

# 초등학생들의 먹이 피라미드 예측 모형 구성에서 과학적 추론의 역할

한문현

## Role of Scientific Reasoning in Elementary School Students' Construction of Food Pyramid Prediction Models

Han, Moonhyun

### ABSTRACT

This study explores how elementary school students construct food pyramid prediction models using scientific reasoning. Thirty small groups of sixth-grade students in the Kyoungki province (n=138) participated in this study; each small group constructed a food pyramid prediction model based on scientific reasoning, utilizing prior knowledge on topics such as biotic and abiotic factors, food chains, food webs, and food pyramid concepts. To understand the scientific reasoning applied by the students during the modeling process, three forms of qualitative data were collected and analyzed: each small group's discourse, their representation, and the researcher's field notes. Based on this data, the researcher categorized the students' model patterns into three categories and identified how the students used scientific reasoning in their model patterns. The study found that the model patterns consisted of the population number variation model, the biological and abiotic factors change model, and the equilibrium model. In the population number variation model, students used phenomenon-based reasoning and relation-based reasoning to predict variations in the number of producers and consumers. In the biotic and abiotic factors change model, students used relation-based reasoning to predict the effects on producers and consumers as well as on decomposers and abiotic factors. In the equilibrium model, students predicted that "the food pyramid would reach equilibrium," using relation-based reasoning and model-based reasoning. This study demonstrates that elementary school students can systematically elaborate on complicated ecology concepts using scientific reasoning and modeling processes.

**Key words:** ecology concept, food pyramid, food web, model, scientific reasoning

### I. 서 론

생태계 개념은 생물적 요소 및 비생물적 요소들 뿐만 아니라, 이들의 역동적 상호작용 이면에 있는 메커니즘들을 이해하는 것을 포함하는 것으로 학습자들이 이해하기 쉽지 않다(Boersma *et al.*, 2011; Hmelo-Silver & Azevedo, 2006). 예를 들어, 학습자들은 첫째, 생태계의 여러 구성 요소 즉, 생물적 요소 및 비생물적 요소를 파악하고, 구성 요소 간의 관계 및 과정을 이해하는 것, 둘째로 생태계를 여러 요소의 역동적 상호작용 속에서 나타나는 상위 수준의 질서들을 포함하는 시스템으로 이해하는데

인지적 어려움을 겪을 수 있다(Hogan, 2000; Westra, 2008).

그러므로 교사가 생태계 개념을 단순 암기식 수업으로 진행하거나(Kim & Yoo, 1996), 지식 전달 수업으로 운영할 때 학생들은 개념을 잘 이해하지 못하거나, 대안개념(또는 오개념)을 구성할 가능성이 높다(Grotzer & Basca, 2003; Han & Kim, 2013). 구체적으로 첫째, 학생들은 소비자 간의 먹고 먹히는 관계에서 소비자에 포함되는 생물들의 생태적 지위가 고정되어 있다는 대안개념을 가지기 쉽다(Griffiths & Grant, 1985). 둘째, 학생들은 생태계가 생물적 및 비생물적 요소들의 상호작용이 동시

적, 무차별적, 역동적으로 일어나는 열린계임을 이해하는데 어려움을 겪을 수 있다(Hmelo-Silver *et al.*, 2007). 셋째, 학생들은 생태계의 생물적 및 비생물적 요소들의 역동적 상호작용 이면에 숨어있는 여러 메커니즘을 파악하는데 어려움을 보일 수 있다(Jordan *et al.*, 2014). 넷째, 학생들은 생태계에서 벌어지는 특정 사건이 생물적 및 비생물적 요소들의 영향 아래에서 나타나고, 다시 특정 사건이 생물적 및 비생물적 요소들에 영향을 줄 수 있다는 양방향의 상호작용을 이해하기 어려워 한다(Green, 1997; Park *et al.*, 2003). 이러한 선행 연구 결과들은 생태계가 과정-평형 범주에 속하는 개념이며(Chi, 1992), 복잡계에 해당하므로 학생들이 이해하기가 쉽지 않음을 보여주는 것이다(Hmelo-Silver *et al.*, 2007).

이러한 어려움들은 초등학생에게도 마찬가지로 적용될 것으로 추론해볼 수 있다. 예를 들어, 초등학생들은 생물적 요소들 사이의 간단한 관계를 파악하는데(예: 매뚜기는 풀을 먹는다)는 거의 어려움을 보이지 않지만(Han & Kim, 2012), 생물적 및 비생물적 요소들 사이의 역동적 상호작용과 이면에 있는 메커니즘을 이해하는데 어려움을 보일 수 있다(Jordan *et al.*, 2014). 그러므로 초등학생들이 생물적 및 비생물적 요소들의 역동적 상호작용, 역동적 상호작용 이면에 있는 메커니즘을 보다 더 잘 이해할 수 있도록 도울 수 있는 전략이 필요하다(Hmelo-Silver *et al.*, 2015).

과학적 모형 구성(이하 모형 구성)은 여러 요소들의 상호작용과 이면에 있는 메커니즘을 이해하도록 도울 수 있고(Han & Kim, 2019; Peel *et al.*, 2019), 특히 생태계 개념을 이해하는데 유용한 교수-학습 방법으로 사용될 수 있다(Han & Kim, 2012). 그 이유로 첫째, 모형 구성은 학생들의 과학적 추론을 촉진하도록 하여 자연 현상에 대한 다양한 측면을 생각해 보도록 이끌 수 있다(Passmore *et al.*, 2009). 둘째, 모형 구성은 자연 현상 이면에 있는 메커니즘을 구성하도록 도울 수 있기(Forbes *et al.*, 2015) 때문에 생태계를 이해하는데 요구되는 이면의 여러 메커니즘을 고려하도록 이끌 수 있다. 셋째, 모형 구성에서 학생들은 사회적 상호작용을 바탕으로 자연 현상에 대한 설명 모형을 계속적으로 구성, 평가, 수정하며, 자연 현상에 대한 이해를 심화시켜 나갈 수 있다(Schwarz *et al.*, 2012). 이러한 측면들은 모형 구성이 초등학생들이 생태계 개념

을 잘 이해할 수 있도록 돕는 교수-학습 방법으로 사용될 수 있는 근거들임을 보여주는 것이다(Han & Kim, 2012).

하지만 초등학교 6학년 학생들이 이해할 필요가 있는 생물적 요소 및 비생물적 요소, 먹이 사슬 및 먹이 그물 개념, 먹이 피라미드 개념을 총체적으로 활용하여 생태계 개념을 어떻게 이해해 나갈 수 있는지에 대한 모형 구성 수업에 대한 질적 사례 연구는 부족한 실정이다. 이러한 사례 연구의 부족은 현장 교사들의 모형 구성 수업에 대한 이해 부족을 야기할 수 있으며(Windschitl *et al.*, 2008), 교사들이 모형 구성을 교수-학습 방법으로 사용하는데 어려움으로 작용할 수 있다(Chen *et al.*, 2016). 이를 위해 본 연구에서는 생태계를 이루는 여러 구성 요소들(생물적 요소 및 비생물적 요소)과 먹이 사슬, 먹이 그물, 먹이 피라미드 개념들을 기반으로 초등학생들이 어떠한 과학적 추론을 통하여 특정 먹이 피라미드의 변동을 예측해 나갈 수 있는지를 탐색하고자 한다. 본 연구는 사회적 구성주의 관점에서 초등학생들이 사회적 상호작용에 기반하여 이해하기 어려운 생태계 개념들을 어떻게 구성 및 적용해 나가는지에 대한 함의를 제공할 수 있을 것으로 기대해 볼 수 있다. 구체적인 연구 문제는 다음과 같다.

1. 먹이 피라미드의 변화를 예측해 보도록 하는 모형 구성 과제에서 초등학생들의 모형 구성은 어떠한 유형으로 나타나는가?
2. 각각의 먹이 피라미드 예측 유형들은 어떠한 과학적 추론들로 구성되는가?

## II. 연구 방법

### 1. 참여자 및 모형 구성 과제

경기도 소재 A시(인구 약 85만 명) B초등학교 6학년 15개의 소집단과 C시(인구 약 30만 명) D초등학교 6학년 15개 소집단인 총 30개 소집단이 연구에 참여하였고, 각 소집단은 4~5명의 남, 여 초등학생들로 구성되었다. B, D 초등학교는 모두 해당 도시의 관내 초등학교 중 학업 성취도가 중간 정도에 해당하였다. 연구자는 B, D 초등학교 학생들이 대도시 및 중소도시에 소재한 초등학교들의 평균적인 맥락을 반영한다고 판단하여 이들을 연구 참여자로 선정하였고, 이들은 연구자가 설계한 모형

구성 과제에 참여하였다(Table 2).

모형 구성 과제는 NGSS Lead states (2013) 및 Yeo and Lee (2016, p. 37)를 기반으로 설계되었다. NGSS 문서는 미국의 과학교육표준을, Yeo and Lee의 연구는 생태계와 관련한 한국의 과학 교과 핵심 성취기준을 구조화하여 안내하고 있다. 연구자는 이 두 문서를 참조하여 만들어진 한국의 초등학교 6학년 학생들이 생태계 개념과 관련하여 어떤 것을 학습할 필요가 있는지를 생성하였다(Table 1). 이후 연구자는 Table 1을 토대로 하여 B, D 초등학교 6학년 학생들이 수행할 모형 구성 과제를 설계하였다(Table 2). 3차시로 이루어진 모형 구성 과제는 초등학교생들이 1, 2차시에 학습한 내용을 바탕으로 3차시의 먹이 피라미드 예측 모형 구성을 생태계의 여러 하위 개념들에 기반하여 다양한 측면에서 고려할 수 있도록 설계된 것이다.

1차시 수업의 경우, 강의식 수업으로 운영될 수 있도록 설계하였다. 1차시에서 학생들은 생물적 요소와 비생물적 요소를 배운 뒤, 이것들이 서로에게 영향을 줄 수 있는 관계임을 학습한다. 2차시 수업은 모형 구성 수업으로 안내될 수 있도록 설계하였다. 2차시에서 학생들은 소집단으로 먹이 사슬 개념을 학습하고 생산자 및 소비자에 해당하는 여러 생물의 먹고 먹히는 관계를 연결 지으며 먹이 그물의 핵심 메커니즘(생물들의 먹고 먹히는 관계를 서로 복잡하게 얽혀져 있어, 어느 한 생물의 개체 수가 줄어들더라도 쉽게 먹이 그물이 파괴되지 않는

다)을 구성해 나갈 수 있도록 설계하였다(Han & Kim, 2013).

3차시 수업에서 학생들은 먹이 피라미드 개념을 학습한 뒤(Han & Kim, 2012, p. 73), 특정 먹이 피라미드에 특정 사건이 발생하였을 때 이후의 먹이 피라미드의 개체 수 변화를 1~3차시에 학습했던 개념들을 사용하여 예측하고, 왜 그렇게 예측했는지를 설명하는 모형을 구성하였다(Fig. 1, Left). 3차시 수업에서 학생들은 소집단(남, 여 혼성 4~5명)으로 이루어져 모형을 구성하였으며, 특히 사회적 상호작용을 통해 먹이 피라미드 예측 모형을 계속적으로 구성, 평가, 수정해 나갔다(Schwarz et al., 2009). 또한, 학생들은 모형 구성 과정에서 최종적으로 합의된 설명 모형을 표상으로 나타내었다(Fig. 1, Right).

## 2. 자료 수집 및 분석

본 연구는 초등학교 6학년 학생들이 먹이 피라미드 예측 모형을 어떠한 과학적 추론을 통해 구성해 나가는지를 탐색한 질적 사례 연구이다. 이를 위해 연구자는 세 종류의 질적 자료를 수집하였다. 첫째, 3차시 수업에서 학생들의 담화 내용이다. 연구자는 학생들이 모형 구성 과제를 수행하면서 이루어진 담화를 녹화 및 녹음하였고, 이를 전사하였다. 전사본은 학생들이 어떠한 담화를 통해 모형을 구성해 나갔는지를 이해하도록 도와주는 자료였다. 둘째, 3차시 수업의 모형 구성 과제 중 학생들이 나타낸 표상이다(Fig. 1, Right). 표상은 학생들이 최종

Table 1. Ecology concepts for 6<sup>th</sup> grade elementary school students

단계	학습 내용
1	생태계가 생물적 요소(생산자, 소비자, 분해자)와 비생물적 요소(햇빛, 물, 공기 등)들로 이루어져 있음을 학습한다.
2	생태계에서 생물들 사이의 먹고 먹히는 관계를 이해하기 위해 먹이 사슬, 먹이 그물, 먹이 피라미드 개념을 학습한다.
3	생물적 요소, 비생물적 요소, 먹이 사슬, 먹이 그물, 먹이 피라미드 개념에 기반하여 먹이 피라미드에서 생물의 개체 수가 어떻게 변화될 수 있는지를 설명할 수 있다.

Table 2. Modeling task conducted by 6<sup>th</sup> grade elementary school students in this study

차시	내용	수업 형태
1(40분)	생물적 요소(생산자, 소비자, 분해자) 및 비생물적 요소(햇빛, 물, 공기 등) 학습하기	강의식
2(40분)	먹이 사슬 개념을 학습한 뒤, 먹이 그물 모형 구성을 통해 먹이 그물의 핵심 메커니즘을 이해하기	모형 구성
3(50분)	먹이 피라미드 개념을 학습한 뒤, 특정 먹이 피라미드의 변동을 예측하고, 왜 그렇게 예측했는지를 설명하는 모형 구성하기(학생들은 생물적 요소, 비생물적 요소, 먹이 사슬, 먹이 그물, 먹이 피라미드 개념 등을 사용하여 모형을 구성하도록 안내됨)	모형 구성



Q) 어떤 생태계에서 알 수 없는 이유로 1차 소비자인 토끼의 개체수가 급감하였다. 이로 인해 벌어지게 되는 먹이 피라미드의 변화를 예상하고, 그 이유를 근거를 들어 설명해보자.

(단, 지금까지 배웠던 생물적 요소, 비생물적 요소, 먹이 사슬, 먹이 그물, 먹이 피라미드 개념 등을 사용하여 설명합니다).



Fig. 1. Modeling task about the food pyramid prediction (left) and their representation during the food pyramid prediction modeling process (right).

적으로 어떠한 담화를 통해 모형을 구성하였는지를 보완하는 자료였다. 마지막으로 연구자가 3차시 수업에서 기록한 필드 노트였다. 필드 노트는 소집단에서 어떠한 담화가 일어나고 있는지, 어떠한 맥락에서 담화가 일어나고 있는지, 어떠한 분위기였는지, 각 소집단만의 특징은 무엇이었는지를 간략하게 기술한 자료로써 전사본, 표상 자료의 신뢰성을 보완하는 자료였다. 연구자는 이 세 가지 질적 자료를 수집하여 자료의 신뢰성을 높이고자 하였다.

연구자는 전사본, 표상, 필드 노트를 반복적으로 검토 및 비교하면서 소집단 학생들이 구성한 모형들을 세 가지의 유형으로 범주화할 수 있었다. 그 뒤 연구자는 각 먹이 피라미드 예측 유형이 어떠한 추론을 통해 구성될 수 있었는지를 분석하였다. 이를 위해 연구자는 과학 수업에서 나타날 수 있는 학생들의 과학적 추론(Driver *et al.*, 1996)을 분석 도구로 사용하였다(Table 3).

Driver *et al.*의 과학적 추론은 모형 구성 또는 논변 활동에서 학생들이 자연 현상 이면에 있는 메커니즘, 자연 현상에 대한 예측, 시스템의 숨겨져 있는 여러 측면이나 구조, 기능, 행동 등을 어떠한 추론을 사용하여 이해해 나가는지를 분석하는 데 유용하게 사용될 수 있다(e.g., Han & Kim, 2012; Han & Kim, 2019; Kawasaki *et al.*, 2004). 이에 따라 연구자는 학생들이 구성한 각각의 모형들이 어떠한 과학적 추론을 통하여 정교화되었는지를 질적으로 분석하였다.

연구자는 분석 내용인 예측 유형 및 유형에 따른 학생들의 과학적 추론 내용을 B, D 초등학교 학생들의 수업을 담당한 과학 전담 교사 2인에게 제공하여 분석의 타당성을 높이고자 하였다. 수업을 담당한 교사들은 연구자의 분석 내용에 대부분 동의하면서도 동의하지 않은 내용에 대한 다른 해석을 제안하였고, 연구자는 이를 최대한 반영하였다. 이

Table 3. Students' scientific epistemological reasoning(Driver *et al.*, 1996)

추론의 종류	설명	예시
현상 기반 추론	표면적으로 드러나는 현상에 초점을 맞추어 현상을 묘사함.	토끼 개체 수가 감소할 때 토끼를 잡아먹는 뱀의 개체 수는 감소할 수 있다(현상). 그러므로 토끼 개체 수가 감소하면 토끼를 잡아먹는 참매의 개체 수도 감소할 것이다(현상 기반 추론).
관계 기반 추론	변인들 사이의 상관관계를 고려하여 경험적 일반화를 이끌어냄.	토끼는 토끼풀을 먹지만 뱀에게 먹힌다(변인). 메뚜기는 풀을 먹지만 사마귀에게 먹힌다(변인). 평은 잠자리를 먹지만 참매에게 먹힌다(변인). 그러므로 대부분의 생물들은 서로 먹고 먹힌다(관계 기반 추론).
모형 기반 추론	과학적 이론이나 모형에 기반한 설명 체계를 만들어 나감.	먹이 그물 개념에 기반하여 볼 때(과학적 이론), 먹이 피라미드의 각 단계의 생물들은 개체 수의 일시적인 변화가 있더라도 평형에 도달할 것이다(모형 기반 추론).

렇게 검토받은 분석 내용은 과학교육 박사 과정에 재학 중인 현직 초등학교사 2인 및 고등학교 교사 1인에게 재검토받아 분석의 내적 타당성을 높였다. 이들 역시 분석 내용과 부분적으로 다른 견해를 제시하였고, 연구자는 이를 모두 수용하여 현장의 실제성 및 학술 연구의 엄밀함을 높이는 분석이 될 수 있도록 노력하였다.

한편, 본 연구는 연구 결과의 일반화보다는 초등학교 6학년 소집단 학생들이 어떠한 과학적 추론 과정을 통해 생태계 개념의 다양한 측면을 이해해 나갈 수 있었는지에 대한 상세한 기술을 제시하여 과학교육에 이바지하고자 함에 있다.

### III. 연구 결과 및 해석

#### 1. 먹이 피라미드 예측 유형

연구자는 소집단 학생들이 구성한 먹이 피라미드 예측 모형을 세 가지로 범주화할 수 있었다 (Table 4). 첫 번째는 개체 수 변동 모형이다. 개체 수 변동 모형에서 학생들은 현상 기반 추론 및 관계 기반 추론을 사용하여 토끼 개체 수가 급감하였을 때 생산자, 1차 소비자, 2차 소비자, 최종 소비자의 개체 수가 감소하거나 늘어날 수 있다고 예측하였다. 두 번째는 생물적 및 비생물적 요소 변화 모형으로 이 모형에서 학생들은 관계 기반 추론을 사용하여 토끼의 수가 급감하였을 때 생물적 요소인 생산자, 소비자, 분해자와 비생물적 요소인 햇빛, 물, 공기 등에 영향을 미치게 됨을 예측하였다. 마지막은 평형 설명 모형으로 이 모형에서 학생들은 관계 기반 추론 및 모형 기반 추론을 사용하여 토끼의 수가 급감하더라도 먹이 피라미드 생태계가 평형을 이루게 됨을 예측하였다. 다음에서 연구자는 상술한 세 유형이 어떠한 과학적 추론들을 통해

구성될 수 있었는지를 해당 모형들의 대표적인 사례를 들어 설명하고자 한다.

#### 2. 개체 수 변동 모형

개체 수 변동 모형을 구성한 학생들은 현상 기반 추론을 사용하여 토끼의 개체 수가 급감한다면 생산자 및 소비자들의 개체 수도 변동할 것으로 예측하였다. 개체 수 변동 모형 구성에서 학생들이 나타난 표상 자료는 Fig. 2와 같다.

##### 1) 생산자 및 소비자들의 개체 수 변동을 논의함

개체 수 변동 모형을 구성한 소집단 학생들은 현상 기반 추론 및 관계 기반 추론을 사용하여 토끼의 개체 수가 급감한다면 토끼와 직, 간접적으로 먹고 먹히는 관계에 놓여 있는 생물들의 개체 수가 변동할 것으로 예측하였다. 먼저, 학생들은 1차 소비자에 속한다고 볼 수 있는 토끼가 급감하면 1차 소비자의 개체 수가 감소할 것으로 보았다(현상 기반 추론). 이러한 1차 소비자의 감소는 생산자의 개체 수의 증가를 가져오고, 동시에 2차 소비자의 감소를 불러올 것으로 여겼다(현상 기반 추론). 그 뒤, 2차 소비자의 감소는 최종 소비자의 감소를 가져오지만, 최종 소비자의 감소는 2차 소비자의 증가를 불러올 것으로 보았다(현상 기반 추론). 종합하여 학생들은 이러한 현상들을 바탕으로 토끼 개체 수의 감소가 생산자, 소비자들의 개체 수 변동을 가져올 것을 관계 기반 추론을 사용하여 예측하였다 (답화 1).

S1: 자, 보자. 먹이 피라미드에는 생산자, 1차 소비자, 2차 소비자, 최종 소비자가 있어. 애네들이 어떻게 될지를 알아봐야 해.

S2: 1차 소비자인 토끼가 거의 사라진 거잖아. 그러면?

Table 4. The pattern of food pyramid prediction models constructed by students

학생들이 구성한 개념 예측 유형	생산자 및 소비자들의 개체 수 변동 설명	분해자 및 비생물적 요소들의 변화가 나타남을 설명	먹이 피라미드가 평형을 이루게 됨을 설명
개체 수 변동 모형 (15개 소집단, 50%)	현상 기반 추론 관계 기반 추론		
생물적 및 비생물적 요소 변화 모형 (6개 소집단, 20%)	현상 기반 추론 관계 기반 추론	관계 기반 추론	
평형 모형 (9개 소집단, 30%)	현상 기반 추론 관계 기반 추론	관계 기반 추론	관계 기반 추론 모형 기반 추론

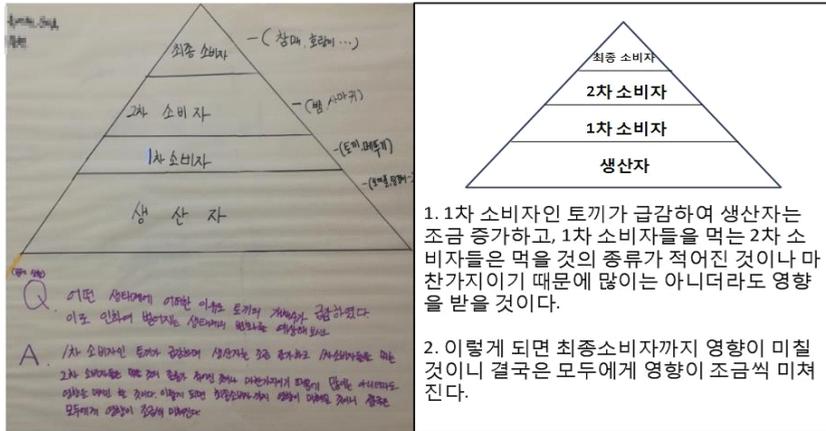


Fig. 2. The students' representation about the population variation model.

S1: 그러면 1차 소비자들이 줄어든 것이지? 그러니까 1차 소비자들이 먹는 생산자들은 많이 증가할 거야(현상 기반 추론, 1차 소비자 감소 및 생산자 증가).

S2: 오케이, 좋아. 생산자는 증가한다.

S1: 그런데 (대체할) 먹이를 못 찾은 2차 소비자들은 1차 소비자들이 줄어들 때 줄어들 수밖에 없어(현상 기반 추론, 2차 소비자 감소). 그리고 이러한 영향은 계속 최종 소비자까지 영향을 미칠 것 같아(현상 기반 추론, 최종 소비자 감소).

S3: 그런데 최종 소비자까지 결국은 영향을 받으면, 그러니까 최종 소비자가 줄어든다면 다시 2차 소비자는 늘어나는 건가?(현상 기반 추론, 다시 2차 소비자 증가)

S1: 그러니까 그런 식으로 계속 영향을 주는 거야(관계 기반 추론, 현상 기반 추론의 결과(변인)들을 종합하여 생산자 및 소비자의 개체 수가 계속 변동됨을 예측함).

답화 1, D초등학교 소집단 5

2) 해석

연구자는 개체 수 변동 모형을 구성한 학생들의 사회적 상호작용을 다음과 같이 해석하였다. 학생들은 답화 1에서 현상 기반 추론들을 추가해 나가는 방식으로 현상 기반 추론의 결과들을 축적하였고, 축적된 현상 기반 추론을 변인들로 삼아 관계 기반 추론을 통해 경험적 일반화를 이루어 내었다. 이는 학생들의 사회적 상호작용이 소집단 내 학생들의 의견들을 축적해 나가는 누적형 대화(Mercer et al., 1999)의 양상을 보인 것이다.

개체 수 변동 모형 구성에서 보여준 학생들의 현상 기반 추론 및 관계 기반 추론은 다음과 같이 해

석될 수 있다. 첫째, 학생들은 1차 소비자인 토끼 개체 수가 급감한 사건이 발생한 뒤, 2차 소비자 감소 또는 생산자 증가에 대한 현상이 순차적으로 일어나는 것처럼 논의하였다. 이러한 논의 방식은 먹이 피라미드에서 발생하는 현상들이 비선형적이라기보다는 선형적인 순서에 따라 이루어진다고 생각하는 것으로(Han & Kim, 2012, p. 80) 사건들이 비선형적, 무차별적으로 발생하는 생태계의 복잡성(Hmelo-Silver et al., 2007)을 현상 기반 추론 및 관계 기반 추론만 사용하여 추론하지는 못한 것으로 해석할 수 있다.

둘째, 학생들이 현상 기반 추론 및 관계 기반 추론을 통해 논의한 것은 먹이 피라미드에서 1차 소비자를 기준으로 위 단계 생물(즉, 2차 소비자 또는 최종 소비자)들과 아래 단계 생물(생산자)의 개체 수의 변동만을 언급한 것만으로 그친 것이다. 이는 토끼 개체 수의 급감이 분해자나 비생물적 요소들에게 미치는 영향을 고려하지는 않았다는 제한점을 가진다. 한편, 학생들은 토끼 개체 수가 급감하는 사건으로 인해 먹이 피라미드가 어느 시점에 다르다면 생산자 및 소비자들의 개체 수 변동이 멈출 것으로 예측하지는 않았다(답화 1). 오히려 학생들이 개체 수 변동이 지속될 것으로 예측한 점(답화 1)은 초등학생들도 ‘생태계에서 벌어지는 사건의 시작과 끝이 명확치 않음’(Chi, 1992)을 어느 정도 수준까지 이해할 수 있다는 가능성을 보여준 것이다.

3. 생물적 및 비생물적 요소 변화 모형

생물적 및 비생물적 요소 변화 모형을 구성한 학

생들은 관계 기반 추론을 사용하여 토끼 개체 수의 급감이 생물들의 먹이 경쟁이 치열해지는 결과를 낳을 것으로 예측하였고, 또한 생물적 및 비생물적 요소에도 영향을 줄 것으로 생각했다. 모형 구성 과정에서 학생들이 나타낸 표상은 다음과 같다(Fig. 3).

1) 생물들의 먹이 경쟁이 치열해질 것으로 예상함

생물적 및 비생물적 요소 변화 모형을 구성한 학생들은 개체 수 변동 모형에서 논의되었던 생산자 및 소비자 개체 수의 변동에 대한 의견 교환을 마찬가지로 나누었다. 하지만 개체 수 변동 모형을 구성했던 학생들과 비교하였을 때의 차이점이 있다면 이들은 관계 기반 추론을 통해 두 가지 측면을 추가로 다루었다는 점이다.

첫째, 학생들은 관계 기반 추론을 사용하여 토끼 개체 수의 급감 사건 이후 생물들의 먹이 경쟁이 치열해질 것을 예측하였다. 먼저, 학생들은 토끼 개체 수가 급감할 경우, 1차 소비자의 개체 수가 줄어들게 되고, 이후 1차 소비자를 잡아먹는 2차 소비자들끼리 먹이 경쟁이 일어날 것으로 보았다. 마찬가지로 2차 소비자의 개체 수가 줄어들게 되면 이후 2차 소비자들을 먹는 최종 소비자들끼리 먹이 경쟁이 일어날 것으로 보았다. 학생들은 이러한 변인들을 고려하여 1차 소비자, 2차 소비자, 최종 소비자들이 줄어든 먹이로 인해 일시적으로 먹이 경쟁을 치열하게 벌일 것으로 예상하였다(답화 2).

S4: 그런데 봐봐. 토끼가 줄어들었다. 그러면 1차 소비자들이 줄어든 거잖아. 그러면 1차 소비자들이 줄면 2차 소비자들은 다른 먹이들을 찾아야 하는 거

잖아.

S5: 오케이. (토끼를 잡아먹는) 2차 소비자들은 토끼가 사라졌으니 다른 먹이들을 서로 가지고 싸울 수밖에 없어. 이 상황에서 토끼가 사라졌으니까 생산자는 개체 수가 늘어나고.

S6: 그러면 마찬가지로 2차 소비자들이 감소하게 되면 2차 소비자를 먹는 최종 소비자들도 먹이를 가지고 싸워야 되고.

S4: 그러니까 2차 소비자들도 그렇고 최종 소비자들도 그렇고 토끼 수가 줄어들면서 먹이 경쟁을 하게 된다는 거지?

(중략)

S5: 정리하면은 토끼 수가 급감하면서 1차 소비자는 1차 소비자들끼리 싸우고(변인), 2차 소비자는 2차 소비자들끼리 싸우고(변인), 최종 소비자들은 최종 소비자들끼리 싸운다(변인). 그러니까 모든 소비자들은 줄어든 먹이 때문에 서로 치열하게 싸울 때가 생긴다.

S4: 그런데 1차 소비자, 2차 소비자는 (생태적 지위)도 바뀌기도 하니까. 하지만 전보다 생물들이 줄어든 먹이 때문에 치열하게 싸워야 하는 때가 생긴다는 거.

S6: 그런데 그런 논리면 그러니까 서로 먹이 때문에 치열하게 싸워야 된다면 점점 더 전쟁터, 싸움터가 되는 거잖아. 좀 말이 안 되지 않나?

S7: 맞아 맞아. 싸움이 계속 치열해진다는 아니지. 다시 안정될 것 같은데 그렇게 되려면?

S6: 먹이 경쟁이 치열해졌다가 치열해지지 않았다가 그렇게 되는 거라고 봐야 하지 않을까?(변인들을 기반으로 관계 기반 추론을 사용하여 일반화를 도출) 먹이 경쟁에서 밀린 애들이 사라지게 되면 경쟁자들이 적어지니까 다시 안정되는 거야.

답화 2. B초등학교 소집단 2

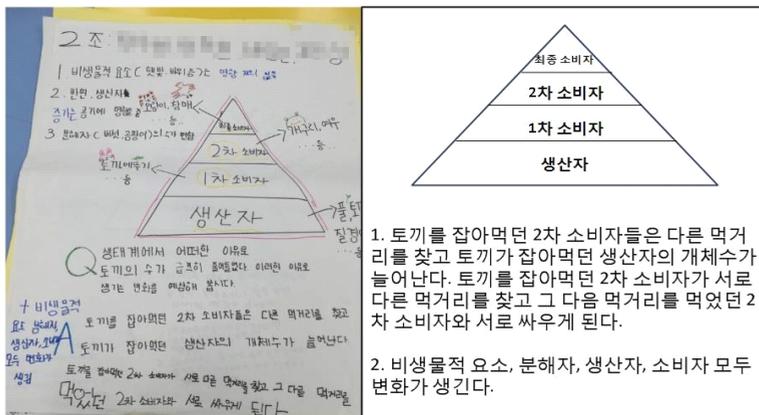


Fig. 3. The students' representation about the biotic and abiotic factors change model.

## 2) 분해자 및 비생물적 요소에 영향을 미침을 고려함

둘째, 학생들은 토끼의 개체 수 급감이 생산자 및 소비자들의 개체 수뿐만 아니라, 다른 생물적 요소인 분해자 및 비생물적 요소들인 토양, 공기 등에 영향을 미치게 될 것으로 예측하였다. 그렇게 결론 내리게 된 담화를 살펴보자(담화 3). 담화 3에서 학생들은 담화 2에서 논의한 일시적으로 ‘먹이 경쟁이 치열해질 것’이라는 결론에 머무르지 않았다. 오히려 학생들은 토끼 개체 수의 급감 사건이 단기적으로는 먹이 경쟁의 치열함을 유발할 수도 있겠지만, 장기적으로는 생물적 요소인 생산자, 소비자, 분해자 및 비생물적 요소인 토양, 공기 모두에게 영향을 미치는 사건으로 해석하는 모습을 보여주었다(담화 3).

S7: 그런데 먹이 경쟁이 치열해졌다가 치열해지지 않았다가 하면서 다른 것에도 영향을 미치지 않아?  
(중략)

S4: 그러니까 이거야. 뵙뵙. 치열해진다는 거는 서로 그만큼 토끼가 급감한다는 게 여러 요소들에 영향을 미치게 된다는 거지. 뵙뵙. 1차 소비자인 토끼가 수가 줄면서 생산자, 2차 소비자, 최종 소비자에 다 영향을 미쳐. 또, 생산자, 소비자들이 죽으면서 분해자들이 더 열심히 일하게 되잖아. 또, 토양이나 공기에도 어느 정도 영향을 미쳐. 왜냐하면 분해자가 토양을 좀 더 기름지게 할 거잖아. 또, 생산자가 산소를 더 많이 만들면서 공기에도 영향을 미치고. 그러니까 내 말은 굶어 죽는 동물도 생기고, 개를 분해자가 분해하기도 하고 그리고 그거 후에 영향을 미치기도 하니까.

(중략)

S6: 결론은 이런 거지? 토끼 수가 줄어드는 것은 생산자에게도 영향을 미쳐(변인). 소비자에게도 영향을 미쳐(변인). 분해자에게도 영향을 미쳐(변인). 토양이나 공기에도 영향을 미쳐(변인). 결론, 짜잔~ 토끼 수의 급감은 생산자, 소비자, 분해자, 토양, 공기와 같은 생태계 요소에 영향을 미친다(관계 기반 추론). 맞는 것 같은데?

S7: 이렇게 쓰자. 먹이 경쟁이 일시적으로 생긴다. 그리고 생산자, 소비자, 분해자, 토양, 공기 모두에 영향을 미친다.

담화 3, B초등학교 소집단 2

## 3) 해석

연구자는 생물적 및 비생물적 요소 변화 모형을 구성한 학생들의 사회적 상호작용을 다음과 같이

해석하였다. 학생들은 담화 2 및 3에서 변인들의 상관관계를 통해 경험적 일반화를 도출해 내는 관계 기반 추론을 사용하면서도 관계 기반 추론의 제한점 및 추가적으로 고려해야 할 필요가 있는 점들을 논의하는 모습을 보였다. 이를테면, 학생들이 관계 기반 추론을 통해 먹이 경쟁이 치열해질 수 있다고 예측하면서도 이것이 일시적인 것으로 본 점(제한점 고려)과 먹이 경쟁이 치열해지는 상황이 다른 생태계 요소들에도 영향을 미치는 상황으로 이어지게 된다는 점을 논의한 것(추가적인 상황 고려)은 설명에 대한 반대 의견을 고려하여(Lee et al., 2019) 모형 수준을 높인 것으로 해석할 수 있다.

연구자는 생물적 및 비생물적 요소 변화 모형을 구성한 학생들이 관계 기반 추론을 사용하여 보여준 담화 내용을 다음과 같이 해석하였다. 첫째, 학생들은 관계 기반 추론을 사용하여 생물들 간의 먹고 먹히는 관계가 경쟁이 치열해질 수도 있음을 언급하였는데, 이는 생물 간 먹고 먹히는 관계의 역동성을 간접적으로 탐색한 것으로 해석할 수 있다. 왜냐하면 이것은 단순히 생물들의 개체 수 변동을 고려하는 것뿐만 아니라, 소비자들의 먹이 경쟁이 시간이 흐름에 따라 치열해질 수도 있다는 일종의 주기성(Oscillation)을 예측한 것이기 때문이다(Draper, 1993).

두 번째, 학생들은 관계 기반 추론을 사용하여 생산자 및 소비자의 개체 수 변동뿐만 아니라, 생산자 및 소비자의 개체 수 변동이 먹이 피라미드에 명시적으로 제시되어 있지 않은 분해자 및 비생물적 요소들에게까지 영향을 줄 수 있음을 고려하였다. 이는 먹이 피라미드 시스템에 관련되어 있는 숨겨져 있는 요소들을 추론하여 파악해 나간 것으로 시스템과 상호작용하고 있는 다양한 여러 요소들을 고려할 수 있었음을 보인 것이다(Lee et al., 2016).

그럼에도 불구하고, 학생들은 개체 수 변동 모형을 구성한 학생들과 마찬가지로 생물들의 먹고 먹히는 관계들이 비선형적 및 무차별적으로 일어나는 과정임을 설명하지는 않았다(Han & Kim, 2012, p. 80). 또한, 먹이 피라미드에 관련된 다양한 요소들을 고려했으나, 이를 통해 먹이 피라미드가 평형을 유지하게 된다는 점을 논의하지 않았다.

## 4. 평형 모형

평형 모형을 구성한 학생들은 생물적 및 비생물

적 요소 변화 모형을 구성한 학생들보다 생물들의 번식 가능성을 고려한 더 정교한 예측 모형을 구성하였으며, 또한 모형 기반 추론을 사용하여 먹이 그물 개념을 바탕으로 먹이 피라미드가 장기적으로 평형을 이룰 것으로 예측하였다. 학생들이 나타낸 표상 자료는 다음과 같다(Fig. 4).

1) 생물 개체 수 증가 요인 중 하나인 번식을 고려해야 함을 논의함

평형 모형을 구성한 학생들 또한 토끼 개체 수 급감으로 인한 생산자 및 소비자들의 개체 수 변동을 다루었으며, 생물적 및 비생물적 요소 변화를 예측하였다. 그러나 이들이 덧붙여 논의한 것은 생물들의 개체 수 변동에 미치는 변인으로 생물들의 번식 가능성을 추가적으로 다루었다는 점이다. 종합하여, 평형 모형을 구성한 학생들은 생물들의 개체 수 변화, 생물적 및 비생물적 요소들의 변화, 생물들의 번식 가능성을 변인들로 고려하였고, 관계 기반 추론을 사용하여 먹이 피라미드가 평형을 유지할 것으로 예측하는 모습을 보였다(답화 4).

S8: 1차 소비자인 토끼들이 급감했다고 해도 다른 1차 소비자들이 있기 때문에 2차 소비자들이 굶어 죽거나 그러지 않을 것 같아. 그리고 토끼의 수가 급감을 해도 아직 생산자는 많기 때문에 토끼가 다시 늘어날 것이라고 생각해. 이걸 다른 생물들도 마찬가지로 지이고(변인, 생산자 및 소비자들의 개체 수 변동을 예상함).

S9: 결국 생물들의 수가 변화가 없을 거라는 말이지?  
S8: 아니 그게 아니라... 그게 아니지.  
S9: 그게 무슨 말이나? 다시 말해봐. 아니 내 생각에는

토끼가 줄 것 같은데 너의 말은 토끼 수가 큰 변화가 없다는 말이잖아. 뱀의 수는 안 줄까? 토끼풀은 늘지 않을까? 생물들의 수에 변화가 있는 거지.

S8: 내 말은 그게 아니라 만약에 예를 들어 토끼가 번식력이 너무 왕성해져서 새끼를 많이 낳고 개체들이 많이 살아남으면 이야기는 달라진다고. 마찬가지로 뱀들도 새끼를 많이 낳을 수도 있는 거고(변인, 생물들의 번식에 대한 고려를 보여줌). 그리고 뱀은 꼭 토끼가 아니더라도 개구리를 먹으면서 살 수도 있고, 풀은 1차 소비자들이 많이 먹더라도 소비자들이 증가(배변)를 하면 이게 거름이 되어서 풀이 많이 자랄 수도 있는 거거든(변인, 무기물의 증가가 생산자의 증가를 야기할 수 있음을 고려함).

(중략)  
S9: 아하... 그러니까 서로 먹히는 것을 고려하고(변인), 번식을 고려하고(변인), 거름이 늘어나는 것을 고려하고(변인) 그런 것들을 다 고려하면은 생물들의 수는 일시적으로 크게 줄더라도 다시 돌아올 것이다. 즉, 생산자나 소비자들의 수도 일시적으로는 변해도 다시 돌아올 것이다(관계 기반 추론).

(중략)  
만약 그게 안 될 정도의 상황은 동족을 먹을 정도로 아주 심각한 상황인 거고.

답화 4, B초등학교 소집단 3

2) 먹이 그물 개념에 기반하여 생태계의 평형을 논의함

또한, 평형 모형 구성 과정 중 학생들이 논의한 것은 먹이 그물 개념을 바탕으로 모형 기반 추론을 사용하여 먹이 피라미드의 평형을 논의했다는 점이다. 먼저, 학생들은 토끼 개체 수가 급감하는 사건이 생태계의 생물적 및 비생물적 요소에 영향을 주게 될 수 있음을 관계 기반 추론을 통해 논의하

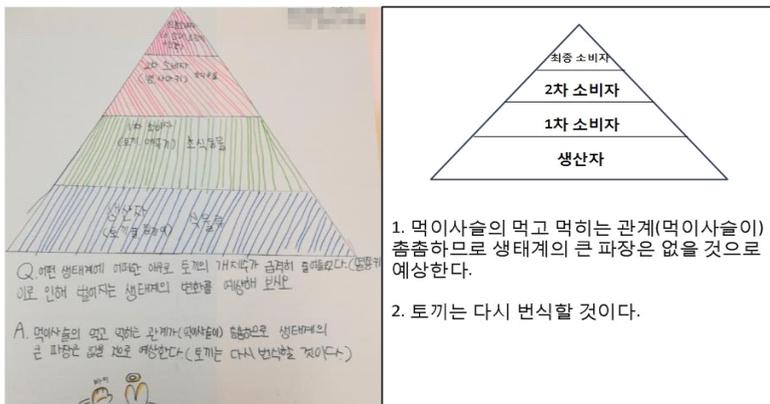


Fig. 4. The students' representation about the equilibrium model.

었다. 그리고 토끼 개체 수의 급감이 생물적 및 비 생물적 요소에 영향을 주게 됨은 맞지만, 장기적으로 먹이 피라미드에 심각한 타격을 줄 것으로 보지는 않았다(답화 5).

S8: 정리해 보자. 1차 소비자가 줄어들게 되면 생산자는 늘어나고(변인) 2차 소비자는 줄어들고(변인), 최종 소비자는 줄어들게 돼(변인). 그런데 또 최종 소비자가 줄어들면 2차 소비자는 늘어날 수 있고(변인), 1차 소비자는 줄어들 수 있어(변인). 그러면 또 생산자는 늘어날 수 있거든(변인). 즉 이렇게 생산자, 소비자들은 영향을 받아(관계 기반 추론). 그렇게 영향을 주는 것은 맞는데 그렇다고 해서 피라미드가 무너지는 것 같지는 않은 거지. 토끼가 급감한다고 피라미드가 무너진다고 말하는 건 이상하잖아(논리적 비약할 수 있음을 파악한 것임).

담화 5, B초등학교 소집단 3

담화 5에 뒤이어 학생들은 먹이 피라미드가 평형에 다다를 것으로 예측한 다른 근거로 먹이 그물 개념을 활용하였다. 먹이 그물 개념, 즉 ‘생물 간의 먹고 먹히는 관계가 복잡하게 얽혀 있어 쉽게 무너지지 않는 구조를 가짐’을 바탕으로 모형 기반 추론을 통해 토끼의 급감이 있더라도 먹이 피라미드가 다시 평형을 이룰 것으로 예측하였다(담화 6).

S9: 나도 그럴 것 같은 게 우리가 배운 먹이 그물을 생각해봐. 먹이 그물에서는 심지어 어느 생물이 완전히 멸종했다고 해도 쉽게 무너지지 않는다고 했잖아(과학적 이론). 그런데 문제에서 토끼가 멸종한 것도 아니라고 했어. 급감한 거라고 했지. 그러면 어떻게 되겠어. 먹이 피라미드에서도 생산자, 소비자들에게 영향을 미치겠지만 다시 평형을 이룬다고 해야 맞는 거 같아(모형 기반 추론).

S10: 나도 비슷한 의견인데 토끼가 1차 소비자에서 차지하는 비중이 아무래도 크지 않을 것 같기 때문에. 왜냐하면 생각해봐. 생태계에 생물들이 얼마나 많아. 정말 토끼는 일부잖아. 토끼가 멸종했다고 하더라도 피라미드가 급격하게 망가진다고 하는 건 아닌 듯.

S11: 결론은 큰 파장이 없다. 이거 완벽한데? 너무 우리 잘하는 거 아니?

담화 6, B초등학교 소집단 3

### 3) 해석

평형 모형을 구성한 학생들의 사회적 상호작용

은 서로의 아이디어를 계속 발달시켜 나가는 탐색적 대화 유형으로 볼 수 있다(Mercer et al., 1999). 이를테면 학생들이 소비자 및 생산자 개체 수 변동에 생물들의 먹고 먹히는 관계뿐만 아니라, 생물들의 번식까지 고려해야 한다고 말한 것, 먹이 피라미드의 평형을 예측하기 위한 증거를 보강하기 위해 관계 기반 추론뿐만 아니라, 먹이 그물 개념을 활용한 모형 기반 추론을 활용한 것은 아이디어의 정교화를 추구하는 대화 양상을 드러낸 것으로 해석할 수 있다.

평형 모형을 구성한 학생들은 다른 예측 유형을 구성한 학생들에 비해 두 측면을 추가적으로 고려하였다고 해석할 수 있다. 첫째, 학생들은 먹이 피라미드를 예측하기 위해 고려할 필요가 있는 변인 중 하나로 개체의 번식 가능성을 논의하였던 점이다. 이는 개체 수 변동 모형이나 생물적 및 비생물적 요소 변화 모형을 구성한 모형에서는 고려되지 않았던 점이었다. 이러한 점은 먹이 피라미드 예측을 위해 더 많은 요소들을 고려한 것으로 평가할 수 있다.

둘째, 학생들은 먹이 그물 메커니즘을 바탕으로 먹이 피라미드 예측 모형을 구성하였다는 점이다. 학생들은 먹이 그물 메커니즘(즉, 생태계의 생물들의 먹고 먹히는 관계는 복잡하고 역동적으로 얽혀 있어 어느 한 생물의 개체 수가 급감하더라도 쉽게 무너지지 않는 구조를 가진다)을 바탕으로 먹이 피라미드 예측에 평형 개념을 적용하였다. 물론, 학생들이 생태계의 평형 개념을 어느 수준까지 이해하였는지는 담화 내용만 보아서는 파악하기 힘들다. 또한, 학생들이 평형이라는 단어를 사용하였다고 하더라도 그들의 이해 수준이 “수많은 포식과 피식 과정이 동시에 무작위적으로 이루어지는 중에 영양 단계별로 생물량이 평형을 이룬다(Han & Kim, 2012)”라는 이해 수준에 도달하였다고 볼 수 있는 증거는 없다.

하지만 본 연구 결과는 초등학교 6학년 학생들의 인지적 수준을 고려하더라도 먹이 피라미드 예측 문제를 해결하면서 평형 개념을 제한적으로 부분적으로나마 적용, 이해할 수 있다는 가능성을 보여준 것이다. 게다가 평형 모형을 구성한 학생들은 먹이 피라미드 예측 모형 구성에서 생태계의 다양한 요소(예: 토끼의 번식 가능성)들을 고려하였고, 요소들을 바탕으로 관계 기반 추론, 모형 기반 추론을 적절히 활용하여 먹이 피라미드 설명 모형을

설득력 있게 설명하는 모습을 보였다. 이는 초등학교생들이 설명을 생성, 평가, 수정해 나가는 모형 구성에 참여하여 과정-평형 범주에 속하는 생태계 개념(Chi, 1992)을 과학적 추론을 사용하여 일정 수준 이상으로 정교화해 나갈 수 있다는 가능성을 보여준 것이다.

#### IV. 결론 및 제언

본 연구는 초등학교생들이 먹이 피라미드의 변화를 예측해 보도록 하는 문제에서 어떠한 과학적 추론을 사용하여 정교화된 모형을 만들어 나갈 수 있었는지를 탐색한 것이다. 본 연구에서 학생들의 먹이 피라미드 예측 유형은 개체 수 변동 모형, 생물적 및 비생물적 요소 변화 모형, 평형 모형으로 나타났다. 먼저, 개체 수 변동 모형을 구성한 학생들은 현상 기반 추론 및 관계 기반 추론을 사용하여 생산자 및 소비자의 개체 수 변동을 설명하는 모형을 구성하였다. 두 번째, 생물적 및 비생물적 요소 변화 모형을 구성한 학생들은 관계 기반 추론을 사용하여 먹이 피라미드 상에서 토끼 수의 급감이 생물적 및 비생물적 요소 모두에게 영향을 미칠 수 있는 사건임을 탐색하였다. 마지막으로 평형 모형을 구성한 학생들은 생물들의 번식 가능성을 생물들의 개체 수 변동의 추가적 변인 중 하나로 고려하였으며, 먹이 그물 개념을 바탕으로 모형 기반 추론을 활용하여 먹이 피라미드가 평형에 이를 것으로 예측하였다.

본 연구 결과를 바탕으로 초등학교 6학년 학생들의 생태계 개념 이해 수준을 높이는 데 도움이 될 수 있는 제언을 하고자 한다. 첫째, 생태계 생물들의 먹고 먹히는 관계 파악을 위해 현상 기반 추론 및 관계 기반 추론을 사용하도록 이끄는 것은 생물들의 먹고 먹히는 관계들을 재기술하도록 돕고, 이를 기반으로 먹이 연쇄의 수직 관계를 예측하는 데 유용하게 사용될 수 있다. 한편, 학생들의 추론이 현상 기반 및 관계 기반 추론으로만 제한될 경우 생태계에서 벌어지는 먹이 연쇄 사건들이 순차적으로 일어나는 것으로(Han & Kim, 2012, p. 78) 잘못 이해할 가능성이 있다. 따라서 그러한 대안개념을 가지지 않도록 안내할 필요가 있다.

둘째, 학생들이 생물적 및 비생물적 요소가 생태계에 영향을 주게 된다는 점을 이해하도록 관계 기반 추론을 사용하도록 돕는 것은 생물 간 먹고 먹

히는 관계의 역동성을 이해하도록 돕고, 생태계에서 분해자 및 비생물적 요소의 중요성을 인지하도록 이끌 수 있다. 그러므로 학생들이 먹이 피라미드 예측 모형을 구성할 때, 생물적 및 비생물적 요소와 같은 여러 변인들을 관계 기반 추론을 활용하여 이들의 상관관계를 파악하도록 돕는 것은 효과적인 교수-학습 전략이 될 수 있다.

마지막으로, 학생들이 먹이 그물 메커니즘을 바탕으로 모형 기반 추론을 활용하여 생태계 평형을 예측하도록 돕는 것은 생태계 평형에 대한 이해 수준을 부분적으로 높이는데 기여할 수 있다. 종합하여 연구자는 교사가 초등학교 6학년 학생들의 생태계 개념 이해 수준을 높이기 위해 생물적 요소 및 비생물적 요소, 먹이 사슬, 먹이 그물, 먹이 피라미드 개념들에 기반하여 현상 기반 추론, 관계 기반 추론, 모형 기반 추론과 같은 과학적 추론이 활발하게 일어나도록 이끌 필요가 있음을 제안한다.

#### 참고문헌

Boersma, K., Waarlo, A. J. & Klaassen, K. (2011). The feasibility of systems thinking in biology education. *Journal of Biology Education*, 45(4), 190-197.

Chen, Y. C., Benus, M. J. & Yarker, M. B. (2016). Using models to support argumentation in the science classroom. *The American Biology Teacher*, 78(7), 549-559.

Chi, M. T. H. (1992). Conceptual change within and across ontological categories: Examples from learning and discovery in science. In Giere, R. (Ed.), *Cognitive models of science: Minnesota studies in the philosophy of science* (pp. 129-186). Minneapolis, MN: University of Minnesota Press.

Draper, F. (1993). A proposed sequence for developing system thinking in a grade 4-12 curriculum. *System Dynamic Review*, 9, 207-214.

Forbes, C. T., Zangori, L. & Schwarz, C. V. (2015). Empirical validation of integrated learning performances for hydrologic phenomena: 3rd-grade students' model-driven explanation-construction. *Journal of Research in Science Teaching*, 52(7), 895-921.

Green, D. W. (1997). Explaining and envisaging an ecological phenomenon. *British Journal of Psychology*, 88(2), 199-217.

Griffiths, A. K. & Grant, B. A. (1985). High school students' understanding of food webs: Identification of a learning hierarchy and misconceptions. *Journal of*

- Research in Science Teaching*, 22(5), 421-436.
- Grotzer, T. A., & Basca, B. B. (2003). How does grasping the underlying causal structures of ecosystems impact students' understanding? *Journal of Biology Education*, 38(1), 16-29.
- Han, M. H. & Kim, H. B. (2012). Elementary students' reasoning patterns represented in constructing models of "Food web and food pyramid". *Journal of Korean Elementary Science Education*, 31(1), 71-83.
- Han, M. H. & Kim, H. B. (2013). The role of teacher's question prompt in elementary students' "Food web" modeling. *Biology Education*, 41(2), 296-309.
- Han, M. H. & Kim, H. B. (2019). Elementary students' modeling using analogy models to reveal the hidden mechanism of the human respiratory system. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 17(5), 923-942.
- Hmelo-Silver, C. E. & Azevedo, R. A. (2006). Understanding complex systems: some core challenges. *Journal of the Learning Sciences*, 15(1), 53-61.
- Hmelo-Silver, C. E., Marathe, S. & Liu, L. (2007). Fish swim, rocks sit, and lungs breathe: Expert-novice understanding of complex systems. *Journal of the Learning Sciences*, 16(3), 307-331.
- Hmelo-Silver, C. E., Liu, L., Gray, S. & Jordan, R. (2015). Using representational tools to learn about complex systems: A tale of two classrooms. *Journal of Research in Science Teaching*, 52(1), 6-35.
- Hogan, K. (2000). Assessing students' systems reasoning in ecology. *Journal of Biological Education*, 3(1), 163-168.
- Jordan, R. C., Brooks, W. R., Hmelo-Silver, C., Eberbach, C. & Sinha, S. (2014). Balancing broad ideas with context: An evaluation of student accuracy in describing ecosystem processes after a system-level intervention. *Journal of Biological Education*, 48(2), 57-62.
- Kawasaki, K., Herrenkohl, L. R. & Yeary, S. (2004). Theory building and modeling in a sinking and floating unit: A case study of third and fourth grade students' developing epistemologies of science. *International Journal of Science Education*, 26(11), 1299-1324.
- Kim, A. S. & Yoo, B. S. (1996). A study on the conceptions about ecosystem of the elementary school children. *Biology Education*, 24(2), 127-138.
- Lee, K., Han, M. & Kim, H. B. (2016). Development of high school students' system thinking through the construction of external representations of an ecosystem. *Biology Education*, 44(3), 447-462.
- Lee, M. S., Kim, H. N. & Yang, I. H. (2019). Elementary school students' interaction and conceptual change in collaborative scientific argumentation. *Journal of Korean Elementary Science Education*, 38(2), 216-233.
- Mercer, N., Wegerif, R. & Dawes, L. (1999). Children's talk and development of reasoning in the classroom. *British Educational Research Journal*, 25(1), 95-111.
- NGSS Lead States (2013). The next generation science standards: For states, by states. Washington: National Academies Press.
- Park, J. Y., Min, J. S. & Kim, H. B. (2003). High school students' patterns of ecological conceptions. *Biology Education*, 31(3), 203-213.
- Passmore, C., Stewart, J. & Cartier, J. (2009). Model-based inquiry and school science: Creating connections. *School Science and Mathematics*, 109(7), 394-402.
- Peel, A., Zangori, L., Friedrichsen, P., Hayes, E. & Sadler, T. (2019). Students' model-based explanations about natural selection and antibiotic resistance through socio-scientific issues-based learning. *International Journal of Science Education*, 41(4), 510-532.
- Schwarz, C., Reiser, B., Acher, A., Kenyon, L. & Fortus, D. (2012). MoDeLS: Challenges in defining a learning progression for scientific modeling. In Alonzo, A. & Gotwals, A. (Eds.), *Learning progressions in science (LeaPS)* (pp. 101-137). Boston, MA: Sense Publishers.
- Westra, R. H. V. (2008). *Learning and teaching ecosystem behavior in secondary education*. Doctoral dissertation, University of van Utrecht. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/27708726\\_Learning\\_and\\_teaching\\_ecosystem\\_behaviour\\_in\\_secondary\\_education\\_Systems\\_thinking\\_and\\_modelling\\_in\\_authentic\\_practices](https://www.researchgate.net/publication/27708726_Learning_and_teaching_ecosystem_behaviour_in_secondary_education_Systems_thinking_and_modelling_in_authentic_practices)
- Windschitl, M., Thompson, J. & Braaten, M. (2008). Beyond the scientific method: Model-based inquiry as a new paradigm of preference for school science investigations. *Science Education*, 92(5), 941-967.
- Yeo, C. & Lee, H. (2016). Developing and assessing a learning progression for the ecosystem. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 36(1), 29-43.