

# 과학 교수-학습 프로그램의 두뇌기반 분석을 위한 두뇌맞춤지수 산출식 개발

이일선 · 이준기<sup>1</sup> · 권용주\*

한국교원대학교 · <sup>1</sup>전북대학교

## Development of the Brain Compatibility Index Equation for Brain-based Analysis of Teaching-Learning Program in Science

Il-Sun Lee · Jun-Ki Lee<sup>1</sup> · Yongju Kwon\*

Korea National University of Education · <sup>1</sup>Chonbuk National University

**Abstract:** The purpose of this study was to develop the brain compatibility index equation for the brain-based analysis method of science teaching-learning program. To develop the index equation, one sample unit in middle school science programs was selected and analyzed by the brain-based analysis frame (CORE Brain Map). Then, the index equation was derived by the CORE Brain Map. In addition, four sample units in elementary science programs were selected to validate the brain compatibility index equation. From the random network theory of Erdős and

Rényi, this study derived the brain compatibility index equation; ( $BCI = \frac{L_o}{11(N_o - 1)} \cdot \sum_{i=1}^4 l_i w_i$ ) for quantitative analysis

of science teaching-learning program. With this equation, this study could find the quantitative difference among the teaching-learning programs through the unit and curriculum. Brain-based analysis methods for the qualitative and quantitative analysis of science teaching-learning program, which was developed in this study is expected, to be a useful application to analyze and diagnose various science teaching-learning programs.

**Key words:** Brain compatibility index (BCI) equation, science teaching-learning program, brain-based analysis frame, CORE Brain Map

### I. 서 론

전통적인 과학 교육의 중요한 교육목표는 체계화된 지식들을 학생들에게 잘 전달하는 것이었다. 그러나 구성주의적 과학교육의 목표는 학습자 스스로가 과학 지식을 발견하고, 이 과정에서 새로운 지식을 생성할 수 있는 능력을 배양하도록 도와주는 것 - 즉, 과학적 탐구 능력의 향상에 있다(권용주 등, 2003; 이안나 등, 2007; 허명, 1999). 최종적으로는 이를 통해 모든 학생들이 21세기 지식정보화 사회에서 창조적 지식생산자로 그들의 삶을 영위하도록 하는 것을 궁극적인 목표로 하고 있다(허경철 등, 2001; 권용주 등, 2009). 이러한 목표에 다가가기 위해 교육연구자들과 과학교사들은 다양한 형태의 과학탐구 교수-학습 프로그램

을 개발하여 활용해 오고 있다. 다양한 형태의 과학 교수-학습프로그램 중 최근 뇌과학의 비약적 발전과 더불어 학생들을 위한 뇌 기반 교수-학습 프로그램들이 국내외 연구진들에 의해 개발되고 소개되었다(임채성, 2005; 임채성, 2009; Jensen, 2000; Kwon *et al.*, 2009; Posner & Rothbart, 2005). 이들 연구들에 의하면 교수-학습프로그램을 통한 교사의 학습 전략이 학생들의 두뇌를 변화시킬 수 있음을 알 수 있다(Sousa, 2001; Süzcs & Goswami, 2007).

더 나아가 뇌 과학과 인지신경과학 분야의 연구결과에 의하면 인간의 뇌는 외부 환경과의 상호작용에 의해 계속 변화하고 있으며(Doidge, 2007; Erickson *et al.*, 2007a, 2007b; Olesen *et al.*, 2004; Kassubek *et al.*, 2001), 학생들의 뇌는 성인에 비해 더욱 변화가

\*교신저자: 권용주(kwonyj@knu.ac.kr)

\*\*2010.06.16(접수) 2010.10.27(1심통과) 2010.12.10(2심통과) 2010.12.23(3심통과) 2010.12.23(최종통과)

\*\*\*이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2010-0008198).

용이한 것으로 알려져 있다(Luna *et al.*, 2010). 특히 최근에는 뇌의 자연성숙에 의한 발달적 분화(Gogtay & Thompson, 2010)이외에도 교사에 의해 제공되는 특정 교수-학습프로그램을 비교적 짧은 기간 동안 경험할지라도 학생의 인지구조나 뇌 활성 패턴 자체가 물리적으로 변화할 수 있다는 연구결과들이 보고되고 있다(권용주와 이준기, 2010; Kwon *et al.*, 2009; Lee, 2009). 또한 최근의 연구 결과들에 따르면 두뇌 활성이나 물리적 발달이 잘될수록 지능과 같은 외부적으로 들어나는 개인의 능력이 높은 것으로 나타났다(Chen *et al.*, 2007; Choi *et al.*, 2008; Eckert *et al.*, 2008; Greake & Hansen, 2005; Lee *et al.*, 2006; Reis *et al.*, 2007; Schmithorst & Holland, 2006). 따라서 교사 스스로 사전에 자신이 실시할 교수-학습 프로그램이 학생의 학습에 관련된 뇌를 어떻게 자극하고 발달시킬지에 대해 가늠해 볼 필요가 있다.

그러나 뇌기반 과학교육 연구와 관련된 선행 연구들이 제안한 방법(김용진과 장남기, 2001a; 김용진, 2003; 권용주 등, 2006a, 2006b; Jin *et al.*, 2006; Kwon *et al.*, 2009)은 교사가 특정 교수-학습 프로그램을 실시한 후에 학생의 두뇌의 활성 패턴이 물리적으로 변형되고 나면 그 변화를 직접 두뇌영상 장비를 통해 측정하는 방식들이었다. 이러한 방법들은 교수-학습 프로그램의 설계 및 적용에 아직 미숙한 초임교사나 예비교사들에게 직접 적용하는데는 제한이 따른다. 즉, 학문적으로는 객관적이고 타당한 연구방법이며, 후속 연구에 좋은 피드백을 줄 수 있지만 현장 유용성 면에서는 떨어지는 단점이 있었다. 물론 선행연구들 중에는 두뇌영상장비가 아닌 검사지나 인지심리학적 검사방법들을 활용함으로써 직접 두뇌활성 측정을 하지 않는 연구들도 있었지만(강호감, 1991; 권용주, 1998; 김용진과 장남기, 2001b; 김유미, 2002; 김재영과 최선희, 2003; 배진호와 임채성, 2004; 임채성과 김정용, 2003; 최선희와 장남기, 2003). 이러한 경우역시 해당 교수-학습 프로그램을 직접 학생에게 적용해 보기 전에는 두뇌 수준에서 어떤 영향을 주게 될지 예측해 보기가 어렵기는 마찬가지라고 할 수 있다. 즉, 교수-학습 프로그램이 적절한지 가늠해보는 시점인 적용이후에는 일부 학생의 두뇌 구조는 이미 변형되어 있을 것이다. 만약 수업에 적용한 교수-학습 프로그램이 적절치 않았다면 교사가 의도하는 상태로 되돌리기 위해 교수-학습 프로그

램 적용 전인 최초시점보다 더 큰 어려움을 겪게 될 것이다.

그러므로 보다 나은 과학 교수-학습의 실현을 위해서는 학생들에게 적용해 보기 이전에 교사 스스로 수업에 활용할 교수-학습 프로그램들을 간편하게 점검해 줄 진단적인 분석방법의 개발이 요구된다. 이에 대한 하나의 대안으로 최근 소개된 두뇌기반 과학탐구 교수-학습프로그램 분석틀(이준기 등, 2010)이 있다. 두뇌기반 과학탐구 교수-학습프로그램 분석틀(이준기 등, 2010)은 여러 과학 교수-학습 프로그램들에게서 공통적으로 나타나는 요소인 인지, 동기, 감성을 중심으로 과학탐구와 관련된 최신 뇌영상 과학 연구 결과들을 메타 분석하여 개발된 것이다. 두뇌기반 분석틀에 의하면 과학 교수-학습프로그램에 대한 두뇌기반 정도를 서술적이고 정성적인 내용 수준에서 가늠할 수 있다. 교사는 이러한 분석을 통하여 자신의 과학 교수-학습프로그램을 보다 두뇌에 기반하도록 수정 보완해야 하지만, 어떠한 요소를 어느 정도 수정-보완해야 하는지에 대한 구체적인 내용을 파악하기가 어렵다. 또한 과학 교수-학습프로그램들 간의 두뇌기반 정도를 비교함에 있어 서술적이고 정성적인 결과만으로는 한계가 있다. 두뇌기반 분석틀의 경우 두뇌기반 정도에 대한 전반적인 내용만을 미리 가늠할 수 있을지 모르지만, 과학 교수-학습프로그램의 두뇌 수준의 구성 요소인 인지, 동기, 감성적인 측면의 하위 요소들이 서로 어떻게 얼마나 영향을 주고 있는지에 대한 세부적인 부분을 파악하기에는 한계가 있다. 이러한 단점을 효과적으로 극복할 수 있는 방법 중의 하나가 정성적인 분석 결과를 정량적 수치인 지수로 변환 시켜 줄 수 있는 산출식의 개발로 볼 수 있을 것이다.

따라서 이 연구에서는 학교 현장에서 사용되고 있는 과학 교수-학습프로그램이 얼마나 두뇌의 다양한 부분을 자극하고 발달시킬 수 있도록 구성되어 있는지 분석·진단할 수 있는 정량적인 지수산출 방법을 고안하여 제시하고자 하였다. 이를 위해 먼저 교수-학습 프로그램을 정성적으로 분석하여 연관 뇌기능 맵핑을 실시한 뒤, 이에 대한 두뇌기반 분석을 실시하였다. 이렇게 얻은 정성적 분석 결과에 대한 정량화를 위해 두뇌맞춤지수(Brain Compatibleness Index: BCI) 산출식을 개발하였다. 또한 개발된 두뇌맞춤지수 산출식에 의한 두뇌 기반 분석을 확인하기 위해 실

제 과학 교수-학습 프로그램에 적용하여 두뇌맞춤지수 분석을 실시였다.

## II. 연구방법과 내용

### 1. 연구대상

이 연구의 목적은 학교 현장에서 이루어지는 과학 교수-학습프로그램의 두뇌기반 컨설팅을 위한 정성적·정량적 분석방법을 제시하는 것이다. 첫 번째로 두뇌기반 컨설팅을 위한 분석방법 제시에는 중학교 2학년 물질의 특성 단원에서의 일반적인 교수-학습 지도안을 연구대상으로 선정하여 분석하였다. 제시된 분석방법의 유용성 검증에는 7차 및 2007 개정 교육과정 초등학교 과학 교사용 지도서에서 제시하고 있는 교수-학습지도안이 사용되었다. 교수-학습 지도안의 단원은 4학년 과학의 물질영역에 해당되는 무게 재기, 수평잡기 단원과 생명영역에 해당되는 강낭콩, 식물의 한 살이 단원을 선정하여 분석하였다.

### 2. 연구절차

과학 교수-학습프로그램의 두뇌기반 컨설팅을 위한 분석방법은 정성적인 측면과 정량적인 측면으로 고안 되었다.

#### 1) 정성적 분석 방법 고안 절차

정성적인 분석방법의 고안은 중학교 2학년 물질의 특성 단원 교수-학습프로그램 중 한 단원을 두뇌기반 과학 교수-학습프로그램 분석틀(이준기 등, 2010)이 제시하는 기준을 통해 분석하였다. 첫째, 연구자들은 연구대상 교수-학습프로그램을 학습과정에 따른 단위로 분절하였다. 이후 연구자들은 분석틀에서 제시된 예시와 정의를 참고하여 분절된 학습과정과 일치하는 두뇌기능 및 영역을 확인하였다. 이러한 과정을 통해 확인된 과학 교수-학습프로그램의 최종적인 두뇌 영역들을 CORE Brain map(이준기 등, 2010)에 나타내었다.

둘째, 교수-학습프로그램과 관련된 두뇌 네트워크의 특성을 파악하기 위하여 Core Brain map에 표지된 영역들을 교수-학습프로그램의 흐름에 맞춘 순차적인 연결(link)의 형태로 도식화 하였다. 이렇게 파악

된 두뇌 네트워크의 특성을 바탕으로 과학 교수-학습 프로그램에 대한 정성적인 두뇌기반 컨설팅방법을 고안할 수 있었다.

이 연구에서 고안된 정성적 분석방법은 전문가의 피드백을 통하여 수정·보완되었는데, 과학교육 전문가 3인과 뇌과학 및 인지신경과학 전문가 2인 그리고 현장 과학교사 4인으로 구성된 정기적인 세미나에서 8회 이상의 토의과정을 거쳐 검토되었다.

#### 2) 정량적 분석 방법 고안 절차

두뇌기반 과학 교수-학습 프로그램 분석틀(이준기 등, 2010)을 통한 교수-학습 프로그램 단계 관련 두뇌 맵핑 및 네트워크 구성을 실시하여도, 교사는 자신이 분석한 교수-학습 프로그램에 대한 기술적(descriptive) 특징들의 나열밖에 할 수 없는 상태에 머물게 된다. 즉, 초임교사가 최초 설계한 과학 교수-학습 지도안과 차년도의 것을 비교하거나 교원양성기관의 예비교사들이 교육에 따른 자신의 교수-학습 프로그램의 변화를 파악하고자 할 때, 혹은 교육과정 개정에 따른 학습자의 두뇌 수준 변화를 정량적으로 예상해 보고자 할 때 여기에 사용할 만한 적절한 방법은 현재로서는 알려져 있지 않다. 이러한 필요성에 의거하여 수행된 과학 교수-학습 프로그램의 두뇌기반 정량적 분석을 위한 두뇌맞춤지수 산출식의 개발절차는 그림 1과 같다.

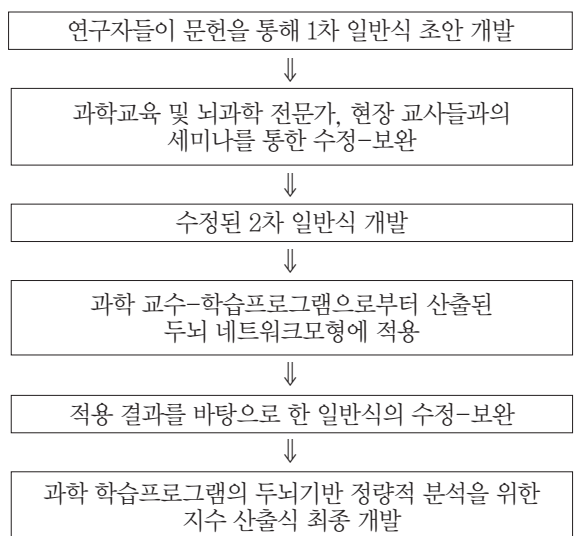


그림 1 과학 교수-학습 프로그램의 두뇌기반 정량적 분석을 위한 지수 산출식 개발 절차

그림 1과 같이 연구자들은 먼저 1차 일반식을 개발하여 과학교육 및 뇌과학 전문가와 현장 교사들을 대상으로 세미나를 통해 1차 일반식의 단점을 개선하였다. 이렇게 수정된 2차 일반식을 과학 교수-학습프로그램으로부터 산출된 두뇌 네트워크모형 평가에 적용하여 일반식의 타당성과 신뢰성을 재차 점검한 후 수정-보완하여 최종적인 일반식을 개발하였다.

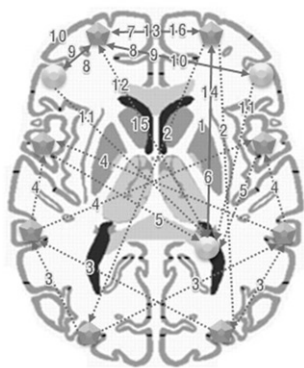
### Ⅲ. 연구 결과 및 논의

#### 1. 두뇌기반 분석틀을 적용한 과학 교수-학습 프로그램의 분석

##### 1) 정성적 분석

두뇌기반 과학 교수-학습 프로그램 분석틀인 'CORE Brain Map'을 실제 과학 교수-학습 프로그램 분석에 적용해 보면 다음과 같다. 예시 1과 그림 2는 교사 L의 중학교 2학년 과학 단원 중 물질의 특성(4. 용해도)에 대한 교수-학습 프로그램과 이에 대한 분석을 예시한 것이다. 교수-학습 프로그램의 상황에 대한 연관된 대표적 두뇌 기능과 영역은 두뇌기반 과학 교수-학습 분석틀(이준기 등, 2010)의 정의와 예시에 의하여 분석하였다.

교사 L의 수업을 분석하면 그림 2와 같은 형태로 도식화 할 수 있다. 교사 L은 중학교 과학 수업을 탐구 학습 형태로 진행하고 있지만, 두뇌 수준에서 매우 편중된 형태의 수업이 진행되고 있음을 본 분석틀을 통해 확인해 볼 수 있었다.



**그림 1** 교사 L의 교수-학습 프로그램에 대한 CORE brain map 분석예시 (점선 화살표는 단방향링크, 실선 화살표는 양방향 링크, 화살표 위의 숫자는 교수-학습 프로그램의 흐름에 의한 경로 순서, 서로 다른 색깔의 노드는 서로 다른 계를 나타냄)

교사 L의 수업은 두뇌 수준에서 피질영역의 발달만을 촉진시키는 편중된 수업형태이다. 이러한 방식의 수업만으로는 학생들의 변연계와 보상계의 적절한 발달을 기대하기 어렵게 된다. 뿐만 아니라 피질 내의 활용 영역과 이들 간의 네트워크 형성 정도가 우측 해마로 집중되는 경향을 발견할 수 있다. 이것은 과거 기억에 대한 재인과정을 단순 확인하는 과정에서 1차적으로 종종 일어나는 반응으로, 이 수업이 창의적인 지식생성형의 탐구라기보다는 학생들의 기존 개념 확인에 관련되는 두뇌 영역만을 많이 자극하고 있다는 것을 의미한다.

##### 2) 정량적 분석

두뇌기반 과학 교수-학습 프로그램에 대한 정성적 분석 결과는 연관 두뇌기능을 중심으로 22개 대표 두뇌영역위에 맵핑된다. 이때 학생의 두뇌는 교수-학습의 시간적 순서에 따라 순차적 자극을 경험하게 된다. 따라서 개별 두뇌 영역은 고립되어 존재하는 것이 아니고 순차적 흐름에 따른 경로 연결망을 지니는 네트워크를 형성하게 된다. 따라서 이를 정량화할 지수 산출식의 개발을 위해서는 네트워크의 구조에 대한 수학적 분석에 대한 이론적 근거가 필요하다.

헝가리의 수학자 Erdős와 Rényi는 1960년에 발표한 그들의 논문 "On the evolution of random graph"에서 그래프 상의 점과 연결선(링크)의 분포와 그 확률에 관한 이론을 발표한 바 있다(Erdős & Rényi, 1960). 이는 차후에 모든 네트워크 이론의 기초가 되었고 아울러 오늘날의 월드와이드웹(World Wide Web)의 연계 구조나 사람들의 고유관계와 같은 사회현상 분석 및 뇌와 같은 복잡한 신경네트워크 구조의 동역학적 분석의 이론적 배경을 제공해 주었다(Barabasi, 2002). 따라서 이 연구에서는 Erdős와 Rényi의 random network theory에 기반을 두어 교수-학습 프로그램으로부터 유도된 두뇌영역과 네트워크를 정량적으로 분석해 낼 식을 유도해 내었으며, 그러한 산출식의 유도 과정은 아래와 같다.

먼저, 과학 교수-학습 프로그램에 대한 정성적 분석결과, 교수-학습프로그램이 자극하고 있는 것으로 나타난 실제 네트워크상의 노드(node)의 수를  $N_0$ 라 하자. 여기서  $N_0$  (Observed node)는 정성적 분석 결과 얻어낸 관측치를 의미한다. CORE Brain Map(이준기 등, 2010)에서 이론적으로 가능한 전체 노드의

[예시 1]

교사 L의 중학교 2학년 과학 단원 중 물질의 특성에 대한 교수-학습 프로그램

일시	2010. 04. 06. 3교시		장소	과학실		차시	15
단원명	물속에도 산소가 있을까?						
학습목표	온도와 압력에 따른 기체의 용해도 변화를 알 수 있다.						
단계	학습과정	교수-학습활동				학습자료 / 유의점	시간
		교사 활동		학생 활동			
도입	선수 학습 확인	• 용해도의 개념 질문 ▶ 기억의 재인 - 우측해마	• 용해도에 대하여 답한다.			• 파워포인트를 이용	5분
	학습 목표	• 본시의 학습 목표 제시 ↓(링크 번호 - 1) ▶ 추상정보 유지 - 우측 배외측전전두피질	• 학습 목표 인지				
전개	준비물 점검	• 실험대 위의 준비물 확인 및 유의 사항을 전달 ↓(링크 번호 - 2) ▶ 구체적 정보의 수집, 시각 - 양측 후두피질	• 실험 보고서를 보면서 설명을 듣고 유의 사항 숙지			[준비물] • 시험관, 비이커, 사이다, 얼음, 고무마개, 초시계  [유의사항] • 실험기구 파손 주의 • 사이다는 실험 직전 개봉	2분
	탐구 활동 도입	• 안전수칙에 대한 설명 ↓(링크 번호 - 3) ▶ 구체적 정보의 수집, 시각 - 양측 후두피질	• 안전수칙을 경청				
	탐구 활동 전개	• 실험안내서를 참고하여 실험을 실시하도록 지시	• 실험순서에 따라 실험 진행				
		• 20초 동안 시험관에 발생한 기포의 양 비교하기 • 얼음물의 시험관을 실온과 50℃의 물에 넣을 때의 변화 확인하기 ↓(링크 번호 - 3) ▶ 구체적 정보의 수집, 시각 - 양측 후두피질 ↓(링크 번호 - 3) ▶ 시공간정보 및 수리정보 유지 및 운용 - 양측 두정피질 ↓(링크 번호 - 4) ▶ 정보의 상세 탐색 및 연합 - 양측 측두피질	• 기포의 양을 비교해 보고 상대적인 개수를 그림으로 그려본다. • 어떤 현상이 일어나는지 확인한다.				
결과 토의	• 기포가 가장 많이 발생하는 시험관이 무엇인지 질문	• 약 50℃의 물속에 넣어 둔 시험관에서 가장 많이 발생			• 지적 받은 모든 조의 조장이 결과를 발표한다.	5분	
	• 실온의 물에 담긴 두 시험관 중 기포가 더 많이 발생하는 시험관은 무엇인지 질문 ↓(링크 번호 - 5) ▶ 기억의 재인 - 우측 해마	• 고무마개를 막지 않은 시험관에서 기포 발생이 많았다.					
	• 기체의 용해도에서 압력과 온도의 영향을 설명 ↓(링크 번호 - 6) ▶ 추상정보의 유지 - 우측 배외측전전두피질	• 기체의 용해도가 압력과 온도의 영향을 받음을 이해함.					
	• 어항속의 금붕어가 물위로 나와 빠끔 거리는 이유는? ↓(링크 번호 - 7) ▶ 추상적 정보의 구성 및 생성 - 좌측 배외측전전두피질 ↓(링크 번호 - 8) ▶ 추상정보의 선택 - 양측 복외측전전두피질	• 여름에는 온도가 따뜻하므로 산소의 용해도가 줄어들기 때문이다.			• 온도, 압력 관계를 상기시킴	5분	

단계	학습 과정	교수-학습 활동		학습 자료 / 유의점	시간
		교사 활동	학생 활동		
전개	결과 고찰	<ul style="list-style-type: none"> <li>탄산음료를 마시고 트림이 나는 이유는?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>몸속에서 압력은 낮아지고 온도가 높아지므로</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>충분히 생각할 여유를 준다.</li> </ul>	5분
		↓ (링크 번호 - 9) ▶ 추상적 정보의 구성 및 생성 - 좌측 배외측전전두피질 ↓ (링크 번호 - 10) ▶ 추상정보의 선택 - 양측 복외측전전두피질			
		<ul style="list-style-type: none"> <li>일상생활 속에서 이러한 특성이 나타나는 것을 2~3개 정도 찾아봅시다.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>생활에서 이용할 수 있는 예를 생각함</li> </ul>		
		↓ (링크 번호 - 11) ▶ 기억의 재인 - 우측해마 ↓ (링크 번호 - 12) ▶ 추상적 정보의 구성 및 생성 - 좌측 배외측전전두피질			
정리 및 평가	학습 내용 정리	<ul style="list-style-type: none"> <li>기체의 용해도는 압력이 증가하면 커지고, 온도가 증가하면 감소함을 설명</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>설명을 듣고 숙지</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>파워포인트 제시</li> </ul>	3분
	↓ (링크 번호 - 13) ▶ 추상정보의 유지 - 우측 배외측전전두피질				
정리 및 평가	형성 평가	<ul style="list-style-type: none"> <li>실험 보고서의 평가 문항을 각자 풀게 함</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>스스로 확인하고 풀어 봄</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>파워포인트로 정리 확인</li> </ul>	5분
	↓ (링크 번호 - 14) ▶ 기억의 재인 - 우측 해마 ↓ (링크 번호 - 15) ▶ 추상적 정보의 구성 및 생성 - 좌측 배외측전전두피질				
차시 예고	차시 예고	<ul style="list-style-type: none"> <li>차시 학습 내용 예고한다.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>차시 학습 준비</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>과학실 주변을 정리 시킨다.</li> </ul>	2분
		↓ (링크 번호 - 16) ▶ 추상정보의 유지 - 우측 배외측전전두피질			

수는 22개이다.

$$BCI = \frac{N_o}{22} \cdot \frac{L_o}{\frac{N_o(N_o - 1)}{2}}$$

N개의 노드를 가지는 네트워크는 최대로  $\frac{N(N-1)}{2}$

의 링크(link)를 가질 수 있다(Erdős & Rényi, 1960). 그리고 과학 교수-학습 프로그램이 자극하고 있는 것으로 나타난 실제 네트워크상의 링크의 수를  $L_o$ 라 하자.

또한, 네트워크 효율성을 알아내려면 해당 네트워크의 포화도를 파악해야 한다. 이는 이 네트워크의 노드 및 링크가 이론적으로 가질 수 있는 전체 노드 및 링크인 이론치에 대한 (saturated model) 실제 관측된 노드 및 링크 개수인 관측치의 비율로 표현할 수 있다(McIntosh & Gonzalez-Lima, 1994).

이를 바탕으로, 두뇌맞춤지수 산출식은 1차적으로 다음과 같이 정리할 수 있다(BCI = Brain Compatibleness Index).

그러나 CORE Brain Map에서 나타나는 두뇌 영역 간 네트워크의 링크는 하나의 유형이 아니므로 가중치를 통해 표 1과 같이 변별해 주어야 한다(Milo et al., 2002).

두뇌의 활성네트워크는 정보전달의 효율성에 있어서 단방향보다 양방향 회로에서 우수성을 지닌다(Sporns & Kötter, 2004). 아울러 네트워크가 형성되는 과정에서 피질계, 변연계, 보상계와 같은 두뇌의 거대 시스템 내에서의 물리적 섬유다발이나 뉴런의 직접적 연결에 의한 링크도 형성되지만 보다 추상적이고 고차원적인 인지과정일수록 시스템들 간을 넘나드는 동조과정이 중요한 것으로 알려져 있다(Bressler

**표 1**  
두뇌맞춤지수 산출을 위한 네트워크 유형과 가중치

네트워크상의 링크유형( <i>i</i> )	링크의 가중치 값( <i>w</i> )
계내(intra-system) 단방향 링크( <i>i</i> = 1)	1점
계내(intra-system) 양방향 링크( <i>i</i> = 2)	2점
계간(inter-system) 단방향 링크( <i>i</i> = 3)	3점
계간(inter-system) 양방향 링크( <i>i</i> = 4)	4점

& Tognoli, 2006; Tononi, 2004; Wagner & Thagard, 2004). 따라서 네트워크 내의 개별 링크는 이들이 연결해주는 system이나, 연결의 방식(방향성)에 따라 가중치를 보유했을 수 있다. 이를 하나의 항으로 정리하면 다음과 같다.

$$\sum_{i=1}^4 l_i w_i \quad (l_i: i \text{ 유형 링크의 개수}, w_i: i \text{ 유형 링크의 가중치})$$

그러므로 최종적으로 두뇌기반 과학 교수-학습 프로그램의 정량적 분석을 위한 두뇌맞춤지수 산출식을 정리하면 다음과 같다.

$$BCI = \frac{N_o}{22} \cdot \frac{L_o}{\frac{N_o(N_o-1)}{2}} \cdot \sum_{i=1}^4 l_i w_i = \frac{L_o}{11(N_o-1)} \cdot \sum_{i=1}^4 l_i w_i$$

즉, 두뇌맞춤지수(BCI)는 노드의 수, 링크의 수, 링크의 유형별 가중치 값으로 나타낼 수 있다. 이제, 앞서 제시된 교사 L의 교수-학습 프로그램을 정량적으로도 분석해보자. 표 2는 정성적으로 분석된 교사 L의 교수-학습 프로그램에 대한 두뇌영역과 네트워크 링크 분포이다.

교사 L의 과학 교수-학습 프로그램의 경우, 나타난 노드의 수는 11개이며 노드들 간의 링크는 19개 이다. 19개 링크들을 유형에 따라 나누면 시스템 내에서의 단방향 링크가 12개, 양방향 링크가 7개이며, 시스템 간의 단방향 링크가 3개, 양방향 링크가 3개임을 확인할 수 있다. 위의 결과를 근거로 하여 두뇌맞춤지수를 산출해보면 아래와 같다.

**표 2**  
교사 L의 교수-학습 프로그램에 대한 CORE Brain Map 분석 결과

나타난 노드의 수( <i>N<sub>o</sub></i> )	나타난 링크의 수( <i>L<sub>o</sub></i> )	유형별 링크( <i>i</i> )의 수( <i>l<sub>i</sub></i> )			
		<i>i</i> = 1	<i>i</i> = 2	<i>i</i> = 3	<i>i</i> = 4
11	19	12	1	3	3

$$BCI = \frac{19}{11(11-1)} \times (12 \times 1 + 1 \times 2 + 3 \times 3 + 3 \times 4) = 6.05$$

따라서 교사 L의 교수-학습 프로그램은 두뇌기반 분석의 결과, 정량적인 측면에서 두뇌맞춤지수는 6.05의 값을 가진다고 할 수 있다.

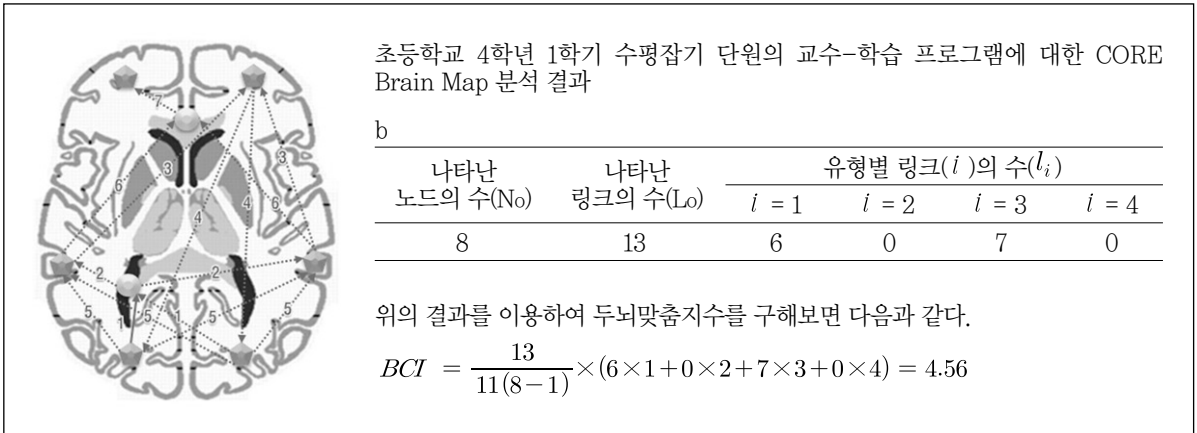
## 2. 과학 교수-학습 프로그램의 두뇌기반 분석방법의 적용

개발된 두뇌맞춤지수 산출식에 의한 두뇌 기반 분석을 확인하기 위해 실제 과학 교수-학습 프로그램에 적용하여 정성적·정량적으로 분석해 보면 다음과 같다. 예시 2와 예시 3은 7차 교육과정 초등학교 과학 교수-학습프로그램이다. 예시 2는 7차 교육과정 초등학교 4학년 1학기 수평잡기 단원(물체의 무게 비교하기)의 교수-학습 프로그램을 분석 한 후 얻은 두뇌기반 과학 교수-학습 프로그램 분석결과이다.

이 교수-학습프로그램의 경우, 나타난 노드의 수는 8개이며 노드들 간의 링크는 13개 이다. 13개 링크들을 유형에 따라 나누면 계내에서의 단방향 링크가 6개, 계간의 단방향 링크가 7개임을 확인할 수 있다.

위의 결과들에서처럼, 이 교수-학습프로그램의 두뇌맞춤지수는 4.56으로 나왔으며, 일부 변연계 영역을 자극하는 과정이 있긴 하지만 대부분 피질계를 자극하는 과정만으로 이루어진 것을 확인할 수 있다. 또한 관련 노드들 사이의 연결(link)이 많지 않고 방향성이 대부분 단방향으로 두뇌 네트워크상의 동조

[예시 2]



효율성이 높지 않음을 알 수 있다. 이 교수-학습프로그램이 보다 두뇌 최적화되기 위해서는 우선적으로 두뇌 보상계를 자극할 수 있는 학습요소(동기유발, 칭찬 등)가 반영되어야 할 것이고, 학습과정에서 두뇌 시스템간의 교류를 유발시킬 수 있도록 인지 · 동기와 관련된 학습단계간의 순서를 조절해야 할 것이다.

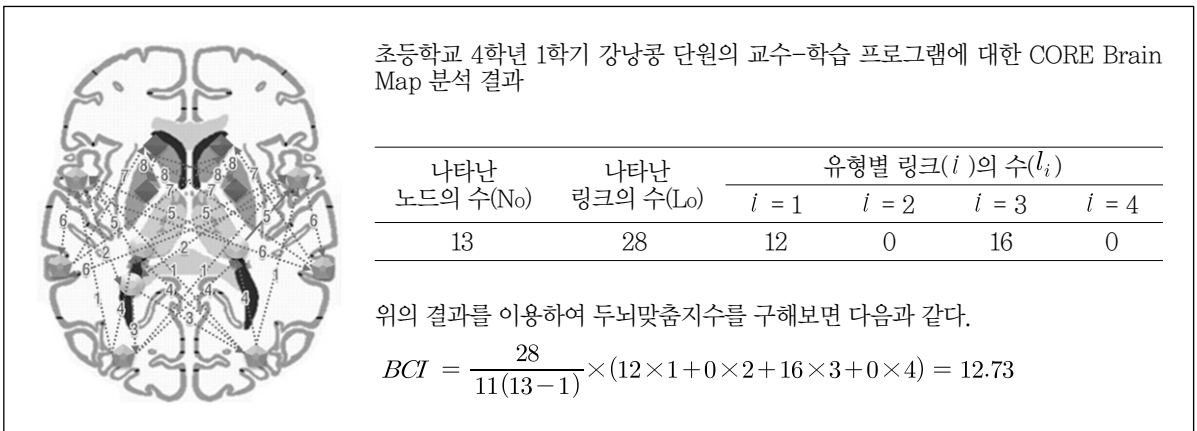
예시 3은 7차 교육과정 초등학교 4학년 1학기 강낭콩 단원(씨앗의 모양 관찰하기)의 교수-학습 프로그램을 분석 한 후 얻은 두뇌기반 과학 교수-학습 프로그램 분석결과이다.

이 예시의 경우, 나타난 노드의 수는 13개이며 노드들 사이의 링크는 28개 이다. 28개 링크들을 유형에 따라 나누면 시스템 내에서의 단방향 링크가 12개, 시스템간의 단방향 링크가 16개임을 확인 할 수 있다.

이 교수-학습프로그램의 두뇌맞춤지수는 12.73으로 예시 2의 경우 보다 매우 높게 나왔다. 그 이유는

예시 2보다 나타난 노드의 수도 많았고 노드 수에 대한 링크 수도 상대적으로 매우 많이 나타났기 때문에 볼 수 있다. 특히 각 계간들을 연결하는 링크들이 많이 나타난 것을 알 수 있다. 이는 이 교수-학습프로그램에 의해서 피질계, 변연계, 보상계 영역들 간의 네트워크 형성이 잘 이루어 질 수 있음을 의미한다. 이 교수-학습프로그램은 비록 각 계간 연결이 잘 이루어지고 있긴 하지만 계간 연결이 모두 단방향이고, 피질계 영역 중 과학지식 생성과 관련된 피질영역이 나타나지 않고 있음을 확인할 수 있다. 이 교수-학습 프로그램에서는 학생들이 스스로 지식생성 과정을 경험할 수 있는 학습과정이 포함되어야 할 것이며, 또한 학습과정에서 두뇌 계간의 양방향 교류를 유발시킬 수 있도록 인지 · 동기 · 감성과 관련된 학습단계간의 순서를 조절한다면 보다 두뇌 친화적인 교수-학습 프로그램이 될 수 있을 것이다.

[예시 3]





예시 4와 5는 2007개정 교육과정 초등학교 4학년 과학 교수-학습프로그램을 분석한 결과이다. 먼저, 예시 4는 2007 개정 교육과정 초등학교 4학년 1학기 무계재기 단원(윗접시 저울)의 교수-학습 프로그램을 분석 한 후 얻은 두뇌기반 과학 교수-학습 프로그램 분석결과이다.

이 예시의 경우, 나타난 노드의 수는 15개이며 노드들 사이의 링크는 25개 이다. 25개 링크들을 유형에 따라 나누면 시스템 내에서의 단방향 링크가 7개, 시스템간의 단방향 링크가 16, 양방향 링크가 2개임을 확인 할 수 있다.

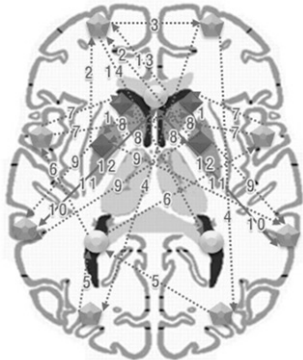
이 교수-학습프로그램의 두뇌맞춤지수는 10.23으로 예시 3과 마찬가지로 피질계, 보상계, 변연계 모두를 고루 자극함과 동시에 다양한 유형의 링크가 나타난 것을 확인할 수 있다. 이 예시는 노드의 수에 비해 링크의 수가 많지 않았고 계내 양방향 링크가 나타나

지는 않았지만, 계간 단방 링크가 16개, 계간 양방 링크가 2개로 높은 가중치를 갖고 있다. 이는 교수-학습프로그램에서 인지, 동기, 감성 영역을 자극하는 학습단계들 간의 순서가 어느 정도 적절히 배열되었음을 의미한다고 볼 수 있다. 즉, 이러한 과학 교수-학습프로그램을 학생들에게 적용시킬 경우, 학생들은 인지, 동기, 감성관련 해당 두뇌 영역 모두를 충분히 자극받을 수 있으며 각 영역들 간의 두뇌 수준 교류가 잘 이루어지는 경험을 할 수 있을 것이다.

예시 5는 2007 개정 교육과정 초등학교 4학년 1학기 식물의 한 살이 단원(씨앗의 모양 관찰하기)의 교수-학습 프로그램을 분석 한 후 얻은 두뇌기반 과학 교수-학습 프로그램 분석결과이다.

이 예시의 경우, 나타난 노드의 수는 15개이며 노드들 간의 링크는 30개 이다. 30개 링크들을 유형에 따라 나누면 계내에서의 단방향 링크가 8개, 양방향 링크가

[예시 4]



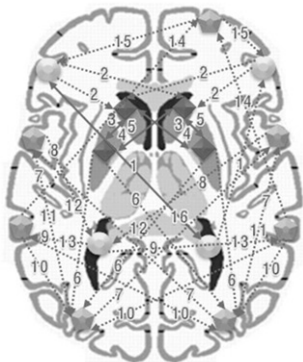
초등학교 4학년 1학기 무계재기 단원의 교수-학습 프로그램에 대한 CORE Brain Map 분석 결과

나타난 노드의 수( $N_0$ )	나타난 링크의 수( $L_0$ )	유형별 링크( $i$ )의 수( $l_i$ )			
		$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$
15	25	7	0	16	2

위의 결과를 이용하여 두뇌맞춤지수를 구해보면 다음과 같다.

$$BCI = \frac{25}{11(15-1)} \times (7 \times 1 + 0 \times 2 + 16 \times 3 + 2 \times 4) = 10.23$$

[예시 5]



초등학교 4학년 1학기 식물의 한 살이 단원의 교수-학습 프로그램에 대한 CORE Brain Map 분석 결과

나타난 노드의 수( $N_0$ )	나타난 링크의 수( $L_0$ )	유형별 링크( $i$ )의 수( $l_i$ )			
		$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$
15	30	8	5	17	0

위의 결과를 이용하여 두뇌맞춤지수를 구해보면 다음과 같다.

$$BCI = \frac{30}{11(15-1)} \times (8 \times 1 + 5 \times 2 + 17 \times 3 + 0 \times 4) = 13.44$$

5개, 계간의 단방향 링크가 17개임을 확인 할 수 있다.

이 교수-학습프로그램의 경우 두뇌맞춤지수는 13.44로 예시들 중 가장 높게 나타났다. 그 이유는 노드의 수에 비해 링크의 수가 다른 예시들 보다 많았으며, 링크의 유형에 따른 가중치도 높게 나타났기 때문으로 볼 수 있을 것이다. 이 예시는 피질계, 보상계, 변연계 모두를 고루 자극함과 동시에 3가지 유형의 링크에 의한 가중치가 높게 나타나고 있다. 하지만 인지적인 과정 중 과학지식의 생성에 관여하는 좌측 배외측전전두피질 영역을 자극하는 학습단계가 없고, 각 계들 간의 양방향 링크를 형성하지 못하고 있다. 따라서 이 교수-학습 프로그램에서 과학지식을 학생 스스로 생성할 수 있도록 하는 학습단계의 추가 및 순서 조절이 보완된다면 인지적 영역 노드가 추가될 수 있고 계간의 양방향 연결이 많아지게 될 것이다. 이는 학생들에게 인지, 동기, 감성 두뇌 영역들의 충분한 자극 및 교류를 경험하게 해줄 수 있을 것이다.

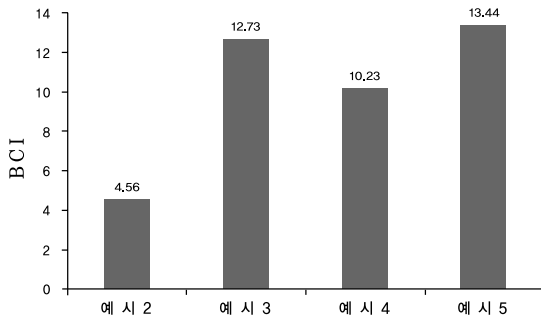


그림 3 연구에 사용된 과학 교수-학습프로그램들의 두뇌맞춤지수(BCI)

분석된 네 가지 과학 교수-학습프로그램들의 두뇌맞춤지수를 비교해 보면, 예시 2의 교수-학습프로그램에 비해 예시 3, 4, 5 교수-학습프로그램들의 두뇌맞춤지수가 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 차이는 예시 2의 경우 보상계 영역의 자극 없이 피질계 영역과 변연계 영역의 자극만을 줄 수 있도록 학습단계가 구성되어 있었지만, 예시 3, 4, 5의 경우 피질계, 보상계, 변연계 모두 자극되고 이들 간 링크를 이룰 수 있도록 학습단계가 구성되어 있었기 때문일 것이다. 비록 예시 3, 4, 5 교수-학습프로그램들이 3영역 모두를 자극할 수 있었지만 이들 간에도 링크의 수와 유형에 따라 두뇌맞춤지수가 차이가 나는 것을 확인할 수 있었다.

[예시2]~[예시5]에서 제시된 과학 교수-학습프로그램의 분석 결과들은 두뇌맞춤지수 산출식이 과학-교수학습프로그램의 두뇌맞춤정도에 대하여 구체적이고 정량적인 분석 결과를 제공할 수 있음을 보여준다.

#### IV. 결론 및 교육적 적용

이 연구에서는 과학 교수-학습프로그램의 두뇌기반 분석을 위한 정성적·정량적 분석방법을 제시하고자 하였다. 이를 위하여 두뇌기반 분석틀을 활용한 네트워크 맵핑과 두뇌맞춤지수(BCI) 산출식을 개발하였다. 이 연구의 결과를 통해 얻을 수 있는 결론 및 교육적 시사점은 다음과 같다.

우선, 과학 교수-학습 프로그램의 정성적 분석을 통해 얻은 CORE Brain Map의 네트워크 모형은 교수-학습 프로그램을 두뇌수준에서 진단해 보는데 있어 효과적이었다. 또한, 과학 교수-학습 프로그램의 정량적 분석을 위해 개발된 두뇌맞춤지수(BCI) 산출식은 개별 및 교육과정별 교수-학습 프로그램들을 평가해 보는데 있어 효과적인 것으로 나타났다.

이 연구를 통해 개발된 두뇌기반 과학 교수-학습 프로그램의 정성적·정량적 분석방법은 두뇌기반 과학 교수-학습 프로그램의 제작을 위한 현장교사의 과학수업 분석과 컨설팅에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 전망된다. 아울러, 문서 형태의 교수-학습 지도안 뿐 아니라 실제 수업과정이나 학생 자유탐구를 위한 보조교재의 구성 등에 대한 두뇌기반 분석과 컨설팅 역시 가능할 것으로 기대된다.

그럼에도 불구하고, 이 연구가 제시하고 있는 과학 교수-학습프로그램의 두뇌기반 컨설팅을 위한 정성적·정량적 분석방법은 현장에서 교사들이 수업에 사용하고 있는 모든 과학 교수-학습 프로그램에 대한 적용이 이루어진 것이 아니므로 활용 및 해석시 제한점을 지닌다. 이러한 점은 추후 더욱 많은 과학 교수-학습 프로그램들에 대한 적용 및 분석 연구들을 통해 보완해 나가야 할 것이며, 두뇌맞춤지수에 맞춘 교수-학습프로그램의 학습효과 검증에 관한 연구 또한 보완되어야 할 것이다.

#### 국문 요약

이 연구의 목적은 과학 교수-학습프로그램의 두뇌

기반 분석을 위한 정성적·정량적 분석방법을 제시하는 것이다. 연구목적 달성을 위해, 첫 번째로 두뇌기반 분석을 위한 분석방법의 고안에는 중학교 과학 교수-학습프로그램 중 한 단원을 연구대상으로 선정하여 분석하였다. 제시된 분석방법의 유용성 검증에는 7차 및 2007 개정 교육과정의 초등학교 과학 교수-학습프로그램 중 네 단원을 연구대상으로 선정하여 검증하였다. 그 결과, 교수-학습 프로그램을 CORE Brain Map을 통해 정성적으로 컨설팅 할 수 있었다. 또한 네트워크 이론으로부터 정량적 분석을 위한 두

$$\text{뇌맞춤지수 산출식}(BCI = \frac{I_o}{11(N_o-1)} \cdot \sum_{i=1}^4 l_i w_i) \text{을 유도}$$

하였다. 이를 통해 단위 및 교육과정에 따른 연구대상 교수-학습프로그램들 간의 정량적 차이를 확인할 수 있었다. 이 연구를 통해 개발된 두뇌기반 과학 교수-학습 프로그램의 정성적·정량적 분석방법은 두뇌기반 다양한 과학 교수-학습 프로그램의 분석 및 진단에 활용 가능할 것으로 전망된다.

주요어: 과학 교수-학습 프로그램, 두뇌기반 분석, 두뇌맞춤지수(BCI) 산출식, 두뇌기반 컨설팅

### 참고 문헌

임채성(2005). 뇌 기능에 기초한 과학 교수학습: 뇌기능과 학교 과학의 정의적·심체적·인지적 영역의 연계적 통합 모형. 초등과학교육, 24(1), 86-101.  
 임채성(2009). 뇌기반 진화적 과학 교수학습 모형의 개발. 한국과학교육학회지, 29(8), 990-1010.  
 강호감(1991). 두뇌의 기능분화에 따른 교수전략이 창의력 및 자연과 학업성취도에 미치는 영향. 서울대학교 박사학위논문.  
 권용주(1998). 청소년들에게서 전두연합령은 어떻게 과학적 추론 및 과학개념 변화의 수행을 매개하는가? 한국과학교육학회지, 18(3), 437-441.  
 권용주, 박지영, 신동훈(2006a). 가설생성 학습 후에 나타난 초등 예비교사의 뇌파 변화. 초등과학교육, 25(2), 159-166.  
 권용주, 박지영, 신동훈, 정진수, 박국태(2006b). 가설생성 학습 후에 나타난 초등학생의 두뇌 활성화 변화. 한국생물교육학회지, 34(1), 72-80.

권용주, 이준기(2010). 분류 지식의 생성과 이해 형태 학습을 통한 학생들의 두뇌활성 변화. 한국과학교육학회지, 30(4), 487-497.  
 권용주, 정진수, 박윤복, 강민정(2003). 선언적 과학 지식의 생성 과정에 대한 과학 철학적 연구: 귀납적, 귀추적, 연역적 과정을 중심으로. 한국과학교육학회지, 23(3), 215-228.  
 권용주, 정진수, 이준기, 이일선 (2009). 과학적 탐구사고력 향상을 위한 과학지식의 생성과 평가. 서울: 메이드.  
 김용진(2003). 과학 문제 풀이의 사고과정에서 뇌파 분석에 의한 두뇌 기능 연구. 한국생물교육학회지, 31(4), 313-319.  
 김용진, 장남기(2001a). 시청각 학습의 반복 수행에 따른 전두부의 뇌파 활성화도 변화. 한국과학교육학회지, 21(3), 516-528.  
 김용진, 장남기(2001b). 중학교 과학 수업에서 두뇌순환학습 프로그램의 적용 효과. 한국생물교육학회지, 29(2), 186-194.  
 김유미(2002). 두뇌기반 교수-학습의 원리와 적용방안 탐색. 교육학연구, 40(3), 247-270.  
 김재영과 최선희(2003). 두뇌기반 학습원리에 기초한 초등 과학수업의 효과 - 4학년 생명영역을 중심으로 -. 한국생물교육학회지, 31(2), 119-131.  
 이안나, 권용주, 정진수, 양일호(2007). 동물 행동학자의 연구 활동에서 나타나는 연구 단계, 사고 과정, 행동 양식 및 생성 지식에 관한 연구. 한국생물교육학회지, 35(3), 361-373.  
 이준기, 이일선, 권용주(2010). 과학탐구 교수-학습프로그램의 평가를 위한 두뇌기반 분석틀 개발. 한국과학교육학회지, 30(5), 647-667.  
 임채성, 김정용(2003). 과학학습양식에 따른 4MAT System 활용 초등 과학 수업의 효과. 한국생물교육학회지, 31(4), 320-331.  
 최선영, 장남기(2003). 초등학생의 창의력, 학업성취도 및 과학관련 태도를 신장시킬 수 있는 전뇌순환학습 프로그램 개발과 적용 효과. 한국생물교육학회지, 31(4), 282-291.  
 허경철(1999). 지식생성교육을 위한 지식의 구조 분석. 한국교육, 26(1), 101-127.  
 허명(1999). 중등학생의 과학탐구능력 신장을 위한 학습지도 및 평가방법의 개선방향. 한국과학교육

학회지, 10(2), 1-9.

Barabasi, A. L. (2002). *Linked: The new science of networks*. Perseus Publishing, Cambridge, MA. [강병남, 김기훈 공역 (2002). 링크 크. 동아시아 출판사.

Bressler, S. L., & Tognoli, E. (2006). Operational principles of neurocognitive networks. *International Journal of Psychophysiology*, 60, 139-148.

Chen, C., Xue, G., Dong, Q., Jin, Z., Li, T., Xue, F., Zho, L., & Guo, Y. (2007). Sex determines the neurofunctional predictors of visual word learning. *Neuropsychologia*, 45, 741-747.

Choi, Y. Y., Shamos, N. A., Cho, S. H., DeYoung, C. G., Lee, M. J., Lee, J., Kim, S. I., Cho, Z., Kim, K., Gray, J. R., & Lee, K. H. (2008). Multiple bases of human intelligence revealed by cortical thickness and neural activation. *The Journal of Neuroscience*, 28(41), 10323-10329.

Doidge, N. (2007). *The brain that changes itself*. NY: Penguin Books.

Eckert, M. A., Lombardino, L. J., Walczak, A. R., Bonihla, L., Leonard, C. M., & Binder, J. R. (2008). Manual and automated measures of superior temporal gyrus asymmetry: Concordant structural predictors of verbal ability in children. *NeuroImage*, 41, 813-822.

Erdős P., & Rényi, A. (1960). On the evolution of random graphs. *Publications of the Mathematical Institute of Hungarian Academy of Sciences*, 5, 17-61.

Erickson, K. I., Colcombe, S. J., Wadhwa, R., Bherer, L., Peterson, M. S., Scalf, P. E., Kim, J. S., Alvarado, M., & Kramer, A. F. (2007a). Training-induced functional activation changes in dual-task processing: An fMRI Study. *Cerebral Cortex*, 17(1), 192-204.

Erickson, K. I., Colcombe, S. J., Wadhwa, R., Bherer, L., Peterson, M. S., Scalf, P. E., Kim, J. S., Alvarado, M., & Kramer, A. F.

(2007b). Training-induced plasticity in older adults: Effects of training on hemispheric asymmetry. *Neurobiology of Aging*, 28, 272-283.

Gogtay, N., & Thompson, P. M. (2010). Mapping gray matter development: Implications for typical development and vulnerability to psychopathology. *Brain and Cognition*, 72, 6-15.

Greake, J. G., & Hansen, P. C. (2005). Neural correlates of intelligence as revealed by fMRI of fluid analogies. *NeuroImage*, 26, 555-564.

Jensen, E. (2000). *Brain-based learning* 2nd Ed. Turning Point Publishing.

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

Kassubek, J., Schmidtke, K., Kimmig, H., Lücking, C. H., & Greenlee, M. W. (2001). Changes in cortical activation during mirror reading before and after training: an fMRI study of procedural learning. *Cognitive Brain Research*, 10(3), 207-17.

Kwon, Y. J., Lee, J. K., Shin, D. H. & Jeong, J. S. (2009). Changes in brain activation induced by the training of hypothesis generation skills: An fMRI study. *Brain and Cognition*, 69, 391-397.

Lee, J. K. (2009). *Dissociation of the brain activation network associated with hypothesis-generating and hypothesis-understanding in biology learning: Evidence from an fMRI study*. Unpublished Doctoral Dissertation. Cheongwon, Chungbuk: Korea National University of Education.

Lee, K. H., Choi, Y. Y., Gray, J. R., Cho, S. H., Chae, J. H., Lee, S., & Kim, K. (2006). Neural correlates of superior intelligence: Stronger recruitment of posterior parietal cortex. *NeuroImage*, 29, 578-586.

Luna, B., Padmanabhan, A., & O'Hearn, K. (2010). What has fMRI told us about the Development of Cognitive Control through Adolescence? *Brain and Cognition*, 72, 101-113.

McIntosh, A. R., & Gonzalez-Lima, F. (1994). Structural equation modeling and its application to network analysis in functional brain imaging. *Human Brain Mapping*, 2, 2-22.

Milo, R., Shen-Orr, S., Itzkovitz, S., Kashtan, N., Chklovskii, D., & Alon, U. (2002). Network motifs: Simple building blocks of complex networks. *Science*, 5594(298), 824-827.

Olesen, P. J., Westerberg, H., & Klingberg, T. (2004). Increased prefrontal and parietal activity after training of working memory. *Nature Neuroscience*, 7(1), 75-79.

Posner, M. I., & Rothbart, M. K. (2005). Influencing brain networks: implications for education. *Trends in Cognitive Science*, 9(3), 99-103.

Reis, D. L., Brackett, M. A., Shamosh, N. A., Kiehl, K. A., Salovey, P., & Gray, J. R. (2007). Emotional intelligence predicts individual differences in social exchange reasoning.

*NeuroImage*, 35, 1385-1391.

Schmithorst, V. J., & Holland, S. K. (2006). Functional MRI evidence for disparate developmental processes underlying intelligence in boys and girls. *NeuroImage*, 31, 1366-1379.

Sousa, D. A. (2001). *How the brain learns*. Thousand Oaks, CA: Corwin Press.

Sporns, O., & Kotter, R. (2004). Motifs in Brain Networks. *PLoS Biology*, 2(11), 1910-1918.

Suzcs, D., & Goswami, U. (2007). Educational Neuroscience: Defining a new discipline for the study of mental representations. *Mind, Brain and Education*, 1(3), 114-127.

Tononi, G. (2004). An information integration theory of consciousness. *BMC Neuroscience*, 5, 42.

Wagner, B. M., & Thagard, P. (2004). Spiking phineas gage: A neurocomputational theory of cognitive-affective integration in decision making. *Psychological Review*, 111(1), 67-79.