

생물학자의 탐구에 기반한 메커니즘 추론 모델 개발*

정선희, 양일호*

서울양남초등학교, 한국교원대학교

Development of a Mechanistic Reasoning Model Based on Biologist's Inquiries

Sunhee Jeong, Ilho Yang*

Yangnam Elementary School, Korea National University of Education

ARTICLE INFO

Article history:

Received 8 January 2018

Received in revised form

22 January 2018

4 June 2018

Accepted 3 September 2018

Keywords:

mechanistic reasoning, reasoning model, biologist's inquiry

ABSTRACT

The purpose of this study is to analyze mechanistic reasoning in Fabre's inquires and to develop mechanistic reasoning model. To analyze the order of the process elements in mechanistic reasoning, 30 chapters were selected in book. Inquiries were analyzed through a framework which is based on Russ *et al.* (2008). The nine process elements of mechanistic reasoning that was presented in Fabre's inquires were as follows: Describing the Target Phenomenon, Identifying prior Knowledge, Identifying Properties of Objects, Identifying Setup Conditions, Identifying Activities, Conjecturing Entities, Identifying Properties of Entities, Identifying Entities, and Organization of Entities. The order of process elements of mechanistic reasoning was affected by inquiry's subject, types of question, prior knowledge and situation. Three mechanistic reasoning models based on the process elements of mechanistic reasoning were developed: Mechanistic reasoning model for Identifying Entities(MIE), Mechanistic reasoning model for Identifying Activities(MIA), and Mechanistic reasoning model for Identifying Properties of entities (MIP).

Science teacher can help students to use the questions of not only "why" but also "How", "If", "What", when students identify entities or generate hypotheses. Also science teacher should be required to understand mechanistic reasoning to give students opportunities to generate diverse hypotheses. If students can't conjecture entities easily, MIA and MIP would be helpful for students.

1. 서론

과학적 탐구의 목적은 자연현상의 이면에 존재하고 있는 인과 메커니즘(causal mechanism)을 이해하여 밝히는 것이며(Russ *et al.*, 2008), 과학자들은 현상에 대한 의문을 탐구 활동을 통해 해결하고자 한다(Braben, 1994). 이 때 현상에 대한 과학적 설명은 대부분 인과적 추론(causal reasoning) (Gopnik *et al.*, 2001)이나 귀추적 추론(abductive reasoning)(Kown *et al.*, 2000; Yang *et al.*, 2006)을 사용하지만 현상을 하나의 원인적 설명자(causal explicans)로 설명하기 어려운 경우가 많고, 자연현상은 여러 가지 인과관계들이 복잡하게 얽혀 있기 때문에(Glymour, 2003) 현상을 인과적 추론이나 귀추적 추론만으로 설명하기에는 어려움이 따른다. 특히 인과적 추론이나 귀추적 추론은 현상의 복잡성과 역동성을 다루는 특정 과학 분야에서 현상을 구성하는 메커니즘 개념의 본성을 충분히 설명할 수 없다(Van Mil *et al.*, 2013)는 한계를 지닌다.

인과성에 관한 연구에서 인과적 추론이나 귀추적 추론의 한계를 보완해 줄 수 있는 것이 메커니즘적 접근이다(Ahn & Kalish, 2000). 생물학자들은 현상의 설명을 위한 현상의 메커니즘을 발견하려고 노력하며(Darden, 2006), 현상을 구성하는 시스템적 요소를 설명하기 위한 시스템에 대한 메커니즘적 모델을 구성하는 시도에서부터 시작

된다(Boogerd *et al.*, 2007). '메커니즘'은 기능, 상호작용, 활동 등의 관점에 따라 다양하게 정의되고 있다. '기능'의 관점에서는 메커니즘을 '부분적 구성 요소들의 작동과 그 조직으로 인해 기능을 수행하게 되는 구조(Bechtel & Abrahamsen, 2005)'라고 정의하고 있으며, '상호작용' 관점에서는 '직접적인 부분들의 상호작용에 의해 그 행동이 유발되는 복잡한 체계(Glennan, 2002)'라고 정의한다. 실체의 활동을 강조하는 '활동'의 관점에서는 메커니즘을 '초기 조건에서 종결 조건까지 규칙적인 변화를 유발하도록 조직된 실체들과 그 활동(Machamer *et al.*, 2000)'으로 정의한다. 이와 같은 여러 메커니즘 정의에서 중요한 요소는 부분을 담당하는 실체들(entities), 실체들의 상호작용, 그로 인해 나타나는 규칙적인 활동, 복잡성이다(Darden, 2002).

메커니즘 추론(mechanistic reasoning)은 관찰된 현상에 대한 복잡한 인과 메커니즘을 밝히기 위한 추론으로(Russ *et al.*, 2008), 실체와 활동을 확인해나가는 과정이다. 이때 실체는 메커니즘의 규칙적 변화를 이끄는 인과적인 각각의 부분들을 의미하며, 활동은 실체들 사이에서 일어나는 규칙적인 변화와 다양한 상호작용을 의미한다. 인과적 추론은 결과를 야기한 원인이 무엇인지를 밝혀내는데 초점을 두며, 귀추적 추론은 현상을 설명할 수 있는 가설을 생성하는 과정에 대한 추론이다. 반면에 메커니즘 추론은 원인과 결과를 연결시켜주는 복잡

* 교신저자 : 양일호 (yih118@knue.ac.kr)

** 본 논문은 정선희의 2012년도 박사 학위 논문에서 발췌 정리하였음.

http://dx.doi.org/10.14697/jkase.2018.38.5.599

한 인과 과정을 밝히는 것을 강조한다(Bolger *et al.*, 2012). 메커니즘 추론은 인과적이고(Koslowski, 1996; Schauble, 1996), 경험에 기반하고 있으며(Keil *et al.*, 1999), 직관적이고(Van Mil *et al.*, 2016), 역동적이다(Bogen, 2008). 특히 메커니즘 추론은 구조를 설명하는데 용이하기 때문에(Chinn & Malhotra, 2002), 인과 메커니즘을 밝히고 물질세계를 이해하기에 적합하다(Russ *et al.*, 2008). 이러한 특성으로 인해 메커니즘 추론은 분자 생물학 교육(Van Mil *et al.*, 2016)이나 생태학 교육(Dickes *et al.*, 2016)에 이용되기도 하며, 특히 생물학에서 메커니즘 추론의 중요성이 강조되고 있다(Machamer *et al.*, 2000).

Russ *et al.*(2008)은 메커니즘 추론을 통해 학생들의 담화를 분석했지만, 이때 사용된 메커니즘 추론 분석틀은 학생들의 수업 담화를 바탕으로 만들어졌기 때문에 과학자들이 수행하는 탐구의 복잡성을 보여주지 못했다. 과학자의 탐구 흐름을 제시한 탐구모형도 있지만(Reiff *et al.*, 2002; Yang *et al.*, 2007), 과학자의 탐구과정을 너무 단순한 형태로 제시하거나 행동 요소 중심으로 설명하고 있어 탐구 과정에서 나타나는 추론을 심층적으로 이해하는데 어려움이 있다. Lee *et al.*(2009)이 탐구에서 나타나는 귀추적 추론을 통해 제안한 추론 모델 역시 원인적 설명자가 나타난 단계는 확인할 수 있지만, 귀추적 추론의 범주를 어디까지 볼 것인가에 대한 문제가 존재하며(Magnani, 2004;), 원인적 설명자가 될 수 있는 여러 실체들의 관계를 파악하기 힘들다는 한계를 지닌다. Cho(2009)가 제안한 추론 모델은 주제 선정부터 결과 발표까지의 6단계를 거치는 동안 추론이 천문학자들의 연구 과정과 어떻게 연관되었는지를 보여주었지만, 귀납적 추론, 귀추적 추론, 연역적 추론의 관점에서만 분석하였다. 따라서 과학자가 여러 단계의 실험을 거쳐 메커니즘을 밝혀가는 탐구를 진행하는 과정에서 이루어지는 메커니즘 추론을 기반으로 한 추론 모델이 요구된다.

이 연구에서는 여러 단계의 관찰과 실험을 거쳐 원인에 대한 메커니즘을 규명한 파브르의 추론 과정을 분석하여 이를 바탕으로 과학자의 메커니즘 추론 모델을 개발하는데 목적이 있다. 구체적인 연구 내용은 첫째, 과학자의 탐구에서 메커니즘을 담당하는 실체들이나 활동이 어떤 추론 과정을 통해 확인되는가 분석하는 것이고 둘째, 확인된 메커니즘 추론을 범주화하여 유형별과 분류하고 메커니즘 추론 모델을 개발하는 것이다. 이를 통해 메커니즘 추론의 하위 과정을 알 수 있고, 과학자의 탐구에 기반한 메커니즘 추론 과정을 보다 정확하게 이해할 수 있을 것으로 생각된다.

Table 1. Subject of analysis for mechanistic reasoning

순	제목	코드	순	제목	코드	순	제목	코드
1	소똥구리 사육	1.2	2	암살의 명수들	1.5	3	노랑조롱박벌	1.6
4	파리 사냥꾼	1.17	5	귀소능력	1.19	6	집흙가위벌에 대한 새로운 연구	2.7
7	나무말기의 주민들	2.13	8	돌담가뢰	2.14	9	돌담가뢰의 1령 애벌레	2.15
10	힘난한 먹을 거리	3.2	11	성별 섭식량 차이	3.16	12	가위벌	4.7
13	하늘소	4.17	14	금풍뎡이-동지짓기	5.11	15	사마귀-사냥	5.18
16	사마귀-사랑	5.19	17	곤봉송장벌레	6.8	18	소나무행렬모층나방	6.20
19	소나무행렬모층나방-피부발진	6.23	20	곤충의 독성물질	6.25	21	의사행동	7.2
22	가면침노린재	8.6	23	쉬파리	8.15	24	왕거미-거미줄치기	9.6
25	왕거미-끈끈이그물	9.8	26	왕거미-전신줄	9.9	27	왕거미-짜짓기, 그리고 사냥	9.11
28	왕거미-소유권	9.12	29	지중해소똥풍뎡이-아가방	10.7	30	금록색딱정벌레-급식	10.14

II. 연구방법

1. 연구 대상

이 연구에서는 곤충 행동학자 파브르가 쓴 『파브르 곤충기 1~10』(Fabre, 1989)를 연구 대상으로 선정하였다. 이는 역사적으로 유명한 과학자의 연구 사례와 연구 결과물을 분석하는 In *historico* 접근 방법(Nersessian, 1992; Thagard, 1999)에 의한 것으로서, 공간적인 제약이 없고, 과학자의 실제 탐구 과정에서 나타난 사고의 변화를 알아볼 수 있다는 장점이 있다. 파브르 곤충기는 곤충을 관찰하여 의문을 해결해나가는 파브르의 사고 흐름이 자세하고 명확하게 서술되어 있으며, 여러 곤충들의 행동이나 생태를 비교하면서 차이가 나타난 원인을 밝히기 위해 실험하는 과정 등 메커니즘을 밝히기 위한 탐구 과정이 자세히 드러나 있다. 따라서 파브르의 곤충기를 연구대상으로 선정하였다.

2. 연구 절차

먼저 파브르 곤충기를 정독한 후, 추론의 과정 요소가 나타나는 30개의 챕터를 분석 대상으로 선정하고 프로토콜을 생성하였다. 생성된 프로토콜은 Russ *et al.*(2008)의 분석틀을 수정하여 개발된 분석틀로 분석되었다. 분석틀을 개발하는 과정에서는 내용 타당도 검증은 받았으며, 분석 과정에서는 코딩의 일치도를 확인하여 분석에 대한 신뢰도를 확보하였다. 프로토콜 분석 결과를 바탕으로 과학자의 메커니즘 추론 과정에서 나타나는 경향성을 파악하고, 유형화 하여 메커니즘 추론 모델을 개발하였다. 개발된 메커니즘 추론 모델은 3명의 생물학자 연구과정을 분석하여 그 타당성을 확인하였다.

3. 자료수집

『파브르 곤충기 1~10』에 제시된 총 223개의 챕터 가운데 30개 챕터를 메커니즘 추론 분석을 위한 분석 대상으로 선정하였다. 223개의 챕터 중 탐구와 관련 없는 일상적인 행동, 가정환경, 어린 시절에 관한 에피소드가 주로 기술된 장, 여러 곤충들의 관찰을 통해 획득된 사실들을 종합한 장을 배제하고 순수하게 한 가지 곤충에 대한 행동

이나 생태에 관한 의문을 바탕으로 탐구한 장은 191개의 챗터였는데, 이 중에서도 새로운 추론의 과정 요소가 나오는 30개의 챗터를 추출하였다. 선정된 분석 대상은 Table 1과 같다.

『파브르 곤충기 1~10』 가운데 분석 대상으로 선정된 30개의 챗터들 중에서도 일상적인 행동에 관한 부분, 사색적인 표현이나 비유적 표현으로 부연 설명한 부분을 제외하고, 도치법으로 표현된 부분은 추론 순서에 맞게 앞뒤 순서를 바꾸어 최종 프로토콜을 생성하였다.

4. 자료 분석

파브르의 탐구 과정에서 나타난 메커니즘 추론을 분석하기 위해 분석 대상으로 생성된 30개 챗터의 최종 프로토콜을 선행 연구된 Russ *et al.*(2008)의 메커니즘 추론 분석틀로 분석하였으나, 분석하기 애매하거나 분석되지 않는 추론의 과정요소가 있었다. 따라서 Russ *et al.*(2008)의 분석틀로 코딩되지 않는 요소들은 귀납적으로 분류하여 새로운 하위 추론 요소를 생성하였으며, 코딩하기 애매한 추론 과정 요소는 요소를 세분화하거나 용어 또는 조작적 정의를 수정하였다. 분석틀에 있지만 실제로 코딩되지 않는 요소는 분석틀에서 삭제하였다. 이 과정에서 과학교육 전문가 4인에게 2차에 걸쳐 내용에 관한 안면타당도를 검증받았다. 최종 완성된 분석틀은 Table 2과 같고, 최종 개발된 분석틀에서 메커니즘 추론의 하위 추론 요소 구분의 타당성에 관한 CVI(Content Validity Index)는 0.93이었다.

『파브르 곤충기 1~10』에서 추출한 30개의 챗터에서 생성된 프로토콜을 Table 1으로 [부록1]과 같은 방식으로 분석하였다. 코딩의 신

뢰도를 높이고자 메커니즘 추론 전문가 2인에게 프로토콜 중 한 개 챗터의 프로토콜을 무작위로 제시하고 코딩하도록 한 뒤, 분석자간 일치도를 Kappa법을 사용하여 계산하였다. 한 개 챗터의 프로토콜에서 코딩된 항목은 총 79개였는데, 연구자를 포함한 분석자 3인의 일치도는 각각 $K=0.81, 0.85$ 로 높은 신뢰도를 나타내었다.

프로토콜 코딩을 마친 후 코딩된 메커니즘 추론의 하위 과정요소가 나타나는 순서의 경향성을 확인하기 위해 순서도를 작성하였다. 순서도에서는 목표현상기술, 시작조건확인, 활동확인, 실체속성확인, 실체추정, 실체확인, 실체조직화의 순서로 논리적인 전개에 따라 기본적인 흐름에 관한 세로축을 잡고, 선지식확인과 대상속성확인은 어느 단계에서나 나타날 수 있는 추론 과정 요소였기 때문에 가로축으로 빼서 표현해 주었다. 메커니즘 추론 과정에서 나타난 각각의 요소들은 시간 순서에 따라 화살표(→)로 표현하고, 2회 이상 반복된 것을 굵은 화살표(➔)로 표현하였다. 또 처음과 끝에 나타난 추론 요소에 음영처리를 하여 어떤 추론 요소에서 출발하여 어떤 추론 요소로 끝났는지를 확인할 수 있도록 하였고, 몇 번째 나타난 것인지 순번을 기록해 주었다. Figure 1은 순서도의 예시이다. Figure 1을 살펴보면, 메커니즘 추론이 선지식확인에서 실체확인으로 끝났음을 알 수 있다. 선지식확인에서 실체확인까지 추론 요소가 16개 나왔는데 첫 추론 요소인 선지식확인 후에는 대상속성확인을 하였고, 마지막 추론 요소인 실체확인은 실체추정 다음에 나타났음을 알 수 있다. 또한 굵은 화살표로 표현된 시작조건확인, 활동확인, 실체추정이 2회 이상 반복적으로 나타났음을 알 수 있다.

Table 2. A framework for analyzing mechanistic reasoning

하위 추론 요소	정의	프로토콜 예시
선지식확인 (Identifying Prior Knowledge)	실체의 속성이나 활동에 대해 기존에 연구된 실증적 자료나 지식, 또는 목표 현상에 관여하는 대상 이외의 다른 대상에 대한 일반적 속성을 확인하는 것	책에서 벌판을 텅둠며 운반되는 배설물 텅어리 속에 곤충의 알이 있다고 했다.
목표현상기술 (Describing the Target Phenomenon)	설명하려고 하는 특정 현상이나 의문에 대해 기술하는 것	왜 그렇게 사치를 부렸을까?
시작조건확인 (Identifying Setup Conditions)	활동이 발생하는 시간적 공간적 제한에 대한 기술, 또는 실험 조건을 확인하는 것	5~6마리의 행렬모충을 바늘로 찢러 피를 몇 방울 빼내 사각형 거름종이에 배어둘게 하고, 팔에 붙여 물이 새지 않는 봉대로 감았다.
활동확인 (Identifying Activities)	목표 현상에서 나타나는 대상의 규칙적인 작동, 또는 목표 현상에 관여하는 실체로 인해 나타나는 규칙적 변화를 확인하는 것	다리를 한쪽은 방사선에, 다른 쪽은 보조나선의 가로대에 걸고, 이 나선의 반대 방향으로 간다.
대상속성확인 (Identifying Properties of Objects)	목표 현상에 관여하고 있는 대상의 일반적 속성에 대해 확인하는 것	애벌레용으로 판 금풍뎡이 땅굴은 뽕소똥구리나 왕소똥구리의 땅굴보다 별로 깊지 않았다.
실체추정 (Conjecturing Entities)	현상을 야기하게 하는 실체라고 짐작하는 것	여기에 작용하는 것이 틀림없이 중력이며, 이 중력이 뒤집힌 곤충의 자세를 바로잡게 한다.
실체속성확인 (Identifying Properties of Entities)	실체로 인해 활동이 나타나는 조건이나 실체의 일반적 속성을 확인하는 것	주위가 서늘하면 그 상태가 보통의 한계 이상으로 길어졌다.
실체확인 (Identifying Entities)	잠정적으로 메커니즘에 관여할 것이라 짐작했던 실체에 대해 결론 내리는 것	어미의 위장에서 정성 들어 만든 죽이 확실하다.
실체조직화 (Organization of Entities)	확인된 실체를 시공간적으로 조직하여 실체들 간의 상호작용에 관한 메커니즘의 기작을 밝히는 것	어릴 때는 기름기 있는 물질을 먹고 산다. 좀 자라면 성충처럼 어느 곤충이든 다 먹어서 식단을 다양화한다. 푸줏간의 창고는 녀석에게 뜨거운 곳이다. 거기서는 비계 요리를 연다가 나중에는 죽은 것을 먹는 서식성 파리나 수시렁이, 그밖의 다른 벌레를 발견한다. 어두컴컴하고 비를 맞지도 않는 부엌에서 기름기 조각을 주워 먹고 졸던 파리나 집 없는 꼬마 거미를 덮친다. 잘 자라기는 이것으로 충분하다.

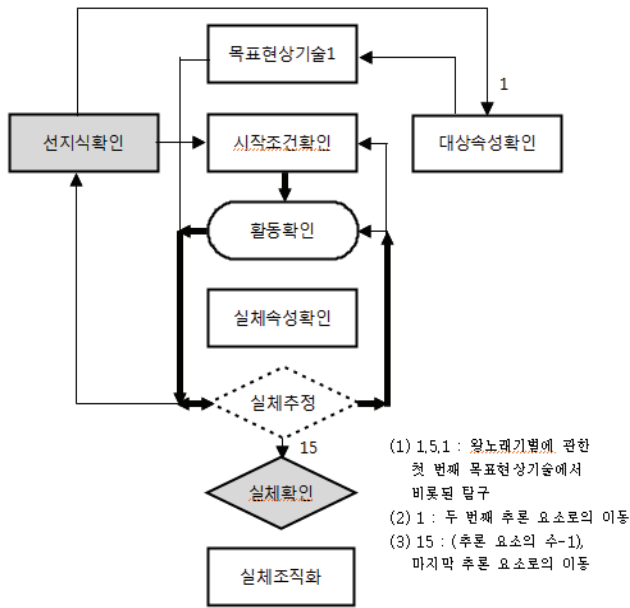


Figure 1. Example of flow chart for mechanistic reasoning

순서도는 새로운 목표현상기술이 나타날 때 마다 작성하였으며, 메커니즘 추론에 대한 전문적 지식이 있는 3인과 연구자가 작성한 순서도를 교차 검토하여 바르게 작성되었는지 확인하였다. 30개 챗터의 프로토콜에서 작성된 순서도는 총 128개이다.

III. 연구결과 및 논의

1. 메커니즘 추론의 과정

프로토콜을 Russ *et al.*(2008)의 기준에 따라 분석 대상으로 삼은 메커니즘 추론을 실체의 속성을 확인하고 실체를 조직한 강한 증거의 메커니즘 추론, 실체를 조직화 하지는 못했지만 관련된 실체에 대해 언급하고 추정한 중간 증거의 메커니즘 추론, 목표현상에 대한 실체의 규칙적인 변화만 기술한 약한 증거의 메커니즘 추론으로 구분하였다. 30개 챗터의 프로토콜 중에서 강한 증거의 메커니즘 추론은 12개 챗터, 중간 증거의 메커니즘 추론은 15개 챗터, 약한 증거의 메커니즘 추론은 3개 챗터였다.

가. 강한 증거의 메커니즘 추론

코드 2.15는 돌담가뢰 1령 애벌레에 관한 장으로서 4개의 목표현상기술이 있었다. 목표현상기술1은 돌담가뢰 1령 애벌레에 털이나 과상한 주둥이가 왜 있는 것인지에 대한 의문이며, 메커니즘 추론의 과정은 Figure 2와 같다. 목표현상기술 후에 애벌레의 이상한 생김새와 애벌레가 부화한 후 7개월 동안 아무 것도 먹지 않는 것을 확인한 후 ‘굵주림’이라는 실체를 추정한다. 하지만 애벌레는 꿀을 보자마자 도망치고, 빨가위벌을 넣어보는 조작을 했을 때 벌의 가슴털 속으로 파고드는 모습을 관찰한 것을 통해 ‘이동’이라는 실체를 추정한다. 그 후 줄벌 가슴털마다 돌담가뢰 애벌레가 붙어있는지 확인하고, 죽어있는 먹이를 제공하는 등의 활동을 통해 ‘이동’ 하기 위한 것이라는

실체를 확인한다. 나아가 줄벌에 고정시키기 위해 점액과 털이 존재한다는 것과 암컷에는 붙어있지 않다는 것을 추가로 확인한다. Figure 2를 보면, 코드 2.15.1의 메커니즘 추론의 과정에서 실체조직화를 제외한 모든 추론 과정 요소를 다 거치며, 시작조건확인-활동확인-실체속성확인을 통한 실체 확인이 반복적으로 이루어진다는 것을 알 수 있다. 이 때 선지식확인과 대상속성확인이 병렬적으로 계속된다.

목표현상기술2는 왜 암컷에게는 돌담가뢰를 볼 수 없는가에 관한 의문이다. 일반적으로 수컷이 암컷보다 거의 한 달 빨리 부화한다는 선지식확인을 통해 부화한 줄벌의 수컷에서 돌담가뢰를 발견할 수 있다는 실체확인이 이루어진다. Figure 3을 보면 실체추정 과정이 생략되어 있으며, 실체를 확인하기 위해 시작조건확인, 활동확인이 반복적으로 나타남을 알 수 있다.

목표현상기술3은 목표현상기술2의 마지막 추론 과정에서 동지 안에 줄벌의 알들이 떠 있고 그 위에 돌담가뢰 애벌레가 있는 것을 관찰한 것에서 의문이 시작된다. 돌담가뢰 애벌레가 언제, 어떻게 들어왔을지에 대한 의문에 대해 Figure 4와 같은 추론 과정을 거친다. Figure 4에서는 시작조건확인, 활동확인을 반복하여 실체속성을 확인하지만 실체추정에까지 다다르지는 못한다.

목표현상기술4는 목표현상기술 3에서 마지막으로 관찰된 돌담가뢰 애벌레들이 차례차례 방 안으로 들어가는 행동에서 시작된다. 왜 순서대로 들어가는 것인가에 대한 의문을 돌담가뢰 애벌레들은 줄벌의 알 위에 있고, 차례차례 방 안으로 들어가며, 이 때 암컷 줄벌이 알을 낳는 순간 그 알 위에 올라타면서 들어간다는 목표현상기술3의 활동확인, 실체속성확인을 통해 해결해 나간다. 이를 통해 ‘알 위’라는 실체를 추정한다. Figure 5와 같이 추정된 실체는 여러 번의 시작조건확인, 활동확인, 실체속성확인을 거쳐 실체확인에 다다른다. 결국 돌담가뢰 1령 애벌레는 줄벌의 가슴털에 붙어 동지 밖으로 나갔다가 줄벌이 짝지기 하는 동안 암컷으로 옮겨 와서 암컷이 산란할 때 알 위에 붙어 동지 안으로 들어간다는 메커니즘을 밝히게 된다. 메커니즘을 밝히는 데는 목표현상기술1, 2, 3, 4가 모두 관여하며, 목표현상기술4까지의 탐구가 진행된 후 실체조직화가 이루어졌다.

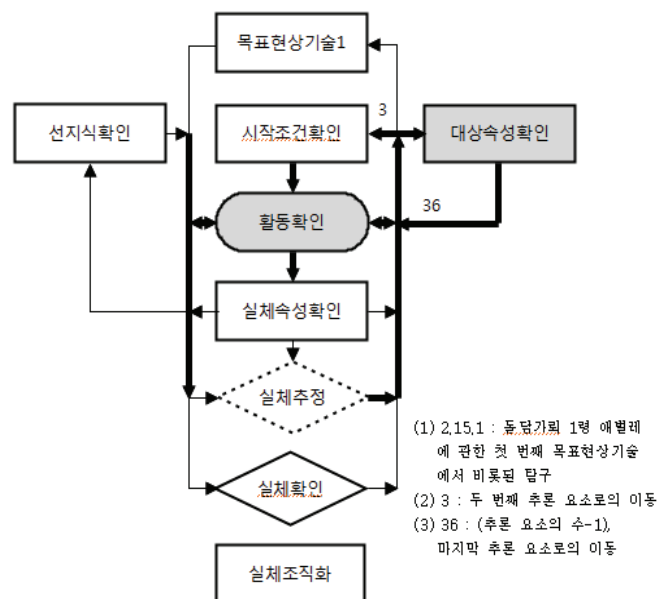


Figure 2. Mechanistic reasoning of 2.15.1

코드 2.15의 메커니즘 추론 과정요소의 순서를 Table 3으로 정리할 수 있다.

Table 3. process of mechanistic reasoning about 2.15

코드	추론 과정
2.15.1	· 목표현상기술 → 활동확인 → 실체속성확인 → 실체추정 → 시작조건 확인 → 활동확인 → 실체추정
2.15.2	· 목표현상기술 → 활동확인 → 실체확인 → 시작조건확인 → 활동확인
2.15.3	· 목표현상기술 → 시작조건확인 → 활동확인 → 실체속성확인
2.15.4	· 목표현상기술 → 실체추정 → 실체확인 → 시작조건확인 → 활동확인 → 실체속성확인

나. 중간 증거의 메커니즘 추론

코드 1.2는 소똥구리에 관한 장으로서 3개의 목표현상기술이 있었다. 책에서 배설물 덩어리 속에 곤충의 알이 있다는 보았다는 선지식 확인과 왕소똥구리 알이 얇은 막으로 싸여 있어 연약하고 깨지기 쉽다는 대상속성 확인을 통해 탐구가 시작된다. 인공사육장에서의 실험을 통한 진왕소똥구리의 활동확인과 야외에서의 왕소똥구리의 대상속성 확인을 거쳐 비좁고 감잡한 굴에서 어떻게 경단을 만드는지에 대한 목표현상기술1이 이루어진다. 목표현상기술 후에는 관찰을 통해 경단 내부다 액체성 물질로 칠해져 있다는 대상속성 확인이 이어지지만 실체추정이나 실체확인에 이르지 못하는 못한다. 코드 1.2.1의 메커니즘 추론 과정은 Figure 6과 같다.

목표현상기술2는 경단 안쪽의 액체성 물질이 어떻게 만들어졌가에 대한 의문이다. ‘어미가 위장에서 새끼를 위해 만든 죽’이라는 실체를 추정하고 활동확인을 거친다. 코드 1.2.2의 메커니즘 추론 과정은 Figure 7과 같다.

목표현상기술3은 소똥구리 탐구에 관한 내용으로 소똥구리 무리는 다리가 다섯 마디로 나뉘는데, 발목마디가 없는 소똥구리가 존재하는 이유에 대한 의문이다. Figure 8을 살펴보면 선지식 확인과 실체 확인이 반복된다. 이를 통해 ‘환경’의 영향이 아닌 타고난 불구자라는 실체를 확인한다. 하지만 코드 1.2에서 소똥구리에 관한 메커니즘의 조직화는 이루어지지 않았다.

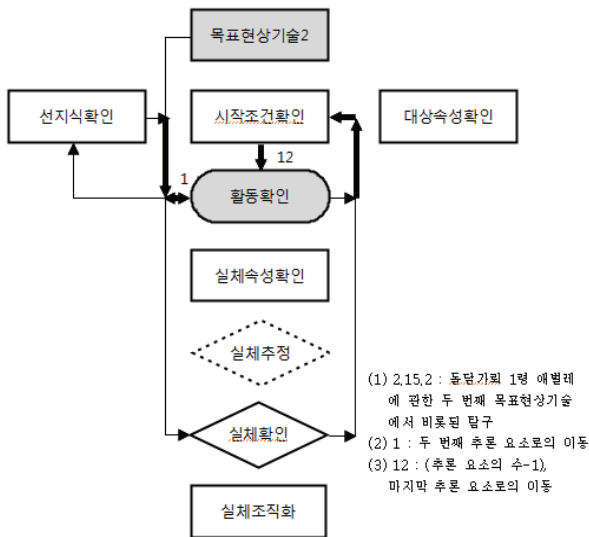


Figure 3. Mechanistic reasoning of 2.15.2

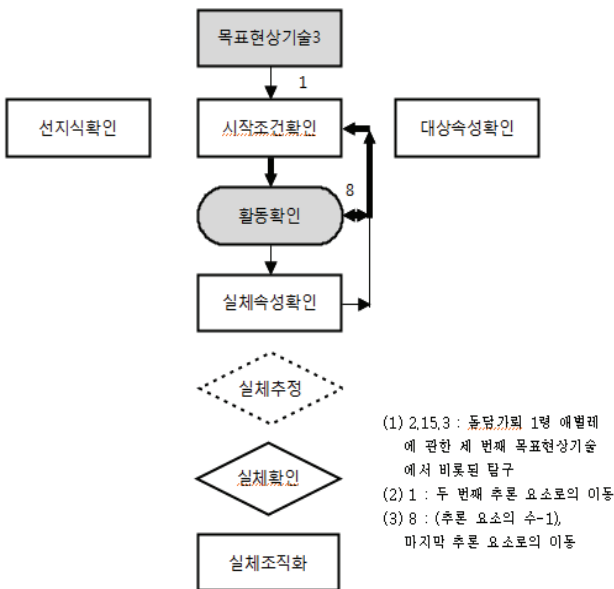


Figure 4. Mechanistic reasoning of 2.15.3

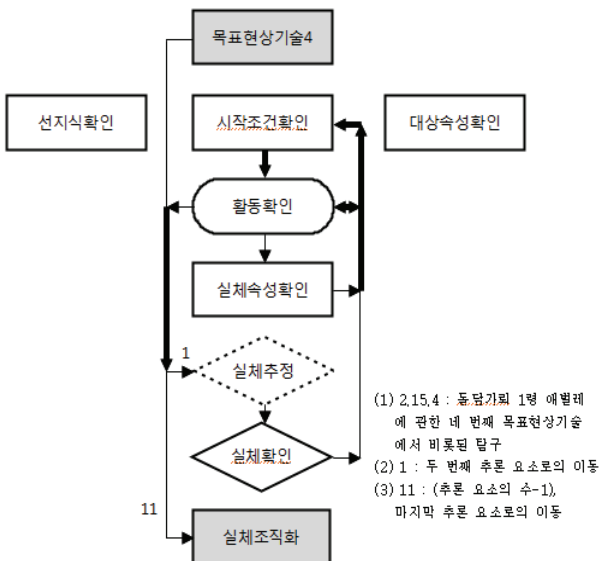


Figure 5. Mechanistic reasoning of 2.15.4

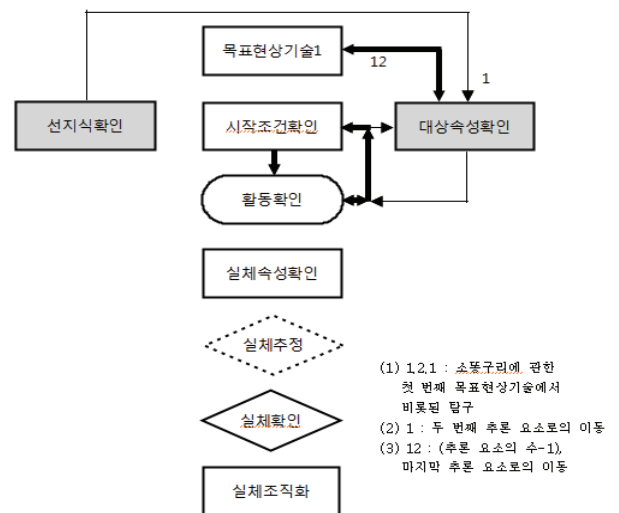


Figure 6. Mechanistic reasoning of 1.2.1

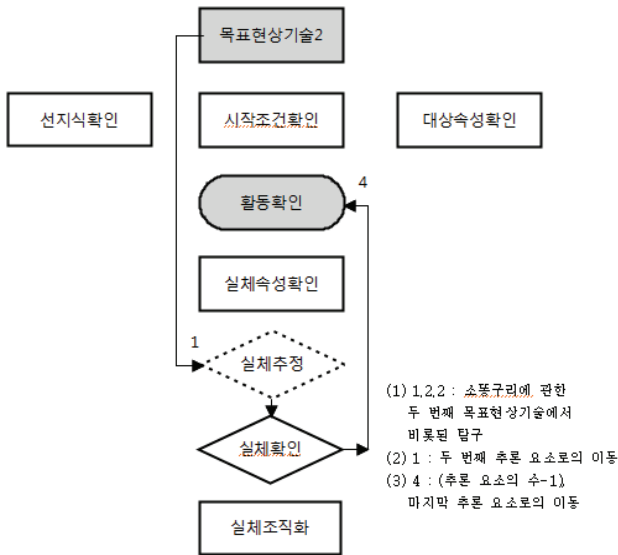


Figure 7. Mechanistic reasoning of 1.2.2

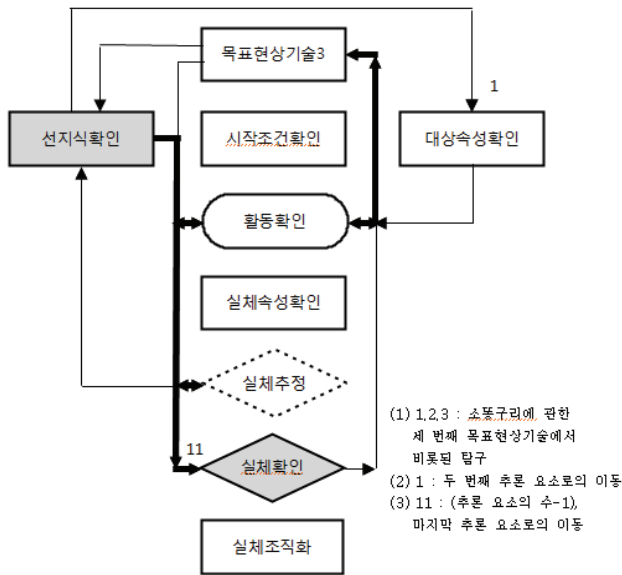


Figure 8. Mechanistic reasoning of 1.2.3

다. 약한 증거의 메커니즘 추론

코드 2.14는 돌담가래에 관한 장으로서 3개의 목표현상기술이 있었다. 줄벌과 빨가위벌의 등지를 관찰하여 대상속성을 확인하고, 빨가위벌의 고치 안에 존재하는 애벌레의 대상속성을 확인하여 빨가위벌에게는 재니등에, 줄벌에게는 돌담가래가 기생한다는 실체속성확인단계를 거친다. 그런데 돌담가래 애벌레가 부화하면서 뒤집어 쓰고 있는 껍질이 무엇인지가 이 탐구의 목표현상기술1이다. Figure 9를 살펴보면, 대상속성확인, 실체속성확인, 선지식확인을 통해 목표현상기술이 이루어진다. 다양한 관찰과 선지식이 기반이 되어 탐구에 관한 의문이 생성됨을 알 수 있다.

목표현상기술2는 돌담가래가 줄벌이 있는 안쪽 등지까지 어떻게 들어갔는가에 관한 의문이다. 실체추정을 위해 유리병에 암수 돌담가래를 넣고 어떻게 행동하는지 관찰을 하니 수컷이 암컷보다 고치에서 먼저 나와 암컷의 껍질을 벗겨주려고 애쓰고, 암컷이 나오면 교미를

한다는 사실과 수컷은 교미 후에 2~3일 동안 움직이지 않고 있다가 죽고 암컷은 산란할 곳을 찾아 불안하게 날아다닌다는 사실을 알게 되었다. Figure 10을 살펴보면, 실체추정 없이 시작조건확인, 활동확인, 실체속성확인까지만 선형적으로 나타남을 알 수 있다.

목표현상기술3은 암컷이 산란하는 장소에 대한 의문이다. 유리병 속에 줄벌 등지의 통로와 같은 공터를 만들고 산란 직전의 암컷 돌담가래를 넣고 관찰했다. Figure 11을 살펴보면 돌담가래 암컷이 어느 장소에 산란하는지 알아보기 위해 시작조건확인, 활동확인, 대상속성확인이 반복적으로 나타난 것을 알 수 있다. 목표현상기술1에서는 돌담가래가 줄벌에 기생한다는 것을, 목표현상기술2에서는 암수의 교미 방법을, 목표현상기술3에서는 암컷이 산란하는 장소에 대한 활동확인이 이루어지지만 실체추정이나 실체확인, 실체조직화는 이루어지지 않는다. 하지만 코드 2.14에서 확인된 사실을 기반으로 하여 코드 2.15에서 돌담가래가 애벌레에서 성충이 되는 메커니즘을 밝히게 된다.

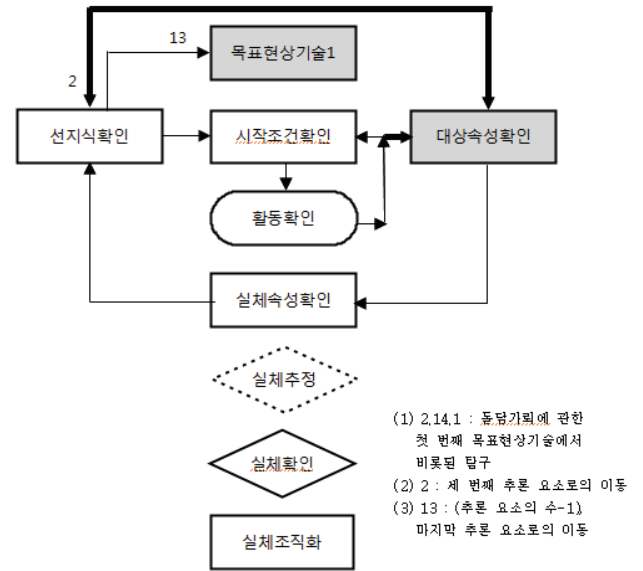


Figure 9. Mechanistic reasoning of 2.14.1

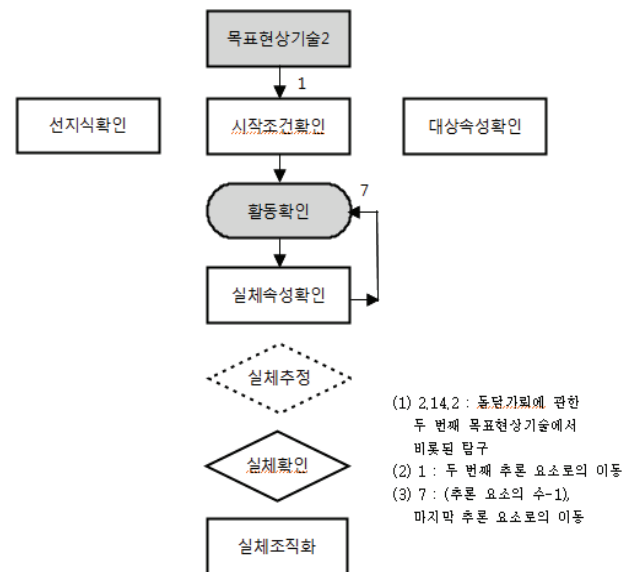


Figure 10. Mechanistic reasoning of 2.14.2

는 것이 아니라 여러 순서도를 걸쳐 나타나 한 순서도 내의 흐름을 파악하는 데는 영향을 미치지 않기 때문이다. 52개의 순서도에서 나타난 추론 과정은 [부록2]와 같다.

Yang *et al.*(2007)이 제안한 SMIP(Scientists's Methodology of Investigation Process)모델에서 예측적 의문인 If 질문, 인과적 의문인 Why 질문, 방법적 의문인 How 질문이 가설생성, 증거 평가, 연구 설계, 연구 수행에 핵심적인 역할을 하였다. 또한 Lawson(1995)은 what에 관한 의문은 주로 현상에 대한 규칙성을 확인할 때 사용된다고 언급하였으며, How 질문은 생물학에서 다른 수준으로 조직된 요소들을 서로 연결하는 역할을 한다(van Mil *et al.*, 2013). 이를 바탕으로 목표현상기술에 사용된 의문 유형을 살펴본 결과, 목표현상기술에 사용된 Why, How, If, What과 같은 의문 유형에 따라 메커니즘 추론의 하위 과정이 조금씩 달라짐을 알 수 있었다. 52개의 순서도 중 목표현상기술의 의문 유형이 Why인 것은 21개, How인 것은 12개, If인 것은 10개, What인 것은 9개가 나타났다. 또한 목표현상기술이 '들락거릴 때마다 허물어지는 모래더미 속에 길을 내느라 극심한 고생을 해 가며, 새끼에게 사냥한 먹이를 전해 주느라고 끔끔댄다. 왜 그런 짓을 할까?'와 같이 Why의문으로 시작될 경우 실체추정과 실체 확인을, '어떻게 다시 돌아오지?'와 같이 How의문으로 시작될 경우 실체추정과 활동확인을 포함하고 있음을 알 수 있다. 목표현상기술이 '순서를 바꿔서 탈출할 수 없을 때는 어떤 일이 일어날까?'와 같이 If의문으로 시작될 경우 시작조건 확인과 활동확인을, '어느 딱정벌레가 쉽게 마비시킬 수 있어서 먹이감으로 선택될까?'와 같이 What의문으로 시작될 경우 실체추정과 실체속성 확인을 포함한다. Why와 How 질문이 메커니즘적인 설명을 필요로 하는 질문이라고 언급했던 Hung과 Jonassen(2006)의 견해와 일치하는 부분이다.

메커니즘 추론의 과정을 목표현상기술에 사용된 의문 유형에 따라 분류한 후 살펴본 결과, 각 의문에 대해서도 실체추정이 나타나는 위치가 다름을 확인할 수 있었다. 따라서 의문유형내에서도 실체추정이 나타나는 위치에 따라 추론과정들을 분류해 보았다. 의문 유형이 Why, How, What일 경우 실체추정이 활동확인보다 먼저 나타나기도 하고 활동확인 후에 나타나기도 하지만 의문 유형이 If일 경우에는 활동확인 이후에 실체추정이 나타났다. If 의문에서의 조건이 활동에 영향을 주는 실체라고 해석할 수 있기 때문이다. Why의문 유형은 실체추정이 활동확인보다 먼저 이루어지는 추론 과정 11개와 활동확인이 실체추정보다 먼저 이루어지는 추론 과정 4개로 분류되었고, How의문 유형은 실체추정이 활동확인보다 먼저 이루어지는 추론 과정 6개와 활동확인이 실체추정보다 먼저 이루어지는 추론 과정 2개로

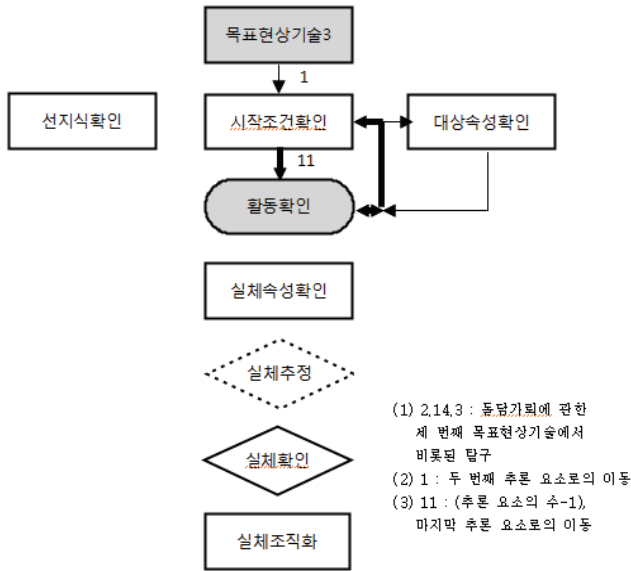


Figure 11. Mechanistic reasoning of 2.14.3

연구 결과, 목표현상기술, 선지식 확인, 대상속성확인, 시작조건확인, 활동확인, 실체속성확인, 실체추정, 실체확인, 실체조직화의 요소들이 메커니즘을 밝히는 과정에서 비선형적이고 반복적인 형태로 나타남을 확인할 수 있었다. 현상을 설명하기 위한 변인을 선택할 때 선지식이 영향을 미친다는 연구(Zeineddin & Abd-El-Khalick, 2010) 결과와 같이 메커니즘 추론과정에서도 선지식 확인과 대상속성 확인을 통해 설명하고자 하는 실체를 찾고 있었다. 또한 메커니즘을 모델링하기 위해 활동의 규칙적인 변화를 먼저 기술한 후 그 규칙성을 야기하는 원인이 무엇이 기술한다는 연구(Glennan, 2005; Craver, 2007) 결과와 같이 메커니즘 추론 과정에서 활동확인이 실체확인 이전에 수행됨을 확인하였다.

2. 메커니즘 추론 모델 개발

목표현상기술을 중심으로 생성한 순서도는 총 128개였는데, 그 중 강한 증거의 메커니즘 추론으로 분류되었던 12개의 첩터에서 나타난 52개의 순서도를 모델 개발을 위한 분석대상으로 선정하였다. 52개의 순서도를 분석하여 유형화 할 때 선지식확인, 대상속성확인, 실체조직화는 추론과정요소에서 제외하였다. 선지식확인, 대상속성확인, 추론의 흐름과 관계없이 어느 추론에서나 나타났으며, 확인된 실체를 조직하면서 나타나는 실체조직화는 한 순서도를 통해서만 이루어지

Table 4. A Classification according to the process of reasoning

유형	확인 순서	추론 과정
A	Why*	· 목표현상기술→실체추정→시작조건확인→활동확인→실체속성확인→실체확인
	How*	
B	What*	· 목표현상기술→실체추정→시작조건확인→활동확인→실체속성확인
	Why†	
C	How†	· 목표현상기술→시작조건확인→활동확인→실체속성확인→실체추정→실체확인
	If‡	
	What‡	

* 실체추정이 활동확인보다 먼저 나타나는 경우 *(Why*, How*, What*), 실체추정이 활동확인보다 나중에 나타날 경우 †(Why†, How†, If†, What†)으로 나타냄

분류되었다. If는 활동확인이 실체추정보다 먼저 이루어지는 추론 과정 6개, What은 실체추정이 활동확인보다 먼저 이루어지는 추론 과정 3개와 활동확인이 실체추정보다 먼저 이루어지는 추론 과정 4개로 구분되었다. 각각을 추론 과정 요소가 나오는 순서에 맞춰 하나의 과정으로 통일한 후, 동일한 과정끼리 묶으면 3가지 유형으로 구분될 수 있고, 이는 Table 4와 같다. 인과 메커니즘을 밝히기 위한 궁극적 의문은 Why이며, Why에 If, How, What과 같은 의문들이 서로 상호 작용하고 있었다.

Table 4의 유형화를 기반으로 하여 메커니즘 추론 모델을 추론 과정에 따라 실체 확인형, 활동확인형, 실체속성확인형 3가지 모델로 개발하였다.

가. 실체확인형 메커니즘 추론 모델(MIE)

실체확인형 메커니즘 추론모델(MIE: Mechanistic reasoning model for Identifying Entities)이란 추정된 실체를 검증할 목적으로 추론의 과정이 진행되는 모델이다. 실체확인형 메커니즘 추론모델 (MIE)은 실체추정이 쉽게 되는 경우 주로 사용되는데, 활동에 영향을 미칠 것이라 여겨지는 잠정적 실체를 먼저 추정된 뒤, 추정된 실체가 목표 현상에 대한 의문을 해결해 줄 수 있는 요소인지 확인할 수 있는 실험 설계를 하고 가능성을 검증한다. 목표현상기술→실체추정→시작조건확인→활동확인→실체속성확인→실체확인→실체조직화의 순으로 추론이 진행되는 것이 일반적이다. 실체확인형 메커니즘 추론 모델 (MIE)은 Figure 12와 같다.

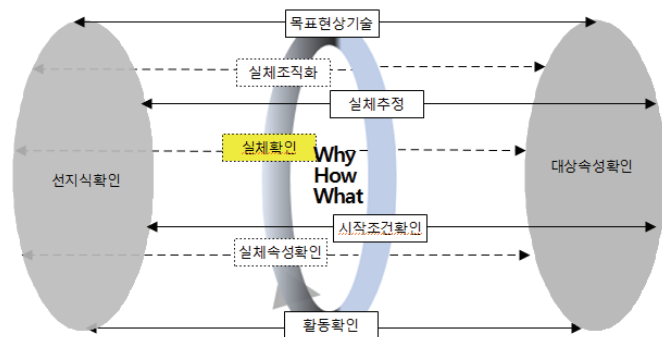


Figure 12. MIE(Mechanistic reasoning model for Identifying Entities)

그러나 실험 등을 통한 검증에서 추정된 실체가 목표현상을 설명하는데 적절하지 않다고 판단되면 다시 다른 실체추정이 이루어지기도 하고, 실체에 대한 검증의 정확성을 높이기 위해 동일한 실체에 대해 실험을 추가적으로 진행하여 시작조건확인, 활동확인이 반복적으로 나타나기도 한다. 실체 확인형 메커니즘 추론(MIE)을 진행할 수 있게 하는 단서가 되는 의문은 Why, How, What이다.

나. 활동확인형 메커니즘 추론 모델(MIA)

활동확인형 메커니즘 추론모델(MIA: Mechanistic reasoning model for Identifying Activitis)이란 실체를 추정하기 전에 활동확인이 이루어지는 모델을 의미한다. 활동확인형 메커니즘 추론모델(MIA)는 실

체가 목표현상기술 이후에 바로 추정되지 않을 경우 주로 사용되는데, 시간적 공간적 제한 또는 실험 조건을 확인한 후 현상에서 나타나는 대상의 규칙적 변화를 관찰하여 실체를 추정한다. 목표현상기술→시작조건확인→활동확인→실체추정→실체속성확인→실체확인→실체조직화의 순으로 추론이 진행되는 것이 일반적이다. 활동확인형 메커니즘 추론 모델(MIA)은 Figure 13과 같다.

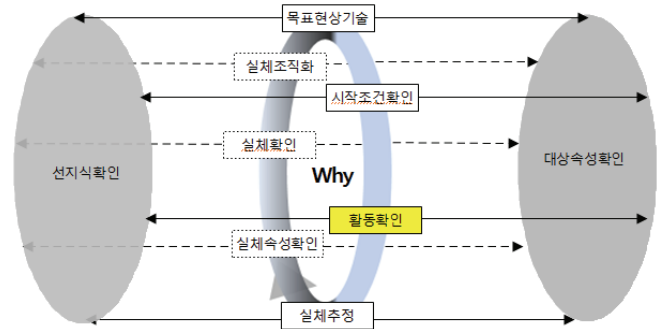


Figure 13. MIA(Mechanistic reasoning model for Identifying Activities)

그러나 활동확인을 통해 실체를 추정하더라도 추정된 실체를 검증하기 위해 다시 시작조건확인, 활동확인이 반복해서 나타날 수 있으며, 이 과정에서 선지식확인 and 대상속성확인이 병렬적으로 이루어질 수 있다. 활동확인형 메커니즘추론(MIA)을 진행할 수 있게 하는 단서가 되는 의문은 Why이다.

다. 실체속성확인형 메커니즘 추론 모델(MIP)

실체속성확인형 메커니즘 추론모델(MIP: Mechanistic reasoning model for Identifying Properties of Entities)이란 다양한 시작조건을 만들어 활동확인 and 실체속성확인을 통해 실체를 추정하는 모델을 의미한다. 실체속성확인형 메커니즘 추론모델(MIP)은 목표현상을 설명할 수 있는 실체를 추정하는 것이 어려울 때 주로 사용되는데, 다양한 실험과 관찰 후에 조건이 나타나는 속성으로 실체를 추정한다. 일반적으로 목표현상기술→시작조건확인→활동확인→실체속성확인→실체추정→실체확인→실체조직화의 순으로 추론이 진행된다. 이 과정에서 선지식확인 and 대상속성확인이 함께 이루어진다. 실체속성확인형 메커니즘 추론 모델(MIP)은 Figure 14와 같다.

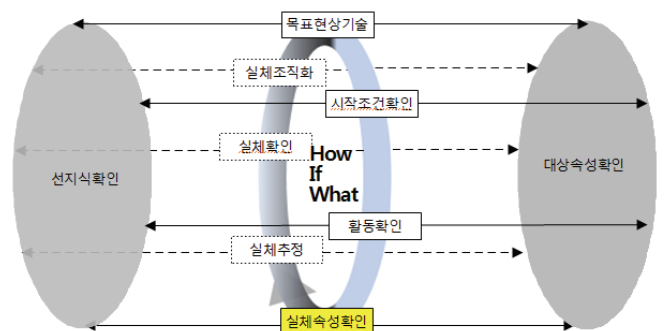


Figure 14. MIP(Mechanistic reasoning model for Identifying Properties of Entities)

실체속성확인형 메커니즘추론(MIP)을 진행할 수 있게 하는 단서가 되는 의문은 How, If, What이다.

IV. 결론 및 제언

이 연구에서는 생물학자 파브르의 탐구를 통해 메커니즘을 추론이 어떤 과정을 통해 이루어지는가를 분석하고, 이를 통해 메커니즘 추론 모델을 개발하고자 하였다. 파브르의 탐구과정에서 나타난 메커니즘 추론을 분석한 결과 내릴 수 있는 결론은 다음과 같다.

첫째, 파브르가 탐구를 통해 메커니즘을 밝히는 과정에서 사용한 메커니즘 추론의 하위 과정 요소들을 분석해 본 결과, 의문을 해결하고 목표현상에 관여하는 대상의 속성을 확인하거나 활동을 확인하기 위해 선지식확인, 대상속성확인, 시작조건확인, 활동확인 등의 과정이 반복적으로 일어났다. 하지만 메커니즘 추론 과정 요소들의 순서는 수행되는 탐구주제, 의문의 유형, 선지식, 주어진 상황 등에 따라 달랐다. 또한 탐구의 흐름은 비선형적이고 반복적인 형태로 나타났다.

둘째, 파브르의 탐구를 통해 제안되는 메커니즘 추론 모델은 실체확인형 메커니즘 추론 모델(MIE), 활동확인형 메커니즘 추론 모델(MIA), 실체속성확인형 메커니즘 추론 모델(MIP)이다. 실체확인형 메커니즘 추론 모델(MIE)은 먼저 실체추정을 하고 그 실체의 가능성을 검증하는 과정으로 진행된다. 활동확인형 메커니즘 추론 모델(MIA)은 주어진 조건과 활동을 확인한 뒤 실체를 추정하고, 실체속성을 확인하는 과정으로 진행된다. 실체속성확인형 메커니즘 추론 모델(MIP)은 실체추정이 어려울 경우 다양한 시작 조건을 설정하여 활동과 실체속성을 확인한 뒤, 실체를 추정하게 되는 과정으로 진행된다. 이러한 과정에서 실체확인을 목적으로 하는 Why에 관한 의문, 실체확인과 활동확인을 목적으로 하는 How에 관한 의문, 활동확인을 목적으로 하는 If에 관한 의문, 실체속성확인을 목적으로 하는 What에 관한 의문이 메커니즘 추론을 진행시켜 줄 수 있는 탐구의 단서가 되었다.

과학적 탐구가 일어나는 교실 현장에서 이루어지는 과학 수업을 분석한 연구 결과들을 살펴보면, 인과적 의문(causal question)에서 탐구가 시작되는 경우가 매우 드물다. 그렇기 때문에 탐구의 자유도 측면에서 요리책식 실험이나 낮은 수준의 탐구가 주를 이루고 있다. 이 연구 결과에서 나타난 바와 같이 과학자들의 연구에서 가설생성이나 실체를 찾는 과정에서 인과적 의문은 매우 중요한 역할을 한다. 따라서 교사는 학생들에게 why, how, if, what과 같은 다양한 의문을 생성하도록 분위기를 조성하여야 하며, 자연 현상을 이해하는 과정에서 단순한 인과적 관계가 아닌 다양성과 복잡성을 인정하는 메커니즘적 이해가 요구됨을 지도할 필요성이 있다. 아울러 이 연구 결과는 학생들이 쉽게 가설이나 실체를 추정하지 못할 때 활동확인형 메커니즘 추론 모델(MIA)과 실체속성확인형 메커니즘 추론 모델(MIP)과 같은 과정으로 탐구를 진행하게 할 수 있다는 시사점을 제공하고 있다.

국문요약

이 연구의 목적은 파브르의 탐구 과정에서 나타난 메커니즘 추론을 분석하고, 분석 결과에 기반하여 메커니즘 추론 모델을 개발하는 것

이다. 이를 위해 Russ *et al.*(2008)의 분석틀을 수정 보완한 메커니즘 추론 분석틀로 『파브르 곤충기 1~10』 가운데 추론요소가 등장하는 30개의 챕터를 분석하였다. 분석결과 첫째, 파브르의 탐구 과정에서 나타난 메커니즘 추론의 하위 과정 요소는 선지식확인, 대상속성확인, 시작조건확인, 활동확인 등의 과정이 반복적으로 일어났다. 뿐만 아니라 이 메커니즘 추론의 과정 요소들의 순서는 탐구 주제, 의문 유형, 선지식이나 주어진 상황 등에 따라 다르게 나타났으며, 비선형적이고 반복적인 형태로 나타났다. 둘째, 메커니즘 추론의 과정 요소가 나타난 순서에 기반하여 메커니즘 추론 모델을 개발하였다. 파브르의 탐구 과정 분석을 통해 제안되는 메커니즘 추론 모델은 실체확인형 메커니즘 추론 모델(MIE), 활동확인형 메커니즘 추론 모델(MIA), 실체속성확인형 메커니즘 추론 모델(MIP) 3가지였다. 이러한 결과는 인과 메커니즘을 밝히고자 하는 탐구를 수행하는 학생들에게 교사가 Why 뿐만 아니라 How, If, What과 같은 다양한 발문을 통해 탐구를 진행하도록 유도할 수 있음을 시사해준다. 또한 교사는 자연 현상의 기저에 존재하는 여러 실체들을 인식하는 메커니즘적 이해가 요구되며 학생들에게 다양한 가설을 생성하도록 하는 기회를 제공해야함을 시사해준다.

주제어 : 메커니즘 추론, 추론 모델

References

- Ahn, W., & Kalish, C. W. (2000). The role of mechanism belief in causal reasoning. In F. Keil & R. A. Wilson (Eds.), *Explanation and Cognition* (pp. 199-225). Cambridge, MA: MIT Press.
- Bechtel, W., & Abrahamsen, A. (2005). Explanation: A mechanist alternative. *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Science*, 36(2), 421-441.
- Bogen, J. (2008). Causally productive activities. *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, 39(1), 112-123.
- Bolger, M. S., Kobiela, M., Weinberg, P. J., & Lehrer, R. (2012). Children's mechanistic reasoning. *Cognition and Instruction*, 30(2), 170-206.
- Booger, F. C., Bruggeman, F. J., Hofmeyr, J. H. S., & Westerhoff, H. V. (2007). *Systems biology: Philosophical foundations*. Amsterdam: Elsevier.
- Braben, D. W. (1994). *To be a scientist*. Oxford: Oxford University Press.
- Chinn, C. A., & Malhotra, B. A. (2002). Epistemologically authentic inquiry in schools: A theoretical framework for evaluating inquiry tasks. *Science Education*, 86(2), 175-218.
- Cho, H. (2009). *The Analysis of the Astronomers' Research Process and Reasoning*. Korea National University of Education, Doctoral dissertation. Chung-Buk.
- Craver, F. F. (2007). *Explaining the brain*. NY: Oxford University Press.
- Darden, L. (2002). Strategies for discovering mechanisms: Schema instantiation, modular subassembly, forward/backward chaining. *Philosophy of Science*, 69(3), 354-365.
- Darden, L. (2006). Reasoning in biological discoveries: Essays on mechanisms, interfield relations, and anomaly resolution (Cambridge studies in philosophy and biology). Cambridge, NY: Cambridge University Press.
- Dickes, A. C., Sengupta, P., Farris, A. V., & Basu, S. (2016). Development of Mechanistic Reasoning and Multilevel Explanations of Ecology in Third Grade Using Agent-Based Models. *Science Education*, 100(4), 734-776.
- Fabre, J. H. (1989). *Souvenirs Entomologiques(Études sur l'instinct et les mœurs des insectes)*. Bouquins : Robert Laffont Press. In Kim, J (Ed), *Souvenirs entomologiques 1~10*. Seoul: hyeonamsa.
- Glennan, S. (2002). Rethinking mechanistic explanation. *Philosophy of Science*, 69(S3), S342-S353.
- Glennan, S. (2005). Modeling mechanisms. *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Science*, 36(2), 443-464.
- Glymour, C. (2003). Learning, prediction and causal bayes nets. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(1), 43-48.
- Gopnik, A., Sobel, D. M., & Glymour, C. (2001). Causal learning

- mechanisms in very young children: Two-, three-, and four-year-olds infer causal relations from patterns of variation and covariation. *Developmental Psychology*, 37(5), 620-629.
- Hung W., & Jonassen, D. H. (2006). Conceptual understanding of causal reasoning in physics. *International Journal of Science Education*, 28(13), 1601-1621.
- Keil, F., Levin, D., Gutheil, G. and Richman, B. (1999). Explanation, cause and mechanism: The case of contagion. In Medin, D. and Atran, S. (Eds.), *Folkbiology*, pp. 285-320. MIT Press, Cambridge, MA.
- Koslowski, B. (1996). *Theory and evidence: The development of scientific reasoning*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Kown, Y., Yang, I., Chung, W. (2000). An Explorative Analysis of Hypothesis-Generation by Pre-service Science Teachers. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 20(1), 29-42.
- Lawson, A. E. (1995). *Science teaching and the development of thinking* (pp. 139-147). Belmont, CA: Wadsworth Publishing Company.
- Lee, H., Yang, I., Kwon, Y. (2009). A Study on the Abductive Thinking in the Processes of Biologists' Science Knowledge Generation. *The Korean Journal of Biology Education*, 36(2), 189-202.
- Machamer, P., Darden, L., & Craver, C. F. (2000). Thinking about mechanisms. *Philosophy of Science*, 67(1), 1-25.
- Magnani, L. (2004). Model-based and manipulative abduction in science. *Foundation of Science*, 9(3), 219-247.
- Nersessian, N. J. (1992). How do scientists think? Capturing the dynamics of conceptual change in science. In R. N. Giere (Ed.), *Cognitive Models of Science* (pp. 5-22). Minneapolis, MN: University of Minnesota Press.
- Reiff, R., Harwood, W. S., & Phillipson, T. (2002). A scientific method based upon research scientists' conception of scientific inquiry (pp. 1-24). In proceedings of the annual international conference of the Association for the Education of Teachers in Science, Charlotte, NC.
- Russ, R. S., Hammer, D., & Mikeska, J. (2008). Recognizing mechanistic reasoning in student scientific inquiry: A Framework for discourse analysis developed from philosophy of science. *Science Education*, 92(3), 499-525.
- Schauble, L. (1996). The development of scientific reasoning in knowledge-rich contexts. *Development Psychology*, 32(1), 102-119.
- Thagard, P. (1999). *How scientists explain disease*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Van Mil, M. H. W., Boerwinkel, D. J., & Waarlo, A. J. (2013). Modelling molecular mechanisms: A framework of scientific reasoning to construct molecular-level explanations for cellular behaviour. *Science & Education*, 22(1), 93-118.
- Van Mil, M. H., Postma, P. A., Boerwinkel, D. J., Klaassen, K., & Waarlo, A. J. (2016). Molecular Mechanistic Reasoning: Toward Bridging the Gap Between the Molecular and Cellular Levels in Life Science Education. *Science Education*, 100(3), 517-585.
- Yang, I., Jeong, J., Jown, Y., Jeong, J., Hur, M., Oh, C. (2006). An Intensive Interview Study on the Process of Scientists' Science Knowledge Generation. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 26(1), 88-96.
- Yang, I., Oh, C., & Cho, H. (2007). Development of the scientific inquiry process model based on scientists' practical work. *Journal of Korea Association for Research in Science Education*, 27(8), 724-742.
- Zeineddin, A., & Abd-El-Khalick, F. (2010). Scientific reasoning and epistemological commitments: Coordination of theory and evidence among college science students. *Journal of Research in Science Teaching*, 47(9), 1064-1093.

저자 정보

정선희(서울양남초등학교 교사)

양일호(한국교원대학교 교수)

[부록1] 메커니즘 추론의 프로토콜 코딩 예시 (An Example of protocol coding about mechanistic reasoning)

- 1mm, 피부는 두껍고 녹색 광택이 감도는 검정색이다. <대상속성확인>
- 제8절과 9복절 사이의 가시돌기는 이 장치들이 펼쳐지면 매끄러운 표면에서도 잘 돌아다닐 수 있다. <대상속성확인>
- 마지막 복절과 흑 모양의 항절은 몸의 축과 직각으로 구부러져 항문이 지면과 접촉된 형태가 되는데, 그 접촉면에서 맑은 유리처럼 투명하고 끈적끈적한 액체가 분비된다. <대상속성확인>
- 유리판 위에서 걸을 때 유리를 흔들거나 거꾸로 뒤집어도 <시작조건확인>
- 이 접촉제 덕분에 떨어지지 않는다. <활동확인>
- 배의 근육을 수축시켜 접촉했던 항문 부분이 앞으로 끌려오게 하고, 다시 2개의 가시돌기와 함께 새 지점에 고정시킨다. <대상속성확인>
- 이동할 때 다리의 털은 바닥을 스치며 끌려간다. <활동확인>
- 이런 구조물들이 왜 필요한지 <목표현상기술>
- 4월 말이 되자 그때까지 알껍질과 함께 해면의 산처럼 쌓인 덩어리에서 꼼짝 않던 1령 애벌레가 움직이기 시작했다. <활동확인>
- 애벌레들은 9월말에 부화해서 지금까지 7개월 동안 아무것도 먹지 않았다. <실체속성확인>
- 굶주림이 녀석들을 활발히 움직이도록 자극했을 것 <실체추정>
- 돌담가뢰가 부화하기 직전에 준비했던 것처럼 문이 열렸거나 닫힌 몇 개의 방을 그들에게 제공했다. <시작조건확인>
- 굶주린 돌담가뢰 애벌레는 줄벌의 번데기도 애벌레도 원치 않는다. <활동확인>
- 뚜껑을 마감질한 줄벌 등지에서 애벌레를 꺼내고 대신 가뢰 애벌레를 조심스럽게 한 마리 또는 몇 마리 올려놓았다. <시작조건확인>
- 녀석들은 먹지를 않는다. <활동확인>
- 끈끈한 끈이 몸에 묻자 <시작조건확인>
- 허둥지둥 밖으로 도망친다. <활동확인>
- 빨가위벌을 몇 마리의 가뢰 애벌레가 든 유리병에 넣었다. <시작조건확인>
- 5마리의 애벌레가 벌의 가슴털 속으로 파고들었다. <활동확인>
- 그 숙주의 털에 달라붙어서 등지 안까지 운반된다. <실체추정>
- 맨 처음 꺼낸 벌의 가슴에 가뢰 애벌레가 붙어 있었다. 두 번째 벌도 그랬다. 제 3, 제 4의 벌도 그랬다. <활동확인>
- 카르팡트라의 줄벌 등지에서는 조사한 바의 3/4이 가슴털에 돌담가뢰 애벌레가 붙어 있었다. <실체속성확인>
- 털 속으로 파고든 애벌레는 자신이 선택한 벌의 어깨 근처에서 머리는 아래로, 꼬무니는 위로 거꾸로 매달려 꼼짝 않는다. <활동확인>
- 돌담가뢰 애벌레가 담벼락줄벌의 몸에서 양분을 취하지 않음을 확인하려고 죽은 지 오래되어 바삭 마른 벌을 애벌레가 든 유리병에 넣었다. <시작조건확인>
- 값을 수는 있더라도 빨아먹을 피나 체액 따위가 전혀 없는 시체 <대상속성확인>
- 녀석들은 살아 있는 벌과 똑같이 원하는 장소를 찾아가 제자리를 지킨다. <활동확인>
- 어쨌든 가뢰 애벌레는 줄벌에게서 아무 것도 빨아먹지 않는다. <실체속성확인>
- 털이가 새의 깃털을 갉아먹듯이 <선지식확인>
- 벌이 귀찮아서 떨쳐 내려는 기색이 없다. <활동확인>
- 애벌레가 붙지 않은 줄벌과 대어섯 마리가 붙은 줄벌을 각각 다른 유리병에 넣어 보았다. <시작조건확인>
- 양쪽 집단의 행동에 차이가 없다. <활동확인>
- 가뢰 애벌레가 줄벌에 붙은 것은 이제 건설 중인 벌의 저택으로 신을 데려다 주기 바랐음을 나는 의심하지 않았다. <실체확인>
- 돌출한 초승달 모양 돌기 <대상속성확인>
- 떨어질 염려가 있어도 점액이 미세한 동물을 고정시킬 수 있다. <대상속성확인>
- 엉덩이와 다리에 난 탄력성 털들 <대상속성확인>
- 암컷에서 붙어 있는 경우를 찾아보았으나 한 마리도 없었다. <활동확인>

[부록2] 메커니즘 추론의 과정 (The order of process elements of mechanistic reasoning)

코드	추론 과정
1.5.1	• 목표현상기술→실체추정→시작조건확인→활동확인→실체확인
1.5.2	• 목표현상기술→실체추정→실체속성확인
1.5.3	• 목표현상기술→실체확인
1.5.4	• 목표현상기술→시작조건확인→활동확인→실체속성확인→실체확인
1.17.1	• 목표현상기술→실체추정→실체속성확인→시작조건확인→활동확인
1.17.2	• 목표현상기술→실체추정→시작조건확인→활동확인→실체확인
1.17.3	• 목표현상기술→활동확인
1.19.1	• 목표현상기술→실체추정→시작조건확인→활동확인→실체속성확인→실체확인
1.19.2	• 목표현상기술→시작조건확인→활동확인→실체확인
1.19.3	• 목표현상기술→활동확인→실체추정→시작조건확인→활동확인→실체확인
1.19.4	• 목표현상기술→시작조건확인→활동확인→실체확인
1.19.5	• 목표현상기술→실체확인→시작조건확인→활동확인
2.13.1	• 목표현상기술→실체추정→활동확인→실체속성확인
2.13.2	• 목표현상기술→실체추정→시작조건확인→활동확인→실체확인
2.13.3,4	• 목표현상기술→시작조건확인→활동확인→실체속성확인
2.13.5	• 목표현상기술→실체추정→시작조건확인→활동확인→실체속성확인
2.13.6	• 목표현상기술→시작조건확인→활동확인→실체속성확인→실체추정→실체확인
2.13.7	• 목표현상기술→실체추정→실체속성확인→활동확인
2.15.1	• 목표현상기술→활동확인→실체속성확인→실체추정→시작조건확인→활동확인→실체추정
2.15.2	• 목표현상기술→활동확인→실체확인→시작조건확인→활동확인
2.15.3	• 목표현상기술→시작조건확인→활동확인→실체속성확인
2.15.4	• 목표현상기술→실체추정→실체확인→시작조건확인→활동확인→실체속성확인
3.16.1	• 목표현상기술→실체추정→실체속성확인
3.16.2	• 목표현상기술→시작조건확인→활동확인→실체추정→실체속성확인→실체확인
3.16.3	• 목표현상기술→시작조건확인→활동확인→실체속성확인→실체확인
3.16.4	• 목표현상기술→활동확인→실체속성확인→실체확인
4.17.1	• 목표현상기술→실체추정→활동확인→시작조건확인→활동확인
4.17.2	• 목표현상기술→실체추정→실체확인→시작조건확인→활동확인→실체속성확인
4.17.3	• 목표현상기술→시작조건확인→활동확인→실체속성확인
4.17.4,5	• 목표현상기술→시작조건확인→활동확인→실체속성확인
5.11.1	• 목표현상기술→활동확인→실체속성확인
5.11.2	• 목표현상기술→시작조건확인→활동확인→실체추정→실체확인
5.11.3,4	• 목표현상기술→실체추정→실체확인
6.25.1	• 목표현상기술→실체추정→시작조건확인→활동확인→실체확인
6.25.2	• 목표현상기술→실체추정→실체확인→시작조건확인→활동확인→실체확인
6.25.3	• 목표현상기술→실체확인→활동확인
6.25.4	• 목표현상기술→실체확인
6.25.5,6	• 목표현상기술→시작조건확인→활동확인→실체속성확인
6.25.7	• 목표현상기술→시작조건확인→활동확인
6.25.8	• 목표현상기술→시작조건확인→실체속성확인→활동확인→시작조건확인→활동확인→실체확인
6.25.9	• 목표현상기술→시작조건확인→활동확인→실체확인
8.6.1	• 목표현상기술→활동확인
8.6.2	• 목표현상기술→실체추정
8.6.3	• 목표현상기술→시작조건확인→활동확인
8.6.4	• 목표현상기술→실체추정→활동확인
8.6.5	• 목표현상기술→실체추정→시작조건확인→활동확인
8.6.6	• 목표현상기술→실체속성확인→실체추정→실체확인
8.6.7	• 목표현상기술→실체추정→활동확인→실체확인→시작조건확인→활동확인→실체속성확인→실체확인
9.8.1	• 목표현상기술→활동확인→실체추정→시작조건확인→활동확인→실체확인
9.9.1	• 목표현상기술→실체추정→시작조건확인→활동확인→실체확인
9.9.2	• 목표현상기술→실체추정→실체속성확인→실체확인→시작조건확인→활동확인
9.9.3	• 목표현상기술→실체추정→시작조건확인→활동확인→실체속성확인→실체확인