

주간보고서에 나타난 전공역학 수강생들의 마찰력에 대한 어려움과 그 어려움의 원인 구조

하상우 · 이경호

서울대학교 물리교육과, 서울 151-748

(2011년 4월 18일 받음, 2011년 7월 20일 수정본 받음, 2011년 8월 23일 게재 확정)

마찰력은 일상생활에서 뉴턴 역학을 이해하는데 매우 중요한 힘임에도 불구하고 많은 학생들이 마찰력 이해에 어려움을 느끼고 있다. 그러나 아직도 학생들이 마찰력에 대해 느끼고 있는 어려움의 실체는 무엇인지, 어려움의 원인 구조는 어떻게 되는지 체계적으로 접근한 연구가 부족하다. 이에 본 연구에서는 전공역학을 수강하는 학생들이 작성한 주간보고서에 나타난 내용을 중심으로 학생들의 어려움을 파악하고, 어려움을 유형화하였다. 이후 지식신념틀을 이용하여 학생 어려움의 원인 구조를 분석하였다. 본 연구에서 나타난 학생들의 마찰력 관련 어려움들로는 마찰력의 방향, 마찰력의 반작용 힘, 마찰력의 원인, 힘의 이해(구심력, 수직항력), 좌표계 설정에 관한 어려움이 있었다. 이러한 어려움의 원인들에는 마찰력 관련 인과론적 신념, 마찰력의 규칙 사용, 좌표축의 선택, 힘의 이해 부족등이 있었다. 우리는 본 연구에서의 분석 결과를 바탕으로 학생들의 마찰력 관련 어려움에 대한 해소 방안에 관하여 논의하였다.

핵심어: 마찰력, 어려움, 어려움의 원인 구조, 주간보고서

Understanding Students' Difficulties and Their Structure in Learning Friction in Upper Level Mechanics Course via Weekly Report

Sangwoo HA · Gyoungho LEE*

Department of Physics Education, Seoul National University, Seoul 151-748

(Received 18 April 2011 : revised 20 July 2011 : accepted 23 August 2011)

Although friction is one of the most important forces to understand in Newtonian mechanics in everyday context, many students have difficulties in studying friction. However, there is little research that investigates students' specific difficulties and their structure. Therefore, in this study, we tried to understand students' difficulties about friction by using weekly reports in our upper level mechanics course. In order to analyze the structure of students' difficulties in learning friction, we used the framework of knowledge & belief. As a result, we found that students had difficulties related with the direction of friction, reaction of friction, cause of friction, understanding of force (centripetal force, normal force), and selection of coordinate system. In addition, sources of these difficulties that constructed the structure of student's difficulties in learning friction included an epistemological belief of causality, use of a simple friction rule, selection of a coordinate axis, and insufficient understanding of force.

PACS numbers: 01.40.Fk

Keywords: Friction, Student difficulty, Structure of student difficulty, Weekly report

I. 서론

학생들이 물리학을 기피하는 가장 큰 이유는 물리학을 어렵다고 느끼기 때문이다 [1,2]. 하지만 학생들이 물리학에 대해 느끼는 어려움의 실체가 무엇인지 아직 명확하게 밝혀지지 않았다. 이후 학생들의 어려움과 그 해소 방안에 대한 연구들이 많이 진행되었다 [3-7]. 이러한 학생들의 어려움에 대한 연구들은 역학 [3-5] 분야에서부터 전자기 [6,7] 분야에 이르기까지 다양한 분야에서 진행되고 있다. 본 연구에서는 일상생활에서 뉴턴역학을 이해하는데 중요한 힘임에도 불구하고 많은 학생들이 이해하기 힘들어하는 마찰력과 관련한 학생들의 어려움에 대해 살펴보았다 [8].

마찰력은 여러 변수의 영향을 받는 복잡한 힘이다 [9]. 그래서 사람들이 마찰력에 대해 인식하게 된 것은 꽤 오래 전의 일임에도 불구하고 아직까지도 마찰력이 무엇인지 완전하게 이해하지 못하고 있다 [10]. 심지어 교과서에서 기술하고 있는 마찰력 관련 성질들, 예를 들어 마찰력의 크기가 수직항력과 비례한다거나, 마찰력의 크기가 물체의 운동 속도나 접촉 면적과 관련이 없다는 진술들도 엄밀히 따지면 정확한 설명이라고 볼 수 없다 [11]. 이렇듯 마찰력은 과학적으로 아직 정립되지 않은 복잡한 힘이기 때문에 학생들이 마찰력 이해에 어려움을 겪는 것도 이상한 일은 아니다.

선행 연구들은 마찰력과 관련한 학생들의 어려움의 원인에 대해 크게 두 가지로 접근하고 있다. 첫째 그룹은 교수자들이 마찰력과 관련한 복잡한 상황을 지나치게 단순화해서 설명함으로써 학생들의 어려움을 유발한다고 생각한다. 이들은 학생들에게 특정한 상황에서만 성립하는 마찰력 관련된 규칙들을 가르침으로써 학생들의 어려움을 유발하게 된다고 생각한다 [9,12,13]. 학생들이 이들 규칙들을 항상 성립하는 법칙으로 암기하게 되고, 이 규칙들이 성립하지 않는 상황에서 학생들이 혼란을 느낀다는 것이다. 특정한 상황에서만 성립하는 마찰력과 관련된 규칙의 대표적인 예로 ‘마찰력의 방향은 물체가 운동하는 방향의 반대 방향으로 작용한다’는 것이 있다. 학생들은 이 규칙에 대해서 깊이 생각해보지 않고 문제 풀이 상황에서 이 규칙을 단순히 적용함으로써 마찰력의 방향을 잘못 결정하게 된다. 또 다른 예로, 강체를 고려해야 할 상황을 질점으로 고려함으로써 학생들의 어려움을 유발하는 경우도 있다 [8]. 강체를 질점으로 생각하면 구르는 물체에 작용하는 마찰력을 정확하게 생각할 수 없어 많은 어려움이 발생할 수 있다.

둘째 그룹은 학생들에게 마찰력과 관련된 현상만 제시해서 말하고 그 원인을 제대로 설명해주지 않아서 학생


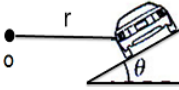
들의 어려움이 생긴다고 생각한다. 이들은 학생들이 어떻게 정지 마찰력이 외력과 정확히 같아지는지 [14], 상황에 따라 물체가 정지 마찰력과 운동 마찰력을 어떻게 선택할 수 있는지 [15], 그 원인을 궁금해 하고, 이런 궁금증이 제대로 해소되지 않아서 학생들이 어려움을 겪는다고 본다. 학생들은 단지 수동적인 객체로 보이는 자연이 어떻게 능동적으로 상황을 선택할 수 있는지 이해하기 어려워 한다는 것이다.

많은 연구자들이 마찰력과 관련한 학생들의 어려움을 해소하기 위한 방법을 연구했다. 그들이 제안한 해소 방법은 그들이 파악한 학생들의 어려움의 원인과 관계가 있다. 먼저 마찰력을 지나치게 단순화해서 가르침으로써 학생들의 어려움을 일으킨다고 본 연구 그룹에서는 학생들에게 특정 상황에만 적용되는 마찰력과 관련된 규칙을 가르쳐서는 안 된다고 주장한다 [9]. 이들은 대신, 보다 일반적인 마찰력 관련 규칙인 ‘마찰력의 방향은 두 물체의 접촉면에서 상대적으로 운동을 방해하려는 방향으로 작용한다’는 규칙을 가르쳐야 한다고 주장한다 [9, 13]. 이에 대해 Cheong [12]등은 일반적인 법칙이 없는 마찰력과 같은 특수한 힘의 경우, 규칙이나 이론 위주의 접근을 고집하기 보다는 현상에 기반한 과학적 추론도 함께 할 수 있도록 해야 마찰력에 대한 이해를 높일 수 있다고 주장했다. 강체를 고려해야 하는 상황에서는 학생들이 문제 상황을 그리게 할 때 물체의 질량 중심뿐만 아니라 표면에 작용하는 힘도 고려할 수 있도록 가르쳐야 한다고 주장하기도 한다 [8].

한편, 마찰력과 관련한 현상만 제시하고 그 원인을 제대로 설명해주지 않아서 학생들의 어려움을 일으킨다고 생각한 연구자들은 학생들에게 납득할만한 이유를 제공해주어야 한다고 주장한다. 이들은 마찰력 관련 현상을 설명해주기 위해 실험적인 방법을 도입하거나 [15], 학생들이 물체들의 접촉면에서 일어나는 미시적 현상을 주목하게 하여, 마찰력의 기작을 스스로 설명할 수 있도록 하는 모델링 활동을 제안하기도 한다 [11,14,16].

하지만 이들 연구들이 많은 경우 학생들의 어려움의 원인에 대해 명시적으로 밝히고 있지 않거나 체계적으로 접근하고 있지 못하다. 학생들의 어려움의 원인에 대해 체계적으로 접근했을 때, 비로소 학생들의 어려움을 해결할 수 있는 방법에 대해서도 체계적으로 접근할 수 있을 것이다. 따라서 본 연구의 목적은 마찰력 관련 학습에서 학생들이 겪고 있는 어려움과 어려움의 원인 구조에 대해 구체적으로 알아보고, 이를 바탕으로 학생들이 이러한 어려움을 해소하기 위해서는 어떻게 해야 하는지를 제안하는 것이다. 구체적으로 본 연구에서는 학생들이 학습해나가는 과정에서 어떠한 어려움을 겪고 있

Table 1. Representative Friction-Problems That Students Had Difficulties in Solving.

구분	문제	그림
1	그림과 같이 등속도로 회전하는 원형 탁자위에 동전이 놓여있다. 동전이 원형 탁자에 대해 상대적으로 정지해 있다면 동전에 작용하는 마찰력의 방향은 어느 쪽일까?	
2	자동차가 수평과 θ 만큼 기울어져 있는, 반경이 r 인 곡선도로를 달리고 있다. 마찰 계수가 μs 라면 자동차가 미끄러지지 않고 달릴 수 있는 최고 속도는 얼마인가?	

는지 구체적으로 알고자 하였으며, 이를 학생의 입장에서 파악하기 위해 주간보고서 [17]의 내용을 바탕으로 학생들의 어려움을 파악하였다. 학생들은 본 연구에서 주간 보고서를 통해 마찰력과 관련하여 자연스럽게 의문을 가지고, 자신들의 지식에 대해 반성적으로 고찰할 수 있었다. 한편, 지식신념틀 [18]을 이용하여 주간보고서에서 파악된 학생들의 어려움을 구조화해서 제시하고, 이와 관련한 학생들의 어려움의 원인도 함께 분석하였다.

II. 연구 맥락 및 연구 방법

본 연구는 대학에서 전공 역학을 수강하는 2학년 학생을 대상으로 진행되었다. 마찰력과 관련한 어려움은 전공 역학 강의 중에서도 주로 1학기 강의에서 나타났으며, 1학기에 전공 역학을 수강하는 학생 수는 평균 20명 내외였다. 학생들의 어려움은 2004년부터 2008년까지 5년간의 주간 보고서 자료를 바탕으로 분석하였다. 주간 보고서는 학생들이 한 주 동안 배운 내용 중 새롭다고 생각한 내용과, 어렵다고 생각한 내용을 자유롭게 적을 수 있도록 한 것이다. 우리가 연구에서 사용한 주간보고서는 Etkina가 개발한 문항 중 세 번째 문항을 제외한 것으로 아래의 두 가지 질문으로 구성되었다 [17].

1. 한 주 동안 내가 배운 것 중 새롭고 핵심적인 것은 무엇인가?

2. 이번 주 수업내용을 학습할 때 내가 지각한(느낀) 어려움들은 무엇인가?

그림1은 학생들이 작성한 주간보고서 중 2번 문항의 응답에 대한 예시이다. 이와 같이 학생들은 한 주 동안 배운 내용 중 1, 2번 문항에 대해 자유서술 방식으로 응답했다. 본 연구에서 분석한 학생들의 어려움은 주로 주간보고서의 2번 문항에 대한 학생들의 응답이었지만, 경

우에 따라서는 주간보고서의 1번 문항에도 학생들이 자신들이 느낀 어려움들을 기술하는 경우도 있었기 때문에 1번 문항의 응답도 배제하지 않았다. 학생들이 주간 보고서에 제시한 마찰력과 관련한 어려움은 대체로 수업 시간이나 연습 문제 시간에 제시된 마찰력 관련 문제 상황과 관련이 있었다. 자료 분석은 우선 본 연구의 제1저자가 주간보고서의 전체 중, 마찰력과 관련한 어려움을 추출하였고, 추출된 결과를 다른 연구자(본 연구에서의 역학 강의 진행자)가 검토하고, 분석 결과에 대해 두 연구자가 토의를 거쳐 합의하는, 동료 검토(Peer examination)의 방법을 통해 이루어졌다 [19]. 표1은 마찰력과 관련하여 어려움을 느낀 문제들 중 학생들이 가장 빈번하게 언급한 두 개의 문제를 정리한 것이다.

문제1은 회전하는 원형 탁자에 놓여 있는 동전에 작용하는 마찰력의 방향을 묻는 문제로 원운동에 대한 이해를 필요로 하는 문제였다. 문제2는 Symon [20] 역학 교재의 1장에 있는 10번 연습문제로 경사진 빗면을 도는 자동차 문제였다. 이것은 마찰력에 대한 이해뿐만 아니라 원운동, 빗면, 좌표축, 관성계, 비관성계 등을 종합적으로 이해해야 제대로 풀 수 있는 어려운 문제였다.

우리는 학생들의 어려움에 대한 분석을 위해 먼저 문제 상황별로 학생들의 어려움을 나열한 후, 이를 서로 유사한 어려움을 가진 것끼리 묶은 후 이를 다시 유형화하였다. 문제 상황별 학생들의 어려움은 연구 결과 1에 나타내었다. 이후 우리는 학생들이 겪고 있는 어려움의 원인이 무엇인지 파악하여 학생들의 어려움을 그 원인별로 다시 유형화하여 연구 결과2에 나타내었다. 연구 결과2의 유형은 연구 결과1의 유형 중 연구자들이 중요하다고 생각한 것들을 다시 나타낸 것으로 연구 결과1의 어려움들 가운데 제외된 것들도 있다. 연구 결과2에서는 학생들의 어려움을 단순히 제시하는데서 그치지 않고, 그런 어려움에 영향을 준 것은 무엇인지를 밝혀, 학생 어려움의 원인 및 그 구조를 종합적으로 보여주고자 했다.

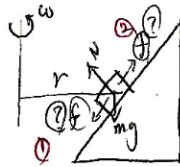
2007년 1학기 역학 Weekly Report

ID : apple

chapter : 2

date : 2007. 3. 25. 2 주차

2. 이번 주 수업내용을 학습할 때 내가 지각한(느낀) 어려움들은 무엇인가? (구체적으로)



가속좌표계나 관성좌표계에서

마찰력의 방향이 ① 인지 ② 인지 # 모르겠다.

저 문제는 축을 중심으로 원운동한다 그렇다면 운동방향이 접선 방향이므로
그 방향의 반대 방향에는 마찰력이 작용해야 하는데 의미선 그것은
적용하지 않는다. 그 이유를

예전부터 마찰력이 구심력이므로 ①이 당연하다 생각했지만 ②의 경우도
생긴다 자세한 것은 안고살다.

Fig. 1. An Example of Students' Weekly Reports.

Table 2. The Types and Contents of Students' Difficulties.

문제	어려움 유형	내용
1	마찰력의 방향	- 마찰력의 방향은 물체의 운동 방향과 반대 방향이라는 것과 원운동 하는 물체의 경우 중심 방향의 힘이 작용한다는 것 사이에서 혼란스러움.
	마찰력의 반작용	- 턴테이블 위의 동전에 작용하는 마찰력의 반작용의 힘은 무엇인가?
	마찰력의 방향	- 자동차의 속도에 따라 마찰력의 방향이 어떻게 결정되는 것인지 잘 모르겠다. - 마찰력은 운동 방향의 반대(혹은 외력의 반대) 방향이라고 알고 있는데 그것과 이 문제에서의 마찰력의 방향이 연결되지 않는다.
	마찰력의 원인	- 문제2에서 생기는 마찰력의 원인은 무엇인가?
2	구심력의 이해	- 구심력은 Free Body Diagram에 같이 그려야 하는 힘인가? - 구심력도 분해할 수 있는 힘인가? - 구심력에 의해 속도가 생기는가? 속도에 의해 구심력이 생기는가?
	수직항력의 이해	- 수직항력은 단지 중력의 분력일 뿐인가? 중력과 대등한 하나의 힘으로 고려해 주어야 하는가? - 수직항력의 정체는 무엇인가? 수직항력은 물체가 평면을 미는 힘에 대한 반작용인가? - 문제2에서 수직항력이 자동차의 속도가 증가함에 따라 커지는 이유는 무엇인가?
	좌표계 설정	- 관성계, 비관성계 좌표 설정과 관련한 어려움 : 원심력은 가상의 힘이라고 알고 있는데 문제를 풀 때 사용해도 되는가? - 빗면에 평행한 방향과 지면에 평행한 방향의 두 좌표계 설정과 관련한 어려움 : 어느 좌표계가 문제를 푸는데 더 유용한지 모르겠다. - 지면에 평행한 방향으로 좌표계를 설정하여 문제를 푸는 경우 $mg\sin\theta$ 의 힘은 왜 고려하지 않는가?
	가속도의 방향	- 문제2에서 자동차의 가속도의 방향이 빗면에 수평한 방향인가? 지면에 수평한 방향인가?
기타	마찰력의 방향	- 소년이 줄을 이용해서 썰매를 끄는 상황에서 소년과 썰매에 작용하는 마찰력의 방향을 잘 모르겠다.
	자동차의 마찰력	- 자동차가 땅에 힘을 주며 가속되어 나갈 때와 단순히 굴러가면서 진행할 때 자동차에 대한 힘의 분석이 어렵다.
	움직이는 순간	- 움직이는 순간의 마찰력은 정지마찰력인가? 운동마찰력인가?

III. 연구 결과

1. 문제별 학생들의 어려움

학생들의 어려움을 문제 상황별로 묶은 후 비슷한 어려움을 유형화한 결과를 다음과 같이 표2에 제시하였다. 표2의 세 번째 열의 ‘내용’에 해당하는 학생들의 어려움은 학생이 주간보고서에 서술한 내용의 느낌을 최대한 살려 연구자가 다시 요약하여 서술한 것이다. 여기서는 문제별로 나타난 학생들의 어려움에 대해 표2에 제시된 순서대로 자세히 알아보려고 한다. 보다 심층적인 분석은 연구결과2에 제시하였다.

1) 문제 1과 관련한 어려움

먼저 문제1의 첫 번째 어려움 유형은 마찰력의 방향과 관련한 어려움으로 학생들은 기존에 마찰력의 방향은 물체의 운동 방향의 반대 방향이라고 배웠던 지식을 바탕으로 턴테이블 위의 동전에 작용하는 마찰력의 방향을 판단하려는 경향이 있었다. 마찰력의 방향이 물체가 운동하는 반대 방향이라고 단순히 생각할 경우 동전에 작용하는 마찰력의 방향은 동전이 원운동 하는 접선 방향의 반대 방향이라고 생각하게 된다. 또한 학생들의 이런 판단은 그들이 기존에 알고 있던 원운동 관련 지식인 ‘원운동 하는 물체의 경우 원의 중심 방향의 힘이 작용한다’는 것과 달랐기 때문에 더욱 혼란스러워했다. 이들은 단순히 암기하고 있던 지식, 즉 ‘물체에 작용하는 마찰력의 방향은 물체가 운동하는 반대 방향’과, 또 다른 지식 ‘원운동 하는 물체에 작용하는 구심력의 방향은 원의 중심 방향’ 사이에서 갈등을 경험하고 있었다. 다음은 이와 관련하여 주간보고서에 나타난 어떤 학생의 진술이다.

마찰력은 운동 방향과 반대임을 알고 있었고 원운동을 하는 물체의 운동 방향은 원궤도의 접선 방향이라고 생각을 했기 때문에 매우 큰 혼란을 겪었다.

한편, 동전에 작용하는 마찰력의 반작용에 해당하는 힘은 무엇인가에 대한 어려움도 있었다. 이 문제 상황에 대해, 비관성계에서의 상황은 이해했으나 관성계에서의 상황은 완전하게 이해하지 못했다고 생각하는 학생들에게서 이런 어려움이 주로 나타났다. 이전까지 학생들은 동전의 운동 상황에만 주로 관심을 가졌기 때문에 동전에 작용하는 마찰력만 고려했었다. 그래서 동전에 작용

하는 마찰력의 반작용인, 동전이 탁자에 작용하는 마찰력에 대해서는 거의 고려하지 않아서 이런 어려움이 생긴 것으로 보인다. 다음은 이와 관련하여 주간보고서에 나타난 어떤 학생의 진술이다.

물체의 원운동을 비관성계-원심력을 이용한 설명은 이해가 가는데 관성계에서 바라볼 때 잘 이해가 가지 않았다. ... 원운동하는 물체를 옆에서 볼 때 구심력의 반작용의 실체가 무엇인지...

2) 문제2와 관련한 어려움

문제1과 관련한 학생들의 어려움은 주로 앞에서 소개한 두 개의 유형, 즉 마찰력의 방향과 마찰력의 반작용과 관련한 문제에 집중되어서 나타났다. 한편, 문제2에서는 상대적으로 더 다양한 유형에 해당하는 학생들의 어려움을 찾을 수 있었다. 이는 문제1에 비해 문제2가 더 복잡하고 고려할 점이 많았기 때문인 것으로 보인다.

먼저, 문제2에서도 문제1과 마찬가지로 마찰력의 방향에 대한 학생들의 어려움이 제기되었다. 학생들이 가지고 있는 마찰력의 방향과 관련한 어려움은 선행 연구의 고찰에서 살펴본 것처럼 두 가지로 나눌 수 있다. 우선, 학생들에게 마찰력과 관련된 현상만 제시해서 말하고 그 원인을 제대로 설명해주지 않아서 학생들의 어려움을 일으킨다고 보는 선행연구의 관점과 부합하는 학생들의 어려움으로, 자동차의 속도에 따라 마찰력의 방향이 어떻게 결정되는 것인지 잘 모르겠다는 의견이 많이 제기되었다. 표2의 ‘마찰력의 원인’ 유형에 나타난 ‘마찰력의 원인은 무엇인가’도 마찰력이 발생하는 기작을 정확하게 이해하고 싶다는 어려움의 연장선상에서 이해할 수 있다. 다음으로 ‘마찰력은 운동 방향(혹은 외력)의 반대 방향’이라는 지식이 이 문제에는 적용이 되지 않아서 어려움을 느끼는 경우가 있었다. 여기서 학생들이 느끼는 어려움은 마찰력을 지나치게 단순화해서 특정 상황에서만 성립하는 규칙만을 가르침으로써 학생들의 어려움을 유발한다는 선행연구의 관점과 일치한다.

한편 구심력이나 수직항력 등, 힘에 대한 이해가 부족해서 문제 풀이에 어려움을 겪는 경우도 있었다. 구심력과 관련해서는 문제 풀이 과정에서 구심력을 Free Body Diagram(이후 FBD로 약칭)에 다른 힘들과 함께 나타내서 문제를 풀어도 되는지에 대한 어려움을 가지고 있었다. 또한, 구심력도 다른 힘들과 마찬가지로 좌표축의 설정에 따라 분해할 수 있는 힘인지에 대해서도 혼란을 느끼는 학생들이 있었다. 또한, 구심력과 관련해서는 구심

력과 운동의 관계에 대한 의문도 있었는데 구심력이 먼저인지, 운동이 먼저인지를 궁금해 하는 학생도 있었다. 이런 어려움들은 모두 구심력에 대한 이해의 부족에서 비롯된 것으로 보인다.

그리고 수직항력과 관련하여 학생들은 고등학교 때까지 주로 평면상에서의 수직항력을 배워왔고, 중력과 평형을 이루는 경우를 다루어왔기 때문에 수직항력은 문제 풀이에서 고려하지 않는 경우가 많았다. 따라서 학생들은 이 문제를 풀면서도 수직항력을 문제 풀이에서 따로 고려해야 하는 힘인지, 중력과 대등한 하나의 힘으로 고려해 주어야 하는 것인지 의문을 가졌다.

좌표계 설정과 관련한 어려움도 나타났다. 좌표계의 설정과 관련한 어려움은 두 가지로 나눌 수 있었다. 하나는 관성계, 비관성계와 관련한 어려움이었고, 다른 하나는 지면에 나란한 좌표계와 빗면에 나란한 좌표계와 관련한 어려움이였다. 학생들은 보통 문제를 풀 때 관성 좌표계, 혹은 비관성 좌표계 중 하나를 설정해서 문제를 푼다. 그 중 비관성 좌표계를 설정해서 문제를 푸는 학생들의 경우 원심력이 주로 가상힘이라는 말을 많이 들어서 이 힘이 문제 풀이에 직접 활용해도 되는 힘인지(FBD에 나타내도 되는 힘인지)에 대해 많이 고민했다. 지면에 나란한 좌표계와 관련해서는 학생들이 지금까지는 별다른 생각 없이 빗면에 나란한 좌표계를 설정하여 문제를 풀어 왔었는데, 새롭게 지면과 나란하게 좌표계를 설정하여 문제를 푸는 것을 보고 나타난 어려움이였다. 이 경우 지면에 나란한 좌표계를 사용해도 되는지에 대한 어려움과 함께, 지면과 나란하게 좌표계를 설정하여 문제를 풀 때 중력은 분해하지 않아도 되는 상황인데 학생들은 습관적으로 중력을 분해하여 $mg\sin\theta$ 를 이용해 문제를 풀었던 경험 때문에 $mg\sin\theta$ 가 오히려 더 직접적으로 운동을 일으키는 힘이라고 생각하고, 왜 이 힘은 문제 풀이에서 고려하지 않는지에 대해 의문을 가지는 경우가 있었다. 또, 문제 상황에 대한 이해가 부족하여 자동차의 가속도의 방향이 지면에 평행한 방향인지, 빗면에 평행한 방향인지를 알지 못해 어려워하는 학생들도 있었다.

3) 기타 어려움

문제1, 문제2 이외에 제기된 학생들의 어려움들은 그 빈도가 적어서 따로 분류 하였다. 먼저 문제1, 문제2와 같이 마찰력의 방향에 대해 어려워하는 경우가 있었는데 소년이 줄을 이용해서 썰매를 끌 때, 소년과 썰매에 작용하는 마찰력의 방향을 잘 모르겠다는 학생이 있었

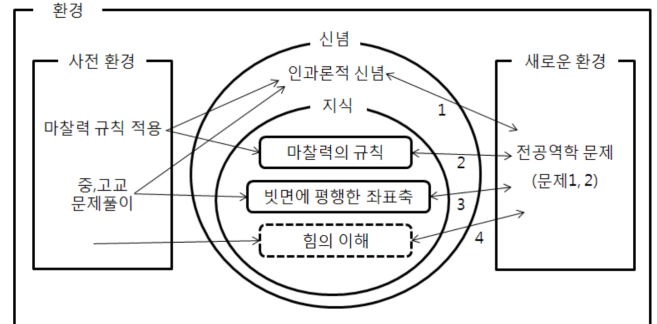


Fig. 2. The Structure of Creating Student Difficulty in Studying Friction.

다. 또 다른 학생은 구름 마찰력과 관련하여 어려움을 가지고 있었는데 자동차가 땅에 힘을 주며 가속되어 나갈 때와 그냥 주행하고 있을 때 등 상황에 따라 자동차에 작용하는 힘의 분석을 어떻게 해야 하는지, 각각의 경우에서 마찰력의 방향이 어떻게 되는지를 고민하는 경우가 있었다. 이는 마찰력에 대한 고민을 실생활에 응용하려는 과정에서 나타난 어려움이였다. 또한 물체가 정지해 있다가 움직이는 순간에 주목하여 움직이는 순간에 작용하는 마찰력은 정지마찰력인지, 운동마찰력인지 모르겠다는 학생도 있었다.

2. 학생 어려움의 원인 구조

우리는 연구 결과1에서 파악한 학생들의 어려움을 바탕으로 학생들이 가지고 있는 어려움의 원인 구조를 알아보고자 하였다. 그림2는 학생들의 어려움의 원인 구조를 지식신념틀 [18]을 이용하여 체계적으로 도식화한 것이다. 지식신념틀은 통합적 정신모형이론을 기반으로 학생들의 어려움의 문제를 이해하기 위해 개발된 것으로 기존의 물리교육 선행연구들을 바탕으로 지식, 신념, 환경등의 어려움의 원인요소들을 탐색하고, 이들 요소들의 전체적인 관계를 고려하려고 한 분석틀이다. 이 분석틀은 특히 어려움의 원인 요소들을 분절적으로 파악하지 않고, 환경이 지식이나 신념에 미치는 영향이나, 지식과 신념 사이의 관계에 주목하려고 한 특징이 있다. 그림2는 신념이 지식을 포함하는 관계라기보다 지식의 배후에서 지식과 서로 영향을 주고받는다라는 의미로 그린 것이다. 여기서 화살표는 한 항목이 다른 항목의 형성에 영향을 주는 것을, 양쪽 화살표는 두 항목 간에 서로 갈등을 겪고 있는 것을 나타낸다. 단, 그림2는 본 연구의 일부 사례와 선행연구의 검토 결과를 바탕으로 한 것이기에 마찰력을 학습하는 모든 학생들이 경험하는 어려움을 대표한다고는 볼 수 없다.

Table 3. The Sources and Contents of Students' Difficulties.

어려움의 원인	내 용
마찰력 관련 인과론적 신념 (단순규칙 적용 vs 불일치 사례)	- 자동차의 속도에 따라 마찰력의 방향이 어떻게 결정되는 것인지 잘 모르겠다. - 구심력에 의해 속도가 생기는가? 속도에 의해 구심력이 생기는가?
마찰력의 규칙 사용 (운동 방향과 반대 방향 vs 운동 상태에 따라 변하는 방향)	- 마찰력의 방향은 물체의 운동 방향과 반대 방향이라는 것과 원운동 하는 물체의 경우 중심 방향의 힘이 작용한다는 것 사이에서 혼란스러움. - 마찰력은 운동 방향의 반대(혹은 외력의 반대) 방향이라고 알고 있는데 그것과 문제1에서의 마찰력의 방향이 연결되지 않는다. - 자동차의 속도에 따라 마찰력의 방향이 어떻게 결정되는 것인지 잘 모르겠다.
좌표축의 선택 (빗면에 평행한 좌표축 vs 지면에 평행한 좌표축)	- 빗면에 평행한 방향과 지면에 평행한 방향의 두 좌표계 설정과 관련한 어려움 : 어느 좌표계가 문제를 푸는데 더 유용한지 모르겠다. - 지면에 평행한 방향으로 좌표계를 설정하여 문제를 푸는 경우 $mg\sin\theta$ 의 힘은 왜 고려하지 않는가?
관련된 힘 개념의 부족 (마찰력, 구심력, 수직항력, 원심력)	- 턴테이블 위의 동전에 작용하는 마찰력의 반작용의 힘은 무엇인가? - 문제2에서 생기는 마찰력의 원인은 무엇인가? - 구심력은 Free Body Diagram에 같이 그려야 하는 힘인가? - 구심력도 분해할 수 있는 힘인가? - 수직항력은 단지 중력의 분력일 뿐인가? 중력과 대등한 하나의 힘으로 고려해 주어야 하는가? - 수직항력의 정체는 무엇인가? 수직항력은 물체가 평면을 미는 힘에 대한 반작용인가? - 문제2에서 수직항력이 자동차의 속도가 증가함에 따라 커지는 이유는 무엇인가? - 원심력은 가상의 힘이라고 알고 있는데 문제를 풀 때 사용해도 되는가?

선행 연구에 따르면 학생들이 마찰력과 관련하여 겪고 있는 어려움은 특정한 상황에만 적용되는 마찰력의 규칙 사용과 마찰력 관련 현상의 원인 설명 부족에서 유발된다고 보았다. 그리고 이런 어려움은 중·고등학교의 교수 학습 상황과 밀접한 관련이 있다고 보았다. 선행 연구에서 지적한 두 가지 마찰력 관련 현상의 어려움의 원인과 관련된 사례는 본 연구에서도 반복적으로 살펴볼 수 있었으며, 우리는 이를 각각 ‘마찰력의 규칙 사용’과 ‘마찰력 관련 인과론적 신념’으로 나누어 범주화 하였다. 한편 그림에서 사전 환경은 이러한 어려움들을 유발했을 것으로 추정되는 중·고등학교의 교수 학습 상황을 표현한 것이다. 이들 사전 환경이 현재의 지식과 신념의 형성에 영향을 주었다고 봐서 이를 화살표로 표시했다.

한편, 연구자들은 선행 연구의 범주들로 범주화되지 않는 학생들의 나머지 어려움들을 모은 후, 이 나머지 어려움들에 대해 범주화를 시도하였는데, 학생들에게서 반복적으로 나타나는 어려움들을 두 개의 추가적인 범주로 범주화할 수 있었다. 그 중 하나는 문제2와 관련한 특정 문제 풀이 상황에서 나타난 어려움으로 많은 학생들이 빗면에 평행한 좌표축을 이용하여 문제를 풀려고 하는 경향을 보이고, 이로부터 어려움을 겪고 있었으며, 마찰력, 구심력, 수직항력, 원심력등과 같은 힘과 관련한 개념도 부족하다는 것을 알 수 있었다. 우리는 이런 학생들의 어려움을 각각 ‘좌표축의 선택’ 범주와 ‘관련된

힘 개념의 부족’ 범주로 나누었다. 그리고 연구자들은 이러한 학생들의 지식과 신념은 본 연구에서의 문제1, 문제2의 상황과 갈등을 일으켜 학생들의 어려움을 부각시켰다고 봐서 학생들의 지식, 신념과 새로운 환경 사이의 관계는 갈등 관계인 양쪽 화살표로 표시하였다. 그림2에서 힘에 대한 지식은 아직 완전하게 정립되어 있지 못했다는 의미로 점선으로 표시하였다. 표3은 표2를 바탕으로 연구자들이 학생들이 겪고 있는 어려움들을 우리가 만든 4개의 범주로 다시 재배열 한 것이고, 그림2는 앞서 설명한 내용을 그림으로 구조화하여 나타낸 것이다.

이제 그림2의 화살표 1, 2, 3, 4와 관련하여 학생들이 겪고 있는 어려움의 원인 구조를 순서대로 살펴보면 다음과 같다. 먼저 ‘마찰력 관련 인과론적 신념’ 유형에서 학생들은 ‘자동차의 속도에 따라 마찰력의 방향이 어떻게 결정되는 것인지 잘 모르겠다’는 어려움을 겪고 있었다. 이런 어려움은 선행 연구들에서 지적한 바와 같이 중·고등학교에서 마찰력 문제를 풀 때 마찰력 규칙을 바탕으로 항상 마찰력의 방향을 먼저 정하고 문제를 푸는 데서 비롯된 것으로 추측해볼 수 있다. 학생들은 이런 경험이 누적되어 항상 힘이라는 원인에 따라 운동이라는 결과가 따라온다는 신념을 형성하는데, 이런 신념 아래에서 학생들에게 문제2의 상황은 매우 낯선 것이었다. 학생들의 인과론적 신념에 의하면 힘이 원인이고 운동이 결과인데, 결과인 것처럼 운동이 힘을 바꾼다는 것

이 이상하게 보일 것이다. 이렇게 형성된 학생들의 신념과 관련한 어려움은 선행 연구에서 살펴보았던 ‘마찰력과 관련한 현상만 제시하고 그 원인을 제대로 설명해주지 않아서 학생들의 어려움을 일으킨다’고 생각한 연구자들의 관점과 연결 된다.

‘마찰력의 방향’ 유형과 관련해서 학생들은 중·고등학교에서 마찰력의 방향이 물체의 운동 방향과 반대 방향이라거나 외력의 반대 반대 방향이라고 배웠기 때문에 지금도 그렇게 믿고 있는 경향이 있었다. 하지만 문제1과 문제2는 학생들의 이런 선지식이 적용되지 않는 상황이었고, 학생들은 이에 갈등을 겪었다. 문제1에서는 물체의 운동 방향은 물체가 원운동을 하고 있는 접선방향인데, 마찰력의 방향이 접선 방향의 반대 방향이 아니라 구심 방향이라는 사실에서 갈등을 겪고 있었고, 문제2에서는 아예 물체가 운동 방향을 바꾼 것도 아닌데 힘의 방향이 바뀌는 것에 대해 의아해 하고 있었다. 이런 학생들의 어려움은, 마찰력을 지나치게 단순화해서 특정 상황에서만 성립하는 규칙을 가르침으로써 학생들의 어려움을 유발한다는 선행 연구의 결과와도 관련 된다.

한편, 선행 연구들은 학생들의 어려움에 대해 두 가지 관점을 분리해서 접근하고 있었지만 우리는 앞에서 논의한 바와 같이 이 어려움들이 서로 연결되어 있다고 생각한다. 학생들의 신념과 관련되는 어려움과 학생들의 지식과 관련되는 어려움은 결국 연결된다고 볼 수 있다. 그림1에서 학생들은 중·고등학교에서의 학습 경험 및 문제 풀이 경험을 바탕으로 마찰력은 운동 반대 방향이라는 견고한 지식을 형성하였다. 그리고 이런 지식은 학생들에게 마찰력의 방향은 바뀔 수 없고, 문제를 풀 때 마찰력의 방향을 먼저 결정해서 풀면 된다는 신념을 형성하게 하였다. 그러나 학생들은 문제1, 문제2와 같이 기존에 그들이 가지고 있던 지식과 신념으로는 설명할 수 없는 현상을 만나게 되었고, 결국 표3에서와 같은 어려움을 겪었다.

‘좌표축의 선택’ 유형에서 학생들이 느끼는 어려움은 고등학교 때까지는 주로 빗면에 평행한 좌표계를 이용해서 문제를 풀었는데, 전공 역학에서 문제를 풀 때 지면에 평행한 좌표계를 새로 도입하면서 비롯된 것으로 보인다. 이와 관련한 학생들의 어려움은 크게 두 가지였다. 우선 새로 도입된 좌표계가 문제 풀이에 유용한지, 원래 좌표계도 잘 사용하고 있었는데 왜 그런 좌표계를 사용해야 하는지에 대한 것이 있었다. 그 다음으로 학생들은 문제를 푸는 과정에서 빗면에 평행한 좌표계에서는 항상 중력의 분력인 $mg\sin\theta$ 의 힘을 고려해 왔던 경험을 바탕으로 지면에 평행한 좌표계에서는 왜 중력의 분력을 고려하지 않는지 혼란스러워했다. 학생들이 빗면

문제에서는 중력보다도 중력의 분력인 $mg\sin\theta$ 를 물체의 운동을 일으키는 더 실제적인 힘이라고 생각하고 이에 대해 주목하고 있는 것은 매우 흥미로운 현상이었다.

많은 학생들이 마찰력 문제풀이와 관련한 어려가지 힘들(마찰력, 구심력, 수직항력, 원심력등)에 관한 이해가 부족하였으며, 이것이 그들이 겪는 어려움의 원인이 되었다고 볼 수 있다. 예를 들어 학생들은 어떤 힘을 FBD에 나타낼 수 있는 힘인지의 여부를 혼란스러워했다. 학생들의 이런 혼란과 고민은 어떤 힘을 FBD에 나타낼 수 있는 힘인지의 여부가 문제를 푸는데 있어서 직접적으로 중요하기 때문인 것으로 보인다. 학생들의 이런 고민은 특히 구심력에서 많이 나타났는데, 일부 학생의 경우 구심력도 FBD에 함께 그려놓고 합력을 구할 때 어려움을 겪는 경우도 있었다. 한편, 구심력과 함께 FBD에 원심력을 함께 나타내도 좋은지에 대한 의문도 있었다. 학생들이 이전까지 주로 원심력이 가상의 힘이라는 말을 많이 들어왔기 때문에 원심력을 다른 힘과 동일하게 고려해서 문제 풀이에 사용해도 되는지 의문을 가지는 것을 볼 수 있었다. 또한 FBD에 함께 나타내는 힘이라도 두 힘을 대등한 힘으로 고려해도 되는지에 대한 의문도 있었다. 어떤 힘을 FBD에 그릴 수 있는 힘인지, 또는 중력과 수직항력이 대등한 힘인지에 대해 의문을 가지는 것을 보면 학생들 스스로가, 여러 힘들을 똑같이 취급할 수는 없고 그 힘들이 조금씩 다르다는 것을 어느 정도 인식하고 있는 것으로 보인다. 하지만 그들은 아직 이러한 힘들 간의 관계에 대한 정확한 이해는 하지 못하고 있었다.

IV. 결론 및 논의

본 연구에서 나타난 학생들의 마찰력 관련 어려움들은 마찰력의 방향, 마찰력의 반작용 힘, 마찰력의 원인, 힘의 이해(구심력, 수직항력), 좌표계 설정에 관한 어려움들이 있었다. 이러한 어려움의 원인들에는 마찰력 관련 인과론적 신념, 마찰력의 규칙 사용, 좌표축의 선택, 관련된 힘 개념의 부족 등이 있었으며 특히, 문제풀이 과정에서 학생들은 마찰력의 방향을 찾는 것에 대해 많은 인지 갈등을 느꼈다. 마찰력의 크기를 도입하기 이전에, 다양한 상황에서 학생들에게 마찰력의 방향을 생각해 보게 하고 토론하게 하는 것이 학생들의 마찰력 이해에 도움이 될 수 있을 것이다. 이 과정에서 특히 물체에 작용하는 마찰력만 생각하게 하지 말고 학생들이 잘 생각하지 않는, 바닥에 작용하는 마찰력 및 그 방향도 함

게 생각해 보도록 한다면 학생들의 깊은 사고를 유도할 수 있을 것이다.

선행 연구들에서 두 가지로 분류되었던 학생들의 어려움 원인 즉, 마찰력을 지나치게 단순화해서 가르침으로써 학생들의 어려움을 일으킨다는 생각과, 마찰력과 관련한 현상만 제시하고 그 원인을 제대로 설명해주지 않아서 학생들의 어려움을 일으킨다는 생각은, 본 연구에서 분석한 바와 같이 결국 서로 관련이 있는 것으로 나타났다. 본 연구에서 시도했던 학생들의 어려움에 대한 통합적 접근이 학생들이 겪고 있는 어려움을 보다 잘 이해하고, 그 어려움을 해소할 수 있는 방법을 찾는 데 많은 도움을 줄 수 있을 것으로 생각한다.

본 연구에서 학생들의 어려움을 발견했던 문제1, 2는 학생들이 기존에 배웠던 지식을 반성적으로 검토할 수 있는 기회를 주는 좋은 문제였다. 마찰력은 상황 의존적 성격이 강한 힘이다. 문제1, 2 뿐만 아니라 학생들이 보다 다양한 문제 상황을 접하고, 또 그 문제 상황에 대해 생각해 볼 수 있도록 기회를 제공해 주어야 한다. 또한 본 연구에서는 두 가지 문제 상황에서의 학생들의 어려움이 주로 부각되었지만 학생들의 어려움에 대한 보다 심층적인 이해를 위해 보다 다양한 교수학습 및 문제 상황에서 학생들이 겪는 어려움을 분석해 볼 필요가 있다.

우리는 연구를 통해, 학생들이 마찰력 문제를 풀고, 논의하면서 다양한 힘들과의 관련성을 찾고자 고민하는 모습을 자주 목격하였다. 다음은 표1의 문제 2에서 한 학생이 다양한 힘들과의 관련성을 고민하면서 주간보고서에 적은 내용이다.

등속원운동을 학습하며 새롭게 배운 구심력, 원심력과 기존에 알고 있던 수직항력, 중력 사이에 정확한 관계를 모르겠다. 예를 들어 어떤 벨로드롬을 도는 자전거의 경우에 수직항력, 중력, 구심력이 모두 있는건지 수직항력, 중력을 구심력으로 표현하는건지 하는 점이다.

Arons [21]는 마찰력의 특성으로 마찰력이 접촉힘, 수동힘의 특성을 지닌다는 것에 주목했고, Feynman [22]은 마찰력이 근본적인 힘이 아니고 수많은 현상들이 복합적으로 작용한 결과임을 강조했다. 이에 대해 Cheong [12]등은 실험힘의 개념을 도입하면서 현상을 설명하는 간단하고 일반적인 법칙이 없는 경우(힘의 특성에 관한 일반적 법칙이 없을 때)의 힘들을 실험힘으로 명명하고, 이런 힘들을 다룰 때 현상에 기반한 추론의 중요성을 주장하기도 했다. 우리는 마찰력이 고유하게 가지고 있는 이런 특성들을 다른 힘들과의 관계와 함께 학생들이 이해할 수 있도록 도와주면 학생들의 이해를 도울 수 있다

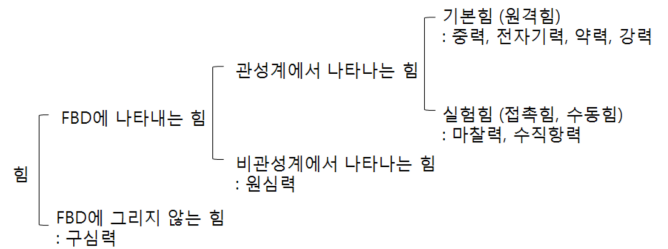


Fig. 3. An Example of Categorizing Forces.

는 것을 발견했다. 다음은 힘의 분류에 대한 강의를 들은 후 학생이 주간보고서에 자신의 나름대로 이해한 것을 인용한 것이다. 이 결과로부터 다음과 같이 학생의 어려움이 어느 정도 해소된 사례들을 발견할 수 있었다.

구심력과 원심력을 동일하게 놓고 (단, 방향은 반대) 문제를 풀어도 크게 문제가 되지 않는 편이어서, 주로 구심력 보다는 내가 더욱 쉽게 느낄 수 있는 원심력을 통해서 문제에 접근하는 편이었다. 그래서 원심력을 우리가 회전운동을 하면서 생기는 기본힘과도 같게 여기고 문제를 풀어 왔다. 하지만 수업시간에 구심력(원심력이 아닌), 중력, 마찰력을 구분짓는 과제를 수행하면서 큰 오류를 범하고 있다는 것을 알 수 있었다. 우선 원심력이 아닌 구심력을 중심으로 하여 생각해야 하며, 구심력은 기본힘도 실험힘도 아닌 그때의 상황에 따라 결정되는 힘이라는 것을 알 수 있었다.

즉, 학생들이 궁금해 하는 어떤 힘이 FBD에 그려주어야 하는 힘인지 아닌지, 관성계에서만 나타나는 힘인지의 여부와 관련된 논의에 마찰력을 포함시키는 것이다. 마찰력을 가르치면서 마찰력과 관련한 부분의 문제에만 치우쳐 학생들의 어려움을 생각하지 말고, 마찰력과 다른 힘들 전체와의 관계로 확장시켜 주자는 것이다. 구체적으로 수업 시간에 그림3과 같은 힘의 분류를 도입한다면, 이런 힘에 대한 체계적인 분류가 학생들의 마찰력에 대한 이해에 도움을 줄 수 있을 것이라 기대한다. 그러나, 본 연구와 같은 수업을 통하여 학생들의 마찰력 관련 어려움이 얼마나(그리고 어떻게) 해소되는지에 관하여는 추후 심층적인 연구가 필요하다.

한편, 마찰력에 대한 학생들의 이해를 높여 주기 위해서는 마찰력 교수에서 특정 상황에만 적용되는 마찰력 규칙들을 남용하지 말아야 할 것이다. 특정 상황에만 적용되는 마찰력 규칙들이 학생들에게 어려움을 주는 지식과 신념을 형성하게 할 수 있기 때문이다. 이를 해결하기 위해 중·고등학교에서는 마찰력을 너무 복잡하게 다루면 학생들이 이해하기 힘들어하므로, 선행 연구들에

서 제안한 마찰력과 관련한 보다 일반적인 규칙을 가르쳐주고, 대학교 이상에서는 학생들이 스스로 마찰력의 기작을 설명할 수 있는 모델링 활동을 하도록 해주는 것이 좋다고 본다.

참 고 문 헌

- [1] H. Kim and B. Lee, SAEMULLI **52**, 521 (2006).
- [2] C. Williams, M. Stanisstreet and K. Spall, E. Boyes, D. Dickson, Physics Education **38**, 324 (2003).
- [3] C. Jeon and G. Lee, SAEMULLI **55**, 134 (2007).
- [4] C. Jeon, G. Lee and J. Park, New Physics: Sae Mulli **60**, 1185 (2010).
- [5] S. Lee and G. Lee, New Physics: Sae Mulli **60**, 1175 (2010).
- [6] J. Choi, G. Lee and D. Jeon, SAEMULLI **55**, 143 (2007).
- [7] K. Jung and G. Lee, SAEMULLI **58**, 48 (2009).
- [8] P. S. Carvalho and A. S. e. Sousa, Physics Education **40**, 257 (2005).
- [9] A. Salazar, A. Sanchez-Lavega and M. A. Arriandaga, Physics Education **25**, 82 (1990).
- [10] *The Korean Physical Society, Force & motion* (Dong-A Science, Seoul, 2005).
- [11] U. Besson, L. Borghi, A. De Ambrosio and P. Mascheretti, American Journal of Physics **75**, 1106 (2007).
- [12] Y. W. Cheong, S. Ha, T. Byun, and G. Lee, presented at 2008 PER Conference.
- [13] S. Hong, New Physics: Sae Mulli **60**, 142 (2010).
- [14] J. Reichert, The Physics Teacher **39**, 29 (2001).
- [15] D. Ludwigsen and K. Svinarich, The Physics Teacher **47**, 158 (2009).
- [16] E. G. Corpuz and N. S. Rebello, AIP Conference Proceedings **951**, 73 (2007).
- [17] E. Etkina, Science Education **84**, 594 (2000).
- [18] G. Lee, SAEMULLI **54**, 284 (2007).
- [19] S. B. Merriam, *Qualitative Research and Case Study Applications in Education*, 2nd Edition (Jossey-Bass Publishers, San Francisco, 1998).
- [20] K. R. Symon, *Mechanics*, 3rd Edition (Addison-Wesley, Reading, MA, 1971).
- [21] A. B. Arons, *Teaching Introductory Physics* (John Wiley & Sons, New York, 1997).
- [22] R. P. Feynman, R. B. Leighton and M. L. Sands, *The Feynman Lectures on Physics* (Addison-Wesley, Redwood City, Calif., 2006).