

# 학생 개념체계의 연속적 세련화와 정교화를 통한 개념 변화 분석<sup>1)</sup> - 이론적 논의를 중심으로 -

박 종 원  
(전남대학교 물리교육과)

An analysis of the processes of conceptual change through  
the successive refinement and articulation of student's  
conceptual framework  
- Focused on the theoretical discussions -

Park, Jongwon  
(Chonnam National University, Department of Physics Education)

## ABSTRACT

This study is for better understanding about the process of students' conceptual change. As a starting point, it is assumed that the process of students' conceptual change can be viewed as the process of the successive refinement and articulation of students' conceptual framework. Based on the theoretical review of conceptual change literature, various processes, which can be involved in the above assumed process, can be found. And also, by analyzing the process of development of scientific knowledge about Planck's blackbody radiation law and Bohr's atom, six types of processes of refinement and articulation of scientific knowledge can be found. It is hoped that these theoretical discussions can guide the direction for obtaining and interpreting the students' real responses during the process of conceptual change.

**Key Words:** process of conceptual change, history of science, evolution of scientific knowledge, conceptual framework.

## I. 서 론

1970년대 학생의 개념을 조사하기 시작한 이래로, 개념변화에 대한 연구와 논의는 다양한 측면에서 계

속되고 있다. 예를 들어, 불일치 해결을 위한 구체적 인 단계와 단계별 사용 전략에 대한 상세한 논의 (Darden, 1992), 불일치 상황에서의 학생의 다양한 반응에 대한 연구(Chinn & Brewer, 1998), 학생의

\*2001.12.11(접수) 2002.2.7(1차 수정) 2002.3.5(최종 통과)

1) 이 논문은 2000년도 학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음. (KRF-2000-C00652)

실제 반응을 과학철학적 관점에서 분석한 연구(Park *et al.*, 2001), 개념변화에서 연역논리의 역할(Park & Han, 2002), 개념변화 과정이 선형적이지 아닐 수 있다는 지적(Caravita & Hallden, 1994; Shymansky *et al.*, 1997; Limon, 2001, 정수인과 박종원, 2001), 기존의 개념변화를 'cold cognition'이라고 지적하고 개념변화 과정에 정의적 요소와 사회적 요소를 포함시킨 논의(Strike & Posner, 1982; Pintrich *et al.*, 1993), 메타인지를 강조한 개념변화 모형 개발 (박종원과 박승재, 1992), 개념변화에서 '개념' 자체에 대해 새로운 관점을 제시한 연구(diSessa & Sherin 1998), 개념변화에 대한 다양한 이론을 함께 고려하여 다중적 모델을 제시한 연구(Tyson *et al.*, 1997), 그리고 수업에 적용하여 개념변화에 성공적인 경우와 그렇지 못한 경우에 인지적 학습활동의 차이에 대한 연구(Biemans *et al.*, 2001) 등 매우 다양한 관심과 접근으로 개념변화에 대한 논의가 있어 왔다.

개념변화에 대한 이러한 다양한 연구와 관심과 관련지어, Kaufman 등(2000)은 학생의 개념변화에 대해 제기될 수 있는 질문을 다음과 같이 요약하였다.

- 형식적 학습 이전에 학생의 지식구조는 어떤 특징을 가지는가?
- 개념변화에서 변화가 일어나는 지식 요소(믿음, 이론, 명제 등)는 무엇인가?
- 개념변화와 발달의 과정과 기작은 어떠한가?
- 과학적 설명을 평가하고 받아들이는 데 사용되는 판단 요소는 무엇인가?
- 개념변화에서 감성적 요인과 동기적 요소는 어떻게 통합될 수 있는가?

이러한 여러 질문들 중에서 본 연구의 주된 관심은 세 번째에 관한 것이다. 좀 더 구체적으로 말하면, 학생의 개념구조는 혁명적인 과정을 통하는가? 진화적인 과정을 통하는가에 대한 문제이다.

그리고, 개념변화에서 '변화'라고 하는 것은 구체적으로 어떤 '변화'를 의미하는 것인가이다. 단지 과학적으로 틀린 내용이 옳은 내용으로 변화되는 것인가?

비정합적인 상태에서 정합적인 상태로 변화하는 것인가?(Kaufman *et al.*, 2000) 아니면, 점차로 세련화되고 정교화되어 가는 식의 변화가 일어나는 것인가? 이미 형성된 나름대로의 체계성이 보다 풍부해지고 분화되고 수정 보완되어 가는 것인가?

본 연구에서는, 학생의 개념구조가 진화적 과정을 통해 변화된다고 가정하고자 한다. 그리고 학생 개념구조의 변화과정은 연속적이고 점진적인 세련화와 정교화의 과정이라고 가정하고자 한다. 여기에서 '가정한다'고 한 이유는 여러 관점들 중에서 각 관점들의 진위를 결정하거나, 어느 한 관점만이 개념변화에 대한 모든 질문에 답할 수 있다고 보기 어렵기 때문이다. 그러나, 본 연구에서는 개념 변화에 대한 그 동안의 연구들을 재고찰하면서 왜 그런 관점을 가지게 되었는지에 대한 근거도 나름대로 제시하게 될 것이다.

이를 위해 본 연구에서는 혁명적 과정과 진화적 과정으로서의 개념변화에 대한 기존의 연구들을 재고찰하고, 개념변화에서 무엇이 어떻게 변화하는 지에 대한 질문과 관련된 연구 논문들을 재고찰하여, 개념변화 과정을 점진적으로 세련화되고 정교화되는 과정으로 볼 수 있는 근거들을 제시할 것이다. 또한 그러한 관점과 관련된 과학사적인 사례도 분석하고자 한다. 이러한 연구에 기초하여, 다음 연구에서는 실제 학생의 개념 변화 과정을 분석하게 될 것이다.

## II. 본 론

### 1. 혁명적 과정과 진화적 과정으로서의 개념변화

Tytler(1998)는 개념변화 이론가들을 크게 두 그룹으로 나누었다. 하나는 아동의 과학지식 발달이 과학에서의 이론변화 과정과 유사하며 따라서 기존의 개념과 구조가 전혀 새로운 개념과 구조로 본질적인 변화를 거친다고 보는 그룹이고, 다른 하나는 지식을 상황 의존적인 성격을 가진 것으로 보며, 따라서 지식의 습득 및 변화 과정이 누적적이고 점진적이라고 보는 그룹이다. 이는 바로 혁명적 과정으로 개념변화를 보는 관점과 진화적 과정으로 개념변화를 보는 관점이라고 할 수 있다.

### 1) 혁명적 과정으로서의 개념변화

혁명적 과정으로서의 개념변화 과정은 개념이나 구조가 완전히 새로운 개념이나 구조로 대체되는 것을 의미한다. 여기에서 '대치'라는 말이 특히 중요하다. 즉, 단순한 수정이나 보완이 아니며, 옛 개념구조와 새로운 개념구조를 서로 양립할 수 없는 불가공약적인 관계로 보는 것이다(Carey, 1985; Posner et al., 1982; Chi, 1992; Chi et al., 1994).

개념변화를 혁명적 관점으로 보는 데에는 과학사가 중요한 역할을 해 왔다. 예를 들어, 개념변화 이론에서 잘 알려진 Posner et al.(1982)의 연구를 보면, 그들은 Kuhn(1972)이 논의한 과학 지식의 발달 모형을 과학학습에 적용하여 학생의 개념변화를 혁명적 과정으로 비유하였다. 즉, 과학학습에는 동화(assimilation)와 조절(accommodation)이 있는데, 이때 조절을 학생이 자신의 중심 개념을 다른 것으로 대체시키거나 재조직하는 급격한 변화라고 하였으며, 이러한 개념변화를 쿤의 과학혁명으로 비유하였다. 따라서 학생의 이전 개념과 변화된 개념은 서로 양립할 수 없는 관계라고 하였다.

Chi et al.(1994)도 존재론적 범주간의 이동으로 개념변화를 설명하면서, 혁명적 과정으로서의 개념변화를 논의하였다. 즉, 개념변화에는 주어진 개념이 기존의 존재론적 나무 가지에서 새로운 존재론적 나무 가지로 편입시키는 것이 포함되며, 옛 의미와 새로운 의미는 서로 일대일 대응이 되지 않는 불가공약적인 관계라고 하였다. 그들은, 열을 초기에는 열소설과 같이 '물질(matter)' 범주로 생각하다가, 높은 온도에서 낮은 온도로 이동함으로써 계의 에너지 변화를 야기시키는 '과정(process)' 범주로 바뀌는 경우를 예로 들었다. 이때 이러한 두 개의 존재론적 범주는 서로 불일치하고 양립할 수 없기 때문에, 한 범주에서 다른 범주로의 이동이 어렵게 마련이고, 이것이 혁명적 개념변화가 어려운 이유라고 하였다.

개념변화의 유형을 몇 가지로 구분하고, 그 중에서 혁명적 개념변화를 정의하기도 하였다. 예를 들면, Carey(1985)는 지식의 강한 재구성과 약한 재구성을 구분하였다. 약한 재구성에서는 개념들간의 관계가 새롭게 제시되고, 그에 따라 새로운 도식이 만들어지

면 새로운 문제를 풀 수 있게 해 주고, 옛 문제에 대해 새로운 해답을 얻을 수 있게 해 준다고 하였다. 그리고 강한 재구성에서는 지식 체계의 핵심에 있는 개별 개념 자체가 변화한다고 하면서, 이러한 강한 재구성을 개념변화라고 하였다. 요약하면, 개념들간의 관계가 변화된 경우를 약한 재구성으로, 개념 자체가 변화된 경우를 강한 재구성으로 본 것이다. 강한 재구성에서는 핵심 개념의 혁명적 재구성이 일어나며 기존의 개념과 호환가능(interstranlatable)하지 않다고 하여, Kuhn(1972)의 불가공약성과 비슷한 개념을 제안하였고, '살아 있는 것'에 대한 아동의 개념 변화 과정을 통해 실험적으로 그의 주장을 확인하였다.

Gentner et al.(1997)은 개념변화에서 비유적 사고가 중요한 역할을 한다는 것을 주장하기 위해, Kepler의 과학사적 분석을 통해 천체 운동에 대해 일어났던 중요한 변화 내용 6가지를 정리하였다. 그리고 이러한 변화들은 서로 수준이 다를 수 있다고 하여, 개념 변화 수준을 크게 세 수준, 즉 믿음 수정, 이론 변화, 개념 변화로 구분하였다. 이때 믿음 수정은 사실의 변화로, 이론 변화는 전반적인 지식 구조의 변화로 보았다. 그리고 개념 변화는 본질적인 개념의 변화이며(앞서 언급하였던 6가지 변화 내용 중에서 3가지가 이에 속한다고 하였다), 적어도 국소적으로 불가공약적인 믿음을 필요로 한다고 하여 개념변화를 옛 개념에서 완전히 새로운 개념으로의 혁명적 변화로 보았다.

좀 더 세부적으로, Thagard(1992)는 개념변화를 단순한 믿음 수정과 개념망의 변화로 먼저 나누고, 다시 세부적으로 개념변화 수준을 9개 단계로 나누었다. 단순한 믿음 수정이란, 개념에 새로운 예가 더해지거나 빠지는 경우(첫번째), 개념에 대한 약한 또는 강한 법칙이 추가되는 되는 경우(두 번째와 세 번째, 예를 들면, 고래는 정어리를 먹는다)에 일어나는 변화를 의미한다. 그리고 개념망의 변화란, 개념에 대해서 새로운 부분관계(예를 들면, 고래도 비장을 가지고 있다)나 부류관계(돌고래와 고래는 같은 부류이다)가 더해지거나(네 번째와 다섯 번째), 전혀 새로운 개념이 도입되는 경우(여섯 번째), 개념들간의 통합이 일어나는 경우(일곱 번째), 그리고 개념망의 한 가

지에서 다른 개념가지로 옮겨가는 경우(여덟 번째)와 개념망 자체가 재조직되는 경우(아홉 번째)를 의미한다. 이때, 여덟 번째와 아홉 번째의 경우는 쉽게 일어나기 어려운 과정으로 개념적 혁명에 해당되는 것으로 보았다.

## 2) 진화적 과정으로서의 개념변화

혁명적 과정으로서의 개념변화보다는 진화적 과정으로서의 개념변화를 강조한 학자들도 많이 있다(예를 들면, Gunstone & Mitchell, 1997; Fensham, Gunstone, & White, 1994).

Caravita와 Hallden(1994)은 국소적 개념의 대치를 목표로 삼는 기존의 개념 변화 관점을 환원주의적 접근법이라고 비판하고, 학습은 여러 가지 측면에서 일어나는 진화적 과정이라고 주장하였다. 그래서 개념 체계의 조직화(organization), 세련화(refinement), 그리고 상황들간의 분화(differentiation)가 개념 체계의 점진적 변화 과정에서 관찰될 수 있는 주요 요소라고 하였다.

Dagher(1994)는 비유를 통한 개념변화 과정은 점진적이고 누적적인 과정으로 더 잘 이해될 수 있다고 하였고, Pearsall, Skipper & Mintzes(1997)는 대학 생물을 배우는 학생을 대상으로, 학생지식의 구조적 복잡성이 점진적인 성장을 보였다고 보고하였다. Limon(2001)은 개념변화에서 인지적 갈등이 중요함을 지적하면서, 개념변화 과정은 옛 개념이 포기되는 것이 아니라 보는 "all-or-nothing"의 과정이 아니며, 오히려 오랜 기간에 걸쳐 일어나는 점진적인 과정이라고 강조하였다. 그리고 개념변화 과정은 선형적이라고 단순하게 가정할 수 없으며, 따라서 개념변화 과정의 세부 과정을 더 이해할 필요가 있다고 강조하였다.

Keil(1989) 역시 아동의 생물개념의 발달 과정을 연구하면서 개념적 혁명을 포함하지 않은 개념변화를 제안하였다. 즉, 생물 영역에서의 아동의 개념변화 과정은 기본적으로 생물학 지식의 발달과정을 포함하

며, 그것은 이미 가지고 있는 초보적 형태의 생물학 이론을 정교화(elaboration)해 가는 과정이라고 보았으며, 따라서 과학 혁명과 같은 혁명적 과정을 가정하지 않았다(Thagard, 1992).

Niaz(1995)는 정량적인 화학 문제와 개념적 화학 문제의 해결에서 나타난 학생들의 해결 전략들을 특징별로 나누고, 이 전략들이 라카토스식의 점진적인 변화 과정을 거친다고 하였다. 즉, 발견적 기능<sup>2)</sup>과 설명력이 증가하는 방식으로 변화해 간다고 하였다. 그리고 그러한 연구에 기초하여, 화학평형에 대해서 라카토스식 개념변화 수업 지도 전략을 개발하였다(Niaz, 1998)<sup>3)</sup>.

Tytler(1998)는 학생의 개념이 연속적으로 진화하면서 변화한다고 보는 이유를, 아동들이 가지고 있는 초기 개념(공기와 압력에 대한 개념)이 앞으로 대치되어야 할 어떤 구조를 갖춘 일관성있는 개념이라고 보기 어렵기 때문이라고 하였다. 그는 아동의 개념생태계는 폭넓은 인식론적 믿음(epistemological commitment)과 형이상학적 믿음 뿐 아니라, 개념과 특정 현상을 서로 연결시켜주는 경험적 연관성(experiential associations)이나 사례들로 구성되어 있다고 강조하였다. 그리고 그 속에서 아동의 다양한 개념들은 보다 진보되고(advanced) 새로운 상황에 대해 일반화된 개념으로 그 범위를 확장해 나가는 방식으로 변화되어 간다고 보았다.

Linder(1993)는 개념을 정신적 모델 관점에서 보지 않고 현상론적 관점에 본다면, 개념의 진보는 기존의 개념을 버리고 새로운 개념을 받아들이면서 일어나는 것이 아니라, 일련의 여러 개념들로부터 특정 현상에 적절한 한 개념을 선택하도록 배워나가는 과정이라고 강조하였다. Tytler(1998)와 Linder(1993)의 지적에 의하면, 학생의 개념 변화 과정은 하나의 일관성있는 초보적인 개념 체계가 새로운 다른 개념 체계로 대치되는 것이 아니라, 여러 개의 다양한 개념들이 동시에 존재하면서, 그 개념들을 여러 상황 속에서 선택적으로 적용할 수 있는 기준과 방법을 알

2) 발견적(heuristic) 기능이란, 연구 프로그램의 성장과정에서 이론적으로 새로운(novel) 사실을 예측할 수 있는 능력을 의미한다.

3) 그러나, 실제 수업에서 학생의 개념이 변화하는 점진적인 과정에 대한 구체적인 데이터와 해석 및 논의는 부족하였다.

게 되어 가는 과정, 그러면서 각 개념들의 내용과 범위가 수정되고 확장되어 가는 과정으로 보았다고 할 수 있다.

이와 같이 학생의 초기 개념이 정합적인 구조를 가지고 있지 않기 때문에 개념 변화 과정을 세련화와 정교화를 통한 점진적인 과정이라고 볼 수 있다는 입장에는 diSessa(1993)의 관점도 포함된다. 그녀는 학생의 초기 개념체계는 일관된 형태의 체계성을 가지고 있기 보다는, 매우 풍부하고 복잡하며 다양한 지식 요소들인 현상론적 초안(p-prism : phenomenological primitives)들로 구성되어 있다고 하였다. 이 현상론적 초안은 공통된 사건들에 대해 최소한도로 추상화시킨 인지 요소이며, 이를 통해 아동이 자신들의 경험을 해석하게 된다. 이때, 현상론적 초안들은 서로 조각나 있거나 느슨하게 연결되어 있기 때문에, 이러한 조각화된 비체계적인 지식조각들이 보다 복잡한 지식 체계로 체계성을 갖추어 나가는 점진적인 과정이 개념변화 과정이라고 보았다.

개념 변화에 대해 진화적 관점을 갖는 이유가 반드시 학생의 초기 개념을 비정합적이라고 보기 때문만은 아니다. 학생 개념을 이미 나름대로의 구조를 갖춘 이론 체계로 보면서도 학생의 개념 변화 과정을 진화적 과정으로 보는 연구자들도 있다. 예를 들어, Vosniadou et al.(2001)은 지구의 구형 모습에 대한 학생의 초기 개념 체계를 선행 조건들과 믿음 등이 정합적으로 구성된 형태로 보았다. 이러한 개념 체계는 새로운 정보에 직면하여 자신들의 선행가정들(entrenched presuppositions)을 폐기하기 보다는 부분적으로 수정하면서 과학적 개념과 조화를 이루어 하나의 통합적 모델(synthetic model)을 만든다고 보아, 개념변화를 점진적 과정으로 이해하였다. 그리고 그러한 개념변화 과정에는 단계적인 순서가 있다고 하였다. 예를 들면, 지구가 둥글다는 것을 이해하기 위해서는 먼저 중력을 이해할 필요가 있고, 중력을 올바르게 이해하기 위해서는 학생들이 생각하는 '위-아래'로의 중력개념을 변화시켜야 하며, 중력은 지구 중심을 향해 당기는 힘이라는 것을 이해해야 한다는 것이다. 즉, 그들은 개념변화 과정을 기존의 개념과 새로운 개념과의 능동적인 통합을 통해 일어나는 점

진적인 변화과정으로 본 것이다. 이러한 관점에서 그들은 다음과 같이 결론을 맺었다.

“최근의 연구에 의하면, 개념변화는 현재 받아들여지고 있는 과학적 설명의 요소들을 점진적으로 통합하면서 초기 개념체계가 천천히 교정(slow revision)되는 과정임을 제안한다. 이러한 과정 중에 학생들은 기존의 믿음이나 가정(presuppositions)을 깨달을 필요가 있다. 그리고 그것의 이론적 특성이나 반증가능성을 깨달을 필요가 있다. 그들은 현재 과학적으로 받아들여지는 관점과 보다 일치하는 방식으로 기존의 개념구조를 천천히 변화시킬 필요가 있다. 결국에 학생들이 보다 큰 설명적 적절성(explanatory adequacy)을 갖는, 보다 큰 이론적 구조를 생성시킬 수 있도록 도와야 하고, 다른 관점에서 고려할 수 있는 유연성을 갖도록 도와야 한다.”

3) 개념 변화 과정 유형에 대한 논의에서 생각해 볼 점  
개념변화 과정을 혁명적 관점으로 볼 것인지, 진화적 관점으로 볼 것인지에 대해서 몇 가지 생각할 측면이 있다.

첫째, 학생의 개념변화과정을 과학사에서의 과학 개념의 변화과정으로 비유할 때 조심할 점이 있다. 과학사에서의 과학 혁명은 학생의 학습 기간에 비해 굉장히 오랜 기간에 걸쳐 다양한 상호작용(실험 장치의 개발, 새로운 데이터, 새로운 관련 이론의 등장, 다른 연구자들과의 논쟁 등) 속에서 일어난다는 것이다. 따라서, 과학사적 사례를 과학 학습 과정에 비유할 때, 단순하게 이전의 개념과 이후의 개념만을 비교해서는 안되고 구체적으로 변화과정에서 일어나는 다양한 상호작용과 변화과정에 관심을 기울일 필요가 있다. 즉, 학생의 개념변화 과정을 이해하고자 할 때, '개념 변화가 일어나는 중간 세부 과정'과 '개념 변화 이전과 이후에 나타난 개념들을 서로 비교한 것'을 구별할 필요가 있다는 것이다. 예를 들면, Vosniadou(1999)는 짧은 기간 동안에 일어나는 개념적 재구성은 점진적 변화라고 할 수 있고, 초심자가 오랜 기간에 걸쳐 전문 과학자가 되었을 때, 전문 과학자가 결과적으로 구성된 개념을 초심자의 것과

비교하면 혁명적 변화에서 말하는 개념적 재구성에 해당될 수 있다고 보았다. 따라서, Vosniadou(1999)는 다음과 같이 강조하였다.

“앞으로의 연구는 작고 점진적인 변화를 통한 개념적 재구성이 어떻게 오랜 기간에 걸치면서 혁명적 재구성을 일으키게 하는지, 그리고 이러한 것이 수업지도에 어떤 시사점을 주는지에 대한 문제를 계속 제기할 필요가 있다.”

또한, 학생의 개념변화 과정을 개념 조절로 보고 이것이 혁명적 과정으로 일어난다고 보았던 Posner et al., (1982)도 다음과 같이 지적한 바 있었다.

“우리는 개념 조절을 개념 체계 내에서의 급격한 변화로 서술하였다. 그러나 개념조절이 급격하다는 것이 출발적이라는 의미는 아니다. 실제로 학생들의 개념조절은 점진적이며 일부분에서 점차 확산되듯이 일어난다는 가정이 적절할 수도 있다. ... 그러면서도 최종적으로는 그 자신의 중심 개념이 본질적으로 재조직되거나 변화가 일어나게 된다. ... 개념조절은 많은 잘못된 출발이나 실수로 방향을 자주 바꾸는 일을 포함한다고 볼 수 있다”

따라서, 본 연구에서 개념 변화 과정을 진화적 과정으로 본다는 것은 개념 변화의 이전과 이후의 특성을 단순히 비교하기 보다는, 개념이 실제로 변화해 나가는 세부 과정에 보다 관심을 둔다는 것을 의미한다고 하겠다.

둘째로, 개념변화 과정이 혁명적인가 진화적인가 하는 문제는 내용과 상황에 따라 다를 수 있다는 것이다(Caravita, 2001). Thagard(1992)도 개념변화의 특성은 과제 영역에 따라 다를 수 있다고 하였다(Thagard, 1992, p. 256). 그는 아동의 개념변화에 대해 어떠한 결론을 내릴 수 있는냐는 질문에 대해서, 아마도 천문학, 생물학 등에서의 개념변화는 과학혁명과 같은 방식으로 일어나지 않는 반면, 물리학에서는 과학혁명과도 같은 개념적 재구성(범주간 이동이나 개념체계의 한 가지에서 다른 가지로의 이동)

이 포함될 수 있다는 제안을 하였다. 이러한 제안에 대해서 그는 성급할 수 있다고 하였지만, 그의 제안은 학습심리과정의 영역에 따라 다를 수 있다는, 즉 역사를 학습할 때의 심리적인 과정과 과학을 학습할 때의 심리적인 과정, 그리고 나아가 생물학이나 천문학을 학습할 때의 심리적인 과정과 물리학을 학습할 때의 심리적인 과정이 다를 수 있다고 생각해 볼 수 있다는 측면에서 흥미로운 제안이라고 생각한다. 좀더 미시적으로는 아리스토텔레스적 역학 개념에서 뉴턴적 역학 개념으로의 변화과정과, 전류개념의 변화 과정이 서로 다른 특성을 가진다고 볼 수도 있을 것이다. 따라서, 이러한 제안은 개념변화 과정과 개념 내용이나 특성 간의 상호작용에 대한 앞으로의 연구를 위해 의미있는 제안이라고 생각한다.

## 2. 개념 변화 과정에서 ‘변화’의 의미

개념변화에서 무엇이 어떻게 변화하는지에 대한 논의, 즉, ‘변화’의 의미에 대한 논의가 명확하게 제시된 문헌은 생각보다 많지 않다(Duit, 1999). 따라서, 여기에서는 개념변화에서 무엇이 어떻게 변화하는지에 대한 논의를 정리해 보고자 한다.

이때, 개념변화의 과정에 대한 논의는 개념을 무엇으로 정의하는가에 대한 논의와 밀접하게 연관되어 있다. 예를 들어, 개념을 하나의 개별된 개념 내용으로 본다면, 내용 자체가 새로운 다른 내용으로 수정되거나 대체되는 것을 개념변화로 볼 수 있으나, 개념을 개념들간의 관계까지 포함된 것으로 본다면 개념들간의 관계 변화도 개념변화로 볼 수 있을 것이다. 따라서, 개념변화 과정을 이해하고자 할 때, ‘어떻게 변화’하는 가에 대한 논의뿐만 아니라, ‘무엇이 변화’하는 가에 대한 논의도 포함될 것이다.

### 1) 개별 개념 내용 자체의 변화

먼저 개념을 구체적인 개별 내용으로 보고, 개념 변화의 의미를 옛 개념 내용으로부터 새로운 개념 내용으로 개념 자체가 변화하는 것으로 보는 관점이 있다. 즉, 기존의 개념 C<sub>1</sub>(예를 들면, 전류가 소모된다)이 새로운 개념 C<sub>2</sub>(예를 들면, 전류는 보존된다)로 변

화하는 경우이다. 이때,  $C_1$ 은 폐기되면서 새로운 개념  $C_2$ 로 대체된다고 보는 것이 대표적인 혁명적 개념변화에 대한 관점이다(Strike & Posner, 1992).

그러나,  $C_1$ 이 폐기되고  $C_2$ 로 대체되는 과정만이  $C_1$ 에서  $C_2$ 로의 개념변화라고 보지 않는 실험적 결과와 주장들도 많이 있다(Wiser & Amin, 2001; Duit, 1999; Mortimer, 1995; Bliss & Ogborn, 1994; Gunstone, 1994). 즉,  $C_1$ 을 완전히 폐기하기 보다는  $C_1$ 과  $C_2$ 가 적용될 수 있는 상황을 각기 구별하여  $C_1$ 이 살아남으면서  $C_2$ 를 받아들일 수도 있으며,  $C_1$ 과  $C_2$ 를 적절하게 조화시키면서  $C_2$ 를 받아들일 수도 있다(Pozo et al., 1999; Vosniadou, 1994; Vosniadou & Brewer, 1992). 예를 들어, 속도의 상대론적 합을 이해하기 전에, 갈릴레오적 속도의 합 ( $C_1$ )을 그대로 가지고 있으면서 빛의 속도 일정에 대한 가정 ( $C_2$ )을 받아들이는 경우나, 편평한 지구 모형 ( $C_1$ )과 구형지구 모형 ( $C_2$ )을 조화시켜 타원형 모형(가운데에 편평한 부분이 있는)으로 변화시키거나 구 속에 평면이 들어 있는 모형으로 변화시킨 경우가 그것이다.

물론, 이러한 경우에 우리는 완전한 개념변화가 이루어지지 않았다고 주장할 수도 있다. 그러나 그러한 주장을 하는 근거는 ' $C_1$ 의 폐기와  $C_2$ 로의 드라마틱(dramatic)한 대체'만을 개념변화라고 보기 때문이다. 따라서 개념변화를 혁명적 관점이 아닌 진화적 관점에서 본다면,  $C_1$ 과  $C_2$ 가 적용되는 상황을 구분하는 방식으로의 변화나  $C_1$ 과  $C_2$ 가 융합하는 방식으로의 변화도 앞으로 계속될 일련의 변화과정 속에 놓인 미시적인 개념변화라고 볼 수 있다.

이러한 관점은 개념 변화를 개념의 지위가 변화하는 것으로 보는 관점과도 유사하다(Hewson & Hanessey, 1992). 예를 들어, Treagust et al.(1996)은 비유를 사용하여 빛의 굴절에 대한 학생의 개념변화 과정을 조사하여, 학생의 개념적 지위는 지적인 상태에서 그럴듯한 상태로, 그리고 유용한 상태로 변화해 가며, 이러한 과정은 개념적 교환(conceptual exchange)이나 조절(accommodation)보다는 개념적 습득(conceptual capture)(Hewson & Hewson, 1992)이나 동화(assimilation)에 가깝다고 하였다.

## 2) 존재론적 범주간 이동과 범주의 특성 변화

개념변화에서 개별 개념 내용 자체의 변화가 아닌 다른 측면에서의 변화를 강조한 경우도 있다. 먼저 개별 개념 내용 자체는 변화하지 않지만, 하나의 존재론적 범주에서 다른 존재론적 범주로 범주간 이동을 개념변화로 설명한 연구자들이 있다(예를 들면, Chi et al., 1994). 그것은 기본적으로 개념의 속성이 범주화에 있다는 가정에서 출발한 것이다. 즉, 사물이나 사건, 또는 현상에 대한 공통된 속성을 범주화하고 그러한 공통된 속성을 추상화한 결과물을 개념이라고 본다면, 개념변화를 범주화의 변화로 볼 수 있다. 예를 들어, Chi et al.(1994)은 열의 개념이 '물질(matter)' 범주에서 '과정(process)' 범주로 이동한 경우를 개념변화로 예시하였다.

Chi et al.(1994)이 존재론적 범주간 이동을 개념변화로 본 반면, Pauen(1999)은 범주 구조 자체의 변화도 개념변화로 보았다. 그리고 이러한 범주 구조의 변화로 3가지 유형을 들었다. 첫째, 전혀 구조화되어 있지 않은 상태에서 점차로 추상성과 구조를 갖추어 나가는 변화, 둘째, 처음부터 인과적이고 정합적인 구조를 갖추고 있었으나, 현상과의 관련성이 점차로 풍부해져 가는 변화, 그리고 셋째, 이러한 두 가지 유형이 동시에 그리고 비선형적으로 이루어지는 경우가 그것이다. 즉, Pauen(1999)은 범주 구조의 추상성이나 정합성 등이 변화하는 것으로 개념 변화를 논의하였다. 추상성과 정합성의 변화에 대한 논의는 뒤에서 다시 자세하게 다룰 것이다.

## 3) 개념 구조의 변화

Carey(1985)는 개념 변화 유형을 약한 재구성과 강한 재구성으로 나누었는데, 약한 재구성의 경우에는 개념 자체는 변화하지 않으면서 개념들간의 관계만이 변화한다고 보았다. 개념들간의 관계가 변화하면, 새로운 개념이나 개념체계(schemata)의 형성을 촉진하고 새로운 문제를 해결할 수 있게 해주며 옛 문제에 대해 알려졌던 답과 다른 새로운 답을 제시해 준다. 이러한 재구성에는 장기를 두는 초심자가 전문가로 변화하는 경우를 들 수 있다.

사실 Carey(1985)는 이러한 약한 재구성을 진정

한 개념변화로 보지 않았다. 그러나 개념과 개념과의 관계와 개념 구조 변화도 개념변화의 중요한 측면이라고 본 연구자들도 많이 있다. 왜냐하면, 개념의 의미는 다른 개념들과의 관련성 속에서 결정된다고 볼 수 있기 때문이다(Chalmers, 1986).

“개념의 의미는 그 개념이 쓰여지는 이론의 구조에 의존하고, 이론의 정확성과 정합성의 정도가 개념의 그것을 결정한다는 것을 더욱 더 분명히 알 수 있게 된다. ... 첫째는 역사적 연구 결과, 이론은 조직화된 구조를 띠고 있는 것으로 나타났으며, 둘째는 개념들은 오직 정합적으로 구성된 이론에 의해서만 정확한 의미를 얻을 수 있다는 사실이다.” (pp. 78 - 79)

이러한 관점은, 개념학습은 개념과 개념이 연결된 명제를 통해 이루어진다고 강조한, 그래서 개념도 (concept map)를 개념적 이해를 돕는 유용한 도구로 사용한 Novak(1998)에게서도 볼 수 있다.

이러한 측면에서, 아동의 개념체계를 이루는 구성 요소들과 그러한 요소들간의 구조와 관계를 보다 구체적으로 제시하고, 그에 기초하여 개념변화 이론을 제시한 연구자도 있다. 예를 들어, Vosniadou(1994)와 몇몇 연구자들(Vosniadou & Brewer, 1992; 1994)은 아동의 개념체계를 틀이론(framework theory) 과 특정 이론(specific theory) 으로 구성된 구조물로 보았다. 또, 틀이론은 세계가 어떻게 운행되는지에 대해 마음 깊이 새겨져 있는 존재론적이고 인식론적인 기본 전제(presuppositions)들로 구성되어 있으며, 특정 이론은 명제와 믿음, 정신적 모델들이 얽혀져 있는 구조물로서 이것이 어떤 개념에 대한 내적 구조물이라고 하였다.

Vosniadou(1994) 에 의하면 개념변화는 풍부함(enrichment)과 수정(revision)을 통해 일어난다. 먼저, 풍부함(enrichment)은 기존의 개념구조에 새로운 정보가 더해지면서 구조가 변화하는 방식으로 변화하는 것으로서, 달에 대한 일반적인 개념상태에서

‘달에도 분화구가 있다’는 설명과 그림, 또는 관찰을 통해 달에 대한 개념이 풍부하게(enrichment) 된 경우를 예로 들 수 있다. 수정(revision)은 전제조건들(presuppositions), 믿음, 정신적 모델 자체의 변화뿐 아니라 이론들간의 구조 변화를 통해 일어난다.

특정 이론(specific theory)에 비해 틀이론(framework theory)은 상대적으로 더 정합적인 설명 체계를 가지고 있으며, 일상경험에 의해 오랫동안 확증받아 왔기 때문에 훨씬 강하게 마음 속 깊이 새겨져 있어서 그 변화가 훨씬 더 어렵다. 따라서, 학생이 새로운 정보에 직면하게 되면, 틀이론에서 드라마틱한 변화가 일어나기보다는, 연속적으로 풍부해지고 분화되고 수정되어 가는 과정을 거치게 된다. 이때, 종종 기대되지 않은 방향으로의 변화도 일어나게 되는데, 예를 들면, 어떤 학생은 비일관성을 야기시키거나(태양 중심설과 저녁에 태양이 진다는 개념을 동시에 가지게 되는 경우), 암묵적 지식으로 저장해 놓기도 하며(특정 경우에만 그렇다고 별개로 기억해 두었다가 그 상황에서만 꺼내어 사용하는 경우), 또는 새로운 오개념이 유발되기도 한다. 즉, Vosniadou(1994)는 McCloskey(1983)나 Carey(1985)와 달리, 오개념을 자발적인 구성물로서 어떤 상황을 검증하거나 이해하려는 노력 과정에서 생성된 것으로 보고, 깊게 가지고 있는 특정 이론이 아니라고 본다. 즉, 오개념은 학생이 불일치되는 설명 구조를 조화롭게 하려는 시도에서 야기된 것이므로, 바꾸기 힘든 것은 바로 전제 조건들(presuppositions)이며 오개념 자체는 아니라고 본다.

예를 들어, 등속으로 움직이는 물체에 움직이는 방향으로 힘이 작용한다고 생각하는 오개념을 바로잡기 위해서는, 오개념 자체보다는 보다 깊이 마음 속에 새겨져 있는 틀이론을 변화시켜야 한다고 보았다. 즉, ‘무생물은 스스로 움직이지 못하고, 움직이려면 힘이 필요하다’는 틀이론이 그것이다.

이와 같이 Vosniadou(1994)는 학생의 지식 구조를 보다 세분화하고 구체적인 구성 요소들을 제시하면서

4) 정신적 모델이란, 특정 상황의 요구에 대처하기 위해 임시방편적으로 생성된, 정신적으로 조작될 수 있는 비유적이고 생성적인 표상이라고 할 수 있다(Caravita, 2001). 따라서 설명보다는 덜 구조화되어 있다. 그러나 임시방편적이라고 해서 항상 유동적이고, 비안정적인 것만은 아니다. 정신적 모델 중에서는 특정 현상에 한정되어 있지만 꽤 안정적으로 형성된 경우도 많이 있다.



그에 기초한 개념변화를 논의하였고, 특히 왜 과학적 정보에 직면하여 학생들이 예기치 못한 반응을 보이며, 오개념이 변화되기 어려운지를 설명하였다. 그리고 학생의 개념변화 과정을 왜 연속적으로 수정 분화되어 가는 과정으로 볼 수 있는지도 설명하였는 점에서 여러 가지 중요한 시사점을 준다.

그러나 한가지 개선해야 할 점을 지적한다면, 인지 구조를 이루는 요소들, 즉, 전제조건(presupposition), 믿음, 정신적 모델 등의 구분을 위한 좀 더 명확한 기준이 필요하다는 것이다. 왜냐하면, 틀이론과 특정 이론간의 구분이 명확하지 않게 되면 개념이 보다 큰 이론들 속에 들어있고, 따라서 성공적인 개념변화를 위해서는 특정 현상에서 나타난 오개념 자체가 아니라 오개념의 형성에 영향을 미친 틀이론이라는 주장이 설득력을 얻기 힘들게 되기 때문이다.

#### 4) 개념과 현상과의 관계 변화

Carey(1985)는 강한 재구성의 경우에는 다음 3가지 변화가 항상 함께 일어난다고 보았다: (1) 이론 체계(개념 체계)가 설명하고 있는 현상들의 영역 변화, (2) 현상들에 대한 설명의 변화, (3) 이론 체계(개념 체계) 속에 포함된 개별 개념 자체의 변화.

이러한 Carey(1985)의 개념변화 설명에서 중요한 측면은, 개별 개념 내용 자체의 변화뿐 아니라 개념이 설명하고 있는 현상 범위의 변화와 그러한 현상에 대한 설명 내용의 변화를 강조했다는 점이다. 즉, 개념적 이해에는 개념자체나 개념간 관계의 이해에만 한정되는 것이 아니다. 개념의 이해에는 개념과 현상과의 관계에 대한 이해도 포함된다는 것이다.

나아가 Caravita(2001)는 우리가 말하는 학생의 개념은 어떤 설명이론이라고 보기 힘들며, 현상에 대한 직관적 해석으로서 직관적으로 추측된 관계나 패턴으로 보아야 한다고 가정하였다. 따라서, 개념변화를 구체적인 특정 현상에 대한 직접적인 해석의 변화로 보았다. 즉, 개념변화는 특정 현상과의 관련성 속에서 상황의존적으로 일어난다는 것이다(Gunstone & Mitchell, 1997; Tao & Gunstone, 1999).

이것은 개념을 일반화된 추상적인 수준에서 정의하는가, 아니면 보다 제한적이고 상황적인 수준에서 정

의하는가와 관련이 있다. 예를 들어, '힘이 작용하지 않으면 운동상태가 유지된다'는 관성의 법칙을 일반화된 추상적 수준에서의 개념이라면, '마찰이 작용하는 책상 위에서 등속운동하는 나무 블록에 작용하는 알짜힘은 없다'는 생각은 제한적이고 상황적인 수준에서의 힘과 운동과의 관계에 대한 개념이라고 볼 수 있다. 이때 개념과 현상과의 관계 속에서의 개념적 이해란, 위에서 언급한 후자의 경우에 대한 이해를 의미하는 것이다.

개념을 개념과 연결된 상황이나 현상과의 관계 속에서 보아야 한다는 입장은 diSessa(1993)의 연구에서도 볼 수 있다. 그녀는 초보적인 수준의 학생 개념 요소를 현상론적 초안(p-prism : phenomenological primitives)이라고 명명하였는데, 이것은 바로 공통된 특정 상황들에 대해 최소한도로 추상화시킨 인지요소라는 것이다. 학생들은 이것을 통해 자신들의 경험을 해석하게 된다.

개념의 본성을 논의할 때 개념과 현상과의 관계를 강조하는 이유는, 학생의 개념구조는 초기에 직접적인 경험을 통해 형성되며, 이때 형성된 수준이 매우 모호하고 이론적인 구조를 갖추고 있지 못하고 특정 경험과 현상, 그리고 특정 상황 속에 그 개념의 의미가 주어지는 경우가 많다고 보기 때문이다. 따라서 이러한 관점에 의하면, 개념변화는 특정한 현상이나 상황으로부터 다양한 현상이나 상황으로 확장되어 가면서 상황이나 현상에 따라 서로 다른 개념으로 분화되거나, 겉보기에 다른 상황이나 현상들 속에서 개념들이 공통된 속성으로 서로 융합되는 것과 같이, 점진적이고 연속적인 과정으로 볼 수 있을 것이다.

이때 흥미로운 점은, 학생의 개념은 비록 일반화된 물리학 개념에 비추어서 틀렸지만, 특정 상황이나 현상에서 보면 옳을 수도 있다는 것이다. 예를 들어, '책상 위의 물체에 일정한 힘으로 밀면 물체가 등속으로 운동한다'는 개념(C1)은 일반화된 물리학 지식에 비추어 보았을 때 틀린 것이지만, 마찰이 흔히 존재하는 일상적인 상황에서는 옳을 수 있다는 것이다. 단지, 상황과 현상에 대한 분석이나 그 속에 포함된 조건 인식 등이 부족한 것일 뿐이다. 따라서, 이때 관심을 가져야 할 것은 단순히 개념 C1을 버리고 '일정

한 힘이 작용하면 물체는 일정한 가속도로 운동한다'는 새로운 개념(C<sub>2</sub>)을 채택하는 것이라기 보다는, '마찰이 작용하는 경우(상황 1)와 그렇지 못한 경우(상황 2)'를 서로 구분하는 것이라고 하겠다. 결국 개념 변화란, 개념 C<sub>1</sub>이 상황 1만 고려했던 수준에서 상황 2까지 고려하는 수준 (C<sub>2</sub>)으로 보다 정교화되고 세련화되어 가는 과정으로 볼 수 있을 것이다.

이러한 측면에서 Mortimer(1995)는 새로운 개념은 반드시 옛 개념과 대체될 필요는 없다고 지적하였고, 학생들은 각 개념과 관련된, 그리고 각 개념이 사용되고 적용되는 영역을 인식하고, 각 개념들간의 위계적 관계 (예를 들면, 과학적 개념이 일상적 개념을 포괄하고 설명하는 것과 같은)를 깨달을 필요가 있다고 하였다. 이때 문제가 될 수 있는 것은 과학적 개념과 일상적 개념이 서로 모순을 일으킬 수 있고, 따라서 학생의 개념체계가 정합성을 갖추기 어렵다는 측면이지만, 이것은 실제 과학 활동에서도 충분히 일어날 수 있는 일이라는 것이다. 예를 들면, 보어(Bohr)의 원자모형에서 새로운 가정과 기존의 고전 물리학적 체계가 서로 정합적이지 못했던 예가 그것이다(자세한 논의는 뒤의 역사적 사례에서 다시 다룰 것이다).

마찬가지로, Spada(1994)도 일상적 개념과 과학적 개념은 오히려 서로 상호보완적이라고 하였고, Linder(1993)는 갈릴레오식 시간 개념이 버려지고 아인슈타인적 시간개념으로 대체되어야 한다는 주장을 반대하였으며, Wiser & Amin(2001)은 열현상에 대한 일상적 개념과 과학적 개념의 통합을 개념변화로 보았다. 이때, 두 개의 개념은 상황에 따라 각기 살아남을 수 있으므로, 상황에 따라 상황에 적절한 개념을 이끌어 내는 능력이 학생에게 필요한 중요한 능력이라고 할 수 있다(Limon, 2001; Spada, 1994; Caravita & Hallden, 1994). 그리고 어떤 요인들이 상황에 적절한 개념을 이끌어내는데 영향을 주는지를 조사한 Pozo *et al.*, (1999)은, 학생들이 가지고 있는 다중적 개념들 중에서 무엇이 활성화되는지는 과제의 형태나 상황에 따라 그리고 나이와 교육 정도에 따라 다르다는 것을 관찰하였다.

##### 5) 추상성의 변화

개념변화에서 '어떻게 변화' 하는가에 대한 논의에는 개념 내용이나 구조의 변화 뿐 아니라, 개념 내용이나 구조 등의 추상성이나 정합성이 어떻게 변화하는가에 대한 논의도 포함된다. Carey(1985)도 (개념들간의 관계변화를 진정한 개념변화에 포함시키지 않았지만) 개념들간의 관계와 구조 변화에는 추상성과 정합성 등의 변화가 따른다고 보았다. 이때 일반적으로는 지식이 구조화되어 갈수록 지식구조의 성격은 점차로 추상화되어 간다고 본다. 예를 들면, Caravita & Hallden(1994)도 지식이 구조화되어 갈 때 한가지 특징은 탈 상황화라고 지적하였다.

그러나, 개념 변화의 과정이 '구체적인 것에서 추상적인 것으로' 발달(피아제의 구체적 조작에서 형식적 조작으로의 인지발달 관점도 이에 포함)해 나간다는 일반적인 관점과 달리, 아동의 지식구조가 오히려 '추상적인 것에서 구체적인 것으로' 발달한다고 제안한 연구자도 있다(Simon & Keil, 1995). 그들에 의하면, 개념의 변화는 구체적인 수준의 개념에서 보이지 않는 추상적인 개념으로 일어나기보다는, 먼저 추상적인 개념구조가 만들어지고 세분화(differentiation)되고 풍부화(enrichment)되는 과정을 통해 구체화된다고 하였다. 즉, 한 두 번의 사례만으로 먼저 추상적 수준의 개념을 형성하고 이후에 보다 많은 다양한 사례들을 통해 개념이 점차로 구체화될 수도 있고, 한 영역에서 형성된 추상적 수준의 개념을 이용하여 새로운 영역(그 영역에 대한 구체적인 사례와 경험이 매우 적은 상태에서도)에 대해 추상적 개념을 형성하고(예를 들어, 이미 알고 있는 중력 위치 에너지 개념으로부터 새롭게 전기적 위치 에너지 개념을 형성하는 경우), 이후의 구체적 사례와 관련 현상을 통해 구체화될 수도 있을 것이다(Simon & Keil, 1995).

한편, 개념이 추상적으로 발달하는가, 구체적으로 발달하는가에 대한 논의는 개념의 특성에 따라 다를 수도 있다. 예를 들어, White(1994)는 과학학습 지도가 개념 내용의 특성에 따라 달라질 수 밖에 없다고 지적하면서, 한가지 예로 일상 경험과 직접적인 관련을 가지고 있는 개념(예를 들면, 힘이라는 개념)과 그렇지 못한 개념(예를 들면, 원자 개념)을 들었다. 이

러한 개념의 특성 차이에 의해, 전자의 경우에는 학생들이 쉽게 경험을 통해 구체적인 개념을 이미 가지고 있을 수 있으므로 학생들의 개념을 보다 추상화된 개념으로 발달시킬 필요가 있는 반면, 후자의 경우에는 추상적인 개념을 비유나 실제 실험 결과 등에 비추어 보다 구체화된 개념으로 발달시킬 필요가 있다는 것이다.

구체성에서 추상성으로의 변화와, 추상성에서 구체성으로의 변화는 배타적으로 일어난다고 보다는 순환적으로 일어난다고 볼 수도 있다. Song *et al.*, (2001)은, 과학활동에서 이상조건의 사용이 중요한 측면임을 강조하면서, 이상조건을 다루는 과정이 구체적인 현상에서 이상화된 물리 세계의 구축으로, 다시 이상화된 물리 세계와 실제 현상과의 연결로 진행되며, 이러한 과정이 순환적으로 일어난다고 지적하였다. 예를 들어, 갈릴레오가 무거운 것이 먼저 떨어진다는 아리스토텔레스의 설명에 반박하는 과정을 요약해 보자(Park *et al.*, 2001): (1) 경험에 의하면, 무거운 것이 가벼운 것보다 그렇게 빨리 떨어지지 않는다(구체적 현상), (2) 이상화된 사고실험에 의하면, 아리스토텔레스적 관점에 모순이 있다(추상적/이상적), (3) 따라서, 무거운 것과 가벼운 것은 동시에 떨어진다(추상적/논리적), (4) 그러나, 실제 현상에서는 무거운 것이 가벼운 것보다 조금 빨리 떨어진다는(구체적 현상), (5) 실제로는 공기와 같은 매질이 영향을 주기 때문이다(구체적 현상), (6) 따라서, 극한 사례 분석(limit case analysis)에 의하면, 공기가 없는 이상적인 상황에서는 모든 물체가 동시에 떨어진다는(추상적/이상적). 즉, 개념은 초기의 구체적인 실제 경험에서 출발하지만, 핵심 변인들만을 추출하는 이상화된 조건을 설정함으로써 추상화된 개념으로 발달하게 된다. 그러나, 추상화된 개념이 다시 현실 세계에 적용되고, 이상조건으로 무시되었던 조건(공기 저항)이 다시 포함되면서 보다 구체성을 갖는 방향으로 발달한다는 것이다.

과학 지식의 구체성으로의 변화와 추상성으로의 변화가 순환적으로 일어난다고 보면, 학생 개념의 변화 과정도 선형적(linear)이 아닐 수 있음을 시사한다. 예를 들면, Shymansky *et al.*(1997)은 학생개념의

변화과정을 오랜 기간에 걸쳐 관찰해 보면, 진보(progression)와 회귀(regression)가 반복해서 일어나는 톱니 형태의 성장 과정을 보인다고 하였다. 물론, 그들의 톱니 형태의 지식 성장 과정에 대한 연구에서는 구체성과 추상성의 순환과 직접적인 연관을 짓지는 않았지만, 그들 연구가 학생 개념은 한 두 번의 드라마틱한 변화에 의해 일어나기보다는 연속적이고 점진적인 변화를 통해 일어난다는 점을 시사하고 있다고 하겠다.

#### 6) 정합성/체계성의 변화

개념구조가 추상적으로 발달하는가, 보다 구체성을 갖는 방향으로 발달하는가에 대한 논의 뿐 아니라, 정합적인 구조를 갖추는 방향으로 일어나는가 이미 정합적인 구조를 가지고 출발하는가에 대한 논의도 개념변화에서 중요하게 다루어지는 측면이다.

먼저 아동의 초기 개념구조는 정합적 구조를 갖추지 못하고 체계가 없는 낱개의 지식이라고 보는 관점이 있다. 이 관점에 의하면 개념변화 과정은 비정합적인 상태에서 점차로 체계성과 정합성을 갖추어 나가는 과정이라고 볼 수 있다.

예를 들어, diSessa(1993)가 언급한 현상론적 초안(p-prism : phenomenological primitives)들도 일관된 형태의 체계성을 가지고 있지 않으며, 매우 풍부하고 복잡하며 다양하게 구성되어 있다고 본다. Vygotsky(1934, 1986)는 아동의 개념이 구조화되지 않은 경험에 기초한 예시적 개념들로부터 하나의 원리에 기초한 논리적인 구조를 갖춘 개념 체계로 발달해 나가는 3단계 발달과정을 제안하였다: (1) 대부분 지각적인 인상에 기초한 예시적 개념들의 구조화되지 않은 덩어리들, (2) 사물들간에 존재하는 연결에 의해 구조를 이루지만, 논리적인 구조라기 보다는 전반적 유사성에 기초한 구체적인 연결, (3) 추상적이고 논리적인 사고에 기초하여 하나의 원리에 기초한 정합적인 구조(Keil, 1989).

이후에 diSessa & Sherin(1998)은 개념을 개념에 대한 내용뿐 아니라 개념을 형성하는 과정까지 함께 통합시켰다. 즉, 개념을 통합체(coordination class)라고 지칭하면서, 이것은 인과적 연결망(causal net)과

정보추출전략(readout strategy)으로 구성되어 있다고 하였다. 인과적 연결망(causal net)이란, 변인들간의 인과적 관련성에 대한 정보를 가지고 있는 것으로 뉴튼의 운동방정식을 예로 들 수 있다. 보다 초보적인 인과적 연결망(causal net)으로는 '물체를 밀면 더 멀리 간다'와 같은 구체적인 현상과 관련된 것(이것은 diSessa는 1993년 논문에서 현상론적 초안이라고 명명하였었다. 즉, 초보적인 형태의 인과적 연결망을 현상론적 초안이라고 할 수 있다)을 예로 들 수 있다.

여기에서 정보추출전략(readout strategy)이란, 세계로부터 정보를 얻는 방법을 의미하는데, 예를 들면, 주어진 내용이 어떤 범주에 들어갈 지 결정하는 전략(예를 들면, 어느 자동차의 속도가 더 빠른지를 결정하는 방법), 다양한 상황과 풍부한 정보 속에서 믿을 만하고 결정적인, 그리고 관련된 정보와 특징들을 선택할 수 있는 전략, 여러 관찰들을 서로 조합시킬 수 있는 전략 등이 그것이다. 이러한 전략의 사용을 통해 다양한 상황과 풍부한 정보들을 통합(integration)시키게 되고, 그렇게 통합된 다양함 속에서 하나의 동일한 정보를 구축하게 되는데, 이를 가리켜 불변의 특성(invariance)이라고 하였다. 이와 같이 불변의 특성을 구축함으로써, 복잡해 보이는 다양한 정보와 상황 속에서 정합성을 유지하게 된다는 것이다.

비정합적인 상태의 예를 들어 보면 어떻게 학생개념이 정합성을 갖추어 나가는 방향으로 변화되어야 하는지를 알 수 있다. 만일 어떤 학생이 힘( $F=ma$ )과 무게(들고 있을 때의 힘), 중력(지구가 당기는 힘)에 대해서는 별개로 잘 알고 있었지만, 중력을 물체의 무게라고 보지 않고 중력가속도라고 보고 '무겁건 가볍건 중력은 같아요. 무거운 것은 질량이 크기 때문이에요'라고 응답하였다면, 그것은 힘과 무게와 중력이 올바르게 통합(integration)되지 못한 경우라고 하겠다. 또, 책상 위의 책에 대해서는 작용력과 반작용력을 잘 지적하였지만, 마찰력에 대해서는 반작용력을 잘 지적하지 못했다면, 그것은 여러 가지로 걸 보기에 다른 상황들 속에서 공통적인 불변의 특성을 가진 개념이 형성되지 못한 경우이다.

요약하면, diSessa와 Sherin(1998)은 학생 개념 체

계가 정합적으로 발달한다는 의미를, (1) 정보추출 전략을 통해 다양한 상황과 정보들을 통합시켜 불변의 특성을 구축해 나가는 것으로, 그래서 (2) 개념 내용이 현상론적 초안에서 인과적 관련성을 갖게 되는 것으로 본 것이다. 이 외에, Thagard(1992)도 설명적 정합성이 증가하는 식으로 개념변화가 일어난다고 지적하였다.

그러나, 어린 아동들의 개념체계도 이미 정합적인 구조를 갖추고 있다고 보는 연구자들도 많이 있다. 예를 들어, Vosniadou(1994)는 앞서 논의한 바와 같이 아동들도 이미 정합적으로 구조화된 개념체계를 가지고 출발한다고 가정한다. 즉 아동들은 어떤 행동들에 대해서 인과적 설명을 할 수 있도록 믿음이나 개념의 체계를 가지고 있다는 것이다(Thagard, 1992, p. 256). Brewer and Samarapungavan(1991) 역시 천문학에 대한 아동의 지식구조는 과학적 이론과 매우 유사한 요소들을 포함하고 있음을 보였으며, Vosniadou & Brewer(1992)도 지구에 대한 학생의 정신적 모델이 정합적임을 관찰하였다. 어린 아동의 초기 개념들이 이론적 체계를 갖추고 있다는 측면에서 정합적인 구조를 가지고 있다는 주장은 Murphy & Medin(1985)에게도 찾아볼 수 있다. 따라서, 이들은 개념들이 흐트러져 있고 비정교화된 상태에서부터 강하게 구조화되고 이론적으로 유도된 것으로 발달해 간다는 개념변화 생각을 반대한다.

아동들이 이미 정합성을 갖추고 있다고 가정한다면, 우리는 "그렇다면, 개념변화에서 변화되는 것은 무엇인가?"라는 질문을 다시 던지게 된다. 이에 대해, Vosniadou(1994)는 아동들이 상급학년으로 갈수록 오히려 지식 구조는 더 분화되어 정합성으로부터 조각나는 과정으로 개념변화가 일어난다고 지적하고 있다. 그리고, 그러한 이유가 과학수업을 통해 초기의 정합적 지식체계를 대신할 수 있는 대안적 구조들이 구성되지 못하기 때문이라고 지적하였다. 그러나 계속적인 전문지식 습득과정을 통해 전문가로 되면 다시 정합적인 개념체계를 얻게 된다고 보았다. 그러면서 보다 더 큰 설명적 적절성을 갖도록, 그래서 다른 관점에서 고려할 수 있는 유연성을 갖게 된다고 설명하였다.

또 한가지 중요한 점은 정합성을 갖추었다는 것이 반드시 과학적으로 옳은 구조임을 의미하는 것이 아니라는 것이다. 정합성을 갖추었다는 것은 나름대로의 근거가 있고 체계성을 갖추고 있으며, 개념과 개념, 개념과 현상들간의 관계가 비임의적인 구조(예를 들면, 인과적인 구조)로 연결되어 있다는 것을 의미하는 것이다. 예를 들어, '힘을 주면 움직이고 힘을 주지 않으면 정지한다'는 생각은 물리적으로 옳지 않지만, 힘과 운동과의 관계에 대한 인과적인 구조를 갖추고 있다고 할 수 있다. 따라서, 정합성을 갖추고 있음에도 불구하고 개념이 변화했다면, 그것은 근거를 이루는 내용 자체의 변화, 개념 구조가 가진 체계성의 변화(예를 들면, 위계의 변화와 연결 구조의 변화), 개념과 개념과의 연결의 변화, 또는 개념과 현상과의 연결의 변화 등을 의미하는 것이라고 하겠다. 예를 들어, '힘을 주면 움직이고, 힘을 주지 않으면 정지한다'는 힘과 운동과의 관계가 '힘을 주지 않아도 계속 움직일 수 있고, 힘을 주면 운동상태가 변한다'와 같은 힘과 운동과의 관계로 변화되었다면, 그것은 이미 힘과 운동과의 관계에 대해 나름대로 정합성을 갖춘 개념이지만 개념과 개념간의 관계에서 변화가 일어난 것(힘과 운동과의 관계에서 힘과 운동 변화와의 관계로의 변화)이라고 볼 수 있다.

학생의 개념체계가 정합적인 구조를 갖추어 나가는 방향으로 변화해 간다는 관점과 이미 정합적인 구조를 갖추고 있다는 관점을 서로 통합시키려는 노력도 있다. 즉, Pauen(1999)은 개념의 형성을 존재론적 범주의 구성으로 보고, 개념변화를 존재론적 범주 구조의 변화로 보면서, 이러한 구조의 변화에 두 가지 관점이 있음을 지적하였다. 앞서 논의한 바와 같이, 전혀 경험과 지각에 기초하여 구조화되어 있지 않은 초기의 상태에서 점차로 형식적이고 추상적으로 구조화되어 가는 과정으로 개념변화를 보는 관점(예를 들면, 피아제, Carey, 또는 diSessa)과, 처음부터 이미 나름대로의 인과적이고 정합적인 구조를 갖추고 있으면서 현상과의 관련성이 풍부해지는 방향으로 변화해 가는 과정으로 보는 관점(예를 들면, Vosniadou, Keil)이 그것이다. Pauen은 이러한 극단적인 두 관점의 약점을 지적하면서, 실제로는 두 개의 과정이 동

시에 그리고 비선형적으로 일어난다는 CEC(Causes and Effects of Changes) 모델을 제안하였다. 이 모델에 의하면, 아동은 여러 사물들 간의 구체적인 유사성이나 차이점뿐 아니라 추상적인 유사성이나 차이점에 대해서도 동시에 인식할 수 있으며, 존재론적 범주에 대한 구조 변화가 하나의 선형적인 과정을 통해서 일어나는 것이 아니고 여러 종류의 구조 변화가 동시에 일어날 수 있다는 것이다.

한편, 학생의 개념체계가 정합적인 구조를 갖추고 있는가 아닌가는 개념 내용의 특성에 따라 다를 수 있다는 주장도 있다. 즉, Spada(1994)는 Vosniadou의 지구에 대한 학생 개념이 정합성을 가진다는 주장에 동의하면서, 동시에 '힘'과 같은 추상적 개념에 대해서는 학생들이 정합적인 개념체계를 갖추기 어렵다고 지적하였다.

## 7) 정리

개념변화에서 무엇이 어떻게 변화하는가에 대해 여기에서는 6가지 관점에서 살펴보았다: (1) 개별 개념 내용 자체의 변화, (2) 존재론적 범주간 이동과 범주의 특성 변화, (3) 개념구조의 변화, (4) 개념과 현상과의 관계 변화, (5) 추상성의 변화, 그리고 (6) 정합성의 변화.

이러한 논의로부터, 우리는 개념 변화가 매우 다양한 상호작용을 통해 여러 가지 측면에서 일어날 수 있다는 것을 알 수 있었다. 예를 들어, 학생이  $F=ma$ 를 이해하고 관련된 문제를 풀었다고 해서 우리는 그 학생이  $F=ma$ 를 잘 이해하고 있다'고 쉽게 말하지 못하는 데 그 이유는 무엇일까? 그것은  $F=ma$ 의 정의와 그것으로 적용되는 대표적인 문제의 해결만으로  $F=ma$ 를 이해했다고 말하기 힘들기 때문이다.  $F=ma$ 에는 존재론적 가정(예를 들어, F를 실체(reality)로 보는 입장과 상호작용으로 보는 입장이 포함될 수 있고, 다른 개념과의 연결(예를 들면, m에 대한 중력질량과 관성질량, 힘의 여러 가지 종류 등)이 있으며, 구체적인 다양한 현상들(예를 들면, 낙하운동, 원운동 등)과 연관되어 있다. 그리고, 그러한 다양한 관련 요소들에 대한 이해가 얼마나 추상적인지, 그리고 그 요소들이 어느 정도로 정합적인

구조를 갖추고 있는가에 따라 이해의 정도는 다르다고 할 수 밖에 없다. 그러므로 이러한 측면에서 본 연구에서는 학생의 개념변화 과정이 오랜 기간에 걸쳐, 여러 가지 상호 작용을 통해 여러 가지 측면에서 점진적으로 세련화되고 정교화되어 가는 과정으로 보고자 하는 것이다.

다음은 개념변화를 점진적인 정교화와 세련화 과정으로 보는 입장으로 볼 수 있는 과학사적 사례를 찾아보고자 한다.

### 3. 과학사적 사례

개념변화에 대해 논의할 때 과학사적 사례는 많은 시사점을 준다. 실제로 Gentner *et al.*(1997)은 케플러의 연구를 조사하였고, Thagard(1992)는 플로지스톤 이론이 산소 이론으로 대체되는 사례를 분석하여 학생의 개념 변화 과정에 대한 시사점을 얻었다.

마찬가지로, 본 연구에서도 과학사적 사례를 통해 어떻게 과학지식이 점진적으로 정교화되어가고 세련화되어 가는 지를 살펴보고자 한다. 이러한 조사 연구는 앞으로 실제 학생들의 개념변화 과정을 이해하는데 하나의 단서 역할을 하게 될 것이다.

#### 1) 흑체 복사에 대한 플랑크의 설명의 변화과정

흑체 복사에 대한 플랑크(Planck)의 설명이론은 양자역학의 발견의 과정에서 중요하게 다루어진 분야이다. 여기에서는 Langley *et al.*(1987), 에미리오와 세그레(1994, 박병소 옮김) 등의 분석에 기초해서 흑체 복사에 대한 과학 지식의 변화 과정을 단계별로 정리해 보고자 한다. 뿐만 아니라, 어떻게 플랑크가 에너지의 불연속성을 가정하게 되었는지를 정합성의 추구라는 측면에서 나름대로 분석해 보고, 결론적으로 개념변화 과정을 어떻게 세련화와 정교화의 과정으로 볼 수 있는지를 살펴보고자 한다.

#### ① 19세기 중반부터 복사하는 물체의 에너지를 온

도와 파장의 함수로 밝히려는 관심이 있어왔으며, 키르히호프(Kirchhoff)와 다른 여러 물리학자들에 의해 20세기 초반까지 관심이 계속되었다. 그러면서 보다 넓은 온도범위와 파장 범위에 대한 정확한 실험들도 많이 이루어져 왔다.

- ② 실험 결과를 이해하려는 노력에서, 파센(Paschen)의 실험결과에 기초하여 비인(Wein)은 1896년 특정 파장에서의 복사 에너지를 파장과 온도의 함수로 공식화하였다:  $I(\nu) = \frac{A}{\exp(k\nu/T)}$ .

그러나 이 식은 실험결과에만 기초하였을 뿐 이론적인 유도과정이 없었다. 또한, 매우 높은 진동수와 낮은 온도에서만 맞는 식이었다.

- ③ 1899년 플랑크는 고전물리학적 원리(열역학의 엔트로피 개념을 이용하여)에 기초하여 비인의 공식을 이론적으로 유도하였다.

- ④ 1900년 여름, 높은 진동수와 낮은 온도에서의 실험결과가 얻어졌다. 1900년 10월 7일 루벤스(Rubens)는 새로운 실험결과가 비인의 공식과 불일치한다는 것을 플랑크에게 알려주었다. 즉, 낮은 진동수와 높은 온도에서는 마치 복사 에너지가 다음과 같은 경향을 보인다고 지적하였다:

$$I(\nu) = A(T/k\nu)$$

- ⑤ 그날 저녁 플랑크는 새로운 실험결과와 일치하도록 하기 위해 비인의 공식을 다음과 같이 수정하였다:

$$I(\nu) = \frac{A}{\exp(k\nu/T) - 1}$$

이러한 수정은 이론적 유도가 아니었으며 실험결과와 맞추기 위한 시도일 뿐이었다<sup>9)</sup>.

- ⑥ 새로운 식은 1900년 10월 19일에 발표되었지만, 새로운 식에 대한 플랑크의 물리적 설명은 1900년 12월에 발표되었다. 여기에서 플랑크가 어떻게 에너지의 불연속성을 가정하게 되었는지 추론해 보면 다음과 같다: 먼저 레일리(Rayleigh)의 복사공식에서 출발해 보자(  $u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} kT$  ).

5) Langley *et al.*(1987)에 의하면, 수학자이거나 물리학자들에게 복사에 관한 내용임을 모르게 하고 빈의 공식과 같은 형태의 식과 루벤스가 제시한 것과 같은 불일치하는 데이터를 제시하였을 때, 물리적인 이해와 설명이 없이도 플랑크의 복사 공식을 쉽게 유도할 수 있었음을 관찰하였다고 하였다.

(연구논문) 학생 개념체계의 연속적 세련화와 정교화를 통한 개념 변화 분석(이론적 논의를 중심으로) : 박종원

레일리에 의하면, 흑체 속의 가능한 상태의 수를 구하기 위해 경계조건을 이용하여 ( $k_x = 2\pi n_x$ ) 불연속적인 상태의 수들을 계산하였고( $\frac{8\pi v^2}{c^3}$ ),

각 상태에 대한 평균 에너지를 구하기 위해 연속적인 에너지 분포를 가정하고 고전적인 통계적 방법에 의해 평균 에너지를 구했다

$$\left( \bar{E} = \frac{\int_0^\infty E e^{-E/kT} dE}{\int_0^\infty e^{-E/kT} dE} = kT \right), \text{ 즉, 한 편에서는}$$

불연속적인 상태의 수를 구하였고, 다른 한 편에서는 연속적인 에너지를 가정하여 평균 에너지를 구하였는데, 여기에 부정합성이 내재해 있던 것이었다. 결국 연속적인 에너지 대신에 불연속적인 에너지를 가정하고, 흑체 속의 경계 조건에 의해 전자 기파의 파장이 불연속적으로 정해지듯이 에너지도 파장에 의해 불연속적으로 결정된다고 보는 방

$$\text{식으로 } \left( \bar{E} = \frac{\sum_{n=0}^\infty (n)\epsilon e^{-n\epsilon/kT}}{\sum_{n=0}^\infty e^{-n\epsilon/kT}} = \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} \right),$$

$$E = n\epsilon = nh\nu.$$

정합성을 추구하게 되면, 지금의 플랑크 공식을

$$\text{유도할 수 있다 } \left( u(\nu, T) = \frac{8\pi \nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} \right).$$

⑦ 플랑크는 새로운 공식을 실험 데이터에 기초하여 제안하고 이론적으로도 유도하였지만, 그것이 고전역학의 마감을 의미하는지를 깨닫지는 못했다. 그러한 깨달음은 1905년과 1906년에 이르러서야 아인슈타인(Einstein)과 에른페스트(Ehrenfest)에 의해 지적되었다. 그리고 하이젠버그(Heisenberg)와 슈뢰딩거(Schrodinger)에 의해 양자역학에 에너지 양자화의 개념이 적용되기까지 26년이 걸렸다.

이러한 과학 지식의 변화과정을 다시 요약하면 다음과 같다: 특정 영역에서의 흑체 복사에 대한 실험 결과 (파센) → 그 영역에서의 실험결과와 일치하는 실험 공식의 제안 (비인) → 실험 공식의 이론적인

유도 (플랑크) → 새로운 영역에서의 불일치 결과 관찰 → 새로운 영역을 포괄하기 위한 공식의 수정 (플랑크) → 새롭게 제안한 실험 공식의 이론적인 재유도 → 새로운 공식의 물리적 의미 부여 (플랑크, 아인슈타인, 에른페스트 등).

위와 같은 과정에서 과학지식이 점진적으로 세련화되고 정교화되어 가는 과정은 다음과 같은 경우에서 볼 수 있다: (1) 처음에는 단지 실험 데이터와 일치하는(fitting) 공식을 제안하였지만, 실험적 공식을 이론적으로 다시 유도하는 과정, (2) 제한된 영역에서만 일치하였던 공식에 대해 불일치하는 실험 결과가 제시되자 새로운 결과까지 포괄하는 (기존의 영역도 물론 포함하면서) 새로운 식으로 수정하는 과정, (3) 이론의 정합성을 추구해 가는 과정, (4) 실험 결과와 일치하고 이론적인 유도까지 한 후에도, 그것의 물리적인 의미를 부여하는 과정.

## 2) 보어의 원자모형 변화과정

다음은 보어(Bohr)의 원자모형 변화과정에 대한 예이다(Lakatos, 1978; Holton & Brush, 1973). 이것은 정합성이 부족한 상태에서도 이론이 시작될 수 있으며, 진보를 통해 부족했던 과학이론이 어떻게 점차로 세련화되고 정교화되어 가는지를 잘 보여주는 예라고 하겠다.

- ① 1913년 보어는 러더포드(Rutherford)의 원자모형이 가지는 한계를 극복하기 위해, 몇 가지 가정과 함께 새로운 원자모형을 제안하였다: (1) 전자는 정상상태에만 있다, (2) 정상상태에서는 빛을 방출하지 않는다, (3) 정상상태에서 다른 정상상태로 천이할 때 빛을 흡수하거나 방출한다, (4) 정상상태에서 전자는 역학법칙을 따르지만, 정상상태간의 천이에는 그러한 법칙이 적용되지 않는다, (5) 정상상태에서 전자의 궤도는 원형이다, (6) 핵 주위를 도는 전자의 각운동량은  $h/2\pi$ 와 같다.
- ② 이러한 가정들 중에는 고전 전자기학과 부정합하는 측면이 있다. 즉, 전자가 원형으로 궤도운동(가속운동)하면서도 전자기파를 방출하지 않는

다는 가정은 고전 전자기학에 위배되는 조건이었다. 또한, 이러한 가정들 중에서는 설명할 수 없는 가정도 있다. 즉, 정상상태간에 전자가 천이할 때, 어떤 기작(mechanism)에 의해 빛을 방출하거나 흡수하는지를 설명하지 못하였고, 왜 핵 주위를 도는 전자의 각운동량이  $h/2\pi$ 과 같아야 하는지를 설명하지 못하였다.

- ③ 이러한 부정합성은 모든 사람들이 알고 있었지만, 원자모형이 진보적이라는 이유(예를 들면, 1885년 관찰되었던 발머계열과 1908년 관찰되었던 파센계열뿐 아니라, 새로운 더 많은 계열을 예측할 수 있었다. 즉 새로운 계열이 1914년 라이먼(Ryman)에 의해 발견되었고, 1922년에는 브라켓(Brackett)에 의해, 1924년에는 폰트(Pfundt)에 의해 발견되었다)로 오랫동안 무시되었다.
- ④ 그러나, 설명할 수 없는 관찰사실도 있었다. 즉, 피커링(Pickering)은 1896년 별의 스펙트럼에서, 파울러(Fowler)는 1989년 태양의 스펙트럼에서, 그리고 1912년 파울러는 수소기체와 헬륨기체의 혼합기체에서 보어의 원자모형으로는 설명할 수 없는 계열들을 관찰하였다.
- ⑤ 1913년 보어는 전자는 하나이지만, 두 개의 양성자로 이루어진 이온화된 헬륨모델로 바꾸었고, 피커링 - 파울러의 계열을 설명할 수 있게 되었다. 더구나, 헬륨과 염소의 혼합물에서의 계열을 예측하였고, 실험적으로 입증되었다.
- ⑥ 파울러는 새로운 원자모형이 수소 계열이 아니라 헬륨 계열이라고 비판하였고, 파울러 계열 내의 파장이 보어의 새로운 원자 모형에 의해 예측된 값과 상당히 다르다고 지적하였다.
- ⑦ 이제까지 보어는 원자핵은 무한질량으로 고정되어 있다고 가정하였었다. 이제 보어는 원자핵과 전자가 공통질량 중심 주위를 공전한다고 수정하게 되었다. 이러한 수정을 통해 파울러의 반박을 설명할 수 있게 되었다.
- ⑧ 1915년 쑤머펠트(Sommerfeld)에 의해 전자의 원형궤도는 타원궤도로 수정되었다. 그리고, 원자핵 주위를 도는 전자가 고속으로 회전하기 때

문에 상대론적으로 질량이 증가해야 한다고 수정하였다. 이로 인해, 쑤머펠트는 새로운 에너지 준위 배열을 얻을 수 있게 되었고, 스펙트럼의 미세구조를 얻어낼 수 있었다.

- ⑨ 이제 전자가 한 개인 원자모형을 확장해서, 여러 전자를 가진 원자의 모형에까지 관심을 갖게 되었다. 이에 대한 관심은 1913년 보어의 논문에서도 볼 수 있었고, 1920년 경 과학자들은 껍질 모델(shell model)을 개발하였다.
- ⑩ 1905년 아인슈타인의 광전효과에 의해 빛이 입자라는 것에 감명을 받은 드 브로이(De Broglie)는 전자와 같은 입자도 파동일 수 있다는 생각으로 1924년 물질파 개념을 발표하였다. 이러한 물질파 개념을 이용하여, 보어의 원자모형에서도 도입되었던 가정들 중 몇 가지가 설명될 수 있었다. 즉, 정상상태에서 전자가 입자가 아닌 파동으로 존재한다고 함으로서 전자기파를 방출하지 않을 수 있게 되었고, 왜 전자의 각운동량이  $h/2\pi$ 와 같은지를 설명할 수 있게 되었다.

위의 같은 지식의 변화과정을 다시 요약해 보면 다음과 같다: 부정합성을 가지고 있었지만, 몇 가지 가정과 함께 새로운 원자모형을 제안함으로써 실험 현상을 잘 설명 → 피커링-파울러의 새로운 스펙트럼선 관찰에 의한 문제점 제기 → 핵의 질량을 수정하여 반증 사례를 설명 → 파울러의 반박 → 공통질량 중심 주위로 핵이 공전한다고 수정 → 전자의 원형궤도를 타원궤도로 수정 → 전자 질량의 상대론적 효과 고려 → 여러 전자를 가진 원자모형으로 확대 → 드브로이의 물질파 개념에 의해 설명할 수 없었던 가정들을 설명할 수 있게 됨.

이러한 과정에서 과학 지식이 정교화되고 세련화되는 과정은 다음 경우에서 볼 수 있다: (1) 부정합성을 가지고 있는 초기 모델이 정합성을 갖추어 가는 과정(초기에 도입된 설명할 수 없었던 가정들이 설명되어 가는 과정), (2) 처음에 무시되었던 조건들이 고려되어 가는 과정(핵의 질량 중심 운동, 타원 궤도, 전자의 상대론적 질량 등), (3) 초기 단순한 모델에서 복잡한 모델로 확장되어 가는 과정 (한 개의 전자 모



형에서 여러 개의 전자 모형으로)

### 3) 정리

여기에서는 플랑크의 복사 공식이 변화되어 가는 과정과 보어의 원자모형이 변화되어 가는 과정을 요약함으로써, 어떻게 과학지식이 정교화되고 세련화되어 가면서 변화되어 가는지를 분석해 보았다. 이러한 정교화와 세련화의 과정에는 다음과 같은 6가지 과정들이 포함됨을 알 수 있었다.

- 불일치하는 실험 결과를 포괄하는 수정 과정(과거의 이론을 그대로 남겨 두면서)
- 실험 결과에 기초한 실험 법칙을 이론적으로 다시 유도하는 과정
- 실험적으로 옳고, 이론적으로 유도된 법칙에 대해서도 물리적 의미를 부여해 나가는 과정
- 정합성을 추구해 가는 과정
- 처음에 무시했던 조건들을 다시 고려해 가는 과정
- 초기의 단순한 모델로부터 보다 복잡한 모델로 확장해 가는 과정

물론, 과학에서 나타나는 모든 과학 지식의 변화과정이 이러한 정교화와 세련화의 과정이라고 단언하는 것은 아니다. 그러나, 이러한 과정을 충분히 찾아볼 수 있다는 것이다. 나아가 정교화와 세련화의 과정에 포함된 위의 6가지 과정들 외에 다른 과정들도 더 많이 있을 것이다. 이러한 분석으로부터 우리는 학생의 개념도 어떻게 점진적으로 세련화되고 정교화되어 가면서 변화해 나갈지를 예측해 볼 수 있을 것이고, 또 학생의 개념변화 과정을 이해하고 해석하는 데에도 도움이 될 것이다.

## Ⅲ. 결 론

본 연구는 학생의 개념변화 과정을 점진적으로 세련화되고 정교화되어 가는 과정으로 가정하고, 그 과정을 보다 깊이 이해하기 위한 목적으로 시작되었다. 이를 위해, 먼저 학습 심리학적 측면에서의 개념변화 연구들을 재고찰하고, 어떤 측면에서 개념변화 과정

을 점진적인 세련화와 정교화의 과정으로 볼 수 있는지를 논의하였다. 예를 들어, 이러한 유형의 개념변화 과정에는, 기존의 개념과 새로운 개념이 서로 융합되거나 조화를 이루어 나가는 과정, 기존 개념에 새로운 개념이 더해지면서 보다 개념구조가 풍부해 지거나 세밀해져 가는 과정, 개념이 속해 있는 존재론적 범주의 구조와 특성(예를 들면, 정합성이나 추상성)이 변화해 나가는 과정, 개념의 기저에 깔린 형이상학적 믿음이나 인식론적 믿음이 변화되어 가는 과정, 개념과 연결된 현상과의 연관성이 변화하면서 개념 영역이 제한되거나 확장되어 가는 과정, 그래서 상황에 따라 개념이 구별되거나 결보기에 다른 상황 속에서 서로 달라 보이는 개념들이 통합되어 가는 과정, 개념 구조의 특성이 보다 추상적으로 또는 구체적으로 변화되어 가는 과정, 개념 구조의 정합성이 변화되어 가는 과정 등이 포함될 수 있을 것이다.

그리고 본 연구에서는 구체적인 과학사적 사례에 대한 분석을 통해서도, 과학 지식의 발달 과정에 포함되어 있는 세련화와 정교화의 과정들을 추출해 보았다. 여기에는 불일치하는 관찰 결과를 포괄해 가는 과정, 실험 법칙을 이론적으로 재유도해 가는 과정, 이론 법칙에 물리적인 의미를 부여해 가는 과정, 초기의 단순한 이론을 점차로 확장해 가는 과정, 초기에 무시되었던 조건들이 다시 고려되어 가는 과정, 정합성을 추구해 가는 과정 등이 포함될 수 있다는 것을 알 수 있었다.

이러한 이론적 논의를 통해 앞으로 실제 학생의 선행 개념구조를 조사하고, 관련 실험과 다양한 현상, 그리고 여러 가지 정보들을 제시하면서, 어떻게 학생의 개념이 변화되어 가는지를 조사하게 될 것이다. 이때 학생의 다양한 반응을 얻어내고 그 반응들을 분석하고 해석하는데, 본 연구에서의 이론적 논의가 중요한 지침 역할을 하게 될 것이다.

## 적 요

본 연구에서는 학생의 개념변화 과정을 연속적인 세련화와 정교화의 과정으로 보았다. 이러한 관점은 학생의 개념변화에 대한 학습심리학적 연구의 재고찰

과 물리학 지식의 발달과정에 대한 물리학사적 사례 연구의 분석에 기초하였으며, 구체적으로 세련화와 정교화를 통한 개념변화 과정 사례를 추출할 수 있었다. 본 연구 결과는 실제 학생의 반응을 분석하는데 지침 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

## 참 고 문 헌

- 박병소 옮김(1994). X-선에서 쿼크까지: 현대 물리학 자들과 그들의 발견. 기린원. (에미리오 & 세그레 지음, 1980)
- 박종원, 박승재(1992). 초인지적 물리학습 모형. 물리교육, 10(1), 1-11.
- 정수인, 박종원(2001). 갈릴레오 자유낙하 사고실험에 대한 중학생들의 사고과정 분석. 한국과학교육학회지, 21(3), 566-579.
- Biemans, H. J. A., Deel, O. R., & Simons, P. R.(2001). Differences between successful and less successful students while working with the CONTACT-2 strategy. *Learning and Instruction*, 11, 265-282.
- Bliss, K., & Ogborn, J.(1994). Force and motion from the beginning [special issue]. *Learning and Instruction*, 4, 7-25.
- Brewer & Samarapungavan(1991). Child theories versus scientific theories: Differences in reasoning or differences in knowledge? In R.R. Hoffman & D.S. Palermo (Eds.), *Cognition and the symbolic processes: Applied and ecological perspectives* (pp. 209-232). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Carey, S.(1985). *Conceptual change in childhood*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Caravita, S.(2001). A re-framed conceptual change theory. *Learning and Instruction*, 11, 421-429.
- Caravita, S., & Hallden, O.(1994). Re-framing the problem of conceptual change. *Learning and Instruction*, 4, 89-111.
- Chalmers, A. F.(1986). *What is this thing called science?* Philadelphia: Open University Press.
- Chi, M.T.H., Slotta, J. D., & de Leeuw, N. (1994). From things to processes: A theory of conceptual change for learning science concepts. *Learning and Instruction*, 4, 27-43.
- Chi, M. T. H.(1992). Conceptual change within and across categories: Implications for learning and discovery in science. In R. Giere (Ed.), *Cognitive Models of Science, Minnesota Studies in the Philosophy of Science*, vol. 15. Minneapolis: University of Minnesota Press.
- Chinn, C. A., & Brewer, W. F.(1998). An empirical test of a taxonomy of responses to anomalous data in science. *Journal of Research in Science Teaching*, 35, 623-654.
- Dagher, Z. R.(1994). Does the Use of Analogies Contribute to Conceptual Change? *Science Education*, 78(6), 601-614.
- Duit, R.(1999). Conceptual change approaches in science education, in W. Schnota, S. Vosniadou, & M. Carretero (Eds.), *New perspectives on conceptual change*. (3-13). Oxford: Pergamon.
- Darden, L.(1992). Strategies in anomaly resolution. in R. Giere (Eds.), *Cognitive Models of Science*, (251-273). Minnesota: University of Minnesota Press.
- diSessa, A. (1993). Towards an epistemology of physics. *Cognition and Instruction*, 10(2/3), 105-225.
- diSessa, A., & Sherin, B. L.(1998). What changes in conceptual change? *International Journal of Science Education*, 20(10), 1155-1191.

- Fensham, P. J., Gunstone, R. F., & White, R. T.(1994). *The content of science: A constructivist approach to its teaching and learning*. London: Falmer Press.
- Gentner, D., Brem, S., Ferguson, R.W., Markman, A.B., Levidow, B.B., Wolff, P., & Forbus, K. D.(1997). Analogical reasoning and conceptual change: a case study of Johannes Kepler. *Journal of the Learning Sciences*, 6(1), 3-40.
- Gunstone, R. F.(1994). The importance of specific science content in the enhancement of metacognition. In P. Fensham, R. White (Eds.), *The content of science* (pp. 131-146). London: Falmer Press.
- Gunstone, R. F., & Mitchell, I. J(1997). Metacognition and conceptual change. In J. J. Mintzes, J. H. Wandersee, & J. D. Novak (Eds.), *Teaching science for understanding* (pp. 133-163). San Diego: Academic Press.
- Hewson, P. W., & Hennessey, M. G.(1992). Making status explicit: A case study of conceptual change. In R. Duit, F. Goldberg & H. Niedderer (Eds.), *Research in Physics Learning: Theoretical Issues and Empirical Studies* (pp. 176-187). Kiel, Germany: Institute for Science Education at the University of Kiel.
- Hewson, P. W., & Hewson, M. G.(1992). The status of students' conceptions. In R. Duit, F. Goldberg & H. Niedderer (Eds.), *Research in Physics Learning: Theoretical Issues and Empirical Studies* (pp. 59-73). Kiel, Germany: Institute for Science Education at the University of Kiel.
- Holton, G., & Brush, S. G.(1973). *Introduction to concepts and theories in physical science* (2nd ed.). London: Addison-Wesley Publishing Company.
- Kaufman, D. R., Vosniadou, S., diSessa, A., & Thagard, P.(2000). Scientific explanation, systematicity, and conceptual change. Proceedings of the twenty-second annual conference of the cognitive science society, August, 13-15., pp. 5-9., University of Pennsylvania.
- Keil, F.(1989). *Concepts, kinds, and cognitive development*. Cambridge, MA: MIT Press: Bradford Books.
- Kuhn, T.(1972). *The structure of scientific revolutions*. Chicago: University of Chicago Press.
- Lakatos, I.(1978). *The methodology of scientific research programmes* (edited by J. Worrall & G. Currie). New York: Cambridge University Press.
- Langley, P., Simon, H. A., Bradshaw, G. L., & Zytkow, J. M.(1987). *Scientific discovery: computational explorations of the creative processes*. London: The MIT Press.
- Limon, M.(2001). On the cognitive conflict as an instructional strategy for conceptual change: A critical appraisal, *Learning and Instruction*, 11, 357-380.
- Linder, C.(1993). A challenge to conceptual change. *Science Education*, 77(3), 293-300.
- Magnusson, S. J., Templin, M., & Boyle, R. A. (1997). Dynamic science assessment: a new approach for investigating conceptual change. *Journal of the Learning Science*, 6(1), 91-42.
- McClosky, M.(1983). Intuitive physics. *Scientific American*, 248(4), 122-130.
- Mortimer, E. F.(1995). Conceptual change or conceptual profile change. *Science & Education*, 4, 267-285.
- Murphy, G., & Medin, D.(1985). The role of

- theories in conceptual coherence. *Psychological Review*, 92(3), 289-316.
- Niaz, M.(1995). Progressive transitions from algorithmic to conceptual understanding in student ability to solve chemistry problems: A Lakatosian interpretation. *Science Education*, 79, 19-36.
- Niaz, M.(1998). A Lakatosian Conceptual Change Teaching Strategy Based on Student Ability To Build Models with Varying Degrees of Conceptual Understanding of Chemical Equilibrium. *Science and Education*, 7(2), 107-127.
- Novak, J. D.(1998). *Learning, creating, and using knowledge: Concept Maps™ as facilitative tools in schools and corporations*. New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.
- Park, J., & Han, S.(2002). Using deductive reasoning to promote the change of students' conceptions about force and motion. *International Journal of Science Education*.
- Park, J., Kim, I., Kim, M., & Lee M.(2001). Analysis of the students' processes of confirmation and falsification of their prior ideas about electrostatics. *International Journal of Science Education*, 23(12), 1219-1236.
- Park, J., Kim, I., Kwon, S., & Song, J.(2001). An analysis of thought experiments in the history of physics and implications for physics learning. In R. Pinto & S. Surinach (Eds.), *Physics teacher education beyond 2000* (pp. 347-351). Paris: Elsevier.
- Pauen, S.(1999). The development of ontological categories: Stable dimensions and changing concepts. In W. Schnota, S. Vosniadou, & M. Carretero (eds.), *New perspectives on conceptual change*. (3-13). Oxford: Pergamon.
- Pearsall, N. R., Skipper, J. E., & Mintzes, J. J. (1997). Knowledge restructuring in the life science: a longitudinal study of conceptual change in biology. *Science Education*, 81, 193-215.
- Pintrich, P. R., Marx, R. W., & Boyle, R. A. (1993). Beyond cold conceptual change: The role of motivational beliefs and classroom contextual factors in the process of conceptual change. *Review of Educational Research*, 63, 167-200.
- Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W., & Gertzog, W. A.(1982). Accommodation of a scientific conceptions: toward a theory of conceptual change. *Science Education*, 66, 211-227.
- Pozo, J. I., Gomez, M. A., & Sanz, A.(1999). When change does not mean replacement: different representations for different contexts. In W. Schnotz, S. Vosniadou, & M. Carretero (Eds.), *New perspectives on conceptual change* (pp. 161-174). Amsterdam: Pergamon.
- Simon, D., & Keil, F.(1995). An abstract to concrete shift in the development of biological thought: The inside story. *Cognition*, 56, 129-163.
- Shymansky, J. A., Woodworth, G., Norman, O., Dunkhase, J., Matthews, C., & Liu, C. T. (1997). A study of changes in middle school teachers' understanding of selected ideas in science as a function of an inservice program focusing on student preconceptions. *Journal of Research in Science Teaching*, 30, 737-755.
- Song, J., Park, J., Kwon, S., & Chung, B. (2001). Idealization in physics: its types, roles and implications to physics learning.

- In R. Pinto & S. Surinach (Eds.), *Physics teacher education beyond 2000* (pp. 259-362). Paris: Elsevier.
- Spada, H.(1994). Conceptual change or multiple representations? *Learning and Instruction*, 4, 113-116.
- Strike, K. L., & Posner, G. J.(1992). A revisionist theory of conceptual change. In R. Duschl & R. Hamilton (Eds.), *Philosophy of science, cognitive science and educational theory and practice*. Albany, NY: SUNY Press.
- Tao, P., & Gustnone, R. F.(1999). The Process of Conceptual Change in Force and Motion during Computer-Supported Physics Instruction. *Journal of Research in Science Teaching*, 36(7), 859-882.
- Thagard, P.(1992). *Conceptual revolutions*. Princeton: Princeton University Press.
- Treagust, D. F., Harrison, A., Venville, G., & Dagher, Z.(1996). Using an analogical teaching approach to engender conceptual change. *International Journal of Science Education*, 18, 213-229.
- Tyson, L. M., Venville, G. J., Harrison, A. G., Treagust, D. F.(1997). A multidimensional framework for interpreting conceptual change events in the classroom. *Science Education*, 81, 387-404.
- Tytler, R.(1998). Children's conceptions of air pressure: exploring the nature of conceptual change. *International Journal of Science Education*, 20(8), 929-958.
- Vosniadou, S.(1994). Capturing and modeling the process of conceptual change. *Learning and Instruction*, 4, 45-70.
- Vosniadou, S., & Brewer, W. F.(1992). Mental models of the earth: A study of conceptual change in childhood. *Cognitive Psychology*, 24, 535-585.
- Vosniadou, S., & Brewer, W. F.(1994). Mental models of the day/night cycle. *Cognitive Science*, 18, 123-183.
- Vosniadou, S.(1999). Conceptual change research: State of the art and future directions. In W. Schnotz, S. Vosniado, and M. Carretero (Eds.), *New perspectives on conceptual change* (pp. 3-13). Oxford: Pergamon.
- Vosniadou, S., Ioannides, C., Dimitrakopoulou, A., & Papademetriou, E. (2001). Designing learning environments to promote conceptual change in science. *Learning and Instruction*, 11, 381-419.
- Vygotsky, L. S.(1934/1986). *Thought and language*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Wiser, M., & Amin, T.(2001). "Is heat hot?" Inducing conceptual change by integrating everyday and scientific perspectives on thermal phenomena. *Learning and Instruction*, 11(4-5), 331-355.
- White, R.(1994). Dimensions of content. In P. Fensham, R. Gunstone, & R. White (Eds.), *The content of science: A constructivist approach to its teaching and learning*. London: The palmer press.