

RESEARCH ARTICLE

# A Study on the Brain Network Development Model in Self-Regulation Process of Adolescents' Life Science Learning

Sang-Hee Park<sup>1</sup> · Su-Min Lee<sup>2</sup> · Seung-Hyuk Kwon<sup>3\*</sup> · Yong-Ju Kwon<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Daejeon Gwanpyeong Elementary School

<sup>2</sup>Korea National University of Education

<sup>3</sup>Gongju National University of Education

## 청소년의 생명과학 학습에서 자기조절 과정의 두뇌 연결망 발달 모델 연구

박상희<sup>1</sup> · 이수민<sup>2</sup> · 권승혁<sup>3\*</sup> · 권용주<sup>2\*</sup>

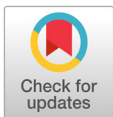
<sup>1</sup>대전관평초등학교 · <sup>2</sup>한국교육대학교 · <sup>3</sup>공주교육대학교

\*Corresponding Author: kwonyj@knu.ac.kr, masonkwon@gjue.ac.kr

### ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate which areas and networks of students' brains are activated in life science related learning activities and cognitive self-regulation thinking processes (evidence, conflict, regulation). One hundred and eight adolescents consisting of 7th, 9th, and 11th grades participated as subjects. Learning tasks involve the process of self-regulation of the biological classification and the selection of relationships tasks involving animals, plants, and fungi. The NIRSIT device was used to measure brain activity in the subjects. Interregional brain activation regions and networks were analyzed by the NIRSIT analysis program and the NIRS-SPM program. As a result, adolescent's brain regions composed of FP, OFC, and DLPFC were activated in assimilation, conflict, and regulation stages in the process of self-regulation, and interacted with each other by establishing a network. As the age increases, the thinking process becomes more complex and various functions are performed. Based on the analyzed results, this study was proposed a brain development model for age-specific self-regulation processes.

**Key words:** Self-regulation, assimilation, conflict, accommodation, brain development model



### OPEN ACCESS

Brain, Digital, & Learning  
2022, Vol. 12, No. 1, 119-129.

<https://doi.org/10.31216/BDL.20220008>

**Received:** February 16, 2022

**Revised:** February 17, 2022

**Accepted:** February 17, 2022

© 2022. Institute of Brain based Education,  
Korea National University of Education



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## Introduction

인간은 호기심이 많고 새로운 창조물에 관심이 많은 생물로 자연스럽게 새로움과 도전을 추구하고 배움을 즐기며 주변 사물이나 자연에 관심을 가지고 새로운 가치와 지식을 보다 적극적으로 내면화시킨다(Grouzet, 2013). 이러한 과정에서 필요한 것이 동화, 갈등, 조절의 과정을 두루 포함하고 있는 ‘자기조절’이며, 자기조절(Self-Regulation)은 교육과 발달, 건강하고 기본적인 생활 등 다양한 면에서 영향을 미치는 주요한 요인으로 작용한다. 특히 호기심을 바탕으로 한 동화, 갈등, 조절의 과정은 인지적 발달과 학습, 사회적 촉진까지 두루 일으킨다(Niemiec et al, 2009). 또한 자기조절은 전인적 성장과 인지, 정서, 사회성 등 모든 발달의 초석이 됨과 동시에 그 영향이 청소년기와 성인기까지 지속된다(Lawson, 1995).

그동안 ‘자기조절’에 대해서는 인간의 사고능력이나 정서적 측면에서의 인지심리학적 연구가 많이 이루어져 왔으며(Lawson, 1995; Savina, 2014), 여기에 신경과학적 측면에서 인간의 두뇌 수준에서 뇌과학적 관점을 적용하여 자기조절 과정에서 청소년에게 나타나는 두뇌 활성화 및 특성이 어떤지 확인한다면 ‘자기조절’이라는 인지, 정서적 과정에 대해 더욱 과학적인 설명이 가능할 것이다.

자기조절은 학습자가 스스로 문제를 해결하기 위한 계획을 세우고 알맞은 정보를 선택하고 통제하는 능력(Zimmerman, 1989)으로 과학적 탐구능력이나 학습, 문제해결 등에 두루 영향을 미친다(Jeong et al, 2010). 자기조절 능력이 환경과의 상호작용을 통해 발달할 수 있으며, 나이가 들에 따라 더 정교화된다는 것(Kelly et al, 2015; Savina, 2014)은 이미 많은 연구로 밝혀졌다. 하지만 자기조절이 발달함에 따라 두뇌 수준에서 어떤 활성화 변화와 연결망이 형성되는지에 대한 연구는 지금까지 이루어지지 않았다. 다만, 일부 문헌에서 과학 학습에서의 자기조절에 대한 의미와 과정, 그리고 학습 과제를 통한 자기조절의 발현에 대한 연구가 있었으며(Lawson, 1995; Park et al., 2020a), 연구에서 사고발성법을 활용하여 생명과학 학습에서의 자기조절 단계를 규명하였다(Park et al., 2020b). 이 연구에서는 자기조절의 불일치 과정 이후를 대상으로 “1단계-기존 인지구조 유지”, “2단계-가설 및 대안 생성 시도 후 실패”, “3단계-불완전한 가설 및 대안 생성 성공”, “4단계-완전한 가설 및 대안 생성 성공”의 총 4가지 단계를 제시하였다.

이에 자기조절의 사고과정을 활발하게 활용하여 학습하고 환경과 상호작용하는 청소년의 뇌를 대상으로 학습과 인지, 사고활동 중에 나타나는 자기조절 상황에서 두뇌의 어떤 영역이 활성화되며 서로 연결망 형성하여 정보교환 및 사고 활동을 활발하게 하는지 알아보고자 하였다. 특히, 본 연구에서는 시, 공간적 분해능이 비교적 높으면서도 편리하게 다양한 대상에게 착용시켜 두뇌 활성을 측정할 수 있는 fNIRS(functional Near-infrared Spectroscopy, 기능적 근적외분광법)를 활용하였다. 해당 기기는 최근 거울과제에서의 자기조절 연구(Kwon et al., 2020) 뿐 아니라, 사회성 관련 두뇌 활성화 발달 연구(Kwon et al., 2021) 등 학습 및 발달 관련 연구에 두루 활용되고 있다. 본 기기를 활용한 측정을 통해 학생들이 실제 생명과학 교과를 학습하고 있는 것과 가장 비슷한 상황에서 과제를 제시하여 자기조절을 유발시켰으며 주어진 문제에 대해 자신의 사고를 조절할 수 있는 상황을 제시하고자 하였다.

본 연구에서는 청소년기에 해당하는 중1, 중3, 고2 학생들을 대상으로 생명과학과 관련된 학습 활동 및 인지적 자기조절 사고과정(동화, 갈등, 조절)에 따라 학생들의 두뇌가 어떤 영역의 활성화 및 연결망을 활용하는지 알아보고자 한다. 여러 영역에 위치한 신경세포들은 서로 정보를 주고받으며 동시에 정보를 비선형, 병렬적으로 처리하면서 특정 인지기능과 그에 따른 행동적 결과를 가져온다. 이에 두뇌를 대상으로 한 연구에는

단순한 활성화 뿐 아니라 공간적 위치와 상관성을 토대로 각 영역의 관계를 나타낸 두뇌 연결망의 제시가 더 효과적이기 때문이다(Friston, 2005; McIntosh, 2000). 두뇌 연결망 분석을 통해 학년이 높아지고 나이가 증가함에 따라 청소년의 자기조절 과정과 그에 따른 두뇌 연결망은 어떻게 변화하고 발달하는지에 대한 모델을 정리하고자 하였다.

## Methods

본 연구는 생명과학 학습 내용 중 분류와 유연 관계를 중심으로 자기조절을 일으킬 수 있는 내용으로 구성하여 블록 패러다임 형식으로 설계하였다. 자기조절을 유발하기 위해서는 적절한 난이도의 과제가 제시되어야 한다. 분류와 유연관계는 분류의 과정에서 자신의 선행지식을 적용해 문제 해결을 시도하며, 정확한 분류 지식을 생성하지 않을 경우 자신의 인지 구조를 수정해서 다시 시도하는 과정을 거친다. 이 과정에서 문제 수준을 조절하여 적절한 자기조절을 유발할 수 있다.

과제 개발은 생물교육 전문가 및 아동, 청소년 발달 전문가 등과의 세미나 및 예비 실험 등을 거쳐 수정과 보완을 진행하였다. 형식적 조작기에 해당하는 청소년들을 인지적 발달 단계상 주요한 변화가 발생할 수 있을 것으로 생각되는 2년씩 간격을 나누어(Pascual-Leone, 1970) 중1, 중3, 고2의 3개 학년에 대해 측정 및 데이터 수집을 실시하였으며 NIRSIT Analysis 프로그램(OBELAB, 2019)을 활용하여 전처리하고 NIRS-SPM 프로그램을 활용하여 집단별로 채널별, 영역별 베타값을 얻었으며 이를 다시 상관분석하여 최종적인 연결망의 세기를 구할 수 있었다.

## Participants

연구 대상자는 자발적으로 연구에 참여하고자 하였으며 학부모의 허락과 서면 동의를 거친 청소년으로 구성되어 있다. 이들은 서로 문화 및 교육수준, 소득 수준이 비슷한 G지역, S지역, C지역의 청소년들로 중1, 중3, 고2 학생들로 구성되어 있다. 본 연구의 분석에 활용한 연구 대상자의 수는 중1 학생 59명, 중3 학생 27명, 고2 학생 22명으로 총 108명이다. 사전에 측정한 학생의 수는 더 많았으나 측정 데이터의 결측치나 소실, 특이사항이 없고 두뇌 편측성을 고려하여 오른손잡이이며 온전하게 수집된 학생의 데이터에 한정하여 분석을 실시하였다.



Fig. 1. Examples of tasks that induce self-regulation using biological classification

## Task Design

과제는 학생들의 자기조절 사고를 유발시킬 수 있는 부분적으로 익숙하고 이해되지만 전체적으로 모두 알고 있지는 않은 과제(Wollman & Lawson, 1977)로 선정하였으며 많은 생물 중에서 형태나 서식지에 따른 단순한 분류로는 생물들 간의 유연 관계를 쉽게 설명할 수 없는 종들을 나열하고 이를 활용하여 제시하였다. 실제 유연 관계와는 달리 형태나 서식지가 비슷하여 선택하는 경우가 생기도록 생물종이나 화면에 제시되는 장면을 선택하였으며 생물종 간에는 서로 간섭이 일어나거나 힌트가 되지 않도록 유의하고 주변의 환경은 되도록 불러치리 또는 잘 보이지 않고 관찰해야 하는 생물종 자체가 뚜렷하게 부각되는 것으로 골랐다. 또한 생물종의 이름을 그대로 제시할 경우 자기조절 보다는 기존의 지식으로 선택할 수 있기 때문에 ‘가, 나, 다’와 같은 기호로 표현하고 동물, 식물, 균류 등 다양한 생물계에 대한 과제를 제시함으로써 기존 지식에 의해 답을 결정하는 상황을 막고자 노력하였다.

과제가 제시되는 방법은 먼저 지문을 읽고 해당 생물과 유연 관계가 가장 가까운 생물을 선택지 중에서 선택하고 정답을 확인 한 후, 자신의 정답 유무에 따라 생물의 유연관계에 참고할 수 있는 정보의 종류를 자신이 선택하게 되며 이를 바탕으로 각각의 정보를 다시 확인하여 조건을 탐색하고 재선택이 이루어지고 평가하는 방식으로 구성되었다. 학생이 정보 탐색을 스스로 충분하다 생각하여 그만 둘 때까지 3~4종 이상의 정보를 제공하도록 과제가 이루어졌으며 학생이 생각하고 생물종을 선택하는 부분을 자기조절의 사고가 집중적으로 이루어지는 부분으로 보고 마커 처리하여 분석에 활용하였다.

## Measurement

본 연구에 사용된 두뇌 활성 측정 장치는 OBELAB사의 NIRSIT (모델명: NS1-H20A; OBELAB, Seoul, Korea)으로 기존의 f-NIRS 장치가 두뇌 전체를 측정했던 것에 비해 주로 고등사고가 이루어지는 전두엽 부분을 집중적으로 측정할 수 있는 장점이 있는 장치이다(OBELAB, 2019). NIRSIT 장치가 두뇌 데이터를 수집하는 동안 과제의 입력 신호와 화면 전환 시간, 순서 등이 자동으로 데이터 수집 장치에 기록되도록 하는 Psychology Software Tools Inc.사의 E-prime (v3.0)을 사용하여 과제가 진행되는 순서에 따라 Marker와 Task number가 데이터 수집 장치에 기록되도록 하였다.

측정은 조용하고 앞에 시야를 방해하는 것이 없도록 하얀 벽면 등을 측정 대상의 앞에 두고 실시했으며 자기조절 과제를 제시하는 모니터는 피험자의 눈높이를 고려하여 높이를 조정하였다. 오른쪽에 안정적으로 측정을 진행하는 측정요원이 착석하여 피험자의 각 단계마다 측정을 잘 안내하고 한 단계씩 이해하며 측정에 참여하도록 하였고, 피험자의 뒤쪽에는 두뇌 활성 데이터 수집 컴퓨터를 설치하고 또 다른 측정 요원이 착석하여 데이터 수집 및 기록이 잘 이루어지고 있는지를 실시간으로 확인하는 방식으로 이루어졌다.

## Analysis

수집된 데이터는 NIRSIT Analysis Tool (v2.2)를 활용하여 분석 전에 전처리를 진행하며 이 과정에서 과제의 번호를 분석에 필요한 부분을 선정하여 편집하고, high-pass filter (DCT 0.005Hz)와 low-pass filter (DCT 0.01Hz)를 적용하여 불필요한 잡파를 제거한다. 또한 채널별로 그래프를 확인하여 실험 데이터 분석 과정에서 영향을 줄 수 있는 비정상적인 신호가 있다면 해당 채널에서 수집된 신호는 제거할 수 있다. 이와 같은 과정을 거쳐 전처리가 끝난 데이터는 Matlab (v2020b)과 NIRS-SPM (v4.1)을 활용하여 GLM 방식의 산출식에 의해 각

대상 학년별 동화, 갈등, 조절 각각의 채널별 회귀계수( $\beta$ 값)를 산출하였다. 채널별로 산출된 회귀계수( $\beta$ 값)는 연결성에 대한 값을 구하기 위해 다시 상관분석을 실시하였으며 이를 통해 두 채널 간 상호의존 관계의 유무와 정도를 분석하였다.  $p$ 값이 0.05 미만인 구간에서 상관계수( $r$ )의 범위가  $\pm 0.2 \sim 0.4$  사이는 낮은 연결성,  $\pm 0.4 \sim 0.6$ 은 확실한 연결성,  $\pm 0.6 \sim 0.8$  사이는 높은 연결성이 있는 것으로 보았다. 채널별로 도출된 연결성은 보다 확인과 해석이 용이하도록 다시 전두엽의 각 영역별 연결성으로 변환하여 최종 결과를 도출하였다. 마지막으로 BrainNet Viewer v1.7(Xia, Wang, & He, 2013) 프로그램을 활용하여 영역별 해부학적 위치와 상관 정도를 표현하였다.

## Results and Discussions

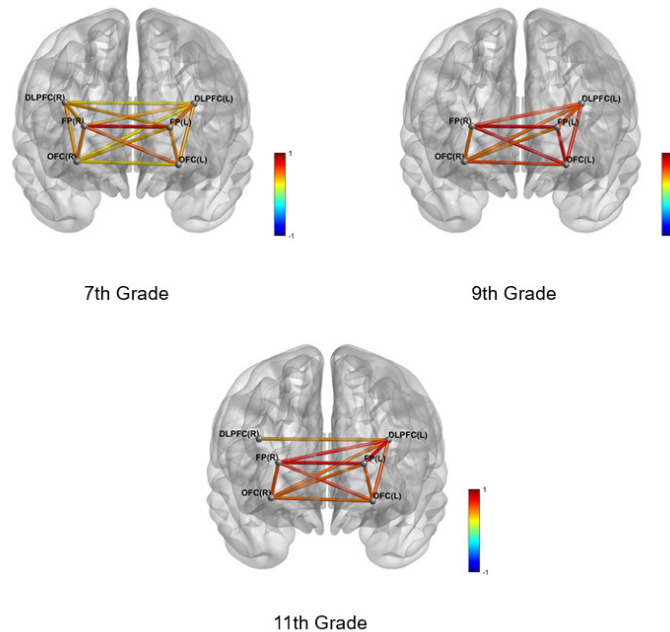
### Adolescent's Brain Network Model of Assimilation

자기조절의 동화 과정에서 분석된 청소년의 두뇌 연결망은 Table 1과 같고, 두뇌 연결망 모델은 Fig. 2와 같다. 중1의 '동화' 사고과정에서 가장 높은 상관을 가진 두뇌 연결망은 FP(L)-FP(R)였으며, 그 외에도 OFC(L)-FP(R), DLPFC(L)-FP(L), FP(R)-OFC(R), DLPFC(L)-FP(R) 등에서 비교적 높은 상관이 나타난다. 하지만 중1 집단의 경우에는 FP(L)-FP(R) 외에는 상관계수( $r$ ) 값이 0.6 이하로 나타나 매우 높은 상관이 나타나지는 않는 경향을 가지고 있다. 중3의 '동화' 사고과정에서 가장 높은 상관을 가진 두뇌 연결망은 OFC(L)-FP(R)이며, FP(L)-FP(R), FP(L)-OFC(L), FP(L)-OFC(R), DLPFC(L)-OFC(L), DLPFC(R)-FP(R) 등에서 비교적 높은 상관이 나타났다. 특히, 가장 강한 상관을 가진 OFC(L)-FP(R) 외에도 현재 높은 상관을 가진 것으로 나오는 영역 사이의 연결망이 많은 편이었고 상관계수( $r$ ) 또한 0.7 이상의 높은 상관을 나타내는 것이 많은 편이다. 고2의 '동화' 사고과정에서 가장 높은 상관을 가진 두뇌 연결망은 FP(L)-FP(R)였으며, DLPFC(L)-FP(L), DLPFC(L)-FP(R), OFC(L)-FP(R), DLPFC(L)-OFC(L) 등에서 비교적 높은 상관이 나타난다.

**Table 1.** Brain connectivity between regions in the process of assimilation

| 7th Grade         |       | 9th Grade       |       | 11th Grade        |       |
|-------------------|-------|-----------------|-------|-------------------|-------|
| Region Pair       | r     | Region Pair     | r     | Region Pair       | r     |
| FP(L)-FP(R)       | 0.801 | OFC(L)-FP(R)    | 0.817 | FP(L)-FP(R)       | 0.754 |
| OFC(L)-FP(R)      | 0.603 | FP(L)-FP(R)     | 0.806 | DLPFC(L)-FP(L)    | 0.750 |
| DLPFC(L)-FP(L)    | 0.515 | FP(L)-OFC(L)    | 0.743 | DLPFC(L)-FP(R)    | 0.747 |
| FP(R)-OFC(R)      | 0.494 | DLPFC(L)-OFC(L) | 0.704 | OFC(L)-FP(R)      | 0.635 |
| DLPFC(L)-FP(R)    | 0.471 | DLPFC(L)-FP(R)  | 0.640 | DLPFC(L)-OFC(L)   | 0.635 |
| FP(L)-OFC(L)      | 0.470 | OFC(L)-OFC(R)   | 0.624 | FP(R)-OFC(R)      | 0.585 |
| DLPFC(R)-OFC(R)   | 0.438 | DLPFC(L)-FP(L)  | 0.575 | FP(L)-OFC(L)      | 0.570 |
| DLPFC(R)-FP(R)    | 0.432 | DLPFC(L)-OFC(R) | 0.547 | DLPFC(L)-OFC(R)   | 0.528 |
| DLPFC(L)-OFC(L)   | 0.429 | FP(R)-OFC(R)    | 0.530 | OFC(L)-OFC(R)     | 0.522 |
| FP(L)-DLPFC(R)    | 0.414 | FP(L)-OFC(R)    | 0.487 | FP(L)-OFC(R)      | 0.522 |
| FP(L)-OFC(R)      | 0.372 | -               | -     | DLPFC(L)-DLPFC(R) | 0.439 |
| OFC(L)-OFC(R)     | 0.289 | -               | -     | -                 | -     |
| DLPFC(L)-OFC(R)   | 0.274 | -               | -     | -                 | -     |
| DLPFC(L)-DLPFC(R) | 0.267 | -               | -     | -                 | -     |

(FP: Frontal pole, OFC: Orbitofrontal cortex, DLPFC: Dorsolateral prefrontal cortex, L: left, R: Right,  $p < 0.05$ )



**Fig. 2.** Brain network development model in the process of 'Assimilation' in adolescents

중1의 '동화' 사고과정에서 가장 높은 상관을 가진 두뇌 연결망은 FP(L)-FP(R)였으며, 그 외에도 OFC(L)-FP(R), DLPFC(L)-FP(L), FP(R)-OFC(R), DLPFC(L)-FP(R) 등에서 비교적 높은 상관이 나타난다. 하지만 중1 집단의 경우에는 FP(L)-FP(R) 외에는 상관계수( $r$ ) 값이 0.6 이하로 나타나 매우 높은 상관이 나타나지는 않는 경향을 가지고 있다. 중3의 '동화' 사고과정에서 가장 높은 상관을 가진 두뇌 연결망은 OFC(L)-FP(R)이며, FP(L)-FP(R), FP(L)-OFC(L), FP(L)-OFC(R), DLPFC(L)-OFC(L), DLPFC(R)-FP(R) 등에서 비교적 높은 상관이 나타났다. 특히, 가장 강한 상관을 가진 OFC(L)-FP(R) 외에도 현재 높은 상관을 가진 것으로 나오는 영역 사이의 연결망이 많은 편이었고 상관계수( $r$ ) 또한 0.7 이상의 높은 상관을 나타내는 것이 많은 편이다. 고2의 '동화' 사고과정에서 가장 높은 상관을 가진 두뇌 연결망은 FP(L)-FP(R)였으며, DLPFC(L)-FP(L), DLPFC(L)-FP(R), OFC(L)-FP(R), DLPFC(L)-OFC(L) 등에서 비교적 높은 상관이 나타난다.

'동화' 사고과정에서는 전 학년 모두 FP(L)-FP(R)의 두뇌 연결망이 높은 것으로 나타났으며, FP는 관련 선행연구들에서 목표지향적 사고, 다중작업을 담당하는 것으로 알려져 있다(Koechline, 2011; Kwon et al., 2020). 중1의 경우에 다양한 연결망이 나타나는 것은 자동적인 연결망이 약해서 서로 동조화를 많이 시키지 못하고 미약한 동조화로 인하여 여러 부분의 연결망이 다양하게 나타나는 것으로 보인다. DLPFC(L)은 언어 기능과 관련되어 있다. 언어적 정보를 주로 받아들여 사고에 활용할 수 있게 정보를 특화시키고 있으며 OFC의 경우에는 본인이 인지 비평형을 해결하기 위해 잘 하고 있는지를 계속해서 확인하고 평가할 때 나타나는 부분이다. 고2에서 나타나는 DLPFC(R)은 이미지를 생성하여 이미지를 위주로 정보를 받아들이며, 중3이 언어적 정보를 주로 활용하는 반면 인지 발달을 통해 이미지화 된 정보도 활용하도록 점차 발달하고 있음을 알 수 있다. 또 중3은 중1이나 고2에 비해 과제에 대한 부담을 많이 가지고 OFC를 활발히 활용하여 자신에 대한 스스로의 평가, 타인의 평가에 대해 계속하여 신경을 쓰고 있다는 것도 알 수 있다.

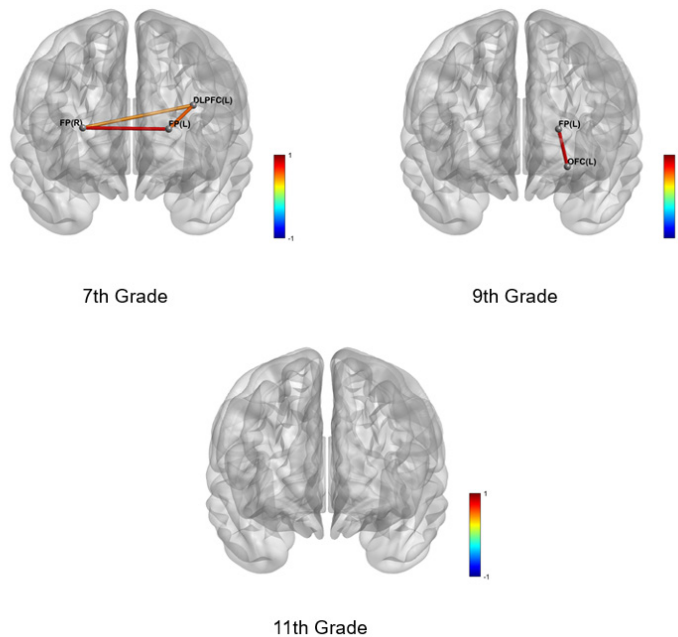
## Adolescent's Brain Network Model of Conflict

자기조절의 갈등 과정에서 분석된 청소년의 두뇌 연결망은 Table 2와 같고, 두뇌 연결망 모델은 Fig. 3과 같다. 중1의 '갈등' 사고과정에서 가장 높은 상관을 가진 두뇌 연결망은 FP(L)-FP(R)이었으며, 그 외에는 DLPFC(L)-FP(L), DLPFC(L)-FP(R) 정도가 높은 상관을 가진 편이다. FP(L)-FP(R)는 전형적인 목적지향적 사고를 하고 있음을 나타내고 DLPFC는 인지적 비평형 단계에서 느낄 수 있는 불확실성에 관여하는 피질 (McLaughlin et al., 2009)이며, 작업기억을 활용한 정보 조작에도 관여하고 있다(Barbey et al., 2013). '동화'의 사고 과정에 비해 두뇌 연결망이 덜 복잡하게 나타나는 것은 '동화'가 기존 자신의 기억을 재인하며 생각을 확인하고 판단하며 보다 활발한 사고가 이루어지고 있는 반면, 갈등의 경우에는 인지 비평형 상태에서 인지구조가 만족할만한 평형을 이루지 못하고 계속하여 사고활동을 하고 있기 때문인 것으로 보인다. FP와 DLPFC(L)의 연결망이 두드러지는 것은 인지 비평형 상태가 유발된 것을 의미하며 주어진 과제와 자신의 작업기억 가운데에서 새로운 도식이나 설명을 고안하여 자신이 생성한 가설을 지지하고자 언어적 정보에 따른 목표지향적인 다중 작업을 활발히 하고 있는 것(Koechlin, 2011)으로 볼 수 있다.

**Table 2.** Brain connectivity between regions in the process of 'Conflict'

| 7th Grade      |       | 9th Grade    |       | 11th Grade  |   |
|----------------|-------|--------------|-------|-------------|---|
| Region Pair    | r     | Region Pair  | r     | Region Pair | r |
| FP(L)-FP(R)    | 0.749 | FP(L)-OFC(L) | 0.733 | -           | - |
| DLPFC(L)-FP(L) | 0.732 | -            | -     | -           | - |
| DLPFC(L)-FP(R) | 0.726 | -            | -     | -           | - |

(FP: Frontal pole, OFC: Orbitofrontal cortex, DLPFC: Dorsolateral prefrontal cortex, L: left, R: Right,  $p < 0.05$ )



**Fig. 3.** Brain network development model in the process of 'Conflict' in adolescents

중3의 ‘갈등’ 사고과정에서 가장 높은 상관을 가진 두뇌 연결망은 FP(L)-OFC(L)였다. 그 외에도 DLPFC(L)-FP(L), DLPFC(L)-DLPFC(R), DLPFC(L)-FP(R), DLPFC(R)-FP(R) 등에서 높은 상관이 나타나기는 하였으나 유의하지는 않은 것으로 나타난다. 두뇌 연결망의 상관이 증가하는 것은 학생들이 점차 언어적인 정보 외에 시각적, 도식적인 정보도 함께 활용하여 해당 생명과학 현상을 설명할 수 있는 가설을 만들고자 노력하는 부분으로 볼 수 있다. 중3의 경우에는 특히 OFC 영역과의 활성이 동화와 갈등 모두 높게 나타나는데 이는 중3 학생들이 다른 발달과정에 비해 평가에 대한 민감도가 매우 높기 때문일 것으로 보인다.

고2의 ‘갈등’ 사고과정에서 가장 높은 상관을 가진 두뇌 연결망은 DLPFC(L)-FP(L)이었으며, 그 외에 FP(L)-OFC(L), DLPFC(L)-FP(R), OFC(L)-OFC(R)에서 매우 높은 상관이 나타났지만 유의미한 것으로 나타나는 두뇌 연결망은 없었다. 그 이유는 과제가 고2 학생들이 해결하기에 쉽게 느껴지거나 혹은 고2 학생들의 경우에 이미 교육과정 상에서 유전자에 따른 유연 관계 판단에 대해 배웠기 때문에 이를 기억하여 갈등보다는 동화나 조절의 사고가 더 활발히 일어났기 때문일 것으로 보인다.

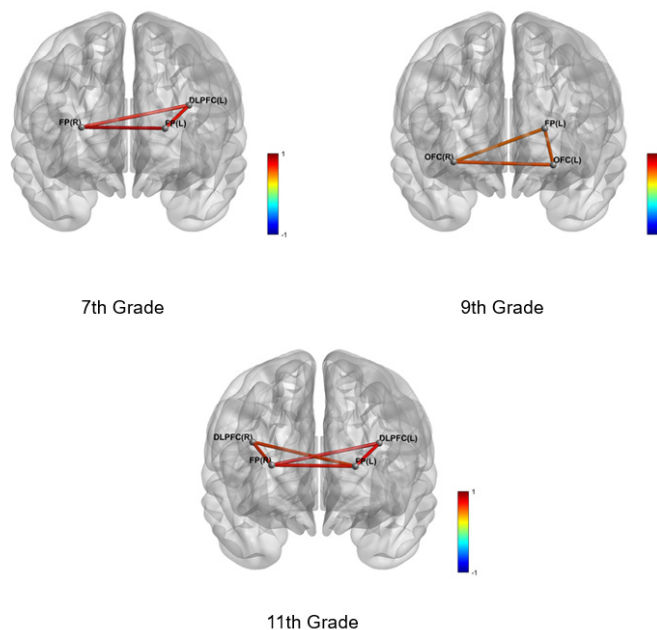
### Adolescent's Brain Network Model of Accommodation

자기조절의 조절 과정에서 분석된 청소년의 두뇌 연결망은 Table 3과 같고, 두뇌 연결망 모델은 Fig. 4와 같다.

**Table 3.** Brain connectivity between regions in the process of ‘Accommodation’

| 7th Grade      |       | 9th Grade     |       | 11th Grade     |       |
|----------------|-------|---------------|-------|----------------|-------|
| Region Pair    | r     | Region Pair   | r     | Region Pair    | r     |
| FP(L)-FP(R)    | 0.851 | OFC(L)-OFC(R) | 0.580 | DLPFC(L)-FP(R) | 0.804 |
| DLPFC(L)-FP(L) | 0.720 | FP(L)-OFC(L)  | 0.561 | DLPFC(L)-FP(L) | 0.730 |
| DLPFC(L)-FP(R) | 0.703 | FP(L)-OFC(R)  | 0.531 | FP(L)-FP(R)    | 0.707 |
| -              | -     | -             | -     | FP(L)-DLPFC(R) | 0.609 |

(FP: Frontal pole, OFC: Orbitofrontal cortex, DLPFC: Dorsolateral prefrontal cortex, L: left, R: Right,  $p < 0.05$ )



**Fig. 4.** Brain network development model in the process of ‘Accommodation’ in adolescents

중1의 '조절' 사고 과정에서 가장 높은 상관을 보인 두뇌 연결망은 FP(L)-FP(R)이었으며, DLPFC(L)-FP(L)과 DLPFC(L)-FP(R)의 두뇌 연결망이 함께 높은 상관을 보였다. 언어를 중심으로 정보 조작을 실시한다는 점에서 갈등의 사고와 비슷한 점을 발견할 수 있다.

중3의 '조절' 사고 과정에서 가장 높은 상관을 보인 두뇌 연결망은 OFC(L)-FP(R)이었으며, FP(L)-OFC(L), FP(L)-OFC(R) 등에서 유의미한 상관이 있는 것으로 나타났다. OFC는 인지적 비평형 상태에서 자신의 행동이나 선택에 대해서 확인과 평가를 계속할 수 있도록 동기를 부여하고 보상에 관여한다(Ballesta et al., 2015). 또 자신의 인지적 선택이 어느 정도 합당하고 가치를 지니는지 모니터링하기도 한다. 이는 조절이 일어나는 동안에 계속하여 자신의 수행을 판단하고 자신이 한 선택과 자신이 만든 가설을 적용했을 때, 인지적 평형에 이를 수 있는지 계속해서 확인하기 때문인 것으로 보인다.

고2의 '조절' 사고 과정에서 가장 높은 상관을 보인 두뇌 연결망은 DLPFC(L)-FP(R)이었으며, DLPFC(L)-FP(L), FP(L)-FP(R), FP(L)-DLPFC(R) 등에서 유의미한 상관이 있는 것으로 나타났다. 고2는 자기조절에 관여하는 것으로 보이는 FP, DLPFC의 영역이 두루 활성화되며 높은 상관관계를 맺고 서로 연결되어 상호작용을 주고받고 있음을 알 수 있다. DLPFC가 충분히 활성화되고 있다는 것은 학생들이 문제를 풀기 위해 매우 주의집중하고 있다는 사실을 알 수 있다. DLPFC(L)은 언어적 작업기억 정보를 중심으로 한 조작이 이루어지고 DLPFC(R)은 시각적 자기조절 정보를 중심으로 한 작업이 이루어지는 바(Mars & Grol, 2007; Murphy et al., 1998), 고2에서는 중1과는 달리 언어적 작업기억 뿐 아니라 시각적 작업기억 활용도 활발하게 이루어지고 있다. 이는 중1과 중3에 비해 고2의 경우 사고과정과 두뇌 활성이 다른 학년에 비해 매우 활성화되고 안정화되어 있다고 해석할 수 있다.

## Conclusions and Implications

이 연구를 통해 자기조절은 각 단계별로 동화, 갈등, 조절의 특화된 사고과정 뿐 아니라 활성 영역과 두뇌 연결망이 있는 것이 확인된다. 학생들의 자기조절 사고과정에는 두뇌의 다양한 부분이 관여한다. FP는 목표를 인지하고 문제 해결을 위해 계획이나 전략을 수립하는 역할을 하는 것으로 알려져 있다(Koechiline, 2011). 자기조절 과정에서 FP(R), FP(L)가 중1, 중3, 고2 모두 두루 연결망을 형성하고 활성화된 것은 자기조절이 이러한 모든 기능이 필요한 사고과정임을 확인할 수 있다. 또한 DLPFC는 주의집중 뿐 아니라 기억의 유지나 높은 수준의 실행 처리, 전략적 처리, 주의집중, 정보 모니터링 및 작업기억을 활용한 문제해결 등에 관여한다(Toepper et al., 2010). 이러한 DLPFC의 연결망 및 활용 정도가 중1, 중3, 고2 집단에서 유의미한 차이가 나는 것이 드러나므로 자기조절 과정에서는 DLPFC의 활성이 잘 유지될 필요가 있으며 자기조절의 수준이 높아지고 발달할수록 다양한 전략이나 집중을 통해 기존에 자신이 가진 정보와 비교하여 해당 작업을 잘할 수 있게 된다.

또한 국내에서 자기조절에 대해 다룬 많은 선행연구들은 자기조절에 있어 인지적 부분도 있지만 정서, 심리적 부분이 클 수 있다고 밝힌 바 있는데 이는 중3 학생들에게서 두드러지게 드러나는 OFC 영역의 연결망과 활성을 보더라도 확인할 수 있다. 중3 학생들은 자신들이 생각한 의사결정이 합당하고 신뢰할 수 있는 것인지 확인하기 위하여 OFC영역(Kepecs et al., 2008; Stalnaker et al., 2015)을 많이 활용하고 있다. 이를 통해 고2 학생들의 경우에는 자기조절이 많이 완성된 상태로 계속하여 목적 지향적 사고를 많이 하는 편이지만 오히려 중3 학생들의 경우에는 과제 자체에 주의집중하기 보다 자신이 현재 잘하고 있는지를 스스로 평가하려는 경향이

나타나는 것을 확인할 수 있으며 자기조절의 안정적인 이행을 위해서는 DLPFC의 활용 뿐 아니라 OFC의 활용도 충분히 이루어져 자신의 사고과정이나 의사결정에 대해 신뢰를 가질 수 있어야 함을 알 수 있다.

자기조절은 연령이 증가함에 따라 정교화되고 자기조절 사고에 관여하는 보다 많은 부분에서 두뇌 활성화와 연결망이 발생하여 일어난다. 또한 자기조절의 일정 수준 이상이 도달되면 보다 편안하게 큰 갈등을 일으키지 않고 다음 단계로 넘어가게 된다. 이미지 정보보다 언어 정보를 통한 자기조절이 먼저 일어나며 점차 자신이 가진 언어, 이미지를 모두 활용하여 자기조절을 할 수 있게 된다.

자기조절은 자신에게 필요한 문제 해결을 인식하고 목적을 설정하여 다양한 인지전략을 활용하여 인지 불평형을 인지 평형으로 이끄는 과정(Bandura, 1986)이라고 보았을 때, 자기조절을 위한 다양한 전략을 연습시킬 수 있으며 자기조절에 관여하는 두뇌 각 영역의 연결망과 활성이 보다 효과적으로 일어날 수 있도록 교육적 처치가 필요하다.

## Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. 2019R1F1A1058641).

## References

- Ballesta, S., Shi, W., Conen, K., & Padoa-Schioppa, C. (2020). Values encoded in orbitofrontal cortex are causally related to economic choices. *Nature*, 588, 450-453.
- Bandura, A. (1986). *Social Foundations of Thought and Action: A Social Cognitive Theory*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Barbey, A. K., Koenigs, M., & Grafman, J. (2013). Dorsolateral prefrontal contributions to human working memory. *Cortex*, 49, 1195-1205.
- Friston, K. (2005). Models of brain function in neuroimaging. *Annual Review of Psychology*, 56, 57-87.
- Grouzet, F. (2013). Self-regulation and autonomy: The dialectic between organismic and sociocognitive valuing processes. In B. Sokol, F. Grouzet, & U. Müller (Eds.), *Self-Regulation and Autonomy: Social and Developmental Dimensions of Human Conduct* (pp. 47-77). Cambridge: Cambridge University Press.
- Jeong, S. H., Kim, B. G., Koo, I. S., & Park, J. K. (2010). Effects on scientific inquiry, scientific attitudes, and scientific achievements of experimental classes for kinetics unit using self-regulated learning strategy. *Journal of The Korean Association For Science Education*, 30, 681-692.
- Kelly, B., Edgerton, C., Graham, S., Robertson, E., & Syme, B. (2015). Parents and the preschool PATHS(Promoting Alternative Thinking Strategies) curriculum. *Journal of Children's Services*, 10, 231-241.
- Kepecs, A., Uchida, N., Zariwala, H. A., & Mainen, Z. F. (2008). Neural correlates, computation and behavioral impact of decision confidence. *Nature*, 455, 227-231.
- Koechline, E. (2011). Frontal pole function: What is specifically human? *Trends in Cognitive Sciences*, 15, 241.
- Kwon, S. H., Park, J. S., & Kwon, Y. J. (2021). Analysis of Korean children's developmental pattern on the social brain related to mentalization ability: An fNIRS study. *Brain , Digital, & Learning*, 11, 703-712.
- Kwon, S. H., Park, S. H., Park, J. S., Hwang, N. R., & Kwon, Y. J. (2020). Identification of fNIRS brain activity

- and exploration of deep learning-based predictive model in self-regulation process taking mirror task. *Brain, Digital, & Learning*, 10, 365-376.
- Lawson, A. E. (1995). *Science Teaching and the Development of Thinking*. Belmont, CA: Wadsworth.
- Mars, R., & Grol, M. (2007). Dorsolateral prefrontal cortex, working memory, and prospective coding for action. *The Journal of Neuroscience*, 27, 1801-1802.
- McIntosh, A. R. (2000). Towards a network theory of cognition. *Neural Network*, 13, 861-870.
- McLaughlin, N. C. R., Wiebe, D., Fulwiler, C., & Gansler, D. A. (2009). Differential contributions of lateral prefrontal cortex regions to visual memory processes. *Brain Imaging and Behavior*, 3, 202-211.
- Murphy, D., Daly, E., Amelsvoort, T., Robertson, D., Simmons, A., & Critchley, H. (1998). Functional neuroanatomical dissociation of verbal, visual and spatial working memory. *Schizophrenia Research*, 29, 105-106.
- Niemiec, C. P., Ryan, R. M., & Deci, E. L. (2009). The path taken: consequences of attaining intrinsic and extrinsic aspirations in post-college life. *Journal of Research in Personality*, 43, 291-306.
- OBELAB (2019). *NIRSIT Analysis Tool v2.2 Manual*. Seoul, Korea: OBELAB.
- Park S. H., Hwang, N. R., Park, J. S., Lee, S. R., Kwon, S. H., & Kwon, Y. J. (2020a). An analysis of the meaning, process, and learning task of self-regulation in science learning. *Biology Education*, 48, 477-488.
- Park S. H., Hwang, N. R., Park, J. S., Lee, S. R., Kwon, S. H., & Kwon, Y. J. (2020b). Identification of the stages of self-regulation through the think aloud method in life science learning. *Biology Education*, 48, 535-545.
- Pascual-Leone, J. (1970). A mathematical model for the transition rule in Piaget's developmental stages. *Acta Psychologica*, 32, 301-345.
- Savina, E. (2014). Does play promote self-regulation in children? *Early Child Development and Care*, 184, 1692-1705.
- Stalnaker, T., Cooch, N., & Schoenbaum, G. (2015). What the orbitofrontal cortex does not do. *Nature Neuroscience*, 18, 620-627.
- Toepper, M., Gebhardt, H., Beblo, T., Thomas, C., Driessen, M., Bischoff, M., & Sammer, G. (2010). Functional correlates of distractor suppression during spatial working memory encoding. *Neuroscience*, 165, 1244-1253.
- Wollman, W., Lawson, A. (1977). Teaching the procedure of controlled experimentation: A Piagetian approach. *Science Education*, 61, 57-70.
- Xia, M., Wang, J., & He, Y. (2013). BrainNet Viewer: a network visualization tool for human brain connectomics. *PloS One*, 8, e68910.
- Zimmerman, B. J. (1989). A social cognitive view of self-regulated academic learning. *Journal of Educational Psychology*, 81, 329-399.

## Authors Information

Park, Sang-Hee: Daejeon Gwanpyeong Elementary School, Teacher, First Author

Lee, Su-Min: Korea National University of Education, Graduate Student, Author

Kwon, Seung-Hyuk: Gongju National University of Education, Professor, Co-corresponding Author

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9202-447X>

Kwon, Yong-Ju: Korea National University of Education, Professor, Co-corresponding Author

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8283-1574>