

생명현상에 관한 과학적 의문 생성 과정에서 나타나는 생물학자의 두뇌 활성화 양상

권용주* · 정진수 · 이준기 · 양일호

한국교원대학교

The Biologists' Brain Activation Patterns during the Generation of Scientific Questions on Biological Phenomena

Kwon, Yongju* · Jeong, Jinsu · Lee, Junki · Yang, Ilho

Korea National University of Education

Abstract: The purpose of this study was to investigate biologists' brain activation patterns during the generation of scientific questions on biological phenomena. Eight right-handed healthy biologists volunteered to be participants in the present study. The question-generation tasks were presented in a block design. The BOLD signals of the biologists' brain were measured by 3.0T fMRI system and data were analyzed using Statistical Parametric Mapping (SPM2). According to our results, the left inferior and middle frontal gyri, the medial prefrontal cortex, the bilateral hippocampus, the occipito-parietal route, the fusiform gyrus, and the cerebellum were activated significantly during the generation of scientific questions. Therefore, we suggested that generating scientific question is associated with analyzing observed situations, using verbal strategy, retrieving episodic memories for comparisons, and feeling cognitive conflicts.

Key words: scientific question, biologist, fMRI, brain activation pattern, biological phenomena, VLPFC

I. 서 론

과학적 의문이란 자연현상 탐구에서 현재의 지식으로는 설명할 수 없는 불안정한 문제, 의심, 불확실성 등을 인식했을 때 갖게 되는 궁금증을 의미한다(Christenbury & Kelly, 1983; Lawson, 1995; Spargo & Enderstein, 1997). 과학적 의문은 과학 연구의 방향과 가치를 결정짓는 중요한 중간적 지식(intermediate knowledge)이다(권용주 등, 2003). 뿐만 아니라, 탐구력 신장을 중요한 교육 목적으로 두고 있는 과학교육에서도 학생들의 과학적 의문은 매우 중요한 것으로 인식되고 있다(권용주 등, 2003; Gott & Duggan, 1995). 왜냐하면 자율적 탐구는 학생들의 흥미를 기반으로 이루어질 때 가장 효과적이고, 학생들의 흥미는 스스로 생성한 과학적 의문에 의해 가장 잘 드러나기 때문이다(이혜정 등, 2004; Christenbury & Kelly, 1983).

과학적 의문에 관한 선행 연구들에 의하면, 과학적

의문은 주로 선지식과의 모순(Scardamalia & Bereiter, 1992), 호기심이나 놀람(Christenbury & Kelly, 1983), 실제적인 필요(Thargard, 1998) 등에 의해 발생된다. 또한 인지적 관점에서 과학적 의문은 관찰현상 추출, 관찰현상 분석, 경험상황 표상, 경험상황 추출, 경험상황 분석, 원인적 설명자 표상, 현상 비교, 설명자 판단 등의 일련의 연속적 지식 표상과 사고 과정을 통해서 생성된다(이혜정 등, 2005).

그러나 이러한 선행 연구들은 과학적 의문의 생성을 인지적 관점에서 구성한 개념들을 사용해서 설명했을 뿐, 실제 우리의 두뇌 속에서 일어나고 있는 신경들의 활동이나 변화에 대해서는 설명해주지 못하는 한계를 가지고 있다. 뿐만 아니라, 선행 연구들에서 적용된 지필검사, 회상적 면접법, 발성 사고법, 관찰법 등의 인지심리학적 연구 방법들은 모두가 피험자의 행동 반응에 의존하는 간접적인 방법이기 때문에 연구 과정에서 의문 생성의 본질이 왜곡될 수도 있는 제한점을 갖고 있다(Gagne, et al., 1997).

* 교신저자: 권용주(kwonj@knu.ac.kr)

** 이 논문은 2005년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. R01-2005-000-11024-0).

*** 2006.11.07(접수) 2007.02.07(1심통과) 2007.02.12(최종통과)

하지만 비교적 최근에 개발된 PET (positron emission tomography), fMRI (functional magnetic resonance imaging), MEG (magnetoencephalography) 등의 뇌 기능 영상화 기술들은 인지적 연구의 제한점을 해결해 줄 수 있는 가능성을 열어가고 있다. 특히 fMRI는 뇌의 구조뿐만 아니라 기능에 대한 3차원 영상구성이 가능하고 뇌의 활동에 대한 작은 구조적 및 기능적 변화도 탐지할 수 있을 뿐만 아니라 비침습적(non-invasive) 기술이기 때문에 교육과 관련된 인지 기능 연구에 활발하게 활용되고 있다(Buxton, 2002; Frith, *et al.*, 1991; Rosenweig *et al.*, 2005). 뇌 기능 영상화 기술은 특정한 인지적 기능이 뇌의 어떤 부위들을 어떻게 사용함으로써 발현되는지를 직접적인 방법으로 연구할 수 있는 길을 열어놓은 것이다.

이러한 뇌 기능 영상화 기술을 적용한 연구 결과들은 과학적 의문 생성에 관해서도 몇 가지 시사점들을 주고 있다. 먼저, 주어진 현상에서 의문이 생성되기 위해서는 현상 자체를 분석적으로 인식하는 것이 필요한데 이러한 지각 기능은 방추이랑(fusiform gyrus)의 활성화와 관련이 높을 것으로 생각된다(Caveza & Nyberg, 2000; Naghavi & Nyberg, 2005; Smith *et al.*, 2005). 또한 정보들을 비교하기 위한 내적 심상 및 언어의 표상을 위해서는 작업기억(working memory)의 활용이 필수적인데 이것은 상전두이랑(superior frontal gyrus)과 상·하두정엽(inferior & superior parietal lobule)의 기능과 관련될 것으로 생각된다(Ruff *et al.*, 2003). 더 나아가 의문 생성 과정에서 표상된 정보들을 통합하는 좌뇌 전두엽(left frontal gyrus)의 역할도 중요할 것으로 생각된다(Caveza & Nyberg, 2000; Goel & Dolan, 2003a, 2003b). 마지막으로 의문의 생성은 갈등 상황의 감성이 개입될 것이므로 복외측 전두피질(ventral lateral prefrontal cortex; VLPFC)이 관련될 것으로 생각할 수 있다(Blackwood *et al.*, 2004; Heekeren *et al.*, 2004; Stavy *et al.*, 2006; Voltz *et al.*, 2005a, 2005b).

그러나 이러한 시사점들은 과학의 내용이 배제된 인지심리학적 과제들을 활용한 연구 결과들을 근거로 한 것이기 때문에 과학적 의문 생성과 직접적으로 관련시키는 데는 많은 제한점들이 있다고 할 수 있다. 또한 대부분 일반인들을 연구 대상으로 한 것이어서 과학적 의문 생성의 표준으로 삼을 수 있는 과학자들의 사고와는 거리가 있다고 생각된다. 따라서 이 연구는 과학의 한 영역인 생물학 영역에서 뚜렷한 연구 업적을 보인 생물학자들이 생물학적 의문을 생성할 때 활성화되는 두뇌의 특성을 분석하고자 한다.

II. 연구 방법

1. 연구 대상

연구 목적에 따라 8명의 생물학자들(평균 연령 = 37.9±4.95)이 연구 대상으로 선별되었다. 이들은 모두 생물학 분야에서 박사학위를 취득하였고, 최근 2년 이내에 2편 이상의 생물학 논문을 SCI급 학술지에 발표하였다. 뇌 기능 영상화 자료 분석의 변인을 최소화하기 위해서 오른손잡이인 남성 생물학자만을 선별하였다. 선별된 생물학자들은 모두 fMRI 측정에 적합한지를 검토하는 질문지에서 정신과 치료, 폐쇄공포증, 약물 복용, 체내 금속 물질 등의 항목에 관계없다고 응답하였고, 연구자와 한국과학기술원 fMRI 연구소 측에서 제시한 연구 참여 동의서에 서명하였다.

2. 측정 과제 개발

연구자들은 생명현상에 관한 의문 생성 과정에서 나타나는 두뇌 활성을 알아보기 위해서 3개의 연습과제와 10개의 본 과제를 개발하였다. 신경생물학적 연구를 수행한 경험이 있는 생물교육 전문가 3인과 현직 과학교사 4인과의 정기적인 세미나 및 워크숍을 통해 R & D 방식으로 과제들을 개발하였다. 먼저 30개의 1차 의문 생성 과제와 제시 패러다임을 개발하였고, 이 과제들을 세미나에서 전문가들의 논의를 바탕으로 수정 보완하여 2차 과제를 개발하였다. 또한 2차 과제들을 측정에 참여하지 않는 생물학자 및 박사 과정 학생들에게 투입한 후, 의문이 전혀 생성되지 않거나, 사진 자극이 너무 혐오스러워서 거부감이 크게 나타나는 것, 혹은 암기된 지식에 의해 너무 쉽게 답이 나오는 과제들을 우선적으로 제외시켰고, 남은 과제 중 생물 영역 및 의문 유형을 안내하여 10개의 과제로 구성된 3차 과제를 완성하였다. 3차 과제는 동물에 관한 과제 5개와 식물 및 균류에 관한 과제 5개로 구성되었다.

3. 측정 과제 제시

연구자들은 본 과제에 앞서 3개의 예비과제를 통해서 fMRI 촬영 과정 및 과제 수행 방법을 피험자들이 숙지할 수 있도록 훈련하였다. 훈련 중 피험자들이 이해하지 못한 부분은 반복적으로 과제를 수행하게 함으로써 연구자들의 의도를 충분히 파악할 수 있도록 하였다.

연구자들은 본 과제를 제시하기 위해서 블록 디자인 방법을 적용하였다(Buxton, 2002). 10개의 과학적 의문 생성 과제는 모두 21개의 블록으로 구성된 패러

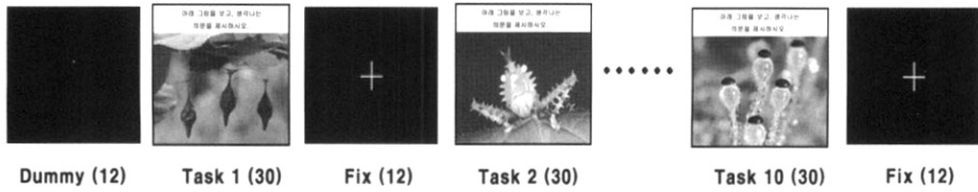


그림 1 과제 제시 방법

그림 1 과제 제시 방법

다임 안에 포함되어 들어갔고, 블록 슬라이드는 공조건(dummy)과 본 과제(main task; 의문 생성 과제), 기저조건(baseline condition; fix slide) 등으로 구분되었다(그림 1).

처음에 제시된 공조건(dummy)은 검은 화면을 12초간 제시하는 것이며, 이것은 피험자들에게 본 측정에 앞서 과제 수행을 준비할 것을 알리는데 의미가 있다. 본 과제에서는 생명현상에 관한 다양한 의문을 유발할만한 사진자료를 피험자들에게 30초간 제시하면서 관찰된 현상에 대한 의문을 생성할 것을 요구하였다. 과제 슬라이드에는 피험자들이 의문 생성 이후 가설까지 생성하거나, 혹은 의문을 생성하지 않고 현상의 관찰에만 머무르는 것을 방지하고, 피험자들이 의문 생성에만 집중할 수 있도록 돕기 위해서 사진자료 위에 지시 문구를 제시하였다(예, 아래 그림을 보고, 생각나는 의문을 제시하시오). 본 과제의 제시 문구는 모두 동일하였고 되도록 사진만 보고도 그러한 사고가 유발될 수 있도록 과제를 고안하였다. 기저조건은 검은 화면에 ‘+’ 표시를 제시하고 12초간 단순히 응시하게 하는 형태로 제시되었다. 이것은 본 과제의 인지적 뇌 활성화에서 시각 피질에서 일어나는 1차적 반응과 같은 뇌의 기본적 활성을 제거하기 위해서 사용하는 일반적인 기법이다(Buxton, 2002).

4. 기능성 자기공명 영상 촬영

피험자들의 두뇌 활성 상태를 측정하기 위해서 한국과학기술원 fMRI 연구동 내에 있는 ISOL 3.0 Tesla forte MRI scanner를 사용하였다. 자기공명영상의 획득은 Gradient Echoplanar Imaging (EPI) sequence를 사용하였으며, 반복시간(repeated time; TR)은 3000ms, 에코시간(echo time; TE)은 35ms로 하였다. 또한 이미지 매트릭스는 64×64, 영상범위(FOV)는 220mm², 영상절편의 두께는 5mm, 절편의 수는 30장으로 하였다. 기능성 자기공명 영상의 촬영 전에 T1 MR 영상이 시상면(sagittal plane)으로 촬영되었고, 이어서 과제의 시작과 동시에 EPI 방식으로 기능영상을 위의 변수들을 통하여 촬영하였다.

5. 사후 면담

피험자들이 과제 수행에서 의미 있게 의문을 생성했는지, 또 생성한 의문의 수와 어떤 종류의 의문을 생성했는지를 확인하기 위해서 면담지를 이용하여 사후 면담을 실시하였다. 먼저 면담지에 각 과제에서 생성한 의문들을 모두 기록하게 하였고, 작성된 의문 이외에 fMRI 촬영 시 생성했었던 의문이 없었는지 질문하는 형식으로 면담을 실시하였다. 또한 이 과정에서 어떠한 인지적 전략을 사용했는지 질문하였다.

6. 기능성 자기공명 영상 분석

영상 촬영을 통해 수집된 결과를 MATLAB 프로그램 환경에서 구현되는 SPM2 (statistical parametric mapping, version 2)를 이용해서 분석하였다. 피험자들이 실험 중에 머리를 움직임으로써 생기는 오차를 줄이기 위해서 뇌 영상을 재조정(realignment)하였으며, 이를 통해 생성된 평균 영상(mean-image)에 각 피험자의 T1 영상을 상관정렬(co-register)하였다. 이후에 공간 표준화(normalization)와 편평화(smoothing) 작업을 했는데, 편평화는 8mm의 FWHM (full width at half maximum)로 Gaussian Kernel 필터를 이용하였다. 이후 각각의 피험자 마다, 위에서 처리된 두뇌 부피영상의 구성단위인 부피소(voxel; 2.0×2.0×2.0mm³) 별 BOLD (blood oxygen level dependent) 신호의 변화는 실험조건(experimental condition), 그리고 기저조건(baseline condition)으로 나누어 각각의 scan에서 비교되었다. 이렇게 구성된 모델과 영상들의 처리된 결과는 상관관계를 이용하여 분석하였다.

각 피험자별로 위와 같은 대조조건을 가진 영상을 얻은 다음 피험자 간 집단 분석을 실시하였다. 집단분석에서는 통계적인 검정력을 높일 수 있도록 하기 위해서 개인차를 무선편수로 고려한 무선편수효과분석(random-effect analysis)을 사용하였다. 본 연구에 적용한 통계적 방법은 T 검증이므로 SPM basic model의 단일 표본 T-검증(one sample T-test)을 사용하여 통계처리를 하였다. 다중비교(multiple comparison) 유의 수준 p 값은 보정하지 않은 0.001로 정하고 (uncorrected,

$p < 0.001$), 범위역치 (extent threshold) 값인 k 는 50 이상으로 제한하였다. 이렇게 얻어진 활성화된 두뇌 영역의 MNI (Montreal Neurology Institute) 좌표를 Talairach 좌표 (Talairach & Tournoux, 1998)로 변환하여 구체적인 두뇌 부위를 추론 하였다.

III. 연구 결과 및 논의

1. 사후 면담 결과

fMRI 측정이 완료된 후 이루어진 사후 면담에서

표 1

피험자들이 생성한 의문의 종류와 수

피험자	의문 유형	의문 생성 과제									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	추측적 의문	2	2	2	1	1	3	3	2	1	1
	인과적 의문	1	1	2	1	2	2	0	1	2	1
	예측적 의문	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	적용적 의문	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	계	3	3	4	2	3	5	3	3	3	2
2	추측적 의문	2	3	1	1	1	1	1	2	2	2
	인과적 의문	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1
	예측적 의문	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	적용적 의문	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	계	3	5	3	2	3	3	3	4	4	4
3	추측적 의문	4	4	3	5	4	4	3	2	2	2
	인과적 의문	2	0	1	1	1	1	0	3	1	0
	예측적 의문	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
	적용적 의문	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	계	6	4	5	6	5	5	3	5	3	4
4	추측적 의문	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
	인과적 의문	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	예측적 의문	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	적용적 의문	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	계	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1
5	추측적 의문	0	1	0	0	0	3	2	1	0	2
	인과적 의문	2	2	2	2	3	0	1	3	3	0
	예측적 의문	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	적용적 의문	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	계	2	3	2	2	3	3	3	4	3	2
6	추측적 의문	1	1	1	1	1	2	2	1	1	2
	인과적 의문	3	3	3	3	3	2	1	2	2	0
	예측적 의문	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	적용적 의문	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2
	계	4	4	4	4	4	4	3	4	3	4
7	추측적 의문	0	1	2	0	0	2	2	3	2	3
	인과적 의문	4	4	2	5	5	3	2	2	2	2
	예측적 의문	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	적용적 의문	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	계	4	5	4	5	5	5	4	5	4	5
8	추측적 의문	3	3	4	3	3	3	3	3	5	3
	인과적 의문	1	0	1	1	3	1	2	2	1	2
	예측적 의문	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	적용적 의문	0	2	1	0	0	1	0	0	0	0
	계	4	5	6	4	6	5	5	5	6	5

모든 피험자들은 제시된 자극을 보면서 자연스럽게 과학적 의문을 생성하였다고 응답했다. 이들은 각 과제에서 평균 3.55(SD=1.40)개의 의문을 생성하였으며, 추측적 의문이 가장 많았고 방법적 의문은 나타나지 않았다. 또한 피험자들은 의문 생성 과정에서 언어적 전략을 사용하였다고 응답하였다. 피험자들이 생성한 과학적 의문의 종류 및 수는 표 1과 같다.

2. 두뇌 활성화 분석 결과

생물학자들이 과학적 의문을 생성하는 동안의 전체적인 두뇌 활성화 양상은 좌뇌 전두엽의 활성화가 두드러졌으며, 우뇌 전두엽의 활성화는 나타나지 않았다. 후두엽과 측두엽 및 변연엽도 강하게 활성화 되었다. 특히 변연엽에서는 양측 해마의 활성화가 발견 되었다. 또한 두정엽 영역에서는 양측 모두 활성을 보이는 것으로 나타났다 (그림 2, 3과 표 2).

(1) 전두엽 영역

의문 생성 과정에서 생물학자들의 두뇌는 다양한 활성화 패턴을 보였는데, 그 중 전두엽에서는 좌측 하전두이랑(inferior frontal gyrus; BA 47, 45), 상전두이랑(superior frontal gyrus; BA 6, 44), 중전두이랑(middle frontal gyrus; BA 6, 9), 중심전두이랑(pre-central gyrus; BA 9), 내측전두이랑 (medial frontal

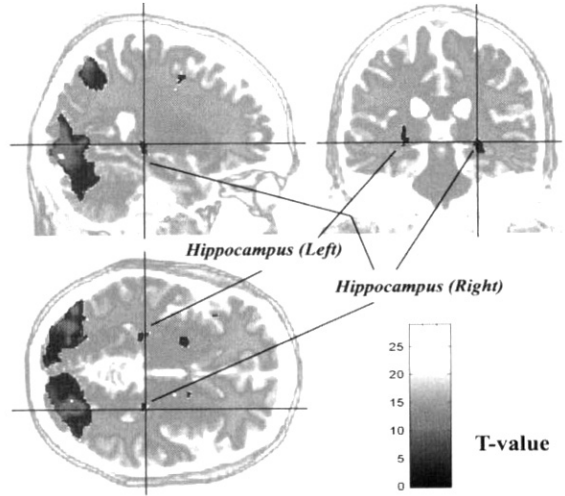


그림 3 과학적 의문 생성 과정에서 나타나는 변연엽 활성화 양상

gyrus; BA 8, 9) 및 대상이랑 (cingulate gyrus; BA 32)의 활성화가 유의미하게 나타났다(그림 2와 표 2).

이중 상전두이랑은 우측소뇌와 함께 활성화 되는 경우가 많은데, 주로 불확실한 상황 하에서의 추론 혹은 의사결정이나 언어전략을 구사하는 속말하기(silence word generation)와 같은 과제의 연구에서 많이 발견된다(Fiedman *et al.*, 1998). 이는 이들 영역이 언어적 작업기억(verbal working memory)과 많은 관련이 있기 때문이다(Peterson *et al.*, 1988). 이 연구에서도 모든 생물학자들이 자기공명영상 측정 후 갖은 심층 면담에서 과제 수행 중 언어적 전략을 구사하였다고 보고한 바 있어, 의문지식이 두뇌에서 언어를 통해 생성되고 있는 것으로 추정된다.

BA 8은 내측전두이랑의 한 영역으로 전안구영역(frontal eye field; FEF)라고도 불린다(Smith *et al.*, 2005). 이 영역은 방추회와 더불어 상세 관찰 시 나타나는 영역으로 분석적 관찰 시 나타나는 활발한 안구운동으로 인해 활성화되고 있다. 이혜정 등(2005)의 연구 결과에 나타난 과학적 의문의 생성 과정 중 ‘관찰현상 추출’과 ‘관찰현상 분석’ 단계의 수행이 이 영역의 활성화와 관계가 깊다고 할 수 있다.

대상이랑(cingulate gyrus; BA 32)은 전방과 후방에서의 역할이 다르다고 알려져 있다(Caveza & Nyberg, 2000; Naghavi & Nyberg, 2005). 이 영역은 주로 어떤 대상에 대한 주의 집중이나 의사결정, 잘 모르는 상황에 대한 추론, 답을 획득한 뒤의 실행 등의 역할을 수행한다고 알려져 있다. 이 중 실행자(executive role)의 역할은 전대상이랑에서는 나타나지 않으며 주

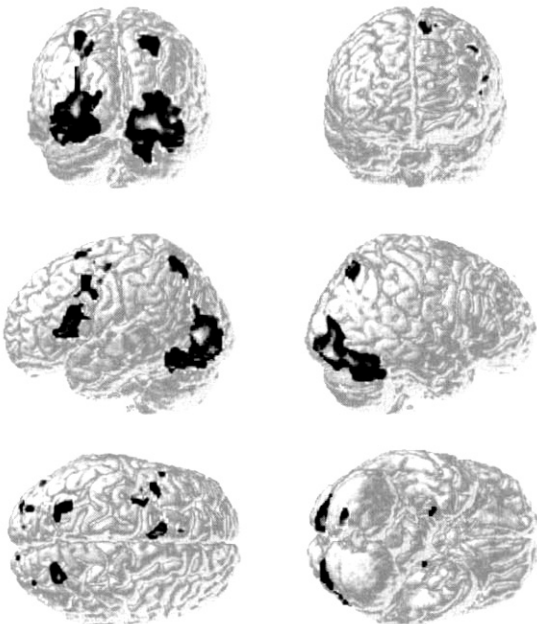


그림 2 과학적 의문 생성 과정에서 나타나는 두뇌 활성화 영역

표 2

과학적 의문 생성 과정에서 나타난 두뇌의 활성화 영역

	두뇌 활성화 영역	브로드만 영역(BA) 및 반구	좌표 및 활성화수준			Z-value
			x	y	z	
전두엽 (Frontal lobe)	하전두이랑 (Inferior frontal gyrus)	47 L	-42	27	2	5.36
	하전두이랑 (Inferior frontal gyrus)	45 L	-46	20	12	4.70
	상전두이랑 (Superior frontal gyrus)	44 L	-50	14	18	3.96
	상전두이랑 (Superior frontal gyrus)	6 L	-8	12	55	4.34
	상전두이랑 (Superior frontal gyrus)	6 L	-14	15	62	4.18
	중전두이랑 (Middle frontal gyrus)	9 L	-28	17	30	4.24
	중전두이랑 (Middle frontal gyrus)	6 L	-40	12	44	4.13
	중심전두이랑 (Precentral gyrus)	9 L	-34	12	36	4.13
	내측전두이랑 (Medial frontal gyrus)	9 L	-10	31	32	3.57
	내측전두이랑 (Medial frontal gyrus)	8 L	-8	31	41	3.46
	대상이랑 (Cingulate gyrus)	32 L	-10	21	34	4.05
	측두엽 (Temporal lobe)	방추이랑 (Fusiform gyrus)	37 R	48	-57	-16
두정엽 (Parietal lobe)	상두정소엽 (Superior parietal lobule)	7 R	26	-63	57	4.47
	하두정소엽 (Inferior parietal lobule)	40 L	-46	-43	39	5.64
	하두정소엽 (Inferior parietal lobule)	40 L	-44	-35	46	2.67
변연엽 (Limbic lobe)	해마 (Hippocampus)	L	-24	-31	3	3.32
	해마 (Hippocampus)	R	28	-27	2	3.16
후두엽 (Occipital lobe)	췌기소엽 (Cuneus)	17 R	22	-78	4	5.65
	하후두이랑 (Inferior occipital gyrus)	18 R	30	-86	-6	5.35
	하후두이랑 (Inferior occipital gyrus)	18 L	-46	-78	1	5.21
	중후두이랑 (Middle occipital gyrus)	18 L	-32	-78	4	5.20
	중후두이랑 (Middle occipital gyrus)	18 L	-44	-76	-8	5.02
기타 영역 (Others)	소뇌비탈 (Declive)	R	4	-85	-20	4.19
	외측창백핵 (Lateral globus pallidus)	L	-18	-2	7	3.87
	조가비핵 (Putamen)	L	-22	1	15	3.59

$P < 0.001$, $k > 50$, uncorrected, L; 좌반구, R; 우반구

로 후대상이랑(posterior cingulate gyrus)에서만 나타난다(Caveza & Nyberg, 2000; Elliot & Dolan, 1998). 이 연구에서는 좌표상으로 보아 대상이랑의 전-후 두 지역 중 전대상이랑(anterior cingulate gyrus) 지역에 속하므로 주의집중 혹은 대상물에 대한 비교와 선택기능에 해당한다고 볼 수 있다. 과학적 의문 생성 과정에서 피험자들은 제시된 현상을 자신의 기존 지식 및 경험상황과 비교하고 이를 수차례 선택 및 판단하는 과정을 거친다. 선행 연구의 과정에서 나타난 현상 비교(comparing phenomena)와 설명자 판단(judging explicans)이 이에 해당하는데, 이 과정에서 대상이랑이 매우 중요한 역할을 했을 것으로 생각된다.

상전두이랑의 한 영역인 브로카 영역(좌측 BA 44)은 언어생성 영역으로 매우 잘 알려져 있다(Caveza

& Nyberg, 2000; Naghavi & Nyberg, 2005; Rosenzweig et al., 2005). 또한 이 영역은 실제로 말을 하지 않은 상태에서 머릿속으로 언어를 생성하기만 해도 활성화 된다는 것이 많은 선행 연구들에서 나타나있다(이수화와 이정민, 2000). 여기서는 최종적인 과학적 의문이 생성될 때, 비록 외부로 말을 통해 표출되지는 않았으나 피험자들의 두뇌 안에서 언어의 형태로 의문이 생성되고 있었음을 보여준다고 할 수 있다.

중전두이랑은 상전두이랑과 함께 등외측전두피질부(dorsolateral prefrontal cortex; DLPFC)의 일부분이다. 이 영역은 고등사고 및 추론의 핵심 영역으로 보고되고 있으며, 주로 의사결정, 외부 정보들의 통합에 대한 역할을 한다고 알려져 있다(Caveza & Nyberg, 2000; Goel & Dolan, 2003a, 2003b). 여기서는 관찰된 정보를 통합하여 표상하는 역할로 판단된다.

하전두이랑은 복내(외)측전두피질(ventral lateral prefrontal cortex; VLPFC)의 일부분이며, 많은 연구들에서 감성과 관련된 부위로 알려져 있다. 특히 추론 및 사고 과정에서의 감성적 개입이나(Damasio, 1997; Goel & Dolan, 2003a, 2003b; Vartanian & Goel, 2005), 신념(Goel & Dolan, 2003b), 선지식에 의한 오판(Goel & Dolan, 2003a), 직관 및 확률적 추론(Stavy *et al.*, 2006), 불확실한 상황 하에서의 의사결정(Blackwood *et al.*, 2004; Heekeren *et al.*, 2004; Voltz *et al.*, 2005a, 2005b) 등에 다양하게 영향을 미치는 영역이다. 선행 연구의 결과들로 볼 때에 이 영역은 수집된 외부 정보가 자신이 만족할만한 설명(결론)을 만들어내기에 불충분한 제한된 경우나, 불확실한 경우, 정보는 충분하나 기존정보가 없어서 비교가 불가능한 경우, 혹은 인지적 갈등 및 부조화 상황이 유발되었을 때 활성화 된다. 따라서 과학적 의문의 원천에 관한 인지적인 연구들의 언급(Christenbury & Kelly, 1983; Lawson, 1995; Spargo & Enderstein, 1997)으로 볼 때에 이 영역을 과학적 의문 생성의 핵심 영역으로 볼 수 있다.

(2) 측두엽 영역

측두엽 부위에서는 우측 방추이랑(fusiform gyrus; BA 37)의 활성이 나타났는데(그림 2와 표 2), 이 영역의 활성은 주로 사람의 얼굴을 인식하거나 물체를 상세히 관찰할 때에 활성화 된다고 보고되고 있다(Smith *et al.*, 2005; Caveza & Nyberg, 2000; Naghavi & Nyberg, 2005). 이는 이해정 등(2005)이 밝힌 과학적 의문 생성의 단계 중 관찰 현상 분석(analysing observed phenomena) 단계와 일치된다고 생각된다. 즉 이 부위의 활성은 시각을 통해 분석적이고 세밀한 정보 수집 과정에서 나타난다고 판단된다.

(3) 두정엽 영역

두정엽 부위에서는 우측 상두정소엽과 좌측 하두정소엽 영역의 활성이 나타났다(그림 2와 표 2). 이들 영역은 시각피질로부터 들어온, 혹은 자신의 기억으로부터 추출된 내적 심상(mental imagery) 정보를 후두-두정 회로(occipito-parietal pathway)를 통하여 넘겨 받은 뒤에 사고의 진행과정 동안 이를 유지하는 시각적 작업기억(visual working memory)의 역할을 수행한다고 알려져 있다(Ruff *et al.*, 2003). 과학적 의문 생성에서는 관찰현상과 경험상황의 비교를 위해 추출된 내적 심상을 작업기억에 유지시키는 역할을 두정부 영역에서 하고 있는 것으로 볼 수 있다.

(4) 변연엽 영역

변연엽에서는 양측 해마(hippocampus)의 활성이 나타났다(그림 3과 표 2). 최근 연구 결과들에 의하면 해마는 좌-우측의 기능이 다르다고 알려져 있는데(Öngür *et al.*, 2005; Rosenzweig *et al.*, 2005), 주로 좌측의 경우는 새로운 자극에 관한 의미적 부호화(semantic encoding)에 많이 사용되고(Goel & Dolan, 2003a) 우측의 경우에는 이미 보았던 것과 같은 익숙한 것에 관한 인출에 활용된다고 알려져 있다(Öngür *et al.*, 2005).

과학적 의문 생성은 관찰된 현상을 자신의 선지식 혹은 경험상황과 비교하여 불일치 될 때에 종종 일어난다(이해정 등, 2005). 이 과정에서 현재 관찰하고 있는 새로운 상황에 대한 부호화와 표상이 필요한데 이를 좌측해마가, 이미 알고 있는 상황에 대한 인출 후 표상(representation)은 우측 해마가 맡게 되는 것으로 생각된다.

(5) 후두엽 영역

후두엽에서는 시각피질부(visual cortex area)의 활성이 두드러졌는데, 우측 췌기소엽(cuneus; BA 17), 양측 하후두이랑(inferior occipital gyrus; BA 18) 및 중후두이랑(middle occipital gyrus; BA 18)이 나타났다(그림 2와 표 2). 이것은 과학적 의문의 생성 과정에서 자신이 기존에 알고 있던 내용(경험상황)과 현재 직면한 현상(관찰현상)과의 비교를 위해 심상(mental image)을 표상하고 있기 때문으로 생각 할 수 있다. 뿐만 아니라 관찰 현상에 대한 시각 정보를 받아들인 이후 이에 대해 사고하기에 앞서, 시각적 작업기억에 후두-두정 회로를 통해 운용 가능한 심적인 이미지의 형태로 표상하게 되므로 이 영역의 활성은 중요하다(Knauff *et al.*, 2002; Mazard *et al.*, 2005). 더욱이 일화적 기억의 인출을 통해 장기기억에서 작업기억으로 표상될 때는 주로 심상의 형태를 띠는 경우가 많기 때문에 실제로 시각정보를 제공받지 않더라도 이 영역은 활성화 된다는 연구결과가 많다(Giesbrecht *et al.*, 2006; Knauff *et al.*, 2002; Ruff *et al.*, 2003). 과학적 의문 생성 과정에서 피험자들은 현재 직면한 관찰현상과 자신의 경험상황 간의 비교 과정을 통해서 현재 보고 있지 않은 많은 장면에 대해서도 머릿속에 떠올리게 되며, 이 과정에서 장기기억에 관한 시각적 재인이 선행된다. 이것이 바로 단순히 시각적으로 바라보기만 하는 기저조건을 인지적 감산법(cognitive subtraction method)을 통하여 제거해 주었음에도 시각 피질 활성이 우세하게 나타난 이유일 것이다.

IV. 결론 및 제언

이상의 결과들을 통해 생물학자들이 과학적 의문을 생성할 때의 두뇌 활성 양상을 살펴보았다. 이 연구의 결과를 통하여 얻을 수 있는 결론은 다음과 같다.

첫째, 방추이랑 및 전안구운동 영역과 같은 물체의 상제 인식에 관련되는 영역의 활성이 높은 것으로 보아 과학적 의문 생성 과정에서 뇌는 관찰현상을 상세히 분석한다고 볼 수 있다. 둘째, 소뇌와 좌측 전두엽의 활성과 특히 브로카 영역의 활성으로 볼 때에 의문을 생성할 때에 뇌는 과학적 의문을 생성하기 위해서 언어적 전략을 사용한다고 할 수 있다. 셋째, 과학적 의문 생성 과정에서 생물학자들의 뇌는 좌우측 해마와 대상이랑이 활성화 되었다. 이러한 결과로 볼 때에, 과학적 의문 생성에서 현재의 관찰현상과의 비교를 위한 경험상황과 선지식 등 장기기억의 인출 및 표상은 매우 중요하다고 할 수 있다. 넷째, 과학적 의문 생성 과정에서 복외측전두피질부(VLPFC)의 활성이 특징적으로 나타났다. 이는 의문 생성 과정에서 뇌가 인지적 갈등 및 부조화 단계를 거쳤음을 보여주었다고 할 수 있다.

이러한 연구결과들을 종합해 볼 때에, 과학적 의문을 생성할 때 뇌는 관찰현상에 대한 분석적인 인식 이후, 장기기억에 저장된 경험상황이나 선지식의 인출을 통해 내적 심상(mental imagery)을 형성하여 시공적 작업기억(visuo-spatial working memory) 상에 표상하고 이를 현 상황과 비교한다. 이때 일치요소가 부족하거나 부조화로 인해 갈등이 발생하면 언어적으로 의문이 생성된다고 할 수 있다.

이 연구는 공간적 해상력이 우수한 기능성 자기공명 영상 기법을 과학적 의문 생성에 관한 연구에 도입하였다. 이 연구의 방법은 과학 교육 연구의 전 분야에 적용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한 이 연구의 결과는 fMRI를 이용해서 학생들의 생물학적 의문 생성 능력을 평가하는 방법을 고안하는 데 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다. 또한 의문 생성력 향상을 위한 교수-학습 프로그램의 효과를 평가할 수 있는 척도로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

국문 요약

이 연구는 생물학자들이 생물학 현상에서 과학적 의문을 생성할 때 나타나는 두뇌의 활성을 분석하고자 했다. 이를 위해서 10개의 의문 생성 과제를 개발하여 8명의 생물학자들에 투입하였고, 의문 생성 과정에서 fMRI를 통해 생물학자들의 두뇌 활성을 측정하

여 분석하였다. 그 결과, 방추이랑, 전안구운동 영역, 소뇌, 좌측 전두엽, 좌우측 해마와 대상이랑, 복외측전두피질부 등이 특징적으로 활성화되었다. 이것은 과학적 의문을 생성하는 과정에서 생물학자들의 뇌는 주어진 생물학 현상을 상세히 분석하였고, 언어적 전략을 사용하였으며, 현재의 현상과 비교하기 위해서 과거의 경험상황과 선지식 등의 장기기억을 인출하고 표상했다고 할 수 있다. 특히 복외측전두피질부의 활성은 의문 생성 과정에서 뇌가 인지적 갈등 및 부조화 단계를 거쳤음을 보여주었다고 할 수 있다.

참고 문헌

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

이수화, 이경민 (2000). 단어 유창성 검사 수행에 동반된 뇌 활성화 양상 : 기능적 자기공명영상 연구. 대한신경과학회지, 18(2), 138-143.

이혜정, 박국태, 권용주 (2005). 초등예비교사들의 관찰활동에서 나타난 인과적 의문의 사고 유형과 생성 과정. 한국초등과학교육학회지, 24(3), 249-258.

이혜정, 정진수, 박국태, 권용주 (2004). 초등학생들과 초등예비교사들이 관찰활동에서 생성한 과학적 의문의 유형. 한국과학교육학회지, 24(5), 1018-1027.

Blackwood, N., ffytche, D., Simmons, A., Bentall, R., Murray, R., & Howard, R. (2004). The cerebellum and decision making under uncertainty. *Cognitive Brain Research* 20, 46-53.

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

Caveza, R., & Nyberg, L. (2000). Imaging cognition II: An empirical review of 275 PET and fMRI studies. *Journal of Cognitive Neuroscience* 12(1), 1-47

Christenbury, L., & Kelly, P. (1983). *Questioning: A Path to Critical Thinking*. Urbana, IL: National Council of Teachers of English.

Damasio, A. R. (1997). Neuropsychology. Toward a neuropathology of emotion and mood. *Nature*, 386(6672), 769-770.

Elliot, R., & Dolan, R. J. (1998), Activation of different anterior cingulate foci in association with hypothesis testing and response selection. *NeuroImage*, 8, 17-29.

Fiedman, L., Kenny, J. T., Wise, A. L., Wu, D., Stuve, T. A., Miller, D. A., Jesberger, J. A., & Lewin, J. S. (1998). Brain activation during silent word generation evaluated with functional MRI. *Brain and Language*. 64, 231-256.

- Frith, C. D., Friston, K. J., Liddle, P. F., & Frackowiak, F. S. J. (1991). A PET study of word finding. *Neuropsychologia*, 29, 1137-1148.
- Gagne, E. D., Yekovich, F. R., & Ykovich, C. W. (1997). *The cognitive psychology of school learning* (2nd Ed.), New York: Addison Wesley Longman, Inc.
- Giesbrecht, B., Weissman, D. H., Woldorff, M. G., & Mangun, G. R. (2006). Pre-target activity in visual cortex predicts behavioral performance on spatial and feature attention tasks. *Brain Research*, 1080, 63-72.
- Goel, V., & Dolan, R. J. (2003a). Explaining modulation of reasoning by belief. *Cognition*, 87, B11-B22.
- Goel, V., & Dolan, R. J. (2003b). Reciprocal neural response within lateral and ventral medial prefrontal cortex during hot and cold reasoning. *NeuroImage*, 20, 2314-2321.
- Gott, R., & Duggans, S. (1995). *Investigative work in the science curriculum*. Buckingham: Open University Press.
- Heekeren, H. R., Marrett, S., Bandettini, P. A., & Ungerleider, L. G. (2004). A general mechanism for perceptual decision-making in the human brain. *Nature*, 431, 859-862.
- 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.
- Lawson, A. E. (1995). *Science teaching and development of thinking*. Belmont, CA: Wadsworth Publishing Company.
- Mazard, A., Laou, L., Joliot, M., & Mellet, E. (2005). Neural impact of semantic content of visual mental images and visual percepts. *Cognitive Brain Research*, 24, 423-435.
- 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.
- Öngür, D., Zalesak, M., Weiss, A. P., Dítman, T., Titone, D., & Heckers, S. (2005). Hippocampal activation during processing of previously seen visual stimulus pairs. *Psychiatry Research Neuroimaging* 139, 191-198.
- Peterson, S. E., Fox, P. T., Posner, M. I., Mintun, M., & Raichle, M. E. (1988). Positron emission tomographic studies of the cortical anatomy of single-word processing. *Nature*, 331, 585-589.
- Rosenzweig, M. R., Breedlove, S. M., & Watson, N. V. (2005). *Biological psychology: an introduction to behavioral and cognitive neuroscience*, (4th Ed.), Sinauer associate, Inc.
- Ruff, C., Knauff, M., Fangmeier, T., & Spreer, J. (2003). Reasoning and working memory: common and distinct neural processes. *Neuropsychologia*, 41, 1241-1253.
- Scardamalia, M., & Bereiter, C. (1992). Text-based and knowledge-based questioning by children. *Cognition and instruction*, 9(3), 177-199.
- 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.
- Spargo, P. E., & Enderstein, L. G. (1997). What questions do they ask?. *Science and Children*, 43-45.
- Stavy, R., Goel, V., Critchley, H., & Dolan, R. (2006). Intuitive interference in quantitative reasoning. *Brain Research*, 383-388.
- Talairach, J., & Tournoux, P. (1988). *Co-planar stereotaxic atlas of the human brain*. Theime, Stuttgart 859-873.
- Thagard, P. (1998). Ulcers and bacteria I: Discovery and acceptance. *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Science*, 29(1), 107-136.
- Vartanian, O., & Goel, V. (2005). Task constraints modulate activation in right ventral lateral prefrontal cortex. *NeuroImage*, 27, 927-933.
- Vlotz, G. C., Schubotz, R. I., & von Cramon, Y. (2005a). Variants of uncertainty in decision-making and their neural correlates. *Brain Research Bulletin*, 67, 403-412.
- Vlotz, G. C., Schubotz, R. I., & von Cramon, Y. (2005b). Frontomedian activation depends on both feedback validity and valence: fMRI evidence for contextual feedback evaluation. *NeuroImage*, 27, 564-571.