

## 과학적 가설평가 과정의 뇌 과학적 분석방법 고찰 -Effective connectivity 중심으로-

이일선\* , 권용주\*\*  
한국교원대학교

### A review on Brain Study Methods in Scientific Hypothesis evaluation - A Focus on the effective connectivity analysis -

Lee, Il-Sun\*, Kwon, Yong Ju\*\*  
Korea National University of Education

---

#### <ABSTRACT>

---

The purpose of this study was to review how the brain scientific analysis in scientific hypothesis evaluation with a focus on the effective connectivity. To review how the brain scientific analysis, we have found 3 methods of effective connectivity from previous studies: PPI, SEM, DCM. Firstly, Fifty literatures on the brain network associated connectivity analysis were analyzed to know the characteristic which is related to three methods. Secondly, thirty literatures associated with the sub-element of the hypothesis evaluation process using effective connectivity analysis methods were evaluated. As a result, effective connectivity analysis showed that a more appropriate analysis of functional connectivity. In addition, the PPI analysis consist of ROIs, to derive SEM model using ROIs was the best analysis method. These analysis methods are expected to be utilized in other scientific inquiry process.

**Key words:** hypothesis evaluation, effective connectivity, fMRI, connectivity analysis methods, PPI, SEM, DCM

---

---

\* 제1저자 e-mail: ilsunbrain@gmail.com

\*\* 교신저자 e-mail: kwonyj@knue.ac.kr

2011. Institute of Brain based Education, Korea National University of Education

## I. 서론

최근 인간의 두뇌에 관해 국내외 많은 연구자들의 관심이 집중되면서, 이를 연구하려는 학자들이 급증하고 있다. 이러한 변화에 발맞추어 교육 분야에서도 뇌-신경학적 방법에 근거한 연구들이 많이 나타나고 있다(Jin et al., 2006a; 2006b; Lee et al., 2009). 최근 과학교육 분야에서도 기능성자기공명영상장치(fMRI)를 이용한 연구가 일부 연구자들에 의해 이루어지고 있다. 예를 들어, 관찰에서 시작하여 최종 결론도출 과정에 이르는 여러 과학탐구 과정에 관한 연구들에서 각 과정의 주요 두뇌 활성 영역 또는 두뇌 네트워크 연결을 밝혀내었다(Lee et al. 2009). 비록 일부 연구자들에 의해 과학교육에서의 fMRI를 활용 연구가 진행되고는 있지만, 연구 사례가 많지 않다보니, 연구에 적합하게 사용할 만한 표준화되고 효과가 검증된 과제 설계법이나 제시방법론 혹은 결과 분석방법 등이 명확하게 구현된 바가 없다. 최근 다양한 측정기법, 자극제시 기법 및 이에 대한 분석방법들이 개발되고 연구논문들을 통해 보고되고 있는 실정이지만(Rosenzweig et al., 2005) 대부분 심리학과 의학에 치우쳐 있어서(Caveza & Nyberg, 2000) 해당 분야의 목표사고 구현에 맞게 디자인 된 것들뿐이다. 특히 분석방법에 있어서는 최신의 다양한 두뇌영상 데이터 분석기술들이 개발되고 있는 실정이므로, 어떤 분석방법을 어떻게 적용하느냐에 따라 연구의 결과가 달라 질수 있을 것이다. 즉, 연구과제의 성격과 연구 목적에 최적화 된 분석방법을 택하는 것이 매우 중요하다고 할 수 있을 것이다.

EEG, fMRI, PET등과 같은 두뇌 영상 장치를 활용한 인지적 기능 연구의 분석방법은 기능의 특화(functional specialisation)에 관한 관점과 기능의 통합(functional intergration)에 관한 관점으로 나누어 볼 수 있다(Price & Friston, 1997). Functional specialization의 경우 두뇌 활성영역 분석방법의 측면이고, functional intergration의 경우 두뇌 네트워크 분석방법의 측면으로 구분될 수 있다. 두뇌 연구의 초기에 주를 이루었던 두뇌 활성영역 분석 방법은 실제 인지과제 수행 중 통계적으로 유의하게 나타나는 주요 두뇌 활성 지역(region)을 확인하는 방법이다. 즉, 특정 인지과정 중 어느 영역을 사용하였는가에 주된 관심을 갖고 분석하는 방법이다. 두뇌 네트워크 분석방법은 주요 활성영역 분석방법에서 더 나아가 각 지역(region)들 간의 연결(connectivity)이 어떻게 이루어지고 있는지를 확인하는 방법이다. 즉, 주요 활성 영역들 간의 관계에 관심을 갖고 분석하는 방법이다. 이러한 두뇌 네트워크 분석방법은 크게 3가지로 나뉘는데, 첫째, 구조적(해부학적)연결(anatomical connectivity), 둘째, 기능적 연결(functional connectivity), 셋째, 유효 연결(effective connectivity)이 있다(Price & Friston, 1997). 이 연구에서는 최근 뇌과학 연구에서 많은 관심을 갖고, 다양한 분석방법이 개발되고 있는 두뇌 네트워크 분석방법 중 effective connectivity분석방법에 대해서 알아본 후, 이를 통하여 과학적 가설평가 과정의 뇌과학적 분석을 위한 최적의 방법을 탐색해 보았다.

## II. 연구 내용과 방법

### 1. 연구대상 문헌

### 1) Effective connectivity 방법 연구대상 문헌

연구대상으로는 2000년대 이후에 발표된 뇌과학 문헌들 중에서 두뇌 네트워크 분석 중 effective connectivity 분석 방법 개발과 관련된 11편을 선정하였다. 결과의 신뢰성을 위하여 분석에 사용된 모든 문헌은 SCI에 등재된 저널로만 한정하였다.

### 2) Effective connectivity 활용 연구대상 문헌

연구대상 문헌은 2000년대 이후에 발표된 뇌과학 문헌들 중에서 effective connectivity 방법을 활용한 30편이 선정되었다. 결과의 신뢰성을 위하여 분석에 사용된 모든 문헌은 SCI에 등재된 저널로만 한정하였으며, 연구에 사용된 모든 문헌은 실험을 통해 두뇌활성 패턴에 대한 실측 자료들을 제시한 경우에만 유효 문헌으로 인정하였다.

## 2. 연구절차

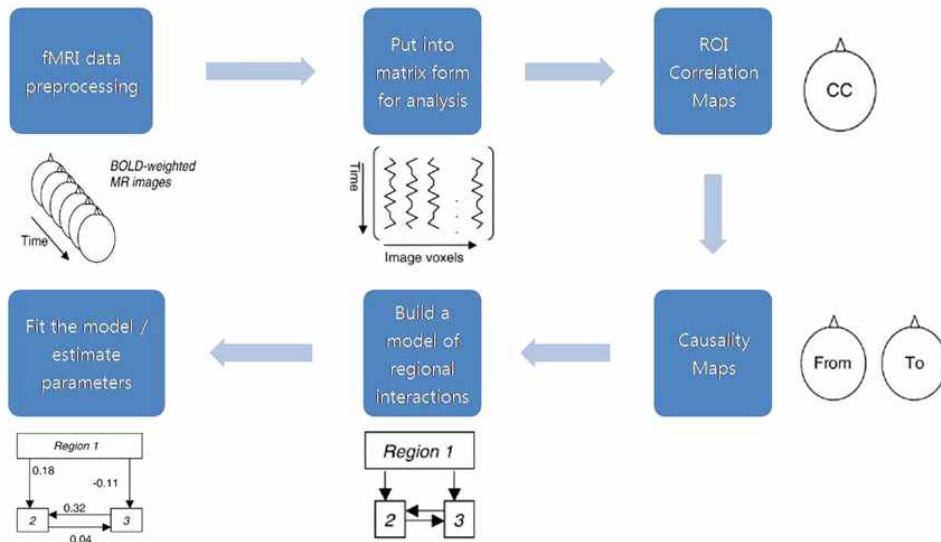
연구자는 먼저 두뇌 네트워크 분석 중 effective connectivity 분석 방법론과 관련된 연구문헌들을 바탕으로 effective connectivity 분석방법의 특징, 장·단점, 활용 방안 등에 대하여 확인하였다.

두 번째로 연구자는 과학탐구 과정 중 가설평가 과정의 인지적 하위 요소와 관련된 연구 문헌들 중 effective connectivity 분석을 활용한 문헌들을 선정하여 분석하였다. 이를 통해 effective connectivity의 여러 분석방법 들 중 과학적 가설평가 과정의 뇌과학적 연구에 맞는 최적의 분석 방법을 구성하였다.

## Ⅲ. 연구 결과 및 논의

### 1. Effective connectivity 분석 방법

두뇌 네트워크 분석방법은 크게 3가지로 나뉘는데, 첫째, 구조적(해부학적)연결(anatomical connectivity)분석, 둘째, 기능적 연결(functional connectivity)분석, 셋째, 유효 연결(effective connectivity)분석이 있다(reference). Anatomical connectivity분석은 두뇌의 해부학적 구조상의 연결, 시냅스의 수, 형태, 효과, 억제 및 촉진 등의 분석기능을 포함한다. Functional connectivity 분석은 공간적으로 떨어진 voxels이나 region들의 time-course를 이용한 상관관계를 통하여 분석을 하게된다(Friston et al, 1993). 이들 두 가지의 분석 방법은 분석과정에서 예측 모델이 정해지 않으며 연결강도, 상관정도에 의해서 연결네트워크 모델이 도출되게 된다. 또한 시계열적인 데이터를 이용한 분석이 아니므로 각 지역들 간의 인과관계를 나타내기는 어렵다. 이러한 단점을 보완할 수 있는 분석방법으로 Effective connectivity 분석이 있다. 이 분석 방법은 시계열적인 데이터를 이용하여 두뇌 각 영역들 간의 인과성을 확인 할 수 있는 네트워크 모델을 확인할 수 있다. 이 방법은 분석 과정에서 연구자에 의해 사전에 두뇌 영역들 간의 네트워크 예측 모델을 설정하고 상관분석, 회귀분석, 요인분석 등을 통하여 이 모델들의 적합도를 통계적으로 판단하게 된다(그림 1).



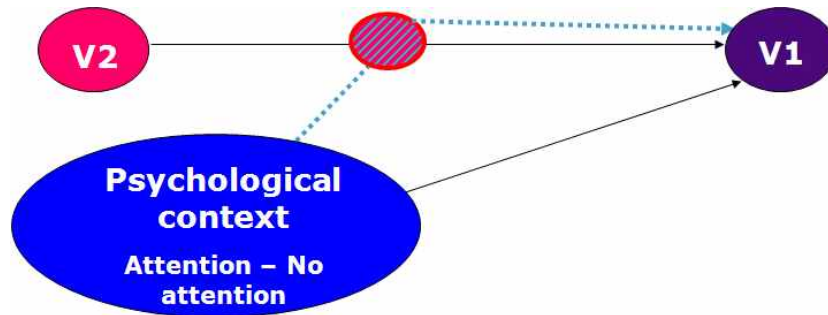
<그림 1> 시계열 데이터를 활용한 두뇌 네트워크 분석 방법(Rogers et al. 2007)

EEG나 MEG에 의해 측정된 두뇌활성 데이터 분석기술은 목표사고에 관한 시계열적 측정 및 분석이 가능하기 때문에 시간에 따른 주요 활성화 지역의 경로 추적이 가능하다. 다만 이들은 공간해상도가 높지 않기 때문에 수학적 방법을 통하여 해당 지역을 확률적으로 예측하는 형태로 경로이동을 가능하고 있다(Penny et al., 2004; Lee et al., 2006; Friston et al., 2003). fMRI의 경우는 통상 3초당 1회 MR scan이 이루어지기 때문에 3초 단위의 시계열적 변화 양상은 알 수가 있으나 3초 이하의 단위에서 벌어지는 사고변화에 따른 두뇌 활성화지역이동은 전혀 파악할 길이 없다(Huettel et al., 2004). 이러한 단점은 effective connectivity 분석방법에 의해 극복되어 질 수 있다. Effective connectivity는 특정 neural system이 다른 neural system에 직·간접적으로 영향을 주는 연결을 확인하고 이들 지역들 간의 인과적인 연결을 확인할 수 있는 분석 방법이다(Friston et al, 1997).

이 방법은 크게 3가지로 나뉘 수 있다. 우선 심리생리 상호작용(PPI: Psychophysiological interaction)분석방법, 두 번째로 구조방정식 모델(SEM: Structural equation model)분석방법, 마지막으로 동적 인과 모델(DCM: Dynamic causal model)분석방법이 있다. 이들 각각 분석 방법에 대하여 살펴보면 다음과 같다.

### 1) PPI 분석

PPI 분석은 그림 2에서와 같이 심리화적인 요인과 생리화적인 요인간의 상호작용 모두를 고려한 분석방법이다. 즉 특정 지역의 두뇌 활성화에 영향을 미치는 다른 지역의 영향(생리화적인 요인)뿐만 아니라 주어진 과제에 의한 심리적인 요인까지 고려한 분석방법이다(Kim & Horwitz, 2008). PPI 분석은 분석 가능한 여러 프로그램들이 있지만 일반적으로 SPM(Statistical Parametric Mapping)프로그램을 활용한다.



<그림 2> PPI 분석 방법

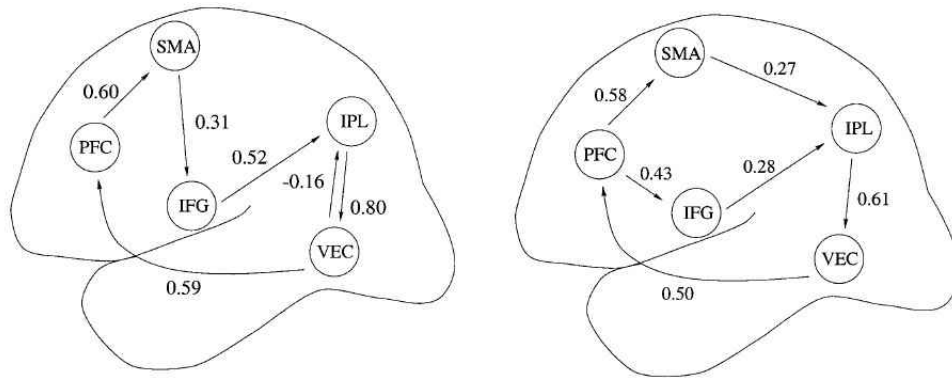
PPI 분석방법의 일반적인 분석 논리는 다음과 같다. PPI 분석은 특정 한 지역의 seed ROI(Region of interesting)가 확인 되었을 때 이 ROI와 연결이 이루어지고 있는 두뇌 영역을 통계적으로 찾아가는 방법이다. 이 방법은 seed ROI를 이용하여 분석이 시작된다. 실험과정(자극제시 과정)동안 통계적으로 유의미한 활성을 나타낸 지역 모두를 대상으로 seed ROI와 connection 관계를 확인하게 된다. 이 과정에서 seed ROI와 높은 수준의 연결강도가 나타나는 지역들을 찾아내게 된다. Connectivity 분석과정에서 가장 직접적인 방법 중의 하나는 seed ROI를 설정하고 다른 모든 voxels의 시계열 데이터와의 상관관계를 분석하여 가장 높은 상관을 갖는 지역을 찾는 것이다. PPI 분석의 특징은 두뇌 네트워크 분석에서 심리화학적 요인(psychological context)을 고려한다는 것이다. Friston등(1997)에 의하면, 두 지역들 간의 상관관계가 실험과정 전체에 걸쳐 변하지 않았거나, rest condition동안 완벽하게 비활성화 되지 않는 이상 완벽한 ROI 분석은 매우 어렵다. 예를 들어, 어느 두 지역들 사이의 연결이 B condition 보다 A condition 에서 더 강하게 나타날 수 있는 것처럼 한 voxel과 seed ROI간의 연결강도는 실험(psychological context)에 따라 변할 수 있을 것이다. 이러한 경우 심리학적 요인인 실험과정에 의한 영향을 고려한 분석이 필요하게 된다. PPI 분석은 seed ROI와 한 지역 간의 연결이 실험에 어떻게 영향을 미치는지, 혹은 실험과정이 이들 연결에 어떻게 영향을 미치는지를 보여줄 수 있을 것이다(Kim & Horwitz, 2008). PPI 분석은 비교적 간단한 방법으로 특정 seed ROI와 연결을 이루는 지역을 확인하는데 매우 좋은 방법이다. 그러나 피험자가 많거나 ROI 영역이 여러 곳일 경우 실제 분석시간이 오래 걸릴 수 있다는 단점이 있다.

## 2) SEM 분석

SEM분석은 특정 ROIs set 내에서 ROIs 영역들 사이의 연결 모델을 확인할 수 있는 분석 방법이다. 그림 3과 같이 이 분석은 한 ROIs 세트내 영역들의 시계열적 데이터를 이용하여 가능한 모든 연결 강도를 추정하고 가장 이상적인 연결 모델을 추정해 나간다(Bulmore et al. 2000). SEM 분석은 SPM에서 모델을 세우는 방법과 활성정보들을 추출하여 AMOS 프로그램에서 재구성하는 방법이 있다.

SEM 분석 방법은 “경로분석” 과정으로도 볼 수 있다. 이 분석 방법은 기존의 회귀분석과 요인분석의 결합 형태로 나타난다(Gates et al. 2010). 즉, 모든 과정은 GLM 분석과 같은 통계적 절차에 의해 이루어지며, 최적의 connection model을 찾을 때 까지 가능한 모든 연결간의 관계를 지속적으로 분석하게 된다. 이 분석과정에서는 가설적(이론적) connection model들이 먼저 설정되어야 하며

이 이론적 모델들을 통계적인 절차에 의해 검증하여 최적의 connection model을 추정할 수 있게 된다(Marco et al. 2009; Zheng & Rajapakse, 2006). 따라서 SEM 분석 과정에서 모델의 적합도 판정 과정은 매우 중요한 과정이다.



<그림 3> SEM분석의 theoritical model(좌), best fitting model(우)(Bulmore et al. 2000)

SEM 분석은 한 세트의 ROI를 알고 있을 때, 실험과정 동안 이 ROI 내 지역들 간의 기능적, 구조적 연결정도를 파악하는데 좋은 분석방법이 될 수 있다. 이 분석 방법을 사용할 경우 각 지역들 간의 확률적인 경로를 알 수 있고, 인과관계를 확인하여 서로간의 효과를 비교 검정하고 모형이 변화하는 과정과 형태를 확인할 수 있게 된다(Bulmore et al. 2000).

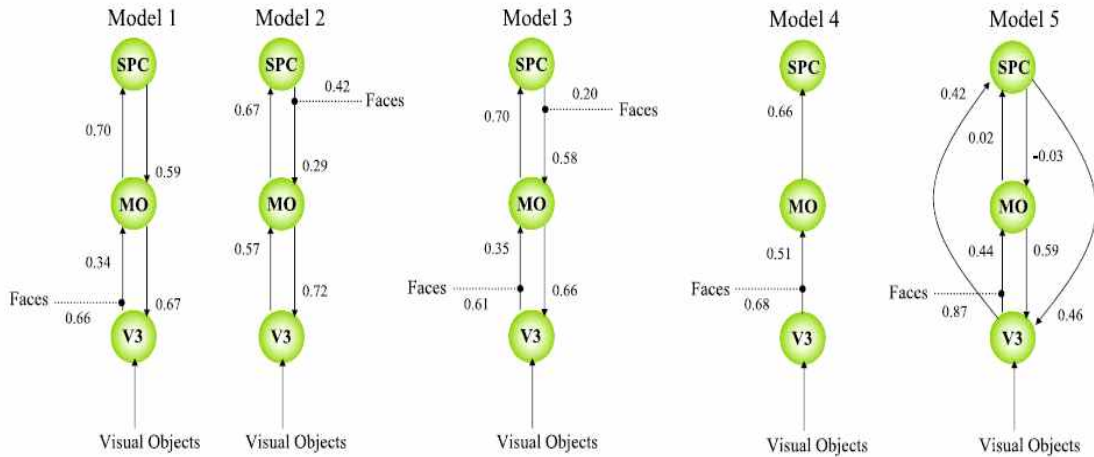
### 3) DCM 분석

DCM은 매우 높은 수준의 모델 기반 분석 방법이다. 이 방법은 표준 일반선형모델(GLM)에 의한 두뇌 활성 분석뿐만 아니라 대부분의 두뇌 네트워크 분석 방법을 포함한다(Friston et al, 2003; Penny et al. 2004b). 이 분석은 공변량 분석이나 선형회귀분석 등을 통해 각 변수들의 관계를 추정하고 이를 통해 구조방정식 모형들을 구축하게 된다. DCM 분석은 MATLAB을 기반으로 SPM 내에서 모델을 세운 후 변수 추정과 bayesian model을 선택하는 과정으로 이루어지게 된다.

DCM 분석은 한 세트 ROIs내의 각 영역들 모두가 네트워크를 형성하고 있다는 가정 하에서 각 영역들의 시계열데이터를 이용하여 분석이 시작된다. 각 영역들 간의 연결정도에 있어서 실험(자극)과 같은 또 다른 여러 요인들의 영향을 고려하여 모델분석이 이루어진다. 이 방법은 일반 선형 모델과 함께 실험(자극제시)과정에서의 비선형적인 측면까지 고려하여 분석이 이루어지며, ROIs 각 영역들 간의 연결정도는 실험과정의 변화에 의해서도 영향을 받는 것을 전제로 통계 분석이 이루어진다(Penny et al. 2004a). 이 과정은 실험(자극제시)과정이 ROIs 각 영역에 어떻게 영향을 주는 지에 대하여 가능한 모든 연결 모델에 대한 분석이 이루어지게 된다. 이 때 각 모델들은 다시 Bayesian model selection 과정에 의해서 최적의 dynamic causal models로 선택되게 된다(그림 4).

DCM 분석은 한 세트의 ROIs와 ROIs들간의 connection에 관한 가설적 모델들이 존재할 경우 매우 훌륭한 모델분석 방법이다. 이 분석방법은 결과에 대한 해석에 있어서 다소 어려운 점이 있을 수 있지만, 현재까지 fMRI data에대한 connectivity 연구에 있어서는 가장 최신의 고급 통계 분석방

법이라고 볼 수 있다(Friston et al, 2003).



<그림 4> DCM분석의 과제 modulation에 따른 다양한 model(Penny et al. 2004a)

## 2. Effectivity connectivity 활용 문헌 분석

가설평가의 하위 인지요소과 관련된 Effective connectivity 활용 문헌 분석 결과는 표 1과 같다.

문헌들에서 주로 사용한 Effective connectivity 분석 방법은 PPI, SEM, DCM 분석이었다. 피험자의 측면을 살펴보면 연구의 특성에 따라 5명에서 42명까지 매우 다양하게 나타났다. 실험과제의 형식은 대부분 block design을 사용하였으며, 과제의 인지적인 수준은 단순 감각수용 보다는 고등인지 과제가 대부분이었다. 과제의 이러한 특징으로 인하여 네트워크 수준의 분석과정이 필요할 것이다. Effective connectivity 분석의 특성상 모든 문헌에서 혈중 산소 의존 레벨(BOLD)의 시계열적인 data를 사용하였음을 알 수 있었다. 분석 방법들의 특징에 맞춰 SEM과 DCM의 경우 대부분 2가지 이상의 models이 도출되었으며, 이 두 방법의 경우 가설적인 모델이 우선 설정되고 통계적인 절차를 거쳐 적합 모델들이 도출됨을 확인 할 수 있었다. 결과해석의 관점에서 분석한 결과, PPI 문헌들의 경우 대부분 correlation과 direction을 확인하였지만, causality를 해석하는 데는 다소 어려운 점이 많았다. SEM 문헌들의 대부분 correlation, causality, connection strength까지 확인하여 결과를 해석하는 것을 확인할 수 있었으며, 마지막으로 DCM 관련 문헌들은 SEM 문헌들과 마찬가지로 correlation, causality, connection strength에 대하여 해석함과 더불어 experimental factor 측면까지 고려하여 다양한 dynamic causal models을 도출하는 것을 확인하였다.

## &lt;표 1&gt;

## Effective connectivity 활용 문헌 분석 결과

| Researcher                    | Subjects | Task type | Cognition level    | Extraction data  | ROIs | Models | Interpetation type                                               | Analyzing method |
|-------------------------------|----------|-----------|--------------------|------------------|------|--------|------------------------------------------------------------------|------------------|
| Akitsuki et al. (2009)        | 14       | event     | higher cognition   | time-series bold | 1    | 1      | correlation                                                      | PPI              |
| Bingel et al. (2006)          | 19       | block     | higher cognition   | time-series bold | 1    | 1      | correlation, direction                                           | PPI              |
| Blöksman et al. (2005)        | 10       | block     | higher cognition   | time-series bold | 1    | 1      | correlation, direction                                           | PPI              |
| Cao et al. (2008)             | 12       | block     | higher cognition   | time-series bold | 4    | 2      | correlation, causality, connection strength, experimental factor | DCM              |
| Cooke et al. (2006)           | 21       | block     | higher cognition   | time-series bold | 4    | 3      | correlation, causality, connection strength                      | SEM              |
| Das et al. (2005)             | 28       | event     | sensory perception | time-series bold | 6    | 1      | correlation                                                      | PPI              |
| Erikson et al. (2005)         | 20       | block     | higher cognition   | time-series bold | 10   | 1      | correlation, causality, connection strength                      | SEM              |
| Ethofer et al. (2006)         | 24       | block     | higher cognition   | time-series bold | 3    | 4      | correlation, causality, connection strength, experimental factor | DCM              |
| Fairhall & Ishai (2006)       | 5        | block     | sensory perception | time-series bold | 6    | 3      | correlation, causality, connection strength                      | DCM              |
| Hirano et al. (2006)          | 13       | block     | higher cognition   | time-series bold | 4    | 2      | correlation, causality, connection strength                      | SEM              |
| Karunanayaka et al. (2007)    | 313      | block     | sensory perception | time-series bold | 6    | 1      | correlation, causality, connection strength                      | SEM              |
| Kim & Horwitz (2009)          | –        | block     | higher cognition   | time-series bold | 7    | 4      | correlation, causality, connection strength                      | SEM              |
| Kuhtz-Buschbeck et al. (2009) | 33       | block     | higher cognition   | time-series bold | 3    | 1      | correlation, direction                                           | PPI              |
| Lee et al. (2006)             | –        | block     | higher cognition   | time-series bold | 5    | 11     | correlation, causality, connection strength, experimental factor | DCM              |
| Li et al. (2008)              | 12       | block     | higher cognition   | time-series bold | 1    | 1      | correlation, direction                                           | PPI              |

&lt;표 1&gt; 계속

| Researcher               | Subjects | Task type | Cognition level    | Extraction data  | ROIs | Models | Interpetation type                                               | Analyzing method |
|--------------------------|----------|-----------|--------------------|------------------|------|--------|------------------------------------------------------------------|------------------|
| Marco et al. (2006)      | 14       | block     | sensory perception | time-series bold | 3    | 2      | correlation, causality, connection strength                      | SEM              |
| Mechelli et al. (2002)   | 13       | block     | higher cognition   | time-series bold | 4    | 10     | correlation, causality                                           | SEM              |
| Mechelli et al. (2004)   | 5        | block     | higher cognition   | time-series bold | 6    | 40     | correlation, causality, connection strength, experimental factor | DCM              |
| Minnebusch et al. (2009) | 11       | event     | sensory perception | time-series bold | 2    | 1      | correlation                                                      | PPI              |
| Nyberg et al. (1996)     | 11       | block     | higher cognition   | time-series bold | 11   | 2      | correlation, causality, connection strength                      | SEM              |
| Passamonti et al. (2008) | 10       | event     | sensory perception | time-series bold | 2    | 2      | correlation, causality, connection strength, experimental factor | PPI, DCM         |
| Perin et al. (2010)      | 16       | block     | sensory perception | time-series bold | 4    | 1      | correlation, causality, connection strength                      | SEM              |
| Quaglino et al. (2008)   | 18       | block     | higher cognition   | time-series bold | 3    | 2      | correlation, causality, connection strength                      | SEM              |
| Rowe et al. (2004)       | 12       | block     | higher cognition   | time-series bold | 7    | 3      | correlation, causality, connection strength                      | SEM              |
| Schlosser et al. (2008)  | 16       | block     | higher cognition   | time-series bold | 5    | 8      | correlation, causality, experimental factor                      | DCM              |
| Schuyler et al. (2010)   | 42       | event     | higher cognition   | time-series bold | 3    | 5      | correlation, causality, connection strength, experimental factor | DCM              |
| Szatkowska et al. (2008) | 16       | block     | higher cognition   | time-series bold | 6    | 2      | correlation, causality, connection strength                      | SEM              |
| Vitali et al. (2005)     | 10       | block     | higher cognition   | time-series bold | 14   | 1      | correlation, causality, connection strength                      | PPI, SEM         |
| Yoshno & Decety (2009)   | 9        | block     | higher cognition   | time-series bold | 2    | 1      | correlation, causality, connection strength                      | PPI, DCM         |
| Zhuang et al. (2008)     | 7        | block     | higher cognition   | time-series bold | 4    | 6      | correlation, causality, connection strength                      | SEM              |

## IV. 결론

이 연구에서는 최신의 뇌과학 분석방법을 중심으로 다양한 선행연구들을 고찰하였다. 이를 통해 과학적 가설평가 과정의 뇌과학적 두뇌 네트워크 분석방법을 탐색해 보았다.

이러한 결과들로부터 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

첫째, 과학적 가설평가 과정의 두뇌 활성화에 관한 연구는 functional connectivity 분석보다 effective connectivity 분석이 적절하다.

둘째, 과학적 가설평가 과정의 effective connectivity 분석을 위한 실험과제는 block design이 적절하다.

셋째, 과학적 가설평가 과정의 실험과제는 가설평가 과정의 하위 인지요소별로 구분지어 제작되어야 할 것이다.

넷째, 가설평가 과정의 하위 인지요소별 실험결과는 PPI 분석을 통해 ROIs를 구성하고 구성된 ROIs들을 SEM을 이용하여 경로 모델을 도출하는 것이 적절하다.

종합하면, 자연스럽게 실험결과를 해석하여 가설을 평가할 수 있도록 하위 요소별로 과제를 제작하며, 블록디자인으로 제시한다. 수집된 fMRI data는 우선 인지적 감산법으로 핵심 ROI를 알아낸 뒤, PPI 분석을 통해 ROIs 세트를 구성할 수 있을 것이다. 이 후 SEM 분석을 이용하여 ROIs들 간의 Best fitting models을 구성하여 과학적 가설평가 과정의 두뇌 활성화 경로와 인과적인 연결을 파악해야 한다.

\* \* \* \* \*

## 국문요약

이 연구의 목적은 과학적 가설평가 과정의 뇌 과학적 분석 방법을 effective connectivity 분석 방법 중심으로 고찰해보는 것이다. 분석 방법을 고찰해보기 위해, 이 연구는 두뇌 네트워크 분석 방법과 관련된 선행연구들로부터 effective connectivity의 3가지 분석방법을 확인하였다: PPI, SEM, DCM. 첫 번째로, 각 항목에 관련된 분석 방법을 파악하기 위하여 connectivity 분석 방법에 대한 15 편의 뇌과학 문헌들을 분석하였다. 두 번째로, 과학적 가설평가 과정의 하위 요소들과 관련된 연구들 중 effective connectivity 분석 방법을 사용한 30편의 뇌과학 문헌들을 분석하였다. 그 결과, 과학적 가설평가 과정의 뇌과학적 연구에는 functional connectivity 분석보다 effective connectivity 분석이 보다 적절한 것으로 나타났다. 또한 가설평가 과정의 하위 인지요소별 실험결과는 PPI 분석을 통해 ROIs를 구성하고 구성된 ROIs들을 SEM을 이용하여 경로 모델을 도출하는 것이 최적의 분석 방법임을 확인하였다. 이러한 분석 방법들은 과학탐구의 다른 하위 과정들의 분석에도 활용 가능할 것으로 전망된다.

**주요어:** 가설평가, effective connectivity, fMRI, connectivity analysis methods, PPI, SEM, DCM

## 참고문헌

- Akitsuki, Y., & Decety, J. (2009). Social context, and perceived agency affects empathy for pain: An event-related fMRI investigation. *NeuroImage*, 47, 722-734.
- Bingel, U., Lorenz, J., Schoel, E., Weiller, C., & Buchel, C. (2006). Mechanisms of placebo analgesia: rACC recruitment of al subcortical antinociceptive network. *PAIN*, 120, 8-15.
- Boksman, K., Theberge, J., Williamson, P., Drost, D. J., Malla, A., Densmore, M., Takhar, J., Pavlosky, W., Menon, R. S., & Neufeld. (2005). *Schizophrenia research*, 75, 247-263.
- Bullmore, E., Horwitz, B., Honey, G., Brammer, M., Williams, S., & Sharma, T. (2000). How good is good enough in path analysis of fMRI data? *NeuroImage*, 11, 289-301.
- 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.
- Cooke, A., Grossman, M., DeVita, C., Gonzalez-Atavales, J., Moore, P., Chen, W., Gee, J., & Detre, J. (2006). Large-scale neural network for sentence precessing. *Brain and Language*, 96, 14-36.
- Das, P., Kemp, A. H., Liddell, B. J., Brown, K. J., Olivieri, G., Peduto, A., Gordon, E., & Williams, L. M. (2005). Pathways for fear perception: Modulation of amygdala activity by thalamo-cortical systems. *NeuroImage*, 26, 141-148.
- Erikson, K. I., Ringo, M. Colcombe, S. L., & Kramer, A. F. (2005). A structural equation modeling analysis of attentional control: an event-related fMRI study. *Cognitive Brain Research*, 22, 349-357.
- Ethofer, T., Anders, S., Erb, M., Herbert, C., Wiethoff, S., Kissler, J., Grodd, W., & Wildgruber, D. (2006). *NeuroImage*, 30, 580-587.
- Fairhall, S. L., & Ishai, A. (2006). Effective connectivity within the distributed cortical network for face perception. *Cerebral Cortex*
- Friston, K. J., Frith, C. D., & Frackowiak, R. S. J. (1993). Time-dependent changes in effective connectivity measured with PET. *Human Brain Mapping*, 1, 69-79.
- Friston, K. J., Harrison, L., & Penny, W. (2003). Dynamic causal modelling. *NeuroImage* 19, 1273-1302.
- Gates, K. M., Molenaar, P. C. M., Hillary, F. G., Ram, N., & Rovine, M. J. (2010). Automatic search for fMRI connectivity mapping: An alternative to granger causality testing using formal equivalences among SEM path modeling, VAR, and unified SEM. *NeuroImage*, 50, 1118-1125.
- Hirano, Y., Fujita, M., Watanabe, K. Niwa, M., Takahashi, T., Kanematsu, M., Ido, Y., Tomida, M., & Onozuka, M. (2006). Effect of unpleasant loud noise on

- hippocampal activities during picture encoding: An fMRI study. *Brain and Cognition*, 61, 280-285.
- Huettel, S. A., Song, A. W., McCarthy, G. (2004). *Functional Magnetic Resonance Imaging*. Sinauer Associates, Inc. Massachusetts.
- Jin, S., Kwon, Y., Jeong, J., Kwon, S., & Shin, D. (2006). Differences in brain information transmission between gifted and normal children during scientific hypothesis generation, *Brain and Cognition*, 62, 191-197.
- 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, 337-344.
- Karunanayaka, P. R., Holland, S. K., Schmithorst, V. J., Solodkin, A., Chen, E. E., Szaflarski, J. P., & Plante, E. (2007). Age-related connectivity changes in fMRI data from children listening to stories. *NeuroImage*, 34, 349-360.
- Kim, J., & Horwitz, B. (2008). Investigating the neural basis for fMRI-based functional connectivity in a blocked design: application to interregional correlations and psycho-physiological interactions. *Magnetic Resonance Imaging*, 26, 583-593.
- Kim, J., Horwitz, B. (2009). How well does structural equation modeling reveal abnormal brain anatomical connections? An fMRI simulation study. *NeuroImage*, 45, 1190-1198.
- Kuhtz, J. P., Gilster, R., Horst, C., Hamann, M., & Jansen, w. O. (2009). Control of bladder sensations: An fMRI study of brain activity and effective connectivity. *NeuroImage*, 47, 18-27.
- Lee, I., Lee, J., & Kwon, Y. (2009). Brain activation pattern and functional connectivity network during experimental design on the biological phenomena. *Journal of Korean Association for Research in Science Education*, 29(3), 348-358.
- Lee, L., Friston, K., & Horwitz, B. (2006). Large-scale neural models and dynamic causal modeling. *NeuroImage*, 30, 1243-1254
- Li, J., Liu, J., Liang, J., Zhang, H., Zhao, J., Huber, D., Rieth, C. A., Lee, K., Tian, J., & Shi, G. (2009). A distributed neural system for top-down face processing. *Neuroscience Letters*, 451, 6-10.
- Marco, G. D., Devauchelle, B., & Berquin, P. (2009). Brain functional modeling, what do we measure with fMRI data?. *Neuroscience Research*, 64, 12-19.
- Marco, G., Bonis, M., Vrignaud, M. C., Feugeas, H., & Peretti, I. (2006). Changes in effective connectivity during incidental and intentional perception of fearful faces. *NeuroImage*, 30, 1030-1037.
- Mechelli, A., Penny, W. D., Price, C. J., Gitelman, D. R., and Friston, K. J. (2002). Effective connectivity and intersubject variability: Using a multisubject network to test differences and commonalities. *NeuroImage*, 17, 1459-1469.
- Mechelli, A., Price, C. J., Friston, K. J. & Isha, A. (2004). Where bottom-up meets top-down: Neuronal interactions during perception and imagery. *Cerebral Cortex*, 14(11), 1256-1265.

- Minnebusch, D. A., Suchan, B., Koster, O., & Daum, I. (2009). A bilateral occipitotemporal network mediates face perception. *Behavioral Brain Research*, 198, 179-185.
- Nyberg, L., McIntosh, A. R., Cabeza, R., Nilsson, L., Houle, S., & Habib, R. (1996). Network analysis of positron emission tomography regional cerebral blood flow data: ensemble inhibition during episodic memory retrieval. *The Journal of Neuroscience*, 16, 3753-3759.
- Passamonti, L., Rowe, J. B., Ewbank, M., Hampshire, A., Keane, J., & Calder, A. J. (2008). Connectivity from the ventral anterior cingulate to the amygdala is modulated by appetitive motivation in response to facial signals of aggression. *NeuroImage*, 43, 562-570.
- Penny, W. D., Stephan, A. M., & Friston, K. J. (2004). Comparing dynamic causal models. *NeuroImage*, 22, 1157-1172.
- Penny, W. D., Stephan, A. M., & Friston, K. J. (2004). Modeling functional integration: a comparison of structural equation and dynamic causal models. *NeuroImage*, 23, s264-s274.
- Perin, B., Godefroy, O., Fall, S., & Marco, G. (2010). Alertness in young healthy subjects: An fMRI study of brain region interactivity enhanced by a warning signal. *Brain and Cognition*, 72, 271-281.
- Price, C. J., Friston, K. J. (1997). Cognitive conjunction: A new approach to brain activation experiments. *NeuroImage*, 5, 261-270.
- Quaglino, V., Bourdin, B., Czternasty, G., Vrignaud, P., Fall, S., Meyer, M. E., Berquin, P., Devauchelle, B., & Marco, G. (2008). Differences in effective connectivity between dyslexic children and normal readers during a pseudoword reading task: An fMRI study. *Neurophysiologie Clinique*, 38, 73-82.
- Rogers, P. B., Morgan, V. L., Newton, A. T., & Gore, J. C. (2007). Assessing functional connectivity in the human brain by fMRI. *Magnetic Resonance Imaging*, 25, 1347-1357.
- Rosenzweig, M. R., Breedlove, S. M., Watson, N. V. (2005). *Biological Psychology: an introduction to behavioral and cognitive neuroscience*. Sinauer Associates, Inc. Massachusetts.
- Rowe, J. B., Stephan, K. E., Friston, K. J., Frackowiak, R. S. J., & Passingham, R. E. (2004). The prefrontal cortex shows context specific changes in effective connectivity to motor or visual cortex during the selection of action or colour. *Cerebral Cortex*.
- Schlosser, R. G. M., Wagner, G., Koch, K., Dahnke, R., Reichenbach, J. R., & Sauer, H. (2008). Fronto-cingulate effective connectivity in major depression: A study with fMRI and dynamic causal modeling. *NeuroImage*, 43, 645-655.
- Schuyler, B., Ollinger, J. M., Oakes, T. R., Johnstone, T., & Davidson, R. J. (2010). Dynamic causal modeling applied to fMRI data shows high reliability. *NeuroImage*, 49, 603-611.
- Szatkowska, I., Bogorodzki, P., Wolak, T., Marchewka, A., & Szeszkowski, W. (2008). *Neurobiology of Learning and Memory*, 90, 475-478.

- Vital, P., Abutalebi, J., Tettamanti, M., Rowe, J., Scifo, P., Fazio, F., Cappa, S. F., & Perani, D. (2005). Generating animal and tool names: An fMRI study of effective connectivity. *Brain and Language*, 93, 32-45.
- Yoshino, A., Okamoto, Y., Onoda, K., Yoshimura, S., Kunisato, Y., Demoto, Y., Okada, G., & Yamawaki, S. (2010). Sadness enhances the experience of pain via neural activation in the anterior cingulate cortex and amygdala: An fMRI study. *NeuroImage*, 50, 1194-1201.
- Zheng, X., & Rajapakse, C. J. (2006). Learning functional structure from fMR images. *NeuroImage*, 31, 1601-1613.
- Zhuang, J., Peltier, S., He, S., LaConte, s., & Hu, X. (2008). Mapping the connectivity with structural equation modeling in an fMRI study of shape-from-motion task. *NeuroImage*, 42, 799-806.