

ORIGINAL ARTICLE

과학적 대칭성에 대한 이론적 고찰 및 과학교육에의 함의

배경석¹ · 손연아² · 오준영^{3*}

(¹단국대학교 석·박사통합과정, ²단국대학교 교수, ³단국대학교부설통합과학교육연구소 초빙교수)

Theoretical Study of Scientific Symmetry and Its Implications for Science Education

Kyungsuk Bae¹ · Yeon-A Son¹ · Jun-Young Oh^{2*}

(¹Dankook University, ²Institute of Integrated Science Education of Dankook University)

ABSTRACT

This study aims to provide a theoretical examination of symmetry and its implications for science education. For this purpose, first, we examined the way of thinking of Western science in general through ancient Greek scholars. Second, we divided the perception of symmetry into ancient and modern times. Third, we draw out the implications for science education. The results of this study show that, first, the way of thinking in Western science is 'abstraction', which began with Parmenides and was established by Plato. Second, the ancient perception of symmetry is symmetry as beautiful proportions and harmony based on abstraction, and the modern perception of symmetry is symmetry as an invariant perspective based on abstraction that seeks to find constancy in change. We examined Eratosthenes' experiment to measure the circumference of the earth as an example of ancient symmetry, and Galilean relativity or transformation as examples of modern symmetry. Third, the implications for science education are as follows. Awareness of symmetry can help educate students about the nature of science, as it is a central theme that runs through ancient and modern science. Second, the Eratosthenes' experiment and Galilean relativity or transformations are not represented in the 2022 revised curriculum, but could support understanding of science and key competencies and concepts. Finally, an integrated approach to science education centered on symmetry can have a positive impact on scientific attitudes and interest.

Key words : symmetry, abstraction, eratosthenes' experiment, galilean relativity, science education

I. 서론

대칭성(symmetry)은 일반적으로 수학의 가장 기본적인 개념인 등가(equivalence)와 밀접하게 관련이 있는데, 이는 두 사물이 동일하다면 - 곧 수학적으로 등가라면-

그들이 같다(equal)고 말하고 보편적인 등호(=)를 사용하는 것이다. 따라서 대칭은 사물 간의 동등(equality)의 표현이다. 여기에서 사물은 서로 다른 대상(object)이거나, 어떤 대상의 서로 다른 부분들 일 수 있으며 하나의 대상에 무언가 일을 하기 전과 후의 모습일 수도 있다

Received 16 January, 2023; Revised 24 April, 2023; 25 April, 2023; Accepted 27 April, 2023

*Corresponding author: Jun-Young Oh, Institute of Integrated Science Education of Dankook University, 152 Jukjeon-ro Suji-gu Yongin-city Gyeonggi-do, 16890, Korea
E-mail: jyoh3324@nate.com

This work was supported by the Ministry of Education of the Republic of Korea and the National Research Foundation of Korea (NRF-2020S1A5A2A01047131).

© The Korean Society of Earth Sciences Education. All rights reserved.

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.

(Lederman & Hill, 2011).

대칭성은 물리학에서 특히 많이 논의되고 있는데 (Flannery, 1991; Jho, 2018) 물리학적 대칭성은 주로 수학에 기반을 두고 있다. 우리가 관측하는 대상이나 상황은 언제든지 변화할 수 있다. 그리고 그 관측값도 그 대상이나 상황에 따라 변할 수 있다. 다만, 중요한 것은 상이한 대상이나 상황을 설명하는 물리적 이론이나 법칙이 변화하지 않는다는 것이다. 즉, 어떤 대상을 재배열해도 변하지 않는 무언가(재배열되기 전과 후를 설명하는 물리적 법칙)가 존재할 때, 그 대상은 ‘대칭을 갖고 있다’고 말한다(Kaku, 2021). 따라서 대칭이란 특별한 종류의 변환(transformation)이며 이는 어떤 대상의 위치를 이동시키는 방식이다(Stewart, 2007, 2010). 물리학에서 주로 논의되는 대칭성이 수학적 방정식의 특성을 기반으로 한다면 생명과학에서는 진화의 우연적 결과로 나타나는 형태적 대칭에 대해 주로 논의가 이루어지고 있다. 동물의 신체적 형태에서 관찰할 수 있는 주요 대칭성으로 방사형 대칭이나 좌우 대칭에 대해 많은 과학적 연구가 이루어지고 있고(Holló, 2017; Moubayidin & Østergaard, 2015), 생명과학의 핵심인 유전 분야에서도 DNA 염기 서열의 대칭성에 대해 논의하고 있다(Heinemann & Roske, 2020; Zhang, 1997; Zinoviev *et al.*, 2004)

방정식의 각 요소를 재배열하거나 이리저리 뒤섞어도 방정식의 형태가 변하지 않으면 그 방정식에는 매우 심오한 진리가 담겨 있을 가능성이 크기 때문에(Kaku, 2021) 역사적으로 물리학자들은 명백한 역설에 직면했을 때 관점의 변화를 통해 역설을 설명할 수 있는 대칭성을 찾아 문제를 해결하였다. 이와 같이 대칭성은 물리학자에게 아름다움을 느끼게 하는 원동력이 되고 있으며 더 깊은 대칭성을 찾는 일련의 노력이 현대 물리학의 발전에 큰 동기를 부여하고 있기도 하다(Melo, 2022; van der Veen, 2013). 그리고 대칭성은 과학의 중요한 특성 중 하나로 항상 논의되기도 한다(Anderson, 1972; Castelian, 2002; Lederman & Hill, 2011; Rosen, 1990, 1995; Stewart, 2007, 2010; Voloshinov, 1996; Weyl, 1952; Zee, 1986, 1992).

대칭성은 과학교육에도 유의미한 시사점을 주고 있다. van der Veen(2007, 2012, 2013)은 대학 물리 입문 과정에서 학생들이 느끼는 물리학의 비인간성(inhumanity)에 문제의식을 느끼고 이를 해결할 방안으로 대칭성을 활용한 과학교육을 제안하였다. 이 교육 프로그램은 물리 법칙에 대한 근본적인 개념적 동기로 대칭성을 활용

해야 한다는 Lederman & Hill(2011)의 제안을 바탕으로 대칭성을 개념적 주제 및 통합적 방법으로 삼아 물리교육을 재구성한 프로그램이다. 이 교육 프로그램은 평소 물리학에 대한 관심이 부족한 학생에서 물리학 전공 학생까지 대부분의 학생을 대상으로 물리학에 대한 긍정적인 태도를 끌어내는 데 성공적이었다. 이처럼 대칭성을 주제로 한 과학교육은 과학에 대한 기존과는 다른 접근법을 제공하여 과학에 관심을 가질 수 있도록 하고, 어려운 개념이 많은 과학 학습에서 흥미를 유발할 수 있는 도구가 될 수 있다(배경석 외, 2022). 또한, 대칭 개념은 과학교육에서 통합적인 주제로서도 기능할 수 있다. 대칭성에 대한 개념은 과학 지식의 내용을 체계화하고 구조화하는 데 사용될 수 있으며, 활용할 수 있는 과학적 지식을 간결하게 축적하고 주변 현실의 현상과 법칙을 체계화하기 위해 사회가 개발한 도구의 역할을 할 수 있다(Gapontsev *et al.*, 2019).

그러나, 과학자에게 대칭성이 갖는 중요한 의미와 교육적 효과 및 활용도에도 불구하고, 이 개념이 과학교육에 활용되는 경우는 매우 드물다. 대칭성과 관련된 논의가 대부분 물리학에서 이루어지고 있으나 물리교육에서 활용되는 빈도도 낮을뿐더러 화학, 지구과학, 생명과학 교육에서도 찾아보기 어렵다. 그 이유에는 여러 가지가 있겠지만, 우선 과학이나 과학철학 분야와는 다르게 과학교육 분야에서 대칭성 자체에 대한 논의가 거의 이루어지지 않고 있다는 점이 가장 큰 이유일 것이다. 따라서 본 연구는 과학자들이 과학의 핵심적 특성으로 제시하는 대칭성에 대해서 과학철학 및 과학사적으로 조망하고, 과학교육에 어떤 시사점이 있는지 살펴보고자 한다.

따라서 본 연구는 다음과 같은 연구 목표를 가진다. 첫째, 고대 그리스에서부터 근현대를 관통하는 과학사상사의 기본 틀을 살펴본다. 과학사상사를 관통하는 주요 사유 방식을 살펴봄으로써 대칭성이 주요 사유 방식과 어떠한 관련이 있는지 살펴보는 것은 매우 중요하다. 둘째, 과학교육에 대칭성을 활용하기 위해서 개념을 명확히 할 필요가 있으므로 고대의 대칭성 개념과 근현대의 대칭성 개념을 차례로 살펴보고 그 차이점과 공통점을 도출한다. 마지막으로, 과학교육에의 시사점을 도출한다. 본 연구는 과학의 핵심적인 특성으로 간주되는 대칭성을 개념적으로 정리하고, 이에 대한 교육적 함의를 도출하여 과학교육에 유의미한 시

사점을 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

II. 과학과 철학의 기본 틀: 추상화

흔히 탈레스(Thales), 아낙시만드로스(Anaximander), 아낙시메네스(Anaximenes)로 대표되는 밀레투스(Miletus) 학파를 사상적 시작으로 보는 자연과학에서는 자신 주위를 둘러싼 물리적 세계를 끊임없이 변화하는 혼돈의 상태로 보았으나, 이러한 혼돈을 지배하는 어떤 법칙(logos)이 존재한다고 믿어왔다. 탈레스는 물(water), 아낙시만드로스는 무한자(apeiron), 아낙시메네스는 공기(air)가 그 법칙이라고 생각했는데, 이 3명의 철학자는 공통적으로 혼란스럽다고 생각되는 현상에서 질서 있는 무언가로 향하는 추상적 추리를 보여주고 있으며(Katz & Katz, 1995) 이는 우리의 마음과 독립적으로 세계 속에는 고정되고 변함없는 질서 체계가 존재한다는 자연과학의 형이상학적 믿음이 되었다.

밀레투스학파의 세 철학자는 이 세상의 근본적인 질서를 물질로 보았으나, 파르메니데스(Parmenides)에 이르러 물질을 넘어 정신적 측면에서의 차원 높은 추상성으로 옮겨갔다(오준영, 2023). 파르메니데스의 중요성은 그가 처음으로 사유의 방식을 물질적 추상성에서 정신적 추상성으로 나아가게 했다는 것이며, 지성이 외계의 사실과 관계없이 활동하도록 했고, 또한 지성의 활동 결과를 감각적 지각의 활동 결과보다도 격을 높였다는 것이다(Guthrie, 1960, 2000). 그는 불완전한 것에 대비해서 완전한 것, 상대적인 것에 대비해서 절대적인 것, 시공간에 의존하기보다는 초시공간적인 것, 변하는 것 보다 변하지 않는 것, 어지럽고 모순되어 부조화를 이루는 것보다는 일관되고 모순되지 않은 조화로운 것을 추구하였다.

이후, 플라톤(Plato)은 파르메니데스의 사상을 정립하였다. 플라톤의 사상은 과학 사상에 큰 영향을 주었다. 플라톤은 세계를 이해하기 위한 최상의 방법은 세계의 바탕을 이룬다고 여겨지는 수학적(기하학적) 규칙성의 관점에서 혼란스러운 현실로부터 추출한 추상성에 바탕을 둔 이성적 접근법을 사용하여 세계를 해석하는 일이라고 주장했다(Henry, 2012, 2013). 플라톤의 사상에서 가장 중요한 것은 그가 ‘이デア(idea)’ 세계를 창조했다

는 것이다. 그는 현실 세계를 헤라클레이토스(Heraclitus)의 만물 유전설을 차용하여 변화가 가득한 세계로 설명하는데, 이러한 변화의 세계와 구별된 세계가 존재의 세계 즉, 이デア의 세계라는 것이며 이デア의 세계는 파르메니데스의 존재론과 강력하게 연관되어 있다(이창욱, 2016). 이デア의 세계는 우리가 같은 이름으로 부르는 사물들의 집합마다 하나의 원형(original form)을 부여해야 한다는 의미(Ricken, 2000)로 가장 잘 정의될 수 있다. 피타고라스(Pythagoras)학파가 ‘수(number)’를 이 세계의 질서라고 생각했듯, 플라톤에게 있어 이デア란 ‘원형’으로 대표되는 객관적인 존재였다(Kosaka, 2004). 플라톤은 자연현상은 모두 변화 가득하기 때문에 진정한 존재가 될 수 없다고 생각했으며, 따라서 진정으로 존재하는 것은 이데아에 존재하는 변화하지 않는 것이라 보았다. 그리고 그는 그러한 성질을 가지고 있는 존재를 파악할 방법은 인간의 사유라고 생각했다. 플라톤의 생각은 존재를 자연적 위치에서 개념적 위치로 전환한 것이며, 이는 추상화에 해당한다(오준영과 이은주, 2022).

플라톤과는 다르게 서양의 과학 사상에 큰 영향을 준 아리스토텔레스(Aristotle)는 좀 더 평범하고 실용적인 관점을 채택한 것으로 알려져 있다. 우리 눈에 보이는 것을 관찰함으로써 세계를 이해할 수 있다고 여겼으며, 이러한 이해(사물들의 패턴)는 단지 규칙적인 원리에 따라 사물들을 분류한다면 드러난다고 여겼다. 그러나, 아리스토텔레스의 견해 밑바탕에는 플라톤에서 비롯된 믿음이 깔려있었다. 자연현상의 복잡성에도 불구하고, 규칙적이며 질서정연한 우주로서 자연법칙의 지배를 받는다는 믿음이 바로 그것이다(Henry, 2012, 2013). 아리스토텔레스는 플라톤의 이데아론에는 반대했지만, 보편적인 것에서 특수한 것으로의 추상화에 대해서는 반대하지 않았으며, 추상적 방법에 대해 인식하였다(Bäck, 2006). 그에게 있어 세상의 변화는 질료인, 형상인, 운동인, 목적인의 4원인론에 따라 설명되었으며 이는 아리스토텔레스가 끊임없는 세상의 변화 속에서 찾은 ‘변화’를 설명하는 하나의 자연법칙이었고, 이와 같은 사유 방식은 보편적인 것을 통해 특수한 법칙을 추상화하는 추상적 사유 방식이다.

따라서 파르메니데스와 플라톤 그리고 아리스토텔레스에 이르기까지 고대 그리스 학자들의 사상은 전통적으로 변화에서 불변을, 다수에서 하나의 원형을

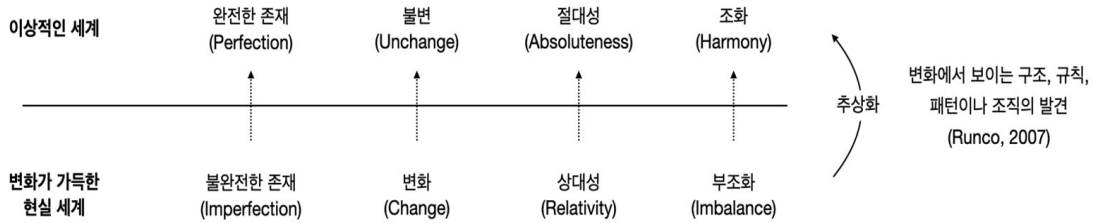


Fig. 1. 과학사상사의 기본 틀: 추상화

찾아가는 것이다. 불완전한 것에서 완전을 찾았으며, 구체적인 것에서 추상적인 것을 찾아내려 하였다. 그리고 변화하는 것, 부조화한 것에서부터 변하지 않는 것, 조화로움을 찾고자 하였다(오준영과 이은주, 2022). 즉, 고대 그리스의 철학자들은 Fig. 1과 같이 비교급 사이에서 최상급을 발견하거나 실현하는 것을 목표로 삼았으며, 변화에서 보이는 구조, 규칙, 패턴이나 조직을 발견하는 추상성을 보여주었다(Runco, 2007). 이런 점에서 서양의 과학 사상사를 최상급에 대한 추구의 역사라고 규정할 수 있다(남경희, 2013). 이후, 변화가 가득한 현실 세계의 배후에 있는 실체, 즉 법칙으로의 추상화 작업은 파르메니데스, 플라톤 그리고 아리스토텔레스로부터 시작되어 이후 지금까지도 과학을 관통하는 하나의 철학적 기본 틀이 되었다.

Ⅲ. 대칭성에 대한 역사적 고찰

1. 대칭성의 의미

Paparazzo(2015)에 따르면 대칭성의 의미를 크게 3가지로 요약해 볼 수 있다. 첫째, ‘수학에서 같은 종류의 양 사이의 조화로운 비율을 표현하는 척도’ 혹은 ‘예술과 자연현상에 대한 설명에서의 균형’으로서의 대칭성이다. 둘째, 오늘날 우리가 흔히 알고 있는 ‘비기술적이고 시각적인 감각, 예를 들어 기준으로 작용하는 물체에 대해 등거리로 배열된 물체 쌍 또는 패턴

의 양방향 대응’으로서의 대칭성이다. 마지막으로 현대 수학을 기반으로 한 물리학에서 주로 이야기하는 불변(invariant)의 관점으로서의 대칭성이다.

이러한 대칭의 3가지 개념은 역사적으로 변화해 왔다. Dardashti *et al.*(2021)에 따르면 대칭성에 대한 개념은 규칙적인 기하학적 도형을 구성하는 개별 요소 간의 비율과 조화를 의미하는 것으로부터 시작되었다. 즉, Paparazzo(2015)가 이야기하고 있는 첫 번째 개념으로서의 대칭성으로 그 개념이 시작되었다. 이후, 대칭성의 개념은 전체 그림을 변경하지 않고, 그림의 다른 부분을 교환할 수 있는 가능성 즉, Paparazzo(2015)의 두 번째 개념인 등거리로 배열된 물체 쌍 또는 패턴의 양방향 대응’에 대한 논의가 이루어졌다. 그리고 이와 같은 ‘등거리 배열’로서의 대칭성 개념(등가 부분의 기하학적 상호 교환 가능성)이 추상 대수 객체로 일반화되어 주어진 변형 그룹에서의 불변이라는 대칭에 대한 현대적인 이해가 등장하였다. 이를 다음 Table 1에 나타내었으며 본 연구에서는 가장 오래된 대칭 개념인 수학적으로 조화로운 비율로서의 대칭 개념을 먼저 살펴해보도록 한다.

2. 고대 그리스: 규칙적인 기하학적 도형을 구성하는 개별 요소 간의 비율과 조화

Hon & Goldstein(2005)에 따르면 ‘기준으로 작용하는 물체에 대한 등거리 배열 및 패턴의 양방향 대응’, ‘현대 수학을 바탕으로 한 불변의 관점’ 등의 근현대적 대칭성

Table 1. 대칭 개념의 변화

구분	고대	근대 및 현대	
대칭성 개념 (Paparazzo, 2015)	규칙적인 기하학적 도형을 구성하는 개별 요소 간의 비율과 조화	기준으로 작용하는 물체에 대한 등거리 배열 및 패턴의 양방향 대응	현대 수학을 바탕으로 한 불변의 관점
변화 과정 (Dardashti et al., 2021)	—————>		

개념은 18세기 이전에는 명시적으로 등장하지 않았다. 그러나, '수학에서 같은 종류의 양 사이의 비율을 표현하는 척도' 혹은 '예술과 자연현상에 대한 설명에서의 균형'으로서의 대칭성 개념(Paparazzo, 2015)은 플라톤에서부터 인식되어 시작되었다고 할 수 있다(Lloyd, 2010).

앞서 살펴보았듯이 과학사상사를 관통하는 주요한 개념은 변화에서 보이는 구조, 규칙, 패턴 등을 찾아내는 추상화 작업(Rucon, 2007)이라고 할 수 있으며 이와 같은 방식은 과학의 발전에 큰 영향을 미쳤다. 특히 플라톤은 이데아의 세계를 만들어내며 이와 같은 추상화를 공식화하였는데, 그 이데아를 찾아가는 방법으로 제시한 것이 바로 '기하학'이다. 플라톤에게 기하학은 변화가 가득한 현실 세계를 다루는 학문이 아니었다. 기하학은 변화가 가득한 현실 세계에서 인간의 지각을 벗어나 이데아를 인식할 수 있는 철학적 방법이자 목표였다(Mueller, 2005). 그리고 플라톤이 강조한 기하학에서는 플라톤을 비롯한 고대 그리스 철학자들이 추구했던 추상화와 같이 무정형보다는 정형이, 직사각형보다는 정사각형이, 일반 다면체보다는 정다면체가, 그리고 원은 그중 가장 최고의 완전한 도형으로 간주된다(Nisbett, 2003; Toulmin & Goodfield, 1961).

Paparazzo(2015)가 제시한 대칭성의 첫 번째 개념은 비율과 조화로써의 대칭성 개념인데 이 개념에 대한 플라톤의 활용은 그의 저서 『Timaeus』와 『Philebus』에 명시적으로 드러난다. 이 두 책에서 플라톤은 데미우르고스(Demiourgos)라는 세계를 만드는 지성으로서의 신을 창조하였으며, 이 신의 행동을 통해 우주(cosmos)의 생성에 대해 논한다. 플라톤에게 있어 우주는 불변하고 영원한 존재이며, 이는 혼돈 자체에 수학적 질서를 부과한 데미우르고스가 제작한 작품이다. 특히 데미우르고스의 목표는 '선(good)'으로서(Zeyl & Sattler, 2022) 통합되고 독립적이며 완전하고 조화로워 올바르게 기능하는 세계를 만들고자 하였고, 이 '선'을 바탕으로 만들어진 우주는 아름다운 것이었다(O'Meara, 2014). 그리고 대칭성과 관련하여 주목해서 보아야 할 것은 데미우르고스가 우주를 생성할 때 기하학적 방법을 사용한다는

점이다.

우선 데미우르고스는 '우주의 몸체(cosmic body)'를 만드는데, 하나의 천구(ouranos)를 먼저 만들고 그 후 물질을 구성하는 물·불·공기·흙을 기하학적 비율에 따라 결합한다(김윤동, 2016). 그리고 우주를 구성하는 이 4원소는 가장 '선'한 것이며, 이에 따라 가장 '선'한 물질은 가장 기본적인 기하학적 형상, 즉 삼각형을 통해 나타나야 하는 것이다. 플라톤은 기본적인 삼각형을 활용해서 물은 정이십면체, 불은 정사면체, 공기는 정팔면체, 흙은 정육면체로 보았다. 이러한 정다면체를 이루는 모든 면은 크기와 모양이 같으며, 이는 최대의 기하학적 비율과 조화, 즉 대칭성을 나타내는 것이다(Baez, 2020).

이후, 데미우르고스는 '세계영혼(world-soul)'의 구성에 대해 설명하는데, 이때에도 기하학적 비율과 조화에 따라 생성된다(Gregory, 2021). 데미우르고스는 '동일성(likeness)', '차이(difference)', '존재(be-ing)'라는 세 측면에서 세계영혼을 구성하는데 그 방법은 비율과 조화에 따른 '혼합'과 '분리'라고 할 수 있다. 적절한 비율과 조화에 따라 '동일성', '차이', '존재'라는 성질이 합쳐지고, 또 나뉘며 마지막에는 '동일성', '차이', '존재'가 모두 혼합된 혼합물이 남게 된다(Brisson, 2020).

데미우르고스가 수행한 두 작업(우주의 몸체와 세계영혼의 제작)에 공통으로 적용되는 원리는 기하학적 비율과 조화로 나타난 비례이다(김윤동, 2016). 즉, 우주를 구성하는 4원소가 가장 '선'한 것이며 이에 따라 가장 기본적인 기하학적 형상을 가져야 한다는 것, 그리고 비율과 조화에 입각한 세계영혼의 제작은 플라톤을 비롯한 고대 그리스 사상의 '추상화' 작업과 '대칭성'에 대한 추구를 잘 보여준다. 이 과정에서 비율과 조화의 의미로서 반복적으로 플라톤이 사용하는 단어는 *summetria*, *summetros*이며(Lloyd, 2010) 이는 Paparazzo(2015)가 제시한 대칭성에 대한 첫 번째 정의에 부합한다고 할 수 있다. 즉, 기하학적 비례는 서로 다른 '평등(equality)'(기하학적 및 조화로운 평등)의 형태로 동일성을 표현하는 비율과 조화, 즉 대칭이며 이는 『Philebus』에서 사용된 의미와 동일하다(O'Meara, 2014).

따라서 이와 같은 플라톤의 서술은 변화 가득한 현실 세계에 있는 객체의 속성보다 더 큰 현실성을 추구하는 방식이며, 무질서에서 질서를, 변형에서 원형을 추상화하는 것으로 이해될 수 있으며(오준영과 이은

1) 『Timaeus』는 플라톤의 저서로 우주의 생성에 대해 논하고 있으며 소크라테스, 크리티아스, 헤르모크라테스, 티마이오스의 대화 내용으로 구성되어 있다. 특히, 이 책에서는 우주를 생성하는 신을 데미우르고스라고 칭하고 있으며 이경직(2001)에 따르면 데미우르고스는 우주 생성에 대한 발화를 담당하고 있는 티마이오스 자체이다.

주, 2022; Nisbett, 2003; Oh, 2017), 추상화의 목표로써 추구된 비율과 조화는 대칭성이라고 할 수 있다.

플라톤과 같은 고대 그리스 철학자들이 완벽한 도형을 추구하고, 특히 아름다운 비율과 조화를 추구할 수 있었던 이유는 그 초점을 대상에만 맞출 수 있었기 때문이다. 왜냐하면 플라톤을 비롯한 고대 그리스 철학자들의 세계관은 지구가 움직이지 않는다는 ‘지구중심설(geocentrism)’을 기반으로 하고 있기 때문이다. 지구가 움직이지 않는다는 것은 지구에서 관찰하는 관찰자가 움직이지 않는다는 뜻이며, 관찰하는 대상에만 움직임이 있다는 의미이다. 따라서 그들은 변화가 가득한 세상을 설명할 때 움직이는 대상에만 초점을 맞출 수 있었으며 그 움직임의 근본적인 질서를 찾는 과정에서 완벽하고 아름다움을 추구하는 추상화 작업에만 초점을 맞출 수 있었다. 그리고 이와 같은 고대 그리스의 대칭성 추구를 명확히 보여주는 사례는 지구과학에서 주로 논의되는 에라토스테네스(Eratosthenes)의 지구 둘레 측정 실험이라 할 수 있다.

고대부터 에라토스테네스의 지구 둘레 측정 실험은 알렉산드리아 과학의 유명한 업적 중 하나였다(Russo, 2013). 그러나 에라토스테네스가 남긴 저술은 대부분 사라졌으며 우리는 그의 업적 대부분을 클레오메데스(Cleomedes)의 서술에 의존하여 살펴볼 수 있을 뿐이다(Dutka, 1993). 에라토스테네스가 활용할 수 있는 당대의 지적 자산이 그리 많지는 않았지만, 그가 지구 둘레를 측정할 수 있도록 한 3가지 가정(Crease, 2003, 2006)이 있었다.

첫째, 그림자의 길이를 측정할 장소인 알렉산드리아와 시에네는 거의 같은 자오선 상에 놓여있다. 그는 일 년 중 낮이 가장 긴 하지 정오에 이집트의 도시 시에네에는 그림자가 거의 드리우지 않는다는 사실을 알고 있었다. 그에겐 1년 중 하지에 태양이 시에네의 바로 머리 위에 있지만, 시에네의 북쪽이나 남쪽에서는 그렇지 않다는 것이 중요한 사실이었다(Makowski, 1996). 결과론적으로 이 가정이 에라토스테네스에게 중요했던 이유는 시에네의 바로 위에 태양이 떠 있다는 사실을 통해 시에네에서는 태양 빛이 지구 중심을 향해 일직선으로 떨어질 것이라는 예상을 할 수 있게 만들었기 때문이다.

둘째, 태양은 지구에서 굉장히 멀리 떨어져 있기 때문에 지구에 도달하는 태양 빛은 언제나 서로 평행하다.

그 당시 에라토스테네스는 아리스타쿠스(Aristarchus)의 주장을 바탕으로 태양과 지구의 거리를 가늠했다. 기원전 260년경, 아리스타쿠스는 태양과 별이 움직이지 않는다는 가정을 통해 지구, 달, 태양의 상대적인 크기와 달과 태양까지의 상대적인 거리를 추정했다. 이를 통해 아리스타쿠스는 태양과 고정된 별이 너무 멀리 떨어져 있기 때문에 지구와 태양에서 별에 이르기까지 그 빛은 사실상 평행하게 도달할 것이라는 결론을 얻었다(Evans, 1998; Oh, 2017). 물론, 에라토스테네스가 태양과 별이 움직이지 않을 것이라는 아리스타쿠스의 주장을 온전히 받아들인 것은 아니다. 에라토스테네스는 플라톤의 우주관을 믿고 있었기 때문에 아리스타쿠스의 지구와 태양 사이의 거리에 대한 수리적 가정만을 받아들였을 뿐이다.

세 번째 가정은 지구가 완벽한 ‘구(sphere)’라는 것이다. 에라토스테네스가 지구를 완벽한 구형으로 가정했다는 것은 피타고라스와 플라톤의 사유 방식에서 기인한다(Oh, 2017). 데미우르고스에게는 두 가지 원칙이 특히 중요했다. 질서는 혼돈보다 모든 면에서 더 낫다는 것, 그리고 유사성은 비유사성보다 비교할 수 없을 정도로 우월하다는 것이다. 데미우르고스가 사용할 수 있는 모든 것은 음악의 수학적 표현인 조화에 기반한 비율로 결합한다. 그런 다음, 결합한 물질은 구형 우주의 중심에 구형 지구가 있는 대우주를 구성하는 데 사용되었다(Lloyd, 2010). 플라톤이 이데아로 가는 길로써 제시한 수학(기하학)에서 상향식 추상화 원칙에 따라 무정형보다는 정형이 완전하며, 직사각형보다는 정사각형이, 일반 다면체보다는 정다면체가, 그리고 원은 최고의 완전한 도형으로 여겨진다(Nisbett, 2003; Toulmin & Goodfield, 1961). 그중에서도 구는 ‘더 완벽하고 그 자체와 유사한 모양은 없다’는 플라톤의 문구를 참고해 보았을 때, 그가 가장 완벽한 모양이라고 고려한 것이다(Lloyd, 2010). 따라서, 데미우르고스가 ‘선’으로써 만든 아름다운 결과인 우주와 지구는 최고의 완전한 도형인 구체이며, 에라토스테네스는 이와 같은 플라톤의 사유를 받아들였다(Oh, 2017).

에라토스테네스는 이와 같은 세 가지 가정을 활용하여 짧은 그림자의 길이를 재는 행위만으로 우주의 규모에 관련된 수치들을 발견할 수 있다는 단순한 실험을 통해 Fig. 2와 같이 지구의 크기를 측정하였다(Crease, 2006). 태양이 시에네의 꼭대기에 오면 시에네

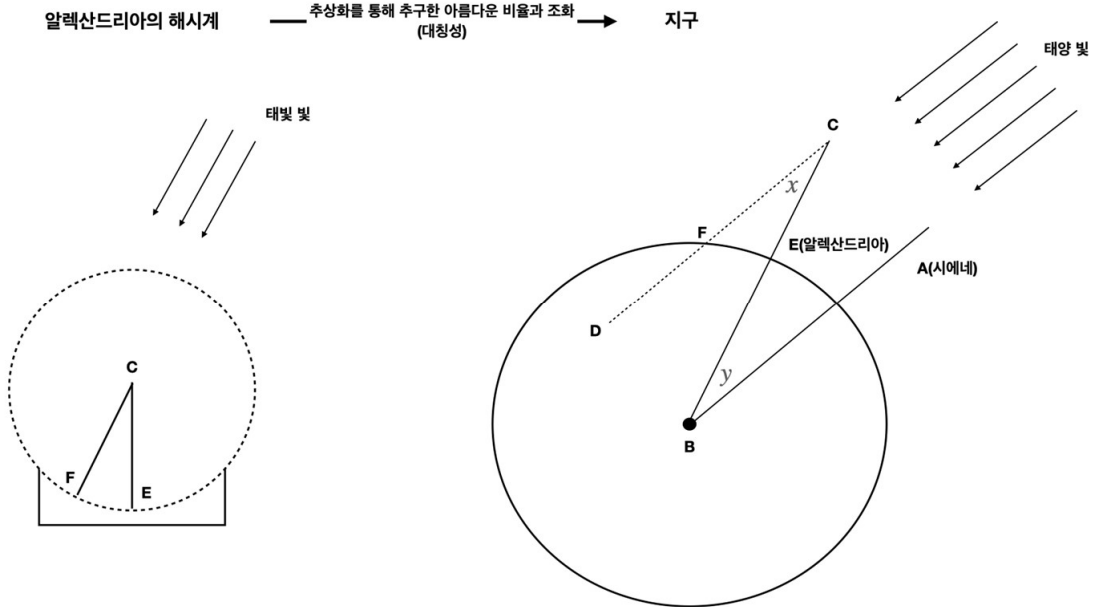


Fig. 2. 에라토스테네스의 지구 둘레 측정 실험(Crease, 2006)

에 꽂혀있는 막대기의 그림자는 없어진다. 그러나, 알렉산드리아에 있는 해시계에는 \overline{CD} 방향으로 그림자가 생긴다. \overline{CD} 와 \overline{CB} 가 이루는 각을 x , \overline{AB} 와 \overline{BC} 가 이루는 각을 y 라고 한다. 이때, 에라토스테네스는 지구의 둘레 길이를 기하학을 통해 측정하였다. ‘유클리드 기하학’에 따르면 한 직선이 두 평행선과 만나는 각도는 같다. 따라서 x 와 y 는 같다. 결국 \widehat{FE} 가 해시계 원둘레에 대해 가지는 비율과 \widehat{AE} 가 지구 둘레에 가지는 비율은 동일할 것이며 이를 통해 지구의 둘레를 측정할 수 있다.

에라토스테네스의 지구 둘레 측정 실험은 플라톤의 대칭성 개념과 밀접한 연관성을 가지고 있다. 첫째, 추상화 작업을 통해 물리적 세계에 있는 객체의 속성보다 더 큰 현실성 즉, 무질서에서 질서를, 변형에서 원형을 그리고 작은 것에서 광활한 것을 추상화하는 플라톤의 방식(Nisbett, 2003; Oh, 2017)을 따른다. 에라토스테네스는 플라톤의 우주론을 받아들여 지구를 완벽한 구체라고 생각했으며 이는 무정형보다는 정형이 완전하며, 직사각형보다는 정사각형이, 일반 다면체보다는 정다면체가, 그리고 원은 최고의 완전한 도형이라고 생각했던 고대 기하학의 원리를 내포하고 있는 것이다. 둘째, 플라톤의 『Timaeus』, 『Philebus』 등에서 나타난 수학에서 같은 종류의 양 사이의 비율을 표현하

는 척도(공통 척도를 갖는 것 혹은 상용 또는 적당한 비율을 갖는 것)라는 플라톤적 관점에서의 대칭성을 보여주고 있다. 이는 ‘유클리드 기하학’의 비례식을 통해 나타난다. 지구와 태양 간의 거리가 충분히 멀다는 아리스타쿠스의 주장을 받아들임으로써 태양 빛의 평행함을 가정하고, x 와 y 가 엇각으로써 동일하다는 원리를 바탕으로 해시계와 구체로써의 지구의 동등한 척도 및 비율을 나타낸 것이다.

결과적으로 에라토스테네스의 지구 둘레 측정 실험을 대칭성의 관점에서 해석한다면 다음 Table 2처럼 나타낼 수 있다. 우선 에라토스테네스의 지구 둘레 측정 실험에 적용되는 대칭성 개념은 아름다운 비율과 조화로써의 대칭성 개념이다. 또한 이와 같은 방식은 아름다운 비율과 조화를 추구하는 추상화를 기반으로 하고 있으며, 관찰자가 정지해 있는 지구중심적 세계관을 전제하고 있다.

그러나, 이후 코페르니쿠스(Copernicus)가 ‘태양중심설(heliocentrism)’을 주장한 이후 이와 같은 추상화가 어려워졌다. 관찰자가 존재하는 지구가 움직이기 시작하면서 관찰자의 움직임을 고려해야 했으며, 관찰자의 움직임과 대상의 움직임을 함께 고려할 때 그들이 추구했던 완전성, 절대성, 아름다운 비율과 조화 등의 일방적인 적용이 어려워졌기 때문이다.

Table 2. 대칭성의 관점에서 바라본 에라토스테네스의 지구 둘레 측정 실험

	대칭성 관점	에라토스테네스 지구 둘레 측정 실험
사유 방식 (Nisbett, 2003, pp.156-157)	추상화	추상화를 기반으로 지구를 완전한 ‘구체’로 바라보았으며, 추상화의 추구 방향은 아름다운 비율과 조화임.
우주론	지구중심설	
관점	정지한 관찰자(주체)가 움직이는 물체(객체)를 관찰함	정지한 관찰자(주체)가 움직이는 물체(태양과 그림자 등)를 관찰함.
대칭의 정의 (Dardashti et al., 2021; Paparazzo, 2015)	규칙적인 기하학적 도형을 구성하는 개별 요소 간의 비율과 조화	‘유클리드 기하학’의 비례식을 활용하여 나타낸 해시계와 지구의 비율과 조화

3. 근대와 현대: 양방향 대응 개념이 전이된 현대 수학을 기반으로 한 대칭성

코페르니쿠스는 약 1500년간 믿어졌던 아리스토텔레스와 프톨레마이오스(Ptolemy)의 지구중심적 세계관과는 다른 새로운 이론을 만들어냈다. 지구가 움직이지 않는다고 믿어져 왔던 기존의 세계관과는 달리 지구가 태양을 중심으로 움직인다는 ‘태양중심설’이 그것이다. 그러나, 코페르니쿠스의 주장은 여러 경험적 사실과 부합하지 않았다. 그중 가장 대표적인 부정함은 ‘탑의 논증’이라 불리는 것이었는데, 지구의 지면이 움직인다면 탑의 꼭대기에서 떨어뜨린 물체가 바로 그 밑으로 떨어져서는 안 된다는 것이었다. 떨어지는 동안 지면이 움직이면 다른 위치에 물체가 떨어져야 한다는 것이다.

그리고 갈릴레이(Galilei)는 코페르니쿠스의 태양중심설은 뒷받침할 증거로 상대성원리를 논증하였으며 소위 ‘탑의 논증’이라 불리는 경험적 부정함을 해결하였다. 그리고 이러한 갈릴레이의 상대성원리에서 ‘현대 수학을 바탕으로 한 불변의 관점으로서의 대칭성’ 개념(Paparazzo, 2015)을 살펴볼 수 있다.

갈릴레이는 논증을 위해 밖이 보이지 않는 배의 선실이라는 가상의 공간을 가정한다. 그리고 그 선실 안에 어항 속을 헤엄치는 물고기, 날아다니는 나비와 같은 곤충, 물이 한 방울씩 새어 떨어지고 있는 병을 추가로 가정한다. 이때, 헤엄치는 물고기와 날아다니는 나비를 관찰한다면 두 개체 모두 평온하게 우리가 알고 있는 그대로 그들의 운동을 하고 있을 것이다. 그리고 병에서 새어 나온 물은 바로 밑의 바닥으로 떨어질 것이다. 이후, 갈릴레이는 배를 등속으로 출발시킨다. 등속으로 출발시킨 후 어느 정도 시간이 지났을 때, 선

실 안에서 앞서 본 현상을 다시 관찰해보는다면 정지해 있을 때와 동일한 양상을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 즉, 어항 속 물고기와 나비는 정지해 있을 때와 동일하게 운동하고 있으며, 병에서 떨어지는 물은 다시 그 밑으로 떨어지고 있는 것이다. 결국 선실 안에 있는 사람은 정지해 있을 때와 등속으로 움직이고 있을 때, 선실 안의 물리적 현상만 가지고는 내가 존재하고 있는 이 배가 움직이는지 정지해 있는지 알 수 없다. 그러나, 배 밖에서 배를 관찰하고 있는 제 3자는 어떠한가? 배가 정지해 있을 때와 움직이고 있을 때를 모두 관찰할 수 있다.

갈릴레이의 이와 같은 논증을 통해 우리는 다음과 같은 사실을 알 수 있다. 첫째, 움직이는 배 안의 사람은 선실 안의 물리적 현상을 가지고 자신이 움직이고 있는지 혹은 정지해 있는지 알 수 없으나 배를 관찰하는 제 3자는 이를 알 수 있다는 점을 통해 운동은 관찰자의 운동 상태에 대해 상대적이다. 둘째, 정지해 있는 배의 선실 안 물고기, 나비 그리고 떨어지는 물의 운동과 등속으로 움직이는 배 안에서 그것들의 운동이 동일하다는 점에서 두 상황 모두에서 동일한 물리 법칙이 적용되고 있다는 것이다.

그리고 갈릴레이의 상대성원리를 수학적으로 표현한 것이 바로 ‘갈릴레이 변환(galilean transformation)’²⁾이다. 갈릴레이 변환은 다음과 같다. 만약 어떤 A 좌표계에서 특정한 물체의 좌표를 $A(x, y, z)$, 시간을 t 라고 가정해보자. 그리고 A 좌표계에서 y 축과 z 축은 평행한 상태로 x 축 방향으로 속도 v 로 움직이는 B 좌표계가 있다고 가정해보자. B 좌표계에서 특정한 물

2) 갈릴레이 변환은 갈릴레이가 직접 나타낸 것이 아니라 갈릴레이 이후 정리된 것으로 알려져 있다(Browne, 2020).

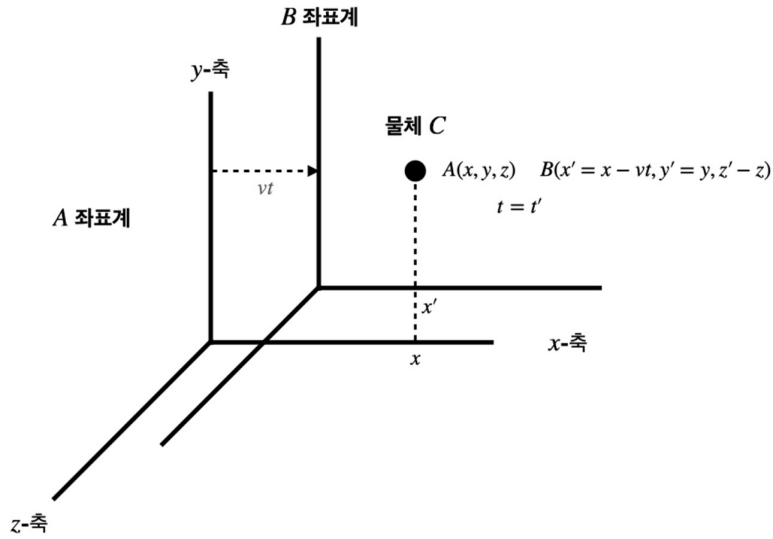


Fig. 3. 갈릴레이 변환

체의 좌표는 $B(x', y', z')$ 이며 시간은 t' 이다. 이때 우리는 x' 을 x 를 활용하여 나타낼 수 있는데 이는 Fig. 3에서 보듯 $x' = x - vt$ 가 된다. 시간은 $t = t'$ 의 관계를 가지며, y 축과 z 축은 평행하게 이동하였기 때문에 같은 값을 가진다. 따라서, B 좌표계에서 특정 물체의 좌표는 $B(x' = x - vt, y' = y, z' = z)$ 으로 나타낼 수 있다. 이때 $x' = x - vt, t = t'$ 을 ‘갈릴레이 변환’ 식이라고 한다.

‘갈릴레이 변환’은 A 좌표계에서 관측한 물체의 좌표를 활용하여 등속으로 움직이는 B 좌표계에서 관측한 물체의 좌표를 설정할 수 있다는, 혹은 A 좌표계의 좌표를 활용해 B 좌표계의 좌표로 변환할 수 있다는 의미를 가지고 있다(Kamphorst et al., 2023). 이는 등속으로 움직이는 두 개의 다른 공간 및 시간 좌표계를 서로 연결한다는 것이다. 즉, $x' = x - vt$ 에서 x' 과 x 를 서로 바꾸어도 $x = x' + vt$ 가 됨으로써 x' 과 x 가

서로 상호 호환된다는 것이다.

현대 수학을 바탕으로 한 현대적 대칭성 개념은 불변의 관점으로써의 대칭성 개념인데, 과학 이론적으로 세부적인 많은 논의가 있으나 결국 이러한 논의의 핵심적인 이야기가 어떤 상황에서도 물리 법칙은 불변한다는 관점(Lederman & Hill, 2011)에서 이와 같은 갈릴레이의 상대성원리는 물리 법칙의 불변성, 즉 대칭성을 의미하는 것이다. 이처럼 ‘갈릴레이 변환’은 A 좌표계와 등속으로 움직이는 B 좌표계에서 동일한 물리 법칙이 적용된다는 ‘물리 법칙의 대칭성’을 보여준다(Lederman & Hill, 2011). 상술한 바에 따르면 대칭이란 특별한 종류의 변환이며 어떤 물체를 재배열 했을 때 변하지 않는 무언가가 있다는 것이다. ‘갈릴레이 변환’은 특별한 종류의 변환이며 어떤 대상을 재배열(A 좌표계에 대한 B 좌표계의 등속 운동) 하는 과정이고, 이 과정에서 물리 법칙은 동일하다는, 변하지 않는 무언

Table 3. 대칭성의 관점에서 바라본 갈릴레이 변환

대칭성 관점		갈릴레이 변환
사유 방식 (Nisbett, 2003, pp.156-157)	추상화	변화가 가득한 현실 세계에 적용할 수 있는 법칙의 불변성을 찾음.
우주론	태양중심설	
관점	움직이는 관찰자(주체)가 움직이는 물체(객체)를 관찰함	움직이는 관찰자(주체)가 움직이는 물체(물리적 현상)를 관찰함.
대칭의 정의 (Dardashti et al., 2021; Paparazzo, 2015)	불변의 관점에서서 현대적 대칭성	현대 수학을 기반으로 나타난 현대적 대칭성 (물리 법칙의 불변성)

가가 있다는 의미를 가지고 있다.

이후, 현대과학에서도 불변의 관점으로써 대칭성은 나타난다. 아인슈타인(Einstein)의 특수상대성이론은 어떤 형태의 운동을 가지는 광속의 불변성을 가정하고 있으며, 이 광속의 불변성에 대해 시간과 공간의 대칭성이 나타난다. 또한, 일반 상대성이론에서는 비관성계에서 빛의 휘어짐을 나타내고 있는데, 중력장과 관성계는 빛의 휘어짐에 대하여 대칭성을 보인다. 즉, 일반상대성이론의 대칭성의 범위는 뉴턴(Newton)의 고전역학과 특수상대성이론의 대칭성 범위를 중력장이 강한 곳으로 확장시켰다. 양자역학에서는 관찰시 불변인 플랑크 상수에 대하여 입자성과 파동성이 대칭성을 보인다. 이처럼 대칭성에 대한 인식과 추구는 고대의 기하학적 대칭성에서 시작되어 현대와 이론적 대칭성까지 확장되고 있으며, 과학 사상을 관통하는 하나의 방향이 되었다.

4. 고대와 근대 및 현대적 대칭성에 대한 종합 논의

서양의 과학 사상은 기본적으로 파르메니데스, 플라톤, 아리스토텔레스 등 고대 그리스 학자의 사상을 기반으로 하고 있다. 파르메니데스는 밀레투스학파의 세 철학자와는 다르게 이 세상의 근본적인 질서인 로고스를 물질적인 차원을 넘어 정신적인 측면으로, 즉 높은 추상성을 가진 것으로 격상시켰다. 지성을 진리에 이르는 길이라 판단하고, 이를 감각적 지각의 활동 결과보다도 높은 것이다(Guthrie, 2000). 플라톤 완전성, 절대성, 단순성, 초시공간성, 독립성 등을 근원적 성질로 하는 이데아의 세계를 창조하며 파르메니데스의 사상을 정립하였다. 아리스토텔레스는 변화하는 세계에 초점을 맞추었으나 그 ‘변화’를 설명하는 자연법칙이 있

다고 믿었다. 고대 그리스 철학자를 시작으로 이루어진 변화가 가득한 세계에서 법칙이나 패턴 등을 찾는 추상화가 과학사상을 관통하는 하나의 기본 틀이다. 그리고 고대 그리스 철학자들은 아름다운 비율과 조화의 관점에서 대칭성을 추구 방향으로 삼았으며, 근현대 과학자들은 현대 수학을 바탕으로 한 불변의 관점에서의 대칭성을 추구의 방향성을 삼았다.

고대와 근현대의 대칭성 개념의 차이는 각 시대가 가지고 있는 우주론에도 영향을 받았다. 고대 그리스는 정지한 관찰자(주체)가 움직이는 물체(객체)를 관찰하는 관점을 통해 세상을 바라보았는데 이는 ‘지구중심설’을 기반으로 한다. 지구는 정지해 있기 때문에 지구 위에서 서서 관찰하는 관찰자는 정지한 상태이다. 그러나 코페르니쿠스의 태양중심설이 제기된 이후, 움직이는 지구 위에 서서 관찰하는 관찰자는 정지한 상태가 아니라 움직이는 상태가 된다. 즉, 움직이는 관찰자(주체)가 움직이는 물체(객체)를 관찰하는 것이다. 이러한 사상적 기반의 차이는 고대 그리스 운동론의 경험적 증거와 새롭게 나타난 이론적 실재성의 부정함을 가져왔으며, 갈릴레이는 이를 일치시키는 과정에서 그의 상대성원리를 논증하였고 이를 통해 물리 법칙의 대칭성을 논증하였다. 이를 정리해보자면 Table 4과 같다.

IV. 과학교육에의 시사점

역사적으로 대칭성은 규칙적인 기하학적 도형을 구성하는 개별 요소 간의 비율과 조화라는 개념에서 시작하여 전체 그림을 변경하지 않고 다른 부분을 교환할 수 있다는 등거리 배율적 개념을 거쳐 상호 교환의 추상화가 적용된 변형 그룹에서 불변의 관점으로의 이론적 대칭성으로 나아갔다(Dardashti et al., 2021). 그리

Table 4. 고대와 근현대 대칭성의 개념

	고대	근대 및 현대
사유 방식 (Nisbett, 2003, p.156-157)	파르메니데스, 플라톤, 아리스토텔레스를 기반으로 한 추상화	
우주론	지구중심설	태양중심설
관점	정지한 관찰자(주체)가 움직이는 물체(객체)를 관찰함	움직이는 관찰자(주체)가 움직이는 물체(객체)를 관찰함
대칭의 정의 (Dardashti et al., 2021)	규칙적인 기하학적 도형을 구성하는 개별 요소 간의 비율과 조화로서의 대칭성	현대 수학을 바탕으로 한 불변의 관점에서의 대칭성

고 이와 같은 대칭성에 대한 추구는 변화가 가득하여 부조화한 것에서 아름다운 조화로운 것을, 변하는 것에서 변하지 않는 불변의 것을 추구하는 추상화에 의해 시작되었다. 따라서, 대칭에 대해 배운다는 것 혹은 추론한다는 것은 고대 그리스적 개념으로서의 대칭성인 비율과 조화에 대해 확인하는 것에서부터 시작하여 개념과 다른 개념의 연결된 네트워크적인 관계에 대한 깊은 이해를 추구하는 현대적 대칭성까지 폭넓은 방향을 포괄한다(Seah & Home, 2019).

우선, 대칭성이라는 주제는 과학의 본성 교육에 활용될 수 있다. 과학교육의 궁극적인 목표는 과학적 소양(scientific literacy)을 기르는 것인데(조은희, 2022) 과학적 소양을 함양하기 위한 방법으로 제시되는 교육은 과학의 본성에 대한 교육이다(박영신과 유지연, 2017; 이상균, 2016; Abd-El-Khalick *et al.*, 1998; Abd-El-Khalick & Lederman, 2000; Lederman *et al.*, 2013). 특히 최근 과학의 본성에 대한 연구에서 주목받고 있는 가족유사성 접근(family resemblance approach)에서는 과학의 본성 요소로서 단순성, 통일성을 비롯해 대칭성을 과학의 본성 중 하나로 규정하고 있으며(Erduran & Dagher, 2014), Lederman(2007)이 제시한 과학의 본성적 측면에서 살펴 보더라도 대칭성은 과학자들이 오래전부터 추구해오던 가치라는 점에서 과학의 본성과 밀접한 연관성을 가진다(조현국, 2018). 특히 과학의 본성을 함양하는데 주요한 도구로서 과학사와 과학철학이 거론되는데(박종원, 2016; Jimenez-Liso *et al.*, 2020; Kolsto, 2001; Millar & Osborn, 1998) 고대 그리스의 추상화에서 시작된 대칭성에 대한 추구가 갈릴레이, 데카르트(Descartes), 뉴턴과 같은 과학자부터 아이슈타인과 같은 현대 과학자를 관통하는 주제이며, 일반상대성이론에서 양자장이론에 이르기까지 현대 물리학의 기초에 명시적으로 놓여있다는 점에서(Livio, 2012) 과학사 전체를 아우르는 통합적 주제로 기능할 수 있을 것으로 생각된다.

일례로 2022 개정 교육과정의 <과학의 역사와 문화> 교과에서는 '[12과사01-02] 고대 그리스 철학자의 과학적 사고나 주장 등을 조사하고, 그리스 문명이 고대에서 현대에 이르기까지 인간의 삶에 미친 영향을 설명할 수 있다'와 같은 성취기준이 제시되어 있으며, 이에 대한 내용으로 고대 그리스 시대의 우주관과 자연관을 이해하고 고대 그리스 철학자들의 생각이 오늘날 과학에 미치고 있는 영향 등에 대해 제시하게 되어

있다. 2022 개정 교육과정을 담은 교과서가 아직 출판되지 않아 그 정확한 내용을 알기 어렵지만, 2015 개정 교육과정을 기반으로 한 <과학사> 교과서를 통해 유추해보자면 “파르메니데스의 주장을 계기로 철학자들 사이에서 감각적 인식과 순수 사유를 두고 논쟁이 시작되었다. 한동안 감각적인 인식보다 순수 사유가 우세했다”(정인경 외, 2017)(p.40), “플라톤은 우주와 자연에서 일어나는 변화에 대해 부정적인 시각을 가졌다. 그는 신이 만든 우주와 자연은 완벽하고 질서 정연해야 하므로 불변이어야 한다고 생각했다”(p.41) 등 고대 그리스의 추상화에 해당하는 내용이 포함될 것으로 생각된다.

또한, 고대 그리스 철학자의 과학적 사고나 주장에는 귀납법 및 연역법과 같은 전통적인 과학적 방법론이 포함될 수 있다. 과학에서 필요로 하는 과학적 방법론은 자연현상을 인식하고 추상화하는 능력을 기반으로 ‘관찰-가설-증명-일반화-예측’에 이르는 귀납과 연역의 과정을 학습하는 것이다(김윤기 외, 2015; Leo, 1945). 즉, 추상이라는 것은 귀납과 연역의 과정에 모두 포함되는 것이다. 대표적인 과학적 방법으로 여겨지는 가설-연역법은 보편적 명제(추상적인 명제)에서 개별적 명제(구체적인 명제)를 논리적으로 끌어내는 방법인 연역법과 개별적 명제(구체적인 명제)에서 보편적 명제(추상적인 명제)를 끌어내는 귀납법이 결합된 방법으로서, 관찰에 기반을 둔 문제 발견, 문제를 해결하는 가설 제기, 가설에서 시험명제 연역, 시험명제를 실험적으로 검증 및 반증, 실험 결과에 따라 가설 수용 여부 결정이라는 5단계를 기반으로 한다(Noc, 2017). 관찰에 기반을 둔 문제 발견 및 그 문제를 해결하는 가설을 제기하는 이와 같은 과정에 명백히 귀납적 추리가 쓰이며 이는 복잡한 세계에서 구체적인 사례를 통해 법칙이나 패턴을 도출하는 추상화 작업이다. 또한, 연역은 복잡한 세계에서 구체적인 사례를 통해 추상한 가설로부터 시작하는 것이다. 그리고, 이와 같은 추상화의 한 방향은 고대에는 아름다운 조화와 비율로서의 대칭성이었으며, 현대에 이르러서는 수학을 바탕으로 한 불변의 관점으로써의 대칭성이다.

고대 그리스에서 살펴볼 수 있는 에라토스테네스 지구 둘레 측정 실험과 근현대적 대칭성 관점을 살펴볼 수 있는 갈릴레이 변환 또한 과학교육적 함의를 가진다. 우선, 에라토스테네스 지구 둘레 측정 실험의 경

우 2015 개정 교육과정의 지구과학 교과에 명시되어 있다. 과학사적으로 지구과학 분야에서 가장 중요한 발견 중 하나는 에라토스테네스가 지구 둘레를 측정한 것이며 이는 지구과학에서의 혁명으로 알려져있다 (Chae, 2010). 아름다운 비유와 조화를 추구했던 에라토스테네스의 대칭성 관점을 중심으로 교육과정에 제시된 지구 둘레 측정 실험 교육 프로그램을 구성한다면 과학사를 기반으로 한 맥락적인 교수학습이 가능하며 이를 통해 과학사 교육의 목표 중 하나인 ‘과거의 과학자들이 그 당시의 상황에서 어떤 사고를 했는가를 추론함으로써 오늘날 과학을 배우는 학생들이 진정한 과학적 사고를 이해하도록 내용을 재구성하는 것’(백성혜, 2013)을 달성할 수 있을 것으로 생각된다. 에라토스테네스 지구 둘레 측정 실험이 갖는 그 자체적인 중요성에도 불구하고, 이 실험은 2022 개정 교육과정에서 제외되었다. 그러나, 이미 중학생과 고등학생을 대상으로 에라토스테네스 지구 둘레 측정 실험과 관련된 연구가 다수 수행되었으며(우명복과 차희영, 2006; Chae, 2010; Chae & Han, 2013) 해당 실험이 과학적 핵심역량이 긍정적인 영향을 미친다는 연구 결과가 있다는 점(유은정과 김경화, 2019)에 비추어보았을 때 <과학의 역사화 문화> 교과와의 융합 교육을 통해 학생들에게 제공될 수 있을 것으로 기대된다.

갈릴레이 상대성 및 변환의 경우 2015 개정 교육과정과 2022 개정 교육과정 모두에 포함되어 있지는 않지만, 많은 연구자들이 아인슈타인의 상대성이론에 대한 교수학습을 역사적, 철학적 맥락에서 가르쳐야 함을 강조하고 있다(Arriassecq & Greca, 2012; Levrini, 2014; Villani & Arruda, 1998). 특히, Arriassecq & Garcia(2012), Kamphorst *et al.*(2023), Otero *et al.*(2015)의 경우 아인슈타인의 상대성이론을 가르치기 위해 갈릴레이 상대성 및 변환의 맥락에 대해 연구하였으며, 특히 Kamphorst *et al.*(2023)은 아인슈타인의 특수 상대성 이론이 갈릴레이 상대성과 맥스웰(Maxwell) 전기 역학 해석 사이의 비대칭성을 해결하기 위해 시작되었다는 점을 강조한 바 있다. 또한 Otero *et al.*(2015)는 고등학생을 대상으로 아인슈타인의 상대성이론에 대해 학습하기 전 갈릴레이 상대성 및 변환을 먼저 가르치는 것이 학생들의 이해를 돕는다는 연구 결과를 발표하기도 하였다. 이와 같은 관점에서 볼 때, 대칭성을 주제로 한 갈릴레이 상대성 및 변환에 대한 학습은 아인슈타인의 상대성원리

에 대한 대칭성과 맞물려 대칭성을 핵심 주제로 한 상대성이론에 대한 통합적 학습의 가능성을 보여주고 있으며, 그 교육적 효과까지 기대해 볼 수 있다.

또한 van der Veen(2007, 2012, 2013)의 선행 연구에 의하면 대칭성을 중심으로 구성된 과학 수업은 학생들의 과학에 대한 태도 및 흥미에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 대칭성을 중심으로 구성된 과학 수업에서 ‘대칭성’은 과학을 전공한 학생뿐만 아니라 과학을 전공하지 않은 학생들을 대상으로도 과학적 태도와 흥미에 대해 긍정적인 효과가 있음이 보고되었다. 대칭성은 과학철학적으로나 과학적으로 많은 논의의 대상이 되어왔으나, 과학교육에 접목된 사례가 적어 학생들에게는 생소하고 새로운 개념으로 다가와 이와 같은 효과가 나타나는 것으로 생각된다.

V. 결론 및 제언

대칭성은 물리학자에게 아름다움을 느끼게 하는 원동력이 되고 있으며, 방정식의 각 요소를 재배열하거나 이리저리 뒤섞어도 방정식의 형태가 변하지 않으면 그 방정식에는 매우 심오한 진리가 담겨 있을 가능성이 크다(Kaku, 2021). 또한, 역사적으로 수많은 물리학자들은 명백한 역설에 직면했을 때, 관점의 변화를 통해 역설을 설명할 수 있는 대칭성을 찾아 문제를 해결하였으며, 더 깊은 대칭성을 찾는 일련의 노력이 현대 물리학의 발전에 큰 동기를 부여하고 있기도 하다(Melo, 2022; van der Veen, 2013). 그리고 대칭성은 과학의 중요한 특성 중 하나로 항상 논의되기도 한다(Anderson, 1972; Castelian, 2002; Lederman & Hill, 2011; Rosen, 1990, 1995; Stewart, 2010; Voloshinov, 1996; Weyl, 1952; Zee, 1986, 1992).

과학교육에서는 대칭성을 활용한 교육이 과학에 대한 새로운 접근법을 제시함으로써 학생들의 과학에 대한 긍정적인 태도를 이끌어내기도 하였다(van der Veen, 2007, 2012, 2013). 따라서, 본 연구는 과학 사상사를 통해 일반적인 서양 과학의 기본 틀을 살펴보고, 이를 바탕으로 대칭성이 고대에서부터 근현대에 이르기까지 어떤 양상으로 인식되었는지 살펴보았다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

첫째, 역사적으로 대칭성은 규칙적인 기하학적 도형을 구성하는 개별 요소 간의 비율과 조화라는 개념에서 시작하여 전체 그림을 변경하지 않고 다른 부분을 교환할 수 있다는 등거리 배율적 개념을 거쳐 상호교환의 추상화가 적용된 변형 그룹에서 불변의 관점으로서의 이론적 대칭성으로 나아갔다(Dardashti *et al.*, 2021). 그리고 이와 같은 대칭성에 대한 추구는 변화가 가득하여 부조화한 것에서 아름다운 조화로운 것을, 변하는 것에서 변하지 않는 불변의 것을 추구하는 추상화에 의해 시작되었다. 고대 그리스에서는 아름다운 조화와 비율로서의 대칭성을 추구하였으며, 근대와 현대를 거쳐 수학을 기반으로 한 불변의 관점에서의 대칭성이 추구되었으며 이는 과학을 관통하는 철학적 틀인 추상화 방식에 의해 수행되었다.

둘째, 고대의 대칭성 인식은 상향식 추상화를 기반으로 한 비율과 조화로서의 대칭성 추구, 근현대의 대칭성 인식은 상향식 추상화와 수학적 변환을 기반으로 한 불변의 관점으로서의 대칭성 추구로 요약되는데, 고대 그리스는 지구중심설을 기반으로 정지한 관찰자(주체)가 움직이는 물체(객체)를 관찰하면서 물체(객체)의 기하학적 비율과 조화를 통해 대칭 원리를 인식했던 반면, 근현대의 대칭성은 태양중심설을 기반으로 움직이는 관찰자(주체)가 움직이는 물체(객체)를 관찰하면서 나타난 경험과 이론의 부정함을 해결하는 과정에서 수학적 변환을 기반으로 한 대칭 원리를 인식하였다. 그리고 대표적인 예시로서 고대 그리스에서의 에라토스테네스의 지구 둘레 측정 실험, 근대과학에서의 갈릴레이 상대성 및 변환을 나타낼 수 있었다.

이와 같은 결과를 바탕으로 과학교육에의 시사점을 도출하였으며 이는 다음과 같다. 첫째, 대칭성을 중심으로 한 과학교육은 과학의 본성을 위한 교육에 활용될 수 있다. 최근 과학의 본성에 대한 연구에서 주목받고 있는 가족유사성 접근(family resemblance approach)에서는 과학의 본성 요소로서 단순성, 통일성을 비롯해 대칭성을 과학의 본성 중 하나로 규정하고 있으며(Erduran & Dagher, 2014), Lederman(2007)이 제시한 과학의 본성적 측면에서 살펴보다라도 대칭성은 과학자들이 오래전부터 추구해오던 가치라는 점에서 과학의 본성과 밀접한 연관성을 가진다(조현국, 2018). 특히 과학의 본성을 함양하는데 주요한 도구로서 과학사와 과학철학이 거론되는데(박종원, 2016; Jimenez-Liso *et*

al., 2020; Kolsto, 2001; Millar & Osborn, 1998) 고대 그리스의 추상화에서 시작된 대칭성에 대한 추구가 갈릴레이, 데카르트(Descartes), 뉴턴과 같은 과학자부터 아인슈타인과 같은 현대 과학자를 관통하는 주제이며, 일반상대성이론에서 양자장이론에 이르기까지 현대 물리학의 기초에 명시적으로 놓여있다는 점에서(Livio, 2012) 과학사 전체를 아우르는 통합적 주제로 기능할 수 있을 것으로 생각된다.

둘째, 대칭성을 나타내는 예시로서 에라토스테네스의 실험과 갈릴레이 상대성 및 변환은 과학과 핵심역량 및 개념 이해에 도움을 줄 수 있다. 에라토스테네스의 실험은 2015 개정 교육과정에는 포함되어 있으나, 2022 개정 교육과정에는 포함되어 있지 않은데, 그럼에도 불구하고 2022 개정 교육과정에 포함된 <과학의 역사화 문화> 교과와 융합되어 과학사 연계 탐구 교육의 가능성을 보여주고 있다. 또한, 갈릴레이 상대성 및 변환은 대칭성을 핵심 관통 개념으로 상대성원리에 대한 폭넓은 이해를 가능케 해주며 이는 개념적 이해에도 도움이 될 것으로 생각된다.

셋째, 대칭성을 중심으로 과학교육을 수행한 선행 연구를 참고해 보았을 때, 이는 학생들의 과학에 대한 태도 및 흥미에 긍정적인 역할을 할 수 있을 것으로 생각된다. 대칭성은 과학철학과 과학 분야에서 많이 논의되고 있으나 과학교육에서 활용된 빈도는 매우 적어 학생들에게는 생소한 개념이며 신기한 개념으로 다가갈 것으로 기대된다.

추가적으로 본 연구는 다음과 같은 후속 연구를 필요로 한다. 본 연구는 대칭성에 대한 인식의 흐름을 과학사적으로 살펴본 것으로서, 이와 같은 주제가 과학교육의 전반을 아우르기 위해서는 교육과정에서 제시하는 여러 과학 개념의 대칭적 관점에서의 해석 가능성을 더욱 조사할 필요가 있다. 근대과학에는 갈릴레이, 케플러(Kepler), 뉴턴 등 대칭성을 추구했던 과학자들의 작업이 무수히 담겨있고, 현대 과학에도 아인슈타인의 상대성이론과 관련된 대칭성, 더 나아가 양자역학과 관련된 대칭성이 나타난다. 과학 내용학 분야에서는 이에 대한 논의가 상당히 진전되어 있지만, 교육학적 관점에서 이와 같은 해석이 이루어진 경우가 거의 없어 그 활용성이 중요성에 비해 상당히 낮기 때문에 교육학적 관점에서의 해석이 더욱 필요하다.

국문요약

본 연구는 대칭성에 대해 이론적으로 고찰하고 이의 과학교육적 함의를 도출하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 첫째, 고대 그리스 학자들을 통해 일반적인 서양 과학의 사유방식을 살펴보았다. 둘째, 대칭성에 대한 인식을 고대와 근현대로 나누어 살펴보았다. 셋째, 이에 대한 과학교육적 함의를 도출하였다. 본 연구의 결과는 첫째, 서양 과학의 사유방식은 파르메니데스에서 시작되어 플라톤이 정립한 ‘추상화’이다. 둘째, 고대의 대칭성 인식은 추상화를 기반으로 한 아름다운 비율과 조화로서의 대칭성, 근현대의 대칭성 인식은 변화에서 불변을 찾고자 했던 추상화를 기반으로 한 불변의 관점으로서의 대칭성이다. 그리고 고대의 대칭성의 예시로서 에라토스테네스의 지구 둘레 측정 실험에 대해 고찰하였으며, 근현대의 대칭성의 예시로서 갈릴레이 상대성 및 변환을 고찰하였다. 셋째, 이에 따른 과학교육적 함의는 다음과 같다. 대칭성에 대한 인식은 고대부터 근현대 과학을 관통하는 핵심주제라는 관점에서 과학의 본성 교육에 도움이 될 수 있다. 둘째, 에라토스테네스 지구 둘레 측정 실험과 갈릴레이 상대성 및 변환의 경우 2022 개정 교육과정에는 제시되어 있지 않지만 과학과 핵심역량 및 개념 이해에 도움이 될 수 있다. 마지막으로, 대칭성을 중심으로한 통합적 접근으로의 과학교육은 과학적 태도와 흥미에 긍정적인 영향을 줄 수 있다.

주제어: 대칭성, 추상화, 에라토스테네스 실험, 갈릴레이 상대성, 과학교육

References

김윤기, 이보경, 하윤경(2015). 원자 모형 발전 단계에 내재된 과학적 추론과 과학의 본성. *교양교육연구*, 9(2), 347-376.

김윤동(2016). 플라톤의 ‘nous’ 개념. *철학연구*, 137, 109-130.

남경희(2013). 철학적 최상급: 서양철학의 사유범주 비판2. *철학*, 117, 57-85.

박영신, 유지연(2017). 국내 과학관 전시물에 반영된 과학의 본성(NOS) 특징 분석에 따른 프로그램 개발 및 이의 적용. *대한지구과학교육학회지*, 10(2), 104-121

박종원(2016). 과학적 소양에 대한 세 가지 논의-통합적 이해, 교육과정에서의 정착, 시민교육을 중심으로. *한국과학교육학회지*, 36(3), 413-422.

배경석, 오준영, 최재혁, 문예진, 손연아(2022). 미적 과학교육 연구 동향 분석-R 프로그램의 Bibliometrix 패키지를 활용한 상세 서지분석을 중심으로. *한국과학교육학회지*, 42(5), 543-555.

백성혜(2013). 과학교육에서 과학사의 응용: 입자개념의 발달에 대한 과학사적 고찰이 과학교육에 주는 함의. *한국과학사학회지*, 35(3), 499-519.

오준영(2023). 과학적 세계관과 과학사상의 이해. 서울: 연세대학교 출판문화원.

오준영, 이은주(2022). 과학교육을 위한 과학이론의 철학적 위치. *대한지구과학교육학회지*, 15(3), 354-372.

우명복, 차희영(2006). 지구의 크기 측정을 위한 교구 개발 및 적용 효과. *교원교육*, 22(4), 165-183.

유은정, 김경화(2019). 수학과 연계한 장소기반 지구과학 프로그램에 대한 교육봉사활동 사례 연구: 지구의 크기 측정. *한국지구과학회지*, 40(5), 518-537

이경직(2001). 플라톤과 데미우르그스: 세계 설명과 세계 제작. *서양고전학연구*, 16, 63-86.

이상균(2016). 언어 네트워크 분석을 이용한 과학의 본성에 관한 국내연구 동향. *대한지구과학교육학회지*, 9(1), 65-87.

이윤경, 신동희(2014). 과학자의 희로애락이 담긴 과학사 에피소드 활용 교육 프로그램 개발. *한국과학교육학회지*, 34(5), 469-478.

이창욱(2016). 고대철학의 존재론에 관한 연구. *동양철학연구*, 86, 233-263.

정인경, 김영민, 손영운, 이재봉, 이준기(2017). *고등학교 과학사*. 서울: 씨마스

조은희(2022). 과학적 소양의 함양을 위한 교양교육. *교양교육연구*, 16(5), 203-216.

조현국(2018). 과학의 미적 가치 인식에 대한 학습자의 응답에 대한 네트워크 및 감성 분석과 머신 러닝을 활용한 탐색적 예측 평가. *학습자중심교과교육연구*, 18(20), 1325-1346.

Abd-El-Khalick, F., Bell, R. L., & Lederman, N. G. (1998).

- The nature of science and instructional practice: Making the unnatural natural. *Science Education*, 82(4), 417-436.
- Abd-El-Khalick, F., & Lederman, N. G. (2000). The influence of history of science courses on students' views of nature of science. *Journal of Research in Science Teaching*, 37(10), 1057-1095.
- Anderson, P. W. (1972). More is different. *Science*, 177(4047), 393-396.
- Arriassecq, 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, 827-851.
- Bäck, A. (2006). The concept of abstraction. *The Society for Ancient Greek Philosophy Newsletter*, 376. <https://orb.binghamton.edu/sagp/376>
- Baez, J. (2020). Platonic solids in all dimensions. <https://math.ucr.edu/home/baez/platonic.html>
- Brisson, L. (2020). How to make a soul in the Timaeus. In C. Jorgenson, F. Karfik, & S. Spinka (Eds.), *Plato's Timaeus* (pp. 70-91). Leiden: Brill.
- Browne, K. M. (2020). Galilei proposed the principle of relativity, but not the "Galilean transformation". *American Journal of Physics*, 88, 207-213.
- Castelian, E. (2002). Symmetry, quantum mechanics, and beyond. *Foundations of Science*, 7, 181-196.
- Chae, D. (2010). Analysis of experiments for 'measuring the size of earth in 8th science textbooks. *Journal of Korean Association for Science Education*, 30(7), 901-907.
- Chae, D., & Han, J. (2013). Teachers' & students' conception of the measurement of the size of the earth. *Journal of Korean Association for Science Education*, 33(3), 639-649.
- Crease, R. P. (2006). 세상에서 가장 아름다운 실험 열 가지. 김명남 역, 서울: 도서출판 지호. (원서출판 2003)
- Dardashti, R., Frisch, M., & Valente, G. (2021). Editorial: Symmetries and asymmetries in physics. *Synthese*, 199, 983-989.
- Dutka, J. (1993). Eratosthenes' measurement of the earth reconsidered. *Archive for History of Exact Sciences*, 46, 55-66.
- Erduran, S., & Dagher, Z. R. (2014). Reconceptualizing the nature of science for science education: Scientific knowledge, practice and other family categories. Dordrecht: Springer.
- Evans, J. (1998). *The history and practice of ancient astronomy*. New York & Oxford: Oxford University Press.
- Flannery, M. C. (1991). Science and aesthetics: A partnership for science education. *Science Education*, 75(5), 577-593.
- Gapontsev, V. L., Fedorov, V. A., & Gapontseva, M. G. (2019). Symmetry principles as a basis for integration in science and its value for education. *Obrazovanie i Nauka*, 21(4), 9-35.
- Gregory, A. (2021). Mathematics and cosmology in Plato's Timaeus. *Apeiron*, 55(3), 359-389.
- Guthrie, W. K. C. (2000). *희랍 철학 입문-탈레스에서 아리스토텔레스까지*. 박종현 역, 과주: 서광사. (원서출판 1960)
- Heinemann, U., & Roske, Y. (2020). Symmetry in nucleic-acid double helices. *Symmetry*, 12(5), 737.
- Henry, J. (2013). *서양과학사상사*. 노태복 역, 서울: (주) 도서출판 책과함께. (원서출판 2012)
- Holló, G. (2017). Demystification of animal symmetry: Symmetry is a response to mechanical forces. *Biology Direct*, 12, 11.
- Hon, G., & Goldstein, B. R. (2005). Legendre's revolution(1794): The definition of symmetry in solid geometry. *Archive for the History of Exact Sciences*, 59, 107-155.
- Jho, H. (2018). Beautiful physics: Re-vision of aesthetic features of science through the literature review. *Journal of the Korean Physical Society*, 73(4), 401-413.
- Jimenez-Liso, M. R., Lopez-Banet, L., & Dillon, J. (2020). Changing how we teach acid-base chemistry a proposal grounded in studies of the history and nature of science education. *Science & Education*, 29(5), 1291-1315.
- Kaku, M. (2021). 단 하나의 방정식: 궁극의 이론을 찾아

- 서. 박병철 역, 파주: 김영사. (원서출판 2021)
- Kamphorst, F., Vollebregt, M. J., & Savelsbergh, E. R. (2023). An educational reconstruction of special relativity theory for secondary education. *Science & Education*, 32, 57-100.
- Katz, A. M., & Katz, P. B. (1995). Emergence of scientific explanations of nature in Ancient Greece: The only scientific discovery? *Circulation*, 92, 637-645.
- Kolsto, S. D. (2001). Scientific literacy for citizenship: Tools for dealing with the science dimension of controversial socioscientific issues. *Science Education*, 85(3), 291-310.
- Kosaka, S. (2004). 철학사 여행(상). 방준필 역, 서울: 간디서원.
- Lederman, N. G. (2007). Nature of science: Past, present, and future. In S. K. Abell, & N. G. Lederman (Eds.), *Handbook of research on science education* (pp. 831-879). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Lederman, L. M., & Hill, C. T. (2011). 대칭과 아름다운 우주. 안기연 역, 서울: 승산. (원서출판 2004)
- Lederman, N. G., Lederman, J. S., & Antink, A. (2013). Nature of science and scientific inquiry as contexts for the learning of science and achievement of scientific literacy. *International Journal of Education in Mathematics, Science and Technology*, 1(3), 138-147.
- Leo, B. I. (1945). Science in liberal education. *Journal of Chemistry Education*, 22, 187-193.
- Levrini, O. (2014). The role of history and philosophy in research on teaching and learning of relativity. In M. R. Matthews (Ed.), *International handbook of research in history, philosophy and science teaching* (pp. 157-181). Dordrecht: Springer.
- Livio, M. (2012). Why symmetry matters. *Nature*, 490, 472-473.
- Lloyd, D. R. (2010). Symmetry and beauty in Plato. *Symmetry*, 2, 455-465.
- Melo, I. (2022). Aesthetic criteria in fundamental physics-The viewpoint of Plato. *Philosophies*, 7(96), 1-15.
- Moubayidin, L., & Østergaard, L. (2015). Symmetry matters. *New Phytologist*, 207(4), 985-990.
- Mueller, I. (2005). Mathematics and the divine in Plato. In T. Koetsier, & L. Bergmans (Eds.), *Mathematics and the divine* (pp. 99-121). Amsterdam: Elsevier.
- Nisbett, R. E. (2003). *The geography of thought: How asian and westerners think differently...and why*. New York: A Division of Simon & Schuster Inc.
- Noe, K. (2017). 과학 인문학으로의 초대. 이인호 역, 서울: 오아시스. (원서출판 2015)
- Oh, J. Y. (2017). Understanding the estimation of circumference of the earth by of eratosthenes based on the history of science, for earth science education. *Journal of Korean Society of Earth Science Education*, 10(2), 214-225.
- O'Meara, D. (2014). The beauty of the world in Plato's Timaeus. *Schole*, 8(1), 24-33.
- Paparazzo, E. (2015). Does present-day symmetry underlie the cosmology of Plato's Timaeus? A response to D. R. Lloyd. *Apeiron*, 48(2), 123-148.
- Ricken, F. (2000). 고대 그리스 철학. 김성진 역, 파주: 서광사. (원서출판 1988)
- Rosen, J. (1990). Fundamental manifestations of symmetry in physics. *Foundations of Physics*, 20(3), 283-307.
- Rosen, J. (1995). *Symmetry in science*. New York: Springer Verlag.
- Runco, M. A. (2007). *Creativity: Theories and themes: Research, development, and practice*. Burlington, MA: Elsevier Academic Press.
- Russo, L. (2013). Ptolemy's longitudes and eratosthenes' measurement of the earth's circumference. *Mathematics and Mechanics of Complex Systems*, 1(1), 67-79.
- Seah, R., & Horne, M. (2019). An exploratory study on students' reasoning about symmetry. In G. Hine, S. Blackley, & A. Cooke (Eds.), *Mathematics education research: Impacting practice (Proceedings of the 42nd Annual Conference of the Mathematics Education Research Group of Australasia)* (pp. 628-635). Perth: MERGA.
- Stewart, I. (2010). 아름다움은 왜 진리인가. 안재권, 안기연 역, 서울: 승산. (원서출판 2007)
- Toulmin, S., & Goodfield, J. (1961). *The fabric of the heavens: The development of astronomy and dynamics*. Chicago and London: The University of Chicago Press.

- Van der Veen, J. (2007). Symmetry and aesthetic in introductory physics: An experiment in interdisciplinary physics and fine arts education. Doctoral dissertation, University of California. Retrieved from http://web.physics.ucsb.edu/~jatila/papers/J_van-der-Veen_Dis-compressed.pdf
- Van der Veen, J. (2012). Draw your physics homework? Art as a path to understanding in physics teaching. *American Educational Research Journal*, 49(2), 356-407.
- Van der Veen, J. (2013). Symmetry as a thematic approach to physics education. *Symmetry: Culture and Science*, 24(1-4), 463-484.
- Villani, A., & Arruda, S. M. (1998). Special theory of relativity, conceptual change and history of science. *Science & Education*, 7(1), 85-100.
- Voloshinov, A. V. (1996). Symmetry as a superprinciple of science and art. *Leonardo*, 29(2), 109-113.
- Weyl, H. (1952). *Symmetry*. Princeton: Princeton University Press.
- Zee, A. (1986). *Fearful symmetry: The search for beauty in modern physics*. Princeton and Oxford: Princeton University Press.
- Zee, A. (1992). Symmetry and the search for beauty in modern physics. *New Literary History*, 23(4), 815-838.
- Zeyl, D., & Sattler, B. (2022). Plato's Timaeus. *The Stanford encyclopedia of philosophy* (Summer 2022 ed.). In E. N. Zalta (Ed.), URL: <https://plato.stanford.edu/archives/sum2022/entries/plato-timaeus/>
- Zhang, C. T. (1997). A symmetrical theory of DNA sequence and its applications. *Journal of Theoretical Biology*, 187(3), 297-306.
- Zinoviev, V., Yakishchik, S. I., Evdokimov, A. A., Malygin, E. G., & Hattman, S. (2004). Symmetry elements in DNA structure important for recognition/methylation by DNA [amino]-methyltransferases. *Nucleic Acids Research*, 32(13), 3930-3934.