

RESEARCH ARTICLE

Changes of child's brain activity and functional connectivity in transformational geometry program: An fNIRS study

Ming-Jung Kang
Korea National University of Education

변환기하 프로그램에서 아동의 두뇌 활성 및 기능적 연결성의 변화: fNIRS 연구

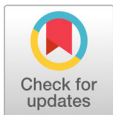
강민정
한국교원대학교

Corresponding Author: ice9562kr@naver.com

ABSTRACT

This study was analyzed whether children's transformation geometry ability can be developed through educational programs using tangram, and how the brain was activated and changed in the process. The subjects of this study are 20 first-year elementary school students, a single group pre test-post test experimental research design was employed. There are three types of transformational geometry tasks: house as a translation, square as a rotation, swan as a reflection. The research results are as follows. First, the difference in the accuracy rate according to the pre and post-test was significant in house and square. Second, DLPFC was activated in all three tasks as a result of analyzing the difference between the brain active regions before and after the program in solving translation, rotation, and reflection tasks. In square task, VLPFC were significantly activated and in the task, FPPFC were significantly activated along with the activation of DLPFC. Third, the functional connectivity of brain activity in pre and post tasks was analyzed. In the pre test, only channel 6(R) in the DLPFC region and channel 10(R) in the VLPFC region showed a connectivity of .834. In the post task, channel 12(R) showed functional connectivity with DLPFC, OFC, and VLPFC, and functional connectivity of the brain was found only in the right hemisphere. However, in the post task, there was a significant functional connection between the left and right hemispheres.

Key words: Transformational geometric, tangram, fNIRS, child



OPEN ACCESS

Brain, Digital, & Learning
2021, Vol. 11, No. 2, 199-213.
<https://doi.org/10.31216/BDL.20210013>

Received: May 24, 2021

Revised: June 04, 2021

Accepted: June 07, 2021

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education(NRF-2019R111A1A01059200).

© 2021. 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

변환기하는 2차원과 3차원에서 모양의 움직임을 구별하고 설명하는 방법을 배우는 기하학의 하위 영역으로 K-12 수학 교육과정의 중요한 주제이다(Kirby & Boulter, 1999). 변환기하는 비교적 일찍 알게 되는 기하학적 발견 중 하나로, 아동들은 일상생활에서 물건을 움직이고 조작할 때 위치, 크기, 모양의 변화를 경험한다. 이들은 모양에 대해 역동적인 공간감을 지니고 있으며, 모양을 변화 가능한 것으로 인식하고 유사한 모양에 대해 설명하기도 한다. 또한 합동과 유사성을 구별할 수 있으며, 회전은 돌리기, 반사는 뒤집기, 이동은 밀기로 이해함으로써 변환기하의 움직임을 인식할 수 있다(Olive et al., 2010). 변환기하의 역동적 특성은 아동들에게 광범위한 기하학적 개념을 연결하고, 다양한 표현을 사용하여 더 높은 수준의 추론 활동에 참여할 수 있는 기회를 제공한다(Hollberands, 2003). 이처럼 공간에서 물체가 어떻게 움직이는지에 대한 질문은 변환기하를 통해 명확해질 수 있으며, 변환기하의 교육과 학습은 기하학적 도형의 새로운 위치나 방향에 대한 정신적 또는 물리적 조작을 탐구하고 학습하는 것으로부터 시작될 수 있다.

변환기하에 대한 몇몇 연구들(Schultz & Austin 1983; Xistouri & Pitta-Pantazi 2011)은 초등학생에게 변환기하를 가르치는 것이 가능하고, 학생들의 수학학습에 긍정적인 영향을 미칠 수 있다고 하였다. Van Hiele (1986)는 한 수준에서 다음 수준으로의 전환은 생물학적 성숙에 의한 자연스러운 과정이라기보다는 수업 내용과 방법에 의존한 교수 학습 프로그램의 영향으로 일어난다고 보았다. 따라서 아동들에게 교육 프로그램을 제공하여 기하학적 사고를 촉진하고, 교사는 아동들의 사고 수준에 맞도록 학습경험을 계획하고 제공할 필요가 있다. 또한 한 수준에서 다음 수준으로의 전환을 용이하게 하기 위해서는 물리적 경험 특히 물리적 조작이 필요하며 이를 위해서는 조작적 교수 및 학습 보조 도구가 유용하다(Tchoshanov, 2011). 변환기하 학습에서 수학적 보조도구의 사용은 아동들의 사고력을 향상시키고 추상적 개념과 구체적 대상을 연결하여 명확한 개념 형성에 도움을 준다.

아동의 변환기하 능력과 공간적 추론 과정을 습득하는데 도움이 되는 교육 보조도구로 연구자들은 탱그램을 언급하고 있다(Khairiree, 2015; Saleem & Aziz, 2017; Tian, 2012). 탱그램은 일상생활에서 비교적 쉽게 접할 수 있는 교구로서, 아동들이 직접 조작해보면서 흥미와 호기심을 유발하고, 이를 통해 스스로 문제를 해결하기 위해 다양한 방법을 생각하게 된다. 탱그램은 정사각형, 평행사변형, 2개의 큰 직각삼각형, 중간 크기의 직각삼각형 그리고 2개의 작은 직각삼각형 총 7개로 구성된다. 기본 모양은 삼각형, 정사각형 그리고 평행사변형이며, 큰 정사각형, 직사각형 등의 다각형을 형성하기 위해서 조각들을 다양 방식으로 결합할 수 있다(Tian, 2012).

탱그램과 같은 구체적 조작 학습 및 교육 보조도구는 초등 1학년과 같이 연령이 어린 학생들이 기하학적 모양을 시각화하고 분석하는데 도움이 되며 동시에 기하학적 사고를 촉진하는 학습 환경을 제공해 준다. 아동들은 구체적 사물을 만지고 조작할 때 공간 및 구조의 위치나 포지션을 이해하는데 능숙해지며, 기하학적 특성과 관계에 대한 강력하고 직관적인 이해를 발달시킨다. 따라서 탱그램을 이용한 변환기하 학습은 추상적인 기하학적 개념을 이해하고 기하학적 모양간의 관계성을 발견하는데 도움을 주며 관찰, 창의력, 분석 및 논리적 사고 개발에도 중요하다.

탱그램과 관련된 선행연구들을 살펴보면, 탱그램으로 볼록 다각형을 구성하는데 도움이 되는 교육 전략을 제시한 연구(Tian, 2012), 탱그램 활동이 포함된 2학년과 4학년 교과서 내용에 대한 과제 변형을 학문적 측면에서 시도한 연구(Yoo & Park, 2019), 사용자 데이터 로그를 기반으로 탱그램 퍼즐 게임의 사용자 행동을 파악한 연구(Renavitasari et al., 2018) 등이 있다. 또한 탱그램이 학생들의 학업성취도에 미치는 영향을 탐구하고 이것을 블록의 분류학에 근거하여 그 효과를 탐구하기도 하였다(Saleem & Aziz, 2017; Xistouri et al., 2014). 이처럼 탱그램 관련 연구들이 지속적으로 이루어지고 있으나, 대부분이 피험자의 행동적 반응에 의존하는 간접적 방법으로 측정되고 있어 두뇌에서 일어나는 실제적인 사고과정을 나타내고 설명하는 데 한계가 있다. 아동들의 수학적 개념 습득 및 과정에 대한 여러 행동 연구가 우리의 이해를 크게 향상시켰으나, 여전히 우리는 아동들의 사고과정을 알 수 없으며 변환기하 과제를 해결하는 동안 두뇌 안에서 뇌세포들의 생리학적 반응이 어떤 영역을 통해 나타나고 활성화 되는지에 대해서는 알려진 바가 거의 없다.

학습 및 수학적 사고는 인지 신경과학의 중요한 연구 영역으로, 최근 신경 이미징 기술의 발전은 학습과 인지의 근간을 이루는 신경 매커니즘의 탐색 가능성을 열어 놓았다. 비교적 최근에 등장한 fNIRS(functional near-infrared spectroscopy, 기능적 근적외분광법)는 전두엽 피질에서 산소 및 탈산소화된 헤모글로빈의 농도 변화를 측정하기 위해 근적외선 파장을 사용하는 광학 이미징 기술이다(Park et al., 2019; Scholkmann et al., 2014). fNIRS는 안전성, 비 침습성, 경제성 및 휴대성이 뛰어나 뿐 아니라 피험자의 움직임에 덜 민감하고, 상대적으로 높은 시간 해상도를 제공한다. 또한 과제해결을 방해하지 않는 조용하고 잡음이 없는 절차로 인해 다른 구체적인 인지 능력을 효과적으로 연구하고, fMRI와 같은 생소한 상황이나 제한에 대한 불안과 같은 문제를 유발하지 않는다(Soltanlou et al., 2017). 따라서 fNIRS는 인지적 작업 과정을 효과적으로 모니터링 할 수 있으며, 움직임이 많은 아동들에게 좀 더 친화적이고, 휴대 가능하므로 생태학적으로 유효한 환경인 교육현장에서 보다 많은 데이터 샘플을 수집할 수 있도록 해준다.

교육관련 fNIRS 선행연구들을 살펴보면, 사칙연산에서 6-7학년은 노력을 덜 해도 되는 빠기에서는 전두엽의 활성화가 감소하고, 자동 인출이 되는 더하기와 곱하기에서는 측두엽의 활성화가 증가하였다(Artemenko et al., 2018). 또한 초등 고학년은 한 자릿수 곱셈에 비해 두 자릿수 곱셈에서 오른쪽 하전두 이랑에서 더 큰 활성화를 보였다(Soltanlou et al., 2018). 거울과제를 활용한 자기조절의 동화, 갈등, 조절 과정에서 고등학생들은 공통적으로 OFC와 DLPFC가 활성화 되었고(Kwon et al., 2020), 핀치새의 생김새를 관찰하고 분류하는 과정에서 나타난 중학생들의 두뇌 활성은 실감형 콘텐츠인 AR이 VR보다 전두엽에서 더 많은 활성화가 나타났다(Park et al., 2019). 교육관련 fNIRS의 많은 연구들이 초등학교 고학년이나 중, 고등학생을 대상으로 하고 있으며, 수학의 경우 수 및 연산과 관련된 내용이 많고 변환기하와 관련된 내용은 찾아보기 어렵다.

초등 1학년은 변환기하에 대한 기초개념이 형성되고 획득되는 시기이나(Clements et al., 2004), 초등 저학년을 대상으로 한 기하 및 변환기하에 대한 연구는 활발하지 않으며 두뇌 영상을 활용하여 분석한 연구는 거의 전무한 실정이다. 이에 아동들이 변환기하를 어떻게 해결하고 배우며, 특정 아이디어에 대해 어떻게 생각하는지, 그리고 그 과정에서 두뇌의 어떤 영역이 활성화되고 서로 상호작용하는지 알아보고자 한다. 두뇌에서 일어나는 사고활동은 특정 하나의 영역에서만 이루어지기 보다는 여러 영역에서 활성화 되고, 영역들 간의 기능적 네트워크를 형성한다. 따라서 본 연구에서는 탱그램을 활용한 아동의 변환기하 능력이 교육적 개입을 통해 향상될 수 있는지, 과제를 해결하는 과정에서 두뇌의 어떤 영역이 활성화되고 변화되는지 그리고 교육적 개입 전후에 따른 두뇌의 기능적 연결성은 어떻게 변화되는지 fNIRS를 활용하여 분석하였다.

Materials and Methods

Participants

본 연구는 탱그램을 활용한 프로그램을 통해 아동의 변환기하 과제해결에서 나타나는 두뇌 활성화 및 기능적 연결성의 변화를 분석하고자 하였다. 연구가 수행되기 전 소속기관의 생명윤리위원회(IRB)로부터 승인을 받았으며, 연구대상은 A시에 소재한 초등학교 1학년을 대상으로 하였다. 그 이유는 초등 2학년부터 ‘여러 가지 도형’ 단원에서 탱그램으로 모양 만들기 내용이 제공되어 공식적 교육을 받기 전인 1학년을 대상으로 하였다. 연구대상의 평균 연령은 6.82 (SD=1.94)세였으며, 연구를 진행하기 전 해당 교육기관의 허락을 구하였다. 담임교사와 학부모에게 연구목적, 프로그램의 내용, fNIRS 측정 방법 및 개인정보 보호, 그리고 연구동의 철회에 대해 설명하고 동의서를 서면으로 전달하였다. 연구 참여에 동의한 아동만을 연구대상으로 선정하였으며 24명이 모집되었다. 아동들이 과제를 수행하기 위해서는 정상적인 의사소통이 가능하여야 하며, 두뇌 활성을 측정하여야 하므로 오른손잡이만을 선발하였고 신경학적 수술 및 처치가 없는 아동을 선발하였다. 이들은 교육 프로그램에 참여하고 사전과 사후에 fNIRS로 변환기하 과제해결 과정을 측정하였다. 프로그램에 2/3 이상 지속적으로 참여하지 않은 아동 2명과 측정 중간에 시그널이 중단되거나 갑작스런 소음, 중도에 포기한 아동 2명, 총 4명이 제외되어 최종 연구대상은 초등 1학년 20명이다.

Tangram Program Contents

탱그램을 활용한 변환기하 프로그램의 내용은 2015 개정 초등학교 수학과 교육과정 중 초등 수학 1·2학년의 ‘도형’ 영역 중 입체도형과 내용을 연계하여 프로그램 내용을 구성하였다. 예비연구에서 초등 1학년 2학기 수학 교육과정과 연계를 위해 원, 세모, 네모에 대한 활동 2개를 첨부하였으며, 코로나 19로 인해 소그룹 활동 2개는 삭제되었다. 이에 최종 프로그램은 총 12개의 활동으로 구성되었으며, 초등 수학 전문가 1인과 교사경력 15년 이상의 석사학위 이상 초등교사 3인에게 내용 타당도를 검증받았다. 탱그램 프로그램은 방과 후 학교에서 제공하는 교실에서 별도로 이루어졌으며, 각 활동은 약 15-20분 내외가 소요되었고, 매주 1회씩 2-3개의 활동을 4-5주간 실시하였다. 관련내용은 Table 1과 같다.

Table 1. Tangram program contents for each class

Class	Title	Contents	Class	Title	Contents
1	Making a shape	Making various shapes by using circle, triangle, and square.	7	Making triangles using 4-5 pieces	Making various triangles, such as isosceles triangle, right triangle, etc.
2	Making triangle and square	Making triangles and squares of various sizes using triangles and squares.	8	Making shapes using 5 pieces	Use 5 pieces of tangram to make the duck, the bower, etc.
3	Navigating tangram	Use the tangram to make various shapes that I want.	9	Making squares using 5 pieces	Making various squares, such as rectangles, parallelograms, etc.
4	Making shapes with tangram	Provide two tangram clues to make trees, butterflies, etc.	10	Making shapes using 6 pieces	Use 6 pieces of tangram to make the lighthouse, cat, etc.
5	Cover tangram pieces with other pieces	Cover the medium triangle with 2 small triangles and square with 2 triangles.	11	Making shapes using 7 pieces	Use 7 pieces of tangram to make the bird, bowl, etc.
6	Making shapes using 4 pieces	Use 4 pieces of tangram to make seal, horseman, etc.	12	Making polygons using 7 pieces	Making various polygons such as squares, pentagons, hexagons, etc.

fNIRS Task Design

아동의 변환기하 능력을 측정하기 위해 선행연구들(Kang, 2020; Panorkou & Maloney, 2015; Tian, 2012; Xistouri et al., 2014)을 바탕으로 변환기하의 기본 유형인 이동(translation), 회전(rotation), 반사(reflection) 3가지 유형을 활용하였다. 이동은 원래의 모양은 같으나 상, 하, 좌, 우 다른 위치로 모양을 단지 밀어서 옮기는 것이다. 반사는 원래 모양의 거울 이미지로서, 선대칭과 관련된다. 회전은 원래의 모양을 뒤집지 않고 90도 회전하거나, 다양한 각도로 돌리는 것이다(Fife et al., 2019; Kirby & Boulter, 1999). 변환기하 과제는 사전검사에서 집, 정사각형, 백조 3가지 형태로 구성되었고, 사후검사에서는 집이 10센티 위로 이동되었으며, 정사각형은 45도 회전되었다. 그리고 반사 유형인 백조는 수직선을 기준으로 좌우 대칭된 형태이다. 탱그램 과제는 E-prime (v3.0)을 이용하여 제작되었다.

본 검사가 이루어지기 전 과제에 대한 예비검사를 초등 1학년 5명에게 실시하였으며 이를 통해 과제해결에 소요되는 시간과 정확률을 확인하였다. 그 결과 과제당 해결소요시간의 편차가 큰 것으로 나타나 과제 제시 시간을 5분으로 제한하였다. 과제는 초등 수학 전문가 1인과 초등 교사 2인에게 내용 타당도를 검증받았으며, 과제 제시 순서는 아동의 동기유발을 위해 쉬운 과제부터 제시하라는 전문가의 조언에 따라 예비검사에서 정확률이 높았던 이동 과제를 먼저 제시하고 나머지 두 개는 무작위로 제시하였다.

Experiment Procedures and Data Collect

두뇌 활성 자료를 수집하기 위해 소음이 적은 곳에서 개별로 사전, 사후검사가 진행되었다. fNIRS 측정기는 OBELAB Inc.에서 개발한 NIRSIT을 사용하였으며, 전전두엽 영역이 48개의 채널로 구성되어 있다. 자료의 수집 과정은 먼저, 아동에게 진행 과정, 유의사항 및 과제에 대해 설명하고 아동의 컨디션을 체크하였다. 측정기기의 친숙함을 위해 아동들에게 기기를 직접 만져보게 한 뒤 이마에 측정기기를 부착하였고, 머리 둘레가 작을 경우 머리 뒷부분에 쿠션을 착용하여 기기가 밀착될 수 있도록 조절하였다. 이후 48개 채널의 신호 대 잡음비(SNR, Signal to Noise Ratio)를 측정하여 송출되는 신호를 확인하였다. 탱그램 과제는 모니터를 통해 제시되었으며, 모니터와 동일한 크기의 그림이 그려져 있는 그림판을 아동들에게 제시하여 그 위에 탱그램 조각을 놓아 과제를 수행하도록 하였다.

fNIRS에서 일반적으로 많이 사용하는 방법은 블록 설계(Block design)이다. 블록 설계의 원리는 목표로 하는 뇌기능을 포함하는 활성화 과제와 그렇지 않은 대조 과제를 번갈아 제시하는 것이다(Park et al., 2019). 이에 각 과제 제시 전과 후에 아이콘(+)을 제시하였으며, 최대 5분간 각 과제를 수행할 수 있다. 5분 전에 과제 수행이 끝나면 과제에 대한 성공여부를 체크하고, 성공하였을 경우 다음 과제를 준비한다. 실패하면 탱그램 과제 화면을 다시 제공하여 과제를 수행하도록 하였으며 최대 3회까지 시도할 수 있다. 시행횟수 3회가 되기 전에 과제 수행 시간 5분이 지나면 화면은 자동으로 넘어간다. 아동별 과제 수행에 소요된 시간은 평균 25분 내외였으며, 연구자는 이 모든 과정을 진행하고 특이사항이 있을 경우 기록하였으며, 캠코더로 녹화하였다. 관련된 내용은 Fig. 1과 같다.

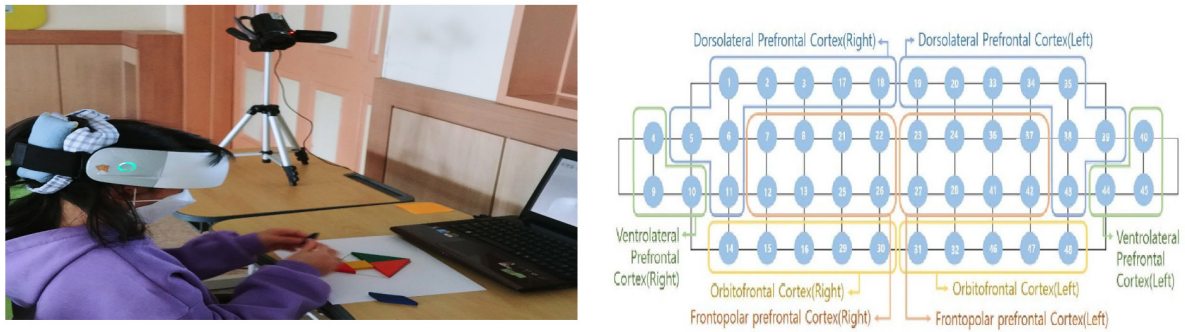


Fig. 1. Scene of experiment execution(Left), 48 channels and Brodmann area(Right)

Data Analysis

탱그램 과제의 정확률 변화를 살펴보기 위해 사전, 사후 과제의 정답에 대해 Wilcoxon 검정을 실시하였다. 그리고 두뇌 활성 변화를 분석하기 위해 Nirsit Analysis Tool을 사용하여 marker 작업을 하고, 노이즈 제거를 위해 Low/High pass filter, Baseline설정을 통해 1차 전처리 과정을 진행하였다. MBLL(Modified Beer-Lambert Law)을 사용하여 혈중산소헤모글로빈(oxy-hemoglobin; HbO) 농도를 계산하였고, MATLAB과 NIRS-SPM을 활용하여 혈류역학함수(HRF)를 적용하여 2차 전처리를 진행하였다. 그리고 일반선형모형(GLM)을 구성하여 사전 검사와 사후 검사에 대한 채널별, 과제별 회귀계수를 산출하였다. 이를 활용하여 두뇌 활성 변화 정도를 분석하기 위해 각 과제에 대한 사전, 사후 검사의 채널별 회귀계수를 이용하여 Wilcoxon 검정을 실시하였다. 그리고 두뇌 기능적 연결성 분석하기 위해서는 단일표본 t검정을 통해 사전과 사후 검사에서 유의미한 채널을 산출하고, 이들 간의 상관도를 보기 위해 Pearson의 상관계수를 산출하였다. 통계적으로 유의미한 채널의 해부학적 위치와 활성의 정도, 기능적 연결성은 BrainNet Viewer(Xia et al., 2013)를 활용하여 시각화하였다.

Results and Discussions

Changes of Accuracy Rate in Solving Tangram Tasks

탱그램 프로그램 참여 전후에 따라 사전과 사후로 집단을 나누어 변환기하 과제 정확률의 변화를 분석하였다. 이를 위해 Wilcoxon 검정을 실시하였으며 관련 내용은 Fig. 2, Table 2와 같다.

프로그램 참여 전후에 따른 변환기하 과제 정답률의 차이는 집과 정사각형에서만 유의미하게 나타났다. 이를 보다 자세히 분석하면, 이동 과제인 집 형태의 정답률은 사전검사에서 약 57%, 사후검사에서 약 86%로 과제 중 정답률이 가장 높았으며 증가율에서도 유의미한 차이가 있는 것으로 나타났다. Xistouri et al. (2014)에 따르면, 4, 5, 6학년 학생들도 이해하기 가장 쉬운 변환이 이동이었으며, 반사와 회전은 어렵게 인식하는 것으로 나타났다. 이동 과제는 모양이 변화되는 것이 아니라 위, 아래, 좌, 우로 ‘밀기’만 하므로 형태의 변화가 없다. 사후 검사에서도 사전 검사와 동일한 형태로 위치가 위로 이동되지만 하여 아동들이 좀 더 쉽게 과제를 해결한 것으로 해석된다. 특히 집 형태는 굴뚝 부분이 정사각형으로 자연스럽게 나타나 학생들이 7개가 아닌 최종적으로 6개의 조각만을 구성하면 되므로 과제 정답률이 상대적으로 높았던 것으로 해석된다.

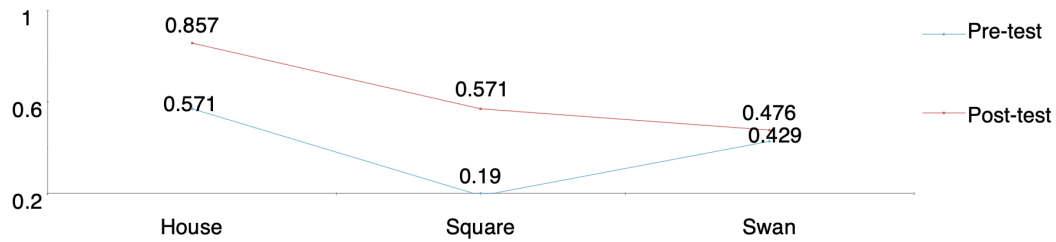


Fig. 2. Changes for the accuracy rate between pre-test and post-test in solving the tangram tasks

Table 2. Wilcoxon test for accuracy rate in solving the tangram tasks

		Pre-test		Post-test		Z	p
		M	SD	M	SD		
Translation	House	.571	.497	.857	.348	2.449	.014
Rotation	Square	.190	.402	.571	.497	2.828	.005
Reflection	Swan	.429	.507	.476	.501	.577	.564

정사각형은 사후검사에서는 45도 회전한 마름모 형태이다. 사전검사에서는 정답률이 약 19%로 가장 낮게 나타났으나 사후검사에서는 약 57%로 가장 큰 폭의 증가율을 보여 유의미한 차이가 있는 것으로 나타났다. 정사각형이 사전검사에서 정답률이 가장 낮은 이유는 변의 개수가 4개로 가장 적었으며 이는 문제해결의 단서가 될 수 있는 부분이 상대적으로 적었기 때문으로 추측된다. 그러나 프로그램 참여를 통해 사후검사에서는 정답률이 약 57%까지 상승하였다. 이는 정확률이 낮은 과제일수록 프로그램 참여 후에 긍정적 효과가 크다는 연구결과(Saleem & Aziz, 2017)와 유사한 맥락에서 해석이 가능하다. 이처럼 프로그램에 참여하는 동안 아동들은 직접 탱그램을 조작하고 구체적으로 경험하였으며, 이것이 과제해결에 긍정적으로 작용한 것으로 보인다. 이는 변환기하와 관련된 초등학교의 수학 능력이 교육 프로그램을 통해 향상될 수 있음을 의미한다.

Brain Activation for Each Task by Tangram Program

변환기하 과제해결에서 탱그램 프로그램 사전과 사후에서 나타난 fNIRS에 의한 두뇌 활성화 영역의 변화를 분석하였다. 이를 위해 각 과제의 사전 HbO₂와 사후 HbO₂에 대한 채널별 회귀계수를 산출하였으며, 그 변화를 Wilcoxon 검정을 활용하여 분석하였다. 관련 내용은 Fig. 3, Table 3과 같다.

변환기하 과제해결에서 프로그램 사전, 사후 두뇌 활성화 영역의 차이를 분석한 결과 3개의 변환기하 과제 모두에서 배외측 전전두피질(Dorsolateral Prefrontal Cortex, DLPFC)이 활성화되었다. 이동 과제인 집에서는 DLPFC의 채널 5(R), 19(L)만 활성화 되었으며, 회전 과제인 정사각형에서는 DLPFC의 채널 1(R), 2(R), 반사 과제인 백조에서는 DLPFC의 채널 11(R)에서 유의한 수준의 활성화가 나타났다. 먼저, 이동 과제인 집에서는 DLPFC에서만 유의한 차이가 있었다. 일반적으로 과제의 난이도가 증가할수록 활성화도 같이 증가하나, 이동 과제는 가장 쉽게 인식된 변환과제이므로 문제해결에 반드시 필요한 두뇌의 정보처리 기능을 조절하는 영역인 DLPFC만 활성화 된 것으로 보인다. DLPFC는 높은 수준의 실행 처리 과정인 계획, 전략적 처리, 주의집중, 외부에서 생성된 정보의 모니터링 및 조작에 관여한다(Toepper et al., 2010). 또한 DLPFC는 기저핵과

연합되어 불확실한 상황에서 경쟁적 대안에 대한 선택 과제를 수행할 때 활성화 되는 핵심 영역이다(Jin et al, 2009). 아동들은 3개의 과제를 해결해야 하는 불확실한 상황에서 주의집중 및 전략적 수행을 통해 대안을 선택하고 조작하면서 과제해결에 도움을 주는 DLPFC가 모든 과제에서 활성화 된 것으로 보인다. 이는 5-7세 아동의 탱그램 과제해결에서 단서 유무에 관계없이 DLPFC가 유의미하게 활성화 되었다는 연구결과(Kang, 2020)와 유사하다. 특히 DLPFC의 경우 우반구에서 많은 활성화가 나타났다. Murphy et al. (1998)은 시각적 작업기억 과제 수행 시에는 우측, 언어적 작업기억 과제 수행에서는 좌측 편측화가 나타난다고 하였다. 탱그램 과제는 공간적이고, 비언어적인 과제에 가까우므로 좌측보다는 우측 DLPFC에 더 의존하여 많은 활성화가 나타난 것으로 보인다.

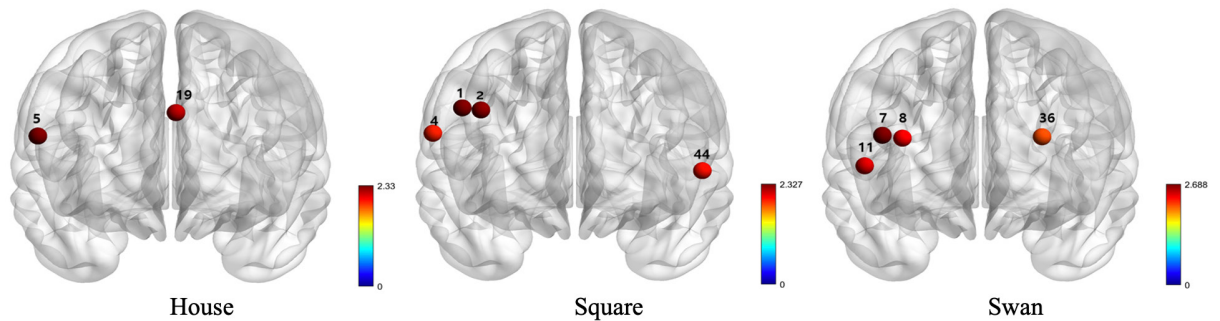


Fig. 3. Brain activation of channels for the difference between pre and post-test in solving the tangram tasks

Table 3. Wilcoxon test for difference in brain activation after program application

Task	Region	BA	Channel	Hemisphere	Z	p
House	DLPFC	46	5	R	2.330	.020
		10	19	L	2.165	.030
Square	DLPFC	46	1	R	2.327	.020
		9	2	R	2.296	.022
	VLPFC	45	4	R	1.955	.050
		46	44	L	2.012	.044
Swan	DLPFC	10	11	R	2.427	.015
		10	7	R	2.688	.007
	FPPFC	10	8	R	2.352	.019
		10	36	L	2.128	.033

(BA: Brodmann Area, DLPFC: Dorsolateral Prefrontal Cortex, VLPFC: Ventrolateral Prefrontal Cortex, FPPFC: Frontopolar Prefrontal Cortex, $p < 0.05$)

회전 과제인 정사각형에서는 DLPFC의 활성화와 함께 복외측 전전두피질(Ventral Lateral Prefrontal Cortex, VLPFC)의 채널 4(R), 44(L)가 유의미하게 활성화 되었다. 회전은 공간 내 한 위치에서 다른 위치로 움직이는 것 대신에 축을 중심으로 움직이는 것을 의미하며, 한 점이 고정되고 다른 모든 점들이 그 주위로 둘러진 것이다. 회전 각도가 크면 클수록 두 물체가 동일한 물체인지 파악하는데 더 많은 시간이 소요되며, 때로는 모

양이 회전하였을 때 아동들은 당황하기도 한다. VLPFC는 새로운 정보에 대해 판단하는 시각적 기억 비교, 작업 기억 내용의 유지 또는 리허설 등에 관여하고, 시각정보의 의미론적 처리, 의사결정을 포함하는 인지적 판단 기능에도 관여한다(Wanger et al., 2001). 아동들이 회전 과제에서만 VLPFC가 유의미하게 활성화 된 것은 사전 과제와의 시각적 기억 비교를 통해 사후 과제를 새로운 과제로 판단하는 과정에서 이 영역이 더욱 활성화된 것으로 보인다.

반사 과제인 백조에서는 DLPFC의 활성화와 함께 전두극 전전두피질(Frontopolar Prefrontal Cortex, FPPFC)의 채널 7(R), 8(R), 36(L)이 좌우반구 모두에서 유의미하게 활성화 되었다. 반사 과제는 선대칭과 관련된 개념으로 대칭축에 거울을 놓을 경우 대칭 모양 각 변의 이미지가 다른 변에 대응되어 도형의 기하학적 특징을 설명할 때 도움이 된다. 반사 과제에서 활성화된 FPPFC는 BA 10으로 다른 하위 인지 또는 운동 프로세스에서 진행 중인 과정을 감독하거나 통합하는 고차적 제어기능과 관련이 있다(Gilbert et al., 2006). 또한 FPPFC는 하위 목표를 생성하고 유지하며, 동시에 진행 중인 두 개의 작업을 조정해야 할 때 활성화된다(Braver & Bongiolatti, 2002). 아동들은 과제를 해결하기 위해 목표와 관련된 도형에 대한 정보를 통합하고 모니터링하며 다양한 방법으로 조각들을 놓아보면서 전체 이미지와 부분들을 동시에 고려하여야 하므로 FPPFC가 더욱 활성화 된 것으로 해석된다.

Functional Connectivity of the Brain Brain Functional Connectivity

변환기하 과제해결 과정에서 나타난 탠그램 프로그램 사전, 사후 두뇌 활성 채널들간의 기능적 연결성을 확인하기 위해 상관계수를 산출하였으며, 분석결과는 Fig. 4와 같다.

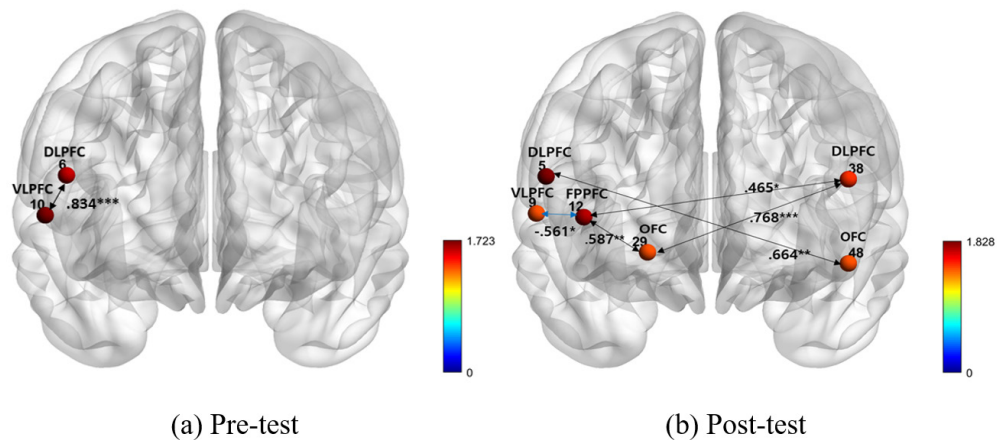


Fig. 4. Functional connectivity of brain to the tangram tasks in pre-test and post-test

먼저, 사전검사에서 나타난 아동들의 두뇌 활성 채널의 기능적 연결성을 살펴보면, 우반구 DLPFC의 채널 6(R)과 VLPFC의 채널 10(R)에서만 .834의 유의미한 연결성이 나타났다. DLPFC는 대상의 위치를 기억하는 공간 작업 과제 수행 및 공간정보 업데이트와 관련이 있다(MaLaughlin et al., 2009). 그리고 VLPFC는 작업기억부터 장기기억으로 정보를 부호화하고 유지하는데 관여하며, 우측의 활성화는 비언어적 내용을 유지할

때 활성화 된다(Kelley et al, 1998). 즉 DLPFC는 공간 위치에 관한 정보를, VLPFC는 대상에 관한 정보를 유지하는데 관여한다. 따라서 아동은 변환기하 과제를 수행하면서 완성해야 할 모양의 공간적 정보와 위치를 모니터링하고 조작함과 동시에 그 대상과 관련된 정보만을 선택하고 유지 활성화하면서 두 영역간의 기능적 연결성이 유의미하게 나타난 것으로 추론된다. 이는 시공간 정보의 부호화는 DLPFC, VLPFC 모두 활성화시킨다는 연구결과(Toepper et al., 2010)와 유사하다. 이처럼 DLPFC와 VLPFC는 서로 다른 역할을 하는 듯하나 분리되기보다는 서로가 유기적으로 연결되어 과제해결에 같이 참여한다고 볼 수 있다. 또한 사전 검사에서는 우반구에서만 기능적 연결성이 나타났는데, 이는 일화적 기억 회상 시 우반구의 높은 활성화를 보고한 연구결과(Habib et al., 2003)에서처럼 학습과 부호화에 의한 것이라기 보다는 유사한 경험과 기억을 회상하면서 과제를 해결한 것으로 추측된다.

반면, 사후검사에서는 두뇌 활성의 기능적 연결성이 좌우반구 골고루 나타났으며, 특히 DLPFC와 OFC는 좌우반구에서 채널 5(R)와 채널 48(L)에서 .664, 채널 38(L)과 채널 29(R)에서 .768로 유의미하게 기능적으로 연결되어 있었다. 이를 통해 프로그램 참여가 과제해결에서의 정확률 증가 뿐 아니라 좌우반구간의 기능적 연결성도 증가시켰음을 알 수 있다. 이는 고등학생을 대상으로 한 거울과제의 동화, 갈등 과정에서 DLPFC와 OFC가 같이 활성화된 연구결과(Kwon et al., 2020), DLPFC의 영역들은 인지과 정서의 통합에 민감하다는 연구결과(Gray et al., 2002)와 유사한 맥락에서 해석이 가능하다. 이처럼 좌우반구 간 DLPFC와 OFC의 기능적 연결성을 통해 아동들은 사후과제를 해결하기 위해 다양한 감정과 정서들을 상황에 맞게 조절하면서, 시공간적 정보를 활성화하여 연결성이 증가한 것으로 추론된다. 이는 정서와 인지적 과정의 수행이 서로 연결되어 상호 영향을 주고받고 있음을 의미한다.

그리고 사후검사에서 유의미한 기능적 연결성을 가장 많이 보인 채널은 12(R)로 FPPFC영역이며, DLPFC인 채널 38(L)과 .465, OFC인 채널 29(R)와 .587의 유의미한 정적 연결성을 보였다. 이는 FPPFC의 경우 미래의 행동을 계획하고 새로운 대안을 모색하는 탐색적 의사결정에서 판단과 추론을 담당한다(Koechlin & Hyafil, 2007). 그리고 DLPFC는 목표 지향적 행동의 표상과 전략적 처리, 공간 정보를 업데이트 하고 공간 작업 기억에 관여하는데 FPPFC가 이를 조정하고 통합하는 역할을 한다(Fletcher & Henson, 2001). 이는 더 높은 정답률을 보인 사후검사에서만 이와 같은 기능적 연결성이 나타났으며 이는 능력이 뛰어난 아동일수록 DLPFC와 함께 FPPFC의 활성화가 많이 나타난다는 연구결과(Kang, 2020)와 유사하다. 변환기하 과제를 해결하기 위해 아동들은 새로운 대안을 모색하고 찾아가는 과정에서 도형을 옮기고 뒤집고 돌리면서 공간을 시각화하고 의사결정 하는데 FPPFC는 이러한 과정을 조정, 감독 및 통합하면서 영역간의 기능적 연결성이 더욱 분명하게 나타난 것으로 보인다.

또한 동기, 정서, 사회적 행동과 관련된 영역인 OFC는 보상과 처벌의 연관성을 평가하며, 감정적 부분이 정신적 사고과정과 관련되어 나타난 경우에 더욱 활성화된다(McDannald et al., 2012). Ballesta et al. (2020)의 연구에서처럼 아동들은 자신의 선택에 대해 주관적 가치를 부여하면서 동기화하고 이것이 변환기하 과제해결로 이어진다. 즉 아동들은 탱그램 조각들이 제시된 모양에 잘 맞는지 틀리는지에 따라 다양한 감정들을 경험하게 되고 동시에 이러한 감정들은 다시 과제 해결과 관련되면서 사고와 감정이 서로 유기적으로 연합된 것으로 보인다.

한편, 채널 12(R)는 채널 9(R)인 VLPFC와 기능적 연결성이 -.561로 유의한 수준의 부적상관을 보였다. 채널 9는 BA 45로 우반구 브로카 영역에 해당된다. 좌반구가 주로 언어 과정에서 중요한 역할을 하나, 우반구가 언어적 처리에 전혀 관여하지 않는 것은 아니다. 우반구는 단어의 일반화된 의미보다는 특정 의미에 근거하여 단어를 처리하므로 정보를 재분석하여 광범위한 의미 연합을 가능하게 하며, 언어 과제를 수행하는 동안 정보처리 과정에서 인지과부하와 밀접한 관련이 있다(Federmeier, 2007). 즉 아동들은 변환기하 과제를 해결하는 동안 인지과부하를 피하기 위해 과제해결과 무관한 언어 관련 정보들이 활성화 되지 않도록 억제하고 있음을 알 수 있다. 이는 과제해결이라는 목표 달성을 위해 두 개의 작업을 활성화하려는 FPPFC와 언어 정보의 활성화를 억제하려는 브로카 영역의 VLPFC가 서로 상충하면서 나타난 결과로 보인다. 이는 아동들이 변환기하 과제를 해결하는 과정에서 내적으로는 언어를 억제하고 공간 정보에만 주의를 집중하면서 인지적 정보처리 과정의 효율성을 극대화하려고 한 것으로 해석된다.

Conclusions

본 연구는 탱그램을 활용한 변환기하 프로그램에서 아동의 두뇌 활성 및 기능적 연결성의 변화를 fNIRS로 측정하여 분석하였다. 결론은 다음과 같다.

첫째, 변환기하 과제 정답률의 사전, 사후 차이를 분석한 결과 사후검사에서는 이동 과제인 집과 회전 과제인 정사각형에서 유의미한 정답률의 변화가 나타났다. 사전검사에서는 정사각형의 정답률이 가장 낮았으나 교육 프로그램을 통해 이동 과제 다음으로 높은 정답률을 보였다. 그리고 반사 과제인 백조에서는 사후가 사전보다 정답률이 상승하였으나 정답률의 차이에서 유의미한 변화가 없었다. 백조의 경우 다른 과제에 비해 변의 수가 많았으며, Tian (2012)은 변의 수가 많을수록 과제 해결을 더욱 어렵게 한다고 하였다. 또한 Schults와 Austin (1993)은 이동이 가장 쉬운 변환이고, 변환의 방향은 회전 또는 반사의 상대적 난이도에 영향을 준다고 하면서 회전과 반사를 어려운 이유에 대해 언급하였다. 본 연구 또한 이동 과제를 가장 쉽게 해결하였으며, 회전과 반사 과제를 상대적으로 어려워하였다. 그러나 프로그램을 통해 과제 모두 정답률이 상승하였으며 이는 교육적 개입을 통해 아동들의 변환기하 능력이 향상될 수 있음을 의미한다. 그 중에서도 정사각형인 회전 과제에서의 정답률이 사후검사에서 가장 큰 폭의 증가율을 보였다. 이는 어려운 과제일수록 다양한 교육적 경험을 제공하고, 구체적 조작이나 학습 도구를 사용하는 것이 아동들의 변환기하 학습을 지원하고 의미화 하는 중요한 하나의 방안이 될 수 있음을 시사한다.

둘째, 탱그램 프로그램 적용 후 fNIRS에 의한 두뇌 활성 영역의 변화를 분석한 결과 3개 과제 모두에서 DLPFC가 활성화가 유의미하게 증가하였고, 회전 과제인 정사각형에서는 VLPFC가, 반사 과제인 백조에서는 FPPFC가 유의미하게 증가하였다. 이는 프로그램을 통해 2차원 도형의 수학적 이름과 속성을 통상적으로 암기하는 대신, 모양들을 분류, 비교하고 기하학적 맥락내에서 과제들을 해결하면서 나타난 것으로 보인다. 특히 모든 과제에서 DLPFC의 활성화가 뚜렷하게 증가한 것은 프로그램 참여로 목표 지향적 행동의 표상, 작업기억, 주의집중이 더욱 활성화면서 DLPFC가 과제 유형과 관계없이 변환기하 과제해결에 많이 관여하고 있음을 알 수 있다. 그리고 활성 영역의 변화에서 OFC만 유의미한 차이가 나타나지 않았다. 이는 욕구, 동기 와 관련된 정보를 처리하고 다양한 감정적, 정서적 행동과 정보들을 상황에 맞게 조절하는 OFC가(Stalnaker

et al., 2015) 사전, 사후 과제 수행 모두에서 그 역할을 골고루 수행하고 있으므로 두뇌 활성화에서 차이가 나타나지 않은 것으로 보인다.

셋째, 사전과 사후검사에서 두뇌의 기능적 연결성을 분석한 결과 사전검사에서는 두뇌 활성이 우반구의 DLPFC와 VLPFC에서만 유의한 수준에서 나타났으나, 사후검사에서는 DLPFC와 OFC가 좌우반구에서 골고루 나타났으며 FPPFC에서 기능적 연결성이 가장 많이 나타났다. 프로그램 적용으로 인해 DLPFC와 OFC의 좌우반구 간 기능적 연결성의 증가는 과제 수행이라는 인지적 측면에 정서라는 부분이 상호 연결되면서 과제수행에 상호 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 또한 FPPFC는 의사결정에서 판단과 추론에 관여하는데, 탭그림 프로그램을 통해 아동들은 합동, 대칭, 유사성과 같은 추상적 개념을 탐구하고 이를 구체적 사물로 연결하면서 보다 명확한 변환기하 개념이 형성되면서 나타난 것으로 보인다. 이처럼 좌우반구 모두에서 기능적 연결성이 나타난 것은 과제해결을 위해 두뇌의 더 많은 부분이 활용되고 있으며, 연결성의 강도를 늘려 인지적 정보처리 능력을 증가시키고 있음을 알 수 있다.

이상의 결론을 바탕으로 한 교육적 함의는 다음과 같다. 첫째, 신경 영상학적 연구를 통해 교육 프로그램이나 교수 활동의 효과를 객관적이고 과학적인 증거로 제시 가능함을 시사한다. 즉, 특정 프로그램 사전과 사후의 두뇌 활성 패턴을 비교하여 그 효과를 직접적으로 확인할 수 있으므로 교육 프로그램이나 교수 활동의 평가에 있어 새로운 측정 방법과 시각적 결과를 제공할 수 있다.

둘째, fNIRS를 활용할 경우 아동의 사고과정과 능력을 보다 정확하게 측정하여 진단하고 평가할 수 있다. 이는 아동들이 새로운 수학적 개념과 원리를 배울 때 경험하게 되는 어려움을 알 수 있게 하여 교사의 수업 준비에 도움을 줄 수 있다. 따라서 효율적 학습을 가능하게 할 뿐 아니라 아동 평가의 또 다른 방법이 될 수 있음을 시사한다.

셋째, 반사 및 회전 과제는 수직, 수평, 대각선 등과 같은 변환의 ‘방향’에 영향을 받아 더욱 어렵게 인식된다. 그러므로 변환기하의 어려움을 유발하는 요인이 무엇인지 아동의 인지적 측면, 교육자료, 수학교육 시스템 측면 등 다양한 요인을 구체화하여 아동의 더 나은 변환기하적 사고와 능력을 도모해야 함을 시사한다. 나아가 ‘방향’과 같은 어려움을 유발하는 요인을 고려한 다양한 유형의 변환기하 과제를 개발하고, 이를 난이도에 따라 단계별로 체계화하여 아동의 인지적 능력에 맞는 내용들을 제공할 필요가 있다.

Acknowledgement

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (NRF-2019R1I1A1A01059200).

References

- Artemenko, C., Soltanlou, M., Ehli, A. C., Nuerk, H. C., & Dresler, T. (2018). The neural correlates of mental arithmetic in adolescents: A longitudinal fNIRS study. *Behavioral and Brain Functions*, 14, 1-13.
- Braver T. S., & Bongiolatti S. R. (2002). The role of frontopolar cortex in subgoal processing during working memory. *Neuroimage*. 15, 523–536.
- Clements, D. H., Wilson, D. C., & Satama, J. (2004). Young children's composition of geometric figures: A learning trajectory. *Mathematics Thinking and Learning*, 6, 163-184.
- Federmeier, K. D. (2007). Thinking ahead: The role and roots of prediction in language comprehension. *Psychophysiology*, 44, 491–505.
- Fife, J. H., James, K., & Bauer. M. (2019). A Learning Progression for Geometric Transformations. ETS Research Report Series, ETS RR-19-01, 1-14
- Fletcher. C., & Heson. A. R (2001). Frontal lobes and human memory insights from functional neuroimaging. *Brain*, 12, 849–881.
- Gilbert, S. J., Spengler, S., Simons, J. S., Steele, J. D., Lawrie, S. M., Frith, C. D., ... Burgess, P. W. (2006). Functional specialization within rostral prefrontal cortex (area 10): A meta-analysis. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 18, 932-948.
- Gray, J. R., Braver, T. S., & Raichle, M. E. (2002). Integration of cognition and emotion in the lateral prefrontal cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99, 4115–4120.
- Habib, R., Nyberg, L., & Tulving, E. (2003). Hemispheric asymmetries of memory: the Hera model revisited. *Trends in Cognitive Sciences*, 7, 241-245.
- Hollebrands, K. F. (2003). High school students' understandings of geometric transformations in the context of a technological environment. *The Journal of Mathematical Behavior*, 22, 55–72.
- Kang, M. J. (2020). Brain activation with fnirs in children's transformational geometry problem solving: Using tangram. *Brain, Digital, & Learning*, 10, 485-497.
- Kelley, W. M., Miezin, F. M., McDermott, K. B., Buckner, R. L., Raichle, M. E., Cohen, N. J., ... Petersen, S. E. (1998). Hemispheric specialization in human dorsal frontal cortex and medial temporal lobe for verbal and nonverbal memory encoding. *Neuron*, 20, 927–936.
- Khairiree. K. (2015). Creative Thinking in Mathematics with Tangrams and The Geometer's Sketchpad. *Proceedings of the 20th Asian Technology Conference in Mathematics*. 153-161.
- Kirby, J. R. & Boulter, D. R. (1999). Spatial ability and transformation geometry. *European Journal of Psychology of Education*, 14, 283-294.
- 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 on self-regulation process taking mirror task. *Brain, Digital, & Learning*, 10, 365-376.
- Koechlin, E., & Hyafil, A. (2007). Anterior prefrontal function and the limits of human decision-making. *Science*, 318, 594-598.
- McDannald, A. M., Takahashi, K. Y., Lopatina, N., Pietras, W. B., Jones, L. J., & Schoenbaum, G. (2012). Model-based learning and the contribution of the orbitofrontal cortex to the model-free world. *European Journal of Neuroscience*, 35, 991-996
- 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 neuro anatomical dissociation of verbal, visual and spatial working memory. *Schizophrenia Research*, 29, 105-106.
- Olive J., Makar K., Hoyos V., Kor L. K., Kosheleva O. & Straber R. (2010) Mathematical knowledge and practices resulting from access to digital technologies. In Hoyles C. & Lagrange J. B. (eds.), *Mathematics Education and Technology: Rethinking the Terrain*(pp. 133–177). New York, NY: Springer.
- Panorkou, N., & Maloney, A. (2015). Elementary Students' Construction of geometric transformation reasoning in a dynamic animation environment. *Constructivist Foundations*, 10, 338–347.
- Park, S. H., Park, J. S., Hwang, N. R., Kwon, S. H., & Kwon, Y. J. (2019). An exploration of the brain study through a practical measurement and application using f-NIRS in educational research study. *Brain, Digital, & Learning*, 9, 213-231.
- Park, S. H., Park, J. S., Hwang, N. R., Kwon, S. H., & Kwon, Y. J. (2020). The effect of realistic contents(ar, vr) on the brains of middle school students - Using f-NIRS study. *Brain, Digital, & Learning*, 10, 157-166.
- Renavitasari, I. R. D., Supianto, A. A., & Tolle, H. (2018). Log data analysis of player behavior in tangram puzzle learning game. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, 12, 123-129.
- Saleem, T., & Aziz, S. (2017). Effect of using tangram puzzles on the achievement of students in geometry at primary level. *International Journal of Innovation on Teaching and Learning*, 3, 1-19.
- Scholkmann, F., Kleiser, S., Metz, A. J., Zimmermann, R., Pavia, J. M., & Wolf, U. (2014). A review on continuous wave functional near-infrared spectroscopy and imaging instrumentation and methodology. *Neuroimage*, 85, 6–27.
- Soltanlou, M., Artemenko, C., Dresler, T., Haeussinger, F. B., Fallgatter, A. J., Ehlis, A. C., & Nuerk, H. C. (2017). Increased arithmetic complexity is associated with domain-general but not domain-specific magnitude processing in children: A simultaneous fNIRS-EEG study. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*. 17, 724–736.
- Soltanlou, M., Sitnikova, M. A., Nuerk, H.-C., & Dresler, T. (2018). Applications of functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) in studying cognitive development: The case of mathematics and language. *Frontiers in Psychology*, 9, 277.
- Schultz K. A. & Austin J. D. (1983) Directional effects in transformation tasks. *Journal for Research in Mathematics Education*, 14, 95–101.
- Stalnaker, T., Cooch, N., & Schoenbaum, G. (2015). What the orbitofrontal cortex does not do. *Nature Neuroscience*, 18, 620-627.
- Tchoshanov, M., (2011). Building students' mathematical proficiency: Connecting mathematical ideas using the tangram. *Learning and Teaching Mathematics*, 10, 16-23
- Tian, X. (2012). The art and mathematics of tangrams. *Bridges 2012: Mathematics, Music, Art, Architecture, Culture*, 553-556.
- 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.
- Van Hiele, P. M. (1986). *Structure and Insight*. New York, NY: Academic Press.
- Wagner, A. D., Marj, A., Bjork, R. A., & Schacter, D. L. (2001). Prefrontal contributions to executive control: fMRI evidence for functional distinctions within lateral prefrontal cortex. *Neuroimage*, 14, 1337–1347.
- Xia, M., Wang, J., & He, Y. (2013) BrainNet viewer: A network visualization tool for human brain connectomics. *PLoS ONE*, 8, e68910.

- Xistouri, X., & Pitta-Pantazi, D. (2011). Elementary Students' Transformational Geometry Abilities and Cognitive Style. Proceedings from CERME7: `The Seventh Congress of the European Society for Research in Mathematics Education(pp. 1-10). February'11. Rzeszów, Poland.
- Xistouri, X., Pitta-Pantazi, D., & Gagatsis, A. (2014). Primary school students' structure and levels of abilities in transformational geometry. *Revista Latinoamericana de Investigacion en Matematica Educativa*, 17, 149-164.
- Yoo, J. G., & Park, M. H, (2019). Tangram task modification for exploring in elementary mathematics. *Education of Primary School Mathematics*, 22, 95-111.

Author Information

Kang, Min-Jung: Korea National University of Education, Lecturer, First Author