고등학교 화학 교과서의 '용액' 단원에 대한 입자 수준의 컴퓨터 보조 수업자료 개발 및 적용 효과 분석

김종현[†] · 김정원[‡] · 박찬근[§] · 백성혜^{*}

[†]김천여자고등학교

[‡]한광여자고등학교

[§]보문고등학교

한국교원대학교 화학교육과

(2005. 3. 16 접수)

Development of Particle-level Computer Assisted Instruction Materials for the 'Solution' Chapter in High School Chemistry Textbook and Analysis of the Educational Effects

Jong-Hyun Kim[†], Jeong-Won Kim[‡], Chan-Keun Park[§], and Seong-Hey Paik^{*}

[†]Kimcheon Girls' High School, Gyeong-buk 740-010, Korea

[‡]Hangwang Woman High School, Gyeonggido, 450-150, Korea

[§]Bomoon High School, Daejeon, 300-170, Korea

Department of Chemistry Education, Korea National University of Education, Chung-buk 363-791, Korea

(Received March 16, 2005)

요 약. 이 연구에서는 고등학교 화학II 교과서의 '용액' 단원에 대한 내용을 입자 수준으로 표현한 컴퓨터 보조 수업자료를 개발하고 그 효과를 고등학교 1학년과 2학년 학생들에게 적용하여 그 효과를 알아보았다. 개발된 내용은 교과서에서 제시한 '용액' 단원의 주요 내용으로 용해, 증기압, 끓는점과 어는점의 변화, 삼투현상 등으로 구성되었다. 이 연구에서는 애니메이션과 시뮬레이션을 이용하여 자료를 개발하였다. 이 자료에서는 특히 용액에서 일어나는 현상에 대한 주요 개념을 입자 관점에서 이해할 수 있도록 중점을 두었다. 용액의 여러 현상들을 용액의 총괄성으로 단순화하지 않고, 용매와 용질 사이의 인력 개념으로 설명하였다. 용액과 관련된 자료의 제작은 플래시 5.0과 플래시 6.0의 Action Script를 이용하였다. 개발한 자료를 고등학교 학생들에게 투입한 결과, 통계적으로 유의미하게 개념 향상을 나타내었으며 특히 고등학교 1학년은 과도기와 형식적 조작기 학생들에게, 그리고 고등학교 2학년의 경우에는 형식적 조작기 학생들과 자연계열 학생들에게서 그 효과가 크게 나타났다.

주제어: 컴퓨터 보조 수업자료, 애니메이션, 시뮬레이션, 입자 관점, 고등학생, 개념 이해, 용액, 인지수준

ABSTRACT. In this study computer assisted instruction materials for the 'Solution' chapter in high school chemistry II textbook were developed based on a view of particle and analyze the effect of the materials on 10th and 11th high school students. The contents of developed materials are dissolution, vapor pressure, the change of boiling point and freezing point, osmosis, and so on which are the major contents of 'Solution' chapter in high school chemistry II textbook. Materials were developed with using animation and simulation for students' understanding of the phenomena with a particle view point. Many phenomena in a solution were not simplified by colligative property of solution, but tried to explain by the concept of attraction between solute and solvent molecules. This computer assisted learning materials were developed using Flash 5.0 and Flash 6.0 Action Script. Educational

effects of the materials on 10th and 11th grade students represented statistically meaningful increase of concept understanding. Especially the materials were effective to the transition stage or formal stage students in 10th grade and formal stage or the natural science major students in 11th grade.

Keywords: Computer Assisted Instruction Materials, Animation, Simulation, Particle View Point, High School Students, Concept Understanding, Solution, Cognitive Level

서 론

화학은 미시와 거시세계를 연결하여 이해하여야 하는 학문이며, 또한 미시와 거시 세계를 표현하는 기호까지 동시에 생각하여 균형 있게 이해할 수 있는 학문이라고 할 수 있다¹. 이러한 기호 체계를 제대로 이해하기 위해서는 미시세계의 개념과 거시세계의 개념과의 연결이 제대로 이루어져야 하고 이러한 문제를 해결할 수 있는 교과 도구 중의 하나로, 눈으로 관찰 할 수 없는 미시세계의 입자적 움직임을 역동적으로 표현한 컴퓨터 시뮬레이션 보조 자료가 필요하다.

학생들에게 미시적 세계에 대한 간접적 경험을 제공해 줄 수 있는 입자 수준의 컴퓨터 보조 학습은 컴퓨터와 매우 친숙한 지금의 학생들에게 흥미 있고 효과적인 학습 도구가 될 수 있을 것이다. 지금까지 애니메이션, 동영상, 시뮬레이션, 자료 제시 등 다양한 학습 자료가 개발되었고, 미시세계를 이해하기에는 입자 수준의 사고가 매우 중요하다는 연구들^{2,6}도 많이 제시되었다.

미시세계의 애니메이션 자료를 활용한 컴퓨터 보조 수업은 학생들이 학습함에 있어서 교사의 설명과 정적인 그림 자료를 이용하여 상상을 함으로써 이해해야 하는 전통적인 수업 보다 눈으로 볼 수 없는 미시세계를 직접 눈으로 관찰하면서 이해하게 되어 개념의 이해에 효과적이다.⁷ 따라서 물질의 입자성과 문제 해결 전략을 강조한 컴퓨터 보조 수업을 통해 고등학생들의 화학 개념 형성, 화학 문제 해결 능력, 학습 동기 및 화학 수업에 대한 태도가 유의미하게 향상되었다는 연구도⁸도 보고되었다. 이러한 논의들을 살펴볼 때, 앞으로 활동적이고 입자적인 내용으로 구성된 컴퓨터 보조 자료를 개발하여 화학 수업 시간에 이용하는 것이 시급함을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 아직까지 입자 수준의 컴퓨터 보조 자료 개발이 이루어지지 않은 고등학교 화학 II 교과서의 용액 단원을 중심으로 컴퓨터 보조 자료를 개발하였다. 그리고 개

발된 보조 자료가 학생들의 용액에 관련된 내용의 이해에 미치는 효과를 알아보고자 하였다.

개발 내용 및 방법

개발의 절차. 이 연구에서 개발하고자 하는 주제들은 물리, 생물, 지구과학 등의 과목과 상충되는 내용들과 용어의 정의가 확실하지 않는 주제가 많이 포함되어 있다. 따라서 각 교과서에서 제시되어 있는 설명들과 다른 교과에서 설명하는 내용 및 대학 교재 등에서 설명하는 방식과 여기에 관련된 선행 연구 논문들을 살펴보고, 적절한 표현 방법을 선택하여 개발하였다. 본 연구에서 이루어진 개발의 절차는 다음과 같다. 첫째, 컴퓨터 보조 수업자료의 개발과 이용에 관한 과학교육학적 접근 방식에 관한 연구를 수행하였다. 둘째, 최적의 효과를 얻을 수 있는 개발 형태에 대한 논의와 의사 결정과정을 기쳤다. 셋째, 제7차 교육과정의 화학II 교과서에서의 주요 개념에 대해 조사하였다. 넷째, 물리, 생물, 지구과학 교과에서의 설명 방식을 조사하였다. 다섯째, 대학 교재에서의 설명 방식을 조사하고 중등학교 교과서의 유형과 비교하였다. 여섯째, 용어 및 개념에 관해 일반화할 수 있는 결과를 도출하였다. 일곱째, 이러한 결과들을 중심으로 자료를 개발하였다. 저작도구는 Macro Media사의 Flash 5.0 및 Flash 6.0을 사용하였으며 Action Script를 통해 시뮬레이션을 제작하였다.

개발 내용의 선정. 고등학교 화학II의 용액 단원의 내용 중에서 용해의 과정, 증기압과 끓음 등 총 9개의 학습 내용에 관련된 자료를 개발하였다(Table 1).

이 단원에 관련된 화학 II 교과서는 출판사의 가나다 순서로 C1-C7⁹⁻¹⁵의 번호를 붙여 표기하였다.

개발의 제한점. 이 연구에서 개발한 자료는 2차원으로 표현되었다. 또한 시뮬레이션의 경우, 표현된 입자의 수가 실제 자연현상에서 고려하여야 하는 입자 수에 비해 엄청나게 적기 때문에 일시적으로는 실

Table 1. Contents of particle-level computer assisted instruction materials for the solution chapter in high school chemistry II textbook

Chapter	Learning content	Form
Dissolution	Process of dissolution	Simulation
	Vapor pressure & Boiling	Simulation/Animation
	Vapor pressure lowering of solution	"
Property of dilute solution	Boiling point elevation of solution	"
	Freezing point depression of solution	"
	Semi-permeable membrane	"
	Osmosis & Osmotic pressure	"
Colloid solution	Definition of colloid	"
	Property of colloid	"

제 관찰되는 현상과 다른 현상이 표현될 수 있다. 그리고 개발한 자료는 주로 시뮬레이션이었으며, 애니메이션이 효과적이라 판단되는 경우에 한정하여 애니메이션으로 구현하였다.

적용 대상. 대전광역시 소재한 인문계 고등학교 1학년 학생 10학급 344명과 경기도 소재한 인문계 고등학교 2학년 학생 8학급 259명을 대상으로 하였으며, 실험반은 고등학교 1학년의 경우에는 5학급 172명, 그리고 고등학교 2학년은 4학급 124명을 선정하였다. 통제반은 고등학교 1학년의 경우 5학급 172명과 고등학교 2학년의 경우 4학급 135명으로 구성하였다. 고등학교 2학년의 경우에는 인문계열 반은 실험반과 통제반에서 각각 3반씩이었고, 자연계열 반은 각각 한반씩이었다. 인문계열을 선택한 연구 대상 학생 수는 199명, 자연계열을 선택한 학생 수는 60명이었다.

이들의 인지 수준을 GALT 검사지로 조사한 결과, 구체적 조작기는 고등학교 1학년의 경우에는 통제반이 15(8.7%)명, 실험반이 23(13.3%)이었으며, 과도기는 통제반이 88(51.2%)명, 실험반이 82(47.7%)명이었다. 그리고 형식적 조작기는 통제반이 69(40.1%)명, 실험반이 67(39.0%)명으로, 통제반과 실험반의 인지수준은 유사한 분포를 나타내었다. 고등학교 2학년의 경우에도 통제반이 19(14.1%)명, 실험반이 17(13.7%)명이었으며, 과도기는 통제반이 74(54.8%)명, 실험반이 59(47.6%)명이었다. 그리고 형식적 조작기는 통제반이 42(31.1%)명, 실험반이 48(38.7%)명으로, 통제반과 실험반의 인지 수준은 유사한 분포를 나타내었다.

자료 적용 기간 및 내용. 고등학교 1학년의 경우에는 개발된 자료를 한 달에 걸쳐 매 주 1차시씩 총 4차시 동안 실험반에 투입하였다. 실험반에 적용한 교

수 자료의 내용은 액체의 증발과 끓음, 물질의 용해, 묽은 용액의 성질 등이었다. 고등학교 2학년의 경우에는 개발된 자료를 1주일에 2차시씩 3주 동안 묽은 용액의 성질에 관련된 단원을 가르치는 시기에 실험반에 투입하였다. 실험반에서 적용한 교수 자료 내용은 용해의 과정, 증기압과 끓음, 증기압 내림, 끓는점 오름과 어는점 내림 등이었다.

개념 이해 검사 도구의 개발. 이 연구에서 사용된 개념 이해도 검사 도구는 고등학교 1학년 학생용과 고등학교 2학년 학생용을 구분하였다. 고등학교 1학년의 경우에는 총 12 문항을 선행연구들¹⁶⁻¹⁸⁾에서 사용한 문항을 토대로 이 연구에 맞게 수정하였다. 고등학교 2학년의 경우에는 총 11문항을 같은 과정을 거쳐 연구자들이 개발하고, 이 문항을 예비검사(pilot test)를 거쳐 문항의 적절성을 검사하였다. 수정 개발한 문항지는 4인(국립대 화학교육과 교수 1인, 중학교 과학교사 1인, 고등학교 화학전공 교사 2인)의 내용 타당도 검사를 거쳤다. 그 후 최종적으로 화학전공 교수와 전문가들의 도움을 받아, 고등학교 1학년의 경우에는 액체의 증발과 끓음 3문항, 물질의 용해 2문항, 묽은 용액의 성질 7문항을 최종적으로 완성하였다. 연구 대상이 아닌 고등학교 1학년 학생들을 대상으로 구한 재검사 신뢰도는 0.82였다. 고등학교 2학년의 경우에는 용해 관련 2문항, 외부압력과 끓는점 관련 2문항, 용액의 끓는점, 어는점 관련 3문항, 용액의 응용 관련 2문항 등 총 9문항을 최종적으로 완성하였다. 연구 대상이 아닌 고등학교 2학년 학생들을 대상으로 구한 재검사 신뢰도는 0.90 이었다. 이 검사 도구로 학생들의 사전 개념과 사후 개념의 차이를 비교하였다. 사전검사와 사후 검사는 수업처치 직전과 직후에 실시하였으며, 검사 시간은 30분이었다.

개발 결과 및 적용 효과

용해의 과정 개발 결과. 용해를 설명할 때 모든 교과서에서 염화나트륨을 예로 들어 수화의 개념과 용매화를 언급하고 용질과 용매의 인력 개념을 사용하였다. 그리고 C1 교과서를 제외하고는 모든 교과서에서 극성 용매가 극성 용질을 녹이고, 비극성 용매가 비극성 용질을 녹인다는 표현도 제시하였다. C3와 C5 교과서에서는 요오드가 물에 녹지 않는 현상을 물 분자들 사이의 인력이 크거나 요오드 분자들 사이의 인력이 크기 때문이라고 설명하였다.

C2 교과서의 경우, 에탄올과 물, 요오드와 사염화탄소가 섞이는 예를 용해 과정으로 설명하였다. 그러나 이렇게 용매와 용매 사이의 인력과 용질과 용질 사이의 인력 간의 차이가 크지 않은 경우에는 용매에 용질이 섞일 때 용질의 용해도가 존재하지 않고 용매에 한없이 섞인다. 이를 깁스 자유에너지의 관점에서 설명한다면, 반응에서 에너지의 차이는 거의 0에 가깝지만 엔트로피의 증가로 인해 자유에너지의 값이 음의 값을 가지게 되어 자발적인 반응이 일어나는 것으로 설명할 수 있다. 따라서 이 두 현상은 용해보다는 확산의 개념으로 설명되는 것이 타당하다.¹⁹ 교과서별로 용해가 일어나는 원인에 대한 설명과 용해 과정에 대한 설명을 정리하면 Table 2와 같다.

개발된 자료에서는 우선 용해의 개념을 확산과 구분하여 설명하였다. 즉, 용질과 용질 사이의 인력과 용매와 용매 사이의 인력보다 용질과 용매 사이의 인력이 더 작을 때 일어나는 현상을 용해로 설명하였다. 그리고 용질과 용질 사이의 인력과 용매와 용매 사이의 인력이 용매와 용질 사이의 인력과 큰 차이가 없어서 엔트로피의 증가에 의해 자발적 반응이 일어나는 경우를 확산으로 구분하여¹⁹ 표현하였다. 용해의 경우, 물 입자가 염화 이온과 나트륨 이온을 붙잡는 인

Fig. 1. The computer assistant material of 40 g NaCl dissolution in water.

력의 개념으로 구현하였다. 또한 물 100g에 염화나트륨 20g을 넣으면 모든 염화 이온과 나트륨 이온이 물 입자에 붙잡혀 용해되지만, 염화나트륨 40g의 경우에는 일부만 용해되고 일부는 더 이상 인력을 작용할 물 분자가 존재하지 못하여 녹지 못하는 과정(Fig. 1)을 구현함으로써 용해도의 개념도 포함하였다. 용해되는 과정은 나트륨 이온 주위에는 물 분자 중 산소 원자 쪽이, 염화 이온 주위에는 수소 원자 쪽이 달라 붙는 것으로 표현하였다. 이때 물질마다 용해도가 다른 이유는 물 분자와 용질 입자의 인력이 작용하는 크기가 물질의 고유한 성질로 자기 다르기 때문으로 보았다. 따라서 용질 입자에 수화되는 물 입자의 개수가 용질의 성질에 따라 달라지기 때문에 같은 양의 물에서 녹는 용질의 양이 물질마다 다르게 되는 것으로 보았다.

확산은 물에 에탄올 입자가 흩어지는 모습으로 구현하였다. 이때 물 입자와 물 입자 사이의 인력 크기와 에탄올 입자와 에탄올 입자의 인력 크기가 물 입자와 에탄올 입자의 인력 크기와 거의 유사하기 때문에 물과 에탄올이 섞일 때에는 용해도와 같은 일정한

Table 2. Comparison of explanations about cause and process of dissolution by textbooks

Textbook	Explanation
C1-C7	Example of NaCl in dissolution phenomena, hydration, and solution Attraction of solvent & solute
C2-C7	Dipolar solvent dissolves dipolar solute, Non-dipolar solvent dissolves non-dipolar solute.
C3, C5	Iodine does not dissolve in water because the attraction between water & water molecules is bigger than the attraction between the Iodine molecule & water molecules.
C2	Example of ethanol & water, Iodine & Carbon Tetra-Chloride in dissolution phenomena

Fig. 2. The computer assistant material of 50 g Ethanol diffusion in water.

양만큼 섞이는 현상이 관찰되지 않는다. 즉, 이 경우에는 확산이기 때문에 엔트로피가 증가하는 방향으로 두 물질이 한없이 섞이는 현상을 관찰할 수 있다. 따라서 물 100 g에 에탄올 20 g이 섞일 때와 에탄올 40 g이 섞일 때를 비교하여 물 입자와 에탄올 입자 사이의 인력을 표현하지 않고, 단지 두 종류의 물질이 엔트로피가 증가하는 형태로 섞이는 모습을 구현하였다 (Fig. 2). 이때 물 입자와 에탄올 입자는 독립적으로

Fig. 3. Vapor pressure explanation in C4 textbook.

Fig. 4. Vapor pressure explanation of boiling in C2 textbook.

부작위하게 움직이는 형태로 표현하였다.

증기압과 끓음, 증기압 내림의 개발 결과. 모든 교과서에서 증기압은 열린계가 아닌 닫힌계에서 기화와 응축의 속도가 같을 때 즉, 동적 평형 상태에서 증기가 나타내는 압력으로 표현하고 있다. 이는 주어진 온도에서 포화수증기압을 의미하는 것이나 (Fig. 3). 그러나 일부 교과서(C1, C2, C7)에서는 끓을 때 기포 속의 압력으로 증기압을 표현 (Fig. 4)하였다 (Table 3).

개발 자료에는 우선 증기압을 닫힌계에서 온도가 증가할수록 증발되는 수증기의 수가 증가하여 내부 압력이 높아지는 것으로 표현하였다 (Fig. 5).

이 개발 자료에서 수증기가 물에서 벗어난 경우, 위쪽의 벗어난 수증기의 숫자를 표시하여 위쪽의 압력 세기판의 지시선의 회전 각도를 조절하도록 구현하였다. 또한 수증기의 이동 속도도 시간에 따라 증가

Fig. 5. The computer assistant material of vapor pressure.

Table 3. Comparison of explanations about vapor pressure & boiling by textbooks

Textbook	Explanation
C1-C7	Vapor pressure: Pressure of vapor in the air when liquid and gas equilibrium occurs in closed system Boiling: Vaporization in liquid when vapor pressure is the same as air pressure in open system.
C1,C2,C7	Boiling occurs when pressure in bubble is the same as external pressure.

Fig. 6. The computer assistant material of vapor pressure in solution.

하도록 구현하였다.

증발을 통해 증기압이 올라가는 현상을 다음과 같이 표현하였다. 물 분자는 임의의 범위 안에서 일정한 속력으로 움직이도록 하고, 위쪽에는 보이지 않는 벽을 만들어 물 분자가 벽을 통과할 정도의 속력이 높아지면 외부로 증발되는 것이 표현되도록 구현하였다. 보편적으로 묽은 용액의 경우 순수한 물 사이의 인력보다 용질과 용매 사이의 인력이 더 크므로, 이를 고려하여 같은 온도에서 물 입자의 이동 속도가 더 느리게 구현하였다. 또한 온도를 조절할 때 이동하는 속도를 증가 또는 감소시켜 증발하는 물 분자 수의 변화를 표현하도록 구현하였다. 그리고 온도에 따른 증기압의 변화를 나타내는 곡선도 물 분자 수의 변화에 따라 작동하도록 구현하였다(Fig. 6). 이와 같은 방법으로 묽은 용액에서의 증기압 내림 현상을 구현하였다.

끓는점 오름과 어는점 내림의 개발 결과. 대부분의 교과서에서 끓는점 오름과 어는점 내림에 대한 설명은 상평형 그래프를 이용하였다(Table. 4). 보편적으로 제시된 그래프의 예를 Fig. 7에 제시하였다. C7 교과서에서 유일하게 어는점 내림을 상평형 그래프가 아

Fig. 7. Explanation of boiling point elevation & freezing point lowering in C6 textbook.

Fig. 8. Explanation of boiling point elevation & freezing point lowering in C2 textbook.

닌 입자의 관점에서 설명하였다. 그러나 설명이 구체적이지 못하고 시각 자료가 같이 제시되지 않아서 설명을 이해하기 어렵게 되어 있다.

C2 교과서의 경우에는 상평형 그래프에서 어는점 내림을 표현하였는데, 그림의 자료에서는 어는점 내림이 아닌 삼중점의 이동으로 어는점 내림을 표현하는 오류도 발견되었다(Fig. 8). 이러한 오류는 일부 대학 교재에서도 찾아볼 수 있었다.

순수 용매와 비휘발성 용질이 포함된 용액에서 일어나는 끓는점 오름은 우선 끓음에 대한 정확한 정의가 있어야 한다. 용액에서 표현되는 증기압은 액체의

Table 4. Comparison of explanations about boiling point elevation & freezing point lowering by textbooks

Textbook	Explanation
C1 - C6	Boiling point elevation & freezing point lowering represent on state equilibrium graph.
C7	Boiling point elevation: State equilibrium graph Freezing point lowering: Solute particles disturb attraction of solvent particles. Therefore the solution freezes in lower temperature when solvent particles lose more energy.

표면에서 생기는 수증기를 표현한 것이므로 증발의 경우를 설명하는데 더 설득력이 있지만, 끓음을 표현할 때 표현하는 증기압은 액체 내부에서 발생하는 기포의 압력으로 제시하는 것이 더 설득력이 있다고 보았다.

따라서 이 개발 자료에서는 액체 내부에서의 상태 변화 즉, 액체에서 기체로의 변화에 따른 기포의 형성과 기포 내부에서의 압력이 외부압력과 같아질 때 끓음을 표현하였다. 이 시점이 두 상태가 공존하는 상태이기 때문이다. 온도가 증가하면 용매와 용질 모두 분자운동이 활발해지도록 표현하고, 운동에너지가 일정 양까지 증가하면 용매와 용매 사이의 인력이나 용매와 용질 사이의 인력을 끊고 기화가 표현되도록 프로그램을 구현하였다. 일반적으로 용매와 용질 사이의 인력이 용매와 용매 사이의 인력과 용질-용질 사이의 인력에 비해 더 클 때 용해가 일어나기 때문에 용질이 첨가된 용액에서는 입자들이 순수한 용매 상태일 때보다 더 큰 운동에너지를 가질 때 비로소 인력을 이기고 기포가 발생될 수 있도록 표현하였다. 따라서 순수한 용매의 경우 끓는점에 도달하여 기포가 발생하는 온도에서 용액의 경우는 입자들이 서로의 인력으로 분산해서 기포를 형성하고 있지 못하는 상황을 대조적으로 표현하였다(Fig. 9). 그리고 입자들이 더 큰 분자운동 에너지를 가지는 상황은 온도를 높임으로써 표현되도록 하였으며, 이를 통해 순수한 용매보다 용액에서 끓는점 오름이 나타나는 것을 입자의 관점에서 구현하였다.

끓는점에 도달하지 않은 용액의 경우에도 알코올렌

프로 온도를 높이는 동안 용액이 남아 있는 용기의 표면에서는 기포가 발생하도록 표현하였다. 이는 용액 자체의 온도는 끓는점에 도달하지 않았지만, 알코올렌프로 가열하는 부분은 끓는점까지 높아진 상태를 표현한 것이다. 이는 자연현상에서 쉽게 관찰되는 현상까지도 자세히 표현한 경우에 해당한다. 그리고 끓는점에 도달하는 순간부터는 용기의 표면 뿐 아니라 액체 내부에서도 기포가 발생하도록 표현하였다.

어느점 내림은 0℃의 온도에서 물 분자들이 육각형으로 결정을 형성하며 얼음의 상태로 변화하는 과정을 표현하였다. 이때 표현의 제약 때문에 입체구조가 아닌 평면 구조로 육각형을 나타내었다. 비록 3차원적 구조로 표현하지는 못했지만, 어느점에서 액체가 고체로 상태변화하는 것을 입자의 수준에서 표현하는 데에는 큰 무리가 없다고 보았다.

비휘발성 용질이 첨가된 용액에서는 물 분자끼리의 인력보다 용질과 물 분자의 인력이 크기 때문에 0℃에서 얼음의 결정을 형성하지 못한다. 용질이 물 분자와 충돌하면서 물 분자가 용질과의 인력 때문에 결정을 만들지 못하고 용질에게 끌려 다니는 상황이 일어나기 때문이다. 많은 교과서에서 어느점 내림은 명확하게 설명하지 않고, 미리 설명된 끓는점 오름의 원리를 인용하여 “끓는점 오름과 같은 원리로...”라는 식의 표현을 하고 있다. 그러나 입자의 인력과 운동의 관점으로 일관성 있게 표현하다 보면, 끓는점 오름의 현상과 어느점 내림의 현상은 교과서의 시각과 다르게 표현된다. 즉 묽은 용액에서 용질은 끓음 현상에서는 용매가 인력을 끊고 기체로 상태변화 하는

Fig. 9. The computer assistant material of boiling point elevation.

Fig. 10. The computer assistant material of freezing point lowering.

것을 붙잡는 역할을 하며, 어는 현상에서는 용매가 결정 구조를 형성하는 것을 방해하는 역할을 하는 것으로 표현하였다(Fig. 10).

반투막의 개발 결과. 모든 교과서에서 반투막을 통과하는 입자를 용매로 표현하기 때문에 용매 입자보다 용질 입자의 크기가 더 크다는 생각을 하게 된다. 그러나 대부분 용질과 용매의 입자 크기 개념으로 반투막을 설명하지 않았다. 유일하게 C7 교과서에서만 용매가 크기가 작고, 용질이 크기가 클 때 용매만 통과한다고 설명하였다.

또한 많은 교과서에서 세포막을 반투막의 예로 제시하지만, 세포막은 살아있는 때에는 에너지를 사용하여 나트륨이나 칼륨 이온 등 특정 물질만 선택적으로 투과시키는 능동 수송으로, 죽은 후에는 에너지를 사용하여 막의 개폐가 불가능하기 때문에 진투막으로 표현되어야 한다. C1 교과서의 경우에 '부게를 다는 종이' 반투막의 예로 제시하였다. 이것은 약포지를 말하는 것으로 판단되는데, 약포지의 경우 불과 접촉하면 막의 성질을 잃어버리고 찢어지기 때문에 적당한 막의 예가 될 수 없다고 판단된다. 또한 많은 교과서(C2, C3, C5, C6)에서는 셀로판 종이를 반투막의 예로 제시하였는데, 셀로판 종이의 구멍 크기에 따라 용질과 용매 입자가 모두 통과할 수도 있고, 모두 통과하지 못할 수도 있다. 따라서 입자의 크기와 막의 구멍 크기를 정확하게 표현하지 않는 한, 반투막의 예로 특정 물질을 거론하는 것은 적절하지 않다고 판단된다.

그리고 C7 교과서에서는 배추와 오이름 소금에 절이는 현상을 삼투 현상으로 제시하였는데, 이때 용질에 해당하는 소금은 배추나 오이 속으로 들어가 짠맛을 내게 된다. 이는 배추나 오이의 세포막이 더 이상 능동수송을 할 수 없게 되기 때문에 일어나는 현상이다.¹⁶ 따라서 이러한 사례도 삼투 현상의 설명에는 부적절하다고 판단하였다. 이러한 교과서의 설명

Fig. 11. The computer assistant material of all-permeable membrane.

Fig. 12. The computer assistant material of semi-permeable membrane.

유형을 정리하여 Table 5에 제시하였다.

개발한 자료에서는 우선 막을 물질의 이동에 따라 세 가지로 구분하였다. 첫째는 용질과 용매 입자가 모두 통과할 수 있는 구멍을 가진 전투과성막(Fig. 11), 둘째는 용매든 용질이든 두 혼합 물질 중 크기가 작은 입자만 통과하고 크기가 큰 입자는 통과할 수 없는 구멍의 크기를 가진 반투막(Fig. 12), 셋째는 에너

Table 5. Comparison of explanations about Semi-permeable membrane by textbooks

Textbook	Explanation
C1-C6	Molecules of solvent as water permeate through membrane, but molecules of solute as sugar can not.
C1	Paper for weighing, Cello-phane paper, Cell membrane
C2, C3, C5, C6	Cello-phane paper, Cell membrane
C4	Cell membrane
C7	Smaller molecules of solvent as water permeate through cell membrane but larger molecules of solute can not. Salted cabbages and cucumber

Fig. 13. The computer assistant material of selective permeable membrane.

지를 사용하여 능동적으로 입자들이 선택되어 투과하는 선택적 투과막(Fig. 13)으로 구분하였다. 살아있는 세포막은 선택적 투과막으로 표현하였으며, 죽은 세포막의 경우에는 전투과성막으로 표현하였다. 이러한 막은 대부분의 교과서에서 제시하고 있는 세포막을 예로 들어 설명하였다.

삼투현상과 삼투압의 개발 결과. 대부분의 교과서에서 삼투현상이 일어나는 원인에 대해 입자의 수준에서 설명하지 않고, 단순히 농도가 높은 쪽에서 진한 쪽으로 용매의 이동이 일어난다고 표현하였다. 그리고 C6과 C7 교과서에서는 용매 분자가 용액 쪽으로 이동하는 현상을 확산이라고 표현하였다. 대부분의 경우 교과서에 제시된 그림에서도, 용질 분자와 용매 분자의 크기만 다르게 표현하였으며(Fig. 14), 용

Fig. 14. Explanation of osmosis in C5 textbook.

Fig. 15. Explanation of osmosis with solute molecule hydration by solvent molecules in C2 textbook.

Table 6. Comparison of explanations about Osmosis by textbooks

Textbook	Explanation
C1-C5	Movement of solvent molecules from dilute solution to dense solution
C6, C7	Diffusion of solvent molecules through semi-permeable membrane
C2	Hydration of solute molecules by solvent molecules

질 분자를 용매 분자가 둘러싸는 수화의 개념은 C2 교과서에서만 표현되어 있었다(Fig. 15). 이러한 교과서의 설명 유형을 정리하여 Table 6에 제시하였다.

삼투현상은 용매와 용질의 인력이 작용해서 자유롭게 이동할 수 있는 용매의 수가 달라지기 때문에 일어나는 현상으로 구현하였다. 용질이 용매에 녹아 들어가는 현상은 용질 주위에 용매 분자들이 둘러싸는 것으로 표현되고, 수화에 참여하지 않고 남은 용매 분자들이 막을 자유롭게 통과할 수 있는 형태로 표현하였다. 따라서 순수한 용매의 경우가 용액의 경우보다 반투막을 통과할 수 있는 용매 입자의 수가 커지게 된다. 이러한 차이로 용액 쪽의 분자 수가 점점 증가하면서 수면의 높이가 올라가는 현상을 삼투현상이 일어나는 것으로 설명하였다. 이때 이동하는 용매 분자의 수를 시간에 따라 표시하였으며, 이를 그래프로 제시하여 용액 쪽의 물 높이가 올라가는 것과 동시에 구현되도록 하였다.

용질의 종류는 설탕과 염화나트륨 중에서 선택할 수 있도록 하였는데, 설탕의 분자 크기는 반투막의 구멍보다 크게 표현하였고(Fig. 16), 소금의 나트륨 이

온과 염화 이온은 물 분자와 거의 같은 크기로 표현하였다(Fig. 17). 실제 염화 이온은 0.39 nm, 나트륨 이온은 0.51nm이고, 물은 0.30 nm이다.¹⁶ 따라서 염화나트륨 용액의 경우에는 용매와 용질의 입자 크기 차이가 거의 없기 때문에 대부분의 막 구멍을 같이 통과하거나 통과하지 못하여 설탕볼과 달리 삼투 현상이 나타나지 않는다.

그러나 순수한 물과 염화나트륨을 녹인 용액 사이에 반투막을 설치하면 처음에는 염화나트륨을 녹인 용액에서도 삼투 현상이 나타난다. 그것은 물 입자들이 나트륨 이온이나 염소 이온을 인력으로 붙잡기 때문에 이온들의 이동 속도가 느려지는 현상이 나타나기 때문이다. 따라서 초기에는 순수한 용매 쪽에서 막을 통과하여 용액 쪽으로 이동하는 물 분자 수가 더 많지만, 시간이 지나면 용액 쪽의 물 입자들과 나트륨 입자들, 그리고 염소 입자들이 막을 통과하게 되면서 점차 순수한 용매와 용액 수면의 높이 차이가 없어지게 된다. 동영상에서 막을 사이에 두고 순수한 물 쪽의 물 입자 수의 변화가 시간에 따라 표와 그래프로 나타나도록 구현하였다. 오랜 시간동안 계속 변

Fig. 16. The computer assistant material of sugar solution osmosis.

Fig. 17. The computer assistant material of salt solution osmosis.

화를 관찰하는 것이 어렵고, 변화의 경향성을 알아보는 것이 더 중요하기 때문에 대략적으로 더 이상 물 입자 수의 변동이 일어나지 않는 적정 횟수인 20회의 측정 결과를 제시하는 것으로 개발하였다. 표현한 물 입자의 수가 제한적이어서 그래프의 선이 자연스럽게 나타나지 못하지만, 초기에 삼투현상이 나타나다가 시간이 지나면서 순수한 용액 쪽 수면의 물 높이가 다시 처음으로 올라가는 현상이 표현되었다(Fig. 17). 그러나 설탕물의 경우에는 수화된 설탕 입자가 막을 통과할 수 없기 때문에 시간이 지나도 순수한 용액

쪽의 수면 높이가 계속 낮은 상태로 동적 평형에 도달하는 것이 표와 그래프에서 표현되었다(Fig. 16).

적용 효과. 개발한 보조 수업자료를 적용한 수업의 효과를 알아보기 위하여 통제반과 실험반의 사전, 사후 개념검사 점수의 독립표본 T검정을 실시한 결과를 Table 7과 Table 8에 제시하였다.

고등학교 1학년과 2학년 학생들에게 수업 전에 실시한 사전 개념검사에서 실험반과 통제반은 점수의 유의미한 차이가 나지 않아 개념 수준에 있어서 동질한 집단임이 확인되었다. 개발한 보조 수업 자료를 실

Table 7. T-test result of experiment group and control group in 10th grade

Treatment	Group	N	M	SD	t	p
Pre-test	Experiment	172	4.72	1.84	1.134	0.257
	Control	172	4.48	1.96		
Post-test	Experiment	172	7.02	2.39	6.058	0.000*
	Control	172	5.54	2.12		

*p<.05

Table 8. T-test result of experiment group and control group in 11th grade

Treatment	Group	N	M	SD	t	p
Pre-test	Experiment	124	3.57	1.67	1.198	0.232
	Control	135	3.31	1.83		
Post-test	Experiment	124	4.97	2.00	3.032	0.003*
	Control	135	4.21	1.99		

*p<.05

Table 9. T-test results of experiment group and control group by cognitive level in 10th grade

Cognitive level	Treatment	Group	N	M	SD	t	p
Formal	Pre-test	Experiment	67	4.88	1.92	-0.73	0.47
		Control	69	5.23	2.08		
	Post-test	Experiment	67	7.85	2.41	3.75	0.00*
		Control	69	6.44	1.97		
Transition	Pre-test	Experiment	82	4.68	1.85	1.38	0.17
		Control	88	4.31	1.71		
	Post-test	Experiment	82	6.87	2.08	5.47	0.00*
		Control	88	5.17	1.96		
Concrete	Pre-test	Experiment	23	4.31	1.58	3.84	0.00*
		Control	15	3.53	1.13		
	Post-test	Experiment	23	5.11	2.26	2.19	0.03*
		Control	15	4.60	1.84		

*p<.05

Table 10. T-test results of experiment group and control group by cognitive level in 11th grade

Cognitive level	Treatment	Group	N	M	SD	t	p
Formal	Pre-test	Experiment	48	3.85	1.75	0.42	0.68
		Control	42	3.69	1.97		
	Post-test	Experiment	48	6.13	1.78	3.32	0.00*
		Control	42	4.90	1.69		
Transition	Pre-test	Experiment	59	3.37	1.64	0.26	0.80
		Control	74	3.30	1.74		
	Post-test	Experiment	59	4.61	1.78	1.11	0.27
		Control	74	4.24	1.97		
Concrete	Pre-test	Experiment	17	3.47	1.50	1.77	0.09
		Control	19	2.53	1.68		
	Post-test	Experiment	17	2.94	1.09	0.72	0.48
		Control	19	2.58	1.80		

*p<.05

험반에 투입한 후에 통제반과의 개념 검사 평균값의 차이를 비교한 결과, 유의 수준 .05에서 통계적으로 유의미한 차이를 확인할 수 있었다. 즉 학년의 구분 없이 실험반이 통제반보다 개념 검사에서 더 높은 점수를 얻는 것으로 나타났다. 이 결과는 입지수준으로 묘사된 수업 자료가 학습자의 학습에 효과적이라는 선행연구들^{20,25}의 결과와 일치하는 것이다.

인지수준별 적용 효과. 학습자의 인지수준에 따라 개발한 자료의 교육 효과에 있어서 차이가 있는지 알아보았다. 이를 위하여 학습자의 인지 수준에 따라 실험반과 통제반의 사전, 사후 개념검사 점수의 독립표본 T검정을 실시한 결과를 Table 9과 Table 10에 제시하였다.

분석 결과, 고등학교 1학년의 경우에는 형식적 조

작기와 과도기의 실험반과 통제반 사전 검사 점수는 통계적으로 유의미한 차이가 없어서 동질 집단으로 볼 수 있었으며, 사후 검사 결과에서 실험반이 통제반보다 유의미하게 높은 점수를 얻는 것으로 나타났다. 즉, 형식적 조작기와 과도기 학생들에게 입지 수준의 학습 자료가 효과적임을 확인할 수 있었다. 그러나 구체적 조작기의 경우에는 사전 검사에서도 실험반이 통제반보다 평균이 유의미하게 높았기 때문에 사전 검사 점수를 공변인으로 하고 사후 검사 점수의 차이를 공변량분석하여 Table 11에 제시하였다.

고등학교 1학년 구체적 조작기 학생들의 사전 검사를 공변인으로 하고, 사후 검사 결과를 변량분석한 결과, 실험반과 통제반의 사후 검사 점수에 유의미한 차이가 없는 것으로 분석되었다. 따라서 이 연구에서 개

Table 11. ANCOVA of experiment group and control group in 10th grade concrete level

Source	SS	df	MS	F	Sig.
Corrected Model	45.63	2	22.81	5.88	0.01
Intercept	29.77	1	29.77	7.67	0.01
Covariance(pre-test)	24.36	1	24.36	6.28	0.02
Treatment	1.50	1	1.50	0.39	0.54
Error	135.85	35	3.88		
Total	960.00	38			
Corrected total	181.47	37			

발한 입자 수준의 학습 자료는 구체적 조작기 학생들에게는 효과가 없다고 할 수 있다. 이는 구체적 조작기에 해당하는 고등학교 1학년 학생들의 수가 매우 적었기 때문일 가능성도 배제할 수 없다.

Table 10를 볼 때, 고등학교 2학년의 경우에는 사전 검사점수는 통계적으로 유의미한 차이가 없었다. 그리고 형식적 조작기 학생들의 사후 검사 결과를 비교할 때 실험반이 통제반보다 유의미하게 높은 점수를 나타내었다. 따라서 고등학교 2학년의 경우에는 입자 수준의 학습 자료가 형식적 조작기 학생들에게 효과가 있었음을 알 수 있다.

이러한 연구 결과는 입자 수준의 컴퓨터 시뮬레이션의 효과를 알아본 연구²⁶결과와 일치하지만, 다른 선행연구들^{2,26}의 결과와는 상반되는 것이다. 다른 선행

행연구들에서는 이러한 입자 수준에서 묘사된 보조 수업 자료들이 형식적 조작기 학생들보다는 구체적 조작기나 과도기 학생들에게 효과적이라고 주장하였다. 그러나 이러한 결과들은 주로 중학교 수준의 연구에서 밝힌 것이다. 따라서 이 연구와 같이 고등학교 수준의 내용을 깊이 있게 다루는 경우에는 오히려 형식적 조작기 학생들의 이해에 큰 도움이 될 수 있다는 점을 확인할 수 있었다.

계열과 인지수준별 적용 효과. 고등학교 2학년의 경우에는 계열과 인지수준에 따른 보조수업 자료의 효과를 알아보기 위하여 사전검사 결과를 공변인으로 하고, 이원공변량분석을 한 결과를 Table 12에 제시하였다.

Table 12에 따르면, 유의수준 0.05에서 계열과 인지

Table 12. ANCOVA of experiment group and control group by major and cognitive level in 11th grade

Source	SS	df	MS	F	Sig.
Corrected Model	514.97	12	42.91	19.32	0.00
Intercept	372.67	1	372.67	167.81	0.00
Covariance(pre-test)	103.67	1	103.67	46.68	0.00
Treatment	6.77	1	6.77	3.05	0.08
Major	46.79	1	46.79	21.07	0.00
Cognitive level	16.25	2	8.13	3.66	0.03
Treatment * Major	1.46	1	1.46	0.66	0.42
Treatment * Cognitive level	9.43	2	4.71	2.12	0.12
Treatment * Major * Cognitive level	10.50	2	5.25	2.37	0.10
Error	546.32	246	2.22		
Total	6483.00	259			
Corrected Total	1061.28	258			

Table 13. ANCOVA of experiment group and control group by major in 11th grade

Major	N	Adj. M	SD	F	p
Natural Science	60	5.82	0.22	41.30	0.00 [*]
Humanities	199	4.20	0.12		

*p<.05

수준에 따른 효과를 확인할 수 있었다. 이를 보다 자세히 알아보기 위하여 사전 검사 결과를 공변인으로서 하고 실험반과 통제반의 사후 검사의 교정평균값을 비교한 결과를 Table 13에 제시하였다. 그 결과 자연계열 학생들이 인문계열 학생들보다 사후 검사 평균이 유의미하게 높은 것을 확인할 수 있었다. 따라서 이 연구에서 개발한 보조수업 자료는 형식적 조작기의 학생들과 자연계열 학생들에게 보다 효과적이라고 할 수 있다. 그러나 Table 12에서 계열과 인지수준의 상호작용 효과는 나타나지 않았다.

결론 및 제언

이 연구에서는 고등학교 화학 II 교과서에 제시되어 있는 용액 단원의 내용을 중심으로 미시적인 입자 수준의 컴퓨터 보조 수업 자료를 개발하고, 고등학교 1학년과 2학년 학생들에게 적용한 후 학습의 향상 효과를 분석하였다. 자료의 제작 과정에서 시뮬레이션 형태의 자료는 실제 상황과 다르게 많은 연산을 수행할 경우 컴퓨터의 수행 능력에 무리를 주어 빠른 속도의 처리가 일어나지 않기 때문에 많은 양의 입자의 움직임을 동시에 표현함으로써 자연 현상과 유사한 형태로 표현하는 것이 어려웠다. 따라서 구현하고자 하는 목적을 보여 주기에 적절한 수준의 최적 조건을 맞추려고 노력하였다.

‘물은 용액은 성질’ 단원을 학습하는 고등학교 1학년과 2학년 학생들을 대상으로 실험반과 통제반으로 구분하여 개발한 보조 수업 자료의 교육적 효과를 알아본 결과에 따르면, 이 자료는 교육적 효과를 뚜렷하게 나타내었으며 특히 1학년의 경우에는 과도기와 형식적 조작기 학생들에게, 그리고 고등학교 2학년의 경우에는 형식적 조작기 학생들과 자연계열 학생들의 이해 향상에 큰 도움이 되는 것으로 나타났다. 보편적으로 영상적으로 표현된 교수 자료들이 형식적 조작기 학생들보다는 구체적 조작기 학생들에게, 과학에 관심이 높은 자연계열보다는 인문계열 학생들에게 큰 도움이 될 것이라는 기대와는 달리 이러한 교육적 효과가 나타난 이유는 다루는 내용이 화학 II 교육과정 수준의 깊이 있는 지식을 요구하는 내용이었기 때문이라고 생각한다. 따라서 어느 정도 이에 대한 이해가 가능한 학생들에게 이러한 개발 자료는 더욱 교육적 효과를 나타낼 수 있었다고 볼 수 있다.

최근 학교 교육에서 ICT를 강조하고, 인터넷의 발달로 많은 과학교육 자료들이 개발·보급되었지만, 화학 개념을 올바르게 이해하기 위해 필요한 미시적인 입자 수준의 설명이 이루어진 자료는 거의 없었다. 특히 고등학교 수준에서 다루어지는 용액 단원과 관련된 입자 수준의 애니메이션, 시뮬레이션, 동영상 자료는 매우 드물었다. 많은 컴퓨터 보조 자료들은 주로 텍스트 형식이거나 단순한 그림 형식으로 교과서와 참고서의 내용을 화면 위에 옮겨 놓은 형태를 취하였다. 이러한 자료들은 학생들에게 화학의 근본적인 원리로 주요 개념들을 이해시키는데 어려움이 많다. 그리고 개발된 자료의 대부분은 초등학교나 중학교 수준의 저학년에 초점을 맞춘 것들이었으며, 고등학교 이상의 수준에 맞는 보조 자료는 드물었다. 따라서 고등학교 이상에서 이루어지는 교육에서는 주로 교과서를 중심으로 강의하는 형태가 보편적이었다.

그러나 이 연구를 통해 고등학교 2학년 수준의 교육 내용에서 형식적 조작기 학생들이나 자연계열 학생들의 이해에 더욱 효과적인 교수 자료의 개발 가능성이 드러나게 되었다. 특히 개발한 자료에서 강조한 점이라고 할 수 있는, 미시적인 입자 수준에서 화학의 현상들과 원리들을 설명하고 표현하는 방식은 과학을 계속 공부할 학생들의 이해에 큰 도움을 주었다는 점은 매우 중요한 것이라고 할 수 있다. 따라서 앞으로 화학의 원리와 개념을 제대로 설명해 줄 수 있는 깊이 있는 수준의 교수 자료 개발이 지속될 필요가 있다고 본다.

이 연구에서는 개발된 자료의 일부분을 고등학교 1학년과 2학년 학생들에게 부분적으로 적용하여 그 효과를 알아보았다. 앞으로는 개발 자료를 현장 교사들에게 보급하여서 그 교육적 효과를 광범위하게 검증받을 필요가 있다고 본다. 또한 이러한 검증 자료를 근거로 앞으로도 계속 자료의 개선이 이루어져야 할 것이다.

이 연구는 2004년도 학술진흥재단 교과교육공동연구지원사업(KRF-2004-030-B00029)에 의해 수행되었습니다.

인용문헌

1. 백성혜, *교원교육*, 1999, 15(1), 160.

2. Bar, V.; Galili, I., *International Journal of Science Education*, 1994, 16(2), 157.
3. Chang, J.-Y., *Science Education*, 1999, 83(5), 511.
4. Johnson, P., *International Journal of Science Education*, 1998, 20(5), 567.
5. Stavy, R., *Journal of Research in Science Teaching*, 1990, 27(3), 247.
6. Tytler, R., *International Journal of Science Education*, 2000, 22(5), 447.
7. 김진규, *중학교 과학에서 애니메이션 자료 개발 및 컴퓨터 보조 수업의 효과*, 한국교원대학교 석사학위논문, 2002.
8. Noh, T. H.; Kim, C. M.; Cha, J. H.; Jeon, K. M., *The Korean Association for Research in Science Education*, 1998, 18(3), 337.
9. 윤 용: 정지오; 박종식; 김영호, *고등학교 화학 II*. (주)교학사: 서울, 2002; p 68.
10. 서정쌍, 허성일, 김출배, 박종욱, 하윤경, 임영중, 배병일, *고등학교 화학 II*. (주)금성출판사: 서울, 2002; p 56.
11. 우규환, 최석남, 오두환, 한은택, 김봉래, 강봉주, *고등학교 화학 II*. (주)중앙교육진흥연구소: 서울, 2002; p 48.
12. 여상인, 이진승, 김홍석, *고등학교 화학 II*. (주)지학사: 서울, 2002; p 48.
13. 김희준, 윤경병, 이준용, 황성용, 이복영, 진화영, *고등학교 화학 II*. (주)천재교육: 서울, 2002; p 46.
14. 여수동, 여환진, 장영근, 이규옥, 조춘현, 박헌영, 양도권, 이충길, *고등학교 화학 II*. 창문각: 서울, 2002; p 54.
15. 송호봉, 이재호, 이진현, 강금덕, 양기열, 구인선, 정관영, *고등학교 화학 II*. 도서출판 형설: 서울, 2002; p 50.
16. 고영환, *화학과 생물 교과서에 제시된 삼투 개념과 고등학교 과학 교사와 학생의 삼투 개념 분석*, 한국교원대학교 박사학위논문, 2002.
17. 윤영기, *조별토론 수업을 통한 증기압력 개념에 대한 개념 형성 연구*, 이화여자대학교 교육대학원 석사학위논문, 1997.
18. 정애경, *증발과 끓음에 대한 중등 교과서의 개념간 관련성 분석 및 과학 교사들의 인식 조사*, 한국교원대학교 석사학위논문, 2003.
19. 김주현: 이종준; 김선경; 강성주; 백성혜, *대한화학회지*, 2000, 44(6), 611.
20. Williamson, V. M.; Abraham, M. R., *Journal of Research in Science Teaching*, 1995, 32(5), 521.
21. Gabel, D. L., *Journal of Chemical Education*, 1993, 70(3), 193.
22. 김수현, *초등학교 자연과 분자 단위 학습에서 입자성을 강조한 동적 자료와 정적 자료의 교수 효과 비교*, 청주교육대학교 석사학위논문, 2000.
23. 김선자, *초등학교 자연과 용해단위 학습에서 입자성을 강조한 컴퓨터 애니메이션 자료의 교수효과*, 청주교육대학교 석사학위논문, 1998.
24. 채종락, *Anderson의 요술안경 교수방법이 초등학교 6학년 아동들의 자연학습에 미치는 효과분석*, 한국교원대학교 석사학위논문, 1997.
25. 남금표, *중학교 과학과 전기 단위 학습에서 입자성을 강조한 컴퓨터 보조자료의 개발 및 적용*, 한국교원대학교 석사학위논문, 2002.
26. 서형근, *컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 수업이 화합평형 개념형성에 미치는 영향*, 한국교원대학교 석사학위논문, 2001.