

RESEARCH ARTICLE

Development of Planning and Prediction of Difficulty in Young Children: An fNIRS Study

Hana Choi, Jeein Jeong*

Department of Child Development and Family Studies, Pusan National University

유아의 계획 및 난이도 예측의 발달: fNIRS 연구

최하나, 정지인*

부산대학교 아동가족학과

*Corresponding Author: jeongjee@pusan.ac.kr

ABSTRACT

This study examined the activation of the anterior prefrontal cortex (aPFC) in young children during block-building planning and explored whether activation levels and difficulty predictions varied by age. A total of 124 children, aged 3 to 6 years, participated in one-on-one interviews with a researcher. During the sessions, children's aPFC activation was measured using the fNIRS method. Following the planning tasks, they were asked to predict the difficulty of the block-building tasks. The results showed that 5-6-year-olds exhibited significantly higher activation in the left aPFC during planning for an easy block-building task compared to 3-4-year-olds. Additionally, after planning, the older children predicted the easy task to be less difficult than the younger children and were more accurate in distinguishing between the difficulty levels of easy and hard tasks. These findings suggest that older children, who exhibit greater left-aPFC activation during planning, are better at predicting the difficulty of the tasks they plan than younger children.



OPEN ACCESS

Brain, Digital, & Learning

2025, Vol. 15, No. 1, 19-37

<https://doi.org/10.31216/BDL.2025.15.1.2>**Received:** August 05, 2024**Revised:** December 24, 2024**Accepted:** December 26, 2024© 2025. 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.

Keywords: Young children, planning, prediction of difficulty, fNIRS, anterior prefrontal cortex (aPFC)

Introduction

목표 달성을 위해 순서화된 절차를 발전시키고 준비하는 인지적 계획 능력은 목적 지향적인 상황에서 문제를 해결하고 의사결정을 하는데 있어 매우 중요한 역량이다 (Domic-Siede et al., 2021; Schröer et al., 2024). 우리는 미래에 해야 할 일의 절차나 방법, 규모 등을 미리 헤아리고 준비할 수 있을 때 적절한 방향을 결정하고 효과적으로 문제를 해결할 수 있게 되기 때문이다. 이러한 이유로 계획 능력은 문제해결에서 요구되는 실행기능의 중요 요소로서 강조되어 왔으며(Zelazo et al., 1997), 메타인지적 관점에서도 점검, 평가, 전략 수정 능력 등과 함께 주요한 고차원적 인지 능력으로 다루어져 왔다

(Borkowski, 2000; Schraw & Moshman, 1995).

이러한 계획 능력은 유아기에 나타나기 시작하여 연령이 증가함에 따라 점차 정교하고 복잡해지는 것으로 알려져 있다(Hudson & Fivush, 1991; Kaller et al., 2008; McColgan & McCormack, 2008). 예를 들어, 만 2세경에 유아들은 미래에 있을 사건에 대해 말하기 시작하고, 이러한 발화는 유아기를 거쳐 점차 증가하는 것으로 보고된다(Hudson, 1993). 또한 만 3-4세가 되면 아침 식사나 생일파티 준비와 같이 익숙한 단일 상황에 대해 계획하는 것이 가능해지며, 만 4세 유아들도 “아침 식사로 먹을 수 있는 다른 것들을 생각해 볼래?”와 같이 성인의 피드백을 받으면 만 5세와 유사한 수준으로 적절한 계획을 세울 수 있는 것으로 나타났다(Hudson & Fivush, 1991). 이후 만 5세 정도에 이르면 공을 원하는 위치로 보내기 위해 공의 이동 통로를 계획하는 등의 비교적 복잡한 계획도 가능해지고(McColgan & McCormack, 2008), 새로운 정보나 단서에 따라 계획을 조율하는 모습도 보이는 것으로 나타났다(Kaller et al., 2008). 이후 계획 능력은 학령기를 거치면서 꾸준히 발달하여 비교적 쉬운 난이도의 계획 과제에서는 청소년기(16-17세)에 성인 수준으로 수행할 수 있게 되고, 매우 어려운 수준의 계획 과제는 22-25세 경에 최고 수준에 이르는 것으로 보고된 바 있다(Albert & Steinberg, 2011).

이러한 계획 능력은 목표를 효율적으로 달성하고, 미래 상황을 효과적으로 관리하는 데 있어 매우 중요한 역할을 한다(Wameken et al., 2014). 계획을 잘 세우는 성인은 상자를 지정된 위치로 이동시켜야 하는 과제에서 상자의 이동 경로를 최적화하여 배치하고, 더 신속하게 이동시킬 수 있는 것으로 나타났으며(Li et al., 2020), 계획 전략을 잘 사용하는 아동은 과제 수행 속도와 정확도의 측면에서 우수하고 상황에 따라 유연한 대처도 가능한 것으로 나타났다(Gardner & Rogoff, 1990). 또한 계획 능력은 학습능력과의 밀접한 관련이 있으며(Alyami et al., 2021), 특히 유아기의 계획 능력은 학령기의 수학과 읽기 능력을 비롯한 학업 성취도를 예측하는 것으로 보고된다(Friedman et al., 2014). 따라서 유아기의 계획 능력에 대해 살펴보는 것은 자기주도적인 문제해결 및 학습을 위한 초기 역량을 이해하는 데 있어 중요한 부분이라고 볼 수 있다.

유아들의 계획 능력을 살펴보기 위해 실시된 많은 연구들은 목표를 달성하기 위해 절차나 경로를 순서대로 준비하도록 하는 런던 타워(Kaller et al., 2008), 미로에서 길 찾기(Gardner & Rogoff, 1990), 공을 목표 지점에 보내기 위한 통로 만들기(Tecwyn et al., 2014), 코딩 과제(Arfé et al., 2020) 등을 사용하거나 필요한 물건을 준비하도록 하는 과제(Hudson & Fivush, 1991) 등을 자주 사용해왔다. 여러 단계의 경로를 복합적으로 계획해야 하는 미로 찾거나 목표 지점에 공을 보내는 과제에서 만 4-6세의 유아들은 어느 정도 경로를 계획할 수 있었으나, 수행의 정확도가 비교적 낮고, 즉각적이거나 불필요한 행동을 자주 보이는 것으로 나타났다(Gardner & Rogoff, 1990). 가장 빈번하게 사용되어 온 계획 과제 중 하나인 런던타워 과제에서는 보통 최소한의 공의 이동으로 공을 목표 상태로 배치하도록 요구하는데(Kaller et al., 2008), 이러한 과제에서 만 4세 유아들은 이동 순서가 복잡한 과제보다 공이 이동해야 하는 위치가 명확한 과제를 더 정확하게 수행하는 것으로 나타났다. 반면, 만 5세 유아들은 이동 순서나 위치가 단순한 과제와 복잡한 계획 과제 모두에서 더 높은 정확도를 보이는 것으로 나타났다(Kaller et al., 2008). 더불어 익숙한 가상의 시나리오(예: 아침 식사, 생일파티)에서 필요한 물건을 준비하도록 하는 과제에서 만 3-4세 유아들은 하나의 사건에 대한 계획만 가능하거나 외부의 피드백이 필요했던 반면, 만 5세 유아들은 독립적인 두 사건에 대해 각각 계획을 세우는 것이 가능한 것으로 나타났다(Hudson & Fivush, 1991). 이와 같은 연구들은 과제의 특성에 따라 유아들의 계획 능력이 다르게 나타날 수 있으며, 연령이 증가하면서 점차 고차원적 계획이 가능해짐을 보여준다.

그러나 이러한 연구들은 방법론적인 특성으로 인해 몇 가지 한계를 지니기도 한다. 먼저, 계획 행동은 크

게 앞으로의 일에 대해 정신적 표상을 하는 단계(plan)와 표상된 계획을 실천에 옮기는 수행 단계로(planning execution) 나뉠 수 있음에도 불구하고(Domic-Siede et al., 2021; Wilensky, 1983), 두 단계가 구분되지 않고 수행을 통해 나타난 결과가 우수한지 그렇지 않은지에 따라 계획 능력을 파악하는 경우가 많았다(Gardner & Rogoff, 1990; Kaller et al., 2008; Tecwyn et al., 2014). 예를 들어, 런던타워나(Kaller et al., 2008) 경로를 계획하는 과제를 통해 계획 능력을 살펴본 연구들은(Gardner & Rogoff, 1990; Tecwyn et al., 2014) 주로 참여자들이 최소 시도를 통해 목적을 달성할 수 있는지에 대해 살펴보는 방식으로 계획 능력을 파악해왔는데, 이러한 방식은 경로를 내적으로 표상하는 절차와 대상을 이동시키는 수행 절차를 분리하지 않는다는 특성을 지닌다. 이러한 맥락에서 최근에는 성인을 대상으로 미로를 보면서 인지적으로만 길을 찾도록 하는 정신적 표상과 실제로 미로 과제를 풀도록 하는 수행 단계를 구분하여 과제를 제시한 연구도 등장하였다(Domic-Siede et al., 2021). 더불어 대부분의 연구들이 외적으로 나타나는 수행 수준이나 행동을 관찰하는 방식을 취해왔기 때문에 계획을 할 때 유아들이 경험하는 내적 변화인 신경학적 변화에 대해서는 보고된 바가 매우 부족하다. 따라서 유아의 계획 능력을 측정하기 위해서는 정신적 표상 단계와 수행 단계에 대한 구분이 필요할 수 있으며, 특히 정신적 표상은 행동적 관찰이 어려운 만큼 신경학적 방식과 같은 다양한 방식이 시도될 때 유아가 경험하는 내적 과정에 대한 이해가 높아지리라 본다.

사실 신경학적 방식을 통해 계획할 때 뇌에서 일어나는 변화에 대해 살펴본 연구들은 주로 정상적으로 기능하는 성인(Christoff & Gabrieli, 2000; Domic-Siede, 2021; Koechlin et al., 1999; Koechlin et al., 2000; Momennejad & Haynes, 2012)을 대상으로 이루어져 왔으며, 최근에서야 유아를 대상으로 하는 연구가 시도되고 있다(Schröer et al., 2024). 전전두엽(prefrontal cortex, PFC)의 활성화가 계획 능력과 어떠한 관련이 있는지에 대해 살펴보는 연구들은 특히 전방 전전두엽 피질(anterior prefrontal cortex, aPFC)이 계획이나 계획 기억(prospective memory) 등을 비롯한 고차원적 과제 해결과 밀접한 관련이 있음을 보고하고 있다(Koechlin et al., 2000; Momennejad & Haynes, 2012). 예를 들어, 성인을 대상으로 한 PET 연구와 EEG 연구에 따르면 런던타워와 동물원 관람 경로를 계획하는 과제를 수행할 때 aPFC가 활성화되는 것으로 나타났다(Christoff & Gabrieli, 2000; Domic-Siede, 2021). 이러한 연구들은 특히 공의 이동 횟수가 많아지거나 경로 선택의 폭이 좁아지는 등 계획 수립 조건이 어려워질수록 인지적 요구가 높아지고, aPFC의 활성화가 크게 증가하는 것으로 보고하였다.

또한 fMRI 연구에 따르면, 효과적인 계획과 밀접한 관련이 있는 인지적 분기(cognitive branching) 과제에서도 aPFC가 활성화되는 것으로 나타났다(Koechlin et al., 1999; Koechlin et al., 2000; Momennejad & Haynes, 2012). 효과적인 계획을 위해서는 앞으로 일어날 상황에 대해 다수의 시나리오를 떠올리며 기억해야 하는 경우가 있고 여러 절차의 순서를 생각해야 하므로, 하나의 목표를 수행하면서 다른 목표들을 기억하는데 필요한 인지적 분기 능력이 필요한 경우가 많다. 따라서 계획 과제나 인지적 분기가 필요한 과제를 수행할 때 aPFC 영역이 활성화됨을 보여준 보고들은 이 영역이 목표 달성을 위해 필요한 여러 하위 목표와 절차를 순서화하는 기능과 밀접한 관련이 있음을 보여준다.

사실 유아나 아동의 aPFC 영역에 대해 다룬 연구는 매우 소수이며, 특히 계획 과제가 유아의 aPFC 영역과 어떠한 관련이 있는지에 대해 살펴본 연구는 부재한 상황이다. 다만, 구조물을 만들기 위해 필요한 블록을 준비하도록 하는 계획 과제에서 만 3세와 5세 유아들의 배외측 전전두엽 피질(Dorsolateral prefrontal cortex; DLPFC)이 활성화되는 것으로 보고된 바 있다. 이러한 결과는 유아의 계획 과정에 PFC가 관여한다는 것을 보여준다(Schröer et al., 2024). 또한 fNIRS 방식을 통해 문자 유창성 과제에서의 aPFC 영역 활성화를 살펴본

결과, 문자 유창성이 높은 성인 남성의 활성화 정도가 문자 유창성이 낮은 만 5-18세 남아·남자 청소년의 활성화 정도보다 높은 것으로 나타났다(Kawakubo et al., 2011). 이러한 결과는 문자 유창성을 비롯한 인지적 과제에 있어서 aPFC 영역 활성화가 발달 연령에 따라 증가할 수 있음을 암시한다.

그러나 이 연구들을 제외하면, 계획 과제 시 유아의 PFC, 특히 aPFC 영역이 어떻게 활성화되는지에 대한 연구는 부재한 상황이다. 더불어, PFC가 유아기에 급격히 발달하고(Anderson et al., 2008; Tsujimoto, 2008), 유아들의 계획 능력 역시 연령에 따라 함께 발달함에도 불구하고(Gardner & Rogoff, 1990; Hudson & Fivush, 1991; Kaller et al., 2008; McColgan & McCormack, 2008; Tecwyn et al., 2014), 계획을 할 때 나타나는 aPFC 활성화 양상이 연령에 따라 어떻게 변화할 수 있는지에 대해 살펴본 연구는 부재하다. 따라서 계획 과제 수행 시 유아의 연령에 따라 aPFC가 활성화되는 정도와 계획 수행의 양상이 달라지는지를 함께 살펴본다면, 유아의 계획 과제에서의 발달적 변화에 대한 행동적, 신경학적 정보를 종합적으로 얻을 수 있을 것이다.

더불어, 계획은 앞으로의 상황에 대해 헤아리고 모델링하는 정신적 활동이므로, 필연적으로 미래에 대한 예측을 연루한다고 볼 수 있다. 따라서 계획 이후 유아가 과제 상황에 대해 합리적으로 예측할 수 있는지 살펴봄으로써 계획 능력을 좀 더 확장하여 살펴볼 필요가 있다. 특히, 난이도 예측은 계획 과정에서 시간이나 자원을 얼마나 투입해야 할지에 대해 결정하도록 하며, 장차 도움 요청이나 협력, 경쟁이 필요한지에 대해 판단하기 위해 필수적인 부분이므로(Gweon et al., 2017; Yildirim et al., 2019), 계획 절차와 함께 중요하게 다루어질 필요가 있다. 실제로, 행동에 앞서 계획하는 능력이 부족한 것으로 알려져 있는 주의력 결핍 과잉행동 장애(Attention Deficit Hyperactivity Disorder : ADHD) 아동의 경우, 과제의 난이도에 따라 수행 시간을 적절하게 조절하지 못하는 경우가 많은데(Marzocchi et al., 2008; Papadopoulos et al., 2005), 이는 앞으로 수행할 과제의 난이도에 대해 예측하고 이를 기반으로 본인의 자원을 적절히 분배하는 능력이 부족하기 때문으로 볼 수 있다.

유아의 과제 난이도 예측에 대해 실증적으로 다룬 연구들은 많지 않으나, 최근 몇 연구들은 간단한 물리적 과제에 대해 유아들이 난이도 비교를 할 수 있는지에 대해 살펴보고 있다(Bennett-Pierre et al., 2018; Gweon et al., 2017; Magid et al., 2018). 블록 만들기 과제에서 유아의 난이도 비교에 대해 살펴본 연구에 따르면, 4-5세 유아들은 쌓아야 하는 블록의 개수가 많을수록, 그리고 완성작이 높고 클수록 과제가 어려울 것으로 예측하는 것으로 나타났다(Gweon et al., 2017). 또한 블록을 15개 쌓아야 하는 과제와 6개를 쌓아야 하는 과제가 있을 때 3-5세 유아들은 전자가 더 어려울 것이라고 예측하였으며, 쉬운 과제보다는 15개를 쌓아야 하는 과제를 하는 친구를 도와주어야 한다고 판단하는 것으로 나타났다(Bennett-Pierre et al., 2018). 더불어, 4-5세 유아들은 타인과 협력해야 하는 상황에서 과제의 난이도에 따라 어떤 과제를 본인이 하고 어떤 과제를 파트너가 해야 할지에 대해서도 분배할 수 있는 것으로 나타났다(Magid et al., 2018).

이러한 연구들은 간단한 물리적 과제에 대해 만 3세 이상의 유아들도 과제 난이도를 합리적으로 비교할 수 있다는 것을 보여준다. 그러나 이러한 연구를 통해 두 가지 과제가 시각적으로 주어졌을 때 무엇이 더 어렵거나 쉬운지에 대해 비교하는 능력은 다루어졌으나, 각각의 과제가 주어졌을 때 유아가 본인이 수행해야 할 과제 난이도를 어떻게 판단하는지에 대해서는 밝혀진 바가 부족하다. 예컨대, 15개의 블록으로 이루어진 만들기 과제와 6개의 블록으로 이루어진 만들기 과제 사진이 함께 주어졌을 때 만 3-5세 유아들은 전자가 더 어렵다고 직관적으로 판단할 수 있었다(Bennett-Pierre et al., 2018). 그러나 이러한 결과는 유아들이 단순히 시각적으로 더 크거나 높은 구조물이 만들기 어렵다고 판단하기 때문에 발생하였을 수도 있다. 또한 일상에서는 두 개의 과제 중 무엇이 더 어려운지 비교하기보다, 본인이 마주한 단일 상황에 대해 난이도를 파악하고 그

에 맞추어 과제를 수행하는 경우가 일반적이다. 따라서 유아가 과제의 난이도를 민감하게 파악하는지 살펴 보기 위해서는 두 개의 과제 난이도를 시각적으로 비교하도록 하기보다는 각각의 과제에 대해 난이도 파악을 어떻게 하는지 살펴볼 필요가 있다.

이에, 본 연구에서는 계획 활동에서 나타나는 만 3-6세 유아의 뇌 활성화 정도와 계획 이후 유아가 예상하는 과제 난이도에 대한 예측이 과제의 난이도, 유아의 연령, 그리고 이들 간의 상호작용에 의해 달라지는지 살펴보려고 한다. 최근 유아 대상 연구에서는 일상에 가까운 계획 과제를 제공하고자, 블록으로 목표물을 만드는 순서를 이해하고 준비하는 계획 과제를 제공한 바 있다(Schröer et al., 2024). 이를 참고하여 본 연구에서도 블록으로 목표물을 만드는 순서화된 절차를 이해하고 표상하는 과업을 계획 과제로서 제공하고자 한다. 특히, 필요한 재료를 물리적으로 준비하는 계획 수행(planning execution)보다는 순서를 이해하여 표상하는 계획 자체(plan)에 초점을 두기 위해 유아들에게 도안의 순서를 주고 어떻게 만들지에 대해 생각하는 계획 과제를 구성하고자 한다.

더불어, 계획 활동에서 나타나는 유아들의 신경학적 변화를 살펴보기 위해 본 연구에서는 기능적 근적외선 분광법으로 불리는 fNIRS 방식을 사용하였다. 이 방식은 근적외선을 대뇌피질에 조사하여 신경 활동에 반응하는 피질의 혈액학적 활동을 측정하는 방식으로(Pinti et al., 2020; Yücel et al., 2021), 비침습적이고 움직임에 덜 민감하기 때문에 유아들을 대상으로 한 연구에 적용되기 적합하다(Davidson et al., 2024; Pinti et al., 2020). 더불어 계획 과제에서 나타나는 뇌의 활성화 정도를 살펴본 대부분의 연구들이 성인을 대상으로 하거나(Christoff & Gabrieli, 2000; Domic-Siede, 2021; Koechlin et al., 1999; Koechlin et al., 2000; Momennejad & Haynes, 2012), 유아의 연령에 따른 비교가 이루어지지 않았으므로(Schröer et al., 2024), 본 연구에서는 계획 과제에서 나타나는 aPFC의 활성화 양상이 유아의 연령에 따라 달라지는지에 대해 살펴보려고 한다.

마지막으로 계획 능력은 계획한 과제의 난이도에 대한 예측을 포함하여 좀 더 확장적으로 살펴볼 필요가 있으므로, 계획 이후 유아들이 과제의 난이도를 어떻게 예측하는지 살펴보려고 한다. 구체적으로, 블록을 만드는 순서에 대해 계획한 후, 유아가 예측하는 과제 난이도와 난이도 예측의 민감성이 연령에 따라 다른지 살펴보려고 한다.

Methods

Participants

본 연구에는 B 광역시에 소재한 어린이집 세 곳에 재원하고 있는 만 3세 유아 28명(남 : 19명, 여 : 9명, $M = 43.60$, $SD = 3.35$), 만 4세 유아 31명(남 : 16명, 여 : 15명, $M = 54.48$, $SD = 2.99$), 만 5세 유아 35명(남 : 20명, 여 : 15명, $M = 65.63$, $SD = 2.84$), 만 6세 유아 30명(남 : 19명, 여 : 11명, $M = 75.03$, $SD = 2.54$)이 참여하였다. 연령에 따른 유아들의 행동적, 신경학적 자료 분석을 용이하게 하기 위해 본 연구에서는 만 3-6세 유아들을 대상으로 진행된 이전 연구에서와 같이(Moriguchi & Sakata, 2020; Shinohara & Moriguchi, 2017) 참여 유아들을 연령이 낮은 집단인 3-4세(59명, 남 : 35명, 여 : 24명, $M = 49.32$, $SD = 6.32$)와 연령이 높은 집단인 5-6세(65명, 남 : 39명, 여 : 26명, $M = 69.97$, $SD = 5.43$)로 나누어 살펴보았다. 본 연구를 실시하기에 앞서 어린이집을 통해 연구 설명서와 동의서를 배부하였으며, 부모가 연구 참여에 동의를 표한 유아에 한해 연구를 진행하였다.

Procedure

본 연구는 연구자가 소속된 기관의 생명윤리위원회(IRB)의 사전 승인을 받은 후 수행되었다. 연구자는 어린이집 내의 조용한 공간에서 유아와 15분 가량의 일대일 면담을 가졌으며, 이 면담을 통해 블록 만들기에 대한 계획 및 난이도 예측 과제가 주어졌다.

fNIRS Recordings

Practice Phase

본 과제에 앞서, 유아들이 fNIRS 장비를 착용하지 않은 상태에서 본 과제의 절차 및 응답 방식에 익숙해질 수 있도록 연습 과정이 주어졌다. 연습 과정은 PsychoPy 3.10 프로그램으로 제작된 자극물을 노트북 화면을 통해 보여줌으로써 진행되었다(연습 절차와 본 과제 절차에서 사용된 자극물이 유사하므로 Fig. 1 참조). 먼저, 아무런 자극이 없는 상태(Baseline)를 조성하기 위한 휴식 절차(Rest phase)에 대해 유아들이 연습할 수 있도록 화면의 검은 동그라미를 조용히 응시할 수 있는 시간을 35초 동안 가졌다(안내 음성 포함). 그 후 계획 절차에 대한 연습으로 유아들이 화면에 나타난 간단한 블록 만들기 절차 사진을 보면서 어떻게 만들지에 대해 계획할 수 있는 시간을 가졌다. 유아들에게는 “어떻게 만들지 생각해 보세요”라는 음성 안내를 포함하여 20초가 주어졌으며, 유아들은 이 시간 동안 블록 만들기 절차가 나타나 있는 사진을 보면서 블록 만들기의 순서에 대해 계획하였다.

그 후 난이도 예측 절차에 대한 연습이 이어졌다. 이때에는 바로 전에 계획한 완성된 블록 구조물 사진이 화면에 다시 주어졌으며, “이 블록 만들기는 얼마나 어려울까요? 아주 조금 어려울까요? 조금 어려울까요? 많이 어려울까요? 아주 많이 어려울까요?”라는 질문이 주어졌다. 평정척도는 유아의 직관적 이해를 돕기 위해 난이도를 높이 평정할수록 스마일 척도의 동그라미 크기가 커지고, 무표정한 표정에서 찡그리는 표정으로 변화하도록 설계되어 있었다. 또한, 난이도 예측을 위한 스마일 척도와 동일한 표정 이미지를 노트북의 키보드에 부착하였으며, 평정에 대한 음성 안내가 제시되는 동안, 연구자가 화면의 스마일 척도와 키보드의 스마일 척도를 번갈아 가리킴으로써 화면에 나타난 척도와 키보드에 붙어 있는 척도를 매치시켜 어떤 키보드 버튼을 눌러야 하는지 유아가 파악할 수 있도록 하였다. 예를 들어, “이 블록 만들기는 얼마나 어려울까요? 아주 조금 어려울까요?”라는 음성 안내가 나오면 연구자가 노트북 화면의 가장 왼쪽에 위치한 스마일 척도를 가리킨 후 연달아 키보드에 부착된 동일한 스마일 척도를 가리킴으로써 화면에 해당하는 난이도 정도를 선택하고 싶으면 키보드에서 어떤 스마일 척도를 눌러야 하는지에 대해 매치할 수 있도록 하였다. 이어서 “조금 어려울까요?”라는 음성 안내가 나오면 연구자가 노트북 화면에서 두 번째에 위치하고 있는 스마일 척도를 가리키고 연달아 키보드에 부착된 동일한 두 번째 스마일 척도를 가리킴으로써 화면에 위치한 척도와 키보드에 위치한 척도를 매치시킬 수 있도록 하였다. 이러한 방식으로 “아주 조금 어려움”, “조금 어려움”, “많이 어려움”, “아주 많이 어려움” 모두에 대해 노트북 화면과 키보드에 위치한 척도를 각각 매치시킴으로써 유아가 생각하는 난이도 정도를 해당 키보드를 누름으로써 평정할 수 있도록 하였다.

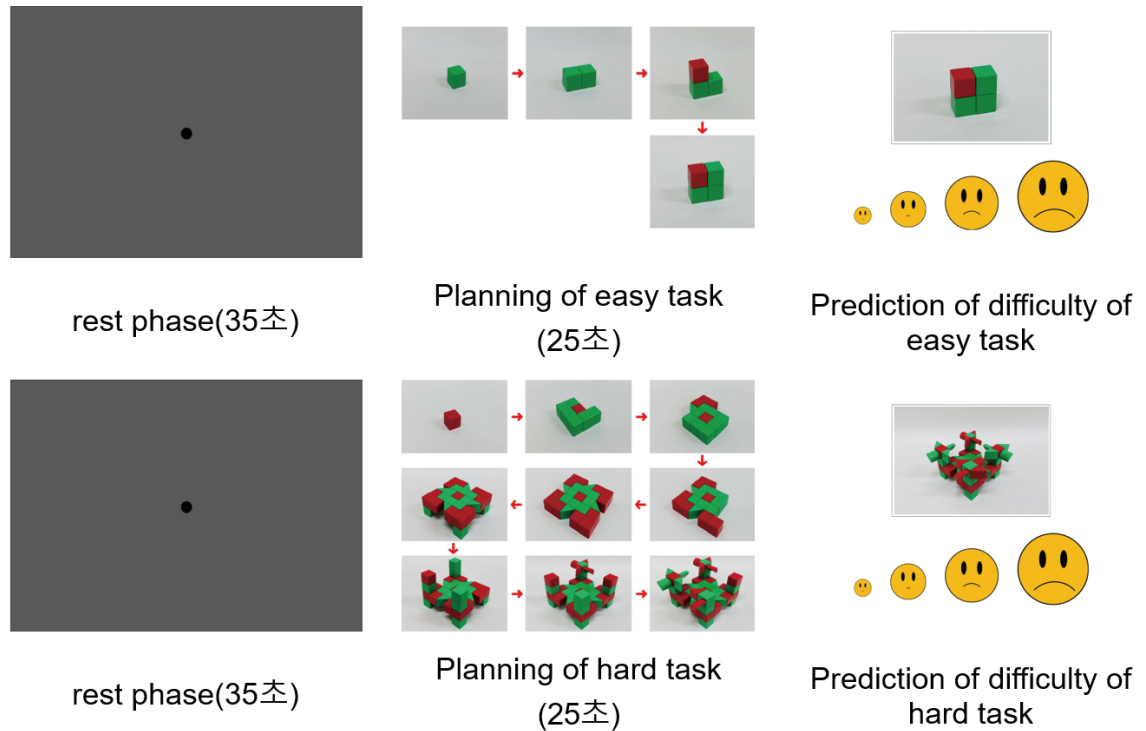


Fig. 1. Sequence of main task

Main Phase

위와 같이 과제의 절차 및 평정 방식을 연습한 후에는 유아가 fNIRS 장비를 착용하였다. 장비 착용 후 유아들에게 화면을 보고 어떻게 만들지 생각할 때에는 말하거나 움직이지 않고 조용히 생각해 볼 것을 안내하였다. (본 과제 수행 모습은 Figure 2 참고) 본 과제 역시 연습 과제와 마찬가지로 PsychoPy 3.10 프로그램으로 제작된 자극물을 통해 주어졌으며 연습 절차와 거의 동일한 구성으로 진행되었다(본 과제 절차 및 순서는 Figure 1 참고). 다만, 한 개의 블록 만들기 도안만이 주어졌던 연습 절차와는 달리 본 과제에서는 쉬운 블록 만들기 과제와 어려운 블록 만들기 과제가 각각 하나씩 주어졌으며, 계획하기 절차에서 주어지는 시간이 약간 더 길었다(연습 과제에서는 20초간 계획, 본 과제에서는 25초간 계획).

본 과제에서 사용된 쉬운 난이도의 도안은 자석 블록을 4개만 활용하면 되는 매우 쉬운 수준이었으며 파일럿 연구에서 모든 연령의 유아들이 빠른 시간 안에 쉽게 완성하는 것이 확인되었다. 반면, 어려운 난이도의 도안은 총 55개의 블록을 사용해야 하는 도안이었으며, 사전 연구에서 모든 연령의 유아들이 5분 안에 완성하지 못할 정도로 난이도가 높음을 확인하였다. 유아에게 쉬운 만들기 도안이 먼저 주어지는지, 또는 어려운 만들기 도안이 주어지는지의 여부는 역균형화(Counter-balanced) 되어 순서 효과가 상쇄될 수 있도록 하였다.



Fig. 2. Scene of experiment

본 과제는 연습 절차에서와 유사하게 휴식(음성 안내 포함 35초), 계획하기(음성 안내 포함 25초), 난이도 예측(정해진 시간 없이 유아가 키보드에 부착되어있는 난이도 평정척도를 누르면 종료) 순서로 이어졌다. 그 후 다시 휴식 절차가 주어졌으며, 휴식 절차 후에는 이전에 주어지지 않았던 새로운 난이도의 블록 만들기 과제에 대한 계획 및 난이도 예측 절차가 주어졌다. 난이도 예측에서는 연습 절차에서와 동일하게 연구자가 화면에 나타난 평정척도와 키보드에 붙어 있는 평정척도를 번갈아 손가락으로 가리킴으로써 화면의 평정척도와 키보드의 평정척도를 매치시킬 수 있도록 하였으며, 유아가 본인이 생각하는 난이도를 키보드에 있는 평정척도를 누름으로써 평정하였다.

본 연구에서는 아동용 fNIRS 장비인 NIRSIT-LITE Kids(OBELAB, Seoul, Korea)를 사용하여 유아가 쉬운 난이도의 만들기 과제와 어려운 난이도의 만들기 과제의 계획 절차에서 보이는 PFC의 활성화 정도를 측정하였다. NIRSIT-LITE Kids는 15개의 채널과 5개의 source, 7개의 detector로 구성되어 있으며, 채널 간 거리는 2.5cm로 설계되어 있다(Fig 3. 참고). 본 연구에서는 NIRSIT-LITE Kids 장비를 활용하여 780nm와 850nm 두 파장의 근적외선을 투과시켜 전두엽의 혈액학적 변화를 1초에 8회 측정하였으며, 측정된 산화 헤모글로빈(이하 oxy-Hb)과 탈산화 헤모글로빈(이하 deoxy-Hb)을 뇌의 활성화 지표로서 수집하였다. 과제를 수행하면 뇌의 특정 영역이 활성화되어 그 영역의 뇌 혈류량이 증가하면서 산소와 결합된 oxy-Hb는 높아지고, 이와 반대로 산소와 분리된 deoxy-Hb는 낮아지게 된다(Pinti et al., 2020).

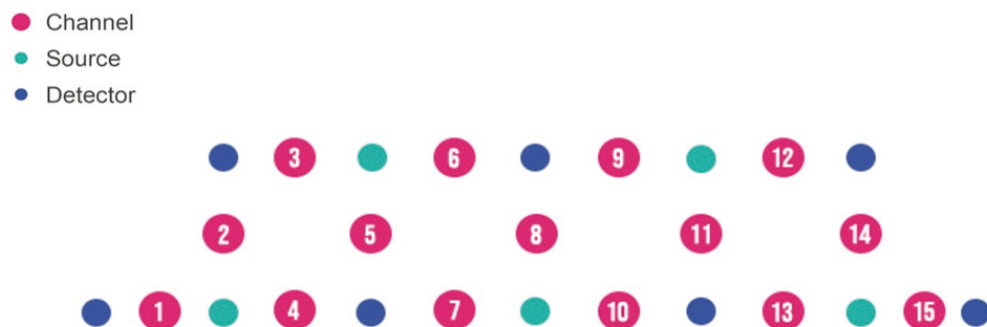


Fig. 3. Configuration of channels and sensors of NIRSIT LITE (OBELAB, 2022)

본 연구에서의 관심 영역(Region of Interest, ROI)은 Broadmann Area(BA) 분류를 기준으로 이마의 가장 앞쪽 부분인 aPFC 좌측과 우측으로 설정하였다(좌측: L-aPFC, 우측: R-aPFC). aPFC 영역은 계획 및 계획 기억, 인지적 분기 등을 비롯한 계획 관련 고차원적 과제에서 활성화되는 것으로 알려져 있다(Koechlin et al., 2000; Momennejad & Haynes, 2012). 본 연구에서는 OBELAB에서 제시하는 채널과 영역에 대한 정보를 참고하여 (OBELAB, 2022), R-aPFC는 2, 3, 4, 5, 6, 7번 채널로 구성되었으며, L-aPFC는 9, 10, 11, 12, 13, 14번 채널로 구성되었다(Fig. 4 참고). 그리고 각 영역에서의 전두엽 피질 활성화 정도는 각 채널에서 측정된 oxy-Hb와 deox-Hb의 농도 변화량을 영역별로 합산한 값의 평균으로 산출하였다(R-aPFC는 2, 3, 4, 5, 6, 7 채널의 평균, L-aPFC는 9, 10, 11, 12, 13, 14 채널의 평균).

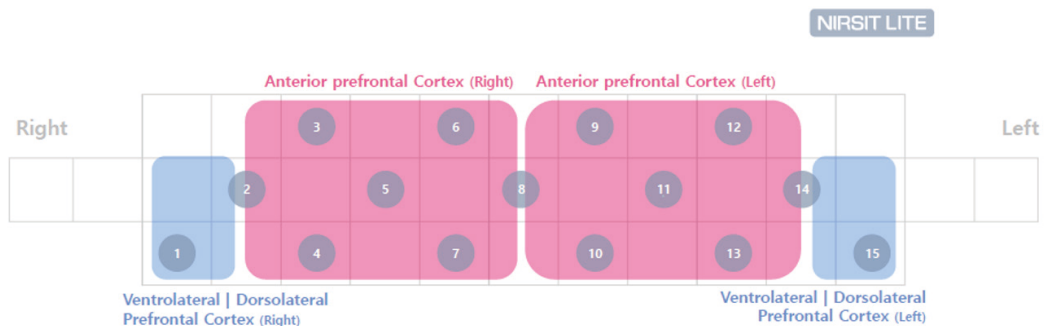


Fig. 4. Brodmann mapping of NIRSIT LITE channels (OBELAB, 2022)

Behavioral Tasks

본 연구에서는 행동적 데이터로서 유아가 해당 블록 만들기에 대해 난이도를 어떻게 예측하는지 측정하였다. 본 과제에서는 쉬운 난이도의 만들기 과제와 어려운 난이도의 만들기 과제가 각각 한 개씩 주어졌으므로 난이도 예측 역시 각각에 대해 이루어졌다. 유아가 화면에 나타난 블록 만들기에 대해 아주 조금 어려울 것이라고 응답하면 1점, 조금 어려울 것이라고 응답하면 2점, 많이 어려울 것이라고 응답하면 3점, 아주 많이 어려울 것이라고 응답하면 4점으로 코딩하였으며, 따라서 만들기가 어려울 것이라고 예측할수록 더 높은 평정점수를 부여하였다.

또한 각 과제에 대한 난이도 예측과 함께, 과제의 특성에 따라 난이도를 얼마나 민감하게 예측하였는지를 나타내는 지표로서 난이도 예측의 민감성 변수를 산출하였다. 유아의 자신감 판단의 민감성을 살펴보기 위해 이전 연구에서는 유아가 맞힌 문제에서의 자신감 평정 값에서 틀린 문제에서의 자신감 평정 값을 감하거나(Destan & Roebbers, 2015), 도움을 받았을 때의 자신감 평정 값에서 도움을 받지 않았을 때의 자신감 평정 값을 감하는 방식을 사용한 바 있다(Coughlin et al., 2015). 이와 유사한 맥락에서 본 연구에서는 유아가 난이도를 얼마나 민감하게 예측하였는지 측정하기 위해 어려운 만들기 과제에 대한 난이도 평정 값에서 쉬운 만들기 과제에 대한 난이도 평정 값을 감하여 난이도 예측의 민감성 변수를 산출하였다. 유아의 어려운 과제에 대한 난이도 예측과 쉬운 과제에 대한 난이도 예측 간의 차이가 클수록 과제에 따라 난이도를 민감하게 인식한다고 볼 수 있다.

Data Analysis

본 연구에서는 SPSS(27.0)를 활용하여 계획 절차에서 유아가 보인 aPFC의 활성화 정도와 유아가 응답한 과제의 난이도 예측에 대해 분석하였다. 먼저, fNIRS 데이터였던 계획하기 절차에서의 aPFC의 활성화 정도는 OBELAB에서 제공하는 NIRSIT 데이터 분석용 소프트웨어인 NIRSIT QUEST를 사용하여 Preprocessing 과정과 일반선형모형(General Linear Model: GLM) 분석을 거쳐 추출하였다. GLM 분석에 앞선 Preprocessing 과정에서는 쉬운 만들기 계획과 어려운 만들기 계획 절차를 분석해야 할 블록으로 설정하고, 신호가 좋지 않은 채널은 리젝션하였다. 본 연구에서는 측정된 oxy-Hb와 deoxy-Hb 간에 미러링이 있거나(Takizawa et al., 2014), 포화가 5% 이상 일어난 경우(Yücel et al., 2021) 해당 채널을 리젝션하였으며, 리젝된 채널은 BA 기준에 의해 같은 영역으로 구분되는 채널들의 평균값으로 대체하였다. 그 후, 실험 중 유아의 움직임이나 생리적 혹은 비생리적으로 발생할 수 있는 소음의 영향력을 최소화하기 위해 데이터에 포함된 불필요한 움직임(motion artifacts)과 잡음(noise)을 제거하는 TDDR(Temporal Derivative Distribution Repair)(Fishburn et al., 2019)과 Digital Filtering(Yücel et al., 2021) 절차를 거쳤다. 또한 연령에 따른 DPF(Differential Pathlength Factors)를 추산하여(Scholkmann & Wolf, 2013) 빛의 강도를 헤모글로빈 농도로 변환하는 과정을 거쳤다.

Preprocessing을 거친 데이터는 통계 분석에 앞서 GLM을 활용한 분석 절차로 이어졌다. GLM 분석은 측정된 데이터를 다수의 요인들의 선형 조합으로 설명하는 모델을 구성하고, 이 모델을 통해서 주요 요인인 과제와 관련된 regressor와 신호의 유사도를 통해 해당 과제 동안의 활성화 정도를 다른 외부요인의 영향을 통제할 수 있도록 하는 분석 기법이다(Yücel et al., 2021). 본 연구에서는 GLM 분석 과정에서 머리의 움직임(head motion)의 x, y, z 방향의 각도를 나타내는 regressor를 사용하여 혹시 있을 잔여 동잡음을 통제하였으며, 8mm 소스-디텍터 거리를 가진 숏채널에서 얻어진 Hb 값의 평균도 가외 변인(nuisance regressor)으로 추가하여 대뇌 피질 신호가 아닌 표면에서 오는 global physiological noise를 상쇄하였다.

GLM을 통해 활성화를 계산하는 과정에서는 다른 구간에는 활성화가 없고, 특정 구간에만 활성화가 있을 것으로 가정하는 모델을 구성하고 그 모델과 신호 간의 상관도를 통해 활성화 정도를 요약하게 되며 이것이 Beta 계수로 산출된다. 이하 본 연구의 통계 분석에서는 이 회귀 계수인 Beta 값을 자료로 사용하였으며, 이를 oxy-Hb(산화 헤모글로빈) 또는 deoxy-Hb(탈산화 헤모글로빈)라고 지칭하였다. GLM 방식을 통해 추출된 oxy-Hb와 deoxy-Hb는 ANOVA를 통해 과제 난이도(쉬운 난이도 vs. 어려운 난이도), 유아의 연령 집단(3-4세 vs. 5-6세), 그리고 과제 난이도와 연령 집단 간의 상호작용에 따라 L-aPFC와 R-aPFC 영역의 oxy-Hb와 deoxy-Hb가 달라지는지 분석하였다.

행동적 데이터인 유아의 난이도 예측에 대해서는 독립표본 *t*-검증을 통해 연령 집단(3-4세 vs. 5-6세)에 따라 쉬운 만들기 과제와 어려운 만들기 과제에서의 난이도 예측과 난이도 예측의 민감성(어려운 만들기 과제에 대한 난이도 평정 - 쉬운 만들기 과제에 대한 난이도 평정)이 달라지는지 살펴보았다.

Results

fNIRS Data Results

Oxy-Hb Data Results

과제 난이도, 연령 집단, 그리고 과제 난이도와 연령 집단간의 상호작용이 R-aPFC와 L-aPFC의 oxy-Hb에 영향을 미치는지 ANOVA를 통해 각각 살펴본 결과, R-aPFC에서는 어떠한 요인도 유의한 효과가 없는 것으로 나타났다. 그러나 L-aPFC에서는 난이도와 연령에 따른 상호작용 효과가 있는 것으로 나타났다($F(1,122)=6.826374, p<0.05$) (Table 1 참고). 상호작용 효과에 대한 분석을 위해 쉬운 만들기 계획 절차와 어려운 만들기 계획 절차에서 연령 집단의 효과가 있는지 각각 살펴본 결과, 쉬운 만들기 계획 절차에서만 연령 집단에 따라 oxy-Hb에 차이가 있는 것으로 나타났다($F(1,122)=0.467855, p<0.05$). 구체적으로, L-aPFC에서는 쉬운 만들기를 계획할 때 5-6세 유아의 oxy-Hb가($M=0.028704, SD=0.062296$) 3-4세 유아들의 oxy-Hb($M=0.004523, SD=0.063620$)보다 더 높은 것으로 나타났다. 그러나 어려운 만들기에 대한 계획 절차에서는 L-aPFC에서 3-4세와 5-6세간의 oxy-Hb의 차이가 유의하지 않았다.

쉬운 만들기에 대한 계획 절차에서 L-aPFC 영역의 oxy-Hb가 연령 집단에 따라 다른 것으로 나타났으므로, 연령 집단 별 차이를 시각적으로 확인하기 위해 채널별 oxy-Hb Beta 값을 연령 집단으로 나누어 Activation Map으로 살펴보았다. 그 결과, Figure 5와 6에서 나타나듯, L-aPFC에 위치한 채널들에서 연령 집단에 따라 색깔 차이가 두드러지게 나타난 것을 확인할 수 있었다. 다만, Activation Map을 살펴보면 2번 채널에서도 연령

Table 1. ANOVA results for Oxy-Hb on aPFC activation

Brain Area	Variable	SS	df	MS	F
R-aPFC	Difficulty	0.005478	1	0.005478	1.586182
	Age	0.000352	1	0.000352	0.090987
	Difficulty×Age	0.001483	1	0.001483	0.429372
	Error	0.421348	122	0.003454	
L-aPFC	Difficulty	0.000926	1	0.000926	0.424896
	Age	0.004654	1	0.004654	0.992248
	Difficulty×Age	0.014873	1	0.014873	6.826374*
	Error	0.265808	122	0.002179	

* $p<0.05$

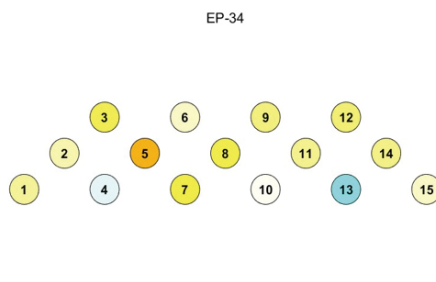


Fig. 5. 3-4-year-olds' activation map in planning of easy taskNIRSIT LITE (OBELAB, 2022)



Fig. 6. 5-6-year-olds' activation map in planning of easy taskNIRSIT LITE (OBELAB, 2022)

집단에 따라 색깔 차이가 있는 것처럼 나타났으나, 2번 채널만 통계적으로 살펴보았을 때에는 연령이 낮은 집단과 높은 집단 간에 oxy-Hb에서 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다.

Deoxy-Hb Data Results

deoxy-Hb의 농도는 oxy-Hb의 농도보다 CNR(Contrast-to-Noise Ratio)이 낮아 뇌의 미묘한 혈류의 변화를 민감하게 보여주기 어려운 것으로 알려져 있으나(Cui, 2011; Strangman, 2002), 뇌의 신경학적 변화를 종합적으로 이해하기 위해서는 oxy-Hb 뿐만 아니라 deoxy-Hb도 함께 살펴볼 것이 권장된다(Zimeo et al., 2018). 따라서 deoxy-Hb 역시 oxy-Hb과 동일한 Preprocessing과 GLM 과정을 거쳐 Beta 값을 산출하였다. 자극에 대한 활성화가 일어날 때 oxy-Hb는 높아지는 반면, deoxy-Hb는 낮아지는 경향이 있으므로 deoxy-Hb 수치와 해당 영역의 활성화는 oxy-Hb와 반대로 해석해야 한다. 그러나 해석을 용이하게 하기 위해 GLM 과정에 -1을 곱하여 deoxy-Hb의 활성화가 반대 방향으로 표현되도록 하는 과정이 포함되었다. 따라서 deoxy-Hb도 oxy-Hb와 동일하게 더 큰 값이 더 많은 활성화를 나타내는 방향으로 해석할 수 있도록 하였다.

deoxy-Hb의 Beta 값을 oxy-Hb와 동일한 ANOVA 절차를 통해 살펴본 결과, R-aPFC와 L-aPFC에서 어떠한 요인도 유의한 효과가 없는 것으로 나타났다(Table 2 참고). 다만, 유의한 차이는 나타나지 않았으나, 쉬운 만들기 과제를 계획할 때 L-aPFC의 deoxy-Hb가 3-4세($M=0.004523$, $SD=0.063620$)보다는 5-6세($M=0.028704$, $SD=0.062296$)에서 더 높은 추세로 나타났다. 따라서 oxy-Hb와 유사하게 deoxy-Hb에서도 쉬운 만들기 과제를 계획할 때 3-4세 유아보다는 5-6세 유아들의 L-aPFC이 더 활성화되는 경향을 보였다고 볼 수 있다.

Table 2. ANOVA results for Deoxy-Hb on aPFC activation

Brain Area	Variable	SS	df	MS	F
R-aPFC	Difficulty	0.003855	1	0.003855	3.127916
	Age	0.000025	1	0.000025	0.018788
	Difficulty×Age	0.001391	1	0.001391	1.128858
	Error	0.150341	122	0.001232	
L-aPFC	Difficulty	0.001013	1	0.001013	1.085315
	Age	0.000236	1	0.000236	0.181143
	Difficulty×Age	0.000929	1	0.000929	0.995002
	Error	0.113881	122	0.000933	

Behavioral Data Results

연령 집단에 따라 쉬운 만들기과 어려운 만들기과에 대한 난이도 예측, 그리고 난이도 예측의 민감성이 달라지는지 살펴보기 위해 독립표본 t -검증을 실시한 결과는 Table 3과 같다.

분석 결과, 쉬운 만들기 과제에서는 연령 집단에 따라 난이도 예측을 달리하는 것으로 나타났으나($t(122)=5.861$, $p<0.001$), 어려운 만들기 과제에서는 연령 집단에 따른 난이도 예측이 다르지 않은 것으로 나타났다. 구체적으로 쉬운 만들기 과제에서 5-6세($M=1.23$, $SD=0.606$) 유아들은 3-4세($M=2.36$, $SD=1.411$)보다 과제가 더 쉬울 것이라고 예측하였던 반면, 어려운 만들기 과제에 대해서는 5-6세 유아들과($M=3.34$, $SD=0.957$) 3-4세 유아들($M=3.00$, $SD=1.326$) 모두 대체로 과제가 '많이 어려울 것이다'고 예측한 것으로 나타났다.

더불어, 난이도 예측의 민감성에서도 연령 집단에 따른 차이가 있는 것으로 나타났으며($t(122)=-5.536$, $p<0.001$), 구체적으로 3-4세($M=0.64$, $SD=1.845$)보다는 5-6세 유아들이($M=2.11$, $SD=1.017$) 난이도 예측을 더 민감하게 하는 것으로 나타났다. 난이도 예측의 민감성은 어려운 과제에 대한 난이도 평정 값에서 쉬운 과제

Table 3. Children's prediction of task difficulty based on age group

	Age	N	M	SD	t
Prediction of difficulty of easy task	3-4 years	59	2.36	1.411	5.861***
	5-6 years	65	1.23	0.606	
Prediction of difficulty of hard task	3-4 years	59	3.00	1.326	-1.641
	5-6 years	65	3.34	0.957	
Sensitivity of prediction of task difficulty	3-4 years	59	0.64	1.845	-5.536***
	5-6 years	65	2.11	1.017	

*** $p < 0.001$

에 대한 난이도 평정 값을 감한 변수이므로, 본 연구의 결과는 5-6세 유아들이 계획 절차 이후 쉬운 과제와 어려운 과제에서의 난이도 차이를 더 크게 인식하였다는 것을 보여준다.

Discussion

본 연구는 블록 만들기 과제를 계획할 때 aPFC에서 나타나는 활성화 정도에 대해 살펴보고, 이러한 활성화 정도와 계획 직후 이루어지는 과제 난이도에 대한 예측이 연령 집단에 따라 달라지는지에 대해 살펴보기 위해 실시되었다. 연구 결과, 어려운 블록 만들기 과제에서는 aPFC의 활성화 정도가 연령 집단에 따라 다르지 않았으나, 쉬운 블록 만들기 과제에서는 5-6세 유아들의 L-aPFC가 3-4세보다 더 많이 활성화되는 것으로 나타났다. 또한 계획 절차 직후에 이루어진 난이도 예측에 있어서도 5-6세 유아들이 3-4세 유아들보다 쉬운 난이도의 과제가 더 쉬울 것이라고 예측하였으며, 과제 난이도를 더 민감하게 예측하는 것으로 나타났다. 따라서 쉬운 과제에 대한 계획 절차에서 3-4세 유아들에 비해 L-aPFC가 더 많이 활성화되었던 5-6세 유아들은 본인이 계획한 과제에 대해 난이도를 더 합리적이고 민감하게 예측한 것으로 볼 수 있다. 주요 결과에 대한 논의는 다음과 같다.

첫째, 쉬운 과제에 대한 계획 절차에서 유아의 aPFC를 살펴본 결과, 5-6세 유아의 L-aPFC에서 나타나는 oxy-Hb가 3-4세 유아들에 비해 더 높은 것으로 나타났다. aPFC는 계획 및 계획 기억, 인지적 분기 등을 비롯한 고차원적 과제를 수행할 때 활성화되는 것으로 알려져 있다(Koechlin et al., 2000; Momennejad & Haynes, 2012). 본 연구에서 사용된 과제에서도 유아들은 만들기의 순서에 대해 파악하고 앞선 절차에 대한 기억에 토대하여 이후의 절차를 떠올리고 조합해야 했으므로 이러한 과정에서 L-aPFC가 활성화된 것으로 볼 수 있다. 그리고 이러한 결과는 런던타워 과제, 동물원 관람 경로 탐색 등의 계획 과제에서 성인의 aPFC 영역이 활성화되었음을 보고한 이전 연구들과도(Christoff & Gabrieli, 2000; Domic-Siede, 2021; Koechlin et al., 1999; Koechlin et al., 2000; Momennejad & Haynes, 2012) 유사한 맥락이라고 볼 수 있다.

특히, 성인 대상의 연구에 따르면 공을 목표한 위치로 옮겨야 하는 계획 과제(Christoff & Gabrieli, 2000)나 동물원 관람 경로를 계획해야 하는 과제에서(Domic-Siede, 2021) 계획 조건이 고도화될수록 aPFC가 더 활성화되는 것으로 보고된 바 있다. 본 연구에서 사용된 계획 과제 역시 사진을 보고 절차를 떠올리며 머릿속에서 순서에 맞게 구조를 조합해나갈 것이 요구되므로 쉬운 난이도의 만들기에 대한 계획일지라도 유아들에게는 다소 복잡한 사고가 요구된 것으로 보인다. 또한 L-aPFC는 정보를 회상하고 점검하며 평가할 때 활성화되는 것으로 알려져 있는데(Ranganth et al., 2000; Strane et al., 2001), 본 연구에서의 계획 과제에서도 화면에 나타난

절차들을 기억하고 그 다음 절차를 조합하여 구조물을 완성해 나가는 사고 과정이 요구되므로 L-aPFC 영역이 활성화된 것으로 볼 수 있다.

34세보다 5-6세에서 쉬운 만들기를 계획할 때 L-aPFC 영역이 더 많이 활성화된 결과는 연령이 높은 유아들이 쉬운 만들기 계획에서 어린 연령보다 더 많은 인지적 노력을 기울였기 때문으로 해석할 수 있다. 계획 절차에서 나타나는 뇌 활성화에 대해 살펴본 대부분의 연구들이 연령이나 발달 단계에 따른 활성화 양상의 차이를 살펴보지 않았기 때문에(Christoff & Gabrieli, 2000; Domic-Siede, 2021; Koechlin et al., 1999; Koechlin et al., 2000; Momennejad & Haynes, 2012) 본 연구의 결과와 직접적으로 유사한 관련 연구를 찾아보기는 어렵다. 그러나 이전 연구들은 유아의 연령이 높아질수록 복잡한 계획 과제가 가능해지고, 상황과 조건에 따라 계획을 구체적이고 전략적으로 세울 수 있는 것으로 보고하고 있다(Gardner & Rogoff, 1990; Hudson & Fivush, 1991; Kaller et al., 2008; Tecwyn et al., 2014). 따라서 본 연구의 5-6세 유아들도 연령이 낮은 유아들보다 완성될 구조물에 대해 더 정확하게 떠올리면서 그 구조물을 만들기 위한 순서 및 절차들에 대해 구체적인 전략을 세웠을 가능성이 크며, 이러한 이유로 L-aPFC가 더 많이 활성화되었다고 생각해 볼 수 있다.

한편 deoxy-Hb 분석 결과에서도 5-6세 유아들은 34세보다 L-aPFC 영역이 더 많이 활성화되는 추세를 보였으며 이러한 결과는 oxy-Hb의 결과와 유사한 양상이라고 볼 수 있다. 그러나 deoxy-Hb 분석에서는 oxy-Hb에 서와는 다르게 연령 집단간 차이가 유의한 수준으로 나타나지 않았다. 일반적으로 deoxy-Hb의 농도는 oxy-Hb의 농도보다 CNR(Contrast-to-Noise Ratio)이 낮아 뇌 활동의 미묘한 변화가 민감하게 측정되기 어려우며(Cui, 2011; Strangman, 2002), oxy-Hb 농도 측정에 비해 생리학적, 방법론적 측면에서 오류에 더 취약한 것으로 알려져 있다(Strangman, 2002). 따라서 본 연구에서 deoxy-Hb 분석 결과가 유의한 수준에 이르지 못한 것도 이러한 이유에서 비롯되었다고 해석된다. 다만, 본 연구의 결과가 일반적으로 나타나는지에 대해 확인하기 위해서는 추후 연구를 통해 계획 과제에서 유아들의 deoxy-Hb 양상을 재검증할 필요가 있다.

또한, 어려운 난이도의 만들기를 계획할 때에는 34세와 5-6세의 활성화 정도에 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다. 이것은 어려운 도안의 경우 파일럿 테스트에서 5-6세 유아들을 포함한 모든 유아들이 완성하지 못할 정도로 어려움을 느꼈고, 머릿속으로 구조물의 순서와 절차를 기억하여 조합하는 작업이 모든 연령대에서 많은 인지적 노력을 요하였기 때문으로 해석할 수 있다. 실제로, 계획 직후 있었던 난이도 예측에서 34세와 5-6세 유아들은 대체로 어려운 만들기 과제가 많이 어려울 것이라고 예측하였다. 따라서 어려운 만들기 계획에서는 두 연령 집단 모두에서 인지적 부담이 컸던 것으로 보이며, 이에 따라 L-aPFC의 활성화 정도에 차이가 없었던 것으로 해석된다. 물론, 이러한 해석을 명확히 하기 위해서는 계획의 난이도에 따라 유아의 aPFC의 활성화 정도가 달라지는지에 대한 추후 연구가 더 필요할 것으로 생각된다.

둘째, 쉬운 난이도의 계획 과제에서 34세보다 L-aPFC가 더 많이 활성화되었던 5-6세 유아들은 계획 직후 이루어진 난이도 예측에서도 더 민감하고 적절하게 과제의 난이도를 예측하는 것으로 나타났다. 5-6세 유아들은 34세에 비해 쉬운 과제가 더 쉬울 것이라고 예측하였으며, 자연히 쉬운 과제와 어려운 과제의 난이도 차이 역시 5-6세 유아들이 더 크게 인식하는 것으로 나타났다. 이는 계획 과정에서 해당 구조물의 난이도를 민감하게 예측하고 준비하는 능력이 연령의 증가에 따라 발달함을 보여준다. 그리고 이러한 결과는 만 3세조차도 연령이 더 높은 유아들과 다를 것 없이 간단한 물리적 과제의 난이도를 합리적으로 비교할 수 있음을 보여준 이전 연구(Bennett-Pierre et al., 2018; Gweon et al., 2017; Magid et al., 2018)들과 다소 다른 관점을 제시한다고 볼 수 있다. 이전 연구들은 만 3세 유아들도 블록 만들기 과제의 난이도를 비교할 수 있음을 보고하였으

며(Bennett-Pierre et al., 2018), 난이도를 파악하는 능력에 연령에 따른 차이가 있는지에 대해 주목하지 않았다(Bennett-Pierre et al., 2018; Gweon et al., 2017; Magid et al., 2018). 이에 비해, 본 연구에서는 연령이 높은 유아들이 도안의 복잡성에 따라 난이도를 더 민감하게 파악하는 것으로 나타났다.

이러한 차이는 이전 연구들이 큰 구조물과 작은 구조물을 시각적으로 함께 제시하면서 둘 중 무엇이 더 어려울지에 대해 비교하도록 하였던 반면(Bennett-Pierre et al., 2018; Gweon et al., 2017; Magid et al., 2018), 본 연구에서는 단일 과제를 제시하면서 화면에 나타나는 과제를 계획한 후 얼마나 어려울지에 대해 각각 평정하도록 하였기 때문인 것으로 해석된다. 즉, 본 연구에서는 시각적으로 비교할 대상 없이 화면에 나타난 단일 과제에 대해 절대적인 난이도를 평가하도록 하였으므로, 시각적 비교를 넘어서는 보다 추상적 사고가 요구되었다고 볼 수 있다. 더불어, 연령이 높은 유아들은 연령이 낮은 유아들에 비해 본인의 과제 수행 결과에 대해 더 정확하게 점검하고 예측할 수 있으므로(Coughlin et al., 2015; Destan et al., 2014; Lyons & Getty, 2013), 보다 합리적인 결과 예측이 가능한 5-6세 유아들이 본 연구에서도 쉬운 과제와 어려운 과제가 각각 어느 정도의 난이도인지에 더 민감하게 예측한 것으로 보인다.

한편, 어려운 만들기 과제에서는 3-4세와 5-6세 모두 과제가 많이 어려울 것으로 예측하였다. 이러한 결과는 쉬운 과제를 쉽다고 인지하는 것보다 난이도가 높은 과제의 어려움을 지각하는 능력이 더 이른 시기에 발달할 수 있다는 가능성을 제시한다. 유아의 과제 난이도에 대한 이해에 다른 연구가 부족한 만큼, 유아들이 과제의 어려운 정도와 쉬운 정도 중 무엇을 더 민감하게 지각하는지, 그리고 어떠한 인식이 더 일찍 발달하는지에 대한 연구가 더 필요할 것으로 보인다.

본 연구에서는 계획하기 과제에서 나타나는 유아의 aPFC의 활성화 정도에 대해 살펴보고, 이 활성화 정도와 계획 이후 이루어진 난이도 예측이 연령 집단에 따라 어떻게 다르게 나타나는지에 대해 살펴보았다. 미래에 수행할 과제를 계획하는 것과 수행할 과제의 난이도에 대해 미리 예측하는 능력은 서로 밀접한 관련을 지님에도 불구하고, 대부분의 이전 연구에서 별개의 영역으로 다루어져 왔다(Bennett-Pierre et al., 2018; Gweon et al., 2017; Hudson & Fivush, 1991; Magid et al., 2018; McColgan & McCormack, 2008; Kaller et al., 2008). 이전 연구들과 비교할 때, 본 연구에서는 계획 절차에서 일어나는 전두엽의 활성화 양상과 계획 이후 이루어진 난이도 예측을 연계하여 종합적으로 살펴보았다는 측면에서 의의를 지닌다. 더불어, 계획 과제에서 나타나는 뇌의 활성화 양상을 살펴본 대부분의 연구들이 성인을 대상으로 하거나(Christoff & Gabrieli, 2000; Domic-Siede, 2021; Koechlin et al., 1999; Koechlin et al., 2000; Momennejad & Haynes, 2012), 유아의 연령에 따른 비교에 관심을 두지 않았던 반면(Schröer et al., 2024), 본 연구에서는 뇌 활성화 정도에 발달적 차이가 있는지를 고려하여 살펴보았다는 측면에서 새로운 정보를 제공한다.

그러나 본 연구는 몇 가지 한계 역시 지니고 있다. 먼저, 본 연구에서 사용한 계획 과제에서는 주어진 순서에 따라 본인이 거쳐야 할 절차를 표상하는 정신적 작용이 요구되었으나, 스스로 순서를 구상하는 과정은 요구되지 않았다. 이러한 설계는 유아 스스로 순서를 구상하도록 하는 절차를 포함되지 않는다는 점에서 한계를 지니므로, 추후 연구에서는 유아가 도안을 순서대로 배치하도록 하는 등의 방식을 통해 계획 과제에서 유아가 스스로 절차를 구상할 수 있도록 하는 것이 대안이 될 것으로 보인다.

더불어, 본 연구에서는 쉬운 난이도의 만들기 계획에서만 aPFC의 활성화 정도가 연령 집단에 따라 달라지는 것으로 나타났다. 그러나 성인 대상의 연구에서 계획 수립의 조건이 어려워질수록 aPFC 영역이 더 활성화되는 것으로 나타난 만큼(Christoff & Gabrieli, 2000; Domic-Siede, 2021), 추후 연구를 통해 과제 수준과 연령에

따라 유아의 aPFC의 활성화 양상이 달라지는지에 대한 재검증이 필요하다고 생각된다.

마지막으로 본 연구에서는 aPFC에 초점을 두고 분석을 진행하였으나 계획 작업은 뇌의 다양한 영역간의 상호작용에 의해 수행될 수 있다. 예컨대 배외측 전전두엽 피질(Dorsolateral Prefrontal Cortex, DLPFC)과 복외측 전전두엽 피질(Ventrolateral Prefrontal Cortex, VLPFC) 등이 계획 작업과 관련이 영역으로 보고된 만큼 (Christoff & Gabrieli, 2000), 이후 연구에서는 더 다양한 범위의 뇌 영역으로 확대하여 살펴보고, 영역간 연결성이 계획 능력과 어떠한 관련이 있는지에 대해 살펴보는 것이 보다 종합적인 이해에 도움이 될 것이다.

Conclusion

본 연구 결과, 쉬운 과제를 계획할 때 5-6세 유아들은 3-4세 유아들에 비해 L-aPFC 영역이 더 많이 활성화되는 것으로 나타났으며, 이는 계획 과정에서 연령이 높은 유아들이 더 많은 인지적 노력을 기울였을 가능성을 시사한다. 즉, 5-6세 유아들은 도안을 볼 때 본인이 만들어야 할 구조물의 순서 및 절차를 더 구체적으로 표상하고 기억하며 상세한 전략을 세웠을 것으로 생각된다. 반면, 어려운 만들기 과제에 대한 계획에서는 두 연령 집단의 L-aPFC 활성화 정도가 유사하였으며, 이는 어려운 만들기 과제에 대해 도안을 파악하고 절차를 표상하는 것이 모든 연령의 유아들에게 많은 인지적 부담을 주었기 때문으로 볼 수 있다.

이러한 결과는 난이도에 대한 예측 결과에서도 유사한 맥락으로 나타났다. 쉬운 과제에 대한 계획 직후 5-6세 유아들은 3-4세보다 그 과제가 더 쉬울 것으로 예측하였으며, 어려운 과제에 대한 계획 이후 있었던 난이도 예측에서는 두 연령 집단의 유아들이 전반적으로 과제가 많이 어려울 것으로 예측하였다. 더불어 5-6세 유아들은 3-4세보다 계획 절차 이후 쉬운 과제와 어려운 과제에 대한 난이도 차이를 더 크게 인식하였다. 이러한 결과를 oxy-Hb 농도 분석에서 나타난 결과와 종합하면, 쉬운 과제에 대한 계획 절차에서 더 많은 인지적 노력을 기울였던 5-6세 유아들이 3-4세보다 쉬운 과제에 대해 더 합리적으로 난이도를 예측하였음을 보여준다. 반면, 어려운 과제에 대한 계획에서는 3-4세와 5-6세의 L-aPFC 영역의 활성화 정도가 유사했던 만큼, 계획 직후 있었던 난이도 예측에서 두 연령 집단이 난이도를 유사한 정도로 어렵다고 예측하였다. 이러한 결과는 L-aPFC 영역이 유아들이 해야 할 일의 순서를 파악하고 표상하는 능력과 밀접한 관련이 있다는 것과 이 영역의 활성화가 본인이 장차 해야 할 과제의 난이도를 민감하게 예측하는 능력과도 연관이 있음을 시사한다. 따라서 유아의 계획 및 난이도 예측을 이해하기 위해서는 L-aPFC 영역의 활성화를 고려할 필요가 있으며, 유아 교육과 양육 과정에서 유아에게 과제를 계획하거나 난이도에 대해 생각해 보도록 하는 경험이 유아의 L-aPFC 영역 발달을 촉진하는지에 대한 부분 역시 살펴볼 필요가 있다.

References

- Albert, D., & Steinberg, L. (2011). Age differences in strategic planning as indexed by the Tower of London. *Child Development*, 82, 1501-1517.
- Alyami, A., Abdulwahed, A., Azhar, A., Binsaddik, A., & Bafaraj, S. M. (2021). Impact of time-management on the student's academic performance: A cross-sectional study. *Creative Education*, 12, 471-485.
- Anderson, J. R., Fincham, J. M., Qin, Y., & Stocco, A. (2008). A central circuit of the mind. *Trends in cognitive sciences*, 12, 136-143.
- Arfé, B., Vardanega, T., & Ronconi, L. (2020). The effects of coding on children's planning and inhibition skills. *Computers & Education*, 148, 103807.

- Bennett-Pierre, G., Asaba, M., & Gweon, H. (2018). Preschoolers consider expected task difficulty to decide what to do & whom to help. *Proceedings of the Annual Meeting of the Cognitive Science Society*, 40, 1359-1374
- Borkowski, J. G., Chan, L. K., & Muthukrishna, N. (2000). A process-oriented model of metacognition: Links between motivation and executive functioning. In G. Schraw and J. Impara (Eds.), *Issues in the measurement of metacognition* (p. 42). Lincoln: Buros Institute of Mental Measurements, University of Nebraska.
- Christoff, K., & Gabrieli, J. D. (2000). The frontopolar cortex and human cognition: Evidence for a rostrocaudal hierarchical organization within the human prefrontal cortex. *Psychobiology*, 28, 168-186.
- Coughlin, C., Hembacher, E., Lyons, K. E., & Ghetti, S. (2015). Introspection on uncertainty and judicious help - seeking during the preschool years. *Developmental Science*, 18, 957-971.
- Cui, X., Bray, S., Bryant, D. M., Glover, G. H., & Reiss, A. L. (2011). A quantitative comparison of NIRS and fMRI across multiple cognitive tasks. *Neuroimage*, 54, 2808-2821.
- Davidson, C., Theyer, A., Amaireh, G., & Wijekumar, S. (2024). The impact of caregiver inhibitory control on infant visual working memory. *Infant Behavior and Development*, 74, 101921.
- Destan, N., Hembacher, E., Ghetti, S., & Roebers, C. M. (2014). Early metacognitive abilities: The interplay of monitoring and control processes in 5-to 7-year-old children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 126, 213-228.
- Destan, N., & Roebers, C. M. (2015). What are the metacognitive costs of young children's overconfidence?. *Metacognition and Learning*, 10, 347-374.
- Domic-Siede, M., Irani, M., Valdés, J., Perrone-Bertolotti, M., & Ossandón, T. (2021). Theta activity from frontopolar cortex, mid-cingulate cortex and anterior cingulate cortex shows different roles in cognitive planning performance. *NeuroImage*, 226, 117557.
- Fishburn, F. A., Ludlum, R. S., Vaidya, C. J., & Medvedev, A. V. (2019). Temporal derivative distribution repair (TDDR): A motion correction method for fNIRS. *Neuroimage*, 184, 171-179.
- Friedman, S. L., Scholnick, E. K., Bender, R. H., Vandergrift, N., Spieker, S., Pasek, K. H., Keating D. P., Park Y. (2014). Planning in middle childhood: early predictors and later outcomes. *Child Development*, 85(4), 1446-1460.
- Gardner, W., & Rogoff, B. (1990). Children's deliberateness of planning according to task circumstances. *Developmental Psychology*, 26, 480.
- Gweon, H., Asaba, M., & Bennett-Pierre, G. (2017). Reverse-engineering the process: Adults' and preschoolers' ability to infer the difficulty of novel tasks. *Proceedings of the Annual Meeting of the Cognitive Science Society*, 39, 458-463.
- Hudson, J. A. (1993). Reminiscing with mothers and others: Autobiographical memory in young two-year-olds. *Journal of Narrative and Life History*, 3, 1-32.
- Hudson, J. A., & Fivush, R. (1991). Planning in the preschool years: The emergence of plans from general event knowledge. *Cognitive Development*, 6, 393-415.
- Kaller, C. P., Rahm, B., Spreer, J., Mader, I., & Unterrainer, J. M. (2008). Thinking around the corner: The development of planning abilities. *Brain and cognition*, 67, 360-370.
- Kawakubo, Y., Kono, T., Takizawa, R., Kuwabara, H., Ishii-Takahashi, A., & Kasai, K. (2011). Developmental changes of prefrontal activation in humans: A near-infrared spectroscopy study of preschool children and adults. *PloS one*, 6, e25944.
- Koechlin, E., Basso, G., Pietrini, P., Panzer, S., & Grafman, J. (1999). The role of the anterior prefrontal cortex in human cognition. *Nature*, 399, 148-151.

- Koechlin, E., Corrado, G., Pietrini, P., & Grafman, J. (2000). Dissociating the role of the medial and lateral anterior prefrontal cortex in human planning. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97, 7651-7656.
- Li, Z., De Boeck, P., & Li, J. (2020). Does planning help for execution? The complex relationship between planning and execution. *Plos one*, 15, e0237568.
- Lyons, K. E., & Ghetti, S. (2013). I don't want to pick! Introspection on uncertainty supports early strategic behavior. *Child development*, 84(2), 726-736.
- Magid, R. W., DePascale, M., & Schulz, L. E. (2018). Four-and 5-year-olds infer differences in relative ability and appropriately allocate roles to achieve cooperative, competitive, and prosocial goals. *Open Mind*, 2, 72-85.
- Marzocchi, G. M., Oosterlaan, J., Zuddas, A., Cavolina, P., Geurts, H., Redigolo, D., Vio, C. & Sergeant, J. A. (2008). Contrasting deficits on executive functions between ADHD and reading disabled children. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 49, 543-552.
- McColgan, K. L., & McCormack, T. (2008). Searching and planning: Young children's reasoning about past and future event sequences. *Child Development*, 79, 1477-1497.
- Momennejad, I., & Haynes, J. D. (2012). Human anterior prefrontal cortex encodes the 'what' and 'when' of future intentions. *Neuroimage*, 61, 139-148.
- Moriguchi, Y., & Sakata, C. (2020). Development of cognitive shifting from others' behavior in young children: A near-infrared spectroscopy study. *Developmental Neuropsychology*, 45, 39-47.
- OBELAB, Inc., (2022). NIRSIT Channel Information. Seoul, Korea. Retrieved from <https://www.obelab.com/info/notice.php>
- Papadopoulos, T. C., Panayiotou, G., Spanoudis, G., & Natsopoulos, D. (2005). Evidence of poor planning in children with attention deficits. *Journal of Abnormal Child Psychology*, 33, 611-623.
- Pinti, P., Tachtsidis, I., Hamilton, A., Hirsch, J., Aichelburg, C., Gilbert, S., & Burgess, P. W. (2020). The present and future use of functional near - infrared spectroscopy (fNIRS) for cognitive neuroscience. *Annals of the new York Academy of Sciences*, 1464, 5-29.
- Ranganath, C., Johnson, M. K., & D'Esposito, M. (2000). Left anterior prefrontal activation increases with demands to recall specific perceptual information. *The Journal of Neuroscience*, 20, RC108.
- Scholkmann, F., & Wolf, M. (2013). General equation for the differential pathlength factor of the frontal human head depending on wavelength and age. *Journal of Biomedical Optics*, 18, 105004-105004.
- Schraw, G., & Moshman, D. (1995). Metacognitive theories. *Educational Psychology Review*, 7, 351-371.
- Schröer, L., Pinti, P., Cooper, R. P., & Mareschal, D. (2024). Using mobile fNIRS to explore the development of goal-directed action sequence planning in freely moving preschoolers. In *Proceedings of the Annual Meeting of the Cognitive Science Society* (Vol. 46).
- Shinohara, I., & Moriguchi, Y. (2017). Adults' Theory of Infants' mind: A comparison between parents and nonparents. *Child Development Research*, 2017, 8724562.
- Strange, B. A., Henson, R. N. A., Friston, K. J., & Dolan, R. J. (2001). Anterior prefrontal cortex mediates rule learning in humans. *Cerebral Cortex*, 11, 1040-1046.
- Strangman, G., Culver, J. P., Thompson, J. H., & Boas, D. A. (2002). A quantitative comparison of simultaneous BOLD fMRI and NIRS recordings during functional brain activation. *Neuroimage*, 17
- Takizawa, R., Fukuda, M., Kawasaki, S., Kasai, K., Mimura, M., Pu, S., Noda, T., Niwa, S., & Okazaki, Y. (2014). Neuroimaging-aided differential diagnosis of the depressive state. *Neuroimage*, 85, 498-507.
- Tecwyn, E. C., Thorpe, S. K., & Chappell, J. (2014). Development of planning in 4-to 10-year-old children: Reducing inhibitory demands does not improve performance. *Journal of Experimental Child Psychology*, 125, 85-101.

- Tsujimoto, S. (2008). The prefrontal cortex: Functional neural development during early childhood. *The Neuroscientist*, 14, 345-358.
- Warneken, F., Steinwender, J., Hamann, K., & Tomasello, M. (2014). Young children's planning in a collaborative problem-solving task. *Cognitive Development*, 31, 48-58.
- Wilensky, R. (1983). *Planning and understanding*. Reading, MA: Addison-Wesley.
- Yildirim, I., Saeed, B., Bennett-Pierre, G., Gerstenberg, T., Tenenbaum, J., & Gweon, H. (2019). Explaining intuitive difficulty judgments by modeling physical effort and risk. *arXiv preprint arXiv:1905.04445*.
- Yücel, M. A., Lühmann, A. V., Scholkmann, F., Gervain, J., Dan, I., Ayaz, H., ... Wolf, M. (2021). Best practices for fNIRS publications. *Neurophotonics*, 8, 012101.
- Zelazo, P. D., Carter, A., Reznick, J. S., & Frye, D. (1997). Early development of executive function: A problem-solving framework. *Review of General Psychology*, 1, 198-226.
- Zimeo Morais, G. A., Scholkmann, F., Balardin, J. B., Furucho, R. A., de Paula, R. C. V., Biazoli Jr, C. E., & Sato, J. R. (2018). Non-neuronal evoked and spontaneous hemodynamic changes in the anterior temporal region of the human head may lead to misinterpretations of functional near-infrared spectroscopy signals. *Neurophotonics*, 5, 011002-011002.

Authors' Information

Choi, Hana: Pusan National University, Doctoral Student, 1st Author.

<https://orcid.org/0009-0007-0275-8797>

Jeong, Jeein: Pusan National University, Associate Professor, Corresponding Author.

<https://orcid.org/0000-0002-5130-4624>