학습 발달과정 연구의 현황, 방법론적 특징 및 연구 사례

맹승호* · 성연선¹ · 장신호²

강원대학교 · ¹삼성초등학교 · ²서울교육대학교

Present States, Methodological Features, and an Exemplar Study of the Research on Learning Progressions

Maeng, Seungho* · Seong, Yeonseon¹ · Jang, Shinho²

Kangwon National University · ¹Samsung Elementary School
· ²Seoul National University of Education

Abstract: The purpose of this paper is to introduce the current studies and research methods about *Learning Progressions* disseminated to several countries including the U.S. since 2006. It also provides a methodological base to investigate learning progressions in science by introducing a case study of learning progression conducted in Korea. For this study, we described several features of current studies on learning progressions in the U.S., and reported the common ways and sequences employed in examining learning progressions especially with respect to assessment for learning. Learning progressions are descriptions of developmental pathways of learning a topic, in which science knowledge is used in students' engaging in science practices. Each learning progression consists of upper anchor, lower anchor, and intermediate steps that connect both anchors. In investigating a learning progression, researchers usually utilize Wilson's four building blocks of assessment system based on the assessment triangle. This kind of method was also applied in investigating the learning progression for water cycle in this study. We discussed implication and consideration for the future research on learning progressions in science in Korea.

Key words: Learning progressions, water cycle, assessment for learning, ordered multiple-choice items, construct map, Rasch model

I. 서 론

이 논문은 2006년 이후 미국과 유럽의 과학교육학 분야에서 급속히 확산되고 있는 **학습 발달과정** (Learning Progressions)[†] 연구의 현황과 연구 방법을 소개하고, 최근에 국내에서 수행된 연구 사례를 중심으로 학습 발달과정 연구의 실재를 제시하여 학습 발달과정을 조사하는 방법론적 기초를 제공하기 위한 것이다. 학습 발달과정에 대한 최근의 공식적인 진술은 the Consortium for Policy Research in Education (CPRE)의 보고서 Learning Progressions in Science에 다음과 같이 제시되었다.

“과학의 핵심적인 개념(core concepts)과 과학적 설명 및 그와 관련된 과학 탐구의 실행(scientific inquiry practices)에 대한 이해와 사용 능력이, 적절한 과학 교수활동에 의해 시간이 지남에 따라 성숙되고 연속적으로 점점 더 정교해지는 과정에 대한, 경험적 근거에 기반하고 검증 가능한 가설이다” (Corcoran *et al.*, 2009, p. 15).

학습 발달과정에 대한 위와 같은 정의는 1990년대 이후 과학 학습에 대한 연구를 종합하여 발표한 미국 National Research Council (2007)의 보고서 *Taking Science to School* 의 내용에 근거하고 있

*교신저자: 맹승호(seunghom@gmail.com)

**2012.11.19(접수) 2013.01.15(1심통과) 2013.01.30(2심통과) 2013.02.01(최종통과)

***이 논문은 2012년 정부재원(교육과학기술부)으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구되었음.[NRF-2012-S1A5B5A01-022532]

[†]Learning Progressions의 사전적 의미는 학습의 발전, 학습의 발달, 학습의 진전 등으로 볼 수 있다. 그러나 선행 연구 결과들에서 과학의 특정 주제에 대한 학습 평가 및 평가 결과의 해석, 학습을 위한 수업 전략을 바탕으로 학습자의 학습 수준이 발달하는 경로 또는 과정을 learning progression으로 진술하고 있기에, 본 연구에서는 learning progression을 **학습 발달과정**으로 번역하여 사용하였다.

다. 위의 정의에 따르면, ‘학습 발달과정’은 1) 과학의 핵심 개념을 이해하고 사용하는 능력과, 과학적 탐구 실행을 활용하여 수행하는 능력이 점점 더 정교해지는 과정에 대한 발달 경로를 다루고 있으며, 2) 학생들의 생물학적 성장에 따라 자연스럽게 형성되는 발달이 아니라 과학교사의 적절한 수업활동에 의해 형성되는 발달(instruction-assisted development)의 과정을 말하며, 3) 전문가의 지식이나 개인적 경험에서 제기하는 주관적인 의견이 아니라 과학교육의 연구에서 도출된 경험적 근거 자료를 바탕으로 제시하는 발달의 경로이다. 그러나 이 경로는 모든 학생들이 동일하게 경험하게 되는 정형화된 발달의 경로가 아니라 가설적인 발달의 과정으로서 구체적인 평가를 통해 검증 가능한 것임을 말하고 있다.

학습 발달과정은 2006년에 NRC의 Board of Testing and Assessment가 발간한 국가 수준 과학 학습 평가의 안내를 위한 보고서 *Systems for State Science Assessment*에서 처음 공식적으로 제안되었다. 이 보고서의 중심적인 의제는 평가의 결과로 파악되는 학습의 수행(learning performances)이 학습자의 발전을 검토하고, 평가의 결과를 반영하여 교수활동이 보완되고 발전하는 **평가 적응적 수업**(adaptive instruction, Corcoran & Silander, 2009)에 대한 정보를 제공하여 **학습을 위한 평가**(assessment FOR learning, Black & Wiliam, 1998)를 수행할 수 있으려면 장기간에 걸친 과학 학습의 순서와 계열이 어떻게 구성되는지 알아야 한다는 것이었다. 즉, 적합한 과학 학습 평가 시스템에 근거한 과학 학습의 순서와 계열이 나타내는 과학 학습의 수직적 경로(vertical pathways)가 학생들의 학년이 높아짐에 따라 형성되는 그들의 학습 발달의 경로와 일치하는지의 문제를 다루고 있다(NRC, 2006). 이후 학습 발달과정의 개념적 정의와 초기의 연구 사례들의 결과가 *Taking Science to School*에서 종합적으로 보고되었으며, 그 내용은 후속적으로 진행되었던 학습 발달과정에 대한 거의 모든 연구에서 이론적 근간이 되었다.

학습 발달과정은 그 뒤 *Science Framework for 2009 National Assessment and Educational Progress*(NAEP, National Assessment Governing Board, 2008)에서 과학 학습 평가를 작성을 위한 기본 지침으로 적용되었다. 뿐만 아니라 최근 미국의

Next Generation Science Standards (NGSS)를 구성하는 근간이 되었던 *A Framework for K - 12 Science Education*(NRC, 2012)을 구성하는 기본 원리 중 하나로 반영되었다. 학습 발달과정이 NAEP와 NGSS를 위한 기본 원리와 준거로 반영된 이유는 학습 발달과정이 궁극적으로 교육과정, 교수활동, 학습평가가 일관되게 운영될 수 있게 하는 중요한 방법적 틀이 될 수 있기 때문이다(Corcoran *et al.*, 2009; Duschl *et al.*, 2011; NRC, 2007). 그 밖에 학습 발달과정의 과학교육적 중요성과 장기적 전망을 인식하여 2009년에 학습 발달과정을 주제로 한 학술지 특별호가 발간되었고(*Journal of Research in Science Teaching* 46권 6호), 미국 Iowa city에서 LeaPS (LEAarning Progression in Science) 학술대회가 개최되었으며, 그 결과물로 2012년에 동명의 책이 출판되기도 하였다(*Learning Progressions in Science: Current challenges and future directions*, by A. C. Alonzo & A. W. Gotwals (Eds.), 2012, Sense Publishers).

반면에 우리나라의 과학 교육과정 개발 및 과학교육 내용 선정의 과정은 교육과정의 내용 체계를 구성하는 준거로서 학생들의 과학 학습 성취에 대한 평가의 결과나 학생들의 개념 이해 수준의 발달에 대한 지속적인 과학교육 연구의 경험적 증거를 충분히 반영했다고 보기에는 한계가 있었다. 그보다는 해당 과학교과의 개념 위계에 대한 논리적 분석에 근거하여 학년단 위계를 설정하거나(윤현진 등, 2009), 학생들이 어려워하거나 과학 교사들이 가르치기 어렵다고 생각하는지 여부에 따라 교육과정에 포함되어야 할 주제나 내용을 어느 학년에 어떤 순서로 배치할 것인가를 결정해 왔다(백남진, 2006; 윤현진 등, 2009). 더욱이 우리나라의 과학 교육과정 연구는 과학 교육과정의 결과물이나 그 개발 과정에서, 과학 교사의 교수활동을 개선하거나 혁신적이고 적절한 교수활동을 촉진시키는 데 영향을 줄 수 있는 방법론적 틀을 제시하지 못하는 한계도 있었다(이해명, 2003).

최근 교육계의 다양한 의견과 비판 아래 진행되고 있는 국가 수준 학업 성취도 평가 역시 아직은 학생들의 학업 성취도에 영향을 주는 여러 변인들에 따라 학력 향상 여부를 파악하거나(김경희 등, 2012), 학업 성취도를 성별, 지역별, 그리고 성취 수준별로 비교하는(김미경 등, 2012) 등 단지 학습된 결과를 평가

(assessment OF learning)하는데 그치고 있어서 평가의 결과를 과학 교사들의 교수활동을 지원하거나 과학 교육과정 개발에 활용하는 학습을 위한 평가가 되지 못하고 있다. 이러한 국내의 결과는 과학 학습 평가 및 과학 학습 수준의 발달에 대한 과학교육 연구의 결과를 교육과정 개발과 연계할 수 있는 방법론적 틀이 부재하기 때문이라고 볼 수 있다.

과학교육 평가와 과학 학습 및 과학 교육과정에 대한 국내외의 이 같은 상황에 비추어 볼 때 과학의 교육과정, 학습평가 및 교수활동을 일관되게 연계할 수 있는 틀로서 학습 발달과정 연구가 국내에서도 매우 중요하다고 하겠다. 최근 국내의 학술 발표회 및 일부 학술지에서 학습 발달과정에 부분적인 언급이 있었지만(강남화, 2012; 맹승호, 2011; 맹승호 등, 2012; 배대성, 유준희, 2012), 아직 국내의 연구자들에게 학습 발달과정에 대한 인식이나 관점이 충분히 공유되지 못한 상황이다. 과학교육 연구의 새로운 연구 의제로서 학습 발달과정이 국내에 정확히 소개되고, 이 분야에 대한 우리나라의 과학교육 연구가 올바르게 정립되기 위해서는 학습 발달과정의 의미와 연구의 현황을 구체적으로 파악하고 이해하는 것이 필요하다. 이에 이 연구에서는 미국을 중심으로 진행되어 온 학습 발달과정 연구의 현황을 살펴보고, 선행 연구에서 주로 사용되었던 학습 발달과정의 조사 방법과 절차를 정리하였다. 또한, 이 방법과 절차가 적용된 국내의 학습 발달과정 연구 사례를 소개하였다. 이를 통해 국내의 과학교육 연구자들에게 학습 발달과정에 대한 이해 수준을 높이고, 국내의 학습 발달과정 연구의 활성화를 도모하고, 학습 발달과정에 대한 후속 연구를 위한 함의점을 제시하고자 하였다.

II. 연구 방법

학습 발달과정 연구의 현황을 이해하기 위하여 이 연구에서는 *Systems for State Science Assessment* (NRC, 2006) 이후 과학교육의 주요 학술지에 출판된 학습 발달과정을 주제로 한 연구 논문들과 과학교육 정책 보고서들을 중심으로 학습 발달과정의 연구 현황을 종합적으로 검토하고 고찰했던 Duschl *et al.* (2011)의 연구 내용을 바탕으로 학습 발달과정 연구에서 다루었던 주제, 학습 발달과정의 구성, 학습 발달과정에서 제시하는 학습의 발달적 경로에 대하여 정

리하였다. Duschl *et al.* (2011)의 연구에서 검토했던 학습 발달과정의 경험적 연구 사례들 중 주요 문헌 자료의 목록을 국내의 후속 연구를 위하여 Table 1에 제시하였다. 문헌 연구를 바탕으로 각각의 연구 논문에서 공통적으로 제시된 특징적인 학습 발달과정의 조사 방법과 절차를 도출하였다. 특별히 이 연구에서는 학습 발달과정의 조사 절차 중에서 과학 학습 평가가 가진 역할을 중심으로 서술하였다. 그리고 문헌 연구로 도출된 학습 발달과정의 조사 방법과 절차가 실제 학습 발달과정 연구에서 구체적으로 어떻게 구현되는지 보여주기 위하여 최근 국내에서 본 연구진이 수행 중인 학습 발달과정의 연구 사례를 학습 발달과정 개발 절차에 따라 제시하였다.

III. 연구 결과

1. 학습 발달과정 연구의 현황

Duschl *et al.* (2011)의 분석적 검토 결과에 의하면, NRC(2007)의 공식적인 보고 이후 개발된 과학의 학습 발달과정 연구들에서 다루어진 주제들은 과학의 각 영역(물리학, 화학, 생물학, 지구과학, 환경과학)에서 차지하는 중요성이나 국가 또는 지역 수준의 과학 교육 기준에 포함된 내용을 바탕으로 결정되는 경우가 많았다. 그러나 각 주제들은 과학의 탐구실행(inquiry practice)보다는 주로 과학의 핵심 개념(core idea)에 대한 발달과정을 규명한 것이었다.

과학의 학습 발달과정은 기존의 과학 교육과정이 특정한 과학의 내용에 제한되지 않은 일반적인 탐구기능(domain-general science process skill) 중심이었거나, 과학적 추론이나 탐구실행을 고려하지 않은 선언적인 과학 내용의 나열로 제시되는 것에 대한 비판에서 제기되었다(NRC, 2007). 따라서 과학의 학습 발달과정 연구는 학습자의 내용 이해와 추론 활동의 발달 경로를 안내하고 촉진할 수 있는 근본적인 지식(foundational knowledge, Duschl *et al.*, 2011)을 과학의 탐구실행 상황에 맞추어 활용하는 능력의 발달 경로를 제시하는 것이 필요하다(Duschl & Grandy, 2012). 즉, 학생들이 과학적 탐구실행에 참여하여 그 실행의 수준이 높아짐에 따라 과학의 영역 특이적인(domain-specific) 개념 이해의 수준이 발달하는 경로를 제시할 수 있도록 탐구실행과 과학 내

Table 1*The lists of empirical studies on learning progressions in science reviewed for this study*

저자	주제	과학 영역	주요 특징
Alonzo & Steedle (2009)	힘과 운동	물리	7학년 대상의 소규모 학습 발달과정 순위정렬 선다형 평가 문항 사용
Berland & McNeill (2010)	논증활동	영역 일반적	2, 3, 7, 12학년 대상 수업의 맥락에 따라 논증의 과정과 결과를 준거로 발달과정 기술
Duncan et al. (2009)	현대 유전학	생물	5 - 10 학년 대상 현대 유전학의 8대 주요 아이디어
Furtak (2012)	자연선택	생물	9 - 10 학년 대상 학습 발달과정을 형성평가에 적용
Gunckel et al. (2012)	물의 순환	환경과학	5 - 12 학년 대상 규모, 구조와 체계, 원리를 준거로 학생들의 임상면담자료 분석
Jin & Anderson (2012)	에너지	환경과학	4 - 12 학년 대상 연결과 추적 활동에 사용된 에너지 개념에 대한 이해 수준
Lehrer & Schauble (2012)	진화	생물	K - 6 학년 대상 변화, 변이, 생태계의 모델링 활동을 주제로 함
Mohan et al. (2009)	탄소 순환	환경과학	4, 6 - 12 학년 대상 생명, 물질, 규모, 모델에 따른 탄소 순환 설명 비교
Plummer & Krajcik (2010)	천체의 운동	지구과학	1, 3, 8 학년 대상 플래니테리엄 수업의 효과 비교
Schwarz et al. (2009)	모델링	영역 일반	5, 6 학년 대상 설명과 예상 모델 및 모델의 변화가능성을 주제로 함
Songer et al. (2009)	종 다양성	생물	4 - 6, 8 학년 대상 내용 발달과정과 추론 발달과정 병행
Stevens et al. (2010)	물질	화학	7 - 14 학년 대상 구인 중심 설계 연구에 기반한 다차원적 학습 발달과정
Wiser et al. (2012)	물질의 원자/분자 이론	화학	3 - 5 학년 양적 추론 및 측정 활동을 소재로 원자/분자 이론의 발달과정 규명

용이 서로 중첩되는(embedding) 주제가 선정되어야 한다(Duschl *et al.*, 2011).

학습 발달과정 연구들은 공통적으로 각 주제에 대하여 학습 발달과정의 하위 정착점(lower anchor)과 상위 정착점(upper anchor)을 포함하였다(NRC, 2007). 하위 정착점은 학생들이 학습 발달과정을 시작할 때 이미 가지고 있던 이해 수준 또는 과정 실행

능력으로서 학생들의 학습 발달과정의 시작점에 해당된다. 상위 정착점은 학생들이 학습의 발달과정의 마지막 단계에서 학습하게 된다고 예상되는 개념 이해 수준 또는 과정 실행 능력의 기대치를 말한다. 학습 발달과정 연구에 대한 Duschl *et al.* (2011)의 분석적 고찰 결과, 학습 발달과정의 하위 정착점은 주로 거시 규모의 자연 현상(Mohan *et al.*, 2009)이나 감각적

으로 인지하는 일상적 개념 수준(Alonzo & Steedle, 2009), 또는 학생들이 가진 낮은 수준의 오개념으로 설정되어 학습 발달과정을 학생들에게 접근 가능하게(accessible, NRC, 2007) 하는 기능을 하는 것으로 밝혀졌다. 이에 비해 과학의 학습 발달과정의 상위 정착점은 학습 목표로 설정한 더 정확한 과학 개념의 이해 수준과 더욱 정교한 과학적 탐구 기능의 실행 능력이 어느 정도의 난이도를 갖느냐에 따라 낮은 수준의 추상화 정도(abstractness)를 보이거나(e.g., Mohan et al., 2009), 12학년의 학교 과정에서 갖추어야 할 대학 입학 수준의 목표치(e.g., Duncan et al., 2009) 또는 과학자 수준의 이해(e.g., Stevens et al., 2010)와 같은 매우 높은 추상화 정도를 나타내기도 하였다(Duschl et al., 2011).

개발된 과학 학습 발달과정이 학생들의 실제적인 과학 학습의 발달 경로를 제시하는지 여부를 판단할 수 있게 하는데 가장 중요한 것은 하위 정착점에서 상위 정착점에 이르기까지 중간 과정의 세부적인 단계를 파악하고 구체적으로 기술하는 것이다. 이 중간 단계들은(intermediate steps) 적절한 교수활동의 중재(instructional intervention)를 통해 학생들을 시작점과 종착점 사이에서 연결해 주는 디딤돌(stopping stones, Wiser et al., 2012) 역할을 하게 된다. 학습 발달과정 연구에서 중간 과정의 단계를 규명할 때 제기되는 문제는 첫째, 어떤 도구와 방법으로 중간 단계들을 조사하는가, 둘째, 조사한 결과가 시작점에서 종착점으로 학습의 발달을 연결해 주는 실제적인 경로를(비록 가설적인 경로라 할지라도) 표현할 수 있는가 하는 것이다. 첫 번째 문제인 학습 발달과정의 중간 과정 단계를 규명하는 방법적인 측면에서 학습 발달과정의 연구들은 학습을 위한 평가를 지향하는 연구의 방법적 틀을 제시하고, 각 주제에 대한 학생들의 이해 수준을 다양한 평가 방법을 적용하여 파악하여 그 발달의 경로를 제시하였다. 학습 발달과정 연구에서 많이 사용된 대표적인 평가 방법으로는 순위정렬 선다형 검사지(ordered multiple-choice items, Alonzo & Steedle, 2009; Briggs & Alonzo, 2012, Briggs et al., 2006), 열린 응답 검사지(open-ended written response tests, Mohan & Anderson, 2009; Mohan et al., 2009), 그리고 임상 인터뷰(clinical interview, Carraher et al.,

2009; Smith et al., 2009) 등이 있었다. 또한, 학습 발달과정 연구들에서 평가 결과를 근거로 학생들의 학습 발달 수준을 규명하는데 이론적인 배경이 된 것은 바로 '문항 반응 이론(item response theory)'이었다. 과학의 학습을 위한 평가 및 문항 반응 이론이 학습 발달과정을 개발하고 정립하는 데 적용되는 과정은 다음 장에서 자세히 기술할 것이다.

과학의 학습 발달과정 연구에서 학습 평가의 결과로 파악된 중간 과정 단계들이 하위 정착점에서 상위 정착점으로 학습의 발달을 연결해 주는 가설적인 경로를 표현할 수 있는가의 문제는 평가의 결과가 교사의 교수활동에 반영되어 학생들의 학습의 발달을 촉진시키는 평가 적응적 교수활동, 또는 교사의 교수활동이 지원하는 학습자의 발달을 추구하는 관점에서 그 해답을 찾고 있다. Duschl et al.(2011)의 분석적 고찰에서 교수활동이 지원하는 학습 발달의 긍정적인 사례로 제시했던 Mohan and Anderson(2009)의 연구는 Mohan et al.(2009)의 탄소 순환에 대한 학습 발달 과정을 수정하면서 과학 원리에 기반한 학생들의 설명 능력을 보완하기 위한 몇 가지 유형의 수업 실험(teaching experiment)을 수행하였다. 즉, 수업 실험의 결과에 근거하여 교사의 적절한 교수활동이 탄소 순환에 대한 학생들의 학습 발달과정을 형성할 수 있다는 것이다. Duschl et al. (2011)의 분석적 고찰에서 학습 발달의 가설적 경로에 대한 또 하나의 중요한 연구 결과로 선정되었던 Lehrer and Schauble (2012)[†]의 진화 이론에 대한 학습 발달과정 연구에서는 학생들이 변화(change), 변이(variation), 생태환경(ecosystem)과 관련된 표상(representation) 활동과 모형화(modeling) 활동에 참여하면서 진화의 이론을 학습하는 발달과정에 대하여 10여 년에 걸친 종단연구를 진행하였다. 이들은 과학 교사가 수업 중 형성평가를 통해 학생들에게 교수활동이 지원하는 학습자의 역동적인 발달과정을 제시하고자 하였다. 예를 들면, 변이에 대한 학습자의 발달과정이 '기술된 차이(difference described) → 측정된 차이(difference measured) → 개체의 분포 표현하기(distribution making) → 분포 모델 형성(modeling the distribution) → 각 모델들의 경쟁(competition of models)'에 이르는 동안 '질문을 부과하고 수정하기, 다른 조사와 비교하기, 질문의 답을 찾는 조사할

[†] Duschl et al. (2011)의 논문에서는 Lehrer and Schauble (in press)였으나 그 후 2012년에 출판되었음.

동에 참여하기, 측정과 표상의 방법 고안하기, 전체 학습의 연구 미팅 참여하기' 등의 교수활동을 진행하여 이와 같은 발달과정을 촉진하고 형성하였다.

2. 학습 발달과정의 조사 방법 및 절차

과학의 학습 발달과정은 과학 학습을 위한 평가를 지향하면서 제안된 것이었다. 그래서 학습 발달과정을 조사하고 기술하는 과정은 그 자체로 과학 학습 평가를 발전시키는 방향으로 제시되었다. 따라서 학습 실행의 지시자(learning performance indicators)를 규정하고, 학생들의 학습 수준을 측정하기 위한 평가 도구를 고안하여 그것의 타당성을 검증하는 것은 과학의 학습 발달과정에서 매우 중요하다(Wilson, 2009). 학습 발달과정을 조사할 때 적용되었던 평가의 방법적 틀로서 중요한 것은 *Knowing What Students Know*(NRC, 2001)와 *Systems for State Science Assessment* (NRC, 2006)에서 소개되었던 평가의 삼각형(assessment triangle)이다(Fig. 1). 평가의 삼각형은 적절하고 타당한 평가 도구를 개발하여 학생들의 학습 수준을 측정하고 평가하는 '관찰(observation)', 학습 평가 결과에 따라 등급을 결정하고 학습 발달의 단계를 판단하는 '해석(interpretation)', 그리고 학습 발달의 각 단계별로 적절한 교수활동을 통해 도달하게 될 학습 과제를 설정하여 학습 발달과정을 수정, 보완하는 '인지 과정(cognition)'이 순환적으로 작용하는 평가 시스템이다(NRC, 2001, 2006).

Wilson(2005)은 평가의 삼각형을 기초로 평가 시스템을 개발하는 과정으로서 '구인 모델링 방식(construct modeling approach)'을 제안하였다.

Wilson의 구인 모델링 방식은 '구인 특화 단계 - 평가 문항 개발 - 평가 결과 기술 - 측정 모델'의 평가 시스템 구성 단위(building blocks)으로 구성되며, 그가 운영하는 University of California, Berkeley의 연구 센터 이름을 따서 BEAR (Berkeley Evaluation & Assessment Research) Assessment System 으로 지칭되기도 한다. 4단계의 평가 시스템 구성 단위(Fig. 2)는 학습 발달과정을 개발한 여러 연구들에서 평가 도구를 개발하고 적용하여 그 결과를 분석하는데 적용되었을 뿐만 아니라, 그 자체로도 학습 발달과정을 조사하기 위한 절차로 적용되기도 했다(e.g., Gunckel *et al.*, 2012; Jin & Anderson, 2012; Mohan *et al.*, 2009; Rivet & Kastens, 2012).

Wilson의 구인 모델링 방식 평가 시스템에서 첫 단계는 평가하고 측정할 요소(구인, construct)를 선정하고, 이를 수준별로 정리하여 구인 구성도(construct map)를 작성한다(구인 특화 단계, specifying construct stage). 구인 특화 단계는 평가의 삼각형에서 인지 단계에 해당한다. 학습 발달과정 개발을 위한 평가의 구인은 정형화된 개념 이해가 아니라, 그 구인에 대한 이해 및 실행의 정도가 낮은 수준에서 높은 수준에 이르기까지 질적으로 구분되는 연속적인 도식으로 제시되는데, 이를 구인구성도(Wilson, 2005)라고 한다. 구인구성도를 통해 "1차원적인 잠재적 변수(unidimensional latent variable)로서 응답자의 능력을 그 연속선 상의 특정한 위치에 배치할 수 있다" (Wilson, 2005, p. 7). Wilson의 진술에서 **1차원적**이라 함은 구인구성도가 과학 학습과 관련된 학생들의 특성 중 한 가지의 단일한 요소(구인)를 선택하여 그것의 발달 수준을 나타내기 위한 것임을 말하

Fig. 1 Assessment triangle (NRC, 2001, 2006)

Fig. 2 Assessment triangle with four building blocks (NRC, 2006)

며(지은림, 채선희, 2000), **잠재적 변수**는 구인 구성도가 학생들의 겉으로 드러나지 않은 심리적 특성을 표현하고 있음을 말한 것이다(성태재, 2001). 구인구성도는 학습 발달과정 조사를 위한 평가 문항을 개발하는 토대가 되며, 평가 문항의 응답 결과를 바탕으로 응답자를 그 구인의 이해 및 실행 수준에 따라 특정한 수준에 배치하는 준거가 된다.

평가 시스템 구성 단위의 두 번째는 학생들이 해당하는 구인에 대해 무엇을 얼마만큼 알고 있는지에 대한 데이터를 수집하기 위한 평가 문항 또는 도구를 개발하는 문항 개발(item design) 단계이다. 문항 개발 단계는 평가의 삼각형에서 관찰 단계에 해당한다. 이 단계에서 개발되는 평가 문항은 앞서 언급했던 순위 정렬 선다형 검사지, 열린 응답 검사지, 임상 인터뷰 등 연구자마다 다양한 형태로 제시될 수 있다. 세 번째 평가 시스템 구성 단위는 평가의 결과를 해석하기 위하여 평가 과제나 평가 문항에 대한 학생들의 응답에 특정한 점수를 주어 범주화하는 결과 기술(outcome space description) 단계이며, 이것은 평가의 삼각형에서 해석 단계에 해당된다. 선다형 검사지에 대한 평가 결과 기술은 문항의 배점 및 각 선택지의 부분 점수를 지정하여 비교적 단순하게 처리할 수 있지만, 열린 응답 검사지나 임상 인터뷰와 같이 평가의 결과가 다양한 경우에는 그 결과를 채점하고 기호화(coding)하여 범주별로 분류하는 방법을 안내하는 평가 기준표(rubric)이 필요하며, 또한 평가 결과의 신뢰도를 높일 수 있는 방법을 제시해 주어야 한다.

평가 시스템 구성 단위의 마지막 단계는 측정 모델(measurement model) 단계로서, 평가자가 평가 결

과로 얻은 응답자의 점수나 기호화한 결과를 평가의 구인에 대한 성취 수준과 연결하는 방법이나 모델을 구성하는 것이다. 측정 모델 단계도 평가의 삼각형에서 해석 단계와 관련된다. 측정 모델은 통계적 방법이나 해석적 방법을 이용하여 응답자의 점수나 성취 수준을 구인구성도의 특정한 위치에 배치하는 근거가 된다. 따라서 측정 모델 단계의 결과물은 평가의 결과를 교수 활동의 개선이나 교육과정 및 교육 프로그램 개선과 같은 실제적인 적용으로 안내하는 역할을 할 수 있다. 학습 발달과정 연구에서 널리 사용되고 있는 측정 모델로 문항 반응 이론에 근거한 1모수 로지스틱 모델(one parameter logistic model)의 하나인 Rasch 모델이 있다. 최근의 학습 발달과정 연구에서는 초기의 Rasch 모델을 다분 문항 반응(polytomous item response)의 상황으로 확장시킨 부분 점수 모델(partial credit model), 평정 척도 모델(rating scale model), 다국면 Rasch 모델(many-facet Rasch model) 등이 적용되고 있다. 과학교육의 학습 발달과정에서 Rasch 모델을 적용한 연구들은 특징적으로 Wright map을 사용한 사례들이 많았다(e.g., Gunckel *et al.*, 2012; Johnson & Tymms, 2011; Rivet & Kastens, 2012). Wright map을 활용한 측정 모델의 적용 과정은 다음 절에서 구체적인 실례와 함께 기술할 것이다.

3. 학습 발달과정 연구의 실제

이 장에서는 평가의 삼각형과 BEAR 평가 시스템에 근거하여 본 연구진이 최근 진행 중인 물의 순환

(water cycling)에 대한 학습 발달과정을 조사했던 연구 사례를 제시하였다. 이 학습 발달과정은 초등학교 4 ~ 6학년 학생들을 대상으로 물의 순환에 대한 이해의 발전 경로를 추적하고자 하였으며, 평가 도구로는 8문항으로 구성된 순위정렬 선다형 문항을 개발하여 적용하였다. 학습 발달과정을 규명하는 실제적인 연구 사례를 통해 평가의 삼각형 및 4단계의 평가 시스템 구성 단위를 적용하여 학습 발달과정을 조사하는 방법에 대하여 서술하였다.

1) 구인 특화 단계: 구인구성도 작성

평가 시스템 구성 단위의 첫 단계인 구인 특화 단계에서는, 학습 발달과정에서 중심 주제로 다루고자 하는 구인으로서 물의 순환을 선정하고, 물의 순환에 대한 학생들의 오개념 또는 대안적 개념을 조사했던 선행 연구와 교육과정 내용을 바탕으로 물의 순환 개념의 위계 분석을 실시하여 구인구성도를 작성하였다. 학습 발달과정의 중심 구인으로서 ‘물의 순환’을 선정한 근거는 지구 시스템을 구성하는 각 하위 시스템(지권, 수권, 기권, 생물권)에서 물이 분포하는 양상과, 각 하위 시스템들 사이에서 물이 이동하는 과정 및 물을 매개로 한 하위 시스템 간의 물질의 상호작용을 이해하는 것이 지구를 시스템적으로 이해하는데 매우 중요한 개념이기 때문이다(신동희 등, 2005; 정진우, 김윤지, 2008; Gunckel *et al.*, 2012). 또한 물 순환의 역동적, 순환적 특성을 이해하는 것은 지구 시스템에 대한 현대 시민들의 지구 환경적 소양과 시스템 사고를 함양하기 위한 필수적인 소재이기(Ben-zvi-Assarf & Orion, 2005a) 때문이다. 이에 덧붙여, 현행 초등학교 과학 교과서에는 물의 순환을 4학년 과정에서 ‘물의 상태 변화’ 주제의 단원에서 ‘물과 수증기’를 다루는 중단원에 포함된 일부분으로만 다루고 있는데, 이러한 현황은 물의 순환을 기권에 제한된 관점에서 학습함으로써 지구에 대한 시스템적 이해를 제한할 수 있다. 따라서 물의 순환에 대한 초등학생들의 학습 발달과정을 파악하면, 그 결과로 이후 과학 교육과정 개정을 위한 경험적 연구 결과를 제시할 수 있다고 판단하였기 때문이다.

이 단계의 결과물로 제시된 구인구성도는 물의 순환에 대하여 낮은 수준의 오개념부터 부분적인 이해를 포함하는 중간 수준의 이해를 거쳐 과학적으로 올바른 이해를 나타내는 상위 수준까지 개념 이해의 발

달 단계를 나타낸 임의적인 가설적 발달 경로이다. 구인구성도를 작성하기 위해 먼저 물의 순환에 대한 학생들의 오개념을 연구했던 문헌들을 검토하였다. 검토했던 문헌의 목록은 Table 2에 제시하였다. 선행 연구의 검토 결과, 물의 순환에 대한 학생들의 개념 이해 양상을 **물의 분포**에 대한 이해와 **물의 이동**에 대한 이해로 나눌 수 있었다. 이를 바탕으로 구인구성도를 작성한 것이 Table 3이다. 구인구성도에서 각각 물의 분포와 물의 이동에 대하여 제 1 수준의 개념 이해부터 제 4 수준의 개념 이해를 제시하였다. 구인구성도를 작성하는 과정에서 개념 이해 수준의 위계는 선행 연구에서 제시한 오개념의 유형을 교육과정에 제시된 과학적 개념과 비교하여 과학 개념에 근접한 정도에 따라 연구자(제 2 저자)가 1차적으로 분류하였으며, 이를 공동 연구자(제 1 저자와 제 3 저자)와 과학 교육과정 및 과학 개념과의 관련성에 비추어 토의하고, 연구자간 합의된 내용을 바탕으로 정리하였다. 이 개념 구성도에서 제 1 수준은 학습 발달과정의 하위 정착점에 해당하며, 제 4 수준은 상위 정착점에 해당한다. 즉, 상위 정착점 또는 제 4수준은 연구 대상의 최상위 학년인 6학년에서 학습하도록 교육 과정에 제시되었거나, 6학년 수준의 학습 수준을 가진 학생이 갖출 것으로 기대되는 개념을 배치하였다. 그리고 하위 정착점 또는 제 1수준은 4학년 또는 그 이하의 연령대에 해당하는 학습 수준을 가진 학생들에게 발견될 것으로 예상되는 개념을 배치하였다. 상위 정착점과 하위 정착점을 설정한 후, 그 사이의 중간 단계인 제 2수준과 제 3수준을 설정하여 총 4개의 수준으로 이루어진 구인 구성도를 작성하였다. 그러나 구인 특화 단계의 구인구성도는 학생들을 대상으로 한 구체적인 평가 결과에 근거한 것이 아니므로, 두 정착점과 중간 단계의 수준들은 경험적인 평가 연구 결과에 따라 타당성을 검증하고 수정되어야 하고, 실제로 수정되었다.

2) 평가 문항 고안: 순위정렬 선다형 문항

평가의 삼각형의 관찰 단계 또는 평가 시스템 구성 단위의 두 번째 단계인 평가 문항 고안 단계에서는 물의 순환에 대한 학습 발달과정을 조사하기 위한 평가 도구로서 순위정렬 선다형 평가 문항을 개발하였다. 순위정렬 선다형 평가는 문제의 상황을 제시하고, 이 상황과 관련된 학습자의 개념 이해 정도를 수준별로

Table 2

Lists of literature reviewed in this study to describe a construct map for water cycling

저자	논문 제목	학술지
국동식 (1988)	물의 상태 변화에 대한 중, 고등학생의 개념 형성에 관한 연구	한국과학교육학회지
김효남 등 (1993)	증발과 응결에 대한 국민 학생들의 개념 조사	한국과학교육학회지
남윤경 등 (2004)	'대기와 물의 순환' 관련 개념들에 대한 과제 상황에 따른 고등 학생들의 응답의 일관성	한국지구과학회지
박현주 (1996)	초등학교 학생들의 증발에 대한 개념 생태 연구	초등과학교육
백성혜 등 (2002)	물의 상태, 상태변화 및 그 조건에 대한 유치원, 초등, 중등 과학 교재의 내용 분석	한국과학교육학회지
유병길, 양정인 (2003)	초등학교 학생들의 증발과 응결 개념에 관한 연구	과학교육연구
이용복, 배영부 (1994)	물의 순환에 대한 아동들의 인식에 관한 연구	초등과학교육
이용복, 이성미 (1998)	초등학교 학생들의 증발과 응결 개념에 대한 연구	초등과학교육
정진우, 김윤지 (2008)	물의 순환에 대한 초등 예비 교사들의 지구 시스템적 인식	초등과학교육
조부경 등 (2002)	증발과 증발 조건에 관한 활동에서 유·초·중학교 학생들의 개념 유형 및 학년별 경향성에 관한 연구	한국과학교육학회지
조현희, 김광명 (2000)	대기 현상에 대한 초등학생의 선개념 및 오개념 분석	과학교육연구
Bar (1989)	Children's views about the water cycle	Science Education
Ben-zvi-Assaraf & Orion (2005b)	A study of junior high students' perceptions of the water cycle	Journal of Geoscience Education
Ben-zvi-Assaraf & Orion (2010)	System thinking skills at the elementary school level	JRST*
Covitt et al. (2009)	Students' developing understanding of water in environmental systems	Journal of Environmental Education
Gunckel et al. (2012)	A learning progression for water in socio-ecological systems	JRST
Johnson (2007a)	Children's understanding of changes of state involving the gas state, part 1: boiling water and the particle theory	IJSE**
Johnson (2007b)	Children's understanding of changes of state involving the gas state, part 2: Evaporation and condensation below boiling point	IJSE
Taiwo et al. (1999)	Perceptions of the water cycle among primary school children in Botswana	IJSE

* JRST: Journal of Research in Science Teaching

** IJSE: International Journal of Science Education

설정하고, 각 수준을 선다형 평가 문항의 선택지로 제시한 것이다. 1차 구인구성도는 그 자체로 개념의 발달 경로를 예상한 것이기도 하지만, 그보다는 이후 평

가 문항을 개발할 때 문항 개발의 근거 자료로 활용되었다. 특히 이 연구에서는 순위정렬 선다형 문항을 사용하였는데, 선다형 선택지를 작성할 때 구인구성도

Table 3

The Construct map for water cycling at the stage of specifying construct

수준	자세한 기술	시스템 사고	발달변수
4	공기 중의 수증기가 응결하여 구름방울이 되고, 구름방울이 커져서 떨어지면 비가 된다. 지표면의 물은 지표 근처의 공기가 건조할 때 더 빨리 증발한다. 바람이 강하면 식물의 잎에서 수증기가 빨리 증발한다.	기권 - 지권 지권 - 기권 생물권 - 기권	물의 이동
	수증기가 냉각되어 작은 물방울이 되면 구름이 만들어진다. 땅 속에는 지층 입자 사이(공극)가 지하수로 채워진 암석층이 존재한다. 암석 안에 포함된 지하수는 지표면의 호수와 강물을 합친 것보다 더 많다 식물체 내의 물은 식물의 광합성에 사용된다.	기권 지권: 지하수 지권 생물권	물의 분포
3	구름의 수증기들이 차가워지며 응결하고, 구름 방울들이 크고 무거워져 비가 내린다 햇볕과 바람은 지표면에 있는 물을 증발시켜 구름이 되게 한다. 비가 많이 내리는 곳은 지하수의 양이 많다. 식물의 잎에서 수증기가 공기 중으로 증발한다 식물의 잎에서 증발한 수증기는 이슬이 된다	기권 - 지권 지권 - 기권 기권 - 지권 생물권 - 기권 생물권 - 기권	물의 이동
	구름이나 안개는 수증기가 응결하여 형성된 작은 물방울들로 이루어진다. 땅 속에서 지하수는 암석의 갈라진 틈을 따라 통과할 수 있다. 육지에서 대부분의 빙하나 지하수로 있으며, 아주 적은 양이 시내나 호수에 있다. 강에서 바다로 물이 흘러가기 때문에 바닷물의 양은 계속 증가한다 물은 식물의 먹이의 원료이다 동물이 마신 물은 혈액의 형태로 몸 안에서 순환한다. 지구 온난화 때문에 물이 더 많이 증발하여 지표의 물의 양이 감소할 것이다.	기권 지권: 지하수 수권 수권 생물권 생물권 수권	물의 분포
2	구름이 무겁고 검은색으로 변할 때 비로 발전한다. 구름이 차가워져서 얼음으로 변하고 그 얼음이 무거워지면 비가 된다. 지표면의 물이 수증기로 되어 하늘로 올라간다. 식물의 잎에 있는 기공을 통해 증산작용으로 물방울이 나온다 식물은 뿌리를 통해 흙에서 물을 흡수한다.	기권 - 지권 기권 - 지권 지권 - 기권 생물권 - 기권 지권 - 생물권	물의 이동
	공기 중에서 물은 수증기가 되어 존재한다. 지하수는 땅 속에서 호수나 시냇물 같이 존재한다. 지하수는 물로 채워진 스펀지처럼 바위의 작은 구멍에 남아있다. 물은 바다, 강, 호수, 시냇물로 분포하지만, 대부분은 바다에 있다. 식물의 뿌리, 줄기, 잎에 물이 저장된다. 동물이 마신 물은 혈액의 성분으로 몸 안에 저장된다.	기권 지권: 지하수 지권: 지하수 지권: 지표수 생물권 생물권	물의 분포
1	구름 속의 구멍에서 물이 흘러나온다. 구름이 많아지고 무거워지면 비가 된다. 지표에 존재하는 물이 땅 속으로 스며들어 사라진다. 지표면의 물이 작은 물방울이 되어 공기 중으로 올라간다. 비가 오면 잎을 통해 빗물이 나무에 흡수된다. 피부의 땀은 공기 중의 수증기가 응결한 것이다	기권 - 지권 기권 - 지권 지권 - 기권 지권 - 기권 기권 - 생물권 기권 - 생물권	물의 이동
	공기 중에서 물은 구름에 담겨 존재한다. 구름은 연기나 수증기로 이루어져 있다. 땅 속으로 스며든 물은 사라져서 우리 눈에 보이지 않는다. 지표에서 고체 상태인 얼음과 액체 상태인 물이 함께 존재한다. 식물체 내의 물은 뿌리 또는 줄기에 있다 동물이 물을 마시면 몸 안에서 모두 흡수된다. 동물의 몸에 있는 물은 땀과 소변이다	기권 기권 지권: 지하수 지권: 지표수 생물권 생물권 생물권	물의 분포

가 기본적인 근거 자료가 되었다.

순위정렬 선다형 평가는 많은 학생을 동시에 동일한 문항으로 평가하여 통계적 경향성을 파악할 수 있게 하는 선다형 문항의 장점을 반영하였다. 또한 순위정렬 선다형 평가는 다양한 수준의 선택지를 포함함으로써 각 선택지를 선택한 것이 학생들의 개념 이해 정도를 반영할 수 있게 하여 더 많은 개념 이해 진단적 정보를 제공할 수 있다. 따라서 순위정렬 선다형 평가의 검사 결과는 측정하려는 구인에 대한 학생들의 인지적 발달 모델을 제시해 줄 수 있다는 장점이 있다(Briggs *et al.*, 2006).

이 사례 연구에 적용한 순위정렬 선다형 평가 문항은 구인구성도에 제시된 바와 같이 물의 분포와 물의 이동을 주제로 구성되었다. 각 문항은 ‘비가 오는 상황’, ‘운동장의 물 웅덩이의 물이 증발하는 상황’, 그리고 ‘비가 온 뒤에 나무가 젖어 있는 상황’ 등 세 장면을 제시하고 그 상황에 해당하는 물의 분포와 물의 이동에 대해 평가하는 문항을 작성하였다. Table 4는 이 사례 연구에 적용했던 순위정렬 선다형 평가 문항의 세부 특징을 기술한 것이다.

아래 Fig. 3은 이 연구 사례에서 개발했던 순위정렬 선다형 평가 문항의 일부분이다.

물의 순환 학습 발달과정을 조사하기 위하여 사례 연구에서 개발된 순위정렬 선다형 평가 문항을 서울 지역의 한 초등학교 4학년(60명), 5학년(65명), 6학년(94명) 학생들에게 적용하여 개념 이해 정도를 평가하였다.

3) 평가 결과 기술

평가 결과 기술은 각 문항에 대한 학생들의 응답에 적절한 점수를 부여하고, 각 점수의 결과를 정리하여 서술하는 것이다. 앞서 제시한 순위정렬 선다형 평가 문항에 대하여 학생들에게 각 문항별로 선택지 중 하나의 선택지만을 선택하게 하였으며, 학생들이 선택한 선택지의 수준에 따라 각 문항별 점수를 배당하였다. 즉, 문항에 제시된 선택지 중 가장 낮은 수준의 개념 이해에 해당하는 수준 1의 선택지를 선택한 경우 0점, 수준 2의 선택지를 선택한 경우 1점, 수준 3의 선택지는 2점, 수준 4의 선택지는 3점을 배당하는 것이다. 동일한 수준의 선택지가 2개 있는 문항은 별도로 구별하지 않고 동일한 점수를 부여하였다. 각 선택지의 부분 점수 배점은 평가 결과를 해석하는데 용이하게 하기 위해서였다. Fig. 4는 응답한 학생들의 학년별, 문항별 평균값과 분포를 나타낸 것이다. 순위정렬

Table 4
Description of the ordered multiple-choice items employed in this study

문항의 맥락	비가 오는 상황		물 웅덩이의 물이 증발하는 상황			나무가 비에 젖은 상황		
문항 번호	문항 1	문항 2	문항 3	문항 4	문항 5	문항 6	문항 7	문항 8
문항 기호	WMAtoS	WDinA	WMStoA	WMGtoS	WDinS	WMLtoA	WDinL	WDinL
물의 분포	기권의 물		지표수			생물권		
물의 이동	기권 → 지표		지표 → 기권	지하 → 지표		생물권 → 기권		

- 어느 날 학교를 마치고 집으로 가는 도중 강 건너 마을에서 갑자기 소나기가 내리는 모습을 관찰하게 되었습니다. 비가 올 때 물은 어떻게 움직일까요? (물의 이동: 기권 - 지표)
 - 구름이 물로 채워지면 구름 속의 구멍에서 물이 흘러나옵니다. (수준 1)
 - 구름이 많아지고 무거워지면 검은 색으로 변해 비가 내립니다. (수준 2)
 - 구름이 차가워져서 얼음으로 변하고 그 얼음이 무거워지면 녹아서 비가 됩니다. (수준2)
 - 구름 사이의 수증기들이 차가워지면 물방울이 되고, 이 물방울들이 크고 무거워지면 비가 내립니다. (수준 3)
 - 구름 속의 물방울들이 서로 합쳐져서 커다란 물방울이 되면 비가 되어 내립니다. (수준 4)

Fig. 3 An exemplar of OMCs used in this case study

Fig. 4 The Outcome Spaces of the OMCs assessment

선다형 평가 문항은 각 문항별 선택지마다 수준이 결정되어 있으므로 점수를 매기고 평가 결과를 기술하는 것이 비교적 용이한 편이다.

4) 측정 모델: Rasch모델 기반 문항 반응 이론

측정 모델 단계는 학습 발달과정 연구가 경험적 데이터에 기반한 학습자의 발달적 경로를 실제적으로 제시하는지 여부를 판단하게 해 주는, 즉, 개발된 학습 발달과정의 타당성을 제공해 주는 중요한 과정이다. 물의 순환에 대한 순위정렬 선다형 평가 문항의 검사 결과를 초기의 구인구성도에 연결시켜 평가의 결과를 해석하기 위하여 문항반응이론 소프트웨어인 ConstructMap을 사용하였다. ConstructMap은 문항 반응 이론의 측정 모델 중에서 평가 문항의 난이도를 단일 모수(parameter)로 하여 피험자의 능력을 측정하는 Rasch 모델을 적용한 프로그램이다. Rasch 모델에서는 피험자의 능력이 문항의 난이도보다 높을수록 그 문항의 정답을 맞힐 확률이 높아지고, 피험자의 능력이 문항의 난이도보다 낮을수록 그 문항에 오답할 확률이 높아지는 것으로 해석한다(지은림, 채선희, 2000). 이에 따라 먼저 피험자의 능력과 문항 난이도의 차이를 계산하고, 이를 근거로 피험자가 그 문

항의 정답을 맞힐 확률을 계산하기 위하여 로지스틱(logistic) 함수를 적용한다. 최종적으로 계산된 피험자의 응답 확률과 문항의 난이도를 로지트(logit) 점수로 변환하여 문항 특성 곡선(item characteristic curve)을 작성한다. 초기의 Rasch 모델은 일반적인 선다형 문항에서 볼 수 있듯이 문항에 대한 응답자의 반응을 정답(1점)과 오답(0점)만 있는 이분(dichotomous) 문항 모델을 기초로 구성되었다. 그러나 순위정렬 선다형 평가 문항은 선다형 문항이지만 선택지마다 서로 다른 점수가 할당되므로 이분 문항 반응 모델로 해석하는 것은 부적절하다. 이에 따라 이 사례 연구에서는 Rasch 모델의 기본 틀을 다분 문항 반응 모델로 확장한 부분 점수 모델을 적용하여 문항 난이도와 학생들의 응답 확률을 계산하고 문항 특성 곡선을 작성하였다. Fig. 5는 앞서 제시한 물의 순환 순위정렬 선다형 평가 1번 문항에 대한 문항 특성 곡선을 나타낸 것이다.

문항 특성 곡선의 가로축은 응답자의 능력에 대한 로지트 값을 나타낸 것이고, 세로축은 각 선택지의 난이도를 고려하여 응답자들이 그 선택지에 응답할 확률을 나타낸 것이다. 즉, $p(0)$ 의 파선은 응답자의 능력이 낮을 때 수준 1에 해당하는 선택지를 선택할 확

Fig. 5 Item characteristic curve for the item No.1 of Water Cycling OMCs

률이 높으며, 응답자의 능력이 높아짐에 따라 그 확률은 감소함을 보여준다. $p(1)$ 의 열은 실선은 응답자의 능력이 낮을 때는 수준 2의 선택지를 선택할 확률이 낮지만 응답자의 능력이 높아지면서 이 선택지를 선택할 확률이 점차 높아지다가 능력에 대한 로지트 $-3.0 \sim -2.0$ 을 넘어서면서 그 확률이 점차 낮아짐을 보여준다. 응답자의 능력 로지트 값이 높아짐에 따라 수준 2의 선택지보다는 수준 3의 선택지를 선택할 확률이 높아져서 $p(2)$ 의 짧은 파선의 확률 변화를 보인다. 끝으로 $p(3)$ 의 굵은 실선은 응답자의 능력이 높아짐에 따라 수준 4에 해당하는 선택지를 선택할 확률이 높아짐을 의미한다. Rasch모형에서는 세로 축의 확률 값이 0.5일 때 응답자의 능력이 문항의 난이도 수준과 일치하는 것으로 본다. 즉, 수준 4의 선택지는 응답자의 능력이 1.6 로지트를 보일 때 선택할 확률이 0.5가 된다. 따라서 응답자의 능력이 1.6보다 높은 경우 이 선택지는 쉬운 문항이 되고, 1.6보다 낮은 로지트를 보이는 응답자에게는 어려운 문항이 되는 것이다. 문항 반응 이론에서는 확률 값이 0.5일 때의 응답자 능력에 해당하는 로지트 값을 그 문항의 난이도로 정의한다. Fig. 5에서 네 곡선 중 인접한 두 곡선의

교점은 이전 수준에서 그 다음 수준으로 전이하는 단계 값(step points)을 나타낸다. 즉 단계 값을 경계로 응답자의 능력에 따른 수준을 구분할 수 있는 것이다.

이와 같이 전체 8 문항의 문항 특성 곡선을 작성한 후, 전체 문항에 대하여 학생들의 능력과 각 문항별 선택지에 응답할 확률을 계산하여 물의 순환에 대한 평가 전반에 대한 학생들의 응답과 발달 경로를 추적하였다. Rasch 모델에서는 응답자의 능력과 문항의 난이도를 동시에 표현하는 다이어그램으로 Wright map을 제공한다. Wright map은 응답자의 능력과 문항의 난이도를 로지트 단위로 표시하여 동일한 맵(map)에 표시하여 문항 난이도에 따라 응답자의 수준을 시각적으로 구별할 수 있게 해 준다(Fig. 6).

Fig. 6의 Wright map에서 가장 왼쪽에 표시된 숫자들(3, 2, 1, 0, -1, -2, -3)은 응답자의 개념 이해 능력과 각 문항의 난이도를 고려하여 계산한 로지트 값을 나타낸 것으로, 각 줄마다 0.1 로지트 간격으로 표시되었다. 그 옆의 students 아래는 각 로지트 값에 해당하는 능력을 가진 응답자(학생)의 인원 수를 x 로 표시한 것이다. 각 x 는 응답자 2명을 뜻하며, x 가 많을수록 그 능력 값에 해당하는 학생 수가 많은 것을

Fig. 6 Wright map from the results of the water cycling OMCs

나타낸다. 로지트 -1 부근의 ‘-----’는 응답자 능력 값의 평균에 해당하는 위치를 표시한 것으로, 이 값을 중심으로 대략적인 정규 분포를 이루고 있음을 알 수 있다. Wright map의 오른 쪽에는 Thurston 임계값(Thurstonian threshold) 값에 따라 각 문항별 선택지들을 해당하는 로지트 값의 위치

에 표시하였다. Thurston 임계값은 응답자들이 그 선택지를 선택할 확률이 0.5가 될 때 응답자의 능력에 대한 로지트 값을 말한다. 앞서 문항 특성 곡선에서 그 선택지를 선택할 확률이 0.5가 될 때의 응답자 능력 값을 그 선택지의 난이도로 본다고 하였다. 그러므로 문항별 선택지들의 Thurston 임계값은 그 선택지

의 난이도를 나타내는 것으로 볼 수 있다. 즉, Wright map에서 오른 쪽 위에 있는 WMLtoA. 3은 WMLtoA (생물권에서 기권으로 물의 이동) 문항의 수준 4 선택지가 가장 난이도가 높았으며, 가장 아래에 있는 WMAtoS. 1은 WMAtoS(기권에서 지표로 물의 이동) 문항의 수준 1 선택지가 가장 난이도가 낮았음을 말해 준다.

이와 같이 하여 Wright map은 평가 문항의 난이도와 평가에 참여한 응답자(학생)의 능력을 함께 비교

하고, 전체적인 문항 선택지와 응답자 개개인의 수준을 구분할 수 있게 해 준다. 또한, Wright map은 순위정렬 선다형 평가 문항의 응답 결과를 반영하여 앞서 작성한 구인구성도를 수정하는 근거 자료로 사용되며, 수정된 구인구성도를 이용하여 학생들의 물의 순환에 대한 학습 발달과정을 규명할 수 있게 해 준다. Table 5는 이와 같은 단계를 거쳐 1차적으로 정리된 물의 순환에 대한 학습 발달과정의 예시이다. 뿐만 아니라, Wright map을 분석하여 순위정렬 선다형

Table 5

The first learning progression for water cycling drawn from the first round of building block

	지권(수권)의 물 분포	지권-기권 간 물 이동	기권의 물 분포	생물권-지권/기권 간 물 이동	생물권의 물 분포
수준 4	땅 속에는 입자 사이가 지하수로 채워진 암석층이 존재하며, 암석 안에 포함된 지하수의 양은 지표면의 호수와 강물을 합친 것보다 더 많다.			식물의 잎에서 수증기가 공기 중으로 증발한다. 햇볕과 바람이 강하면 더 빨리 증발한다.	
수준 3	비가 많이 내리는 곳은 지하수의 양이 많다. 육지의 물은 대부분 빙하나 지하수로 있으며, 아주 적은 양이 시내나 호수에 있다. 강에서 바다로 물이 흘러가기 때문에 바닷물의 양은 계속 증가한다. 지구가 더워지면 물이 더 많이 증발하여 지표의 물의 양이 감소할 것이다.	지표면의 물은 지표 근처의 공기가 건조할 때 더 빨리 증발한다. 햇볕과 바람은 지표면에 있는 물을 증발시켜 구름이 되게 한다. 땅 속에서 지하수는 암석의 갈라진 틈을 따라 통과할 수 있다.	공기 중의 수증기가 응결하여 구름방울이 되고, 구름방울이 커져서 떨어지면 비가 된다. 수증기가 냉각되어 작은 물방울이 되면 구름이 만들어진다.	식물은 뿌리를 통해 흙에서 물을 흡수한다. 식물의 잎에 있는 기공을 통해 증산작용으로 물방울이 나온다.	식물체 내의 물은 식물의 광합성에 사용된다.
수준 2	물은 바다, 강, 호수, 시냇물로 분포하지만, 대부분은 바다에 있다. 땅 속으로 스며든 물은 사라져서 우리 눈에 보이지 않는다.	지표면의 물이 작은 물방울이 되어 공기 중으로 올라간다. 지표에 존재하는 물이 땅 속으로 스며들어 사라진다.	공기 중에서 물은 구름에 담겨 존재한다. 구름은 연기나 수증기로 이루어져 있다.	피부의 땀은 공기 중의 수증기가 응결한 것이다.	동물이 물을 마시면 몸 안에서 모두 흡수된다. 동물이 마신 물은 혈액의 형태로 몸 안에서 순환한다. 동물의 몸에 있는 물은 땀과 소변이다. 식물의 뿌리, 줄기, 잎에 물이 저장된다.
수준 1	지표에서 고체 상태인 얼음과 액체 상태인 물이 함께 존재한다.	구름의 수증기들이 차가워지면 크고 무거워져 구름 속의 구멍에서 물이 흘러나와 비가 된다.		비가 오면 잎을 통해 빗물이 나무에 흡수된다.	식물체 내의 물은 뿌리 또는 줄기에 있다.

평가 문항들의 선택지를 학생들의 발달 수준에 맞추어 새로 수정, 보완할 수 있다.

5) 반복적 연구

현재 물의 순환 학습 발달과정 연구는 1차 순위정렬 선다형 평가를 학생들에게 적용한 후 평가 결과를 해석하여 네 단계의 평가 시스템 구성 단위를 한 차례 수행하여 학습 발달과정의 1차 형태를 수립한 상태이다. 학습 발달과정 연구는 1회적인 평가 시스템 구성 적용으로 완성되는 것이 아니라 지속적인 반복 연구(iterative study)를 통한 평가 문항의 타당성 검증 및 평가 결과 해석, 적절한 교수활동 계획 및 구성, 학습 발달과정의 타당성, 신뢰도를 검증 받아야 한다. 그리하여 최종적으로 정리된 학습 발달과정이 학생들의 물의 순환에 대한 이해의 발달 경로를 경험적으로 보여줄 수 있도록 해야 한다. 이 사례 연구 또한 2차년도 이후 연구를 통해 물의 순환 학습 발달과정을 규명하기 위한 지속적인 반복 연구를 수행할 계획이다.

IV. 논의 및 결론

과학 교육과정은 교육의 목표와 내용, 과학 교사의 교수활동, 그리고 과학 학습 평가가 일관성을 유지할 수 있도록 편성되고 운영되어야 한다(Oliva, 1988; Saylor et al., 1981; Schubert, 1986). 과학의 **학습 발달과정**은 경험적 데이터에 근거하여 타당성을 검증받아 적합하게 조직되고, 교사의 교수활동에 기반한 학생들의 장기적인 발달 경로를 제시할 수 있으므로, 교육과정에 제시된 교육의 목적과, 과학 교사의 교수활동에 포함된 학습 목표, 그리고 그 목표를 평가하여 학생들의 발달을 지원할 수 있는 방법론적 틀의 역할을 수행할 수 있다. 최근 2009 개정 과학과 교육과정 이후 과학교육계 안팎으로 과학 교육과정에 대한 관심이 높아지고 있으며, 새로운 교육과정을 개발을 위한 ‘과학교육 내용 표준’을 개발한 연구 사례(박현주 등, 2012)도 보고된 바 있다. 이러한 국내의 상황에서 과학 교육과정 개발(또는 개정)이 더 이상 일부 과학자나 과학교육자 그룹에 의해 결정될 것이 아니라, 과학 학습 평가 및 과학 교수활동에 근거한 학생들의 과학 학습 연구의 결과를 반영한 교육과정 개발로 나아가야 할 것이다. 과학의 학습 발달과정 연구는 국내에서 그 동안 한국과학교육학회를 비롯하여 기타 과학

관련 학회 차원에서 지속적으로 발전시켜 온 과학교육의 연구 성과와, 지역별 그리고 교과 영역별로 현장 과학 교사들의 교사연구회 차원에서 수행되어 온 과학 수업활동 개선의 노력들, 그리고 한국 교육과정 평가원을 중심으로 체계적으로 진행되었던 과학 학습 평가의 경험과 연구 결과들을 일관성 있게 연결해 주는 중요한 방법론적 틀이 될 수 있을 것으로 생각된다.

이 연구에서 소개한 학습 발달과정의 개발 방법과 절차들은 과학의 학습 발달과정에 대한 선행 연구들에서 이미 그 정당성이 인식되었으며, 각 단계를 적용하고 실현하기 위한 세부적인 방법론들이 다양한 관점에서 논의되고 있다. 학습 발달과정을 개발하기 위한 ‘관찰 - 해석 - 인지’의 순환적 과정 및 평가 시스템의 4단계 구성 단위는 과학 교수활동은 물론 학생들의 과학 학습을 지원하고 개선할 수 있는 학습을 위한 평가를 올바르게 실행할 수 있는 방법론적 틀이라 할 수 있다. 또한, 물의 순환 학습 발달과정의 사례 연구에서 소개한 순위정렬 선다형 평가와 Rasch 모델을 적용한 측정 모델과 Wright map 분석과 같은 방법들은 이후 국내에서 다른 교과 영역의 학습 발달과정 조사 연구에 적용되어 더 많은 연구의 성과를 만들어 낼 수 있을 것이다.

학습 발달과정 연구는 특정 학년에 해당하는 학생들의 개념 이해를 파악하거나 단기간의 교수 효과에 의한 개념 이해 정도의 변화를 파악하는 것이 아니라, 학생들의 과학 개념에 대한 이해 정도 및 과학 탐구실행 능력이 장기간에 걸쳐 변화되고 발전하는 경로나 과정을 규명하는 것이다. 따라서 학습 발달과정의 개발은 비교적 장기간에 걸친 종단적 추적 연구와, 각 학년 간의 학습 성취를 비교하는 횡단적 연구를 병행하여 수행하는 것을 권장하고 있다(Lehrer & Schauble, 2009, 2012; NRC, 2007). 장기적 연구에 덧붙여 학교 현장에서 학생들의 과학 학습 발달을 유도할 수 있는 과학 교사들의 적절한 교수활동의 실행 및 개선이 함께 수행되어 교수활동이 지원하는 학습 발달 경로를 제시할 수 있어야 한다. 따라서 과학의 학습 발달과정 연구는 한두 명의 개인의 연구만으로는 그 성과를 충분히 만들어내기 쉽지 않다. 그보다는 과학교육계 전반의 관심과 학회 차원의 계획적인 지원을 바탕으로 과학교육 연구의 새로운 전망을 만들어가는 것이 필요하다고 하겠다.

국문 요약

이 논문은 2006년 이후 미국을 비롯한 세계 여러 나라로 점차 확산되고 있는 학습 발달과정(Learning Progressions) 연구의 현황과 연구 방법을 소개하고, 최근에 국내에서 수행된 연구 사례를 중심으로 학습 발달과정 연구의 실재를 제시하여 학습 발달과정을 조사하기 위한 방법론적 기초를 제공하기 위한 것이다. 이를 위해 미국을 중심으로 진행되어 온 학습 발달과정 연구의 현황을 소개하고, 특별히 학습을 위한 평가의 관점에서 학습 발달과정을 조사하는 방법과 절차를 정리하였다. 과학의 학습 발달과정은 과학의 주제를 학습할 때 형성되는 발달의 경로를 기술한 것으로서, 발달의 경로를 따라 학생들은 과학 지식을 활용하여 과학의 탐구실행에 참여하게 된다. 각각의 학습 발달과정은 상위 정착점과 하위 정착점, 그리고 두 정착점을 연결해 주는 중간 단계들로 구성되었다. 과학의 학습 발달과정을 조사할 때, 연구자들은 평가의 삼각형에 기반하여 구성된 Wilson의 4단계의 평가 시스템 구성단위를 주로 사용하였다. 논문에서는 학습 발달과정의 조사 방법과 절차를 물의 순환에 대한 학습 발달과정 조사에 적용한 사례 연구를 소개하고, 한국에서 수행될 학습 발달과정에 대한 후속 연구를 위한 함의점과 고려할 점을 논의하였다.

참고 문헌

강남화 (2012, 7월). 미국의 국가수준 과학교육틀 수립이 주는 우리나라 과학교육과정에서의 시사점. 한국과학교육학회 하계 학술대회, 강원대학교.

국동식 (1988). 물의 상태 변화에 대한 중, 고등학생의 개념 형성에 관한 연구. 한국과학교육학회지, 8(1), 33-42.

김경희, 신진아, 송미영, 박인용, 김완수, 최인봉, 손원숙, 이현숙 (2012). 2011년 국가수준 학업성취도 평가 결과: 학업 성취 및 향상 특성 분석. 한국교육과정평가원 연구 보고서 RRE 2012-1-5.

김미경, 김동영, 이인호, 정은영, 강훈식, 최요한 (2012). 2011년 국가수준 학업성취도 평가 결과 분석: 과학. 한국교육과정평가원 연구 보고서 RRE 2012-2-5.

김효남, 신인철, 최병순, 강순희 (1993). 증발과 응결에 대한 국민 학생들의 개념 조사. 한국과학교육학

회지, 13(1), 92-99.

남윤경, 정진우, 장명덕 (2004). '대기와 물의 순환' 관련 개념들에 대한 과제 상황에 따른 고등학생들의 응답의 일관성. 한국지구과학회지, 25(8), 656-662.

맹승호 (2011, 9월). 미국의 새 과학교육 프레임워크(A Framework for K-12 Science Education)에 입각한 지구과학 Learning Progression 연구의 전망. 한국지구과학회 추계학술발표회 논문집, 제주대학교.

맹승호, 성연선, 장신호 (2012, 7월). Ordered Multiple Choice Items를 적용한 '물의 순환' 주제의 학습 발달과정(learning progressions) 개발: Rasch 모델에 기반한 초등학교 4 - 6 학년의 사례. 한국과학교육학회 하계 학술대회, 강원대학교.

박현주 (1996). 초등학교 학생들의 증발에 대한 개념 생태 연구. 초등과학교육, 15(2), 215-222.

박현주, 김영민, 노석구, 정진수, 이은아, 유은정, 이동욱, 박종원, 백운수 (2012). 과학교육 내용 표준 개발. 한국과학교육학회지, 32(4), 729-750.

배대성, 유준희 (2012). 중학생의 힘과 운동 현상 관련 과학적 모형구성 수준의 상세화, 새물리, 62(8), 809-825.

백남진 (2006). 교과 교육과정에서의 교육 내용 진술의 구체화. 교육과정연구, 24(2), 207-233.

백성혜, 박재원, 박진옥, 임명혁, 고영미, 조부경, 김효남 (2002). 물의 상태, 상태변화 및 그 조건에 대한 유지원, 초등, 중등 과학 교재의 내용 분석. 한국과학교육학회지, 22(2), 215-229.

성태제 (2001). 문항 반응 이론의 이해와 적용. 서울: 교육과학사.

신동희, 이양락, 이기영, 이은아, 이규석 (2005). 지구 환경을 고려한 미래 지향적 지구 과학 교육 과정 제안. 한국과학교육학회지, 25(2), 239-259.

유병길, 양정인 (2003). 초등학교 학생들의 증발과 응결 개념에 관한 연구. 과학교육연구, 28, 185-198.

윤현진, 이재봉, 김용진, 백성혜, 이기영 (2009). 과학과 교육 내용 개선 방안 연구: 교육과정 내용 관련 쟁점을 중심으로. 한국교육과정평가원 연구보고서 RRC 2009-3-4.

이용복, 배영부 (1994). 물의 순환에 대한 아동들의 인식에 관한 연구. 초등과학교육, 13(1), 81-92.

이용복, 이성미 (1998). 초등학교 학생들의 증발과 응결 개념에 대한 연구. 초등과학교육, 17(1), 89-103.

이해명 (2003). 교육과정 개정 사례를 통해서 본 교육과정 개발체제의 문제점 및 개선 방향. *교육학연구*, 41(2), 197-224.

정진우, 김윤지 (2008). 물의 순환에 대한 초등 예비 교사들의 지구 시스템적 인식. *초등과학교육*, 27(4), 319-327.

조부경, 고영미, 김효남, 백성혜, 박재원, 박진옥, 임명혁 (2002). 증발과 증발 조건에 관한 활동에서 유·초·중학교 학생들의 개념 유형 및 학년별 경향성에 관한 연구. *한국과학교육학회지*, 22(2), 286-298.

조현희, 김광명 (2000). 대기 현상에 대한 초등학생의 선개념 및 오개념 분석. *과학교육연구*, 24, 1-23.

지은림, 채선희 (2000). Rasch 모형의 이론과 실제. 서울: 교육과학사.

Alonzo, A. C., & Gotwals, A. W. (2012). Learning progressions in science: Current challenges and future directions. Sense Publishers, Rotterdam: The Netherlands.

Alonzo, A. C., & Steedle J. T. (2009). Developing and assessing a force and motion learning progression. *Science Education*, 93(3), 389-421.

Bar, V. (1989). Children's views about the water cycle. *Science Education*, 73(4), 481-500.

Ben-zvi-Assaraf, O. & Orion, N. (2005a). Development of system thinking skills in the context of earth system education. *Journal of Research in Science Teaching*, 42(5), 518-560.

Ben-zvi-Assaraf, O. & Orion, N. (2010). System thinking skills at the elementary school level. *Journal of Research in Science Teaching*, 47(5), 540-563.

Ben-zvi-Assarf, O., & Orion, N. (2005b). A study of junior high students' perceptions of the water cycle. *Journal of Geoscience Education*, 53(4), 366-373.

Berland L.K., & McNeill, K.L. (2010). A learning progression for scientific argumentation: Understanding student work and designing supportive instructional contexts. *Science Education*, 94(5), 765-793.

Black, P. J., & Wiliam, D. (1998).

Assessment and classroom learning. *Assessment in Education: Principles, Policy and Practice*, 5(1), 7-73.

Briggs, D. C., & Alonzo, A. C. (2012). The psychometric modeling of ordered multiple-choice item responses for diagnostic assessment with a learning progression. In A. C. Alonzo & A. W. Gotwals (Eds.), *Learning progressions in science: Current challenges and future directions* (pp. 293-316). Rotterdam: Sense Publishers, The Netherlands.

Briggs, D. C., Alonzo, A. C., Schwab, C., & Wilson, M. (2006). Diagnostic assessment with ordered multiple-choice items. *Educational Assessment*, 11(1), 33-63.

Carraher, D., Smith, C., Wiser, M., Schliemann, A., & Cayton-Hodges, G. (2009). Assessing students' evolving understandings about matter. Paper presented at the Learning Progressions in Science (LeaPS) Conference, Iowa City, IA, USA.

Corcoran, T., & Silander, M. (2009). Instruction in high schools: The evidence and the challenge. *The Future of Children: America's High Schools*, 19, 157-183. Retrieved from <http://www.futureofchildren.org>

Corcoran, T., Mosher, F.A., & Rogat, A. (2009). Learning progressions in science: An evidence-based approach to reform (Consortium for Policy Research in Education Report #RR-63). Philadelphia, PA: Consortium for Policy Research in Education.

Covitt, B. A., Gunckel, K. L., & Anderson, C. W. (2009). Students' developing understanding of water in environmental systems. *The Journal of Environmental Education*, 40(3), 37-51.

Duncan, R. G., & Hmelo-Silver, C. E. (2009). Learning progressions: Aligning curriculum, instruction, and assessment. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(6), 606-609.

Duncan, R. G., Rogat, A. D., & Yarden, A. (2009). A learning progression for deepening students' understandings of modern genetics across the 5th–10th grades. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(6), 655–674.

Duschl, R., & Grandy, R. (2012). Two views about explicitly teaching nature of science. *Science & Education*, DOI 10.1007/s11191-012-9539-4.

Duschl, R., Maeng, S., & Sezen, A. (2011). Learning progressions and teaching sequences: A review and analysis. *Studies in Science Education*, 47(2), 123–182.

Furtak, E. M. (2012). Linking a learning progression for natural selection to teachers' enactment of formative assessment. *Journal of Research in Science Teaching*, 49(9), 1181–1210.

Gunckel, K. L., Covitt, B. A., Salinas, I., & Anderson, C. W. (2012). A learning progression for water in socio-ecological systems. *Journal of Research in Science Teaching*, 49(7), 843–868.

Jin, H., & Anderson, C. W. (2012). A learning progression for energy in socio-ecological systems. *Journal of Research in Science Teaching*, 49(9), 1149–1180.

Johnson, P. (2007a). Children's understanding of changes of state involving the gas state, part 1: boiling water and the particle theory. *International Journal of Science Education*, 20(5), 567–583.

Johnson, P. (2007b). Children's understanding of changes of state involving the gas state, part 2: Evaporation and condensation below boiling point. *International Journal of Science Education*, 20(6), 695–709.

Johnson, P., & Tymms, P. (2011). The emergence of a learning progression in middle school chemistry. *Journal of Research in Science Teaching*, 48(8), 849–877.

Lehrer, R., & Schauble, L. (2009). Images of learning, images of progress. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(6), 731–735.

Lehrer, R., & Schauble, L. (2012). Seeding evolutionary thinking by engaging children in modeling its foundations. *Science Education*, 96(4), 701–724.

Mohan, L., & Anderson, C. W. (2009, June). Teaching experiments and the carbon cycle learning progression. Paper presented at the Learning Progressions in Science (LeaPS) Conference, Iowa City, IA, USA.

Mohan, L., Chen, J., & Anderson, C. W. (2009). Developing a multi-year learning progression for carbon cycling in socio-ecological systems. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(6), 675–698.

National Assessment Governing Board (2008). NAEP 2009 science framework development: issues and recommendations. Retrieved from <http://www.nagb.org>

National Research Council (2001). *Knowing what students know: The science and design of educational assessment*. J. W. Pellegrino, N. Chudowsky, & R. Glaser (Eds.). Washington, DC: National Academy Press.

National Research Council (2006). *Systems for state science assessment*. M. R. Wilson & M. W. Bertenthal (Eds.). Washington, DC: National Academy Press.

National Research Council (2007). *Taking science to school: Learning and teaching science in grades K–8*. R. A. Duschl, H. A. Schweingruber, & A. W. Shouse (Eds.). Washington DC: The National Academies Press.

National Research Council (2012). *A framework for K–12 Science Education: Practices, cross-cutting concepts, and core ideas*. Committee on a Conceptual Framework for New K–12 Science Education Standards. Washington DC: The National Academies Press.

Oliva, P. F. (1988). *Developing the curriculum* (2nd ed.) Glencview, IL: Scott, Foresman and Company.

Plummer, J.D., & Krajcik, J. (2010).

Building a learning progression for celestial motion: Elementary levels from an Earth-based perspective. *Journal of Research in Science Teaching*, 47(7), 768–787.

Rivet, A. E., & Kastens, K. A. (2012). Developing a construct-based assessment to examine students' analogical reasoning around physical models in earth science. *Journal of Research in Science Teaching*, 49(6), 713–743.

Saylor, J. G., Alexander, W. M., Lewis, A. J. (1981). *Curriculum planning for better teaching and learning* (4th ed.). New York: Holt, Rinehart and Winston.

Schubert, W. H. (1986). *Curriculum: Perspectives, paradigm, and possibility*. New York: Macmillan.

Schwarz, C.V., Reiser, B.J., Davis, E.A., Kenyon, L., Achér, A., Fortus, D., Shwartz, Y., Hug, B., & Krajcik, J. (2009). Developing a learning progression for scientific modeling: Making scientific modeling accessible and meaningful for learners. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(6), 632–654.

Smith, C. L., Wiser, M., & Carraher, D. W. (2010, March). Using a comparative, longitudinal study with upper elementary school students to test some assumptions of a learning progression for matter. Paper presented at the annual meeting of the National Association for Research on Science Teaching, Philadelphia, PA, USA.

Songer, N. B., Kelcey, B., & Gotwals, A.W. (2009). How and when does complex reasoning occur? Empirically driven development of a learning progressions focused on complex reasoning about biodiversity. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(6), 610–631.

Stevens, S., Delgado, C., & Krajcik, J. S. (2010). Developing a hypothetical multi-dimensional learning progression for the nature of matter. *Journal of Research in Science Teaching*, 47(6), 687–715.

Taiwo, W. W., Ray, H., Motswiri, M. J., & Masene, R. (1999). Perceptions of the water cycle among primary school children in Botswana. *International Journal of Science Education*, 21(4), 413–429.

Wilson, M. (2005). *Constructing measures: An item response modeling approach*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

Wilson, M. (2009). Measuring Progressions: Assessment structures underlying a learning progression. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(6), 716–730.

Wiser, M., Smith, C. L., & Doubler, S. (2012). Learning progressions as tools for curriculum development: Lessons from the Inquiry project. In A. C. Alonzo & A. W. Gotwals (Eds.), *Learning progressions in science: Current challenges and future directions* (pp. 359–403). Rotterdam: Sense Publishers, The Netherlands.