고등학교 물리에서 양자물리의 교육방향

DOI: 10.3938/PhiT.21.009

박 병 윤

How to Teach and What to Teach in Quantum Physics in the 21st Century High School

Byung-Yoon PARK

In the 2009 National Curriculum for high-school physics, quite many subjects associated with quantum physics have been introduced. In former curricula, quantum physics had been avoided because of its math and conceptual difficulties. This made high-school physics too outdated for this hi-tech society, so most physics educators agreed that we needed a more innovative contemporary-physics curriculum suitable for this age. We explain the main purpose of the quantum physics course in high school and then discuss how to reach the goal.

2009년에 개정한 물리 교육과정은 물리학회가 개발에 참여할 수 있었기에 물리교육을 전공한 학자들과 여러 전공의 물리학자들이 함께 의견을 모을 수 있었다. 개편된 내용 중에서 무엇보다 강조하였고 그로 인해 물리교육의 방향에 큰 파장을 일으킨 부분은 바로 현대물리학을 많이 강화하였다는 점이다. 2009 개정 교육과정에서는 양자물리와 상대성 이론을 상당량 다루도록 되어 있다. 인터넷에 올라온 글을 바탕으로 일선 교육현장의 분위기를 짐작해보면 이러한 변화에 대한 반대의견이 많은 것으로 보인다. 반대의견의 대부분이 기존의 교육과정에 담긴 내용만으로도 물리를 어려워하는 학생이 많아 과학 4과목 중에서 선택하는 비율이 상대적으로 낮

은데 내용을 추가하면 더 상황이 나빠질 것이라는 것을 이유로 들고 있다. 또한, 새로 도입된 내용들이 기존의 교육과정에서는 다루지 않았기 때문에 일선 교육현장에서 적용하는데 큰 혼란이 있을 것이라는 것도 반대하는 이유의 하나이다. 현대물리학의 도입에 찬성하는 사람들조차도 일선현장에서의 적용에 대해서는 우려를 하고 있다. 이에 교육과정의 개정에 참여했던 사람으로서 이 글을 통해 고등학교 교육과정에 양자물리를 도입하는 취지를 밝히고 어느 정도 수준으로 어떤 내용을 어떻게 교육해야 하는지에 대해 논의해 보고자 한다.

양자물리를 아직도 현대물리학이라고 부르고 있기는 하지만, 플랑크가 양자라는 개념을 물리학에 도입한 것은 지금으로부터 100년도 넘는 일로서 '현대물리'라는 분류가 무색할 정도로 오래된 학문이다. 특수상대성 이론은 1905년에 발표되었으며, 양자물리가 확고하게 정립된 1920년대도 이제 거의 100년이 되어 간다. 그럼에도 불구하고 교육계에서는 유독 이 두 주제만은 고등학교 물리 교육과정에서 다루는 것을 터부시해왔다. 맥스웰에 의해 전자기학이 완성된 것이 1860년대이고, 볼츠만의 기체운동론은 1890년대이니 이들 '현대물리학'보다 크게 앞선 것도 아닌데도 고등학교 교육과정에서 1차 교육과정부터 다루고 있다. 단지 양자역학과 상대론은 해방 이후 우리나라의 교육과정이 만들어질 당시에 새로운 분야였기에 포함되지 않았고 그것이 지금까지 지속된 것뿐이다.

한편, 물리교사를 양성하는 사범대학의 교육과정은 중등 교육과정에 맞추어 편성되어 상호 순환적인 구조가 되어 교육과정에 새로운 내용을 추가하는 것은 점점 더 어렵게 되었다. 몇 번에 걸쳐 교육과정이 개정되었다고는 하지만 새롭게 정립된 물리학의 내용을 추가하지 않고 같은 내용에 대해 배열만 바꾸는 정도에 그쳤다. 최근에 와서는 더 많은 학생들이 물리를 선택하도록 유도하기 위해 오히려 예전 교육과정에서 다루던 내용까지 삭제하기까지 하였다. 하지만, 배우는 내용을 줄여도 학생들은 여전히 물리를 어렵게 여기고 있다. 단순하고 제한적인 교육 내용 안에서 객관식 문제로 학생들의 서

저자약력

박병윤 교수는 서울대학교 물리학과 이학박사(1987)로서 현재 충남대학교 물리학과 교수로 재직 중이며 한국물리학회 물리학력평가위원회 위원장을 맡고 있다. (bypark@cnu.ac.kr)

열을 매기기 위해서는 수학능력평가 문항을 억지로 까다롭게 낼 수밖에 없다. 물리학을 어느 정도 이해하는가에 대한 문제가 아니라 대부분의 내용을 알고 있는 학생조차 쉽게 대답하기 어려운 지능 검사형 문제가 되기 마련이다. 따라서 학생들에게 물리가 자연현상의 이치를 설명하는 재미있는 과목이 아니라 복잡하기만 하고 실제로는 별로 쓸데가 없는 과목으로 전락한 것은 아닌지 생각해 볼 일이다.

물리 2를 아직도 선택하고 있는 3% 정도의 학생의 입장에서 기존의 교육과정을 평가해보자. 요즘 학생들은 과학이 가져다 준 온갖 기계 문명의 혜택을 누리고 있다. 학생들이 가지고 있는 스마트폰은 물론이고 영화나 TV와 같은 대중매체에 노출된 학생들은 더 이상 고전역학이나 전자기학과 관련된 현상에 대해 호기심을 느끼기 어렵다. 각 가정에 전기가 공급되기 시작할 무렵, 백열등이 환히 밝힌 밤을 처음으로 맞아 본 사람들에게는 전기의 원리가 매우 흥미로운 현상일 수 있다. 하지만, 지금은 고장난 가전제품을 집에서 고치는 사람은 없는 세상이 되었다. 요즘은 물리학을 배운 사람도 간단한 형광등도 고치지 못하고 통째로 바꾸어야 한다. 요즘 아이들은 더 이상 연을 날리거나 팽이를 치며 놀지는 않는다. 새로운 세대들은 대부분 놀이동산의 스틸 넘치는 놀이기구를 타고 보았고 초고속 열차나 비행기를 타고 여행을 한다. 이런 세상에서 아버지 세대가 배웠던 ‘마찰 없는 빗면을 미끄러져 내려오는 나무토막의 운동’은 학생들의 흥미를 더 이상 끌지 못할 수밖에 없다. 어쩌다 자녀의 물리교과서를 들여다 본 부모는 ‘우리 학교 다닐 때도 이런 문제 때문에 속을 썩었는데 아직도 이런 것을 배우고 있나?’ 할 것이고 뉴턴 이후 삼백 년 간 물리학은 더 이상 새로운 발전이 없는 학문이라고 여길지 모른다. 새로운 세대의 학생들에게는 자신들이 사용하고 있는 스마트폰이나 컴퓨터에 물리학이 적용되어 있음을 알려주고 그 원리를 설명할 때에야 비로소 물리학에 흥미를 느낄 수 있을 것이다.

양자물리는 물리학자들의 전유물이 아니라 이미 우리 일상 생활에 깊이 들어와 있다. 컴퓨터나 USB 메모리, 디지털 카메라, LED 모니터 등등 우리 주변의 거의 모든 기기들이 양자물리의 부산물들이다. 특히 전자제품 중심의 우리나라 수출품은 반 이상이 양자물리의 원리를 적용한 것이라고 해도 과언이 아니다. ‘불확정성’과 같은 물리 용어는 ‘엔트로피’와 함께 이미 대중들이 사용하는 용어가 된 지 오래이다. 21세기를 맞은 지도 한참이 지난 시기에 양자물리를 교육과정에 넣는 취지를 자세히 설명한다는 것이 오히려 어색한 일인지도 모른다.

물론 고전역학이나 전자기학 같은 고전물리학들도 모두 중요하다. 그 내용만 가지고도 충분히 과학을 교육하는 중요 목

표 중의 하나인 ‘과학적인 사고능력의 신장’을 학생들이 이루도록 할 수 있다. 더구나 이들은 현대물리학이 서있는 바탕이기 때문에 고전물리학의 기본 개념이 없이는 앞으로 더 나아갈 수조차 없다. 어쩌면, 고전물리학조차 어려워져 기피하는 학생들에게 현대물리학까지 배우라고 하는 말은 어불성설로 들릴지도 모른다. 하지만 현대물리학이 나오기 전의 모든 고전물리학을 이해해야만 현대물리학을 배울 수 있는 것은 아니다. 뉴턴의 운동법칙을 배우기 위해 뉴턴 역학이 나오기까지의 모든 과정을 알아야 할 필요는 없는 것처럼 말이다. 고전물리학의 기본 내용을 습득한 학생은 현대물리학을 받아들일 준비가 된 것이다.

다음으로는 양자물리가 추가된 새로운 고등학교 물리 교육과정의 운영방식에 대한 의견을 제안해 보기로 한다. 교육과정이 바뀌었다고 해서 교육시수에 변동이 있는 것은 아니기 때문에 단순히 새로운 내용을 추가하기만 해서는 학생들의 부담만 가중될 뿐이다. 따라서 추가로 들어간 분량만큼 기존의 교육내용을 줄여야 한다. 이것은 과학적인 내용의 축소가 아니라 교육내용의 축소로 해결되어야 한다. 기존의 교육과정을 분석해보면 과학적인 내용은 대폭 줄어들어 있는 반면 매우 깊은 부분까지 교육하고 있는 것을 볼 수 있다. 예를 들면, 물리 2에서 열역학 제 1법칙을 교육하는 데 있어서 카르노 사이클까지 다룰 필요는 없다고 본다. 카르노 기관의 열효율을 사용하여 열역학 제 2법칙을 기술하기 위한 것으로 생각되지만 이러한 깊이 있는 내용은 나중에 물리를 전공하고자 하는 학생을 제외하고는 대다수의 학생들에게 특별한 의미가 없을 수도 있다. 현대의 과학문명 사회를 살아가는 데 필요한 기본적인 원리나 법칙을 이해하는 정도를 물리교육의 목표로 한다면 기존의 교육 내용을 큰 폭으로 줄일 수 있을 것이다. 예로 든 열역학 제 1법칙에 대해서는 간단한 열역학적 과정을 부피-압력 그래프로 나타내고 이에 수반되는 열의 이동과 일과 내부에너지의 변화를 정성적으로 아는 정도에 그치도록 내용을 축소할 수 있다. 기존의 교육과정에서 지나치게 깊이 들어간 내용은 고등학생의 수준에 맞게 과감히 삭제하는 것도 매우 중요하다.

대부분의 교사들이 고등학교 교육과정에서 양자물리를 다루는 데에 대해 거부감을 느끼는 이유는 그들 역시 고등학교에서 전혀 들어보지도 못했던 내용을 대학에서 처음으로 접했기 때문일 것이다. ‘양자역학’하면 머리에 떠오르는 것이 슈뢰딩거 방정식을 푸는 어려운 수학적 과정이기 때문에 미분방정식을 푸는 방법에 대해 배우지 못한 고등학생들에게 어떻게 슈뢰딩거 방정식을 설명할 수 있을지 의문이 들 것이다. 하지만, 슈뢰딩거 방정식을 직접 풀지 않고도 양자물리를 설명할 수 있다.

뉴턴의 운동방정식도 엄밀하게 말하면 위치에 대한 2계 미분방정식이지만 고등학교에서는 등가속도 운동만을 다루도록 하여 이 문제를 피해가고 있다. 기존 교육과정에서도 RC 회로나 교류회로를 다룰 때 미분방정식을 풀지 않고 그 해를 제시하여 물리적인 현상을 설명해오고 있다. 파동현상도 마찬가지이다. 파동방정식에 대해서는 아예 언급도 하지 않고 그 해 중의 하나인 사인파만을 이용하여 파동에 관련된 여러 현상을 설명한다. 물리학의 특성상 모든 것을 기본원리로부터 출발하여 설명하는 것이 바람직하기는 하지만 다른 한편으로는 수학적인 풀이과정 못지않게 다양한 자연현상을 접하고 이것을 물리적으로 설명하는 것도 중요하기 때문에 이런 방식으로나마 가르치는 것이다. 슈뢰딩거 방정식도 이 수준 정도로 다루면 된다. 방정식 자체에 대해서는 과학사를 소개하거나 식의 형태를 설명하는 정도로 그치고 그 해의 물리적 의미만을 다룬다면 충분하다. 에너지 준위, 파동함수, 불확정성 원리, 양자터널효과 등에 대한 기본적인 개념을 이해할 수 있다면 미시세계에 대한 다양한 자연현상을 파악할 수 있을 것이다.

사실, 흑체복사나 광전효과와 같은 현상과 물질과 이론까지는 기존의 교육과정에서 상당히 높은 수준까지 다루어 왔다. 아이러니컬하게도, 이들이 양자물리학의 탄생에 이르게 한 과학사적인 의의는 매우 강조되는 반면 정작 그 결과로 탄생한 양자물리는 생략되었다. 예를 들면, 흑체복사를 설명하는 데 있어서 흑체복사 스펙트럼에 대한 빈의 공식과 레일리-진의 이론 공식의 불일치나, 광전효과의 한계진동수로 인한 빛의 이중성에 대해서는 매우 강조하였으나 정작 이들의 물리적 의미나 공학적인 응용에 대해서는 크게 다루지 않았다. 빈의 법칙이 만든 흑체복사 스펙트럼에 대한 공식은 비록 완벽한 것은 아니었으나 이것이 천문학이나 다른 분야에 미친 영향은 실제로 지대하다. 이 발견이 없이 태양계에서 수만 광년 떨어진 별의 표면온도를 어떤 방법으로 잴 수 있었겠는가? 광전효과 역시 마찬가지이다. 빛을 받은 금속 표면에서 광전자가 튀어나오는 현상은 빛 신호를 전기 신호로 바꾸어 줌으로써 유성영화시대를 열었을 뿐 아니라 현재 사용하는 복사기에도 그 원리가 적용된다는 것들도 함께 강조되어야 한다. 새로운 물리교육과정에서 현대물리학을 추가할 때 이러한 과학적인 발견이 어떤 기술적인 혁명을 이끌어내었는지도 알려주어야 한다. 물리학이 현대 과학문명을 유지하는 기본 원리임을 알도록 하자는 것이 이런 내용을 고등학교 과정에서 다루는 가장 중요한 목표일 것이다.

양자물리 현상은 직접 실험을 하기 어려운 것들이 많아 현재 초·중등 과학 교육의 기본 방식인 탐구활동 중심의 수업을 하기에는 무리라 할지 모른다. 하지만, 최근 많은 수의 컴퓨

터 시뮬레이션 프로그램이 개발되어 학생들이 양자물리의 개념을 익히는 데 큰 도움을 받을 수 있다. 한 예로, 미국 콜로라도 대학의 PhET(Physics Education Technology) 팀이 운영하고 있는 웹사이트^[1]에서는 고등학교에서 갖추기 어려운 실험장비 없이도 스턴-게를라흐 실험이나 데이비슨-거머 실험 등의 양자현상을 경험해 볼 수 있다. 또한, 여러 변수를 바꾸어 가면서 실험 상황을 조작해 볼 수 있는 다양한 대화형 프로그램을 통해 양자터널현상, 다양한 원자 모형, 레이저와 반도체의 원리 등에 대해서도 학생 스스로 공부할 수 있다. 플랑크 상수에 나타나는 10^{-34} 은 양자물리 현상이 일상생활과는 전혀 관계가 없는 것으로 생각하게 만든다. 하지만, 백열등의 전력 소모^[2]나 LED의 광전효과^[3]를 이용한 간단한 실험으로도 플랑크 상수를 측정하는 탐구활동을 해볼 수도 있다. 앞으로 이러한 탐구활동의 개발에 많은 연구가 진행되어야 할 것이다.

지금까지 2009 개정교육과정에 새롭게 추가된 양자물리에 대해 어떤 방법으로 무엇을 가르칠지에 대해 논의해 보았다. 요약하면 다음과 같다.

첫째, 추가된 분량만큼 기존의 교육과정을 줄이되 과학적인 내용을 줄일 것이 아니라 자세한 세부사항에 대한 내용을 과감하게 줄여 학생들이 물리에 대한 전체적인 모습을 파악할 수 있도록 도와야 한다.

둘째, 슈뢰딩거 방정식의 풀이과정에 대해서는 다루지 말고 에너지 준위, 파동함수, 불확정성 원리, 양자터널효과 등의 물리적 이해에 중점을 두고 이를 통해 미시세계에서 일어나는 현상을 정성적으로 소개하는 수준에 그친다.

셋째, 양자물리의 기본적인 개념 설명과 더불어 이것이 첨단기구나 일상 생활용품의 작동 원리로 작용한다는 것을 반드시 알도록 해야 한다.

넷째, 많이 개발되어 있는 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램을 활용하면 탐구활동 수업을 하는 데에도 무리가 없고 이를 통해 양자물리에 쉽게 접근할 수 있다. 학생들이 보다 쉽게 양자현상을 경험할 수 있게 도와주는 탐구활동의 개발이 가능하고 이에 대한 연구가 필요하다.

새로운 교육과정이 올바르게 정착되고 이를 통해 제대로 된 과학교육이 이루어지도록 하기 위해서는 교육활동 못지않게 평가가 중요하다. 현재 수학능력평가 문항과 같이 그 목적이 학생들의 성적에 따라 등급을 매기는 목표를 가진 시험에서는 어떤 교육과정으로 어떻게 가르치건 결국 과학 특히 물리는 재미없는 과목이 될 수밖에 없다. 이러한 문제에 대해서는 80% 정도를 이해한 학생들조차도 정답을 맞추기 어렵기 때문에 자신이 물리를 잘 하지 못한다고 생각할 것이기 때문이다. 이러한 문제점은 현재의 상대평가를 통한 등급제 대신 절

대평가를 통한 인증제로 평가방법을 바꾸어 물리에 대한 이해 정도에 따라 자신의 등급을 인정받는 방법을 통해 해결할 수 있다. 이러한 절대평가에서는 학생들의 서열이 중요한 것이 아니라 학습 목표에 대한 성취도를 평가하는 것이기 때문에 학생들의 부담이 줄어든다.

지금처럼 탐구과목을 학생들이 선택하도록 되어 있는 제도에서 절대평가를 인정하면 과목간의 경쟁으로 인해 교육의 질이 떨어질 우려가 있다. 사실, 과목 선택제는 올바른 과학 교육의 앞길을 막고 있는 큰 장애물이다. 과학을 통해 국가 경쟁력을 기르려고 한다면 현재의 과목 선택제는 폐지되어야만 하는 제도이다. 제대로 된 교육을 하면 학생들이 어려워서 선택을 하지 않을 것이 당연한데 어떤 과목에서 우리 물리과목처럼 앞장서서 수준을 높인 교육과정을 만들고 이에 따라 교육을 하려고 하겠는가? 과학과 교육과정의 개발과 함께, 교육정책도 따라 바뀌어 예전과 같이 학생들이 모든 과목을 필수로 배우게 하는 방법도 생각해 볼 일이다. 이렇게 되면 각 과목에서 국가의 장래를 위해 도움이 되는 내용을 학생들의 눈치를 보지 않고 교육할 수 있을 것이다. 시험 보아야 하는 과목 수를 늘리는 일이 꼭 수험생들을 지금보다도 더 몰아부치는 일일까? 기본과목 몇 개에 대한 시험 점수만으로 대학입시를 결정하는 것은 학생들을 더 괴롭게 만드는 일은 아닐까? 학생들이 이해할 만한 수준의 내용만 다룬다면 다양한 분야에 대해 공부하는 것이 오히려 더 즐거운 일이 될 수도 있지 않을까?

양자물리를 고등학교 교육과정에 도입하는 취지가 아무리 타당하다고는 하나 2009 교육과정을 개정하는 과정에서 모든 것이 너무 성급하게 추진되었다는 점은 부인할 수 없다. 이에 대해서는 일을 성급하게 추진한 정부 해당 부처의 탓만

이 아니라 막상 일이 닥쳐서야 일을 추진한 물리학회와 책임도 어느 정도 있다고 본다. 정립된 지 100년이 지난 물리학에 대해 갑작스럽게 도입되었다고 반대하는 물리교육계도 수차례의 교육과정 개정에서 새롭게 발전한 분야를 점진적으로 도입해오지 않은 데 대한 책임이 있다. 물리학회에서는 앞으로 물리 교육에 지속적인 관심을 가지고 장기적인 추진 계획을 세워 연구를 진행해 두어야 기회가 있을 때 제대로 짜인 교육과정뿐만 아니라 합리적인 운영방안을 제시할 수 있을 것이다.

또 하나 미흡한 점이 있다면 교육과정의 개정이 고등학교 교육에서부터 시작되었다는 점이다. 제대로 된 교육과정이 되려면 초등학교에서부터 고등학교에 이르는 12년의 전체 교육과정이 체계적으로 짜여야 한다. 지금의 교육과정에 의하면 현대물리학이 고등학교의 물리 1과 2에서 갑자기 나타난다. 상대적으로 대학 입학시험에 대한 부담이 적고 시간이 많은 저학년 교육과정에 여러 개념을 분산 배치하여 다양한 탐구 활동을 통해 이를 익히도록 한다면 학생들이 어렵지 않게 현대물리학과 만날 수 있을 것이다. 이런 점들에 대해 교육과학기술부의 정책적인 지원과 물리학회의 철저한 준비가 필요하다고 생각한다.

REFERENCES

- [1] phet.colorado.edu, it is free cite and most of the programs are translated into Korean, phet.colorado.edu/ko.
- [2] Youngmin Kim *et al.*, High School Physics 2 (Gyohagsa, 2010), p 272.
- [3] Youngmin Kim *et al.*, High School Physics 2 (Gyohagsa, 2010), p 324.