

RESEARCH ARTICLE

Tool Affordance from Interactions with Tools during Scientific Experimental Activities

Seong-Un Kim

Korea National University of Education

과학 실험 활동 중 도구와의 상호작용에서 나타나는 도구 어포던스 : 전자석 만들기를 중심으로

김성운

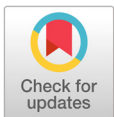
한국교원대학교

Corresponding Author: auul@naver.com

ABSTRACT

The purpose of this study is to find out what tool affordances are for tools and materials that interact with students during scientific experimental activities. For this, 22 university students were asked to conduct scientific experimental activities "to make electromagnet and to identify the properties of electromagnets" to collect experimental behaviors and concurrent think aloud, retrospective think aloud, and gaze positions. Based on the collected data, all experimental behaviors of the participants were listed, and the number of participants in each experimental behavior was investigated. Tool affordance, which is the cause of this experimental behavior, was inferred, focusing on unintended experimental behavior among experimental behaviors that appeared in many participants. As a result of the study, 3 kinds of tool affordance were found as follows. "There will be some reaction at a specific location of the tool.", "When you manipulate tools of different sizes together, manipulate the small ones and keep the large ones still.", "Do not touch the seemingly dangerous parts." These tool affordances can lead to incorrect procedural representations, making it difficult to accurately follow the experimental manual. Due to human nature, tool affordance perceived from tools and materials in scientific experimental activities affect the construction of representations of procedures. Therefore, it is necessary to understand tool affordance and produce experimental manuals in order to avoid negative effects from representation of incorrect procedures.

Key words: Tool affordance, scientific experimental activities, making electromagnet, wearable eye-tracking, scientific experimental behavior



OPEN ACCESS

Brain, Digital, & Learning
2021, Vol. 11, No. 1, 131-148.

<https://doi.org/10.31216/BDL20210009>

Received: March 15, 2021

Revised: March 17, 2021

Accepted: March 22, 2021

© 2021. Institute of Brain based Education,
Korea National University of Education



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

Introduction

인간은 주변의 도구를 지각할 때 어떤 선천적인 능력을 갖고 있는 것으로 보인다. 우리는 날카로운 모서리가 있는 물체는 자르는데 사용할 수 있고, 단단하고 뽀족한 긴 물체는 무른 물질을 뚫거나 굽는데 사용할 수 있다는 것을 알고 있다. 인간은 도구의 특징적인 외형, 표면의 물질 특성, 주변 환경 등에 따라서 사용자와의 상호작용 방식(어떤 목적으로 사용할 것인지, 손잡이는 어디인지 등)과 다른 물체와의 상호작용 방식(찌르기, 휘두르기, 두드리기 등) 등을 지각한다. Gibson은 이를 어포던스(Affordance)라고 하였다(Gibson, 1979).

어포던스란 인간이 어떤 물체에 반응하는 방식을 형성하게 하는 물체의 기본 특성을 말한다(Reason, 1990). 물체는 지각될 수 있는 어떤 정보를 담고 있기 때문에 인간은 그 물체의 어포던스를 통해서 특정 행동을 할 수 있게 된다는 것이다(McGrenere & Ho, 2000). 때문에 인간은 한 번도 사용해 본 적이 없는 도구일지라도 그 외형을 지각하여 본능적으로 그 용도를 떠올려 처리할 수 있다. 이처럼 도구를 시각적으로 지각하는 것만으로도 그 도구의 사용 행동에 대한 정보처리가 일어난다(Kim et al., 2013).

한편, 학교 현장의 과학 수업에서도 도구 어포던스의 영향을 받게 되는 상황이 있다. 바로 과학실험활동 상황이다. 학생들은 과학 실험 활동에서 매번 낯선 도구와 재료를 접한다. 실험 도구들 역시 도구 어포던스를 가지며, 학생들의 실험 활동에 영향을 미칠 수 있다는 것을 알 수 있다. 그러나 우리는 지금까지 이러한 점을 간과해 왔다.

실제로 학생들은 실험 매뉴얼에 따라서 실험 활동을 수행하는 것을 어려워한다. 그 원인으로 학생들의 지식과 경험의 부족(Keys, 1998), 탐구 기능의 부족(Duggan et al. 1996), 실험 매뉴얼의 어려움(Lunetta et al., 2007) 등 여러 가지 원인을 밝혔으며, 원인을 해결하기 위한 다양한 연구가 이루어져 왔다(e.g. Davidowitz & Rollnick, 2001; Karelina & Etkina, 2007; Khaparde, 2013). 그러나 이러한 접근들은 과학 실험활동 상황의 주요 구성 요소 중 학생과 실험 매뉴얼 요소에만 초점을 맞추었고, 실험 도구나 재료처럼 작업 공간(work space)과 학생이 상호작용하는 측면을 소홀히 하였다. 이에 본 연구에서는 실험활동 상황의 작업 공간요소에 초점을 맞추어 도구와의 상호작용에서 나타나는 실험행동과 그 실험행동을 야기한 도구 어포던스를 밝힘으로써 학생들의 실험 활동을 더 깊게 이해하고자 한다.

과학실험활동과 관련하여 도구 어포던스와 관련된 과학교육의 연구는 거의 없다. 탐구 중심 학습에서 가상과 실제 수업 환경에서 학습자의 실험 행동 차이를 조사한 Bumbacher et al. (2018)의 연구가 있으나, 이 연구는 노이즈가 많은 데이터가 실험 행동에 어떤 영향을 미치는지에 머물고 있어, 학생들이 도구와 실제로 어떻게 상호작용하는지, 그 상호작용 이면의 도구 어포던스는 무엇인지에 대해서는 다루고 있지 않다. 이에 본 연구에서는 과학실험활동에는 어떤 도구 어포던스가 존재하는지 알아보려 한다. 연구 목표를 달성하기 위해 학생들의 도구와의 상호작용에서 나타나는 실험 행동을 분석하여, 행동 이면에 있는 학생들이 지각한 도구 어포던스를 찾고자 한다.

이를 위해서는 과학실험에서 나타나는 학생들의 실험 행동을 수집해야 한다. 본 연구에서는 생태학적인 타당도를 극대화하여 실제 상황과 유사한 실험 행동을 수집하기 위해 웨어러블 타입의 시선추적 장치를 활용하고자 한다. 웨어러블 타입의 시선추적 장치를 활용하면 비 침습적으로 사고발생을 방해하지 않을 수 있으며, 실험행동, 사고발생, 시선위치가 동기화된 데이터를 손쉽게 얻을 수 있다(Kim & Yang, 2019; Seo et al., 2019; Cha et al., 2020). 본 연구에서는 시선추적 장치를 활용해 도구 어포던스를 찾고, 학교 과학 실험활동에서 학생들이 실험 매뉴얼이 의도한대로 정확하게 실험을 실행할 수 있는 방안에 대한 시사점을 제공할 수 있을 것으로 기대한다.

Materials and Methods

Participants

본 연구의 연구 참여자는 학부생 22명(남학생 5, 여학생 17)이다. 본 연구에서는 실험 행동 이면에 있는 도구 어포던스를 구명하기 위해 과학실험 중 행동과 사고과정을 분석해야 한다. 이에 과학실험에 대한 전문성의 정도와 사고과정의 언어화 능력을 고려하여 4년제 국립 대학교의 학부생을 대상으로 하였다. 시선추적을 위해 안구질환 여부와 나안시력을 고려하였고, 과제에 대한 친숙도를 고려하여 물리교육 전공자는 연구 참여자 모집에서 제외하였다. 초등교육 전공자는 과학교육론 및 과학과 교재연구 강의를 수강하지 않은 2학년 학생을 중심으로 모집하였다. 최종적으로 선정된 연구 참여자의 전공은 초등교육 15명, 지리교육, 역사교육, 컴퓨터교육, 미술교육, 기술교육, 독어교육, 가정교육 각 1명이다.

Experimental Task

본 연구의 과제는 학교현장의 실험활동을 반영해야 하며 다양한 도구와 재료를 사용한 조작적 관찰이 포함된 실험이어야 한다. 이에 과제의 선정기준을 다음과 같이 설정하였다. 첫째, 자연 현상을 관찰하여 귀납적으로 과학 개념의 학습이 가능한 과제. 둘째, 소집단활동이 아닌 개별 실험활동이 가능한 과제. 셋째, 실험 매뉴얼의 절차를 이해하는 것이 어렵지 않아 절차를 따라하면 충분히 실행이 가능한 과제. 넷째, 지나치게 친숙하여 자동화된 방법으로 해결하는 것이 불가능한 과제이다. 이러한 기준을 고려하여 본 연구의 과제를 “전자석을 만들어 전자석의 성질 알아보기”로 선정하였다.

과제는 가열한 못과 에나멜선 등을 이용해 전자석을 만들고 전자석을 침핀과 나침반에 가까이 하면서 스위치의 열고 닫음에 따라 나타나는 현상을 관찰하도록 하여 전자석의 성질을 학습할 수 있도록 하였다. 과제 실행을 위한 실험 매뉴얼은 활동제목, 준비물, 실험 절차, 전자석이 포함된 전기회로 사진 1장으로 구성하였다. 이후 학부생 2인을 대상으로 예비 검사를 실시하여 실험 절차의 문장을 매끄럽게 수정하였다. 개발한 과제는 Fig. 1과 같다.

전자석을 만들어 전자석의 성질 알아보기
준비물 전지, 전지 끼우개, 집게전선, 스위치, 나침반, 에나멜선, 구운 못, 침핀, 흰 종이, 가위, 사포, 니퍼, 투명테이프
활동 순서 ① 못을 흰 종이로 감싼 후, 종이의 양 끝을 투명 테이프로 붙여 고정시킨다. ② 에나멜선의 한쪽 끝 부분을 10cm 정도 남기고 한 방향으로 가지런하고 촘촘하게 150회 감는다. ③ 에나멜선이 풀리지 않도록 투명테이프로 고정시키고 에나멜선 양 끝의 길이를 10cm 정도 남기고 잘라낸다. ④ 사포를 이용해서 에나멜선 양 끝의 에나멜 피복을 벗겨 낸다. 이 때, 약 1cm 정도 길이의 피복을 벗겨낸다. ⑤ 전지 1개, 스위치, 전자석을 집게 전선으로 각각 연결한다. ⑥ 전기회로의 스위치를 닫은 상태에서 전자석을 침핀 가까이 가져간다. 그런 후 스위치를 열고 나타나는 변화를 관찰한다. ⑦ 전기회로의 스위치를 닫은 상태에서 전자석을 나침반 가까이 가져간다. 그런 후 스위치를 열고 나타나는 변화를 관찰한다.


Fig. 1. Experimental manual

Data Collect

본 연구의 목적을 달성하기 위해서는 학생들의 과학실험 중 실험행동과 사고과정을 수집해야 한다. 본 연구에서는 사고과정분석 연구에 널리 사용되고 있는 사고발성법을 사용하였다(van Someren et al., 1994). 사고발성법은 연구 참여자가 문제해결 과정 중 나타나는 모든 생각을 언어화하여 발성하도록 요청하여 분석하는 방법으로 참가자들이 실험을 수행하는 동안의 사고 발성을 수집하는 동시적 사고발성법과 과제 수행이 끝난 후에 수행 동안의 경험에 대한 사고발성인 회고적 사고발성법으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 심층적이고 다각화된 자료 수집을 위해 실험활동 중 동시적 사고발성을 수행하도록 하고, 실험활동이 끝난 후 실험활동에 대한 회고적 사고발성을 수행하도록 하였다.

본 연구에서는 웨어러블 타입의 시선추적 장치를 활용하였다. 이는 본 연구의 자료 수집에 다음과 같은 여러 가지 장점이 있기 때문이다. 첫째, 실험행동을 연구 참여자 관점에서 시선의 위치와 함께 수집가능하다. 웨어러블 타입의 시선추적 장치는 연구 참여자의 눈 위치에서 촬영하므로, 행동연구에서 일반적으로 실험행동을 수집하기 위해 사용하는 비디오 녹화보다 더 가까운 곳에서 실험 행동을 수집할 수 있다. 둘째, 웨어러블 타입의 시선추적 장치는 과학실험이나 사고발성을 방해하지 않으므로 실제 실험 상황을 있는 그대로 수집할 수 있다. 시선추적 장치 중 웨어러블 타입은 과제수행 또는 사고발성으로부터 발생하는 인지적인 부담이 적기 때문에(Seagull & Xiao, 2001) 생태학적 타당도가 매우 높다(Knoblich et al., 2005). 셋째, 시선추적 장치를 통해 수집되는 시선비디오는 사고발성과 실험행동, 시선위치가 시간적으로 동기화 되어 있어 분석에 용이하다. 넷째, 시선의 위치가 포함된 시선비디오는 실험 당시의 상황을 추리하는데 유용하며, 회고적 사고발성을 수집하는데 효과적인 단서로 사용할 수 있다.

본 연구의 실험절차는 다음과 같다. 실험실에 들어온 연구 참여자는 먼저 시선추적 가능 여부를 확인하기 위해 시선추적 장치를 착용하고 시점조정(calibration)을 실시하였다. 이후 사고발성훈련을 15분 내외로 실시하였다. 본 실험 전에 다시 시점조정을 거친 후, 본 실험에서는 “전자석을 만들어 전자석의 성질 알아보기” 과제를 수행 하도록 하며 실험 행동과 동시적 사고발성, 시선위치를 수집하였다. 과제 수행 이후, 시선비디오를 단서로 하여 당시 상황과 다른 연구 참여자와 차별되는 특이한 실험 행동에 대한 회고적 사고발성을 수집하였다. 실험 행동, 시선위치, 동시적 사고발성은 Tobii 사의 웨어러블 타입의 시선추적장치인 Tobii Pro Glasses 2를 이용하여 수집하였고(Fig. 2), 회고적 사고발성은 비디오카메라로 수집하였다. 연구 참여자들의 시선 추적율은 전원 80%이상(mean=90.36%, SD=5.15)으로 모든 데이터는 분석 가능한 신뢰로운 자료이다.



Fig. 2. Tobii Pro Glasses 2

Data Analysis

자료 분석을 위해 Tobii Pro Lab 프로그램을 이용하여 연구 참여자의 시선비디오를 mp4파일로 추출하였다. 추출한 시선비디오를 이용해 시간의 흐름에 따른 실험행동, 동시적 사고발성, 회고적 사고발성, 시선위치를 전사하여, 전사본과 시선비디오를 반복적이고 분석적으로 검토하였다. 연구 참여자들은 같은 실험매뉴얼로 실험을 했음에도 실험행동의 차이가 있었으며, 연구 참여자들의 도구와의 상호작용 방식도 다양하게 나타났다. 본 연구에서는 연구 참여자의 실험 행동 차이를 연구 참여자와 실험 도구 및 재료 간 상호작용에서 도구 어포던스의 지각이 원인임을 가정하고, 이 도구 어포던스가 무엇인지 알아내기 위해 다음과 같은 분석방법을 수립하였다.

먼저, 실험 매뉴얼의 절차를 분할하였다. 연구 참여자들은 매뉴얼의 절차와 실험 중인 공간 사이를 빈번히 번갈아 보는 전환(*switching*)행동을 보인다. 이러한 실험 행동은 절차의 수행과 관련된 지식이 부족한 초보자에게서 나타나는 자연스러운 행동이며, 많은 정보로 인한 작동기억의 부하가 그 원인이다(Duggan & Payne, 2001). 연구 참여자들은 실험 매뉴얼의 특정 절차가 많은 정보를 담고 있을 때, 한 번에 이해하여 실행할 수 있는 정도로 분할하여 실행하는 것을 관찰할 수 있고, 그 분할지점은 실험 행동을 구분하기 위한 기준점이 될 수 있다. 따라서 효과적인 분석을 위해 다음과 같이 실험 매뉴얼의 절차를 분할하였다(Table 1).

Table 1. Division of experimental manual procedures for data analysis

Procedures in the Experimental Manual	Divided Procedures
1 Wrap the nails with paper and fix the ends of the paper with cellophane tape.	1 Cut the paper according to the size of the nail. 2 Wrap a nail around with paper. 3 Attach cellophane tape to each end of the paper and fix it.
2 Wrap the enamel wire 150 times neatly in one direction, leaving about 10 cm at one end.	4 Wrap the enamel wire 150 times neatly in one direction, leaving about 10 cm at one end.
3 Fix the enamel wire with cellophane tape to prevent it from being loosened and cut off with about 10 cm left at both ends of the enamel wire.	5 Fix the enamel wire with cellophane tape to prevent it from being loosened. 6 Cut off with about 10 cm left at both ends of the enamel wire.
4 Peel off enamel sheath at both ends of enamel wire using sandpaper. At this time, peel off the sheath about 1 cm long.	7 Peel off enamel sheath at both ends of enamel wire using sandpaper. At this time, peel off the sheath about 1 cm long.
5 Connect one battery, switch, and electromagnet to the claw wire respectively.	8 Connect one battery, switch, and electromagnet to the claw wire respectively.
6 With the switch of the electrical circuit closed, take the electromagnet close to the pin. Then open the switch and observe the changes.	9 Put several pins on the table. 10 With the switch of the electrical circuit closed, take the electromagnet close to the pins. 11 Then open the switch and observe the changes.
7 With the switch of the electrical circuit closed, take the electromagnet close to the compass. Then open the switch and observe the changes.	12 Put the compass on the table. 13 With the switch of the electrical circuit closed, take the electromagnet close to the compass. 14 Then open the switch and observe the changes.

다음 단계에서는 연구 참여자들에게서 나타난 모든 실험행동의 목록을 작성하였다. 분할된 절차 별로 실험 행동의 목록을 작성하였으며, 실험 행동은 실험 매뉴얼이 의도한 것과 의도하지 않은 것으로 구분하여 연구자가 매뉴얼을 통해 의도한 실험행동은 0으로 명명하였고(예, 1-0, 2-0), 의도하지 않은 실험 행동은 1, 2의 순서로 명명 하였다(예, 1-1, 1-2). 이때, 실험 행동 목록의 순서는 연구 참여자의 순서와 행동이 나타난 순서이므로 순서차이의 의미는 없으며, 0으로 명명된 의도한 실험행동이 2가지 이상일 경우에는 알파벳 소문자를 붙여 명명하였다(예, 4-0a, 4-0b). 또한, 정확한 측정을 요하는 절차(10 cm 남기고 자르기, 에나멜선을 150회 감기 등)에서 어림짐작 측정을 하는 행동, 실험 절차를 이해하지 못해 나타난 개인 특이적인 행동은 분석에서 제외하였다.

다음은 실험 행동을 목록화한 표를 이용하여 각 연구 참여자의 실험에서 해당하는 실험 행동이 나타났는지의 여부를 조사하였다. 한 연구 참여자에게서 같은 실험행동이 반복적으로 여러 번 나타나도 1회로 횟수를 기록하였고, 한 절차에서 다양한 행동을 보이면 그 여부에 따라 해당하는 실험 행동의 횟수를 기록했다. 따라서 한 절차에서 모든 연구 참여자가 하나의 행동을 보이면 연구 참여자의 수인 22가 기록되고, 한 절차에서 연구 참여자 별로 다양한 행동이 보이면 그 합이 22 또는 그 이상이 될 수 있다.

그 다음은 실험 행동으로부터 도구 어포던스를 추리하기 위해서 의도하지 않은 실험행동 중 연구 참여자 다수에게서 나타난 행동을 중심으로 그 원인을 분석하였다. 도구 어포던스는 암묵적이다. 따라서 실험행동의 원인을 동시적 및 회고적 사고발생, 그 실험 행동 전 후의 다른 행동, 시선위치 등을 종합적으로 판단하여 도구 어포던스를 추리하였다. 모든 의도하지 않은 실험행동이 도구 어포던스로부터 비롯된 것은 아니며 경험이나 지식, 매뉴얼을 이해한 정도가 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 도구와의 상호작용으로부터 비롯된 실험 행동을 중심으로 살펴보았으며 매뉴얼과의 상호작용은 분석에서 제외하였다. 도구 어포던스 추출은 수집한 자료를 종합적으로 검토하고, 분석과정과 분석결과를 과학교육전문가 1인과 논의하는 과정을 반복하며 진행하였다.

한편, 도구 어포던스의 긍정적인 영향은 밝힐 수 없었다. 실험 매뉴얼에 따라서 의도한 대로 정확히 수행한 경우에는 도구 어포던스가 어떻게 작용했는지 사고발생 또는 실험행동에서 드러나지 않으므로 분석할 수 없다는 한계점이 있다. 그리고 본 연구의 결과가 “전자석을 만들어 전자석의 성질 알아보기” 과제에 특수적인 도구 어포던스인 점도 본 연구의 한계점으로 볼 수 있다.

Results

Experimental Behavior of Participants in Scientific Experimental Activities

“전자석을 만들어 전자석의 성질 알아보기” 실험 활동에서 나타난 연구 참여자의 절차별 실험 행동과 각 실험 행동이 나타난 연구 참여자의 수는 다음과 같다(Table 2).

Table 2를 살펴보면 절차 2, 6, 8, 11과 같이 실험 매뉴얼이 의도한 실험 행동만 나타나는 경우가 있다. 의도한 실험 행동만 나타나는 절차는 비교적 이해하기 쉬운 절차로 볼 수 있다. 이 절차의 내용은 연구 참여자마다 다르게 해석 할 수 있는 여지가 없거나, 실험 매뉴얼에 제시된 사진을 통해서 절차의 내용을 쉽게 표상할 수 있는 경우이다.

Table 2. Experimental behavior and the number of participants in each experiment behavior

Divided Procedures		Experimental behavior	Number of participants
1	Cut the paper according to the size of the nail.	1-0 Cut the paper according to the size of the nail.	20
		1-1 Fold the paper to fit the size of the nail.	4
		1-2 Use the A4 size without cutting the paper.	5
2	Wrap a nail around with paper.	2-0 Wrap a nail around with paper.	22
3	Attach cellophane tape to each end of the paper and fix it.	3-0 Fix the nail's head and end paper by attaching tape.	19
		3-1 Attach the tape to the part that begins to wrap the paper around the nail, wrap all the paper around the nail, and attach the tape to the end.	3
4	Wrap the enamel wire 150 times neatly in one direction, leaving about 10cm at one end.	4-0a Hold the head of the nail and wrap the enamel wire from the head of the nail.	19
		4-0b Hold the end of the nail and wrap the enamel wire from the end of the nail.	3
		4-0c With the enamel wire fixed, turn the nail and wrap it from the head.	4
5	Fix the enamel wire with cellophane tape to prevent it from being loosened.	5-0 Attach a cellophane tape to the ends of the enamel wire at both ends of the electromagnet, where the enamel wire can be loosened.	20
		5-1 Attach the cellophane tape to the entire side of the electromagnet.	2
6	Cut off with about 10cm left at both ends of the enamel wire.	6-0 Cut off with about 10cm left at both ends of the enamel wire.	22
7	Peel off enamel sheath at both ends of enamel wire using sandpaper. At this time, peel off the sheath about 1cm long.	7-0a Fold the sandpaper and put the end of the enamel wire between the folded sandpaper and rub it by pulling it.	8
		7-0b Place the end of the enamel wire in a solid place, such as a table, and rub it on top with sandpaper.	14
		7-1 Place the tip of the enamel wire on the nail or finger and rub it with sandpaper.	8
		7-2 Lift the end of the enamel wire and rub it with sandpaper.	6
8	Connect one battery, switch, and electromagnet to the claw wire respectively.	8-0 Connect one battery, switch, and electromagnet to the claw wire respectively.	22
9	Put several pins on the table.	9-0 Place several pins on the table and close the electromagnet.	5
		9-1 Place a pin on the table and close the electromagnet.	6
		9-2 Place the electromagnet on the table and place one pin close to the electromagnet.	14
10	With the switch of the electrical circuit closed, take the electromagnet close to the pins.	10-0 Place the tip or head of the electromagnet close to the pin.	9
		10-1 Place the enamel wire of the electromagnet close to the pin.	19
11	Then open the switch and observe the changes.	11-0 Then open the switch and observe the changes.	22
12	Put the compass on the table.	12-0 Place the compass on the table and close the electromagnet.	6
		12-1 Place the electromagnet on the table and place the compass close to the electromagnet.	15
		12-2 Place the compass on the table and place the electromagnet on top of the compass.	5
13	With the switch of the electrical circuit closed, take the electromagnet close to the compass.	13-0 Place the tip or head of the electromagnet close to the compass.	5
		13-1 Place the enamel wire of the electromagnet close to the compass.	19
14	Then open the switch and observe the changes.	14-0 Then open the switch and observe the changes.	22

반면, 절차 1, 7, 9, 12와 같이 의도한 실험 행동뿐만 아니라 의도하지 않은 실험 행동이 나타날 수 있으며, 의도하지 않은 실험 행동이 한 종류가 아니라 여러 가지로 나타날 수 있다. 이 절차의 내용은 다양하게 해석할 수 있는 여지가 있다고 볼 수 있다. 이러한 의도하지 않은 실험 행동이 나타난 원인 중 하나는 실험 매뉴얼의 절차가 모호하게 기술되었기 때문이다. 이러한 예로 Fig. 3은 연구 참여자들에게서 나타난 1-0, 1-1, 1-2 실험 행동을 시간의 순서대로 보여준다. 예시 사진은 한 연구 참여자에게서 나타난 실험 행동을 대략 5초 내외의 시간 간격으로 캡처한 것으로 흔들리지 않고 물체의 윤곽이 명확한 장면으로 구성하였다. 연구 참여자에게 제시된 실험 절차는 “못을 흰 종이로 감싼 후, 종이의 양끝을 투명테이프로 붙여 고정시킨다.”로 흰 종이의 크기는 어떠해야 하는지, 흰 종이를 못의 길이에 맞게 조정하는 방법은 무엇인지에 대한 상세한 안내가 없다. 때문에 의도하지 않은 실험 행동이 나타나는 것이다.

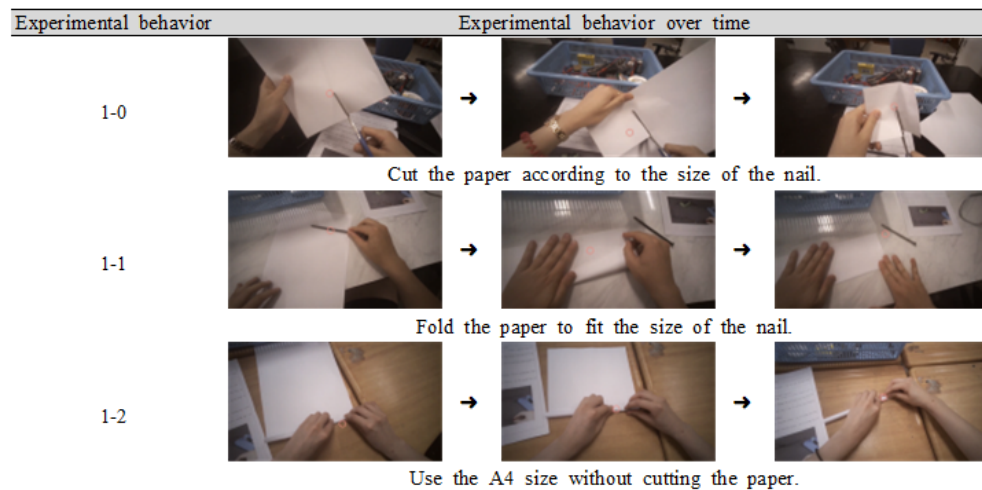


Fig. 3. Experimental behaviors 1-0, 1-1, 1-2 for procedure 1

다른 원인은 연구 참여자가 실험 절차를 자의적으로 해석하여 본디 의도와 다르게 실험 절차를 표상했기 때문이다. 그 예시로 Fig. 4은 연구 참여자들에게서 나타난 9-0, 9-1, 9-2 실험 행동을 시간의 순서대로 보여준다. 실험 절차에 따르면 전자석을 들어 바닥에 둔 침핀 더미에 가까이 가져가야 한다. 그러나 연구 참여자들은 반대로 침핀을 전자석에 가져가는 실험행동을 보인다. 조작해야 하는 물체를 착각한 것이다.

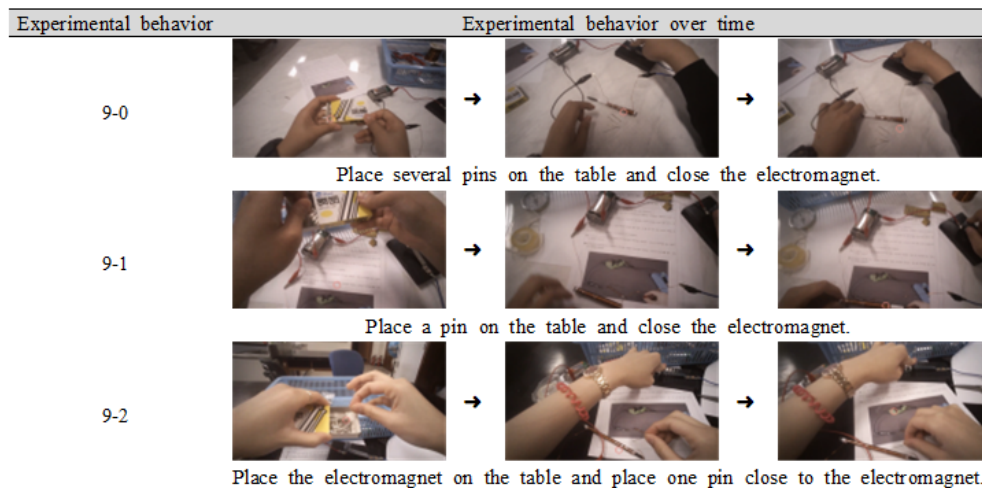


Fig. 4. Experimental behaviors 9-0, 9-1, 9-2 for procedure 9

다양한 실험 행동이 나타나는 또 다른 원인은 연구 참여자 스스로 효율적인 실험 행동을 찾기 위해 시행착오를 거치면서 실험행동을 계속 변경하기 때문이다. 그 예시로 Fig. 5은 연구 참여자들에게서 나타난 4-0a, 4-0b, 4-0c는 종이로 감싼 못에 에나멜선을 감아야 하는 실험 행동을 시간의 순서대로 보여준다. 이 절차에서는 연구 참여자들의 실험 행동에서는 차이가 나타났지만 절차를 실행한 결과물인 못에 에나멜선을 감은 결과는 유사했다. 이와 같은 행동은 절차를 실행하며 실행에 대한 결과를 산출물로부터 즉각적인 피드백을 받아 실행의 방식을 변경하는 과정에서 나타난다. 즉 시행착오 전략을 통해 효율적으로 절차의 목표에 도달하려 하는 것이다.

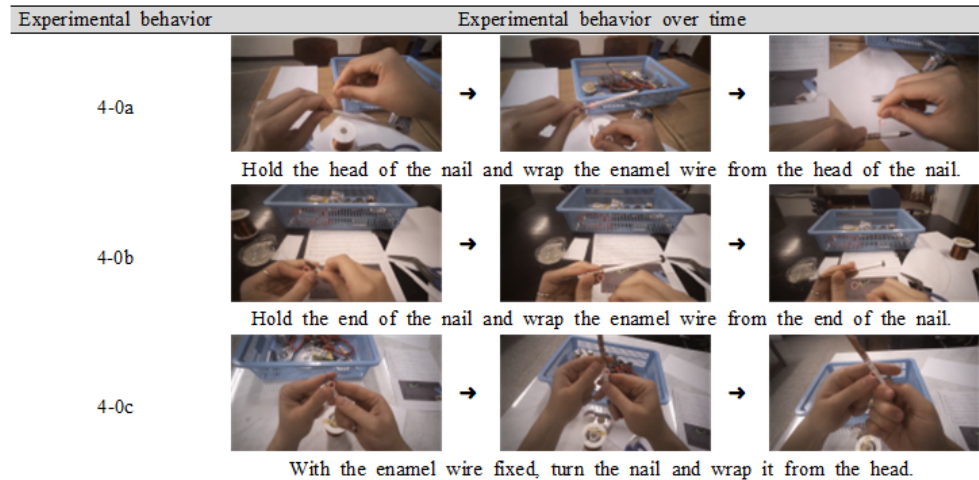


Fig. 5. Experimental behaviors 4-0a, 4-0b, 4-0c for procedure 4

Table 2에서 제시한 절차별로 각 실험 행동이 나타난 연구 참여자의 수를 조사한 결과를 살펴보면, 각 절차 중에서는 다수의 연구 참여자에게서 의도한 실험 행동이 나타난 절차가 있는 반면, 다수에게서 의도하지 않은 실험 행동이 나타난 절차도 있었다. 또한, 대부분의 연구 참여자에게서 특정 실험행동이 나타난 경우도 있고, 2-3명의 연구 참여자에게서만 나타나는 실험행동도 있었다.

절차 3의 경우에 연구 참여자 중 19명은 의도한 실험행동을 보였으며, 단 3명 만이 의도하지 않은 실험행동을 보였다(Fig. 6). 이 3명은 “종이의 양 끝에 투명테이프를 붙여 고정시킨다.” 라는 절차를 흰 종이를 못에 감기 전에 종이 전체의 양끝으로 이해하여 실행하였다. 또한 절차 5의 경우에 20명은 의도한 실험행동을 보였으며, 단 2명 만이 의도하지 않은 실험행동을 보였다(Fig. 7). 두 경우 모두 소수의 연구 참여자들에게서 의도에 벗어난 실험 행동이 나타났지만, 절차를 이해하고 실행하는 과정에서의 어려움이 없었고 실행 결과가 만족스러웠다. 이를 통해 같은 실험 매뉴얼 처리에서도 도구와의 상호작용에 따라서 절차를 다양하게 이해할 가능성이 있음을 알 수 있다.

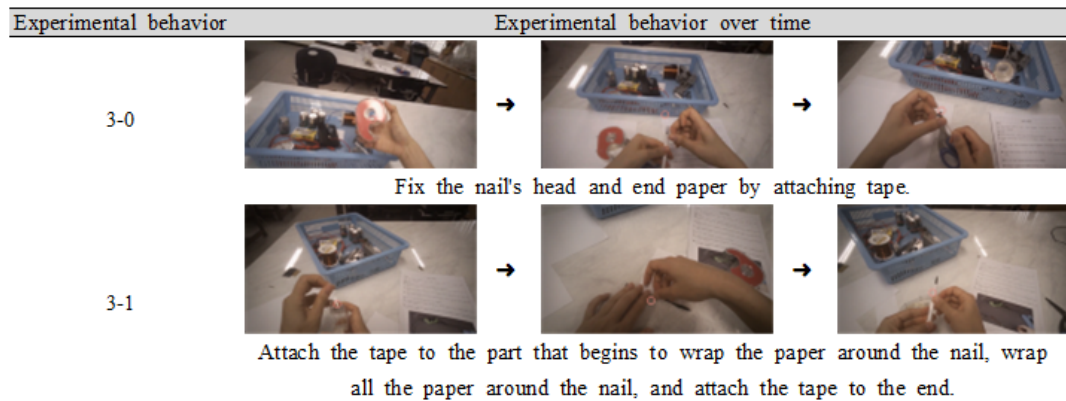


Fig. 6. Experimental behaviors 3-0, 3-1 for procedure 3

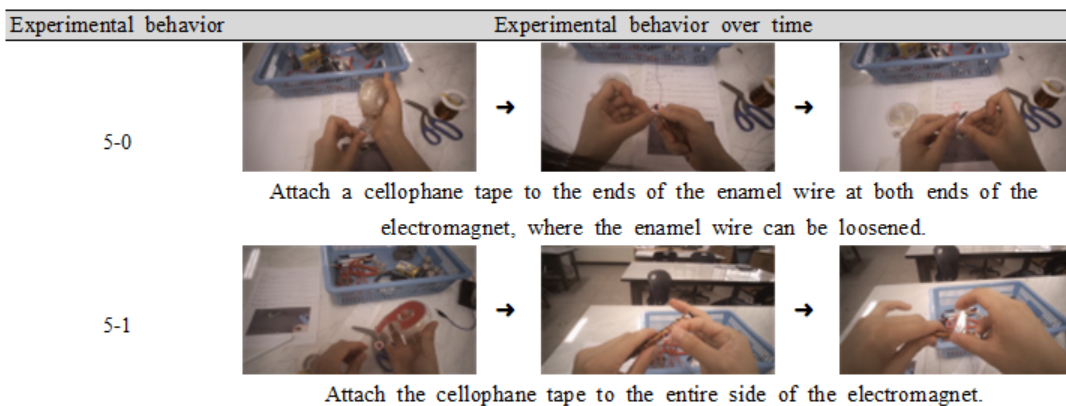


Fig. 7. Experimental behaviors 5-0, 5-1 for procedure 5

반대로 절차 중 연구 참여자 다수에게서 의도하지 않은 실험 행동이 나타나는 경우도 있다. Fig. 8에서 볼 수 있는 절차 10의 경우에는 연구 참여자 중 9명 만이 의도한 실험행동을 보였으며, 19명은 다른 실험행동을 보였다. 의도하지 않은 실험 행동이 나타난 19명의 연구 참여자들은 “전기회로의 스위치를 닫은 상태에서 전자석을 침핀 가까이 가져간다. 그런 후 스위치를 열고 나타나는 변화를 관찰한다.”를 해결하기 위해 전자석의 양극이 아니라 에나멜선 부분을 갖다 댄다. 이와 같은 조작으로는 전자석의 극과 침핀사이의 거리가 멀어 현상을 관찰하기 어렵다. 때문에 19명의 연구 참여자들 중 11명은 전자석과 철로 된 물질이 서로 끌어당기는 현상을 관찰할 수 없었으므로 실험에 실패했다. 한편, 19명의 연구 참여자 중 8명은 전자석의 에나멜선 부분과 침핀을 가까이 한 조작에 대해 아무런 반응을 관찰할 수 없자 전자석으로 여기저기를 갖다 대어보는 시행착오 전략으로 우연히 전자석의 양쪽 끝에 침핀이 붙는 현상을 관찰하여 전자석의 성질을 확인할 수 있었다.

Fig. 9의 절차 13 “전기회로의 스위치를 닫은 상태에서 전자석을 나침반에 가까이 가져간다. 그런 후 스위치를 열고 나타나는 변화를 관찰한다.”에서도 19명의 연구 참여자는 전자석의 에나멜 선 부분을 나침반과 가까이 하여, 이에 따른 현상을 관찰하고 설명하는 것을 어려워했다. 전자석의 에나멜선 부분을 나침반에 가까이 한 경우, 나침반의 바늘의 방향과 전자석이 놓인 방향이 평행하여 나침반 바늘의 편향을 관찰하기 어려웠던 것이 원인으로 보인다.

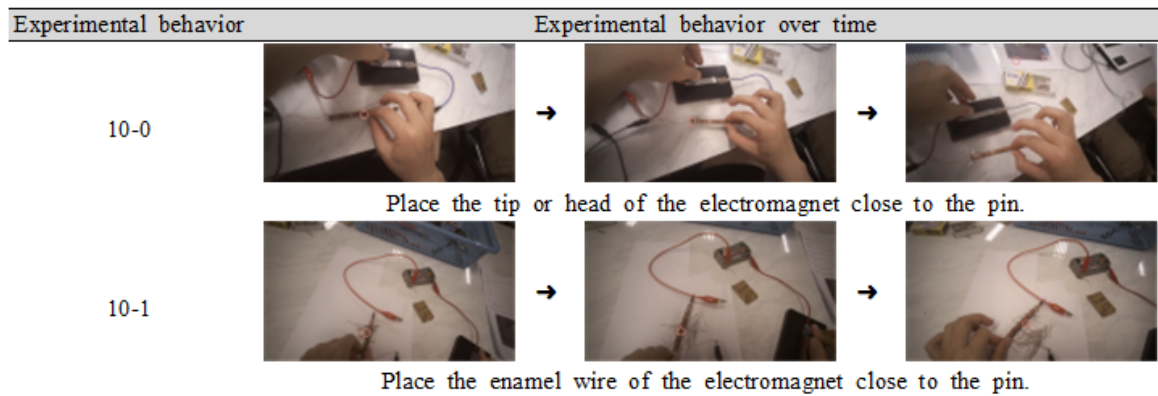


Fig. 8. Experimental behaviors 10-0, 10-1 for procedure 10

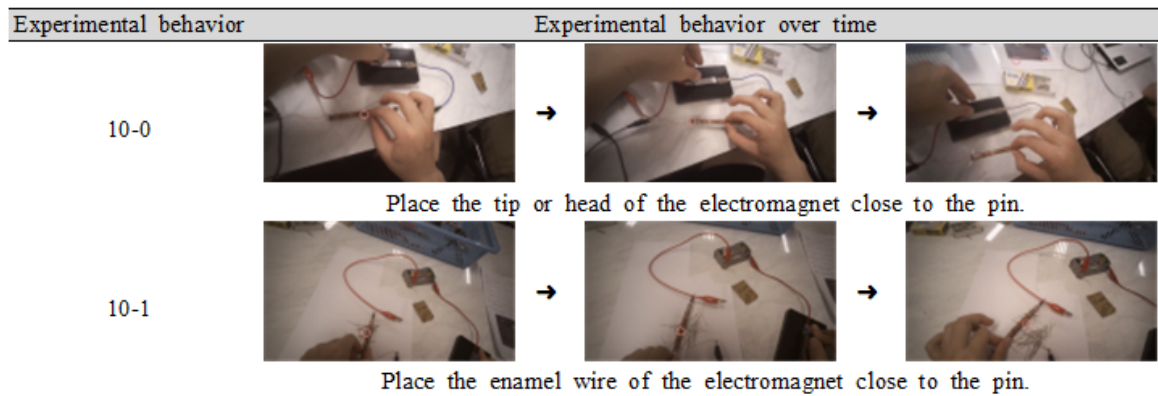


Fig. 9. Experimental behaviors 13-0, 13-1 for procedure 13

이러한 연구결과는 연구 참여자들의 실험 행동이 모두 같거나 제각기 다르지 않고, 어느 정도 경향성이 있는 유사한 실험 행동을 보인다는 것을 말한다. 연구 참여자들이 철차를 표상할 때, 유사한 형태로 표상하도록 영향을 미치는 요인이 존재한다는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 이 요인을 도구 어포던스의 관점에서 추가적으로 보고하고자 한다.

Tool Affordance that Affect Experimental Behavior.

연구 참여자의 실험 행동을 바탕으로 다음과 같은 3가지 도구 어포던스를 추출하였다.

There will be some reaction at a specific location of the tool.

본 연구의 연구 참여자들에게서 나타난 실험 행동 중 가장 주목할 부분은 대부분의 연구 참여자들이 전자석의 에나멜선이 감긴 부분을 침핀 또는 나침반에 가까이 하는 행동을 보였다는 것이다. 연구 참여자들의 회고적 사고발성으로 드러난 것처럼 전자석의 에나멜선 부분을 작업했으므로 그 위치에 어떤 변화 또는 반응이 있을 것이라고 생각한 것이다. 본 연구의 과제에서 특정 위치는 전자석의 에나멜선을 감은 부분이다. 이 도구 어포던스는 연구 참여자들이 도구에서 외형적으로 두드러지거나 연구 참여자가 사전에 어떤 작업을 한 위치에서 조작에 의한 반응이 있을 것으로 생각하도록 유도한 것으로 생각된다.

자석도 분명히 가운데로 가면 안 붙는데 그 생각이 아예 없었어요. 그냥 전자석 아무데나 붙이면 다 붙겠지 하고 갖다 댔는데, 이렇게 저렇게 하다보니까 끝에 붙는 거구나. 그랬었어요. 대보니까 붙으니까 알았던 거 같아요.

(연구 참여자 H의 회고적 사고발성: 10-1 실험행동)

여기 에나멜선 부분에 끌리는 줄 알았어요. 여기 부분으로. 근데 여기(전자석의 양극)는 아무것도 없는 상태잖아요. 근데 여기는 당연히 뽕족하고 일단은 쇠가 연결되어 있으니까 여기 구간만 실험하는 데지.

(연구 참여자 K의 회고적 사고발성: 10-1 실험행동)

이때 진짜 멘붕 왔어요. 왜냐하면 전자석에 갖다 대라고 해서 갖다 댔는데 아무런 변화가 없는 거예요. 근데 여기가 아니라 이 끝에 부분에 갖다 대라고 했나 봐요. 그런 설명이 있었으면 금방 발견했을 텐데 하고 했어요, 음.. 전자석이니까 가운데에 갖다 댔는데요.

(연구 참여자 G의 회고적 사고발성: 10-1 실험행동)

When you manipulate tools of different sizes together; manipulate the small ones and keep the large ones still.

다수의 연구 참여자들은 절차 9와 12에서 전자석을 침핀 또는 나침반에 가까이 하라는 절차를 반대로 이해하여, 침핀과 나침반을 들어 바닥에 놓인 전자석에 가까이 하는 실험 행동을 보였다. 이와 같은 실험 행동의 원인은 사고 발생으로는 명확하게 드러나지 않았지만 전후의 행동으로 유추해보면 크기가 다른 도구를 서로 가까이 할 때는 작은 것을 들어 조작하고 큰 것은 실험대에 가만히 두어야 한다고 생각하는 것으로 보인다. 또한 이 도구 어포던스는 절차 4에서 대부분의 연구 참여자들이 크기가 큰 못은 고정된 채로 크기가 작은 에나멜선을 감아서 전자석을 만드는 실험 행동 역시 맥을 같이 한다. 이 도구 어포던스는 연구 참여자들이 여러 개의 도구를 조합하거나 함께 조작해야 할 때 큰 것은 두고 작은 것을 움직이게끔 생각하도록 유도한 것으로 보인다.

[침핀을 전자석에 가까이 가져갔다. 매뉴얼에는 전자석을 침핀 가까이 가져가라고 되어 있는데 왜 그렇게 행동한 것인지?]

이거 안 읽고 당연히 이렇게 해야 된다고 생각했어요. 그냥 이것보다는 결과만 같으면 되잖아요. 이렇게 해도 되고 저렇게 해도 되니까 어떻게 하든 하기만 하면 된다는 생각으로 그냥 그랬던 거 같아요.

(연구 참여자 K의 회고적 사고발성: 9-2 실험행동)

아... 내가 잘못된 거구나. 애가(침핀) 애한테(전자석) 가져가야 한다고 읽었는데 지금 보니까 아니네요. 잘못 읽었었네요. 근데 그렇게 해도 실패했을 거 같아요.

(연구 참여자 T의 회고적 사고발성: 9-2 실험행동)

음.. 왜 그랬을까요? 침핀 같은 경우는 들고 있다가 딱 붙으면, 근데 붙을 거라는 것을 생각하고 있었기 때문에. 붙었다는 것을 더 체감을 하려면 들고 있다가 대는 게 나을 것 같다는 생각. 미세한 느낌을 알기 위해서요.

(연구 참여자 R의 회고적 사고발성: 9-2 실험행동)

Do not touch the seemingly dangerous parts.

대부분 연구 참여자들은 실험에서 사용한 도구 중 못의 끝, 침핀의 끝 부분과 같이 뾰족한 부분은 잡지 않는 실험 행동을 보였다. 또한 대부분의 연구 참여자들이 못에 에나멜선을 감을 때 뾰족한 못의 끝부분이 아닌 못의 머리 부분을 잡고 머리 부분부터 감기 시작하는 실험 행동을 바탕으로 겉보기에 위험한 부분은 만지지 않아야 한다고 생각하는 것으로 보인다. 그리고 에나멜선이 감전의 위험이 있는 것으로 인식되어 쉽게 잡지 못했다는 연구 참여자들의 회고적 사고발성이 나타났다. 이 도구 어포던스는 연구 참여자들이 도구에서 위험요소는 만지지 않도록 유도한 것으로 보인다.

아무래도 전기가 흐르다 보니까 이거 그냥 내손으로 만지면 큰일나는 것 아닌가 고무장갑같은거는 안 주냐? 근데 그런 거를 바랄 수는 없겠드라고요, 빠진거 같아서. 그래서 그때 말을 못했어요. 그냥 되니까 시켰겠지, 아마 그렇게 말했을 거예요 여기서.

(연구 참여자 H의 회고적 사고발성: 9-0 실험행동)

이때 적극적으로 좀 못했던 게 혹시나 여기 전기가 통하면 어떡하지? 이러면서 걱정이 들어서 적극적으로 대보지 못했던 거예요...(중략)...이제 막 전기가 통해서 감전되어서 내가 죽거나 하진 않을 거 같아서 그때부터 만져서 좀 해보고, 근데 정말 우연히 되어서 좀 신기했던 거 같아요. 중간에 대면 될 줄 알았는데 중간보다는 끝에 더 잘되는 거 같고, 아직 잘 모르겠어요.

(연구 참여자 M의 회고적 사고발성: 10-1 실험행동)

이러한 도구 어포던스들은 연구 참여자들의 실험에 부정적인 영향을 미쳤다.

침핀이 안 붙더라구요. 아무 일이 없어가지고 사포질을 잘못했나보다 생각하면서, 나침반이라도 한번 해보자 했는데. 나침반은 또 변화가 있더라구요. 그래서 뭔가 잘못된 건 아니고 침핀이 그냥 잘 안 붙나보다 하고 생각하고 넘어갔어요.

(연구 참여자 I의 회고적 사고발성: 13-1 실험행동)

당연히 침핀이 붙어야 되는데 안 붙으니까 처음에 제가 뭔가를 잘 못 만들고 있다고 생각한다고 했었잖아요. 그래서 내가 잘 못 한건가 하는 생각도 들고. 그리고 그냥 전류가 좀 약한가 하는 생각도 들고, 전류가 통하나 안통하나 그런것도 궁금하고 해서 전구로 불도 켜보고 했어요. 근데 이때부터 내가 뭘 잘못하고 있는지를 모르겠어요, 문제가 뭔지, 그래서 새로 만든거예요.

(연구 참여자 T의 회고적 사고발성: 10-1 실험행동)

전자석의 에나멜선 부분을 침핀에 가까이했던 연구 참여자 I와 T는 에나멜선 부분에 침핀이 붙을 것이라고 기대했던 결과와는 다르게 아무런 변화를 관찰하지 못했다. 도구 어포던스는 연구 참여자들이 실험 절차를 잘못 이해하게 하여 본디 의도와는 다르게 절차를 표상하게 한다. 이러한 표상은 절차를 수행했을 때 나타날 수 있는 기대되는 결과에 대한 잘못된 신념을 갖게 하는 것으로 보인다. 이러한 신념을 갖게 되면 기대되는 결과만을 관찰하려 하고, 실제 나타나는 현상을 관찰하기 어렵게 하여 실험 활동의 목표를 달성하기 어렵게 만든다.

본 연구의 결과를 통해서 과학 실험 활동에서 학생들이 상호작용하게 되는 실험 도구와 재료에 도구 어포던스가 존재하고 이 도구 어포던스가 학생들의 실험 행동에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 도구 어포던스는 부정적으로 영향을 미칠 가능성이 있으며, 나아가 실험활동에 실패하도록 이끌 수 있다. 도구 어포던스에 의해서 실패로 이끌어 지는 실험행동은 본 연구의 실험 매뉴얼 제작 단계에서는 전혀 예상하지 못했던 것이다. 도구 어포던스는 존재하고, 학생들이 정확하게 실험을 수행하게 하기 위해서는 도구 어포던스의 부정적 영향에 대한 대처가 필요하다.

Discussions

과학 실험 활동은 과학 개념의 학습뿐만 아니라 과학교육에서 생각하는 중요한 능력들의 발달을 목적으로 한다(Hofstein & Lunetta, 2004). 학생들로 하여금 실험활동을 정확하게 따라하게 하는 것은 실험활동의 목적을 달성하기 위해서 반드시 선행되어야 할 조건이다. 지금까지는 효과적인 실험활동을 위해서 학생들이 도구와 재료의 명칭을 익혀 실험활동의 실행에서 인지부하를 줄이고(Johnstone & Wham, 1982), 정확하고 친절하게 도구의 사용 방법을 전달하여 학생들이 혼란을 겪지 않도록 하는데 초점을 맞추었다(Lunetta et al., 2007). 그러나 본 연구 결과는 실험 도구 및 재료가 단순히 실험활동의 목표를 달성하는데 필요한 준비물로서 기능하는 것을 넘어서, 실험 활동 중 도구와의 상호작용에서 도구가 갖는 외형으로부터 지각되는 도구 어포던스가 있으며, 그 도구 어포던스는 절차의 표상을 구성하는 하나의 요소로서 기능한다는 것을 밝혔다.

학생들은 실험매뉴얼에 따라 교수자의 의도대로 정확하게 실행하는 것을 어려워한다(de Vries, 2006; Tiberghien et al., 2000). 여러 과학교육자들은 이러한 현상에 대해 실험활동에 대한 학생들의 경험이나 배경 지식의 부족을 주요 원인으로 꼽았다(Bunce, 2006; de Vries, 2006; Keys, 1998; Marzin & de Vries, 2008; Millar et al., 1994). 정확한 실험활동을 위한 실험 매뉴얼의 처리를 위해서는 일반적인 설명적 텍스트의 인지처리와는 다르게, 절차에 따른 실행으로 물체나 과정이 어떻게 작용하는지 예견할 수 있을 정도로 정교화 된 표상을 시도해야 한다(Morgado et al., 2014). 때문에 경험이나 배경지식의 부족은 잘못된 표상을 야기하여(Bunce, 2006), 잘못된 표상은 잘못된 실행으로 이끈다. 본 연구는 이러한 선행 연구의 결과에 추가하여, 잘못된 표상에는 학생들의 경험이나 배경지식의 부족뿐만 아니라 도구가 갖는 어포던스가 그 원인이 될 수 있다고 지적한다.

본 연구에서는 3가지의 도구 어포던스가 나타났으며, 이는 과제의 특성에 따른 것으로 보인다. 또한 도구 어포던스는 사용자의 필요나 도구의 외형을 지각하는 방식 등에 의해 개인 마다 다르게 인식되기도 한다(Osiurak & Badets, 2016). 따라서 과학 실험활동에 사용되는 모든 도구의 어포던스를 파악하여 잘못된 표상으로 이끌 가능성이 있는 도구 어포던스를 찾는 것은 어렵다. 이러한 도구 어포던스를 찾기 위해서는 본 연구에서 시도한 분석과정과 같이 실험 매뉴얼에서 의도하지 않은 실험 행동이 여러 사람에게서 동시에 높은 빈도로 나타날 때, 그 실험 행동의 원인에 관심을 갖고 파악을 시도할 수 있다.

이러한 논의를 바탕으로 학교 현장에서 학생들이 실험활동을 정확하게 따라하도록 안내하기 위한 방안을 제안할 수 있다. 첫째, 실험 활동 중 사용하는 실험 도구 및 재료의 도구 어포던스는 절차의 표상에 영향을 미칠 가능성이 있음을 알고, 둘째, 학생들에게서 의도하지 않은 실험 행동이 반복적으로 나타날 때 이를 인지해야 하며, 셋째, 그 실험 행동의 원인이 실험 상황 요소 중 학생의 경험이나 지식의 문제인지, 실험 매뉴얼의 문제인지, 도구 어포던스의 문제인지를 분석하여 원인을 파악하여 해결해야 한다.

Conclusions

본 연구는 과학실험에서 실험행동 중 실험 매뉴얼이 의도하지 않은 학생들의 잘못된 실험행동으로부터 도구 어포던스를 규명하였다. 본 연구의 결과로부터 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

첫째, 과학실험활동에서 나타나는 연구 참여자의 실험 행동을 목록화 할 수 있었다. 연구 참여자들에게서 절차별로 매뉴얼이 의도한 실험 행동과 의도하지 않은 실험 행동이 다양하게 나타나며, 이 행동은 경향성을 보이므로 목록화하여 구분할 수 있었다.

둘째, 각 절차별로 실험 행동이 나타난 연구 참여자 수를 조사하면 실험 매뉴얼이 의도하지 않은 실험 행동이 다수인 경우가 있으며, 이 의도하지 않은 행동이 다수인 경우로부터 실험행동에 영향을 미친 도구 어포던스를 추리할 수 있었다. “전자석을 만들어 전자석의 성질 알아보기” 과제에서 나타난 도구 어포던스는 “도구의 특정 위치에서 어떤 반응이 있을 것이다.”, “크기가 다른 도구를 함께 조작할 때, 작은 것을 조작하고 큰 것은 가만히 둔다.”, “겉보기에 위험한 부분은 만지지 않는다.”가 나타났다. 이러한 도구 어포던스는 잘못된 절차 표상을 하게하여 실험 활동에 부정적인 영향을 미칠 수 있다.

인간은 단순히 외부의 정보를 입력 받는 것이 아니라 도구를 어떤 특정한 형태로 지각하게 되어 그 도구의 사용 행동에 대한 특성을 스스로 구성한다. 이러한 인간의 본성적인 특성 때문에 과학실험활동의 도구 및 재료로부터 지각된 도구 어포던스는 절차의 표상을 구성하는데 영향을 미친다. 따라서 잘못된 절차의 표상으로 인한 부정적인 영향을 방지하기 위해서는 도구 어포던스에 대해 이해하고 실험 매뉴얼을 제작할 필요가 있다.

Acknowledgement

This work was supported by the Ministry of Education of the Republic of Korea and the National Research Foundation of Korea(NRF-2018S1A5B5A02034210).

References

- Bumbacher, E., Salehi, S., Wieman, C., & Blikstein, P. (2018). Tools for science inquiry learning: Tool affordances, experimentation strategies, and conceptual understanding. *Journal of Science Education and Technology*, 27, 215-235.
- Bunce D. M. (2006). A procedural problem in laboratory teaching: Experiment and explain, or vice-versa? *Journal of Chemical Education*, 83, 159-163.
- Cha, J. H., Son, T. K., & Lee, K. H. (2020). Analysis of the effects of changing novice teachers gaze through gaze image self-reflection in elementary mathematics class. *Brain, Digital, & Learning*, 10, 107-121.
- Davidowitz, B., & Rollnick, M. (2001). Effectiveness of flow diagrams as a strategy for learning in laboratories. *Australian Journal of Education in Chemistry*, 57, 18-24.
- de Vries, E. (2006). Students' construction of external representations in design-based learning situations. *Learning and Instruction*, 16, 213-227.
- Duggan, G. B., & Payne, S. J. (2001). Interleaving reading and acting while following procedural instructions. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 7, 297-307

- Duggan, S., Johnson, P., & Gott, R. (1996). A critical point in investigative work: Defining variables. *Journal of Research in Science Teaching*, 33, 461-474.
- Gibson, J. J. (1979). The theory of affordances. In R. Shaw & J. Bransford (Eds.), *Perceiving, Acting and Knowing: Toward an Ecological Psychology* (pp. 67-82). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Hofstein, A., & Lunetta, V. N. (2004). The laboratory in science education: Foundations for the twenty-first century. *Science Education*, 88, 28-54.
- Johnstone, A. H., & Wham, A. J. B. (1982). The demands of practical work. *Education in Chemistry*, 19, 71-73.
- Karelina, A., & Etkina, E. (2007). Acting like a physicist: Student approach study to experimental design. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 3, 020106.
- Keys, C. W. (1998). A study of grade six students generating questions and plans for open-ended science investigations. *Research in Science Education*, 28, 301-316.
- Khaparde, R. B. (2013). A novel approach to encourage students independent thinking in the physics laboratory. *arXiv: Physics Education*, 1311, 6255.
- Kim, H. J., Park, J. H., & Yi, D. J. (2013). The interaction between tool affordance and the sense of agency in the extrastriate body area. *Korean Journal of Cognitive Science*, 24, 49-69.
- Kim, S. U., & Yang, I. H. (2019). An analysis of dialogue in instructional reflection using gaze videos in teaching practice. *Brain, Digital, & Learning*, 9, 175-188.
- Knoblich, G., Öllinger, M., & Spivey, M. J. (2005). Tracking the eye to obtain insight into insight problem solving. In G. Underwood (Eds.), *Cognitive Processes in Eye Guidance* (pp. 355-375). Great Britain: Oxford University Press.
- Lunetta, V., Hofstein, A., & Clough, M. (2007). Learning and teaching in the school science laboratory: An analysis of research, theory, and practice. In S. Abell & N. Lederman (Eds.), *Handbook of Research on Science Education* (pp 393-441). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Marzin, P., & De Vries, E. (2008) How can we take into account student conceptions of the facial angle in a palaeontology laboratory work? In *International Conference on Learning Science* (p. 567). Utrecht, Netherlands, June, 23-28
- McGrenere, J. & Ho, W. (2000) Affordances: clarifying and evolving a concept, *Proceedings of Graphics Interface 2000*, 179-186.
- Millar, R., Lubben, F., Got, R., & Duggan, S. (1994). Investigating in the school science laboratory: Conceptual and procedural knowledge and their influence on performance. *Research Papers in Education*, 9, 207-248.
- Morgado, J., Otero, J., Vaz-Rebelo, P., Sanjosé, V., & Caldeira, H. (2014). Detection of explanation obstacles in scientific texts: The effect of an understanding task vs an experiment task. *Educational Studies*, 40, 164-173.
- Osiurak, F., & Badets, A. (2016). Tool use and affordance: Manipulation-based versus reasoning-based approaches. *Psychological Review*, 123, 534.
- Reason, J. T. (1990). *Human Error*. New York, NY: Cambridge University Press.
- Seagull, J. F., & Xiao, Y. (2001). Using eye-tracking video data to augment knowledge elicitation in cognitive task analysis. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 45th Annual Meeting* (pp. 400-403). Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society.
- Seo, Y. J., Kim, S. U., & Yang, I. H. (2019). An analysis of elementary school teachers beliefs about visual attention and gaze distributions in real science classes. *Brain, Digital, & Learning*, 9, 281-292.

- Tiberghien, A., Veillard, L., Le Maréchal, J. F., Buty, C., & Millar, R. (2001). An analysis of labwork tasks used in science teaching at upper secondary school and university levels in several european countries. *Science Education*, 85, 483-508.
- van Someren, M. W., Barnard, Y. F., & Sandberg, J. A. C. (1994). *The Think Aloud Method: A Practical Guide to Modeling Cognitive Processes*. London: Academic.

Author Information

Kim, Seong-Un: Korea National University of Education, Research Professor, First Author

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7455-6077>