

‘반응 속도’ 단원의 학습 내용에 적합한 탐구 실험의 제안 : 붉은 염산과 마그네슘 리본의 반응을 중심으로

남미자 · 윤희숙[†] · 정대홍* · 채희권*

서울대학교 화학교육과

[†]강원대학교 과학교육학부

(2008. 10. 15 접수)

Improved Experiment of the Learning Contents of ‘Chemical Reaction Rate’ Unit: Reaction of Dilute Hydrochloric Acid and Magnesium Ribbons

Mi-Ja Nam, Heesook Yoon[†], Dae Hong Jeong*, and Hee K. Chae*

Department of Chemistry Education, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

[†]Department of Science Education, Kang-won National University, Chuncheon, Korea

(Received October 15, 2008)

요 약. 본 연구의 목적은 고등학교 ‘과학’과 ‘화학 II’의 ‘반응 속도의 측정’ 단원에서의 주된 학습 내용을 분석하고, 학습 내용에 적절한 개선된 탐구 실험을 제시하는 것이다. 학습 내용의 분석을 위해 고등학교 ‘과학’ 11종, ‘화학 II’ 8종의 교과서와 교사용 지도서 11종을 분석하고, 교사들의 인식을 조사하였다. 대부분의 교과서와 교사들이 ‘시간에 따라 반응 속도가 점점 느려진다’는 개념을 학습 내용으로 제시 또는 인식하고 있으나, 교과서에 제시된 탐구 활동의 내용은 ‘시간에 따른 반응 속도의 감소’를 설명하기에 부적절한 경우가 있었다. 학습 내용에 적절한 탐구 활동을 제안하기 위해 개선된 조건에서 염산과 마그네슘의 반응 실험을 실시하였고, 얻어진 실험 결과를 이론적으로 예측한 결과와 비교함으로써 ‘시간에 따른 반응 속도의 감소’를 설명하기에 타당함을 알 수 있었다. 본 연구에서 개선된 탐구 활동은 교과서의 화학 반응 속도에 대한 개념을 보다 정확히 기술하는데 도움이 될 수 있을 것으로 기대된다.

주제어: 화학 반응 속도, 실험개선, 교과서 분석, 교사용 지도서

ABSTRACT. The purposes of this study are to analyze the learning contents on the measurement of reaction rate which is introduced in the high school ‘science’ and ‘chemistry II’ textbooks, and to revise the experiment appropriate to the learning contents. We examined 11 kinds of ‘science’ textbooks, 8 kinds of ‘chemistry II’ textbooks and 11 kinds of teacher’s manuals used in Korea and additionally surveyed teachers’ opinions on this subject. Most of textbook and teacher’s manuals described that ‘the reaction rate generally decreases through the time’, teachers’ conception also agreed with it. But most of experimental activities in the textbooks were inadequate to explain the concept that the reaction rate generally decreases with time. We analyzed the reasons and revised the experimental condition to solve this disagreement between the description in textbooks and an experimental result. Then we compared improved experimental result and theoretical prediction data. The improved experiment in this study is expected to help to describe the conception of chemical reaction rate in the textbook more clearly.

Keywords: Chemical Reaction rate, Experiment Revision, Textbook Analysis, Teachers' Manuals

서 론

최근 과학 교과에서는 실험 실습을 통한 탐구 수업을 강조하고 있다. 탐구 활동은 학생들이 직접 과학의 과정을 경험해 보면서 탐구 능력을 향상시킬 수 있을 뿐 아니라, 학생들에게 과학의 본질을 이해시키고 과학에 대한 태도를 함양시키는 데 유용하기 때문이다.¹ 또한 실험 활동은 정보를 수집하고 조직하는 기능과 관찰 결과를 전달하고 해석하는 기능을 향상시킴으로써 학생들에게 새로운 개념이나 이론을 탐색할 수 있는 구체적인 학습 경험을 제공해 주며 이러한 방법은 추상적인 과학 지식을 지도하는 데 효과적인 교수법이다.²

7차 교육과정에서도 학습 활동 측면에서 종합적인 탐구 활동을 중시하고 있다. 그럼에도 불구하고 교과서에서 단원의 시작이나 전개과정에서 제시되는 탐구 실험 중 몇몇은 실제 학교 현장에서 실험을 수행하였을 때의 실험 결과가 교과서나 교사용 지도서에서 제시된 결과와 다르거나 이론에 따라 예상한 것과 크게 차이가 나기도 한다.³ 이러한 경우, 실험 활동의 경험이 오히려 학생의 개념학습에 방해가 되며, 실험에 대한 학생들의 인식에 부정적인 영향을 줄 우려가 있다. 실제로 교육 현장에서 탐구적인 실험 활동이 화학 개념의 이해를 증진시키지 못하고 개념 발달에 유용하지 못하며, 여러 가지 탐구 기능을 신장시키지 못한다는 회의적인 연구들이 있다.^{4,6} 학생들에게 효과적인 실험이 되기 위해서는 그 단원의 학습 목표에 맞는 즉, 학습하고자 하는 개념과 잘 연결되도록 실험 활동을 조직해야 한다. 그러므로 실험장치와 방법에 있어 어떤 내용을 어떤 형태로 조직하느냐 하는 것은 매우 중요한 과제이다.

학생들은 과학 내용을 실험 활동이나 교과서에 기술된 내용을 통하여 습득하기도 하지만 교사와의 상호작용을 통하여 과학 개념을 습득하기도 한다. 결과적으로 교사가 가지고 있는 선개념은 학생들에게 직접적인 영향을 미치게 된다.⁷ 특히 탐구 활동의 경우, 교과서에 간략하게 서술되어 있으므로 교사의 역할은 보다 중요하다. 따라서 교사는 기본적인 조작적 기술뿐 아니라 원리를 정확히 알고 있어야 한다. 실험 과정을 통해 과학

적 사고력을 증진시킬 수 있도록 실험 활동의 학습 목표를 올바르게 인식하여 실험 활동을 효과적으로 지도해야 한다.⁸ 그러나 교사 역시 적절한 실험 안내서가 없어 탐구학습의 지도에 어려움을 겪고 있다.⁹ 교사용 지도서는 교사를 대상으로 하는 교과용 도서로서 학습 목표 및 자세한 학습 내용뿐만 아니라 교과서에서 제시되지 않은 내용도 부가적으로 설명하고 있어 교사에게 수업 준비의 지침서가 된다. 그러나 과학교사들은 교사용 지도서의 활용 시 문제점으로 ‘실험할 때 예상되는 문제점과 그에 대한 대안’ 또는 ‘대체실험이나 대체 자료’의 부족을 지적하고 있다.¹⁰

이러한 필요성에 의해 지금까지 다양한 실험 개선 연구가 진행되어 왔다. 그 중 반응 속도의 이해를 위하여 교과서에서 자주 제시되는 ‘뚝은 염산과 마그네슘 리본의 반응’ 실험에 관한 연구도 몇 차례 진행되었다.^{11,12} 이들 선행 연구에서는 주로 실험 기구와 실험 방법에 초점을 맞추어 재현성 없는 실험 결과를 지적하고 이를 해결하도록 기구와 방법을 개선하는 방식으로 접근하였다. 학생들이 직접 실험을 수행하고 재현성 있는 실험 결과를 얻어 탐구 능력을 향상시키는 것은 중요하다. 그러나 그것과 함께 실험의 과정을 통해서 교과서에 제시된 개념을 학생 스스로 깨닫도록 하는 것 역시 실험 활동을 하는 중요한 이유 중 하나이다. 따라서 실험 활동이 그 단원에서 학습하고자 하는 개념과 얼마나 잘 연결되어 있는지를 고찰하여 실험 활동에 접근해야 한다. 또한 학습 개념에 적합하지 않은 실험이 제시되어 있는 경우 이를 적절히 수정, 보완하는 연구가 필요하다.

화학 반응 속도는 화학 반응과 관련된 주요 개념 중 하나이며 일상생활에서 쉽게 관찰되는 연소 반응이나 철의 부식 등의 거시적인 현상을 미시적인 수준에서 이해하고 설명하는 데 있어서 기본적인 개념이다. 반응 속도와 관련된 내용은 7차 교육과정에서 10학년 ‘과학’과 ‘화학 II’에서 다루고 있으며 화학 반응의 메커니즘과 관련하여 그 중요성이 점차 증대되고 있다.¹³ 그 중 반응 속도의 측정과 관련하여 ‘뚝은 염산과 마그네슘 리본의 반응’ 탐구 실험은 많은 과학 교과서와 화학 II 교과서에 나타나 있다.

따라서 본 연구에서는 ‘반응 속도’ 단원에서 ‘물은 염산과 마그네슘 리본의 반응’ 실험이 다루는 개념 또는 학습 내용을 파악하고, 이를 기준으로 기존 실험의 문제점과 개선 방안을 살펴보고자 한다. 구체적인 연구문제는 다음과 같다.

첫째, ‘반응 속도 측정’ 단원의 탐구 활동에서 주된 학습 내용은 무엇인가?

둘째, 기존 교과서의 탐구 실험의 문제는 무엇인가?

셋째, 학습 내용에 적합한 탐구 실험은 무엇인가?

연구방법

교과서 및 교사용 지도서 분석

고등학교 과학 및 화학 II 교과서에 제시되어 있는 ‘반응 속도’ 단원에서 목표로 하는 학습 내용을 조사하기 위하여 차세대 교과서를 포함한 모든 종류의 검인정 교과서를 선정하여 11종의 고등학교 ‘과학’ 교과서와 8종의 ‘화학 II’ 교과서를 분석하였다. ‘반응 속도’는 10학년 과학과 화학 II에서 모두 제시되는 개념으로 다루는 내용의 깊이는 다르지만 개념적으로 같은 내용을 다루고 있으므로 본 연구에서는 함께 분석하였다. 과학 교육 전문가 2인이 협의를 통해 교과서에 제시된 학습 목표를 살펴보고 탐구 활동의 형태와 소재를 분류하였으며 탐구 활동의 질문과 교과서 서술 내용을 분석하였다. 탐구 활동의 학습 내용을 보다 분명히 알아보기 위하여 고등학교 ‘과학’ 교사용 지도서와 제 7차 과학교육과 교육과정 안을 함께 분석하였다. 교사용 지도서에는 교과서에서 제시되지 않았지만 학생들에게 제시되어야 하는 학습 내용이 자세하게 기술되어 있어서 학습 내용을 보다 명확히 파악할 수 있었다.

설문지

학생들에게 실험 탐구 활동은 교실 수업만큼이나 중요하며 그 과정과 결과가 특정 단원의 학습 목표를 체득하는 데 결정적일 수 있으므로 교사가 실험의 설계, 준비, 결과 및 토론할 내용을 숙지하고 있어야 한다.⁸ 물은 염산과 마그네슘의 반응을 통한 반응 속도에 대한 교사들의 이해 정도를 알아보기 위하여 설문 조사를 실시하였다. 설

문지에는 고등학교 ‘과학’ 교과서 중 한 교과서에서 제시된 반응 속도 측정 실험을 그대로 제시하였으며, 반응 속도를 정량적으로 알아볼 수 있도록 각각의 물은 염산과 마그네슘 리본의 양(mole)을 제시하였다. 설문지 내용은 실제로 이 실험을 수행해 보았는지에 대한 여부를 물은 후, 교과서에서 제시된 조건에서의 실험 결과를 예측하게 하고, 염산의 농도를 반응의 당량과 비슷한 수준까지 작게 하였을 때의 실험 결과에 대해 예측해 보도록 하였다. 개발한 설문지는 예비 검사를 통해 일차 수정을 한 후, 화학 및 과학 교육 전공자 4인의 검토를 통해 최종 수정되었다. 개발된 설문지를 과학 또는 화학 II를 가르치고 있는 현직 교사에게 투입하였고 고등학교 과학 교사 가운데 반응 속도를 가르쳐 본 경험이 있는 교사 24명의 응답을 얻었다. 응답자의 대부분은 교사경력이 10년 이상이었고 전공은 화학이 19명, 물리 2명, 생물 2명, 지구과학 1명이었다. 얻어진 결과를 분석하기 위하여 각 문항의 응답 빈도를 구하였다.

실험

교과서 반응 속도 단원에서 반응 속도의 측정과 개념을 설명하기 위하여 높은 빈도로 제시되고 있는 ‘산과 금속의 반응에서의 수소기체의 부피 측정’ 실험을 단원의 학습 내용에 적합하게 개선하기 위하여 몇 가지 새로운 실험 조건을 고안한 후 이를 수행하였다. 반응 속도 측정의 정확성과 물은 염산과 마그네슘 리본 반응에서의 반응 속도의 측정에서의 문제점을 해결하기 위하여 생성되는 수소 기체의 부피를 측정하는 대신 정밀도가 ± 0.0035 bar인 MBL실험 장치의 압력 센서를 사용하여 생성되는 수소 기체의 압력을 측정하였으며, 각 실험은 항온수조를 사용하여 온도를 일정하게 유지한 상태로 3회 반복하여 수행하였다. 이들 실험 결과를 토대로 적합하다고 생각되는 개선 실험을 제안하였다.

연구 결과 및 논의

반응 속도단원의 학습 내용 분석

과학 교과서 12종과 화학 II 7종에 나타난 ‘화학 반응 속도’ 단원을 분석하여 다음과 같은 결과

Table 1. Inquiry activity of the unit of reaction rate in the high school science textbooks.

| | Science | | Chemistry II | | Total |
|--------------------------------|------------|---------------|--------------|---------------|-------|
| | Experiment | Data Analysis | Experiment | Data Analysis | |
| The reaction of Acid and Metal | 3 | 5 | 2 | 1 | 11 |
| Decomposition reaction | 1 | 1 | | 3 | 5 |
| Etc. | 1 | 1 | | 1 | 3 |
| Total | 5 | 7 | 2 | 5 | 19 |

Table 2. The classification of learning objective in the unit of the reaction rate

| Learning objective | Science | Chemistry II |
|---|---------|--------------|
| Comprising the reaction rate in various reactions | 5 | |
| Comprehending a fast reaction and a slow reaction | 3 | |
| Measuring the reaction rate | 10 | 1 |
| Explaining the definition of the reaction rate | 2 | 2 |
| Explaining the variation of reaction rate by time | 3 | |
| Writing the reaction formula and Explaining the formula | | 12 |
| Explaining the reaction mechanism | | 5 |

를 얻을 수 있었다. 반응 속도의 측정과 관련된 탐구 활동을 살펴보면 실험과 자료해석의 두 가지 형태이며, 실험이 제시된 것은 7종, 자료해석은 12종이었다. 또한 소재적 측면에서 분석하여 보면, 반응 속도를 설명하기 위하여 산과 금속과의 반응을 제시한 교과서가 11종이 있었고, 과산화수소 등의 분해반응이 6종, 기타 반응이 2종 있었다(Table 1). 산과 금속의 반응은 ‘산의 성질’에서 접한 친숙한 반응이면서, 생성된 기체의 부피를 측정하여 반응의 생성물을 정량적인 그래프로 나타내기 쉬워 반응 속도의 설명에 유용하기 때문에 많은 교과서에서 제시하는 것으로 생각된다.

‘반응 속도’ 단원은 과학과 화학 II에서 모두 제시되어 있다. 10학년 과학의 ‘반응 속도’ 단원에서는 빠른 반응과 느린 반응의 비교와 같이 반응의 빠르기와 우리 주변에서 관찰할 수 있는 다양한 화학 반응, 반응 속도의 측정 및 반응이 진행되는 과정의 관찰을 다루고 있으며, 화학 II에서는 실험 또는 자료 해석을 통하여 반응 속도를 측정하고 측정한 반응 속도를 바탕으로 반응 속도식을 적는 것과 반응 메커니즘의 설명을 다루고 있다. 또한 고등학교 과학과 교육과정 해설서에서는 10학년 ‘반응 속도’ 단원의 주요 학습 목표를 ‘화학 반응의 실험을 통하여 반응 속도를 비교한다.’로 제시하고 화학 II에

서는 ‘실험을 통하여 얻은 자료로 화학 반응 속도식을 꾸미고, 간단한 화학 반응의 메커니즘을 설명한다’로 제시하고 있다.¹

이와 관련하여 구체적으로 ‘반응 속도’ 단원에서의 학습 목표와 내용을 살펴보기 위하여 고등학교 과학 교과서, 교사용 지도서, 그리고 화학 II 교과서에 제시되어있는 학습목표를 분류하여 표로 나타내었다. 대부분의 교과서에서 각 단원에서 2~3개의 학습목표를 가지고 있었으며 그 결과를 Table 2에 나타내었다. Table 2에서 보여주는 바와 같이 10학년 과학에서는 반응 속도의 측정에 초점을 맞추고 있다. 반면에 화학 II의 경우는 반응에 대해 좀 더 구체적으로 이해하고 있었으며 묶은 염산과 마그네슘 리본의 반응의 반응식을 적고 이를 설명하는 것을 주요 학습 목표로 정하고 있다. 나선형 교육과정이 반영된 10학년 과학에서는 현상의 관찰과 측정을 다루고 화학 II에서 반응 속도식과 메커니즘에 대한 내용을 다루고 있었다. 그러나 반응 속도가 시간에 따라 점점 느려진다는 기본적인 반응 속도에 대한 가정은 과학과 화학 II에서 모두 동일하게 나타나고 있었다.

묶은 염산과 마그네슘 리본의 반응을 소재로 다루는 ‘반응 속도’ 단원에서의 교과서 전개를 살

Table 3. The questions of the inquiry activities in textbooks.

| The questions of the inquiry activities | Science | Chemistry II |
|---|---------|--------------|
| Description of a gradient(reaction rate) with time | 6 | 3 |
| Gas products(mL) with time | 4 | |
| Drawing a graph of the experimental results | 4 | 1 |
| Calculation a reaction rate | 4 | 1 |
| The time when the reaction end | 5 | 1 |
| The initial reaction rate | | 1 |
| Where is the large variation? | | 1 |
| Where is the section with the fast reaction rate? | | 1 |
| Write the reaction formula. | | 2 |

펴보면, 대부분의 교과서가 실험과 자료해석 등의 탐구 활동이 단원의 앞 부분에 제시되며 설명이 뒤따르는 방식으로 되어 있다. 반응 속도의 측정과 관련된 탐구 활동을 통해서 습득하고자 하는 학습 지식내용을 파악하기 위하여 탐구 활동에서 제시된 질문을 분석하고 그 결과를 Table 3에 제시하였다.

탐구 활동의 내용을 살펴보면 과학과 화학 II 교과서 19종 가운데 9종의 교과서에서 ‘시간에 따른 기율기 변화 즉, 반응 속도에 변화’에 대하여 질문하였다. 또한 ‘시간에 따른 기체의 발생량’에 대한 질문도 4종의 교과서에서 제시되었는데, 단위 시간당 생성물의 변화량이 반응 속도이므로 동일한 질문으로 볼 수 있다. 또한 그래프를 직접 그려보게 하는 질문이 제시되어 있는 교과서가 5종, 반응 속도의 정의를 익히도록 각각의 구간의 반응 속도의 계산을 질문한 교과서는 과학이 4종, 화학 II가 1종이었다. 또 반응이 일정 시간이 지나면 멈춘다는 내용을 포함하는 반응 종료시간을 질문한 교과서는 6종이 있었고, 그 외에 일반적으로 초기 반응 속도가 가장 빠르다는 내용과 관련된 문제와 화학 반응식을 적는 문제가 제시된 교과서도 있었다. 특히 화학 II 교과서의 경우에는 물은 염산과 마그네슘 리본의 반응과 관련하여 초기 반응 속도, 그래프의 기율기가 가장 큰 구간, 반응 속도가 가장 빠른 구간 등에 대한 질문이 추가되었다. 이것은 반응 속도가 시간에 따라 달라진다는 것을 강조하고 있는 것이며 반응 초기와 반응 나중의 반응 속도의 차이가 있음을 학생들이 깨달을 수 있도록 유도하는 질문으로 보인다.

과학과 화학 II 교과서에서 탐구 활동의 질문은 주로 ‘시간에 따른 반응 속도(생성물의 양, 기율기)의 계산과 그래프 그리기’로 볼 수 있으며, 그래프를 그려보는 것 역시 시간에 따라 변하는 반응 속도를 시각적으로 확인하는데 도움이 된다.

교과서 본문을 살펴보면 전체 과학과 화학 II 교과서 19종 가운데 12종의 교과서에서 그래프를 직접 제시하고 있는데, 이는 모두 초기 반응 속도가 가장 빠르며 반응 속도가 점점 느려지는 포물선 형태의 반응 속도 그래프이다. 특히 화학 II 교과서에는 생성물의 양과 반응물의 양이 시간이 지남에 따라 어떻게 변화하는지를 그래프로 나타내어 반응 속도와 생성물의 양과의 관계도 함께 설명하고 있었다. 각각의 그래프에 대한 설명과 일반적인 반응 속도에 대한 설명 모두 ‘반응 속도는 초기에 가장 빠르며 시간이 지날수록 반응 속도가 점점 느려지다가 일정 시간이 지나 반응물 질이 모두 반응하고 나면 반응이 종결되어 반응 속도가 0이 된다’고 기술하고 있다.

과학, 화학 II 교과서의 탐구 활동과 본문의 내용, 교사용 지도서를 분석한 결과 ‘시간의 변화에 따른 반응 속도의 변화’를 이해하는 것이 주된 학습 내용이었으며, 중등 교과서의 수준에서는 일반적으로 반응 속도는 ‘반응이 진행됨에 따라 점점 느려진다’라고 생각한다는 것을 알 수 있다. 그러나 선행 연구에 의하면 고등학교 과학 교과서에서 제시된 조건(산의 농도와 마그네슘리본의 양)하에서의 화학 반응 속도는 유사 0차 반응으로 시간에 따른 기체 부피의 기율기가 점차 줄어드는 형태가 아닌 직선에 가까운 그래프로 나타난

다.^{12,14} 반응시간 동안 리본의 표면적의 변화가 거의 없으며 과량의 묽은 염산이 반응하기 때문에 마그네슘 리본이 반응하여 완전히 사라지는 동안 수소 이온의 농도 역시 거의 변화가 없어 시간에 따른 반응 속도의 차이가 거의 나타나지 않는 즉, 반응 속도가 시간에 따라 일정한 경향으로 나타난다.

교과서에 제시된 묽은 염산과 마그네슘 리본의 반응에 관한 이론적 계산

묽은 염산과 마그네슘 리본 반응의 반응 속도 식은 다음과 같이 나타낼 수 있으며,¹⁵

$$\begin{aligned} \text{rate} &= -\frac{1}{2} \frac{d[H^+]}{dt} = k \cdot A_{Mg}^a \cdot [H^+]^b \\ &= k \cdot A_{Mg} \cdot [H^+]^2 \end{aligned} \quad (1)$$

k : 반응 속도 상수, $[H^+]$: 수소이온의 농도,
 A_{Mg} : 마그네슘 표면적

마그네슘 표면적의 감소는 대략 13 %정도이며 특정한 순간에 마그네슘의 표면적이 0이 된다.¹¹ 즉, 마그네슘 표면적이 반응이 진행되는 동안 거의 변하지 않으므로 이 반응을 마그네슘의 표면적이 반응 속도에 거의 영향을 미치지 않는다고 가정하면 수소이온의 농도에 따라서 반응 속도가 결정되고 일반적인 2차 반응 속도의 적분식을 이용하면 t 초 후의 수소이온의 농도는 다음과 같다.

$$[H^+]_t = \frac{[H^+]_0}{1 + k' t [H^+]_0} \quad (2)$$

$$k' = 2k \cdot \text{Area}_{Mg}$$

한편, 참여한 수소이온의 농도의 변화량은 생성된 수소 기체의 양과 같고, 이상기체상태방정식을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.¹⁵

$$-\Delta[H^+] = \frac{\Delta n_{H^+}}{V_s} = \frac{2\Delta n_{H_2}}{V_s} = \frac{2(\Delta P_g)V}{V_s RT_g} \quad (3)$$

V_s : 염산 수용액의 부피, P_g : 생성된 수소기체의 압력, V : 사용한 용기의 부피, R : 기체 상수, T_g : 기체의 온도

따라서, 시간에 따른 시간 수소 기체의 압력은 다음과 같고,

$$\frac{dp_g}{dt} = -\frac{1}{2} \frac{d[H^+]}{dt} \frac{V_s RT_g}{V} \quad (4)$$

위 식을 적분하여 수소이온의 농도 식을 대입하면, 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P(t) - P(0) &= -\frac{1}{2} \frac{RT_g V_s}{V} \{ [H^+]_t - [H^+]_0 \} \\ &= -\frac{1}{2} \frac{RT_g V_s}{V} \left\{ \frac{[H^+]_0}{1 + k' t [H^+]_0} - [H^+]_0 \right\} \\ &= \frac{1}{2} \frac{RT_g V_s}{V} \left\{ \frac{k' [H^+]_0^2 t}{1 + k' [H^+]_0 t} \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

즉 묽은 염산과 마그네슘 리본의 반응의 결과로 얻어진 수소 기체의 압력을 시간에 따라 그래프로 나타내게 되면 수소이온의 농도의 2차 식으로 표현되게 된다. 그러나 선행연구에서 밝혀진 바와 같이 과학 및 화학 II 교과서에 제시하는 묽은 염산과 마그네슘 리본의 반응에 있어서 묽은 염산의 농도가 100배 이상 과량을 차지하고 있어 수소 이온의 농도가 반응 속도에 거의 영향을 미치지 않아 유사 0차의 그래프를 얻게 되고 이러한 결과를 통하여서는 ‘시간이 지남에 따라 반응 속도가 점점 느려진다’ 또는 ‘시간이 지남에 따라 생성물의 양이 점점 늘어난다’라는 내용을 설명하기 어렵다.

묽은 염산과 마그네슘 리본 반응의 반응 속도와 관련된 교사들의 인식

위와 같은 학습 내용과 관련하여 교사들의 인식을 살펴보기 위하여 교과서의 ‘금속과 산의 반응 속도 측정’ 탐구 실험을 그대로 제시하여, 반응 속도 그래프를 예상하게 하였다. 설문에 응답한 92%의 교사들은 교과서나 교사용 지도서에서 제시된 형태와 같이 실험 결과가 반응이 진행됨에 따라 반응 속도가 점점 느려지는 ③번 그래프를 실험 결과로 예상하였고 (Figure 1), 선행 연구에서 실제 실험을 통해 관찰된다고 보고된 ②번, ④번 그래프를 선택한 교사는 각 1명뿐이었다. 교사 역시 반응 속도의 변화를 ‘반응이 진행됨에 따라 점차 감소’하는 것으로 인식하고 있기 때문에, 탐구 실험의 결과 또한 그 설명에 적합한 그래프를 기대하는 것이라 생각된다.

몇몇 교사용 지도서의 경우 교과서에서 제시된 그래프와 달리 실제 실험 데이터를 제시하고 있었으며 그 형태는 각 설문 문항의 4번과 같은 모양이며 반응이 시작된 후 어느 정도 시간이 지나서야 포집된 기체의 부피변화가 관찰 되고, 반응이 종결될 때까지 거의 기울기가 일정한 직선형의 그래프로 선행연구에서 보인 결과와 유사하다. 그래프의 해석에서 초기에 일정시간이 지난 뒤에 부피변화가 관찰 되는 것에 초점을 맞추어 산화막이 제거되지 않은 마그네슘 표면 또는 수산화물의 방법적인 측면에 대해서는 설명하고 있지만 그래프의 기울기가 시간이 지남에 따라 일정한 것에 대해서는 고려하지 않고 ‘시간이 지남에 따라 그래프의 기울기가 점점 감소하므로 반응 속도는 점점 느려진다’고 서술하고 있다.

Figure 1에서 보여주듯이 대부분의 교사들이 교과서에서 제시된 탐구 실험(마그네슘에 비해 염산이 과량인 조건)의 결과를 교과서에 제시된 그래프와 같은 형태로 예측하고 있었는데, 그 이유로는 ‘반응 물질의 농도 감소’를 제시하는 비율이 가장 많았다. 또한 단순히 시간에 따라서 반응 속도가 점점 느려지기 때문이라고 답한 교사도 있었다. 물은 염산의 양이 마그네슘의 양과 비슷한 조건에서의 예측결과(Figure 2)에서는 동일한 ③번 그래프를 선택한 경우가 63%로 가장 많았으며, 농도의 감소가 오히려 기울기를 일정하게 할 것으로 예상하여 ②번을 선택한 교사가 29%, 물은 염산의 농도가 줄어들어 따라 마그네슘 리본의 농도가 과량이 되어 수소기체가 계속

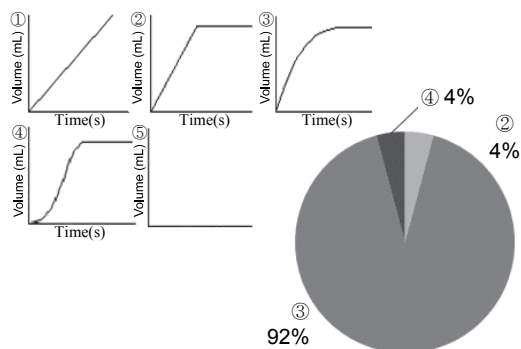


Figure 1. Teachers' expectation of the experimental result of the high school textbook

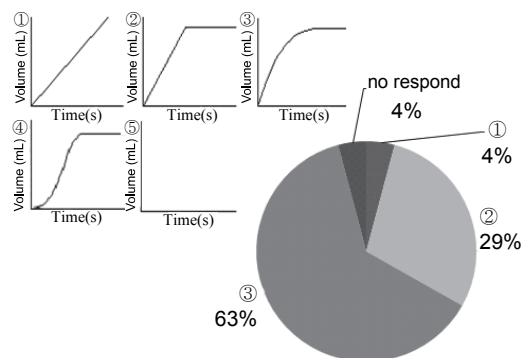


Figure 2. Teachers' expectation of the experimental result of the equivalent condition of hydrochloric acid

해서 발생할 것으로 예상하여 ①번을 선택한 교사가 4% 있었다. 이는 설문에 반응물의 물수를 직접적으로 제시하였음에도 대부분의 교사들은 반응하는 수소이온과 마그네슘의 비율이 반응 속도 그래프에 미치는 영향을 고려하지 않고 있으며, ‘반응 속도는 시간에 따라 느려진다’는 것을 기계적으로 적용하는 경향이 있음을 보여준다. 실험을 직접 수행한 경험이 있는 교사가 42%임에도 불구하고 선형 그래프를 선택한 교사는 1명 뿐이었는데 이는 실제 반응 속도 실험에서 얻은 그래프는 선형으로 나타났지만 그것을 실험오차로 여기고 교과서나 교사용 지도서에서 제시된 형태에 맞추어 답을 하려는 경향이 있는 것으로 보인다.

‘반응 속도’ 단원의 학습 목표와 물은 염산과 마그네슘 리본의 반응에 관한 선행 연구의 결과에 비추어 볼 때 현재 교과서에서 제시된 탐구 실험은 적절하지 않다. 교과서에 제시된 조건은 시간에 따라 반응 속도가 점점 느려지는 일반적인 반응 속도의 변화를 보여주기에 부적절하다. 탐구 활동을 통하여 학생들로 하여금 개념의 이해를 더욱 용이하게 하기 때문에 탐구 실험을 활용하는 것이지만 제시된 탐구 활동이 오히려 개념 이해에 방해가 되어서는 안될 것이다. 뿐만 아니라 배울 내용과 실제 실험의 불일치는 실험 결과에 대해 불신하거나 이론으로 실험 결과를 짜맞추려고 하는 잘못된 인식을 심어줄 우려도 있다. 따라서 반응 속도 측정과 관련된 학습 내용에 적합한 조건으로 탐구 실험을 개선할 필요가 있다.

실험의 개선

‘반응 속도’ 단원에서 반응 속도의 측정과 개념 이해에 있어서 주요한 학습 내용인 ‘시간에 따라 반응 속도가 점차적으로 감소’하는 것을 관찰할 수 있는 적절한 실험 조건을 찾기 위하여 마그네슘과 반응하는 염산의 양과 농도를 변화시키면서 실험을 실시하였다. 정량적인 데이터를 얻기 위하여 MBL (Microcomputer-Based Laboratory) 을 사용하였고 생성된 수소 기체의 부피를 측정하기 위한 수상치환의 번거로움을 피하고 MBL sensor 를 이용하였고 사용한 MBL의 압력 센서는 정밀도가 ± 0.0035 bar로 비교적 정확한 압력 값을 얻을 수 있었으며 발생한 수소 기체의 압력을 0.1 초 간격으로 측정하였다. 실험장치는 Bang(2006)의 반응 속도 측정 실험 장치를 참고하였으며 수소 기체의 압력을 측정하기 위하여 고안한 실험 장치를 Figure 3에 나타내었다.¹² 가지 달린 삼각 플라스크에 염산을 넣고 삼각 플라스크 마개에 연결된 고리에 마그네슘 리본을 매달아 놓은 후, 장치가 준비된 후 삼각플라스크를 흔들어서 마그네슘 리본이 떨어지도록 한다. 온도를 일정하게 유지하기 위하여 항온조를 사용하였으며 삼각 플라스크를 MBL 압력 센서와 연결하고, 이를 컴퓨터와 연결하여 실시간으로 생성된 수소 기체의 압력 값을 얻었다. 수소기체의 발생량이 많을수록 플라스크의 압력이 증가하므로 이때의 반응 속도는 단위 시간당 압력의 변화로 볼 수 있다. 선행 연구에서 지적한 반응 초기 반응이 지연되는 문제를 보완하기 위하여 마그네슘 리본의 표면적의

산화막을 제거한 후 삼각 플라스크의 마개에 고리를 연결하여 마그네슘 리본을 달아놓고 장치가 준비되면 삼각플라스크를 흔들어서 마그네슘이 묶은 염산 수용액에 떨어지도록 했다. 반응열로 인한 온도의 변화를 줄이기 위해 항온조로 온도를 일정하게 유지(25℃)하였다.

먼저 마그네슘 리본의 양의 10배 정도의 수소 이온이 존재하는 조건에서 실험을 수행하였다. 마그네슘 리본 5.0 cm (약 2.3×10^{-3} mol)와 2.0 M의 염산 20 mL(약 4.0×10^{-2} mol)를 사용하여 실험한 결과를 Figure 4에 제시하였다. 선행연구에서 설명한 것과 같이 반응이 진행되는 동안 마그네슘의 표면적은 거의 일정하게 유지되고, 또한 마그네슘에 비해 10배 과량의 수소이온이 존재하는 경우 수소이온의 농도도 반응 후에 큰 변화가 없어 직선형의 유사 0차의 그래프를 얻게 된다.

염산이 제한시약(limiting agent)로 작용하는 조건인 마그네슘 리본 5.0 cm (2.3×10^{-3} mol)와 0.1 M의 염산 20 mL (2.0×10^{-3} mol)의 반응에서 얻은 실험 결과를 Figure 5에 나타내었다. 이 조건에서는 수소 이온의 농도가 반응 속도에 영향을 미쳐 그래프의 기울기가 시간이 지남에 따라 점점 작아짐을 볼 수 있다. 즉, 염산이 제한시약이 되는 조건에서는 교과서에 제시된 형태의 그래프인, 반응이 진행됨에 따라 반응물의 농도가 감소함으로써 반응 속도가 점차 감소하는 형태의 그래프를 얻을 수 있다. 그러므로 현재의 교과서에서 제

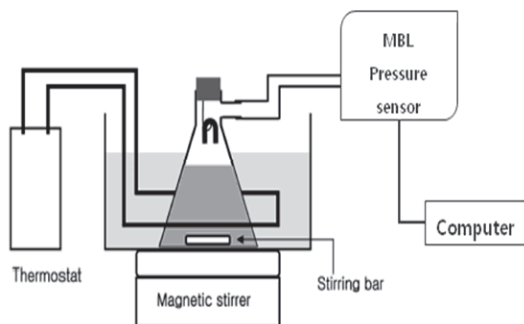


Figure 3. Schematic diagram of improved experiment using a MBL pressure sensor

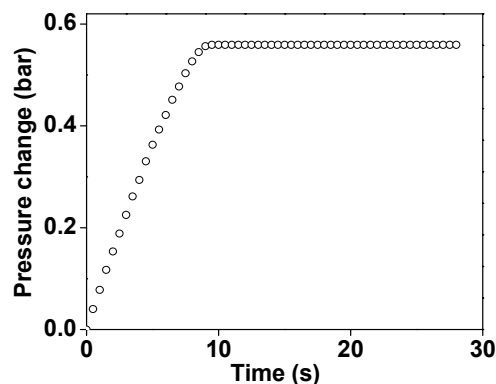


Figure 4. The pressure change inside of flask with time due to H_2 gas in the reaction between 2.0 M, 20 mL hydrogen chloride and 5.0 cm magnesium ribbon at 25 °C measured by MBL(Microcomputer Based Laboratory).

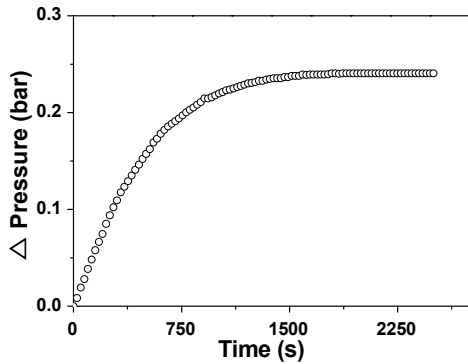


Figure 5. The pressure change inside of flask with time due to H₂ gas in the between 0.1 M, 20 mL hydrogen chloride and 5.0 cm magnesium ribbon at 25 °C measured by MBL.

시되고 있는 탐구 실험의 조건을 염산이 제한시약이 되는 조건으로 개선한다면, 반응 속도의 측정 단원에서 주된 학습 내용의 설명에 적합한 결과를 얻게 되고, 탐구 실험이 학습 내용을 이해하는 데 더 효과적일 수 있을 것으로 예상된다.

개선된 실험 결과에서 반응이 종결된 시간을 t_f 라고 하면, t_f 이후에는 더 이상 생성되는 수소기체가 없어 측정되는 압력이 일정하게 유지되므로 $P(t)$ 를 다음과 같이 나누어서 생각해 볼 수 있다.

$$P(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} \frac{RT_g V_s}{V} \left\{ \frac{k' [H^+]_0^2 t}{1 + k' [H^+]_0 t} \right\}, & 0 \leq t \leq t_f \\ \frac{1}{2} \frac{RT_g V_s}{V} \left\{ \frac{k' [H^+]_0^2 t_f}{1 + k' [H^+]_0 t_f} \right\}, & t > t_f \end{cases} \quad (6)$$

상수를 $a = \frac{RT_g V_s}{V} k'$, $b = [H^+]_0 k'$, $k' = 2k \cdot \text{Area}_{Mg}$ 로 설정하여 origin 7.0 프로그램을 이용하여 피팅(fitting)한 결과를 Figure 6에 제시하였다.

그래프를 살펴보면 교과서에 제시된 조건, 즉 물은 염산이 과량일 때에서와 물은 염산이 제한시약일 때에 모두 실험 결과와 이론적으로 유도한 식의 피팅 결과가 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 각각의 피팅 그래프에서 얻어진 상수 값 b 와 k 를 이용하여 반응 속도 상수 k 값을 계산하였고, 25 °C에서 얻어진 값은 각각 $2.62 \times 10^{-3} / \text{mol} \cdot \text{mm}^2$, $2.69 \times 10^{-3} / \text{mol} \cdot \text{mm}^2$ 로 농도에 관계없이 거의 일

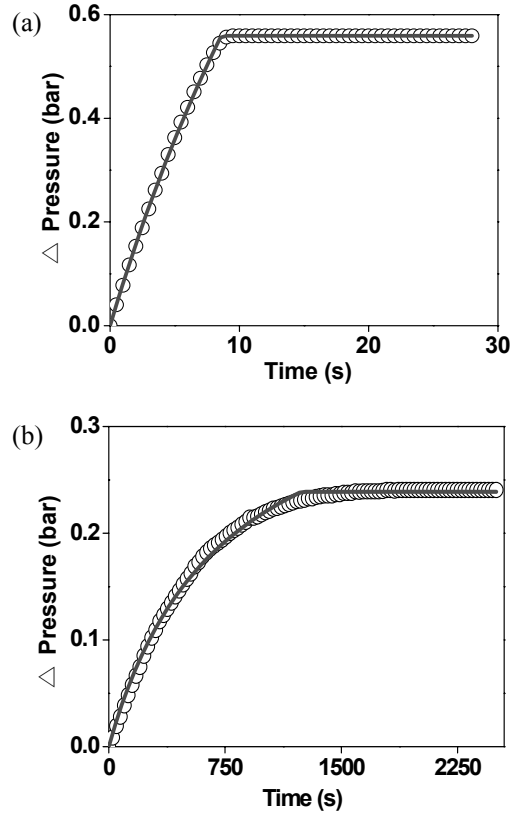


Figure 6. (a) The experimental results and fitted data for the reaction between 2.0 M, 20 mL hydrogen chloride and 5 cm magnesium ribbon. (b) The experimental results and fitted data for the reaction between 0.1 M, 20 mL hydrogen chloride and 5 cm magnesium ribbon.

치하였다. 이를 통하여 생성된 수소 기체의 압력을 측정하고 물은 염산의 농도를 낮추어 실험을 수행하였을 때의 결과가 이론적으로도 잘 맞음을 보여준다. 또한 개선된 실험의 결과 그래프가 교과서에서 제시된 실험의 결과보다 초기 반응 속도와 나중 반응 속도의 차이가 현저하게 나타났으며, ‘일반적으로 반응이 진행됨에 따라 반응 속도가 점점 느려진다’는 교과서 기술을 설명하고 표현하기에 적합하였다.

결론 및 제언

본 연구에서는 ‘반응 속도 측정’ 단원에서 고등학교 ‘과학’ 교과서와 ‘화학 II’ 교과서에서 주로

다루고 있는 ‘물은 염산과 마그네슘 리본의 반응’의 실험이 교과서에서 제시하는 학습 내용에 적절한 실험인지 고찰하였고, 학습 내용에 적합하게 개선된 실험조건을 제시하였다.

고등학교 ‘과학’ 11종, ‘화학 II’ 8종의 교과서와 교사용 지도서 11종을 분석한 결과, 상당수의 수의 교과서가 ‘물은 염산과 마그네슘 리본의 반응’을 자료해석 또는 탐구 실험의 형태로 제시하여 학생들이 스스로 문제를 해결하고 반응 속도에 대한 내용을 습득하도록 유도하고 있었고, ‘일반적으로 반응 속도가 시간에 따라서 점점 느려진다’는 것을 이해하는 것을 주요한 학습 내용으로 제시하고 있음을 알 수 있었다. 또한 이와 관련하여 교사들에게 교과서의 실험 조건을 제시하고 결과를 예상해 보도록 한 결과, 대부분의 교사들은 시간에 따라 반응 속도가 점점 느려질 것으로 예상하였으며, 이는 교사들도 반응 속도의 시간에 따른 변화에 대하여 교과서나 교사용 참고서의 내용과 동일하게 인식하고 있음을 의미한다. 그러나 교과서에서 제시된 조건에서는 반응하는 물은 염산의 양이 마그네슘 양의 열 배 이상이므로 반응 전후에 수소이온의 농도 변화가 거의 없어 실제 실험 결과에서는 반응 속도가 점점 느려지는 그래프를 얻을 수 없었다.

이에 반응 속도 단원에서 다루고자 하는 내용과 실험 결과를 일치시키기 위하여 반응 속도에 영향을 주는 반응물질인 수소이온의 양을 마그네슘의 양보다 적게 하는 조건에서 반응을 진행시키는 개선 실험을 수행하였다. 실험 결과, 반응 속도가 시간에 따라 점점 느려지는 그래프를 얻을 수 있었다. 또한 ‘물은 염산과 마그네슘 리본의 반응’을 수소이온 농도의 2차 반응으로 가정하여 이론적인 그래프를 그린 결과, 수소이온이 제한 시 약일 경우 실험 결과와 동일하게 이론적으로도 시간에 따라 반응 속도가 점점 느려지는 그래프를 얻을 수 있었다.

개선된 실험 조건으로 실험을 수행할 경우 교과서에서 제시된 것과 일치하는 반응 속도 그래프를 얻을 수 있고, 따라서 반응 속도의 시간에 따른 변화를 설명하고 학습하기에 더욱 효과적일 것으로 생각된다. 또한 소극적 측면에서 살펴보면 이론에서 예상된 것과 일치하지 않는 실험 결

과로 인해 실험에 대한 부정적인 인식을 갖거나 억지로 이론에 짜맞추어 실험 결과를 왜곡하려는 경향을 줄이는 데에 도움이 될 것으로 생각된다. 실제로 개선된 실험이 기존의 실험에 비해 반응 속도와 관련된 개념을 학생들이 학습하기에 더 효과적인지 알아보기 위해서는 개선된 실험을 교육현장에 적용하는 후속 연구가 필요할 것이다. 또한 교과서에 제시되고 있는 탐구 실험이 해당되는 학습 내용에 적합한 것인지, 오히려 개념 형성에 방해가 되지 않는지 고찰해 볼 필요가 있을 것이다. 아울러 지금까지 교과서 실험에 대한 다양한 개선 연구들이 꾸준히 진행되어 왔음에도 불구하고, 이의 반영은 실제로 많이 되어 있지 않고 있다. 이러한 연구결과들이 교과서나 교사용 지도서에 반영되고 학교 현장에 활용되기 위한 노력이 필요하다고 생각된다.

인 용 문 헌

1. The Ministry of Education *Science Curriculum in High School*; The Ministry of Education: Seoul, Korea, 2000, p. 23, 150.
2. White, R. T. *International Journal of Science Education* **1996**, 18, 761.
3. Ko, Y. -S.; Kim, S. -K.; Lee, H. -K. *Elementary Science Education* **2004**, 23(2), 152-158.
4. Hue, M.; Jung, G. -S. *Journal of the Korean Association for Research in Science Education* **1993**, 13(2), 146-151.
5. Yang, I. -H.; Kwon, Y. -J.; Kim, Y. -S.; Jang, M. -D.; Jeong, J. -W.; Park, K. -T. *Journal of the Korean Association for Research in Science Education* **2002**, 22(2), 314-335.
6. Jung, G.-S.; Heo, M. *Journal of the Korean Association for Research in Science Education* **1993**, 12(1), 61.
7. Lee, J.; Jeong J.; Woo, J. *Journal of the Korean Association for Research in Science Education* **2002**, 22(3), 560-570.
8. Cho, H. Y. *Journal of the Korean Association for Research in Science Education* **1992**, 12(1), 61.
9. Park, J. -H.; Kim, J. -Y.; Park, Y. -R. *Journal of the Korean Earth Science Society* **2004**, 25(8), 731.
10. Cho, Y.-J. *A Study on the Utilization and Improvement for Subject of Science Teacher's Guide in the Middle School*; Master's Thesis of Ewha Womans University **2005**.

11. Song, S.-H.; Park, K.-S.; Kim, D.-J.; Kim, E.-S.; Park, K.-T. *Journal of the Korean Chemical Society* **2005**, 49(1), 105-111.
 12. Bang, J.-A.; Yoon, H.; Choi, W.; Jeong, D.-H. *Journal of the Korean Chemical Society* **2006**, 50(5), 404-414.
 13. Cho, B.-S.; Choi, B. -S.; Park, K.-T. *Journal of the Korean Chemical Society* **2004**, 48(3), 283-290.
 14. Pacer, R. A. *Journal of Chemical Education* **1997**, 74(5), 543-544.
 15. Birk, J. P.; Walters, D. L. *Journal of Research in Science Teaching* **1993**, 70(7), 587-589.
-