

Development of An Inquiry Model of Ecosystem Based on the System Thinking – Focused on Gotjawal Ecosystem*

Yeong-Ji Lee¹⁾ · Yong-Ju Kwon^{**2)}

¹⁾Aewol High School · ²⁾Korea National University of Education

시스템 사고에 기반한 생태계 탐구 모델 개발 - 곶자왈 생태계를 중심으로

이영지¹⁾ · 권용주²⁾

¹⁾애월고등학교 · ²⁾한국교원대학교

<ABSTRACT>

The purpose of this study is to develop a model of ecosystem inquiry based on systems thinking. To attain the purpose, the systemic components for the inquiry model were derived from a review of the literature with systems educators. In addition, the commonly-observed ecological phenomena in Gyorae Gotjawal Area on Jeju Island were examined and matched up with each component of systems thinking in order to identify whether each component are appropriate for the inquiry model of ecosystem. Reflecting on the components of systems thinking and ecological phenomena, we proposed a model of ecosystem inquiry focusing on developing systems thinking. The proposed model is comprised of the four steps including "Identification of the system components", "Analysis of the competitive relationships", "Analysis of the cyclic/dynamic cooperation", and "Analysis of the delayed/hidden cooperation". The findings provide the first step in designing effective teaching and learning strategies for developing systems thinking in the biological education field.

Keywords : Ecosystem inquiry, system thinking, Gotjawal ecosystem, ecological systems

I. Introduction

시스템 사고(system thinking)는 1980년대 후반 시스템 다이내믹스 분야에서 처음으로 도입된 용어

로서, 이후 교육을 비롯한 여러 분야에서 사용되면서 주목받기 시작하였다. 시스템 사고라는 용어가 사용되기 시작한 이후 많은 연구자들이 시스템 사고를 정의하려는 노력이 있었으나, 지금까지도 시스

* 이 논문은 한국교원대학교 2018학년도 연구년교수 학술지원비 지원을 받아 수행한 연구의 결과임

** Corresponding author : Yong-Ju Kwon, kwonjy@knue.ac.kr

Received November 30, 2019; Reviewed December 20, 2019 Corrected December 24, 2019; Accepted December 26, 2019

© 2019. Institute of Brain based Education, Korea National University of Education

템 사고에 대한 정의는 매우 다양하다. Richmond(1997)는 시스템 사고를 "부분" 보다는 "전체"적인 면에서 사고하는 것(Richmond, 1997)으로 정의하였으며, 이후 여러 연구자들은 상호작용과 피드백을 이해하기 위해 파악하고 탐색하는 것(Ossimitz, 2000; Potash & Heinboke, 1997; Richmond, 1997; Sweeney & Sterman, 2000), 역동적인 작용의 개념을 이해하는 것(Ossimitz, 2000; Potash & Heinboke, 1997; Richmond, 1997; Sweeney & Sterman, 2000)으로 정의하였다. 즉, 시스템 사고에 대한 정의들을 종합적으로 보았을 때, 시스템 사고란 시스템의 구성요소와 구성요소 간의 상호작용을 파악하고, 순환 고리와 피드백 관계를 이해하며, 이를 바탕으로 시스템의 역동적 특성을 이해하는 사고라고 할 수 있다.

우리 주변에는 시스템 구조를 가지고 있는 다양한 현상들이 존재하지만, 그 중에서 특히 생명체는 단순히 구성요소의 단순한 총합으로 설명할 수 없는 순환적이고 유기적인 시스템의 대표적 사례이다. 즉, 생명현상은 세포이하 단계, 세포, 개체 및 개체군, 군집, 생태계로 연결된 각 단계의 요소들이 상호작용하는 입체적인 구조로 구성되어 있기 때문에 환원주의적 관점에서는 이를 이해하는데 한계가 존재한다. 그러므로 생명현상에 대한 본질적인 이해를 위해서는 단위구조의 미세한 현상뿐 아니라 유기적인 시스템 구조와 이들의 상호작용 특성을 이해하기 위해서는 '시스템적 사고'가 무엇보다 필수적이다(Boersma, Waarlo & Klaassen, 2011; Kitano, 2002). 이러한 중요성에 힘입어 시스템 사고에 기반하여 생명현상을 이해하는 시스템 생물학은 생명과학의 핵심 주제로 자리매김하고 있다(Ideker, Galitski & Hood, 2001; Palsson, 2000). 과학교육과정의 하나인 Next Generation Science Standards (NGSS Lead States, 2013) 역시 '생명현상에 대한 시스템과 시스템 모델'을 생명과학 교육과정의 핵심 개념으로 제시하고 있다.

생명과학 영역 가운데 생태계(ecosystem)는 시스템 특성이 체계적으로 갖추어진 생명현상의 대표적 사례 중 하나이다(Westra, 2008). 생태계는 살아있는 생명체 집단 및 그들과 상호작용하는 주변 환경 집단의 시스템 복합체를 가리키는 용어로, Tansley(1935)에 의해 처음으로 제안되었다. 그는

이 용어를 통해 생태학에서 생물 요소(biotic factor)와 무생물 요소(abiotic factor) 간의 물질 교환의 중요성을 강조하였고, 이후 많은 생태학자들은 생물 그 자체보다 생물과 주변 환경, 즉 무생물 요소를 아우르는 생태계에 주목하기 시작하였다. 또한 생태계에서는 여러 생물 종들은 주변 환경과 끊임없이 상호작용하며 서로 다른 수준의 시스템들이 역동적으로 작동하여 평형을 이루고 있다. 생태계는 이러한 특성 때문에 시스템 구조의 대표적 사례로 제시되며, 이를 이해하는 과정은 시스템 사고 과정의 핵심으로 평가된다(Sauvé, 2005; Westra, 2008). 실제 교육 현장에서도 생태계를 학습자의 시스템 사고 발달을 위한 학습 주제로 제시하고 있으며(Kwon et al., 2011), 특히 야외 생태계 탐사는 학습자들이 관찰과 경험을 바탕으로 시스템 사고를 적용하여 생태 시스템을 이해하는데 효과적인 교수-학습 방법으로 제안되고 있다(Korfiatis & Tunnicliffe, 2012; Prokop, Tuncer & Kvasničák, 2007; Zoldosova & Prokop, 2006).

그러나, 학교 현장에서 야외 생태 교육 프로그램이 비교적 활발하게 제안되고 있지만(Bae & Jung, 2007; Park, 2008; Tilling, 2004), 여전히 시스템 사고 과정을 반영한 탐구 모델의 부재로 인해 생태계 교육 효과가 제대로 발휘하지 못하고 있다(Lock & Tilling, 2002; Turner & Fulmer, 2013). 즉, 현행의 야외 생태 학습 활동은 주로 동식물의 단순 관찰 또는 동정(indentification)에만 머무를 뿐, 먹이 사슬이나 생태계 순환과 같은 시스템 사고에 기반한 탐구활동은 매우 부족한 상황이다(Randler, 2008). 특히, 대부분의 야외 생태계 교육 프로그램들은 생태계의 시스템 특성을 고려하지 않은 채 단선적인 '관찰-의문-가설-검증-결론'과 같은 기존의 과학 탐구 모델을 단순히 적용하고 있다(Kim & Lee, 2008; Rozenszayn & Assaraf, 2011).

그러므로 생태계에 대한 체계적인 탐구를 위해서는 생태계의 시스템 특성을 고려하여 시스템 사고 과정을 적용한 생태계 탐구 모델을 제시할 필요가 있다. 이에 따라 이 연구에서는 시스템 구조를 갖는 실제 생태계에 대해서 시스템 사고 과정에 기반하여 생태계를 탐구하는 모델을 제시하고자 한다. 생태계 탐구에서 기존의 과학탐구 모델인 아닌 생태

계의 시스템 구조와 시스템 사고 과정을 반영한 탐구 모델을 활용한다면 학습자들이 생태계의 시스템 특성을 보다 체계적으로 탐구할 수 있을 것으로 기대된다. 특히, 이 연구에서는 우리나라 생태계 중에서 생물 다양성이 뛰어나고 생태적 특성이 보존이 잘 되어 있는 제주 꽃자왈 생태계를 중심으로 탐구 모델을 제시하였다. 제주도 꽃자왈은 크고 작은 암괴들이 쪼개져 요철지형을 이루며 쌓여있는 지역으로, 온도와 습도가 비교적 일정하게 유지되어 열대 북방한계식물과 한대남방한계식물이 동시에 관찰되는 보존가치가 높은 지역이다(Jeon et al., 2012). 꽃자왈에는 양치식물과 선대식물, 목본류, 덩굴식물 등의 생산자 구성요소들이 혼합 식생하고 있을 뿐 아니라 포식자인 동물과 분해자인 균류 등 다양한 생태계 구성요소들이 서로 상호작용 하는 시스템적 구조의 대표적 생태계이다. 이러한 풍부한 생물자원에 주목하여 꽃자왈을 활용한 숲 놀이체험, 꽃자왈 교육용 어플리케이션 개발 등과 같은 교육 연구가 이루어져 왔으나(Ko & Hong, 2010; Jang & Kim, 2012; Jeong, 2018), 꽃자왈 생태계가 가지는 시스템 특성에 주목하여 이를 교육적으로 활용하려는 시도는 이루어진 바가 없다.

따라서 이 연구는 시스템 사고 과정에 기반하여 꽃자왈의 생태계를 분석하고, 이를 바탕으로 체계적인 생태계 탐구 모델을 고안하고자 하였다.

II. Methodology

1. Study Procedure

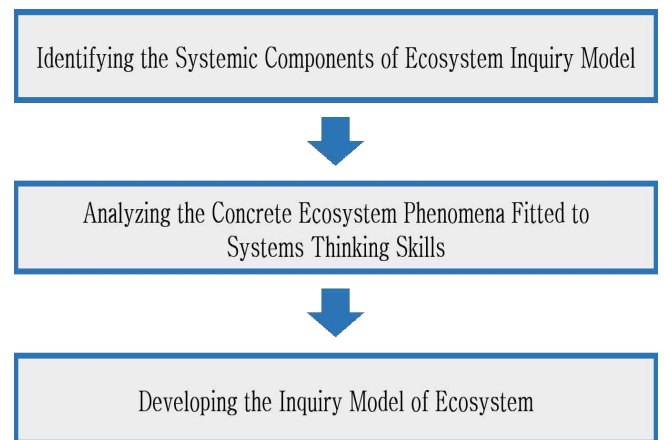
시스템 사고과정에 기반한 생태계 탐구 학습 모델을 개발하기 위해서는 모델 개발에 앞서 시스템 사고과정이 어떻게 생태계 탐구 학습에 적용될 수 있는지에 대한 분석이 필요하다. 따라서 이 연구에서는 먼저 시스템 사고 과정에 대한 문헌 연구를 수행하고, 이를 통해 탐구모델에 필요한 시스템 사고 학습 요소를 추출하였다.

그리고 추출한 시스템 사고 학습 요소를 바탕으로 생태계 탐구 학습 모델을 개발하기 위하여 실제 야외 생태계를 대상으로 탐구를 진행하였다. 본 연

구에서는 풍부한 생물자원으로 생태계의 시스템 특성이 잘 갖추어진 교래리 꽃자왈을 대상으로 생태계 탐구를 수행하였으며, 이를 통해 문헌에서 추출한 학습 요소가 실제 야외 생태계를 탐구하는 과정에 접목시킬 수 있는지 확인하였다.

마지막으로 앞서 수행한 문헌분석과 야외 생태계 탐구를 바탕으로 선정한 학습 요소가 교수-학습 상황에서 어떤 순서로 일어날 수 있는지 분석하였다. 이는 시스템 사고 전문가 3인을 포함한 정기적인 세미나를 통해 이루어졌으며, 이 과정을 통해 시스템 사고과정을 기반으로 한 꽃자왈 야외 생태계 탐구 모델을 최종적으로 구성하였다.

이에 대한 전체적인 연구 과정은 [Figure 1]과 같다.



[Figure 1] Study procedures

2. Identification of the Systemic Components of Ecosystem Inquiry Model

시스템 사고과정을 반영한 탐구 학습 모델을 개발하기 위해서는 먼저 시스템 사고 중 어떤 특성이 탐구 학습 모델을 구성하는 학습요소가 될 수 있는지 이론적인 분석이 필요하다. 이러한 필요성에 의거하여 이 연구는 다음의 기준을 바탕으로 분석할 문헌을 선정하였다. 첫째, 시스템 사고의 특성 혹은 단계를 서술한 논문을 분석하였다. 둘째, 과학 교육 연구 분야에서 시스템 사고에 대한 연구 동향을 알아보기 위하여 2000년부터 2018년 사이에 출판된 국내외 논문을 분석 문헌으로 선정하였다. 이를 통해 본 연구에서는 일반적으로 통용되는 시스템 사

고의 요소 뿐 아니라 과학교육 분야에서 중요하게 다루어지는 시스템 사고의 요소를 모두 추출하여 탐구 학습 모델에 반영하고자 하였다. 위의 선정 기준에 따라 Google scholar, RISS, Springer, Wiley 등과 같은 학술 검색 엔진에서 문헌을 검색하였으며, 검색 키워드는 systems thinking, systems thinking levels, systems thinking process 등의 키워드를 조합하여 문헌을 검색하였다. 이러한 검색을 통하여 8개의 문헌을 선정하였다.

그리고 선정된 문헌에서 진술된 시스템 사고 과정을 바탕으로 탐구 학습 모델을 구성하는 시스템 사고 학습요소를 추출하였다. 이를 위해 가장 먼저 각 문헌에서 다루어지고 있는 시스템 사고 구성 요소들을 비교 분석하였으며, 그 결과 공통적으로 제시되는 시스템 사고의 구성요소를 추출하였다. 공통적인 요소로 포함되지 못하는 각 문헌의 사고 과정은 가장 근접하는 공통적 요소에 통합하여 생태계 탐구 학습 모델을 위한 시스템 사고 학습요소를 최종적으로 도출하였다. 최종적인 생태계 탐구 학습요소의 도출은 시스템 사고 과정을 연구해온 전문가 3인의 비교·검토를 거친 다음, 전문가 3인이 모두 동의하는 합의안을 도출하여 구분하였다.

3. Analysis of Ecosystem Phenomena Fitted to Systems Thinking Skills

이 연구에서는 문헌에서 시스템 사고 관련 문헌을 분석하여 생태계 탐구 학습 모델을 위한 학습요소를 도출한 후, 이 학습요소가 실제 생태계에서 관찰되는 생명현상 탐구에 적용이 가능한지 확인하였다.

문헌에서 추출한 시스템 사고 학습 요소는 실제 야외 생태계 탐구의 특성을 반영하지 않았기 때문에, 생태계 탐구 학습모델의 구성요소로서 적합하지 않을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 문헌 분석을 바탕으로 추출한 시스템 사고 학습 요소 중 어떤 요소가 실제 생태계의 생명현상 탐구와 매칭될 수 있는지 확인하기 위하여 실제 야외 생태계 탐구를 수행하였다. 이를 통해 야외 생태계에서 어떤 생명현상이 탐구의 대상이 될 수 있는지와 이를 대상으로 한 탐구가 어떤 시스템 학습 요소와 관련되어 있는지 분석하였다. 이 과정에서 문헌에서 도출한 시스템

사고 학습 요소들 중에서 야외 생태계의 탐구 과정과 접목시킬 수 있는 학습 요소들을 선정하였다.

야외 생태계 탐구를 수행한 연구지로는 생물 다양성과 생태계의 시스템 특성이 잘 갖추어져 있는 제주도 북동쪽에 위치한 교래 꽃자왈을 선정하였다. 교래 꽃자왈의 경우 수십종에 이르는 희귀 동식물이 발견되고 있으며, 원시림의 형태와 가장 유사한 식생구조를 가지고 있다고 보고되고 있다(Song et al., 2014). 더불어 교래 꽃자왈은 낙엽활엽수림으로서 현재는 예척나무(25.2%), 팽나무(17.1%), 개서어나무(3.4%)등을 포함한 다양한 수목이 자라고 있으며, 특히 다양한 양치식물과 선대식물이 자생하고 있다(Song et al., 2014). 이를 바탕으로 보았을 때 교래 꽃자왈은 생태계의 다양한 생명현상을 포함하고 있을뿐 아니라, 생태계의 시스템 구조를 탐구하고 관찰하는데 매우 적합한 대상이다. 따라서 이 연구에서는 제주도 교래 꽃자왈을 생태계 탐구 대상으로 선정하여 교래 꽃자왈에서 관찰할 수 있는 다양한 생명현상을 조사 및 분석하였다. 야외 생태계 탐구를 위해 2019년 4월부터 8월까지 약 10차례에 걸쳐 생태계 전문가 1인과 동반하여 교래 꽃자왈을 직접 방문하였으며, 탐방로 주변의 식생을 중심으로 조사하였다. 이 과정에서 꽃자왈에서 어떤 생물 종이 관찰되는지 뿐 아니라 종간 포식-피식 관계, 외부 환경에 대한 생물 종의 적응, 생태계 내 물질의 순환 등 시스템 특성과 관련된 다양한 생명현상을 조사하고 관찰 및 기록하였다.

생태계 탐구를 마친 이후에는 꽃자왈에서 관찰 및 조사한 생명현상이 앞서 문헌연구에서 도출한 시스템 사고 학습요소 중 어떤 요소와 매칭될 수 있는지 분석하였다. 이 검증은 생태계 전문가 1인과 과학교육을 전공한 시스템 사고 전문가 2인이 연구팀이 제시한 꽃자왈 생태계 현상이 시스템 사고 학습요소와 타당하게 연결되는지를 검증하였다. 최종적으로, 전문가 3인의 연결성 일치도 검증 결과는 연구팀이 분석하여 고안한 생태계 현상과 시스템 사고 학습요소가 100% 일치함을 나타내었다. 이를 통해 문헌에서 도출한 시스템 사고 관련 학습요소가 실제 야외 생태계의 생명현상 탐구를 위한 모델의 구성요소로서 적합한지 확인하였다.

4. Developing the Inquiry Model of Ecosystem

이 연구에서는 문헌 분석을 통해 도출한 시스템 사고 학습 요소와 각 학습요소와 관련된 곳자왈 생태계 탐구 과정을 기반으로 야외 생태계 탐구 모델을 개발하였다. 모델 개발은 곳자왈 생태계 탐구 과정과 매칭될 수 있는 시스템 사고 학습 요소를 교수-학습 상황에 맞게 순서대로 배치하면서 이루어졌다. 이 과정에서 탐구 모델을 구성하는 각 단계에서 학생들이 어떤 탐구과정을 수행하는지 그리고 어떤 시스템 사고의 축진을 목표로 하는지 설정하였다. 이는 시스템 사고 과정을 연구해온 전문가 3인으로 구성된 정기적인 세미나를 거쳐 수행되었으며 전문가들이 구성한 모델을 비교·검토를 하여 최종적인 모델 개발이 이루어졌다. 최종 모델을 개발하는 과정에서는 실제 탐구 모델이 실제 야외 생명현상을 탐구하는 과정에서 시스템 사고를 자극시킬 수 있도록 고안하기 위하여, 해당 탐구모델이 다양한 수준의 시스템 사고를 개발할 수 있도록 고안되었는지, 야외 생명현상 탐구로부터 다루어질 수 있는 내용으로 구성되어 있는지에 대해 중점을 두었다.

이후 개발한 야외 생태계 탐구 모델에 대해 내용 타당도 검증을 실시하였다. 타당도 검증은 생물교육학으로 박사학위를 취득한 전문가 2인으로부터 내용 타당도를 검증받았다. 설문지는 생태계 현상과 영역별 하위요소의 일치여부 및 탐구모델의 생태계 교육에 대한 활용 가능성 여부 등에 대해서 총 13 문항을 제시한 후 5단계의 리커트 스케일로 반응을 분석하였다. 전문가들의 타당도 검증결과는 0.97의 모델 타당도를 확인하였다.

III. Results and Discussions

1. Literature Review on System Thinking Process

문헌 연구를 분석한 결과 시스템 사고는 낮은 수준의 사고부터 높은 수준의 사고에 이르기까지 다양한 요소로 구성되어 있었다.

시스템 사고(system thinking)는 크게 3가지 요소인 시스템 구성요소, 시스템 구성요소 간의 상호연결성, 시스템의 기능 또는 목적으로 구성되어 있다. 이에 기반하여 시스템 다이내믹스, 공학, 교육 등 다양한 분야에서 시스템 사고의 수준을 구분하고 이를 바탕으로 시스템 사고의 평가틀을 개발하는 많은 시도가 이루어져왔다. 본 연구에서 분석한 문헌과 각 문헌에서 제시된 시스템 사고 수준을 정리하면 다음의 <Table 1>과 같다.

<Table 1> Components of systems thinking processes in literatures

Authors (Year)	Components of systems thinking processes
	· Identify the components of a system and processes/simple relationships/dynamic relationships within the system.
Ben-Zvi Assaraf Orion (2005)	· Organize the systems' components, processes, and their interactions, within a framework of relationships · Recognize the cycles of matter and energy within the system/hidden dimensions of the system · Make generalizations · Think temporally: retrospection and prediction.
Stave & Hopper (2007)	· Recognizing interconnections · Identifying Feedback · Understanding Dynamic Behavior · Differentiating types of flows and variables · Using Conceptual Models · Creating Simulation Models · Testing Policies
Verhoef f (2003)	· Distinguish between the different levels of organization · Interrelate concepts at the cellular level of organization · Link cell biology concepts to concepts at higher levels · Think back and forth between abstract cell models and real cells

Raved & Yarden (2014)	· Identify components in the system/ simple relationships/dynamic relationships · Organize the system components in a framework of interactions
Draper (1993)	· Structural thinking · Dynamic thinking · Generic thinking · Operational thinking · Scientific thinking · Closed-loop thinking · Continuum thinking · Focus on the critical factors · Consider various elements of the system at the micro-level
Lee et al. (2016)	· Organize the relationship between various elements · Recognize the cyclic aspect of the complex system
Lee et al. (2018)	· Identification of representing system and interconnectivity/linearity and cause-effect relations/feed back and dynamics processes · Contextualization and identification of time delay and hidden dimension · Identification of system components and processes/relationships
Kwon et al. (2011)	· Organization of system components and processes in the relation structures · Understanding of dynamic relationships in the systems · Identification of cyclic characteristics in the systems

위의 문헌을 분석한 결과, 본 연구에서는 시스템 사고를 서로 다른 하위 수준으로 나눌 수 있었다(표 2). 선행연구에서는 시스템 사고를 4가지 구성요소부터 8가지 구성요소까지 다양하게 구분하고 있었으나, 각 문헌에서 제시한 시스템 사고의 구성요소를 비교 분석한 결과 공통적으로 4가지 사고로 구분할 수 있었다. 그 중에서 시스템 사고를 이루는 가장 기본적인 수준의 사고는 시스템을 이루는 구성요소를 파악하고 구성요소 간의 상호 연관성 및 단순한 관계를 파악하는 사고로서, 이는 시스템 다

이내믹스 문헌 뿐 아니라 과학교육 문헌에서도 시스템 사고를 이루는 가장 기본적인 요소로 여겨지고 있었다(Assaraf & Orion, 2005; Kwon et al., 2011; Lee, Han & Kim, 2016; Lee, Jeon & Lee, 2018; Raved & Yarden, 2014; Stave & Hopper, 2007). 따라서 본 연구에서는 시스템의 구성요소 및 단순한 관계를 파악하는 사고를 탐구 모델을 위한 가장 기본적인 시스템 사고 학습요소로 선정하고, 이를 ‘시스템 구조와 구성요소의 제시 및 단선적 비인과성 연결’로 명명하였다. 이와 더불어 대부분의 문헌에서 시스템 구성요소 간의 긴밀한 의사소통과 상호작용을 파악하는 사고가 시스템 사고를 이루는 공통적인 요소로 언급되고 있었다. 그러나 이 사고는 구성요소 간의 관계를 이해하는 것에 그칠 뿐 각각의 상호관계를 전체 시스템과 연결시켜 순환적인 과정으로 이해하는 수준까지는 미치지 않는 중간 수준의 시스템 사고로 여겨지고 있었다(Assaraf & Orion, 2005; Draper, 1993; Kwon et al., 2011; Lee, Han & Kim, 2016; Lee, Jeon & Lee, 2018; Raved & Yarden, 2014; Stave & Hopper, 2007). 이에 따라 본 연구에서는 시스템 겉으로 드러나는 인과관계를 파악하고 각각의 관계를 이해하는 사고를 또 하나의 시스템 사고 학습요소로 선정하고, 이를 ‘시스템 구조의 비순환적 인과성 제시’로 명명하였다. 더불어 대부분의 문헌에서는 이 사고를 기반으로 시스템 내 각각의 상호 작용을 역동적인 관계로 이해하고 더 나아가 시스템의 전체 피드백 관계를 파악하는 사고가 시스템 사고를 이루는 핵심 사고로 언급되고 있었다(Assaraf & Orion, 2005; Draper, 1993; Kwon et al., 2011; Lee, Han & Kim, 2016; Lee, Jeon & Lee, 2018; Raved & Yarden, 2014; Stave & Hopper, 2007)). 따라서 탐구 모델에 필요한 하나의 시스템 사고 학습요소로서 시스템의 피드백 관계와 역동적인 관계를 이해하는 사고를 선정하고, 이를 ‘시스템 구조의 순환 관계와 역동적 과정 제시’로 명명하였다. 마지막으로 일부 문헌에서는 시스템의 역동적 관계를 넘어서 시스템 구조에서 보이지 않는 차원을 발견하고 시간 지연에 따른 새로운 시스템 특성을 파악하는 사고를 가장 높은 수준의 시스템 사고로 제시하고 있었다. 따라서 본 연구에서는 시스템의 변화를 파

악하고 그 결과 나타나는 새로운 차원을 발견하는 사고를 탐구 모델을 위한 시스템 사고 학습 요소로 선정하고 이를 ‘시스템 구조의 시간 지연 및 숨겨진 차원 제시’로 명명하였다. 그 결과 본 연구에서는 문헌 분석을 바탕으로 최종적으로 시스템 사고 학습 요소 4가지를 추출하였으며 이는 <Table 2>과 같다.

<Table 2> Systemic components of ecosystem inquiry model

Contents of systemic components	
Level 1	Identification of system structure, system components and linear causal relationships
Level 2	Identification of non-cyclic causal relationships
Level 3	Identification of cyclic relationships and dynamic processes in the system
Level 4	Identification of time delay and hidden dimension in the system

2. Analysis of Ecosystem Inquiry Process by System Thinking Levels

본 연구에서는 제주도 교래 꽃자왈을 연구 대상으로 선정하여 생명현상을 조사하였으며, 앞서 문헌에서 도출한 시스템 사고 학습요소가 꽃자왈 생태계에서 어떤 생명현상을 탐구하는 것과 연결될 수 있는지 분석하였다.

첫째, 가장 기본적인 시스템 사고 학습요소인 ‘시스템 구조와 구성요소의 제시 및 단선적 비인과성 연결’은 꽃자왈 내의 다양한 식물 종을 동정하고 꽃자왈의 발달된 미기후를 탐구하는 과정과 매칭될 수 있었다. 특히 교래 꽃자왈에서는 뽕고사리, 큰톱지네고사리, 홍지네고사리, 개관중, 큰우단일엽, 창고사리 등 국내 다른 지역에서는 보기 어려운 다양한 종류의 고사리가 무리지어 자생하고 있었다. 이외에도 천남성, 갈매기난초, 새우난초, 등수국, 바위수국 등 독특한 특징으로 동정이 비교적 쉬운 식물들이 다수 분포하고 있어 다양한 생물종 동정이 가능했다. 따라서 꽃자왈 내에서 양치, 선대 식물을 동정하는 것은 꽃자왈 생태계가 어떤 식물 종으로 구성

되어 있는지 이해하는 기본적인 수준의 시스템 사고로 연결될 수 있었다. 더불어 꽃자왈에는 좁은 범위 내에서도 함몰되거나 융기된 지형이 많아 미기후가 잘 발달되어 있는데, 함몰된 곳에서는 양치식물과 함께 다양한 초본식물이 그리고 햇빛에 바로 노출된 곳은 상산나무와 같이 건조에 강한 식물들이 자라고 있었다. 이와 같이 꽃자왈 내에서도 온도, 습도, 조도, 지형과 같은 비생물 요인(abiotic factors)의 차이와 이로 인한 식생의 차이를 탐구할 수 있었다. 따라서 본 연구에서 도출한 시스템 사고 학습 요소 중 ‘시스템 구조와 구성요소의 제시 및 단선적 비인과성 연결’은 꽃자왈 내 식물 종을 동정하고 식물 종이 서식하는 주변 환경의 비생물 요인을 대상으로 한 탐구에서 필요한 시스템 사고 학습 요소로 선정될 수 있었다.

둘째, 시스템 사고 학습요소 중 ‘시스템 구조와 구성요소의 제시 및 단선적 비인과성 연결’은 자기방어와 자원획득을 위한 식물들의 다양한 경쟁 관계를 탐구하는 과정과 매칭될 수 있었다. 꽃자왈의 대부분 수목들은 척박한 환경에서 굵은 뿌리, 판근을 발달시키며 물과 토양 자원을 대상으로 경쟁을 하고 있었다. 뿐만 아니라 식물들의 포식 회피 전략과 이러한 전략을 피하려는 포식자의 포식행위 간의 치열한 경쟁관계도 쉽게 관찰할 수 있었다. 이와 같은 포식관계 즉, 먹이사슬에 대한 탐구는 탄소, 빛, 에너지와 같은 무생물 요소가 생태계 내로 어떻게 유입되어 전달되는지에 대한 이해를 통해 생태계의 시스템 특성을 이해하는 기본 틀을 제공한다(Karamanos et al., 2012). 꽃자왈에서 관찰한 두릅나무와 머귀나무의 경우 가시를 발달시켜 초식동물의 접근을 막았고, 상산나무와 누리작나무는 독특한 향을 내뿜어 해충이 쉽게 접근할 수 없었다. 뿐만 아니라 착생식물과 지생식물의 경쟁관계도 확인할 수 있었다. 꽃자왈에서는 적은 토양과 수분으로도 생존할 수 있는 착생식물이 우점하고 있었고, 일부 지생식물은 착생식물과의 경쟁에서 이기지 못하고 부러지거나 말라 죽어가는 모습을 쉽게 볼 수 있었다. 이러한 식물 종들의 경쟁관계를 탐구하는 과정은 포식에 대한 생물들의 자기 방어 반응, 제한된 자원으로 인한 생물들의 경쟁과 같이 원인-결과로 설명되는 비순환적 관계에 대한 학습을 가능하게

하였다. 따라서 본 연구에서 도출한 시스템 사고 학습 요소 중 ‘시스템 구조의 비순환적 인과성 제시’는 꽃자왈 내 생물들의 경쟁관계를 탐구하는 과정에서 필요한 시스템 사고 학습 요소로 선정될 수 있었다.

셋째, 시스템의 역동적 관계를 이해하고 피드백 고리를 파악하는 ‘시스템 구조의 순환 관계와 역동적 과정 제시’는 상리공생과 같은 생물 종 간의 긴밀한 협력을 탐구하는 과정과 매칭될 수 있었다. 꽃자왈에는 상리공생의 대표적인 예인 지의류부터 난초류와 균근균 간의 공생관계까지 다양한 생물 종 간의 협력관계를 관찰할 수 있었다. 꽃자왈에는 금새우란과 갈매기란과 같은 난초류가 쉽게 관찰되었으며, 이러한 난초과 식물의 종자는 난균근균과의 공생관계 없이는 발아가 불가능하다고 여겨질 정도로 난균근균과의 긴밀한 협력관계를 유지하고 있다. 이와 같은 식물과 균근균의 공생관계는 생태계의 시스템 특성인 탄소순환에 핵심적인 역할을 수행하고 있으며, 식물 뿌리와 균근균의 공생 시스템이라고 불려지고 있다(Zhi-lin, Chuan-chao & Lian-qing, 2007; Zhu & Miller, 2003). 그 외에도 산수국의 경우 수정이 된 헛꽃이 뒤집어지면서 곤충과의 긴밀한 의사소통으로 효율적인 수분이 이루어지도록 한다. 이와 같이 꽃자왈에서 관찰되는 생물 종간의 밀접한 협력과정과 상리공생 현상을 탐구하는 과정은 생물들 간의 양분, 수분과 같은 물질이 역동적으로 오고가는 과정에 대한 학습을 가능하게 하였다. 따라서 본 연구에서는 시스템의 순환 관계와 역동적인 흐름을 이해하는 ‘시스템 구조의 순환 관계와 역동적 과정 제시’를 꽃자왈 내의 상리공생과 같은 생물 종간의 밀접한 협력관계를 탐구하는 과정에서 필요한 시스템 사고 학습 요소로 선정하였다.

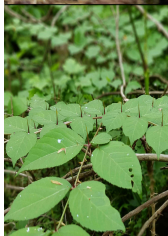
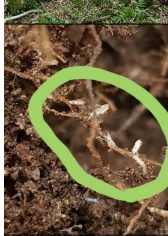
마지막 시스템 사고 학습요소인 ‘시스템 구조의 시간 지연 및 숨겨진 차원 제시’는 물질의 순환과 꽃자왈의 천이 과정을 탐구하는 과정과 매칭될 수 있었다. 꽃자왈 내에는 쓰러진 고목, 낙엽 등에서 여러 종류의 버섯을 쉽게 관찰할 수 있었는데, 버섯과 같은 균류의 경우 광합성을 통해 식물에 저장된 탄소를 분해하여 다시 생태계로 돌려보내는 중요한 역할을 수행하기 때문에 탄소 순환 시스템을 이해

하는데 필수적이다(Shulze, 2000). 더불어 토양이 척박한 꽃자왈에서 이끼가 바위를 부식시켜 부식토를 생성하고, 그 주변에 초본식물이 자라 토양층이 두터워지고 목본식물이 자라는 등 꽃자왈에서 일어나는 천이의 과정도 확인할 수 있었다. 이러한 특징들은 단순히 생태계 내 생물적 요인 뿐 아니라 물, 탄소, 지형 등과 같은 다양한 비생물적 요인과 생물적 요인과의 상호작용, 그리고 이로 인한 시스템 구조로 인해 나타나는 생명현상이다. 이러한 생명현상을 탐구하는 것은 오랜 시간에 걸쳐 일어나는 변화를 이해하고, 물질이 생태계 각 구성요소를 거쳐 결국에는 다시 순환되는 시스템 특성을 파악하는 과정이기 때문에 이를 탐구하는 과정은 시스템 사고 학습요소 중 ‘시스템 구조의 시간 지연 및 숨겨진 차원 제시’와 연결될 수 있었다.

최종적으로 본 연구에서 꽃자왈의 생태계를 탐구하고 관찰한 생명현상을 문헌에서 도출한 시스템 사고 학습요소에 매칭한 결과는 다음의 <Table 3>와 같다.

<Table 3> Application instance of system thinking skill in Gotjawal ecosystem

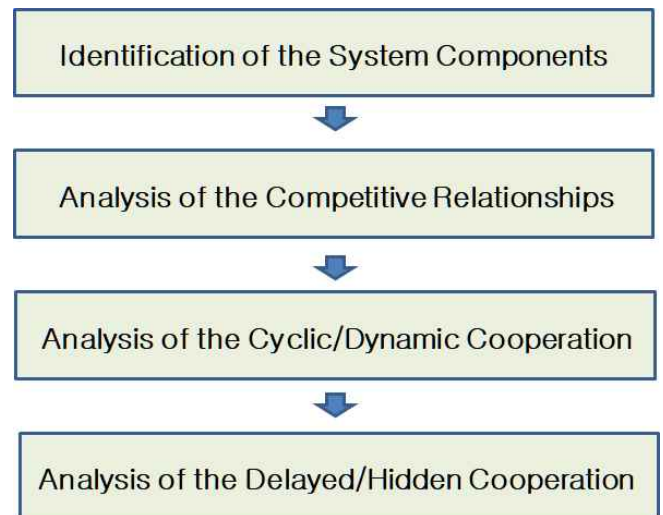
Biological phenomenon	Description of the phenomenon	Systemic Components
	Camouflage of <i>N. sericea</i> : The young leaves disguise themselves as poisonous.	Identification of non-cyclic causal relationships
	A lichen : A mutualistic relationship between a fungus and photosynthetic organism.	Identification of cyclic relationships and dynamic processes in the system
	Hairy holly fern, Cross holly fern, arisaema	Identification of system structure, system components and linear causal relationships

	Mushrooms : Fungi play a significant role in the carbon cycle	Identification of time delay and hidden dimension in the system
	Paulownia thorns : Young Paulownia has thorns to protect themselves from predators	Identification of non-cyclic causal relationships
	The leaves of East Asian orixia emit an unpleasant odor to protect themselves from the pests	Identification of non-cyclic causal relationships
	Cooperation between moss and trees : Moss retain water and the trees provide shade, the moss' habitat.	Identification of time delay and hidden dimension in the system
	Mutualism between ectotrophic mycorrhizae and trees	Identification of cyclic relationships and dynamic processes in the system
	Cooperation between Mountain hydrangea and pollinators	Identification of cyclic relationships and dynamic processes in the system

3. Development of A Model of Ecosystem Inquiry Based on the System Thinking

앞서 수행한 시스템 사고 문헌분석과 야외 생태현상 탐구과정 분석을 기반으로 본 연구에서는 시스템 사고과정을 반영한 탐구 모델을 개발하였다. 문헌

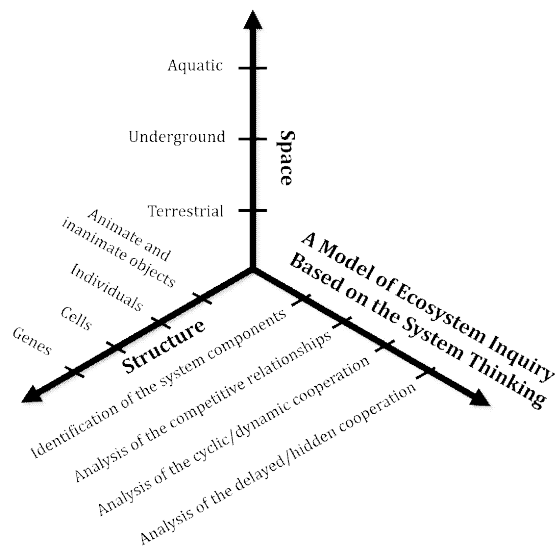
분석 결과 시스템 사고 학습 요소는 총 4가지로 추출될 수 있었으며, 본 연구에서는 이에 관련된 야외 생명현상 탐구과정을 확인할 수 있었다. 이에 따라 크게 4단계로 이루어진 생태계 탐구 모델을 개발할 수 있었으며 이는 다음의 [Figure 2] 와 같다.



[Figure 2] An inquiry model of ecosystem based on the system thinking

개발된 생태계 탐구 모델의 첫 단계는 ‘요소 동정’으로 가장 기본적인 수준의 시스템 사고 학습요소인 ‘시스템 구조와 구성요소의 제시 및 단선적 비인과성 연결’을 반영하고자 하였다. 이 단계에서 학생들은 야외 생태계의 다양한 선대 및 양치식물과 초본식물을 동정하고 이들이 서식하는 환경을 조사하면서 해당 시스템을 이루는 구성요소를 동정하는 과정을 거친다. 그리고 이어지는 두 번째 단계는 ‘경쟁 분석’으로 이는 시스템 사고 학습요소 중 ‘시스템 구조의 비순환적 인과성 제시’를 반영하고자 하였다. 이 단계에서 학생들은 개별적인 종을 학습하는 것이 아닌 생물 종 간의 관계를 파악하게 된다. 예를 들어, 독특한 향기나 가시, 독과 같은 다양한 포식 회피 전략, 햇빛, 물 등의 자원을 두고 둘러싼 경쟁 관계를 탐색하면서, 시스템 구성 요소 간의 비순환적 인과 관계를 중점적으로 분석하는 과정을 거치게 된다. 세 번째 단계는 ‘순환적·역동적 협력관계 분석’으로 세 번째 시스템 사고 학습 요소인 ‘시스템 구조의 순환 관계와 역동적 과정 제시’를 반영하고자 하

었다. 이 단계에서 학생들은 공생으로 인해 나타나는 생물 종간의 에너지, 무기물 교환 그리고 긴밀한 협력관계를 분석한다. 예를 들어, 이 단계는 균류와 조류의 자원 공유 및 협력 관계에 대한 이해를 바탕으로 지의류라는 새로운 종을 분석하면서 생물 종간의 협력 관계로 인해 드러나는 시스템의 역동적 특성을 파악하는 단계이다. 마지막 단계인 ‘지연된·숨겨진 협력 분석’은 가장 높은 수준의 시스템 사고 학습 요소인 ‘시스템 구조의 시간 지연 및 숨겨진 차원 제시’를 반영하고자 하였다. 이는 생물 요소 뿐 아니라 자원이나 에너지를 비롯한 무생물 요소를 포함하여 시스템 내의 생물 및 비생물 요소 간의 상호관계와 물질 순환 및 에너지 흐름을 이해하고, 이를 바탕으로 시스템의 숨겨진 또 다른 차원을 발견하거나 시간 지연으로 인해 나타나는 새로운 특성을 분석하는 단계이다.



[Figure 3] A three dimensional model of ecosystem inquiry based on the system thinking

더불어 야외 생태계 탐구를 크게 3가지 축을 중심으로 나누어 분류할 수 있었다 [Figure 3]. 야외 생명현상에서 관찰할 수 있는 시스템 특징들은 육안으로 식별 가능한 개체 수준에서만 나타나는 것이 아니라 균근균과 식물 뿌리의 공생과 같이 세포나 유전자 수준에서도 관찰할 수 있다. 따라서, 궁극적으로 야외 생태계의 시스템 특징을 이해하고 빠짐없이 분석하기 위해서는 쉽게 관찰 가능한 개체 수준 뿐

아니라 세포나 유전자 수준에서의 생명현상 관찰도 반드시 포함되어야 할 것이다. 더불어 거대한 시스템으로 구성되어 있는 전체 생태계를 이해하기 위해서는 야외 생태계 중에서도 육상 생태계 뿐만 아니라 이와 관련된 근처 수중 생태계와 지하 생태계에서의 생명현상을 조사하는 것이 필수적이다. 예를 들어, 흙속에 존재하는 미생물과 균근균을 조사하고, 주변 하천이나 호수를 비롯한 수중 생태계 탐사, 그리고 숲 내에서도 낙엽층부터 수관층(canopy)까지의 서로 다른 층을 조사한다면 보다 거대한 시스템에 대한 이해가 이루어질 수 있다. 이러한 점을 반영했을 때, 본 연구에서 제시한 야외 생태계 탐구 모델을 구조와 공간 측면에서 각각 한 차원씩 확장하여 적용한다면 거대한 생태계 시스템을 학습하는데 효과적인 탐구 모델로서 활용될 수 있을 것이다.

IV. Conclusions and Educational Implications

이 연구는 제주 꽃자왈의 생태계를 이용하여 시스템 사고를 기반한 생태계 탐구 모델을 개발하였다. 이 연구결과로부터 얻어진 결론 및 교육적 함의는 다음과 같다.

첫째, 문헌 분석 결과 생태계 탐구 모델을 위한 시스템 사고 학습 요소는 크게 4가지로 구분할 수 있었다. 가장 기본적인 수준의 시스템 사고 학습 요소는 ‘시스템 구조와 구성요소의 제시 및 단선적 비인과성 연결’로, 시스템 구성요소와 단선적 비인과성 관계를 파악하는 사고이다. 더불어 두 번째 시스템 사고 학습 요소인 ‘시스템 구조의 비순환적 인과성 제시’는 구성요소 간의 인과 관계는 파악할 수 있으나 이를 연결하여 순환 시스템으로 이해하는 수준에는 미치지 못하는 사고이다. 그리고 또 다른 학습요소인 ‘시스템 구조의 순환 관계와 역동적 과정 제시’는 시스템의 피드백 관계와 역동적 관계를 이해하는 사고이다. 마지막으로 ‘시스템 구조의 시간 지연 및 숨겨진 차원 제시’는 시간의 흐름에 따라 시스템의 변화를 파악하고 이로 인해 드러나는 새로운 차원을 발견하는 사고이다.

둘째, 문헌에서 도출한 각 시스템 사고 학습 요소들을 실제 교재 콧자왈의 생명현상을 대상으로 탐구 과정과 매칭시킬 수 있었다. 콧자왈의 다양한 생물종과 미기후의 발달은 생태계의 생물요소와 비생물 요소를 대표적으로 보여주고 있었으며, 이를 탐구하는 과정은 시스템의 구성 요소를 파악하고 단순한 관계를 이해하는 사고와 연결지을 수 있었다. 더불어 시스템의 비순환적인 인과관계를 파악하는 사고는 토양이나 햇빛, 양분과 같이 자원을 두고 끊임없이 경쟁하는 관계를 탐구하는 과정과 매칭될 수 있었다. 그리고 시스템의 역동적 관계와 순환 시스템을 파악하는 사고는 상리공생과 같은 생물 간의 긴밀한 협력 관계를 대상으로 한 탐구과정과 매칭될 수 있었다. 마지막으로 가장 높은 수준의 사고인 시스템의 시간지연의 효과와 숨겨진 차원을 파악하는 사고는 생태계 물질 순환과 생태 천이에 대한 탐구과정과 연결 지을 수 있었다.

셋째, 시스템 사고 기반 생태계 탐구 모델은 크게 4단계로 구성할 수 있었다. 탐구 모델의 각 단계는 시스템 사고의 4가지 수준을 각각 반영하고자 하였으며, '요소 동정'-'경쟁 분석'-'순환적·역동적 협력 관계 분석'-'지연된·숨겨진 협력 분석'로 구성되었다. 또한 야외 생태계 탐구 모델을 구조 차원과 공간 차원으로 각각 확대하여 3차원의 모델로 이를 확대 적용할 수 있었다.

더 나아가 본 연구의 결과를 바탕으로 학생들의 야외 생태계 탐구를 위한 교육적 활용에 대한 시사점은 다음과 같다.

첫째, 본 연구 결과는 야외 생태계 탐구에 대한 구체적인 교수-학습 전략을 구성하는데 기본 틀을 제공할 수 있다. 특히 기존의 야외 생태계를 활용한 탐구 모델은 주로 생물종 동정 및 관찰을 중심으로 이루어졌으며, 생물 종간의 관계나 전체 생태계의 시스템적 이해를 증진시키는데 한계점을 가지고 있었다. 그러나 본 연구에서 개발한 야외 생태계 탐구 모델은 각각의 종 동정뿐 아니라 종간의 관계, 물질 순환과 같은 시스템의 역동적 특징을 파악하는데 주안을 두고 있기 때문에 학생들의 시스템적 사고를 발달시키기 위한 구체적인 전략으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

둘째, 본 연구 결과는 야외 생태계가 학생들의 시

스템 사고 발달을 위한 교육 현장이 될 수 있음을 보여주었다. 지금까지 시스템 사고 발달을 위한 교수-학습은 주로 다이어그램이나 마인드맵과 같이 여러 개념을 도식화하여 표현해보는 방식으로 제한되어 있었다. 그러나 본 연구에서는 교실이 아닌 실제 야외 생태계가 학생들의 시스템 사고를 위한 교육 현장으로서 가치를 지니고 있음을 확인하였다. 본 연구에서 개발한 모델이 교재 콧자왈 뿐 아니라 다양한 생태계에서 활용된다면, 학생들은 실제 생명현상을 직접 관찰하고 경험하면서 생태계의 시스템적 이해를 보다 효과적으로 발달시켜 나갈 수 있을 것이다.

셋째, 본 연구 결과는 생태계에 대한 시스템 사고 수준을 진단하고 평가하기 위한 도구 개발의 밑거름이 될 수 있을 것이다. 기존의 시스템 사고 측정 및 평가는 생명과학 전체 개념을 대상으로 포괄적인 수준으로 수행되어 왔으며, 구체적으로 생태계에 대한 시스템 사고를 평가하기 위한 연구는 아직 미비한 수준이다. 본 연구에서 제안한 시스템 사고의 4단계와 3차원의 생태계 탐구 모델은 생태계에 대한 시스템 사고 수준을 평가하는 기준으로 삼을 수 있을 것이다.

References

- Assaraf, O. B. Z., & Orion, N. (2005). Development of system thinking skills in the context of earth system education. *Journal of Research in Science Teaching: The Official Journal of the National Association for Research in Science Teaching*, 42(5), 518-560.
- Bae, J. H., & Jung, H. T. (2007). The Effect of the Biology Outdoor Inquiry Instruction on the Scientific Process Skills and Scientific Attitudes of Elementary School Students. *Biology education*, 35(2), 201-211.
- Boersma, K., Waarlo, A. J., & Klaassen, K. (2011). The feasibility of systems thinking in biology education. *Journal of Biological Education*, 45(4), 190-197.
- Draper, F. (1993). A proposed sequence for developing

- systems thinking in a grades 4—12 curriculum. *System Dynamics Review*, 9(2), 207-214.
- Ideker, T., Galitski, T., & Hood, L. (2001). A new approach to decoding life: systems biology. *Annual review of genomics and human genetics*, 2(1), 343-372.
- Jang, J. H., Kim, C. W. (2012). An Application of 'The birds of Gotjawal' for the Field Trip based on Tablet PCs. *KIISE Transactions on Computing Practices*, 18(11), 804-807.
- Jeon, Y. M., Ahn, U. S., Ryu, C. G., Kang, S. S., & Song, S. T. (2012). A review of geological characteristics of Gotjawal terrain in Jeju Island: Preliminary Study. *Journal of the Geological Society of Korea*. 48(5), 425-434.
- Jeong, K. S. (2018). The Discovery of Learning Resources around Seonheul-Gotjawal Dongbaek-Dongsan Trail and the Exploration of the Direction of their Utilization for School Education. *Tamla Culture*, 58, 249-285.
- Karamanos, K., Gkiolmas, A., Chalkidis, A., Skorodoulis, C., Papaconstantinou, M., & Stavrou, D. (2012). Ecosystem food-webs as dynamic systems: Educating undergraduate teachers in conceptualizing aspects of food webs' systemic nature and compartment. *Advances in Systems Science and Applications*, 12(4), 353-372.
- Kim, J. G., & Lee, B. E. (2008). Relationship between Biology Contents in Middle School and Ecological Education Programs in Yeoeudo-saekgang Eco-park. *School Science Journal*, 2(1), 59-66.
- Kitano, H. (2002). Systems biology: a brief overview. *Science*, 295(5560), 1662-1664.
- Ko, S. W., Hong, S. H. (2010). Effects of the Nature Game Experience Learning on Schoolchild's Environmental Sensitivity Change in Jeju Gotjawal Forest. *The Environmental Education*, 23(3), 97-114
- Korfiatis, K. J., & Tunnicliffe, S. D. (2012). The living world in the curriculum: ecology, an essential part of biology learning. *Journal of biological education*, 46(3), 125-127.
- Kown, Y. J., Kim, W. J., Lee, H. Y., Byun, J. H., & Lee, I. S. (2011). Analysis of Biology Teachers' Systems Thinking about Ecosystem. *Biology education*, 39(4), 529-543.
- Lee, H. Y., Jeon, J. D., & Lee, H. D. (2008). Development of Framework and Rubric for Measuring Students' Level of Systems Thinking. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 38(3), 355-367.
- Lee, K. H., Han, M. H., & 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.
- Lock, R., & Tilling, S. (2002). Ecology fieldwork in 16 to 19 biology. *School Science Review*. 84, 79-87.
- NGSS Lead States. (2013). Next generation science standards: For states, by states. Washington, DC: The National Academy Press.
- Ossimitz, G. (2000). Teaching system dynamics and systems thinking in Austria and Germany. In System Dynamics Conference in Bergen, Norway.
- Palsson, B. (2000). The challenges of in silico biology. *Nature biotechnology*, 18(11), 1147.
- Park, H. W. (2008). A Study on Jangbongdo Islands as Biology Outdoor Inquiry Work. *Biology education*, 36(1), 63-75.
- Potash, J., & J. Heinbokel. (1997). Assessing progress in systems thinking and dynamic modeling: some thoughts for educators. Creative Learning Exchange.
- Prokop, P., Tuncer, G., & Kvasničák, R. (2007). Short-term effects of field programme on students' knowledge and attitude toward biology: a Slovak experience. *Journal of Science Education and Technology*, 16(3), 247-255.
- Randler, C. (2008). Teaching Species Identification—A

- Prerequisite for Learning Biodiversity and Understanding Ecology. *Eurasia Journal of Mathematics, Science & Technology Education*, 4(3), 223-231.
- Raved, L., & Yarden, A. (2014). Developing seventh grade students' systems thinking skills in the context of the human circulatory system. *Frontiers in public health*, 2, 260.
- Richmond, B. (1997). The "thinking" in systems thinking: how can we make it easier to master. *The Systems Thinker*, 8(2), 1-5.
- Rozenszayn, R., & Assaraf, O. B. Z. (2011). When collaborative learning meets nature: Collaborative learning as a meaningful learning tool in the ecology inquiry based project. *Research in Science Education*, 41(1), 123-146.
- Sauvé, L. (2005). Currents in Environmental Education: Mapping a Complex and Evolving Pedagogical Field. *Canadian Journal of Environmental Education*, 10(1), 11-37.
- Schulze, E. D. (2000). The carbon and nitrogen cycle of forest ecosystems. In Carbon and nitrogen cycling in European forest ecosystems (pp. 3-13). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Song, J. H., Han, B. H., Lee, K. J., Kwark, J. I., & Kim, H. S. (2014). A Study on Characteristics of Vegetation Structure of the Deciduous Broad-leaved Forest on Gyorae Gotjawal in Jeju Island, Korea. *Proceedings of the Korean Society of Environment and Ecology Conference*, 2014(1), 29-30.
- Stave, K., & Hopper, M. (2007). What constitutes systems thinking? A proposed taxonomy. In 25th International Conference of the System Dynamics Society, Boston, MA.
- Sweeney, L. B., & Sterman, J. D. (2000). Bathtub dynamics: initial results of a systems thinking inventory. *System Dynamics Review: The Journal of the System Dynamics Society*, 16(4), 249-286.
- Tansley, A. G. (1935). The use and abuse of vegetational concepts and terms. *Ecology*, 16(3), 284-307.
- Tilling, S. (2004). Fieldwork in UK secondary schools: influences and provision. *Journal of Biological Education*, 38, 54-58.
- Turner, J. C., & Fulmer, S. M. (2013). Observing interpersonal regulation of engagement during instruction in middle school classrooms. In Interpersonal regulation of learning and motivation (pp. 161-183). Routledge.
- Verhoeff, R. P. (2003). Towards systems thinking in cell biology education (Doctoral dissertation).
- Westra, R. H. (2008). Learning and teaching ecosystem behaviour in secondary education: Systems thinking and modelling in authentic practices. Utrecht University.
- Zhi-lin, Y., Chuan-chao, D., & Lian-qing, C. (2007). Regulation and accumulation of secondary metabolites in plant-fungus symbiotic system. *African Journal of Biotechnology*, 6(11).
- Zhu, Y. G., & Miller, R. M. (2003). Carbon cycling by arbuscular mycorrhizal fungi in soil-plant systems. *Trends in plant science*, 8(9), 407-409.
- Zoldosova, K., & Prokop, P. (2006). Education in the field influences children's ideas and interest toward science. *Journal of Science Education and Technology*, 15(3-4), 304-313.
- [저자의 소속과 직위]
이영지 : 애월고등학교, 교사, 제1저자
권용주 : 한국교원대학교, 교수, 교신저자