



초·중등 인공지능 교육에서 피지컬 컴퓨팅을 활용한 연구에 대한 체계적 문헌 고찰

A Systematic Literature Review on the Use of Physical Computing in Primary and Secondary Artificial Intelligence Education

임수훈[†] · 고태능^{††} · 김성원^{†††} · 이영준^{††††}

Suhun Lim[†] · Hakneung Go^{††} · Seong-Won Kim^{†††} · Youngjun Lee^{††††}

요약

본 연구는 초·중등 인공지능 교육에서 피지컬 컴퓨팅 활용의 현황과 특성을 파악하고 교육적 개선 방안을 도출하고자, 2020년부터 2025년 2월까지 발표된 관련 국내 연구 34편을 체계적으로 분석하였다. 분석 결과, 관련 연구가 2023년 이후 급증했으나 초등교육에 편중되어 중등교육 연구 확대가 필요하였다. 연구 방법은 효과성 검증 중심의 양적·혼합 연구가 주류를 이루어 학습 메커니즘 규명을 위한 질적 연구가 부족하였고, 역량 측면에서는 컴퓨팅 사고력 등 인지적 역량이 편중되어 협력적 태도, 끈기, AI 윤리적 판단력 등 정의적 역량이 상대적으로 부족하였다. AI 교육 내용은 기술적 '활용'에 집중되어 원리적 '이해'와 사회·윤리적 '가치' 영역이 미흡하였으며, 교과 융합은 기술 관련 교과에 편중되어 인문·예술 교과와의 융합이 제한적이었다. 블록형 프로그래밍 언어 위주로 텍스트 기반 코딩과의 연계성도 부족하였다. 이를 바탕으로 피지컬 컴퓨팅 환경에서 특화되는 다차원적 역량을 통합 개발하는 교육 프로그램과 학습 과정 심층 탐구를 위한 질적 연구 확대, 학교급별 체계적 도구·언어 학습 경로 설계, 그리고 다양한 교과 융합 모델 개발 및 제도적 지원 강화를 제언한다.

주제어 인공지능 교육, 피지컬 컴퓨팅, 체계적 문헌 고찰, 초·중등 교육, 연구 동향

ABSTRACT

This study systematically analyzed 34 Korean studies published from 2020 to February 2025 to understand the current status and characteristics of physical computing utilization in primary and secondary AI education and to propose educational improvement strategies. The analysis revealed that research has rapidly increased since 2023 but is concentrated in elementary education, indicating a need for expanded research in secondary education. Methodologically, quantitative and mixed-methods studies focusing on effectiveness validation predominated, while qualitative research exploring learning mechanisms was insufficient. In terms of competencies, cognitive abilities such as computational thinking were emphasized, while affective competencies including collaborative attitudes, perseverance, and AI ethical judgment were relatively underaddressed. AI education content concentrated on technology 'utilization' with insufficient attention to principled 'understanding' and social and ethical 'values'. Interdisciplinary integration was limited to technology-related subjects, with limited integration into the humanities and arts. The predominance of block-based programming languages also showed limited connectivity to text-based coding. Based on these findings, this study proposes developing educational programs that integrate multidimensional competencies specialized in physical computing environments, expanding qualitative research for in-depth exploration of learning processes, designing systematic tool and language learning pathways by school level, and developing diverse interdisciplinary models with enhanced institutional support.

Keywords AI Education, Physical Computing, Systematic Literature Review, Primary and Secondary Education, Research Trends

†정회원 한국교원대학교 컴퓨터교육과 박사과정
††정회원 송정중앙초등학교 교사
†††중신회원 부산교육대학교 컴퓨터교육과 조교수
††††중신회원 한국교원대학교 컴퓨터교육과 교수 (교신저자)
논문투고 2025년 05월 20일
심사완료 2025년 07월 05일
게재확정 2025년 07월 09일
발행일자 2025년 08월 06일

1. 서론

인공지능(Artificial Intelligence, AI) 기술의 급격한 발전은 4차 산업혁명 시대를 가속하며 사회, 경제, 산업 등 다양한 영역에서 패러다임의 전환을 이끌고 있다. 이러한 변화 속에서 AI 리터러시와 문제해결 역량 등은 미래 사회를 살아갈 학생들에게 필수적인 핵심 소양으로 자리 잡고 있으며, 이에 따라 AI를 효과적으로 교육하는 것이 중요한 과제로 부상하고 있다[1, 2]. 우리나라 또한 초·중등 교육에서 소프트웨어(Software, SW) 교육이 의무화되었으며, 2022 개정 교육과정에 AI 교육 내용이 추가되었다[3, 4]. 이에 따라, AI 교육을 위한 교육 과정 분석, 교사 전문성 강화, 교육 프로그램 개발, 평가 도구 개발 등 다양한 연구들이 추진되고 있다[5-8].

AI 교육의 목표는 단순한 개념 이해를 넘어, 학생들이 AI를 활용해 실제 문제를 해결하는 역량을 함양하는 것이다[9]. 하지만 현재 학교 현장의 AI 교육은 이론 학습이나 정제된 데이터 기반의 실습에 치중하여, 이러한 목표를 달성하는 데 한계를 보인다. 이로 인해 학생들은 통제된 환경에서는 모델을 구현하지만, 현실 세계의 AI가 마주하는 본질적인 문제들, 즉 데이터의 불균형, 예측 불가능한 외부 변수, 환경 변화와 같은 복잡성을 경험하지 못한다[10, 11].

문제해결 역량은 바로 이러한 실세계의 복잡성에 부딪히며 시스템의 작동 원리와 한계를 체험적으로 이해할 때 길러진다[12]. 더 나아가, 이러한 실제적 경험은 AI의 사회적 함의나 윤리적 쟁점에 대한 깊이 있는 이해를 촉진하여 비판적 성찰 역량을 강화하는 토대가 된다[13]. 따라서 학생들이 현실 세계의 문제를 AI로 다루며 기술적 한계와 사회적 영향을 직접 체험하고 성찰하는 구체적이고 체험적인 교육 방법이 요구된다.

이러한 교육적 필요에 부응하는 해결책으로 피지컬 컴퓨팅(Physical Computing)이 주목받고 있다. 피지컬 컴퓨팅은 하드웨어(Hardware, HW)와 SW를 결합하여 물리적 환경과 상호작용하는 교육 방식으로서[14], 눈에 보이지 않는 AI의 작동 원리를 학생들이 직접 조작하고 체감할 수 있는 물리적 결과물로 변환한다. 실제로 고등학생 대상 머신러닝 교육에 대한 체계적 문헌 분석 결과, 학생들이 직접 손으로 만들어보고 조작하는 체험 중심의 학습 활동이 참여와 학습 효과를 높이는 데 매우 효과적인 것으로 나타났다[15]. 하지만 이러한 교육적 효과가 입증되고 있음에도 불구하고, 실제 교육 현장에서는 다양한 한계와 과제들이 나타나고 있다. 선행연구를 살펴보면, 이승원과 강신조(2025)는 레고 스파이크 프라임으로 AI 로봇 제작 수업을 하였으나, AI 핵심 개념 학습이 충분히 다루어지지 못했으며[16], 김유성과 김영식(2024)은 마이크로비트 기반 AI 교육에서 AI의 사회적 영향이나 윤리적 측면과 같은 내용이 부족했다[17]. 정형섭(2024)과 양희선 등(2024)은 각각 스파이크 프라임-티처블머신 연동 교육과 아두이노 기반 화학 AI 융합 교육을 고등학생 대상으로 실시하였으나, 두 연구 모두 블록 코딩을

사용하여 고등학교 교육과정 수준에 적합하지 않은 한계를 보였다[18, 19]. 송주연과 김연경(2023)은 아두이노 기반 안전교육을 실시했지만 단순 센서 제어에 머물러 AI의 학습이나 판단 기능과의 융합이 제한적이었다[20].

이러한 연구 현황 분석 결과, 기존 연구들은 AI 교육 내용을 편향적으로 다루거나 학습자 수준을 고려하지 못하는 등 피지컬 컴퓨팅의 교육적 잠재력을 온전히 활용하지 못하고 있는 것으로 나타났다. 이에 따라 피지컬 컴퓨팅을 활용한 AI 교육의 효과적인 설계와 구현을 위해서는 기존 연구들의 성과와 한계를 체계적으로 분석하여 전반적 동향과 특성을 파악하고, 개선 방향을 도출할 필요가 있다.

이에 본 연구는 체계적 문헌 고찰을 통해 국내 초·중등 교육에서의 피지컬 컴퓨팅을 활용한 AI 교육 연구 동향과 특성을 분석하고, 교육 현장 적용을 위한 실질적 시사점을 도출하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 인공지능 교육

AI 교육은 단순히 AI 기술을 사용하는 것을 넘어, 비판적 리터러시와 창의적 문제해결 역량을 갖춘 '창의적 활용자'를 양성하는 데 목표를 둔다[23]. 이러한 고차원적 목표 달성을 위해, AI 교육은 '이해(원리)', '활용(적용)', '가치(윤리)'라는 세 가지 핵심 영역을 통합적으로 다루어야 함을 강조한다[9, 24]. 이는 학습자가 지식을 수동적으로 받아들이는 것이 아니라, 실제적인 과제를 통해 능동적으로 지식을 구성해야 한다는 구성주의 학습이론과 그 맥을 같이한다[21].

그러나 현재 AI 교육은 이론적 지식 전달에 치중하여 실제적 문제해결 경험을 제공하지 못하는 한계를 보인다[9]. 특히, AI의 추상적 개념과 이론과 실제 사이의 괴리는 학습자로 하여금 지식을 단편적으로 습득하게 만들어, 실세계 문제에 AI를 적용하는 능력을 기르는 데 한계를 드러낸다[10-12].

따라서 이를 해결하기 위해, 학생들이 직접 대상을 조작하고 만들어보는 구체적 조작 활동을 통해 추상적인 개념을 눈에 보이는 현상으로 바꾸는 과정이 요구된다. 더 나아가, 단순한 만들기 활동을 넘어 그 경험 속에서 문제를 해결하고 원리를 내면화하는 경험학습으로 심화될 때, 비로소 실세계 문제해결 역량을 효과적으로 함양할 수 있다[21]. 이에 학생들의 조작 활동을 의미 있는 경험으로 이끄는 구체적인 교육 방법론의 역할과 그 현황을 분석할 필요가 있다.

2.2 피지컬 컴퓨팅

피지컬 컴퓨팅은 '센서를 이용하여 현실 세계로부터 입력 값을 받아들이고, 값들을 처리하여 또 다른 장치를 제어하는 것'으로 정의된다[25]. 교육적 측면에서 피지컬 컴퓨팅은 직접적인 조작 경험을 통한 학습 동기 유발, 즉각적 피드백을 통한 자기 주도적 학습, 실생활 문제 해결을 위한 창의적

접근 촉진, 그리고 학습자 간 협력적 상호작용 증진 등의 장점을 가진다[26].

AI 교육에서 피지컬 컴퓨팅은 두 가지 핵심적 역할을 한다. 첫째, AI 학습에 필요한 데이터를 수집하는 입력 도구로 활용되며, 둘째, AI 모델 학습의 결과를 실제 세계에서 구현하는 출력 도구로 기능한다[18]. 이를 통해 학습자는 추상적인 AI 개념을 구체적으로 체험하고, AI의 알고리즘적 사고와 패턴 인식 능력을 효과적으로 학습할 수 있다[27]. 또한 피지컬 컴퓨팅은 다양한 교과와의 융합을 용이하게 하며, 학습자 중심의 프로젝트기반학습을 촉진한다. 피지컬 컴퓨팅 도구를 활용한 AI 교육은 학습자 간 협력적 학습을 촉진하고, 컴퓨팅 사고력과 AI 리터러시 함양에 효과적이다[28].

3. 연구 방법

본 연구는 초·중등 AI 교육에서 피지컬 컴퓨팅을 활용한 연구를 체계적으로 분석하여, 향후 연구를 위한 시사점을 도출하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 Kitchenham(2004)의 체계적 문헌분석(Systematic Literature Review, SLR) 가이드라인을 기반으로 분석을 진행하였다[29]. SLR은 명확한 절차와 기준을 바탕으로 연구 질문을 중심으로 문헌을 탐색, 선정, 분석하는 구조화된 방법론이다.

본 연구에서는 SLR의 절차인 계획(Planning), 수행(Conducting), 보고(Reporting)의 세 단계에 따라 다음과 같이 진행하였다. 첫째, 계획 단계에서는 본 연구의 분석 목적과 연구 질문을 명확히 정의하고, 체계적 문헌 검색 전략을 수립하였으며, 분석 대상 문헌의 포함 및 제외 기준을 설정하였다. 둘째, 수행 단계에서는 수립된 전략에 따라 체계적으로 문헌을 검색 및 선별하고, 최종 선정된 문헌에서 핵심 데이터를 추출하여 종합하였다. 셋째, 보고 단계에서는 종합된 결과를 구조화하여 해석하고, 교육적 시사점과 향후 연구 방향을 제안하였다. 본 연구에서 적용한 각 단계별 세부 절차는 Table 1에 요약하여 제시하였다.

Table 1. Systematic Literature Review Process

Phase	Description
Planning	Define the purpose of the analysis and research questions, establish a literature search strategy, and determine inclusion and exclusion criteria.
Conducting	Perform a systematic search and selection of literature, and extract and synthesize relevant data.
Reporting	Structure and interpret the findings, derive educational implications, and propose directions for future research

3.1 연구 문제

본 연구는 교육 분야에서 폭넓게 활용되는 PICO 프레임워크를 적용하여 연구 문제를 구성하였다[30]. 본 연구에 적

용된 PICO 구성 요소는 Table 2와 같으며, 이를 바탕으로 네 가지 연구 질문을 설정하였다.

첫째, 초·중등 AI 교육에서 피지컬 컴퓨팅을 활용한 연구의 현황은 어떠한가?

초·중등 AI 교육에서 피지컬 컴퓨팅을 활용한 연구들이 추구하는 핵심 역량은 무엇인가?

셋째, 초·중등 AI 교육에서 피지컬 컴퓨팅을 활용한 연구들의 교육 내용, 교수·학습 방법 및 교과 융합 현황은 어떠한가?

넷째, 초·중등 AI 교육에서 피지컬 컴퓨팅을 활용한 연구들이 사용한 HW 도구와 프로그래밍 언어 유형은 어떠한가?

Table 2. PICO Framework Summary

PICO Element	Description
Population	Primary and Secondary students
Intervention	Use of Physical Computing in AI education
Comparison	Pretest – posttest or one–group pre – post design
Outcome	Measured changes in student competencies

3.2 문헌 검색 및 선정

본 연구는 2020년 1월부터 2025년 2월까지 발표된 국내 연구를 대상으로 하였다. 문헌 검색을 위해 RISS(Research Information Sharing Service)와 KCI(Korea Citation Index) 학술 데이터베이스를 활용하였으며, ‘AI 교육’, ‘피지컬 컴퓨팅’, ‘아두이노’, ‘마이크로비트’, ‘스마트팜’, ‘드론’, ‘자율주행’ 등의 주요 키워드를 조합하여 체계적 검색을 수행하였다.

또한, 문헌 선별 과정에서 객관성을 확보하고 편향을 줄이기 위해 명확한 포함 및 제외 기준을 적용하였다. 포함 기준으로는 AI 교육 맥락에서 피지컬 컴퓨팅을 활용한 경험적 연구, 초·중등학생을 대상으로 한 연구, 2020년 1월부터 2025년 2월까지 국내 학술지(KCI 등재 및 등재후보)에 게재된 논문으로 설정하였다. 제외 기준으로는 교육적 효과 검증 없이 단순히 프로그램 개발에만 국한된 연구, 대학생, 교사 등 초·중등학생 이외의 대상을 다룬 연구를 제외하였다. 또한 연구의 질적 일관성을 위해 석·박사 학위논문, 학술대회 발표 논문, 그리고 연구 설계가 불명확하거나 원문 확보가 불가능한 문헌 역시 분석 대상에서 제외하였다. 이러한 선정 기준은 Table 3에 요약하여 제시하였다.

Table 3. Inclusion and Exclusion Criteria

Inclusion Criteria	Exclusion Criteria
<ul style="list-style-type: none"> ·Physical computing + AI education (empirical) ·K-12 students ·KCI journals (2020–2025) ·Clear design + full-text available 	<ul style="list-style-type: none"> ·Development only / theory only ·Non-K-12 populations ·Dissertations / conferences ·Poor design / no full-text

이와 같은 기준에 따라 문헌을 선정하는 전체 과정은 PRISMA 2020 가이드라인을 따랐으며, 구체적인 흐름은 Fig. 1에 제시된 바와 같다[31].

문헌 검색을 통해 총 603편의 문헌이 확인되었으며, 중복 문헌(151편), 2020년 이전 출판 문헌(109편), 연구 주제와 관련성 없음(286편)을 제외한 57편에 대해 적격성 평가를 실시하였다. 이 과정에서 초·중등 교육과 무관한 문헌(18편), 프로그램 개발만 다룬 문헌(4편), 연구 설계가 불명확한 문헌(1편) 등 23편을 추가로 제외하여, 최종적으로 34편의 문헌을 분석 대상으로 선정하였다.

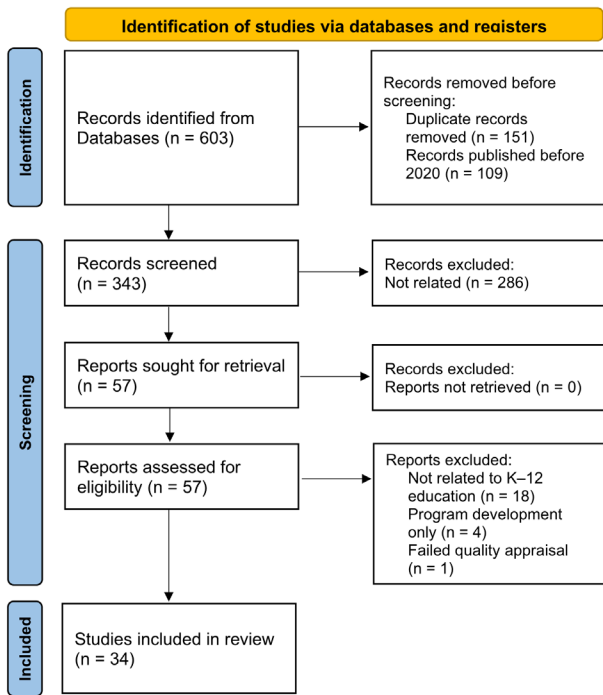


Figure 1. PRISMA Flow Diagram

3.3 문헌 분석 기준

본 연구의 문헌 분석 기준은 백수현, 유지원(2024), 이다겸 외(2022)의 분류 체계를 참고하되, 본 연구의 목적과 대상에 적합하도록 일부 항목을 수정·보완하여 Table 4과 같이 구성하였다[32, 33]. 데이터 분석 과정에서 연구진 간 해석에 불일치가 발생할 경우, 충분한 논의를 통해 조정하였다.

Table 4. Classification Criteria

Category	Subcategory
Subjects	Primary and Secondary school students
Research Method	Quantitative, Qualitative, Mixed
Competencies	Cognitive Competencies, Affective Competencies, Other Competencies
Educational Content	Understanding, Utilization, Value

Category	Subcategory
Convergence	Single Subject, Convergence Subject
Teaching and Learning Methods	Problem-Based Learning, Project-Based Learning, Demonstration-Practice, Unplugged, Design Thinking, Others
Tool Type	Board, Module, Robot
Programming Language	Block-based, Text-based, Others

4. 연구 결과

4.1 연구 현황

4.1.1 연도별 편수

초·중등 AI 교육에서 피지컬 컴퓨팅을 활용한 연구의 연도별 현황은 Fig. 2에 제시되어 있다. 2023년(15편)을 기점으로 관련 연구가 많이 증가하는 추세를 보이며, 이는 AI 관련 다양한 정부 정책, 2022 개정 교육과정의 AI 교육 신설 등에 따라, AI 교육에 대한 연구 수요가 증가했기 때문으로 해석할 수 있다[3, 4, 34].

한편, 2024년(8편)에는 연구 건수가 다소 감소하는 경향을 보이나, 이는 생성형 AI의 등장과 이에 대한 관심의 급부상으로 인한 연구의 분산으로 해석할 수 있다[35]. 이러한 외부 요인에 따른 변동성은 피지컬 컴퓨팅을 활용한 AI 교육 연구가 아직 외부 환경 변화에 민감한 초기 단계에 있음을 보여준다. 따라서 이 분야가 장기적으로 뿌리내리고 지속적으로 발전하기 위해서 안정적인 연구 기반 구축을 위한 학계의 꾸준한 관심과 정책적 지원이 동반되어야 할 것이다.

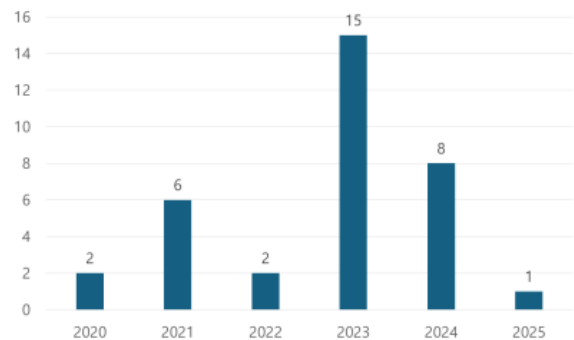


Figure 2. Number of Papers by Year

4.1.2 연구 대상

연구 대상의 학교급별 분포는 Fig. 3과 같으며, 초등학생을 대상으로 한 연구가 24편으로 가장 높은 비중을 나타내었다. 중등학생 대상 연구는 10편으로 상대적으로 적은 비중을 보였으며, 이 중 중학생 대상 3편, 고등학생 대상 6편, 중·고등 통합 1편으로 구성되었다.

초등학교 대상 연구의 집중은 2022 개정 교육과정에서 정보교육 및 AI 교육이 강화된 정책적 환경과 AI 교육 조기 도입의 시대적 요구에서 기인하는 것으로 볼 수 있다[2, 34]. 반면 중등 교육과정에 피지컬 컴퓨팅 내용이 포함되어 있으며, 2022 개정 교육과정에서 AI 영역이 신설되었지만[4], 관련 연구가 부족한 점은 주목할 만하다. 이러한 연구 분포의 편중은 피지컬 컴퓨팅을 활용한 AI 교육의 연속성 있는 발전을 위한 중등교육 단계 연구의 확대 필요성을 시사한다.

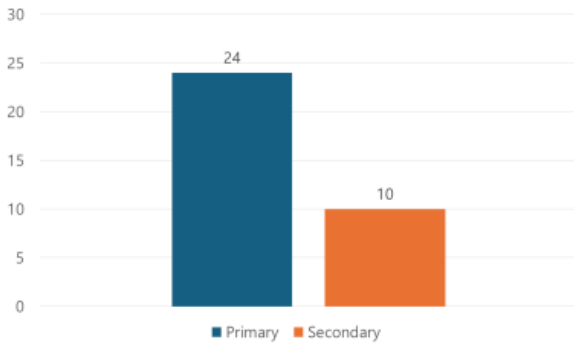


Figure 3. Number of Papers by Educational Level

4.1.3 연구 방법

연구 방법 현황은 Fig. 4과 같다. 양적 연구가 18편으로 가장 많았고, 혼합 방법 연구 13편, 질적 연구 3편 순으로 나타났다. 이는 사전-사후 검사를 통한 정량적 접근이 피지컬 컴퓨팅을 활용한 AI 교육 연구에서 주로 사용되고 있음을 보여준다. 질적 연구 3편에서는 학생들의 참여도와 협력 과정 관찰, AI 개념 이해 특성 분석, 학습 과정의 어려움과 흥미도 변화 탐구 등에 집중하였다[27, 39, 42]. 그러나 이들 연구는 프로그램 개발과 개선을 위한 형성평가적 성격이 강하여, 학습자의 내재적 경험이나 의미 구성 과정을 깊이 있게 탐구하는 접근은 부족한 편이었다.

종합적으로, 피지컬 컴퓨팅을 활용한 AI 교육 연구는 효과성 검증을 위한 정량적 접근이 주를 이루고 있으며, 학습자의 경험과 과정을 깊이 있게 탐구하는 질적 접근은 상대적으로 부족함을 시사한다.

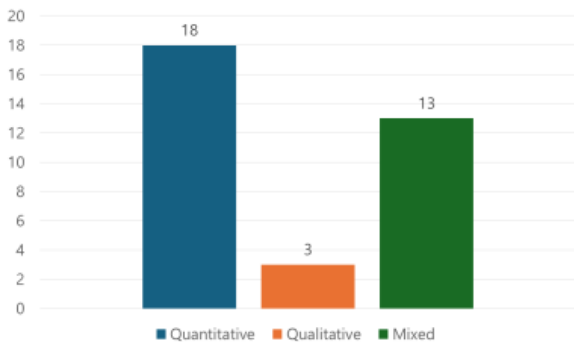


Figure 4. Number of Papers by Research Method

4.2 핵심 역량

본 연구는 총 34편의 문헌을 분석하여, 피지컬 컴퓨팅을 활용한 AI 교육 연구에서 중점적으로 향상하고자 한 역량을 ‘인지적’, ‘정의적’, ‘기타’영역으로 구분하였다. 복합적 성격을 지니거나 특정 영역에 명확히 속하지 않는 역량에 대해서는 ‘기타’로 분류하여 검토하였다. 중복 집계를 허용하였으며, 분석한 결과는 Table 5와 같다. 분석 결과, 인지적 역량은 39편, 정의적 역량은 26편, 기타 역량은 3편으로 확인되었다.

Table 5. Number of Papers by Competencies

Competencies	Sub-competencies	N	Total
Cognitive	Computational thinking	13	39
	AI competency	6	
	Creative problem-solving Ability	6	
	Career competency	5	
	Creativity	3	
	Problem-solving	2	
	Subject competency	3	
	Others	1	
Affective	Attitude	7	26
	Self-efficacy	4	
	Interest	4	
	satisfaction	11	
Other	Human rights awareness, Digital citizenship, Creative convergence mindset	3	3

4.2.1 인지적 역량

인지적 역량 연구 39건 중 컴퓨팅 사고력 (Computational Thinking, CT)이 13편으로 가장 높은 비중을 차지했으며, AI 역량(6편), 창의적 문제해결력(6편), 진로 역량(5편), 창의성(3편), 교과 역량(3편), 문제해결력(2편) 순으로 나타났다.

CT 관련 연구(13편)에서는 학생들이 피지컬 컴퓨팅 활동을 통해 추상화, 알고리즘적 사고, 분해, 패턴 인식 등 CT의 하위 요소를 경험하고 이를 함양할 수 있도록 수업을 설계하였다[17, 36]. 창의적 문제해결력(6편), 창의성(3편), 문제해결력(2편) 연구에서는 학생들이 실생활 문제를 AI와 피지컬 컴퓨팅을 활용하여 해결하는 과정을 통해 관련 역량을 키우고자 하였다[37, 38]. AI 이해 및 활용 역량(6편)은 학생들이 AI의 기본 원리와 작동 방식을 이해하고 이를 피지컬 컴퓨팅을 통해 구현하는 활동을 통해 향상하고자 하였다[18]. 진로 역량(5편)과 교과 역량(3편) 관련 연구에서는 학생들이 AI 기술과 연계된 직업 세계를 간접적으로 체험하거나[39], 다양한 교과 지식을 통합적으로 이해하는 활동을 통해 각 역량을 함양하고자 하였다[19]. 이러한 결과는 2015

교육과정, 2022 개정 교육과정에서 강조된 컴퓨팅 사고력과 문제해결 역량이 피지컬 컴퓨팅을 활용한 AI 교육 연구에서도 주요 향상 목표로 설정되고 있음을 보여준다[4, 40]. 한편, AI 이해 및 활용 역량을 다룬 연구는 6건으로 상대적으로 부족한 편이었으며, 이는 AI 교육의 본질적 목표 달성을 위해 이 영역의 연구가 더욱 필요함을 시사한다.

4.2.2 정의적 역량

정의적 역량 향상 목적으로 이루어진 연구는 총 26편으로, 이 중 프로그램 만족도를 조사한 연구가 11편으로 가장 높은 비중을 차지하였다. 한편, 실제 정의적 역량 함양에 초점을 둔 연구는 태도(7편), 자기효능감(4편), 흥미(4편) 등 총 15편으로, 인지적 역량 관련 연구(39편)에 비해 상대적으로 적은 비율을 보였다.

태도 관련 연구(7편)에서는 학생들이 피지컬 컴퓨팅을 활용하여 AI 기술을 직접 구현하고 성취감을 경험함으로써, AI에 대한 긍정적인 태도와 인식을 기를 수 있도록 교수·학습 과정을 설계하였다[41]. 흥미 관련 연구(4편)에서는 학생들에게 친숙한 주제를 활용한 피지컬 컴퓨팅 활동과 프로젝트 기반 경험을 제공하여, AI 학습에 대한 흥미를 높이고자 하였다[42]. 자기효능감 관련 연구(4편)에서는 AI 교육에서 피지컬 컴퓨팅을 활용한 구체적 협력 학습 경험과 협력적 프로젝트 수행을 통해 자기효능감 향상에 초점을 두었다[20].

이러한 결과는 피지컬 컴퓨팅을 활용한 AI 교육에서 정의적 역량의 함양 역시 중요하게 인식되고 있음을 시사한다.

4.2.3 기타 역량

기타 역량은 총 3편으로, 인권 감수성, 디지털 시민성, 창의적 마인드셋이 이에 해당한다. 인권 감수성 연구에서는 AI 기술의 윤리적 측면을 이해하고 타인의 권리를 존중하는 태도를 함양하고자 하였고[16], 디지털 시민성 연구에서는 디지털 사회에서 책임감 있게 참여하는 능력을 키우고자 하였으며[43], 창의적 마인드셋 연구에서는 실생활 문제에 대한 공감을 바탕으로 융합적 사고와 혁신적 해결책을 창출하는 역량을 향상시키고자 하였다[44].

이러한 결과는 피지컬 컴퓨팅을 활용한 AI 교육이 다양한 미래 사회 역량 함양을 목표로 하는 연구로 확장되고 있음을 보여준다.

4.3 교육 내용

본 연구는 한선관(2020)의 AI 교육 내용 기준에 따라 중복을 허용하여 분석하였으며[24], 그 결과는 Fig. 5와 같다. 활용(34편)이 모든 연구에서 다루어졌지만, 이해(25편)와 가치(16편)는 부족했다.

구체적으로, ‘활용’영역은 자율주행 자동차로 교통 문제를 해결하거나, 드론으로 지역사회 문제를 해결하는 등 피지컬 컴퓨팅을 통해 AI를 실제 문제 해결에 적용하는 내용

을 다루고 있었다[36, 38]. ‘이해’영역은 사각형 구분 로봇 제작으로 의사결정나무 알고리즘을 경험하거나, 마이크로 비트로 스마트 선풍기를 구현하며 기계학습 원리를 학습하는 등 피지컬 컴퓨팅을 통해 AI 개념과 원리를 체험적으로 학습하는 내용을 담고 있다[37, 40]. ‘가치’영역은 AI 로봇으로 인권 고려 제품을 설계하거나, 자율주행 자동차 실습을 통해 윤리적 딜레마를 논의하는 등 피지컬 컴퓨팅으로 구현된 AI 산출물의 사회적 영향과 윤리적 쟁점을 성찰하는 내용을 담고 있다[16, 22].

종합하면, 피지컬 컴퓨팅은 AI 교육의 모든 영역을 실생활 문제 해결 경험을 통해 구체화하고 체험적으로 학습할 수 있는 교육적 도구임을 보여주었다. 그러나 현재 연구들이 주로 AI 모델을 실제 산출물로 구현하는 ‘활용’ 중심의 활동에 집중하는 경향을 보여, ‘이해’와 ‘가치’영역을 균형 있게 포함시키는 통합적 교수·학습 모델 개발이 필요함을 시사한다.

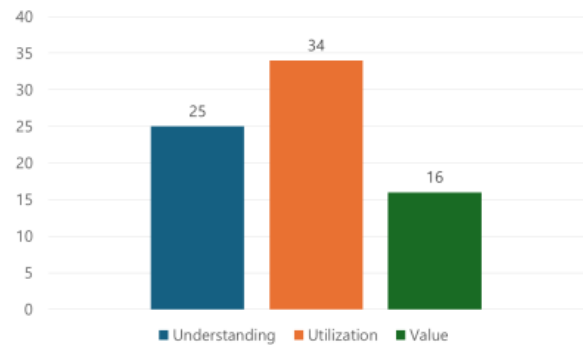


Figure 5. Number of Papers by AI Education Content Area

4.4 교과 융합

본 연구에서 피지컬 컴퓨팅을 활용한 AI 교육에서의 교과 융합 현황을 분석하였다. 결과는 Fig. 6과 같다. 분석한 결과, 단일 교과 연구가 22편으로 다수를 차지하였고, 교과를 융합한 연구는 12편으로 상대적으로 적은 비중을 보였다. 이러한 단일 교과 중심의 경향은, 피지컬 컴퓨팅을 활용한 융합 수업이 지닌 기술적 복잡성, 교과 간 전문성 격차, 그리고 시수 및 지원 부족이라는 현실적 제약 때문으로 분석된다[18, 36, 42, 47-49]. 그러나, 피지컬 컴퓨팅을 활용한 AI 융합 교육은 교과 간 지식 연결을 통한 ‘융합적 사고 촉진’[36], 통합적 접근을 통한 ‘효과적인 역량 향상’[19], 맥락적 학습을 위한 ‘실생활 문제 해결’[39], 그리고 교과 연계를 통한 ‘시수 확보’[27] 등 다양한 교육적 가치를 제공하는 것으로 확인되었다.

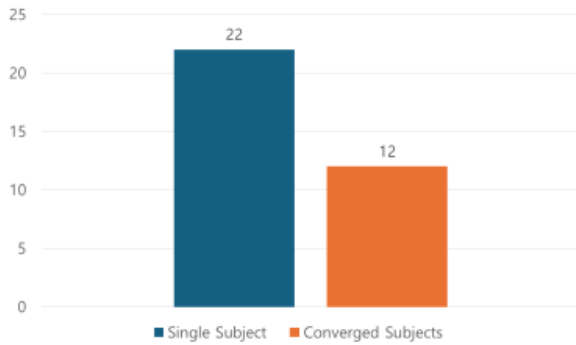


Figure 6. Number of Papers by Type

12편의 융합 연구 논문을 중복 집계를 허용하여 교과군별 분포를 심층적으로 분석한 결과, Table 6와 같이 과학/기술·가정(실과)/정보 교과군이 8편으로 가장 많았고, 사회(역사 포함)/도덕과 선택 교과(진로, 창의적 체험 활동 등)가 각각 5편, 수학과 예술(음악, 미술, 체육)이 각 3편, 국어는 1편으로 확인되었다. 이러한 분포는 2022 개정 교육과정에서 강조하는 기술 및 정보 교육, 그리고 AI의 사회·윤리적 쟁점을 다루는 사회 교과와의 연관성이 높기 때문으로 해석할 수 있다. 다만, 과학·기술 및 사회 교과군에 비해 인문, 예술 분야와의 융합 시도는 상대적으로 부족한 것으로 나타났다.

Table 6. Number of Papers by Subject Convergence

Subjects(Subject Clusters)	N	Total
Science / Practical(Technology & Home Economics) / Informatics	8	25
Social Studies(including History)/Ethics	5	
Elective Subjects(career / Creative Experiential Activities)	5	
Mathematics	3	
Arts(Music/Art/Physical Education)	3	
Korean Language	1	

4.5 교수·학습 방법

본 연구에서는 AI 교육에서 피지컬 컴퓨팅이 활용된 교수·학습 방법은 중복을 허용하여 분석하였다. 결과는 Table 7과 같다.

가장 많이 사용된 교수·학습 방법은 문제기반학습 13편과 프로젝트기반학습 11편이었다. 이외에도 시연·실습 5편, 언플러그드 4편, 디자인씽킹 3편, 그리고 기타 방법 5편이 확인되었다.

문제기반학습과 프로젝트기반학습은 드론을 활용한 AI 이미지 분류[38, 50], 머신 러닝 기반 로봇으로 문제 해결 [18, 22] 등 실생활 문제를 피지컬 컴퓨팅으로 데이터를 수집하고 AI 모델을 적용하는 방식으로 설계되었다. 언플러그드 활동은 피지컬 컴퓨팅 활용 이전에 AI 원리를 체험적으로 이해하도록 하였으며[39], 디자인씽킹은 공감 기반 문제 해결 과정을 통해 AI와 피지컬 컴퓨팅을 의미 있게 연계하

는 방식으로 활용되었다[16, 44].

기타 방법으로는 과학-AI 모델링을 융합한 ASKMB[19], AI 로봇 활용 교육에 사용·수정·창조 단계를 적용한 UMC[27], 실제 도전과제를 중심으로 한 도전 기반 학습 [36], 창의적인 AI 작품을 제작하는 메이커 활동[51] 등 다양한 교수·학습 방법이 활용되었다.

종합적으로, 피지컬 컴퓨팅의 체험적 특성과 AI의 실생활 문제 해결 특성으로 인해, 학습자 주도의 실천적 활동과 실제적 경험을 중시하는 교수·학습 방법이 선호되고 있음을 확인할 수 있었다.

Table 7. Number of Papers by Teaching-Learning Methods

Teaching-Learning Methods	N	Total
Problem-Based Learning	13	41
Project-Based Learning	11	
Demonstration-Practice	5	
Unplugged	4	
Design Thinking	3	
Others	5	

4.6 도구 유형

본 연구에서는 피지컬 컴퓨팅 활용 AI 교육에 사용된 도구를 HW와 프로그래밍 언어로 구분하여 분석하였다. HW는 보드형, 모듈형, 로봇형으로, 프로그래밍 언어는 블록형, 텍스트형, 기타로 분류하였다. 보드형은 아두이노, 라즈베리파이 등 마이크로컨트롤러와 센서 인터페이스가 결합한 형태의 도구를 의미한다. 모듈형은 마이크로비트, 코블 등 기능별 블록 조립을 통해 피지컬 컴퓨팅 시스템을 구성하는 방식이다. 로봇형은 오조봇, 대시와 같이 프로그래밍을 통해 제어할 수 있는 완성된 로봇 형태의 시스템이다[52].

4.6.1 하드웨어

HW 도구 유형을 중복 허용하여 분석한 결과, 로봇형이 16편, 모듈형은 12편, 보드형은 7편에서 사용되었다. 결과는 Table 8과 같다.

학교급별로 살펴보면, 초등학교에서는 로봇형(12편)과 모듈형(11편)이 많이 활용됐지만, 보드형은 1편에 그쳤다. 중학교에서는 보드형이 3편, 모듈형이 1편이 사용되었으며, 로봇형은 사용되지 않았다. 고등학교에서는 로봇형은 4편, 보드형은 3편이 활용되었으나, 모듈형은 사용되지 않았다.

도구 측면에서 살펴보면, 로봇형은 사용의 편리성, 즉각적인 피드백 제공, 복잡한 제어 활동에의 적합성 등으로 다양한 교육 현장에 널리 활용되고 있었다[50]. 모듈형은 조각이 직관적이고 단순해 주로 초등학생을 대상으로 사용되었으며[48, 53], 보드형 도구는 회로 구성, 센서·모터 제어 등 컴퓨터 구조와 HW 원리를 실제로 체험하며 학습할 수 있어 중등 교육에서 주로 채택되었다[18].

Table 8. Number of Papers by Hardware Tools Used

Educational Level	Robot	Module	Board
Elementary School	12	11	1
Middle School	0	1	3
High School	4	0	3
Total	16	12	7

HW 도구 선택 경향을 더욱 심층적으로 이해하기 위해, 교수·학습 방법과 도구 유형 간의 관계를 교차 분석하였으며, 그 결과는 Table 9와 같다.

분석 결과, 로봇형 도구는 학교급별 분석에서 16편이었으나 교수·학습 방법별 분석에서는 22편으로 집계되었다. 이는 일부 연구에서 복수의 교수·학습 방법을 연계 적용했기 때문이다. 구체적으로 언플러그드 활동을 통해 로봇을 직접 제어하고 호기심을 증진한 후 프로그래밍을 진행하거나[39, 53], 언플러그드 활동으로 순차, 반복 알고리즘을 학습한 후 로봇을 통해 실제 구현하는 방식이 사용되었다[48]. 이러한 연계 활용이 가능한 이유는 로봇형 도구가 복잡한 조립 없이 즉각적 실행이 가능하며, 수업 설계와 진행에 있어 높은 유연성을 제공하기 때문이다. 보드형 도구는 전체 7편 중 4편이 문제기반학습에서 활용되었다. 이는 센서와 액추에이터를 자유롭게 조합할 수 있는 보드형 도구의 특성이 다양한 해결책 탐색을 장려하는 문제기반학습과 잘 부합하기 때문으로 보인다.

교수·학습 방법별 도구 선택을 분석하면, 문제기반학습(13편)은 로봇형 5편, 모듈형 4편, 보드형 4편으로 균등한 분포를 보였다. 문제기반학습은 문제의 특성과 학습자의 능력에 따라 여러 종류의 도구를 골고루 사용하는 것으로 해석할 수 있다.

프로젝트기반학습(11편)에서는 로봇형 도구가 9편으로 집중되었다. 이는 최종 산출물의 완성도를 중시하는 프로젝트기반학습에서, 하드웨어 조립의 기술적 진입 장벽을 낮추고 학습자가 창의적인 아이디어 구현과 프로그래밍에 집중할 수 있도록 돕는 로봇형 도구의 특성이 반영된 결과이다[50].

시연·실습(5편)에서는 모듈형 도구가 4편을 차지했다. 김유성, 김영식(2024)은 학생들이 마이크로비트의 온도, 빛, 기울기 센서를 각각 체험한 후 프로그래밍 실습을 통해 작품을 제작하는 단계적 방식을 사용했다[17]. 이는 모듈형 도구의 분리된 기능 구조가 교사의 단계별 안내와 학습자의 순차적 체험 및 실습에 최적화되어 있기 때문이다.

종합적으로, HW 도구 선택은 학교급별, 교수·학습 방법 간의 특성을 기반으로 한 전략적 교육 설계로 나타났다. 이는 학습자의 발달 단계, 수업 목표, 도구 조작성 등의 다양한 요인을 종합적으로 고려한 의사결정 결과이며, 효과적인 교육 실현을 위해서는 도구 특성과 교수·학습 방법의 적합성을 중심으로 한 체계적 접근이 필요함을 시사한다.

Table 9. Tool Types by Teaching-Learning Method

Teaching-Learning Methods	Robot	Module	Board	Total
Problem-Based Learning	5	4	4	13
Project-Based Learning	9	1	1	11
Demonstration-Practice	1	4	0	5
Unplugged	3	1	0	4
Design Thinking	1	1	1	3
Others	3	1	1	5
Total	22	12	7	

4.6.2 프로그래밍 언어

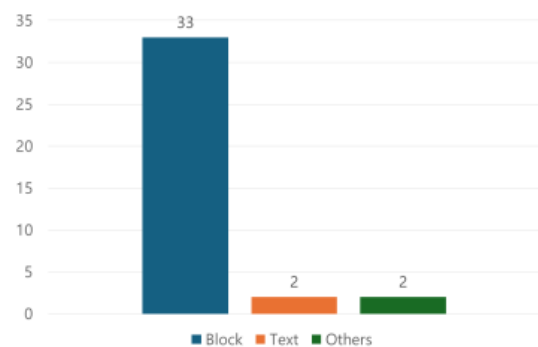
AI 교육에서 피지컬 컴퓨팅을 활용할 때 사용된 프로그래밍 언어는 중복을 허용하여 분석하였으며, 그 결과는 Fig. 7과 같다. 블록형 언어가 33편으로 가장 많았으며, 텍스트형은 2편, 기타는 2편으로 나타났다.

블록형 언어는 시각적이고 간단한 코딩 환경을 제공하여 학습자의 AI 접근성과 이해도를 높이고, 짧은 수업 시간 내에 알고리즘 개념 습득과 HW 제어 경험이 가능하여 주로 이용되었다[18, 38, 50].

텍스트형 언어는 코딩에서 발생하는 문법 오류와 디버깅 과정의 인지적 부담, AI 개념과 프로그래밍을 동시에 학습해야 하는 복합적 난이도, 그리고 교사의 전문성과 수업 시간 등 현실적 제약 등으로 저조한 사용을 보였다[50, 54].

기타는 카드형 언어로 초등 저학년층을 대상으로 활용된 사례가 2편 확인되었으며, 이는 프로그래밍 경험이 적은 학습자들에게 기초 AI 개념을 도입하기 위한 교육적 접근으로 사용되었다[53].

종합적으로, 피지컬 컴퓨팅을 활용한 AI 교육에서는 학습 접근성과 실습 용이성을 고려해 블록형 프로그래밍 언어가 주로 활용되고 있다. 반면, 고등학교 교육과정에서 텍스트 코딩 중심임에도 관련 연구가 제한적인 것은 피지컬 컴퓨팅을 활용한 AI 교육이 아직 도입 초기 단계에 머물러 있음을 시사한다. 이에 비해 중·고등 교사들은 텍스트형 프로그래밍 AI 실습의 필요성을 높게 인식하고 있어[55], 교육 현장의 요구와 연구 현황 간 격차가 존재함을 시사한다.

**Figure 7.** Number of Papers by Programming Language

5. 결론 및 제언

본 연구는 2022 개정 교육과정에 AI 교육이 본격 도입되는 시점에서, AI 교육을 효과적으로 실행하기 위한 방안으로서 피지컬 컴퓨팅에 주목하였다. 이에 따라 2020년 이후 발표된 국내 초·중등 AI 교육에서 피지컬 컴퓨팅을 활용한 연구 34편을 체계적으로 분석하였다. 연구 현황, 핵심 역량, AI 교육 내용, 교수·학습 방법, 교과 융합, 도구 유형 등을 중심으로 분석을 실시하였으며, 그 결론은 다음과 같다.

연구 현황 측면에서, 피지컬 컴퓨팅을 활용한 AI 교육 연구는 최근 급증했으나 초등교육에 편중된 불균형을 보였다. 초등학교 연구의 활성화는 2022 개정 교육과정의 정책적 기반 위에서[3], 피지컬 컴퓨팅이 학생의 인지 발달 단계에 적합하여 높은 학습 효과를 나타내며[56], 담임교사제 하에서 교육 프로그램 적용이 용이하다는 구조적 이점이 복합적으로 작용한 결과로 볼 수 있다[57]. 반면 중등학교 연구의 부족은, 기존 SW 교육이 직면했던 현실적 제약이 AI 교육으로 이어지고 있음을 시사한다. 구체적으로 교사의 전문성 부담, 자원 확보의 어려움, 고교 정보과목의 선택과목 편성이라는 구조적 한계가 복합적으로 작용하며 연구 활성화를 가로막는 주요인으로 분석된다[19, 50, 52, 58].

연구 방법론 측면에서는 양적 연구와 혼합 연구 중심의 효과성 검증에 치중되어 있으며, 질적 연구는 제한적으로 이루어졌다. 이는 피지컬 컴퓨팅의 교육적 효과를 충분히 활용하지 못하는 한계를 드러낸다. 피지컬 컴퓨팅은 코드·하드웨어 불일치로 인한 디버깅, 협력적 상호작용 등 기존 AI 교육과 차별화되는 학습 경험을 제공한다. 이러한 복합적 현상은 양적 데이터로는 충분히 파악되지 않는다. 따라서 ‘효과성’중심에서 ‘학습 메커니즘’규명 중심으로 연구 방향을 전환하여 질적 접근이 필요하다.

핵심 역량 측면에서는 컴퓨팅 사고력과 창의적 문제해결력 등 기존 SW 교육에서 강조되어 온 인지적 역량이 중심이 되었다. 반면, AI 관련 역량과 정의적 역량은 상대적으로 부족하게 다루어졌다. 따라서 AI 리터러시, 디지털 시민성 등 AI 시대의 핵심 역량을 포괄하는 교육 모델 개발이 요구된다.

AI 교육 내용에서는 ‘활용’영역이 모든 연구에서 다루어졌으나, ‘이해’와 ‘가치’영역은 상대적으로 부족하게 다루어졌다. 이는 현재 피지컬 컴퓨팅을 활용한 AI 교육이 기술적 구현과 실용적 적용에 치중되어 있음을 보여주며, 향후 AI의 원리적 이해와 사회적 책임을 아우르는 포괄적 AI 교육 패러다임으로의 전환이 요구된다.

교수·학습 방법으로는 문제기반학습과 프로젝트기반학습이 주로 활용되었으며, 이는 피지컬 컴퓨팅의 체험적 특성과 AI의 실생활 문제 해결 특성이 구성주의 학습과 높은 적합성을 보이기 때문으로 해석된다.

교과 융합 측면에서는 단일 교과 중심의 연구 편중과 기술 관련 교과군으로의 융합 집중이라는 이중적 한계를 보였다. 이러한 현상은 2022 개정 교육과정에서 AI 교육 내용을

직접 포함하는 교과에 연구가 집중된 결과로 볼 수 있다. 그러나 피지컬 컴퓨팅은 체험적·조작적 특성상 다양한 교과의 핵심 개념과 연결될 수 있는 잠재력을 지닌다. 따라서 현재의 기술 중심 융합을 넘어 국어, 예술 등 보다 다양한 교과 영역으로 융합 연구를 확장하고, 교과 간 협력을 지원하는 체계적 접근이 필요하다.

도구 유형 분석에서는 학교급별로 교육 목표에 따른 체계적 설계를 확인할 수 있었다. 초등학교에서는 조작성과 흥미를 고려해 로봇형과 모듈형 도구가 주로 활용되었다. 중·고등학교에서는 문제 탐구를 위한 보드형 도구와 프로젝트 완성을 위한 로봇형 도구를 전략적으로 선택하는 이원화된 접근을 보여주었다.

피지컬 컴퓨팅을 활용한 AI 교육에서 나타나는 블록형 언어 편중 현상은 중요한 교육적 과제를 시사한다. 현재 교육은 초기 학습자의 진입 장벽을 낮추는 데는 성공했으나, 심화 학습으로의 연속적 이행을 효과적으로 지원하지 못하고 있다. 특히 텍스트 프로그래밍을 지향하는 고등학교 교육과정과 블록형 언어를 중심으로 하는 교육 현장 간의 괴리는 설계된 교육과정과 실행된 교육과정 사이의 구조적 불일치를 보여준다. 따라서 블록형에서 텍스트형으로의 점진적 전환을 지원하는 연계 전략을 마련하고, 학습 단계 간 연속성을 담보하는 체계적인 교수·학습 모델 개발이 필요하다.

이를 바탕으로, 피지컬 컴퓨팅을 활용한 AI 교육의 질적 향상을 위한 구체적 제언은 다음과 같다.

첫째, 피지컬 컴퓨팅을 활용한 AI 교육의 고유한 가치를 극대화하기 위해, 교육 목표와 연구 방법을 체계적으로 발전시켜야 한다.

본 연구 분석 결과, 현재 국내 피지컬 컴퓨팅을 활용한 AI 교육 연구는 컴퓨팅 사고력 중심의 인지적 역량에 편향되어 학습 동기, 자신감, 협력적 태도 등 정의적 역량을 충분히 다루지 못하고 있다. 또한 AI 교육 내용이 기술의 ‘활용’에 치중되며 원리적 ‘이해’와 사회·윤리적 ‘가치’ 영역이 부족한 한계를 보였다.

피지컬 컴퓨팅 환경은 바로 이러한 한계를 극복할 수 있는 독특한 교육적 잠재력을 지니고 있다. 디지털과 물리적 세계를 직접 연결하는 체험적 특성을 통해 AI의 작동 원리에 대한 구체적 ‘이해’를 촉진하고[37, 40], 실생활 문제 해결 과정에서 자연스러운 ‘활용’ 경험을 제공하며[36, 38], AI 윤리 딜레마 상황에서 ‘가치’성찰을 유도할 수 있다[22]. 또한, 동료와 협력하며 시행착오를 겪는 제작 과정은 협력적 태도, 끈기, 자신감과 같은 핵심적인 정의적 역량을 자연스럽게 함양시키는 최적의 학습 환경을 제공한다[39].

따라서 이러한 잠재력을 바탕으로, 교육 목표를 다차원적으로 발전시켜야 한다. 인지적 역량에서는 AI 리터러시, 창의적 문제해결력과 함께 실제 센서 데이터를 통한 AI 모델 학습 과정 이해, 다중 입출력 장치를 활용한 AI 시스템 설계 능력, 물리적 제약 속에서 AI 솔루션을 구현하는 실세계 연결 역량 등 피지컬 컴퓨팅 환경에서 특화되는 역량들을 포함해야 한다. 정의적 역량에서는 협력적 제작 과정에서 형성

되는 AI 기술에 대한 호기심과 탐구 정신, 오류 해결 과정에서 기르는 끈기와 회복력, 성공적 구현을 통한 자신감과 학습 동기 등을 통합적으로 개발하고, AI 윤리적 판단력, 디지털 시민성 등까지 포괄하는 교육 프로그램이 필요하다.

연구 방법 측면에서는 피지컬 컴퓨팅을 활용한 AI 교육이 이러한 다차원적 역량을 ‘어떻게’ 효과적으로 함양시키는지에 대한 과정을 심층적으로 규명하는 질적 연구가 확대되어야 한다. 구체적으로 학생들이 AI 센서 데이터 오류를 물리적 조작으로 해결하며 AI 이해를 재구성하는 과정, 피지컬 컴퓨팅 도구로 AI 모델을 구현하며 경험하는 성취감과 기술 인식 변화, AI 기반 물리적 시스템의 윤리적 활용을 동료와 토론하며 나타나는 가치 판단 형성 과정 등을 생생하게 관찰하고 분석함으로써, 피지컬 컴퓨팅을 활용한 AI 교육이 제공할 수 있는 고유한 역량을 검증해야 한다.

이처럼 교육 목표의 통합적 발전과 연구 방법의 질적 심화가 유기적으로 결합될 때, 피지컬 컴퓨팅은 단순한 교육 도구를 넘어 AI 시대를 살아갈 학습자를 기술을 깊이 이해하고 책임감 있게 사용하며, 따뜻한 감성으로 협력하는 창의·융합 인재로 성장시키는 핵심 교육 플랫폼으로 자리매김할 것이다.

둘째, 교육과정 목표와 학습자 발달 수준에 적합한 피지컬 컴퓨팅 도구 및 프로그래밍 언어의 선정 기준과 활용 전략을 체계적으로 정립해야 한다.

AI 교육에서 효과적인 도구 선택은 학습 성과에 결정적인 영향을 미치며[52], 학습 과정에서 겪을 수 있는 인지적 부담과 이를 극복했을 때 얻는 성취감을 고려한 전략적 접근이 중요하다[49]. 선행연구에서 초등 단계는 로봇형 도구가 높은 교육적 효과를 보였고[56], 중등 고학년에서는 텍스트 기반 언어에 대한 선호가 있으며[49], 이는 학교급별, 그리고 학습자 특성을 고려한 맞춤형 접근의 필요성을 뒷받침한다.

하지만 실제 교육 현장에 적용할 최적화 전략에 관한 실증 연구는 여전히 부족하다. 따라서 AI 교육의 연속성 확보와 효과성 극대화를 위해, 다음과 같은 학교급별 ‘학습 경로’ 설계 연구에 주목해야 한다.

먼저, 초등학교에서는 로봇형 도구를 중심으로 AI 개념을 직관적으로 체험하고 긍정적 인식을 형성하도록 돕는 연구가 요구된다. 다음으로 중학교 단계에서는 모듈형 또는 보드형 도구를 활용해 데이터를 직접 다루고 AI 모델 학습을 경험하며, 프로젝트 기반으로 문제 해결 학습을 심화해야 한다. 마지막으로 고등학교 단계에서는 텍스트 기반 프로그래밍을 중심으로 AI 기술의 심층적 이해와 적용 능력을 함양하는 데 중점을 두어야 한다. 특히 블록형에서 텍스트형 코딩으로의 효과적인 전환을 지원하는 교수·학습 전략과 스캐폴딩 방안 등에 대한 실증 연구가 더욱 활성화될 필요가 있다.

이러한 체계적인 학습 경로의 설계와 적용은 초·중등 AI 교육의 질을 높이고 학습자의 역량 함양에 실질적으로 기여할 것이다.

셋째, 기술 중심의 단편적 교육을 넘어, 피지컬 컴퓨팅을 활용한 다양한 교과 지식을 통합하는 AI 교육 융합 모델의 개발과 그 확산을 위한 제도적 지원이 필요하다.

본 연구 분석 결과, 현재 피지컬 컴퓨팅을 활용한 AI 교육 연구는 기술 관련 교과군에 편중된 단일 교과 중심의 접근이 주를 이루고 있다. 이러한 접근은 AI 기술을 특정 교과의 기능적 도구로만 국한시켜, 학생들이 다양한 학문적 관점에서 AI를 이해하고 그 사회적 가치를 성찰할 기회를 제한하는 한계를 가진다. 물론, 일부 연구들은 피지컬 컴퓨팅의 융합적 잠재력을 명확히 보여준다. 박정호와 박수영(2023)은 ‘AI 스마트 하우스 제작’이라는 실생활 문제 해결 프로젝트를 중심으로 과학의 단원 개념 탐구와 수학의 전개도 설계, 미술의 창의적 제작, 실과의 센서 프로그래밍이 연결되는 융합 과정을 구현하였다[42]. 강신조와 최유현(2023)은 ‘AI 적용 제품 개선’이라는 공통 과제를 중심으로 도덕의 AI 윤리와 미술의 아이디어 시각화, 실과의 기술 구현, 국어의 발표 소통을 융합하여 각 교과의 역량이 상호작용하며 문제를 해결하도록 수업을 구성하였다[44]. 그러나 이러한 사례들의 존재에도 불구하고, 이와 같이 깊이 있는 융합 모델을 탐색한 연구는 전반적으로 매우 부족한 실정이다. 따라서 피지컬 컴퓨팅의 교육적 잠재력을 일부의 가능성에서 보편적 실천으로 확산시키기 위해, 향후 연구는 인문·사회·예술 교과 등 다양한 교과와 새로운 융합 모델을 개발하고 그 교육적 효과를 검증하는 방향으로 체계적인 확장이 요구된다.

또한, 이러한 혁신적인 융합 교육이 학교 현장에 성공적으로 안착하기 위해서는, 피지컬 컴퓨팅 도구 확보를 위한 예산 지원, 교과 간 협력 AI 교육 역량 강화를 위한 교사 연수, 융합 수업을 가능하게 하는 유연한 교육과정 운영 등 다차원적인 제도적 지원이 반드시 뒤따라야 한다.

이러한 통합적 노력을 통해 학생들은 AI 시대에 요구되는 기술적 이해력을 바탕으로 인문학적 성찰을 더해, 새로운 가치를 창출하는 창의적 인재로 성장할 수 있을 것이다.

본 연구는 국내 34편의 문헌을 분석 대상으로 하였으므로 연구 결과의 일반화나 국제적 동향과의 직접 비교에는 한계를 지닌다. 그러나 본 연구는 국내 피지컬 컴퓨팅을 활용한 AI 교육의 현황과 발전 방향을 체계적으로 제시하고, 학교급과 교수·학습 방법에 따른 도구 선택의 차별화 패턴을 실증적으로 규명함으로써, 향후 교육 정책 및 프로그램 개발에 필요한 핵심적인 학술적·실천적 토대를 마련했다는 데 의의가 있다.

이러한 결과를 바탕으로, 향후 연구는 본 연구가 발견한 사실들을 더욱 깊이 있게 탐구하는 방향으로 확장되어야 한다. 개별 연구들의 효과 크기를 통계적으로 비교하는 메타 분석을 통해 어떤 도구, 교수·학습 방법이 가장 효과적인지 정량적으로 검증하거나, 학습 효과의 지속성을 확인하는 장기적 연구 등 다양한 접근이 이루어져야 한다. 이러한 후속 연구는 피지컬 컴퓨팅을 활용한 AI 교육의 이론적 토대를 공고히 하고, 교육 현장에 실질적인 가이드라인을 제공함으

로써, 미래 사회가 요구하는 AI 소양을 갖춘 창의·융합 인재 양성이란 국가적 목표 달성에 핵심적인 동력이 될 것이다.

참고문헌

- [1] Eom, H. J., & Lee, M. J. (2020). A Study on Labor Market Changes from Artificial Intelligence (AI) in the Intelligence Information Society. *Information Society & Media*, 21(2), 1-20.
<https://doi.org/10.52558/ISM.2020.08.21.2.1>
- [2] Touretzky, D., Gardner-McCune, C., & Seehorn, D. (2023). Machine learning and the five big ideas in AI. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 33(2), 233-266.
<https://doi.org/10.1007/s40593-022-00314-1>
- [3] Ministry of Education. (2021). *2022 Revised Curriculum Overview*. Sejong city. Ministry of Education
- [4] Ministry of Education. (2022). *Practical (Technology/Home Economics)/Information Department Curriculum*. (Ministry of Education Notification No. 2022-33. Separate Volume 10). Ministry of Education.
- [5] Lee, E. (2020). A Comparative Analysis of Contents Related to Artificial Intelligence in National and International K-12 Curriculum. *The Journal of Korean Association of Computer Education*, 23(1), 37-44. <https://doi.org/10.32431/kace.2020.23.1.003>
- [6] Kim, S. W., Kim, S. A., Park, C. S., Hong, J. Y., & Park, J. H. (2023). Development of Modular Artificial Intelligence Education Textbooks to Cultivate Pre-service Teachers' Artificial Intelligence Literacy. *The Journal of Korean Association of Computer Education*, 26(5), 43-56.
<https://doi.org/10.32431/kace.2023.26.5.004>
- [7] Kim, S., Kim, S., Lee, M., & Kim, H. (2020). Review on Artificial Intelligence Education for K-12 Students and Teachers. *The Journal of Korean Association of Computer Education*, 23(4), 1-11.
<https://doi.org/10.32431/kace.2020.23.4.001>
- [8] Kim, S. W., & Lee, Y. (2020). Development of Test Tool of Attitude toward Artificial Intelligence for Middle School Students. *The Journal of Korean Association of Computer Education*, 23(3), 17-30. <https://doi.org/10.32431/kace.2020.23.3.003>
- [9] Sung, E., Kim, D., Shin, S., & Lee, Y. (2023). The possibilities and promises for educational practice of artificial intelligence. *Journal of Educational Technology*, 39(4), 1479-1508.
<https://doi.org/10.17232/KSET.39.4.1479>
- [10] Akgun, M., & Hosseini, H. (2025). AI Education in a Mirror: Challenges Faced by Academic and Industry Experts. *arXiv e-prints*, arXiv-2505.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.02856>
- [11] Tedre, M., Toivonen, T., Kahila, J., Vartiainen, H., Valtonen, T., Jormanainen, I., & Pears, A. (2021). Teaching machine learning in K-12 classroom: Pedagogical and technological trajectories for artificial intelligence education. *IEEE access*, 9, 110558-110572.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3097962>
- [12] Kim, S. K., Kim, T. Y., & Kim, K. (2025). Development and effectiveness verification of AI education data sets based on constructivist learning principles for enhancing

- AI literacy. *Scientific Reports*, 15(1), 10725. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-95802-4>
- [13] Ottenbreit-Leftwich, A., Glazewski, K., Jeon, M., Jantaraweragul, K., Hmelo-Silver, C. E., Scribner, A., et al & Lester, J. (2023). Lessons learned for AI education with elementary students and teachers. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 33(2), 267-289. <https://doi.org/10.1007/s40593-022-00304-3>
- [14] O'Sullivan, D., & Igoe, T. (2004). *Physical computing: sensing and controlling the physical world with computers*. Course Technology Press.
- [15] Martins, R. M., & Gresse Von Wangenheim, C. (2023). Findings on teaching machine learning in high school: A ten-year systematic literature review. *Informatics in Education*, 22(3), 421-440. <https://doi.org/10.15388/infedu.2023.18>
- [16] Lee, S., & Kang, S. (2025). Development of Educational Program Integrated Human Rights Awareness Program Using AI Robots. *Journal of Korean Practical Arts Education*, 31(1), 187-208. <https://doi.org/10.29113/skpaer.2025.31.1.09>
- [17] Kim, Y. S., & Kim, Y. S. (2024). The Effect of Physical Computing Programming Education Integrating Artificial Intelligence on Computational Thinking Ability of Elementary School Students. *Journal of the Korea Society of Computer and Information*, 29(3), 227-235. <https://doi.org/10.9708/jksci.2024.29.03.227>
- [18] Jung, H. S. (2024). Analysis of the Effectiveness of AI Convergence Education Using Physical Computing. *Journal of convergence security*, 24(5), 137-144. <https://doi.org/10.33778/kcsa.2024.24.5.137>
- [19] Yang, H., Ahn, S., Kim, S. H., & Kang, S. J. (2024). An Investigation Into the Effects of AI-Based Chemistry I Class Using Classification Models. *Journal of the Korean Chemical Society*, 68(3), 160-175. <https://doi.org/10.5012/jkcs.2024.68.3.160>
- [20] Song, J., & Kim, Y. (2023). Development and Effectiveness of Problem Solving based Safety Education Program using Physical Computing. *Journal of the Korea Society of Computer and Information*, 28(11), 235-243. <https://doi.org/10.9708/jksci.2023.28.11.235>
- [21] Hong, M., & Cho, J. (2022). Development of design principles and conceptual models of artificial intelligence education based on experiential learning for cultivating computational thinking. *The Journal of Korean Association of Computer Education*, 25(3), 61-77. <https://doi.org/10.32431/kace.2022.25.3.006>
- [22] Jung, H. B., & Moon, S. H. (2023). Effects of Artificial Intelligence Education Program Using Robots on Attitudes toward Artificial Intelligence Technology in Elementary School Students. *Journal of Elementary Education*, 39(2), 1-22. <https://doi.org/10.23103/dnueje.2023.39.2.1>
- [23] Kim, S., Kim, S., Lee, M., & Kim, H. (2020). Review on Artificial Intelligence Education for K-12 Students and Teachers. *The Journal of Korean Association of Computer Education*, 23(4), 1-11. <https://doi.org/10.32431/kace.2020.23.4.001>
- [24] Han, S. K. (2020). *Artificial intelligence and education, what should we prepare for?*. Education Policy Forum, 325, 4-7. <https://www.kedi.re.kr/khome/main/journal/selectJournalForm.do?plNum0=13143>
- [25] Kim, S., & Lee, C. (2016). The three-year comparative study of effects of STEAM education programs based on physical computing. *The Journal of Korean Association of Computer Education*, 19(1), 11-18. <https://doi.org/10.32431/kace.2016.19.1.002>
- [26] Hur, K., & Sohn, W. (2017). Education Method for Basic Programming Subject through Physical Computing. *Journal of practical engineering education*, 9(2), 139-148. <https://doi.org/10.14702/jpee.2017.9.2.139>
- [27] Choi, S. Y., & Chang, H. (2024). Development and application of artificial intelligence education program for mathematics convergence using robots. *Education of Primary School Mathematics*, 27(1), 19-38. <https://doi.org/10.7468/jksmec.2024.27.1.19>
- [28] Park, J. H. (2020). The Case Study on Artificial Intelligence Based Maker Education for Pre-Service Teacher. *Journal of Digital Contents Society*, 21(4), 701-709. <https://doi.org/10.9728/dcs.2020.21.4.701>
- [29] Kitchenham, B. (2004). *Procedures for performing systematic reviews*. Keele, UK, Keele University, 33(2004), 1-26.
- [30] Nishikawa-Pacher, A. (2022). Research questions with PICO: a universal mnemonic. *Publications*, 10(3), 21. <https://doi.org/10.3390/publications10030021>
- [31] Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., ... & Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *bmj*, 372. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- [32] Baek, S. H., & You, J. W. (2024). A Systematic Literature Review Analysis of the Development of Artificial Intelligence Education Programs for Elementary School Students in Korea. *Journal of Educational Studies*, 55(2), 59-83. <https://doi.org/10.15854/jes.2024.06.55.2.59>
- [33] Lee, D., Yi, S., & Lee, Y. (2022). A Study of Domestic Programming Education in Elementary School Based on Systematic Literature Review. *The Journal of Korean Association of Computer Education*, 25(6), 35-50. <https://doi.org/10.32431/kace.2022.25.6.003>
- [34] Yoo, K., & Suh, W. (2024). A Systematic Literature Review of the Study on the Incorporation of K-12 Artificial Intelligence Education. *The Journal of Korean Association of Computer Education*, 27(7), 83-90. <https://doi.org/10.32431/kace.2024.27.7.008>
- [35] Lee, S., & Song, K. (2023). Exploration of Domestic Research Trends on Educational Utilization of Generative Artificial Intelligence. *The Journal of Korean Association of Computer Education*, 26(6), 15-27. <https://doi.org/10.32431/kace.2023.26.6.002>
- [36] Hong, H. J., & Park, C. J. (2023). Development of an Artificial Intelligence-Based Convergence Education

- Program Focusing on Transportation Technology Problems in Middle School Technology Subjects for Enhancing Computational Thinking Ability. *The Journal of Korean Association of Computer Education*, 26(1), 83-94.
<https://doi.org/10.32431/kace.2023.26.1.008>
- [37] Kim, I., & Yoo, I. (2023). Development of ML instruction program centered on challenge-based learning to improve creative problem-solving skills. *Journal of Elementary Education*, 39(4), 113-136. <https://doi.org/10.23103/dnueje.2023.39.4.113>
- [38] Yoon, K., & Moon, S. (2023). Effects of a Drone-Based Artificial Intelligence Education Program on Elementary School Students' Creative Problem-Solving Skills. *Korean Journal of Elementary Education*, 34(4), 101-117. <https://doi.org/10.20972/Kjee.34.4.202312.101>
- [39] Park, S. (2024). Development of an AI Robot Career Education Program. *Journal of Korean Practical Arts Education Research*, 30(4), 79-102. <https://doi.org/10.29113/skpaer.2024.30.4.05>
- [40] Ministry of Education. (2015). *Practical (Technology, Home Economics)/Informatics Curriculum* (Ministry of Education Notice No. 2015-74, Separate Volume 10). Ministry of Education.
- [41] Yun, H. K., & Kim, Y. (2024). Development and Application of a Project-based AI Career Education Program to Cultivate Elementary School Students' AI Attitudes and Career Exploration Competency. *Journal of The Korean Association of Information Education*, 28(1), 73-86. <https://doi.org/10.14352/jkaie.2024.28.1.73>
- [42] Park, J. H., & Park, S. Y. (2023). A Study on SW·AI-based STEAM Convergence Camp Program. *Journal of the Edutainment. Korea Edutainment Society*, 5(1), 13-25. <https://doi.org/10.36237/koedus.5.1.13>
- [43] Lee, S., & Kim, J. (2023). Development and Application of SW·AI Convergence Digital Citizenship Education Program for Elementary School Students. *Journal of The Korean Association of Information Education*, 27(6), 801-810. <https://doi.org/10.14352/jkaie.2023.27.6.801>
- [44] Kang, S., & Choi, Y. (2023). The Effect of Design Thinking(3I)-based Artificial Intelligence Convergence Making Activity Program on Elementary School Students' Creative Convergence Mindset. *The Korean Journal of Technology Education*, 23(2), 51-70. <https://doi.org/10.34138/KJTE.2023.23.2.51>
- [45] Kim, T., & Han, S. (2021). Development and application of online physical computing curriculum for pre-service teachers. *Journal of The Korean Association of Information Education*, 25(4), 621-632. <https://doi.org/10.14352/jkaie.2021.25.4.621>
- [46] Lim, S. W., & Park, H. (2022). Development of a Physical-Computing Based STEAM Education Program - Focused on Exploring the Heartbeat. *BIOLOGY EDUCATION*, 50(2), 172-186. <https://doi.org/10.15717/bioedu.2022.50.2.172>
- [47] Zha, H., Li, W., Wang, W., & Xiao, J. (2025). The Paradox of AI Empowerment in Primary School Physical Education: Why Technology May Hinder, Not Help, Teaching Efficiency. *Behavioral Sciences*, 15(2), 240. <https://doi.org/10.3390/bs15020240>
- [48] Kim, I., Jun, S., & Yi, S. (2023). Development and Effect Analysis of SW and AI Camp Programs using Educational Robots for Elementary School Students. *Journal of The Korean Association of Information Education*, 27(4), 411-423. <https://doi.org/10.14352/jkaie.2023.27.4.411>
- [49] Kim, S. (2020). Development of artificial intelligence (AI)-based maker education program using physical computing. *The Korean Journal of Technology Education*. 20(3), 76-95. <https://doi.org/10.34138/KJTE.2020.20.3.76>
- [50] Yoo, J. M., Yoon, H. S., & Kim, K. B. (2024). Development of a Software Education Program Using Autonomous Flying Drones. *Smart Media Journal*, 13(12), 56-68. <https://doi.org/10.30693/SMJ.2024.13.12.56>
- [51] Oh, H. G., Yoon, J. A., & Kim, K. S. (2023). Effects and Development of the Smart Farm Maker Education Program in the Middle School Technology Subject. *Journal of the Korean Institute of Industrial Educators*, 48(1), 172-193. <https://doi.org/10.35140/kiiedu.2023.48.1.172>
- [52] Lee, E. (2019). A Meta-Synthesis of Research about Physical Computing Education in Korean Elementary and Secondary Schools. *The Journal of Korean Association of Computer Education*, 22(5), 1-9. <https://doi.org/10.32431/kace.2019.22.5.001>
- [53] Noh, J., & Park, K. H. (2023). The Effects of SW·AI Convergence Educational Program on Computational Thinking, Motivation and Attitude. *Journal of The Korean Association of Information Education*, 27(6), 775-789. <https://doi.org/10.14352/jkaie.2023.27.6.775>
- [54] Yoon, S. Y., & Choe, H. J. (2022). Developing a Framework for Teaching Text-Based Programming in High School. *Journal of Digital Contents Society*, 23(10), 1969-1979. <https://doi.org/10.9728/dcs.2022.23.10.1969>
- [55] Jeon, I. S., Jun, S. J., & Song, K. S. (2020). Teacher Training Program and Analysis of Teacher's Demands to Strengthen Artificial Intelligence Education. *Journal of The Korean Association of Information Education*, 24(4), 279-289. <https://doi.org/10.14352/jkaie.2020.24.4.279>
- [56] Bae, Y., & Lee, J. (2020). Effects of SW-STEAM Education for Elementary School: A Meta-Analysis. *The Journal of the Korea Contents Association*, 20(10), 247-258. <https://doi.org/10.5392/JKCA.2020.20.10.247>
- [57] Choi, E. Y., Moon, B. C., & Han, K. L. (2017). Analysis of research trends on STEAM education in Korea-focus on from 2011 to 2016. *Journal of the Korean Society of Earth Science Education*, 10(2), 185-198. <https://doi.org/10.15523/jksese.2017.10.2.185>
- [58] Hong, W., Choi, J. S., & Lee, H. (2020). Effects of maker education for high-school students on attitude

toward software education, creative problem solving, computational thinking. *Journal of The Korean Association of Information Education*, 24(6), 585-596. <https://doi.org/10.14352/jkaie.2020.24.6.585>



임수훈

- 2013년 한국교원대학교 컴퓨터교육과(교육학사)
- 2025년 한국교원대학교 정보영재교육전공(교육학석사)
- 2025년~현재 한국교원대학교 컴퓨터교육과 박사과정
- 2016년~현재 중등학교 교사

✚ 관심분야: 인공지능 교육, 피지컬 컴퓨팅 교육, 융합 교육

✉ suhun51@naver.com



고학능

- 2015년 광주교육대학교 과학교육과(교육학사)
- 2018년 광주교육대학교 대학원 초등컴퓨터교육전공(교육학석사)
- 2024년 한국교원대학교 초등컴퓨터교육(교육학박사)
- 2018년~현재 초등학교 교사

✚ 관심분야: 프로그래밍 교육, 온라인 저지, 인공지능 교육, 데이터 과학

✉ snddl3@outlook.kr



김성원

- 2013년 한국교원대학교 컴퓨터교육과(교육학사)
- 2015년 서울대학교 과학교육과 생물전공(교육학석사)
- 2020년 한국교원대학교 컴퓨터교육과(교육학박사)
- 2024년~현재 부산교육대학교 컴퓨터교육과 조교수

✚ 관심분야: 인공지능 교육, TPACK, 로봇 프로그래밍 교육, 융합 교육

✉ swkim@bnue.ac.kr



이영준

- 1988년 고려대학교 전산학과(이학사)
- 1994년 미국 미네소타대학교 전산학과(Ph.D)
- 2003년~현재 한국교원대학교 컴퓨터교육과 교수

✚ 관심분야: 지능형시스템, 학습과학, 정보교육, 인공지능교육

✉ yjlee@knue.ac.kr