

수리 문제와 개념 문제 사이의 유도 효과

노태희 · 강훈식 · 전경문*
(서울대학교) · (광주교육대학교)*

Inductive Influence of Algorithmic and Conceptual Problems

Noh, Tae-Hee · Kang, Hun-Sik · Jeon, Kyung-Moon*
(Seoul National University) · (Gwangju National University of Education)*

ABSTRACT

This study investigated whether algorithmic problem solving and conceptual problem solving influenced each other or not. Four classes of 12th grade (N=112) that are equal in prior achievement were randomly assigned to group AC (Algorithmic-Conceptual problem) and group CA (Conceptual-Algorithmic problem). Students of group AC solved the conceptual problems after learning the related algorithmic problems, and those of group CA solved the same problems in reverse order. The results revealed that learning the algorithmic problems improved students' ability to solve the related conceptual problems, but learning the conceptual problems did not help students solve the related algorithmic problems. Regarding the confidence on problem solving, learning the algorithmic problems had little effect on the related conceptual problems. Learning the conceptual problems also had little effect on students' confidence on solving of the related algorithmic problems.

Key words: algorithmic problem, conceptual problem, problem solving ability, confidence on problem solving

I. 서론

전통적으로 수리 문제 해결과 개념의 이해는 과학 교육에서 매우 중요하게 다루고 있는 목표들이다(Stewart, 1982). 그리고 오랫동안 많은 연구자들이 이들의 관계에 대해 상당한 관심을 가져 왔다. 많은 선행 연구들은 수리 문제 해결력과 개념 문제 해결력 사이에 큰 차이가 있는 것으로 보고하고 있다. 즉, 학생들은 공식이나 비례식이 필요한 수리 문제는 잘 해결할지라도 그 수리 문제와 관련된 개념은 잘 이해하지 못하고 심지어는 많은 오개념을 가지고 있었다(Chiu, 2001; Nakhleh, *et al.*, 1996; Zoller *et al.*, 1995). 이는 결국 학생들이 통합적인 문제 해결 학

습을 받고 있지 못함을 의미한다. 수리 문제 해결과 개념 문제 해결을 통합하여 학습하는 것은 성공적이고 의미 있는 과학 학습을 위해 중요하다(Pushkin, 1998).

수리 문제 해결과 개념 문제 해결과의 관계는 이분법적인 것이 아니라 연속적인 것으로 특징지을 수 있다(Niaz, 1995). 진정한 의미의 수리 문제 해결력 향상을 위해서는 우선 관련 개념에 대해 이해하는 것이 중요하다(Heyworth, 1999). 학습자들은 영역에 대한 선언적 정보를 가진 후 그 선언적 지식을 수리 문제 해결과 관련된 과정적 지식으로 전환하며(Anderson, 1995), 수리 문제 해결을 통한 학습은 개념 학습과 관련된 선언적 지식을 적용하고 해석함으로써 일어날 수 있다(Glaser, 1994). 또

한, 화학에서의 개념은 주로 원자나 분자와 같은 미시적 수준의 표상을 다루고 있으므로, 이러한 표상에 포함된 개념을 이해함으로써 문제를 해결하는 데 필요한 과정적 지식을 보다 쉽게 탐색할 수 있을 것이다(Gagne *et al.*, 1993). 이에 Neto와 Valente(1997)는 문제 해결에 있어 정성적인 학습에 보다 중점을 두어야 한다고 제안하기도 하였다.

이와 반대로 수리 문제의 해결도 개념 문제의 해결을 도와줄 수 있다고 제안된다. 학생들은 특별한 예로부터 일반적인 개념을 배울 수 있으며(Laurillard, 1993), 정량적인 추론을 이용하여 문제를 해결하는 과정을 이해함으로써 그 문제에 포함된 개념을 이해하는 데 도움을 받을 수 있다(Dukes *et al.*, 2002). 또한, 수리 문제 해결 과정에서 매우 중요한 단계로 인식되는 과정적 지식은 개념 문제 해결 과정에서 요구되는 선언적 지식보다 환경에 보다 빠르게 반응하므로(Chiu, 2001), 학생들은 과정적 지식이 추론되는 원리의 이해를 통해 보다 효율적으로 개념적 지식을 이해할 수 있을 것으로 기대된다.

이처럼 수리 문제 해결과 개념 문제 해결은 서로에게 영향을 미칠 가능성이 있다. 그러나 이런 가능성에도 불구하고, 실제로 두 가지 문제 해결력 사이의 유도 효과를 조사한 연구는 미흡한 실정이다. 일부 행해진 연구들도 주로 물리 영역에서 진행되었으며, 그 결과도 혼재되어 있다. 예를 들어, Dukes *et al.*(2002)이 뉴턴 역학을 수강하는 대학생들을 대상으로 실시한 연구에서는 수리 문제를 먼저 해결하는 활동이 관련된 개념 문제를 해결하는 능력을 향상시키는 것으로 나타났으나, Kim과 Pak(2002)이 일반 물리를 수강하는 국내 학생들을 대상으로 실시한 연구에서는 수리 문제를 많이 풀어본 경험이 기본 개념을 이해하는 데에 별 도움이 되지 못하는 것으로 나타났다.

이에 이 연구에서는 일부 화학 단원(화학양론, 기체 법칙)에서 수리 문제 해결과 개념 문제 해결이 서로 영향을 미치는지 조사하고자 한다. 이 연구의 구체적인 목표는 다음과 같다.

- 1) 화학 수리 문제를 먼저 해결하고 그 답안지를 학습하는 경험(수리 문제 해결에 대한 학습)이 관련된 개념 문제를 해결하는데 도움이 되는가? 반대로, 화학 개념 문제를 먼저 해결하고 그 답안지를 학습하는 경험(개념 문제 해결에 대한 학습)이 관련된 수리 문제를 해결하는데 도움이 되는가?
- 2) 화학 수리 문제 해결에 대한 학습이 관련된 개념 문

제 해결에 대한 자신감 향상에 도움이 되는가? 반대로, 화학 개념 문제 해결에 대한 학습이 관련된 수리 문제 해결에 대한 자신감 향상에 도움이 되는가?

II. 연구 내용 및 방법

1. 연구 대상 및 시기

이 연구는 서울시에 위치한 일반계 고등학교 3학년 이과 4학급(N=112)을 대상으로 실시하였다. 2학년 화학 성적이 유사하도록 2학급씩 두 집단으로 구분한 후, 수리 문제(Algorithmic problem) 해결에 대한 학습을 수행한 후 개념 문제(Conceptual problem)를 해결하는 AC 집단(n=54)과 개념 문제 해결에 대한 학습을 수행한 후 수리 문제를 해결하는 CA 집단(n=58)으로 무선 할당하였다. 연구 대상 학교에서는 2학년 1학기부터 매주 2시간씩 화학 수업을 실시하고 있으며, 검사는 '화학양론'과 '기체 법칙' 내용 학습이 끝난 후인 3학년 1학기 정규 화학 수업 시간(차시 당 50분)에 실시하였다.

2. 검사 도구

이 연구에서 사용한 검사 도구는 공식이나 단순한 비례식을 사용하여 해결하는 '수리 문제'와 그 문제의 바탕에 있는 개념의 이해를 요하고 분자 수준(molecular level)의 그림으로 제시된 '개념 문제'를 쌍으로 하는 4쌍의 문항(화학양론 2쌍, 기체 법칙 2쌍)으로 구성되어 있다. 모든 문항은 문헌(Nakhleh, 1993; Noh & Scharmann, 1997; Nurrenbern & Pickering 1987)에서 취했으며, 객관식 5지 선다형이다. 검사 문항의 예를 〈부록〉에 제시하였다. 각 문항에 대해 자신의 답에 대한 자신감을 묻는 5단계 리커트 문항도 함께 제시하였으며, 수리 문제와 개념 문제 해결에 대한 자신감의 내적 신뢰도(Cronbach's α)는 각각 .86, .81이었다.

3. 검사 절차

검사는 총 두 차시에 걸쳐 진행하였다. AC 집단의 학생들은 1차시에 수리 문제(4문제) 해결에 대한 학습을 수행한 후 2차시에 개념 문제(4문제)를 해결하였으며, CA 집단의 학생들은 1차시에 개념 문제(4문제) 해결에 대한

학습을 수행한 후 2차시에 수리 문제(4문제)를 해결하였다. 1차시에는 각 집단에 해당하는 개념 또는 수리 문제를 학생들이 먼저 해결하도록 한 후, 검사지를 수거하고 답안을 제공하여 학생들이 문제 풀이 내용을 스스로 학습하도록 하였다. 이 때, 수리 문제의 답안에는 개념과 관련된 진술 없이 공식이나 비례식만을 이용하였고, 개념 문제의 답안에는 수식이나 공식 없이 정성적인 개념만을 문장으로 제시하였으며, 교사는 순회하면서 학생들을 지도하였다. 2차시에는 각 집단에 해당하는 수리 또는 개념 문제만 해결하도록 하고 문제 해결에 대한 학습 활동은 실시하지 않았다. 모든 문항에 대해 자신의 답에 대한 자신감을 묻는 리커트 문항을 함께 제시하였다. 이 연구의 검사 절차를 요약하면 Table 1과 같다.

4. 분석 방법

먼저 수리 문제 해결력 및 개념 문제 해결력과 유의미한 상관이 있는 2학년 화학 성적(수리: $r=.486$, 개념: $r=.365$, $p<.01$)에 기초하여 화학 성취도에 대한 두 집단의 사전 동질성을 확인하였다($t=1.83$, $p>.05$). 수리 문제 해결에 대한 학습이 관련된 개념 문제의 해결력에 미치는 영향을 알아보기 위해 수리 문제 해결에 대한 학습을 수행하기 전(CA 집단)과 수행한 후(AC 집단)의 개념 문제 해결력을 전체 및 문항별로 비교하였다. 즉, 집단 간 전체 개념 문제 해결력을 독립 표집 t 검증(independent t-test)으로 비교하였고, 연구의 결과가 특정 문항에 의해 좌우되는지를 알아보기 위해 각 개념 문항들의 정답 빈도에 대한 χ^2 검증을 실시하였다. 또한 AC 집단 내 수리 문제 해결력과 개념 문제 해결력을 종속 표집 t 검증(paired t-test)으로 비교하였다. 그리고 수리 문제 해결에 대한

학습이 관련된 개념 문제 해결에 대한 자신감의 향상에 도움이 되는지를 알아보기 위해 AC 집단과 CA 집단의 개념 문제 해결에 대한 자신감의 평균을 독립 표집 t 검증(independent t-test)으로 비교하였다.¹⁾ 그러나 한 셀(cell)당 기대 빈도가 5이하인 경우가 많아 문항별로 χ^2 검증을 실시하지는 못하였다(송인섭, 2003). 개념 문제 해결에 대한 학습이 관련된 수리 문제의 해결에 미치는 영향에 대해서는 위와 반대 방법으로 비교하였다. 통계 분석에는 SPSS 통계 패키지를 사용하였다.

Ⅲ. 결과 및 논의

1. 문제 해결력에 미치는 효과

문제 해결력 검사 점수의 평균과 표준 편차, 그리고 이에 대한 집단 간 독립 표집 t 검증 결과와 집단 내 종속 표집 t 검증 결과를 Table 2에 제시하였다. AC 집단의 학생들은 수리 문제를 해결하고($M=2.33$) 이에 대해 학습한 후 개념 문제를 해결하였고($M=2.00$), CA 집단의 학생들은 개념 문제를 해결하고($M=1.02$) 이에 대해 학습한 후 수리 문제를 해결하였다($M=2.36$). 본 분석에 앞서 수리 문제와 개념 문제의 사전 평균을 비교한 결과, 수리 문제의 사전 평균(AC 집단: 2.33)이 개념 문제의 사전 평균(CA 집단: 1.02)보다 통계적으로 유의미하게 높았다($t=5.38$, $p=.000$). 이는 수리 문제의 해결력과 개념 문제 해결력 사이에 차이가 있다는 선행 연구를 지지하는 결과라 할 수 있다(Chiu, 2001; Zoller *et al.*, 1995).

그러나 본 분석에서 수리 문제 해결에 대한 학습을 수행한 후 개념 문제를 해결하도록 했을 경우(AC 집단)에는 수리 문제(2.33)와 개념 문제(2.00)의 평균 차이가 통계적

Table 1. Process of the test

	First (Test & Learning)	Second (Test)
Group AC	4 Algorithmic problems (A) → provide solutions using formula or proportion	4 Conceptual problems (C)
Group CA	4 Conceptual problems (C) → provide solutions using qualitative sentence	4 Algorithmic problems (A)

1) 4문항의 점수를 합산하여 계산하는 과정에서 점수 분포가 4-20점 사이에 넓게 퍼져 있어서 빈도수 분석인 χ^2 검증 대신 독립 표집 t검증(independent t-test)으로 분석하였다.

Table 2. Means, standard deviations, and results of independent/paired t-test on the scores of the problem solving ability test between/within groups

	Group AC (N=54)			Group CA (N=58)		t	p
	M	SD		M	SD		
Conceptual (4) ¹	2.00	1.47	(After A)	1.02	1.02	4.10	.000
Algorithmic (4) ¹	2.33	1.50		2.36	1.50	(After C)	-.10 .919
t		-1.48			-7.69		
p		.146			.000		

¹is a full marks.

으로 유의미하지 않게 되었다(Table 2). 또한, 수리 문제 해결에 대한 학습을 수행한 집단의 개념 문제 평균(AC 집단: 2.00)이 수행하지 않은 집단의 개념 문제 평균(CA 집단: 1.02)보다 유의미하게 높았다($p < .001$). 이러한 결과들은 비록 개념과 수리 문제의 평균이 모두 만점(4점)에 비해 낮은 경향이 있었지만, 수리 문제 해결에 대한 학습이 관련된 개념 문제 해결력의 향상에 어느 정도 도움이 되었다는 것을 의미한다. 수리 문제 해결에서 수식이나 상징적 표상을 사용한 경험(Chiu, 2001)이나, 수리 문제 해결에 대한 학습을 통해 알고리즘이 어떤 원리로부터 추론되는지에 주의를 기울인 것이 관련된 개념 문제를 해결하는 데 도움이 된 것으로 보인다(Dukes *et al.*, 2002; Schrader, 1987). 예를 들어, 화학양론의 수리 문제를 통해 화학 반응식의 계수비가 입자의 몰 수 또는 개수비와 같다는 개념이나 제한 물질(limiting reagent)의 개념을 확인해본 경험이 관련된 개념 문제를 해결하는데 유용하게 활용될 수 있다. 또한, 기체 법칙의 경우, 이상기체 상태 방정식($PV=nRT$)을 통해 압력(P), 부피(V), 몰 수(n), 절대 온도(T)의 관계를 미리 가능해봄으로써 관련된 개념 문제를 해결하는 데에 도움을 받을 가능성이 있다. 그러나 학생들이 수리 문제를 통해 이해한 것을 개념 문제 해결에 어떻게 이용했는지에 대해서는 구체적으로 알 수 없으므로, 이에 대한 정성적인 연구가 필요하다.

개념 문제 해결에 대한 학습을 수행하기 전과 후의 수리 문제 평균을 비교한 결과에서는 수행 전(AC 집단: 2.33)과 수행 후(CA 집단: 2.36)의 평균 차이가 통계적으로 유의미하지 않았다. 즉, 수리 문제를 해결하기 전에 관련된 개념을 이해하는 것이 수리 문제의 해결에 도움이 될 수 있다는 선행 연구의 주장(Gagne *et al.*, 1993; Niaz, 1995)과는 달리, 이 연구에서는 개념 문제 해결에

대한 학습이 관련된 수리 문제를 해결하는 데에 거의 도움이 되지 않는 것으로 나타났다. 이는 학생들이 자신이 이해한 개념을 수리적 문제 해결과 연결시키는 능력이 부족하거나(Chiu, 2001), 수리 문제는 개념을 정확히 알지 못해도 단순히 공식이나 풀이 과정을 암기하여 풀거나(Pushkin, 1998; Schrader, 1987), 물질의 입자성에 대해 어느 정도 이해하고 있어도 이것을 수리 문제 해결에 활용하지 않기 때문일 수 있다(Wolfer, 2000).

문항별 정답 빈도를 χ^2 검증으로 비교한 결과(Table 3), 모든 개념 문제에서 AC 집단의 정답 빈도가 CA 집단보다 유의미하게 높았으나, 수리 문제의 경우 모든 문항에서 두 집단 간 정답 빈도 차이가 통계적으로 유의미하지 않았다. 이는 수리 문제 해결에 대한 학습이 관련된 개념 문제를 해결하는데 도움이 되는 반면 개념 문제 해결에 대한 학습이 관련된 수리 문제를 해결하는 데에는 별 도움이 되지 못한다는 이 연구의 결과가, 특정 문항에 의해 좌우되는 것이 아니라 화학양론이나 기체 법칙과 관련된 문항들에서 공통적으로 나타났다는 것을 의미한다.

2. 자신감에 미치는 효과

개념 문제와 수리 문제 해결에 대한 자신감의 평균과 표준 편차, 그리고 집단 간 독립 표집 t 검증 결과는 Table 4와 같다. 개념 문제에 대한 자신감에서 AC 집단의 전체 평균(2.74)이 CA 집단의 전체 평균(2.66)보다 높았으나, 그 차이가 통계적으로 유의미하지는 않았다. 즉, AC 집단의 경우 수리 문제 해결에 대한 학습을 통해 관련된 개념 문제를 해결하는 능력이 향상되었음에도 불구하고, 개념 문제 해결에 대한 자신감은 여전히 향상되지 않았다. 그리고 개념 문제 해결에 대한 자신감의 평균들

Table 3. Results of test on frequencies of correct answer in each conceptual and algorithmic problems between groups

		Frequency of correct answer		χ^2	p
		Group AC (N=54)	Group CA (N=58)		
Conceptual	Stoichiometry 1	34	18	11.46	.001
	Stoichiometry 2	28	17	5.91	.015
	Gas law 1	28	14	9.16	.002
	Gas law 2	18	10	3.86	.049
Algorithmic	Stoichiometry 1	28	32	.12	.725
	Stoichiometry 2	23	32	1.77	.183
	Gas law 1	37	35	.81	.367
	Gas law 2	38	38	.30	.583

Table 4. Means, standard deviations, and results of independent t-test on the scores of the confidence test on solving of the conceptual and the algorithmic problems between groups

	Group AC (N=54)		Group CA (N=58)		t	p
	M	SD	M	SD		
Conceptual (5) ¹	2.74	.94	2.66	.90	.44	.660
Algorithmic (5) ¹	2.94	.93	2.89	1.30	.25	.806

¹is a full marks.

이 모두 중앙값(3점)보다 낮은 것으로 보아, 학생들은 여전히 미시적 관점에서 화학 개념을 이해하는 것을 어려워한다고 생각할 수 있다.

집단 간 수리 문제 해결에 대한 자신감을 비교한 결과에서도 집단 간에 통계적으로 유의미한 차이가 나타나지 않았다. 즉, 개념 문제 해결에 대한 학습(CA 집단)도 관련된 수리 문제 해결에 대한 자신감을 향상시키지 못했다.

IV. 결론 및 제언

이 연구에서는 화학 수리 문제 해결과 개념 문제 해결이 서로 어떤 영향을 미치는지를 문제 해결력과 문제 해결에 대한 자신감 측면에서 조사하였다.

연구 결과, 수리 문제 해결에 대한 학습이 관련된 개념 문제 해결력을 향상시키는 것으로 나타났다. 이는 수리 문제의 해결 과정을 이해하게 하는 것이 관련된 개념의 이해를 도울 수 있는 하나의 방안이 될 수 있음을 시사한다. 그러나 개념 문제 해결에 대한 학습은 관련된 수리 문

제 해결력을 향상시키지 못하였다. 이러한 결과는 문제 해결에 있어 정성적인 학습에 보다 중점을 두어야 한다는 주장(Neto & Valente, 1997)과 상반되는 것으로, 학생들이 자신이 이해한 개념을 수리적 문제 해결과 연결시키는 능력이 부족하기 때문일 수 있다(Chiu, 2001). 따라서 개념의 이해가 수리 문제의 해결에 도움이 되기 위해서는 개념 이해를 수리 문제 해결에 조직적으로 연결시키도록 유도하는 방안을 강구할 필요가 있다. 예를 들어, 개념 문제와 수리 문제를 통합하여 제시하는 것이 이를 위한 하나의 방안이 될 수 있을 것이다(Nakhleh *et al.*, 1996). 또한, 이 연구에서 이루어진 수리나 개념 문제 해결에 대한 학습 기간이 짧았고, 학생 스스로 학습하는 과정이 효과적으로 이루어지지 않았을 가능성도 있으므로, 수리나 개념 문제 해결에 대한 학습을 보다 효과적으로 진행하는 방안을 모색하여 이 연구의 결과를 추가적으로 조사해보아야 할 것이다.

문제 해결에 대한 자신감 결과에서는 수리 문제 해결에 대한 학습이 관련된 개념 문제의 해결에 대한 자신감에

별 영향을 미치지 못하였으며, 개념 문제 해결에 대한 학습도 관련된 수리 문제의 해결에 대한 자신감에 별 영향을 미치지 못하였다. 문제 해결에 대한 자신감과 관련 지식에 대한 충분한 이해가 관련이 있다는 점에 비추어볼 때(Reid & Yang, 2002), 이 연구에서 진행된 1차시의 학습 시간은 문제 해결에 대한 자신감을 향상시키기에는 짧았을 가능성이 있다. 따라서 보다 타당하고 의미 있는 결과를 얻기 위해서는 충분한 학습 시간이나 효과적인 학습 방법을 제공한 후 문제 해결에 대한 자신감을 조사해볼 필요가 있다.

한편, 이 연구의 결과는 모두 정량적인 검사 자료로부터 얻어진 것이므로, 수리 문제 해결과 개념 문제 해결이 구체적으로 어떤 과정을 통해 서로 영향을 미치는지에 대해서는 알기 어렵다. 따라서 이 연구의 결과를 보다 심도 있게 이해하기 위해서는 문제 해결 과정에 대한 정성적인 연구가 필요하다. 또한 이 연구에서는 개념 문제가 모두 그림으로 주어졌으므로, 문장으로 주어진 개념 문제(Beall & Prescott, 1994)와 같은 다양한 형태의 개념 문제들을 고려하여 수리 문제 해결과 개념 문제 해결 사이의 관계를 추가적으로 조사해 보아야 한다. 그리고 이 연구에서 사용한 문항은 4쌍(화학양론 2쌍, 기체 법칙 2쌍)뿐이었으므로, 이 연구의 결과를 일반화하기 위해서는 보다 많은 주제 영역과 연구 대상에 대하여 지속적인 연구가 필요하다.

국 문 요 약

이 연구에서는 화학 영역에서 수리 문제 해결과 개념 문제 해결이 서로 영향을 미치는지를 조사하였다. 서울 소재 고등학교에서 사전 화학 성적이 유사한 4학년(N=112)을 선정하여 AC(Algorithmic-Conceptual problem) 집단과 CA(Conceptual-Algorithmic problem) 집단으로 무선 할당하였다. AC 집단의 학생들은 수리 문제 해결에 대한 학습을 수행한 후 개념 문제를 해결하였으며, CA 집단의 학생들은 개념 문제 해결에 대한 학습을 수행한 후 수리 문제를 해결하였다. 연구 결과, 수리 문제 해결에 대한 학습은 관련된 개념 문제의 해결력을 향상시켰으나, 개념 문제 해결에 대한 학습은 관련된 수리 문제의 해결력에 도움이 되지 못하는 것으로 나타났다. 문제 해결에 대한 자신감에서는 수리 문제 해결에 대한 학습이 관련된 개념 문제에 큰 영향을 주지 못했으며, 개념 문제

해결에 대한 학습도 관련된 수리 문제 해결에 대한 자신감에 큰 영향을 주지 못했다.

참 고 문 헌

- 송인섭(2003). 통계학의 이해. 서울: 학지사.
- Anderson, J. R.(1995). *Learning and Memory: An Integrated Approach*. New York: John Wiley & Sons.
- Beall, H. & Prescott, S.(1994). Concepts and calculations in chemistry teaching and learning. *Journal of Chemical Education*, 71(2), 111-112.
- Chiu, M.-H.(2001). Algorithmic problem solving and conceptual understanding of chemistry by students at a local high school in Taiwan. *Proceedings of the National Science Council, Republic of China Part D: Mathematics, Science and Technology Education*, 11(1), 20-38.
- Dukes, P., Pritchard, D. E., & Morote, E.-S.(2002). *Inductive influence of related quantitative and conceptual problems*. A paper presented at the Annual Meeting of the National Association for Research in Science Teaching (New Orleans, LA, April 6-10), ED 463978.
- Gagne, E. D., Yekovish, C. W., & Yekovish, F. R.(1993). *The Cognitive Psychology of School Learning*. New York: Harper Collins College Publishers.
- Glaser, R.(1994). Learning theory and instruction. In G. d'Ydewalle, P. Eelen, & P. Bertelson (Eds.), *International Perspectives on Psychological Science*, Vol. 2: The state of the art (pp. 341-357). Hove, UK: Larence Erlbaum Associates.
- Heyworth, R. M.(1999). Procedural and conceptual knowledge of expert and novice students for the solving of a basic problem in chemistry. *International Journal of Science Education*, 21(2), 195-211.
- Kim, E. & Pak, S.-J.(2002). Students do not overcome conceptual difficulties after solving 1000 traditional problems. *American Journal of Physics*,

- 70(7), 759-765.
- Laurillard, D.(1993). *Rethinking university teaching: A framework for the effective use of educational technology*. New York: Routledge.
- Nakhleh, M. B.(1993). Are our students conceptual thinkers or algorithmic problem solvers? *Journal of Chemical Education*, 70(1), 52-55.
- Nakhleh, M. B., Lowrey, K. A., & Mitchell, R. C.(1996). Narrowing the gap between concepts and algorithms in freshman chemistry. *Journal of Chemical Education*, 73(8), 758-762.
- Neto, A. & Valente, M. O.(1997). *Problem solving in physics: Towards a metacognitively developed approach*. A paper presented at the Annual Meeting of the National Association for Research in Science Teaching (70th, Oak Brook, IL, March 21-24), ED 405217.
- Niaz, M.(1995). Progressive transitions from algorithmic to conceptual understanding in student ability to solve chemistry problems: A Lakatosian interpretation. *Science Education*, 79(1), 19-36.
- Noh, T. & Scharmann, L. C.(1997). Instructional influence of a molecular-level pictorial presentation of matter on students' conceptions and problem-solving ability. *Journal of Research in Science Teaching*, 34(2), 199-217.
- Nurrenbern, S. C. & Pickering, M.(1987). Concept learning versus problem solving: Is there a difference? *Journal of Chemical Education*, 64(6), 508-510.
- Pushkin, D. B.(1998). Introductory students, conceptual understanding, and algorithmic success. *Journal of Chemical Education*, 75(7), 809-810.
- Reid, N. & Yang, M.-J.(2002). The solving of problems in chemistry: The more open-ended problems. *Research in science & Technological Education*, 20(1), 83-98.
- Schrader, C. L.(1987). Using algorithms to teach problem solving. *Journal of Chemical Education*, 64(6), 518-519.
- Stewart, J.(1982). Two aspects of meaningful problem solving in science. *Science Education*, 66(7), 731-741.
- Wolfer, A. J.(2000). *Introductory college chemistry students' understanding of stoichiometry: Connections between conceptual and computational understandings and instruction*. Unpublished Doctoral Dissertation, Oregon State University.
- Zoller, U., Lubezky, A., Nakhleh, M. B., Tessier, B., & Dori, Y. J.(1995). Success on algorithmic and LOCS vs. conceptual chemistry exam questions. *Journal of Chemical Education*, 72(11), 987-989.