

산학 공동연구 R&D 네트워크의 복잡계 특성과 지배적 피드백 루프: 거듭제곱법칙과 양의 피드백 루프를 중심으로

Complexity System Characteristics and Dominant Feedback Loops of Industry-University Joint Research R&D Networks: Centered on Power Law and Reinforcing Feedback Loops

홍성호* · 이만형**

Hong, Sung-Ho* · Lee, Man-Hyung**

Abstract

Applying social network analysis techniques, this study examines complex system characteristics of industry-university joint research R&D networks. In specific, it focuses on whether these R&D networks comply with the power law, whose system typically presents the-rich-get-richer and the-poor-get-poor patterns. The basic data come from 7,751 industry-university joint research projects, all of which were carried out by Daejeon, Chungbuk, and Chungnam-based universities from January 2005 to October 2008. The empirical results reveal that the R&D networks abide by the power law. That is, a handful of business units and universities command an overwhelming majority in the joint links, indicating positive feedback dominance within the system.

Keywords: 복잡계, R&D 네트워크, 거듭제곱법칙, 부익부-빈익빈

(Complex System, R&D Network, Power Law, The-rich-get-richer and the poor-get-poor)

* 충북발전연구원 전문연구위원 (제1저자, hongsh@cri.re.kr)

** 충북대학교 도시공학과 교수 (교신저자, manlee@chungbuk.ac.kr)

I. 서론

복잡계란 무수한 요소가 상호 간섭하여 패턴을 이루고, 각 패턴이 요소 자체에 피드백 되는, 그리고 시간의 흐름에 따라 끊임없이 진화하는 과정에 있는 시스템이다(Arthur, 1997: 107). 대개 인간 활동보다는 자연 활동에 의한 산물인 경우에 복잡성이 상대적으로 크기 때문에 초기 복잡계 연구는 자연계를 중심으로 전개되었다. 그러나 근래 들어 정보화 패러다임의 도래와 함께 인간 활동의 상호작용 또한 자연계 못지않은 복잡성을 띠고 있다는 사실이 증명되면서 복잡계 연구는 인간의 행위에 대한 복잡성을 주요한 탐구 대상으로 설정하고 있다. 복잡한 요인이 내재되어 보이는 인종별 거주분리 현상의 원인에 사실은 단순한 규칙이 존재한다는 점을 제시한 Schelling(1978)의 연구, 인간 활동의 총체라 할 수 있는 도시의 사업체 입지 패턴을 사업체 간 상호의존성에서 찾은 Krugman(1996)의 연구 등을 대표적으로 들 수 있다. 한편 Sterman(2000)에 따르면 복잡계는 시스템다이내믹스의 기본 개념과 궤를 같이한다. 시스템다이내믹스는 기본적으로 사회 시스템의 요인을 복잡하다고 전제한 가운데 비선형 피드백의 동태를 통해 시스템의 구조를 파악하는 논리체계를 갖추고 있기 때문이다.

이에 이 연구에서는 산학 공동연구 R&D 네트워크의 특성을 복잡계의 관점에서 분석하고, 시스템의 구조를 시스템다이내믹스의 지배적 피드백 루프의 관점에서 해석하는 데에 목적을 둔다. 복잡계의 다양한 특성 가운데는 부익부-빈익빈 특성에 포커스를 두고자 한다. 그 이유는 특정 시스템의 네트워크가 부익부-빈익빈 패턴을 따르는지, 혹은 그렇지 않은지를 밝히는 과정에서 네트워크가 복잡계 연구에서 주목받게 된 계기가 되었기 때문이다. Buchanan(2002)에 따르면 웹, 할리우드 배우들의 공동출현, 과학자들의 인용지수에 대한 네트워크 연구 결과에서는 부익부-빈익빈 패턴을 띠지만, 우리 두뇌의 신경 네트워크는 물론이고 미대륙을 뒤덮고 있는 도로와 철도망을 포함한 운송 네트워크 그리고 예쁜꼬마선충(*Caenorhabditis elegans*)이라는 선충의 신경 네트워크는 특별한 허브없이 14개의 뉴런으로 구성된 부익부-빈익빈 패턴과 무관한 네트워크 특성을 띤다. 현재 산학 공동연구 R&D 네트워크를 실제 자료를 토대로 부익부-빈익빈 관점에서 분석한 연구는 찾기 어렵다.

II. 이론적 고찰

1. 복잡계 이론의 전개과정

복잡계 이론의 핵심은 국지적 상호작용에 의해 거시적 구조가 창발(emergence)한다는 관점이다. 다시 말해 어떤 현상이 단순한 국지적 규칙에 원인을 두고 나타날 때 이를 복잡계 현상이라 한다. 창발이라는 번역어는 출현과 동의어로 사용되는데, 그 자체로는 별로 새로운 말이 아니고 철학 용어로는 이전부터 잘 알려져 있었다. 철학사에서 「창발적 진화(emergence evolution)」라면 19세기 영국의 사상가 Lewis의 창발적 정신주의에서 비롯되어, 심리학자 Morgan이 1923년 간행한 같은 이름의 책에서 확립된 사상의 계보를 가리킨다. 복잡계에 대한 논의 가운데 Polany의 창발론이 가장 유명하다. Polany는 《암묵지(暗默知)의 차원》 제2부에서 「창발」을 구체적으로 논하고 있다. 또 암묵지 창출(inventiveness)의 확장으로 창발을 파악하고, 생물에서는 상위 차원의 구조가 하위 차원에 없는 창발로 인해 생긴다는 점을 지적하고 있다. 나아가 뒤에 Hayek가 사용해 유명해진, 사회사상에서 창발적 자기조직화론의 키워드인 「자생적 질서」도 근본을 따져보면 Polany의 용어이다 (Yoshinaga, 주병갑 옮김, 1997: 124-125).

현대적 맥락에서 복잡계에 대한 관심이 차차 숙성하게 된 때는 1980년대 들어서이며, 그 배경에는 컴퓨터 과학의 비약적 성장이 있다. 퍼스널 컴퓨터나 워크스테이션이 보급되어 누구나 손쉽게 상당히 대규모적인 컴퓨터 실험을 할 수 있게 되면서, 그동안 학문적 “시민권”을 얻지 못했던 컴퓨터 실험이 여러 가지로 제안되고, 연구되어 새로운 모델의 연구법으로 인정되었다(Shiozawa, 임채성 외 옮김, 1999, 137-138). 발단이 된 연구 가운데 하나로 기상학자 Lorenz의 컴퓨터 시뮬레이션 분석 결과를 들 수 있으며,¹⁾ 이후 자연과학의 세계관은 크게 보아 결정론적이고 환원주의적인 세계관과 비결정론적이고 비환원주의적인 세계관으로 구분된다.

결정론은 모든 세상 만물에 발생하는 사건은 이전의 사건이 원인이 되어 그 결과로서

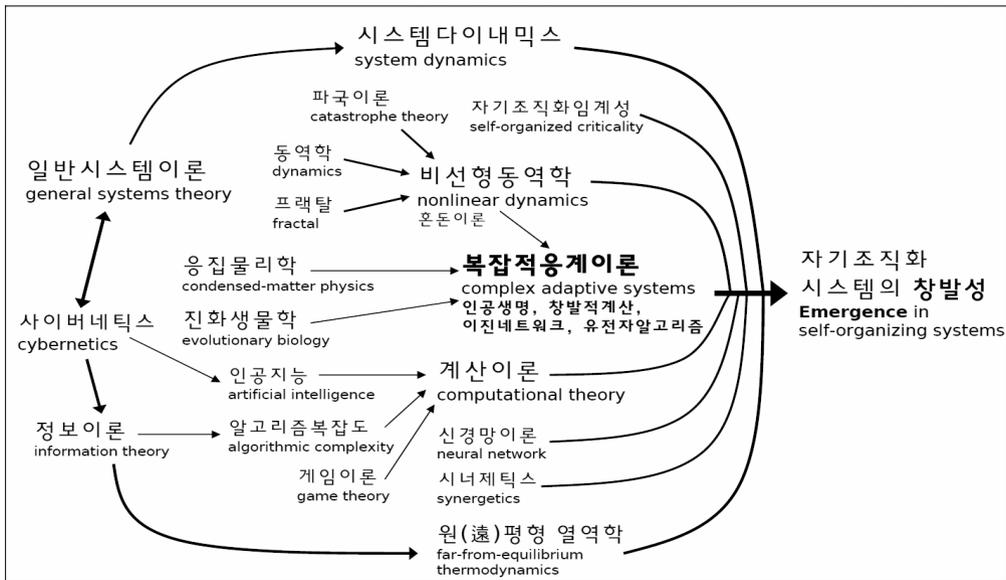
1) 1961년 기상학자 Lorenz는 컴퓨터로 「장난감 날씨」를 만들어 대기의 대역적 변동을 시뮬레이션 하는 작업을 수행한다. 이때, 우연히 상태변수의 입력 값을 최초 시뮬레이션 때는 0.506127을 사용하였으나, 재계산할 때에는 밑의 세 자리를 빼고 0.506만 입력하게 되었다. 그런데 결과는 매우 다르게 나타났다. 대개 초기조건(입력 데이터)의 근소한 차이는 거기에 비례하는 정도의 근소한 변동밖에 일으키지 않는 것으로 알려져 있었다. 그러나 그 「상식」을 벗어난 현상이 로렌츠에 의해 감지되었고, 이후 로렌츠는 「초기 조건에 대한 예민한 의존성」의 개념을 정립한다. 이 성질은 “북경의 나비 날개 짓이 일으킨 바람이 뉴욕의 태풍으로 나타날 수 있다”는 비유를 의미하는 「나비효과」라고 불리 운다(Yoshinaga, 주병갑 옮김, 1997: 245).

이루어진다는 개념이다. 여기에는 사람의 모든 인지작용이나 행동 또한 포함된다(윤영수 · 채승병, 2005: 77). 현재의 상태를 알 수 있다면 미래를 정확하게 예측할 수 있다는 일의(一意)적 인식에 기반하며, Newton 역학에 과학적 기원을 둔다.²⁾ 환원주의는 모든 현상은 현상을 구성하고 있는 요소의 성질로 설명할 수 있다는 Descartes와 같은 인식방법이다(Inoue, 강석태 옮김, 2002: 25). 환원주의(reductionism)는 연구 대상을 세세한 요소로 환원하여 각각의 요소를 자세하게 분석한 다음, 그것들을 종합함으로써 대상의 전체를 이해한다는 수법이다. 따라서 분석과 종합은 환원주의를 지탱해 주는 기본적인 인식 수법이다. 달리 말해 환원주의는 전체는 부분의 총화라는 인식을 전제로 하고 있어 대상을 요소로 환원하여 개별적으로 분석한 후, 그 결과를 종합하여 대상의 전체상을 인식하려는 방식이다. Descartes는 *Discourse on the Method*에서 환원주의 인식론을 토대로 세계의 배후에는 절대불변의 보편적 법칙이 존재한다고 주장한다(Tasaka, 주병갑 옮김, 1997: 36). 따라서 결정론적이고 환원주의적인 세계관은 미시적(부분) 세계와 거시적(전체) 세계에 변함없이 동일하게 적용되는, 원인과 결과로 귀결되는 결정적인 법칙이 존재한다고 간주한다. 달리 말해, 아무리 복잡해 보이는 현상이라도 나누다 보면 결국 단순해지고, 단순한 요소들을 지배하는 법칙을 알면 전체의 운동 원리를 알 수 있다는 인식이다(최창현, 2005: 47). 결정론 세계관에 근거한 과학적인 분석 기반은 정형화된 모델링에 근거한 선형적인 관계들을 다룬다(김용학 외, 2009: 161).

상대적으로 비결정론적 세계관은 어떤 사물이나 세계에 결정적인 법칙이 존재하지 않는다고 인식한다. 이 원리는 미시적 세계와 거시적 세계에 적용되는 원리가 다르다는 비환원주의적 입장에서 출발하며, 비선형적 관계에 보다 주목한다. 이러한 관점은 과학사 측면에서 비선형 역학계의 카오스 계열 이론과 비평형계 열역학의 자기조직화 계열의 이론에 기반을 두고, 이 후 두 흐름의 이론이 상호작용하며 복잡계 이론으로 발전한다(Yoshinaga, 주병갑 옮김, 1997: 233). 관련 이론으로 시스템 다이내믹스(system dynamics)로 이어진 시스템 이론체계와 생태계를 진화적 관점에서 해석한 응집물리학이나 진화생물학과 같은 이론

2) Newton 역학, 즉 고전역학의 기초는 운동학이다. 그리고 운동학은 지극히 단순한 3개의 법칙으로 복잡하고 다양한 물체의 모든 운동을 기술해보자는 뜻을 내포하고 있다. Newton이 *Principia*에서 정리한 운동의 3대 법칙 가운데 제1 법칙과 제3 법칙은 「관성의 법칙」, 「작용 반작용의 법칙」이라고도 불린다. 제2 법칙은, 이른바 Newton의 운동방정식이다. Newton의 운동 제3 법칙은 세계의 수학적 구상의 원형뿐만 아니라, 나아가서는 근대 과학의 자연주의적 세계관의 큰 테두리를 단적으로 나타낸다. 근대 과학의 자연주의적 세계관을 요약하면 다음과 같다. 첫째, 아무리 복잡하고 다양한 물체라도 운동학의 대상으로서는 넓이가 없는 기하학상의 점과 동등한 질점으로 환원된다. 둘째, 운동방정식에 따른 수학적 종합을 거쳐 물체의 운동이라는 실제 현상이 재구성되는 데, 이때의 결과는 필연적으로 일의성을 갖는 결정론적인 형태이다. 셋째, 운동방정식은 형식상의 보편성을 띤다(Yoshinaga, 주병갑 옮김, 1997: 217).

체계를 들 수 있다(그림 1 참조). 이러한 과정을 거쳐 복잡계 세계관은 역동성, 행위자, 네트워크, 창발성, 진화의 측면에서 전통적인 세계관과 결정적인 차이를 나타내고 있는데 (Beinhocker, 안현실 외 옮김, 2007: 175), 이를 통해 기상 예측이나 생태계 현상 등에서 과거의 선형적인 접근법으로 해소하지 못했던 많은 난제들을 해소하는 방안을 얻고 있으며, 자기조직화 계열의 배아 세포나 태풍, 신경 세포, 지진 등 자연과학과 사회과학의 제 영역에서 새로운 인식 틀을 형성하고 있다(Krugman, 박정태 옮김, 2002: 17-18).



출처 : 채승병, 2006: 22

[그림 1] 복잡계의 학문적 계보

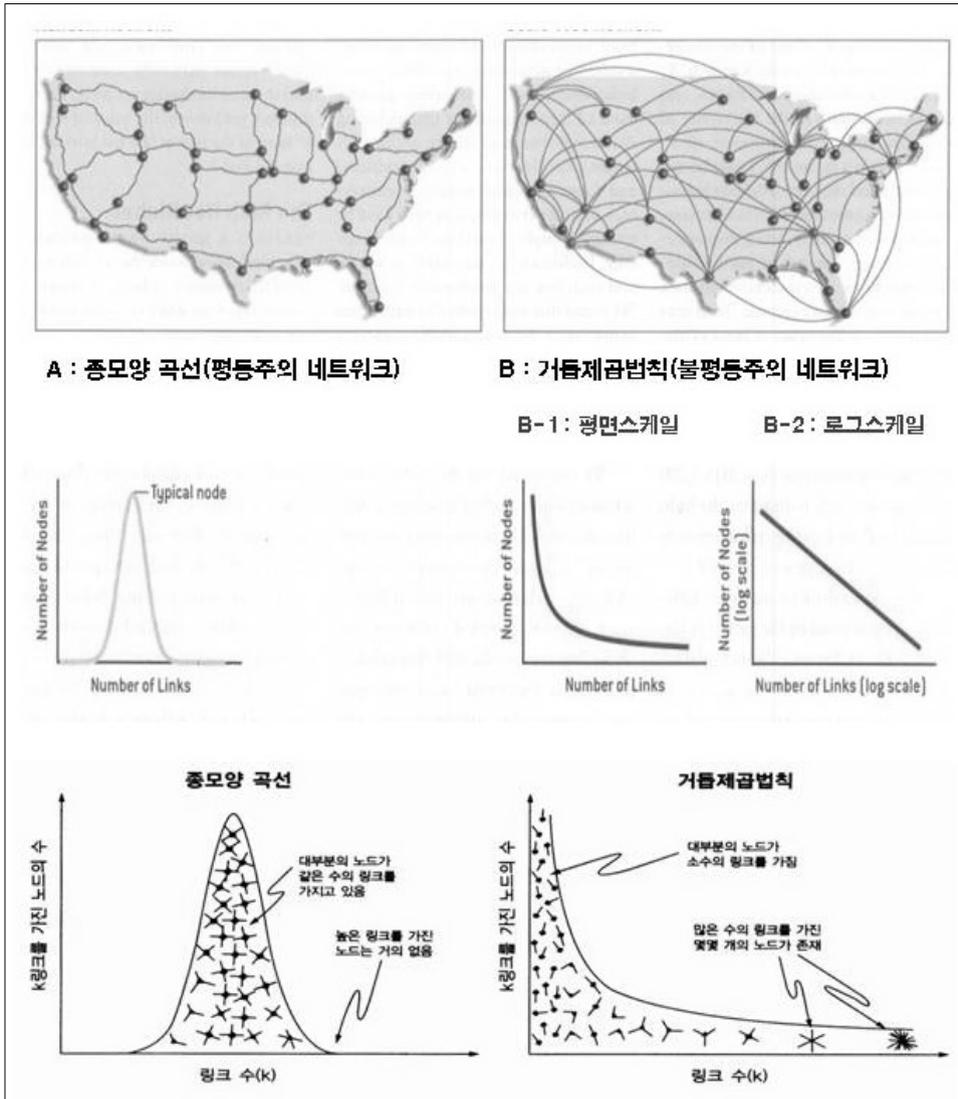
한편, 컴퓨터의 발달과 인터넷의 광범위한 보급으로 인해 이전에 다루지 못했던 거대한 네트워크의 정보를 수집·처리하는 과정에서 네트워크 연구가 복잡계 이론과 상호 연관되기 시작하였다. 왜냐하면 수십 개의 노드를 가진 작은 네트워크부터 수천, 수만, 그 이상의 노드를 가진 거대한 네트워크에 이르기까지 다양한 네트워크에 대한 정보를 분석하고 이들의 통계적인 특성을 연구한 결과, 이들 네트워크가 복잡계 이론에서 주로 다루고 있는 창발적 형태를 내포하고 있다는 사실이 알려졌기 때문이다(윤영수 외, 2005: 285-287). 단적으로, 외환위기, 주가폭락, 전염병의 급속한 확산, 특정한 상품이 갑자기 시장을 장악하는 현상 등이 네트워크 분석과 복잡계 이론에 의해 밝혀진 예를 들 수 있다(김용학·하재경, 2009: 161).

2. 거듭제곱법칙과 양의 피드백 루프

거듭제곱법칙(power law)은 소수가 전체의 대부분을 차지하고 있을 때 나타나는 현상으로 수학, 물리학에서 규정되어온 수식이다. 거듭제곱법칙을 따르는 그래프는 종래의 자연계를 특징짓는 그래프라 할 수 있는 정규분포를 의미하는 종형 곡선(bell curve)과는 상이한 특성을 나타낸다. 가장 중요한 차이는 거듭제곱 분포에는 종형 곡선 분포와는 달리 정점이 나타나지 않는다는 점이다. 희소한 허브에서부터 많은 작은 노드들에 이르기까지의 연속적인 위계가 있을 뿐이다. 가장 큰 허브 다음으로는 두세 개의 조금 작은 허브가 있고, 그 다음에는 열 개 정도의 조금 더 작은 허브가 있고, 이런 식으로 쭉 가장 작은 노드들까지 있다. 이 말은 작은 사건이 많이 있다는 사실 뿐만 아니라 그것이 소수의 대사건들과 공존한다는 점을 의미하며 불평등성을 함의한다(Barabási, 강병남 외 옮김, 2002: 114-120).

네트워크 차원에서 종형 곡선 분포의 경우에는 대부분의 노드가 같은 수의 링크를 가지며, 높은 링크를 가진 노드는 거의 없다. 상대적으로 거듭제곱법칙을 따르는 네트워크는 대부분의 노드가 소수의 링크를 가지고 많은 수의 링크를 가진 몇몇 개의 노드가 존재한다. 이러한 이유로 거듭제곱법칙을 따르는 네트워크를 불평등주의 네트워크 또는 척도 없는(Scale-free) 네트워크라 지칭하고 종형 곡선 분포를 나타내는 네트워크를 평등주의 네트워크 또는 무작위(Random) 네트워크라고 지칭한다(Barabási et al, 2003).

수학적 정의 측면에서 거듭제곱법칙은 한 변수가 다른 변수의 지수적 제곱 형태로, 예를 들어 $f(x) = x^{-\alpha}$ 로 나타나는 데에 근거를 둔다. 로그를 취하면 $\log f(x) = -\alpha \log x$ 다. 함수의 로그 형태는 직선이 되고 그 기울기는 $-\alpha$ 가 된다(Beinhocker, 안현실 외 옮김, 2007: 737). 달리 말해, 그래프 상으로, $f(x)$ 와 x 를 평면으로 나타내면 [그림 2]의 B-1과 같이 나타나고, 이식의 양변에 \log 를 취하면 B-2와 같은 관계가 형성된다. 이 때의 α 값을 거듭제곱지수라 한다.



출처 : Barabási, 강병남 외 옮김, 2002: 119; Barabási et al, 2003: 53을 종합함

[그림 2] 종형곡선과 거둬제곱법칙 그래프의 비교

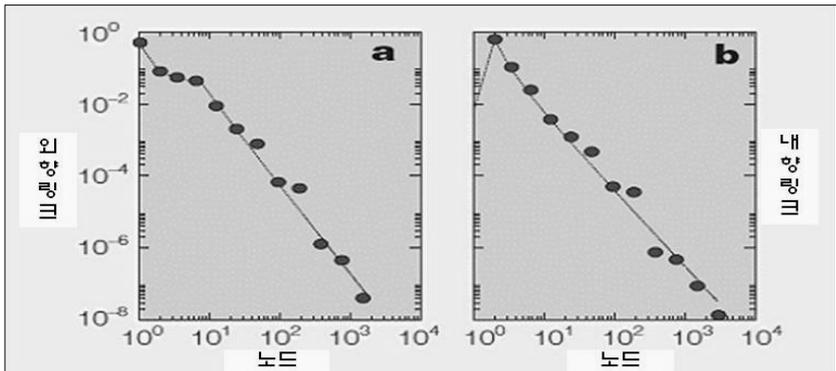
이러한, 거둬제곱법칙이 의미하는 불평등성은 사실 마태효과³⁾나 파레토 법칙⁴⁾과 같은

3) 불평등주의 현상은 마태효과를 통해 단적으로 확인할 수 있다. Merton은 1968년에 “무릇 있는 자는 받아 풍족하게 되고 없는 자는 그 있는 것까지 빼앗기리라(마태복음, 25장 29절)”라는 성경구절을 인용하여, 과학 분야에서 인용을 많이 받는 학자가 더욱 많이 인용되는 부익부 빈익빈 현상을 설명하였고, 이를 마태효과라 지칭하였다(김용학 외, 2009: 74 재인용).

4) Pareto는 소득에 관한 연구에서 가난한 사람은 많고, 중산층은 넓은 소득 구간에 걸쳐 분포되어 있으며,

정의를 통해 오래전부터 숙지되어 온 현상이다. 불평등성에 대한 인식은 우리 사회의 구조를 밝히는 매우 중요한 발견인데, 지난 수십 년 동안의 연구 과정에서 과학자들은 보다 중요한 발견을 이룬다. 과학자들은 자연이 어떤 경우에는 중형이 아니라 거듭제곱법칙 분포에 따르는데, 그 안에서 「질서」를 생성해낸 결과로 불평등성이 유발된다는 보다 중요한 사실을 인식하여 왔다. 지진의 강도와 빈도, 생물들의 소멸 사건들의 규모, 태양 표면의 폭발 강도 등이 예이다. 이는 사회과학의 영역에서도 언어의 단어 빈도 수, 규모별 도시 순위, 전쟁에서의 사망자 수 등이 그러하다는 점을 규명하는 데에 이른다.

근래 들어 더욱 강하게 부각되고 있는 거듭제곱법칙에 대한 재조명은 네트워크 과학 차원에서의 영향력 있는 접근이 복잡계의 창발 질서로 인식된 데에 근거한다. 단적으로 Albert et al(1999)는 인터넷을 돌아다니는 로봇을 제작하여 웹(web)의 구조를 탐색함으로써 네트워크 총 링크 수의 80~90%가 일부의 노드에 집중되어 있다는 현상을 규명하는 한편 이러한 사실을 거듭제곱법칙이 의미하는 수학적 공식과 그래프로 나타내었다(그림 3 참조).



주 : a는 특정 웹에서 다른 웹으로 나가는 외향 관계를, b는 다른 웹에서 특정 웹으로 들어오는 내향 관계를 의미함

[그림 3] 월드와이드웹의 링크 분포

이러한 사실은 외형적으로 대다수의 노드들은 소수의 링크만을 지니고 있고, 이러한 다수의 작은 노드들이 이례적으로 많은 링크들을 구비하고 있는 소수의 노드들과 공존하고 있다는 점을 뜻한다. 내재적으로는 소수의 노드들을 통해 네트워크 전체가 상호 유기적으로 연계된다는 점을 의미한다. 많은 링크를 가지는 소수의 노드에 대한 발견은 허브의 역할을 주목하게 하였고, 이후 웹에서부터 세포 내의 네트워크에 이르기까지 이론적으로 중

매우 부자인 사람들은 드문 분포를 보인다고 설명한다. 이 연구 결과는 후에 “상위 20% 고객이 매출의 80%를 창출한다”는 80 대 20의 법칙으로 확장 된다(Beinhocker, 안현실 외 옮김, 2007: 301).

요한 대부분의 네트워크들이 거둬제공법칙을 나타내고 있다는 사실이 밝혀지면서 허브의 존재는 정당성을 인정받는다. 다양한 사례의 귀납적 결론은 파레토 법칙이 적용되는 경우에는 언제나 그 배후에 거둬제공법칙이 있다고 생각하면 틀림이 없다는 점을 밝혀내고 있다.

이후의 연구에서 거둬제공법칙은 규칙성이 없는 시스템에서는 출현하지 않고, 지속적인 양의 되먹임(positive feedback) 현상이 지배하는 시스템에서 나타난다는 점이 규명되고 있다. 즉 시스템다이내믹스 이론에서 밝히고 있는 애초의 변화를 증폭시키는 자기강화(self-reinforcement)의 특성에 의해 나타나는 패턴이 거둬제공법칙의 형태로 나타난다는 것이다.

Ⅲ. 분석방법론

1. 사회 네트워크 분석

현재 복잡계 연구방법론 중에서 가장 널리 활용되는 접근법은 사회 네트워크 분석(social network analysis: SNA) 기법이다(장덕진 외, 2006: 60). 사회 네트워크 분석은 점과 선의 형태로 행위자의 연계 특성을 고찰하는 분석 기법으로(Craven and Wellman, 1973: 57), 이미 오래전부터 대단히 광범위한 분야에서 응용되고 있다(Fischer, 1977: 19). 다방면의 연구자들은 시스템의 구조와 조직을 이해하기 위하여 은유적 모델이자 정형적인 통계적 모델로써 사회 네트워크 분석의 개념을 동원하여 왔다(Neal, 2010: 2195). “과장이 아니라, 은유적이면서 통계적이기도 한 사회 네트워크 분석은 시스템을 고찰하기 위한 이론적 접근과 분석적 기술이 완벽하게 조합된 기법 (Smith and Timberlake, 1993: 197)”이라고 할 수 있다.

2. 사례 분석의 대상

이 연구의 분석 자료는 대전, 충북, 충남 소재 29개 종합대학 가운데 공동연구 R&D 자료를 제공한 25개 대학의 BT와 IT 부문 공동연구 R&D 자료이다. 분석 자료의 시간적 범위는 2005년 1월부터 2008년 10월까지로써, 이 기간 동안 25개 대학에서는 7,751건의 산학 공동연구 R&D 프로젝트를 수행한 바 있다.

〈표 1〉 자료조사 대학

구분	내용					
자료의 시간적 범위	2005년 1월 ~ 2008년 10월					
자료의 대상	조사 대학					
조사 대학 명	대전		충북		충남	
	대전대학교		건국대학교		건양대학교	
	배재대학교		세명대학교		공주대학교	
	우송대학교		영동대학교		금강대학교	
	충남대학교		청주대학교		남서울대학교	
	한국과학기술원		충북대학교		단국대학교	
	한국정보통신대학		충주대학교		백석대학교	
	한남대학교		X		선문대학교	
	한밭대학교				순천향대학교	
	X				중부대학교	
					한국기술교육대학교	
	X		X		호서대학교	
					소 계 8개 대학 조사 1개 대학 미조사	

주: 한국정보통신대학(ICU)과 한국과학기술원(KAIST)는 2009년 통합하였고, 충주대학교는 철도대학과 2012년 통합하여 한국교통대학교로 출범하였으나, 본 연구에서는 분석 자료의 시점을 고려하여 기존 명칭을 그대로 사용함

3. 분석 체계

이 연구는 대학 공동연구 R&D 네트워크가 거둬제공법칙을 따르는지 혹은 그렇지 않은지를 분석하여 R&D 네트워크의 복잡계 특성을 도출하는 데에 역점을 둔다. 여기서 그래프를 이용하여 거둬제공법칙의 수용 여부를 판별한다. 선행연구에서는 거둬제공법칙 그래프의 x축과 y축에 나타내는 변수를 임의적으로 채택하는데, 대체로 순위와 노드 크기(규모)를 대상으로 하는 경우가 많다. 이 연구에서는 행위자의 크기를 대별하는 지표로 연결 중앙성

지수를 활용한다. 즉, 연결 중앙성의 순위와 값을 그래프로 나타낸다. 연결 중앙성은 한 노드가 보유한 링크의 무게와 빈도를 반영하여 값이 결정된다는 측면에서 노드 크기를 대별하는 데에 적합하다.

구체적으로, 연결 중앙성(degree centrality)은 특정한 노드가 얼마나 많은 노드와 연계되어 있는가를 수식으로 정의하며, 연결 중앙성이 높은 노드를 흔히 허브로 지칭한다. 기본적으로 보다 많은 노드와 연계된 결점이 연결망 내에서 핵심적 역할을 할 수 있고, 따라서 상대적으로 중요한 위치에 있다는 관계적 논리에 의해 계산되는 지표이다(김용학, 2007: 41-42). 전체 노드 수를 #nodes라 할 때, 한 노드의 인접한 링크 수의 합계를 #nodes에서 1을 뺀 값으로 나누어 계산한다(식1 참조). 이 때, 분모인 #nodes-1은 네트워크 크기가 다른 경우에도 상대적인 비교가 가능하도록 표준화하기 위한 데에 목적이 있다(Freeman, 1979: 220-221; Cyram, 2007). 개별 노드의 연결 중앙성 산출방법은 <표 2>와 같다.

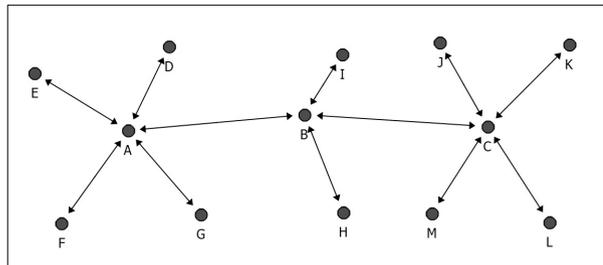
<표 2> 연결중앙성 산출방법

$$\text{degree centrality of node} = \frac{\text{sum [weight of incident links]}}{\#nodes - 1} \quad \text{식(1)}$$

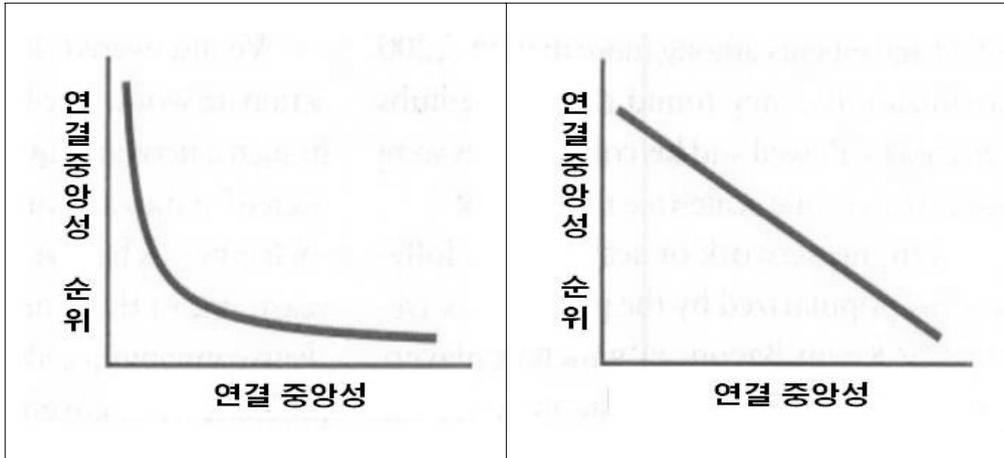
where,
 #nodes = 네트워크에서의 전체 노드 수
 weight of incident links = 노드의 링크 수

구분	A, C	B	나머지 노드
weight of incident links	5	4	1
#nodes-1	12	12	12
연결 중앙성	0.4167	0.3333	0.0833

그림



그래프는 지식주체의 순위를 의미하는 $f(x)$ 와 연결 중앙성을 의미하는 x 의 관계를 거듭제곱지수 a 로 나타낸 식 $f(x) = x^{-a}$ 를 1차적으로 x - y 평면 그래프에 나타내고, 2차적으로 $\log x$ - $\log y$ 평면으로 옮긴다. 이 때, 그래프가 x - y 평면에서 L자형을 나타내고 $\log x$ - $\log y$ 평면에서 선형을 나타내면 R&D 네트워크는 거듭제곱법칙을 따른다고 판별한다.



주 : 좌측 그래프는 x - y 평면 그래프이며, 우측 그래프는 $\log x$ - $\log y$ 평면 그래프임
 [그림 4] 거듭제곱법칙의 판별 그래프

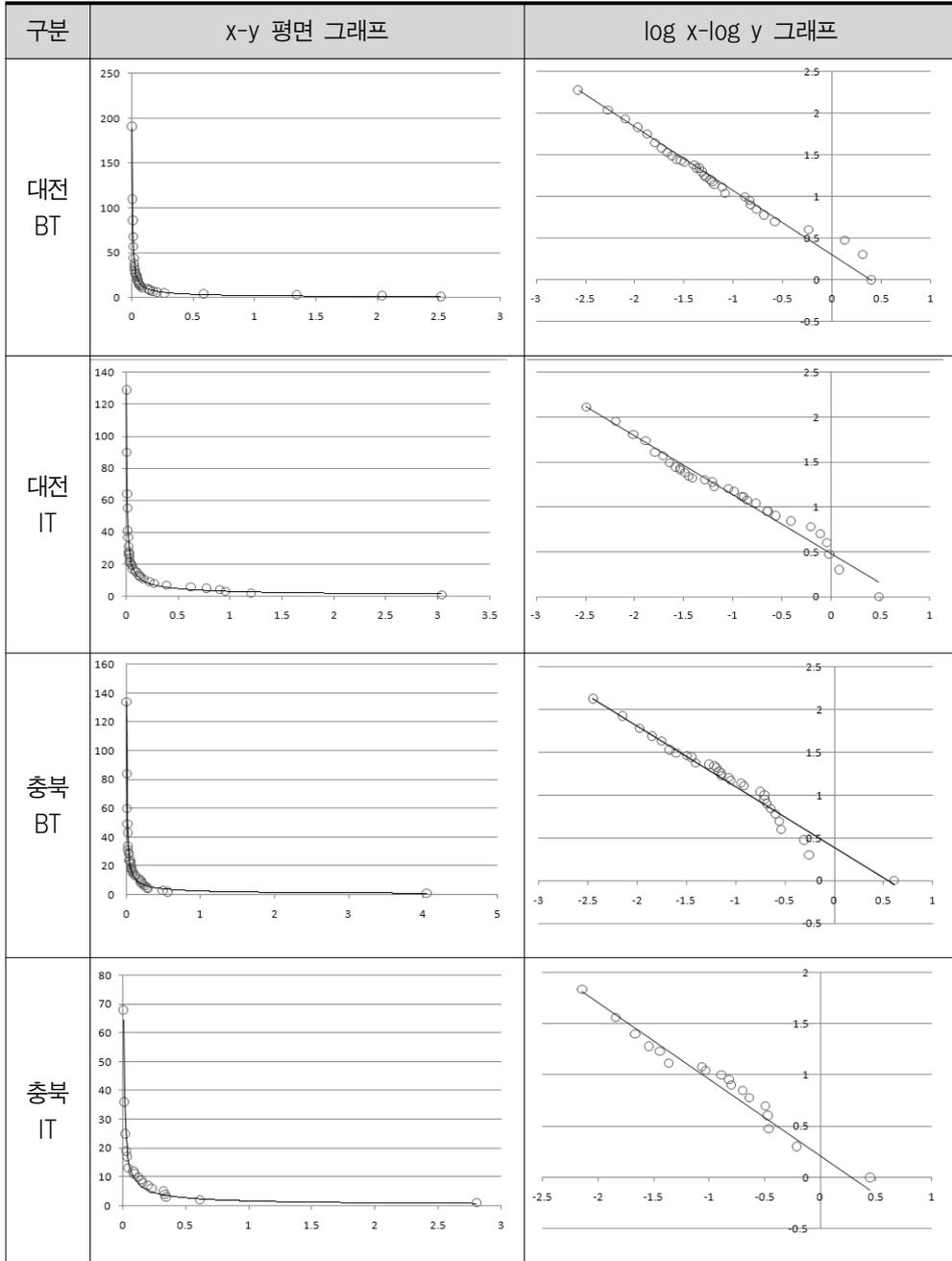
한편 대전, 충북, 충남의 BT와 IT 부문 공동연구 R&D는 지역별·산업별로 나누어 분석한다. 자료를 통합하기 보다는 지역별·산업별로 나눔으로써 복수의 사례를 귀납적으로 분석·확인할 수 있는 실효성이 있기 때문이다. 이와 같은 귀납적인 방식은 복잡계의 기본 접근법이라고 할 수 있다.

IV. 분석결과: 거듭제곱법칙과 지배적인 피드백 루프의 관계

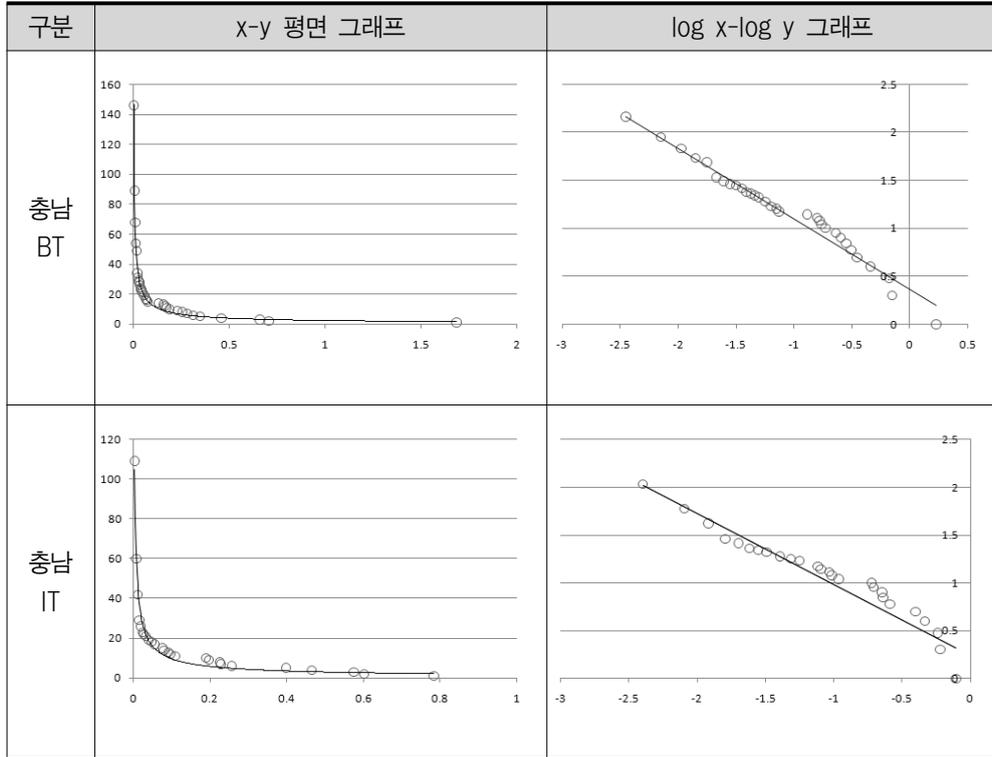
1. 거듭제곱법칙의 출현

우선, 기초 분석단위의 그래프를 x - y 평면 그래프와 $\log x$ - $\log y$ 그래프를 전체적으로 나타낸다. 이 때, 그래프의 x 축에는 지식주체의 연결 중앙성을 나타내고, y 축에는 지식주체의 연결 중앙성 순위를 나타낸다. 그 결과, <표 3>과 같이 거듭제곱법칙을 따르는 그래프 형태가 나타났다.

〈표 3〉 대학 공동연구 R&D의 연결중양성-순위 그래프



(계속)



주 : x축은 지식주체의 연결 중앙성을 나타내고 y축은 연결 중앙성에 따른 순위를 나타냄

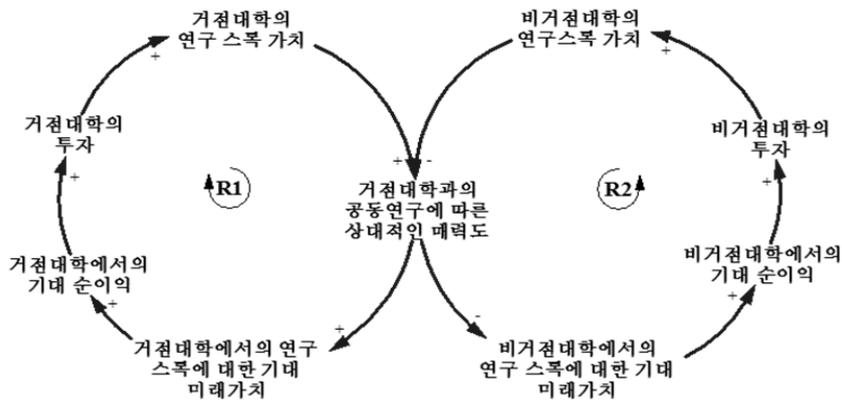
그래프를 수식으로 정의한 결과는 <표 4>와 같으며, 거듭제곱지수는 0.6564부터 0.7681 사이를 나타낸다. 수식의 유의도(R^2)는 모든 그래프에서 0.98 혹은 그 이상이어서, 수식의 신뢰도 수준은 대단히 높다. 이와 같은 사실은 다양한 행위자로 구성되어 복잡하게 보일 수 있는 대학의 공동연구 R&D 네트워크는 부익부-빈익빈 규칙에 의해 지배되고 있다는 사실을 함의한다.

〈표 4〉 거둬제공법칙의 수식

구 분		x-y 평면 그래프	log x-log y 그래프	거둬제공 지수	유의도 (R ²)
대전	BT	$y = 1.992x - 0.768$	$y = -0.7681x + 0.2993$	0.7681	0.99
	IT	$y = 3.0072x - 0.656$	$y = -0.6564x + 0.4782$	0.6564	0.99
충북	BT	$y = 2.4431x - 0.711$	$y = -0.7107x + 0.3879$	0.7107	0.99
	IT	$y = 1.6072x - 0.747$	$y = -0.7471x + 0.2061$	0.7471	0.98
충남	BT	$y = 2.325x - 0.734$	$y = -0.7338x + 0.3664$	0.7338	0.99
	IT	$y = 1.7488x - 0.742$	$y = -0.742x + 0.2427$	0.742	0.98

2. 지배적인 피드백 루프에 대한 탐색

대학 공동연구 R&D 네트워크가 거둬제공법칙의 따른다는 점을 시스템 다이내믹스적인 관점에서 재해석하면 이러한 시스템에서는 자기강화적인 루프(reinforcing loops)가 지배적인 루프를 이루고 있다는 의미를 내포한다. 특히, x-y 평면 그래프에서 ‘L’자 모양(log x-log y



[그림 5] 대학공동연구 R&D 네트워크에 대한 인과지도

그래프에서 우하향의 직선 모양)은 시간적인 지체(time delay)가 거의 영향을 미치지 않는 자기강화적인 루프가 시스템을 주도한다는 맥락으로 받아들여진다.

[그림 5]에 표현한 바와 같이, 이 가운데에 가장 중요한 루프는 소수의 주요대학(편의상 거점대학으로 표현)이 지닌 공동연구의 상대적인 매력도가 나머지 다수의 대학(편의상 비거점대학으로 표현)이 보유한 상대적인 매력도 사이에 존재하는 자기강화적인 루프로서, 시간의 흐름에 따라 일종의 잠금효과(lock-in)가 더해지는 특성을 드러낸다. 즉, 그동안 쌓아온 전통이나 명성 또는 국가의 지원을 비롯한 특정한 요인으로 인하여 소수 주요대학이 지닌 공동연구의 상대적인 매력도가 여타 대학에서의 상대적인 매력도에 비하여 일단 우월적 지위를 차지한다면, 그에 따른 우월성은 시간이 흐름에 따라 증폭하기 십상이다. 이로 말미암아 공동연구 R&D 네트워크도 빈익부 부익부 현상을 드러내며, 주요 대학이 공동연구 R&D 네트워크의 주류를 이룬다.

V. 결론

네트워크가 복잡계 연구의 주요한 대상으로 등장한 가운데 이 연구는 대학의 공동연구 R&D 네트워크의 특성을 복잡계 관점에서 고찰하였다. 흔히 네트워크의 복잡계 연구 포커스가 부익부-빈익빈 패턴이 지배하는 거둬제공법칙을 따르는가 그렇지 않은가에 주어진다 는 사실에 비추어 이 연구에서도 산학 공동연구 R&D 네트워크에서 거둬제공법칙이 출현하는지 여부를 분석하였다.

분석 자료는 대전, 충북 및 충남에 소재한 25개 종합대학이 BT, IT 분야에서 2005년 1월부터 2008년 10월 사이에 수행한 공동연구 R&D 자료 7,751건을 활용하였으며, 그래프를 통해 산학 공동연구 R&D 네트워크에서 거둬제공법칙의 출현성을 판별하였다. 그 결과 산학 공동연구 R&D 네트워크는 산업과 지역을 떠나 공통적으로 거둬제공법칙이 출현하고 있다. 즉, 대학-산업체 사이의 공동연구 R&D 7,751건에는 무수한 행위자들이 등장하는 데, 파레토 법칙이 상정하는 바와 같이 소수의 대학 및 산업체가 전체 연결의 대부분을 차지하고 있는 것이다.

산학 공동연구 R&D 네트워크가 부익부-빈익빈 패턴을 형성하게 된 구조를 인과지도를 통해 분석한 결과에 따르면, 지배적 피드백 루프는 시간지체가 없는 양의 피드백 루프이다. 특히 주목해야 할 핵심루프는 소수의 주요대학이 지닌 공동연구의 상대적인 매력도가 나머지 다수의 대학이 보유한 상대적인 매력도 사이에 존재하는 자기강화적인 루프이다. 양자 사이에는 또 시간의 흐름에 따라 일종의 잠금효과(lock-in)가 더해지는 특성을 드러내는 바,

소수의 주요대학(거점대학)이 지닌 공동연구의 상대적인 매력도가 다수의 여타 대학(비거점 대학)에서의 상대적인 매력도보다 우월적인 지위를 차지하면, 그로 말미암아 양자 사이의 격차는 시간이 흐름에 따라 증폭하기 쉬운 구조를 지니고 있어, 대학의 공동연구 R&D 네트워크도 전형적인 빈익부 부익부 현상을 보여준다.

한편 차후 과제와 관련하여, 이 연구의 성과를 기반으로 SD 시뮬레이션 작업을 수행하여 보다 구체적인 지침을 도출할 수 있으리라고 여긴다. 이를 통해 산학 공동연구 R&D 네트워크의 불평등성을 완화하는 정책방향--예를 들어, 현재 한국연구재단이 책임연구자 선정과제 수에 한계치를 두고 있는 사례와 같은--이 필요한지 혹은 그 경우 부익빈-빈익부의 늪에 빠질 수 있는지에 대한 시사점을 찾을 수 있으리라고 기대한다.

【참고문헌】

- 김용학 · 하재경. (2009). 『네트워크 사회의 빛과 그늘』 서울: 박영사.
- 윤영수 · 채승병. (2005). 『복잡계 개론』. 서울: 삼성경제연구소.
- 장덕진 · 임동균. (2006). 『복잡계와 사회구조』. 복잡계 네트워크 엮음. 복잡계 워크샵 자료집. 서울: 삼성경제연구소. 35-83.
- 채승병. (2006). 복잡계 네트워크 강의자료: 복잡계 연구는 어떻게?, 복잡계 네트워크 (www.complexity.or.kr)
- 최창현. (2005). 복잡계로 바라본 조직관리. 서울: 삼성경제연구소.
- 홍성호. (2010). 사회 네트워크 분석 기법에 근거한 지식 네트워크의 구조와 창발형태: 충청권 지역 전략산업을 중심으로, 충북대학교 박사학위논문.
- Albert, Réka, Hawoong Jeong, and Albert-Lázló Barabási, “Diameter of the World-Wide Web,” 1999. *Nature*, Vol. 401, September (<http://nd.edu~networks>).
- Arthur, W. Brian, 1999, “Complexity and the Economy,” *Science*, 2 April, Vol. 284, pp.107-109.
- Barabási, A. L., 2002, *Linked: The New Science of Networks*, Cambridge: Perseus (강병남 외, 역, 2002, 링크 : 21세기를 지배하는 네트워크 과학, 서울 : 동아시아).
- Barabási, A. L., and E. Bonabeau. (2003) “Scale Free Networks,” *Scientific American*. May. 50-59.
- Beinhocker, Eric, 2006, *The Origin of Wealth: Evolution, Complexity, and the Radical Remaking of Economics*, Cambridge: McKinsey (안현실 외, 역, 2007, 부의 기원, 서울 : 랜덤하우스 코리아).
- Buchanan, Mark, 2002, *Nexus: Small Worlds and the Groundbreaking Theory of Networks*, New York: W. W. Norton (강수정, 역, 2003, 넥서스 : 여섯 개의 고리로 읽는 세상, 서울 : 세종연구원).
- Craven, Paul, and Barry Wellman, 1973, “The Network City,” *Sociological Inquiry*, Vol. 43, No 3: 57-88.
- Cyram, 2007, *NetMiner Help*, Seoul: Cyram.
- Fischer, Claude S., 1977, “Network Analysis and Urban Studies,” 19-37 in Fischer, C. S., ed., *Networks and Places: Social Relations in the Urban Setting*, New York: The Free Press.
- Freeman, L., 1979, “Centrality in Social Networks: Conceptual Clarification”, *Social Networks* Vol. 1: 215-239.
- Inoue, Masayoshi, 1996, *Kaosu to Fukuzatsu-Kei No Kagaku*, Tokyo: Nippon Jitsugyo Publishing

- (강석태, 역, 2002, 카오스와 복잡계의 과학, 서울 : 한성).
- Krugman, P., 1996, *The Self-Organizing Economy*, Cambridge: Blackwell (박정태, 역, 2002, 자기조직의 경제, 서울 : 부키).
- Neal, Zachary P., 2010, "Refining the Air Traffic Approach to City Networks," *Urban Studies*, Vol. 47, No. 10, pp.2195-2215.
- Schelling, Thomas, 1978, *Micromotives and Macrobehavior*, New York: W. W. Norton & Company.
- Shiozawa, Yoshinori, 1997, *Fukuzatsukie Keizaigaku Nyumon*, Tokyo: Japan Productivity Center (임채성 외, 역, 1999, 왜 복잡계 경제학인가?, 서울 : 푸른길).
- Smith, D. A., and M. Timberlake, 1993, "World Cities: a Political Economy/Global Network Approach," *Research in Urban Sociology*, Vol. 3, pp.181-207.
- Sterman, John D., 2000, *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*, Boston: McGraw-Hill.
- Tasaka, Hiroshi, 1997, *Fukuzatsu-Kei No Keiei*, Tokyo: Toyo Keizai (주명갑, 역, 1997, 복잡계 경영, 서울 : 한국경제신문사).
- Yoshinaga, Yoshimasa, 1996, *Fukuzatsu-Kei Towa Nani Ka*, Tokyo: Kodansa (주병갑, 1997, 복잡계란 무엇인가?, 서울 : 한국경제신문사).