

퍼텐셜 에너지 곡선에 대한 예비 화학 교사들의 이해 조사

박종윤* · 김은경

이화여자대학교 과학교육과
(접수 2015. 7. 8; 게재확정 2015. 9. 17)

Pre-service Chemistry Teachers' Understanding of the Potential Energy Curve

Jong-Yoon Park* and Eun-Kyoung Kim

Department of Science Education, Ewha Womans University, Seoul 03760, Korea. *E-mail: jypark@ewha.ac.kr
(Received July 8, 2015; Accepted September 17, 2015)

요 약. 본 연구에서는 개념 질문지를 사용하여 퍼텐셜 에너지 곡선에 대한 예비 화학 교사들의 이해 정도를 조사하였다. 조사 대상은 화학교육을 전공하는 사범대학 3학년 학생 24명, 4학년 학생 26명으로 총 50명이었다. 개념 질문지는 구슬 두 개의 거리에 따른 퍼텐셜 에너지 변화 곡선을 주고 상상실험을 하는 것으로 구성하였다. 질문지의 응답을 분석한 결과 예비 화학 교사들은 퍼텐셜 에너지나 전체 역학적 에너지가 음의 값을 가지는 것을 받아들이기 어려웠다. 또한 역학적 에너지 보존은 대부분 알고 있었으나 이를 상상실험의 조건에 제대로 적용하지 못하는 것으로 나타났다. 그리고 구슬에 작용하는 힘의 방향은 대체로 알고 있었으나, 초기 위치에서 구슬이 이동하여 퍼텐셜 에너지가 가장 낮은 우물 바닥에서 정지할 것이라는 응답이 상당히 많았다. 또한 퍼텐셜 에너지 곡선과 관련지어 화학 결합, 기체의 액화, 분자의 진동 운동에 대한 이해도가 매우 낮은 것으로 드러났다.

주제어: 퍼텐셜 에너지, 퍼텐셜 에너지 곡선, 역학적 에너지 보존, 예비 화학 교사, 개념 이해

ABSTRACT. In this study, the pre-service chemistry teachers' understanding of potential energy curve was investigated. The subjects were 24 junior students and 26 senior students studying chemistry education in a college of education. A concept questionnaire consisted of thought experiments with different initial conditions was developed to survey the pre-service teachers' conceptions of potential energy curve. The survey results showed that the pre-service chemistry teachers had difficulties to accept the negative values for potential energy and total energy. And they knew the mechanical energy conservation but they could not apply it properly to the thought experiment situations given in the questionnaire. Also they had the knowledge about the direction of force exerted between the two balls, but many of them believed that the balls would stop moving at the bottom of potential energy curve well. In addition, it was discovered that few pre-service teachers could relate the thought experiments to the chemical bonding, the liquefaction of gas, and the molecular vibration.

Key words: Potential energy, Potential energy curve, Conservation of mechanical energy, Pre-service chemistry teacher, Conceptual understanding

서 론

학생들이 올바른 과학 개념을 습득하도록 하는 것은 과학교육의 핵심 목표 중의 하나이다.¹ 그러므로 지난 수십 년 동안 학생들의 개념 학습에 대한 연구가 과학교육 연구의 중요한 부분을 차지해 왔다.²⁻⁵ 이러한 연구들은 학생들의 선개념 조사, 선개념의 근원에 대한 조사, 선개념을 과학적 개념으로 변화시키기 위한 전략 등에 대한 연구들을 포함하고 있다.^{5,6} 그 동안 밝혀진 바에 의하면 학생들은 일상 경험을 통해서 나름대로의 선개념들을 가지고 있으며, 이 선개념이 과학적 개념과 다르면 오개념 또는 오인으로 부르기도 한다. 이러한 오개념은 일상 경험뿐만

아니라 학교 교육을 통해서도 생길 수 있는데, 교사가 잘못된 개념을 가지고 있거나 교과서의 서술이 잘못된 경우도 그 원인이 될 수 있다.⁷⁻¹⁴ 그리고 한 번 형성된 오개념은 견고하여 쉽사리 과학적 개념으로 변화되지 않으므로 각 개념마다 적합한 교수 전략의 개발이 필요하다.^{6,15} 그동안 학생들의 개념 학습과 관련하여 수많은 연구들이 진행되었지만, 개별 개념별로 각각의 연구가 필요하기 때문에 아직도 학생들의 개념 학습에 대한 연구가 지속되고 있다.³

에너지는 과학에서 가장 핵심적인 기본 개념 중의 하나로써 물리뿐만 아니라 화학, 생명과학, 지구과학에서도 에너지 개념의 정립이 다른 개념을 이해하는데 필수적이

다. 따라서 미국의 차세대 과학교육 기준에서도 에너지는 핵심 관념(core idea)이면서 공통 개념(crosscutting concept)으로 다루고 있다.¹⁶ 우리나라 교육과정에서도 에너지 개념을 중요하게 생각하고 중학교 과학에서부터 에너지 개념을 다루도록 하고 있다.¹ 그러나 물리교육 분야의 연구에 의하면 에너지 개념은 가르치기도 어렵고 배우기도 어려운 것으로 드러났다.¹⁷⁻¹⁹ 에너지 개념은 추상적이고, 또한 일상생활에서도 정교하게 정의되지 않은 에너지 용어를 다양하게 사용하고 있으므로 학생들은 학교에서 에너지 개념을 배우기 이전에 이미 다양한 오개념을 가지고 있다.²⁰ 따라서 학교 수업을 통해서도 에너지에 대한 과학적 개념을 제대로 가지지 못하고, 다른 물리 개념인 힘, 일률, 온도 등과 잘 구분하지 못하며, 에너지 보존에 대해서도 제대로 이해하지 못한다고 한다.¹⁸

또한 학생들은 퍼텐셜 에너지에 대한 이해에 어려움을 느낀다.^{21,22} 운동 에너지는 물체가 운동하기 때문에 가지는 에너지로 그 크기가 항상 $\frac{1}{2}mv^2$ 으로 주어지기 때문에 상대적으로 쉽게 생각한다. 그러나 퍼텐셜 에너지는 역장(field of force)에서의 위치나 배향에 따른 에너지로, 그 정의 자체가 추상적이며 크기를 나타내는 수식도 역장에 따라 달라진다. 퍼텐셜 에너지의 예로는 중력장이나 전기장에서의 퍼텐셜 에너지를 들 수 있다. 퍼텐셜 에너지에 대한 이해는 화학에서도 매우 중요한데, 화학에서 다루는 입자들의 상호작용은 모두 전기장에서의 퍼텐셜 에너지로 설명할 수 있기 때문이다. 입자간 거리에 따른 퍼텐셜 에너지의 변화를 나타낸 것이 퍼텐셜 에너지 곡선인데, 화학에서는 이 곡선이 여러 곳에서 등장한다. 예를 들면, 기체 입자들의 상호작용, 기체의 액화, 이온 결합과 공유 결합, 분자의 진동 운동 등에서 퍼텐셜 에너지 곡선으로 설명하는 것을 볼 수 있다.²³

Lindsey²¹는 일반물리를 수강하는 대학생들을 대상으로 전하를 띤 두 물체의 거리가 변했을 때의 퍼텐셜 에너지 변화를 알아보았다. 같은 전하를 띤 물체의 거리가 가까워졌을 때는 70% 이상의 학생들이 퍼텐셜 에너지가 높아진다고 옳게 대답했지만, 반대 전하를 띤 두 물체의 거리가 멀어졌을 때는 옳게 대답한 학생들이 45% 이하였다. 또한 만유인력과 관련하여 질량을 가진 두 물체의 거리에 따른 퍼텐셜 에너지 변화와 지구 주위를 타원 궤도로 돌고 있는 인공위성과 지구와의 거리에 따른 퍼텐셜 에너지 변화를 물어 본 결과 둘 다 옳게 대답한 학생은 22%밖에 되지 않았고, 40%의 학생들은 두 물체에 대해 일관성 없는 대답을 하였다. 따라서 많은 학생들이 퍼텐셜 에너지 개념을 제대로 이해하고 있지 못하며, 같은 문제라도 상황에 따라 다르게 응답함을 알 수 있다.

Saglam-Arslan¹⁹은 터키의 고등학생과 예비 교사인 대

학생, 대학원생을 대상으로 에너지에 대한 정의를 물어보고, 또 수직으로 던져진 물체의 높이와 속력에 따른 운동 에너지, 퍼텐셜 에너지, 전체 에너지의 변화를 그래프로 나타내게 하였다. 에너지의 정의는 많은 대상들이 일을 할 수 있는 능력으로 바르게 대답하였으나, 일부는 일률과 혼동하거나 다른 오개념들을 가지고 있는 것으로 나타났다. 높이에 따른 각 에너지의 변화를 모두 바르게 그린 학생들은 고등학생 12%, 대학생 22%, 대학원생 21%로 낮게 나타났다. 속력에 따른 각 에너지 변화를 모두 바르게 그린 학생은 대학생 9%에 불과했고, 각 집단의 80% 이상이 세 개 중 하나의 그래프로 제대로 그리지 못하였다. Stephanik과 Shaffer²²의 연구에서도 이공계 대학생들은 퍼텐셜 에너지 곡선에 대한 이해가 부족하고, 퍼텐셜 에너지가 음의 값을 가지는 것과 역학적 에너지 보존에 대한 이해가 부족함을 언급하였다.

이와 같이 퍼텐셜 에너지 곡선에 대한 이해가 화학 결합 등 여러 가지 화학 개념들을 이해하는데 필수적인데, 선행 연구들에 의하면 고등학생뿐만 아니라 대학생들도 퍼텐셜 에너지와 퍼텐셜 에너지 곡선에 대한 이해가 부족하다고 한다. 그리고 선행 연구들은 대부분 물리 분야에서 외국 학생들을 대상으로 이루어졌고, 화학 분야나 국내 학생들을 대상으로 한 연구는 찾아보기 어렵다. 특히 고등학생들의 개념 이해나 오개념 형성은 교사들의 개념 이해와도 밀접한 관련이 있으므로 예비 교사 교육에서 올바른 과학적 개념을 갖도록 하는 것이 중요하다. 그러므로 본 연구에서는 퍼텐셜 에너지 곡선을 이용한 개념 질문지를 사용하여 예비 화학 교사들의 퍼텐셜 에너지 곡선에 대한 이해 정도를 알아보려고 하였다.

연구 방법

연구 대상

퍼텐셜 에너지 곡선에 대한 예비 화학 교사들의 이해 정도를 알아보기 위하여 퍼텐셜 에너지 곡선을 이용한 개념 질문지를 제작하여 사용하였다. 개념 질문지 조사 대상은 대도시 소재 한 대학교의 사범대학 화학교육전공 3학년 학생 24명과 4학년 학생 26명으로 총 50명이었다. 연구 대상자는 모두 대학에서 일반화학, 화학열역학, 양자화학을 수강하였다.

개념 질문지

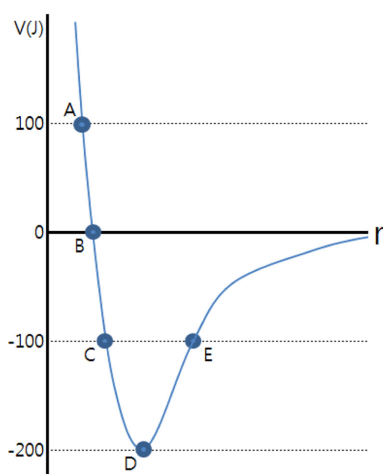
퍼텐셜 에너지 곡선에 대한 개념 질문지는 선행 연구를 참고하여 연구자들이 제작하였다. 전체 4개의 대문항으로 구성하였으며, 대문항 1번은 6개의 소문항, 대문항 3번은 4개의 소문항을 포함하고 있다. 문항의 형태는 단답형, 서

Table 1. Situation or content of concept questionnaire items

Item Number	Situation or Content
1	Hold two balls at position E and let them go
2	Hold two balls at position A and let them go
3	Two balls are approaching each other with the certain total energy
4	Compare classical mechanics and quantum mechanics

술형 또는 선택 후 이유 진술 형태로 되어 있다. 개념 질문지는 두 구슬의 거리에 따른 퍼텐셜 에너지 곡선과 특정 초기 조건을 주고, 두 구슬의 운동에 대한 상상실험을 하는 상황에서 특정 거리에서의 퍼텐셜 에너지와 운동 에너지의 크기, 두 구슬에 작용하는 힘의 방향, 앞으로의 운동 경로를 예상하는 물음들을 포함하고 있다. 이 때 구슬은 지름 1 cm의 것을 사용하여 고전 역학을 적용하는 상황을 제시하였고, 중력이나 구슬의 움직임에 따른 저항은 없는 것으로 명시하였다. 개념 질문지는 부록에 첨부하였고, 대문항별 상황과 내용은 Table 1에 제시하였다. 설명의 편의를 위해 개념 질문에 포함된 퍼텐셜 에너지 곡선을 Fig. 1에 따로 나타내었다.

대문항 1은 두 구슬을 거리 E(Fig. 1 참조)에 해당하는 위치에서 붙들고 있다가 놓아주는 상황으로 거리 E, D에서의 운동 에너지와 퍼텐셜 에너지의 크기, 두 구슬에 작용하는 힘의 방향과 그 이유, 최소 접근 거리와 그 이후의 운동 등에 대한 물음을 포함하고 있다. 대문항 2는 초기 조건을 바꾸어 두 구슬을 거리 A에서 붙들고 있다가 놓아주는 경우에 두 구슬의 움직임을 시간에 따른 거리 변화로 설명하는 것이다. 대문항 3은 두 구슬이 서로 접근하는 경우로 거리 E에서의 운동 에너지 값을 두 가지 제시하고

**Figure 1.** The potential energy curve used in the concept questionnaire.

각각의 경우에 두 구슬의 움직임을 설명하는 것이다. 그리고 이 결과를 화학 결합과 기체의 액화와 관련하여 설명하는 물음을 포함하고 있다. 대문항 4는 고전 역학과 양자 역학의 차이에 대한 질문이다. 완성된 개념 질문지는 화학교육전공 대학원생 3명을 대상으로 예비 조사를 하면서 문장의 이해 정도와 문항의 타당성을 점검하였다.

본 조사 결과 얻은 개념 질문지의 선택형 물음에 대한 응답은 답지별 백분율로 제시하였다. 서술형 물음의 응답은 각 문항별로 그 응답을 유목화하고 각 유목별 응답 백분율을 제시하였다. 응답의 유목화는 연구자 중의 한 명이 1차 작업을 하고, 그 결과를 연구자들과 다른 화학교육전공 대학원생 3명이 함께 검토하면서 수정 보완하였다.

연구 결과 및 논의

퍼텐셜 에너지 곡선의 개념 질문에 대한 예비 화학 교사들의 응답을 각 문항 별로 분석한 결과는 다음과 같다.

문항 1: 두 구슬을 거리 E에서 붙들고 있다가 놓아주는 경우

거리 E에서의 운동 에너지와 퍼텐셜 에너지: 거리 E에서 두 구슬을 붙들고 있는 초기 조건에서 두 구슬이 가지는 운동 에너지와 퍼텐셜 에너지를 단답형으로 물어본 데 대한 응답 백분율을 Table 2에 정리하였다. 초기 조건에서 두 구슬을 움직이지 못하도록 붙들고 있으므로 운동 에너지는 0이고, 퍼텐셜 에너지는 주어진 그래프로부터 거리 E에서 -100 J임을 읽을 수 있다.

먼저 퍼텐셜 에너지를 보면 퍼텐셜 에너지 곡선에서 거리 E의 경우 -100 J임을 쉽게 읽을 수 있음에도 정답률은 66%(33명)밖에 되지 않았다. 나머지의 대다수인 28%는 +100 J로 응답하였다. 이러한 결과는 퍼텐셜 에너지가 음의 값을 가질 수 없다는 오개념을 가진다는 선행 연구²²의 결과와 부합된다. 퍼텐셜 에너지의 영점은 임의로 잡을 수 있기 때문에 퍼텐셜 에너지가 음의 값을 가질 수 있지

Table 2. Percentages of responses for the kinetic and potential energy of the two balls held at point E

Response	Percentage (n = 50)	
	Kinetic energy	Potential energy
-100 J	16	66
0	16	2
100 J	52	28
200 J	4	-
400 J	2	-
N.R.*	10	4

*N.R.: no response.

만 이러한 오개념 때문에 절댓값을 취하여 +100 J로 응답한 것으로 볼 수 있다.

운동 에너지는 정답인 0으로 응답한 비율이 16%밖에 되지 않는 것으로 나타났다. 응답자의 52%가 100 J로 응답하였고, 16%는 -100 J로 운동 에너지가 음의 값을 가지는 것으로 응답하였다.

퍼텐셜 에너지를 -100 J로 옳게 응답한 66%(33명)의 응답자 중에서 운동 에너지를 0으로 옳게 응답한 비율은 14%(7명)로 낮게 나타났고, 운동 에너지를 100 J로 응답한 비율은 30%로 높게 나타났다. 그리고 운동 에너지를 -100 J로 음의 값으로 응답한 비율도 16%나 되었다. 운동 에너지를 100 J로 응답한 30%의 경우는 전체 역학적 에너지가 음의 값을 가지면 안 된다는 오개념에 기인한 것으로 볼 수 있다.²² 즉, 전체 응답자의 30%는 퍼텐셜 에너지가 -100J로 음의 값을 가지는 것은 수용하였지만 운동 에너지를 100 J로 응답하여 전체 에너지가 음의 값을 가지는 것은 수용하지 않았음을 알 수 있다. 운동 에너지를 -100 J이라고 응답한 한 응답자는 총 에너지 합이 -200 J이 되어야 한다고 기술했는데, 그 이후 문항 1-(3)에서도 D점은 운동 에너지 0, 퍼텐셜 에너지 -200 J, 문항 1-(5)에서도 B점은 운동 에너지 -200 J, 퍼텐셜 에너지 0이라고 응답하였다. 이 응답자는 역학적 에너지 보존은 잘 적용하였으나 운동 에너지가 음의 값을 가지는 것은 간과하였다.

거리 E에서 두 구슬 사이에 작용하는 힘과 그 이유: 거리 E에서 두 구슬을 붙들고 있는 초기 조건에서 두 구슬 사이에 작용하는 힘에 대한 물음에서 92%의 예비 화학 교사들이 인력을 선택하였다. 이는 3학년 2명과 4학년 2명을 제외한 수치로 거의 대부분이 정답을 선택하였다. 이를 선택한 이유에 대한 응답을 분류한 결과는 Table 3과 같다.

퍼텐셜 에너지 곡선에서 거리 E에서의 기울기가 양이기 때문에 인력이 작용한다고 명확하게 서술한 비율은 10%였다. 그 외에 가장 안정한 D점으로 가려는 경향이 있으므로 인력이 작용한다는 응답이 24%였고, D점을 기준으로 인력과 반발력이 작용하는 영역이 나누어진다는 응답이 24%였다. 그리고 거리에 따라 인력과 반발력이

Table 3. Percentages of responses for the reason of attractive force between the two balls held at point E

Response	Percentage
Slope at point E is positive, $F = -dV/dr < 0$	10
Tendency to move to the most stable point D	24
Attractive and repulsive region is divided by point D	24
Attractive and repulsive region is divided by distance	12
Miscellaneous	22
N.R.	8

Table 4. Percentages of responses for what happened to the reduced potential energy

Response	Percentage
Transforms into kinetic energy	48
Transforms into kinetic energy and raises speed	12
Transforms into kinetic energy and used for translation, rotation and vibration	4
Transforms into kinetic energy and released as heat	6
Miscellaneous	28
N.R.	2

작용하는 영역이 나누어진다는 응답도 12%로 나타났다. 이 경우에 D점을 기준으로 나누어진다는 언급은 없었지만 그것을 알고 있는 것으로 간주할 수 있다. 따라서 70% 정도의 예비 화학 교사들이 거리 E에서는 인력이 작용하는 이유를 알고 있다고 볼 수 있다. 무응답이 8% 있었고, 그 외 기타 응답으로 퍼텐셜 에너지가 음수이기 때문이라거나 인력 때문에 퍼텐셜 에너지가 감소한다는 응답 등 옳지 않은 응답들이 22% 있었다.

역학적 에너지 보존. 거리 E에서 붙들고 있던 두 구슬을 놓아주면 거리가 가까워지면서 퍼텐셜 에너지가 감소하게 되는데, 이 때 감소한 퍼텐셜 에너지가 어떻게 되는가를 물어본 데 대한 응답은 Table 4와 같다.

응답자의 70%는 감소한 퍼텐셜 에너지가 운동 에너지로 전환된다고 하였다. 그 중에서 48%는 단순히 운동 에너지로 전환된다고 하였고, 12%는 운동 에너지로 전환되어 속도가 빨라진다고 하였다. 그러나 10%는 운동 에너지로 전환되어 병진, 회전, 진동 운동에 사용된다거나 주위에 열로 방출된다고 잘못 응답하였다. 여기서는 두 구슬의 1차원 운동만 있는 것으로 간주하므로 회전 운동은 생각할 수 없으며, 또한 거시적인 두 구슬의 경우에 열이나 온도의 개념은 적용할 수 없기 때문이다. 기타 응답으로는 줄어든 퍼텐셜 에너지가 결합하는데 사용된다거나(16%), 인력으로 사용된다(8%)는 잘못된 응답이 있었다.

거리 D에서의 운동 에너지와 퍼텐셜 에너지: 거리 E에

Table 5. Percentages of responses for the kinetic and potential energy of the two balls at point D

Response	Percentage	
	Kinetic energy	Potential energy
-200 J	2	68
0	42	8
100 J	4	—
200 J	34	16
300 J	2	—
∞	2	—
N.R.	14	8

있던 두 구슬이 접근하여 거리 D에 왔을 때의 운동 에너지와 퍼텐셜 에너지에 대한 응답은 Table 5와 같다.

거리 D에서는 퍼텐셜 에너지가 -200 J이고, 운동 에너지는 100 J이 된다. 퍼텐셜 에너지를 -200 J이라고 옳게 답한 응답자는 68%로 거리 E에서의 정답률 66%와 비슷하였다. 16%는 +200 J이라고 응답하여 음의 값 대신 절댓값으로 나타내었다. 반면에, 운동 에너지를 100 J이라고 옳게 응답한 경우는 4%밖에 되지 않았다. 바로 위에서 E점에서 D점으로 갈 때 줄어든 퍼텐셜 에너지가 운동 에너지로 전환된다는 응답자가 70%였지만 이를 실제로 수치에 적용하지는 못하였다. 응답자의 42%가 운동 에너지를 0이라고 응답하였고, 34%는 200 J이라고 응답하였다.

퍼텐셜 에너지를 -200 J로 옳게 응답한 68%의 응답자 중에서 운동 에너지를 100 J로 옳게 응답한 비율은 4%밖에 되지 않아 거리 E에서의 정답률 14%보다도 낮았다. 이들 중에서 운동 에너지를 0으로 응답한 비율은 30%, 200 J로 응답한 비율은 26%로 나타났다. 앞서 거리 E에서의 응답 분석에서 언급한 바와 같이 운동 에너지를 0으로 응답한 경우는 전체 에너지를 -200 J로 생각한 경우이고, 운동 에너지를 200 J로 응답한 경우는 전체 에너지를 음의 값으로 하지 않기 위한 것으로 볼 수 있다. 이것은 문항 1-(1), 1-(3), 1-(5)에서의 운동 에너지와 퍼텐셜 에너지 값을 비교해본 결과 대부분의 경우에 이와 같은 일관성을 가짐을 확인할 수 있었다.

거리 D에서 두 구슬 사이에 작용하는 힘과 그 이유. 거리 E에 있던 두 구슬이 접근하여 거리 D에 왔을 때 두 구슬 사이에 작용하는 힘과 그 이유에 대한 응답은 Table 6과 Table 7에 나타내었다.

Table 6을 보면 응답자의 66%가 힘이 작용하지 않는다고 응답하였다. 16%는 인력과 반발력이 모두 작용한다고 하였고, 14%는 인력이, 2%는 반발력이 작용한다고 응답하였다.

그 이유를 정리한 Table 7을 보면, 힘이 작용하지 않는다는 66%의 응답자 중 12%는 D점에서 퍼텐셜 에너지 곡선의 기울기가 0이기 때문에 힘이 작용하지 않는다고 명확하게 이유를 언급하였다. 그 외에 40%는 인력과 반발력이 균형을 이루기 때문에 힘이 작용하지 않는다고 하

Table 6. Percentages of responses for the force acting on the two balls at point D

Response	Percentage
Attractive	14
Repulsive	2
No force	66
Attractive and repulsive	16
N.R.	2

Table 7. Percentages of responses for the reason of the force acting on the two balls at point D

Response	Percentage
No force because $F = -dV/dr = 0$	12
No force because attractive and repulsive forces are balanced	40
No force because of the most stable state	10
Both forces because attractive and repulsive forces are balanced	16
Miscellaneous	16
N.R.	6

였고, 10%는 가장 안정한 상태이기 때문에 힘이 작용하지 않는다고 언급하였다. 가장 안정한 상태라는 것이 최솟값일 때이므로, 그 때의 기울기가 0이라는 수학적 표현의 겉보기 표현으로 볼 수 있다. 한편, 인력과 반발력이 모두 작용한다고 응답한 16%는 그 이유로 인력과 반발력이 균형을 이루기 때문이라고 언급하여 실질적으로 힘이 작용하지 않는다는 응답과 동일한 것으로 나타났다. 따라서 전체 응답자의 82%가 D점에서 힘이 작용하지 않음을 알고 있지만, 그 중 대부분인 56%는 인력과 반발력이 균형을 이루기 때문이라고 생각하고 있으며, 퍼텐셜 에너지 곡선의 기울기를 이용해서 명확하게 그 이유를 설명한 응답자는 12%밖에 되지 않음을 알 수 있다. 그 외에 인력이 작용한다고 응답한 경우는 그 이유로 퍼텐셜 에너지가 가장 낮기 때문, 또는 0보다 작기 때문이라고 하였고, 반발력이 작용한다고 응답한 1명은 그 이유를 서술하지 않았다.

최소 접근 거리와 그 이후 움직임. 두 구슬이 접근할 수 있는 가장 가까운 거리와 그 이후의 움직임에 대한 응답은 Table 8에 정리하였다.

이 물음도 역학적 에너지 보존에 대한 것으로 초기에 E점에서 두 구슬이 가진 전체 에너지가 -100 J이므로 E점에서 놓아주면 D점을 거쳐 C점까지 이동이 가능할 것이다. C점에서는 퍼텐셜 에너지 -100 J, 운동 에너지 0이므로 정지하게 되고, 그 다음에 멀어지기 시작해서 D점을 거쳐 E점까지 갔다가 다시 C점으로 되돌아오는 운동을 하게 된다. 따라서 최소 접근 거리는 C점이 되고, 두 구슬은 C점과 E점 사이에서 진동을 하게 될 것이다.

Table 8을 보면, 두 구슬의 최소 접근 거리로 정답인 C점을 선택한 응답은 2%에 불과한 것으로 나타났고, 38%가 D점을, 34%가 B점을 선택했다. 이를 통해 응답자들이 이 상황에서 역학적 에너지 보존을 전혀 고려하지 못했음을 알 수 있다. D점을 선택한 이유로는 퍼텐셜 에너지가 가장 작아 안정하기 때문, 또는 D점보다 가까이 가면 반발력이 작용하여 밀어내기 때문이라고 응답하였다. B

Table 8. Percentages of responses for the shortest distance that the two balls can approach and the subsequent movement

Movement after reaching the shortest distance	Shortest distance						Total
	Closer than A	A	B	C	D	N.R.	
Oscillate	2	—	2	—	4	—	8
Move apart and then get close	—	2	2	—	—	—	4
Oscillate and stop at point D	2	—	4	—	—	—	6
Move apart	10	4	12	—	22	—	48
Stop at point D	4	—	12	2	12	—	30
N.R.	—	—	2	—	—	2	4
Total	18	6	34	2	38	2	100

점을 선택한 이유도 주로 두 가지인데, 퍼텐셜 에너지가 0이기 때문이라거나 B점보다 가까이 접근하면 반발력이 너무 커지기 때문이라고 하였다. 질문지의 “답 없음”을 선택한 18%는 그 이유로 모두 A점보다 더 가까이 접근할 수 있기 때문이라고 응답하였는데, 반발력이 커져서 에너지가 많이 필요하다는 것을 전제로 하였다. 따라서 이 문제 상황에서 두 구슬이 가지고 있는 전체 에너지를 전혀 고려하지 않고 답변한 것임을 알 수 있다.

두 구슬이 가장 가까이 접근한 이후의 움직임에 대해서는 48%가 서로 멀어질 것이라고 하였고, 30%는 D점에서 멈출 것이라고 하였다. 옳은 응답으로 볼 수 있는 진동 운동을 할 것이라는 응답이 8%, 멀어지다가 다시 가까워질 것이라는 응답이 4% 있었다. 그리고 진동 운동을 하다가 D점에서 멈춘다는 응답도 6% 있었다. 그러나 C점과 E점 사이에서 진동 운동을 한다고 명확하게 서술한 응답자는 한 명도 없었다. 최소 접근 거리로 C점을 택한 1명의 응답자도 그 이후의 움직임에 대해서는 D점에서 멈춘다고 응답하여 역학적 에너지 보존 개념의 적용에 일관성이 없었다. 즉, 이 응답자는 E점, D점, C점에서의 운동 에너지와 퍼텐셜 에너지 값을 역학적 에너지 보존을 이용해서 정확하게 기술하였고, 최소 접근 거리로 C점을 선택한 것도 다음과 같이 언급하여 역학적 에너지 보존 개념을 잘 적용하였다. “처음 구슬이 움직일 때 E점에 있었으므로 퍼텐셜 에너지 -100 J을 가지고 있었다. 이때 구슬은 움직이지 않았으므로 운동 에너지를 0이라고 할 수 있다. 따라서 에너지는 일정하게 보존되어야 하므로 C까지 접근할 수 있다.” 그러나 최소 거리 접근 이후의 움직임에 대해서는 다음과 같이 역학적 에너지 보존을 적용하지 않았다. “가장 가까이 접근한 후 구슬은 서로 반발력이 생겨 밀어내므로 거리가 멀어진다. 거리가 멀어지며 퍼텐셜 에너지가 D점과 같아지는 순간에 안정한 상태가 되므로 멈추어 그 거리를 유지한다.”

최소 접근 거리로 D점을 선택한 응답자는 그 이유로 퍼텐셜 에너지가 가장 작아 안정하기 때문이라거나, 또는 D점보다 가까이 가면 반발력이 작용하여 밀어내기 때문이

라고 응답하였다. 그런데 Table 8을 보면 최소 거리 접근 이후에 D점에서 정지한다는 응답은 12%밖에 안 되고, 서로 멀어진다는 응답이 22%, 진동한다는 응답이 4%임을 알 수 있다. 서로 멀어진다고 응답한 경우는 그 이유로 D점보다 가까이 접근하면 반발력이 작용하기 때문이라고 하였다. 그 논리대로 하면, 멀어지는 것은 반발력이 작용하기 때문이고, 반발력이 작용하려면 D점보다 가까이 접근해야 하므로 최소 접근 거리가 D점이라고 한 것과 모순된다. 진동한다고 응답한 경우도 D점을 기준으로 진동한다고 하여 D점보다 가까이 접근할 수 있다는 것이 되므로 논리적으로 모순이 된다.

최소 접근 거리로 B점 또는 B점보다 더 가까운 거리를 선택한 경우는 그 이후 움직임에서 거리 무한대로 멀어지게 된다. 그러나 Table 8에 의하면 이러한 응답자 총 58% 중에서 26%만 서로 멀어진다고 응답하였고, 30%는 어떤 형태로든 퍼텐셜 에너지 곡선의 우물을 탈출하지 못하는 것으로 기술하였다. 그러므로 두 구슬이 서로 접근할 때나 다시 멀어질 때도 모두 역학적 에너지 보존을 적용하지 못하는 응답자가 많음을 알 수 있다. 결과적으로 극히 일부를 제외한 대부분의 예비 화학 교사들은 두 구슬이 가진 전체 에너지를 고려하지 못하고, 역학적 에너지 보존 자체는 알고 있지만 이 상상실험의 상황에 제대로 적용하지 못하는 것으로 나타났다.

문항 2: 두 구슬을 거리 A에서 붙들고 있다가 놓아주는 경우

문항 1에서는 두 구슬을 거리 E에서 붙들고 있다가 놓아주는 상황이므로 전체 에너지가 -100 J이 되어 0보다 작기 때문에 두 구슬은 퍼텐셜 에너지 곡선의 우물에 갇히게 되고, 거리 E와 C 사이를 왕복하는 진동 운동을 하게 된다. 문항 2는 두 구슬을 거리 A에서 붙들고 있다가 놓아주는 상황으로 전체 에너지가 +100 J이므로 두 구슬이 퍼텐셜 에너지 곡선의 우물에 갇히지 않고 서로 멀리 떨어지게 된다. 문항 2에 대한 응답은 Table 9와 같다.

응답자의 28%가 서로 멀어진다는 옳은 응답을 하였다. 가장 많은 응답은 D점에서 멈춘다는 것으로 44%였고, 진

Table 9. Percentages of responses for the movements of the two balls released from holding at point A

Response	Percentage
Move apart	28
Stop at point D	44
Oscillate and stop at point D	6
Move apart and then get close	8
Oscillate	2
Miscellaneous	2
N.R.	10

동하다가 D점에서 멈춘다는 응답도 6% 있었다. 그리고 멀어지다가 가까워진다가나 진동한다는 응답이 10%로 나타났다. 이 상황에서는 퍼텐셜 에너지 곡선의 우물을 탈출하기에 충분한 에너지를 가지고 있음에도 불구하고 문항 1의 경우와 구별되지 않는 응답을 한 예비 화학 교사가 많음을 알 수 있다. 한편, 서술과 함께 시간에 따른 거리 변화를 그래프로 나타낸 응답자가 30% 있었다. 앞의 문항 1에서도 28%, 뒤의 문항 3에서도 32%가 그래프로 나타내어, 그래프를 사용하는 응답자는 모든 문항에서 거의 일관성 있게 그래프를 사용하는 것으로 나타났다. 그래프를 사용하여 나타낸 경우에, 서로 멀어진다고 했을 때는 거리-시간 그래프에서 시간에 따라 거리가 계속 증가하는 것으로 나타내었다. 그리고 D점에서 멈춘다고 했을 때는 시간에 따라 거리가 증가하다가 일정해지는 것으로, 또 진동한다고 했을 때는 시간에 따라 거리가 진동하는 형태로 그래프를 나타내었다.

서로 멀어진다고 응답한 28%의 경우에도 그 이유로 대부분 반발력이 크기 때문에 멀어진다고 하였지만 어디까지 멀어진다고 밝힌 경우는 많지 않았다(시간에 따른 거리 변화를 그래프로 제시한 10%는 거리가 계속 증가하는 것으로 나타내기는 하였다). 이 응답자 28% 중에서 18%는 문항 1에서도 멀어진다고 응답하였고, 4%는 진동한다, 4%는 무응답, 2%는 D점에서 정지한다고 응답한 경우였다. 문항 1에서도 멀어진다고 응답한 응답자 중 한 명은 운동 에너지가 남아 있으므로 거리 무한대까지 멀어진다고 하였지만, 문항 1에서도 최소 접근 거리로 B점을 선택하고 동일한 응답을 하였다. 다른 한 명은 반발하여 결합이 깨진다고 응답하였는데, 문항 1에서는 결합이 깨진다는 언급을 하지 않았다.

D점에서 정지한다고 응답한 44% 중에서 문항 1에서도 동일한 응답을 한 비율은 22%이고, 20%는 멀어진다고, 2%는 진동한다고 응답한 경우였다. 이 경우에도 그 이유는 문항 1에서와 마찬가지로 반발력이 작용하여 멀어지다가 반발력과 인력이 균형을 이루는 가장 안정한 D점에서 멈춘다고 하였다. 그러므로 문항 1에서와 마찬가지로 두 구

슬이 가진 전체 에너지와 역학적 에너지 보존을 이 상황에 제대로 적용하지 못함을 알 수 있다.

문항 3: 특정 운동 에너지를 가지고 접근하는 두 구슬의 운동

앞의 문항 1, 2의 경우에는 초기 조건이 정지 상태였지만, 문항 3은 초기 조건에서 두 구슬이 운동 에너지를 가지고 서로 접근하는 경우에 대한 상상실험이다. E점을 통과할 때 두 구슬이 가진 운동 에너지가 200 J인 경우와 10 J인 경우에 각각 두 구슬의 움직임은 어떻게 될 것인지 물어보고, 이를 화학 결합 형성이나 기체의 액화와 연관하여 설명해 보게 한 문항이다.

서로 접근하는 두 구슬의 운동: 문항 3-(1)은 퍼텐셜 에너지가 -100 J인 E점에서의 운동 에너지가 200 J인 경우로 전체 에너지가 100 J이 되어 0보다 크다. 그러므로 두 구슬이 접근하여 A점까지 갔다가 다시 멀어져서 거리 무한대로 가게 되는 경우이다. 반면에, 문항 3-(2)는 E점에서의 운동 에너지가 10 J이므로 전체 에너지가 -90 J로 0보다 작기 때문에 거리 무한대로 멀어지지 못하고, 퍼텐셜 에너지가 -90 J인 두 점(C점보다 약간 안쪽과 E점보다 약간 바깥쪽) 사이에서 진동하게 된다. 따라서 문항 1, 2와 비교해서 초기 조건만 다르고, 퍼텐셜 에너지 곡선의 우물을 탈출하는 경우와 갇히는 경우에 해당하므로 두 구슬의 운동은 유사하다.

문항 3-(1)과 3-(2)에 대한 응답은 Table 10에 정리하였다. 문항 3-(1)의 경우에는 가까워졌다가 멀리 떨어진다는 옳은 응답이 12%로 나타났다. 그러나 어디까지 접근하는지를 명시하지 않아 역학적 에너지 보존을 정량적으로 명확하게 적용하지는 못한 것으로 생각된다. 한편, A점까지 가까워진다고 응답한 경우가 14% 있었는데, 그 이후에 다시 멀어진다고 응답한 경우는 4%밖에 없었다. 나머지는 운동 에너지가 0이므로 A점에서 정지한다거나, 그 이후의 움직임에 대해서는 아무런 언급이 없었다. 가장 많은 응답은 가까워진다고 46%였다. 이 경우는 가까이 접근하여 멈춘다는 의미인데, 이 중에서 26%는 그냥 가까워진다고 하였고, 16%는 D점까지, 2%는 C점까지, 2%는 D점 이전

Table 10. Percentages of responses for the movements of the two balls approaching each other with a certain amount of total energy

Response	Percentage	
	Item 3-(1)	Item 3-(2)
Oscillate	6	8
Get close and then move apart	12	4
Get close to point A	14	-
Get close (to other than point A)	46	54
Miscellaneous	12	14
N.R.	10	20

까지 가까워진다고 하였다. 문항 2에서도 서로 멀어진다는 옳은 응답이 28%밖에 없었고, D점에서 멈춘다는 잘못된 응답이 44%나 되었던 것과 유사한 결과임을 알 수 있다.

A점까지 접근한다고 응답한 경우는 역학적 에너지 보존을 잘 적용하여 A점에서 운동 에너지가 0이 되기 때문이라고 하였다. 그리고 문항 3-(2)에서도 대부분 역학적 에너지 보존을 적용하여 B점과 C점 사이까지 접근한다고 응답하였다. 예를 들어 한 응답자의 경우 문항 3-(1)에서는 “A까지 갈 수 있다. 운동 에너지가 0인 지점이 A임.”이라고 하였고, 문항 3-(2)에서는 “B와 C 사이까지 갈 수 있다. 운동 에너지가 0이 되는 지점이 그 사이임.”이라고 하였다. 그러나 이 응답자는 그 이후의 움직임에 대해서는 아무런 언급이 없었다. 그 이후의 움직임에 대해 언급한 다른 응답자의 예는 다음과 같다. 문항 3-(1)에서 “A 지점까지 가까워졌다가 다시 밀려 D 지점 → E 지점 → 더 멀어짐. D 지점 이후 (C, B 방향으로 이동할 때) 반발력 넘을 만큼의 에너지 가지고 있음.”이라고 하였고, 문항 3-(2)에서는 “D 지점에서 소폭의 진자 운동. 여분의 에너지 가지고 있음.”이라고 하여 이 상황을 이해하고 있는 것으로 생각된다. 그러나 이 응답자도 앞의 문항 1과 문항 2에서는 역학적 에너지 보존을 제대로 적용하지 못하였다. 문항 1에서 E점의 퍼텐셜 에너지는 -100J, 운동 에너지는 0이라고 제대로 응답하였으나, D점에서는 퍼텐셜 에너지 -200J, 운동 에너지 0이라고 하여 역학적 에너지 보존을 적용하지 못하였다. 두 구슬의 최소 접근 거리는 D점이라고 하고, 더 가까이 접근하면 반발력이 인력보다 커지기 때문이라고 하였다. 그 이후 움직임은 가장 안정한 상태이므로 정지해 있다고 하였다. 그리고 문항 2에서도 멀어지다가 퍼텐셜 에너지가 가장 낮아 안정한 D점에서 정지한다고 하였다. 그러므로 이 응답자는 주어진 상황에 따라 역학적 에너지 보존의 적용이 달라져 안정되지 않은 개념을 가지고 있음을 알 수 있다.

문항 3-(2)의 경우에는 진동 운동을 한다는 옳은 응답은 8%밖에 되지 않았다. 그러나 이 경우에도 진동 구간을 정확하게 명시한 응답은 하나도 없어 옳은 응답이라고 볼 수는 없다. 가장 많은 응답은 가까워진다는 것으로 54%였다. 이 중에서 20%는 그냥 가까워진다고 하였고, 14%는 D점에서 정지한다, 12%는 D점까지는 접근하지 못한다고 응답하였다. 그리고 무응답이 20%나 되어 문항의 상황 파악을 제대로 하지 못한 것으로 생각된다.

진동 운동을 한다고 응답한 8% 중에서 4%는 문항 3-(1)에서 A점까지 접근한 후 다시 멀어진다고 옳게 응답한 응답자들이다. 그러나 이들도 진동 구간을 제대로 명시하지는 못하였다. 그 중 한 명은 앞서 응답 예를 제시한 “D 지점에서 소폭의 진자 운동. 여분의 에너지 가지고 있음.”

으로 진동 구간을 명시하지 않았고, 나머지 한 명의 응답은 “C와 E를 반복하다 D에 머무른다.”고 하여 진동 구간이 정확하지 않으며, 진동하다가 결국은 D점에서 정지하는 것으로 서술하였다.

이와 같이 두 구슬이 가지는 전체 에너지의 크기에 따라 두 구슬이 일정 거리 사이에서 진동 운동을 하거나, 아니면 거리 무한대로 멀어질 수도 있는데, 거의 대부분의 예비 화학 교사들이 이에 대한 명확한 이해가 부족한 것으로 나타났다.

화학 결합 형성과의 연관: 화학 결합 형성의 관점에서 보면 문항 3-(1)의 경우에는 가까이 접근했다가 다시 멀어지는 것이므로 결합을 형성하지 않는 경우에 해당하고, 문항 3-(2)의 경우에는 일정 거리 사이에서 진동 운동을 하므로 화학 결합을 형성하는 경우로 볼 수 있다. 화학 결합 형성에 관한 응답은 Table 11에 나타내었다.

무응답이 32%로 아주 많았으며, 응답을 한 경우에도 화학 결합에 대한 서술이 모호한 경우가 많았다. 서술이 명확하지 않은 경우에는 앞의 문항 3-(1)과 문항 3-(2)의 응답을 종합하여 유형을 분류하였다. 문항 3-(2)만 화학 결합이 형성된다고 올바르게 응답한 예비 화학 교사는 14%였다. 그리고 문항 3-(1)만 화학 결합이 형성된다는 응답이 12%, 둘 다 화학 결합이 형성된다는 응답이 24%로 나타났다. 그러므로 대다수의 응답자들이 이 상황을 화학 결합 형성 여부와 제대로 연관시키지 못하는 것으로 나타났다. 문항 3-(2)만 화학 결합이 형성된다고 응답한 경우에도 대부분 운동 에너지가 크면 결합이 형성되지 않고, 적절하면 결합을 형성한다는 정성적인 서술을 하였다. 전체 에너지가 0보다 크면 결합이 형성되지 않고, 0보다 작으면 결합을 형성할 수 있다고 정량적으로 명확하게 서술한 응답은 없었다.

기체 액화와의 연관: 기체의 온도가 낮아지면 기체 분자의 평균 운동 에너지가 감소한다. 따라서 기체 분자들이 퍼텐셜 에너지 곡선의 우물에 갇히는 경우가 많아지므로 기체 분자의 응집 현상이 나타나 궁극적으로 액화가 일어나게 된다. 그러나 이러한 연관성을 명확하게 설명한 응답은 극소수였다. 기체의 액화와 관련한 응답은 Table 12에 제시하였다.

Table 11. Percentages of responses for relating the movements of the two balls in item 3-(1) and 3-(2) with the chemical bonding

Response	Percentage
Bonding is made only in item 3-(2)	14
Bonding is made only in item 3-(1)	12
Bonding is made in both items	24
Miscellaneous	18
N.R.	32

Table 12. Percentages of responses for explaining the liquefaction of gases at low temperature using the potential energy curve

Response	Percentage
Decreased K.E. → cannot escape potential well	4
Decreased K.E. → reduced r → condensing	20
Decreased K.E. → reduced r → decreased P.E. → condensing	12
Decreased K.E. → increased P.E. → reduced r → condensing	30
Miscellaneous	12
N.R.	22

응답자의 대부분은 온도가 낮아지면 운동 에너지가 감소하는 것을 알고 있었다. 그러나 온도가 낮아지면 운동 에너지가 감소하게 되어 퍼텐셜 에너지 곡선의 우물에 갇히게 되어 액화한다고 명확하게 서술한 응답은 4%밖에 되지 않았다. 이들은 앞의 문항 3-(1), (2), (3)에서도 완전하지는 않지만 대체로 옳은 응답을 했던 응답자들이다. 온도가 낮아지면 운동 에너지가 감소하여 입자간 거리가 줄어들어 액화가 일어난다는 응답이 20%였고, 운동 에너지가 감소하여 입자간 거리가 줄어들어 퍼텐셜 에너지가 감소하여 액화한다는 응답도 12% 있었다. 그런데 온도가 낮아지면 운동 에너지가 감소하므로 역학적 에너지 보존에 의해 퍼텐셜 에너지가 증가한다는 잘못된 응답이 30%나 되었다. 온도가 낮아지면 운동 에너지가 감소하지만, 감소한 운동 에너지가 퍼텐셜 에너지로 전환되는 것은 아닌데, 무조건 역학적 에너지 보존을 적용하려 한 경우에 해당한다.

문항 4: 고전 역학과 양자 역학의 차이

이 상상실험에서는 지름 1 cm의 구슬을 사용하여 두 구슬의 움직임에 대해 고전 역학을 적용할 수 있도록 하였다. 화학 결합이나 기체의 응축은 원자나 분자의 수준이므로 엄밀하게 따지면 양자 역학을 적용해야 하지만, 기체 분자 운동론과 같이 경우에 따라서는 기체 분자의 움

직임을 고전 역학으로 설명하기도 한다. 따라서 문항 3에서는 고전 역학의 관점에서 화학 결합과 기체의 응축에 대해 질문을 하였다. 이에 대한 한계를 인식할 수 있도록 하기 위하여 문항 4를 설정하였다. 두 개의 구슬 대신 두 개의 기체 원자를 사용하게 되면 양자 역학을 적용해야 하며, 따라서 불확정성 원리에 의해 원자가 움직이는 궤적을 알 수 없다. 그러므로 이 상상실험에서와 같이 원자가 어떻게 움직일 것인지 물어 볼 수 없게 된다. 뿐만 아니라 양자 역학에서는 터널링 현상도 나타나므로 퍼텐셜 에너지 곡선의 우물에 갇히는 것도 의미가 달라지게 된다.

이 상상실험에서 두 개의 구슬 대신 두 개의 원자를 사용할 수 있는가에 대한 응답은 Table 13에 제시하였다. 불가능하다는 응답이 16%, 가능하다는 응답이 66%였고, 무응답이 16%였다. 불가능하다는 응답도 그 이유로 불확정성 원리를 언급한 경우는 2%, 즉 1명에 불과하였다. 나머지 응답으로는 구슬은 부피를 가지기 때문 등으로 구슬과 원자 사이의 차이를 언급하였다. 구슬이 부피를 가진다는 응답은 구슬을 강체구로 생각하여 원자와 다르다고 생각한 것이다. 불확정성 원리로 응답한 경우도 다음과 같이 완전하지는 않았다. “기체 원자의 운동 에너지와 위치 에너지는 동시에 측정 불가능하므로(슈뢰딩거 불확정성 원리) 사용할 수 없다.” 즉, 기체 원자의 운동량과 위치를 동시에 측정할 수 없는 것인데, 운동 에너지와 위치 에너지로 잘못 표현하였다. 한편, 가능하다는 응답에 대한 이유도 26%가 구슬과 원자의 유사성에 대한 것이었고, 18%는 아무런 이유 없이 사용 가능하다고 하였고, 6%는 완전 기체이면 사용 가능하다고 하였다. 응답자들이 모두 양자 역학을 배웠음에도 불구하고, 고전 역학과 양자 역학의 근원적인 차이를 이 상상실험의 상황에서 깨닫지 못함을 알 수 있다.

결론 및 제언

퍼텐셜 에너지 곡선과 두 개의 구슬을 이용한 상상실험을 통해 예비 화학 교사들의 퍼텐셜 에너지 곡선에 대한

Table 13. Percentages of responses for the possibility of replacing the balls used in the thought experiment with the atoms

Response	Percentage
Not possible	The indeterminacy principle
	Ball has volume
	Miscellaneous
Possible	Without specific reason
	Ball and gas obey the same principle of mechanical energy and force direction
	Under the condition of perfect gas
	Miscellaneous
Ambiguous	
N.R.	

이해 정도를 조사하여 얻은 결론 및 제언은 다음과 같다.

첫째, 예비 화학 교사들은 퍼텐셜 에너지가 음의 값을 가질 수 있음에 대해 의아해 하는 것으로 드러났다. 퍼텐셜 에너지 값은 퍼텐셜 에너지 곡선에서 그 수치를 읽기만 하면 되는데도 66%만 -100 J로 제대로 응답하였고, 28%가 그 절댓값인 +100 J로 응답하였다. 또한 전체 역학적 에너지 값이 음의 값을 갖는 것에 대해서도 상당한 거부감을 느끼는 것으로 드러났다. 초기 조건에서 두 구슬이 정지해 있으므로 두 구슬의 운동 에너지는 0인데, 이에 대한 정답률은 16%밖에 되지 않았다. 이와 같이 낮은 정답률은 운동 에너지가 0이 되면 전체 역학적 에너지가 -100 J이 되어 음의 값이 되므로 운동 에너지를 0이라고 응답하지 못한 것으로 생각된다. 따라서 퍼텐셜 에너지를 설명할 때 퍼텐셜 에너지의 0점은 임의로 잡기 나름이므로 퍼텐셜 에너지가 음의 값을 가질 수 있고, 또한 퍼텐셜 에너지와 운동 에너지의 합도 음의 값이 될 수 있음을 강조할 필요가 있다.

둘째, 예비 화학 교사들은 특정 거리에 있는 두 구슬 사이에 작용하는 힘의 방향은 퍼텐셜 에너지 곡선을 이용하여 잘 아는 것으로 나타났으나 그 이유에 대해서는 명확하게 설명하지 못하였다. 즉, 두 구슬 사이에 작용하는 힘의 방향은 퍼텐셜 에너지 곡선의 최저점을 기준으로 인력과 반발력이 작용하는 것을 알고 있었으나, 그 이유를 퍼텐셜 에너지 곡선의 기울기를 이용하여 명확하게 설명한 예비 화학 교사는 10%로 적었다. 그러므로 퍼텐셜 에너지 곡선 설명에서 인력과 반발력이 작용하는 구간만 명시할 것이 아니라 그것이 퍼텐셜 에너지 곡선의 기울기 때문에 나누어진 것이라는 설명도 덧붙일 필요가 있다.

셋째, 예비 화학 교사들은 역학적 에너지 보존에 대한 개념은 있었지만 이를 개념 질문지의 상상실험 상황에 적용하지는 못하였다. 두 구슬이 움직이면서 감소된 퍼텐셜 에너지가 운동 에너지로 전환된다는 것은 70%가 알고 있었으나, 줄어든 퍼텐셜 에너지만큼 운동 에너지가 증가한다고 정량적으로 응답한 경우는 4%밖에 되지 않았다. 이러한 결과는 전체 역학적 에너지가 음의 값을 가지는 것에 대한 거부 반응에 기인한 것으로 볼 수 있다.

또한, 두 구슬의 운동은 두 구슬이 가진 전체 역학적 에너지에 의존하고, 역학적 에너지 보존에 의해 퍼텐셜 에너지와 운동 에너지의 전환이 이루어지게 된다. 그러나 개념 질문지 응답을 보면 두 구슬의 최소 접근 거리나 향후 운동에 대해 전혀 역학적 에너지 보존 개념을 적용하지 못하는 응답자가 대부분인 것으로 드러났다.

넷째, 예비 화학 교사들은 두 구슬이 가진 에너지와 퍼텐셜 에너지 곡선의 우물 깊이를 비교하여 두 구슬이 진

동 운동을 하거나 또는 완전히 멀어질 수 있음을 잘 알지 못하였다. 그러므로 두 구슬을 이용한 상상실험을 화학 결합이나 기체의 액화와 연관하여 제대로 설명하지 못하였다.

다섯째, 예비 화학 교사들은 두 구슬을 이용한 상상실험에서 구슬 대신 원자를 사용한다면 원자의 움직임을 고전역학으로 설명할 수 없음을 깨닫지 못하였다. 지름 1cm의 구슬을 사용하는 경우는 초기 조건이 주어지면 고전역학으로 그 움직임을 예측할 수 있지만, 원자의 경우에는 불확정성 원리로 인해 원자가 움직이는 궤적을 알 수 없게 됨을 생각하지 못한 것이다.

퍼텐셜 에너지 곡선이 주어졌을 때 두 구슬의 운동에 역학적 에너지 보존을 적용한다거나, 그 결과 두 구슬의 운동을 예측한다거나, 또한 이러한 상상실험이 화학 결합이나 기체의 액화, 분자의 진동 운동과 연관된다든지 하는 것은 어떤 새로운 개념을 터득하는 것이라기보다는 이미 알고 있는 지식을 서로 연관시키는 것에 해당한다. 그러므로 본 연구에서 사용한 개념 질문지의 상상실험을 활용한다면 퍼텐셜 에너지 곡선에 대한 이해를 증진시키고, 이와 관련되는 지식들을 서로 연관시킬 수 있는 기회를 제공할 수 있을 것이다.

Acknowledgments. Publication cost of this paper was supported by the Korean Chemical Society.

REFERENCES

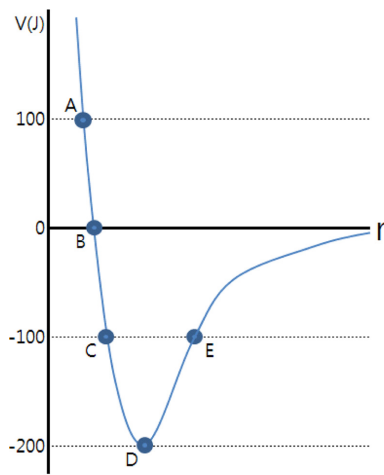
1. Ministry of Education, Science and Technology. *National Curriculum of Science Education 2011-361*; MEST: Seoul, 2011.
2. Lee, M.-H.; Wu, Y.-T.; Tsai, C.-C. *Int. J. Sci. Educ.* **2009**, *31*, 1999.
3. Lin, T.-C.; Lin, T.-J.; Tsai, C.-C. *Int. J. Sci. Educ.* **2014**, *36*, 1346.
4. Tsai, C.-C.; Wen, M. L. *Int. J. Sci. Educ.* **2005**, *27*, 3.
5. Wandersee, J. H.; Mintzes, J. J.; Novak, J. D. In *Handbook of Research on Science Teaching and Learning*; Gable, D. L., Ed.; Macmillan Publishing Co.: New York, 1994; pp. 177-210.
6. Hewson, P. W.; Beeth, M. E.; Thorley, N. R. In *International Handbook of Science Education, Part One*; Fraser, B. J.; Tobin, K. G., Eds.; Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, 2003; pp. 199-218.
7. Kang, D.-H.; Paik, S.-H.; Park, K.-T. *J. Korean Chem. Soc.* **2004**, *48*, 399.
8. Park, J.-Y. *J. Korea Assoc. Sci. Edu.* **2011**, *31*, 1009.
9. Park, J.-Y. *Journal of Research in Curriculum Instruction* **2014**, *18*, 1239.
10. Kahveci, A. *Chem. Educ. Res. Pract.* **2009**, *10*, 109.

11. King, C. J. H. *Int. J. Sci. Educ.* **2010**, 32, 565.
 12. Leite, L.; Mendoza, J.; Borsese, A. *J. Res. Sci. Teach.* **2007**, 44, 349.
 13. Levy Nahum, T.; Mamlok-Naaman, R.; Hofstein, A.; Krajcik, J. *Sci. Educ.* **2007**, 91, 579.
 14. Talanquer, V. *Int. J. Sci. Educ.* **2007**, 29, 853.
 15. Treagust, D. F.; Duit, R. *Cult. Stud. of Sci. Educ.* **2008**, 3, 297.
 16. NGSS Lead States. *Next Generation Science Standards: For States, By States*; The National Academies Press: Washington, DC, 2013.
 17. McClelland, G. *Phys. Educ.* **1989**, 24, 162.
 18. Neumann, K.; Viering, T.; Boone, W. J.; Fischer, H. E. *J. Res. Sci. Teach.* **2013**, 50, 162.
 19. Saglam-Arslan, A. *J. Sci. Educ. Technol.* **2010**, 19, 303.
 20. Pujol, O.; Pérez, J. P. *Eur. J. Phys.* **2007**, 28, 569.
 21. Lindsey, B. A. *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res.* **2014**, 10, 013101.
 22. Stephanik, B. M.; Shaffer, P. S. *AIP Conf. Proc.* **2012**, 1413, 367.
 23. Alyea, H. N. *J. Chem. Educ.* **1942**, 19, 337.
-

부록. 퍼텐셜 에너지 곡선에 대한 개념 질문지

*기체 분자 운동, 화학 결합과 관련하여 퍼텐셜 에너지 곡선은 화학에서 중요하게 다루는 내용이다. 퍼텐셜 에너지 곡선과 관련하여 다음과 같은 상상실험을 해보자.

지름 1 cm의 두 구슬간 거리(r)에 따른 퍼텐셜 에너지(V) 변화가 그래프와 같다고 하자(단, 중력은 없고 구슬의 움직임에 따른 저항도 없다고 하자).



1. 두 구슬을 E점에 해당하는 위치에 붙들고 있다고 하자.

(1) 두 구슬의 운동 에너지와 퍼텐셜 에너지는 각각 얼마인가?

이 때 두 구슬 사이에는 어떤 힘이 작용하는가?

① 인력 ② 반발력 ③ 작용하는 힘 없음

그렇게 생각하는 이유는?

(2) 두 구슬을 놓아주면 구슬간 거리는 가까워지기 시작한다. E점에서 D점으로 가는 동안 퍼텐셜 에너지가 감소하는데, 이 감소한 퍼텐셜 에너지는 어떻게 되는가?(어디에 쓰이는가? 무엇으로 변화되는가?)

(3) 두 구슬이 접근하여 구슬간 거리가 D점에 해당할 때 두 구슬의 운동 에너지와 퍼텐셜 에너지는 각각 얼마인가?

이 때 두 구슬 사이에는 어떤 힘이 작용하는가?

① 인력 ② 반발력 ③ 작용하는 힘 없음

그렇게 생각하는 이유는?

(4) 두 구슬이 접근할 수 있는 가장 가까운 거리에 해당하는 위치는 어디인가?

① A점 ② B점 ③ C점 ④ D점 ⑤ 답 없음

그렇게 생각하는 이유는?

(5) 두 구슬이 가장 가까이 접근한 위치에 있을 때 두 구슬의 운동 에너지와 퍼텐셜 에너지는 각각 얼마인가?

이 때 두 구슬 사이에는 어떤 힘이 작용하는가?

① 인력 ② 반발력 ③ 작용하는 힘 없음

그렇게 생각하는 이유는?

(6) 두 구슬이 가장 가까이 접근한 다음 그 이후 두 구슬의 움직임은 어떻게 변화하는가? 시간에 따른 거리 변화를 제시하고 그 이유를 설명하시오.

2. 이번에는 두 구슬을 A점에 해당하는 위치에서 붙들고 있다가 놓아 주었다고 하자.

그 이후 두 구슬의 움직임은 어떻게 변화하는가? 시간에 따른 거리 변화를 제시하고 그 이유를 설명하시오.

3. 이번에는 두 구슬이 멀리 떨어져 있다가 서로 접근하고 있다고 하자.

(1) 만약 E점을 통과할 때 두 구슬이 200 J의 운동 에너지를 가지고 있었다면 그 이후 두 구슬의 움직임은 어떻게 변화하는가? 시간에 따른 거리 변화를 제시하고 그 이유를 설명하시오.

(2) 만약 E점을 통과할 때 두 구슬이 10 J의 운동 에너지를 가지고 있었다면 그 이후 두 구슬의 움직임은 어떻게 변화하는가? 시간에 따른 거리 변화를 제시하고 그 이유를 설명하시오.

(3) 화학결합의 관점에서 위 (1)과 (2)를 비교하여 설명하시오.

(4) 상온에서 기체인 물질도 온도를 낮추면 액화가 일어난다. 그 원리를 퍼텐셜 에너지 곡선을 이용하여 설명해보시오.

4. 이 상상실험에서 두 개의 구슬 대신 두 개의 기체 원자를 사용해도 되겠는가? 가부를 밝히고 그 이유를 설명하시오.