

생물 과제의 자기조절 활동에서 나타나는 중등학생의 연령별 두뇌 활성 -fNIRS 연구

이서리 · 권용주^{1*}

여천고등학교 · ¹한국교육원대학교

Age-Specific Brain Activation in Secondary School Students' Self-Regulating Activities on Biological Tasks -fNIRS Study

Seo-Ri Lee · Yong-Ju Kwon^{1*}

YeoCheon High School · ¹Korea National University of Education

Abstract : The purpose of this study is to compare and analyze secondary school student's brain activity on assimilation, conflict, and accommodation processes of self-regulation. The self-regulation task was presented a biological phylogenetic task, and the brain activity was measured and analyzed with fNIRS. As a result, a significant activation was found in the left DLPFC, OFC, and FP regions in the conflict process compared to the assimilation process, and a significant activation was found in DLPFC and VLPFC in the accommodation process. As the age increase, the DLPFC also increases in the conflict process and VLPFC increases in the assimilation process. In addition, comparing conflict and accommodation process, the 7th grade students show a significant brain activity in the right VLPFC, the 9th grade students show significant brain activity in the left FP and DLPFC areas in the accommodation process. However, the 11th grade students did not show any significant brain activity at this process. These results presumably show that the neurological research method could be applied to educational research in cognitive activity and classroom instructional situation.

keywords : self-regulation, brain activity, fNIRS, biological phylogenetic task, secondary school

I. 서론

4차 산업혁명 시대의 도래뿐만 아니라, COVID-19로 인하여 학습자들의 학습 환경이 급격하게 변화하였다. 개별화 학습을 기반으로 한 온라인 학습은 선택이 아닌 필수의 상황이 되었으며 이러한 학습 환경의 변화에서 요구되는 자기주도적이고 능동적인 학습을 위해서는 학습자의 자기조절 능력이 더욱 중요해졌다. 자기조절은 관찰된 현상과 기존 인구구조가 갈등상황인 비평형상태에서 협력하여 판단과 피드백을 통해 대안 도식을 성공적으로 생각하게 되는 과정이다 (Kwon *et al.*, 2020). 관찰(Observation)된 사실은 현재의 정신구조에 동화(Assimilation)되어 예상 결과를 기대(Expectation)하며, 실제 행동(Behavior) 결과

와 비교(Comparison)한다. 예상 결과와 실제 결과가 일치(Good match)하면 동화로 완료된다. 동화는 현재 자신이 가지고 있는 정신구조에 의하여 새로운 정보에 대해 즉각적이며 잠재적으로 이루어진다. 동화 과정에서 학습자의 행동은 예상과 기대를 포함하며, 이 행동이 성공적이라면 적응이 불필요하지만, 실제 결과와 예상이 일치하지 않는다면(Poor match), 비평형(Disequilibrium)이 발생한다. 대안적 정신구조를 선택 및 고안하고 평형을 회복하기 위해 예상 결과와 실제 결과 사이에 일치가 일어날 때까지 순환(cycle)을 반복하게 된다(Lawson, 1995).

그러나 이 모델에서는 동화와 조절이 구분이 모호하며 비평형상태에 대한 구체적 언급이 부족하기 때문에 갈등의 개념을 상세화한 인지 갈등 모형

* 교신저자: 권용주 (kwonyj@knue.ac.kr)

** 이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2019R1F1A1058641).

*** 2022년 2월 10일 접수, 2022년 4월 21일 수정원고 접수, 2022년 4월 21일 채택

<http://dx.doi.org/10.21796/jse.2022.46.1.30>

(Hashewh, 1986) 및 대안적 도식을 생성하는 과정을 상세화한 연구(Kwon *et al.*, 2011)를 토대로 순환 구조를 체계화하여 수정된 형태의 자기조절 과정을 제시하였다(Kwon *et al.*, 2020). Kwon *et al.* (2020)의 연구에서 제시된 수정된 모델에 따르면, 학습자는 관찰 후 관찰된 현상과 관련된 기존 도식을 인출하여 예상 결과를 도출하고 실제 행동 후 둘을 비교한다. 만약 예상 결과와 실제 행동 결과가 일치하면 동화 과정으로 종료되어 평형상태를 유지하며, 일치하지 않는다면 갈등으로 종료되고 비평형상태가 된다. 비평형 상태에서는 관찰된 현상에 대한 정보의 명확 유무에 따라 관찰 과정으로 되돌아가거나 대안적 도식을 생성하는 단계로 들어간다. 대안적 도식이 생성되면 예상, 행동 비교 과정을 거치고 최종적으로 일치하게 되면 평형상태에 이르러 조절이 완료되고 자기조절에 성공하게 된다. 그러나 이 단계에서 실패하게 되면 갈등으로 종료되어 자기조절 과정을 다시 반복하게 된다(Figure 1).

생명현상을 탐구하고 생명현상의 기원에 대해 학습하는 생명과학의 경우 생명현상과 관련된 학습자의 인지구조를 끊임없이 변화시켜 개념을 구성하므로 인지적, 정서적 어려움을 해결해내는 자기조절이 필요하다. 생물 분류를 통해 생물의 유연관계를 파악하는 사고 과정은 대상으로부터 정보를 지속적으로 탐색하고 범주화 가능한 정보를 발견하는 과정에 해당하며 (Byeon *et al.*, 2014), 유연관계 분류 기준으로 사용 가능한지에 대해 확인하는 과정을 포함한다. 그러므로 관련된 다양한 정보를 작업 기억에 보유하고 있어야 하며 모니터링을 통한 판단과 피드백으로 예상 결과와 실제 결과의 합치 유무를 판단하는 자기조절 과정

이 필수적으로 요구된다. Pascual-Leone (1970)에 따르면 작업 기억에서 처리 가능한 정보의 양은 나이에 따라 증가하며 발달 과제의 해결에 실패하는 까닭은 그 과제를 해결하기 위해서 요구되는 정보처리 양이 자신의 정보처리 용량을 넘어서기 때문이라고 하였다. 나이가 들어감에 따라 단기 기억의 정보처리 용량이 증가하므로 이전에는 해결할 수 없었던 과제를 해결할 수 있을 정도로 인지능력은 발달한다고 보았다.

그러나 과학기술의 발달에 따라 인간 두뇌 활동에 대한 관찰 및 정량적 측정이 가능해지면서 학습 현상을 이해하려는 학습과학 등의 개념들이 신경과학 분야의 연구 결과와 연계되어 재평가되어야 한다는 주장(OECD, 2002) 및 신경생물학, 뇌과학, 인지신경과학을 교육학과 접목한 교육신경학이 주목받으며 인간 사고 과정에 대한 과학적 이해를 통해 교육 환경을 개선하고자 하는 교육 연구가 활발하게 논의되기 시작하였다(Carew & Magsamen, 2010). 따라서 학습에서 필수적인 능력인 자기조절 과정에 대한 신경학적 연구를 병행하면 객관적이고 실증적인 데이터를 통해 자기조절 과정에 대한 폭넓은 이해가 가능해질 것이며 특히 뇌와 관련된 지식을 교육적으로 활용하는 방안에 대한 논의는 보다 다각적으로 접근 가능할 것이다.

특히, 이 연구에서 활용하는 기능적 근적외선 분광기(fNIRS)는 Modified Beer-Lambert 법칙 (Yamshita *et al.*, 1996)에 기반하여 두 파장 대역의 레이저를 통해 두뇌의 혈액 내 산소 포화도를 측정하여 실시간으로 영상화된 두뇌 활성화 수준을 조사할 수 있는 방법이다. 휴식상태에서는 뇌혈류가 산소대사와 높은 상관관계를 가지는 반면, 신경 활동 중에는

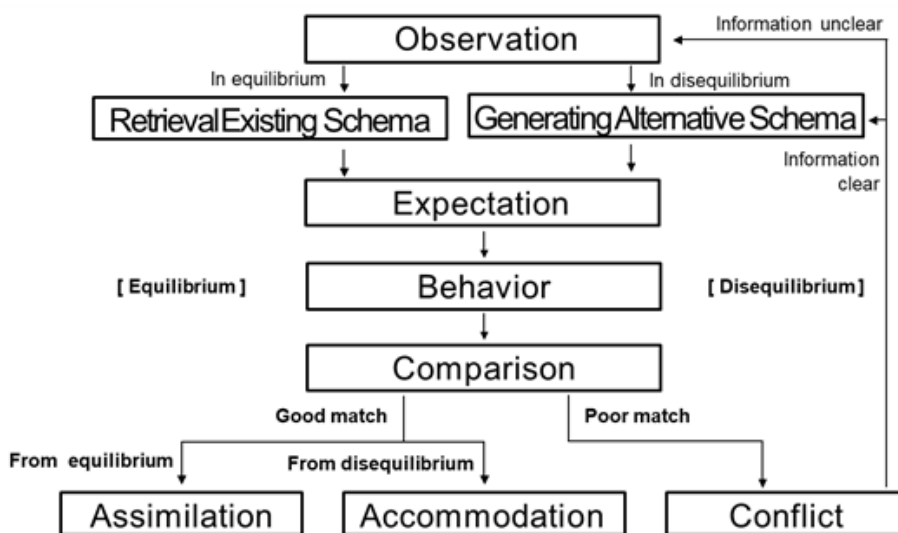


Figure 1. Revised self-regulation process (Kwon *et al.*, 2020)

뇌 산소대사율이 증가하는 정도보다 뇌혈류가 더 빠르게 증가하므로 휴식상태보다 상관관계가 낮아진다 (Fox *et al.*, 1988). 이러한 측정 원리를 갖는 fNIRS는 장비의 휴대가 용이하며, 비침습적이고, 비교적 환경의 제약 없이 대뇌 피질의 활성화를 측정할 수 있다는 장점이 있다(Ham *et al.*, 2018). 그러므로, 머리 움직임과 같은 외부 잡음에 상대적으로 안정적이며, 폐쇄된 공간에서 측정이 이루어지는 fMRI와 다르게 개방된 공간에서 실시할 수 있다는 점에서 아동 및 청소년의 두뇌 활성 측정에 다양하게 활용되고 있다 (Park *et al.*, 2019; Park & Kwon, 2021).

따라서, 이 연구에서는 청소년기인 중학생과 고등학생을 대상으로 자기조절 과제를 수행할 때 나타나는 두뇌 활성을 fNIRS를 활용하여 수집한 데이터를 분석하여 비교하고자 한다. 이를 위한 연구 문제는 중학교 1학년, 중학교 3학년, 고등학교 2학년 학생들의 자기조절 과정의 동화, 갈등, 조절 간 두뇌 활성의 차이를 비교 및 분석하는 것이다.

II. 연구 방법

1. 연구 대상

연구 참여가 가능한 중·고등학교 관계자와 협의를 한 뒤 연구 동의를 구하고 학생들을 자발적 의사에 따라 모집하였다. 연구참여자에게 손 우세성 검사 (Edinburgh, 1971)를 실시하였고, 그 결과 오른손잡이인 중학교 1학년 32명, 중학교 3학년 26명, 고등학교

2학년 22명 총 80명을 최종 대상으로 선정하여 자료를 수집하였다. 연구 대상자는 이마에 fNIRS 측정 기기를 30분 내외로 착용하고 이마 앞 영역의 두뇌 활성을 측정하는 생체 연구이기 때문에 한국교원대학교 생명윤리위원회(IRB)의 사전 승인을 받았다 (KNUE-202011-BMSB-0100-01).

2. 과제 설계

자기조절을 위한 과제 조건은 학생들이 부분적으로 이해하지만 완전히 이해할 수 없는 것이어야 하며, 자신의 생각을 반영하는 적절한 힌트를 가지고 스스로 아이디어를 모으도록 허용될 수 있는 과제(Lawson & Wollman, 1977)가 주어져야 한다. 2015 개정 과학과 교육과정 생물 분류의 목적은 생물 간의 멀고 가까운 관계를 파악하는 것이지만(MOE, 2015), 학생들은 생물 분류와 유연관계 기준을 외형적인 특징만을 보고 판별하는 경향이 강하다. 평소 자신이 생각하고 있는 개념이나 자신의 경험으로 모두 설명되기 어려운 도전적인 과제를 제시하기 위해 동물계, 균계, 식물계의 대표적인 생물을 한 가지의 사진과 함께 명칭을 제시하였고, 제시한 이 생물과 가장 가까운 유연관계를 갖는 생물을 세 가지 선택지와 비교하여 선택하도록 과제를 구성하였다(Figure 2). 세 가지 선택지로 제시한 생물의 이름은 제시하지 않고 사진만을 제시하여 스스로 다양한 생각을 모을 수 있도록 하였다. 자기조절의 과정에서 나타나는 두뇌 활성을 fNIRS를 이용해 분석하는 것이 이 연구의 목적이기 때문에 사고 과정 별로 과제를 세분화하여 제시하였다. 연구에 활용한 과제의 흐름은 Table 1과 같다.

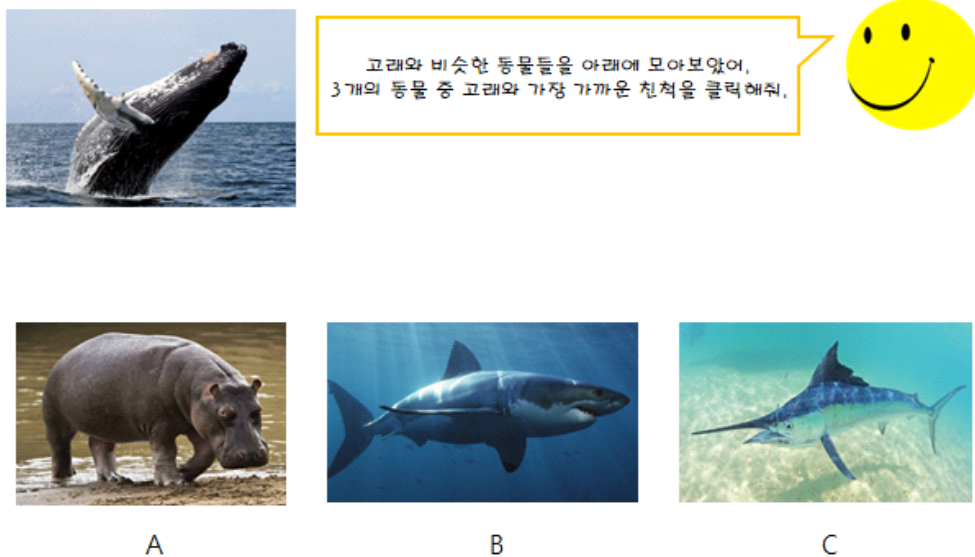


Figure 2. An example of self-regulation task (Mammal)

Table 1. Details of the self-regulation problem-solving task by presentation process

Sequence	Context
1	지문 이해하는 사고
2	유연관계가 가까운 생물 선택을 위한 사고
3	유연관계가 가까운 생물 간 조건 비교 사고
4	정답을 확인한 이후의 사고
5	조건별 정보를 탐색할 때의 사고
6	유연관계가 가까운 생물 선택을 위한 재사고
7	조건 선택을 위한 사고
	반복

고안된 측정 과제가 생물 자기조절을 측정하는 과제로서 타당한지에 대해서 검증하였다. 타당도는 생물 교육 전문가가 2인, 생물교육 전공 교사 4인을 대상으로 고안된 과제의 타당도 검증을 수행하였다. 검증에 참여한 전문가는 모두 과학적 자기조절에 관한 연구 논문을 출판한 경험이 있다. 고안된 과제의 생물 자기조절 문제 여부 대한 검증을 실시하였고, 타당도 검증은 전문가 모두가 100% 동의할 때까지 과제를 수정한 후 측정과제를 확정하였다.

3. 데이터 수집

두뇌 활성 측정 기기는 OBELAB의 NIRSIT (모델명: NS1-H20A; OBELAB, Seoul, Korea)을 사용하였다. 측정 기기의 센서 위치는 근적외선이 통과 가능한 깊이인 두피 중층 3cm 정도의 대뇌 피질 영역을 48개의 채널로 구성되어 있으며, 측정된 빛의 세기를 광학 밀도로 변환하여 각 채널마다 계산된 HbO₂와 Hb 농도를 전두엽 기능에 맞게 맵핑할 수 있도록 구현되어 있다. 측정 기기 정면부에 표시된 3개의 점 중 중앙의 점을 눈과 눈 사이의 중간지점에 위치시키고 기기의 하단부를 눈썹 위에 고정시켜 앞이마에 충분히

밀착시킨 다음 측정 기기의 뒷부분에 부착된 스트랩을 이용해서 이마에 충분히 밀착될 수 있도록 조여준다. 측정 기기의 착용이 완료되면 NIRSIT EYE PC Tool (v2.4)를 이용한 데이터 수집 기기가 측정 기기와의 무선연결이 원활한지 확인한다. 이후 교정 (Calibration) 작업을 거쳐 48개 채널의 신호대 잡음비(Signal-to-noise ratio, SNR)를 고려하여 근적외선 송신 및 수신이 원활히 이루어질 수 있도록 보정한다. 연구 대상자는 과제 제시 화면을 응시하고 마우스를 이용해 화면 안내에 따라 과제 수행을 스스로 컨트롤할 수 있으며, fNIRS 측정 시스템은 연구 대상자의 시야 밖에 두어 측정 화면에 시선이 닿지 않도록 하였다.

과제는 입력 신호와 시간에 따라 화면이 전환되면서 시간 정보를 기록해주는 Psychology Software Tools Inc.에서 개발한 E-prime (v3.0)을 사용하였다. 과제의 분석 구간마다 삽입해둔 Marker와 Task number를 토대로 시간에 대한 정보와 측정 기기로부터 얻은 두뇌 활성 정보가 구간별 분석 가능한 두뇌 활성 데이터로 데이터 수집 기기에 저장된다. fNIRS 측정 장면은 Figure 3과 같다.

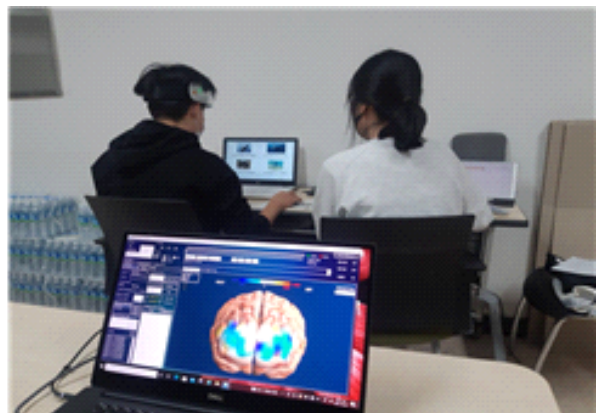


Figure 3. An examples of fNIRS study

4. 자료 분석

수집된 데이터는 NIRSIT Analysis Tool (v2.2)에서 1차 전처리를 진행하였고, 이 과정에서 fNIRS를 통해 측정된 빛의 세기를 두 개의 파장(780mm, 850mm)마다 광학 밀도(optical density)로 변환한 후 Modified Beer-Lambert 법칙(Yamshita *et al.*, 1996)에 기반하여 HbO₂와 Hb의 농도를 계산한다. 측정 중 호흡과 심장박동 등과 관련된 잡음, 과제 수행과 관련 없는 주파수 대역의 신호를 제거하고자 high-pass filter (DCT 0.005Hz), low-pass filter (DCT 0.01Hz)를 적용했다. 연구 대상자마다 불안정한 상태 등으로 인한 부적절한 기준값을 보정하고자 눈을 뜨고 고정(Fixation) 화면을 바라보는 구간과 눈을 감고 휴식을 취하는 구간의 중간값을 기저선(Baseline)으로 두어 두뇌 활성의 기준값으로 설정하였다.

1차 전처리를 마친 fNIRS 자료는 Matlab (v2020b)과 NIRS-SPM (v4.1)을 통해 2차 전처리 과정을 거친다. Wavelet-MDL (Minimum Description Length) detrending을 통해 혈류 역학적 신호와 관계없는 신호를 제거하며, 혈류 역학적 반응 함수(Hemodynamic Response Function, HRF)를 적용하여 이마 앞 영역에 대한 대비 영상(Contrast Image)을 계산했다. 분석하고자 하는 각 과정의 연구 대상자별 조건을 요인으로 일반 선형 모델(GLM)을 구성하였고 연구 대상자별 동화와 갈등 간, 갈등과 조절 간, 동화와 조절 간 채널별 회귀계수(β)를 산출하였다. 분석 결과 유의미한 통계값을 토대로 채널의 해부학적 위치에 따른 활성도를 BrainNet Viewer v1.7 (Xia, Wang, & He, 2013)로 시각화하였다.

Ⅲ. 연구 결과 및 논의

1. 동화와 갈등 과정의 연령별 두뇌 활성 차이

자기조절 과정의 동화와 갈등 과정의 두뇌 활성 대조로 단일 표본 *t*-검정을 통해 얻은 중학교 1학년, 중학교 3학년, 고등학교 2학년의 유의미한 두뇌 활성 부위는 Figure 4와 같다. 중학교 1학년의 경우 동화 과정에서 갈등 과정에서 좌측 DLPFC 영역에 해당하는 채널 33번에서 유의미한 활성이 나타났다. 갈등 과정은 동화 과정과 비교했을 때, 기존 도식 또는 대안적 도식에서 인출한 예상 결과와 관찰 결과의 합치가 이루어지지 않는 상황이기 때문에 불확실한 도식을 토대로 작업 기억의 정보 조작을 시도하게 된다.

이러한 과정은 불확실성에 관여하는 피질(McLaughlin *et al.*, 2009)이며, 작업 기억의 정보 조작에 관여하는 DLPFC의 기능(Barbey *et al.*, 2013)과 일치한다. 중학교 3학년의 경우 동화 과정에서 갈등 과정에서 좌측 OFC 영역에서 유의미한 활성이 나타났다. 갈등 과정은 기존 도식을 불러오거나 대안적으로 형성된 도식을 이용하여 해당 현상을 설명하려고 시도하지만 예상 결과와 실제 결과의 불일치를 겪는 비평형상태이므로 지속적으로 자신의 행동에 대한 확인과 평가의 과정이 중요하다. 내측 OFC는 동기 부여와 보상에 관여(Ballesta *et al.*, 2015)하며, 자신의 인지적 선택에 대한 가치를 모니터링하는 영역이다(Cooch *et al.*, 2015). 동기 보상 및 선택에 대한 평가의 가치를 부여하고, 자신의 인지적 선택에 대한 주관적 가치 부여를 통해 동기화하는데 관여하는 OFC 영역에서 유의미한 활성이 나타나는 것은 어떤 것이 성공 또는 실패를 이끌었는지 파악하는 과정이 비평형상태에서 보다 유의미한 두뇌 활성 영역임을

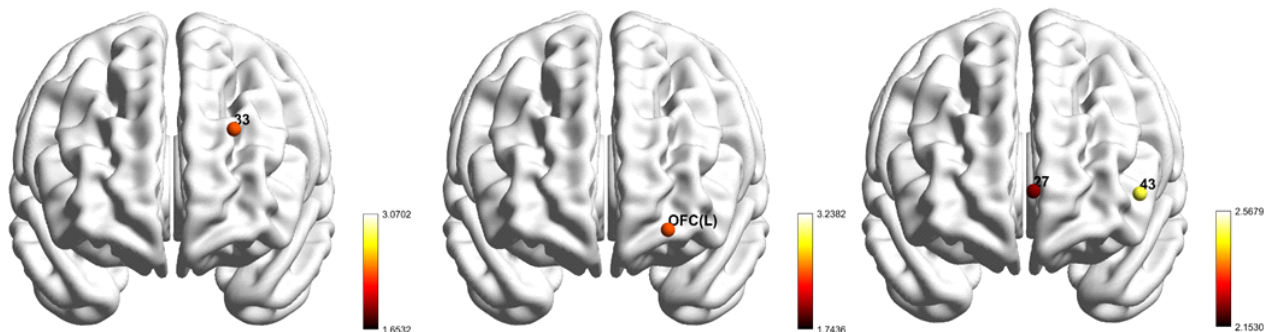


Figure 4. The difference in brain activity between assimilation and conflict of the self-regulation process. (1st grade in mid, 3rd grade in mid, 2nd grade in high, $p < 0.05$)

해석할 수 있다.

고등학교 2학년은 동화 과정보다 갈등 과정에서 좌측 FP, DLPFC 영역에 해당하는 27번과 43번 채널에서 유의미한 활성이 나타났다. 동화 과정에 비해 갈등 과정은 기존 도식이나 대안적 도식을 적용하지 못하는 인지적 부조화를 겪으며 과제 관련 작업 기억 정보 조작을 기반으로 대안적 도식의 고안과 적용을 모색하는 목표 지향적 다중 작업이 보다 활발해진다. 이는 목표 지향적 사고의 특성과 관계있는 FP 영역의 기능과 일치한다(Boorman *et al.*, 2009; Zajkowski *et al.*, 2017). 또한 FP는 DLPFC를 조정하고 통합하는 역할을 하며, 과제 수행 중 인지 기억 유지, 조작 및 모니터링과 관련된 LPFC (Lateral Prefrontal Cortex)의 기능을 최대화하기 위해 작동한다(Fletcher & Hensen, 2001). 따라서 FP와 DLPFC 영역이 활성화되어 기존 인지구조로 설명할 수 없는 새로운 현상을 설명하기 위해 정보를 조정하고 통합, 조작 및 모니터링에 관여하는 영역이 동화 과정보다 갈등 과정에서 더 활발한 것으로 해석할 수 있다.

2. 갈등과 조절 과정에서 연령별 두뇌 활성 차이

자기조절의 갈등 과정과 조절 과정의 두뇌 활성 대조로 단일 표본 t-검정을 통해 얻은 중학교 1학년, 중학교 3학년, 고등학교 2학년의 유의미한 두뇌 활성은 Figure 5와 같다. 중학교 1학년의 경우 조절 과정보다 갈등 과정에서 우측 VLPFC 영역의 유의미한 활성이 나타났다.

갈등 과정은 인지적 부조화를 겪는 비평형상태이므로 조절 과정에 비해 불확실한 상황에서 의사 결정을 해야하며, 인지적 주의와 이해 과정의 각성을 통해 불확실성에 대한 처리가 보다 활발할 것이다. 이는 불확실한 상황에서 의사 결정을 할 때 관여하는 우측 VLPFC 기능(Blackwood *et al.*, 2004; Heekeren *et*

al., 2004; Levy & Wagner, 2011; Volz *et al.*, 2005) 및 목표지향을 위한 정서적 조절에 관여(Zhenhong *et al.*, 2018)하는 우측 VLPFC의 기능과 일치하므로 인지 과정에서 우선순위를 정하고 가치를 부여하는 정서적 조절 기능을 통해 불확실성에 대한 처리가 보다 활발한 것으로 해석된다. 중학교 3학년의 경우 갈등 과정보다 조절 과정에서 좌측 FP와 DLPFC 영역에 해당하는 19번과 41번 채널에서 유의미한 활성이 나타났다. 성공적인 자기조절이 이루어지기 위해서는 주어진 현상을 설명할 수 있는 대안적 인지구조를 형성하는 것이 필요하다. 갈등 과정에서 기존의 인지구조 또는 대안적 도식으로 해당 현상을 설명할 수 없지만 조절 과정에서는 관련 자료를 탐색하고 연관된 장기기억을 인출하며, 적합한 가설을 생성하는 과정을 통해 새로운 현상을 대안적 인지구조로 예상 결과와 실제 결과의 합치를 이끌어낼 수 있게 된다. 따라서 인지적 비평형상태에서 주어진 과제와 관련된 작업 기억의 정보 조작을 기반으로 새로운 도식의 고안, 적용 및 선택에 대한 목표 지향적 다중 작업과 관련된 FP와 DLPFC 영역(Koechlin, 2011)의 기능을 보다 적극적으로 활용했음을 알 수 있다.

반면 고등학교 2학년에서는 갈등 과정과 조절 과정 간 $\alpha = 0.05$ 수준에서 유의미한 두뇌 활성 결과는 나타나지 않았다. 학년이 높아짐에 따라 기존 도식과 해당 현상을 비교 및 대조하는 과정에서 두 정보 사이의 불일치성을 쉽게 인식할 뿐만 아니라 새로운 정보를 타당하게 받아들인다(Roh *et al.*, 2000)는 연구 결과로 미루어보아 고등학교 학생들은 기존 인지 도식과 정보 사이의 불일치성을 쉽게 인식하며 새로운 정보를 타당하게 받아들이는 것으로 보인다. 따라서 갈등 과정 후 예상 결과와 실제 결과의 합치가 일어나는 조절 과정이 비교적 수월하게 일어난 결과 두 과정의 유의미한 두뇌 활성 차이가 없는 것으로 해석된다.

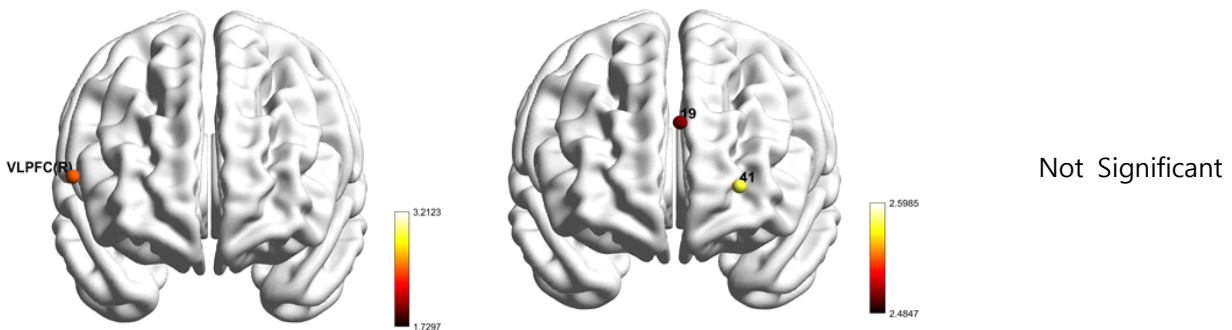


Figure 5. The difference in brain activity between conflict and accommodation of the self-regulation process. (1st grade in mid, 3rd grade in mid, 2nd grade in high, $p < 0.05$)

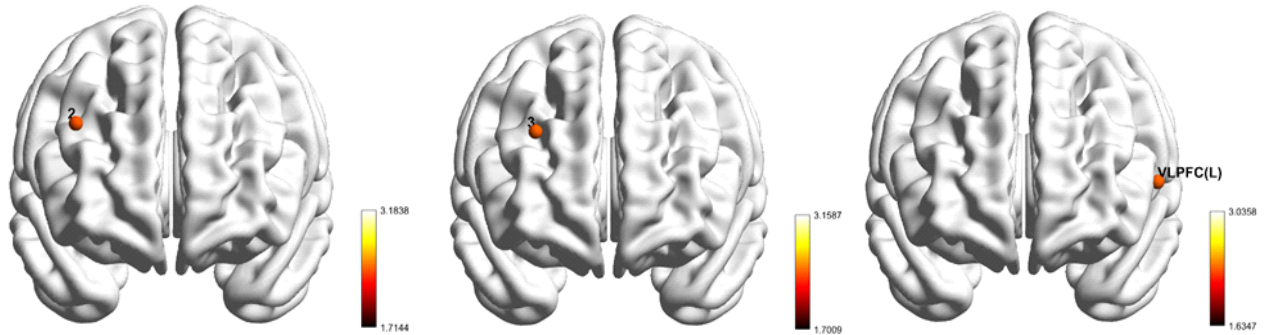


Figure 6. The difference in brain activity between assimilation and accommodation of the self-regulation process. (1st grade in mid, 3rd grade in mid, 2nd grade in high, $p < 0.05$)

3. 동화와 조절 과정에서 연령별 두뇌 활성 차이

자기조절의 동화 과정과 조절 과정의 두뇌 활성 대조로 단일 표본 t -검정을 통해 얻은 중학교 1학년, 중학교 3학년, 고등학교 2학년의 유의미한 두뇌 활성은 Fig. 6과 같다. 중학교 1학년과 중학교 3학년 모두 동화 과정보다 조절 과정에서 우측 DLPFC 영역에 해당하는 2번과 3번 채널에서 유의미한 활성이 나타났다.

동화 과정과 조절 과정은 평형상태이지만 동화는 기존 도식으로 예상 결과와 실제 결과의 합치를, 조절은 새로 형성한 대안적 도식으로 예상 결과와 실제 결과의 합치를 이끌어내는 과정이다. 따라서 조절 과정은 새로 고안한 도식이 기존 도식을 대체하는 과정이 추가되므로 지속적인 확인 및 평가 작업이 이루어질 것이다. 이러한 과정으로 미루어보아 기억시스템에서 인출된 정보와 비교 및 통합되며 지속적인 주의 집중 과정 및 계속적인 정보의 탐색과 발견을 통해 지식을 생성하고 적용하는 사고의 두뇌 영역인 우측 DLPFC 영역(Toepfer *et al.*, 2010)이 보다 활성화되었음을 해석할 수 있다.

고등학교 2학년의 경우 동화 과정보다 조절 과정에서 좌측 VLPFC 영역의 유의미한 활성이 나타났다. 좌측 VLPFC 영역은 언어적 처리를 통해 정보의 명확화에 기여하며, 활성화된 정보의 과정 중 정보를 선택할 때 관련성 또는 해결 가능성이 높은 것을 선택하여 새로운 가설을 고안하는 사고에 관여한다(Schendan, 2012). 따라서 관련성 또는 해결 가능성이 높은 것을 선택하여 새로운 가설적 인지구조를 고안하는 조절 과정과 관련된 두뇌 활성 영역이라고 볼 수 있다. 동화 과정은 오랫동안 인지구조 속에 정착되어 있던 기존의 도식에서 해당 현상을 설명하고자 하기 때문에 분명한 목표를 정하고 필요한 정보를 모으는 활동과 관련이 깊은 반면, 조절 과정은 정보를 모은 뒤 이에 기반을 두고 패턴을 찾아가며 해결결과

목표를 향해가는 것과 유사한 사고 과정이라고 볼 수 있다. VLPFC 영역은 상향식 주의 기제를 통해 기억 단서에 주의를 할당하고 인출을 돕는다고 알려져 있다(Cabeza, 2008). 이런 사고 과정으로 보아 동화 과정보다 조절 과정에서 좌측 VLPFC 영역이 활성화된 것으로 해석된다.

IV. 결론 및 교육적 함의

이 연구는 생물 분류와 유연관계 문제해결의 자기 조절 과정에서 나타나는 동화, 갈등, 조절 간 두뇌 활성을 중학교 1학년, 중학교 3학년, 고등학교 2학년을 대상으로 두뇌 활성 차이를 통해 비교 및 분석하였다. 생물 분류와 유연관계 문제해결 과제를 통해 자기 조절 과정이 나타난 구간의 fNIRS 측정 데이터로 자기 조절 과정 간 유의미한 두뇌 활성 영역을 도출하였고, 분석 결과로부터 얻은 결론 및 교육적 함의는 다음과 같다.

첫째, 동화 과정에 비해 갈등 과정에서 DLPFC, OFC, FP의 유의미한 두뇌 활성이 나타났다. 기존 도식이나 대안적 도식을 통해 예상 결과와 실제 결과의 합치를 이끌어내지 못하는 인지적 갈등을 겪으며 아이디어의 재평가와 목표 지향적 다중 작업이 보다 활발한 것을 뜻한다. 유의미한 두뇌 활성은 모두 좌반구 편측화 현상이 나타났는데, 동화 과정보다 갈등 과정에서 언어적 정보를 조작하는 과정에 중점을 두며 전체적인 접근보다는 부분적인 접근을 선호한 것으로 해석된다.

둘째, 갈등과 조절 과정을 비교한 결과 중학교 1학년은 갈등 과정에서 우측 VLPFC, 중학교 3학년은 조절 과정에서 좌측 FP, DLPFC 영역의 유의미한 두뇌 활성이 나타났으며, 고등학교 2학년은 유의미한 두뇌 활성이 나타나지 않았다. 갈등 과정은 인지적 주의와

이해 과정의 각성을 통해 불확실성에 대한 처리가 중요한 사고 과정이며, 조절 과정에서는 작업 기억의 정보 조작으로 높은 대안의 가치를 탐색하는 것이 보다 중요한 사고 과정임을 알 수 있다. 또한 두 정보 간의 불일치성을 쉽게 인식하고 새로운 정보를 타당하게 받아들이는 경우 비평형상태에서 평형상태로 도달하는 성공적인 자기조절 과정이 보다 수월함을 뜻한다.

셋째, 동화 과정에 비해 조절 과정에서 DLPFC, VLPFC의 유의미한 두뇌 활성이 나타났다. 동화 과정보다 조절 과정에서 계속적인 정보의 탐색과 발견을 통해 지식을 생성하고 적용하는 사고 및 활성화된 정보 중 관련성이 높은 것을 선택하는 등 추론적 사고 활동이 보다 활발한 것으로 보인다. 특히 고등학교 2학년의 경우 정보를 모은 뒤 이에 기반을 두고 패턴을 찾아가며 해결점과 목표를 향해가는 상향식 주의 기제에 관여하는 좌측 VLPFC의 활성으로 보아 이 기제는 보다 상급 학년에서 나타날 수 있는 특성으로 해석할 수 있다.

자기조절 과정 간 두뇌 활성의 학년 간 감소 결과 학년에 따른 동화, 갈등, 조절 과정 간 유의미한 두뇌 활성 영역의 차이를 제시한 결과는 평형화 유지, 비평형상태에서 평형상태로 이르는 자기조절의 순환 과정에 필요한 교육적 전략을 신경학적 분석에 근거하여 제시할 수 있음을 시사한다. 자기조절 과정에서 나타나는 두뇌 활성을 비교 및 분석하기 위해 신경학적 방법인 fNIRS를 활용하였으며, 자기조절 과정을 겪는 중 실시간으로 변화하는 학생들의 두뇌 활성 측정을 통해 자기조절 과정 간 두뇌 활성에 유의미한 차이가 있음을 확인하였다. 이러한 결과는 인지 활동 및 교실의 수업 상황에서 신경학적 연구 방법이 교육 연구에 잘 적용될 수 있다는 것을 의미하므로 교육 연구의 신경학적 접근에 대한 교육적 시사점을 제공할 수 있을 것이다.

국 문 요 약

이 연구의 목적은 중등학생의 자기조절 과정에서 동화, 갈등, 조절의 세부 과정에 대한 뇌 활성을 비교하고 분석하는 것이다. 자기조절 과정은 생물학적 계통발생 과제로 제시되었고, 뇌활성은 fNIRS로 측정 및 분석되었다. 그 결과 동화 과정과 비교하여 갈등 과정에서 좌측 DLPFC, OFC, FP 영역에서 유의미한 활성이 발견되었고, 조절 과정에서는 DLPFC, VLPFC에서 유의미한 활성화가 발견되었다. 중등학생의 학년이 높아질수록 갈등 과정에서도 DLPFC가 증가하고 동화 과정에서도 VLPFC가 증가한다. 또한, 갈등과 조절 과정을 비교한 결과,

7학년 학생들은 오른쪽 VLPFC에서 유의미한 뇌 활동을 보였고, 9학년 학생들은 조절 과정에서 왼쪽 FP와 DLPFC 영역에서 유의미한 뇌 활동을 보였지만, 11학년 학생들은 이 과정에서 유의미한 뇌 활동을 보이지 않았다. 이러한 결과는 신경학적 연구 방법이 인지 활동과 강의실 교육 상황과 관련된 교육 연구에 적용될 수 있음을 보여준다.

주제어: 자기조절, 뇌 활성, fNIRS, 생물학적 계통 발생 과제, 중등학교

References

Ballesta, S., Shi, W., Conen, K., & Padoa-Schioppa, C. (2020). *Values encoded in orbitofrontal cortex are causally related to economic choices*. *Nature*, <https://dx.doi.org/10.1038/s41586-020-2880-x>.

Barbey, A. K., Koenigs, M., & Grafman, J. (2013). Dorsolateral prefrontal contributions to human working memory. *Cortex*, *49*(5), 1195-1205.

Blakemore, S. J., & Choudhury, S. (2006). Development of the adolescent brain: Implications for executive function and social cognition. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, *47*(3-4), 296-312.

Blackwood, N., Simmons, A., Bentall, R., Murray, R., & Howard, R. (2004). The cerebellum and decision making under uncertainty. *Cognitive Brain Research*, *20*(1), 46-53.

Boorman, E. D., Behrens, T. E., Woolrich, M. W., & Rushworth, M. F. (2009). How green is the grass on the other side? Frontopolar cortex and the evidence in favor of alternative courses of action. *Neuron*, *62*(5), 733-743.

Byeon, J. H., Kwon, S. H., & Kwon, Y. J., (2014). Identifying the difference between the cognitive thinking process between science high school students and general high school students through comparison of brain activity in the biological

- classification process. *Biological Education*, 42(2), 194-207.
- Cabeza, R. (2008). Role of parietal regions in episodic memory retrieval: The dual attentional processes hypothesis. *Neuropsychologia*, 46(7), 1813-1827.
- Carew, T. J., & Magsamen, S. H. (2010). Neuroscience and education: An ideal partnership for producing evidence-based solutions to guide 21st century learning. *Neuron*, 67(5), 685-688.
- Fletcher, C. P., & Henson, A. R. (2001). Frontal lobes and human memory insights from functional neuroimaging. *Brain*, 124(5), 849-881.
- Ham, K., Kim, K. P., Jeong, H., & Yoo, S. H. (2018). Increased ventrolateral prefrontal cortex activation during accurate eyewitness memory retrieval: An exploratory functional near-infrared spectroscopy study. *Korean Journal of Legal Medicine*, 42(4), 146-152.
- Hashweh, M. (1986). Toward an explanation of conceptual change. *European Journal of Science Education*, 8, 229-249.
- Heekeren, H. R., Marrett, S., Bandettini, P. A., & Ungerleider, L. G. (2004). A general mechanism for perceptual decision-making in the human brain. *Nature*, 431(7010), 859-862.
- Hong, S., Lee, J., Heo, J., Baek, H. J., & Park, K. S. (2015). The estimation of activated prefrontal brain area due to the execution of mental tasks using fNIRS. *Journal of Biomedical Engineering Research*, 36, 177-182.
- Jeong, H. R., Park, J. W., & Kim, J. G. (2016). Development of an educational program called 'Change in the Biological Classification System' using argumentative activities. *Biological Education*, 44(3), 463-476.
- Jin, Y., Lee, J., Kim, S., & Yoon, B. (2019). Noninvasive brain stimulation over M1 and DLPFC cortex enhances the learning of bimanual isometric force control. *Human Movement Science*, 66, 73-83.
- Koechlin, E. (2011). Frontal pole function: What is specifically human?. *Trends in Cognitive Sciences*, 15(6), 241.
- 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(4), 365-376.
- Kwon, Y. J., Choi, S. J., Park, Y. B., & Jeong, J. S. (2003). Scientific thinking types and processes generated in inductive inquiry by college students. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 23(3), 286-298.
- 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(2), 391-397.
- Kwon, Y. J., Jeong, J. S., Shin, D. H., Lee, J. K., Lee, I. S., & Byeon, J. H. (2011). *Generation and evaluation of scientific knowledge*. Seoul, Korea: Hakjisa.
- Lawson, A. E. (1995). *Science teaching and the development of thinking*. Belmont, CA: Wadsworth Publishing Company.
- Lawson, A. E. (2006). *The neurological basis of learning, development and discovery: Implications for science and mathematics instruction* (Vol. 18). Springer Science & Business Media.
- Lawson, A. E., & Wollman, W. T. (1977). Using chemistry problems to provoke self-regulation. *Journal of Chemical Education*, 54(1), 41.
- Levy, B. J., & Wagner, A. D. (2011). Cognitive control and right ventrolateral prefrontal cortex: Reflexive reorienting, motor inhibition, and action updating. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1224(1), 40.
- Lloyd-Fox, S., Blasi, A., & Elwell, C. E. (2010). Illuminating the developing brain: The past, present and future of functional near infrared spectroscopy. *Neuroscience and biobehavioral reviews*, 34(3), 269-284.
- 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.
- Ministry of Education [MOE]. (2015). *Science curriculum*. Ministry of Education Notice No. 2015-74.
- Organisation for Economic Co-operation and Development [OECD]. (2002). *Understanding the Brain: Towards a New Learning Science*. Paris, France: OECD Publishing.
- OBELAB (2019). NIRSIT analysis tool v2.2. Seoul, Korea: OBELAB.
- Park, J. S., & Kwon, Y. J. (2021). Comparison of science gifted and general students' brain activity and thinking process in the process of self-regulation -An fNIRS study. *Brain, Digital, & Learning*, 11, 405-416.
- 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.
- Pascual-Leone, J. (1970). A mathematical model for the transition rule in Piaget's developmental stages. *Acta psychologica*, 32, 301-345.
- 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(4), 347-373.
- Roh, T. H., Lim, H. Y., & Kang, S. J. (2000). Comparison of cognitive conflict induction and conceptual change according to sex and age. *Journal of the Korean Academy of Education*, 20(4), 634-641.
- Schendan, H. E. (2012). Implicit memory. <http://hdl.handle.net/10026.1/1207>. In V. S. Ramachandran (Ed.), *Encyclopedia of human behavior*. Burlington, MA: Elsevier/Academic Press.
- Spear, L. P. (2000). The adolescent brain and age-related behavioral manifestations. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 24(4), 417-463.
- 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.
- Volz, K. G., Schubotz, R. I., & von Cramon, D. Y. (2005). Variants of uncertainty in decision-making and their neural correlates. *Brain Research Bulletin*, 67(5), 403-412.
- Xia, M., Wang, J., & He, Y. (2013). BrainNet Viewer: A network visualization tool for human brain connectomics. *PLoS One*, 8(7), e68910.
- Yamashita, Y., Maki, A., Ito, Y., Watanabe, E., Mayanagi, Y., & Koizumi, H. (1996). Noninvasive near-infrared topography of human brain activity using intensity modulation spectroscopy. *Optical Engineering*, 35(4), 1046-1049.
- Zajkowski, W. K., Kossut, M., & Wilson, R. C. (2017). A causal role for right frontopolar cortex in directed, but not random, exploration. *eLife*, 6, e27430.
- Zhenhong, H., Lin, Y., Xia, L., Liu, Z., Zhang, D., & Elliott, R. (2018). Critical role of the right VLPFC in emotional regulation of social exclusion: a tDCS study. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 13(4), 357-366.

저 자 정 보

이 서 리 (여천고등학교 교사)

권 용 주 (한국교원대학교 교수)