

# Analysis of College Students' Understanding of Energy Changes in a System Undergoing a Thermodynamic Process

Youngrae Ji

Department of Physics Education, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

Jinwoong SONG\*

Department of Physics Education and Center for Educational Research,  
Seoul National University, Seoul 08826, Korea

(Received 8 January 2018 : revised 27 February 2018 : accepted 9 March 2018)

This study was conducted to analyze students' understanding of the energy change of the system undergoing a thermodynamic process and to draw implications for physics teaching and learning. The purpose of this study was to analyze the responses of 7 semi-structured questionnaires to 34 undergraduate students. First, students explained the energy change of the system caused by work, volume change, heat transfer, average kinetic energy, *etc.* However, attempts to explain the changes by using the same physical quantities led to different results according to the interpretation of the students. Second, students explained the energy change of the system mainly through energy transfer caused by work, but they did not understand the definition of work in thermodynamics; *i.e.*, that a force must exist on the boundary and the boundary must move. Third, students did not clearly distinguish between open, closed, isolated, and adiabatic systems and tended to classify systems based on whether they interacted with the outside. Based on the results of this study, some suggestions for the teaching and the learning of thermodynamics are presented.

PACS numbers: 01.40.Fk

Keywords: Thermodynamics, System, Energy, Force, College student

## 열역학 과정에서 계의 에너지 변화에 대한 대학생들의 이해 분석

지영래

서울대학교 사범대학 물리교육과, 서울 08826, 대한민국

송진웅\*

서울대학교 사범대학 물리교육과 & 교육종합연구원, 서울 08826, 대한민국

(2018년 1월 8일 받음, 2018년 2월 27일 수정본 받음, 2018년 3월 9일 게재 확정)

본 연구는 열역학 과정에서의 계의 에너지 변화에 대한 대학생들의 이해를 분석하고 물리 교수학습에 대한 시사점을 도출하기 위해 수행되었다. 이를 위해 서울에 소재한 사범대학 학부생 34명을 대상으로 수행된 총 7개의 반구조화된 문항에 대한 응답을 분석하였다. 설문지는 외력이 작용한 계의 에너지 변화에 대한 설명과 열역학에서의 일과 계의 정의를 묻는 문항으로 구성되었다. 첫째, 학생들은 계의 에너지



변화를 일, 부피 변화, 열전달, 평균운동에너지 등으로 설명하였으나, 같은 물리량을 통한 설명의 시도도 학생들의 해석에 따라 다른 결과를 가져왔다. 둘째, 학생들은 계의 에너지 변화를 일을 통한 에너지 전달을 중심으로 설명했으나, 경계에 힘이 작용하고 그 경계가 이동해야 한다는 열역학에서의 일의 정의를 정확히 이해하지 못하고 있었다. 셋째, 학생들은 열린계, 닫힌계, 고립계, 단열계를 명확히 구분하지 못하였으며 외부와의 상호작용 여부를 기준으로 계를 분류하려는 경향이 나타났다. 본 연구는 분석한 결과를 토대로 열역학의 교수학습에 대한 몇 가지 제언을 제시하였다.

PACS numbers: 01.40.Fk

Keywords: 열역학, 계, 에너지, 힘, 대학생

## I. 서론

에너지는 과학 전반에서 사용되는 여러 용어 중에서 가장 중요한 개념이지만 [1], 에너지 개념의 교수학습에서 학습자들이 겪는 어려움은 계속하여 보고되고 있다 [2]. 학생들의 에너지 개념 학습을 저해하는 원인을 규명하기 위해 다양한 측면에서 선행 연구들이 수행되어 왔지만, 여전히 에너지 개념을 학습하는 학생들은 어려움을 겪고 있다 [3-18]. 에너지에 대한 어려움에 대해서는, 개념이 갖는 추상성 [19], 그 추상성으로 인해 도입한 은유적 표현에 의한 개념적 혼동 [1,3], 일상 언어와 과학적 의미의 불일치 [20], 과학 분과에 따른 관심 분야와 에너지를 활용한 설명 방식의 차이 [21] 등이 지적되고 있다. 역설적이지만 이 연구 결과들은 통합 개념으로 에너지 개념을 적극적으로 활용해야 한다는 주장의 근거로 사용되기도 한다 [22].

물리교육 연구에서는 학생들이 힘과 에너지를 유사하게 생각하거나 지나치게 두 개념을 연결하려는 경향을 지적했다. Megalakaki와 Thibaut [4]는 저학년 학생들이 힘과 에너지를 구분하지 못하며 에너지를 힘의 작용을 결정하는 요인으로 생각한다고 보고했다. 고학년 학생들이 힘과 에너지 개념에 대한 비대칭적인 (asymmetrically) 발달을 보이는데, 이러한 비대칭적 이해는 운동하지 않는 (inanimated) 물체를 설명할 때 증가했다. Clement [5]를 비롯한 여러 연구자들은 학생을 비롯하여 성인들도 운동하는 물체에 힘이 내재해 있다는 생각을 갖고 있다고 보고했다 [5-8]. 일상생활에서 에너지와 힘이 유사하게 (synonymous) 사용된다는 점이 학습에 부정적인 영향을 미칠 수 있기 때문에 교수학습 과정에서 에너지 개념을 유의하여 지도할 필요가 있다 [9-13].

한편, 에너지를 계 (system) 개념을 중심으로 다루어야 한다는 관점도 주목할 필요가 있다 [14-21]. Lindsey 등 [14]은 에너지와 일 개념에 대한 학생들의 적용을 용수철과 물체로 구성된 계를 조사한 결과, 학생들이 어떤 계에서도 에너지가 일정하다는 잘못된 믿음을 갖고 있다고 지적했다.

그래서 학생들은 계의 총에너지를 통해 계를 해석하지 않고 운동에너지나 포텐셜에너지의 변화에 의해 전환된 일로 해석하려는 경향이 있다고 지적했다. 이를 근거로 총에너지를 통해 계를 해석하지 못한 학생들의 실패를 보완할 수 있는 튜토리얼을 제안했다. 김은경 등 [15]도 일과 에너지 등의 개념이 계와 관련되므로 계가 주요 물리 개념들과 관련하여 학습될 필요가 있음을 주장했다. 지영래 등 [16]은 계의 정의와 분류에 대한 학생들의 설명을 분석하고 학생들이 운동량 보존법칙을 계와 관련하여 분석하였다. 분석 결과, 학생들은 운동량 보존법칙이 전제하는 계인 고립계에 대해서 정확히 설명하지 못했으며 그에 적합한 시스템을 선택하지 못하는 경향을 보였다고 보고했다. 한편, 열역학 상황에서도 유사한 목적의 연구가 수행되었다. Robertson과 Shaffer [17]는 기체분자 운동이론에 포함된 조건들을 토대로 에너지 개념이 이해가 되어야 한다고 주장하였다. 기체분자 운동이론에 포함된 조건은 계를 구성하는 기체와 그 기체로 구성된 계에 대한 것으로 구분된다. 기체운동에 대한 미시적 이해를 토대로 계의 상태가 해석되어야만 에너지 개념에 대한 이해가 가능한데 대부분의 학습자들은 그들의 관계를 이해하고 적용하는 것에 어려움을 갖고 있다고 지적했다.

열역학은 다입자계에서 에너지를 비롯한 열과 일이 복합적으로 관여한 상황을 이해하기 때문에 계와 에너지에 대한 이해가 핵심이다 [18]. 따라서 열역학에서는 소수의 입자에 대한 위치와 운동량을 파악하여 해석하는 뉴턴 역학적 접근과 달리 통계적 상황을 이용하여 계의 상태를 예측해야 한다 [23-25]. 가역·비가역 과정과 엔트로피 개념은 이상적인 계를 규정하고 이해를 전제하고 있다는 점이 학습자에게 어려움을 제공한다 [26-29]. 닫힌계를 포함한 고립계의 설정은 엔트로피 이해에서 강조되는데 이는 가역가정에 대한 이해와도 관련된다 [30-32]. 따라서 닫힌계 (또는 밀폐계)와 반대되는 열린계 (또는 유동계)와 함께, 중등물리와 일반물리학 수준에서 문제 상황에서 제시되는 단열계 등은 주의하여 지도될 필요가 있다. 이에 추가하여 열역학을 이해할 수 있는 방안으로 다입자계에서의 통계적

Q1. The figure shows that two objects are connected by a string which can ignore the mass. Both objects are suspended with no friction with the ground. A constant force of 20N was applied to object A in the left direction. Choose a change in the magnitude of the mechanical energy of the two object systems and explain why.

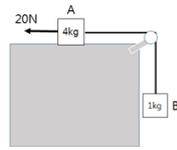


Fig. 1. (Color online) The change of mechanical energy of two body systems.

처리, 가역과정의 조건, 열역학적 평형에 대한 충분한 학습이 제안되기는 했지만 [18], 학습자들의 어려움은 여전하다. 본 연구의 목적은 대학생들이 열역학 과정에서의 계의 에너지 변화에 대해 학생들이 보이는 이해의 양상을 탐색하고, 이를 통해 에너지에 대해 어떻게 접근하는 것이 바람직한지에 대해 논의해 보는 것이다. 연구는 일반적인 문제 상황에 대한 학생들의 설명 분석으로 시작하여 그 현상에 대한 설명을 위해 기초가 되는 기본 개념인 열역학에서의 일, 계에 대한 설명을 분석하여 제시하는 방식으로 전개하였다.

## II. 연구 방법

### 1. 연구대상 및 연구과정

본 연구는 서울에 위치한 사범대학의 물리교육과 학생 34명을 대상으로 한다. 연구 참여자 전원은 일반물리학 수준 이상의 물리학 강좌를 이수하였다. 구체적으로 일반물리학과 역학을 이수한 학생이 19명, 일반물리학까지만 이수한 학생이 11명, 일반물리학, 역학, 열역학을 모두 이수한 학생은 4명이었다.

설문지에 사용된 문항 개발은 다음의 과정으로 진행되었다. 설문 문항을 개발하기 위해 국내에서 일반적으로 사용하는 물리학 교재를 선택하고 [33-35] 에너지 관련 단원을 분석했다. 해당 단원에 주로 사용되는 내용을 토대로, 열역학을 중심으로 하되 열역학의 내용과 비교하여 논의하기 위해 역학 문제를 포함하였다. 개발한 설문지는 물리교육을 전공한 박사 2인과 문항에 대한 타당성 검토를 실시하여 문항을 수정하고, 수정된 문항을 물리교육 전공 대학원생들과 현직 교사들 약 10인이 참여하는 학술 공동체에서 피드백을 받았다. 피드백은 설문지의 구성, 난이도, 문항에서 사용된 문장을 중심으로 이뤄졌으며, 의견을 수렴하여 예비조사에 사용할 설문지를 완성했다. 예비조사는 물리교육 전공 학부생 3인과 물리교육 전공 대학원생 2인을 대상으로 2014

Q2. As shown in the figure, the cylinder filled with ideal gas is in equilibrium. The piston's mass and all friction are negligible. And heat transfer is impossible. When the piston moves due to a force 10N acting in the right direction on the piston, select the change of internal energy and explain why.



Q3. When heat transfer is possible through the boundary of the cylinder, compare your answer to the internal energy change in Q2 and explain why.

Fig. 2. (Color online) The change of internal energy of gas systems.

년 7월과 8월에 실시했다. 이후 예비설문 결과를 정리하고 검토하여 본 연구에 사용할 설문지 최종본을 완성했다. 예비설문지의 자료는 설문지의 개선 과정에서만 사용하고 본 연구의 결과에는 포함하지 않았다. 본 조사는 2014년 11월 말에서 12월 초까지 총 4회 실시했으며, 물리교육과 학부 강좌 수강자 중 연구 참여를 수락한 학생들을 대상으로 이뤄졌다.

문항1(Q1, Fig. 1)은 질량을 무시할 수 있는 줄에 연결된 두 물체에 힘이 작용했을 때의 역학적에너지 변화를 물어보는 문항이다. 이 문제는 역학적 일이 계의 에너지 변화에 미치는 영향을 학생들의 이해를 확인하기 위한 목적으로 제시되었다. 문항1은 비보존력인 외력이 작용하는 상황으로, 운동에너지와 포텐셜에너지의 변화량을 각각 계산하거나 계에 작용하는 물체에 작용하는 보존력과 외력의 크기와 방향을 고려하여 역학적에너지가 증가함을 설명해야 한다. 문항2(Q2, Fig. 2)는 열의 이동이 불가능한 닫힌계에서, 평형상태였던 기체계에 작용한 외력에 의해 계의 부피가 확장된 경우의 내부에너지 변화를 묻는 문항이다. 열역학에서 관습적으로 사용하는 일은 기체계가 일을 했는지 또는 받았는지를 통해 일의 부호를 결정하는데, 이 문제는 계와 주위의 온도 차로 인해 부피가 변화한 것이 아니라, 평형상태였던 계가 외력에 의해 강제적으로 팽창했을 때의 에너지 변화에 대한 학생들의 설명에 초점을 두었다. 평형상태의 계에 힘이 작용했을 때 외부에서 계로 에너지가 유입되었다고 해석하지 않고 기체계의 부피 변화를 통해 기체계가 일을 했는지 판단하는 것이 필요하며, 이 문항에서는 기체계의 부피가 팽창했기 때문에 외부에 일을 함으로써 내부에너지가 감소했다고 설명해야 한다. 문항3(Q3, Fig. 2)은 동일한 문제 상황이되 열의 이동이 가능한 닫힌계에서의 내부에너지 변화를 물어보는 문항으로 문항2의 응답과 비교하여 내부에너지의 변화를 설명하도록 했다. 문항2와 같이 일을 통한 에너지 전달 방향을 계가

Table 1. Questionnaires about the system and work.

Q4. Explain the mechanical work and thermodynamic work in detail.
Q5. What system dose the first thermodynamic law apply to?
Q6. Explain the isolated, closed, open, and adiabatic system in detail.

한 일로 설명해야 하고, 추가로 준정적 과정 여부의 판단, 열의 이동이 가능한 경우와 이동이 가능하지 않은 경우 한 일의 크기 비교, 외부의 열원에 의해 유입되는 열에너지의 양 등을 고려해야 한다. 해당 문항은 학생들이 설명을 위해 사용하는 변수들로 무엇을 제시하고 그 변수들을 어떻게 설명하는가에 초점을 두고 분석하였다.

문항4(Q4, Table 1)는 열역학에서의 일과 역학에서의 일 에 대한 학생들의 이해를 알아보는 문항으로, 두 가지 일 개념을 구체적으로 설명하도록 했다. 역학적 일은  $W = \int F ds$  로 정의하는 것을 과학적 설명으로, 열역학에서 사용하는 일은  $W = \int PdV$  보다 구체적인 설명이 요구된다. 열역학 상황에서의 일은 다음의 조건이 포함된 경우를 과학적 정의로 사용했다. 첫째, 계가 일을 한다는 것은 계와 주위를 경계 짓는 ‘물리적 또는 추상적’ 경계에 힘이 작용해야 한다. 둘째, 경계의 이동이 있어야 한다 [36]. 이를테면 진공 상태의 빈 공간으로 팽창하는 기체계가 한 일은 0이다. 이 경우 경계의 변위(또는 기체가 점유한 공간의 확장)가 있더라도, 기체 계는 진공으로부터 어떠한 힘을 받지 않는다. 즉, 경계를 통해 계로 전달되는 에너지가 없다.

한편 문항5(Q5, Table 1)는 열역학 제1법칙이 적용되는 계를 학생들에게 답하도록 요구하였다. 열역학 제1법칙은 열, 일, 물질 유동, 입자들의 확산적 상호작용 등을 포함하여 논의할 수 있으므로 특정 계에 한정하여 적용되는 법칙이 아니다. 학생들이 특정 계에서만 적용되는 법칙이라고 설명했는지를 살펴보고, 열역학에서 다루는 네 가지 계에 대한 학생들의 설명을 요구한 문항6과 함께 분석하였다.

문항6(Q6)은 고립계, 닫힌계, 열린계, 단열계에 대한 학생들의 이해를 알아보는 문항이다. 열역학 상황에서의 일 개념이 계와 밀접하다는 것은 앞에서 논의했다. 일 개념과 함께 열 개념도 계와 밀접하다. 열과 일의 유사점에 대한 Cengel 등 [36]의 지침을 살펴보는 것은 중요하다. 첫째, 열과 열역학적 일은 경계에서 확인되는 물리량으로 계의 경계를 통과할 때 확인되는 경계현상 (boundary phenomena) 이다. 둘째, 계는 에너지를 보유할 수 있지만 열이나 일을 보유하지는 못한다. 셋째, 열과 일은 과정과 관계되며 상태량이 아니며, 경로함수 (path function) 이다. 요컨대 열역

Q7. As shown in the figure, the ideal gas is in the left side of the closed valve and on the right is the vacuum. Answer the following questions about what happens when the valve open rapidly. What is the work done by an ideal gas? And please explain the reason why.

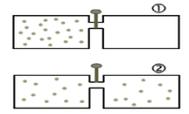


Fig. 3. (Color online) The work of ideal gas in the process of free expansion.

학적 일은 계와 관련하여 이해되어야 하며 열역학 과정을 거치는 계의 변화 상태를 주목하여 해석해야 함을 의미한다. 네 가지 계에 대한 학생들의 응답은 열 ( $\delta Q$ ), 일 ( $\delta W$ ), 질량유동 ( $\delta M$ ) 을 기준으로 분류하고 논의하였다. 고립계는 외부와의 상호작용이 없다. 닫힌계와 열린계는 질량유동의 유무를 기준으로 구분하며 열과 일을 통한 에너지 전달을 허용한다. 단열계는 열을 통한 에너지 전달이 없으며 닫힌계와 열린계의 형태가 될 수 있다.

Fig. 3의 문항7(Q7)은 자유팽창 과정에서의 이상기체 계의 일에 대한 학생들의 이해를 알아보는 문항이다. 이 문항은 자유팽창 과정에서 계가 일을 했는지 안했는지에 대한 학생들의 결정보다, 학생들이 일을 어떻게 이해하고 설명하고 있는지를 살펴보고 문항4의 응답과 비교하는 데 목적이 있다. 자유팽창 과정에서는 순간적인 코르크의 제거로 인한 경계의 변위는 있지만 기체계가 진공으로부터 받는 힘이 없기 때문에 기체계가 한 일이 없다.

### III. 연구 결과

#### 1. 계에 작용한 외력이 한 일은 계의 에너지를 증가시키는가?

계의 에너지 변화는 계의 물리적 상태를 결정한다. 에너지 전달 매커니즘의 유형과 정의를 이해하는 것은 에너지 변화를 추정하기 위해 필요하다. 열역학 과정에서 에너지 전달 매커니즘은 세 가지로 일, 열전달, 질량유동으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 계에 작용한 힘이 계의 에너지에 어떻게 영향을 미치는가에 대한 학생들의 이해를 알아보기 위해 두 물체 계와 기체 계에 대한 문제를 사용하였다.

문항1[Q1]은 두 물체 계에 작용한 힘과 역학적에너지의 관계에 대한 문항이며, 문항2[Q2]는 기체 계에 작용한 힘과 내부에너지의 관계에 대한 문항이다. 문항1과 2는 두 가지 측면에서 유사하다. 첫째, 일정한 힘이 계에 작용했으며, 그 힘은 계 내부에서 발생한 힘이 아닌 외부에서 작용한 외력이었다. 둘째, 문항1과 문항2에서 변화에 대한 설명을 요구한 에너지는 운동에너지와 포텐셜에너지의 합으로 정

Table 2. Students' answers to Q1 &amp; Q2: mechanical energy and internal energy (Number of responses).

Change of Energy	Mechanical Energy (Q1)	Internal Energy (Q2)
Increase	*27/34	6/34
Constant	3/34	8/34
Decrease	-	*16/34
We cannot know	-	1/34
no response	4/34	3/34

\* Scientific answer

의되는 물리량이다. 한편, 두 문항의 첫 번째 차이점은 힘이 작용하는 위치이다. 문항1은 계의 구성요소에 직접 힘이 작용한 반면, 문항2는 계의 경계에 힘이 작용하였다. 두 번째는 문항1에서는 역학적 상황에서 일반적으로 사용하는 블록이 계의 구성요소였으며, 문항2 열역학 상황에서 주로 제시되는 이상기체였다는 점이 다르다.

문항2는 문항1에 비해 상대적으로 다양한 응답이 나타났다(Table 2). 문항1에서는 전체 응답자 34명 중 27명이 역학적에너지가 증가한다고 응답했으며, 일정하게 유지될 것이라는 응답은 3명이었다. 문항2에서는 내부에너지가 감소할 것이라는 응답이 16명으로 가장 많았지만, 일정하거나(8명) 증가할 것(6명)이라는 응답도 다수 있었다.

### 1) 계의 에너지 변화에 대한 학생들의 설명 방식

문항1과 문항2에는 모두 외력이 작용했다. 계가 어떤 상호작용을 허용하는지에 대한 학생들의 이해가 계의 에너지 추정에 영향을 주지만, 이 절에서는 계의 에너지 변화에 대한 학생들의 설명 방식을 분석하는 것에 초점을 두었다. 계에 대한 논의는 본 연구의 후반부에서 다룰 것이다. Table 2의 결과와 같이 문항1과 문항2에 대한 학생들의 응답은 대비된다. 문항1에서는 외력이 에너지를 계에 전달한 것으로 이해한 학생들이 가장 많았으나 문항2에서는 계의 내부에너지가 감소한다고 응답한 학생들이 가장 많았다. 평형상태에 작용한 외력이 왜 다른 결과를 이끌어냈는지를 학생들의 설명을 통해 살펴보았다.

우선 문항1에 대한 학생들의 설명을 살펴보자. 문항1의 경우 34명의 학생 중 27명이 역학적에너지가 증가할 것이라고 응답했다. 해당 문항에 대해 답하지 않은 4인을 제외하면, 계의 에너지 변화에 대한 응답자 중 90%가 '증가'를 선택한 것이다. 에너지 변화에 대한 세부적인 설명은 세 가지로 분류되었다(Table 3). 첫째, 12명은 운동에너지와 포텐셜에너지를 각각 계산하여 역학적에너지의 변화를 설명했다. 역학적에너지를 정의하는 두 에너지의 합을

Table 3. Students' approaches to solve the Q1.

Types	Change of Internal energy			Number of responses
	* ↑	→	↓	
Calculation each energy	12	0	0	12/34
Work by outside of system	10	2	0	12/34
Only explain as a Force	5	1	0	6/34
No response	0	0	0	4/34
	27/34	3/34	0/34	

\*Scientific answer, ↑: Increase, →: Same, ↓: Decrease.

이용하여 변화를 계산한 학생들은 모두 증가할 것이라고 응답했다. 둘째, 계의 외부에서 작용한 일로 역학적에너지 변화를 설명한 학생이 12명이었다. 12명 중 10명의 학생은 일을 한 주체가 계의 외부이기 때문에 역학적에너지가 증가할 것으로, 같은 이유이지만 2명은 변화가 없을 것이라고 설명했다. 마지막으로 6명의 학생들은 힘의 작용만으로 역학적에너지의 변화를 설명하였고 5명의 학생이 증가할 것이라고 응답했다. 예를 들어 '외부에서 힘이 작용했으니 계의 에너지는 증가함'이라는 설명이 힘의 작용만으로 계의 에너지를 설명하려 한 경우이며, 이 학생들은 외부에서 힘이 작용했기 때문에 계의 에너지는 증가할 것이라는 인과적 설명을 하였다.

한편, 문항2에서는 일정한 힘이 작용한 단열계의 내부에너지 변화를 선택하고 그 이유를 설명하도록 했다. 문항1에서는 에너지 변화가 증가할 것이라는 응답이 34명 중 27명이었던 반면 문항2의 응답은 변화가 다양하게 나타났다. 내부에너지가 감소할 것이라는 응답이 16명으로 가장 많았으며 8명의 학생은 일정, 6명은 증가를 선택하였다. 설명 방식을 분류하면 다음과 같다(Table 4).

첫째, 계 외부에서 작용한 힘, 즉 '외력과 관련된 일'로 설명한 학생이 14명이었다. 그러나 문항1에서 외부의 힘이 작용하여 계의 에너지가 증가할 것이라는 응답이 대부분이었던 결과와 문항2의 경우는 양상이 달랐다. 14명의 학생들 중 7명은 내부에너지 감소, 4명은 증가, 3명은 일정하다고 선택했다. 즉, 에너지 전달 매커니즘의 하나인 '일'을 사용하여 문제 상황에 접근했음에도, 계의 에너지 변화에 대해 같은 결과에 도달하지 않았음을 확인할 수 있다. 이에 대해서는 열역학 과정에서의 일에 대한 학생들의 이해를 분석하는 다음 절에서 구체적으로 논의할 예정이다.

둘째, 기체분자의 평균운동에너지의 변화로 계의 에너지 변화를 설명한 학생이 6명이었다. 6명의 학생 중 4명은

Table 4. Students' approaches to solve the Q2.

Types	Change of Internal energy					Number of responses
	↑	→	* ↓	↓↑	?	
Internal energy would be related with <u>work</u> .	4	3	7	0	0	14/34
Internal energy would be related with <u>average kinetic energy</u> of gas in the system.	1	4	3	1	0	9/34
Internal energy would be related with the <u>volume's change</u> of the system.	0	1	5	0	0	6/34
I don't know	1	0	1	0	3	5/34
	6/34	8/34	16/34	1/34	3/34	

\* Scientific answer, ↑: Increase, →: Same, ↓: Decrease, ↓↑: We cannot know, ?: I don't know

Table 5. Students' answers to Q3 as compared with Q2: a case of internal energy.

Question 2		Change of internal energy		Question 3	
Question 2	Number			Question 3	Number
Increase	6/34	→		It is different with adiabatic process.	*5/34
				We cannot know	1/34
Constant	8/34	→		It is different with adiabatic process.	*6/34
				We cannot know	2/34
Decrease	16/34	→		It is different with adiabatic process.	*10/34
				It is same with adiabatic process.	3/34
				We cannot know	3/34
We cannot know	1/34	→		It is same with adiabatic process.	1/34
No response	3/34	→		No response	3/34

\* Scientific answer

일정, 3명은 감소, 1명은 증가, 1명은 판단할 수 없다고 설명했다. 이들은 이동하는 피스톤, 즉 계의 경계와 충돌하는 기체분자의 속도의 크기 변화에 주목했다. 그래서 이동하는 피스톤과 충돌 전후의 기체분자의 속도의 크기를 정성적으로 판단하고 기체계의 평균운동에너지 변화를 추론했다. 이들은 내부에너지를 기체의 평균운동에너지와 양의 상관관계로 이해하고 있었으며, 기체분자의 포텐셜에너지에 대해서는 언급하지 않았다. 이상기체 분자라는 가정에 따라 계를 점유한 기체분자 간의 거리는 무시했다는 점에서 화학적 결합에너지를 고려하지 않는 것은 적절해 보인다.

셋째, 기체 계가 점유한 부피(공간)의 증가로 내부에너지 변화를 설명한 학생이 6명이었다. 6명의 응답자 중 5명은 감소, 1명은 일정함을 선택했다. 예를 들어 부피가 팽창했기 때문에 내부에너지는 감소한다는 형태로 설명한 부류가 이 유형에 해당한다. 이 유형의 학생들로부터 부피 변화가 어떻게 내부에너지 변화로 이어지는가에 대한 구체적인 설명을 확인할 수 없었다. 즉, 이 학생들의 설명에서는 부피의 변화가 직접 내부에너지 변화에 대한 결정으로 이어졌으며, 에너지 전달 매커니즘에 대한 구체적인 설명이 드러나지 않았다.

요컨대 계에 작용한 외력은 반드시 계의 에너지를 증가시키지 않는다. 물체의 운동 상태가 합력에 의해 추정되어야 하는 것과 같이, 기체 계에 힘이 작용했다는 상황만으로 계의 에너지의 변화를 추정해서는 안된다. 즉, 계에 작용한 힘은 계의 내부에서 작용하는 힘과 함께 고려해야 한다. 유체계의 경우 이 힘은 압력으로 변환하여 이해하는 것이 병행되어야 하며, 최종적으로 계의 에너지는 계와 외부와의 상호작용이 고려되어야 한다.

2) 내부에너지 변화에 대한 학생들의 설명 방식: 열에너지 이동 불가 → 열에너지 이동 가능

문항3(Q3)은 문항2(Q)에 연결된 문항으로 실린더를 통해 열에너지의 이동이 가능한 상황이다. 이 문항은 열역학 과정에서의 일과 내부에너지 간의 관계를 계의 변화와 연결하여 살펴볼 목적으로 제시되었다. 학생들은 열에너지의 이동이 불가능한 상황인 문항2의 내부에너지와 ‘달라질 것’(21명), ‘알 수 없음’(7명), ‘동일함’(3명) 순으로 응답했다. 열에너지의 이동 가능 여부에 따른 내부에너지 변화에 대한 응답에서는 다음과 같은 특징이 나타났다(Table 5).

첫째, 열역학 과정이 열에너지의 이동이 가능한 계에서 일어날 때 문항2와 비교하여 내부에너지가 달라질 것이라고 설명한 학생은, 문항2에서 내부에너지가 증가할 것이라고 응답했던 6명 중 5명, 일정할 것이라 응답했던 8명 중 6명, 감소할 것이라 응답했던 16명 중 10명으로 총 21명이었다. 둘째, 문항2에서 내부에너지의 변화를 ‘알 수 없다(we cannot know)’는 응답이 1명이었는데, 열에너지의 이동이 가능했을 때 내부에너지 변화가 한 가지 응답으로 확정하기 어렵다는 응답이 6명으로 증가했다. 문항2의 응답과 비교하면, 증가할 것이라고 대답했던 6명 중 1명, 일정할 것이라고 응답했던 8명 중 2명, 감소할 것이라고 응답했던 16명 중 3명이 내부에너지를 알 수 없다고 설명했다. 셋째, 문항2의 내부에너지 변화와 동일할 것이라는 응답은 총 4명이었으며, 문항2에서 감소할 것이라 응답했던 16명 중 3명과 알 수 없음으로 응답했던 1명이었다.

문항3에서 열에너지의 이동 여부에 따른 내부에너지 변화에 대한 응답에서 나타난 학생들이 사용한 설명을 구체적으로 살펴보면 다음과 같다.

첫째, 내부에너지 변화가 단일 상황과 다를 것이라고 설명한 21명 중 13명은, 계의 경계를 통한 열에너지의 이동( $\delta Q$ )이 내부에너지에 영향을 줄 것이라고 설명했다. 그들은  $\delta Q$ 가 열역학 제 1법칙에 포함된 항이므로 내부에너지가 변할 수밖에 없다고 생각하고 있었다. 즉,  $\delta U = \delta Q - \delta W$ 에서, 열에너지가 전달이 가능함에 따라  $\delta Q$ 가 0이 아니므로 내부에너지는 단일 상황과 달라진다. 그러나 이 학생들은 내부에너지가 어떻게 달라질 것인지 설명하지는 않았다.

둘째, 내부에너지 변화가 단일 상황과 다를 것이라고 설명한 21명 중 5명은, 열에너지가 이동 가능한 경우 내부에너지가 일정할 것이라고 설명했다. 그 이유는 열에너지가 이동 가능한 계에 대해 학생들의 잘못된 이해에 근거하고 있었다. 열에너지가 이동 가능한 닫힌계는 에너지 전달 매커니즘 중 물질유동을 제외한 일과 열을 통한 에너지 상호작용이 가능한 계이지만, 이 학생들에게는 내부에너지를 비롯한 에너지 전반이 계에서 일정할 것으로 이해하고 있었다. ‘닫혀 있음’의 의미가 그들에게는 ‘에너지 상호작용이 닫혀 있음’을 의미했다.

셋째, 내부에너지의 변화를 알 수 없다고 응답한 7명은, 내부에너지의 변화를 예측할 수 없는 이유가 열에너지의 전달 방향에 대한 정보를 얻을 수 없기 때문이라고 설명했다. 정보 부족의 이유로는 계와 주위의 온도가 제시되지 않았기 때문이었다. 그러나 이러한 응답은 문제 상황에 대한 이해가 부족했기 때문으로 판단된다. 문제3도 문제2와 동일하게 처음에 평형상태를 이루고 있었고 외력의 작용에 의해 피스톤이 이동했기 때문에 계와 주위의 온도가

동일했다는 것을 의미한다. 따라서 피스톤의 이동 후 계의 온도 변화를 통해 열에너지의 전달 방향을 예측할 수 있다.

문항1~3에 대한 바람직한 접근 방식은 다음과 같다. 문항1은 역학적에너지가 운동에너지와 포텐셜에너지의 합이므로 각 물리량의 변화를 계산하거나 일-에너지 정리를 활용하여 설명할 수 있다. 보존력만이 작용하는 경우라면 역학적에너지가 일정하므로 비보존력의 작용 여부를 확인하는 것이 문제상황 인식에서 중요하다. 문항2는 계를 선택하고 일, 열전달, 물질유동 중에서 외부와 상호작용(또는 이동) 가능한 물리량을 선별해야 한다. 문항2의 경우 일을 통한 에너지 전달만 가능한 계이므로 일의 크기와 부호를 계산한다. 계가 일을 했는지 받았는지에 대한 판단은 작용한 외력의 크기와 방향보다는 계의 부피 변화로 판단한다. 이는 물체의 운동상태를 해석할 때 물체에 작용한 모든 힘을 계산하지 않고, 물체에 작용한 합력을 운동방정식에 대입하여 가속도를 계산하는 것과 동일하다. 즉, 외력이 기체계를 압축시키는 방향으로 작용하거나 그 반대라도, 기체계가 팽창했으므로 기체계는 외부에 일을 한 것이다. 한편 문항3은 계와 주위의 열에너지의 이동을 허용한다. 내부에너지의 증감만 추정하는 경우라면, 문항2에서와 같이 부피의 변화를 통해 일을 통한 에너지 전달을 확인하고 온도차에 의한 열에너지 이동을 고려한다. 정확한 수치 계산을 위해서는 계의 온도, 압력, 엔트로피, 비열 등의 추가 정보가 필요하다.

## 2. 학생들은 계의 에너지에 대해 왜 어려움을 갖게 되는가?

1) 계의 에너지 이해에 결정적인 ‘일을 했는가? 하지 않았는가?’의 판단

학생들은 내부에너지의 변화를 결정하고 그 이유를 설명하는 과정에서 일을 통한 에너지 전달 매커니즘을 가장 많이 사용하였다. 그런데 주목할 점은 열역학적 일을 통해 내부에너지를 고려했음에도 불구하고 그들은 공통된 결론으로 도달하지 않았다는 것이다. 학생들이 왜 다른 결론을 도출했는지를 그들의 설명을 통해 추측할 수 있다.

첫째, 내부에너지가 감소될 것이라 응답한 학생들은 기체계가 외부에 일을 한 것으로 판단했다. 예를 들어 학생1은 “부피가 팽창하여 기체가 일을 하였으므로 내부에너지는 감소했을 것”이라고 설명했다. 학생1이 기체계의 팽창이 계가 한 일이라는 설명에는  $W = \int PdV$ 이 사용되었다. 이 설명에서 과학적인 오류를 지적하기는 어렵지만 명확하지 않은 부분은 여전히 남는다. 계가 팽창한 것은 옳지만 기체가 한 일이 맞는가? 문항2의 초기 조건은 평형상태였고

외력이 피스톤의 운동 상태의 변화를 가져왔다는 점이, 학생 1의 설명에 의문점을 제기하게 한다.

학생2의 설명은 이러한 의문에 대한 실마리를 제공한다. 학생2는 “힘의 방향과 이동거리의 방향이 같고 따라서 기체계가 외부에 일을 했다.”고 설명했다. 여기서 학생2가 지칭하는 힘이 외력이므로, 외력과 변위의 방향이 같기 때문에 기체가 일을 한 것이라고 설명했다고 볼 수 있다. 그런데 힘 (또는 합력일지라도)의 방향으로 변위가 발생했는데 왜 힘 (여기서는 외력)이 한 일이 아니라 기체계가 한 일이라고 설명하는가? 열역학 과정에 한정하여 학생2와 같은 경우가 계의 부피 변화와 일을 직접적으로 연결하여 이해하고 있을 가능성도 있다. 즉, 계의 팽창과 수축이라는 상태 변화라는 정보로 일의 주체를 결정하는 것을 의미한다. 만약 그 학생이 기체계가 한 일이 아니라 외력이 한 일이라고 이해했다면, 에너지 변화에 대한 판단은 일정하거나 증가할 것이라는 결론에 도달했을 것이다.

둘째, 내부에너지가 증가할 것이라고 생각한 학생들은 계가 외부로부터 일을 받은 것으로 설명했다. 학생3은 “피스톤을 당겨 계에 100 J의 일을 해주었다. 이 일은 내부에너지로 갈 것”이므로 계의 에너지가 증가할 것이라고 설명했다. 학생4는 “ $U = W + Q$ 인데,  $W > 0, Q = 0$ 이다. 따라서 내부에너지는 증가”할 것이라고 이유를 설명하고 있었다. 학생4도 계가 일을 통해 에너지를 전달 받은 것으로 이해하고 있었다.

이러한 차이는 문제1의 응답과 비교하면 더욱 두드러진다. 1번 문항에서 34명의 학생 중 27명의 학생이 계의 에너지가 증가할 것이라 응답했고, 그 중에서 외부에서의 전달된 에너지가 일의 형태로 유입될 것이라 설명한 학생 12명 중 10명이 계의 에너지를 증가한다고 설명했다. 그리고 2명의 학생도 계의 에너지는 일정하다고 응답했으며, 한 명의 학생도 계의 에너지가 감소한다고 생각하지 않았다. 이어지는 절에서는 열역학 과정에서의 일에 대한 학생들의 설명을 분석하여, 계의 에너지에 대한 이해가 다른 양상을 보인 이유를 알아보려고 한다.

① 열역학적 일 (thermodynamic work) 과 역학적 일 (mechanical work)은 어떻게 다른가?

역학적 일과 열역학적 일의 차이를 살펴보기 위해 문항1과 2를 풀이한 34명의 대학생들에게 두 가지 일을 설명하도록 요구했다. 34명의 응답자 중 31명의 학생들이 역학적 일을  $W = \int F ds$ 로 설명하고 있었다.

그러나 열역학적 일에 대한 설명은 상대적으로 다양한 형태의 응답이 나타났다 (Table 6). 계에 작용하는 압력과 부피를 곱한 양으로 열역학적 일을 설명한 학생이 8명으로 가장 많았으며, 7명의 학생들이 계의 에너지 변화량을 열역

Table 6. Students' answers to explanation of thermodynamic work.

Response	$W = \int PdV$	Change of energy	Potential of system	Etc.	I don't know
No. of responses	8/34	7/34	3/34	4/34	12/34

Table 7. Students' explain to work of the free expansion.

Responses	Students said that the reason why	Number of responses
	- that process is freely expansion (or diffusion).	8/34
Work not done	- I can not explain.	8/34
	- force is not acted by the other side.	*5/34
	- etc.	4/34
Work done	- volume of gas system is increasing.	3/34
	- number of collision is decreasing.	1/34
	- I can not explain.	2/34
No response		3/34

\* Scientific answer

학적 일이라고 설명하였다. 계의 포텐셜 (에너지), 즉 계의 잠재적인 능력을 열역학적 일이라고 설명한 학생도 3명 있었다. 기타 응답으로는 ‘역학에서의 일과 열에너지의 합의 변화량’, ‘열 이동의 원인’ 등이 있었다. 한편 34명 중 12명의 학생들이 열역학 과정에서의 사용되는 일을 설명하지 못했다는 것을 주목할 필요가 있다.

그렇다면 열역학에서 다루지는 일 개념에 대한 학생들의 이해가 적절한 것인지 알아볼 필요가 있다. 문제1과 2에 대한 논의로 돌아가기 위해, 열역학에서의 일을 다음과 같이 규정하도록 할 것이다 [36]. 첫째, 계가 일을 한다는 것은 계와 주위를 경계 짓는 ‘물리적 또는 추상적’ 경계에 힘이 작용해야 한다 (조건①). 둘째, 계의 경계가 이동해야 한다 (조건②). 예를 들어 기체계가 진공 상태의 빈 공간으로 팽창할 때, 기체계가 한 일을 생각해 보자. 자유팽창 과정이라고 부르는 이 열역학 과정은, 경계의 변위 (또는 기체가 점유한 공간의 확장)가 있지만 (조건②) 기체계는 진공으로부터 어떠한 힘도 받지 않는다 (조건①). 따라서 자유팽창 과정에서 기체계가 한 일은 없으며, 팽창하는 계의 경계에서 열역학적 일을 통한 에너지 전달은 없다.

열역학 상황에서의 일에 대한 학생들의 생각을 구체적으로 살펴볼 필요가 있었다. 따라서 경계의 이동과 계의 경계에 작용하는 힘을 생각하여 답할 수 있는 자유팽창에

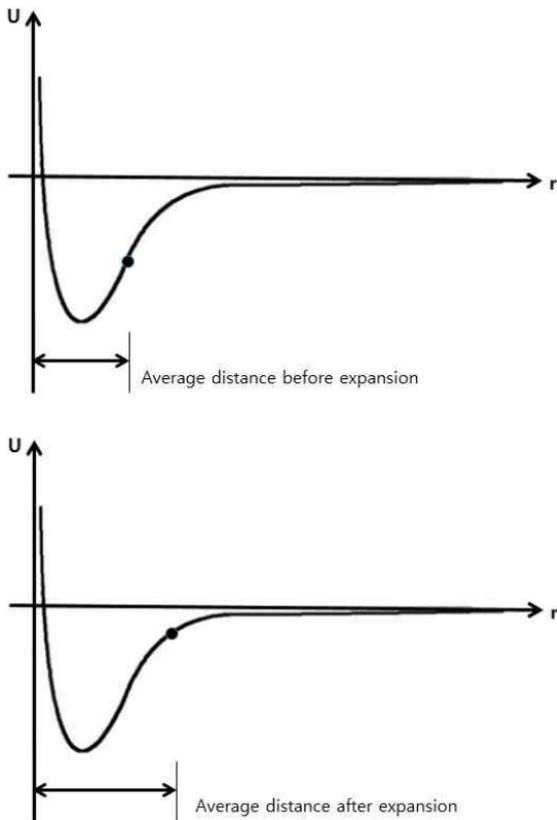


Fig. 4. Potential energy according to intermolecular distance during expansion process.

대한 문제를 제시할 필요가 있었으며 (Q6), 그 결과는 Table 7과 같다.

자유팽창 과정에서 기체 계가 일을 하지 않았다고 응답한 학생은 34명 중 25명 있었으며, 일을 했다고 응답한 학생은 6명이었다. 기체 계가 일을 하지 않았다고 설명한 학생 중 16명은 그 이유를 구체적으로 설명하지 못했다. 16명 중 8명이 자유롭게 팽창하는 과정이기 때문이라고 응답하거나 확산이어서 기체 계가 일을 한 것이 아니라고 설명했으며, 8명은 일을 하지 않은 이유를 설명하지 못하겠다고 응답했다. 5명의 학생만이 과학적으로 설명했는데, 그들은 기체 계가 팽창하는 과정에서 외부에 힘이 작용하지 않기 때문이라고 생각하고 있었다. 한편, 일을 했다고 설명한 6명의 학생 중, 3명은 기체 계의 부피가 증가했기 때문에 일을 한 것이라고 설명했으며, 2명은 기체의 충돌수가 감소할 것이기 때문에 일을 한 것이라고 설명했다.

다시 문항2와 문항3에 대한 결과로 돌아가 보자. 평형상태였던 계에 작용한 외력이 한 일은 계에 에너지를 전달하는가? 또한 문항7의 자유팽창 과정과 무엇이 다른가? 준정적 과정 여부에 대한 논의는 제외하고 일을 통한 에너지 전달에만 초점을 두도록 하겠다. 첫째, 문항2와 3은 열역학적 일에 대한 조건①과 조건②를 모두 만족한다. 즉, 물리적 경계에

Table 8. Students' responses to which system is available for use the first thermodynamics law.

Closed system	Isolated system	Adiabatic system	Open system	Number of responses
✓				8/34
	✓	✓		3/34
		✓		3/34
			✓	2/34
✓		✓		1/34
	✓			1/34
✓	✓	✓	✓	1/34
10/34	5/34	8/34	3/34	

힘이 작용해야하며 경계의 이동이 있다. 반면, 자유팽창과정에서는 추상적 경계의 이동이 있지만 경계에 작용하는 힘이 없기 때문에 일을 통한 에너지 상호작용은 없게 된다. 둘째, 문항2와 문항3은 평형상태에서 외력에 의해 경계의 이동이 발생한다. 이 경우 경계의 이동이 있다는 조건②가 만족하며, 외력 때문에 경계의 이동이 발생하더라도 기체분자가 계의 경계(피스톤)에 충돌함으로써 인한 힘이 기체계의 에너지에 기인하기 때문에 기체 계가 한 일로 설명할 수 있다. 따라서 기체 계가 한 일이 있으며 계의 내부에너지는 외부로 전달된다.

한편, 일을 통해 계의 내부에너지를 추정하는 것이 중요한 이유는 그 정보가 계의 상태 해석과 관련되기 때문이다. 이를 자유팽창 과정에서 논의해 보자. 이를테면, 자유팽창을 하는 기체는 충돌 과정에서 에너지를 잃지 않는다. 이는 자유팽창 과정에 있는 이상기체와 일반 기체 모두에 해당한다. 이상기체는 분자 간 위치에너지를 무시하지만 일반 기체는 분자 간 위치에너지를 고려한다. Fig. 4와 같이 일반 기체의 팽창 전후의 위치에너지를 보면, 분자간 거리가 커질수록 기체의 위치에너지는 낮은 우물에 위치하므로 위치에너지가 증가한다. 자유팽창 과정에서 계의 에너지가 일정하므로 위치에너지 증가량은 운동에너지 감소량이 되며, 계의 온도는 감소하게 된다.

자유팽창 과정에 대한 학생들의 이해의 부족은 열역학에서 사용되는 일을 학생들이 잘 이해하고 있지 못함을 보여준다고 의미할 수 있지만, 자유팽창 상황과 관련된 가정과 조건의 이해, 그리고 에너지 전달의 한 가지 형태인 일 개념의 적용에 대한 본질적인 어려움일 수 있다. 본 연구는 그러한 본질적인 어려움이 열역학에서 사용하는 계의 분류가 갖는 어려움에서 시작될 것이라 가정했다. 따라서 이어지는 절에서는 열역학에서 주로 사용되는 계를 학생들이 어떻게 구분하고 있는지를 분석하고, 지금까지의 결과를 함께 논의할 것이다.

System	Interaction with outer		$\delta N$		$\delta Q$		$\delta W$		$\delta E$		Number of responses
	Impossible	Possible	=0	$\neq 0$							
Isolated	✓		✓						✓		12/34
									✓		6/34
					✓				✓		3/34
			✓		✓				✓		2/34
							✓		✓		1/34
Closed	✓										8/34
			✓								4/34
			✓							✓	3/34
					✓				✓		3/34
									✓		2/34
						✓			✓		1/34
					✓		✓				1/34
										✓	1/34
Adiabatic					✓						26/34
					✓					✓	2/34
			✓		✓					✓	2/34
					✓				✓		1/34
Open		✓									9/34
							✓			✓	6/34
				✓						✓	5/34
										✓	2/34
							✓		✓		1/34

The shadow square is the scientific classification

Fig. 5. Students' answers to the definition of several systems.

② 계의 에너지를 이해하기 위한 출발점인 ‘계’에 대한 이해 부족

[열역학 법칙이 적용되는 계에 대한 응답]

열역학 상황은 계의 경계 선택과 계의 조건을 파악하는 것이 선행되어야 한다. 열역학 과정에서 다루는 여러 상호작용들은 계의 경계를 기준으로 추적해야하므로, 열역학 법칙을 적용하려는 계가 어떤 특성을 갖고 있는지에 대한 파악이 문제해결의 시작점이 되기 때문이다. 학생들의 계에 대한 이해의 양상은 다음과 같다.

문항5는 열역학 제1법칙이 사용될 수 있는 계에 대한 학생들의 응답을 알아본 문항으로 그 결과는 Table 8과 같다. 34명의 중 가장 많은 학생이 닫힌계 (closed system)에서만 1법칙이 적용된다고 응답했다. 고립계 (isolated system)와 단열계 (adiabatic system)에서 적용할 수 있다는 학생은 3명, 단열계에서만 적용될 수 있다는 학생은 3명이었다. 모든 계에서 적용가능하다고 설명한 학생은 1명이었다. 한편, 가장 많이 선택된 계를 순서대로 나열하면 닫힌계(10명), 단열계(8명), 고립계(5명), 열린계(3명) 순이었다.

이 결과는 학생들이 열역학 상황에 대한 이해에 상당한 어려움을 겪고 있음을 보여준다. 열역학 제1법칙은 일반적으로 에너지 보존법칙을 의미한다 [36,37]. 열역학 제1법칙은 열, 일, 물질의 유동, 입자들의 확산적 상호작용 등을

모두 아우르는 법칙이기 때문에 모든 계에 적용할 수 있다. 모든 계에서 열역학 제1법칙이 적용될 수 있다고 응답한 학생이 34명 중 1명이라는 점은, 학생들이 해당 법칙을 잘 이해하지 못하고 있거나 계의 구분에 어려움이 있다는 것으로 해석될 수 있다.

[고립계, 닫힌계, 열린계, 단열계에 대한 설명]

계에 대한 학생들의 설명은 경계를 통해 전달되는 에너지를 기준으로 분류하였다 (Fig. 5). 열역학에서 일반적으로 취급하는 에너지는 열 ( $\delta Q$ ), 일 ( $\delta W$ ), 질량유동 ( $\delta N$ )이다 [36,37]. 세 가지 형태의 에너지는 외부에서 계로 또는 계에서 외부로 전달된다. 에너지는 계의 경계에서 확인하며, 열역학 과정 동안에 계에 유입되거나 유출되는 에너지는 계의 상태 해석에 필요한 정보를 제공한다. Fig. 5에는 에너지 변화량 ( $\delta E$ )과 외부와의 상호작용 (interaction with outer)를 추가했는데, 이는 학생들이 에너지를 열, 일, 질량유동으로 세분화하여 설명하지 않고 에너지 또는 상호작용 등의 표현을 사용한 경우가 있었기 때문이다. 이를테면 열, 일, 질량유동으로 구분하여 설명하지 않고 ‘에너지의 변화가 없는 계’ 등으로 표현하면 ‘에너지 변화가 없음 ( $\delta E = 0$ )’으로, ‘외부와 상호작용이 없는 계’로 기술하면 ‘상호작용 불가능 (interaction with outer-impossible)’으로 분류하였다. Fig. 5의 음영 부분은 과학적 설명에 해당되는 상호작용

용을 표시하였다. 문항6에 대한 학생들의 응답을 정리한 결과는 다음과 같다.

첫째, 각 계에 대한 주도적인 설명은 다음과 같다. 고립계는 가장 많은 학생들에게 (12명) '외부와의 상호작용이 불가능한 계'로 인식되고 있었으며, '질량유동이 없으며 에너지 전달이 없는 계'로 설명한 학생이 6명이었다. 단열계는 34명 26명이 '열의 전달이 없는 계'로 설명했다. 닫힌계는 '외부와의 상호작용이 없는 계'가 8명으로 가장 많았으며, '질량유동이 없는 계(4명)', '질량유동이 없으며 에너지 전달이 있는 계(3명)'로 설명되고 있었다. 열린계는 '외부와의 상호작용이 있는 계'가 9명으로 가장 많았으며, '열과 에너지가 전달되는 계(6명)', '질량과 에너지가 전달되는 계(5명)'로 인식되고 있었다.

둘째, 단열계를 제외한 설명에서 계와 외부의 '상호작용 여부'라는 판단 기준이 가장 많이 사용되고 있었다. 주목할 점은 고립계와 닫힌계를 '상호작용이 없는 계'로 동일하게 설명한 학생들이 가장 많았다는 것이다. 이는 학생들이 고립계와 닫힌계를 명확히 구분하는 것에 어려움을 갖고 있다고 해석할 수 있다. 닫힌계의 경우 경계를 계와 주위의 상호작용인 에너지 전달이 가능한 계이므로 닫힌계를 상호작용이 없는 계로 설명하는 것은 과학적 설명으로 볼 수 없다. 열역학에서는 일반적으로 고립계보다는 닫힌계를 사용하기 때문에, 학생들이 닫힌계와 고립계의 구분에 대해 고민을 해 본 경험이 없었거나 그들에게 고립계와 닫힌계를 구분하여 적용해야 하는 문제상황을 접한 경험이 적었기 때문일 수 있다. 또한 엔트로피 증가에 대한 개념의 적용에서 고립계에 대한 인식이 지적되었다는 점은 [32], 두 계의 구분에 대한 학생들의 어려움을 열역학의 교수학습 과정에서 해소할 필요가 있다.

셋째, 학생들은 에너지 전달의 유형인 열전달, 일, 질량유동 중의 일부를 사용하여 계를 설명하고 있었다. 이는 열역학에서 일반적으로 사용하는 계의 구분에서 기준이 되는 물리량인 '물질'과 '에너지'의 전달 여부로 설명하는 방식을 따르는 것처럼 보인다. 예를 들어 고립계에 대해 6명은 '에너지와 물질의 이동이 없다( $\delta N = 0, \delta E = 0$ )'고 설명한다. 여기에 열과 일을 통한 에너지 전달 유무에 대한 설명은 없지만 열과 일을 통한 에너지 전달이 없다는 것을 학생들이 의도했다고 볼 수도 있다. 그러나 열역학 제1법칙  $\delta U = \delta Q - \delta W - \mu\delta N$ 에서 계의 내부에너지가 열전달, 일, 질량유동 의해 정의된다는 것을 보면, 세 물리량에 대한 언급으로 계를 정의하는 것이 적절하다.

이러한 방식으로 구분하는 것은 닫힌계를 정의할 때 더 요구된다. 그 이유는 닫힌계에 대한 응답에서는 물질유동, 열전달, 일, 에너지라는 표현이 고르게 나타났으며, 대부분의 학생들이 잘못된 설명을 하고 있었기 때문이다. 닫힌계

에 대한 설명에서 가장 많은 8명이 상호작용이 없는 계라고 설명했는데, 물질유동을 제외한 에너지 전달 매커니즘이 유효한 계에 대한 설명으로 적절하지 않다. 4명의 학생은 '물질유동이 없으며 에너지 전달은 가능한 계'로 설명한 것이 가장 과학적 응답에 근사하지만, 그들이 다른 에너지 전달 매커니즘을 과학적으로 이해하고 있는지는 해당 설명에서는 확인하기 어렵다. 닫힌계에 대한 설명에서는 과학적 설명에 해당하는(표의 음영) 부분에서 벗어난 응답이 가장 많았다.

#### IV. 결론 및 시사점

본 연구는 대학생들이 계의 에너지 변화에 대해 학생들이 보이는 이해의 양상을 탐색하고, 이를 통해 에너지 학습에 대한 교육적 시사점을 도출하기 위해 수행되었다. 이를 위해 외력이 작용했을 때의 계의 에너지 변화에 대한 응답을 열역학에서 다루는 에너지 전달 매커니즘과 계에 대한 설명을 바탕으로 분석하였다. 분석 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

첫째, 에너지 변화를 설명하기 위해 접근한 방식이 계의 에너지 변화를 결정하는 것에 영향을 주었으며, 한 물리량을 중심으로 설명하더라도 그 물리량을 어떻게 해석하는지에 따라 결과가 달라졌다. 학생들은 내부에너지 변화를 일(14명), 분자의 평균운동에너지(9명), 부피의 팽창(6명)을 중심으로 설명했다. 그러나 가장 많은 응답이었던 일 개념을 사용한 접근도 다양한 내부에너지 변화(감소7, 증가4, 일정3)로 이어졌다. 이는 학생들이 역학보다(문항1) 열역학에서(문항2) 일의 주체가 무엇인지에 대한 혼란을 경험하고 있음을 의미했다. 한편 기체분자의 평균운동에너지로 설명했던 학생들은 내부에너지의 예측에 다소 다른 양상(일정4, 감소3, 증가1, 알 수 없다1)을 보였으며, 부피 변화만을 언급한 학생들의 대부분은 내부에너지가 감소될 것이라고 설명했다(감소5, 일정 1).

둘째, 계의 유형 변화를 통해 계의 이해가 에너지 해석에 영향을 주고 있음을 확인하였다. 단열계에서 닫힌계로 계의 유형이 변하게 되면 단열계와 비교하여 내부에너지 변화가 달라질 것이라 생각한 학생이 21명이었으며 판단할 수 없다는 응답이 7명이었다. 열전달( $\delta Q$ )이 가능해지기 때문에 내부에너지 변화가 단열계와 다를 것이라는 13명의 응답은 과학적으로 타당해 보인다. 그리고 단열계에서 내부에너지가 일정할 것이라고 설명했던 8명 모두의 응답이 일정하지 않을 것으로 변한 대신, 새로운 5명이 닫힌계에서 내부에너지 일정할 것을 선택하였다. 한편 내부에너지 변화를 판단할 수 없다는 학생들은 실린더의 이동 후 열에너지의

전달 방향을 알 수 없음을 이유로 설명했다. 그러나 이는 실린더가 초기에 평형상태였으므로 계와 주위가 열평형 상태에 있었음을 고려하지 못한 응답이었다.

셋째, 학생들은 열역학에서의 일을 과학적으로 설명하는 것을 어려워했다. 열역학의 일에 대한 자료는 역학에서의 일과 열역학에서의 일을 비교하여 설명하는 문항과 자유팽창과정에서 기체계가 한 일에 대한 문항을 통해 수집하였다. 역학적 일에 대해서는 31명이  $W = \int Fds$ 로 설명했으나 열역학에서의 일은 세 가지 설명방식이 나타났으며,  $W = \int PdV$ 로 설명한 8명, 계의 에너지 변화 7명, 계의 포텐셜 3명이었다. 경계의 이동과 경계에 작용하는 힘이 존재할 때 열역학에서의 일을 정의되는 열역학에서의 일에 대한 학습이 더 강조될 필요가 있다. 한편 일에 대한 학생들의 이해 부족은 자유팽창과정에서 기체가 한 일에 대한 설명에서도 나타났다. 기체계가 일을 했다는 응답이 6명 이외에 25명이 기체계가 일을 하지 않았다고 응답했다. 그러나 25명 중 8명은 이유를 모르겠다고 답했으며 ‘자유로운 팽창이니까 또는 확산이니까’ 등의 기술을 한 학생이 8명이었다. 일을 하지 않았다는 25명 중 5명만이 계의 경계 확장을 했음에도 외부에 힘이 작용하지 않았기 때문이라는 과학적인 설명을 했다. 마지막으로 열역학 과정에서 핵심적으로 사용되는 열역학적 일을 34명 중 12명이 전혀 설명하지 못했다는 점은, 물리 교수학습에서 다뤄져야 하는 기초 개념이 더욱 강조되어야 함을 보여준다.

넷째, 학생들은 열역학 제1법칙이 적용되는 계로 닫힌 계를 가장 많이 선택했으며, 학생들이 주요 계를 비교하여 설명한 문항에서는 학생들이 계의 차이를 엄밀하게 구분하지 못하고 있었다. 우선 열역학 제1법칙을 적용할 수 있는 계에 대한 질문에 답하지 못한 학생은 34명 중 15명이였다. 응답 순으로는 닫힌계(8명), 고립계와 단열계(3명), 단열계(3명), 열린계(2명)였으며, 모든 계에서 적용할 수 있다고 설명한 학생은 1명이였다. 이는 열역학 제1법칙을 설명할 때 가정하는 일반적인 상황이 질량유동에 에너지( $\mu dN$ )를 제외된 닫힌계 상황이기 때문일 것으로 추측된다. 그러나 열역학 제1법칙이 열린계까지 포함한 모든 계에서 적용 가능하므로, 열역학 문제 상황에서 계의 특성과 구분을 명시적으로 파악하고 문제해결로 이어질 수 있는 지도가 요구된다.

계의 구분에 대한 문항에서 학생들은 닫힌계와 고립계는 외부와의 상호작용이 불가능한 계, 단열계는 열의 전달이 없는 계, 열린계는 외부와 상호작용이 가능한 계라는 설명이 가장 많았다. 외부와의 상호작용 여부로 세 개의 계가 구분된다는 점이 특징이었으며, 닫힌계와 고립계에 대한 설명이 동일했기 때문에 학생들이 두 개를 구분하지 못한 것으로 해석된다. 또한, 질량(또는 물질) 유동과 에너지 전

달 여부로 계를 구분한 학생들이 많다는 점은 주목할 필요가 있다, 특히 에너지 전달 가능 여부를 포함하여 일, 열에너지, 질량유동을 설명하는 응답이 많았다. 일반물리교재와 열역학 전공서는 에너지 전달 매커니즘을 일, 열전달, 질량유동으로 제시하고 있기 때문에 [26-30]. 교수자는 추상적이며 많은 개념들을 포괄하는 에너지 개념을 유의하여 사용하고 지도할 필요가 있다.

이 연구에서 수행한 계에 에너지 변화에 대한 학생들의 어려움의 분석 결과를 바탕으로 열역학의 교수학습과 관련된 제언은 다음과 같다.

첫째, 열역학의 교수학습에서 계에 대한 설명이 강조될 필요가 있다. 에너지의 이해는 계와 관련되며, 역으로 계에 대한 이해는 에너지를 정성적으로 추정하고 계산하는 것과 밀접하다. 역학에서 에너지 개념, 에너지 보존과 전환, 일 개념과 관련하여 계의 학습을 강조한 선행연구를 비롯하여 [14-16], 열역학에서도 에너지를 계의 정확한 이해를 바탕으로 학습되어야 한다는 보고들과 같은 맥락이다 [23-32]. 또한 운동량 보존법칙이 고립계에서 적용되어야 한다는 것을 대학생들이 잘 알고 있지 못하다는 보고 [16]와 유사하게 열역학 제1법칙이 적용되는 계에 대해 학생들의 이해가 부족하다는 것도 주목해야 한다. 고전역학의 뉴턴 법칙과 같이 열역학의 기본이 된다고 여겨지는 법칙인 열역학 법칙이 가정하고 있는 조건을 정확히 알고 있지 못하다는 것은, 법칙을 적용해야 하는 환경적 조건(계)이 달라졌을 때 어떤 항을 추가하거나 수정해서 사용할 때 학생들에게 혼란을 줄 수 있다.

둘째, 에너지라는 포괄적인 개념보다 일, 열전달, 질량유동을 열역학 맥락에서 학생들이 이해하도록 하고, 그 이해를 토대로 계와 열역학 법칙을 지도하는 것이 요구된다. 열역학 상황은 역학과 달리 에너지 개념에서 파생된 물리량이나 열역학적 상황에 적절한 물리량을 재정의하여 사용한다. 따라서 문제 상황에 제시된 대상이나 관찰자의 관심사에 따라 계에 대한 설명이 차이를 보인다. 고립계의 예를 들면 역학에서는 에너지의 보존과 함께 계에 작용하는 합력의 0이라는 조건이 강조되는 반면, 열역학에서는 물질유동, 일에 의한 에너지 전달, 열전달이라는 상호작용이 불가능하다는 조건을 둔다. 또는 엔트로피가 일정한 계가 고립계에 대한 설명으로 사용되기도 한다. 이렇게 한 계를 설명하시는 방식은 그 분야에서 공유하는 규약을 따른다. 열역학에서는 에너지 전달 매커니즘이라 불리우는 일, 열에너지, 질량유동을 기준으로 사용된다. 그러나 학생들은 물질과 에너지라는 두 개념을 기준으로 계를 분류함으로써 혼란을 겪거나 잘못된 분류를 한다. 이러한 학생들의 혼란은 열역학 상황이 어떤 상호작용을 허용하고 허용하지 않는지에 대한 판단을 어렵게 한다. 학생들이 열역학 제1법칙이 적용되는

계를 다양하게 설명하게 된 이유도 여기서 찾을 수 있으며, 문제해결 단계의 시작인 문제 상황의 인식과 문제 해결 방안 수립을 잘못된 방향으로 이끌게 되어 문제를 잘못 해결하거나 해결 자체를 불가능하게 한다.

셋째, 열역학 상황을 이해하기 위한 접근은 다른 유형의 방식으로도 검토할 수 있어야 한다. 학생들이 계의 에너지를 추정하는 방식은 주로 한 가지 방식이 사용되었다. 학생들이 생각할 때 가장 타당하고 정확하며 빠른 경로로 에너지를 추정하려 했지만 과학적 설명을 검토하려는 시도는 부족해 보인다. 예를 들어 일을 사용하여 내부에너지를 추정하려 했던 학생이 일을 주체를 잘못 결정한 상태에서 계의 에너지를 추정했다면 잘못된 결론에 도달할 수밖에 없다. 그러나 내부에너지를 추정하는 방식은 한 가지 방식이 아니다. 계의 팽창에 따른 기체 분자의 충돌을 통한 속도의 크기라는 미시적인 접근도 가능하며 계의 부피의 증감을 통한 거시적인 접근도 가능하다. 또는 경계에 작용하는 힘이나 엔트로피를 통한 에너지의 계산도 가능할 것이다. 물론 더 정밀한 계의 상태 해석을 위해서는 준정적 과정 또는 가역/비가역 과정, 이상기체와 실제 기체의 화학적 결합에 따른 포텐셜에너지 등 고려할 사항이 많아지겠지만, 기본이 되는 것은 역학의 체계 안에서 다입자계의 통계적 운동을 정성적으로 이해하는 것이다. 그 이해는 한 가지 물리량 또는 개념 중심으로 현상을 이해하는 것이 아닌 다양한 방식으로 그 현상을 설명해 보려는 시도를 통한 검토 행위일 것이다.

결론적으로, 에너지 개념의 이해와 에너지를 통해 계의 상태를 분석하고 해석하기 위해서는 계와 계의 경계를 통한 상호작용인 에너지 전달 매커니즘에 대한 강조가 필요하다. 에너지 변화로 계의 상태를 추정하기 위해서는 경계적 상호작용인 계가 외부에 하거나 외부로부터 받는 일, 경계를 통한 열에너지 전달, 물질유동을 과학적으로 정의하고, 이를 기준으로 하여 계를 분류하고 적용하려는 법칙과 관련된 상호작용을 선별할 수 있도록 해야 한다. 이를 위해서 열역학 교수-학습에서는 물리량과 계의 관계를 더 강조하고, 다양한 접근 방식을 통해 열역학 현상을 이해하는 기회를 제공할 필요가 있다. 나아가 관련된 교수학습 자료의 개발과 적용을 위한 노력이 병행이 요구된다.

## 감사의 글

본 논문은 지영래의 2016년도 박사 학위논문의 데이터를 활용하여 재구성하였습니다.

## REFERENCES

- [1] R. Lancor, *Sci. & Educ.* **23**, 1245 (2014).
- [2] U. Besson and A. de Ambrosis, *Sci. & Educ.* **23**, 1309 (2014).
- [3] R. Duit, *Sci. Educ.* **75**, 649 (1991).
- [4] O. Megalakaki and J. P. Thibaut, *Res. Sci. Educ.* **46**, 457 (2016).
- [5] J. Clement, *Am. J. Phys.* **50**, 66 (1982).
- [6] S. Bayraktar, *Int. J. Sci. Math. Educ.* **7**, 273 (2009).
- [7] J. Minstrell, *The Physics Teacher* **20**, 10 (1982).
- [8] R. Osborne, *Learning in Science, The Implications of Children's Science* (Heinemann Educational Books, 1985).
- [9] A. Brook and R. Driver, *Aspects of Secondary Students' Understanding of Energy: Summary Report* (Children's Learning in Science Project, The University, 1984).
- [10] R. Duit, *Int. J. Sci. Educ.* **9**, 139 (1987).
- [11] C. Ioannides and S. Vosniadou, *Cogni. Sci. Q.* **2**, 5 (2002).
- [12] C. Kruger, P. David and M. Summer, *Sci. Educ.* **76**, 339 (1992).
- [13] J. Gilbert and M. Watts, *Stud. Sci. Educ.* **10**, 61 (1983).
- [14] B. A. Lindsey, P. R. L. Heron and P. S. Shaffer, *Am. J. Phys.* **77**, 999 (2009).
- [15] E. Kim and H. Choi, *New Phys.: Sae Mulli* **60**, 702 (2010).
- [16] Y. Ji, Y. Cheong and J. Song, *New Phys.: Sae Mulli* **66**, 422 (2016).
- [17] A. D. Robertson and P. S. Shaffer, *Am. J. Phys.* **81**, 303 (2013).
- [18] J. Lee and J. Song, *New Phys.: Sae Mulli* **63**, 606 (2013).
- [19] J. W. Warren, *Eur. J. Sci. Educ.* **4**, 295 (1982).
- [20] N. Papadouris and C. P. Constantinou, *Teaching and Learning of Energy in K-12 Education* (Springer International Publishing, 2014).
- [21] R. Millar, *Teaching and Learning of Energy in K-12 Education* (Springer International Publishing, 2014).
- [22] H.-G. Yoon and Y. W. Cheong, *J. Korean Assoc. Sci. Educ.* **37**, 799 (2017).
- [23] A. Hobson, *Am. J. Phys.* **34**, 411 (1966).

- [24] J. L. Lebowitz, *Physica A* **194**, 1 (1993).
- [25] R. H. Swendsen, *Am. J. Phys.* **76**, 643 (2008).
- [26] M. Samiullah, *Am. J. Phys.* **75**, 608 (2007).
- [27] E. N. Miranda, *Eur. J. Phys.* **29**, 937 (2008).
- [28] E. A. Gislason, *Am. J. Phys.* **78**, 995 (2010).
- [29] J. Anacleto and M. G. Pereira, *Eur. J. Phys.* **30**, 177 (2009).
- [30] T. V. Marcella, *Am. J. Phys.* **60**, 888 (1992).
- [31] W. Z. Black and J. G. Hartley, *Thermodynamics* (Harper & Row, Cambridge, 1985).
- [32] J. Lee and J. Song, *Sae Mulli* **55**, 182 (2007).
- [33] D. Halliday, R. Resnick and J. Walker, *Fundamentals of Physics*, 9th ed. (New York, 2011).
- [34] H. D. Young, R. A. Freedman and L. Ford, *Sears and Zemansky's University Physics*, 12th ed. (Pearson education, 2006).
- [35] R. A. Serway and J. W. Jewett, *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*, 8th ed. (Cengage Learning, Boston, 2009).
- [36] Y. A. Cengel and M. A. Boles, *Fundamentals of Thermodynamics* (New York, 2002).
- [37] K. S. Stowe, *Introduction to statistical mechanics and thermodynamics* (New York, 1984).