

컴퓨터교육학회 논문지 2026년 제29권 제7호
<https://doi.org/10.32431/kace.2026.29.7.011>



예비교사를 위한 AI-TPACK 기반 피지컬 AI 활용 교육과정 개발 및 적용

Development and Application of an AI-TPACK-based Physical AI Education Curriculum for Pre-Service Teachers

이은지[†] · 김귀훈^{††}
 Eunji Lee[†] · Kwihoon Kim^{††}

요약

본 연구는 AI-TPACK 기반 피지컬 AI 활용 교육과정을 개발하고, 그 적용에 따른 예비교사의 AI 융합교육 교수역량 변화를 분석하는 데 목적이 있다. 이를 위해 ADDIE 모형에 따라 AI-TPACK 5단계의 15주 45차시 교육과정을 개발하여 사범대학 재학생 18명에게 적용하고, 자료는 기술통계와 Wilcoxon 부호순위 검정으로 분석하였다. 그 결과 전체 교수역량이 통계적으로 유의하게 향상되었고($Z=-3.73$, $p<.001$, $r=.88$), 설계·실행·평가 하위 영역도 모두 유의한 향상과 큰 효과크기를 보였다($r=.77\sim.88$). 또한 수업 산출물의 AI-TPACK 요소별 매핑 분석에서 예비교사가 피지컬 AI를 교과 내용과 연계해 AI 융합수업으로 설계하고 구현할 수 있음을 확인하였다. 본 연구는 AI-TPACK 모형을 개념적으로는 센서 입력-데이터 해석-AI 판단-물리적 출력으로 이어지는 피지컬 AI로 확장하고, 교수설계 측면에서는 보드형·모듈형·로봇형 도구 선정과 센서·액추에이터를 교과 내용과 연계하는 과정을 반영하였으며, 예비교사 대상 피지컬 AI 활용 교육과정의 적용 가능성을 제시했다는 점에서 의의가 있다.

주제어 AI 융합교육, 피지컬 AI, AI-TPACK, 예비교사 교육, AI 융합교육 교수역량

ABSTRACT

This study aimed to develop an AI-TPACK-based Physical AI curriculum and to analyze the resulting changes in pre-service teachers' AI-convergence teaching competencies. Based on the ADDIE model, a five-stage AI-TPACK curriculum spanning 15 weeks and 45 sessions was developed and applied to 18 students enrolled in a college of education, and the data were analyzed using descriptive statistics and the Wilcoxon signed-rank test. Overall teaching competency improved significantly ($Z=-3.73$, $p<.001$, $r=.88$), and the design, implementation, and evaluation subdomains all showed significant gains with large effect sizes ($r=.77\sim.88$). In addition, an AI-TPACK component mapping of the lesson products confirmed that the pre-service teachers could link Physical AI with subject content to design and implement AI-convergence lessons. This study is significant in that it extends the AI-TPACK model in two ways—conceptually, into a Physical AI cycle that links sensor input, data interpretation, AI judgment, and physical output; and in instructional-design terms, by incorporating the selection of board-, module-, and robot-type tools and the linking of sensors and actuators to subject content—and in that it demonstrates the applicability of a Physical AI curriculum for pre-service teachers.

Keywords AI-Convergence Education, Physical AI, AI-TPACK, Pre-service Teacher Education, AI-Convergence Education Teaching Competency

†비회원 한국교원대학교 일반대학원 인공지능 융합교육학과 박사과정
 ††중신회원 한국교원대학교 일반대학원 인공지능융합 교육학과 교수(교신저자)
 논문투고 2026년 04월 29일
 심사완료 2026년 06월 23일
 게재확정 2026년 07월 01일
 발행일자 2026년 07월 30일

1. 서론

인공지능은 디지털 공간을 넘어 현실 세계와 상호작용하는 피지컬 AI로 확장되고 있다. AI는 더 이상 소프트웨어 기반의 정보 처리 기술에만 머무르지 않는다. AI는 센서로 데이터를 수집하여 해석하고, 이를 바탕으로 판단하여, 그 결과를 물리적 출력으로 구현하는 방향으로 발전하고 있다. 이러한 변화는 AI 교육 역시 알고리즘 이해나 도구 활용 중심에서 벗어나, 학습자가 이 전체 과정을 실제 물리적 환경에서 직접 경험하도록 확장될 필요가 있음을 시사한다.

피지컬 AI는 AI 융합교육을 실제 세계와 연결된 문제 해결 경험으로 구체화한다. 학습자는 이러한 과정을 수업에서 직접 경험하며, 이때 피지컬 컴퓨팅은 데이터를 수집하고 학습 결과를 실제 세계에 구현하는 핵심 도구로 활용된다[1]. 이러한 경험은 AI의 작동 원리를 실제 환경과 연결된 문제 해결 과정으로 이해하게 한다는 점에서 교육적 의의가 있다.

그러나 예비교사 대상 AI 교육 연구는 피지컬 AI보다 소프트웨어 기반 접근에 집중되어 왔다. 최근 연구는 AI 리터러시, AI 활용교육, AI 융합교육 프로그램 개발, 기술수용의도, 교수효능감 등으로 확대되고 있으나[2], 주요 연구 흐름은 생성형 AI, 챗봇, AI 플랫폼 활용 등 소프트웨어 기반 도구 활용에 초점을 두는 경향이 강하다[3]. 또한 기존 연구들은 AI 교육 내용을 편향적으로 다루거나 학습자 수준을 충분히 고려하지 못하여 피지컬 컴퓨팅이 지닌 교육적 가능성을 충분히 반영하지 못한 한계가 지적된다[4]. 나아가 AI 융합교육 연구에서도 피지컬 컴퓨팅 도구를 활용한 연구는 6.4%에 그치는 것으로 나타났다[5]. 이는 예비교사 교육에서 AI 융합교육의 범위가 소프트웨어 기반 도구 활용을 넘어, 물리적 환경과 상호작용하는 피지컬 AI 기반 수업 설계 및 실행 경험으로 확장될 필요성을 보여준다.

따라서 본 연구의 목적은 예비교사를 대상으로 AI-TPACK 기반의 피지컬 AI 활용 교육과정을 개발 및 적용하고, 그 과정이 예비교사의 AI 융합교육 교수역량에 미치는 영향을 분석하는 것이다.

2. 이론적 배경

2.1 피지컬 AI

피지컬 AI는 최근 주목받는 인공지능 개념으로, Miriyev & Kovač(2020)는 피지컬 AI를 지능적 유기체와 관련된 과업을 수행할 수 있는 물리적 시스템을 창조하는 이론이자 실천으로 정의하였다[6]. 이후 이 개념은 자율로봇, 재료, 구조, 지각이 통합된 다학문적 인공지능 분야로 설명되었다[7]. 국내 정책 담론에서도 피지컬 AI는 물리적 환경과 상호작용하며 실제 상황에서 작업을 수행하는 인공지능으로 제시되고 있다[8]. 이러한 논의는 인공지능이 디지털 환경 안에서 정보를 처리하는 수준을 넘어, 현실 세계를 인식하고 판단하며 물리적으로 상호작용하는 방향으로 발전하고 있

음을 보여준다.

교육에서 피지컬 AI는 피지컬 컴퓨팅의 개념적 토대 위에서 설명될 수 있다. 피지컬 컴퓨팅 개념을 처음 제시한 O'Sullivan과 Igoe(2004)는 피지컬 컴퓨팅을 “물리적 세계와 컴퓨터의 가상 세계 간의 대화(conversation)를 창조하는 것[9]”으로 설명하였으며, 이 과정이 센서와 액추에이터를 통한 입력, 처리, 출력의 상호작용 구조를 바탕으로 이루어진다고 보았다. 이에 따르면 피지컬 컴퓨팅은 물리적 환경의 변화를 감지하고 이를 컴퓨터가 처리한 뒤 다시 물리적 반응으로 구현하는 체계라 할 수 있다.

피지컬 AI는 이러한 피지컬 컴퓨팅 구조에 인공지능의 데이터 해석 및 판단 기능이 결합된 확장 개념으로 볼 수 있다. 즉, 피지컬 AI는 인공지능이 센서를 통해 수집된 데이터를 해석하고 판단하며, 그 결과를 물리적 출력으로 구현하는 구조를 가진다. 따라서 교육에서의 피지컬 AI는 학습자가 센서 입력-데이터 해석-AI 판단-물리적 출력으로 이어지는 전 과정을 유기적 구조로 경험하도록 하는 교육적 접근으로 정의할 수 있다. 그 과정은 Figure 1과 같다.



Figure 1. Physical AI Structure

2.2 피지컬 AI 활용 교육

피지컬 AI 활용 교육은 인공지능을 추상적인 개념이 아니라 물리적 환경에서 작동하는 시스템으로 구체적으로 경험하게 한다는 점에서 의의가 있다. 학습자는 피지컬 AI를 통해 데이터 수집, 해석, 판단, 실행의 과정을 직접 경험하며 인공지능의 원리와 한계를 구체적으로 이해할 수 있다.

또한 피지컬 AI는 최근 교육 현장에서 요구되는 인지적 역량과 정의적 역량의 균형적 함양에도 기여할 수 있다. 피지컬 컴퓨팅을 활용한 AI 교육의 효과를 살펴보면, 학습자의 컴퓨팅 사고력[10, 11], AI 리터러시[12]와 창의적 문제해결력[13, 14], 협력적 문제해결력[15, 16] 등 인지적 역량 향상에 긍정적인 효과가 보고되었다. 정의적 역량 측면에서도 자기효능감과 인공지능에 대한 태도[17], 자기효능감과 흥미[18], 창의적 자기효능감[19] 등의 향상에 기여하는 것으로 나타났다. 이러한 선행연구는 피지컬 컴퓨팅을 활용한 AI 교육이 학습자의 인지적 역량과 정의적 역량을 함께 신장시키는 데 효과적인 접근임을 보여주며, 피지컬 AI 활용 교육의 교육적 타당성을 뒷받침한다.

이처럼 초중등 학생을 대상으로 한 효과성 연구는 활발히 이루어지고 있으나, 향후 학교 현장에서 피지컬 AI 교육을 설계하고 실행해야 할 예비교사를 대상으로 한 연구는 아직 제한적이다. 김태령 외(2021)는 초등 예비교사를 대상으로 온라인 피지컬 컴퓨팅 교육 프로그램을 개발하였으나, 스마트폰 내장 센서와 앱 활용에 한정되어 실제 학교 현장에

서 활용되는 다양한 도구를 충분히 반영하지 못하였다[20]. 최은희, 박정호(2024)는 AI와 피지컬 컴퓨팅을 함께 다루는 초등 예비교사 대상 교육과정을 개발하였으나, 실제 적용된 이력이 없어 교육적 효과를 실증적으로 검증하는 데 한계가 있었다[21]. 즉, 기존 연구는 예비교사를 대상으로 피지컬 컴퓨팅과 AI를 연계하려는 시도를 보여주었으나, 학교 현장에서 활용 가능한 도구를 바탕으로 프로그램을 개발하고 그 효과를 검증한 연구는 충분하지 않았다. 이에 본 연구는 교육 현장에서 활용 가능한 보드형, 모듈형, 로봇형 피지컬 컴퓨팅을 체계적으로 다루고, 이에 AI를 접목한 피지컬 AI 활용 교육과정을 개발하고자 한다.

2.3 예비교사를 위한 AI-TPACK 모델

TPACK은 내용지식(CK), 교수지식(PK), 기술지식(TK)의 상호작용을 바탕으로 교사가 기술을 수업에 통합하는 역량을 설명하는 틀이다[22]. 그러나 TPACK은 테크놀로지(TK)를 교과 내용과 교수법을 전달하기 위한 보조적 도구로 전제한다. 반면 인공지능은 학습을 지원하는 도구인 동시에 학습해야 할 내용이기도 하므로, 일반 TPACK만으로는 그 특성을 설명하기 어렵다. 이에 인공지능을 내용 차원에서 학습한 뒤 테크놀로지로 전이시키는 과정을 반영한 확장 틀로 AI-TPACK이 제안되었다.

최정원 외(2022)는 기존 TPACK 함양 모델이 인공지능의 내용적 성격을 별도로 다루지 않고, 학습자 과업 중심으로 기술되며, 멘토 수업의 단순 관찰에 의존한다는 한계를 지적하였다[23]. 이를 보완하여 AI-TPACK은 '인공지능 이해' 단계를 독립적으로 추가하고, 교수자의 과업을 명세화하며, 수업 관찰을 예비교사의 직접 참여로 전환하였으며, 그 결과 인공지능 이해, TPACK 이해, 수업 관찰 및 경험, 수업 설계 및 실천, 수업 평가 및 성찰의 5단계로 구성되었다[23].

그러나 AI-TPACK 기반 선행 연구는 주로 AI 소프트웨어 활용에 머물러 피지컬 컴퓨팅 및 피지컬 AI를 다루지 않았다[24, 25]. 이에 본 연구는 AI-TPACK을 두 가지 방향에서 확장한다. 개념적으로는 '도구이자 내용으로서의 AI'를 센서 입력-데이터 해석-AI 판단-물리적 출력의 피지컬 AI로 확장하고, 교수설계 측면에서는 보드형·모듈형·로봇형 도구 선정과 센서·액추에이터를 교과 내용과 연계하는 과정을 함께 고려한다. 이를 바탕으로 예비교사를 위한 피지컬 AI 활용 교육 프로그램을 개발하고자 한다.

2.4 예비교사를 위한 AI 융합교육 교수역량

AI 융합교육이 교육 현장에 정착하기 위해서는 교사의 교수역량이 중요하다. UNESCO(2024)는 AI competency framework for Teachers를 통해 교사의 AI 역량 필요성을 강조하였으며[26], 이소율과 김귀훈(2025)도 AI 융합교육에서 교사의 역할이 복잡해지고 요구되는 전문성의 수준도 높아지고 있다고 보았다[27]. 이는 예비교사에게 필요한

역량이 단순한 AI 지식의 습득에 그치지 않고, 이를 바탕으로 수업을 설계하고 실행하며 평가할 수 있는 교수역량으로 확장되어야 함을 시사한다.

이러한 맥락에서 배운주 외(2023)는 예비교사의 AI 융합 교육 교수역량을 설계역량, 실행역량, 평가역량의 세 하위 요인으로 구성된 측정 도구를 개발하였다[28]. 이 틀은 예비교사가 AI 융합수업을 계획하고 운영하며 학습 결과를 평가하는 전 과정을 포괄한다는 점에서, 본 연구의 목적과 부합한다. 특히 본 연구가 AI-TPACK 기반의 피지컬 AI 활용 교육 프로그램을 통해 예비교사의 AI 융합교육 교수역량 변화를 살펴보고자 한다는 점에서, 해당 검사도구는 프로그램의 효과를 분석하는 데 적절한 기준이 된다. 이에 본 연구는 AI-TPACK 기반 피지컬 AI 활용 교육 프로그램이 예비교사의 AI 융합교육 교수역량에 미치는 영향을 AI 융합교육 설계역량, 실행역량, 평가역량의 세 가지 하위영역을 중심으로 분석하고자 한다.

3. 연구 방법

3.1 연구 대상

본 연구는 K대학교에서 개설한 교양 교과목을 수강한 사범대학 재학생 20명을 대상으로 실시하였다. 해당 교육과정은 15주 동안 주 3차시씩 운영되었으며, 총 45차시로 구성되었다. 연구 분석에는 결석 등의 사유로 사전 또는 사후 설문문에 참여하지 못한 경우를 제외하고, 사전-사후 설문에 모두 참여한 18명의 자료를 활용하였으며, 실험 대상의 일반적 특성은 Table 1과 같다. 모든 자료는 익명 설문으로 수집하였으며, 연구 참여는 자발적이며 교과 성적과 무관함을 사전에 안내하였다.

Table 1. General Characteristics of Participants

Category		n (%)
Gender	Male	9 (50.0%)
	Female	9 (50.0%)
Grade	1st	8 (44.4%)
	2nd	7 (38.9%)
	3rd	1 (5.6%)
	4th	2 (11.1%)
Experience with Physical Computing	Yes	2 (11.1%)
	No	16 (88.9%)
Major	Computer	2 (11.1%)
	English	2 (11.1%)
	German Language	2 (11.1%)
	Home Economics	2 (11.1%)
	Art	1 (5.6%)
	Chinese Language	1 (5.6%)
	Early Childhood	1 (5.6%)
	Earth Science	1 (5.6%)
	Environmental Education	1 (5.6%)

Category		n (%)
Major	Geography	1 (5.6%)
	History	1 (5.6%)
	Mathematics	1 (5.6%)
	Physical Education	1 (5.6%)
	Special Education	1 (5.6%)

Note. "Education" was omitted from some major label.

3.2 연구 설계

본 연구는 예비교사를 위한 피지컬 AI 활용 교육과정을 개발하기 위해, 교육 프로그램의 타당성과 실행 가능성을 체계적으로 확보하는 ADDIE 모형에 따라 수행하였다[29]. 각 단계에서 필요한 자료를 수집·검토하여 다음 단계에 반영하는 방식으로 교육과정을 개발하였다. 연구 설계의 구조는 Figure 2와 같고 구체적인 절차는 Table 2와 같다.

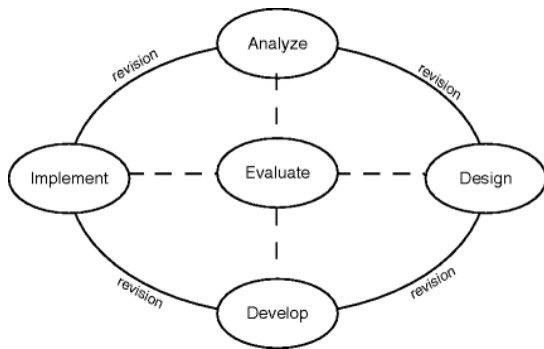


Figure 2. ADDIE-based Development Procedure

분석 단계에서는 교육과정 개발의 기초를 마련하기 위하여 피지컬 AI 관련 선행연구, 예비교사 대상 AI 교육 관련 국내·외 학술논문, 예비교사 대상 피지컬 컴퓨팅 관련 국내·외 학술논문을 검토하였다. 아울러 2022 개정 교육과정을 분석하여 학교 현장에서 요구되는 교육 내용과 방향을 확인하였다. 또한 예비교사 20명을 대상으로 학습자 요구를 조사하여 학습 수준, 관심 영역, 교육적 필요를 파악하고, 이를 교육과정 목표와 내용 구성의 근거로 활용하였다.

설계 단계에서는 분석 결과를 바탕으로 학습 목표를 설정하고, 교육과정 운영에 필요한 교수-학습 도구를 선정하였다. 요구분석 결과 피지컬 컴퓨팅 경험이 없는 학습자가 다수임을 고려하여, 다양한 유형의 피지컬 컴퓨팅 도구를 경험할 수 있도록 보드형, 모듈형, 로봇형 도구와 교육용 AI 플랫폼, 협업 기반 에듀테크를 선정하였다. 또한 이들 도구를 수업 설계에 활용할 수 있도록 AI-TPACK 기반의 교수-학습 구조를 설계하였다. 아울러 한 학기 운영을 전제로 전체 15주차, 총 45차시의 교수-학습 내용을 구성하고, 교육과정의 효과성을 측정하기 위한 검사도구를 선정하였다.

개발 단계에서는 설계 단계에서 도출한 내용을 실제 수업에 적용할 수 있도록 15주차(45차시)의 교수-학습 프로

그램과 차시별 자료를 개발하였다. 각 차시의 학습 목표, 주요 활동, 프로젝트 과제, 활용 도구, 산출물 및 평가 요소가 교육과정의 전체 목표와 연계되도록 구성하였다. 또한 피지컬 AI 수업의 특성상 웹 프로그램 접속 환경, 펌웨어 업데이트, 기기 작동 여부 등 운영 변수를 고려하여, 매 주차 수업 전 관련 장비와 자료를 점검·보완하였다. 이를 통해 프로그램이 실제 수업 맥락에서 안정적으로 실행될 수 있도록 하였다.

실행 단계에서는 개발된 교육과정을 예비교사 20명에게 적용하였다. 적용 전 AI 융합교육 교수역량 수준을 파악하기 위해 사전 검사를 실시한 뒤, 15주차(45차시)의 교육과정을 운영하였다. 수업 과정에서는 학습자의 이해 수준과 활동 수행 정도를 확인하고, 필요에 따라 과제 난이도와 활동 방식을 조정하였다. 수업 종료 후에는 동일한 검사도구로 사후 검사를 실시하고, 학습자 인식을 확인하기 위해 만족도 설문을 실시하였다.

마지막으로 평가 단계에서는 사전-사후 검사 결과를 비교하여 예비교사의 AI 융합교육 교수역량 변화를 분석하고, 만족도 설문 결과를 함께 검토하여 교육과정의 교육적 효과와 적용 가능성을 종합적으로 평가하였다. 이어서 본 교육과정의 타당성을 확보하기 위해 전문가 검토를 시행하여 수정 및 보완 과정을 거쳤다.

Table 2. Research Activities across the ADDIE Phases of Curriculum Development

Phase	Research Activities
A (Analysis)	- Literature review on physical AI, AI education, and physical computing for pre-service teachers - Analysis of the 2022 Revised National Curriculum - Learner needs analysis
D (Design)	- Establishment of learning objectives - Selection of instructional tools - Design of a 15-week AI-TPACK-based program - Selection of assessment instruments
D (Development)	- Development of the instructional program and materials - Preliminary review and revision of instructional materials
I (Implementation)	- Pre-test of AI-Convergence teaching competency - Implementation of the program - Post-test and satisfaction survey
E (Evaluation)	- Analysis of changes in AI-Convergence teaching competency - Analysis of satisfaction survey results - Post-implementation expert review of curriculum

3.3 연구 절차

3.3.1 AI-TPACK 기반 교육과정 설계

AI-TPACK은 교수-학습 활동을 인공지능 이해, TPACK 이해, TPACK 수업 관찰 및 경험, TPACK 수업 설계 및 실천, TPACK 수업 평가 및 성찰의 5단계로 제시한다. 본 연구에서는 이 단계 구조를 바탕으로 피지컬 AI의 특성이 반영

되도록 교육과정을 재구성하였다. 구체적으로 초기 단계에서는 피지컬 AI의 개념, 센서-데이터-AI-출력의 구조, 보드형·모듈형·로봇형 도구 실습을 다루었으며, 이후 단계에서는 이를 교과 수업 맥락에 적용할 수 있도록 사례 분석과 수업 설계 활동을 배치하였다. 단계별 교수자·예비교사 활동은 부록 1과 같으며, 원형 AI-TPACK 모델에 새로 추가 또는 수정한 부분은 볼드체로 표시하였다.

이소율, 김귀훈(2025)의 연구에 따르면, AI 융합교육에서는 실제 교과 수업에 적용 가능한 통합적 수업 설계와 실행 중심의 역량이 중요하다고 강조하였다[27]. 이에 본 연구는 예비교사가 AI 개념 이해를 넘어 피지컬 AI 기반 수업을 분석, 설계, 실천, 성찰하는 일련의 과정을 경험하도록 교육과정을 구성하였다.

3.3.2 피지컬 AI 활용 교육과정 구성

본 연구에서는 김재휘, 김동호(2016) 연구가 피지컬 컴퓨팅 도구의 유형을 보드형, 모듈형, 로봇형으로 구분한 것을 참고하여 교육과정을 구성하였다[30]. 이에 따라 교육과정은 예비교사가 각 유형의 피지컬 컴퓨팅 도구를 형태별로 다양하게 경험하고, 형태별 특징에 대해 이해하고, 이를 AI와 연계하여 수업 설계에 활용할 수 있도록 조직하였다.

교육과정은 AI-TPACK 모델을 기반으로 다섯 단계로 구성하였다. 1단계에서는 인공지능과 피지컬 AI의 개념을 이해하고 교육용 AI 도구와 피지컬 컴퓨팅 도구의 기본 기능을 탐색하도록 하였다. 2단계에서는 AI 융합교육과 TPACK의 개념을 이해하고, 교과 융합 AI 프로젝트와 피지컬 AI 프로젝트를 수행하도록 하였다. 3단계에서는 교과별 AI 융합교육 사례를 분석하고 공유하여 수업 적용 가능성을 탐색하도록 하였다. 4단계에서는 이러한 프로젝트 경험을 바탕으로 적절한 교수-학습 도구를 선정하여 AI 융합 수업을 설계하고 시연하도록 하였다. 5단계에서는 수업 평가와 성찰을 통해 설계한 수업을 반성하고 개선 방향을 도출하도록 하였다.

3.3.3 전문가 내용 타당도 검토

개발된 교육과정의 내용 타당성을 확인하기 위해 I-CVI를 기준으로 전문가 검토를 실시하였다. 1차 검토에서 I-CVI 0.83 미만인 항목은 자료를 수정·보완한 뒤 2차 검토를 거쳐 교육과정 최종본에 반영하였다. 검토에는 컴퓨터교육 박사 학위 소지 대학교수 1명과 박사 2명, AI 융합교육·컴퓨터교육 박사과정 교사 3명, 총 6명(평균 교육 경력 14.8년)이 참여하였다.

검토 문항은 매우 적절함을 4점, 매우 부적절함을 1점으로 하는 4점 리커트 척도로 구성하였으며, 결과는 항목별 I-CVI(Item Content Validity Index)와 척도 수준의 S-CVI/Ave로 산출하였다. 그 결과 2차 검토에서 모든 문항의 I-CVI가 1.00으로, 즉 S-CVI/Ave 1.00으로 나타나, 본 교육과정이 권장 기준을 충족하는 내용 타당도를 확보한 것으로 판단하였다[31]. 구체적인 내용은 Table 3

과 같다.

Table 3. Results of the Content Validity Expert Review (I-CVI)

Category	Item	Round 1		Round 2	
		Mean	I-CVI	Mean	I-CVI
Objectives & Learner Suitability	1	3.83	1.00	3.83	1.00
	2	3.83	1.00	3.83	1.00
Structural Coherence	3	3.83	1.00	3.83	1.00
	4	3.67	1.00	3.67	1.00
	5	3.50	1.00	3.50	1.00
Content & Tool Selection	6	3.17	1.00	3.17	1.00
	7	3.67	1.00	3.67	1.00
Implementation & Assessment	8	3.67	1.00	3.83	1.00
	9	3.00	0.67	3.67	1.00
	10	3.67	1.00	3.67	1.00
S-CVI/Ave		-	0.97	-	1.00

3.4 측정 도구

3.4.1 AI 융합교육 교수역량 검사 도구

예비교사의 AI 융합교육 교수역량을 측정하기 위하여 배운주 외(2023)가 개발한 ‘예비교사의 AI 융합교육 교수역량 측정 도구’를 활용하였다. 해당 도구는 AI 융합교육 설계역량, 실행역량, 평가역량의 3개 하위요인 23 문항으로 구성된다. 원 도구의 각 하위요인의 신뢰도는 설계역량 .931, 실행역량 .913, 평가역량 .910으로 보고되었으며, 전체 신뢰도는 Cronbach's α = .963으로 나타났다. 모든 문항은 5점 Likert 척도(1점=전혀 그렇지 않다, 5점=매우 그렇다)로 응답을 수집하였다. 도구의 구체적인 내용은 Table 4와 같다.

Table 4. Structure of AI Convergence Education Teaching Competency Scale

Category	No. of Items	Description	Cronbach's α
Design Competency	10	AI convergence lesson planning and curriculum design	.931
Implementation Competency	7	Instructional facilitation and learner support using AI	.913
Evaluation Competency	6	Assessment and feedback in AI convergence learning	.910
Total	23	AI convergence teaching competency	.963

3.4.2 학습자 만족도 검사 도구

학습자 만족도 검사는 교육과정에 대한 예비교사의 반응과 수용성을 확인하기 위해 실시하였다. Kirkpatrick의 4수준 평가모형에 따르면 교육 프로그램의 효과는 반응(Reaction), 학습(Learning), 행동(Behavior), 결과

(Results)의 단계로 평가될 수 있으며, 학습자 만족도는 이 중 1수준인 반응 평가에 해당한다[32]. 따라서 본 연구에서는 사전-사후 역량 검사와 수업 산출물 분석을 보완하는 자료로 만족도 검사를 활용하였다.

만족도 검사 문항은 총 14문항으로 구성하였으며, 교육과정 구성, 교수-학습 상호작용, 학습 경험, 이론-실습 연계, 전반적 만족도의 5개 영역을 포함하였다. 각 문항은 5점 Likert 척도(1점=전혀 그렇지 않다, 5점=매우 그렇다)로 응답하도록 하였다. 학습자 만족도 검사 도구의 구성은 Table 5와 같다.

Table 5. Structure of the Learner Satisfaction Questionnaire

Category	Items	Description
Course Organization	1, 2, 3, 8	Course planning and clarity of instruction
Teaching & Interaction	4, 5, 6, 7	Instructional support and interaction
Learning Experience	10, 11	Perceived learning and understanding
Theory-Practice Integration	12, 13, 14	Integration of theory and practice
Overall Satisfaction	9	Overall recommendation and satisfaction

3.5 자료 수집 및 분석

본 연구에서는 피지컬 AI 활용 교육과정의 적용 효과를 분석하기 위하여 사전-사후 검사 결과와 만족도 설문 응답을 수집하였다. 또한 교육과정 수행 과정에서 산출된 수업 설계안과 프로젝트 결과물을 함께 수집하여 학습자의 수행 양상을 확인하였다.

사전-사후 변화를 측정하기 위해 Wilcoxon 부호순위 검정을 사용하였다. 이는 표본 수가 제한적이라는 점과 정규성 가정을 충족하기 어려운 점을 고려한 것이다. 하위 영역별 사전-사후 차이 역시 동일한 방식으로 분석하였다. 통계적 유의성뿐 아니라 변화의 실질적 크기를 확인하기 위해 Wilcoxon 부호순위 검정의 효과크기 r 을 산출하였다($r = |Z| / \sqrt{N}$). Fritz 외(2012)에 따르면 효과크기 r 은 비모수 검정에서도 관찰된 변화의 크기를 제시하여 효과의

실질적 수준을 해석하는 데 유용하다[33]. 효과크기 해석은 Cohen(1988)의 기준에 따라 $r < .30$ 은 작은 효과, $.30 \leq r < .50$ 은 중간 효과, $r \geq .50$ 은 큰 효과로 판단하였다[34]. 분석은 SPSS Statistics 22를 활용하였다.

4. 연구 결과

4.1 교육과정 개발 결과

본 연구에서 개발한 교육과정은 AI-TPACK 모형을 기반으로 예비교사가 인공지능과 피지컬 AI를 이해하고 이를 수업 설계와 실행에 적용할 수 있도록 구성하였다. 교육과정은 총 15주, 45차시로, 인공지능 및 피지컬 AI 이해 → TPACK 이해 및 인공지능·피지컬 AI 프로젝트 → AI 융합 교육 사례 분석 및 공유 → AI 융합 수업 설계 및 실천 → AI 융합 수업 평가 및 성찰의 5단계로 개발하였다.

1단계에서는 인공지능, 피지컬 AI, 생성형 AI 및 AI 기반 에듀테크의 개념을 다루어 AI 융합교육의 기초를 이해하였다. 2단계에서는 TPACK과 TPACK 기반 수업 설계를 이해한 뒤, AI 프로그래밍 실습과 피지컬 AI 프로젝트를 수행하도록 하였다. 프로그래밍 실습에서는 Teachable Machine, Entry AI 등으로 이미지 분류, 컴퓨터 비전, 자연어 처리 등 인공지능의 기본 원리를 경험하였고, 피지컬 AI 프로젝트에서는 micro:bit, Arduino, pingpong robot 등으로 센서 입력-데이터 해석-AI 판단-물리적 출력의 과정을 구현하였다.

3단계에서는 인문·사회, 자연·공학, 예술·체육 영역의 AI 융합 수업 사례를 분석 및 공유하여 AI-TPACK의 적용 방안을 탐색하였고, 4단계에서는 예비교사가 AI 융합 수업을 직접 설계·공유하였으며, 5단계에서는 피드백과 성찰을 통해 수업 개선 방안을 도출하였다.

이처럼 본 교육과정은 이해-실습-사례 분석-설계-성찰의 단계적 구조를 통해 예비교사의 AI 융합교육 교수역량을 함양하도록 설계되었다. 개발된 교육과정의 주차별 구성은 Table 6과 같으며, 이를 한국어로 번역한 내용은 부록 2에 제시하였다.

Table 6. AI-TPACK-Based Physical AI Curriculum for Pre-service Teachers

Stage	Week	Contents	Tools & Platforms	AI-TPACK Phase
Stage 1. Understanding AI & Physical AI	1	Orientation: AI technology and AI-based edutech (AI, physical AI, and generative AI concepts: intro to AI programming)	-	1,2
Stage 2. Understanding TPACK	2	AI-convergence education and TPACK-based instructional design (overview, AI ethics, generative-AI edutech theory & practice, TPACK-based design)	Generative-AI edutech	1,2,3
(1) AI Programming Practice & Projects	3	AI programming I: AI concepts and principles, basics of AI programming	Teachable Machine (AI Classification)	1,2
	4	AI programming II: AI-based problem solving	Entry AI, Computer Vision, NLP, etc.	1,2
	5	AI programming III : subject-integrated AI project (shared via Padlet)	Entry AI, padlet	1,2,3,4

Stage	Week	Contents	Tools & Platforms	AI-TPACK Phase
(2) Physical AI Practice & Projects	6	Introduction to physical-AI-based AI-convergence education and sharing of exemplary cases	-	1,2,3
	7	Physical AI project I (board-type): basic AI practice	micro:bit	1,2
	8	Physical AI project II (module-type): practice based on vibe coding	Arduino with sensors and actuators	1,2
	9	Physical AI/Robot project III (robot-type): robot motion and control	pingpong robot	1,2
	10	Physical AI/Robot project IV: subject-integrated physical AI project (shared via Padlet)	Physical AI tools, padlet	1,2,3,4
Stage 3. Observation & Experience of TPACK Lessons	11	Analysis and sharing of AI-convergence lesson cases (humanities & social studies)	Selected AI or physical AI tools, padlet	3,4
	12	Analysis and sharing of AI-convergence lesson cases (natural sciences & engineering)		3,4
	13	Analysis and sharing of AI-convergence lesson cases (arts & physical education)		3,4
Stage 4. Design & Practice of TPACK Lessons	14	Designing and sharing AI-convergence lessons		4,5
Stage 5. Evaluation & Reflection of TPACK Lessons	15	Feedback on designed AI-convergence lessons and reflection	padlet	4,5

4.2 교육과정 적용 결과

4.2.1 AI 융합교육 교수역량

본 연구에서 개발한 교육과정이 교수역량에 미치는 효과를 분석하기 위해, 측정도구의 신뢰도를 확인하기 위해 내적 일관성 지수인 Cronbach's α 계수를 산출하였다. 그 결과, 전체 AI 융합교육 교수역량의 Cronbach's α 는 사전 .887, 사후 .870으로 나타났으며, 모든 하위 영역에서도 .80 이상으로 확인되어, 본 측정도구는 사전-사후 검사 모두 양호한 내적 일관성을 확보하였다. 자세한 결과는 Table 7과 같다.

교육과정 적용에 따른 AI 융합교육 교수역량의 변화를 확인하기 위해 사전-사후 점수에 대해 Wilcoxon 부호순위 검정을 실시하였다. 분석 결과, 전체 AI 융합교육 교수역량은 사전 점수($M=3.68$, $SD=.42$)보다 사후 점수($M=4.39$, $SD=.46$)가 높게 나타났으며, 이러한 차이는 통계적으로 유의하였다($Z=-3.73$, $p<.001$). 하위 영역별 분석 결과, 설계 역량($Z=-3.73$, $p<.001$), 실행 역량($Z=-3.27$, $p=.001$), 평가 역량($Z=-3.46$, $p=.001$) 모두에서 사전 점수에 비해 사후 점수가 통계적으로 유의하게 향상되었다. 또한 전체 교수역량과 각 하위 영역의 효과크기(r)는 .77~.88의 범위로 나타났으며, Cohen(1988)의 기준에 따라 모두 큰 효과크기($r\geq .50$)에 해당하였다. 자세한 결과는 Table 8에 제시하였다.

Table 7. Reliability of AI Convergence Education Teaching Competency Scale (N=18)

Domain	Cronbach's α	
	Pre-test	Post-test
Design competency	.893	.872
Implementation competency	.895	.875
Evaluation competency	.891	.878
Total	.887	.870

Table 8. Wilcoxon Signed-Rank Test Results for AI Convergence Education Teaching Competency (N=18)

Category		M	SD	Z	p	r
Design	Pre	3.57	.50	-3.73	.000	.88
	Post	4.39	.47			
Implementation	Pre	3.78	.40	-3.27	.001	.77
	Post	4.34	.50			
Evaluation	Pre	3.76	.47	-3.46	.001	.82
	Post	4.44	.50			
Total	Pre	3.68	.42	-3.73	.000	.88
	Post	4.39	.46			

이러한 결과는 본 교육과정 적용 이후 예비교사의 AI 융합교육 교수역량 전반에 긍정적인 변화가 나타났음을 시사한다. 다만 본 연구는 18명의 예비교사를 대상으로 한 단일 집단 사전-사후 설계이므로, 신뢰도 계수와 효과 검정 결과를 해석할 때 표본 규모와 연구 설계상의 제한을 고려할 필요가 있다.

4.2.2 학습자 만족도

학습자 만족도를 영역별로 분석한 결과, 전반적 만족도

(M=4.84)가 가장 높게 나타났으며, 수업 운영(M=4.83), 교수-학습 상호작용(M=4.83), 이론-실습 연계(M=4.82) 순으로 높은 만족도를 보였다. 학습 경험 영역(M=4.77) 역시 높은 수준으로 나타나 본 프로그램이 전반적으로 긍정적인 학습 경험을 제공한 것으로 확인되었다. 자세한 결과는 Table 9에 제시하였다.

Table 9. Learner Satisfaction Score by Category

Category	Items	Mean Score
Course Organization	1, 2, 3, 8	4.83
Teaching & Interaction	4, 5, 6, 7	4.83
Learning Experience	10, 11	4.77
Theory-Practice Integration	12, 13, 14	4.82
Overall Satisfaction	9	4.84

4.2.3 수업 산출물

본 교육과정에서 예비교사들은 단계별 프로젝트를 통해 전공 교과 내용에 AI 및 피지컬 AI를 통합한 산출물을 제작하였다. 본 절에서는 대표 산출물을 1) 프로젝트 유형별 대표 산출물과 2) AI-TPACK 요소별 분석으로 나누어 제시한다.

1) 프로젝트 유형별 대표 산출물

대표 산출물로 교과 융합 AI 프로젝트, 교과 융합 피지컬 AI 프로젝트, 최종 AI-TPACK 기반 피지컬 AI 수업 설계 산출물을 제시하였다. 세 산출물은 AI의 판단 결과가 구현되는 방식에서 차이를 보인다. 교과 융합 AI 프로젝트는 입력 데이터를 AI가 분류 등의 판단을 하여 그 결과를 화면 정보나 피드백으로 제시하는 소프트웨어 기반 활동인 반면, 교과 융합 피지컬 AI 프로젝트는 AI의 판단 결과가 micro:bit 등 피지컬 컴퓨팅 도구의 입·출력 장치와 연결되어 물리적 반응으로 구현된다는 점에서 확장된다.

첫째, 교과 융합 AI 프로젝트의 대표 사례는 가정 교과의 '엔트리를 활용한 의복 정보 알리미'이다. 중학교 3학년 기술·가정의 의복 재료와 세탁 및 관리 내용을 바탕으로, 학습한 이미지 분류 모델이 의류를 인식하면 섬유 특성과 드라이클리닝·세탁기·손세탁 등 적절한 관리 방법을 안내하는 챗봇으로 설계되었다. 이는 교과서의 세탁 취급 주의 표시와 섬유 구분 내용을 AI 이미지 분류와 연결한 사례로, AI가 의복 관리라는 교과 내용(CK)을 표현·전달하는 교수-학습 도구로 활용되어 기술과 교과 내용을 결합한 기술내용지식(TCK)이 두드러진다. 다만 그 결과가 화면 안내에 머문다는 점에서 소프트웨어 기반 활용에 해당한다. 이와 관련한 자료는 Figure 3과 같다.



Figure 3. Example of an AI-TPACK-Based AI-Convergence Lesson Product

둘째, 교과 융합 피지컬 AI 프로젝트의 대표 사례는 중국어 교과의 'micro:bit AI를 활용한 중국어 감정 표현 학습 수업'이다. 예비교사는 기쁨·분노·슬픔의 감정 어휘를 선정하고 감정별 한자 필기 이미지를 직접 구축해 Teachable Machine 분류 모델을 학습시켰다. 학습자가 직접 쓴 한자를 모델이 감정별로 분류하면, 그 결과는 MakeCode와 연계되어 micro:bit LED 표정으로 출력된다. 여기서 AI는 중국어 감정 표현이라는 교과 내용을 위한 교수-학습 도구로써 기술내용지식(TCK)을 갖춘다. 다만 첫째 프로젝트와 달리 AI의 판단이 micro:bit LED라는 물리적 출력으로 구현된다. 이처럼 쓰기(입력)-글자(데이터)-분류(AI)-LED(출력)의 과정이 학습 활동을 이끈다는 점에서, 기술이 교수-학습 방식을 매개하는 기술교수지식(TPK)까지 확장된 것으로 볼 수 있다. 이에 대한 자세한 내용은 Figure 4와 같다.



Figure 4. Example of an AI-TPACK-Based Physical AI Convergence Lesson Product

셋째, 최종 산출물은 예비교사가 전공 교과 내용에 피지컬 AI를 활용해 설계·구현한 AI 융합 수업 과정안이다. 대표 사례는 중학교 과학Ⅱ '우주 탐사' 단원으로, 학습자가 탐사선이 되어 소행성을 피하며 우주선을 조작하고 퀴즈를 해결하는 게임형 활동이다. 예비교사는 Entry와 micro:bit를 연계해 A, B 버튼 입력으로 우주선을 조종하고, 행성별 신호 지연(화성 0초, 목성 2초)을 구현해 지구와의 거리에 따른 통신 지연이라는 우주 탐사의 과학적 특성을 경험하도록 했으며, 퀴즈에는 AI 이미지 인식으로 탐사 행성을 판별하는 과정을 포함하였다. 이전의 두 프로젝트가 각각 기술내용지식(TCK)과 기술교수지식(TPK)에 초점을 두었다면, 이 산출물은 교과 내용·교수 전략·기술이 결합된 가장 통합

적인 형태(TPACK)로, 구성요소별 분석은 2)에서 다룬다. 함께 제출된 교수-학습 자료는 Figure 5, 요약된 수업 설계안은 Table 10과 같으며, 이에 대한 피지컬 AI 요소 분석은 Table 11과 같다.



Figure 5. Example of an AI-TPACK-Based Physical AI Lesson Product (Instructional Materials)

Table 10. Example of an AI-TPACK-Based Physical AI Lesson Product (Instructional Plan)

Category	Description
Subject / Unit	Middle School Science II / Space Exploration
Lesson Topic	Space Exploration Process Using AI and micro:bit
Achievement Standard	[9Sci15-04] Students can investigate the significance of space exploration and its impact on humanity, and recognize the usefulness of science.
Tools Used	Entry, AI image classification model, micro:bit
Physical AI Elements	Spacecraft control using micro:bit input devices; identification of target planets based on AI image classification; representation of exploration status through display output
Main Activities	Introduction: Students identify the significance of space exploration and the need for space exploration technology. Development: Students experience an "AI space probe" simulation using Entry and Micro:bit, and explore the judgment and control processes required in space exploration. Closure: Students discuss the difficulties of space exploration and the usefulness of science and technology based on their activity experience.

Table 11. Physical AI in Representative Lesson Products

Stage	Implementation in the Product
Sensor Input	Controls the spacecraft via input from the micro:bit A and B buttons
Data Interpretation	The AI image-classification model recognizes and extracts features from the planet image card a learner presents to the camera
AI Judgment	Classifies the image as "Mars" → "communication authentication success"; otherwise → "not a Mars image" and prompts a retry
Physical Output	Asteroid collisions during navigation reduce durability; planet-specific signal delays (ex., 2 s for Jupiter) execute code 2 seconds after button input

2) AI-TPACK 요소별 분석

본 연구에서는 산출물을 AI-TPACK 구성요소(CK, PK,

TK, PCK, TCK, TPK, TPACK)를 기준으로 분석하였다. 이때 기술지식(TK)은 AI 도구뿐 아니라 피지컬 AI 도구의 작동 원리와 활용 가능성에 대한 이해를 포함하는 것으로 보았다. 대표 산출물(중학 과학 '우주 탐사' 단원)의 매핑 결과는 Table 12와 같으며, 이를 한국어로 번역한 내용은 부록 3에 제시하였다.

Table 12. AI-TPACK-Based Mapping of a Representative Lesson Product

Component	Implementation in the Product
CK	Science unit "Space Exploration" ([9Sci15-04]); significance and usefulness of exploration
PK	Gamified, experience- and inquiry-based learning structure: Introduction (need for exploration) - Development (simulation experience) - Closure (discussion of scientific usefulness)
TK	Understands and applies the functions and input - data - AI - output principles of Entry, the AI image classification model, and micro:bit
PCK	Concretizes the abstract concept of space exploration through a "spacecraft control" simulation and signal-delay implementation, letting learners experience the exploration process indirectly
TCK	Applies AI image classification to "identifying target planets", linking science content with AI technology
TPK	Uses micro:bit input (A/B buttons) and output (display) to organize gamified, experience- and inquiry-based learning
TPACK	Restructures the "Space Exploration" subject context around the Physical AI structure of "sensor input - data interpretation - AI judgment - physical output", realizing an integrated form that combines subject content, teaching strategies, and AI and physical AI tools

매핑 결과, 모든 구성요소가 고르게 나타나 AI 기술이 교과 내용·교수 전략과 분리되지 않고 통합적으로 활용되었음을 확인하였다. 특히 센서 입력-데이터 해석-AI 판단-물리적 출력으로 이어지는 피지컬 AI 구조가 교과 수업 맥락으로 재구성되었고, 설계 단계에서 구성된 기술교수내용지식(TPACK)이 발표 및 시연을 통해 실제 수업 실행 장면으로 전환되었다. 이는 예비교사가 피지컬 AI를 교과 내용과 연계하여 AI 융합수업으로 설계하고 실행할 수 있음을 보여준다.

5. 결론

본 연구는 예비교사의 AI 융합교육 교수역량 향상을 위해 AI-TPACK 기반 피지컬 AI 활용 교육과정을 ADDIE 모형에 따라 15주(45차시)로 개발하고, 이를 사범대학 예비교사에게 적용하여 교육적 효과를 분석하였다. 교육과정은 인공지능 및 피지컬 AI 이해, TPACK 이해, TPACK 수업 관찰 및 경험, TPACK 수업 설계 및 실천, TPACK 수업 평가 및 성찰의 단계로 구성되었으며, 보드형/모듈형/로봇형 피지컬 컴퓨팅 도구와 AI 도구를 적절하게 활용할 수 있도록 개발

되었다.

본 연구의 주요 결과와 그에 대한 논의는 다음과 같다. 첫째, AI-TPACK 기반 피지컬 AI 활용 교육과정 적용 후 예비교사의 AI 융합교육 교수역량이 사전 대비 사후에 통계적으로 유의하게 향상되었고, 설계·실행·평가 전 영역에서 큰 효과크기가 나타났다. 이는 교수역량 전반의 긍정적 변화 가능성을 시사한다. 다만 18명 단일집단 사전-사후 설계라는 점에서 결과 해석에는 신중함이 필요하다.

둘째, 학습자 만족도 분석 결과, 본 교육과정은 전반적으로 높은 만족도를 보였다. 특히 수업 운영, 교수-학습 상호작용, 이론과 실습의 연계, 전반적 만족도 영역에서 높은 점수가 나타났다. 이는 본 교육과정이 피지컬 AI와 AI 융합교육에 대한 이론적 이해뿐 아니라, 실제 도구 활용과 프로젝트 수행을 통해 예비교사에게 의미 있는 학습 경험을 제공하였음을 보여준다.

셋째, 수업 산출물 분석을 통해 예비교사가 AI와 피지컬 컴퓨팅 도구를 교과 내용과 연계하여 수업으로 구현할 수 있음을 확인하였다. 예비교사들은 교과 성취기준을 분석하고, 학습 목표에 적합한 AI 및 피지컬 AI 도구를 선정하여 교수-학습 과정안을 설계하였다. 또한 최종 발표에서 수업 설계 의도와 교수-학습 흐름을 설명하고, 구현한 활동을 직접 시연함으로써 수업의 실행 가능성을 점검하였다. 이는 본 교육과정이 예비교사의 AI 융합교육 교수역량을 단순한 수업 설계 수준에 머물게 하지 않고, 실행과 평가 역량으로 확장하는 데 기여하였음을 시사한다.

이상의 결과를 종합하면, AI-TPACK 기반 피지컬 AI 활용 교육과정은 예비교사가 AI를 단순한 디지털 도구로 활용하는 수준을 넘어, 물리적 환경과 상호작용하는 피지컬 AI의 특성을 이해하고 이를 교과 수업에 통합하도록 지원하는 교육 방안으로 볼 수 있다. 본 연구는 기존 예비교사 대상 AI 교육이 주로 소프트웨어 기반 도구 활용에 집중되어 온 한계를 보완하고, 센서 입력-데이터 해석-AI 판단-물리적 출력으로 이어지는 피지컬 AI의 구조를 예비교사 교육에 적용하였다. 나아가 AI-TPACK을 두 방향에서 확장하여, 개념적으로는 ‘도구이자 내용으로서의 AI’를 센서 입력-데이터 해석-AI 판단-물리적 출력의 피지컬 AI로 확장하고, 교수 설계 측면에서는 보드형·모듈형·로봇형 도구 선정과 센서·액추에이터를 교과 내용과 연계하는 과정을 함께 고려하였다. 이로써 예비교사의 AI 융합 수업 설계·실행·평가를 지원하는 교육과정 사례를 제시하였다는 점에서 의의가 있다.

다만 본 연구에는 몇 가지 제한점이 있다. 첫째, 본 연구는 단일 대학의 예비교사를 대상으로 수행되었으며, 분석 대상의 수가 제한적이므로 연구 결과를 모든 예비교사에게 일반화하는 데에는 한계가 있다. 둘째, 단일집단 사전-사후 검사 설계를 적용하였기 때문에 교육과정 효과를 보다 엄밀하게 검증하기 위해서는 통제집단을 포함한 후속 연구가 필요하다. 셋째, 본 연구는 자기보고식 검사와 만족도 조사, 수업 산출물 분석을 중심으로 효과를 분석하였으므로, 향후에는 수업 시연 분석, 면담 및 성찰일지 분석 등을 병행하여

예비교사의 역량 변화를 보다 다각적으로 탐색할 필요가 있다.

후속 연구에서는 다양한 전공과 학교급의 예비교사를 대상으로 피지컬 AI 활용 교육과정을 확대 적용하고, 교과별 특성에 따른 AI 융합 수업 설계 양상을 비교 분석할 필요가 있다. 또한 예비교사가 개발한 피지컬 AI 기반 수업안을 실제 학교 현장에 적용하여 학습자에게 미치는 영향을 검증한다면, 피지컬 AI 활용 교육의 현장 적용 가능성과 교육적 효과를 보다 구체적으로 확인할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] Chung, C. C., & Lou, S. J. (2021). Physical computing strategy to support students' coding literacy: An educational experiment with arduino boards. *Applied Sciences*, 11(4), 1830. <https://doi.org/10.3390/app11041830>
- [2] Seo, H., Kwon, H., & Cho, Y. (2023). Analysis of cases and effectiveness of AI-based instruction for pre-service teachers. *Culture and Convergence*, 45(12), 845-857. <https://doi.org/10.33645/cnc.2023.12.45.12.845>
- [3] Lee, J. (2025). Exploring research trends in AI education and its use for pre-service teachers. *Journal of The Korean Association of Information Education*, 29(2), 173-182. <https://doi.org/10.14352/jkaie.2025.29.2.173>
- [4] Lim, S., Ko, H., Kim, S., & Lee, Y. (2025). A systematic literature review of research using physical computing in K-12 artificial intelligence education. *The Journal of Korean Association of Computer Education*, 28(8), 1-14. <https://doi.org/10.32431/kace.2025.28.8.001>
- [5] Lim, C., Han, O., Chae, J., Hong, S., Ko, B., & Lim, E. (2025). Research trends and future directions in AI convergence education. *Journal of Educational Technology*, 41(1), 363-395. <https://doi.org/10.17232/KSET41.1.363>
- [6] Miriyev, A., & Kovač, M. (2020). Skills for physical artificial intelligence. *Nature Machine Intelligence*, 2(11), 658-660. <https://doi.org/10.1038/s42256-020-00258-y>
- [7] Li, Y., Li, Z., Duan, Y., & Spulber, A. B. (2023). Physical artificial intelligence (PAI): the next-generation artificial intelligence. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 24(8), 1231-1238. <https://doi.org/10.1631/FITEE.2200675>
- [8] Ministry of SMEs and Startups. (2025, April 9). Discussing innovation directions for small and medium manufacturers in the era of AI technology innovation [Press release]. <https://www.mss.go.kr/site/smba/ex/bbs/View.do?bcIdx=1057974&cbIdx=86>
- [9] O'Sullivan, D., & Igoe, T. (2004). Physical computing: Sensing and controlling the physical world with computers. Thomson.
- [10] Hong, H., & Park, C. (2023). Development of a transportation-technology problem-centered, AI-based convergence education program in middle school

- technology subjects to improve computational thinking. *The Journal of Korean Association of Computer Education*, 26(1), 83-94. <https://doi.org/10.32431/kace.2023.26.1.008>
- [11] Kim, Y., & Kim, Y. (2024). The effect of AI-integrated physical computing programming education on elementary students' computational thinking. *Journal of the Korea Society of Computer and Information*, 29(3), 227-235.
- [12] Kim, S. (2026). The effect of design-thinking-based AI education using generative AI on elementary students' AI literacy. *The Journal of Korean Association of Computer Education*, 29(1), 116-127. <https://doi.org/10.32431/kace.2026.29.1.011>
- [13] Lee, E., & Song, K. (2025). Development of a social-emotional learning (SEL)-based AI social robot maker education program using affective computing. *The Journal of Korean Association of Computer Education*, 28(5), 33-44. <https://doi.org/10.32431/kace.2025.28.5.004>
- [14] Choi, S. (2026). Development of a project-based AI robot education program to enhance middle school students' AI literacy and creative problem-solving. *The Journal of Educational Information and Media*, 32(1), 443-468. <https://doi.org/10.15833/KAFEIAM.32.1.443>
- [15] Kim, G., Cho, M., & Kim, G. (2025). The effects of a cooperative-learning-based AI convergence relational-character project lesson using physical computing on elementary students' AI competency and collaborative problem-solving. *Journal of Learner-Centered Curriculum and Instruction*, 25(7), 137-151. <https://doi.org/10.22251/jlcci.2025.25.7.137>
- [16] Song, Y., Lee, E., Kim, M., Choi, S., Kim, S., & Kim, Y. (2025). Development and application of an AI-based education program in technology subjects to improve collaborative problem-solving competency and AI literacy in the digital age. *The Korean Journal of Technology Education*, 25(3), 51-78. <https://doi.org/10.34138/KJTE.2025.25.3.51>
- [17] Lee, H. (2023). *The effects of using physical computing on AI education: Focusing on middle school students' self-efficacy and attitudes toward AI* [Master's thesis], Seoul National University.
- [18] Song, J., & Kim, Y. (2023). Development and effects of a problem-solving-based safety education program using physical computing. *Journal of the Korea Society of Computer and Information*, 28(11), 235-243.
- [19] Kim, J. (2025). *The effects of using generative AI in a 3D-printing maker education program on middle school students' character design improvement and creative self-efficacy* [Master's thesis], Seoul National University.
- [20] Kim, T., & Han, S. (2021). Development and application of an 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>
- [21] Choi, E., & Park, J. (2024). Development of a curriculum to enhance pre-service elementary teachers' professionalism in AI-convergence instruction. *Journal of The Korean Association of Information Education*, 28(2), 191-203. <https://doi.org/10.14352/jkaie.2024.28.2.191>
- [22] Mishra, P., & Koehler, M. J. (2006). Technological pedagogical content knowledge: A framework for teacher knowledge. *Teachers College Record*, 108(6), 1017-1054. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9620.2006.00684.x>
- [23] Choi, J., Jeon, S., Kim, S., & Park, J. (2022). Design of an AI-TPACK model for cultivating pre-service teachers' professionalism in AI-convergence classes. *The Journal of Korean Association of Computer Education*, 25(2), 79-89. <https://doi.org/10.32431/kace.2022.25.2.007>
- [24] Park, C., Kim, S., Kim, S., Hong, J., & Park, J. (2023). Development of an AI-TPACK-model-based education program for elementary pre-service teachers to design AI subject-convergence lessons. *The Journal of Korean Association of Computer Education*, 26(3), 15-29. <https://doi.org/10.32431/kace.2023.26.3.002>
- [25] Shin, H., & Baek, S. (2025). The effects of an AI-TPACK education program for elementary and secondary teachers. *Journal of Learner-Centered Curriculum and Instruction*, 25(6), 131-150. <https://doi.org/10.22251/jlcci.2025.25.6.131>
- [26] Cukurova, M., & Miao, F. (2024). *AI competency framework for teachers*. UNESCO Publishing.
- [27] Lee, S., & Kim, G. (2025). Determinants and latent profile analysis of teachers' AI-convergence education competency: Focusing on TAM, TPACK, and background variables. *The Journal of Korean Association of Computer Education*, 28(12), 74-92. <https://doi.org/10.32431/kace.2025.28.12.008>
- [28] Bae, Y., Park, G., Hong, J., & Lee, J. (2023). Development of a measurement tool for pre-service teachers' AI-convergence education teaching competency. *Journal of Learner-Centered Curriculum and Instruction*, 23(23), 339-351. <https://doi.org/10.22251/jlcci.2023.23.23.339>
- [29] Branch, R. M. (2009). *Instructional design: The ADDIE approach*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-09506-6>
- [30] Kim, J., & Kim, D. (2016). Development of an elementary physical computing curriculum to improve computational thinking. *Journal of The Korean Association of Information Education*, 20(1), 69-82. <https://doi.org/10.14352/jkaie.2016.20.1.69>
- [31] Polit, D. F., & Beck, C. T. (2006). The content validity index: are you sure you know what's being reported? Critique and recommendations. *Research in Nursing & Health*, 29(5), 489-497. <https://doi.org/10.1002/nur.20147>
- [32] Kirkpatrick, D., & Kirkpatrick, J. (2006). Evaluating training programs: *The four levels* (3rd ed.). Berrett-Koehler Publishers.
- [33] Fritz, C., Morris, P., & Richler, J. (2012). Effect size estimates: Current use, calculations, and interpretation. *Journal of Experimental Psychology: General*, 141(1), 2-18. <https://doi.org/10.1037/a0024338>
- [34] Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). Lawrence Erlbaum Associates.



이은지

- 2019년 한국교원대학교 가정교육학과, 기술교육학과(교육학사)
- 2025년 한국교원대학교 AI융합교육과(교육학석사)
- 2025년~현재 한국교원대학교 AI융합교육과(박사과정)
- 2025년~현재 중평중학교 교사

✚ 관심분야 : AI융합교육, 피지컬AI, 로봇교육, 기술교육, 사회정서학습
 ✉ tobe311@naver.com



김귀훈

- 1998년 KAIST 전기및전자공학(공학사)
- 2000년 KAIST 전기및전자공학(공학석사)
- 2019년 KAIST 전기및전자공학부(Ph.D.)
- 2000년~2005년 LG 데이콤 주임연구원
- 2005년~2020년 ETRI 실장, 책임연구원
- 2020년~현재 한국교원대학교 인공지능융합교육교수
- 2006년~현재 ITU-T SG11 Rapporteur, Editor
- 2022년~현재 한국AI융합교육연구소 소장
- 2024년~현재 교육정보원 원장

✚ 관심분야 : 인공지능융합교육, 지능형에지컴퓨팅, 강화학습
 ✉ kimkh@knue.ac.kr

부록

Appendix 1. AI-TPACK Model Adapted for Physical AI-Integrated Education

	Understanding of AI and Physical AI	Understanding of TPACK	Observations and Experiences of TPACK lesson	Design and Practice of TPACK Lessons	Evaluation and Reflecting TPACK lesson
Instructor' task	· Introducing AI concepts and principles · Explaining physical AI based on physical computing · Presenting the sensor – data – AI – output structure · Providing hands-on activities using board-, module-, and robot-type tools	· Introducing TPACK concepts and components · Explaining AI and physical AI as instructional resources	· Presenting AI- and physical AI-based lesson cases · Demonstrating how AI tools and physical outputs are used in lessons · Guiding lesson analysis	· Guiding the selection of lesson topics for AI integration · Supporting lesson design and microteaching · Supporting project implementation	· Providing feedback on lesson design, teaching practice, and project outcomes · Guiding reflection and revision
Pre-service teachers' task	· Understanding AI and physical AI concepts · Exploring the interaction of sensors, AI tools, and physical outputs · Experiencing physical AI activities using board-, module-, and robot-type tools	· Understanding TPACK concepts and their application to AI-integrated teaching · Identifying AI and physical AI as instructional resources	· Observing and analyzing AI-integrated lesson cases · Participating in AI- and physical AI-based lesson activities	· Designing AI-integrated lessons using physical AI tools · Implementing lesson plans through microteaching or projects	· Evaluating lesson plans and teaching practices · Revising lessons based on instructor and peer feedback

〈부록 2〉 예비교사를 위한 AI-TPACK 기반 피지컬 AI 교육과정 (원문: Table 6)

단계	주차	내용	활용 도구 및 플랫폼	AI-TPACK 단계
1단계. 인공지능 및 피지컬 AI 이해	1	오리엔테이션: AI 기술과 AI 기반 에듀테크 (인공지능·피지컬AI·생성형AI 개념, AI 프로그래밍 입문)	–	1, 2
2단계. TPACK 이해	2	AI 융합교육과 TPACK 기반 수업 설계 (개요, AI 율리, 생성형 AI 에듀테크 이론 및 실습, TPACK 기반 설계)	생성형 AI 에듀테크	1, 2, 3
(1) AI 프로그래밍 실습 및 프로젝트	3	AI 프로그래밍 I: AI 개념과 원리, AI 프로그래밍 기초	Teachable Machine (AI 분류)	1, 2
	4	AI 프로그래밍 II: AI 기반 문제 해결	엔트리 AI, 컴퓨터 비전, 자연어 처리 등	1, 2
	5	AI 프로그래밍 III: 교과 융합 AI 프로젝트 (padlet 공유)	엔트리 AI, padlet	1, 2, 3, 4
(2) 피지컬AI 실습 및 프로젝트	6	피지컬 AI 기반 AI 융합교육 소개 및 우수 사례 공유	–	1, 2, 3
	7	피지컬 AI 프로젝트 I (보드형): 기초 AI 실습	micro:bit	1, 2
	8	피지컬 AI 프로젝트 II (모듈형): 바이트 코딩 기반 실습	Arduino (센서·액추에이터 포함)	1, 2
	9	피지컬 AI/로봇 프로젝트 III (로봇형): 로봇 동작 및 제어 실습	pingpong robot	1, 2
	10	피지컬 AI/로봇 프로젝트 IV: 교과 융합 피지컬 AI 프로젝트 (padlet 공유)	피지컬 AI 도구, padlet	1, 2, 3, 4
3단계. TPACK 수업 관찰 및 경험	11	AI 융합 수업 사례 분석 및 공유 (인문·사회)	선정한 AI 또는 피지컬 AI 도구, padlet	3, 4
	12	AI 융합 수업 사례 분석 및 공유 (자연·공학)		3, 4
	13	AI 융합 수업 사례 분석 및 공유 (예술·체육)		3, 4
4단계. TPACK 수업 설계 및 실천	14	AI 융합 수업 설계 및 공유	padlet	4, 5
5단계. TPACK 수업 평가 및 성찰	15	공유한 AI 융합 수업에 대한 피드백 및 성찰		4, 5

〈부록 3〉 대표 수업 산출물의 AI-TPACK 요소별 매핑 (원문: Table 12)

구성 요소	산출물에서의 구현 내용
CK (내용지식)	중학교 과학 '우주 탐사' 단원(관련 성취기준 [9과15-04]); 우주 탐사의 의의와 유용성
PK (교수지식)	게이미피케이션 기반 경험·탐구 학습 구조: 도입(탐사의 필요성) - 전개(시뮬레이션 경험) - 정리(과학적 유용성 논의)
TK (기술지식)	엔트리, AI 이미지 분류 모델, micro:bit의 기능과 입력-데이터-AI-출력 원리를 이해하고 적용함
PCK (교수내용지식)	'우주선 조종' 시뮬레이션과 신호 지연 구현을 통해 우주 탐사라는 추상적 개념을 학습자가 탐사 과정을 간접적으로 체험할 수 있도록 구체화함
TCK (기술내용지식)	AI 이미지 분류를 '탐사 행성 식별'에 적용하여, 과학 교과 내용을 AI 기술과 연계함
TPK (기술교수지식)	micro:bit의 입력(A, B 버튼)과 출력(디스플레이)으로 게이미피케이션 기반 경험·탐구 학습을 조직함
TPACK (기술교수 내용지식)	'우주 탐사' 교과 맥락을 '센서 입력 - 데이터 해석 - AI 판단 - 물리적 출력'의 피지컬 AI 구조로 재구성하여, 교과 내용·교수 전략·AI 및 피지컬 AI 도구가 결합된 통합적 형태로 구현함