

연결주의 개념관이 과학 개념학습에 주는 시사점 고찰

정용재 · 송진웅[†]

(서울탑동초등학교) · (서울대학교)[†]

Investigating the Implications of the Connectionist Views of the Concept in Conceptual Learning of Science

Jung, Yong-Jae · Song, Jinwoong[†]

(Seoul Top-Dong Elementary School) · (Seoul National University)[†]

ABSTRACT

Conceptual learning has been one of the important issue in science education, and its theory and method has been interacted with the studies of philosophy of science, cognitive science, and cognitive psychology. The last two decades have witnessed a remarkable growth of the study on brain-style computation, i.e. connectionism. This study aimed to investigate the properties of the connectionist views of the concept and its implications in the conceptual learning of science. In connectionist views, a concept was represented as a pattern of activity distributed over many connected units, and a kind of network composed of many sub-concept units. And the 'distributed representation' had the features of the constructivity, the automatically generalization, and the tunability. On the base of these views, it was suggested that (i) 'Typically-Perceived-Situation', a kind of mental representation rising spontaneously in an individual mind when someone is thinking about any object, should be highlighted, and (ii) the roles of the sub-concept units in formation of concept and the resolution of concept into the sub-concept units should be highlighted. Finally the meanings of these implications in conceptual learning of science are discussed.

Key words : connectionism, connectionist view of the concept, distributed representation, conceptual learning of science

I. 서 론

과학 개념학습은 과학 교육에서 주된 의제가 되어 왔다. 1920년대 J. Piaget의 연구 이래로 자연에 대해 학생이 가지고 있는 관점을 이해하기 위한 수많은 시도가 행해져 왔으며, 이는 개념 변화에 대한 관심을 불러 일으켰다(Wandersee *et al.*, 1994). Duit (2004)에 의하면 2000년을 넘어서면서 관련된 논문의 수가 6000여 편을 헤아리고 있다.

그러나 전통적인 교수학습 방법으로는 학생들의 개념변화는 쉽게 일어나지 않음이 여러 연구자들에 의해 지적되어왔다. 예를 들어, 어떤 경우에는 자신의 생각과 반대되는 사례를 무시하거나 회피함으로써(Driver *et al.*, 1985; Hashweh, 1986; Duit, 1991; Wandersee *et al.*, 1994), 어떤 경우에는 직관적인 사

고로 일관함으로써(Newell & Simon, 1972; Andersson, 1986; Stepan, 1991) 학생들은 자신의 생각을 고수한다. 그렇다면 이러한 난점을 극복하기 위한 방안은 무엇인가?

과학 개념학습에 대한 논의는 개념과 개념학습 과정(혹은 개념변화 과정)에 대한 논의를 필요로 한다. 개념과 개념변화 과정에 대해 어떤 관점을 견지하고 있는가는 추구되는 과학 개념학습의 양태와 방향에 영향을 주기 때문이다(Duschl & Gitomer, 1991; 조희형, 1996; Schnotz *et al.*, 1999). 예를 들어, 개념을 필요충분조건에 의해 경계가 확정되는 것으로 보는 경우에는 오개념을 과학적 개념으로 변화시키는 방향이 추구될 것이다. 또, 만약 그 변화 과정을 혁명적인 것으로 보는 경우에는 적절한 내용과 적당한 강도의 인지갈등 제공 및 해소를 지향하는, 그리고

대체된 개념을 확인하는 방략이 추구될 것이다. 그런데, 개념에 대한 관점은 매우 다양하며(Howard, 1987; Thagard, 1992), 개념변화 과정에 대한 관점 역시 매우 다양하다(박종원, 2002). 따라서 이러한 다양한 관점들 중에서 학생의 선개념이 갖는 특성에 비교적 잘 부합되는 개념관과 개념변화 과정에 대한 관점을 견지하는 것이 앞서 지적한 과학 개념학습의 난점을 극복하는 시작이 될 것이다.

한편, 과학교육 연구는 타 학문의 연구와 상호 영향을 주고받아 왔다. 예를 들어 1940년대 말 J. Conant와 그의 동료들은 세계 제2차대전의 종결과 자유민주주의의 확산이라는 시대적 상황 하에서 과학교육의 새로운 접근을 위해 *Harvard Case Histories in Experimental Science*(Conant, 1948)를 출판한 바 있다. 과학 교육에서 과학 이론의 형성 과정과 역사적 사례 제시의 중요성을 골자로 한 이들의 주장은 당시 강의를 들던 T. Kuhn에게 큰 영향을 주었는데, *The Structure of Scientific Revolution*(Kuhn, 1962)의 서문과 그가 제시한 사례들에서 그 영향이 드러난다. 이후 과학적 방법에 대한 역사적 접근과 과학 지식의 사회성에 대한 T. Kuhn의 연구는 다시 과학 교육의 지식사회학적 접근에 큰 영향을 미치게 된다(Collins & Shapin, 1989).

과학 개념학습 이론이나 방법 역시 과학철학, 인지심리학, 인지과학, 인공지능 등의 다른 학문과 영향을 주고 받아왔다. 예를 들어, Posner 등(Posner et al., 1982; Strike & Posner, 1985)의 개념 변화 이론은 과학철학자인 I. Lakatos, T. Kuhn, S. Toulmin의 이론에 기반을 두고 발전되었음을 저자들이 스스로 밝힌 바 있고(Strike & Posner, 1982), Nussbaum(1989)은 개념의 역동적인 변화 과정을 명료화하는데 있어서 과학철학의 역할이 중요함을 지적한 바 있다. 또, Stevens & Gentner(1983)는 *Mental Model*의 서문에서, 학생이 가지고 있는 개념과 지식의 표상 및 처리에 대한 연구, 즉 정신 모형(mental model)에 대한 연구는 인지심리학과 인공지능의 발달에 영향을 받으며 발전하였다고 밝힌 바 있다. 이러한 주장은 과학 개념 학습 이론이 사람의 인지 일반과 정보 처리 과정, 즉 마음(mind)을 어떤 관점에서 바라보는가에 의해서도 영향을 받아왔음을 지적한 예라 할 것이다.

이러한 주장들은 앞서 언급한 과학 개념학습의 난점을 극복하기 위해서는 학생들이 정보를 처리하는

인지 과정을 어떠한 관점에서 바라볼 것인가에 대한 논의도 필요함을 말해주고 있다. 어떻게 정보를 처리하는가에 대한 관점은 개념의 형성과 사용, 개념의 특성에 대한 설명 등을 제공할 것이고, 이는 개념학습 방안의 선택에도 영향을 미칠 것이기 때문이다.

근래 인지과학과 인지심리학, 인공 지능 분야에서는 연결주의(connectionism)가 주된 흐름 중 하나로 자리매김하고 있다(McLeod et al., 1998; Anderson, 2000; 이정모, 2001). 연결주의는 여러 학문 분야에 걸친 간학문적 접근으로서, 두뇌의 기제를 은유적으로 차용하여 사람의 인지 일반과 정보가 처리되는 과정에 대한 새로운 관점을 제시하고 있다. 20세기 후반에 들어서면서, 기존의 정보처리모형의 한계에 대한 지적과 더불어 두뇌에 대한 연구가 증가하고 인공 지능 관련 기술이 발달함에 따라 급부상하게 된 연결주의는, 특히 기존의 정보처리모형과는 달리 학습을 중시하고 있으며, 개념이 무엇인가에 대해 새로운 시각에서 접근하고 있다(Martindale, 1991; Quinlan, 1991; McLeod et al., 1998; 신현정, 2000; Anderson, 2000; 이정모, 2001). 마음에 대한 연결주의 관점은 그것이 인지 과정을 다루고 있으며 개념에 대한 대안적 관점을 제시하고 있다는 점에서 과학 개념학습에도 시사하는 바가 클 것이다.

그러나 국내 과학교육에서는 연결주의를 배경으로 하는 과학 개념학습에 대한 연구를 찾아보기 쉽지 않다. 물론, 두뇌의 기제에 바탕을 둔 접근은 국내 과학교육 연구(예를 들어, 강호감, 1991, 허명 등, 1997, Kwon, 1998, Kwon & Lawson, 1999, 김용진, 2000, 박재근 등, 2002)나, 교육학 연구(예를 들어, 조주연, 1998, 김유미, 2001, 김유미, 2002 등)에서도 꾸준히 수행되어 왔다. 이들 연구들은 뇌파의 분석으로 특정 뇌 부위의 활성화를 측정하여 이를 학습에 활용하거나, 특정 뇌 부위가 추론 과정에서 하는 역할을 분석하고, 실험 활동이 교수 학습 과정에서 갖는 효율성을 신경학적으로 분석하거나, 다양하고 풍요로운 학습 환경과 활동을 중시하는 두뇌 기반 학습을 주장하는 등, 두뇌 신경망의 발달과 학습을 관련짓고 있다. 하지만, 두뇌의 기제에 기초한 인지 과정이나 개념관에 대한 논의에 주안점을 둔 연구는 찾아보기 어렵다.

이에 본 연구에서는 인지 과정을 다루는 주요한 이론 중 하나인 연결주의를 개관하고, 특히 개념에 대한 연결주의 관점을 고찰하여 근래 과학 개념학습

관련 연구와 비교한 후, 이를 토대로 과학 개념학습에서 얻을 수 있는 시사점을 탐색하였다.

II. 본 론

1. 연결주의의 개관

연결주의는 마음을 두뇌 은유에 근거한 계산 시스템 모형으로 설명하는 학문적 흐름으로서, 흔히 병렬 분산처리 모형(parallel distributed processing model), 인공신경망 모형(artificial neural network model)이라고도 불린다(Martindale, 1991).

연결주의에 대한 관심이 급증한 것은 1980년대에 들어서지만, 그 역사적 근원은 멀게는 아리스토텔레스의 연합의 형성에(Quinlan, 1991), 가깝게는 19세기 말과 20세기 초 연합주의(associationism)에 바탕을 두고 있다(이정모, 2001). 연합의 원칙과 두뇌의 기체에 대한 연구는 D. Hebb(1904~1985)에 이르러 획기적인 발전을 하게 된다. 그는 학습을 세포와 세포 사이의 연결 강도의 변화로 보았다(Quinlan, 1991). 두 신경 단위가 동시에 흥분하는 것이 반복되면 둘 사이의 연결 강도가 증가하고, 한 신경단위의 활성화를 연결된 다른 신경단위를 활성화로 이어지게 한다. D. Hebb의 학습 규칙은 실제 인지과정을 모형화 하기에는 지나치게 단순하였지만, 이후 등장하는 연결주의 주장들의 이론적 토대를 마련하였다.

연합주의 전통은 1920년대부터 컴퓨터 과학의 영향을 받으며 발전하게 된다. 초기에는 두뇌와 무관하게 발전하였지만, 1940년대 들어서면서 뉴런을 수학적으로 형식화 하여 이를 인간의 인지과정을 설명하는 틀로 제시하는 시도가 이뤄지게 되고, 급기야 Rosenblatt(1958)에 의해 신경망 이론이 제안되게 된

다(McLeod *et al.*, 1998). 그의 신경망 모형은 입력 층과 출력층의 두 층을 가진 퍼셉트론(perceptron)¹⁾으로 요약된다. 그의 이론에서 신경단위 사이의 연결은 흥분적이거나 억제적이며, 연결의 강도가 변화한다. 신경망은 시행착오를 거치면서 특정한 패턴을 갖는 연결로 스스로 변화한다. 퍼셉트론은 이후 학습을 중시하는 신경망 모형에 대한 수 많은 연구들을 촉발시켜 신경망 모형의 모태가 되었다. 그러나 그의 퍼셉트론 체계는 복잡한 함수를 학습할 수 없고 시간이 많이 걸린다는 비판을 받게 되었고, 급기야 단순한 논리적 표현도 불가능하다는 Minsky & Papert (1969)의 치명적인 비판²⁾에 의해 인지 모형으로는 적절하지 않다는 평가를 받게 된다(이정모, 2001).

Rosenblatt의 퍼셉트론이 부정되면서, 인지 과정에 대한 설명을 컴퓨터의 기체에 근거해서 하는 정보처리모형이 주류를 이루게 된다. 1940년대 이후 컴퓨터 하드웨어와 프로그램 언어 등이 급속도로 발달하면서, 정보의 계열적 처리, 정보처리를 지시하는 감독자로서 프로그램, 정적 표상으로서 정보의 저장과 인출 과정 등을 인지 과정 설명에 은유적으로 사용하게 된다. 이러한 흐름은 행동주의의 몰락, 인공두뇌학의 발전, 생득적인 구조를 가정한 언어학의 발전 등과 함께 고전적 인지주의를 형성하게 된다. 그러나 고전적 인지주의의 정보처리모형은 다양한 상황에서 일어나는 학습을 설명하기 어렵고, 인간의 인지 과정에서 나타나는 ‘우아한 퇴행(graceful degradation) 특성³⁾’을 설명하지 못하며, 처리 속도의 제한에 따른 ‘100단계 논증 문제⁴⁾’를 해결하지 못한다는 비판을 받게 된다(Newell, 1990; Martindale, 1991; 이정모, 2001).

정보처리모형의 한계가 지적되는 한편, 신경망 모형과 관련된 새로운 연구 결과들이 축적되면서 1980

1) perceptron을 국문으로 번역하자면, ‘인식자’ 정도로 번역될 수 있을 것이다. 그러나 기존에 발행되어 있는 연결주의에 관한 국문 문헌들(예를 들면, 이정모, 2001)에서 perceptron은 특별한 번역 과정 없이 ‘퍼셉트론’으로 사용되고 있다. 이에, 본 논문에서도 기존의 용례를 좇아 perceptron을 ‘퍼셉트론’으로 표기하고자 한다.
2) Minsky & Papert는 Rosenblatt의 퍼셉트론이 논리합(OR)이나 논리곱(AND) 문제는 해결할 수 있지만, 배타적 논리합(Exclusive OR) 문제를 해결할 수 없음을 지적하였다. 이에 대한 자세한 내용은 McLeod *et al.*, 1998에서 다루지고 있다.
3) ‘우아한 퇴행’ 특성이란, 전체 정보의 일부가 변경되거나 손상되었다라도 전체를 판단하는 데 있어서 급격한 변화가 생기지 않고 천천히 즉, ‘우아하게’ 퇴행한다는 특성을 말한다. 만약 원래 전체 모습은 10개의 정보를 갖고 있는데, 이중에 3개가 손실되어 7개만의 정보가 남아있다고 해보자. 그렇다고 해서, 단순히 7개의 정보를 전부라고 판단하여 원래 전체와는 다른 축소된 전체를 인식해버리지는 않는다는 것이다. 예를 들어 호랑이의 줄무늬가 몇 개가 지워졌다고 해서 단번에 호랑이가 아니라고 판단하지는 않는다는 것이다.
4) ‘100단계 논증 문제’란, 사람이 어떤 정보를 처리하기 위해 일반적으로 걸리는 시간을 고려할 때, 그 단계가 100단계를 넘어서는 안 된다는 사실에 근거해서, 컴퓨터의 정보처리 과정에 은유한 정보처리 모형으로는 사람의 인지과정을 설명할 수 없다는 주장을 말한다. 그 근거로는 지금까지의 어떠한 컴퓨터도 100단계 내의 계열적인 프로그램으로는 게임 정도의 판단력도 가지지 못한다는 점을 제시하고 있다.

년대에 연결주의는 다시금 급부상하게 된다. 뉴런의 정보처리 기체에 대한 연구 성과의 축적, 신경망 모형을 위한 이론적이고 수리적인 도구의 발전, 입력층과 출력층 사이에 은닉층을 추가하여 연결강도를 조정하는 다층 퍼셉트론 체계의 등장, 여러 가지 학습 규칙의 등장은 인지과정을 설명하는 데 있어서 다시금 두뇌 은유에 근거한 설명에 대한 관심을 불러일으켰다. 이후, 경쟁과 진화 이론의 반영, 확률에 근거한 추론 등 다양한 이론이 발전하였고, 문장 내의 단어 발음에 대해 학습하는 인공신경망, 크기와 방향 및 위치가 변했을 경우에도 알파벳을 인식하는 인공신경망 등이 구현되었으며, 음성 인식 장치, 자동 운전 장치, 다양한 자동 로봇들이 연결주의 인공신경망 이론에 바탕을 두고 구현되었다(Nilsson, 1998; 장병탁, 2000).

연결주의는 두뇌 기체에 대한 다음과 같은 다섯 가지 전체에 기반하고 있다(McLeod *et al.*, 1998). 첫째, 뉴런은 정보를 집적한다. 다양한 형태의 뉴런들이 존재하지만, 그들이 갖고 있는 공통적인 기능은 일단의 뉴런들로부터 오는 정보를 집적하여 새로운 일단의 뉴런들에게 전달하는 것이다. 둘째, 뉴런은 입력의 강도에 대한 정보를 전달한다. 출력은 단순히 '입력이 들어왔다'라는 것 이상의 정보를 전달한다. 셋째, 두뇌의 구조는 층을 이루고 있고, 무수한 뉴런이 연결되어 있다. 두뇌에서 일어나는 정보 처리는 이러한 두뇌의 물리적인 구조에 의존한다. 넷째, 근접한 다른 뉴런에게 미치는 한 뉴런의 영향은 그들 사이의 연결 강도에 의존한다. 이러한 성질은 연결주의의 신경망에 '비중(weight)'으로 도입된다. 다섯째, 학습은 뉴런 간 연결 강도 즉, 비중의 변화에 의해 일어난다. 반복된 경험은 특정 자극에 반응하는 유기체의 행위에 변화를 준다. 이러한 기체가 완전히 밝혀진 것은 아니지만, 학습이 뉴런 간 연결 강도의 변화를 포함하고 있다는 증거가 되고 있다.

연결주의는 모든 인지적 조작이 마치 두뇌의 정보처리 과정과 같이 단위의 연결과 활성화에 의해서 수행되는 것을 강조한다(Martindale, 1991). 이때 연결의 대상이 되는 단위들은 주로 상징 이하의 신경수준 단위 즉, 뉴런이나 뉴런과 비슷한 수준의 단위를 의미한다(McLeod *et al.*, 1998). 하나의 단위는 인접한 다른 단위로부터 입력을 받고 다시 인접한 단위로 출력을 내보낸다. 이때 입력의 총합에 의해 단위의 활성화 여부가 결정되며, 단위의 활성화 상태

는 출력으로 이어져 특정한 전파 규칙에 따라 전체 연결망에 전파된다. 활성화 값은 {0(비활성화), 1(활성화)}, 혹은 {-1(억제), 1(흥분)} 등의 불연속적인 것으로 상정되기도 하고, 때로는 연속적인 값으로 상정되기도 한다. 한 단위에 들어오는 입력의 총합은 인접한 다른 단위의 활성화 값에 의존하지만, 동시에 얼마나 강하게 연결되어 있느냐, 즉 비중에도 의존한다. 비중은 흔히 행렬로 표현된다. 연결망을 구성하고 있는 단위들의 활성화 값과 비중 행렬의 패턴을 연결 패턴이라 하고, 이 연결 패턴은 신경망이 표상하는 것을 결정한다. 연결 패턴은 환경과 상호작용하면서 특정한 학습 규칙에 따라 비중이 조정되면서 변화하게 된다(Rumelhart *et al.*, 1986; McLeod, 1998).

연합주의와 맥을 같이 하고 있고, 입력단위와 출력단위의 연결로 마음의 기체를 설명하고 있다는 점에서 연결주의는 종종 행동주의와 비슷하게 보이기도 한다. 그러나 행동주의는 기능주의, 도구주의, 논리실증주의의 영향 하에 인간의 마음을 부정하고, 외부에서 객관적으로 관찰 가능한 자극과 반응의 단선적 연쇄가 곧 마음에 해당한다고 주장한 반면(이정모, 2001), 연결주의는 마음의 존재를 가정하고, 심리학과 신경생리학의 통합을 추구하였다(Quinlan, 1991; Elman *et al.*, 1996). 또, 병렬분산처리라는 복잡한 처리과정을 상정하고, 전체적인 표상과 무관한 하위 단위를 가정하면서도 이 하위 단위들이 어떻게 전체적인 표상을 창발하게 되는지 설명하고 있으며, 인지과정에서 감독자 혹은 실행 명령자를 가정하진 않지만 연결망의 배선이 안정화되면 일종의 구조를 갖게 되어 그 구조가 일종의 감독자 역할을 할 수 있다고 가정하고 있는 것도 연결주의가 행동주의와 다른 면이다(Plunkett, 2001). 특히, 연결주의가 가정하고 있는 몇 가지 요소들은 내적인 표상을 인정하고 있다는 면에서, 또, 환경과 상호 작용하기는 하지만 환경의 자극이 그대로 출력으로 이어지지 않는 기체를 가정하고 있다는 면에서, 행동주의와는 다른 관점을 가지고 있다(Elman *et al.*, 1996).

이상에서 살펴 본 것처럼 연결주의는 연합주의적 전통과 맥락을 같이하고 있고, 신경생리학과 컴퓨터 과학의 발달에 영향을 받으며 발전하여 왔다. 또, 두뇌의 기체에 기반 하여 외부 자극에 상응하는 활성화 패턴을 연결망의 병렬분산 처리 과정에 의하여 형성하고 조정하는 처리 체계를 가지며, 그 활동들의

총체를 인지 과정으로 보고 있다. 이러한 마음과 인지 과정에 대한 연결주의 관점은 개념 역시 기존의 관점과는 다른 관점에서 바라보고 있다.

2. 개념에 대한 연결주의의 관점

(1) 분산 표상으로서 개념

연결주의에서는 개념을 ‘분산 표상(distributed representation)’으로 본다. 즉, ‘수많은 단위들에 걸쳐 분산되어 있는 활성화 패턴(Quinlan, 1991, p. 217)’으로 본다. 이러한 분산 표상은 다음과 같은 특징을 가지고 있다(Hinton *et al.*, 1986).

첫째, 분산 표상은 본질적으로 구성적(constructive)인 특징을 갖고 있다. 사람들은 부분적인 정보만을 가지고 전체를 파악할 수 있는 능력을 가지고 있다(Norman & Bobrow, 1979). 예를 들어, 한 귀퉁이가 잘려나간 ‘A’라는 글자, 옆모습만 보이는 친구의 얼굴 등 일부분만 확인되는 경우에도 전체를 파악할 수 있다. 이러한 능력은 정보처리모형으로는 설명하기 어렵다. 즉, 두뇌의 특정한 장소에 내용과 무관한 주소를 지정하여 저장된 후, 그 주소를 검색하여 재생되는 방식으로는 설명하기 어렵다. 왜냐하면, 부분적인 정보로는 적합하지 않은 주소를 걸러낸다는 것이 불가능하거나 적어도 무한에 가까운 과정을 거쳐야 하기 때문이다. 반면에 분산된 표상은 이러한 문제를 비교적 쉽게 해결할 수 있다. 활성화 패턴은 많은 단위들의 연결과 비중을 포함하는 것으로서 특정한 국소 위치에 저장되어 있는 어떤 것이 아니다. 따라서 특정한 부위가 가려진 부분적인 정보만이 입력되어도 그 정보를 포함하고 있는 가장 적합한 패턴의 활성화가 일어날 수 있다. 분산표상으로서 개념은 스스로 구성을 완성시키는 과정을 거쳐 안정화된 패턴을 형성하는 특징을 가지고 있다.

둘째, 분산 표상은 새로운 상황으로 자동 일반화(generalize automatically)하는 능력이 있다. 활성화 패턴의 변화는 연결 비중의 조정에 의해 일어난다. 이때, 연결 비중의 조정은 기존의 단위나 연결을 없애버리지 않아도 일어난다. 다량의 단위 사이에 주어저 있는 연결 비중을 약간씩만 조정해 주면 가능하다. 이는 비슷한 패턴들이 쉽게 연이어서 혹은 동시에 조정 과정을 겪을 수 있음을 의미하며, 일반화와 관련이 있다.

사람들은 흔히 새로운 지식을 일반화하는 능력을

가지고 있다. 만약 어떤 대상에 대해서 새로운 사실을 학습하였다면, 그 대상과 비슷한 다른 대상에 대해서도 그 사실을 적용하려고 한다. 예를 들어, 칠판지가 양파를 좋아한다는 사실을 새롭게 학습하였다면, 고릴라도 양파를 좋아할 가능성이 높다고 생각하기 쉬울 것이다(Hinton *et al.*, 1986, p. 82).

칠판지를 표상하고 있던 활성화 패턴이 학습과정을 거치면서 새롭게 단위들 사이의 비중을 조정하게 되면, 칠판지가 양파를 좋아한다는 사실을 포함하는 새로운 패턴이 형성된다. 그런데, 이때 비중을 조정하는 과정은 칠판지를 표상하고 있던 패턴과 비슷한 활성화 패턴들의 비중도 조정하게 된다. 따라서 칠판지를 표상하고 있던 활성화 패턴과 비슷한 고릴라를 표상하고 있던 활성화 패턴 역시 비중이 자동으로 조정되게 된다. 이러한 과정을 거치면서, 분산 표상은 일반화를 자동으로 수행하게 된다.

셋째, 분산 표상은 변화하는 환경에 적응하는 조율 능력(tunability)이 있다. 조율 능력이란 환경과 주어진 환경에 적응하도록 연결망의 비중을 조정하여 적합한 연결 패턴을 형성하는 능력을 말한다. 조율능력은 주어진 환경의 변화에 적합한 새로운 개념을 형성할 때 드러난다. 이러한 조율능력은 기존의 정보처리 모형에서 가정하고 있는 국소적인 표상으로서의 개념에 비해 비교적 쉽게 환경에 적합한 새로운 개념을 형성할 수 있게 해준다.

국소적인 표상으로서의 개념은 새로운 개념의 형성을 설명하기 위해 두 가지 문제의 해결을 요구한다(Hinton *et al.*, 1986). 첫째는 적절한 단위를 어떻게 찾아내느냐 하는 문제이고, 둘째는 언제 새로운 개념이 형성되느냐 하는 문제이다. 즉, 새로운 개념을 표상하기에 적절한 단위를 찾아야만 하고, 그 단위가 어느 시점에서 연결되는지를 밝혀야만, 새로운 개념이 형성되는 기제를 설명할 수 있다. 그러나 이것은 무수한 가능성 중에 왜 하필 그 단위가 적당한 단위이고, 왜 그때 형성되는가를 설명해야하는 어려움을 안고 있다. 이러한 어려움은 개념을 분산된 표상으로 가정하게 되면 해결할 수 있다. 분산 표상으로서 새로운 개념의 형성은 새로운 단위의 연결이기보다는 활성화 패턴의 변화이기 때문이다. 그리고 이미 연결되어 있는 활성화 패턴은 환경과의 상호작용을 통해 비중이 조율되면서 새로이 안정된 활성화 패턴으로 되기 때문이다. 이러한 조율 과정은 약간의 조정에

의해 수행되며, 단절적이지 않다. 즉, 시행착오적인 반복 수행과 특정한 학습규칙을 통해 점진적으로 이뤄지는 것이다. 따라서 언제 새로운 개념이 형성되는 가하는 문제 역시 자연스럽게 해결된다.

연결주의에서는 개념을 연결망 전체에 분산되어 있는 표상으로 보고 있다. 분산 표상은 안정화된 패턴을 형성하는 과정에서 구성적인 특징과 자동 일반화의 특징을 드러낸다. 또, 조율능력을 통하여 환경에 적합한 새로운 개념의 형성을 설명하고 있다.

(2) 상징 이하 단위들의 체계로서 개념

연결주의에서는 개념을 분산 표상으로서 보고 있다. 그런데 이러한 분산 표상을 일으키는 연결망은 상징 이하(sub-symbolic) 수준의 단위들로 이뤄진 체계로서, 흥분과 억제와 같은 특정한 기제를 바탕으로 망 전체에 정보를 분산시켜 개념을 형성하게 된다. 따라서 연결망 전체에 분산 표상되어 있는 개념은 곧 상징 이하 단위들로 이뤄진 체계이기도 하다.

한 단위가 상징 이하의 수준이라는 것은, 한 단위가 하나의 개념을 지칭하는 기호가 아니라는 의미이다. 즉, 한 단위는 개념이 분산 표상 되어 있는 연결망의 구성 요소이면서, 그러나 그 개념과 직접적인 관계를 가지지 않는 하위 수준의 어떤 것이라는 것이다. 이러한 관점은 표상 되는 것을 세부특징, 개념, 명제 등으로 구분했던 고전적인 인지주의나 정보처리 모형(이정모, 2001)과 구성상으로는 크게 다르지 않다. 그러나 고전적인 인지주의에서는 이들 표상 단위가 각각 하나씩 개별적으로 표상 된다고 보고 있는 반면, 연결주의에서는 이들 표상 단위를 구성하는 하위 단위가 개별 단위로 존재한다고 본다. 물론, 연결주의자들도 하위 단위를 무엇으로 볼 것인가에 대해서는 조금씩 다른 입장을 가지고 있다(Ramsey, 1989). 그러나 이들이 공통적으로 가지고 있는 것은, 개별 단위는 기호나 개념과 같은 상징 수준의 것을 표상하고 있지 않다는 것이다. 이러한 관점은, 개념은 그것과는 직접적인 관계가 없는 하위 수준의 단위들에 의해 창발되는 과정을 거쳐야 함을 가정하고 있는 것인데, 그 창발성은 단위가 활성화되는 규칙과 연결망에서 학습이 일어나는 규칙에 의해 발현되게 된다.

활성화 규칙과 학습 규칙의 기본적인 기제 중 하나가 흥분과 억제이다. 흥분적 연결은 연결된 단위를 흥분, 즉 활성화시키는 연결이고, 억제적 연결은 활

성화를 억제하는 연결이다. 이러한 흥분과 억제는 비중에 의존하며, 입력과 출력이 반복되면서 활성화 상태가 전파되어 가게 한다. 보통 같은 층의 인접한 단위 사이에는 억제적 연결이, 다른 층에 있는 단위 사이에는 흥분적 연결이 있다. 이러한 상징 이하 수준의 단위들로 이뤄진 체계와 흥분·억제 기제는 실제 생물들의 구조와 지각 과정에서도 나타난다. 예를 들어, Lettvin *et al.*(1959)은 개구리가 사물을 탐지하는데 있어서 사물 그 자체를 통째로 인식하기보다는 사물이 갖는 세부특징들을 탐지하여 적절한 흥분과 억제 기제에 따라 인식한다는 것을 밝혀냈다. 복잡함 정도의 차이는 있지만 이와 비슷한 세부특징 탐지가 참깨나 고양이, 그리고 사람의 지각과정에서도 발견된다(Martindale, 1991).

이러한 관점은 필요충분조건만족으로 범주화되는 것을 개념으로 보는 기존의 고전적인 개념관과 달리(신현정, 2000), 개념의 테두리를 명확히 구분하는 경계선이 존재하지 않는다고 보고 있다. 개념이 세부특징의 조합에 의해, 좀더 엄밀히 얘기하면, 세부특징들이 연결되어 활성화되는 패턴에 의해 형성된다고 보기 때문이다. 또, 단독적으로 존재하는 기호적 표상이기보다는 일련의 하위 단위들이 연결되어 이뤄지는 연결망으로 개념을 보고 있다.

개념을 분산 표상으로 보고 상징 이하 단위들의 체계로 보는 연결주의의 관점은 컴퓨터 모의실험에서 실제로 구현되어 왔는데, McClelland(1981)의 모의실험이 그 한 예이다. 그는 Jet단과 Shark단이라는 두 폭력 집단을 가상으로 설정하고, 27명의 구성원들이 갖고 있는 특성을 연령, 직업, 결혼 여부, 집단, 학력 등의 6가지 범주로 나누어 부여한 후, 이를 특정한 규칙에 따라 안정화된 상태에 이르게 하였다. 이 연결망은 한 개인에 대한 기억과 재생을 연결된 각 범주의 단위들이 활성화되는 패턴에 따라 수행하였으며, 부족한 정보를 가지고서도 가장 근접한 대상을 찾아 내거나, 기존에 주어지지 않는 정보를 조율과정을 통해 확률적으로 추론해나가는 능력을 보여주었다. 이 컴퓨터 모의실험은 인지과정을 극단적으로 단순화시킨 것이긴 하지만, 개념을 상징 이하 단위들로 이뤄진 체계이면서, 구성적이고 자동 일반화 능력을 가지고 있으며 조율 능력을 가진 분산 표상으로서 보는 연결주의 개념관을 잘 보여 주고 있으며, 동시에 연결주의의 개념관에 바탕을 둔 지식 체계가 사람의 인지 과정 특성을 보다 잘 설명해주고 있음을 구현

을 통해 보여주었다(McClelland *et al.*, 1986).

3. 연결주의 개념관이 과학 개념학습에 주는 시사점

(1) 학생이 인식하고 있는 전형적인 상황이 부각될 필요가 있다.

연결주의 개념관에 의하자면 개념은 분산 표상의 특성을 가지고 있다. 개념이 필요충분조건에 의해 국소적으로 경계 지워지거나 국소적인 위치에 저장되어 있지 않으면서, 구성적이고 자동일반화 능력과 조율 능력을 보이는, 주어진 환경 속에서 순간적으로 발현되는 일종의 패턴이라는 것이다. 이러한 연결주의 개념관을 수용한다면, 과학 개념학습에서 학습의 대상이 되고, 형성 혹은 변화되기를 기대하는 개념과 관련하여 학생이 인식하고 있는 ‘전형적인 상황’이 부각될 필요가 있다.

개념은 일반적으로는 사물에 대한 관념이나 그 심상을 의미하며, 포괄적으로 개요·개관·지식·사고방식 등의 의미로도 사용되지만, 개념이 무엇인가 하는 문제는 여전히 명쾌하게 해결되지 않고 있으며, 개별 학자들마다 매우 다양하게 개념에 대한 정의를 내리고 있다(조희형, 1996). 그러나 이러한 관점들이 전혀 공통점을 가지고 있지 않은 것은 아니어서, 대체로 몇 가지 관점으로 요약될 수 있다. Gilbert & Watts (1983)는 기존의 철학, 심리학, 사회학적 전통을 크게 설명을 목적으로 하는 패러다임과 이해를 목적으로 하는 패러다임으로 나누고 그것이 과학 교육에 반영되어 있음을 지적하면서, 개념에 대한 관점을 고전적(classical) 관점과 행위적(actional) 관점, 관계적(relational) 관점의 세 가지로 분류한 바 있다. 또, Howard(1987)는 개념을 범주화의 표상으로 정의하면서 범주화에 대한 관점을 고전적 관점, 원형(proto-type) 관점, 본보기(exemplar) 관점으로 분류한 바 있는데, 이러한 분류는 범주화와 관련지어 이뤄지는 개념에 대한 근래의 논의들에 있어서 공통적이기도 하다(Howard, 1987; diSessa & Sherin, 1998; 신현정 2000).

개념이 필요충분조건에 의해 국소적으로 경계 지워져 있다는 관점은 개념에 대한 고전적 관점의 특성이다(Gilbert & Watts, 1983; Howard, 1987). 고전적 관점은 개념을 필요충분조건을 만족하는 ‘논리적 원자(logical atom)’로서 위계적인 체계화를 통해 지식을 이루는 것으로 보고 있다(Markova, 1982). 그

렇기 때문에 옳은 개념과 옳지 않은 오개념이 구분 가능하다. Ausubel(1968)과 Gagne(1970)는 개념에 대한 고전적 관점을 견지한 대표적인 경우이다(Gilbert & Watts, 1983). 이러한 관점은 인지경계성 면에서 효율적이고, 범주화에 있어서 다른 범주와 구별되게 하는 응집성 측면에서 우수한 장점이 있다(신현정, 2000).

하지만, 고전적 관점은 다음과 같은 두 가지 면에서 한계를 가지고 있다. 첫째, 몇몇 수학적 개념을 제외하면 필요충분조건을 정의하는 것이 거의 불가능하다(Howard, 1987; Smith, 1989). 다시 말해 개념의 정의를 내리는 것이 모호하며, 일단 정의를 내렸다고 하더라도 수많은 예외를 만나게 된다. 그런 점에서 정보를 제공하는 데 있어서도 한계를 보인다.

둘째, 전형성(typicality) 효과를 설명할 수 없다(Howard, 1987; Smith, 1989). 전형성이란 동일한 범주의 사례들이라도 어떤 사례는 다른 것보다 그 범주를 더 잘 대표한다는, 즉 보다 전형적이라는 특성을 말한다. 예를 들어 같은 새라고 하더라도 펭귄보다는 비둘기가 더 전형적이다. 이러한 특성은 Rosch와 그의 동료들의 연구(Rosch, 1975; Rosch *et al.*, 1976)를 비롯해 비슷한 많은 연구에서 실험적으로 밝혀진 바 있다. 그러나 고전적 관점은 필요충분조건에 의해 일단 경계 지어지게 되면 같은 개념 내에 있는 사례들은 모두 동일한 대표성을 갖게 된다. 따라서 전형성 효과를 설명하지 못한다. 이러한 한계를 극복하기 위해 제시된 관점이 원형 관점과 본보기 관점이다. 이들은 특정한 원형이나 본보기와의 유사성에 의해 범주화가 일어난다는 관점이다. 원형 관점과 본보기 관점은 무엇이 범주로 표상되느냐에 따라 각각 추상화된 원형과 전형적 본보기를 주장하여 서로 다른 입장을 취하고 있기는 하지만, 모두 필요충분조건을 만족이라는 예리한 정의를 필요로 하지 않는다(신현정, 2000).

연결주의의 분산 표상으로서 개념관은 개념에 대한 고전적 관점의 한계를 극복하고, 원형 관점의 특성을 잘 설명해 주고 있으며(Churchland, 1995; Roth, 2000), 나아가 본보기 관점의 특성도 설명해준다(Way, 1997). 연결주의의 연결망 모형은 개별 입력 패턴들에 의해 반복적으로 훈련되는 과정에서 원형을 형성하게 되고, 그 과정에서 범주화를 수행하게 된다. 이러한 범주화와 원형 형성의 과정은 McClelland & Rumelhart(1985)에 의해 훌륭하게 구현된 바 있다.

이들은 개에 대한 50개의 개별 외부 입력 패턴으로 유사성에 기반 한 비중 조정 과정을 거쳐 원형을 형성하였다. 이러한 원형의 형성은 반복되는 개별 자극과 간단한 학습 규칙에 의한 비중 조정에 의해 자동으로 수행되었다. 개념을 분산 표상으로 보는 관점은 어떤 과정을 거쳐 원형이 형성되어 저장되고 재생되는가를 잘 보여주어 준다. 한편, 분산 표상은 본보기 관점의 특성도 가지고 있다. 연결망은 유사성에 기반을 두고 원형 패턴을 형성하지만, 동시에 주어진 입력 패턴의 특성에 따라 그 시점에서 각기 다른 패턴을 출력할 수 있으므로 분산 표상은 수많은 본보기의 저장과 인출이 가능하다. 이런 점에서 분산 표상은 본보기 관점의 특성을 잘 설명하고 있다. 특히, 순환되는 연결을 포함한 연결망의 경우는 기존에 형성된 패턴을 다시 입력하거나 혹은 우선 입력할 수 있어 맥락에 의존한 분산 표상을 형성할 수 있다 (Churchland, 1995; McLeod *et al.*, 1998).

분산 표상으로서 개념은 수많은 단위들의 연결 패턴으로 원형과 본보기를 기억하고 재생한다. 그러나 그것이 분산되어 있기 때문에 국소적일 수 없으며, 그것이 환경과 상호작용하면서 순간순간 발현되는 패턴이기 때문에 항구적인 모양을 가지고 있다고 보기 어렵다. 그렇기 때문에 연결주의의 개념은 실체(entity)가 아니다(Thagard, 1992). 원형 관점이나 본보기 관점과 맥을 같이하면서도, Rosch *et al.*(1976)이 개념을 경험에 의해 형성된 정신적 실체로 봤다는 점에서는 그들과 입장을 달리한다. 그러나 그렇다고 해서 패턴이 허구는 아니기 때문에 개념의 존재 자체를 의심하는 행동주의자들의 관점과는 또 다르다(Thagard, 1992). 다시 말해 그것은 분명히 우리 머리 속에서 발현되고 있는 어떤 것이다. 그리고 그것은 전형성을 가지고 있다. 그렇다면, 도대체 과학 개념 학습에서 우리는 분산 표상으로서의 개념을 어떻게 다룰 수 있을까? 즉, 학생의 개념을 어떻게 파악하고, 그 개념을 변화시키기 위해서는 어떠한 조작들을 할 수 있으며, 또, 그 결과는 어떻게 파악할 수 있을까?

분산 표상으로서의 개념을 파악하는 한 가지 방법은 그 개념과 관련하여 학생이 인식하고 있는 '전형적 인식상황(Typically-Perceived-Situation)'을 파악하는 것이다. 분산 표상은 명제로서 파악되기 어렵다. 필요충분조건이 명시될 수 없기 때문이다. 또, 특정한 기호나 관계로 파악되기 어렵다. 위계적인 체계를 가지고 있지 않아 가장 핵심적인 기호나 원리를 가

지고 있지 않기 때문이다. 분산 표상은 환경 속에서 조율되고 자동 일반화되면서 순간순간 구성되는 패턴이므로, 그 패턴이 발현되는 맥락과 함께 파악되어야 한다. 분산 표상으로서 개념의 파악은 주어진 맥락 속에서 그 순간 떠오르는 복합적인 어떤 것, 즉 상황을 파악하는 것이 필요하다. 상황은 일이 되어가는 과정이나 형편(국립국어연구원, 1999)이라는 사전적 의미를 가지고 있으며 어떤 순간의 위치, 상태, 사정을 말한다. 그런데 어떤 일의 형편이나 모습, 사정은 주어진 맥락에 의존할 수밖에 없으므로, 상황은 White(1988)가 말한 인상(image)과 일화(episode)를 포함한다. 즉, 상황은 일종의 기호나 명제가 아니라 매우 다양한 요소가 복합적으로 관여된 일종의 일화적 장면이기 때문에 분산 표상을 파악하고 기술하는데 유리하다. 그런데 분산 표상은 전형성을 가지고 있다. 다시 말해 원형과 본보기로서 개념의 특성을 가지고 있다. 그렇기 때문에 상황들의 원형을 파악하거나 적절한 본보기 상황을 파악하는 것이 필요하다. 결국, 분산 표상으로서 개념을 파악하는 것은 그 개념과 관련하여 학생들이 인식하고 있는 전형적인 상황을 파악하는 것을 필요로 한다.

본 논문에서 말하는 전형적인 인식상황이란 "사물, 감정, 개념, 상황 등과 같은 어떤 개상에 관해 생각할 때, 즉시적이고 자동적으로 떠오르는 상황으로서, 관련된 수많은 상황들을 대표하는 추상화된 원형이거나 주어진 맥락에서 가장 적절한 것으로 선택되도록 안정화된 본보기 상황"을 의미한다. 전형적인 인식상황은 그것이 원형이던 본보기이던 상관없이 다른 상황에 비해서 먼저 떠오를 것이다. 왜냐하면, 연결주의의 연결망은 특별히 이 패턴을 활성화하는 명령자를 가정하고 있지 않고 단지 반복적인 규칙의 수행에 의해 안정화된 활성화 패턴을 가정하고 있는데, 안정화된 활성화 패턴이란 환경과의 상호작용 하에서 조율되어 그 패턴이 자동으로 활성화 되게끔 되어 있는 상태이기 때문이다. 다시 말해 그것은 먼저 떠올라야 하는 특별한 이유를 가지고 있기 때문이 아니라 그렇게 안정화되었기 때문에 자연스럽게 먼저 떠오르게 될 것이다.

예를 들어, '힘'이라는 단어를 들었을 때 어떤 학생에게 "수평면에서 커다란 책상을 밀고 있는 상황"이 가장 먼저 떠오른다면, 그 학생은 힘이라고 하는 것을 '수평면'과 '커다란 책상', 그리고 '밀기' 등을 포함하는 연결망에서 그 상황을 발현하는 특정한 패

턴을 분산 표상으로 가지고 있을 것이라고 예상할 수 있다. 물론 이것은 그 상황에 포함되어 있는 수많은 단위들을 추린 것으로서 완전한 분산 표상을 기술한 것으로 보기 어렵다. 그것은 상황이 갖는 한계가 아니라, 그 상황을 기술하는 언어가 갖는 한계에 기인한다. 그러나 그러한 한계를 인정하더라도, 상황을 기술하는 것이 학생의 개념을 명제로 기술하는 것보다는 분산 표상을 좀더 충실하게 기술하는 방법일 것이다.

한편, 상황에 의존하여 형성되고 발현된다는 학생 선개념의 특성(Mori *et al.*, 1974; Dreyfus & Jungwirth, 1980; Driver *et al.*, 1985; Driver, 1988)을 고려해 볼 때도, 학생들이 전형적으로 인식하고 있는 상황을 기술하는 것은 학생들의 생각을 파악하는 적절한 방법일 수 있다. 학생들의 개념은 사회문화적 상황에 의존하기도 하고(Mori *et al.*, 1974), 주어진 문제의 내용과 성격(Dreyfus & Jungwirth, 1980; Driver *et al.*, 1985)에 의존하기도 한다. 특히, 학생들은 새로운 상황들을 자신이 알고 있거나 인식하고 있는 어떤 것으로 그려봄으로서 그 상황을 이해하려고 한다(Driver, 1988). White(1985) 역시 실제상황(real context)과 인식된 상황(perceived context), 그리고 상황의 객관적 측면과 주관적 측면을 구분하는 것이 중요함을 지적하면서, 특히 인식된 상황이 학생들에게 실제적 영향을 미치고 있음을 지적한 바 있다. 이러한 학생 선개념이 갖는 특성은 학생들의 개념을 파악하는 데 있어서 관련되어 있는 구체적인 상황의 파악이 함께 수행되어야 함을 시사하고 있다고 하겠다.

전형적 인식상황을 '개념을 파악하고 기술하는 하나의 도구'로서만 봐야 할 것인지, 아니면 '개념은 곧 전형적 인식상황'으로 볼 수 있는 것인지에 대해서는 논의의 여지가 있다. 그것은 개념이 먼저 형성되어 있어서 사물과 사건을 범주화하는 것인지(Strike & Posner, 1985), 사물과 사건 그 자체가 자동으로 범주화되는 것인지(Rosch, 1978), 아니면 마음이란 아예 존재하지 않으며 단지 경험의 연속만이 존재할 뿐인지(Varela *et al.*, 1991), 혹은 기호로 지시될 수 없는 사건의 연쇄가 의미를 구성하고 있는 것인지(Deleuze, 1969) 등에 대한 심도 있는 논의를 포함한다. 그러나 어찌되었든, 그것이 곧 개념이건, 아니면 개념의 파악과 기술을 위한 도구이건 상관없이 전형적 인식상황은 '전형성'과 '상황'이 갖는 특성상 학생

의 분산 표상을 파악하고 기술하는데 유용한 한 방법이 될 것이다.

(2) 개념 하위 단위들의 연결과 역할이 부각될 필요가 있다.

연결주의의 개념관은 개념과 관련하여 상징 이하의 하위 수준에서 세부특징을 드러내는 개념 하위 단위가 존재할 것임을 시사하고 있다. 연결주의의 연결망은 다층 구조를 가지고 있으며 각 층에는 무수한 단위들이 존재한다. 그리고 각 단위들은 모두 특정한 비중을 가지고 연결되어 있다. 연결망에서 나타나는 패턴은 이러한 단위들의 활성화에 의해 형성되고 그 활성화는 비중의 조정에 의존한다. 연결망의 이러한 구조는 상징 이하 수준에서 그 개념을 형성하는 하위 단위의 존재를 가정하게 한다.

과학 개념학습 관련 연구에서도 개념을 일종의 연결망과 관련지어 보는 관점은 꾸준히 견지되어 왔다. 예를 들면 개념도를 발전시킨 Novak 등(Novak & Gowin, 1984; Novak, 1998)이 그러하고, 개념 생태의 의미를 발전시킨 Posner 등(Strike & Posner, 1982, 1985)이 그러하다. Pines(1985)도 개념 사이의 관계가 중시되는 일종의 연결망을 가정하고 있다. 개념이 연결망과 관련되어 기술된다는 점에서 이들의 주장은 연결주의의 개념관과 맥을 같이 하지만, 그러나 기본적인 관점에 있어서 다소 차이를 보인다.

첫째, 이들은 개념을 국소적으로 기호화된 어떤 것으로 보고 있고, 위계적인 상징체계를 가정하고 있다는 점에서 연결주의 관점과 다소 차이가 있다. Novak(1998)은 개념을 '사건이나 대상 혹은 그것들의 기록 속에 있는 규칙성으로서 이름(label)으로 표시되는 것(p. 22)'으로 정의하고 있다. 이름은 단어나 기호로 붙여지며 그렇게 이름 지어진 개념은 위계적으로 구조화 되어 있고, 역시 위계적으로 구조화되어 있는 명제와 함께 지식을 구성한다(Novak, 1998). 개념도는 이러한 위계적인 구조를 가진 지식을 표현하기 위해 고안된 도구로서, 개념을 논리적 원자로 취급하여 위계적인 수형도로 지식을 표현하고 있다는 점에서 고전적 관점을 토대로 이뤄진 결과물이라 할 수 있다.

둘째, 이들은 개념의 형성 과정보다는, 개념 체계가 이미 있다고 가정하고 기존 개념 혹은 개념 체계와 대상 개념 사이의 관계에 초점을 맞추고 있다는 점에서 연결주의 관점과 다소 차이가 있다. Strike &

Posner(1982; 1985)는 개념을 단독적인 어떤 것으로 보지 않고 Toulmin(1972)의 용어를 빌려 일종의 생태계를 가정하였으며, 변칙사례, 보기(exemplar)와 인상, 과거 경험, 형이상학적 신념 등의 개념 생태 요소간의 생태학적인 기제로 개념 변화를 설명하고자 한 바 있다. 이들의 개념 생태는 일종의 연결망으로 생각될 수 있으며, 생태학적 기제는 연결망의 기제와 비견될 수 있으므로, 연결주의의 개념관과 맥을 같이 한다. 그러나 이들은 개념을 '경험의 전체 조건(Strike & Posner, 1985, p. 215)'으로 보고 기존 개념의 '조절(accommodation)'을 강조하는 반면, '동화(assimilation)'에는 큰 중요성을 부여하지 않는다. 물론 '조절과 동화는 정도의 차이(p. 216)'라고 말하고는 있지만, 현재 학생들이 가지고 있는 개념 생태와 특정 개념 사이의 관계에 관심이 있지, 개념의 형성이나 '최초 경위의 문제(the problem of the first case: Strike & Posner, 1982)'와 같은 것에는 큰 의미를 두고 있지 않다. 이들에게 있어서 논의의 쟁점은 학생이 가지고 있는 가용한 지적 자원을 특징짓는 것이다. 그러나 연결주의는 개념 형성과 관련된 최초 경험의 문제와 동화 과정에 큰 관심을 가지고 있으며, 현재 학생이 가지고 있는 가용한 지적 자원이 왜 그렇게 형성되었는지에 관심을 가지고 있다. 그리고 그 과정에서 개념 하위 단위들의 연결 패턴을 중시한다. 그런 점에서 이들의 연결망은 연결주의의 연결망과는 다소 차이가 있다.

그렇다면, 연결주의에서 얘기하는 상징 이하 수준의 개념 하위 단위는 과학 개념학습에서 무엇을 의미하는 것일까? 그것은 연결망에서 개별 단위가 의미하는 것을 무엇으로 보느냐에 따라 몇 가지로 나뉘질 수 있다.

첫째, 개별 단위를 대상 개념에 관련된 일종의 가설들로 볼 수 있다. 이 경우에 개념 하위 단위는 상징 이하 하위 단위이기보다는 하위 개념에 가깝다고 볼 수 있다. Smolensky(1986)는 두뇌에서 일어나는 기제와 연결주의의 수리적 모형에서 일어나는 기제, 그리고 개념 체계에서 일어나는 기제를 비교하면서, 두뇌의 뉴런에 해당하는 연결망의 개별 단위를 개념 체계에서는 가설에 대응시켰다. 그는 수리적 연결망 전체를 개념 체계에 비유하였고, 개별 개념이 높은 신뢰도를 보이면서 활성화되는 데 필요한 긍정적 증거와 부정적 증거, 추론 등등의 개념적 요소와 연결주의의 수리적 연결망의 요소를 대응시켰다. 그의 시

도는 개별 단위를 가설에 비유하게 되면 기존의 개념 체계에서 일어나는 기제를 연결주의의 연결망의 기제로 대응시켜 설명할 수 있음을 보여주기 위한 것이었고, 그렇기 때문에 기존의 과학 개념학습에서 전지되어온 연결망으로서의 개념과 개념 체계의 기제(Strike & Posner, 1985; Pines, 1985)와 흡사한 면이 있다. 또, 이렇게 개별 단위를 의미 짓는 것은, 진화론 등의 과학 이론들이 타당성을 획득하는 과정에서, 관련된 여러 가지 근거가 어떤 비중으로 기여하는가를 분석한 Thagard(1992)의 연구에서도 볼 수 있다. 이상과 같이 개념 하위 단위를 가설과 같은 수준으로 보는 것은 개념 생태와 같은 개념 체계의 기제를 설명하고, 과학 개념학습 과정을 분석하는데 유용할 것이다.

둘째, 개별 단위를 일종의 추상화된 원형으로 볼 수 있다. 이 경우에 개념의 하위 단위는 개념을 구성하는 요소이면서 동시에 여러 경험이나 본보기들의 원형이다. 이러한 원형들이 특정한 규칙에 의해 연결망에서 패턴을 형성하게 되면 개념으로 표상된다. 이와 유사한 접근을 diSessa의 연구(diSessa, 1993; diSessa & Sherin, 1998)에서 볼 수 있다. 그는 지식 체계를 기술하는 데 있어서, 다량의 현상론적 초안(phenomenological primitives)이 연결된 상태에 초점을 맞추었다. 현상론적 초안은 '공통되는 현상들의 최소한의 추상(diSessa, 1993, p. 114)'으로서 신체가 받아들인 직접적인 감각 정보들과 범주나 개념 같은 추상적인 관념 사이에 존재하고, 일단 형성되면 사람들이 그들의 경험을 기억하고 해석하게 해주는, 인지 요소의 원자적이고 최소한의 기억요소이다. 어떤 현상론적 초안이 활성화되는가 하는 것은 특정한 맥락에서 부여되는 촉발 우선성(cuing priority)과 신뢰도 우선성(reliability priority)에 의존하는데, 촉발 우선성은 초기 활성화를 일으키는 연결의 강도와 관련이 있고, 신뢰도 우선성은 되먹임을 통하여 초기 활성화를 강화하거나 억제하는 기능과 관련이 있다. 이러한 기제는 연결주의의 연결망에서 단위들의 활성화와 연결 비중의 조정에 의해 안정화된 패턴을 발현하게 되는 과정과 매우 흡사하다. 실제로 diSessa는 현상론적 초안의 구조적인 측면을 강조한 '구조로서 현상론적 초안(structural phenomenological primitives)'이란 용어를 연결주의의 단위에 대응시키기도 하였다(diSessa, 1993).

diSessa의 현상론적 초안은 연결주의의 연결망에서

개별 단위에 해당되며, 그것은 연결주의의 개념관에서 보면 일종의 개념 하위 단위로 볼 수 있다. 물론, diSessa & Sherin(1998)은 연결주의의 한계에 대한 지적과 함께, 범주화의 표상으로서 개념을 바라보는 관점을 보완하면서 대안적인 개념관으로 ‘통합체(coordination classes)⁵⁾’에 대한 논의를 전개한 바 있다. 통합체는 개념의 기능 면에서는 ‘통합(integration)’과 ‘불변특성(invariance)’ 추출이라는 정보추출 전략을, 형태 면에서는 추론과 설명 체계를 갖춘 인과적 연결망을 특성으로 하는 일종의 복합체로서의 개념이다. 통합체를 개념으로 보자면 현상론적 초안은 개념의 구성 요소라기보다는, 개념이 의미 지어야 할 대상에 가깝다. 그러나 최초, 혹은 적어도 초기의 통합체가 어떤 과정으로 형성되었을 것인가라는 질문을 던져 보면, 역시 현상론적 초안, 즉, 추상화된 원형으로서의 개별단위들이 중요할 수밖에 없다. ‘인과적 연결망의 초기 단계는 현상론적 초안들의 망으로 시작된다(diSessa & Sherin, 1998, p. 1178)’는 언급은 이러한 면을 뒷받침해주고 있다.

개념 하위 단위를 현상론적 초안과 같이 최소로 추상화된 원형으로 보는 것은 여러 개의 원형 사이의 관계를 통해 개념을 파악하거나 기술할 수 있다는 점에서 효율적이고, 비교적 실제 현상과 가깝다는 면에서 구체성을 확보할 수 있다. 또, diSessa 등은 그러한 시도를 하지 않았지만, 개념 구성에 영향을 미치는 원형들 사이의 관계를 앞서 기술한 Thagard(1992)가 사용했던 모의실험 방법을 사용하여 탐색할 수 있다는 점에서도 유용할 것이다.

셋째, 개별 단위를 개별 현상이나 개별 사례, 개별 상황으로 볼 수 있다. 이러한 관점은 개념이나 추상화된 원형 등이 형성되는 과정에 주목하고, 가장 직접적인 현상이나 감각 정보들, 그리고 그들 사이의 관계에 주목하는, 연결주의의 개념관에 가장 충실한 관점으로 볼 수 있다. diSessa(1993)가 현상론적 초안의 하나로 제시한 ‘움직이게 하는 것으로서의 힘(forces as mover)’을 예를 들어 보자. 이 현상론적 초안은 힘이 주어지게 되면 그 방향으로 움직이게

된다는 것이다. 우리는 왜 이러한 현상론적 초안이 형성되게 되었는지를 질문할 수 있다. 이에 대한 해답을 찾기 위해 우리는 아마도 한 학생을 선정할 것이며, 그 학생이 힘과 관련하여 드는 여러 가지 예시들을 알아볼 것이다. 그리고 힘과 관련하여 어떤 경험들을 했으며, 그 경험은 구체적으로 어떤 장소에서 일어났으며, 어떤 대상에, 어떤 작용이 있었는지를 물어 볼 것이다. 그리고 그 경험은 어떤 맥락에서 이루어진 것이고, 얼마나 인상 깊게 남아있는지 등에 대해서도 물어 볼 것이다. 그렇게 정보가 수집되면 이러한 여러 가지 개별 경험이나 사례, 상황 등이 어떻게 현상론적 초안이 형성되는 데에 관여하는지를 전형성을 따져가면서 분석해 볼 것이다.

이러한 관점은 개념 형성에 영향을 미치는 현상이나 상황을 탐색한다는 점에서, 개념을 현상에 대한 직관적 해석으로서 주어진 맥락에서 추측된 관계나 패턴으로 보고(Caravita & Hallden, 1994; Caravita, 2001), 일상생활 상황에서의 맥락화를 중시하는 입장(Hallden, 1999)이나, 개별 개념 자체나 개념들 사이의 관계 변화뿐만 아니라 특정 개념이 갖고 있는 현상과의 관계 변화 혹은 그것에 대한 이해의 변화가 개념학습에서 중요하다는 입장(Carey, 1985), ‘특정한 문제 해결 상황에서 요구되는 것을 다루기 위해 만들어지는 것으로 물리적 현상에 대한 인과적 설명과 예측을 제공하는 역동적이고 생산적인(중략) 일종의 정신적·비유적 표상인 정신 모형(mental model)(Vosniadou, 1994, p. 48)’을 중시하는 입장(Stevens & Gentner, 1983; Vosniadou, 1994), 그리고 수많은 일상 경험이 학생의 정합적이고 견고한 틀 이론/framework theory)을 형성하고 그 틀 이론이 개념변화에서 중요한 역할을 한다는 입장(Vosniadou, 1996; Vosniadou & Ioannides, 1998) 등과 맥을 같이하고 있으며, 동시에 이러한 입장들에서 사용할 수 있는 해석의 틀을 제공할 것이다. 더불어, 현상을 제시하는 것이 논리를 제시한 것 보다 인지갈등을 잘 유발하거나 개념 변화에 효과적이라는 연구결과들(권재술, 2002)의 해석에도 유용한 틀을 제공할 것이다.

5) 박종원(2002)은 coordination classes를 ‘통합체’로 번역한 바 있다. 그러나 diSessa & Sherin(1998)은 “coordinate를 일반적인 ‘보다(see)’와 ‘정보를 결정지우다(determine information)’의 의미를 갖고 있으면서, 여기에 방략과 추론을 포함하는 형태의 ‘보기(seeing)’의 의미도 가지고 있음을 강조하기 위해 사용한다(pp. 1171-1172)”고 명시하고 있다. 따라서 coordination을 ‘통합’으로 번역하는 것은 그 특성을 드러내는데 부족할 수 있으며, 정위(定位: 생물체가 몸의 위치나 자세를 능동적으로 정함, 또는 그 위치나 자세, 국립국어연구원, 1999)나 안목(眼目: 사물을 보고 분별하는 건식, 국립국어연구원, 1999)의 의미가 일부 포함된 용어가 필요할 것으로 생각된다. 하지만, 새로운 용어에 대한 논의가 충분치 않아 본 논문에서는 기존에 통용되고 있는 ‘통합체’라는 용어를 그대로 사용하고자 한다.

개념의 하위 단위가 존재할 것이고, 이에 대한 분석이 과학 개념학습에서 부각될 필요가 있다는 연결주의 개념관의 시사점은 자연스럽게 과학 개념학습에서 개념 분해 활동이 필요함을 제안하고 있다. 개념 분해 활동이란 학생이 인식하고 있는 개념을 관련된 하위 단위로 분해하는 활동을 말한다. 개념 하위 단위가 가설의 수준이건 추상화된 원형의 수준이건, 아니면 개별 현상이나 사례, 상황의 수준이건, 현재 학생의 개념을 한 단계 하위 단위로 분해하는 것은 학생의 개념이 왜 그렇게 형성되었으며 주된 영향을 미치는 요인이 무엇이고 개념 변화를 위해 처치되어야 할 요인은 무엇인가를 파악하는데 유용할 것이다. 물론, 개념의 특정한 하위 단위는 또 한 단계 하위 수준의 단위로 이뤄져 있을 것이므로 무한 순환의 오류에 빠질 수 있다. 또, 과연 실제 과학 개념학습에서 개념 하위 단위를 어느 수준까지 어떻게 파악할 수 있는가 하는 현실적인 문제를 안고 있기도 하다. 그러나 스피커를 분해 하는 활동이 반드시 코일과 자석, 전선을 분해하는 수준까지 이르러야만 원리 파악에 도움을 주는 것은 아닐 것으로 예상할 수 있는 것처럼, 특정 수준에서 한 단계 하위 단위를 특성화 하고 그들 사이의 관계를 분석하는 것은 오개념의 원인 분석과 처치 등을 가능하게 등 과학 개념학습 지도에 유용할 것이다.

III. 결 론

연결주의는 마음을 두뇌 은유에 근거하여 설명하는 학문적 흐름으로서, 19세기 연합주의와 맥을 같이 하고 있으며 근래 인지 과학 분야의 주된 연구 흐름 중 하나로 자리하고 있다. 연결주의는 인지 과정의 특성을 비교적 잘 설명해주고 있으며, 자동 운전 장치 등의 다양한 인공지능 시스템의 구현에 이론적 바탕을 제공하고 있다. 연결주의는 인지 과정이 단위 혹은 마디의 연결과 활성화에 의해서 수행되는 것을 강조한다. 하나의 단위는 인접한 다른 단위로부터 입력을 받고 다시 인접한 단위로 출력을 내보내면서 연결망 전체에 그 정보가 전파되고 안정화된 활성화 패턴이 발현되는데, 그 과정은 두뇌의 정보 처리 방식과 유사하게 병렬적이고 동시적으로 이루어진다.

연결주의에서는 개념을 '분산 표상'으로 보고 있다. 분산 표상은 구성적 특성, 자동 일반화 능력, 환경에 대한 조율능력을 가지고 있으며, 인지 과정의 특성을

비교적 잘 설명해주고 있다. 또, 이러한 분산 표상이 일어나는 연결망은 상징 이하 수준의 체계와 연결망 내의 단위 간 흥분과 억제라는 기제를 전제하고 있다.

연결주의 개념관은 과학 개념학습에 다음과 같은 시사점을 주고 있다. 첫째, 특정 개념과 관련하여 학생이 인식하고 있는 '전형적 인식상황'이 부각될 필요가 있다. 전형적 인식상황은 전형성과 상황이 갖는 특성상 원형 모형과 본보기 모형의 특성을 지닌 분산 표상을 파악하고 기술하는데 용이하다. 둘째, 개념 하위 단위들의 연결과 역할이 부각될 필요가 있다. 그리고 이러한 개념 하위 단위의 상정은 개념 분해 활동을 제안하고 있다.

이러한 시사점은 과학 개념학습에서 학습과 변화의 대상이 되는 개념에 대한 관점을 재고 할 것과, 개념의 형성 과정에 주의를 가져야 함을 제안하고 있다. 즉, 개념은 기호적인 실체가 아닐 수 있으며, 그렇게 보는 것이 학생의 개념 특성을 설명하는데 좀더 유용할 것이라는 제안을 하고 있는 것이다. 또, 학생이 이미 선개념을 가지고 있다는 사실을 비판적 분석 없이 받아들이고 조절을 일으키는 데에만 주목하는 연구 풍토는 동화의 과정을 거쳐 선개념이 형성되는 기제에 대한 연구 속에서 얻을 수 있는 학생 개념에 대한 특성 파악과 현실적 처치 방안 모색의 기회를 감소시킬 수 있음을 지적하고 있다. 그리고 학생이 인식하고 있는 전형적 인식상황의 파악과 개념 하위 단위의 상정, 그리고 그들의 역할 및 기제에 대한 연구가 학생 개념에 대한 특성 파악과 현실적 처치 방안 모색의 기회를 증가시키는 역할을 할 수 있다고 제안하고 있다.

본 연구는 연결주의를 개관하고, 연결주의 개념관의 특성을 고찰한 후, 관련성과 유용성에 근거하여 연결주의 개념관이 과학 개념학습에 주는 시사점을 기존의 문헌을 중심으로 고찰하였다. 따라서 실험적인 근거를 제시하는 추후 연구에 의해 좀더 보완될 필요가 있을 것이다. 하지만 본 연구에서 고찰된 시사점들은 학생의 개념에 충실한 개념관과 이에 바탕을 둔 다양한 과학 개념학습 지도 방안에 대한 대안적 모색과 더불어 관련된 실험적인 연구들에 기초를 제공할 수 있을 것으로 기대한다. 즉, 실제로 학생들이 특정한 대상이나 개념과 관련하여 어떤 전형적 인식상황을 가지고 있으며, 전형적 인식상황의 조사를 통해 학생들의 생각을 파악할 수 있는지에 관한

연구에 기초를 제공할 수 있을 것이다. 특히, 전형적 인식상황은 개인의 마음에 떠오르는 상황이므로 그 상황의 모습을 그림으로 나타낼 수 있을 것이라는 점을 감안해 보면, 전형적 인식상황의 조사를 통해 학생의 생각을 파악하는 것은 아직 언어를 사용한 의사소통, 특히 추상적인 과학 용어를 사용한 의사소통에 어려움을 갖고 있는 초등학생들의 생각을 파악하는 하나의 대안적인 방법을 제공할 수 있을 것이다. 더불어, 전형적 인식상황의 변화와 개념변화의 관계는 어떠한지, 전형적 인식상황의 변화를 가져올 수 있는 방안에는 어떠한 것들이 가능한지, 그리고 실제로 이러한 방안들이 과학 개념학습에 효과적인지 등에 대한 연구에 기초를 제공할 수 있을 것이다.

참고문헌

- 강호감(1991). 두뇌의 기능분화에 따른 교수전략이 창의력 및 자연과 학업성취도에 미치는 영향. 서울대학교 박사 학위 논문.
- 권재술(2002). 과학교육에서 인지갈등 관련 연구의 동향과 방향. 박승재교수 정년퇴임 기념 학술대회 자료집.
- 국립국어연구원(1999). 표준 국어 대사전. 서울: 두산 동아.
- 김용진(2000). 학습 활동의 뇌파분석에 기초한 두뇌순환 학습모형의 개발과 과학학습에의 적용. 서울대학교 박사 학위 논문.
- 김유미(2001). 두뇌에 기반을 둔 초등교육의 방향 탐색. 초등교육학연구, 8(1), 1-32.
- 김유미(2002). 두뇌 기반 교수-학습의 원리와 적용 방안 탐색. 교육학연구, 40(3), 247-270.
- 박재근, 김용진, 장남기(2002). 사고 활동 중의 전방전두엽에서의 뇌전도 분석에 기초한 두뇌의 활성화 상태 분석. 한국생물교육학회지, 30(1), 54-65.
- 박종원(2002). 학생 개념체계의 연속적 세련화와 정교화를 통한 개념 변화과정-이론적 논의를 중심으로-. 한국과학교육학회지, 22(2), 357-377.
- 신현정(2000). 개념과 범주화. 서울: 아카넷.
- 이정모(2001). 인지심리학. 서울: 아카넷.
- 장병탁(2000). 신경망, *Natural Science*, vol. 8. at: <http://cbit.snu.ac.kr/seminar-frame.htm> (2004. 1. 검색).
- 조주연(1998). 학습 및 기억에 대한 인지과학적 발견의 교육적 적용. 초등교육연구, 12(2), 5-27.
- 조희형(1996). 과학 개념의 특성과 학습지도 방법에 관한 연구의 분석. 한국과학교육학회지, 16(1), 77-86.
- 허명, Lawson, A. E., & 권용주(1997). 과학적 추론 능력의 발달에서 전두엽합령의 역할. 한국과학교육학회지, 17(4), 525-540.
- Anderson, J. R. (2000). *Cognitive psychology and its Implication*. Worth Publishers: New York.
- Andersson, B. (1986). The experiential gestalt of causation: a common core to pupils' preconceptions in science. *European Journal of Science Education*, 8(2), 155-171.
- Ausubel, D. P. (1968). *Educational psychology: A cognitive view*, Holt, Rinehart and Winston: New York.
- Caravita, S. (2001). A re-framed conceptual change theory?. *Learning and Instruction*, 11, 421-429.
- Caravita, S. & Hallden, O. (1994). Re-framing the problem of conceptual change. *Learning and Instruction*, 4, 89-111.
- Carey, S. (1985). *Conceptual change in childhood*. MIT Press: Cambridge, MA.
- Churchland, P. M. (1995). *The engine of reason, the seat of the soul: a philosophical journey into the brain*. MIT Press: Cambridge, MA.
- Collins, H. & Shapin, S. (1989). Experiment, science teaching, and the new history and sociology of science. M. Shortland & A. Warwick (Eds.), *Teaching the History of Science*. Basil Blackwell; Oxford, 67-79.
- Conant, J. B. (1948). *Harvard case histories in experimental science*, Cambridge, MA.
- diSessa, A. A. (1993). Toward an epistemology of physics. *Cognition and Instruction*, 10(2 & 3), 105-225.
- diSessa, A. A. & Sherin, B. L. (1998). What change in conceptual change? *International Journal of Science Education*, 20(10), 1155-1191
- Deleuze, G. (1969). *Logique du sens*. 이정우 역 (1999). 의미의 논리. 서울: 한길사.
- Dreyfus, A. & Jungwirth, E. (1980). A Comparison of the 'Prompting effect' of out-of-school with of in-school contexts on certain aspects of critical thinking. *European Journal of Science Education*, 2(3), 301-310.
- Driver, R., Guesne, E., & Tiberghien, A. (1985). *Children's ideas in science*. Open University Press: Milton Keynes, Philadelphia.
- Driver, R. (1988). Restructuring the science curriculum: some implications of studies on learning for curriculum development. In D. Layton (Ed.) *Innovations in Science and Technology Education (Vol. II)*. Unesco, 59-84.
- Duit, R. (1991). Students' conceptual frameworks: Consequences for learning science. In Glynn, S. M., Yeany, R. H., & Britton, B. K. (Eds.) *The psychology of learning science*. Lawrence Erlbaum: NJ., 65-85.
- Duit, R. (2004). Bibliography - Students' Alternative Frameworks and Science Education. at: <http://www.ipn.uni-kiel.de/aktuell/stcse/stcse.html> (2004. 4. 검색)
- Duschil, R. A. & Gitomer, D. H. (1991). Epistemological perspective on conceptual change: Implications for educational practice. *Journal of Research in Science Teaching*, 28(9), 839-858.
- Elman, J. L., Bates, E. A., Johson, M. H., Karmiloff-Smith, A., Parisi, D., & Plunkett, K. (1996). *Rethinking innateness: A connectionist perspective on development*. MIT Press: Cambridge, MA.

- Gagne, R. M. (1970). *The conditions of learning*. Holt, Rinehart and Winston: New York.
- Gilbert, J. K. & Watts, D. M. (1983). Concepts, misconception and alternative conceptions: changing perspectives in science education. *Studies in Science Education*, 10, 61-98.
- Hallden, O. (1999). Conceptual change and contextualization. In W. Schnotz, S. Vosniadou & M. Carretero (Eds.), *New perspectives on conceptual change*, Pergamon: Amsterdam, 53-65.
- Hashweh, M. Z. (1986). Toward an explanation of conceptual change. *European Journal of Science Education*, 8(3), 229-249.
- Hinton, G. E., McClelland, J. L., & Rumelhart, D. E. (1986). Distributed representations. In D. E. Rumelhart & J. L. McClelland (Eds.) *Parallel distributed processing: Exploration in the microstructure of cognition*, Vol. 1. MIT Press: Cambridge, MA, 77-109.
- Howard, E. W. (1987). *Concepts and schemata*. Cassell Educational: London.
- Kuhn, T. S. (1962). *The structure of scientific revolution*. Chicago.
- Kwon, Y. (1998). How do the prefrontal lobes mediate scientific reasoning and conceptual change in adolescents? *Journal of Korean Association for Research in Science Education*, 18(3), 437-441.
- Kwon, Y. & Lawson, A. E. (1999). Why do most science educators encourage to teach school science through lab-based instruction?: A neurological explanation. *Journal of Korean Association for Research in Science Education*, 19(1), 29-40.
- Letlvin, Y. J., Maturana, H. R., McCulloch, W. S., & Pitts, W. H. (1959). What the frog's eyes tells the frog's brain. *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, 47, 1940-1951.
- Markova, I. (1982). *Paradigms, thought and language*. John Wiley & Sons: Chichester.
- Martindale, C. (1991). *Cognitive psychology: A neural-network approach*. 신현정 역(1994) 인지심리학-신경회로망적 접근. 서울: 교육과학사.
- McClelland, J. L. (1981). Retrieving general and specific knowledge from stored knowledge of specific. *Proceedings of the Third Annual Conference of Cognitive Science Society*. Berkeley, CA.
- McClelland, J. L. & Rumelhart, D. E. (1985). Distributed memory and the representation of general and specific information. *Journal of Experimental Psychology: General*, 114, 159-188.
- McClelland, J. L., Rumelhart, D. E., & Hinton, G. E. (1986). The appeal of parallel distributed processing. In D. E. Rumelhart & J. L. McClelland (Eds.) *Parallel distributed processing: Exploration in the microstructure of cognition*, Vol. 1. MIT Press: Cambridge, MA, 3-44.
- McLeod, P., Plunkett, K., & Rolls, E. T. (1998). *Introduction to connectionist modelling of cognitive process*. Oxford University Press: Oxford, New York.
- Minsky, M. & Papert, S. (1969). *Perceptrons*. MIT Press: Cambridge, MA.
- Mori, I., Kitagawa, O., & Tadang, N. (1974). The effect of religious ideas on a child's concept of time: a comparison of Japanese and Thai children. *Science Education*, 58(4), 519-522.
- Newell, A. (1990). *Unified theory of cognition*. 차경호 역 (2002). 통합인지이론. 서울: 아카넷
- Newell, A. & Simon, H. (1972). *Human problem-solving*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs: NJ.
- Nilsson, N. J. (1998). *Artificial intelligence: A new synthesis*. 최중민, 김준태, 심광섭, 장병탁 역 (2000). 인공지능-지능형 에이전트를 중심으로. 서울: 사이텍미디어.
- Norman, D. A., & Bobrow, D. G. (1979). Descriptions: An intermediate stage in memory retrieval. *Cognitive Science*, 11, 107-123.
- Novak, J. D. & Gowin, D. B. (1984). *Learning how to learn*. Cornell University Press: Ithaca, New York.
- Novak, J. D. (1998). *Learning, creating, and using knowledge: Concept Maps as facilitative tools in schools and corporations*. Lawrence Erlbaum: NJ.
- Nussbaum, J. (1989). Classroom conceptual change: Philosophical perspectives. In D. E. Herget (Ed.), *The history and philosophy of science teaching*. Florida State University: Floridapp, 278-291.
- Pines, A. L. (1985). Toward a taxonomy of conceptual relations and the implications for the evaluation of cognitive structures. In L. H. T. West & A. L. Pines (Eds.) *Cognitive structure and conceptual change*. Academic Press: Orlando, 101-116.
- Plunkett, K. (2001). Connectionism today. *Synthese*, 129, 185-194.
- Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W., & Gertzog, W. A. (1982). Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. *Science Education*, 66(2), 211-227.
- Quinlan, P. T. (1991). *Connectionism and psychology: A psychological perspectives on new connectionist research*. The University of Chicago Press: Chicago.
- Ramsey, W. M. (1989). *The philosophical implications of connectionism*. Unpublished Doctorial Dissertation. Chicago University: Chicago.
- Rosch, E. (1975). Cognitive representations of semantic categories. *Journal of Experimental Psychology*, 104, 192-233.
- Rosch, E., Marvis, C. B., Gray, W., Johnson, D., & Braem, P. B. (1976). Basic objects in natural categories. *Cognitive Psychology*, 7, 573-605.
- Rosenblatt, F. (1958). The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain.

- Psychological Review*, 65, 386-408.
- Roth, W.-M. (2000). Artificial neural networks for modeling knowing and learning in science. *Journal of Research in Science Teaching*, 37(1), 63-80.
- Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., & McClelland, J. L. (1986). A general framework for parallel distributed processing. In D. E. Rumelhart & J. L. McClelland (Eds.) *Parallel distributed processing: Exploration in the microstructure of cognition*, Vol. 1. MIT Press: Cambridge, MA, 45-76.
- Schnotz, W., Vosniadou, S., & Carretero, M. (1999). Preface. In W. Schnotz, S. Vosniadou, & M. Carretero (Eds.) *New perspectives on conceptual change*, xvi. Pergamon: Amsterdam.
- Smith, E. (1989). Concepts and induction. In M. Posner (Ed.) *Foundations of cognitive science*. MIT Press: Cambridge, MA, 501-526.
- Smolensky, P. (1986). Neural and conceptual interpretation of PDP Models. In J. L. McClelland & D. E. Rumelhart (Eds.) *Parallel distributed processing: Exploration in the microstructure of cognition*, Vol. 2. MIT Press: Cambridge, MA, 390-431.
- Stepans, J. (1991). Developmental patterns in students' understanding of physics concepts. In Glynn, S. M., Yeany, R. H., & Britton, B. K. (Eds.) *The psychology of learning science*. Lawrence Erlbaum: NJ, 89-115.
- Stevens, A. L. & Gentner, D. (1983). Introduction In D. Gentner, & A. L. Stevens (Eds.) *Mental models*. Lawrence Erlbaum: NJ., 1-6.
- Strike, K. L. & Posner, G. J. (1982). Conceptual change and science teaching. *European Journal of Science Education*, 4(3), 231-240.
- Strike, K. A. & Posner, G. J. (1985). A conceptual change view of learning and understanding. In L. H. T. West & A. L. Pines (Eds.) *Cognitive structure and conceptual change*. Academic Press: Orlando, 211-231.
- Thagard, P. (1992). *Conceptual revolution*. Princeton University Press: Princeton, NJ.
- Toulmin, S. (1972). *Human understanding*. Princeton University Press: Princeton, NJ.
- Varela, F. J., Thompson, E., & Rosch, E. (1991). *The embodiment mind: Cognitive science and human Experience*. MIT Press: Cambridge, MA.
- Vosniadou, S. (1994). Capturing and modelling the process of conceptual change. *Learning and Instruction*, 4, 45-69.
- Vosniadou, S. (1996). Toward a revised cognitive psychology for new advances in learning and instruction. *Learning and Instruction*, 6(2), 95-109.
- Vosniadou, S. & Ioannides, C. (1998). From conceptual development to science education: a psychological point of view. *International Journal of Science Education*, 20(10), 1213-1230
- Wandersee, J. H., Mintzes, J. J., & Novak J. D. (1994). Research on alternative conceptions in science education. In D. L. Gabel (Ed.) *Handbook of research on science teaching and learning*, Macmillan Publishing Company: New York, 357-387.
- Way, W. C. (1997). Connectionism and conceptual structure. *American Behavioral Scientist*, 40(6), 729-753.
- White, R. T. (1985). Importance of context in educational research. *Research in Science Education*, 15, 92-102.
- White, R. T. (1988). *Learning science*. Blackwell: Oxford, UK.