



## 환경 문제의 통합적 이해를 위한 국내외 연구 동향 분석 -탄소 순환 주제의 과학 교육을 중심으로-

박병열<sup>1</sup>, 전재돈<sup>2</sup>, 이현동<sup>3</sup>, 이효녕<sup>\*</sup>

<sup>1</sup>University of Connecticut, <sup>2</sup>경북대학교, <sup>3</sup>대구교육대학교

### An Analysis of Research Trend for Integrated Understanding of Environmental Issues: Focusing on Science Education Research on Carbon Cycle

Byung-Yeol Park<sup>1</sup>, Jaedon Jeon<sup>2</sup>, Hyundong Lee<sup>3</sup>, Hyonyong Lee<sup>2</sup>

<sup>1</sup>University of Connecticut, <sup>2</sup>Kyungpook National University, <sup>3</sup>Daegu National University of Education

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received 30 November 2019

Received in revised form

29 January 2020

4 May 2020

Accepted 2 July 2020

##### Keywords:

Science Education, Earth  
Environmental Education,  
Global warming,  
Carbon Cycle,  
Research Trend,  
Science Curriculum

#### ABSTRACT

Issues on climate change we are facing, such as global warming, are very important as it affects our lives directly. To overcome this, efforts to reduce greenhouse gases emissions (e.g., carbon dioxide) are necessary and these efforts should be based on our integrated understanding of carbon cycle. The purpose of this study is to examine the research trend on carbon cycle education and to suggest the value and direction of carbon cycle education for students who will be citizens of the future. We analyzed 52 carbon cycle education related studies collected from academic research databases (RISS, KCI, ERIC, Google Scholar, and others). As a result, we conclude that resources are still limited and more researches on verification and utilization of developed program, development of accurate and comprehensive tools for students' recognition and level assessment, developing educational model or teacher professional development, providing more appropriate curriculum resources, and the use of various topics or materials for carbon cycle education are necessary. Students' comprehensive understanding of the carbon cycle is important to actively react to the changes in the global environment. Therefore, to support such learning opportunities, resources that can be connected to students' daily experiences to improve students' understanding of carbon cycle and replace misconceptions based on the verification of existing programs should be provided in the classroom as well as the curriculum. In addition, sufficient exemplary cases in carbon cycle education including various materials and topics should be provided through professional development to support teachers teaching strategies with carbon cycle.

## 1. 서론

인류가 직면한 여러 지구 환경 문제들 중 지구온난화를 동반한 기후 변화 이슈는 지속적으로 우리의 경각심을 일깨워 주고 있다. 이러한 이슈는 우리의 삶에 직접적인 영향을 미치는 매우 중요한 문제이기도 하다. 기상청 국가기후데이터센터 자료 분석에 의하면, 한반도 연평균 기온이 1912년(약 11.8 °C) 이후 2015년(약 14.2 °C)까지 상승 하였으며 그에 따른 폭염, 한파와 같은 이상 기후가 심화되고 있음을 알 수 있다(Kim, 2016). 이러한 변화는 최근 반세기 동안 급격하게 진행되었으며 한반도에 국한된 것만은 아니다. NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)의 세계 지표면 온도 변화 분석 결과에 따르면, 지난 한 세기 동안 세계 연평균 기온이 약 1 °C(오차 범위: 0.8~1.2 °C)가 증가한 것으로 나타났다(IPCC, 2018). 우리나라, 일본, 그리고 미국에서는 2019년 9월과 10월에 다발적으로 발생한 강력한 태풍 ‘미탁’, ‘하기비스’, ‘부알로이’ 등과 허리케인 ‘도리안’으로 인해 심각한 피해를 보았다. 일본의 경우 10월 한 달 간 태풍으로 인한 사망자가 100명이 넘었으며, 미국에서도 ‘도리안’

으로 인해 최소 43명이 사망하였다(Hwang, 2019; VOA news, 2019). 이와 관련하여, 미국에서 발생한 허리케인에 대한 연구는 그 규모와 세기의 증가에 지구온난화가 상당히 중요한 영향을 미쳤다는 결과를 제시하였다(Reed *et al.*, 2018).

20세기 말에 이르러, 세계기상기구(WMO, World Meteorological Organization), 국제연합환경계획(UNEP, United Nations Environment Programme) 등과 같은 범국가적 단체들은 지구온난화에 따른 기후 변화를 예방하기 위해 여러 형태의 협약 또는 조약을 체결하였고, 현재까지 5차례에 걸쳐 기후 변화 평가보고서를 발표해 왔다(IPCC, 1990, 1995, 2001, 2007, 2014). 특히, 유엔기후 변화협약(UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change)의 최고 과학자문기구인 IPCC (2014)는 대기, 해양, 빙하, 해수면, 탄소 및 기타 생지화학적 순환 영역의 기후 시스템에서 관측된 변화들을 분석하여 95 %의 확률로 기후 변화의 주된 원인이 인간이라고 주장하였다. 48차 IPCC회의에서는 이산화 탄소 배출량 감축이 지속가능한 발전을 위한 최우선 과제로 선정되었고, 이를 위해 인류는 2030년까지 이산화 탄소 배출량을 2010년 대비 적어도 45 %까지 줄이고 20년

\* 교신저자 : 이효녕 (hlee@knu.ac.kr)

\*\* 이 논문은 2017년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2017S1A5A2A01026791).

<http://dx.doi.org/10.14697/jkase.2020.40.3.237>

뒤인 2050년까지는 이산화 탄소를 아예 배출하지 않아야 한다고 지적했다(IPCC, 2018). Aengenheyster *et al.* (2018)는 지구온난화에 대한 연구를 통해 현재와 동일한 형태로 지구온난화가 진행될 경우, 인류는 2035년에 결국 ‘더 이상 돌이킬 수 없는 시기(PNR: point of no return)’로 돌입하게 됨을 경고하였다. 또한, 세계 153개국 11,258명의 과학자들이 지구의 기후가 현재 비상상태에 직면하고 있다는 성명을 공동으로 발표하였다(Ripple *et al.*, 2019). 이들은 지난 수 십 년간의 노력에도 불구하고 기후 변화에 있어 대부분의 문제를 해결하지 못하고 있으며, 이 문제들은 인류에게 재앙 수준의 매우 심각한 영향을 줄 수 있음을 강하게 경고하며 대응책 마련을 촉구하였다.

실제로 온실가스 배출 감축을 위한 논의가 진행되면서 국제사회의 협력이 절실히 요구되고 있지만(IPCC, 2007, 2014), 일부 온실가스 주요 배출국들의 비협조적인 참여와 지구 환경 문제에 대한 시민의식의 부족으로 이러한 노력은 큰 효과를 거두지 못하고 있다. 그 예로, 미국, 러시아, 사우디아라비아, 쿠웨이트 4개국은 지구의 기온 상승이 18세기 산업혁명 시기보다 1.5 °C가 넘지 않도록 온실가스 배출량을 조절하지는 않을 협의를 담고 있는 IPCC의 ‘1.5도 특별보고서’ 수용을 거부하여 특별보고서의 채택이 연기된 사례가 있다. 결국, 2018년 10월이 특별보고서가 채택이 되고 온실가스의 배출을 감축하기 위한 다양한 형태의 정책과 규제가 시행되고 있지만 그에 대한 시민의식의 향상과 적극적인 참여가 여전히 절실한 실정이다(IPCC, 2018). 이러한 노력이 결실을 맺기 위해서는 참여자의 지속적인 실천 의지를 배양할 수 있는 환경에 대한 소양의 함양과 교육이 필수적이다. 특히, 기후 변화에 대한 이러한 참여의식과 이해의 부족을 해결하기 위한 방안으로 학생들의 지구 환경에 대한 교육이 중요하게 고려되어야 할 것이다. 학생들을 대상으로 한 여러 연구에 따르면 기후 변화에 대한 교육의 필요성을 더욱 절실히 느낄 수 있다. 여러 연구를 통해 기후 변화에 대한 학생들의 지식이 제한적이며(Leiserowitz *et al.*, 2011; Shepardson *et al.*, 2009), 많은 학생들이 대기오염 자체가 기후 변화를 일으킨다고 믿거나(Cheong, 2011; Shepardson *et al.*, 2009), 오존층 파괴가 기후 변화의 주요 원인이라고 생각하는(Han *et al.*, 2000; Oh & Kim, 2014) 등의 비과학적 개념을 가지고 있는 것으로 나타났다. 또한, 학생들은 다양한 과학 자료가 있음에도 기후 변화 및 지구 환경 문제의 해결에 적절하게 활용하지 못하는 것으로 나타나 과학적 개념의 이해뿐만 아니라 그 적용 능력의 배양도 마찬가지로 중요하게 요구됨을 알 수 있다(Leiserowitz *et al.*, 2011).

지구 환경에 대한 교육 목표는 사회 구성원들의 의식 전환을 기반으로 환경적 이슈나 문제 등에 대한 근본적인 해결 방안에 기여하는 것에 중점을 두고 있다(Park *et al.*, 2001). 우리나라에서도 이러한 환경 문제 해결과 연계된 교육이 인류의 생존과 지속가능한 발전을 위한 새로운 교육 과제로 떠오르고 있다(Hwang & Kim, 2012; Kim, 2017). 지구 환경에 대한 교육을 통해 미래사회의 주인인 학생들에게 올바른 환경 소양과 의식을 함양하도록 하여 현재는 물론 미래의 기후 변화 문제를 예방하고 해결하는 데 적극적으로 참여하도록 하는 것이 지구 환경 문제의 근원적인 해결책이 될 것이기 때문이다(Bissinger & Bogner, 2018; Kwon *et al.*, 2016). 기후 변화는 생활 환경, 산업 구조 및 미래 정책 등의 많은 분야에 걸쳐 중대한 질문을 제기하게 될 요소로서, 학생들은 그와 관련된 합리적인 의사결정을 내릴 수 있도록 기후 변화에 대한 교육이 중요하게 요구된다(Bord

*et al.*, 2000). 이와 관련하여 2015 개정 교육과정에서는 ‘생태와 환경’ 교과를 신설하고 “환경 문제를 해결하기 위해 여러 가지 환경 문제의 양상과 원인을 알고, 이를 해결하기 위한 과학적인 접근 방식과 합리적이고 민주적인 의사결정 과정을 체험(p. 140)” 할 수 있도록 안내하고 있다(MOE, 2015). 이는 우리 교육이 학생들로 하여금 과학적 탐구 능력뿐만 아니라 지구 환경과 관련된 문제를 통합적으로 이해할 수 있는 능력의 함양을 통해 지속가능한 발전과 지구 환경 보전을 위한 소양을 요구하고 있음을 알 수 있다. 이러한 능력은 학생들이 자신이 처한 지구 환경의 문제를 파악하고 사회 구성원으로서의 문제 해결의 실천적 의지를 기르는데 매우 중요하며, 더 나아가 미래의 올바른 환경 정책의 수립을 위해 필수적이다. 따라서 지구 환경 문제에 대한 교육, 특히 기후 변화와 관련된 교육적 노력은 ‘지속가능한 발전(sustainable development)’을 바탕으로 인류의 삶을 의미 있는 방향으로 이끌어 나가는데 핵심적 요소가 될 것이다(Bissinger & Bogner, 2018; McNeill & Vaughn, 2012; Shealy *et al.*, 2019).

기후 변화와 같은 전 지구적인 문제를 이해하기 위해서 학생들은 과학적 개념을 지구 시스템 내에 적절히 적용하고, 질량 보존, 물리적 그리고 생지화학적 변화와 같은 과학적 기본 법칙을 적용해 시스템이 어떻게 작동하는지 충분히 이해할 수 있어야 한다(Park *et al.*, 2019). 이러한 광범위한 시스템을 효율적으로 이해하는 과정은 학문 간의 구분이 모호하고 다양한 과학적 개념이 복합적으로 적용되므로 결코 쉬운 일이 아니다. 미국의 Framework for K-12 Science Education (NRC, 2012) 및 Next Generation Science Standards(NGSS Lead States, 2013)에서는 이러한 형태의 학습을 돕기 위해 범교과적 핵심 아이디어로써 ‘Crosscutting Concepts(CCCs)’을 제시하고 있다. 예를 들어, CCCs 중의 하나인 ‘Energy and Matter in System: Flow, Cycles, and Conservation’은 시스템 내에서 일어나는 물질이나 에너지 플럭스의 유입과 유출에 대한 이해에 초점을 맞추어 학생들로 하여금 시스템의 작동 과정 및 가능성과 한계 등의 이해를 돕는다. 그 외에 ‘Patterns’, ‘Cause and Effect’, ‘Scale, Proportion, and Quantity’ 등의 총 7가지 항목의 CCCs을 통해 교과나 주제의 범위를 넘어서 과학 교육의 전반에 걸쳐 학생들의 효율적이고 실질적인 이해와 학습을 도모하고 있다(NGSS Lead States, 2013). 국내에서도 빅 아이디어 개념을 교육과정에 적용하여 통합형 과학 교육과정의 모듈을 제안한 연구가 있었지만(Bang *et al.*, 2013), 그 적용에 있어서는 여전히 논의가 필요한 실정이다.

이와 같은 맥락에서, 탄소 순환에 대한 학습은 기후 변화와 관련된 지구 환경 교육을 위한 하나의 빅 아이디어로써 다루어질 수 있을 것이다. 최근 미국에서는 기후 변화뿐만 아니라 탄소 배출과 관련된 학습 주제가 초·중등 과학 교육의 중요한 교육 목표로 제시되어 있으며(NGSS Lead States, 2013), 기권, 수권, 지권, 생물권을 포함한 지구 시스템의 관점에서 이를 학습하고 이해할 것을 학생들에게 강조하고 있다(NRC, 2012). Zangori *et al.* (2017)에 따르면, 탄소 순환(즉, 탄소 순환 내에서의 탄소의 이동 및 변화 과정)에 대한 확고한 이해를 가지고 있지 않을 때, 학생들은 탄소 순환과 기후 변화에 대한 관련성 그리고 그 복잡성을 제대로 설명할 수 없었음을 지적하며 탄소 순환에 대한 깊이 있는 교육을 강조하였다. 지구 시스템은 여러 가지 복잡한 하부 시스템들의 복합적인 작용으로 구성된다. 그 중에서도 탄소 순환은 다양한 관련 요소들의 시간적, 공간적 상호작용으로 그 과정

이 매우 복잡하며, 에너지의 생산과 사용의 측면에서 인간 생활과 밀접한 관계를 맺고 있다(Lee *et al.*, 2013). 지구계 내에서 탄소 순환에 대한 이해와 인간 활동이 미치는 영향에 관한 과학적 이해는 최근의 기후 변화 양상을 완화하기 위한 노력으로써 매우 중요하다(Higgins & Harte, 2012). 또한 탄소 순환은 ‘수권’, ‘지권’, ‘기권’, ‘생물권’, 그리고 ‘인간의 활동’ 등의 영역에서 여러 요소들의 복잡한 상호관계를 포함하고 있으며, 자원의 사용과 관련하여 지구 환경 문제에 핵심적인 영향을 미치고 있으므로, 환경을 중심으로 한 사회적, 과학적 이슈와의 연계성 측면에서도 적절한 주제이다.

탄소는 인간이 사용하는 화석 연료의 중심 자원으로서 그 개발과 사용이 인간에 의해 이루어지며, 그 영향은 지구 환경에 반영되고 그것이 다시 인간에게 영향을 미친다. 이러한 관계는 자연에 대한 인간의 행동과 책임감을 중요하게 여기는 인간 사회와 환경이 연계된 이슈의 대표적인 특징이다(López-Ridaura *et al.*, 2002; Musters *et al.*, 1998; Petriani & Pozzebon, 2009). 탄소 순환 과정에 반영되는 지구 하위 시스템들과의 다양하고 복잡한 관계는 학생들에게 문제에 접근하는 다양한 관점을 제공한다. 그와 더불어, 생활과 밀접한 소재를 통해 학생들의 실질적인 이해를 추구할 수 있으며, 실생활에서 적용 가능한 다양한 논의가 이루어질 수 있다. 게다가, 이러한 활동은 학생들이 사회의 구성원으로서 지구 환경 문제에 대한 자신들의 이해를 활용하는데 긍정적인 영향을 미칠 수 있다(Cockerill, 2010; Tumer *et al.*, 2016). 따라서 탄소 순환을 활용한 과학학습은 학생들로 하여금 환경, 과학, 그리고 사회의 복잡하고 다양한 측면에 대한 적절한 이해를 돕는데 적용될 수 있을 것이다.

기존의 국내 초중고 교육과정에서는 기후 변화와 관련하여 그 영향을 파악하고 원인을 탐색하는 과정에서 탄소 순환을 다루고 있지만, 문제를 해결하기 위한 학생들의 아이디어를 구체화하는 활동은 여전히 부족하였다(Shin & Kwon, 2015). 최근 2015 개정 교육과정에서 ‘지속가능한 발전’ 및 ‘기후 변화’에 대한 내용이 성취기준에 포함되어 있지만, 탄소 순환에 대한 내용은 제7차 과학과 교육과정의 지구과학 I에서 처음 다루어진 이후 그 중요성에 비해 다루어지는 비중이 상대적으로 낮을 뿐만 아니라 관련된 연구마저 부족한 실정이다(Lee *et al.*, 2013; MOE, 1997, 2015; Moon *et al.*, 2004; Shin, 2017). 또한, 학생들에게 탄소 순환과 기후 변화에 대한 통합적인 학습기회를 제공하는 ‘융합과학’은 진로 선택 교과로 분류되어 필수선택 교과에서 제외되는 등, 탄소 순환 교육에 대한 필요성과 관심이 더욱 절실한 실정이다(MOE, 2015). 탄소 순환의 과정과 그 영향에 대한 과학적 이해를 바탕으로 문제를 해결하는데 그 시스템의 복잡성을 고려할 수 있는 형태의 학습 기회를 학생들에게 충분히 제공해 줄 필요가 있으며, 이러한 학습 기회는 관련 내용이 교육과정에 체계적으로 제시되었을 때 효과적으로 제공될 수 있다. 따라서 학생들의 지구 환경 문제에 대한 과학적 이해와 문제해결 능력의 배양을 위해 탄소 순환에 대한 내용을 교육과정에 체계적으로 반영하는 것이 중요하다. 이를 위해 이 연구에서는 기존에 수행된 탄소 순환 관련 교육 연구들의 경향을 파악하고 그 쟁점을 분석하여 보다 체계적인 교육과정 내용 구성을 위한 시사점을 얻고자 하였으며, 미래 시민으로 성장할 학생들을 위한 탄소 순환 교육의 가치와 방향을 제시하고자 하였다. 이를 위한 구체적인 연구 문제는 다음과 같다.

첫째, 국내외 탄소 순환 교육에 대한 연구의 목적, 형태, 교과영역,

그리고 대상 및 대상의 수준은 어떠한 경향을 보이는가?

둘째, 국내외 탄소 순환 교육에 대한 연구에서 나타나는 연구 내용과 관련된 핵심 쟁점은 무엇인가?

## II. 연구 방법

### 1. 연구 대상

탄소 순환 관련 교육 연구 경향 분석을 통해 체계적인 교육과정 내용 구성 및 학생들을 위한 탄소 순환 교육의 가치와 방향을 제시하기 위하여, 탄소 순환 교육에 관련된 다양한 연구 문헌들을 분석 대상으로 하였다. 교육 영역에서 탄소 순환 전반을 다루는 연구는 물론, 탄소 순환과 관련된 일부 핵심 개념을 다루는 연구 문헌까지를 연구 대상으로 설정하였다. 탄소 순환 전체를 아우르기 위해 출판 시기의 제한을 두지 않고, 국문 또는 영문으로 수행된 가능한 많은 연구 문헌을 대상으로 분석을 수행하여 탄소 순환 교육의 연구 동향과 발전 방향을 찾고자 하였다.

### 2. 자료 수집

연구 대상 자료 수집을 위하여 국내 연구는 RISS ([www.riss.kr](http://www.riss.kr)), 한국학술지인용색인([www.kci.go.kr](http://www.kci.go.kr)) 및 대학도서관 전자자료 검색을 통해 수집하였고, 해외 연구는 Google 학술검색([scholar.google.co.kr](http://scholar.google.co.kr)) 및 대학도서관에서 제공하는 국외 데이터베이스(Academic Search Premier, EBSCO host Premier Package, Education Source), ERIC (Educational Resources Information Center)에서 검색을 통해 수집하였다. 데이터베이스 검색은 ‘탄소 순환(carbon cycle)’ 및 ‘탄소 시스템(carbon system)’을 중심으로 ‘교육(education)’, ‘학교(school)’, ‘학생(student)’ 등과 같은 교육관련 주제어로 검색하여 수집하였다. 탄소 순환 전체를 다루지 않더라도, 탄소 순환 과정의 일부분을 다루고 있는 연구, 즉, 광합성이나 화석연료의 사용 등과 같은 내용을 중심으로 수행된 연구를 포함하였다.

데이터베이스 검색을 통해 수집된 연구는 총 55편이었으나, 온라인 검색을 통해 수집된 연구들의 초록, 연구 방법 및 결론을 우선 확인하여 교육 현장과 관련된 논문을 중심으로 선별하였다. 이 과정에서 ‘CNO 사이클 관련 연구’, ‘대학교 에너지 자원 운영에 대한 연구’ 등 탄소 순환 또는 교육과 관련성이 낮은 일부 연구들은 분석에서 제외하였으며, 연구를 위해 최종적으로 선정된 분석 대상은 총 52편(국내 연구 15편, 국외 연구 37편)이다. 선정된 연구, 2015 개정 과학과 교육과정 및 NGSS에서 확인할 수 있는 탄소 순환 내용을 종합하여 탄소 순환과 관련된 교육의 지향점을 찾고자 하였다.

### 3. 자료 분석

#### 가. 연구 경향 분석

선정된 연구 문헌들은 5개의 영역을 기준으로 분류하여 분석을 진행하였다. 분류 기준 틀은 Jang & Shin (2013)이 ‘우리나라 에너지·기후 변화 교육 연구의 실태 및 동향 분석’에서 선행 연구들의

양적 분포를 확인하기 위하여 개발하여 사용한 ‘분류 기준표’를 바탕으로 이 연구의 주제에 맞추어 개발한 분류 기준 틀을 활용하였다. Jang & Shin (2013)의 연구에서 사용된 분류 기준에는 ‘연구 영역’, ‘연구 대상’, ‘대상 수준’, ‘연구 형태’, ‘연구 년도’, ‘연구 목적’, ‘국내외 자료’ 및 ‘연구 동향’의 8개 기준에서 세부 항목을 구성하여 선행 연구를 분석하였다. 이 연구에서는 연구 년도, 국내외 구분과 같은 분류 기준으로는 탄소 순환 교육에 대한 연구 동향의 시사점을 도출하기 어려운 부분을 고려하여, ‘연구 목적’, ‘연구 형태’, ‘교과 영역’, ‘연구 대상’, 그리고 ‘연구 대상 수준’의 5개 분류 기준 및 세부 항목을 구성하고, 전문가 협의 과정을 통해 최종 완성되었다(Table 1). 이에 따라 탄소 순환 교육 연구들의 정량적 분포와 경향을 확인하고 과학과 교육과정의 발전 방안에 대해 논의하였다.

연구 목적 분류와 관련하여 ‘교수·학습 자료 개발 및 적용’은 교육 활용 자료, 교육 모듈 등 교육 현장에 활용할 수 있는 자료를 개발하고 효과를 검증하는 연구를 포함하였다. ‘도구 개발 및 적용’은 학생들의 수준을 측정하는 평가 도구, 인식 조사에 활용되는 검사 도구 등을 개발한 연구를 포함하였다. ‘인식 및 수준 조사’는 연구 주제와 관련된 학생 또는 교사들의 실태를 조사하는 연구로 학생들의 사고 수준, 지구 환경 문제에 대한 인식 등의 내용을 다루고 있고, ‘문헌 조사’는 기존의 교육, 연구 및 온라인 자료 등에 대해 수집하고 정리하는 내용을 다루는 연구를 포함하였다. 그 밖에, 특정 사례를 조사하거나 기술한 연구, 기존 연구에 대한 해석을 포함하는 일부 연구들은 ‘기타’ 범주로 분류하였다. 연구 형태 분류와 관련하여 ‘조사 연구’는 인식 조사, 지식 수준 조사, 교육 도구 및 시설 조사 등을 포함하였고, 다양한 교육적 처치를 통해 경험적 증거를 바탕으로 효과성을 검증하는 연구들은 ‘실험 연구’로 분류하였다. ‘개발 연구’는 교육 자료, 교육 모듈 개발 및 평가 도구 개발 등의 내용을 다루는 연구를 대상으로 하였고, ‘문헌 연구’는 연구 논문, 교과서, 교육과정과 같은 교육 관련 자료를 분석한 연구를 포함하였다. 끝으로 기존의 연구 사례, 교육과정 운영 사례 등 실제 특정 사례에 대한 연구는 ‘사례 연구’로 분류하였다. 이러한 연구 형태 분류를 통해 연구의 목적을 달성하기 위해 연구자들이 수행한 연구 방법의 적절성과 그에 대한 통계적 결과를 확인할 수 있었다.

교과 영역 분류에서는 연구에서 주로 다루는 주제를 바탕으로 ‘물리학’, ‘화학’, ‘생명과학’, ‘지구과학’, ‘통합과학’, ‘환경’, ‘기타’ 교과로 분류 하였다. ‘통합과학’의 경우, 교과의 내용을 특정하지 않고 중학교 이하의 통합적인 내용을 다루는 경우나, 다양한 영역을 복합적으로 다루는 경우에 포함하였고, 지속가능한 발전, 탄소 발자국 등과 같이 지구과학 개념을 언급하지 않는 경우 ‘환경’으로 분류하였다.

‘기타’는 ‘공학’, ‘정보’ 등 일부 비과학 교과가 포함되었다. 연구 대상은 유형에 따라 ‘학생’, ‘교사’ 및 ‘교과서 및 교육과정’으로 분류하였고, 온라인 데이터베이스, 홈페이지 등 구체적인 자료의 분류가 모호한 경우 ‘기타’로 분류하였다. 그리고 연구 대상의 세부적인 구분을 위해 그 수준에 따라 ‘초등학교’, ‘중학교’, ‘고등학교’, ‘대학교’ 그리고 ‘기타’로 구분하였다. 이 과정에서 대상 수준에 대한 구체적인 언급이 없는 경우나, 명확한 구분이 힘든 경우에는 ‘기타’로 구분하였다. 이러한 연구 영역 분류와 연구 대상 분류를 통해 탄소 순환 교육이 중요하게 다루어지는 주요 학문 분과 및 대상, 그리고 대상의 수준에 대한 양적인 분포를 확인할 수 있었다.

연구자들은 각각 선행 연구들을 분류 기준들에 맞추어 분류하였고, 지속적인 협의 세미나를 통해 분류의 차이가 나는 영역에 대한 논의를 바탕으로 분석의 타당성 및 신뢰성을 높이고자 노력하였다. 협의 세미나를 통해 논의된 구체적인 사항으로 모든 분류 기준에서 연구 내용이 두 가지 이상의 범주에 포함되는 경우를 확인할 수 있었고 각 범주에 중복하여 포함하였기 때문에 범주 별 총 연구의 수는 연구 대상 논문의 총 개수보다 많았다. 자료 분석은 분류 기준을 고려한 문헌 리뷰를 바탕으로 데이터베이스화하였고, 각 분류 기준에 포함되는 연구의 수 및 백분율을 포함해 표와 그래프로 정리하여 연구 영역의 동향을 분석하였다.

#### 나. 자료 분석

탄소 순환 교육을 위한 연구들의 내용적 특성을 알아보기 위해, 각 연구의 키워드(keywords)를 수집함과 동시에 연구 방법, 연구 결과 및 결론 등의 내용 분석을 통해 핵심적으로 사용된 용어를 정리하였다. 각 연구별 4개 내외의 핵심 용어를 선정하고, 그 성격에 따라 교육학적 측면에서 탄소 순환과 함께 다루어지는 교육 관련 핵심 용어들과 그 외 다양한 영역에서 탄소 순환이 관련되어 있는 내용 관련 핵심 용어들로 구분하였다. 모든 연구에 대한 개별적인 검토는 진행되었으나, 체계적인 내용 분석과 의미 있는 논의를 도출하기 위해 각 관련 핵심 용어의 통계 분석에서 가장 빈번하게 등장한 상위 4개의 핵심 용어를 중심으로 관련 연구의 내용 및 해당 연구에서 추가적으로 관련된 핵심 용어들을 포함하여 내용 분석 및 논의를 수행하였다. 분석의 타당성 및 신뢰성을 높이기 위하여 연구자들은 각각 핵심 용어 초안을 정리한 후 지속적인 협의 세미나 과정을 통해 최종 선정하였다.

분류 기준들에 따른 정량적 분석을 통해 선행 연구들의 다양한 특성을 확인할 수 있으며, 핵심 용어를 바탕으로 하는 구체적인 목적

Table 1. Framework for analysis of carbon cycle education studies

분류 기준	연구 목적	연구 형태	교과 영역	연구 대상	연구 대상 수준
세부 항목	교수·학습 자료 개발 및 적용	조사 연구	물리학	교사	초등학교
	도구 개발 및 적용	실험 연구	화학	학생	중학교
	인식 및 수준 조사	개발 연구	생명과학	교과서 및 교육과정	고등학교
	문헌 조사	문헌 연구	지구과학	기타	대학교
	기타	사례 연구	통합과학		기타
			환경		
			기타		

과 내용의 분석을 통해 탄소 순환 교육 연구에서 주요하게 다루어지는 주제를 확인할 수 있다. 이러한 분석을 통해 관련 영역 연구자들의 주요 관심사를 반영한 연구 목적을 명확히 이해할 수 있기 때문에, 도출된 결과를 바탕으로 탄소 순환 교육 연구의 현황을 바탕으로 교육과정에서 탄소 순환을 체계적으로 다룰 수 있는 방안에 대해 논의하는데 종합적으로 활용되었다.

### III. 연구 결과 및 논의

이 연구에서는 기존에 수행된 탄소 순환 관련 교육 연구들의 경향을 파악하고 그 쟁점을 분석하여 보다 체계적인 교육과정 내용 구성을 위한 시사점을 얻고자 하였다. 또한, 미래 시민으로 성장할 학생들을 위한 탄소 순환 교육의 가치와 방향을 제시하고자 하였다. 연구 대상 분석을 통해 얻은 결과는 아래와 같다.

#### 1. 연구 경향 분석 결과

##### 가. 연구 목적 분석

연구 목적에 대한 정량적 분석 결과를 정리하면 Table 2와 같다. 탄소 순환 교육과 관련된 연구 영역에서는 교수·학습 자료 개발 및 적용이 26편(38.8%)으로 가장 많이 이루어졌다. 주로 학생들의 탄소 순환에 대한 내용 학습을 위한 수업 프로그램 개발이 이루어졌지만, 수업을 위한 모형 개발이나 단순히 참고 자료를 개발한 경우도 있었다(Asshoff *et al.*, 2010; Clary & Wandersee, 2015). 그 다음으로 도구 개발 및 적용 연구가 18편(26.9%) 수행되었다. 이 영역에서는 학생들의 수준을 파악하고 평가하기 위한 도구 개발 연구가 주로 수행되었는데, 일반적인 교수·학습 자료 개발 연구와 같이 개발된 교수·학습 자료를 적용하여 그 효과를 검증하기 위해 검사 도구 또는 평가 도구를 개발하고 그것을 타당화하는 연구가 10편 확인되었다. 이처럼, 탄소 순환에 대한 다양한 평가 도구가 개발되고 연구에 활용되고 있는 것을 확인할 수 있었는데(Kim, 2012; Krauskopf, 2010; Zangori *et al.*, 2017), 실제 이러한 도구들 사이의 모형 검증, 요인 분석을 통한 관련성 연구는 미비한 것으로 분석되었다(Antonarakis, 2018; Ricci *et al.*, 1988). 탄소 순환에 대한 보다 체계적인 평가들을 완성하기 위해서는 기존 검사 도구들에 대한 체계적인 상호 관련성 연구를 바탕으로 보다 종합적이고 일반적으로 적용 가능한 검사 도구의 구성

이 필요할 것이다(Kim, 2017; Lee *et al.*, 2013).

문헌 조사 연구는 10편(17.9%)으로 교과서를 분석하거나, 다양한 영역의 선행 연구 문헌 및 온라인 자료를 분석하여 교육 현장에 적용할 수 있도록 교수·학습 자료 개발 연구의 기초 자료로 활용되었다(King, 2014; Kook, 2003; Oh & Choi, 2014). 또한, 인식 및 수준 조사 연구도 8편(11.9%)이 수행되었는데, 대부분 학생들의 인식과 수준을 조사하는 연구가 수행되었고, 이 중 일부는 도구 개발 및 적용 연구의 일환으로 체계적인 설계를 통한 학생들의 탄소 순환에 대한 학습발달과정 조사 연구가 수행되었다(Jin & Anderson, 2012; Lee *et al.*, 2013). 기타에 포함된 연구는 특정 지역에서 수행된 교육 사례인데, EU의 기후 변화 연구 프로젝트에 참여한 중학생에 대한 연구(Dijkstra & Goedhart, 2011), Clearwater County, ID 지역의 탄소 순환 체험 프로그램 운영 사례(Warren, 2015) 및 대학 교육과정에서 탄소 순환을 적용한 사례(Gallego-Schmid *et al.*, 2018)이다. 탄소 순환의 경우 현재 인류가 직면한 기후 변화와 밀접한 관련을 가지고 있어 크게 주목 받는 과학 관련 사회 윤리적 문제(SSI)로 다양한 관련 자료들이 온라인을 통해 제공되고 있는 상황이다. 이러한 접근성이 좋은 온라인 자료들에 대한 체계적인 정리와 검증을 통해 우리 교육 현장에 활용할 수 있는 방안에 대한 연구가 요구된다(Bae & Park, 2013).

##### 나. 연구 형태 분석

연구의 형태에 따라 선행 연구들을 분류한 결과를 정리하면 Table 3과 같다. 조사 연구는 15편(28.8%)으로 확인되었다. 현재 상태에 관한 문제를 다루기 위해 학생, 교사 등 특정 집단을 조사하여 현대 상태를 확인하고 지향점을 제시할 수 있는 조사 연구의 경우 연구 목적 분류에서 학생들의 인식과 수준을 조사하거나 평가 도구 개발을 위한 자료조사 등이 수행된 경우가 포함되었는데, 특히 학생들의 학습발달과정(LP)에 대한 체계적인 연구가 일부 수행된 것을 확인할 수 있었다(Jin & Anderson, 2012; Lee *et al.*, 2013). 한편, 교육적 처치를 통해 연구 대상에 미치는 영향을 바탕으로 효과를 탐색하고 의의를 찾는 실험 연구도 15편(28.8%)으로 확인되었는데, 연구 목적에서 교수·학습 자료 개발 및 적용이 가장 많은 비중을 차지하는데, 이는 교수·학습 자료 개발을 위해 기존 학생들의 수준과 인식을 조사하거나 문헌 분석을 실시하고 이를 바탕으로 교육 현장에 적용할 수 있는 교육 프로그램 및 교수·학습 자료를 개발하고 학생들에게 직접 적용하여 그 효과를 실험적으로 검증한 연구가 많이 수행되었기

Table 2. The analysis of the selected researches purposes in this study

	교수·학습 자료 개발 및 적용	도구 개발 및 적용	문헌 조사	인식 및 수준 조사	기타	합계
연구 수	26	18	10	8	3	65
백분율(%)	38.8	26.9	17.9	11.9	4.5	100.0

Table 3. The analysis of the selected researches methods in this study

	조사 연구	실험연구	개발연구	문헌연구	사례연구	합계
연구 수	15	15	12	6	4	52
백분율(%)	28.8	28.8	23.1	11.5	7.7	100.0

때문이다(Brehm *et al.*, 1986; Gudovitch & Orion, 2001).

12편(23.1 %)이 수행된 개발 연구는 실험 연구와 유사하게 교육적 처치가 가능한 새로운 교육적 프로그램을 개발하고 보급하는 것을 목적으로 다수 수행되었으나, 개발된 교육 프로그램 및 교수·학습 자료에 대한 실험적 검증이 없는 연구들이 많은 것을 확인하였다(Antonarakis, 2018; Swant, 1970). 학생들을 대상으로 적용하는 교육 프로그램 개발 연구가 많은 것에 반해 이론적이고 실제적인 검증을 바탕으로 한 교육모형 개발 사례는 매우 부족한 것으로 확인되었다. STEAM 모형 개발 연구(Choi *et al.*, 2012), 백워드 설계 모형 개발 연구(Yi & Kang, 2012)와 같은 체계적인 교수·학습 모형 개발은 추후 교육과정 개선에서도 적절한 개선 방향을 제시할 수 있으며 교육 내용을 구성함에 있어서도 효과적이기 때문에, 탄소 순환 교육에 있어서도 단순한 교육 프로그램 개발 및 적용을 넘어서 교수·학습 모형을 체계적으로 개발하는 연구들이 진행될 필요가 있을 것이다.

연구 문헌, 서적, 온라인 자료 등 다양한 기초 자료들을 광범위하고 체계적으로 수집 분석해 연구 영역의 발전 방안을 논의하는 문헌 연구는 6편(11.5 %)으로 연구 목적 분석 결과와 유사하게 나타났다. 프로그램 개발을 위한 간략한 선행 연구 조사는 제외하여, 교과서나 교육과정을 분석하고 시사점을 찾는 연구(King, 2014; Kook, 2003; Oh & Choi, 2014)와 자료를 수집하고 해당 자료를 분석하는 연구를 확인할 수 있었다(Antonarakis, 2018; Joyce *et al.*, 2011; Lee, 2003). 특정한 사례를 소개하고 세밀한 관찰을 통해 심층적인 정보를 바탕으로 해당 연구 영역의 특수성을 보여줄 수 있는 사례연구는 4편(7.7 %)이 수행되었는데, 특정한 상황의 교수·학습 사례를 보여주는 연구들 외에도 대학생의 환경에 대한 교육을 위해 특정 프로그램을 개발하고 이를 적용한 연구가 포함되었다(Lindstrom & Middlecamp, 2017).

#### 다. 교과 영역 분석

교과 영역과 관련한 정량적 분석 결과를 정리하면 Table 4와 같다. 탄소 순환 교육에 대한 대부분의 연구는 과학 교과에서 주로 수행되었다. 가장 많은 연구가 수행된 교과는 생명과학으로 총 18편(28.6 %)의 연구가 확인되었는데, 특히, 동물과 식물의 호흡 및 광합성과 관련하여 이산화 탄소의 이동을 중심으로 탄소의 순환을 다루는 연구가 주로 수행되었으며, 이를 바탕으로 학생들의 이해 수준을 분석하고 적절한 교수·학습 자료를 개발하는 등의 연구가 추가적으로 수행되었다(Brehm *et al.*, 1986; Mohan *et al.*, 2009). 그리고 생태계를 주제로 한 연구에서 먹이사슬(생산자 - 소비자 - 분해자) 사이에서 발생하는 물질 순환을 탄소의 이동으로 해석하고 다루는 연구가 수행되었다(Düsing *et al.*, 2018). 그 밖에도 현재 강조되고 있는 기후 변화에 대해 생물학적 접근을 통해 탄소의 순환을 다루는 연구가 일부 수행되었다(Antonarakis, 2018; Monroe *et al.*, 2016; Zangori *et al.*, 2017).

다음으로 많은 연구가 수행된 영역은 지구과학으로 총 16편(25.4 %)이 확인되었다. 지구계 학습과 관련하여 기후 변화 및 지구온난화의 측면에서 탄소 순환을 체계적으로 다루고 있는 연구가 다수 수행되었고, 이러한 현상을 바탕으로 탄소 순환에 대한 학생들의 이해 수준을 분석한 연구가 있었다(Lee *et al.*, 2013; Seo *et al.*, 2014; Sibley *et al.*, 2007). 그와 더불어, 지구 환경 문제에서 지속적으로 강조되고 있는 지구온난화에 대한 교육을 위한 기존 교육과정 분석 및 교수·학습 자료의 개발에 대한 연구도 수행되었다(King, 2014; Kook, 2003; Lee, 2003). 그 밖에, 학생들의 공간 지각 능력과 탄소 순환 개념의 관련성을 분석한 연구(Lee *et al.*, 2017), 해양 산성화를 중심으로 탄소 순환 학습을 위한 자료 개발 연구(Joyce *et al.*, 2011), 열대 우림과 같은 숲 생태계를 중심으로 탄소 순환과 물 순환의 지구 시스템 상호작용을 활용한 교육 자료 연구(Antonarakis, 2018) 등이 있었다.

화학 영역에서 수행된 연구는 총 10편(15.9 %)이 있었다. 순수하게 화학 영역에서 탄소 순환을 다룬 경우는 CaCO<sub>3</sub>와 HCl 반응을 통한 CO<sub>2</sub> 발생 실험에 대한 연구 두 편이 있었고(Cho, 1995; Ko *et al.*, 2004), 그 외에는 생명과학 영역에서 탄소의 이동에 대한 화학적 접근을 다루거나, 지구과학 또는 환경 영역에서 탄소의 이동을 화학식을 포함한 진술로 언급하는 연구가 포함되었다.

통합과학 영역에서 다루어진 연구 7편(11.1 %)의 연구들은 단순히 특정 과학교과 내용을 다루는 것을 넘어서 탄소 순환에 초점을 맞춘 교육에 대한 연구들이 포함되었는데, 석탄을 중심으로 탄소 순환을 진술하는 조사 연구(Clary & Wandersee, 2010)나 에너지 소비에 대한 학생들의 의사소통 기능을 평가하는 연구(Jin *et al.*, 2015) 등이 포함되었다. 탄소 순환에 대한 과학 전반에 걸친 학생들의 이해 수준, 학습 발달과정 분석 연구(Chen & Anderson, 2015; Jin & Anderson, 2012; You *et al.*, 2018) 또한 통합과학으로 포함되었다.

과학 교과 외에 가장 많은 연구가 수행된 교과 영역은 환경으로 총 10편(15.9 %)이 포함되었다. 지속가능한 발전에 대한 연구(Lindstrom & Middlecamp, 2017; Warren, 2015)와 함께 탄소 배출권(Park *et al.*, 2014) 및 탄소발자국(Kim, 2012; Kim & Hwang, 2013; Lin, 2016)을 주제로 탄소 순환에 대한 연구들이 수행되었으며, 환경 교육의 핵심으로 탄소 순환을 지정하여 이를 평가할 수 있는 문항 개발에 대한 연구(Summers *et al.*, 2001)도 포함되어 있다. 그 외, 정보 교과에서 수행된 그린 IT 교육(Jun, 2014)과 대학교 화학공학 전공에서 수행된 탄소발자국을 반영한 교육과정 운영 사례(Gallego-Schmid *et al.*, 2018)가 확인되었다.

자료 분석 결과, 과학 관련 다양한 교과 영역에서 탄소 순환 교육에 대한 연구가 수행되어 온 것을 확인할 수 있었지만, ‘물리학’ 교과 영역에서는 탄소 순환에 초점을 둔 교육 연구의 사례를 쉽게 찾아볼 수 없었다. Mohan *et al.* (2009)과 You *et al.* (2018)의 연구에서는 화학, 생명과학의 영역에서 에너지 보존 법칙과 같은 열역학의 개념을 포함한 탄소 순환을 다루고 있음을 확인할 수 있었는데, 2015 개정

Table 4. The analysis of the selected researches area in this study

	물리학	화학	생명과학	지구과학	통합과학	환경	기타	합계
연구 수	0	10	18	16	7	10	2	63
백분율(%)	0.0 %	15.9 %	28.6 %	25.4 %	11.1 %	15.9 %	3.2 %	100.0 %

교육과정의 물리학 교과와 ‘열과 에너지’ 영역의 경우 탄소 순환을 바탕으로한 에너지의 전환, 에너지의 보존 내용을 함께 다루어 볼 수 있을 것이다. 또한, 영국의 교육과정을 분석한 연구에서 Key Stage 3 (11-14세)과 Key Stage 4 (14-16세)에서 물리학의 에너지 영역을 다룰 때, 에너지 자원, 신재생 에너지 등을 함께 다루어 실생활과 관련성을 높이는 방법을 활용하고 있음을 고려할 때(King, 2014), 탄소 순환에 대한 물리학 영역의 교육 연구가 더 활발하게 진행될 필요가 있을 것이다. 아울러 최근 지구온난화가 심각한 문제로 대두되고 탄소 순환이 중요 개념으로 강조되고 있는 상황에서(IPCC, 2018), 탄소 순환의 복합적인 측면을 다루기 위해서는 과학기술적인 접근 외에도 인류의 경제활동이나 문화 활동, 여러 국가의 사회적 상황에 따른 관계 등을 다룰 필요가 있다(Kim, 2018). 따라서 다양한 인문사회 교과 영역을 복합적으로 탄소 순환과 함께 다루는 연구도 추가적으로 수행될 필요가 있을 것이다(Crawford-Brown & LaRocca, 2006).

### 라. 연구 대상 및 대상의 수준 분석

연구 대상과 그 수준에 대한 정량적 분석 결과는 Table 5와 같다. 분석된 연구들 중 많은 연구들은(총 67편 중 48편) 학생을 대상으로 수행되었다. 이를 학교급 수준으로 구분하여 확인한 결과, 해당 연구에서 학교급 수준에 대한 명확한 언급이 없는 연구를 제외하면(Krauskopf, 2010; Ricci et al., 1988; Zangori et al., 2017), 고등학교 14편, 중학교 11편, 초등학교 및 대학교가 각각 10편으로 나타나 대체로 유사한 비율로 연구가 수행되었음을 알 수 있다. 학생을 대상으로 하는 연구들은 주로 탄소 순환에 대한 학생들의 인식과 수준을 조사하거나, 탄소 순환 교육 프로그램 및 교수·학습 자료를 개발해 투입하는 연구인 것으로 분석되었다.

교사를 대상으로 하는 연구 5편의 경우, 탄소 순환 및 탄소 순환 교육에 대한 인식을 조사하였고, 주로 초등학교 교사들을 대상으로 연구가 수행되었다(Kim, 2012; Ko et al., 2004; Summers et al., 2001). 교과서 분석 연구의 경우, 국내의 7차 개정 교육과정이 반영된 고등학교 과학 교과서를 분석한 연구와(Kook, 2003), 2009 개정 교육과정이 반영된 중학교 과학 교과서를 분석한 연구를 확인할 수 있었다(Oh & Choi, 2014). 교육과정 분석에 대한 연구는 영국의 KS 3과 4 수준에 대한 과학과 교육과정에서 탄소 순환 내용을 분석한 연구가 있었다(King, 2014). 기타 연구들은 기존의 선행 연구, 전공 서적, 온라인 문서 등의 자료들을 분석하고 교육 현장에서 갖는 의의를 제시하는 연구들로 특별히 학교급을 구분하지 않고 교육 현장 전반에 대한 논의를 다루고 있었다.

탄소 순환은 물질의 순환과 에너지 흐름에 대한 시스템적 사고와 그에 대한 종합적인 이해를 필요로 하며, 물질 순환의 관점에서 탄소 원자의 이동에 대한 복잡하고 심도 있는 개념들까지 다룰 수 있어야 하므로 중학교, 고등학교 수준에서 수행된 학생을 대상으로 한 연구가 초등학교 수준에 비해 많은 것으로 판단된다. 그러나 초등학교 수준에서도 탄소 순환에 대한 연구가 적지 않게 수행된 것을 봤을 때, 기존에 수행된 횡단적 연구를 넘어서 종단적 연구를 병행하여 탄소 순환에 대한 학생들의 학습발달과정에 대한 연구를 수행할 필요가 있을 것이며, 이를 통해 교육과정에서 탄소 순환 내용을 적절하게 반영할 수 있을 것이다(Maeng et al., 2013). 한편, 교사 그리고 교과서 및 교육과정에 대한 연구는 학생을 대상으로 한 연구에 비해 그 비중이 낮게 나타났으며, 학교급에 있어서도 그 수준이 제한적으로 나타났다. 교육과정의 성공적인 운영을 통해 교육내용을 효과적으로 다루기 위해서는 이를 위해 개발된 적절한 교과서와 함께, 교육 현장에서 직접 적용하는 교사들의 관심과 노력이 매우 중요하다(Yoon et al., 2011). 따라서 추후의 연구들은 학생은 물론 교사 및 교과서와 같은 교육 매체에 대한 포괄적인 이해를 바탕으로 한 탄소 순환 교육에 대한 논의가 이루어져야 할 것이다.

## 2. 자료 분석 결과

수집된 핵심 용어는 총 181개로 교육 관련 핵심 용어는 65개(35.9%), 그리고 내용 관련 핵심 용어는 116개(64.1%)로 교육학적 측면의 내용 보다는 탄소 순환과 관련된 다양한 영역의 내용들이 다루어 졌음을 확인할 수 있었다.

### 가. 교육 관련 핵심 용어 분석

탄소 순환에 대한 교육 관련 핵심 용어 65개의 빈도 분석 결과는 Table 6과 같다. 수집된 교육 관련 핵심 용어 중 가장 높은 비율을 차지한 핵심 용어는 ‘평가’(18건, 27.3%)로 확인되었다. Brehm et al. (1986)의 광합성 및 호흡에 대한 생물학적 오개념 평가에서부터 시작된 평가에 초점을 둔 연구는 탄소 순환 교육과 관련해 학생들의 현재 상태를 점검하고 교육적 처치에 대한 변화를 확인하기 위해 최근까지도 다양한 측면에서 연구가 지속되고 있다. 평가의 방법도 다양하게 나타나는데, 많은 연구들이 탄소 순환에 대한 학생들의 서술이나 면담을 통해 수집한 학생들의 이해 수준을 루브릭을 통해 평가하는 방법을 택하고 있다(Chen & Anderson, 2015; Oh & Kim, 2014). 이러한 평가 방법은 관련 개념에 대한 학생들의 이해를 보다 체계적

Table 5. The analysis of the selected researches subjects in this study

수준	학생		교사		교과서 및 교육과정		기타 *		계
초등	10	(20.8 %)	4	(80.0 %)	0	(0.0 %)	-		14 (20.9 %)
중학	11	(22.9 %)	1	(20.0 %)	2	(66.7 %)	-		14 (20.9 %)
고등	14	(29.2 %)	0	(0.0 %)	1	(33.3 %)	-		15 (22.4 %)
대학	10	(20.8 %)	0	(0.0 %)	0	(0.0 %)	-		10 (14.9 %)
기타	3	(6.3 %)	0	(0.0 %)	0	(0.0 %)	11	(100.0 %)	14 (20.9 %)
계	48	(100.0 %)	5	(100.0 %)	3	(100.0 %)	11	(100.0 %)	67 (100.0 %)

\* 기타 분류에는 초·중·고에 대한 구체적인 구분이 없는 연구 문헌들이 포함되기 때문에 구분하지 않음.

이고 깊이 있게 조사할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 많은 수의 학생들을 평가하기 힘들고 평가 결과를 일반화하기에 다소 어려운 측면이 있어, 이를 보완하기 위해 객관식 문항을 포함하여 평가에 활용하는 연구들도 일부 수행되었다(Hartley *et al.*, 2011; You *et al.*, 2018). 교육 평가는 학생의 상태를 진단하고 학습 결과를 확인하여 교육 목표 도달 정도를 확인할 수 있도록 해 주기 때문에(Gardner *et al.*, 2008), 탄소 순환 교육의 질적 발전을 위해서는 보다 체계적이고 효과적인 평가 방법의 개발이 요구될 것이다.

‘프로그램’을 핵심 용어로 포함하는 연구는 13건(19.7%)으로, 이들은 다시 학생들의 ‘과학에 대한 이해 증진을 위하여 탄소 순환을 활용한 연구들’과 ‘환경 문제에 대한 이해와 이를 해결하기 위하여 탄소 순환을 활용하는 연구들’로 구분된다. 과학에 대한 이해 증진을 위하여 탄소 순환을 활용한 교육 프로그램 연구로 Gudovitch & Orion (2001), Savasci (2014), 그리고 Lee & Kwon (2008)이 수행한 지구 시스템적 접근을 활용한 연구들을 예로 들 수 있다. 연구자들은 연구의 일환으로 개발된 활동 중심의 교육 프로그램이 학생들의 전 지구적인 탄소 순환에 대한 이해를 증진시킬 수 있고, 다양한 활동을 통해 학생 스스로 지구 시스템 속에서 인간의 역할을 지각하는데 도움이 되었다고 보고하였다(Gudovitch & Orion, 2001; Lee & Kwon, 2008; Savasci, 2014). 특히, Lee & Kwon (2008)의 연구에서는 프로그램에 참여한 절반이상의 학생들이 지구 환경의 구성요소와 각 권역들과 관련된 개념의 학습에도 도움이 되었다고 응답하여 탄소 순환 자체의 내용을 넘어서 지구과학 전반의 학습에서도 주요한 요소가 될 수 있음을 보여주었다.

다음으로 생명과학 영역에서 수행된 Hartley *et al.* (2011)의 연구에서는 생물학 전공의 대학생 수준에서 미시적인 관점을 포함하는 탄소 순환 교육 framework을 개발하고 운영하였다. 그 결과 대학생임에도 불구하고 많은 학생들이 가지적으로 보이지 않는 영역(분자·원자 수준, 에너지 흐름 등)에서 다양한 오개념을 가지고 있었다. 또한 개발된 프로그램을 통해 이를 개선할 수 있음을 제시하여 학생들의 능력을 고려한 체계적인 교육 프로그램에 대한 논의를 수행하였다. 그 밖에도, 탄소 순환을 중심으로 물질의 순환과 에너지의 흐름을 다루어 학생들의 시스템 사고 능력 향상을 위한 교육 프로그램에 대한 연구(Brehm *et al.*, 1986), 해양 산성화에 대한 탄소 순환의 화학적인 적용을 보여준 교육 모듈 연구(Joyce *et al.*, 2011) 등이 수행되었지만, 현장에 적용하여 검증하는 과정을 거치지지는 않았다.

문헌 분석 결과를 보면, 탄소 순환을 적용한 교육 프로그램의 효과와 중요성에 비해 그에 대한 체계적인 개발과 타당한 검증을 바탕으로 한 연구들이 여전히 미흡한 실정이고, 추후 관련 연구에 대한 연구자들의 높은 관심이 요구된다. 지구 환경 문제에 대한 이해와 문제를

해결하기 위하여 탄소 순환을 활용한 교육 프로그램의 경우, 탄소 순환과 관련성이 깊은 ‘지구온난화’ 및 ‘기후 변화’에 대해 주로 다루고 있다(Warren, 2015; Lee & Lee, 2014). 이 연구에서 개발된 프로그램들은 탄소 순환에 대한 과학적 개념의 이해를 바탕으로 지구 환경 문제 상황을 이해하고, 이를 해결해 나갈 수 있는 능력과 자세를 함양할 수 있도록 내용이 구성되어있다. 이러한 구성은 학생들이 인간의 활동과 지구온난화에 대한 관련성을 바탕으로 기후 변화를 대비하는 자세를 기를 수 있도록 도와준다. 그 밖에도, ‘바이오 연료’(Krauskopf, 2010), ‘전기 에너지’(Kim, 2012), ‘공병 재활용’(Kim & Hwang, 2013), ‘탄소발자국’(Lin, 2016)과 같이 특정한 주제를 중심으로 탄소의 순환에 대한 학습과 함께 실생활 속에서 경험을 통해 실천할 수 있는 사례들을 다루어 학생들의 지구 환경 문제에 대한 이해와 그 해결방안을 고민을 할 수 있도록 구성된 프로그램들도 존재한다. 특히 Lin (2016)의 연구에서는 최근 학생들의 인터넷 접근성이 높은 것을 고려하여 실생활 속에서 탄소발자국 절감을 실천할 수 있는 인터넷 프로그램을 개발하고 학생들에게 활용할 수 있는 교육 프로그램을 제공하여 교육적 효과는 물론 학생들의 지구 환경에 대한 인식도 높일 수 있음을 잘 나타내었다. Krauskopf (2010)는 이러한 프로그램의 효과적인 구성과 교육 현장으로의 적용은 학생들의 과학 지식에 대한 학습은 물론이고 지속가능한 발전에 대한 논의를 통해 지구 환경 문제에 대한 깊이 있는 이해를 도모하며, 기술/공학적인 해결책과 같은 구체적인 해결 방안에 대한 고려를 가능하게 한다고 보고하였다.

실험에 중점을 둔 탄소 순환에 대한 교육 연구는 10건(15.2%)으로 상대적으로 많이 다루어졌음을 알 수 있었다. 실험에 대한 연구들은 실제 실험도구를 활용하여 변인 통제 및 조작 과정을 거쳐 결과를 도출하는 실험들과 이를 수업에 활용하는 연구도 있었지만, 보다 거시적인 관점에서 전 지구적인 탄소 순환에 대한 논의를 위해 자료조사 또는 분석을 위한 연구를 교육적 관점에서 다루는 경우도 확인되었다. 실제 실험도구를 활용하고 변인 통제 및 조작 과정을 거쳐 결과와 결론을 도출하는 실험에 대한 연구들은 생명과학, 화학과 같이 기초과학의 측면에서 다를 수 있는 부분을 중점적으로 언급하고 있었다. Cho (1995)과 Ko *et al.* (2004)의 연구에서는 화학 영역에서 이산화 탄소가 발생하는 과정, 이산화 탄소의 특성 등을 다룰 수 있는 실험을 제시하고, 학생들이 이러한 실험을 통해 학습할 수 있는 개념들, 실험의 개선을 위한 제언을 통하여 이산화 탄소의 이해를 높이고자 하였다.

다음으로 생명과학의 관점에서 탄소 순환과 관련해 중요한 개념으로 다루어지는 광합성과 호흡에 대해서도 다수의 실험이 다루어졌다. 호흡에 관해 Schlenker *et al.* (2007)의 연구에서는 5E 교수·학습

Table 6. Results of education key concepts analysis

교육 관련 핵심 용어	빈도	비율(%)	교육 관련 핵심 용어	빈도	비율(%)
평가	18	27.3	의사소통	2	3.0
프로그램	13	19.7	공간지각능력	1	1.5
실험	10	15.2	교사 인식	1	1.5
오개념	9	13.6	순환학습	1	1.5
학습발달과정	5	7.6	정신모형	1	1.5
모델링	4	6.1	학제 간 이해	1	1.5



모형(Engage - Explore - Explain - Extend - Evaluate)을 활용하여 동물(인간)의 날숨에 포함된 이산화 탄소를 확인하고 그 특성을 다루는 수업 모듈을 개발하여 실제 학생들에게 적용한 결과를 제시하였다. 비록 눈에 보이지 않는 개념에 대한 학습이지만 학생들은 실험을 통한 과학적 개념 학습에 대한 상당한 흥미와 높은 이해를 보여주었음을 제시하였다. 또한 광합성에 대한 Drouin *et al.* (2006)의 연구에서는 해조류(*Closterium algae*)의 성장을 대기 중 이산화 탄소와 관련지어 직접 관찰한 내용을 바탕으로 기권과 수권, 생물권 사이의 탄소 순환에 대한 학생들의 진술을 분석하였다. Wrigley (2012)의 연구에서는 광합성 실험과 관련하여 과거의 잘못된 실험 결과 사례(Baptist von Helmont, 1662)의 연구 결과 ‘식물은 물로 만들어진다’는 개념을 바탕으로 학교 현장에서 광합성 실험의 중요성, 주의사항에 대한 논의를 제시하였다.

지구 시스템적 관점에서는 영구 동토의 해빙과 관련한 Taterka & Cory (2016)와 Antonarakis (2018)의 연구가 수행되었는데, Taterka & Cory (2016)의 연구에서는 탄소 순환의 관점에서 지구온난화의 진행에 따른 영구동토의 해빙과 이로 인한 기권의 탄소 변화에 대한 실험을 활용한 수업 모듈을 구성하였고, Antonarakis (2018)의 연구에서는 숲을 중심으로 물 순환과 탄소 순환의 관련성 및 영향에 대해 지구 시스템적 관점으로 소개하고 학생들이 직접 수행할 수 있는 실험 활동을 제안하였다. 특히, Taterka & Cory (2016)의 연구는 시스템적 관점으로 지구온난화가 탄소 순환에 미치는 영향을 논하는 과정에서 흔히 다루어지지 않았던 영구동토를 그 대상으로 한다는 측면에서 교육 참고 자료로서 그 의미가 크다고 할 수 있다.

실험과 관련한 일부 연구들은 학생들의 직접적인 조작을 통한 실험 활동에 중점을 두기 보다는 자료조사 및 분석을 바탕으로 한 전 지구적인 탄소 순환에 대한 학생들의 탐구 활동을 다루는 경우도 있었다. Asshoff *et al.* (2010)의 연구에서는 ‘Swiss Canopy Crane 프로젝트’의 실험 결과 자료를 교육 현장에 활용하여 탄소 순환에서 식물과 인간이 미치는 영향을 탐구할 수 있는 학습 자료를 구성하고자 하였다. 이는 학생들의 탄소 순환에 대한 이해를 높이기 위해 비교적 장시간, 큰 규모의 자료를 통해서 보다 객관적이고 실제적인 정보를 활용한 좋은 예로 볼 수 있다. 그리고 EU의 지원으로 과학과 기후 변화에 초점을 두고 2008년부터 2010년까지 수행된 ‘Carbo Schools 프로젝트2)’에 참여한 유럽 7개국 100여개 중등학교 학생들을 대상으로 한 Dijkstra & Goedhart (2011)의 연구에서도 실제 연구자와 함께 데이터 수집 및 분석을 통한 이산화 탄소와 기후 변화에 대한 연구가 학생들의 과학 연구에 대한 흥미와 관심, 지구 환경에 대한 관심을 높이는데 도움을 주었으며 학생들의 진로 선택에도 영향을 미친 것으로 확인되었다. 고등학생을 대상으로 한 Clary & Wandersee (2015)의 연구는 기권의 이산화 탄소 변화와 관련하여 인간의 활동, 화산 분화 등과

같은 실제 자료를 조사하고 이를 분석하는 활동이 학생들의 탄소 순환에 대한 이해를 높이고 지구 환경 문제를 자신의 문제로 받아들여 해결 방안을 고민하는데 긍정적인 역할을 한다는 것을 증명하였다.

‘프로그램’이나 ‘실험’과 관련된 연구들에서 알 수 있듯이, 실험에 관련된 과학 개념들의 학습과 실제 문제 상황과 연계된 문제해결 능력의 신장을 위해서는 학생들이 직접 실험에 참여하거나 관련 연구를 수행하는 활동이 중요하며, 특히 탄소 순환과 같이 다양한 개념이 복합적으로 관련된 시스템적 상황을 이해하는데 있어서는 실험을 활용하는 것이 효과적인 방법임을 확인할 수 있었다(Clary & Wandersee, 2015; Dijkstra & Goedhart, 2011). 따라서 추후 탄소 순환 연구 및 실험 관련 문제해결을 위한 효과적인 교수·학습 방법을 고려할 때, 그와 관련된 실험 활동이나 과학적 탐구 활동을 적절히 활용할 필요가 있을 것이다.

분석된 연구들 중에서 ‘오개념’을 다루는 연구는 9건(13.6%)으로 확인되었다. 탄소 순환은 지구 환경과 관련한 중요한 과학적 개념이지만, 비가시적인 수준을 포함하는 영역으로서 다른 형태의 지구 환경 문제와 혼동하거나 오개념을 가지는 경우가 많이 있다. 가장 빈번하게 보고되는 탄소 순환에 대한 오개념은 지구온난화 및 기후 변화에 관련된 내용이다. 예를 들어, ‘오존층 파괴가 지구온난화에 영향을 미친다’, ‘온실효과에 이산화 탄소의 기여도가 가장 크다’와 같은 오개념은 지금까지 여러 연구에서 보고되었는데, 학생들이 접할 수 있는 대중 매체들뿐만 아니라 교과서와 같은 교육 자료를 통해서도 오개념이 형성될 수 있음을 강조하고 있다(Kook, 2003; Gudovitch & Orion, 2001; Summers *et al.*, 2001). 또한, 지구 환경에 관련된 오개념들을 지구 시스템적 관점을 적용하여 해석한 연구들도 존재한다. 이 연구들은 ‘대기 중에 탄소가 가장 많이 존재한다’와 같은 오개념이 시스템적 관점의 부족과 눈에 보이지 않는 현상에 대한 이해 부족으로 나타나고 있음을 강조하였다(Gudovitch & Orion, 2001; Zangori *et al.*, 2017).

생물 영역의 ‘광합성’ 실험과 관련해서 식물(생명체)의 몸체를 구성하는 물질의 기원과 생성과정에 대해 ‘식물은 물 흡수로 성장한다’, ‘식물은 토양 속 광물 성분을 흡수하여 몸체를 구성한다’와 같은 이해를 오개념으로 지적하고 있다(Brehm *et al.*, 1986; Wrigley, 2012). 그리고 화학 영역에서의 ‘산화·환원 반응’ 실험에서 이산화 탄소에 대한 이해 부족 및 부적절한 실험 설계 등으로 인해 ‘이산화 탄소는 냄새가 난다’, ‘이산화 탄소는 색이 있다’와 같은 오개념을 학생들이 가질 수 있음을 제시하였다(Ko *et al.*, 2004; Cho, 1995). 연구자들은 오개념의 원인에 대해 학생들이 접할 수 있는 정보들의 부정확성을 언급하고 있으며, 실제 교과서에서 제시되는 잘못된 내용들을 지적하기도 하였다. 따라서 학생들이 가지고 있는 오개념을 면밀히 파악하고 그것을 과학적 개념으로 치환하는데 도움을 줄 수 있도록 학생들의 학습발달과정을 고려한 적절한 교육 자료의 개발과 그에 대한 지속적인 연구가 필요할 것이다.

## 나. 탄소 순환 내용 관련 핵심 용어 분석

탄소 순환 교육 연구들에서 수집된 내용 관련 핵심 용어 116개의 빈도 분석 결과는 Table 7과 같다. 탄소 순환 교육을 위한 연구에서 가장 많이 다루어진 내용은 ‘기후 변화(지구온난화)’에 대한 내용으로

1) Swiss Canopy Crane 프로젝트는 스위스에 위치한 숲을 대상으로 2001년부터 2008년까지 다섯 층으로 구성된 14그루 나무들에 대하여, 2060년 도달할 것으로 예측되는 이산화 탄소 농도를 식물 주변 대기에 반영하여 나무에서 나타나는 변화와 탄소플럭스를 확인하는 연구이다. 초기 이산화 탄소농도를 370ppm에서 연간 2ppm 증가시켜 최종 540ppm까지 증가시켜 연구가 수행되었다(Asshoff *et al.*, 2010).

2) Carbo Schools 프로젝트는 EU의 지원을 바탕으로 2008년부터 2010년까지 유럽 내 100여개의 학교가 참여한 과학 프로젝트로, 탄소 순환을 연구하는 과학자 1인 이상과 참여 학생들이 협력하여 온실가스의 영향, 기후 변화, 이산화 탄소 방출 등과 관련된 실험을 직접 수행하도록 구성되었다(Dijkstra & Goedhart, 2011).

Table 7. Results of contents key concepts analysis

내용 관련 핵심 용어	빈도	비율	내용 관련 핵심 용어	빈도	비율
기후 변화	17	14.0 %	해조류	2	1.7 %
시스템	13	10.7 %	탄소 플럭스	2	1.7 %
광합성	8	6.6 %	EU 프로젝트	1	0.8 %
환경 보호 실천	7	5.8 %	과학 관련 사회적 쟁점(SSI)	1	0.8 %
지구계	6	5.0 %	기술권(Technosphere)	1	0.8 %
탄소발자국	6	5.0 %	광물	1	0.8 %
지속 가능성	5	4.1 %	그린IT	1	0.8 %
화석 연료	5	4.1 %	미생물	1	0.8 %
물질 순환	4	3.3 %	바이오 연료	1	0.8 %
에너지 흐름	4	3.3 %	생태계	1	0.8 %
호흡	4	3.3 %	식물 성장	1	0.8 %
오존층 파괴	3	2.5 %	암석 순환	1	0.8 %
온실 효과	3	2.5 %	영구 동토	1	0.8 %
생애 전주기 평가(LCA)	2	1.7 %	이산화 탄소 배출권	1	0.8 %
먹이 사슬	2	1.7 %	재활용	1	0.8 %
물 순환	2	1.7 %	질소 순환	1	0.8 %
산화 환원	2	1.7 %	해양 석회화 생물	1	0.8 %
삼림 파괴	2	1.7 %	해양 산성화	1	0.8 %
에너지 소비	2	1.7 %	화산	1	0.8 %
전기 에너지	2	1.7 %	황 순환	1	0.8 %

총 17건(14.0%)이 확인되었다. 사회·환경 이슈(SEI) 중 하나인 지속가능성의 측면에서 강조되는 기후 변화와 지구온난화에 대한 내용은 탄소 순환을 비롯한 교육 영역 전반에서 그 중요성이 더욱 더 강조되고 있으며(Monroe *et al.*, 2016; Zangori *et al.*, 2017), 이는 기후 변화 및 지구온난화에 대한 교사, 학생 및 학부모들의 인식 조사에서도 잘 확인할 수 있다(Gudovitch & Orion, 2001; Lee & Lee, 2014).

실제 많은 연구들에서 학생들의 기후 변화와 관련된 이해가 다소 부족한 것을 지적하고 있으며, 탄소 순환에 대한 이해 부족으로 인한 다양한 오개념이 존재하고 있음을 보고하였다(Gudovitch & Orion, 2001; Lee *et al.*, 2013). 이와 관련하여 Oh & Choi (2014)의 2009 개정 중학교 과학 교과서 분석 연구에서는 기후 변화와 탄소 순환에 대한 내용이 불충분하거나 특정 영역에 편중되어 있음을 지적하며 다양한 분야와 관점에서 폭넓게 교육할 필요가 있음을 제안하였다. 또한 이와 같은 교육 현장의 인식을 개선하기 위하여 화석연료(Clary & Wandersee, 2010), 탄소발자국(Lee & Lee, 2014), 영구 동토의 해빙(Taterka & Cory, 2016), 삼림 파괴(Antonarakis, 2018), 화산(Clary & Wandersee, 2015) 등과 같은 특정 주제를 중심으로 하는 교육 프로그램들이 개발되어 그 효과 검증이 수행되었고, 더 나아가 탄소 순환 전체에 대한 체계적인 이해를 높여 기후 변화에 대한 과학적 이해, 그리고 지구 환경 문제에 대한 경각심을 높일 수 있는 교육 프로그램의 개발도 활발히 수행되고 있음을 확인할 수 있었다.

학생들이 앞으로 마주하게 될 기후 변화는 현재 활발하게 진행 중인 사회·환경 이슈이기 때문에 실제 과학자들이 수행한 다양한 연구 자료를 바탕으로 기후 변화에 대한 본질적인 내용을 다루는 실천적인 현장 교육이 시행되고 있다(Asshoff *et al.*, 2010; Dijkstra & Goedhart, 2011). 특히 IPCC 평가 보고서(IPCC, 2014)와 같은 국제적인 전문가 집단의 자료를 수업 활동에 적용하는 시도를 확인할 수

있었다(Seo *et al.*, 2014; Oh & Choi, 2014). 또한 Crawford-Brown & LaRocca (2006)의 연구에서는 학생들이 어려워 할 수 있는 전문적인 자료를 학생들의 수준을 고려한 수치 모형으로 만들어 기후 변화에 따른 미래 지구 환경을 예측하도록 하는 비교적 높은 수준의 교육 프로그램이 적용되었다. 이와 같이 기후 변화의 측면에서 탄소 순환을 적용한 교육이 다양하게 개발되고 있는 상황에서 이를 학생들에게 보다 체계적으로 적용하고 평가해 그 효과성을 체계적으로 정리하는 연구가 필요할 것이다.

다음으로 많이 다루어진 주제는 ‘시스템(시스템 사고)’과 관련된 내용으로 13건(10.7%)의 연구를 확인할 수 있었다. 탄소 순환은 기권(CO<sub>2</sub>), 수권(CO<sub>2</sub>, HCO<sup>3-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 등의 용존 탄소 및 이온), 지권(화석 연료, 석회암), 생물권(유기물, 생물의 골격)과 같은 지구시스템 주요 권역에서 다양한 형태로 존재하고 있으며, 화산 폭발, 광합성, 호흡, 용해, 연소 등과 같은 다양한 과학적 과정을 통해 활발히 이동하여 역동적인 지구 시스템의 일부를 이루고 있다(Lee, 2003). 이미 IPCC와 같은 전문가 집단의 수준에서 이러한 탄소 순환에 대한 정량적인 모형을 구현하고 이를 바탕으로 미래 상황을 추론하는 시스템적 논의가 활발히 진행되고 있다(IPCC, 1995, 2001). Crawford-Brown & LaRocca (2006)의 연구에서는 이러한 탄소 순환 모형을 바탕으로 일반 학생들의 수준을 고려한 교육용 모형 개발을 수행하였는데, 연구를 통해 이들은 지구 시스템 하위 권역들 사이의 물질 순환과 에너지 흐름을 정량적 수치, 그리고 수식으로 정리함과 동시에 역동적인 상호작용을 강조하며 모델링에 대한 시스템적 접근이 중요성을 강조하였다. 또한, 이를 활용한 학생들은 기후 변화와 관련된 탄소 순환의 수학 및 과학적 내용에 대해 높은 이해도를 보였고, 탄소 순환과 관련된 문제를 잠재적으로 해결할 수 있는 환경 정책을 논의하는데 해당 교육이 도움 되었음을 확인하였다.

IPCC (2001)의 탄소 순환 모형을 활용한 국내의 연구(Seo *et al.*, 2014)에서는 기후 변화의 원인에 대한 이해, 미래 지구 환경 변화 예측 및 해결책 논의를 위한 검사 도구를 개발하였다. 이들은 탄소 순환에서 인류와 밀접한 관련을 가지는 산업혁명 및 화석 연료 연소와 관련한 고등학생들의 이해 분석 결과, 많은 학생들의 탄소 순환에서 질량 보존에 대한 이해가 부족함을 확인하였다. 해당 연구에서 연구자들은 "...탄소의 질량 보존과 관련한 학습에서는 탄소의 배출 및 자연적으로 순수하게 제거되는 양에 따른 구성 요소들 간 상호 맥락의 인과 관계를 파악해야 할 필요가 있다. ... (중략) ... 탄소에 대한 각 요소 간 상호작용과 이 작용들이 탄소 순환에 미치는 피드백 효과를 고려한 사고의 적용이 필요할 것"(p. 200) 이라고 언급하며, 탄소 순환 교육에 있어서 시스템적 관점의 중요성을 다시 한 번 강조하고 있다. 탄소 순환에 대한 학생들의 이해를 다루고 있는 다른 연구들(Düsing *et al.*, 2018; Oh & Kim, 2014)에서도 탄소 순환에 대한 학생들의 과학적 이해가 부족함을 지적하고 있는데, 이러한 상황을 개선하기 위해 연구자들은 탄소 순환 교육을 위해 물질의 순환과 에너지의 흐름 측면에서 시스템 사고가 체계적으로 적용될 필요가 있음을 제안하고 있다. 이와 관련하여 고등사고능력의 한 유형인 시스템 사고를 다루는 과거의 연구들에서 일부 탄소 순환을 주제로 한 검사를 수행한 사례들이 있는데(Lee & Kwon, 2008; Lee *et al.*, 2013), 그 결과는 학생들의 시스템 사고 수준이 비교적 낮고, 탄소 순환에 대한 이해가 부족함을 보여주고 있다. 그와 더불어, 공간 지각 능력과 탄소 순환에 대한 이해의 관련성에 대한 Lee *et al.* (2017)의 연구에서는 "... 시간적, 공간적 측면에서 복잡한 시스템의 특징을 갖고 있는 탄소 순환...(p. 321)"을 언급하며 시스템 사고 능력과 탄소 순환의 이해가 밀접한 연관이 있음을 언급하였다. Zangori & Koontz (2017)의 탄소 순환과 식물학에 대한 연구와 Zangori *et al.* (2017)의 탄소 순환과 지구온난화에 대한 연구에서는 이러한 시스템적 관점을 반영한 수업 처치를 통해 학생들의 시스템 사고 능력 및 탄소 순환의 이해가 증가되었음을 보고하며, 추후 연구에서 탄소 순환에 시스템 사고를 반영한 교육 프로그램 개발 및 적용이 확대될 필요가 있음을 제안하였다.

그리고 '광합성' 개념을 핵심 내용 키워드로 한 연구가 총 8건(6.6%)으로 세 번째로 그 빈도가 높은 것으로 나타났다. 탄소 순환에 있어 광합성은 기권의 이산화 탄소를 생물권으로 이동시켜 생태계를 유지할 수 있는 중요한 생물학적 과정으로(Drouin *et al.*, 2006), 초등학교에서부터 교사까지 다양한 영역에서 폭넓게 다루어지고 있는 것을 확인할 수 있었다. Swant (1970)의 연구에서는 초등학생을 대상으로 광합성을 다루면서 눈에 보이지 않는 산소, 이산화 탄소, 수증기와 같은 분자 개념을 의인화하여 쉽게 접근하고 이해할 수 있도록 안내하고 있다. 하지만 대학생을 대상으로 광합성에 대한 연구를 수행한 Brehm *et al.*(1986) 및 Hartley *et al.* (2011)의 연구에서는 실생활 경험 등을 통해 학습한 광합성에 대한 오개념이 대학생 수준에서까지 유지되고 있음을 지적하였다. Wrigley (2012)는 여러 오개념 중에서 과거 Baptist van Helmont (1662)가 주장한 '물이 식물의 몸체를 구성하는 가장 중요한 물질이다'와 같은 실험을 통해서 발생할 수 있는 오개념을 지적하며, 광합성에 대해 원자나 분자 수준에서의 깊이 있는 이해와 체계적인 실험을 포함하는 접근의 필요성을 제안하였다. 중학생을 대상으로 한 수중 식물(조류)의 광합성 실험에 대한 연구

(Drouin *et al.*, 2006)는 체계적인 과학 실험을 통해 광합성에 대한 이해가 증진될 수 있음을 잘 보여준다. 특히, 이 연구는 수중 식물을 활용하여 기권과 수권의 상호작용에 대해 다루고 있어 학생들이 탄소 순환의 측면에서 광합성의 역할을 이해하도록 한다는 데 의의가 있다. 또한 대학생을 대상으로 한 연구들은 광합성 내용과 함께 탄소 순환을 시스템적 관점으로 다루고 있는데, 많은 대학생들이 시스템 사고 능력의 부재로 탄소 순환은 물론 에너지 보존에 대한 개념을 잘 다루고 있지 못함을 지적하였다(Brehm *et al.*, 1986; Hartley *et al.*, 2011).

Antonarakis (2018)과 Zangori & Koontz (2017)의 연구에서는 광합성을 포함하는 생물학적 개념을 기후 변화 및 탄소 순환과 연계하여 논의하고 교육 프로그램을 구성하였는데, Zangori & Koontz (2017)의 연구에서는 이를 대학생에게 적용하여 그 긍정적 효과를 확인하였다. 이러한 긍정적 효과들은 탄소 순환 및 기후 변화에 대한 더욱더 체계적인 연구와 접근의 필요성을 뒷받침 한다. Asshoff *et al.* (2010)의 연구에서는 실제 대기 중 이산화 탄소 농도 변화와 식물의 광합성과 생장을 연구하는 'Swiss Canopy Crane 프로젝트'와 관련하여 광합성 및 식물의 생장을 지구온난화와 관련하여 다룰 것을 제안하였다. 또한 이 연구에서는 광합성과 같이 실생활과 관련성이 높은 개념(현상)은 지식 수준이 낮은 학습자에게도 탄소 순환을 이해시키는 데 효과적인 것으로 나타났다. 그러므로 이러한 개념이나 현상을 활용한 교육에 대해 연구자들의 관심이 더욱 요구될 것이다.

기후 변화에 대한 관심이 높아짐에 따라서 탄소 순환 교육과 관련하여 2012년 이후부터는 환경 보호를 위한 실천적 측면에 대한 연구가 점차 증가하고 있다(총 7건, 5.8%). 이 연구에서는 탄소 순환에 대해 과학적 개념과 내용적인 측면을 강조하기 보다는 현재 강조되고 있는 환경 이슈에서 탄소 순환의 의미를 설명하고, 이를 생활 속에서 실천할 수 있는 환경 소양을 강조하고 있다. Kim (2012)과 Kim & Hwang (2013)의 연구에서는 초등학생을 대상으로 각각 '전기 에너지'와 '재활용'에 대한 교육 프로그램을 개발하고 직접 생활 속에서 실천하는 방안들을 다루며, 구체적인 탄소 순환을 학습하기 보다는 인류의 에너지와 자원의 사용 과정에서 발생할 수 있는 탄소 순환의 영향을 간접적으로 체험하고 지구 환경 문제를 해결할 수 있는 교육적 계기를 마련하고 있다. 반면 '전기 에너지' 또는 '재활용'과 같은 구체적인 주제를 다루는 연구와는 달리, 2013년 이후의 연구들에서는 '탄소발자국'이라는 포괄적인 주제를 바탕으로 환경 보호를 위한 다양한 실천적 방법을 고려하고 있다. 구체적으로, Lin (2016)의 연구에서는 탄소발자국을 관리할 수 있는 인터넷 프로그램을 직접 개발하여 학생들의 생활 속에서의 실천을 강조하였고 실제 에너지 절약에 있어서 긍정적인 효과를 확인하였다. 또한 Lee & Lee (2014)의 연구에서는 탄소발자국과 함께 푸드 마일리지 개념을 적용하여 이산화 탄소에 의한 온실효과와 인류 활동으로 인해 발생하는 탄소 순환의 변화를 다루어, 이러한 교육이 환경 보호를 위한 학생들의 실천적 의지의 향상을 위해 활용될 수 있음을 제시 하였다.

그 밖에도 탄소 순환 교육의 측면에서 환경 보호 실천을 위한 지역 환경자원을 활용하는 사례도 확인되었다. Warren (2015)의 연구에서는 초등학생을 대상으로 특정 지역의 자원을 활용하여 토양, 임업, 방목, 수산, 천연자원, 야생 동물과 같은 지역 자연 환경에 대한 이해와 벌목, 수질, 화재 등과 같은 인간의 영향을 포함 투어 프로그램을 운영하였다. 이를 통해 학생들에게 직접 자연 속에서 탄소 순환이

이루어지는 방법을 관찰하고 그룹 활동에 참여하여 지속가능성에 대한 이해를 높일 수 있는 기회를 제공하였다. Lindstrom & Middlecamp (2017)와 Gallego-Schmid *et al.* (2018)의 연구에서는 대학 캠퍼스에서 찾을 수 있는 자원을 활용하여 전공 영역과 탄소발자국을 포함하는 환경 영역을 접목한 교육과정을 제시하고 실제 운영을 통해 대학생들의 탄소 순환을 포함하는 기후 변화에 대한 이해를 높이는 한편, 대학 캠퍼스 내에서 환경 보호에 대한 관심을 높이고 직접 실천할 수 있는 계기를 제공하였다. 특히, Gallego-Schmid *et al.* (2018)는 화학공학 내용과 탄소발자국을 연계한 교육이 학생들의 진로 선택과 고용 가능성에 긍정적인 역할을 할 것으로 전망하며 이러한 통합적 교육의 중요성을 강조하였다. 기존의 연구들에서 확인한 바와 같이 실생활 속에서 환경 보호를 직접 실천할 수 있는 방안의 제공은 학생들로 하여금 환경 보호에 대한 의식 개선과 동기 증진에 도움이 되며 탄소 순환과 같은 과학적 배경지식을 수반하는 경우 그 효과가 더 커질 수 있음을 확인할 수 있다. 따라서 더욱 체계적이고 지속적으로 탄소 순환을 포함한 환경 보호를 위한 실천적 교육기회가 제공될 필요가 있을 것이다.

#### IV. 결론 및 제언

이 연구의 주요 목적은 탄소 순환 교육에 대한 국내외 연구 동향을 분석하여, 탄소 순환 교육의 가치와 방향을 제시하는데 있다. 이를 위해 ‘탄소 순환 교육’과 관련하여 국내외 52편의 학술 연구들을 대상으로 분석하였다. 이 연구의 결과에 따른 결론과 제언을 종합하여 정리하면 다음과 같다.

첫째, 학생들을 대상으로 탄소 순환 교육 프로그램을 개발하는 연구는 다수 수행되었지만, 개발을 위한 이론적이고 실제적인 검증 결과를 다루고 있는 연구는 부족한 것으로 나타났다. 분석된 연구에서는 이론적 근거가 부족한 교수·학습 자료의 개발과 일회성 적용에 초점을 두고 있다. 그러나 보다 개선된 탄소 순환 교육을 위해 체계적인 교수·학습 모형을 제시하거나 효과적인 평가 도구를 개발하여, 이를 기반으로 체계적인 적용을 통한 검증이 필요할 것으로 사료된다. 과학 교육의 내용적 측면에서 그 적용 범위가 넓은 탄소 순환 개념의 특성을 고려하면, 학생들의 인식이나 수준을 일괄적으로 평가할 수 있는 도구를 개발하기란 쉬운 일이 아닐 것이다. 그러나 체계적인 탄소 순환에 대한 학습을 위해 학생들의 인식과 수준을 정확하게 측정할 수 있는 도구는 필요할 것이다. 따라서 추후 연구에서는 기존의 연구들을 바탕으로 탄소 순환의 특성을 반영한 타당한 검사 도구의 개발이 요구되며, 연구자들은 이를 바탕으로 탄소 순환의 내용적 특성과 학생의 수준을 균형적으로 반영한 교수·학습 자료의 개발에 관심을 가져야 할 것이다.

둘째, 교과 영역에 대한 분석 결과를 통해 생명과학과 지구과학 영역에서 탄소 순환이 많이 다루어져 왔으며 물리학, 화학, 그리고 환경 영역에서는 상대적으로 적게 다루어졌음을 알 수 있었다. 실제 분석 연구들에서 물리학 관련 개념들이 탄소 순환과 함께 다루어지고 있다는 것을 확인하였지만, 물리학 영역에서 체계적으로 수행된 연구는 찾아볼 수 없었다. 지구 시스템 내에서 탄소와 탄소 순환의 역할을 이해하는데 특정 교과에 편중된 교육은 학생들에게 편향된 인식을 심어줄 수 있으며, 균형적인 학습기회의 제공에 부정적인 영향을 미

칠 수 있을 것이다. 이러한 편중된 연구 경향은 통합적이고 융합적인 사고를 지향하는 최근 과학 교육 방향에도 부합하지 않는다. 따라서 탄소 순환의 물리학적, 화학적 및 환경적 측면을 고려한 추가적인 연구가 요구되며, 이러한 연구 결과들은 학생들에게 탄소 순환에 대한 균형적인 교육 기회를 제공하는데 반영되어야 할 것이다.

셋째, 탄소 순환 교육과 관련된 선행 연구들이 대부분 학생을 대상으로 수행되었고, 모든 학교 급에서 다루고 있음을 확인하였다. 그에 비해, 교사와 교과서 및 교육과정에 대한 연구는 매우 낮은 비율을 차지하고 있다. 교육의 중요한 요소는 자료와 학생만으로 구성되는 것이 아니다. 그러므로 학생의 수준을 정밀하게 분석하고, 그것을 반영한 효과적인 학습을 위한 프로그램을 개발하더라도, 학습 내용과 학생들의 학습을 연결하는 교사에 대한 연구가 수행되지 않는다면 교육의 효과를 극대화시키기 어려울 것이다. 또한, 학습 내용의 깊이와 범위, 그리고 내용의 체계적인 구성을 위한 기준이 되는 교육과정과 실질적인 현장 교육의 자료가 되는 교과서에 대한 연구가 부족한 것으로 나타났다. 따라서 학생들의 인식과 수준을 분석하고 프로그램을 적용하여 검증하는 연구 이외에 교사, 교육과정, 그리고 교과서 등을 대상으로 한 연구에 초점을 맞추어 교사의 탄소 순환에 대한 교수·학습 활동에 실질적으로 기여할 수 있는 연구의 수행이 요구된다.

넷째, 선행 연구들은 평가, 프로그램, 오개념 등과 관련된 연구 내용에 초점을 두고 수행된 경향이 나타난다. 이러한 결과는 탄소 순환 교육을 위해 학생들이 가지고 있는 기존의 개념 수준을 파악하고 그것을 개선하기 위한 노력이 비교적 많이 이루어 졌음을 의미한다. 그러나 교수·학습 과정에 전략적으로 활용될 수 있는 학습발달과정, 교수·학습 모형의 개발 및 적용, 평가 등과 같은 교수·학습 방법에 중점을 둔 연구는 많이 수행되지 않았다. 탄소 순환에 대한 교육에 있어서 간학문적 접근에 대한 연구 또한 부족한 것으로 나타났다. 따라서 추후의 연구에서는 탄소 순환 교육을 위해 적용 가능한 교수·학습 모형, 효과적인 교수·학습 방법에 대한 연구 및 다양한 교과에서 관련 내용을 통합적으로 다룰 수 있는 방안들에 대한 연구들이 필요할 것이다.

다섯째, 교과내용학적 관점에서 살펴본 결과, 지구 시스템 내에서 일어나는 상호작용의 대표적인 예시는 탄소 순환이고, 과학 교육에서 탄소 순환에 대한 학습을 위해 다룰 수 있는 소재나 주제는 다양하게 나타났다. 연구 결과를 통해 알게 된 흥미로운 사실 중 하나는 탄소 순환 교육을 위해 다양한 소재와 주제를 활용할 수 있으며, 또 그러한 많은 시도와 연구가 필요하다는 것이다. 표 7에서 제시된 것과 같이, 기존의 연구에서 일반적으로 흔히 다루어진 ‘기후 변화’, ‘시스템’, ‘환경’, ‘광합성’ 등의 주제뿐만 아니라 논의의 빈도가 낮은 ‘화산’, ‘해양 산성화’, ‘탄소 플릭스’, ‘조류’, ‘영구 동토’, ‘그린 IT’ 등과 같은 개념들을 포함하여 아직까지 다루어 지지 않은 주제에도 관심을 둘 필요가 있다. 실제로 ‘화산’, ‘탄소 플릭스’, ‘영구 동토’를 주제로 한 연구들은 교육 연구자들이 거의 다루지 않았던 내용을 다루어 탄소 순환 교육을 위한 새로운 소재와 주제의 활용 가능성을 제시했다는 측면에서 중요한 의의를 가진다. 이는 탄소 순환과 관련된 개념의 과학적이고 효과적인 이해를 위해 실생활에서 관찰 가능하고 적용 가능한 주제나 소재를 활용하는 것이 유용하기 때문이기도 하지만, 보다 다양한 소재와 주제를 활용한 학습을 통해 폭넓은 관점을 바탕

으로 탄소 순환을 이해하는 것이 지구시스템을 유지하는데 있어서 광범위하게 작용하는 탄소 순환의 특성을 이해하는데 유용하기 때문이다.

기존의 연구들을 통해 살펴본 바와 같이 탄소 순환 교육을 위해 많은 연구들이 다양한 형태로 이루어져 왔다. 그러나 기존의 연구 경향에 대한 분석 결과는 개발된 프로그램의 낮은 활용성, 검증의 필요성, 정밀하고 일괄적인 학생 인식과 수준 조사 도구 개발의 필요성, 교수·학습 모형과 교사를 대상으로 한 관련 연구의 필요성, 교사의 탄소 순환 교육을 위한 교수 자료의 필요성, 그리고 다양한 주제와 소재의 활용 필요성을 보여주고 있다. 따라서, 추후 연구에서 연구자들은 기존에 개발된 프로그램의 검증을 통해 교육적 의미가 높은 연구 결과들을 선별하여 교육현장에서 활용 가능한 형태의 자료로 소개하거나 교육과정의 내용구성에 적극 반영할 필요가 있다. 또한 탄소 순환에 대한 학생의 수준 및 오개념을 판별하는 객관적인 조사를 바탕으로 학생의 교육적 요구에 부합하는 형태의 교육 내용을 실생활에 적용할 수 있도록 제공할 필요가 있다. 그와 더불어 교사의 전문적인 지식과 이해를 지원하기 위해 교사 연수를 통해 다양한 소재와 주제를 포함하는 탄소 순환 교육의 사례를 접할 수 있도록 관련 경험을 충분히 제공할 필요가 있을 것이다.

## 국문요약

인류가 직면한 지구온난화와 같은 기후 변화에 대한 이슈는 우리의 삶에 직접적인 영향을 미치는 매우 중요한 문제로 이를 극복하기 위해서는 탄소 순환에 대한 통합적 이해를 바탕으로 대기 중 이산화탄소 등의 온실기체 방출량 감축이 필수적이다. 이 연구의 목적은 탄소 순환 교육에 대한 국내외의 연구동향을 분석하여, 미래 시민으로 성장할 학생들을 위한 탄소 순환 교육의 가치와 방향을 제시하는데 있다. 이를 위해 ‘탄소 순환 교육’과 관련하여 국내외 다양한 학술 연구 데이터베이스 (RISS, KCI, Google 학술검색, ERIC 등)에서 수집된 52편의 연구들을 대상으로 분석하였다. 그 결과, 탄소 순환 교육을 위해 많은 연구들이 다양한 형태로 이루어져 왔으나, 개발된 프로그램의 낮은 활용 가능성과 검증의 필요성, 정밀하고 일괄적인 학생 인식과 수준 조사 도구 개발의 필요성, 교수·학습 모형과 교사를 대상으로 한 관련 연구의 필요성, 교사의 탄소 순환 교육을 위한 자료의 필요성, 그리고 다양한 주제와 소재의 활용이 필요한 것으로 확인되었다. 지구온난화를 포함한 지구 환경 변화에 능동적으로 대처하기 위해서는 학생들의 탄소 순환에 대한 통합적인 이해가 중요하다. 이러한 학습 기회를 지원하기 위해 기존에 개발된 프로그램의 검증을 바탕으로 교육 현장에서 활용할 수 있도록 제공하고, 학생들의 탄소 순환에 대한 이해 수준을 높이고 오개념을 개선할 수 있도록 생활 속에서 적용할 수 있는 실질적인 형태의 내용을 교육과정에 포함할 필요가 있다. 또한 교사의 전문성 향상을 위해 다양한 소재와 주제를 포함하는 탄소 순환 교육 사례에 대해 교사 연수를 통해 제공되어야 할 것이다.

**주제어** : 과학 교육, 지구 환경 교육, 지구온난화, 탄소 순환, 연구 동향, 과학과 교육과정

## References

- Aengenheyster, M., Feng, Q. Y., Van Der Ploeg, F., & Dijkstra, H. A. (2018). The point of no return for climate action. *Earth System Dynamics*, 9(3), 1085-1095.
- Antonarakis, A. (2018). Linking carbon and water cycles with forests. *Geography*, 103(1), 4-11.
- Asshoff, R., Riedl, S., & Leuzinger, S. (2010). Towards a better understanding of carbon flux. *Journal of Biological Education*, 44(4), 180-184.
- Bae, K.-J., & Park, H.-J. (2013). A study on the current condition and the improvement of digital literacy education. *Journal of Korean Library and Information Science Society*, 44(2), 241-265.
- Bang, D., Park, E., Yoon, H., Kim, J., Lee, Y., Park, J., Song, J. Y., Dong, H., Shim, B. J., Lim, H. J., & Lee, H. (2013). The design of integrated science curriculum framework based on big ideas. *Journal of the Korean Association for Research in Science Education*, 33(5), 1041-1054.
- Baptist von Helmont, J. (1662). *Physics refined* (trans. by K. J. Chandler). London, UK: Cited by Boll, (1999).
- Bissinger, K., & Bogner, F. X. (2018). Environmental literacy in practice: education on tropical rainforests and climate change. *Environment, development and sustainability*, 20(5), 2079-2094.
- Bord, R. J., O'connor, R. E., & Fisher, A. (2000). In what sense does the public need to understand global climate change? *Public Understanding of Science*, 9(3), 205-218.
- Brehm, S., Anderson, C. W., & DuBay, J. (1986). *Ecology: A teaching module* (Occasional Paper No. 94). East Lansing, MI: The Institute for Research on Teaching, Michigan State University.
- Chen, J., & Anderson, C. W. (2015). Comparing American and Chinese Students' Learning Progression on Carbon Cycling in Socio-Ecological Systems. *Science Education International*, 26(4), 439-462.
- Cheong, C. (2011). Middle school students' perceptions about global environmental problems using drawings. *Korean Journal of Environmental Education*, 24(1), 76-87.
- Cho, K. (1995). Learning and teaching strategies to correct misconception in nature subject: Focusing on oxygen and carbon dioxide unit. *Research of Science•Mathematics Education*, 18, 29-36.
- Choi, Y.-H., Noh, J.-A., Lee, B.-U., Moon, D.-Y., Lee, M.-H., Chang, Y.-C., Park, G.-M., Son, D.-M., Lim, Y.-J., & Lee, E.-S. (2012). Development of STEAM curriculum model for cultivating of creative and integrative thinking person. *The Korean Journal of Technology Education*, 12(3), 63-87.
- Clary, R., & Wandersee, J. (2010). Connect-the-spheres with the coal cycle. *Science Scope*, 34(2), 20-29.
- Clary, R., & Wandersee, J. (2015). Finding the CO2 culprit. *Science Teacher*, 82(3), 23-29.
- Cockerill, K. (2010). Communicating how water works: results from a community water education program. *The Journal of Environmental Education*, 41(3), 151-164.
- Crawford-Brown, D., & LaRocca, S. (2006). Teaching Systems Principles and Policy Applications Using a Reduced-Scale Carbon Cycle Model for Global Warming. *Journal of Geoscience Education*, 54(3), 301-333.
- Dijkstra, E., & Goedhart, M. (2011). Evaluation of authentic science projects on climate change in secondary schools: A focus on gender differences. *Research in Science & Technological Education*, 29(2), 131-146.
- Drouin, P., Welty, D. J., Repeta, D., Engle-Belknap, C. A., Cramer, C., Frashure, K., & Chen, R. (2006). Seeing the Carbon Cycle. *Science Scope*, 29(4), 14-18.
- Düsing, K., Asshoff, R., & Hammann, M. (2018). Students' conceptions of the carbon cycle: Identifying and interrelating components of the carbon cycle and tracing carbon atoms across the levels of biological organisation. *Journal of Biological Education*, 53(1), 110-125.
- Gallego-Schmid, A., Rivera, X. C. S., & Stamford, L. (2018). Introduction of life cycle assessment and sustainability concepts in chemical engineering curricula. *International Journal of Sustainability in Higher Education*, 19(3), 442-458.
- Gardner, J., Harlen, W., Hayward, L., & Stobart, G. (2008). *Changing assessment practice: Process, principles and practice*. London: Assessment Reform Group.
- Gudovitch, Y., & Orion, N. (2001). The Carbon Cycle and the Earth Systems: Studying the Carbon Cycle in Multidisciplinary Environmental Context. In *Proceedings of the 1st IOSTE Symposium in Southern Europe*. (April 29-May 2).
- Han, J., Jeong, Y., & Noh, T. (2000). The conceptions of high school students about acid rain, ozone layer, and greenhouse effect. *Journal of the*

- Korean Association for Science Education, 20(3), 364-370.
- Hartley, L. M., Wilke, B. J., Schramm, J. W., D'Avanzo, C., D'Anderson, C. W. (2011). College students' understanding of the carbon cycle: Contrasting principle-based and informal reasoning. *BioScience*, 61, 65-75.
- Higgins, P. A., & Harte, J. (2012). Carbon cycle uncertainty increases climate change risks and mitigation challenges. *Journal of Climate*, 25(21), 7660-7668.
- Hwang, H. T. (2019). Japanese typhoon heavy rain damage... 'Attention for disaster prevention housing'. Retrieved October 31, 2019, from <http://news.kbs.co.kr/news/view.do?ncd=4314404&ref=A>
- Hwang, H.-Y., & Kim, Y. (2012). The educational strategy for sustainable development. *The Journal of Education Assignment Institute*, 18(5), 108-132.
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (1990). *Climate Change: The IPCC scientific assessment*. In J. T. Houghton, G. J. Jenkins, & J. J. Ephraums (Eds.). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (1995). *IPCC Second Assessment: Climate change 1995*. In J. T. Houghton, L. G. M. Filho *et al.*, (Eds.). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2001). *Climate change 2001: The scientific basis. Contribution of working group I to the Third assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. In J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Gnggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Oai, K. Maskell, & C. A. Johnson (Eds.). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2007). *Climate change 2007: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the Fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Geneva, Switzerland: IPCC.
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2014). *Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the Fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Geneva, Switzerland: IPCC.
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2018). *Climate change 2018: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the Fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Geneva, Switzerland: IPCC.
- Jang, S.-Y., & Shin, D. (2013). An analysis on recent trend of research about climate change and energy education. *Journal of Energy and Climate Change Education*, 3(2), 115-125.
- Jin, H., & Anderson, C. W. (2012). A learning progression for energy in socio-ecological systems. *Journal of Research in Science Teaching*, 49(9), 1149-1180.
- Jin, H., Mehl, C. E., & Lan, D. H. (2015). Developing an analytical framework for argumentation on energy consumption issues. *Journal of Research in Science Teaching*, 52(8), 1132-1162.
- Joyce, C., Viola, T., & Amster, A. (2011). *Understanding Ocean Acidification (Ocean Acidification Teachers Guide)*.
- Jun, W. (2014). A study on development of green IT education contents for elementary school students. *Journal of the Korean Association of Information Education*, 18(1), 89-100.
- Kim, B. (2018). The impact of community-based environmental education programs on elementary school students' ecological literacy. *Global Studies Education*, 10(2), 65-96.
- Kim, C. (2017). Trends and directions in research on education for sustainable development (ESD) in Korean. *Journal of Environmental Education (1994~2017)*. *Korean Journal of Environmental Education*, 30(4), 353-377.
- Kim, W. K. (2016, June 16). Hot Korea ... Temperature changed over 104 years. Retrieved January 20, 2019, from <http://news.kbs.co.kr/news/view.do?ncd=3296560>
- Kim, Y. & Hwang, G. (2013). Utilization of bottle-deposit system for climate change education. *Journal of Energy and Climate Change Education*, 3(2), 161-169.
- Kim, Y. G. (2012). Effect of educational materials from normal energy usage receipt on saving energy in houses. *Journal of Energy and Climate Change Education*, 2(2), 153-163.
- King, C. (2014). The Earth Science Education Unit's professional development workshop on "The carbon question-cycling, releasing, capturing" for teachers of key stages 3 and 4. *School Science Review*, 96(354), 123-129.
- Ko, Y. S., Kim, S. K., & Lee, H. K. (2004). A study about improvement of experiment of carbon dioxide production on elementary school science textbook. *Journal of Korean Elementary Science Education*, 23(2), 152-158.
- Kook, D. S. (2003). An analysis of 10th grade science textbook as an origin of misconception on greenhouse effect concept. *Journal of the Korean Association for Research in Science Education*, 23(5), 592-598.
- Krauskopf, S. (2010). A Life-Cycle Assessment of biofuels. *Science Teacher*, 77(9), 35-40.
- Kwon, Y., Lee, J., Kim, C., Ahn, J., Seo, E., Nam, Y., Park, E., Choi, S., & Ahn, Y. (2016). The 2015 Revised National Curriculum for "Environment" Subject : Major Changes in Contents and Approaches. *Environmental Education*, 29(4), 363-383.
- Lee, D. Y., Oh, E. S., Kim, H., & Jeong, J. W. (2013). Analysis of carbon cycle concepts based on earth systems perspective of high school students. *Journal of Science Education*, 37(1), 157-169.
- Lee, H., & Kwon, Y. R. (2008). Development and application of Earth science module based on earth system. *Journal of Korean Earth Science Society*, 29(2), 175-188.
- Lee, H. (2003). Teaching and learning about the earth. *Eric Digests*.
- Lee, H., Kwon, H., Park, K., & Lee, H. (2013). An instrument development and validation for measuring high school students' systems thinking. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 33(5), 995-1006.
- Lee, J. E., Han, S., & Park, T. (2017). Conception of carbon cycle in high school students according to the difference of spatial perception ability. *Journal of Korean Society of Earth Science Education*, 10(3), 308-322.
- Lee, S. W., & Lee, Y. J. (2014). Development of the low carbon education program for upper elementary students. *Journal of Korean Practical Arts Education*, 27(1), 135-157.
- Leiserowitz, A., Smith, N., & Marlon, J. R. (2011). *American teens & knowledge of climate change*. Yale University. New Haven, CT: Yale Project on Climate Change Communication, 5.
- Lin, S. M. (2016). Reducing students' carbon footprints using personal carbon footprint management system based on environmental behavioural theory and persuasive technology. *Environmental Education Research*, 22(5), 658-682.
- Lindstrom, T., & Middlecamp, C. (2017). Campus as a Living Laboratory for Sustainability: The Chemistry Connection. *Journal of Chemical Education*, 94(8), 1036-1042.
- López-Ridaura, S., Masera, O., & Astier, M. (2002). Evaluating the sustainability of complex socio-environmental systems. The MESMIS framework. *Ecological indicators*, 2(1-2), 135-148.
- Maeng, S., Seong, Y., & Jang, S. (2013). Present states, methodological features, and an exemplar study of the research on learning progressions. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 33(1), 161-180.
- McNeill, K. L., & Vaughn, M. H. (2012). Urban high school students' critical science agency: Conceptual understandings and environmental actions around climate change. *Research in science education*, 42(2), 373-399.
- Ministry of Education[MOE]. (1997). *High school curriculum (No. 1997-15)*. Seoul, Korea: Author.
- Ministry of Education[MOE]. (2015). *2015 revised national curriculum*. [ME Notification No. 2015-74]. Sejong: Author.
- Mohan, L., Chen, J., & Anderson, C. W. (2009). Developing a multi-year learning progression for carbon cycling in socio-ecological systems. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(6), 675-698.
- Monroe, M. C., Hall, S., & Li, C. J. (2016). Can climate change enhance biology lessons? A quasi-experiment. *Applied Environmental Education & Communication*, 15(2), 125-137.
- Moon, B. C., Jeong, J. W., Kyung, J. B., Koh, Y. K., Youn S. T., Kim, H. G., & Oh, K. H. (2004). Related conceptions to earth system and applying of systems thinking about carbon cycle of the preservice teachers. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 25(8), 684-696.
- Musters, C. J. M., De Graaf, H. J., & Ter Keurs, W. J. (1998). Defining socio-environmental systems for sustainable development. *Ecological Economics*, 26(3), 243-258.
- National Research Council. (2012). *A framework for K-12 science education: Practices, crosscutting concepts, and core ideas*. Washington, DC: National Academies Press.
- Next Generation Science Standards (NGSS) Lead States. (2013). *Next generation science standards: For states, by states*. Washington, DC: National Academies Press.
- Oh, E. S., & Kim, H. (2014). The analysis of mental models of middle school students on the greenhouse effect. *Korean Journal of Teacher Education*, 30(1), 237-252.
- Oh, Y., & Choi, K. (2014). Analysis of middle school science textbook of 2009-revision for climate change education. *Journal of Learner-Centered Curriculum and Instruction*, 14(10), 111-130.
- Park, J., Lee, S., & Moon, S. (2014). The Perception of Middle School Teachers about the Environmental Problem. *Journal of the Korean Chemical Society*, 58(6), 590-599.
- Park, K., Lee, H., Lee, H., & Jeon, J. (2019). Analysis of systems thinking

- level of pre-service teachers about carbon cycle in earth systems using rubrics of evaluating systems thinking. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 39(5), 599-611.
- Park, T., Jung, W., Choi, S., Choi, D., Lee, D., & Noh, K. (2001). *Introduction to environmental education*. Seoul: Kyoyookbook.
- Petrini, M., & Pozzebon, M. (2009). Managing sustainability with the support of business intelligence: Integrating socio-environmental indicators and organisational context. *The Journal of Strategic Information Systems*, 18(4), 178-191.
- Reed, K. A., Stansfield, A., Wehner, M., & Zarzycki, C. M. (2018). The human influence on Hurricane Florence. Retrieved from [https://cpb-us-e1.wpmucdn.com/you.stonybrook.edu/dist/4/945/files/2018/09/climate\\_change\\_Florence\\_0911201800Z\\_final-262u19i.pdf](https://cpb-us-e1.wpmucdn.com/you.stonybrook.edu/dist/4/945/files/2018/09/climate_change_Florence_0911201800Z_final-262u19i.pdf)
- Ricci, J. C. D., Grau, R. R., Limansky, A. S., & de Mendoza, D. (1988). Environmental Biochemistry: A new approach for teaching the cycles of the elements. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 16(4), 205-208.
- Ripple, W. J., Wolf, C., Newsome, T. M., Barnard, P., & Moomaw, W. R. (2019). World Scientists' Warning of a Climate Emergency. *BioScience*, 1-5. Retrieved from <https://doi.org/10.1093/biosci/biz088>
- Savasci, F. (2014). Carbon Goes to. *Science Activities*, 51(2), 33-43.
- Schlenker, R. M., Blanke, R., & Mecca, P. (2007). Using the 5E learning cycle sequence with carbon dioxide. *Science Activities: Classroom Projects and Curriculum Ideas*, 44(3), 83-86.
- Seo, J. W., Kim, H., & Potvin, P. (2014). An analysis of high school students' conceptions of conservation of mass on carbon cycle through carbon emission scenario. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 35(3), 192-202.
- Shealy, T., Klotz, L., Godwin, A., Hazari, Z., Potvin, G., Barclay, N., & Cribbs, J. (2019). High school experiences and climate change beliefs of first year college students in the United States. *Environmental Education Research*, 25(6), 925-935.
- Shepardson, D. P., Niyogi, D., Choi, S., & Charusombat, U. (2009). Seventh grade students' conceptions of global warming and climate change. *Environmental Education Research*, 15(5), 549-570.
- Shin, M., & Kwon, G. (2015). Exploring characteristics of scientific activities presented in weather and climate change related units in elementary, middle and high school science textbooks of the 2009 revised science curriculum. *Journal of Energy and Climate Change Education*, 5(2), 149-160.
- Shin, Y. (2017). Analysis on contents related to appropriate technology, sustainable development, climate change and energy of the 2015 revised national curriculum. *Journal of Energy and Climate Change Education*, 7(1), 15-23.
- Sibley, D., Anderson, C., Heidemann, M., Merrill, J., Parker, J., & Szymanski, D. (2007). Box diagrams to assess students' systems thinking about the rock, water and carbon Cycle. *Journal of Geoscience Education*, 55(2), 138-146.
- Summers, M., Kruger, C., & Childs, A. (2001). Understanding the science of environmental issues: development of a subject knowledge guide for primary teacher education. *International Journal of Science Education*, 23(1), 33-53.
- Swant, G. D. (1970). The oxygen cycle. *Scientific American*, 223(3), 110-123.
- Taterka, B., & Cory, R. M. (2016). Measuring CO<sub>2</sub>. *Science Teacher*, 83(9), 29-35.
- Turner II, B. L., Esler, K. J., Bridgewater, P., Tewksbury, J., Sitas, N., Abrahams, B., ... & Mooney, H. (2016). Socio-environmental systems (SES) research: What have we learned and how can we use this information in future research programs. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 19, 160-168.
- VOA news. (2019, September 7). Bahamas Hurricane Deaths Increase to 43. Retrieved September 15, 2019, from <https://www.voakorea.com/a/5073976.html>
- Warren, W. A. (2015). The Carbon Cycle: Teaching Youth about Natural Resource Sustainability. *Journal of Extension*, 53(1), 1-5.
- Wrigley, C. (2012). Wood made from water? An introduction to photosynthesis based on a historical error. *Teaching Science: The Journal of The Australian Science Teachers Association*, 58(3), 53-54.
- Yi, J.-E., & Kang, H.-S. (2012). A new model development of backward design: Focusing on improved model. *The Journal of Research in Education*, 45, 87-114.
- Yoon, H., Yoon, W., & Woo, A. J. (2011). High school science teachers' perceptions of the 2009 revised science curriculum and the science textbook. *Journal of Research in Curriculum Instruction*, 15(3), 757-776.
- You, H. S., Marshall, J. A., & Delgado, C. (2018). Assessing students' disciplinary and interdisciplinary understanding of global carbon cycling. *Journal of Research in Science Teaching*, 55(3), 377-398.
- Zangori, L., & Koontz, J. A. (2017). Supporting upper-level undergraduate students in building a systems perspective in a botany course. *Journal of Biological Education*, 51(4), 399-411.
- Zangori, L., Peel, A., Kinslow, A., Friedrichsen, P., & Sadler, T. D. (2017). Student development of model-based reasoning about carbon cycling and climate change in a socio-scientific issues unit. *Journal of Research in Science Teaching*, 54(10), 1249-1273.

## 저자정보

박병열(University of Connecticut 박사수료)

전재돈(경북대학교 시간강사)

이현동(대구교육대학교 교수)

이효녕(경북대학교 교수)