

An Exploration of the Brain Study through A Practical Measurement and Application Using f-NIRS in Educational Research

Sang-Hee Park¹⁾, Jin-Sun Park²⁾, Na-Rae Hwang²⁾, Seung-Hyuk Kwon²⁾, Yong-Ju Kwon^{*2)}

¹⁾DaejeonGwanpyeong Elementary School·²⁾Korea National University of Education

교육연구에서 f-NIRS의 실제 측정과 적용을 통한 두뇌 연구의 탐색

박상희¹⁾·박진선²⁾·황나래²⁾·권승혁²⁾·권용주^{*2)}

¹⁾대전관평초등학교·²⁾한국교원대학교

<ABSTRACT>

Combining research methods in brain science and education is already one of the main trends and is effectively used to test existing theories of learning at the brain level and to discover new unknown knowledge in education. Functional near infrared spectroscopy (f-NIRS) is a device that measures the hemodynamic changes of the prefrontal lobe related to emotional changes, cognitive activity, and physical exercise. Its measuring principle is a method of detecting the transmittance of a light source whose wavelength is disturbed by the difference in histological characteristics of the prefrontal lobe brain region, using a near infrared light source with a wavelength of about 650-1000 nm. Cerebral blood flow changes can be measured in a non-invasive way. There are many advantages and high utilization in the convenience of measurement, the mobility of the measuring device and the possibility of the subject's movement. This method has advantages in terms of ease of measurement, maintenance efficiency, and low maintenance costs. This can be the best tool for brain research and mass sampling of students. To explore the practical applicability of f-NIRS in educational research, the study measured the brain activity of college students in observing biological phenomena designed with the block paradigm. The brain activity of the college students was shown that the BA10 region was activated in the guided observation and the BA8 region was activated in the non-guided observation. The findings suggest that the use of f-NIRS in educational research can be a useful approach for studying probes in the learning process, as well as short- and long-term learning effects. Therefore, the proliferation of f-NIRS use in educational research will contribute to the development of specific and systematic research methods.

Keywords : f-NIRS, educational research, brain-based education, prefrontal cortex, hemodynamic measurement

* Corresponding Author : Yong-Ju Kwon (kwonyj@knue.ac.kr)

Received September 1, 2019; Reviewed September 3, 2019 Corrected September 9, 2019; Accepted September 18, 2019

© 2019. Institute of Brain based Education, Korea National University of Education

I. Introduction

교육에서는 기존의 인지심리학적인 연구 방법 뿐 아니라 신경과학적 연구 방법이 동시에 병행될 수 있다 (Ansari & Coch, 2006; Shin & Kwon, 2006; 2007). 인지심리학적인 연구들은 학습에서 나타나는 다양한 특성이나 변화에 대해 눈으로 관찰 가능한 연구 결과는 제시할 수 있지만, 왜 그러한 현상과 결과가 나타나는지 그 원인에 대해 충분하고 과학적인 설명이 어렵다 (Kwon et al, 2009). 이러한 제한점을 보완할 수 있는 것이 신경학적 측정 방법을 적용한 교육학 연구이다.

인간의 모든 인지 활동은 두뇌에서 일어난다는 사실은 이제 과학계에서 널리 인정되고 있다. 그런데, 이런 인지 활동이 두뇌의 어느 부분에서 어떤 과정과 작용에 의해 일어나는지에 대한 구체적인 신경학적 연구는 아직 많이 부족한 실정이다 (Blackmore & Frith, 2005). 따라서 신경과학을 교육 연구에 적용하여 얻어지는 과학적 근거는 교육과 학습에 대한 발전 및 진보를 가져올 수 있기에 두뇌 기반 학습과학 및 교육연구에 대한 긍정적인 관심이 나날이 증가하고 있다 (Posner & Rothbart, 2005).

교육 연구에 있어 신경과학과의 융합 및 협력은 이미 하나의 큰 흐름으로 인식되고 있다. 기존의 과학 교육에서 신경과학적 연구를 위해 활용한 연구 방법에는 뇌전도 (Electroencephalography, EEG), 뇌자도 (Magnetoencephalography, MEG), 기능적 자기공명영상 (functional Magnetic Resonance Imaging, f-MRI), 시선 추적(또는 안구운동 추적, Eye Tracking) 등이 있다. 현대의 신경과학 연구가 발달할 수 있었던 것은 뇌 영상 기술이 지속적이고 혁신적인 발전을 거듭했기 때문이다. 그 결과, 이전에는 밝히지 못했던 학습과 인지 과정에서 나타나는 두뇌 수준의 현상들을 관찰하고 측정할 수 있게 되었다 (Hughes, 2008).

기존의 두뇌 기능에 대한 신경과학 연구에서는 주로 f-MRI나 EEG를 많이 사용했으나, 최근 기능적 근적외선 분광법 (functional Near Infrared Spectroscopy, f-NIRS)도 그 활용이 점점 많아지고 있다. f-NIRS는 편의성, 이동 가능성 등으로 인해 많은 인지심리학 및 과학교육 연구자들이 관심을 갖는 두뇌 활성 측정법이다. 현재 가장 널리 쓰이고 있는 f-MRI의 경우에는

두개골에서 신경 활동과 관련된 산소 포화 혹은 산소 제거된 혈액의 농도 변화를 비침습적으로 측정하고 있다. 하지만 연구 장비를 활용하기 위한 복잡한 절차와 많은 연구비용 등이 필요하기 때문에 f-NIRS가 f-MRI의 부분적인 대안으로 최근 많이 활용되고 있다 (Shuvra, 2019). 그 이유는 f-NIRS에서 근적외선을 이용하여 추출하는 뇌 신경 세포의 활동성 신호가 주로 헤모글로빈 신호와 밀접히 관련되어 있기 때문이다. 뇌의 활성화에 의한 산화 헤모글로빈의 농도 증가와 탈산화 헤모글로빈의 농도 감소는 근적외선 영역의 흡수율 차이를 발생시킬 수 있다. 따라서, f-NIRS는 그 차이를 탐지하며, 이 때 추출한 f-NIRS의 신호는 f-MRI의 BOLD (Blood Oxygen Level Dependent) 신호와 밀접한 연관이 있다 (Kang et al, 2009). 특히, f-NIRS 신호를 측정하기 위해 개발된 기기 중 f-NIRSIT (OBELAB, 2019)은 플라스틱 밴드형으로 제작되어서 전두엽 영역의 착용과 작동 및 측정이 매우 간편하며 학생들의 두뇌 기능 측정에 매우 유용하다.

이러한 장점에도 불구하고 여전히 국내외적으로 f-NIRS를 활용한 학생들의 두뇌 측정 연구는 아직 찾아보기 어렵다. 그러므로 f-NIRS를 이용한 연구의 활성화를 위하여 연구 설계와 분석, 결과 해석 등 f-NIRS의 원리와 장단점에 대한 논의와 실제 활용 방안에 대한 소개가 반드시 필요하다.

이에 본 연구에서는 앞으로 교육연구에 활발하게 적용될 수 있는 f-NIRS와 관련된 국내외의 선행 연구 결과들을 고찰한 후, 향후 학생들을 대상으로 한 교육 연구에서 어떻게 활용할 수 있을 것인가에 대한 교육적 함의를 제시하고자 한다.

이에 따라, 이 연구에서 연구 문제는 다음과 같이 설정하였다.

첫째, f-NIRS의 두뇌 측정 원리는 무엇이며, 이로 인해 f-NIRS가 갖게 되는 교육연구에서의 장점과 단점이 무엇인지 분석한다.

둘째, 교육 및 인지심리학 분야 등에서 f-NIRS를 활용한 선행 연구들을 고찰하여 f-NIRS를 활용한 연구 절차 및 측정 절차, 분석 방법 및 결과 제시 방법에 대해 알아본다.

셋째, f-NIRS를 이용한 과학교육, 특히 그 중에서도 생물교육과 관련된 연구에 적용할 수 있는 방안과 가능성에 대해 분석하여 제시한다.

II. Research Method Using Functional Near-Infrared Spectroscopy (f-NIRS)

1. Principles

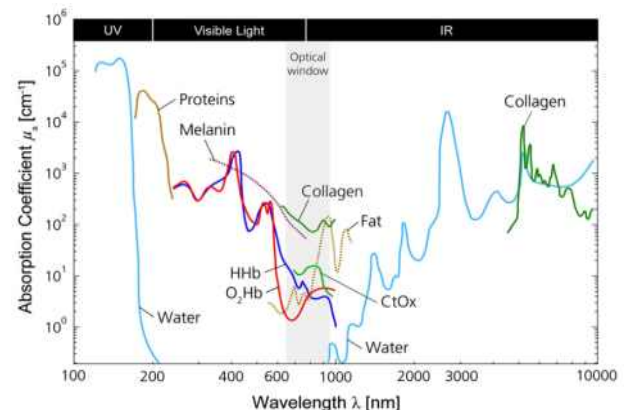
기능적 근적외선 분광법(Functional Near-Infrared Spectroscopy, fNIRS)은 감정, 인지과정, 운동 시 뇌의 변화를 혈류 역학적으로 측정할 수 있어 (Shuvra et al., 2018) 사람의 뇌 기능연구에 이용될 수 있다. f-NIRS는 무해한 파장의 빛인 근적외선을 송신한 후 산화 헤모글로빈과 탈산화 헤모글로빈의 농도에 따라 다르게 감쇄되어 돌아온 빛을 수신하여 뇌 활성화에 따른 혈류변화를 측정한다 (Hong et al., 2015).

인간의 뇌는 환경 자극에 반응함에 따라 많은 생리적 변화를 겪으며, 이러한 변화는 광학적 특성에 영향을 미칠 수 있다. 뇌 활성화에 대해 알려진 일반적인 생리학적 기전은 다음과 같다. 신경활성이 외부 자극에 의해 유발되면 ATP(Adenosine triphosphate)의 소비량이 증가하여 이를 보충하기 위해 포도당과 산소가 공급되어야 한다. 이를 위해 세동맥의 혈관이 확장되고, 뇌 혈류량 및 뇌산소대사량이 변화된다(Bunce et al., 2006). 산소의 공급은 증가하지만 뇌산소대사량이 크게 증가하지 않기 때문에 혈액 내 산화 헤모글로빈(oxy-hemoglobin, O_2Hb)의 농도는 증가하고, 탈산화 헤모글로빈(deoxy-hemoglobin, HHb)의 농도는 감소하게 된다 (Fox et al., 1988).

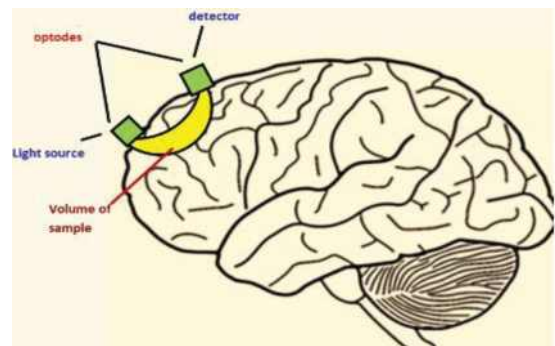
O_2Hb 과 HHb는 근적외선광 범위에서 특징적인 광학적 성질을 가지고 있기 때문에 이들의 농도변화를 근적외선 분광법으로 측정할 수 있다. 뇌 활성도의 비침습적인(noninvasive) 측정을 위해 적합한 빛의 파장 대역을 optical window라고 부른다 (Bunce et al., 2006). optical window 스펙트럼 범위(약 650~950nm)의 빛은 [Figure 1]에서 확인할 수 있듯이 주로 물(water), 헤모글로빈(hemoglobin), 콜라겐(collagen), 단백질(protein)에 의해 약하게 흡수되기 때문에 비교적 깊이 침투될 수 있다. 650nm

이하의 빛은 주로 헤모글로빈에 의해 너무 강하게 흡수되고, 950nm 이상은 물에 의해 너무 강하게 흡수된다. 'optical window'의 스펙트럼 범위에서 O_2Hb 와 HHb는 흡수 스펙트럼의 최소값과 최대값이 다르고, 800nm에서 O_2Hb 와 HHb는 흡수계수가 같다[Figure 1].

이 범위에서 더 높은 흡수 계수를 가지고 있는 다른 물질들이 있지만, 상대적으로 낮은 농도로 존재하기 때문에 O_2Hb 와 HHb는 주요 흡수 계수로 간주될 수 있다(Scholkmann et al., 2014). 두개골에서 투과된 근적외선은 대부분의 조직을 통과하여 산란되거나 흡수된다. 예측 가능한 양의 근적외선이 바나나 형태의 경로를 따라 피부 표면으로 되돌아오므로, [Figure 2]와 같이 광검출기를 사용하여 두 피에서 측정할 수 있다(Bunce et al., 2006).



[Figure 1] Absorption coefficient according to wavelength of light (Scholkmann et al., 2014)



[Figure 2] Banana-shaped near-infrared spectroscopy path (Shuvra et al., 2018)

1977년 Jobsis는 뇌의 O_2Hb 와 HHb 의 농도를 연속적이고 비침습적으로 측정할 수 있는 가능성을 토대로 기능적 근적외선 분광법을 고안했다(Jobsis, 1977). 그의 발견은 여러 NIRS 기구를 설계하고 제작하는 것으로 이어졌다(Scholkmann et al., 2014). 일반적으로 이 기구들은 optical window 스펙트럼 범위에 해당하는 2개 이상의 별개의 파장의 빛을 두개골로 투과한 후, $[O_2Hb]$ 와 $[HHb]$ 에 따라서 변하는 흡광도를 두개골에서 측정한다(Tak & Ye, 2014). 두개골로 빛을 전송하는 것과 뇌 조직에 흡수 및 산란 이후 방출되는 빛의 흡수는 일반적으로 주요 기록 장치에 연결된 광섬유를 통해 유도된다(Pinti et al., 2018). 수신한 빛을 토대로 $[O_2Hb]$ 와 $[HHb]$ 을 구하기 위해 Modified Beer-Lambert Law (MBLL)를 사용한다(Delpy et al., 1988). 1729년 프랑스 수학자 Bouguer가 Beer-Lambert Law를 개발했고(Bouguer, 1729), 이 법칙은 산란되지 않는 매체에서만 유효하므로 생물학적 조직에 적용하기 위해 Delpy et al.에 의해 수정되었다.

2. Features (Component, Advantage and Disadvantage)

인간이 인지 및 사고하는 과정동안 기초적인 신경 매커니즘을 측정하기 위해 그동안 다양한 신경 영상 장치가 사용되어 왔다(Soltanlou et al., 2018).

시중에는 다양한 f-NIRS 장치가 있으며, 연구에 맞는 기기를 사용할 수 있다. f-NIRS 장치들은 근적외선을 방출하는 방출체(Emitter)와 뇌 조직에 흡수 및 산란 이후 방출되는 빛을 흡수하는 검출기(Detector)를 지닌다(Scholkmann et al., 2014). 지난 10년간 소형화 및 웨어러블(wearable) f-NIRS 장치 개발 추세가 지속되었다(Pinti et al., 2018). 이런 기기들은 대상에 부착하여 무선으로 데이터를 PC에 전송할 수 있어, 자유롭게 움직이는 사람의 두뇌 활성 연구에 이용될 수 있다. f-NIRS 장치는 흔히 채널(channel)수로 특징지어진다. 하나의 채널을 하나의 방출체와 하나의 검출기 사이의 하나의 경로로 정의한다면, 16개의 방출기와 32개의 검출기 시스템에 대한 최대(이론) 채널수는 $16 * 32 = 512$ 채널이

된다(Scholkmann et al., 2014).

인지 과정동안 기초적인 신경 매커니즘을 측정하기 위해 신경 영상 장치가 사용되어왔다. 대표적인 신경 영상 장치로 f-NIRS, 기능적 자기 공명 영상 장치(Functional Magnetic Resonance Imaging, fMRI), 양전자 방출 단층 촬영장치(Positron Emission Tomography, PET), 뇌전도 측정 장치(Electroencephalogram, EEG), 뇌자도 측정 장치(magnetoencephalography, MEG) 등이 있다.

[Table1]에서 볼 수 있듯이 각각의 장치들은 장점과 단점을 가지고 있다. 이 중 f-NIRS는 발달 중인 아이에게도 적용할 수 있어 교육용 신경과학 연구에서 뇌 활성 변화를 조사할 수 있는 적절한 도구로 볼 수 있다(Soltanlou et al., 2018). f-MRI와 PET 모두 인체에 영향을 미치지 않는다고 알려져 있지만, PET에서 사용하는 방사선이나 f-MRI에서 사용되는 자기장에 대해 아동 혹은 부모의 거부감이 있을 수 있다(Ahn, 2017). f-MRI나 PET, MEG를 활용한 측정 시 대상자가 스캐너에 누운 상태로 진행되기 때문에 물리적인 제약이 있으며, 머리 움직임에 따른 허상(artifact)에 취약하다(Pinti et al., 2018). 따라서 이들을 활용한 측정 시 대상자가 누운 상태로 장비 안으로 들어가 머리를 최대한 움직이지 않는 상태에서 과제를 수행하므로 이를 이용한 과제 수행 결과를 일상적인 과제 수행의 결과로 보기 어렵다(Ahn, 2017). EEG 또한 머리 움직임에 따른 허상에 취약하다는 단점이 있다(Pinti et al., 2018). f-NIRS는 움직임에 제약이 없고, 머리 움직임에 따른 허상이 적어 인지실험에 매우 유용하게 이용될 수 있다(Tak & Ye, 2014).

이처럼 많은 장점을 가진 f-NIRS의 경우에도 신경 영상 장치로서 갖는 단점이자 제약점이 없는 것은 아니다. 먼저, cm 단위로 측정이 가능하기 때문에 f-MRI 등의 고성능 신경 영상 장치와 비교하였을 때에는 공간 해상도가 비교적 낮은 편이다. 또한 대뇌 피질의 범위에서만 측정이 가능하며, 대뇌 외의 혈액학적 반응에 의해 영향을 받을 수 있고, 머리카락이나 두개골의 특성에 의한 영향이 있다는 점도 제한점으로 작용한다(Soltanlou et al., 2018).

<Table 1> Exemplary advantages and disadvantages of common neurocognitive brain imaging techniques (Soltanlou et al., 2018).

Technique	Advantage	Disadvantages
fNIRS	• relatively high temporal resolution (milliseconds) • recording in natural body positions • low sensitivity to motion artifacts • portable • inexpensive	• low spatial resolution (centimeters) • only cortical brain coverage • influence of extra-cerebral hemodynamics • influence of hair and skull characteristics
fMRI	• very high spatial resolution (millimeters) • whole brain coverage • structural and functional data • good source localization	• relatively low temporal resolution (seconds) • sensitivity to motion artifacts • constraints on body position • contraindications (e.g., heart pacemaker) • expensive
PET	• high spatial resolution (millimeters) • whole brain coverage • metabolic data	• low temporal resolution (seconds) • injection of radioactive tracer • expensive
EEG	• very high temporal resolution (milliseconds) • portable • inexpensive	• low spatial resolution • sensitivity to environmental noise • inverse problem of source localization • time-consuming preparation
MEG	• high temporal resolution (milliseconds) • high spatial resolution (millimeters) • good source localization	• sensitivity to environmental noise • contraindications (e.g., dental crowns) • non-portable • expensive

3. Research Process

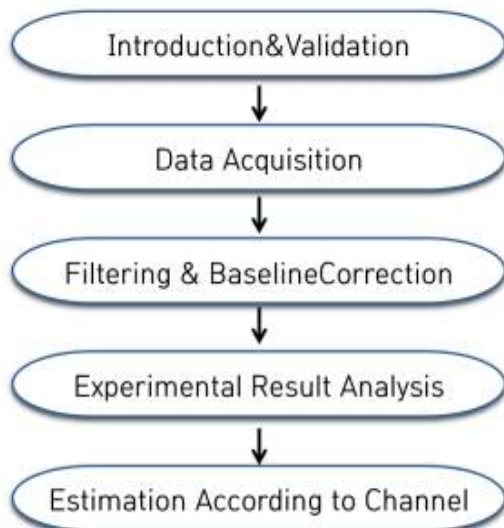
기능적 근적외선 분광기(f-NIRS)를 이용한 연구의 단계는 세부적인 연구 내용 및 방법에 따라 차이가 있지만 대부분 다음과 같은 과정을 따른다. 먼저 인지심리학이나 교육학에서 이루어지는 연구들은 대부분 밝히고자 하는 연구 주제 및 내용을 선정하고 ‘인지심리적 연구’와 ‘신경생리적 연구’의 두 가지 영역으로 연구 체제를 구분하여 진행하는 경우가 많다. 먼저 인지심리적 연구를 통해 연구 주제와 관련된 문헌들을 연구하여 연구 과제에 관련된 자료 수집을 준비한다.

이와 동시에 신경생리적 연구 측면에서 f-NIRS와 관련된 기기 특징이나 과제 설계 방법, 연구에 대한 이해를 정립하고 이를 바탕으로 측정 상황에서의 과제와 패러다임을 개발한다. 개발된 과제와 패러다임은 행동 과제검사와 전문가의 타당도 분석을 통해 수정 및 보완을 거치는 것이 좋으며, 정해진 연구 대상에게 필요에 따라 과제 제시 상황과 비슷한

수행 과제를 주고 연습을 시키는 경우들이 있다. 측정 전에는 실행해야 하는 과제와 인지적인 과정들에 대해서 잘 설명하고 기기를 피험자에게 장착한 다음, 측정에 들어간다. 측정을 시작하기 전 각 채널들이 기능을 잘 하고 있는지 확인할 필요가 있으며(OBELAB, 2017), 측정을 마친 자료는 결과를 분석할 수 있는 형태로의 전처리 과정을 거친다. 특히, f-NIRS의 경우에는 f-MRI에 비하여 채널수가 적고 채널 간의 간격이 넓은 편이기 때문에 f-MRI 분석 시에 사용하던 방법을 그대로 적용할 수 없으며, 변환을 통해 조밀한 뇌 활성 영역에 대한 정보를 얻고 그 신호에 따라 통계적 알고리즘을 활용하여 분석해야 한다. 이러한 과정에 맞춤형된 f-NIRS 전용 분석 프로그램, 예를 들면 NIRS-SPM과 같은 소프트웨어들이 계속하여 개발되고 있다(Tak & Ye, 2014). 분석용 소프트웨어를 활용하여 결과를 분석하고, 분석 결과를 여러 가지 방법으로 나타내어 제시할 수 있다. 교육학 연구에서는 이러한 과정을 거쳐 결론과 교육학적 함의를 얻는다.

4. Experimental Procedure

f-NIRS를 활용한 연구는 [Figure 3]에 제시하는 단계와 같이 실험 절차를 진행하게 된다.



[Figure 3] Flow chart of the experimental procedure in the research using f-NIRS

먼저 피험자가 측정에 들어가기 전에 연구 목적, 실험 과정, 기기 사용 시 자세 등에 대한 충분한 설명을 통해 부족한 안내로 인한 예기치 못한 변수가 발생하지 않도록 한다. 또한 혈액의 흐름을 데이터로 얻어야 하는 f-NIRS의 특성상 피험자의 심박수와 호흡 속도가 실험과 관련 없는 외부 요인으로 인해 영향을 받지 않도록 상태를 확인하고 주의 사항을 안내하며 광검출기에 영향을 줄 수 있는 주변의 빛을 배제할 수 있을 정도의 적절한 환경을 조성하도록 한다.

어느 영역에서의 전두엽 피질이 활성화되는지 측정하기 위해서는 최대한 넓은 해당 구간의 정상적인 신호가 수신되도록 해야 하기에 센서의 결속 상태를 확인할 필요가 있다. 최대한 이마에 측정기기를 부착시키면서 신호의 왜곡되어 방해요소가 되는 머리카락이 사이에 끼지 않도록 함은 물론 수신기를 통해서 전송되는 신호여부를 확인해야 한다. 이때 이마 전체 영역의 헤모글로빈 변화가 관찰될 수 있도록 생리학적 반응을 활용하는 방법이 있는데

그 예로는 최대한 오래 숨 참기(Maximal Breath-hold)가 있다. 최대한 오래 숨을 참음으로써 CO_2 분압이 기준치 이상으로 상승되는 것을 뇌가 감지하게 되어 O_2 와 CO_2 의 교환을 촉진하기 위해 혈액 공급 속도가 증가되기 때문이다. 숨을 참은 구간 전후에 정상 호흡 구간을 두고 이를 수행했을 때 헤모글로빈의 기저선(Baseline) 기준 대비 변화를 살펴 보면서 각 채널별로 유효성을 확인할 수 있다(Hong et al., 2015).

본 과제를 수행하기 전에 비슷한 노력과 사고를 필요로 하는 유사 유형의 사전과제를 제시하여 데이터 수집의 효율성을 높일 수 있다. f-NIRS를 활용한 연구에서의 사전과제 예로는 정지상태서 종이 위에 나열된 글자들 중에서 특정 글자의 수를 세거나 정상 속도로 걷기, 본 과제 시 설정된 전체의 경로를 걷기(Pinti et al., 2015), 노인의 창문을 들어 올리거나 내리는 것을 돕기, 청각장애자를 위한 알람시계 디자인하기, 시각장애인을 위한 부엌용 측정 도구 설계하기(Hu, 2018) 등이 있다. 본 과제 시에는 각 설계 사이에 기준인지 측정 및 휴식기간을 포함시키는 과정이 있는데 이는 신경과학의 이전에 정의된 방법에 기반한다(Tak & Ye, 2014). 설정한 과제에 대한 수행이 원활하게 진행될 수 있도록 지속적으로 피험자를 관찰하면서 측정된 데이터가 수집되는지 확인해야 한다.

수집된 데이터는 필터링 과정을 통해 노이즈를 제거하여 얻게 된 유효한 데이터를 가지고 채널 위치에 따른 뇌활성화 여부를 분석하여 추론하게 된다. 이에 대한 설명은 Analysis Procedure에서 보다 상세하게 기술하였다.

5. Task Design

f-NIRS와 관련된 연구 설계의 대상 및 선정 기준, 설계한 블록 수, 행동 과제 및 조건의 특징에 대한 사례들을 Pinti 등의 리뷰 논문을 토대로 국내외 논문들을 추가 수집하여 <Table 2>에 제시하였다(Pinti et al., 2018).

<Table 2> Summary of the characteristics in f-NIRS study' participants and experimental protocol

Reference	Participants	A healthy standard	Conditions	Number of blocks	Behavior task
Kim Jae-Myoung et al (2018)	Healthy young adults (n=20; 22.1±3.4)	No history of neurological, cardiovascular diseases, non-smokers, none were taking any medications	Rest Task	1 block 1 block 5 blocks 5 blocks	Initialization Baseline Squatting rest Standing rest
Shin Jae-Young et al (2018)	Healthy young adults (n=13; 24.9)	No neurological, psychiatric, or other brain-related diseases	Rest Introduction Task	30 blocks 30 blocks 10 blocks 10 blocks 10 blocks	Mental arithmetic task Idle state task Breath holding task
Ahn Jong-Bok (2014)	Children who stutter/don't stutter (n=10/10; 6-7)	X	Rest Task	2 blocks 2 blocks	Reading task Monologizing task
Ye Jong-Chul et al (2009)	Healthy young adults (n=12; 26.4±2.5)	X	Rest Interval Task Rest Task	10 blocks 10 blocks 10 blocks 16 blocks 16 blocks	Finger tapping task Working memory task
Hong Seung-Hyuk et al (2015)	Healthy young adults (n=5; 28.6)	No damage to the blood vessels, cardiovascular system.	Rest Control Task	5 blocks 5 blocks 5 blocks	Preparation Mental counting Mental task (MS/MR)
Atsumori et al (2010)	Healthy young adults (n=6; 29.7±3.3)	Right-handed, non neurological abnormalities	Rest Control(NW) Task	1 block 6 blocks 5 blocks	NW DTW + attention-demanding task
Balardin et al (2017)	Healthy young adult (n=1; 30)	X	Rest Forehand Predictable Unpredictable	10 blocks 10 blocks 10 blocks 10 blocks	Playing table tennis
	Healthy young adult (n=1; 26)	X	Everyday-life activities	Continuous	Continuous monitoring in everyday life
Doi et al (2013)	MCI older adults (n=16; 75.4±7.2)	X	Control (NW) Task Rest	3 blocks 3 blocks 3 blocks	NW DTW + VFT
Feng et al (2019)	MDD patients (n=15)	X	Rest Task	4 blocks 4 blocks	VFT
Himichi et al (2015)	Healthy young adults (n=44; 21.32±1.73)	Female only	Rest Pre-task Task	30 blocks 3 blocks 30 blocks	Emotional movie Director task
Hu et al (2018)	Healthy young adults (n=12;)	Graduate engineering students, right-handed	Rest Task	3 blocks 1 block	unstructured design task (BS) partially structured design task (MA) structured design task (TRIZ)

Maidan et al (2016)	Older adults with Parkinson's disease (n=68; 71.6±0.9)	X	Rest Task	5 blocks 5 blocks	NW DTW + serial subtraction DTW + negotiating obstacles
	Healthy older adults (n=28; 70.4±0.9)	No orthopedic problems that may affect their gait or had unstable medical condition, including cardiovascular instability			
McKendrick et al (2016)	Healthy young adults (n=20; 18-29)	Right handed, no history of cardiovascular abnormalities	Rest Task	47blocks 37blocks 10blocks	DTW + auditory 1-back task DTW + scenery probe
McKendrick et al (2017)	Healthy young adults (n=13; 22±3.0)	Right handed, normal vision, no history of cardiovascular health problems, no drugs that alter neural or cognitive function	Task	4 blocks 2 blocks 2 blocks	Sitting + auditory 1-back task DTW indoor + auditory 1-back task DTW outdoor + auditory 1-back task
Mirelman et al (2014)	Healthy young adults (n=23; 30.9±3.7)	No underlying orthopedic or neurological disorders, be cognitively intact based on the Montreal Cognitive Assessment score	Rest Task	6 blocks 5 blocks	NW DTW + counting forward DTW + serial subtraction Standing + serial subtraction
Nieuwhof et al (2016)	Older adults with Parkinson's disease (n=12; 70.1±5.4)	X	Rest Task	6 blocks 5 blocks	DTW + counting forward DTW + serial subtraction DTW + reciting Digit span
Pinti et al (2015)	Healthy young adults (n=1; 24)	X	Rest Ongoing task Non-social PM task Social PM task	2 blocks 2 blocks 1 block 1 block	DTW + ongoing task DTW+PM
Sakakibara et al (2017)	Same-sex twins (n=78; 5-17)	X	Rest Task	2 blocks 1 block	VFT
Takeuchi et al (2016)	Healthy young adults (n=16; 25.9±4.4) Healthy older adults (n=15; 71.7±3.3)	Right-handed, no neurological abnormalities, cut off score of MMSE	Rest Task	6 blocks 15 blocks	DTW + playing Touch the numbers

NW = normal walking; DTW = dual-task walking; MCI = mild cognitive impairment; PM = prospective memory; MS = mental subtraction; MR = mental rotation; MA = morphological analysis; BS = brainstorming; VFT = verbal fluency task

f-NIRS 기술에서 통상적으로 가장 많이 사용하는 방법은 블록 설계(Block Design)이다. 블록 설계의 기본 원리는 연구자가 목표로 하는 뇌기능을 포함하는 활성화 과제(Active Task)와 포함하지 않는 대조 과제(Control Task)를 번갈아 제시하는 것이다 (Huettel et al., 2004). 가능한 한 실생활처럼 자유롭게 활동하는 상황에서 전기적 신호가 아닌 혈류 역학에 의해 낮은 시공간 해상도를 가진 f-NIRS의 결과값에 대한 신뢰도를 높이기 위해서는 지속적 모니터링이 가능하도록 비교적 간단한 수준의 설계와 반복적으로 과제를 제시할 수 있는 장점을 가진 블록 설계가 적합하다(Shin et al., 2007). 또한 f-NIRS를 활용한 연구과제 수행 결과로 전두엽피질의 활성영역을 관찰하는 1차적 연구가 주를 이루고 있는 특성상 블록 설계가 많이 활용되고 있다. 대체적으로 활성화 과제와 대조과제를 5~10 블록 이상 설계하여 여러 번 반복하는 과정을 통해 일반화할 수 있는 결과를 얻고자 하였고 Himinichi의 경우에는 부정적 감정이 자아관점에 미치는 영향으로 인한 외측전두엽피질에 미치는 영향을 알아보려고 대조과제와 활성화 과제 사이에 짧은 영상을 통해 감정 형성을 위한 사전 과제를 설정하기도 하였다 (Himichi et al., 2015). 한편 블록설계를 취하지 않고 활성화 과제 없이 4시간 동안 지속적으로 옥시헤모글로빈의 농도 변화를 측정하여 일상생활 속에서 대뇌 반구의 기능적 연결성의 변화 양상과 혈류 역학간의 상관관계 여부를 살펴보는 형태의 연구 (Balardin et al., 2017)도 있었다.

조사한 대부분의 연구(Table2)는 과제의 신뢰도를 높이기 위해 변수를 최소화하고자 건강한 청년 집단에서 수행되었다. 피험자는 심혈관이나 뇌신경 관련 계통 질환이 없어야 한다는 공통적인 전제하에 실험목적이나 오차가능성을 고려한 기준에 따라 선별되었다. 예를 들면, 약물을 복용하지 않는 비흡연자(Kim et al., 2018), 혈관 관련 질환이 없는 사람(Hong et al., 2015), 오른손잡이(Atsumori et al., 2010; McKendrick et al., 2016), 공감을 불러 일으킬 수 있는 영상의 목표층인 여성(Himichi et al., 2015), 보행에 영향을 줄 수 있거나 불안정한 의학적 상태를 가지지 않는 사람(Maidan et al., 2016),

인지기능을 변화시키는 약물 복용을 하지 않고 정상 시력을 가진 오른손잡이(McKendrick et al., 2017) 인지적 평가기준을 통과하여 손상이 없다고 간주된 사람(Mirelman et al., 2014)을 기준으로 하였다. 혹은 정도인지장애 노인(Doi et al., 2013), 중증 우울증 장애인(Feng et al., 2019), 공대 대학원생(Hu et al., 2018), 파킨슨병에 걸린 노인(Nieuwhof et al., 2016), 건강한 동성 쌍둥이(Sakakibara et al., 2018) 등 특정 집단을 대상으로 수행되었거나 말 더듬는 아동과 일반 아동(Ahn, 2017), 파킨슨병에 걸린 노인과 건강한 노인(Maidan et al., 2016), 치매 차단 평가의 기준 점수를 통과한 오른손잡이의 건강한 청년과 건강한 노인(Takeuchi et al., 2016) 등 집단 간 비교 연구를 위해 복수의 집단에서 수행되었다.

f-NIRS를 통해 이루어지는 연구는 크게 인지 상태나 운동 상태의 변화로 인한 뇌활성 변화를 측정하기 위한 목적으로 진행되었으며 그 중 인지 운동 상태의 변화를 관찰하기 위한 과제들은 기존의 f-MRI, EEG의 기술을 이용한 연구에서의 것과 유사한 형태를 보이고 있다. 주목할 점은 f-NIRS의 측정기기 활용 및 환경 조건의 제약이 적은 장점을 이용하여 운동 상태에서의 뇌활성 변화를 측정하는 관련 연구들이다. 그 예로는 스쿼트 과제를 통해 기립성 저혈압(Orthostatic lightheadedness)을 유도하면서 뇌혈류(cerebral blood flow, CBF)를 유지하는 대뇌의 자기조절(cerebral autoregulation, CA)을 알아보는 연구(Kim et al., 2018), 단순하면서도 직관적이고 재현성이 뛰어난 혈류 역학적 반응을 기대하고자 호흡운동의 자발적 억제로 정의되는 숨을 깊게 들이마시기 과제(breath-holding, BH) 연구(Shin et al., 2018), 측정 가능한 깊이인 외측 전두엽 피질 내 1차 운동 피질의 활성 측정을 위해 수축이완을 유도하고자 무작위로 손가락을 두드리는 과제(right finger tapping, RFT) 연구(Ye et al., 2009), 탁구 운동 상황에서 예측 가능한 조건과 불가능한 조건을 제시하여 적당한 수준의 신체 활동과 f-NIRS의 타당성을 조사하는 연구(Balardin et al., 2017) 등이 있다.

또한 걷기와 인지 과제를 이중으로 제시하여 이중 과제 시 보행속도가 느려지거나 불규칙성이 증가하는 현상을 통해 걷기가 전두엽 활성화와 관련

된 정보원에 의존하는 점을 활용한 연구들이 수행되었다(Mirelman et al., 2014). 일반적으로 이중 과제 시에는 대조과제가 활성화 과제와 동일한 환경과 시간 속에 주어지는 휴식 상태 뿐 아니라 활성화과제가 없어도 걷기를 지속하는 통제과제가 주어졌으며 추가로 사용된 다른 인지과제의 예로는 순항 계산(Mirelman et al., 2014; Nieuwhof et al., 2016), 일련의 자릿수 숫자(serial subtraction, reciting Digit span) 맞추기(Nieuwhof et al., 2016), 언어유창성과제(Doi et al., 2013), 그리고 스마트폰으로 숫자를 누르는 게임(Takeuchi et al., 2016) 등이 있다.

위에서 언급한 연구가 주로 실내 환경에서 수행되었지만 일상 생활 활동을 수행하는 동안 전두엽 피질 활동 변화를 모니터링(Balardin et al., 2017)하거나 캠퍼스를 거니는 동안 auditory 1-back 과제를 제시하여 사람들에게서 일어나는 상황 인식과 정신적 작업 과정을 조사함과 동시에 시각적 인식이나 제시된 각 음절이 이전에 제시된 음절과의 동일성을 찾으려는 연구(McKendrick et al., 2016) 혹은 도심 거리의 제한이나 과제환경에 대한 대비 없이 돌아다니는 상황에서 추측 기억(prospective memory, PM) 과제를 수행하는 연구(Pinti et al., 2015) 등 많은 움직임을 허용하고 자연스러움을 추구하는 형태의 과제를 제시하는 연구들도 등장하고 있다(Pinti et al., 2018).

6. Analysis Procedure

근적외선 분광 시스템은 fMRI나 PET와 같은 범주의 뇌기능영상장비가 아니기 때문에 뇌의 해부학적 정보를 얻을 수 없다는 점에서 한계가 있지만 상대적으로 간편하고, 이동이 가능하여 각종 두뇌 측정 연구에 활용 가능성이 높다(Tak & Ye, 2014). 그러나 근적외선을 측정하는 채널 위치의 정확한 해부학적인 위치 정보를 얻기 어렵고 공간해상도가 낮으며 근적외선이 통과할 수 있는 깊이 약 3cm 정도의 피질활성화만 주로 측정할 수 있다는 한계점 때문에 분석에 있어 더 큰 주의가 요구된다. 이에 근적외선 분광 시스템은 f-MRI 영상의 Bold signal로부터 뇌 활성화 위치를 비교하도록 하는 기능자기 공명영상 동시 활용 방법을 쓰는 경우가 많다.

f-NIRS 신호 처리 과정에서 처리된 f-NIRS 관련 데이터의 분석을 위해서는 특정화된 채널의 위치를 추정하는 것이 매우 중요하다. 이 단계에서 f-NIR 모형은 채널들은 MRI의 3차원 이미지와 융합되어 topoplot으로부터 쉽게 활성화 위치가 감지될 수 있다(Shuvra et al., 2018).

또 다른 측면에서 대부분의 생물학적인 신호는 매우 낮은 주파수 대역에서 일어나므로 특히 뇌 신호나 심장의 신호와 같은 생물학적 신호를 처리하는 과정에서는 'band pass filter'나 'low pass filter'를 거치는 것이 좋다(Shuvra et al., 2018). 특히, '가우시안 필터(Gaussian filter)'는 가장 많이 쓰이는 비균일하고 비인과적이며 '0'이 아닌 'low pass filter' 중 하나로 가우스 함수와 중첩적분(합성곱)을 통해 입력신호를 수정하고 필터에 걸린 부분들을 제거하여 신호를 부드럽게 만들 수 있다. 또 다른 계산 가능한 함수는 '혈류역학적 반응(HRF, hemodynamic response function)'으로 NIR의 빛에 의해 반영된 시스템이 이 함수의 계산값이 될 것이다.

근적외선 분광 신호의 분석에는 GLM(General Linear Model)모델이 널리 활용된다(Tak & Ye, 2014; Shuvra et al., 2018). GLM(일반선형모델)이란, 시간에 따라 달라지는 신호의 크기 변화를 분석하여 두뇌 활성을 판단하는 것이 아니라 설계된 실험으로부터 예상할 수 있는 이상적인 신호 모형을 설정하고, 측정된 신호와의 상관관계를 분석하여 두뇌 활성을 추정하는 방식이다.

또 다른 분석 모델로서의 제거 알고리즘은 생체 신호들 내에서 일종의 추세 또는 이동을 알아보기 위해 활용되며, 이러한 제거 방법은 개별적인 채널이나 광단자를 다루기 위해 사용된다. 이 과정에서 선형적인 추세는 데이터의 시스템적인 증가와 감소를 반드시 가져오게 되며, 혈류역학적인 응답은 매우 낮은 주파수의 신호들을 포함하게 된다. 전반적인 편향 영역은 이 신호와 비슷하며 쉽게 낮은 주파수의 신호들과 섞일 수 있다. 앞서 밝힌 GLM(일반선형모델)은 데이터를 수집하는 중의 호흡이나 움직임, 또는 기타 기계적인 오류들을 감지하지 못하는 경향이 있지만 제거 알고리즘을 사용하면 웨이블릿 최소 설명 길이(MDL)와 전반적인 편향을 찾아낼 수 있다. 그래서 웨이블릿 MDL의 뇌의 신호에 대한 더 정밀한 판단을 가능하게 한다.

이러한 웨이블릿 MDL 사용과 GLM 이외에도 DCT(이산 코사인 변환) 또한 smooth한 신호 데이터를 필터링하기 위해 사용되는 이상적인 제거 방법이다. DCT는 신호 데이터를 간의 상관 관계를 적절하게 줄일 수 있으며, NIRS-SPM 소프트웨어 내에서는 웨이블릿 MDL 제거 방법이 DCT 기반의 'high-pass filtering' 접근보다 신경 활성화에 대한 특정 영역 최적화에 대해 더 확실하고 구체적으로 제공하는 것으로 관찰되고 있다.

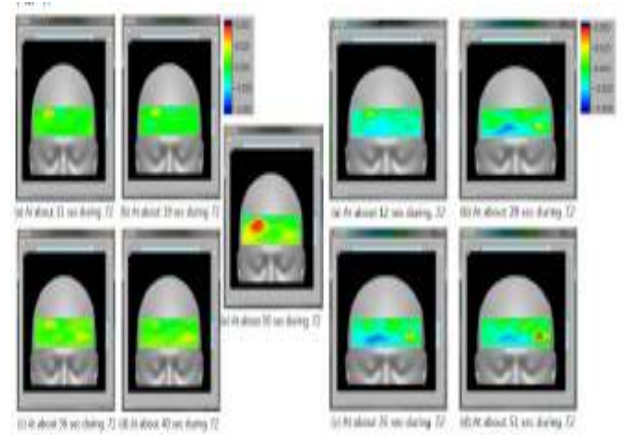
Base line 보정이 이루어지기 위해서는 연속적인 실험 또한 필요하며 주로 이것들은 base level을 수정함으로써 얻을 수 있다. 완벽한 형태의 2D 데이터 곡선에 일정하게 포함되어 있는 base level 상수 값은 신호가 없는 것으로 나타나며 이것은 2D 곡선의 기준선, 즉 base line이다. 때로는 온도의 영향이나 또는 다른 형태의 간섭 현상 때문에 base line이 편차가 발생하는 경우도 종종 있다. 이러한 편차를 줄이기 위해서 base line 보정이 필요한 것이다. 시계열 분석에서는 base line 보정 실험 기간 동안 초기 시점 또는 시간 범위를 필요로 한다.

GLM 모델을 기반으로 제작된 두뇌 활성영역 분석 SPM(Statistical Parametric Mapping) 소프트웨어를 대표적으로 활용한다.

7. Result Presentation

기능적 근적외선 분광법(f-NIRS)의 연구 결과를 나타내는 방법은 다음과 같이 다양하다.

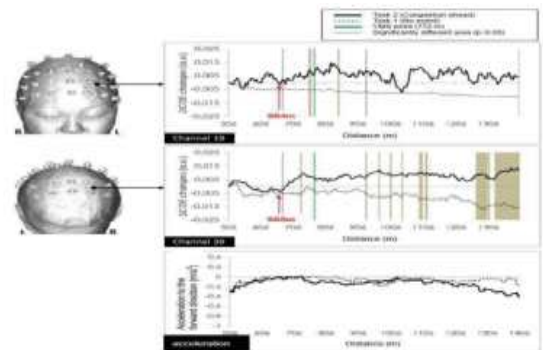
첫째, 과제를 수행하는 중에 변화하는 OHb 농도를 수치화하고 데이터의 평균값을 이용하여 가상의 두뇌 템플릿에 매핑하고 수치에 따른 다양한 색깔로 가시화하여 나타낼 수 있다(Kang et al, 2009). [Figure 4]는 과제1(T1)과 과제2(T2)를 수행하면서 나타난 두뇌 활성의 영역을 표시하고 있으며 채널 위치를 찾아 해석이 가능하다. 이와 같이 나타내는 방법은 기능적 근적외선 분광법을 다른 기타 비침습적인 측정 기기들과 비교했을 때, 보다 명확한 관찰 결과를 얻을 수 있다는 장점을 더욱 부각시킨다. 이외에도 두뇌 좌, 우반구가 모두 드러나는 MR 이미지에 활성화된 영역을 밝은 색깔로 표시해 활용하는 방법 등 f-MRI나 EEG와 마찬가지로 분석한 결과를 시각화하여 나타낼 수 있는 방법이 다양하다.



[Figure 4] Changes in OHb concentration during T1, T2 task (Kang et al., 2009)

$$\text{둘째, } \Delta COE = \frac{\Delta DeoxyHb - \Delta OxyHb}{\sqrt{2}} \text{의 식을}$$

활용하여 디옥시헤모글로빈(Deoxy-hemoglobin)의 변화 값에서 옥시헤모글로빈의 값을 감한 뒤, $\sqrt{2}$ 로 나누어 COE 값을 정하는데 이 COE 값의 변화량을 그래프로 나타내어 비교하는 방법도 있다.



[Figure 5] Comparison of brain activity between Task 1, 2 after 506m (Yamamoto et al., 2018)

위와 같은 방법으로 나타낼 경우, 실험 시간 중에서 사건이나 과제가 발생한 시간대 별로 별도의 표지를 미리 해 둔 선을 바탕으로 2가지 이상의 과제 혹은 2가지 이상의 두뇌 영역 활성화에 대해 서로 비교할 수도 있다(Yamamoto et al, 2018).

셋째, raw data를 활용하여 노이즈 요소들을 제거하고 분석하고자 하는 부분만 남겨 수치화 한 다음, 각 수치들을 표나 그래프로 간단하게 제시하며 비교하게 하는 방법이 있다.

III. Application in Education Research

인간의 인지 및 학습 과정은 뇌 영역의 활성화 및 상호적으로 긴밀히 연관된 신경망에 의해 조절된다. 인간의 학습 과정이 뇌에서 일어난다는 사실은 명확하지만 학습 과정에 대한 뇌의 역할과 기작에 대하여 밝히고자 하는 연구 노력은 뇌 과학의 역사가 짧은 만큼 부족한 편이라 할 수 있다(Shin & Kwon, 2007). 뇌 기능을 연구하는 최신 기법이 학습과 관련된 연구에 활용되면 두뇌 기능에 대한 획기적인 이해가 가능해지므로 이와 같은 시도가 필요하며, 최근에는 신경과학 분야의 혁신적이고 비약적인 발전을 통해 다양한 측정 기법이나 과제 제시 방법, 분석 기법 등이 개발되고 있을 뿐 아니라 논문을 통한 실제적인 근거도 제시되고 있다(Rosenzweig et al., 2005).

f-NIRS는 기존에 활용되던 두뇌 측정 장비들의 여러 가지 단점을 보완할 수 있고, 비침습적이라 학생 대상 연구에 가장 선행되어야 하는 안전성이 확보되어 있다(Slotanlou et al, 2018). 또한 다른 두뇌 측정 장비들이 갖기 어려운 간편성과 이동성까지 더하여 f-NIRS(기능적 근적외선 분광기)를 교육 연구에 활용할 수 있는 방안이 매우 다양하다.

1. Learning Process

f-NIRS와 같은 두뇌 측정 장비들을 활용하면 f-MRI, EEG, MEG, Eye-tracker 등의 신경과학적 측정 장비를 활용했던 연구들을 대부분 보완할 수 있다. 일찍이 한 가지 이상의 두뇌 영상 장비와 시스템을 이용하여 학습 과정에서 학습자의 동기유발이나 각성, 감성, 태도 등 정의적 요소를 측정하는 연구들이 다수 보고(Kwon et al., 2009)되어 있으며, f-NIRS 또한 위의 장비들과 마찬가지로 학습자의 학습 과정 뿐 아니라 정의적인 요소들이 학습자에게 미치는 영향을 측정할 수 있다.

그 예로는 학생들이 음악을 듣지 않으면서 학습을 할 때와 클래식 음악을 들으면서 학습을 할 때 뇌 활성을 f-NIRS로 측정하여 학습 환경에 따른 뇌 활성 정도를 비교한 연구(Lee et al., 2014)가 있으

며, 뇌의 영역 중 집중력을 관장하는 것으로 알려진 전두엽을 측정한 결과, 클래식 음악은 학습 시 집중력에 큰 영향을 주지 않아 조용한 환경에서의 학습 활동과 비슷한 집중력을 갖게 함을 증명할 수 있었다. 이처럼 f-NIRS를 이용하면 학습자의 학습 과정에 대한 정량적이고 혁신적이며 체계적인 두뇌 기능과 구조 관련성 등을 밝혀 상호 예측이 가능한 기본 모델을 제시할 수 있다.

2. Teaching Process

f-NIRS를 활용하여 교사의 교수 과정 및 특정 교수 방법과 그로 인한 학습 방법의 효과도 알아볼 수 있다. 교육학에서의 신경과학과의 융합 연구는 지난 30년간 성장해 왔으며, 기존의 교육 프로그램과 교수 활동이 객관적이고 과학적인 증거가 기반이 되어야 함을 주장해 왔다(Kwon et al., 2009). 그러나 교육연구에서 신경학적 기법을 적용한 연구들은 교육적 맥락에서 자연스러운 인지 과정을 충실히 조사하지 못한다는 점, 텍스트와 과제가 단순화되어 있으며, 시뮬레이션을 통해 교실 활동의 모든 변수를 설명하지 못한다는 점에서 한계성을 비판받아 왔다(Kim et al, 2011). 하지만 f-NIRS 연구의 경우에는 교실의 일상 활동과 유사한 시나리오 속에서 교사와 학생의 상호 작용과 교사의 교수 과정, 학생의 학습 과정에 대한 통찰력을 제공할 수 있기 때문에 이 기법의 잠재력이 크다고 여겨진다(Brockington et al, 2018).

기존의 두뇌 영상 측정 장치들은 특정 교수 방법의 적용 전과 후의 피험자 상태를 자기 보고(self-report) 방식이 아닌 두뇌 활성화 패턴을 비교하여 그 효과를 직접 파악할 수 있었다(Shin & Kwon, 2007). 이에 f-NIRS 또한 교수자의 교수 방법과 과정에 대해 측정할 수 있고, 그 효과 또한 평가할 수 있다. 이를 활용할 수 있는 단순한 예를 든다면 최근 그 필요성이 제기되고 있는 학생참여형 수업과 전통적인 방식의 교사중심의 수업 중에서 어떤 방법이 학생들의 두뇌 활성화를 촉진하는지 f-NIRS를 통해 측정할 수 있을 것이다. 또한 그 두 가지 방법으로 수업을 진행하는 도중의 학생과 교사의 두뇌 활성 및 인지 변화에 대해서도 연구할 수 있을 것이다.

3. Learning Evaluation

f-NIRS는 학습의 각종 프로그램 및 학생 평가 과정에서 활용될 수 있다. 주로 학습을 담당하는 것으로 알려진 우리 뇌의 부위는 전두엽으로 알려져 있다. f-NIRS는 비침습적으로 근적외선 영역의 파장을 이용해 전두엽의 헤모글로빈 농도를 측정할 수 있기 때문에 뇌 활성화라는 기준을 도입하여 학습 프로그램을 설계하거나 학습자들의 일일 과제 수행 중의 뇌 활성화를 측정하여 능력이나 효과를 측정하는 방법의 고안이 가능하다(Han et al., 2016). 또 다른 연구에서는 창의성이 비즈니스 문제해결에 미치는 영향을 뇌 인지 변화를 통해 측정하고자 창발성 유발 이론을 적용하여 비즈니스 문제 해결 과정에서의 학생들의 창의성 정도를 f-NIRS를 이용하여 측정하기도 하였다(Ryu & Lee, 2018).

즉, 현재 각종 학습 프로그램이나 평가 프로그램이 오직 문항점수에 의존하여 개인의 능력이나 잠재력, 창의성을 추정해 왔다면 f-NIRS와 같은 두뇌 측정 장비를 활용할 경우, 피 실험자의 능력을 정확히 측정할 수 있다는 것이다. 이러한 방식으로 f-NIRS를 활용할 경우 보다 정밀한 학습 프로그램이나 시스템을 마련할 수 있고, 학생의 능력을 측정할 수 있게 됨으로써 효율적 학습이 가능하고 과정 중심의 다양한 평가가 가능해진다. 또한 학생 능력을 측정하는 진단도구로서의 역할과 f-MRI와 같은 타 기기와 연계한 통합진단도구로서의 활용 가능성도 있다.

4. Study of Brain Activation

f-NIRS를 이용하여 학습자의 두뇌 수준에서의 발달 및 변화에 대한 연구는 교육의 측면이 아닌 심리학 측면에 치우쳐져 있기는 하나, 여러 가지 방법과 과제를 이용하여 수행되어 왔다.

대표적으로는 학생들의 수학 및 언어 능력 개발 과정에서 뇌 활성화와 변화에 중점을 둔 연구(Soltanlou et al., 2018)가 있으며 이는 보다 자연스러운 학교의 학습 상황에서 데이터 수집이 가능했기 때문에 f-MRI의 기술적 한계 때문에 제한되어

있던 학생의 발달 과정에서의 신경학적 변화에 대한 우리의 이해도를 높일 수 있는 기회가 되었다.

유아(7~8세)와 청소년 초기(11~12세)의 학생들이 신경 구조상 큰 변화를 이루는 발달단계에 해당한다는 점에 착안하여 영, 유아와 청소년 초기, 성년기에 이르기까지 두뇌 네트워크 구상 등의 변화를 조사하기 위해 지속적인 휴지 상태에서 f-NIRS를 측정한 연구(Cai et al., 2018)는 우리에게 두뇌 발달과 관련된 많은 시사점을 제공한다. 유아는 청소년 초기 학생들과 비교했을 때 지구력 및 효율성이 현저히 낮았으며, 분산된 네트워크는 인지 발달 단계 전반에 걸쳐 강화된다는 것을 찾을 수 있었다. 또한 기능적인 분리의 경우에는 유아기부터 청소년 초기까지 비교적 안정적으로 이루어지며, 두 가지 중요한 발달 단계에서 중요한 두뇌 기능적 네트워크 조직의 변화가 발생하였고 이 변화를 통해 새로운 통찰력이 생김도 밝힐 수 있다.

음악치료 전, 후의 우울증 장애 환자들의 뇌 기능 변화를 측정하여 음악치료를 받은 집단에서 DLPFC, OFC, VMPFC 등이 상당히 활성화된 것을 확인함으로써 음악치료가 우울증 환자들의 뇌 기능을 향상시킬 수 있음을 밝힌 연구도 있다(Feng et al., 2019). 이 뿐 아니라, f-NIRS를 사용하여 구어산출 메커니즘 협응을 이용한 치료 전, 후의 대상자 1, 2가 둘 다 좌반구의 전전두 피질과 배·외측 피질에서 활성화의 정도와 범위가 증가된 사실을 확인한 연구가 있다(Ahn, 2017).

이와 같이 f-NIRS는 학습자들의 발달에 의한 학습자들의 뇌 기능 및 구조의 변화, 네트워크의 변화 및 발달에 대해 밝힐 수 있다.

IV. Practical Application on Biological Observation

향후 활용도가 높을 것으로 예상되며 비상적인 발전을 거듭하고 있는 f-NIRS를 활용한 교육 관련 연구는 아직 많이 시도되지 않은 초기 단계이며, 과학 교과와 경우에는 더욱 그러하다. 외국 사례에서도 인지심리학과 신경과학 관련 논문들의 일부에서만 다

루고 있기에 과연 우리나라 과학교육 연구에서도 활용할 수 있는지에 대한 간단한 연구를 진행하였다.

본 연구의 목적은 실제 f-NIRS를 활용한 실증적인 연구를 진행하여 연구 절차 및 측정 절차, 분석 방법 및 결과 제시에 대한 방안과 사례를 마련하는데 있다. 이를 통해 f-NIRS를 이용한 관찰 탐구 학습에 관련된 연구에 적용할 수 있는 방안과 가능성에 대해 분석하여 제시하고자 한다.

탐구의 기본이 되는 관찰 활동을 안내된 관찰과 자유 관찰로 나누어 블록 패러다임 방식(Buxton, 2002)으로 수행하는 동안 실제 대학생들의 두뇌를 측정하였다. 연구 대상은 만 21세에서 23세에 해당하는 오른손잡이 남학생 3명과 여학생 2명, 총 5명에 대해 이루어졌다. 과제는 총 18종으로 제시되었으며 이 중에서 지시문 형태로 안내된 관찰이 9종, 자유롭게 연구 대상자가 원하는 영역에 대해 관찰하도록 한 안내된 관찰이 9종이었다. 과제는 식물, 동물, 균류의 3개 분류군 중에서 각각 6장씩 사진을 뽑아 제시하였으며 안내된 관찰의 경우에는 각각 주어진 사진에 대하여 모양, 색깔, 수 등을 관찰할 수 있도록 하였다. 과제의 제시 순서와 패러다임은 [Figure6]와 같다.



[Figure 6] Paradigm for presenting the task of guided and free observation

측정의 순서는 [Figure7]과 같다. 실험 대상자를 선정 후, 실험 대상자에게 실험의 방법을 설명하고 관찰에 대해 안내한 다음, 간단한 사전 검사를 통해 과제가 익숙해질 수 있도록 하였다. 다음으로 한국 교원대학교 교육연구원 미래교육공간의 공동 활용 교육연구장비인 f-NIRS 장치(NIRSIT)를 지원받아 실험 대상자들에게 착용하게 하고 과제 제시를 준

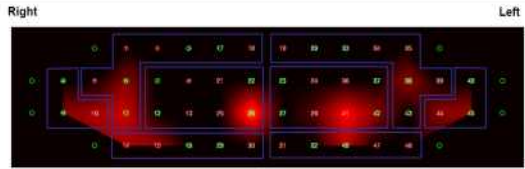
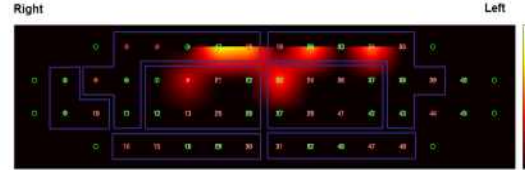
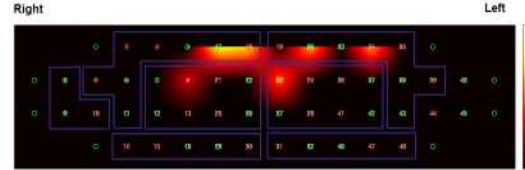
비하였다. 실험 대상자의 두뇌 위치에 맞게 NIRSIT 이 잘 장착되었는지 확인하기 위한 Calibration 과정을 거친 뒤, 측정 프로그램에 피험자에 대한 정보와 측정날짜 등을 입력하고 측정을 시작하였다. 과제는 위에서 제시된 패러다임대로 제공하였으며, 각 과제의 종류에 따라 마커를 이용하여 체크함으로써 분석이 용이하도록 하였다. 측정이 종료되고 나서는 데이터를 확인하고 사후 행동과제검사를 통해 대상자들이 적절하게 관찰 활동을 수행하였는지 확인하였다.



[Figure 7] Measurement process using f-NIRS

안내된 관찰의 경우에는 안내된 지시 수행 유지와 관련하여 목적 형성 및 메타인지에 관여하는 BA10(FP)영역이 활성화되는 것을 f-NIRS 측정 데이터를 통해 확인하였으며, 자유 관찰의 경우에는 불확실한 과제에 대한 탐색이 이루어질 때 활성화되는 BA8(DLPFC)영역이 활성화됨이 관찰되었다. BA10(FP)의 경우는 목표 형성에 관여하고 정보를 통합하여 더 높은 수준의 인지 과정을 이루는데 관여한다고 연구(Marley, 2017)를 고려할 때, 안내된 관찰 활동은 안내된 목표에 대해 탐색하고 그 목표를 적절히 수행하고 있는지 스스로 계속하여 확인하는 인지 과정이 진행되고 있음을 두뇌 활성을 통해 확인할 수 있었다. BA10 영역이 자신에 대한 내적인 성찰과 평가 기능과 관련된 두뇌영역이라는 연구결과(Pfeifer et al., 2009), 안내된 관찰에서 목표를 적절히 수행하는지에 대한 자기 스스로의 확인 과정에서 활성이 나타나는 것으로 볼 때 f-NIRS 측정을 통한 두뇌 기능의 측정은 타당하다고 할 수 있다.

<Table 3> Difference of the brain activation during scientifically guided or free observation

	3D MAP(Frontal)	2D MAP (Hot)	채널별 신뢰도							
안내된 관찰			Region	Ch.	T	P	Region	Ch.	T	P
			DLPFC	6	1.657	0.049	DLPFC	39	1.933	0.027
자유 관찰			FP	11	2.655	0.004	FP	41	3.314	< 0.001
			FP	26	4.244	< 0.001	FP	42	1.704	0.044
			VLPFC	9	1.687	0.046	VLPFC	44	1.746	0.04
			VLPFC	10	2.076	0.019	VLPFC	45	1.970	0.024
								46	2.389	0.004
다양한 정보가 투입되더라도 안내된 지시 수행 유지와 관련하여 FP가 포함된 BA10이 활성화 됨을 확인할 수 있음										
자유 관찰			Region	Ch.	T	P	Region	Ch.	T	P
			DLPFC	17	2.665	0.004	DLPFC	20	1.933	0.027
			DLPFC	18	2.379	0.009	DLPFC	34	2.095	0.018
			FP	8	1.039	0.149	FP	23	1.723	0.042
불확실한 정보를 기반으로 의사결정해야 하는 상황과 관련하여 DLPFC가 포함된 BA8이 활성화 됨을 확인할 수 있음										

또한 BA10의 경우 다른 뇌 영역과의 기능적인 연결과 언어적인 작업이 이루어질 때 크게 활성화 되는 영역으로서 언어적 자극으로 준 관찰 안내문에 대한 반응이 적절하게 일어나고 있음도 확인할 수 있다.

자유 관찰에서 활성화된 BA8 영역의 경우에는 시각적 반응에 의해 시선을 움직이는 가장 기초적인 부분으로 BA9과 같은 인접 영역과 함께 공간 기억을 제공하고 시각 자극의 중요성을 해석하며 자발적인 움직임 제어를 제공하는 공간(Waitzman, 2016)으로 자유 관찰이 일어날 때 주어지는 다양한 시각적 자극 중에서 어떤 부분을 관찰할 것인지 결정하고자 하는 두뇌의 활성을 확인할 수 있는 부분이기도 하다.

아울러 BA8과 BA9 영역의 기능은 제한된 과제를 수행하지 않고 다양한 부분에 대한 자유로운 관심으로 탐색할 때 활성화되는 영역임을 고려할 때 f-NIRS 측정을 통한 두뇌기능의 측정은 타당하다고 할 수 있다.

이처럼 f-NIRS는 학습자가 학습 과정에서 일어나는 두뇌 활성을 보다 편리하고 손쉽게 측정할 수 있게 함으로써 실제적으로 학습자의 두뇌 수준에서 어떤 부위에 활발한 활성이 일어나며 어떤 네트워크를 통해 사고들이 지속되게 되는지에 대해 보다 효과적으로 밝힐 수 있다.

V. Conclusions and Educational Implications

최근 교육 연구에서는 인지신경학적 방법과 함께 신경과학적 방법이 활발히 적용되고 있으며, 그 중 편의성, 이동성, 높은 시간 분해능 등 많은 장점을 가진 기능적 근적외분광법(f-NIRS)은 교육 연구에서의 활용 가능성이 높다. 이에 본 연구에서는 교육 연구를 위한 f-NIRS의 적용 가능성을 탐색하기 위하여 f-NIRS의 원리, 연구 절차, 자료 수집 및 분석방법을 고찰하고 교육적 적용 방안과 가능성을 제안하였다. 본 연구를 통해 얻을 수 있는 결론은 다음과 같다.

첫째, f-NIRS는 교육 연구 분야의 주요 연구 대상인 학습자 및 교수자의 두뇌 활성을 연구하는데 적합한 연구 방법이다. f-NIRS는 근적외선을 이용하여 두뇌 혈중 산소헤모글로빈의 농도를 실시간으로 측정하는 기기로서 기기 비용이 비교적 낮으며, 시간분해능이 높다. 또한 앉은 상태 및 운동 상태에서 측정이 가능하며, 이동성이 높아 전문 연구 시설 외 학교 및 가정에서도 사용이 가능하다. f-NIRS는 이러한 강점에 기반하여 f-MRI의 고비용, 낮은 이동성을 해결하고, Eye-tracking 등의 간접적인 접근을 넘어서 수 있으며 기존 신경과학

연구 장비들의 단점을 보완할 수 있을 것이다. 따라서 다양한 연구 대상과 복잡한 학습 상황에서 최대한 현장 상황을 그대로 반영하는 연구가 필요한 교육 연구 분야에서 f-NIRS를 두뇌 연구에 활용한다면 그 효과가 매우 높을 것으로 예상된다.

물론, 낮은 공간분해능과 대뇌 피질의 범위에서만 측정 가능한 점, 대뇌 외의 혈액학적 반응에 의한 영향과 머리카락이나 두개골의 특성에 의한 영향을 배제할 수 없다는 점 등은 제한점으로 작용한다. 하지만 향후 f-NIRS를 활용한 지속적인 연구를 통해 이러한 제한점을 줄여 나가고 단점을 고려하여 이를 소강할 수 있는 측정, 분석 방법들이 자리 잡는다면 f-NIRS를 활용하여 학습자나 교수자의 두뇌에 대해 우리가 얻을 수 있는 정보는 더욱 많아질 것이다.

둘째, f-NIRS는 교육에서 교수 및 학습에 대한 정량적이며 객관적인 분석을 가능케 하는 연구 방법이다. f-NIRS는 전통적으로 수행되고 있는 연구 방법인 설문, 면담, 관찰 등의 방법 안에서 두뇌 활성 정보를 수치로서 측정해낼 수 있다. 그리고 이러한 실험의 절차, 과제 제시 전략, 자료의 수집·전처리·분석 방식이 높은 신뢰성과 통계적 타당성을 가지며, 합의되어 연구되고 있다. 이는 기존 연구방법들이 안고 있던 각종 한계들을 정량적이고 객관적인 수치로서 보완할 수 있을 것이다.

셋째, 교육에서는 다양한 연구 대상과 주제를 대상으로 f-NIRS를 활용한 연구가 수행될 것이다. f-NIRS는 인체에 무해하며 이동이나 운동에 큰 영향을 받지 않고, 비교적 장비가 간단하고 편리하기 때문에 측정 가능한 연령 폭이 넓으며 제한 요인이 거의 없다. 따라서 학생을 대상으로 한 학습 연구, 교사를 대상으로 한 교수 행동 및 전문성 연구가 가능할 것이다. 또한 앉은 상태에서의 학습 뿐 아니라 글쓰기, 논변 활동 등 다양한 연구 주제에서의 손쉬운 활용이 가능할 것이다.

한편, 교육 분야에서의 f-NIRS 적용 사례가 거의 없고, 신경과학 분야의 연구가 주로 진행됨에 따라, 본 연구에서 제시하는 연구의 절차, 피험자 선정 방법, 과제 제시 방법 등은 실제 교육 연구와 거리가 있을 수 있다. 이에 후속 연구로서 본 연구에서 제시한 연구 방법을 적용하여 다양한 실제

검증 연구가 필요하다. 또한 연결망 분석법, 가소성 분석법, 시계열 분석법 등 연구 대상의 특성을 더욱 심도 있게 규명할 수 있는 고급 분석법에 대한 고찰, 적용 연구도 이어서 진행되어야 할 것이다. f-NIRS를 이용한 연구의 활성화를 위하여 연구 설계와 분석, 결과 해석 등 교육과 관련된 다양한 연구에서 f-NIRS를 활용할 수 있도록 원리와 장단점에 대한 논의 및 국내, 외의 선행연구 분석을 통한 활용 방법에 대한 다각적인 분석이 더욱 필요하다.

References

- Ahn, J. B. (2017). A comparative study of frontal lobe cortex activation of pre- and post-treatment using speech production mechanism coordination: Case study by using fNIR. *Journal of Speech-language & Hearing Disorders*, 26(2), 21-35.
- Ansari, D., & Coch, D. (2006). Bridge over troubled waters: education and cognitive neuroscience. *Trends in Cognitive Sciences*, 10(4), 146-151.
- Atsumori, H., Kiguchi, M., Katura, T., Funane, T., Obata, A., Sato, H., Manaka, T., Iwamoto, M., Maki, A., Koizumi, Hideaki., & Kubota, K. (2010). Noninvasive imaging of prefrontal activation during attention-demanding tasks performed while walking using a wearable optical topography system. *Journal of biomedical optics*, 15(4), 046002.
- Balardin, J. B., Morais, G. A. Z., Furucho, R. A., Trambaiolli, L., Vanzella, P., Biazoli, C., Jr., & Sato, J. R. (2017). Imaging brain function with functional near-infrared spectroscopy in unconstrained environments. *Frontiers in Human Neuroscience*, 11(258).
- Blakemore, S. J., & Frith, U. (2005). *The learning brain : Lessons for education*. Oxford: Blackwell.
- Bouguer, P. (1729). *Essai d'optique sur la gradation de la lumiere*. Claude Jombert, Paris.

- Brockington, G., Balardin, J. B., Morais, G. A. Z., Malgeiros, A., Lent, R., Moura, L. M., & Sato, J. R. (2018). From the laboratory to the classroom: The potential of functional near-Infrared spectroscopy in educational neuroscience. *Frontiers in psychology*, 9, 1840.
- 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/AUGUST, 54-62.
- Cai, L., Dong, Q., & Niu, H. (2018). The development of functional network organization in early childhood and early adolescence: A resting-state fNIRS study. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 30, 223-235.
- Delpy, D. T., Cope, M., van der Zee, P., Arridge, S., Wray, S., & Wyatt, J. (1988). Estimation of optical pathlength through tissue from direct time of flight measurement. *Physics in Medicine and Biology*, 33(12), 1433-1442.
- Doi, T., Makizako, H., Shimada, H., Park, H., Tsutsumimoto, K., Uemura, K., & Suzuki, T. (2013). Brain activation during dual-task walking and executive function among older adults with mild cognitive impairment: A fNIRS study. *Aging Clinical and Experimental Research*, 25, 539-544.
- Feng, K., Shen, C.-Y., Ma, X.-Y., Chen, G.-F., Zhang, M.-L., Xu, B., Liu, X.-M., Sun, J.-J., Zhang, X.-Q., Liu, P.-Z., & Ju, Y. (2019). Effects of music therapy on major depressive disorder: A study of prefrontal hemodynamic functions using fNIRS. *Psychiatry research*, 275, 86-93.
- Fox, P. T., Raichle, M. E., Mintun, M. A., & Dence, C. (1988). Nonoxidative glucose consumption during focal physiologic neural activity. *Science*, vol. 241, 462-464.
- Han, J. Y., Son, W. H., Kim, H. S., Moon, J. K., Kim, K., & Choi, J.-W. (2016). Design of personalized learning system using fNIRS and machine-learning. *Proceedings of Symposium of the Korean Institute of communications and Information Sciences*, 478-479.
- Himichi, T., Fujita, H., & Nomura, M. (2015). Negative emotions impact lateral prefrontal cortex activation during theory of mind: An fNIRS study. *Social neuroscience*, 10(6), 605-615.
- 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.
- Hu, M., Shealy, T., & Gero, J. S. (2018). Neuro-cognitive differences among engineering students when using unstructured, partially structured, and structured design concept generation techniques. *American Society for Engineering Education Conference*, #22916.
- Huettel, S. A., Song, A. W., & McCarthy, G. (2004). Functional magnetic resonance imaging (Vol. 1). Sunderland, MA: Sinauer Associates.
- Hughes, S. J. (2008). Comprehensive assessment must play a role in RTI. In E. Fletcher-Janzen & C. R. Reynolds (Eds.), *Neuropsychological perspectives on learning disabilities in the era of RTI: Recommendations for diagnosis and intervention*, 115-130. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, inc.
- Jobsis F.F. (1977) Noninvasive infrared monitoring of cerebral and myocardial sufficiency and circulatory parameters. *Science*, vol. 198, 1264-1267.
- Kang, W.-S., Abibullaev, B., Lee, S. H., & An, J. (2009). Observation on brain activations with the tasks of arithmetic and word spelling using fNIRS. *The Korean Institute of Information Scientists and Engineers Conference*, 36(2A), 84-85.
- Kim, D. I., Kim, I. N., Lee, K. J., & Shin, J. H. (2011). Brain-based education and learning disabilities: Review of neuroimaging studies on effects of reading intervention. *Korean Journal of Educational Psychology*, 25(1), 175-200.

- Kim, J.-M., Choi, J.-K., Choi, M., Ji, M., Hwang, G., Ko, S.-B., & Bae, H. (2018). Assessment of cerebral autoregulation using continuous-wave near-infrared spectroscopy during squat-stand maneuvers in subjects with symptoms of orthostatic intolerance. *Scientific Reports*, 8(1), 13257.
- Kwon, Y. J. Lee, J., Shin, D., & Jeong, J. (2009). Changes in brain activation induced by the training of hypothesis generation skills: An fMRI Study. *Brain & Cognition*, 69, 391-397.
- Lee, S. H., Kim, G. T., Bae, S. B., Jin, S. H., Jang, G. H., Lee J. H., & An, J. (2014). A study of effect of classical music on learning : A fNIRS pilot study. *Conference of The HCI Society of Korea*, 877-879.
- Maidan, I., Nieuwhof, F., Bernad-Elazari, H., Reelick, M. F., Bloem, B. R., Giladi, N., Deutsch, J. E., Hausdorff, J. M., Claassen, J. A. H., & Mirelman, A. (2016). The role of the frontal lobe in complex walking among patients with Parkinson's disease and healthy older adults: An fNIRS study. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 30, 963–971.
- Marley, J. (2011). The amazing world of psychiatry: A psychiatry blog: Brodmann area 10
- McKendrick, R., Parasuraman, R., Murtza, R., Formwalt, A., Baccus, W., Paczynski, M., & Ayaz, H. (2016). Into the wild: Neuroergonomic differentiation of hand-held and augmented reality wearable displays during outdoor navigation with functional near infrared spectroscopy. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10, e00216.
- McKendrick, R., Mehta, R., Ayaz, H., Scheldrup, M., & Parasuraman, R. (2017). Pre- frontal hemodynamics of physical activity and environmental complexity during cognitive work. *Human Factors*, 59, 147–162.
- Mirelman, A., Maidan, I., Bernad-Elazari, H., Nieuwhof, F., Reelick, M., Giladi, N., & Hausdorff, J. M. (2014). Increased frontal brain activation during walking while dual tasking: an fNIRS study in healthy young adults. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 11(1), 85.
- Nieuwhof, F., Reelick, M. F., Maidan, I., Mirelman, A., Hausdorff, J. M., Rikkert, M. G. O., Bloem, B. R., Muthalib, M., Claassen, A. H. R., & Claassen, J. A. (2016). Measuring prefrontal cortical activity during dual task walking in patients with Parkinson's disease: Feasibility of using a new portable fNIRS device. *Pilot and Feasibility Studies*, 2(59).
- Pfeifer, J. H., Masten, C. L., Borofsky, L. A., Dapretto, M., Fuligni, A. J., & Lieberman, M. D. (2009). Neural correlates of direct and reflected self-appraisals in adolescents and adults: When social perspective-taking informs self-perception. *Child Development*, 80(4), 1016–1038.
- Pinti, P., Aichelburg, C., Lind, F., Power, S., Swingler, E., Merla, A., Hamilton, A., Gilbert, S., Burgess, P., & Tachtsidis, I. (2015). Using fiberless, wearable fNIRS to monitor brain activity in real-world cognitive tasks. *Journal of Visualized Experiments*, 106, e53336.
- Pinti, P., Aichelburg, C., Gilbert, S., Hamilton, A., Hirsch, J., Burgess, 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.
- Posner, M. I., & Rothbart, M. K. (2005). Influencing brain networks: Implications for education. *Trends Cognition, Science*, 9, 99-103.
- Ryu, J. K., & Lee K. C. (2018). An exploratory study on the fNIRS-based analysis of business problem solving creativity. *Proceedings of Conference of the Korea Contents Association*, 167-168.
- Sakakibara, E., Takizawa, R., Kawakubo, Y., Kuwabara, H., Kono, T., Kasumi, H., Shiho, O., Satoshi, E., Ayaka, I.-T., & Kiyoto, K. (2018). Genetic influences on prefrontal activation during a verbal fluency task in children: A twin study using near-infrared spectroscopy. *Brain and*

Behavior, 8(6), e00980.

- Scholkmann, F., Kleiser, S., Metz, A. J., Zimmermann, R., Mata Pavia, J., Wolf, U., & Wolf, M. (2014). A review on continuous wave functional near-infrared spectroscopy and imaging instrumentation and methodology. *Neuroimage*, 85, 6-27.
- Shin, D.-H., & Kwon, Y.-J. (2006). Brain activities by the generating-process-types of scientific emotion in the pre-service teacher's hypothesis generation about biological phenomena : an fMRI study. *Journal of the Korean Association for Research in Science Education*, 26(4), 568-580.
- Shin, D.-H., Kim, S.-K., & Kwon, Y.-J. (2007). Development of a spider inquiry program for elementary students based on the scientific-knowledge generation model. *Journal of Korean Elementary Science Education*, 25(5), 465-475.
- Shin, D.-H. & Kwon, Y.-J. (2007). A review on brain study methods in elementary science education - A focus on the fMRI method. *Journal of Korean Elementary Science Education*, 26(1), 49-62.
- Shin, J., Kwon, J., Choi, J., & Im, C.-H. (2018). Ternary near-infrared spectroscopy brain-computer interface with increased information transfer rate using prefrontal hemodynamic changes during mental arithmetic, breath-holding, and idle state. *IEEE Access*, 6, 19491-19498.
- Shin, W. S. (2016). Review of eye-tracking method in elementary science education research. *Journal of Korean Elementary Science Education*, 35(3), 288-304.
- 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.
- Shuvra, L. T., Islam, S. R., Zaman, N., & Hasan, A. (2019). Identification of human pain perception using fNIRS. *Proceedings of International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques*, 434-439.
- 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, Article 277.
- Tak, S., & Ye, J. C. (2014). Statistical analysis of fNIRS data: a comprehensive review. *Neuroimage*, 85, 72-91.
- Takeuchi, N., Mori, T., Suzukamo, Y., Tanaka, N., & Izumi, S. I. (2016). Parallel processing of cognitive and physical demands in left and right prefrontal cortices during smartphone use while walking. *BMC Neuroscience*, 17(9).
- Waitzman, D. M. (2016). Conn's Translational Neuroscience Chapter 20. Oculomotor System and Control, 439-465.
- Yamamoto, K., Takahashi, H., Sugimachi, T., Nakano, K., Suda, Y., & Kato, T. (2018). The study of driver's brain activity and behavior using fNIRS during actual car driving. *11th International Conference on Human System Interaction*, 418-414.
- Ye, J. C., Tak, S., Jang, K. E., Jung, J., & Jang, J. (2009). NIRS-SPM: statistical parametric mapping for near-infrared spectroscopy. *Neuroimage*, 44(2), 428-447.

[저자의 소속과 직위]

박상희 : 대전관평초등학교, 교사, 제1저자
 박진선 : 한국교원대학교, 대학원생
 황나래 : 한국교원대학교, 대학원생
 권승혁 : 한국교원대학교, 전임연구원
 권용주 : 한국교원대학교, 교수, 교신저자