

구르는 물체에 작용하는 마찰력에 대한 과학 영재학교 학생들의 이해의 특징

하상우*

경기과학고등학교

Characteristics of Science High School Students' Understanding about friction acting on a rolling object

Sangwoo Ha*

Gyeonggi Science High School for the Gifted

Abstract : The purpose of this study is to examine the characteristics of science gifted students' understanding of friction acting on a rolling object, and to examine the implications of teaching methods that can be derived from them. For this purpose, 48 students in grade 3 students who take advanced physics classes at the science high school for the gifted were asked to answer three questions about the friction problems. As a result, students' responses were divided into three types: rule, none-rule, and calculation. In addition, students of the rule type have difficulty in reasoning about the friction by using friction rules. We believe that students will be able to reach a deeper understanding of friction if we teach them to correctly infer the direction of friction without using friction rules, along with a strategy to emphasize relative motion in contact.

keywords : Gifted students, Students' understanding, friction, rolling object, rule type, none-rule type

I. 서 론

마찰력은 일상생활에서의 뉴턴 역학을 이해하기 위해 필수적인 힘임에도 불구하고 그 복잡한 특성으로 인해 많은 학생들이 이해하기 힘들어 하는 힘이다(Carvalho, & Sousa, 2005). 때문에 학생들은 마찰력에 대한 깊은 고민이나 이해 없이 간단한 지식을 암기하고 이를 문제 상황에 적용하려 하며, 이 과정에서 많은 어려움을 겪는다(Ha, & Lee,

2011). 특히 일반계 중 고등학생의 마찰력에 대한 이해도는 낮은 것으로 보고되어 있고(Song *et al.*, 2004), '마찰력은 운동을 방해하는 힘'과 같은 간단한 지식을 바탕으로 마찰력의 방향을 찾으려는 경향이 있는 것으로 알려져 있다(Hong, 2010).

학생들이 마찰력에 대해 가지고 있는 어려움을 해소시키기 위해 다양한 방면의 접근이 이루어지고 있다. 우선 마찰력은 실제로 복잡한 특성을 가진 힘이므로, 마찰력 자체가 가진 특성을 학생들 스스로 생각해 보고 마찰력이 발생하는 원인이 무엇인

*교신저자: 하상우(hswgcb3@snu.ac.kr)

**2018년 2월 23일 접수, 2018년 4월 18일 수정원고 접수, 2018년 7월 30일 채택
<http://dx.doi.org/10.21796/jse.2018.42.2.120>

지 생각해 보도록 하는 접근이 있다. 이런 접근들에서는 마찰력의 미시적 특성에 주목하여 학생들이 미시적으로 어떤 상황에 의해서 마찰력이 발생하는지 스스로 모델링해 보고 미시 세계와 거시 세계를 연결시켜 볼 수 있도록 유도한다(Besson *et al.*, 2007; Corpuz, & Rebello, 2011; Reichert, 2001). 다른 한편으로는 교과서 등에서 ‘마찰력은 운동을 방해하는 힘’과 같은 제한된 규칙을 학생들에게 주입하는 것이 잘못된 것으로 보고, 이보다는 보다 일반적으로 활용할 수 있도록 학생들에게 ‘마찰력이란 두 물체의 접촉면에서의 상대운동을 방해하는 것’이란 규칙을 강조해서 가르칠 필요가 있다는 주장들이 있다(Arons, 1997; Hong, 2010; Kim, & An, 2013; Salazar *et al.*, 1990).

이처럼 마찰력에 대한 학생들의 어려움에 대한 연구는 중, 고등학생(Hong, 2010) 및 대학생(Corpuz, & Rebello, 2011; Rimoldini, & Singh, 2005), 예비 과학교사(Kim, & An, 2013)에 이르기까지 다양한 편이지만 과학 영재 학생들에 대한 연구는 찾아보기 힘들다. 또한 일반계 고등학교에서 다루는 마찰력 관련 문제들은 과학 영재 학생들에게는 너무 쉬워서 마찰력에 대한 간단한 잘못된 지식이 강화되거나, 영재 학생들에게 마찰력에 대한 오해를 불러일으키기 쉽다. 따라서 과학 영재 학생들도 충분히 고민해볼만한 마찰력 관련 문항 및 마찰력에 대한 과학 영재 학생들의 이해에 대한 연구가 필요하다. 강체의 경우 강체의 각 부분에 대해 각기 다른 방향의 힘이 작용할 수 있으며, 따라서 강체 모형의 경우 입자 모형 보다 고려해 주어야 할 요소가 많다(Pinto, & Fiolhais, 2001). 따라서 강체에 마찰력이 작용하는 문제 상황은 마찰력에 대한 보다 깊은 이해를 요구하며, 이런 특성으로 인해 과학 영재 학생들에게도 충분히 풀어볼 만한 수준의 어려운 문제가 될 수 있다. 이에 본 연구에서는 영재 학생들에게도 많은 고민이 필요한 강체와 관련한 마찰력 문항, 특히 구르는 물체에 작용하는 마찰력의 방향에 대한 문항을 학생들에게 풀

어보도록 하고 영재학생들에게도 일반 중, 고등학생처럼 간단한 지식을 바탕으로 마찰력의 방향을 찾으려는 경향이 나타나는지, 그밖에 또 다른 특징은 무엇이 있는지 알아보려 하였다.

이에 따라 본 연구의 연구 문제는 다음과 같다.

첫째, 구르는 물체에 작용하는 마찰력에 대한 과학 영재 학생들의 이해의 특징은 무엇인가?

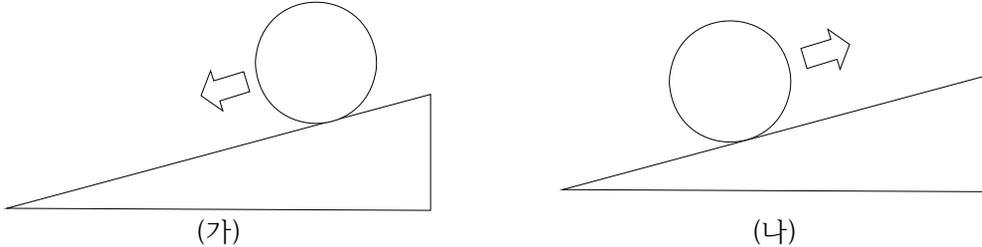
둘째, 영재 학생들의 이해의 특징으로부터 도출할 수 있는 교수 학습법적인 시사점은 무엇인가?

II. 연구내용 및 방법

본 연구의 참여자는 수도권 소재 과학영재학교에서 고급물리학을 수강하는 3학년 학생 48명이었으며, 이들은 1, 2학년에서 일반물리학 수준의 교과를 모두 이수하였다. 이들은 고급물리학을 수강하는 학생들인 만큼 과학 영재 학교에 진학한 학생들 중에서도 물리를 좋아하고 잘 한다고 생각되는 학생들이다. 연구자는 강체에 작용하는 마찰력에 대한 학생들의 이해를 알아보기 위해 학생들에게 다음의 세 문항을 풀어보도록 하였다.¹⁾ 세 문항을 선정한 기준은 다음과 같다. 첫째, 학생들이 기존에 가지고 있는 마찰력과 관련한 규칙을 적용해 볼 수 있도록 마찰력의 방향만 물어보는 문항을 선정하였으며, 이러한 조건에 부합하는 문항들 중 문항 신뢰도를 위해 선행 연구들에서 빈번하게 언급되는 문제들을 최종 선정하였다. 둘째, 대상자가 영재 학생임을 고려하여 회전 및 병진 운동을 모두 고려할 수 있도록 구르는 물체 상황을 선정하였다. 셋째, 문제의 복잡도를 줄이기 위해 미끄러지지 않고 구르기만 하는 문제 상황을 선정하였다. 학생들이 개인별로 세 문항을 모두 풀게 한 후에는 조별로 토론을 거쳐 조별로 문제를 풀어보도록 하였으며 토론 결과를 조별로 발표하도록 하였다. 학생들의 개별 응답은 개인별 설문지에 기록되었고, 조별 응답 내용은 수업 중에 기록되었다.

1) 본 연구에서 제시한 세 문항에 대한 바람직한 응답의 예시는 연구결과의 Table 1, Table 2, Table 3에서 각각 찾아볼 수 있다.

1. 그림 (가)는 마찰이 있는 경사면에서 공이 미끄러짐 없이 굴러 내려오는 것을, (나)는 동일한 경사면에서 공이 미끄러짐 없이 굴러 올라가는 것을 나타낸 것이다.



1-a) (가)의 상황에서 공에 작용하는 마찰력의 방향을 정하고, 그렇게 정한 이유를 자세히 서술하시오.
 1-b) (나)의 상황에서 공에 작용하는 마찰력의 방향을 정하고, 그렇게 정한 이유를 자세히 서술하시오.

Figure 1. Friction acting on a ball placed on an inclined plane

Figure 1은 경사면에 놓인 공에 작용하는 마찰력을 물어보는 문항(Carvalho, & Sousa, 2005; Rimoldini, & Singh, 2005)으로 (가)의 상황은 공이 아래로 운동하며 가속되는 상황을, (나)의 상황은 공이 위로 운동하며 감속되는 상황을 나타낸 것이다.

Figure 2는 평지에 놓인 공에 외력이 작용할 때의 마찰력에 대해 물어보는 문항으로 Rimoldini & Singh(2005)의 연구에서는 학생들이 가장 이해하기 어려워했던 유형의 문항이다. Kim & An(2013)

은 비슷한 유형의 문제에서 내부 동력이 작용할 때의 마찰력에 대해 예비 과학 교사들이 이해하기 어려워했다고 보고하고 있다. 학생들이 개인별로 문제를 푼 후에는 공의 윗 부분에 외력이 작용할 때 마찰력이 어느 방향으로 작용할지도 생각해 보도록 했는데, 이 경우는 관성모멘트의 크기가 마찰력의 방향에 영향을 주기 때문에 계산을 해보지 않으면 마찰력의 방향을 결정할 수 없다. 학생들에게는 이 경우 왜 마찰력의 방향이 쉽게 결정되지 않는지도 생각해보도록 유도 하였다.

2. 그림과 같이 질량 m , 반지름 R 인 균일한 원판에 실을 연결하고 잡아당긴다. 원판은 미끄러지지 않고 굴러간다. 가능한 계산하지 말고 마찰력의 방향을 정하고, 그렇게 정한 이유를 자세히 서술하시오.

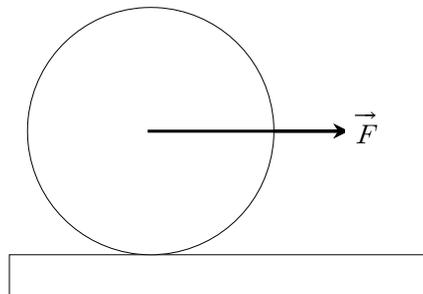
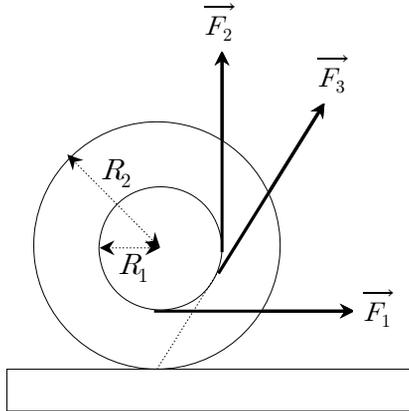


Figure 2. Friction acting on a disk placed on a plane

3. 그림과 같이 안쪽 반지름 R_1 , 바깥쪽 반지름 R_2 인 요요의 세 곳에 실을 연결하고 각각 잡아당긴다. 요요의 관성모멘트는 I 이며, 요요는 미끄러지지 않는다. 다음 물음에 답하되, 가능한 계산하지 말고 마찰력의 방향을 결정해 보시오.



- 3-a) \vec{F}_1 의 경우 요요에 작용하는 마찰력의 방향을 정하고, 그렇게 정한 이유를 자세히 서술하시오.
- 3-b) \vec{F}_2 의 경우 요요에 작용하는 마찰력의 방향을 정하고, 그렇게 정한 이유를 자세히 서술하시오.
- 3-c) \vec{F}_3 의 경우 요요에 작용하는 마찰력의 방향을 정하고, 그렇게 정한 이유를 자세히 서술하시오.

Figure 3. Friction acting on a yo-yo placed on a plane

Figure 3은 평지에 놓인 요요에 작용하는 마찰력에 대해 물어보는 문항으로 요요의 안쪽 반지름 부분에 다양한 방향으로 외력이 작용할 때 마찰력의 방향이 어떻게 변하는지 생각해야 하는 복잡한 문항이다(Carvalho, & Sousa, 2005; Halliday, Resnick, & Walker 2011). 이 경우도 2번 문항과 비슷하게 요요의 안쪽 반지름의 윗 부분에 외력을

가하면 마찰력의 방향을 쉽게 결정할 수 없는데, 그 이유도 학생들에게 조별로 생각해 보도록 유도하였다. 다만 본 연구의 문제 상황에서는 마찰력의 방향이 한 쪽으로 정확하게 주어지는 상황에 대한 것만 고려하도록 하였다. 본 연구에서 다루고 있는 문제들의 마찰력 관련 개념과 구체적인 문제 상황은 Table 1과 같이 분류할 수 있다.

Table 1. Categorization of students' responses about question 1

마찰력 개념 및 상황		다루고 있는 문항
상황	마찰력의 크기	.
	마찰력의 방향	1-a, 1-b, 2, 3-a, 3-b, 3-c
	외력이 질량 중심에 작용	1-a, 1-b, 2
	외력이 질량 중심 이외의 부분에 작용	3-a, 3-b, 3-c
	마찰력의 방향이 문제의 조건에 따라 바뀜	.
	마찰력의 방향이 문제의 조건에 따라 바뀌지 않음	1-a, 1-b, 2, 3-a, 3-b, 3-c
	빗면에서 작용하는 마찰력	1-a, 1-b
	평면에서 작용하는 마찰력	2, 3-a, 3-b, 3-c

Table 1을 보면 본 연구에서 선정한 문항들은 몇 가지 특징을 가진다는 사실을 알 수 있다. 첫째, 학생들이 기존에 가지고 있는 마찰력과 관련한 규칙을 적용해 볼 수 있도록 마찰력의 방향만 물어 보는 문항을 선정하였다. 즉, 특정한 상황에서 물체에 작용하는 마찰력의 크기도 마찰력과 관련한 중요한 개념이지만, 이에 대해서는 의도적으로 물어 보지 않았다. 둘째, 마찰력의 방향이 문제의 조건에 따라 바뀔 수 있는 상황은 물어보지 않았다. 본 연구에서는 학생들이 정성적인 생각만으로도 마찰력의 방향을 찾을 수 있도록 하는데 초점을 맞추었으며, 이에 따라 계산을 해 보아야만 정확히 마찰력의 방향을 산출할 수 있는 문항은 의도적으로 제외하였다. 셋째, 외력이 질량 중심에 작용하는 경우와 작용하지 않는 경우, 마찰력이 빗면에서 작용하는 경우와 평면에서 작용하는 경우 등 가능한 상황들 모두 고려하여 문항을 선정하였다. 넷째, 대상자가 영재 학생임을 고려하여 회전 및 병진 운동을 모두 고려할 수 있도록 구르는 물체 상황을 선정하였다. 다섯째, 문제의 복잡도를 줄이기 위해 미끄러지지 않는다고 구르기만 하는 문제 상황을 선정하였다. 결과적으로 본 연구에서는 위의 다섯 조건에 부합하는 문항들 중 문항 신뢰도를 위해 선행 연구들에서 빈번하게 언급되어 이미 타당성이 검증된 문제들을 연구 문제로 최종 선정하였다.

III. 연구 결과

연구 결과 구르는 물체에 작용하는 마찰력에 대한 과학 영재 학생들의 응답은 크게 규칙형, 비규칙형, 계산형의 세 유형으로 나눌 수 있었다. 먼저 규칙형은 기존에 자신들이 잘 알고 있는 마찰력과 관련한 규칙을 문제 풀이에 적용하는 유형이었다. 이들은 선행 연구에서 지적한대로 ‘마찰력은 운동

의 반대 방향’, 혹은 ‘마찰력은 외력의 반대 방향’ 등 기존에 자신들이 마찰력에 대해 가지고 있는 특정한 규칙을 바탕으로 마찰력의 방향을 찾으려고 했으며, 선행연구에서 강조하고 있는 ‘마찰력은 접촉면의 상대 운동의 반대 방향’이라는 규칙을 활용하여 마찰력의 방향을 찾으려는 학생들도 있었다. 비규칙형의 학생들은 마찰력과 관련한 규칙을 사용하지 않고, 물체의 운동 방향, 혹은 가속도나 각속도의 방향을 먼저 찾은 후 뉴턴의 법칙을 적용하여 마찰력의 방향을 찾으려는 학생들이었다.²⁾ 한편, 본 연구 상황에서 연구자는 학생들에게 마찰력의 방향을 찾을 때 가급적 계산하지 말고, 정성적으로 마찰력의 방향을 찾을 것을 요구하였는데, 계산형의 학생들은 연구자의 요구에도 불구하고 정성적으로 마찰력의 방향을 찾는 법을 발견하지 못하여, 기존에 본인들이 배워왔던 방식으로 방정식을 세우고, 방정식을 통해 마찰력의 방향을 찾으려는 학생들이었다. 본 연구에서 학생들이 마찰력의 방향을 정확하게 찾았더라도, 명백히 오류를 일으킬 수 있는 논리를 적용하여 마찰력의 방향을 찾은 학생들은 오류 유형으로 분류하여 정답에 이르지 못한 것으로 분류했다.

먼저 Table 2는 Figure 1의 문항에 대한 학생들의 응답을 나타낸 것이다. 과학 영재학생들이고, 이 문항이 비교적 잘 알려진 문항이었음에도 불구하고 많은 학생들이 마찰력의 방향을 정확히 찾지 못하거나, 마찰력의 방향이 빗면 윗 방향이 되어야 하는 이유를 정확히 설명하지 못했다. 그래서 이 문제에서 다른 세 문제와 비교해 볼 때 가장 낮은 정답률(56.3%)이 나왔다. 무엇보다 이 문제의 경우 학생들이 기존에 알고 있던 마찰력과 관련한 규칙을 잘 적용하여 문제를 제대로 푼 학생이 한 명도 없었다. 이는 마찰력과 관련한 규칙을 적용하여 이 문제에서의 마찰력의 방향을 제대로 찾기 위해서는 병진과 회전을 모두 고려해야 하는 복잡한 사고 과정이 요구되기 때문인 것으로 보인다. 또한 ‘마찰력

2) 규칙과 법칙의 구분이 다소 모호할 수도 있으나, 본 연구에서는 마찰력과 관련한 학생의 어려움에 대한 선행 연구에서 대체로 마찰력의 방향을 찾는 특정한 지식을 ‘규칙’으로 보고 있다는 점에 근거하여 마찰력과 관련한 ‘규칙’과, 뉴턴의 운동 법칙과 같은 ‘법칙’을 구분하였다. 이에 따라 ‘법칙’만을 사용한 학생들의 논리는 비규칙형으로 분류하였음을 밝힌다.

Table 2. Categorization of students' responses about question 1

유형	응답예시	응답수
규칙오류1	두 접촉면의 경계에서 마찰력은 상대적으로 회전하는 방향으로 작용한다. 따라서 (가)의 경우 빗면 윗 방향, (나)의 경우 빗면 아랫 방향의 마찰력이다.	2
규칙오류2	(가)와 (나)의 두 경우 모두 빗면과 닿는 부위는 정지해 있어야 미끄러짐없이 구를 수 있다. 두 경우 모두 $mg\sin\theta$ 의 성분이 빗면 아랫 방향으로 작용하고 있으므로, 두 경우 모두 빗면 윗 방향의 마찰력이 작용해야 한다.	6
비규칙정답	(가)는 빗면 아랫 방향의 각속도가 증가하고 있고, (나)는 빗면 윗 방향의 각속도가 감소하고 있다. 따라서 (가), (나) 모두 빗면 윗 방향의 마찰력이 작용해야 한다.	26
비규칙오류	공이 구를 때 공을 그 방향으로 구르게 하기 위한 토크가 필요하다. 따라서 (가)의 경우 빗면 윗 방향, (나)의 경우 빗면 아랫 방향의 마찰력이 작용한다.	11
계산정답	.	1
모름	.	2
정답률		56.3% (27/48)

은 접촉면에서 상대적으로 미끄러지는 방향의 반대 방향으로 작용한다.’는 생각을 적용하려면 우선 접촉면이 상대적으로 미끄러지려는 방향이 어느 쪽인지 제대로 찾아야 했는데, 이 경우 접촉면이 상대적으로 미끄러지려는 방향이 어느 쪽인지 제대로 찾으려면 상대적으로 마찰력이 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우를 비교하여 접촉면이 상대적으로 미끄러지려는 방향을 찾아야 해서 많은 학생들이 접근을 어려워했다.

아래의 예시는 학생들에게 ‘마찰력은 접촉면에서 상대적으로 미끄러지는 반대 방향으로 작용한다’는 규칙을 적용하여 조별로 문제를 풀어보도록 요구하였을 때 나온 조별 응답의 모범 응답 예시이다. 다음에서 살펴볼 수 있는 것처럼 마찰력과 관련한 규칙을 제대로 적용하여 이 문제를 푸는 것은 쉽지 않다.

마찰이 없을 때의 운동 상황을 고려해서 상대적으로 미끄러지려는 반대 방향으로 마찰력 방향을 찾을 수 있다. 내려갈 때 마찰이 없으면 병진운동은 빨라지는데, 회전운동의 영향이 없어 병진운동에 의한 영향이 커지므로 병진운동에 의한 미끄러짐의 반대 방향, 즉 빗면 윗

방향의 마찰력이 작용한다. 한편 올라갈 때 마찰이 없으면 병진 방향의 운동은 느려지는데 회전은 그대로 유지되므로 병진 운동에 비해 회전 운동의 영향력이 커져서 회전 반대 방향의 마찰이 작용한다고 할 수 있다. 따라서 두 경우 모두 윗 부분의 마찰력이 작용한다고 할 수 있다.

규칙오류1 유형으로 분류된 학생들은 2명으로 선행연구들에서 강조하고 있는 규칙을 활용하여 문제를 풀고자 하였으나, 규칙을 잘못기억하여 마찰력이 접촉면에서 상대적으로 미끄러지는 방향으로 작용한다는 잘못된 규칙으로 문제에 접근하여 마찰력의 방향을 잘못 찾은 학생들이다. 한편, 규칙오류2 유형의 학생들은 6명으로 외력의 반대 방향으로 마찰력이 작용한다는 논리를 활용하여 문제를 푼 학생들이다. 이 학생들의 경우 결과적으로 마찰력의 방향은 맞았지만 이들이 사용한 논리가 잘못되어 있어서 오류로 분류했다. 이 유형의 학생들에게는 마찰력이 반드시 외력의 반대 방향으로 작용하는 것은 아니며, 특히 외력의 반대 방향이라는 논리를 적용했을 때 마찰력의 방향을 잘 못 찾을 수 있는 경우를 구체적으로 알려줄 필요가 있다.

비규칙정답 유형의 학생들은 26명으로 가장 많았는데 이들은 마찰력에 대한 특별한 규칙 없이 공의 각가속도를 구한 후, 공의 각가속도 방향으로 토크가 작용해야 하는데 질량 중심에 대한 토크는 마찰력만 줄 수 있다는 법칙을 이용해 마찰력의 방향을 잘 구한 학생들이다. 이에 반해 비규칙오류 유형의 학생들은 11명이 있었는데, 이들은 구르는 방향으로 토크가 작용한다고 잘못 생각한 학생들이다. 이는 병진운동에서 뉴턴의 운동 방정식을 가르칠 때도 흔히 보이는 유형의 학생들로 병진운동의 예를 들자면 힘이 운동 방향으로 작용한다고 생각하는 학생들이다. 영재 학생들의 경우 병진 운동에서는 이와 같은 오류를 보이는 학생을 거의 찾아보기 힘들었으나 회전 운동에서 정성적으로 생각하는 상황에서 이와 같은 오류를 일으키는 학생들이 많았다. 토크는 구르는 방향으로 작용하는 것이 아니라 각 가속도의 방향으로 작용한다는 것을 제대로 인지시킨다면 이 유형의 학생들은 큰 어려움 없이 논리적 사고를 할 수 있으리라 생각된다.

Table 3은 Figure 2의 문항에 대한 학생들의 응답을 나타낸 것이다. Figure 1의 문항에 비해 정답률이 높은 편이다. 이 문제의 경우 외력이 질량 중심에만 작용하고 있어 상황에 대한 분석이 다른 문항보다 쉽고, 또 동력바퀴, 비동력바퀴 등 복잡한 다른 외적 요소를 도입하지 않아서 정답률이

83.3%로 다른 문항들에 비해 높게 나타났다.

먼저 규칙정답 유형의 학생들은 5명으로, 앞서 언급했듯이 외력이 질량 중심에만 작용하고 있으므로 원판이 바닥에 대해 미끄러지려는 방향을 고려할 때 병진 운동을 우선하여 고려하면 된다. 이에 따라 학생들은 큰 어려움 없이 마찰력의 방향을 찾을 수 있었다. 하지만 규칙오류1 유형의 학생은 마찰력이 접촉면에서 상대적으로 미끄러지는 방향으로 작용한다는 생각을 적용한 Figure 1의 문제에서의 생각을 동일하게 적용하여 마찰력의 방향을 잘못 구했다. 규칙오류2 유형의 학생들 7명은 결과적으로 마찰력의 방향은 맞았지만 원판을 하나의 질점처럼 생각하여 단순히 원판이 운동하는 반대 방향인 왼쪽으로 마찰력이 작용한다고 생각하는 학생들이었다. 이처럼 Kim & An(2013)이 지적하는 것과 같이 일부 과학 영재 학생들도 물체와 지면의 상대 운동을 면밀히 분석하여 마찰력을 고려하기 보다는 마찰력이 물체 전체가 운동하는 방향과 반대 방향으로 작용한다고 생각하는 경향이 있었다 (p. 1084).

한편, 비규칙 유형의 학생들은 28명이 전원 정답에 접근했다. 특히 비규칙 유형의 학생들은 원판이 반시계 방향으로 회전할 것이라는 것만 잘 예측하면 문제 풀이에 큰 어려움을 겪지 않았다. 다만 비규칙 유형의 학생들 중에도 오류로 분류될만한 학

Table 3. Categorization of students' responses about question 2

유형	응답예시	응답수
규칙정답	원판이 바닥면에 대해 상대적으로 앞으로 미끄러지려는 상황이므로 마찰력은 그 반대 방향인 뒤(왼쪽)로 작용한다.	5
규칙오류1	두 접촉면의 경계에서 마찰력은 상대적으로 회전하는 방향으로 작용한다. 따라서 회전하는 방향인 왼쪽 방향으로 마찰력이 작용한다.	1
규칙오류2	마찰력은 운동을 방해하는 힘이다. 원판이 오른쪽으로 움직이고 있으므로 마찰력은 운동 반대 방향인 왼쪽 방향이다.	7
비규칙정답	원판과 바닥의 접촉점을 기준으로 토크가 시계 방향으로 작용하고 있으므로 원판은 시계 방향으로 구른다. 질량 중심에 대해 토크는 마찰력 밖에 없으므로 시계 방향의 토크를 주기 위해서는 마찰력이 왼쪽으로 작용해야 한다.	28
계산정답	.	7
정답률		83.3% (40/48)

생들이 몇 명 있었는데 이 문제의 경우 Figure 1의 문제와는 다르게 원판이 정지 상태에서 출발한다고 해석할 수도 있어 각가속도의 방향이 아니라 원판이 굴러가는 방향으로 토크가 작용한다고 생각해도 완전히 오류라고 보기는 힘들어서 오류로 분류하지는 않았다. 한편, 문제 상황을 정성적으로 분석하기 힘들어하는 학생들 7명은 접점에서의 마찰력의 방향을 임의로 두고 방정식을 세워 수식을 풀어서 마찰력의 방향을 찾았다.

추가적으로 이 문항에서 학생들이 조별 토론을 할 때 원판의 위쪽에 외력을 수평방향으로 가하면 마찰력의 방향이 어떻게 되는지 마찰력 규칙을 사용한 방법과 사용하지 않은 방법을 모두 활용하여 정성적으로 구해보도록 했다. 원판의 위쪽에 외력을 주면 마찰력의 방향은 관성모멘트의 크기에 따라 달라져서 정량적으로 계산해보지 않으면 정확히 알기 힘들다. 학생들에게는 이 경우는 왜 계산하지 않으면 마찰력의 방향을 정확히 알기 힘든지 고민해보도록 유도하였고, 학생들은 다음의 예시와 같이 조별 토론 시간에 발표하였다. 각각 마찰력 규칙을 적용한 응답과 적용하지 않은 응답이다.

이 경우 외력으로 인한 회전에 의한 미끄러짐은 접촉점을 기준으로 왼쪽, 병진에 의한 미끄러

러짐은 접촉점을 기준으로 오른쪽이다. 회전에 의한 영향이 큰지 병진에 의한 영향이 큰지 계산해보기 전에는 알 수 없으므로 어느 쪽으로 미끄러지는지 결정할 수 없어 마찰력의 방향도 간단히 결정할 수 없다.

접촉점을 기준으로 토크를 고려해보면 결과적으로 원판은 시계 방향으로 회전하는데 질량 중심을 기준으로 외력이 시계 방향의 토크를 주고 있다. 따라서 마찰력은 어느 쪽이 되어도 결과적으로 질량중심에 대해 시계 방향의 토크가 가능한 상황이라 마찰력의 방향을 간단히 결정할 수 없다.

학생들이 응답한 것처럼 마찰력의 방향이 정확히 결정되지 않는 이유를 마찰력 규칙을 적용하여도 논리적으로 생각할 수 있고, 적용하지 않아도 논리적으로 생각할 수 있다. 다만 과학 영재 학생들의 경우에도 이 부분에 대해 정확하게 생각하는데 어려움을 겪고 있었다. 따라서 이와 같은 추가 질문은 학생들에게 마찰력에 대해 보다 더 깊이 생각해 보게 하는 도전적인 과제가 될 수 있다고 본다.

Table 4는 Figure 3의 문항에 대한 학생들의 응답을 나타낸 것이다. 응답예시는 a, b, c의 경우

Table 4. Categorization of students' responses about question 3

유형	3-a 응답예시	응답수		
		a	b	c
규칙정답	외력이 반시계 방향의 회전운동과 오른쪽 병진 운동을 일으키므로 요요는 바닥면에 대해 상대적으로 오른쪽으로 미끄러지려 한다. 따라서 마찰력은 왼쪽이다.	4	3	9
규칙오류2	요요는 오른쪽으로 운동하는데 마찰력은 운동을 방해하므로 왼쪽이다.	2	0	2
비규칙정답	요요는 시계 방향으로 회전한다. 외력이 반시계 방향의 토크를 주므로 마찰력이 시계 방향의 토크를 줘야하고, 결과적으로 마찰력은 왼쪽으로 작용해야 한다.	21	24	15
계산정답	.	11	8	4
계산오류	.	1	0	1
모름	.	9	13	17
정답률		75.0% (36/48)	72.9% (35/48)	58.3% (28/48)

가 모두 비슷하게 나타나므로 편의상 3-a의 응답 예시만 나타내었다. Figure 3의 문항은 요요의 안쪽 원통부분에 다양한 접촉점과 방향으로 힘이 작용할 때 마찰력의 방향을 묻는 문항으로 수식을 사용하지 않기를 권장하였으나 상대적으로 많은 학생들이 수식을 활용하여 문항을 해결하고자 했다. 본 연구에서 다른 요요 문제의 경우 학생들이 이미 일 반물리학 강좌에서 이미 마찰력의 방향을 임의로 정하고 방정식을 푼 후, 마찰력의 값이 양수가 나오면 처음에 설정한 마찰력 방향으로, 음수가 나오면 처음에 설정한 마찰력의 반대 방향으로 주어진다는 것이 익숙한 상황이어서 계산을 활용한 접근을 하고자 했던 것으로 보인다. 한편, 세 가지 부분 문항 중 c 문항의 정답률이 가장 낮았는데, 이 경우 외력이 요요와 바닥사이의 접촉점을 향하는 방향이라는 것을 파악한 후 요요가 회전하지 않을 것이라는 것을 생각하지 못한 학생들이 규칙의 사용 여부와 관계없이 정답에 접근하지 못했기 때문인 것으로 보인다.

한편, 이 문항에서는 규칙을 활용하여 정답에 접근한 학생들이 적었다. 특히 3-a와 3-b의 경우에서 제대로 접근한 학생들이 드물었는데 이는 이 문제에서 규칙을 활용하여 정답에 접근하려면 외력에 의한 요요의 병진 운동과 회전 운동을 모두 고려해야했기 때문인 것으로 보인다. 상대적으로 3-c에서는 회전 운동이 일어나지 않으므로 병진 운동만 고려하면 요요가 미끄러지는 방향을 알 수 있기 때문에 회전 운동이 일어나지 않는 것을 간파한 학생들은 규칙 적용에 어려움을 겪지 않았다. 이 문항에서도 규칙을 적용할 때 단순히 요요가 오른쪽으로 움직이므로 마찰력은 요요의 운동 반대 방향인 왼쪽이라고 응답하는 규칙오류2 유형의 학생들이 2명씩(a와 c문항에서) 있었다.

규칙을 사용하지 않고 논리적인 응답을 한 학생들은 각각 21, 24, 15명으로 이들은 먼저 요요의 회전 방향을 파악한 후 요요가 그 방향으로 회전하기 위한 토크를 주려면 마찰력이 왼쪽이어야 한다는 사실을 제대로 지적했다. 특히 3-c의 경우 규칙을 사용하는 학생과 사용하지 않은 학생의 논리가 대조적으로 드러났는데, 두 경우 모두 요요가 회전

하지 않는다는 사실을 먼저 파악했지만, 규칙을 사용하는 학생들은 요요가 회전하지 않고 끌려가는 상황을 떠올려서 마찰력이 상대적으로 미끄러지는 반대 방향으로 작용한다고 생각한 반면, 규칙을 사용하지 않은 학생들은 회전하지 않으려면 토크의 총합이 0이어야 하므로 마찰력이 왼쪽이어야 한다는 것을 지적했다. 한편, 3-c와 같이 요요를 당겨도 외력이 충분히 강하여 요요가 가속 운동을 한다면 요요는 회전을 하게 된다. 학생들에게 3-c의 경우에도 외력을 점점 강하게 가하면 어떻게 될 것 같은지 사고 실험을 하게 하면 기존에 회전하지 않는다고 생각했던 학생들도 무언가 이상하다는 것을 느끼게 된다. 연구자는 이 문제 상황을 활용하면 강체의 경우 토크 방정식을 세울 때 축을 잡을 수 있는 곳은 정지해 있거나 등속 운동을 하는 곳이어야 한다는 것을 알려줄 수 있는 좋은 예시가 될 수 있다고 본다.

Table 5는 본 연구에서 활용한 학생들의 유형별, 그리고 문항별 응답자 수를 정리한 것이다. 전체적으로 규칙을 사용한 학생들 수보다 규칙을 사용하지 않은 학생들 수가 많다. 이는 구르는 물체의 경우 규칙을 사용하여 마찰력의 방향을 논리적으로 결정하기가 쉽지 않았기 때문인 것으로 보인다. 비슷한 관점에서 규칙을 사용하여 정답에 이른 학생 수보다 규칙을 사용하지 않고 정답에 이른 학생들 수가 더 많다.

경사면을 구르는 물체 문제의 경우(1번 문항)와 요요 문제의 경우(3번 문항)에 학생들은 두 접촉면이 상대적으로 미끄러지는 반대방향으로 마찰력이 작용한다는 규칙을 적용하여 마찰력의 방향을 찾는 것을 어려워했다. 경사면을 구르는 물체의 경우에는 마찰이 없는 경우와의 상대적인 비교를 통하여 두 접촉면에서 상대적으로 미끄러지는 방향을 찾아야 하는데, 학생들은 이 점에서 어려움을 겪은 것으로 보이며, 요요 문제의 경우는 병진 운동에 의한 미끄러짐과 회전 운동에 의한 미끄러짐을 동시에 고려하는 것에서 어려움을 겪은 것으로 보인다.

반면 규칙을 사용하지 않는 학생들은 1번 문항에서 많은 어려움을 겪었는데 이들은 주로 회전 방향으로 토크가 작용할 것이라고 잘못 생각하여 오류

Table 5. The number of responses about all the questions of this study

문항 유형	1	2	3-a	3-b	3-c
규칙정답	0	5	4	3	9
규칙오류1	2	1	0	0	0
규칙오류2	6	7	2	0	2
비규칙정답	26	28	21	24	15
비규칙오류	11	0	0	0	0
계산정답	1	7	11	8	4
계산오류	0	0	1	0	1
모름	2	0	9	13	17
정답률	56.3% (27/48)	83.3% (40/48)	75.0% (36/48)	72.9% (35/48)	58.3% (28/48)

를 일으켰다. 1번 문항에 비해 2번, 3번 문항에서는 규칙을 사용하지 않는 학생들의 오류를 찾아보기 힘들었는데, 이는 2번, 3번 문항의 경우 정지한 상태에서 시작하는 것이라 회전 방향으로 토크가 작용한다고 생각해도 문제가 없는 상황들이었기 때문이다. 따라서 규칙을 사용하지 않는 학생들이 보다 더 깊게 고민하도록 하려면 경사면에서 구르는 물체에 작용하는 마찰력을 파악해야 하는 문제처럼 회전 방향이 아니라 각가속도 방향을 엄밀하게 따져서 마찰력을 구해야 하는 문제를 더 개발할 필요가 있다.

IV. 결론 및 제언

연구 결과, 구르는 물체에 작용하는 마찰력에 대한 과학 영재 학생들의 이해의 특징은 다음과 같다. 첫째, 학생들의 응답은 규칙형, 비규칙형, 계산형의 세 유형으로 나눌 수 있었다. 구르는 물체에 작용하는 마찰력의 방향을 찾기 위해 규칙형의 학생들은 자신들이 중 고등학교 때 이미 익숙한 마찰력과 관련한 규칙만으로 마찰력에 대해 추론하여 마찰력의 방향을 찾았다. 한편, 비규칙형의 학생들은 물체가 어느 쪽으로 구를 것인지 먼저 예측한 후 그 방향으로 구르기 위해 마찰력이 어느 쪽이

되어야 하는지를 기본으로 하여 마찰력의 방향을 찾았고, 계산형의 학생들은 마찰력의 방향을 임의로 설정하고 방정식을 푼 후 결과로 나온 마찰력의 부호를 통해 마찰력의 방향을 찾았다.

둘째, 규칙을 사용하여 마찰력의 방향을 논리적으로 접근하는 학생 수가 많지 않았다. 이는 구르는 물체의 경우 학생들이 병진 운동과 회전 운동을 모두 고려해서 상대 운동을 구해야 했기 때문에 많은 경우 접촉면이 미끄러지는 방향을 생각하기 어려워했기 때문인 것으로 보인다. 하지만 많은 연구들이 마찰력에 대한 학생들의 어려움을 해소해 주기 위해 마찰력 교수 학습에서 접촉면에서의 상대 운동에 초점을 맞추고 설명할 것을 제안하고 있다 (Arons, 1997; Hong, 2010; Kim, & An, 2013; Salazar et al., 1990). 본 연구에서와 같이 구르는 물체에 작용하는 마찰력의 방향을 구하는 경우 과학 영재 학생들도 많이 어려워하므로, 상대적으로 미끄러지는 방향을 구할 때, 보다 세심한 지도 전략이 요구된다. 연구자는 구르는 물체에서 접촉면의 상대 운동을 강조하는 교수 전략을 세우고자 한다면, 마찰이 없는 경우와 비교해보기, 병진 운동과 회전 운동에 의한 미끄러짐의 방향을 각각 구해보기와 같은 활동이 학생들의 마찰력에 대한 이해에 도움이 될 것이라 생각한다.

셋째, 문항에 따라 마찰력 규칙을 활용하여 문제를 풀기가 상대적으로 용이한 문항이 있고, 규칙을 활용하지 않고 문제를 풀기가 상대적으로 용이한 문항이 있었다. 과학 영재 학생들의 경우 2번 문항에서 규칙을 활용하려는 학생들이 가장 많았으며, 3-c 문항에서 규칙을 활용하여 정답에 접근한 학생들이 가장 많았다. 다만 1번 문항처럼 경사면을 구르는 물체의 경우 규칙을 활용하여 마찰력의 방향을 생각하기가 상대적으로 까다로웠던 것으로 보인다. 한편, 규칙을 활용하지 않고 문제를 풀려는 학생들은 모든 문항에서 골고루 있었으나 1번 문항에서 규칙을 활용하지 않고 문제를 푸는 학생들의 실수가 많았다. 이처럼 문항 특성에 따라 마찰력과 관련한 규칙의 사용에 대한 선호도가 바뀌므로 학생들이 다양한 접근을 해 볼 수 있도록 마찰력에 대한 균형 있는 문항 개발이 필요하며, 개발된 문항이 규칙을 활용하여 접근하기 쉬운 문항인지 어려운 문항인지 판단해 볼 필요도 있다.

넷째, 학생들에게 가능한 계산하지 말고 마찰력의 방향을 유추해보도록 요청했음에도 불구하고, 문항이 복잡할수록 계산을 통해 마찰력의 방향을 찾으려는 학생수가 많아졌다. 일반적으로 과학고등학교 학생들은 입학 전 평균적으로 2,000문제 정도의 많은 물리 문제를 푼다고 알려져 있고, 이에 따라 기계적인 문제 풀이 습관을 형성하고 있는 경우가 많다(Byun, & Lee, 2014). 본 연구에서의 과학 영재 학생들도 과학고등학교 학생들처럼 기계적인 문제 풀이가 익숙하여 정성적으로 쉽게 생각하기 힘든 문항에서는 평소 문제를 풀던대로 식을 세우고 문제를 풀려고 접근했던 것으로 보인다. 일반계 고등학생들의 경우 문제가 복잡해질수록 계산식을 쓰지 못하는 경향이 있는 것과 비교해볼 때, 본 연구에서의 계산형의 학생들은 영재 학생들에게 두드러지게 나타나는 독특한 학생들이라 할 수 있다.

학생들이 어떤 유형의 학생에 속하느냐에 따라 학생들이 마찰력에 대해 가지고 있는 어려움을 해소해 주기 위한 전략에 차이가 생길 수 있다. 따라서 학생에 대한 고려 없이 일률적으로 접촉면에 대한 상대 운동을 강조하는 접근을 취하기보다는 학생이 어떤 유형의 학생인지 먼저 파악해 볼 필요가

있다. 본 연구에서 연구자는 선행 연구들에서 제안한, 규칙을 활용한 문제 풀이뿐만 아니라 규칙을 적용하지 않은 문제 풀이도 함께 해 보도록 강조하였다. 이처럼 답은 하나지만 문제에 접근하는 방식에서 여러 가지 해석이 가능한 문항은 학생들에게 많은 생각거리를 제공해주고, 또 학생들의 마찰력에 대한 이해도도 높여 준다고 생각된다. 연구자는 학생들이 규칙을 사용하는 추론과, 규칙을 사용하지 않는 추론의 균형 잡힌 사고를 통해 마찰력에 대한 보다 깊은 이해에 도달할 수 있다고 생각한다.

본 연구에서와 같이 구르는 물체에 작용하는 마찰력에 대한 학생들의 다양한 응답을 분석해 봄으로써 각각의 문항에 대해 다양한 논리적인 응답이 가능하다는 것을 알 수 있었다. 연구자는 본 연구에서의 여러 응답들은 다양한 해석이 가능하게 하는 열린 수업을 위한 자료로 활용 가능하다는 점에서 의의가 있다고 본다. 특정 주제에 대한 다양한 해석을 추구하는 접근은 학생들의 이해에 도움이 된다고 알려져 있다(Ha, Lee, & Kalman, 2013; Ha, & Lee, 2015). 본 연구에서 소개한 학생들의 다양한 논리 유형을 또 다른 수업에서 활용한다면 학생들의 다양한 응답으로부터 이 주제에 대한 보다 활발한 토론 수업을 계획할 수 있을 것이다.

참고 문헌

- Arons, A. B. (1997). *Teaching introductory physics*. New York, NY: John Wiley & Sons.
- Besson, U., Borghi, L., De Ambrosis, A., & Mascheretti, P. (2007). How to teach friction: Experiments and models. *American Journal of Physics*, 75(12), 1106-1113.
- Byun, T., & Lee, G. (2014). Why students still can't solve physics problems after solving over 2000 problems. *American Journal of Physics*, 82(9), 906-913.
- Carvalho, P. S., & Sousa, A. S. e. (2005). Rotation in secondary school: teaching the effects of

- frictional force. *Physics Education*, 40(3), 257-265.
- Corpuz, E. D., & Rebello, N. S. (2011). Investigating students' mental models and knowledge construction of microscopic friction. I. Implications for curriculum design and development. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, 7(2), 020102.
- Ha, S., & Lee, G. (2011). Understanding students' difficulties and their structure in learning friction in upper level mechanics course via weekly report. *New Phys.: Sae Mulli*, 61(9), 840-849.
- Ha, S., & Lee, G. (2015). Hermeneutics and science education: Focus on implications for conceptual change theory. *Journal of the Korean Association for Research in Science Education*, 35(1), 85-94.
- Ha, S., Lee, G., & Kalman, C. S. (2013). Workshop on friction: Understanding and addressing students' difficulties in learning science through a hermeneutical perspective. *Science & Education*, 22(6), 1423-1441.
- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2011). *Fundamentals of physics* (9th ed.). New York, NY: Jhon Wiley & Sons, Inc.
- Hong, S. (2010). A study of student's concept creation using a basic mechanical conception about friction. *New Physics: Sae Mulli*, 60(2), 142-149.
- Kim, Y., & An, M.-Y. (2013). Analysis of secondary students' Difficulty in understanding the frictional force concept and a suggestion for its teaching strategy. *New Physics: Sae Mulli*, 63(10), 1077-1084.
- Pinto, A., & Fiolhais, M. (2001). Rolling cylinder on a horizontal plane. *Physics Education*, 36(3), 250-254.
- Reichert, J. F. (2001). How did friction get so "smart"? *Physics Teacher*, 39(1), 29-31.
- Rimoldini, L. G., & Singh, C. (2005). Student understanding of rotational and rolling motion concepts. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, 1(1), 010102.
- Salazar, A., Sanchez-Lavega, A., & Arriandiaga, M. A. (1990). Is the frictional force always opposed to the motion?. *Physics Education*, 25(2), 82-85.
- Song, J., Kim, I., Kim, Y., Kwon, S., Oh, W., & Park, J. (2004). *Students' Physics Misconception Map*. Seoul: Bookshell.

국문 요약

본 연구의 목적은 구르는 물체에 작용하는 마찰력에 대한 과학 영재 학생들의 이해의 특징을 살펴보고, 이로부터 도출할 수 있는 교수 학습법적인 시사점은 무엇인지 살펴보는 것이었다. 이를 위해 수도권 소재 과학영재학교에서 고급물리학을 수강하는 3학년 학생 48명을 연구 참여자로 하여 구르는 물체에 작용하는 마찰력에 대한 세 가지 문항을 개인별로 풀어보게 하고, 이후 조별 토론을 실시하였다. 연구 결과 학생들의 응답은 규칙형, 비규칙형, 계산형의 세 유형으로 나눌 수 있었으며, 비규칙형으로 분류되는 학생들이 가장 많았다. 이중 규칙형의 학생들은 마찰력과 관련한 규칙을 활용하여 구르는 물체에 작용하는 마찰력에 대해 추론하는데 어려움을 겪고 있었다. 연구자는 접촉면에서의 상대 운동을 강조하는 전략과 더불어 마찰력에 대한 규칙을 사용하지 않고도 마찰력의 방향을 제대로 추론하도록 가르친다면 학생들이 마찰력에 대한 깊은 이해에 도달할 수 있을 것이라고 생각한다.

주제어: 과학 영재, 학생들의 이해, 마찰력, 구르는 물체, 규칙형, 비규칙형