

복합체계 사고의 의의와 이론적 토대

변종현*

< 목 차 >

- I. 머리말
- II. 복합체계와 복합체계 사고
- III. 일반체계이론의 등장
- IV. 복합적 적용체계
 - 1. 체계의 의미
 - 2. 개방체계와 엔트로피
- V. 혼돈이론
 - 1. 혼돈과 질서
 - 2. 나비효과
 - 3. 혼돈의 가장자리
- VI. 자기조직화이론
 - 1. 소산구조
 - 2. 요동을 통한 질서
- VII. 맺음말
- * 참고문헌

I. 머리말

놀라움은 우리의 상식이 깨졌을 때 생긴다. 우리의 상식 속에 용해되어 있던 사고나 통념이 그것과는 전혀 다른, 더욱이 그것도 매우 심오한 의미를 내포한 것으로

* 제주교육대학교 윤리교육과 조교수

드러나게 될 때 놀라움은 생겨난다. 자연과 인간 및 사회 현상을 지배하는 실제의 규칙들이 우리의 일상적인 상식에 기초한 것으로부터 너무나 멀리 떨어진 경우에도 놀라움은 배가된다. 아마도 오늘날 이러한 놀라움의 원천이 되는 개념이나 관념 가운데 하나가 바로 복잡성(complexity) 내지는 복합체계(complex system)라는 말이 아닐까 한다. 복잡한, 복잡계, 복합적인, 복잡성, 복합(체)계 등의 말들은 이미 우리의 일상 생활에서 지극히 상식적인 용어들이 되었기 때문에 그것 자체가 전혀 새롭거나 놀랄만한 것이라고는 할 수 없을 것이다. 하지만 역설적으로 우리의 상식 속에 깊이 자리한 이들 개념이 지닌 또 다른 의미와 잠재력에 주목한다면 그것은 놀라움의 진원지임에 틀림없는 것처럼 보인다. 피상적으로나마 이들 개념의 또 다른 면에 접한 많은 사람들은 과거에는 볼 수 없었던 인간과 자연 현상의 새로운 해석에 주목하고 있으며, 그 속에 굉장한 무엇인가가 내포되어 있다는 것을 어렵듯이 감지하고 있고, 과학분야에서 우리의 상식을 뛰어넘는 엄청난 변화가 이미 시작되었거나 진행되고 있다는 인상을 떨쳐버릴 수 없는 것처럼 보인다.

실제로 1990년대 이후 유럽과 미국 등지에서 본격적으로 일기 시작한 복잡성 과학에 대한 폭발적인 관심은 학문적 유행을 넘어 일종의 대중 문화적 현상으로까지 급속도로 확산되고 있다. 우리 사회 역시 최근 들어 복잡성이나 복합체계는 물론 보다 일반적으로 체계이론 전반에 대한 대중적 관심이 점차 확대되고 있는 것으로 보인다. 예컨대, 엔트로피(entropy), 카타스트로프(catastrophe), 혼돈(chaos), 두 갈래치기(bifurcation), 자기조직화(self-organization), 소산구조(dissipative structure), 체계 진화(system evolution) 등과 같은 용어나 개념들은 새로운 학문의 흐름을 주도하거나 일반 독자들의 대중적 관심을 촉발시키고 있는 체계이론의 주요 개념들이다. 이와 같은 추세는 체계이론과 관련된 개념이나 용어들이 지닌 발견적(heuristic) 도구로서의 적실성이나 위상을 반증하는 것이기도 하며, 과거의 학문적 개념들이 간과하거나 제대로 설명할 수 없었던 측면들을 다룰 수 있는 보다 강력한 접근방법으로서의 가능성을 내포하고 있다는 기대에서 기인한 것으로 보인다.

이와 같은 기대는 체계이론의 방법론적 적실성에 대한 최근의 폭발적 관심이, 칸트(I. Kant)의 용법을 빌리자면, 사실문제가기 보다는 권리문제에 가깝다는 점을 시사하는 것이기도 하다. 그 결과 체계이론과 관련된 개념과 용어들이 유행하고 또

한 다양한 현상 영역에 적용되고 있으며, 일상어법에서도 이들 용어나 개념 자체를 사용하는 것이 마치 논리적 정당성과 합리성의 근거를 보장하는 것처럼 보이는 경우도 있다. 이와 같은 현상은 한편으로는 새로운 과학적 개념들에 대한 친숙한 접근을 통해 그것에 내포된 새로운 의미에 눈뜨게 하고, 더 나아가 체계이론, 복합체계 사고, 복합성 과학 등에 대한 이해는 물론 그것을 다양한 영역과 현상에 적용할 수 있는 가능성을 제고할 수 있다는 측면에서 매우 긍정적인 변화가 아닐 수 없다. 그러나 정작 체계이론이 무엇이며 복합체계나 복합성은 도대체 무엇인가 그리고 그것이 왜 중요한가 하는 문제에 대해서 설득력 있는 답을 제시하기가 어려운 것이 사실이다. 더욱이 학문적 유행이나 대중적 관심이 체계이론의 본질적인 개념 내용을 지나치게 단순화하거나 더 나아가 그 본질을 굴절시킬 수 있다는 점을 감안한다면, 체계이론 일반이나 최근 새롭게 주조된 개념들에 대한 보다 근원적인 이해와 접근이 선행되어야 할 것이다.

본 논문은 복합체계이론과 관련된 주요 개념들의 올바른 이해 및 그것이 지닌 과학적·사회적 함의를 검토하는 데 그 목적이 있다. 이를 위해 복합체계이론의 성립 과정에서 중요한 토대를 제공한 혼돈이론과 자기조직화이론의 핵심적 주장에 대해서 다루어 보고자 한다. 사실상 복합체계이론은 오늘날 다양한 개념의 창조적 적용을 통하여 자연은 물론 우주와 인간 및 사회현상 등을 설명할 수 있는 하나의 접근 방법이자 우리가 선택하고 기대할 수 있는 강력한 대안으로 자리매김하고 있다. 이러한 작업은 적어도 21세기의 과학이라고 불리는 복합체계이론에 대한 이해의 지평을 넓히고 그것이 지닌 방법론적 적실성과 사회과학적 함의를 확인한다는 데 의의가 있을 것이다.

II. 복합체계와 복합체계 사고

일반적으로 복합체계(complex system)란 무수한 구성요소로 이루어진 일련의 집합으로서, 각각의 요소가 다른 요소와 끊임없이 상호작용을 함으로써 전체적으로는 각 부분의 움직임의 총화 이상으로 무엇인가 독자적인 행동을 보이는 체계를 뜻한다. 복합체계란 수많은 요소들이 상호작용하며, 수많은 위계조직들이 하위체계

(subsystem)나 하위-하위체계(sub-subsystem)를 구성하고 있으며, 본질적으로 예측할 수 없는 질적으로 전혀 새로운 속성의 발현(emergence)을 보여주는 체계들이다.

복합체계나 복잡성과 관련된 문제들은 수학의 영역에서만 나타나는 것이 아니며 우리의 일상에서도 흔히 접할 수 있다. 주사위를 던져서 무슨 숫자가 나올지 정확하게 예측하는 것은 불가능에 가깝다. 물리학적으로는 처음 던질 때의 주사위의 힘과 방향 등과 같은 초기조건을 알고 낙하한 지점과 주사위가 굴러가는 경로의 마찰력 등을 알아내 계산하면 무슨 숫자가 나올지 알 수 있을 것이다. 그러나 실제로는 슈퍼 컴퓨터의 도움을 받아도 던져진 주사위의 정확한 숫자를 예측하는 것이 거의 불가능하다. 더욱이 2개의 주사위를 던져 그 합을 구하는 문제는 상황을 더욱 복잡하고 어렵게 할 수 있다. 여기에도 바로 복잡성의 문제가 개입하고 있는 것이다.

주식시장의 흐름도 복잡하기는 마찬가지이다. 최근 각광받고 있는 펀드매니저들은 전세계적인 경기 흐름, 금리, 해당 기업의 실적과 전망, 정부의 각종 정책, 외국시장의 동향 등을 바탕으로 효과적인 투자를 위한 전략을 구사한다. 그러나 우리가 보듯이, 정확한 시장 예측을 바탕으로 성공적인 투자를 지속해 나간다는 것은 거의 불가능한 일이 아닐 수 없다. 이처럼 이 세상 모든 일은 몇 가지의 단순한 요소만으로는 설명할 수 없는 것이 사실이다. 더욱이 전체가 부분들의 단순한 합 이상이라고 한다면, 거시적인 전체 현상에 대한 정확한 진단과 예측은 사실상 불가능하다고 할 수밖에 없다.

그런데 여기서 한 가지 주목할 것은 복잡성 자체가 최근에 빚어진 것이 아니라는 점이다. 그것은 항상 존재했었다. 다만 인류는 복합적인 현상과 체계를 설명할 수 있는 보다 단순한 모델을 선호해 왔으며, 이러한 모델로써 설명할 수 없는 부분에 대해서는 애써 예외로 간주해 왔다. 그리고 이와 같은 현상 인식의 전형적인 모델로 주목받아 온 것이 바로 근대 과학의 기계론적 세계관이다. 그러나 주지하듯이, 기계론적 세계관의 한계는 분명해 보인다(변종현, 1999a). 따라서 현상의 복잡성을 복합적인 관점에서 설명할 수 있는 새로운 세계관이 요청되고 있는 바, 이와 같은 요청에 부응할 수 있는 강력한 대안이 바로 전체적인(holistic) 조망을 중시하는 체계론적 세계관이라고 할 수 있다.

뉴턴(I. Newton)에 의해 완성된 근대 과학의 기본 전제는 모든 대상을 작은 요

소로 쪼개가다 보면 결국에는 기본 요소로 귀착된다는 요소환원주의의 사고이다. 그러나 이와 같은 요소환원주의로 규명할 수 없는 세계가 존재한다는 사실은 현상을 인식하는 새로운 방법의 필요성을 반증하는 것이다. 하지만 분석적이고 기계적인 세계관의 한계가 분명하게 드러났음에도 불구하고, 이것을 대신할 수 있는 뚜렷한 대안이 명확한 체계를 갖추지 못하고 있는 것이 또한 사실이다. 그러나 한 가지 분명한 것은, 이와 같은 막연함에도 불구하고, 대안적 세계관이 지닌 새로운 시각과 잠재력이 사람들의 관심을 끌기에 충분하며 이러한 이유에서 복합체계나 복잡성의 과학에 대한 학문적 관심과 대중적 인기가 확대되고 있다는 점이다.

체계론적 사고의 발전과 관련된 가장 중요한 문제는 개념과 이론을 정교하게 다듬고 그것을 실제 세계에 적용하는 것이다. 이러한 맥락에서, 오늘날 전개되고 있는 체계론적 사고는 그 발전단계를 고려할 때 이른바 제2의 물결이라고 할 수 있다(De Greene, 1994). 제1의 물결은 평형과 안정 그리고 소극적 환류 루프(negative feedback loop)의 통제를 통한 체계의 유지에 관심을 기울여 왔다. 여기서 체계는 목표를 추구하고 있으며, 자율적이거나 아니면 외부로부터 통제될 수 있는 것으로 간주되었다. 제1의 물결에는 사이버네틱스(Cybernetics), 체계역학(System Dynamics), 정보이론(Information Theory), 초기의 일반체계이론 등이 포함된다. 또한 체계분석, 체계엔지니어링 및 체계관리 등은 이러한 제1의 물결이 반영된 분야들이다.

무엇보다도 제1의 물결 시기에 있어서 가장 중요한 특징은 체계들을 단지 기능할 수 있는 것으로 파악한다는 점이다. 즉, 체계들이 진화하거나 새로운 어떤 것으로 자기조직화 할 수 있다는 사실을 인식하지 못했다는 점이다. 그 결과 제1의 물결 시기의 접근방법은 제한된 타당성만을 지닐 수밖에 없었다. 이러한 한계에서 시작된 것이 바로 체계론적 사고의 제2의 물결이라고 할 수 있다. 따라서 제2의 물결은 진화, 비평형, 평형으로부터 멀리 떨어진 상태, 문턱점(threshold point)이나 두갈래치기점, 불안정의 창조적 역할, 요동의 자기증폭화, 새로운 패턴과 구조의 발현 등과 밀접하게 관련되어 있다. 소산구조이론, 시너지학(Synergetics), 두갈래치기이론, 혼돈이론, 카타스트로프이론 등은 이러한 흐름을 보여주는 대표적인 것들이다.

최근 제2의 물결을 주도하고 있는 복합체계이론이 갑자기 등장한 것이 아니라는

점은 분명하다. 그것은 오히려 이와 같은 과학적 패러다임의 등장을 자극하고 이론적 기초를 제공한 수많은 개념들과 이론 속에서 그 지적 토대가 구축되었다. 복합체계에 대한 인식은 동서양을 막론하고 멀리 고대까지 소급될 수 있다. 그러나 복합체계, 복잡성, 복잡성의 과학 등에 대한 학문적·이론적 천착이 이루어질 수 있는 기반은 제2차 세계대전 이후 본격화되기 시작한 일반체계이론에서 찾을 수 있을 것이다. 개별 학문의 구획성을 뛰어넘는 전체적인 조망을 증시하는 가운데 많은 학자들이 주목하기 시작한 개념이 체계(system)이며, 이러한 체계 개념을 토대로 분석적이고 단편적인 사고가 지닌 한계를 극복할 수 있는 대안을 추구해 온 것이 바로 일반체계이론이다.

최근 활발하게 논의되고 있는 복합체계나 복잡성에 관한 논의는 바로 이와 같은 체계론적 사고의 가장 첨단인 새로운 영역이라고 할 수 있다. 따라서 복합체계나 복잡성에 기초한 새로운 과학적·학문적 패러다임을 이해하기 위해서는 체계이론 중에서도 제2의 물결 이후 최근 새롭게 제기된 개념·아이디어 및 다양한 시각 등에 주목해야 한다. 이러한 핵심 개념과 이론에 속하는 것들이 바로 복합적 적용체계, 혼돈이론, 자기조직화이론 등이다. 다음 장부터는 이러한 주제들에 대해서 하나씩 살펴보기로 하자. 하지만 그에 앞서 체계이론의 출발이라고 할 수 있는 일반체계이론에 대해서 살펴보는 것이 순서일 것이다.

Ⅲ. 일반체계이론의 등장

체계론적 사고의 기반은 생물학 분야에서 발전된 이른바 일반체계이론(General Systems Theory)에서 비롯되었다. 1920년대에 버터란피(Ludwig von Bertalanffy)에 의해 주도된 일반체계이론은 과학의 통합을 중시하는 하나의 학문운동으로서, 제2차 세계대전 이후 다양한 학문 배경을 지닌 학자들에 의해서 본격적으로 발전되었다. 이와 같은 학문운동은 다수의 개별 학문이 폐쇄적으로 구획되어 있을 뿐만 아니라 개별 학문간의 교류가 단절됨으로써 비생산적인 중복 연구가 이루어지는 등 전반적인 학문 발전에 역기능을 초래할 수 있다는 반성에서 시작되었다(이용필, 1985, p. 25). 일반체계이론가들은 다수의 개별 학문이 제각기 특

수한 현상에만 전념함으로써 추상적이고 일반적인 논의들을 배제하게 되었으며, 이것은 또한 개별 학문 영역에서 얻어진 지식들을 의미있게 통합할 수 있는 가능성을 차단해 왔다고 주장하였다. 이러한 관점에서, 그들이 강조한 것이 바로 일반적이고 추상적인 이론의 중요성이다. 그러나 이와 같은 입장은 완전한 추상성을 바탕으로 하는 고도의 일반화와는 구별될 필요가 있다. 실제로, 보울딩(Kenneth Boulding)은 일반체계이론을 이론적 모델 정립의 수준을 서술하기 위해서 사용하는 명칭이라고 전제하고, 그것을 순수수학의 고도의 일반화와 전문화된 개별 학문의 특수이론 중간에 위치시키고 있다(Boulding, 1968, p. 3).

수학은 고도의 일반적 관계들을 일관된 체계로 조직화한다. 그와 같은 체계는 우리의 주위에 있는 현실 세계와 필연적인 관련을 갖고 있지 않다. 수학은 모든 이론을 포함하고 있기 때문에 또한 아무 것도 포함하고 있지 않다고 말할 수 있다. 수학은 이론의 언어이지만 우리에게 아무런 내용도 제시하지 않는다. 반면에, 수학과는 정반대의 입장에 있는 각각의 개별 학문이나 과학들은 그들 나름의 이론을 가지고 있다. 각각의 개별 학문이나 과학들은 경험 세계의 어떤 특정 부분이나 영역을 다루고 있으며 그와 같은 대상 세계에 적용될 수 있는 이론들을 발전시켜 왔다. 그러나 제2차 세계대전 이후 경험 세계의 일반적 관계들을 논의할 수 있는 일단의 체계적인 이론을 구성해야 한다는 목소리가 커지기 시작하였으며, 이러한 요청에 부응해서 일반체계이론에 대한 탐구가 본격화된 것이다.

하지만 여기서 주목할 것은 특정 학문이나 과학이 지닌 특수 이론을 대체할 수 있는 단일의 자족적인 일반이론은 사실상 불가능하다는 점이다. 그와 같은 일반이론은 내용을 배제한 채 고도의 일반성을 추구하기 때문에 공허할 수밖에 없다. 말하자면 모든 것을 설명할 수 있다는 것은 아무 것도 설명할 수 없다는 것과 마찬가지로 지이다. 그렇다고 아무런 의미가 없는 특수성과 아무런 내용이 없는 일반성사이의 어딘가에 최적의 일반성(an optimum degree of generality)이 존재하지 않는다고 가정할 이유가 없다는 것이 일반체계이론의 주장이다(Bertalanffy, 1956). 그리고 여기서 분명한 것은 그와 같은 최적성이 적어도 특수한 학문이나 과학에 의해서는 결코 도달될 수 없다는 사실이다.

최적의 일반성 추구를 목표로 하는 일반체계이론은 몇 가지 특징을 지니고 있다. 첫째, 일반체계이론은 전체적인(holistic) 이론적 틀을 강조한다는 점이다. 체계를

구성하고 있는 부분들 사이의 상호관계와 상호의존성을 설명하고자 하며, 체계와 환경과의 관계, 그리고 물리·생물·사회·상징체계 등과 같은 다양한 종류의 체계 사이의 관계를 설명하고자 한다는 점에서 전체적인 이론 틀을 중시한다. 이러한 접근방법은 전통적인 개별 학문이나 과학이 취해왔던 환원론적인 접근법과는 상당히 다른 것이다. 전통적으로 과학은 체계를 가장 작은 부분들로 쪼개어 이해하고자 하였으며, 분리된 학문 영역의 전문화를 강조함으로써 세계에 대한 우리의 이해를 단편화하고 파편화시키는 경향이 있었다. 비록 일반체계이론이 전문화된 지식의 중요성을 인정하지 않는 것은 아니지만, 그보다는 서로 다른 학문이나 과학 영역을 통합할 수 있는 이론적 틀을 개발하고 발전시키는데 주력하였다.

둘째, 일반체계이론은 인간적인(humanistic) 접근방법을 중시하였다는 점이다. 일반적으로 체계이론을 적용한 모델들은 기술적인 측면을 많이 내포하고 있으며, 인간에 대한 효율적인 관리를 조장할 수 있는 비인간적인 정향을 지니고 있다는 오해를 받아 왔다. 그러나 버터란피는 전통적인 존재론과 인식론에 대한 숙고를 중시하는 체계철학(systems philosophy)과 이와 같은 형이상학적 기본 전제에 대한 검토 없이 단지 현대 산업사회의 실제적인 조직상의 문제를 해결하는 데 초점을 맞추는 체계기술(systems technology)을 구분하고자 하였다(Bertalanffy, 1968). 실제로 이러한 체계철학의 연장선상에서, 최근 새롭게 발전되고 있는 체계이론에서는 초기의 유기체론자들이 범했던 일종의 사회적 통제와 억압을 조장할 수 있는 모델이 아닌 전혀 새로운 시각에서 사회조직을 이해할 수 생물학적인 틀을 제공하고 있다. 예컨대, 발달생물학의 이론적 작업에서 출현한 자기조직화의 관념은 보다 참여적이고 민주적인 형태의 사회조직을 설명하는 데 적합하다고 할 수 있다.

셋째, 일반체계이론은 민주적인 가치와 참여의 중요성을 담지하고 있다는 점이다. 일반체계이론에 가해진 비인간화의 문제에 관련된 많은 쟁점들은 사실상 자유의지와 결정론의 문제에 집중되어 있다. 고전적인 기계론적 관점은 인간 행동에 대한 결정론적인 이해를 강조하는 경향이 있는 반면에, 일반체계이론가들은 결정과정에서 개인들의 적극적인 역할을 고무하고 격려할 수 있는 창조성과 자발성의 중요성을 강조하고 있다. 버터란피 역시 고전 과학의 선형적 인과론(linear causality)과 기계론적이고 환원론적인 접근방법을 비판하면서 대신에 다양한 관점의 중요성을 강조하고 있다. 사회 조직에 관한 전체적인 조망을 중시하는 체계이론은 공동체

와 협동의 가치를 강조하고 개인의 중요성을 침해하는 것으로 종종 의심받고 있다. 그러나 전체적인 조망의 의도는 통체에 관심이 있기보다는 모든 것을 포용하며 권한을 분산하고 위임하는 사회 구조를 창출하는 데 관심을 두고 있다. 이렇듯, 일반체계이론은 조직의 위계적인 패턴보다는 참여와 다양한 관점들의 중요성을 강조하고 있다.

1954년 버터란피, 보올딩, 제라드(Ralph Gerard), 라포포트(Anatol Rapoport) 등 서로 다른 학문 배경을 지닌 학자들에 의해서 창립된 일반체계연구회(The Society for General Systems Research)는 생물체·사회조직·기술적 조직의 복합성에 대한 관심이 증대되면서 나타난 자연스런 결과였다. 그 후 1960-70 년대에 체계 관념과 모델들이 유행하면서 큰 영향력을 행사하게 되었다. 그러나 한편으로는 체계 관념에 대한 회의가 확산되기 시작하였는데, 이것은 체계이론이 전체주의적인 거대담론(totalizing metanarrative)이라는 오해와 사람들의 의식 속에 자리잡기 시작한 기술적 진보에 대한 환멸에서 그 이유를 찾을 수 있다. 이러한 상황 속에서, 체계 관념은 고도로 합리화된 기술적·제도적 체계와 연계되면서 급기야는 통제나 전체화와 동의어로 간주되기에 이르렀다(Lilienfeld, 1978). 그러나 분명한 사실은 체계론적 사고에는 다양한 흐름이 있으며, 일반체계연구회의 많은 구성원들은 체계의 아이디어를 군사적이고 기술적으로 활용하는 것에 대해서 비판적인 입장을 취하고 있다는 점이다. 일반체계이론이 관심을 기울이고 있는 것은 현대 사회의 고도의 상호의존적 특성을 고려하는 사회 조직의 관념을 발전시키는 것이다. 이러한 관심은 민주주의 이론이 지닌 참여의 이상을 추구하는 것과 같은 맥락에서 이해할 수 있다. 이처럼 전체화 대신에 관점의 다양성을 강조하고 있는 것이 체계이론의 모습이다.

IV. 복합적 적응체계

1. 체계의 의미

체계이론에 있어서 가장 중심적인 개념은 체계(system)이다. 체계는 내적으로

연결되어 상호작용하는 일련의 단위들(units)이다. 여기서 일련의 단위라는 것은 체계를 이루는 단위들이 어떠한 공통된 속성들을 지니고 있다는 것을 뜻한다. 만일 단위들이 상호작용하거나 관계를 맺기 위해서는 이러한 공통된 속성들이 본질적이다. 각 단위들의 상태는 다른 단위들에 의해서 제약을 받고, 조건지어지거나 아니면 그것들에 의존하고 있다(Miller, 1978, p. 16).

버터란피는 체계를 상호작용하는 일련의 요소들(components)이라고 정의한 반면에, 파슨스(T. Parsons)와 실즈(E. Shils)는 체계가 지닌 가장 일반적이고 근본적인 속성을 부분들(parts) 혹은 변수들(variables)의 상호의존성에서 찾고 있다. 상호의존성은 무작위적인 변화와는 대조적으로 부분이나 변수들 사이에 명확한 관계들이 존재한다는 것을 뜻한다. 말하자면, 체계를 이루고 있는 구성요소들 사이의 관계에 질서가 있다는 것을 의미한다(Parsons & Shils, 1951, p. 107).

할(A. D. Hall)과 페건(R. E. Fagen)은 체계를 대상들과 대상들의 속성들 사이의 관계를 포함하는 대상들의 일련의 집합이라고 정의하고 있다(Hall & Fagen, 1956, p. 18). 그러나 이와 같은 개념정의는 매우 간결하고 막연하다. 따라서 대상, 속성 및 관계의 용어를 정교하게 규정할 필요가 있다. 먼저, 대상들은 수없이 다양하게 연결되고 있는 체계의 부분 또는 구성요소들이다. 여기에는 물리적 세계의 원자, 항성, 스위치, 스프링, 전선, 뉴런, 유전자, 근육, 가스 등은 물론 그 밖의 수학적 변수, 등식, 법칙, 과정과 같은 추상적 대상들도 포함된다. 둘째, 속성은 대상들의 성질이다. 예컨대, 원자는 전자 수, 원자의 에너지 상태, 핵에 있어서의 원자입자 수, 원자가 등의 속성을 지니고 있다. 항성은 온도, 다른 항성과의 거리, 상대적 속도 등과 같은 속성을 가지고 있다. 셋째, 관계는 체계를 하나로 묶는 것을 말한다.

또한, 체계는 다음과 같은 속성을 지닌 두 개 이상의 상호연관된 요소들의 집합으로 정의될 수 있다: 첫째, 각각의 요소는 전체의 기능에 영향을 미친다. 둘째, 각각의 요소는 적어도 체계에 있는 하나의 다른 요소의 영향을 받는다. 셋째, 각각의 요소들로 구성될 수 있는 모든 하위집단 역시 위의 두 가지 속성을 지니고 있다(Ackoff, 1981, pp. 15-16). 한편, 베리엔(F. Berrien)은 체계 개념을 구성요소들, 투입, 산출로서 설명하고 있다. 즉, 체계는 상호작용하는 일련의 구성요소들과 체계 내부와 외부로의 투입과 산출을 걸러주는 속성을 지닌 경계로 구성되어 있

다(Berrien, 1968, pp. 14-15).

그렇다면 이러한 다양한 체계 개념 속에 나타나고 있는 공통점은 무엇인가? 첫째, 비록 그 용어는 달라도, 체계의 기본 단위를 구체적으로 명시하고 있다는 점이다. 구성요소, 부분, 단위, 특징, 변수, 속성 등 다소의 뉘앙스 차이는 있지만, 체계의 기본 단위를 제시하고 있다는 점에서는 공통적이다. 둘째, 관계, 내적인 상호관계, 연결, 상관관계 등으로 다양하게 표현하고는 있지만, 기본 단위들 사이의 일종의 연결을 구체적으로 밝히고 있다는 점이다. 셋째, 기본 단위들 사이의 관계가 무작위적이지(random) 않다는 점(즉, 엔트로피가 극한값보다 낮다는 사실)을 구체적으로 명시하거나 아니면 의미상 함축하고 있다는 점이다. 예컨대, 밀러(J. G. Miller)는 체계가 에너지-물질의 무작위적인 축적이 아니라고 주장하면서, 생명체들은 엔트로피 변화에도 불구하고 스스로 네겐트로피의 안정 상태를 유지할 수 있다고 보았다. 파슨스와 실즈 역시 체계가 무작위적인 변화로부터 벗어나 있다는 점을 지적하고 있다. 넷째, 비록 그것이 구체적으로 표명되었든 아니든 관계없이, 체계 개념은 경계(boundary)와 환경(environment)의 존재를 인정하고 있다는 점이다(Bailey, 1994, p. 46).

위에서 간단히 언급했듯이, 경계와 환경은 체계를 이해하는 데 있어서 필수불가결한 요소들이다. 환경의 개념정의는 체계 및 경계와의 관계 속에서만 가능하다. 일반적으로 환경은 경계를 기준으로 어떠한 체계의 외부에 있는 대상들의 일련의 집합이라고 정의할 수 있다. 그러나 고려하는 체계가 개방적인 것이라고 할 때, 환경은 그 속성의 변화가 경계를 가로질러 체계에 영향을 미치고 있는 집합이며 또 그러한 속성이 체계의 행태에 의해서 변화되는 모든 대상의 집합이다(Hall & Fagen, 1956, p. 21). 그러나 이러한 개념정의는 어떤 대상이 특정 체계에 속하고 또한 동시에 환경에 속하는 경우에 문제가 있다. 또한 만일에 어떤 대상이 위에서 언급된 바와 같은 방식으로 체계와 상호작용한다면 그것 역시 체계의 한 부분으로 보아야 하는가 하는 것도 분명치 않다. 이러한 맥락에서 볼 때, 체계와 그것을 둘러싼 환경은 다함께 우리가 고려하고자 하는 현상의 세계를 형성하는 불가분리의 관계에 있는 것이다. 따라서 이러한 세계를 두 개의 집합, 즉 체계와 환경으로 구분하는 것은 여러 가지 측면에서 자의적이고 임의적인 것이라고 할 수 있다(이승필, 1985, p. 34).

체계이론에 있어서 환경과 경계의 존재는 또한 체계를 분류하는데 있어서 중요한 기초가 되었다. 체계론자들은 통상 경계를 둘러싼 환경과의 상호작용을 토대로 체계를 고립체계(isolated system), 폐쇄체계(closed system), 개방체계(open system)로 구분하였다(Hall & Fagen, 1956). 고립체계는 물질과 에너지가 체계의 경계를 넘나들 수 없는 체계로서, 이것은 폐쇄체계의 하나의 극단적 형태이다. 폐쇄체계는 에너지는 체계 경계를 가로지르지 않지만 물질은 그렇지 못한 체계로서, 고립체계보다는 덜 폐쇄적인 체계를 말한다. 개방체계는 물질과 에너지 모두 체계 경계를 가로지를 수 있는 체계이다. 이와 같은 체계 구분은 체계이론을 사회과학의 영역에 적용하는데 있어 특히 중요하다. 그러나 이러한 구분은 아인슈타인(A. Einstein)의 상대성 이론과 1940년대 이후 강조되기 시작한 정보의 중요성으로 인해 그 의미가 많이 퇴색되었다. 아인슈타인의 물질과 에너지 방정식($E=mc^2$)으로 인해 물질과 에너지의 2가지 양은 물질-에너지로 수정되었다. 그리고 고립체계와 폐쇄체계의 차이가 무의미해지면서 폐쇄체계라는 개념이 배타적으로 사용되었다. 또한 폐쇄체계는 물질-에너지에 대해서 뿐만 아니라 정보의 흐름에 대해서 폐쇄적인 것으로 이해되고 있다. 따라서 오늘날 개방체계는 물질-에너지 뿐만 아니라 정보의 흐름을 허용하는 경계를 지니고 있다.

지금까지 살펴 본 체계에 대한 개념정의는 적어도 매우 추상적인 수준에서 체계 관념에 대한 어떠한 함의를 도출할 수 있다는 사실을 전제로 하고 있다. 그러나 영(Oran Young)은 체계 개념의 조작적 정의를 위해서는 이것이 더욱 정교화되어야 한다고 주장하면서, 두 가지의 접근방법을 제시하고 있다(Young, 1968, pp. 15-16). 첫째로, 체계라는 용어는 요소들간의 상호의존의 수준이 높다는 의미에서 상호 밀접하게 연결된 요소들에만 적용되어야 한다는 것이다. 따라서 체계는 요소들이 무작위로 형성된 것(random aggregation)과는 구별되어야 한다. 이때 중요한 구분의 기준이 되는 것이 바로 일반체계이론에서 전제하고 있는 유질동상(isomorphism)과 상호연결(interlocking)이다. 유질동상은 상이한 체계들에 있는 대상들간의 1대1의 대응관계를 말한다. 상호연결은 체계들간의 대응성 또는 체계들에 통용되는 원리나 과정에 있어서의 기본적 유사성을 가리킨다. 두 번째 접근법은 대상이나 대상들의 속성들 사이의 관계에 대한 구성적 시각(constructive view)에 초점을 맞추고 있다. 이러한 관점은 추상적이고 이론적인 체계 개념보다

는 그것을 실제로 적용하고 활용하는 데 더 큰 관심이 있다. 여기서 중요한 관건은 체계의 존재를 결정짓는 기준의 적용에 있다. 즉, 연구의 목적에 비추어서 관심이 있거나 적합성이 있는 것만이 하나의 체계로서 간주되기 쉽다는 것이다. 결국, 이와 같은 접근방법은 특정한 체계의 존재여부가 자의적으로 이루어 질 수 있는 문제가 있다.

2. 개방체계와 엔트로피

생물학 분야에서 발전된 버터란피의 개방체계의 관념은 일반체계이론에 있어서 가장 중요한 공헌이 아닐 수 없다. 기본적으로 이러한 개방체계 관념이 지닌 의의는 그것이 생명체들을 평형체계가 아닌 비평형 체계로서 이해해야 한다는 주장을 뒷받침하고 있다는 점이다. 말하자면, 생명체들은 지속적인 비평형 상태에서 스스로를 유지할 수 있고, 환경으로부터 물질과 에너지를 받아들이고 체계 내부의 엔트로피를 배출함으로써 복잡한 조직 수준을 유지할 수 있는 것이다. 이러한 접근방법은 인간들이 구성하고 있는 사회체계의 경우에도 마찬가지로 적용될 수 있다 (Byeon, 1999). 따라서 전통적인 평형 관념보다는 비평형 관념이 생명체나 사회체계의 변화를 규명할 수 있는 주요한 토대가 될 수 있다. 이와 같은 비평형 체계의 변화를 다루는 데 있어서 매우 중요한 위치를 차지하는 개념 가운데 하나가 바로 엔트로피이다.

엔트로피(entropy)는 본래 열역학 제2법칙에서 파악된 물리적 성질을 의미하는 개념이다. 이 말은 독일의 물리학자인 클라우지우스(R. Clausius)가 1865년에 처음으로 사용했는데, 변환량을 뜻하는 그리스어에서 나온 것이다. 그가 엔트로피라는 개념을 사용한 목적은 어떤 계의 에너지가 변환 불가능함으로 보여주기 위한 것이었다. 그 후 엔트로피 개념을 이론적 범주로 끌어들이는 사람은 볼츠만(L. Boltzman)이다. 이때부터 엔트로피는 무질서의 크기로 이해되었다. 볼츠만은 질서있는 구조에서는 낮은 엔트로피가 그리고 무질서한 상황에서는 높은 엔트로피가 연계되고 있음을 보여주고 있다. 요컨대, 엔트로피는 시간의 흐름에 따라서 증가하는 무질서를 표시하는 단위로 간주되었다(Prigogine & Stengers, 1984, p. 151).

폐쇄체계의 경우, 엔트로피가 커질수록 체계 내부에서 사용할 수 있는 에너지는 그만큼 줄어든다. 이것은 엔트로피 증가의 법칙이 고립된 폐쇄체계의 진행 방향을 암시하고 있다는 것을 의미한다. 결국 폐쇄체계에서는 엔트로피가 증대되는 과정만 일어날 수 있다. 그런데 여기서 주목할 것은 체계내의 엔트로피 증대 과정이 궁극적으로는 최대 엔트로피 상태에 상응하는 열역학적 평형상태로 나가는 과정을 의미한다는 사실이다. 따라서 엔트로피 증대 과정은 평형상태를 설명하는 데 타당한 반면에, 열역학적 비평형 상태 말하자면 체계의 질서가 유지되는 개방체계를 설명하는 데는 한계가 있는 것이다. 실제로 지구상의 생명체들이나 인간이 만든 체계들은 고립되어 존재하는 폐쇄적인 체계이기보다는 수시로 외부로부터 에너지와 정보를 받아들여 내부의 엔트로피를 방출함으로써 질서를 유지하는 개방체계라고 할 수 있다. 따라서 개방체계의 엔트로피 변화는 폐쇄체계의 경우와는 분명 다르다.

유명한 프리고진 방정식은 개방체계의 엔트로피 함수를 가장 간명하고 적절하게 묘사하고 있다(Prigogine, 1955, p. 16):

$$dS = d_eS + d_iS$$

여기서 dS 는 체계의 전체 엔트로피 변화량이고, d_eS 는 체계로 유입된 외부 엔트로피 생산량을, d_iS 는 체계의 비가역적 과정에서 생성된 내부 엔트로피 생산량이다. d_iS 는 항상 불변적 이든가 또는 증가하는 반면에, d_eS 는 충분한 양의 물질-에너지 혹은 정보가 체계 내로 유입된다면 음수 값이 될 수 있다. 이것은 d_eS 가 음의 엔트로피(negative entropy) 즉, 네겐트로피(negentropy)가 될 수 있다는 것을 뜻한다. 따라서 개방체계의 전체 엔트로피는 일정한 수준을 유지하거나 아니면 더 나아가 감소할 수 있다.

비평형 상태의 개방체계는 환경과의 상호작용을 통해 내부의 엔트로피 증대를 막거나 엔트로피를 감소시킴으로써 새로운 질서를 형성해 갈 수 있다는 사실이 확인되었다. 따라서 열역학 제2법칙에 대한 기존의 비관적인 견해를 불식시킬 수 있게 되었다. 그 결과 어떤 체계는 엔트로피가 증대되는 반면, 어떤 체계는 엔트로피가 소멸됨으로써 자발적인 조직화가 가능한 방향으로 성장할 수 있는 것이다. 생명체와 인간이 만든 사회·문화적 체계는 후자에 해당되며, 원칙적으로 평형체계나 항상적 체계(homeostatic system)가 아닌 비평형 체계 내지는 네겐트로피를 생성

하는 체계(negentropic system)라고 할 수 있다. 버클리(W. Buckley)는 이것을 복합적 적응체계(complex adaptive system)라고 보고, 평형체계나 항상적 체계와 구별하고 있다(Buckley, 1981).

버클리에 따르면, 평형체계는 비교적 폐쇄적이며 엔트로피가 증대하는 체계이다. 평형상태가 되면서 이러한 체계는 구조를 상실하며 자유 에너지의 양이 최소가 된다. 평형체계는 비교적 폐쇄적이기 때문에 환류 기능이 작동하지 않으며, 자율성과 적응력이 결여되어 있다. 따라서 외부적인 섭동에 의해서 영향을 받으며, 내적인 혹은 내부적인 원인에 의해서 변화가 일어나지 않는다. 둘째, 인체 기관과 같은 항상적 체계는 일정한 통제 범위 내에서 적절한 에너지 수준을 유지할 수 있는 개방적인 체계로서 네겐트로피를 생성할 수 있는 체계이다. 그러나 이러한 체계는 주어진 한도 내에서 주어진 체계의 구조를 유지하는 데 주된 목적이 있다. 이와 같은 체계 유지의 기능은 환류 루프를 통해 환경과 에너지 및 정보를 교류함으로써 이루어진다. 원칙적으로 이것은 창조적 적응(체계 구조의 변화)보다는 자율(구조의 유지)에 기초한 것이다. 셋째, 복합적 적응체계 역시 개방적이면서 네겐트로피를 생성할 수 있는 체계이다. 그러나 이러한 체계들은 그들 구성요소들 사이의 상호교류가 전체로서의 체계는 물론 구성요소들 자체의 본질에 중요한 변화를 초래할 수도 있다는 점에서 외적 내적으로 개방되어 있다. 체계가 동원할 수 있는 에너지 수준도 비교적 광범위하며, 정보의 흐름을 통해 외적 변화는 물론 내적인 변화까지 조정할 수 있다. 환류 루프가 활성화되어 있어서 체계 구조를 유지하는 것은 물론 자체의 방향 설정 내지는 최소한 변화하는 환경에 효과적으로 적응할 수 있다. 따라서 복합적 적응체계는 생존과 활력을 위해 그 구조를 새롭게 변화시키거나 보다 정교하게 만들 수 있는 것이다.

V. 혼돈이론

1. 혼돈과 질서

혼돈에 대한 연구는 1970년대 중반부터 수학계에서 산발적으로 이루어졌다. 그

후 이러한 연구 활동을 통일적으로 추진하는 과정에서 복합체계에 관한 논의가 활발하게 진행되었다. 따라서 혼돈에 대한 관심과 연구는 복합성에 새로이 눈뜨고 복합체계를 들여다 볼 수 있는 창문의 역할을 한 것으로 보인다.

혼돈을 가리키는 카오스(chaos)는 우주의 질서, 전체의 질서, 세계의 질서 등을 의미하는 그리스어 코스모스(cosmos)와 반대되는 말이다. 비록 혼돈이론이 체계화된 것은 최근의 일이지만, 인간의 의식 속에는 일찍부터 혼돈에 대한 생각이 자리잡고 있었던 것으로 보인다. 고대 그리스인들은 질서정연한 우주가 생기기 이전의 커다란 혼돈상태를 의식하고 있었고, 따라서 혼돈에서 질서가 생겨났다고 생각하였다. 이러한 생각은 고대 동양에 있어서도 마찬가지이다¹⁾. 다만 인간의 의식 속에 자리했던 혼돈에 대한 연구가 최근에 본격화되었다는 사실은 혼돈과 질서의 본질을 이해하고 파악하는 것이 결코 쉬운 문제가 아니라는 것을 보여주고 있다.

혼돈은 우리가 상식적으로 이해하고 있는 것과는 다른 차원의 것이다. 오히려 그것은 처음에는 정연한 질서를 보이다가 어느 순간 걸잡을 수 없는 상황이 펼쳐지는 것을 의미한다고 보아야 할 것이다. 즉, 결정론적으로 진행되던 체계에서 나타나는 불확정적인 현상을 지칭한다(Stewart, 1989). 결정론적인 체계에서 일어나는 확률론적인 현상, 또는 전적으로 법칙에 따라서 지배되지만 법칙성이 없는 현상 내지 행동이 바로 혼돈이다.

밀가루 반죽 변환은 이에 대한 적절한 예가 될 수 있다. 우선 밀가루 반죽으로 얇은 층을 만들고 그 위에 흑설탕을 얹는다고 가정해 보자. 다음에는 이것을 늘려서 반으로 포개어 접는 행위를 반복한다. 이와 같은 조작을 충분한 횟수만큼 반복하면 밀가루와 흑설탕이 고루 섞이게 될 것이다. 이 때 흑설탕 알갱이 하나를 추적해 보면 혼돈의 의미를 이해할 수 있다. 우리가 추적하고자 하는 흑설탕 알갱이는 늘려서 반으로 접는 행위를 반복할 때마다 이리저리 왔다갔다하게 될 것이다. 한

1) 「장자」 응제왕(應帝王) 第七에 나오는 다음의 내용에서 혼돈과 질서에 관한 고대 동양적 사고를 엿볼 수 있다(안동립 역주, 「장자」, 서울: 현암사, 1998, pp. 235-7 참조): 남해의 임금을 숙(儻)이라 하고 북해의 임금을 홀(忽)이라 하며, 중앙의 임금을 혼돈(渾沌)이라 한다. 숙과 홀이 때마침 혼돈의 땅에서 만났는데, 혼돈이 매우 융숭하게 그들을 대접했으므로 숙과 홀은 혼돈의 은혜에 무엇으로 보답할 것인지 의논을 했다. <사람은 누구나 모두 7개의 구멍이 있어서 그것으로 보고, 듣고, 먹고, 숨을 쉬는데 혼돈에게만 없다. 시험삼아 구멍을 뚫어 주자.> 그래서 매일 하나씩 구멍을 뚫어 주었다. 그런데 7일째 마지막 구멍을 뚫자 혼돈은 그만 죽고 말았다.

두 번 정도 그와 같은 행위를 반복하는 경우에는 흑설탕 알갱이의 위치를 확인할 수 있다해도, 그러한 조작이 수없이 반복되면 그 위치를 정확하게 찾는 것은 거의 불가능하다. 이러한 상황에서 늘려서 반으로 접는 행위는 결정론적이다. 따라서 흑설탕 알갱이의 위치 변화는 우리가 반복하는 조작에 따라서 확정되어 있는 것이다. 더 나아가 그와 같은 조작을 거꾸로 해 나가면 원래의 상태로 되돌아갈 수 있다는 점에서 이것은 가역적인(reversible) 과정이기도 하다. 그러나 이것은 현실적으로 불가능하다. 여기에는 여러 가지 변수들이 개입하기 때문이다. 이처럼 결정론적인 조작에서 확률적이고 불확정적인 현상이 나타나는 것이 바로 혼돈이다.

자연이나 사회, 생리 현상 등과 같이 완벽하게 하나의 체계를 이루고 있는 것이라고 할지라도 때로는 불규칙성이 나타나는 경우가 있는데, 그 불규칙성이 바로 혼돈이다. 그리고 그러한 혼돈 속에서 일정한 패턴을 찾고자 하는 것이 혼돈이론(Chaos Theory)의 목적이다. 이러한 관점에서 보면, 혼돈은 단순한 무질서가 아니라 그 속에 질서를 전제로 하고 있는 것이다. 그래서 라즐로(E. Laszlo)는 혼돈을 세련된 질서라고 규정한 바 있다. 혼돈에 관한 이와 같은 새로운 인식은 기존의 상식과 가치관에 심각한 의문을 던지고 있다. 전통적인 사회과학의 영역에서조차 혼돈과 무질서는 그것이 지닌 부정적인 뉘앙스 때문에 바람직하지 못한 상태로 간주되어 온 것이 사실이다(Bailey, 1990). 그러나 혼돈에 관한 새로운 해석은 기존의 상식은 물론 평형관념에 사로잡혔던 사회과학과의 결별을 의미한다.

2. 나비효과

혼돈이론의 아이디어를 처음으로 간파한 사람은 이른바 3체문제(three-body problem)를 다룬 프랑스의 수학자 프앙카레(H. Poincare)였다. 두 개의 물체가 서로 운동하고 있을 때에는 그 물체들의 운동을 얼마든지 예측할 수 있다. 그러나 여기에 제3의 물체가 도입되면, 상황은 매우 불규칙해지고 물체의 운동을 예측하는 것이 거의 불가능하다는 것이 3체문제의 핵심이다(Gleick, 1988). 프앙카레는 여기서 고전 과학의 엄격한 수학적 방식으로는 불확정적이고 혼돈스런 행위를 다루거나 설명할 수 없다는 사실을 인식하였다.

고전 과학에 따르면, 만일 우리가 자연법칙과 우주의 현재 상태를 정확히 안다면 다음 순간에 이 우주가 어떻게 될 지 정확하게 알 수 있다. 하지만 실제로 우리는 우주의 현재 상태에 대해서 정확히 알지 못하며, 따라서 그와 같은 정도의 정확성만 갖고 우주의 다음 순간을 예측할 뿐이다. 그럼에도 불구하고 우리는 자연과 우주 현상을 정확하게 예측할 수 있다고 생각하고 있으며, 또한 그것들이 엄밀한 법칙의 지배를 받는다고 말하고 있다. 그러나 초기조건(initial conditions)의 아주 미세한 차이가 결과에 있어서는 엄청난 차이를 가져올 수 있다는 점을 상기한다면, 이러한 주장은 더 이상 설득력이 없다. 초기조건의 차이 때문에 정확한 예측은 더 이상 불가능하며, 우리는 단지 우연적인 현상만을 볼 뿐이다. 결과적으로, 프랑카레는 고전 과학이 간과했던 매우 작은 원인이 결과적으로 엄청난 차이를 낳게 된다는 사실을 간과했던 것이다. 그러나 혼돈의 관념은 사람들의 관심 밖에서 깊은 잠에 빠지게 되었다. 이러한 혼돈의 잠을 깨운 것이 바로 나비효과(butterfly effect)이다.

혼돈이론의 가장 중요한 특징으로 꼽히는 나비효과는 MIT의 기상학자인 로렌츠(E. Lorenz)에 의해서 감지되었다. 그는 당시에 컴퓨터를 이용해서 대기의 변화를 시뮬레이션하는 작업을 수행하고 있었다. 온도, 풍압, 습도 등 기상 현상과 관련된 여러 가지 변수들을 포함하는 12개의 방정식을 만들고, 이를 기초로 기상 변화를 모형화하고자 한 것이다. 로렌츠는 정확한 방정식 체계만 구할 수 있다면, 장기적인 기상 변화를 예측하는 것이 가능하다고 생각하였다. 이러한 접근방법은 물리적 실재를 수학으로 모형화할 수 있다고 믿는 전통적인 과학적 사고에서 볼 때, 당시로서는 지극히 당연하고 합리적인 가정이었다.

그러나 로렌츠는 컴퓨터 시뮬레이션 작업 도중에 우연히 입력 데이터의 미세한 차이가 결과적으로 엄청난 차이를 가져온다는 사실을 발견하게 되었다. 그는 반복되는 계산 과정의 시간을 절약하기 위해 소수점 6자리의 입력 데이터를 소수점 3자리까지만 입력하였다. 정확한 데이터는 0.506127이었지만, 실제로 그가 입력한 수치는 0.506이었다. 로렌츠는 이 정도의 차이는 무시할만한 것으로 생각했으나, 그 결과를 보고 놀라지 않을 수 없었다. 어느 단계를 넘어서자 그 결과가 이전의 패턴과는 전혀 다른 패턴을 보여 주었던 것이다. 이것이 바로 나비효과로 알려진 현상이다(Stewart, 1989, p. 141). 혼돈이론에 공통적인 이와 같은 현상은 흔히

초기조건의 민감성으로 이해되고 있다. 이 때부터 로렌츠는 장기 기상 예보가 불가능하다는 사실을 증명하였다.

대개 초기조건의 근소한 차이는 결과에 있어서도 그것에 비례하는 정도의 차이를 낳을 것이라는 것이 고전 과학에서 비롯된 상식이라고 한다면, 나비효과는 이러한 상식과의 결별을 의미하는 것이다. 왜냐하면 초기조건의 아주 작은 변화가 체계의 장기적인 행위를 완전히 다르게 만들 수 있기 때문이다. 요컨대, 초기조건에 대한 체계의 매우 민감한 의존성이 나비효과의 요체라고 할 수 있다. 그리고 이것은 혼돈상태에 직면한 체계들이 지닌 특징들을 파악할 수 있는 출발점이 된다.

무엇보다도 혼돈상태의 체계들은 초기조건에 극도로 민감하다. 비슷한 투입이 전혀 관계가 없는 산출을 낳을 수 있기 때문에 체계의 장기적인 결과를 예측하는 것이 사실상 불가능하다. 이러한 맥락에서, 혼돈상태의 체계들은 비선형적인 체계(nonlinear system)로 간주된다. 둘째, 혼돈상태의 체계들은 결정론적인 체계로서 무작위적이지 않다. 많은 사람들은 혼돈과 무작위를 종종 혼동하고 있는데, 이것은 옳지 않다. 혼돈상태의 체계와는 달리 무작위적인 상태의 체계에서는 어떠한 일이 일어날 것인지 전혀 알 수가 없다. 반면에, 결정론적인 혼돈상태의 체계에서는 체계의 패턴을 분별해 낼 수 있다. 이것은 그 체계가 결코 무작위적이지 않다는 것을 의미한다. 셋째, 이와 같은 맥락에서, 혼돈상태의 체계들은 비선형적이기는 하지만 거기에는 상당히 믿을만한 강력한 패턴이 내재하고 있다. 이러한 패턴을 혼돈이론에서는 유인자(attractor)라고 부르는 데, 이것이 체계의 행위를 지배한다고 보고 있다(Byeon, 2000).

많은 과학자들은 역동적인 체계 변화를 분석하고 이것을 실제로 적용하는 데 도움이 되는 관념들을 모색하고 있다. 초기조건의 민감성으로 인해 결정론적인 체계에서 발생하는 예측할 수 없는 장기적인 행위로서 혼돈을 정의한다면, 혼돈상태의 체계가 가져올 정확한 산출을 예측하는 것은 불가능하다. 그러나 우리가 혼돈이론과 관련해서 반드시 주목해야 할 것은 다양하게 변화하는 조건들이 어떻게 체계에 영향을 미치는가를 이해하는 데 도움이 되는 분별가능한 패턴들이 혼돈상태에서 출현하고 있다는 사실이다. 그리고 시간이 지나면서 이와 같은 혼돈상태의 체계들은 일정한 패턴으로 귀착되는 데, 이러한 패턴들은 점 유인자(point attractor), 주기적 유인자(periodic attractor), 혼돈적(특이한) 유인자(chaotic(strange)

attractor) 등으로 구분될 수 있다(변종현, 1999b, p. 66). 그런데 이들 각각의 유인자를 통해서 우리는 시간이 경과함에 따라서 체계가 어떻게 움직이는가를 시각적으로 확인할 수 있는 것이다.

과학적 탐구의 본질이 자연에 있는 규칙성이나 패턴을 발견하는 데 있다면, 혼돈 이론은 여기에 기여하는 바가 많다. 혼돈상태의 체계들은 반복되지 않고 비선형적이지만 우리가 인식할 수 있는 일정한 패턴들을 따르고 있다. 혼돈이론은 바로 이와 같은 조직과 구조 그리고 패턴에 관한 연구라고 할 수 있다. 이것이 바로 과학이 추구하고자 하는 것이며, 따라서 혼돈이론을 21세기의 과학이라고 부르는 이유가 여기에 있다. 더 나아가 혼돈이론의 실제적인 강점은 다양하고 복합적인 생물학적 현상은 물론 인간과 사회 및 심리 현상 등에 내재되어 있는 패턴을 이해할 수 있는 접근방법으로서 충분한 잠재력을 지니고 있다는 사실이다(Goerner, 1994).

3. 혼돈의 가장자리

위에서 보았듯이, 혼돈상태에서는 아주 미세한 변화가 확대되어 전체 체계의 역학을 변화시킬 수 있다. 그러나, 우리의 상식과는 달리, 이것이 반드시 부정적인 것만은 아니라는 사실을 아는 것은 매우 중요하다. 왜냐하면 혼돈 가운데 어떤 것들은 매우 창조적인 것이 될 수 있기 때문이다. 예를 들어, 뇌는 계속적으로 혼돈상태에 있는 신경 망들을 가지고 있다. 이러한 이유 때문에 신경 망들은 그 속으로 입력되는 매우 정교하고 미세한 변화에 반응할 수 있다. 거의 혼돈상태에 가까운 인간의 의식 활동이 창조성의 원천이 될 수 있다는 사실은 매우 고무적이다. 과학자, 예술가, 시인 등은 종종 극도의 혼돈상태 속에서 그리고 그들의 생애가운데 가장 스트레스가 많았던 시기에 매우 훌륭한 아이디어나 위대한 영감을 얻은 경우가 많다. 이러한 예들은 혼돈상태가 오히려 새로운 질서로 나아갈 수 있는 창조적 전환의 가능성을 지니고 있음을 보여주고 있다.

물론 혼돈은 희망뿐만 아니라 위험도 동시에 내포하고 있다. 혼돈상태에 있는 체계는 작은 변화에도 매우 민감하다. 그리고 이러한 변화가 전혀 예기치 않았던 해로운 결과들을 가져올 수도 있다. 예를 들어, 내가 사용한 적은 양의 에어졸 스프

레이 가스가 그다지 중요한 것 같지 않아도 그것이 지구를 뒤덮고 있는 온실 가스를 증가시킬 수 있다. 그리고 그 결과 세계의 평균 기온이 상승해서 세계 기상 판도에 엄청난 변화를 초래할 수 있다. 사회 역시 때때로 혼돈의 상태에 빠져들 수 있다. 이것은 무정부 상태가 아니라 작은 움직임에도 극도로 민감한 상태로서 변화의 서곡이라고 할 수 있다. 혼돈상태에 있는 사회는 모든 미세한 변동, 예컨대 새로운 생각, 새로운 운동, 새로운 사고방식과 행동양식 등에 특히 민감하다. 이러한 관점에서 사회의 혼돈상태는 인간에게 자유, 즉 사회구성원들에게 그들이 속해 있는 구조와 제도들을 변화시킬 수 있는 자유를 제공해 줄 수 있다.

이처럼 혼돈상태가 제공하는 두 가지의 가능성이 공존하는 곳이 바로 혼돈의 가장자리(edge of chaos)이다. 케스틀러(A. Koestler)는 이것을 무질서에서 질서로 넘어가는 길목으로 그리고 새로운 질서를 형성하는 자리로 보고 있다(Koestler, 1990). 달리 말하자면, 질서가 무너져서 극도의 혼란 상태로 치달기 전에 새로운 방향으로 질서를 잡아주는 자리가 바로 혼돈의 가장자리이다. 예상할 수 없는 혼돈과 규칙적인 변화 사이에 존재하는 것이 혼돈의 가장자리이며, 이것은 질서를 창조하는 데 매우 중요한 역할을 한다. 혼돈의 가장자리는 혁신성을 가지고 있으면서도 안정성을 유지하는 장소이고, 투쟁과 변혁의 장이기도 하다. 그 곳에 지나치게 가까이 가면 체계가 소산되고 분해될 위험이 있는 반면에, 반대로 지나치게 멀어지면 경직과 획일화에 발목이 잡혀 체계가 발전할 수 있는 창조적 기회를 얻지 못할 수도 있는 절묘한 균형점이다.

VI. 자기조직화이론

1. 소산구조

프리고진(I. Prigogine)의 연구 활동에 토대가 되었던 브뤼셀 학파(Brussels School)는 체계의 변화를 설명할 수 있는 참신하고 포괄적인 이론을 제공하였는데, 이는 복합체계에 관한 논의에서 간과할 수 없는 매우 중요한 이론적 기반이 되고 있다. 이들에 따르면, 기계론에 근거한 과학적 견해는 우리가 접하는 대상 가운데

데 극히 일부에 불과한 폐쇄체계의 변화를 설명하는데 적합할 뿐이다. 오히려 우리가 관심을 갖는 대부분의 체계들은 환경과의 상호작용을 통해 물질-에너지 및 정보를 교류하는 개방되어 있는 영역이나 개방체계라는 점에서 기계론적 분석이 지닌 타당성은 제한적일 수밖에 없는 것이다. 프리고진은 생명체나 사회체계와 같은 개방체계들은 종래의 폐쇄된 기계론적 개념에 기초해서는 이해할 수 없다는 점을 분명하게 보여주고 있다.

개방체계의 중요성에 대한 인식과 함께 또 한가지 주목할 것은 대부분의 체계들이 질서정연하고 안정된 평형상태에 있기보다는 변화와 무질서 그리고 혼돈의 과정을 겪는 비평형 상태에 놓여 있다는 점이다. 프리고진에 의하면, 모든 체계는 그 속에 보다 작은 하위체계들(subsystem)을 포함하고 있으며 이 미세한 체계는 계속해서 요동의 상태에 있다. 그러나 어느 순간에는 이와 같은 작고 단순한 요동 상태가 상상과 예측을 초월하는 위력을 발휘하고 적극적 환류(positive feedback) 과정을 통해 증폭됨으로써 기존의 구조나 조직을 파괴할 수 있다. 이러한 과정을 거쳐 체계는 과거와는 다른 새로운 상태로 전환될 수 있는데, 이것이 바로 체계의 자기조직화 과정을 설명하는 프리고진의 이론적 토대가 되고 있다.

프리고진은 체계가 질적인 변화의 가능성을 갖는 순간을 특이점(singular point) 또는 두갈래치기점(bifurcation point)이라고 명명하고 있다. 그런데 그 순간에 체계가 어느 방향으로 변화될 것인가를 예측하는 것은 근원적으로 불가능하다(Prigogine & Nicolis, 1977). 즉, 두갈래치기점에 도달한 체계가 극도의 혼돈상태로 나아갈지 아니면 보다 새롭고 보다 높은 수준의 질서 또는 구조를 띤 상태로 변환될 것인가는 예측할 수가 없다. 여기서 후자로의 변환이 가능한 물리 또는 화학적 구조를 소산구조(dissipative structure)라고 부른다. 프리고진이 제시한 소산구조는 일반적으로 비평형 상태의 두갈래치기점에서 새로운 질서가 발생하는 경로에 있는 체계의 일시적인 생산적 구조를 의미한다(Prigogine & Stengers, 1984, p. 157). 소산(消散)이라는 말을 쓰는 이유는 보다 단순한 구조의 안정상태를 유지하는 것과 비교해 볼 때, 체계 변환 과정에서 훨씬 많은 에너지가 소요되기 때문이다.

요컨대, 프리고진은 하위체계들로 구성된 모든 체계들이 하위체계들의 끊임없는 요동상태 속에 놓여 있다고 전제하고 있다. 그러다가 어느 순간에 작고 단순한 요

동이 때로는 엄청난 위력을 가질 수 있으며, 그 결과가 적극적 환류 루프를 통해 환류됨으로써 앞서 존재하던 체계의 구조나 조직을 완전히 파괴할 수 있는 것이다. 이러한 대변혁의 순간을 거쳐 체계는 보다 높은 수준의 질서 또는 구조로 변환될 수 있는데, 이러한 질서 혹은 구조가 소산구조이다. 이처럼 두갈래치기점에서 체계가 보다 높은 수준의 질서 상태로 나가는 것이 가능한 근거를 프리고진은 자기조직화(self-organization)의 원리에서 찾고 있다. 즉, 비평형 상태의 체계는 이른바 자기조직화 과정을 통하여 무질서와 혼돈상태로부터 자발적으로 벗어날 수 있다는 관점이다.

프리고진은 위와 같은 자기조직화의 과정을 보다 분명하게 하기 위해서 체계를 전통적인 분류방식이 아닌 새로운 분류방식으로 나눌 것을 제안하고 있다. 평형과 비평형의 개념을 사용하면 개방체계는 3가지 상태로 구분될 수 있는데, 평형상태(equilibrium), 평형 근방의 상태(near equilibrium), 평형에서 멀리 떨어진 상태(far from equilibrium)가 그것이다(Prigogine & Stengers, 1984). 평형상태의 체계는 열적 평형을 이루고 있으며 따라서 하위체계들은 무작위적으로 움직인다. 평형 근방의 상태는 하위체계들 사이에 작은 차이가 존재하지만 원래의 안정상태로 되돌아 갈 수 있다. 수학적으로는 이것을 선형 비평형(linear equilibrium) 상태라고 부른다. 평형으로부터 멀리 떨어진 상태에는 하위체계들 사이에 역동적인 상호작용이 나타나기 때문에 이것은 비선형 방정식으로 표시된다. 따라서 물질-에너지와 정보의 흐름이 어떤 임계 범위를 넘어서게 될 때 비선형적 상호작용이 나타나게 되고, 그 결과 체계 전체적으로는 새로운 구조나 질서가 자연 발생적으로 출현한다. 이것이 위에서 살펴본 소산구조이다.

여기서 중요한 사실은 평형에서 멀리 떨어진 상태, 즉 비선형 비평형(nonlinear equilibrium) 상태에서는 아주 미세한 섭동이나 요동작용이 거대한 위력을 가지고 환류됨으로써 기존의 구조와 조직을 파괴할 수 있다는 점이다. 그리고 이러한 관점은 물리 화학의 범주를 넘어 모든 종류의 질적·혁명적 변화를 이해하고 설명할 수 있는 발단이 되었다.²⁾ 평형에서 멀리 떨어진 상태에서의 비선형적

2) 물리 화학적 현상 가운데서 볼 수 있는 전형적인 소산구조의 예로는 베르나르 대류와 베르나르 세포, 화학시계, 벨루소프-자보틴스키 반응(BZ 반응), 레이저 등을 들 수 있다. 이에 대한 간단한 설명은 김용정·김동광 역, F. 카프라저, 「생명의 그물」, 서울: 범양사출판부, 1998, pp. 121-129 참조.

상호작용 그리고 이들의 환류 과정에 대한 연구에서 비롯되는 통찰들은 적어도 사회·경제 등 인간 체계에도 유추하여 적용될 수 있다는 점에서 의미가 매우 크다. 따라서 사회 변동, 경제 위기, 혁명, 패러다임의 변화 등에 대한 분석이 요동, 환류 과정, 두갈래치기, 소산구조, 질서의 발현, 진화 등과 같은 관점에서 새롭게 해석될 수 있게 된 것이다(변중헌, 1995, p. 32).

2. 요동을 통한 질서

19세기의 평형 열역학에서 비가역적인 과정들은 연구할 가치가 없는 주제로서 예외적인 것으로 취급되어 왔다. 그러나 오늘날 이러한 상황은 완전히 바뀌었다. 이제는 평형으로부터 멀리 떨어져 있는 상태에서만 새로운 형태의 구조가 자발적으로 출현할 수 있음이 확인되었다. 즉, 비선형 비평형 상태에서 체계는 열적 혼돈이나 무질서로부터 어떤 질서있는 구조로 변환될 수 있는 것이다. 안정, 평형, 선형이 아니라 비선형, 비평형, 불안정, 요동 등이 소산구조의 출현 및 체계의 진화를 규명하고 설명할 수 있는 중심 개념들이 되고 있는 것이다.

프리고진은 평형으로부터 멀리 떨어진 비평형 상태에서만 소산구조의 자기조직화 과정을 통하여 체계의 자발적인 발전이 가능하다고 보고 있다. 이것은, 앞에서 살펴본 바와 같이, 비평형 상태의 체계가 체계 내부의 엔트로피 증대에도 불구하고 환경으로부터 물질-에너지 및 정보를 받아들임으로써 자신을 새롭게 조직화해 나간다는 의미이다. 따라서 비선형 비평형 체계에서 나타나는 구조적 질서의 증가는 필연적인 자기조직화 과정으로 이해할 수 있다. 즉, 평형으로부터 멀리 떨어진 상태의 체계는 환경으로부터 물질-에너지 그리고 정보를 받아들이고 체계의 엔트로피를 체계 밖으로 배출함으로써 내부 질서를 고도화해 나가는 복합적 적응체계로서 기능하는 것이다.

자기조직화 과정을 가장 잘 보여주는 것이 바로 생명체의 성장이다. 인간을 포함해서 모든 생명체는 자기조직화를 이루고 있다. 그 중에서 세포 분열은 가장 적절한 예라고 할 수 있다. 모든 생명체는 세포분열을 거듭하면서 스스로 새로운 단계를 발생시키고 분화해 나가는 데, 이것이 자기조직화의 전형이다. 물론 이와 같은

생명체의 자기조직화 과정은 물리 체계의 그것과는 다르다. 이들은 모두 물질적인 분자로 구성되어 있으며 새로운 구조를 만들어 나간다는 점에서는 공통적이지만, 자기조직화에 이르는 과정에는 미묘한 차이가 있다.

물리체계의 자기조직화는 넓은 의미의 질서화 과정으로서 하위체계들 사이의 협동효과에 의해서 발생한다. 반면에, 생물체나 사회체계 등의 자기조직화는 하위체계들 사이에 서로의 변화를 제어하는 상호작용이 이루어진다는 점에서 차이가 있다 (김용운, 1999, p. 114). 이러한 이유 때문에 생물의 진화와 사회의 발전과정이 다양할 수 있는 것이다. 이렇듯 자기조직화는 매우 넓은 의미를 지니고 있다. 왜냐하면 이것은 물리체계를 비롯해서 생명체와 사회구조 및 일상 생활에 이르기까지 폭넓게 접할 수 있는 현상이기 때문이다. 예컨대, 출퇴근시 사람들의 움직임에서도 자기조직화의 현상을 찾아볼 수 있다. 무수한 사람들이 바쁘게 움직이고 있지만 서로 부딪치지 않으면서, 즉 무질서 상태에 빠지지 않으면서 저절로 하나의 흐름을 형성하게 되는 데, 이것 역시 하나의 자기조직화 과정이라고 할 수 있다.

프리고진의 자기조직화이론은 체계 내부의 대단히 작은 요동에 의해 거시적인 체계의 전체적인 상태가 극적으로 변화될 수 있다는 사실을 보여주고 있다. 이것은 비선형 비평형 상태에서의 요동의 중요성을 전제하고 있는 것이다. 이처럼 체계가 요동을 통해서 보다 구조화된 질서를 발전시켜 나간다고 보는 것이 요동을 통한 질서의 원리(principle of order through fluctuation)이다(Prigogine & Stengers, 1984, p. 178). 이것은 비가역적인 과정에 기초한 것으로 체계가 새로운 질서와 짜임새를 보이게 되는 자발적인 자기조직화 과정을 다루고 있다.

프리고진은 요동을 통한 질서의 원리가 물질에서부터 생명체, 사회체계 등에 이르기까지 모든 수준에서 작용하고 있다고 보고 있다. 실제로, 요동을 통한 질서의 원리는 인간체계에 관한 연구에서도 경험적으로 발견되고 있는 데, 그 기본적 틀은 물리체계와 동일하다(이용필, 1999, pp. 138-141). 즉, 높은 엔트로피로 질서 상태에 다다른 체계는 물질-에너지 및 정보를 받아들임으로써 요동하게 되며, 결국 새로운 역동적 상태로 전환하게 되는 것이다. 새로운 체계 상태의 초기에는 엔트로피 생산이 매우 높다. 왜냐하면 역동적인 체계에 상응하는 새로운 구조를 형성하고자 하는 목적과 내적으로 조화를 이루기 때문이다. 그러나 같은 환경 속에서 다른 체계들과 경쟁하게 되면서부터는 경제적인 기준에 따라서 엔트로피 생산이 최소화

된다. 이러한 현상은 물리체계와 인간체계에 동일한 형태로 나타난다.

이렇듯 소산구조를 통한 자기조직화 과정은 모든 체계의 진화를 이해할 수 있는 의미있는 수단이 될 수 있는 것이다. 말하자면, 자기조직화이론은 체계의 성질에 의해서 규정된 경계를 초월하여 체계의 변화를 규명하는 일반이론의 가능성을 지니고 있는 것이다. 이러한 맥락에서, 얀츠(E. Jantsch)는 비평형 개방체계의 변환 과정을 요동을 통한 질서의 원리로서 파악하고 이것이 모든 체계의 진화론적 과정을 설명할 수 있는 기본적인 메커니즘이 될 수 있다고 보았다(Jantsch, 1975, p. 37). 적어도, 비평형 열역학의 이론적 가정에 기초한 프리고진의 요동을 통한 질서의 원리는 체계의 변동과 전환 과정을 규명할 수 있는 중요한 토대라고 할 수 있다. 이것은 또한 복합적인 체계의 역동적이고 계기적인 변동 과정에 대한 모델을 정립하는 데 유용한 출발점을 제공하고 있는 것이다.

VII. 맺음 말

복합성은 21세기의 학문을 지배하는 키워드가 되고 있다. 하지만 이 주제가 간직하고 있는 개념적 혁명성과 폭발적 설명력을 인정하면서도 복합성을 다룰 수 있는 명확한 틀이 정립되지 않고 있다는 사실은 우리를 매우 곤혹스럽게 하고 있다. 과연 모든 복합체계를 관통하는 일반이론은 존재하는가 그리고 그것을 밝혀낼 수 있는가? 우주와 자연 그리고 인간과 사회에 내재된 복합성의 수수께끼를 풀어줄 수 있는 마법의 기준(magic criterion)은 존재하는가? 복합체계 사고나 복합성 과학은 이와 같은 질문에 답하고자 하는 지금까지의 노력이라고 할 수 있다.

복합체계 사고는 복합성의 깊숙한 곳에 있는 단순함을 해명하고자 한다. 요컨대, 현상의 복합성은 심연의 단순성에서 비롯된다는 것이 복합체계 사고의 출발점이다. 하지만 그것은 동시에 근대 과학이 터하고 있는 요소환원주의에 대한 철저한 반성에서 시작하고 있다. 본 논문 역시 근대 과학은 복합성의 문제를 다룰 수 없다는 전제에서 출발하였다. 근대의 기계론적 세계에서 복합성은 귀찮거나 예외적인 것으로 취급되어 왔다. 복합성에 대한 인식의 전환은 1970년대 이후에 활발하게 전개된 혼돈이론과 비평형 열역학의 자기조직화이론에서 이루어졌다. 이들 이론은 질서

와 혼돈을 고정된 정적인 주제로서 따로따로 취급하지 않고 이들 사이의 역동적인 관계를 밝혀냄으로써 복합체계 사고의 기반을 마련하였다.

복합체계 사고는 지금까지 세계를 규정하고 틀 지워온 서구의 근대 과학을 뿌리에서부터 변혁시킬 수 있는 가능성을 보여주고 있다. 복합성은 부분에 대한 이해를 통해서는 결코 파악할 수 없다는 것이 그 출발점이다. 적어도 복합성은 복합성의 눈으로 보아야 한다는 것이 복합체계 사고가 던지는 당위적 요청이다. 더욱 중요한 것은 복합체계 사고가 수학과 과학의 범주를 넘어서서 인식론적 패러다임의 전환을 수반한다는 점이다. 따라서 복합체계 사고는 사물을 보는 우리의 시각과 사회의 존재양식까지도 변화시킬 수 있는 것이다. 이것은 그야말로 대전환이 아닐 수 없다. 그것이 얼마나 절릴지 모르지만, 우리가 그러한 대전환의 길목에 서 있는 것은 분명해 보인다. 그것을 기회의 창으로 전환시킬 수 있는 것은 우리 자신의 몫이다.

복합체계 사고는 복합성의 신비를 풀 열쇠를 찾아내려는 지적 도전이며, 새로운 과학의 방법론을 확립하려는 인간의 야심이자, 새로운 문화 발현(emergence)의 전조라고 할 수 있을 것이다. 매우 보수적인 물리학자 가운데 하나인 페겔스(H. Pagels)의 다음과 같은 지적은 복합성과 복합체계 사고가 왜 중요할 수밖에 없는가에 대한 지극히 현실적이지만 결코 간과할 수 없는 측면을 단적으로 보여주고 있다(Pagels, 1988): 과학은 미시의 우주와 거시의 우주를 탐구해 왔다. 아직까지 탐구되지 않은 처너지는 복합성이다. 복합성의 과학을 자기 것으로 만드는 국가나 민족은 다음 세기의 경제·문화·정치에서 강력한 힘(super power)을 얻을 수 있을 것이다.

◆ 참고 문헌 ◆

- 김용운. 1999. 「카오스의 날갯짓」, 서울: 김영사.
- 김용정·김동광 역. 1998. F. 카프라 저, 「생명의 그물」, 서울: 범양사출판부.
- 변종현. 1995. "제5공화국 정치체계의 민주적 이행과정 연구", 서울대학교 대학원 박사학위 논문.
- 변종현. 1999a. "민주적 정치체계의 발전과정에 관한 체계론적 접근의 적실성", 제주교육대학교 논문집 제28집, pp. 147-179.
- 변종현 역. 1999b. E. 라즐로 저, 「비전 2020」, 서울: 민음사.
- 안동립 역주. 1998. 「장자」, 서울: 현암사.
- 이용필. 1985. 「정치체계 - 구조와 기능」, 서울: 교육과학사.
- 이용필. 1999. 「사회과학연구와 새로운 패러다임」, 서울: 서울대학교 출판부.
- Ackoff, R. 1981. *Creating the Corporate Future*, New York: Wiley.
- Bailey, K. 1990. *Social Entropy Theory*. New York: State University of New York Press.
- Bailey, K. 1994. *Sociology and the New Systems Theory*. New York: State University of New York Press.
- Berrien, K. 1968. *General and Social Systems*, New Brunswick: Rutgers University Press.
- Bertalanffy, L. 1956. "General Systems Theory," *General Systems* 1: 1-10.
- Bertalanffy, L. 1968. *General Systems Theory*, New York: George Braziller.
- Boulding, K. 1968. "General Systems Theory: The Skeleton of Science," in *Modern Systems Research for the Behavioral Scientist* (W. Buckley & A. Rapoport, eds.), Chicago: Aldine Publishing Co..
- Buckley, W. 1981. "Society as a Complex Adaptive System," in *Systems Behaviour* 3rd ed.(Open Systems Group ed.),

- London: Harper & Row Publishers.
- Byeon, J. H. 1999. "Non-equilibrium Thermodynamic Approach to the Change in Political Systems," *Systems Research & Behavioral Science* Vol. 16, No. 3.
- Byeon, J. H. 2000. "The Implications of a Chaos Theoretic Approach to the Study of Political Systems," *Journal of Applied Systems Studies* Vol. 1, No. 2.
- De Greene, K. 1994. "The Challenge to Policymaking of Large-Scale Systems Evolution, Instability, and Structural Change," *Journal of Theoretical Politics* Vol. 6, No. 2: 161-188.
- Gleick, J. 1988. *Chaos: Making a New Science*, New York: Penguin Books.
- Goerner, S. 1994. *Chaos and the Evolving Ecological Universe*, New York: Gordon and Breach Science Publishers.
- Hall, A. & Fagen, R. 1956. "Definition of System," *General Systems 1*: 18-28.
- Jantsch, E. 1975. *Design for Evolution: Self-Organization and Planning in the Life of Human Systems*. New York: George Braziller.
- Koestler, A. 1990. *The Act of Creation*, New York: Penguin USA.
- Laszlo, E. 1994. *Vision 2020: Reordering Chaos for Global Survival*. Pennsylvania: Gordon and Breach Science Publishers.
- Lilienfeld, R. 1978. *The Rise of Systems Theory: An Ideological Analysis*, New York: John Wiley & Sons.
- Miller, J. 1978. *Living Systems*, New York: McGraw-Hill Book Co.,
- Pagels, H. 1988. *The Dreams of Reason: The Computer and the Rise of the Sciences of Complexity*, New York: Simon & Schuster.
- Parsons, T. & Shils, E. eds. 1951. *Toward a General Theory of*

- Action*, New York: Harper & Row.
- Prigogine, I. & Nicolis, C. 1977. *Self Organization in Nonequilibrium System: From Dissipative Structure to Order through Fluctuation*, New York: Wiley.
- Prigogine, I. & Stengers, I. 1984. *Order out of Chaos: Man's New Dialogue with Nature*, New York: Bantam Books.
- Prigogine, I. 1955. *Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes*, Springfield, Illinois: Charles C. Thomas.
- Stewart, I. 1989. *Does God Play Dice?: The Mathematics of Chaos*, Oxford: Basil Blackwell Ltd..
- Young, O. 1968. *Systems of Political Science*, Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall.