

사이버네틱스와 급진적 구성주의에 입각한 학습모형 구안을 위한 예비 작업

유 병 길
부산교육대학교

Preliminary Work for Designing a Learning Model Based on Cybernetics and Radical Constructivism

Pyoung-Kil Yoo

Busan National University of education

ABSTRACT

This work describes a preliminary investigation to a learning model based on cybernetics and radical constructivism. To achieve this purpose, main ideas of cybernetics, i.e., negative feedback, difference, self-regulation, equilibrium, and purpose-directed behavior was analysed under radical constructivism. Powers' model, which consists of hierarchically arranged negative feedback systems, is introduced into this work. This was based on the claim that living organisms behave to control perceptions. By adding the notion of scheme from the view of radical constructivism, a learning procedure, which consists of six steps, was suggested in this work.

Key words : cybernetics, radical constructivism, perception control theory, negative feedback, self-regulation, purpose-directed behavior, learning model.

I. 서 론

급진적 구성주의(radical constructivism)라는 용어는 1974년에 출판된 연구보고서에서 처음으로 등장하였다(Smock & von Glasersfeld, 1974). 이후, 급진적 구성주의는 지난 30여 년 동안 과학교육에 지대한 영향을 끼쳤다는 것은 부인할 수 없다(Tobin & Tippins, 1993; Tobin, 2007; Riegler, 2001).

급진적 구성주의는 다양한 분과 학문에 그 기원을 두고 있지만, von Glasersfeld(1974)에 의해 해석되고 확장된 Piaget의 이론과 사이버네틱스(cybernetics)에 가장 심오한 영향을 받았다. 일반적으로, 급진적 구성주의를 채택하고 있는 사람들은 학습자가 문제로 보고 있는 상황을 해소함으로써 자신이 설정한 목표를 달성하고자 함에 따라 자신의 경험에 입각

하여서만이 점차적으로 정교한 앎(knowing)의 방법을 구성한다고 믿고 있다(Cobb, 1994).

일반적으로 사이버네틱스는 어떠한 기체가 시스템을 제어하는가 그리고 특히 해당 시스템은 해당 시스템 스스로를 어떻게 조절하는가 하는 자기조절(self-regulation)에 관심을 갖는다. 하지만 공통점이 없어 보이는 여러 분과 학문, 예를 들어 사회과학, 철학, 인식론, 교육, 공학, 컴퓨터, 정보이론 등과 같은 분야로 전개되어 왔기 때문에 사이버네틱스를 한 마디로 정의하기란 매우 어려운 일이다. 따라서 개개인의 연구자가 연구하고 있는 분야에 따라 그 정의가 다르다(Schmidt, 1987).

사이버네틱스는 급진적 구성주의의 인식론적 관점과 그 맥을 같이 하며(Schmidt, 1987), 생물학적·인지적 체계의 개념을 환경과 변증법적으로 상호작용

* 교신저자 : 유병길(pkyoo@bnu.ac.kr)

2010.08.09(접수) 2010.08.21(1심통과) 2010.08.25(2심통과) 2010.12.23(최종통과)

이 논문은 2008년도 부산교육대학교 발전기금 해외파견 연구교수 연구비 지원계획에 의하여 연구되었음.

용하는, 내적으로 조정된 전체로 파악하는 Piaget 역시 자주 사이버네틱스를 호의적으로 언급하였다 (Boden, 1994). 생명을 본질적으로 자기조절적으로 간주하는 Piaget는 사이버네틱스 모델들이 자기조절 메커니즘의 본질에 빛을 던지는 유일한 모델이 모든 인지 메커니즘에 관련된 구조들에 직접적인 표현을 주는 것으로 보았다. 사이버네틱스로부터 지각 제어 이론(perception control theory, 이하 PCT)을 고안한 Powers(1973)는 Piaget가 자신의 원리를 공식적인 진술로 조직화하지 않고서 적용하고 있지만, Piaget와 동일한 결론으로 수렴되는 또 다른 접근법이라고 기술한 바가 있다(Powers, 1974). 또한 Richards와 Glasersfeld(1979)는 사이버네틱스 모델이 Piaget의 인지발달 모델과 상당히 양립 가능하며 Powers의 PCT와 Piaget의 지식구성 메커니즘과의 유사성을 지적하기도 하였다.

Powers(1973)의 모델은, 위계적으로 배열된 음의 피드백(negative feedback) 체계로 구성되어 있으며, 살아있는 유기체는 지각을 제어하기 위해 행동한다는 주장에 입각하고 있다. 그의 이론은 유기체들은 자신들의 경험세계를 구성한다는 것을 제안하고 있다.

본 논문에서는 사이버네틱스와 급진적 구성주의의 관점에서 지식이 어떻게 구성되는가 하는 지식구성 기제로부터 학습모형 구안을 위한 기초적인 작업에 대해 논하고자 한다.

차이 혹은 구분은 사이버네틱스에서 가장 기본적인 개념이다. 일반적으로 사이버네틱스 학자들은 현상 자체에 관심을 갖는 것이 아니라 현상의 출현과 부재간의 차이에 관심을 갖는다. 어떠한 관찰자도 반드시 우주, 즉 환경의 나머지 부분으로부터 연구 대상인 시스템을 개념적으로 분리하거나 구분함으로써 시작한다. 보다 상세한 연구는 그 시스템의 다양한 성질들(또한 차원이나 속성으로 불리기도 한다.)의 출현과 부재간의 구분으로 나아간다(Heylighen & Joslyn, 2001).

II. 사이버네틱스에 대한 고찰

사이버네틱스 혹은 제어이론과 인지적 접근을 살아있는 유기체에게서 발생하는 자기조절적인 학습과 같은 것에 적용하는 것들 간에 유사점이 있기 때문에 먼저 사이버네틱스의 몇 가지 주요 개념들에

대해 기술하는 것이 지식 구성의 기제를 이해하는데 도움이 될 것이다.

1. 음의 피드백

사이버네틱스에서 실용적인 면에서 가장 성공적인 관념들 중 하나는 음의 피드백 원리였다. 이 원리의 실제적인 실행은 BC 3세기까지 거슬러 올라가며, 램프가 기름을 태우는 양에 따라서 기름의 흐름을 조절하는 램프의 경우가 상세히 기록되어 있다 (Mayr, 1970). 오늘날에는 자동온도조절장치, 자동항법장치, 유도미사일 등이 있다. 이들 장치가 구조와 사용된 재료는 다를지라도 공통적인 것이 하나 있다; 어떤 제약 내에서 이전에 인간 행위자의 주의, 구별, 판단을 요하였던 활동을 수행할 수 있다는 것이다. 모든 제어 메커니즘은 보다 중요한 과제에 대해 혹은 아마도 보다 재미있는 활동에 대해 사람의 손과 마음을 해방시키도록 고안되었다. 그 시초부터 제어 메커니즘의 목적은 설계자 혹은 사용자가 경험세계에서 바람직하다고 생각하는 상태를 유지하거나 창조하는 - 하인이 잠든 후에도 램프가 계속 타도록 하는 것, 날씨에 관계없이 방안의 온도를 일정하게 유지하는 것 등등 - 것이었다. 이 모든 것은 오늘날에는 당연시 여기고 있으며, 그것이 해당 현상의 기본적인 측면을 간과하기 쉽도록 하는 한 가지 이유이다.

음의 피드백을 사용하는 '목적 기계', 즉 의식적 목적을 가지고 있는 양 행동하는 기계 내지 물건은 사물의 현재 상태와 '바라는' 상태와의 차이를 채는 일종의 측정 장치를 가지고 있다. 이 차이가 클수록 기계는 더 열심히 돌아가도록 만들어져 있다. 이렇게 해서 기계는 자동적으로 차이를 줄이려고 한다. 이것이 음의 피드백이라고 불리는 이유이다. 그리고 '바라는' 상태에 도달하면 기계는 멈추게 된다 (Dawkins, 1976).

간단한 피드백-제어 시스템은 몇 개 안 되는 적은 부분으로 이루어져 있다 (예를 들어, Powers, 1973). 이 시스템은 신호를 비교기로 보낼 수 있는 감각기관과 같은 종류를 가지고 있는데, 여기서 중심적인 단위는 비교기로서 센서로부터 받은 신호를 사전에 설정된 준거값과 비교하는 역할을 한다. 감지기로부터 들어오는 감각 신호와 준거신호가 같은 한, 그 시스템은 아무 일도 하지 않는다. 만약 두 값이 같지 않으면 비교기는 오류신호를 발생시켜 효과기로

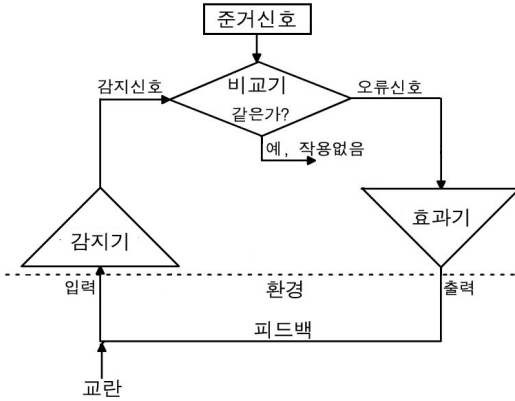


그림 1. 음의 피드백 기제를 이용한 제어 시스템

전달하여 활동을 촉발시킨다.

화장실 변기를 예로 들어 음의 피드백에 대해 좀 더 자세히 알아보도록 하자. 화장실에서 볼 일을 보고 나서 손잡이를 누르게 되면 배수가 시작된다. 배수가 끝나고 나면 다시 물통에 물이 채워지게 되는데, 이 물통에 물이 채워지는 기제에는 바로 음의 피드백이 적용되고 있다. 그림에 나타낸 것과 같이 손잡이를 내리고 나면 물은 완전히 배수가 되어 부자라고 하는 공기통이 물통의 바닥에 있게 된다. 변기 시스템에서 부자는 현재의 상태와 도달하여야 할 상태 간의 차이를 재는 기구가 된다.

물이 완전히 배수가 되었을 때 시간을 t_1 이라고 하면 물의 수면은 L_1 이며, 현재의 상태와 도달하여야 할 상태 간의 차이는 d_1 이다(그림 2참조). 이후 급수관의 밸브가 열려서 물통에 물이 채워지기 시작하고 시간 t_2 일 때 수면이 L_2 라고 하면 그때 수면의 차이는 d_2 가 된다. t_2 와 그보다 이전인 t_1 간의 수면의 차이는 $d_2 - d_1$ 으로 그 차이는 음수가 된다.

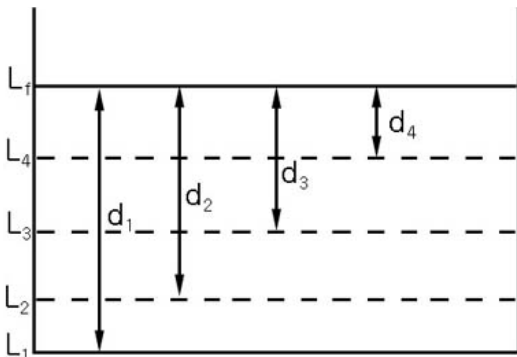


그림 2. 음의 피드백 기제

차이가 음수가 되면 아직 최종상태, 즉 도달하여야 할 목표값 혹은 준거값에 도달하지 않았다는 것을 뜻하며, 따라서 물통으로 물은 계속 공급이 된다. 최종적으로 수면이 L_f 에 도달하게 되면 수면의 차이가 0이 되어 급수관의 밸브는 닫히게 되고 물 공급은 중단이 된다. 즉, 목표에 도달하게 되면 더 이상 활동은 발생하지 않는다.

현재의 상태의 값에서 보다 이전의 상태의 값을 빼게 되면 음수가 되고 이것은 아직 목표에 도달하지 않았기 때문에 계속 하던 활동을 계속하라는 피드백을 보내게 된다는 뜻에서 음의 피드백이라고 한다.

위에서 언급된 예에서 음의 피드백은 고유의 물리적 힘에서 유래한다. 예를 들어 와트의 조속기에서 그것은 엔진의 속력을 “감지하는” 원심력에 의해 바깥으로 향하도록 유도되는 회전하는 무게의 집합이다; 기름램프나 변기에서 액체가 없어짐에 따라서 가라앉으면서 용기가 비어가고 있다는 것을 감지하는 수위 조절 부구가 있다. 위에서 말한 “감지하기”는 물론 순전히 은유적이다. 그것들은 기관을 의미하는 것이 아니라 어떤 위치에 도달할 때 그 각각이 손잡이나 사슬에 의한 물리적 연결에 의해 밸브를 닫거나 여는 방법으로 구성되어 있다. 이들 모든 장치에서 피드백은 기계적으로 이루어지며 신호나 상징적인 의사소통을 수반하지 않는다. 그럼에도 불구하고 그것들 중 보다 더 정교한 것들은 사이버네틱스의 중요한 이론적 특성을 드러내는 특징들을 지니고 있다. 이러한 이유 때문에 초기 사이버네틱스 학자들은 되먹임을 기초적으로 설명하는 예로서 온도 조절 장치를 사용하였다. 에어컨의 경우에 온도 조절 장치의 역할은 밀폐된 공간에서 바라는 수준으로 온도를 유지하는 것이다. 인간 행위자(작용자, 동인)는 준거값으로서 특정 온도를 설정한다. 온도 조절 장치는 온도계로서 실제 온도를 “감지하고” 실제값과 준거값을 비교하는 능력을 지니고 있다. 온도 조절 장치가 등록된 값이 준거값보다 낮으면 가열기를 활성화시키고, 더 높으면 냉각기를 활성화시킨다. 이 기능에서 두 가지 원리가 유래된다.

2. 차이의 기능

그 첫 번째는, 온도 조절 장치가 어떠한 작용을 개시하든 감지된 온도가 아니라 준거값과의 상대적인 차이가 원인이 되어 그 작용이 일어난다는 것이

다. 결과적으로 이들 작용들 중 어떤 것이라도 두 가지 이유로 멈출 수 있다: 관련된 공간이 준거값과 동일한 온도에 도달하였거나 준거값이 변하여 온도 조절 장치가 감지한 온도와 같아졌기 때문이다.

이 작용과 반작용 패턴은 살아있는 유기체들의 행동을 설명하기 위한 유용한 이론적 모델을 제공한다. 이는 직관적으로 납득이 될 것이다. 피드백이라는 개념은 자극-반응 이론이 안고 있는 주요 문제를 해결한다. 즉, 자극으로 범주화된 것이 무엇이든 그것은 항상 반응을 이끌어내지 못한다. 결과적으로 내적 조건 또한 고려되어야 하며 이 조건은 “준거값”과의 상대적인 불일치로 간주될 수 있다. 만약 관련된 불일치가 존재하지 않는다면, 자극의 지각은 작용을 촉발하지 못한다(von Glasersfeld, 1981). 소를 물가로 끌고 갈 수는 있지만 물을 먹일 수는 없다. 사실을 농부들은 항상 알고 있었다.

급진적 구성주의의 관점에서 이 차이는 동화와 조절과 밀접한 관계를 이루고 있다. von Glasersfeld (1976)은 동화를 차이를 무시하는 기술로, 조절을 차이를 드러내는 기술로 정의하고 있다.

3. 자기조절과 평형

두 번째 원리는 그렇게 명백하게 드러나지는 않는다. 만족스러운 조절자이기 위해서 온도 조절 장치는 너무 민감해서는 안된다. 그것은 설정 온도 근처에서 적당한 여유가 있어야 한다. 그래야 설정값 바로 아래의 온도를 감지하는 순간 가열기를 켜지 않도록 하여 설정값 바로 위로 온도가 올라가는 순간 냉각기를 켤 수 있다. 바꾸어 말하면 감당할 수 없는 동요(perturbation)¹⁾를 피하기 위해서 평형 영역이 있어야 한다(von Glasersfeld, 2002).

이러한 요구가 실현되면 초점을 이동시킬 수 있다. 더 이상 유기체의 동요에 대한 하나의 외부 요인을 고립시키는데 관심을 집중하는 것이 아니라 오히려 평형을 제한하는 조건, 즉 평형이 유지될 수 있는 제약이 관심의 초점이 된다(von Glasersfeld, 1981).

4. 목적 지향성

유기체의 행동에서 가장 뚜렷한 특성 중 하나는

목적 지향성이다. 동물이 먹이를 찾거나 배우자를 찾거나, 또는 잃은 새끼를 찾고 있는 것을 보면 우리들이 무엇인가를 찾고 있을 때 경험하는 어떤 종류의 주관적 감정을 그 동물이 가지고 있다고 말할 수 있다. 이와 같은 감정에는 어떤 것에 대한 욕망, 바라는 것을 머리에 그리는 상 또는 목적 내지 설계도 혹은 도식이 포함되어 있다(Heylighen & Joslyn, 2001).

동물행동에 대한 연구들은 가장 원시적인 유기체라 할지라도 과거에 불쾌하거나 고통스럽다고 증명된 경험보다는 기분 좋은 경험을 제공하였던 상황으로 움직여가는 경향이 있다는 것을 보여주었다. Maturana는 이것을 다음과 같이 말함으로써 그러한 경향을 특징짓고 있다.

살아있는 체계는 순환적인 조직 때문에 귀납적 체계이며 항상 예상적인 방법으로 기능을 발휘한다. 한번 발생하였던 것은 다시 발생할 것이다. 그 조직은(발생적이든 그렇지 않든) 보수적이며 작동되는 것만을 반복한다. (Maturana, 1970; p.15-16)

위에서 인용한 Maturana의 문장은 원시적인 생물 조직은 실제로 기대를 조직적으로 수립하거나 예측을 한다는 것을 의미하는 것은 아니다. 그것은 그 유기체의 행동을 기술하는 세련된 관찰자의 방법이다. 그러나 학습하는 패턴은 배아제의 도식이론과 똑같으며, 우리가 유기체에게 경험에 관해 반성하는 능력을 이입하기만 하면, 귀납의 원리는 유기체 자신의 사고 속에서 발생한다. 이 원리는 David Hume이 미래는 과거와 유사할 것이라는 추정(supposition)이라고 불렀던 것에서 논리적 기반을 갖는다(Hume, 1742, Essay 3, Part 2). 과거의 경험에서 상황 A는 보통 불쾌한 상황 B로 이어진다는 것을 관찰하였다면, 이것이 미래에도 똑같은 것이라고 믿는 유기체는 상황 A를 자진하여 피할 수 있다.

역으로 생각하면(상황 B가 기분 좋은 것이고, 따라서 상황 A를 피하기보다는 쫓을 때), 이것은 아마 예상 행동에 대한 첫 번째 표명일 것이다. 그러나 성공적이기 위해서 추구와 피함 모두는 다소 연속적인 감각적 피드백에 의해 감독되어야 하며, 이것 역시 예상의 특수한 형식을 포함한다. Rosenblueth 등(1943)은 다음과 같이 기술하고 있다:

자발적인 행동의 목적은 추상적인 해석의 문제라 아니라 심리학적 사실의 문제이다. 우리가 자발적인 행동을 수행할 때, 우리가 자발적으로 선택한 것은

1) 운동 감각적 수준과 인지적 혹은 개념적 수준 모두에서 일어나는 갈등을 지칭한다.

특수한 목적이지 특수한 움직임이 아니다. (Rosenblueth et al., 1943, p.19)

그들이 목적 행동에 대해 논할 때, 물을 마시기 위해서 물잔을 입에 가져가는 예를 사용하였다. 음의 피드백이라는 용어는 대상의 행동은, 상대적으로 특수한 목표를 준거로 하여 주어진 시간에 그 대상이 지속하는 오류의 최저한도에 의해 제어된다는 것을 의미한다. 그러나 그와 같은 목표 지향적인 행동은 필수 불가결한 또 다른 요소를 갖는다. 피드백 - 주어진 예에서 이것은 잔과 입 간의 간격을 감소시킬 것이다 - 에 의해 나타난 오류의 최소한도를 통제하기 위해서 행위하는 주체는 오류를 감소시키는 방법으로 행동할 것을 결정하여야 한다. 단지 과거의 경험으로부터의 귀납적인 추론은 주체로 하여금 적합한 행위하는 방법을 선택할 수 있도록 할 뿐이다.

Piaget의 많은 저작(그는 80권 이상의 책을 출판하였으며, 수백편의 논문을 발표하였다)에서 우리가 지식이라고 부르는 것은 관찰자와 독립된 실재의 표상일 수 없다는 것을 되풀이하였다. Piaget가 “생물학적 적응에 대한 메커니즘과 과학적 사고와 그 인식론적 해석인 고차원적인 적응의 형식의 분석을 추구하는 것은 항상 나의 중심적인 목표였다. (Piaget, in Gruber & Voneche, 1977; p.xii)”라고 표현한 것처럼 인간의 알기의 활동은 가장 높은 적응의 형식이라고 말하고 있다. 인용한 단락은 또한 하나 이상의 적응의 수준이 있다는 것을 말해주고 있다. 지각과 육체적인 행동의 운동감각적 수준에서 적응은 물리적 동요의 기피와 중요한 문제가 되는 생존의 가능성이 있다. 사고의 수준에서 우리는 개념과 그 관계, 이론과 설명에 관심을 가지고 있다. 이 모든 것은 간접적으로만 삶의 실천과 연결되어 있다. 더 높은 수준에서 존속 가능성은 목표의 획득과 개념적 모순의 제거에 의해 결정된다(Glaserfeld, 1979, 1993a, Ch. 3 in 1995, 1998a, 1998b; Cobb & Glaserfeld, 1984; Glaserfeld & Steffe, 1991).

Ⅲ. 지식구성의 기제

1. 규칙의 발생

제어 시스템은 시스템이 감지한 것(감각신호, 입

력신호)과 감지되기로 되어있거나 감지하고자 하는 것(준거)간에 차이가 있을 때 행동한다. 문제가 되는 관계는 활동이 감각 “입력”에서 야기하는 변화에 따라 시스템의 레퍼토리에 있는 활동들의 연결이다. 주어진 업무에 우리들을 대체하는 기계적인 피드백 장치는 경험적 학습의 결정판이다. 설계자의 경험으로부터 귀납적으로 유도되는 if-then 규칙을 구체화한 것이다(von Glasersfeld, 1998b).

잠시 동안 에어컨의 자동온도조절장치가 자각과 몇 가지 인지 기능을 갖게 되었다고 가정해 보자. 따라서 자동온도조절장치가 경험세계에 관해 생각하고 조직화할 수 있게 된다. 자동온도조절장치가 행할 수 있는 유일한 지각적 구별이 준거값에 부족한 신호들, 준거값과 일치하는 신호들, 준거값을 초과하는 신호들 사이에 있기 때문에 자동온도조절장치는 아주 간단한 세계가 될 것이다. 다른 지각 데이터는 있을 수 없다. 자기자극감수의 측면, 즉 그 자체의 행위에 의해 발생하는 계의 운동감각적 피드백에 대해 가열하기 활동은 냉각하기 활동과 구별될 수 있다. 자동온도조절장치에 대해 두 가지 종류의 지각적 동요와 활동 간의 연결은 고정된다. 즉 준거값 이하이면 가열하라 그리고 준거값을 초과하면 냉각하라.

이들 if-then 규칙이 성공적이라는 것이 증명되기만 하면 앞에서 인용한 Maturana(1970)가 말한 것과 같이 “작동하는 것만 반복한다”는 점에서 살아있는 유기체계가 있어서 “반사작용” 혹은 “고착된 행위패턴”이 함의하는 것들과 유사하다. 그와 같은 것이 어떻게 일어날 수 있는가 하면 신호들의 연쇄가 경험의 흐름에서 나중에 “입혀지기” 위해서 기록될 수 있는 장소는 기억과 같은 것을 필요로 한다. 그와 같은 능력이 있다면, 귀납학습의 필수조건이 만족된다. 초기 수준에서 귀납은 David Hume이 200여년 전에 말했던 것만큼 간단하다: 필요한 모든 것은 시스템으로 하여금 과거의 경험에서 성공적이었던 것을 반복하도록 하는 성향 혹은 규칙이다. 즉, 동요가 발생할 때마다 시스템은 과거에 그와 같은 특수한 동요를 감소시키거나 제거하였던 활동을 선택할 것이다. 묵시적이든 명시적이든 성공적으로 판명된 연결은 미래에 있어서 또한 성공적일 것이라는 신념이 있어야 한다. 왜냐하면, “자연의 추세가 변할 수 있고 과거는 미래에 대한 규칙이 아닐 수도 있다는 의심이 있다면, 모든 경험은 무용지물이 되며 추론

이나 결론을 발생시킬 수 없기” 때문이다(Hume, 1963, p. 47).

가설적으로 가상적인 학습 자동온도조절장치에 얼마나 정교한 인지적 기능이 있다고 생각하더라도 이상 활동과 감각신호에 대해 그 후에 경험되는 변화간에 특수한 연결과 관련한 규칙성을 수립할 수 없다. 그 학습장치는 가열장치를 활성화시킴으로써 “환경”의 온도를 변화시키고 이어서 이것은 감각 기관으로 보내는 “입력”을 수정한다는 것을 학습하거나 발견할 수 없다. 그 외적 연결은 관찰자에 의해서만 규정될 수 있는데, 관찰자의 관점에서만이 유기체와 그 환경 모두가 실제적인 경험의 단편이기 때문이다. 그러나 유기체의 관점에서 어떠한 연결이 이루어지는가와 어떠한 규칙성들이 발견되는가는 그 자체의 내적 신호들의 연결과 규칙성일 수 밖에 없다.

2. 음의 피드백과 도식이론과 관계

Piaget는 보통 두 가지 요소 - 자극과 고정된 반응 - 로 구성되어 있는 전통적인 반사작용의 관념으로부터 이 패턴을 유도하였다고 한다(Glaserfeld, 1979). 그러나 Piaget는 자신의 학습모델과 행동주의자의 자극반응 학습모델간의 관계를 설명하는 가운데서 ‘모든 학습은 반응이 자극에 선행한다’ (Piaget, 1964)고 주장하고 있다는 점에서 행동주의에서 말하는 자극과 반응과의 다른 점을 극적으로 표현한 부분일 것이다.

Piaget는 목적 지향적인 감각운동 활동의 기본적인 구조로서 어린아이의 반사작용의 세 부분으로 이루어진 연쇄를 채택하였다. 그는 그것을 행동도식으로 불렀으며, 그것에 입각하여 동화와 조절의 개념의 도움으로 혁명적인 학습이론을 구성하였다. 감각과 운동을 사용하는 행동도식은 그림 2와 같으며, 심적 조작을 사용하는 개념적 수준에서 인지도식은 그림 3과 같다 (Glaserfeld, 1979, 1993a, Ch. 3 in 1995, 1998a, 1998b; Cobb & Glaserfeld, 1984; Glaserfeld & Steffe, 1991).

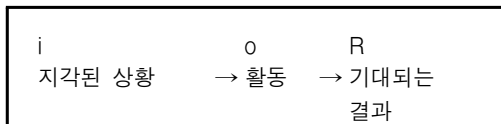


그림 2. 감각운동 수준의 행동도식

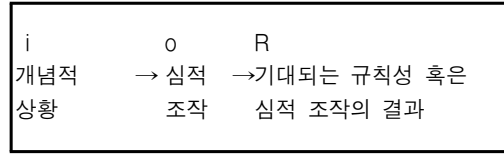


그림 3. 개념수준에서의 도식

위 도식은 인간의 모든 행동(육체적 행동과 심적 조작을 모두 포함하여)에 목표가 수반된다면, 아직 일어나지 않은 미래에 대한 기대 혹은 목표를 달성하기 위해 활동을 수행한다는 것을 의미한다. 다시 말해서, 지각된 상황이 있고 그에 따른 기대되는 결과 혹은 목표를 예상하고 활동을 수행한다. 이것을 음의 피드백 기제에 대입해 보면 그림 4와 같이 나타낼 수 있을 것이다.

갈증을 느끼는 경우의 예를 생각해 보도록 하자. 목이 마르다. 그리고 앞에 있는 탁자에 물잔이 있다. 과거의 경험으로부터 (귀납과 추상에 의해) 물은 갈증을 식혀주는 수단이라는 것을 배웠다. 이것은 지금 이 순간에 선택한 자발적인 목적이다. 바꾸어 말하면, 물이 과거에 그러하였던 것을 다시 할 것이라는 것을 예상하고 있다. 그러나 목적을 달성하기 위해서 나는 물을 마셔야 한다. 잔을 입으로 가져올 것을 기대(예상)하는 특수한 움직임을 수행한다는 의미에서 다시 과거의 경험에 의존하고 있다. 음의 피드백에 의해 제어되고 안내되는 것은 바로 이 움직임이다. 이 움직임, 즉 손을 내밀어서 물잔을 잡아가고 오는 활동은 다음과 같은 음의 피드백에 의해 이루어진다.

앞에서 언급하였듯이 바라는 상태와 현재의 상태간의 차이를 채는 장치는 이 경우 눈에 해당한다.

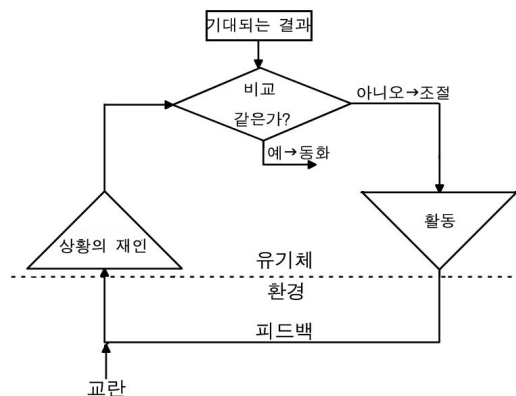


그림 4. 음의 피드백 기제를 적용하여 나타낸 행동도식

물 잔이 탁자에 놓여 있고(지각된 상황), 손을 뺀다면 물 잔을 잡을 수 있다는 예상을 한다(기대되는 결과). 눈으로 손과 물 잔과의 차이를 재고 그 차이를 줄이기 위해서 물 잔을 향해 손을 뺀다(활동). 가령, 손과 물 잔과의 거리의 차이가 50cm라고 하면 바라는 상태(0cm)와 현재의 상태 간의 차이는 50cm가 된다. 이제 손을 잔을 향해 뺀다면 그 차이는 40cm가 되고 차이는 40cm-50cm=-10cm이다. -10cm는 피드백되어 이와 같은 활동을 계속하면 바라는 상태에 도달할 수 있다는 것을 뜻한다. 마찬가지로 물 잔을 입으로 가져오는 과정도 이 음의 피드백에 의해 제어된다.

물이 갈증을 해소해준다는 것은 인지적 혹은 개념적 수준이다. 개념적 수준의 도식은 감각과 운동 기능을 사용하는 감각운동 수준의 행동도식을 통해서만 간접적으로 환경에 접촉할 수 있기 때문에 개념적 수준의 인지 도식은 다르게 표현되어야 할 것이다.

이 상황을 Powers(1973, 1989, 1998)가 제시한 조절의 계층적 위계(hierarchy of control) 수준을 고려하

여 그림 5와 같이 나타낼 수 있을 것이다.

그림 5에서는 단순화 하여 나타내었지만, 이 제어 시스템들은 마치 그물망처럼 배열되어 있으며 α , β , γ 로 나타낸 것과 같은 제어 시스템들 좌우(동일 수준) 상하(보다 높은 수준 및 보다 낮은 수준)로 입력과 출력에 의해 연결 되어있거나 독립된 형태로 배열되어 있을 수 있다. 위의 그림 5에서 감각과 운동을 사용하는 감각운동 수준에서는 제일 낮은 수준이 환경과 직접적으로 접촉하고 있지만, 사고수준인 2계 이상에서는 직접적으로 환경과 접촉할 수 없으며 간접적으로만 1계를 통하여 환경과 접촉할 수 있다. 그리고 관찰자의 관점에서 행당 주체를 관찰할 수 있는 것은 주체의 활동뿐이다.

도식이 반사작용이나 인지구조의 정교한 배열에서 실행되는지에 관계없이 그것은 세 가지 요소로 구성되어 있다. 예를 들면, 첫째, 관찰자의 관점에서 외부 자극의 결과로 간주될 수 있는 감각신호들의 패턴이 있다; 둘째, 유기체가 협응시킨, 그리고 관찰자가 관찰할 수 있는 한에서 반응이라고 생각할 수 있는 감각신호들의 특수한 패턴에 의해 촉발되는 활동이 있다; 셋째, 그 활동에 이어서 활동의 결과로서 등록되어 있는 어떤 변화를 유기체가 경험한다. 사실상, 그 결과는 특수한 활동이 특수한 동요와 연결되어 있는 이유이다. 진화의 수준에서 자연선택은 환경으로부터의 동요에 대한 비적응적인 반응을 가지고 있는 개체들을 제거하는 경향이 있는 반면, 적응적인 연결을 가지게 된 것들은 살아남는다. 따라서 계통 발생은 과거로 거슬러 올라가 생각해 보아서 귀납이 결과인 것처럼 보이는 결과들을 생성한다: 살아남은 것은 환경을 동요를 견뎌낸 돌연변이들뿐이다. 개체발생 수준에서 그와 같은 패턴은 유사하다. “다른 것들이 동등할 때, 만족스러운 상황을 생기게 한다면 연결은 더 강해진다”는 효과의 법칙(Thorndike, 1931)은 필연적으로 “살아있는 시스템은 그 순환적 조직화 때문에 귀납적인 체계이며 예측적인 방법으로 항상 기능을 발휘한다: 한번 발생하였던 것은 다시 발생할 것이다. 그 조직은 (발생적이든 그렇지 않든) 보수적이며 작동하는 것만을 반복한다”(Maturana, 1970)는 패러다임과 동등하다. 이 맥락에서 “작동한다”란 말은 동요를 성공적으로 제거한다는 것을 의미한다. 이와 똑같은 원리가 도식 개념에 선천적으로 가지고 있으며, 동화와 조절 과정의 통합에 의해 더욱 더 강력해진다. 활성화되

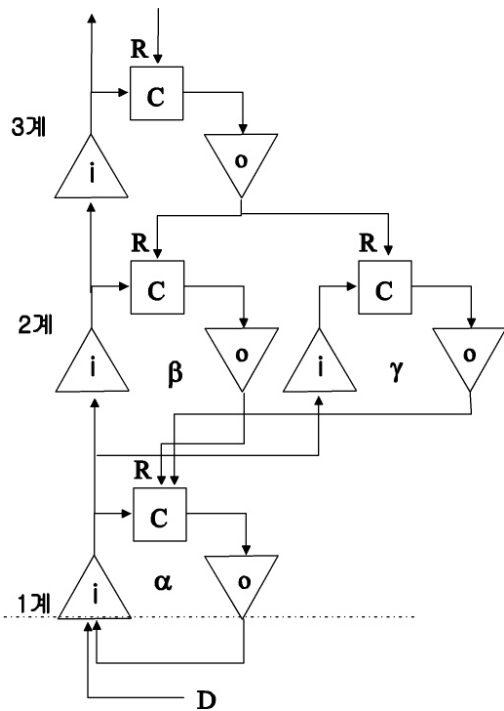


그림 5. 음의 피드백 기제를 적용한 행동도식과 개념적 수준의 계층적 위계의 한 예(i: 지각된 상황 혹은 개념적 상황, o: 활동 혹은 심적 조작, C: 비교, R: 기대되는 결과 혹은 심적 조작의 결과).

기 위해서 도식은 감각신호의 특수한 패턴에 대한 지각을 요한다. 그러나 실제적인 경험에서 두 가지 상황은 똑같지 않다. 따라서 특수한 도식을 촉발하는 감각패턴은, 요구된 패턴을 완성하는데 필요되는 더 많은 혹은 더 적은 신호들을 포함할 수도 있는 지각장에서 유기체에 의해 고립되어야 한다. 바꾸어 말하면, 차이가 무시 - 패턴이 차이에도 불구하고 획득될 수 있기 위해서 이 차이를 무시하기는 동화라고 불린다 - 되어야 한다(von Glasersfeld, 1976).

인간 유기체의 관점에서, 감각 시스템이 그 패턴에 적합하지 않는 신호들을 발생시키지 않기 때문이거나 혹은 유기체가 그 신호에 주의를 기울이지 않기 때문에 차이가 없을 수도 있다. 둘 중 어느 경우에 있어서 외생적인 신호들을 등록하는 관찰자만이 해당 유기체가 동화시키고 있다고 말할 수 있을 뿐이다. 그러나 인지 유기체는 그와 같은 차이를 고의적으로 무시할 수 있는 능력을 가지고 있으며, 인지 유기체에게 동화는 도식의 실질적인 확장에 대해서 뿐만 아니라 규칙성과 규칙의 구성에서 중대한 도구가 된다. 한 가지 예를 들면, 누군가 부엌에 있는 전등을 수리하기 위해 긴급히 드라이버가 필요하다면, 특수한 수리 도식의 맥락에서 칼이 지각적으로 그리고 기능적으로 드라이버와 다르다는 사실을 잘 알고 있음에도 불구하고 칼을 드라이버의 기능으로 동화시킬 수 있다.

3. 인과관계의 수립

이러한 결정과 행동의 과정을 반성할 때, 인과성의 관념은 본 사상에서 중요한 역할을 한다는 것이 명확해진다. 특수한 행위를 수행할 것이라는 나의 모든 결정들은 바라는 목적을 향해 변화를 일으킬 것이라는 기대에 입각하고 있다.

단일 관찰만으로는 무엇이 변했다는 결론으로 이끌 수 없기 때문에 차이를 알 수 있는 어떤 것을 나타내는 최소한 일련의 두 프레임을 필요로 한다. 지도도 만들기는 결과적으로 다음과 같은 그림 6과 같은

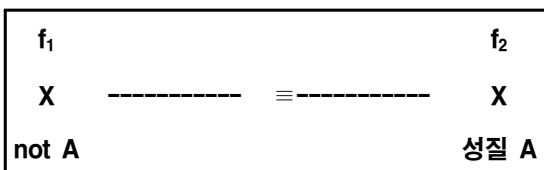


그림 6. 차이를 나타내는 다이어그램

형식을 취한다.

여기서 X는 양 프레임에서 똑같은 개체라고 생각되는 항목을 나타낸다(동일성을 기호 ≡로 나타낸다). 간략하게 두 개 이상의 관찰 프레임 전반을 통해 개체 정체성이라는 한 항목을 유지하고 동시에 나중 프레임에 이전 것에서 갖지 않은 성질을 갖는다(혹은 이전에 갖고 있는 성질을 잃는다)고 주장한다.

변화의 개념 없이는 인과관계를 사용할 수 없다. 변화가 왜 발생하였는가를 묻는 순간에 그와 같은 일이 일어난다. 이러한 의문은 우리가 새로운 성질(혹은 성질의 상실)을 똑같은 개체라고 생각하고자 하는 항목에 이입시킨다는 사실에서 가장 쉽게 유래한다는 것을 von Glasersfeld(1995)은 제안한 적이 있다.

변화를 나타내는 프레임들이 잇달아 일어나는 관찰을 나타내기 때문에 그와 같은 이유는 이전 프레임에서 찾아야 한다. 따라서 우리는 프레임 1에서 지각될 수 있었던 어떤 다른 것을 조사한다. 우리는 그 경험을 X가 몇 개의 프레임을 걸쳐 변하지 않은 채 남아 있는 우리가 기억하고 있는 다른 경험과 비교하여 지금 나타났지만 X가 변하지 않았을 때는 나타나지 않는 어떤 것을 찾으려고 할 수도 있을 것이다. 혹은 과학자들과 같이 행동하여 그 변화에 대해 책임을 지을 수 있는 어떤 것을 고립시키기 위해서 새로운 요소들 a, b, c, ... 하나씩을 더해 가면서 f1의 상황을 복제할 수도 있을 것이다. 만약 하나를 찾는다면, 그것을 다음과 같이 그림 7로 나타낼 수 있다(von Glasersfeld, 1998b).

실제로 우리가 과학자라면, 요소들이 변화에 어떻게 영향을 주는지를 보여주는 이론적 모델을 구성하기 위해서 모든 종류의 실험을 수행할 것이다. 성공한다면, 세계를 수정하려고 할 때 우리가 사용하는 도구에 첨가할 것이다.

일상적인 삶에서 우리는 그렇게 신중하지 않다.

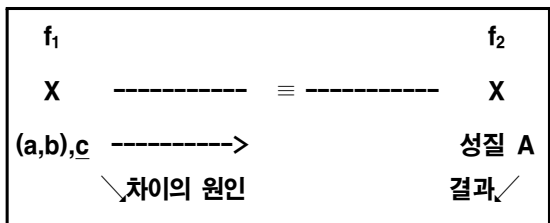


그림 7. 인과관계를 나타내는 다이어그램

주어진 X가 바람직한 방법으로 변화했을 때 어떤 요소가 두 세 번 나타난다는 것을 발견한다면, 그것이 원인이라고 쉽게 가정하게 되고, 그것이 바랐던 변화를 일으킬 것이라는 바램에서 그 요소를 사용할 것이다.

그 요소가 바랐던 변화를 일으키지 않는다고 할 지라도 우리들을 낙담케 하는 수많은 실패를 취할 수도 있을 것이다. 어떤 사람이 그것이 왜 작동하여야 하여야 하는가에 대한 형이상학적 이유를 제공한다면, 실패는 결코 중요하지 않은 것처럼 보일 것이다.

이 모든 것은 예상을 수반하고 있다. 어떤 변화를 일으키기 위해서 원인-결과간의 연결을 사용하는 일은 원인은 과거에 그 결과를 생성하였으므로 미래에도 결과를 생성할 것이라는 신념에 입각하고 있다. 수립된 경험적 연결을 우리가 아직 가진 적이 없는 경험영역으로 투사한다. Hume은 우리가 그와 같은 연결을 어떻게 수립하는가를 설명한 바가 있다: 두 항목이 시간의 연속에서 발생하였다는 반복된 관찰은 우리들로 하여금 A가 발생하면 B가 이어질 것이라는 규칙을 추론하고 공식화하도록 한다. 바꾸어 말하면, 우리는 목적을 가지고 있으며, 우리가 그것을 획득할 것이라고 믿는 방법으로 행동한다.

신비적인 특징은 과거의 경험에 관해 반성하고, 경험으로부터 특수한 규칙성을 추상하고, 예측으로서 규칙성들을 미래에 투사하는 우리들의 능력이다. 이 패턴은 너무나 다양한 우리들의 행동을 포함하고 있다.

IV. 사이버네틱스와 급진적 구성주의에 기반한 학습모형

사이버네틱스와 급진적 구성주의에 입각한 지식 구성에 대한 분석은 과학수업을 조직화하는 방법에 대한 통찰을 제공한다. 본 분석은 다음과 같은 학습 과정을 제안할 수 있다.

1 단계: 학생들로 하여금 놀라움을 경험할 수 있는 연시, 그림, 동영상, 교사에 의한 이야기 등과 같은 자료를 제시한다.

2 단계: 놀라운 경험에 대한 원인을 찾아서 if-then

형식의 가설적 규칙을 수립한다.

3 단계: 가설적 규칙을 검증할 수 있는 실험을 수행하거나 설명을 창안한다.

4 단계: 실험 결과나 창안된 설명으로부터 가설적 규칙의 타당성 여부를 검증한다.

5 단계: 타당성 여부가 검증될 때까지 2에서 4 단계 과정을 반복한다.

6 단계: 이 가설적 규칙의 단 하나의 사례로부터 만들어졌기 때문에 다른 방법을 사용하거나 혹은 유사한 사례에 적용하여 확실성을 검증한다.

사이버네틱스와 급진적 구성주의 관점에서 수립한 지식 구성 기제로부터 수업에 시사하는 바는 다음과 같은 것들이 있다(von Glasersfeld, 2002).

첫째, 지식이 학습자들이 자신의 머리 속에 형성하여야 할 개념적 구조로 이루어져 있다면, (교사들의 말이나 교과서에 의한)언어적 의사소통은 긍정적인 결과를 보장하지 못한다. 요구되는 것은 사고, 즉 실제적 경험뿐만 아니라 교사와 교과서가 의사소통하려고 하는 것에 관한 반성이다.

둘째, 교사가 학생들의 반성을 육성하는 두 가지 탁월한 방법은 다른 학생들과의 협력 속에 두는 것과 문제해결을 시도할 때 학생들이 자신의 사고를 언어화하도록 지속적으로 요구하는 것이다.

셋째, 구성주의 접근을 실행하기 위해서는 두 가지를 교사에게 요한다. 학생들이 생각하는 능력을 가지고 있다는 것을 신뢰하여야 하며, 학생들이 교사가 미리 만들어 놓은 해를 제공하지 않더라도 문제를 해결할 수 있다는 것을 발견할 기회를 학생들에게 제공하여야 한다.

넷째, 아마도 가장 중요한 것은 언어적 의사소통을 통한 수업은 학생들 자신의 경험으로부터 지식을 능동적으로 추상하는 것을 대체할 수 없다는 통찰이다.

V. 결론 및 제언

1. 결론

본 논문은 급진적 구성주의에서 주창하고 있는 알기 이론과 사이버네틱스의 통찰을 통합하여 학습모형을 구안하기 위한 기초 작업을 수행하였다. 이러한 목적을 달성하기 위해 사이버네틱스의 주요

개념들, 즉 음의 피드백, 차이의 기능, 자기조절, 평형, 목적 지향적 행동을 급진적 구성주의의 관점에서 분석하였다. 그리고 급진적 구성주의 관점에서

해석된 Piaget의 감각운동 수준의 행동도식과 개념적 혹은 인지적 수준의 도식을 Powers의 지각제어 이론을 통합하여 지식 구성과정을 지식 구성의 기제를 개관하였다. 이러한 개관으로부터 6 단계로 이루어진 학습 절차를 제안하였다. 그 절차는 다음과 같다.

1 단계: 학생들로 하여금 놀라움을 경험할 수 있는 연시, 그림, 동영상, 교사에 의한 이야기 등과 같은 자료를 제시한다.

2 단계: 놀라운 경험에 대한 원인을 찾아서 if-then 형식의 가설적 규칙을 수립한다.

3 단계: 가설적 규칙을 검증할 수 있는 실험을 수행하거나 설명을 창안한다.

4 단계: 실험 결과나 창안된 설명으로부터 가설적 규칙의 타당성 여부를 검증한다.

5 단계: 타당성 여부가 검증될 때까지 2에서 4 단계 과정을 반복한다.

6 단계: 이 가설적 규칙의 단 하나의 사례로부터 만들어졌기 때문에 다른 방법을 사용하거나 혹은 유사한 사례에 적용하여 확실성을 검증한다.

2. 시사점

사이버네틱스와 급진적 구성주의 관점에서 살펴본 지식 구성의 기제를 고려한다면 교육적 태도를 급진적으로 변화시킬 필요가 있다는 것을 시사한다. 즉, 사고와 학습에 대한 학생들 자신의 능력을 발달시키기 위해서 학생들에게 상당히 많은 자율을 넘겨주는 일이다.

그와 같은 변화에 반대하는 심각한 논의는 현재 학생들에게 주어진 것들과는 매우 다른 시험을 요하곤 한다는 것이다. 이해를 시험하는 일은 교사에게 들었거나 교과서에서 읽었던 언어적 진술의 올바른 반복을 위한 시험보다 훨씬 더 어렵다. 다른 한 편으로, 배우려는 동기는 학생들이 학습은 수동적이 아니라 능동적인 과정이며 자신의 생각에 의해 문제를 해결하는 능력은 적어도 게임에 이기는 것만큼 즐거운 만족을 준다는 관점 전환이

요구된다. 또한 생각하기를 가르치고자 한다면, 학생들이 생각할 수 있다는 신념을 교사는 가지고 있어야 하며, 학생들에게 생각할 기회를 제공하여야 한다.

참고 문헌

- Boden, M.(1994). Piaget. Harper Collins Publishers Ltd.(서창렬 역, 1999. 피아제. 시공사).
- Cobb, P. (1994). Constructivism and learning. In T. Husén & T. N. Postlethwaite, The international encyclopedia of education(2nd). Vol. 2. Elsevier Science Ltd., 1049-1052.
- Cobb, P. & von Glasersfeld, E. (1984). Piaget's scheme and constructivism, The Genetic Epistemologist, 13 (2), 9-15.
- Cosgrove, M., and Osborne, R. (1985). Lesson frameworks for changing children's ideas. In Osborne, R. and Freyberg, P. (Eds.), Learning in science (pp. 101- 102). London: Heinemann.
- Hume, D. (1742) Philosophical essays concerning human understanding. London: Millar.
- Dawkins, R. (1976). The selfish Gene. Oxford University Press Inc., New York(홍영남 역, 1993. 이기적 유전자. 을유문화사).
- Driver, R.(1986). A constructivist approach to curriculum development in science. Studies in Science Education, 13, 105-122.
- Geelan, D. (1997). Epistemological Anarchy and the Many Forms of Constructivism. Science & Education 6, 15-28.
- Gruber, H.E. & Vonèche, J. J. (Eds.) (1977) The essential Piaget. London: Routledge & Kegan Paul.
- Heylighen, F. and Joslyn, C. (2001). Cybernetics and Second-Order Cybernetics in: R.A. Meyers (ed.), Encyclopedia of Physical Science & Technology (3rd ed.), Academic Press, New York, 155-169.
- Karplus, R.(1964). The Science Curriculum Improvement Study. Journal of Research in Science Teaching, 2, 293-303.
- Lawson, A. E., Abraham, M. R., and Renner, J. W. (1989). A theory of instruction: Using the learning cycle to teach science concepts and thinking skills. NARST.
- Maturana, H. (1970) Biology of cognition. BCL Report No. 9.0. Urbana: University of Illinois. [von Glasersfeld, E. (1998b) 재인용]
- Mayr, O. (1970). The Origin of Feedback Control. Cambridge, Mass.: M.I.T. Press.
- Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W., & Gertzog, W. A. (1982). Accommodation of scientific conception: Toward a theory of conceptual change. Science Education, 66(2), 211-227.

- Powers, William T.(1973). Behavior: The Control of Perception. Aldine Publishing Company.
- Powers, William T.(1974). Applied Epistemology. In Smock, C. D. & Glasersfeld, E.von, (Eds.), Epistemology and education: The implications of radical constructivism for knowledge acquisition, Report #14. Athens, GA: Follow Through Publications
- Powers, William T.(1989). Living Control Systems: Selected Papers of William T. Powers. The Control Systems Group, Inc..
- Powers, William T.(1998). Making Sense of Behavior: The Meaning of Control. Benchmark Publications Inc..
- Riegler, A.(2001). Towards a Radical Constructivist Understanding of Science. Foundations of Science. 6(1), 1-30.
- Richards, J. & Glasersfeld, E. von (1979) The control of perception and the construction of reality. *Dialectica* 33(1), 37 - 58.
- Schmidt, S. J.(1987). Der Diskurs des Radikalen Konstruktivismus, Suhrkamp. (박여성 역, 1995, 급진적 구성주의. 도서출판 까치).
- Smock, C. D. & von Glasersfeld, E. (eds.). (1974) Epistemology and education: The implications of radical constructivism for knowledge acquisition (Report #14). Athens, GA: Follow Through Publications.
- Tobin, K.(2007). Key contributors: Ernst von Glasersfeld' radical constructivism. *Cultural Studies of Science Education*, 2(3), 529-538.
- Tobin, K. & Tippins, D. (1993), Constructivism as a referent for teaching and learning. In K. Tobin (Ed.), The practice of constructivism in science education. Lawrence Erlbaum Associates. 3-21.
- von Glasersfeld, E. (1974) "'Because'" and the concepts of causation, *Semiotica*, 12 (2), 129-144.
- von Glasersfeld, E. (1974). Piaget and the radical constructivist epistemology. In C. D. Smock & E. von Glasersfeld (Eds.), Epistemology and education. Athens, GA: Follow Through Publications, 1-24.
- von Glasersfeld, E. (1976). The Constructs of Identity or the Art of Disregarding Difference. In paper presented at the Biennial Southeastern Conference on Human Developmen (4th, Nashville, Tennessee, April 15-17, 1976).
- von Glasersfeld, E. (1979a). Cybernetics, experience, and the concept of self. In M. N. Ozer (Ed.), A cybernetic approach to the assessment of children: Toward a more humane use of human beings. Boulder, CO: Westview Press.
- von Glasersfeld, E. (1979b). Radical constructivism and Piaget's concept of knowledge. In F. B. Murray (Ed.), The impact of Piagetian theory. Baltimore, MD: University Park Press, 109-122.
- von Glasersfeld, E. (1981). Feedback, induction, and epistemology . In: G. E. Lasker (ed.) Applied systems and cybernetics, Vol. 2. New York: Pergamon Press, 712-719.
- von Glasersfeld, E. (1990). Teleology and the concepts of causation, *Philosophica*, 46(2), 17-43.
- von Glasersfeld, E. (1992). Declaration of the American Society for Cybernetics. In C.V. Negiota (Ed.), Cybernetics and applied systems. New York: Marcel Decker, 1-5.
- von Glasersfeld, E. (1993). Learning and adaptation in the theory of constructivism, *Communication and Cognition*, 26(3/4), 393-402.
- von Glasersfeld, E. (1995). Radical constructivism: A way of knowing and learning. London. Falmer Press. [김관수의 공역, 급진적 구성주의, 1999, 원미사].
- von Glasersfeld, E. (1998a). Scheme theory as a key to the learning paradox. Invited paper presented at the 15th Advanced Course, Archives Jean Piaget Geneva, September 20-24, 1998.
- von Glasersfeld, E (1998b). Anticipation in the constructivist theory of cognition. in D .M. Dubois (Ed.) Computing anticipatory systems, Woodbury, NY: American Institute of Physics. 38-47
- von Glasersfeld, E. (2002). Cybernetics and the Theory of Knowledge. UNESCO Encyclopedia, Section on System Science and Cybernetics, 2002, from <http://www.eolss.net>.
- von Glasersfeld, E. & Steffe, L. P. (1991). Conceptual models in educational research and practice, *Journal of Educational Thought*, 25 (2), 91-103.