

Brain Activation with fNIRS in Children's Transformational Geometry Problem Solving: using Tangram

Min-Jung Kang*

Korea National University of Education

아동의 변환기하 문제해결에서 fNIRS에 의한 두뇌 활성화 연구: Tangram 활용하여

강민정*

한국교원대학교

<ABSTRACT>

This study analyzed the brain activity by fNIRS in children's transformational geometric problem solving. Tangram task was used, and the participants were 31 preschool children, 29 first graders, and 35 second graders. The research results are as follows. First, the percentage of correct answers to the tangram task was highest in the second grader, and among the tasks, the percentage of correct answers was the lowest in the fish task without clue. Second, in the case of tasks with clues, there were many significant activation channels in OFC for preschool children and FPPFC for first graders. And for tasks without clue, for the first time in the second grade of elementary school, a significant activation channel appeared in VLPFC. DLPFC was significantly activated at all ages with or without clues. Third, in the tangram task performance, the brain activity area was analyzed by dividing it into three groups by ability. As a result, the correct group showed relatively significant activation in FPPFC. The group who got all of the tasks correctly and the group whose only one was wrong were significantly activated in OFC and BA 47 in common. The left hemisphere lateralization was found in the group with two or more wrong tasks. The above research results will provide basic data for research on children's brain development by linking children's cognitive development with brain development. Furthermore, it will be of great helpful in enhancing the understanding of children's cognitive development trajectories.

Key words : Transformational geometric, tangram, fNIRS, children's problem solving, brain activation

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)

* 1st Author : Min-Jung Kang, ice9562kr@naver.com

Received November 30, 2020; Reviewed December 1, 2020 Corrected December 11, 2020; Accepted December 11, 2020

© 2020. Institute of Brain based Education, Korea National University of Education

I. Introduction

공간적 사고(spatial thinking)는 수학의 중요한 예측 변수로 기하학적 세계를 해석하고 이해하는데 필요하다(Gilligan et al., 2018). 연령이 어린 아동은 시각적 공간을 구축하나, 연령이 증가하면서 표상적 공간이라고 부르는 공간에 대한 사고를 축적한다. 공간적 사고는 잘 구조화된 시각적 이미지를 생성, 유지, 검색 및 변환하는 능력으로 기하학적 형태를 규명하는 것과 관련이 있으며 학문적 성공 특히 수학 및 과학 분야에서 중요하다(Newcombe, 2017; Verdine et al., 2017).

기하는 ‘Geo’와 ‘Metry’ 두 단어의 조합으로 점, 선, 각도, 곡면, 물체의 속성, 측정 및 관계를 다루는 수학의 한 분야이다(Webster, 2017). 기하는 공간과 형태를 연구하는 학문으로 공간에 있는 도형이나 입체의 치수, 모양, 상대적 위치 등을 연구하면서 수학적 사고의 한 측면을 구성하고 있다(Woo, 2007). 또한 기하는 일상생활 속 물리 세계를 이해하기 위한 수단을 제공하며 수학 이외의 영역에서도 문제를 표상하고 해결하는 유용한 도구로 사용되고 있다(Clements, 2000). 이처럼 아동이 더 잘 생활하고, 움직이기 위해서는 공간을 배우고 탐색할 수 있어야 하며, 기하학적 사고를 통해 아동은 더 나은 방식으로 현실 세계를 이해할 수 있다.

현실 세계를 2차원과 3차원의 세계로 묘사하고 이해하기 위해 여러 가지 기하 체계가 개발되었으며 위상기하, 유클리드 기하, 좌표기하, 변환기하에 한해서는 아동도 최소한 그 기본 속성에 대해서는 알 필요가 있다(John, Tipps & Kennedy, 2018). 그 중 변환기하는 이동기하라고도 불리며, 공간적 변형전과 후의 비교를 통해 사물의 형태나 위치가 어떻게 바뀔지 예측하는 것이다. 이는 정신적으로 이미지를 조작하고 변형하여 추론하는 능력으로 아동의 시공간 추론 능력 형성에 매우 중요하다(Casey, Kersh & Young, 2004). 변환기하는 2차원 도형이나 3차원 형체를 재배열하거나 조합을 다루는 것으로 도형을 옮기고(slide), 뒤집고(flip), 돌려서(rotation, turn) 이동시키거나 변환시키면 외형상 변화된 듯하

지만, 기본 특성인 길이, 넓이는 변하지 않는다는 개념 이해를 바탕으로 한다(Haylock & Cockburn, 2017).

특히 아동기는 변환기하에 대한 기초 개념을 습득하는 중요한 시기로서(Clements et al., 2004), 아동은 여러 사물들을 기하학적으로 탐색하며 도형에 대한 기초적 개념과 관계를 알아가기 시작한다. 변환기하는 아동이 수식을 사용하지 않고 회전, 합동, 면적과 같은 기본 기하학적 개념을 직관적으로 이해할 수 있도록 도와준다. 또한 물체의 위치와 방향을 파악하고 공간과 도형간의 관계를 이해하기 시작하면서 수학 문제해결을 위한 다양한 접근의 기초를 제공해준다. 그러므로 취학 전 부터 이러한 변환기하를 자주 경험하게 하고 교육할 필요가 있다.

기하학적 사고를 발달시키기 위해서는 다양한 조각이 가능한 재료들을 사용하는 것이 유익하며(Clements, 2000), 아동이 입체적 퍼즐이나 블록, 게임 등을 사용하는 것은 개념 이해에 도움이 될 수 있다. 공간과 모양과의 인과관계는 모양의 이름을 학습하는 것만으로는 가능하지 않다. 오히려 놀이를 통해 다양한 모양과 도형에 노출되는 것이 공간적 사고를 익히고 연습하며 공간적 특성을 토의하는데 도움이 될 수 있다.

이에 아동의 변환기하 능력과 관련된 선행연구들을 살펴보면 Lee & Bang (2007)은 초등 2, 4, 6학년의 합동변환에 대해 분석하였고, Kim, Choi & Ko (2018)는 유아의 변환기하 능력과 공간능력간의 관계를 살펴보았다. 또한 아동의 변환기하 능력을 향상시키기 위해 몇몇 연구들은 탱그램을 제안하고 있다(Clements et al., 2004; Khairiree, 2015; Saleem & Aziz, 2017; Tian, 2012). 탱그램은 기하학 분야에서 수학 개념을 쉽게 이해하도록 하는 흥미로운 방법 중 하나이다. 탱그램은 정사각형 1개, 평행사변형 1개, 삼각형 5개로 구성되어 있으며, 3~6세경에 아동은 탱그램을 사용하여 다양한 모양을 만들면서 변환기하에 대한 기초 개념을 획득하며 6세부터는 안정화된다고(Clements et al., 2004). 또한 초등학교 4학년을 대상으로 한 기하학업성취도 평가에서 탱그램을 활용하여 삼각형의 다양한 유형, 넓이와 둘레 개념 설명에서 실험집단이 넓이와 둘레 계산에서 통제집단 보다 더 높은

학업성취도를 나타내었다(Saleem & Aziz, 2017). Tian(2012)은 탱그램으로 얼마나 많은 다각형을 만들 수 있는지에 대한 연구에서 탱그램이 기하학적 구성 및 기하학에 대한 긍정적 태도를 향상시킨다고 하였다. 또한 학생들은 주어진 모양을 형성하기 위해 탱그램 조각을 옮기고, 회전, 변환하면서 창의적, 논리적 사고력을 개발하고 수학 개념에 대한 이해를 표현하는데 도움을 주었다(Khairiree, 2015). 이처럼 탱그램은 기하학적 도형간의 관계를 찾는 데 유용하며 공간 능력을 향상시키고 아동들의 관찰, 모양 분석 및 논리적 사고를 개발하는데 도움이 된다.

그러나 이러한 연구결과들은 결과론적 측면을 제시하고 있을 뿐 문제해결 과정 중 아동의 인지 변화 과정을 알 수는 없으며, 두뇌의 어느 부분이 어떻게 작용하여 이러한 결과를 도출했는지 알려주는 데에는 한계가 있다. 아동의 인지발달에 대한 더 나은 이해를 위해서는 행동적 데이터 그 이상으로 나아가야 할 필요가 있으며, 최근의 신경영상 기술의 발전은 신경과학적 접근법을 통해 이를 보완할 수 있는 방법을 제안하고 있다.

신경과학적 접근법 중 기능적 근적외분광법(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)은 비교적 최근에 등장한 신경영상 측정 시스템의 하나로 대뇌 피질의 뇌 구조에서 산소화 및 탈산소화된 헤모글로빈의 농도 변화를 측정하기 위해 근적외선을 사용하는 신경영상 기술이다(Park et al., 2019; Scholkmann et al., 2014). 자극신호가 주어진 시점을 전후로 전두엽 영역으로부터 기록되는 뇌 혈류 역학 신호의 특이적인 변화를 측정한다.

사실, 신경영상 기술을 교육적 연구에 적용하는데 어려움이 있었다. 기존 신경영상 시스템의 공통적 단점이 신호에 영향을 미치지 않도록 피험자가 신체의 움직임에 최소화해야 한다는 것이다. 따라서 교육 및 신경과학 연구에서 생태학적 타당성 측면에서 제한점이 있었다. 그러나 fNIRS는 생태학적으로 유효한 매개변수를 제공할 수 있는 몇 가지 특성을 가진다. 첫째, 근적외선을 사용하므로 인체에 안전한 측정 도구이며 둘째, 움직임에 덜 민감하여 피험자의 자연스러운 포지션에서도 기록이 가능하고 상대적으로 높은 시간 해상도를 가진다. 셋째,

비침습적이고 뚜렷이 구별되는 스펙트럼 구조를 가지고 있어 신경과학 연구에서 활용 가능성이 높다(Bunce et al., 2006). 특히 주의집중, 작업 기억, 문제해결 등과 같은 인지적 작업을 효과적으로 모니터링 할 수 있다(Ayaz et al., 2011). 따라서 변환기하 문제 역시 인지적 과제에 해당하므로 fNIRS가 적절한 측정 방법이라 할 수 있다.

fNIRS가 교육분야에 적용되어 연구되기 시작한 것은 최근이다. Park et al. (2020)은 fNIRS를 활용하여 중학생을 대상으로 실감형 콘텐츠 유형인 AR, VR을 사용하여 핀치새의 생김새를 관찰하고 분류하는 과정에서 AR이 VR보다 전두엽 전반에서 더 활발한 두뇌 활성이 나타났음을 보고하였다. 또한 fNIRS를 활용한 신경영상 연구에서 아동들은 더하기와 곱하기에서 전두엽과 두정엽 네트워크에서 활성화를 보였다(Soltanlou et al., 2017). 6학년과 7학년은 빼기 과제에서 덜 노력적인 계산의 경우 전두엽의 활성화가 감소하였으며, 더하기와 곱하기에서는 인출과 자동계산에서는 측두엽의 활성화가 증가하였다(Artemenko et al., 2018). 수학과 관련된 어린 아동을 대상으로 한 fNIRS 연구를 살펴보면, 5.5-6.5개월 영아를 대상으로 숫자 변화에 대한 뇌의 반응을 측정한 연구에서 영아는 비 상징적 숫자를 정신적으로 조작하기 시작하였다(Edwards et al., 2016). 또한 미취학 아동의 경우 우측 뇌고랑의 활성화를 통해 언어와 상징적 수 체계를 습득하기 전에 대략적인 숫자체계에 의존한다는 증거를 제시하였다(Hyde et al., 2010).

fNIRS를 활용한 아동 대상 신경영상 연구들이 아직은 활발하게 이루어지지 않고 있으며, 대부분 숫자 및 연산과 관련된 주제로 수행되었다. 특히 아동의 변환기하 문제와 관련된 fNIRS 활용한 연구는 찾아보기 어렵다. 이에 본 연구에서는 fNIRS를 활용하여 변환기하 문제 해결과정에서 나타나는 행동적 자료인 과제의 정답률을 분석하고, 신경영상 자료로 문제해결 과정 중 탱그램 과제에서 단서 제공 유무에 따른 두뇌 활성과 과제 수행 능력에 따른 두뇌 활성 영역을 분석하고자 한다.

II. Research Method

1. Participants

본 연구는 탱그램 과제 해결에서 나타나는 두뇌 활성화 영역을 분석하기 위해 한국교원대학교 생명윤리위원회(IRB)의 승인을 받고 진행하였다(KNUE-2019-H-00263-1). 연구대상은 A시에 소재한 유아교육기관의 취학 전 연령인 만 5세 4학급과 초등학교 1학년, 2학년 각 4학급을 단순무선 표집으로 선정하였다. 취학 전 아동의 평균 연령은 5.92(SD=1.28)세, 초등 1학년과 2학년의 평균 연령은 각각 6.89(SD=.87)세, 7.76(SD=.59)세였다. 연구를 진행하기 전 해당 교육기관의 담임교사와 학부모에게 연구 목적, 방법 및 내용, 개인정보 보호에 대해 설명하였으며 이후 동의서를 서면으로 전달하였다. 학부모로부터 동의를 구한 아동을 연구대상으로 선정하였다.

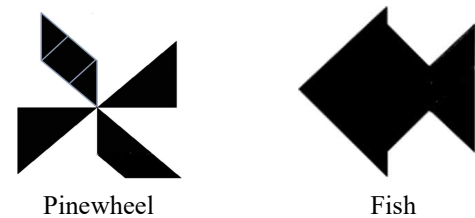
탱그램 과제를 수행하기 위해서는 정상적인 의사소통이 가능한 아동과 두뇌 활성화 측정을 위하여 오른손잡이만을 선발하였으며 신경학적 수술 및 처치가 없는 아동을 선발하였다. 최종 연구대상은 예비 실험에 참석한 각 연령별 아동 6명을 제외한 취학 전 아동 31명, 초등 1학년 29명, 초등 2학년 35명이다.

2. fNIRS Task Design

아동의 변환기하 능력을 측정하기 위해 선행연구들(Clements, Wilson & Sarama, 2004; Khairiree, 2015; Saleem & Aziz, 2017; Tian, 2012)을 바탕으로 도형을 옮기고 뒤집고 돌리기가 모두 가능한 탱그램 예비 과제 5개를 개발하였다.

본 실험에 앞서 예비 실험을 실시하였으며, 이는 과제 해결 시간, 측정 도구의 거부감 및 과제의 난이도를 확인하기 위해서이다. 1차 예비 실험 결과 탱그램 과제 해결 시간의 편차가 크게 나타나 과제당 해결 시간을 최대 5분으로 제한하였으며, 동일 연령 내에서도 정답의 편차가 큰 과제가 1개는 전문가와 논의 후 제외하였다. 2차 예비 실험에서는 컴퓨터 화면으로 제시된 그림에서 아동이 선의 길이와 각도의 차이를 명확히 지각하는데 어려움이

있었다. 이에 컴퓨터 화면과 동일한 모양과 크기의 그림판을 아동에게 제공해 주어 그 그림판 위에 탱그램 조각들을 놓고 완성하도록 하였다. 또한 측정 도구 착용에서 머리 둘레가 작은 아동의 경우 측정에 어려움이 있어 쿠션을 넣고 기기를 착용하였다.



[Figure 1] Examples of tangram task

1, 2차 예비 실험 결과 최종 탱그램 과제는 바람개비, 배, 물고기, 로켓 총 4개가 선정되었다. 과제의 유형을 달리하기 위해 단서가 있는 것과 없는 것으로 구분하였다. 단서가 있는 과제는 바람개비와 배이며 단서로 도형 3개에 대한 테두리 선을 제공하였다. 단서가 없는 과제는 물고기와 로켓이다. 본 과제는 수학교육 전문가 2인과 유치원 교사 1인, 초등학교 교사 2에게 내용타당도를 검증 받았으며, 과제 제시 순서는 전문가의 조언에 따라 단서가 있는 과제를 먼저 제시하였다.

3. Data Collect

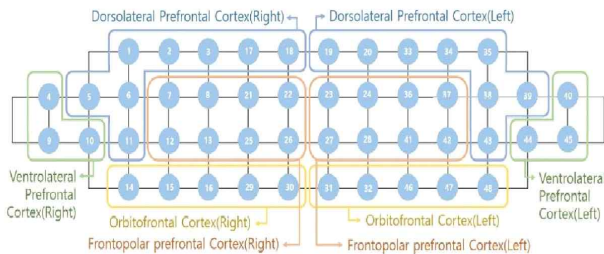
아동의 변환기하 능력을 측정하기 탱그램 과제를 활용하여 두뇌 활성을 측정하였다.



[Figure 2] fNIRS device and sensor

이를 위해 교육기관의 소음이 적은 곳에서 일대일 면담 방식으로 진행되었다. 먼저 아동에게 진행 과정을 설명하고 이마에 측정기기를 부착한 뒤 수신기를 통해 전송되는 신호를 확인하였다. 탱그램

과제는 컴퓨터 화면을 통해 제시되었으며 과제 제시와 동시에 아동에게 그림판과 탱그램 조각을 제공하였다.



[Figure 3] 48 Channels and Brodmann Area

과제 제시 시간은 최대 5분으로 수행이 끝나면 연구자가 성공과 실패 여부를 판단한다. 아동이 과제 수행에 실패하면 다시 그림을 화면에 제공하여 최대 5번까지의 기회를 제공하였으며, 만약 시간이 5분을 초과하면 자동으로 다음 화면으로 넘어간다. 과제 제시 전과 후에는 10초 동안 화면 중앙에 아이콘(+)을 제시하여 과제로부터 환기하는 시간을 제공하였다. 이상의 모든 과정은 캡코더를 설치하여 녹화하였으며, 특이사항은 기록지에 기록하여 분석에 참조하였다. 아동의 두뇌 활성 측정을 위해 fNIRS 장비인 OBELAB사의 NIRSIT을 활용하였다.

4. Data Analysis

아동의 탱그램 과제 해결에 대한 두뇌 활성 영역을 분석하기 위해 먼저 과제별 정답률을 연령별로 산출하고 이요인 반복측정 분산분석을 실시하였다. 그리고 Mauchly 구형성 가정이 충족되지 않아 Greenhouse-Geisser에 기초한 F값을 사용하였다.

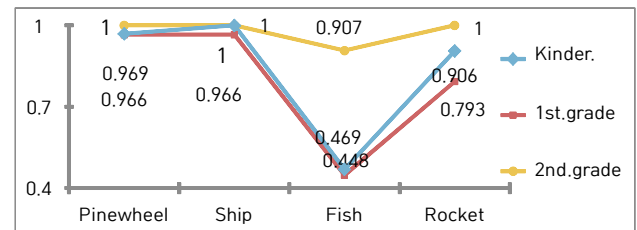
아동의 두뇌 활성을 분석하기 위해서는 수집된 자료에 marker 작업을 거친 뒤 노이즈 제거를 위해 Low pass filter와 High pass filter, 베이스 라인 설정을 통해 전처리하였다. 혈중 산소헤모글로빈 (oxy-hemoglobin; HbO) 농도는 MBLL(Modified Beer-Lambert Law)을 사용하여 계산하였고, MATLAB과 NIRS-SPM을 활용하여 혈류역학함수 (HRF)를 적용하였다. 그리고 일반선형모형(GLM)을 구성하여 아동별, 채널별, 과제별 활성 계수를 산출

하였다. 탱그램 과제 유형별, 능력별 각 채널에 대해 유의미하게 활성화된 HbO 채널을 도출하기 위해 단일표본 t검정을 실시하였으며, 채널의 해부학적 위치와 활성 정도는 BrainNet Viewer(Xia, Wang & He, 2013)를 활용하여 시각화하였다.

III. Results and Discussions

1. Accuracy Rate in Solving Tangram Tasks

탱그램 과제해결에 대한 정답률을 분석하기 위해 과제별 정답의 평균값을 연령별로 산출하였으며, 결과는 [Figure 4], <Table 1>과 같다.



[Figure 4] Accuracy rate in solving tangram tasks by age

<Table 1> The results of accuracy rate in solving tangram tasks

Source	SS	df	MS	F	p
Age	3.377	2	1.688	3.655	.029
Error	35.231	101	.349		
Accuracy	9.635	3	7.743	9.595	.002
Accuracy x Age	3.727	6	1.497	1.559	.213
Error		303			

연령에 따른 탱그램 과제별 정답에서의 차이를 보다 자세히 분석하기 위해 이요인 반복측정 분산분석을 실시하였다. 연령간 차이에 대한 유의성 검정결과 $F=3.655$ 유의확률은 .029로 과제의 정답률이 연령에 따라 유의한 차이가 있었다. 피험자 내에서 과제별 정답률에 대한 차이가 있는지 분석한 결과 $F=9.595$, 유의확률은 .002로 유의한 차이가 있었으며 정답과 연령간의 상호작용 효과는 $F=1.559$, 유의확률 .213으로 없는 것으로 나타났다.

탱그램 과제 정답률은 초등 1학년이 평균적으로 가장 낮았으며, 취학 전 아동보다 유의한 수준은 아니지만 대부분의 과제에서 정답률이 동일하거나 낮게 나타났다. 이는 취학 전 아동의 경우 유아교육기관에서 자유롭게 다양한 퍼즐, 블록 등 변환기와 관련된 활동을 많이 접할 수 있는 반면, 초등 1학년은 교육과정에서 도형 관련 활동이 1학년 2학기에만 제공되며 그것도 한 단원에서만 제공된다. 따라서 초등 1학년은 상대적으로 모양이나 도형과 관련된 교육내용을 경험할 기회가 적어 과제 정답률이 더 낮게 나타난 것으로 추측된다.

그리고 물고기 과제의 경우 취학 전, 초등 1학년에서 정답률이 급격히 감소하여 상대적으로 어렵게 인식되고 있음을 알 수 있었다. 물고기 과제는 단서가 없는 것으로 도형의 변환 중 뒤집기와 돌리기가 요구되는 과제이다. 이는 초등학생들은 특정 변환 중 돌리기에서 정확도가 가장 낮았다는 연구결과(Lee & Bang, 2007)와 유사하다. 일정한 각도만큼 회전하는 돌리기는 돌리는 방향과 그 각도를 공간적으로 사고할 수 있어야 하며, 도형과 도형이 차지하는 공간의 위치 등 공간 관계에 대해서도 종합적으로 사고할 수 있어야 한다. 따라서 아동들이 이를 어렵게 인식하여 정답률이 낮아진 것으로 해석된다. 특히 초등 1학년이 2학년보다 물고기 과제의 경우 정답률에서 큰 차이가 나타났다. 초등 2학년은 피아제의 구체적 조작기에 해당하는 연령으로 가역적 사고와 인지적 조작이 가능하면서(Shaffer, 2010), 아동은 자신의 사고를 수정하고 재구성하는 논리적 과정을 통해 문제 해결에 좀 더 정확하게 도달한 것으로 보인다.

2. Brain Activation by Problem Types

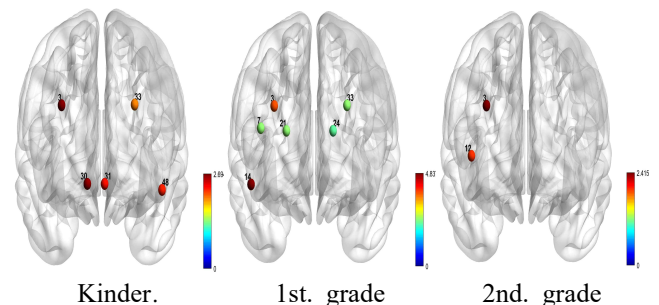
탱그램 과제의 유형을 단서가 있는 것과 없는 것으로 구분하여 연령별 두뇌 활성화 영역을 분석하였다.

1) Brain Activation for Tangram Tasks with Clues

탱그램 과제에서 도형 3개에 대한 테두리 선을

그려 단서를 제공하였을 때 나타난 연령별 유의한 두뇌 활성화는 [Figure 5], <Table 2>와 같다.

취학 전 아동은 배외측 전전두피질(Dorsolateral Prefrontal Cortex, DLPFC)의 채널 3(R), 33(L), OFC의 채널 30(R), 31(L), 48(L)에서 유의미한 수준에서 활성화가 나타났다. 초등 1학년은 DLPFC의 채널 3(R), 33(L), 전두극 전전두피질(Frontopolar Prefrontal Cortex, FPPFC)의 채널 7(R), 21(R), 24(L), 안와전두피질(Orbitofrontal Cortex, OFC)의 채널 14(R)에서 유의한 수준의 활성화가 나타났다. 초등 2학년은 DLPFC의 채널 3(R), FPPFC의 채널 12(R)에서만 유의한 수준의 활성화가 나타났다($p < .05$).



[Figure 5] Brain activation for significant channel of tangram tasks with clues. ($p < .05$)

단서가 제공된 과제의 경우 모든 연령에서 DLPFC가 유의미하게 활성화 되었다. DLPFC는 주의집중과 기억 유지를 담당하며, 높은 수준의 실행 처리 과정인 전략적 처리, 주의집중, 외부에서 생성된 정보의 모니터링 및 조작 또는 이중 작업을 조정하는데 관여한다(Toepper et al., 2010). 아동은 특정 형태를 구성하는 과제를 효율적으로 해결하기 위해서 주의를 집중하여 이미지를 만든 다음 이미지와 도형을 겹쳐서 목표 모양에 일치시켜야 한다. 또한 아동은 시행착오를 통해 전체 모양에 대한 조합에서 측면의 길이와 나중에는 각도의 크기와 같은 특성을 생성하고 이를 결합할 수 있게 되었다. 이를 위해서는 정신적 변환 처리 실행 기능이 필요하며 이 과정에서 DLPFC가 모든 연령에서 유의미하게 활성화 된 것으로 보인다.

<Table 2> Activated channels for tangram tasks with clues by age

Age	Region	BA	Channel	Hemisphere	t
Kinder.	DLPFC	9	3	R	2.694
			33	L	2.025
	OFC	11	30	R	2.694
			31	L	2.318
			47	L	2.245
1st. grade	DLPFC	9	3	R	3.851
			33	L	2.467
	FPPFC	10	7	R	2.461
			21	R	2.467
			24	L	2.256
			47	R	4.837
2nd. grade	DLPFC	9	3	R	2.415
	FPPFC	10	12	R	2.004

(BA: Brodmann Area, DLPFC: Dorsolateral Prefrontal Cortex, VLPFC: Ventrolateral Prefrontal Cortex, FPPFC: Frontopolar Prefrontal Cortex, OFC: Orbitofrontal Cortex, $p<.05$)

단서가 있는 탱그램 과제의 경우 취학 전과 초등 1학년에서만 OFC에서 유의미한 활성화가 나타났다. 취학 전 아동의 경우 OFC 채널 3개가 유의미하게 활성화된 반면, 초등 1학년에서는 1개, 초등 2학년에서는 유의미하게 활성화된 채널이 없었다. OFC의 경우 학습과정에서 동기 및 강화와 관련이 있는 영역이다. 따라서 OFC는 욕구, 동기와 관련된 정보를 처리하고 다양한 감정적, 정서적 행동과 정보들을 상황에 맞게 조절하며 적절한 사회적 행동을 수행하도록 한다(Stalnaker, Cooch & Schoenbaum, 2015). 단서가 있는 탱그램 과제의 경우 정답률이 평균 97%이상으로 연령이 어린 아동도 쉽게 과제를 인식한 것으로 추측되며, 이 과정에서 긍정적 욕구와 동기가 활성화된 것으로 해석된다. 특히 취학 전 아동의 경우 OFC의 채널이 상대적으로 많이 활성화된 것은 다른 연령에 비해 쉽게 인식되는 과제에서 좀 더 감정적, 정서적 측면에 영향을 많이 받는 것으로 추론된다. 이는 긍정적 정서와 관련된 자극이 OFC의 산소포화도를 증가시킴을 알 수 있다.

또한 OFC는 감정 정보를 결정하는데 중요한 역할을 하지만, 감정이 정신적 사고 과정과 관련되어 나타난 경우에 더욱 활성화 된다(McDannald et al., 2012)고 하였다. 즉 취학 전과 초등 1학년은 단서가

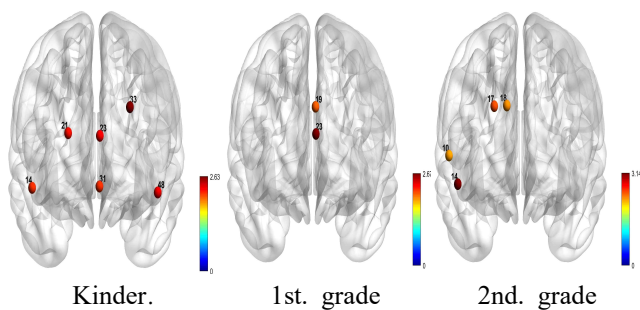
있는 탱그램 과제를 해결하면서 다양한 모양의 도형을 돌리고 뒤집으면서 정신적 시뮬레이션과 공간 추론의 사고과정이 발생되면서 OFC의 활성화가 더욱 많이 나타난 것으로 추측된다. 이는 동시에 초등 2학년에게는 OFC가 나타나지 않은 결과에 대한 설명을 뒷받침해 주고 있다. 즉 아주 쉽게 지각된 과제일 경우 특히 새로운 정보를 통합하지 않아도 되고 해결 전략을 미리 알고 있으며 예측할 필요가 없으면 OFC는 활성화 되지 않는다(Stalnaker et al., 2015)는 것을 보여주고 있다. 이처럼 OFC의 활성화는 정서나 감정뿐 아니라 다양한 사고 과정 및 가치 기반 행동에서 중요한 역할을 수행함을 보여주고 있다.

그리고 초등 1학년의 경우 상대적으로 FPPFC의 활성화가 좌우반구에 걸쳐 폭넓게 나타났다. FPPFC는 BA 10으로 기억 회상 및 다양한 실행 기능에 있어 전략적 과정에 관여한다. FPPFC는 미래의 행동을 계획하고 새로운 대안을 모색하는 탐색적 의사결정에서 판단과 추론을 담당하며, OFC와 연관된 것으로 알려져 있다(Koechlin & Hyafil, 2007). 초등 1학년은 탱그램 과제 해결이라는 미래의 목표를 위해 다양한 해결책과 수행 전략들을 고민하고 의사결정하면서 FPPFC가 활성화 되었음을 추측할 수 있다. 그리고 과제를 성공적으로 해결하는 과정에서 발생한 긍정적 정서가 합리적 행동을 유발한 것으로 추론되며, 이 과정에서 FPPFC와 OFC가 동시에 유의미하게 활성화 된 것으로 보인다.

2) Brain Activation for Tangram Tasks without Clues

탱그램 과제 해결에서 단서를 제공하지 않았을 때 나타난 연령별 유의미한 두뇌 활성화는 [Figure 6], <Table 3>과 같다.

취학 전 아동은 DLPFC의 채널 9(L), FPPFC의 채널 21(R), 23(L), OFC의 채널 14(R), 31(L), 48(L)에서 유의미한 수준에서 활성화가 나타났다. 초등 1학년은 DLPFC의 채널 19(L), FPPFC의 채널 23(L), 두 개에서만, 초등 2학년은 DLPFC의 채널 17(R), 18(R), VLPFC의 채널 10(R), OFC의 채널 14(R)에서 유의미한 수준의 활성화가 나타났다($p<.05$).



[Figure 6] Brain activation for significant channel of tangram tasks without clues. ($p < .05$)

<Table 3> Activated channels for tangram tasks without clues by age

Age	Region	BA	Channel	Hemisphere	t
Kinder.	DLPFC	9	33	L	2.632
	FPPFC	10	21	R	2.266
			23	L	2.294
	OFC	47	14	R	2.186
			31	L	2.180
1st. grade	DLPFC	10	48	L	2.334
	FPPFC	10	19	L	2.094
2nd. grade	DLPFC	10	23	L	2.676
			17	R	2.482
	VLPFC	46	18	R	2.272
			10	R	2.232
	OFC	47	14	R	3.144

(BA: Brodmann Area, DLPFC: Dorsolateral Prefrontal Cortex, VLPFC: Ventrolateral Prefrontal Cortex, FPPFC: Frontopolar Prefrontal Cortex, OFC: Orbitofrontal Cortex, $p < .05$)

단서가 없는 탱그램 과제를 해결하기 위해 모든 연령에서 DLPFC의 활성화가 나타났다. DLPFC는 불확실성에 관여하는 피질로 불확실성과 정적 상관이 있으며, 대상의 위치를 기억하는 공간 작업 기억 과제 수행과도 관련이 있다(McLaughlin et al., 2009). 아동들은 과제를 해결하기 위해 두 개의 삼각형을 조합하여 사각형을 만들고 사각형의 다른 형태인 평행사변형도 구성할 수 있어야 하며 이를 작업 기억 속에서 유지하면서 조작할 수 있어야 한다. 이러한 과정은 불확실성을 낳으며 동시에 공간 과제에 대한 작업 기억 처리를 요구하므로 DLPFC가 더욱 활성화된 것으로 보인다. 이처럼 DLPFC는 아동의 공간 정보를 업데이트 하고, 공간 작업 기억에서 중요한 역할을 담당하고 있음을 추론할 수 있다. 이는 Bor et al. (2006)의 연구결과와 유사하게 아동은 공

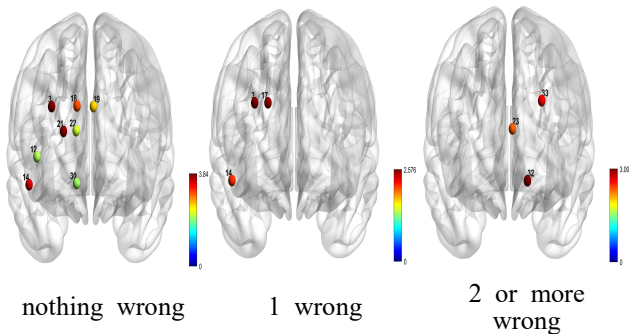
간 과제를 수행하는 동안 정보를 모니터링하고 조작하는 것과 같은 전략적 운영을 통해 모든 연령에서 DLPFC가 활성화된 것으로 보인다.

초등 2학년의 경우 단서 없는 과제에서 처음으로 우반구 VLPFC에서 유의미한 활성화 채널이 나타났다. VLPFC는 새로운 정보에 대해 판단하는 시각적 기억 비교, 작업 기억 내용의 유지 또는 리허설 등에 관여한다(Wagner et al., 2001). 또한 VLPFC는 정보가 유지될 때 활성화되며, 관련 정보와 비관련 정보 사이에서 관련 정보를 선택하고 인출할 때 활성화되기도 한다(McLaughlin et al., 2009). 초등 2학년은 단서가 없는 과제를 해결하기 위해 시행착오를 통해 의도적이고 신중하게 행동하였고, 이 과정에서 시각적인 전체를 고려하여 한 쪽 길이를 생각하고 결국에는 각도를 고려하면서 탱그램을 성공적으로 수행하였다. 즉 다양한 도형들의 조합을 시각적으로 비교하고, 공간 정보를 유지하면서 작업 기억을 활용하여 관련 정보만 선택적으로 인출하여 과제를 해결하였음을 추론할 수 있다. 이는 비교적 복잡한 인지처리 과정으로 VLPFC가 다른 영역에 비해 상대적으로 늦게 발달함을 알 수 있다.

3. Brain Activation by Ability

탱그램 과제 수행에서 능력별 두뇌 활성 영역을 살펴보기 위해 세 집단 즉, 과제를 모두 맞힌 집단의 아동 53명, 과제를 1개 틀린 집단의 아동 43명, 과제를 2개 이상 틀린 집단의 아동 8명으로 분류하였다.

탱그램 과제 수행에서의 능력별 두뇌 활성 영역을 살펴보면, 과제를 모두 맞힌 집단은 DLPFC의 채널 3(R), 18(R), 19(L)에서, FPPFC의 채널 12(R), 21(R), 22(R)에서, OFC의 채널 14(R), 30(R)에서 유의한 수준에서 활성화가 나타났다. 그리고 과제를 1개 틀린 집단은 DLPFC의 채널 3(R), 17(R)과 OFC의 채널 14(R)에서, 과제를 2개 이상 틀린 집단은 DLPFC의 채널 33(L), FPPFC의 채널 23(L), OFC의 채널 32(L)에서 유의미한 수준의 활성화가 나타났다($p < .05$).



[Figure 7] Brain activation for significant channel by ability groups. ($p < .05$)

<Table 4> Activated channels by ability groups

Ability	Region	BA	Channel	Hemisphere	t
nothing wrong	DLPFC	9	3	R	3.840
		10	18	R	3.078
			19	L	2.530
	FPPFC	10	12	R	2.102
			21	R	3.786
			22	R	2.165
1 wrong	OFC	47	14	R	3.560
		10	30	R	2.021
	DLPFC	9	3	R	2.576
		10	17	R	2.529
	OFC	47	14	R	2.108
2 or more wrong	DLPFC	9	33	L	2.612
	FPPFC	10	23	L	2.342
	OFC	11	32	L	3.007

(BA: Brodmann Area, DLPFC: Dorsolateral Prefrontal Cortex, VLPFC: Ventrolateral Prefrontal Cortex, FPPFC: Frontopolar Prefrontal Cortex, OFC: Orbitofrontal Cortex, $p < .05$)

과제를 모두 맞힌 집단은 상대적으로 FPPFC의 활성화가 많이 나타났다. FPPFC는 DLPFC를 조정하고 통합하는 역할을 하며, 과제 수행 중 유지, 조작 및 모니터링과 관련된 LPFC(Lateral Prefrontal Cortex)의 기능을 최대화하기 위해 작동한다(Fletcher & Henson, 2001). FPPFC는 하위 목표를 생성하고 유지하여, 동시에 진행 중인 두 개의 작업을 조정해야 할 때 활성화된다(Braver & Bongiolatti, 2002). 과제를 모두 맞힌 집단의 경우 과제를 해결하기 위해 하위목표를 구체화하여 어떤 크기와 모양의 도형을 어디에, 어떻게 놓는지에 따라 도형의 공간과 위치가 정해지므로 두 개의 작업을 동시에 원활하게 수행하여야만 성공적으로 과제를 해결할 수 있다. 그리고 FPPFC는 지각적 자극과 같은 외부 정보를 작업 기억에 있는 내부 정보

로 주의를 전환해야 할 때를 결정할 때도 활성화된다(Burgess, Dumontheil & Gilbert, 2007). 즉 외부 자극인 도형의 지각적 특징을 통해 작업 기억으로부터 자료와 정보를 검색하고 적합한 전략을 계획하고 수행하여 과제를 해결하면서 FPPFC가 더욱 활성화 된 것으로 추론된다. 또한 Yamamuro et al.(2016)는 FPPFC가 도덕적 판단과 충동을 통제하고 관리하는 데도 관여한다고 보고하였다. 이처럼 FPPFC는 메타 수준의 제어 처리와 연관되어 있으며 능력이 뛰어난 아동일수록 산만함을 잘 통제하고 억제하면서 과제를 해결하였음을 알 수 있다.

과제를 모두 맞힌 집단과 과제를 1개만 틀린 집단은 우반구 OFC 및 브로드만 영역(Brodmann Area, BA) 47에 해당하는 채널 14가 활성화 되었다. BA 47은 다른 것과 비교하여 인지 재평가를 구현하는 것에 관여하며, 새로운 정보에 대해 판단하고 시각기억을 비교할 때 활성화 된다(McLaughlin et al., 2009). 이에 BA 47은 탱그램 과제 해결 과정에서 이전에 수행하였던 도형의 변환과 새로 시도하는 변환 사이에서, 이를 비교하며 평가함으로써 과제 해결에 도달할 수 있도록 매개하는 역할을 하는 것으로 추측된다.

그리고 과제를 2개 이상 틀린 집단은 좌반구 편측화가 나타났다. 우반구는 공간적, 시각적 정보를 받아들이고 전체적인 접근법을 선호하는 반면, 좌반구는 언어적 정보를 조작하며 부분적인 접근을 선호(Murphy et al., 1998)하는 것으로 알려져 있다. 따라서 능력이 낮은 집단일수록 언어적 정보를 통해 과제를 해결하려고 하며 전체보다는 부분적인 것에 초점을 두면서 과제를 해결하였음을 알 수 있다.

IV. Conclusions and Implications

본 연구는 탱그램을 활용하여 아동의 변환기하 문제해결에서 fNIRS에 의한 두뇌 활성을 분석하였으며 결론은 다음과 같다.

첫째, 탱그램 과제 정답률은 초등 2학년이 가장 높게 나타났으며, 과제 중에서는 단서가 없는 물고기 과제에서 정답률이 가장 낮았다.

초등 2학년에서 정답률이 가장 높게 나타나 것은

연령이 증가할수록 공간 기억과 인지처리 능력 및 변환능력의 발달을 의미한다. 동시에 2015 개정 수학과 교육과정에서는 초등 2학년에 패턴블록, 쌓기 나무 등 다양한 도형과 관련된 도구들로 모양을 만들거나 모양을 채우는 활동이 제시되어 있어 학습의 영향으로 나타난 결과일 수도 있다. 따라서 초등 2학년 아동의 과제 정답률이 학습의 영향인지 또는 인지적 성장에 따른 발달의 결과인지 그 원인을 명확히 알 수는 없으나 이 두 가지 모두 아동의 변환 기하 능력에 영향을 주고 있음을 추론할 수 있다.

그리고 과제 중 정답률이 가장 낮은 물고기 과제는 도형의 변환 중 뒤집기와 돌리기가 요구되는 과제이다. 이는 평행이동과 함께, 대칭이동, 회전이동이라는 변환의 구체적 유추이다(Kim & Lee, 2019). 따라서 탱그램 과제를 해결하기 위해서는 도형을 재배열하거나 조합하여 위치나 공간의 변화를 추론하는 사고 과정이 요구되어 더 어렵게 인식된 것으로 보인다.

둘째, 과제 유형을 단서가 있는 과제와 단서가 없는 과제로 구분하여 연령별로 두뇌 활성 영역을 분석하였다. 먼저 단서가 있는 과제의 경우 취학 전 아동은 OFC에서, 초등 1학년은 FPPFC에서 유의미한 활성화 채널이 많이 나타났다. 단서가 없는 과제의 경우 초등 2학년에서 처음으로 VLPFC에서 유의미한 활성화 채널이 나타났다. 그리고 DLPFC는 모든 연령에서 단서 유무에 관계없이 유의미하게 활성화 되었다.

취학 전 아동은 단서 유무에 관계없이 공통적으로 OFC에서 유의미한 활성화 채널이 많이 나타났다. 이는 연령이 어릴수록 과제해결에서 감정적, 정서적 영향력이 상대적으로 큼을 시사하며, 인지적 과제를 해결하는 과정에서도 정서적 측면이 함께 관여함을 의미한다.

초등 1학년의 경우 단서가 있는 과제를 해결하기 위해 FPPFC에서 유의미한 활성화 채널이 많이 나타났다. FPPFC는 기억을 회상하고, 적응적인 의사결정을 하며, 위치 관계를 배우는 것에 관여한다(Milovanovic et al, 2020). 초등 1학년은 단서가 있는 과제를 해결하기 위해 공간 내에서 도형의 위치를 지각하고 회상하며, 도형 간의 관계를 인식하기 시작하면서 FPPFC의 활성화가 나타난 것으로 보인다.

초등 2학년의 경우 단서가 없는 과제에서 처음으로 VLPFC의 채널이 유의미하게 활성화되었다. 이는 VLPFC의 발달이 상대적으로 늦음을 의미하며, 탱그램 과제를 해결하기 위해 작업 기억을 통해 공간 정보를 유지하면서 관련 정보를 선택적으로 인출하였음을 의미한다. 특히 VLPFC와 DLPFC가 같이 활성화 된 것은 VLPFC가 공간 정보 내용을 유지하고 DLPFC가 공간 정보를 업데이트 하면서 과제를 수행하고 해결하였음을 알 수 있다.

그리고 모든 연령에서 단서 유무에 관계없이 좌우반구에서 DLPFC가 유의미하게 활성화 되었다. DLPFC는 실행 기능을 담당하고 전략적 처리에 관여하므로 탱그램 과제를 해결하는 과정 중에 대부분 활성화됨을 알 수 있다. 또한 물체나 신체 일부를 회전시켜 다른 위치에 배치하는 것을 사고하는 추상적 작업도 DLPFC를 활성화시킨다. 이를 통해 DLPFC는 공간 작업 기억에 전문적으로 관여함과 동시에 높은 수준의 실행과정에서도 중요한 역할을 하고 있음을 알 수 있다.

셋째, 탱그램 과제 수행에서 능력별로 3개의 집단으로 구분하여 두뇌 활성 영역을 분석한 결과 모두 맞힌 집단은 상대적으로 FPPFC에서 유의미한 활성화가 많이 나타났고, 과제를 모두 맞힌 집단과 1개만 틀린 집단은 공통적으로 OFC 및 BA 47에서 유의하게 활성화 되었다. 그리고 과제를 2개 이상 틀린 집단은 좌반구 편측화가 나타났다.

과제를 모두 맞힌 집단은 FPPFC 활성화를 통해 과제 해결이라는 상위목표를 유지하면서 하위 과정을 구체적으로 진행하고, 그 과정에서 외부 자극인 탱그램 도형을 내부의 정보로 전환하면서 활성화가 나타났다. 과제를 모두 맞힌 집단과 1개만 틀린 집단은 과제 해결을 위해서 OFC 및 BA 47 활성화를 통해 서로 다른 수행을 비교 평가하면서 최선의 해결책을 도출하려고 하였음을 알 수 있다. 그리고 과제를 2개 이상 틀린 집단은 좌반구 편측화가 나타났다. 탱그램은 도형 일부를 회전시키거나 돌리며 다른 위치에 적절하게 배치하는 것을 사고하는 공간 과제이다. 그러나, 이들은 좌반구 편향화를 통해 공간적 시각적 정보를 활용하기 보다는 언어적 정보를 조작하거나 인출하면서 과제를 해결하려 하였음을 알 수 있다.

이상의 탱그램 과제에 대한 두뇌 활성 분석 결과를 바탕으로 한 교육적 함의는 다음과 같다. 첫째, 과제가 아주 쉽거나 아주 어려울 경우 오히려 두뇌 활성화가 감소하였다. 단서가 있는 과제에서 초등 2학년은 정답률 100%였으나, 2개의 채널만 유의하게 활성화되었고, 단서가 없는 과제에서 초등 1학년은 가장 낮은 정답률을 보였으며, 이때도 2개의 채널에서만 유의미한 활성화가 나타났다. 이는 일반적으로 과제 복잡성이 증가할수록 활성화가 같이 증가한다는 사실과 상반되는 것으로 과제가 너무 어려울 경우 오히려 활성화가 적게 나타났다. 따라서 아동의 활발한 두뇌 활성을 촉진하기 위해서는 적당한 난이도의 과제를 제공하여 학습 동기를 유발할 필요가 있음을 시사한다.

둘째, 과제의 난이도가 낮아 쉽게 과제를 해결한 집단은 우반구에서, 어렵게 과제를 해결한 집단은 좌반구에서 유의미한 활성화 채널이 많이 나타났다. 이는 공간 과제 해결시 두뇌의 편측화가 존재함을 의미한다. 따라서 탱그램 과제의 정답률이 낮은 집단에게는 공간적, 시각적 정보와 관련된 우반구를 더욱 활성화 할 수 있도록 다양한 도형 과제 및 도형 개념의 추상화 과정에 대한 학습기회를 제공할 필요가 있음을 시사한다.

셋째, 아동의 공간 지식은 단순한 것에서부터 지각적으로 도형을 조합하는 복합적 지식으로, 개별 모양 뿐 아니라 구성요소 그리고 궁극적으로는 모양의 속성을 인식하고 설명하며 조작하는 의식적인 능력에 도달하게 된다. 이러한 과정에서 변환기하 능력을 향상시키기 위해서는 도형을 하나의 단위로 생성하고 유지하는 능력, 도형을 다른 도형과 결합한 다음 이를 적용하여 복합 도형을 새로운 단위로 재개념화 할 수 있도록 교육할 필요가 있다.

넷째, fNIRS를 활용한 아동의 변환기하 문제해결 과정에서 두뇌 활성 영역을 분석은 인지 발달을 두뇌 발달과 연계하여 뇌의 기능적 역할을 더 잘 이해하고 그 결과를 발달 및 교육환경에 적용함으로써 인지발달 매커니즘 규명에 실질적 도움이 될 수 있을 것이다.

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), 1-13.
- Ayaz, H., Shewokis, P. A., Bunce, S., Izzetoglu, K., Willems, B., & Onaral, B. (2011). Optical brain monitoring for operator training and mental workload assessment. *Neuroimage, 59*, 36-47.
- Bor, D., Duncan, J., Lee, A., Parr, A., & Owen, A. M. (2006). Frontal lobe involvement in spatial span: Converging studies of normal and impaired function. *Neuropsychologia, 44*, 229-237.
- Braver, T. S., & Bongiolatti, S. R. (2002). The role of frontopolar cortex in subgoal processing during working memory. *Neuroimage, 15*, 523-536.
- Bunce, S. C., Izzetoglu, M., Izzetoglu, K., Onaral, B., & Pourrezaei, K. (2006). Functional near-infrared spectroscopy: An emerging neuroimaging modality. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine, July*, 54-62.
- Burgess, P. W., Dumontheil, I., & Gilbert, S. J. (2007). The gateway hypothesis of rostral prefrontal cortex (area10) function. *Trends Cognitive Science, 11*, 290-298.
- Casey, B., Kersh, J. E., & Young, J. M. (2004). Storytelling sages and effective medium for teaching early childhood mathematics. *Early Childhood Research Quarterly, 19*(1), 167-172.
- Clements, D. H. (2000). Mathematics in the preschool. *Teaching Children Mathematics, 7*, 270-275.
- Clements, D. H., Wilson, D. C., & Sarama, J. (2004). Young children's composition of geometric figures: A learning trajectory. *Mathematics Thinking and Learning, 6*(2), 163-184.
- Edwards, L. A., Wagner, J. B., Simon, C. E., & Hyde, D. C. (2016). Functional brain organization for number processing in pre-verbal infants. *Developmental Science, 19*, 757-769.

- Fletcher. C. P., & Henson. A. R. (2001). Frontal lobes and human memory insights from functional neuroimaging. *Brain*, 12(5), 849-881.
- Gilligan. A. K., Hodgkiss. A., Thomas. C. M., & Farran. K. E. (2019). The developmental relations between spatial cognition and mathematics in primary school children. *Developmental Science*, 22(4), 1-18.
- Haylock, D., & Cockburn, A. D. (2017). *Understanding mathematics for young children* (5th ed.). London: SAGE.
- Hyde, D. C., Boas, D. A., Blair, C., & Carey, S. (2010). Near-infrared spectroscopy shows right parietal specialization for number in pre-verbal infants. *Neuroimage*, 53, 647-652.
- Johnson, A., Tipps, S., & Kennedy, L. M. (2018). *Guiding children's learning of mathematics* (13th ed.). Belmont, CA: Cengage Learning.
- Khairiree. K. (2015). Creative thinking in mathematics with tangrams and the geometer's sketchpad. *Proceedings of the 20th Asian Technology Conference in Mathematic*, 153-161.
- Kim, S. Y., & Lee, K. H. (2019). A study on 5th graders' understandings of the meaning of symmetric figure for a point using the 'bilateral symmetric ruler. *Brain, Digital, & Learning*, 9(3), 252-270.
- Kim, Y. S., Choi, J. S., & Ko, E. S. (2018). Relationship between motion geometric ability and spatial ability of young children. *Journal of Early Childhood Education*, 38(5), 31-48.
- Koechlin, E., & Hyafil, A. (2007). Anterior prefrontal function and the limits of human decision-making. *Science*, 318, 594-598.
- Lee. S. M., & Bang. J. S. (2007). An investigation on the understanding of spatial sense of elementary school students. *The Mathematical Education*, 46(3), 273-292.
- 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(7), 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(2), 202-211.
- Milovanovic, J., Hu, M., Shealy, T., & Gero. J. (2020). Evolution of brain network connectivity in the prefrontal cortex during concept generation using brainstorming for a design task. *Proceedings of the ASME 2020. International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. IDETC/CIE202.
- 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(1-2), 105-106.
- Newcombe, N. S. (2017). Harnessing spatial thinking to support stem learning. *OECD Education Working Papers*, 161, 1-51.
- 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(3), 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(2), 157-166.
- 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(2), 1-19.
- Scholkmann, F., Kleiser, S., Metz, J. A., Zimmermann, R., Pavia, M. J., Wolf, U., & Wolf, M. (2014).

- A review on continuous wave functional near-infrared spectroscopy and imaging instrumentation and methodology. *Neuroimage*, 85, 6-27.
- Shaffer, R. D., & Kipp, K. (2010). *Developmental psychology* (8th ed.). Belmont, CA: Cengage Learning.
- Soltanlou, M., Artemenko, C., Dresler, T., Haeussinger, F. B., Fallgatter, A. J., Ehli, A. C., & Nuerket, 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.
- Stalnaker, T., Cooch, N., & Schoenbaum, G. (2015). What the orbitofrontal cortex does not do. *Nature Neuroscience*, 18(5), 620-627.
- 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(4), 1244-1253.
- Verdine, B. N., Bunker, A., Athanasopoulos, A., Golinkoff, R. M., & Hirsh-Pasek, K. (2017). Shape up: An eye-tracking study of preschoolers' geometry knowledge and spatial development. *Developmental Psychology*, 53(10), 1869-1880.
- Wagner, A. D., Maril, 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.
- Webster, M. (2017). Merriam webster. Retrieved from www.merriam-webster.com.
- Woo, J. H. (2007). *The educational foundation of school mathematics*. Seoul, Korea: Seoul National University Press.
- Xia, M., Wang, J., & He, Y. (2013) BrainNet viewer: A network visualization tool for human brain connectomics. *PLoS ONE*, 8, e68910.
- Yamamuro, K., Kimoto, S., Iida, J., Kishimoto, N., Nakanishi, Y., Tanaka, S., Ota, T., Makinodan, M., & Kishimoto, T. (2016). Reduced prefrontal cortex hemodynamic response in adults with methamphetamine induced psychosis: Relevance for impulsivity. *PLoS ONE*, 11(4) e0152373.

[저자의 소속과 직위]

강민정 : 한국교원대학교, 강사, 단독저자