

특별호

초등학교 과학 교육과정에 현대 물리 도입 가능성 탐색*

박종원 · 윤혜경[†] · 이인선

Exploring the Possibility of Introducing Modern Physics into Elementary School Science Curriculum

Park, Jongwon · Yoon, Hye-Gyoung[†] · Lee, Insun

국문 초록

본 연구에서는 초등학교 과학 교육과정에 현대 물리 내용을 도입하는 것의 가능성을 논의하였다. 초등학생에게 현대 물리를 지도하는 것이 왜 필요한지 현대 물리 도입의 필요성을 논의하였고, 실제로 초등학생에게 현대 물리를 지도한 외국의 사례와 연구 결과를 살펴보았다. 그리고 구체적으로 우리나라 초등학교 과학 교육과정에 현대 물리를 도입하기 위한 몇 가지 방안을 제안하였다.

현대 물리는 학생이 경험하는 다양한 일상적 상황과 연계될 수 있으며, 학생들이 배우고 싶은 내용으로서 과학에 대한 흥미와 호기심을 높일 수 있다. 또한, 아직 고전적 자연관이 굳어지지 않은 초등학생에게 현대 물리를 도입하면 새로운 자연관 형성을 도울 수 있다. 최근 현대 물리를 초등 수준에 도입하기 위한 해외의 몇몇 프로젝트에서도 학생의 이해와 흥미 증가에 관한 긍정적인 결과를 보고하고 있다.

연구자들은 초등학생 수준에서 이해가 가능할 것으로 생각하는 몇 가지 주제에 대해 구체적인 내용 수준과 지도방안을 간략하게 제안하였다. 이러한 제안은 후속 연구를 통해 적절한 자료개발과 경험적이고 실증적인 연구를 통해 그 가능성과 효과가 입증되어야 하지만 현대 물리 도입 가능성에 대한 논의를 진전시킬 것으로 기대한다.

주제어: 초등학교 과학과 교육과정, 현대 물리

ABSTRACT

This study explored the possibility of introducing modern physics into the elementary school science curriculum. The study discussed the need of introducing modern physics to elementary school students and examined the results of certain projects and studies on teaching modern physics to elementary school students. Furthermore, this study proposes several teaching and learning techniques to introduce modern physics into the elementary school science curriculum.

Modern physics can be linked to various everyday situations experienced by students and can increase their interest and curiosity in science. Additionally, introducing modern physics to elementary school students who are yet to establish a background on the classical view of nature can help them build a new perspective. Recently, several global projects to introduce modern physics at the elementary level have also reported positive results regarding the increase in student understanding and interest in modern physics.

The study briefly proposed specific topics and teaching and learning techniques that could be suitable for the elementary school level. These proposals are expected to advance discussions on the possibility of introducing modern physics. However, appropriate follow-up studies are warranted to confirm the possibility and

effectiveness of this initiative.

Key words: elementary school science curriculum, modern physics, curriculum revision

I. 서론

현대 물리는 19세기 말부터 태동한 물리학을 일컬으며 뉴턴 역학과 같은 고전 물리와 대비되는 의미로 사용된다. 물리학에서는 1900년에 플랑크 상수가 도입되고, 아인슈타인의 특수 상대성 이론이 1905년에 발표되면서, 양자역학과 상대성이론이 태동하였고 이때 현대 물리가 시작되었다고 할 수 있다. 물리학에 플랑크 상수가 도입된 지 120여 년이 지났지만, 현대 모든 과학기술사회의 기반을 이루고 있는 현대 물리 내용은 과학 교육과정에 거의 도입되고 있지 않으며 특히 초등 과학 교육과정에 그것을 도입하는 것에 관한 논의는 이루어진 적이 없다. 현대 물리는 추상적이고 어려운 개념을 포함하여 초등 과학교육에 포함될 수 없다고 주장하는 사람도 있겠으나 본 논문에서는 초등학생에게도 현대 물리를 도입하는 것이 가능함을 주장하고 구체적인 방안을 제안하고자 한다.

스푸트니크(Sputnik) 쇼크 이후, 미국의 과학 교육과정은 과학지식의 구조와 과학의 과정을 강조하게 되었고(DeBoer, 2000), 다른 여러 국가의 과학 교육과정 또한 과학지식을 중심으로 구성되었다(Eilks & Hofstein, 2017). 우리나라 과학 교육과정도 여러 번의 변화를 거쳤지만, 기본적으로 과학지식(개념)의 위계적 구조를 근간으로 하고 있다고 볼 수 있다. 미국의 차세대 과학 기준(Next Generation Science Standard: NGSS)에서는 핵심 개념(core idea)의 4가지 조건 중의 하나로 ‘여러 학년에 걸쳐 깊이와 정교함이 증가하는 방식으로(at increasing levels of depth and sophistication) 지도되고 이해될 수 있어야 함’을 제시하고 있다(NGSS Lead States, 2013, p. xvi). 이러한 교육과정 구성 방향에 따르면 현대 물리 내용은 과학 교육과정의 맨 마지막에, 그리고 상위 학년에만 도입될 수밖에 없었고, 따라서 초등 과학 교육과정에 현대 물리 내용을 도입하는 것은 바람직하지 못한 것으로 여겨질 수 있다.

그러나 교육과정의 내용이 반드시 학문의 위계적 구조에 따라 선정되고 조직되어야 하는 것은 아니다. 예를 들어, Bruner(1977, p. 33)는 ‘어떠한 내

용이라도 어떤 발달 단계의 아동에게 지적으로 정직한 방식(intellectually honest form)으로 효과적으로 지도할 수 있다’라고 하였다. 즉 초등학생도 세상을 보는 자신만의 방식이 있고, 학습할 내용을 그 방식에 맞추어 제시하면 초등학생에게 상위 수준의 개념이나 과학 내용도 가르칠 수 있다고 보았다.

이러한 관점에 따르면, 초등학생의 일상적 경험과 관련된 내용이고 초등학생의 관심과 흥미를 끌 수 있는 내용이라면, 나아가 미래 민주시민으로서 필요한 과학적 소양을 위한 내용이라면, 위계적으로 상위의 개념이라고 하더라도 초등 과학 교육과정에 현대 물리의 도입 가능성과 필요성을 논의할 수 있다. 현대 물리 내용을 초등학생이 이해하기 어려울 것이라는 문제는 지도 방법의 고안을 통해 해결할 수 있는 사항이며, 이러한 문제로 교육과정에서 미리 특정 내용을 제외할 필요는 없을 것이다.

실제로 아인슈타인의 상대성이론은 학문의 위계로 볼 때 미분기하학에 기초한 텐서를 이용하므로 대학에서도 지도하기 어려운 내용이다. 그러나 사고실험을 이용하여 현재 고등학교 물리 교육과정에 일부가 도입되어 있다. 또 초등학교 교육과정에서 제시된 ‘수평 잡기의 원리’도 정확하게는 대학에서 배우는 ‘토크의 평형’과 관련된 것이지만, 시소 놀이를 통해 초등학생에게 접근 가능한 수준에서 지도하고 있다. 즉 과학개념이나 원리는 학생의 수준에 맞게 도입되고 다양한 방식으로 지도될 수 있다. 학습 목표와 학습 내용에는 여러 수준과 여러 유형이 있기 때문이다. 예를 들어, Bloom의 학습 목표 분류를 수정한 Anderson *et al.*(2001, p. 31)은 학습을 통해 학생이 수행할 수 있는 인지적 활동의 수준을 ‘기억’, ‘이해’, ‘적용’, ‘분석’, ‘평가’, ‘창안’의 6가지로 구분하였다. 그리고 Marzano and Kendall(2007, p. 13)은 학생이 배우는 지식의 유형을 ‘정보적 지식(또는 명제적 지식)’, ‘정신적 절차 지식(또는 절차적 지식)’, ‘심체적 절차 지식(또는 심체적 지식)’의 3가지로 구분하였고, 정보적 지식(information knowledge)은 다시 용어, 사실, 시간 계열(시간 흐름에 따라 일어난 주요 사건), 일반화, 원

리가 있다고 하였다(Marzano & Kendall, 2007, pp. 24-25). 따라서 초등학교 수준에서는 ‘용어’나 ‘사실’에 대한 ‘기억’도 낮은 수준의 학습 내용과 학습 목표로 선정될 수 있다. 그리고 이러한 낮은 수준의 학습은 Bruner(1977, pp. 52-54)의 나선형 교육과정 방식에 따라 학년이 올라가면서 상위 수준의 학습으로 연결될 수 있다.

또한, 과학학습의 목표에는 인지적 측면의 개념 이해와 적용뿐 아니라, 정의적 측면의 흥미와 호기심 유발도 포함된다. 즉, 초등학교 과학 교육과정에 도입하는 현대 물리는 학생에게 개념적 이해를 목표로 하기보다는 흥미와 호기심 유발을 목표로 할 수도 있다. 이러한 흥미와 호기심은 미래 과학자의 꿈을 가지게 하는 데 주요 역할을 할 수 있을 것이다.

이러한 점에서 본 연구에서는 초등 과학 교육과정에 현대 물리 내용을 도입하는 것의 가능성을 여러 측면에서 논의해 보고자 한다. 초등학생에게 현대 물리를 지도하는 것이 왜 필요한지 현대 물리 도입의 필요성을 논의하고, 실제로 초등학생에게 현대 물리를 지도한 외국의 사례와 연구 결과를 살펴보고자 한다. 그리고 구체적으로 우리나라 초등 과학 교육과정에 현대 물리를 도입하기 위한 몇 가지 방안을 제안해 보고자 한다.

II. 초등 과학 교육과정에 현대 물리 도입의 필요성

1. 학생의 삶과 연계된 과학 교육과정

영국의 과학교육협회(ASE: The Association for Science Education)에서 발간된 문서에는 5개 차원으로 구성된 과학학습 목표에 ‘상황(context)’을 하나의 차원으로 포함하고 있으며(Milner, 1986, p. 6) 이러한 ‘상황’에는 순수 과학(pure science)의 상황뿐 아니라 일상생활 속의 기술공학적인 상황과 환경적 상황이 포함되어 있다. 과학교육에서 과학개념이나 원리가 도입되는 ‘상황’은 과학학습에서 중요하게 다루어져 왔고(Archenhold *et al.*, 1988, pp. 2-3; Keeves & Aikenhead, 1995; King & Ritchie, 2012), 과학적 소양 모델에서도 주요한 요소로 포함되었

다(박종원, 2016). 특히 박종원(2016)이 제안한 통합적 과학적 소양 모델에서는 과학개념과 법칙 및 원리 등과 같은 과학 내용 지식뿐 아니라, 과학과 관련된 과학 밖의 상황(일상생활, 기술공학, 미디어 등)이 함께 강조되고 있다. Gilbert(2006, p. 960)에 의하면, 상황은 ‘관계’나 ‘연결’을 의미하는 라틴어인 ‘contextus’에서 유래되었다고 하였다. 과학학습에서 상황을 강조하는 가장 큰 이유는 상황이 과학을 학생의 일상적 경험이나 삶과 연결해 주는 역할을 하고(Hofstein & Kesner, 2006; Murphy & Whitelegg, 2006; Wierstra & Wubbles, 1994), 이를 통해 과학에 대한 흥미를 불러일으키고, 나아가 추상적인 과학지식을 이해하는 데 도움을 줄 수 있기 때문이다(e.g., Barker & Millar, 2000; Lubben *et al.*, 1996; Ramsden, 1997).

그런데 과학교육에서 강조하고 있는 다양한 상황 속에는 이미 현대 물리 내용이 폭넓게 포함되어 있다(Shabajee & Postlethwaite, 2000, pp. 52-53). 초등학생들은 과학잡지나 영화 및 드라마 등을 통해 아인슈타인의 상대성이론 내용을 이미 접하고 있으며, 레이저 등과 같이 현대 물리에 기초한 다양한 전자제품들을 실제로 경험하고 있다. 이러한 측면에서 현대 물리는 학생들의 일상적 삶과 연결하기에 좋은 학습 내용이 될 수 있다. 실제로 Angell *et al.*(2004)에 의하면, 노르웨이의 고등학생들은 현대 물리 내용이 고전 물리 내용보다 더 자신들의 일상적 삶과 연관이 있는 것으로 생각하였다. Millar and Osborne(1998, p. 5)은 학교에서 배우는 과학과 사회에서 경험하는 과학 사이에 큰 격차가 있다고 지적하였고, 초등학생들은 학교에서 배우는 과학이 자신들의 일상적 경험이나 삶과 관련이 없다고 생각한다(Nasir *et al.*, 2014, p. 731)는 연구들이 있다. 학생들이 과학을 자신의 일상적 경험이나 삶과 연계된 것으로 느끼도록 하는 데 현대 물리 내용이 일조할 가능성이 있다.

현재 초등 과학 교육과정에는 다양한 상황과 내용 요소들이 제시되고 있다. 예를 들어, 일상생활에서 사용하는 평면거울, 볼록렌즈 등이 초등 과학 교육과정에서 다루지고 있다. 이와 더불어 ‘빛’ 개념을 다룰 때 ‘레이저’나 ‘LED’와 같은 도구에 초점을 둔 상황¹⁾이 도입된다면 이것은 현대 물리와

1) 본 논문에서는 상황은 과학 실험실 또는 자연 및 일상생활에서 일어나는 과학적 현상과 사건뿐 아니라, 과학지식이 일상생활이나 공학 기술적으로 적용되는 사례와 소재도 포함하는 것을 의미한다.

연결될 수 있고, ‘속력’ 개념을 다룰 때도 여러 가지 교통수단의 빠르기뿐만 아니라 ‘매우 빠른(빛의 빠르기에 가까운) 우주선 여행’과 같은 상황을 다룬다면 상대론적 내용이 도입될 수 있다.

결론적으로 상황은 과학학습에서 중요한 요소이며, 현대 물리는 다양한 일상 상황 속에 이미 폭넓게 포함되어 있고, 초등학생도 현대 물리와 관련된 다양한 상황을 일상생활 속에서 경험하고 있다는 점에서, 초등 과학 교육과정에 현대 물리를 도입하는 것의 가능성을 고려할 필요가 있다. 이것은 학교 과학학습을 자신의 경험과 삶에 연결하데 도움을 줄 수 있다.

2. 흥미와 호기심을 위한 교육과정

과학학습의 목표에는 지식과 탐구 능력 함양뿐 아니라 흥미와 호기심, 과학에 대한 태도, 과학적 태도 등도 포함된다. 그러나 학생들의 과학에 대한 흥미 저하는 우리나라에서 오랫동안 과학교육의 주요 문제로 지적되어왔다. 예를 들어, TIMMS (Trends in International Mathematics and Science Study) 2015 결과에 의하면, 우리나라 8학년 학생들은 38개국 중에서 4위로 높은 과학성취도를 보였으나(Martin *et al.*, 2016, p. 19), 과학학습을 좋아한다는 응답은 29개국 중에서 최하위로 나타났다(Martin *et al.*, 2016, p. 168). 영국도 3,551명의 15세 남학생 중에서 4%의 학생만이 물리가 쉽다고 하였고(Osborne *et al.*, 2003), 물리에 대한 흥미가 낮아졌다고 보고한 연구들(e.g., Fullarton *et al.*, 2003; Oon & Subramaniam, 2010)이 있어 과학에 대한 흥미 저하는 몇몇 국가에서 중요한 문제로 인식되고 있다. 이러한 낮은 정의적 성취도에는 학습 환경이나 교사, 학생의 개인적 경험 등 여러 가지 원인이 있을 수 있지만, 학생들이 학습하는 과학 내용에서 직접적인 원인을 살펴볼 수도 있을 것이다. 실제로 학생들이 과학 수업에서 무엇을 배우길 원하는가에 관한 조사에 의하면(Park *et al.*, 2016), 대만의 5~6학년들이 배우고 싶은 내용 중에는 현대 과학 기술내용에 관련된 것이 절반에 달하였고, 물리와 관련된 현대과학기술 내용은 약 11%에 달했다. 우리나라 9~10학년 학생 경우도 배우고 싶은 과학 내용의 66%가 현대 과학기술내용과 관련된 내용이었고, 물리와 관련된 현대과학기술 내용은 약 20%이었다. 노르웨이 고등학생을 대상으로 한 연구에

서도, 천체물리와 상대론이 매우 흥미롭다고 한 응답이 70%를 넘었고, 양자물리가 매우 흥미롭다는 응답이 50% 넘게 나타났다(Angell *et al.*, 2004). 초등학생을 대상으로 한 연구는 아니지만 이러한 연구 결과들은 현대 물리 내용을 도입하는 것이 학생의 물리에 대한 흥미를 높일 가능성이 있음을 보여준다. 실제로 Kaur *et al.*(2017)의 연구는 중학교 수준의 학생뿐 아니라 초등학교 6학년에 해당하는 학생들도 포함되어 있으며 이들의 현대 물리 내용에 흥미가 높았으며 특히 남학생보다 여학생의 흥미가 높다고 보고하였다. 또 Park *et al.*(2016, p. 380)에 의하면, 연구자 중의 한 사람도 초등학교 시절에 과학잡지로부터 블랙홀 내용을 접하면서 과학자의 꿈을 가지게 되었다고 하였다. 그러나 초등학생을 대상으로 현대 물리 내용에 대해 어느 정도의 흥미가 있는지를 알아본 연구는 국내외적으로 거의 없어 별도의 연구를 통해 현대 물리에 대한 초등학생의 흥미를 확인하거나 조사하는 연구를 수행할 필요가 있다.

역시 초등학생을 대상으로 한 연구는 아니지만, 현대 물리를 학생들에게 지도하였을 때 물리에 대한 학생의 흥미가 올라갔다는 연구들이 있다. 오스트리아와 독일의 9학년 학생을 대상으로 한 연구에서는(Zöchling *et al.*, 2020), 입자 물리 내용을 자연이나 일상생활, 또는 기술 공학적 상황에 적용하여 제시했을 때 학생들의 흥미가 높은 것으로 나타났다. 예를 들어, 입자가속기를 이용한 질병 치료나 입자 물리를 통해 빅뱅을 이해하는 내용에 대해서 더 배우고 싶다고 하였다. 앞 절에서 과학학습에서 상황의 중요성에 대해서 논의하였듯이, 구체적인 상황이 학생의 흥미 유발에 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있었다. Gedigk and Pospiech(2015)에 의하면 고등학생을 대상으로 입자 물리를 주제로 4~6시간 수업을 한 결과, 입자 물리에 대한 흥미가 증가하였고, 이러한 흥미 증가는 성별이나 성적에 무관하며 6~8주 후에도 유지되는 것으로 나타났다. 이 연구는 비록 고등학생을 대상으로 하였지만, 그 결과가 성적에 무관하다는 점에서 좀 더 낮은 학년의 학생들에게도 유사한 결과를 기대할 수 있을 것이다.

이처럼 현대 물리 내용은 학생들이 배우고 싶은 내용 중 하나이며, 이러한 내용에 대한 학습은 과학에 대한 흥미를 높이는 데 도움이 될 수 있다. 현대 물리 내용 자체가 학생들에게 신기한 것이며 충

분히 호기심과 흥미를 불러일으킬 수 있는 부분이 많이 있기 때문이다(Shabajee & Postlethwaite, 2000, pp. 52-53). 따라서 현대 물리는 초등학생들에게 깊이 있는 이해를 목표로 하기 보다는 호기심과 흥미를 불러일으키기 위한 목적으로 도입될 수 있고, 나아가 상급학교에서 과학 과목을 선택하고, 미래 과학자의 꿈을 가지게 하는 긍정적인 역할도 기대할 수 있다.

3. 새로운 자연관을 위한 교육과정

흔히 상대론이나 양자역학의 주요 개념들은 학생이나 일반인들에게 신기하고 믿기 어려운 현상으로 보이고 이해하기 어려운 개념으로 여겨지고 있다. 이처럼 현대 물리가 중·고등학생뿐 아니라 대학생에게도 신기하고, 믿기 어렵고, 이해하기 어려운 이유 중의 하나는 현대 물리가 고전적 자연관과는 다른 새로운 자연관을 바탕으로 하기 때문이다. 예를 들어, 시간과 공간, 그리고 물질의 질량을 변하지 않는 것으로 인식하는 고전적 자연관은 상대론을 받아들이는 데 걸림돌 역할을 한다(조현국, 2014; Arriasecq & Greca, 2012). 또 자연에서 원인과 결과 사이에 인과적인 관계가 결정되어 있다는 고전적인 인과론 관점도 양자역학의 확률개념과 양자 도약 등의 개념을 받아들이는 데 방해가 된다(Hadzidaki, 2000).

만약 초등 과학 교육과정에 현대 물리가 도입된다면, 고전 물리학적 세계관이 형성되기 이전이므로 학생들에게 오히려 새로운 자연관이 쉽게 받아들여질 가능성이 있다. 예를 들어, 초등학생들은 즐거울 때는 시간이 빨리 흘러가고 힘든 일을 할 때는 시간이 천천히 흘러간다고 감성적으로 이미 경험해 보았기 때문에 상대론적으로도 시간의 흐름이 다를 수 있다는 것을 더 쉽게 받아들일 수도 있다. 멀리 날아가는 비행기가 천천히 움직이는 것으로 보이는 것처럼, 빠르게 날아가는 비행기 안의 시계가 천천히 흘러가는 것으로 보인다고 한다면, 이것은 ‘실제로는 똑같이 흘러가지만, 천천히 흘러가는 것처럼 보인다’고 생각한다는 점에서 분명한 오개념이다. 그러나 초등학생은 ‘어떤 상황에서도 시간은 실제로 똑같이 흘러간다’는 고전적 시간 개념 자체가 없을 수 있고, 따라서 비행기 속의 시계 비유나 감성적인 시간 흐름 경험을 통해 ‘실제로도 시간이 천천히 흘러간다’는 개념을 오히려 쉽게 받

아들일 가능성이 있다.

다른 예를 들자면 초등학생들은 물체를 밀어 속도를 증가시킬 때, 가벼운 물체보다 무거운 물체의 경우에 더 많은 에너지가 필요하다는 것을 이해할 수 있을 것이다. 물체를 밀 때 정지해 있던 물체는 쉽게 속도를 증가시킬 수 있지만, 속도가 빨라진 후에는 그 물체와 같이 빠르게 움직이면서 물체의 속도를 더 빠르게 하려면 더 많은 에너지가 필요하다고 설명한다면 상대론적 질량의 증가를 받아들일 수도 있을 것이다. 즉 절대적인 양으로서 질량은 변하지 않는다는 개념을 가지지 않은 초등학생들에게는 속도에 따른 질량의 변화가 오히려 쉽게 받아들여질 수 있고 이것은 새로운 자연관 형성을 도울 것이다.

또 관찰행위에 무관하게 관찰대상이 절대적 값을 가진다는 실재론적 관점이 아직 형성되지 않은 초등학생에게는 관찰 행동이 관찰대상에 영향을 주게 마련이라는 불확정성 개념도 쉽게 받아들여질 수 있다. 예를 들어, 물의 온도를 측정하기 위해 온도계를 물속에 넣으면 물의 온도가 변하기 마련이고, 따라서 측정행위로 인해 원래 물의 온도가 부정확하게 될 수밖에 없다는 것은 초등학생이 받아들이기 어렵게 어려운 일이 아닐 것이다. 물론 이러한 예상은 모두 구체적인 연구를 통해 검증될 필요가 있다.

요컨대 초등학생들에게는 기계론적이고 결정론적인 자연관이 견고하게 형성되어 있지 않을 수 있고 따라서 하나의 정해진 결과를 인과론적으로 예측하는 것보다 확률론적으로 예측하는 것이 초등학생들에게는 쉽게 받아들여질 수도 있다. 입자와 파동을 물리적으로 상호배타적인 특성을 가진 것으로 보는 관점도 고전적 자연관에 해당한다. 따라서 이러한 고전적 개념이 아직 형성되지 않은 초등학생들에게는 빛의 이중성도 그렇게 어려운 개념이 아닐 수 있다. 즉 실험상황에 따라 빛이 알갱이가 같은 입자일 수도 있고, 물결과와 같이 공간을 퍼져나가는 파동일 수도 있다는 개념은 Fig. 1과 같은 비유로 쉽게 설명할 수 있다(박종원과 이인선, 2021). Fig. 1에서는 원통을 왼쪽에서 보면 원으로 보이고, 오른쪽에서 보면 사각형으로 보인다는 것을 나타낸다. 따라서 Fig. 1의 비유는 빛이 무엇인지 아직 우리는 정확히 모르지만, 어떤 관찰을 하면 알갱이로 관찰되고, 다른 관찰을 하면 파동으로

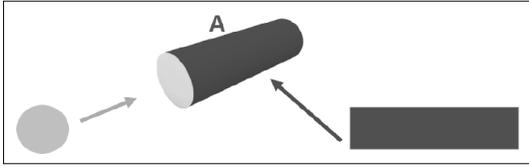


Fig. 1. An analogy to explain the duality of light

관찰될 수 있다는 것을 설명하는 데 사용할 수 있다. 이처럼 아직 고전적 자연관으로 굳어지지 않은 초등학생들에게 현대 물리 도입을 통해 오히려 새로운 자연관 형성을 촉진할 수 있고 이것이 다시 이후 과학학습을 촉진하는 역할을 할 수 있을 것이다.

III. 초등학교에서의 현대 물리를 위한 교수-학습 방안

1. 상식과 익숙함을 통한 학습

초등학생에게 현대 물리를 지도할 때에는 ‘상식’과 ‘익숙함’을 활용할 수 있다. 이는 학습이 반드시 논리적인 과정을 통해서만 일어나는 것은 아니라는 것을 전제로 한다. 예를 들어, 초등학생들이 알고 있는 지구의 자전은 실제로 지구의 회전을 관찰하거나 경험한 것도 아니고, 탐구나 추론 과정을 통해 얻은 결론도 아니다. 오히려 아침에 동쪽의 해를 보면 ‘해가 뜨는 것’을 관찰할 수 있을 뿐 지구 자전을 경험하기는 어렵다. 우리나라 지역의 경우 지구가 약 0.37 km/s 속도로 빠르게 회전하는데, 이로 인해 어지럽거나 사람이 튕겨 나가지 않는 이유를 설명하기도 못한다. 또한, 지구가 왜 회전하는지, 회전 방향이 왜 서쪽에서 동쪽인지에 대한 인과적인 설명도 쉽지 않다. 그렇지만 초등학생이 지구의 자전을 ‘알고’ 있는 이유는 지구의 자전이 초등학생들에게 상식적인 수준에서 당연한 지식으로 주어지면서 그들에게 익숙해졌기 때문이다. 따라서 ‘빨리 움직이면 천천히 흘러가는 시간’, ‘빛도 빨아들이는 블랙홀’, ‘온도에 따라 다르게 보이는 빛의 색’, ‘알갱이 성질을 가진 빛’, ‘신호를 증폭하는 트랜지스터’, ‘누르면 전기가 생기는 압전물질’ 등과 같은 현대 물리 내용도 상식 수준의 당연한 지식으로 초등학생에게 제시할 수 있을 것이다. 실제로 초등학생은 아니지만 Choudhary *et al.*(2018)은 7~10학년 학생에게 중력파에 관한 내용을 하루리는

짧은 시간 동안 지도한 결과, 아인슈타인 물리학의 핵심 개념에 대한 이해가 증가함을 관찰하였고, 이러한 이해증가는 나이나 선행개념에 무관하다고 하였다. 예를 들어, 빛이 사물에 힘을 작용할 수 있다는 개념에 대한 이해는 7학년 학생의 경우에 사전에 25%에서 사후에 83%로 증가하였다.

그러나 엄밀하게 정의된 과학개념과 달리 상식은 과학적으로 오개념인 경우가 많아, 과학학습을 방해할 수 있다는 지적을 고려하지 않을 수 없다. 예를 들어, ‘온도는 차고 뜨거운 정도를 나타낸다’, ‘에너지를 아껴 쓰자’, ‘힘을 주면 움직이고 힘을 주지 않으면 정지한다’와 같은 상식적 지식은 모두 물리학적 오개념에 해당한다. 그러나 오개념을 포함하고 있는 상식적 지식도 과학학습에서 새로운 학습을 위한 발판 역할을 할 수 있다는 관점도 있다. 예를 들어, Yu & Cole(2014)은 과학학습에서 상식의 긍정적인 역할과 부정적인 역할을 함께 논의하였는데, 학습은 인지구조의 재구조화 과정이며 과학학습은 일상적 경험에 기초한 선행 지식으로부터 누적적인 과정을 통해 일어난다고 하였다. 즉 과학적으로 불완전한 상식과 같은 선행개념들도 새로운 개념의 학습을 위한 닻의 역할을 할 수 있다는 것이다.

불완전한 개념, 오개념이 과학적 개념으로 발전하는 것은 실제 과학의 발달과정에서도 볼 수 있다. 즉 과학이 발달하는 과정을 보면, 이전의 잘못된 개념이 완전히 폐기되면서 새로운 개념이 등장하는 혁명적 과정도 있지만, 초기에 불완전하고 모순을 담고 있던 개념이 점차 정교화되고 세련되게 발달하는 진화적 과정도 있다(박종원, 2002; Tytler, 1998). 예를 들어, Lakatos(1994, pp. 55-68)는 보어의 불완전하고 부정합적인 초기 원자모형이 불일치 사례들에 의해 폐기되지 않고 오히려 세련되고 정교화되어 가면서 발달해 가는 과정을 설명하고 있다. 즉 불일치 사례들을 설명하는 과정에서 초기 전자의 원형궤도가 타원궤도로 바뀌고, 원자핵도 질량 중심을 중심으로 함께 회전하는 원자모형으로 바뀌었으며, 전자의 빠른 운동으로 인해 전자의 질량이 상대론적 질량으로 바뀌었다. 그리고 1913년 전자가 정해진 정상궤도에만 있을 수 있다는 가정은 10년이 지난 1924년 De Broglie의 물질파 개념으로 설명될 수 있었다. 후에는 코펜하겐 학파에 의해 확률론적 해석이 도입되면서 전자의 궤도 개

념은 전자가 발견될 확률이 가장 높은 위치를 나타내는 것이라고 바뀌었고 실제 전자의 궤도는 알 수 없다고 하였다.

따라서 초등학생들이 상식적 수준에서 현대 물리 내용을 불완전하고 피상적으로 알게 되면서 오개념이 생길 수도 있지만, 그러한 오개념은 학년이 올라가면서 점진적으로 발달하여 점차 올바른 이해로 발전할 수 있을 것이다.

2. 가상 경험과 사고 실험의 활용

가상 경험은 초등과학에 현대 물리를 도입하기 위한 유용한 방안이다. Kafai and Dede(2014)는 가상 경험이 학습에서 가지는 장점을 다음과 같이 네 가지로 정리한 바 있다. 첫째, 가상 경험은 시각화와 시뮬레이션을 통해 복잡한 현상을 탐구할 수 있도록 한다. 둘째, 아바타와 같은 기능을 이용하여 가상세계에서도 충분히 사회적 상호작용을 하면서 집단(community) 내 활동을 할 수 있다. 셋째, 가상 세계는 학생에게 동기를 유발하고 참여를 격려하는 데 도움이 되며, 이를 통해 자율성, 자아효능감 그리고 탐구기능 등을 향상하는 데 도움이 된다. 넷째, 가상세계에서의 활동에 대한 데이터를 얻을 수 있으므로, 학생이나 교사 또는 학부모에게 학습 활동에 대한 피드백을 주고, 나아가 평가에 도움을 줄 수 있다. 최근에는 다양한 교육용 시뮬레이션이나 애니메이션, 가상현실(VR: Virtual Reality), 증강현실(AR: Augmented Reality) 콘텐츠가 개발되고 있고, 이에 따라 가상 경험을 학습에 유용하게 활용할 수 있는 환경이 더욱 빠르게 조성되고 있다. 시뮬레이션은 물리의 형식적 측면, 물리의 수식에 익숙하지 않은 학생들에게 직관적인 이해를 가능하게 하고, 시각화 도구로써 실제 현상과 과학적 이론을 연결하는 다리가 될 수 있다. 그것은 비현실적인 상황에서의 탐구 활동을 가능하게 한다. 예를 들면 우리는 시뮬레이션 공간에서 지구 중력의 크기를 마음대로 조정할 수 있다. 가상현실(VR)과 증강현실(AR)과 같은 기술은 직접 관찰이 어렵거나 텍스트와 2D 자료로 설명하기에 어려운 학습 내용, 가시화하기 어려운 내용, 추상적인 개념, 위험하거나 경비가 많이 드는 실험 등을 다루기에 유용하다

(Dünser & Hornecker, 2007). 또 기존의 2D 이미지 교육환경을 벗어나 3D 기반의 입체적 교육환경을 제공함으로써 다-감각적인 정보를 제공하고 학습자의 몰입을 도와주며(노경희 등, 2010; 최섭과 김희백, 2020; Wu *et al.*, 2013), 공간 감각을 토대로 현상을 이해하도록 하는 데 효과적이다. 이러한 가상 현실(VR)과 증강현실(AR)은 실제 거시적 실체에 미시적 이미지나 정보를 겹쳐 보이도록 하거나 실제로는 조작이나 관찰이 어려운 우주 공간에서의 직접 조작 활동을 해 볼 수 있도록 한다.

현대 물리는 학생들이 직접 경험하기 어려운 상황을 다루기 때문에 가상 경험이 특별히 도움을 줄 수 있고, 실제로 많은 연구자가 현대 물리 지도를 위해 가상 경험을 개발하여 활용해 왔다. 예를 들어, 상대론 지도를 위한 ‘Real Time Relativity’라는 가상현실 시뮬레이션 프로그램이 있고(McGrath *et al.*, 2008; Savage *et al.*, 2007), 양자 현상을 지도하기 위해 게임 형식으로 개발된 ‘Virtual Lab by Quantum Flytrap’이라는 가상 실험실도 있다(Migdal *et al.*, 2020). 또 CERN과의 협력으로 개발된 ‘Big Bang AR’²⁾ 앱은 iso 운영 체제에서만 작동하는 하지만, 우주의 탄생과 형성 과정을 손안의 스마트폰으로 감상할 수 있게 해 주고, 우주를 배경으로 자신의 사진을 찍어 보는 재미를 더해 준다. 온라인 게임과 같은 활동도 이러한 가상 경험의 범주로 포함할 수 있을 것이다. ‘Quantum Moves’³⁾는 양자 컴퓨터 분야의 실제 문제를 시각화해 다룬 게임이다. 원자의 에너지 상태를 바꾸지 않으면서 원자 위치를 빠르게 옮길수록 높은 점수를 얻도록 했다. 이러한 시민참여 게임은 새로운 과학적 아이디어를 생성하고 게임의 분석 결과는 정식 논문으로 여러 편 발표되기도 했다. 초등학생도 이러한 게임에 참여하면서 양자역학의 기본 개념에 익숙해질 수 있다.

이러한 가상 경험을 과학학습에서 활용할 때, 가상 경험이 실제 경험보다 학습적인 면에서 효율이 낮다고 생각할 수도 있지만, 현대의 초등학생들에게는 이미 가상 경험이 매우 익숙하고 친숙할 수 있다. 따라서 가상 경험은 충분히 초등학생 학습에 도움을 줄 수 있는 유용한 학습 도구이고, 이를 통해 현대 물리 내용을 간접적으로 경험할 수 있게

2) <https://home.cern/resources/document/physics/big-bang-ar-app-background-information>

3) <https://citizensciencegames.com/games/quantum-moves/>

Table 1. Projects of teaching modern physics to elementary school students

프로젝트 사례	국가 (대상 학생)	주제	지도 방법
Einstein-First Project (Pitts <i>et al.</i> , 2014; Ruggiero <i>et al.</i> , 2021)	호주 (10~11세)	곡선 공간에서의 기하학과 중력을 포함한 아인슈타인 물리학의 기본 개념 <ul style="list-style-type: none"> • 시공간 다이어그램 • 시간과 공간의 연결 • 우주에 대한 두 가지 이야기와 Pi 이야기 • 풍선이 있는 곡선 공간 기하학 • 블랙홀의 재미 • 중력은 무엇인가? 	<ul style="list-style-type: none"> • 비유, 은유, 모형 전략을 사용한 강의를 통해서 아인슈타인 물리학과 관련된 개념 및 아이디어를 소개 • 체험 중심의 중력 발견 센터 견학을 통해서 강의 시간에 학습한 이론을 강화 • 과학자가 되어보는 역할놀이를 통해 우주, 시간, 중력에 대해 설명
The Particle Physics for Primary Schools (PPPS) program (Pavlidou & Lazzeroni, 2016)	이탈리아 (10~11세)	아인슈타인의 중력이론(상대성이론) <ul style="list-style-type: none"> • 중력의 의미 • 곡선에서의 평행선 • 블랙홀 주변에서의 움직임과 시간의 의미 • 갈릴레오와 아인슈타인이 살았던 역사적 맥락과 근본적인 발견 등 	<ul style="list-style-type: none"> • 시공간 시뮬레이터 실험(관찰)과 시각화 과정을 통해서 태양 주위의 행성들의 움직임을 유추 • 풍선에 그려진 삼각형의 내각 측정하기 활동을 통해 곡면의 특성을 이해
	영국 (8~11세)	물질의 기본 구성 요소들의 분류와 특성(입자물리학) <ul style="list-style-type: none"> • 세 가지 기본 입자(쿼크, 렙톤, 보손) • 물질과 반물질 • 입자 간의 상호작용(파인만 다이어그램) • 암흑물질 등 	<ul style="list-style-type: none"> • 비유와 은유 전략을 사용하여 추상적인 아이디어를 일상 개념과 연관 짓기 • 놀이 활동 중심의 카드게임을 통해 입자의 특성 및 입자들 사이의 상호작용 개념 익히기 • 예술과 공예 활동을 통해 입자 모델 만들기 • 입자 모델을 이용하여 파인만 다이어그램의 예를 설명하기

할 수 있을 것이다.

IV. 초등학생을 대상으로 한 현대 물리 교육 사례

복잡하고 추상적인 현대 물리 내용을 초등 수준의 학생들에게도 적합한 방법으로 교육할 수 있다는 것은 해의 사례를 통해서 확인할 수 있다. 최근 호주와 영국을 비롯하여 유럽의 여러 국가에서는 최신 물리학이 초등학생에게 일찍 노출될 수 있도록 다양한 교육 기회를 제공하고 있다(Pavlidou & Lazzeroni, 2016; Pitts *et al.*, 2014; Ruggiero *et al.*, 2021).

먼저, 서호주 대학교에서 진행하고 있는 ‘Einstein-First Project⁴⁾’에서는 어린 학생들에게 아인슈타인 물리학 개념을 가르칠 수 있도록 초등 수준에 맞는 교수-학습 자료를 개발하였고, 다양한 활동과 체험을 통해 초등학생들에게 현대 물리 개념을 소개하고 있다(Pitts *et al.*, 2014). 또 Pavlidou and Lazzeroni

(2016)는 오랜 입자물리학 연구 경험을 바탕으로 영국의 8~11세 학생들을 대상으로 워크숍을 설계하고 시범 적용하였는데, 워크숍 참여 과정에서 초등학생들은 여러 단계의 활동을 통해 기본 입자의 세계에 대해 배우고, 창의적인 디자인을 사용하여 입자 모델을 만들어봄으로써 현대 물리 개념을 이해하였다. 이처럼 현대 물리를 초등 수준에 도입하기 위한 다양한 시도들이 이루어지고 있으며, 이와 관련된 프로젝트 내용을 간략하게 정리하면 Table 1과 같다.

위의 프로젝트들에서 초등학생을 위한 현대 물리 내용은 크게 두 개의 중심축, 즉 아인슈타인 물리학(상대성이론)과 원자 세계와 아원자(subatomic particle) 세계에 대한 지식(입자물리학)으로 이루어져 있다. 그리고 이러한 내용을 초등학생에게 지도하기 위해서 강의, 실험, 역할 놀이(scripted play), 비유, 모델, 시공간 시뮬레이터,⁵⁾ 사고 실험 등 학생들의 흥미와 능력에 맞는 다양한 교수-학습 전략이 사용되고 있다. 세부 주제를 살펴보면, 아인슈타

4) <https://www.einsteinianphysics.com/>

5) 라이크라 시트 중심에 무거운 공을 놓았을 때 그 주변의 물체가 휘어진 궤도를 따라 운동하는 것을 관찰할 수 있도록 제작한 장치로, 질량이 존재하는 상태에서의 시공간의 곡률을 시각적으로 구현하였다.

인 물리학과 관련해서는 시간과 공간의 연결, 곡선 공간 기하학, 중력, 블랙홀 등의 개념적 아이디어를, 입자물리학과 관련해서는 기본 입자(쿼크, 렙톤, 보손), 물질과 반물질, 입자들 사이의 상호작용, 암흑물질과 같은 물질의 기본 구성 요소들의 분류와 특성에 대한 주제들을 주로 다루고 있다. 초등학교 학생들을 대상으로 한 이러한 교육 프로그램에서는 현대 물리의 추상적인 아이디어를 학생들이 구체적이고 경험적인 방법으로 체험하고 사고하며, 토론하는 것을 강조하고 있다.

호주와 이탈리아에서 수행된 ‘Einstein-First Project’에서 학생들은 시공간 시뮬레이터를 이용한 실험을 통해 라이크라 시트 위에서 움직이는 구슬의 경로를 관찰하고, 공의 질량이 클수록 구슬의 궤적은 더 휘어진다는 사실을 확인하게 된다. 이러한 활동은 학생들이 태양계의 질량 사이의 상호작용을 이해하도록 돕는다. 또 초등학교 학생들은 다른 크기의 풍선에 그려진 삼각형의 내각을 측정하고 내각의 합이 180도 이상일 수 있으며, 두 평행선이 만날 수 있다는 것을 확인하며 이를 통해 곡면의 특성을 이해하게 된다.

특히, 영국에서 진행된 PPS(The Particle Physics for Primary Schools) 워크숍에서는 러시아 인형 세트⁶⁾를 이용한 시연을 통하여 원자의 구조를 발견하는 방법, 즉 우리가 볼 수 없는 원자 안에 무엇이 있는지 알기 위해 입자를 분해하고 가속하고 서로 부수는 이유를 비유를 사용하여 소개하고 있다. 그리고 머핀 틀, 축구공과 탁구공을 사용하여 입자가 속기의 개념을 도입하고 있는데, 초등학교 학생들은 머핀 틀(미지의 원자 구조)에 축구공(큰 입자)과 탁구공(작은 입자)을 던졌을 때, 축구공은 항상 같은 방향으로 튕겨 나가지만 탁구공은 모두 같은 방향으로 튕겨 나가지 않는다는 것을 경험하게 되고, 이를 통해 작은 입자로 충돌시켰을 때 원자처럼 작은 물체의 구조를 확인할 수 있으며 충돌 후 이 작은 입자(탁구공)들이 어디로 가는지도 확인할 수 있다는 것을 알게 된다. 또 물질과 반물질에 대한 학생들의 이해를 돕기 위한 시각적 자료로 ‘Top quark’, ‘Bottom quark’, ‘Strange quark’ 등으로 이름 붙여진 크기와 질량, 색이 다른 삼각형 모양의 봉제 인형을 사용하거나 기본 입자의 이름, 질량, 전하량, 특성 등이

적혀 있는 종이(입자 카드)에 입자의 성격과 특성을 반영하여 그림으로 표현하고 (예를 들어, 물질은 흰색으로, 반물질은 검은색으로 표현하거나 모자나 쿿수염 등을 사용하여 입자의 특성을 표현) 작은 공을 사용하여 입자 모델을 만들어보는 활동을 통해 초등학교 학생들이 30개의 기본 입자의 이름과 특성을 알고 이해하도록 돕고 있다.

위의 프로젝트들은 초등학교 학생들에게 현대 물리 내용을 제시하는 것이 가능할 뿐만 아니라 적절한 교수 방법으로 교육 경험을 제공한다면 초등학교 학생들이 현대 물리 개념을 이해할 수 있다는 증거를 보고하고 있다. Pitts *et al.*(2014)은 호주의 한 초등학교에서 6학년 학생 26명을 대상으로 10주 동안 현대 물리 내용으로 과학 수업을 진행하였고, 학생의 개념 이해가 통계적으로 유의하게 향상되었음을 보고하였다. 특히 초등학교 학생들은 휘어진 공간을 더 잘 이해할 수 있었고, 중력에 대한 이해가 향상되었는데, 교육 이전에는 3명의 학생만이 아인슈타인 물리학과 일치하는 설명을 할 수 있었지만, 교육 후에는 26명 중 13명의 학생이 아인슈타인 물리학을 자신의 언어로 올바르게 설명을 할 수 있었고, 또 다른 10명의 학생도 부분적으로는 아인슈타인 물리학과 일치하는 설명을 하는 것으로 나타났다. Ruggiero *et al.*(2021)은 이탈리아 토리노에 있는 초등학교 3개 학급에서 뉴턴 물리학을 교육을 받지 않은 학생들에게 15시간 동안 현대 물리 수업을 진행하였다. 프로그램 적용 과정에서 학생들의 아인슈타인 물리학 관련 개념 이해를 조사한 결과, 교육에 참여한 50% 이상의 초등학교 학생들이 시공간 곡률의 개념과 블랙홀을 아인슈타인 관점으로 설명할 수 있음을 확인하였다. 또 Pavlidou and Lazzeroni (2016)의 연구에서는 입자물리학 워크숍 참여 후 초등학교 학생들이 ‘과학자는 원자와 같은 작은 것의 구조를 어떻게 알아낼까?’, ‘얼마나 많은 종류의 입자들이 있으며 그들의 이름은 무엇인가?’, ‘특별한 입자의 특징을 기억하고 있는가?’ 등의 질문에 쉽게 대답하였다.

또한, 초등학교 학생들에게 현대 물리를 도입하는 것이 학생들의 과학에 대한 흥미나 태도 측면에도 도움이 된다는 연구 결과들도 보고되고 있다. ‘Einstein-First Project’에 참여한 학생들이 응답한 설문 결과

6) 목각 인형 속에 조금씩 작은 인형이 반복해서 들어 있는 구조로 제작되어 있으며, 학생들은 인형 세트 안에서 작은 인형들을 계속 찾을 수 있다.

를 살펴보면, 5~9세 학생의 44%와 10~14세 학생의 56%가 아인슈타인 물리학 내용을 배우기에 자신들이 너무 어리다는 것에 동의하지 않았다(Foppoli *et al.*, 2018). 또 초등학생을 위한 입자물리학 프로그램(PPPS) 말기에 학생들이 응답한 설문조사 결과에 따르면 입자물리학 워크숍 참여 경험이 새로운 주제에 관한 관심을 높이는 데 도움이 되었고, 이를 통해 평균적으로 과학 공부에 대한 동기가 증가한 것으로 나타났다(Lazzeroni *et al.*, 2021).

V. 초등 교육과정에 현대 물리 내용 도입 방안

초등학생을 대상으로 하는 상업용 학습만화나 도서를 보면, 이미 초등학생을 대상으로 현대 물리 내용을 지도하기 위한 시도는 시작되었다고 볼 수 있다. 그리고 방과 후 프로그램이나 과학관과 같은 학교 밖 프로그램에서도 초등학생을 대상으로 현대 물리 지도가 일부 이루어지고 있다고 본다. 그러나 본 연구에서는 현대 물리에 대한 기본적인 이해는 모든 초등학생에게 필요한 과학적 소양이라고 보았다. 즉, 현대 물리는 이미 120여 년이나 지난 학문의 내용이라는 점에서, 그리고 초등학생들이 살아가고 있는 세계가 이미 현대 물리와 연관된 세계라는 점에서, 초등학생들도 현대 물리를 배울 권리가 있다고 보았다. 나아가 교육과정 속에 현대 물리를 도입하는 것은 학교에서 배우는 과학을 초등학생들의 일상적인 경험이나 삶과 연결할 수 있는 중요한 측면이라고 보았다. 이러한 점에서 본 연구에서는 초등학교 과학 교육과정에 현대 물리를 도입하는 방안을 제안해 보고자 하였다.

이 절에서는 초등학교 과학 교육과정에 구체적으로 현대 물리의 어떤 내용을 어떤 수준으로 도입할 수 있을지 두 가지 방안을 제안하고자 한다. 각각의 방안은 연구자 간의 반복적인 논의를 통해 제안되었으며 총 7회의 집중 논의가 이루어졌다. 연구자 3인 중 1인은 초등 과학과 교육과정 개발 경험과 초등학교 과학 교과서 개발 경험이 있으며 1인은 중등학교 과학과 교육과정 개발 자문위원 경험과 고등학교 물리 교과서 개발 경험이 있다. 또

연구자 2인은 대학에서 현대물리학을 지도한 경험이 있다. 이러한 경험을 바탕으로 연구자들은 초등 수준에서 현대 물리의 도입이 가능성을 여러 가지 측면에서 탐색하고 초등학생 수준에서 이해가 가능할 것으로 생각하는 몇 가지 주제에 대해 구체적인 내용 수준과 지도방안을 제안하였다. 이러한 제안은 후속 연구를 통해 적절한 자료개발과 경험적이고 실증적인 연구를 통해 그 가능성과 효과가 입증되어야 하지만 현대 물리 도입 가능성에 대한 논의와 담론을 촉발할 것으로 기대한다.

1. 현재 교육과정 구조와 연계하여 도입하는 방안

초등학교 과학과 교육과정에 현대 물리를 도입하는 첫 번째 방안은 현재 교육과정 내용에 관련된 현대 물리 내용을 연계시켜 추가하는 방안이다. 이 방안은 현대 물리 내용을 체계적으로 제시하지 못한다는 단점은 있지만, 현재의 교육과정을 지도하면서 자연스럽게 현대 물리 내용을 도입할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 도입할 현대 물리 내용은 현행 교육과정 내용과 연결될 수 있는 내용인 동시에 초등학교 수준에서 지도 가능하다고 판단되는 내용으로 선정하였다. 그리고 각각의 현대 물리 내용에 대해 성취 기준과 학습할 내용을 제시하고, 가능한 지도방안을 제안해 보았다.

1) 질량-에너지 등가 개념

현재 초등학교 4학년에서 다루는 ‘물체의 무게’ 단위에서는 일상생활에서 무게 측정이 필요한 이유를 알고, 수평 잡기 활동을 통해 물체의 무게를 비교하도록 한다. 또 무게와 용수철의 늘어난 길이의 관계를 조사하고 용수철저울의 원리를 설명할 수 있도록 하며 마지막으로 간단한 저울을 직접 설계하여 제작해 보도록 하고 있다.

이 단위와 관련해서는 무게와 질량의 개념을 구분하는 것이 적절한 것인지 그리고 그러한 개념을 어떻게 도입해야 하는지 많은 논의가 있다(박준형과 전영석, 2020). 본 연구에서는 초등학교 수준에서 굳이 무게와 질량 개념을 명확하게 구분하지 않아도 된다고 보았다. 즉 질량을 단순하게 물질의 양으로 정의하고,⁷⁾ 물체의 무게는 질량에 비례한다

7) 물질의 양은 부피로 정의할 수도 있다. 그러나, 물질이 얼마나 촘촘하게 또는 성기게 모여 있는지에 따라 부피는 달라질 수 있다는

Table 2. Introduction of energy-mass equivalence concept

주요 개념	교육과정 구체화 방안
성취 기준	물체의 질량이 에너지로, 또는 에너지가 물체의 질량으로 변환되는 예를 조사하여 발표할 수 있다.
학습 내용 $E=mc^2$	우주의 탄생은 빅뱅에서 시작되었다. 빅뱅은 우주 생성 과정을 설명하는 이론으로 우주 생성 초기에는 빛에너지로부터 물질이 만들어지고 다시 물질이 빛에너지로 바뀌는 과정이 활발하게 일어난다. 빅뱅 이론을 통해 에너지와 질량이 서로 바뀔 수 있다는 것을 알고 실제 실험 사례를 조사를 통해 알 수 있다.
지도 방안 예시	[1단계] 하늘의 별들이 처음에 어떻게 탄생했는지 토의한다. [2단계] 빅뱅 애니메이션 ⁸⁾ 시청을 통해 빛에너지가 물질로 바뀌고 다시 물질이 빛으로 바뀔 수 있음을 이해한다. [3단계] 태양도 물질이 에너지로 변환되는 과정을 통해 에너지가 나온다는 것을 요약하여 발표할 수 있다.

는 정도로 질량과 무게 개념을 동시에 도입할 수 있다고 보았다. 특히, 초등학생들이 다양한 과학 서적이거나 미디어를 통해 ‘ $E=mc^2$ ’이라는 공식을 들어 본 경우가 있다고 가정하였다. 따라서 이 단원의 내용과 연관 지어 질량-에너지 등가 개념을 도입할 수 있다고 보고, Table 2와 같이 성취기준과 학습 내용 및 지도방안 예시를 제안해 보았다.

Table 2에서 에너지-질량 등가 개념 지도방안은 크게 3단계로 1단계는 상황 도입, 2단계는 개념 도입, 3단계는 개념 확장으로 구성해 보았다. 즉 1단계에서는 학생들에게 우주의 별들이 처음에 어떻게 만들어졌는지를 자유롭게 상상하면서 토의해 보도록 한다. 즉 넓은 우주에 있는 많은 물질이 어떻게 만들어졌는지에 초점을 맞추어 상상해 보도록 한다. 2단계에서는 약 150억 년 전 대폭발을 하면서 우주의 물질이 만들어졌다는 빅뱅우주론을 소개하기 위해, 관련된 애니메이션을 활용할 수 있다. 이 과정에서 빛에너지가 물질로 바뀌고 다시 물질이 에너지로 바뀔 수 있다는 설명을 도입한다. 이때 ‘ $E=mc^2$ ’ 공식을 직접 도입할 필요는 없고, 빛으로부터 만들어지는 물질에 반물질이 포함된다라는 것을 설명할 필요도 없을 것이다. 단지 빛은 질량(무게)이 없는 에너지로서, 빛이 물질로 바뀌는 현상은 곧 에너지가 물질로 바뀌는 것임을 설명한다. 3단계에서는 태양도 물질들이 서로 결합하면서 질량(무게)이 줄어들고, 줄어든 질량(무게)이 빛에너지와 열에너지 등으로 바뀌고 있으며, 이것이 태양 에너지라고 설명한다. 나아가, 원자력 발전소에서는 물질이 쪼개지면서, 이 경우에도 질량(무게)이 줄어들고, 이때 줄어든 질량(무게)이 에너지로 바뀌

어 전기를 만든다고 소개할 수도 있다.

2) 일반 상대론의 흰 공간 개념

4학년에서 다루고 있는 ‘그림자와 거울’ 단원에서는 여러 가지 물체의 그림자를 관찰하여 그림자가 생기는 원리를 이해하고 전등과 물체 사이의 거리에 따른 그림자 크기 변화를 학습한다. 또 평면 거울의 성질과 그 이용 예를 조사하는 활동을 한다. 이때 이러한 현상은 빛의 직진 성질로 설명하게 된다. 따라서 이 단원과 관련된 현대 물리 내용으로는 휘는 빛을 도입할 수 있다고 보고, 이를 통해 Table 3과 같이 흰 공간 개념을 일부 도입하는 방식을 제안해 보았다. 그리고 흰 공간 개념을 이용하여 초등학생들도 흥미가 있을 것으로 판단되는 블랙홀을 소개해 보고자 하였다.

Table 3의 지도방안 1단계에서는 평편하게 퍼진 종이 위에 빛의 경로를 직선으로 그려보도록 한 다음, 종이를 둥글게 구부릴 때 종이 위에 그린 직선이 휘어진다는 것을 관찰하고, 발표해 보도록 한다. 그리고 둥근 공위에 두 점을 찍고 두 점 사이의 가장 가까운 선을 그려 보도록 하고, 이때 그려진 선도 곡선이라는 것을 관찰하고, 발표해 보도록 한다. 2단계에서는 시뮬레이션을 통해 별에서 나온 빛이 무거운 별 근처를 지날 때 휘어서 진행한다는 것을 관찰하고, 이것은 공간이 휘었기 때문이라고 추론해 보도록 한다. 3단계에서는 시뮬레이션에서 별이 무거운 정도에 따라 빛이 휘는 정도가 다르다는 것을 관찰하고, 별이 더 무거워지면 빛이 어떻게 될지 추론해 보도록 한다. 즉 매우 무거운 별 근처를 지나는 빛은 계속 휘어서 빠져나오지 못할 수 있고,

점에서 물질의 양을 질량으로 정의하는 것이 더 적절하다고 볼 수 있다.

8) <https://www.youtube.com/watch?v=4jYkfyhR6Q>

Table 3. Introduction of curved space concept in general relativity

주요 개념	교육과정 구체화 방안
성취 기준	곧게 나아가는 성질을 가진 빛이 공간의 성질에 따라 휘어질 수 있는 예를 조사하여 발표할 수 있다.
학습 내용	표면에서 종이에 직선을 그려서 종이를 구부리면 선이 휘어지듯이 중력에 의해 휨 공간에서 진행되는 빛은 휘어서 진행하게 된다.
휨 공간	[1단계] 종이에 직선을 그려서 종이를 구부린 다음 선이 어떻게 되는지 발표해 본다. 마찬가지로 공위에 두 점을 잇는 선을 그리고 그것이 직선인지 발표해 본다.
지도 방안 예시	[2단계] 무거운 별 근처를 지나가는 빛이 어떻게 진행하는지 시뮬레이션 ⁹⁾ 을 통해 관찰한다. 이를 통해 무거운 별 근처의 공간이 휘었는지 아닌지를 추론하여 토론해 본다. [3단계] 시뮬레이션에서 무거운 별이 더 무거워질수록 빛의 휨은 정도가 커진다는 것을 관찰하고, 충분히 무거운 경우 빛이 빠져나오지 못하는 상황을 추론해 보고, 그러한 경우가 블랙홀이라고 것을 이해한다.

Table 4. Introduction of relativistic time delay

주요 개념	교육과정 구체화 방안
성취 기준	빛의 속도에 가깝게 빠르게 운동하는 우주선 안에서 시간의 흐름과 지표면에 정지한 시계의 시간의 흐름을 비교할 수 있다.
학습 내용	빠르게 운동하는 우주선 안에서의 시간의 흐름은 지표면에서의 시간의 흐름보다 느리다.
시간 지연	[1단계] 영화나 소설 등에서 우주여행을 하고 돌아온 우주인과 지구에 남아있는 사람의 나이를 비교하는 장면을 찾아본다.
지도 방안 예시	[2단계] 우주인과 지구인의 나이에 차이가 나는 현상을 시간의 흐름으로 설명해본다. [3단계] 시뮬레이션 계산기 ¹⁰⁾ 를 이용하여 빠르게 운동하는 우주선 안에서 시계의 시간이 얼마나 느려지는지 살펴본다.

이러한 경우가 블랙홀이라는 것을 교사가 간단하게 소개하도록 한다.

3) 시간 지연

5학년 ‘물체의 운동’ 단원에서는 물체의 이동 거리와 걸린 시간을 측정하여 속력을 구해보고 일상 생활에서 속력과 관련된 안전 사항이나 안전장치의 예를 찾아보도록 한다. 이 단원에서는 Table 4와 같이 속도가 빛의 속도에 가깝게 매우 빠른 상황을 도입하고, 그러한 상황에서는 시간이 천천히 흘러갈 수 있다는 상대론적 시간 지연 현상을 소개할 수 있다. 이 내용은 이미 영화 등을 통해 초등학생도 시간 지연 현상을 접해 보았을 것으로 가정하였다.

Table 4의 지도방안 1단계에서는 SF영화를 통해 우주여행을 하는 우주인이 지구에 남아있던 사람과 다시 만났을 때, 두 사람의 시간이 서로 다르게 흘러간 상황에서 두 사람의 나이를 비교해 본다. 대부분 우주여행을 한 사람은 젊고 지구에 남아있던 사람은 늙어 있는 장면을 보게 된다. 2단계에서

는 우주인과 지구인의 나이에 차이가 나는 것으로부터 우주선과 지구에서 시간이 다르게 흘러갔다는 것을 추론해 보도록 한다. 이때 이러한 시간 흐름의 차이가 우주선이 빠르게 운동하기 때문이라는 것을 교사가 설명한다. 3단계에서는 상대론적 시간 지연 계산기를 이용하여, 2단계에서 추론한 시간 지연 효과가 우주선의 속도에 따라 달라진다는 것을 확인하고, 다양한 속도에서 시간이 얼마나 다르게 흘러가는지를 확인해 본다. 예를 들어, 우리가 경험하는 비행기 여행 경우도 매우 작지만, 시간 지연이 있다는 것을 확인해 본다.

요약하면, 현재의 교육과정과 연계하여 현대 물리 내용을 도입하는 방안에서는 초등학생들이 배우는 내용으로부터 자연스럽게 연결되어 현대 물리 개념이 도입되는 방식을 제안해 보았다. 특히 도입되는 현대 물리 내용은 현대 물리의 개념체계 측면에서 기본적으로 핵심적인 내용보다는 초등학생에게 흥미를 유발할 수 있는 개념을 우선해서 고려하였다. 즉 $E=mc^2$, 휨 공간과 블랙홀, 시간 지연

⁹⁾ https://javalab.org/gravitational_lensing/

Table 5. Introduction of quantum theory in elementary school science curriculum

주요 개념		교육과정 구체화 방안
불확정성 원리	성취 기준	액체나 기체 온도를 측정하는 상황에서, 온도계로 인해 액체나 기체의 원래 온도가 바뀔 수 있음을 설명할 수 있다.
	학습 내용	알코올 온도계를 이용하여 물의 온도를 측정할 때, 측정 대상(물)과 측정 도구(온도계) 사이의 상호작용으로 인해 측정 대상이 영향을 받는다.
	지도 방안 예시	[1단계] 따뜻한 물의 온도를 측정하는 상황에서 온도계를 넣기 전과 온도계로 측정한 물의 온도가 같은지를 토론해 본다. [2단계] 온도가 같지 않다면 그 까닭을 설명해 본다. [3단계] 적외선 온도계는 직접 접촉하지 않고 온도를 측정하는데 이 경우에도 측정을 통해 온도가 바뀔 수 있는지를 설명해 본다.
빛의 이중성	성취 기준	빛이 측정 상황에 따라 알갱이의 성질과 파동의 성질로 나타날 수 있다는 것을 비유적으로 표현할 수 있다.
	학습 내용	빛이 한 점에 모여 있는 작은 알갱이의 성질을 가질 수도 있고, 물결과 파와 같이 공간 중에 널리 퍼져있는 파동의 성질을 가질 수도 있다는 것을 Fig.1의 비유로 표현할 수 있다.
	지도 방안 예시	[1단계] 작은 쇠 구슬이 굴러가는 모습과 잔잔한 수면 위에서 퍼져나가는 물결과를 관찰하고, 진행 과정에서의 차이점(선을 따라 진행하는지, 공간에 퍼져서 진행하는지)을 비교하여 발표한다. [2단계] Fig. 1의 비유를 통해 원통이 보는 위치에 따라 원으로 보일 수도 있고 사각형으로도 보일 수 있듯이, 빛을 관찰하는 방식에 따라 알갱이로 관찰될 수도 있고 공간에서 퍼져나가는 파동으로 관찰될 수도 있음을 추론해 보고, 각각의 경우를 그림으로 표현해 보도록 한다. [3단계] 주변에서 관찰하는 방식에 따라 전혀 다른 성격으로 관찰될 수 있는 사례(예: 흰색 공을 빨간 셀로판지로 관찰하는 경우와 파란 셀로판지로 관찰하는 경우)를 찾아 발표해 본다.
확률 개념	성취 기준	자연 및 주변에서 일어나는 현상을 확률적으로 표현할 수 있다.
	학습 내용	동전을 던지거나, 슈뢰딩거 고양이 사고 실험과 같은 상황에서 직접 관찰하기 전에는, 여러 가지 가능한 상황들이 확률적으로 함께 존재하는 사실을 표현할 수 있다.
	지도 방안 예시	[1단계] 동전을 던질 때 동전의 앞면이나 뒷면이 나올 확률을 말해 본다. 이때 확률을 분수로 표현해 본다. [2단계] 비디오 자료 ¹⁰⁾ 를 일부 시청하고(2:14-4:09까지의 내용), 슈뢰딩거의 이야기를 정리해 본다. [3단계] 고양이 상자의 문을 열었을 때 고양이가 살아있을 확률과 죽어있을 확률을 표현해 본다. 그리고 상자의 문을 열었을 때 비로소 고양이가 살았는지 죽었는지 알 수 있으며, 상자의 문을 열기 전에는 고양이가 살아있을 수도 있을 확률과 죽어있을 확률이 함께 있을 수 있다는 것을 이해하도록 한다. 앞서 다루었던 동전도 상자 속에 동전을 넣고 흔들어 놓으면, 상자 안을 직접 관찰하기 전에는 앞면일 확률과 뒷면일 확률이 함께 있다는 것을 추론해 본다.

현상이 그렇다고 보았다.

2. 독립된 단원으로 도입하는 방안

앞 절에서는 현재의 교육과정과 연계될 수 있는 현대 물리 내용으로 어떤 경우가 가능한지를 살펴 보았다. 여기에서는 초등학교 과학 교육과정에 하나의 독립된 단원으로 현대 물리 내용을 도입하는 방안을 생각해 보았다. 이 방안은 현재의 교육과정과의 연계가 불명확하다는 단점은 있지만, 현대 물리 내용을 별도의 단원에서 체계적으로 제시할 수 있는 있다는 장점이 있다. 본 제안에서는 Table 5와 같이 3개의 주제를 선정해 보았는데, 모두 고전적 자연관과 다른 양자역학적 자연관을 부각하기 위

해 제안해 보았다. 즉 이러한 양자론 관련 단원은 기계론적이고 결정론적인 자연관이 아닌 상호작용적이고, 확률적 관점을 가지게 하는데 효과적일 수 있다고 보았다. 이때 상대론도 별도의 단원으로 구성하는 것이 가능하지만 상대론은 현재 단원과의 연계가 어느 정도 가능함을 앞 절에서 제안하였으므로, 양자론을 별도의 단원으로 구성하는 방안을 제안해 보았다.

Table 5의 불확정성 원리는 미시세계에서 소립자의 운동량과 위치를 동시에 정확하게 알 수 없다는 것인데, 이러한 근본적인 이유는 관찰행위가 관찰 대상자에게 영향을 주기 때문이다. 초등학생들에게 운동량과 위치의 불확정성 개념을 도입할 수는 없

¹⁰⁾ <http://www.shellac.org/slu/slutime.html>

¹¹⁾ <https://www.youtube.com/watch?v=hg798x6rAnU>

지만, 관찰행위가 관찰대상에 영향을 준다는 의미는 도입할 수 있다. 이를 위해, 지도방안 1단계에서는 알코올 온도계를 이용한 따뜻한 물의 온도를 측정하는 상황에서, 온도계의 눈금으로 읽은 물의 온도가 온도계를 넣기 전의 원래 물의 온도와 같은지 아닌지 토론해 본다. 학생들은 ‘열평형’이란 용어는 학습하지 않지만, 온도가 높은 물체에서 온도가 낮은 물체로 열이 이동하고 두 물체의 온도가 같아진다는 내용은 실험을 통해 학습하기 때문에 1단계에서 다양한 의견이 개진될 수 있을 것이다. 2단계에서는 온도계를 이용한 온도 측정 과정에서는 온도계가 물속에 들어가면서 물과 온도계 사이에 열을 주고받으며 원래 물의 온도가 변할 수밖에 없다는 것을 설명한다. 즉 온도를 측정하는 행위가 측정대상의 온도에 영향을 주며 마련이라는 것을 설명한다. 3단계에서는 적외선 온도계는 물체에 직접 접촉하지 않지만, 물체에서 나오는 열을 이용하여 물체 온도를 측정한다는 원리를 소개하고 적외선 온도계로 물체의 표면 온도를 측정하는 경우 물체에서 나오는 열에 의해 물체의 원래 온도가 변하게 된다는 것을 추론해 보도록 한다.

‘빛의 이중성’에서는, 먼저 구슬이 굴러가는 경우와 물결파가 퍼져나가는 경우를 관찰하여, 물체는 하나의 경로로 진행하지만, 물결파는 공간에 퍼져 진행한다는 차이점을 인식하도록 한다. 그리고 Fig. 1을 이용하여 관찰자가 관찰하는 방식에 따라 관찰대상이 다르게 관찰될 수 있다는 것을 도입한다. 즉 자연이 우리에게 보여주는 모습은 자연과 우리가 어떻게 상호작용하는가에 따라 다를 수 있다는 점에 초점을 맞추었다. 빛도 관찰하는 방식에 따라 구슬과 같이 진행되는 것으로 관찰될 수도 있고, 물결파와 같이 진행되는 것으로 관찰될 수도 있다고 도입한다. 그리고 빛이 진행하는 두 가지 방법을 그림으로 그려 시각적으로 표현해 보도록 한다. 빛의 이중성에 대한 이해가 학생들에게 어려울 수 있으므로, 일상적인 상황을 예로 활용해도 좋다. 즉 색이 다른 셀로판지를 통해 흰색의 공을 보면 공이 다른 색으로 보이는 상황을 예로 들거나, 영수는 칠수에게는 ‘친절한’ 친구이지만, 경호에게는 ‘불친절한’ 친구일 수도 있다는 예를 들 수도 있다. 이러한 일상적 상황의 예시는 양자론의 기본개념들이 ‘이상한 나라의 앨리스’와 같은 내용이라기보다는 학생들의 일상적 상황을 이해하는 데에도 관

련성이 있는 내용이라는 점을 강조하기 위해서 제안해 보았다.

‘확률 개념’에서는 먼저 동전이나 주사위를 이용하여 간단히 확률 개념을 도입한다. 슈뢰딩거 고양이 사고 실험은 만화나 비디오를 이용하면 초등학교 학생들도 실험과정 자체는 어렵지 않게 이해할 수 있다. 그리고 상자 문을 열기 전에 상자 안의 고양이 상태를 확률로 표현해 보도록 한다. 이때 문을 여는 순간, 고양이 상태는 하나의 상태로 정해진다는 양자 도약 개념은 도입하지 않고, 문을 열기 전에 고양이 상태는 산 고양이와 죽은 고양이의 상태가 확률을 가지고 동시에 가능하다는 점만 도입한다. 그리고 다시 동전의 경우로 돌아와서, 상자 속에 동전을 넣고 흔들고 나면, 동전의 상태는 앞면의 상태와 뒷면의 상태가 모두 확률적으로 가능하다는 추론을 해 보도록 돕는다. 이러한 양자중첩 개념은 일상적인 상황을 이용하여 비유적으로 도입할 수도 있다. 예를 들어, 초등학교생은 앞으로 과학자가 될 확률과 미술가가 될 확률을 동시에 가지고 있을 수 있다. 또 여행 계획을 세울 때도 여행을 가진 전에는 산으로 여행을 갈 확률과 바다로 여행을 갈 확률이 동시에 있다고 할 수 있다.

VI. 결론 및 제언

우리나라 과학과 교육과정은 계속 변화해 왔지만, 그 내용 요소는 큰 변화가 없었다. 특히 초등학교 과학 교육과정의 경우 수십 년 전과 비교하여 크게 내용 요소가 변화된 것이 없다. 과학기술의 빠른 발달에도 불구하고 교육과정은 19세기의 물리학 내용을 크게 벗어나지 못하는 것에 관해 과학 교육 공동체에서 진지한 논의와 연구가 필요하다. 특히 초등학교 수준에서는 학생들의 이해 수준이나 발달 수준이 제한적이라는 관점에서 교육과정 내용 요소를 혁신적으로 변화시키는 것에 대한 논의가 거의 이루어지지 않았었다.

본 연구에서는 초등학교 과학 교육과정에 현대 물리 내용을 도입하는 것의 가능성을 논의하였다. 초등학교생에게 현대 물리를 지도하는 것이 왜 필요한지 현대 물리 도입의 필요성을 논의하였고, 실제로 초등학교생에게 현대 물리를 지도한 외국의 사례와 연구 결과를 살펴보았다. 그리고 구체적으로 우리나라 초등학교 과학 교육과정에 현대 물리를 도

입하기 위한 몇 가지 방안을 제안하였다.

현대 물리는 학생이 경험하는 다양한 일상적 상황과 연계될 수 있으며, 학생들이 배우고 싶은 내용으로서 과학에 대한 흥미와 호기심을 높일 수 있다. 또한, 아직 고전적 자연관이 굳어지지 않은 초등학생에게 현대 물리를 도입하면 새로운 자연관 형성을 도울 수 있다. 최근 현대 물리를 초등 수준에 도입하기 위한 해외의 몇몇 프로젝트에서도 학생의 이해와 흥미 증가에 관한 긍정적인 결과를 보고하고 있다.

연구자들은 초등학생 수준에서 이해가 가능할 것으로 생각하는 몇 가지 주제에 대해 구체적인 내용 수준과 지도방안을 간략하게 제안하였다. 사실 초등 과학교육 과정에 현대 물리 내용을 도입하자는 본 논문의 주장은 교육과정에 대한 관점의 변화, 실험적 시도와 연구를 위한 제안에 가깝다. 즉 물리학 개념체계 측면에서도 보면, 초등학교 과학 교육과정에 현대 물리를 도입할 수 있는 논리적이고 정합적인 정당성을 부여하기가 쉽지 않다. 예를 들어, 현대 물리 개념을 초등학교 교육과정에 도입하고자 하면 어느 정도 사전 개념 지도가 필요할 수 있고, 현대 물리 내용을 표면적으로만 배우면서 오개념이 형성될 수도 있으며, 학생들이 고전 물리와 현대 물리를 동시에 배우면서 자연관에 대한 혼란이 있을 수도 있을 것이다. 이러한 여러 가지 논리적인 한계로 인해 현대 물리가 이제까지 초등과정에 도입되지 못했다고 본다. 그러나 본 연구에서는 이러한 논리적 한계를 넘어서서 초등 과학교육에 대한 관점 자체를 변화시키고 보다 과감한 변화를 위한 담론을 촉발하고자 하는 목적으로 현대 물리 도입을 제안한 것이다.

그러나 이러한 제안이 교육적으로 의미가 있려면 후속 연구를 통해 적절한 자료개발과 경험적이고 실증적인 연구를 통해 그 가능성과 효과가 입증되어야 할 것이다. 이러한 점에서 구체적으로 후속되어야 할 연구를 제안하면 다음과 같다. 첫째, 현대 물리와 관련하여 초등학생이 알고 싶은 것, 배우고 싶은 것이 무엇인지 학년 수준이나 성취 수준과 같은 다양한 변인별로 체계적으로 조사할 필요가 있다. 이것은 연구 방법에 따라, 즉 어떻게 묻는지에 따라 다른 결과가 나올 가능성이 크므로 세심한 연구 계획이 필요하다. 또한, 경험이 많은 초등 교사가 학생들의 수준과 이해 능력에 대해 잘

이해하고 있을 것이므로 초등 교사들이 현대 물리 내용의 도입에 관해 어떠한 의견을 가지는지 동시에 조사하는 것도 필요하다. 이 또한 교사 자신이 현대 물리 내용을 이해한 상태에서 의견을 내는 것이 바람직하므로 주의 깊은 연구 설계가 뒤따라야 할 것이다.

다음으로 현대 물리 특정 주제와 관련된 다양한 초등 수준의 교수-학습 자료를 개발하는 연구가 필요하다. 과학이나 수학에 대한 사전 지식이 많지 않아도 이해할 수 있는 텍스트 자료, 시각자료가 필요하고 학생들이 직관적으로, 시각적으로 혹은 비유적으로 현대 물리의 내용을 이해할 수 있는 간단한 활동 중심의 프로그램도 필요하다. 특히 본 연구에서 제안한 바와 같이 다양한 가상 경험 자료, 즉 시뮬레이션, 애니메이션, 가상현실(VR), 증강현실(AR), 게임 등을 개발하는 것도 필요할 것이다. 이와 같은 새로운 교수-학습 자료의 개발과 현장 적용, 효과 검증은 단기간에 이루어질 수 없고 연구자들의 꾸준한 관심과 연구가 어느 정도 축적되어야 할 것이다. 본 연구에서 조사한 외국의 프로젝트 사례들은 이러한 연구에 디딤돌 역할을 할 수 있을 것이다. 또한, 본 연구에서 제안한 간단한 지도방안들도 이에 참고가 될 것으로 기대한다.

마지막으로 교육과정에 관한 연구가 필요하다. 초등학교 과학 교육과정에 현대 물리가 도입된다면, 기존의 내용에서 무엇을 줄여야 하는지에 대한 결정도 필요할 것이다. 나아가 초등학교, 중학교, 고등학교의 전체적인 구조와 연계도 중요하다. 즉 현대 물리 도입을 초등학교 수준에서만 논의한다면 교육과정을 실제로 변화시키는데 적절한 대안을 제시하지 못할 것이다. 따라서 거시적인 관점에서 고전 물리학의 내용과 현대물리학의 내용을 어떠한 체계로 구조화하는 것이 좋을지 여러 가지 교육과정 모델을 제시하고 그러한 모델을 중심으로 과학교육 공동체의 토론과 협의, 연구를 통해 교육과정을 혁신하려는 노력이 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

- 노경희, 지형근, 임석현(2010). 증강현실 콘텐츠 기반 수업이 학업성취, 학습흥미, 몰입에 미치는 효과. 한국콘텐츠학회논문지, 10(2), 1-13.
- 박종원(2002). 학생 개념체계의 연속적 세련화와 정교화

- 를 통한 개념 변화 분석: 이론적 논의를 중심으로. 한국과학교육학회지, 22(2), 357-377.
- 박종원(2016). 과학적 소양에 대한 세 가지 논의: 통합적 이해, 교육과정에서의 정착, 시민교육을 중심으로. 한국과학교육학회지, 36(3), 413-422.
- 박종원, 이인선(2021). 예비 물리교사와 물리교사의 상대론과 양자론에 대한 인식. 새물리, 71(5), 476-489.
- 박준형, 전영석(2020). 초등학교에서 무게와 질량 단위 도입의 문제에 대한 고찰. 새물리, 70(7), 603-612.
- 조현국(2014). 20세기 상대성이론과 미술의 관계의 논의를 통한 과학교육에 대한 시사점. 새물리, 64(5), 550-559.
- 최섬, 김희백(2020). 가상현실 특성을 반영한 VR 프로그램 기반 수업 적용 및 효과. 한국과학교육학회지, 40(2), 203-216.
- Anderson, L. W., Krathwohl, D. R., Airasian, P. W., Cruikshank, K. A., Mayer, R. E., Pintrich, P. R., Rath, J., & Wittrock, M. (2001). A taxonomy for learning, teaching, and assessing: A revision of Bloom's taxonomy of educational objectives. Longman.
- Angell, C., Guttersrud, Ø., Henriksen, E. K., & Isnes, A. (2004). Physics: Frightful, but fun. Pupils' and teachers' views of physics and physics teaching. *Science Education*, 88(5), 683-706.
- Archenhold, F., Bell, J., Donnelly, J., Johnson, S., & Welford, G. (1988). Science at age 15: A review of APU survey findings 1980-84, HMSO.
- Arriaseq, I., & Greca, I. M. (2012). A teaching-learning sequence for the special relativity theory at high school level historically and epistemologically contextualized. *Science & Education*, 21(6), 827-851.
- Barker, V., & Millar, R. (2000). Students' reasoning about basic chemical thermodynamics and chemical bonding: What changes occur during a context-based post-16 chemistry course?. *International Journal of Science Education*, 22(11), 1171-1200.
- Bruner, J. S. (1977). The process of education. Harvard university press.
- Choudhary, R. K., Foppoli, A., Kaur, T., Blair, D. G., Zadnik, M., & Meagher, R. (2018). Can a short intervention focused on gravitational waves and quantum physics improve students' understanding and attitude?. *Physics Education*, 53(6), 065020.
- DeBoer, G. E. (2000). Scientific literacy: Another look at its historical and contemporary meanings and its relationship to science education reform. *Journal of Research in Science Teaching*, 37(6), 582-601.
- Dünser, A., & Hornecker, E. (2007, February). Lessons from an AR book study. In *Proceedings of the 1st international conference on Tangible and embedded interaction* (pp. 179-182). ACM.
- Eilks, I., & Hofstein, A. (2017). Curriculum development in science education. In K. S. Taber & B. Akpan (Eds.), *Science education: New directions in mathematics and science education* (pp. 169-181). Sense Publishers.
- Foppoli, A., Choudhary, R., Blair, D., Kaur, T., Moschilla, J., & Zadnik, M. (2018). Public and teacher response to Einsteinian physics in schools. *Physics Education*, 54(1), 015001.
- Fullarton, S., Walker, M., Ainley, J., & Hillman, K. (2003). Patterns of participation in year 12 (LSAY Research Report No. 33). Australian Council for Educational Research.
- Gedigk, K., & Pospiech, G. (2015). Development of students' interest in particle physics as effect of participating in a Masterclass. *Il Nuovo Cimento C*, 38(3), Article No. 100.
- Gilbert, J. K. (2006). On the nature of "context" in chemical education. *International Journal of Science Education*, 28(9), 957-976.
- Hadzidaki, P., Kalkanis, G., & Stavrou, D. (2000). Quantum mechanics: a systemic component of the modern physics paradigm. *Physics Education*, 35(6), 386-392.
- Hofstein, A., & Kesner, M. (2006). Industrial chemistry and school chemistry: Making chemistry studies more relevant. *International Journal of Science Education*, 28(9), 1017-1039.
- Kafai, Y. B., & Dede, C. (2014). Learning in virtual worlds. In R. K. Sawyer (Ed.), *The Cambridge handbook of the learning sciences* (pp. 561-581). Cambridge University Press.
- Kaur, T., Blair, D., Moschilla, J., Stannard, W., & Zadnik, M. (2017). Teaching Einsteinian physics at schools: Part 3, review of research outcomes. *Physics Education*, 52(6), 065014.
- Keeves, L., & Aikenhead, G. (1995). Science curricula in a changing world. In B. J. Fraser & H. J. Walberg (Eds.) *Improving science education* (pp. 13-15), University of Chicago Press.
- King, D., & Ritchie, S. M. (2012). Learning science through real-world contexts. In B. J. Fraser, K. Tobin, & C. J. McRobbie (Eds.), *2nd International handbook of science education*, Vol. 24 (pp. 69-80). Springer.
- Lakatos, I. (1994). Falsification and the methodology of scientific research programmes. In J. Worrall & G.

- Currie (Eds.), *The methodology of scientific research programmes: Philosophical papers Vol. 1* (pp. 8-101). Cambridge University Press.
- Lazzeroni, C., Malvezzi, S., & Quadri, A. (2021). Teaching science in today's society: The case of particle physics for primary schools. *Universe*, 7(6), 169-179.
- Lubben, F., Campbell, B., & Dlamini, B. (1996). Contextualizing science teaching in Swaziland: Some student reactions. *International Journal of Science Education*, 18(3), 311-320.
- Martin, M. O., Mullis, I. V. S., Foy, P., & Hooper, M. (2016). TIMSS 2015 international results in science. IEA: TIMSS & PIRLS. Retrieved from <http://timssandpirls.bc.edu/timss2015/international-results/>
- Marzano, R. J., & Kendall, J. S. (2007). *The new taxonomy of educational objectives*. Corwin Press.
- McGrath, D., Savage, C., Williamson, M., Wegener, M., & McIntyre, T. (2008). Teaching special relativity using virtual reality. In A. Hugman & K. Placing (Eds.), *Proceedings of the 14th UniServe science conference* (pp. 67-73). UniServe Science.
- Migdal, P., Jankiewicz, K., Grabarz, P., Decaroli, C., & Cochin, P. (2022). Visualizing quantum mechanics in an interactive simulation-Virtual lab by quantum flytrap. arXiv preprint arXiv:2203.13300.
- Millar, R., & Osborne, J. (1998). *Beyond 2000: Science education for the future*. King's College.
- Milner, B. (1986). Why teach science and why to all? In J. Nellist & B. Nicholl (Eds.), *The ASE science teachers' handbook* (pp. 1-10), Hutchinson.
- Murphy, P., & Whitelegg, E. (2006). Girls and physics: Continuing barriers to 'belonging'. *The Curriculum Journal*, 17(3), 281-305.
- Nasir, N. S., Rosebery, A. S., Warren, B., & Lee, C. D. (2014). Learning as a cultural process: Achieving equity through diversity. In R. K. Sawyer (Ed.), *The Cambridge handbook of the learning sciences* (2nd ed., pp. 728-749). Cambridge University Press.
- NGSS Lead States (2013). *Next generation science standards: For states, by states*. NGSS Lead States.
- Oon, P. T., & Subramaniam, R. (2010). Views of physics teachers on how to address the declining enrollment in physics at the university level. *Research in Science & Technological Education*, 28(3), 277-289.
- Osborne, J., Simon, S., & Collins, S. (2003). Attitudes towards science: A review of the literature and its implications. *International Journal of Science Education*, 25(9), 1049-1079.
- Park, J., Liu, C., Huang, C., Shen, M., & Shin, M. K. (2016). Introducing modern science and high technology in schools. In H. S. Lin, J. K. Gilbert & C. J. Lien (Eds.), *Science education research and practice in east asia: Trends and perspectives* (pp. 379-404), Higher Education Publishing.
- Pavidou, M., & Lazzeroni, C. (2016). Particle physics for primary schools-enthusing future physicists. *Physics Education*, 51(5), 054003.
- Pitts, M., Venville, G., Blair, D., & Zadnik, M. (2014). An exploratory study to investigate the impact of an enrichment program on aspects of Einsteinian physics on year 6 students. *Research in Science Education*, 44(3), 363-388.
- Ramsden, J. M. (1997). How does a context-based approach influence understanding of key chemical ideas at 16+?. *International Journal of Science Education*, 19(6), 697-710.
- Ruggiero, M. L., Mattiello, S., & Leone, M. (2021). Physics for the masses: Teaching einsteinian gravity in primary school. *Physics Education*, 56(6), 065011.
- Savage, C. M., Searle, A., & McCalman, L. (2007). Real time relativity: Exploratory learning of special relativity. *American Journal of Physics*, 75(9), 791-798.
- Shabajee, P., & Postlethwaite, K. (2000). What happened to modern physics?. *School Science Review*, 81(297), 51-56.
- Tytler, R. (1998). Children's conceptions of air pressure: Exploring the nature of conceptual change. *International Journal of Science Education*, 20(8), 929-958.
- Wierstra, R. F., & Wubbels, T. (1994). Student perception and appraisal of the learning environment: Core concepts in the evaluation of the PLON physics curriculum. *Studies in Educational Evaluation*, 20(4), 437-455.
- Wu, H. K., Lee, S. W. Y., Chang, H. Y., & Liang, J. C. (2013). Current status, opportunities and challenges of augmented reality in education. *Computers & Education*, 62, 41-49.
- Yu, C. H., & Cole, J. M. (2014). Friend or Foe? Common sense in science education from the perspective of history and philosophy of science. *Journal of Education, Society & Behavioural Science*, 4(5), 673-690.
- Zöchling, S., Hopfa, M., Woitheb, J., & Schmeling, S.

(2020). Spreading interest in particle physics among high-school students-what matters?. In Proceedings of 40th International Conference on High Energy physics-ICHEP2020 (pp. 964-969). Sissa Medialab.

박종원, 전남대학교 교수(Park, Jongwon; Professor, Chonnam National University).

† 윤혜경, 춘천교육대학교 교수(Yoon, Hye-Gyoung; Professor, Chuncheon National University of Education).

이인선, 충북대학교 교수(Lee, Insun; Professor, Chungbuk National University).