

컴퓨터교육학회 논문지 2026년 제29권 제8호
<https://doi.org/10.32431/kace.2026.29.8.004>



탄소중립 행동의 습관 형성 과정을 지원하는 AI 기반 온라인 도구 개발*

Development of AI-based Online Tool to Support the Habits Formation Process for Carbon Neutral Behaviors

백소현[†] · 이다연^{††} 
 Sohyun Baek[†] · Dayeon Lee^{††}

요약

탄소중립 행동이 지속되기 위해서는 습관 형성이 중요하다. 이에 이 연구는 습관 형성 모델과 자기결정성 이론(SDT)을 통합하여, 초등학생의 탄소중립 행동 습관 형성 과정을 지원하도록 설계된 AI 기반 온라인 도구를 개발하였다. 설계·개발 연구 방법론에 따라 5단계를 거쳐 개발된 도구는 초등 도덕 수업에 적용되었으며, 학습자와 교수자 모두에게 사용 용이성을 인정받았다. 또한 도구의 설계 요소가 행동 유도 및 습관 형성 과정을 지원하는 데 활용될 수 있음을 확인하였다. 이 연구는 교육 현장과 일상 전반에서 AI 기반 도구를 활용한 탄소중립 행동의 습관 형성 지원 방안을 제시하였다는 점에서 의의가 있다.

주제어 탄소중립 행동, 습관 형성 과정, 자기결정성 이론(SDT), 온라인 도구, 설계·개발연구

ABSTRACT

To sustain carbon-neutral behavior, habit formation is essential. This study developed an AI-based online tool designed to support the habit formation process of carbon neutral behavior among elementary school students by integrating Self-Determination Theory(SDT) and a habit formation model. Following the Design and Development Research(DDR) methodology through five stages, the developed tool was applied in a 4th-grade elementary school ethics class and recognized for its user-friendliness by both learners and instructors. Furthermore, it was confirmed that the tool's design elements could be utilized to support behavior induction and the habit formation process. This study is meaningful in that it proposes a way to support the habit formation of carbon-neutral behaviors using an AI-based tool across both educational settings and daily life.

Keywords carbon-neutral behavior, habit formation process, Self-Determination Theory (SDT), online tool, Design Development Research (DDR)

†정회원 서울대학교 사범대학 협동과정 환경교육 전공 석사과정
 ††정회원 서울대학교 객원교수(교신저자)
 논문투고 2026년 04월 07일
 심사완료 2026년 06월 30일
 게재확정 2026년 07월 08일
 발행일자 2026년 08월 04일

* 본 논문은 2025년 한국환경교육학회 학술대회에서 “탄소중립 행동의 습관 형성을 위한 AI 기반 온라인 도구 개발”의 제목으로 발표된 논문을 확장한 것임.

1. 서론

산업화 이후 지구 평균 온도가 1°C 이상 상승함에 따라 전 세계는 폭염, 폭설, 가뭄, 한파 등 극한 기후 현상의 빈도와 강도가 증가하는 기후 위기에 직면해 있다[1]. 이에 주요 국가들은 2050년까지 온실가스 순 배출량을 0으로 만드는 탄소중립을 국가 목표로 선언하고, 사회·경제 전반의 구조적 전환을 추진하고 있다. 우리나라 역시 2021년 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법」을 제정하여 2050 탄소중립 목표를 법제화하였다.

이러한 정책적 변화는 교육 분야로도 확장되어, 2023년부터 학교 환경교육이 의무화되었고[2, 3] 2022 개정 교육과정에서는 기후·생태환경 변화에 대응할 수 있는 역량 함양을 교육과정 구성의 중점 사항으로 명시하였다[4]. 이는 단순한 환경 지식 전달을 넘어, 학습자가 삶 속에서 주체적으로 행동을 변화시켜 나가는 실천 중심의 환경교육으로의 전환을 의미한다. 특히 개인의 탄소중립 행동은 반복적이고 습관적인 행동으로 내면화될 때 지속가능성 측면에서 의미 있는 효과를 창출한다[5]. 실제로 환경교육 관련 초등 연구학교 및 시범학교에서는 학생들의 ‘습관 형성’을 학교 운영의 핵심 목표로 설정하기도 하였다[6].

그러나 실제 교육 현장에서 탄소중립 행동의 습관 형성을 실제적이고 체계적으로 지원하는 도구나 프로그램은 찾아보기 어렵다. 탄소중립 중점학교를 통해 다양한 교육 프로그램이 개발되었으나[7], 이는 주로 학교 차원의 실천 문화 조성에 초점을 두었다. 교사가 개별적으로 탄소중립교육 프로그램을 개발한 사례[8]에서도 학습자의 시스템적 사고 역량 함양에 중점을 두었을 뿐, 개별 학습자의 습관 형성을 지원하지는 않았다.

도구 개발 측면에서도 한계가 있다. 탄소중립 교육용 보드게임[9]은 내용 학습을 목적으로 개발되어, 습관 형성을 지원하는 기능은 포함하지 않았다. 탄소저감챌린지 웹 플랫폼[10]이 일반인 대상으로 개발되었으나, 사용자들의 실천 습관 부족으로 지속적 참여가 이루어지지 않았다. 한편, 정부 및 민간 기관에서는 ‘기후행동 1.5°C’와 같은 탄소중립 생활 실천 애플리케이션을 보급하고 있으나, 복잡한 회원가입 절차로 교육 현장에서 즉시 활용하기에는 한계가 있다. 또한 해당 도구는 실천 기록에 따라 점수를 적립하여 상품을 제공하는 경쟁 중심의 외재적 보상 체계를 채택하고 있다. 이러한 방식은 챌린지 기간과 같은 특정 시점에는 참여율이 높으나, 물질적 보상이 사라지면 실천 동기가 저하되어 행동의 지속성과 습관 형성으로 이어지기 어렵다는 한계가 있다[11].

이와 더불어 AI의 도입 또한 환경교육 분야에서는 제한적인 수준에 머물러 있다. 현재 관련 연구는 특정 수업 상황에만 활용 가능한 프로그램 개발에 주로 치중되어 있으며[12, 13], 교수적·비교수적 상황을 포괄하여 일상생활에서도 활용 가능한 도구 설계 연구는 미비한 실정이다. 특히 사용자의 행동 맥락에 반응하는 AI 기반의 도구에 관한 연구는

여전히 부족하다.

이상의 논의를 종합하면, 학습자의 내재적 동기를 자극하여 탄소중립 행동의 습관 형성을 지원하고 교육 현장에서의 활용 가능성 또한 높은 AI 기반의 도구 개발이 요구된다.

이에 이 연구에서는 Deci와 Ryan[14]의 자기결정성 이론과 Clear[15]의 습관 형성 모델을 통합적으로 적용하여 도구를 설계 및 개발하고자 한다. 이러한 이론적 토대를 바탕으로 개발된 도구는 외재적 보상 없이도 학습자가 탄소중립 행동을 스스로 지속하며 습관으로 이어질 수 있도록 그 과정을 지원할 것으로 기대된다.

이 연구의 구체적인 연구 문제는 다음과 같다.

첫째, 탄소중립 행동의 습관 형성 과정을 지원하는 AI 기반 온라인 도구는 어떻게 설계 및 개발되는가?

둘째, 개발된 AI 기반 온라인 도구에 대한 교수자 및 학습자의 반응은 어떠한가?

2. 이론적 배경

2.1 탄소중립과 탄소중립 행동

탄소중립은 인간의 활동으로 배출되는 온실가스의 양과 자연적 혹은 인위적 흡수·제거량이 균형을 이룬 상태를 말하며, ‘넷 제로(Net Zero)’라고도 불린다. 산업화 이후 온실가스 배출량이 급격히 증가하면서 전 세계는 폭염, 한파, 가뭄 등 극한 기후 현상이 빈번하게 발생하는 기후 위기에 직면하였으며, 이에 주요 국가들은 2050년까지 탄소중립 달성을 국가적 목표로 설정하고, 사회 전반의 구조적 전환을 추진하고 있다[16]. 특히, 전 세계 온실가스 배출량의 약 79%는 에너지, 산업, 교통, 건물 부문에서 배출되며 나머지 약 22%는 농업, 임업 및 기타 토지 이용 부문에서 발생한다[1]. 이처럼 온실가스 배출 비중이 높은 부문의 구조적 전환은 탄소중립 달성을 위한 필수 전제 조건인 것이다.

그러나 탄소중립 실현을 위해서는 국가적 차원의 구조적 전환과 더불어 사회 구성원 모두의 생활양식 변화와 실천 또한 병행되어야 한다[17]. 이를 위해 환경부와 한국환경보전원[17]은 가정·기업·학교를 중심으로 실천 가능한 행동 지침을 제안하였으며, 특히 일상생활에서의 실천 용이성을 고려하여 에너지, 소비, 수송, 자원순환, 흡수원이라는 5대 분야로 구분하여 구체적인 행동 지침을 제시하였다.

이 연구에서는 이러한 지침을 바탕으로 개인, 특히 학생들이 일상생활에서 수행할 수 있는 실천 행위를 ‘탄소중립 행동’으로 명명한다. 이는 단순한 일회성 실천이 아니라 학습자의 일상 속에서 반복적으로 수행되며 궁극적으로 습관으로 형성될 수 있는 실천 양식을 의미한다. 이 연구에서 선정한 구체적인 탄소중립 행동은 Table 1과 같다.

Table 1. Carbon Neutral Actions for students

Category	Actions
Energy	·Turning off unnecessary lights ·Reducing TV viewing time ·Cutting off standby power for appliances ·Reducing digital carbon footprint ·Lowering heating and raising cooling temperatures ·Using stairs instead of elevators
Consumption	·Purchasing contents only in reusable containers ·Avoiding over-packaged products ·Buying used goods and Sharing unused items ·Saving water by using a basin or container ·Participating in school uniform sharing programs ·Eating local and seasonal foods
Transport	·Walking or using public transportation for commuting ·Walking for short distances (~3km round trip) ·Using public transportation for long distances
Resource Circulation	·Reducing the use of plastic bags ·Taking only as much food as needed ·Using reusable cups instead of disposable cups ·Minimizing the use of wet wipes ·Using personal handkerchiefs instead of paper towels or hand dryers ·Reducing paper use when printing ·Sorting waste for recycling
Carbon Sinks	·Understanding the importance of and protecting carbon sinks ·Participating in tree-planting campaigns

2.2 습관과 습관 형성 모델

습관은 학습된 행위가 되풀이되면서 비교적 고정된 행동 방식으로 자리 잡은 상태를 의미한다[18]. 일반적으로 습관은 반복성과 무의식성을 특징으로 한다. 그러나 습관을 단순히 반복적인 행위의 누적으로만 이해한다면, 이는 인간의 자율적 성장보다는 인습적인 행동 패턴에 머무르게 한다는 비판이 제기된다[19].

이에 Dewey[20]는 습관을 기계적 반복이 아니라, 유기체와 환경의 상호작용 속에서 형성되는 능동적이고 적응적인 행동 방식으로 보았다. Dewey의 관점에서 습관은 주체가 환경 속에서 경험을 통해 사고하고 판단하며, 상황에 맞게 행동을 스스로 조정해 가는 성찰적 과정의 산물이다.

따라서 이 연구에서는 Dewey의 관점을 바탕으로, 학습자가 일상에서 환경과 상호작용하며 탄소중립 행동을 지속적인 실천으로 전환하는 능동적인 행동양식을 ‘습관’으로 정의한다. 그리고 그 행동양식에 이르기까지 일련의 과정을 ‘습관 형성’으로 정의하며, 이미 실천이 고착화된 결과적 상태와는 구별한다.

이러한 습관 형성 과정을 지원하기 위해 Clear[15]가 「Atomic Habits」에서 제시한 습관 형성 모델을 활용하였다. 이 모델은 신호(Cue), 열망(Craving), 반응(Response), 보상(Reward)의 네 단계가 순환되는 행동 고리로 구성되어, 특정 행동의 자동화를 유도하고 이를 통해 지속성을 갖도록 돕는 실천적 방법론을 제공한다. Clear는

이러한 반복 고리를 습관 순환(habit loop)이라 명명하고, 각 단계에서 적용할 수 있는 행동 변화 법칙을 함께 제시하였다. 신호 단계에서는 ‘분명하게 만들기’, 열망 단계에서는 ‘매력적으로 만들기’, 반응 단계에서는 ‘하기 쉽게 만들기’, 보상 단계에서는 ‘만족스럽게 만들기’가 그것이다[21].

첫째, 신호 단계에서는 행동을 유발하는 단서를 명확하고 가시적으로 만드는 것이 중요하다. 이를 위해 Clear는 구체적으로 행동을 계획하는 실행 의도(implementation intention) 전략을 제시한다. 이는 실행으로 이어지지 않는 막연한 의도를 넘어, 행동 유발을 위한 효과적인 계획 형태이다. 특히 습관 쌓기(habit stacking)는 실행 의도의 특별한 형태로, 기존 습관 다음에 새로운 습관을 연결함으로써 새로운 행동을 유발하는 전략이다.

둘째, 열망 단계에서는 행동을 매력적으로 만들어 동기를 강화해야 한다. 인간은 인정, 존경, 칭찬을 가져다주는 행위에 매력을 느끼며, 자신이 속한 집단의 문화에 따라 특정 행동이 더욱 매력적으로 느껴진다. 따라서 원하는 행동이 일반적으로 여겨지는 집단에 소속되는 것이 행동 변화에 유리하다[21].

셋째, 반응 단계에서는 행동을 실제로 수행하기 쉽게 만드는 것이 핵심이다. Clear는 계획보다 실행에 초점을 맞추라고 강조하며, 습관 형성에서 중요한 것은 들인 시간이 아니라 실행한 횟수라고 설명한다. 따라서 새로운 습관을 시작할 때는 2분 이하의 시간에 할 수 있는 아주 작은 행동으로 시작하여 실행 장벽을 낮추는 것이 효과적이다[22].

넷째, 보상 단계에서는 행동 직후 즉각적인 만족감을 경험하는 것이 중요하다. 아주 사소한 것일지라도 성공했다는 느낌을 즉각적으로 받는 것은 습관을 강화하는 데 기여한다. 이를 위해 Clear는 습관 추적(habit tracking)을 활용하여 자신이 습관을 이행했음을 시각적으로 확인하도록 하거나, 다른 사람에게 자신의 행동을 지켜봐 달라고 요청하는 방법을 제안한다. 이러한 방법들은 행동에 대한 즉각적인 피드백을 제공하여 습관을 유지하도록 돕는다. 따라서 Clear의 습관 형성 모델은 탄소중립 행동의 습관 형성 과정을 지원하기 위한 도구 설계의 이론적 기반이 된다.

2.3 자기결정성 이론(Self-Determination Theory, SDT)

습관 형성 모델은 행동의 자동화를 위한 실천적 방법론을 제공하지만, 이러한 행동이 장기적으로 지속되기 위해서는 행동의 근원적인 동기 요인을 고려해야 한다. 동기는 행동을 유발하고 유지하는 원동력으로, 크게 외재적 동기와 내재적 동기로 구분된다. 외재적 동기는 보상이나 처벌과 같은 외부 요인에 의해 행동이 유발되는 것을 의미하며, 내재적 동기는 흥미, 즐거움, 호기심 등 개인 내부에서 행동의 원인이 발생하는 것을 의미한다. Deci와 Ryan[14]은 이 두 동기를 연속선상의 개념으로 제시하며, 개인의 동기와 행동이 어떻게 형성되고 유지되는지 설명하는 자기결정성 이론

(Self-Determination Theory, SDT)을 제안했다.

자기결정성 이론은 자율성(Autonomy), 유능성(Competence), 관계성(Relatedness)이라는 세 가지 기본 심리 욕구가 충족될 때, 개인이 내재적 동기를 갖게 되어 자기결정적으로 행동을 한다는 이론이다. 자율성은 자신의 행동에 대한 주도권과 주인의식을 의미하고, 유능성은 과제를 성공적으로 수행하고 스스로가 유능하다고 느끼는 지각된 효능감을 의미하며, 관계성은 타인과의 연결과 소속감을 뜻한다[23].

이러한 욕구의 충족을 통해 형성된 내재적 동기는 행동의 지속성 측면에서 외재적 동기와 구별된다. 외재적 동기에 의존한 행동은 보상이 사라지면 행동도 함께 중단되는 경향이 있으나, 내재적 동기에 기반한 행동은 외부 보상 없이도 지속되고 심화된다[14]. 따라서 이 연구에서는 행동이 지속적으로 반복되어 습관 형성으로 이어질 수 있도록, 자기결정성 이론의 관점을 활용하여 도구를 설계하였다.

2.4 AI 기반 온라인 도구

최근 인공지능(AI) 기술의 발전은 교육 분야에 새로운 가능성을 제시하고 있다. AI는 일상 전반의 활동을 처리하는데 도움을 주는 도구로, 교육 분야에서는 학습을 지원하거나 촉진하는 목적으로서 활용된다[24]. 머신러닝, 자연어 처리, 데이터 분석 등의 기술을 통해 학습자의 활동 데이터를 수집 및 분석하고, 이를 바탕으로 개별 학습 경험을 제공한다. 또한 학생 출석 확인, 평가지 채점 등과 같은 반복적인 업무를 자동화하며, 온라인 환경의 특성을 활용하여 시간과 장소의 제약을 해소하는 데에도 기여한다[25].

AI 도구가 제공하는 이러한 이점은 학습자의 행동 변화 및 습관 형성이 필요한 분야에서도 AI 도구의 활용을 촉진하였다. Ward 등[26]은 AI 도구 사용이 학생들의 동기, 학습 습관, 시간 관리, 학업 성취도에 긍정적인 영향을 미쳤다고 보고하였다. 건강 행동 변화 분야에서도 AI 도구를 활용한 행동 기록과 피드백을 통해 사용자의 습관 형성을 촉진하는 것으로 확인되었다[27]. 이러한 연구들은 습관 형성 과정에서 AI 기반의 온라인 도구가 사용자의 행동 변화에 기여할 수 있음을 시사한다.

이에 이 연구에서는 AI의 데이터 체계화 및 시각화 기능, 자동 피드백 기능과 온라인 환경의 시공간적 제약 해소라는 이점을 활용하여 도구 개발의 방향을 모색하였다.

3. 연구 방법

이 연구는 초등학교 학생들의 탄소중립 행동 습관 형성 과정을 지원하는 AI 기반 온라인 도구 개발을 목표로 하였다. 연구 목적 달성을 위해 설계·개발 연구(Design and Development Research, DDR) 중 산출물 및 도구 연구의 절차에 따라 연구를 수행하였다[28]. 연구는 분석, 설계, 개발, 실행, 평가의 다섯 단계로 진행되었으며, 구체적인 절차는 다음과 같다.

분석 단계에서는 습관 형성 모델과 자기결정성 이론에 관한 문헌 분석을 통해 도구의 설계 요소를 도출하였다. 도출된 설계 요소를 바탕으로 초등 교육 맥락에 적합한 설계 지침을 구체화하였다. 설계 단계에서는 개인 실천이 학습 기록으로 연결되는 흐름으로 도구를 설계하였으며, 설계 지침을 기반으로 3단계 인터페이스(실천-채움-기움)를 구성하였다. 개발 단계에서는 앞서 설계된 흐름도와 인터페이스를 바탕으로 프로토타입을 개발하였다. 개발된 프로토타입에 대해 전문가 및 학습자를 대상으로 두 차례의 사용성 평가를 실시하였다. 프로토타입 사용 후 실시된 사용성 평가는 도구의 사용 용이성과 습관 형성 전략을 측정하도록 구성된 설문지를 활용하였다. 1차 평가 결과를 반영하여 2차 프로토타입을 개발하였으며, 2차 평가를 거쳐 최종 버전을 완성하였다. 실행 단계에서는 개발된 도구를 초등학교 4학년 도덕 수업에 적용하였다. 평가 단계에서는 설문과 면담을 통해 학습자 및 교수자의 반응을 수집하고 도구의 현장 가능성을 평가하였다.

위 단계는 설계·개발 연구(Design and Development Research, DDR)의 일반적인 절차를 따른 것이며, 구체적인 연구 절차는 Table 2와 같다.

Table 2. Research Procedure

Phase	Research Activities	Results
Analysis	·Literature review	Action items, Tool design elements and guidelines
Design	·Flowchart design ·User Interface (UI) design	Tool flowchart, Interface design
Development & Usability Evaluation	·1st prototype development ·1st Usability testing (4 experts, 4 students) ·Revision & refinement ·2nd prototype development ·2nd Usability testing (4 experts, 4 students) ·Final tool development	AI-based online tool
Implementation & Field Evaluation	·Field application (5~7 days) ·Student survey (n=43) & interview (n=4) ·Instructor interview (n=2) ·Data analysis	Field evaluation results

3.1 분석 단계

탄소중립 행동의 습관 형성 과정을 지원하는 AI 기반 온라인 도구 개발을 목표로 문헌 분석을 수행하였다.

먼저 도구에 탑재할 행동 항목을 도출하기 위해 관련 문헌을 탐색하였으며, 이 과정을 통해 학생이 실천할 수 있는 탄소중립 행동 항목(5개 분야 24개 항목)을 1차적으로 도출했다[17]. 이후 초등학생의 실천 가능성을 고려하여 5개 분야에서 15개의 실천 항목을 최종 선정하였다.

또한 도구의 이론적 기반을 정립하기 위해 자기결정성 이론(Self-Determination Theory, SDT)과 습관 형성 모델

을 주요 이론적 근거로 확정하였다. 문헌 분석을 통해 도출된 설계 요소를 연역적, 귀납적 코딩으로 초등교육 맥락에 적합하도록 구체화하여 설계 지침을 마련하였다.

3.2 설계 단계

분석 결과를 바탕으로 도구의 흐름도와 인터페이스를 설계하였다. 먼저, 개별 학습자의 활동 기록이 개인 데이터로 누적됨과 동시에 학급 차원의 누적 데이터로 자동 집계되는 흐름도를 설계하였다. 이러한 흐름도를 기반으로 설계 지침을 반영한 3단계 인터페이스(실천-채움-키움)를 구성하였다. 각 단계에는 자기결정성 이론의 기본 심리 욕구와 습관 형성 모델의 단계별 행동 변화 법칙이 구현되도록 설계되었다.

3.3 개발 및 사용성 평가 단계

설계 내용을 바탕으로 AI 기반 온라인 도구의 1차 프로토타입을 개발하였다. 이 프로토타입은 바이브 코딩 플랫폼인 Replit을 활용하였으며, AI 맞춤형 피드백 및 데이터 시각화 도구를 구현하기 위해 OpenAI의 ChatGPT API를 연동하였다. 이를 통해 단순한 규칙 기반의 정적 피드백을 넘어, 학습자의 실시간 실천 데이터와 누적된 행동 패턴을 분석하여 개별화된 칭찬 메시지를 동적으로 생성하도록 설계하였다. 또한 학급 차원의 누적 데이터를 실시간으로 분석하여 시각화된 대시보드를 제공하도록 하였다.

프로토타입 개발 후, 초기 단계의 문제점 탐색과 개선 사항 도출을 목적으로 1차 사용성 평가를 실시하였다. 사용성 평가는 4~5명의 참여자만으로도 전체 문제의 80%를 발견할 수 있다는 선행 연구 결과에 따라[29], 전문가 4인과 실제 도구의 사용자인 초등학생 4인을 대상으로 진행하였다. 먼저, 전문가 집단은 본 도구가 초등학생을 대상으로 한다는 점을 고려하여 초등교육에 전문성을 갖춘 교사를 위주로 선정하였다. 구체적으로는 탄소중립 행동 항목의 적절성을 검토할 수 있는 환경교육 전문가와 AI 기반 온라인 도구의 기술적·교육적 타당성을 평가할 수 있는 AI 융합교육 전문가를 포함하였다. 학습자 집단은 주 사용층의 다양한 발달 수준을 포괄하기 위해 초등학교 저·중·고학년 학생 4인으로 구성하였다. 아울러, 원활한 사용성 평가를 위해 기본적인 디지털 기기 활용 경험을 갖추고 있으며, 일상생활에서 탄소중립 행동을 실천할 수 있는 학생들을 평가자로 선정하였다. 사용성 평가 참여자 정보는 각각 Table 3, Table 4와 같다.

Table 3. Expert Profile for Usability Evaluation

Expert	Position	Teaching Experience	Areas of Expertise ① Elementary Education ② Environment Education ③ AI-Integrated Education	Highest Degree
A	E Elem. Teacher	16 years	①, ③	Master's

Expert	Position	Teaching Experience	Areas of Expertise ① Elementary Education ② Environment Education ③ AI-Integrated Education	Highest Degree
B	E Elem. Teacher	15 years	①, ③	Master's
C	S Elem. Teacher	8 years	①, ②	Master's
D	D Elem. Teacher	5 years	①, ②, ③	Bachelor's

Table 4. Student Profile for Usability Evaluation

Student	School	Grade	Gender
A	C Elem.	6th	Male
B	S Elem.	6th	Female
C	J Elem.	3rd	Male
D	J Elem.	2nd	Male

사용성 평가는 비대면 방식으로 진행되었으며, 평가에 앞서 모든 참여자에게 프로토타입의 사용법에 대한 사전 안내 자료를 제공하였다. 특히 학습자에게는 평가 과정에서 발생할 수 있는 용어 이해의 어려움을 해소하기 위해 유선을 통한 사전 오리엔테이션을 별도로 실시하였다.

평가도구는 도구의 사용 용이성과 습관 형성 전략을 측정하기 위해 개발한 설문지를 활용하였다. 사용 용이성 문항(10문항)은 임철일 외[30] 연구에서 도출된 문항을 이 연구의 맥락에 맞게 수정 및 보완하였으며, 나머지 문항은 습관 형성 전략을 측정하기 위해 이 도구의 이론적 기반인 자기결정성 이론(3문항)과 습관 형성 모델(7문항)의 반영도를 측정하도록 개발하였다. 설문지는 Table 5와 같이 정량적 문항(20문항)과 개선 사항에 대한 질적 자료 수집을 위한 개방형 문항(1문항)으로 구성되었으며, 정량적 문항은 5점 리커트 척도(5: 매우 그렇다 ~ 1: 매우 그렇지 않다)로 평정되었다. 정량적 문항의 신뢰도 확인을 위해 Cronbach's α 계수를 산출하였으며, 신뢰도는 .94로 높게 나타났다.

Table 5. Usability Evaluation Questionnaire

Factor	Evaluation Items
Ease of Use	1. Is this tool generally convenient to use?
	2. Are the menu and icon functions easy to understand?
	3. Is screen navigation via the bottom menu clear?
	4. Is the entry process (code/nickname) simple?
	5. Is recording practice actions straightforward?
	6. Are the graphics and text easy to read?
	7. Is the design appealing to elementary students?
	8. Is the language appropriate for the students' level?
	9. Does the screen display stably across devices?
	10. Can students use it independently without help?

Factor	Evaluation Items
Habit Formation Strategies	Self-Determination
	11. Does the action list support student Autonomy?
	12. Does AI feedback provide a sense of Competence?
	13. Do the shared features foster Relatedness?
	Habit Formation Model
	14. Can students clearly identify executable actions?
	15. Does the continuity indicator induce repetition?
	16. Do growth elements stimulate practice motivation?
	17. Does class-wide sharing encourage peer motivation?
	18. Are the presented actions easy to perform?
Other	19. Does visual growth provide immediate satisfaction?
	20. Do cumulative rewards make practice enjoyable?
	Any suggestions for modifying or adding functions/designs?
Cronbach' α	.94

1차 사용성 평가에서 도출된 개선 사항을 반영하여 1차 프로토타입을 수정 및 보완하였으며, 이를 기반으로 2차 프로토타입을 개발하였다. 이후 동일한 참여자 집단(전문가 4인, 초등학생 4인)을 대상으로 동일한 문항으로 2차 사용성 평가 및 수정을 거쳐 최종 도구를 완성하였다.

3.4 실행 및 현장평가 단계

최종 개발된 도구를 검증하기 위해 학교 현장에서 도구를 활용하고 평가를 실시하였다. 실행 및 현장평가는 현장 적용 당시 교육과정과의 연계 가능성이 높고, 자신의 의견을 구체적으로 표현하며 도구 활용에 적극적으로 참여할 수 있는 4학년을 대상으로 실시하였다. 이에 따라 경기도 소재 E초등학교 4학년 2개 학급 학생 43명이 참여하였으며, 참여자 정보는 Table 6와 같다.

Table 6. Students for Field Evaluation

Class	Male	Female	Total
A	11	12	23
B	12	8	20

현장평가 실시 전, 연구 참여자를 대상으로 연구 목적과 수집된 자료의 활용 범위를 상세히 안내하였으며, 온라인 설문을 통해 학생의 자발적인 연구 참여 동의서를 수집하였다. 동의서에는 자료의 활용 목적과 개인정보 보호에 관한 지침을 명확히 포함하였다. 이후 설문 및 면담 단계에서는 참여자 확인을 위해 최소한의 정보(학급 및 성명)를 수집하였으나, 실제 자료 분석 과정에서는 이를 전면 익명 처리하여 특정 개인을 식별할 수 없도록 하였다. 아울러, 도구 사용 과정에서도 학급 접속을 위한 학급 코드와 참여자가 직접 설정한 닉네임만을 활용하여 신원 노출을 철저히 방지하였다. 이 연구는 참여자의 신원이 노출되지 않는 최소 위험 수준의 연구로 수행되었으나, 공식적인 기관생명윤리위원회(IRB)

승인 절차는 거치지 않았다.

도구가 활용된 수업은 도덕 ‘자연은 소중한요’ 단원 내의 환경 위기를 극복하기 위해 자신이 실천할 수 있는 행동을 찾아 실천하는 차시였다. 교사는 행동 실천 시, 이 연구에서 개발한 도구를 활용할 것을 안내하였다. 학생들은 수업 후 5일 동안 개발 도구를 활용하여 자신이 실천한 탄소중립 행동을 기록하며 개인 및 학급 데이터를 축적하였다. 주말 참여는 학생의 자율적 선택에 맡겼으며, 참여를 희망한 학생들은 가정에서 개발 도구를 추가 활용하여 참여 일수에 따라 총 6~7일간 기록하였다. 도구 적용 기간이 종료된 후 학생들은 자신이 실천했던 탄소중립 행동에 대해 공유하며 도구 사용 소감을 발표하였다.

수업 종료 후에는 사용성 평가 시 사용한 문항을 활용하여 학습자 대상의 설문을 실시하였다. 학습자 4인과 교수자 2인을 대상으로 면담도 실시하였으며, 설문과 면담을 통해 수집된 자료를 종합적으로 분석하여 개발 도구의 활용 가능성을 검증하였다.

4. 연구 결과

4.1 탄소중립 행동 항목

문헌 분석을 통해 에너지, 소비, 수송, 자원순환, 흡수원 5개 분야에서 학생이 실천할 수 있는 탄소중립 행동 24개를 도출하였다. 그 후 2차 선정 과정에서는 초등학생 중심의 실천 가능성을 최우선으로 고려하여 다음과 같이 항목을 정제하였다.

먼저, ‘가전제품 대기 전력 차단하기’는 주요 가전제품의 실사용자가 보호자이며, 안전사고 예방 등을 위해 보호자의 관여가 필요한 경우가 많다는 점을 고려하여 제외하였다. ‘우리나라·우리 지역·제철 식재료를 이용한 음식 먹기’ 또한 보호자의 구매 행위에 의존하는 특성이 크므로 최종 항목에서 제외하였다. 대신 학생이 자율적으로 실천할 수 있는 ‘음식물 쓰레기 줄이기’ 항목을 넣어 관련 부문의 의미를 담았다. 또한 ‘인쇄 시 종이 사용 줄이기’는 초등학생의 경우 보호자가 인쇄를 대행하는 경우가 많아 삭제하였다.

둘째, 문항의 간결성을 위해 유사한 내용을 통합하였다. ‘텔레비전 시청 시간 줄이기’는 현재 학생들이 스마트폰과 태블릿 등의 디지털 기기를 통해 영상 매체를 접한다는 점을 고려하여, ‘디지털 탄소발자국 줄이기’ 항목으로 포괄하였다. ‘등하교 시 도보 및 대중교통 이용하기’와 ‘왕복 3km 정도의 짧은 거리는 도보로 통학하기’는 내용상 중복되어 하나의 문항으로 통합하였다.

셋째, 분야별 균형과 실천의 용이성을 고려하였다. 자원순환 분야의 세부 실천 행동이 다른 분야에 비해 많았으므로, 초등학생이 쉽게 자주 실천할 수 있는 행동을 중심으로 선별하였다. 이에 따라 ‘비닐 사용 줄이기, 멀티슈 털 쓰기, 일회용 컵 대신 다회용 컵 사용하기’ 항목 중 ‘일회용 컵 대신 다회용 컵 사용하기’를 학생들이 일상적으로 사용하는 물병과 연결하여 ‘다회용 컵 챙겨 사용하기’로 수정하였다. ‘교

복 물려주기 실천하기'는 중·고등학생에게 적합한 행동으로 판단하여 생략하였다. 이상의 선정 과정을 거쳐 Table 7과 같이 5개 분야에 대한 15개의 최종 실천 항목을 도출하였다.

Table 7. Carbon Neutral Actions for Elementary students

Initial items	Final items
Energy	
·Turning off unnecessary lights ·Reducing TV viewing time ·Cutting off standby power for appliances ·Reducing digital carbon footprint ·Lowering heating and raising cooling temperatures ·Using stairs instead of elevators	·Turning off unnecessary lights ·Adjusting heating and cooling temperatures ·Reducing digital device usage time ·Using stairs instead of elevators
Consumption	
·Purchasing contents only in reusable containers ·Avoiding over-packaged products ·Buying used goods and Sharing unused items ·Saving water by using a basin or container ·Participating in school uniform sharing programs ·Eating local and seasonal foods	·Using a cup when brushing teeth ·Refusing over-packaged products ·Sharing unused items
Transport	
·Walking or using public transportation for commuting ·Walking for short distances (~3 km round trip) ·Using public transportation for long distances	·Walking or riding a bicycle ·Using public transportation (bus, subway)
Resource Circulation	
·Reducing the use of plastic bags ·Taking only as much food as needed ·Using reusable cups instead of disposable cups ·Minimizing the use of wet wipes ·Using personal handkerchiefs instead of paper towels or hand dryers ·Reducing paper use when printing ·Sorting waste for recycling	·Reducing food waste ·Carrying and using reusable cups ·Carrying and using personal handkerchiefs ·Sorting waste for recycling
Carbon Sinks	
·Understanding the importance of and protecting carbon sinks ·Participating in tree-planting campaigns	·Participating in tree-planting activities ·Protecting green spaces (flowers and trees)

에너지 분야에는 불필요한 조명 끄기, 냉난방 온도 조절하기, 디지털 기기 사용 시간 줄이기, 계단 이용하기 항목이 포함되었으며, 소비 분야에는 양치할 때 물컵에 물 받아 사용하기, 과대포장 거절하기, 중고물품 나눔하기 항목이 포함되었다. 또한 수송 항목에는 도보 또는 자전거 이용하기와 버스 및 지하철 등 대중교통 이용하기 항목이 포함되었고, 자원순환 분야에는 음식물 쓰레기 줄이기, 다회용 컵 챙겨 사용하기, 손수건 챙겨 사용하기, 분리배출 실천하기 항목이 포함되었으며, 흡수원 분야에는 나무 심기 참여하기,

꽃·나무 등 녹지 보호하기가 포함되었다.

4.2 도구 설계 요소 및 지침

이 도구의 주요 설계 요소는 자기결정성 이론(SDT)과 습관 형성 모델에 관한 문헌 분석을 통해 도출되었다. 문헌 분석 결과, 자기결정성 이론(SDT)에서는 자율성, 유능성, 관계성이 학습자의 내재적 동기를 유발하는 핵심 요소로 확인되었다. 한편 습관 형성 모델에서는 신호, 열망, 반응, 보상의 4단계 순환 고리가 일시적인 행동을 지속적인 행동 양식으로 전환하는 필수 요소로 제시되었다. 이 연구에서는 이 요소들이 초등학생의 탄소중립 행동의 습관 형성 과정을 지원하는 데 적합한 요인이라 판단하여, 도구의 주요 설계 요소로 설정하였다.

이후 구체적인 설계 지침을 마련하기 위해 문헌 분석 결과를 대상으로 연역적, 귀납적 코딩을 실시하였다. 먼저, 관련 문헌에서 추출된 이론적 요소를 바탕으로 연역적 코딩을 진행하여 지침의 초기 범주를 구성하였다. 이후 초등교육의 실질적 맥락과 AI 기반 온라인 도구의 특성을 반영하기 위해 귀납적 접근을 병행하여 세부 지침을 구체화하였다. 아울러 이 과정에서 발생할 수 있는 연구자의 주관성을 배제하고 객관성을 확보하기 위해, 연구자 간 교차 검증을 통해 의견을 조정하고 내용의 타당성을 확립하였다. 이러한 과정을 거쳐 구체화 된 최종 설계 지침은 Table 8과 같다.

첫째, 자기결정성은 학습자의 내재적 동기를 유발하기 위해 자율성, 유능성, 관계성이라는 세 가지 기본 심리 욕구가 충족되어야 함을 의미한다. 먼저 자율성은 외부의 강요가 아닌 스스로의 선택에 의해 자신의 행동을 결정하고자 하는 욕구이다. 이에 따라 도구 내에서 학습자가 실천하고자 하는 탄소중립 행동을 스스로 선택하고 주도할 수 있도록 구성한다. 유능성은 자신의 역량을 발휘하고 효능감을 경험하고자 하는 욕구이다. 이를 위해 실천 과정에서 즉각적인 피드백을 제공하여 성취감을 느낄 수 있도록 설계한다. 마지막으로 관계성은 타인이나 집단과 연결되어 있다는 소속감을 느끼고자 하는 욕구이다[31]. 이에 개인의 탄소중립 행동이 학급 전체의 공동 목표 달성에 기여함을 시각적으로 명시하도록 한다.

Table 8. Design Elements and Guidelines

Design Elements	Design Guidelines	References
Self-Determination	Autonomy 1.1 Allow learners to autonomously select action items that fit their own situations.	Deci & Ryan, 1985; Ryan & Deci, 2000
	Competence 1.2 Provide feedback so that learners can feel immediate self-efficacy and achievement during the practice process.	Ryan & Deci, 2000
	Relatedness 1.3 Visually state how individual actions contribute to achieving the goals of the entire class.	Deci & Ryan, 1985; Ryan & Deci, 2020

Design Elements	Design Guidelines	References
Habit Formation	Cue	2.1 Provide a list of specific actions.
		2.2 Provide continuous action cues to help link existing habits with new ones.
	Craving	3.1 Create a positive class-wide culture.
	Response	4.1 Guide easy and simple actions that can minimize barriers to execution.
	Reward	5.1 Provide immediate feedback upon completion of an action.
		5.2 Allow users to visually verify their own progress in practicing actions.

둘째, 습관 형성은 일시적인 행동이 지속적인 행동 양식으로 정착되기 위해 신호, 열망, 반응, 보상의 네 가지 요소가 유기적으로 순환해야 함을 의미한다. 첫 단계인 신호는 행동을 시작하게 만드는 단서를 분명하게 하는 전략이다. 탄소중립을 위한 구체적인 실천 방법을 모르는 학습자를 위해 명확한 행동 목록을 제시하여 행동의 단서를 제시한다. 또한 기존 습관에 새로운 습관을 연결할 수 있도록 지속적인 행동 신호를 제공한다[15]. 다음으로 열망은 행동을 매력적으로 만들어 하고 싶은 것으로 만드는 전략이다. 이에 학습자가 속한 학급 단위의 긍정적인 실천 문화를 조성하여[21], 탄소중립 행동이 집단 내에서 매력적으로 느껴지도록 함으로써 실천 동기를 강화한다. 반응은 행동의 실행을 용이하게 만드는 전략이다[22]. 행동을 실행할 때 겪는 장벽을 최소화하기 위해 초등학생의 발달 수준과 실천 환경에 맞춘 쉽고 단순한 행동을 안내한다. 마지막으로 보상은 행동 후 만족감을 경험하게 하는 전략이다[32]. 탄소중립 행동 완료 후 즉각적인 피드백을 제공하여 만족감을 경험하게 하고, 자신의 실천 이행 여부를 시각적으로 확인할 수 있도록 한다.

4.3 도구 흐름도 및 인터페이스

4.3.1 흐름도

탄소중립 행동의 습관 형성 과정을 지원하는 도구 개발을 위해 흐름도를 Figure 1과 같이 설계하였다. 이 흐름도는 학습자의 개별 활동 기록이 개인 데이터로 누적됨과 동시에 학급의 누적 데이터로도 자동 집계되는 방식으로 설계하였다.

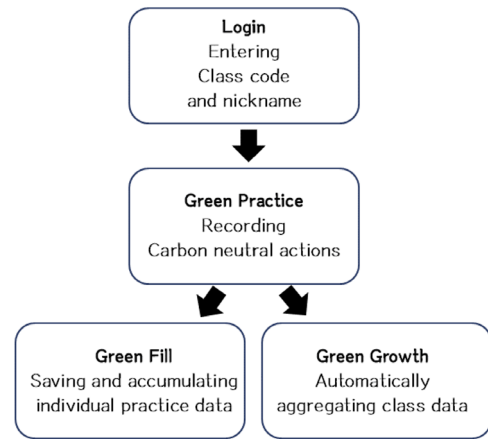


Figure 1. Flowchart

4.3.2 인터페이스

도구의 인터페이스(Figure 2)는 개발된 설계 지침을 바탕으로, 학습자 접근 단계인 로그인 페이지와 메인 단계인 초록 실천 페이지, 초록 채움 페이지, 초록 키움 페이지 3단계로 구성되었다.

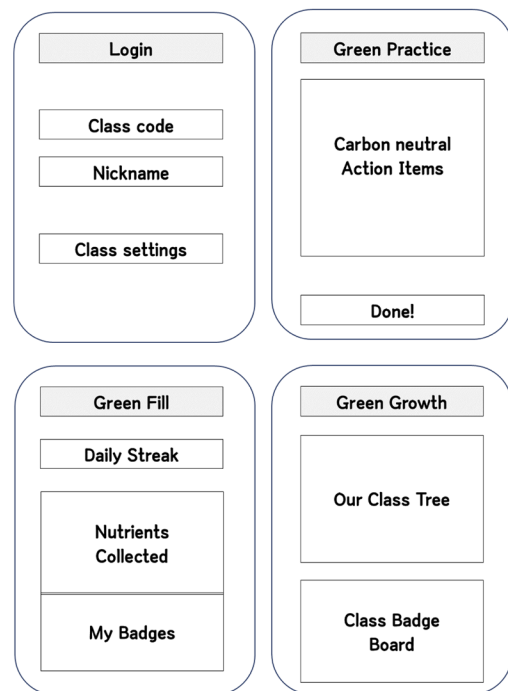


Figure 2. Interface

로그인 페이지는 학급 코드 입력 칸, 닉네임 입력 칸, 교사용 학급 설정 버튼을 포함하여, 개별 학습자가 소속된 학급 환경에 접속하도록 설계되었다.

초록 실천 페이지는 학습자가 개별적으로 실천한 탄소중립 행동을 기록하는 공간으로, 5개 카테고리 아이콘과 하위 행동 목록으로 구성되어 있다. 학습자가 실천 완료 버튼을

누르면, 시스템은 즉각적으로 ChatGPT API를 호출하여 개별화된 칭찬 메시지가 생성 및 제시된다. 이때 AI의 응답 품질과 교육적 적합성을 통제하기 위해 프롬프트 엔지니어링 기법을 적용하였다. 프롬프트에 ‘초등학생의 발달 특성을 고려한 친절하고 격려하는 교사의 페르소나’를 부여하였으며, 닉네임, 당일 실천 행동, 연속 실천 일수, 미 실천 행동 등 학습자의 실시간 로그 데이터를 동적 변수로 주입하였다. AI는 이러한 입력 변수들을 종합적으로 분석하여, 당일 행동에 대한 즉각적인 보상 메시지뿐만 아니라 미 실천 활동에 대한 후속 행동 신호가 포함된 텍스트를 실시간으로 생성한다. 또한, 무분별한 배지 획득을 방지하기 위해 실천 완료 버튼은 1일 1회만 활성화되도록 시스템적으로 제한하였다.

초록 채움 페이지는 개인의 실천 데이터가 누적되고 시각화되는 공간이다. 연속 실천 일수와 함께 우리 반 나무 성장을 위한 양분이 시각적으로 표시되고, 7일 연속 실천 성공 시에는 특별 양분이 추가로 제공된다. 동일한 행동을 3회 실천할 때 획득하는 배지는 총 15개의 하위 행동과 일대일로 연결되어 배지 모음판에 표시된다. 여기서 누적되는 개인별 실천 데이터와 배지 획득 현황은 데이터베이스에 저장된 후, AI가 다음 칭찬 메시지를 생성할 때 참조하는 누적 컨텍스트로 API에 다시 전달된다. 즉, AI가 단편적인 일회성 행동이 아닌 학습자의 지속적인 실천 패턴을 추적하며, 연속 실천 성공 시에는 강화된 보상 피드백을 제공하는 등 상호작용의 연속성을 유지하도록 설계하였다.

초록 키움 페이지는 학급 전체의 성취를 시각화하는 공간으로, AI 피드백과 연동된 개인별 실천 데이터가 학급 데이터로 자동 집계된다. 앞서 누적된 양분의 총합에 따라 우리 반 초록 나무가 자라는 모습을 단계별 이미지로 구현하며, 공동 배지 모음판을 통해 학급 구성원이 획득한 배지의 누적 현황도 표시된다.

인터페이스에 적용된 구체적인 설계 지침은 Table 9과 같다.

Table 9. Design Guidelines for Interface

Page	Functions	Design Guidelines
Login	Class code	3.1
	Nickname	1.1
Green Practice	Carbon neutral Action Items	1.1, 2.1, 4.1
	Done (Praise Messages)	1.2, 1.3, 5.1
Green Fill	Daily Streak	1.2, 2.2, 5.1, 5.2
	Nutrients Collected	1.2, 1.3, 2.2, 5.1, 5.2
	My Badges	1.1, 2.2, 4.1, 5.2
Green Growth	Our Class Tree	1.2, 1.3, 3.1, 5.1, 5.2
	Class Badge Board	1.1, 1.3, 2.1, 2.2, 3.1, 4.1, 5.2

Note. The numbers represent the Design Guidelines listed in Table 8.

4.4 AI 기반 온라인 도구

4.4.1 사용성 평가

인터페이스 설계 내용을 바탕으로 개발한 프로토타입 사용성 평가를 두 차례 실시하였으며 그 결과는 Table 10과 같다.

사용 용이성 측정 결과, 1차 평가 대부분의 문항에서 전문가와 학습자 집단 모두 평균 4.00점 이상의 높은 점수를 주었다. 2차 평가에서는 모든 문항의 평균이 4.50점 이상으로 향상되어, 도구의 전반적인 사용과 조작 편의성이 긍정적으로 평가되었음을 확인하였다. 다만 도구의 디자인에 관한 문항은 1차 평가에서 두 집단 모두 평균 3.75점으로 기능적 측면에 비해 상대적으로 낮게 주었으나, 2차 평가에서는 전문가 4.50점, 학습자 4.00점으로 개선되었다.

Table 10. Results of Prototype Usability Evaluation

Measures	1st		2nd	
	Expert (n=4) Mean	Learner (n=4) Mean	Expert (n=4) Mean	Learner (n=4) Mean
Ease of Use				
1. Overall Ease of Use	4.25	4.25	4.75	5.00
2. Ease of Understanding Menus/Icons	4.00	4.00	4.75	4.75
3. Ease of Navigation	4.50	4.50	4.75	4.75
4. Simplicity of Login Procedure	4.50	5.00	4.75	5.00
5. Simplicity of Recording Process	4.75	4.50	4.75	4.75
6. Readability of Images/Text	4.00	4.50	4.75	4.75
7. Aesthetic Appeal of Design	3.75	3.75	4.50	4.00
8. Level Appropriateness	4.00	4.25	4.75	5.00
9. System Stability	4.25	4.50	4.75	5.00
10. Autonomous Use without Assistance	4.75	4.75	4.75	5.00
Habit Formation Strategies – Self Determination				
11. Autonomy	4.50	4.25	4.50	5.00
12. Competence	3.50	3.75	4.25	4.50
13. Relatedness	4.50	4.25	4.50	4.25
Habit Formation Strategies – Habit Formation Model				
14. Cues for Action List	4.75	4.75	4.75	4.75
15. Cues for Sequential Practice	4.00	4.50	4.50	4.25
16. Desire for Continued Practice	4.75	4.00	4.50	4.25
17. Desire for Class-wide Practice	3.75	4.25	4.75	4.25
18. Ease of Action	4.50	4.50	4.50	4.50
19. Immediate Reward	4.25	4.50	4.50	4.50
20. Enjoyable Reward	4.50	4.75	4.75	4.75
Total Mean	4.29	4.38	4.64	4.65

습관 형성 전략은 도구의 이론적 기반인 자기결정성 이론과 습관 형성 모델의 반영도를 중심으로 평가되었다. 자기

결정성 이론의 반영도를 측정한 3개 문항 중 자율성과 관계성 관련 문항은 1·2차 평가 모두에서 평균 4.25점 이상의 높은 점수를 보여, 도구가 학습자의 선택권과 연대감을 효과적으로 지원함을 확인하였다. 유능성 관련 문항은 1차 평가에서 전문가 평균 3.50점, 학습자 평균 3.75점으로 다른 영역에 비해 다소 낮았으나, 칭찬 메시지 창의 배치 변경과 사용자의 닉네임을 포함한 개인화된 칭찬 메시지로 개선한 결과 전문가 평균 4.25점, 학습자 평균 4.50점으로 나타났다. 습관 형성 4단계를 측정한 7문항에서는 하나의 문항을 제외한 모든 문항에서 평균 4.00점 이상의 높은 점수가 나타나, 습관 형성의 단계별 전력이 적절히 구현된 것으로 나타났다. 다만 열망 단계와 관련하여 ‘우리 반 초록 나무를 통한 학급 공유가 또래와 함께 실천하려는 동기를 자극하는지’ 묻는 문항(17번 문항)에서는 1차 평가의 전문가가 평균이 3.75점으로 다른 영역에 비해 상대적으로 낮게 나타났다. 이에 학급 전체의 목표 달성 정보를 시각화하여 또래와의 협력적 실천이 명확히 보이도록 개선하였으며, 2차 평가에서는 4.75점으로 나타났다.

개방형 질문에서는 구체적인 수정 요구 사항이 도출되었다. 1차 평가에서는 태블릿, 휴대전화 등 다양한 기기에서의 화면 최적화 필요성, 칭찬 메시지 창 배치 변경, 도구 흐름도의 논리적 연계성 강화, 그리고 초등학교 수준에 맞는 용어 수정 등이 제안되었다. 2차 평가에서는 학급 나무의 성장 단계별 이미지 중 4단계 이미지가 5단계에 잘못 배치된 것으로 보인다는 의견이 제시되었다. 두 차례의 사용성 평가 결과를 종합하여 최종 도구 개발에 반영한 사항은 Table 11과 같다.

Table 11. Usability Evaluation Feedback and Improvements

1st Expert/User Feedback	Improvements
· Screen not optimized for tablet environments.	· Implemented responsive web design for multi-device optimization.
· Simple design fails to trigger user interest.	· Redesigned with an attractive interface for elementary students.
· Praise message windows are not prominent enough.	· Repositioned to center and increased window size.
· User nicknames should be included in praise messages.	· Integrated user nicknames into personalized praise messages.
· Praise message content is too generic.	· Integrated API to provide context-aware encouraging messages.
· The tool's flowchart lacks logical consistency.	· Revised flow: 'Action → Nutrient → Tree'
· User nickname should be displayed after logging in.	· Displayed nickname at the top of the screen post-login.
· Lack of intuitiveness in displaying consecutive practice.	· Created a dedicated block to emphasize the 'Streak' indicator.
· Practice actions are not specific enough.	· Replaced with concrete phrases.
· Ambiguous visual changes in the tree's growth stages.	· Enhanced images and clarified distinct design changes for each stage.
· Need to provide status of class-wide goal achievement.	· Visualized class goal progress for improved readability.

2nd Expert/User Feedback	Improvements
· Images for each growth stage are incorrectly placed.	· Reorganized and repositioned images for each growth stage correctly.
· Difficult to ensure data reliability due to repeated clicks on the completion button.	· Set the completion button to activate only once per day to ensure data integrity.
· Reward function for consecutive practice (streak) is not functioning.	· Activated a reward system upon achieving 7 consecutive days of practice.

4.4.2 최종 도구

1차 및 2차 사용성 평가 결과를 종합적으로 반영하여 최종 도구(Figure 3)를 완성하였다. 최종 도구는 학습자의 탄소중립 행동 습관 형성 과정을 지원하는 것을 주된 목표로 하며, 이론적 기반인 자기 결정성 이론과 습관 형성 모델의 원리를 충실히 적용하였다. 더불어 도구의 주 사용자인 초·중·고등학교 학습자의 편의성을 최우선으로 고려하였고, 반응형 웹으로 개발되어 다양한 기기 환경에서 최적화된 사용 경험을 제공한다.

이 연구에서 개발한 도구는 로그인, 초록 실천, 초록 채움, 초록 키움 4개 페이지로 구성되어 있으며, 학습자의 지속적인 참여와 맞춤형 상호작용을 지원하기 위해 초·중·고교사의 페르소나가 반영된 AI 에이전트가 시스템 백엔드에 통합되어 작동한다.

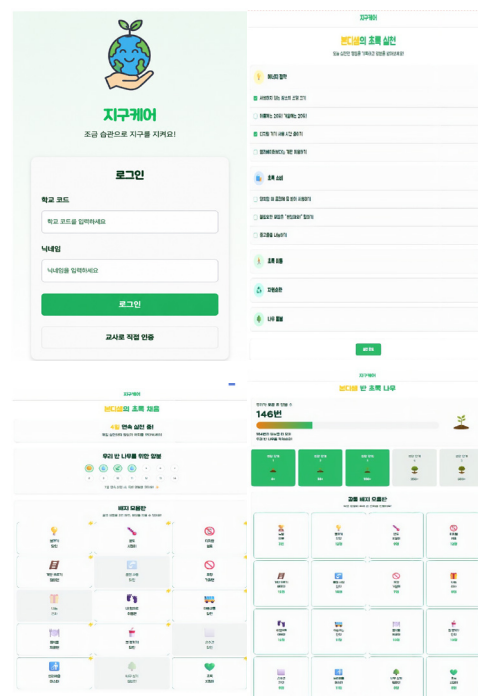


Figure 3. Final Tool

로그인 페이지에서는 학급 코드 입력 기능을 통해 학급 문화를 조성할 수 있는 기반을 마련하고, 닉네임만으로 접속 가능한 간편한 로그인 방식을 적용하여 개인별 실천을 용이하게 하였다.

초록 실천 페이지에서는 학습자가 쉽게 실천할 수 있는 탄소중립 행동 목록이 제시된다. 이러한 구체적인 행동 목록 제시는 행동 실행의 어려움을 줄여주며, 학습자에게 행동의 시작점을 제공하는 신호의 역할도 한다. 학습자는 이 목록 중 자신의 상황에 맞는 행동을 스스로 선택함으로써 자율성을 경험할 수 있다. 학습자가 행동 선택 후 실천 완료 버튼을 누르면 AI 에이전트의 맞춤형 칭찬 메시지가 즉각 제공된다. 이 칭찬 메시지는 학습자가 기록한 실천 데이터의 맥락을 분석하여 생성한 것으로, 초등학교의 발달 특성을 고려하여 긍정적이고 격려하는 내용을 제시한다. 이는 실천 직후 주어지는 보상으로서, 학습자의 유능감을 강화한다. 또한 학습자에게 미실행 활동에 대한 행동 신호를 제공하여 학습자가 실천 범위를 확장하도록 유도한다. AI 피드백이 제공됨과 동시에 학습자의 실천 행동은 개인 데이터와 학급 데이터에도 자동으로 기록되는데, 이를 통해 학습자는 자신의 실천이 학급 전체의 목표에 반영되는 모습 또한 확인할 수 있다.

초록 채움 페이지에서는 개인 데이터가 연속 실천 일수와 획득한 양분의 형태로 표현되어, 학습자가 자신의 변화 과정을 시각적으로 파악할 수 있도록 하였다. 이는 실천을 지속하게 만드는 행동 신호이자, 자기 효능감을 경험하게 하는 피드백으로 작용한다. 특히 개인이 획득한 양분은 학급 데이터에도 반영되어, 학습자는 자신의 실천이 학급 전체의 실천 현황에 기여하고 있음을 확인함으로써 타인과의 관계성을 경험하게 된다. 또한 이 페이지에서는 동일한 행동을 3회 이상 실천하면 해당 행동과 연결된 배지가 부여된다. 총 15개의 하위 행동과 일대일로 대응되는 배지는 배지 모음판에 표시된다. 예를 들어 ‘사용하지 않는 장소의 조명 끄기’ 행동을 3회 이상 실천한 경우, ‘불끄기 달인’ 배지를 획득하게 된다. 이러한 배지 시스템은 단순한 외재적 보상이나 유희적 요소가 아니라, 학습자가 자신의 실천 이행 여부를 시각적으로 확인하며 성취감을 느낄 수 있는 정보 제공의 성격을 갖는다. 나아가 학습자가 미획득 배지를 채워나가는 과정에서 지속적인 실천을 열망하도록 유도한다.

초록 키움 페이지에 구현된 학급 데이터는 개별 학습자의 실천으로 모인 양분 총량에 따라 학급 나무가 단계별로 성장하는 방식으로 시각화된다. 나무 성장은 30개, 100개, 250개, 500개의 양분을 기준으로 5단계로 구분되며, 각 단계로의 전환에 필요한 양분 수가 시각적으로 제시된다. 이러한 점진적 난이도 설정은 초기에는 쉬운 목표 달성을 통해 동기를 부여하고, 이후 지속적인 실천을 유도하도록 설계되었다. 또한 개인의 실천 결과가 학급 나무의 성장에 반영되는 과정을 시각적으로 제시함으로써 학습자는 자신의 행동이 공동 목표 달성에 기여하고 있음을 확인하고, 유능감과 관계성을 함께 경험할 수 있다.

이와 함께 배치된 공동 배지 모음판에는 학급 구성원이 획득한 개별 배지의 누적 현황과 7일 연속 실천 성공 시 부여되는 특별 양분의 제공 횟수가 표시된다. 이를 통해 학습자는 학급 구성원들의 실천 현황을 확인하며 자신이 실천할 행동을 선택하는 데 필요한 행동 신호를 얻을 수 있다. 또한 탄소중립 행동을 학급 전체가 함께하는 협력 활동으로 인식하게 함으로써 학습자의 참여 열망을 자극하고 학급 내의 긍정적인 실천 문화를 조성하도록 하였다.

이처럼 최종 도구는 자율적 선택, 즉각적 피드백, 협력적 목표 달성 명시화를 통해 내재적 동기를 강화하고, 그에 덧붙여 실천 행동 목록 제시, 연속 실천 일수 표시, 배지 모음 등의 기능을 통해 신호-열망-반응-보상의 체계를 구현함으로써 탄소중립 행동의 습관 형성 과정을 지원하도록 설계되었다.

4.5 현장평가 결과

4.5.1 학습자 설문 결과

현장에서의 도구에 대한 학습자의 반응은 Table 12와 같다. 설문 결과 모든 문항의 평균이 3.95점 이상으로 나타나, 도구가 학습자들에게 전반적으로 높은 만족도를 제공했음을 확인하였다.

특히 사용성 영역에서는 로그인 절차의 간단성 및 수준 적합성 문항이 각각 4.58점으로 가장 높게 나타났다. 이는 초등학교 학습자의 수준에 맞춘 인터페이스 설계가 효과적이었음을 시사한다.

습관 형성 전략 측면에서는 행동 용이성 문항이 4.44점, 자율성 문항이 4.33점으로 긍정적인 평가를 받았다. 이러한 결과는 도구에서 제공하는 탄소중립 행동 목록이 학습자가 실천 가능한 수준으로 적절히 설계되어 행동 실행을 촉진하고, 학습자의 자율적 선택권을 보장하였음을 나타낸다. 나아가 지속 실천 열망 문항에서 4.19점, 학급 실천 열망에서 4.12점을 기록하여, 도구가 개인 및 학급 수준에서 지속적인 행동 실천에 대한 동기를 유발하는 데 기여한 것으로 나타났다.

그러나 연속 실천 신호 문항($M=3.95$, $SD=1.23$)과 즐거운 보상에 관한 문항($M=3.95$, $SD=1.29$)은 다른 문항에 비해 상대적으로 낮은 평균과 높은 표준편차를 보였다. 주말에도 가정에서 자발적으로 도구를 사용한 학습자는 7일 연속 실천 조건을 달성하여 상위 보상을 경험한 반면, 평일에만 학교에서 도구를 사용한 학습자들은 보상 획득 기회가 상대적으로 제한되었기 때문이다. 또한 이 연구가 지향한 교수적·비교수적 상황을 포괄하는 도구 활용 측면에서, 학교 밖 환경에서의 지속적인 참여를 위해서는 신호와 보상 체계의 보완이 필요함을 시사한다. 구체적으로, 웹 기반 도구의 특성상 일상에서 즉각적인 실천을 유도할 수 있는 모바일 푸시 알림과 같은 연속 실천 신호가 부재했으며, 제공된 보상 체계 역시 장기적이고 자발적인 동기를 형성하기에는 다소 부족했던 것으로 분석된다. 따라서 향후 도구 고도화 시에는 가정에서도 쉽게 접근하여 즉각적인 알림을 받을 수 있

도록 모바일 환경에 최적화된 인터페이스로 개선하고, 주말 참여를 유인할 수 있는 보다 즉각적이고 다각화된 보상 구조를 마련할 필요가 있다.

Table 12. Student Survey after Field Application

Measures	Mean (n=43)	SD
Usability		
1. Overall Ease of Use	4.53	0.767
2. Ease of Understanding Menus/Icons	4.30	0.832
3. Ease of Navigation	4.49	0.883
4. Simplicity of Login Procedure	4.58	0.663
5. Simplicity of Recording Process	4.47	0.735
6. Readability of Images/Text	4.49	0.736
7. Aesthetic Appeal of Design	4.49	0.798
8. Level Appropriateness	4.58	0.731
9. System Stability	4.56	0.666
10. Autonomous Use without Assistance	4.51	0.827
Habit Formation Strategies – Self Determination		
11. Autonomy	4.33	0.892
12. Competence	4.26	0.954
13. Relatedness	4.23	1.07
Habit Formation Strategies – Habit Formation Model		
14. Cues for Action List	4.26	0.928
15. Cues for Sequential Practice	3.95	1.23
16. Desire for Continued Practice	4.19	0.982
17. Desire for Class-wide Practice	4.12	1.12
18. Ease of Action	4.44	0.796
19. Immediate Reward	4.12	1.10
20. Enjoyable Reward	3.95	1.29
Total Mean	4.34	0.87

4.5.2 학습자 및 교수자 면담 결과

개발된 도구의 심층적인 이해를 위해 학습자 4인과 교수자 2인을 대상으로 면담을 실시하였다. 면담 분석 결과, 설계 단계에서 의도한 Clear의 습관 형성 모델과 Deci 및 Ryan의 자기결정성 이론의 주요 요소가 개발 도구에 구현되었음을 보여주었다.

먼저 습관 형성의 첫 단계인 신호 측면에서, 도구는 학습자에게 구체적인 실천 방향을 제시했다. 한 학습자는 “처음에는 ‘내가 지구를 지키기 위해 무언가를 할 수 있을까?’라는 생각이 들었는데, 도구를 사용하다 보니 무슨 행동을 해야 하는지 알았어요.”라고 응답하며, 막연했던 의지가 명확하게 구체화 되었음을 밝혔다. 또한 “칭찬 메시지를 보면서 내가 안 했던 실천이 무엇인지 알게 됐어요.”라는 언급은 AI 에이전트의 피드백이 단순한 보상을 넘어 미실행 활동에 대한 또 다른 신호로 작용했음을 보여준다.

실천 행위 자체가 학습자들에게 매력적인 과업으로 인식되는 열망의 양상도 나타났다. 교수자 A는 “휴대전화에 없는 친구는 주말에 학교 태블릿을 빌려 가서 해도 되냐고 물어보

고, 쉬는 시간에 지구케어(도구명) 해도 되냐고 물어봤어요.”라고 관찰 결과를 전했다. 이는 탄소중립 행동 실천이 아이들에게 즐거운 활동이었음을 시사한다. 특히 “친구들이랑 우리 반 나무를 같이 키우니까 더 좋았어요.”라는 학습자의 응답은 학급 내 형성된 실천 문화가 탄소중립 실천 행동을 더 매력적인 것으로 인식하게 만든 결과로 해석된다.

또한 이 도구의 주 사용자인 초등학생의 발달 단계를 고려하여 실행 장벽을 낮춘 설계는 행동의 반응을 용이하게 하였다. “아이들이 사용하는 내내 도구 사용법에 대해 질문하지 않았어요.”라는 교수자의 응답과 “지구를 지키는 일이 쉬웠어요.”라는 학습자의 대답은 이 도구가 실행에 집중하게 했음을 보여준다. 1일 1회 기록 제한에 대해 “저녁에 실천한 활동이 추가로 생겼는데 또 누를 수 없어서 아쉬웠어요.”라는 응답도 학습자가 습관 형성의 핵심인 실행 횟수에 반응하고 있음을 보여준다.

마지막으로 행동 기록 후 제공되는 즉각적인 보상은 만족감을 극대화했다. 한 학습자는 “제가 입력했더니 지구케어(도구명)에서 칭찬을 해줬는데, ‘지구(가명), 넌 계단 오르기 챔피언!’이라는 문구가 떴어요. 그때 제가 지구를 위해 대단한 일을 한 것처럼 느껴져서 기분이 좋았어요.”라고 답하며, AI 에이전트의 즉각적인 맞춤형 칭찬이 성취감을 제공했음을 밝혔다. 이와 더불어 “우리가 실천할 때마다 나무가 자라서 뿌듯했어요.”라는 응답은 공동체의 성과 또한 학습자에게 만족감을 제공한 것으로 해석된다.

나아가 이 도구는 학습자의 내재적 동기를 자극하는 심리적 욕구 또한 충족시키고 있었다. “저는 주말에도 계속 했어요. 아침에 일어나자마자 어제 했던 일을 떠올려보고 기록했어요.”라는 학습자의 언급과 “쉬는 시간에 지구케어(도구명) 해도 되냐고 물어봤어요.”라는 교수자의 말을 종합해 보면, 학생들이 스스로 행동을 주도하는 자율성이 발현되었음을 보여준다. “특별 양분 얻으니까 뿌듯했어요.”와 “칭찬 메시지를 보면 오늘도 지구를 지켰다는 생각이 들었어요.”라는 학습자의 답변은 도구를 통해 자신의 효능감을 확인하는 유능성 욕구가 충족되었음을 드러낸다. 마지막으로 “우리 반 애들이 환경을 같이 지키는 것 같아서 좋았어요.”라는 응답과 “친구들이랑 우리 반 나무를 같이 키우니까 더 좋았어요.”라는 학습자들의 답변은 이 도구가 타인과 연결되는 관계성의 욕구를 충족시키고 있음을 보여준다.

그러나 도구의 내실화를 위한 기능 보완 의견 역시 도출되었다. 교수자 B는 “다른 반의 데이터를 함께 볼 수 있으면 더 좋을 것 같아요.”라고 응답하였다. 이는 학습자들이 학교 공동체 내에서 소속감을 느끼며 실천 동기를 추가로 얻을 수 있다는 점에서, 향후 이를 반영한 도구의 고도화가 이루어진다면 긍정적인 효과를 거둘 것으로 보인다. 또한 한 학습자는 “지구케어(도구명) 들어가는 링크를 몰라서 주말에 못 했어요.”라고 응답하였다. 이는 웹 기반 도구의 접근성이 학교 밖 환경에서는 제한될 수 있을 보여주며, 향후에는 모바일 환경에 최적화된 접근 방식을 적용하는 등 도구의 고도화가 필요함을 시사한다.

이상의 반응을 종합하면, 이 도구는 학습자의 탄소중립 행동의 습관 형성 과정을 지원하는데 활용될 수 있으며, 교육 현장에서 실질적으로 활용 가능한 도구임을 보여준다.

5. 결론 및 논의

이 연구는 탄소중립 행동 습관 형성 과정을 지원하는 AI 기반 온라인 도구를 설계 및 개발하고, 교수자와 학습자의 반응을 탐색하는 것을 목적으로 하였다.

연구는 설계·개발 연구의 산출물 및 도구 연구 절차에 따라 분석, 설계, 개발, 실행, 평가의 5단계로 수행되었다. 분석 단계에서는 선행 문헌 분석을 통해 5개 분야의 15개 탄소중립 행동 목록을 도출하였으며, 습관 형성 모델과 자기 결정성 이론을 기반으로 7개의 설계 요소와 9개의 설계 지침을 마련하였다. 설계 단계에서는 개별 기록이 개인 데이터와 학급 데이터로 자동 집계되는 흐름도와 3단계 인터페이스(실천-채움-기쁨)를 구성하였다. 개발 단계에서는 설계 내용을 바탕으로 프로토타입을 개발하고 두 차례의 사용성 평가를 통해 도구를 개선하여 최종 버전을 완성하였다. 실행 단계에서는 경기도 소재 E초등학교 4학년 2개 학급의 학생 43명을 대상으로 5~7일간 현장 적용을 실시하였다. 평가 단계에서는 설문과 면담을 통해 도구에 대한 현장 반응을 수집하였다. 분석 결과, 학습자와 교수자는 도구가 사용하기 용이하다고 평가하였으며 도구의 설계 요소가 학습자의 탄소중립 행동의 습관 형성 과정을 지원하는 데 활용될 수 있음을 보여주었다.

이 연구는 다음과 같은 교육적 의의를 지닌다.

첫째, 학습자의 행동 맥락에 반응하는 AI 기반 도구를 개발하여 개별 맞춤형 지원을 구현하였다는 점이다. 이 도구는 일방향적인 기존 환경교육 프로그램[12,13]과 달리, 학습자 개인의 실천 데이터를 기반으로 습관 형성 과정을 개별적으로 지원하도록 설계되었다.

둘째, 온라인 도구의 특성을 활용하여 시공간적 제약을 해소하고 학습자의 일상 전반에서 실천을 지원한다는 점이다. 이는 특정 수업 상황에만 활용 가능한 프로그램이나[8, 12, 13] 학교 차원의 문화 조성[7]에 치중했던 기존 연구들과 차별화된다. 정규 교육과정 내 교수적 상황 뿐만 아니라 가정 등 비교수적 상황에서도 탄소중립 행동을 지속할 수 있는 환경을 제공함으로써 습관 형성 과정을 지원할 수 있는 가능성을 제시하였다.

셋째, 초등 학습자의 발달 단계와 요구를 반영하여 교육적 실용성을 확보하였다는 점이다. 일반인을 대상으로 개발된 기존 도구들[10, 32]과 달리 초등학생이 실천하기 용이한 행동 목록을 구성하고 긍정적인 칭찬 메시지와 직관적인 인터페이스를 통해 사용 편의성을 제고함으로써 실천 과정에서의 실행 장벽을 최소화하였다.

넷째, 학습자의 내재적 동기를 형성하고 행동의 지속성을 지원하는 도구라는 점이다. 외재적 보상 중심의 참여 유도 방식을 적용한 기존 도구[33]와 달리, 자기결정성 이론[14]과

습관 형성 모델[15]을 통합 적용하여, 학습자의 내재적 동기 형성을 돕고 탄소중립 행동의 지속적 실천을 지원한다.

이 연구는 다음과 같은 한계 또한 지닌다.

첫째, 이 연구는 현장에서의 도구 사용 가능성과 학습자와 교수자의 반응을 탐색하는 데 주된 목적이 있었다. 따라서 E초등학교 4학년 2개 학급의 학생 43명이 대상이었던 연구 결과를 다른 학년이나 지역으로 일반화하기에는 한계가 있다. 다양한 학년과 지역의 학습자를 대상으로 한 추가 검증이 필요하다.

둘째, 프로토타입 사용성 평가에는 초등학교 저·중·고학년 학생이 참여한 반면, 실제 현장 적용은 4학년을 대상으로 이루어졌다. 따라서 사용성 평가에서 확인된 반응이 실제 적용 대상인 4학년 학생의 반응과 다를 수 있다. 또한 1·2차 사용성 평가는 동일한 집단을 대상으로 실시되었으므로 평가 결과에는 도구 개선 효과와 함께 반복 사용에 따른 친숙성 효과가 일부 반영되었을 가능성을 배제할 수 없다.

셋째, 현장평가 기간이 5~7일로 제한되어, 학습자들이 새로운 도구에 대해 보이는 일시적인 흥미인 신기효과(Novelty Effect)를 배제하기 어렵다는 한계가 있다. 또한 이 연구는 개발 도구의 현장 적용을 통해 학습자와 교수자의 반응 및 활용 가능성을 탐색하는 데 중점을 두었으므로, 실제 탄소중립 행동의 습관 형성 효과를 직접 검증하지는 못하였다. 따라서 향후 연구에서는 충분한 기간의 현장 적용과 함께 사전·사후 비교, 실천 로그 데이터 분석, 비교 집단 설정 등을 통해 도구의 실제 습관 형성 효과를 검증할 필요가 있다.

넷째, 이 연구에서 개발한 도구는 웹 기반으로 개발되어 학교 밖 환경에서의 접근성이 다소 제한되었으며, 일상적 실천을 촉진하는 푸시 알림과 같은 기능 역시 제공되지 못하였다. 따라서 향후 도구 고도화 시에는 가정 등 학교 밖 환경에서도 쉽게 접근이 가능하도록 모바일 기반 방식을 도입할 필요가 있다. 아울러 현장평가 결과를 반영하여 보상 체계의 다각화와 타 학급 간 데이터 공유 기능의 추가를 통해 도구를 고도화할 필요가 있다.

다섯째, 이 연구의 현장평가는 참여자의 신원이 노출되지 않는 최소 위험 수준으로 진행되었으나, 사전에 공식 기관 생명윤리위원회(IRB)의 승인 절차를 거치지 못하였다는 절차적 한계가 있다. 따라서 학습자의 행동 변화나 습관 형성을 장기적인 관점에서 추적하는 향후 연구에서는 사전에 반드시 IRB 승인을 득하여 연구 윤리적 절차를 철저히 준수해야 할 것이다.

참고문헌

- [1] IPCC. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report*. IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- [2] *Framework Act on Education*, Pub. L. No. 18456 (Sept. 24, 2021). Korea Ministry of Government Legislation.
- [3] *Act on the Activation and Support of Environmental Education*, Pub. L. No. 18916 (June 10, 2022). Korea Ministry of Government Legislation.
- [4] *Ministry of Education*. (2022). National curriculum for primary and secondary schools (Ministry of Education Announcement No. 2022-33 [Separate Volume 1]). <https://ncic.re.kr/inv/org/list.do>
- [5] Linder, N., Giusti, M., Samuelsson, K., & Barthel, S. (2022). Pro-environmental habits: An underexplored research agenda in sustainability science. *Ambio*, 51, 546–556. <https://doi.org/10.1007/s13280-021-01619-6>
- [6] Seo, H., & Kim, C. (2016). Analysis on Operations of Whole School Approach for Environmental Education: Three Types of Elementary School Cases in Korea. *Korean Journal of Environmental Education*, 29(3), 263-285. <https://doi.org/10.17965/kjee.2016.29.3.263>
- [7] Kim, J., & Kim, C. (2024). Analysis of Operation of the Model School for Carbon Neutrality and Directions for Environmental Education with a Whole School Approach. *Korean Journal of Environmental Education*, 37(2), 282-302. <https://doi.org/10.17965/kjee.2024.37.2.282>
- [8] Kim, D. (2024). *Developing a carbon neutrality education program to cultivate elementary school students' systems thinking* [Master's Thesis], Korea National University of Education. <https://www.riss.kr/link?id=T16942124>
- [9] Mun, J., Choi, S., & Hyun, E. (2023). A Case Study on the Development and Use of a Board Game to Educate Children about Carbon Neutrality Using Service Design Methods. *Journal of the Korean Society of Design Culture*, 29(3), 129-139. <https://doi.org/10.18208/ksdc.2023.29.3.129>
- [10] Lim, J., Chae, J., & Yoo, J. (2024). Design and Implementation of a Carbon Reduction Challenge Web Platform for Achieving Carbon Neutrality. *Journal of the Korea Contents Association*, 24(10), 21-31. <https://doi.org/10.5392/JKCA.2024.24.10.021>
- [11] Deci, E. (1971). Effects of externally mediated rewards on intrinsic motivation. *Journal of Personality and Social Psychology*, 18(1), 105-115. <https://doi.org/10.1037/h0030644>
- [12] Na, Y., & Moon, Y. (2024). Analysis of literature on the effects and limitations of using artificial intelligence in environmental education. In *Proceedings of the 2024 Autumn Conference of the Korean Society for Environmental Education*, Cheongju, Korea, 101-104.
- [13] Lee, H. (2025). Teachers' Experiences with AI Robot-Integrated Resource Circulation Education in Model Schools: A Qualitative Interview Study. *Korean Journal of Environmental Education*, 38(2), 189-202. <https://doi.org/10.17965/kjee.2025.38.2.189>
- [14] Deci, E., & Ryan, R. (1985). *Intrinsic motivation and self-determination in human behavior*. Plenum.
- [15] Clear, J. (2018). *Atomic habits*. Penguin Random House.
- [16] Jointly by Relevant Ministries. (2023). *National strategy for carbon neutrality and green growth and the first national basic plan* (Report No. 2023-01). <https://www.pcccr.go.kr/base/board/read?boardManagementNo=2&boardNo=1469&menuLevel=2&menuNo=16>
- [17] Ministry of Environment, & Korea Environmental Preservation Institute. (2024). *Carbon neutral life practice guide: Birth of school*. https://www.mcee.go.kr/home/web/policy_data/read.do?menuId=10262&seq=8336
- [18] *Habit (Seup-gwan)*. Naver Korean Dictionary. <https://ko.dict.naver.com/>
- [19] Chung, Y. (2013). *Exploring the concept of habituation as a goal of elementary moral education and its practical strategies* [Doctoral dissertation], Changwon National University.
- [20] Dewey, J. (1922). *Human Nature and Conduct: An Introduction to Social Psychology*. Henry Holt and Company.
- [21] Fitriana, A. (2024). Atomic Habits Principles: Strategy for Implementing Four Laws of Behavior Change in Strengthening Digital Literacy in Arabic Learning. *Proceeding of Annual International Conference on Islamic Education and Language (AICIEL)*, 69–80. <https://ftk.uinbanten.ac.id/journals/index.php/aiciel/article/view/10627>
- [22] Shnayder-Adams, M., & Sekhar, A. (2021). Micro-habits for life-long learning. *Abdominal Radiology*, 46, 5509–5512. <https://doi.org/10.1007/s00261-021-03185-7>
- [23] Ryan, R., & Deci, E. (2000). Intrinsic and Extrinsic Motivations: Classic Definitions and New Directions. *Contemporary Educational Psychology*, 25(1), 54–67. <https://doi.org/10.1006/ceps.1999.1020>
- [24] Kim, K., & Han, H. (2021). A Design and Effect of Maker Education Using Educational Artificial Intelligence Tools in Elementary Online Environment. *Journal of Digital Convergence*, 19(6), 61-71. <https://www.kci.go.kr/kciportal/ci/sereArticleSearch/ciSereArtiView.kci?sereArticleSearchBean.artiId=ART002725735>
- [25] Fitria, T. N. (2021). Artificial intelligence (AI) in education: Using AI tools for teaching and learning process. In *Prosiding seminar nasional & call for paper STIE AAS*, 134-147.
- [26] Ward, B., Bhati, D., Neha, F., & Guercio, A. (2025). Analyzing the impact of AI tools on student study habits and academic performance. In *2025 IEEE 15th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*. 434-440. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.02166>
- [27] Lee, Y., Keum, M., Jee, H., & Jeong, J. (2025). Customer Experience Enhancement in AI-Based Cognitive Behavioral Fitness Services for Obese Children and Adolescents. *Journal of the Korean Society of Design Culture*, 31(3), 587-601. <https://doi.org/10.18208/ksdc.2025.31.3.587>
- [28] Richey, R., & Klein, J. (2007). *Design and development*

research: Methods, strategies, and issues. Routledge.

- [29] Virzi, R. A. (1992). Refining the Test Phase of Usability Evaluation: How Many Subjects Is Enough? Human Factors: *The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 34(4), 457-468.
- [30] Lim, C., Song, H., Lee, Y., & Lee, Y. (2009). Development and Implementation of a Digital Textbook Platform Usability Assessment Instrument. *Journal of Educational Technology*, 25(4), 127-157.
- [31] Ryan, R., & Deci, E. (2020). Intrinsic and extrinsic motivation from a self-determination theory perspective: Definitions, theory, practices, and future directions. *Contemporary Educational Psychology*, 61, 101860. <https://doi.org/10.1016/j.cedpsych.2020.101860>
- [32] Fahmi, R., & Hidayah, F. (2025). Designing a character education development based on Atomic habit by James Clear. In *Proceedings of the International Conference on Humanity Education and Society (ICHES)*, 4(1). <https://proceedingsiches.com/index.php/ojs/article/view/324>
- [33] New Climate Regime Response Team. (2020, November 10). *Launch of "Climate Action 1.5°C," a climate action practice app for future generations*. Ministry of Environment. <https://mcee.go.kr/home/web/board/read.do;jsessionid=c7vwJDVaBVHa-eHzUsZYNXwWdrwCmzshvMdabFR2.mehome2?pagerOffset=4830&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=&searchValue=&menuId=&orgCd=&boardId=1408740&boardMasterId=1&boardCategoryId=39&decorator=>



백소현

· 2012년 전주교육대학교 초등교육(학사)
· 2025년~현재 서울대학교 사범대학 협동과정 환경
교육전공 석사과정
· 2012년~현재 초등학교 교사

✚ 관심분야 : 환경교육, 융합교육
✉ baek123400@snu.ac.kr



이다연

· 2016년 경북대학교 영어교육학과(문학사)
· 2021년 서울대학교 교육학과(교육학석사)
· 2024년 서울대학교 교육학과(교육학박사)
· 2024년~현재 서울대학교 객원교수

✚ 관심분야 : 교수설계, AI융합 수업, 창의적 문제해결
✉ dayeon3129@snu.ac.kr