

RESEARCH ARTICLE

Study on Brain Activation Characteristics of Students According to The Familiarity With Physics Term and The Physics Unit

Chang-hun Lee · Kwang-Su Ryu*

Department of Physics Education, Korea National University of Education

물리 용어 친숙도와 물리 단원에 따른 학생들의 뇌활성화 특성 연구

이창훈 · 류광수*

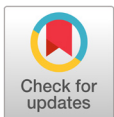
한국교원대 물리교육과

*Corresponding Author: ksryu@knue.ac.kr

ABSTRACT

In this study, we have investigated the brain activation characteristics of students according to the familiarity with physics term and the physics unit using a functional near infrared spectroscopy device capable of measuring the changes in brain activation in real-time. As a result of analyzing the brain activation data, it was found that the brain activation change of the students in the left hemisphere midfrontal gyrus increased in the familiar physics words and decreased in the unfamiliar physics term. This is because the image and conceptual associations are made when students see the familiar physics term. In addition, as a result of comparing the brain activation characteristics for each physics unit, the significant brain activation was found in a part of the dorsolateral prefrontal cortex included in BA46 in the thermodynamics unit, which was related to the association of algebraic concepts with the thermodynamic term. Additionally, in the case of the wave unit, it was found that significant brain activation occurred in a part of the orbitofrontal cortex corresponding to BA47. This is thought to be due to the musical syntactic association with the wave term. The results of this study are expected to not only increase the possibility of neuroscientific research techniques for educational research, but also be used as educational neuroscientific bases for effective physics teaching and learning strategies.

Key words: Physics terminology, familiarity, brain activation, fNIRS



OPEN ACCESS

Brain, Digital, & Learning
2022, Vol. 12, No. 3, 499-512.

<https://doi.org/10.31216/BDL.20220030>

Received: September 05, 2022

Revised: September 14, 2022

Accepted: September 16, 2022

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



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

Introduction

대부분의 학습자들은 과학 용어에 대해 많은 어려움을 겪고 있으며, 이러한 이유로 과학적 글쓰기와 과학 문장 읽기 등에서도 많은 장애를 겪고 있다(Park, 2010). 그 중에서도 물리 용어는 다른 과학 용어에 비해 그 어려움이 더하는데 그 이유는 물리 용어 자체가 물리학의 일부분으로 일반 과학 용어와는 다른 특수성을 가지고 있기 때문이다. 즉, 물리 용어는 물리학자들이 자연계 독립체들 사이의 관계를 분류하고 그 범주와 체계를 정립하는데도 사용되기 때문에 일상생활에 잘 사용되지 않는 것이 대부분이다. 그러나 효과적인 물리학 학습을 위해서는 학습자들 사이의 원활한 의사소통이 기본 바탕이 되어야 하기에 학습자들은 물리 용어를 익히는데 충분한 시간을 투자하여야 한다(Wellington & Osborne, 2001).

일반적으로 인간이 단어를 처음 익힐 때 독립된 단어 하나만을 인식하기 힘들며, 보통은 다른 사물이나 상황을 떠오르거나 혹은 다른 단어들과 연결 지어 해당 단어를 인식하게 된다(Stenberg & Ben-Zeev, 2001). 그러므로 많은 사람들이 단어 교육에서 단어의 연상적 의미를 지도하거나 인접 어휘를 학습 시키는데, 그 이유는 인간이 어떤 대상을 인식할 때 다른 것들을 함께 연상하기 때문이다(James, 1890; Lee, 1996). 고로 어떤 특정 물리 용어에 대한 연상과 다른 물리 용어들과의 관계성 측면에서 볼 때 해당 물리 용어의 친숙도는 선지식의 형태로써 학습자가 지식을 구성하거나 개념을 이해하는데 있어서 보다 더 큰 도움이 될 수 있다(Mumba et al., 2015; Tanner & Allen, 2005; Warren et al., 2001).

과학 문제에서 문제 상황 또는 용어에 대한 친숙도가 높을수록 과학 개념에 대한 이해도와 성취가 높다는 몇몇 연구 결과들이 보고되고 있다(Bryce & Macmillan 2005; Jeong et al., 2016; Saunders & Jesunathadas, 1988; Song, 2014). 중학생을 대상으로 한 과학 학습에 있어서 학습자들에게 친숙한 자연적 상황과 매우 생소한 과학 교과서 상황을 비교 학습을 할 때, 친숙한 자연적 상황을 이용한 학습자들의 이해도와 성취가 더 높음을 확인하였다(Saunders & Jesunathadas, 1988). 또한, 역학적 운동 상황에서 친숙한 운동 상황이 친숙하지 않은 운동 상황보다 학습자들이 좀 더 세분화된 개념을 형성하는데, 이는 물리 문제를 해결하는 과정에서 개념의 이해를 돕는데 중요한 역할을 한다(Song, 2014). 그리고 이러한 현상은 과학을 학습하는 학습자뿐만 아니라 과학을 가르치는 교사들에서도 똑같이 일어난다. 초등 교사들을 대상으로 한 물리 파동개념에 대한 이해도, 확신도, 친숙도를 분석한 결과 물리 용어에 대한 친숙도가 높을수록 물리 개념에 이해도와 성취가 매우 높았다(Jeong et al., 2016). 한편, 수업에 사용되는 비유물 역시 친숙도와 관련지어 생각할 수 있는데, 학습자에게 친숙한 비유물일수록, 과학 개념에 대한 이해도가 매우 증가하였다(Bryce & Macmillan 2005). 그러므로 물리 학습에 있어서 문제 상황과의 연상과도 관련이 있는 물리 용어의 친숙도에 대한 이해가 매우 중요하다는 것을 알 수 있다.

지금까지 대부분의 용어 친숙도에 대한 연구들은 학습자의 용어 친숙도를 조사하기 위해 설문지를 사용 해왔는데, 이러한 방식은 설문 응답자의 주관적 판단과 검사 자체의 환경적 요인에 영향을 받을 가능성이 있어 연구의 신뢰도에 있어서 많은 의문이 제기 되고 있다(Au, 2005; Yun & Park, 2015). 최근 기능적 뇌영상 장비의 개발로 인해 학습자들의 뇌 내부에서 일어나는 신경활동들을 직접 관찰 할 수 있게 되어 이러한 뇌 신경과학 장비가 교육 연구에 많이 활용되고 있다. 이에 대한 근거로는 학습이란 뇌 내부에서 일어나는 신경 활동을 통해 외부로 표출된 결과물로 볼 수 있기 때문이다(Kim, 2006). 한편, 뇌신경과학 장비를 이용한 연구

에 의하면 전전두엽 피질(prefrontal cortex)의 일부 영역들이 친숙한 용어에 의해 활성화되는 것이 관측되며, 이러한 뇌신경활동의 결과물이 용어의 친숙함 때문이라는 결과들이 많은 연구자들에 의해 보고되고 있다 (Chastelaine et al., 2017; Johnson et al., 2013; Scalici et al., 2017; Yonelinas et al., 2005). 하지만 아직까지 물리 용어의 친숙도에 대한 신경과학적 연구 결과들은 보고되고 있지 않고 있다.

따라서 이 연구에서는 실시간 뇌활성화 특성을 관찰할 수 있는 기능적 근적외선 분광 장비(functional near infrared spectroscopy, fNIRS)를 사용하여 물리 용어 친숙도 여부에 따른 학생들의 뇌활성화 특성을 분석하고자 한다. 또한, 학생들이 친숙하다고 응답한 용어들에 대해 물리 단위별 뇌활성화 특성을 분석하고 이들을 비교 연구하고자 한다. 이 연구결과물은 물리 용어의 친숙도에 대한 신경과학적 연구에 도움을 줄 뿐 아니라, 효과적인 물리 학습을 위한 교육신경과학적 기제를 마련함에 도움이 될 것이라 생각된다.

Materials and Methods

Fig. 1은 전체적인 연구과정 및 방법을 개략적으로 나타낸 것이다. 첫째, 물리 용어의 친숙도를 조사한다. 이를 위해 여러 물리 단원에 해당하는 물리 용어들을 선택하고 선택된 물리 용어들에 대해 학생들을 대상으로 친숙도에 대한 설문 조사를 한다. 둘째, fNIRS 장비를 이용하여 학생들의 실시간 뇌활성화를 측정한다. 뇌활성화 측정을 위해 측정 절차인 Block을 설계하고 이 Block에 따라 실시간 뇌활성화량을 측정한다. 셋째, 측정된 뇌활성화 데이터를 분석하고 학생들과 심층 인터뷰를 진행한다. 인터뷰는 물리 용어로부터 연상된 내용을 중심으로 이루어졌다. 더 세부적인 내용은 아래에 기술하였다.

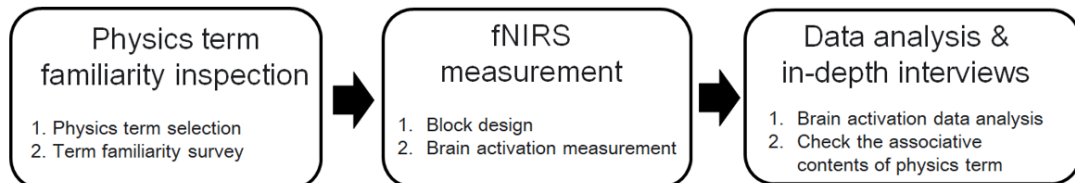


Fig. 1. Overall research process and method

Research Objects and Physics Terms

연구 대상은 광역시 소재 일반고 재학 중인 고등학생 6명을 대상으로 하였고, 남학생 1명과 여학생 5명이었다. 이 학생들은 모두 2015 개정 교육과정의 물리학 I 을 선택 및 이수하였고, 모두 오른손잡이였으며 과거에 정신 장애 및 질환 이력이 없었다. 이 연구를 위해 사용된 물리 용어는 물리학에 대한 연구 대상의 이해 수준과 집중력을 고려하여 Table 1과 같이 30가지의 물리 용어를 선정하였다. 물리 용어들은 역학, 열역학, 전자기학, 파동, 현대물리 등의 단원에서 선택되었으며, 석사 학위 이상을 소지하고 있는 현직 물리교사 3인이 두 차례의 협의를 거쳐 최종 선정되었다.

Table 1. Physics terms by physics unit

Unit	Physics terms
Mechanics	velocity, acceleration, gravity, potential energy, momentum, energy, torque
Thermal Physics	heat, engine, thermal efficiency, internal energy
Electromagnetics	charge, current, magnetic field, magnetism, electromagnetic induction, electric field, electromagnetic wave
Wave	wave, interference, frequency, wavelength, refraction, total reflection, diffraction
Modern Physics	Quantization, energy band, photon, photoelectric effect, matter wave

물리 용어에 대한 연구 참여자들의 친숙도를 조사하기 위해서 설문지를 이용한 설문을 진행하였다. 친숙도의 단계는 물리 용어 친숙도에 대한 선행 연구들과 마찬가지로 친숙(familiar)과 생소(unfamiliar) 2단계 척도로 구성하였다(Jeong et al., 2016; Mbewe, 2012; Mumba et al., 2015). 연구 참여자를 대상으로 실시한 설문에서 신뢰도는 .835였으며, 결과는 Table 2와 같다. 흥미롭게도 역학과 전자기학, 파동 영역에 해당하는 물리 용어들에 대한 친숙도가 대체로 높았으며, 열역학과 현대 물리 영역의 물리 용어들은 친숙도가 떨어짐일 알 수 있었다. 친숙도가 높은 물리 용어들은 실생활에서 많이 접하고 사용하는 용어이기도 하고, 물리 및 과학교과서에서도 해당 물리 영역이 대부분을 차지하기 때문인 것으로 생각된다.

Table 2. Survey results for physics term familiarity (N=6)

Chapter	Terminology	Familiar	Unfamiliar
Mechanics	velocity	6	0
	acceleration	6	0
	gravity	6	0
	potential energy	6	0
	momentum	6	0
	energy	6	0
	torque	1	5
Thermal physics	heat	5	1
	engine	1	5
	thermal efficiency	2	4
	internal energy	2	4
Electromagnetics	charge	6	0
	current	6	0
	magnetic field	6	0
	magnetism	6	0
	electromagnetic induction	5	1
	electric field	6	0
	electromagnetic wave	4	2
Wave	wave	5	1
	interference	4	2
	frequency	5	1
	wavelength	5	1
	refraction	5	1
	total reflection	1	5
	diffraction	5	1
Modern physics	Quantization	3	3
	energy band	5	1
	photon	3	3
	photoelectric effect	3	3
	matter wave	1	5

Measurement of Brain Activation Using fNIRS

학생들의 뇌활성화 특성을 연구하기 위해서 실시간 뇌활성화 변화량을 측정할 수 있는 fNIRS를 사용하였다. fNIRS 장비는 뇌생체조직에 투과된 근적외광이 반사되어 나올 때의 광세기를 측정하여 뇌활성화에 따른 혈류량 농도의 변화를 측정하는 것이다. 기본적으로 fNIRS 장비는 광을 방출하는 발광부(Laser module)와 광세기를 측정하는 흡광부(Detector module)부분으로 구성되어 있다. 즉, 혈관 내의 헤모글로빈의 산소 유무에 따라 근적외광의 광흡수율이 달라지기 때문에 이를 분석함으로써 혈관 내에서의 산화 및 환원 헤모글로빈의 농도 변화량을 측정할 수 있게 된다. 이 연구에서 사용된 fNIRS 장비는 OBELAB 회사에서 개발한 NIRSIT (모델명: NS1-H20A)으로, 사용된 광의 파장은 780, 850 nm이며 광의 투과 깊이는 두피 안쪽 약 3 cm 깊이의 전전두엽에 해당하였다. 전전두엽에 해당하는 영역에 퍼져 있는 48개의 채널에서 각각 산화 및 환원, 총 헤모글로빈의 몰랄농도의 변화량(mM)을 측정하고, 초당 약 8 frame을 측정할 수 있다. 특히, 뇌활성화가 일어날 때 산화 헤모글로빈의 양이 증가하기 때문에 뇌활성화 정도를 조사하기 위해 산화 헤모글로빈의 농도 변화량을 중심으로 분석하였다.

측정된 데이터는 각 채널별 시간에 따른 광세기에 해당하는 값으로써 이 데이터는 분석 프로그램을 통하여 노이즈 제거 과정을 거치게 된다. 특히, low-pass filter (DCT 0.1 Hz)로 고주파 노이즈와 high-pass filter (DCT 0.005 Hz)로 저주파 노이즈를 제거하였다. 노이즈 처리를 거친 데이터는 Modified Beer-Lambert (MBLL) 법칙에 의한 변환식을 이용하여 각 채널별 시간에 따른 헤모글로빈의 농도 변화량 값으로 계산된다. 또한, 뇌활성화의 통계적 유의미성을 알아보기 위해 일반선형모델(General linear model, GLM)을 이용한 통계적 분석을 사용하여 채널별 GLM 회귀 계수 β 값을 산출하였다(Ye et al., 2009). 그리고, β 값에 대한 독립 표본 t 검정을 실시하여 $p = 0.05$ 수준의 유의미한 뇌활성화 채널을 파악하였고, 해당 채널들을 뇌해부학적 위치에 시각화하였다(Xia et al., 2013).

fNIRS 장비는 전전두엽에서의 뇌활성화를 측정하는 것인데 물리 용어의 친숙도에 대한 뇌활성화 특성 연구는 이 장비의 측정 범위 내에 있다. 선행 연구 결과에 의하면 인간이 친숙함과 회상 기능을 수행 시 뇌영역에서 전방전전두엽피질(anterior prefrontal cortex, aPFC)과 배외측전전두엽피질(dorsolateral prefrontal cortex, DLPFC) 영역이 활성화되며 친숙함에 대한 확신도가 높을수록 두 영역을 포함하는 왼쪽 중간이마미랑의 활성화도가 증가한다는 것이 알려져 있다(Yonelinas et al., 2005; Scalici et al., 2017). 따라서 이 연구에서는 물리 용어의 친숙도에 따른 뇌활성화 변화를 측정하기 위해서 왼쪽 전방전전두엽피질과 배외측피질을 포함하는 이 fNIRS 장비의 4개 채널을 관심 영역(Region of interest, ROI)으로 지정하여 이 4개의 채널에서의 산소 헤모글로빈 농도 변화량을 중점적으로 분석하였다. ROI에 대응하는 fNIRS 채널 번호는 33, 34, 36, 37이다.

Block Design for Measuring Brain Activation

물리 용어의 친숙도에 따른 뇌활성화 특성을 체계적으로 측정하기 위해서 휴식시간과 물리 용어들의 순서들을 정한 블록 설계를 수행하였다. 블록 설계는 연구자가 목표로 하는 뇌기능을 포함하는 활성화 과제(active task)와 포함하지 않는 대조 과제(control task)를 번갈아 제시하는 것으로, 혈류역학에 기반하는 fNIRS의 결과들에 대한 신뢰도를 반복 과정을 통하여 높일 수 있기 때문에 뇌과학 연구에 널리 사용된다(Huettel et al., 2004; Shin & Kwon, 2007). 앞에서 선정된 30 개의 물리 용어들을 무작위 순서로 배치한 슬라이드들을 Fig. 2와 같이 하나의 Session으로 구성한다. Session의 첫 슬라이드에서 '+'가 17초 간 제시되고, 이는 과제 수행 중

의 뇌활성 변화량의 계산에서 기준이 되는 것으로 Baseline에 해당한다. 이 단계에서 참여자는 시선을 ‘+’에 고정된 채로 육체적 및 심리적으로 안정적인 상태를 유지하게 된다. 그 후 물리 용어가 있는 슬라이더가 3초 간 제시되는데 이 때 참여자는 용어를 보고 생각나는 이미지와 개념을 연상하는 것이 활성화 과제(Task)에 해당한다. 그리고 다시 ‘+’가 4초 간 제시되며 참가자는 시선을 ‘+’에 고정하고 연상을 멈추는 Rest 단계가 이어진다. 이렇게 Task와 Rest가 반복되며 등장하는 일련의 순서로 하나의 Session이 구성된다. 그리고 모든 측정이 끝난 후, 학생별 심층 인터뷰와 설문을 통하여 각각의 물리 용어를 볼 때 즉 Task 단계에서 참여자가 연상한 이미지와 개념들을 확인하였다. 이 상담 결과는 각각의 물리 용어의 친숙도에 따른 뇌활성화 데이터를 분석 및 해석하는데 중요한 자료로 사용되었다.

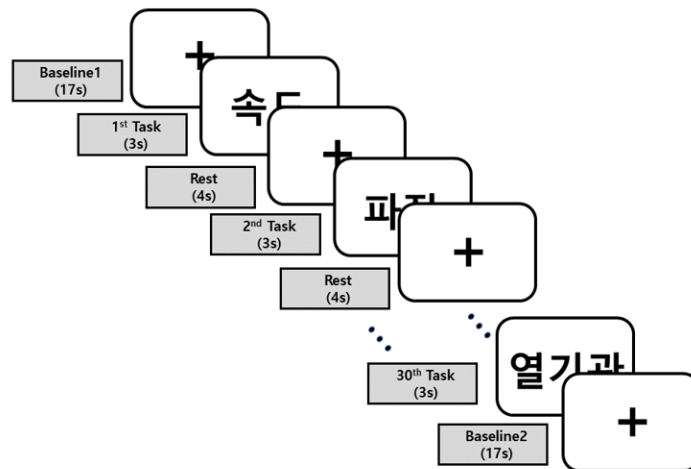


Fig. 2. Block design for measuring brain activation

Results and Discussions

Brain Activation Characteristics According to Familiarity with Physics Term

Fig. 3은 fNIRS 장비를 이용하여 측정된 한 학생의 48개 채널에서 나타난 물리 용어의 친숙도 여부에 따른 뇌활성화 변화량 분포를 나타낸 것이다. 여기서 뇌활성화 변화량은 물리 용어를 보는 각 Task 단계에서의 산화 헤모글로빈의 농도 변화량의 평균값에 해당한다. 그리고 농도 변화량의 범위는 $-0.1 \sim +0.1$ mM이며 농도 증가량이 최댓값인 $+0.1$ mM에 가까워질수록 빨간색으로 표시되고, 최솟값인 -0.1 mM에 가까워질수록 파란색으로 표시된다. 또한, 흰색은 농도 변화가 없는 상태이며 Baseline 상태와 같다. Figure 3에서 보는 바와 같이 친숙한 물리 용어를 볼 때 뇌활성화 변화량이 전체적으로 증가하고 특히 중앙 부분에서 변화량이 증가함을 알 수 있다. 특히, 검은 사각형 안에 포함된 친숙도와 관련된 관심 영역에 해당하는 4개의 채널(33, 34, 36, 37번 채널)에서 뇌활성화 변화량의 증가가 두드러짐을 알 수 있었다. 즉, 이는 물리 용어의 친숙함으로 인해 이미지와 개념 연상이 활발하게 일어나 학생들의 전방전두엽피질(anterior prefrontal cortex, aPFC)과 배외측 전두엽피질(dorsolateral prefrontal cortex, DLPFC)영역을 포함하는 왼쪽 중간이마의 뇌활성도가 증가한

다는 것을 말하고 이는 선행연구결과와 일치한다(Scalici et al., 2017; Yonelinas et al., 2005). 또한, 친숙한 단어를 사용한 문장 생성 수행에 대한 선행 연구결과와 똑같이 왼쪽 중간이마이랑의 뇌활성화가 활발하게 일어나는 것으로 보아 친숙한 용어를 사용한 문장 생성이 이미지와 개념 연상 효과와 비슷하게 작용함을 알 수 있다(Johnson et al., 2013). 반대로 친숙하지 않는 물리 용어를 볼 때 전전두엽 중앙부분에서 뇌활성화 변화량이 감소하였고, 관심 영역에 해당하는 채널들에서도 마찬가지로 감소하였다.

친숙한 물리 용어를 볼 때 뇌활성화 변화량이 증가하는 현상은 모든 학생들에게 확인할 수 있었다. Table 3은 모든 학생들의 4개 채널에서 나타난 물리 용어 친숙도에 따른 뇌활성화 변화량의 차이를 나타낸 것이다. 여기서도 뇌활성화 변화량은 물리 용어를 보는 각 Task단계에서의 산화 헤모글로빈의 농도 변화량의 평균값에 해당한다. 측정은 6명의 학생에서 이루어 졌으며 학생들은 S1에서 S6으로 명명하였다. 흥미롭게도 모든 학생들이 4개의 채널에서 대체로 학생들이 친숙한 물리 용어를 볼 때 뇌활성화 변화량이 증가하였고, 반대로 친숙하지 않는 물리 용어를 볼 때 오히려 감소함을 알 수 있었다. 이는 두 변화량의 차이를 볼 때 몇몇 작은 값을 제외하고 아주 잘 드러난다. 그러므로 친숙한 물리 용어 일 때 중간이마이랑 영역의 뇌활성화가 활발하게 일어나고 친숙하지 않는 물리 용어를 볼 때 반대로 감소함을 알 수 있었다.

aPFC와 DLPFC를 포함하는 왼쪽중간이마이랑 영역에 해당하는 4개 채널에서의 산화 헤모글로빈 농도 변화량의 유의미성을 정확히 확인하기 위해서 모든 학생들의 뇌활성화 변화량의 데이터를 통계 분석하였다(Table 4). 여기서 모든 학생들의 데이터를 비교하기 위해서 친숙한 용어 제시 구간과 친숙하지 않은 용어 제시 구간에 대한 채널별 GLM 회귀 계수 β 값을 산출한 후 단일 표본 t -검정을 수행하였다. 관심 영역 중 33, 34, 36 세 개의 채널에서 유의미한 차이를 보였고, 친숙한 물리 용어에 대해서는 뇌활성화가 증가하고 친숙하지 않는 용어에 대해선 뇌활성화가 감소함을 알 수 있다. 또한, t -검정 결과 친숙한 용어와 생소한 용어에 대하여 33, 34, 36 채널은 뇌활성화의 유의미한 차이가 있으나 37번 채널은 $p=0.492$ 로 유의미성을 확인할 수 없었는데 이는 37번 채널 위치가 왼쪽중간이마이랑 영역에서 다른 채널에 비해 상대적으로 멀리 있고 학생들이 다 해부학적 위치가 차이가 날 것으로 추측된다.

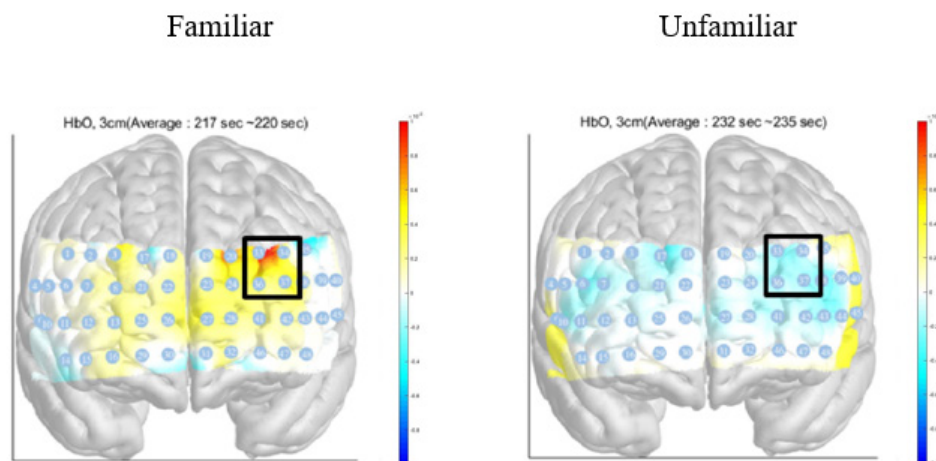


Fig. 3. Distribution of the changes in brain activation according to the familiarity with the physics term

Table 3. Changes in brain activation observed in 4 channels corresponding to the ROI

Student	Channel	Familiar	Unfamiliar	Difference
S1	33	0.02388	-0.20600	0.22988
	34	0.08377	-0.40214	0.48591
	36	0.02457	-0.12117	0.14574
	37	0.01285	-0.09808	0.11093
S2	33	0.02665	-0.02033	0.04698
	34	0.02620	-0.02054	0.04674
	36	0.01390	-0.01132	0.02522
	37	0.02715	-0.02272	0.04987
S3	33	-0.00668	-0.00495	-0.00173
	34	0.03285	-0.01647	0.04932
	36	0.01184	-0.00285	0.01469
	37	0.31894	-0.60559	0.92453
S4	33	0.01357	-0.10179	0.11536
	34	0.10469	-0.04304	0.14773
	36	0.07280	-0.07401	0.14681
	37	0.02967	-0.02227	0.05194
S5	33	0.04079	-0.20608	0.24687
	34	0.02172	0.00227	0.01945
	36	0.02792	-0.00738	0.0353
	37	-0.02515	0.00786	-0.03301
S6	33	0.14218	-0.20117	0.34335
	34	0.02005	-0.04251	0.06256
	36	0.03782	-0.05137	0.08919
	37	0.01779	-0.02849	0.04628

Table 4. Mean values of β values corresponding to ROI and the τ -test result

Channel	Mean		SD		τ	p
	Familiar	Unfamiliar	Familiar	Unfamiliar		
33	0.000259	-0.000176	0.000479	0.000605	2.817	.007
34	0.000144	-0.000223	0.000430	0.000541	2.657	.011
36	0.000139	-0.000112	0.000345	0.000517	2.017	.049
37	-0.000213	-0.000359	0.000877	0.000584	.693	.492

Brain Activation Characteristics According to Physics Unit

물리 단위별 뇌활성화 특성 차이를 분석하기 위해서 역학, 열역학, 전자기학, 파동, 현대 물리 등 모든 단원에 대해서 단위별 모든 학생들의 친숙한 용어 제시 구간과 친숙하지 않은 용어 제시 구간에 대한 채널별 GLM 회귀 계수 β 값을 산출한 후 단일 표본 τ -검정을 수행하였다. Table 5는 각 단위별 물리 용어에서 뇌활성화 데이터가 통계적으로 유의미한 차이를 보이는($p < 0.05$) 채널들의 해당 뇌영역과 브로드만 영역(Brodmann area, BA), 채널 번호, τ 값을 각각 나타낸 것이고, Figure 4는 해당 채널들의 해부학적 위치를 시각적으로 나타낸 것이다. 유의미한 차이를 보이지 않는 채널($p > 0.05$)은 제외하였다. Figure 4에서 오른쪽 컬러 지표는 τ 값을 나타내는 것으로 빨강색은 $\tau = 4$ 이고 파란색은 $\tau = 0$ 에 해당한다. 흥미롭게도 각각 단위별로 유의미한 차이를 보이는 학생들의 뇌활성화 공간적인 분포가 다르다는 것을 알 수 있다. 예를 들어 역학 물리 용어의 경우

좌반구의 안와전두피질(Oorbitofrontal, OFC)와 BA11에 해당하는 32, 46번 채널에서 유의미한 뇌활성화가 일어남을 볼 수 있는데, 열역학 물리 용어는 좌우반구 OFC의 16, 29, 32번 채널과 좌반구 DLPFC 및 BA10에 해당하는 19, 43번 채널 등 5개의 채널에서 유의미한 뇌활성화 차이를 보임을 볼 수 있다. 마찬가지로 전자기학, 파동, 현대 물리 단원에서도 다양한 뇌활성화 공간 분포 특성을 보임을 알 수 있다. 이는 단원 별로 물리 용어를 인식했을 때 연상되는 이미지 연상이나 상황이 각각 다르며 이것들이 신경활동의 결과물으로써 차이가 나타난다는 것을 말한다.

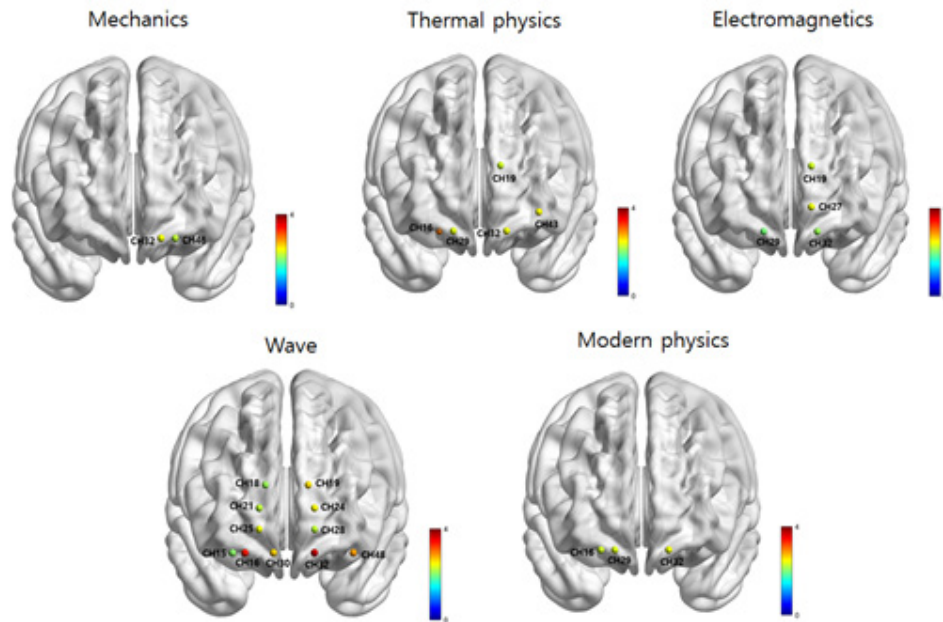


Fig. 4. Distribution of the changes in brain activation according to the familiarity with physics term

먼저, 공통적으로 모든 단원에서 유의미한 뇌활성을 보이는 뇌영역은 OFC 영역이었다. 즉, 좌반구 OFC 영역은 모든 단원에서 유의미한 뇌활성화 변화가 일어났고, 그 중에서도 32번 채널에 해당하는 영역에서 유의미한 뇌활성화가 일어났다. 우반구 OFC 영역은 역학 단원을 제외한 4개 단원에서 유의미한 뇌활성화가 일어났다. 일반적으로 OFC 영역은 학습, 기억, 의사 결정과 같은 인지 활동에 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다(Wikenheiser & Schoenbaum, 2016). 구체적으로 OFC 영역은 외부 자극에 대해 중요한 의미를 가진 생각이나 기억을 회상하고 그에 대응하는 신체 반응이 일어나도록 하며, 어떤 객체들 사이의 연관성을 인코딩하고 검색하는 역할을 수행 한다(Bechara, 2004; Rolls, 2004). 이 연구에서 학생들로 하여금 물리 용어를 보고 떠오르는 이미지와 개념을 연상하도록 한 만큼 물리 용어와 관련된 기억 속에 있는 이미지와 개념들의 연상하는 과정에서 OFC 영역의 기능이 활성화 된 것으로 추측된다.

또한, 열역학, 전자기, 파동 단원에서는 공통적으로 좌반구 DLPFC 및 BA10에 해당하는 19번 채널에서 유의미한 뇌활성화를 보임을 알 수 있다. DLPFC 영역은 작업 기억 및 선택적 주의를 포함한 실행 기능을 수행하는 데, 이는 친숙함과 밀접한 관련이 있다(Curtis & D'Esposito, 2003). 친숙한 단어 및 시각적 자극에 대한 뇌 과학 연구 결과에 따르면 친숙함과 회상에서 DLPFC 영역에서의 뇌활성화가 두드러지게 나타났다(Johnson et al., 2013; Turriziani et al., 2008; Yonelinas et al., 2005). 단원별 물리 용어에 대한 뇌활성화 특성 분석은 친숙한

물리 용어에 대해서만 수행하였기 때문에 친숙한 물리 용어의 반응으로 DLPFC 영역의 활성화는 매우 자연스럽다. DLPFC 영역에서 유의미한 뇌활성화를 보이지 않았던 역학과 현대 물리 단원에서도 많은 물리 용어 데이터가 추가 된다면 유의미한 차이를 보일 것이라고 추측된다. 또한, DLPFC 영역은 목표 및 보상 정보의 표현과 통합에 관여를 하는데(Miller & Cohen, 2001; Wagner et al., 2001), 실제로 동기 유발 요소에 반응하여 활성화됨이 보고되고 있다(Ballard et al., 2011). 교육학적으로 학습자에게 친밀한 배경지식 등의 관련성은 학습 동기 유발의 중요 요소임을 고려할 때(Keller, 2010), DLPFC의 활성화는 친숙한 물리 용어에 대한 학습의 동기 보상과도 연관된 것으로 추측된다.

Table 5. Channel information showing significant brain activation by physics unit

Unit	Region	BA	Hemisphere	Channel	τ
Mechanics	OFC	10, 11	L	32	2.212
	OFC	10, 11	L	46	2.305
Thermal physics	OFC	10, 11	R	16	3.011
	OFC	10, 11	R	29	2.338
	OFC	10, 11	L	32	2.421
	DLPFC	9, 10	L	19	2.281
	DLPFC	10, 45, 46	L	43	2.491
Electromagnetics	DLPFC	9, 10	L	19	2.255
	FP	10	L	27	2.440
	OFC	10, 11	R	29	1.991
	OFC	10, 11	L	32	2.064
Wave	OFC	10, 11	R	15	2.031
	OFC	10, 11	R	16	3.359
	OFC	10, 11	L	30	2.636
	OFC	10, 11	L	32	3.719
	OFC	47	L	48	2.875
	DLPFC	9, 10	R	18	2.081
	DLPFC	9, 10	L	19	2.607
	FP	10	R	21	2.215
	FP	10	R	25	2.419
	FP	10	L	24	2.474
	FP	10	L	28	2.243
	OFC	10, 11	R	16	2.280
Modern physics	OFC	10, 11	R	29	2.324
	OFC	10, 11	L	32	2.410

열역학 단원의 물리 용어에 대한 뇌활성화 특성의 특이점은 BA46에 해당하는 43번 채널의 활성화이다. BA46 영역의 위치는 해부학적으로 중간이마이랑의 1/3에 해당하는 영역과 아래이마이랑의 앞부분을 포함하고 있다. 특히, 이중에서도 아래이마이랑은 대수방정식 또는 대수학용어와 같은 대수학적 개념을 인지할 때 뇌활성화가 일어난다는 최근 연구결과들이 보고되고 있다(Liu et al., 2019; Zhang et al., 2012). 이는 학생들이 열역학 단원의 물리 용어를 볼 때 수학 용어를 볼 때와 같이 대수학적 개념을 인지하는 것으로 추측할 수 있으며, 학생들과의 심층 인터뷰를 통해 확인할 수 있었다. 즉, 학생들이 열역학 단원의 물리 용어인 열, 열효율, 내부에너지 등의 연상개념으로 열역학 제1법칙, 열효율의 수학적 정의, 이상기체의 내부에너지와 같은 수학적 공식들을 연상하였다고 답하였다. 이러한 연상들은 대수학적 표현들과 관련이 있기 때문에 학생들

이 열역학 단위 물리 용어를 볼 때 다른 단위와 달리 BA46 영역에서 뇌활성화가 일어났을 것으로 추측된다.

마지막으로, 파동 단원의 물리 용어에 대한 뇌활성화 특성은 크게 두 가지가 있었다. 첫 번째 특징은 OFC 영역에 BA47에 해당되는 48번 채널의 유의미한 뇌활성화이다. BA47은 구조적으로 아래이마이랑의 궤도 부분에 근접하며, 음악적 구문 및 언어 능력과 밀접한 관련이 있다고 알려져 있다. 규칙적인 화음에서 아래이마이랑 영역이 활성화 되며, 비클래식 음악과는 달리 음악적 구조가 잘 갖춰진 클래식 음악에서 BA47의 뇌활성화가 잘 일어난다는 결과들이 보고되고 있다(Koelsch et al., 2005; Levitin & Menon, 2003). 마찬가지로 학생들과의 심층 인터뷰를 통하여 확인한 결과 파동 단위 물리 용어에 대한 연상을 할 때 진동수에 대한 소리의 높낮이와 계이름을 연상했다는 답변이 많았다. 즉, 음악적 구문과 관련이 있는 진동수, 파장과 같은 물리 용어에 대해서는 음악적 연상이 일어나서 이것이 뇌활성화에 영향을 미친 것으로 추측된다. 또한, 좌측 아래이마이랑은 구체적 용어보다는 인지 및 감정 같은 추상적인 용어에서 활성화가 일어남이 실험적으로 관측되고 있다(Wang et al, 2013). 즉, 물리 용어가 다른 용어에 비해 추상적인 개념을 담고 있다는 점에서 48번 채널의 유의미한 뇌활성화는 아래이마이랑의 활성화와 관련이 있는 것으로 추측된다.

파동 단위 용어의 두 번째 특징은 다른 단원의 물리 용어에 비해 전두극전전두피질(Frontopolar prefrontal cortex, FP) 영역의 뇌활성화가 많이 이루어졌다는 것이다. 학생들과의 심층 인터뷰 결과 파동 단원의 경우 다른 단원의 물리 용어에 비해 문장형 및 서술식의 개념 연상 비중이 매우 높았다는 것을 확인하였다. 예를 들면 회절이라는 물리 용어는 ‘장애물 모서리에서 파동이 회절’, ‘파장이 길수록 잘 굽어짐’, ‘슬릿을 지나간다’ 등과 같은 문장형 개념으로 연상하였고, 굴절에 대해서는 ‘빛이 휘는 것’, ‘진행 방향이 변함’과 같은 연상들이 있었다. 다른 파동 단원의 물리 용어들도 다들 비슷하였다. 선행 연구에 의하면 동일한 대수문제를 문장 형식과 수식 형식으로 제시하였을 때 문장 형식의 경우가 전두엽 앞부분이 좀 더 활성화됨이 확인 되었고(Sohn et al., 2004), 또한 같은 문장 형식이라도 수학 및 과학 개념이 포함된 문장의 경우 좌반구 중간이마이랑의 뇌활성화가 두드러짐이 확인되었다(Wang et al., 2021). 이러한 선행 연구 결과들로 종합해 볼 때 파동 단원의 물리 용어에서의 FP 영역의 뇌활성화는 문장형 개념 연상에 기인한 것으로 추측된다.

Conclusions

이 연구에서는 실시간 뇌활성화 변화를 측정할 수 있는 fNIRS 장비를 이용하여 물리 용어를 볼 때 나타나는 학생들의 뇌활성화 특성을 친숙도 여부와 물리학 단원에 따라 분석하였다. 먼저, 친숙한 물리 용어 일 때 중간이마이랑 영역의 뇌활성화가 활발하게 일어나고 친숙하지 않는 물리 용어를 볼 때 반대로 감소함을 알 수 있었다. 또한, 물리 단위 별 물리 용어에 대한 뇌활성화 특성을 분석한 결과 모든 단원의 물리 용어에서 공통적으로 좌반구 OFC 영역의 유의미한 뇌활성화가 나타났다. 이는 OFC 영역이 중요한 의미나 기억을 회상하고 이에 대한 신체 반응과 관련된 역할을 담당하는 기능을 가지고 있다는 것을 고려할 때, 물리 용어에 대한 의미를 떠올리고 연관 개념을 회상하는 인지 과정 수행에 따른 뇌활성화로 생각된다. 특히, 열역학 단위에서 DLPFC 및 BA46 영역의 유의미한 뇌활성화는 인터뷰 결과와 종합할 때 열역학 개념과 관련된 대수학적 표현의 연상으로 인한 결과로 보여진다. 파동 단위 용어의 경우 BA47에 해당하는 일부 OFC와 BA10에 해당하는 FP에서 유의미한 뇌활성화가 나타났다. OFC 영역의 뇌활성화는 파동 용어에 대하여 음악적 구문의 연상의 결과로 보이며, FP 영역의 뇌활성화는 학생들의 문장 형식의 연상에 따른 결과로 판단된다.

이러한 결론을 바탕으로 다음과 같은 교육적 함의를 제시할 수 있다. 첫째, 용어 친숙도에 따른 두뇌의 혈류역학적 반응과 설문을 통한 친숙도의 인지적 판단 결과 사이에 상관관계가 존재한다. 이는 기존 교육 연구에서 사용되는 설문 방식의 용어 친숙도 연구 방법과 결과에 신뢰성을 더할 수 있으며 나아가 교육 연구에 대한 신경과학적 연구의 접근 가능성을 높일 수 있을 것이다. 둘째, 효과적인 물리 학습을 위해 단위별로 차별화된 교수학습 전략 수립의 필요성과 방법을 제공한다. 개념에 대한 친숙도는 학습자에게 새로운 도식에 대한 실마리를 제공하여 지식 구성을 돕고 높은 성취로 이끌 수 있다. 즉, 이 연구결과를 고려할 때 학습자의 물리 용어 친숙도를 높이거나 선지식 형태로 활용하기 위해선 단위별로 적절한 형태의 학습 경험을 제시하여야 할 것이다.

References

- Au, Y. (2005). The analysis of detection index on distorted response in the occupational assessment for career counseling. *The Korea Educational Review*, 11, 135–156.
- Ballard, I. C., Murty, V. P., Carter, R. M., MacInnes, J. J., Huettel, S. A., Adcock, R. A. (2011). Dorsolateral prefrontal cortex drives mesolimbic dopaminergic regions to initiate motivated behavior. *Journal of Neuroscience*, 31, 1034.
- Bechara, A. (2004). The role of emotion in decision-making: Evidence from neurological patients with orbitofrontal damage. *Brain and Cognition*, 55, 30–40.
- Bryce, T., & Macmillan, K. (2005). Encouraging conceptual change: The use of bridging analogies in the teaching of action–reaction forces and the 'at rest' condition in physics. *International Journal of Science Education*, 27, 737–763.
- Chastelaine, M., Mattson, J. T., Wang, T. H., Donley, B. E., & Rugg, M. D. (2017). Independent contributions of fMRI familiarity and novelty effects to recognition memory and their stability across the adult lifespan. *NeuroImage*, 156, 340–351.
- Curtis, C. E., & D'Esposito, M. (2003). Persistent activity in the prefrontal cortex during working memory. *Trends in Cognitive Sciences*, 7, 415–423.
- Huettel, S. A., Song, A. W., & McCarthy, G. (2009). *Functional Magnetic Resonance Imaging*. Oxford University Press.
- James, W. (1890). *Principles of Psychology* (New York: Henry Holt). Reprinted Cambridge, MA: Harvard.
- Jeong, J., Lee, J., & Kim, J. (2016). A study on elementary school teachers' understanding of, certainty in, and familiarity with wave concepts in textbook and teacher's guidebook. *Journal of Korean Elementary Science Education*, 35, 389–405.
- Johnson, J. D., Suzuki, M., & Rugg, M. D. (2013). Recollection, familiarity, and content-sensitivity in lateral parietal cortex: A high-resolution fMRI study. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 219.
- Keller, J. M. (2010). *Motivational Design for Learning and Performance: The ARCS Model Approach*. New York: Springer.
- Kim, S. I. (2006). Brain-based learning science: What can the brain science tell us about education? *Korean Journal of Cognitive Science*, 17, 375–398.
- Koelsch, S., Fritz, T., Schulze, K., Alsop, D., & Schlaug, G. (2005). Adults and children processing music: An fMRI study. *NeuroImage*, 25, 1068–1076.
- Lee, J. (1996). The way and the material to teach the associative meaning of words. *Korean Language Education Research*, 6, 137–155.

- Levitin, D. J., & Menon, V. (2003). Musical structure is processed in “language” areas of the brain: A possible role for Brodmann Area 47 in temporal coherence. *Neuroimage*, 20, 2142–2152.
- Liu, J., Yuan, L., Chen, C., Cui, J., Zhang, H., & Zhou, X. (2019). The semantic system supports the processing of mathematical principles. *Neuroscience*, 404, 102–118.
- Mbewe, S. (2012). Middle School Teachers’ Familiarity with, Interest in, Performance on, and Conceptual and Pedagogical Knowledge of Light. Southern Illinois University at Carbondale.
- Miller, E. K., & Cohen, J. D. (2001). An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annual Review Neuroscience*, 24, 167.
- Mumba, F., Mbewe, S., & Chabalengula, V. M. (2015). Elementary school teachers’ familiarity, conceptual knowledge, and interest in light. *International Journal of Science Education*, 37, 185–209.
- Park, J. (2010). Analysis of processes in students' scientific understanding through reading scientific texts: Focused on literature review. *Journal of the Korean Association for in Science Education*, 30, 27–41.
- Rolls, E. T. (2004). The functions of the orbitofrontal cortex. *Brain and Cognition*, 55, 11–29.
- Saunders, W. L., & Jesunathadas, J. (1988). The effect of task content upon proportional reasoning. *Journal of Research in Science Teaching*, 25, 59–67.
- Scalici, F., Caltagirone, C., & Carlesimo, G. A. (2017). The contribution of different prefrontal cortex regions to recollection and familiarity: A review of fMRI data. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 83, 240–251.
- Shin, D., & Kwon, Y. (2007). A review on brain study methods in elementary science education: A focus on the fmri method. *Journal of Korean Elementary Science Education*, 26, 49–62.
- Sohn, M. H., Goode, A., Koedinger, K. R., Stenger, V. A., Fissell, K., Carter, C. S., & Anderson, J. R. (2004). Behavioral equivalence, but not neural equivalence—neural evidence of alternative strategies in mathematical thinking. *Nature neuroscience*, 7, 1193–1194.
- Song, Y. (2014). Analysis of the Magnitudes of the speed, the acceleration and gravity according to the context by students of a teachers' college and a university of education New Physics: Sae Mulli, 64, 290.
- Sternberg, R. J., & Ben-Zeev, T. (2001). *Complex Cognition: The Psychology of Human Thought*. Oxford University Press.
- Tanner, K., & Allen, D. (2005). Approaches to biology teaching and learning: Understanding the wrong answers—teaching toward conceptual change. *Cell Biology Education*, 4, 112–117.
- Turriziani, P., Oliveri, M., Salerno, S., Costanzo, F., Koch, G., Caltagirone, C., & Carlesimo, G. A. (2008). Recognition memory and prefrontal cortex: dissociating recollection and familiarity processes using rTMS. *Behavioural Neurology*, 19, 23–27.
- 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.
- Wang, J., Baucom L. B., & Shinkareva, S. V. (2013). Neural representation of abstract and concrete concepts: a meta-analysis of neuroimaging studies. *Hum Brain Mapp*. 34, 1133.
- Wang, L., Li, M., Yang, T., Wang, L., & Zhou, X. (2021). Mathematics Meets Science in the Brain. *Cerebral Cortex*, 32, 123–136.
- Warren, B., Ballenger, C., Ogonowski, M., Rosebery, A. S., & Hudicourt - Barnes, J. (2001). Rethinking diversity in learning science: The logic of everyday sense - making. *Journal of Research in Science Teaching*, 38, 529–552.
- Wellington, J., & Osborne, J. (2001). *Language and Literacy in Science Education*. McGraw-Hill Education (UK).
- Wikenheiser, A. M., & Schoenbaum, G. (2016). Over the river, through the woods: Cognitive maps in the

- hippocampus and orbitofrontal cortex. *Nature Reviews Neuroscience*, 17, 513–523.
- 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.
- Yonelinas, A. P., Otten, L. J., Shaw, K. N., & Rugg, M. D. (2005). Separating the brain regions involved in recollection and familiarity in recognition memory. *Journal of Neuroscience*, 25, 3002–3008.
- Yun, E. J., & Park, Y. (2015). Test Environment Factors Influencing Word Association about Science Terminology in Students. *Journal of the Korean Association for in Science Education*, 35, 1031–1038.
- Zhang, H., Chen, C., & Zhou, X. (2012). Neural correlates of numbers and mathematical terms. *Neuroimage*, 60, 230–240.

Authors Information

Lee, Chang-hun : Korea National University of Education, Graduate Student, First Author

Ryu, Kwang-Su : Korea National University of Education, Professor, Corresponding Author