권용주, 정진수, 이준기(2006b). 생명 현상에 대한 과학 교사들의 잠정적 설명의 유형. *한국생물교육학회지*, 34(2), 297-305.

김연수, 조용현, 권재술(2005). 작용 반작용 과제에서 고등학생의 인지갈등 불안유형에 따른 설명가설 형성의 특성(II). *한국과학교육학회지*, 25(3), 400-410.

남기춘, 김동휘(2002). 인간 언어정보저리와 관련된 대뇌 영역. *한국심리학회지: 실험 및 인지*, 14(4), 291-308.

박은미, 강순희(2006). 유사 경험의 제공이 귀추에 의한 가설 설정에 미치는 효과. *한국과학교육학회지*, 26(3), 356-366.

박종원(2000). 학생의 과학적 설명가설의 생성 과정 분석: 과학적 가설의 정의와 특성을 중심으로. *한국과학교육학회지*, 20(4), 667-679.

신동훈, 권용주(2006). 예비교사들의 생물학 가설 생성에서 나타나는 과학적 감성의 생성 과정 유형별 두뇌 활성화에 대한 fMRI 연구. *한국과학교육학회지*, 26(4), 568-580.

오필석, 김찬중(2005). 지구과학의 한 탐구 방법으로서 귀추법에 대한 이론적 고찰. *한국과학교육학회지*, 25(5), 610-623.

유승식 (2001). 기능 자기 공명 영상 실험(실전 응용을 중심으로 한). 서울: 의학문화사.

이원택, 박경아(1996). 의학 신경 해부학. 연세 의대 해부학 교실(<http://anatomy.yonsei.ac.kr/neuro-web/home.htm>).

이준기, 권용주, 정진수(2006). 생명 현상에 대한 가설 생성에서 나타나는 과학교사의 두뇌 활성화-fMRI 연구. *한국생물교육학회지*, 34(4), 453-464.

이해원, 양일호, 조현준(2005). 초·중학생의 관찰, 예상, 가설의 이해. *초등과학교육*, 24(3), 236-241.

정용재, 송진웅(2006). Peirce의 귀추법 양식을 이용한 교육 대학생들이 생성한 가설의 특징 분석. *초등과학교육*, 25(2), 126-140.

정진수(2006). 초·중등 학생들의 과학적 가설 생성력 측정 도구 개발과 활용. *한국생물교육학회지*, 34(3), 388-404.

정진수, 원희정, 권용주(2005). 과학적 가설의 생성력 향상을 위한 삼원귀추모형의 적용. *한국과학교육학회지*, 25(5), 595-602.

진진욱, 신현용(2006). 실수 연산의 기본 성질에 대한 고등학교 2학년 학생들의 이해와 적용 능력 분석. *수학교육*, 45(1), 61-74.

Ansari, D., & Coch, D. (2006). Bridges over troubled waters: education and cognitive neuroscience. *Trends in cognitive sciences*, 10(4), 146-151.

Bartels, A., & Zeki, S. (2004). The neural correlates of maternal and romantic love. *NeuroImage*, 21(3), 1155-1166.

Buxton, R. B. (2002). *Introduction to functional magnetic resonance imaging: Principles and techniques*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Gazzaniga, M. S., Ivry, R. B., & Mangun, G. R. (2002). *Cognitive neuroscience: The biology of the mind* (2nd ed.), W. W. Norton & Company.

Green, A. E., Fugelsang, J. A., Kraemer, D. J. M., & Shamosh, N. A. (2006). Frontopolar cortex mediates abstract integration in analogy. *Brain Research*, 1096, 125-137.

Hanson, N. R. (1958). *Patterns of discovery*. (송진웅, 조숙경 역, 1995). Cambridge University Press.

Huettel, S. A., Song, A. W., & McCarthy, G. (2004). *Functional magnetic resonance imaging*. Sunderland, MA: Sinauer Associates, Inc.

Jin, S., Kwon, Y., Jeong, J., Kwon, S., & Shin, D. (2006). Increased information transmission during scientific hypothesis generation: Mutual information analysis of multichannel EEG. *International Journal of Psychophysiology*, 62(2), 337-344.

Kawashima, R., Taira, M., Okita K., Inoue, K., Tajima, N., Yoshida, H., Ssaki, T., Sugiura, M., Watanabe, J., & Fukuda, H. (2004). A functional MRI study of simple arithmetic-a comparison between children and adults. *Cognitive Brain Research*, 18(3), 225-231.

Kemmotsu, N., Villalobos, M. E., Graffrey, M. S., Courchesne, E., & Muller, R. (2005). Activity and functional connectivity of inferior frontal cortex associated with response conflict. *Cognitive Brain Research*, 24, 335-342.

Klahr, D., & Dunbar, K. (1998). Dual space search during scientific reasoning. *Cognitive Science*, 12, 1-48.

Kwon, Y., Jeong, J., & Jin, S. (2004). EEG correlation patterns of hypothesis-generating in undergraduate students' generation of scientific knowledge. *Journal of the Korean Association for Research in Science Education*. 24(4), 722-730.

Kwon, Y., Yang, I., Kang, M., & Lee, J. (2006).

Changes in the brain activity after training of hypothesis generation in science. *NeuroImage*, 31(S1), S58.

Lawson, A. E. (1995). *Science teaching and development of thinking*. Belmont, CA: Wadsworth Publishing company.

Lawson, A. E. (2002). What does Galileo's discovery of Jupiter's moons tell us about the process of scientific discovery? *Science Education*, 11, 1-24.

Menon, V., Mackenka, K., Rivera, S., & Reiss, A. (2002). Prefrontal cortex involvement in processing incorrect arithmetic equations: Evidence from event-related fMRI. *Human Brain Mapping*, 16, 119-130.

Menon, V., Rivera, S., White, C., Glover, G., & Reiss, A. (2000). Dissociating prefrontal and parietal cortex activation during arithmetic processing. *NeuroImage*, 12(4), 357-365.

Naghavi, H. R., & Nyberg, L. (2005). Common fronto-parietal activity in attention, memory, and consciousness: Shared demands on integration? *Consciousness and Cognition*, 14, 390-425.

O'Boyle, M., Cunnington, R., Silk, T., Vaughan, D., Jackson, G., Syngeiotis, A., & Egan, G. (2005). Mathematically gifted male adolescents activate a unique brain

network during mental rotation. *Cognitive Brain Research*, 25, 583-587.

Rivera, S., Reiss, A., Eckert, M., & Menon, V. (2005). Developmental changes in mental arithmetic: Evidence for increased functional specialization in the left inferior parietal cortex. *Cerebral Cortex*, 15, 1779-1790.

Schmithorst, V., & Holland, S. (2004). The effect of musical training on the neural correlates of math processing: a functional magnetic resonance imaging study in humans. *Neuroscience Letters*, 354, 193-196.

Smith, D. T., Jackson, S. R., & Rorden, C. (2005). Transcranial magnetic stimulation of the left human frontal eye fields eliminates the cost of invalid endogenous cues. *Neuropsychologia*, 43, 1288-1296.

Snell, R. S. (2001). *Clinical neuroanatomy for medical students*. (박경환 대표역, 2005), Lippincott Williams & Wilkins, Inc.

Talairach, J., & Tournoux, P. (1988). *Co-planar stereotaxic atlas of the human brain*. New York: Thieme Medical publishers, Inc.

Veltman, D., Hutton, C., Ashburner, J., & Henson, R. (2001). SPM99 Manual. <http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm>.