New Physics: Sae Mulli,
Vol. 70, No. 12, December 2020, pp. 1092∼1100
http://dx.doi.org/10.3938/NPSM.70.1092

Content Analysis of Interference and Diffraction Presented in High School Physics Textbooks

Bongwoo Lee*
Department of Science Education, Dankook University, Gyeonggi 16890, Korea

(Received 19 October 2020 : accepted 22 November 2020)

The purpose of this study is to analyze the explanation of interference and diffraction presented in high school physics textbooks. The definitions and the principles of interference and diffraction, as well as examples of interference and diffraction, in 13 physics textbooks according to the 2015 revised curriculum were analyzed. The definitions of interference were similarly described for each textbooks, but inaccurate expressions were found in the section describing coherence and constructive/destructive interference as a phase. Regarding diffraction, the degree of explanation of Huygen's principle differed among textbooks, and some textbooks used the concept of 'interference' in the process of explaining the principle of diffraction. Examples of interference and diffraction have been described in various examples, but the same phenomena have been explained by using different principles (interference, diffraction) depending on the textbook. Based on the results, we discuss the unnecessariness of the dichotomy of interference and diffraction, as well as the teaching method for interference and diffraction.

Keywords: Interference, Diffraction, Physics textbook, Huygens' principle, Dichotomous thinking

고등학교 물리학 교과서에 제시된 간섭과 회절의 내용 분석

이봉우*
단국대학교 과학교육과, 경기 16890, 대한민국

(2020년 10월 19일 받음, 2020년 11월 22일 게재 확정)

본 연구의 목적은 고등학교 물리학 교과서에 제시된 간섭과 회절에 대한 설명을 분석하는 것이다. 2015 개정 교육과정에 의한 13종의 물리학 교과서에서 간섭과 회절의 정의와 원리, 간섭과 회절의 예시 등을 분석하였다. 간섭의 정의는 교과서마다 비슷하게 기술하였지만, 결맞음과 보강/상쇄 간섭의 조건을 위상으로 설명하는 부분에서 부정확한 표현이 발견되었다. 회절에 대해서는 하위헌스의 원리를 설명하는 정도가 교과서마다 차이가 있었고, 회절의 원리를 설명하는 과정에서 '간섭' 개념을 사용한 교과서도 있었다. 간섭과 회절의 예는 다양하게 기술되었는데, 동일한 현상을 교과서에 따라 다른 원리(간섭, 회절)로 설명하기도 했다. 연구 결과를 바탕으로 간섭과 회절에 대한 이분법적 사고의 불필요성, 간섭과 회절의 교수방법 등을 논의하였다.

Keywords: 간섭, 회절, 물리 교과서, 하위헌스의 원리, 이분법적 사고

*E-mail: peak@dankook.ac.kr

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서 론

과학사에서 빛이 무엇인지에 대한 논쟁보다 더 오랫동안 지속된 주제는 없을 것이다. 뉴턴을 비롯한 많은 사람은 빛이 입자라고 주장했었고, 하위헌스나 훅 등은 빛이 파동이라고 주장했다 [1]. 빛이 파동이라는 것이 널리 받아들여지게 된 계기가 된 것은 '영(T. Young)의 이중 슬릿 실험'이다. 토마스 영은 1801년에 다양한 간섭 현상을 제시한 논문("On the Theory of Light and Colours")을 발표했고, 1803년에 이중 슬릿 실험을 제안했다. 그는 이중 슬릿을 사용하지 않고 작은 구멍을 통과한 빛이 종이판에 의해 양쪽으로 갈라진 빛을 이용하였지만, 그가 설명한 개념은 빛이 파동일 수밖에 없는 결정적 실험이었다. 그 당시의 과학자들은 이중 슬릿 실험만으로 빛의 파동설을 정설로 받아들이지는 않았지만, 이후 프레넬의 실험, 아라고의 실험 등을 통해서 빛이 파동으로 받아들여졌다.

빛(또는 전자기파)의 파동 이론은 고등학교 물리에서 중요하게 학습되는 내용이다. 2015 개정 교육과정의 물리학 Ⅰ에서는 파동의 간섭을 학습하고, 물리학 Ⅱ에서는 전자기파의 간섭과 회절을 학습하고 이중 슬릿 실험을 성취기준에 추가로 제시하였다 [2]. 간섭과 회절은 주로 예와 활용을 중심으로 학습하도록 되어 있는데, 그 이유는 고등학교 학생들이 간섭과 회절의 개념 이해에 어려움을 갖기 때문일 것이다.

지금까지 진행된 간섭과 회절의 이해와 관련된 연구는 주로 대학생을 중심으로 이루어져 왔다. 대학교에서 간섭과 회절 학습은 논리적인 전개를 통해 간섭 및 회절 조건을 유도하거나 레이저를 이용한 실험을 통해 현상을 보여주는 방식으로 진행되는데, 대학생도 간섭과 회절을 이해하는데 어려움을 갖고 있다고 많은 연구에서 밝히고 있으며, 이를 바탕으로 새로운 교수 방법을 제시하기도 했다 [3–6]. 간섭과 회절은 파동 이론 자체에서도 중요한 역할을 하며, 현대 물리학에서 가장 중요한 개념 중 하나인 파동-입자 이중성의 이해를 위해서 간섭과 회절과 같은 파동 현상을 잘 설명할 필요가 있다. 따라서 대학생은 물론 고등학교 학생들의 간섭과 회절의 이해를 돕기 위한 연구는 매우 중요하다.

간섭과 회절과 관련된 선행 연구를 살펴보면, 간섭과 회절 현상을 잘 보여줄 수 있는 장치의 개발이 많이 이루어졌는데 [7], 최근에는 간섭과 회절 현상을 보여주는 컴퓨터 기반 인터페이스 실험 장치들이 개발되어 사용되어 쉽게 관찰할 수 있는 기반을 제공해주고 있으며, 경제성을 고려한 저렴한 실험 장치도 개발되었다 [8]. 다양한 모양의 구멍(집모양, 대칭적 육각형, 사다리꼴, 원과 직사각형 조합, 원과 삼각형 조합)에 의한 프라운호퍼 회절을 이론 계산, 컴퓨터 계산, 실험 수행 등의 교육 방안을 제시하는 연구도 진행되었으며 [9–13], 달에 의한 코로나 현상을 모형화한 실험으로 원형 구멍에 의한 회절 현상 이해를 돕는 실험 방안도 제안되었다 [14]. 빛의 간섭이나 회절의 이해를 위해서는 슬릿의 모양이나 크기를 변화시키면서 빛의 간섭과 회절 무늬의 변화를 관찰하는 것이 필요한데, 슬릿을 교체하지 않고 가변형 슬릿을 개발하여 직관적으로 간섭과 회절 무늬의 변화를 살펴볼 수 있도록 하는 개발 연구도 진행되었고 [15], 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 여러 변인들이 간섭 무늬와 회절 무늬에 어떤 영향을 주는지 쉽게 볼 수 있는 프로그램도 개발되어 사용되고 있다 [16].

간섭의 학습은 파동의 중첩, 간섭 조건, 영의 이중슬릿 실험, 얇은 막에 의한 간섭, 간섭계 등의 내용으로 구성되어 있으며, 회절의 학습은 하위헌스의 원리, 단일 슬릿 회절, 이중 슬릿 회절, 회절 격자, 원형 구멍 회절과 분해능 등의 내용으로 구성되어 있다. 고등학교에서는 제한된 학습 시간 때문에 일부의 내용만 학습하게 되며, 간섭과 회절이 발생하는 원리에 대한 충분한 설명 없이 결과를 제시하고 있다. 과학고등학교 학생들의 회절과 회절 무늬에 대한 이해 유형을 분석한 결과, 학생들은 공식을 암기하여 문제를 해결하는 경향이 컸는데 [17], 이러한 결과는 충분한 설명 없이 결과 위주로 학습하고 있는 상황과 관련된 것이다.

간섭과 회절은 빛의 파동성에 의해서 나타나는 대표적인 두 가지 현상으로 고등학교 물리에서 중요하게 다루어진다. 따라서 본 연구에서는 현재 사용되는 고등학교 물리 교과서의 간섭과 회절의 서술 방식을 분석하고, 이를 대학교 일반물리학 교재 및 전공 광학 교재와 비교하여 그 차이를 설명하고자 한다. 또한 간섭과 회절의 차이가 무엇인지 논의하고 광학 교육에서 간섭과 회절의 교육 방법에의 시사점을 논의하고자 한다.

II. 연구 방법

1. 연구 대상

본 연구는 2015 개정 과학과 교육과정에 의해 개발된 고등학교 물리학 교과서를 분석 대상으로 하였다. 분석에 사용된 교과서는 8종의 물리학 Ⅰ 교과서와 5종의 물리학 Ⅱ 교과서였다. 교과서를 구분하여 나타내기 위해서 출판사명을 A – H로 하였는데, 같은 출판사의 교과서는 같은 문자로 표시해, P1A와 P2A는 A 출판사에서 개발된 물리학 Ⅰ, 물리학 Ⅱ 교과서를 나타내도록 하였다. 또한 대학교에서 사용하는 일반물리학 교재 5종에 제시된 간섭과 회절의 설명방식을 추가로 분석하였다.

Table 1. Conditions of interference given in the definition of interference.

textbooks	conditions of interference	coherence	visual representation
P1A	two waves meet in the same shape	◯	3D real wave
P1B	two or more waves overlap each other		single pulse
P1C	two waves overlap		single pulse
P1D	two identical waves overlap each other,	◯	wave
P1E	continuous waves with a single frequency overlap	◯	wave
P1F	two waves with the same frequency and wavelength overlap	◯	wave
P1G	two or more waves overlap		wave
P1H	two or more waves overlap each other		wave

2. 분석 과정

2015 개정 과학과 교육과정의 물리학Ⅰ에서는 간섭을 다루고, 물리학Ⅱ에서는 간섭과 회절을 모두 다루고 있다. 총 13종의 물리학Ⅰ, Ⅱ 교과서에서 간섭과 회절과 관련된 내용을 추출하고 간섭에 대해서는 간섭의 정의(물리학Ⅰ), 간섭의 사용 예(물리학Ⅰ, Ⅱ)를 분석하였다. 간섭의 정의는 간섭이 일어나는 조건, 보강 간섭과 상쇄 간섭의 조건 등을 중심으로 분석하였고, 간섭의 예는 일상생활 속에서 발견할 수 있는 간섭으로 나타난 현상과 간섭의 원리를 이용한 예로 구분하여 분석하였다.

파동의 회절도 회절의 정의와 원리, 회절의 사용 예 등으로 구분하여 분석하였는데, 회절의 정의는 회절의 발생 대상, 하위헌스 원리의 설명방식 등을 분석하였다. 특히 회절을 설명하는 과정에서 간섭의 개념이 어떻게 사용되는지를 분석하였으며, 이를 위해 일반물리학 교재에서의 설명방식을 추가로 분석하였다. 또한 회절 격자를 어떤 방식으로 설명하고 있는지 분석하였다. 회절의 예는 간섭과 유사하게 일상생활에서 발견할 수 있는 회절의 예, 회절의 원리를 사용한 예 등으로 구분하여 분석하였다.

III. 연구 결과

1. 간섭의 정의와 원리

한국물리학회에서 제공하는 물리학사전에서는 간섭을 "둘 이상의 결맞는(coherent) 파동이 중첩되면서 일어나는 현상으로, 파동들 사이의 위상 차이가 잘 정립되어 있는 결맞는 파동들이 중첩되면 파동들 사이의 위상 차이에 따라 파동이 더해져서 더욱 강해지거나 서로 상쇄되어 약해지는 현상이 일어나는데, 이를 간섭이라 한다."로 정의하고 있다 [18]. 이 정의에 따르면 간섭이 일어나기 위해서는 '둘 이상의 파동', '결맞는', '중첩' 등의 조건이 필요하다. 또한 그 결과로 파동이 강해지거나 약해지는 현상을 말한다. 이러한 간섭에 대한 정의에서 간섭이 일어나는 조건과 관련하여 고등학교 물리학 교과서에서는 어떻게 제시되어 있는지 분석하여 Table 1에 제시하였다.

모든 교과서에서 '둘 또는 둘 이상의 파동이 만나(또는 중첩되어)' 간섭이 이루어진다고 표현하고 있다. 그런데 간섭이 일어나는 조건 중 결맞음과 관련된 표현은 4개의 교과서에서만 제시되었고, 다른 4개의 교과서에서는 언급되지 않았다. P1A교과서에서는 '같은 모양', P1D교과서에서는 '동일한', P1E교과서에서는 '단일 진동수를 갖는', P1F교과서에서는 '진동수와 파장이 같은'의 표현을 통해 간접적으로 결맞음의 내용을 설명하고 있다. 두 파동 사이에 위상 차가 일정하게 주어졌을 때 두 파동을 결맞은 상태에 있다고 한다. 즉, 결맞은 파동은 두 파동의 모양이 같아야 한다(파장 또는 진동수가 같고). 앞에서 언급한 4개의 교과서에서는 이를 반영한 것이다.

간섭을 일으키는 파동은 각 파동 안에서 어떤 시각 한 지점의 위상의 값이 다른 시각 다른 지점에서의 위상값과 일정한 관계를 가지고 있어야 한다. 즉, 파동을 시각적으로 표현하였을 때 동일한 파형이 지속적으로 유지되는 형태여야 한다. 그런데 P1B와 P1C 교과서에서는 간섭의 정의를 설명하기 위해 제시한 그림에서 Fig. 1과 같이 하나의 마루만 갖는 단일펄스(single pulse)로 제시하고 있다. 이러한 표현은 파동의 간섭을 나타내었다기보다는 파동의 중첩을 설명한 것으로 두 파동이 중첩되어 커지거나 상쇄되는 모습을 나타내기는 하지만, 파동의 간섭 조건인 결맞음 관점에서 보았을 때 잘못된 표현이라고 할 수 있다. 이러한 오류는 대학교 일반물리 교재(예: 대학물리학(Harris Benson 저))에서도 발견되곤 한다.

색깔이 동일한(파장이 동일한) 두 손전등을 한 지점에 비춘다고 해도 간섭 현상을 관찰할 수 없는 것처럼(물론 이 이유를 설명하기 위해서는 전등의 각 지점에서 발생하는 빛이 결맞은 상태가 아니라는 것을 설명해야 한다), 간섭 현상이 나타나기 위해서는 반드시 결맞음 조건이 필요하

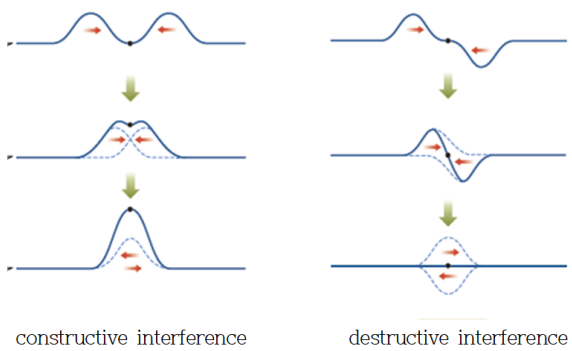

Fig. 1. (Color online) Inappropriate visual representation of the interference.

Table 2. Condition of a constructive interference and a destructive interference in textbooks.

textbooks	condition of a constructive interference and a destructive interference			definition of phase
	shape	displacement	phase	
P1A	○	○	○	×
P1B		○		×
P1C	○		○	○
P1D			○	○
P1E		○	○	×
P1F	○			×
P1G	○		○	○
P1H			○	○

다. 물론 '결맞음'은 고등학교 과정의 학생에게는 이해하기 어려운 개념이기 때문에 명시적으로 '결맞음'이란 용어를 사용하지 않더라도 "모양이 같은(또는 파장이 같은) 두 연속된 파동이 중첩된다."는 표현으로 나타내 암시적으로라도 결맞음 조건을 포함할 필요가 있다. P1A, P1D, P1E, P1F의 네 교과서에서 '결맞음' 조건을 포함한 표현을 제시하고 있다고 볼 수 있다.

빛의 간섭 조건은 물리학Ⅱ 교과서 중 하나인 P2D 교과서에 제시되어 있는데, "1. 결맞음(Coherence): 시간에 따른 빛의 위상 변화가 일정해야 한다. 2. 단일파장(Identical wavelength): 빛의 파장 폭이 좁아야 한다. 3. 중첩의 원리를 적용할 수 있어야 한다."와 같이 3가지로 제시하고 있다.

간섭의 정의를 설명할 때, 간섭 때문에 진폭이 커지거나 작아지는 현상이 나타난다고 제시하면서 보강 간섭과 상쇄 간섭을 도입한다. 교과서에서 보강 간섭과 상쇄 간섭이 나타나는 조건을 어떻게 제시하고 있는지 교과서별로 정리하여 Table 2에 제시하였다.

간섭하는 파동의 모양으로 보강 간섭과 상쇄 간섭의 조건을 제시한 교과서는 P1A, P1C, P1F, P1G의 4종의 교과서로 '모양이 같다/서로 반대 모양'으로 표현하거나(P1A), '마루와 마루가 만날 때/마루와 골이 만날 때'로 표현하였다(P1C, P1F, P1G). P1A, P1B, P1E의 3종의 교과서에서는 '변위의 방향이 같다/반대이다'와 같이 변위의 방향을 통해 모양을 표현하였다. 보강 간섭과 상쇄 간섭의 조건을 표현하는 방법으로 가장 많은 유형은 위상을 이용한 설명인데, P1B와 P1F의 두 교과서를 제외한 나머지 6종의 교과서에서 발견되었다. 그런데 '위상차가 없다/위상차가 180°'로 표현한 P1A와 P1E 교과서를 제외한 나머지 4종의 교과서에서는 '같은 위상/반대 위상'으로 나타내었다. 위상이란 매질의 위치와 운동 상태를 나타내는 것으로 파동을 방정식($A\sin(kx-\omega t+\phi_0)$)으로 표현하였을 때 삼각함수 안에 있는 '$kx-\omega t+\phi_0$'를 의미한다. 따라서 정확하게 나타내려면 두 파동의 위상차가 0이거나 '$2n\pi$ (n은 0, 1, 2, $\cdots$)'일 때 보강 간섭을 하고, 두 파동의 위상차가 '$2n\pi+\pi$ (n은 0, 1, 2, $\cdots$)'일 때 상쇄 간섭을 한다고 설명해야 한다. '위상이 반대'라는 표현이 두 파동의 모양이 서로 반대라는 것을 나타내는 것이지만, 엄밀하게 말했을 때는 정확하지 않은 표현이다. 또한 위상의 정의는 4종의 교과서에서만 제시되어 있었다.

2. 회절의 정의와 원리

회절의 정의는 물리학Ⅱ 교과서에 제시되어 있는데, 대부분의 교과서에서 '장애물을 만났을 때 (모서리에서 휘어져) 장애물의 뒤쪽으로(휘어져) 전파되는 현상'으로 정의하고 있다. 또한 2종의 교과서(P2B, P2E)에서는 '좁은 틈을 통과한 후에 퍼져나가는 현상'으로도 정의하고 있다. 모든 교과서에서는 회절을 '현상'으로 정의하고 있지만, 한 종의 교과서(P2C)에서는 '장애물의 뒤쪽으로 전파되는 성질'로 정의하고 있다.

회절이 나타나는 원리는 하위헌스의 원리로 설명할 수 있다. 하위헌스의 원리란 빛의 파동성에 근거하여 빛(파동)이 어떻게 전파하여 나가는지를 기술하는 원리로 어느 순간의 파면이 주어지면 다음 순간의 파면은 주어진 파면상의 각 점이 각각 독립된 파원(wave source)이 되어 발생하는 2차적인 구면파에 공통으로 접하는 면이 된다는 것이다. 따라서 빛은 입자와 같이 한 방향으로만 전파하는 것이 아니라 구면파의 형태로 사방으로 전파하게 되고, 여러 파원에서 전파한 파동의 중첩(간섭)에 의해 결과적인 현상이 나타나게 된다. 하위헌스의 원리를 이용하면 빛의 직진, 반사, 굴절은 물론 회절 현상을 설명할 수 있다.

명시적으로 하위헌스의 원리를 설명한 교과서는 5종의 물리학Ⅱ 교과서 중에서 3종의 교과서였다. 하위헌스의 원리를 이용하여 회절 분포를 설명한 교과서는 총 4종으로 P2C 교과서에서는 하위헌스의 원리로 파동이 퍼져서 전파되는 과정만 설명하였고, P2A, P2D, P2E의 3종의 교과서

Table 3. Explanation of textbooks on diffraction.

textbooks	explanation		Huygens' principle	Use the Huygens' principle to explain diffraction
	obstacle	opening		
P2A	○		×	○
P2B	○	○	×	×
P2C	○		○	○
P2D	○		○	○
P2E	○	○	○	○

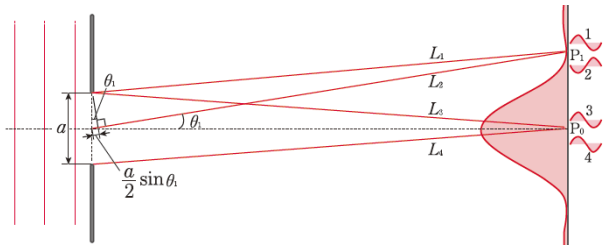

Fig. 2. (Color online) Example of explaining diffraction using the concept of interference (P2E, p.168).

에서는 단일 슬릿에 의해 나타나는 회절 무늬를 하위헌스의 원리로 설명하였다. P2A 교과서에서는 하위헌스의 원리에 대한 명시적 설명을 포함하지 않았지만, '어두운 무늬는 단일 슬릿의 맨 위와 중앙의 파동이 상쇄되어 나타낸다.'와 같이 서술하면서 하위헌스의 원리를 이용하여 단일 슬릿에 의한 회절 무늬를 설명하고 있다.

하위헌스의 원리를 이용하여 단일 슬릿에 의한 회절을 설명할 때, 단일 슬릿의 슬릿면 위의 모든 점들이 제2의 점파원이 되어 이 점파원에서 발생한 구면파들이 스크린에서 중첩하게 된다. 교과서에 제시된 Fig. 2의 예시와 같이 단일 슬릿에 의한 회절 무늬에서 어두운 무늬가 나오는 이유를 슬릿의 끝 지점과 중앙 바로 아랫 지점에서 출발하여 도달한 빛이 반파장의 경로차가 나서 서로 상쇄되고, 이러한 상쇄는 단일 슬릿의 모든 점들에 대해서 슬릿폭의 1/2의 길이만큼 차이가 나는 두 쌍의 점파원에 대해서 동일하게 적용되기 때문에 스크린에서 어두운 무늬가 나타나게 된다. 이러한 설명은 이중 슬릿의 간섭에서 설명한 방식과 유사하다. 단일 슬릿의 회절을 하위헌스의 원리를 이용하여 설명한 3종의 교과서 중 2종의 교과서에서는 '(중첩하여) 상쇄된다.'고 표현하면서 간섭의 개념을 이용하여 서술하였고, P2D 교과서에서는 "간섭 조건에 의하여 $\frac{a}{2m}\sin\theta = \frac{\lambda}{2}$일 때, 상쇄 간섭이 일어나므로 어두운 회절 무늬가 나타날 때 $a\sin\theta = a\frac{x}{L} = \frac{\lambda}{2}\cdot 2m(m = 1, 2, 3, \cdots)$이 된다."와 같이 '상쇄 간섭'이라는 표현을 명시적으로 사용하였다.

고등학교 물리학 책에서는 간섭과 회절을 구분하여 설명하기 위해서 1종의 교과서를 제외한 모든 교과서에서 회절 설명에서 '간섭'을 명시적으로 넣지 않고 있지만, 대학생들이 배우는 일반물리학 교재에서는 회절을 설명하는 과정에서 '간섭' 용어를 사용하고 있다. 그 대표적인 예를 옮기면 다음과 같다.

· 슬릿 너비의 1/2만큼 떨어져 있는 임의의 두 점에서 나온 파동은 위상차가 180°가 된다. 따라서 슬릿의 위쪽에서 절반 나온 파동과 아래쪽에서 절반 나온 파동은 상쇄 간섭한다. [19]

· 회절 현상을 빛이 좁은 슬릿에서 나오면서 퍼지는 현상이라고 정성적으로 정의하였다. 그러나 단순한 빛의 퍼짐뿐만 아니라 빛의 간섭으로 회절무늬가 생기게 된다. [20]

· 파동은 중첩되어 간섭하고, 스크린에서 보이는 회절 무늬를 생성한다. [21]

회절에 의해서 생기는 무늬들은 파동의 중첩에 의한 간섭의 원리에 따라 생기는 것이기 때문에 회절 무늬는 간섭 무늬라고도 할 수 있다. Serway와 Jewett가 집필한 「Principles of Physics (최신대학물리학)」에는 회절과 회절 무늬의 형태에 대한 설명에서 "회절 무늬는 실제로 잘못 사용된 단어이지만, 물리 용어로 깊숙이 정착한 단어이다. 단일 슬릿에 비출 때, 스크린에 보이는 회절 무늬는 실제로 또 다른 형태의 간섭 무늬이다. 간섭은 슬릿의 각각 다른 영역에 입사하는 빛의 일부분들이 만나 생기게 된다."와 같이 설명하고 있다 [19]. 또한 Walker 등이 집필한 「Principles of Physics(일반물리학)」에서도 "이중 슬릿 회절 무늬는 간섭과 회절이 서로 혼합되어 나타나는 현상이다. 간섭과 회절의 구분은 단정적인 것이 아니고 다소 임의적이며 편의적인 것이다. 이들은 둘 다 중첩 효과에 기인한 것이고, 동시에 나타난다고 설명하면서 간섭과 회절은 이분법적으로 구분하는 것이 적절치 않다고 제시하였다 [20].

간섭과 회절을 구분하는 것의 부적절한 대표적인 예는 '이중 슬릿에 의한 간섭(영의 실험)'과 '이중 슬릿에 의한 회절'에서 잘 살펴볼 수 있다. '이중 슬릿에 의한 간섭'의 원리를 설명할 때는 두 슬릿으로부터의 경로차에 의해서 간섭무늬가 나타나는 과정을 보여주고, '이중 슬릿의 회절'의 원리를 설명할 때는(프라운호퍼 회절에 제한하여 설명하면) 각 회절내의 지점들에서 구면파로 방사된 파동들을 스크린 상에서 중첩시켜 그 결과를 해석하고 있다. 두 내용이 간섭을 보여주느냐, 회절을 보여주느냐에 따라 해석하는 방법에 차이가 있기는 하지만, 실제 실험하는 모습은 동일하다. 이중 슬릿에 의한 간섭은 슬릿의 폭을 무시할 수 있을 만큼 작다고 가정할 뿐, 실제로 이중 슬릿에 의한 간섭 실험이나 이중 슬릿에 의한 회절 실험은 같은 방법으로 실시한다. 심지어 동일한 실험 장치로 어떤 곳에서는 영의 실험(이중 슬릿 간섭) 장치로 사용하고, 다른 곳에서는 이중 슬릿에 의한 회절 실험 장치로 사용한다. 어떤 교재에서는

회절 효과가 분명히 나타난 사진을 영의 실험 결과로 보여주기도 한다. 이중 슬릿에 의한 간섭 효과만 보고자 하더라도 구멍의 크기에 의해 회절 현상이 필수 불가결하게 나타나기 때문에 회절 효과가 나타나지 않는 간섭 실험은 불가능하다. 즉, 이중 슬릿에서 회절과 간섭은 동시에 일어나는 것이지 독립적으로 나타나는 현상이 아니다.

앞에서 회절 무늬의 원리를 설명하기 위해서 간섭 개념을 사용해야 한다고 설명했는데, 이중 슬릿에 의한 간섭 현상을 설명하기 위해서도 회절 개념이 필요하다. 스크린의 한 지점에서 어떻게 간섭하는지를 알기 위해서 두 슬릿까지의 거리의 차(경로차)를 구한다. 그런데 문제는 슬릿에서부터 스크린까지 빛(파동)이 어떻게 진행할 수 있는지를 설명해야 한다. 즉, 슬릿에 도달한 파동은 구면파의 형태로 퍼져나가고(회절되어 퍼져나가고), 이 파동이 중첩하여 간섭 무늬가 나타나는 것이다.

간섭과 회절의 구분 모호성은 회절 격자에 대한 설명에서 두드러지게 나타난다. 보통 회절에 대한 내용은 '하위헌스 원리 → 단일 슬릿 회절 → 이중 슬릿 회절 → 회절 격자 → 사각형 구멍 회절 → 원형 구멍 회절 → 분해능' 등의 순서로 진행된다. 즉, 구멍의 개수를 '1개 → 2개 → 여러 개'로 증가시키면서 회절 특성을 설명한다.

회절 격자의 회절 분포(프라운호퍼 회절)를 계산하면 $I(\theta) = I_{\theta=0}\left(\frac{\sin\beta}{\beta}\right)^2\left(\frac{\sin N\alpha}{\sin\alpha}\right)^2$와 같다. 여기서 $\alpha = (ka/2)\sin\theta, \beta = (kb/2)\sin\theta$이며, a는 슬릿 간격이고 b는 슬릿의 폭이다. 이때 Fig. 3 (a)와 같이 슬릿 간격이 슬릿의 폭보다 훨씬 큰 경우, 회절 효과($\sin\beta/\beta$)보다 간섭 효과($\sin N\alpha/\sin\alpha$)가 더 크게 나타나 Fig. 3 (b)와 같은 세기 분포를 나타낼 것이다. 즉, 회절에 의한 효과는 전혀 보이지 않는다. Giancoli가 집필한 「Physics, Principles with Applications(일반물리학)」에서 지적한 것처럼 '회절 격자'보다 '간섭 격자'라는 용어가 더 적합할지도 모른다. 회절 격자를 해석할 때에도 회절과 관련된 공식보다는 간섭에서 사용되는 유도 과정을 사용한다.

Serway와 Jewett도 "회절 무늬와 같이, 회절 격자도 잘못된 이름이지만 널리 사용되어 굳어진 물리 용어이다. 회절 격자는 이중 슬릿처럼 회절에 의존하는데, 여러 슬릿으로부터 빛을 간섭할 수 있도록 빛을 퍼트린다. 그래서 간섭 격자라고 부르는 것이 더 맞겠지만, 회절 격자가 현재 사용되는 이름이다."고 지적하면서 회절 격자는 간섭 격자라고 주장하였다 [19]. 이러한 이유로 Knight 등은 일반물리학 교재의 파동광학의 내용 순서를 '빛의 간섭 → 회절 격자 → 박막 간섭 → 단일 슬릿 회절' 등의 순서로 배치하여 회절 격자를 간섭 직후에 학습하도록 하였다 [21].

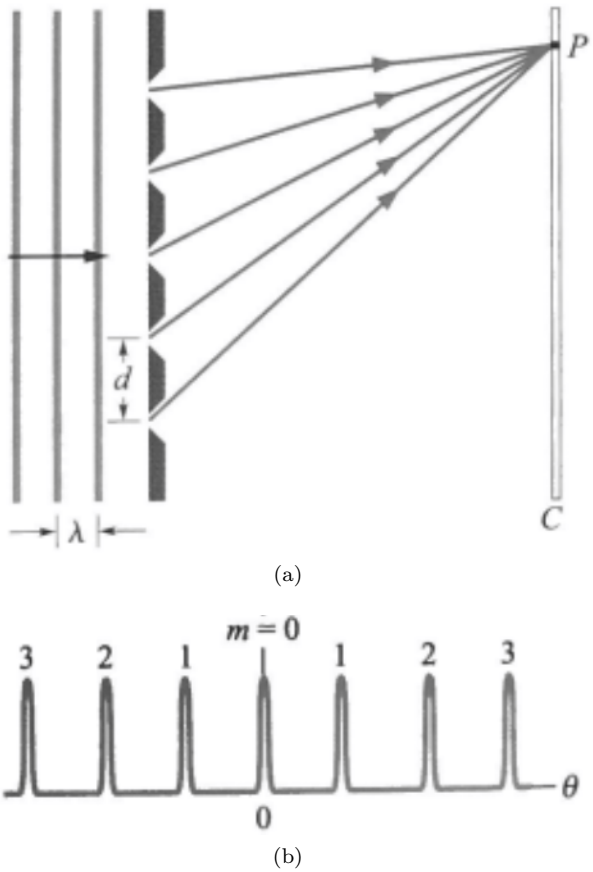

Fig. 3. 회절격자의 구성과 세기 분포([20], p.560)

3. 간섭과 회절의 예

2015 개정 교육과정에서는 물리학 I 에서 "파동의 간섭이 활용되는 예를 찾아 설명할 수 있다."를, 물리학 II 에서 "전자기파의 간섭과 회절을 이해하고 이와 관련된 다양한 예를 조사하여 설명할 수 있다."를 성취기준으로 제시하고 있다. 즉, 간섭과 회절의 학습에서 관련된 사례를 학습하는 것을 중요하게 제시하고 있다. 따라서 교과서에는 간섭과 회절의 원리에 대한 설명과 함께 자연이나 일상생활에서 발견할 수 있는 간섭과 회절에 의한 현상, 간섭과 회절을 이용한 예 등이 제시되어 있는데, 이 내용을 정리하여 Table 4, 5에 제시하였다.

13종의 물리학 I , II 교과서에 제시된 간섭의 예로는 생활 주변에서 관찰할 수 있는 사례로 물 위에 떠 있는 기름막에서 보이는 무지갯빛, 비누막이나 비눗방울에서 볼 수 있는 무지갯빛, 공작의 깃털의 색, 모르포 나비나 풍뎅이에서 나타나는 색 등을 제시하였다. 기름막이나 비누막과 같이 얇은 막에 의한 간섭 현상을 예로 든 교과서는 총 8종이었고, 공작 깃털과 같이 자연에서 발견할 수 있는 예를 제시한 교과서는 총 6종이었다. 한편, 3종의 교과서에서는

Table 4. Examples of interference presented in textbooks.

textbooks	everyday life	example of use
P1A	oil film, soap film	noise cancelling tech., anti-reflective coating, astronomical interferometer
P1B		noise cancelling tech., musical instrument, concert hall design
P1C	soap film	noise cancelling tech., anti-reflective coating, color shifting ink
P1D		noise cancelling tech., anti-reflective coating, astronomical interferometer, hologram, medical equipment for stone removal
P1E	oil film, soap film(bubble), color of insect wing	noise cancelling tech., anti-reflective coating, musical instrument (standing wave)
P1F	soaf bubble, peacock feather, Morpho butterfly wing, beetle	noise cancelling tech., anti-reflective coating, musical instrument (standing wave), hologram, spectroscope
P1G	oil film, soap film, peacock feather	noise cancelling tech., anti-reflective coating, hologram, beat
P1H	peacock feather	noise cancelling tech., anti-reflective coating, LIGO, musical instrument, hologram
P2A	oil film, soap film(bubble)	astronomical interferometer
P2B	peacock feather, Morpho butterfly wing	
P2C		interference of communication wave
P2D	oil film, soap bubble, Morpho butterfly wing, moire	LIGO, color shifting ink, theremin
P2E	soap film(bubble)	concert hall design, muffler, interference of air-wave

Table 5. Examples of diffraction presented in textbooks.

textbooks	everyday life	example of use
P2A	peacock feather	x-ray lithography, CD, telescope resolution, DNA diffraction pattern
P2B	abalone shell	pointillism, CD, AM/FM, lader, X-ray diffraction (crystal structure, DNA structure)
P2C	water wave, hearing behind wall	AM/FM, aperture of camera
P2D		electromagnetic wave repeater, X-ray diffraction (crystal structure, DNA structure)
P2E	hearing behind pilar, peacock feather, beetle wing	CD, inset screen, bell of a wind structure, X-ray diffraction

일상생활 속에서 관찰할 수 있는 간섭의 예를 제시하지 않았다.

간섭을 이용한 예로는 물리학 I 에서는 모든 교과서에서 소음 제거 기술을 제시하였다. 2015 개정 교육과정에서 '두 개의 스피커를 이용한 보강-상쇄 간섭 실험'을 탐구활동으로 제시하면서 이 탐구와 관련된 예로 소음 제거 스피커, 소음기 등을 제시한 것이다. 얇은 막의 간섭과 관련해서는 무반사 코팅을 7종의 교과서에서 제시하였는데, 안경에 코팅을 하여 투명하게 보이도록 하는 것 이외에도 태양전지판에 코팅을 하여 에너지 효율을 높이려는 예를 제시하였다. 이밖에 간섭 전파 망원경, 악기의 정상파, 공연장 설계, 맥놀이, 중력파 검출, 위조 지폐 방지를 위한 홀로그램과 색변환 잉크 등을 예로 들었다. 교과서 P1D에서는 초음파를 이용한 결석 제거용 의료장비를 예로 들었는데, 초음파 발생기를 타원체의 초점에 위치시키고 반대쪽 초점에 환자의 결석을 놓는 방법을 설명하였다. 이때 초음파 발생기에서 나온 모든 초음파는 타원체 내에서 반사되어 환자의 결석에 모이게 되어 강한 충격을 받은 결석을 깬다. 초음파 발생기에서 나온 파동(초음파)이 모든 같은 거리를 이동하여 한 점에 모이므로 보강 간섭 조건에 해당된다고 제시하였다. 초음파도 파동이기 때문에 파동의 간섭으로 설명하는 것도 가능하지만, 이 장비는 타원체의 한 초점에서 나온 파동이 타원체 내에서 반사하여 반대쪽 초점으로 모인다는 원리를 이용한 것으로 타원경에서 물체와 상의 관계, 또는 빛의 반사로 설명하는 것이 더 타당하므로 적절하지 않은 예라고 할 수 있다. 이 밖에 물리학Ⅱ 교과서에서는 전자기파의 간섭을 이용한 악기인 테레민을 추가적인 예로 제시하였다.

회절에 대한 예도 일상생활에서 발견할 수 있는 예와 회절의 원리를 이용한 예로 구분하였다. 회절을 이용한 예로 5종의 물리학Ⅱ 교과서에서 공통으로 제시한 것은 DNA 구조를 밝힌 X선 회절 실험이다. X선을 이용하면 원자 사이의 간격, 결정구조 등 아주 작은 물체의 내부 구조에 대한 정보를 알 수 있어 왓슨과 크릭은 DNA의 X선 회절 사진을 분석하여 DNA가 이중 나선 구조임을 밝혀 노벨상을 수상하였다. 이밖에 CD의 무지개색, AM/FM, 레이더, 점묘법, 방충망, 관악기의 벨구조, X선 리소그래피, 망원경의 분해능 등을 예로 제시하였다. 그리고 일상생활 속에서 발견할 수 있는 예로는 담이나 기둥 위에서 소리 듣기, 파도의 회절과 함께 공작, 전복, 곤충 날개에서 발견할 수 있는 색을 예로 제시하였다.

특이한 것은 공작 깃털, 전복, 곤충의 날개 등은 어떤 교과서(P1E, P1F, P1G, P1H, P2B, P2D)에서는 간섭의 예로 설명하였는데, 다른 교과서(P2A, P2E)에서는 회절의 예로 설명한 것이다. 동식물의 미세구조로 인해 나타나는 이러한 색은 회절 격자 구조, 광자 결정(photonic crystal), 결정 섬유(crystal fibres) 등을 포함한 다양한 광전자 매커니즘에 의한 효과로 알려져 있다 [22]. P2D 교과서에서 '모르포 나비 날개의 두께와 구조는 특히 푸른색이 잘 보이도록 회절격자와 유사한 주기성을 가지고 있다.'고 제시하고, P2E 교과서에서 '규칙적으로 배열된 구조가 회절 격자와 유사한 역할을 한다.'고 설명하고 있다. 풍뎅이 겉껍질을 광학 현미경과 전자 현미경으로 분석한 연구 [23]에서, 풍뎅이의 무지개색이 풍뎅이 겉껍질의 아라고나이트 타일 형태의 홈구조에 의한 반사형 회절 격자에 의해 생긴 회절 무늬로 밝혔다. 이처럼 동식물의 미세 구조에 의해 나타나는 색은 회절 격자에 의한 현상으로 해석하는 것이 바람직하기에 간섭과 회절을 모두 고려해야 한다. 많은 교과서에서 예로 제시한 CD의 무지갯빛도 대부분의 교과서에서는 회절에 의한 효과로 제시하고 있는데, 같은 구조를 지닌 분광기를 간섭의 예로 설명한 교과서(P1F)도 있었다.

IV. 결론 및 시사점

본 연구는 파동 광학의 대표적인 물리 개념인 간섭과 회절이 고등학교 물리학 교과서에 어떻게 제시되어 있는지 분석하여 간섭과 회절의 설명 방법에 대해 시사점을 제시하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해서 8종의 물리학Ⅰ 교과서, 5종의 물리학Ⅱ 교과서에 제시된 간섭의 정의와 조건, 회절의 정의와 원리, 간섭과 회절의 예 등을 중심으로 분석하였다.

교과서 분석 결과, 간섭의 정의는 대부분 교과서에서 비슷하게 설명하고 있었지만, 간섭의 조건에 대해서는 일부 교과서에서만 결맞음 조건과 관련된 표현을 제시하였으며, 보강 간섭과 상쇄 간섭을 위상으로 설명할 때 부정확하게 나타낸 교과서들이 있었다. 회절의 정의는 현상적으로는 모든 교과서에서 비슷하게 설명하고 있지만, 회절이 나타나는 원리를 하위헌스의 원리로 설명하는 정도는 교과서별로 상이하였다. 간섭과 회절의 예는 일상생활에서 발견할 수 있는 예와 간섭과 회절을 이용한 예로 구분하여 분석하였는데, 교과서에서 다양한 예들을 발견할 수 있었다.

분석 결과로부터 주목해야 할 부분은 간섭과 회절의 구분이다. 많은 교과서(특히, 일반물리학 교재)에서 회절의 원리를 설명하면서 '간섭' 용어를 사용하고 있다. 간섭과 회절의 사용 예에서도 회절 격자의 구조와 관련된 여러 사례(동식물, 분광기 등)에서 어떤 교과서에서는 간섭으로, 다른 교과서에서는 회절로 설명하기도 했다. "간섭과 회절은 어떻게 구분해야 할 것인가?"와 같은 질문을 한다면 어떻게 대답할 수 있을까? 이러한 질문이 나온 이유는 우리가 이분법적 사고에 익숙하기 때문이라고 생각한다. '이것은 간섭이고, 저것은 회절이다'라는 구분은 우리가 편의상 만든 것일 뿐 자연 현상은 있는 그대로 존재하는 것이다. 간섭 무늬나 회절 무늬는 빛(또는 전자기파)이 파동의 특성을 가지고 있기 때문에 나타나는 현상이고 그 원리를 설명하기 위해서 편의상 간섭과 회절의 개념을 만든 것이다. 파동의 중첩과 하위헌스의 원리를 이용해서 설명하면 모든 현상이 올바르게 설명되지만, 이러한 설명은 수학적인 식으로 풀어서 나오는 결과로만 이해되기 때문에 물리적(정성적)인 과정을 통해서 설명할 필요가 있다. 아마도 이 때문에 우리가 교과서에서 배우는 간섭이나 회절 개념이 있어야 할지도 모른다.

회절은 빛이 구멍을 통과할 때 퍼져나간다는 장면을 보여주는 현상적인 특성이 강한 개념이다. 그리고 간섭은 두 파동의 중첩으로 새로운 현상이 만들어진다는 원리적인 특성이 강한 개념이다. 따라서 회절 현상을 설명하기 위해서는 원리적 개념인 간섭이 사용될 수 있는 것이다. 단일 슬릿에 의한 회절을 예로 들면, 파동이 단일 슬릿을 통과하면 하위헌스의 원리에 의해 파면의 각 지점이 파원이 되어 퍼져나가므로 슬릿 뒤쪽에서 파동이 휘어져 퍼져나가는데 이러한 현상적인 결과를 회절이라고 하고, 스크린에서 회절 무늬의 분포를 설명하기 위해서는 파원의 각 지점에서 오는 파동의 합성을 통해 보강 간섭이 나타나거나 상쇄 간섭이 나타난다고 설명하게 된다. 이런 방식으로 설명하면, 간섭과 회절은 서로 완전하게 다른 구별되는 개념이 아니라, 빛(전자기파)이 파동이기 때문에 나타나는 현상을 설명하기 위해서 도입된 개념으로 이해할 필요가 있으며, 빛이 파동이라는 좀 더 근본적인 개념을 우선하여 고려해야 한다.

감사의 글

이 연구는 2020학년도 단국대학교 대학연구비 지원으로 연구되었습니다.

REFERENCES

[1] B. Lee, New Physics: Sae Mulli **67**, 1086 (2017).
[2] Ministry of Education, 2015 Revised National Curriculum (MOE, 2015).
[3] K. Wosilait, P. Heron, P. Shaffer and L. McDermott, Am. J. Phys. **67**, S5 (1999).
[4] B. Ambrose, P. Shaffer, R. Steinberg and L. McDermott, Am. J. Phys. **67**, 146 (1999).
[5] S. K. Şengören, Phys. Educ. **45**, 253 (2010).
[6] S. Vokos, P. Shaffer, B. Ambrose and L. McDermott, Am. J. Phys. **68**, S42 (2000).
[7] D. Ivanof and S. NIlolov, Phys. Educ. **46**, 705 (2011).
[8] S. Springham, Phys. Educ. **35**, 64 (2000).
[9] K. Lee, G. Won, E. Kang, E. Kim and H. Kim, Sae Mulli **54**, 3 (2007)
[10] E. Kang, K, Lee, H. Lee and H. Kim, Sae Mulli **56**, 3 (2008).
[11] H. Lee, H. Kim and J. Song, New Physics: Sae Mulli **60**, 35 (2010).
[12] H. Lee and H. Kim, New Physics: Sae Mulli **60**, 1094 (2010).
[13] H. Lee and H. Kim, New Physics: Sae Mulli **62**, 388 (2012).
[14] J. Huh, E. Yoon, S. Lee and Y. Kang, New Physics: Sae Mulli **62**, 862 (2012).
[15] K. Oh and J. Park, New Physics: Sae Mulli **65**, 43 (2015).
[16] S. Bravo and y M. Pesa, Revista de enseñanza de la física **29**, 215 (2017)
[17] G. Kwon, New Physics: Sae Mulli **62**, 1053 (2012).
[18] Physics encyclopedia, https://terms.naver.com/ entry.nhn?docId=3536891
[19] R. A. Serway and J. W. Jewett, Principles of Physics : A Calculus-Based Text, 5th ed., p.909, 914.
[20] J. Walker, D. Halliday, R. Resnick, Principles of Physics, 10th ed., Vol. 2, p.540, 558.
[21] R. D. Knight, B. Jones and S. Field, College Physics, A strategic Approach, 3rd ed., p.525.
[22] wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Structural_coloration
[23] K. Yuk, B. Kim, T. Lee, S. Nam and S. Chang, Sae Mulli **47**, 162 (2003).