



예비 초등 교사들의 과학 모델 평가 기준

오필석^{1*}, 이정숙²

¹경인교육대학교, ²연세대학교

Criteria for Evaluating Scientific Models Used by Pre-service Elementary Teachers

Phil Seok Oh^{1*}, Jung Sook Lee²

¹Gyeongin National University of Education, ²Yonsei University

ARTICLE INFO

Article history:

Received 10 January 2014

Received in revised form

1 April 2014

17 April 2014

Accepted 20 April 2014

Key words:

scientific model, model evaluation, modeling pedagogies, evaluation criteria, elementary science, pre-service teacher

ABSTRACT

The purpose of this study is to explore evaluation criteria that pre-service elementary teachers employ as they evaluate and select models to explain electric circuits. Thirty junior students in a university of education have participated in the study as a part of the science education course in which they were enrolled. The lessons for the participants have been organized as a cyclic sequence of different modeling pedagogies including the expressive, experimental, and evaluative modeling. The pre-service teachers have been given five electric circuits in order and asked to create models and further develop them through peer discussion. Their modeling activities have been video- or audio-recorded, and the recordings and their transcripts have been analyzed using a framework of model evaluation criteria. It reveals that the types and frequencies of evaluation criteria used are different between situations of model development and model selection. While empirical and theoretical criteria have been used dominantly in both situations, more various criteria have been employed in the situation where the pre-service teachers selected one model among alternatives. Implications for science education and science education research have been suggested.

1. 서론

최근 과학 교육 분야에서는 모델(model)을 활용한 과학 수업 혹은 모델링(modeling)을 통한 과학 학습이 강조되고 있다. 그런데 이러한 경향이 대두되는 까닭은 단순히 모델이 과학 지식을 얻는 데 도움이 되는 학습의 매개체라는 데 있지 않다. 과학 교육에서 모델 활용이나 모델링이 중요시되는 까닭은 그것이 과학적 탐구를 수행하는 데 꼭 필요한 실천 행위(practice) 중의 하나이며, 학교의 과학 교육은 그러한 과학자적인 실천 행위를 반영하여 이루어져야 하기 때문이다(National Research Council [NRC], 2012). 즉, 과학적 탐구는 현상을 기술하거나 설명, 예측하기 위하여 모델을 창안하여 사용하는 모델링 활동을 포함하고 있으며, 이러한 활동은 학교의 과학 프로그램을 조직하는 데에도 핵심적인 원리가 되어야 한다는 것이다.

모델링이 탐구를 구성하는 실천 행위들 중의 하나라면, 탐구라는 큰 틀 속에서 모델링은 다른 과학적 실천 행위들과 밀접하게 관련될 수밖에 없다. 그 중 과학 교육자들이 주목하고 있는 것 중의 하나가 논증(또는 논변, argument) 또는 논증 활동(또는 논변 활동, argumentation)이다(Böttcher & Meisert, 2011; Clark & Sengupta, 2013; Passmore & Svoboda, 2012; Sutton, 1996). 예를 들어, 일찍이 Sutton(1996)은 모델링의 두 단계를 각각 현상에 대한 재술(re-describing)과 설득(persuading)이라고 하여 모델링이 논증 활동과 같은 담화 행위를 수반하고 있음을 통찰하였다. 또, 보다 최근에

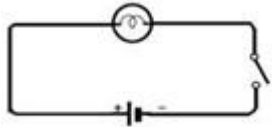
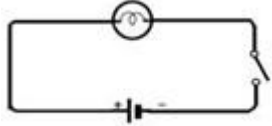
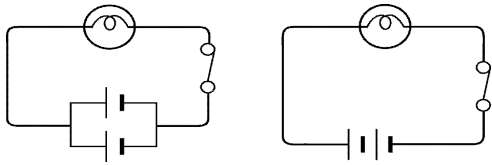
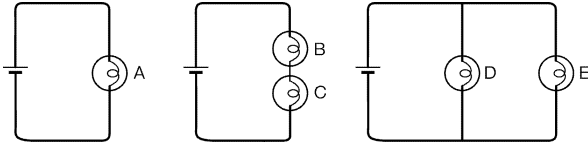
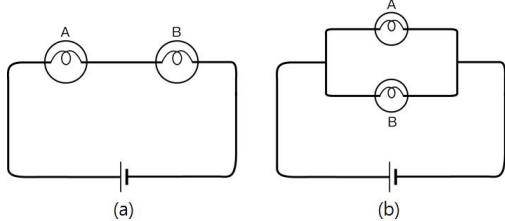
Böttcher & Meisert (2011)는 과학에서의 논증 활동을 모델에 관한 비판적인 평가 과정이라고 하면서 이 과정에서 모델의 설득력이나 적절성 등에 대한 근거가 제시되고 논의된다고 하였다. 더 나아가 Passmore & Svoboda(2012)는 모델링이 본질적으로 논증적 활동이라고 주장하였다. 즉, 모델 창안의 동기가 되는 질문을 형성하는 단계로부터 경쟁하는 모델들을 평가하는 단계에 이르기까지 모든 모델링 단계에서 개인은 자기 자신이나 다른 사람들이 모델에 관해 납득하고 확신할 수 있게 하는 활동에 참여한다는 것이다.

모델링에서 논증 활동이 일어날 수 있는 가장 유력한 상황은 자신의 모델 또는 다른 사람들의 모델을 평가하는 경우이다(Böttcher & Meisert, 2011; Campbell, Oh, & Neilson, 2013; Clark & Sengupta, 2013; Lee *et al.*, 2012; Passmore & Svoboda, 2012). 즉, 논증은 모델의 타당성을 따져 보고 그것을 개선하거나 여러 가지 대안적인 모델들의 상대적인 장점을 비교하여 가장 적절한 것을 선택하는 과정에서 발생하기 쉽다. 왜냐하면, 논증 활동은 어떤 주장이 타당함을 입증하고 그것을 바탕으로 상대방을 설득하는 과정을 수반하기 때문이다(Berland & Reiser, 2008; Osborne & Patterson, 2011). 그런데, 흔히 과학적인 주장은 관찰과 실험을 통해 얻은 증거에 의존하여 평가된다고 생각하지만, 실제적인 과학 탐구나 논증 상황에서는 경험적인 증거 외에도 여러 가지 다른 평가 기준들이 활용된다는 것이 알려져 있다(Abi-El-Mona & Abd-El-Khalick, 2011). 따라서 과학 탐구를 위한 실천 행위로서 모델링을 논증 활동과 관련지어 충분히 이해하기

* 교신저자: 오필석(philoh@ginue.ac.kr)

** 이 논문은 2012학년도 경인교육대학교 교내연구비 지원을 받아 작성된 것임.
http://dx.doi.org/10.14697/jkase.2014.34.2.0135

Table 1. Electric circuits and focus questions presented to the pre-service elementary teachers

Level	Electric circuit	Focus question
1		Construct a model that can explain why the bulb lights up when the switch is closed.
2		Using your model, predict the amount of electric current at different places in the circuit when the switch is closed.
3		Using your model, compare the brightness of the bulbs.
4		Using your model, compare the bulb brightness of the circuits.
5		Suppose that in circuit (a), the brightness of bulb B is greater than that of bulb A. Using your model, predict which bulb is the brighter in circuit (b).

위해서는 모델을 평가하는 상황에서 어떤 다양한 평가 기준들이 어떻게 활용되는지 연구할 필요가 있다.

이러한 점들을 고려하여 본 연구에서는 과학적 실천 행위로서 모델과 논증을 연결 짓기 위한 출발점으로서 참여자들이 모델을 평가하는데 동원하는 기준들을 살펴보고자 한다. 특별히 본 연구는 예비 초등교사들이 여러 가지 전기회로에 관한 모델을 창안하고 개선해 나가는 동안 다양한 모델 평가 기준들을 어떻게 사용하는지 조사해 보고자 한다. 이러한 연구의 결과는 예비 교사들의 탐구 능력을 알아보고 그에 알맞은 예비 교사 교육 프로그램을 마련하거나 현장 교사들과 연계된 과학 교육 연구를 구성하는 데 도움을 줄 수 있을 것이다.

II. 연구 방법

1. 연구의 맥락

본 연구는 대도시에 소재하고 있는 한 교육대학교에서 이 논문의 제 2저자가 담당하고 있는 과학 교육 과목을 수강하는 학생들의 참여로 이루어졌다. 이들은 초등사회교육을 전공하는 3학년 30명의 학생들로 수업 활동의 일부로서 Table 1에 제시된 것과 같은 여러 가지 전기회로에 관한 모델링 활동을 수행하였다. 이 모델링 활동의 목적은 예비 초등교사들로 하여금 까다로운 수식을 사용하지 않고 전기 현상을 설명할 수 있는 모델을 스스로 개발하게 함으로써 과학 지식에 대한 이해를 높이고 장차 초등학교 현장에서 관련 단원을 가르치는 능력을

증진하는 데 있었다. 이 때 사용한 전기회로는 선행 연구(McDermott *et al.*, 2002)와 2009년 초등 교사 임용 고시에 출제된 문항을 수정 보완하여 사용하였다.

예비 교사들을 위한 모델링은 Campbell *et al.* (2013)이 제안한 다섯 가지 모델링 교수법(modeling pedagogies) 중 일부를 선택하고 그들을 일련의 활동 계열에 따라 조직하여 이루어졌다(Figure 1 참조). 먼저 예비 교사들을 5명이 한 조가 되도록 6개의 조로 편성한 후, 간단한 전기회로의 그림(Table 1의 1)을 보여주고 조별로 전구에 불이 켜지는 까닭을 설명할 수 있는 모델을 창안하는 ‘표현적 모델링(expressive modeling)’을 하도록 하였다. 다음으로, 예비 교사들에게 그들의 모델을 이용하여 처음과 동일한 전기회로에서 전류량에 대해 예측하도록 한 후, 실제 실험 결과를 말해 줌으로써 예비 교사들이 자기 조의 모델을 수정할 수 있는 ‘실험적 모델링(experimental modeling)’을 진행하였다(Table 1의 2). 이후에는 새로운 전기회로(Table 1의 3)를 이용하여 실험적 모델링을 수행하고, 연이어 예비 교사들의 모델을 둘 씩 짝지어 모델들의 장단점을 비교하여 더욱 적절한 것을 선택하는 ‘평가적 모델링(evaluative modeling)’을 진행하였다. 마찬가지로 방법으로 두 개의 추가적인 전기회로(Table 1의 4, 5)를 가지고 실험적 모델링을 수행하고, 최종적으로 하나의 모델을 선택하는 평가적 모델링을 진행함으로써 예비 교사들의 전체적인 활동이 ‘순환적 모델링(cyclic modeling)’의 구조 속에서 조직될 수 있도록 하였다.

이상과 같은 모델링 활동의 계열은 Figure 1에 도해적으로 제시하였다. 즉, 예비 교사들은 Figure 1의 계열을 따라 모델의 타당성에서 대해

Table 2. A framework for analyzing model evaluation criteria

Category	Criterion	Description or example
Empirical criteria	Consistency with direct evidence	A result logically predicted from a model is actually observed.
	Consistency with indirect evidence	Evidence similar to a result predicted from a model or a result predicted from a similar model is actually observed.
	Empirical scope	A model explains or predicts a great range of phenomena.
	Strength of evidence	(e.g.) significance of the evidence predicted or explained by a model, quantitatively accurate prediction, etc.
Theoretical criteria	Internal coherence	Model components do not conflict with each other. There is no logical contradiction in explanations by a model.
	External coherence	The content of a model is coherent with well-established scientific theories or models.
	Detailedness	A model provides detailed descriptions of mechanism, processes, variables, and/or causal relationship that contribute to the occurrence of a phenomenon.
	Openness	A model/modeler readily accepts an attempt for verification or falsification.
	Fruitfulness	A model provides guidelines and information for future research.
	Use of proper forms and terms	(e.g.) use of mathematical forms of representation, etc.
Aesthetic criteria	Simplicity	A model explains a phenomenon with fewer assumptions or hypotheses
	Similarity	A model is similar to other, well-established models or the appearance of the phenomenon addressed.
	Tractability or adjustability	A model is easy to handle, and adjustments can be made with minimal effort in the face of explanatory failure.
	Aesthetic beauty	(e.g.) elegance, neatness, harmony, balance, etc.
Social-cultural criteria	Clarity or comprehensibility	A model communicates the ideas of the modeler so clearly that the audience can understand.
	Compatibility with current research trends	(e.g.) compatibility with the views of significant scholars, etc.
	Ethical, social, or cultural consideration	(e.g.) gender, ethnic, religion, moral and political relationships, etc.
	Economic consideration	(e.g.) pursuit of the topic prioritized by a funding agency, etc.
Personal criteria	Personal relevance	(e.g.) consistency with personal interest, beliefs, etc.
	Personal emotion	(e.g.) satisfaction, confidence, conviction, etc.
Other criteria	Appeal to the nature of models	A model is selected by a participant based on his/her perception of the nature of models.
	No alternative model	A current model is selected since there is no alternative model.

서 논의하고 설득하는 활동에 참여하였으며, 이 과정에서 자신의 모델이나 동료들의 모델을 평가하는 경험을 하였다. 말하자면 본 연구는 모델 평가 기준 분석을 위한 연구의 맥락으로 참여자들이 과학적 탐구 상황에서 자연스럽게 논증 활동을 수행하게 하는 몰입 전략(immersive strategy, Cavagnetto, 2010, 2011)을 채택하였다고 할 수 있다.

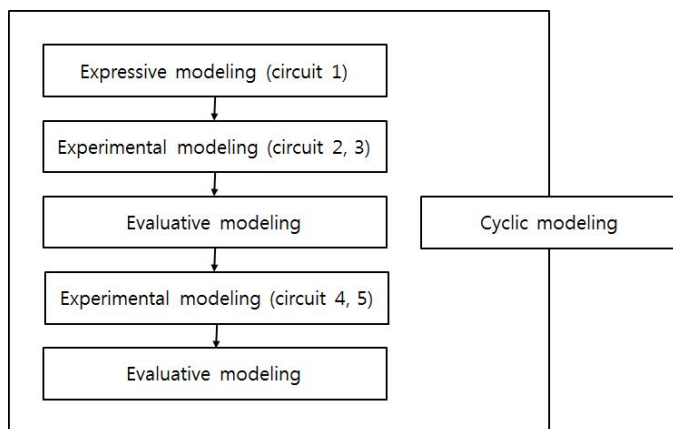


Figure 1. The sequence of modeling instruction for the pre-service elementary teachers

2. 연구 자료 및 분석 방법

본 연구에서는 예비 초등 교사들의 모델링 활동을 비디오나 오디오 파일로 녹음하여 연구의 자료원으로 사용하였다.¹⁾ 또, 예비 교사들이 자신이나 동료의 모델을 평가하는 동안 사용하는 기준들을 분석하기 위하여 Table 2와 같은 분석틀을 마련하였다. 이 틀은 과학 이론과 모델의 평가에 관한 문제를 다루었던 선행 연구들(Abi-El-Mona & Abd-El-Khalick, 2011; Brewer, Chinn, & Samarapungavan, 1998; Chauviré, 2005; Hodson, 2001; Kordig, 1978; Kuhn, 1974; Nelson & Davis, 2012; Oh & Oh, 2011a, b; Passmore & Svoboda, 2012; Pluta, Chinn, & Duncan, 2011; Samarapungavan, 1992; Sampson, Grooms, & Walker, 2011; Thagard, 1978)에 대한 반복적인 고찰을 통해 만들어졌다. 구체적으로, 문헌들에서 제시하고 있는 기준들을 이용하여 임시의 모델 평가 기준들의 목록을 만들고, 다른 연구물을 계속 읽으면서 새로운 기준들을 추가하여 목록의 내용을 풍부하게 하였다. 이때 유사한 기준이지만 문헌들마다 서로 다른 명칭으로 불린 것들에 대해서는 본 연구의 연구자가 판단하기에 적절한 명칭을 선택하거나 새로운 이름을 붙여 하나의 기준으로 통합하였고, 여러 가지 기준들을 포괄할 수 있는 명칭을 찾아 낱말의 기준들을 몇 가지 범주로

1) 연구 자료원으로서 파일의 저장 형식이 다른 까닭은 캠코더와 보이스 레코더 중 자료 수집 당시에 가용한 한 가지 매체를 이용하였기 때문이었다. 즉, 본 연구에서 사용한 파일들은 동일한 활동을 서로 다른 형식으로 저장한 것이 아니라 형식에 관계없이 각각 다른 활동에 관한 정보를 담고 있었다.

Table 3. The pre-service elementary teachers' initial models explaining electric circuits

Group	Model	Model description	First selection	Second selection
1	Marathon model	Electrons are compared to marathon runners, and a bulb is compared to a narrow bumpy road. The marathon runners collide with each other, cause friction, and give out light as they pass through the narrow bumpy road.		
2	Conveyor belt model	The electron flow is compared to the movement of a conveyor belt, and a bulb is compared to a up and down road such as a roller coaster road. A battery supplies charges on the conveyor belt. The charges collide with each other and give out light when they enter the up and down road.	○	○
3	Electron death model	Positive and negative charges are distributed to each terminal of a battery. When a switch is closed, the negative charges move and collide with the resistance particles in a bulb, which result in heat and light. In this process, some of the charges are extinguished.		
4	Dam model	A light bulb is compared to a fan. Water comes down from a high position to spin the fan. The water goes back up to the original position.		
5	Revolving door model	Charges are compared to prisoners, a battery is compared to a prison full of prisoners, and a bulb is compared to a revolving door. When whipped, the prisoners move and spin the revolving door to give out light.	○	
6	Moving electron model	When electrons in a battery move out and run into the resistance (bulb), electrical energy is transformed into light energy.	○	

묶여 정리하였다. 또, 각각의 모델 평가 기준의 의미를 간략한 문장으로 기술(description)하거나 의미가 포괄적이고 그 사례가 다양해서 한두 문장으로 정의하는 것이 적합하지 않은 경우에는 구체적인 예(example)를 제시하였다. 이렇게 하여 정의된 각 기준의 의미나 예들은 Table 2에 제시된 것과 같다.

이상과 같이 하여 초기 분석틀이 완성된 후에는 그것을 활용하여 예비 교사들의 모델 평가 기준을 예비적으로 코딩하였다. 이때 초기 분석틀에 포함되지 않은 새로운 기준이 발견되면 그것을 추가하여 분석틀을 지속적으로 수정하였다. 그리고 이러한 과정을 새로운 기준이 등장하지 않을 때까지 실시하여 분석틀과 연구 결과를 동시에 확정하였다. 본 논문에서는 분석틀의 이러한 발견법적인 성격을 고려하여 Table 2의 ‘과학 모델 평가 기준의 분석틀’을 최종적으로 완성된 형태로 제시하기보다 후속 연구에 따라 계속 수정보완될 수 있는 잠정적인 것으로 제안하고자 한다.

자료 분석 과정에서는 먼저 예비 교사들의 모델링 활동을 기록한 파일들을 재생하여 대화 내용의 대강을 전사하면서 예비 교사들이 자신이나 동료들의 모델에 관하여 평가적인 코멘트나 질문을 하는 지점을 표시하였다. 또, 그러한 평가적인 발화의 근거가 되는 평가 기준이 무엇인지 예의 분석틀에 비추어 기록해 두었다. 이 과정에는 과학 교육에서의 모델과 모델링에 관한 다수의 연구를 진행해 온 연구자(제 1저자)와 그와 함께 공동 연구를 진행하고 있는 박사 후 연구원(제 2저자)이 함께 참여하였다. 다음으로 예비 교사들의 대화를 정밀하게 전사한 후, 두 분석자가 독립적으로 파일과 전사본을 검토하여 예비 교사들이 자신이나 동료의 모델의 타당성에 대해 주장하고 토론하는 동안 사용하는 모델 평가 기준들을 확인하였다. 또, 이 과정에서 처음의 판단이 달라진 경우에는 처음에 기록한 것을 수정하였다. 이후 두 분석자가

다시 함께 만나 분석 결과를 공유하고 분석자간에 의견이 일치하지 않는 부분에 대해서는 상호간의 협의를 통해 합의에 이르도록 하였다. 또, 수월하게 합의가 이루어지지 않은 경우에는 두 분석자가 별도로 자료를 재검토 한 후 다시 협의하였다. 결과적으로, 본 연구에 참여한 예비 초등 교사들이 사용한 총 11가지의 세부적인 과학 모델 평가 기준들이 확인되었으며, 각각의 기준을 대표할만한 담화 사례를 추출함으로써 연구 결과를 확정하였다.

III. 연구 결과

Table 3은 예비 초등 교사들이 전구에 불이 들어오는 까닭을 설명하기 위하여 조별로 처음 창안한 모델을 정리한 것이다.²⁾ 예비 교사들은 이 초기 모델을 바탕으로 새로운 전기회로를 설명하며 서로 토론하였고 그 과정에서 자신들의 모델을 점차 개선하였다. 또, 평가적 모델링을 통해 3개의 모델을 1차로 선택하였으며, 추가로 모델을 개선한 후 2차 평가적 모델링을 통해 학급 내에서 최종적인 하나의 모델을 합의하였다. Table 3에서 ‘First selection’ 또는 ‘Second selection’이라고 표시된 것은 각각 1차와 2차 평가적 모델링 과정을 통해 선택된 모델이라는 것을 뜻한다. 다시 말하여, 본 연구에서 예비 교사들은 전기회로를 설명하는 모델을 개발 또는 개선하는 과정과 상대적으로 우수한 모델을 선택하는 과정에서 자연스럽게 모델을 평가하는 활동에 참여하였다고 할 수 있다. 그런데, Table 4에 요약적으로 제시한 바와 같이, 각각의 경우에 예비 교사들이 사용한 모델 평가 기준들에는 다소의 차이가 있었다. 이에 따라 다음 본문에서는 예비 초등 교사들의 과학 모델 평가 기준들을 두 가지 맥락에 따라 그 대표적인 사례와 함께 분리하여 제시한다.

2) Table 3에서 보는 바와 같이, 예비 초등 교사들이 창안한 6개의 초기 모델들 중 4개가 비유적인 모델이었다. 그런데 본 연구 과정에서는 ‘과학 모델’을 과학적인 문제를 다루기 위해 사용하는 모델이라는 포괄적인 의미로 사용하였고, 따라서 예비 교사들에게도 어떤 특정한 방식으로 모델을 만들라고 요구하지 않았다. 하지만 결과적으로 예비 교사들의 초기 모델 중에는 비유 모델이 많았고, 최종적으로 합의된 모델 또한 비유적인 것이었다. 학생들이 창안하는 모델 중에 왜 비유적인 것들이 많는지, 비유 모델의 비율이 모델이 표상하고자 하는 대상이나 주제, 또는 과학 영역 등에 따라 달라지는 것은 아닌지 등과 같은 질문들이 추후에 연구해 볼만한 문제가 될 수 있을 것이다.

Table 4. Criteria for evaluating models used by the pre-service elementary teachers

Evaluative criteria		Situation 1: Model development/ improvement	Situation 2: Model selection
Empirical criteria	Consistency with direct evidence	6	·
	Consistency with indirect evidence	1	·
	Empirical scope	8	2
Theoretical criteria	Internal coherence	14	1
	External coherence	9	5
	Detailedness	1	3
Aesthetic criteria	Similarity	·	1
	Tractability or adjustability	·	5
Social-cultural criteria	Clarity or comprehensibility	1	3
Personal criteria	Personal relevance	·	2
Other criteria	Appeal to the nature of models	2	2

1. 모델을 개발·개선하는 과정에서 사용된 평가 기준들

1) 경험적 기준(empirical criteria)

① 경험적 범위(empirical scope)

본 연구에서 수행한 모델링 수업은 예비 초등 교사들에게 새로운 전기회로를 제공하고 자신들의 모델로 그것을 설명하게 하여 모델의 설명적 범위를 넓혀가는 일련의 과제들로 이루어졌다. 따라서 ‘경험적 범위’를 준거로 모델을 평가하는 활동은 예비 교사들이 인식하지 못하더라도 수업의 진행 과정 중에 암묵적으로 포함된 것이었다. 그럼에도 불구하고 예비 교사들은 자신이나 다른 사람의 모델을 평가하여 개선하는 과정에서 자발적으로 모델이 설명해야 하는 현상을 추가하여 모델의 경험적 범위를 넓혀가는 모습을 보여 주었다.

예비 교사들이 과제로 주어진 현상 외에도 모델의 경험적 범위를 넓히고자 하는 목적에서 추가로 설명하고자 했던 전기 현상들 중에 대표적인 것은 전기회로에서 결국에는 전지가 닳게 된다는 사실이었다. 즉, 대부분의 사람들이 인지하고 있는 이 현상을 잘 설명하는가의 여부가 예비 교사들이 모델을 평가하는 데에도 중요한 기준이 되었다. 예를 들어, 4조의 예비 교사들이 ‘댐 모델’을 이용하여 전기회로 1, 2에 관해 설명하고 난 후에 동료 학생들은 다음과 같은 대화를 통해 4조의 모델을 평가하였다.

예비교사: 그러면 전류가, 전지에 있는 전류가 다 소진이 ... 되는 건 어떻게 설명을 하시겠어요?

4조 예비교사1: 저수지에 항상 일정한 물이 있기 때문에 저수지의 물이 뭘 소진되거나 그런 건 없고 항상 일정한 물이 돌아가는,

4조 예비교사2: 돌아간다는 시스템. 양수식.

4조 예비교사1: 네. 양수식 발전소기 때문에.

예비교사: 전지는 닳지 않아요?

4조 예비교사1: 전지는 닳지 않죠. (학생들이 여기저기서 웅성웅성 말하기 시작한다.)

4조 예비교사3: 그러니까 닳는다는 것은 물을 빼면 되죠.

위 대화에 잘 나타난 바와 같이, 4조의 예비 교사들은 동료 학생들의 연이은 평가적인 질문으로부터 자신들의 모델을 수정하는 모습을 보여 주었다. 이와는 달리 1조의 예비 교사들은 마라톤 선수가 결국에는 지치게 된다는 사실에 비유하면 전지가 닳는 현상도 설명할 수 있다고 하여 자신들의 모델이 경험적 범위가 넓다는 것을 주장하였다. 또한 6조의 예비 교사들은, 회로를 돌아 온 전하의 일부가 소멸된다는 다른 조의 모델과는 달리, 자신들의 모델에서는 전하가 에너지 또는 동력을 잃게 되어 전지가 닳는 것이라고 설명하였다. 이 밖에도 예비 교사들은 문제로 주어진 전기회로가 점차 복잡해짐에 따라 회로에 연결된 전구의 밝기를 비교하여 설명함으로써 자신들의 모델의 경험적 범위를 넓히거나 동료들의 모델을 평가하였다.

② 직·간접 증거와의 일치성(consistency with direct/indirect evidence)

예비 교사들이 모델을 평가하는 경험적 기준으로서 ‘직·간접적인 증거와의 일치성’을 문제 삼는 상황은 주로 동료들이 그들의 모델을 설명하는 중에 경험적 증거에 의해 지지되는지의 여부가 의문시 되는 내용이 등장하는 때이었다. 예를 들어, 2조의 예비 교사들은 ‘컨베이어 벨트 모델’을 이용하여 5번 전기회로의 특징을 설명하면서 전자가 전구에 머무르는 시간이 저항에 따라 다르고 전구의 밝기는 전자가 머무는 시간에 비례하기 때문에 전구의 밝기가 달라진다고 하였다. 즉, “[병렬회로에서는] A의 저항이 더 작기 때문에 만약 A에 [전자가] 1초에 1개가 머문다고 한다면, B에는 ... 저항이 크기 때문에 2초에 1개가 머물러야 된다. ... 그래서 ... A가 더 밝다”는 것이다. 따라서 2조의 모델에 따르면, 육안으로는 식별되지 않더라도 전자가 전구에 머무르는 시간과 그렇지 않은 시간이 교차하면서 전구의 불빛은 반복적으로 점멸하게 된다. 물론 전구는 필라멘트의 발열에 의해 빛을 내기 때문에 전구가 점멸한다는 설명은 과학적으로 옳지 않다. 하지만 이러한 개념이 확고하게 정립되어 있지 않은 예비 초등 교사들은, 다음

대화에서와 같이, 2조가 제시한 설명을 경험적인 증거를 통해 입증하기를 원하였다.

예비교사1: [직렬회로에서] A가 2초 동안 꺼져 있다가 1초 켜지고, 1초 동안 켜져 있다가, 그런데 그거를 평균을 낸다는 거잖아요?
 2조 예비교사1: 네. 짧은 순간이기 때문에,
 예비교사1: 그럼 그게 꺼졌다, 켜졌다?
 2조 예비교사1: 꺼졌다, 켜졌다 한다고 해도 솔직히 짧은 시간이지 않아요. (학생들 웅성대기 시작한다.)
 2조 예비교사2: 우리가 못 보는 거지 어쨌든 꺼졌다 켜졌다 하는, 아주 찰나이지 꺼졌다 하는 거잖아요.
 예비교사1: 그런데 실제로 그런가요?
 예비교사2: 실제로 맞는 거야? (유사한 질문이 계속 이어진다.)

이외에도 5조가 ‘회전문 모델’로 마지막 전기회로를 설명할 때에는 ‘도선 전체에 흐르는 전류의 양은 같다’, ‘병렬회로에서 두 저항에 걸리는 전압은 같다’는 경험적인 증거와 충돌하는 설명에 대한 평가적인 대화가 예비 교사들 사이에 발생하였다.

예비 교사들이 간접적인 증거를 들어 동료 모델의 타당성을 평가하는 시도 역시 2조가 5번 전기회로를 설명하는 상황에서 일어났다. 2조의 개선된 컨베이어벨트 모델의 핵심적인 아이디어 중의 하나는 전지로부터 나오는 전자의 양이 회로에 연결된 저항에 따라 달라진다는 것이었다. 이것은 전지가 연결되어 있는 회로에 따라 전류의 양이 달라진다는 과학적인 개념에 상응하는 것으로 볼 수 있다. 하지만 본 연구에 참여한 예비 초등 교사들은 많은 경우 전지는 회로에 관계없이 항상 동일한 양의 전자를 내보낸다는 오개념을 가지고 있었고, 특히 아래 대화에서 질문을 던진 학생은 문제로 주어진 전기회로와는 다른 상황에서 발생한 경험적 증거, 즉 간접적인 증거를 통해 2조의 설명을 반박하고자 하였다.

예비교사: 질문이 있는데, 전지의 단위가 몇 볼트, 몇 볼트 나눠놓잖아요. 그런데, 예를 들어 220 볼트에다가 전구를 꽂으면 그게 거기서 맞춰 밝기가 변하는 게 아니라 빵 터져 버린다 이거죠. 저게[2조가 설명한 것]와 같이 전구에 맞게 내보내는 게[회로에 따라 전지가 전자를 내보내는 것]이 아니라,
 2조 예비교사: 그건 전구가 그걸 수용하지 못하는 능력을 가졌기 때문이에요.
 예비교사: 그러니까 그게 그러면은, 저기서는 전구에 맞춰서, 맞춰 준다는 이거인데, 그게 다르지 않느냐 이거죠.
 2조 예비교사: 그런데 저번에 실험했듯이 ... 전자석 만든 거. 그것도 심하면 녹거든요. 수용을 다 못하면 녹거나 끊어지거나 하잖아요.
 예비교사: ... 제가 말하는 건, 전지가 그때그때 상황에 맞춰서, 거기에 맞춰 주는 게 아니라 ...

위의 대화는 이후에도 다른 예비 교사들이 참여한 가운데 계속 되었고, 처음 질문한 학생이 “전지가 보내는 힘”이라고 표현한 것이 실제로 회로에 따라 달라지는지 확인해 보아야 한다는, 즉 직접적인 증거에 대한 요구로까지 이어졌다. 하지만 이들의 수업이 실험실 상황에서 이루어진 것이 아니었기 때문에 회로에 따라 전체 전류가 다르다는

경험적인 증거를 직접 수집할 만한 여건은 되지 못하였고, 결국 위 대화는 2조의 예비 교사들이 “[모델의 틀릴 수도 있어]라면서 모델의 본성에 호소하여 자신들의 모델을 변론하면서 마무리 되었다.

2) 이론적 기준(theoretical criteria)

① 내적 정합성(internal coherence)

Table 2에 정의된 바와 같이, 과학 모델을 평가하는 이론적 기준으로서 ‘내적 정합성’이란 모델의 구성 요소나 모델이 제공하는 설명이 논리적으로 모순되지 않는 것을 특징으로 한다. 그런데 본 연구에 참여한 예비 초등 교사들은 동료들의 모델에 관한 설명을 듣는 도중 논리적인 문제점이 발견되면 곧 그것을 지적하여 모델을 평가하는 모습을 보여 주었다. 특히 전기회로 2번을 설명하는 동안에는 1조, 4조, 5조의 모델에서 공통적으로 회로 전체의 전류의 양은 일정하다는 답변과 그 이유에 대한 설명이 서로 상충된다는 문제가 지적되었다. 다음은 그 중 1조의 사례로, 이 조의 학생들은 “단위 시간 당 길을 통과하는 선수의 수는 일정할 수밖에 없고, 다만 길 저항의 폭이나 길이 얼마나 편리하냐에 따라 저항의 크기에 따라 선수들이 이동한 속도만 달라지는 거라 전류의 양”은 일정하다고 설명하였다. 이러한 설명은 다음과 같은 도전적인 질문을 불러 일으켰다.

예비교사1: 저 안저항에서 그럼 선수들이 속도가 ... 느려지는 거잖아요. ... 선수들이 느리게 ... 가는 길에서 선수들이 더 많이 있어야 되는 거 아니에요?
 1조 예비교사: 길을 자른다고 생각해 보세요. 길을 자르면 단면적이 있을 거 아니에요. ... 길을 통과하는 선수들을 단면적을 잘라서 ... 생각을 해 보면 ... 이 지점을 통과하는 사람의 숫자가 저항이 많아지면, 줄어들겠죠. 그러니까 선수들의 숫자가?
 예비교사1: [이전 설명대로라면 선수들의 숫자가 일정하게 가야 되는 거 아니에요?
 1조 예비교사: 아, 아이.
 예비교사1: 당황스럽죠? (학생들 웃음.) ...
 1조 예비교사: 그게 아니라 ... 선수들이 느려져서 많아진다고 표현을 했는데, 느려지는 이유가 길이 불편하고 좁기 때문이거든요. ... 길만 좁아지는 거지 달리는 선수들의 수는 똑같은데 길만 좁아져서. ...
 예비교사2: 저항이 있는 곳이 길이 좁다고 했잖아요. 그럼 넓은 길에서도 5명이 통과하고 저항이 있는 좁은 길에서도 5명이 통과하긴 하는데, 좁은 길은 솔직히 지나기 힘드니까 열이 나는 거 아니에요?
 1조 예비교사들: (동시에) 아, 맞아요. 그겁니다. 그거예요. 맞아요. (전체 웃음.)

위 대화에서 처음 질문을 던진 예비 교사는 “단위 시간 당 길을 통과하는 선수의 수”라는 말 속에 이미 속도 개념이 포함되어 있으므로 그것이 일정한 상태에서 “선수들이 이동한 속도만 달라지는” 것은 서로 모순된다는 것을 바르게 지적하고 있다. 다시 말해 1조의 설명대로 저항이 큰 길을 통과하는 동안 전하가 느리게 이동한다면 단위 시간 당 일정한 단면적을 통과하는 전하의 양, 즉 전류가 달라질 수밖에 없음에도 불구하고 1조의 학생들은 전체 회로에서 전류의 양은 같다고 설명하였으므로 1조의 초기 모델은 내적인 이론 정합성을 결여

하고 있다고 볼 수 있다. 이와 동일한 문제는 5조가 4번 전기회로를 설명하는 도중에도 제기되었다. 5조의 예비 교사들은 회전문(전구)이 하나인 회로에 10명의 죄수(전하)가 움직인다고 한다면 회전문 두 개가 병렬로 연결된 회로에서는 회전문 각각에 5명의 죄수가 통과하게 된다고 설명하였다. 이렇게 되면 단위 시간당 일정한 면적을 통과하는 전하의 양은 줄어들게 되는 셈인데, 5조의 예비 교사들은 1조의 예비 교사들과 마찬가지로 속도는 같다고 주장하였다. 이렇게 ‘단위 시간당 일정한 면적을 지나는 전하의 양’이라는 개념으로부터 발생한 모델의 문제는 예비 교사들의 수업에서 최종적으로 선택된 2조의 컨베이어 벨트 모델에 의해 잘 설명되었다.

본 연구에서는 예비 초등 교사들이 창안한 모델들 중 비유적인 모델이 상대적으로 많았으므로 비유물 자체의 특성 때문에 내적 정합성의 문제가 발생하고 그것이 모델 평가의 대상이 되기도 하였다. 예컨대, 4조의 모델 발표 중에는 ‘땀에 물이 차오르듯 전기회로의 안쪽에도 전류가 쌓여 전류의 양이 같다고 할 수 없다’는 문제가, 5조의 경우에는 ‘스위치가 열려 있는 동안에도 채찍을 맞는 죄수(전하)들은 이동하려고 하므로 한 곳에 죄수(전하)가 모이게 되고 따라서 전류의 양이 일정하다고 할 수 없다’는 문제가 지적되었다. 이러한 문제는 회로가 끊겨 있는 경우 불연속한 곳의 양단에 전위차가 존재하여 한 쪽에 전자가 쌓이고 다른 쪽에는 전자가 부족해서 (+)가 된다는 과학적인 설명을 도입하면 해결될 여지가 있는 것이었다. 하지만 이러한 과학 이론에 익숙하지 않은 예비 초등 교사들은 평가의 맥락에서 지적된 문제를 즉시로 해결하지 못하였고, 다만 ‘스위치를 닫으면 결국 같은 양의 물이 흐른다’는 식으로 설명하며 자신들의 모델을 변론하였다.

② 외적 정합성(external coherence)

모델을 평가하는 기준으로서 내적 정합성이 모델 자체의 이론적 특징에 관한 것이라면, ‘외적 정합성’이란 모델의 내용이 이미 잘 알려진 다른 과학 이론과 모순되지 않음을 의미한다. 이것은 어떤 모델의 과학적 타당성을 결정하는 중요한 요인 중의 하나로서, 본 연구에 참여한 예비 교사들은 모델을 개발하는 초기부터 자신들이 옳다고 믿고 있는 과학 이론을 들어 상대방 모델의 타당성을 가늠해 보곤 보았다. 한 예로, 앞서 단위 시간 당 이동하는 전하의 양과 전하의 이동 속도를 다르게 생각하여 내적 정합성의 문제가 발생한 것과는 조금 다르게, 4조의 발표 중에는 전류의 과학적인 개념을 명시적으로 언급하며 모델의 이론적인 부정합성을 지적하는 학생이 있었다.

예비교사: 그런데 회로 안에 있는 물의 양은 일정하잖아요?

4조 예비교사: 네.

예비교사: 그런데 수문을 열었을 때, 그 수문을 열었을 순간의 속력이랑 수문을 지났을 때 속력은 다르지 않을까요? 왜냐하면 전류의 양이 시간당 지나가는 물의 양이잖아요.

4조 예비교사: 처음 열었을 때는 달라지겠지만, 그게 둘다 보이면 결국엔 일정한 양으로 돈다는 의미에서 저희 조는 ...

위 대화에서는 4조의 예비 교사가 “전류의 양이 시간당 지나가는 물의 양”에 비유된다는 동료의 지적을 반영하여 자신의 모델을 보다 세련되게 설명하는 모습을 발견할 수 있다. 즉, 이 대화의 맥락은 문제의 모델과는 별도로 이미 잘 확립되어 있는 과학적인 전류 개념에

비추어 모델을 평가하고 개선하는 상황이라고 할 수 있다.

그런데 본 연구의 모델링 수업에서는 예비 교사들의 오개념으로 인해 모델의 외적인 이론 정합성 문제가 등장하기도 하였다. 즉, 예비 교사들은 자신이 믿고 있는 것이 과학적으로 타당하지 않은 것임에도 불구하고 그것을 옳은 이론이라고 믿고 그것에 비추어 동료들의 모델을 평가하곤 하였다. 예컨대, 대부분의 예비 교사들은 ‘전지가 하는 일은 전하(또는 전자)를 공급하는 것이며, 회로에 관계없이 전지는 항상 동일한 일을 한다, 즉 동일한 양의 전하를 내 보낸다’고 생각하고 있었다. 이와 대비되는 과학적인 개념은 ‘전지가 하는 일은 전위차를 만드는 것이며, 저항에 따라 회로에 흐르는 전하의 양이 달라진다’는 것이다. 하지만 전지가 항상 같은 능률을 가져야 한다고 잘못 알고 있는 예비 교사들은 그들의 생각과 상충되는 설명이 등장할 때마다 그 문제를 지속적으로 지적하며 모델을 부정적으로 평가하였다. 다음은 그 중 3조의 대화 사례이다. 3조는 처음에는 전기회로를 이동해 온 전자가 결국 소멸한다는 모델을 창안하였지만, 3번 전기회로의 특성을 설명할 때에는 이와는 다른 새로운 모델을 제안하였다. 이 모델에서는 전지가 국가에 비유되었고, 전하는 국가가 내보내는 병사에 비유되었다. 또, 전지 두 개가 직렬로 연결되었을 때에는 병사를 내보내는 속도가 두 배로 빨라지고, 병렬로 연결되었을 경우에는 전구가 하나일 때와 동일한 속도로 병사를 내보낸다. 그런데 이러한 3조의 설명에 대해 동료 예비 교사들은 다음과 같은 질문을 제기하였다.

예비교사: 그럼, [전지 두 개가 직렬로 연결된 회로에서] 속도가 빨라지면, 나라가 두 배니까, 4배예요?

3조 예비교사: 4배라니? 아니, 아니, 2배.

예비교사: 아니, 그러니까, 나라도 늘고 속도도 빨라지면 ... [전지의] 수도 늘고 속도도 빠르면 4배 아닌가요?

3조 예비교사: [전하의] 수는 상관없이, 수는 그냥 그대로 [전지가 하나일 때와 같이] 가는 건데.

위 대화에서 3조의 예비 교사는 전하의 양을 고정시켜 놓은 채 전하의 이동 속도를 달리하여 직렬회로와 병렬회로에서 전구의 밝기가 달라지는 것을 설명하려 하고 있다. 즉, 이 학생은 앞서 언급한 바와 같이 전류의 과학적인 의미를 잘 이해하고 있지 못하다고 볼 수 있다. 반면 질문을 제기한 예비 교사는 전지는 어떤 경우라도 동일한 양의 전하를 내보내야 한다는 (오)개념을 강하게 가지고 있고, 그로부터 평가적인 질문을 하겠다고 해석할 수 있다. 또 다른 유사한 예로, 전지가 컨베이어벨트 위에 전하를 내어 놓는 비율이 저항에 따라 달라진다고 설명하였던 2조의 발표 중에는 “[그렇게 되면] 전지의 힘이 차이가 있게 되는 거 아니에요?”, “똑같은 전지 하나에 전지의 역할이 다른 건가요?”라는 반박이 있었다.

2. 대안적인 모델들 중 하나를 선택하는 경우에 사용된 평가 기준들

앞 절에서 기술한 바와 같이, 예비 초등 교사들이 여러 가지 전기회로의 특징을 설명할 수 있는 모델을 창안하고 점차 개선시켜 가는 과정에서 모델을 평가하는 데에는 경험적인 기준과 이론적인 기준들이 지배적인 역할을 하였다. 이와 대비하여 예비 교사들이 여러 가지

모델들 중에 하나를 선택하는 상황에서는 경험적이론적 기준들 뿐만 아니라 다양한 과학 모델 평가 기준들이 동원되었다. 이것은 모델의 미흡한 점을 수정하거나 보완하여 모델을 지속적으로 개선할 수 있는 여지가 없이 서로 다른 모델들 중에 상대적으로 더 나은 것을 선택해야 하는 맥락적인 제한에 기인한 것이라고 생각된다. 즉, 예비 교사들은 모델들이 경험적으로나 이론적으로 오류가 있더라도 그들 중 하나를 선택하기 위해서 선택 대상의 상대적인 우월성이 드러나는 다른 기준들을 고려하였다고 해석할 수 있다. 이러한 특성을 고려하여 본 절에서는 경험적이론적 기준에 앞서 예비 초등 교사들이 모델을 평가선택하는 데 동원한 다른 여러 가지 기준들에 대해 먼저 기술한다.

1) 심미적 기준(aesthetic criteria)

① 조작 또는 수정의 용이성(tractability or adjustability)

과학 모델을 평가하는 심미적 기준의 하나로서 ‘조작 또는 수정의 용이성’이란 모델에 포함된 인과적 과정을 관념적으로나 물리적으로 작동하기 쉽고 현재의 모델이 문제 현상을 설명하는 데 미흡하다면 차후에 모델의 일부분을 수정하여 개선될 여지가 많음을 의미한다. 본 연구에서 예비 초등 교사들은 1~3번 전기회로에 대한 각 조의 설명을 마친 후, 총 6개의 모델을 2개씩 짝을 지어 평가하는 ‘평가적 모델링’에 참여하였고, 이때 조작 또는 수정의 용이성을 특정한 모델을 선택하는 기준으로 사용하였다. 다음 사례는 2조와 3조의 모델 중 2조의 컨베이어벨트 모델을 선택한 학생들이 자신들의 평가 이유를 설명하는 모습이다. 이에 앞서 2조의 예비 교사들은 전지 두 개를 직렬과 병렬로 연결했을 때 전구의 밝기가 서로 다른 까닭은 전지에서 전하를 내어 놓는 속도가 다르기 때문이라고 설명하였다. 예를 들어, 전지의 병렬회로에서 1초에 1개의 전하를 컨베이어벨트 위에 내어 놓는다고 하면, 직렬회로에서는 1초에 2개의 전하를 내어 놓아 직렬회로에서의 전구의 밝기가 더 밝다는 것이다. 그런데 이러한 설명은 또 다시 ‘전지의 능력은 늘 동일해야 하지 않느냐?’는 논쟁을 불러 일으켰다. 하지만 이러한 문제에도 불구하고 다음 사례에서 예비 교사들은 2조의 모델이 수정하여 개선될 여지가 크므로 더 좋은 모델로 선택하였다고 답하고 있다.

강사: 지금 2모둠의 모델이 2모둠의 모델을 선택한 사람들에 더 많았는데, 이유는 뭘까요?

예비교사1: 잘 다듬으면 ...

강사: 잘 다듬어진다는 걸 한번 구체적으로 얘기해 볼래요.

예비교사2: 조금만 더 잘 다듬으면 좋을 거 같아요.

강사: 어떤 부분을 다듬으면요?

예비교사2: 저희가 아까 궁금해서 물어뵈던 부분이 컨베이어벨트가 하나였는데, [직렬회로에서는 전지] 두 개가 같이 짝는다, [병렬회로에서는] 다르게 짝는다 [설명할 때, 저희는 전지의 능력이 바뀌었다고 생각을 했거든요, 처음 설명을 들었을 때는, 그 부분만 조금 더 이해가 쉽게 다듬으면 되게 만족스러운 ...

이들과 유사하게 4조와 5조의 모델 중 4조의 모델을 더 나은 것으로 선택한 3조의 학생들은 조별 토론 중에 “더 발전 가능성이 있는 걸로 [선택]해”라고 합의한 후, 강사가 모델 선택 이유를 물었을 때 그 이유

를 다음과 같이 말하여 수정의 용이성이 중요한 모델 평가 기준이 되었음을 드러내었다.

강사: 여기는 어떻게 [결정했어요]?

예비교사1: 수력 댐으로.

강사: 어, 여기도 댐으로 결국 결정을. 이유는요? ...

예비교사1: 변형을 하면 좀 더 모델링하기가 쉽지 않을까 생각했어요. ... 댐의 역할 같은 거를 변형을 하면,

예비교사2: 병렬연결 때 댐이 이걸 하나의 전지를 다 쓰면 이걸 다른 하나의 전지를 쓰고 했는데,

예비교사1: 네. 그런 걸 좀 변형을 하면.

② 유사성(similarity)

Table 2에 정의된 바와 같이, 과학 모델 평가 기준으로서 ‘유사성’이란 모델이 이미 잘 알려진 다른 모델이나 현상의 외형과 유사한 정도를 의미한다. 그런데 본 연구에 참여한 예비 교사들 중 댐 모델을 제안하였던 4조의 학생들은 전지의 직렬연결과 병렬연결 회로에서 밝기의 차이를 설명할 때 다음과 같은 설명을 제시하였다.

4조 예비교사: 제가 그림을 그린 이유는 ... 저희 조의 이론[모델을 제공하려고 하다보니까 이게] 댐이 병렬로 연결된 그림 직렬이 되고, 이게 댐이 직렬로 연결된 그림 병렬이 됐어요 ... 직렬, 여기서 보면은 세기가 빨라지잖아요 ... 같은 굵기를 [지나는 물의 양이 두 배로 늘었으니까. ... 여기서] [두 개의 전지가 병렬로 연결된 회로에서는] ... 이 댐[전지]에서 먼저 나오기 시작하면은 한 바퀴 도는 거예요 ... 근데 여기 두 개, 하나의 똑같은 양의 댐이 하나가 더 있으니까 여기서 똑같이 나오기 시작하면은 두 시간 나오는 거죠. ...

즉, 4조의 예비 교사들은 ‘전지’ 두 개를 ‘직렬’로 연결하면 마치 ‘댐’ 두 개를 ‘병렬’로 연결한 것처럼 되어 단위 시간 당 수량이 두 배가 된다고 하였고, 반면에 ‘전지’ 두 개를 ‘병렬’로 연결하면 ‘댐’ 두 개가 연이어 있는 것과 같아서 하나의 댐이 먼저 작동하고 나중에 다른 하나의 댐이 작동하게 된다고 하였다. 이것은 전지를 병렬로 연결한 회로에서 전지를 더 오래 사용할 수 있다는 사실을 설명하기 위한 것이었다. 그런데 이러한 설명에 대하여 동료 예비 교사들은 전지 두 개가 연결된 모습과 모델이 설명하는 댐의 구조가 서로 상응하지 않는다는 점을 문제점으로 지적하였다.

강사: 결정이 됐어요? 어떤 모델을 채택했습니까? 아, 여기 5모둠의 모델을 선택했다. 이유는?

예비교사: [4조가] ... 전기회로를 설명할 때 그림을 다시 그렸잖아요. 원래는 직렬인데 병렬로 하고, 원래는 병렬인데 직렬로 했어요. 그런데, 이론 [모델이라면 원래 문제에 있는 대로 설명도 똑같이 해야 되는데 [그렇지 않았어요.]

강사: 오케이. 그게 [4조의 모델이] 탈락이 되는 이유고요.

위와 같이 본 연구에서 특정한 모델이 유사성의 기준을 위배한다는 사실은 어떤 모델이 여러 가지 전기회로의 특성을 설명할 수 있음에도 불구하고 좋은 모델로 선택되지 못하는 중요한 평가 이유가 되었음을 알 수 있다.

2) 사회문화적 기준(social-cultural criteria)

Table 2의 분석들에 따르면, 과학 모델을 평가하는 데에는 다양한 사회문화적 기준들이 동원될 수 있다. 그런데 본 연구에서 예비 초등 교사들이 동료들의 모델을 선택할 때 자주 언급한 사회문화적 기준은 ‘전달의 명료성 또는 이해가능성(clarity or comprehensibility)’이었다. 한 예로, 다음 대화 속의 예비 교사는 처음에는 2조의 모델이 “오류가 많다”는 이유로 좋지 않은 모델로 평가하였다고 하였지만, 강사의 추가적인 질문을 받고는 모델에 대한 설명이 “헛갈리고 ... 정리가 안 돼서”라고 하여 전달의 명료성 또는 이해가능성이 모델을 선택하지 않은 중요한 이유가 되었음을 밝히고 있다.

강사: 3모둠의 모델을 채택한 이유가 있을 거예요. 그죠? 여기의 이유는 뭘니까?

예비교사: 아, 저희는 그냥 오류 같은 게 되게 적다고 생각해서.

강사: ... 그러면 여기[3조]가 오류가 적고, 저기[2조]가 오류가 많은 거죠? ... 어떤 오류였습니까?

예비교사: 설명 듣는데 헛갈리고 제 나름대로 정리 안 된 부분이 많아서. 그냥, 정리가 안 돼서 오류가 많다고 인식이 됐어요.

이와 같이 과학 모델 평가 기준으로서 전달의 명료성 또는 이해가능성은, 모델 자체의 이론적 경험적 타당성과는 별도로, 모델의 내용이 다른 사람들과 수월하게 소통되는 문제와 관련되어 있다. 이러한 평가 기준은 예비 교사들이 최종적으로 하나의 모델을 학습 내에 합의된 모델로 결정하는 상황에서도 동원되었다. 예컨대, 5조의 예비 교사들은 자신들의 모델을 수정하는 과정에서 전하에 비유된 죄수들이 일정량의 ‘힘’을 가지고 회로를 이동하다가 전구에 비유된 회전문을 만나 일을 하는 데 그 ‘힘’의 일부를 쓰게 된다고 설명하였다. 이러한 설명은 회로에 따라 전지를 통과하는 전류의 양과 저항 양단에 걸리는 전압이 다르다는 현상을 설명하기 위한 것이었지만, 비유물에 대응하는 물리량이 명확히 정의되지 않은 것이 문제가 되었다. 그래서 동료 예비 교사들은 “죄수는 뭐고, 죄수가 가지고 있는 힘은 뭐예요?”, “뭐가 전압이고, 뭐가 전류고?”라고 지속적으로 질문을 하였고, 결국 “정리가 안 돼”라고 하여 전달의 명료성 또는 이해가능성이 5조의 모델을 최종적으로 선택하지 않는 중요한 기준이 되었음을 언급하였다.

3) 개인적 기준(personal criteria)

사회문화적 기준으로서 전달의 명료성 또는 이해가능성이 모델의 설명에 관한 상호간 의사소통에 관한 것이라면, ‘개인적 관련성(personal relevance)’은 모델의 다양한 특징들 중 일부가 모델 평가자의 흥미나 믿음 등과 잘 어울린다는 개인적인 이유에 토대한 것이다. 본 연구에서는 이 평가 기준이 장단점을 모두 지니고 있는 대안적인 모델들 중 하나를 선택하는 상황에서 중요한 판단 준거의 역할을 하였다. 즉, 다음 대화는 1조와 6조의 모델 중 더 나은 것을 선택하는 과정에서 이루어진 것으로, 예비 교사의 말을 통해 그들이 6조의 모델을 선택한 까닭이 자신들의 모델과의 관련성이 높다는 데 있었다는 것을 잘 알 수 있다.

강사: 2모둠은 6모둠의 모델을 채택했대요. 이유는요?

예비교사: 저희 모형과 굉장히 유사하고요 ... 저희가 부족했던 것을 채워주는 것 같은 기분이 들었고요.

4) 모델의 본성에의 호소(appeal to the nature of models)

앞 절에서는 예비 교사들이 모델을 개발하고 개선하는 상황에서도 모델의 본성에 호소하여 특정한 모델을 변론하는 경우가 있다고 간략하게 언급하였다. 이와 유사하게 대안적인 모델들 중 하나를 선택하는 상황에서도 예비 교사들이 자신들이 인식하고 있는 모델의 본성에 호소하여 모델을 정당화하려는 경향이 발견되었다. 예를 들어, 1조의 예비 교사들은 자신들의 모델이 6조의 모델과 비교 평가되는 상황에서 6조의 모델이 상대적으로 우수하다는 평가가 이어지자 다음과 같이 자신들의 모델을 변호하는 모습을 보였다.

강사: 그럼 혹시 모델을 만든 사람들은 자기 모델에 대한 자기 평가를 어떻게 했을까? 1모둠 어떻습니까?

예비교사1: 비유다 보니까 ... 전자를 ... 사람으로 취급했잖아요. 그러다 보니까 오류가 생길 수밖에 없다고 생각해요. ... 비유로 접근했을 때 사람으로 접근하는 거랑 당연히 오류가 있지 않을까 생각을 했어요. ...

예비교사2: 애초에 살아남은 이론들만 봐도 비유했던 이론을 다듬은 거잖아요.

예비교사3: 지금 과학계에 살아남은 이론들처럼, 거기서 설명한 것처럼 ... 그렇게 살아남은 이론들이 했던 것처럼 ...

즉, 1조의 예비 교사들은 모델이 오류 가능하기 때문에 자신들의 모델도 유지될 수 있고, 과학사적(科學史的)으로도 비유를 통해 처음 만들어졌던 모델이 점차 발전하여 과학적인 것으로 인정받는 것처럼 자신들의 모델도 더욱 발전될 가능성이 있다는 점을 들어 모델에 대한 자기 평가를 하었다고 해석할 수 있다.

위와 같이 예비 교사들은 모델의 오류가능성에 대한 인식을 근거로 자신들의 모델을 긍정적으로 평가하였을 뿐만 아니라, 최종적인 하나의 모델을 선택하는 상황에서는 모델의 다른 본질적인 특징을 들어 상대방의 모델을 평가 선택하기도 하였다. 예를 들어, 6조의 학생들은 5번 전기회로를 설명하면서 다음과 같이 말하였다.

6조 예비교사: ... 직렬과 병렬에 따라서 밝기에 영향을 주는 게 달라졌어요.

... 여기 직렬연결에서는 모든 곳에서 전류의 양이 같아요. ... 같은 전류의 양이 여기[저항이 작은 전구 시를 지나갈 때는 별 무리 없이 지나가요. 그런데 B에서는 저항이 크기 때문에 ... 그에 비례해서 전압이 더 세져서 ... B가 더 밝다고 설명했습니다. ...

위와 같은 설명은 각종 과학 교재나 수업에서 교사가 전구의 밝기를 구하는 수식을 말로 해설하여 알려주는 방식과 유사하였다. 그런데 이러한 6조의 설명을 듣고 난 후 동료 예비 교사들은 다음과 같이 문제를 제기하였다.

예비교사1: 그러니까 [지금 설명은] 깔끔한데, 모델이 뭐냐 이거죠. 그냥 과학적인 원리 아니에요? ...

예비교사2: 이런 것도 모델이라고 할 수 있어요?

예비교사3: 네. 그럼(그렇게 하면) 원리를 설명하는 게 되는 거 아니에요?

... 이렇게 하면 그(원리) 자체를 설명하는 거지, 어떤 모델을 통한 설명이 아닌 거 아닌가요.

강사: 아, '모델이 아니다'라는 거의 본질적인 공격이 나왔네. 모델은 아니다.

즉, 위의 발췌문을 통해 예비 교사들은 모델이 “과학적인 원리” 자체가기보다는 그것을 대신하여 나타내는(represent) 것이라는 생각을 가지고 있음을 짐작할 수 있고, 모델의 본성에 관한 그러한 인식이 6조의 모델을 그들 수업의 최종적인 모델로 선택하지 않는 중요한 이유가 되었다고 해석할 수 있다.

5) 경험적 기준

이미 기술한 바와 같이, 모델과 증거 사이의 관계에 관한 경험적인 모델 평가 기준들은 대체로 모델을 개발하고 개선하기 위한 예비 교사들의 담화 속에 자주 등장하였다. 그런데 여러 가지 경험적 기준들 중 경험적 범위는 예비 교사들이 대안적인 모델 가운데 하나를 선택하는 상황에서도 중요한 평가 준거가 되었다. 한 예로, 다음 대화에서 알 수 있는 것과 같이, 2조의 컨베이어벨트 모델과 3조의 ‘전자 소멸 모델’ 중 보다 유력한 것을 선택하는 상황에서 예비 교사들은 모델이 설명하는 증거의 범위가 넓은 것을 중요한 이유로 고려하였다.

강사: 여기는 어떤 모둠의 모델을 채택했죠? 2모둠? 왜 2모둠의 모델을 채택했어요?

예비교사: 처음에 조 안에서 의견이 통일되지 않아서 헛갈렸는데, 나중에 컨베이어벨트가 하나고 전지가 찍는 기계라고(전지가 전하를 찍어 내는 기계라고 설명을 했을 때는 왜 병렬일 때 전지가 덜 났느냐가 설명이 된 거 같아요.

즉, 전기회로를 설명하는 모델이 전지가 닳는 것과 같은 잘 알려진 사실 또한 설명할 수 있을 만큼 넓은 경험적 범위를 가지고 있어야 한다는 요구는 예비 초등 교사들이 모델을 개발 개선하는 상황에서도 모델을 선택하는 상황에서 모두 중요한 평가 기준이 되었음을 알 수 있다.

6) 이론적 기준

본 연구에서 과학 모델을 평가하는 이론적 기준들은 예비 교사들이 전기회로에 관한 모델을 개발하고 개선하는 과정에서 뿐만 아니라 대안적인 모델들을 상호 비교하여 하나를 결정하는 상황에서도 비교적 자주 등장하였다. 또, 다양한 이론적 기준들 중에서도 모델이 처음 창안될 때에는 근거로 삼지 않았던 다른 과학 이론과의 일치 여부를 의미하는 외적 정합성이 가장 빈번하게 고려되었다. 예를 들어, 학급 내의 최종적인 모델을 합의하는 상황에서 한 예비 교사는 저항이 다른 두 개의 전구를 병렬로 연결했을 때 단위 시간에 각 전구를 통과하는 전하의 양이 다르다는 컨베이어벨트 모델의 설명에 의문을 제기하였다. 이에 대해 2조의 학생들이 자신들의 모델을 다시 장황하게 설명하였지만, 질문을 제기한 학생은 여전히 납득하지 못하였다. 이러한 상황

에서 한 예비 교사가 ‘옴의 법칙’을 언급하며 두 개의 저항을 각각 통과하는 전류의 양이 서로 다르다는 것이 과학적인 이론에 비추어 옳은 설명이라고 강조하였고, 이것이 2조의 모델이 예비 교사들 사이에서 최종적으로 합의된 모델이 되는 결정적인 이유가 되었다.

예비교사1: 그러면 위에 병렬, 전구의 병렬, 저기서 A로 가는 도선에는 1초에 한 개가 지나가고, B에 가는 도선에는 2초에 한 개가 지나가는 거잖아요.

2조 예비교사: 네.

예비교사1: 그러면, 전류의 양이 달라지는 거 아니에요, 두 도선에서? (2조 예비교사 두 명이 자신들의 모델을 설명하지만 질문한 예비교사는 이해하지 못한다.)

(처음 질문한 학생이 약 5분 후 다시 질문한다.)

예비교사1: 아까 계속 그 질문인데, 아까 전류의 양이, A랑 B가 저항이 다르니까, 달라진다고 했었잖아요. 그런데 도선에서도 달라지면 안 되는 거 아니에요? 도선에서는 전류가 똑같이 흘러야 되는 거 아닌가?

예비교사2: 아니야. 전체는, 그냥 가는 건 i인데, 옴의 법칙에서 위의 A에는 i1이 걸리고, B에는 i2가 걸려.

예비교사1: 아아, 진짜?

예비교사2: 어. 옴의 법칙에서 전체 i는 있는데, i가 저기 나뉘는 곳에서 A에는 i1이 흐르고, B에는 i2가 흘러. 옴의 법칙. 예스. (학생들 웃음)

이에 앞서 예비 교사들은 1조와 6조의 모델을 비교하여 그 중 우월한 것을 선택하는 상황에서 6조의 모델이 “기본적인 과학 원리를 제대로 모델로 설명한 것 같아서 채택”하였다고 말하여 외적인 이론 정합성을 모델 평가의 준거로 사용하였음을 직접적으로 나타내었다. 이렇듯 대안적인 모델들 중 하나의 모델을 선택하는 상황에서 외적인 이론 정합성이 고려되는 까닭은 과학의 비전문가인 예비 초등 교사들이 여러 가지 대안적인 설명을 비교 평가할 때에는 자기 스스로 판단을 내리기보다 전문적인 과학 지식에 비추어 보려하기 때문이라고 해석할 수 있다.

마지막으로, 예비 교사들의 모델링 수업에서는 외적인 이론 정합성 외에도 ‘상세함(detailedness)’이 모델을 선택하는 이론적 기준으로 동원되었다. 이 때 상세함이란 모델의 내용 속에 문제의 현상이 발생하는 기작이나 과정이 자세하게 포함되어 있음을 의미한다. 본 연구에서 예비 교사들은 아래 사례에서와 같이 그러한 이론적 내용이 잘 드러나는 모델을 상대적으로 좋은 것으로 평가하였다.

강사: 5모둠의 의견은?

예비교사: 6모둠이요.

강사: 아, 6모둠을 채택했다. 이유는요?

예비교사: 1모둠의 경우에는 이해가 안 되는 부분이 [서로 다른 전지에서 나온 전하 A랑 B가 저항 있는 곳을 지나갈 때 ... A, B의 저항과 A, A끼리의 저항의 차이에 대해서 설명이 분명하지 못한 것 같아서 그랬고요. 6모둠은 ... 명쾌했어요, 설명이.

IV. 논의 및 결론

본 연구에서는 과학적 실천 행위로서 모델링과 논증 활동을 연결 짓기 위한 출발점으로서 예비 초등 교사들이 전기회로에 관한 모델을 창안하고 그것을 개선해 나가는 과정과 여러 가지 대안적인 모델들 중 더 좋은 것을 선택하는 과정에서 사용하는 모델 평가 기준들을 조사하였다. 이 연구를 통해 새롭게 알게 된 사실과 시사점은 다음과 같이 세 가지로 집약하여 논의할 수 있다.

첫째, Böttcher & Meisert(2011)에 따르면, 논증에 대한 모델 중심적인 관점은 지금까지 논증 분석에 많이 사용되어 온 Toulmin(2003)의 방식이 지니고 있는 문제점들을 극복하는 데 도움이 된다. 예를 들어, 논증을 이루고 있는 구성 요소(예: 주장(claim), 자료(data), 이유(warrant))와 그들의 구조를 찾아내는 데 초점을 두고 있는 Toulmin의 방법은, 논증 요소들을 변별해 내는 것이 쉽지 않다는 문제 외에도, 논증이 다루는 내용이나 논증이 발생하는 맥락을 충분히 고려하지 못한다는 제한점을 지니고 있다. 그래서 서로 다른 참여자들이 생산하는 논증의 내용적인 차이를 구별해 내지 못하고(Abi-El-Mona & Abd-El-Khalick, 2011; Driver, Newton, & Osborne, 2000), 실제 논증 과정이 대화로 진행되었음에도 불구하고 논증을 분석할 때에는 독백처럼 처리하는 경향 또한 있어 왔다(Nielsen, 2013). 이에 비하여 본 연구는 논증이 발생하는 유력한 상황으로서 모델 평가 과정에서 이루어지는 참여자들의 자연스런 담화를 분석함으로써 과학 모델을 평가하는 데에는 Toulmin이 말한 논리적이고 구조적인 요소들 외에도 여러 가지 준거들이 동원된다는 것을 알게 해 주었다. 본 연구에서 예비 초등 교사들이 사용한 구체적인 모델 평가 기준들은 선행 연구들(Nelson & Davis, 2012; Pluta *et al.* 2011)에서 확인된 것들과도 일치한다. 그러면서도 본 연구는 모델을 지속적으로 개선해 가는 상황에 비해 대안적인 모델들 중에 상대적으로 우월한 것을 선택하는 상황에서 더욱 다채로운 기준들이 동원될 수 있다는 것을 보여주었다는 점에서 의미가 있다. 즉, 본 연구의 결과는 모델 평가 상황에서는 여러 가지 이유들이 동원될 수 있고 그에 따라 서로 다른 종류의 논증이 발생할 수 있다는 Böttcher & Meisert(2011)의 제안을 실증적으로 확인시켜 주는 것이다. 더 나아가 이러한 결과는 과학 연구와 개발 과정에서는 여러 가지 가치 판단이 개입되고 서로 다른 맥락에 서로 다른 가치가 관련된다는 최근 인지 과학 분야의 견해와도 일치하는 것이다(Thagard, 2012). 하지만 본 연구의 결과는 과학 모델을 평가하는 여러 가지 기준들이 동등하게 중요하다는 것을 의미하는 것으로 해석되어서는 안 된다. 이 연구의 결과가 암시하는 보다 중요한 결론은 모델 평가 기준의 등장이 맥락에 의존적이라는 점이다.

둘째, 서론에서 언급한 바와 같이 본 연구는 예비 초등 교사들의 탐구 능력을 알아보고 그들을 위한 교육 프로그램에 관한 시사점을 얻는 것을 한 가지 목적으로 하여 진행되었다. 그런데 앞서 기술한 연구 결과는 적어도 이 연구에 참여한 우리나라의 예비 초등 교사들이 과학 탐구에 필요한 모델링과 논증 활동을 수행할 수 있는 잠재적인 능력을 갖추고 있음을 말해 주고 있다. 예를 들어, 학생들은 과학 이론에 비추어 모델을 평가하는 데 익숙하지 않다는 선행 연구(Sampson *et al.* 2011)의 주장과 비교할 때, 본 연구에 참여한 예비 교사들이 자신과 동료들의 모델을 평가하면서 전기회로와 관련된 과학 이론에 자주 의존하고자 하였다는 것은 고무적인 일이다. 따라서 여러 가지

과학 교사 교육 상황에서 모델링과 논증을 수반한 탐구 활동을 적극적으로 수행하여 교사들의 잠재적인 능력을 더욱 계발하는 노력이 필요하다고 생각된다. 하지만 그러한 탐구 중심의 과학 교사 교육 프로그램에서도 반드시 고려할 점이 있는 것처럼 보인다. 왜냐하면 본 연구에서 예비 초등 교사들이 모델을 개선하고 하나의 모델을 합의해 나가는 과정을 보면, 여러 가지 모델 평가 기준들을 고려하는 것만으로는 과학적인 모델에 이르는 것이 보장되지 않는다는 것을 알 수 있기 때문이다. 본 연구에서 모든 예비 교사들이 과학적인 모델에 이르지 못하는 것은 무엇보다 연구의 목적이 다양한 모델 평가 기준들을 탐색하는데 있었고 그에 따라 예비 교사들의 모델링 활동에 강사가 개입하는 것을 최소화 하였다는 데 가장 큰 이유가 있다. 하지만, Campbell *et al.* (2012)의 연구에 따르면, 학생들이 과학적으로 타당한 모델을 구성하도록 하기 위해서는 관련 과학 지식을 지속적으로 상기시키고 도전적인 질문과 응답의 교환을 통해 과학적인 아이디어를 이해하게 하는 교사의 역할이 중요하다. 따라서 참여자들이 주도적으로 모델 중심의 과학 탐구를 진행하는 중에도 모델을 개발하는 데 도움이 되는 ‘개념적 자원(conceptual resources)’(Oh & Oh, 2013; Parnafes, 2012)을 소개하고 이미 잘 확립된 과학 이론에 비추어 모델을 평가 개선하게 하는 활동이 반드시 포함되어야 할 것이다. 말하자면, 과학에 비전문가인 참여자들을 위한 모델링 활동은 안내된 탐구(guided inquiry)의 형식으로 진행되는 것이 바람직할 것이다.

셋째, 본 연구의 결과는 과학 교육 연구의 측면에서도 암시해 주는 바가 있다. 지금까지 과학 교육 분야에서 모델링과 같은 새로운 교수학습 전략이 제안되면 그것의 효과를 검증하는 연구가 주로 이루어졌고 그 중에서도 학습자들이 과학 개념을 바르게 이해하게 되었는가에 초점을 두는 경우가 많았다. 하지만 본 연구의 결과를 보면, 예비 교사들이 결국 과학적으로 매우 타당한 모델에 이르지 못하더라도 그것을 추구하는 과정 중에 의미 있는 경험을 하게 된다는 것을 알 수 있다. 즉, 학생들이 자신과 동료들의 모델을 평가하고 개선하는 과정에서 모델이 점차 변화하고 모델이 담고 있는 내용 또한 풍부해진다는 것이다. 이렇게 지속적으로 과학적인 문제에 직면하여 모델이 점차 변화하는 과정을 ‘모델 진화(model evolution)’라고 부를 수 있을 것이다. 또, 과학자나 교사, 학생들의 모델이 어떤 과정을 통해 진화하는지 연구하는 것은 과학 교육적인 시사점을 도출하는 데 유용한 일이 될 수 있을 것이다. 이와 관련하여서는 과학 모델이 발달하는 특징을 ‘해상도(resolution)’와 ‘범위(range)’라는 개념으로 설명하였던 Parnafes(2012)의 연구가 선구적이라고 할 수 있다. 따라서 앞으로의 연구에서는 선행 연구를 확장하여 모델의 발달 과정을 추적할 수 있도록 모델의 진화 특성을 개념적으로 정의하고 그것을 바탕으로 모델 진화 과정을 경험적으로 탐색하는 연구를 수행할 수 있을 것이다. 특히 그러한 연구에서는 앞서 언급한 것과 같이 교사가 개념적 자원과 과학 이론을 가지고 교수법적으로 개입하는 것이 학생들의 모델 진화에 어떻게 기여하는지 탐구하여 효과적인 모델 중심의 과학 수업을 위한 구체적인 지침을 제공할 필요가 있다.

국문요약

본 연구의 목적은 예비 초등 교사들이 여러 가지 전기회로를 설명하기 위한 모델을 개발하고 선택하는 과정에서 동원하는 모델 평가 기준

들을 탐색하는 것이었다. 한 교육대학교에서 과학교육 강좌를 수강하는 30명의 3학년 학생들이 연구에 참여하였다. 이들을 위한 수업은 표현적, 실험적, 평가적 모델링을 포함하는 순환적 계열에 따라 조직되었다. 예비 교사들에게 다섯 개의 전기회로를 차례로 제공하고, 그것을 설명할 수 있는 모델을 개발하고 동료들 간의 토론을 통해 점차 모델을 개선해 가도록 하였다. 예비 교사들의 모델링 활동을 모두 녹음 또는 녹화하였고, 모델 평가 기준의 분석틀을 이용하여 녹음 또는 녹화된 것과 전사본을 분석하였다. 그 결과 모델을 개발 개선하는 상황과 모델을 선택하는 상황에 동원되는 모델 평가 기준의 유형과 빈도에 차이가 있음을 알 수 있었다. 즉, 경험적 기준과 이론적 기준이 두 상황에서 모두 주된 평가 준거의 역할을 하였지만, 예비 교사들이 여러 가지 대안적인 모델들 중 하나를 선택하는 상황에서 좀 더 다양한 평가 기준들이 사용되었다. 본 연구가 과학 교육과 과학 교육 연구에 시사하는 점들을 제안하였다.

주제어: 과학 모델, 모델 평가, 모델링 교수법, 평가 기준, 초등 과학, 예비 교사

References

- Abi-El-Mona, I., & Abd-El-Khalick, F. (2011). Perceptions of the nature and 'goodness' of argument among college students, science teachers, and scientists. *International Journal of Science Education*, 33(4), 573-605.
- Berland, L. K., & Reiser, B. J. (2008). Making sense of argumentation and explanation. *Science Education*, 93, 26-55.
- Braaten, M., & Windschitl, M. (2011). Working toward a stronger conceptualization of scientific explanation for science education. *Science Education*, 95, 639-669.
- Brewer, W., Chinn, C. A., & Samarapungavan, A. (1998). Explanation in scientists and children. *Minds and Machines*, 8, 119-136.
- Böttcher, F., & Meisert, A. (2011). Argumentation in science education: A model-based framework. *Science & Education*, 20, 103-140.
- Campbell, T., Oh, P. S., & Neilson, D. (2012). Discursive modes and their pedagogical functions in model-based inquiry (MBI) classrooms. *International Journal of Science Education*, 34(15), 2393-2419.
- Campbell, T., Oh, P. S., & Neilson, D. (2013). Reification of five types of modeling pedagogies with model-based inquiry (MBI) modules for high school science classrooms. In M. S. Khine & I. M. Saleh (Eds.), *Approaches and strategies in next generation science learning* (pp. 106-126). Hershey, PA: IGI Global.
- Cagagnetto, A. (2010). Argument to foster scientific literacy: A review of argument interventions in K-12 science contexts. *Review of Educational Research*, 336-371.
- Cavagnetto, A. (2011, September). The multiple faces of argument in school science. *Science Scope*, 35(1), 34-37.
- Chauviré, C. (2005). Peirce, Popper, abduction, and the idea of a logic of discovery. *Semiotica*, 153(1-4), 209-221.
- Clark, D. B., & Sengupta, P. (2013). Argumentation and modeling: Integrating the products and practices of science to improve science education. In M. S. Khine & I. M. Saleh (Eds.), *Approaches and strategies in next generation science learning* (pp. 85-105). Hershey, PA: IGI Global.
- Driver, R., Newton, P., & Osborne, J. (2000). Establishing the norms of scientific argumentation in classrooms. *Science Education*, 84(3), 287-312.
- Hodson, D. (2001). Inclusion without assimilation: Science education from an anthropological and metacognitive perspective. *Canadian Journal of Science, Mathematics and Technology Education*, 1(2), 161-182.
- Kordig, C. R. (1978). Discovery and justification. *Philosophy of Science*, 45, 110-117.
- Kuhn, T. (1974). Objectivity, value judgment, and theory choice. In T. Kuhn, *The essential tension: Selected studies in the scientific tradition and change* (pp. 320-339). Chicago, IL: The University of Chicago Press.
- Lee, S., Kim, C.-J., Choe, S.-U., Yoo, J., Park, H., Kang, H., & Kim, H.-B. (2012). Exploring the patterns of group model development about blood flow in the heart and reasoning process by small group interaction. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 32(5), 805-822.
- McDermott, L. C., Shaffer, P. S., & The Physics Education Group at the University of Washington (2002). *Tutorials in introductory physics*. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall.
- National Research Council (2012). *A framework for K-12 science education: Practices, crosscutting concepts, and core ideas*. Committee on a Conceptual Framework for New K-12 Science Education Standards. Board on Science Education, Division of Behavioral and Social Sciences and Education. Washington, DC: The National Academies Press.
- Nelson, M. M., & Davis, E. A. (2012). Preservice elementary teachers' evaluations of elementary students' scientific models: An aspect of pedagogical content knowledge for scientific modeling. *International Journal of Science Education*, 34(12), 1931-1959.
- Nielsen, J. A. (2013). Dialectical features of students' argumentation: A critical review of argumentation studies in science education. *Research in Science Education*, 43(1), 371-393.
- Oh, P. S., & Oh, S. J. (2011a). A study on the processes of elaborating hypotheses in abductive inquiry of preservice elementary school teachers. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 31(1), 128-142.
- Oh, P. S., & Oh, S. J. (2011b). What teachers of science need to know about models: An overview. *International Journal of Science Education*, 33(8), 1109-1130.
- Oh, P. S., & Oh, S. J. (2013, September). Modeling sunspots: How Korean high school students used two types of modeling in their study of the Sun. *The Science Teacher*, 80(6), 51-56.
- Osborne, J. F., & Patterson, A. (2011). Scientific argument and explanation: A necessary distinction? *Science Education*, 95, 627-638.
- Passmore, C. M., & Svoboda, J. (2012). Exploring opportunities for argumentation in modeling classrooms. *International Journal of Science Education*, 34(10), 1535-1554.
- Parnafes, O. (2012). Developing explanations and developing understanding: Students explain the phases of the moon using visual representations. *Cognition and Instruction*, 30(4), 359-403.
- Pluta, W. J., Chinn, C. A., & Duncan, R. G. (2011). Learners' epistemic criteria for good scientific models. *Journal of Research in Science Teaching*, 48(5), 486-511.
- Samarapungavan, A. (1992). Children's judgments in theory choice tasks: Scientific rationality in childhood. *Cognition*, 45, 1-32.
- Sampson, V., Grooms, J., & Walker, J. (2011). Argument-driven inquiry as a way to help students learn how to participate in scientific argumentation and craft written arguments: An exploratory study. *Science Education*, 95, 217-257.
- Sutton, C. (1996). The scientific model as a form of speech. In G. Welford, J. Osborne, & P. Scott (Eds.), *Research in science education in Europe: Current issues and themes* (pp. 143-152). London, UK: The Falmer Press.
- Thagard, P. (1978). The best explanation: Criteria for theory choice. *The Journal of Philosophy*, 75(2), 76-92.
- Thagard, P. (2012). *The cognitive science of science: Explanation, discovery, and conceptual change*. Cambridge, MA: The MIT Press.
- Toulmin, S. E. (2003). *The uses of argument*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.