

# STEM 영역 디지털교과서 활용 효과에 대한 메타분석

김민주\* · 이민경\*\* · 박진만\*\*\* · 이영리\*\*\*\*

**국문초록** 본 연구는 국내 STEM 영역(수학, 과학, 정보·컴퓨터)에서 디지털교과서의 사용이 학생들의 학업성취도에 미치는 영향을 메타분석으로 검증하였다. 이를 위해 2000년 이후 국내에서 발표된 한국어 학술지 및 학위논문을 PRISMA 절차에 따라 선별하여 최종적으로 25편의 연구에서 산출된 35개의 효과크기를 분석하였다. 분석 결과, 디지털교과서 활용 수업의 통합 효과크기는  $0.26(SE=0.05, p < .001)$ 로 나타나, 전통적인 서책형 교과서 활용 수업보다 학업성취도 향상에 유의미한 정적 효과가 있는 것으로 확인되었다. 조절변인 분석에서는 학년이 유의한 변인으로 나타났으며, 저학년일수록 효과가 크고 학년이 높아질수록 효과가 감소하는 경향을 보였다. 디지털교과서가 STEM 수업에서 학업성취 향상에 기여할 수 있으나, 그 효과는 학습자의 발달 수준과 수업 맥락에 따라 달라질 수 있음을 시사한다. 본 연구는 디지털교과서 활용의 실증적 근거를 제시하고, 향후 학교 현장에서의 활용 전략 및 후속 연구 방향에 시사점을 제공한다.

**주제어:** 디지털교과서, STEM 교육, 학업성취도, 메타분석, 조절효과

## 목차

- I. 서론
- II. 이론적 배경
- III. 연구 방법
- IV. 연구 결과
- V. 논의

논문접수일: 2026.03.04.

논문수정일: 2026.03.27.

게재확정일: 2026.04.10.

## I. 서론

### 1. 연구의 필요성 및 목적

최근 디지털교과서의 보급이 확산됨에 따라 AI 기술과 결합된 새로운 형태의 디지털 학습환경이 등장하고 있다(박형도, 2025; 이현애, 2025). 특히 코로나19 이후 원격수업과 혼합수업이 일상화되면서 디지털 학습도구의 활용이 급증하였고, 이에 따라 디지털교과서는 단순한 전자화 교재를 넘어 학습자 맞춤형 피드백, 상호작용 기능, 멀티미디어 자료 제공 등 다양한 교수·학습 지원 기능을 갖춘 학습환경

\* 제1저자, 고려대학교 교육학과 대학원생 / raw1212@korea.ac.kr

\*\* 공동저자, 고려대학교 교육학과 대학원생 / imimyeong@korea.ac.kr

\*\*\* 공동저자, 고려대학교 교육학과 대학원생 / breezyblue@naver.com

\*\*\*\* 교신저자, 이화여자대학교 심리학과 교수 / yr.lee@ewha.ac.kr

으로 발전하였다.

그동안 디지털교과서의 교육적 효과를 검증한 연구들은 학업성취도, 학습 태도, 탐구 능력 등의 측면에서 일정 수준의 긍정적인 효과를 보고해 왔다(김성숙, 2015; 김종신, 2012; 박상우, 2011). 특히 디지털교과서를 활용한 수업은 학업성취도가 낮은 학습자나 학습부진 학생에게 보다 효과적일 수 있음이 다수의 연구에서 제시되었다(김옥령, 2010; 이용섭 & 홍순원, 2010). 그러나 이러한 연구들은 대부분 특정 교과나 학년, 제한된 수업 상황을 대상으로 한 개별 실험연구에 머물러 있어, 연구 결과를 일반화하는 데 한계가 있다.

또한 디지털교과서는 국가 차원의 정책적 투자와 지속적인 개발에도 불구하고 학교 현장에서의 활용률이 기대에 미치지 못하고 있으며, 교사의 교수 가이드스 수준이나 디지털교과서 활용 방식에 따라 학습 효과의 차이가 크게 나타나는 것으로 보고되고 있다(송해덕 & 박주호, 2009; 김진, 2015). 이는 디지털교과서의 효과가 단순한 도입 여부가 아니라 활용 조건과 맥락에 따라 달라질 수 있음을 시사한다.

디지털교과서의 효과를 분석한 해외 메타분석 연구들이 진행되었는데, 디지털 교과서의 사용이 학생들의 전반적인 학습 성과에 미치는 영향을 분석한 연구, 언어 학습에 미치는 영향을 분석한 연구, 수학 성취도에 미치는 영향을 분석한 연구 등이 있다(Jang et al., 2015; Listanto et al., 2025; Wijaya et al., 2022). 선행연구 결과에 따르면 디지털 교과서 활용은 학생들의 학습 성과에 전반적으로 유의미한 긍정적인 영향을 미쳤으며, 특히 학업성취도보다 학습동기와 학습태도와 같은 정의적 영역에서 더 큰 효과가 나타났다(Jang et al., 2015). 또한, 디지털교과서 기반 학습은 종이 교과서 기반 학습에 비해 언어 학습 성과에 유의미한 긍정적 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 그 효과크기는 중간 수준으로 보고되었다(Listanto et al., 2025). 뿐만 아니라, 디지털교과서를 활용한 수업은 전통적인 종이 교과서 수업에 비해 학생들의 수학 성취도를 유의미하게 향상시키는 것으로 나타났으며, 전체 효과크기는 큰 수준으로 보고되었다(Wijaya et al., 2022).

국내에서 수행된 디지털교과서의 효과 관련 메타분석 연구는 초기에는 효과가 제한적이거나 통계적으로 유의하지 않은 결과를 보고한 경우가 많았다. 초등학교를 대상으로 한 연구에서는 디지털교과서 활용이 학업성취에 미치는 전체 평균 효과크기가 작거나 유의하지 않은 수준으로 나타났으며, 과목 및 학년에 따라 효과의 차이가 존재하는 것으로 보고되었다(변호승 외, 2011). 또한 초등 영어 디지털교과서를 중심으로 한 메타분석에서도 영어 학업성취도와 영어 교과 관련 태도에서 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았으며, 평균 효과크기 역시 유의하지 않은 것으로 분석되었다(박현아, 2010). 영어 교과를 대상으로 한 또 다른 연구에서도 전체 평균 효과크기는 낮은 수준으로 나타났고, 학업성취보다는 일부 정의적 영역에서 제한적인 효과가 보고되었다(박찬진, 2015). 최근 연구에서는 보다 긍정적인 결과가 제시되고 있다. 디지털교과서를 활용한 수업의 전체 평균 효과크기가 중간 수준으로 나타났으며, 특히 정의적 영역에서 가장 큰 효과가 보고되었다는 연구 결과도 제시되었다(서봉언 & 공은화, 2021).

기존 국내 메타분석 연구는 디지털교과서의 전반적인 효과를 종합적으로 제시하였으나, 대부분 2010년대 중반 이전 연구를 중심으로 이루어져 최근 AI 코스웨어, 맞춤형 학습, 비계설정 기능 등 기술적 변화를 충분히 반영하지 못하고 있다. 특히 2020년대 이후 AI 기반 디지털교과서 및 AI 코스웨어를 활용한 연구들이 축적되고 있음에도 불구하고, 이를 종합적으로 분석한 메타분석 연구는 부족한 실정이다(마명선, 2024; 박형도, 2025). 다양한 과목을 대상으로 디지털교과서의 효과를 분석한 선행연구가 진행되었는데, 특히 STEM 영역(수학, 과학, 정보, 컴퓨터 등)을 적용한 국내의 연구가 많으며, 효과의 유의성에 있어서는 개별 연구별로 차이가 있어 STEM 영역에 초점을 두어 국내 연구 결과를 종합적으로 분석하여 디지털교과서의 효과를 검증하고자 한다.

이에 본 연구는 AI 기반 디지털교과서(AI Digital Textbook, AIDT)를 포함한 디지털교과서를 활용한 국내 연구들을 대상으로 메타분석을 실시하여, 디지털교과서의 실제 학습 효과를 객관적으로 검증하고자 한다. 나아가 향후 디지털교과서의 효과적인 활용 전략 수립과 교육적 시사점을 제안하고자 한다.

## 2. 연구 문제

본 연구는 디지털교과서의 사용이 학생들의 학업성취도 향상에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 또한 디지털교과서 활용 수업의 학업성취도 효과크기에서 연구 간 이질성이 존재하는지, 존재할 경우 어떠한 조절변인이 이를 설명할 수 있는지를 확인하고자 한다. 본 연구는 디지털교과서의 사용이 학생들의 학업성취도 향상에 효과가 있는지, 유의미한 효과가 있다면 효과크기를 조절하는 변인이 무엇인지를 규명함으로써 효과적인 디지털교과서 활용 수업 방안을 모색하는 데 시사점을 제공하고자 한다. 이러한 연구 목적을 바탕으로 다음과 같은 연구 문제를 설정하였다.

1. STEM 영역(수학, 과학, 정보, 컴퓨터 등)에서 디지털교과서의 사용이 학생들의 학업성취도 향상에 영향을 미치는가?
2. 디지털교과서 활용 수업의 학업성취도 효과크기에서 연구 간 이질성이 존재하는가?
3. 디지털교과서의 학업성취도 효과는 학년, 학교급, 교과목, 수업 차시, 출판연도에 따라 차이가 나타나는가?

## II. 이론적 배경

### 1. 디지털교과서의 개념 및 특징

디지털 전환이 가속화됨에 따라 디지털교과서는 학교 수업에서 활용되는 주요 교수·학습 매체로 자리 잡고 있다. 디지털교과서는 서책형 교과서의 내용을 디지털 매체로 구현한 학습 자료로서, 텍스트

중심의 정보 전달을 넘어 다양한 멀티미디어 자료와 상호작용 기능을 포함하는 특징을 지닌다. 이러한 특성을 바탕으로 디지털교과서는 학습자, 교사, 학습자료 간의 상호작용을 통합적으로 지원하고 활성화하는 교수·학습 환경으로 기능하며(이용섭 & 홍순원, 2010), 학습자의 능동적 참여를 촉진한다(서봉언 & 공은화, 2021). 또한 다양한 학습자원과 기능을 통해 학습자의 탐구 활동과 문제 해결 과정을 지원하는 학습 지원 체제로 이해될 수 있다(송해덕 & 박주호, 2009). 나아가 디지털교과서의 활용은 학습 환경의 질을 향상시키고(이용섭 & 홍순원, 2010), 탐구 활동 과정에서 학습자가 학습 절차를 보다 명확히 이해하도록 돕는 것으로 나타났다(김종신, 2012). 이처럼 디지털교과서는 정보 전달 중심의 전통적 교과서와 달리 학습 활동을 중심으로 설계된 학습 환경으로 기능하며, 다양한 매체와 기능을 통해 학습자의 이해를 촉진하고 학습 경험을 확장시키는 특징을 가진다.

## 2. 디지털교과서 활용 STEM 수업의 학습 효과와 관련된 선행연구

디지털교과서를 활용한 수업의 효과를 분석한 국내 연구들은 주로 학업성취도와 탐구능력을 중심으로 이루어져 왔다. 과학 교과를 대상으로 한 연구에서는 디지털교과서 활용 수업이 학업성취도 향상에 긍정적인 영향을 미친 사례가 보고되었으며, 탐구 활동이 포함된 수업에서 그 효과가 비교적 뚜렷하게 나타났다(박상우, 2011; 김성숙, 2015). 또한 5E 순환학습모형<sup>1)</sup>을 기반으로 개발된 디지털 교재를 적용한 연구에서는 학습자의 개념 이해와 수업 참여도가 향상된 것으로 나타났다(정유나, 2017).

수학 교과를 대상으로 한 연구에서도 디지털교과서 활용 수업이 전통적인 서책형 교과서 수업에 비해 학업성취도 향상에 유의미한 효과를 보였으며, 특히 학업성취 수준이 낮은 학습자에게 더 큰 효과가 나타나는 것으로 확인되었다(송해덕 & 박주호, 2009). 최근 AI 디지털교과서를 활용한 맞춤형 수학 수업 연구에서는 학습자의 수준과 학습 데이터를 기반으로 한 개별화된 학습 지원이 가능해짐에 따라 학업성취도 향상에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 특히 학생 수준에 따른 분석에서 학습 효과가 차별적으로 나타나는 경향이 확인되었다(장건휘, 2025; 강은미, 2025). 또한, 과학 교과를 대상으로 한 연구에서는 디지털교과서가 실험 장면의 시각화, 탐구 과정의 단계적 제시, 반복 학습이 가능한 구조를 통해 학습자의 이해를 돕는 도구로 활용될 수 있음이 제시되었다(이용섭 & 홍순원, 2010; 김종신, 2012).

이는 AI 디지털교과서가 학습자의 수행 수준을 진단하고 이에 적합한 학습 과제를 제공함으로써 개별화된 학습을 지원하는 데 효과적인 도구로 기능함을 시사한다. 또한 이러한 맞춤형 학습 환경은 단순한 성취도 향상을 넘어 학습자의 수학적 태도에도 긍정적인 변화를 유도하는 것으로 보고되었으며, 이는 디지털교과서 기반 수업이 인지적 영역과 정의적 영역을 통합적으로 지원하는 교수·학습

1) 5E 순환학습모형은 Engagement, Exploratioin, Explanation, Elaboration, Evaluation의 5단계로 구성된 구성주의 기반 수업 모형이다(정유나, 2017).

환경으로 작용할 수 있음을 보여준다(장건휘, 2025). 이와 같은 결과는 디지털교과서가 단순한 정보 전달 도구를 넘어 학습자의 참여를 유도하고 학습 과정을 지원하는 매체로 기능함을 시사한다. 그러나 이러한 연구들은 대부분 특정 교과나 학년, 제한된 수업 상황을 대상으로 수행된 개별 실험연구로, 연구 결과를 일반화하는 데 한계가 있으며 연구 간 결과가 일관되지 않다는 문제가 지속적으로 제기되고 있다(변호승 외, 2011).

### 3. AI 기반 디지털교과서 관련 연구

최근에는 디지털교과서가 AI 기술과 결합되면서 학습자의 학습 과정과 반응을 분석하고 이를 교수·학습에 반영하는 형태로 발전하고 있다. AI 기반 디지털교과서를 활용한 수업에서는 학습자의 성취도와 학습 태도에 긍정적인 변화가 나타났으며, 학습 과정에서 제공되는 단계적 안내와 학습 활동 지원 기능이 학습 참여에 영향을 미치는 것으로 보고되었다(마명선, 2024; 박형도, 2025). 또한 학습부진 학생을 대상으로 한 연구에서는 AI 기반 디지털교과서의 진단 및 비계설정 기능이 학습 지원 도구로 활용될 수 있음이 제시되었다. AI 기술을 활용한 디지털 지도방법을 적용한 결과, 학습부진 학생의 학업성취도 향상에 긍정적인 효과가 나타났으며, 학습 단계별로 제공되는 지원이 학습 수행을 돕는 역할을 한 것으로 분석되었다(이현애, 2025).

AI 기반 디지털교과서는 기존 디지털교과서의 상호작용 기능을 확장하여 학습자의 수행 데이터를 기반으로 실시간 피드백을 제공하고, 학습 수준에 따라 학습 내용과 난이도를 조정하는 개인화된 학습 환경을 구현한다. 이러한 특성은 학습자의 지속적인 참여와 자기주도적 학습을 촉진하는 데 기여하는 것으로 나타났다(마명선, 2024). 또한 AI 코스웨어를 활용한 수업에서는 학습자의 수학적 태도와 학습 동기가 향상되는 경향이 확인되었으며, 이는 단순한 콘텐츠 제공을 넘어 학습 과정 전반을 지원하는 기능이 학습 효과에 영향을 미친 결과로 해석된다(박형도, 2025). 이러한 결과는 AI 기반 디지털교과서가 개별화된 학습 지원을 통해 학습자의 인지적·정의적 측면을 동시에 향상시킬 수 있는 잠재력을 지니고 있음을 시사한다.

### 4. 디지털교과서 효과에 대한 메타분석 연구 및 연구 필요성

디지털교과서의 효과를 보다 종합적으로 이해하기 위해 국내외 메타분석 연구가 수행되어 왔다. 국내 연구에서는 디지털교과서가 학업성취도에 유의미한 긍정적 영향을 미치는 것으로 나타났으나, 교과 및 학년 등 다양한 조절변인에 따라 효과의 차이가 존재하는 것으로 보고되었다(변호승 외, 2011; 서봉언 & 공은화, 2021). 이러한 결과는 디지털교과서의 효과가 단일한 방향으로 나타나기보다 학습 맥락에 따라 달라질 수 있음을 시사한다.

영어 교과를 중심으로 수행된 국내 메타분석 연구에서는 디지털교과서의 효과가 제한적으로 나타나

거나 유의미하지 않은 결과도 보고되었다. 영어 디지털교과서 적용 효과를 분석한 연구에서는 학업성취도와 학습태도 모두에서 효과크기가 크지 않은 것으로 나타났으며, 연구 유형 및 시행 시기와 같은 조절변인에 따라 효과가 상이하게 나타나는 것으로 분석되었다(박현아, 2010).

한편 해외 연구에서는 디지털교과서 및 전자책 활용이 전반적으로 학습 성과에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 수학 교과에서는 학업성취도 향상에 유의미한 효과가 확인되었고(Wijaya et al., 2022), 언어 학습에서는 상호작용 기능이 포함된 디지털 자료일수록 효과가 높게 나타나는 것으로 보고되었다(Listanto et al., 2025). 또한 디지털 학습 환경은 학습자의 동기와 참여를 촉진하는 측면에서 긍정적인 역할을 수행하는 것으로 나타났다(Jang et al., 2016). 그러나 이러한 긍정적 결과에도 불구하고, 효과의 크기는 전반적으로 중간 수준에 머무르며 학년, 교과, 연구 설계 등에 따라 효과가 유의하지 않거나 제한적으로 나타나는 경우도 보고되고 있다(Jang et al., 2016; Wijaya et al., 2022).

이와 같이 국내외 메타분석 연구 결과들은 디지털교과서의 효과가 전반적으로 긍정적인 경향을 보이면서도, 교과 특성이나 학습 맥락에 따라 상이하게 나타난다는 점을 공통적으로 보여준다. 즉 디지털교과서의 효과는 단순한 매체 적용 여부에 의해 결정되기보다는 학습 환경, 학습자 특성, 교과 내용 등 다양한 요인의 영향을 받는 것으로 이해할 수 있다.

기존 메타분석 연구는 특정 시기 또는 특정 교과에 제한된 경우가 많아 최근 AI 기반 디지털교과서와 같은 기술적 변화를 충분히 반영하지 못하고 있으며, 특히 STEM 영역에 초점을 맞춘 통합적 분석 연구는 부족한 실정이다. 또한 일부 연구에서 효과가 일관되지 않거나 제한적으로 나타난 점을 고려할 때, 디지털교과서의 효과를 보다 정교하게 이해하기 위한 추가적인 통합적 분석이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 STEM 영역을 중심으로 디지털교과서의 학업성취 효과를 종합적으로 분석하고, 효과의 차이를 설명하는 요인을 함께 탐색하고자 한다.

### III. 연구 방법

문헌 검색은 RISS(학술연구정보서비스)와 국회도서관 전자도서관을 중심으로 2025년 9월 29일부터 10월 14일까지 수행하였다. 검색 대상은 2000년 이후 국내에서 발표된 학술논문과 학위논문으로 설정하였다. 이는 2000년대 초반부터 디지털교과서가 국내에 본격적으로 도입되기 시작한 점을 고려한 것이다. 검색식은 디지털교과서 관련 용어와 효과 관련 용어를 결합하여 “(디지털교과서 OR 전자교과서 OR 스마트교과서 OR AIDT) AND (효과 OR 영향)”으로 설정하였다. 또한 검색과정에서 언어는 한국어로, 문헌유형은 학술논문과 학위논문으로 설정하였다. 메타분석에서는 학술지 논문만을 포함할 경우 유의한 결과를 보고한 연구가 상대적으로 많이 남게 되어 출판편향이 커질 수 있으므로, 본 연구주제는 국내에서 새롭게 떠오르는 분야라 전수 파악을 위해 회색문헌을 함께 포함하여 가능한

관련 연구를 포괄적으로 반영하고자 하였다.

AI 디지털교과서 관련 문헌은 용어 사용이 일관되지 않고, AI코스웨어 개념이 디지털교과서의 중재 범주와 명확히 구분되지 않는다는 한계가 확인되었다. 또한 일부 연구에서는 AI를 보조 도구로만 활용하거나 특정 기능 수준에서 기술하는 등 중재의 정의가 불명확하였다. 이에 따라 본 연구에서는 ‘AI 디지털교과서’와 관련된 검색어를 제외하고, 전통적 디지털교과서를 중심으로 분석 대상을 한정하였다.

## 1. 포함 및 제외 기준

연구 대상(Population), 중재(Intervention), 비교(Comparison), 결과(Outcome)의 네 요소를 중심으로 연구 문제를 구조화하는 방법이자, 메타분석에서 포함·제외 기준을 명확히 설정하기 위한 분석 틀인 PICO 틀에 따라 본 연구 방법을 분석하면 다음과 같다. 본 연구에 포함하는 참여 대상은 국내 초·중·고 학생이다. 연구 결과의 폭넓은 적용 및 일반화를 위해 일반 학생을 대상으로 하며, 특수교육대상 학생은 제외하였다. 일반 학생과 상이하여 효과크기를 통합 비교하는 데 이질성이 크다고 판단하였기 때문이다. 학습부진 학생의 경우 특수교육 대상이 아닌 일반 학급에서 교육을 받는 일반적인 경우이기 때문에 포함하였다.

본 연구에서 효과를 살펴보고자 하는 처치 방법은 디지털교과서·전자교과서·스마트교과서의 사용이다. 디지털교과서는 AIDT를 포함하며, 디지털교과서를 직접 수업에서 활용한 경우만 포함하고, 교과서의 형태를 띠지 않는 콘텐츠 및 프로그램은 제외하였다. 본 연구의 실험집단에 대한 통제집단은 디지털교과서를 활용하지 않고 전통적인 서책형 교과서를 사용한 수업을 받은 집단이다. 이때, 특수한 수업(Problem-Based Learning[PBL], 거꾸로 수업 등)의 효과만 독립적으로 측정한 연구는 제외하였다. 즉, 특수한 수업 상황에서 디지털교과서를 활용한 집단과 활용하지 않은 집단을 비교한 연구는 포함하였지만, 특수한 수업을 대조군 없이 한 집단에만 적용하여 효과를 살펴본 경우는 디지털교과서의 일반적 효과로 보기 어렵기 때문에 제외하였다. 본 연구는 디지털교과서의 효과 중에서도 학업성취도에 초점을 두어 분석하고자 하여 학업성취도를 제외한 인지적 요인(문제해결력, 탐구 능력 등), 정의적 요인(흥미, 몰입, 학습동기 등), 학업 외적 요인은 분석 대상에서 제외하였다. 또한 학업성취도를 측정하였더라도 효과크기 산출에 필요한 통계치(표본 수, 평균, 표준편차 등)를 제시하지 않은 연구는 제외하였다. <표 1>은 PICO 틀을 기반으로 본 연구에서 문헌을 선별한 구체적인 기준을 보여준다.

〈표 1〉 PICO 틀에 따른 문헌 선별 기준

PICO	내용
Participants	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 한국 초·중·고 학생</li> <li>• 일반 학생 포함 (학습부진 포함)</li> <li>• 특수교육대상 학생 제외</li> </ul>
Intervention	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 디지털교과서·전자교과서·스마트교과서</li> <li>• AIDT 기능 포함 디지털교과서</li> <li>• 디지털교과서를 직접 수업에서 활용한 경우만 포함</li> </ul>
Comparison	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 전통적 서책형 교과서 또는 디지털교과서 미활용 집단</li> <li>• 특수한 수업(PBL, 거꾸로수업 등)의 효과만 독립적으로 측정된 연구는 제외</li> </ul>
Outcomes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 학업성취도(인지적)</li> <li>• 정의적 요인(흥미, 몰입, 학습동기 등) - 추후 스크리닝에서 제외</li> <li>• 만족도·건강상태·인터넷 중독 등 학업 비관련 변수는 제외</li> </ul>

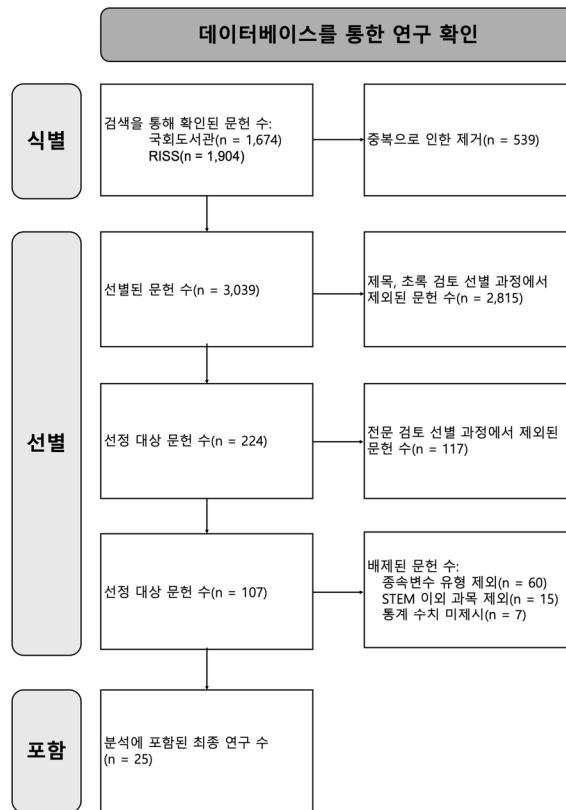
## 2. 문헌 선별 절차

본 연구는 PRISMA 절차에 따라 문헌검색, 중복 제거, 제목·초록 선별, 원문(full-text) 검토 및 추가 제외 기준 적용의 단계를 거쳐 최종 분석 대상을 선정하였다. 초기 검색에서는 RISS 1,904편, 국회도서관 1,674편으로 총 3,578편의 문헌이 선별되었다. 이후 중복 문헌 539편을 제거하여 3,039편을 제목·초록 선별 단계에 포함하였다.

제목·초록 선별 단계에서는 연구주제와의 관련성, 참여자, 연구설계의 적합성 등을 기준으로 검토한 결과 2,815편을 제외하고, 224편을 원문 검토 대상으로 선정하였다. 다음으로 원문 검토 단계에서 포함·제외 기준을 보다 엄격하게 적용하여 디지털교과서의 개념이 본 연구의 중재 정의와 맞지 않거나, 실증연구가 아닌 연구 등 총 117편이 제외되어 107편이 검토 대상 문헌으로 남았다.

이후 본 연구 목적에 맞도록 종속변수 및 교과 범주를 재검토하였다. 먼저 학업성취도 이외의 종속변수 연구 또는 본 연구의 종속변수 유형 기준과 일치하지 않는 문헌 60편을 제외하였다. 다음으로 비 STEM 교과를 대상으로 한 연구 15편을 제외하여 총 32편이 되었다. 마지막으로 효과크기 산출을 위한 통계치(예: 표본수, 평균, 표준편차 등)가 제시되지 않아 효과크기 계산이 불가능한 문헌 7편을 제외하였다. 본 연구의 최종 분석 대상은 25편으로, 일반적인 통계 분석과 비교할 때 적은 수로 인식될 수 있다. 하지만 메타분석에서는 최소 2개 이상의 연구가 존재할 경우 통계적 통합이 가능하며 (Valentine et al., 2010), 연구가 20개 이상일 경우 효과크기 추정의 안정성을 확보 할 수 있는 것으로 보고되었다(Guolo & Varin, 2017). 또한 본 연구는 보다 보수적인 추정을 위해 Knapp-Hartung 방법을 적용하였으며(Guolo & Varin, 2017), 이를 통해 효과크기 추정의 신뢰도를 확보하고자 하였다. [그림 1]은 PRISMA 가이드에 따라 정리한 문헌 선정 및 선별 과정을 보여준다.)

2) Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ* 2021;372:n71. doi: 10.1136/bmj.n71



[그림 1] PRISMA 문헌선정 흐름도

### 3. 자료 추출

문헌 선별은 PRISMA지침에 따라 체계적인 단계별 절차로 진행되었다. 식별 단계에서는 국회도서관, RISS에서 검색어를 통해 받은 논문 목록을 합치고, 전체 논문을 3개의 파트를 나눈 뒤 파트별 2명의 연구자가 다시 한 조가 되어 중복 논문을 제외하였다. 선별 단계에서는 제목과 초록을 각자 검토 및 비교하여 포함·제외 여부를 판단하였다. 연구자의 판단이 일치하지 않은 문헌에 대해서는 상호 논의를 진행하였으며, 충분한 검토와 논의를 통해 합의에 도달하였다. 만약 합의가 이루어지지 않는 경우에는 제3의 연구자가 검토에 참여하여 최종 판단을 내리는 방식으로 진행하였다. 선별된 문헌에 대해서는 원문 전체를 검토하고, 앞서 설정한 포함·제외 기준을 세부적으로 적용하였다. 코딩 단계에서는 연구 내에 제시된 효과크기 산출에 필요한 통계치를 기록하였다. 예를 들면, 집단별 표본 수( $N$ ), 사전·사후 평균( $M$ ), 표준편차( $SD$ ),  $t$ 값,  $F$ 값 등을 기록하였다.

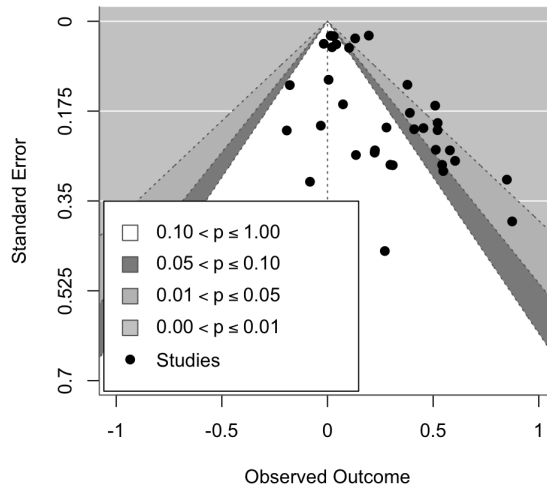
#### 4. 효과크기 산출 및 분석 모형

효과크기란 서로 다른 연구에서 산출된 결과를 공통된 척도로 표준화하여 비교 가능하게 만든 지표로, 실질적인 영향력의 크기를 나타낸다. 본 연구에서는 디지털교과서가 학업성취도에 미치는 영향을 알기 위한 효과크기로, 표준화된 효과크기의 불편 추정량(unbiased estimator)인 Hedges의  $g$ 를 사용하였다. Hedges의  $g$ 는 Cohen의  $d$ 에 보정계수를 곱하여 산출되며, 표본 크기가 작은 연구에서 효과크기가 과대 추정되는 문제를 보정한다. 보정계수는 표본 크기에 따라 달라지며, 작은 표본일수록 더 큰 보정이 이루어진다. Hedges의  $g$ 는 각 연구에서 보고된 표본 수, 평균, 표준편차를 활용하여 계산하였으며, 사전·사후 검사 설계를 적용한 연구의 경우 사전·사후 변화량을 기준으로 효과크기를 산출하였다(Vollestad et al., 2012). 이때 사전·사후 검사 간 상관계수를 보고되지 않은 경우에는 선행연구를 참고하여 상관계수를 0.6으로 가정하여 분석하였다. 상관계수 가정값에 대한 민감도 분석 결과, 효과크기에 큰 변동이 없는 것으로 나타나 최종 분석에서도 0.6을 적용하였다. 또한 효과크기가 양수인 경우는 디지털교과서를 활용한 실험집단이 통제집단보다 학업성취도에서 더 높은 성과를 보였음을 의미한다.

이질성 검정과 평균 효과크기 산출을 위해서는 랜덤효과모형을 적용하였다. 이질성 검정은 연구들에서 산출된 평균 효과크기가 연구 간에 서로 이질적인지를 판단하기 위한 절차이다. 효과크기의 이질성을 검정하기 위해  $Q$  통계량과  $\tau^2$ , 그리고  $I^2$  지수를 산출하였다.  $I^2$  값이 30% 이상일 경우 중간 이상의 이질성이 관측된 것으로 간주하고, 이를 설명하기 위해 조절변인 분석을 추가로 실시하였다(Huedo-Medina et al., 2006). 본 연구에서는 하나의 연구 내에 여러 개의 효과크기가 보고되었기에 모든 효과크기가 서로 독립적이지 않다고 판단하여 로버스트 분산 추정(Robust Variance Estimation, RVE)을 적용하여 연구 내 상관성을 통제하였다. 통합 효과크기를 산출하는 과정과 메타회귀 분석 과정에서 민감도 분석을 실시한 결과, 효과크기와 회귀 계수들 내에서 큰 변동이 보이지 않아 연구 내 효과크기 간의 상관계수는 0.8로 가정하였다. RVE 모형은 동일 연구 내의 여러 개의 효과크기 상관을 고려하고, 작은 표본을 보정할 수 있어 표준오차가 더 크게 추정되는 보수적인 추정 방식을 사용한다.

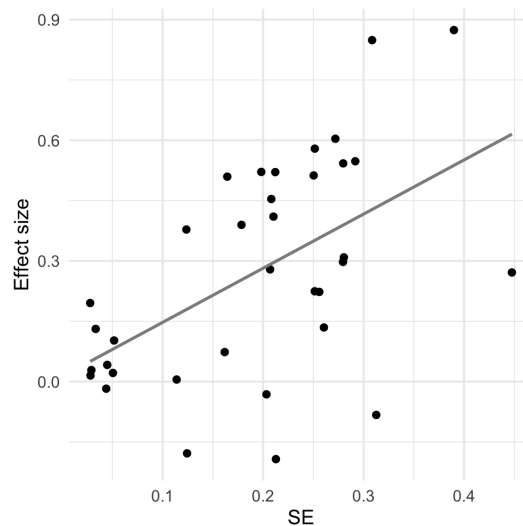
#### 5. 출판편향 검정

연구 결과의 출판편향 가능성을 점검하기 위해 Funnel plot을 통해 시각적으로 확인하였다. 출판편향이란 통계적으로 유의하거나 긍정적인 결과를 보고한 연구가 그렇지 않은 연구보다 출판될 가능성이 높아, 전체 연구 결과가 왜곡되는 현상을 의미한다. [그림 2]는 Funnel plot을 나타내었으며 X축이 연구들의 효과크기, Y축이 효과크기의 표준오차이다. 그래프에서 표본이 큰 연구에서는 정적 효과 부분에 효과크기들이 편중되어 있고, 표본이 작은 연구에서도 마찬가지로 정적 효과 부분에 편중된 것을 확인하였다. 따라서 출판편향이 존재할 가능성이 높다고 판단하여 Egger의 회귀검정을 진행하였다(Egger et al., 1997). [그림 2]는 출판편향 가능성을 점검하기 위한 Funnel plot이다.



[그림 2] Funnel plot

Egger의 회귀 검정 결과, 기울기의 계수는 통계적으로 0과 유의하게 달랐으며, 이는 출판편향이 존재할 가능성이 높음을 의미한다 ( $z = 4.92, p < .001$ ). [그림 3]은 Egger의 회귀 검정 결과를 보여준다.



[그림 3] Egger의 회귀 검정

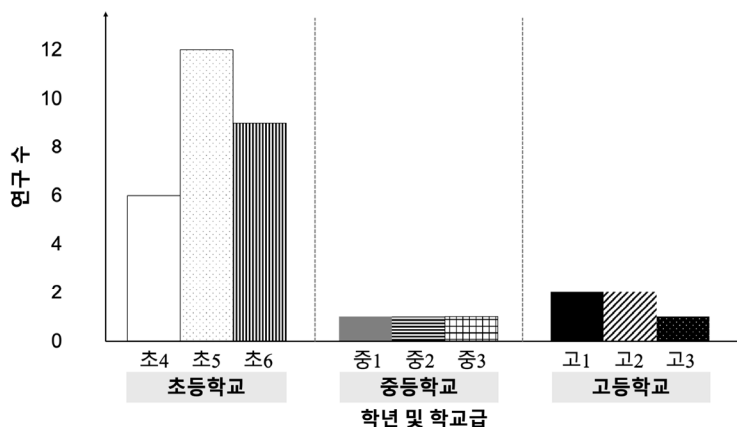
Egger의 회귀 검정 결과, 출판편향의 가능성이 높다고 판단하여 Pustejovsky & Rodgers (2018)가 제시한 효과크기와 독립적인 표준오차를 적용하고자 하였다. 또한 PET & PEESE 방법과 Trim-and-Fill 방법을 적용하여 출판편향을 보정하고자 하였다. PET & PEESE 방법은 효과크기를 표준오차 또는 분산에 회귀시켜 작은 표본 수의 연구 효과를 보정하는 방법이다(Stanley, 2008). Trim-and-Fill은 출판편

향으로 인해 누락되었을 가능성이 있는 연구들을 통계적으로 추정하여 funnel plot의 비대칭성을 보정하고, 이를 반영한 효과크기를 산출하는 방식이다(Stanley & Doucouliagos, 2014). 출판편향을 보정한 효과크기는 연구 결과에서 제시하였다.

## IV. 연구 결과

### 1. 논문 특성 분석 결과

본 메타분석에는 총 25편의 연구에서 산출된 35개의 효과크기가 포함되었다. 효과크기 기준으로 학년 분포를 살펴보면, 초등학교가 27개(77.14%)로 가장 높은 비중을 차지하였다. 구체적으로는 초등학교 4학년 6개, 5학년 12개, 6학년 9개로 나타났으며, 초등학교 기준으로 특히 5학년에 도출된 효과크기가 가장 많았다. 중학교는 총 3개(8.57%)로 중학교 1학년 1개, 2학년 1개, 3학년 1개로 분포하였다. 고등학교는 총 5개(14.29%)로, 고등학교 1학년이 2개, 2학년 2개, 3학년은 1개로 나타났다. 전반적으로 초등학교에 연구가 집중되어 있으며, 중학교와 고등학교 대상 연구는 상대적으로 적은 편임을 확인할 수 있다. [그림 4]은 학년과 학교급 분포를 보여준다.

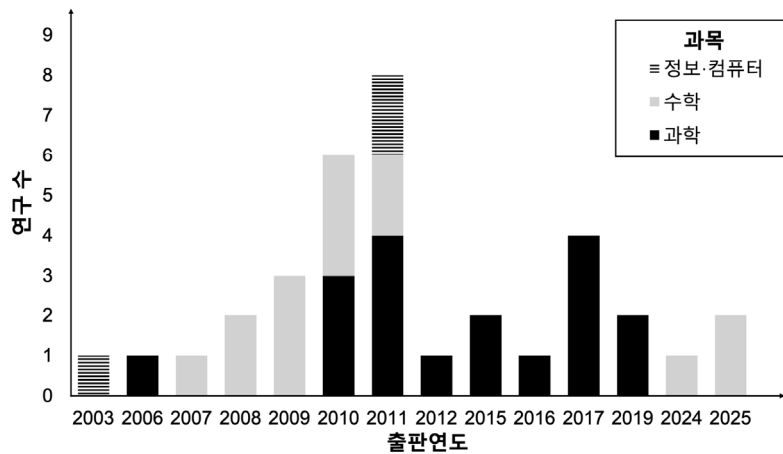


[그림 4] 학년 및 학교급 분포

분석에 포함된 35개의 효과크기를 과목별로 구분한 결과, 과학이 18개(51.43%)로 가장 높은 비중을 차지하였다. 수학은 14개(40%), 정보·컴퓨터 과목은 3개(8.57%)로 나타났다. 이를 통해 국내에서 출판된 디지털교과서 관련 연구는 주로 과학과 수학 교과를 중심으로 이루어졌음을 확인할 수 있으며, 특히 과학 교과에서 가장 활발하게 연구가 수행된 것으로 나타났다. 반면 정보·컴퓨터 교과를 대상으

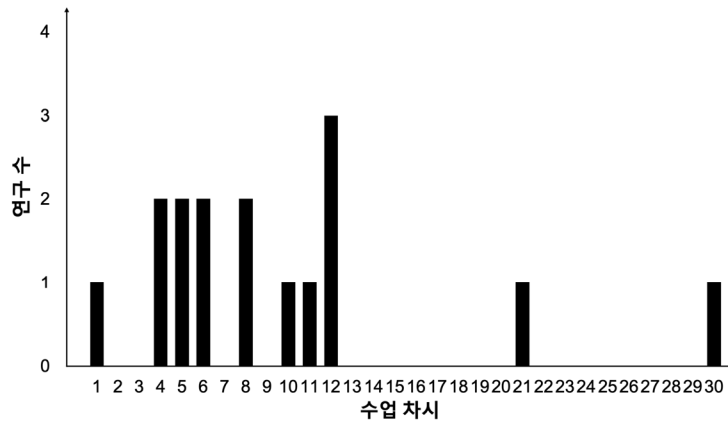
로 한 연구는 상대적으로 제한적인 수준이었다.

출판 연도별 분포를 살펴보면, 2003년부터 2025년까지 연구가 수행된 것으로 나타났다. 2011년에 출판된 논문은 8개, 그리고 2010년에 출판된 논문은 6개로 가장 많은 연구가 집중되었다. 2017년에는 4개의 효과크기가 산출되었고, 2009년에는 3개의 효과크기가 산출되었다. 이후에는 연도별 연구 수가 비교적 적은 수로 유지되는 경향을 보였으며, 2019년 이후에도 지속적으로 연구가 수행되고 있음을 확인하였다. [그림 5]는 과목 및 출판연도 분포를 나타낸다.



[그림 5] 과목 및 출판연도 분포

수업 차시를 명시적으로 보고한 연구는 총 25편 중 15편이었으며, 이에 해당하는 효과크기는 총 16개였다. 수업 차시 분포를 살펴보면, 1차시부터 30차시까지 다양하게 분포되어 있는 것을 확인할 수 있다. 구체적으로는 12차시가 3개로 가장 많았으며, 4차시, 5차시, 6차시, 8차시는 각각 2개씩 보고되었다. 이 외에도 1차시, 10차시, 11차시, 21차시, 30차시가 각각 1개씩 나타났다. 전반적으로 4~12차시 범위의 비교적 단기간 수업이 가장 많이 활용되었으며, 20차시 이상의 장기 프로그램은 소수에 그쳤다. [그림 6]은 연구에서 보고된 수업 차시 분포를 보여준다.

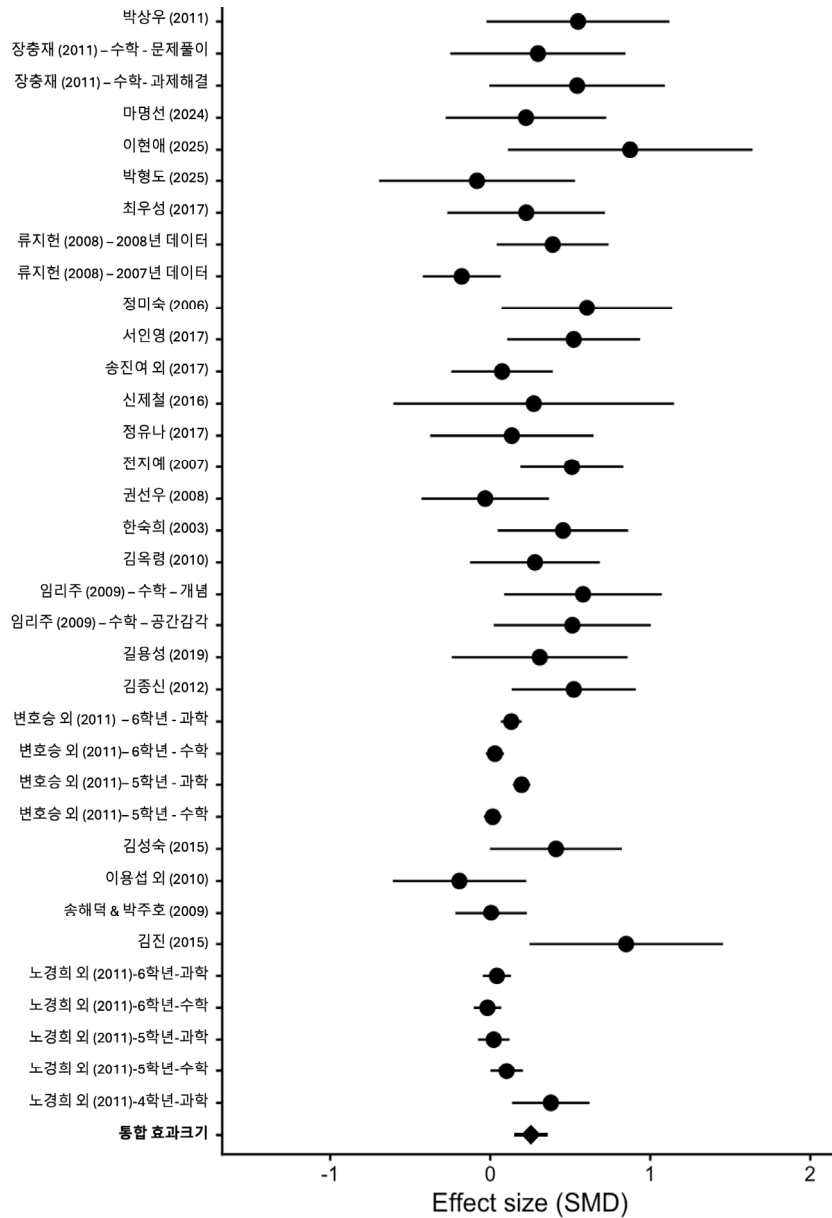


[그림 6] 수업 차시 분포

분석 대상 25편의 논문을 출판 유형 별로 구분한 결과, 석사 학위 논문이 18편(72%)으로 가장 높은 비율을 차지하였다. 학술지 게재 논문은 4편(16%), 연구 보고서는 2편(8%), 그리고 박사 학위 논문은 1편(4%)으로 나타났다. 학술지에 게재된 논문은 『교육공학연구』, 『한국과학교육학회지』, 『대한지구과학교육학회지』, 그리고 『교육정보미디어연구』에서 각각 1편씩 출판되었다. 전체적으로 학위 논문의 비중이 높게 나타났으며, 학술지 게재 논문과 연구 보고서의 비율은 상대적으로 낮은 수준이었다. 이는 국내 STEM 영역 디지털교과서 효과 연구가 학술지 논문보다 학위논문과 연구보고서 등 회색문헌 형태로 상대적으로 많이 축적되어 있었기 때문으로 예상된다.

## 2. 개별 효과크기 산출

하나의 논문에서 복수의 효과크기가 산출된 경우가 있어, 총 25편의 논문에서 35개의 효과크기가 포함되었다. [그림 7]은 각 연구에서 산출된 총 35개의 개별 효과크기와 통합 효과크기를 보여준다.



[그림 7] Forest plot

### 3. 이질성 검증 및 통합된 효과크기

통합된 효과크기를 산출하기 이전에 동질성 가정이 충족되는지 고정효과모형을 통해  $Q$  통계량을 확인하였다. 고정효과모형에 따르면  $Q$  통계량은 101.01,  $I^2$ 은 66.34%로 높은 수준의 이질성이 확인되었다. 연구 간 이질성이 확인되었기에 본 연구는 랜덤효과모형을 적용하였다. Knapp-Hartung 보정이

적용된 랜덤효과모형으로 이질성을 검정한 결과,  $Q$  통계량은 101.01,  $I^2$ 은 82.29%로 마찬가지로 높은 이질성이 발견되었다. 한편, RVE 메타회귀 모형 결과에서  $\tau^2$ 은 0.03,  $I^2$ 은 57.23%으로 나타났다. 약 57% 수준의  $I^2$ 지수를 통해 변동의 절반 이상이 실제 연구 간의 차이에 기인한다고 해석하였다.

RVE 메타회귀모형에서 계산된 통합된 효과크기는 0.26( $SE = 0.05, p < .001$ )였다. 이는 학생들의 수업 중 디지털교과서의 활용이 학업성취도에 긍정적인 영향을 끼침을 보여준다. 민감도 분석 결과, 연구 내 효과크기 간의 상관계수를 다르게 적용하여도 통합 효과크기는 큰 변동이 없었다. <표 2>는 통합 효과크기와 이질성 검정 결과를 보여준다<sup>3)</sup>.

<표 2> RVE 메타회귀 모형의 통합된 효과크기 및 이질성 검정

연구 수	효과크기 수	$g$	$SE$	$df$	95% CI	$p$	이질성 검정	
							$\tau^2$	$I^2$
25	35	0.26	0.05	19.2	[0.15, 0.36]	< .001	0.03	57.23%

#### 4. 조절변인 분석

본 연구의 효과크기 간에 이질성이 확인되어 조절변인 분석을 진행하였다. 총 5개의 조절변인 중 학년, 출판연도, 학교급, 과목은 분석에 포함된 25편의 논문 모두에서 보고되어 하나의 모형에 포함하여 메타회귀 분석을 진행하였다. 반면, 차시는 15개의 연구에서만 보고되어 별도의 메타회귀 모형을 적용하여 분석하였다. <표 3>은 학년, 출판연도, 학교급, 과목과 수업 차시의 조절효과 분석 결과를 보여준다<sup>4)</sup>.

<표 3> 학년, 출판연도, 학교급, 과목, 수업 차시 조절효과 분석 결과

	연구 수	효과크기 수	$Est.$	$SE$	$df$	95% CI	$p$
학년	25	35	-0.16	0.05	9.41	[-0.28, -0.03]	.02
출판연도	25	35	0.01	0.01	6.90	[-0.01, 0.02]	.50
학교급							
- 초등 대비 중등	25	35	0.63	0.18	4.29	[0.14, 1.12]	.02
- 초등 대비 고등	25	35	0.82	0.37	7.15	[-0.06, 1.70]	.06
과목							
- 과학 대비 수학	25	35	-0.08	0.08	8.58	[-0.26, 0.11]	.38
- 과학 대비 정보 컴퓨터	25	35	0.28	0.20	2.93	[-0.37, 0.94]	.26
수업 차시	15	16	0.00	0.01	2.31	[-0.02, 0.03]	.82

3)  $g$  = Hedges'  $g$ 의 효과크기;  $SE$  = 표준오차;  $df$  = 자유도; 95% CI = 95% 신뢰구간;  $p$  = 유의확률;  $\tau^2$  = 연구 간 이질성 분산;  $I^2$  = 전체 변량 중 이질성이 차지하는 비율

4)  $Est.$  = 메타회귀모형에서 추정된 회귀계수;  $SE$  = 표준오차;  $df$  = 자유도; 95% CI = 95% 신뢰구간;  $p$  = 유의확률; 학년, 학교급, 과목, 출판연도는 모든 논문에서 보고되었기에 동일한 메타회귀모형에서 동시에 분석되었다. 그러나 수업 차시의 경우, 모든 논문에서 보고되지 않았기에 별도의 모형에서 분석되었다.

조절효과 분석 결과, 학년은 디지털교과서의 학업성취도에 미치는 효과를 설명하는 유의한 조절변인으로 나타났다( $b = -0.16, SE = 0.05, p = .02$ ). 이는 학년이 증가할수록 디지털교과서 사용의 긍정적인 효과가 감소함을 의미한다. 학교급(초, 중, 고) 변인의 조절효과 분석 결과, 학교급에 따른 효과크기 차이는 초등학교 대비 중학교에서 유의하게 긍정적이었다( $b = 0.63, SE = 0.18, p = .02$ ). 그러나 분석된 자료의 수가 적고, 일부 자유도가 4.29로 제한적인 점을 고려할 때 이 모형의 결과를 해석할 때엔 주의가 필요하다. 반면, 초등학교 대비 고등학교에서는 효과크기가 유의하게 차이를 보이지 않았다( $b = 0.82, SE = 0.37, p = .06$ ). 학교급 변수의 회귀 계수의 통계적 유의성을 다시 검증하기 위해 Wald 검정을 실시한 결과, 전체적인 학교급 변수는 통계적으로 유의하지 않았다( $F = 4.79, 3.99, p = .09$ ).

논문이 출판된 연도는 연구들 간의 효과크기 차이를 통계적으로 유의하게 설명하지 못하였다( $b = 0.01, SE = 0.01, p = .50$ ). 과목 변수는 과학 대비 수학( $b = -0.08, SE = 0.08, p = .38$ )과 과학 대비 정보컴퓨터( $b = 0.28, SE = 0.20, p = .26$ ) 모두 유의한 조절변수가 아니었다. 수업 차시 또한 연구들 간의 효과크기 차이를 유의하게 설명하지 못하였다( $b = 0.00, SE = 0.01, p = .82$ ).

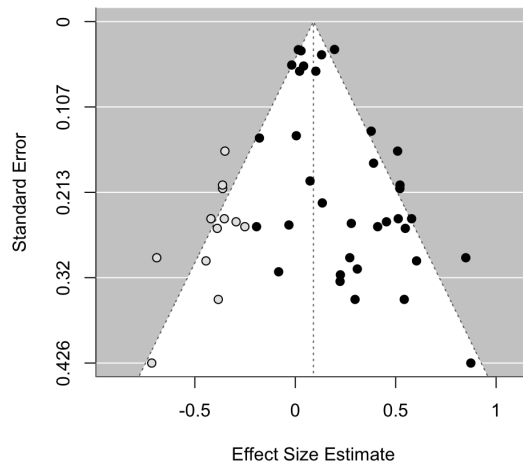
## 5. 출판편향 보정

Egger 회귀검정을 통해 효과크기들 간에 출판편향이 존재할 가능성이 높음을 확인하였다( $z = 4.92, p < .001$ ). 그러나 이 방법은 표준오차와 효과크기가 독립적이지 않아, 출판편향의 존재 가능성을 정확히 검정할 수 없다. 따라서 Pustejovsky & Rodgers (2018)가 제시한 방법에 따라, 효과크기와 독립적인 표준오차를 적용하여 분석하였다. 그 결과 기울기의 회귀계수는 마찬가지로 유의하였다 ( $t = 4.08, p < .0001$ ). 이에 따라 출판편향이 존재할 가능성이 높다고 판단하여 PET & PEESE 방법과 Trim-and-Fill 방법을 적용하여 출판편향을 보정하였다. <표 4>는 세 보정 방법을 적용한 결과를 보여주며, [그림 8]은 Trim-and-Fill 방법으로 보정한 출판편향을 나타낸다).

<표 4> PET & PEESE 방법을 적용한 통합 효과크기

보정 방법	Est.	SE	p	95% CI
PET	0.03	0.05	.58	[-0.07, 0.13]
PEESE	0.07	0.04	.06	[-0.00, 0.14]
Trim-and-Fill	0.09	0.05	< .05	[0.00, 0.18]

5) Est. = 메타회귀모형에서 추정된 회귀계수; SE = 표준오차; p = 유의확률; 95% CI = 95% 신뢰구간



[그림 8] Trim-and-Fill로 보정한 출판편향

출판편향 보정 전 메타분석에서는 유의한 효과( $g = 0.26, p < .001$ )가 확인되었으나, PET-PEESE 분석과 Trim-and-Fill 분석을 통해 출판편향을 보정한 결과 세 방법 간 결과가 일치하지 않았다. PET 분석에서 통합된 효과크기는 0.03으로 유의하지 않았다 ( $p = .58$ ). PEESE 방법에서 또한 통합된 효과크기는 0.07로 유의하지 않음을 확인하였다 ( $p = .06$ ). 그러나 Trim-and-Fill 방법으로 분석한 결과에 따르면 통합된 효과크기는 0.09로 유의하였다( $p < .05$ ). Stanley & Doucouliagos(2014)에 따르면 이질성이 존재하는 경우 PET가 더 안정적인 것으로 알려져 있어, 중간 수준의 이질성( $I^2 = 57.23\%$ )이 확인된 본 연구에서는 PET 결과에 보다 무게를 두어 해석하였다. 이를 고려하면 관찰된 효과의 일부는 출판편향에서 기인했을 가능성을 배제할 수 없으며, 디지털교과서의 학업성취도 효과에 대한 해석은 신중할 필요가 있다.

## V. 논의

본 연구는 한국의 STEM 영역(수학, 과학, 정보컴퓨터)에서 디지털교과서의 사용이 학생들의 학업성취에 미치는 영향을 메타분석으로 검증하였다. 2000년 이후 출판된 25편의 논문에서 총 35개의 효과크기를 산출하였다. 통합된 효과크기를 산출한 결과, 디지털교과서는 전반적으로 학업성취도 향상에 긍정적인 효과를 보였다. 이러한 결과는 디지털교과서 활용이 학업성취도 향상에 긍정적인 영향을 미친다고 보고한 선행연구의 결과와 대체적으로 일치하는 것을 볼 수 있다(김성숙, 2015; 김종신, 2012; 박상우, 2011).

이 디지털교과서가 학업성취도에 미치는 효과크기들은 중간 수준 이상의 이질성을 보였다 ( $I^2 = 57\%$ ).

이는 디지털교과서의 효과가 단일한 조건에서 일관되게 나타나기보다는 학습자의 특성, 교과, 수업맥락 등 외부의 다양한 요인에 따라 달라질 수 있음을 시사한다(변호승 외, 2011; 서봉언 & 공은화, 2021). 특히 본 연구에 포함된 연구들이 서로 다른 학습자 집단과 교육 환경에서 수행되었다는 점을 고려할 때, 이러한 이질성은 연구 간 차이에 의해 발생한 것으로 해석할 수 있다(강은미, 2025; 송해덕 & 박주호, 2009; 장건휘, 2025).

이러한 이질성을 설명하기 위해 조절변수 분석을 실시한 결과, 학년만이 효과크기 차이에 유의한 영향을 미치는 변인으로 나타났다. 반면 디지털교과서를 활용한 수업 차시, 학교급(초, 중, 고), 과목(과학, 수학, 정보컴퓨터)에 따른 효과크기 차이는 통계적으로 유의하지 않았다. 이는 학습자의 Piaget의 인지발달 이론성과 인지부하 이론으로 설명될 수 있다 (Piaget & Inhelder, 2008; Sweller, 2011). Piaget의 인지발달 이론에 따르면 저학년 학습자는 구체적 조작기에 해당하여 시각 자료와 멀티미디어 콘텐츠에 대한 흥미와 수용도가 높다. 따라서 저학년일수록 디지털교과서의 시각화된 자료에 대한 학습 효과가 상대적으로 크다고 해석할 수 있다.

또한 인지부하 이론의 관점에서 볼 때 시각자료와 멀티미디어 콘텐츠는 저학년 학습자에게 학습에 흥미를 유발하는 외재적인 자원으로 볼 수 있다. 그러나 고학년 학습자에게는 오히려 불필요한 인지부하로 작용할 가능성이 있다. 한국의 입시 중심의 평가 구조를 고려했을 때, 고학년일수록 커지는 학습 부담이 디지털 도구 활용 효과를 제한하기 때문으로 보인다 (이규영, 2011). 이러한 결과는 단순히 디지털교과서를 도입하는 것만으로는 학습 효과를 보장할 수 없으며, 학습자의 발달 단계와 교육 맥락에 따라 적합한 방식으로 수업설계·활용되어야 함을 시사한다.

한편, 수업차시, 과목, 출판연도가 유의하지 않은 결과도 살펴볼 필요가 있다. 먼저 수업차시는 디지털교과서의 효과가 단순한 적용 기간보다 실제 수업 설계와 디지털교과서 활용 방식 등에 더 크게 영향을 받기 때문일 수 있다. 또한 연구에 포함된 연구들 간 수업설계 방식과 적용 맥락이 달라 동일한 차시 기준으로 효과를 비교하는 데에는 한계가 있을 가능성이 높다. 과목의 경우 과목별 연구 수가 다르고 과목별 수업 맥락이 다양하여 과목 간 차이가 뚜렷하게 드러나지 않았을 가능성이 있다. 동시에 탐구·실험 중심의 STEM과목이라는 공통점을 가지므로 디지털교과서의 효과가 유사하게 나타났을 가능성이 있다. 출판연도는 코로나 이후 디지털교과서 활용이 확대되었음에도 최근 연구 수가 충분하지 않아 연도에 따른 차이를 충분히 설명하기 어려웠을 것이다. 이러한 결과는 일부 선행연구에서 디지털교과서의 효과가 교과나 수업조건 등에 따라 통계적으로 유의하지 않게 나타났다는 결과와 유사한 경향을 보인다(박현아, 2010; 박찬진, 2015). 이는 해당 변인들이 실제로 효과 크기가 없다는 것이 아니라 연구 간 맥락 차이와 표본 수 제한 등으로 인해 통계적으로 검출되지 않을 가능성도 보여준다. 또한 본 연구에서 출판연향 검토를 통해 일부 편향 가능성이 확인되었으며, 이는 본 연구에서 산출된 효과크기가 실제보다 과대 추정했을 가능성을 배제하기 어렵다. 따라서 디지털교과서의 학업성취도 효과에 대한 해석은 신중할 필요가 있다.

본 연구는 다음과 같은 몇 가지 제한점을 가진다. 첫째, 분석 대상을 한국의 STEM 교과(수학, 과학,

정보컴퓨터)로 한정함으로써 연구 결과를 해외 교육 환경에 적용하는 데 한계가 있다. 둘째, 분석 교과를 STEM 영역으로 제한하였으므로 인문, 사회, 예체능 등 전체 교과로 일반화할 수 없다. 셋째, 특수교육대상 학생을 분석에서 제외하여 다양한 학습 집단에 대한 효과를 대표하지 못하는 한계가 있다. 넷째, AI 디지털교과서(AIDT) 관련 연구의 수가 충분하지 않고, AI 디지털교과서가 AI 디지털자료로 지위가 변경되어 이 영역에 대한 별도의 심층 분석에 제한이 있었다. 다섯째, 본 연구의 최종 포함 연구수가 25편으로 메타분석 수행에는 무리가 없으나 전체 연구 경향을 일반화 하기에는 한계가 있으며, 조절변수별 분석 결과는 범주별 연구 수가 제한적일 수 있어 탐색 수준에서 신중하게 해석할 필요가 있다.

이러한 제한점에도 불구하고, 본 연구는 국내 STEM 교과에서 디지털교과서의 학업성취도 효과를 메타분석으로 종합하고, 학년이라는 유의한 조절변수를 확인함으로써 디지털교과서의 효과적 활용을 위한 실증적 근거를 제공하였다는 점에서 의미가 있다. 본 연구에서 드러난 제한점은 다음과 같은 후속 연구를 제안한다. 첫째, 디지털교과서가 학습자의 정의적 영역에 미치는 영향을 탐색하고 인지적 영역에 미치는 효과와의 상호관계를 포함하는 메타분석 연구가 필요하다. 학업성취도와 정의적 변인 간의 관계를 함께 분석함으로써 디지털교과서의 교육적 효과에 대한 보다 종합적인 이해를 도모할 수 있을 것이다. 둘째, 한국과 해외 디지털교과서의 효과성을 비교 분석하는 국제적 비교 메타분석 연구가 요구된다. 각 국의 교육 제도, 인프라 수준 등의 맥락적 차이가 디지털교과서의 효과에 어떠한 영향을 미치는지를 규명하는 연구 또한 국내 디지털교과서 관련 정책을 개선하는데 중요한 역할을 할 것이다. 셋째, AI 디지털자료를 포함한 차세대 디지털 교과서의 효과성에 대한 연구는 아직 초기 단계에 있으며, 향후 더욱 풍부한 연구가 기대되는 분야이다. AI 기술의 발달과 교육분야에 대한 적용이 현재 진행중이므로 이에 대한 연구 또한 빠르게 확장될 가능성이 크다. 따라서 관련 연구가 충분히 축적되고 이를 바탕으로 메타 분석을 수행하여 차세대 디지털교과서에 대한 효과를 검토할 필요가 있다.

## 참고문헌

- 강은미 (2025). 초등학교 3학년 수학 교과에서의 AI 디지털교과서 활용 학습 효과 분석. 석사학위논문, 한국교원대학교.
- 권선우 (2008). 수학과 전자교과서의 활용이 학업성취도와 흥미도에 미치는 효과. 석사학위논문, 대구교육대학교.
- 길용성 (2019). 디지털교과서를 활용한 과학수업이 학업성취와 과학적 태도에 미치는 영향. 석사학위논문, 광주교육대학교.
- 김성숙 (2015). 디지털교과서 적용 수업이 초등학생의 과학 학업성취도 및 과학적 태도에 미치는 영

- 향. 석사학위논문, 한국교원대학교.
- 김옥령 (2010). 디지털교과서를 활용한 수업이 학생들의 수학성취도와 수학적 태도에 미치는 효과 분석. 석사학위논문, 광주교육대학교.
- 김종신 (2012). 디지털교과서를 활용한 과학수업이 과학 탐구능력 및 학업성취도에 미치는 효과. 석사학위논문, 부산교육대학교.
- 김진 (2015). 교과서 형태 및 디지털교과서 활용 방식에 따른 수업의 효과성 분석. 석사학위논문, 고려대학교.
- 김희수 외 (2012). 『2011년 디지털교과서 효과성 측정 연구』. 한국교육학술정보원 연구보고서.
- 류지현 (2008). 초등학교 수학을 디지털교과서가 성별 및 적용환경에 따라 학업성취와 매체인식에 미치는 영향. **교육공학연구**, 24(3), 53-83.
- 마명선 (2024). AI코스웨어를 활용한 교수학습이 초등 5학년 수와 연산 영역 향상과 수학 태도에 미치는 영향. 석사학위논문, 한국교원대학교.
- 박상우 (2011). 과학과 디지털교과서 적용이 초등학생의 과학 학업성취도와 흥미도에 미치는 영향. 석사학위논문, 대구교육대학교.
- 박찬진 (2015). 영어 수업에서 디지털교과서 적용 효과 메타분석. 석사학위논문, 한국교원대학교.
- 박현아 (2010). 초등 영어 디지털교과서 효과성 메타 분석을 통한 활용 방안 연구. **현대영어교육**, 11(2), 165-192.
- 박형도 (2025). AI 코스웨어 활용에 따른 수학 성취도 및 수학적 태도 변화. 석사학위논문, 전남대학교.
- 변호승 · 류지현 · 송연옥 (2011). 디지털교과서의 연구동향과 학업성취도 효과성 연구에 대한 메타 분석. **교육방법연구**, 23(3), 635-663.
- 서봉언 · 공은화 (2021). 디지털교과서 활용 수업의 효과: 메타분석을 활용하여. **제주교육대학교 교육과학연구**, 23(3), 27-50.
- 서인영 (2017). 초등과학 용해와 용액 단원의 개별 맞춤형 디지털교재 개발 및 적용. 석사학위논문, 한국교원대학교.
- 송진여 · 손준호 · 정지현 · 김중희 (2017). 초등 과학 수업에서 디지털 교과서 활용 수업모형 개발 및 효과. **대한지구과학교육학회지**, 10(3), 262-277.
- 송해덕 · 박주호 (2009). 교수 가이드스 관점에서 디지털교과서 활용유형이 수학과 학습효과에 미치는 영향. **교육정보미디어연구**, 15(2), 29-46.
- 신제철 (2016). 지구과학 I ‘천체의 겉보기 운동’ 단원을 위한 디지털교과서 개발. 석사학위논문, 한국교원대학교.
- 이규영 (2011). 학년에 따른 중학생들의 스트레스 수준 비교 분석. **한국학교보건학회지**, 24(2), 192-198.
- 이용섭 · 홍순원 (2010). 디지털 교과서를 활용한 과학수업이 과학 탐구능력, 학업성취도 및 교수학습 인식에 미치는 효과. **대한지구과학교육학회지**, 3(2), 109-117.

- 이현애 (2025). AI기반 디지털 지도방법을 활용한 수학 교과 학습부진아 비계설정 연구 AI코스웨어를 활용한 비계설정 모형이 무엇이며, 이는 학습부진아의 수학 학업성취도에 영향을 미치는가?. 석사학위논문, 경인교육대학교.
- 임리주 (2009). 디지털교과서를 활용한 도형 수업이 초등학교 6학년 학생들의 공간감각과 수학교과 학습태도에 미치는 영향. 석사학위논문, 한국교원대학교.
- 장건휘 (2025). AI 디지털교과서를 활용한 맞춤형 수학 수업이 초등학교 3학년의 학업성취도와 수학적 태도에 미치는 영향. 석사학위논문, 한국교원대학교.
- 장충재 (2011). E-Book을 활용한 교과 수업 학습 만족도 및 성취도 분석. 석사학위논문, 한국외국어대학교.
- 전지예 (2007). 자기주도적학습을 위한 전자교과서 개발 및 활용 방안 연구. 석사학위논문, 성균관대학교.
- 정미숙 (2006). 초등과학과 전자교과서 개발에 대한 연구: 4학년 ‘열의 이동과 우리생활’을 중심으로. 석사학위논문, 제주교육대학교.
- 정유나·차희영 (2019). 중학교 ‘진화’ 단원 디지털 교재 개발 및 적용. **한국과학교육학회지**, 39(1), 89-99.
- 최우성 (2017). 태양계 행성을 주제로 한 Steam 기반 디지털교재 개발 및 적용. 석사학위논문, 한국교원대학교.
- 한숙희 (2003). 수준별 학습을 위한 정보사회와 컴퓨터 과목 전자교과서 설계 및 구현. 석사학위논문, 연세대학교.
- Egger, M., Smith, G. D., Schneider, M., & Minder, C. (1997). Bias in meta-analysis detected by a simple graphical test. *British Medical Journal*, 315(7109), 629-634.
- Guolo, A., & Varin, C. (2017). Random-effects meta-analysis: The number of studies matters. *Statistical Methods in Medical Research*, 26(3), 1500-1518.
- Huedo-Medina, T. B., Sánchez-Meca, J., Marín-Martínez, F., & Botella, J. (2006). Assessing heterogeneity in meta-analysis: Q statistics or  $I^2$  index? *Psychological Methods*, 11(2), 193-206.
- Jang, D.-H., Yi, P., & Shin, I.-S. (2016). Examining the effectiveness of digital textbook use on students' learning outcomes in South Korea: A meta-analysis. *The Asia-Pacific Education Researcher*, 25(1), 57-68.
- Listanto, V., Arlinwibowo, J., Permatasari, A. D., Ifitah, K. N., & Anwas, E. O. M. (2025). Which is better: E-book or printed book? A meta-analysis of educational materials in language learning. *International Review of Research in Open and Distributed Learning*, 26(3), 170-192.
- Piaget, J., & Inhelder, B. (2008). *The psychology of the child*. Basic books.
- Pustejovsky, J. E., & Rodgers, M. A. (2019). Testing for funnel plot asymmetry of standardized mean differences. *Research Synthesis Methods*, 10(1), 57-71.
- Stanley, T. D. (2008). Meta-regression methods for detecting and estimating empirical effects in the

- presence of publication selection. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 70(1), 103-127.
- Stanley, T. D., & Doucouliagos, H. (2014). Meta-regression approximations to reduce publication selection bias. *Research Synthesis Methods*, 5(1), 60-78.
- Sweller, J. (2011). Cognitive load theory. In J. Mestre, & B. H. Ross (Eds.), *Psychology of learning and motivation* (Vol. 55, pp. 37-76). Academic Press.
- Wijaya, T. T., Cao, Y., Weinhandl, R., & Tamur, M. (2022). A meta-analysis of the effects of e-books on students' mathematics achievement. *Heliyon*, 8(6), e09432.
- Valentine, J. C., Pigott, T. D., & Rothstein, H. R. (2010). How many studies do you need?: A primer on statistical power for meta-analysis. *Journal of Educational and Behavioral Statistics*, 35(2), 215-247.
- Virgiawan, L., Janu, A., Anggraeni, D. P., Khofifa, N. I., & Ence, O. M. A. (2025). Which Is Better: E-Book or Printed Book? A Meta-Analysis of Educational Materials in Language Learning. *International Review of Research in Open and Distributed Learning*, 26(3), 170-192.
- Vøllestad, J., Nielsen, M. B., & Nielsen, G. H. (2012). Mindfulness-and acceptance-based interventions for anxiety disorders: A systematic review and meta-analysis. *British Journal of Clinical Psychology*, 51(3), 239-260.

## A Meta-analysis of the Effects of Digital Textbook Use in STEM Education

Kim, Minju<sup>1</sup> · Lee, Minkyong<sup>2</sup> · Park, Jinman<sup>3</sup> · Lee, YoungRi<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Graduate Student, Department of Education, Korea University

<sup>2</sup>Graduate Student, Department of Education, Korea University

<sup>3</sup>Graduate Student, Department of Education, Korea University

<sup>4</sup>Assistant Professor, Department of Psychology, Ewha Womans University

---

The purpose of this study was to investigate the effects of digital textbook use on students' academic achievement in STEM subjects in Korea through a meta-analysis. Korean-language journal articles and theses and dissertations published since 2000 were selected following the PRISMA guidelines, and 35 effect sizes derived from 25 studies were included in the analysis. The results showed that instruction using digital textbooks had a statistically significant positive effect on academic achievement compared with instruction using traditional printed textbooks (overall effect size = 0.26,  $SE = 0.05$ ,  $p < .001$ ). Moderator analyses revealed that grade was the only significant moderator, with larger effects in lower grades and smaller effects in higher grades. These findings suggest that digital textbooks can enhance academic achievement in STEM education. However, their effectiveness may vary depending on students' developmental levels and instructional contexts. This study offers empirical evidence supporting the potential educational value of digital textbooks and implications for classroom practice and future research.

**Key Words:** Digital Textbooks, STEM Education, Academic Achievement, Meta-Analysis, Moderating Effects