과학교육연구지, 38권 3호, pp. 569-584 (2014.12) Jour. Sci. Edu, Vol. 38, No. 3, 569-584 (2014.12)

심층 면담을 통한 고등학생들의 특수 상대론 기초 개념에 대한 이해 수준 분석

김재권 · 정진규[1] · 김영민[1]*
학성고등학교 · [1]부산대학교

An Analysis of High School Student's Understanding Level about Basic Concepts of Special Relativity through in-depth interview

Jaekwon Kim · Jinkyu Jung[1] · Youngmin Kim[1]*
Haksung High School · [1]Pusan National University

Abstract : The Purpose of this study was an analysis of high school student's understanding level about concepts of special relativity through in-depth interview. The 8 participants were 10th grade students in H high school in Ulsan city, who were interviewed and analyzed in the results of the interview about basic concepts of special relativity using achievement checklist in 6 situations(principle of constancy of light velocity, principle of relativity, relativity of simultaneity, garage paradox, rocket paradox). As results of the checklist, the participants showed high achievement in the content level of simple phenomena and simple concepts related to special relativity. But they showed low achievement in the concept level for fundamental understanding of special relativity. As results of the interview, it was found that the participants decided the order of events depending on their intuition and had a difficulty to apply the coordinate system to real situation, even though they mathematically understood it. In addition, some participants who could not understand the inertial coordinate system explained paradoxes of relativity depending on their intuition and had learner's chaos. Finally, though high school students usually being in formal operational stage, some students had difficulty to draw phenomena of space and time in two dimensional plane.

keywords : special relativity, in-depth interview, paradox, high school student, understanding level of special relativity, learner's chaos

Ⅰ. 서 론

현대 과학 기술의 빠른 발전과 다양한 영역의 융합은 새로운 과학 기술 혁명을 이끌고 있으며 국가과학기술위원회의 2006 보고서에서는 IT(Information Technology), BT(Bio-Technology), NT(Nano Technology), ST(Space Technology), ET(Environment Technology), CT(Culture Technology)에서의 첨단과학기술을 '미래 유망 신기술'로 정의하고 첨단과학기술에 대한 필요성과 이해 증진, 과학기술 교육과정에의 반영 요구들이 이어지고 있다(김영민, 이승우, 박수경, 2011; 오광택, 박종호; 2010; 조선아, 2006). 2009 과학과 교육과정에서는 과학적 소양을 바탕으로 하는 수준 높은 창의성과 인성을 골고루 갖춘 인재 육성을 목표로 설정하였다. 그러므로 2009 과학과 교육과정의 '물리Ⅰ'의 목표에서도 과학적 사고력과 창의적 문제 해결력을 강조하고 있다. '물리Ⅰ'과 '물리Ⅱ'의 내용 측면에서는 학생들

*교신저자 : 김영민(minkiyo@pusan.ac.kr)
**2014년 10월 13일 접수, 2014년 12월 8일 수정원고 접수, 2014년 12월 9일 채택

이 일상생활에 친숙한 현상이나 첨단기기에 대한 물리학의 기초 개념을 이해시키기 위하여 최소한의 현대물리 내용을 도입하여 정성적으로 이해하는 것을 목표로 하고 있다(교육과학기술부, 2009).

2009 고등학교 물리교육과정에는 상대성 이론, 반도체, 레이저, 양자물리 등의 현대 과학의 기초이론들이 도입되어 교육현장에서 지난 수년간 가르쳐져 왔지만 첨단과학의 내용은 고전역학과 전자기학의 기초 개념 위주로 교수학습이 이루어졌던 교실에 쉽게 정착되지 않고 있는 실정이다. 외국의 선행연구를 살펴보면 선행지식이 특수상대성 이론 학습에 미치는 영향(Hewson, 1982), 특수상대성 이론의 이해 정도와 학생들이 가지고 있는 모델에 대한 연구(Scherr, 2001, Scherr, 2007), 상대론을 포함한 현대 물리의 소재를 시각화하는 가상 현실 프로그램 개발 연구 (De Hosson et al, 2010, Savage & McGrath, 2010, McGrath et al, 2010), 교과서에 제시된 특수상태성 이론 교수방법 특징 분석(Arriassecq & Greca, 2007) 등 다양한 연구가 이루어졌다. 하지만 국내 연구에서는 대학생을 대상으로 초인지 학습방법을 특수상대론 기초개념 학습에 적용한 연구(박종원, 1991), 질적 질문을 이용한 특수상대성 이론 학습 효과 연구(강주희, 2007), 특수 상대성 이론 단원을 위한 수준별 시공간 그림 수업모형 개발 연구(진형욱, 2013), 특수상대론 학습에서 VR과 사건도표를 이용한 수업방법 제안(김재권, 김영민, 2011) 등이 이루어졌지만 학생들의 특수상대론에 대한 이해도가 어느 정도인지에 대한 심층 분석 연구는 거의 없다. 뉴턴역학의 '힘', '가속도' 그리고 '일'과 같은 개념들은 초등학교 과학교과서에서부터 고등학교 교과서까지 점차 표현방식을 심화하면서 많이 기술되어 있고 이들에 대한 개념 이해도에 대한 연구는 많은 반면(송진웅 외, 2004), 특수상대론을 이해하기 위한 (관성)좌표계, 시공간, 상대성의 원리, 광속불변, 동시성, 시간 팽창, 길이수축, 질량-에너지 등가 등의 개념에 대하여 중등학생을 대상으로 한 연구는 거의 없다. 이에 대해 김재권, 김영민(2011)의 연구에서는 중등학생용 특수상대론 개념검사도구로 SRCE-S(Special Relativity Concept Evaluation-Secondary)라는 선택 후 설명식 문항들을 개발하였고, 고등학생을 대상으로 SRCE-S를 이용한 분석을 통해 복합 개념(동시성, 시간, 길이)의 성취도가 단일개념(좌표계, 광속, 상대성) 성취도보다 낮게 나타나 특수 상대론의 기초 개념에 대한 이해도는 전반적으로 낮고 뉴턴역학의 힘, 속도 개념에서와 같이 자신의 감각이나 관찰에 주로 의존하는 직관적 개념을 가지고 있는 것으로 나타났다. 따라서 급격한 과학기술의 발달과 과학교육에서 다양한 첨단 과학 내용을 다루기 위해 새로이 도입된 첨단과학에 들어 있는 생소한 물리 개념에 대해 학생들이 어떠한 인식을 가지고 있으며 어느 정도의 수준으로 이해하고 있는지 알아보는 것은 과학 교육적으로 큰 의미를 가질 수 있다.

어떤 물리 개념에 대해 학생들이 어떠한 인식을 가지고 있으며 어느 정도의 수준으로 이해하고 있는지 알아보는 방법은 지필검사 방법을 통해서 할 수 있지만 이 방법을 통해서는 지식이나 이해 수준이 학생들에게 어느 정도로 내면화 되어 있는지, 그리고 어떤 부분을 특히 어려워하고 무엇이 이해를 방해하는지에 대해 심층적으로 알기 어렵다. 이를 알기 위한 방법으로 심층 면담이 많이 사용된다. 심층 면담은 질적 연구 방법의 하나이며 끝 열린(open-ended), 발견 지향적인(discovery-oriented) 방법으로, 목표로 하는 대상자들의 관점으로부터 이해 과정과 결과를 얻어내는 데 적절한 연구방법이다. 심층 면담은 한 사람의 사고와 행동에 대한 상세한 정보를 얻으려고 할 때 또는 새로운 이슈를 심층적으로 탐색하려고 할 때 적절하다. 심층 면담은 조사, 지필 검사 등과 같은 데이터 수집 방법에 비해 훨씬 상세한 정보를 얻을 수 있는 이점이 있지만 편향의 가능성, 시간의 소요, 훈련된 면담자, 일반화하기 어려움 등의 제한이 있다(Rubin & Rubin, 2004; Boyce & Neale, 2006).

본 연구자들은 이미 지필 검사를 통해 특수 상대성 이론에 대해 고등학생들이 수업 후에도 낮은 성취도를 보이는 것을 확인하였으며(김재권, 김영민, 2011), 본 논문에서는 심층면담을 통해 고등학생들이 가지고 있는 특수상대론 기초개념에 대한 이해

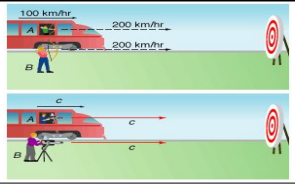
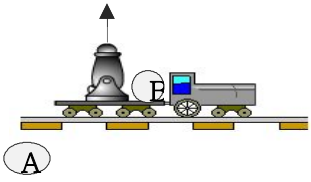
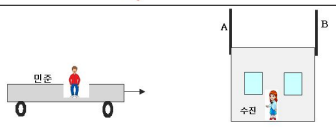
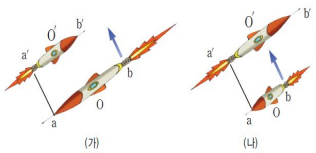
수준이 학생들에 따라 어떻게 다른지 그리고 그 원인이 무엇인지를 분석하고자 하였다.

Ⅱ. 연구방법

1. 연구 대상

본 연구에서는 2009 과학과 교육과정에서 새로이 도입된 특수 상대론 기초 개념에 대해 학생들의 이해 정도를 알아보기 위해 U광역시 H고등학교 1학년 학생 12명을 선정하여 심층면담을 실시하였다. 처음 표집에서는 12명의 학생을 학생의 학교 학업 성적 분포를 고려하여 상위권 4명, 중위권 4명, 하위권 4명으로 해당 그룹에서 무작위로 선정하였지만 3명의 학생은 면담소요시간상 제약, 개인의 의사, 기계적 결함 등의 사유로 이탈(상위권 2명, 하위권 1명)하였고, 중위권 1명은 상대론에 대한 학습 준비도가 너무 낮아 면담을 통해 얻을 수 있는 정보가 거의 없어서 최종적으로 8명(S1 ~ S8)의 사례를 분석하였다. 심층 면담 대상 학생들(상위권 2명, 중위권 3명, 하위권 3명)은 심층면담 전에 2009 교육과정의 물리Ⅰ과목을 주당 6시간씩 한 학기 동안 수강하였다.

표1. 특수 상대론 기초 개념 이해를 면담하기 위한 심층 면담 내용

내용영역	상황그림	주요 면담 내용
광속불변의 원리		고전적 상대속도 측정과 광속 측정의 차이를 현상적으로 이해하는가? 즉 특수상대론의 제 1가설을 이해하고 있는지 확인하는 내용.
상대성의 원리		정지 좌표계와 등속운동 좌표계에서 상대성의 원리를 이해하고 있는지 확인하는 내용. 특히 관측자A와 관측자B의 좌표계에서 쏜 포탄이 움직이는 경로는 다르지만 상승했다가 다시 원래 위치로 돌아온다는 결과는 같아야 한다는 것을 이해하고 있는지 알아봄.
동시성의 상대성 (기차역설)		정지 좌표계에서 기차 양끝에 동시에 친 번개가 운동좌표계에서 어떻게 해석 되는지 물어 봄. 즉, 광속 불변의 법칙과 상대성의 원리를 적용하여 두 좌표계에서 동시성이 상대적이라는 것을 이해하고 있는지를 물어 봄.
차고 역설		차고의 길이보다 긴 자동차가 매우 빠른 속력으로 운동할 때 운동좌표계와 정지 좌표계에서 상대성의 원리와 동시성의 상대성을 적용하여 자동차가 차고를 무사히 통과할 수 있는지를 설명할 수 있는지 알아봄.
로켓 역설		그림 (가)의 아래 로켓 좌표계에서는 로켓에서 쏜 레이저가 빗나가지만 그림 (나)의 위쪽 로켓의 좌표계에서는 레이저 총이 위 로켓에 맞는다. 이 모순적 상황을 길이 수축과 동시성의 상대성 원리를 적용하여 이해하고 있는지 알아봄.

2. 연구 설계

본 연구에서는 심층면담을 위해 반 구조화된 면담 도구를 개발하였다. 면담 도구 개발은 일반적인 심층 면담 도구 개발 과정(Boyce & Neale, 2006)에 따라 '계획 - 도구 개발 - 데이터 수집 - 데이터 분석 - 발견 사실 확인'의 과정을 거쳤으며, <표 1>은 특수 상대론과 관련된 광속불변의 원리, 상대성의 원리, 동시성의 상대성, 차고 역설, 로켓 역설에 대한 학생들의 이해과정을 알아보기 위한 심층면담 내용이다. 면담 내용은 특수 상대론의 출발점이 되는 두 가지 기본 가정의 의미를 묻는 문항과 이 기본가정을 동시성이라는 구체적인 상황에 적용하는 문항 및 좀 더 높은 수준의 문항으로 동시성, 기본 가설을 응용할 수 있는지를 묻는 문항으로 되어 있다. 면담은 연구자 중의 한 사람이 직접 실시하였으며, 8명의 학생을 대상으로 1:1 면담을 30분에서 1시간 정도 진행하였고 면담의 과정은 모두 비디오로 녹취하여 모든 대화를 전사하여 기록하였다. 이를 바탕으로 특수 상대론에 대해 학생들이 어떠한 수준으로 이해하고 있으며 관련 내용을 어떻게 인식하고 있는지 분석하였다. 분석 과정에서 특수 상대론 기초 개념에 대한 성취도를 파악하기 위해 점검표를 구성하였고 그 틀은 <표 2>에 제시하였다.

표2. 특수 상대론 기초 개념 이해에 대한 점검표

항 목	점 수 (pass : 1, Fail : 0)
1. 광속 불변의 원리를 이해하고 있는가?	
2. 상대성의 원리를 이해하고 있는가?	
3. 특정 상황(고전적 상황)에서 상대성 원리를 적용할 수 있는가?	
4. 정지좌표계에서 사건의 발생 순서를 설명할 수 있는가?	
5. 운동좌표계에서 사건의 발생 순서를 설명할 수 있는가?	
6. 동시성의 상대성을 설명하는데 광속불변의 법칙을 적용할 수 있는가?	
7. 동시성의 상대성을 설명하는데 상대성의 원리를 적용할 수 있는가?	
8. 동시성의 상대성이 좌표계에 의존한다는 것을 이해하고 있는가?	
9. '차고 역설'의 문제를 해결할 수 있는가?	
10. '로켓 역설'의 문제를 해결할 수 있는가?	

Ⅲ. 연구결과

1. 특수 상대론 기초 개념 성취도 분석 결과

반구조화 된 심층면담을 통해 학생들과 주고받은 대화 내용을 분석하여 학생들이 특수 상대론 기초 개념에 대해 어느 정도 알고 있는지를 분석한 결과는 <표 3>과 같다. 광속불변의 원리(설문 1)에서 학생들은 움직이는 기차에서 쏜 레이저 총이나 지면에 정지한 사람이 쏜 레이저 총이 동시에 도달한다고 응답한 학생은 6명이었으나 그중 3명은 수업 후에도 광속을 고전적 상대속도로 더하거나 빼는 경향이 남아 있었다. 설문 2의 상대성 원리에서 수직으로 쏜 대포가 움직이는 모습을 운동 좌표계와 정지 좌표계에서 설명하라는 질문에 6명의 학생은 정확히 결과를 설명했으나 2명의 학생은 포탄이 포신 뒤로 떨어지거나 앞으로 떨어지는 것으로 설명하였다. 설문 3에서는 설문 2에서 상대성의 원리를 옳게 설명한 6명의 학생 중 5명이 대포가 포신으로 다시 들어오는 결과가 두 좌표계에서 같다고 하였고 1명은 두 좌표계에서 결과가 같아야 한다는 상대성 원리의 의미를 이해하지 못했다. 설문 4에서 정지 좌표계로 번개가 동시에 치는 현상에 대한 사건순서를 모두(8명) 바르게 표현하였고, 설문 5의 운동 좌표계에서 두 개의 번개가 치는 사건의

순서를 옳게 표현한 학생은 7명이었다. 정규 수업 시간에 동시성의 상대성 개념과 문제풀이 등의 활동을 하였으나 항목 4와 5에서 3명의 학생은 동시성의 상대성을 현상적으로도 표현하지 못했다.

설문 6, 설문 7, 설문 8에서는 특수 상대론의 가장 중요한 개념 중의 하나인 동시성의 상대성이 좌표계의 정의로 부터 출발하여 광속 불변의 법칙과 상대성 원리로 유도 되는 과정을 이해하고 있는지를 질문하였다. 이 3개의 질문은 특수상대론의 결과적인 현상을 암기 지식으로 대답할 수 없는 문항이고 특수 상대론의 본질적인 의미를 묻는 질문이다. 이 질문에 대해서는 8명 중 2 ~ 3명만 응답하였고 나머지 학생들은 질문의 의미를 이해하지 못하거나 대답을 하지 못하고 침묵하거나 잘못된 설명을 하였다. 특히 두 사건의 발생 순서를 판단할 때 좌표계의 개념을 사용하지 않고 관찰자가 보는 순서로 직관적으로 판단한 학생들은 면담 도중 면담자의 계속되는 질문에 정답과 오답을 반복하면서 '학습자 혼돈(Learner's Chaos)'에 빠져들기도 하였다. 면담과정에서 '학습자 혼돈'에 빠져 든 학생들은 동시성의 상대성 효과를 관찰자의 지각을 통하여 직관적으로 사건의 순서를 판단하는 경향이 강하였다. 동시성의 상대성을 물어본 설문 4와 설문 5에서는 옳은 응답을 했던 8명과 7명 중 동시성의 상대성을 좌표계, 광속 불변의 원리, 상대성의 원리를 이용하여 설명하라는 질문(설문 6, 7, 8)에 답하는 학생은 각각 2, 3, 2명에 불과하였다. 이 결과는 특수 상대론적 효과를 현상적으로 암기하는 것과 본질적인 원리를 이해하는 것이 큰 차이가 있음을 보여 준다. 2009 물리교육과정에 따라 집필된 교과서의 내용을 학습한 학생들을 대상으로 치러진 대학수학능력 시험 물리1 문제(2014년 대학수학능력 시험 문제지 물리Ⅰ)(한국교육과정평가원, 2014)에서는 설문 4, 5와 같이 특수 상대론의 기

표3. 특수 상대론 기초 개념 성취도 체크리스트에 의한 분석 결과

항 목	심층 면담 대상 학생								
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	계
1. 광속 불변의 원리를 현상적으로 이해하고 있는가?	1	1	1	1	0	1	1	0	6
2. 상대성의 원리를 현상적으로 이해하고 있는가?	1	1	1	0	1	1	0	1	6
3. 특정 상황(고전적 상황)에서 상대성 원리를 적용할 수 있는가?	0	1	1	0	1	1	0	1	5
4. 정지좌표계에서 사건의 발생 순서를 설명 할 수 있는가?	1	1	1	1	1	1	1	1	8
5. 운동좌표계에서 사건의 발생 순서를 설명 할 수 있는가?	1	1	1	1	1	1	0	1	7
6. 동시성의 상대성을 설명하는데 광속불변의 법칙을 적용할 수 있는가?	0	0	1	0	0	1	0	0	2
7. 동시성의 상대성을 설명하는데 상대성의 원리를 적용할 수 있는가?	0	0	1	0	0	1	0	1	3
8. 동시성의 상대성이 좌표계에 의존한다는 개념을 이해하고 있는가?	0	0	1	0	0	1	0	0	2
9. 차고역설의 문제를 해결할 수 있는가?	0	1	1	0	1	1	0	0	4
10. 로켓역설의 문제를 해결할 수 있는가?	0	1	1	0	1	1	0	0	4
사례별 합계	4	7	10	3	6	10	2	5	

본 가설, 길이 수축, 시간 팽창 등의 개념을 묻고 있지만 동시성의 상대성과 같은 구체적 상황에서 본질적인 이해를 묻는 문제는 출제되고 있지 않아서 학생들의 특수 상대론 이해도를 변별하기는 어렵다고 판단된다.

설문 9와 설문 10의 '차고 역설'과 '로켓 역설' 문제에서는 길이 수축과 동시성의 상대성 두 개념을 이용하여 역설적 상황을 묻는 문항이다. 이 문항에서 각각 4명의 학생이 정성적으로 설명하였고 나머지 4명의 학생들은 문제를 해결하지 못했다. 8명 학생의 심층 면담 세부 과정은 <2. 특수 상대론 기초 개념 심층면담 사례 분석 결과>에서 자세히 소개하였다.

2. 특수 상대론 기초 개념 심층면담 사례 분석 결과

면담에서 1단계는 기본 가설(광속불변의 원리, 상대성의 원리), 2단계는 동시성의 상대성, 3단계는 차고 역설, 4단계는 로켓 역설 순서로 진행하였고 심층 면담 내용 중 특징적인 대화를 바탕으로, 학생들이 어떠한 사고를 나타내는지를 정리하였다.

[심층면담 사례 – S1]

<기본 가정>
T: 움직이는 기차와 지면에서 본 포탄의 운동은 어떻게 보일까?
S: 지면에서 보면 상하로 직선운동... 대포 위에서 보면 포탄이 뒤로 포물선을 그리며 떨어질 것 같아요.
T: (상황 설명을 통해 이 현상을 잘못 이해하고 있음을 설명해 줌)
S: 아 그렇겠네요.
T: 이 법칙이 특수 상대성 이론의 제 1가설. 상대성의 원리야.
S: 네.

위의 대화 내용에서 S1은 느린 일상생활의 상황에 잘못된 정지관성 개념을 사용하여 설명하였다.

<동시성의 상대성- 기차역설>
T: 영희의 좌표계에서 번개가 치는 두 사건의 순서는 어떻게 될 것 같니?
S: 동시예요! 동영상에서 본 것처럼 될 것 같아요.
T: 그럼. 영희의 좌표계에서 동호에게 어느 쪽 번개의 빛이 먼저 도착하는 것으로 판단할까?
S: 동시 아닌가요?
T: 영희의 좌표계에서는 동호가 탄 기차가 움직이는 것을 고려해 주어야지!
S: 그럼...(한참 동안 고민) 잘 모르겠는데요.
T: 이렇게 기차가 움직이면...
S: 그러면 기차의 앞쪽에 친 번개에서 발생한 빛이 먼저 도착 하겠네요.
T: 그렇지. 이번에는 동호의 좌표계에서 실제로 번개가 내리치는 순서는 어떻게 되지?
S: 동영상에서 본대로 앞의 번개가 먼저 터지겠죠? 근데 실제로 앞쪽 번개가 먼저 터지는 건 아니죠?
T: 동호의 좌표계에선 실제로 앞쪽 사건이 먼저 발생하지. 그러면 동호 좌표계에서 두 번개에서 발생한 빛 중 어느 것이 먼저 동호의 위치에 도착할까?
S: 동호 자신이 자신의 공간에서 볼 때면, 기차가 정지한 거와 같으니깐 동시에 빛이 자신에게 오는 거 같아요.
T: 동영상에서 동호 좌표계에서 앞쪽 번개가 먼저 발생한다고 했는데!
S: 그러면 음... (망설이다가) 그러면 어...(혼란스러워 하며) 음... 동시에 도착 하는 게 아닐까요?
T: (교사가 결과를 정리하여 설명해 줌) 좌표계가 달라지면 사건 발생순서가 달라지는 게 이해되니?
S: 똑 같은 상황인데 그런 일이 생겨요? 동호가 볼 때는 기차는 정지한 거잖아요!
T: (교사가 다시 한 번 설명해 주고 정리 해 줌)
S: 아, 그렇겠네요.(확신하지 못하는 것 같음)

위의 대화 내용에서 S1는 영희의 좌표계(정지좌표계)와 동호의 좌표계(운동 좌표계)에서 동시성의 절대성에 대한 신념이 강했고 좌표계상의 사건의 발생순서와 관찰자 관찰 순서를 일치시키려는 경향이 있었다.

S1은 문과계열 진학을 희망하는 학생으로 물리 학습에 대해 소극적인 태도를 가지고 있었다. 상대성의 원리의 인과율적 결과에 대하여 이해가 부족하여 동시성의 상대성을 학습할 때 많은 어려움이

있었다. 동시성의 상대성을 현상적으로는 설명하였지만 이 현상이 광속불변의 법칙과 상대성의 원리로부터 생긴다는 것을 파악하는 데에서 더 이상 면담의 진전이 없었다. 좌표계의 개념이 형성되지 못하여 동호와 영희가 본다는 표현을 자주 사용하였다. S1은 동영상에서 본 동시성의 상대성 현상이 실제로 일어나지 않으리라는 믿음을 가지고 있었다. S1은 동시성의 절대성에 대한 믿음을 변화 시키려 하지 않았고 이 믿음은 '차고 역설'과 '로켓 역설' 문제에까지 계속 이어졌다.

[심층면담 사례 – S2]

<동시성의 상대성-기차역설>

T: 기차 역설에 대해 알아보자. 먼저 영희의 좌표계(정지좌표계)에서 어떤 사건이 먼저 발생하지?
S: 동시예요!
T: 영희의 좌표계에서 동호는 어느 빛을 먼저 본다고 생각하나요?
S: 앞쪽 번개를 먼저 봐요!
T: 왜?
S: 동호가 탄 기차가 앞으로 움직이니까요.
T: 그렇지. 동호의 좌표계(운동 좌표계)에서 보면 두 번개 중 어느 사건이 먼저 발생하지?
S: 동시일거 같아요!
T: 영희의 좌표계에서는 동시인데 동호의 좌표계에서도 동시일까?
S: 아! 동호의 좌표계에서는 앞쪽이 먼저에요.
T: 동호에게 빛이 도달하는 순서는?
S: 동시에... 음... 아니 앞의 것이 먼저...
T: 그러면 두 좌표계에서 같은 결과는 무엇인가요?
S: 동호에게 빛이 도달하는 순서에요.
T: 그럼. 다르게 해석하는 것은 무엇이니?
S: 영희에게는 동시이고 동호에게는 동시가 아니고...
T(1): 그 말은 좌표계상의 사건의 발생 순서인가요? 아니면 두 명의 관찰자가 관찰하는 순서인가요?
S: 네?
T: 관찰자가 눈으로 보는 순서가 아니고 관찰자와 상관없이 사건 발생 순서를 묻는 거야. 예를 들면 동호의 위치를 뒤로 옮긴다면 좌표계에서 사건이 발생하는 순서는 어떻게 되지?
S: 음...(대답을 하지 않고) 지금까지 잘못 알고 있었던 것 같아요. 음... 아마 동호의 위치가 바뀌면 좌표계에서 발생하는 순서는 동시이고, 동호가 관찰하는 것은 동시가 아니고...
T: 다시 한 번 생각해보세요.
S: (한 동안 침묵하고) 뭔가 잘못 된 것 같네요. (매우 당황스런 표정으로)
T: 그럼. 관찰자의 위치가 바뀌는 문제 말고 다시 처음으로 가서 영희의 좌표계에서는 어느 사건이 먼저 발생하지?
S: 동시에요.
T: 그럼, 동호의 좌표계에서는 어느 사건이 먼저 발생하지?
S(1): 음... 동호의 좌표계에서는 동시에요.
T: (교사가 다시 설명함) 이제 다시 보자. 영희의 좌표계와 동호의 좌표계에서 사건의 발생순서는 어떻게 되지?
S: 영희의 좌표계에서는 동시에, 동호의 좌표계에서는 결과가 같으려면 앞의 번개가 먼저 발생 하겠네요.
T: 이제 정리가 좀 되는 것 같군. 특수 상대성 원리는 광속불변과 상대성의 원리로부터 유도되지.
S: 아. 결과가 같아야 하는 상대성의 원리로부터 사건의 발생순서가 좌표계에 따라 달라지는군요. 이제야 알겠네요.

S2는 T(1)에서 교사의 동시성의 좌표계 의존성과 관찰자 의존성의 차이를 묻는 질문에서부터 처음에는 좌표계에 따른 동시성의 상대성을 잘 답변하였으나 S(1)에서 처음의 답변을 번복하고 잘못된 대답을 하였다. 교사의 설명을 듣고 자신의 관찰자 의존적인 동시성의 상대성 개념을 버리고 좌표계 의존적인 동시성의 상대성 개념으로 전환하였다.

S2는 처음에는 관찰자의 시각적 판단에 따라 사건의 순서를 판단하려 하였다. 기차 역설의 동시성의 상대성에서 처음에는 영희와 동호의 좌표계에서의 사건 발생 순서를 바르게 이야기 했으나 그 대답은 관찰자 의존형 개념 즉, 관찰자가 보는 순서에 의한 답들이었다. 그래서 면담자가 관찰자가 보는 순서와 실제로 좌표계에서 사건이 발생하는 순서에 대한 질문을 계속하자 처음 옳게 대답했던 사건의 발생순서 마저 틀리게 대답하면서 '학습자 혼돈' 상태가 되었다. 좌표계 의존적인 동시성의 개념

으로 전환하기 위하여 교사는 광속 불변의 원리와 상대성의 원리를 이용하여 기차 역설의 상황을 설명 해 주었다. 그 후 혼돈 상태에서 조금씩 벗어나면서 과학적 개념으로 변하는 것을 볼 수 있었지만 여전히 특수 상대론이 실제로 일어나는 현상인지에 대하여 의문을 가지고 있었다. 특히, 기차 역설에서 가운데 있던 동호의 위치가 바뀌었을 경우의 동시성에 대한 질문을 하자 올바른 사건 발생 순서에 대한 개념이 흔들리기 시작했다. 하지만, 사건 발생 순서를 관찰자의 직관에 의해 판단했던 자신의 오류를 인식하고 좌표계 의존적인 동시성을 받아 들였다. 이 개념이 형성 된 후에는 '차고 역설'과 '로켓 역설'은 쉽게 해결하였다.

[심층면담 사례 – S3]

<기본 가설>
S3는 기본가설의 내용과 상대성의 원리를 구체적 상황에서 잘 적용하였다.

<동시성의 상대성-기차역설>
T: (기차 역설 상황 설명) 영희의 좌표계에서 두 번개가 치는 사건은 동시 사건인가요?
S: 동시 사건이에요.
T: 그럼 영희의 좌표계에서 동호는 어느 번개에서 오는 빛을 먼저 도착하는 것으로 판단할까?
S(1): 동시죠.
T: 정말 그럴까? 영희의 좌표계에서 동호가 실제 보게 되는 빛의 순서는 어떻게 되지?
S: 아. 앞의 빛을 먼저 보죠.
T: 왜. 그럴까?
S: 번개가 동시에 치지만 동호는 앞쪽으로 움직여서 앞쪽 불빛을 먼저 받지 않을까요?
T: 그렇지, 지금까지는 영희의 좌표계에서의 판단이고, 동호의 좌표계에서는 어떻게 될까?
S(2): 동호 좌표계에서...음... 동호가 볼 때 말이죠?
T: 아니, 동호의 관찰과 관계없이 좌표계에서의 사건 발생순서.
S: 결과가 같으려면 앞의 번개가 먼저 쳐야 할 거 같아요.
T: 이 현상을 동호의 좌표계에서 광속 불변의 원리로 설명해 볼까?
S(3): 기차의 앞면은 멀어지고, 기차의 뒷면은 다가오고...
T: 동호의 좌표계에서 기차의 벽면이 움직이나요?
S: 어...아니요.
T: 그럼, 벽면은 움직이지 않는데 어느 곳에 번개가 먼저 치나요?
S: 앞이요. 아. 그러니까 앞의 번개가 먼저 도착 하겠네요.
T: 동호의 좌표계에서는 기차의 벽면이 움직이면 안되겠지.
S: 예, 그러면 간단하네요.
T: 두 좌표계에서 같은 물리 현상은 무엇인가요?
S: 동호에게 빛이 도착하는 순서요.
T: 두 좌표계에서 다르게 해석되는 것은 무엇이지?
S(4): 어느 것이 움직이느냐에 대한 판단이요
T: 사건의 발생 순서를 묻는 거야.
S: 영희의 좌표계에서는 두 사건이 동시이고 동호의 좌표계에서는 동시가 아니죠.
T(1): 만약 동호의 위치 뒤쪽에 다른 승객이 한명 서 있다면 이 승객의 좌표계에서는 어떤 사건이 먼저 발생할까?
S: 이 승객도 동호와 같은 좌표계이니까 앞의 번개가 먼저겠죠.

이 학생은 S(1)에서 정지 좌표계에서의 사건의 발생순서와 다른 좌표계에서의 관찰자의 관찰 순서를 같은 것으로 생각하였고, S(2)에서는 사건의 동시성을 직관적인 관찰로 판단하려 하였다. S(3)에서는 기준 좌표계가 되는 기차의 내부 벽면이 움직이는 것으로 생각하였다. S(4)에서 동시성의 상대성을 운동 상태의 상대성에 연관 시키려고 했던 것으로 보인다.

<응용-1. 차고 역설> <응용-2. 로켓 역설>

좌표계, 동시성의 상대성, 길이 수축의 개념을 활용하여 두 개의 응용문제를 과학적 개념으로 해결하였다.

S3은 면담 과정에서 동시성의 상대성에 대한 관찰자 의존적 대답을 한두 번 하였으나 '학습자 혼돈'으로까지 이어지지 않고 곧 과학적 개념으로 돌아 왔다. 중간 중간 좌표계 개념이 흔들리면서 기준 좌표계가 되는 기차의 벽면을 부적절하게 움직이기도 하였다. 특히, 좌표계 의존적 동시성을 묻는 질문(T1)에 답한 대부분의 학생들과 달리 큰 혼돈

이 없이 답변이 이루어진 것으로 보아 이 학생은 피 면접자 8명 중에 특수 상대성 이론을 기술하는 기본 틀인 좌표계 개념이 가장 잘 확립된 것으로 보인다.

[심층면담 사례 – S4]

<기본 가설>
T: 지면의 정지한 좌표계에서 포탄의 운동은 어떻게 되니?
S: 수직으로 올라갈 것 같아요.
T: 대포는 앞으로 가니까 포탄은 대포 뒤에 떨어진다는 것이지?
S: 네...아... 잠시 만요(머리를 감싸며) 아니고 포물선 운동을 할 것 같아요.
T: 쏜 포탄은 포신으로 다시 들어올까?
S: 안 들어 올 것 같아요.
T: 대포 위의 관찰자가 보면 어떻게 보일까?
S: 대포 위의 관찰자에게는 포탄이 다시 포신으로 들어오는 것으로 보이겠죠.
T: 그럼, 두 관찰자의 좌표계에서 포탄 하나는 포신 밖에 떨어져 있고 포탄 하나는 포신 안으로 들어가 있고.. 기차가 정지하면 포탄이 두 개이어야 하겠네!
S: 어. 참... 이상하네요.
T: 지면의 좌표계에서 포탄은 어떻게 될까?
S: 그러면, 포탄이 다시 포신으로 들어가야겠네요.
T: 상대성의 원리는 등속좌표계와 정지 좌표계에서 물리 현상의 결과가 같아야 한다는 걸 의미해! 이제 알겠니?
S: 아... 조금 알 것 같아요(자신이 없는 어조로)

위의 면담 내용에서 S4는 일상생활과 같은 느린 상황에서 상대성의 원리를 적용하는데 어려움을 가지고 있었다.

<동시성의 상대성-기차 역설>

S4는 좌표계의 개념이 정립되어 있지 않아 기준이 되는 좌표계의 사물을 움직였다. 그리고 동시성의 개념을 관찰자 의존 형으로 해석하여 사건의 발생 순서를 몇 번 잘못 답변하였으나 곧 과학적 개념으로 회복되었다.

<응용-1. 차고 역설>
T: (상황설명) 수진의 좌표계에서는 차고 문이 어떻게 열리고 닫히는지 손과 책을 이용하여 해 볼까?
S: 조금 전 자동차의 길이가 줄었다고 했으니 동시에 내리고 올리면 되겠죠.
T: 그럼, 민준의 좌표계에서는 차고가 자신의 자동차 보다 훨씬 작아져서 자동차로 접근해 오는데 차고 문이 어떤 순서로 닫히고 열릴까?
S: (손으로 해본다.) 차고가 작아졌고 이렇게 동시에 내리치니까. 자동차가 파손 되네요
T: 민준의 좌표계에서는 민준의 차가 파손되고... 수진의 좌표계에서는 파손 안 되고 통과 했는데.. 멀쩡한 자동차와 파손된 자동차 두 대가...? 이런 일이 있을까?
S: 아 아! (혼란스러워하며...) 그러면 안 되겠지요.
T: 기차 역설의 상황과 비슷하게 운동하는 민준의 좌표계에서 두 문이 열리고 닫히는 사건이 동시일 필요가 있을까?
S: 아. 그렇군요.
T: 이제, 어느 문이 먼저 닫혀야 할지 손으로 해 보렴.
S: 그러면 B의 문이 먼저 닫히고 열린 다음 A의 문이 닫히고 열리면(몇몇 해보고)
T: 그래 이제 해결 된 것 같네요.

위의 면담 내용에서 S4는 정지 좌표계와 운동 좌표계에서 자동차가 차고를 지나는 과정의 결과가 달라지는 상황에 직면하자 '학습자 혼돈' 상태가 되었다. 그리고 S4는 주변의 깡통과 같은 비유물을 이용한 설명은 잘 이해하였다. S4는 광속불변의 법칙은 이해하고 있었으나 상대성의 원리에서 자신이 가진 생각과 실제 결과가 달라서 갈등이 생겼다. 상대성의 원리에 대한 교사의 설명이 그럴 수밖에 없다고는 생각하지만 자신이 가진 신념과 달라서 충분히 개념을 내면화 하지 못한 것으로 보인다. 차고 역설 문제에서 S4는 민수의 좌표계(운동좌표계)에서 차고 문이 동시에 내려진다고 하면 짧아진 차고의 길이 때문에 자동차가 파손 되는 인과율에 위배되는 상황이 벌어지자 갈등이 커져서 일시적인 '학습자 혼돈'에 빠졌다. 그 후 교사가 주위에 있는, 길이가 다른 깡통을 이용하여 비유 상황으로 설명해 주자 갈등은 다소 해소 되었다.

[심층면담 사례 – S5]

<기본 가설>
T: 움직이는 기차가 쏜 레이저와 정지한 사람이 쏜 레이저는 어느 것이 먼저 도착할까?
S: 움직이는 기차에서 쏜 레이저요.
T: 만약 기차가 후진하면 어떻게 될까?
S: 정지한 사람이 쏜 레이저요.
T: (광속 불변의 법칙을 설명하고 학생의 생각이 잘못되었다는 것을 알려 줌)

위의 면담 내용에서 볼 때 수업 시간에 광속 불변에 관한 내용을 충분히 가르쳤다고 생각 했지만 S5는 빛의 속력을 고전적 상대 속도로 계산하였다.

<동시성의 상대성-기차역설>
T: (기차 역설 상황의 설명) 영희의 좌표계(정지좌표계)에서 사건의 발생순서는 어떻게 될까?
S: 동시에요.
T: 영희의 좌표계에서 동호가 두 번개에서 오는 빛을 보는 순서는 어떻게 되지?
S: 그것도 동시에요.
T: 그럼, 동호의 좌표계에서 두 번개가 내리치는 사건의 순서는 어떻게 되지?
S: 앞의 것이 먼저. 수업시간에 동영상을 봤어요.
T: 동호가 실제 보는 것의 순서는 어떻게 될까?
S: 그 것도 역시 앞의 것이 먼저요.
T: (교사가 보충 설명함.)
S: (한동안 말없이 머리를 긁적임) 아 이건 기차 내부에서 일어난 것이고 기차 외부에서는 다른 거 아닌가요?

S5는 동호에게 빛이 도달하는 순서가 정지 좌표계에서는 동시이고 운동좌표계에서는 동시가 아닌 것을 기차의 내부와 외부의 차이라고 생각했다. 그리고 수업 시간에 광속 불변의 원리를 학습 하였음에도 불구하고 고전적 상대속도의 개념을 가지고 있었다. 기차 역설 문제에서도 광속 불변의 원리를 적용하여 동시성의 상대성을 이끌어 내기 보다는 수업 시 보여준 동영상의 결과를 단순히 기억하여 대답하였다. 기차 역설 문제에서 좌표계가 달라졌을 때를 생각하는데 갈등이 심해지자 기차 내부에 일어난 사건의 결과와 기차 외부를 분리시켜 자신의 생각을 지키려는 보호대를 만들기도 하였다. 이 학생 역시 사건 발생의 순서를 관찰자가 보는 순서와 연관 시키려는 감각 의존적 경향이 있었다. 로켓 문제와 차고 문제에서 상대성의 원리, 광속 불변의 원리를 스스로 적용하지는 못하였다.

[심층면담 사례 – S6]

<동시성의 상대성-기차역설>
T: (기차 역설 상황의 설명) 영희의 좌표계에서 사건의 발생순서는 어떻게 될까?
S: 동시에요.
T: 영희의 좌표계에서 동호가 두개의 번개에서 오는 빛을 보는 순서는 어떻게 되지?
S(1): 그것도 동시에
T: 동호의 위치에 빛이 도달하는 순서인데?
S: 음... (한참 생각) 동시일 것 같은 데요.
T: 영희의 좌표계에서 두 번개는 동시에 치지만 번개에서 발생한 빛이 동호에게 도달하는 순서를 영희의 좌표계에서 어떻게 관찰되느냐는 거야?
S: 음... 그건... 앞쪽이겠죠. 기차가 앞으로 움직이니까요.
T: 그럼, 동호의 좌표계에서 두 번개가 치는 사건의 순서는 어떻게 되니?
S: 그것도 동시에...아니요... 잠시 만요. 앞의 것이 먼저요.
T: 동호가 실제 보는 것의 순서는? 그걸 그림으로 그려 볼래?
S: (광속불변의 법칙을 적용하여 사건도표를 그림) 동시에 도착하지 않네요! 앞의 것이 먼저에요.
T: 이 때 광속 불변의 법칙이 적용 될까?
S: 네. 적용 되요.
T: 이때, 동호의 좌표계와 영희의 좌표계에서 동호에게 빛이 도달하는 순서에 대한 판단은 어떻게 할 수 있지?
S: 같죠. 동호의 위치에 앞의 번개 빛이 먼저 도착하는 결과는 같죠.
T: 다르게 해석되는 것은 무엇이니?
S: 두 좌표계에서 두 번개가 치는 사건에 대하여 동시와 동시가 아니라고 판단하는 거요.
T: 보는 것이 그렇다는 거야? 아니면 실제 사건 발생순서가 그렇다는 거야?
S(2): 실제 사건이 발생하는 것이요.

S6은 S(1)에서 좌표계 사건 발생순서와 관찰자가 관측하는 사건의 순서를 동일시하려는 경향을

보였으나 보조 질문을 하자 좌표계 사건발생순서와 관측자 관측순서를 상대성의 원리와 광속불변의 법칙으로부터 잘 유도하여 설명하였다. S(2)에서 좌표계에 의한 사건발생의 개념이 명확함을 볼 수 있다. 이 학생은 특수 상대론의 기본 가정에 대한 내용을 잘 알고 있었고, 동시성의 상대성, 길이 수축 등 복합 개념이 적용되는 상황에서도 기본 가정을 잘 적용했다. 기차 역설 문제에서 좌표계의 사건순서를 관찰자가 보는 사건 순서와 같이 생각한 경우가 있었으나 교사의 자세한 상황 설명을 들은 후 과학적 개념으로 변화 되었다. 그 이후는 좌표계의 사건순서와 관찰자가 감각하는 사건 순서를 명확히 구분하여 진술하였다.

[심층면담 사례 – S7]

<기본 가설>
T: (상대성 원리의 문제 상황 설명) 지면에서 본 포탄의 운동은 어떻게 되지?
S: 포물선을 그리며...(정확히 그림)
T: 기차 위의 좌표계에서 본 포탄의 운동은 어떻게 되니?
S: 바로 위로 갔다가...(정확히 그림)
T: 그럼, 두 좌표계에서 모두 포탄이 포신 안으로 다시 들어오는가?
S: 지면의 좌표계에서는 포탄이 포신 뒤에 떨어지지만 기차 위의 좌표계에서는 포신 안으로...
T: 그럼, 두 좌표계에 따라 결과가 다르네! 포탄하나는 포신 안으로 다른 하나는 포신 뒤로... 그런 게 가능할까?
S: 그렇군요. 포탄이 포신 안으로 들어와야겠네요.

위의 면담 내용에서 S7은 운동 좌표계와 정지 좌표계에서 같은 물리 현상이 일어나야 한다는 상대성의 원리 개념이 정립되어 있지 않음을 알 수 있다.

<동시성의 상대성-기차역설>
T: (기차 역설 상황 설명) 영희의 좌표계에서 사건의 발생순서는 어떻게 될까?
S: 동시에요.
T: 영희의 좌표계에서 동호 위치에 두 번개의 빛이 도달하는 순서는 어떻게 될까?
S: 동호가 볼 때, 영희가 생각할 때... 음... 동시에
T: 기차의 움직임을 고려해 보렴.
S(1): 잘 모르겠네요. (혼란스러워 하며) 수업시간에 동영상의 내용은 이해가 갔는데, 좌표계에서 사건의 발생순서는 알겠는데... 실제 관찰자에게 빛이 도달하는 순서가 무슨 의미인지...
T: (교사가 설명 해줌)
S: 예, 알겠어요.
T: 동호의 좌표계에서 두 사건의 발생순서는 어떻게 될까?
S(2): 영희와 같이 동시에... 아니 앞에서 먼저 터지고 뒤가 나중에... 어... 문제를 잘 모르겠어요.
T: 동호의 좌표계에서 사건의 발생 순서를 말하는 거야?
S: 앞에서 먼저 뒤에서 나중에요
T: 사건 발생이 그렇다는 것이지?
S: 아뇨. 발생순서는 같고요. 동호가 보는 게 그렇다고요.
T: 사건의 순서가 두 좌표계에서 같다고?
S(3): 네. 사건의 순서는 같지만 동호가 보는 것이 앞의 것이 먼저예요.
T(1): 동호의 공간 즉 좌표계에서 두 사건이 동시라면 광속 불변의 법칙을 사용하면 동호가 두 사건을 다른 순서로 보는 게 가능할까?
S: 어... (한참 침묵) 그건...
T: 여기부터 모르겠니.
S(4): (머리를 만지며) 네.
T: (기차 역설의 과정을 설명) 그럼, 정리해 보자. 두 좌표계에서 동호에게 빛이 도착하는 순서는 어떻게 될까?
S: 앞의 것이 먼저죠. 상대성의 원리에 의하여 결과가 같아야 하니까.
T: 두 좌표계에서 다르게 해석되는 것은?
S: 좌표계에서 사건의 발생의 순서죠. 영희의 좌표계에서는 동시이고 동호의 좌표계에서는 동시가 아니고...

위의 면담 내용 중 S(1)에서 S7은 사건과 관찰의 의미를 명확히 구분하지 못함을 알 수 있다. 특수 상대론에서 사건의 의미가 좌표계의 토대 위에서 정의되기 때문에 S7은 좌표계의 개념이 형성되어 있지 않아 동시성의 상대성을 이해하는 것이 거의 불가능 하였다. S(3)에서는 동시성의 판단을 관찰자의 시각적 감각의 순서로 생각함을 알 수 있

다. 대화 S(2), S(4)에서 사건의 순서를 관찰자 기준으로 했다가 다시 좌표계 기준으로 했다가를 반복한다. 운동좌표계에서 사건 발생이 동시이면 이것이 광속불변의 법칙에 위배됨을 지적하는 교사의 설명(T(1))에 S7은 혼돈에 빠지고 이후에는 교사의 질문에 거의 반응이 없어 교사의 설명 위주의 면담이 진행 되었다.

S7은 기본 가정에서 상대성의 원리를 구체적 상황에 적용하여 설명하지 못했다. 기차 역설을 상대성의 원리와 광속 불변의 원리로 추론한 교사의 설명도 이해하지 못했고 자신의 신념과 대치되자 혼란스러워 했고 이후 학습을 어려워했다. 이 학생의 사례에서 동시성의 상대성의 개념 이해는 좌표계와 사건에 대한 명확한 이해가 없이는 어렵다는 것이 확인되었다.

[심층면담 사례 – S8]

<동시성의 상대성-기차역설>
T: (기차 역설 문제 상황 설명) 영희의 좌표계에서 두 사건의 순서는 어떻게 되니?
S: 동시에...
T: 영희의 좌표계에서 동호의 위치에 두 번개에서 발생한 빛이 도착하는 순서는 어떻게 되지?
S(1): 동시에. 동시에 번개가 쳤으니까!
T: 번개가 동시에 쳤지만 기차에 탄 동호는 움직이는데!
S(2): 그러면, 앞의 빛이 먼저 도착해요.
T: 동호의 좌표계에서 두 사건의 발생 순서는 어떻게 되니?
S: 앞의 것이 먼저 도착해요
T: 동호의 좌표계에서 동호에게 빛이 도달하는 순서는?
S: 앞의 것이 먼저 도착해요
T: 동호에게 빛이 도달하는 순서에 대한 영희와 동호 좌표계에서의 판단은? 먼저, 영희 좌표계에서 동호에게 빛이 도착하는 순서는 어떻게 될까?
S(3): 동시에요. 영희는 동시에 터지는 것으로 보았으니까?
T: 어! 조금 전의 대답과 다르네! 영희의 좌표계에서 동호는 앞의 것을 먼저 본다고 했는데...
S(4): 아. (머리를 감싸 쥐며). 좀 이상하네요. (혼란에 빠져듦) 앞의 것...
T: 맞아. 동호에게 빛이 도달하는 순서에 대한 영희와 동호 좌표계의 판단은 같나요? 다르나요?
S(5): 둘 다 같아요. 앞의 것이 먼저. 그런데 밖에 있는 영희는 동호가 빛을 받는다는 것을 걸 느낄 수 있어요?
T: 여기서 중요한 건 느낀다는 것보다도 두 좌표계에서 같은 물리적 결과가 생긴다는 거지!
S: 네...
T: 그럼 두 좌표계에서 다르게 해석하는 것은?
S: 영희는... 어... 영희의 좌표계에서는 두 사건이 동시에, 동호에게는 앞의 것이 먼저.

위의 면담 중 S(1)에서 S8은 좌표계 사건 발생 순서와 관찰자 관측 순서를 동일시하였다. S(2)에서 정지 좌표계에서 기차 안 승객의 번개 불빛 관측 순서를 바르게 대답했으나 S(3)에서는 정지 좌표계의 관찰자 감각순서를 운동좌표계의 관찰자 감각순서와 동일 시 하여 직관적으로 답함을 보였다. 다른 사례에서와 유사하게 사건과 좌표계 개념이 없이 감각 의존 형의 응답을 하다가 S(4)에서는 혼란에 빠진다. S(5)에서 다른 두 좌표계에서의 사건 발생 순서를 느낄 수 있는가라는 의문을 가진 것으로 보아 여전히 사건 발생 순서를 관찰자의 직관과 연관 시키려는 경향이 남아 있었다.

<응용-1. 차고역설>
T: 이제 민준의 좌표계(운동 좌표계)에서는 차고가 민준에게로 접근해 올 텐데 차고 문이 어떻게 열리고 닫혀야 할까? 그리고, 민준의 좌표계에서는 차고의 길이가 더 짧아지는 것도 고려해야 돼.
S: (손과, 역학 수레를 이용하여) 수레가 있고 문이 다가서면서 동시에 내리고 닫히면, 어... 그러면 차고 문이 민준이 탄 차를 파손 시키네요.
T: 수진의 좌표계(정지 좌표계)에서는 자동차가 무사히 통과 했는데, 민준의 좌표계에서는 차가 파손 되는 모순이 생겼네!
S(1): (한참 침묵). 이상하네요.(다시 침묵)
T: 결과가 같아야 한다는 상대성 원리에 위배되지요? 결과가 같으려면 민준의 좌표계에서 자동차는 무사히 통과해야 될 거 같은데!
S: 길이 때문에 파손되요.

T: 상대방이 아주 빨리 달리면 길이가 줄어든다니까.
S(2): 실제로 길이가 줄어드는 것 아니잖아요!
T: 그 좌표계에서는 길이 수축의 효과가 실제로 나타나지.
S: 실제로요. 아! 그렇군요.
T: (교사는 처음부터 차고 문제 상황을 다시 설명) 민준의 좌표계에서는 차고 문이 어떻게 열리고 닫혀야 하는 건지, 역학 수레와 손으로 해 보렴.
S: (좀, 생각 하다가). 그렇다면 차고B 문이 먼저 내려갔다 올라오고 다음은 A문이... (정확히 설명함)
T: 바로. 그거야. 다시 한 번 해 볼까?
S: (정확히 역학 수레와 손을 써서 설명함).

S8은 S(1)에서 동시성을 절대적으로 생각하여 운동좌표계에서 자동차가 파손되는 결과가 생기자 '학습자 혼돈'에 빠진다. 교사의 동시성의 상대성에 대한 안내를 받고 작동적 비유물인 수레와 양손을 이용하여 두 좌표계에서 차량이 파손되는 것을 방지하도록 동시성의 상대성을 적용하였다. S(2)에서 길이 수축 현상을 수용하지 않으려는 태도를 보인 것으로 보아 길이를 정지한 상태에서 측정하는 절대 길이의 개념은 있지만 상대론적 속도로 움직이는 물체의 길이 수축 효과를 수용하지 못한 것으로 보인다. 그리고 이 학생은 광속 불변을 배웠음에도 고전적 상대속도의 개념을 가지고 있었다. 사건 순서를 좌표계와 관찰자로 구분하여 해석하지 않고 관찰자 감각 의존적으로 판단하는 경향이 있었다. 그리고 매우 빨리 움직이는 기차 안에서 일어나는 사건을 외부의 관찰자의 시각으로 판단해야 한다는 생각을 가지고 있었다. 기차 역설 문제에서 동시성의 상대성 개념을 배웠으나 이 개념을 차고 문제에 바로 적용하지는 못하였다. 그래서 동시성의 상대

표4. 심층 면담을 통해 나타난 학생들의 특수 상대론 개념 이해 유형과 태도 분석 결과

사례	성적	유형	물리 학습에 대한 태도
S1	중	현상은 수용 - 설명을 이해 - 확신을 못함 - 학습자 혼돈을 극복 못함	인문사회계 진로 결정. 과학 과목을 소홀히 하지만 시험 과목이기 때문에 해야 한다는 생각을 가짐
S2	상	현상에 대해 잘못된 해석 - 설명을 이해 - 확신	이공계열 진로 결정. 물리과목을 비중 있게 생각함.
S3	상	현상 수용 - 설명 이해-확신	이공계열 진로 결정. 물리 과목에 대한 흥미도와 참여도가 매우 높음.
S4	하	현상 수용 - 설명 이해 - 확신 못함. 혼란 극복. 작동적 사물을 통한 설명 이해	인문사회계로 진로 결정. 과학에 대한 태도는 긍정적. 물리적 현상을 그래프화 하는 것을 이해 못함.
S5	중	현상 수용 - 설명 이해 - 확신 못함. 자신의 보호대로 학습자 혼란 극복.	이공계열 진로 결정. 물리과목에 대해 긍정적 태도. 특수 상대론의 모든 설명 불신. 스스로의 설명을 합리화하는 보호대 만듦.
S6	중	현상 수용-설명을 이해-확신-신뢰. '학습자 혼돈' 미 발생	이공계열 진로 결정. 물리에 대해 긍정적 태도. 동시성의 상대성을 광속 불변과 상대성의 원리를 이용하여 가장 잘 설명.
S7	하	현상을 이해하지 못함 '학습자 혼돈' 극복 못함	이공계열 진로 결정. 물리과목에 대해 긍정적 태도. 기초적인 과학 개념에 대한 이해 능력 떨어져 개념 변화 일어나지 않음.
S8	하	현상 수용 - 설명 이해 - 확신 못함. 사건도표 수용 못함. 작동적 사물을 통한 설명 이해	서비스 업종 종사 희망. 물리를 공부해야 할 필요를 못 느꼈지만 면담을 통해 흥미를 가지게 됨. 길이 수축에 대한 강한 불신.

성 개념은 학생들에게 생소하기 때문에 학습된 개념이 바로 다른 상황에 적용되는 것이 쉽지 않다는 것을 보여준다. 이 학생은 물체의 길이는 절대적이라는 신념이 강하였다. 이 신념은 차고 문제에서 상대론적으로 길이의 개념을 적용하여 문제를 해결하는데 장애가 되었다.

이상 8명의 심층면담 결과를 정리하면 <표 4>와 같다.

Ⅳ. 결론 및 논의

학생들이 이미 학습한 기본가정, 기차역설, 차고역설, 로켓 역설을 테마로 하여 구성된 면담 시나리오를 이용하여 심층적으로 면담을 하면서 10개 항목의 체크리스트로 학생들의 이해를 점검해 본 결과 단순한 현상의 기억, 개념의 암기로 해결할 수 있는 항목들에서는 비교적 높은 성취도를 나타냈으나 특수 상대론의 기본 가정과 좌표계 개념을 이용하여 특수 상대론적 현상을 설명하는 데 있어서는 낮은 성취도를 나타냈다. 특수 상대론의 기초 개념 평가에서 선택형 문항은 단순히 현상의 암기나 개념의 숙달을 통하여 정답을 할 수 있기 때문에 학생들이 특수 상대성 개념의 원리나 복합 개념을 이해하는 과정을 확인하기 어렵다. 특수상대론의 역설적 상황을 서술형 문항을 이용하여 평가하는 경우에도 학생들이 본질적인 원리에 대해 이해를 하지 못해도 문제 해결의 패턴을 계속 반복으로 접하게 되면 높은 성취를 나타낼 수 있다. 그러므로 교육현장에서의 특수 상대론 평가 문제는 이런 요인을 감안하여 선택형 문항, 패턴을 숙달하여 해결 할 수 있는 문항, 기본가정과 좌표계, 사건 등 특수 상대론의 본질적인 개념의 이해를 묻는 문항으로 구분하여 평가 하는 것이 바람직하다.

심층 면담 학습을 통해 밝혀진 고등학생들이 특수 상대론 기초 개념을 학습하는 특성은 다음과 같다. 첫째, 사건의 순서를 판단하는 기준으로 관찰자의 직관(시선이나 감각)에 크게 의존한다는 것이다. 둘째, 좌표계를 학습하였어도 좌표계를 수학적 관념으로만 생각하고 실제 우리가 사는 공간에서 좌표계를 적용하여 사물의 운동 상태나 위치를 판단하지 않는다는 것이다. 셋째, 일반적으로 광속 불변, 상대성 원리, 시간지연, 길이 수축과 같은 하나의 개념이 적용되는 상황에서의 학생들의 문제 해결 능력은 양호하였다. 하지만, 기초 개념들이 복합적으로 적용되는 역설 상황에서의 문제 해결 능력은 크게 낮음을 보였다. 이 경우, 반직관적인 특수 상대론적 개념과 학습자의 직관적 판단이 충돌하여 '학습자 혼돈(Learner's chaos)'이 발생하는 경향을 보였다. 학업 성적이 높은 학생들은 '학습자 혼돈'이 발생하였을 때 자신의 갈등 상황을 메타 인지적으로 파악하여 점차적으로 과학적 개념으로 변하는 양상을 보였지만 학업성적이 낮은 학생들은 학습에서 이탈하는 양상을 보였다. 넷째, 학생에 따라 시공간 현상을 2차원적 평면에 그리는 사건도표 활동을 어려워하거나 받아들이기 힘들어하는 학생들도 있었다.

이상의 연구 결과로 볼 때 특수 상대론 수업 시에는 좌표계와 사건의 정확한 의미를 파악 할 수 있는 수업 활동이 포함될 필요가 있다. 이 활동이 없이 동시성, 길이수축, 시간 팽창 등의 개념을 접하게 되면 개념의 이해보다는 현상의 단순한 암기 위주의 수업 밖에 이루어 질 수 없기 때문이다. 또한 특수 상대론 이해도 평가를 위해서는 선택형, 서술형, 구술형 문항 외에도 좀 더 신뢰도와 타당도가 높은 특수상대론 개념 평가 문항을 개발해 적용할 필요가 있다.

참 고 문 헌

강주희 2007, 특수상대성이론에 대한 질적질문을 이용한 학습효과 : 길이수축과 질량증가. 이화여자대학교 석사학위논문.

교육과정평가원(2014).과학탐구영역(물리Ⅰ).2014학년도 대학수학능력시험

교육과학기술부(2009), 교육과학기술부 고시 제2009-41호, 고교 과학과 교육과정 해설서

김재권, 김영민(2011). 중등학생의 특수상대론 학습에서 VR과 사건 도표를 이용한 수업 방법의 제안, 과학교육연구지, 35(2), 283-294.

김영민, 이승우, 박수경(2011). 전국 중.고등학생 및 과학교사들의 첨단과학기술에 대한 인식 및 관련지식 조사 연구. 새물리, 61(9), 829~839.

박종원(1991). 상대론 기초개념 변화에 있어서 초인지의 역할. 서울대학교 박사학위논문.

송진웅 외(2004). 학생의 물리 오개념 지도, (주)북스힐

오광택, 박종호 (2010). 초등학교 과학영재학생과 일반학생의 첨단과학기술에 대한 인식 비교. 새물리, 60(5), 517-525.

조선아 (2006). 중등 과학교육에서 첨단 과학기술 교육의 문제점과 그 실례 연구. 전북대학교 석사학위논문.

진형욱 (2013). 고교 물리 I 특수 상대성 이론 단원을 위한 수준별 시공간 그림 수업모형 개발. 한양대학교 석사학위논문.

.

Arriassecq, I., & Greca, I. M. (2007). Approaches to the teaching of special relativity theory in high school and university textbooks of Argentina. Science & Education, 16(1), 65-86

Boyce, C., & Neale, P. (2006). Conducting in-depth interviews: A guide for designing and conducting in-depth interviews for evaluation input. Watertown, MA: Pathfinder International.

De Hosson, C., Kermen, I., & Parizot, E. (2010). Exploring students' understanding of reference frames and time in Galilean and special relativity. European journal of physics, 31(6), 1527.

Hewson, P. W. (1982). A case study of conceptual change in special relativity: The influence of prior knowledge in learning‡. European Journal of Science Education, 4(1), 61-78.

McGrath, D., Wegener, M., McIntyre, T. J., Savage, C., & Williamson, M. (2010). Student experiences of virtual reality: A case study in learning special relativity. American Journal of Physics, 78(8), 862-868.

Rubin, H. J., & Rubin, I. S. (2004). Qualitative interviewing: The art of hearing data (2nd ed.). Thousand Oaks, CA: Sage Publications.

Savage, C. & McGrath, D. (2010). Teaching physics using virtual reality, Final Report, Australian Learning & Teaching Council.

Scherr, R. E. (2001). An investigation of student understanding of basic concepts in special relativity (Doctoral dissertation, University of Washington).

Scherr, R. E. (2007). Modeling student thinking: An example from special relativity. American Journal of Physics, 75(3), 272-280.

국 문 요 약

본 연구의 목적은 고등학생들이 특수 상대론에 대한 이해 수준을 심층면담을 통해 알아보는 것이다. 심층 면담 대상은 8명으로 특수 상대론 기초 개념 성취도 체크리스트와 광속불변의 법칙, 상대성의 원리, 동시성의 상대성, 차고 역설, 로켓 역설 등 6가지 상황 단계로 구성하여 심층 면담을 실시하고 분석하였다. 학생들은 특수 상대론과 관련된 단순한 현상의 기억, 개념의 암기 수준에서는 비교적 높은 성취도를 보였으나, 특수 상대론을 설명하는 본질적 원리 이해 수준에서는 낮은 성취를 나타냈다. 심층 면담에서 일부 학생들은 사건의 순서를 관찰자의 직관에 의존하였고, 좌표계를 수학적인 관점에서만 이해하고 실제 상황에서 판단하는 데에

는 어려움을 나타냈다. 그리고 관성좌표계를 이해하지 못한 학생들은 상대론적 역설을 자신의 직관으로 설명하였고 학습자 혼돈이 발생하였다. 마지막으로 고등학생들이 형식적 조작기에 속하는 연령이지만 개인적 차이에 의해 시공간의 현상을 이차원 평면에 그리는 활동을 어려워하는 학생들도 있었다.

주요어 : 특수 상대성 이론, 심층 면담, 역설, 고등학생, 상대론 이해 수준, 학습자 혼돈