

초등 과학 교육에서 두뇌 연구 방법의 고찰 -fMRI 활용법을 중심으로-

신동훈 · 권용주

(한국교원대학교)

A Review on Brain Study Methods in Elementary Science Education - A Focus on the fMRI Method-

Shin, Dong-Hoon · Kwon, Yong-Ju

(Korea National University of Education)

ABSTRACT

The higher cognitive functions of the human brain including learning are hypothesized to be selectively distributed across large-scale neural networks interconnected to the cortical and subcortical areas. Recently, advances in functional imaging have made it possible to visualize the brain areas activated by certain cognitive activities *in vivo*. Neural substrates for learning and motivation have also begun to be revealed. Functional magnetic resonance imaging (fMRI) provides a non-invasive indirect mapping of cerebral activity, based on the blood- oxygen level dependent (BOLD) contrast which is based on the localized hemodynamic changes following neural activities in certain areas of the brain. The fMRI method is now becoming an essential tool used to define the neuro-functional mechanisms of higher brain functions such as memory, language, attention, learning, plasticity and emotion. Further research in the field of education will accelerate the verification of the effects on learning or help in the selection of model teaching strategies. Thus, the purpose of this study was to review brain study methods using fMRI in science education. In conclusion, a number of possible strategies using fMRI for the study of elementary science education were suggested.

Key words : functional magnetic resonance imaging (fMRI), learning, elementary science education, brain mechanism

I. 서 론

인간의 모든 학습 과정은 국소화된 일부 뇌 영역의 활동만이 아니라, 상호 긴밀히 연관된 뇌의 피질과 피질하 구조물들로 구성된 신경망에 의하여 조절되며, 인체 감각 기관을 통해 들어온 정보들을 병렬적으로 처리함으로써 이루어진다(김연희, 2001). 이와 같이 인간의 학습 과정이 뇌에서 일어난다는 사실은 너무나 명확하지만(김유미, 2002; 도경수 등, 2002; 배진호와 임채성, 2004; 신동훈, 2006; 임채성,

2005; Gazzaniga *et al.*, 2002; OECD, 2002; Rosenzweig *et al.*, 2005; Sylwester, 1994), 학습 과정에 대한 뇌의 역할과 그 기작에 대해 연구하려는 노력은 부족한 편이다. 이는 뇌를 본격적으로 연구한 역사가 짧은 이유도 있지만, 뇌 기능을 연구하는 최신 기법이 학습과 관련된 여러 연구자들에게 제대로 소개되지 못한 것도 하나의 이유가 될 수 있다.

사실 인간의 뇌에 대해서는 오래 전부터 연구가 이루어져 왔지만, 20세기 이전까지 실제적인 성과는 거의 없었다. 20세기에 들어서서 뇌의 기능을

해부하지 않은 채로 연구하는 많은 연구 방법들이 개발됨에 따라 두뇌의 기능에 대한 획기적인 이해가 이루어지고 있다. 초기의 뇌 연구는 주로 뇌 손상을 입은 환자들을 중심으로 제한적으로 이루어졌다(강은주와 이정모, 2000). 즉, Pineas Gage처럼 사고로 인해 뇌의 특정 부위가 손상을 입었거나, 병으로 인해 뇌의 특정 부위의 기능이 정지되거나, H. M¹⁾처럼 수술 등으로 뇌의 병소 부분을 제거함으로써 나타나는 행동 변화를 분석함으로써 뇌의 기능을 연구하였다(Damasio *et al.*, 1996). 그러나 이러한 연구는 주로 기능적 장애를 입은 환자를 이해하고 치료하는 데에는 도움을 주지만, 정상적인 사람의 인지 과정에 대해서는 별다른 도움을 주지 못한다. 그러나 1990년 후반 양전자 방출 단층 촬영(Positron Emission Tomography, PET)과 기능적 자기 공명 영상(Functional Magnetic Resonance Imaging, fMRI)의 등장으로 정상적인 사람을 대상으로 연구가 가능해짐에 따라 두뇌 기능에 대한 정보가 폭발적으로 증가하고 있다(유승식, 2001; Amaro & Barker, 2006; Buxton, 2002; Huettel *et al.*, 2004). 이러한 신경생리학적 연구는 생물학, 인지과학, 심리학, 경제학, 광고학, 교육학 등과 결합하면서 학제적 연구의 성격을 갖는 것이 일반적이다(도경수 등, 2002). 외국의 주요한 대학에는 대개 인지과학과 신경생리학이 결합한 인지신경과학(cognitive neuroscience) 관련 교육과정²⁾이 개설되어 있으며, 또한 활발히 연구하고 있다. 특히 미국 Dartmouth 대학의 교육학부에서는 학습 과학(center of learning science)과 fMRI 연구를 결합시켜 과학 학습과 의사 결정, 복잡한 인과적 사고 과정에서의 두뇌 작용 기작에 대한 연구를 진행하고 있다(Fugelsang & Dunbar, 2005; Ursu & Carter, 2005). 한편, 경제협력개발기구(OECD)에서도 두뇌의 작용 원리를 학습에 적용시킨 새로운 학습 과학 정립을 위해 노력하고 있는 중이다(OECD, 2002).

이와 같이 두뇌의 사고 과정, 기억, 학습, 감정 등의 작용 기작을 이해하기 위해서는 신경과학의 도움이 없이는 불가능한 것이다. 이러한 최근의 국제적인 연구 동향에도 불구하고 학습과 두뇌 기능을 관련시키는 국내 연구는 찾아보기 힘들고, 특히 초등 과학교육에서 두뇌 기능을 연구한 결과는 더욱 찾기 어렵다. 신경생리학자인 Hall(2005)도 신경생

리학과 교육학의 학제적 연구의 필요성은 인정하면서도 그와 관련된 연구 결과물들은 사실상 찾기가 어렵다고 하였다. 사실 두뇌 기반 학습(brain-based learning)으로 알려진 여러 연구들이 있지만(강호감, 1991; 김유미, 2002; 배진호와 임채성, 2004; 임채성, 2005; Caine & Caine, 1995; Jensen, 1998; Sylwester, 1994; 2000), 이러한 연구들은 두뇌의 여러 기능을 종합적으로 또는 부분적으로 활용하여 교수-학습을 해야 한다고 이론적으로 주장을 하는 것이다. 예를 들어 임채성(2005)은 인간이 자연을 알아가는 과정의 본질적인 측면을 고려하여 학교 과학의 정의적·심체적·인지적 영역을 통합적으로 연계하는 모형을 개발하여 두뇌 기능을 초등학교 현장에 적극적으로 반영하려는 노력을 하였다. 그리고 이러한 인지적 모형을 초등 과학 수업에 적용하여 효과를 검증하는 다른 연구들도 존재한다. 김재영과 최선희(2003)는 두뇌 기반 학습 원리에 기초한 초등 과학 수업의 효과를 알아보았고, 임채성과 김정용(2003)은 과학 학습 양식에 따른 4MAT System 활용에 의한 초등 과학 수업의 효과를, 배진호와 임채성(2004)은 초등학교 6학년 2학기 과학 단원에 대한 4MAT 학습 모형의 학습 양식 유형과 두뇌 기능성 유형을 분석하였다. 두뇌의 기능 원리를 학교 현장에 적용하는 이러한 연구들이 축적될 때에 학습자의 뇌 기능에 근거한 교수-학습이 점차로 가능하게 된다는 점에서 긍정적인 연구들이다.

그러나 이러한 연구들은 인지과학이나 신경과학 연구 결과물들을 이용하는 것이지 초등 과학 교육과 관련하여 직접적으로 두뇌를 연구하는 것이 아니므로 두뇌에 대한 실증적인 정보를 제공하지 못하는 한계가 따른다(신동훈과 권용주, 2006). 다만 초등 과학교육 영역에서는 김용진(2003)이 과학 문제 풀이의 사고 과정에서 뇌파 분석에 의한 두뇌 기능 연구를 하였고, 김용진 등(2005)이 창의적 과학 문제 해결에서 초등학교 과학 영재아와 보통아의 뇌파 활성 차이를 연구하여 뇌 기능을 과학적으로 분석하였으며, 권용주 등(2006a, 2006b)이 가설 생성 학습 후에 나타난 초등 예비교사와 초등학생의 두뇌 변화를 '뇌파 활성도'와 'Coherence-상관도' 값을 구하여 가설 생성 학습이 가설 수용 학습보다 두뇌의 여러 부위를 사용하는데 효과적이었다는

1) 간질 발작을 치료하기 위하여 측두엽 해마 부위를 절제한 환자의 이름으로 이니셜 되는 공개되지 않았다.

것을 밝혔다. 이러한 연구들은 학습 과정이 일어난 뇌를 뇌파를 이용하여 직접적으로 연구하였다는 측면에서 주목할 만하다. 하지만, 이러한 연구들은 정확한 두뇌의 기능적 영상을 근거로 한 것이라고는 볼 수 없다. 왜냐하면, 고차원적인 사고 기능은 뇌의 피질과 피질하 구조물들의 상호 작용으로 일어나는 것인데, 뇌파는 주로 뇌의 피질에서 발생하는 활동 전위를 뇌의 표면에서 측정하는 것이기 때문이다(신동훈과 권용주, 2006).

인간의 기능적 뇌 영상을 얻는 여러 방법 중 fMRI는 방사선 조사의 위험이 없고, PET와 달리 약물 주입이 없으며, 시간 및 공간적 해상력(temporal and spatial resolution)이 매우 좋아 정상적인 인간의 뇌 기능을 정확히 연구할 수 있는 최첨단 뇌영상 연구 방법이다(강은주와 이정모, 2000; 김연희, 2001; 신동훈과 권용주, 2006; Amaro & Barker, 2006; Huettel *et al.*, 2004; Le Bihan & Karni, 1995). 더군다나 지금까지 알려진 바로는 피험자에게 아무런 해를 끼치지 않기 때문에 연령과 성별에 상관없이 반복적으로 학습과 관련한 두뇌의 기능을 측정하는데 아주 적합하다(도경수 등, 2002; Huettel *et al.*, 2004). 그러므로 성인인 초등 교사나 초등 예비 교사뿐만 아니라 초등학생들의 두뇌를 측정하는 것이 가능하다.

이와 같이 fMRI 장비를 사용하여 초등학생의 두뇌를 연구하는 것은 매우 유익한 과학적 연구 방법이지만, 국내의 초등 과학 교육 분야에서는 fMRI를 이용한 연구를 찾아보기가 매우 어렵다. 다만, Shin *et al.*(2006)이 생물학 가설 생성 과정에서 나타나는 예비 교사들의 두뇌 변화를 fMRI를 이용하여 과학적 감성 생성 과정의 4가지 유형을 검증한 연구와 Kwon *et al.*(2006)이 가설 생성 학습을 한 후 대학생들의 두뇌 변화를 fMRI를 이용하여 두뇌 가소성을 규명한 연구들이 주목할 만하다. 그러나 이러한 fMRI를 활용한 연구들이 두뇌의 기능에 관심을 가지고 있는 많은 연구자들에게 제대로 소개되지 못하고, fMRI 장비의 원리와 사용 방법, 영상 분석 방법 등에 대한 구체적인 정보가 매우 부족하기 때문에 국내에서는 fMRI를 활용한 연구가 활성화되지 못하고 있는 실정이다. 그러므로 뇌과학에서 사용하고 있는 fMRI 장비에 대한 기본 원리와 실험 설계, 분석 방법, 학습과 관련된 연구 사례 등을 초등과학 교육의 관점으로 고찰하는 연구가 필요한 것이다.

따라서 이 연구에서는 최근에 활발하게 이용되

고 있는 fMRI의 사용 방법과 활용 사례 등에 대한 선행 연구들을 두루 고찰하고, 이어서 초등과학교육에서 fMRI를 활용한 두뇌 연구에 대한 앞으로의 전망을 살펴보고자 한다.

II. 연구 방법

이 연구는 fMRI를 이용하여 두뇌의 기능을 연구한 여러 문헌들을 토대로 초등 과학교육 연구에서 실제로 fMRI 연구법을 적용할 수 있도록 고찰하는 이론적 연구로서 크게 다음과 같은 네 단계를 통해서 수행되었다.

(1) fMRI의 원리와 실험 설계, 영상 획득과 분석 방법 등을 다룬 여러 문헌들과 직접적으로 인간의 두뇌 기능을 연구한 각종 연구 논문들을 주기적인 세미나를 통하여 고찰하였다.

(2) 이러한 고찰 결과를 바탕으로 과학적 사고 과정에 대한 두뇌 영상을 fMRI 장비를 사용하여 직접 측정함으로써 활용상의 장점과 한계를 직접 경험하였다.

(3) 측정된 두뇌 영상 자료를 분석하기 위하여 영상 자료 통계 분석 프로그램인 SPM(Statistical Parametric Mapping)의 사용법을 익혀 실제적으로 두뇌 영상을 분석하고 그 결과를 관련 학회에 발표하여 연구 방법의 타당도와 결과 해석에 대한 신뢰도 검증 과정을 거쳤다.

(4) 다양한 뇌기능 연구 사례와 분석 경험을 토대로 실제 초등 과학교육 연구 상황에 적용할 수 있는 다양한 활용 방안들을 모색하여 제시하였다.

III. 결과 및 논의

1. fMRI 의 원리

X-ray는 인간의 눈으로 볼 수 없는 우리 몸 내부의 상태에 대한 구조적인 정보를 나타낸다. 이 때 우리 눈에 보이는 것은 우리 몸의 해부학적 구조에 대한 정보이지 뇌의 신진대사 활동의 정도와 같은 기능적 정보는 아니다. 기능적 정보란 예를 들어, 신경세포의 전위 변화, 혈류량의 변화, 또는 뇌 조직의 모세 혈관에 의해 공급되는 혈류의 산소 공급에 따른 신호 변화를 의미하며, 기능적 영상법은 이러한 생물학적 신호 변화를 물리학적, 화학적, 공

학적인 원리를 이용하여 2차원 또는 3차원 영상으로 재구성하는 것이다. 따라서 X-ray가 인체 내부의 해부학적 구조를 한 순간에 표현하는 사진이라면, 기능적 정보는 뇌에서 정보 처리가 이루어지고 있는 동안의 동영상이라고 할 수 있다(강은주와 이정모, 2000; Eddy *et al.*, 1999).

fMRI는 이러한 뇌세포의 기능적 정보, 즉 신경세포의 활동성을 자기공명의 신호 변화로 나타내어 이를 시각화하여 보여주는 기능적 영상법이다. 이때 뇌신경 세포의 활동성은 국소적인 뇌혈액량(cerebral blood volume), 뇌혈류량(cerebral blood flow), 또는 산소 섭취(oxygenation)의 변화에 의하여 간접적으로 이루어지는 변화를 의미한다(Buxton, 2002; Huettel *et al.*, 2004; Rosenzweig *et al.*, 2005). 특히 신경세포의 활성화와 산소 공급을 위한 뇌 혈류량과의 상관 관계는 Magistretti(2000)의 연구에 의해서 잘 밝혀졌다. 기본적인 원리는 뇌의 특정한 부위가 자극을 받아 활동을 하게 되면 그 부위의 에너지 요구량이 늘어나고, 이를 충족시키려면 에너지 지원인 포도당(glucose)과 산소가 공급되어야 하는

데, 이것이 뇌혈류량을 증가시킨다는 것이다. 사실 뇌의 포도당 이용, 산소 소비, 혈류량의 변화는 매우 복잡하고 잘 알려지지 않은 부분도 있지만, Magistretti(2000)가 에너지 대사와 신경세포 활성화의 직접적인 과정을 밝힌 것이 현재까지 알려진 사실이다. 그에 의하면, 신경세포가 자극을 받으면 글루타메이트(glutamate)가 신경세포 밖으로 분비되고 재흡수되는 과정에서 에너지를 필요로 하고, 이러한 과정이 신경세포의 활성화를 형성하시키는데 중요한 역할을 한다고 하였다.

그림 1에서 글루타메이트가 시냅스전(presynaptic) 뉴런(neuron)에서 분비가 되면 시냅스후(postsynaptic) 뉴런의 수용체인 AMPA²⁾나 NMDA³⁾에 작용을 해서 Na⁺과 Ca²⁺이온을 세포 안으로 통과시킨다. 이 때 신경세포 내에 과도한 Ca²⁺이 들어오면 신경세포가 죽게 되므로 세포 밖으로 분비된 글루타메이트는 즉각적으로 신경세포를 둘러싸고 있는 성상교 세포(astrocyte)⁴⁾로 흡수된다. 이때 Na⁺이온 3개가 같이 성상교 세포내로 따라 들어간다. 들어간 Na⁺ 이온은 Na-pump를 통해 세포 밖으로 나가는데,

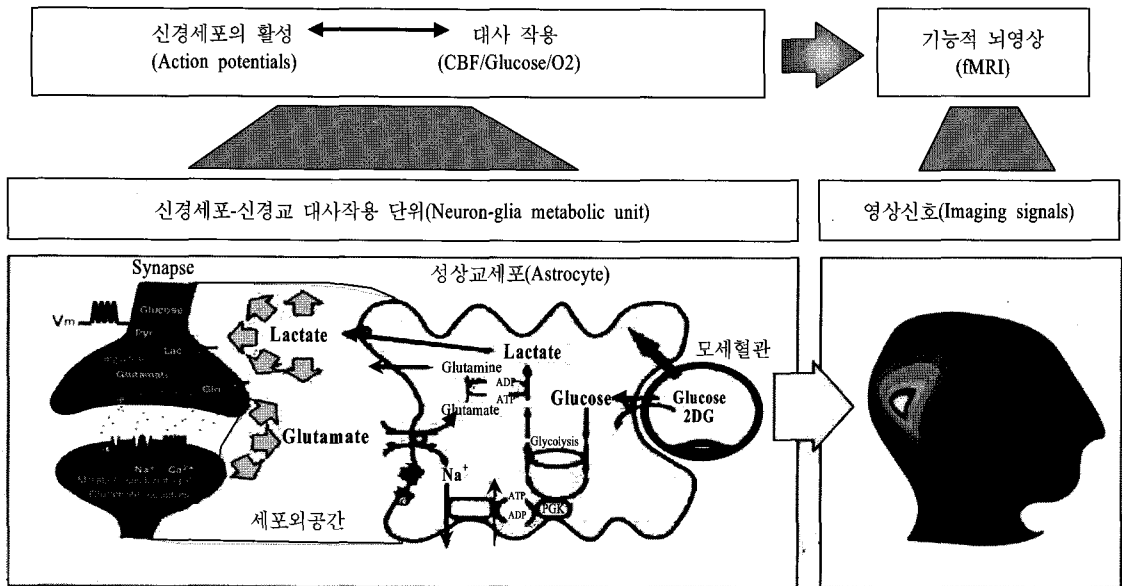


그림 1. 신경세포의 활성화 및 에너지 대사 작용과 영상 신호(Magistretti, 2000)

2) AMPA : alpha-amino-3-hydroxy-5methyl-4-isoxazolepropionic acid

3) NMDA : N-methyl-D-aspartate

4) astrocyte : 신경교 세포의 일종으로서 생김새가 별 모양 같아서 생긴 이름이다. 뉴런에 주위에 밀집해 있으며, 뇌의 역동적 활동에 적극적으로 개입하고 있다. 건강한 성인의 성상교 세포는 뉴런 주위의 화학적 '미세 환경'을 이상적으로 유지해 준다.

이때 에너지를 소비함으로써 정상교 세포내의 ATP (adenosine triphosphate)가 감소하게 된다. 이로 인해 정상교 세포의 포도당 운반체(transporter)가 열려 모세혈관으로부터 포도당이 정상교 세포내로 들어오게 된다. 정상교 세포내에서는 산소가 있는 상황인데도 불구하고 해당 작용(glycolysis)만 일어나 2개의 ATP만을 생성하여 하나는 Na-pump에 사용되고, 다른 하나는 글루타메이트가 글루타민(glutamine)으로 전환하는데 사용된다. 그리고 이때 젖산(lactic acid)이 생성되는데 이것은 천천히 신경세포로 건너가 산화적 인산화(oxidative phosphorylation)를 거쳐 34개의 ATP를 생성한다. 이러한 과정이 뇌신경 세포에서의 에너지 요구량과 공급을 조절하는 것으로 생각하고 있다(Rosenzweig et al., 2005).

Attwell과 Laughlin(2001)의 연구에 의하면 뇌세포에서 사용되는 ATP의 25%만이 생명 유지에 사용되고 75%는 정보의 전달과 신경활성에 사용된다고 하였다. 이와 같이 뇌의 활성화에 따른 ATP 사용량의 증가는 국소적 뇌혈류량의 증가를 초래하며, 이는 곧 조직으로 공급되는 산소량의 증가로 나타나며 이때의 산소량은 활성화된 뇌조직이 필요로 하는 양 이상으로 증가한다. 결국 필요 이상의 산소 공급은 활성화된 뇌조직의 유출정맥내의 옥시헤모글로빈(oxyhemoglobin) 양을 증가시켜 상대적으로 데옥시 헤모글로빈(deoxyhemoglobin)의 농도를 감소시키게 된다. 이러한 데옥시 헤모글로빈 농도의 감소는 MRI 신호 강도의 증가를 초래하게 된다. 이것이 Ogawa et al.(1990)에 의해서 개발된 BOLD(blood oxygen level dependent)기법이며, 현재 fMRI에서 영상을 얻는데 가장 널리 사용되고 있다(Buxton, 2002). 보통 상태에서 사람의 뇌혈류량은 일정한 수준을 유지하고 있다. 그러나 뇌가 활동하기 시작하면 그에 해당하는 부위에 ATP의 소모가 증가하고 곧 국소적인 뇌혈류량의 증가와 당 대사가 증가한다. 이 원리를 이용한 fMRI는 활성화된 부위가 비활성화된 부위에 비해서 데옥시 헤모글로빈의 농도가 적기 때문에 T2 및 T2 강조 영상에서 신호 강도의 감소가 적게 일어나 활성화된 부위의 신호 강도가 다른 부위보다 높게 나타나는 것을 이용한다. 그러므로 ATP 생성에 필수적인 산소의 상대적 양을 측정함으로써 두뇌의 활성 상태를 간접적으로 측정할 수 있는 것이다(Buxton, 2002; Eddy, 1999; Huettel et al., 2004). 따라서 fMRI 상의 활성화 부위가 뇌 신경세포의 활

동이 일어난 부위에 정확히 일치하는 것은 아니다. 그렇지만, PET에 의해 얻어진 뇌의 기능적 영상과 좋은 상관관계를 보이고, 신호 처리 기술의 발달로 이 같은 문제를 충분히 해결할 수 있으므로 오차 범위 내에 속하는 것으로 여겨지고 있다(김연희, 2001; Huettel et al., 2004). 따라서 그림 2에서와 같이 fMRI에 의해서 BOLD 신호가 감지되면, 신경세포의 활동이 fMRI 자료에 영향을 미친다는 것이고, 결국 심리적인 가설은 fMRI 영상이 어떤 인지적 활동을 나타내는 것으로 할 수 있다. 이와 같이 fMRI 연구는 인지적인 해석과 결합될 때 뇌의 고차원적인 기능을 제대로 이해할 수 있는 것이다.

2. 실험 설계

과학자들의 연구는 항상 의문점으로부터 시작된다(권용주 등, 2003; Chin et al., 2002; Lawson, 1995). fMRI를 이용하는 연구자들도 마찬가지이다. 예를 들면, “장기 기억에서 정보를 인출하는 것과 관련된 뇌의 영역은 무엇인가?” 등이다. 이러한 의문점을 해결하기 위해서 연구자들은 연구 가설, 즉 “장기 기억에서 정보를 인출할 때는 전전두엽이 활성화된다.” 등을 설정한다. 이러한 연구 가설을 검증하기 위해서는 원하는 뇌의 기능을 적절히 유도할 수 있는 자극 제시 전략이 매우 중요하다(Amaro & Barker, 2006).

1) 블록 설계(block design)

fMRI 실험에서 전통적으로 가장 많이 사용하는 방법은 블록 설계(block design)이다. 블록 설계의 기본 원리는 원하는 뇌 기능을 포함하는 활성화 과제(active task)와 이 기능을 포함시키지 않은 대조 과제(control task)를 번갈아 제시하는 것이다. 초기의 블록 설계는 이러한 단순한 과제의 제시에 지나지 않지만(그림 3A), 두 과제를 번갈아 제시하는 방

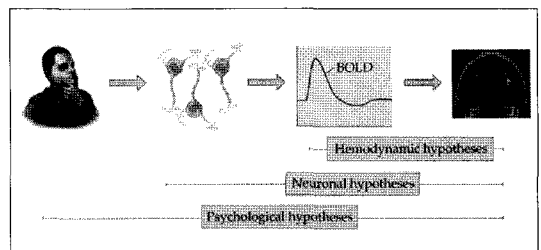


그림 2. 연구 가설의 종류(Huettel et al., 2004)

법(그림 3B)과 여러 과제를 혼합하는 방법(그림 3C) 등 실험 목적에 맞게 다양하게 설계할 수 있다(Huettel et al., 2004; Price & Friston, 1997). 이와 같은 블록 설계의 장점은 설계가 비교적 간단하고 과제를 반복적으로 제시할 수 있다는 것이다.

2) 사건 관련 설계(Event-related Design)

fMRI 실험 설계에 있어서 두 번째로 많이 사용되는 방법은 사건 관련 설계(event-related design)이다. 이 설계의 핵심은 흥미 있는 뇌신경 부위가 짧은 시간 동안 분리되어 제시된 과제에 의해서도 활성화 된다는 가정에 의한 것이다. 이러한 짧은 시간 동안에 제시된 과제가 바로 사건(event) 또는 시도(trials)라고 한다(Huettel et al., 2004). 각각의 사건들은 실험 목적에 맞게 2초에서 20초 사이의 불규칙적인 자극간 간격(interstimulus interval, ISI)을 일반적으로 유지한다(그림 4). 이 설계가 블록 설계와 다른 점은 첫째, 과제 블록 내에서 연속적으로 많은 자극을 제시할 수 있고, 둘째, 서로 다른 조건들이 불규칙적으로 제시할 수 있고, 셋째, 단 한번의 자극만 제시할 수도 있다는 것이다. fMRI 연구 초기에는 단 한번의 자극 제시로 BOLD 신호 변화를 감지하기도 어렵고, 원자료를 얻고 분석하는 과정이 개발되어 있지 않았지만, 현재는 기계의 발달과 분석 방법의 향상으로 많은 fMRI 연구들이 이 설계를 사용하고 있다(유승식, 2001).

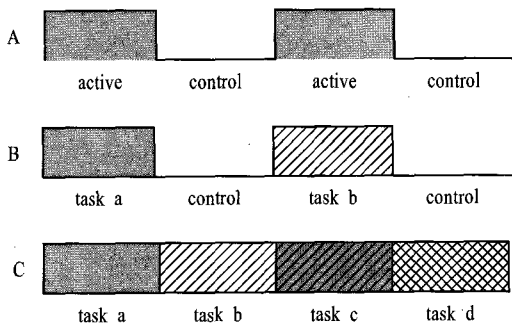


그림 3. 블록 설계의 종류

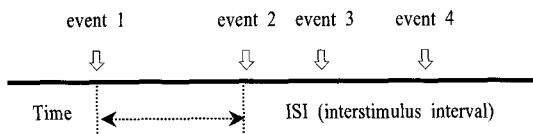


그림 4. 사건 관련 fMRI 설계 모식도

3) 혼합 설계(mixed design)

fMRI 설계의 세 번째 방법은 블록 설계와 사건 관련 설계를 혼합하는 것이다. 어떻게 혼합하느냐에 따라 여러 가지 방법이 있을 수 있지만, 여기서는 대표적인 혼합 설계 한 가지만 언급하겠다. 먼저 블록 설계처럼 일정한 간격으로 활성화 과제와 대조 과제를 교대로 설계하고, 각 활성화 과제 안에 여러 종류의 사건(event)을 제시, 즉 사건 관련 설계를 하는 것이다. 이러한 자극 패러다임을 모식적으로 나타낸 것이 그림 5이다. 이 혼합 설계의 장점은 서로 다른 시간 간격으로 원하는 인지 과정이나 과제 전략을 분석할 수 있다는 것이다. 피험자들의 블록 상태, 즉 활성화된 상태와 대조 상태를 분석 비교하면, 각 블록에서의 상태 관련 과정(state-related processes)을 측정할 수 있고, 블록 안에서 사건 별로 BOLD 신호를 분석 비교하면, 개별적인 자극, 즉 항목 관련 과정(item-related processes)을 측정할 수 있다. 이러한 항목 관련 과정은 사건 관련 설계보다 쉽게 측정할 수 있다(Huettel et al., 2004). 그러므로 혼합 설계는 독립된 과제가 짧은 인지 과정의 수행과 장기적인 인지 과정을 모두 수행하는 연구 가설에 있어서는 아주 유효하다. Donaldson et al.(2001)이재인 기억(recognition memory)을 연구할 때 사용한 설계가 바로 이 방법이며, 혼합 설계의 전형을 잘 보여주고 있어 다른 연구에 많은 도움이 될 것이다.

이와 같은 세 가지 실험 설계 방법에서 자극 제시와 BOLD 신호와의 관계를 정리하면 그림 6과 같다(Amaro & Barker, 2006).

이 외에도 다양한 형태의 실험 설계가 얼마든지 존재할 수 있다. 그러므로 사실상 fMRI 연구에서 정해진 가장 좋은 실험 설계는 없다. 실험하고자 하는 연구 가설에 가장 적합한 설계를 선택하는 것이 최선의 방법이다. 만약, 블록 사이의 조건들이 분리되지 않는다면, 블록 설계를 사용할 수 없고, 흥미

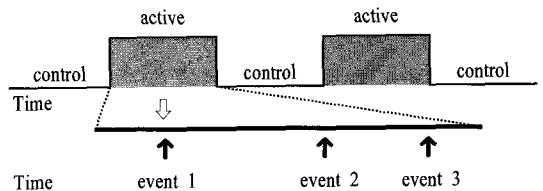
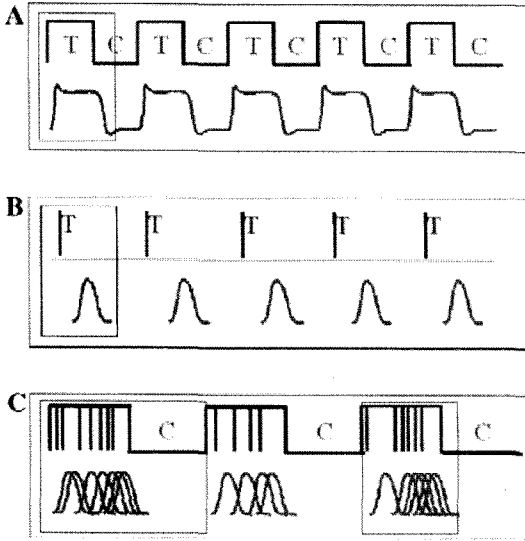


그림 5. 혼합 설계의 모식도



A: 블록 디자인, B: 사건 관련 디자인,
C: 혼합 디자인, T: 과제, C: 통제.

그림 6. 자극 제시 방법과 BOLD 신호(Amaro & Barker, 2006)

있는 뇌 활동이 짧은 시간 동안에 이루어지지 않는다면, 사건 관련 설계를 사용할 수 없는 것이다. 그러므로 연구를 설계할 때 가장 중요한 것은 연구자의 실험적 조작에 의해서 서로 다른 BOLD 신호를 어떻게 만들 수 있는냐에 집중해야 될 것이다.

3. fMRI의 영상 획득과 분석 방법

1) 영상 처리 과정

원하는 뇌 기능을 활성화 시킬 수 있는 실험 설계가 확정되면 첫 번째 단계는 해부학적 영상을 얻는 것이다. 해부학적 영상은 보통의 MR 기기를 사용할 수 있다. 두 번째 단계는 기능적 영상을 얻는 것으로 실험 설계의 패러다임(paradigm)에 따라 수행된다. 이 단계에서는 보통 해부학적 영상과 동일하게 뇌 기능이 위치하는 부위만 선택하여 영상을 얻는다. 이 두 단계에서 획득한 영상 자료가 바로 원자료(raw data)이다. fMRI 장치에서 얻어진 원자료들은 fMRI 분석 프로그램이 있는 컴퓨터로 전송되어 여러 단계의 처리 과정을 거쳐 최종적인 기능적 영상에 도달하게 된다(Buxton, 2002; Friston, et al., 1995). 이러한 전체적인 처리 과정을 정리하면 그림 7과 같다.

fMRI 측정에서 피험자들로부터 얻은 두뇌 영상 원자료(raw data)는 통계적 분석에 앞서, 사전 처리

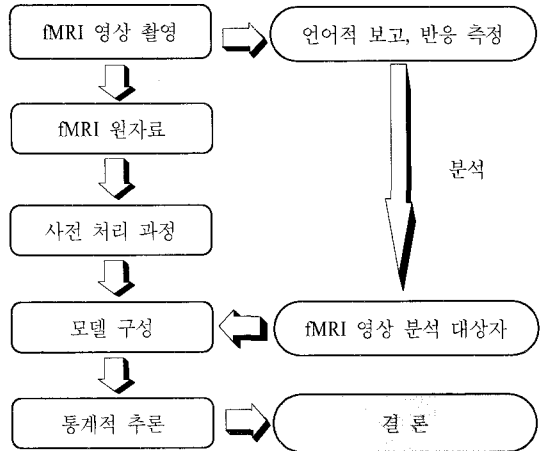


그림 7. fMRI 영상 분석 과정

과정(pre-processing)과 모델 구성을 거쳐야 한다. 제일 먼저 피험자의 머리 움직임으로 인한 측정 오차를 줄이기 위하여 두뇌 영상 자료를 재조정(realignment)하여야 한다. 이 과정을 통해 생성된 평균적 영상에 각 실험 참가자의 해부학적 영상인 T1 영상을 같이 기록하는 상관정렬(coregistration) 작업을 한 후, 기능적 영상의 해부학적인 위치를 파악하기 위해 표준 뇌의 좌표와 실험에서 얻어진 영상 자료를 일치시켜 개인차를 없애고 피험자 간 평균치의 산출을 가능하게 하는 표준화(normalization)과정을 거쳐 처리해야 한다. 마지막으로 얻어진 영상 자료는 부피소(voxel)별 자기 공명 신호 변화의 변별력을 높이기 위해 고르기(smoothing) 작업을 하여 사전 조정 작업을 마무리한다(김연희, 2001; Friston et al., 1995; Huettel et al., 2004). 이러한 사전 조정 작업을 거친 후 각 개인별로 통계적 분석을 위한 모델을 구성한다. 이러한 모델을 기초로 하여 활성 상태와 대조 상태를 감산한 대비 조건으로 차이 검증(t-test)이나 ANOVA 등의 통계적 분석을 실시할 수 있으며, 집단 분석시에는 각 개인의 통계 결과들을 무선 효과 모형(random effect model)으로 분석하는 것이 가능하다. 이 분석 방법은 통계적 검증력을 높일 수 있어서 결과를 일반화하는데 적합하다(Friston et al., 1995; Huettel et al., 2004). 최종적으로 통계적으로 유의미한 부피소 부위의 좌표를 Talairach 좌표로 변환하는 것이 뇌 기능을 이해하는데 도움이 된다(Talairach & Tournoux, 1988). 뇌 기능을 연구한 수많은 논문에서 대개 뇌의 위치를 Talairach 좌표나 브로드만 영역(broadmann area, BA)으로 나타나기 때문

에 Talairach 좌표로 전환하는 것은 활성화된 뇌의 부위를 추론하고 비교하는데 꼭 필요한 작업이다. 최종적인 영상 자료는 절단면(section), 절편(slice) 3차원(rendering) 등 연구 목적에 맞게 가장 적합한 형태로 색깔별 출력이 가능하다.

2) 영상 분석 방법

실험 설계를 할 때 고려해야 되는 것은 측정 후 원자료(raw data)를 어떻게 분석할 것인지를 미리 염두에 두고 고안하는 것이다. 일반적인 분석 방법의 원리는 인지적 감산법(cognitive subtraction)을 사용하는 것이다(그림 8A). 이 방법은 원하는 인지 활동(PI)이 포함된 블록에서 대조 블록, 즉 원하는 인지 활동이 제외된 블록을 차감하는 것이다. 그림 8A처럼 활성 과제(active) 제시시 활성화된 뇌의 부위에서 대조 과제(control) 제시에서 활성화된 뇌의 부위를 제외하면 원하는 인지 활동(PI)만이 작용하는 뇌 활성 부위가 나타나는 것이다. 그러나 과제의 종류가 복잡한 사고 과정이거나 여러 단계의 사고 과정을 거치는 경우에는 단순한 감산법만으로는 정확한 뇌 활성 부위를 추정할 수가 없다. 이런 경우에는 인지적 접합법(cognitive conjunction)이 대안이 될 수 있다. 이 방법의 기본적인 분석 논리는 그림 8B와 같다(Price & Friston, 1997).

만약 어떤 사고 과정이 5단계의 하위 인지 요소로 구성되었다고 가정한다면, 과제 a는 이 모든 과정을 다 포함하도록 설계하고, 과제 b는 원하는 인지 과정이 포함되지 않도록 설계한 다음, 과제 a에서 과제 b를 감산하면 남는 뇌의 활성 부위는 인지

과정 3과 4에 해당하는 부위가 될 것이다. 과제 c는 원하는 인지 활동 과정(PI)이 포함되나 전체 과정이다 포함되지 않도록 구성하고, 과제 d는 PI가 포함되지 않고 일부분의 인지 과정만 포함되도록 설계한다. 이제 과제 c에서 과제 d를 감산하면 남는 뇌의 활성 부위는 인지 과정 4와 5에 해당될 것이다. 첫 번째 과제 결과와 두 번째 과제 결과의 공통성 부위가 우리가 원하는 뇌 활성 부위가 될 것이다(Price & Friston, 1997). 그러나 이러한 분석 논리도 완벽하지 않기 때문에, 피험자가 사고 과정의 하위 요소대로 정확하게 수행했느냐와 또 다른 인지 과정이 끼워들었는지, 특히 하위 인지 과정 사이의 상호 작용의 영향 등을 고려하여 분석해야 한다(Caplan & Moo, 2004).

인지 과정 사이의 상호 작용을 알아보기 위해서는 요인 분석법의 사용이 아주 유용하다(김연희, 2001; Amaro & Barker, 2006). 이 분석 방법의 기본 가정은 측정하고자 하는 인지 작용이 서로 상호 작용을 하고 있다는 것이다. 그러므로 그림 9와 같이 각각의 영상을 비교하여 원하는 결과를 얻을 수 있다. 예를 들어 원하는 인지 요소가 A, B, X, Y 4가지일 경우, 얻을 수 있는 영상은 4가지, 즉 가(AX), 나(BX), 다(AY), 라(BY)이다. 그러므로 각 영상을 비교함으로써 원하는 인지 요소의 뇌 기능 활성화 상태를 알 수 있는 것이다(그림 9).

이와 같이 기능적 영상 자료를 통계처리하기 위해서 특수화된 소프트웨어(software)들이 개발되어 있다. 여러 소프트웨어 중 세계적으로 가장 많이 사용하는 소프트웨어는 영국의 런던 대학에서 개

A: Cognitive subtraction

인지적 사고과정	Active Task	Control Task
1		
2		
3(PI)		

* PI(Process of Interest)

B: Cognitive conjunction

인지적 사고 과정 하위 요소		Task Pair I		Task Pair II	
		Task a	Task b	Task c	Task d
Process	1				
	2				
	3				
	4(PI)				
	5				

A: active - control = process 3 ≙ PI

B: (task a - task b) ∩ (task c - task d) = process 4 ≙ PI

그림 8. 감산법(subtraction)과 접합법(conjunction)

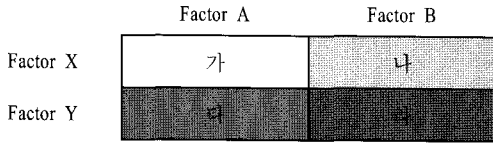


그림 9. 요인 계산법

발한 SPM(Statistical Parametric Mapping, Wellcome Department of Cognitive Neurology, London, UK) series 이다. 가장 최신판은 SPM5이다. 이 프로그램은 Matlab (Mathworks, Inc., USA) 환경 기반에서 실행되며, 인터넷에서 실행 파일과 사용 설명서를 무료로 다운로드 받을 수 있다(<http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm>).

4. fMRI를 이용한 뇌기능 연구 사례

BOLD 기법이 개발된 이래 수많은 fMRI 연구들이 진행되고 있고 이러한 신경생리학적인 연구 결과들을 메타 분석(meta-analysis)한 연구 결과가 Cabeza & Nyberg(2000)에 의해서 이루어졌다. 그들은 275개의 fMRI와 PET의 단편적인 이전 연구를 종합 분석하여 두뇌 기능에 대해 일관성 있는 결과가 나타나고 있다는 것을 보여주었다. 예를 들어 주의와 작업 기억은 전전두엽과 두정엽이 담당하며, 언어와 의미 기억의 인출은 좌뇌의 전전두엽과 측두엽이 담당하고, 일화 기억(episodic memory)의 입력 과정에는 좌뇌의 전전두엽과 내측 측두엽이 관여하고, 일화 기억의 인출 과정에는 전전두엽, 내측 측

두엽 그리고 후중간핵이 담당한다는 것이다. 이러한 연구들은 주로 인간의 기본적인 인지 과정인 기억, 지각, 주의, 언어, 수리 계산, 판단, 감성 등을 대상으로 실시되고 있으며, 교과 교육학적 측면으로 연구한 사례는 많지 않다. 그러나 이러한 인지 과학적 측면에서 뇌 연구 활용 사례가 축적될 때에 초등 과학교육과 같은 교과 교육학에서도 응용할 사례가 매우 많아지므로 충분히 고찰할 필요가 있다.

과학적 사고 과정의 일부인 추리 과정에 대한 두뇌 연구가 상대적으로 많이 이루어졌다. Goel & Dolan(2000)은 가상 생물인 Caminalcules 과제를 이용한 귀납 추리 과정에서의 두뇌 활성 상태를 연구한 바가 있고, 최근에 Goel (2005)은 연역적 추론 과정의 하나인 3단 논법을 추론할 때의 두뇌 활성 상태를 사건-관련 설계를 사용하여 밝혔다. Lee *et al.* (2006)은 대학생들이 생물 현상에 대한 가설을 검증하는 방법을 고안할 때, 즉 연역적 사고 과정이 일어날 때의 두뇌 상태를 조사하였다. 또한 Kwon *et al.*(2006)은 대학생들이 가설 생성 학습을 하기 전과 한 후의 두뇌 상태를 조사하여 학습에 의한 두뇌 가소성의 변화 정도를 측정하였다(그림 10 참조). 그림 10에서 왼쪽 그림의 A는 실험군(사전), B는 대조군(사전), C는 실험군(사후), D는 대조군(사후)의 두뇌 활성 상태를 3차원으로 표시한 것이고, 오른쪽 그림은 뇌의 단면에다가 표시한 것이다⁵⁾. 이 연구 결과에 의하면, 가설 생성 수업을 한 실험

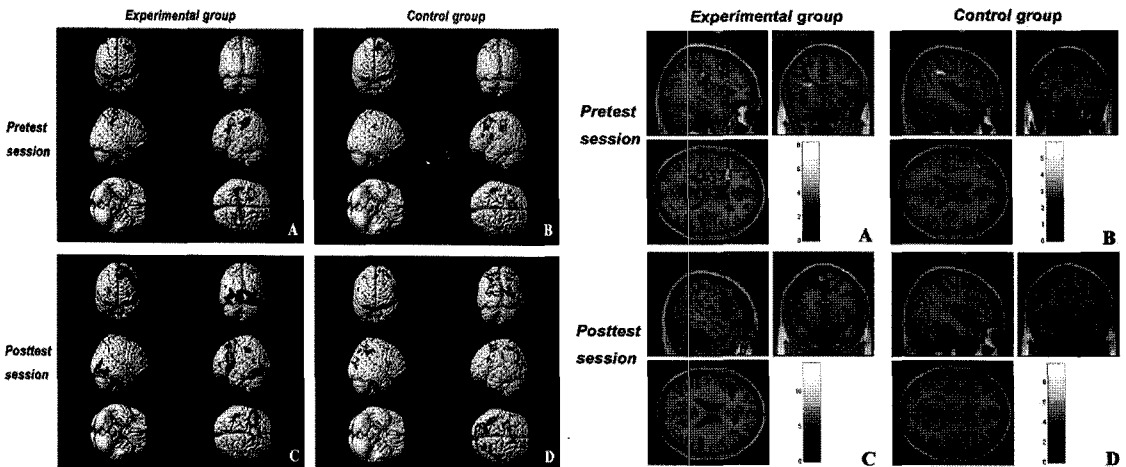


그림 10. 대학생들의 가설 생성 학습 전후의 두뇌 활성화 영역(Kwon *et al.*, 2006)

5) 실제 자료는 활성 부위별로 다양한 색상으로 표현할 수 있지만, 이 연구에서는 학술지 사정으로 흑백으로 표현되었다.

군의 두뇌가 가설 생성 수업을 하지 않은 대조군의 두뇌에 비해 더 많은 부위가 활성화되고 있는 것을 알 수 있었다.

이와 같이 인지신경학적인 연구는 인지심리학적 구성 개념과 이론에 의존하여 상관 관계가 높은 특정 뇌의 영역을 확인하는 연구가 주로 이루어져왔다. 그러나 최근에는 보다 복잡한 추론 과정(Fugelsang & Dunbar, 2005), 의사 결정(Ursu & Carter, 2005), 감성(Shin *et al.*, 2006; Bartels & Zeki, 2004) 등에서도 연구가 이루어지고 있으며, 학습과 교육 분야로의 응용 가능성도 크게 대두되고 있는 추세이다.

5. 초등 과학교육 연구에서 활용 방안

초등 과학교육 연구에서 지금까지의 연구 방법은 주로 인지심리학적 연구가 이루어졌으나, 앞으로는 교육과 인지신경과학을 연관시키는 연구가 많이 이루어질 것이다(신동훈과 권용주, 2006; Ansari & Coch, 2006). 그림 11은 교육 연구를 위한 다중적 분석 수준을 나타낸 것이다(Ansari & Coch, 2006). 이 그림에서 나타난 바와 같이 기존의 교육 연구는 학생들의 ‘검사 점수’나 ‘행동’을 측정해서 분석하는 경우가 대부분이었으나, 앞으로는 좀 더 심층적으로 즉 인간 두뇌의 기능을 연관시켜서 일어날 것이다. 현재의 fMRI 장비들은 두뇌의 ‘시스템’이나 ‘네트워크’ 수준에서 연구되고 있지만, 앞으로 기술 발달이 진행됨에 따라 더 깊은 수준에서의 연구도 가능할 것이다.

과학 학습에 관한 두뇌의 fMRI 연구는 특정 학습 과제를 수행하는 동안 뇌의 변화를 살펴보는 것이 가능하므로, 과학 학습의 신경학적인 원리 이해 또는 학습, 기억 및 각종 학습 장애를 진단하고 치료하는 과정이 기본이 될 것으로 보인다(도경수 등, 2002). 또한 초등학생의 경우 뇌의 발달적인 특성도 고려해서 연구해야 될 것이다. 이러한 초등 과학 학습에 대한 fMRI 연구 방향을 세부적으로 살펴보면 다음과 같은 7가지 활용 방안을 생각할 수 있다.

첫번째, 인지심리학에서 세운 가설적 개념과 이론을 뇌과학 측면에서 수렴적 통합을 이룰 수 있는 유용한 도구로 사용할 수 있을 것이다. 즉, 인지심리학적 모형을 신경생리학적으로 검증할 수 있는 것이다. 신동훈과 권용주(2006)가 생물학 가설 생성 과정에서 나타난 4가지 유형의 과학적 감성

생성 과정 유형을 fMRI을 이용하여 신경학적으로 검증한 연구가 여기에 해당한다. 실제로 초등 과학 교육 연구에서 이런 유형의 연구들은 수없이 가능하다. 왜냐하면 지금까지 인지심리학적 모형을 대한 연구가 수없이 많기 때문이다. 대표적인 예를 들면 임채성(2005)이 개발한 ‘뇌기능을 연계한 교수 학습 모형’을 초등학교 현장의 실제 과학 교수 학습 상황에 적용하여 그 효과를 fMRI를 이용하여 검증하는 연구를 생각할 수 있다. 물론 기존의 연구방법인 ‘검사 점수’나 ‘행동’을 측정하는 것도 가능하나 ‘시스템’이나 ‘네트워크’ 수준에서도 분석 가능한 것이다. 현재까지 알려진 수많은 초등 과학 교육의 교수 학습 모형들이 과연 두뇌의 네트워크 수준에서도 효과가 있는지, 만약 효과가 있다면 어떻게 효과가 있는지를 검증하는 것도 물론 가능하다. 이러한 연구 결과들이 축적될 때 초등과학 교육에서 학습의 과학화가 이루어질 수 있을 것이다.

두번째, 특정 학습 방법과 교수 방법의 효과성을 알아볼 수 있다. 즉, 사용하기 전과 후의 피험자의 상태를 자기 보고(self-report)가 아니라 두뇌 활성화 패턴을 비교하여 그 효과성을 직접 파악할 수도 있을 것이다. Eden *et al.*(2004)은 난독증 환자에게 8주간 읽기 치료 교육을 하였더니 약했던 뇌 부위의 활성이 강화된 것을 확인할 수 있었고, Olesen *et al.*(2004)은 작업 기억 훈련을 한 후 fMRI로 두뇌의 활

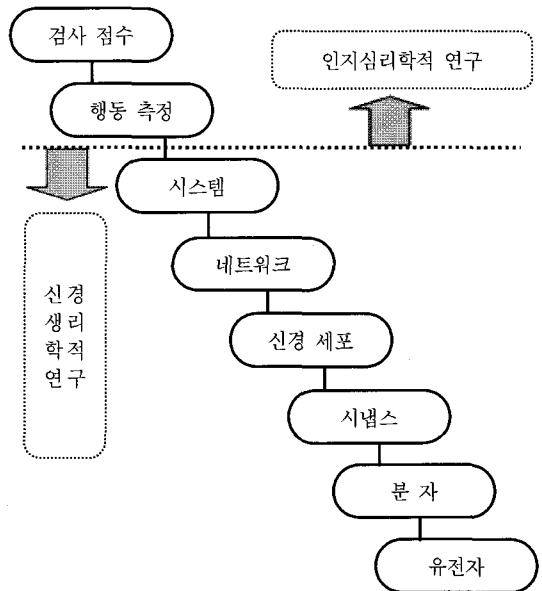


그림 11. 교육연구의 다중적 분석 수준(Ansari & Coch, 2006)

성 부위를 측정하여 전전두엽과 두정엽의 활성화 부위가 증가한다는 사실을 확인하였다. 또 Delazer *et al.* (2003)은 산술 문제를 해결할 때 새롭고 복잡한 문제일수록 더 많은 두뇌 부위가 활성화된다는 것을 밝혔다. 예를 들면, 탐구 활동을 중심으로 하는 수업과 전통적인 강의를 중심으로 하는 수업 중 어느 교수법이 초등학생들의 두뇌 활성화를 촉진하는 것인지를 fMRI를 활용하면 알 수 있는 것이다.

세번째, 학습에 의한 학습자 두뇌의 발달적 변화를 알아보는 것이 가능하다. 초등학생의 경우, 두뇌의 발달이 진행 중이므로 학습에 의한 효과와 발달적 변화의 차이를 연구하는 것이 가능하다. 초등학교 고학년인 경우는 구체적 조작기에서 형식적 조작기로 발달하는 시기이므로 두뇌의 변화가 극적으로 변하는 시기이다. 이러한 경우 fMRI를 이용하면 두뇌의 급격한 변화 시기를 정확하게 조사할 수 있고, 인지적 발달 단계와 두뇌 발달 단계와의 관련성도 밝힐 수 있을 것이다.

네번째, 특정 학습 과정을 수행할 때 성취도가 높은 학생과 낮은 학생들 또는 영재아와 일반아 또는 전문가와 초보자의 뇌 활성화 영역을 비교하는 방식을 통해 이상적이고 효율적인 교수 학습 방법에 대한 구체적인 정보 제공이 가능할 것이다. 예를 들어 특정한 문제를 풀 때 두뇌의 여러 부위를 사용하는 것이 바람직한지, 아니면 두뇌의 특정 부위만 사용하는 것이 바람직한지에 대한 이해가 가능한 것이다. 최근에 Lee *et al.*(2006)은 영재 학생들이 지능 관련 과제를 수행할 때 일반 학생들보다 더 활성화된 두뇌 부위를 밝혀내어 이러한 주제를 가지고 연구하는 것이 가능하다는 것을 증명하였다.

다섯번째, fMRI는 학습자 개인의 학습 양식이나 인지 과정 및 학습 전략에서의 개인차를 측정하고 평가할 수 있으므로 개인의 뇌/인지 기능을 극대화하는 교육/훈련/학습 전략 프로그램 등의 개발에 공헌할 수 있을 것이다(도경수 등, 2002). Caine & Caine(1994)는 인간 두뇌의 학습 방식을 12가지로 제안하였으며, 그 중에 ‘인간 각자의 뇌는 고유하다’는 주장이 포함되어 있다. 따라서 모든 사람에게 모두 유익한 학습 전략은 없는 것이다. 그러므로 각자의 뇌에 맞는 적절한 학습 전략을 수립할 때 fMRI를 활용한다면 크게 도움이 될 것이다.

여섯번째, 학습에 장애를 보이는 학습자들과 정상 수행을 하는 학습자들과의 뇌 기능 차이의 비교

를 통해 장애의 원인을 파악하는데 많은 기여를 할 수 있다. 예를 들어 지능은 정상이지만 글자를 읽거나 쓰는데 어려움이 있어 학습 장애를 보이는 난독증(dyslexia)의 경우, fMRI 촬영으로 좌뇌 두정엽 아래쪽의 활성화가 약한 것이 원인인 것으로 밝혀졌다(Eden *et al.*, 2004). 그러므로 초등 과학 교수 학습에서 특별하게 과학 수업을 따라 가지 못하는 학생들의 원인을 뇌 과학적 측면으로 분석할 수 있는 것이다. 많은 특수 아동들의 현실을 고려한다면, 이러한 영역에 대한 관심도 가져야 될 것으로 보인다.

일곱번째, 학습자가 학습을 할 때는 뇌의 인지적 기능뿐만 아니라 감성적 기능도 동시에 일어난다(신동훈, 2006; 임채성, 2005; Damasio, *et al.*, 1996)는 점을 고려하면, 뇌의 인지적 기능과 감성적 기능과의 상호 관련성에 초점을 맞추는 연구도 진행할 수 있을 것이다(김연희, 2001; 도경수 등, 2002; Phan *et al.*, 2002). 특히 Adolph (2003)는 인간의 사회적 행동에 관한 연구에서 감성과 이성, 감성 표현과 행동 조절, 목표와 행동을 통합하는 구체적인 두뇌 작용 부위를 제시하였다. 그러므로 과학교육에서 정의적 영역과 관련된 여러 학습 기능을 연구하는 것이 가능할 것이다. 구체적인 예를 들면, 높은 학업 성취도를 가진 학생들 중 어떤 학생은 선행 학습이나 반복 학습으로 인한 결과일 수도 있고, 높은 호기심과 열정으로 인한 결과일 수도 있다. 이러한 차이를 fMRI를 이용하면 이런 상황에 대한 객관적이고 실증적인 자료를 얻을 수 있는 장점이 있다.

이밖에도 남학생과 여학생의 두뇌 발달의 차이, 영재아의 두뇌 특성을 조사하여 영재를 판별할 수 있는 도구 개발 등의 연구들도 가능하다. 그러나 이러한 fMRI를 이용한 연구들은 시간적, 공간적, 경제적, 분석적 제한을 가지고 있으므로, 과일반화에 대한 오류를 항상 경계해야 초등 과학교육의 발전에 더욱 공헌할 수 있을 것이다.

IV. 결론 및 제언

fMRI는 뇌신경 세포의 활성화에 의한 생리적인 뇌 혈류량의 변화인 BOLD 효과를 기반으로 인간의 기능적인 뇌 지도를 제공할 수 있다. 특히 fMRI는 다른 두뇌 영상 기구와 달리 비침습적으로 정상적인 인간의 뇌 기능을 영상화 할 수 있기 때문에 기

역, 언어, 추론, 의사 결정, 감성 등과 같은 두뇌 기능에 대한 연구가 가능하다. 지금까지는 기존 인지심리학의 기본적인 구성 요소인 기억, 지각, 언어, 주의, 감성 등의 기본 개념과 이론을 검증하는 연구가 주로 이루어졌지만, fMRI의 급격한 기술 발전과 분석 방법의 발달로 추론, 의사 결정, 학습과 같은 고차원적인 두뇌 기능에 대한 세밀한 연구가 점차로 증가하고 있다.

초등 과학교육과 관련된 연구를 중심으로 보면, 과학 교육에서 fMRI 연구는 과학 학습 과정에 대한 신경학적인 두뇌 이해의 지평을 넓힐 수 있고, 과학 학습 이론의 개발과 검증에 매우 유용한 도구로 될 수 있다. 또한 과학적 사고 과정의 하위 구성 요소들에 대한 두뇌의 단순한 국제화 수준을 넘어서 과학적 사고 과정과 감성의 통합적 기능에 대한 학습 신경망의 발견을 위한 연구가 진행될 수 있다. 그러나 초등 과학교육에서 fMRI 연구는 아직 초보적인 단계에 있기 때문에 다양한 연구 경험이 절대적으로 부족하다. 따라서 fMRI를 사용한 경험이 있는 학자들과 과학 교육학자들의 학제적인 연구가 바람직할 것으로 보인다. 이러한 관점에서 이 연구는 fMRI에 대한 구체적인 활용 정보와 앞으로의 전망을 담고 있기 때문에 초등 과학 교육의 발전에 크게 기여할 것으로 생각한다.

이러한 인지신경과학 분야는 선진국을 중심으로 막대한 지원과 투자로 인해 전문가가 기하 급수적으로 증가하는 추세에 있으나, 우리나라의 연구 인프라와 인력 상황은 선진국과의 격차가 날로 커지고 있다. 그러므로 인지신경과학 분야의 전문 연구 인력의 양성과 학제적인 교육 과정 개발과 연구 지원에 대한 대책이 필요하다. 그러나 무엇보다도 국내의 과학교육 및 학습 심리학자들이 이 분야의 연구 활성화에 많은 관심과 노력을 기울여야 될 것이다. 왜냐하면, 오늘날 과학교육학이 과학과 교육학 사이에서 또 하나의 중요한 학문으로 자리매김을 하듯이 과학교육학과 신경생리학 사이에서 인지신경교육학이 중요한 학문으로 자리매김을 할 것이기 때문이다.

참고문헌

강은주, 이정모(2000). 두뇌 기능 지도화와 정보 처리 과정 이해. 전자공학회지, 27(7), 49-61.

강호감(1991). 두뇌의 기능분화에 따른 교수전략이 창의력 및 자연과 학업성취도에 미치는 영향. 서울대학교 박사학위논문.

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

권용주, 박지영, 신동훈, 정진수, 박국태(2006b). 가설 생성 학습 후에 나타난 초등학생의 두뇌 활성 변화. 한국생물교육학회지, 34(1), 72-80.

권용주, 최상주, 박윤복, 정진수(2003). 대학생들의 귀납적 탐구에서 나타난 과학적 사고의 유형과 과정. 한국과학교육학회지, 23(3), 286-298.

김연희(2001). Functional MRI를 이용한 뇌 기능 연구. 한국뇌학회지, 1(1), 64-76.

김용진(2003). 과학 문제 풀이의 사고 과정에서 뇌파 분석에 의한 두뇌 기능 연구. 한국생물교육학회지, 31(4), 313-319.

김용진, 김재영, 권치순(2005). 창의적 과학문제 해결에서 초등학교 과학 영재아와 보통아의 뇌파 활성 차이. 한국생물교육학회지, 33(1), 23-32.

김유미(2002). 두뇌기반 교수-학습의 원리와 적용방안 탐색. 교육학연구, 40(3), 247-270.

김재영, 최선희(2003). 두뇌기반학습원리에 기초한 초등 과학수업의 효과-4학년 생명영역을 중심으로-. 한국생물교육학회지, 31(2), 119-131.

도경수, 박창호, 김성일 (2002). 인지에 관한 뇌 연구의 개괄적 고찰, 평가, 및 전망. 한국심리학회지: 실험 및 인지, 14(4), 321-343.

배진호, 임채성(2004). 초등학교 과학에서 '폐적한 환경' 단원에 대한 4MAT 학습 모형의 학습양식 유형과 두뇌 기능성 유형 분석. 한국생물교육학회지, 32(2), 107-113.

신동훈(2006). 생물학 가설 생성에서 나타나는 과학적 감성의 생성 과정 설명을 위한 신경 인지적 모형 개발. 한국생물교육학회지, 34(2), 232-245.

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

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

임채성(2005). 뇌 기능에 기초한 과학 교수학습: 뇌기능과 학교 과학의 정의적·심체적·인지적 영역의 연계적 통합 모형. 초등과학교육, 24(1), 86-101.

임채성, 김정용(2003). 과학학습양식에 따른 4MAT System 활용 초등 과학 수업의 효과. 한국생물교육학회지, 31(4), 320-331.

Adolph, R. (2003). Cognitive neuroscience of human social behaviour. Nature Reviews Neuroscience, 4, 165-

- 178.
- Amaro, E. & Barker, G. J. (2006). Study design in fMRI: Basic principles. *Brain and Cognition*, 60(3), 220-232.
- Ansari, D. & Coch, D. (2006). Bridges over troubled waters: education and cognitive neuroscience. *Trends in Cognitive Sciences*, 10(4), 146-151.
- Attwell, D. & Laughlin, S. B. (2001). An energy budget for signaling in the grey matter of the brain. *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism*, 21(10), 1133-1145.
- 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 University Press.
- Cabeza, R. & Nyberg, L. (2000). Imaging cognition II: an empirical review of 275 PET and fMRI Studies. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12(1), 1-47.
- Caine, G. & Caine, R. N. (1995). Reinventing schools through brain-based learning. *Educational Leadership*, 52(7), 43-47.
- Caine, R. N. & Caine, G. (1994). *Making connections: Teaching and the human brain*. Addison-Wesley.
- Caplan, D. & Moo, L. (2004). Cognitive conjunction and cognitive function. *NeuroImage*, 21(2), 751-756.
- Chin, C., Brown, D. E. & Bruce, B. C. (2002). Student-generated questions: A meaningful aspect of learning in science. *International Journal of Science Education*, 24(5), 521-549.
- Damasio, H., Grabowski, T. J., Tranel, D., Hichwa R. D. & Damasio, A. (1996). A neural basis for lexical retrieval. *Nature*, 380, 499-505.
- Delazer, M., Domahs, F., Bartha, L., Brenneis, C., Lochy, A., Trieb, T. & Benke, T. (2003). Learning complex arithmetic-an fMRI study. *Cognitive Brain Research*, 18(1), 76-88.
- Donaldson, D. I., Peterson, S. E., Ollinger, J. M. & Buckner, R. L. (2001). Dissociating state and item components of recognition memory using fMRI. *NeuroImage*, 13(1), 129-142.
- Eddy, W. F., Fitzgerald, M., Genovese, C., Lazar, N., Mockus, A. & Welling, J. (1999). The challenge of functional magnetic resonance imaging. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 8(3), 545-558.
- Eden, G. F., Jones, K. M., Cappell, K., Gareau, L., Wood, F. B., Zeffiro, T. A., Dietz, N. A. E., Agnew, J. A. & Flowerst, L. (2004). Neural changes following remediation in adult developmental dyslexia. *Neuron*, 44(3), 411-412.
- Friston, K. J., Holmes, A. P., Worsley, K. J., Poline, J. B., Firth, C., D. & Frackowiak, R. S. J. (1995). Statistical parametric maps in functional imaging: a general linear approach. *Human Brain Mapping*, 2, 189-210.
- Fugelsang, J. A. & Dunbar, K. N. (2005). Brain-based mechanisms underlying complex causal thinking. *Neuropsychologia*, 43(8), 1205-1213.
- Gazzaniga, M. S., Ivry, R. B. & Mangun, G. R. (2002). *Cognitive neuroscience: The biology of the mind (2nd ed.)*. W. W. Norton & Company.
- Goel, V. (2005). Cognitive neuroscience of deductive reasoning. In K. J. Holyoak & R. G. Morrison (Eds.), *The cambridge handbook of thinking and reasoning*(pp. 475-492). Cambridge University Press.
- Goel, V. & Dolan, R. J. (2000). Anatomical segregation of component processes in an inductive task. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12(1), 110-119.
- Hall, J. (2005). Neuroscience and education. *Education Journal*, 84, 27-29.
- Huettel, S. A., Song, A. W. & McCarthy, G. (2004). *Functional magnetic resonance imaging*. Sinauer Associates, Inc.
- Jensen, E. (1998). *Teaching with the brain in mind*. Association for Supervision and Curriculum Development.
- 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., Lee, J., Kang, M. & Yoon, H. (2006). Changes in the brain activity after training of hypothesis generation in science: An fMRI study. *NeuroImage*, 31(S1), S58.
- Lawson, A. E. (1995). *Science teaching and the development of thinking*. Wadsworth Publishing Company.
- Le Bihan, D. & Karni, A. (1995). Applications of magnetic resonance imaging to the study of human brain function. *Current Opinion in Neurobiology*, 5(2), 231-237.
- Lee, J., Kwon, Y., Yang, I. & Shin, D. (2006). Brain activation during invention of hypothesis-testing method in biological phenomenon: An fMRI study. *NeuroImage*, 31(S1), S58.
- Lee, K., Choi, Y., Gray, J., Cho, S., Chae, J., Lee, S. & Kim, K. (2006). Neural correlates of superior intelligence: stronger recruitment of posterior parietal cortex. *NeuroImage*, 29(2), 578-586.
- Magistretti, P. J. (2000). Cellular bases of functional brain

- imaging: insights from neuron-glia metabolic coupling. *Brain Research Interactive*, 886(1), 108-112.
- OECD. (2002). *Understanding brain; Towards a new learning science*. OECD Publication Service.
- Ogawa, S., Lee, T.-M., Nayak, A. S. & Glynn, P. (1990). Oxygenation-sensitive contrast in magnetic resonance image of rodent brain at high magnetic fields. *Magnetic Resonance in Medicine*, 14(1), 68-78.
- Olesen, P. J., Westerberg, H. & Klingberg, T. (2004). Increased prefrontal and parietal activity after training of working memory. *Nature Neuroscience*, 7(1), 75-79.
- Phan, K. L., Wager, T., Taylor, S. F. & Liberzon, I. (2002). Functional neuroanatomy of emotion: A meta-analysis of emotion activation studies in PET and fMRI. *NeuroImage*, 16(2), 331-348.
- Price, C. J. & Friston, K. J. (1997). Cognitive conjunction: A new approach to brain activation experiments, *NeuroImage*, 5(4), 261-270.
- Rosenzweig, M. R., Breedlove, S. M. & Watson, N. V. (2005). *Biological psychology: an introduction to behavioral and cognitive neuroscience*, 4th Edition. Sinauer associates, Inc.
- Shin, D., Kwon, Y., Yoon, H. & Kwon, S. (2006). An fMRI study on brain activation of 4 types scientific emotion generating process in the generating process of biological hypothesis. *NeuroImage*, 31(S1), S89.
- Sylwester, R. (1994). How emotions affect learning. *Educational leadership*, 52(2), 60-68.
- Sylwester, R. (2000). *A biological brain in a cultural classroom: Applying biological research to classroom management*. Thousand Oaks, CA: Corwin Press.
- Talairach, J. & Tournoux, P. (1988). *Co-Planner stereotaxic atlas of the human brain*. New York: Thieme Medical publishers, Inc.
- Ursu, S. & Carter, S. C., (2005). Outcome representations, counterfactual comparisons and the human orbitofrontal cortex: Implications for neuroimaging studies of decision-making. *Cognitive Brain Research*, 23(1), 51-60.