

다니엘 전지를 구성하는 염다리의 역할에 대한 고등학생, 화학교사, 그리고 예비 과학 교사들의 개념 유형 분석

박진희¹ · 김동욱² · 백성혜

(구암고등학교)¹ · (대구교육대학교)² · (한국교원대학교)

An Analysis of Conception Types of High School Students, Chemistry Teachers, and Pre-service Science Teachers about Salt Bridge of Daniel Electronic Cell

Jin-Hee Park¹ · Dong-Uk Kim² · Seoung-Hey Paik

(Gu Am High School)¹ · (Daegu University of Education)²

· (Korea National University of Education)

ABSTRACT

This study examined the conception types of high school students, chemistry teachers, and pre-service teachers about the salt bridge in Daniel cell by a questionnaire and follow-up interviews. High school chemistry II textbooks were analyzed for finding the cause of the understanding difficulties of the teachers and students. Pre-service teachers' thoughts examined for the problems of pre-service teacher programs. From the analysis, it was found that teachers only thought that the role of salt bridge is for ion movement of two solutions involving electrodes. But they didn't have the conception that salt bridge has a roll of connection a circuit. This result was similar to students' and pre-service teachers' results. It was possible that insufficient and different explanations of the textbooks were attributed the teachers' and students' conceptual difficulties.

Key words: daniel cell, high school chemistry teacher, pre-service teacher, high school student, salt bridge, misconception, closed circuit, movement of ion

I. 서 론

화학전지에 관련된 많은 연구들(Allop & George, 1982; Barral, *et al.*, 1992; Garnett & Treagust, 1992a; Garnett & Treagust, 1992b; Moran & Gileadi 1989; Ogude & Bradly, 1994; Ogude & Bradly, 1996; Ökaya, 2002; Sanger & Greenbowe, 1997a; Sanger & Greenbowe, 1997b)은 학생들이 가지는 오개념에 대해 분석하고, 공통적으로 학생들이 화학전지를 이해하는데 있

어서 어려움을 가진다고 지적하였다. 그리고 일부 연구에서는 이러한 학생들의 오개념을 개선하기 위한 교수법에 대해서도 연구하였다(Burke, *et al.*, 1997; Huddle, *et al.*, 2000; Morikawa & Williamson, 2001; Runo & Peters, 1993). 그러나 일부 논문(Butts & Smith, 1982; De Jong, *et al.*, 1995; Finely, *et al.*, 1982)에서는 학생들 뿐 아니라 과학 교사들조차도 자신들이 가르쳐야 하는 과학 개념에 대해 어려움을 가진다고 보고하였다.

또한 일부 연구에서는 교과서 서술의 문제점을 제기하

기도 하였다. 예를 들어 Ogude와 Bradley(1994; 1996)는 화학전지에서 일어나는 전자와 이온의 이동에 관한 미시적인 관점을 학생들이 가지지 못하는 점을 지적하고, 학생들이 이러한 관점을 제대로 가지고 있지 못한 이유로 교과서의 애매하고 충분하지 못한 설명을 들었다. Sanger와 Greenbowe(1997a)는 학생들이 염다리를 통해 전자가 이동하는 것이라고 생각한다는 점을 지적하였으며, 염다리를 통해 이온이 이동하게 되고 용액의 전기적 중성이 유지된다는 사실을 학생들이 거의 이해하지 못하고 있음을 확인하였다. 이와 관련된 다른 논문에서 이들은 학생들이 개념을 이해하지 못하는 문제가 발생하는 원인으로 교과서의 서술을 언급하였다(Sanger & Greenbowe, 1999). 그들은 대학에서 사용하는 화학교재를 분석하였는데, 교재의 설명 내용에서 찾을 수 있는 명백한 실수나 애매한 표현들, 불충분한 설명들이 학생들의 잘못된 생각을 유발하는 원인이라고 보았다. Okaya(2002)는 예비교사들을 대상으로 전기화학에 대한 개념을 조사하였는데, 예비교사들 역시 학생들과 유사한 어려움이 있음을 밝히고, 그 원인으로 역시 교재의 서술 방식을 문제점으로 지적하였다. 이들은 공통적으로 전기화학에 대한 학생들의 이해를 돕기 위해서는 수업이나 교재를 통해 충분한 설명이 제시될 필요가 있음을 제안하였다. Stylianidou 등(2002)은 과학교과서에 제시된 그림을 분석하여, 교과서 그림이 학생들의 학습에 매우 중요하므로 그림이 주는 이미지를 제대로 전달하기 위해서 교사들은 많은 시간과 노력을 기울여야 한다고 주장하였다.

외국 문헌 중 대학생을 대상으로 염다리 역할의 이해에 대한 어려움을 조사한 연구가 세 편(Garnett & Treagust, 1992a; Ogude & Bradly, 1994; Sanger & Greenbowe, 1997a) 정도 검색되었다. 그러나 아직 국내에서는 고등학생들의 이해를 조사한 연구가 두 편(박진희, 2003; 이순희 등, 2001) 있을 뿐, 화학교사들과 예비 교사들의 이해를 알아본 연구결과는 거의 없다. 그리고 교사들과 학생들이 염다리에 대한 역할을 이해하는데 어려움을 겪는 원인에 대하여 구체적으로 알아본 연구도 부족한 실정이다. 이 연구에서는 화학교사, 예비교사, 고등학교 학생들을 대상으로 염다리에 관련된 개념의 유형과 이들이 이를 이해하는 과정에서 겪는 어려움을 설문과 면담을 통하여 자세하게 알아보았다. 이와 함께 교사들과 학생들의 개념에 관련된 어려움의 유사성도 같이 분석하였다. 또한 교사들과 학생들이 사용하는 교과서를 분석하여 그 어려움의 원인

을 찾아보고자 하였다. 그리고 Pardhan과 Bano(2001)가 지적한 바와 같이, 교사의 대안개념은 교사 자신의 학습 경험과 관련 있다는 주장을 고려하여, 예비 교사에 대한 조사도 병행하였다.

II. 연구 방법

1. 연구 대상

대학원에 재학 중인 고등학교 화학교사 17명, 화학교육과 4학년에 재학 중인 예비교사 17명, 그리고 대학에 갓 입학한 화학교육과 1학년 학생 18명을 대상으로 하였다. 교사들은 남자 9명, 여자 8명으로 구성되었으며, 구성원의 경력은 5년 미만인 1명, 5년 이상 10년 미만이 11명, 10년 이상 15년 미만이 3명, 15년 이상 20년 미만이 1명, 20년 이상이 1명이었다. 예비교사들은 남 3명, 여 14명으로 구성되어 있으며, 17명 모두 대학에서 일반화학과 분석화학 과목을 통하여 전기화학을 배운 집단이었다. 고등학생의 경우에는 3학년에서 전기화학을 배우는데 이들을 연구대상으로 선정하기가 현실적으로 어려워, 그 대신 고등학교에서 전기화학을 배우고 대학에 갓 입학한 대학교 1학년 신입생을 대상으로 3월 초에 연구를 실시하였다. 구성원은 남자 6명, 여자 12명이며 이들 모두 화학Ⅱ를 배운 학생들이었다.

2. 연구 절차

선행 연구를 토대로 염다리에 관련된 오인과 개념의 어려움을 분석한 후, 현행 고등학교 교육과정에 맞추어 설문지를 개발하였다. 개발한 설문지는 예비 검사를 통해 일차 수정을 한 후, 과학교육전문가와 화학교사 3인의 검토를 통해 최종 수정, 보완하였다. 또한 설문지에 응한 연구 대상자들의 생각을 보다 구체적으로 알아보기 위하여 학생과 교사집단에서 대상을 선별하여 면담을 실시하였다. 면담은 설문을 통해 수집한 자료를 보강하는데 목적을 두었다. 설문자료를 토대로 이루어진 면담은, 비교적 자유롭게 대화하는 비구조화 면담이었다. 질문의 절차와 반응은 강요나 제한이 없는 개방적 형식이었다. 면담 대상은 자원자 위주로 하였으며, 설문지를 분석한 결과 필요하다 판단된 경우에는 연구자가 면담 대상을 직접 선정하였다. 학생집단은 그룹 면담을 실시하였는데, 이 경우

대화는 매우 활발하게 진행되었으나 연구대상자들끼리 서로 영향을 미치는 단점이 있었다. 따라서 교사들의 경우는 개별면담을 실시하였다. 면담에 소요된 시간은 30~40분 정도씩이었다. 분석대상 교과서는 고등학교 화학 II 교과서 12종(김시중 등, 2000; 박원기와 윤석진, 1999; 박택규 등, 2000; 소현수 등, 2000; 송호봉과 정용순, 2000; 여수동 등, 2000; 오재직 등, 1997; 우규환 등, 1997; 이운주 등, 2000; 이원식 등, 2000; 정구조 등, 2000; 최병순 등, 1998)이다.

3. 자료 처리

설문결과는 선택형 문항의 경우 응답률을 응답자의 수와 백분율로 나타내었다. 응답 선택에 대한 이유를 묻는 경우는 응답내용을 분석하여 같은 유형의 답을 범주화하여 유형별로 응답자의 수를 나타내었다. 면담한 대화는 모두 녹음하였고, 녹음한 자료는 2일 이내에 전사하여 기록하였다.

4. 설문지

염다리를 통해 이온이 이동하여 용액의 전기적 중성을 유지한다는 관점과 회로를 연결하여 완성한다는 관점을 가지고 있는지 알아보기 위하여 4 문항을 구성하였다. 설

문의 구체적인 내용은 Table 1과 같다.

5. 연구의 제한점

학생의 면담은 집단을 이루어졌으나, 교사의 면담을 개별적으로 이루어졌으므로 이러한 면담 방식의 차이가 자료의 해석에 영향을 미칠 수 있다. 그러나 학생을 교사와 마찬가지로 개별 면담으로 진행하는 방식을 취하면 학생들은 매우 소극적인 응답을 하는 경향이 나타났기 때문에 면담을 통해 학생의 생각을 도출하기가 어려웠다. 반면, 교사의 경우에는 개별 면담을 실시한 경우에도 자신의 생각을 드러내는 데에 학생과 같은 어려움은 없었다. 이러한 문제 때문에 면담 방식의 차이를 그대로 두고 연구를 진행하였다.

Ⅲ. 결과 및 논의

1. 염다리 역할에 대한 이해

염다리 역할에 대한 현직교사, 예비교사, 학생들의 응답을 유형별로 범주화하여 분류한 결과를 고등학교 화학 II 교과서의 설명 유형 분석 결과와 관련지어 Table 2에 제시하였다.

Table 2에서, 기타 응답을 포함한 모든 응답자들은 염

Table 1. The contents of the questionnaire

Contents
What is the function of the salt bridge?
Which particles move through the salt bridge?
What change of the voltage you can observe if the salt bridge is replaced by copper wire in the cell?
What change of the voltage you can observe if the salt bridge is removed?

Table 2. Students', pre-service teachers', and science teachers' thoughts and types of textbook explanation about the function of the salt bridge

Type of thought	Number of response(%)			Textbook explanation type(n=12)
	Students (n=18)	Pre-teachers(n=17)	Teachers (n=17)	
The path of ion transfer	11(61)	0 (0)	0 (0)	3(25)
Charge balance by ion transfer	5(28)	16(94)	14(82)	5(42)
Charge balance and the circuit completion by ion transfer	0 (0)	0 (0)	2(12)	1 (8)
The others	2(11)	1 (6)	1 (6)	3(25)

다리가 이온의 통로라는 관점을 모두 가지고 있었다. 이 결과는 학생들이 염다리를 전자의 통로로 본다고 지적한 외국의 여러 선행연구(Garnett & Treagust, 1992a; Garnett & Treagust, 1992b; Huddle, et al., 2000; Ogude & Bradly, 1994; 1996; Sanger & Greenbowe, 1997a; Sanger & Greenbowe, 1997b)와 매우 달랐다.

이온의 이동 통로라고 응답한 비율이 예비 교사나 교사들의 경우에는 나타나지 않았으나, 학생들의 경우에는 매우 높은 비율(61%)로 나타났다. 25% 정도의 교과서에서도 단순하게 이러한 현상적인 설명을 하는 것으로 나타났다. 반면에 예비 교사와 교사들은 이러한 유형보다는 '이온의 이동으로 인한 용액의 전하 균형'이 염다리의 중요한 역할이라고 생각하는 것으로 나타났다. 이러한 설명 유형으로 분석된 교과서는 42%로 가장 비율이 높았다.

면담을 통하여 학생들의 생각을 보다 구체적으로 알아본 결과, '이온의 이동 통로'라고 답한 학생들도 대부분 이온의 이동에 의해 용액의 전하균형이 유지된다는 사실을 알고 있는 것으로 나타났다. 다음은 학생들과 면담한 내용의 일부이다.

면담자: (설문의 응답을 보며) 염다리의 역할을 이온의 이동 통로라고 응답했구나. 왜 이온이 이동하는 걸까?

학생1:.....(중략) 염다리 역할이 양쪽의 비커를 중성 쪽으로 유지해주는 거라고 생각했거든요.

학생2: SO_4^{2-} 가 이동을 해서 균형이 맞아져야 전류가 계속 흐를 수 있다, 그렇게 생각했어요.

학생3: SO_4^{2-} 가 이동해서 전기적 중성을 유지시켜 주는 거죠.

이때 학생 1이 먼저 자신의 생각을 '중성 유지'라는 개념으로 표현하고, 학생 2는 그 생각에 동조하면서 보다 자세하게 ' SO_4^{2-} 의 이동'의 개념을 첨가하였다. 따라서 이 경우의 상황을 단순히 학생 2가 학생 1의 생각에 동조하는 것이라고 보지 않고, 연구자들은 비록 학생 1이 먼저 자신의 생각을 표현하였으나, 학생 2 역시 학생 1이 표현하기 전에도 그러한 생각을 가지고 있었다고 판단하였다. 학생 3의 경우에는 학생 1이 표현한 '중성 유지'의 개념과 학생 2가 표현한 ' SO_4^{2-} 의 이동'의 개념을 모두 포함하여 자신의 생각을 표현하였다. 학생 3의 경우는 학생 1과 학생 2 같이 자신의 고유한 개념을 새롭게 드러내지는 않았으나, 어느 한 학생의 의견을 전적으로 동조하여 '저

도 그렇게 생각한다.'와 같이 표현하거나 머뭇거리다가 정리한 것이 아니었고, 두 학생의 반응과 거의 시간의 차이를 두지 않고 자신의 생각을 제시하였으므로 이 세 학생의 응답 모두 본래 학생들이 가지고 있던 생각을 표현한 것이라고 판단하였다.

염다리의 역할 중 '폐회로의 완성'이라는 관점을 가지고 있는 현직 교사는 2명뿐이었다. 그리고 이러한 관점을 제시한 교과서도 1종뿐이었다. 교과서에서 기타로 분류된 3종은 염다리의 역할에 대한 설명은 없고 단순하게 염다리의 제법을 설명하거나, 혹은 염다리에 관한 아무런 설명도 없는 경우였다. 이러한 점을 고려할 때, 학생들과 교사들, 예비교사들과 교과서의 설명 유형 사이에는 관련성이 있음을 알 수 있다.

2. 이동하는 입자의 종류

용액과 염다리에 있는 양이온들과 음이온들 중 어느 이온이 어떤 방향으로 이동하는지 알아본 결과와 이에 관련된 교과서의 설명 유형을 분석하여 Table 3에 제시하였다.

Table 3에서 학생들은 전해질의 음이온만 이동한다는 관점을 가진 경우가 50%로 가장 많았다. 반면 예비교사들과 교사들은 염다리 속의 양이온과 음이온이 이동한다는 관점을 가진 경우가 각각 88%, 35%로 가장 높았다. 또한 교사들 중에는 염다리 속의 이온과 전해질의 이온이 모두 이동한다는 관점을 가진 경우도 30% 정도 되었다.

실제로 화학전지 내에 전기장이 형성되면, 전하를 띤 입자인 양이온과 음이온은 모두 이동하게 된다. 전기장 내에서 이온의 이동 뿐 아니라, 농도차에 의한 이온의 확산도 일어나기 때문에 양이온과 음이온의 이동 경로는 다소 복잡하지만, 중요한 것은 전해질이나 염다리 속의 특정 이온만 이동하는 것이 아니라는 점이다. 그러나 이러한 관점을 가진 비율이 학생들과 예비 교사들에게 있어서 그리 높지 않다는 점은 전기화학을 가르칠 때 고려해야 할 문제라고 할 수 있다.

화학Ⅱ 교과서에 제시된 그림 유형을 분석한 결과, 12종 중 4종의 교과서에서만 입자의 이동이 표현되어 있었다. 그러나 이들 4종의 교과서에서도, 염다리 속의 이온만 이동하는 것, 염다리와 전해질의 이온이 모두 이동하는 것, 전해질의 양이온만 이동하는 것 등이 다양하게 표현되어 있었다. 그 외의 교과서 8종에서는 이온의 이동에

Table 3. Students', pre-service teachers', and science teachers' thoughts about kinds of moving particle through the salt bridge

Type of response	Number of response(%)			Textbook explanation type(n=12)
	Students (n=18)	Pre-teachers(n=17)	Teachers (n=17)	
Ions in the salt bridge(K ⁺ , NO ₃ ⁻) & Ions in electrolyte(Zn ²⁺ , SO ₄ ²⁻)*	2(11)	1(6)	5(30)	1 (8)
Ions in the salt bridge(K ⁺ , NO ₃ ⁻)	3(17)	15(88)	6(35)	2(17)
Anion in electrolyte(SO ₄ ²⁻)	9(50)	0(0)	0 (0)	1 (8)
Ions in electrolyte(Zn ²⁺ , SO ₄ ²⁻)	1 (5)	0(0)	2(12)	0 (0)
The others	3(17)	1(6)	4(23)	8(67)

* Scientific conception

관련된 설명이 전혀 제시되어 있지 않았다. Table 3에서는 이를 기타(the others)로 분류하였다. 교과서에 설명이 제시되지 않았다는 점도 학생과 예비 교사들, 그리고 교사들이 이에 대해 정확한 개념을 가지기 어려운 이유로 꼽을 수 있을 것이다.

연구 대상자들의 생각을 보다 정확하게 알아보기 위하여 실시한 면담에서, 전해질 용액 내 음이온이 이동한다고 생각하는 학생들은 용액의 전하 균형을 맞추어 주기 위한 염다리의 역할에 대한 생각에 바탕을 두고 있음을 알 수 있었다.

면담자: (작성한 설문을 보면서) 이동하는 입자는 SO₄²⁻뿐이니?

학생4: 아연 쪽은 양이온이 계속 나오고, 구리 쪽은 구리 이온이 환원되어서 양전하가 없어지잖아요. 그래서 이 염다리 역할이 양쪽의 비커를 중성 쪽으로 유지해주는 거라고 생각했거든요. 그래서 아연 쪽은 양이온이 계속 나오니까, 황산구리 수용액 쪽의 음이온(SO₄²⁻)이 염다리를 통해서 왼쪽으로 가서 이 걸 맞춰주고.. 그렇게 생각했어요.

면담자: SO₄²⁻ 외에 그런 역할을 하는 이온은 없을까?

학생4: 그 외요? 여기서요?.....없는 것 같은데요.

학생들은 염다리 속에 존재하는 이온도 전해질과 똑같은 작용을 할 것이라는 생각은 하지 못하였다. 이는 염다리 속에 존재하는 전해질과 용액 속에 존재하는 전해질을 구분하여 제시하기 때문일 수 있다. 이 때문에 용액이나 염다리 속에 전하를 띤 입자의 존재가 중요한 것인데, 이

보다는 KNO₃나 CuSO₄와 같은 전해질의 종류에 더 초점을 두고 이를 구분하여 생각하였을 가능성이 있다.

면담자: (작성한 설문을 보며) 염다리를 통하여 이동하는 입자는 SO₄²⁻ 뿐이라고 생각한 거니?

학생5: 염다리를 통하여 직접 이렇게 가는 것은 SO₄²⁻ 이구요.

면담자: 염다리 안에 KNO₃는 왜 채웠을까?

학생5: (웃으며)생각해 본 적 없는데요.

면담자: 전기적 중성을 유지하기 위해서?

학생6: SO₄²⁻가 이동해서 전기적 중성을 유지시켜 주는 거죠.

면담자: 그렇다면 염다리 만들 때 KNO₃를 왜 넣어줬을까?

학생6:(대답못함)

면담에 응한 학생들 6명은 모두 염다리의 역할을 '이온의 이동에 의한 전기적 중성 유지'라고 생각하였다. 그러나 학생들에게 보다 구체적으로 용액과 염다리 속의 전해질이 어떠한 역할을 하는지에 대해 물었을 때 이에 대해 제대로 이해하고 있는 학생은 없는 것으로 나타났다.

학생들에게서 가장 보편적으로 나타난 관점인 '전해질 용액 속의 음이온 이동' 관점은 교사들에게서는 전혀 나타나지 않았다. 학생들이 교사들과 달리 이러한 관점을 보편적으로 가지게 된 이유는 면담을 통해서 명확하게 드러나지 않았으나, 몇 가지 점을 추측해 볼 수 있다. 그 중 하나는 도선 속의 전자 흐름과 용액 내 이온의 흐름을

관련지어 유사하게 생각할 수 있다는 점이다. 금속 도선 속에 금속 양이온과 자유전자가 있으나, 도선 속을 이동하는 전하를 띤 입자는 전자뿐이다. 이러한 생각을 확장한다면, 전해질 용액 속에도 양이온과 음이온이 존재하지만, 그 중에 전자와 같이 음이온을 띤 입자만이 이동할 것이라고 생각할 수 있다. 혹은 대다수의 교과서에서 염다리 속에 전해질 용액을 채운다는 사실을 거의 언급하지 않고 있으므로, 염다리 속에도 전해질이 있다는 사실을 학생들은 모를 수도 있다. 만약 염다리 속에 전해질 용액이 존재하지 않는다면, 한천으로 채운(비록 이 사실을 모른다고 하더라도 금속 물질이 아닌) 염다리가 어떻게 화학전지의 전체 회로를 연결시켜서 전류가 흐르게 될 수 있는지 학생들이 스스로 생각하기는 어려울 것이다.

어떠한 원인에 의한 것이든, 학생들이 전해질 용액의 양이온이나 염다리 속의 이온들은 이동하지 않는다고 생각하거나 이 점에 대해 전혀 고려하지 못하고 있다는 점은 교육적으로 고려할 가치가 있다고 본다. 이러한 학생들의 생각을 수정하고, 화학전지에서 이온들이 어떠한 움직임을 보이는지 보다 정확하게 이해함으로써 전기장 내에서 전하를 띤 입자의 이동에 대한 개념을 화학전지의 현상에서도 올바르게 인식하기 위해서는 교육적 노력이 필요하다고 본다. 교과서 분석을 통해 화학 II 교과서에서도 이에 대하여 정확하게 서술한 내용을 찾아볼 수 없었다는 점은 이 문제의 심각성을 드러내 주는 것이라고 볼 수 있다.

학생들과 달리 대학에서 보다 전기 화학에 대한 깊은 내용을 배우게 되는 예비교사들은 상황이 다를 수 있을 것이다. 그러나 이 연구에서는 예비 교사들이 염다리 속의 전해질 이온들만 이동한다는 관점을 매우 강하게 가지고 있었다. 왜 이러한 생각을 하게 되었는지 알아보기 위하여 6명의 예비 교사들과 면담을 실시하였다.

예비교사1: 염다리는 charge를 맞춰주기 위해서죠.

.....〈중략〉.....염다리에 있는.. 그러니깐 염다리 자체에서.. 이 염다리가 다 해결해 주는거죠. 아연 극에서 만약 전자가 하나 빠지는 순간 NO_3^- 하나가 생기고, 들어오고..

예비교사2:〈중략〉..... 여기 염다리가 꼭 채워져 있잖아요.〈중략〉.....이쪽에서(염다리에서 황산 이온용액 쪽을 가리킴) 음이온이 밀려나오는

식으로.. 그 다음 이쪽에는 또 K+가 밀려서 나온다.(염다리에서 황산구리용액 쪽을 가리킴)그런 식으로...배웠던 거 같거든요...〈중략〉

예비교사들이 88%라는 높은 비율이 동일한 관점으로 같은 응답을 한 결과는, 예비교사2가 면담에서 '배운 대로 답했다'고 한 진술과 무관하지 않을 것이다. 만약 대학에서는 주로 염다리 속의 전해질 이온의 이동으로 배우고, 고등학교 화학 II 교과서에서는 다양한 유형으로 제시되어 있다면 가장 혼란을 겪게 되는 사람은 바로 현직 교사일 것이다. Table 3에서 현직 교사들의 응답이 가장 다양하였던 점은 이러한 이유 때문으로 생각된다. 현직 교사들의 생각을 보다 깊이 알아보기 위하여 면담을 실시하였는데, 교사들이 부딪치는 이러한 어려움의 사례를 접할 수 있었다.

현직교사1:〈중략〉..... 책에는 음..고등학교 1학년이 배우는 염다리 쪽에는 뭐라고 나오냐면 염다리 속의 KNO_3 로 나오지 않고 전해질 수용액 속의 이온이 이동한다 이렇게 나와 있거든요. 근데 제가 대학 때 배울 때는 그렇게 배우지 않은 거 같고 KNO_3 로 가지고 하는 게....〈중략〉.....기억이 나거든요. 학생들한테는, 두 가지 모두 설명해 줘요.

이 교사는 설문에는 염다리의 K^+ 와 NO_3^- 가 이동하는 것으로 응답했다. 이는 이 교사의 면담 자료에 의하면 대학교에서 배운 지식에 해당한다. 그러나 가르칠 때는 설문지의 응답과 달리 전해질 수용액의 이온이 이동한다고 응답하였다. 면담을 통해 그 이유가 대학에서 배운 지식과, 수업에서 가르칠 때 사용하는 교과서의 서술이 일치하지 않기 때문임을 알 수 있었다.

3. 회로의 연결이라는 염다리의 역할에 대한 이해

염다리의 중요한 역할 중 하나인 '전기회로의 연결'(Garnett & Treagust, 1992a; Garnett & Treagust, 1992b; Huddle, et al., 2000; Ogude & Bradley, 1994; 1996; Sanger & Greenbowe, 1997a; Sanger & Greenbowe, 1997b)이라는 개념을 얼마나 가지고 있는지 알아보기 위하여 '염다리가 구리선으로 대체된다면 어떻

게 될 것인가?’와 ‘염다리를 제거하면 전지의 전압은 어떻게 될 것인가?’라는 두 문항을 제시하였다. 각 물음에 대한 응답을, ‘전류가 흐른다’와 ‘흐르지 않는다’로 두 유형으로 분류한 후, 각 응답에 대하여 서술한 이유를 유형별로 범주화하여 그 결과를 Table 4에 나타내었다.

Table 4에서 염다리를 구리선으로 대체하면 ‘전자의 흐름은 변함없으므로 전압은 일정하다’고 한 응답자들은 전류의 흐름은 도선을 통한 전자의 이동에 의해서만 가능하다고 생각하였다. 이들은 염다리나 구리선 모두 (-)극과 (+)극을 연결한 도선이 있는 한 전류가 흐른다고 잘못 생각하는 것으로 나타났다.

염다리를 구리선으로 대체하였을 때의 상황에 대한 생각은 학생들과 현직교사들의 경우가 유사하였다. 가장 많은 비율(학생은 44%, 교사는 65%)의 응답자들은 ‘전하의 불균형으로 인해 이온이 이동할 수 없기 때문에 전류가 흐르지 않는다’고 생각하였다. 반면 ‘전하의 불균형으로 인해 이온이 이동할 수 없게 될 때까지 전류는 흐른다’고 올바른 답을 한 비율은 예비 교사가 가장 높았다. 그러나 이들 중에 ‘염다리를 제거하면 폐회로가 되지 않으므로 전류는 흐르지 않는다’고 정확하게 이해하고 있는 경우는 한 명도 없었다. 따라서 염다리의 역할 중에서 스위치와 같은 폐회로의 역할에 대해 예비 교사들은 전혀 이해하고 있지 못함을 알 수 있다.

그러나 실제 실험을 실시하면, 초기에 일정 시간 동안 전류가 흐르면서 전압이 점차 떨어진다(백성혜 등, 2001).

전압이 쉽게 떨어진다는 점에서 염다리보다 구리선이 전지의 효율성은 낮지만, 전류가 전혀 흐르지 않는다는 생각은 잘못된 것이다. 이는 선행연구(이순희, 2002)에서 고등학교 학생들에게 인지 갈등으로 제시한 현상 중 하나이다. 이러한 응답을 한 응답자는, 염다리와 달리 구리선은 용액 내 전하의 불균형을 해소시켜줄 입자가 없다고 생각하였을 것이다.

선행연구(Garnett & Treagust, 1992a; Garnett & Treagust, 1992b; Huddle, et al., 2000; Ogude & Bradly, 1994; 1996; Sanger & Greenbowe, 1997a; Sanger & Greenbowe, 1997b)에서 지적하였듯이 염다리의 역할 중 하나는 폐회로를 형성하는 것이고, 따라서 구리선으로 연결해도 전류는 일정 기간 흐른다. 특히 선행연구(박진희, 2003)에서 지적하였듯이 전해질 용액과 용액에 담긴 금속전극사이의 반응으로 전위차가 형성되고, 두 전극에서 발생한 이러한 전위차의 차이로 인해 회로에 전기를 형성하고, 따라서 구리선이나 염다리를 통해 전하를 띤 입자의 이동이 가능해지면 전해질 용액과 금속의 반응이 계속된다.

그리고 염다리를 제거하면 회로가 끊어져서 전하를 띤 입자의 이동이 불가능해지므로 그 즉시 전류의 흐름은 멈춘다. 그러나 많은 학생들과 예비 교사들은 염다리를 제거해도 전하의 불균형이 유발될 때까지 일정 시간 전류가 흐르는 것으로 생각하였다. 이는 염다리의 역할을 전하의 균형 유지라는 측면에서만 생각하였기 때문으로 볼 수 있다.

Table 4. Students', pre-service teachers', and teachers' thoughts about the phenomena of replacement of salt bridge by wire & removement of salt bridge.

Type of response		Number of response(%)					
		Replacement of salt bridge by wire			Removement of salt bridge		
Electric current	Reason	Students (n=18)	Pre-teachers (n=17)	Teachers (n=17)	Students (n=18)	Pre-teachers (n=17)	Teachers (n=17)
Flow	Voltage is unchanged	1(6)	1(6)	3(18)	1(6)	0(0)	0(0)
	Till charge unbalance	3(17)*	7(41)*	3(18)*	7(39)	10(59)	3(18)
	Others	0(0)	2(12)	0(0)	1(6)	5(29)	0(0)
Don't flow	Charge unbalance	8(44)	3(17)	11(65)	7(39)	0(0)	5(29)
	Circuit is not closed	0(0)	1(6)	0(0)	0(0)	0(0)	6(35)*
	Others	0(0)	0(0)	0(0)	1(5)	1(6)	3(18)
Have not idea		6(33)	2(12)	0(0)	1(5)	0(0)	0(0)
No response		0(0)	1(6)	0(0)	0(0)	1(6)	0(0)

*Scientific conception

이들의 생각을 보다 구체적으로 알아보기 위하여 면담을 실시하였다. 그 결과 학생들은 대부분 깊이 생각하지 않고 답을 한 사실을 확인할 수 있었다.

면담자: 염다리 대신 구리선을 쓰면 전류가 안 흐른다고 했네?

학생 7: 사실 잘 몰라요. 그냥 느낌에.

예비 교사들은 학생들보다 이에 대해 깊게 생각을 하며, 보다 일관성 있게 사고함을 알 수 있었다. 구리선을 사용하면 전하 균형이 맞지 않을 때까지 전류가 흐른다고 생각하였던 41%의 응답자는 모두, 염다리를 제거한 후의 상황에도 같은 개념을 적용하여 전하 균형이 맞지 않을 때까지 전류가 흐른다고 응답하였다.

그러나 구리선을 사용하면 전하균형은 맞지 않기 때문에 전류가 흐르지 않는다고 응답하였던 예비 교사들 중에서 염다리를 제거하면 전류가 흐를 것이라고 생각한 응답자도 있었다. 이들의 생각을 알아보기 위하여 면담을 실시하였다.

면담자: (작성한 설문지의 답을 보며) 전하균형이 맞지 않으면 전류가 흐르지 않는다고 했네요. 그리고 염다리의 역할은 전하균형이라고 응답했고, 음... 염다리가 없어도 전류가 흐를 수 있다고 생각하는 거죠? 왜 그렇게 생각했나요?

예비교사3: 음...염다리가 없어도 전류는 흐른다고 생각해요. 어쨌든 여기서 산화가 될 수 있는 용액이 있고, 환원이 될 수 있는 게 있으니깐, 한 방향으로 전자가 계속 이렇게 흐를 수 있고.....(중략)..... 물리적인 회로개념에서 보면 '전류'라는 말을 쓰잖아요. 전류는 (+)에서 (-)로 흐르고, 우리 화학 전지에서는 똑 같은 개념인데도 불구하고.....(중략).....

(-)에서 (+)로 전자가 이동하는 걸 말하잖아요. 화학을 배우면서 내내 그 전류의 개념을 전혀 생각지 않고도 항상 전자의 이동만으로도 기전력은 생기고 또 그것으로 전지의 역할을 할 수 있다고 생각해요.

예비교사4: 염다리에서 직접 전자가 이동하는 게 아니잖아요.....(중략).....

염다리가 있고 없고는 별 차이가 없는 거 같아요.....(중략)..... 건전지 안에서 전자가 이동하는 게 아니잖아요.(중략).....그래서 여기도 마찬가지로 건전지 내에서 전자가 이동하는 게 아니라, 이 바깥에서 도선을 통해서만.....(중략).....그리고 이 다니엘 전지도 염다리가 있으나 없으나 전류가 흐르는 거죠.

이들의 생각은 Table 4에서 염다리를 구리선으로 대체하였을 때 '전자의 흐름은 변함없으므로 전압은 일정하다'고 한 응답자들의 생각과 관련이 있다. 또한 연결된 회로를 통해 전하를 띤 입자가 이동해야 한다는 관점을 가지지 못하고, 도선을 통한 전자의 흐름만으로 전류를 이해한다고 지적한 외국의 선행연구(Garnett & Treagust, 1992a; Garnett & Treagust, 1992b; Sanger & Greenbowe, 1997a; Sanger & Greenbowe, 1997b)의 결과와도 관련이 있다.

예비교사 3은 면담 도중에 물리와 화학에서 사용하는 전류의 개념이 다르다는 점을 언급하였다. 그는 "물리적인 회로 개념에서 보면 '전류'라는 말을 쓰잖아요.(중략)..... 화학을 배우면서 내내 그 전류의 개념을 전혀 생각지 않고도 화학을 배우면서 내내 그 전류의 개념을 전혀 생각지 않고도 항상 전자의 이동만으로"라고 언급하였다. 이러한 그의 응답은 염다리의 역할에 대한 그의 생각 안에는 물리에서의 회로 개념과 화학에서의 전자 이동 개념이 혼재되어 있어서 명확하게 사고하기 어려움을 드러내 주는 것이라고 보여진다. 이러한 현상은 Garnett와 Treagust(1992a)가 지적했듯이 같은 개념을 다루는 과목 간의 연관성 부족 문제를 드러내는 것이다.

현직 교사들을 면담한 결과에서도 유사한 상황이 관찰되었다.

현직교사2: 염다리가 없다면 처음에는 흐르다가 나중에는 점점 줄어든다....

면담자: 처음에는 흐르다가 나중엔 안 흐르는 이유는 뭐라고 생각하세요?

현직교사2: 나중에는 (설문지 그림에서 (-)극과 (+)극을 연결을 도선을 죽 따라가다가)전하가 편중되니까.....(중략).....나중에는 양쪽 전극의 전하의 양 차이가 없게 되므로...(중략)...

이 교사도 예비 교사들과 마찬가지로 전체적인 회로의 연결을 고려하지 못하고, 도선을 따라 흐르는 전하만을 고려하는 것으로 나타났다. 면담 결과의 특징 중 하나는, 예비 교사들이 자신들의 생각을 쉽게 바꾸지 않고 비교적 자신감 있게 이를 드러냄에 반해 현직 교사들은 가르치면서 부딪혔던 문제들 때문인지 면담 내용에 대해 보편적으로 자신감을 가지지 못하였다는 점이다.

학생들과 예비 교사들과는 달리, 현직 교사들 중에는 염다리를 제거하였을 때 회로의 연결이 끊어지므로 전류가 흐르지 않는다는 과학적 개념을 가지고 있는 비율이 매우 높았다. 그 원인을 알아보기 위하여 면담을 실시하였다. 그 결과, 2 명은 학회지 자료와 연수를 통해서 새로운 개념을 받아들일게 되었음을 확인할 수 있었다.

면담자: 염다리 제거하면 전류 흐르지 않는다고 생각한 이유가 뭐죠?

현직교사3: 끊긴다고 생각했어요.

면담자: 끊긴다면?

현직교사3: 회로가 열린 거죠.

.....(중략).....사실은요, 작년에 연수를 받았는데 거기서 알게 됐어요.

현직교사4: 저는 사실은 올해 초에 이 염다리에 관해서 '화학교육' 지에 실린 글을 읽었었어요.

그래서 이 질문에 대한 답은 이렇게 회로개념을 적용했죠.....(중략).....

현직교사3과 4의 진술은 교사 교육을 통하여 교사들의 과학적 지식에 대한 이해를 높일 수 있음을 보여주는 사례라고 볼 수 있다.

V. 결론 및 제언

이 연구에서는 학생, 예비교사, 현직교사를 대상으로 하여 염다리의 역할에 대한 이해를 알아보았다. 연구를 통하여 대다수의 응답자들이 이온의 이동에 의해 용액의 전기적 중성을 유지한다는 관점은 명확하게 가지고 있음이 밝혀졌다.

그러나 염다리 대신 구리선을 연결한 상황이나 염다리를 제거한 상황에 대한 응답을 통하여 염다리가 전기 회로를 완성시키는 역할도 한다는 관점은 매우 부족함을 확

인하였다. 이는 학생들이 대부분 염다리를 전자의 통로로 본다고 지적한 외국의 여러 선행연구(Garnett & Treagust, 1992a; 1992b; Ogude & Bradly, 1994; 1996; Sanger & Greenbowe, 1997a; 1997b; Huddle, et al., 2000)의 결과와 매우 달랐다. 선행연구에서는 이러한 문제가 교과서의 서술에서 발생하는 문제로 지적하였는데, 이 연구를 통해서도 교과서의 서술이 학생들과 예비교사들, 그리고 교사들의 관점에 영향을 미칠 수 있음을 밝혔다.

외국의 경우와 달리 우리나라 교과서에서는 회로의 연결이라는 관점은 거의 제시하지 않고 있으며, 설명이 되어 있는 경우에는 주로 이온의 이동 통로의 관점만이 제시되어 있었기 때문이다. 그러나 이동하는 이온에 대한 설명도 교과서마다 제각기 달랐기 때문에 전해질 용액 내 이온들과 염다리 속에 존재하는 이온의 이동에 대한 생각도 매우 다양하게 나타났다.

실제로 화학전지에서 전기장이 형성되면, 전하를 띤 입자인 양이온과 음이온은 모두 이동하게 된다. 그러나 회로의 연결이라는 관점이 부족한 경우에는 특정 입자나 전자만이 이동한다는 관점을 가질 수 있다. 비록 중, 고등학교와 대학교 교재에서는 전기 회로의 연결이라는 관점의 제시가 거의 없었으나, 일부 화학 교사들은 교사 연수나 학회지를 통해 이러한 관점을 가지고 있으며, 화학 전지 내의 이온 이동에 대해서도 과학적 관점을 유지하는 것으로 나타났다. 이는 예비 교사 교육에도 이러한 관점도 도입되어야 앞으로 교사가 될 학생들이 전기 화학 현상에 대한 보다 정확한 개념을 형성할 수 있음을 의미하는 것이라고 본다.

같은 전기 현상이지만, 전기 회로의 연결이라는 관점은 주로 물리에서 다루고, 이에 반해 전자나 이온의 이동이라는 관점은 주로 화학에서 다룬다. 따라서 이 두 관점이 통합되어서 동일한 전기 현상을 설명하는 일은 드물고, 단원에 따라 다른 시각을 제시하는 경향이 있다. 이러한 문제 때문에 발생하는 개념의 혼란은 이미 선행연구(Moran & Gileadi, 1989)에서도 지적하였던 점이다.

대부분의 응답자들이 면담에 참여한 응답자들의 높은 비율이, 회로의 개념은 물리과목에만 적용해야 하는 것으로 생각하였다. 이는 염다리가 회로를 완성시킨다는 설명이 있는 화학 II 교과서가 단 한 종류뿐인 사실과 무관하지 않을 것이다. 화학 교과서에서는 전자는 도선을 통하여, 이온은 전해질 용액과 염다리에서 이동하고 있음을

강조한다. 그렇기 때문에 교과서에서 설명을 해 주지 않는다면, 학생과 교사들은 회로는 전하를 띤 입자의 흐름으로 연결된다는 관점을 가지기가 어려울 것이다. 따라서, 교과서의 설명이 과학교과목간에도 연계성 있게 서술된다면, 교사, 예비교사, 현직교사들이 염다리에 대하여 보다 포괄적인 이해수준으로 발전하게 될 것이다.

특히 이 연구를 통해 교과서에 설명이 제시된 경우보다 교과서에 설명이 모호하거나 제시되지 않은 경우에 학생들이나 예비 교사들, 그리고 현직 교사들이 더욱 다양한 사고를 형성하는 것을 알 수 있었다. 이는 교과서 설명이 매우 중요함을 의미하는 것이라고 할 수 있다. 연구대상별 개념유형을 비교하였을 때, 학생, 예비 교사, 현직교사들의 사고 유형은 일부 관련이 있으나 경우에 따라서는 유사하지 않았다. 이는 제시된 개념이나 현상에 대해서로 다른 생각을 하고 있다는 것을 의미한다.

연구 결과, 학생들과는 달리 예비 교사들과 현직 교사들은 염다리 속의 전해질 이온들만 이동한다는 관점을 매우 강하게 가지고 있었다. 이는 대학교에서 배우는 내용과 관련이 깊을 것이라고 생각한다. 만약 대학에서는 주로 염다리 속의 전해질 이온의 이동으로 배우고, 고등학교 화학 II 교과서에서는 다양한 다른 유형으로 제시된다면, 가장 혼란을 겪게 되는 사람은 바로 현직교사일 것이다. 이러한 혼란과 가르칠 때의 어려움은 연구를 통해 드러났다. Stylianidou 등(2002)은 교과서의 그림과 설명은 학생들에게 매우 중요하다고 지적하였다. 학생들을 가르치는 교사에게도 이는 마찬가지일 것이다. 따라서 중고등학교에서 제시하는 개념과 대학교에서 다루는 개념간의 통일은 교사와 예비교사들, 그리고 이들로부터 개념을 배우게 되는 학생들에게 모두 중요한 일일 것이다. 물론 대학교 이상의 교육에서는 중, 고등학교에서는 다루기 어려운 보다 심화된 내용을 다룰 수 있으나, 기본적인 관점은 동일하여야 가르치는 교사들이 자신이 배운 내용과 가르치는 내용 사이의 괴리를 느끼지 않게 될 것이다. 따라서 예비 교사들을 위한 대학교육과정의 내용과 고등학교 화학교과서의 내용 사이의 연계성에 대한 연구도 앞으로 필요하다고 본다.

국 문 요 약

이 연구에서는 고등학교 학생들, 화학교사들, 그리고 예비 교사들을 대상으로 하여 다니엘 전지에서 염다리 역

할에 대한 개념 유형을 설문과 면담을 통하여 알아보았다. 또한 교사와 학생들이 가지는 개념의 어려움에 대한 원인을 알아보기 위하여 고등학교 화학 II 교과서의 서술 내용에 대한 분석도 병행하였다. 예비 교사들의 생각은 교사교육 프로그램의 문제점을 점검하기 위하여 조사되었다. 연구 결과, 교사들은 염다리를 통한 이온의 이동에 관한 관점은 가지고 있었으나, 염다리가 닫힌 회로를 완성하는 역할을 한다는 사실에 대한 관점을 가지고 있지 않은 것으로 나타났다. 이러한 경향은 학생들과 예비교사의 경우에도 유사한 것으로 나타났다. 교사들과 학생들이 염다리에 대한 정확한 개념을 형성하는데 어려움을 겪는 원인은 교과서의 불충분하고 다양한 설명 때문일 가능성이 있었다.

참 고 문 헌

- 김시중, 문정대, 이종면, 구창현, 이상진(2000). 고등학교 화학II. 서울: 금성출판사.
- 박진희(2003). 화학교사들이 전기화학에서 가지고 있는 개념의 어려움과 원인 분석. 한국교원대학교 석사학위논문.
- 박원기, 윤석진(1999). 고등학교 화학II. 서울: 지학사.
- 박태규, 정규철, 김우택(2000). 고등학교 화학II. 서울: 박영사.
- 백성혜, 김동욱, 이순희(2001). 염다리의 역할에 대한 이해. 화학교육, 28, 25-29.
- 소현수, 윤길수, 이영만, 허성일, 김용원(2000). 고등학교 화학II. 서울: 두산
- 송호봉, 정용순(2000). 고등학교 화학II. 서울: 형설출판사.
- 신화정(1998). 전기분해에 대한 과학교사의 이해도 연구. 서울대학교석사학위논문.
- 여수동, 여환진, 장영근, 이규옥(2000). 고등학교 화학II. 서울: 청문각.
- 오계직, 김종희, 박병빈, 최석남(1997). 고등학교 화학II. 서울: 교학사.
- 우규환, 김강진, 이인길, 여상인(1997). 고등학교 화학II. 서울: 천재교육.
- 이순희(2002). 다니엘 전지에 대한 오개념 원인 분석 및 실험을 통한 개념변화 연구. 한국교원대학교 석사학위논문.

- 이운주, 방태철, 이승열(2000). 고등학교 화학II. 서울: 고려서적주식회사.
- 이원식, 한인섭, 윤용(2000). 고등학교 화학II. 서울: 교학사.
- 정구조, 류재홍, 이대형(2000). 고등학교 화학II. 서울: 동아서적.
- 최경희(1997). 중학교 과학교과서에 포함된 과학-기술-사회(STS)내용, 활동유형 및 포함 정도 분석. 한국과학교육학회지, 17, 425.
- 최병순, 문영삼, 신대섭, 김대수, 현종오(1998). 고등학교 화학II, 한샘출판: 서울.
- Allsop, R. T. & George, N. H.(1982). Redox in Nuffield advanced chemistry. *Education of Chemistry*, 19, 57.
- Barral, F. L., Fernández, G. & Gallástegui Otero, J. R.(1992). Secondary Students' Interpretations of the Process occurring in an Electrochemical Cell. *Journal of Chemical Education*, 69, 655.
- Burke, K. A., Greenbowe, T. J., & Windschitl.(1998). Developing and using Conceptual Computer Animations for Chemistry Instructions. *Journal of Chemical Education*, 75, 1658.
- Butts, B. & Smith, R.(1987). What do students perceive as difficult in H. S. C chemistry?. *Australian Science Teachers Journal*, 32, 45.
- De Jong, O., Acampo, J., & Verdonk, A.(1995). Problems in Teaching the Topic of Redox Reactions: Actions and Conceptions of Chemistry Teachers. *Journal of Research in Science Teaching*, 32, 1097.
- Finely, F. N., Stewart, J., & Yaroch, W. L.(1982). Teachers' perceptions of important and difficult science content. *Science, Education*, 66, 531.
- Garnett, P. J. & Treagust, D. F.(1992a). Conceptual Difficulties Experienced by Senior High School Students of Electrochemistry: Electric circuits and Oxidations-Reduction Equations. *Journal of Research in Science Teaching*, 29, 121.
- Garnett, P. J. & Treagust, D. F.(1992b). Conceptual Difficulties Experienced by Senior High School Students of Electrochemistry: Electrochemical (Galvanic) and Electrolytic cells. *Journal of Research in Science Teaching*, 29, 1079.
- Huddle, P. A., White, M. D., & Rogers, F.(2000). Using a Teaching Model to Correct known Misconceptions in Electrochemistry. *Journal of Chemical Education*, 77, 104.
- Moran, P. J. & Gileadi, E.(1989). Alleviating the Common confusion Caused by Polarity in Electrochemistry. *Journal of Chemical Education*, 66, 912.
- Morikawa, T. & Williamson, B. E.(2001). Model for Teaching about Electrical Neutrality in Electrolyte Solutions. *Journal of Chemical Education*, 78, 934.
- Ogude, N. A. & Bradly, J. D.(1994). Ionic Conduction and Electrical Neutrality in Operating Electrochemical Cells. *Journal of Chemical Education*, 71, 29.
- Ogude, N. A. & Bradly, J. D.(1996). Electrode Processes and Aspects Relating to Cell Emf, Current, and Cell Components in Operating Electrochemical Cells. *Journal of Chemical Education*, 73, 1145.
- Ökaya, A. R.(2002). Conceptual Difficulties Experienced by Prospective Teachers in Electrochemistry: Half-Cell Potential, Cell Potential, and Chemical and Electrochemical Equilibrium in Galvanic Cells. *Journal of Chemical Education*, 7, 735.
- Pardhan, H. & Bano, Y.(2001). Science teachers' Alternate conceptions about Direct-currents. *International Journal of Science Education*, 23, 301.
- Runo, J. R. & Peters, D. G.(1993). Climbing a Potential Ladder to Understanding Concepts in Electrochemistry. *Journal of Chemical Education*, 70, 708.
- Sanger, M. J. & Greenbowe, T. J.(1997a). Common Student Misconceptions in Electrochemistry: Galvanic, Electrolytic, and Concentrations Cells. *Journal of Research in Science Teaching*, 34, 377.

Sanger, M. J. & Greenbowe, T. J.(1997b). Students' Misconceptions in Electrochemistry: Current Flow in Electrolyte Solutions and the Salt Bridge. *Journal of Chemical Education*, 74, 819.

Sanger, M. J. & Greenbowe, T. J.(1999). An Analysis of College Chemistry Textbooks As Sources of Misconceptions and Errors in Electrochemistry.

Journal of Chemical Education, 76, 853.

Stylianidou, F., Ormerod, F. & Ogborn, J.(2002). Analysis of Science textbook Pictures about Energy and Pupils' readings of them. *International Journal of Science Education*, 24, 257.