

경제학에서의 행위자기반모형 : 소개와 전망

조남운*

2016년 2월 15일

요약

본 연구에서는 행위자 기반 모형을 소개하고 방법론적 특성에 대해 기술한다. 행위자 기반 모형은 직관적이고 유연한 특성을 가지고 있어 전통적인 양적 분석 방법으로 다루기 어려웠던 주제들을 상대적으로 더 잘 다룰 수 있기 때문에 경제학을 포함한 사회과학 연구자들의 주목을 받아왔다. 경제학에서 행위자 기반 모형은 아직 주된 연구 방법론은 아니지만 관심은 지속적으로 증가하고 있으며, 그 추세는 당분간 지속될 것으로 전망한다.

핵심어: 행위자 기반 모형

1 서론

행위자 기반 모형 (agent-based model, 이하 ABM)은 미시적 토대로부터 발생하는 거시적 패턴 (emergent macro pattern)을 분석하기 위해 제안된 시뮬레이션 기반의 상향식 (bottom-up) 계산 모형이다. ABM 이외에도 동일한 개념이 세포 자동자 (cellular automata), 다중 행위자 모형 (multi-agent model), 개별자 기반 모형 (individual-based model, IBM) 등의 이름으로도 지칭하기도 한다. 초기 발전 단계에서 자연과학과 사회과학의 다양한 학계에서 검토되어왔기 때문이다. 또한 ABM은 시뮬레이션의 형태로만 구현되기 때문에 모형 대신 시뮬레이션을 붙여 지칭하기도 하고 (agent-based simulation, ABS) 둘을 모두 붙여 지칭하기도 한다. (agent-based model and simulation, ABMS) ABM을 사용한 경제학 연구는 행위자 기반 계산 경제학 (agent-based computational economics, ACE) 이라고도 한다. ABM은 그 자체의 유연성으로 인해 복잡한 현상도 모형으로 구현할 수 있기 때문에 전통적인 수리 모형의 적용이 어려운 문제에 직면한 연구자들의 관심을 점점 더 많이 받고 있다.

* <mailto:namun@snu.ac.kr>. 2016 경제학 공동 학술 대회 발표 논문. 본 연구는 제원연구재단의 지원을 받아 수행되었음.

하지만 아직 경제학계에서 ABM은 보편적으로 사용되는 방법론이 아니기 때문에 경제학에서의 ABM에 대해 소개하고 개괄한 국내 문헌은 찾아보기 어려운 상황이다. 이에 본 논문은 ABM이 무엇인지 이해하고 자신의 질문을 해결하는데에 적합한 방법론인지 판단하는 데 도움을 주는 것을 일차적인 목표로 한다. 다른 하나의 목표는 ABM의 한계를 명확히 하는 것이다. ABM이 유연한 모형이긴 하지만 그렇다고 해서 어떤 경우에도 적절한 방법론으로 볼 수는 없기 때문이다.

2 미시적 토대와 거시적 패턴

양적(quantitative) 과학에서 모형(model)이란, 연구하고자 하는 대상을 일련의 변수들과 함수들로 축약(reduce)하여 이론적으로 분석할 수 있도록 만든 지적 도구이다. 즉, 연구 대상을 수학적으로 기술하고, 문제를 푼 뒤, 다시 연구 대상에 적용하는 것이다. 경제학 연구에서 사용하는 수리적 모형들 역시 고찰하고자 하는 경제학 현상 등을 일련의 변수들과 함수들로 표현하는 것이라고 일반화할 수 있을 것이다. 이를 절차적으로 다시 기술해보는다면 크게 세 단계로 나눌 수 있다.

(1단계) 연구 대상의 모형화

(2단계) 모형의 해석

(3단계) 모형에서의 해석 결과를 대상에 다시 적용

가령 미시경제학에서 다루는 소비자이론을 예로 든다면, 소비자 i 가 자신의 소득을 사용하여 만족감을 최대화하려는 현상은 아래와 같은 최적화 문제로 해석한다. 변수 \mathbf{x} 는 상품의 양을 의미하며 (commodity bundle) \mathbf{p} 는 각 상품의 가격 (price vector) 이고, I_i 는 그 소비자의 예산이며, U_i 는 소비량에 대해서 더 만족감이 높은 소비량에 더 높은 값을 부여해주는 효용 함수 (utility function) 이다.

$$\arg \max_{\mathbf{x}} U_i(\mathbf{x}) \quad s.t. \quad \mathbf{p} \cdot \mathbf{x} \leq I_i$$

위와 같이 소비자의 만족감을 추구하는 행태를 수학적 최적화 (optimization) 문제로 환원한 뒤, 해를 구하고 이를 통해 현실에서 관찰되는 수요 법칙 등을 설명한다. 실제 소비자들은 상품 소비량에 대해서 직접 위와 같이 계산하여 자신의 최적 소비량을 결정하지는 않지만, 상품시장에서 관측되는 수요와 공급의 관계를 잘 설명하기 때문에 소비자의 행태를 연구하는 많은 문헌들은 위와 같은 최적화 문제의 해로 소비자의 행태를 설명하는 것이다. 일반 균형 이론은 전체 상품 시장에서 수요와 공급의 문제를 위와 같은 방식의 수리적 문제로 환원하여 전체로서의 경제를 미시적 극대화로 설명하기 위해 고안된 것이라고도 볼 수 있다. 실제로 이러한 수리 모형은 전통적으로 경제학과 미시경제학 커리큘럼의 핵심을 이루고 있다.

하지만 경제학 현상 중에는 미시적 최적화 문제로 잘 설명되지 않는 것들이 많다. 거시경제학이라는 분과는 이론적으로 효과적인 분석이 되지는 않지만 긴급한 정책적 의사결정이 필요한 대공황이라는 상황에서 현대 경제학의 주요 분과로 자리잡았다고도 볼 수 있다. (Krugman and Wells (2015)) 이러한 역사적 이유로 거시경제학은 미시적으로 설명할 수 있는 지와 무관하게 관찰되는 현상을 모형화해야 하는 경우가 많다. 미시적 최적화의 결과로 거시 모형을 구성하는 경우 조차도 합리적 기대를 하는 동질적 대표 행위자 (homogeneous representative agent) 를 가정하여 문제를 단순화하는 경우가 대부분이다. (Stiglitz and Gallegati (2011)) 이러한 이유로 거시 모형은 현재의 변수값 근방에서 선형화하여 모형을 구성하고, 통계학적 검증을 통해 모형을 정당화하는 경우가 많다.

이러한 미시경제학과 거시경제학의 관계는 마치 세포생물학이 아직 모든 의학적 과정을 설명해내지 못하는 현 상황에서 발생하고 있는 질병의 해결이 필요할 때, 의학은 비록 아직 근원적인 설명을 하고 있지 못하더라도 그 질병에 대한 최선의 해결책을 임상 실험 등으로 관측한 데이터를 통계학적으로 분석하여 제시하는 것과 유사하다. 거시경제학에서 이질적 행위자들이 제한된 정보를 가지고 경제적 상호작용을 하는 미시적 토대를 사용하지 못하는 까닭은 그러한 상호작용을 모형화했을 때 일반해가 분석적으로 잘 도출되지 않기 때문이다. 거시경제학자인 맨큐는 한 인터뷰에서 거시경제학의 미시경제학적 토대에 대해 다음과 같이 이야기하였는데, 이는 미시경제학과 거시경제학의 관계의 한 단면을 보여준다.

거시적 현상이 수많은 미시적 현상의 총합이라는 점은 틀림없는 사실일 것입니다. 이 의미에서 거시경제학은 불가피하게 미시경제학에 근거를 두고 있지요. 그렇지만 저는 모든 거시경제학이 반드시 미시경제학적 토대에서 출발해야 한다고 확신하지는 않습니다. 하나의 비유를 들어보지요. 모든 생명체는 소립자로 구성되어 있으므로, 모든 생물학은 어떤 의미에서 소립자 물리학의 총합입니다. 그렇지만 그렇다고 생물학의 자연스러운 출발점이 소립자 물리학에서 시작하는 것이고 그 다음에 함께하는 것을 의미하지는 않습니다. IS-LM 모형처럼 거시경제를 연구하는 데 매우 유용한 모형들이 많이 있습니다. 비록 그 모형들이 개인 단위에서 시작해서 형성된 것은 아니지만 말이지요. (Snowdon and Vane, 2009, p.414)

이러한 인식은 미시적 토대에 대한 분석을 통해 거시적 패턴을 설명하는 것이 쉽지 않기 때문이다. 이는 수리적으로 모형을 만들고 해를 근사적으로라도 구할 수는 있지만, 현실적으로 푸는데 지나치게 많은 시간과 자원이 들어가기 때문일 수도 있고, 해를 구할 수 없기 때문일 수도 있다. Axtell (2000)은 수리적 모형을 균형의 존재 증명 가능성과 해를 구할수 있는 가능성에 따라 크게 세 가지로 나누어

각 경우에 ABM이 어떻게 해석에 기여할 수 있는지를 기술한다. 그는 또한 Buss *et al.* (1990)을 T 기 후의 상태를 예측하는 문제에 대해서 거시 모형이 존재하지만, 그 해를 구하는 데 지나치게 많은 시간이나 자원이 소모될 때 효율적으로 예측하는 유일한 방법은 가능한 한 가장 적당한 ABM을 구현하여 시뮬레이션을 하는 것으로 해석하였다.¹

3 ABM의 간략한 역사

행위자들의 자동적인 상호작용을 통해 구성되는 변화하는 체계라는 ABM의 초기 주요 연구는 1960년대 폰 노이먼 (von Neumann)의 세포 자동자 (cellular automata, CA) 연구에서 출발하여 콘웨이 (Conway)의 생명게임 (Game of Life), 셸링 (Schelling)의 분리 모형 (segregation model), 그리고 1980년대 액셀로드 (Axelrod)의 반복 죄수의 딜레마 게임 컨테스트 등이 있다. (Janssen and Ostrom (2006)) 이러한 연구들은 극도로 간단한 행위자들간의 상호작용을 정의하고, 그러한 상호작용속에서 발생하는 패턴이 상호작용만을 고찰해서는 직관적으로 추론하기가 사실상 불가능에 가깝다는 점에 주목한다. 하지만 그러한 흥미로운 결과들에도 불구하고 계산력의 한계로 행위자간의 상호작용은 극도로 단순한 수준에 머물러 있을 수 밖에 없었다.

하지만 1990년대 후반부터 컴퓨터의 극적인 발전으로 행위자 기반모형의 구현이 용이해지면서 ABM을 사용한 연구는 자연과학과 사회과학 전반에서 증가하기 시작했다. 이러한 경향은 한편으로 전통적인 해석적 접근으로는 풀기 어려운 복잡적응계 (complex adaptive systems, CAS)를 연구하기 위한 방법론에 대한 관심과도 깊은 연관이 있다. (?) 이러한 ABM에 대한 관심의 증가는 현재도 진행 중이다. (그림 1) ABM을 사용한 연구는 매우 다양한 분야에서 이루어지고 있기 때문에 간단히 정리하기는 어렵다. 하지만 컴퓨터에 의존적인 ABM의 특성으로 인해 해당 모델의 복제 (replication)가 용이하여 주목받는 중요 연구들에 대한 일별과 접근은 어렵지 않다. 현재 ABM을 위한 프로그래밍 언어이자 개발 환경 중 하나인 Netlogo의 커뮤니티에서는 주요 ABM 모형들을 Netlogo 언어로 복제하여 해당 연구에 대한 소개와 함께 제공하고 있다. (Wilensky (1999). Netlogo는 무료 오픈소스 소프트웨어이며 이 소프트웨어에 모델 라이브러리가 포함되어 있다) 개발

¹이러한 결론은 풀리지 않거나 효과적으로 풀 수 없는 문제에 대한 강력한 증명처럼 보인다. 하지만 Buss *et al.* (1990)에 대한 Axtell의 해석은 동등한 자동자들 (automatoa)을 현실이라는 자동자와 그 현실을 가능한 잘 축약한 모형이라는 자동자로 해석했다는 점을 고려해야 한다. 그리고 무엇보다 근원적인 한계는 Buss *et al.* (1990)에서 상정하고 있는 예측문제는 임의의 현실 과정이 아닌, 자동자의 상태 예측 문제라는 것이다. 즉, Axtell의 결론은 현실 과정이 자동자 문제로 환원될 수 있음을 암묵적으로 전제하고 있다.

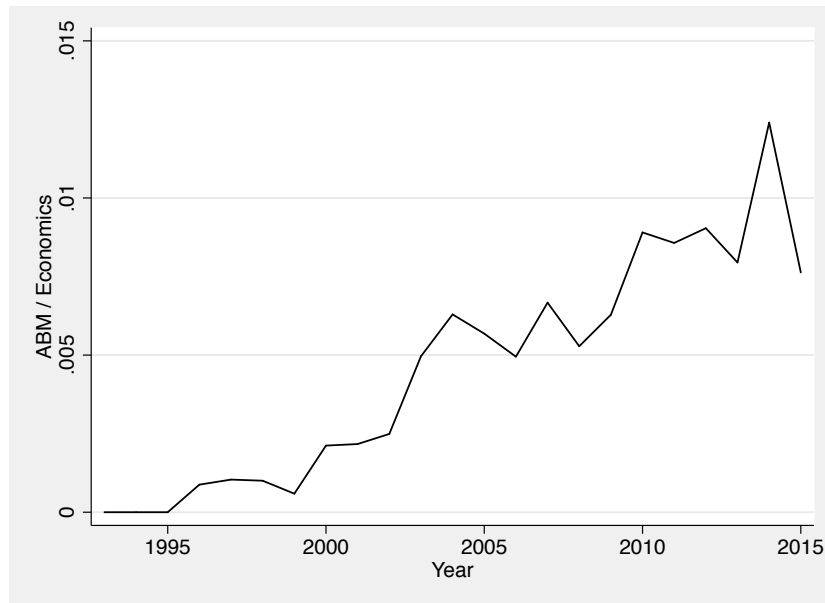


그림 1: 미국 아마존 닷컴의 ‘정치 및 사회과학’ 분야 서적에서 검색된 연도별 ABM 관련 서적과 경제학 관련 서적의 비율

언어와 무관하게 ABM 모형들을 정리하고 있는 웹사이트로는 openabm.org의 모델 라이브러리(<https://www.openabm.org/models>)가 있다.

4 ABM의 구조

통상적으로 ABM은 행위자들과 행위자간 상호작용, 그리고 환경으로 구성된다. (Macal and North (2010)) 데이터의 수집, 시각화 같은 메타 과정도 구성 요소로 볼 수도 있다. (Wilensky and Rand (2015))

4.1 행위자 (agent)

아직 ABM에서 행위자(agent)의 개념 정의에 대한 보편적 합의가 존재하는 것은 아니다. 가장 추상적인 수준에서 규정할 수 있는 agent의 개념은 전산학의 객체(object)이다. 전산학에서 객체란 구현된 변수들(members)와 함수들(methods), 그리고 자식 객체(child object)의 결합체로써 프로그램 실행시 실제 메모리를 차지하는 방식으로 존재한다. (Johnson *et al.* (1995)) 그러한 의미를 강조하기 위해 인스턴스(instance)라고도 한다. 하지만 이는 ABM에서의 행위자에 대한 정의로 보기에는 지나치게 보편적이다. 즉, 행위자는 모두 객체로 볼 수 있지만 모든 객체를 행위자로 볼 수는 없다.

ABM에서 행위자는 보고자 하는 현상의 토대를 이루는 존재이다. 전체로써의 시장을 ABM으로 구현한다면 소비자, 기업, 정부 같은 경제 행위자들을 행위자로 볼 수 있을 것이며, 정신현상을 ABM으로 구현하려 한다면 뉴런, 혹은 뉴런의 집합체를 행위자로 볼 수 있을 것이다. ABM에서 행위자는 행위자들이 처한 환경, 그리고 다른 행위자들과의 상호작용들을 변수와 함수의 논리적 연산을 통해 구현하게 된다. 특히 다른 행위자들과 상호작용한다는 특성은 상호의존적 상황을 의미하는 것이고, 이는 행위자 기반 모형은 이론적 구조상 진화적 게임 이론(evolutionary game theory)으로 해석할 수 있다는 것을 의미한다. (de Marchi and Page (2014))

보통 행위자들은 서로 구분되어야 하며, 자율적이고 다른 행위자에게 영향을 주거나 받으며, 자신의 상태나 행동을 수정하기 위한 규칙이 있는 경우가 많다. 그리고 극히 특수한 경우가 아니라면 행위자들은 어떤 측면으로라도 이질적인 요소가 있어야 한다.

4.2 상호작용 (interaction)

행위자간의 상호작용은 직접적인 상호작용과 간접적인 상호작용으로 나눌 수 있다. 직접적인 상호작용은 행위자들이 다른 행위자들과 각 행위자들에 정의된 행동 함수들을 통해 서로의 상태를 변화시키는 것이다. 행위자들 간의 거래, 통신 등은 직접적인 상호작용의 한 예로 볼 수 있다. 간접적인 상호작용은 환경이나 행위자 구조에 영향을 미침으로써 다른 행위자에 영향을 미치는 것이다.

4.3 환경 (environment)

환경은 행위자들이 위치하는 공간으로 물리적 공간인 것처럼 구성할 수도 있지만, 연결망 (network) 상에 위치하는 것으로 보는 것이 가장 일반적인 기술이다. 많은 ABM이 환경으로 선택하는 토러스 격자 공간 역시 4노드 정규 네트워크 (degree 4 regular network)의 일종으로 볼 수 있기 때문이다. 이러한 이유로 ABM은 연결망 이론 (network theory) 과도 연관을 가지게 된다. (de Marchi and Page (2014))

4.4 메타 환경 (meta-environment)

메타 환경에는 모형을 초기화하고 구현하기 위한 사용자 인터페이스 (user interface), 모형의 시각화 (visualization), 데이터 수집 및 저장, 그리고 시뮬레이션 스케줄링 등 모형의 결과에는 영향을 미치지 않지만 연구에 필요한 요소들이 포함된다. 대체로 ABM에 특화된 개발 환경들에는 기본적으로 포함되어 있는 경우들이 많다. 또한 이러한 요소들이 반드시 모형에 포함되어야만 하는 것은 아니다. 모형에서는 결과 데이터만 생성하고 분석이나 시각화 등은 다른 자료 분석 소프트웨어를 사용할 수도 있다.

5 ABM의 장점과 한계

5.1 장점

가장 먼저 거론할 수 있는 ABM의 장점은 그 유연성에 있다. 전통적으로 모형화하기 어려운 연구 대상도 모형화할 수 있는 경우가 많기 때문에 특히 양적 모형화에 한계가 많은 인류학이나 사회학 같은 사회과학 분야에서도 많은 주목을 받았다. (Borrill and Tesfatsion (2010); Gilbert and Troitzsch (1999); Trajkovski and Collins (2009)) 사회현상들은 대체로 개별 주체들의 집합적 행동으로 나타나는데, ABM은 그러한 사회현상과 구조가 동일하기 때문에 직관적 구현이 가능한 것이다.

Bonabeau (2002)는 ABM이 유용한 연구 주제를 다음과 같이 정리하였다. 아래 주제들의 공통점은 수리적 접근이 어렵다는 공통성을 띠고 있다

1. 행위자간의 상호작용이 수학적으로 표현하기 어려운 형태, 즉 불연속적이거나 이산적, 그리고 비선형적 특성을 띠는 경우
2. 행위자들의 존재 구조(공간)가 중요하고 그 공간상 위치가 고정되어 있지 않을 경우
3. 행위자들간의 이질성이 중요한 경우
4. 행위자간 상호 작용들이 이질적이고 복잡할 경우
5. 행위자 행태가 학습이나 수용 등 복잡한 행동을 보일 경우

설령 전통적인 방식으로 모형화가 가능한 경우에도 그에 상응하는 ABM을 만들 수는 있으며, 이러한 경우 ABM은 일종의 수치 시뮬레이션 도구로도 사용할 수도 있다. (Axtell (2000)) 따라서 ABM은 일반적인 동적 모형을 포괄하는 방법론으로 볼 수도 있다. 하지만 이러한 관점에 의하면 임의의 순차적인 동태적 모형을 ABM 이라고 규정할 수 있기 때문에 통상적으로 규정하는 ABM의 개념에 비해 지나치게 넓은 규정이라고 할 수 있다.²

두번째 장점은 실용성에 있다. 전통적인 정적 모형 (static model) 의 해라는 측면에서 균형 (equilibrium) 의 존재나 안정성만으로는 실제 그 균형이 도달 가능한 것인지에 대한 보장을 하지 못한다. 가령 경제학의 일반균형 모형에서 균형으로의 모색 과정 (tatonnement) 을 감안한 동태적 안정성을 보장하는 일반적 효용함수는 존재하지 않는 것으로 보인다. (Sonnenschein (1972)) ABM은 동학 모형 (dynamic

²하지만 시뮬레이션 과정에서 모형의 적확성을 검증하는 한 방법으로 이질성을 제거하는 등의 방법으로 풀 수 있는 단순한 수리 모형으로 환원하여 예측된 결과가 나타나는지 검증 (validation) 하는 데 응용할 수도 있다.

model)이자 시뮬레이션 모형이기 때문에 모색과정에 대한 검증이 반드시 포함되게 된다. (Gintis (2007))

세번째 장점은 패턴(pattern)을 다룰 수 있는 거의 유일한 모형이라는 점이다. 여기에서 패턴이란, 통상적으로 현상들을 관찰하여 특징짓는, 알려진 사실들(stylized facts)로, 무작위적 현상이 아닌 것처럼 보이는 모든 것이다. (Railsback and Grimm (2011)) 가령 혼돈계(chaotic dynamical system)에서 나타나는 주기적 궤도의 경우, 특정 궤도에 수렴하지는 않고 주기도 일정하지 않지만 패턴이 존재한다는 측면에서 무작위적 현상과 구분될 수 있다. ABM이 기본적으로 동태적 시스템(dynamical system)이기 때문에 혼돈계의 특성이 나타날 가능성이 높다. 또한 이러한 특성은 ABM이 매개변수(parameter)와 같은 초기 조건에 매우 민감할 수 있음을 시사하기도 한다. 만일 이러한 패턴이 어떤 미시적 상호작용에서 비롯된 것인지를 보고자 한다면 ABM이 거의 유일한 방법론이라고 볼 수 있다.

5.2 한계

첫번째로 얘기할 수 있는 ABM의 한계는 기본적으로 ABM이 양적 모형(quantitative model)이라는 속성에서 비롯된다. 양적인 관점에서 질(quality)은 결국 이산적으로 정의된 상태들(states)로 표현할 수 밖에 없으며, 이러한 질이 컴퓨터 내에서 이해되기 위해서는 필연적으로 각 상태를 분류할 수 있는 기준이 주어져야 한다. 가령 ABM에서 어떤 상품시장을 구현하고 이 시장의 청산 상태를 (1) 청산 상태 (2) 청산되지 않은 상태 두 가지로 나누다고 생각해보자. 만일 거래량이 연속적인 수라면 초과 수요량이 0인 상태를 청산 상태로 규정할 경우 시뮬레이션은 극도로 비효율적일 가능성이 높다. 따라서 거래량이 얼마 이하일 때 청산 상태로 규정할 것인지에 대한 규정이 어떠한 방식으로든 이루어져야 한다. 만일 이러한 상태 규정 기준에 따라 시뮬레이션의 핵심적 결과가 크게 달라진다면 모형의 신뢰성이 저하될 수 있다.

또한 인간이나 조직을 행위자로 볼 경우, 행위자의 취향이나 선호 같은 질적 판단 역시 결국 프로그램 내에서 결정되어야 하는 요소가 된다. 이는 미시경제학에서 효용을 효용함수라는 양적 체계로 해석하는 것과 유사한 작업을 모든 질적 요소에 대해서 부여해야 함을 의미한다. 이러한 종류의 문제는 인공적 지능 구현이 당면한 문제와 밀접한 관련이 있다. 따라서 연구 주제에서 행위자들의 질적 판단이 중요한 요소인 경우에는 ABM은 그다지 유용한 방법론이 아닐 수 있다. 하지만 이러한 속성은 ABM만의 문제가 아닌, 모든 양적 모형에 해당하는 문제이다. 만일 이러한 질적 속성을 양적 모형으로 다루고자 한다면, ABM은 선택 가능한 모형들 중 유일하게 구현 가능한 모형일 가능성이 높다. (Bonabeau (2002))

두번째 한계는 앞서 언급한 ABM의 장점과 깊은 연관이 있다. 동학적 모형이기

때문에 ABM은 반드시 시간 개념이 들어가야 한다. 통상적으로 ABM은 모형 내에서 반복(iteration)의 과정을 거치고, 그러한 반복 횟수가 시간으로 취급된다. 그런데 이 특성이 함축하는 바는 바로 ABM을 구현하기 위해서는 반드시 순환 가능한 모든 요소를 포함해야 한다는 것이다. 가령, 일반 균형 모형에서의 모색 과정을 ABM으로 구현한 Gintis (2007)의 경우, 수리 분석에서는 규정할 필요가 없었던 불균형 상태일 때 거래되지 않은 상품(재고)에 대한 가정을 해야 하며, 금융 부문이 필수적으로 들어가야 한다. 그래야 반복이 가능하기 때문이다. 그 외에도 일반 균형 이론에서는 고려하지 않았던 요소들을 ABM으로 구현하기 위해서는 고려해야 하게 되는데, 통상적으로 이러한 규정의 변동에 따라 결과가 달라지기 때문에 연구 목적 외의 고려 요소가 많아질 수록 연구 결과는 복합적인 양상을 띠게 되어 결론 해석에 어려움을 겪을 가능성이 높아진다. (de Marchi and Page (2014))

이러한 한계는 총체적 시스템에 초점을 두고 있을 수록 더 강해지는 경향이 있기 때문에 DSGE 같은 일반적 거시 예측 모형의 대안으로 ABM을 고려할 경우 효과적인 연구가 어려울 가능성이 높다.

세번째 한계는 구체적 예측을 위해 사용하기에는 제한적이라는 점이다. ABM은 패턴 발생의 이유를 이해하는 데에는 적합하지만, 현실에서 관측된 데이터를 매개변수로 사용한다 할지라도 그 결과가 정확한 예측을 할 것이라는 것을 보장하지 않는다. (Buss *et al.* (1990)) ABM으로 주식 시장에서 관찰되는 통계적 패턴을 성공적으로 구현했다 하더라도 이 모형에 실제 주가를 대입했을 때 1년뒤 주가가 어떻게 변화했는지 보려고 한다면 그다지 성공적인 결과를 얻지는 못할 것이다. 이는 좋은 유체역학 모형이 존재한다 하더라도 수개월 뒤의 구체적 장소의 날씨를 정확히 예측하는 것이 어려운 것과 유사한 문제이다. 다만, 패턴의 변화 양상 같은 좀 더 추상적인 수준에서의 예측이나 거시적 집계변수의 예측은 다른 문제이다. 특정 장소의 특정 시점에서의 날씨를 예측하는 것은 어렵지만, 지역별 월평균 강우량을 예측하는 것은 다른 문제인 것과 같다. 실제로 미국 금융가에서는 ABM이 방법론으로 사용되기 시작했던 90년대부터 예측의 도구로 ABM을 사용해온 것으로 알려져 있다. (Geanakoplos *et al.* (2012))

6 ABM의 구현

ABM은 설계, 구현, 분석의 단계를 거친다. Railsback and Grimm (2011)은 모형화의 단계부터 ABM의 구체적인 구현과 분석단계까지 상세하게 다루고 있는 좋은 입문서이며, Wilensky and Rand (2015)은 기술적 구현에 좀 더 초점을 맞추고 있는 입문서이다. 둘 모두 Netlogo를 기반으로 하고 있다.

6.1 설계

실제 ABM을 구현하기 위해서는 행위자, 행위자간 상호작용, 환경 등을 규정하고 프로그래밍 가능한 형태로 기술해야 한다. 즉, 양적인 변수들과 질적인 상태나 속성을 정의하고 행위자들의 행동이나 인식 등을 함수 형태로 구현해야 한다. Grimm *et al.* (2006)은 모형 기술 표준화를 위해 ODD (Overview, Design concepts, and Details) 규약을 제안했다. ODD 규약은 크게 일곱 항목으로 구성되어 있으며, 이 규약에 따라 모형을 기술할 경우 동일 모형의 복제 (replication)가 가능할 수 있도록 설계하였다. 연구 질문에 맞는 적절한 ABM을 구현하는 문제는 모형 일반의 문제를 포괄한다. 즉, 어느 정도로 문제를 단순화할 것인지, 어떤 변수를 외생적으로 취급할 것인지 등을 결정해야 하지만 이에 대한 일반론은 없다.

6.2 구현

모형을 설계하고 나면 컴퓨터로 구현해야 한다. ABM의 구현은 방법적 측면에서 크게 세 가지 종류로 나눌 수 있다. 첫째, ABM을 위해 설계된 프로그래밍 언어를 사용하는 것이다. Netlogo가 그 대표적 예이다. 둘째로, 프로그래밍 언어에 ABM을 위한 라이브러리나 API(application programming interface)를 설치하여 구현할 수도 있다. Repast, MASON, Swarm 등이 대표적이다. 셋째로, 직접 프로그램을 작성하여 구현하는 방법도 있다. 이러한 방법들은 자유도 및 퍼포먼스와 개발 및 분석 효율성 사이에 trade-off가 있다. Netlogo와 같은 개발환경은 가장 빠르게 개발하고 구현 단계에서 간단한 분석까지도 할 수 있지만, 상대적으로 자유도가 떨어지고 제한된 성능 때문에 같은 컴퓨팅 성능으로 구현할 수 있는 행위자의 수나 규모가 다른 방법들에 비해 작다. 반면 직접 프로그래밍을 하는 방법은 가장 자유도가 높고 주어진 하드웨어에서 성능 측면에서 가장 효율적으로 구현할 수 있으나, 개발에 들어가는 시간과 노력이 가장 많이 요구된다. (Railsback and Lytinen (2006)) 따라서 장기적인 연구 플랫폼으로 ABM을 고려하는 경우는 기획 단계에서 Netlogo로 빠르게 구현하여 결과를 대략적으로 살펴본 뒤, 두번째나 세번째 방법으로 다시 구현하는 것이 좋다.

또한 이 단계에서 연구 목적에 맞는 데이터를 어떻게 생성하고 추출할 것인지 결정해야 한다. 기본적으로 시뮬레이션은 동적 과정 (dynamic process)이기 때문에 모든 정보를 모두 기록하는 것은 비효율적이다. 또한 대부분의 시뮬레이션은 다수의 시행을 염두에 두게 된다. 관측된 현상이 초기조건에 의존한 것인지 매개변수에 의한 것인지 식별할 수 있는 유일한 방법은 다수의 시행 뿐이기 때문이다. 또한 구현 단계에서의 오류가 없는지, 의도에 맞는 모형을 구현한 것인지 확인하고 단계별로 구현된 세부 단계나 최종 결과가 현실에서 관찰하고자 하는 대상을 제대로 반영하고 있는지 검증 (Verification and Validation, V&V) 하는 것도 중요한 요소 중에

하나이다. (Wilensky and Rand (2015))

6.3 분석

수집된 데이터는 구현단계에서 바로 결론을 도출할 수도 있지만, 대부분 통계 분석 패키지를 사용하여 분석한다. 이런 측면에서 행위자 기반 시뮬레이션은 일종의 DGP(Data Generating Process)이기도 하다. 만일 수집된 데이터가 평균의 성격을 가지는 양적인 집계변수일 경우, 동일 매개변수 하에서 반복 시행을 통해 얻은 데이터는 시행 횟수가 클 수록 정규분포에 수렴할 것이다. 충분한 반복 시행의 횟수는 경우마다 다르지만, 좋은 ABM 데이터는 행위자들의 초기조건의 변동에 대해서 비교적 매끄러운 분포를 보여야 한다. 그렇지 않다면 행위자의 초기조건을 구성하는 요소 중에 중요 변수가 포함되어 있을 가능성이 매우 높기 때문이다. 일단 관심을 두고 있는 매개변수 아래에서 반복 시행을 통해 매끄러운 분포를 얻었다면, 그 분포도 상에서 유의 수준에 입각한 신뢰 구간을 얻을 수 있다. 하지만 관심이 거시적 패턴의 질적 변화라면 다른 접근법을 고려해야 할 수도 있다. 이 영역의 문제는 ABM의 문제라기 보다는 통계학적 분석이나 추론의 영역이다.

7 경제학에서의 ABM (ACE)

ABM은 미시적 상호작용에 기반하여 발생하는 거시적 패턴의 발생(emergence)에 초점을 맞추고 있는 상향식(bottom-up) 모형이다. 경제학이 풀고자 하는 문제가 분산적인 개별 경제 주체들의 편익 추구가 야기하는 집합적 현상에 있고 그 문제가 전통적인 양적 방법으로는 질적인 접근으로 쉽게 분석되지 않는 상황에서 ABM은 좋은 대안이 될 수 있다. 복잡계(complex system)에 대한 문헌들에서 경제 현상은 빠지지 않고 거론되는 사례다. 하지만 아직 주류 경제학계에서 ABM은 거의 다루고 있지 않은 것으로 보이는데, 그 이유에 대해서는 명확하지 않다. (Stiglitz and Gallegati (2011)) 실제로 경제학 저널 중 피인용지수가 가장 높은 수준에 있는 네 개의 학술 저널 Journal of Economic Literature, American Economic Review, Econometrica, Quarterly Journal of Economics에서 “agent-based”를 키워드로 검색했을 때 검색된 논문은 단 하나 였다. 오히려 이런 방법론들은 경제학계보다 금융 기관이나 중앙 은행들에서 관심을 가지는 경향이 있는데, 이는 당장의 현상을 분석해야만 하는 긴박한 필요성 때문이라고 할 수 있다. (Geanakoplos *et al.* (2012))

Vriend (2002)는 ACE가 하이에크(Hayek)가 제기해온 경제 현상의 복잡성, 그리고 그 해결에 대한 방법론적 아이디어는 사실상 ACE(agent-based computational economics) 연구 방법론의 아이디어라고 본다. 이러한 관점에서 보면 경제학적 현상의 복잡성에 대한 인식은 이미 20세기 초반에 존재했으나, 실질적인 응용 연구는

컴퓨터라는 도구의 발전이 충분히 이루어진 1990년대에 들어서야 가능해진 것이라고 생각할 수 있다. 2007-8년의 세계적 금융 위기를 거치면서 기존 경제학에 대한 비판과 함께 대안 모형에 대한 관심도 증가해왔다. 이대엽 and 박하일 (2012)은 금융 위기의 측면에서 ABM을 포함한 복잡계 방법론들을 소개하고 개괄하고 있는 몇 안되는 국내 연구 문헌이다. 기술 진보와 혁신 (innovation)은 언제나 경제 성장에서 차지하는 중요성에 비해 극히 질적인 현상이라는 이유로 모형으로 설명하는 데 어려움이 많은 주제였다. 이미 존재하는 기술의 양적 성장은 모형화할 수 있지만, 통상적으로 혁신적 현상은 존재하지 않던 것의 등장이라는 질적 특성을 띠고 있기 때문이다. Watts and Gilbert (2014)은 혁신 현상을 ABM으로 구현하려는 체계적 시도이고, 현재로서 ABM은 혁신 같은 현상을 양적으로 해석할 수 있는 거의 유일한 방법론으로 보인다. 그 밖에 다양한 주제들이 지속적으로 연구되고 있다. 전반적인 ACE의 주제들과 연구들은 Tesfatsion에 주제별로 정리되어 있고, 2016년 2월 현재 지속적으로 갱신되고 있다.

8 결론

ABM의 활용 가능성은 컴퓨터의 연산능력에 크게 의존한다. 현재 컴퓨터의 연산 속도의 증가추세는 여전히 인상적인 수준이며, 이러한 추세가 지속되는한, ABM이 다룰 수 있는 영역은 지속적으로 확장될 것으로 전망된다. (Borrill and Tesfatsion (2010)) 또한 2007-8년 경제위기 이후 전반적인 저성장 국면이 장기화될 경우 대공황이 장기화되었던 경우처럼 경제학에서는 새로운 패러다임에 대한 관심이 증대할 것이라는 점은 분명하다. 하지만 당시 경제학의 방법론으로 등장한 거시경제학이 기존의 경제학을 대체했다기 보다는 공존해온 것과 같이 ABM 역시 전통적인 방법들과, 본 논문에서는 거론하지 않은 다른 복잡계 방법론들과 함께 전통적인 방법론을 보완해나가는 방식으로 존재할 것으로 보인다. ABM이 컴퓨터로 구현되는 시뮬레이션의 형태로 존재하는 한, 여전히 컴퓨터로 구현할 수 있는 것 이상을 구현할 수는 없을 것이기 때문이다.

참고 문헌

- AXTELL, R. (2000). *Why agents? On the varied motivations for agent computing in the social sciences*. Tech. Rep. 17.
- BONABEAU, E. (2002). Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. *Proceedings of the National Academy of ...*.

- BORRILL, P. and TEFATSION, L. (2010). Agent-Based Modeling: The Right Mathematics for the Social Sciences? *Staff General Research Papers*.
- BUSS, S. R., PAPADIMITRIOU, C. H. and TSITSIKLIS, J. N. (1990). On the Predictability of Coupled Automata: An Allegory about Chaos. *FOCS*, pp. 788–793.
- DE MARCHI, S. and PAGE, S. E. (2014). Agent-Based Models. *Annual Review of Political Science*, **17** (1), 1–20.
- GEANAKOPOLOS, J., AXTELL, R., FARMER, D. J., HOWITT, P., CONLEE, B., GOLDSTEIN, J., HENDREY, M., PALMER, N. M. and YANG, C.-Y. (2012). Getting at Systemic Risk via an Agent-Based Model of the Housing Market. *The American Economic Review*, **102** (3), 53–58.
- GILBERT, N. G. and TROITZSCH, K. G. (1999). *Simulation for the social scientist*. Buckingham.
- GINTIS, H. (2007). The Dynamics of General Equilibrium. *The Economic Journal*, **117** (523), 1280–1309.
- GRIMM, V., BERGER, U., BASTIANSEN, F., ELIASSEN, S., GINOT, V., GISKE, J., GOSS-CUSTARD, J., GRAND, T., HEINZ, S. and HUSE, G. (2006). A standard protocol for describing individual-based and agent-based models. *Ecological Modelling*, **198** (1-2), 115–126.
- JANSSEN, M. A. and OSTROM, E. (2006). Empirically based, agent-based models. *Ecology and Society*, **11** (2).
- JOHNSON, R., GAMMA, E., VLISSIDES, J. and HELM, R. (1995). *Design Patterns*. Elements of Reusable Object-Oriented Software, Addison-Wesley.
- KRUGMAN, P. and WELLS, R. (2015). *Economics*. Worth Publishers, fourth edition edn.
- MACAL, C. M. and NORTH, M. J. (2010). Tutorial on agent-based modelling and simulation. *Journal of Simulation*, **4** (3), 151–162.
- RAILSBACK, S. and LYTINEN, S. (2006). Agent-based Simulation Platforms: Review and Development Recommendations. *Simulation*.
- RAILSBACK, S. F. and GRIMM, V. (2011). *Agent-Based and Individual-Based Modeling*. A Practical Introduction, Princeton Univ Pr.

- SNOWDON, B. and VANE, H. R. (2009). 박만섭, 배인철, 이상호, 강성진 옮김, *현대거시경제학*. 서울경제경영.
- SONNENSCHN, H. (1972). Market Excess Demand Functions. *Econometrica*, **40** (3), 549–563.
- STIGLITZ, J. E. and GALLEGATI, M. (2011). Heterogeneous Interacting Agent Models for Understanding Monetary Economies. *Eastern Economic Journal*, **37** (1), 6–12.
- TESFATSION, L. (). Agent-Based Computational Economics: Key Application Areas.
- TRAJKOVSKI, G. and COLLINS, S. G. (2009). *Handbook of Research on Agent-based Societies*. Social and Cultural Interactions, IGI Global Snippet.
- VRIEND, N. J. (2002). Was Hayek an Ace? *Southern Economic Journal*, **68** (4), 811–840.
- WATTS, C. and GILBERT, N. (2014). *Simulating Innovation*. Computer-based Tools for Rethinking Innovation, Edward Elgar Publishing.
- WILENSKY, U. (1999). Netlogo.
- and RAND, W. (2015). *An Introduction to Agent-Based Modeling*. Modeling Natural, Social, and Engineered Complex Systems with NetLogo, MIT Press.
- 이대엽, 박하일 (2012). 금융위기 이후 경제학의 새로운 분석도구로서의 복잡계 이론. *사회과학연구논총*, **28** (0), 71–102.