

英才教育研究

Journal of Gifted/Talented Education

2004. Vol 14. No 4, pp. 71-91

과학영재교육에서의 상대론적 개념에 대한 학생 사례 분석

배 세 벽¹⁾ (한국과학기술원 교수)

김 영 화 (부산대학교 박사과정)

김 영 민 (부산대학교 교수)

고등학생 과학영재를 대상으로 하는 상대론 교육을 위해, 과학영재학교로 지정된 부산과학고등학교의 학생 사례 분석을 통한 상대론적 개념 이해에 대한 연구를 제시한다. 특수 상대론이라는 현대 물리 분야에서 발생하는 학생들의 이해도 변화 및 가능한 원인들을 조사하였다. 사전 조사와 사후 조사의 비교 분석에 의하면, 상대론적 개념들에 대한 학생들의 이해 정도가 교육을 통해 전반적으로 향상된 것으로 나타났다. 또한, 학생 사례 분석을 통해 상대론적 개념에 대한 학생들의 이해 및 오개념을 살펴보았다. 학생들이 상대성 원리의 타당성, 광속 불변의 원리가 고전 물리학에 미치는 영향 등에 대해 낮은 이해도를 가지는 것으로 나타났다. 이러한 낮은 이해도를 보이는 개념들에 대한 조사는 고등학생 과학영재의 올바른 개념 형성을 위한 교육방안 고안에 여러 가지 기여를 할 것으로 보인다.

주요어: 고등학생 과학영재, 상대론, 사례 분석, 이해도 변화 분석

1) **Corresponding author.** (E-mail) sbae@kaist.ac.kr, (Fax) +82-42-869-8660, (Tel) +82-42-869-8981.

I. 서론

1905년 아인슈타인에 의해 제안된 특수 상대성 이론(예를 들어, French, 1968; Kogut, 2001)은 시간 및 공간에 대한 고전 역학적 개념을 혁명적으로 변화시키면서 많은 물리학자와 물리학도의 관심사가 되어 왔다. 특수 상대론에서 나타나는 특징적인 개념으로는 동시성의 상대성, 시간 지연, 길이 수축, 물체의 속력 제한 등을 들 수 있다. 한편, 특수 상대론은 고등학생 연령대의 과학영재들의 열정과 관심을 벗어날 수 없으며, 그들의 지적 호기심을 자극하며 과학자로서의 자질을 구비시키는 중요한 분야가 되고 있다. 이러한 견해는 심지어 과학영재교육이 주목 받기 전인 1980년대 고등학생에 대한 연구(소광섭, 박승재, 1985)에 의해서도 뒷받침 될 수 있다. 그 연구에 의하면, 고등학교의 교육 과정을 통해 특수 상대론을 의미 있게 접하기 어려운 상황에도 불구하고, 학생들은 교과서 이외의 관련 서적 등을 통해 아인슈타인의 특수 상대론 및 그것과 관련된 예인 쌍둥이 역설을 알고 있는 것으로 나타났다.

양자 물리학과 더불어 현대 물리의 분야에 속하는 특수 상대론은 현재 일반 고등학교 및 과학 고등학교에서 충분히 교육되기 어려운 상황에 놓여 있다. 6차 교육과정의 고등학교 물리교과에 나오는 특수 상대론과 관련된 내용으로는, ‘힘과 운동’ 단원에서 다루어진 상대 속도와 ‘현대물리’ 단원에서 논의된 핵분열과 관계된 질량-에너지 등가 개념이 있다(박재호 외, 1995). 그러나 특수 상대론의 기초 개념이나 대표적인 상대론적 현상은 거의 다루고 있지 않으며, 기본 가정인 상대성 원리(Principle of Relativity)를 암시할 수 있는 뉴턴 방정식의 형식(form)과 관측계(또는 관측자)와의 관계도 거의 언급하지 않는다. 7차 교육과정의 물리교과도 거의 같은 실정이다(박봉상 외, 2002). 따라서 일반 고등학교 학생들은 특수 상대성 이론의 중요 개념이나 일상 경험과의 분명한 차이를 보이는 상대론적 현상에 관한 지식을 거의 습득하지 못한 채 졸업한다고 볼 수 있다(한국교원대학교 과학교육연구소, 2001). 한편, 과학 고등학교 심화과정에 사용하는 “고급물리” 교과에서는 특수 상대론의 기본 원리인 상대성 원리와 광속 불변의 원리, 시공간의 기하학적 구조와 그로 인한 고전적 시간과 공간에 관한 경험적 사실의 변화(예를 들면, 길이의 수축, 동시성의 상대성) 및 고전적 운동량 및 에너지의 상대론적 확장에 대한 내용을 다루고 있다(서울대학교 사범대학 물리교육과 물리학습연구실, 2000). 하지만 이 교과목은 교육과정상 과학 고등학교 3학년에 개설되고 교육이 대학 입시 중심으로 진행되기 때문에 충분히 다루어지기 어려운 상황에 놓여 있다.

이렇듯 고등학생조차도 정규 교육과정을 통해 특수 상대론을 의미 있게 접하기 어려운 상황인데 비해, 과학영재 학생들은 중학교 때부터 관련 서적 등을 통해 아인슈타인의 특수 상대론 등에 관한 지식을 추구해온 것으로 보인다. 특수 상대성 이론은 고전 물리학과 뚜렷한 차이를 보이는 부분을 가지고 있다. 그 원인은, “물리 법칙의 형식(form)이 모든 관성계(inertial frame of reference)에 대해 동일하다”는 상대성 원리의 적용 대상이 광속 불변의 원리로 인해 뉴턴의 운동 방정식에서 맥스웰의 전자기 방정식으로 변경되었다는 사실에 있다. 이 사실의 결과로 임의의 두 관성계 사이의 시간 및 공간 좌표들의 변환이 갈릴레이 변환(Galilean transformation)에서 로렌츠 변환(Lorentz transformation)으로 대체되었으며, 시공간에 관해 가지고 있던 고전적 ‘편견들’이 수정되었다. 그러나 이 두 변환의 차이는 두 관성계 사이의 상대 속력이 광속에 아주 가까운 경우(예를 들어, 속력이 광속의 10%정도가 되면, 고전적 결과와 대략 1% 정도의 차이가 생긴다)에만 쉽게 관찰될 수 있다. 이것은 과학영재학생들이 일상적인 실험이나 관찰을 통해 특수 상대론의 예측 결과를 충분히 경험하기 힘들다는 것을 의미한다. 따라서 (위에서 언급한) 관련 서적들의 ‘적절하게 인도되지 않는 독서’가 특수 상대론에 대한 올바른 이해보다는 상상력의 그릇된 자극에 의한 오개념(misconception) 형성의 근원이 될 수 있다는 것을 암시한다고 볼 수 있다. 그러므로 특수 상대론의 중요한 개념들을 과학영재에게 올바르게 가르치기 위해 적절한 방법을 고안하고, 보다 정성적인 설명을 위한 많은 탐색과 노력이 필요하다고 할 수 있다.

과학 분야에서의 영재성을 계발시키기 위한 교육 방편으로 “R&E 프로그램”(부산과학고등학교 홈페이지, 2004)이 과학영재학교로 지정된 부산과학고등학교의 학생들에게 제공되어 왔다. R&E 프로그램(Research and Education Program)에서는 교수-교사-학생의 한 팀이 약 1년 동안 사사교육 형태로 공동 연구를 수행하며, 보통 하나의 전문적인 주제를 심도 있게 다루게 된다. 이러한 과학영재교육의 맥락에서, R&E 한 팀이 상대성 이론과 관련된 주제의 심화된 연구를 약 1년 동안 진행하였다. 본 논문에서는, 이 R&E 팀의 학생들의 사례 분석을 통해 고등학생 과학영재의 특수상대론 교육에서 중요한 역할을 할 수 있는 상대론적 개념 이해에 대한 연구 결과를 제시한다. (단, R&E 프로그램 전체를 본 논문의 연구 대상으로 본 것이 아니며, R&E 연구 주제의 한 부분에 해당하는 특수 상대론 교육에 제한하여 그 효과 등을 살펴보고자 한 것이다.) 특수상대론 교육 시점 전후에 행해진 사전 조사 및 사후 조사를 통해 학생들의 이해도 변화를 알아보았다. 또한, 학생들의 사례 분석을 통해 여러 가지 상대론적 개념들에 대한 이해 및 오개념 등을 살펴보았다.

II. 연구 방법

1. 연구 대상 및 실시

본 연구는, 과학영재학교로 지정된 부산과학고등학교 학생 7명으로 구성된, R&E 프로그램 한 팀을 대상으로 하였다. 특수 상대론의 교육은 R&E 프로그램을 수행하는 과정에서 강의, 토론, 문답 등을 통해 실시되었다.

학생들의 개념에 관한 조사는, 특수 상대론에 대한 교육 시점을 기준으로 “사전 조사”와 “사후 조사”로 이뤄졌다. 교육 이전에 수행된 사전 조사에서는, “학생의 물리 오개념 지도를 위한 표준 검사 도구의 개발 및 데이터베이스 구축 프로그램”(이하 ‘표준검사도구’라 함)(송진웅 외, 2003)에서 다뤄진 내용 중 상대론적 개념들과 관련된 20개 문항을 사용하여 개념조사만 실시했다. 단, 20개의 문항 중 한 문항은 특수 상대론보다 역학적 파동의 오개념 조사와 더 깊은 관련을 가지기 때문에 R&E 프로그램의 강의 내용에 포함되지 않았고 일종의 “참고 문항”으로 취급하였다. 따라서, 20개의 문항은 19개의 “본 문항”과 1개의 “참고 문항”으로 구성된다. 각 문항에는 객관식 형태의 문제와 특정 답을 선택한 이유를 간략하게 쓰는 부분이 있다. 강의 이후에 수행된 사후 검사의 문항들은 조사에 사용된 문항의 특성에 따라 크게 두 부분으로 나뉜다. 한 부분은 사전 검사에 이용된 문제와 동일하며, 나머지 부분은 위에서 언급한 강의 내용을 근거로 만든 서술식 형태의 8개 문항들이다. ‘표준검사도구’의 문항만으로 개념조사만 행한 사전 검사와는 달리, 사후 검사에서는 ‘표준검사도구’의 문항과 서술식 형태의 8개 문항들을 가지고 학생들과의 면담을 병행하여 개념별 이해 정도를 조사하였다.

2. 특수 상대론 교육

특수 상대론의 교육은, 기본적으로 지도 교수와 학생 사이에서의 ‘사사 교육’(mentorship)의 형태로 진행되었다. 7명이라는 소수의 학생들이 한 팀을 이루었기 때문에, 학생들의 상태를 적절히 고려할 수 있는 일종의 ‘맞춤식 교육(tailor-made education)’이 시행될 수 있었으며, 일반 강의에서는 충분히 할 수 없었던 다양한 관점의 설명 및 시도가 가능했다. R&E 프로그램에서는 학생들이 선정한 주제와 관련된 (적정 수준의) 연구가 진행된

다. 연구에서는, 통상적으로 ① 연구주제와 관련된 기초 지식을 습득하는 과정과, ② 이 지식을 연구할 특정 문제에 적용하는 부분이 병행하여 나타난다. 연구가 본격적으로 진행될 때에는 후자(곧, 적용의 부분)에 집중적인 투자가 이뤄지며, 토론 및 의견 교환 등이 나타난다. 한편, 본 논문에서 언급하는 특수 상대론 교육은 기초 지식의 습득에 해당한다. R&E 과제의 효율적 수행을 위해 강의의 필요성은 상대론 교육에서 무시할 수 없었다. 하지만, 소수의 학생으로 구성된 R&E 팀이라는 특성을 충분히 살려서, 교수와 학생들 사이의 문답 및 토론, 올바른 개념의 형성 및 오개념의 교정을 위한 과제물 부여 등의 복합적인 과정을 통해 교육할 수 있었다. 따라서 본 논문에서는 R&E 프로그램 전체를 연구의 대상으로 본 것이 아니며, R&E 연구 주제의 기초 교육인 상대론의 교육에 제한하여 학생들에게 미치는 효과 등을 살펴보고자 했다는 것을 주지하기 바란다.

내용적인 측면에서 볼 때, 학생들이 상대론이라는 맥락에서 고전 역학을 이해하는데 큰 어려움이 없는 것으로 보인다. 대학 2학년에서 보통 배우는 “고전 역학”이라는 교과목은 뉴턴 방정식이라는 미분 방정식을 다양한 물리적 상황과 대상에 적용하여 풀이하고 분석하는 것을 주된 내용으로 하기 때문에, 고등학생 과학영재라도 이러한 내용을 습득하는 데에는 충분한 시간이 필요할 수 있다. 하지만, “고전적 상대론”(Classical Theory of Relativity)에서는 미분 방정식을 풀지 않고 단지 뉴턴 방정식

식 $m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = \vec{F}$ 의 “형식”(form)만을 고려해도 논의를 진행시키는데 어려움이 없

다. 이 때 고등학교 수준의 수학 및 물리에서 사용되는 벡터, 미분 및 좌표 변환 정도의 개념만 있으면 충분하다. 따라서 학생들이 비교적 용이하게 고전적 상대론을 이해할 수 있었다. 한편, 고전적 상대론을 다루면서 학생들이 “물리 법칙의 형식”이라는 개념에 친숙하게 되었다. 그 결과, 상대성 원리를 다른 물리 법칙(예를 들어, 맥스웰 방정식)에 적용한다는 개념에 도달할 수 있어서 로렌츠 변환의 유도 원리를 이해할 수 있었다. 특수 상대론에 관한 교육 내용은, 대학 일반 물리학(예를 들어, Halliday, Resnick & Walker, 2001) 및 현대 물리(예를 들어, Bernstein, Fishbane & Gasiorowicz, 2000) 정도의 내용 중 일부를 사용하여 학생들의 수준을 적절히 고려함으로써 구성되었다. 또한, 상대성 원리, 시공간 좌표 변환의 유도 및 내용들의 논리적 전개 등에서는 지도 교수가 고유하게 고안한 내용을 첨가하였다. 내용들은 상대성 원리를 주요 관점으로 하여 그것의 물리학 이론에로의 적용 및 실험의 역할이란 부분들로 배열되었다. 특히, 상대성 원리는 상대성 이론의 핵심 원리이지만 일반적인 교과서(예를 들어, Bernstein, Fishbane & Gasiorowicz, 2000)에서조차도 충분히 다루이지

않고 간략하게 진술하고 넘어가는 실정이므로, 본 연구에서 상대성 원리의 교육의 효과를 추정해 볼 수 있을 것으로 보인다. 특수 상대론에 관한 교육 내용은 <표 1>과 같이 간략하게 형식화될 수 있다.

<표 1> 특수 상대론 관련 교육 내용

특수 상대론 관련 교육 내용
- 이론들 간의 차이점과 유사점 비교를 목표로 함
1) 상대성 원리의 개념, 물리 법칙의 형식 및 관성계 2) 대칭성으로서의 상대성 원리 3) 상대성 원리의 타당성 및 유용성
1) 상대성 원리의 뉴턴 방정식으로의 적용 2) 갈릴레이 변환의 유도 원리 3) 갈릴레이 변환의 특성 분석 및 속도 변환
1) 역사적 배경: 맥스웰 방정식, 고전적 관점의 에테르의 존재성과 특성 2) 광속 관련 실험들: 피조의 실험, 마이컬슨-몰리 실험 3) 광속 불변과 고전적 상대론 사이의 모순점 해결(대응 원리의 관점에서의 확장)
1) 상대성 원리의 맥스웰 방정식으로의 적용 2) 광속 불변 및 형식 불변성 3) 로렌츠 변환의 유도 4) 고전적 상대론과의 비교(동시성, 시간 간격, 물체의 길이, 속도 변환 등) 5) 4차원적 운동학 및 동역학 6) 쌍둥이 역설 7) 추상성과 수학적 기술의 관점에서 일반 상대론과의 비교

특수 상대론(Special Theory of Relativity)의 교육 내용의 체계는 크게 다섯 부분으로 구성된다. 첫째 부분은, 특수 상대론과 관계된 역사적 고찰에 관한 것이며 과학사적 측면에서 이론들의 공통점과 차이점 분석을 목표로 하였다. 둘째 부분은, 물리법칙이 만족해야 하는 상대성 원리에 관한 것이다. 상대성 원리는 “물리 법칙은 모든 관성계에서 동일한 형식으로 나타난다”—이것은 대칭성(symmetry)과도 관련된다—is 것을 의미하며, “한 관성계”에서 발견된 방정식은 “다른 모든 관성계”에서도 동일하게 성립한다는 유용성을 산출한다. 이러한 유용성의 관점에서 다양한 자연 현상들에 상대성 원리를 구체적으로 적용할 수 있다. 셋째 부분은, 상대성 원리를 뉴턴의 운동 방정식에 적용한 고전적 상대론이다. 뉴턴 방정식을 자연의 물리 법칙으로 인정하여 형식 불변의 원리를 적용함으로써 시간과 공간 좌표 사이의 변환인 갈릴레이 변환을 유도할 수 있고, 이로부터 속도 변환도 쉽게 구할 수 있다. 넷째 부분은, 갈릴레이 변환의 타당성에 큰 타격을 입힌 광속 불변의 원리에 관한 것이다. 빛의 경우, 임의의 관성계에 대한 속력이 항상 $c (\approx 3 \times 10^8 \text{ m/s})$ 가 되어 속도의 갈릴레이 변환이 더 이상 적용되지 못하기 때문에, 고전 물리학의 타당성에 영향을 주게 된다. 그리고 고전 물리학의 수정 방법과 관련하여 보어의 대응 원리(Correspondence Principle)를 다루었다. 마지막 부분은, 특수 상대론에 관한 것이다. 특수 상대론에서는 상대성 원리를 빛에 관한 이론인 맥스웰 방정식에 적용함으로써 두 관성계 사이의 좌표 변환인 로렌츠 변환을 얻게 된다. 다시 말해, 상대성 원리가 적용되는 물리 법칙 자리에 뉴턴 방정식 대신 맥스웰 방정식이 들어감으로 인해 고전적 상대론의 갈릴레이 변환과는 다른 로렌츠 변환을 얻게 된다. 또한 로렌츠 변환의 결과로 나타나는 다양한 상대론적 특성들(예, 동시성의 상대성, 시간 지연, 길이 수축, 질량-에너지 등가)을 다루었다.

3. 서술형 개념 조사 문항

서술형 문항은 20개의 사전 검사 문항과 중복되지 않으면서 그 문항과 관련된 중요 개념에 관한 것이다. 각 서술형 문항은 교육을 통해 학생들이 충분히 익숙해진 표현들을 사용하여 만들어졌기 때문에, 학생들이 각 문제가 의미하는 바를 파악하는데 큰 어려움은 없었다. 사후 검사에서 사용된 서술형 문항 및 관련된 물리적 의미는 다음과 같다:

- a. 상대성 원리의 뜻을 관측자와 물리 법칙이라는 개념을 사용하여 기술하라. (관련된 물리적 의미: 상대성 원리는 물리 법칙의 형식이 모든 관성계에서 동일함을 뜻한다.)
- b. 뉴턴 방정식을 이용하여, 상대성 원리가 물리 법칙이 만족해야 할 참된 원리임을 설명하라. (관련된 물리적 의미: 뉴턴 방정식은 여러 관성계에서 광속보다 느린 속력의 운동에 대해 잘 적용됨이 많은 실험을 통해 입증되었으므로, 뉴턴 방정식을 물리 법칙의 한 예로 하여 상대성 원리의 정당함을 추측해 볼 수 있다.)
- c. 상대성 원리와 뉴턴 방정식과 관련하여 갈릴레이 변환의 유도 원리를 설명하라. (관련된 물리적 의미: 갈릴레이 변환은 뉴턴 방정식이 상대성 원리를 만족한다고 할 때 산출되는, 위치와 시간의 좌표 변환이다.)
- d. 갈릴레이 변환에서 시간의 변환이 인간에게 주는 물리적 의미를 쓰라. (관련된 물리적 의미: 시간은 갈릴레이 변환에 의해 변화하지 않으므로, 두 사건사이의 시간차는 모든 관성계에서 동일하다.)
- e. 광속도 불변이라는 실험적 사실이 뉴턴의 방정식에 미치는 영향을 상대성 원리의 관점에서 설명하라. (관련된 물리적 의미: 갈릴레이 변환에 의한 빛의 속도 변환은 관성계 마다 다른 값을 줄 수 있다. 따라서 광속 불변은 갈릴레이 변환의 오류를 드러낸 것이며, 그것의 유도 원리 중 하나인 뉴턴 방정식의 참됨을 부정할 수 있는 가능성을 제시한다.)
- f. 마이컬슨-몰리 실험이 갈릴레이 변환으로 표현되는 고전적 상대성 이론에 미친 영향을 설명하라. (관련된 물리적 의미: 마이컬슨-몰리 실험에서 위상차가 관찰되지 않은 것은 속도의 갈릴레이 변환 또는 빛의 매질인 에테르의 존재를 부정한다.)
- g. 로렌츠 변환을 유도하는 기본 원리와, 그것을 기본 원리로 한 이유를 쓰라. (관련된 물리적 의미: 갈릴레이 변환의 유도 원리와 동일한 맥락에서 취급할 수 있으며, 뉴턴 방정식을 맥스웰 방정식으로 대체하면 로렌츠 변환을 얻을 수 있다. 한편, 갈릴레이 변환에 의해 맥스웰 방정식의 형식이 변화되므로, 상대성 원리의 관점에서 볼 때 두 방정식이 모두 물리 법칙이 될 수 없어서 둘 중에서 하나만을 물리법칙으로 선택해야 한다는 것을 의미한다. 광속 불변은 로렌츠 변환을 관성계 사이의 참된 좌표 변환으로 받아들여야 하는 근거가 된다.)

- h. 고전 상대론과 특수 상대론에서, 관찰자에 따라 동시성이 어떻게 되는지 설명하고, 차이가 있다면 그 이유를 쓰라. (관련된 물리적 의미: 갈릴레이 변환과는 달리 로렌츠 변환에 의한 시간의 변환은 위치 좌표를 포함하고 있어서, 다른 위치에서 발생한 사건의 경우 한 관성계에서의 동시성이 다른 관성계에서의 성립하지 않을 수 있다.)

4. 결과 분석 방법

각 문항들이 특수 상대론에서 갖는 의미를 보다 분명하게 보이기 위해, 앞에서 제시한 특수 상대론 교육 내용을 중심 틀로 삼아서 <표 2>와 같이 “문항들의 체계”를 구성하였다. 단, 여기서 주의할 것은 이 체계는 특수 상대성 이론과 관련된 모든 개념들의 유기적 체계는 아니며—이런 점에서는 <표 1>의 교육 내용이 보다 적절하다—조사에 사용된 문항에 맞춘 “축약된” 형태의 체계라는 점이다. 이 체계는 교육 내용 중의 첫째 부분인 역사적 고찰을 제외한 나머지 네 부분(상대성 원리, 고전적 상대론, 광속 불변, 특수 상대론)으로 구성된다. <표 1>의 교육 내용을 구성하는 각 개념에 맞춰서 조사에 사용한 문항들을 분류하여 각 문항별 사례분석 및 개념 분석을 시행하였다. <표 2>에서, 위 개념들의 체계에 해당하는 문항들이 소괄호 안에 표시되어 있다. 서술형 8개 문항은 a부터 h까지 알파벳 소문자로 표기하였다. ‘표준검사도구’의 특수 상대성 이론에 관한 20개 문항은 원래 검사지의 “현대물리3” 및 “현대물리4” 단원에 속한 것으로서, 단원명과 검사지에 표기된 번호를 그대로 사용하여 표기하였다. 예를 들어, 현대물리3 단원의 제2문항은 “3-2”로 표현된다.

<표 2> 특수 상대론 관련 문항들의 체계 및 문항별 개념 조사

상대성 원리	상대성 원리의 “추상적” 개념(a)			5			
	상대성 원리의 타당성(b)			1	##		
	상대성 원리의 “구체적” 적용	운동 제1법칙(3-2)		6	6		
		운동 제2법칙(3-4)		3	6		
		운동 제3법칙(3-6)		7	7		
		쿨롱의 법칙(3-7)		2	7	***	
		전자기 유도(3-8)		3	6	***	
		빛의 굴절(3-9)		3	6	***	
물의 끓음(3-10)		6	7				
고전적 상대론	갈릴레이 변환의 유도 원리(c)			1	##		
	시간 좌표의 갈릴레이 변환(d)			7			
	속도의 갈릴레이 변환	물체의 속도 변환	(3-11)	6	5		
			(4-1)	6	7		
			(4-2)	6	5		
		역학적 파동의 속도 변환	(4-3)	4	6	***	
			참고 문항 (4-4)	3	1	*	
광속 불변	광속 불변의 개념 (빛의 속도 변환)	(4-5)	7	7			
		(4-6)	7	7			
	광속 불변이 뉴턴의 법칙 및 고전적 상대론에 미친 영향(e)			2	##		
	마이컬슨-몰리 실험이 고전적 상대론에 미친 영향(f)			6			
특수 상대론	로렌츠 변환의 유도 원리(g)			5			
	동시성의 상대성(h)			5			
	속도의 로렌츠 변환	물체의 속도 변환(3-12)	(3-12)	3	5	***	
			(3-13)	5	7		
			빛의 속도 변환	(4-5)	7	7	
				(4-6)	7	7	
	시간 지연(쌍둥이 역설)(4-8)			5	6		
	상대론적 동력학 (관찰자의 속력 제한)	(4-9)		1	3	**	
(4-10)		4	7	***			

학생들이 특수 상대론 교육에 참여하기 전에 사전 검사를 실시하여, 7명의 학생들이 객관식 문제에 대해 제시한 답과 그 답을 선택한 간략한 이유로부터 답이 틀리거나 이유 서술이 잘못된 경우를 분석하였다. 그리고 사후 검사에서는, 사전 검사 문항과 관련된 개념 중에서 '표준검사도구' 문항에 없는 경우에 대해 만든 서술형 문항을 이용하여 7명의 학생들이 제시한 답과 그 이유들 중에서 답이 틀리거나 이유 서술이 잘못된 경우를 분석하였다. 또한, 면담을 통해 학생들의 개념에 대한 이해 정도를 보다 분명하게 파악할 수 있었다. 학생들의 개념 변화와 면담 자료를 이용한 사례분석을 통하여 개념 이해를 분석하였다.

III. 연구 결과

1. 이해도 변화 분석

여기에서, 우리는 특수 상대론의 교육이 학생들에게 미치는 효과를 사전 및 사후 검사를 비교함으로써 검토하고자 한다. 물론, 7명이라는 소수의 학생을 대상으로 교육하였기 때문에 일반화하기 어려운 부분이 있지만 어느 정도의 경향성을 파악할 수 있을 것으로 보인다. 특수 상대론의 교육에서 특징적인 부분은 상대성 원리의 교육이었다. 상대성 원리는 아인슈타인이 자신의 특수 상대성 이론을 확립하기 위해 상정한 핵심 원리이지만, 대학에서 사용되는 일반적인 현대물리 교과서(예들 들어, Bernstein, Fishbane & Gasiorowicz, 2000)에서조차 이 원리에 대한 간단한 서술만 있고 의미에 대한 추가적인 논의가 부족하다. 따라서 본 연구를 통해 상대성 원리의 교육의 효과를 <표 2>의 '상대성 원리의 구체적 적용'에 포함된 문항 분석 등을 통해 어느 정도 추측할 수 있을 것으로 보인다. 또한 상대성 원리를 물리 이론에 적용함으로써 산출되는 좌표 변환과 관련된 다양한 개념 및 현상에 대한 이해도 변화를 살펴본다.

각 개념과 관련된 문항별 정답자 수는 <표 2>와 같다. <표 2>에 나타난 개념들은 이해 정도 변화의 특징에 따라 크게 4가지로 분류하여 분석할 수 있다. 단, 분류의 기준이 되는 정답자 수는 5명으로 한다. 첫째 유형의 개념은, 사전 조사에서의 정답자 수가 5명 미만이었으나 사후 조사에서 정답자 수가 5명 이상이 되어 정답자 수가 많이 증가한 개념(***로 표시됨)이다. 둘째 유형의 개념은, 사전 조사에서 5명 미만이었

으나 사후 조사에도 5명 미만으로 정답자 수가 작게 증가한 개념(**로 표시됨)이다. 셋째 유형의 개념은, 사전 조사에서 5명 미만이었으며 사후 조사에서도 5명 미만으로 정답자 수가 감소한 개념(*로 표시됨)이다. 이 문항(문항 번호 4-4)은 앞에서 말한 이유로 인해 특수 상대론 강의 내용에는 포함되지 않았고, 4-3번 문항과의 대조를 위해 “참고 문항”으로 다뤄졌다. 마지막으로, 사후 조사 서술형 문항에서 정답자 수가 5명 미만인 개념(#로 표시됨)을 분석하였다. 이 네 가지에는 포함되지는 않았지만 사후 조사에서 정답자 수가 1명 감소한 두 개의 문항(문항 번호 3-11 및 4-2)이 있었는데, 감소 이유는 모두 계산상의 실수였다. 그러므로, 특수 상대론 교육 전후에 실시된 사전 조사와 사후 조사를 비교해볼 때, (강의 내용에서 배제된 문항과 계산 실수와 같은 사소한 경우를 제외하면) 상대론적 개념들에 대한 학생들의 이해 정도가 교육을 통해 전반적으로 향상되었다고 할 수 있다.

가. 사후 검사에서 정답자 수가 많이 증가한 개념들

사전 조사에서 정답자 수가 작았으나 사후 조사에서 정답자 수가 많이 증가한 개념들(***)로 표시됨)로는 크게 세 부분으로 분류된다. 첫째 부분은, ‘상대성 원리의 구체적 적용’으로 분류되는 클롱의 법칙, 전자기 유도, 빛의 굴절을 포함한다. 둘째 부분은, ‘두 관성계 사이의 속도 변환’과 관계된 역학적 파동의 속도 변환 및 물체의 속도 변환으로 구성된다. 마지막으로, ‘상대론적 동역학’과 관계된 관찰자의 속력 제한에 관한 것이 있다. 사전 조사에서 이 개념들에 대한 정답자 수가 작았던 이유들은 다음과 같다. 상대성 원리의 경우, 학생들이 그 원리를 충분히 알고 있지 않아서 각 문항과 관계된 물리 법칙의 형식 불변성을 사용하지 못하였다. 속도 변환의 경우, 파동의 속도 변환이 물체의 속도 변환과 동일하다는 것과 속력이 광속에 가까운 경우에서의 속도 변환이 상대론적으로 수정되어야 한다는 것을 인식하지 못하였다. 또한, 0이 아닌 질량을 가진 관찰자가 광속 이상의 속도를 낼 수 없다는 것을 문제에 적용하지 못하는 경우가 나타났다. 그러나 사후 조사에 의하면 학생들이 강의를 통해 이러한 개념들을 충분히 이해하게 된 것으로 나타났다. 특히, 본 연구에서 특징적으로 투입된 상대성 원리의 교육의 효과는 두드러지게 나타났다고 할 수 있다.

나. 사후 검사에서 정답자 수가 작게 증가한 개념

사전 조사에서 정답자 수가 작았으며 사후 조사에서도 정답자 수가 약간 증가하였으나 여전히 작은 문항(**로 표시됨)으로 ‘관찰자의 속력 제한’에 관한 4-9번 문항이

있다. <표 3>을 참고하라. 그런데, 동일한 개념(공, 관찰자의 속력 제한)과 관련된 4-10번 문항은 4-9번 문항과는 달리 <표 2>에서 보듯 정답자 수가 많이 증가하였다. 이러한 차이는, “빛의 속도보다 더 빨리”라는 표현이 있는 4-10번 문항에는 ‘0이 아닌 질량을 가진 관찰자는 광속 이상으로 움직일 수 없다’는 원리를 “더 빨리”라는 표현 때문에 보다 잘 적용하지만, 4-9번 문항의 경우 “빛의 속력과 똑같이”라는 표현이 있는 4-9번 문항에는 같은 원리를 동일한 정도로 적용하지 못하는데 기인한다.

<표 3> 4-9번 문항과 4-10번 문항(표준검사도구 검사지의 표현들을 인용함)

빛의 속력은 30만 km/s이다.
4-9. 만일 빛의 속력과 똑같이 날아가면서 빛을 관찰한다면 빛이 어떻게 보일까? ① 빛이 정지해서 보일 것이다. ② 역시 30만 km/s로 날아가는 빛을 보게 될 것이다. ③ 빛의 속도로 똑같이 날아갈 수가 없다. ④ 기타 ()
4-10. 만일 빛의 속도보다 더 빨리 날아가면서 빛을 관찰한다면 빛이 어떻게 보일까? ① 과거의 빛을 볼 수 있을 것이다. ② 역시 30만 km/s로 날아가는 빛을 보게 될 것이다. ③ 빛의 속도 이상으로 날아갈 수가 없다. ④ 기타 ()

다. 사후 검사에서 정답자 수가 감소한 개념

사전 조사에서 정답자 수가 적었으며 사후 조사에서 정답자 수가 감소한 문항(*로 표시됨)으로 ‘역학적 파동(mechanical wave)의 속도 변환’에 관한 것이 있다. “참고 문항”인 4-4번 문항은, 4-3번 문항과는 달리 매질에 대해 음원이 움직이고 관찰자가 정지한 경우에 대한 것이다. 그러므로, 4-4번 문항의 그 관찰자에 대한 음파의 속력을 구하라는 질문에 대해서 4-3번 문항에서처럼 갈릴레이 변환을 적용해서 음파의 속력을 계산함으로써 답할 수 없다. 이것은 이 문항은 특수 상대론 관련 문항에 포함시키기 어렵다는 것을 의미하므로, 강의 내용에 포함되지 않았다. 학생들이 이러한 사항을 충분히 인식하지 못한 채로 물체의 속도 변환 공식을 지나치게 신뢰하여 적용함으로 인해 4-4번 문항의 경우 정답자 수가 오히려 감소하였다. 이러한 지나친 적용은 음원이 운동할 때의 역학 분야에서의 파동 속도에 대한 개념 정립의 부족과 연관될 수 있다.

라. 사후 조사 서술형 문항에서 정답자 수가 작은 개념들

사후 조사의 서술형 문항에서 정답자 수가 5명 미만인 개념들로서 상대성 원리의 타당성, 갈릴레이 변환의 유도 원리, 그리고 광속 불변이 뉴턴의 법칙 및 고전적 상대론에 미친 영향에 관한 것들이 있다. 이 중에 특이한 것으로서 갈릴레이 변환의 유도 원리를 묻는 c번 문항을 들 수 있다. 갈릴레이 변환은 상대성 원리를 뉴턴 방정식에 적용함으로써 얻어지고, 로렌츠 변환은 상대성 원리를 맥스웰 방정식에 적용함으로써 구해진다. 맥스웰 방정식 보다 뉴턴 방정식에 훨씬 더 친숙함에도 불구하고, 학생들은 덜 친숙한 맥스웰 방정식에 적용하는 문항(문항 번호 g)보다 적은 정답자 수를 보였다. 이는 학생들이 로렌츠 변환과 갈릴레이 변환의 유도 원리에서의 공통점(곧, 어떤 방정식에 상대성 원리를 적용한다는 부분)을 인식하지 못한 것에 기인한 것으로 생각된다.

2. 개념별 사례 분석

여기서 우리는 상대성 이론 관련 중요 개념에 대해 학생들이 가지고 있는 이해 정도, 오개념의 원인 분석 및 교정 등을 사례를 통해 살펴본다. 여기서 분석된 사례는 통상적으로 발생할 수 있는 것들이어서 실제 교육 현장에서 유용할 것으로 보인다.

가. 상대성 원리

<표 2>의 분석표에 보듯 ‘상대성 원리의 뜻’을 기술하는 문항(문항 번호 a)을 대부분의 학생들은 바르게 풀이하였다. 한 학생의 “관성의 법칙에서 모든 관측자”라는 표현은 ‘모든 관성계’로 표현되어야 한다. 이와 같은 경우에는 정교한 표현과 의미 제시를 통해서, 인지하지 못하는 부분을 깨닫게 할 필요가 있다. 다른 학생의 경우, ‘광속 불변’을 상대성 원리의 정의에 포함시켰다. 광속 불변은 상대성 원리와 별개의 원리로서 상대성 원리를 맥스웰 방정식에 적용하는 것이 옳바르다는 것을 입증하며, 상대성 원리와 함께 특수 상대론의 공리계를 구성한다. 이 경우, 특수 상대론과 상대성 원리의 차이점을 분명하게 인지시키는 것이 필요하다. 물리학 이론이 가지는 표현에 대한 해석 방법과 그것의 적용 범위에 대한 학습이 필요한 것으로 생각된다.

‘상대성 원리의 타당성’에 대한 조사는 물리 법칙의 형식이 관성계에 따라 변할 수 없다는 상대성 원리가 자연의 원리가 될 수 있는지에 관한 문항(문항 번호 b)에서 다루졌다. 대부분의 학생들이, 뉴턴 방정식을 예로 하여 상대성 원리를 적용했을 때 구

해지는 갈릴레이 변환이 두 관성계 사이의 상대 속도가 광속보다 충분히 작은 경우에 유효한 시공간 좌표 변환임을 보임으로써 상대성 원리의 적절성을 이끌어 내지 못했다. 이것은, 학생들이 어떤 방정식의 형식이 변하지 않도록 하는 변환을 찾아낸다는 점을 충분히 인식하지 못하여 갈릴레이 변환이 고전 역학적 영역에서 타당한 원리임을 제시하지 못한 것으로 생각된다.

‘상대성 원리의 “구체적” 적용’이란 부분에서는 뉴턴의 역학 법칙(문항 번호 3-2, 3-4 및 3-6), 쿨롱의 법칙(문항 번호 3-7) 및 전자기 유도(문항 번호 3-8), 빛의 굴절(문항 번호 3-9), 물의 끓음(문항 번호 3-10)과 관련된 물리 법칙들에 상대성 원리를 적용할 수 있는가를 분석하였다. 뉴턴의 운동 법칙에 관한 적용의 경우, 사전 및 사후 조사 모두에서 상대성 원리의 적용을 잘 알고 있었다. 하지만 전자기 유도, 빛의 굴절에 대한 적용의 경우, 사전 조사 결과에 비해서 사후 조사에서는 두드러지게 잘 적용하는 사례를 보인다. 이러한 향상은 특수 상대론 교육의 결과로 보인다. 상대성 원리의 ‘쿨롱의 법칙’에로의 적용에 관한 문항의 경우, 두 학생이 사후 조사에서 정답은 제시하였으나, 면담 조사에서 한 물체를 두 사람이 관측하는 경우를 상대성 원리의 적용과 혼동하는 설명을 제시한 사례가 있었다. 이러한 혼동은 뉴턴의 운동 3법칙, 전자기 유도 현상 및 빛의 굴절 현상 그리고 물의 끓음에 관한 적용 문항에서도 나타났으며, 상대성 원리에 대해 자주 발생하는 오류들이다.

나. 고전적 상대론

‘갈릴레이 변환의 유도 원리’(문항 번호 c)는, 갈릴레이 변환은 상대성 원리를 뉴턴 방정식에 적용한 결과로서 산출되는 두 관성계 사이의 시간 및 공간 좌표들의 변환이라고 표현될 수 있다. 그러나 이 문항 관련 결과들을 분석해 보면, 대부분의 학생들이 갈릴레이 변환식—예를 들면, $t' = t$, $x' = x - ut$. 단, u 는 한 관성계의 x 축 방향으로 움직이는 다른 관성계의 속도이다—은 제대로 썼지만, 상대성 원리의 타당성에 관한 문항(문항 번호 b)과 마찬가지로 문제를 잘 해결하지 못했다. 이와 유사한 문항인 로렌츠 변환의 유도 원리를 묻는 문항(문항 번호 g)의 정답자가 5명인 것과 두드러지게 대조된다. g번 문항의 답은 “맥스웰 방정식에 상대성 원리를 적용함으로써 로렌츠 변환을 얻어 낸다”로 요약된다. 여기서의 “맥스웰 방정식”을 “뉴턴 방정식”으로 바꾸면, 갈릴레이 변환의 유도 원리(곧, b 문항의 답)가 되는데, 특이하게도 대부분의 학생들이 이러한 방법론적 공통점을 인식하지 못했다.

‘두 관성계 사이의 시간 좌표의 갈릴레이 변환($t' = t$)’이 암시하는 바와 관련된 문항(문항 번호 d)에서는, 모든 학생들이 고전적 상대론에서 두 사건의 시간차가 모든 관성계에 대하여 동일하다는 것을 잘 이해하고 있다. 이것은 학생들이 수식에서 물리적 의미를 잘 찾아내었다는 것을 보여 준다. 또한, 사전 및 사후 조사에서 ‘물체의 속도의 갈릴레이 변환’(문항 번호 3-11, 4-1 및 4-2) 역시 대부분의 학생들이 잘 이해하고 있는 개념으로 나타났다. 특이한 경우로, 사전 조사에서 갈릴레이 변환을 속력이 광속보다 충분히 작은 경우에 적용할 수 있는 가능성을 포기하였으나, 사후 조사에서 강의를 통해 교정된 학생이 있었다. 또한, 속도 변환 공식을 잘못 적용한 사례가 사후 조사에서 나타났다. 다음으로, 위의 “물체”의 속도 변환 대신 “역학적 파동”의 속도에 대한 갈릴레이 변환(문항 번호 4-3)에 관한 분석 결과는 다음과 같다. 4-3번 문항은 매질에 대해 움직이는 관찰자가 매질에 대해 정지한 음원이 발생하는 음파를 관찰하는 경우에 대한 것이다. 이 경우에는 물체의 속도 변환과 동일한 변환을 적용할 수 있다. 하지만, “물체”와 “파동”의 차이를 지나치게 크게 인식해서, 사전 조사에서는 ‘물체의 속도 변환’ 관련 문항보다 작은 수의 정답자가 나왔다. 사전 조사에서 파동의 속력에 대한 오개념—예를 들면, “진동수 및 파장의 불변성으로 속력 340 m/s로 일정하다”와 같은 이유 제시가 있음—과 속도 변환에 대한 이해가 부족한 서술을 제시한 사례들이 있었다. 한편, 4-3번 문항과는 달리 매질에 대해 정지한 관찰자가 매질에 대해 움직이는 음원에 발생하는 파동을 관찰하는 문항이 있었다. 이 문항은 4-3번 문항에서 다루진 파동 속도의 갈릴레이 변환보다는 오히려 역학적 파동의 전파 속도의 개념을 묻는 문항에 가깝다. 곧, 상대론의 영역 보다는 매질에서의 파동 전파에 대한 오개념 분석에 포함시키는 것이 더욱 적절하다고 할 수 있다. 그래서 이 경우는 강의 내용에 포함되지 않았다. 그러나 4-4번 문항은 4-3번 문항과 대조적인 상황을 보이므로, 일종의 “참고 문항”으로 포함시켰다. 사전 및 사후 조사를 통해서, 대부분의 학생들이 매질 속에서 전달되는 역학적 파동의 속도에 대한 개념이 부족한 것으로 나타났다.

다. 광속 불변

‘광속 불변’—광속의 로렌츠 변환과 관련됨—에 대한 문항(문항 번호 4-6)에서 학생 전원이 사전과 사후 조사에서 객관식 문항의 정답을 제시하여서, 광속 불변에 대해 잘 알고 있다고 할 수 있다. 하지만, 객관식 문제의 답은 맞췄지만, 이유 제시에 있어서 광속 불변의 개념을 정확히 적용하지 못하는 경우와 증력에 대한 이론인 일반 상

대론의 기초가 되는 등가 원리로 설명하려는 경우가 나타났다. ‘광속 불변이 뉴턴의 법칙에 미치는 영향’에 대한 문항(문항 번호 e)의 경우, 사후 조사 서술형 문항에서 정답자의 수가 2명으로 매우 작아서, 광속 불변이 고전 역학에 끼친 파급 효과는 다소 이해하기 어려운 개념으로 볼 수 있다. 빛의 속력이 모든 관성계에 대해 동일하다는 사실에 의해 고전적 속도 변환을 주는 갈릴레이 변환이 수정되어야 하며, 결국 $m\vec{a} = \vec{F}$ 라는 뉴턴의 방정식은 더 이상 자연의 “완전한 법칙”(truth)이 아니라 특정 영역에서만 성립하는 “근사 이론”이기 때문에 상대론적으로 수정되어야 한다는 것을 학생들이 충분히 이해하지 못했다. 하지만 ‘마이컬슨-몰리 실험이 고전적 상대론에 미친 영향’(문항 번호 f)에 대해서는 거의 모든 학생들이 이해하고 있었다.

라. 특수 상대론

‘로렌츠 변환의 유도 원리’(문항 번호 g)는 앞에서 분석했던 문항 “c. 갈릴레이 변환의 유도 원리를 설명하라.”에 대응하는 것이다. 유도 원리에 관한 질문에 대해, 광속이 일정하도록 하는 시공간 좌표들의 변환이라는 다른 관점으로 설명을 제시한 경우와 문제를 이해하지 못했으나 올바른 형태의 로렌츠 변환 $x' = (x - ut)/\sqrt{1 - u^2/c^2}$, $t' = (t - ux/c^2)/\sqrt{1 - u^2/c^2}$ 을 기록한 경우가 있었다. 이 로렌츠 변환과 관련하여, 대부분의 학생들이 ‘동시성의 상대성’(문항 번호 h)을 시간 좌표에 대한 갈릴레이 변환과 로렌츠 변환의 차이로부터 이해하고 있었다. ‘물체의 상대론적 속도 변환’ 관련 문항(문항 번호 3-12)의 경우, <표 2>에서 보듯이 사후 조사에서 정답자 수가 많이 증가한 것으로 볼 수 있다. 그러나 사후 조사 및 면담 조사에서 속도 변환을 잘 이해하지 못하며, 질량을 가진 물체가 광속 이상의 속도로 움직일 수 없음을 적용하지 못한 경우가 나타났다. 한편, ‘빛의 속도 변환’(문항 번호 3-13, 4-5 및 4-6)에 관한 개념은 <표 2>에서 보듯 3개의 문항 모두 사전 및 사후 조사에서 모든 학생들이 잘 이해하고 있는 것으로 나타났다. ‘시간 지연’과 관련된 쌍둥이 역설에 대한 문항(문항 번호 4-8)의 경우—이 역설에서는 관성계와 비관성계의 차이를 인식하는 것이 중요하다—대부분의 학생들이 사전 및 사후 조사에서 객관식 문항의 정답을 제시하였다. 한 학생의 경우, 사전 조사의 이유 제시에서는 “쌍둥이 역설이 이론적으로 불가능하다”고 진술하였으나 사후 조사의 이유 제시에서는 “관성계가 존재하지 않아 관찰자에 따라 다르다”고 기술함으로써, 이해에 이르지 못하고 한 오개념에서 다른 오개념으로 천이하는 양상을 보였다. 또한, ‘상대론적 동역학(관찰자의 속력 제한)’에서는 질량을 가진

관찰자가 광속 이상의 속력으로 움직일 수 없다는 사실과 관련된 문항(문항 번호 4-9 및 4-10)을 다룬다. 관찰자가 “정확하게 광속으로” 움직이는 경우에 관한 문항(문항 번호 4-9)에서는, <표 2>에서 보았듯이 사전 및 사후 조사 모두에서 정답자 수가 작았다. 이것은 대부분의 학생들이 질량을 가진 관찰자가 광속 이상의 속도를 내려면 무한대의 에너지가 필요하므로, 그러한 운동이 현실적으로 불가능하다는 원리를 충분히 적용하지 못했다는 것에 기인한다. 한편, 관찰자가 빛보다 빨리 움직인 경우(문항 번호 4-10), 사후 조사에서 7명 전원이 정답을 제시함으로써 인해 질량을 가진 물체가 “광속보다 큰 속력으로” 운동할 수 없다는 개념을 명확히 알고 있음을 볼 수 있다. 이러한 현상은, 학생들이 동일한 원리를 광속으로 움직이는 경우에 적용하지 못한 결과라 할 수 있다.

IV. 결론 및 제언

지금까지 학생 사례 분석을 통해 고등학생 과학영재의 특수상대론 교육에서 중요한 역할을 할 수 있는 개념들에 대해 살펴보았다. 상대론 관련 이해도 변화 조사 및 개념별 사례 분석의 결과는 다음과 같이 정리될 수 있다.

특수상대론 교육 시점 전후에 실시된 사전 조사와 사후 조사를 비교해 보았을 때, 학생들이 교육을 통해 상대론적 개념들을 보다 잘 이해하게 되었음을 알 수 있다. 특히 본 연구에서 특징적인 부분이었던 상대성 원리의 교육은 이해도의 향상을 촉진시킨 것으로 보인다.

개념별 사례 분석을 통해 분석된 상대론적 개념들은 다음과 같이 요약할 수 있다: 첫째, 상대성 원리의 타당성에 관한 부분에서, 거의 모든 학생들이 뉴턴 방정식을 예로 사용하여 상대성 원리의 타당성을 보여주지 못했다. 이는 학생들이 상대성 원리를 자연의 원리로서 신뢰하는데 많은 어려움이 있을 수 있음을 시사한다. 이것은 학생들이 어떤 방정식에 상대성 원리를 적용한다는 방법론을 충분히 인식하지 못함으로 인해 갈릴레이 변환이 광속보다 훨씬 작은 속력의 영역에서 타당한 좌표 변환임을 제시하지 못한 결과로 보인다. 한편, 상대성 원리의 구체적 적용 부분에서, 학생들이 처음에는 전자기 및 광학적 현상에 대하여 다양한 오류들로 인해 낮은 정답률을 보였으나, 사후 조사에 의하면 대부분의 학생들이 강의를 통해 이러한 문제들을 극복한 것

으로 나타났다. 둘째, 고전적 상대론의 부분에서, 거의 모든 학생들이 갈릴레이 변환이 상대성 원리를 뉴턴 방정식에 적용한 결과로서 산출되는 두 관성계 사이의 시간 및 공간 좌표들의 변환이라는 것을 설명하지 못했다. 상대성 원리의 타당성에 관한 문항에서처럼, 대부분의 학생들이 변환 유도에 있어서의 방법론적 공통점을 인식하지 못했고, 학생들이 이 부분에 있어서 통일적 인식 체계를 갖추기 어렵다는 것을 짐작할 수 있다. 한편, 매질에 대해 정지한 관찰자가 매질에 대해 움직이는 음원에서 발생하는 파동을 관찰하는 문항의 경우, 사전 및 사후 조사를 통해 대부분의 학생들이 매질 속에서 전달되는 역학적 파동의 속도에 대한 개념이 없는 것으로 나타났다. 단, 이 문항은 앞에서 논의한 이유로 인해 강의 내용에 포함되지 않았지만, 다른 문항과의 대조를 위해 “참고 문항”으로 다루었다. 이것은 역학적 파동의 속력에 대한 정의 및 속력 측정 방법에 대한 정확한 개념 교육의 필요성을 암시한다고 볼 수 있다. 마지막으로, 광속 불변에 대해서는 거의 모든 학생들이 잘 알고 있는 것으로 나타났다. 하지만, 광속 불변이 뉴턴의 법칙에 미치는 영향에 대한 문항에 대해 정답자의 수가 훨씬 작아서, 광속 불변이 고전 역학에 끼친 파급 효과는 이해하기 어려운 개념으로 볼 수 있다. 질량을 가진 물체가 광속 이상의 속력을 가질 수 없다는 것과 관련하여, 관찰자가 “정확하게 광속으로” 움직이는 문항에서 특별히 정답자 수가 작았다. 이와는 대조적으로, 관찰자가 “빛보다 빨리” 움직이는 문항에서는 모든 학생들이 정확하게 알고 있음을 볼 수 있다. 이러한 현상은, 학생들이 동일한 원리를 광속으로 움직이는 경우에 적용하지 못한 결과라 할 수 있다. 따라서 이러한 개념들 중에서 이해하기 어려운 것들은 특수 상대론을 고등학생 과학영재에게 교육하는데 있어서 주의 깊은 계획과 설계가 필요한 것이므로, 적절한 교육 방법을 위한 많은 탐색과 연구가 이뤄져야 할 것이다.

참고문헌

- 김익균, 여미경, 박종원(1992). *물리교육*, 10, 2.
- 박봉상, 이태우, 김수용, 신근섭, 박영도, 이상욱, 조봉제(2002). *물리II*. 대한교과서(주).
- 박재호, 정운혁, 김학수, 홍낙형(1995). *물리II*. 탐구원.
- 부산과학고등학교 홈페이지(2004). <http://www2.bsa.hs.kr/R&E.htm>.
- 서울대학교 사범대학 물리교육과 물리학습연구실(2000). *학생의 물리 개념*. 물리교육 연구자료.
- 소광섭, 박승재(1985). *물리교육*, 3, 1.
- 송진웅, 김익균, 권성기, 김영민, 오원근, 박종원(2003). 학생의 물리 오개념 지도를 위한 표준 검사 도구의 개발 및 데이터베이스 구축.
- 한국교원대학교 과학교육연구소(2001). *고급물리*. 교육부.
- French, A. P. (1968). *Special Relativity*. New York: W. W. Norton.
- Halliday, D., Resnick, R. & Walker, J. (2001). *Fundamentals of Physics*. John-Wiley & Sons, Inc.
- Kogut, J. B. (2001). *Introduction to Relativity*. Harcourt/Academic Press.
- Bernstein, J., Fishbane, P. M. & Gasiorowicz, S. (2000). *Modern Physics*. Prentice-Hall, Inc.

An investigation of students' understanding of relativity for the gifted education in science

Saebyok Bae²⁾

Institute for Gifted Students,
Korea Advanced Institute of Science and Technology,
Daejeon 305-701

Yeong-Hwa Kim and Young-Min Kim

Department of Physics Education, Pusan National University, Busan 609-735

For the education of scientifically gifted high-school students in the field of relativity, we have executed a research on the understanding of relativistic concepts through the case study of its students of Busan Science Academy appointed as a high school for the gifted education in science. We showed the analysis of the changes in students' understanding in the field of (special) relativity and their possible causes. The comparison of the pre-test and the post-test tends to support that the students attained better understanding through the instruction of relativity. Students' understanding and misconception of relativistic concepts were also investigated through the case study. The students showed low degree of understanding in the validity of the principle of relativity, the influence of the constancy of the speed of light on the classical physics, etc. It seems that the analysis of these concepts of insufficient understanding can make a contribution to designing the education of relativity for scientifically gifted students.

Key words : scientifically gifted high-school student, relativity, case study, comparison of the pre-test and the post-test

2) Corresponding author. (E-mail) sbae@kaist.ac.kr, (Fax) +82-42-869-8660, (Tel) +82-42-869-8981.