

## 반응적 교수법에 의한 고등학교 1학년 학생들의 질량 보존과 부피 변화에 대한 사고 변화 분석

조나연 · 백성혜<sup>†,\*</sup>

완산고등학교

<sup>†</sup>한국교육대학교 화학교육과

(접수 2020. 2. 8; 게재확정 2020. 7. 4)

## The Analysis of Thought Change of 11th Grade Students related to Conservation of Mass and Volume Change by Responsive Teaching

Na-Yeon Jo and Seoung-Hey Pail<sup>†,\*</sup>

Wansan High School, Jeonju 55071, Korea.

<sup>†</sup>Department of Chemistry Education, Korea National University of Education, Chungju 28173, Korea.

\*E-mail: shpail@knu.ac.kr

(Received February 8, 2020; Accepted July 4, 2020)

**요 약.** 이 연구는 중소도시에 소재한 고등학교 1학년 학생 4명을 대상으로 반응적 교수법의 효과를 알아보았다. 이를 위하여 반응적 교수법의 3단계를 세분화하여 6단계로 구성하였다. 1단계는 학생들의 거시적 생각 드러내기, 2단계는 학생들의 초기 미시적 생각 이끌어내기, 3단계는 입자에 대한생각을 학문과 연결하기, 4단계는 교사가 개입하여 입자에 대한 학습자의 생각을 명료히 하기, 5단계는 학생 생각 심화하기, 6단계는 학생 생각 확장하기였다. 4단계까지의 과정을 통해 질량의 원인은 원자이며, 부피의 원인은 분자라는 학생들의 생각이 명료하게 드러났다. 5단계에서 학생들은 양성자와 중성자가 존재하는 공간을 매우 작으므로 분자 자체의 부피는 무시한다는 개념에 도달하였다. 그리고 생각을 확장하는 6단계에서 입자의 부피를 무시한 질점의 개념으로 분자 운동을 설명하였다. 이를 통해 학생들은 아보가드로의 법칙에서 요구되는 입자의 질량보존과 부피변화의 관계에 대한 관점을 획득하고, 어떤 시스템은 직접 관찰하기에 너무 작거나, 너무 크거나, 너무 빠르거나, 너무 느려서 간접적으로만 연구될 수 있음을 인식하였다.

**주제어:** 반응적 교수법, 질량, 부피, 고등학생

**ABSTRACT.** This study was conducted on four 11<sup>th</sup> grade students at a high school in a small town to determine the effectiveness of responsive teaching. The three phases of the responsive teaching method proposed in the previous study were subdivided into six stages; Step 1 is elicitation of students' thoughts related to macroscopic world, Step 2 is drawing of students' early thoughts related to microscopic world, Step 3 is disciplinary connections with ideas of the particle, Step 4 is to clarify the learner's thoughts on the particle by the teacher's involvement, Step 5 is deepening students' thoughts, and Step 6 is expanding ideas. In Step 4, students came to the recognition that the cause of mass was atoms and that the cause of volume was molecules. In Step 5, students led to a shift in thinking that could ignore the volume of the molecules themselves through the properties of protons and neutrons that affect mass from a particle perspective. In the Step 6 of expanding ideas, students explained molecular motion by the concept of material point which ignores the volume of particles. This steps gave students perspectives on the relationship between the mass and volume of particles required by Avogadro's law. The students recognized that some systems could be studied only indirectly because they were too small, too large, too fast, or too slow to observe directly.

**Key words:** Responsive teaching, Mass, Volume, High school students

### 서 론

과학의 주요 개념인 물질의 본성에 대한 전문적인 지식 체계를 구성하기 위해서는 추상적인 개념인 물질의 입자성에 대한 이해가 필요하다.<sup>1</sup> 물질의 본성에 관련된 발달

단계(Learning Progression)를 이론적, 실험적 증거에 근거하여 '물질과 물체', '힘과 상호작용', '분자운동', '보존', '에너지'라는 하위 주요개념으로 나누어 제시하는 연구가 진행되었다.<sup>2</sup> 이 연구에서는 질량, 부피, 원자, 분자, 반응, 분자 운동, 보존 등의 개념이 학생들의 생각 속에서 어떤

관련성을 맺고 있는지 분석하고, 이러한 학생들의 개념을 확장하여 물질의 본성에 대한 보다 깊은 이해를 향상시킬 수 있도록 하기 위해 반응적 교수법을 적용하여 학생 생각의 변화를 연구하고자 하였다.

반응적 교수법은 교사가 학생의 아이디어를 이끌어내어 학생 생각의 본질에 세심한 주의를 기울여 학생의 생각을 바탕으로 확장 및 심화하는 기회를 제공하는 교수법이다.<sup>3,4</sup> 반응적 교수법에서는 학생들의 아이디어는 다양하고 예측할 수 없다는 특징을 가지며, 학생의 아이디어는 얼마든지 수업의 자원으로 활용할 수 있음을 가정한다.<sup>5,6</sup> 반응적 교수법이 적용된 수업은 기존의 구성주의적 학습의 확장된 형태이나 반응적 교수법이 적용된 수업에서는 교사가 학생 아이디어의 정확성을 판단하고 학생들에게 올바른 답변을 하도록 요청하는 것이 아니라, 이끌어낸 학생의 아이디어를 가치 있게 생각하고 수업의 자원으로 활용하기 위해 지지하고 학문적으로 연결해 주기 위한 대안을 모색하는 것에 초점을 둔다. 반응적인 수업은 학생이 제기하는 아이디어와 문제에 따라 수업이 진행되기 때문에<sup>7</sup> 교사는 사전에 제작된 수업 지도안이나 교육과정으로 학생을 유도하지 않는다.<sup>8</sup> 또한, 전통적인 교실 수업 상황에서 교사는 말하고 학생은 듣는 모습이 아니라 학생은 참가자가 된다.<sup>9,10</sup> 이러한 분위기에서 학생들은 자신의 아이디어를 끊임없이 드러내게 되고, 교사는 이에 반응하여 수업의 방향을 유연하게 변형하게 된다.<sup>11</sup>

반응적 교수법은 학생의 생각을 과학의 씨앗(seeds of science),<sup>4</sup> 자원(resources)<sup>7</sup>이라고 표현할 정도로 수업과 탐구의 출발점이 될 수 있음을 강조한다. 비록 학생들이 문제를 해결할 때 사용하는 지식은 직관적이고 비공식적이지만, 학생의 생각을 수업의 자원으로 활용했을 때의 장점은 교사가 이끌어가는 전략보다 훨씬 강력하고 생산적이라는 것이다.<sup>12</sup> 또한 학생의 생각이 학급 전체에 공유되기 때문에 자신과 동료의 아이디어를 탐색하고 평가하며 논쟁하는 일련의 과학적 실행에 참여할 수 있다.

선행 연구에서는 고등학생의 발달단계 수준을 분석하여 학생들의 입자적 개념의 이해 과정이 불안정하게 진행되고 있다는 것을 확인하였다.<sup>13</sup> 물질의 특성 단위에 제시된 개념에 대해 거시적 수준의 개념을 빠르게 이해한 학생 중에서도 상당수가 미시적 수준에서 다양한 오개념을 가지고 있었으며, 입자 개념을 이해한 학생들 또한 물질의 특성과 관련된 개념을 미시적 수준에서 표현하고 이해하는데 어려움이 있었다.<sup>14</sup> 학생들은 분자의 운동을 설명할 때, 입자 관점에서 자신만의 프레임을 가지고 있으며, 수업을 통해서 이러한 개념이 변화되지 않고, 자신의 초기 생각으로 문제 상황을 해결하려고 시도하려는 경향을 보인다.<sup>15</sup> 지속적으로 일어나는 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 반응적 교수법을 도입하고자 한다. 반응적 교수법에서는

학생들의 초기 생각을 교사가 바꾸어야 할 오개념으로 보지 않고, 학생의 생각을 존중하며 상황에 따라 이러한 생각을 정교화하도록 하며,<sup>16</sup> 이러한 과정에서 학습자의 인식론적 사고의 틀을 안정화시키고, 더 나아가 심화시킬 수 있다고 주장하였다.<sup>17</sup> 또한 반응적 교수법을 통해 학습자들의 이해를 끌어내고, 교육과정에서 기대하는 교육적 목표의 달성이 가능하다고 주장하였다.<sup>5</sup> 반응적 교수법은 NGSS에서 강조하는 Practice를 실천할 수 있는 교수 방법으로 주목받는 교수 방법으로 이 연구를 통해 반응적 교수법을 통해 학생들이 과학 개념을 상황과 맥락에 적용할 수 있도록 사고의 변화를 이끌어낼 수 있는지에 대해 알아보하고자 한다.

여러 연구에서 학생들의 개념 변화를 위하여 소집단 토론 활동의 교육적 효과를 분석하였으나, 소집단 활동이 모든 학생들에게 협력적인 지식 형성의 기회를 제공하는 것은 아니기 때문에 소집단 토론이 잘 일어나도록 하는 특별한 교수 설계가 필요하다.<sup>18</sup> 국내외에서 반응적 교수법과 관련된 다양한 사례 중심의 선행 연구가 진행되고 있으나 반응적 교수법은 수업의 여러 요소가 관여하기 때문에<sup>19</sup> 다양한 양상으로 이루어지므로 사례를 통해 이해할 것을 권장하고 있다. 이 연구에서는 화학에서 다루는 다양한 개념들, 즉, 화학반응에서 질량보존과 기체의 부피변화에 대한 개념, 양성자, 중성자, 전자와 같은 미시적 입자에 대한 개념, 물리변화와 화학변화에서 에너지 출입과 화학결합에 대한 개념 등에 대한 학생들의 사고를 반응적 교수법의 사례로 찾아보고자 한 연구이며, 이러한 연구는 아직까지 구체적으로 다루어지지 않았다. 특히 이 연구에서는 고등학교 1학년 학생들을 대상으로 질량보존과 부피에 관련된 사고를 변화시키는 과정을 보다 세분화하고 화학 수업에 적합한 반응적 교수 단계를 찾아보고자 하였다. 이를 통해 모든 교과에 보편적으로 적용되는 반응적 교수법을 고등학교 1학년 과학 수업에 적합한 단계로 최적화하여 고등학교 1학년 화학을 가르치는 화학 교사들이 쉽게 반응적 교수법을 이해하고 수업에 반영할 수 있도록 제안하고자 한다. 2015 개정교육과정부터 고등학교 2학년 ‘화학 I’의 핵심 개념으로 화학 양론이 도입되고 있으나, 이에 대한 학습의 어려움은 지속되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 이 연구에서는 화학양론의 기본 개념에 해당하는 질량 보존과 기체의 부피에 관한 고등학교 1학년 학생 생각의 본질을 분석하고, 반응적 교수법을 활용하여 사고의 확장을 이끌어내는 과정을 통해 학생들을 화학이라는 학문의 본질과 연결하여 사고의 심화, 확장이 가능한 지에 대하여 알아보하고자 하였다. 미시적 관점을 요구하는 화학 양론 개념의 교수법에 대한 고등학교 1학년 학생들을 대상으로 한 연구 결과는 ‘화학 I’ 교과서의 기본 개념의 이해 과정에서 발생하는 학생들의 어려움을 해결할 수 있는 방안을 제안해 줄 것이다.

## 연구 방법

### 연구대상

인문계 고등학교 1학년 4명을 대상으로, 반응적 교수법을 10차시 동안 소집단 토론 활동으로 진행하였다. 연구 대상자는 자발적으로 연구 참여를 희망하는 학생들로 선발하였으며, 반응적 교수법의 진행은 해당 고등학교의 교사로 재직하고 있는 연구자가 담당하였다. 10차시 활동 중 무게와 질량, 밀도와 질량, 부피 등 화학의 기본 개념에 대한 학생들의 토론을 제외하고, 질량과 부피와의 관계에 대한 학생들의 생각 변화 및 사고 확장에 집중하여 자료를 분석하였다. 선발된 학생들은 중학교 과학교육과정에서 질량과 부피에 관련된 내용을 학습하였을 뿐 아니라, 고등학교 1학년 과학교육과정에서도 과학 성취도가 상위 10% 이내에 드는 학생들로 선발하였다. 학생들은 사전에 교사와 래포(Rapport)가 형성되어 있으며, 다른 과학수업 시간을 통해 소집단 토론에서 자신의 의견을 표현하도록 훈련받았다.

### 수업내용

연구자는 수업에 참여한 학생들이 서로의 생각을 드러내고, 생각을 해석하는 과정을 통해 과학 개념 간의 관계를 파악하고, 관계로부터 개념을 확장해 가는 경험을 하도록 수업을 이끌었다.<sup>21</sup> 연구자는 질소와 수소가 반응하여 암모니아를 생성할 때, 질량과 부피의 보존 여부에 대해 질문하고, 학생 생각의 흐름에 따라 소집단 토론을 진행하였다. 이는 반응적 교수법의 특징을 반영한 것이다. 소집단 토론 활동에서 후반부로 갈수록 학생들이 사고가 확장되면서 다양한 학생들의 생각 흐름을 따라 토론이 진행되는 차시가 증가하였다.

매 차시 수업 후에는 학생들의 토론 자료를 분석하여,

학생들의 생각을 이끌어 내거나 확장시키는데 필요하다고 판단되는 수업 내용을 연구자끼리 논의하고, 다음 시간에 이에 대한 내용을 학생들이 토론하도록 안내하는 방식으로 수업을 진행하였다.

### 분석자료 및 기준

이 연구에서는 10차시에 걸친 학생들의 토론 자료, 교사가 제안한 그림, 학생이 제안한 그림 등 다양한 자료를 통해 학생들의 사고의 변화를 분석하였다. 분석 자료는 두 명의 연구자가 각자 코딩한 후에 합치도를 확인하고, 불일치는 경우에는 논의를 통해 분석 기준을 조정하였으며, 이러한 과정을 반복하면서 의미 있는 자료를 도출하였다. 이러한 과정을 거쳐서 1단계와 2단계에서 드러난 질량 보존에 대한 학생들의 초기 거시적 생각과 미시적 생각은 “질량이 보존된다.”와 “질량이 보존되지 않는다.”의 두 가지 유형으로 구분하였다. 또한 부피에 대해서는 반응 전후에 “부피가 줄어든다.”와 “부피가 보존된다.”의 두 가지 유형으로 구분되었다.

1단계인 학생들의 거시적 생각 드러내는 과정에서는 반응의 종류에 따라 고려해야 할 요인으로 질량 보존 여부, 에너지 출입 방향, 에너지 크기, 원자를 구성하는 입자의 이동 등의 항목이 도출되었다. 2단계인 학생들의 초기 미시적 생각 드러내는 과정에서는 입자 수, 입자크기, 입자간 거리, 상태, 온도, 압력 등이 부피에 영향을 미치는 요인으로 도출되었다. 3단계부터 단계가 진행될수록 학생들의 사고는 다양해졌기 때문에 학생별로 특징적인 단계별 사고를 분석하여 6단계로 제시하였다. 이를 정리하여 Table 2에 제시하였다. 그러나 반응적 교수법에 따른 학생들의 생각 변화를 분석하는 과정에서 연구자의 주관적인 해석이 포함될 수 있다.

**Table 1.** Discussion topics and related science concepts in steps of responsive teaching

Lesson	Responsive Teaching	Discussion Topics	Selector	Scientific Concept
1	1	Is the mass conserved?	Teacher	mass conservation
2		Need of concept related to conservation, mass	Student	conservation, mass, weight, gravity
3		Factors affecting mass conservation	Student	types and number of particles
4	3, 4	Basic particle of mass	Teacher	atom
5		Small particles for the source of mass	Teacher	proton, neutron, electron, nucleus
6	6	Energy entry from reaction	Student	physical reaction, chemical reaction, nuclear reaction
7	1	Is the gas volume conserved?	Teacher	volume of gas
8	2	Factors affecting gas volume	Student	types and number of particles, size of particles, distance between particles, Temperature, pressure, states of matter
9	3,4	Basic particle of of gas volume	Teacher	molecule
10	5,6	Find cross-cutting concept in the relationship between mass and volume	Teacher	material point ignoring volume

Table 2. 6 steps of responsive teaching method

Step	Detailed steps
1. Foregrounding the substance of students' idea	1. Reveal early students' macroscopic thoughts about mass conservation and gas volume change 2. Draw early students' microscopic thoughts about mass conservation and gas volume changes
2. Recognizing the disciplinary connections within students' idea	3. Connecting the thought of particles to science 4. Clarify learner's thinking about particles
3. Taking up the pursuing the substance of student thinking	5. Deepening student thoughts 6. Expanding student thinking

## 연구 결과 및 논의

### 1단계: 질량 보존 및 기체의 부피 변화에 대한 초기 학생들의 거시적 생각 드러내기

학습자의 선개념을 통한 생각의 본질을 드러내는 단계로 교수자는 학습자의 생각을 평가하고 교정하는 것이 아니라 이해하고, 표현할 수 있도록 분위기를 형성하는 지적 공감의 필요하다. 지적 공감을 구하기란 쉽지 않지만 면접, 관찰, 설문지를 통해 획득할 수 있다.<sup>20</sup> 1단계에서 참여 학생들은 모두 질량 보존의 법칙을 설명할 수 있었지만, 질량과 보존이라는 개념에 대해 명확하게 알지 못하고 있었다. 연구자가 수소와 질소가 반응해 암모니아를 생성되었을 때 질량이 보존되는지에 대해 물었을 때, 학생들은 다음과 같이 자신들의 거시적 생각을 드러냈다.

연구자: 수소와 질소가 반응해 암모니아를 생성했을 때 질량이 보존된다고 생각하나요?

학생1: 질량 보존의 법칙이니까 법칙은 어디에나 적용할 수 있어요. 그럼 물질의 상태가 어떻게든 관계없이 다 적용할 수 있다고 생각해요. 액체는 기체든 고체든, 법칙이니까.

학생4: 질량 보존의 법칙이 '화학 반응에서'로 정의되기 때문에 이 반응은 질량이 보존돼요.

학생3: 질량이 보존되지 않는다고 생각해요. 실험 상황에서 질소와 수소를 넣고 반응시켜 암모니아를 만들면 기체로 빠져나가서 질량이 감소하니까.

학생2: 질량 보존의 법칙이 성립하잖아. 간단하게 생각하면, 석판 하나를 쪼갬 다음에 양쪽으로 두 봉지씩 나누면 나누기 전과 나눈 후가 질량이 다르진 않잖아.

수소와 질소가 반응해 암모니아를 생성하는 과정에서 학생 1, 2, 4는 “질량이 보존된다.”고 하였고, 학생 3은 “보존되지 않는다.”고 주장하였다. 이에 대한 근거로 학생 1과 4는 질량 보존의 법칙과 같은 용어에 의존하여 사고하였으며, 미시적인 입자 질량 관점을 드러내지 못하였다. 한

편 학생 3은 실험 상황에서 모든 계를 고려하지 못하고, 실험 도구에서 기체가 빠져나가기 때문에 질량이 감소하여 질량이 보존되지 않는다고 주장하였다. 학생 2는 학생 3에게 어떤 물체를 쪼개거나 합칠 때 질량이 처음과 같으면 질량이 보존된다고 설득하였다.

한편, 부피 보존에 대한 학생들의 거시적인 생각을 이끌기 위해 동일한 질문을 하였다. 이 전 과학수업에서 이미 학생들은 화학 반응식의 계수 비에 대해 배운 상태였다.

교 사: 질소 1 L와 수소 3 L가 반응할 때, 암모니아는 몇 L 생성될까요? 이 경우 부피도 보존되나요?

학생1: 물질의 상태마다 부피가 다르니까 부피는 보존되지 않는다고 생각해요.

교 사: 모두 기체 상태라고 가정할게요.

학생4: 상태만 부피에 영향을 미친다고 생각해서 상태가 같으면 질량 보존의 법칙처럼 부피도 보존된다고 했어.

학생2: 부피가 입자 간의 거리로 결정되잖아. 그러면 질소랑 수소가 따로 있다가 분해되면 암모니아 하나로 합쳐지잖아. 그러니까 부피가 더 줄어들지 않을까?

학생4: 어느 정도는 동의해. 그런데 꼭 합쳤다고 줄어드는 건 아니라고 생각해. 부피가 더 증가하는 반응도 있을 수 있잖아.

학생2: 꼭 줄어드는 건 아닌데 이 반응이 질량이 보존되기 위해서는 1:3:2의 비율로 반응하기 때문에 2L가 생성된다고 생각했어.

학생1: 질량이 보존되니까 원자 수가 같기 위해 1:3:2의 비율로 생성된다고 생각해.

학생3: 기체가 발생하면 날아가니까 부피는 감소한다고 생각해.

토론 과정에서 학생 1, 2, 3은 부피가 줄어든다고 하였고, 학생 4는 부피가 보존된다고 주장하였다. 질량 보존의 경우에는 학생 1, 2, 4가 보존된다고 하였는데, 이 중에서 학생 4만 질량과 부피가 모두 보존된다고 생각하고 있으며, 학생 1, 2는 질량보존 때와 마찬가지로 반응식의 표현 수

준에서 계수를 고려하여 응답하였다. 또한 학생 3은 질량 보존 때와 마찬가지로 실험 상황에서 계와 주위를 고려하지 못하여 부피가 줄어든다고 생각하였다. 따라서 학생들의 질량보존과 부피 개념 사이에는 거시적 수준에서 사고의 연결성이 어느 정도 나타났다.

## 2단계: 질량 보존 및 기체의 부피 변화에 대한 초기 학생들의 미시적 생각 이끌어내기

이 과정에서는 학생들의 거시적인 생각 드러내기에서는 드러나지 않았던 학생이 의미하는 바를 이끌어내기를 통해 학습자의 학습을 방해하는 것을 확인, 학생 생각의 범위를 알아내거나 학습자의 생각을 연결하고 구성해가는 구성체, 학습자의 생각을 의미있게 만드는 메시지, 수업 전체의 방향을 결정하는 등 학생들의 생각을 인식하기 위한 교수자의 접근 방법을 활용할 수 있다.<sup>22</sup> 학생들은 질량 보존에 대한 사고를 할 때 미시적 입자 관점이 드러나지 않았다. 따라서 2단계에서는 연구자가 입자 배열 상태를 그림으로 표현하여 질량 보존에 대한 미시적 생각을 드러내도록 이끌었다.

교 사: 물질의 고체, 액체, 기체 상태를 입자 그림으로 표현해 볼까요?

(학생들이 그림으로 표현)

교 사: 친구들의 그림을 비교해 볼까요? 이렇게 물질의 상태가 변하는 상황에도 질량이 보존된다고 생각하나요? 그 이유를 설명해 볼까요?

학생4: 이런 반응에서는 질량이 보존된다고 생각해요, 그런데 그림을 그릴 때는 공간이 부족해서 기체 쪽에는 입자 수를 같게 그리지 못했어요. 입자 수가 같다면 질량이 같다고 생각해요.

학생3: 입자 수와 입자의 종류도 고려해야지?

학생4: 이 반응에서는 입자의 종류가 변하지 않았잖아. 만약에 입자의 종류가 변하면 그것도 고려해야지.

학생1: 입자 자체의 질량이 증가하거나 개수가 증가하면 질량이 증가해요.

질량에 영향을 미치는 요인에 대한 미시적 관점을 이끌어낸 결과, 거시적 관점에서 질량이 보존된다고 생각한 학생 1, 2, 4는 질량이 보존되기 위해서 입자의 종류와 수가 같아야 한다고 생각하였다. 또한 질량이 보존되지 않는다고 생각한 학생 3도 부피를 고려할 때 입자의 질량과 종류를 고려해야 한다고 동일하게 생각하였다.

학생들이 그린 물질의 세 가지 상태에 관련된 미시적 관점은 같은 종류의 일정한 부피를 가진 입자이며, 고체, 액체, 기체로 갈수록 입자 간의 거리가 증가한다는 공통점이 있다.

한편, 부피의 변화에 대한 미시적 생각을 학문과 연결하기 위하여 교사는 상태가 변할 때 부피가 변화하는 이유에 대해 생각해 보도록 안내하였다. 이 과정에서는 학생들끼리의 토론보다는 교사와 학생들과의 토론이 더 활발하게 일어났다.

교 사: 어떤 물질의 고체, 액체, 기체 상태를 표현한 그림 (Fig. 1)을 다시 한 번 볼까요? 모두 고체, 액체, 기체로 갈수록 부피가 증가한다고 했어요. 왜 그렇게 생각했어요?

학생4: 입자 사이의 거리가 증가했어요. 기체가 되면 온도가 높기 올라가니까 분자 속도가 빨라지잖아요. 움직일 수 있는 공간이 넓어져서 부피가 증가해요.

교 사: 그렇다면 부피에 영향을 미치는 요인은 입자 사이의 거리뿐인가요? 어떻게 하면 이 상자가 커질 수 있을까요?

학생2: 입자 사이의 거리도 중요하지만 입자 수도 중요해요. 입자 수가 많아지면 입자 사이의 거리를 일정하게 유지하기 위해서 부피가 커져요.

학생3: 입자의 종류도 중요해요. 입자의 크기가 종류마다 달라 부피에 영향을 미쳐요.

학생1: 압력도 중요해요. 압력이 증가하면 입자 사이의 거리가 감소해서 부피가 감소해요.

교 사: 그렇다면 부피 보존을 위해 필요한 요인은 입자 사이의 거리, 온도, 입자 수, 입자의 종류, 압력인가요?

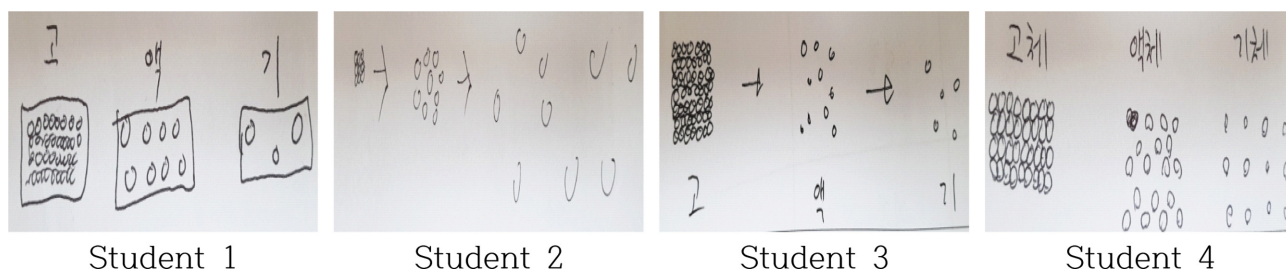


Figure 1. Students' early thoughts related to microscopic world of three states.

**Table 3.** Students' early thoughts related to factors affecting volume change

Students	Factors affecting volume change					
	Number of particles	Size of particles	Distance between particles	Temperature	Pressure	States
1	O	O	O (T, P, States)			
2	O	O (Solid)	O	O	O (Gas)	O
3	O	O (Solid)	O (Gas)	O	O	O
4	O	O	O	O	O	O

이 요인들이 각각 영향을 미치는 건가요?

학생1: 학생4가 말한 것처럼, 입자 사이의 거리는 온도에도 영향을 받을 수 있고, 압력에도 영향을 받을 수 있어요.

교사들의 질문에 대한 학생들의 토론 과정에서 학생들이 기체의 부피에 영향을 미치는 요인으로 입자 사이의 거리, 온도, 입자 수, 압력 뿐 아니라 입자의 종류도 언급하였다. 이를 표로 정리하면 Table 3와 같다.

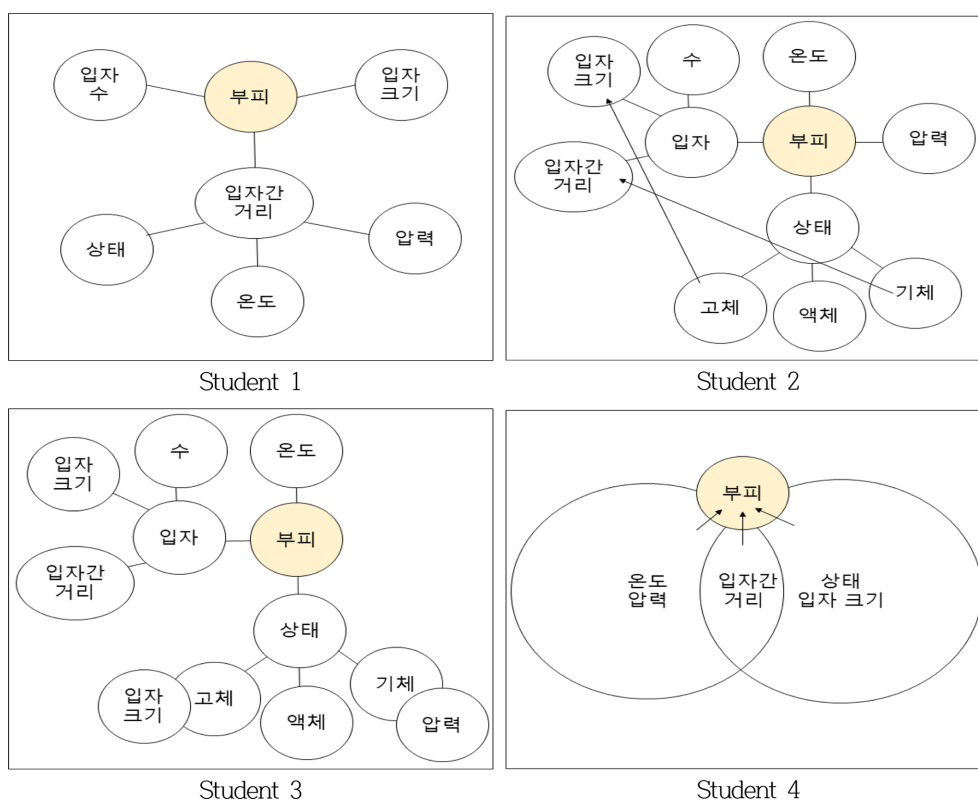
기체의 부피 변화에 대한 학생들의 초기 미시적 생각을 보다 명확하게 이끌어내기 위해 부피에 영향을 미치는 요인들과의 관계를 그림으로 표현하도록 하였다(Fig. 2).

### 3단계: 입자에 대한 생각을 학문과 연결하기

학습자들의 생각에 담긴 학문적 관계를 인식한다. 반응적

교수법은 교수자가 학문적 창조자(disciplinary progenitors)의 역할<sup>23</sup>을 수행하거나, 과학의 출발점(seeds of science)<sup>24</sup>을 포함한 학문과 학습자들의 의미 사이의 결합을 시도하기 위하여 귀를 기울인다는 특징이 있다. 학문적 창조자로서 학습자의 활동은 현상에 대한 고민, 개념을 지지하기 위한 근거 찾기, 정확성을 위한 노력, 예측이나 설명을 위한 기계론적 추론, 또는 비공식 실험이나 설명의 제안을 마련하는 것 등을 포함한다. 이때 교수자는 반응적 교수법을 통해 학습자의 생각을 이끌어내고, 이로부터 학문과의 관련성을 생각하게 된다.<sup>5</sup>

3단계에서 학생들이 생각하는 입자 개념을 학문과 연결한다는 것은 입자라는 개념이 원자, 분자, 양성자, 중성자, 전자와 같이 구체적인 화학 개념으로 연결된다는 것을 의미한다. 이를 위하여 교사는 학생들에게 Fig. 1의 입자에

**Figure 2.** Students' early thoughts related to factors affecting volume change.

대한 생각을 보다 깊이 있게 학문과 연결하도록 다음과 같이 안내하였다.

교 사: 여러분은 질량이 보존되기 위해서는 입자의 종류와 수가 같아야 한다고 주장하였어요. 이 그림(Fig. 1.)에서 입자는 무엇이라고 생각하나요?

학생3: 이런 그림을 분자 배열이라고 부르니까, 입자는 분자 아닐까?

학생1: 입자가 분자 말고도 다양한 용어를 포함하고 있다고 알고 있어.

학생2: 원자나 분자 같은 걸 통틀어서 입자라고 생각해. 철을 표현할 때도 이렇게 입자 배열을 그리잖아.

학생3: 그럼 원자도 필요하겠네.

학생4: 물질을 이루면 다 입자라고 생각해, 어떤 때는 원자, 어떤 때는 분자라고 할 수 있다고 생각해.

학생2: 원자만 있을 때는 원자를 입자라고 하고, 분자가 있으면 분자라고 하는 거 아닐까? 원자량, 분자량이라는 용어가 있으니까.

학생1: 그럼 입자를 원자나 분자로 하면 되나? 그럼 그림에서 원자 개수도 같고, 분자 개수도 같으니까 질량이 보존되고 있다고 생각해.

학생들은 토론을 통해 Fig. 1에 표현한 입자가 원자나 분자가 될 수 있다는 생각으로 연결하였다. 특히 학생 3은 처음에 입자를 분자라고 생각하였으나 토론을 통해 원자나 분자를 모두 의미한다는 생각으로 변화하였다. 또한 학생들은 소집단 토론을 통해 입자의 개수와 질량 보존의 관계를 학문적으로 연결하게 되었다.

#### 4단계: 입자에 대한 학습자의 생각을 명료히 하기

기존의 소집단 토론과는 다르게 교수자가 소집단 토론에 적극적으로 참여하여 예비교사들의 생각을 조명하고, 이들이 자신의 생각을 ‘입증하기(Validation)’와 ‘다시 생각하기(Pondering)’ ‘면밀히 조사하기(Probing)’등의 경험을 할 수 있도록 하여 자신의 생각을 학문과 연결시킬 수 있는 기회를 제공한다.<sup>20</sup> 3 단계에서 교사는 학생들에게 입자를 원자나 분자로 연결하고, 그 다음 단계로 질량보존과 부피변화를 결정하는 입자가 원자인지 분자인지를 구분하는 사고가 명료해지도록 개입을 시도하였다. 이때 교사는 필수적인 인지적 자원이 활성화되도록 ‘필수 자원 촉발 과제’를 제시하였다. 필수 자원 촉발 과제는 시작 과제와 동일한 맥락의 과제로 일종의 유추 전략이라고 할 수 있다.<sup>25</sup>

교 사: 질소와 수소가 반응해 암모니아가 생성된 반응에서 입자를 분자라고 표현한 것(Fig. 3)과 원자라고 표

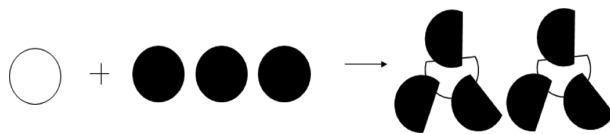


Figure 3. Teacher's representation of particles as molecules.

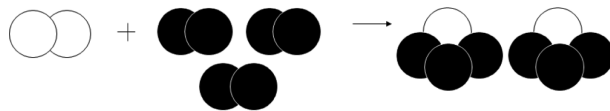


Figure 4. Teacher's representation of particles as atoms.

현한 것(Fig. 4)을 반영해서 선생님이 그린 그림이예요. (중략) 두 그림의 차이를 보면, 물질을 구성하는 입자가 분자라고 생각한 경우(Fig. 3을 가리키면서)에는 그 입자를 더 나눌 수 있기 때문에 하나의 입자가 반쪽 입자로 표현할 수 있어요. 하지만, 물질을 구성하는 입자가 원자라고 생각한 경우(Fig. 4을 가리키면서)에는 원자는 더 이상 쪼개지지 않기 때문에 반응 후에 암모니아가 두 개 만들어지려면 반응 물질인 질소와 수소는 두 개의 원자들이 결합한 형태로 있어야 해요. 이 두 경우에 모두 질량은 보존되지만, 어느 경우에 입자가 보존되었다고 말할 수 있나요?

학생3: 질량은 보존되니까 원자로 그리나 분자로 그리나 같은 거 아니에요?

학생2: 이 그림을 보니까 분자로 보기보다는 원자로 봐야 해. 원자를 볼 때, 질소와 수소 원자가 반응해도 개수가 그대로니까 질량이 보존돼.

(중략)

학생3: 아, 그럼 입자를 분자로 보면 입자의 개수가 변하고, 원자로 보아야 개수가 그대로이기 때문에 분자로 보면 안 된다는 말이구나.

학생2: 맞아, 선생님이 그리신 저거(Fig. 4)를 보면, 원자의 개수가 똑같지만, 분자로 보면 4개가 2개로 변했잖아.

(중략)

학생1: 원자로 봐야 해? 분자로 보면 안 돼?

학생2: 원자로 봐야 쪼개지지 않잖아. 그러니까 저 그림(Fig. 3)과 같이 되면 안 되잖아.

(중략)

학생4: 분자든 원자든 상관없는 거 아니야?

학생2: 분자로 고려하면 원자로만 되어있는 건 설명할 수가 없잖아. (중략) 저 그림(Fig. 3)을 보면, 질소 분자 1개와 수소 분자 3개가 만나서 암모니아 분자 2개를 만들잖아. 그런데 이 그림(Fig. 4)을 보면, 질소 원자 2개와 수소 원자 6개가 만나서 암모니아 분자를 만들 때에도 역시 그 개수는 같잖아.

4단계에서 학생들 중 3명(학생 1, 3, 4)은 질량의 보존과 입자의 보존이 원자 개념과 연결하는 것에 대해 어려움을 느끼고 혼란스러운 사고를 드러내었다. 유일하게 학생 2만이 질량 보존과 입자의 보존에 대한 사고와 원자의 개념을 연결하였다. 그리고 학생 2는 다른 학생들에게 “반응해도 개수가 그대로여야 한다.”, “원자는 쪼개질 수 없다.”, “분자는 원자로 이루어져 있다.” 등과 같은 주장을 꾸준히 하면서 다른 학생들의 사고에 적극적으로 상호작용하였다. 이러한 소집단 토론을 통해 학생들은 질량이 보존되기 위해서는 물질을 구성하는 입자의 개수가 보존되어야 하고, 이 입자는 원자라는 학문적 개념과 명료하게 연결되어야 한다는 것을 인식하게 되었다.

이러한 사고의 명료화 단계는 부피변화에 대한 사고로 연결되는 데 매우 중요하다. 4단계에서 교사의 반응적 교수법을 통해 학생들은 기체의 부피를 결정하는 입자는 분자이고, 분자간 거리가 기체의 부피에 영향을 미치는 가장 중요한 요인이라는 것을 인식하게 되었다.

교 사: 기체의 부피를 결정하는 입자는 무엇일까요?

학생2: 부피에서 입자는 분자라고 생각해. 공기 중에서 분자 상태로 존재하니까.

학생4: 분자가 원자로 이루어져 있으니까 원자라고 생각하면 안 돼?

학생2: 원자로 생각하면 아까 질량 보존의 법칙처럼 부피는 항상 보존되는 거잖아.

학생4: 생각해 보니까 아까 입자가 이동속도가 증가해서 부피가 증가한다고 했었잖아. 이동할 때는 분자로 이동하니까 부피가 보존된다는 생각이 틀렸다고 생각했어. 질소와 수소가 반응해서 암모니아가 생성되는 반응은 분자 수가 줄어드니까 부피가 감소할 것 같아.

학생1: 부피를 고려할 때는 분자로 생각해야 해.

학생들 중에 학생 4만 기체의 부피를 결정하는 입자가 원자라고 생각했으나 소집단 토론을 통하여 학생들은 기체의 부피를 결정하는 입자가 분자라는 것을 합의하게 되었다.

Fig. 2에서 제시한 바와 같이 학생들은 기체의 부피를 결정하는 다양한 요인으로 입자수, 입자의 크기, 입자간 거리, 온도, 압력 등을 언급하였다. 그러나 소집단 토론 과정에서 입자의 크기 때문에 발생하는 인력도 기체의 부피에 영향을 미친다고 생각하는 학생이 있었다.

학생3: 분자마다 크기가 다르니까 분자 크기가 클수록 부피가 크다고 생각해요.

학생4: 입자 자체의 크기 때문에 인력 같은 게 있어서 2L보다 작아진다고 생각했어.

그러나 고등학교 수준에서 다루는 ‘기체 반응의 법칙’에서는 개별 기체 입자의 특성에 초점을 두기 보다는 모든 기체에 적용되는 일반화된 입자 모델을 이해하는 데에 초점이 있다. 따라서 학생들이 개별 기체 입자의 크기나 이로 인해 나타나는 인력이 기체의 부피에 영향을 미친다는 사고에 대해서는 교사가 반응적 교수법을 통해 이를 구분할 수 있도록 안내하였다. 과학 모델은 무질서한 자연 중 선택된 자연을 단순화하여 표현한다.

교 사: 내가 말하는 기체의 부피는 분자 자체의 부피일까요? 분자를 포함하는 공간에 대한 부피인가요?

학생3: 차이가 있는 건가요?

교 사: 우리가 말하는 부피는 분자를 포함하는 공간에 대한 부피를 말하는 거예요. 분자 자체의 부피와는 다른 의미예요.

선택된 자연의 개별 속성에서 공통된 속성을 찾는 추상화 과정이 필요하다.<sup>26</sup> 이를 통해 학생들은 일반화할 수 있는 규칙성을 찾아 표현할 수 있으며, 단순화를 위해 무엇을 무시해야 하는지에 대한 인식을 할 수 있게 된다. 이 연구에서 도입한 반응적 교수법을 통해 학생들은 입자 자체의 크기를 무시하는 과정을 획득함으로써 부피 변화와 관련된 생각을 명료하게 이끌어 낼 수 있었다.

교 사: 기체 상태 입자 배열을 그릴 때, 가장 주의한 점은 무엇이죠?

학생4: 기체에서는 분자 사이의 거리가 더 멀어요.

교 사: 분자 사이의 거리와 분자 자체의 크기를 비교할 때 어떤 것이 더 영향이 크다고 생각하나요?

학생3: 분자 사이의 거리가 분자 크기보다 커요. 그러면 분자 크기도 무시할 수 있나? 기체가 밖으로 나오면 멀리 퍼지니까.

학생4: 그럼 입자 자체의 크기는 무시해야지. 그럼 기체에서는 온도, 압력이 일정할 때, 부피에 영향을 미치는 요인은 분자 수 뿐이네요.

이러한 과정에서 교사가 학생들을 이끌고자 했던 방향은 질량에 영향을 미치는 입자의 단위는 원자이며, 부피에 영향을 미치는 입자의 단위를 분자라는 것이다. 또한 기체의 부피를 결정하는 요인은 분자의 크기를 무시하고 분자 사이의 거리라는 것이다. 교사의 개입을 통해 이러한 방향으로 학생들의 사고가 전환되어 가는 것을 확인할 수 있었다.

고등학교 2학년 이상의 경우에는 개념을 도입할 때 정량적인 수준을 다룰 수 있으므로, 분자의 크기와 분자간 거리를 계산하는 과정을 제시하여 근거에 기반한 수업을 통해 학생들이 분자의 크기에 대한 무시가 가능하다는 결론에 도달하도록 유도할 수 있을 것이다. 그러나 통합과학을 다루는 고등학교 1학년의 수준에서는 정성적인 개념을 다루기 때문에 계산과정을 포함한 논의보다는 그림을 통한 모델의 특성을 인식하는 과정으로 학생들의 사고 전환을 유도하였다.

### 5단계: 학생 생각 심화하기

이 단계에서 교사는 적극적으로 개입하여 질문을 통해 학생들의 사고 안에서 학문적 연계를 심화한다. 예를 들어 교수자는 학습자들의 다른 학습자의 생각을 평가하도록 하거나, 학습자들의 생각과 생각 사이를 연결하도록 하기 위한 전제 조건을 학문 속에서 찾아내고, 학습자들이 자신의 생각을 검증하기 위해 실험을 계획하거나 실시하도록 장려할 수 있다.<sup>20</sup> 교사는 학생들이 미시적 관점에서 질량 보존과 부피변화의 개념을 심화할 수 있도록 원자를 다시 더 미시적 관점으로 분해하는 사고를 이끌었다.

교 사: 질량 보존을 위해서는 원자의 종류와 수가 같아야 한다고 했는데 그렇다면 원자의 질량은 어떻게 결정될까요?

학생2: 원자의 질량은 원자의 고유한 양이에요.

학생1: 원자 종류가 다르면 원자 질량이 다르지. 근데 원자 종류가 달라도 총 질량이 같을 수 있지 않아?

학생4: 아까처럼 원자 종류가 변하지 않고, 원자 개수가 같으면 총 질량은 같지. 그러니까 원자 종류와 원자 수가 중요해.

학생1: 원자 질량은 같은데 원자 종류가 다른 게 있지 않을까? 양성자와 중성자의 질량의 합이 원자의 질량이잖아. 그래서 양성자와 중성자의 수가 같은 게 있을 것 같지 않아? 그래서 주기율표를 만들 때 원자량 때문에 순서가 바뀐 게 있다고 했던 거 같은데.

학생2: 주기율표는 원자번호대로 만든 거 아니야? 원자번호가 양성자 수를 보고 만든 거고, 양성자와 중성자 수의 합이 같더라도 양성자와 중성자가 질량이 다르니까 원자의 질량이 같다고 같은 원자는 아닌 거 아니야?

학생3: 그럼 전자의 질량은 안 중요해?

학생4: 전자 질량은 너무 가벼워서 무시해도 돼. 그래서 양성자와 중성자 수가 변하지 않으면 질량은 변하지 않고, 양성자와 중성자가 변하지 않는 반응에서는 질량은 보존된다고 생각해.

학생들은 교사의 질문을 통해 원자를 구성하는 입자인 양성자와 중성자, 전자가 원자의 질량에 미치는 영향에 토론하였다. 이 과정에서 질량이 같아도 양성자와 중성자의 수가 다르다면 다른 종류의 원자가 된다는 것과 질량을 결정하는 것은 원자의 종류가 아니라 양성자와 중성자의 수임을 확인하였다. 또한 앞서 언급한 바와 같이 전자의 질량은 무시한다는 사고도 모델의 일반화를 도출하기 위하여 필요한 단계였으며, 최종적으로 양성자와 중성자가 변화하지 않는 반응에서는 질량이 보존된다는 사고로 정리하였다. 따라서 초기에 학생들은 원자(혹은 입자)의 수와 종류가 모두 질량 보존에 중요하다고 생각하였으나, 이러한 생각을 바꾸게 되었다. 즉, 원자(혹은 입자)의 수나 종류는 중요하지 않고 보다 근본적으로 양성자와 중성자의 수를 고려해야 한다는 것을 인식하였다.

한편, 부피 변화에 대한 학생 생각을 심화시키기 위하여 교사는 학생 3의 질문으로부터 질문을 5단계를 출발하였다. 4단계에서 다른 학생들은 분자 자체의 부피는 기체의 부피에서 고려할 필요가 없다는 결론을 내렸지만, 학생 3은 여전히 분자 자체가 부피에 영향을 미칠 것이라는 사고를 버리지 못하였다. 따라서 분자 자체의 부피가 분자 사이의 거리보다 더 큰 기체는 없는지 질문을 하였다. 이에 대해 교사는 분자를 구성하는 원자, 그리고 원자를 구성하는 양성자와 중성자, 전자의 부피를 고려해 보도록 이끌었다. 이 과정에서 학생들은 미시적인 입자의 크기를 무시할 필요가 있음을 인식하였다.

학생3: 기체 상태에서 분자 자체의 부피가 분자 사이의 거리보다 작을까요? 분자 사이의 거리보다 분자 자체의 부피가 더 큰 기체는 없는 건가요?

교 사: 그럼 분자 자체의 부피에 영향을 미치는 요인에 대해 생각해 볼까요?

학생4: 분자는 원자로 이루어져 있으니까 원자가 분자 자체의 부피에 영향을 미칠 수 있어.

교 사: 원자를 구성하는 양성자, 중성자, 전자를 모형으로 그려보세요.

학생1: 원자모형은 중앙에 양성자와 중성자가 있는 원자핵, 그 주변 전자껍질에 전자가 있잖아.

학생2: 원자핵은 핵력 때문에 진짜 작아. 반대로 원자핵이 핵력이 있어야 하니까 작은 건가?

학생4: 원자핵이 핵력이 있어야 하니까 작은 거 같아.

교 사: 원자핵이 차지하는 공간 이외의 공간은 어떻게 표현할까요?

학생3: 전자를 그렸어요. 아까 전자의 질량을 무시했으니까 전자가 존재하는 공간도 무시해도 될 듯해요.

학생1: 그럼 기체의 입자 배열 그림에서는 분자 속에 원자

핵 빼고 아무것도 없네.

학생3: 원자마다 원자핵의 크기는 많이 다른가?

학생2: 핵력이 있으려면 거의 엄청 작아야 해서 별로 차이가 크지는 않을 거 같아.

학생4: 원자핵이 엄청 작으니까 무시해도 되겠네. 그럼 기체 부피 속에는 아무것도 없네.

학생1: 기체에서는 분자 자체 크기를 무시해도 되겠네요.

이러한 토론의 과정에서 학생들은 원자핵의 부피를 무시하면, 원자량은 원자핵을 구성하는 양성자와 중성자의 개념만 고려하면 된다는 것으로 학생들의 사고가 심화되었다.

#### 6단계: 학생 생각 확장하기

반응적 교수법을 통해 형성된 개념이 과학자들의 사고, 혹은 과학적 개념과 달랐을 때의 문제를 고민하고, 창의적 사고의 과정의 가치를 받아들이는 과정을 통해 과학의 본성을 이해하는 과정을 수업 상황에서 이해하고 체험하는 단계로 반응적 교수법을 통해 얻을 수 있는 효과라고 할 수 있다.<sup>20</sup> 양성자와 중성자의 개념까지 심화된 학생들의 사고는 반응을 물리 반응, 화학 반응, 핵 반응으로 구분하고, 이에 따라 질량보존의 개념도 달라질 수 있음을 인식하는 과정까지 확장되었다. 1단계에서 질량보존의 법칙은 교과서 진술을 근거로 “화학 반응에서만 성립한다.”고 생각하고 있던 학생 4는 물리반응과 화학반응에서는 양성자와 중성자의 변화가 없기 때문에 질량보존이 된다는 교과서 서술에 갇힌 사고를 바꾸어 핵반응을 제외하고는 모든 반응에서 질량이 보존된다는 사고로 확장하였다.

학생4: 질량 보존의 법칙이 ‘화학 반응에서’ 라는 조건이 있어서 물리 반응에서는 질량이 보존되지 않는 경우가 있다고 생각했는데 물리 반응에서는 양성자와 중성자, 전자가 변하지 않으니까 질량이 보존돼.

학생2: 질소와 수소가 반응해서 암모니아 생성될 때는 공유결합 물질이 공유결합 물질을 만드는 거니까 전자만 이동해. 그래서 질량이 보존된다고 생각해.

학생1: 질소 원자랑 수소 원자가 암모니아를 만들 때 열이 이동하잖아. 질량이 에너지로 변하지 않을까?

학생2: 질량이 에너지로 변하는 반응은 수소 2개를 합쳤는데 헬륨 1개가 나올 때잖아. 그거는 핵 융합하는 과정인데 이건 그냥 원자끼리 다시 결합한 거야.

학생3: 물에 소금을 녹일 때는 반응 후 생성되어 날아가는 게 없잖아, 그런데 이 경우에는 기체가 발생해 날아가잖아, 그럼 기체가 날아간 만큼 질량이 줄어들지

않을까?

학생1: 생성되었으니까 날아간 거까지 더해서 생각해야 보존이 되는 거지.

학생4: 밀폐되어 있다면 질량이 줄지 않잖아, 그런데 생각해 보니까 그게 밖으로 빠져나가는 물질이 없는 거지, 에너지가 이동하면 질량이 변하는 거 아닐까?

학생2: 핵융합은 에너지가 엄청 많이 발생하잖아. 근데 물의 전기분해 실험 그거는 에너지가 오히려 흡수되잖아.

학생3: 에너지가 흡수되는 거도 있어?

학생2: 왜냐면 에너지가 방출되면 질량이 줄어든다고 했는데 이렇게 수소와 산소로 분리될 때는 에너지를 흡수해야 분해되는 거야, 그래서 전기분해라고 하잖아.

교 사: 그럼 수소와 산소로 분리될 때는 에너지를 흡수하니까 질량이 증가하는 건가요? 양성자 수와 중성자 수가 변화한 경우인가요?

학생2: 물이 H<sub>2</sub>O이고 수소와 산소니까 원자의 종류가 같잖아, 그러면 양성자와 중성자 수가 변함이 없어서 질량이 증가할 수는 없잖아.

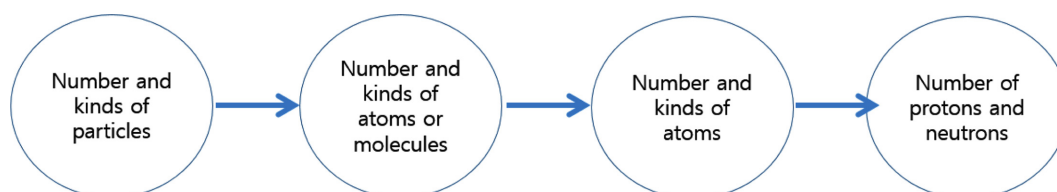
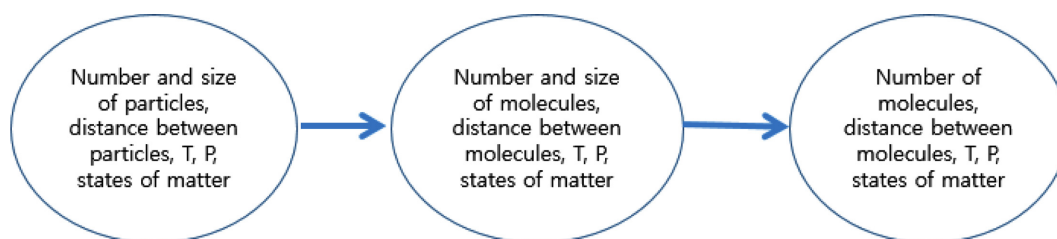
학생4: 이거도 공유결합이 공유결합 물질을 만드는 거니까 전자가 이동하면 에너지가 조금 흡수되거나 방출되고, 질량 손실이 있으면 에너지가 많이 방출되는 거 아닐까?

물리 반응과 화학 반응을 구분하는 토론 과정 초기에는 학생 1과 학생 4는 에너지-질량 등가원리에 대한 개념을 가지고 있었으나, 이 개념은 핵 반응에만 적용되고 화학반응에는 적용되지 않는다는 것을 구분하지 못하였다. 그러나 학생 2는 화학반응에서는 양성자와 중성자 수가 변하지 않으므로 질량이 변하지 않는다는 것을 언급함으로써 핵 반응과 화학반응을 구분하고 있었다. 그러나 그 후 많은 시간을 소요한 소집단 토론을 통해 학생들은 Table 4에 제시한 바와 같이 물리반응과 화학반응, 그리고 핵 반응의 차이를 입자의 변화 관점에서 구분하게 되었다. 즉 화학반응은 전자라는 입자의 변화, 그리고 핵 반응은 양성자와 중성자라는 입자의 변화가 있으며, 이러한 입자의 변화가 없을 때에는 물리변화로 구분하게 되었다.

물론 이 단계에서 교사가 에너지-질량 등가원리  $E=mc^2$ 을 이용하여 핵 반응에서 질량 변화를 계산해 보고, 화학반응에서 동일한 계산을 해서 비교하여, 핵 반응에서는 의미 있는 질량 변화를 보이고 화학 반응에서는 그 변화값이 너무나 작아 확인이 불가능하다는 것을 학생들에게 인식시키는 과정을 포함할 수도 있으나, 정량적인 계산 수준은 고등학교 1학년에서의 범위를 넘어서기 때문에 이 연구에서는 이러한 학습 단계의 제시는 포함하지 않았다.

**Table 4.** Expansion of students' thoughts about the types of reactions that affect mass conservation

Type of reaction	Physical reaction	Chemical reaction	Nuclear reaction
Mass conservation	O	O	X
Energy	emission, absorption	emission, absorption	emission
Amount of energy	small	large	very large
Change of particle	-	electron	proton, neutrons

**Figure 5.** Change of students' thoughts about factors affecting mass conservation.**Figure 6.** Change of students' thoughts about factors affecting volume change of gas.

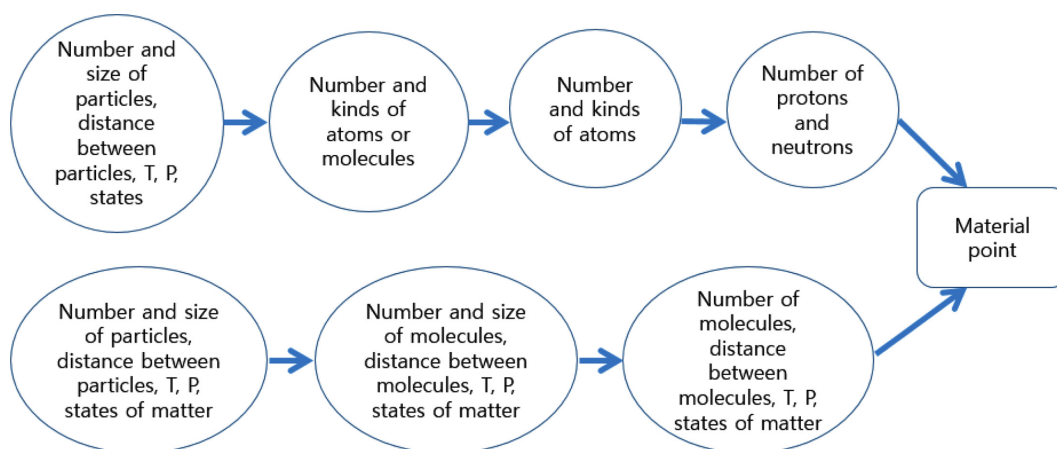
### 반응적 교수법을 통한 학생들의 사고 변화

이 연구에서는 질량보존과 기체의 부피변화에 영향을 미치는 요인에 대한 고등학교 1학년 학생들의 사고의 변화를 반응적 교수법을 통해 이끌어내고, 학문과 연계시키고, 확장시키는 과정을 거쳤다. 이 과정에서 학생들의 질량 보존에 영향을 미치는 요인에 대한 사고의 변화를 Fig. 5에 제시하였으며, 부피 변화에 영향을 미치는 요인에 대한 사고를 Fig. 6에 제시하였다.

이러한 사고의 변화 과정에서 학생들은 분자의 부피를

무시할 수 있다면 질량을 가진 질점(material point)의 개념으로 분자에 대한 사고를 전환할 수 있다(Fig. 7).

화학에서 이상 기체 상태방정식의 기초가 되는 보일의 법칙과 샤를의 법칙은 분자 수가 일정할 때 분자의 종류에 상관없이 부피와 압력의 곱을 온도로 나눈 값이 일정하다. 이때 분자량이 다른 이산화탄소와 수소 분자는 온도를 나타내는 동일한 분자운동에너지를 가지고 있으므로 질량이 큰 이산화탄소 분자의 운동 속도가 수소 분자의 운동 속도보다 느리다. 하지만 기체의 벽면에 부딪칠 때 속도는

**Figure 7.** The process of students' thoughts expanding to material point.

느리지만 분자량은 더 크므로 기체 벽면에 가하는 힘은 속도는 빠르지만 분자량이 더 작은 수소분자와 동일하다. 따라서 온도가 일정할 때 같은 분자수를 가진 이산화탄소 기체와 수소 기체는 동일한 부피를 가지며, 기체의 압력도 같게 된다. 이러한 사고는 기체 분자의 종류에 상관없이 모든 기체 분자를 질점으로 가정하고 오직 분자운동에너지에 영향을 미치는 요인은 질량이라는 가정 하에 가능한 사고이다. 또한 분자의 부피를 고려하지 않는 사고는 아보가드로의 법칙에서 기체의 종류에 상관없이 같은 부피 안에 존재하는 분자의 수가 동일하다는 개념의 출발이 된다. 즉 질점의 개념은 화학에서 매우 중요한 사고의 확장이라고 할 수 있다.

## 결론 및 제언

이 연구에서는 반응적 교수법을 활용하여 고등학교 1학년 학생들의 질량보존과 기체의 부피변화에 대한 생각의 변화를 이끌어내는 6단계의 수업을 구성하였다. 각 단계 활동에서 학생들의 생각의 변화와 시사점은 다음과 같다. 초기 학생들의 거시적 생각 드러내기 단계에서 학생들은 질량이 보존된다는 사고와 보존되지 않는다는 2가지 유형의 사고를 가지는 것으로 분류되었다. 그러나 질량이 보존된다는 개념을 가진 학생들도 단순히 용어에 근거한 사고를 넘지 못하였다. 또한 질량이 보존되지 않는다고 생각한 학생은 기체가 날아가면서 질량이 감소한다고 주장하여 전체 계를 고려하지 못하였다.

질량 보존에 대한 초기 학생들의 미시적 생각 이끌어내기 단계에서 교사가 입자 배열을 그려보도록 함으로써 미시적 관점으로 상황을 설명하도록 제안하자, 모든 학생들이 질량에 영향을 미치는 요인을 입자의 종류와 수로 생각하였으며, 이 요인이 변하지 않는다면 질량이 변하지 않을 것이라고 생각했다. 질량 보존과 관련된 입자에 대한 생각을 학문과 연결하기 단계에서 학생들은 입자라는 개념을 상황에 따라 원자 또는 분자로 설명하였으며, 이 과정에서 질량이 보존되지 않는다고 생각한 학생 3은 입자가 분자라고만 생각했던 개념을 변화시켜서 입자는 원자나 분자로 유연하게 사고할 수 있게 되었다.

교사가 개입하여 입자에 대한 학습자의 생각을 명료화하는 단계에서 질소와 수소가 반응하여 암모니아가 생성된 반응을 제시하고 학생들에게 입자로 표현해 보도록 하였다. 학생들은 이 과정에서 분자는 쪼개지므로 분자의 종류는 변화할 수 있기 때문에 질량 보존에서는 원자를 고려하는 것이 더 필요하다는 인식을 하게 되었다. 또한 질량에 영향을 미치는 요인에 대한 생각을 심화하는 단계에서는 원자의 질량은 원자를 구성하는 입자인 양성자와 중성자의

개수에 의해 결정되며, 전자는 무시할 수 있다는 사고를 이끌어 내었다. 이러한 사고를 확장하여 학생들은 물리 반응, 화학 반응, 핵 반응을 구분하고, 양성자와 중성자의 변화가 없는 물리 반응과 핵 반응의 경우에만 질량 보존이 가능하다는 생각을 도출하였다. 이때 방출하는 에너지의 원인이 전자인지, 양성자나 중성자인 지에 대해 학생들이 소집단 토론을 통해 유추하면서 질량 보존에 대한 사고를 정리하였다.

부피에 대한 초기 학생들의 거시적 생각 드러내기 단계에서는 부피가 줄어든다는 생각과 부피가 보존된다는 2가지 유형이 나타났다. 부피가 감소한다고 생각한 학생들은 화학반응식의 계수 비를 단순히 고려한 경우였으며, 부피가 감소한다고 생각한 학생은 날아가는 기체를 고려하여 계와 주위를 고려하지 못한 것으로 분석되었다.

부피 보존에 대한 초기 학생들의 미시적 생각 이끌어내기 단계에서는 학생들이 부피에 영향을 미치는 요인으로 입자 수, 입자의 크기, 입자 간 거리, 온도, 압력, 상태 등을 고려하였다. 교사가 개입하여 입자에 대한 학습자의 생각을 명료히 하는 단계에서는 질량에 영향을 미치는 입자가 원자라는 개념과 대조하여, 기체 부피는 온도와 압력, 상태에 영향을 받기 때문에 기체 상태로 한정하고 기체의 부피에 영향을 미치는 요인은 원자가 아니라 분자라는 사고를 도출하였다. 그리고 기체 상태에서 분자 간 거리가 분자 자체의 크기보다 크기 때문에 분자 자체의 크기는 무시할 수 있다는 사고를 이끌어 내었다. 기체의 부피에 영향을 미치는 요인에 대해 생각을 심화하는 단계에서는 원자핵이 원자의 질량 대부분을 차지하기 때문에 질량을 무시할 수 없지만, 분자 사이의 거리에 비해 분자를 구성하는 원자핵 자체의 크기가 매우 작기 때문에 분자 자체의 부피는 무시할 수 있다는 개념을 도출하였다. 이러한 사고는 부피를 무시한 질점의 개념으로, 화학에서의 이상기체방정식이나 아보가드로의 법칙, 보일과 샤를의 법칙 등 분자의 운동에 대한 사고의 핵심이다.

이 연구에서는 2015 개정교육과정의 고등학교 2학년 ‘화학 I’ 교과서에 도입된 화학 양론의 기본 개념인 질량 보존과 기체 부피의 관계에 대한 이해를 향상시키기 위하여 고등학교 1학년 학생들을 대상으로 반응적 교수법의 효과를 알아보았다. 기존의 3단계 반응적 교수법과 달리, 이 연구에서는 특정한 주제에 관련하여 상세한 6단계의 사고 과정을 분석하여 제시하였다. 이 중 1, 2 단계를 통해 질량 보존과 기체의 부피에 대한 학생들의 거시적 생각과 드러나지 않은 미시적 생각을 찾아내었다. 또한 3, 4 단계를 통해 입자에 대한 학습자의 생각을 원자와 분자라는 화학 개념과 연결하고, 교사가 개입하여 입자에 대한 학습자의 생각을 명료히 하였다. 이 단계를 통해 학생들은 질량

의 원인은 원자이며, 부피의 원인은 분자라는 사고를 형성하였다. 교사는 이러한 학생들의 생각을 존중하며 학습자 생각의 본질을 심화시키고 확장시키는 5, 6단계를 제공하였다. 이 과정에서 양성자와 중성자가 질량의 원인이므로 원자나 분자의 종류는 중요하지 않으며, 이 때문에 이상기체 방정식이나 아보가드로의 법칙, 보일과 샤를의 법칙 등에서 가정하는 기체의 종류를 무시할 수 있는 규칙성을 이해하게 되었다. 또한 원자와 분자의 부피를 무시하고 질량만 고려하는 질점의 개념으로 확장하였다. 그리고 물리 반응과 화학 반응, 그리고 핵 반응을 구분하여 질량 보존의 개념이 성립하는 것에 대한 사고를 정리하였다. 이러한 반응적 교수법이 적용된 수업에서는 학생의 아이디어가 공개되고, 학습 전체가 아이디어를 공유한다. 이때 모든 학생이 학습 공동체로서, 자신과 동료들의 아이디어를 탐색하고, 평가하며, 논쟁하는 일련의 과학적 의사결정 과정을 함께 수행한다. 이러한 수업은 학생이 자신의 생각을 표현할 수 있는 기회를 제공한다. 반응적 교수법은 궁극적으로 학생의 아이디어에서 학문적으로 연결할 수 있는 요소를 찾아 발전시켜주고, 상호작용 과정에서 학생들은 사고방식이 풍부해질 뿐 아니라<sup>27</sup> 과학에 대한 이해력을 높일 수 있는 기회를 제공받을 수 있다.<sup>4</sup> 그리고 자신의 설명을 구축하고 분석하면서 과학적 방법 습득할 수 있기 때문에 생산적인 과학 실행에도 도움이 된다.<sup>28</sup> 이 연구에서는 화학 양론의 가장 핵심적인 개념이라고 할 수 있는 입자의 질량과 기체의 부피 개념에 관련하여 반응적 교수법이 학생들의 사고 형성에 큰 도움을 줄 수 있음을 확인하였다.

지금까지 교수법에 대한 연구는 특정 교사가 특정 학급에서 수업을 수행하면서 학생들이 보이는 효과는 교수법의 효과와 교사의 좋은 교수법에 의한 효과가 함께 기여하였다. 따라서 교수법의 효과는 교사의 좋은 교수에 의한 효과를 배제하고 도출하기 어려운 점이 있었다. 그러나 이 연구에서 분석한 교사의 반응적 교수법은 좋은 교수의 사례가 아닐 수 있었다. 경우에 따라서 교사는 부적절한 질문이나 학생의 토론에 대한 적절한 피드백을 제공하지 못하였음에도 불구하고, 학생들은 반응적 교수법에 의해 자신의 생각을 학문과 연결하고 정교화하고, 확장하면서 발전시키는 모습을 보여주었다. 따라서 이러한 반응적 교수법은 지금까지 좋은 교수에 의해서만 학생들의 학습이 발달한다는 사고를 벗어나게 해줄 수 있다. 비록 교사가 좋은 교수법을 제공하지 못한다고 해도, 학생들과 함께 반응적 교수법을 구현함으로써 학생들은 교사의 수준을 넘어서서 성장할 수 있는 기회를 가질 수 있기 때문이다.

이 연구를 통해 밝힌 고등학교 1학년 학생들의 질량보존과 부피변화에 대한 화학개념을 학습하는 6단계의 반응적 교수법은 앞으로 다른 학년이나 다른 교과로 확장할 수

있을 것이다. 이러한 교과와 학년에 따른 특성을 고려하여 학생들의 사고를 성장시키는 반응적 교수법을 개발함으로써 앞으로 교사 중심의 수업에서 벗어나, 학생중심의 수업을 통해 교육적 효과를 높일 수 있는 방안이 더욱 활발하게 제안되기를 기대한다.

**Acknowledgments.** This work was supported by the Ministry of Education of the Republic of Korea and the National Research Foundation of Korea (NRF-2019S1A5C2A04081191).

## REFERENCES

1. Niaz, M. *Sci. Ed.* **1995**, 79, 19.
2. Stevens, S. Y.; Shin, N.; Peek-Brown, D. *Journal of Education Quimica*. **2013**, 24, 381.
3. Pierson, J. L. The relationship between patterns of classroom discourse and mathematics learning **2008**, The University of Texas at Austin.
4. Robertson, A. D.; Atkins, L. J.; Levin, D. M.; Richards, J. What is responsive teaching? **2016** New York, NY, Routledge. 1-35.
5. Ball, D. L. *Elem. School J.* **1993**, 93, 373.
6. Maskiewicz, A.C.; Winters, V. Paper Presented at the 9<sup>th</sup> International Conference of the Learning Sciences **2010**, Chicago.
7. Maskiewicz, A. C.; Winters, V. A. *J. Res. Sci. Teach.* **2012**, 49, 429.
8. Kavanagh, S.S.; Metz, M.; Hauser, M.; Fogo, B.; Taylor, M.; Carlson, J. Practicing responsiveness: Using approximations of teaching to develop teachers' responsiveness to students' ideas. *Journal of Teacher Education* **2019** Advance online publication.
9. Bain, R. B. Rounding up unusual suspects: Facing the authority hidden in the history classroom **2006** Teachers College Record, 108(10), 2080-2114.
10. Moje, E. B. Doing and teaching disciplinary literacy with adolescent learners: A social and cultural enterprise **2015** Harvard Educational Review, 85(2), 254-278.
11. Levin, D. M.; Grant, T.; Hammer, D. Attending and responding to student thinking in science **2012** The American Biology Teacher, 74(3), 158-162.
12. Empson, S.B.; Jacobs, V.R. Learning to listen to children's mathematics **2008**, Rotterdam, The Netherlands: Sense. pp. 257-281.
13. Shin, N.; Koh, E. J.; Choi, C. I.; Jeong, D. H. *Journal of the Korean Association for Science Education* **2014**, 34, 437.
14. Lee, J.; Lee, B.; Noh, T. *Journal of the Korean Chemical Society* **2018**, 62, 243.
15. Sangmyeon, A. *청람과학교육연구논총* **1993**, 3, 368.
16. Hammer, D. M. *The Journal of the Learning Sciences* **1996**, 5, 97.
17. Radoff, J.; Hammer, D. Attention to Student Framing in

- Responsive Teaching Routledge: New York, 2016; pp 189-202.
18. Hogan, K. *International Journal of Science Education* **1999**, *21*, 855.
  19. Hammer, D.; Sikorski, T. R. Implications of complexity for research on learning progressions. *Science Education* **2015**, *99*, 424.
  20. Nayeon, J.; Kim, E.; Paik, S.-H. *Journal of the Korean Chemical Society* **2019**, *63*, 123.
  21. Watkins, J.; McCormick, M.; BethkeWendell, K.; Spencer K.; Milto, E.; Portsmore, M.; Hammer, D. *Sci. Ed.* **2018**, *102*, 548.
  22. Colestck, A. A.; Sherin, M. G. What Teachers Notice When They Notice Student Thinking: Teacher-Identified Purposes for Attending to Students' Mathematical Thinking. In *Responsive Teaching in Science and Mathematics*, Robertson, A. D., Scherr, R. E., Hammer, D. Eds.; Routledge: New York, 2016; pp. 126-144.
  23. Harrer, B. W.; Flood, V. J.; Wittmann, M. C. *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.* **2013**, *9*, 023101.
  24. Hammer, D.; van Zee, E. *Seeing the Science in Children's Thinking: Case Studies of Student Inquiry in Physical Science*; Heinemann: Portsmouth, NH, **2012**.
  25. diSessa, A. A. *Cognition and Instruction* **1993**, *10*, 105.
  26. Portides, D. P. *Science & Education* **2007**, *16*, 699.
  27. Brodie, K. Working with learners' mathematical thinking: Towards a language of description for changing pedagogy. *Teaching and Teacher Education* **2011**, *27*, 174.
  28. Colley, C.; Windschitl, M. Rigor in elementary science students' discourse: The role of responsiveness and supportive conditions for talk. *Science Education* **2016**, *100*, 1009.
-