

교통분야에 복잡계이론의 적용 가능성 고찰



이종호

1. 기존 교통분석기법의 한계

5년 또는 10년 전의 타당성조사 등에서 예측된 교통량과 최근 개통 후 조사된 교통량의 차이가 매우 심각하여 교통수요예측방법에 대한 논란이 많다. 한 민자유치사업에서는 실제 교통량보다 과대 예측되어 수익성이 없어 관할 시가 보전을 해야 할 형편인 경우도 있으며, 어느 신설 고속도로 구간의 교통량은 과소 예측되어 개통하자마자 체증이 발생하는 경우도 있다. 두 경우 모두 정책결정자에게는 큰 부담이 아닐 수 없다. 결국 그 책임은 교통계획가에게로 돌아온다. 이러한 논란은 사용되고 있는 현재 수요예측 기법과 자료의 한계성을 정책결정자들이 충분히 이해하지 못하는 한 계속 될 지도 모른다.

전통적 교통분석기법들은 자연과학이나 사회과학에서도 흔히 볼 수 있는 분석방법과 같이 먼저 대상 시스템을 지배하는 규칙 또는 성향(선형관계, 정규분포 등)을 가정한다. 즉, 규칙을 가정한 후 실험이나 조사를 통해 증명하고, 특정 상황을 위한 모형개발에 적용한다. 개발된 모형들은 각종 의사결정과정에 필요한 예측, 진단, 그리고 제어에 사용된다. 이와 같은 분석 방법은 상의하달(top-down)식 접근방법이다. 분석 자료의 한계성은 보다

상세한 자료의 수집으로 어느 정도 극복이 되겠지만, 분석 기법의 한계성은 근본적 접근 방법이 변하지 않는 한 그렇지 못하다.

최근 10여년 동안 물리학, 시스템공학, 컴퓨터공학, 생물학, 고고학 분야 등 다양한 분야에서 복잡계(複雜系, complex system)에 대한 활발한 연구가 진행되고 있다. 기존의 이론들로서 설명할 수 없는 부분을 복잡계 이론으로 증명하려는 시도가 이루어지고 있다. 교통공학 분야도 교통시스템도 하나의 복잡계로 보고 해석하기 위한 개념과 기법들이 도입되고 있다.

본 글에서는 먼저 복잡계가 무엇이며, 어떤 특성들을 가지고 있으며, 이 특성들이 교통시스템에서도 존재하는지 논한다. 그리고 복잡계 이론의 적용 사례를 살펴보고, 특히 교통분야에서의 적용 사례와 그 가능성을 고찰해 보기로 한다.

II. 복잡계의 특성

복잡계를 한 마디로 정의하기가 용이하지 않다. 아직 정의를 내릴 만큼 명확한 개념도 아니다. 문헌마다(요시나가 요시마사(1997), 다사카 히로시(1997), 시오자와 요시노리(1999), 브라이언 아서 외(1997), 스티브 존슨(2004)) 복잡계에 대해 다양한 정의(설명)를 내리고 있음을 볼 수 있는데, 아래는 그들 중에서 발췌한 것들이다.

- 무수한 구성 요소(agent)로 이루어진 집단으로 각 요소가 다른 요소와 끊임없이 상호작용(학습, 진화, 적응)을 함으로 전체적으로는 각 부분의 움직임의 총화(總和) 이상으로 무엇인가 독자적인 행동(創發: emergence)을 보이는 시스템
- 병렬로 작동(parallel processing)하는 수많은 요소의 네트워크를 가지는 시스템
- 시스템의 제어가 고도로 분산되어 있는 시스템
- 수많은 자기 조직화(self-organization)를 하는 시스템
- 미리 설정된 가정 또는 예정표에 의한 수동적이 아닌 시스템 자체의 얻어진 경험에 의해 능동적으로 움직이는 시스템
- 새로운 가능성이 끊임없이 시스템에서 자발적으로 생성(創發: emergence)

되는 시스템

- 요소분해기법(reductionism)으로는 전체를 파악할 수 없는 시스템
- 개개 요소의 반응은 결정론적이어서 단순한 규칙을 따르고 있어도 전체로서는 그와 같은 부분의 화(和)로는 환원할 수 없는 행동을 보이는 시스템
- 카오스이론(반복되지 않음, 나비효과 등)으로만 설명되는 시스템
- 구성요소가 비선형적인 특성을 가지면서 복잡하고 예측하기 어려운 변화를 보이는 시스템

이와 같이 복잡계에 대한 정의들이 다양하지만 이들을 분류하여 정리하여 보면 다음과 같은 몇가지의 특성들로 요약될 수 있다.(다사카 히로시(1997))

○ 전체성(全體性):

전체를 일단 분할하면, 분할된 부분으로 전체를 복원할 수 없다. 즉, 전체를 분할함에 따라 중요한 무엇인가를 상실하게 된다.

○ 창발성(創發性):

각 요소의 자발성이 전체의 질서를 낳는다. 구성 요소에는 없는 특성이나 행동이 전체에서 돌연히 출현한다.

○ 공명성(共鳴性):

공명이 자기조직화(self-organization)를 촉진하며 포지티브 되먹임(Positive feedback 또는 increasing return)이 존재한다. 또한 비선형성이 강한 현상에서 마이크로의 흔들림이 매크로의 거동(舉動)을 지배한다.

○ 공진화성(共進化性):

부분과 전체가 서로 영향을 주고받으면서 함께 진화되어간다. 즉, 상의하달(top-down)과 하의상달(bottom-up) 접근이 공존한다.

○ 초진화성(超進化性):

진화의 프로세스도 함께 진화한다.

○ 일회성(一回性):

진화의 미래는 예측하기 어렵다. 즉, 미래는 지속적으로 창조된다.

Ⅲ. 교통시스템도 복잡계

복잡계의 예는 우리 주변에서 일상생활에 흔히 접하는 것들로, 예측하기 어려운 기상(氣象), 주식시세, 지진과 토네이도, 고도의 집단 능력을 가지고 있는 개미집단(ant colony)과 벌집단(bee colony), 군무(群舞)를 만들어 내는 새떼와 물고기떼, 배일에 싸인 인간의 뇌와 면역시스템, 그리고 자기조절능력이 잠재되어 있는 우리가 살고 있는 도시 등 다양하다.

앞에서 열거한 복잡계의 특성이 교통시스템에서도 존재하고 있음을 우리는 유의할 필요가 있다. 새로 개통된 도로로 인하여 과거에 없었던 통행 수요(induced demand)가 발생하는 현상(전체성 존재), 미세한 교통사고나 운전자의 하찮은 운전실수로 돌연히 나타나는 교통체증현상(창발성과 공명성 존재), 개인은 교통정책변화에 지속적으로 적응·학습하면서 통행을 유발하며 개인의 통행행태변화는 교통정책에 다시 영향을 주는 현상(공진화성 존재), 교통시스템을 진화시키는 교통정책도 지속적으로 시스템에 적용하며 진화하는 현상(초진화성 존재), 도로 한 지점의 시간당 통행량이 매 순간 변하는 현상(일회성 존재) 등, 몇 가지 단편적인 현상들만을 보더라도 교통시스템도 하나의 복잡계임을 부인할 수 없다.

이와 같이 교통시스템을 복잡계 시각에서 조명하면 기존의 교통정책들 중에서 지금보다 더욱 중요시 되어야 할 분야들이 눈에 띄게 된다. 시스템의 각 요소들의 역할이 전체 시스템에 미치는 영향이 매우 크기 때문에 교통시스템의 한 요소인 개인의 교통안전 및 운전 교육의 중요성이 부각된다. 또한 TV 등 미디어를 이용한 지속적인 교통관련 홍보와 더불어, 보다 다양하고 정확한 교통정보의 제공은 각 개인의 합리적인 통행행태를 취하게 하여 전체 시스템의 불안정을 최소화 한다. 신속한 유고관리(有故管理)는 예측하기 어려운 창발현상을 극소화하여 시스템의 평형을 곧 되찾을 수 있게 한다. 또한 장기적으로 일관성 있는 교통정책은 개인의 지속적인 학습 진화에 도움이 되어 개인의 통행행태의 선진화를 유도하며, 결국 전체 교통시스템의 선진화를 촉진한다.

IV. 복잡계 이론의 적용

복잡계 이론은 이미 1990년 후반부터 컴퓨터공학, 생물학, 사회학 분야에서 활발하게 연구되고 있다. 그러나 교통 분야에서 복잡계 이론의 적용은 아직 극히 제한적이다. 본 글에서는 생물학과 사회학 분야의 관련 연구를 소개하고, 교통 분야에서 최근 연구가 활발해 지기 시작한 에이전트기반모형(복잡계를 해석하기 위한 기법 중 하나)에 대해서 간략히 소개¹⁾한다. 반면, 교통 및 도시 분야에서 복잡계 이론을 적용한 시뮬레이션 프로그램들에 대해 좀 더 상세히 설명한다.

1. 생물학 및 사회학 분야

새떼, 매뚜기떼와 물고기떼(swarm) 등도 복잡계이다. 예를 들어 철새인 되새떼를 보면 각 되새는 바로 옆 동료 새의 움직임에 따라 움직일 뿐(local interaction among decentralized components) 되새떼 전체의 움직임은 관심도 없고 알지도 못한다. 그렇다고 되새떼를 인도하는 대장(organizer 또는 coordinator) 되새나 그 무엇이 있는 것²⁾도 아니다. 그러나 각 되새의 이러한 행동으로 전체 되새떼의 매우 정교한 집단움직임(synchronized movements, 창발현상)을 볼 수 있다.(Resnik, 1997)³⁾

지구상에서 이미 수백만 년을 진화해 온 벌, 흰개미(termite) 등의 군집 생활을 하는 곤충들에게서 벌집이나 개미집 등 복잡한 구조물을 손쉽게 만드는 모습을 볼 수 있다.(아주 작은 벌 또는 개미의 뇌 속에 집 전체의 설계도면에 관한 지식이 있을 수 없다는 가정⁴⁾ 하에서는 놀라운 사실이 아닐 수 없다.) 이들은 상호의사소통과 역할분담을 하여 변하는 환경에 유연하게 대처한다. 그들의 집이 자연재해에 의해 파손이 되어도 쉽게 복구하는 모습을 볼 수 있다.

인공생물시스템(artificial life system)으로 잘 알려진 연구로서 개미의

1) 보다 많은 관련 연구 사례는 이종호(2003) 참조

2) 아직 밝혀 지지 않았음.

3) Resnik 외(2001)는 복잡계의 이해를 돕기 위해 Starlogo 프로그램을 개발하였음.

4) 아직 밝혀 지지 않았음.

지점간 최단 거리를 찾는 습성을 이용한 개미시스템(Ant System)도 복잡계 이론을 근거한다. 개미시스템 (Dorigo 외(1997), Bullnheimer 외(1999), 조원경 외(2005))은 외판원문제(traveling salesman problem)와 같이 방문지점(N)수가 증가함에 따라 계산시간이 기하급수적($(N-1)!$)으로 증가하는 최적화문제의 발견적(heuristic)기법으로 연구되고 있다. 또한 Lucic 외(2001)는 벌의 사회성을 이용한 벌시스템(bee system)을 제안하였다. 벌시스템의 주목적은 개미시스템과 같이 노선의 최적해를 구하기보다는 벌떼의 집단적인 사회성(collective bee's intelligence)을 복잡계 시각에서 추적하려는 것이다. 즉, 벌떼의 집단행동(먹이사냥, 적으로부터의 방어, 일의 분담 등)이 어떻게 정교한 벌집을 만들며, 벌꿀을 조달하는지에 대한 의문을 풀기 위한 연구이다⁵⁾.

2. 교통(또는 도시) 분야

1) 에이전트기반모형 (agent-based modelling)

복잡계를 해석을 위한 기법 중 하나가 에이전트기반모형(agent-based modelling)이다. 먼저 분석 대상 시스템의 구성 요소들을 에이전트들로 본다. 여기서 각 에이전트는 시스템 전체와 관련된 자료나 지식(global knowledge)은 가지고 있지 않은 반면, 개별 자료나 지식(localized knowledge)만 가지고 다른 에이전트들과 상호 교류한다. 이 개념을 교통분야에 적용한다면, 작게는 보행자, 운전자, 신호시스템 등이 도시교통시스템의 에이전트들이 될 수 있으며, 크게는 도로, 철도, 공항, 항만시스템을 지역간 교통시스템의 에이전트들로 가정할 수 있다. 또한 이들 시스템의 전반적인 효율성은 에이전트간의 상호교류 및 반응의 결과로 본다.

이 방법은 시스템 전체의 규칙을 가정한 후 접근하기보다는 시스템의 개별 구성요소들의 규칙과 구성요소들간의 상호작용(interaction)을 이해하고 시뮬레이션 함으로서 시스템 전체의 규칙과 성격을 규명해 보고자 하는 하의상달식 방법이다. 예를 들면 교통류에서 개별 운전자는 차량의 가속,

5) <http://www.iwr.uni-eidelberg.de/iwr/comopt/>

감속, 차선변경과 몇가지 규칙을 따르는 운전행태를 보이지만, 이들 운전행태의 집합은 전체 교통류의 다양한 변화를 초래한다.

Burmeister 외(1997))는 미시적 교통류시물레이션을 위해 에이전트기반모형을 구축하였다. 도로구간의 각 차량(또는 운전자)을 에이전트로 가정하였으며, 각 에이전트는 감지기능(sensor)을 통해 자기의 위치, 속도, 가속도에 대한 정보를 습득하며 동시에 주변 차량의 유사 정보와, 도로의 곡선, 구배 등의 도로환경, 기상정보 등을 취득한다. 인식기능(cognition)에서 차량의 가속, 감속, 차선변경 등의 필요성을 판단하여 결정을 하게 되며, 작동기능(actuator)에서는 결정에 따라 운행을 하게 된다. 이들은 이러한 모형에서는 상대적으로 차량의 움직임에 필요한 각종 규칙들의 부여와 수정이 용이하다는 점과 차량들 간의 정확한 정보교환과 상호반응(interaction)의 표현이 가능하였음을 결론으로 제시하였다.

한편 Jiang(1998), Kukla 외(2001), Dijkstra(2002)들은 도시에서 보행교통류의 시물레이션을 위해 에이전트기반모형을 개발하였다. 여기서 보행자와 차량들을 에이전트로 가정하여, 건물, 상점, 박물관등의 도시공간 내에서 보행자와 차량의 움직임을 모형화하였다. 에이전트간의 정보교환 및 상호작용과 동시에 에이전트와 도시공간의 건물, 상점 등의 개체간의 상호작용이 이루어져 통행이 이루어진다. 이 연구에서 각 에이전트의 상호작용의 결과가 어떻게 도시교통류 전체에 영향을 미치는 가를 추적하였다.

2) 복잡계 이론을 적용한 시물레이션 프로그램

(1) TRANSIMS

1970년대부터 본격적으로 연구되기 시작한 활동기반모형(activity-based model)을 기본으로 한 Transportation Analysis and Simulation System(TRANSIMS)은 개개인의 세분화된 통행을 기반으로, 4단계 기법이 기본인 기존 모형들 보다 미시적인 시물레이션이 가능하다. 가구원 개개인의 활동을 기초로 가구나 가구원 자료를 이용하여, 통행을 목적활동에서 파생되는 유발수요로서 다루며, 하루 동안의 지속적인 분석이 가능하여 단기교통수요예측 분석이 용이한 특성을 갖는다.

TRANSIMS는 1990대 말부터 미국의 Los Alamos National Lab에서

개발되어 테스트되고 있으며, 특히 독일에서는 도시 가로망과 고속도로에서의 단기 예측에 적용이 활발하다. TRANSIMS는 활동기반자료입력(population synthesizer), 활동발생(activity generator), 경로계획(route planner), 차량시물레이션(traffic micro simulation), 오염배출량추정(emissions estimator), 결과물표현(output visualizer)의 6개 모듈단위로 구성되어 있다.

4단계모형을 기반으로 하는 프로그램들은 통행자의 통행속성을 준으로 집합화한 값을 활용하여 통행패턴을 추정하는 반면에, 활동기반모형을 채택한 TRANSIMS는 개별 가구원의 활동행태와 개별 차량의 통행 특성을 시물레이션에 반영하기 때문에 통행자의 활동패턴이 실제 상황과 보다 유사하게 모사가 가능하다.

수요측면에서도 TRANSIMS는 가구구성과 가구원 개개인의 활동수를 이용하는 반면 4단계모형을 기반으로 하는 프로그램은 준별로 통합된 유·출입 통행 또는 수단 통행을 수요 예측에 이용하는 차이가 있다. 이러한 차이가 시물레이션 결과에서 많은 상이한 점을 보인다(이승철 외 2005).

TRANSIMS에서는 수많은 운전자(차량)들의 운전행태(타 운전자와의 상호반응 포함)(complex behavior)로 운영되고 있는 도로시스템을 하나의 복잡계로 가정한다. 개별적 차량의 움직임을 Cellular Automata로 모사하고 있다(Nagel 외(1992)). 도로를 일정 길이로 구분한 셀 안에는 1대의 자동차만 점유되며, 차량의 움직임은 셀에서 셀로의 매우 간단한 이동 법칙으로 표현된다. 간단한 이동 법칙에 의한 차량의 움직임(micro movement)은 자기 조직화(self-organization)되어 차량군 전체(macro movement)는 전형적인 교통류의 속성(교통량, 속도, 밀도 간의 관계)을 나타낸다. 또한 앞 셀에 있는 차량의 갑작스런 감속 또는 사고 등으로 인하여 도로망에 나타나는 체증의 확산 현상(창발 현상)과 풀림 현상들이 꽤 잘 모사된다.

(2) SIMCITY⁶⁾

1990년대 초 윌 라이트(Will Wright)가 역사상 게임프로그램 중 최고

6) 2004년에 출시된 SIMCITY 4 Deluxe(by Maxis, Co)의 기능을 참고함.

판매를 기록한 SIMCITY는 복잡계의 주요 특성인 자기조직화, 창발성 개념을 도입한 최초의 게임 프로그램이다. SIMCITY는 도시를 복잡계로 보고 도시의 모든 구성 요소(세포)간의 상호 관계(영향)를 최대한 도시 전체에 담으려는 노력이 엿보인 프로그램이다. 물론 SIMCITY는 게임 프로그램이기 때문에 사용되는 각종 알고리즘, 가정, 그리고 필요한 파라미터들이 공개되지 않고 있지만, 제작진이 간략히 설명하고 있는 프로그램의 주요 구성과 기능들을 근거로 유추하면, 도시는 도시 내의 수많은 요소들 간의 상호 작용으로 형성되고 변해 가는, 즉, 살아 있는 생명체로 접근하고 있음을 알 수 있다.

SIMCITY는 기존의 여타 게임들처럼 시험을 하는 프로그램이 아니다. 사용자는 가상의 도시를 키운다. 그러나 도시의 형태는 우리가 원하는 데로(하향식) 통제되지 않는다. 사용자(game player)가 할 수 있는 것은 도시의 시장(mayor)으로서 주어진 예산 하에서 주거단지, 상업지구 또는 공업지구 등(기타 학교 및 경찰서 등 주요 도시 기반시설 대부분 포함됨)을 만들고, 도로, 지하철 등 각종 교통시설을 건설하는 것이다. 도시 기반 시설들이 만들어지면 사람들(SIMS)이 모이고 이들은 도시 내에서 직업을 가지게 되고 통행을 발생시킨다. SIMS들은 직업에 따라 소득 수준이 다르며, 소득수준에 따라 아침, 저녁으로 출퇴근 시 선택하는 교통수단도 달라진다. 각각의 교통수단은 고유의 네트워크를 따라 움직인다⁷⁾.

도시의 인구가 점점 증가하고 도로에 차량이 늘어나게 되고, 공장과 자동차에서 내뿜는 나쁜 공기가 대기오염을 악화시키게 되면, 시장의 자문위원은 도로의 용량증대와 새로운 교통시설을 건설할 것으로 건의하기도 한다. 또한 도시가 커지면서 예기치 않은 교통사고와 화재가 발생하며 소방차가 출동한다. 심지어 부자동네와 가난한 동네가 구분되어 만들어 지기도 한다. 즉, 도시가 살아서 움직임(물론 utopian city 이지만)을 이 게임은 보여 주고 있다.

도시의 각 세포는 다른 세포와 연결되어 있는 동시에 각 세포들의 행동에 따라 자신의 행동을 바꾸는 세포들의 망, 즉, 하나의 창발적 체계가 이 프로그램에 설계되어 있는 것이다. SIMCITY는 지가(地價)나 대기오염도와 같

7) automata program 기법을 사용함.

은, 현재 도시구획의 상태를 보여 주는 수치들도 제시한다. 실제 도시에서처럼 이들 수치들은 이웃 구획의 수치에 따라 변한다. 알고리즘 자체는 이웃의 상태를 보고 그에 따라 자신의 상태를 변경하는 비교적 단순한 방법이지만 프로그램의 일초에 수천 번의 시뮬레이션은 마치 실제로 살아 있는 것처럼 유동적이고 선명한 변화가 도시 전체에 퍼지는 것이다.

이 게임 프로그램 중 교통계획가의 눈에 띄는 부분은 도시시스템과 그 하부 시스템인 교통시스템의 매우 유기(有機)적인 관계이다. 현재 사용되고 있는 교통수요예측 기법의 취약성을 감안할 때, 새로운 접근방법의 대안으로서 그 시사하는 바가 크다.

도시의 복잡성(complexity)과 형성과정을 학생들에게 이해시키기 위하여 대학교(예, 미국 오하이오 주립대학)의 도시계획시간에 실습 프로그램으로 사용되고 있는 SIMCITY는 동호회 성격의 웹사이트(예, simpolis.com)만 수십 개가 넘는다. 그중 SIMCITY의 현실 적용 가능성이 주제인 사이트에서는 인구 300만명의 가상의 대도시가 구축되어 배포 중이며, 캐나다의 에드몬턴(City of Edmonton) 시의 한 시민은 실제 에드몬턴시와 똑같은 SIMCITY 버전 에드몬턴시를 구축 중이다. 과연 이 구축된 시로 장래 예측된 에드몬턴시와 장래 실제 시의 비교는 자못 기대가 된다.

V. 적용 가능성 및 한계성

교통 분야에서 복잡계 이론의 적용은 타 분야와는 달리 아직 극히 제한적이다. 복잡계를 해석하기 위한 기법 중의 하나인 에이전트기반모형과 관련된 연구들이 주를 이루고 있다.

교통 외 분야, 특히 컴퓨터공학에서의 에이전트기반의 프로그램개발은 아주 효율적인(프로그램의 중복배제, 수정·보완의 용이 등) 우수한 것으로 평가되고 있어 그 적용범위가 급속히 확산되고 있다. 특히 인터넷과 관련된 소프트웨어 에이전트가 다양하게 개발되고 있다.

교통 분야에서 에이전트기반의 접근방법으로는 분산되어 있는 개별교통시스템(에이전트)을 다중(multi) 에이전트시스템으로 연계시켜 역할의 중복을 피하고 상호 보완이 가능토록 하여, 중복투자의 최소화와 개별 시스템

활용의 극대화를 기대할 수 있다. 특히, 각 에이전트의 속성과 에이전트간의 관계들을 분석할 때 가감(加減)하기가 용이하여 모의실험이 수월하다. 다양한 시스템간의 협동과 조화가 필연적인 교통운영과 관제에서 에이전트 기반 접근은 기대할 만하다. 예를 들어, 기존 시스템에 새로운 첨단시스템(예, ITS 등)의 접목 또는 기존 시스템의 하부시스템의 단계적 첨단화를 무리 없이 도입할 수 있을 것이다.

에이전트기반의 알고리즘은 많은 요소들의 상호 작용을 병렬(parallel processing)로 처리하기 때문에 빠른 전산 속도와 대용량의 기억장치를 요구하지만, 향후 컴퓨터기술의 발달로 이 문제는 걸림돌이 되지 않을 것으로 보인다.

그러나 아직 교통 분야에서 에이전트기반 접근에 대한 평가가 미흡하다. 전통적인 접근방법과의 비교는 아직 수리적으로는 용이하지 않다. 특성상 일정기간의 시스템 운영결과로 밖에 비교될 수밖에 없기 때문이다.

또한 복잡계 이론을 근거한 접근 방법들에는 아직 풀어야 할 숙제들이 존재한다. 먼저 개별 요소의 지식에는 전체 시스템에 관한 정보가 없다. 따라서 시스템 전체와 관련된 제약 하에서 시스템 전체의 최적화(global optimum)를 추구하는 경우에는 적합하지 않다. 또한 개별 요소의 미시적 상태와 지식수준에 따라 전체 시스템에 나타나는 결과가 달라진다. 즉, 분석가에 의해서 주어진 개별 요소의 행태와 상호반응의 규칙이 어떻게 시스템 전체에 나타나는 현상에 영향을 미치는지가 명확하게 증명되지 못하고 있다. 아직은 단지 개별 요소들의 다양한 규칙들의 변화시도과정(trial and error)을 거쳐 전체 시스템에 나타나는 현상과의 관계를 유추할 뿐이다. 동시에 개별 요소들의 지식 보유 수준, 요소들 간의 상호반응의 정도, 다양하고 불확실한 상황에서의 대처능력 수준 및 지식습득의 정도 등에 대한 뚜렷한 답을 가지고 있지 못하다.

VI. 맺는 말

오늘날 교통문제의 복잡성은 교통시스템의 더욱 세분화된 하부시스템의 다양화와 상호작용, 그리고 개별 차량 또는 운전자의 행태와 상호작용에서

기인된다고 볼 수 있다. 복잡계의 특성을 지닌 교통시스템 역시 복잡계이다. 그렇다면 복잡계에 걸맞은 접근 전략이 필요하다. 복잡계의 구성 요소의 단순한 통행행태가 전 시스템에 지대한 영향을 미칠 수 있음을 감안할 때, 교통안전교육, 운전교육, 유고관리 그리고 미디어를 통한 지속적이고 일관성 있는 교통관련홍보의 중요성을 새삼 깨닫게 된다.

또한 교통시스템과 같은 복잡계를 대처하는데 있어, 전통적인 상의하달(上意下達) 접근에 한계가 있음을 부인할 수 없다. 본 글에서 소개된 에이전트기반과 같은 접근방법은 기존 방법과는 다른 하의상달(下意上達)과 상의하달 접근이 공존하는 기법이다. 이는 시스템의 개별 구성원인 각 요소의 행태와 요소간의 상호작용에 초점을 둔다. 요소의 행태와 상호작용의 규칙을 변화시킴에 따라 전 시스템에 나타나는 창발현상을 추적한다.

교통분야에 복잡계 이론의 적용은 아직 시작 단계이지만, 기존 접근 방법의 한계성을 뛰어 넘을 하나의 대안으로서 연구 가치가 충분히 있는 주제로 판단된다.

참고문헌

1. 다사카 히로시, 주병갑 옮김(1997), “복잡계 경영” 한국경제신문사.
2. 시오자와 요시노리, 임채성 옮김(1999), “왜 복잡계 경제학인가” (주) 푸른길.
3. 브라이언 아서 외, 김웅철 옮김(1997), “복잡계 경제학” 다이아몬드 하버드 비즈니스 편집부.
4. 스티브 존슨, 김한영 옮김(2004), “이머전스(Emergence)” 김영사.
5. 요시나가 요시마사, 주병갑 옮김(1997), “복잡계란 무엇인가” 한국경제신문사.
6. 이승철과 이종호(2005), “TRANSIMS와 EMME/2를 이용한 활동기반 모형과 4단계 모형의 비교 분석”, 교통정책연구 제12권 제 1호, 한국교통연구원, pp.41~58.
7. 이종호(2003), “교통시스템분석시 에이전트기반모형의 적용”, 대한교통학회지, 제21권 제1호, 대한교통학회, pp.147~156.

8. 조원경과 이종호(2005), "국내택배시스템에 개미시스템알고리즘의 적용가능성 검토", 대한교통학회지, 제23권 제4호, 대한교통학회, pp.81~91.
9. Bullnheimer, B., R. F. Hartl, and C. Strauss(1999), "An Improved Ant System Algorithm for the Vehicle Routing Problem" Annals of Operations Research, 89, pp.319~328.
10. Burmeister, B., A. Haddadi, and G. Matylis(1997), "Application of Multi-Agent Systems in Traffic and Transportation" IEE proceedings Software Engineering, 144(1), pp.51~60.
11. Coveney, P and Roger Highfield(1995), "Frontiers of Complexity", Fawcett Columbine, New York.
12. Dijkstra, J., J. Jessurun, and H. Timmermans(2002), "Simulationg Pedestrian Activity Scheduling Behavior and Movement Patterns using a Multi-Agent Cellular Automata Model: the Amanda Model System" 81th Annual Meeting of Transportation Research Board (CD-ROM).
13. Dorigo, M., and L. M. Gambardella(1997), "Ant Colonies for the Traveling Salesman Problem" BioSystems, 43, pp.73~81.
14. Holland, J(1998), "Emergence from Chasos to Order", PERSUS Books, Cambridge, Massachusetts.
15. Jiang, B.(1998), "Multi-Agent Simulations For Pedestrian Crowds" European Simulation Symposium Simulation Technology Science and Art, pp.383~387.
16. Kula, R., J. Kerridge, A. Wills, and J. Hine(2001), "PEDFLOW: Development of an Autonomous Agent Model of Pedestrian Flow" 80th Annual Meeting of Transportation Research Board (CD-ROM).
17. Lucic, P., and D. Teodorovic(2001), "Bee System: Modeling Combinatorial Optimization Transportation Engineering

- Problems by Swarm Intelligence” In Preprints of the Triennial Symposium on Transportation Analysis TRISTAN IV, Azores, Portugal, pp.13~19.
18. Nagel, K. and M. Schreckenberg(1992), “A Cellular Automaton Model for Freeway Traffic” Journal of Physics I 2 pp.2221~2229.
 19. Resnick, M.(1997), “Turtles, Termites, and Traffic Jams, Explorations in Massively Parallel Microworlds” The MIT Press.
 20. Resnick, M, V, Colella, and E, Klopfer(2001), “Advantures in Modelling, Exploring Complex Dynamic Systems with Starlogo”, Teachers College Press, Columbia University.
 21. SIMCITY(2004) 4th Edition, Maxis, Co.
 22. TRANSIMS(2001), Documentation, Los Alamos National Laboratory.