

공학적 설계 과정에서 초등학생들이 마주하는 실패 경험과 이에 대한 대처 행동의 특징 탐색

심주연 · 박지선[†]

Exploring Types of Elementary School Students' Failures in an Engineering Design Process and How Students Cope with Them

Sim, Ju Yeon · Park, Jisun[†]

국문 초록

본 연구는 공학적 설계 과정에서 학생들이 경험하는 실패의 교육적 활용에 대한 시사점을 얻기 위하여, 학생들이 공학적 설계 과정을 수행하는 과정에서 어떤 실패를 경험하였으며, 이에 대해 어떻게 대처하는지를 살펴보았다. 이를 위하여 초등학교 4학년 ‘물의 여행’ 단원에서 ‘물 부족 현상을 해결하는 장치 설계하기’ 차시를 공학적 설계 과정에 맞추어 재구성하였으며, 4개의 학급에 재구성한 수업을 실시하였다. 7개의 초점 집단을 정하고, 초점 집단의 학생들을 관찰하고 면담하였다. 그 결과, 학생들이 경험한 실패는 크게 인지적 요인으로 인한 실패와 환경적 요인으로 인한 실패로 나눌 수 있었다. 인지적 요인들은 대체로 학생들이 통제 가능한 요인들이었던 반면, 환경적 요인은 통제할 수 없는 요인들이었다. 실패를 경험한 학생들은 대체로 실패의 원인에 대한 논의를 하지 않고, 이를 해결하고자 하는 노력이 즉흥적으로 이루어졌다. 또한 학생들은 실패를 회피하고자 테스트의 성공 기준을 완화하는 등의 모습을 보였다. 이러한 연구 결과를 바탕으로 학생들이 경험하는 실패를 건설적으로 활용하기 위해 어떠한 노력을 기울일 것인가에 대한 교육적 시사점을 논하였다.

주제어: 초등학생, 공학적 설계, 건설적 실패, 과학·공학 융합 수업

ABSTRACT

This study explored types of failure encountered by elementary school students during the engineering design process and how they coped with them. To achieve this goal, we developed and taught engineering design lessons on water shortages to four fourth-grade classes, observing and interviewing seven focus groups. Our analysis revealed that student failures can be categorized into two main types: those caused by cognitive factors and those influenced by environmental factors. While cognitive failures are typically within students' control, environmental factors are beyond their reach. Our findings also showed that students tended to avoid discussing the root causes of failure and instead relied on ad hoc solutions. Additionally, some students lowered their expectations for success to avoid failure. Based on our findings, we offer practical recommendations for educators to help students learn from their failures in a constructive manner.

Key words: elementary students, engineering design, constructive failures, science and engineering integrated education

이 논문은 2021년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 인문사회분야 신진연구자지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2021S 1A5A8066030)

이 논문은 심주연의 2023년도 석사학위논문의 데이터를 활용하여 재구성하였음
2023.10.17(접수), 2023.11.03(1심통과), 2023.11.13(2심통과), 2023.11.15(최종통과)
E-mail: jpark29@ewha.ac.kr(박지선)

I. 서 론

“Every new failure—no matter how seemingly benign—presents a further means toward a fuller understanding of how to achieve a fuller success” (Petroski, 2012, p. 45).

과학과 공학을 융합하여 교육하고자 하는 노력 및 시도는 계속해서 이루어지고 있으며, 가장 대표적으로는 STEAM 교육을 꼽을 수 있다. STEAM 교육은 과학, 기술, 공학, 인문·예술, 수학과 같은 다양한 분야의 융합적 내용을 창의적 설계와 감성적 체험으로 경험함으로써, 과학기술에 대한 흥미와 이해를 높이고 융합적 사고력(STEAM Literacy)과 문제해결력을 배양하는 것이라고 정의하고 있다(백운수 등, 2012). 즉, STEAM 교육을 이루고 있는 구성요소는 창의적 설계, 감성적 체험, 내용 융·통합이라고 보았다(박현주 등, 2012). 최근에는 융합교육종합계획(‘20~’24)의 발표와 함께 미래형 STEAM에서는 상황 관련 문제의 정의, 융합적 설계 및 문제해결, 자기주도 및 성찰이라는 구성요소가 중요하다고 보고 있다(강남화 등, 2023). 시간이 흐름에 따라 STEAM에서 강조되고 있는 점이 조금씩 변화하고 있으나, 변화하지 않고 강조되고 있는 것이 바로 문제를 해결하는 과정 즉 설계 과정에 대한 부분이다.

많은 STEAM 또는 STEM 연구들이 과학의 내용적인 측면과 공학적 문제해결의 과정을 접목하는 것이 중요하다고 보고 있다(남윤경 등, 2020; Cunningham, 2017). 예를 들어, Kennedy and Odell(2014)은 우수한 STEM 교육이 갖추어야 할 특징 중에 하나로 공학적 설계(Engineering design) 및 과학적/공학적 문제 해결을 통해 설계된 세계에 대한 실질적인 이해를 함양하는 것을 꼽았다. 또한 미국의 경우, 차세대 과학 교육과정(Next Generation of Science Standards, NGSS Lead States, 2013)에서 공학적 실천을 포함하여, 과학교육에서 공학적 설계 과정을 융합하여 다룰 것을 명시적으로 제시하고 있다. 우리나라 2015 개정 과학과 교육과정과 2022 개정 과학과 교육과정에서도 공학적 설계를 통해 창의적 산출물을 만드는 내용을 포함한 성취기준이 일부 제시되고 있다(교육부, 2015, 2022).

공학적 설계는 공학에서 공학자들이 활용하는 문제 해결의 과정을 의미하며, 대체로 문제 인식, 해결

책 설계, 최적화의 과정을 거쳐 문제를 해결하는 것을 의미한다(이동영과 남윤경, 2018). NGSS에서는 공학적 설계 과정을 크게 ‘공학 문제의 정의와 한계 상세화’, ‘가능한 해결책 설계’, ‘해결책의 최적화’로 제시하고 있으며, 남윤경 등(2020)은 ‘문제의 정의와 제한 조건의 확인’, ‘정보 수집(배경 연구)과 재료 탐색’, ‘해결책 설계’, ‘최적화’로 제시하고 있다. Cunningham(2017)은 공학적 설계 과정을 초등학생의 수준에 맞게 ‘질문하기’, ‘상상하기’, ‘계획하기’, ‘만들기’, ‘개선하기’ 다섯 단계로 제시하였다. 특히 공학적 설계가 다른 문제해결의 과정과 차별화되는 점은 최적화 과정, 즉 시제품을 시험하고, 이를 바탕으로 최적의 해결책을 선택하기 위해 모델이나 디자인을 수정하는 과정이 있다는 점이다. Cunningham and Kelly(2017)는 이와 같이 공학적 설계의 최적화 과정에서 본인의 모델이나 디자인을 개선하고 수정하는 과정에서 끈기 있게 실패로부터 배우기(persisting and learn from failure)와 같은 공학적 실천을 경험할 수 있다고 보았다.

공학은 초기의 해결법이 대부분 목표에 도달하지 못하기 때문에, 설계를 개선하기 위해서 실패를 이해하고 분석하고, 다시 재설계하는 반복적인 과정을 거치기 때문에(NASEM, 2020), 실패의 가치를 매우 높이 평가하는 학문 중 하나이다(Petroski, 2012). Petroski는 새로운 실패는 완전한 성공을 달성하는 방법을 이해하기 위한 수단이라고 하며, 공학에서의 실패의 가치를 매우 중요하게 언급하였다. 이때의 실패는 결과적인 실패만을 의미하지는 않는다. 예를 들어, 고체 콘크리트 실린더가 목표한 하중까지 버티는가를 시험하여 결과로서의 실패를 분석할 수도 있지만, 고체 콘크리트가 실린더가 깨질 때까지 정적 하중을 가하여 어디까지 버틸 수 있는지를 시험함으로써 과정으로서의 실패를 포함하기도 한다(Lottero & Parry, 2017b). 이처럼 공학에서 발생하는 실패는 공학의 전체 과정을 유도하고 더 나은 해결책으로 나아가는데 도움을 준다(한경희 등, 2014; Cunningham & Lachapelle, 2014; Frate, 2013; Johnson et al., 2021; Lottero & Parry, 2017a).

이렇게 공학 및 공학적 설계에서 실패는 필연적이고 중요한 과정으로 인식되는 것과는 대조적으로, 교육의 맥락에서는 실패가 대체로 부정적인 것으로 인식되어 학생들이 되도록 경험하지 않는 게 좋다고 여겨지는 경우가 많았다. 예를 들어, 실패의

경험은 자신감의 감소로 이어진다거나(Finn, 1979), 포부의 저하로 이어진다는 연구들이 있었다(Robbins & Harway, 1977). 그러나 실패라는 경험이 부정적인 결과만을 가져오는 것이 아니라, 실패를 어떻게 경험하고 대처하느냐에 따라 학생들에게 긍정적이고 학습에 도움이 되는 경험이 될 수 있다는 연구 결과들을 바탕으로(Clifford, 1984) 교육에서 실패를 긍정적으로 활용하고자 하는 움직임(e.g., 김종백, 2017; Lottero & Parry, 2017a)이 늘어났다.

Clifford(1984)는 실패를 “수행-목표 비율이 1보다 작은 경우나 목표가 그에 걸맞은 수행보다 높게 설정된 경우”로 정의하고, 건설적 실패(Constructive failure)에 대해 논하였다. Clifford가 말한 건설적 실패란 목표에 비해 수행의 정도가 작아 비록 목표에는 도달하지 못하였지만, 긍정적인 효과를 가져오는 실패이다. 긍정적인 효과에는 과제 수행력 향상의 인지적 측면뿐만 아니라 과제에 대한 끈기, 흥미 또는 선호도의 향상 등의 정서적 측면도 포함한다. Clifford는 학습을 위협하는 장본인은 실패나 실수가 아니라 부적절한 목표 설정, 비효과적인 목표 인식, 바람직하지 않은 수행 조건, 비효과적인 과제 평가 등이 비생산적인 실패에 대한 귀인이라 주장함으로써 실패의 건설적인 역할에 주목하였다.

공학에서 실패의 중요성이 매우 강조되는 것과 마찬가지로 공학교육에서도 실패의 경험을 매우 중요하게 생각한다(Cunningham & Kelly, 2017; Johnson et al., 2021). 앞서 언급하였듯이, Cunningham and Kelly (2017)는 공학 교육에서 다루어야 할 공학을 특징짓는 16가지의 인식적 실행을 제시하였으며, 그 중 끈기있게 실패로부터 배우는 것(persisting and learn from failure)도 포함되어 있다. 그러므로 학생들이 경험하게 되는 공학적 설계 과정은 단순하게 설계한 장치를 만드는 것에서 그치는 것이 아니라 개선의 과정을 거치는 것이 중요하며, 이 과정에서 끈기 있게 실패를 성공의 경험으로 이끄는 것이 중요하다(Cunningham, 2017). 학생들이 공학적 설계 과정에서 경험하는 실패의 중요성에 대한 논의는 지속적으로 이루어지고 있으나, 이를 경험적으로 살펴본 연구는 많지 않다. Johnson et al.(2021)은 초등학교 3~5학년의 공학 수업에서 나타난 학생들의 실패가 어디에서 나타났는지, 의도적으로 일어났는지, 무엇에 관해서 실패하였는지 등을 유형화 하여 살펴보고, 공학적 설계 과정에서 학생들이 마주하는 실패들이 교

육적으로 활용될 수 있음을 확인하였다. 본 연구에서는 공학적 설계 과정에서 학생들이 마주하는 실패의 경험들을 건설적인 실패 경험으로 이끌기 위해 어떠한 노력을 기울여야 하는지에 대한 시사점을 얻기 위해 학생들이 마주하는 실패 경험을 심층적으로 분석하고자 하였다. 초등학생들이 어떠한 실패를 마주하며, 왜 그러한 실패를 마주하게 되었는지, 그리고 그 실패 경험에 대해 어떻게 대처하였는지를 살펴보았다.

II. 연구 방법

1. 연구 참여자

본 연구는 서울에 위치한 공립초등학교의 4학년 4개 학급의 학생들을 대상으로 이루어졌다. 이 초등학교의 4개 학급에서 연구 참여에 동의한 학생들은 모두 28명이었으며, 이 학생들로 초점 모둠을 구성하였다. Table 1과 같이 (가)학급에 1개 모둠, (나)학급에 2개 모둠, (다)학급에 2개 모둠, (라)학급에 2개 모둠이 연구에 참여하였다.

2. 공학적 설계 수업의 과정

2015 개정 초등학교 3~4학년 과학과 교육과정 중 ‘물의 여행’단원에서는 ‘[4과 17-02] 물의 중요성을 알고 물 부족 현상을 해결하기 위해 창의적 방법을 활용한 사례를 조사할 수 있다.’라는 성취기준이 제시되어 있으며, 성취기준 해설에서는 물 부족 현상을 해결하기 위한 과학·기술·공학적 설계의 예를 찾아봄으로써 적용된 과학적 원리를 탐색하도록 안내하고 있다. 이에 해당 성취기준을 반영한 국정 과학교과서에서는 ‘물의 순환을 이용해 물 모

Table 1. Overview of the research participants

학급	초점 모둠 이름	남자(명)	여자(명)	합계(명)
가	B모둠	2	2	4
	E모둠	1	3	4
나	A모둠	2	2	4
	C모둠	2	2	4
다	G모둠	2	2	4
	D모둠	2	2	4
라	D모둠	2	2	4
	F모둠	2	2	4

은 장치 설계하기' 차시를 제시하고 있다.

이러한 교육과정의 의도와 성취기준을 반영하여, 본 연구에서는 연구참여자가 속한 초등학교에 근무하는 교사와 연구진이 함께 4학년 물의 여행 단원에서 '물 부족 현상을 해결하는 장치 설계하기' 차시를 공학적 설계 과정에 맞추어 재구성하였다. 본 차시의 수업의 재구성은 Cunningham(2017)이 제시한 초등학생을 위한 공학적 설계 과정 5단계에 맞추어 이루어졌으며, Table 2와 같이 재구성되었다. 질문하기(Ask) 단계는 문제를 인식하는 단계로 본 수업에서는 물 부족 지역의 문제 상황을 제시하고, 물 부족 현상을 해결하는 장치의 필요성을 제시하였다. 이에 대한 예시로 와카워터(Warka Water)장치를 소개하며 '물 모으는 장치' 설계라는 문제 상황을 제시하였다. 상상하기(Imagine)단계에서는 물 모으는 장치를 설계하는 다양한 아이디어를 제시하고, 모둠별로 한 가지 아이디어를 선택하도록 하였다. 계획하기(Plan) 단계에서는 모둠에서 정한 물 모으는 장치의 설계도를 그림과 글로 표현하도록 하였으며, 만들기(Create) 단계에서는 디자인한 설계도를 바탕으로 직접 제작하도록 하였다. 이후 만든 장치의 성능을 시험해보고, 제작한 장치를 개선해보는 개선하기(Improve) 단계를 거치도록 하였다. 이렇게 재구성된 공학적 설계 과정은 Table 2과 같이 1~4차시에 걸쳐 수업이 이

루어졌으며, 1~2차시는 하루에 총 80분의 연속된 수업으로 이루어졌으며, 3~4차시는 다른 날 총 80분의 연속된 수업으로 실시하였다.

3. 연구 자료 수집 및 분석

본 연구의 자료 수집은 초등학교 4학년 '물의 여행' 단원에서 '물 부족 현상을 해결하는 장치 설계하기' 차시를 공학적 설계 과정에 맞추어 재구성한 수업에서 이루어졌다. 연구진과 함께 수업을 재구성한 초등학교 교사 1인이 4개의 학급에서 수업을 진행하였으며, 연구자들은 재구성한 수업을 관찰하며 관찰 노트를 작성하였다. 초점 집단이 수업에 참여하는 모습과 담화를 녹화 및 녹음하였으며, 수업을 모두 마친 뒤 초점 모둠 학생들을 대상으로 면담을 진행하였다. 면담은 초점 모둠별로 약 1시간 정도 진행되었으며, 모두 녹음되었다. 이렇게 수집된 수업 중 학생 담화 및 면담 내용은 전사하였다. 또한 학생들이 수업 중 작성한 설계도 및 발표자료, 제출한 산출물 등은 사진으로 촬영되어 분석 자료로 활용하였다.

본 연구의 초점은 공학적 설계 과정에서 학생들이 경험한 실패에 있으므로, 수업 중 학생 담화 전사 자료와 면담 전사 자료에서 학생들이 실패를 마주한 에피소드를 추출하는 분석의 과정이 먼저 수

Table 2. Lesson activities planned according to Cunningham's(2017) engineering design process

차시	학습목표	'물 부족 현상 해결하는 장치 설계하기'에 맞추어 재구성한 활동	Cunningham(2017)의 공학적 설계 과정
1~2	물의 순환을 이용하여 물 모으는 장치를 설계할 수 있다.	<ul style="list-style-type: none"> • 물의 순환 과정을 떠올리며 전시 학습 상기하기 • 에티오피아의 '아이샤'라는 인물이 물 부족으로 겪는 어려움을 소개하여 동기 유발하기 • 공학적 설계 과제인 '에티오피아에 물 모으는 장치를 만드는 프로젝트' 제시하기 	질문하기(Ask)
		<ul style="list-style-type: none"> • 태블릿 PC를 활용하여 각자 물 모으는 장치 아이디어 떠올리고 모둠원들과 공유하기 • 모둠 내에서 최선의 아이디어 선택하기 	상상하기(Imagine)
		<ul style="list-style-type: none"> • 모둠별로 물 모으는 장치 설계도 그리기 • '물 남고 물 가기'를 활용하여 모둠에서 완성한 설계도를 다른 모둠에게 발표하고 피드백 주고받기 • 다른 모둠에게 받은 피드백을 반영하여 모둠별로 설계도를 수정·보완하기 	계획하기(Plan)
3~4	물 모으는 장치를 만들어 테스트해보고 개선할 수 있다.	<ul style="list-style-type: none"> • 교사가 만든 와카워터를 보고 개선할 점을 찾아보며 동기 유발하기 • 모둠별로 물 모으는 장치를 제작하기 • 모둠별로 만든 물 모으는 장치 테스트하기 	만들기(Create)
		<ul style="list-style-type: none"> • 각 모둠의 테스트 결과를 다른 모둠과 공유하여 개선점에 도출에 대한 아이디어 얻기 • 모둠별로 물 모으는 장치 개선하기 • 모둠별로 완성한 물 모으는 장치를 '물 남고 물 가기'로 다른 모둠에게 발표하기 • 물 모으는 장치 만들기 프로젝트를 되돌아보기 	개선하기(Improve)

행되었다. 이 때 학생들이 경험한 공학적 설계 과정에서의 실패는 Frate(2013)가 정의한 ‘공학적 과정, 제품, 서비스 또는 시스템이 제품을 개발한 디자인 팀의 목적에 부합하지 못하는 상태’를 기준으로 분석하였다. 즉, 학생들의 담화에서 제작한 산출물에 대해 불만족한 발화가 나타났을 때 실패를 경험하였다고 판단하였다. 분석의 신빙성(credibility)의 확보를 위해 외부 과학교육전문가 1인과 연구자 1인이 각자 학생들의 수업 중 담화를 전사한 자료에서 실패를 마주한 에피소드를 추출하는 분석을 각자 수행하였다. 1개 초점 모둠의 2개 차시 분량의 수업 담화 전사 자료를 각자 분석하였으며, 그 결과 94%의 분석 일치도가 나왔다. 일치하지 않은 부분에 대해서는 연구자와 외부 과학교육전문가가 함께 논의하여 합의에 도달하였으며, 이후 나머지 자료는 연구자 1인이 분석하였다.

이렇게 추출된 실패 에피소드에서 학생들이 마주한 실패 경험의 원인이 무엇인지, 이에 대해 어떻게 대처하였는지를 살펴보기 위해 학생들의 담화 내용에 귀납적으로 코드를 부여하는 개방 코딩을 실시하고, 유사한 속성을 가진 코드끼리 범주화하였다. 연구자 간 논의를 거쳐 개방 코딩한 내용을 상위 범주로 묶고, 상위 범주의 이름을 정하였다. 이후로도 지속적인 논의를 거쳐 상위 범주명을 수정하기도 하고, 수정된 상위 범주명에 따라 다시 전사본을 살펴보고 재분석하는 과정을 거쳤다. 이러한 과정을 통해 분석의 신빙성을 확보하고자 노력하였다.

학생들의 실패 경험에 대한 원인은 재료 특성에 대한 이해 부족, 과학적 원리에 대한 이해 부족, 탐구 능력의 부족, 만들기 기술의 부족, 활동 시간 부족, 주어진 재료의 한계, 부주의에 의한 실수로 범주화 할 수 있었다. 이 하위 범주 중에 재료 특성 이해에 부족과 과학적 원리 이해 부족, 탐구 능력의 부족, 만들기 기술의 부족에 대한 범주는 학생의 내부 요인과 관련된 내용이었으며, 활동 시간 부족 및 주어진 재료의 한계는 학생 외부 요인과 관련된 내용이었다. 크게 이 둘을 구분하고, 각 내용을 다시 중위 범주로 묶은 결과, 재료 특성 이해 부족과 과학적 원리 이해 부족은 학생의 지식과 관련되어 있었으며, 탐구 능력과 만들기 기술 부족은 학생의 기능과 관련이 있었다. 이처럼 지식이나 기능과 관련이 있었던 실패 원인의 요인을 인지적 요

인이라고 명명하였으며, 수업 시간이나 수업 재료와 같은 학생 외부 환경과 관련된 요인을 환경적 요인이라고 명명하였다.

학생들이 경험한 실패에 대한 대처의 특징을 살펴보기 위하여, 학생들이 실패를 경험하였을 때 원인에 대해서 논의를 하였는지의 유무를 분석하고, 어떤 원인에 대해서 논의하였는지 개방코딩을 실시하였다. 또한 개선의 시도를 하였는지, 어떤 개선 시도를 하였는지를 개방코딩을 한 뒤, 이것이 논의한 원인과 연관이 되는지를 분석하였다.

III. 연구 결과

1. 인지적 요인과 환경적 요인으로 경험하게 된 실패

총 20개의 실패 에피소드에서 실패 원인을 분석한 결과, 크게 인지적 요인으로 인한 실패 15개와 환경적 요인으로 인한 실패 4개로 나눌 수 있었다. 인지적 요인에는 재료 특성 이해 부족, 과학적 원리 이해 부족이라는 지식과 관련된 요인들이 있었고, 탐구능력 부족과 만들기 능력 부족의 기능과 관련된 요인들이 있었다. 환경적 요인에는 주어진 재료의 한계라는 수업 재료에 대한 것과 수업 시간에 대한 요인이 있었다. 나머지 1개 에피소드는 실수로 흙탕물을 엮질러 테스트를 실패했기 때문에 기타로 분류하였다. 주요 실패 원인의 범주 및 에피소드 개수를 Table 3와 같이 정리하였다.

1) 인지적 요인으로 경험하게 된 실패

학생들이 마주하였던 실패의 원인 중 인지적 요인으로는 재료 특성에 대한 이해 부족, 탐구 능력의 부족, 과학적 원리에 대한 이해 부족, 만들기 기술의 부족을 찾아볼 수 있었다.

먼저 재료 특성에 대한 이해 부족으로 인해 학생들이 실패를 경험하게 된 사례에서는 재료의 특성을 장치의 기능과 연결 짓지 못하거나, 장치의 외형과 연결 짓지 못하는 모습을 관찰할 수 있었다. 예를 들어, C 모둠의 사례는 재료의 특성을 장치의 기능뿐 아니라 외형에도 연결 짓지 못하는 모습을 모두 보여주고 있다. C 모둠은 Fig. 1의 좌측 설계도에서 볼 수 있듯, 응결을 핵심 원리로 하여 장치를 설계하고 제작하였다. 장치 안으로 들어온 물이

Table 3. Categories of major causes of failures and the number of episodes

상위 범주	중위 범주	하위 범주	에피소드 개수(개)
인지적 요인	지식	재료 특성 이해 부족	9
		과학적 원리 이해 부족	2
	기능	탐구 능력 부족	3
		만들기 기술 부족	1
환경적 요인	수업 시간	활동 시간 부족	2
	수업 재료	주어진 재료의 한계	2
		기타	실수
			15
			20
			4
			1

햇빛을 받아 증발하게 되고, 증발한 수증기가 장치 표면에 응결되어 경사진 면을 따라 호스로 빠져나가도록 설계하였다. 계획한 설계도대로 제작하여 테스트를 진행하였으나, 천에 물이 스며들어 응결이 제대로 이루어지지 않아 기대하는 결과를 얻지 못하였다. 즉, 물에 잘 젖는 특성을 가진 천을 사용하여 장치의 응결 기능이 제대로 작동하지 않는 것을 경험하게 되었다.

이후, C 모둠은 천을 사용하였기 때문에 장치의 외형을 유지하는 데에도 어려움을 겪는 모습이 관찰되었다. C 모둠은 Fig. 1의 가운데 사진처럼 원래 비닐로 장치를 만들려고 설계도를 그렸지만 제작할 때는 오른쪽 사진처럼 비닐이 아닌 천으로 장치를 제작하였다. C 모둠과의 면담에서 재료를 변경한 이유에 대해 나눈 대화 내용은 다음과 같다.

연구자: 그 [생각한 재료들로 모양이 잘 만들어질지] 고민을 한 다음에 어떻게 했?
 학생 A: 비닐 말고 천으로

연구자: 비닐 말고 천으로 해보자? 왜 그렇게 생각을 바꾸게 된 거야?

학생 A: 비닐보다 천이 모양 잡기 쉬울 것 같아서요.
 ... (중략) ...

연구자: 왜 철사를 사용하게 됐어?

학생 B: 좀 더 모양을 잡기 위해서

연구자: 원래는 어땠는데 원래 설계도에서는?

학생 B: 원래 설계도에서는 그냥 비닐로만 모양을 잡으려고 그랬는데 이 천도 비닐도 안 돼서 철사하고 애를 사용했어요.

- C모둠 면담 중

위 면담에서 알 수 있듯이 C 모둠은 Fig. 1의 중간 그림과 같이 장치를 비닐로 만들려고 하였으나, 산 모양이 잘 구현될 것 같지 않아 비닐 대신 천으로 장치를 만들었으며, 모양을 잡기 위해서 Fig. 1의 오른쪽 사진과 같이 철사를 사용하였다. 장치의 외형 유지를 위해 비닐보다 비교적 뻣뻣한 천을 사용했다는 점과 철사를 추가했다는 점에서 C 모둠이 재료 특성을 고려했다고 볼 수 있지만, 주된 재

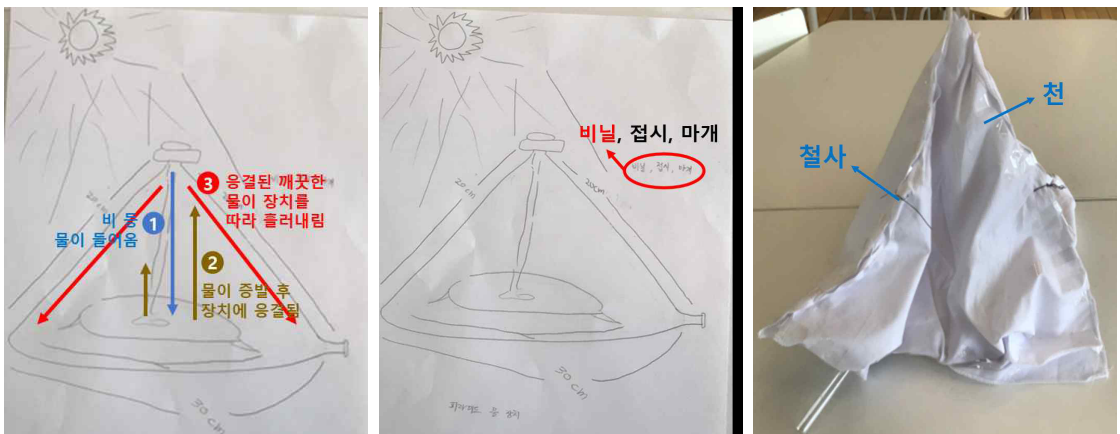


Fig. 1. Group C's design (left and middle) and their water collecting device (right)

료인 천이 모양 유지에 최적화된 재료가 아니라는 점에서 재료 특성을 충분히 이해했다고 보기는 어려웠다.

학생들은 탐구 능력의 부족으로 공학적 설계 과정에서 실패를 마주하기도 하였다. 예를 들어 본 연구의 A 모둠의 학생들은 거름의 원리를 이용하여 물 모으는 장치를 만들었으며, 이 장치의 성능을 테스트하는 과정에서 천의 개수와 흙탕물의 더러운 정도를 동시에 변화시켜 테스트를 진행하였다. Fig. 2에서 볼 수 있듯, 학생들은 꽃다발을 만드는데 쓰이는 망과 천을 이용하여 장치를 만들고 테스트하였으나, 그 결과가 만족스럽지 않아 천을 한 장 더 추가하여 다시 테스트를 진행하였다. 천을 한 장 더 추가하여 이 장치의 성능이 더 향상되었는지를 살펴보기 위해서는 기존에 사용했던 흙탕물로 사용해야 그 정도를 비교할 수 있다. 그러나 이 학생들은 새롭게 흙탕물을 만들어왔고, 그 흙탕물은 이전에 사용한 것보다 더 많은 흙이 포함되어 있었다. 즉, 학생들은 더러운 정도가 모두 다른 여러 개의 흙탕물을 준비하였고, 천의 개수가 증가하였음에도 이전보다 더 거름이 잘 안 되는 실패를 마주하게 되었다.

이외에도 과학적 원리에 대한 이해가 부족하여 실패를 마주하는 사례도 찾아볼 수 있었다. 본 연구에서 2개의 사례가 이에 해당하였는데, 하나는 학생들의 대안 개념으로 인한 것이었으며, 다른 하나는 학생들이 아직 교육과정에서 배우지 않은 과학적 원리와 관련되어 있어 문제를 해결하지 못하

고 실패를 마주하는 사례였다. D 모둠은 식물이 더러운 물을 먹고 깨끗한 물을 뱉는다는 대안 개념을 공학적 설계 과정에 적용하고자 하였다. 아래의 면담내용을 통해 D 모둠의 학생 A는 식물이 더러운 물을 먹고 깨끗한 물을 뱉는다고 생각하였으며, 학생 A의 아이디어를 듣고, 학생 C가 화원에서 물을 정화하는 기능이 있는 식물을 구매하였음을 알 수 있다.

연구자: 너희들이 설계도를 바탕으로 만들고 개선해 봤잖아. 그때 생각처럼 잘 안되거나 어려웠던 게 있었어?

학생 A: 일단은 이 식물을 가지고 하나를 만들었어요. 식물을 흙탕물에 이렇게 넣었어요. 근데, '야, 잘된다!' 라고 생각했는데 밑을 보니깐 (흙이) 다 가라앉아 있었어요.

'깨끗한 물이 만들어진 거구나!'라고 생각을 했어요. 그래서 조금 진짜 잘 된다고 (식물을 사온) 학생 C를 칭찬해 줬는데, 갑자기 밑에 흙이 가라앉은 걸 봐서 좀 짜증이 났어요. 학생 C가 사기를 당한 것 같았어요. 물을 정화한다고 사왔는데요, 흙은 그냥 밑으로 가라앉고 그냥 일반 식물이랑 다름이 없고...

(학생 C를 바라보며) 진짜로 그걸 물을 정화 시키는 식물이야? 사기를 당했다고 생각을 했어요.

... (중략) ...

학생 A: 식물이 물을 먹잖아요. 근데 이 식물이 또 뱉으니까 그래서 정화해서 나올까도 되게 신박했던 했고...

- D 모둠 면담 중 -

실제로 수질 정화를 목적으로 식물을 활용하는 경우가 있으나, 이는 유기물의 산화, 영양염류의 흡



Fig. 2. Group A's conducting a test without controlling variables

수 등이 발생하여 수질이 정화되는 것으로 미시적인 차원의 수질 정화에 해당한다(변명섭, 2008). D 모둠의 학생들은 실제 테스트를 통해 식물이 흙탕물의 흙을 물리적으로 걸러주는 역할을 하지는 못한다는 것을 확인한 뒤 산출물을 수정 설계 하는 과정을 거치게 되었다.

과학적 원리에 대한 부족한 이해 중 학생들이 아직 배우지 않은 과학적 원리가 적용되어 문제를 해결하지 못하고 실패를 마주하게 되는 사례도 관찰되었다. B 모둠의 학생들은 더러운 물이 총 3번 걸러지도록 하기 위해 Fig 3의 왼쪽 사진과 같이 양파망 1과 천, 양파망 2를 차례대로 배치하여 제작하였다. 이후 흙탕물을 부어 테스트를 진행하였으나 Fig. 3의 오른쪽 사진과 같이 양파망 1에서 흙탕물이 밀려 빠지지 않아 장치가 실패하였다고 생각하였다.

이처럼 물이 양파망 구멍을 빠져나가지 않는 현상은 표면장력으로 설명할 수 있다. 학생들은 이 현상의 원인을 양파망의 소재 또는 구멍의 크기, 테스트에 사용한 흙탕물의 모래 양들로 추론하는 모습을 보였지만 표면장력에 대해서는 생각하지 못하였다. 물론 표면장력은 초등학교 4학년 학생들이 추론하기 어려운 과학적 원리이며, 초등학교 교육과정 내에서 다루고 있지 않은 과학 개념이기도 하다. 그러므로 이 에피소드의 경우, 재료 특성에 대한 이해 부족이라기보다는 테스트하는 과정에서 일어난 현상에 대한 과학적 원리의 이해 부족이라고 코딩되었다.

2) 환경적 요인으로 경험하게 된 실패

공학적 설계 과정에서 학생들은 위에서 언급한 인지적 요인 외에도 활동 시간의 부족, 주어진 재료의 한계와 같은 환경적 요인에 의하여 실패를 마주하기도 하였다. 총 20개의 실패 에피소드 중 활동 시간의 부족으로 인한 실패 사례는 2개였으며, 주어진 재료의 한계로 인한 실패 사례도 2개였다.

수업 중 시간 부족으로 인한 테스트 중단으로 테스트 결과를 확인하지 못해 제작한 장치가 목적에 부합하는지, 즉 학생들이 성공인지 실패인지를 판단할 수 없는 경우가 있었다. 이러한 경우에도 본 연구에서는 장치가 잘 작동하는 것을 확인하지 못하였기 때문에 실패를 경험하였다고 코딩하였으며, 그 원인을 시간의 부족이라고 분석하였다. C 모둠의 경우, 위에서 인지적 요인 중 재료의 특성 이해 부족으로 인해 한 차례 실패를 경험하였으며, 이 응결 장치를 햇빛이 잘 드는 곳에서 다시 테스트하는 시도를 하였다. 창가에 장치를 올려두고 테스트 결과를 기다리던 중에 교사는 시간이 끝났음을 알렸다. 아래의 담화와 같이 C 모둠의 학생들은 시간 부족으로 테스트 결과를 확인하지 못한 채 마무리하며 ‘망했다.’, ‘포기’하자는 단어 등을 사용하였는데, 이를 통해 학생들이 본인들의 과정이 실패라고 생각하고 있음을 알 수 있었다.

교사: 자, 제자리. 마무리할게요. (만든 산출물을) 저기 뒤에 올려주세요.

학생 B: 그냥 해. 아, 망했다 망했어.



Fig. 3. Group B's initial water collecting device (left) and test results (right)

학생 A: 포기해 그냥.
 학생 B: 어차피 되돌릴 수 없어. 시간이 없어.
 학생 A: 아, 진짜 고생하면서 만들었는데...
 - C 모둠의 3-4차시 수업 담화 중 -

학생 D: 자리에 앉자.
 학생 B: 봐봐. 근데 흠이야. 물이 흠이야.
 학생 A: 어차피 애들 다 그래. 깔끔하게 투명색이 되겠냐 어떻게?
 학생 C: 똥색 같은데.
 - B 모둠의 3-4차시 수업 담화 중 -

이 외에도 주어진 재료의 한계로 실패를 경험한 사례도 있었다. 수업에서 교사는 학생들이 장치를 고안할 때 필요한 다양한 재료를 준비하여 주었으며, 거름의 원리를 이용한 장치에서 활용할 만한 재료로는 양파망, 탈지면, 천이 있었다. B 모둠은 앞서 양파망과 천으로 거름의 원리를 이용하여 장치를 만들었으나 제대로 흡탕물이 걸러지지 않자, 탈지면을 추가해 Fig. 4과 같이 개선해서 다시 장치를 만들었다.

학생들은 교사가 준비해준 재료를 비교하여 재료 중 가장 구멍이 촘촘한 탈지면을 선택하여 장치를 만들었으나, 탈지면으로도 걸러지기 어려운 만큼 입자가 작은 흠이 있어 학생들은 본인들이 만족할 만큼 깨끗하게 걸러진 물을 얻지는 못하였다.

학생 A: 내려간다. 내려간다.
 학생 B: 많이 부어. 많이 부어.
 학생 C: 오 우와
 학생 A: 깨끗해. 깨끗해. 깨끗해. 깨끗해.
 학생 C: 어디 봐서?
 학생 A: 더러운 물 여기(탈지면 위) 있잖아.

탈지면을 활용하여 만든 장치를 통해 흡탕물을 거른 결과, 연한 갈색을 띠는 물을 거름을 통해 얻을 수 있었다. 그러나 B 모둠의 학생 중에는 이 정도면 깨끗한 물을 얻었다고 생각하는 학생도 있는 반면, 여전히 만족스럽게 깨끗한 물을 얻지 못하였다고 생각하는 학생도 있었다. 즉, 교사가 마련해준 재료로 학생들은 최선을 결과를 얻기는 하였으나, 학생들의 기준에는 못 미쳐 만들었던 장치가 성공적이라고 생각하지는 않았음을 알 수 있다.

2. 공학적 설계 과정에서 마주한 실패에 대한 학생 대처의 특징

학생들은 공학적 설계 과정에서 다양한 실패를 경험하였으며, 이에 대해 다양한 반응을 보여주었다. 본 연구에서는 학생들이 이러한 실패의 경험에서 원인에 대한 논의를 하였는지, 개선 시도를 하였는지를 분석한 결과 Table 4와 같았다. 이와 더불어 학생들이 어떻게 원인에 대한 논의와 개선 시도를 하였는지 살펴본 결과, 학생들은 실패의 원인을 분석하려는 논의가 부족하였으며 이를 바탕으로 계획적으로 개선하려는 모습을 보기 어려웠다. 또한 실패를 회피하려는 모습을 보여주시기도 하였다.

1) 실패의 원인을 분석하려는 논의의 부족과 즉흥적인 개선 시도

학생들이 실패를 마주한 20개의 에피소드를 분석한 결과, 16개의 에피소드에서 학생들은 실패의 원인에 대한 논의가 없었으며 그 중 일부는 계획 없이 즉흥적으로 개선을 시도하였다. 4개의 에피소



Fig. 4. Group B's final water collecting device using condensed cotton balls

Table 4. Types of how students deal with failures and the number of episodes

실패 원인 논의 여부	개선 시도 여부	에피소드 개수(개)	
O	O	4	4
O	X	0	
X	O	8	16
X	X	8	

드에서는 실패의 원인에 대한 논의를 거쳐 이에 따른 대처를 하는 모습이 보였다. 즉, 대다수의 학생들이 실패를 마주하였으나, 왜 그러한지에 대한 논의를 하지 않고 다른 대안들을 제안하는 모습을 보였다. 예를 들어, D 모둠의 사례에서 학생들은 식물이 흙탕물을 정화할 것이라고 생각하고 장치를 만들었으나, 물은 전혀 정화되지 않았다. 이 장치의 문제점이 무엇인지에 대해 전혀 논의하지 않은 채, 아래의 담화와 같이 새로운 방식으로 다시 만들자고 제안하였다.

학생 B: 물 정화가 안 돼. 그냥 이 구정물 먹으라고 해야 돼. 너무 힘든데.

학생 D: 우리는 별 다섯 개 중에 우리는 한 개 아니야? 한 개.

학생 B: 0개 아니야? 0개.

학생 A: 아, 망했어.

(생략)

학생 B: 아, 그냥 양파망이라서 해서 와카워터처럼 만들래?

학생 D: 아니, 옆구리를 칼로 잘라서 짜서 저렇게 만드는 게 아닐까?

학생 B: 옆구리를 뚫으라고?

학생 D: 응, 재네 것처럼.

(생략)

학생 B: 아, 그냥 새 걸로 만들자.

학생 A: 다시 만들어.

학생 A: 와카워터로 그냥 만들어 버리는 거지.

학생 C: 애를 이렇게 잘라서 여기 안에 종이컵을 넣고 그냥 이런 게 낫겠다.

- D 모둠의 3-4차시 수업 담화 중 -

위와 같이 실패의 원인에 대한 논의가 전혀 없는 경우가 대다수였지만, 논의가 있다 하더라도 논의가 이루어진 시간이 대부분 매우 짧았다. 실패의 원인에 대한 논의가 있었던 3개의 에피소드에서 논의가 이루어진 시간은 각각 16초, 45초, 5분 12초로 나타났다. 16초와 45초의 경우는 한 학생이 원인에 대한 본인의 생각을 제시하면 다른 학생들이 수긍하는 담화의 패턴이 나타났다. 5분 12초로 비교적 길게 논의가 있었던 모둠은 B 모둠이었다. B 모둠은 거름의 원리를 이용하여 Fig 2와 같이 양파망과 천을 이용한 장치를 만들었다. 양파망에서 물이 아래로 내려가지 않자, 왜 그런지에 대한 각자의 생각을 나누는 장면이 관찰되었다.

학생 B: 아, 이거 위에 이런 거라도 하나 이렇게 붙여야 될 것 같은데. 어? 내려간다.

학생 D: 방수인가 봐.

학생 B: 연우야, 이거 물이... 방수인가 봐.

학생 A: 방수인가봐. 웬일이야. 모래가 좀 들어가야 되나?

학생 C: 이렇게?

학생 A: 모래가 좀 들어가야 되나?

학생 C: 물이 너무 많나?

학생 A: 망이 너무 조그맣서 그런가?

학생 C: 이거 망...

학생 D: 뒤에 망 뭐야?

학생 A: 손을 닦아. 이거 왜 안 내려가?

학생 B: 천 때문인가 봐.

학생 C: 손?

학생 B: 천...천이 안내려가. 테이프를 붙여야 될 것 같아.

학생 C: 아, 설마 휴지로 했어야 했나? 잠깐. 휴지는 쉽게 젖잖아. 젖으면 밑으로 내려가잖아.

- B 모둠의 3-4차시 수업 담화 중 -

B 모둠의 학생들은 물이 밑으로 잘 내려가지 않는 이유에 대해서 양파망에 방수 기능이 있는 것 같다거나, 흙탕물 속의 모래 양이 적다거나, 물의 양이 적다거나, 양파망의 크기가 작거나, 천의 흡수성이 작다는 등의 다양한 생각들을 나누는 것을 볼 수 있다. 학생들이 마주한 실패의 원인에 대해 다양하게 탐색하였다는 점에서는 의미가 있었으나, 이후에 이러한 논의가 발전하여 하나의 의견으로 수렴되지는 않았다. B모둠은 이후 정교한 논의 대신 한 모둠원이 ‘그냥 양파망을 떼자’라고 던진 제안을 즉흥적으로 실행에 옮기는 모습을 보였다. 결과적으로 문제가 되었던 양파망을 제거함으로써 흙탕물이 밑으로 내려가지 않았던 문제는 해결되었으나 학생들은 끝까지 실패의 원인을 제대로 파악하지 못한 채로 다음 테스트로 넘어갔다.

2) 실패를 회피하려는 경향

실패를 마주하였지만 원인에 대해 논의하지 않고 즉흥적인 대처를 했던 16개의 에피소드 중에서 7개의 에피소드에서 학생들이 실패를 회피하는 대처를 보여주었다. 예를 들어, 아래의 A 모둠에서는 거름의 원리를 이용한 장치가 잘 작동하지 않자, 아래 담화에서 나타나듯 흙탕물을 연하게 타서 다시 테스트 하려는 모습을 보였다. 즉, 장치를 개선하기보다는 실험 조건을 변경하여 실패를 마주하지 않으려

는 모습을 보여주었다. 이후 A 모둠 학생들은 다시 한 번 테스트를 진행했고, 테스트 결과 여전히 더러운 물이 나왔지만 거르기 전 흙탕물과 비교하며 ‘조금은 연해졌으니 이 정도면 된 거’라며 테스트를 마무리하는 모습을 보였다.

학생 C: (장치에 흙탕물을 부으며)야, 이제 냅뒤, 냅뒤, 냅뒤.
학생 B: 아, 더러운데?
학생 D: 잠깐만, 달라진 거야? 약간 원래 색깔도?
학생 C: 야, 그러면,
학생 D: 약간, 약간 사라졌는데.
학생 C: 야, 이거(흙탕물) 연하게 타올게, 이거.

- A 모둠의 3-4차시 수업 담화 중 -

실패를 회피하려는 대처는 D 모둠의 사례에서도 살펴볼 수 있었다. D 모둠은 처음에는 식물을 활용한 장치를 만들었다가, 거름의 원리를 활용한 장치를 새롭게 만들었던 모둠이었다. 거름의 원리를 활용한 장치를 만들고 테스트한 결과, 모둠 내에서 장치의 성능과 관련하여 아래와 같이 의견이 갈리는 상황을 마주하였다.

학생 D: 못 보겠다. 된 게 아닌 것 같아.
학생 A: 깨끗한 물 나온 게 아니라.
학생 C: 이렇게 하자. 아니, 이 정도면 깨끗한 거야. 선생님한테 얘기해도 돼. 선생님한테 얘기해봐.
학생 B: 야, 왜 그래.

- D 모둠의 3-4차시 수업 담화 중 -

학생 C는 ‘이 정도면 깨끗한 거야.’라고 하며 다른 학생들에게 더 개선할 필요가 없고, 성공했다고 교사에게 말해도 된다고 주장하였다. 위 담화 이후에도 학생 C의 실패가 아니라는 주장이 계속되자, 다른 학생들 사이에서도 테스트가 성공한 것이라는 분위기가 형성되고 더 이상 개선이 시도되지 않았다. 즉, 장치를 테스트한 결과에 대해서 엇갈리는 평가가 있지만, 학생들은 이 정도면 성공이라고 생각하며, 처음에 마음에 두었던 성공 기준을 낮추는 모습을 보여주었다.

학생 B: 야, 정화된 물이 나오는데?
학생 C: 색 봐봐, 색 봐봐.
학생 B: 그런데 약간 모래가 있어.
학생 C: 어쩔 수 없는 것 같아.
학생 B: 이쪽에 부어 볼게요. 야, 정화됐다.

학생 A: 이거 된 거 아니야?
학생 D: 정화됐다, 우리 거.
학생 C: 됐는데? 됐잖아. 이거 된 거야. 빨리 된 거라고 해. 된 거잖아. 맞잖아. 됐잖아.
학생 B: 우리 정화됐어.

- D 모둠의 3-4차시 수업 담화 중 -

이렇게 테스트 성공 기준을 완화하여 실패를 회피하는 모습은 B 모둠에서도 관찰할 수 있었다. B 모둠은 거름을 이용한 장치에 흙탕물을 부어 테스트한 결과 다소 더러운 물이 나오자 다음과 같은 대화를 나누었다.

학생 A: (테스트 결과를 보며) 깨끗해. 깨끗해. 깨끗해. 깨끗해.
학생 C: 어디 봐서?
학생 A: 더러운 물 여기 있잖아.
학생 D: 자리에 앉자.
학생 B: 봐봐. 근데 흙이야. 물이 흙이야.
학생 A: 어차피 애들 다 그래. 깔끔하게 투명색이 되겠냐 어떨게?
학생 C: 똥색 같은데.

- B 모둠의 3-4차시 수업 담화 중 -

위의 B 모둠 수업 담화에서처럼 학생들은 실패를 마주했지만 다른 모둠의 좋지 않은 테스트 결과와 비교하며 완전히 투명한 색은 될 수 없다고 성공 기준을 낮추었다. 이렇게 성공 기준을 낮춘 B 모둠은 이후 별다른 개선 없이 활동을 마무리하였다. 이렇게 실패를 회피하는 모습을 보여준 B 모둠은 장치를 제작하는 단계와 테스트를 진행하는 단계에서 실패에 대한 불안감을 보여주기도 하였다.

학생 B: 야, 야, 야. 학생 D한테 맡겨.
학생 D: 안 돼. 안 돼. 안 돼.
학생 B: 또 가져오면 돼. 또 있어.
학생 D: 불안해서 못하겠어.
학생 B: 또 있어.
학생 D: 불안해.
학생 B: 그럼 이렇게 하자. 야, 학생 D가 망하면 뭐 할래?
학생 D: 내가 망하면?
학생 A: 아니. 내 소원 들어주기. 나 소원 들어주기.

- B 모둠 3-4차시 수업 담화 중 -

위 담화를 보면 학생 D는 재료를 자르는 작업을 ‘망칠까’와 불안해하며 주저하는 모습을 보였다. 재료가 또 있으니 괜찮다는 학생 B의 말에도 불구하고

고 계속해서 실패에 대한 두려움을 보여주었다. 한편, B 모듈에서는 학생 D뿐만 아니라 학생 A도 페트병이나 양파망을 자를 때 잘못 자를까 무섭다고 불안함을 드러내기도 하였다.

IV. 결론 및 제언

본 연구는 공학적 설계 과정에서 학생들이 경험하는 실패의 교육적 활용에 대한 시사점을 얻고자, 학생들이 공학적 설계 과정을 수행하는 과정에서 어떤 실패를 경험하였으며, 이에 대해 어떻게 대처하였는지를 살펴보았다. 이를 위하여 초등학교 4학년 ‘물의 여행’ 단원에서 ‘물 부족 현상을 해결하는 장치 설계하기’ 차시를 공학적 설계 과정에 맞추어 재구성하였으며, 4개 학급을 대상으로 수업을 실시하였다. 각 학급에 1~2개의 초점 집단을 정하여 총 7개의 집단의 담화를 분석하였다.

학생들이 마주하였던 실패 경험을 살펴보고 그 원인을 분석해 본 결과, 크게 인지적 요인으로 인한 실패와 환경적 요인으로 인한 실패로 나눌 수 있었다. 인지적 요인으로는 재료 특성에 대한 이해 부족, 탐구 능력의 부족, 과학적 원리에 대한 이해 부족, 만들기 기술의 부족을 찾아볼 수 있었다. 환경적 요인으로는 활동 시간의 부족, 주어진 재료의 한계가 있었다. 인지적 요인은 대체로 학생들이 통제 가능한 또는 교육적으로 학습 가능한 것들이나, 환경적 요인은 학생들이 통제 가능한 요인들이 아니었다.

이러한 결과는 공학적 설계 과정에서 학생들이 마주하는 실패가 교육적으로 기능하여 건설적인 실패가 되기 위해 학생들이 통제 불가능한 환경적 요인 등으로 인한 실패를 반복적으로 마주하지 않도록 하는 노력이 필요함을 시사한다. Clifford(1984)는 결과에 대한 통제 기대감이 클수록 건설적 실패 즉, 실패가 교육적이고 긍정적인 기능을 할 수 있다고 하였다. 건설적 실패란 실패를 경험하였을 때 부정적인 반응이 아니라 건설적인 반응을 보이고, 이후 그 경험을 보다 나은 성취를 이루는 데 활용하는 것을 의미한다. 그러나 학생들이 마주하는 실패의 원인이 통제 불가능한 것이라 인식하고 이러한 실패를 반복적으로 마주하게 되면 학생들은 무기력한 느낌을 갖게 된다. 이렇게 무기력을 학습한 학생들은 이후에 실패를 마주하게 되었을 때, 실패

의 원인을 분석하고 실패하지 않으려면 어떻게 해야 할지를 모색하기보다 좌절하고 어떠한 노력을 기울여도 문제를 해결할 수 없을 거라 생각하는 경향이 있다. 그러므로 교사는 학생들이 공학적 설계 과정에서 마주하게 되는 다양한 실패의 상황들에 주의를 기울이며, 학생들이 통제 불가능한 원인으로 인한 실패 상황을 줄이도록 노력하고, 보다 적극적으로 개입하여 학생들이 실패 상황을 해결하도록 도움을 제공할 필요가 있다.

학생들이 경험한 다양한 실패 상황에 어떻게 대처하였는지를 분석한 결과, 대부분의 학생들은 실패의 원인에 대한 논의를 하지 않았으며, 이를 해결하려는 노력이 즉흥적으로 이루어지고 있었다. 학생들이 실패를 마주한 20개의 에피소드를 분석한 결과, 16개의 에피소드에서 학생들은 실패의 원인에 대한 분석이나 논의 없이 즉흥적으로 대처하는 모습을 보였다. 3개의 에피소드에서는 실패의 원인에 대한 논의를 매우 짧게 거친 뒤, 이에 따른 대처를 하는 모습이 보였다. 1개의 에피소드에서는 실패에 대한 논의도 없었으며, 이에 대한 대처도 찾아보기 어려운 에피소드도 있었다. 앞서 언급된 바와 같이 학생들이 경험한 실패 중에는 학생들이 원인을 분석해 찾아내거나 통제할 수 없는 상황도 있었으나, 원인을 분석하여 해결하는 과정에서 학생들의 학습이 일어날 수 있는 상황들도 있었다. 특히, 인지적 요인으로 인한 실패 중 탐구 능력의 부족 또는 과학적 원리에 대한 이해 부족으로 발생한 실패의 경우, 실패를 개선해가는 과정에서 탐구 기능과 과학 지식을 추가적으로 학습할 수 있는 기회의 장을 마련할 수 있다. 예를 들어, 거름을 이용한 장치에 천을 추가했지만 더 더러운 흙탕물로 테스트하여 잘 걸러지지 않았던 상황에서는 실패를 개선하면서 변인 통제를 하는 방법을 다시 한번 익힐 기회를 가질 수 있었을 것이다. 또한 양파망에서 물이 잘 내려가지 않았던 상황에서는 왜 그러하였는지를 탐구하는 과정을 통해 표면 장력에 대한 내용을 접할 수 있는 기회가 제공될 수도 있었다. 이러한 결과는 학생들이 실패의 경험에서 원인을 분석하고 개선하는 활동을 통해 수업에서 목표한 학습 외에도 다양한 지식과 기능을 학습할 수 있고, 보다 학생들의 학습이 풍부해질 수 있음을 시사한다(Park et al., 2016).

이외에도 본 연구에서는 학생들이 테스트 성공

기준을 완화하는 등의 대처를 통해 실패 상황을 회피하려는 모습을 관찰할 수 있었다. 이러한 모습이 관찰되었던 모둠의 학생들은 설계 및 제작 과정에서 잘 못할까봐 불안하다며 재료를 자르는 일을 서로에게 미루거나, 테스트가 잘 이루어지지 않는 것이 자신 탓으로 돌려지는게 불안하다며 다른 친구들에게 테스트를 맡기는 모습을 보이기도 하였다. 이러한 점을 미루어 볼 때, 학생들은 실패에 대한 부정적 인식을 가지고 있었으며, 이 기저에는 실패에 대한 불안과 두려움이 있었음을 알 수 있다. 임성만 등(2012)의 연구에서도 높은 학습 불안을 보이는 학생들이 실험을 할 때 소극적으로 임하거나, 실수를 두려워하고, 실험을 실패했을 때 바로 실망감을 표현하는 행동 특성이 있다고 보고하였다. Clifford(1990)는 실패를 두려워하지 않는 사람들은 어려운 일에 도전하고자 하는 위험 감수성(risk-taking)이 높다고 하며, 학생들이 위험을 감수하고 실패를 두려워하지 않게 하기 위해서는 실수와 실패에 관대하고 이를 수정하고 개선할 수 있는 환경이 보장되어야 한다고 말하였다. 이는 우리가 공학적 설계 과정에서 학생들이 실패를 마주하고 이를 개선할 수 있는 기회를 충분히 경험할 수 있는 환경을 마련해주어야 함을 시사한다. 예를 들어, 교사가 먼저 학생들이 마주하는 실패에 대해 부정적인 인식을 갖지 않는 것이 중요하며(Lottero-Perdue & Parry, 2017a, 017b), 학생들에게 실패를 마주하고 개선할 수 있는 기회를 주기 위해 충분한 시간을 확보할 필요가 있다. 또한 학생들이 본인의 활동에 주인의식을 갖도록 하여, 실패를 마주하더라도 끈기를 갖고 끝까지 노력하도록 할 필요가 있다(Johnson et al., 2021). 이러한 환경이 지속적으로 조성되고 하나의 문화로 자리잡게 되었을 때, 학생들은 실패를 두려워하지 않고 실패를 보다 나은 성취로 활용할 수 있는 끈기를 학습하게 될 수 있을 것이다(김아영, 2018).

끝으로 공학적 설계과정에서 학생들이 경험하는 실패가 어떠한 과정을 통해 건설적으로 활용되는지에 대한 연구가 추가적으로 더 이루어질 필요가 있다. 본 연구는 공학적 설계 과정에서 학생들이 마주하는 실패 경험들을 실제 초등학교에 과학 수업 관찰을 통해 심도있게 살펴보고 유형화함으로써, 학생들의 경험을 건설적인 실패로 이끌기 위한 노력이 필요하며 어떠한 노력을 해야 하는가에 대

해 논의하였다는 점에서 의미가 있다. 본 연구가 추후 연구들에게도 의미있는 토대가 되기를 기대하며, 이를 통해 공학적 설계 과정에서 학생들이 실패를 두려워하지 않고 도전하는 학습 환경이 조성되고, 실패의 경험을 교육적으로 활용하여 더 풍성한 학습이 학생들의 과학 수업에서 일어나기를 기대한다.

참고문헌

- 강남화, 최상호, 정은영, 이경택, 이나리, 임성민, 이준기, 김현경, 남윤경, 손정우, 임희준, 오기철, 윤현주, 이상민(2023). 융합교육(STEAM) 성과지표 개발 및 융합교육 종합계획 이행 분석 연구. 한국과학창의재단 연구보고서.
- 교육부(2015). 과학과 교육과정. 교육부 고시 제2015-74호. [별책 9].
- 교육부(2022). 과학과 교육과정. 교육부 고시 제2022-33호. [별책 9].
- 김아영(2018). 실패는 나의 힘. 초이스북.
- 김종백(2017). 지적 성장을 위한 창의적 실패교육. 교육심리연구, 31(4), 745-766.
- 남윤경, 이용섭, 김순식(2020). 과학·공학 융합 수업 준거틀 및 공학 설계 수준 제안. 대한지구과학교육학회지, 13(1), 121-133.
- 박현주, 김영민, 노석구, 이주연, 정진수, 최유현, 한혜숙, 백운수(2012). STEAM 교육의 구성 요소와 수업 설계를 위한 준거 틀의 개발. 학습자중심교과교육연구, 12(4), 533-557.
- 백운수, 박현주, 김영민, 노석구, 이주연, 정진수, 최유현, 한혜숙, 최종연(2012). 융합인재교육(STEAM) 실행방향 정립을 위한 기초연구. 한국과학창의재단 연구보고서.
- 변명섭(2008). 수생식물을 이용한 수질정화. 자연보존, 142, 33-39.
- 이동영, 남윤경(2018). 공학설계 측면에서 한국 STEAM 프로그램 분석틀 제안. 대한지구과학교육학회지, 11(1), 63-77.
- 임성만, 강원미, 위수민, 양일호(2012). 초등학교 2학년 학생들이 과학학습 상황에서 보이는 행동 특성; 과학학습 동기체계에 관한 현상학적 연구. 한국과학교육학회지, 32(4), 625-640.
- 한경희, 윤일구, 이강택, 김태연(2014). 실패에 관한 다양한 관점과 공학교육에서의 함의. 공학교육연구, 17(6), 12-19.
- Clifford, M. M. (1984). Thoughts on a theory of constructive failure. Educational Psychologist, 19(2), 108-120.

- Clifford, M. M. (1990). Students need challenge, not easy success. *Educational Leadership*, 48(1), 22-26.
- Cunningham, C. M. (2017). Engineering in elementary STEM education: curriculum design, instruction, learning, and assessment. Teachers College Press.
- Cunningham, C. M., & Kelly, G. J. (2017). Epistemic Practices of Engineering for Education. *Science Education*, 101(3), 486-505.
- Cunningham, C. M., & Lachapelle, C. P. (2014). Designing engineering experiences to engage all students. *Engineering in Pre-College Settings: Synthesizing Research, Policy, and Practices*, 21(7), 117-142.
- Finn, A. (1979). Academic success or failure: a clinical approach through open interviews with adolescents and their parents. *Revue de Psychologie Appliquée*, 29(1), 1-14.
- Frate, L. D. (2013). Failure of engineering artifacts: a life cycle approach. *Journal of Science and Engineering Ethics*, 19(3), 913-944.
- Johnson, M., Kelly, G., & Cunningham, C. (2021). Failure and Improvement in Elementary Engineering. *Journal of Research in STEM Education*, 7(2), 69-92.
- Kennedy, T., & Odell, M. (2014). Engaging students in STEM education. *Science Education International*, 25(3), 246-258.
- Lottero-Perdue, P. S., & Parry, E. A. (2017a). Elementary teachers' reflections on design failures and use of fail words after teaching engineering for two years. *Journal of Pre-College Engineering Education Research (J-PEER)*, 7(1), 1-24.
- Lottero-Perdue, P. S., & Parry, E. A. (2017b). Perspectives on failure in the classroom by elementary teachers new to teaching engineering. *Journal of Pre-College Engineering Education Research (J-PEER)*, 7(1), 47-67.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (NASEM). (2020). Building capacity for teaching engineering in K-12 education. National Academies Press.
- National Research Council (NRC). (2013). Next generation science standards: For states, by states. The National Academies Press.
- NGSS Lead States. (2013). Next Generation Science Standards: For States, By States. Washington, DC: The National Academy Press.
- Park, J., Abrahams, I., & Song, J. (2016). Unintended knowledge learnt in primary science practical lessons. *International Journal of Science Education*, 38(16), 2528-2549.
- Petroski, H. (2012). To forgive design: understanding failure. The Belknap Press of Harvard University Press.
- Robbins, R. L., & Harway, N. I. (1977). Goal setting and reactions to success and failure in children with learning disabilities. *Journal of Learning Disabilities*, 10(6), 356-362.

심주연, 서울동자초등학교 교사(Ju Yeon Sim; Teacher, Seoul Dongja Elementary School).

† 박지선, 이화여자대학교 교수(Jisun Park; Professor, Ewha Womans University).