

RESEARCH ARTICLE

Comparison of Science Gifted and General Students' Brain Activity and Thinking Process in the Process of Self-regulation – An fNIRS Study

Jin-Sun Park¹ · Yong-Ju Kwon^{2*}

¹SeoulSahmyook Middle School

²Korea National University of Education

자기조절의 과정에서 나타나는 과학영재학생과 일반학생의 두뇌 활성화와 사고 과정 비교 – fNIRS 연구

박진선¹ · 권용주^{2*}

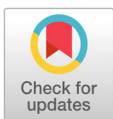
¹서울삼육중학교 · ²한국교육대학교

*Corresponding Author: kwonyj@knue.ac.kr

ABSTRACT

Self-regulation is the process of generating new alternative schemas that can be re-equilibrated through feedback and accommodation of observed information and the existing dis-equilibrated schemas. The purpose of this study was to compare neurocognitive thinking processes in two groups based on brain activity data from scientific gifted and general students' self-regulation process during taking mirror-writing tasks. As a result of the study, the OFC area, where activities appear in the process of performing self-regulating tasks in common with science gifted students, is an area that has the function of predicting errors and determining success or failure. This means that self-regulation is taking place to anticipate the outcome of an action and to continuously check whether it is consistent with the actual results. In addition, comparing brain activity in assimilation, conflict, and accommodation processes that subdivide the process of self-regulation, we found that there were differences between processes and groups. In particular, the DLPFC area, where activities appear during the conflict process and accommodation process that strive to form an alternative schematic, is an area that has the function of manipulating information in the working memory. This means that efforts are being made to reach equilibrium through attempts to integrate information for problem solving and one's strategy. The findings of this study may be used as relevant data for education that can enhance self-regulation for gifted education for all, while also being as data on neurological methods used as a verification tool to support research in cognitive psychology.

Key Words: Science gifted student, brain activity, self-regulation, fNIRS, mirror-writing task



OPEN ACCESS

Brain, Digital, & Learning
2021, Vol. 11, No. 3, 405-416.

<https://doi.org/10.31216/BDL20210026>

Received: August 09, 2021

Revised: September 06, 2021

Accepted: September 09, 2021

© 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

제4차 영재교육진흥종합계획(2018~2022)에서는 ‘재능 계발 영재교육 기회의 확대를 통한 창의융합 인재 육성’이라는 비전을 토대로 5대 분야 추진과제가 제시되었다. 특히 ‘학생 수요 중심의 영재교육을 통한 재능 계발’ 분야는 희망 학생 모두에게 영재교육의 기회를 제공하고 요구와 수준에 맞는 맞춤형 영재교육 프로그램의 운영을 통해 ‘선발’에서 ‘교육’으로의 패러다임 전환을 꾀하고 있다. 또한 제3차 과학영재발굴 육성종합 계획(2018~2022)에서도 모두의 영재성이 발현되고 성장하는 사회를 목표로 하여 지식 전달 중심의 교육으로 인해 융합적 문제 해결의 기회가 부족한 이전의 모습을 벗어나 발달단계 및 특성, 유형에 따른 체계적인 프로그램을 제시하고 학습자가 주도적으로 지식을 활용하여 문제해결력, 창의성 등의 역량이 개발되는 교육체제로의 전환을 통한 과학영재의 발달과 성장에 초점을 맞추고 있다.

국가 수준의 영재교육계획 외에도 영재교육의 패러다임은 높은 인지적 능력 성취로부터 시작하여 영재 교육 대상자 판별, 차별화를 통한 맞춤형 교육, 영재의 재능 발현 중점을 위한 교육으로 변화 및 발전해 왔다 (Dai & Chen, 2013). 영재성 관련 연구에서 오랜 기간 강조되어왔던 인지적 능력의 경우 탁월한 성취를 이끌 기에는 충분한 조건이 되지 않기에(Ritchotte et al., 2014) 학습 성취의 예측 요인 중 하나로 문제해결에 적극적으로 참여할 수 있게 하는 자기조절에 주목해야 한다.

자기조절은 사고력, 개념 구성, 발전을 위한 핵심과정(Lawson, 1995)으로, 스스로의 행동 및 생각 변화와 통제를 통해 자신의 기능과 상태를 변화시키는 과정(Vohs & Baumeister, 2004)이다. 자기조절과 영재성의 연관성을 찾고자 영재의 높은 자기조절 능력을 확인(Ablard & Lipschultz, 1998; Risemberg & Zimmerman, 1992)하거나 영재 대상으로 자기조절 훈련을 통해 과제 몰입, 적절한 학습전략 구사를 하여 성취를 이끌어 내기도 하였다(Siegle & McCoach, 2005). 또한 영재성 및 자기조절의 구성요인을 비교 분석하여 지능, 창의성, 메타인지와 같은 영재의 인지적 특성과 인지전략, 메타인지전략 등의 자기조절 인지조절 하위요소들이 이론적 설명을 공유하고 있고, 자기조절을 영재성에 대해 설명 가능한 척도로서의 역할이 가능함을 제안하였다(Park & Lee, 2015). 발달 및 성장 중심의 효과적인 교육을 통한 자기조절의 신장이 이루어진다는 점에는 공감하고 있으나 자기조절로 인해 어떻게 개념이 새롭게 구성되고 어떤 과정을 통해 문제가 해결되는지에 대한 연구는 부족하기에 자기조절이 일어나는 과정을 구체적으로 살펴볼 수 있는 연구가 필요하다.

자기조절이 일어나는 과정에 대한 연구에서의 큰 제약은 학습으로부터 나타나는 현상과 결과의 원인에 대한 과학적인 설명이 어렵다는 점이다(Kwon et al., 2009). 자기조절을 통한 개념 형성 및 문제 해결에 대해 실제 관찰이 불가능할 경우 피험자의 제한된 기억과 왜곡 가능한 상황 설명으로 인해 신뢰 있고 객관적인 연구가 되기 어렵기에 자기조절이 일어나는 과정을 일반화시킬 수 없게 된다. 두뇌 영상 기술의 발달 이후 인지적 활동을 두뇌 수준에서 직접 관찰 및 측정 가능한 신경과학적 접근이 활용되고 있다(Hughes, 2008). 신경과학적 연구 방법으로는 fMRI, EEG, PET, MEG 등 다양한 형태가 있고 최근 복잡한 절차와 많은 연구비용이 필요한 fMRI의 대안으로 기능적 근적외선 분광법(functional Near-Infrared Spectroscopy, fNIRS)이 활용되고 있다(Soltanlou et al., 2018). fNIRS는 근적외선을 사용하기에 비침습적이고 안정성이 우수하며, 휴대가 가능하고 움직임에 대한 허상이 적어 일상적인 상황에서도 측정이 가능하여 교육용 신경과학 연구에 적합하다(Tak & Ye, 2014). Park et al. (2019)은 학습과정, 학습평가, 교수과정, 두뇌 수준 발달 및 변화 등의 교육연구에서 fNIRS 활용의 유용성을 제안하였다.

따라서 이 연구는 과학영재학생과 일반학생이 자기조절 과정을 수행할 때 나타나는 사고에 대해 fNIRS를 활용하여 얻은 두뇌 활성 데이터를 인지신경학적 분석을 통해 두 집단의 사고를 비교하고자 한다. 이 목적을 달성하기 위한 연구 문제는 자기조절이 일어나는 과정에서 나타나는 동화, 갈등, 조절 과정에 있어 과학영재 학생과 일반학생의 두뇌 활성은 어떤 차이를 보이는가이다.

Theoretical Background

Process of Self-regulation

자기조절의 과정은 현재 사고 패턴 및 행동의 탐구로부터 시작되어 새로운 아이디어 및 행동의 고안을 통해 성공이나 실패한 응용으로 진행되며 Lawson (2003)은 Fig. 1과 같이 모형으로 제시하였다.

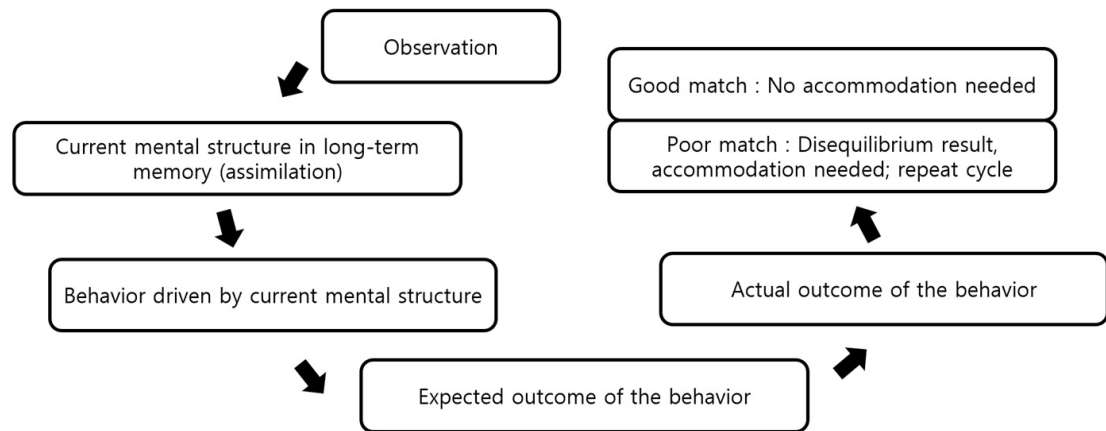


Fig. 1. Process of self-regulation (Lawson, 2003)

과제의 관찰(Observation)로부터 수집된 정보는 기존의 도식을 중심으로 일어나는 동화(Assimilation)에 의해 결과를 예상(Expectation)하고 이를 실제 행동(Behavior)의 결과와 비교(Comparison)한다. 만일 실제 결과와 예상 결과가 합치(Good match)되는 경우 동화 상태로 과제가 마쳐지지만 불합치(Poor match)되는 경우 비평형(Disequilibrium)이 발생한다. 비평형은 대안적 도식을 새롭게 고안하여 조절(Accommodation)을 통해 평형을 회복하고자 하며 실제 결과와 예상 결과의 합치가 이루어질 때까지 순환을 반복한다(Lawson, 2003).

위의 경우 동화와 조절을 바탕으로 새로운 지식을 생성하기 위한 자기조절 과정을 명확하게 설명하고자 했으나 과제 및 학습자 특성에 따라 달라질 수 있는 비평형의 유형에 대한 설명이 부족하고 조절이 일어나는 점은 언급하였으나 구체적인 조건 및 절차 등 평형을 회복하기 위한 반복 과정에 대해서는 제시하지 못하고 있었다. 최근 인지 갈등 모형과 가설의 생성 과정을 토대로 제한점을 보완하여 수정된 형태의 자기조절 과정은 다음과 같다. 만일 실제 결과와 예상 결과가 합치될 경우 동화 과정으로 과제가 마쳐지만 불합치될 경우 비평형상태가 되어 갈등 과정으로 종료된다. 비평형 이후 재차 과제 정보를 관찰하는 단계로 돌아간 후 대안적 도식을 고안 및 생성하고 처음과 같이 결과 예상, 실제 행동으로의 수행, 실제 결과와 예상 결과의 비교 과

정이 진행되며 합치될 경우 평형화되어 조절 과정으로 종료되면서 자기조절이 이루어지나 불합치되는 경우 갈등 과정으로 종료되어 비평형이 유지된 채 회로를 반복하게 된다. 이에 따라 자기조절을 과제 수행 시 관찰 정보와 기존 도식과의 합치 여부를 판단하여 평형을 유지 혹은 불합치로 인해 비평형상태로 바뀌어 피드백을 통해 합치 가능한 대안적 도식을 새롭게 생성하여 다시 평형상태가 되는 과정으로 정의할 수 있다(Kwon et al., 2020).

fNIRS (functional Near-Infrared Spectroscopy)

기능적 근적외선 분광법(functional Near-Infrared Spectroscopy, fNIRS)은 인체에 무해한 파장의 영역에 속하는 근적외선을 송신하고 산소헤모글로빈과 무산소헤모글로빈의 농도에 따라 달리 돌아오는 빛을 수신하는 방식을 통해 비침습적으로 측정하는 방법으로 인지, 운동, 감정 등의 상황에서 혈류 역학적으로 두뇌 변화를 측정이 가능(Shuvra et al., 2018)하여 두뇌 기능 연구에 활용될 수 있다.

환경 자극에 대한 반응의 영향으로 사람의 두뇌도 생리적인 변화가 나타난다. 외부 자극이 신경 활성을 유발하면서 ATP 소비가 증가하고 이를 보충하기 위해 산소와 포도당의 공급이 요구되면서 뇌 산소 대사량 및 뇌 혈류량의 변화가 일어난다(Bunce et al., 2006). 이 때 공급되는 산소의 양에 비해 뇌 산소 대사량의 변화는 크지 않아 혈액 내 산소헤모글로빈의 농도는 증가하지만 무산소헤모글로빈의 농도는 감소한다(Fox et al., 1988).

인지 및 사고 과정에서 기초적인 신경 메커니즘을 측정하기 위해 fNIRS를 비롯하여 양전자 방출 단층 촬영 기기(Positron Emission Tomography, PET), 기능적 자기 공명 영상 기기(Functional Magnetic Resonance Imaging, fMRI), 뇌파(Electroencephalography, EEG), 뇌자도(Magnetic Encephalography, MEG) 등 다양한 신경 영상 기기가 사용되어 왔다. PET, fMRI의 경우에도 인체에 무해한 것으로 알려져 있으나 PET에서 사용되는 방사선이나 fMRI에서 사용되는 자기장에 대해 성장기에 있는 아동과 부모의 거부감이 있을 수 있다. 또한 MEG, PET, fMRI의 경우 연구 대상자가 스캐너 위에 누운 상태에서 측정이 이루어지기 때문에 물리적인 제약이 있어 일상적인 과제 수행이 어렵고 EEG와 함께 머리의 움직임으로 인한 허상(artifact)에 취약한 단점이 있다(Pinti et al., 2018). 이에 비해 fNIRS는 휴대 가능하여 움직임에 대한 제약이 적고 머리의 움직임으로 인한 허상이 적으며 높은 비용이 필요하지 않기에 인지 및 사고 과정에 대한 실험에 유용하게 활용이 가능하다(Tak & Ye, 2014).

fNIRS의 경우 cm 단위로 측정이 가능하기에 비교적 낮은 공간 해상도를 가지고 있고 대뇌 피질 범위에 한해서 측정이 가능하며 심박동, 호흡 등 대뇌 이외의 혈류 역학적 반응에 대한 영향과 머리카락이나 두개골의 형태의 영향 등 제한점을 가지고 있다(Soltanlou et al., 2018). 따라서 두뇌 영역의 활성 정보를 얻은 후 별도의 데이터 변환 과정을 통해 통계 분석 과정을 거쳐 결과를 제시하는 방법이 활용되고 있다. 두뇌 영역 활성을 판단하는 방법 중 하나는 시간에 따른 신호 크기의 변화를 분석하는 것이다. 측정된 신호 중 과제 수행 구간의 optical density 변화량으로부터 산소헤모글로빈 농도 변화를 얻은 후 평균, 최대, 최소 등의 성질을 이용하여 대표성을 가지는 이미지로 산출하여 두뇌 활성을 분석한다. 산소헤모글로빈 농도 변화가 심한 잡음을 가지는 경우 SNR 값이 좋지 않아 시간에 따른 신호 크기 변화를 분석하는 데 어려움이 생길 수 있다. 이 때 일반 선형화 모델(GLM)을 통해 설계된 실험으로부터 예측이 가능한 이상적인 신호 모델 설정과 측정된 신호와의 상관관계를 분석하여 두뇌 활성을 추정하는 방식이 이용되고 있다(Ye et al., 2009).

Methodology

본 연구는 선행연구 및 문헌 분석을 통해 자기조절이 일어나는 과정과 두뇌 활성 측정 및 분석 방법에 대한 이해를 바탕으로 자기조절을 일으킬 수 있는 과제와 측정 패러다임을 설계한 후 예비실험과 전문가와의 타당도 분석을 통해 수정, 보완하였다. 이후 fNIRS 기기를 착용한 상태의 연구 대상자로부터 과제를 수행할 때의 두뇌 활성 데이터 중에서 과제 수행에 따른 행동 데이터를 추출하였고 동화, 갈등, 조절 3개의 과정으로 분류한 후 전처리 과정을 거쳐 NIRS-SPM 프로그램을 활용하여 결과를 통계적으로 분석하였다.

Participants

연구 대상자로는 연구에 동의하고 학부모의 승인을 통해 자발적으로 참여한 C 지역의 고등학생들로 과학영재학생은 과학영재학교 및 과학고등학교 재학생 16명(16.56 ± 0.66), 일반학생은 동일지역 일반계 고등학교 재학생 14명(16.89 ± 0.36)으로 총 30명으로 구성되었다. 이마에 fNIRS 기기를 착용하여 두뇌 활성을 측정하는 방식의 생체 관련 연구이기에 한국교원대학교 생명윤리 위원회의 승인을 받았으며 주로 사용하는 손에 따른 두뇌 활성의 차이를 통제하고자 연구 대상자 표집 과정에서 손우세성 검사(Oldfield, 1971)를 통해 오른손잡이 학생들만 연구에 참여하도록 하였다.

Task Design

자기조절을 일으키기 위해서는 학습자가 부분적으로 이해는 할 수 있으나 완전히 이해할 수는 없고, 도전을 불러일으키면서 해결 가능한 과제가 적합하다(Lawson & Wollman, 1977). 거울보고 글씨 쓰기 과제는 아동의 방향인지 발달, 과학 탐구학습 프로그램, 대뇌의 인지 장애 연구 등에서 활용되었다(Cornell, 1985; Fischer & Koch, 2016; Goldberg & McDermott, 1986). 오직 거울만 보고 따라 그리게 되는 상황은 아무리 간단한 기호라도 까다롭게 느껴질 수 있으며 대부분의 경우 평상시처럼 쓰면 안 되고 대칭의 변화에 대한 필요는 이해하고 있지만 어떻게 변화시켜야 할지 명확하게 인식하지 못하거나 자신이 생각하는 손의 움직임과는 다른 움직임으로 인해 혼란이 더해지면서 모순과 비평형을 일으킬 수 있다. 하지만 점차 자신의 생각을 정리하면서 새로운 전략을 수립해 가는 과정을 거쳐 충분히 해결 가능하기에 자기조절을 일으키기 위한 과제로 적절하다. 동화 과정은 학습자가 제시된 글씨를 관찰하면서 불러온 기존의 도식에 의한 예상 결과와 수행 결과가 일치하는 경우, 갈등 과정은 수행 결과와 자신의 예상이 일치하지 않아 모순을 인식하게 되는 경우, 조절 과정은 손의 움직임으로 인한 글씨의 방향을 관찰하며 얻는 정보들을 토대로 새로운 도식으로 인한 성공을 경험하게 되는 경우로 거울보고 글씨 쓰기 과제에서 자기조절의 과정을 구분할 수 있다(Kwon et al., 2020).

자기조절을 일으키기 위한 과제로 거울보고 글씨 쓰기를 선택한 이후 예비실험 및 세미나를 걸쳐 과제 제시 패러다임을 측정 시 유의사항 안내, 휴식, 과제 안내, 과제 문항 제시 순으로 구성하였다. 낯선 기기를 착용함으로 인한 긴장감을 해소시켜 주면서 평소와 같이 몸을 움직이거나 대화를 하지 않도록 충분히 유의사항을 안내한 후 눈 감고 1분, 눈 뜨고 1분의 휴식을 통해 확보한 두뇌 활성 데이터는 과제를 수행하는 구간과의 대조군으로 활용하였다. 이 후 과제 문항별로 제한 시간은 60초, 고정 10초를 8회 반복하면서 도전 횟수에 대한 제한은 없도록 하여 제한 시간 내에 끝까지 도전할 수 있도록 하고 성공적으로 수행한 경우 바로 다음 문제를 풀 수 있도록 하였다. 연구에 활용한 과제 패러다임은 Fig. 2와 같다.

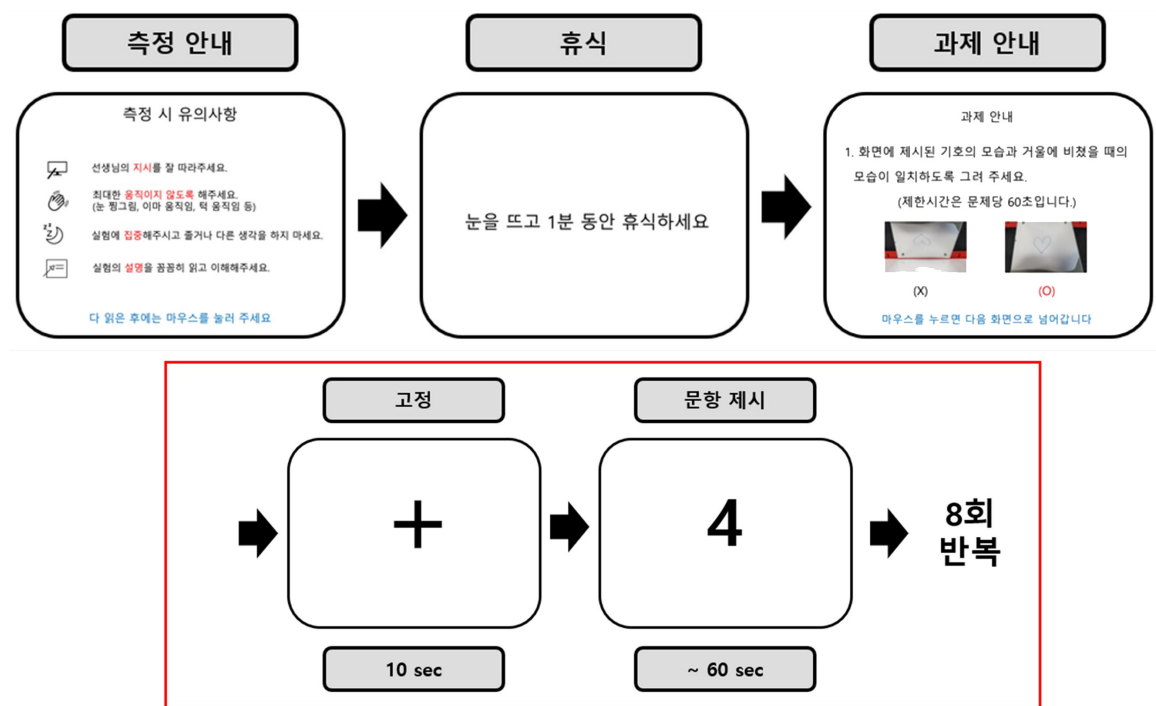


Fig. 2. Paradigm of mirror task

Measurement

fNIRS 측정기기로는 OBELAB Inc.에서 개발한 NIRSIT(NS1-H20A)를 활용하였는데 헤드마운트 형태의 근적외선 다채널 기기로서 안쪽에는 780 nm와 850 nm 파장의 근적외선을 대뇌 피질로 방출하는 24개의 레이저 센서와 돌아오는 빛을 수신하는 32개의 수신기 센서로 구성되어 있다. 센서의 위치는 근적외선이 통과 가능한 두피 안쪽 3 cm 깊이의 대뇌 피질 영역을 48개의 채널로 매핑이 가능하도록 설계되었고 각 채널에 산소헤모글로빈과 무산소헤모글로빈의 농도값이 수집되어 해당 위치의 두뇌 활성을 측정할 수 있다. 연구 대상자가 측정 기기를 착용할 때는 이마 부분의 곡면을 고려하여 채널 위치가 실제 대뇌 피질 영역의 위치와 매칭이 되도록 부착시키면서 스트랩을 이용하여 고정시킨 후 캘리브레이션을 통해 개별 센서별로 원활하게 신호가 잡히는지의 여부를 데이터 수집기기로 확인하였다. 이 때 머리카락이 측정기기와 이마 사이에 놓이게 되는 경우 신호 수신에 큰 방해가 되기 때문에 머리카락이 측정기기의 센서에 닿지 않도록 하였다.

두뇌 활성 측정기기와 데이터 수집기기 이외에도 거울 보고 글씨쓰기 과제를 수행하면서 거울이 아니라 자신의 손이 보이는 경우 거울을 활용하지 않는 전략을 세우는 상황을 막기 위해 오직 거울을 통해서만 글씨를 쓸 수 있는 각도를 고려하여 제작한 가림장치를 세웠고 입력신호와 시간에 따라 화면이 전환되면서 자동으로 시간 정보를 기록할 수 있는 과제 제시용 기기를 사용하였다. 즉, 데이터 수집기기는 과제 제시용 기기로부터 얻은 제시 화면별 시간 정보와 두뇌 활성 측정기기로부터 얻은 두뇌 활성 정보를 조합하여 구간별 분석이 가능한 데이터로 저장된다. 또한 연구 대상자가 과제를 수행하는 과정을 영상으로 녹화하여 각 문항에 대해 시도 구분 및 측정 당시 놓칠 수 있는 행동 관련 특이사항을 기록하였다. 과제 제시 관련 측정 환경은 Fig. 3과 같다.

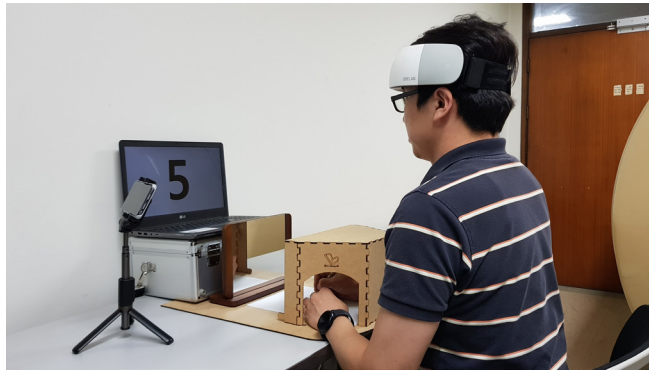


Fig. 3. Measurement environment

Analysis

두뇌 활성 영역 및 기능을 밝히기 위해서는 fNIRS 데이터에 대한 전처리 과정이 필요하다. Nirsit Analysis Tool (v2.2)를 이용하여 이마 쪽의 맥박, 강한 빛, 심장 박동 등의 신호들을 제거하는 Signal Processing 과정을 통해 Optical Density를 얻은 이후 MBLL(Modified Beer Lambert Law) 법칙을 활용한 계산을 통해 과제 수행 구간과 대조 구간에서의 혈액 내 산소헤모글로빈과 무산소헤모글로빈 변화량을 얻게 된다. 또한 Matlab (2019b)과 NIRS_SPM v4.1(Ye et al., 2009)을 이용하여 wavelet-MDL(Minimum Description Length) detrending을 통해 혈류 역학적 신호와 관계없는 인공 신호 및 잡음을 제거하고 혈류 역학적 반응 함수(Hemodynamic response function, HRF)를 적용하여 fNIRS에서 BOLD 신호와 실제 두뇌 활동 사이의 지연 시간을 보정하였다. 이후 추정(Estimation) 단계에서 각 채널에 할당된 데이터 수치를 일반 선형화 모델(GLM)을 이용하여 예상 가능한 이상적 신호 모델을 설정하고 측정된 신호와의 상관관계 분석을 통해 BOLD 신호를 최대한 정확하게 모형화할 수 있는 GLM 회귀계수 β 값을 산출하여 두뇌 활성 추정에 활용하였다.

전처리 과정을 마친 개인별 데이터들은 자기조절 과제 수행 과정과 자기조절의 하위 과정(동화, 갈등, 조절 과정)의 조건에 해당하는 GLM 회귀 계수 β 값을 구한 이후 각 조건별로 충족되는 연구 대상자들의 채널별 β 값을 활용하여 단일 표본 t검정을 거쳐 $\alpha=0.05$ 수준에서 유의미한 활성을 가진 채널을 도출하였다. 집단 분석에서는 과학영재학생과 일반학생의 집단으로 연구 대상자들을 구분하고 각 집단의 구성원들이 가진 채널별 β 값을 활용하여 독립 표본 t검정을 거쳐 $\alpha=0.05$ 수준에서 유의미한 활성을 가진 채널을 도출하였다. 유의미하게 도출된 채널의 통계 수치는 두뇌 활성과 관련된 기능을 용이하게 설명하고자 브로드만 영역별, 좌우 반구가 나뉜 해부학적 영역별로 정리하였고 BrainNet Viewer v1.7(Xia et al., 2013)을 통해 채널의 해부학적 위치 및 활성 정도를 시각화하였다.

Results

Assimilation Thinking Process

거울 보고 글씨쓰기 과제 수행 과정 중에서 기존 도식을 유지하여 첫 시도에서 성공하는 동화의 사고과정 구간에서 측정된 유의미한 두뇌 활성 부위는 Fig. 4와 같다.

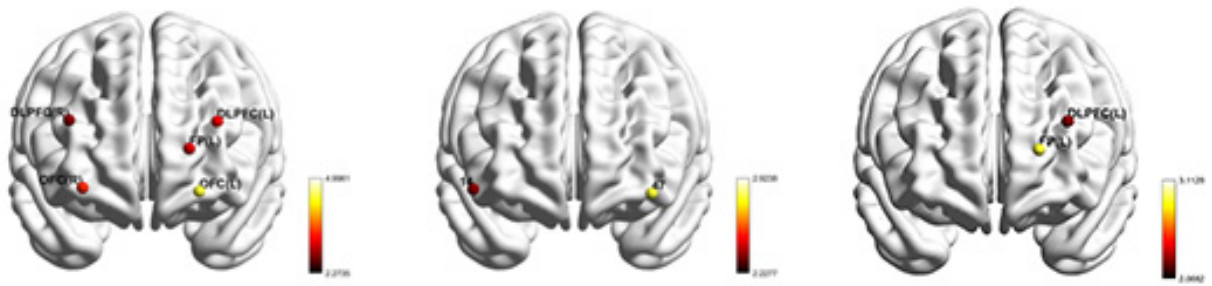


Fig. 4. Brain activity of during assimilation (science gifted students > eye open, general students > eye open, science gifted students > general students, $p < 0.05$)

과학영재학생과 일반학생의 집단에 대해 공통적으로는 좌우 반구의 안와전두피질(Orbitofrontal Cortex, OFC) 영역의 두뇌 활성이 유의미하게 나타났다. OFC는 의사결정과 같은 판단 과정에 있어 핵심 역할을 수행하고 보상에 대한 가치를 판단하며 동기 보상 관련 다양한 정보 통합과 관련이 있어 인지적 선택에 대해 주관적인 가치를 부여하여 선택 조절을 기여하는 상황에서 활성이 나타난다(Ballesta et al., 2020; Bechara et al., 2000; Wallis, 2007). 이를 토대로 기존 도식을 활용한 과제 수행을 통해 실제결과와 예상결과의 합치가 이루어지는 동화 과정의 경우 공통적으로 OFC 영역의 유의미한 두뇌 활성을 통해 기존 도식의 오류를 예상하고 성공 혹은 실패 여부를 파악하는 과정이 이루어지는 것으로 보인다.

두 집단을 대조한 결과 과학영재학생은 일반학생에 비해 좌반구의 배외측전전두피질(Dorsal Lateral Prefrontal Cortex, DLPFC)과 좌반구의 전두극(Frontal Pole cortex, FP) 영역에서 유의미한 활성이 나타났다. DLPFC는 작업 기억을 조작하고 주의 집중과 관련된 영역으로 우반구는 시각적 작업 기억의 정보를, 좌반구는 언어적 작업 기억의 정보를 중심으로 조작이 이루어지는 위치에 따른 기능 차이가 있다(Mars & Grol, 2007). FP는 문제 해결을 위한 목표 지향적 사고, 계획의 수립, 동시에 다중작업을 수행하는 기능과 관련된 영역이다(Koechline, 2011). 과학영재학생은 좌반구 DLPFC, FP 영역을 활용하여 과제 관련 언어적 작업 기억의 정보 조작을 통해 기존 도식의 계획 및 적용 등 목표 지향적 다중 작업이 이루어지는 것으로 보이는데 이는 신속한 해결과제 인지 및 문제 해결을 위한 전략 선택, 필요 자원 할당, 해결 과정을 점검하는 자기조절이 뛰어난 영재들의 특성과 부합한다고 할 수 있다(Rogers, 1986).

Conflict Thinking Process

거울보고 글씨쓰기 과제 수행 과정 중 시도를 하였지만 행동 결과와 예상 결과의 불합치가 일어나 오류라는 판정을 얻은 구간에서 측정된 유의미한 두뇌 활성 부위는 Fig. 5와 같다.

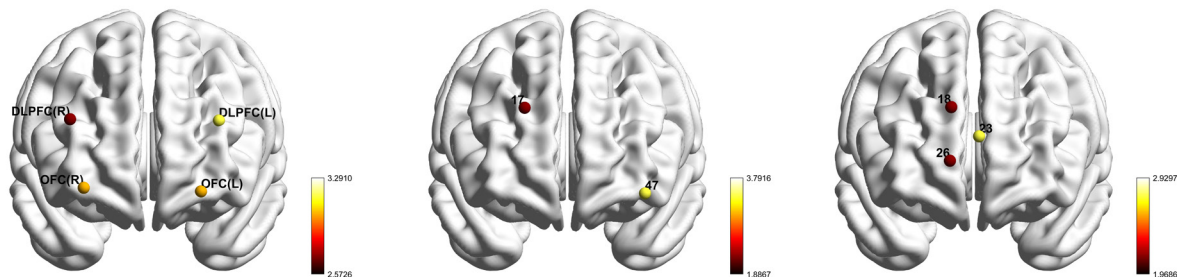


Fig. 5. Brain activity of during conflict (science gifted students > eye open, general students > eye open, science gifted students > general students, $p < 0.05$)

과학영재학생과 일반학생의 집단에 대해 공통적으로는 우반구 DLPFC와 좌반구 OFC 영역에 속하는 채널들의 활성이 유의미하게 나타났으나 과학영재학생은 일반학생에 비해 우반구 DLPFC와 좌우반구 FP에 해당하는 채널에서 차이가 있었다. 이는 기존 도식을 불러오거나 대안적으로 형성된 도식을 이용하여 예상하지만 본인의 수행 결과가 목표에 부합하지 않아 인지 부조화를 겪는 갈등 과정에서 동기 보상과 선택에 대한 가치와 평가를 부여하면서 작업 기억 정보의 조작이 공통적으로 이루어지고 있음을 시사한다(Murphy et al., 1998). 특히 과학영재학생은 불합치 안에서도 시각적 작업 기억의 정보를 조작하며 대안적 도식의 고안, 적용과 같은 목표 지향적 다중 작업이 활발하게 이루어지는 것으로 보이는 점은 문제 해결 및 목표 성취를 위해 해결 의지를 갖고 집중하는 과학영재의 특성과 부합한다고 할 수 있다(Jang et al., 2013).

Accommodation Thinking Process

거울 보고 글씨쓰기 과제 수행 과정 중에서 대안적 도식 형성을 통한 행동 결과와 예상 결과의 합치를 통해 성공을 거둔 구간에서 측정한 유의미한 두뇌 활성 부위는 Fig. 6과 같다.

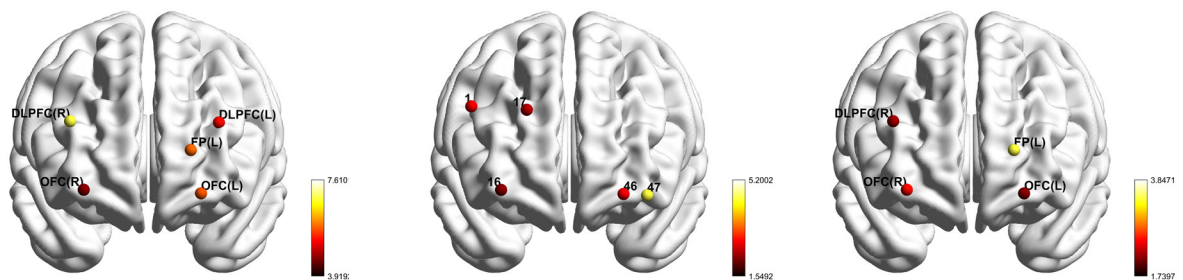


Fig. 6. Brain activity of during accommodation (science gifted students > eye open, general students > eye open, science gifted students > general students, $p < 0.05$)

과학영재학생과 일반학생의 집단에 대해 공통적으로는 우반구 DLPFC와 좌우반구 OFC 영역에 속하는 채널들의 활성이 유의미하게 나타났으나 과학영재학생은 일반학생에 비해 우반구 DLPFC, 좌반구 FP, 좌우반구 OFC 영역에서 차이가 있었다. 비평형 상태의 문제 해결을 위해 대안적 도식을 세우고 예상을 거치며 단어로 제시된 과제 형태이나 문제 해결이 안되기에 갈등 과정을 거치면서 언어 정보가 아닌 시각적 이미지로 정보를 활용하면서 본인의 행동에 대해 확인 및 평가하는 과정이 이루어지고 있음을 시사한다(O'Doherty et al., 2003). 특히 동화 과정이나 갈등 과정에 비해 OFC와 DLPFC에 속하는 채널의 t-value가 높은 점은 비평형 상태였던 이전 시도로부터 수집된 작업 기억 정보의 조작을 토대로 대안적 도식을 형성, 적용 및 평가의 과정을 거치며 주어진 과제의 상황에 맞게 인지 정보 처리가 수월하게 하기 위해 두 영역이 가진 기능을 적극적으로 활용했음을 의미한다. 또한 과학영재학생은 시각적 작업 기억 정보 조작을 토대로 대안적 도식 형성 과정에서의 목표 지향적 다중 작업이 보다 활발하게 이루어지는 것으로 보이는데 메타인지 활용능력이 우수하여 정보를 정교화, 조직화하는 능력이 뛰어난 과학영재의 특성과 부합한다고 할 수 있다(Davis & Rimm, 2004).

Conclusions and Educational Implications

본 연구는 자기조절 과제를 수행하는 과정에서 나타나는 사고를 fNIRS를 활용하여 과학영재학생과 일반 학생의 두뇌 활성을 비교 분석하였다. 이를 위해 자기조절을 일으킬 수 있는 과제를 개발하여 fNIRS 측정 기기를 통해 정량적으로 데이터를 수집하였고 자기조절의 과정인 동화, 갈등, 조절 과정에서의 두뇌 활성을 각각 살펴 보았다. 이러한 연구결과로부터 얻어진 결론 및 교육적 함의는 다음과 같다.

첫째, 과학영재학생과 일반학생은 공통적으로 자기조절 과제 수행 과정에서 오류를 예상하고 성공, 실패 여부를 파악하며 인지적 선택을 조절하는 OFC 영역을 활용하고 있음을 확인하였고 이는 행동의 결과를 예상하고 실제 결과와 합치 여부를 지속적으로 확인하는 자기조절의 특징과 관련 있음을 알 수 있다.

둘째, 자기조절이 일어나는 과정을 세분화시킨 동화, 갈등, 조절 과정별로 두뇌 활성의 차이가 있었다. 기존의 도식을 활용하여 합치가 이루어지는 동화 과정에서는 OFC 영역의 활성이 유의미하게 나타났는데 이는 기존 전략을 기준으로 수행 결과에 대한 예상, 평가 및 선택 조절을 하는 것으로 보인다. 또한 갈등 과정과 조절 과정을 통해서 대안적 도식 형성이 이루어질 때 DLPFC 영역의 활성이 유의미하게 나타났는데 이는 인지적 부조화에 놓여진 이후 문제 해결을 위해 기존 도식에 의한 전략과 과제와 관련된 정보의 통합 과정이 이루어지고 있음을 알 수 있다.

셋째, 동일한 형태 및 난이도를 가진 과제를 수행하였음에도 과학영재학생이 일반학생과 비교하여 작업 기억의 정보 조작, 도식의 계획, 고안, 적용 등 목표 지향적 다중 작업과 관련된 FP, DLPFC 영역의 활성을 활용한 점은 문제 해결을 위한 목표 인지, 전략의 적절한 선택, 정보의 정교화와 조직화를 통한 필요 자원 할당 등 자기조절이 뛰어난 과학영재의 특성과 관련시킬 수 있다.

이 연구에서는 자기조절이 일어나는 과정에서 실제 결과와 예상 결과의 비교를 통한 피드백이 지속적으로 이루어져야 함을 보여 주었기에 본인의 수행이 마칠 때마다 어떤 과정의 개선이 필요한지 점검하고 이후 문제 해결을 위해 새로운 방법을 제안할 수 있는 활동 중심의 교육이 제공될 필요가 있다. 또한 일반학생에 비해 과학영재학생에게서 나타나는 두뇌 활성 차이를 활용하여 영재교육대상자 선발, 진단을 위한 평가의 결과를 지지하거나 재능 계발을 위한 맞춤 교육 프로그램, 영재성을 계발하기 위해 설계된 교수 방법 등의 신뢰도를 높일 수 있는 도구로서의 활용도 가능할 것이다. 또한, 동화, 갈등, 조절 과정에서 두뇌 활성 차이가 있음을 확인하였기에 관련 기능을 신장시킬 수 있는 맞춤 교육이 필요하다. 동화 과정에서는 기존 도식을 활용한 목표 설정, 문제 해결 방법 고안 및 적용 중심의 훈련이, 갈등과 조절 과정에서는 문제 해결을 위한 정보와 본인의 전략을 매칭하여 대안적 도식을 구상하고 평가할 수 있는 훈련이 요구된다(Kwon et al., 2020). 맞춤 교육을 통한 효과적인 자기조절이 이루어진다면 문제 상황 발생 이후 목표 설정, 해결 전략의 고안, 적용, 평가의 과정을 스스로 통제하여 문제 해결은 물론 인지구조 내에서의 평형화에 도달이 만족스럽게 가능할 것이다. 마지막으로 자기조절 과정 및 과학영재의 특성 관련 연구를 지지하는 검증도구 역할 뿐 아니라 인지심리학에서 다루고 있는 연구들에 있어 fNIRS 기술을 활용하여 두뇌 활성을 분석하는 신경학적 접근 방식의 예로도 활용될 수 있다.

Acknowledgement

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

References

- Ablard, K. E., & Lipschultz, R. E. (1998). Self-regulated learning in high-achieving students: Relations to advanced reasoning, achievement. *Journal of Educational Psychology*, 90, 94-101.
- Ballesta, S., Shi, W., Conen, K. E., & Padoa-Schioppa, C. (2020). Values Encoded in Orbitofrontal Cortex Are Causally Related to Economic Choices. *bioRxiv*.
- Bechara, A., Damasio, H., & Damasio, A. R. (2000). Emotion, decision making and the orbitofrontal cortex. *Cerebral cortex*, 10, 295-307.
- Bunce, S. C., Izetoglu, M., Izetoglu, K., Onaral, B., & Pourezaei, K. (2006). Functional near-infrared spectroscopy: An emerging neuroimaging modality. *IEEE Engineering in medicine and biology magazine*, JULY/AUGUST, 54-62.
- Corno, L. (1986). The metacognitive control components of self-regulated learning. *Contemporary Educational Psychology*, 11, 333-346.
- Dai, D. Y., & Chen, F. (2013). Three paradigms of gifted education: In search of conceptual clarity in research and practice. *Gifted Child Quarterly*, 57, 151-168.
- Davis, G. A., & Rimm, S. (2004). *Education of the Gifted and Talented* (5th ed.). Needham Heights, MA: Allyn & Bacon.
- Fischer, J. P., & Koch, A. M. (2016). Mirror writing in typically developing children: A first longitudinal study. *Cognitive Development*, 38, 114-124.
- Fox, P. T., Raichle, M. E., Mintun, M. A., & Dence, C. (1988). Nonoxidative glucose consumption during focal physiologic neural activity. *Science*, 241, 462-464.
- Goldberg, F. M., & McDermott, L. C. (1986). Student difficulties in understanding image formation by a plane mirror. *The Physics Teacher*, 24, 472-481.
- Hughes, S. J. (2008). Comprehensive assessment must play a role in RTI. *Neuropsychological perspectives on learning disabilities in the era of RTI: Recommendations for Diagnosis and Intervention*, 115-130.
- Jang, J., Chung, Y., Choi, Y., & Kim, S. W. (2013). Exploring the characteristics of science gifted students' task commitment. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 33, 1-16.
- Koechlin, E., & Hyafil, A. (2007). Anterior prefrontal function and the limits of human decision-making. *Science*, 318, 594-598.
- Kwon, S. H., Park, J. S., Park, S. H., 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.
- Kwon, Y. J., Lee, J. K., Shin, D. H., & Jeong, J. S. (2009). Changes in brain activation induced by the training of hypothesis generation skills: An fMRI study. *Brain and Cognition*, 69, 391-397.
- Lawson, A. E., & Wollman, W. T. (1977). Using chemistry problems to provoke self-regulation. *Journal of Chemical Education*, 54, 41.
- Lawson, A. E. (1995). *Science Teaching and the Development of Thinking*. Belmont, CA: Wadsworth Publishing Company.

- Lawson, A., E. (2003). *The Neurological Basis of Learning, Development and Discovery*. Netherlands: Springer.
- Mars, R., & Grol, M. (2007). Dorsolateral prefrontal cortex, working memory, and prospective coding for action. *The Journal of Neuroscience* 27, 1801-1802.
- 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.
- O'Doherty, J. P., Dayan, P., Friston, K., Critchley, H., & Dolan, R. J. (2003). Temporal difference models and reward-related learning in the human brain. *Neuron*, 38, 329-337.
- 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 fNIRS in educational research. *Brain, Digital, & Learning*, 9, 213-231.
- Pinti, P., Aichelburg, C., Gilbert, S., Hamilton, A., Hirsch, J., Burges, P., & Tachtsidis, I. (2018). A review on the use of wearable functional near-infrared spectroscopy in naturalistic environments. *Japanese Psychological Research*, 60, 347-373.
- Risemberg, R., & Zimmerman, B. J. (1992). Self-regulated learning in gifted students. *Roper Review*, 15, 98-101.
- Ritchotte, J. A., Matthews, M. S., & Flowers, C. P. (2014). The validity of the achievement-orientation model for gifted middle school students: An exploratory study. *Gifted Child Quarterly*, 58, 183-198.
- Rogers, K. B. (1986). *Do the Gifted Think and Learn Differently? A Review of Recent Research and Its Implications for Instruction*. Virginia: ERIC Clearinghouse.
- Shuvra, L. T., Islam, S. R., Zaman, N., & Hasan, A. (2018). Analysis of hemodynamic response function using fNIRS. *International Conference on Innovation in Engineering and Technology*, 1-6.
- Siegle, D., & McCoach, D. B. (2005). Making a difference: Motivating gifted students who are not achieving. *Teaching Exceptional Children*, 38, 22-27.
- 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, 27.
- Tak, S., & Ye, J. C. (2014). Statistical analysis of fNIRS data: A comprehensive review. *Neuroimage*, 85, 72-91.
- Vohs, K. D., & Baumeister, R. F. (2004). *Understanding Self-Regulation*. Handbook of Self-regulation, 19. NY: Guilford Press.
- Wallis, J. D. (2007). Orbitofrontal cortex and its contribution to decision-making. *Annual Review of Neuroscience*, 30, 31-56.
- Xia, M., Wang, J., & He, Y. (2013). BrainNet viewer: A network visualization tool for human brain connectomics. *PLoS one*, 8, e68910.
- Ye, J. C., Tak, S., Jang, K. E., Jung, J., & Jang, J. (2009). NIRS-SPM: Statistical parametric mapping for near-infrared spectroscopy. *NeuroImage*, 44, 428-447.

Authors Information

Park, Jin-Sun: SeoulSahmyook Middle School, Teacher, First Author

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