Journal of the Korean Chemical Society
2019, *Vol. 63, No. 4*
Printed in the Republic of Korea
https://doi.org/10.5012/jkcs.2019.63.4.289

2009 및 2015 개정 교육과정의 화학 교과서에서 모델 관련 내용 분석: 수용액 전기 분해를 중심으로

김기향 · 장하석† · 백성혜‡,*
세종과학예술영재학교
†영국 케임브리지대 과학사·과학철학과
‡한국교원대학교 화학교육과
(접수 2019. 2. 18; 게재확정 2019. 6. 3)

Analysis of Contents related to Models in the Chemistry Textbooks of the 2009 & 2015 Revised Curricula: Focusing on the Electrolysis of Aqueous Solutions

Kihyang Kim, Hasok Chang†, and Seoung-Hey Paik‡,*
Sejong Academy of Science and Arts, Sejong 30099, Korea.
†*Department of History and Philosophy of Science, University of Cambridge, United Kingdom.*
‡*Department of Chemistry Education, Korea National University of Education, Cheongju 28173, Korea.*
**E-mail: shpaik@knue.ac.kr*
(Received February 18, 2019; Accepted June 3, 2019)

요 약. 이 연구에서는 2015 개정 교육과정의 교과서에서 "모델의 개발과 사용"이라는 항목에서 변화가 있는지 확인하기 위하여 2009 개정 교육과정의 교과서 내용과 비교 분석하였다. 이를 위하여 2015 개정 교육과정의 화학 I 교과서 8종, 화학 II 교과서 6종을 분석하였으며, 2009 개정 교육과정의 화학 I 교과서 4종, 화학 II 교과서 4종을 비교 분석하였다. 분석 범위는 수용액의 전기 분해에 관련된 내용만 선택하였다. 또한 동일한 실험을 다른 모델로 해석하는 전해질 관련 내용을 비교하기 위하여 2015 개정 교육과정 중학교 과학 2 교과서 4종의 관련 단원 내용을 2009 개정 교육과정의 중학교 과학 2 교과서 9종과 비교 분석하였다. 분석 결과, 학년과 단원에 따라 동일한 실험을 다른 모델로 설명하고 있었으며, 모든 설명은 단일 모델로 제한하여 제시하였다. 또한 모델과 일치하지 않을 수 있는 실험 결과가 나오는 전해질의 종류를 제한하는 경향이 2009 개정 교육과정보다 2015 개정 교육과정에서 더 뚜렷하게 나타났다. 이 결과는 2015 개정 교육과정에서 개발된 교과서에서 "모델의 개발과 사용"을 반영하기 위한 노력이 필요함을 시사한다.

주제어: 2015 및 2009 개정 교육과정, 화학 교과서, 모델의 개발과 사용, 수용액의 전기 분해 실험

ABSTRACT. The purpose of this study is to compare the contents of chemistry textbooks developed according to the 2015 revised curriculum with the contents of the 2009 revised curriculum to research the change in "the development and use of models". To do this, we analyzed 8 kinds of Chemistry I textbooks and 6 kinds of Chemistry II textbooks from the 2015 revised curriculum and compared them with 4 kinds of Chemistry I textbooks and 4 kinds of Chemistry II textbooks from the 2009 revised curriculum. The scope of the analysis was the explanations of the textbooks related to aqueous electrolysis experiments. In order to compare the contents regarding electrolytes when the same experiments are interpreted with different models, we analyzed contents of 4 kinds of middle school science textbooks from the 2015 revised curriculum and 9 kinds of middle school science textbooks from the 2009 revised curriculum. As a result of the analysis, the same experiment was explained by different models according to the grade level and unit, and all explanations were limited to a single model. Also, the tendency to limit the kinds of electrolytes for controlled experimental results is more pronounced in the 2015 revised curriculum than in the 2009 revised curriculum. From this results, we suggest that efforts are needed to reflect the "development and use of models" in chemistry textbooks developed according to the 2015 revised curriculum.

Key words: 2015 and 2009 revised curriculum, Chemistry textbooks, Development and use of models, Aqueous electrolysis experiment

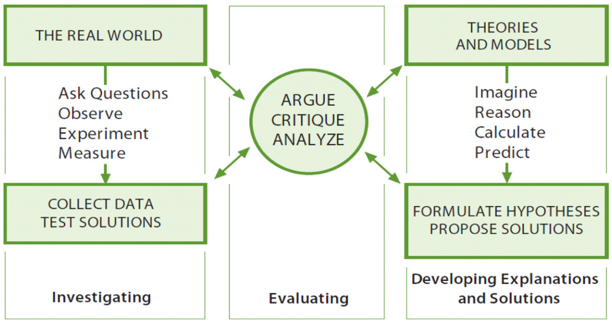


***Figure* 1.** The three spheres of activity for scientists and engineers.[1]

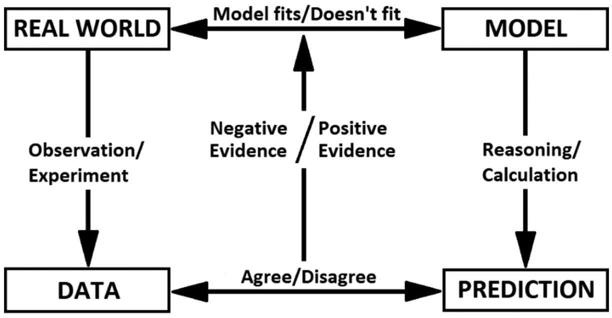


***Figure* 2.** Model of science activity.[20]

서 론

2013년도에 발표된 미국의 차세대 과학교육표준(Next Generation Science Standards 이하 NGSS)에서는 과학자와 기술자를 위한 세 가지 영역의 활동(*Fig.* 1)을 제시하였다.[1] 그동안 과학교육에서는 탐구 실험을 강조하면서, 질문을 던지고, 관찰하고, 실험하고, 측정하는 과정을 통해 자료를 얻고 해결 방안을 검증하는 탐구에 초점을 두었다. 그러나 이제 그보다 더 중요한 활동으로, 이론과 모델을 만들고, 추론하고, 계산하고, 예측하는 활동을 통해 가설을 구축하고 해결 방안을 제안하는 것, 즉 설명과 해결 방안을 개발하는 과정과 그 결과로 나온 이론이나 모델을 자연 현상과 연결하면서 비평하고, 분석하는 평가 활동이 강조되었다. NGSS에서는 이를 'Practice'라고 하였다.

우리나라 2015 개정 교육과정은 NGSS의 영향을 받아, 내용 체계 및 성취 기준의 요소로 'Practice'를 '기능'으로 번역하고 모든 학년의 과학 교육과정에서 강조하고 있다.[2] 교육과정에 제시된 기능의 항목으로 문제 인식, 자료의 수집·분석 및 해석, 결론 도출과 같은 전통적인 탐구 기능뿐 아니라, 수학적 사고와 컴퓨터 활용, 모형의 개발과 사용, 증거에 기초한 토론과 논증, 평가, 의사소통 등이 포함되어 있다.[3,4] 이렇게 2015 개정 교육과정에서 이론과 모델을 만들고, 추론하고, 계산하고, 예측하는 활동을 통해 가설을 구축하고 해결 방안을 제안하는 기능이 강조되면서 이제 화학 교과서에 제시되는 실험의 형태도 자연 현상을 관찰하고, 실험하고, 측정하는 과정을 통해 자료를 얻고 해결 방안을 검증하는 탐구 형태에서 벗어나 모델을 이해하는 활동으로 변화되어야 한다.

오늘날 과학 모델에 대한 연구는 활발하게 이루어지고 있다. Gobert와 Buckley[5]는 모델이 계의 중요한 특성을 명백하게 보여주기 위해 단순화하고 추상화한 표상이라고 정의하였다. 또한 Chamizo[6]는 모델이 특정한 목적을 위해 (예를 들면 수량화된 규칙성) 실제 세계의 특정한 부분(예를 들면 특정한 물질의 반응)을 상황과 관련하여(예를 들면 수용액 상태) 만든 비유에 바탕을 둔 표상이라고 하였다. 또 다른 모델의 정의는 자연 현상에서 관찰된 것과 추상적인 개념이나 이론을 연결하여 구체화하는 설명이라고 한 것이 있다.[7–19] 이처럼 과학 모델은 실제 자연 세계를 그대로 묘사하는 것이 아니라, 개념화하기 위한 특정한 목적을 가지고 단순화하고 표상화하는 과정이라고 할 수 있다. 따라서 모델을 제시할 때 이러한 의도와 조건에 대한 설명이 함께 제시되어야 이를 사실이 아닌 비유나 표상이라는 것을 학생들이 인식할 수 있다.

모델의 중요한 기능 중 하나는 *Fig.* 2에 제시한 것처럼 예측 활동이다.[20] 모델은 실제 자연 현상에서 일어나는 크고 작은 다양한 현상들을 예측하고, 이 예측은 관찰 사실들과 일치할 때 받아들여진다. 만약 불일치할 경우에는 모델은 수정된다. 따라서 학교에서 가르치는 과학에서도 단지 과학 개념을 이해하고 적용하도록 가르치는 것 이외에 과학의 본성 측면에서 자연 현상을 설명하는 모델로서 과학 개념을 우리가 어떻게 이해하여야 하는지, 그리고 우리가 왜 모델의 한 형태인 과학 개념을 믿을 수 있는지에 관하여 학생들에게 가르쳐야 한다.[21–23]

그러나 우리나라 화학 교과서에서는 아직 모델의 개발과 사용에 대한 내용이 충분히 반영되어 기술되지 못하고 있다.[24] 또한 대부분 학교에서 교사들은 과학과 교육과정

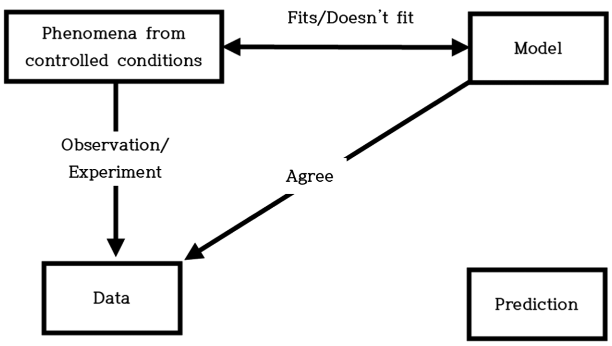


***Figure* 3.** Modified model for students' activity in classroom.[24]

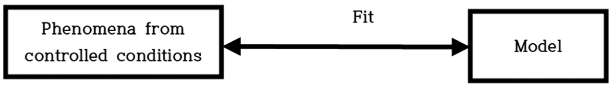


***Figure* 4.** Modified model in science textbooks.[24]

의 목표에 관심을 가지기보다는, 교과서의 내용을 수동적으로 따라 수행하는 경향이 있다.[25,26] 한유화 등의 연구[24]에 따르면, 교실에서의 탐구 활동은 과학자의 탐구 모델과 다르다(*Fig.* 3). 즉, 자연 현상을 탐구하기보다는 교실에서 통제된 현상을 관찰하거나 실험한 후, 이러한 관찰 자료를 자연 현상과 동일시하는 것으로 나타났다. 따라서 이 과정에서 모델의 예측 기능이 사라지고, 모델이 직접적으로 관찰 자료를 설명하는 형태로 이루어지는 것이 일반적이었다.

특히 직접적으로 실험 자료를 제공하지 않는 교과서 내용의 경우에는, 모델이 통제된 자연현상에 항상 잘 맞는 것으로 제시된 문제가 있다(*Fig.* 4). 이렇게 되면 실험은 모델이나 이론을 주입하는 수단으로서의 기능을 하게 되고,[27–29] 결국 실험을 하는 학생들의 주요 관심사는 실험을 무사히 끝마치는 것에 초점을 두게 된다.[30]

따라서 모델의 개발과 사용을 강조한 2015 개정 교육과정에 근거하여 개발된 화학 교과서에서는 이러한 변화가 부각되어야 한다. 과거의 교육과정에서 개발된 화학 교과서와 삽화나 단원의 배치 수준에서만 변화가 있고 “기능” 측면에서 궁극적인 변화를 보이지 않는다면, 교육과정 개정에 따른 교육의 변화를 기대하기 어렵기 때문이다.

장하석[31]에 따르면, 우리가 관찰하는 자연 현상은 굉장히 무질서하여 그 형태가 간단하지 않다. 비유를 든다면 마치 물에 비친 건물을 바라보는 것과 같다. 그리고 모델은 이렇게 무질서하고 불규칙한 자연 현상에서 일부를 선택하여 규칙성을 만들어 간결하고 선명한 건물의 형태로 단순화시키는 것이다. 따라서 모델은 자연 그 자체가 아니며, 과학자들의 상상에 의해 만들어진 가공물이다.[32] 즉, 모델은 패턴을 인식하기 위해 각 개별의 여러 속성 중에서 공통된 속성을 추출하는 것이다. 과학 모델은 패턴 인식을 위해 먼저 다양한 개별 단위에서 일부의 자연을 선택한다.[33–35] 그리고 이 과정에서 무시하는 부분이 발생한다. 장하석[36]은 모델이 설명 범위를 넓힐수록 자연 현상을 선명하게 밝힐 수 없는 회색 음역의 영역이 생기게 되는데, 이를 이그노런스(Ignorance)라고 명명하였다(*Fig.* 5).

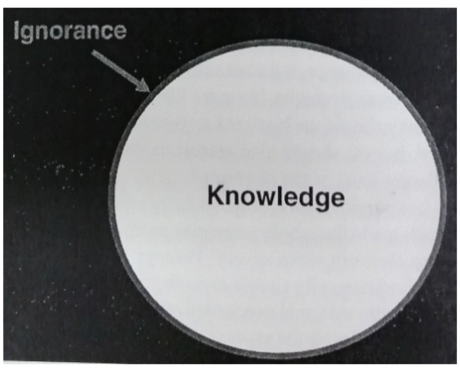


***Figure* 5.** A graphic representation of Priestley’s metaphor concerning the growth of knowledge and ignorance.[36]

장하석은 ‘Is water H_2O?’[36]라는 그의 책에서 물의 전기 분해에 관련된 과학자들의 다양한 모델을 소개하였다. 물의 전기 분해 현상을 설명하기 위하여 과학자들은 서로 다른 모델들을 상상, 추론하고, 이러한 모델로부터 예측되는 현상을 확인하면서 이그노런스에 해당하는 부분을 드러내었다. 따라서 이 연구에서도 물의 전기 분해와 관련된 내용을 중심으로 화학 교과서가 모델을 어떻게 제시하고 있는지에 대해 분석해 보고자 한다.

2015 개정 교육과정에서 수용액의 전기 분해는 화학 I 교과서 안에 화학 결합의 전기적 성질을 알아보는 과정에 포함되어 있으며, 화학 II 교과서에서는 전기 화학을 다루는 단원에 전기 분해의 사례로 제시하고 있다. 대부분의 교과서에서는 물의 전기 분해 실험을 통해 수소 기체와 산소 기체의 발생을 확인하고 이로부터 물이 수소와 산소로 이루어진 화합물임을 알게 하는 것에 초점을 둔다. 과학 모델은 단순화와 추상화라는 전제 조건을 가진 표상화와 정량화라는 패턴으로 간주할 수 있다.[37] 이러한 점에서 자연 현상에서 나타나는 규칙성을 예측하는 것은 모델의 중요한 역할이지만,[38] 모델의 역할 중 가장 중요한 것은 모델의 잠정성에 대한 인식이다.[39] 만약 교과서에서 학생들의 인지 수준 등을 고려한다는 이유로 한 가지 모델만을 과학적 개념으로 제시한다면, 학생들은 모델이 잠정성을 가진다는 것을 인식하기 어렵기 때문에 모델을 과학적 사실로 받아들일 가능성이 크다. 따라서 이 연구에서는 모델의 특성에 대한 선행 연구가 잘 이루어진 물의 전기 분해에 대한 내용을 중심으로 2015 개정 교육과정에 근거하여 개발된 화학 교과서의 내용을 분석함으로써 모델의 개발과 사용에 대한 내용이 어느 수준으로 교과서에 반영되어 있는지 알아보고자 한다.

연구 방법

2015 개정 교육과정의 교과서에서 모델의 개발과 사용이라는 항목에 변화가 있는지 확인하기 위하여 ‘수용액의 전기 분해’와 관련된 내용을 분석 대상으로 선정하였으며 2009 개정 교육과정 교과서와 비교였다. 이에 관련된 내용을 다룬 교과서로 2009 개정 교육과정의 화학 I 교과서

***Table* 1.** Contents of the textbooks developed according to the 2009 revised curriculum

Textbook	Middle School Science 2		High School Chemistry I		High School Chemistry II
Unit	I. Composition of matter – Basic components of matter	I. Composition of matter – Ion	III. World of Chemical bonds and Molecules – Covalent bond	III. World of Chemical bonds and Molecules – Ionic bond	III. Chemical equilibrium – Chemical battery and electrolysis
Mireae-n	p.18 Electrolysis experiment of water with KNO_3 (aq), 9V	p.31 Experiments on the migration of colored ions (Cu^{2+}, MnO_4^-) by flowing current	–	–	–
Visang	p.16 Electrolysis experiment of water with NaOH(aq), 9V	p.39 Conductivity experiments of various solutions p.40 Ionic model with current flowing	p.135 Electrolysis experiment of water with NaOH 0.1M, 9V	p.140 Conductivity experiments of NaCl(aq)	p.202 Compare NaCl, $CuCl_2$, $AgNO_3$, KNO_3, $CuSO_4$ electrolytes with standard reduction potential in electrolysis of water. p.203 Electrolysis experiment of NaCl(aq), 9V
Donga	p.18 Electrolysis experiment of water with NaOH(aq) 0.1M	p.45 Experiments on the migration of colored ions(Cu^{2+}, $Cr_2O_7^{2-}$) by flowing current p.50 Ionic model with current flowing in NaCl(aq)	–	–	–
Kyohaksa	p.13 Electrolysis experiment of water with NaOH(aq)	p.37 Conductivity experiments of NaCl(aq) p.37 Ionic model with current flowing in NaCl(aq)	p.156 Electrolysis experiment of water with NaOH 0.5M, 9V	p.150 Conductivity experiments of NaCl(aq), KNO_3(aq), $CaCl_2$(aq)	p.213 Compare NaCl, NaOH, $AgNO_3$, $CuSO_4$ electrolytes with standard reduction potential in electrolysis of water. p.213 Electrolysis experiment of NaCl(aq)
Sangsang Academy	–	–	p.131 Electrolysis experiment of water with Na_2SO_4, 9V	p.123 Conductivity experiments of NaCl(aq), $C_{12}H_{22}O_{11}$.	p.192 Compare NaCl electrolytes with standard reduction potential in electrolysis of water. p.193 Electrolysis experiment of 0.1M NaCl(aq), 9V
Gihaksa	p.15 Electrolysis of water with NaOH(aq)	p.36 Experiments on the migration of colored ions(Cu^{2+}, MnO_4^-) by flowing current	–	–	–
Kumsung	p.15 Electrolysis experiment of water with Na_2SO_4(aq) 0.018M, 9V	p.42 Experiments on the migration of colored ions(Cu^{2+}, MnO_4^-) by flowing current p.43 Ionic model with current flowing in NaCl(aq)	–	–	–
Chunjea	p.17 Electrolysis experiment of water with NaOH(aq)	p.40 Ionic model with current flowing in NaCl(aq) p.41 Conductivity experiments of ionic beverage	p.132 Electrolysis experiment of water with Na_2SO_4, 9V	p.138 Conductivity experiments of NaCl(aq) p.139 Ionic model with current flowing in NaCl(aq)	p.185 Compare NaCl, KNO_3, Na_2SO_4 electrolytes with standard reduction potential in electrolysis of water.
Sinsago	p.14 Electrolysis experiment of water with NaOH(aq) 0.1M, 9V	p.32 Conductivity experiments of $CuSO_4$(aq) – explaining electrolysis experiment of water	–	–	–

***Table* 2.** Contents of the textbooks developed according to the 2015 revised curriculum

Textbook	Middle School Science 2		High School Chemistry I		High School Chemistry II
Unit	I. Composition of matter – Basic components of matter	I. Composition of matter – Ion	III. World of Chemical bonds and Molecules – Covalent bond	III. World of Chemical bonds and Molecules – Ionic bond	IV. Use of Electrochemistry – Electrolysis
Mireae-n	p.15 Electrolysis of water	p.31 Ionic model with current flowing in NaCl(aq) p.32 Experiments on the migration of colored ions(Cu^{2+}, MnO_4^-) by flowing current	p.108 Electrolysis experiment of water with Na_2SO_4, 9V	p.114 Conductivity experiments of NaCl(aq)	p.189 Compare NaCl, KNO_3, $CuCl_2$ electrolytes with standard reduction potential in electrolysis of water
Visang	–	p.38 Conductivity experiments of various solutions	p.99 Electrolysis experiment of water with Na_2SO_4 0.07M, 9V	p.104 Ionic model with current flowing in NaCl(aq)	p.173 Compare NaCl electrolytes with standard reduction potential in electrolysis of water
Donga	–	p.34 Experiments on the migration of colored ions(Cu^{2+}, MnO_4^-) by flowing current p.35 Ionic model with current flowing	p.110 Electrolysis experiment of water with Na_2SO_4, 9V	p.117 Conductivity experiments of NaCl(aq)	–
Kyohaksa	–		p.103 Electrolysis experiment of water with Na_2SO_4 0.1M, 9V	p.106 Ionic model with current flowing in NaCl(aq) p.107 Conductivity experiments of NaCl(aq)	p.185 Compare NaCl, NaOH electrolytes with standard reduction potential in electrolysis of water p.186 Electrolysis experiment of water with Na_2SO_4, 1M, 9V
Sangsang Academy	–		p.109 Electrolysis experiment of water with Na_2SO_4, 9V	p.116 Conductivity of NaCl(aq)	p.204 Compare NaCl, Na_2SO_4, $CuCl_2$ electrolytes with standard reduction potential in electrolysis of water p.204 Electrolysis experiment of 0.1M NaCl(aq), 9V
Gihaksa	–		p.107 Electrolysis experiment of water with Na_2SO_4 0.028M	p.114 Conductivity of NaCl(aq)	p.195 Compare NaCl, $AgNO_3$, $CuSO_4$, Na_2SO_4 electrolytes with standard reduction potential in electrolysis of water p.195 Electrolysis experiment of 10% NaCl(aq), 9V
Kumsung	–		p.100 Electrolysis experiment of water with Na_2SO_4 0.07M, 9V	p.108 Ionic model with current flowing in NaCl(aq) p.108 Conductivity experiments of NaCl(aq)	–
Chunjea	p.14 Electrolysis experiment of water with NaOH(aq), 9V	p.34 Experiments on the migration of colored ions (Cu^{2+}, MnO_4^-) by flowing current p.35 Ionic model with current flowing in $CuSO_4$(aq), $KMnO_4$(aq)	p.108 Electrolysis experiment of water with saturated Na_2SO_4,(aq), 9V	p.114 Conductivity of NaCl(aq)	p.196 Compare NaCl, $NiSO_4$ electrolytes with standard reduction potential in electrolysis of water

4종,[40–43] 화학 II 교과서 4종[44–47]과 2015 개정 교육과정의 화학 I 교과서 8종,[48–55] 화학 II 교과서 6종[56–61]을 분석하였다. 화학 I 교과서의 경우 '화학 결합' 단원에서 이와 관련된 내용을 다루고, 화학 II 교과서의 경우 '전기 분해' 단원에서 다룬다. 동일한 수용액의 전기 분해 실험이지만 이를 통해 전해질이 물에 녹으면 전기가 통한다는 것을 모델로 설명하는 내용은 중학교 과학 2 교과서 '물질의 구성' 단원 중 '이온'에 관련된 단원에서 다루므로 이 내용도 분석 대상

에 포함하였다. 이에 관련된 내용을 다른 교과서로 2009 개정 교육과정 중학교 과학 2 교과서 8종[62–69]과 2015 개정 교육과정 중학교 과학 2 교과서 4종[70–73]을 분석하였다.

2009 개정 교육과정과 2015 개정 교육과정의 분석 내용은 *Table* 1과 2에 정리하였다(*Table* 1, 2).

분석 대상 자료를 과학사 및 과학철학 전문가 1인, 과학교육 전문가 1인과 현직 화학 교사인 과학교육 박사 1인, 현직 화학 교사인 박사과정 3인이 교차 분석한 후, 일치되지 않은 부분은 상호 의견교환 과정을 거쳐 분석 기준을 재조정한 후에 최종적인 분석을 하였다.

연구 결과

2009 및 2015 개정 교육과정의 화학 I 교과서 내용 비교 분석

2015 개정 교육과정의 화학 I 교과서 'III. 화학 결합과 분자의 세계' 단원에서는 공유 결합에 전자가 관여하고 있다는 개념을 설명하기 위해 물의 전기 분해 실험을 제시하고 있다. 물의 전기 분해 실험에서는 전해질(Na_2SO_4)을 넣고 전원 장치를 이용하여 양극에서 생성되는 기체의 부피 비를 확인한다.[48–55] 실험 결과로부터 생성된 기체를 확인하여 물 분자는 수소 원자 두 개와 산소 원자 한 개로 구성되었다는 사실을 추리하도록 한다. 그리고 물 분자가 수소 기체와 산소 기체로 분해되는 과정에서 전류를 흘려주면서 전자가 공유 결합에 관여한다는 것을 제시한다.

화학 I 교과서에서는 이러한 설명 과정에서 물 분자가 두 개의 수소 원자와 한 개의 산소 원자로 이루어졌다는 이론 혹은 모델(*Fig.* 6)을 증명하기 위해 물의 전기 분해 실험을 제시하기 때문에 실험을 통해 얻은 증거에 기초한 토론과 논쟁, 모델의 적절성에 대한 평가 활동을 고려하지 않았다(*Fig.* 7). 즉 *Fig.* 4에 제시한 '현상'과 단일한 '모델'을 동일시하고 있다.

그런데 전류가 흐르는 물속의 어디에서나 물이 분해된다면 양 극에서 순수한 수소 기체 혹은 산소 기체를 얻을 수 없다. 그러므로 물은 항상 양 극에서만 분해되어야 한다. 이를 설명하는 모델을 입자 수준에서 표현하면 *Fig.* 8과 같다. 현대 화학 교과서에서 주로 제시하는 이 모델에서는 전해질의 존재를 무시하고, 물 분자가 직접 각 전극에 가서 분해되면서 기체가 발생한다. 이 모델에 따르면 양 극에서 수소와 산소 이외의 다른 기체가 발생할 가능성은 없다.

그러나 이 모델에서 가정한 바와 같이 물이 직접 양극에서 분해될 수 있다면, 물에 전해질을 넣지 않고 높은 전압을 걸어주어도 어느 순간 물이 닿아있던 극에서 물의 분해가 일어날 수 있어야 한다. 극에 닿아 있는 물이 극의 전자를 받을 능력을 가지고 있기 때문이다. 이미 극에 닿아있는 물은 전해질의 도움이 필요하지 않다. 그러나 전해질을 넣어주지 않는 한 아무리 전압을 높여도 물은 분해가 일어나지 않는다.

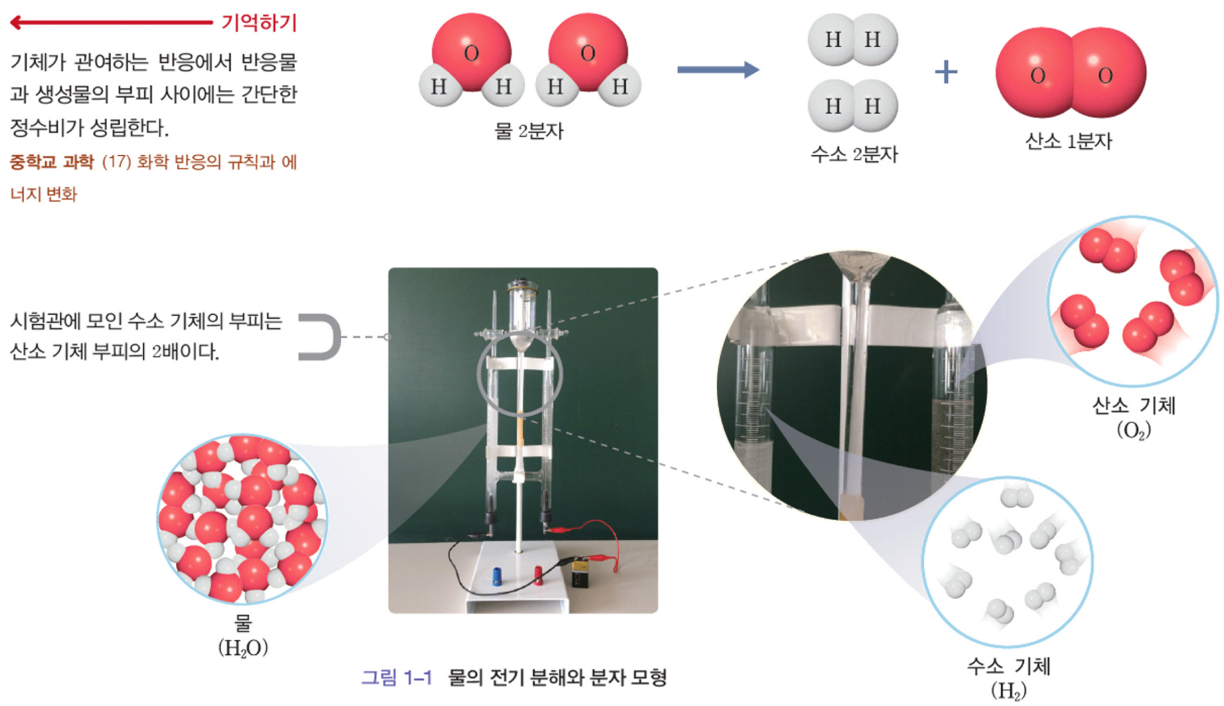
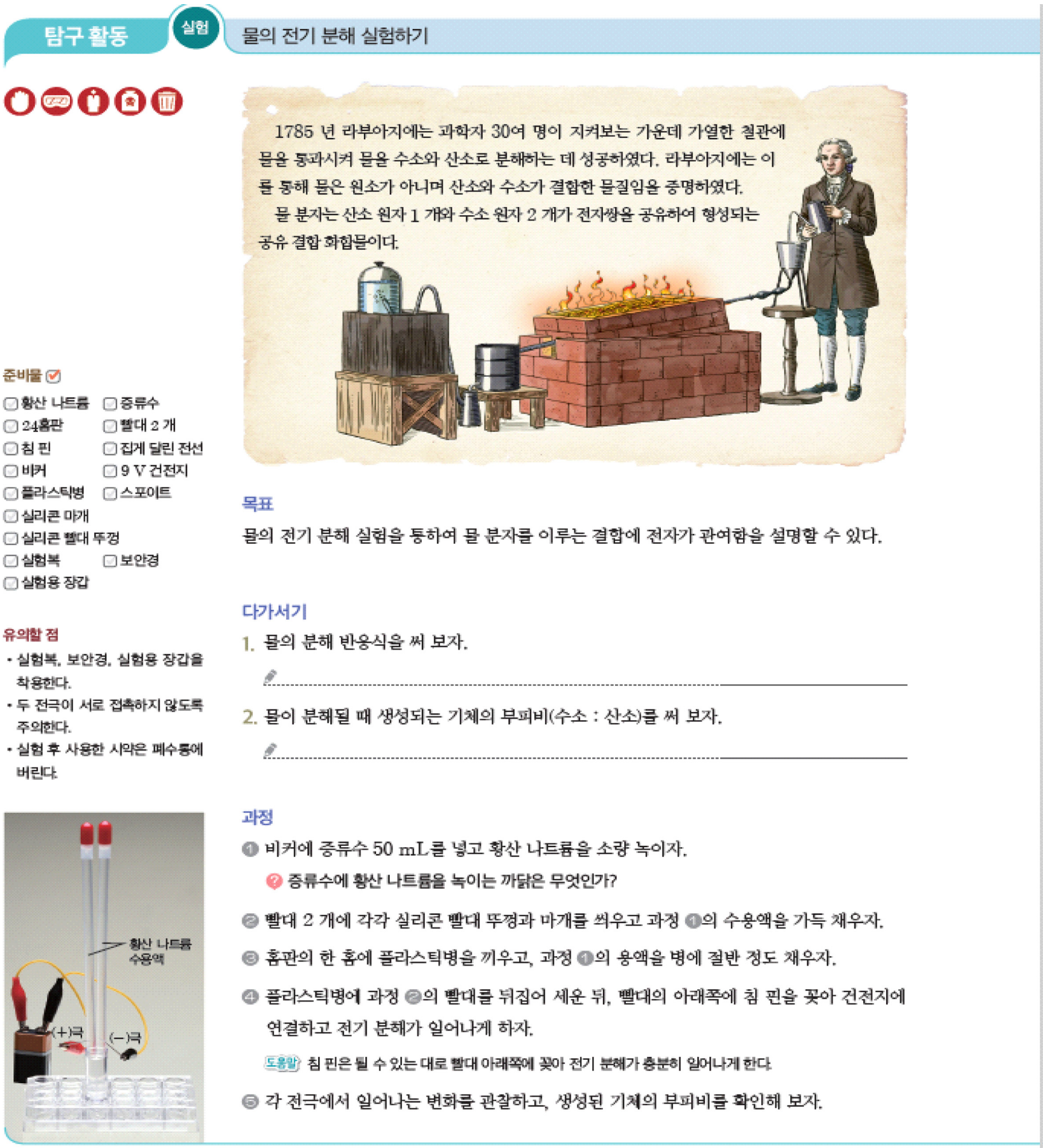


***Figure* 6.** The model of electrolysis of water in Chemistry I textbook of the 2015 revised curriculum.[53]



탐구 활동 실험 물의 전기 분해 실험하기

1785 년 라부아지에는 과학자 30여 명이 지켜보는 가운데 가열한 철관에 물을 통과시켜 물을 수소와 산소로 분해하는 데 성공하였다. 라부아지에는 이를 통해 물은 원소가 아니며 산소와 수소가 결합한 물질임을 증명하였다.

물 분자는 산소 원자 1 개와 수소 원자 2 개가 전자쌍을 공유하여 형성되는 공유 결합 화합물이다.

준비물

- 황산 나트륨
- 증류수
- 24홈판
- 빨대 2 개
- 침 핀
- 집게 달린 전선
- 비커
- 9 V 건전지
- 플라스틱병
- 스포이트
- 실리콘 마개
- 실리콘 빨대 뚜껑
- 실험복
- 보안경
- 실험용 장갑

유의할 점

- 실험복, 보안경, 실험용 장갑을 착용한다.
- 두 전극이 서로 접촉하지 않도록 주의한다.
- 실험 후 사용한 시약은 폐수통에 버린다.

목표

물의 전기 분해 실험을 통하여 물 분자를 이루는 결합에 전자가 관여함을 설명할 수 있다.

다가서기

1. 물의 분해 반응식을 써 보자.

2. 물이 분해될 때 생성되는 기체의 부피비(수소 : 산소)를 써 보자.

과정

1. 비커에 증류수 50 mL를 넣고 황산 나트륨을 소량 녹이자.
   ? 증류수에 황산 나트륨을 녹이는 까닭은 무엇인가?
2. 빨대 2 개에 각각 실리콘 빨대 뚜껑과 마개를 씌우고 과정 1의 수용액을 가득 채우자.
3. 홈판의 한 홈에 플라스틱병을 끼우고, 과정 1의 용액을 병에 절반 정도 채우자.
4. 플라스틱병에 과정 2의 빨대를 뒤집어 세운 뒤, 빨대의 아래쪽에 침 핀을 꽂아 건전지에 연결하고 전기 분해가 일어나게 하자.
   도움말 침 핀은 될 수 있는 대로 빨대 아래쪽에 꽂아 전기 분해가 충분히 일어나게 한다.
5. 각 전극에서 일어나는 변화를 관찰하고, 생성된 기체의 부피비를 확인해 보자.

***Figure* 7.** An electrolysis experiment of chemistry I textbook of the 2015 revised curriculum.[49]

이러한 실험 결과로부터 *Fig.* 8의 모델을 수정할 필요를 느껴야 한다. 그 중에 하나의 시도는 *Fig.* 8의 모델과 달리, 전해질은 전류를 흘려주는 역할 이외에 다른 역할을 담당할 것이라는 가정이다. 예를 들어, 전류가 흐르면서 극에 닿은 물만 산화 환원에 참여하여 전자의 이동을 일으키는 것이 아니라, 전해질도 이동하면서 극에 닿아서 스스로 전자를 주고받는 산화환원 반응에 참여한다는 것이다. 또한 이렇게 하여 생성된 물질은 기체일 수도 있지만, 기체가 아닌 경우에는 물과 반응하여 물의 산화환원 반응을 일으킨다는 것이다. 즉, 이 새로운 모델에 의하면, 물은 전극에 닿아서 직접 전자를 주고받아서 산화환원 반응을 하는 것이 아니라, 전해질의 산화 환원 반응에 의한 이차 반응으로 산화환원에 참여한다는 것이다. 이 경우 전해질의 종류에 따라 자신이 기체가 되어 버리고 산화환원 반응이 종료되는 경우에는 물의 전기 분해 과정 자체가 일어나지 않을 수도 있다. 그러나 2015 개정 교육과정의 모든 화학 I 교과서에서는 이러한 다양한 모델의 가능성을 열어두고 있지 않다.

수용액의 전기 분해를 통해 물만 분해된다는 단일한 모델만 제시하려면, 모델에 예외적인 실험 결과가 관찰되지

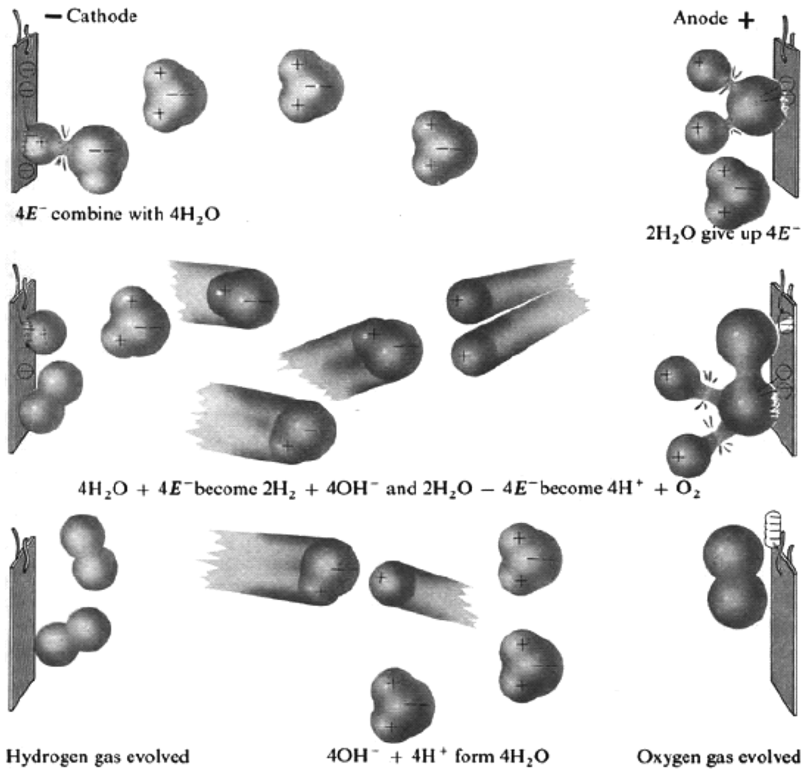
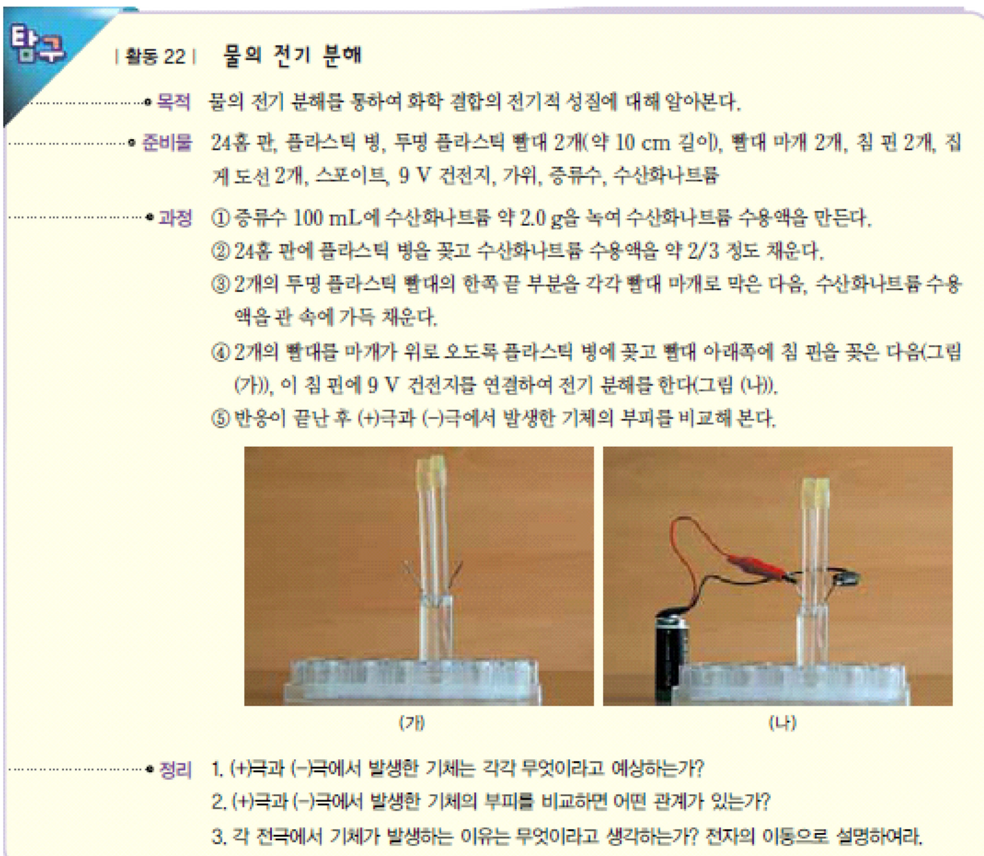


***Figure* 8.** One modern view of the electrolysis of water.[74]



탐구 | 활동 22 | 물의 전기 분해

목적 물의 전기 분해를 통하여 화학 결합의 전기적 성질에 대해 알아본다.

준비물 24홈 판, 플라스틱 병, 투명 플라스틱 빨대 2개(약 10 cm 길이), 빨대 마개 2개, 침 핀 2개, 집게 도선 2개, 스포이트, 9 V 건전지, 가위, 증류수, 수산화나트륨

과정 ① 증류수 100 mL에 수산화나트륨 약 2.0 g을 녹여 수산화나트륨 수용액을 만든다.
② 24홈 판에 플라스틱 병을 꽂고 수산화나트륨 수용액을 약 2/3 정도 채운다.
③ 2개의 투명 플라스틱 빨대의 한쪽 끝 부분을 각각 빨대 마개로 막은 다음, 수산화나트륨 수용액을 관 속에 가득 채운다.
④ 2개의 빨대를 마개가 위로 오도록 플라스틱 병에 꽂고 빨대 아래쪽에 침 핀을 꽂은 다음(그림 (가)), 이 침 핀에 9 V 건전지를 연결하여 전기 분해를 한다(그림 (나)).
⑤ 반응이 끝난 후 (+)극과 (−)극에서 발생한 기체의 부피를 비교해 본다.

(가) (나)

정리 1. (+)극과 (−)극에서 발생한 기체는 각각 무엇이라고 예상하는가?
2. (+)극과 (−)극에서 발생한 기체의 부피를 비교하면 어떤 관계가 있는가?
3. 각 전극에서 기체가 발생하는 이유는 무엇이라고 생각하는가? 전자의 이동으로 설명하여라.

***Figure* 9.** An experiment of electrolysis of water in Chemistry I textbook of the 2009 revised curriculum.[40]

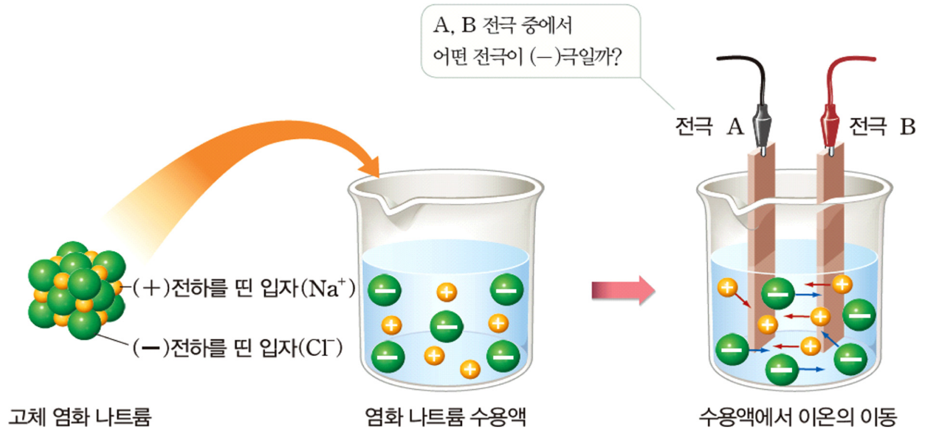


***Figure* 10.** The model to explain the phenomena that current flows when the ionic compounds dissolve in water in Chemistry I textbook of the 2015 revised curriculum.[51]

않도록 실험의 조건을 신중하게 선택하는 것이 중요하다. 이러한 이유 때문에 2015 개정 교육과정에서는 물의 전기 분해에 사용하는 전해질을 Na_2SO_4으로 통일하였다. 그러나 2009 개정 교육과정에서 개발된 화학 I 교과서에서는 물의 전기 분해 실험에 NaOH과 같은 전해질을 제시하기도 하였다(*Fig.* 9). 다양한 전해질을 사용함으로써 나타날 수 있는 다양한 실험 결과를 토대로 증거에 기초한 토론과 논쟁, 모델의 적절성에 대한 평가 활동이 가능할 수 있다. 이러한 점에서 전해질을 한 가지로 제한한 2015 개정 교육과정의 모든 화학 I 교과서는 오히려 모델에 관련된 "기능"을 학생들이 경험할 기회를 제한하였다고 볼 수 있다.

흥미로운 것은, 2015 개정 교육과정의 고등학교 화학 I 교과서에서 다음 단원인 이온 결합을 다룰 때 동일한 수용액의 전기 분해 실험을 제시하지만, 모델은 *Fig.* 10과 같이 다르다는 것이다. 즉, 이온을 강조할 때에는 물을 생략하고 양이온과 음이온의 이동에만 초점을 두고, 공유 결합 물질인 물을 강조할 때에는 전해질 이온들을 생략하고 물에만 초점을 둔다.

이렇게 같은 실험에서 설명하고자 하는 초점에 따라 모델에서 강조하는 점이 다르다 보니 *Fig.* 10의 모델에서는 물의 전기 분해 과정에서 전해질 이온들이 전류를 흐르게 하기 위해 양 극으로 끌려가는 역할만 하는 것으로 묘사되어 있다. 또한 물의 역할도 고려하지 않는다. 그러나 전해질 수용액에서 지속적으로 전류가 흐르는 현상을 설명하려면 전해질이 양극에 끌려간 후에 멈추는 상황으로 제시하는 모델은 부적절하다. 왜냐하면 이러한 모델로는 전류의 이동을 위해 가장 기본적으로 전제해야 하는 폐회로 형성이 이루어지지 않기 때문이다. 전류가 흐르는 현상에서 가장 중요한 요인은 전극 A와 B와 연결된 도선 뿐 아니라 용액 안에도 전하를 띤 입자들이 지속적으로 연결되어 폐회로를 형성하는 것이다. 그러나 *Fig.* 10의 모델에서는 마치 자석의 서로 다른 극이 끌리는 것처럼 모든 이온들이 각자 반대 전하를 띤 전극으로 이동하면 전류가 멈추는 것처럼 표현하고 있다는 문제가 있다.

한편, 동일 교과서 실험의 다른 모델의 제시는, 모델이 자연 현상의 모든 요소를 다 포함할 필요는 없으며 설명하고자 하는 것에 초점을 두어 만든다는 것을 가르치기에는 매우 좋은 소재이다. 그러나 동일한 현상을 분리된 단원에 제시되는 경우, 학생들이나 교사들이 이를 다른 내용으로 받아들일 가능성이 높다.

2009 및 2015 개정 교육과정의 중학교 과학2 교과서 내용 분석

2015 개정 교육과정의 중학교 2학년 과학 교과서에서는 전해질 수용액의 전기 분해 실험이 동일하게 제시된다(*Fig.* 11). 이 실험은 고등학교 화학 I 교과서에서 물의 전기 분해를 위해 전해질 수용액에 전류를 흘려보는 실험과 동일한 실험이다. 그러나 중학교 2학년 교과서에서 이 실험을 제시하는 단원은 물질의 기본 성분과 입자를 다루는 내용으로 구성되어 있고, 이때 초점은 물의 전기 분해가 아니라 전하를 띤 입자인 이온의 존재이다. 즉 수용액의 물이 아닌, 전해질에 관심을 가지는 것이다. 이러한 내용은 2015 개정 교육과정의 고등학교 화학 I 교과서 "이온 결합" 단원의 내용과 동일하다. 교과서에서 제시하는 모델(*Fig.* 12)도 *Fig.* 10과 동일한 것을 확인할 수 있다.

이러한 설명은 2009 개정 교육과정의 과학 2 교과서에서도 제시되었으며(*Fig.* 13), 이를 통해 교육과정이 변화하여도 중학교에서 제시하는 모델의 변화는 없음을 알 수 있다. 즉, 2015 개정 교육과정에서는 2009 개정 교육과정과 달리 모델의 기능을 강조한다고 하였으나, 실제 개발

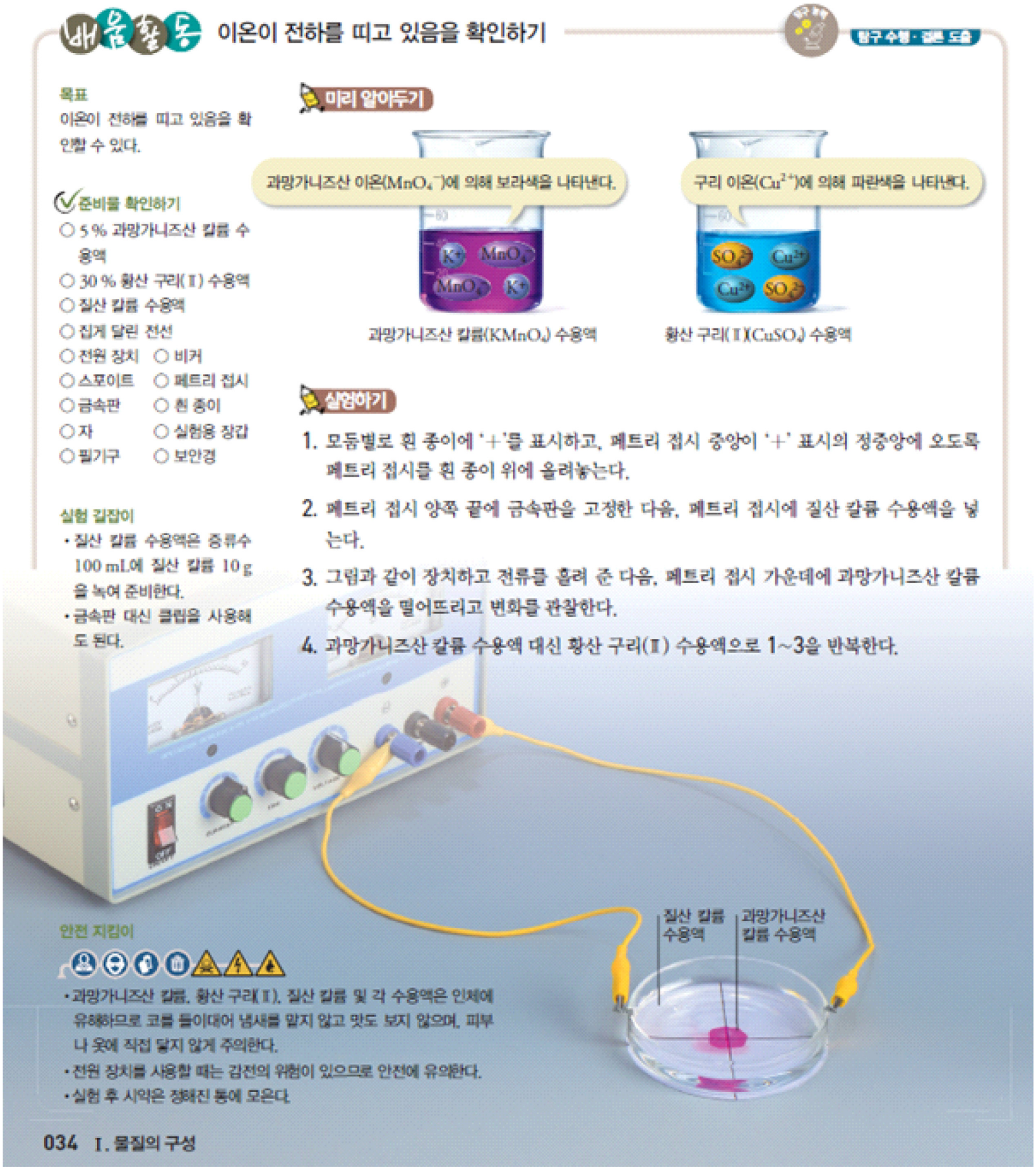


***Figure* 11.** An experiment to confirm existence of charged ions in Science 2 textbook.[70]

된 교과서는 이전 교육과정의 시각과 크게 달라지지 않았음을 알 수 있다.

또한 2009 개정 교육과정 중학교 2학년 '물질의 기본 성분' 단원에서는 물이 두 종류 이상의 원소로 이루어진 화합물이라는 것을 가르치기 위하여 물의 전기 분해 실험을 제시하고 있는데, 이때에도 *Fig*. 9의 2009 개정 교육과정 화학 I 교과서와 같이 전해질로 NaOH을 제시하고 있다 (*Fig*. 14). 이러한 교과서는 6종[62,64,66–69]이었으며, 그 외에도 전해질로 Na_2SO_4[63]나 KNO_3[65] 등을 제시하였다. NO_3^-는 표준 환원 전위가 0.01 V로 음이온이지만 (-)극에서 환원될 수 있는 물질이다.[75] 그러므로 앞서 언급한 수산화 이온과 질산 이온과 같은 전해질을 사용하면 과전압과 같은

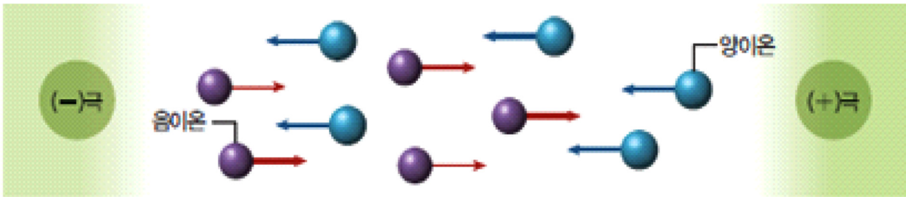


그림 Ⅰ-16 양이온과 음이온의 이동

***Figure* 12.** The model to explain the phenomena in which electric current flows due to charged ions in Science 2 textbook of the 2015 revised curriculum.[70]

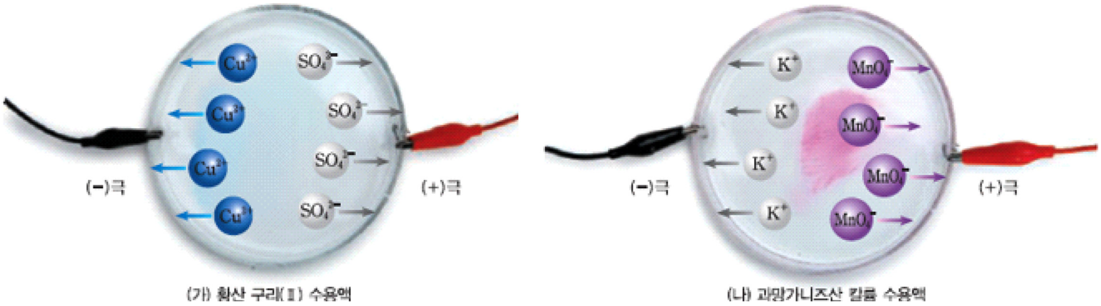


***Figure* 13.** The model to explain the phenomena in which electric current flows due to charged ions in Science 2 textbook of the 2015 revised curriculum.[63]

탐구 1 | 물의 분해

자료 해석

다음은 물의 분해에 대한 실험 과정이다.

목표

물이 수소와 산소로 분해됨을 알 수 있다.

과정

❶ 그림과 같이 물의 전기 분해 실험 장치에 증류수를 넣고 수산화 나트륨을 조금 넣어 녹였다.

❷ 전류를 흐르게 하였더니 두 전극에서 각각 기체가 발생하였다.

❸ (+)극에서 발생한 기체에 꺼져가는 성냥불을 대었더니 불꽃이 타올랐다.

❹ (−)극에서 발생한 기체에 성냥불을 대었더니 '펑' 소리가 났다.

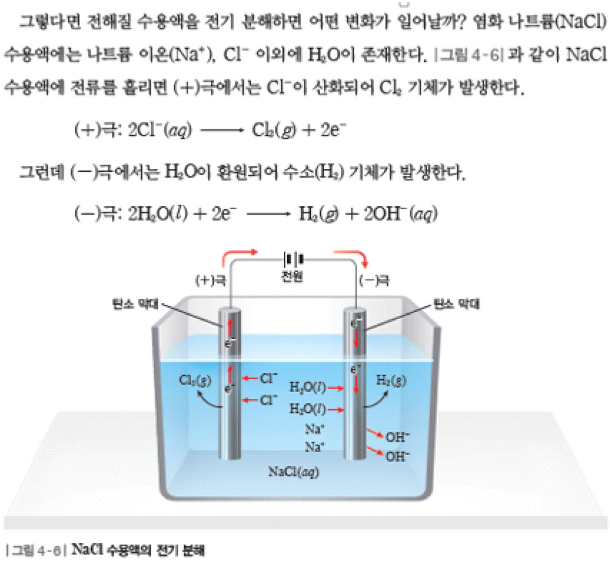
결과/정리

1. (+)극에서 발생한 기체는 무엇인가?
2. (−)극에서 발생한 기체는 무엇인가?
3. 실험 결과를 근거로 물이 물질을 구성하는 기본 성분이라고 할 수 있는지 토의해 보자.

***Figure* 14.** An experiment of electrolysis of water in Science 2 textbook of the 2009 revised curriculum.[62]

상황에서는 물만 전기 분해 되지 않고 전해질도 전기 분해에 참여하게 된다. 따라서 전해질 수용액의 전기 분해를 통해 물만 분해된다는 단일한 모델을 가르칠 때 실험 결과와 모델이 불일치하게 되는 상황이 발생될 수 있다. 현재 교과서에서 가르치고자 하는 내용은 실험을 통해 산소의 발생을 확인하고 산소가 발생하는 모델을 보여주는 것에 그치고 있다. 그러나 모델의 가장 중요한 특징은 실험 결과와의 일치, 불일치를 확인하는 평가 과정을 통해 비판하고 토론하고 분석하는 활동이다. 특히 2015 개정 교육과정에서는 "기능"의 역할을 강조하는데, 교과서 실험에서는 이러한 활동이 충족되지 못하였다고 판단된다.

물론 교과서에서 제시하는 모델은 과학적 활동에서의 모델과 다르다고 주장할 수 있으나, 교과서의 과학 모델과 과학자의 과학 모델에 대한 이해가 다르다면 이는 학교 과학 수업에서 진정한 과학 활동이 아닌 유사과학을 가르치는 것이 된다.[76] 또한 2015 개정 교육과정에서 강조하는 "기능"의 활동의 측면에서도 문제라고 볼 수 있다. 실험의 가치와 의미는 수집된 자료에 근거한 토론과 논쟁에 의한 판단되어야 하는데, 물이 이미 수소와 산소로만 구성되어 있다는 전제 하에 다른 기체의 발생은 무시하도록 하고 산소 발생만 확인하도록 실험이 구성되어 있기 때문이다. 과학은 실험 자료를 근거로 해석하고 토론과 논쟁을 통해 이론과 모델의 적합성을 판단하는 활동이 중요하며, 물이 수소와 산소로 되어 있다는 실험 결과의 해석에서 일어날 수 있는 논쟁을 피하고자 단일한 조건에서 수소와 산소 기체 생성물을 확인하는 수준으로 실험 내용을 구성하는 방식에서 벗어날 필요가 있다고 본다.


그렇다면 전해질 수용액을 전기 분해하면 어떤 변화가 일어날까? 염화 나트륨(NaCl) 수용액에는 나트륨 이온(Na^+), Cl^- 이외에 H_2O이 존재한다. |그림 4-6| 과 같이 NaCl 수용액에 전류를 흘리면 (+)극에서는 Cl^-이 산화되어 Cl_2 기체가 발생한다.

$$(+)\text{극: } 2Cl^-(aq) \longrightarrow Cl_2(g) + 2e^-$$

그런데 (−)극에서는 H_2O이 환원되어 수소(H_2) 기체가 발생한다.

$$(-)\text{극: } 2H_2O(l) + 2e^- \longrightarrow H_2(g) + 2OH^-(aq)$$

|그림 4-6| NaCl 수용액의 전기 분해

***Figure* 15.** An experiment of electrolysis of NaCl aqueous solution in Chemistry II textbook of the 2015 revised curriculum.[57]

2009 및 2015 개정 교육과정의 화학 II 교과서 내용 및 실제 실험 결과

동일한 전해질 수용액의 전기 분해 실험에 대한 다른 모델의 적용은 화학 II 교과서에서 찾아볼 수 있다. 2015 개정 교육과정 화학 II 교과서에서 제시하는 '전기 화학의 이용' 단원에서는 전기 분해의 원리를 설명하기 위해 NaCl 수용액의 전기 분해 실험을 제시하고 있다(*Fig.* 15).

앞서 제시한 화학 I 교과서에서는 전해질은 전기 분해에 참여하지 않는 모델을 제시하였지만, 화학 II 교과서에서는 전해질인 NaCl 중에 Cl^- 이온은 산화환원 반응에 참여하고, Na^+ 이온은 반응에 참여하지 않는다. 그 대신 (-)극에서는 물이 전기 분해 되면서 수소 이온이 발생한다. 이러한 모델은 순수한 물 뿐 아니라 표준 환원 전위를 고려하여 전해질도 전기 분해에 참여한다는 새로운 모델을 제시하는 것이다. 예를 들어 "전해질 음이온과 물에서 전자를 내놓기 쉬운 물질이 산화되기 때문에 F^-, CO_3^{2-}, PO_4^{3-}, SO_4^{2-}, NO_3^- 등은 물이 산화되어 산소 기체가 나오고, Li^+, Na^+, K^+, Mg^{2+}, Ca^{2+}, Al^{3+} 등은 수용액에서 환원되기 어려우므로 물이 대신 환원되어 수소 기체가 나온다."[57]고 설명하고 있다. 이러한 내용은 2009 개정 교육과정의 화학 II 교과서에서도 큰 차이를 보이지 않는다. 따라서 전기 분해 단원의 내용은 교육과정 개정에 따른 변화가 없다고 할 수 있다.

동일한 수용액의 전기 분해 실험이지만, 다양한 전해질을 제시하고 전기 분해 과정에 전해질이 참여하느냐 아니냐를 고려하는 모델의 제시는, 전기 분해 과정에서 전해질의 역할을 배제한 모델보다 훨씬 자연현상을 이해하는 폭을 넓힐 수 있다. 그러나 표준 환원 전위를 고려한 모델 역시 한계점을 가진다.

전기 분해 실험을 실제 수행하면 교과서의 모델로는 예측할 수 없는 3가지의 현상을 관찰할 수 있다. 첫째, Na_2SO_4 수용액에서는 항상 (-)극에서 발생하는 기체의 부피가 (+)극에서 발생하는 기체의 부피보다 2배 이상 크다. 물론 교과서의 실험에서 보려는 초점이 기체의 부피비가 아니라 수소 기체와 산소 기체의 발생이라고 할 수 있지만, 기체의 부피비가 2배 이상이 나오는 결과는 발생하는 기체가 순수하게 물에서 분해된 수소 기체와 산소 기체만이 아니며 다른 기체의 존재를 포함한다는 해석의 근거를 제공한다는 점에서 의미를 가진다. 따라서 이러한 기체 부피비의 차이를 통해 물의 전기 분해를 통해 물이 수소와 산소로만 이루어진 물질인가에 대한 논쟁이 가능하다.

전기 분해를 통해 관찰할 수 있는 실험 결과는 Na_2SO_4의 농도나 가해준 전압에 따라 달라진다. 구체적인 실험 결과를 *Table* 3에 제시하였다. 대부분의 교과서에서는 SSC (Small Scale Chemistry) 실험을 제시하고 있지만, 백금전

***Table* 3.** The ratio of gas volumes generated by electrolysis according to the concentration of Na_2SO_4(aq)

Time: 60 min *: 20 min

Conditions	0.1M	0.2M	0.5M	1.0M
Applied voltage (V)	10.0	10.0	10.0	10.0
Current (A)	0.01	0.02	0.04	0.06
Gas of cathode (mL)	2.8	4.5	9.8	12.6
Gas of Anode (mL)	0.1	0.3	0.9	1.7
Cathode/Anode ratio	28.0	15.0	11.0	7.4
Conditions	0.1M	0.2M	0.5M*	1.0M*
Applied voltage (V)	20.0	20.0	20.0	20.0
Current (A)	0.03	0.05	0.1	0.2
Gas of cathode (mL)	7.3	13.7	7.4	14.0
Gas of Anode (mL)	0.5	1.3	0.8	2.1
Cathode/Anode ratio	14.0	11.0	9.3	6.7

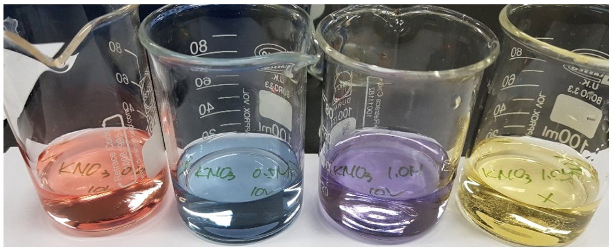


***Figure* 16.** Color change of indicator depending on acidity of solution after electrolysis.

극이나 탄소전극과 같은 다양한 전극의 사용이 용이하고, 부피비 관찰이 보다 확실하게 관찰되는 장점 때문에 2015 개정 교육과정 화학 I 교과서 4종에 제시하고 있는 호프만식 전기 분해 장치로 실험 자료를 수집하였다(*Fig.* 6). 또한 전해질 용액의 농도 차이, 그리고 전압 차이에 따른 실험 결과의 변화를 확인하기 위하여 0.1M, 0.2M, 0.5M, 1.0M Na_2SO_4 수용액에 10V, 20V의 전위를 가하며 전류량, 각 전극에서 발생한 기체의 부피를 측정하였다. 수용액의 메니스커스를 유리관의 눈금 0에 맞추고 60분이 지난 후 수용액의 수위 변화를 통해 발생한 기체의 부피를 측정하였다. 단, 0.5M, 1.0M 수용액에 20V의 전압을 가했을 경우, 기체의 발생 속도가 빨라 20분 후에 기체의 부피를 측정하였다. *Table* 3의 결과는 2회 반복 실험의 평균값이다.

둘째, 전해질의 농도에 따라 전기 분해 결과가 달라질 수 있다. *Fig.* 16은 왼쪽부터 KNO_3 전해질의 농도를 0.2M, 0.5M, 1.0M로 변화시키면서 10V 전압으로 수용액을 전기 분해한 후, 만능 지시약을 떨어뜨린 결과이다.

만약 교과서에 제시된 것처럼 순수한 물만이 전기 분해된다면 다음의 화학 반응식과 같이 (-)극에서 염기성이, (+)극에서 산성이 된다. 그리고 양 전극에서 생성된 수소 이온과 수산화 이온이 혼합되면서 중화되어 액성은 전기 분해 되기 전 용액의 액성과 동일해야 한다.

(-)극 : $2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$

(+)극 : $H_2O \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^-$

(전체) : $H_2O \rightarrow H_2 + 1/2O_2$

그러나 *Fig.* 16과 같이 전해질의 농도에 따라 다른 결과를 얻었으므로, 이는 물의 전기 분해 과정에서 전해질이 반응에 참여했음을 의미한다.

셋째, 교과서의 설명[46]과 달리 전기 분해가 일어날 때 탄소 전극은 안정적이지 않다. 물의 전기 분해 실험에서 KNO_3, NaOH과 같은 전해질을 소량 넣고 탄소 막대를 전극으로 사용하면 *Fig.* 17과 같이 탄소 전극이 반응하는 것을 관찰

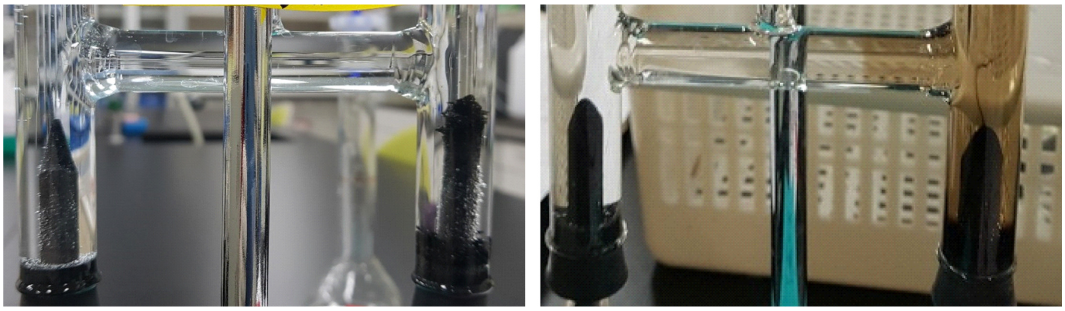


***Figure* 17.** Change of carbon electrode after electrolysis in KNO_3 (aq) solution (left), NaOH (aq) solution (right).

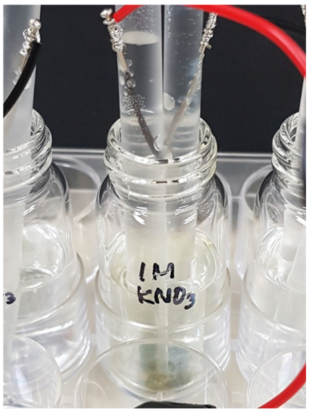


***Figure* 18.** Electrolysis of 1M KNO_3 electrolyte solution with in SSC Apparatus.

할 수 있다. *Fig.* 17의 왼쪽 그림인 KNO_3 수용액에서는 오른쪽 탄소 전극이 왼쪽 전극과 비교할 때 부풀어 오르면서 둥글게 변하는 것을 볼 수 있다. 또한 오른쪽 그림인 NaOH 수용액에서는 오른쪽의 탄소 전극이 녹으면서 용액의 색이 갈색으로 변하는 것을 볼 수 있다.

호프만식 실험 장치의 문제일 수 있으므로, SSC 실험 장치로 실험한 결과, 1M KNO_3 수용액에서는 (+)극이 은백색이 검은색으로 변했으며, 바닥에 검은색 침전물이 쌓이는 것을 관찰할 수 있었다(*Fig.* 18). 이는 극이 전기 분해 과정에서 반응함을 보여준다.

이러한 실험 결과는 전해질 수용액의 전기 분해 과정에서 순수하게 물만 분해되는 이상적인 상황이 아니라는 것을 보여준다. 따라서 이러한 실험을 통해 2015 개정 교육과정에서 강조하는 모형의 개발과 사용, 증거에 기초한 토론과 논증, 평가, 의사소통 등의 활동이 가능하도록 구성할 수 있다. 그러나 모든 교과서에서는 9V, 0.1M Na_2SO_4으로 전압과 농도를 고정하여 다양한 현상을 관찰하지 못하고 수소 기체와 산소 기체가 발생하는 현상만을 보도록 제시하고 있다.

연구자들이 수행한 모든 실험에서는 수소와 산소 기체 이외에 다른 물질들이 생성되고 있음을 생성 기체의 부피비, 지시약의 색변화, 전극의 반응, 침전물 등을 통해 확인할 수 있었다. 이러한 실험 결과에 근거하면 전기 분해를 통해 물이 수소와 산소로 구성되었다는 것을 증명할 수 없다. 이 연구에서는 2015 개정 교육과정에서 강조하는 모형의 개발과 사용, 증거에 기초한 토론과 논증과 같은 "기능" 활동을 위하여 다양한 조건에서 다른 실험 현상을 관찰하도록 제안하고자 한다.

만약 탐구 실험을 통해 모델의 개발과 사용, 증거에 기초한 토론과 논증 등의 "기능"을 가르치는 대신에, 교과서에 제시한 한 가지 모델을 "옳은 것"이라고 가르친다면, 학생들은 *Table* 3과 같은 실험 결과로부터 기체의 포집 방법에서 발생하는 오류, 전극 표면의 문제 등 모델이 자현 현상에서 구현되지 못하도록 방해하는 다양한 오차의 원인을 찾으려고 끊임없이 노력을 기울이게 되고, 궁극적으로는 실험 결과를 믿지 않고 이론과 모델을 믿는 학습이 일어나게 된다. 따라서 이러한 실험 수업은 과학의 본성을 학생들이 제대로 이해하지 못하도록 방해할 것이다.

학생들이 실험의 오차 원인으로 찾을 수 있는 사례를 든다면, 순수한 수소 기체와 순수한 산소 기체가 발생한 후에 (+)극의 산소 기체가 물에 용해되어서 이러한 비율이 되었다는 추론하는 것이다. 이 역시 물은 수소 2원자와 산소 1원자로 결합하였고, 전기 분해를 통해 수소 2부피와 산소 1부피가 측정되어야 한다는 모델을 그대로 받아들일 때 제시할 수 있는 설명이다. 그러나 수소와 산소의 물에 대한 용해도를 고려하였을 때, 수소 기체의 물에 대한 용해도는 1.82 mL/100 mL (20 °C), 산소 기체의 물에 대한 용해도 3.10 mL/100 mL (20 °C)이다.[77] 비록 산소의 용해도가 수소의 용해도의 1.7배이지만, 이러한 용해도의 차이만으로 두 기체의 부피비가 3.3배에서 9배씩 차이가 나는

***Table* 4.** The ratio of gas volumes according to types and concentration of the electrolyte

Time: 30 min, *: 20 min Applied voltage: 10V

Type and concentration of electrolyte	NaOH 0.2M	NaOH 0.5M*	NaOH 1M*
Cathode	6.6	6.5	12.4
Anode	1.7	1.9	4.4
Cathode/Anode ratio	3.9	3.4	2.8
Type and concentration of electrolyte	Na_2SO_4 0.2M	Na_2SO_4 0.5M	Na_2SO_4 1.0M
Cathode	4.5	9.8	12.6
Anode	0.3	0.9	1.7
Cathode/Anode ratio	15.0	11.0	7.4
Type and concentration of electrolyte	KNO_3 0.2M	KNO_3 0.5M	KNO_3 1.0M
Cathode	0.4	0.5	0.7
Anode	0.1	0.9	3.1
Cathode/Anode ratio	4.0	0.6	0.2

현상을 설명하기는 어렵다. 즉, 이 추론은 증거에 기초한 논증에서 선택될 가능성이 적다.

관찰 사실이 모델과 맞지 않는다면 모델의 수정을 제안해 볼 수 있다. 예를 들면, (-)극에서 포집된 기체가 순수한 수소가 아니고, (+)극에서 포집된 기체가 순수한 산소가 아니라는 것이다. 즉, 기체 생성물이 순물질이 아니라 혼합물이라고 가정할 수도 있다. 수용액의 전기 분해 실험에서 전기 분해에 참여하는 물질이 물이라는 가정을 버리고 만약 전해질도 참여한다면, 생성된 기체가 순물질이 아닐 가능성도 있다. 이 때문에 전해질은 가능한 한 소량 넣도록 제안하고 있지만, 전해질로부터 생성된 물질이 물과 이차반응을 통해 지속적으로 다른 기체를 생성한다면 기체의 비율은 2:1이 되지 않을 수 있다. 그렇다고 이러한 문제를 해결하기 위해 전해질을 넣지 않는다면 전기 분해 자체가 일어나지 않는다.

수용액의 전기 분해에서 전해질이 실제 관여하는지 알아보기 위해 전해질의 종류에 따라 (+) 극과 (-) 극에서 발생하는 기체의 부피비가 다른지 검증해 보는 실험을 수행할 수 있다. 연구자들이 실제 실험한 결과를 *Table* 4에 제시하였다. 이 실험은 호프만식 전기 분해 장치와 탄소 전극을 사용하였으며 0.2M, 0.5M, 1.0M NaOH 수용액, Na_2SO_4 수용액, KNO_3 수용액에 10V의 전압을 가하며 각 전극에서 발생한 기체의 부피를 측정하였다. 발생한 기체의 부피는 수용액의 메니스커스를 유리관의 눈금 0에 맞추고 수용액의 수위 변화를 통해 측정하였다. 대부분의 수용액에서는 기체의 부피를 30분 후 측정하였으며, 0.5M, 1.0M NaOH 수용액의 경우 기체의 발생 속도가 빨라 20분 후에 기체의 부피를 측정하였다. 실험은 2회 반복하였으며 평균값을 *Table* 4에 제시하였다.

***Figure* 19.** Electrolysis of KNO_3 electrolyte solution with different concentration in SSC apparatus (The red arrow is the (+) pole, the blue arrow is the (-) pole).

호프만식 전기 분해 장치의 문제 때문에 기체의 부피 측정에 오차가 발생할 수 있으므로, SSC 실험 장치로 KNO_3 수용액에 9V를 가한 실험(*Fig.* 19)도 수행하였으나, 이 실험에서도 산소의 부피가 수소의 부피보다 5배~10배 정도 더 많이 나오는 것을 확인하였다.

Table 4와 *Fig.* 19에 제시한 실험결과에 따르면, 전해질의 종류와 농도에 따라 동일한 전압을 걸어주어도 발생하는 기체의 양이 매우 달라진다. 이러한 ‘자연 현상’을 설명하기 위해서는 표준 환원 전위를 고려한 물의 전기 분해 모델이나 *Fig.* 8과 같은 모델의 적용에 대한 세심한 주의가 필요하다. 전기 화학의 발달로 형성된 다양한 모델들이 *Fig.* 5처럼 자연 현상의 특정한 부분은 잘 설명해 줄 수 있지만, 이러한 모델의 ‘이그노런스’에 해당하는 부분이 바로 전기 분해에서 전해질의 역할일 것이다. 전해질의 농도를 매우 묽게 하면 물론 전해질의 존재를 무시하고 실험 결과를 해석할 수 있지만, 어느 정도 농도가 유지되지 않으면 물은 전기 분해 되지 않는다. 전해질 없이는 물의 전기 분해 현상이 나타나지 않고, 전해질의 농도가 진해지면 실험 결과로 측정한 기체의 부피비가 물만 순수하게 분해되는 값과 차이가 생기는 이러한 실험 현상을 이 연구에서 제안함으로써 앞으로 개발될 교과서에서 모델의 개발과 사용, 증거에 기초한 토론과 논증, 평가, 의사소통 등의 활동이 보다 활발하게 이루어지기를 기대해 보고자 한다.

결론 및 제언

실험의 가치는 모델의 적합성을 평가하는 과정을 통해 인식되어야 한다는 점에서 2015 개정 교육과정에서 새롭게 강조한 ‘모델의 개발과 사용’, ‘증거에 기초한 토론과 논증’, ‘평가’ 기능의 활동으로 매우 중요하다. 이 연구에서는 수용액의 전기 분해 실험을 통해 중등학교 화학 교과서에서 증명하고자 하는 모델이 학년에 따라 달라지며, 실제 실험 자료와 일치하지 않는 사례가 발생함을 제시하였다. 또한 이 연구에서는 2015 개정 교육과정에서 개발한 중등학교 화학 교과서를 2009 개정 교육과정에서 개발된 교과서와 비교함으로써 교육과정의 변화가 교과서에 제대로 반영되었는지에 대해서도 분석하였다. 그러나 수용액의 전기 분해에 관련된 교과서 내용에 국한하여 보았을 때에는 큰 변화가 없었으므로, 이 연구에서는 2015 개정 교육과정에서 강조하는 모델과 관련된 ‘기능’을 수행할 수 있도록 교과서의 내용이 재구성될 필요성을 제안하

였다. 오히려 다양한 자연 현상이 관찰될 수 있는 여러 종류의 전해질을 2009 개정 교육과정의 교과서에서는 제시하였으나, 2015 개정 교육과정에서는 한 가지 전해질로 통일함으로써 다양한 모델의 개발과 사용, 증거에 기초한 토론과 논증 등 “기능”의 측면에서 보았을 때 오히려 활동을 크게 제한하는 것으로 나타났다.

이전의 교육과정에서는 모델에 대한 부분이 크게 강조되지 않았기 때문에 교과서에서 제시하는 단일 모델에 잘 맞는 실험내용의 구성을 문제점으로 지적하기는 어렵지만, 2015 개정 교육과정에 기반을 두어 개발된 교과서의 내용은 이전 교육과정에 기반을 둔 교과서의 내용과 차별화 되어야 교육과정 개정에 따른 교육의 변화를 기대할 수 있을 것이다. 순수한 물은 전기 분해가 되지 않기 때문에 물의 전기 분해를 위해서는 전해질이 반드시 필요하며, 전해질 수용액은 수많은 물 분자와 전해질을 포함하고 있는 복잡계이므로, 교과서에서 가정하는 단일 모델로 실험 결과를 설명하는 데에는 한계가 있다. 그러나 대부분의 교과서에서는 동일한 실험이지만 학년에 따라 다른 모델을 사용하면서 모델의 다양성에 대한 시각은 제시하지 않았으며, 실험 결과를 해석함으로써 2009 개정 교육과정의 교과서와 큰 차이가 없는 검증 실험으로 구성되었다. 이는 실험 결과로부터 가정한 모델을 ‘사실’로 받아들이는 활동이다. 이러한 실험 활동은 실험 자료가 모델과 맞지 않을 때, 실험 자료를 버리는 결과를 초래할 수 있다. 실험과 모델 사이의 과학적 본성에 대한 인식의 부재는 교사와 학생들이 실험을 기피하고 이론과 모델 중심의 문제풀이 수업을 중요시하게 하는 원인으로 작용할 것이다.

과학 모델들을 ‘사실’로 받아들이게 되면, 학생들은 모델을 개발하는 창의적인 과학 활동을 할 수 없게 된다. 특히 이공계로 진학하기 위하여 고등학교에서 화학 I 이나 화학 II 교과목을 선택하는 학생들에게 모델의 개발과 사용, 증거에 기초한 토론과 논증 등의 능력을 길러주기 위해서는 다양한 모델을 개발하고 이용할 수 있는 활동이 포함되어야 한다. 이를 위하여 다양한 종류의 전해질을 넣고 수용액의 전기 분해 실험 결과를 얻은 후에 교과서에서 제시하는 모델에 대한 토론과 평가가 이루어지는 활동이 포함될 필요가 있다. 또한 교과서에서는 한 가지 모델만을 제시하지 말고, 가능한 한 다양한 모델을 제시함으로써 모델들의 장단점을 이해하는 과정을 통해 모델의 사용과 증거에 기초한 토론, 논증 및 모델에 대한 평가 기능을 경험해 보도록 안내할 필요가 있다.

2015 개정 교육과정에서 강조한 이러한 모델의 기능들은 이 연구에서 분석한 수용액 전기 분해 실험에서는 다루지 않았으나 다른 내용에서 포함되어 있을 가능성이 있어 이 연구 결과를 일반화 하는 것에는 제한이 따른다. 또한 만약 교사들이 수업의 목표로 수용액의 전기 분해 실험을 통해 물이 수소 2 : 산소 1의 부피로 결합했다는 것을 증명하고자 한다면, 물의 전기 분해 실험 장치로 백금 전극을 사용하고, 전해질은 농도에 관계없이 NaOH 수용액을 사용하는 것이 적절하다. 이러한 조건에서 벗어난다면, 예상과 다른 다양한 실험 결과를 얻게 될 것이다.

화학 교과서에서는 복잡한 자연 현상을 단순화된 설명으로 제시함으로써 학생들의 사고에 부담을 덜고자 하는 시도를 한다. 그러나 실험 결과는 실험 기구와 실험 조건 등에 따라 다를 수 있다. 따라서 교과서가 단일한 설명을 시도한다면 실험의 실제 의미와 가치를 학생들이 이해하는데 장애가 된다. 그러나 이러한 장애야말로, 진정으로 새로운 모델을 개발해 볼 수 있는 기회를 학생들에게 제공해 줄 수 있다는 것을 이해하고, 교과서 내용과 실험 결과에 대한 논의에 변화가 따라야 한다. 이것이 새롭게 바뀐 2015 개정 교육과정의 취지를 제대로 이해하고 적용하는 방향이라고 본다.

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

REFERENCES

1. NGSS Lead States. *Next Generation Science Standards: For States, By States*; The National Academies Press: Washington, DC: 2013; Available at http://www.nextgen-science.org/
2. Jeong, J.-H.; Kang, N.-H. *New Physics: Sae Mulli* **2016**, *66*(6), 705.
3. Ministry of Education. *National Science Curriculum.* No. 2015-74. Sejong: Ministry of Education. 2015.
4. Kang, N.-H. *Journal of the Korean Association for Science Education* **2017**, *37*(1), 143.
5. Gobert, J. D.; Buckley, B. C. *International Journal of Science Education* **2000**, *22*(9), 891.
6. Chamizo, J. A. *Science and Education* **2013**, *22*(7), 1613.
7. Oh, P. S. *Journal of the Korean Association for Science Education* **2007**, *27*(7), 645.
8. Oh, P. S.; Oh, S. J. *International Journal of Science Education* **2011**, *33*(8), 1109.
9. Cha, J. H.; Kim, Y. H.; Noh, T. H. *Journal of the Korean Chemical Society* **2004**, *48*(6), 638.
10. Ha, J. H.; Lee, H. J.; Kang, S. J. *Journal of Gifted/Talented Education* **2009**, *19*(1), 187.
11. Chi, M. T. H.; Feltovich, P. J.; Glaser, R. *Cognitive Science* **1981**, *5*(2), 121.
12. Gilbert, J. K. Visualization: an emergent field of practice and enquiry in science education. In *Visualization: Theory and Practice in Science Education*; Gilbert, J. K., Reiner, M., Nakhleh, M., Eds.; Kluwer Academic: Dordrecht, The

Netherlands, 2008.
13. Gilbert, J. K.; Boulter, C. J.; Rutherford, M. *International Journal of Science Education* **1998**, *20*(1), 83.
14. Halloun, I. A. *Journal of Research in Science Teaching* **1996**, *33*(9), 1019.
15. Hestenes, D. *American Journal of Physics* **1987**, *55*(5), 440.
16. Treagust, D. F.; Chittelborough, G. D.; Mamiala, T. L. *International Journal of Science Education* **2002**, *24*(4), 357.
17. Magnani, L.; Casadio, C. M. *Model-based Reasoning in Science and Technology*; Springer: NY. 2016.
18. Ruppert, J.; Duncan, R. G.; Chinn, C. A. *Research in Science Education* **2019**, *49*(3), 921.
19. Zangori, L.; Peel, A.; Kinslow, A.; Friedrichsen, P.; Sadler, T. D. *Journal of Research in Science Teaching* **2017**, *54*(10), 1249.
20. Giere, R. N. *Understanding Scientific Reasoning*, 3rd ed., Harcourt Brace Jovanovich: NY. 1991.
21. Han, Y. H. Development of Classroom Inquiry Model to Improve Scientific Communication Ability. Ph.D. Thesis, Korea National University of Education, 2012.
22. Millar, R.; Osborn, J. Beyond. Science Education for the Future; King college: London, 1998.
23. Osborne, J.; Erduran, S.; Simon, S. *Journal of Research in Science Teaching* **2004**, *41*(10), 994.
24. Han, Y. H.; Lee, M. S.; Paik, S. H. *Journal of the Korean Association for Science Education* **2007**, *27*(1), 50.
25. Kwak, Y. S. *Journal of the Korean Association for Science Education* **2004**, *24*(5), 1028.
26. Song, J. W.; Na, J. Y. *School Science Journal* **2015**, *9*(2), 72.
27. Nott, M.; Smith, R. *International Journal of Science Education* **1995**, *17*(3), 399.
28. Nott, M.; Wellington, J. *J. School Science Review* **1996**, *76*, 41.
29. White, R. T. *International Journal of Science Education* **1996**, *18*(7), 761.
30. Watson, J. R.; Swain, J. R. L.; McRobbie, C. *International Journal of Science Education* **2004**, *26*(1), 25.
31. Chang, H. S. *Science Meets Philosophy*; EBS Media: Seoul, 2014.
32. Salis, F.; Frigg, R. Capturing the scientific imagination. In *The Scientific Imagination*; Godfrey-Smith, P.; Levy, A., Eds., Oxford University Press: NY, 2017.
33. Gilbert, J. K. Visualization: an emergent field of practice and enquiry in science education. In *Visualization: Theory and Practice in Science Education*; Gilbert, J. K.; Reiner, M.; Nakhleh, M., Eds., Kluwer Academic: Dordrecht, The Netherlands, 2008.
34. Morrison, M.; Morgan, M. S. Models as mediating instruments. In *Models as Mediators*; Morrison, M.; Morgan, M. S., Eds., Cambridge University Press: Cambridge, 1999.
35. Rouse, W. B.; Morris, N. M. *Psychological Bulletin* **1986**, *100*(3), 349.
36. Chang, H. S. Is Water H_2O?: Evidence, Realism and Pluralism; Springer Science & Business Media: London, 2012.
37. Mislevy, R. J.; Haertel, G.; Riconscente, M.; Rutstein, D. W.; Ziker, C. Design Patterns for Model-Based Reasoning. In *Assessing Model-Based Reasoning using Evidence-Centered Design*; Springer: London, 2017.
38. Lehrer, R.; Schauble, L. *Journal of Applied Developmental Psychology* **2000**, *21*(1), 39.
39. Kim S. K.; Park, C. Y.; Choi, H.; Paik, S. H. *Journal of the Korean Chemical Society* **2018**, *62*(3), 226.
40. Park, J. S.; Youn, Y.; Jung, J. O.; Cho, E. M.; Ryu, S. K. *Chemistry I*; Kyohaksa: Seoul, 2011.
41. Ryu, H. I.; Kim, C. S.; Lee, G. P.; Lee, J. B.; Bak, S. B.; Kang, S. G.; Kim, Y. Y.; Lee, H. G. *Chemistry I*; Visang Press: Seoul, 2011.
42. Noh, T. H.; Choi, S. S.; Kang, S. J.; Lee, S. Y.; Bae, B. I.; Go, S. Y.; Ju, Y.; Choi, S. Y. *Chemistry I*; Chunjae Press: Seoul, 2011.
43. Kim, H. J.; Kim, H. S.; Lee, B. K.; Lee, S. M.; Lee, Y. S.; Lee, J. H.; Lee, J. S.; Lee, H. N.; Cho, H. S. *Chemistry I*; Sangsang Academy Press: Seoul, 2011.
44. Park, J. S.; Youn, Y.; Jung, J. O.; Cho, E. M.; Ryu, S. K. *Chemistry II*; Kyohaksa: Seoul, 2012.
45. Ryu, H. I.; Kim, C. S.; Lee, G. P.; Lee, J. B.; Bak, S. B.; Kang, S. G.; Kim, Y. Y.; Lee, H. G. *Chemistry II*; Visang Press: Seoul, 2012.
46. Noh, T. H.; Choi, S. S.; Kang, S. J.; Lee, S. Y.; Bae, B. I.; Go, S. Y.; Ju, Y.; Choi, S. Y. *Chemistry II*; Chunjae Press: Seoul, 2012.
47. Kim, H. J.; Kim, H. S.; Lee, B. K.; Lee, S. M.; Lee, Y. S.; Lee, J. H.; Lee, J. S.; Lee, H. N.; Cho, H. S. *Chemistry II*; Sangsang Academy Press: Seoul, 2012.
48. Hwang, S. Y.; Jeon, H. Y.; Lee, S. H.; Noh, D. G. *Chemistry I*; Donga Publisher: Seoul, 2018.
49. Choi, M. H.; Seo, I. H.; Han, M. J.; Jeong, D. Y.; Kim, H. K.; Choi, G. S. *Chemistry I*; Mirea-n: Seoul, 2018.
50. Park, J. S.; Park, J. H.; Kang, S. H.; Ryu, S. K.; Sin, D. H.; Lee, S. Y.; Cho, S. Y.; Cho, H. S. *Chemistry I*; Visang Press: Seoul, 2018.
51. Hong, H. K.; Jeon, H. G.; Lee, B. K.; Kim, M. S.; Seok, D. J.; Sin, I. J.; Kim, H. S. *Chemistry I*; Kyohaksa: Seoul, 2018.
52. Ha, Y. K.; Jeon, S. C.; Bae, B. I.; Noh, K. J.; Kang, S. H.; Kim, J. O. *Chemistry I*; Kumsung Publisher: Seoul, 2018.
53. Jang, N. H.; Kang, S. J.; Park, J. B.; Lee, H. I.; Kim, H. C.; Bae, S. W.; Oh, C. J.; Og, J. S.; Lee, J. M.; Lee, H. N. *Chemistry I*; Sangsang Academy Press: Seoul, 2018.
54. Lee, S. G.; Kim, Y. Y.; Lee, J. B.; Kim, H. J.; Kang, S. G.; Park, B. K.; Kim, S. H.; Park, H. J. *Chemistry I*; Jihaksa: Seoul, 2018.
55. Roh, T. H.; Kang, S. J.; Ju, Y.; Go, S. Y.; Kim, Y. H.; Choi, S. Y.; Yang, C. H. *Chemistry I*; Seoul: Chunjea: Seoul, 2018.
56. Choi, M. H.; Seo, I. H.; Han, M. J.; Jeong, D. Y.; Kim, H. K.; Choi, G. S. *Chemistry II*; Mirea-n: Seoul, 2019.

57. Park, J. S.; Park, J. H.; Kang, S. H.; Ryu, S. K.; Sin, D. H.; Lee, S. Y.; Cho, S. Y.; Cho, H. S. *Chemistry II*; Visang Press: Seoul, 2019.
58. Hong, H. K.; Jeon, H. G.; Lee, B. K.; Kim, M. S.; Seok, D. J. Sin, I. J.; Kim, H. S. *Chemistry II*; Kyohaksa: Seoul, 2019.
59. Jang, N. H.; Kang, S. J.; Park, J. B.; Lee, H. I.; Kim, H. C.; Bae, S. W.; Oh, C. J.; Og, J. S.; Lee, J. M.; Lee, H. N. *Chemistry II*; Sangsang Academy Press: Seoul, 2019.
60. Lee, S. G.; Kim, Y. Y.; Lee, J. B.; Kim, H. J.; Kang, S. G.; Park, B. K.; Kim, S. H.; Park, H. J. *Chemistry II*; Jihaksa: Seoul, 2019.
61. Roh, T. H.; Kang, S. J.; Ju, Y.; Go, S. Y.; Kim, Y. H.; Choi, S. Y.; Yang, C. H. *Chemistry II*; Chunjea: Seoul, 2019.
62. Park, H. S.; Jeong, D. Y.; Shin, H. S.; Kim, J. H.; Hur, S. I.; Cho, S. Y.; You, S. N.; Lee, H. W.; Kim, J. Y.; Lee, S. J.; Choi, B. S.; Kang, S. C.; Oh, S. W. *Science 2*; Kyohaksa: Seoul, 2013.
63. Lee, S. M.; Chae, K. P.; Nam, K. W.; Noh, T. H.; Seo, I. H.; Kang, S. J.; Kim, Y. S.; Kum, J. H.; Moon, K. W.; Lee, M. W.; Kwon, S. M.; Son, Y. W. *Science 2*; Kumsung Publisher: Seoul, 2013.
64. Lee, J. S.; Kim, S. H.; Kim, H. R.; Kim, H. S.; Park, K. T.; Park, M. S.; Park, S. Y.; Park, Y. O.; Bae, M. J.; Song, S. J.; Lee, S. Y.; Lim, H.; Jung, D. H.; Hong, J. Y. *Science 2*; Dusan Donga: Seoul, 2013.
65. Lee, K. S.; Kim, S. J.; Kim, T. I.; An, H. S.; Choi, M. H.; Kim, H. S.; Kim, H. K.; Cho, K. S.; Oh, H. S.; Bae, M. J.; Lee, J. W.; Ryu, H. K.; Choi, G. S. *Science 2*; Mirea-n: Seoul, 2013.
66. Im, T. H.; No, S. H.; Paik, J. M.; Lee, B. Y.; Kang, D. H.; Jang, H. S.; Kim, J. S.; Lee, Y. C.; Whang, I. S.; Ko, H. D.; Sin, M. Y. *Science 2*; Visang: Seoul, 2013.
67. Hyun, J. O.; Kim, H. S.; Yoon, H. K.; Kang, T. W.; Choi, W. S.; Han, I. O.; Park, M. Y.; Kim, K. S.; Ji, J. H.; Cho, H. S.; Kim, B. I.; Kim, M. K.; Son, Y. A.; Lee, T. Y. *Science 2*; Sinsago: Seoul, 2013.
68. Lee, S. I.; Kim, Y. H.; Nam, K. S.; Hwang, S. Y.; Kim, Y. K.; Kwon, O. S.; Kim, K. T.; No, D. G.; Park, R. W.; Shin, S. J.; Paik, S. Y.; Yeo, J. Y.; Cho, B. J.; Jeon, B. H.; Kim, C. W. *Science 2*; Jihaksa: Seoul, 2013.
69. Sin, Y. J.; Jin, M. S.; Han, M. J.; Lee, G. Y.; Jung, E. Y.; Kang, J. C.; Kang, S. J.; Shon, J. W.; Bae, Y. H.; Lee, B. W.; Im, H. Y.; Ha, E. S. *Science 2*; Chunjea: Seoul, 2013.
70. Kim, H. R.; Kim, S. H.;, Kim, M. S.; Lee, J. S.; Hwang, S. Y,; Lee, S. H.; Noh, D. G.; Lim, H.; Bae, M. J.; Lee, T. W.; Gwon, O. S.; Park, K. T.; Song, S. J. *Science 2*; Donga: Seoul, 2019.
71. Ahn, H. S,; Cho, Y. G.; Choi, M. H.; Kim, H. S.; Jang, C. H.; Kim, H. K.; Gwon, H. S.; Oh, H. S.; Cu, H. M.; Kang, H. J.; Kim, D. J.; Lee, J. W.; Ryu, H. K.; Moon, M. H.; Lee, Y. J.; Yu, M, I. *Science 2*; Mirea-n: Seoul, 2019.
72. Im, T. H. ; Paik, J. M,; Nam, G. U.; Kang, T. W.; Kang, D. H,; Lee, B. Y.; Jang, H. S.; Kim, M. G.; Whang, I. S.; Lee, Y. C.; Ko, H. D.; Sin, M. Y. Science 2; Visang: Seoul, 2019.
73. Roh, T. H.; Lee, B. W.; Kim, S. K.; Jang, S. J.; Lim, H. Y.; Yang, C. H.; Park, J. G.; Min, J. S.; Bae, Y. H., Oh, P. S.; Kim, Y. G.; Park, C. Y. *Science 2*; Chunjea: Seoul, 2019.
74. Pauling, L.; Pauling, P. *Chemistry*; W. H. Freeman and Co.: San Francisco, 1975.
75. Oxtoby, D.; Gillis, H.; Campion, A. *Principles of Modern Chemistry*, 7th ed.; Cengage Learning: NY, 2012.
76. http://dongascience.donga.com/news.php?idx=26653.
77. https://www.scienceall.com/.