

RESEARCH ARTICLE

Effects of Digital Experience and Subject Major on Biology Teachers' AI-TPACK Understanding and Utilization

Jung-Ho Byeon¹, Yong-Ju Kwon^{2*}¹Gangwon National University²Korea National University of Education

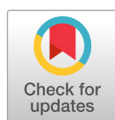
디지털 사용 경험 및 교과 전공이 생물교사의 AI-TPACK 이해와 활용에 주는 영향

변정호¹, 권용주^{2*}¹강원대학교, ²한국교육대학교

*Corresponding Author : Yong-Ju Kwon, kwonjy@knue.ac.kr

ABSTRACT

This study investigated biology teachers' understanding and utilization of Technological Pedagogical Content Knowledge (TPACK) and Artificial Intelligence-integrated TPACK (AI-TPACK), with particular attention to subject major and prior experience with digital tools. Forty-two biology teachers and forty-two ethics teachers, selected to represent contrasting pedagogical contexts (inquiry-based vs. discourse-based) completed an online survey addressing their use of digital technologies, instructional integration of digital tools, and self-reported TPACK and AI-TPACK. Three key findings emerged. First, early-career biology teachers actively used digital tools for both instructional and administrative purposes, yet relied more on self-directed use of personal platforms than on formal institutional training to develop related knowledge. Second, biology teachers' subject major did not significantly influence their AI-TPACK understanding or utilization, suggesting that personal digital practices may play a more decisive role than disciplinary background. Specifically, although the overall AI-TPACK score differed significantly between groups, the effect size was moderate, and among the sub-components, only AI-Ethic reached statistical significance, suggesting that the group difference was primarily driven by ethical awareness rather than by technical or pedagogical integration. Third, more frequent instructional use of digital tools was strongly associated with higher levels of both TPACK and AI-TPACK, underscoring the importance of accumulated, hands-on experience. These results highlight the need for biology teacher education programs that combine subject-sensitive instructional design with individualized, practice-based support for digital learning. AI-enhanced, personalized professional development may further strengthen biology teachers' capacity to meaningfully integrate AI and digital tools into their instruction.

Keywords: Biology teacher, AI-TPACK, teacher education, digital experience, digital learning

OPEN ACCESS

Brain, Digital, & Learning
2026, Vol. 16, No. 1, 29–48<https://doi.org/10.31216/BDL.2026.16.1.3>**Received:** December 29, 2025**Revised:** March 15, 2026**Accepted:** March 17, 2026© 2026 Institute of Brain based Education,
Korea National University of Education

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

Introduction

교사의 전문성은 오랫동안 교육 연구의 핵심적인 관심사로 다루어져 왔다. 교사 역량은 단순한 지식의 누적이 아니라, 고도의 전문성과 통합적 판단력을 요구하는 복합적이며 개인적인 자질로 이해된다. 특히 인지적 요소와 동기적 요소가 결합된 고차원적 개인 특성으로 규정할 수 있으며, 실제 교수 행동의 질을 결정하는 핵심적 기반이라고 볼 수 있다(Baumert et al., 2010). 또한 교사가 보유한 지식과 동기 역시 교사-학생 상호작용과 교수활동 전반에 직접적인 영향을 미칠 수 있다(Rimm-Kaufman & Hamre, 2010). 이러한 맥락에서 교사 역량의 구성 요소는 교과 전문지식, 교수에 대한 신념, 교수에 대한 열정, 자기효능감 등으로 제시되어 왔다(Fauth et al., 2019; Fischer et al., 2012).

최근 대두된 디지털·AI 대전환(digital·AI transformation; DX)은 교사교육 분야에도 큰 영향을 주고 있다. 즉, 디지털 기술이 급속하게 보급되고, 교육 환경이 빠르게 변화함에 따라 전통적 교수역량 요소만으로는 현재의 교수·학습 장면을 설명하기 어려워지고 있다. 특히, 인공지능(Artificial Intelligence; AI)으로 대표되는 디지털 기술의 도입으로 인해 물리적 교육환경의 변화와 함께 교사의 교수학습 역량에 대한 인식도 변하고 있다(Reimers, 2022; Zhang et al., 2023). 예를 들어, COVID-19 팬데믹 이후 학교 현장에서 원격수업, 디지털·AI 자료 이용, 온라인 상호작용 같은 디지털 기술의 적용이 일상화되면서 교사의 디지털·AI 교수역량은 선택이 아닌 필수 요소로 부상하고 있다. 또한, 이러한 변화속에서 기술 격차, 디지털 과부하, 허위 정보 노출 등 다양한 위험 요소도 함께 발생하고 있다. 그러므로, 학습자 보호와 학습권 보장을 위해 교사의 디지털·AI 기술 활용 능력과 이 기술의 책임 있는 교육적 실천이 교사 역량에서 더욱 중요해지고 있다(Fauville et al., 2021).

교육 분야의 디지털화는 이전부터 시도되어 왔으나, 최근 몇 년 동안 디지털 기술의 대중화와 생성형 AI 기술 등의 발달로 인해 디지털·AI 활용은 인구 감소와 함께 교육 분야의 중요 관심 대상이 되고 있다(OECD, 2024). 실제 교육현장에서는 AI, Big Data, Cloud Computing, 사물인터넷(IoT) 등으로 대표되는 디지털 기술의 도입과 융합을 통해서 학교 교육의 물리적·인지적 환경을 재구조화하고 있으며, 교사가 수행해야 하는 역할과 요구되는 역량 또한 근본적인 변화를 요구하고 있다(Haderer & Ciolacu, 2022). 즉, DX 시대의 교사는 단순한 지식 전달자 또는 활동의 안내자 역할을 넘어, 디지털 매체와 AI 도구를 활용하여 학습자의 탐구와 사고를 촉진하는 설계자이자 실행자로서의 전문성과 역량을 필요로 하고 있다.

하지만, 교육에서 다양한 digital·AI 기술의 적용을 위한 시도 및 변화와 달리 실제 수업이 이루어지는 학교 현장의 디지털 격차와 교육 격차 문제는 디지털 대전환이 중요하게 대두된 이후에도 쉽게 개선되지 않고 있다(Fauville et al., 2021; Reimers, 2022). 따라서, 이러한 문제를 해결하기 위해 새로운 유형의 교수학습 방법 개발, 교사 대상 디지털·AI 기술 활용 교육 확대, 학습용 콘텐츠 개발의 확산 등 다양한 방안들이 제시되고 있으며, 디지털·AI 도구를 활용한 교육의 확산을 위해 실질적으로 필요한 것이 무엇인가에 대한 연구가 재정립될 필요가 있다(Bonfield et al., 2020). 특히 교사가 디지털 도구를 수업 상황에 적합하도록 재구성하고 적용하는 과정은 단순한 기술 친숙도가 아니라 교과 특성 및 교사의 인지적·실천적 전문성에 의해 좌우되므로, 이러한 역량 형성 요인을 교과별로 분석하는 것이 필요하다. 과학과 교육과정에서도 스마트 기기를 활용한 탐구, 누리망을 통한 결과 공유, 센서와 소프트웨어를 활용한 데이터 처리, 디지털·AI 도구 기반 실험 활동 등 다양한 활동이 명시되고 있으며, 생물교사에게 있어 이를 효과적으로 구현할 수 있는 디지털 교수 역량 확보가 매우 중요한 교사 역량 중 하나가 되었다(Holmes et al., 2019). 최근 과학 탐구와 디지털·AI 기술 활용의 관련성에 대한 연구들에서도 효과적인 탐구활동이 이루어지기 위해서는 과학교사가 디지털·AI 기술과 교과 내용 및 교

수 전략을 정교하게 조합하여 설계하는 역량이 중요하다고 제시하고 있다(Chen & Chen, 2025).

이렇게 새로운 디지털·AI 전환 시대에는 교사 역량의 요구를 설명하기 위해 기술·교수·내용지식(Technological Pedagogical Content Knowledge: TPACK)이 중요한 이론적 관점으로 제시되어왔으며, 디지털·AI 시대의 교사가 갖추어야 할 핵심 역량으로 인식되고 있다(OECD, 2022). 디지털 도구를 활용하기 위한 교수 역량은 일반적으로 교과지식(CK), 교수지식(PK), 기술지식(TK)의 통합적 상호작용을 통해 형성되는 교사의 전문적 역량으로 표현되며, 기술·교수·내용지식(TPACK: Technological Pedagogical Content Knowledge) 개념으로 제시되어 왔다(Celik, 2023; Jiménez Sierra et al., 2023). 더 나아가, 최근에는 AI 기술의 확산에 따라 전통적인 디지털 기술 기반 TPACK 개념 뿐만 아니라, AI를 교수·학습 과정 속에 통합적으로 활용할 수 있는 역량을 의미하는 AI 기반 기술·교수·내용지식(AI-TPACK: Artificial Intelligence-based TPACK) 개념이 제시되었다(Celik, 2023). 그러나 OECD(2022)의 조사에 따르면, 국내 교육 현장은 디지털 시민성·온라인 안전 등 인프라적 요소들은 국제적 평균을 상회하는 반면, 교사의 디지털·AI 기술의 '교육적 활용' 수준은 여전히 낮은 것으로 보고되고 있다. 즉, 학교 현장에서 디지털·AI 기술을 제공하는 인프라 구조는 갖추어졌으나, 이러한 디지털 기술을 효과적으로 수업에 통합하여 활용하는 교사 역량의 개발은 미흡한 상황이라고 할 수 있다. 실제로, 학교 현장에서 이루어지는 AI 교육은 주로 'AI 이해·개발' 중심의 컴퓨터 기반 교육에 머무르는 경향이 있으며, 교과 수업 속에서 AI를 교수 도구로 활용하는 수준에는 충분히 도달하지 못하고 있는 것으로 보고되었다(Kim & Cho, 2023).

특히, 생명과학과 같은 탐구·실험 중심 교과는 AI 기술의 도입을 통해 실험 데이터 분석, 생물 현상의 시각화, 복잡한 시스템 모델링, 예측 기반 탐구 등 기존 수업에서는 수행하기 어려운 활동을 가능하게 하기 때문에, 생물교사에게 있어 AI 기반 교수역량 개발의 필요성을 더욱 강조하는 요인으로 작용할 수 있다(Alam et al., 2025; Byeon & Kwon, 2023; Zha et al., 2025). 실제로 생명과학 수업에서 AI는 단순한 보조 기술이 아니라 탐구 과정의 구조와 방법론 자체를 변화시키는 도구로 기능할 수 있기 때문에, 생물교사의 AI-TPACK 수준을 진단하고 강화하는 연구는 매우 필요한 실정이다. 반면, 윤리 교과는 인공지능 기술이 학습 내용 자체와 밀접하게 연결되어 있다는 특징을 가진다. 윤리적 판단, 알고리즘 편향, AI 윤리 문제, 인공지능 기반 의사결정의 한계 등은 윤리 교육의 핵심적 주제로 등장하고 있으며, AI 윤리·디지털 시민성 관련 교수역량 논의는 윤리 교과에서 활발하게 이루어져 왔다(Casal-Otero et al., 2023; Kim & Cho, 2023).

이처럼 교과에 따라 디지털 기술 활용의 기회와 맥락은 다를 수 있으나, COVID-19 이후 전반적으로 교사의 디지털 기술이나 도구의 활용이 증가하였으며 생성형 AI 등장 이후 단순히 일상에서 AI를 활용하는 기회도 증가하고 있다. 따라서 디지털·AI 활용 기회가 확대되어 교과에 따른 차이가 희석되고 있는 현재 시점에 AI-TPACK의 차이가 교과 전공의 특성에서 비롯되는 것인지 교사 개인의 디지털 기술 활용 경험에서 비롯되는 것인지를 확인할 필요가 있다. 뿐만 아니라, 생명과학은 AI를 활용한 탐구 실험 역량이 교수역량의 중심이 되는 만큼, AI와 관련성을 지닌 경험적 특성이 AI-TPACK의 차이를 가져오는지 분석하는 것은 교수역량 개발 측면에서 매우 중요하다. 또한 교사가 기술 이해도나 친숙도가 높다고 해서 수업에 적용하는 교수적 통합이 이루어지는 것은 아니므로, AI-TPACK에 대한 경험이 실제 수업에 적용하는 통합적 교수역량을 강화하는데 어떤 영향을 주는지를 규명하는 연구는 여전히 중요하다(Guan et al., 2020).

교사의 디지털 기술 활용 역량은 교과 자체의 성격과 밀접하게 관련되어 있으며, 특히 생명과학 교과는 실험·탐구 중심의 특성과 함께 센서·데이터 분석 도구·시뮬레이션 등 다양한 디지털 도구의 사용이 학습과 직

결될 수 있다고 인식되어 오고 있다(Chen & Chen, 2025; MOE, 2022). 그러나 디지털 기술에 대한 이해도나 친숙도가 높다고 해서 수업에서의 실제 활용으로 자동적으로 이어지는 것은 아니다. 반복적이고 의도적인 적용 경험은 교사의 자신감과 통합적 교수전략을 강화하며, 새로운 시도에 대한 긍정적 인식과 자기효능감을 높이는 선순환적 구조를 형성한다(Hu et al., 2025). 그러므로 교사가 디지털 도구를 어떤 목적과 맥락에서, 얼마나 빈번하게 활용하는지와 관련된 개인의 수업 활용 경험과 교과가 지니고 있는 전공 자체의 특성에 의해 형성되는 교과 성향이 상호작용함으로써 AI-TPACK 형성에 영향을 미칠 수 있을 것이다.

따라서 이 연구에서는 생물교사의 디지털 기술 활용 경향성과 AI 기반 기술·교수지식(AI-TPACK)의 이해와 활용 측면에서 생명과학의 교과 전공과 교사 개인의 디지털·AI 경험의 영향 차이가 존재하는지를 규명하고자 하였다. 이를 통해 생물교사의 디지털·AI 기술의 이해와 활용에서 교과라는 교수역량의 외재적 요인과 교사 개인의 디지털 기술 활용 경험이라는 내재적 요인 중 AI-TPACK에 의미있게 영향을 미치는 요인을 검증하여, 생명과학 교과의 AI 역량 강화와 개인 맞춤형 생물교사 교육의 방향성을 제시하고자 하였다. 이를 위해 교사를 대상으로 인공지능 기반 기술·교수·지식(AI-TPACK)에 대한 연구 문제를 다음과 같이 설정하였다.

첫째, 교과 전공에 따라 교사의 디지털 기술 활용 경향성에 차이가 존재하는가?

둘째, 교과 전공에 따라 교사의 인공지능 기반 기술·교수·내용지식(AI-TPACK) 수준에 차이가 존재하는가?

셋째, 외재적 요인인 교과 전공과 내재적 요인인 디지털 도구의 교육적 활용 빈도 중, AI-TPACK 수준의 차이와 관련성이 높은 설명 요인은 무엇인가?

Research Method

생명과학 교과 전공과 개인의 디지털·AI 경험의 차이에 따라 생물교사의 디지털 기술 활용 경향과 AI 기반 교수지식(AI-TPACK) 수준을 조사하여 분석하고자 하였다. 이에 따라 AI-TPACK 형성 요인을 교과가 지니는 내용적 특성에 의해 형성되는 전공 성향(외재적 요인)과 교사가 디지털 도구를 수업 맥락에서 정기적으로 활용해 축적한 교육적 활용 경험(내재적 요인)의 상호작용으로 개념화하였다.

이 연구는 교과 전공과 교사의 디지털·AI 활용 경험 가운데 어느 요인이 AI-TPACK 형성에 더 큰 관련을 보이는지를 탐색하는 데 목적을 두고 있다. 따라서 교과 전공은 각 교과가 지닌 교수·학습의 특성을 의미하며, 디지털·AI 활용 경험은 교사가 수업 맥락에서 관련 도구를 실제로 사용해 온 경험을 가리킨다. 이에 따라 비교집단은 다수 교과를 단순히 나열하여 비교하는 방식이 아니라, AI의 교육적 활용에 있어 교수·학습 맥락이 뚜렷이 구분되는 교과를 선정하였다.

탐구와 실험, 데이터 기반 활동이 강조되는 생명과학 교과와 달리 담론과 가치 판단 중심의 수업이 이루어지는 윤리 교과를 대비함으로써 서로 다른 교과 맥락 속에서 전공 요인과 경험 요인의 상대적 관련성을 확인하고자 하였다. 윤리교과는 AI-TPACK과 관련해서 ‘AI 활용의 윤리적 고려(AI-Ethic)’를 매우 중요한 하위 요소로 다루는 경향이 뚜렷하며, AI 활용의 ‘윤리적·사회기술적 고려’가 비교적 명시적으로 다루어지는 맥락적 특징을 지닌다. 그러므로, 생명과학 교과의 AI 활용 역량과 비교에 있어 기술과 내용적 측면 뿐만 아니라 윤리적 적용 역량을 함께 조망하는 대비집단으로서의 적합성을 고려하여 선택하였다. 또한 교과 전공 맥락의 대비를 최대화하기 위해 교육 경력을 통제하고자 디지털 경험과 교과 전공의 비교 신뢰성을 확보하기 위한 유층 표집 방식을 채택하였다.

따라서, 이 연구에서 제시하는 교과 전공에 따른 영향은 모든 교과로 일반화하기에는 제한점을 지니며, AI-TPACK 형성에서 교과 요인과 개인의 디지털·AI 실천 경험 요인중 더 강력한 설명 변인을 구체화하는데 한정하였다.

Participants

생명과학 교사와 윤리 교사를 대상으로 디지털 기기 활용과 관련된 이해도, 성향, 경험과 같은 개인적 요인과 PCK, TPACK, AI-TPACK 수준을 비교함으로써 디지털 도구의 교육적 활용이 AI-TPACK에 미치는 영향을 실증적으로 분석하였다. 생명과학 전공 교사와 비교 집단인 윤리 전공 교사를 대상으로 온라인 설문을 동시에 실시하였다. 또한, 교육 현장 경력에 따라 차이가 나타날 수 있음을 최소화하기 위해 1급 정교사 자격연수에 참여한 생물교사 42명과 윤리교사 42명을 연구 대상으로 표집하였다. 두 집단 모두 연구의 목적과 내용을 안내하였으며, 자발적 참여에 동의한 경우에 온라인 설문에 참여하도록 하였다. 설문에 참여한 84명 전체 교사들의 평균 나이는 32.00세(SD: 5.93)였으며, 성별 분포는 남성 22명(26.19%), 여성 62명(73.81%)의 성별 분포를 보였으며, 학교급별로는 중학교 교사가 33명(39.29%), 고등학교 교사가 51명(60.71%)로 고등학교 교사가 상대적으로 많은 편이었다. 생물교사와 윤리교사의 집단별 성별 분포와 소속 학교급은 [Table 1]과 같았으며, 생명과학 교사의 경우 여성 비율과 고등학교 재직 교사 비율이 상대적으로 높은 편이었다. 윤리교사의 경우에도 여성 비율이 높았으나, 학교급 분포에서는 두드러진 차이가 나타나지는 않았다.

Table 1. The distribution of participants' major, gender, and working school level

Major	Gender		School Level	
	Male n (%)	Female n (%)	Middle School n (%)	High School n (%)
Biology Education	10(23.81)	32(76.19)	10(23.81)	32(76.19)
Ethic Education	12(28.57)	30(71.43)	23(54.76)	19(45.24)

또한, 디지털 기술의 교육적 활용 성향에 있어 집단 차이가 존재하는지 확인하기 위하여 설문에 참여한 교사들의 나이와 성별에 대한 평균을 분석하였으며, 집단을 독립변인으로 하여 나이, 성별, 소속 학교급의 분포에 대해 교차분석을 수행하였다. 두 집단의 평균 나이를 산출한 결과 생물교사는 32.67세(SD: 6.25)였으며, 윤리교사는 31.33세(SD: 5.59)로 나타났으며, 두 집단 간 연령 분포에 대한 교차분석 결과는 통계적으로 유의한 차이가 확인되지 않았다($\chi^2 = 27.167, df = 22, p = .205$). 성별 분포의 경우 생물교사 중 남성은 23.81%, 여성은 76.19%였으며, 윤리교사 중 남성은 28.57% 여성은 71.43%로 나타났으며, 교차 분석 결과 집단에서 유의한 차이가 나타나지 않았다($\chi^2 = .246, df = 1, p = .620$). 따라서 두 집단에 속한 교사들의 나이와 성별 분포는 집단 차이에 영향을 미칠 가능성이 낮다고 볼 수 있다. 연구에 참여한 교사들의 연령 평균은 상대적으로 낮은 편으로 평균 출생 시기가 모두 1990년대에 해당한다. 설문에 참여한 교사들 중 1980년 이전 출생자인 4명을 제외하면 디지털 네이티브에 해당하므로, 연구 참여 교사들의 응답에 있어 사회문화적 차이에 따른 영향도 낮을 수 있다. 반면, 연구에 참여한 교사들의 응답 결과가 전체 연령대를 대표하기에는 제한점을 지닌다고 볼 수 있다.

Measurement and Analysis

디지털·AI 기술을 활용한 교수내용지식에 대한 교사들의 자기 인식 수준을 분석하기 위해 AI-TPACK에 대한 설문 문항 27문항(Celik, 2023)을 활용하였으며, TPACK과 PCK에 대한 설문 문항(Celik et al., 2014) 중 수정

을 거쳐 38문항을 구성하여 활용하였다. AI-TPACK 설문 문항은 번역 후에 피험자 응답 결과를 활용하여 분석한 결과 Cronbach α 는 .976로 신뢰도가 높은 수준이었다. TPACK과 PCK 관련 문항은 선행연구에서 제시한 문항 중 현재의 교육현장 상황에 적합한 문항을 선별 및 수정하여 설문지를 구성하였다. 최종 설문 문항은 과학교육 전문가 2인이 참여하는 연구 세미나를 통해 문항별 내용의 타당도를 확인하였으며, 현직 교사의 윤문을 거쳐 최종 문항을 구성하였다. TPACK과 PCK 관련 설문 응답 결과를 활용하여 분석한 결과 Cronbach α 는 .983로 신뢰도가 높은 것으로 확인되었다. 그러나, AI-TPACK, TPACK, PCK 설문 문항은 교수지식 중심으로 구성되어 있으므로, 교사의 개인적 디지털 도구 활용 성향 영역, 디지털 도구 활용에 대한 이해도 영역, 디지털 도구의 교육적 활용 경험 영역으로 구분하여 문항을 추가하였다. 디지털 도구 활용 성향에 대한 문항은 4문항으로 하루 중 디지털 도구 활용 시간, 주로 활용하는 디지털 도구의 유형, 디지털 도구를 활용하는 주요 활동, 디지털 도구 활용에 대한 정보 획득 경로에 대한 질문으로 구성하였다. 디지털 도구 활용에 대한 이해도 문항은 하드웨어 활용 이해도, 소프트웨어 활용 이해도, 디지털 도구 활용 숙련도의 3문항으로 구성하였으며, 응답자의 자유로운 반응을 위해 0점부터 10점까지의 범위에서 선택하도록 하였다. 디지털 도구의 교육적 활용 경험과 관련된 문항은 디지털 도구를 활용한 교육 활동 경험 유무, 교육 활동 유형(교과 수업/동아리 활동 등), 정기적인 교육 활동의 빈도(비정기/주 1회/주 2회 이상)의 3문항으로 구성하였다.

교수지식과 관련된 영역은 전통적 교수·내용지식에 대한 자기인식 수준(PCK)을 측정할 수 있는 6문항과 하위 요소인 PK 7문항, CK 4문항 총 17문항과 디지털 기술·교수·내용지식(TPACK)의 인식 수준을 측정하는 7문항 및 하위 요소인 TK 4문항, TPK 6문항, TCK 4문항 총 21문항을 포함하도록 구성되어 있다. 인공지능 기술·교수·내용지식(AI-TPACK)을 측정하기 위한 7문항과 함께 AI-TK 5문항, AI-TPK 7문항, AI-TCK 4문항, AI-Ethic 4문항 총 27문항으로 이루어져 있다. 개별 문항의 구성과 내용에 대한 적절성을 판단하기 위해 과학교육 전문가 2인의 정기 협의를 통한 내용타당도 검토와 윤리교육 전문가 1인의 검수를 받아 최종 문항 내용을 확정하였다. 설문지는 온라인으로 배포 및 취합되었으며, 생물 및 윤리 전공 1급 정교사 자격연수 참여 교사들 중 자발적 참여 의사를 밝힌 교사들을 대상으로 설문을 실시하였다. 회수된 총 84부의 응답은 모두 분석에 사용되었다.

설문 문항에 대한 교사들의 응답 결과는 평균값을 산출하여 자기 인식의 수준을 SPSS 26.0을 활용하여 분석하였다. 먼저 응답자의 전공, 성별, 연령, 학교급 등을 포함한 기초 특성에 대해 기술통계를 중심으로 표본의 전반적 분포를 확인하였다. 또한 생명과학 교사와 윤리 교사의 교과 특성에 따른 디지털 기술 활용 성향, PCK, TPACK, AI-TPACK 수준 차이가 존재하는지 검증하기 위해 전공 교과를 집단요인으로 하여 독립표본 t-검정을 실시하였다. Levene의 등분산 검정 결과를 확인하였으며, 단순한 평균 차이의 통계적 유의성 외에 실제적 효과를 확인하기 위해 Cohen's d를 활용한 효과 크기를 분석하였다. 다음으로 교사의 개인적 경험 요인인 디지털 도구의 정기적인 교육적 활용 빈도를 기준으로 교사를 세 집단으로 구분한 뒤, PCK, TPACK, AI-TPACK의 차이를 확인하기 위해 일원배치 분산분석(one-way ANOVA)을 실시하였다.

Results

Teachers' Digital Tool Usage Propensity

교사들의 디지털 기술과 기기 활용 관련 문항 중 하루 중 디지털 기기 사용 정도, 주로 사용하는 디지털 기

기의 유형, 디지털 기기를 활용한 주요 활동, 디지털 기기 활용에 대한 정보 획득 방법에 대한 응답 결과를 분석하였다. [Table 2]에 나타난 분석 결과에 따르면, 하루 중 디지털 기기 사용 시간에 대한 질문에서는 연구에 참여한 교사들은 '4~6시간'이라는 응답이 47.62%로 가장 높은 비율을 차지하였다. 다음으로 '7~9시간'이 22.62%, '1~3시간'이 21.43% 순으로 교사들이 응답하였으며, '10시간 이상' 사용하는 교사도 8.33%나 존재하는 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 전반적으로 교사들이 업무나 수업자료 준비, 개인적 관심사 등 다양한 목적을 위해 하루 중 많은 시간을 디지털 기기 활용에 할애하고 있음을 의미한다. 더 나아가, 이 연구에 참여한 교사들은 대체로 하루 중 디지털 기기 활용 시간이 길다는 것을 알 수 있었다.

Table 2. Teacher's digital device usage propensity

Item	Answer	Group		Total n (%)
		Biology Education n (%)	Ethic Education n (%)	
Using time by Digital Device per a day	0 hour	0(0.00)	0(0.00)	0(0.00)
	1 ~ 3 hours	7(16.67)	11(26.19)	18(21.43)
	4 ~ 6 hours	21(50.00)	19(45.24)	40(47.62)
	7 ~ 9 hours	10(23.81)	9(21.43)	19(22.62)
	more 10 hours	4(9.52)	3(7.14)	7(8.33)
Primary Device for Using Digital Device	Smart phone	20(47.62)	30(71.43)	50(59.52)
	Computer(Laptop, Desktop)	19(45.24)	11(26.19)	30(35.71)
	Tablet	3(7.14)	1(2.38)	4(4.76)
Primary Activity using Digital Device	Social Networking Services	6(14.29)	10(23.81)	16(19.05)
	Gaming	2(4.76)	0(0.00)	2(2.38)
	Reading Books	1(2.38)	0(0.00)	1(1.19)
	Working-related Tasks	17(40.48)	11(26.19)	28 33.33)
	Web surfing(individual Interesting)	12(28.57)	18(42.86)	30(35.71)
	Learning	4(9.52)	3(7.14)	7(8.33)
	Information Acquisition Method for Application of Digital Device			
	Teacher Training Course	1(2.38)	0(0.00)	1(1.19)
	Professional Learning community	0(0.00)	1(2.38)	1(1.19)
	Books	0(0.00)	1(2.38)	1(1.19)
	Web Search(portal, blog etc.)	5(11.90)	6(14.29)	11(13.09)
	Youtube	30(71.43)	28(66.67)	58(69.05)
	Instagram	6(14.29)	6(14.29)	12(14.29)

생물교사들의 디지털 기기 활용 시간에 대한 경향성을 확인하기 위하여 윤리교사의 활용 시간과 비교한 결과, 생물교사와 윤리교사는 모두 '4~6시간'으로 응답한 비율이 가장 많았다. '7~9시간' 응답은 두 집단 모두 20% 정도로 나타났으나, 윤리교사의 경우 '1~3시간'에 더 많은 응답이 분포하였다. 두 집단의 디지털 기기 활용 시간 비교에서는 부분적인 차이를 보였으나, 두 집단의 응답에 대해 독립 집단 t 검정을 수행한 결과 통계적으로 유의한 차이를 나타내지 않았다($F = .037, df = 82, t = .880, p = .848$). 따라서 생물교사의 일일 디지털 기기 활용 시간은 전공 특성에 따라 결정된다고 보기는 어려웠다.

다음으로 교사들이 주로 사용하는 디지털 기기의 유형을 분석한 결과, 스마트폰은 59.52%로 가장 높은 응답 비율을 보였으며, 컴퓨터가 35.71%, 태블릿 PC가 4.76% 순으로 나타났다. 이러한 결과는 교사들의 디지털 기기 활용이 주로 모바일 중심으로 이루어지는 경향이 있다는 것을 의미한다. 특히, 생물교사가 주로 사용하는 디지털 기기의 유형을 분석해보면, 스마트폰 47.62%, 컴퓨터 45.24%로 노트북이나 데스크탑 같은 컴퓨터 장비도 스마트폰 만큼 활용하였다. 반면, 윤리교사는 스마트폰 활용 비율이 71.43%로 편측화되어 있었으며,

해당 변인에 대해 독립 집단 t 검정을 수행한 결과, 통계적 수준에서 유의한 차이가 존재하였다($F = 4.973, df = 82, t = 2.278, p = .028$). 즉, 생물교사는 디지털 기기를 다양하게 사용하는 경향이 있는 반면, 윤리교사는 모바일 기기 중심으로 활용하는 성향이 존재함을 확인하였다. 이러한 차이는 생명과학 교과와 경우 지능형과학교실 운영 등 디지털 기술 활용에 있어 컴퓨터 기반으로 구동하는 소프트웨어, 개발도구, 센서 연계 소프트웨어 등의 활용과 관련되어 있을 것으로 추론할 수 있다.

실제 생물교사와 윤리교사의 디지털 기기 활용 유형의 차이가 어떤 활동에 기인하는 것인지 확인하기 위해 디지털 기기를 사용하는 주요 활동이 무엇인지를 설문하였다. 교사들은 ‘개인적 관심사에 대한 웹 서핑’이 35.71%, ‘업무 관련 작업’이 33.33%, ‘SNS’ 19.05%, ‘학습’ 8.33% 순으로 응답 빈도가 높게 나타났으며, ‘게임’과 ‘독서’는 3% 미만으로 매우 낮게 나타났다. 이러한 결과는 교사들이 디지털 기기를 활용하여 주로 수행하는 활동이 개인적인 관심 분야에 대한 웹 서핑뿐만 아니라 직무 수행에 있어서도 높은 빈도로 이루어지고 있음을 의미한다. 집단별로 활용 유형 경향을 분석한 결과, 생물교사는 ‘업무관련 작업’이 40.48%, ‘개인적 관심사에 대한 웹 서핑’이 28.57%, ‘SNS’ 14.29%, ‘학습’ 9.52% 순으로 나타났다. 반면, 윤리교사는 ‘개인적 관심사에 대한 웹 서핑’이 42.86%, ‘업무 관련 작업’은 26.19%, ‘SNS’ 23.81%, ‘학습’ 7.14% 순으로 응답하였다. 즉, 생물교사는 윤리교사에 비해 업무 관련 작업에 있어 디지털 기기 활용을 상대적으로 많이 하고 있음을 알 수 있으며, 앞선 추론과 같이 실험용 센서 등 디지털 탐구 도구를 활용한 실험 활동 등이 교과 활동에서 많은 부분을 차지함에 따라 디지털 기기 활용 유형에서 차이가 존재함을 간접적으로 확인하였다. 그러나 집단별 응답 결과를 활용하여 독립 집단 t 검정을 수행한 결과는 통계적으로 유의한 차이가 확인되지 않았다($F = 1.783, df = 82, t = .205, p = .185$). 즉, 디지털 기기를 활용한 주요 활동에 있어 업무 관련 작업과 개인 관심사에 대한 웹 서핑, SNS 사용에 있어 다소 간의 차이는 존재하지만, 교과 전공에 따른 차이라고 보기는 어렵다는 것을 의미한다.

마지막으로 교사들이 디지털 기기 활용에 대한 정보를 주로 획득하는 경로를 분석한 결과, ‘유튜브’가 69.05%, ‘인스타그램’이 14.29%, ‘웹 검색’이 13.09% 순이었으며, ‘교사 연수’, ‘전문적 학습공동체’, ‘도서’는 극히 일부만 응답하였다. 생물교사들의 정보 획득 방법에 대한 경향을 분석한 결과에서는 ‘유튜브’가 71.43%, ‘인스타그램’이 14.29%, ‘웹 검색’이 11.90% 였으며, 윤리 교사의 경우에도 ‘유튜브’가 66.67%, ‘인스타그램’과 ‘웹 검색’이 14.29%로 나타났다. 해당 변인에 대해 독립 집단 t 검정을 수행한 결과, 생명과학 교과와 윤리교사 집단간 통계적 유의성을 확인할 수 없었다($F = .976, df = 82, t = .326, p = .514$). 이러한 결과는 생물교사 뿐만 아니라, 윤리교사 역시 영상 기반 웹 플랫폼에 게시된 미디어를 주요한 디지털 기기 활용을 위한 정보원으로 인식하고 있음을 의미하며, 교사 연수와 전문적 학습공동체는 주요한 방법으로 인식하지 않고 있음을 시사한다. 또한, 교과 전공 별 차이보다는 1급 정교사 연수에 참여한 전체 교사의 전반적인 성향이 대체로 유사하며, 약 3년 정도의 경력을 갖는 교사들은 디지털 기기 활용에 대한 정보를 획득하는 방법에서 교사 연수와 전문적 학습공동체를 통한 정보 획득을 중요하게 인식하지 않다는 것을 의미한다.

이상의 분석 결과를 통해 생물교사를 포함한 저경력 교사들은 일반적으로 장시간 디지털 기기를 활용하고 있으며, 개인적인 관심사와 업무 관련 작업에 디지털 도구를 활용하고 있음을 알 수 있었다. 또한 디지털 기술 활용에 관련된 정보의 주요 획득 경로는 개별적이며 비공식적인 영상 기반 공유 플랫폼에 집중되어 있고, 학교 기반 지원 체계에 대한 유용성 인식은 낮다고 볼 수 있었다. 따라서, 생물교사를 포함하여 3년 정도의 경력을 갖는 1급 정교사 자격 연수에 참여한 교사들의 디지털 활용과 관련된 성향은 교과 전공 특성보다는 개인의 디지털 활용 경험과 필요에 따라 결정될 수 있다.

다음으로, 하드웨어와 소프트웨어로 대표되는 디지털 도구의 활용에 대한 이해도와 능숙도 수준에 대한 교사의 인식 수준에 대해 분석하였다. [Table 3]은 디지털 도구 활용 수준에 대해 교사가 0점~10점의 범위에서 스스로 평가한 평균 점수를 분석한 결과이며, 대체로 교사들은 디지털 도구 활용에 대한 전반적인 인식 수준을 중간 수준으로 응답하였다. 특히 하드웨어 활용 이해도는 평균 5.62점(SD: 2.15), 소프트웨어 활용 이해도는 평균 5.58점(SD: 2.00)으로 두 영역 모두 유사한 수준의 인식을 나타내었다. 디지털 도구 활용 숙련도 역시 평균 6.27점(SD: 2.06)으로 디지털 도구에 대한 이해도 수준보다 활용의 능숙한 정도를 더 높게 평가하는 경향을 나타내었다. 이러한 결과는 디지털 도구의 기술적 특징이나 원리에 대한 지식적 이해도는 낮게 평가하는 반면, 활용 자체는 가능하다는 인식이 반영된 것으로 보인다.

Table 3. Teacher's self-perceived competence in digital technology and device usage

Item	Group		Total Mean (SD)
	Biology Education Mean (SD)	Ethic Education Mean (SD)	
Level of Understanding in Using Digital Tool (Hardware)	5.81(2.21)	5.43(2.10)	5.62(2.15)
Level of Understanding in Using Digital Tool (Software)	5.76(2.02)	5.40(1.99)	5.58(2.00)
Level of Proficiency in Using Digital Tool	6.38(2.21)	6.17(1.91)	6.27(2.06)

집단별로 디지털 도구 활용에 대한 이해도와 능숙도를 분석해보면, 생물교사는 하드웨어 활용 이해도 5.81점(SD: 2.21), 소프트웨어 활용 이해도 5.76점(SD: 2.02), 디지털 도구 활용 숙련도 6.38점(SD: 2.21)로 응답하였다. 반면, 윤리교사는 하드웨어 활용 이해도 5.43점(SD: 2.10), 소프트웨어 활용 이해도 5.40점(SD: 1.99), 디지털 도구 활용 숙련도 6.17점(SD: 1.91)인 것으로 보아, 생물교사가 전반적으로 다소 긍정적인 자기 인식 수준을 나타내었다. 그러나 통계적 유의성을 검증하기 위한 독립 집단 t 검정에서 유의한 차이가 존재하지 않았다. 그러므로, 디지털 도구 활용에 대한 이해도와 능숙도에서는 교과 특성에 따른 차이가 있다고 일반화하기 어렵다. 즉, 생명과학 교사와 윤리 교사 모두 디지털 기기 활용이 일상화된 학교 환경에서 유사한 방식으로 디지털 기술을 접하고 활용하고 있으므로, 교과 특성보다는 교사의 개인적 활용 경험이 디지털 도구 활용과 관련한 주요 요인으로 작용할 수 있음을 시사한다.

Experiences of Educational Activity using Digital Tool

생물교사의 디지털 도구를 활용한 교육활동 경험을 분석하기 위하여 이들의 디지털 도구 활용 교육 활동의 경험 유무, 활동 유형, 활동 빈도에 대해서 전체 교사의 응답 결과를 함께 분석한 결과는 Table 4와 같이 나타났다.

Table 4. The experience of educational activities using digital tool

Item	Answer	Group		Total n (%)
		Biology Education Mean (SD)	Ethic Education Mean (SD)	
Experience of Educational Activities using Digital Tool	Present	35(83.33)	40(95.24)	75(89.29)
	None	7(16.67)	2(4.76)	9(10.71)
Type of Educational Activities using Digital Tool	Subject Classes	29(69.05)	40(95.24)	69(82.14)
	Extracurricular Club Activities	7(16.67)	0(0.00)	7(8.33)
	None	6(14.29)	2(4.76)	8(9.52)
Frequency of Regular Educational Activities using Digital Tools	Irregular or None	15(35.71)	10(23.81)	25(29.76)
	Once per week	16(38.10)	23(54.76)	39(46.43)
	more 2 times per week	11(26.19)	9(21.43)	20(23.81)

설문에 응답한 전체 교사 중 89.29%가 디지털 도구를 활용한 교육 활동 경험이 있다고 응답하였으며, 경험이 없다고 응답한 교사는 10.71%로 나타났으며, 집단별로 생물교사는 83.33%, 윤리교사는 95.24%가 디지털 도구 활용 경험이 있다고 응답하였다. 대부분의 교사들은 디지털 도구를 활용한 교육활동 경험을 가지고 있었다. 즉, 학교 현장에서는 디지털 기반 교육 활동이 널리 확산되었음에도 불구하고 일부 교사들의 경우에는 디지털 기반 교육 활동 경험이 충분하지 않음을 의미한다. 더 나아가, 디지털 도구를 활용한 교육활동 경험의 유무가 집단에 따른 차이가 존재한다면, 주로 어떤 유형의 활동을 수행하였는지 확인한 결과 연구에 참여한 전체 교사의 82.14%가 교과 수업에서 활용하였다고 응답하였으며, 8.33%는 동아리 활동에서 활용하였다고 응답하였다. 생물교사의 경우 생물교사는 교과 수업에서 디지털 도구를 활용한 비율이 69.05%로, 95.24%인 윤리교사에 비해 낮았다. 그러나 동아리 활동까지 포함하면 디지털 도구 활용 경험이 있는 비율 자체는 83.33%에 이른다. 이는 생물교사 중 전혀 활용하지 않는 비율 14.29%를 제외하더라도, 교과 수업 외의 활용 경로까지 고려하면 교과 전공에 따른 차이보다 개인적인 활용 맥락의 차이가 더 클 수 있다는 것을 의미한다.

뿐만 아니라, 디지털 도구를 활용한 정기적인 교육 활동의 빈도를 통해 적극적인 디지털 기술 활용 성향의 차이를 분석하였다. 비정기적이거나 전혀 사용하지 않는 교사의 비율은 29.76%였으며, 주 1회 활용하는 교사의 비율은 46.43%로 가장 많았으며, 주 2회 이상 적용하는 교사의 비율이 23.81%에 달하였다. 이러한 결과는 70.24%의 교사들이 정기적으로 디지털 도구를 활용한 교육활동을 수행하고 있음을 의미한다. 물론 디지털 도구의 활용은 단순한 활용부터 다차원적인 활용까지를 모두 포함하는 것이나, 정기적인 활용은 교사 개인이 적극적으로 디지털 기술의 활용에 개방적일 수 있음을 의미한다. 집단별로는 생물교사가 ‘비정기적 또는 적용하지 않음’으로 응답한 비율은 35.71%였으며, 윤리교사의 응답 비율 23.81%와 비교할 때 생물교사 집단이 전반적으로 디지털 도구 활용의 적극성이 낮다는 결과임을 나타낸다. 또한, 정기적 활용에 대해 ‘주 1회’로 응답한 비율에서 생물교사가 38.10%이고 윤리교사는 54.76%이었으므로 디지털 기술을 적극적으로 활용하는 생물교사의 비율이 상대적으로 낮음을 알 수 있었다. 다만, ‘주 2회 이상’ 활용으로 응답한 비율에서는 생물교사가 26.19%, 윤리교사가 21.43%로서 생물교사의 응답 비율이 높게 나타났다.

이에 대해 생물교사가 디지털 도구를 활용한 교육활동 경험 측면에서 윤리교사와 비교해서 나타나는 차이가 통계적으로 유의한 것인지 확인하기 위해 교차 분석을 실시하였다. 카이스퀘어 검정 결과, 디지털 도구를 활용한 교육 활동 경험의 $\chi^2=1.680$, $df=1$, $p=.195$ 였으며, 디지털 도구를 활용한 교육 활동의 유형의 결과는 $\chi^2=2.335$, $df=2$, $p=.311$ 로, 디지털 도구를 활용한 교육 활동의 빈도에서는 $\chi^2=1.488$, $df=4$, $p=.829$ 로 나타남으로써 통계적 수준에서 유의한 차이가 나타나지 않았다. 이러한 결과는 생물교사가 교과 특성상 디지털 탐구 도구 등의 활용 기회가 상대적으로 높은 상황임에도 불구하고 다른 교과 교사와 비교할 때 전공에 따른 차이가 유의하게 나타나지 않는다. 즉, 디지털 도구를 활용한 교육 활동이 교과 특성보다 교과 특성 이외의 요인에 의해 영향을 받을 수 있음을 시사한다.

Level of PCK, TPACK, and AI-TPACK

디지털 도구의 활용이 확대되고 있는 상황에서 생물교사의 디지털 도구 활용 교수역량을 분석하고 타 교과와 차이가 존재하는지를 확인하기 위해 교수지식(PCK), 기술·교수·내용지식(TPACK), 인공지능 기반 기술·교수·내용지식(AI-TPACK)에 대한 교사들의 응답을 분석하고, 집단별 차이를 확인하였다. 설문에 응답한 전체 교사의 교수내용지식(PCK) 평균은 총점 42점 중 28.57(SD: 7.31)로 나타났으며, 이는 교사들이 교과내용

지식과 교수지식의 통합적 적용 능력에 대해 중간 이상의 수준(68.02%)에 해당하는 자기 인식을 지니고 있음을 의미한다. 생물교사의 PCK 평균은 26.52로 나타났으며, 30.62인 윤리교사와 비교하기 위해 독립표본 t-검정을 실시한 결과는 통계적으로 유의한 차이가 나타났으므로, 교과 전공이 교사의 PCK 인식 수준에 부분적으로 영향을 미칠 수 있다는 것을 시사한다(Table 5).

PCK 인식 수준 차이에 대해 생물교사의 교수지식(PK) 수준과 내용지식(CK) 수준의 차이를 확인한 결과에서는 PCK와 PK 영역에서 통계적으로 유의미한 차이를 확인하였으며, 생명과학 교사가 인식하는 지식 수준이 윤리 교사에 비해 낮은 경향성을 보였다. 그러므로, 생물교사가 수업 구조화, 교수전략 선택, 학습자 지원 등 일반 교수지식 영역에서 상대적으로 낮은 수준의 자기 인식을 지니고 있음을 확인할 수 있었다. 반면, CK 영역에서는 통계적으로 유의한 차이가 없었으며, 효과 크기도 작게 나타남으로써 교과별 차이가 없다는 것을 확인하였다. 따라서 생물교사는 PCK와 PK에 대해서는 낮은 수준의 인식을 지니는 반면, 교과 내용에 대해서는 비교 집단과 유사한 수준의 인식을 지니고 있었다. 이러한 결과는 생물교사의 교수지식에 대한 자기인식 수준이 생명과학 개념이나 내용에 대한 지식과 달리 탐구 활동에 대한 교수지식을 고려한 응답으로 추정해 볼 수 있을 것이다.

Table 5. The result of independent t-test about PCK between groups

Item	Group		t	p	Cohen's d
	BE M (SD)	EE M (SD)			
Pedagogical Content Knowledge (PCK)	26.52(7.29)	30.62(6.81)	-2.660	0.009*	0.581
Pedagogical Knowledge (PK)	30.71(7.24)	35.98(6.99)	-3.389	0.001*	0.740
Content Knowledge (CK)	19.19(4.28)	20.83(4.17)	-1.783	0.078	0.389

Note. M: mean, BE: Biology Education, EE: Ethic Education

*: $p < 0.05$

연구에 참여한 전체 교사의 디지털 교수·내용지식(TPACK)의 평균점수는 27.77(SD: 9.28)로 나타났다. 생물교사의 디지털 교수·내용지식(TPACK)의 평균점수는 24.19(49.37%)로 31.33(63.94%)인 윤리교사에 비해 14.57% 낮은 인식을 보였으며, 독립 표본 t-검정 결과 두 집단 간 차이는 통계적 수준에서 유의하였고 Cohen's d는 .830으로 높은 수준이었다(Table 6). TPACK의 하위 요인들에 대한 집단간 차이를 확인하기 위해 독립표본 t-검정을 실시한 결과, 디지털 기술지식(TK), 디지털 기술교수지식(TPK), 디지털 기술내용지식(TCK) 수준 모두 통계적으로 유의한 차이가 존재하였다. 또한 효과크기를 확인하기 위해 산출한 Cohen's d는 TK의 경우 .580, TPK는 .877, TCK는 .704로 나타남으로써, 디지털 기술 지식에 대한 인식 차이는 보통 수준이었으나, 디지털 기술을 활용한 교수학습과 내용 지식에 있어서는 다소 차이가 크게 확인되었다. 즉, 생물교사는 디지털 기술 자체를 활용하는 지식과 디지털 기술을 활용하여 교수전략을 선택·구성·조정하는 지식, 그리고 교과 내용을 가르치는데 있어 디지털 기술을 활용하는 지식에 대해 비교 집단에 비해 상대적으로 더 낮은 자신감을 갖는다는 것을 의미한다.

반면, 디지털 도구에 대한 이해도와 숙련도에 대한 인식 수준에 대한 앞선 분석 결과에서 생물교사와 비교 집단 교사들의 응답이 유사한 수준으로 통계적 차이가 없었으므로, 실제로 윤리교사가 디지털 기술에 대한 이해도와 숙련도가 높다는 것을 의미한다고 볼 수 없다. 즉, 디지털 도구와 기술에 대한 이해도와 숙련도는 차이가 없으나, 생물교사는 상대적으로 디지털 기술을 활용한 교수학습에 있어 낮은 자기 인식 수준을 지니고 있다는 것이다.

Table 6. The result of independent t-test about TPACK between groups

Item	Group		t	p	Cohen's d
	BE M (SD)	EE M (SD)			
Technological Pedagogical and Content Knowledge (TPACK)	24.19(8.98)	31.33(8.21)	-3.805	<.001*	0.830
Technological Knowledge (TK)	15.19(5.63)	17.90(4.57)	-2.425	0.018*	0.580
Technological Pedagogical Knowledge (TPK)	21.10(8.49)	27.90(6.97)	-4.017	<.001*	0.877
Technological Content Knowledge (TCK)	15.60(4.87)	18.83(4.31)	-3.227	0.002*	0.704

Note. M: mean, BE: Biology Education, EE: Ethic Education

*: $p < 0.05$

연구에 참여한 전체 교사의 인공지능 기반 디지털 교수·내용지식(AI-TPACK)의 평균은 26.29(SD: 9.49)로 중간 수준의 인식(53.65%)을 나타내었다. 이러한 결과는 PCK에 비해 14.37%정도, TPACK에 비해 3.02% 낮은 인식 수준임을 알 수 있다. 따라서, 전반적으로 교사들은 전통적인 교수내용지식에 비해 인공지능 기반 교수내용지식에 대한 자신감이 낮다는 것을 의미한다.

집단별 차이를 확인하기 위해 분석한 결과에서 생물교사의 AI-TPACK 평균 점수는 24.07였으며, 윤리교사의 28.50에 비해 낮은 수준이었으며, t-검정 결과 통계적으로 유의한 차이가 확인되었고 효과 크기 산출 결과 Cohen's d는 .477로 중간정도의 차이가 존재하였다(Table 7). 즉, 생물교사의 AI-TPACK에 대한 인식 수준은 윤리교사와 비교하여 상대적으로 낮은 수준이었다. 반면, AI-TPACK의 하위 요인들에 대해 분석한 결과, AI-Ethic에서만 통계적으로 유의한 차이가 확인되었다. 이러한 결과는 AI 기술을 교과내용과 통합하는 능력에 있어 생물교사가 상대적으로 낮은 자기 인식을 보이지만, 이러한 차이는 AI를 활용하는 윤리적 지식 수준의 차이가 주요한 원인일 수 있음을 의미한다.

이런 맥락에서 디지털 기반 수업 설계 및 운영과 관련된 지식에 대한 생물교사의 상대적으로 낮은 자기 인식이 최근 확산되고 있는 인공지능 활용 지식에서도 나타나는지 확인할 필요에 따라 분석한 결과, 생물교사의 경우 PCK 대비 AI-TPACK에 대한 인식 수준이 14.02% 낮으며, TPACK 대비 0.24% 낮은 수준이었다. 즉, 생물교사는 디지털 기술을 활용한 교수활용 지식의 수준을 낮게 인식하고 있으나, 인공지능 활용에 있어서는 윤리적 지식을 제외하고 기술적 지식, 교수지식, 내용지식에서의 차이는 없었다. 결국 생물교사는 디지털 도구의 교육적 활용과 관련한 부분에 대해서는 상대적으로 낮은 자기 인식을 보이지만, AI의 교육적 활용에 있어서는 그렇지 않다는 것을 의미한다. 이러한 자기 인식의 차이는 현재 과학 교과에서는 지능형과학실의 확산과 2022 개정 교육과정의 적용에 따라 디지털 탐구도구의 활용이 강화되고 있으나, 학교별 개인별로 준비도의 차이가 존재할 수 있다. 그러나 AI의 활용과 관련해서는 교과에 어떻게 적용해야 하는지에 대한 가이드라인이나 명확한 방향성이 구체적으로 제시되고 있지 않은 실정이다. 그러므로, AI의 교육적 활용과 관련하여 교과 특성 이외의 요인인 개인의 경험적 요인의 영향을 확인할 필요가 있다.

Table 7. The result of independent t-test about AI-TPACK between groups

Item	Group		t	p	Cohen's d
	BE M (SD)	EE M (SD)			
AI Technological Pedagogical and Content Knowledge (AI-TPACK)	24.07(9.96)	28.50(8.54)	-2.188	0.032*	0.477
AI Technological Knowledge (AI-TK)	21.93(6.84)	21.83(6.07)	0.067	0.946	0.015
AI Technological Pedagogical Knowledge (AI-TPK)	28.62(8.27)	32.05(7.84)	-1.950	0.055	0.426
AI Technological Content Knowledge (AI-TCK)	15.93(5.62)	17.79(4.49)	-1.674	0.098	0.365
AI-Ethic	13.74(5.28)	17.12(5.77)	-2.802	0.006*	0.612

Note. M: mean, BE: Biology Education, EE: Ethic Education

*: $p < 0.05$

The Effect of Digital Tool Utilization Frequency on AI-TPACK

교과 전공과 개인의 교육적 실천 경험이 교사의 AI-TPACK 형성에 서로 다른 방식으로 작용함을 검증하였으며, 교과 전공이라는 요인과 함께 디지털 도구의 교육적 활용에 대한 개인적 성향이 주요한 영향 요인일 수 있음을 확인하였다. 이에 따라 디지털 도구의 교육적 활용과 관련된 요인들 중 디지털 도구의 교육적 활용 빈도를 기준으로 교사들을 '지속적 활용 없음', '정기적 활용(주 1회)', '고빈도 활용(주 2회 이상)'을 집단 변인으로 하여 PCK, TPACK AI-TPACK 수준에 대해 일원배치 분산분석을 수행한 결과는 [Table 8]과 같았다.

Table 8. The result of one way ANOVA between Level of Educational Utilization

Knowledge	Level of Educational Utilization using Digital Tool						df	F	p	η^2
	Irregular or None		Regular Use		Frequent Use					
	M	SD	M	SD	M	SD				
PCK	26.12	8.32	29.56	7.07	29.70	5.89	2,81	2.055	0.135	0.048
TPACK	23.60	10.59	29.54	8.00	29.50	8.59	2,81	3.827	0.026*	0.086
AI-TPACK	20.60	8.83	28.26	7.99	29.55	10.25	2,81	7.543	0.001*	0.157

*, $p < 0.05$

PCK 수준은 정기적 활용 없는 교사 집단보다 정기적으로 활용하는 집단에서 다소 높게 나타났으나, 통계적으로 유의한 수준에서 집단 차이가 존재하지 않았으며 정기적인 활용 집단과 더 많이 활용하는 집단에서도 PCK 차이는 나타나지 않았다. 효과 크기는 $\eta^2 = .048$ 로 낮은 수준으로 나타났으므로, 디지털 도구의 교육적 활용 빈도의 차이가 PCK 수준을 설명하기는 어렵다. 사후검정에서도 세 집단이 동일한 부분집합에 포함되어 집단 간 유의한 차이가 확인되지 않았다. 반면, TPACK 수준은 정기적 활용이 거의 없는 집단에 비해 정기적으로 활용하는 집단의 TPACK 수준이 뚜렷하게 높았으며, 더 자주 활용하는 집단에서도 높은 수준을 나타내었다. 뿐만아니라 통계적으로도 유의한 수준에서 차이가 존재하는 것이 확인되었으나($F=3.827, p=.026$), 효과 크기는 $\eta^2 = .086$ 으로 중간정도의 수준이었다. 사후검정 결과, 비정기적 활용 집단($M = 23.60$)은 정기적 활용 집단($M = 29.54$) 및 고빈도 활용 집단($M = 29.50$)과 유의하게 구분되었으나, 정기적 활용 집단과 고빈도 활용 집단은 동일한 부분집합에 포함되어 두 집단 간 차이는 유의하지 않았다. 이러한 결과는 디지털 도구를 실제 수업에 적용하는 경험 자체가 TPACK의 형성 및 강화에 기여할 수 있음을 시사한다.

AI-TPACK 수준 분석에서도 집단 간 차이는 통계적으로 유의하였으며, 효과크기는 $\eta^2 = .157$ 로 큰 수준으로 나타났다. 사후검정 결과에서도 TPACK과 유사한 패턴이 확인되었다. 비정기적 활용 집단($M = 20.60$)은 정기적 활용 집단($M = 28.26$) 및 고빈도 활용 집단($M = 29.55$)과 유의하게 구분되었으나, 정기적 활용 집단과 고빈도 활용 집단 간에는 유의한 차이가 나타나지 않았다. 즉, 디지털 도구의 정기적인 활용 정도는 교사의 TPACK과 AI-TPACK 수준을 설명하는 주요한 요인으로 기능할 수 있음을 의미한다.

TPACK과 AI-TPACK 모두에서 비정기적 활용 집단과 정기적 활용 집단 사이에 뚜렷한 차이가 존재하는 반면, 정기적 활용 집단과 고빈도 활용 집단 간에는 유의한 차이가 나타나지 않았다. 이는 디지털 도구의 교육적 활용이 일정 빈도 이상으로 이루어질 때 AI-TPACK 수준이 유의하게 향상되며, 빈도의 추가적인 증가보다는 정기적 활용의 실천 자체가 핵심적 요인임을 시사한다. 이러한 결과는 교사가 디지털 도구를 더 많이, 더 자주 교육적으로 활용할수록 인공지능 기반 기술·교수·내용지식(AI-TPACK)이 빠르게 축적 및 강화되며, 교사 개인의 경험 누적이 전공 교과가 지니고 있는 외재적 특성보다 더욱 강하게 인공지능 활용 교수역량 개발

에 영향을 줄 수 있음을 보여준다. 즉, 전공 교과별 속성의 차이가 존재하더라도 디지털 도구의 실제적인 활용 경험은 TPACK과 AI-TPACK을 설명하는 핵심 요인으로 작용하므로, 개별 교사의 디지털·AI 활용 성향과 경험이 미래지향적 교수지식 형성의 주요한 기반이라는 것을 시사한다.

Discussions

생물교사들의 디지털 도구 사용 성향과 이들이 인식하는 PCK, TPACK, 그리고 AI-TPACK 수준을 분석한 연구 결과는 전반적으로 디지털 도구의 사용-기술 통합 간 의미있는 시사점을 확인하였다. 대체로, 생물교사를 포함하여 연구에 참여한 교사들은 일상적으로 디지털 기기를 상당히 많이 사용하고 있었으며, 디지털 도구에 대한 학습 역시 비공식적이고 영상 중심의 상업용 플랫폼에 크게 의존하고 있었다. 이렇게 교사들이 비공식 플랫폼에 의존하는 경향은 교사들이 소셜 미디어를 활용해 즉각적인 자료, 동료 네트워크, 전문적 지원을 확보한다는 연구 결과와 일치한다(Carpenter & Krutka, 2014; Trust et al., 2016). 이러한 결과는 저경력 교사들이 학교 현장에서의 공식적 지원체계를 통해 교수역량 개발에 실질적 도움을 받지 못하고 있음을 시사한다. 그러나 효과적인 교사 전문성 개발에 관한 연구에 따르면, 교수·학습의 변화는 학습이 지속적이고, 교과 내용에 초점을 두며, 능동적 학습을 포함하고, 교육과정 및 평가와 정합성을 가질 때 가장 잘 이루어진다(Desimone, 2009; Tondeur et al., 2012). 이러한 점을 종합해 볼 때, 비공식적인 디지털 도구 탐색은 단기적으로는 효율적일 수 있으나, 생물교사들이 자신의 수업을 설계·실행·비평하는 구조화된 실천 중심 학습 기회와 연계되었을 때 공식적이고 체계적인 교사 재교육을 제공할 필요가 있다. 따라서 생물교사 연수를 포함하여 현재의 교사 연수의 방향 설정에 있어 교과의 특성을 반영한 교과 중심의 연수 뿐만 아니라, 개별 교사의 경험과 성향에 맞는 맞춤형 연수가 필요할 수 있다. 또한 실질적인 교수역량 개발을 위해 이론이나 기술 중심 교사 재교육에서 벗어나 실습 및 활용 중심의 교육으로 전환될 필요가 있다.

그럼에도 불구하고, 생물교사를 포함하여 연구에 참여한 전체 교사들이 인식하는 PCK 수준은 TPACK 및 AI-TPACK 수준보다 높게 나타났으며, 디지털 도구를 수업에서 더 빈번하게 활용할수록 TPACK과 AI-TPACK에 대한 인식 수준이 높아지는 경향이 확인되었다. 또한, 전반적으로 생물 교과와 다른 교과 전공 집단 간 통계적 수준에서 유의한 차이가 나타나는 요인과 그렇지 않은 요인들이 확인되었다. 뿐만 아니라, 생물 교사의 디지털·AI 도구에 대한 자기 인식 수준과 달리 교수학습적 영역에 대한 자기 인식 수준은 상대적으로 낮은 경향이 존재하였다.

이러한 결과는 디지털 도구 활용이 교과 특성보다 교사의 경험과 태도에 의해 좌우됨을 보고한 선행연구의 결과(Celik, 2023)와 일치한다. 따라서, 이런 경향은 디지털 기반 수업 환경이 보편화된 학교 현장에서 교과 특성보다 교사 개인의 디지털 친숙도 및 학습경험이 더 핵심적인 영향 요인이 됨을 시사한다. 특히, 기술·교수 및 AI·내용 통합 요소에서 상대적으로 낮은 역량을 나타내는 생물교사들에게는 교과 특성에 기반한 통합 지원의 필요성을 시사한다.

이러한 생물교사의 상대적으로 낮은 교수학습적 자기 인식은 연구 대상의 저경력 특성과 함께 생명과학 교과 고유의 교수적 복잡성이 결합된 결과로 해석할 수 있다. 이 연구에 참여한 생물교사는 교육 경력 5년 미만의 저경력 교사로서 중등 학생들에게 생명과학 관련 개념과 과학 탐구활동을 지도하는 측면에서는 상대적으로 자기효능감이 낮게 형성되어 있을 수 있다. 생물교사의 경우 실내 활동 외에도 자연 환경에서 살아있

는 생물을 관찰하고 탐구하는 등의 활동이 요구되나(Wells et al., 2015), 실제 야외활동 수행은 교수자의 전문성과 다양한 상황에 대한 조절이 필요하기 때문이다(Behrendt & Franklin, 2014). 즉, CK 영역에서는 집단 간 유의한 차이가 없었던 반면 PCK와 PK에서 생물교사의 인식이 낮게 나타난 결과는, 생명과학 교과가 지닌 탐구·실험 중심의 교수적 복잡성이 저경력 교사의 자기효능감에 반영된 것으로 해석할 수 있다.

구체적으로, 전공 집단 간 AI-TPACK 전체 점수에서는 통계적으로 유의한 차이가 확인되었으나, 효과크기는 중간 수준에 그쳤다. 더욱이 AI-TPACK의 하위 요인별로 분석한 결과에서는 AI-TK, AI-TPK, AI-TCK 모두 통계적 수준에서 유의한 차이가 나타나지 않았으며, AI-Ethic에서만 유의한 차이가 확인되었다. 이러한 결과는 전공 간 AI-TPACK 전체 점수의 차이가 주로 AI 윤리 영역에서의 인식 차이에 기인하며, AI 기술지식이나 AI 기반 교수·내용 통합 영역에서는 교과 전공의 영향이 제한적임을 의미한다. 반면, 디지털 도구의 교육적 활용 빈도에 따른 일원배치 분산분석에서 AI-TPACK의 효과크기는 큰 수준이었으며, 이는 전공 간 차이의 설명력과 비교할 때 교사 개인의 실천 경험이 AI-TPACK 수준을 보다 강하게 설명하는 요인임을 보여준다.

특히, AI-TCK 영역에서는 통계적 유의수준에 도달하지 못하였으나, 생물교사가 윤리교사에 비해 낮은 경향을 나타내었다는 점은 주목할 필요가 있다. 이러한 경향적 차이는 생명과학 교과에서 AI 기술을 교과 내용과 통합하는 과정이 단순히 기술을 적용하는 것을 넘어, 복잡한 생물학적 데이터와 탐구 맥락을 고려한 교수·학습 설계를 요구하기 때문일 수 있다. 즉, 생명과학 교과의 탐구·실험 중심 특성은 AI 기술의 내용 통합에 있어 높은 수준의 교과 전문성을 요구하며, 이로 인해 생물교사가 AI-TCK에 대해 상대적으로 신중한 자기인식을 보일 가능성이 존재한다. 이러한 해석은 생물교육에서 디지털·AI 기반 학습의 효과가 구성 요소 수준에서 교수·학습 설계와 내용 통합의 복잡성에 의해 영향을 받을 수 있다는 선행연구의 논의와도 연결된다(Smetana & Bell, 2012).

반면, AI-Ethic 영역에서 나타난 통계적으로 유의한 차이는 윤리 교과의 교수·학습 맥락과 밀접하게 관련될 수 있다. 윤리 교과는 AI 윤리, 알고리즘 편향, 디지털 시민성 등이 교과 내용 자체에 포함되어 있어(Casal-Otero et al., 2023; Kim & Cho, 2023), 윤리교사들이 AI 활용의 윤리적 측면에 대해 상대적으로 높은 인식 수준을 보이는 것은 교과 특성의 반영으로 해석할 수 있다. 이는 AI-TPACK 전체 점수의 집단 간 차이가 AI 기술지식이나 교수 전략 차원이 아니라 윤리적 인식 차원에서 주로 발생하고 있음을 시사하며, 생물교사교육에서 AI 활용의 윤리적 측면에 대한 교육적 보완이 필요함을 보여준다.

이러한 맥락에서 AI-TPACK은 AI 기반 도구의 단순한 기술 통합을 넘어 사회기술적·윤리적 고려를 요구함을 강조할 필요가 있다. AI를 위한 TPACK 확장 연구들은 데이터 수집, 자동화된 판단, 개인화 기능을 포함하는 AI 도구를 개별 교사가 해석하고 윤리적으로 적용할 수 있는 역량의 중요성을 강조한다(Celik, 2023). 아울러 교육에서의 AI 활용에 대한 종합적 고찰은 교사가 AI 도입과 활용 지침의 중심에 위치해야 함을 의미한다(Zawacki-Richter et al., 2019).

또한, 생물교사의 AI-TPACK 수준은 디지털 도구의 교육적 활용 빈도와 밀접하게 연관되어 있었다. 특히 '정기적 활용' 집단과 '고빈도 활용' 집단에서 AI-TPACK 점수가 유의하게 높은 결과를 고려할 때, AI 기반 교수지식이 단순한 기술 이해가 아니라 반복적 실천 경험을 통해 강화된다는 선행연구와도 연결될 수 있다(Hu et al., 2025). 즉, AI-TPACK은 정기적이고 지속적으로 수업에 활용하고 적용하려는 실천적 노력과 시도를 통해 형성되는 역량이라는 것이다.

이상의 결과를 이론적 맥락에서 종합하면, PCK, TPACK, AI-TPACK에서의 차이는 수업에서 기술의 통합이

특정 교과 전공에서의 수업 설계와 실행을 통해 형성되는 상황적 지식을 요구한다는 TPACK 이론의 주장과 부합한다(Graham, 2011; Mishra & Koehler, 2006). 이는 이 연구에 참여한 교사들이 디지털 도구에 대한 이해도와 숙련도에서는 집단 간 차이를 보이지 않았음에도 TPACK과 AI-TPACK에서 차이가 나타난 결과와도 연결되며, 디지털 노출만으로 높은 학습 역량을 갖춘다고 간주하는 '디지털 네이티브' 담론에 대한 비판과도 맞닿아 있다(Kirschner & De Bruyckere, 2017). 또한 수업에서의 디지털 도구 활용 빈도와 TPACK, AI-TPACK 인식 간의 관계는 교사의 기술적 변화가 지식, 자신감, 신념, 맥락 간 상호작용 속에서 이루어진다는 이론적 모델과도 일치한다(Ertmer & Ottenbreit-Leftwich, 2010). 다만, 시간 부족, 접근성 문제, 제도적 지원의 한계와 같은 장애 요인은 디지털 도구 실행 기회와 통합의 깊이를 제약할 수 있다(Hew & Brush, 2007).

특히 이 연구는 동일한 연수 배경의 저경력 교사로 표본을 통제하고, 개인 요인으로서 '디지털 도구의 정기적 교육적 활용 빈도'를 기준으로 집단을 재구조화하여 AI-TPACK 차이를 추가 검증하는 분석 전략을 채택하였다. 이러한 설계는 “교과 전공(외재적 요인)”과 “실천 경험(내재적 요인)”의 상대적 영향력을 비교하는 논리를 강화하며, 결과 해석에서도 실제로 전공 간 AI-TPACK 차이의 제한성과 교육적 활용 빈도의 설명력을 대비하여 논의하였다. 다만, 이 해석은 어디까지나 ‘생명과학-윤리’라는 대비쌍에서의 전공 효과 검증에 근거한 것으로, ‘교과 전공 효과가 모든 교과 조합에서 동일하게 나타난다’는 일반화를 의미하지는 않음을 고려할 필요가 있다. 따라서 본 연구는 교과 전공이라는 외재적 요인의 영향이 제한적인 반면, 교사 개인의 디지털·AI 활용 실천 경험이라는 내재적 요인이 AI-TPACK 형성에 보다 강한 설명력을 지닌다는 점을 근거로, 생물교사 교육에서는 교과 특성의 반영과 함께 개별 교사의 실천 경험을 강화하는 맞춤형 지원이 더 핵심적일 수 있음을 시사하고자 한다.

Conclusions and Educational Implications

이 연구는 생물교사들이 인식하고 있는 교수내용지식, 디지털 기술교수내용지식, 인공지능 기반 기술교수내용지식에 대해 다른 전공 교사들과 비교하여 분석한 결과를 고찰하였으며, 이 연구를 통해 관찰된 결과들을 바탕으로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 생물교사를 포함한 저경력 교사들의 디지털 도구 활용은 업무와 관련된 부분까지 확장되어 있으나, 관련 지식의 획득은 공적 지원 체계보다 개인 차원의 플랫폼 미디어에 의존하고 있다. 이들 교사들은 디지털 이해도와 숙련도가 전반적으로 높은 경우가 다수 존재함에도 불구하고, 디지털 기기 활용 정보 획득 경로에서 유튜브·블로그·웹 검색 등 비공식 경로가 가장 높게 나타났다. 이러한 결과는 업무·수업 준비 등 다양한 영역에서 디지털 도구를 활용하고 있지만, 공적 영역인 교원 연수나 학교 차원의 지원보다 개인의 자발적 탐색을 통해 디지털 역량을 형성하는 구조적 문제점이 있다. 즉, 교사의 디지털 역량 개발은 체계적 지원보다는 개인의 관심사와 탐색 성향에 의해 좌우되고 있다는 것을 의미한다.

둘째, 생물교사의 인공지능 기반 기술·교수·내용지식 수준의 차이는 전공 교과에 따른 차이보다 개인적 실천 경험과 실행 요인에 따른 차이가 더 크게 영향을 미친다. 구체적으로 생물교사와 윤리교사 집단 간 AI-TPACK 전체 점수에서는 통계적으로 유의한 차이가 확인되었으나 효과크기는 중간 수준에 그쳤으며, 하위 요인에서는 AI-Ethic을 제외하면 유의한 차이가 나타나지 않았다. 반면 디지털 도구 활용 빈도를 세 집단으로 구분하여 재구조화하여 분석한 결과에서 유의한 차이와 효과 크기를 확인하였다. 이러한 결과는 AI-TPACK

형성에 생물 교과 특성보다는 개인의 디지털 도구의 교육적 활용 빈도가 훨씬 중요한 설명 변인임을 보여준다.

셋째, 생물교사의 인공지능 기반 기술·교수·내용지식의 수준에는 디지털 도구를 활용한 교육활동을 수행하고자 하는 적극성과 경험의 누적이 긍정적 영향을 주는 것으로 나타났다. 즉, 디지털 도구의 교육적 활용 빈도가 높은 교사 집단은 TPACK과 AI-TPACK 전반에서 평균이 뚜렷한 차이로 높았다. 이는 교사가 디지털 기기나 AI 도구를 실제 수업에 적용해본 경험이 많을수록 통합적 교수역량이 강화될 수 있음을 보여준다. 즉, 생물교사의 AI-TPACK은 단순한 지식 기반 역량이 아니라 실천기반역량이며, 반복적이고 의도적인 디지털 기술의 활용이 누적되면서 발달할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

이 연구를 통해 밝혀진 내용들을 통해 생물교사의 교수역량 개발 측면에서 다음과 같이 제언을 제시할 수 있다.

첫째, 교사 연수에 있어 교과별 특성을 고려한 연수 내용 선정과 운영이 필요하다. 생물교사는 탐구·실험 기반의 수업 특성상 데이터 분석, 시각화, 모델링 등 AI 활용의 실질적 수요가 높다. 실제 분석에서 생물 교과는 타 교과와 차이가 두드러지지 않았지만, AI-TPK와 AI-TCK처럼 교과 특성이 반영될 수 있는 영역에서 경향적 차이가 관찰되었기 때문에 생물교사 연수 시 교과 특성에 맞는 AI 활용 영역을 구분할 필요가 있을 것이다.

둘째, 교과별 특성을 고려한 연수는 무엇을 가르칠지와 관련된 교과 내용을 고려함과 동시에, 교사들이 실제로 역량을 축적하는 방식인 얼마나 자주, 어떤 맥락에서 적용하는지와 관련된 개별 교사의 실천적 경험의 누적이 가능하도록 학교 상황에 따른 수업 설계 및 운영으로의 초점 이동이 필요하다. 즉, 연수 시작 시 생물교사의 현재 디지털·AI 사용 루틴(비공식 플랫폼 이용 등), 수업 적용 빈도, 관심 주제, 디지털 활용 성향, 수업 상황을 진단하고, 이를 바탕으로 개인별 출발점을 설정하여 연수를 진행할 필요가 있다. 또한, 생물 교과의 특성들인 탐구, 실험, 데이터 분석, 시각화, 모델링 등을 반영한 AI-TPK와 AI-TCK 중심의 마이크로 티칭 형태의 프로그램을 구성하고, 개별 교사의 관심 및 성향과 당면하고 있는 수업 맥락에 맞는 프로그램을 모듈형으로 선택하고 수행할 수 있는 상시적 연수 체계 구성이 필요하다.

셋째, 생물교사 연수에 있어 이론적인 부분과 함께 지속적인 실습과 교육적 적용의 기회가 실질적으로 제공될 필요성이 존재한다. AI-TPACK 향상은 교육적 활용 빈도의 증가와 강하게 연결되어 있었으며, 단순한 지식 이해보다 수업 적용 경험의 누적이 더 큰 영향을 미치고 있었다. 즉, AI 활용 관련 생물교사 재교육에서는 일회성으로 이론 중심 교육을 넘어서 실습 중심·적용 중심 연수와 수업 설계-실행-성찰이 반복되는 체계로의 전환이 필요하다.

넷째, 교사의 교수역량은 노하우라는 측면에서 스스로 노력하고 익힐 필요가 있는 영역이므로, 지속적인 지원이 가능한 인공지능 기반 맞춤형 교사 교육 시스템의 마련이 필요할 것이다. 교사들의 디지털 지식 획득 경로가 비공식 개인 플랫폼에 집중되어 있고, 공식 지원 체계의 영향력은 상대적으로 낮은 현재의 구조는 교사 간 디지털 활용 역량 격차를 확대할 가능성이 있다. 따라서 개별 교사의 수준과 필요에 따라 학습 경로·자료·전략을 추천해주는 AI 기반 맞춤형 교사 연수 및 재교육 시스템의 구축이 필요할 것이다. 예를 들어, AI 활용 빈도가 낮은 교사에게는 작은 변화(1차시 단위)부터, 활용 빈도가 높은 교사에게는 복수 차시/단원 수준의 확장 미션을 제공하여 개인 실천 단계별(빈도 기반) 경로화를 구현할 수 있다.

Acknowledgements

This work was supported by the 2025 Sabbatical Leave Research Grant funded by Korea National University of Education.

Conflicts of Interest

The author(s) declared no conflicts of interest.

References

- Alam, M. N. U., Basava, K., Chitransh, A., Abdul Fattah, H. M., Garcia-Verdugo, H. D., Lo, S.-H., Lohchab, T., Martinet, K. M., Román-Palacios, C., Salazar, J. C., & Van Boxel, D. (2025). Machine learning in biological research: key algorithms, applications, and future directions. *BMC Biology*, 23, 324. <https://doi.org/10.1186/s12915-025-02424-3>
- Baumert, J., Kunter, M., Blum, W., Brunner, M., Voss, T., Jordan, A., Klusmann, U., Krauss, S., Neubrand, M., & Tsai, Y.-M. (2010). Teachers' Mathematical Knowledge, Cognitive Activation in the Classroom, and Student Progress. *American Educational Research Journal*, 47(1), 133-180. <https://doi.org/10.3102/0002831209345157>
- Byeon, J. -H. & Kwon, Y. -J. (2023). An investigation of generative AI in educational application : Focusing on the usage of ChatGPT for learning biology. *Brain, Digital, & Learning*, 13, 1-17. <https://doi.org/10.31216/BDL.20230001>
- Bonfield, C. A., Salter, M., Longmuir, A., Benson, M., & Adachi, C. (2020) Transformation or evolution?: Education 4.0, teaching and learning in the digital age. *Higher Education Pedagogies*, 5, 223-246. <https://doi.org/10.1080/23752696.2020.1816847>
- Behrendt, M., & Franklin, T. (2014). A review of research on school field trips and their value in education. *International Journal of Environmental and Science Education*, 9, 235-245. <http://dx.doi.org/10.12973/ijese.2014.213a>
- Carpenter, J. P., & Krutka, D. G. (2014). How and why educators use Twitter: A survey of the field. *Journal of Research on Technology in Education*, 46, 414-434. <https://doi.org/10.1080/15391523.2014.925701>
- Casal-Otero, L., Catalá, A., Fernández-Morante, C., Taboada, M., Cebreiro, B., & Barro, S. (2023). AI literacy in K-12: A systematic literature review. *International Journal of STEM Education*, 10, 1-17., <https://doi.org/10.1186/s40594-023-00418-7>
- Celik, I., Sahin, I., & Akturk, A. O. (2014). Analysis of the relations among the components of technological pedagogical and content knowledge (TPACK): A structural equation model. *Journal of Educational Computing Research*, 51(1), 1-22. <https://doi.org/10.2190/EC.51.1.a>
- Celik, I. (2023). Towards Intelligent-TPACK: An empirical study on teachers' professional knowledge to ethically integrate artificial intelligence (AI)-based tools into education. *Computers in Human Behavior*, 138, Article 107468. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2022.107468>
- Chen, F., & Chen, G. (2025). Technology-Enhanced Collaborative Inquiry in K-12 Classrooms: A Systematic Review of Empirical Studies. *Science & Education*, 34, 1731-1773. <https://doi.org/10.1007/s11191-024-00538-8>
- Desimone, L. M. (2009). Improving impact studies of teachers' professional development: Toward better conceptualizations and measures. *Educational Researcher*, 38, 181-199. <https://doi.org/10.3102/0013189X08331140>

- Ertmer, P. A., & Ottenbreit-Leftwich, A. T. (2010). Teacher technology change: How knowledge, confidence, beliefs, and culture intersect. *Journal of Research on Technology in Education*, 42, 255-284. <https://doi.org/10.1080/15391523.2010.10782551>
- Fauth, B., Decristan, J., Decker, A. T., Büttner, G., Hardy, I., Klieme, E., & Kunter, M. (2019). The effects of teacher competence on student outcomes in elementary science education: The mediating role of teaching quality. *Teaching and Teacher Education*, 86, 102882. <https://doi.org/10.1016/j.tate.2019.102882>
- Fauville, G., Luo, M., Queiroz, A. C. M., Bailenson, J. N., & Hancock, J. (2021). Zoom exhaustion & fatigue scale. *Computers in Human Behavior Reports*, 4, Article 100119. <https://doi.org/10.1016/j.chbr.2021.100119>
- Fischer, H. E., Borowski, A., & Tepner, O. (2012). Professional knowledge of science teachers. In Fraser, B., Tobin, K., & McRobbie, C. (Eds) *Second International Handbook of Science Education*. Springer International Handbooks of Education, 24(pp. 435-448). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9041-7_30
- Graham, C. R. (2011). Theoretical considerations for understanding technological pedagogical content knowledge (TPACK). *Computers & Education*, 57, 1953-1960. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2011.04.010>
- Guan, C., Mou, J., & Jiang, Z. (2020). Artificial intelligence innovation in education: A twenty-year data-driven historical analysis. *International Journal of Innovation Studies*, 4, 134-147. <https://doi.org/10.1016/j.ijis.2020.09.001>
- Haderer, B., & Ciolacu, M. (2022). Education 4.0: Artificial intelligence assisted task- and time planning system. *Procedia Computer Science*, 200, 1328-1337. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.334>
- Hew, K. F., & Brush, T. (2007). Integrating technology into K-12 teaching and learning: Current knowledge gaps and recommendations for future research. *Educational Technology Research and Development*, 55, 223-252. <https://doi.org/10.1007/s11423-006-9022-5>
- Holmes, W., Bialik, M., & Fadel, C. (2019). *Artificial intelligence in education: Promises and implications for teaching and learning*. The Center for Curriculum Redesign.
- Hu, X., Xu, W., Wan, Z., Liu, M., & Xu, W. (2025). Bridging self-efficacy and digital competence: A comprehensive scoping review of teachers' readiness for the digital age. *Sage Open*, 15, 1-25. <https://doi.org/10.1177/21582440251363716>
- Jiménez Sierra, Á. A., Ortega Iglesias, J. M., Cabero-Almenara, J., & Palacios-Rodríguez, A. (2023). Development of the teacher's technological pedagogical content knowledge (TPACK) from the Lesson Study: A systematic review. *Frontiers in Education*, 8, Article 1078913. <https://doi.org/10.3389/educ.2023.1078913>
- Kim, K. J., & Cho, J. W. (2023). Analysis of domestic research trends in AI ethics education. *Journal of the Korea Society of Digital Industry and Information Management*, 19(4), 29-44.
- Kirschner, P. A., & De Bruyckere, P. (2017). The myths of the digital native and the multitasker. *Teaching and Teacher Education*, 67, 135-142. <https://doi.org/10.1016/j.tate.2017.06.001>
- Ministry of Education. (2022). Science curriculum (Notification No. 2022-33 [Appendix 9]). Sejong
- Mishra, P., & Koehler, M. J. (2006). Technological pedagogical content knowledge: A framework for teacher knowledge. *Teachers College Record*, 108, 1017-1054. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9620.2006.00684.x>
- OECD (2022). *Trends Shaping Education 2022*. OECD Publishing.
- OECD (2024). *Education policy outlook 2024*. OECD Publishing.

- Reimers, M. F. (2022). Learning from the frontlines of educational innovation during a pandemic. In Vincent-Lancrin, S., Romani, C. C., & Reimers, F. M. (Eds.), *How learning continued during the COVID-19 pandemic: Global lessons from initiatives to support learners and teachers* (pp. 78-90). OECD Publishing.
- Rimm-Kaufman, S. E., & Hamre, B. K. (2010). The role of psychological and developmental science in efforts to improve teacher quality. *Teachers College Record*, 112(12), 2988-3023. <https://doi.org/10.1177/016146811011201204>
- Smetana, L. K., & Bell, R. L. (2012). Computer simulations to support science instruction and learning: A critical review of the literature. *International Journal of Science Education*, 34, 1337-1370. <https://doi.org/10.1080/09500693.2011.605182>
- Tondeur, J., van Braak, J., Sang, G., Voogt, J., Fisser, P., & Ottenbreit-Leftwich, A. (2012). Preparing pre-service teachers to integrate technology in education: A synthesis of qualitative evidence. *Computers & Education*, 59, 134-144. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2011.10.009>.
- Trust, T., Krutka, D. G., & Carpenter, J. P. (2016). "Together we are better": Professional learning networks for teachers. *Computers & Education*, 102, 15-34. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2016.06.007>
- Wells, N. M., Myers, B. M., Todd, L. E., Barale, K., Gaolach, B., Frenz, G., Aitken, M., Henderson, C. R., Tse, J. C., Pttison, K. O., Taylor, C., Connerly, L., Carson, J. B., Gensemer, A. Z., Franz, N. K., & Falk, E. (2015). The effects of school gardens on children's science knowledge: A randomized controlled trial of low-income elementary schools. *International Journal of Science Education*, 37, 2858-2878. <https://doi.org/10.1080/09500693.2015.1112048>
- Zawacki-Richter, O., Marín, V. I., Bond, M., & Gouverneur, F. (2019). Systematic review of research on artificial intelligence applications in higher education—Where are the educators? *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 16, Article 39. <https://doi.org/10.1186/s41239-019-0171-0>.
- Zha, S., Bragdon, M. M., Gong, N., Wang, J., Leavesley, S., Eaton, E., & Bosarge, E. (2025). A case study of integrating AI literacy education in a biology class. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 35, 2453-2477. <https://doi.org/10.1007/s40593-025-00476-8>
- Zhang, K., Chen, L., & Song, Y. (2023). Human-centered artificial intelligence in education: Review and agenda. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 4, 100104. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2023.100104>.

Authors' Information

Byeon, Jung-ho: Kangwon National University, Assistant Professor, First Author. <https://orcid.org/0000-0002-0109-7866>

Kwon, Yong-Ju: Korea National University of Education, Professor, Co-corresponding Author. <https://orcid.org/0000-0002-8232-1574>