

2009 개정교육과정의 화학교과서에 제시된 Brønsted-Lowry 모델에 관한 설명과 예시의 문제점 분석

최 희 · 박철용 · 김성기 · 백성혜*

봉명고등학교

공주사대부설고등학교

광주과학고등학교

한국교원대학교 화학교육과

(접수 2018. 2. 21; 게재확정 2018. 5. 8)

Analysis of Explanations and Examples of the Brønsted-Lowry Model Presented in Chemistry Textbooks Developed by 2009 Revised Curriculum

Hee Choi, Chul-Yong Park, Sungki Kim, and Seoung-Hey Paik*

Bongmyung High School, Cheongju 28462, Korea.

Kongju National University High School, Gongju 32550, Korea.

Gwangju Science Academy For the Gifted, Gwangju 61005, Korea.

Department of Chemistry Education, Korea National University of Education, Chungju 28173, Korea.

*E-mail: shpaik@knue.ac.kr

(Received February 21, 2018; Accepted May 8, 2018)

요 약. 이 연구에서는 2009 개정교육과정에서 Brønsted-Lowry 모델을 다루는 화학 I과 화학 II 교과서를 대상으로 교과서의 설명과 예시를 분석하였다. 특히 Brønsted-Lowry 모델의 정의와 사례의 제시, 실험 내용 등에서 화학평형이라는 과정적 관점과 비순차적 과정을 제시하고 있는 지에 대해 분석하였다. 분석 대상 교과서는 현재 사용되고 있는 2009 개정교육과정의 화학 I 교과서 4종과 화학 II 교과서 4종이었다. 연구 결과, 화학 I 교과서에서는 Brønsted-Lowry 모델을 설명할 때 화학평형의 관점이 충분히 제시되지 않았으며, 이는 교육과정 개정이 되면서 2009 개정교육과정에서 발생한 문제로 나타났다. 화학 II 교과서에서는 약산과 강염기의 반응과 같은 사례에서 Brønsted-Lowry 모델을 적용하기 보다는 Arrhenius 모델의 순차적 관점으로 묘사하였다. 또한 화학 II 교과서의 Brønsted-Lowry 모델을 증명하기 위한 실험의 예시도 매우 부족하였다. 산-염기 정의에 관련된 실험 예시는 지시약의 색변화로 분류하는 수준이었으며, 산의 세기를 설명하기 위한 실험 예시는 전류의 세기 비교나 금속과의 반응에서 발생하는 수소기체의 발생 정도를 비교하는 것이었다. 또한 모든 교과서에서는 Brønsted-Lowry 모델을 설명할 때 수용액 상태를 제시하여 Arrhenius 모델과 차별화되지 못하는 문제가 있었다. 따라서 비수용액 상태의 산과 염기를 제시함으로써 Brønsted-Lowry 모델에 대한 학생들의 이해를 돕기 위한 실험의 예시에 대한 개발이 필요하다.

주제어: 화학교과서, Brønsted-Lowry 모델, 과정적 관점, 비순차적 과정

ABSTRACT. In this study, we analyzed the explanations and examples of Brønsted-Lowry model in Chemistry I and Chemistry II textbooks of the 2009 revised curriculum. In particular, the definition of the Brønsted-Lowry model, the examples, and the content of experiments were analyzed by the process perspective of chemical equilibrium, emergent process. The analyzed textbooks were 4 kinds of Chemistry I textbooks and 4 kinds of Chemistry II textbooks in 2009 revision curriculum. As a result, Chemical I textbooks did not adequately show the chemical equilibrium viewpoint when explaining the Brønsted-Lowry model. In the Chemistry II textbooks, the examples of Brønsted-Lowry model were not present emergent process viewpoint, and those were described as sequential viewpoint of Arrhenius model. In addition, examples of experiments to demonstrate the Brønsted-Lowry model of Chemistry II textbooks were insufficient. The experimental examples related to the definition of acid bases were at the level of classification by the color change of indicators. The experimental examples for explaining the strength of acid and base were to compare current intensity or amount of hydrogen gas generated from the reaction with metal. In addition, all textbooks presented the state of aqueous solution when describing the Brønsted-Lowry model, causing problems with differentiation from the Arrhenius model. Therefore, it is necessary to develop examples of experiments to help students understand Brønsted-Lowry model by presenting acid and base reaction in the non-aqueous solution state.

Key words: Chemistry textbook, Brønsted-Lowry model, Process viewpoint, Emergent process

서 론

산-염기 개념은 전 세계의 화학교육과정에서 다루어지고 있으며, 우리나라에서도 여러 번의 교육과정 개편에서도 빠지지 않고 포함되었다. 학생들은 저학년에서는 지시약을 이용한 산-염기 용액의 다양한 현상을 관찰하고 학년이 올라감에 따라 점차 여러 가지 산-염기 모델을 통해 개념의 밀도를 높여간다.¹ 그러나 전 세계의 많은 학생들이 초등 학교부터 고등학교, 그리고 이공계 대학교까지 산-염기 개념을 학습하기 위해 오랜 시간을 소요하는데, 이렇게 오랜 시간의 학습에도 불구하고 학생들의 산-염기 개념에 대한 이해에 어려움을 밝힌 선행연구들이 많다.¹⁻¹³

그 중에서도 중등학교에서 산-염기 개념을 다루는 가장 마지막 학년에 제시되는 산-염기 모델은 Brønsted-Lowry 모델인데, 이 모델은 학생들이 학습에 가장 어려움을 겪는 모델임과 동시에, 학습 중요도가 매우 높은 모델이다. 왜냐하면 산-염기 반응을 화학평형 맥락에서 설명하기 때문이다.¹⁴ Arrhenius 모델이 산은 수용액에서 수소이온으로 해리하는 물질로 정의하고 염기는 수용액에서 수산화이온을 제공하는 물질로 정의하면서 산과 염기의 개념을 각각 분리하여 정의한다. 그러나 Brønsted-Lowry 모델은 양성자를 주고받는 연속적인 반응 안에서 산과 염기를 상대적으로 구분함으로써 가역적인 사고와 화학 평형이라는 주요 개념을 통합하고 있다. 이로 인해 산-염기 반응은 단순히 물질의 성질 분류 수준을 넘어서서 산화-환원 반응과 마찬가지로 화학평형의 한 종류로 이해되면서 두 종류의 반응은 화학반응을 대표하는 반응으로 자리 잡았다.¹⁵ 화학평형은 어떤 물질이 왜 안정적인지, 또는 왜 반응하는지를 설명하는 개념으로 화학교과 전체를 관통하는 핵심 개념이다. 따라서 Brønsted-Lowry 모델의 가장 큰 의의는 수용액에 제한하여 물질의 고유한 특성에 초점을 둔 Arrhenius 모델의 설명 범위를 확장하였을 뿐 아니라, 이전의 다른 모델들과 달리 산-염기 반응을 가역적 화학평형 메커니즘으로 정의하였다는 점에 있다.¹⁶

그러나 Brønsted-Lowry 모델을 유난히도 학습하기 어려운 이유는 비단 요구하는 화학 개념의 난이도 때문만은 아니다. 특히 학년별로 산-염기 개념을 제시하면서 먼저 제시되는 Arrhenius 모델을 학습한 후에 고학년에서 Brønsted-Lowry 모델을 학습하게 되면 근본적인 산-염기 개념의 의미와 사고방식이 달라지는데, 학생들은 이를 인식하지 못하고 단순히 용어의 변화에만 초점을 두어 두 모델을 비교하면서 혼란이 유발되는 문제가 발생한다.¹⁷⁻²⁰

Brønsted-Lowry 모델은 산-염기의 분류나 산의 세기 구분기 상대적이라는 점에서 다른 산-염기 모델과 다르다.^{16,21-23} 즉, Arrhenius 모델에서는 산과 염기의 분류가 물질의 속

성으로서 반응 유무에 따라 변하지 않지만, Brønsted-Lowry 모델에서는 반응 물질에 따라 산과 염기의 분류가 변할 수 있다. 예를 들어, 아세트산(CH_3COOH)은 수용액에서 수소이온(H^+)을 내놓기 때문에 Arrhenius 모델에서는 산으로 분류된다. 그러나 Brønsted-Lowry 모델에서는 아세트산(CH_3COOH)과 물과 만나면 물(H_2O)에 수소이온(H^+)을 제공하므로 산이지만, 염산(HCl)을 만나면 수소이온(H^+)을 받으므로 염기로 분류된다. 또한, Arrhenius 모델에서는 강산과 약산으로 나누어진 산의 세기 분류가 절대적이지만, Brønsted-Lowry 모델에서는 산의 세기도 상대적이다. 예를 들어, 수용액이라는 전제 조건을 포함하는 Arrhenius 모델에서 아세트산(CH_3COOH)은 물에서 이온화를 작게 하기 때문에 약산으로 분류된다. 그러나 Brønsted-Lowry 모델은 수용액이라는 전제 조건을 포함하지 않으므로 아세트산(CH_3COOH)은 암모니아(NH_3) 용액에 존재하는 암모늄이온(NH_4^+)에 대해 강한 산으로 정의된다. 이와 같은 산-염기 모델의 관점 차이를 과학 개념의 존재론적 속성을 구분한 Chi 등²⁴의 연구에 근거하여 Arrhenius 모델은 물질적 관점(matter viewpoint)으로, Brønsted-Lowry 모델은 과정적 관점(process viewpoint)으로 구분하기도 한다.²²

과학 모델은 자연세계를 대상으로 과학자가 만들어낸 설명체계이며,²⁷⁻³⁰ 자연세계나 현상 자체에 대한 표상이라기보다는 자연세계나 현상에 대한 “아이디어”의 표상이다.³¹ 따라서 과학 모델에는 자연 현상을 바라보는 과학자의 관점이 반영되어 있으며, 과학 모델을 이해하는 것은 과학자의 관점을 이해하는 것에 직결된다. 그러나 지금까지 과학 교육에서는 다루는 모델의 관점에 대한 학습보다는 개개의 개념적 정의에 대한 학습에 집중되어 있었다. 이러한 점 때문에 많은 학생들이 Brønsted-Lowry 모델 학습 이후에도 여전히 Brønsted-Lowry 모델에 대한 과학자의 관점을 제대로 파악하지 못하고 단순히 양성자 주게 받게 라는 용어에 초점을 두어 모델의 이해에 어려움을 겪고 있는 것이다.²¹ 외국의 선행연구¹⁶⁻¹⁸에서도 교과서에서 모델들의 차이점을 명확하게 제시하지 않고 특히 Brønsted-Lowry 모델을 도입하는 이유를 기술하지 않아 혼란을 일으킨다는 문제점을 지적하였다.

교육의 기본적인 도구라고 할 수 있는 교과서의 진술방식은 학생의 개념 획득에 큰 영향을 미친다. 따라서 교과서 분석을 통해 Brønsted-Lowry 모델에 대한 설명에 화학평형에 관련된 과정적 관점과 비순차적 관점이 포함되어 있는지 분석하는 것은 중요하다. 이를 위해 본 연구는 Brønsted-Lowry 모델의 관점에 초점을 맞춰 화학 교과서를 분석하고, 현재의 Brønsted-Lowry 산-염기 모델의 설명 방식이 가지는 문제점을 파악하고자 하였다.

Table 1. Comparison of characteristics of sequential and emergent processes²⁶

Sequential Process	Emergent Process
The interaction(s) of a single agent or a subgroup of agents can (in)directly 'cause' the observable pattern	The interactions of the entire collection of all the agents together 'cause' the observable pattern
Some interaction(s) have a more controlling (or special) status than others	All the interactions have equal status
Agents' interactions and the pattern behave in a corresponding or aligned way	Agents' interactions and the pattern can behave in disjoint or non-matching ways
Some interactions are undertaken intentionally to achieve the global goal.	Interactions are undertaken by the agents with the intention of achieving local goals only without any intention of causing the in the pattern.
Additive chaining of a sequence of subevents	Collective summing of all interactions at each point in time

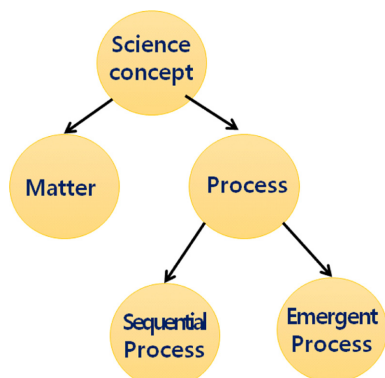
Table 2. Chemistry textbooks analyzed in this study

교과서	저자	출판사
화학 I & II	박종석 등. ^{32,33}	교학사
	류해일 등. ^{34,35}	비상교육
	김희준 등. ^{36,37}	상상아카데미
	노태희 등. ^{38,39}	천재교육

연구방법

분석대상

2015 개정교육과정에서 개발된 고등학교 화학 I과 II 교과서는 2018년 현재까지 고등학교에 적용되지 않고 있으며, 고등학교에서는 2009 개정 교육과정에 근거하여 개발된 교과서를 사용하고 있다. 따라서 이 연구에서는 2009 개정교육과정에서 Bronsted-Lowry 모델을 다루는 화학 I과 화학 II 교과서를 대상으로 분석하였다. 현재 학교 현장에서 사용되고 있는 2009 개정 화학 I 교과서는 4종이며, 화학 II 교과서는 4종으로 총 8종의 교과서를 대상으로 하였다. 화학 I 교과서의 경우에는 'IV. 닭은풀 화학 반응-산과 염기' 소단원에서 이 모델을 다루고 있으며, 화학 II 교과서에서는 'III. 화학 평형-산과 염기 평형' 소단원에서 이 모델을 다룬다. 따라서 이 두 소단원의 내용을 분석하였다. 분석 대상 교과서를 Table 2에 제시하였다.

**Figure 1.** Categories of science concepts.²⁴⁻²⁶

분석방법

본 연구는 Chi 등²⁶이 제안한 과학 개념의 존재론적 속성 범주를 분석틀로 활용하여 Bronsted-Lowry 모델에 대한 교과서 서술 방식을 분석하였다. Chi 등²⁶이 제안한 과학 개념의 존재론적 속성 범주는 크게 물질적 관점과 과정적 과정으로 구분되며, 과정적 관점은 Table 1과 같은 특징에 의해 다시 순차적 과정(Sequential process)과 비순차적 과정(Emergent process)으로 세분화되는데(Fig. 1),²⁵⁻²⁶ 화학에서 산-염기 평형을 포함한 화학평형 개념의 경우 비순차적 과정(Emergent process)에 해당한다.

비순차적 과정(Emergent Process) 범주의 개념은 다른 범주의 개념보다 학습이 매우 어려운 영역에 속한다. 왜냐하면 과정(Process) 범주의 개념들은 과정을 일으키는 동작의 주체가 물질이기 때문에 종종 물질(Matter) 범주로 잘못 분류되기 쉽고, 순차적 과정(Sequential Process) 범주의 개념들은 비순차적 과정(Emergent Process)과 지각적 유사성 때문에 비순차적 과정(Emergent Process) 범주로 오인되기 쉽기 때문이다.²⁶

산-염기 화학평형의 경우, 수많은 산과 염기 입자들의 무작위적인 상호작용의 결과이므로 비순차적 과정(Emergent Process)으로 이해되어야 한다. 그러나, 산-염기 반응의 주체인 산 또는 염기가 물질(Matter)이기 때문에 산-염기 반응마저도 종종 물질(Matter)처럼 생각되기 쉬우며, 산-염기 평형이 원자의 재배열이 일어나는 과정(Process)으로 이해되더라도 미시적인 입자들의 개별적 상호작용이 눈으로 관찰되지 않고 화학반응의 거시적 결과만 관찰되기 때문에, 염산(HCl)과 수산화나트륨(NaOH)이 만나면 마치 물(H₂O)를 생성하기 위한 목적을 가지고 일제히 한 방향으로 반응이 진행되는 것처럼 생각되어 순차적 과정(Sequential Process)으로 오인되기 쉽다.

이러한 관점에 근거하여 Bronsted-Lowry 모델의 정의와 사례의 제시, 실험 내용 등이 화학평형이라는 과정적 관점을 물질적 관점과 대조하여 제시하고 있는지, 또한 비순차적 과정의 특성을 반영하고 있는지를 중심으로 분

석하였다. 분석 대상인 교과서에서는 다루는 모델의 순서나 세부 내용에서 다소 차이가 있었으나, 모든 교과서에서 공통으로 다루고 있는 ‘산-염기의 정의’, ‘산의 세기’, ‘중화반응’의 내용을 선택하여 이와 관련된 화학식, 물질의 예시, 실험 내용 등을 분석하였다. 분석결과의 타당성을 확보하기 위해 과학교육 박사 1인과 현직교사 3인에 의해 교차검증을 하여 의견의 일치도를 높였다.

연구결과 및 논의

화학 I 교과서의 Brønsted-Lowry 모델 설명에서 화학평형 관점 제시의 부족

Brønsted-Lowry 모델의 핵심은 화학평형 및 가역반응에 대한 관점이다. 그러나 교육과정의 구성에 있어서 2009개정 교육과정에서는 Brønsted-Lowry 모델의 정의를 화학 I에 제시하고, 화학평형 개념은 화학 II에 제시함으로써 정의에서 화학평형 개념을 포함시키기 어렵게 되었다. 이는 2009 개정교육과정에서 발생한 문제로, 이전의 교육과정인 7차와 2007 개정교육과정에서는 화학평형과 Brønsted-Lowry 산-염기 모델은 모두 화학 II에 제시되어 있었으며, 화학평형부터 제시한 후에 Brønsted-Lowry 산-염기 정의를 제시하는 순서로 전개되어 있었다. 이를 정리하여 Table 3에 제시하였다.

7차에서 2009개정으로 이어지는 화학교육과정 변천을 살펴보면, 7차 교육과정과 2007 개정교육과정에서는 화학 II 교과서에서 “화학평형”과 “산-염기 반응”을 모두 한 교과서에서 다루고 있으며, 화학평형을 먼저 제시하고 Brønsted-Lowry 모델의 산-염기 반응을 다룸으로써 Brønsted-Lowry 모델의 관점을 형성할 수 있는 기본 개념이 선행되었다. 그러나 2009 개정교육과정에서는 “화학평형”을 배우는 화학 II 이전에, 화학 I 교과서에서 Arrhenius 모델의 산-염기 반응과 함께 Brønsted-Lowry 모델의 정의만 먼저 제시되고, 나중에 화학 II 교과서에서 “화학평형”을 다루면서 Brønsted-Lowry 모델의 “산-염기 평형”을 다룬다.

7차와 2007 개정교육과정까지는 화학평형을 학습하는 화학 II 교육과정 상에 “Brønsted-Lowry 모델”을 명시적으로 서술하였으나, 2009 개정교육과정에서는 화학 I과 화학 II 교육과정 상에 구체적인 모델의 명시가 사라지게 되었다.

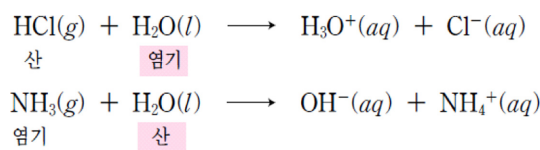


Figure 2. An example of the explanation related to Brønsted-Lowry Acid-Base definition in chemistry I textbook.³²

그러나 2009 개정교육과정에서 모델의 명시가 사라졌다고 해서 과학 모델의 중요성이 약화된 것은 아니다. 오히려 이전의 교육과정보다 과학적 탐구와 과학적 소양의 핵심으로서 모델의 중요성이 더욱 강조되고 있다.

그러나 이러한 강조에도 불구하고, 실제 교과서 서술에서는 Brønsted-Lowry 모델의 정의와 화학평형 개념이 화학 I과 화학 II에 걸쳐 분리가 되면서, 화학 I에서 Brønsted-Lowry 모델을 제시할 때 모델의 관점을 이해하기 위한 전제조건이 충분하지 못하여 다른 모델과의 차이를 학생들이 인식하지 못하도록 제시하는 것은 문제라고 할 수 있다. 화학 I 교과서에서는 Brønsted-Lowry 모델의 산-염기 반응의 사례를 제시할 때, Fig. 2와 같이 화학평형과 관련된 가역 개념이 사라지고 Arrhenius 모델과 같은 정반응의 형태로 제시하고 있다.

그러나 약산과 약염기와 같은 물질들은 Brønsted-Lowry 모델에 속하므로 정반응과 역반응을 동시에 표시하는 가역적 형태로 화학평형의 개념을 고려하는 것이 중요한 전제조건이지만, 이러한 명시가 사라진 것을 확인할 수 있다.

즉, Brønsted-Lowry 모델의 산-염기 개념에서는 반응물 뿐만 아니라 생성물도 양성자를 주고받으면서 짝산과 짝염기를 형성한다는 개념이 중요하지만,^{16,21} 2009 개정교육과정에서 Brønsted-Lowry 모델을 처음으로 제시하는 화학 I 교과서를 분석한 결과 4종의 화학 I 교과서 모두 Brønsted-Lowry 모델의 산-염기 반응의 사례를 Fig. 2와 같이 제시하였다.

따라서 화학 I 교과서는 Brønsted-Lowry 모델을 다루고 있으나, Brønsted-Lowry 모델의 산-염기 정의를 제대로 설명할 수 없으므로 화학평형의 관점을 도입하지 못한 형태로 이 모델을 제시하는 것이 타당한 것인 지에 대한 논의가 필요하다. 비록 화학 II 과정을 선택한 학생들은 Brønsted-Lowry 모델의 산-염기 정의를 화학평형 단원에서 다시 학

Table 3. Changes of chemistry curriculums related to chemical equilibrium and Brønsted-Lowry acid-base concepts⁴⁰⁻⁴²

Curriculum	7th	2007 revised	2009 revised
Chemistry I	-	-	IV. Similar chemical reaction Oxidation reaction Acid-base reaction
Chemistry II	III. Chemical reaction Law of chemical equilibrium, Acid-base, Neutralization titration	IV. Chemical equilibrium VI. Reaction of acid-base Brønsted-Lowry model, Ionization constant number, Quantitative relation of neutralization reaction, Hydrolysis of salt, Buffer solution	III. Chemical equilibrium Principle of equilibrium Movement of equilibrium: acid-base equilibrium

습할 기회를 가질 수 있으나, 화학 I 교육과정까지만 선택적으로 학습하는 대부분의 학생들은 제대로 Bronsted-Lowry 모델의 산-염기 정의를 배울 기회를 잃게 될 것이며, 화학 II 교육과정을 선택한 학생들 또한 화학 I 교육과정에서 잘 못 다룬 개념을 수정하는 과정에서 오히려 학습에 어려움을 가지게 될 가능성이 높다.²¹

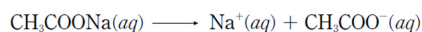
화학 II 교과서의 Bronsted-Lowry 모델 설명에서 비순차적 관점 제시의 부족

2009 개정교육과정의 경우 화학 I 교육과정에서는 화학 평형 개념을 도입하기 전이므로 화학반응을 비가역반응(→)인 정반응의 형태로 표기할 수밖에 없었다고 볼 수 있다. 그러나 화학평형의 개념이 도입된 화학 II 교과서에서는 가역반응(⇌)으로 제시하는 것이 중요하다. 이때 단순히 양성자를 상대적으로 주고받는 과정으로만 제시하면 수소 이온을 내놓는 물질적 관점인 Arrhenius 모델의 산의 개념과 Bronsted-Lowry 모델의 산 개념이 거의 동일시된다.²³ 이러한 문제는 Bronsted-Lowry 모델에서 핵심적인 비순차적 관점이 포함되지 못하였기 때문이다.

4종의 모든 화학 II 교과서에서는 강산과 약염기 또는 약산과 강염기의 반응 생성물이 중성이 아님을 설명하기 위해 ‘염의 가수분해’ 개념을 도입하여 설명하는데, 그 진술방식은 Fig. 3과 같다.

Fig. 3의 설명은 아세트산(CH₃COOH)과 수산화나트륨(NaOH)의 중화반응으로 아세트산나트륨(CH₃COONa)을 생성하고, 생성된 아세트산나트륨(CH₃COONa)이 일차적으로 해리된 후에 물과 반응하여 수산화이온(OH⁻)을 생성하면서 염기성을 나타내는 반응이 순차적(Sequential)인 방식으로 일어나는 것처럼 서술하고 있다. 그러나 실제 비커 안에서 이 반응들이 일어난다면 아세트산과 수산화나트륨, 물이 이미 존재하므로 생성된 아세트산 이온은 바로 물과 반응하여 다시 아세트산을 만들게 될 것이다. Fig. 3에 제시한 설명은 다음과 같은 화학반응식으로 표현할 수 있다.

약산과 강염기의 중화 반응으로 생성된 염의 수용액은 염기성을 나타낸다. 예를 들어 아세트산 나트륨(CH₃COONa)은 아세트산(CH₃COOH)과 수산화나트륨(NaOH)이 중화 반응하여 생성된 염이며, 수용액에서 다음과 같이 이온화한다.



이때 아세트산 이온(CH₃COO⁻)은 약산인 CH₃COOH의 짝염기이므로 H⁺과의 결합력이 상대적으로 강하다. 따라서 CH₃COO⁻의 일부가 다음과 같이 물과 반응하여 OH⁻을 내놓으므로 수용액은 염기성을 나타낸다.

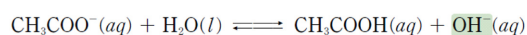
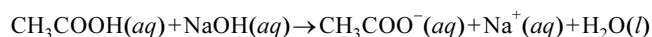
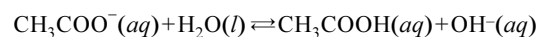


Figure 3. An explanation of weak acid-strong base neutralization reaction in Chemistry II textbook.³⁵



$$K_c = \frac{K_a}{K_w} = \frac{1}{K_b} \quad (a)$$



$$K_c = K_b \quad (b)$$

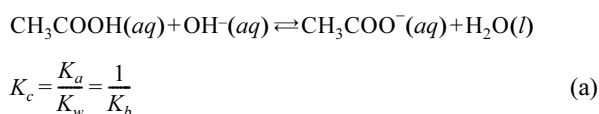
화학반응식 (a)에서 반응에 참여하지 않는 나트륨 이온(Na⁺)을 왼쪽 항과 오른쪽 항에서 모두 지우면, 화학반응식(a)의 왼쪽 항은 화학반응식 (b)의 오른쪽 항과 같고 화학반응식(a)의 오른쪽 항은 화학반응식 (b)의 왼쪽 항과 같게 된다. 즉, 화학반응식 (a)와 (b)의 평형상수는 서로 역수가 된다. 따라서 (a), (b) 두 화학반응식은 반응의 방향이 반대로 표시되었을 뿐이며 동일한 K에 의해 결정되는 반응이다. 즉, 아세트산(CH₃COOH)과 수산화이온(OH⁻), 그리고 아세트산이온(CH₃COO⁻)과 물(H₂O)의 4종류 화학종의 농도는 화학반응식 (a)에 의해서나 (b)에 의해서나 동일할 것이다.

이와 같이 동일한 반응계를 (a)와 (b)의 두 단계 반응으로 구분하고, (a)반응은 산-염기 중화반응으로, (b) 반응은 염의 가수분해 반응으로 나누어 순차적인 2단계 반응으로 진행된다고 설명하는 것은 Arrhenius 모델의 관점이다. Arrhenius 모델에서는 산과 염기가 만나 중화반응을 하면 물과 염이 생성된다, 그 후에 생성된 염이 물과 반응하는 반응을 Arrhenius 모델에서는 산-염기 반응으로 보지 않는다. Arrhenius 모델에서 물은 중성 물질이기 때문이다. 즉 Arrhenius 모델에서는 (a) 반응은 중화반응이며, (b) 반응은 중화반응이 아니라는 구분을 하는 것이다.

또한 Arrhenius 모델에서는 산-염기 중화반응을 H⁺(aq) + OH⁻(aq) → H₂O(l)와 같은 비가역 반응으로 정의하였기 때문에 화학반응식 (a)는 일방반응으로 표시되나, 염의 가수분해는 가역적 평형반응으로 정의하였기에 화학반응식 (b)는 평형반응으로 표시된다. 그러므로 동일한 반응계임에도 불구하고 매우 다른 두 반응이 분리되어 진행되는 것처럼 표현하는 것이다.

그러나 Bronsted-Lowry 모델에서는 모든 산-염기 반응을 가역적인 양성자(H⁺)의 이동으로 정의하였다. Bronsted-Lowry 모델은 산-염기 반응 안에서 상대적으로 산과 염기를 분류하므로, Arrhenius 모델에서는 단지 중화반응 생성물이었던 염과 물(H₂O)도 새로운 산과 염기로 분류되며, 따라서 화학반응식 (a)와 (b)는 모두 가역적으로 양성자(H⁺)가 이동하는 산-염기 반응에 해당된다. Bronsted-Lowry 모델의 염기 정의에 의하면 양성자(H⁺)를 받는 염기는 수산화나트륨(NaOH)이 아니라 수산화이온(OH⁻)이며,^{17,43} 수용액상태에서 수산화나트륨(NaOH)은 강염기이므로 완전히 이온화하여 존재한다. 따라서 아세트산(CH₃COOH)과

수산화나트륨(NaOH)의 산-염기 반응은 다음과 같이 화학 반응식(c) 하나로 표현될 수 있다.



즉, Brønsted-Lowry 모델의 관점에서는 더 이상 동일한 반응계를 2가지 다른 유형의 반응으로 나누어 설명하는 방식을 취하는 것이 타당하지 않다. 이러한 방식은 전형적으로 산과 염기의 반응을 통해 물과 염이 생성된다고 생각하는 Arrhenius 모델의 확장으로 볼 수 있기 때문이다. 또한 ‘염의 가수분해’는 산-염기 반응이 아니라는 사고도 유발한다. 실제 반응계에서 두 반응은 구분되지 않으며, 아세트산(CH₃COOH)과 수산화나트륨(NaOH)이 만나는 과정과 거의 동시에 그 역반응인 아세트산나트륨(CH₃COONa)과 물(H₂O)이 만나는 과정도 일어나게 된다. 그리고 이 두 반응은 가역 반응으로서 화학평형의 개념을 가져야 이해할 수 있는 Brønsted-Lowry 모델의 관점이다. 학생들에게 산-염기 반응을 Brønsted-Lowry 모델의 관점으로 제시하고자 한다면, 전통적인 Arrhenius 모델 설명 방식에서 벗어나 새로운 설명 방식을 취하는 것이 필요하다고 본다.

순차적 관점에서는 동작하는 개체는 사전에 결정되거나 제한된 다른 동작 개체와만 작용할 수 있으며, 서로 다른 방식으로 작용하는 개별 과정이 사슬처럼 순차적으로 일어난다. 반면에, 비순차적 관점에서는 모든 동작 개체는 어떤 임의의 동작 개체와도 상호작용 가능하며, 동일한 규칙을 따르는 일관된 개별 과정이 동시에 상호 작용한다. 또한, 순차적 관점에서 동작하는 개체의 상호 작용은 전체 패턴이 완료되면 종료되는데, 비순차적 관점에서 모든 동작 개체는 전체 패턴의 완료와 관계없이 지속적으로 상호

작용한다. 이와 같은 특징으로 볼 때, 교과서가 제시하는 약산과 강염기의 중화반응을 산-염기 중화반응(a)과 염의 가수분해(b)라는 순차적 2단계 과정으로 구분하고, 특히 산-염기 중화반응(a)을 물(H₂O)이 생성되면 종료되는 비가역적 일방반응으로 표현한 것은 순차적 관점이라고 볼 수 있다.

물론, 비순차적 관점이라고 할 수 있는 Brønsted-Lowry 모델은 정반응과 역반응, 화학평형 등을 동시에 고려하여야 하기 때문에 학생들에게 익숙하지 않으며, 어려운 관점일 수 있다. 그러나 실제적으로 화학반응은 수많은 종류의 입자들이 반응계의 모든 곳에서 동시다발적이고 비순차적으로 일어나며, 화학 II 교과서에서 약산과 강염기의 반응이 ‘화학평형’이라는 큰 틀 안에서 산-염기 평형으로 다루기 때문에 이 연구에서 제안하고자 하는 비순차적 관점은 “화학 II”를 학습하는 학생들이 꼭 획득해야 할 관점이라고 본다. 이 관점을 어떻게 학생들에게 가르칠 것인가의 문제는 아직도 존재하지만, 이 관점을 순차적으로 풀어서 Arrhenius 모델의 설명 방식으로 지속하는 것은 문제라고 본다.

화학 II 교과서의 Brønsted-Lowry 모델을 ‘증명’하기 위한 실험 예시의 부족

화학 II 교과서를 분석한 결과, 대부분의 교과서에서

Table 4. Use of experiments in Chemistry II textbooks

Textbook	for explain acid and base definition	for confirm the strength of acids
T1 ³³	○	○
T2 ³⁵	×	×
T3 ³⁷	×	○
T4 ³⁹	×	○

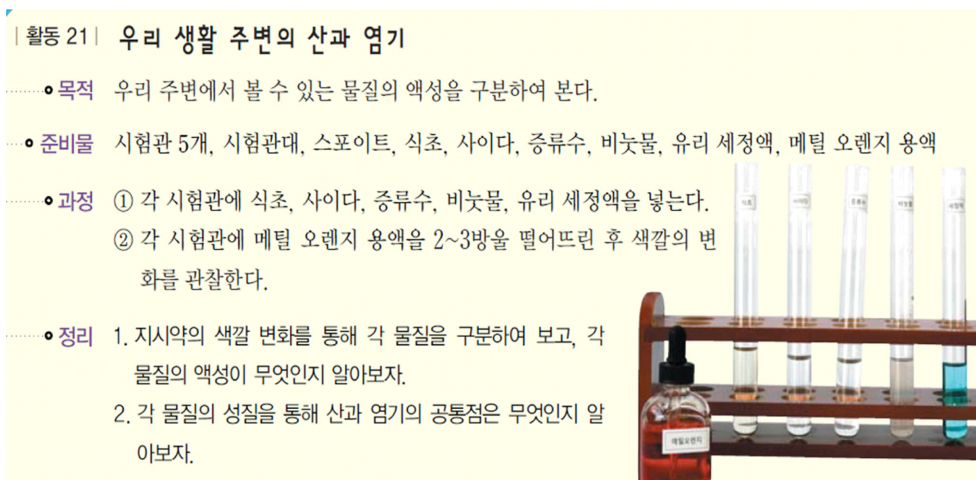


Figure 4. An experiment to explain acid and base definition in Chemistry II textbook.³³

Bronsted-Lowry 모델의 산-염기 정의나 산의 세기에 대한 개념을 도입하기 위해 실험을 제시하였다(Table 4).

4종의 화학 II 교과서 중 유일하게 1종의 교과서³³에서 산-염기 반응을 정의하기 위해 실험(Fig. 4)을 제시하였다.

이 실험은 지시약의 색 변화로 산과 염기를 구분하는 활동이다. 그러나 지시약의 색 변화로 산과 염기를 정의하는 것은 초등학교 5학년과 동일한 수준이며, 거시적 관점이나 분류적 관점 혹은 도구적 관점이라고 할 수 있다. 이온과 같은 미시적 개념을 활용하지 않고, 눈으로 확인할 수 있는 도구를 활용하여 물질을 분류하는 활동이기 때문이다. 지시약의 색은 용액의 절대적인 pH에 따라 변하는 것으로 “산성”과 “염기성”을 판단하는 도구이다. Arrhenius 모델에서는 “산성”과 “산”이 일치하고, “염기성”과 “염기”가 일치하기 때문에 지시약이 Arrhenius 모델의 산과 염기를 구분하는 도구가 될 수는 있다. 혹은 수용액에서 pH 미터기를 이용하여 수소이온의 농도를 측정하는 실험이라면, 이는 수소이온을 내놓는 물질로 산을 정의하고, 수산화이온(물속에서 수소이온과 곱하면 10⁻¹⁴의 관계를 가지는)을 내놓는 물질로 염기를 정의하는 Arrhenius 모델을 ‘증명’하기 위한 실험 예시라고 볼 수 있다.

그러나 Bronsted-Lowry 모델을 ‘증명’하기 위한 실험의 예시로는 적합하지 않다. Bronsted-Lowry 모델에서는 “산성”과 “산”이, “염기성”과 “염기”가 불일치하기 때문이다. Bronsted-Lowry 모델의 존재는 황산이나 염산, 질산과 같은 매우 강한 산의 pH를 수용액 상태에서 측정할 때 상대적 세기를 비교할 수 없지만, 물 대신 약산에서는 상대적인 세기를 비교할 수 있다는 것을 실험적으로 ‘확인’함으로써 증명할 수 있다. 그러나 이러한 실험은 고등학교 수준에서 다루기에는 어렵기 때문에 지금까지는 대학분석 화학 수준에서 다룬다. 따라서 고등학교에서는 Arrhenius 모델과 Bronsted-Lowry 모델을 모두 제시하지만 실험은 Arrhenius 모델에 해당하는 내용만 제시하면서 이러한 실험의 한계점에 대한 언급을 하지 않는 문제점이 있다.

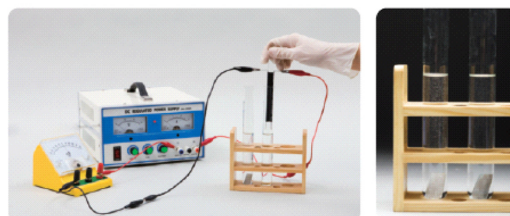
또한 산의 세기를 설명하기 위하여 실험을 도입한 화학

산의 세기 비교

염산과 아세트산 수용액으로 산의 세기를 비교해 보자.

과정

- 1 2개의 시험관에 1 M 염산과 1 M 아세트산 수용액을 각각 20 mL씩 넣는다.
- 2 두 시험관의 수용액에 각각 전극을 담가 전류의 세기를 측정한다.
- 3 두 시험관에 같은 크기의 아연 조각을 넣은 후, 기포의 발생 정도를 관찰하고 비교한다.



정리

- ① 두 용액에 흐르는 전류의 세기를 비교해 보자. 차이가 나는 이유는 무엇인가?
- ② 두 용액에 아연을 넣었을 때 기포의 발생 정도를 비교해 보자. 차이가 나는 이유는 무엇인가?

Figure 5. An experiment to confirm the strength of acids in Chemistry II textbook.³⁹

II 교과서는 4종 중 3종이었다. 산의 세기를 설명하기 위한 실험은 전기전도도성 및 금속과의 반응성을 비교하는 것이었다(Fig. 5).

Fig. 5의 실험에서 측정하고 있는 전류의 세기나 금속과의 반응에서 발생하는 수소기체(H₂)의 발생 정도는 수용액 속의 수소이온(H⁺)농도와 관련이 있다. 즉, 이 실험은 두 산의 농도가 통제되었을 때 이온화도(α)를 비교하는 실험이다. Fig. 5의 실험에서는 두 산의 세기가 각각 독립적으로 측정되며, 산의 세기가 서로에게 영향을 미치지 않으므로 강산과 약산이 절대적으로 구분된다. 이 실험에서 두 산의 세기를 비교하는 관점은 Fig. 6과 같으며, 이와 같이 이온화도(α)를 이용하여 강산과 약산을 구분하는 것은 Arrhenius 모델 관점의 산의 세기이다.

그러나, Bronsted-Lowry 모델의 관점에서는 하나의 산-염기 반응 안에서 이온화상수(K_a)를 이용하여 상대적인 산의 세기를 비교한다. 따라서 궁극적인 상대적인 산의

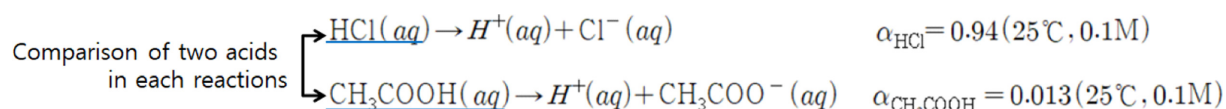


Figure 6. Comparison of absolute acid strength using ionization degree.

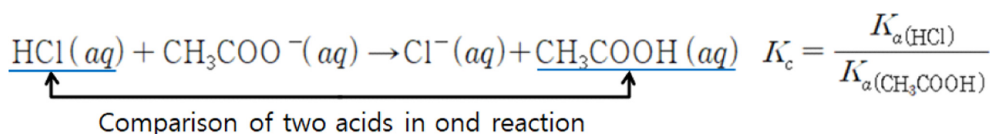


Figure 7. Comparison of relative acid strength using ionization constants.

K_a 와 K_b 는 다른 평형 상수와 마찬가지로 온도에 의존하며, 일정한 온도에서는 농도와 관계없이 항상 동일한 값을 나타낸다. K_a 와 K_b 는 각각 산과 염기의 세기를 나타내는 척도가 된다. 즉, K_a 값이 클수록 산 HA는 H_3O^+ 과 A^- 으로 많이 이온화되는 강산이며, K_b 값이 클수록 염기 B는 HB^+ 과 OH^- 으로 많이 이온화되는 강염기이다.

Figure 8. An explanation of acid strength using ionization constants in Chemistry II textbook.³⁹

세기 비교는 Fig. 7과 같이 되어야 한다.

화학 II 교과서에서도 이온화상수(K_a)가 클수록 강한 산이라는 설명을 하고 있으나, Fig. 8과 같은 설명은 Fig. 6의 관점의 연장선상에서 두 산을 각각 비교하는 것에 불과하다. 이온화상수(K_a)를 이용하여 상대적인 산의 세기를 비교할 수 있는 것은 단지 이온화상수(K_a) 값이 크면 이온화를 많이 하기 때문이 아니라, Fig. 7과 같은 산-염기 반응에서 두 산의 K_a 의 크기에 따라 평형이 어느 쪽으로 치우쳐지는지가 결정되기 때문이다. 비록 상대적인 두 산의 세기를 비교하는 실험이 고등학교 교육과정 수준에 어렵기 때문에 Fig. 5와 같은 실험을 이용하여 간접적으로 이온화상수(K_a)의 크기를 비교한다 할지라도, 이온화상수(K_a)의 크기 비교가 최종적으로는 Fig. 7의 관점에서 이루어져야 한다.

지시약의 색변화 또는 산과 금속의 반응으로 격렬한 기포 발생과 같은 실험은 산-염기 개념에 대한 학생들의 흥미를 유발하는데 매우 효과적인 실험일 수 있다. 그러나 초등학교부터 고등학교까지 산과 염기 개념을 다루면서 사례를 차별화하지 못하고 동일한 사례의 실험을 반복한다면 이러한 실험으로부터 초등학교, 중학교, 고등학교 학생들의 개념 이해에 차이가 나타나지 않을 수 있다. 따라서 교육과정에서 도입하는 개념의 수준에 적합한 실험 사례를 개발하는 것은 학생들의 산-염기 개념의 발달을 위해 필요하다.

결론 및 제언

이 연구에서는 2009 개정교육과정의 화학 I 교과서 4종과 화학 II 교과서 4종을 대상으로 Brønsted-Lowry 모델을 제시하는 내용의 문제점을 분석하였다. 분석 결과, 화학 I 교과서에서는 Brønsted-Lowry 모델을 제시할 때 화학평형의 관점을 도입하지 못하는 문제가 있었으며, 이는 교육과정 개정과정에서 발생한 문제임을 확인하였다. 지금까지 이루어진 대부분의 교육과정 개정의 사유는 기존의 교육과정 정보보다 다루는 내용을 감축하여 학습자의 학습 부담을 줄여주고자 하는 의도를 가지고 있다. 그러나 이러한 과정에서 Brønsted-Lowry 모델을 이해할 때 꼭 필요한 화학평형 개념이 삭제된다면 Brønsted-Lowry 모델을 제대로 설명하는 것은 불가능하며, 따라서 이 모델에 대한 학생들의 잘못된 이해가 형성될 가능성이 있다.

또한 이 연구에서는 약산과 강염기의 반응과 같은 산-염기 반응에서 물과 염이 생성된다는 반응 단계와, 생성된 물과 염이 다시 반응한다는 가수분해 반응 단계로 구분하여 설명하는 것은 순차적 관점이며, 이러한 관점은 Arrhenius 모델의 관점임을 주장하였다. 따라서 Brønsted-Lowry 모델의 관점을 도입하기 위해서는 비순차적 관점으로 표현하여야 하며 비록 이렇게 제시하는 것이 학생들의 이해에 어려움을 줄 가능성이 있다고 하더라도 관점을 명확하게 전달해 주기 위한 노력이 필요함을 주장하였다.

마지막으로 이 연구에서는 화학 II 교과서 실험에서 Brønsted-Lowry 모델을 증명하기 위한 실험의 문제점을 지적하였다. 특히 대부분의 실험은 지시약의 색변화나 pH값을 확인하는 것으로 이는 Arrhenius 모델을 확인하는데 더 적합하였다. 또한 산의 세기를 비교할 때에도 이온화도를 이용하는 것은 Arrhenius 모델에 관련된 것이며, Brønsted-Lowry 모델의 관점에서 산의 세기를 비교하기 위해서는 이온화상수 값을 이용해야 한다고 주장하였다.

오랫동안 Brønsted-Lowry 모델에 대한 학생들의 학습의 어려움은 학습자 인지 능력의 문제로 인식되어 왔다. 그러나 다양한 교수 방법의 제안에도 불구하고 학습의 어려움에 대한 문제는 크게 개선되지 않았다. 이 연구에서는 학습의 어려움이 발생하는 문제를 Brønsted-Lowry 모델이 가지는 과정적 관점과 비순차적 관점의 특성으로부터 찾아보았다는 점에서 의의가 있다.

과정적 관점은 Brønsted-Lowry 모델의 산-염기 정의나 산의 세기의 상대성을 잘 설명해 주며, 비순차적 관점은 Brønsted-Lowry 모델의 화학평형의 특성을 잘 설명해준다. 따라서 이 두 관점은 상대적인 산의 세기나 강산과 약염기의 중화반응, 혹은 약산과 강염기의 중화반응과 같이 Brønsted-Lowry 모델로만 설명이 가능한 예시를 이해할 때 필요하다. 이러한 특성은 Arrhenius 모델과 매우 다른 점이지만, 이 연구에서 분석한 화학 교과서들에서는 Arrhenius 모델과 Brønsted-Lowry 모델의 차이점을 분명하게 대조하여 명료화하거나, 이에 관련된 속성을 파악할 수 있는 설명, 혹은 차이점을 비교함으로써 개념의 이해를 강화시키는 설명들이나 예시가 매우 부족하였다. 이러한 문제 때문에 Arrhenius 모델과 Brønsted-Lowry 모델의 차이점을 학생들이 제대로 인식하지 못한다면 단순한 용어의 변화에만 초점을 두게 되

어 결국 두 모델을 구분하는데 어려움을 겪게 되는 것이다.

과정적 관점을 물질적 관점으로 이해할 때 발생하는 인식론적인 사고의 오류에 대해서는 이미 Chi 등²⁴의 연구에서 제안하였다. 많은 학생들이 Bronsted-Lowry 모델의 산-염기 반응을 이해하지 못하는 이유는 이러한 교과서 설명 방식을 통해 이를 물질적 관점으로 이해하려고 하였기 때문일 가능성이 높다.

이 연구를 통해 주장하고자 하는 것은, 관점이 다른 모델들을 충분히 이해할 수 있도록 설명과 사례가 제시되지 않거나 다른 관점으로 새로운 모델을 설명하게 되면 학습에 오히려 방해할 일으킬 수 있다는 것이다. 교과서에 제시되는 다양한 과학 모델은 자연세계를 대상으로 과학자가 만들어낸 설명일 뿐이며, 따라서 각 모델에 포함된 과학자의 관점을 학생들에게 전달해 주는 다양한 설명과 사례가 부족할 때 효과적인 학습이 일어나기 어렵다. 특히 학생들의 어려움을 미리 가정하여 명확한 설명보다는 흥미를 끌 만한 낮은 수준의 실험을 통해 부적절한 예시를 제공한다면, 이는 오히려 학습자가 스스로 개념을 발견하는 기회를 가지기 어려울 것이다.

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

REFERENCES

- Sheppard, K. *Chem. Educ. Res. Pract.* **2006**, *7*, 32.
- Kang, S. H.; Jo, S. A. *J. Korean Chem. Soc.* **1999**, *43*, 707.
- Kang, S. H.; Lee, S. J. *J. Res. Inst. Curr. Instr.* **2005**, *9*, 151.
- Won, J. A.; Gwak, J. R.; Park, Y. N.; Paik, S. H. *Kor. J. Teach. Educ.* **2010**, *26*, 65.
- Cros, D.; Maurin, M.; Amouroux, R.; Chastrette, M.; Leber, J.; Fayol, M. *Eur. J. Sci. Educ.* **1986**, *8*, 305.
- Cros, D.; Chastrette, M.; Fayol, M. *Int. J. Sci. Educ.* **1988**, *10*, 331.
- Hand, B.; Treagust, D. F. *Sch. Sci. Math.* **1991**, *91*, 172.
- Nakhleh, M. B. *J. Chem. Educ.* **1994**, *71*, 495.
- Botton, C. *Sch. Sci. Rev.* **1995**, *77*, 124.
- Sisovic, D.; Bojovic, S. *Chem. Educ. Res. Pract.* **2000**, *1*, 263.
- Drechsler, M.; Schmidt, H. J. *Chem. Educ. Res. Pract.* **2005**, *6*, 19.
- Demircioglu, G.; Ayas, A.; Demircioglu, H. *Chem. Educ. Res. Pract.* **2005**, *6*, 36.
- McClary, L.; Talanquer, V. *J. Res. Sci. Teach.* **2011**, *48*, 396.
- Kousathana, M.; Demerouti, M.; Tsapalis, G. *Sci. Educ.* **2005**, *14*, 173.
- Kauffman, G. B. *J. Chem. Educ.* **1988**, *65*, 28.
- de Vos, W.; Pilot, A. *J. Chem. Educ.* **2001**, *78*, 494.
- Carr, M. *Res. Sci. Educ.* **1984**, *14*, 97.
- Drechsler, M.; Schmidt, H. J. *J. Sci. Educ. Int.* **2005**, *16*, 39.
- Furió-Más, C.; Luisa Calatayud, M.; Guisasola, J.; Furió-Gómez, C. *Int. J. Sci. Educ.* **2005**, *27*, 1337.
- Cokelez, A. *J. Chem. Educ.* **2009**, *87*, 102.
- Park, S. H.; Kang, N. H.; Sin, E. J. Paper presented in 2014 IHPST Asian Regional Conference, Taipei Taiwan, 2014.
- Paik, S. H. *J. Chem. Educ.* **2015**, *92*, 1484.
- Kim, S. K.; Park, C. Y.; Choi, H.; Paik, S. H. *J. Korean Chem. Soc.* **2017**, *61*, 65.
- Chi, M. T.; Slotta, J. D.; De Leeuw, N. *Learning Instr.* **1994**, *4*, 27.
- Chi, M. T. *J. Learn. Sci.* **2005**, *14*, 161.
- Chi, M. T.; Roscoe, R. D.; Slotta, J. D.; Roy, M.; Chase, C. C. *Cogn. Sci.* **2012**, *36*, 1.
- Morgan, M. S.; Morrison, M. *Models as mediators: Perspectives on Natural and Social Science*; Cambridge University Press: 1999.
- Gobert, J. D.; Buckley, B. C. *Int. J. Sci. Educ.* **2000**, *22*, 891.
- National Research Council. *A Framework for K-12 Science Education: Practices, Crosscutting Concepts, and Core Ideas*; National Academies Press: 2012.
- Chamizo, J. A. *Sci. Educ.* **2013**, *22*, 1613.
- Grosslight, L.; Unger, C.; Jay, E.; Smith, C. L. *J. Res. Sci. Teach.* **1991**, *28*, 799.
- Park, J. S.; Youn, Y.; Jung, J. O.; Cho, E. M.; Ryu, S. K. *Chemistry I*; Kyohak Sa: Seoul, 2011.
- Park, J. S.; Youn, Y.; Jung, J. O.; Cho, E. M.; Ryu, S. K. *Chemistry II*; Kyohak Sa: Seoul, 2011.
- 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.
- 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, 2011.
- 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.
- 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, 2011.
- 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.
- 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, 2011.
- Ministry of Education. *7th Science Curriculum*, 1997.
- Ministry of Education and Human Resources Development. *2007 revised Science Curriculum*, 2007.
- Ministry of Education, Science and Technology. *2009 revised Science Curriculum*, 2009.
- Oxtoby, D. W.; Gillis, H. P.; Butler, L. J. *Principles of Modern Chemistry*; Cengage learning: 2015.