

특집

복잡계 네트워크의 구조와 응용

정민준(한국과학기술원, 컴퓨터학과)

우리는 복잡한 네트워크 세상에 살고 있다. 점점 더 그 의존도가 높아지고 있는 인터넷을 포함하여 사실 우리 주위에서 일어나는 자연현상과 사회적 현상은 자세히 관찰해 보면 그 내면에는 매우 복잡한 네트워크(network)를 형성하여 있고 그 구성 개체들은 서로 유기적인 관계(interaction)를 가지고 활동하고 있다는 것을 알 수 있다. 복잡계 네트워크(complex system 혹은 complex network)로 불리는 이러한 예로 우선 최근 들어 관심이 급증하고 있는 생물학 쪽을 살펴보면, 거시적으로는 수많은 종(種)들이 서로 먹고 먹히는 먹이 사슬(food web)로 복잡하게 얽혀 있는 생태계가 한 예가 될 수 있고, 미시적으로는 세포 안에서 여러 단백질과 생화학물질들이 유기적 반응을 통하여 생성되고 소멸되는 신진대사 네트워크(metabolic network), 또는 인체의 신경조직망도 복잡계 네트워크의 예들이라고 할 수 있다. 수많은 별과 행성, 위성, 작계는 소립자들의 상호작용으로 이루어진 우주도 궁극적으로는 각 구성성분들의 다양한 관계로 얽혀진 네트워크의 구조로 이해할 수도 있다. 이러한 예들은 자연과학분야에만 국한되지 않아서 다른 분야들도 살펴보면, 먼저 사회학의

주요 연구 대상인 사람과 사람들 간의 다양한 인간관계가 네트워크로 연결되어져있는 우리 사회가 복잡계 네트워크의 대표적 예이고, 소비자로부터 여러 기업들, 더 나아가 국가들에 이르기까지 복잡한 계층구조를 갖고 있는 경제금융 네트워크, 다양한 기초기술과 응용기술, 고급기술들이 결합하여 이루어진 기술계, 또한 날로 그 중요성이 부각되고 있는 정보통신분야의 핵심적 역할을 하고 있는 인터넷과 World-Wide-Web, 역시 각 계를 구성하고 있는 구성성분들 사이에 매우 복잡한 유기적 관계, 즉 네트워크로 구성되어 있는 복잡계 네트워크의 좋은 예라고 할 수 있다.

이러한 복잡계는 서로간의 협동현상을 통하여 끊임없이 변화하며, 자체 조절화(self-organization)되고, 더욱 더 복잡한 구조를 이끌어내는 특징이 있다. 생태계에서 진화에 의한 보다 복잡한 생물체가 출현하는 일이나, 세포내의 신진대사를 통한 생명조절 현상, 별들의 진화에 의한 복잡한 은하계의 출현, 경제계에서 교역의 증대에 의한 화폐, 금융기관, 보험회사, 주식시장의 출현, 갈수록 복잡거대화 되고 있는 정보통신 네트워크 등 그 예는 이루 다 열거할 수 없다.

이와 같이 살아서 움직이는 복잡계들은 비평형 상태에 있으며, 현재 이러한 대상들을 이해할 수 있는 방법은 비평형통계역학 방법 밖에는 없다고 하겠다. 이러한 비평형 복잡계에서 일어나는 동역학적 성질을 연구하는 것이 요사이 각광을 받기 시작한 새로운 분야이고, 학문적으로나 응용 면에서나 매우 흥미롭다고 할 수 있다. 이러한 자체조절화된 복잡계는 어떤 특이축척(characteristic scale) 양이 존재하지 않고, 모든 축척이 존재하는 상태, 즉 자체적으로 임계상태(critical state)에 이르게 되는데 이때, 거시적으로 나타나는 현상은 멱함수법칙(power law)으로 설명되며, 장거리 축척 질서를 갖게 된다.

복잡계의 구성성분간의 유기적인 관계는 가장 쉽게는 멋대로 네트워크(random network)를 통해 기술될 수 있다. 우리가 이제는 거의 필수품처럼 사용하고 있는 World-Wide-Web(WWW)이 그 쉬운 예라 할 수 있는데, NEC 연구소의 최근 연구에 따르면, 현재 존재하는 총 웹페이지는 100억 개에 이른다고 추정되고 있으며, 그 숫자는 지금 이 순간에도 지수 함수적으로 증가하고 있다. 이들 100억 개 이상의 웹페이지들은 서로 유기적으로 연결되어 있음을 쉽게 알 수 있는데, 즉, 각각의 웹페이지에는 그 내용과 관련이 있는 다른 페이지들이 표기(URL-hyperlink)되어 마우스 클릭으로 연결될 수 있고, 이 연결된 페이지에서도 또 다른 페이지들로도 같은 방식으로 계속 연결이 되어있는 것이다. 따라서, 웹페이지들은 서로 유기적으로 연결되어 있으며, 각 웹페이지들이 업데이트됨에 따라, 유기적인 관계가 시간에 대하여 바뀔 수도 있다. 이렇게 서로 연결되어있는 웹페이지 네트워크에서 어떤 사실을 발견할 수 있을까?

웹페이지 네트워크를 좀더 정밀하게 연구하

기 위해, 제일 먼저 거시적으로 쉽게 측정 가능한, 각 웹페이지에 기록되어 있는 하이퍼링크(hyperlink)의 정보를 분석해 보기로 하자. 즉, 웹페이지들이 어떠한 식으로 연결이 되어있는지를 네트워크의 구조적 입장에서 살펴보기로 하자. 대부분의 웹페이지에는 클릭을 하면 연결할 수 있도록 다른 URL들이 링크 되어 있다. 예를 들어, 신문이나 도서관의 웹페이지에는 링크가 되는 웹페이지들이 많이 들어 있는 반면, 개인 홈페이지에는 상대적으로 적게 들어있다. Crawler를 이용한 웹페이지에 관한 데이터 수집을 통해 WWW의 지도를 만들고 각 웹페이지에 기록되어 있는 링크 수(즉, 각각의 페이지에 몇 개의 클릭 할 수 있는 링크가 담겨져 있는가) k 의 분포도를 조사하면, 대부분의 웹페이지가 엇비슷한 숫자의 링크를 가질 것이라는(수학적으로는 Gaussian 분포) 기존의 멋대로 네트워크의 예측과는 달리 $P_{out}(k) \sim k^{-\gamma_{out}}$ ($\gamma_{out} \simeq 2.5 \sim 2.7$)라는 멱함수법칙을 따른다는 것이 최근 필자의 논문 결과이다. 또, 반대의 관계(웹페이지에서 연결되어 나가는 링크가 아닌 다른 웹페이지로부터 그 웹페이지로 연결되어지는 들어오는 링크)도 생각해 볼 수 있는데, 예를 들어 Yahoo 라는 사이트는 자기도 모르는 많은 웹페이지로부터 연결을 받고 있지만, 개인 홈페이지는 그 개인을 아는 상대적으로 적은 웹페이지로부터만 연결을 받고 있다. 이러한 연결을 받는 빈도수의 분포함수를 구하면, 역시 멱함수법칙의 $P_{in}(k) \sim k^{-\gamma_{in}}$ ($\gamma_{in} \simeq 2.1$)의 분포함수를 따른다는 사실을 알 수 있다.

여기서 한 가지 주목해야할 점은 이러한 연결 선분포(degree-distribution)라고 불리는 분포함수의 멱함수법칙은 World-Wide-Web에 국한되지 않고 놀랍게도 앞서 언급했던 여러 가지 다

양한 복잡계 네트워크에게서 공통적으로 나타나는 특징이라는 점이다. 물론 WWW의 연결을 가능하게 해주는 물리적인 실체인 인터넷의 연결 구조 또한 멱함수 분포를 따른다는 것도 밝혀졌다. 그럼 이러한 복잡계 네트워크의 구조에서 나타나는 멱함수 법칙의 의미는 무엇일까? 한마디로 말하면 네트워크의 연결구조가 매우 불균일하게 연결되어있다는 것을 뜻한다. 다시 말해서 기존의 멱대로 네트워크 이론을 따르면 네트워크들은 각 연결점들이 비슷한 연결정도를 갖는 균일한 네트워크 구조를 지닐 것으로 예상되었고, 그러한 모델들이 연구되었으나 최근의 일련의 연구를 통해 이러한 균일한 네트워크 구조는 실존하는 여러 가지 네트워크의 구조를 설명하는데 부적합하다는 것이 밝혀졌고, 그 대신 연결 구조가 불균일한 멱함수법칙을 따르는 스케일-프리 구조를 따른다는 것이 밝혀진 것이다. 인터넷의 예를 들어서 설명을 해보기로 하자. Cyber 공간의 WWW이 아니라 정보통신의 backbone 역할을 하고 있는 실제 물리적인 인터넷 망은 결국 수많은 컴퓨터와 이들을 연결하는 장치인 라우터(노드)로 이루어진 네트워크로 볼 수 있는데 이러한 인터넷의 연결 구조를 분석해보면 인터넷은 기존의 이론에서 가정해 온 것처럼 ‘균일한’ 네트워크가 아니라 ‘스케일-프리’ 모델에 가까운 불균일한 네트워크임을 알 수 있었다. 덕분에 무작위 네트워크(random network) 모델에 기초한 기존의 많은 인터넷 모델(Internet Topology Generator)들이 실제 인터넷의 모습과는 전혀 다른 결과를 주고 있었다는 사실 또한 밝혀졌다. 균일한 네트워크와 불균일한 네트워크의 차이점을 좀더 알기 쉽게 비유를 들어 설명하면, 각 도시를 연결하고 있는 고속도로망과 항공망을 비교해서 생각할

수 있는데, 각 도시를 연결하는 고속도로망을 위와 같은 네트워크의 구조적 입장에서 보면 균일한 네트워크로, 항공망은 스케일-프리 네트워크로 생각할 수 있다. 왜냐하면 도시를 연결하는 고속도로의 수는 대부분 2-4개 정도로 비슷한 균일한 구조를 보이지만, 항공망의 경우는 몇몇 대도시에 많은 비행편이 집중돼, 이러한 허브공항(Hub)이라고 불리는 대도시들이 작은 연결편 수를 지닌 여러 중소도시들을 연결하는 중요한 역할을 하게 되는 불균일한 구조를 지니기 때문이다. 결국 WWW과 인터넷 등 많은 복잡계 네트워크들이 균일한 구조를 지닐 것이라는 기존의 이론과는 달리 항공망과 같은 불균일한 멱함수 법칙을 따르는 스케일-프리 구조를 지닌다는 것이다.

그럼 이러한 불균일한 스케일-프리 네트워크 구조가 우리에게 어떤 영향을 미칠 수 있을까? 다시 말해서 이러한 불균일한 네트워크의 구조가 우리와 어떤 상관이 있는 것일까? 언뜻 보기에는 아무런 상관이 없을 것 같지만 실제로는 우리가 이제껏 당연히 여겨왔던 여러 가지 복잡계 네트워크의 성질을 정확하게 설명해주는 중요한 역할을 하고 있음을 알 수 있다. 예를 들어, 항공망의 경우 무작위로 도시를 선택해 그 공항에 기계적 오류 등 문제가 생긴다고 가정하면 상대적으로 수는 많지만 연결중요도가 낮은(즉, 연결비행편 수가 많지 않은) 중소도시가 선택될 확률이 크기 때문에 전체 항공망의 운영에는 큰 장애가 생기지 않는다. 그러나 네트워크 구조를 잘 아는 테러리스트가 중요한 공항 몇 곳만을 골라서 공격한다면 전체 항공연결망은 순식간에 마비되고 말 것이다. 이러한 비유와 같이 인터넷의 구조도 항공망과 같은 ‘스케일-프리’ 구조이기 때문에 무작위적인 오동작이나

고장에는 강하지만 (즉, 언제나 피할 수 없게 되는 컴퓨터나 라우터의 기계적인 고장이나 오동작에도 불구하고 우리가 이메일을 보내고 웹서핑을 하는데 큰 문제가 없는 것이다) 그러나 계획적 공격에는 (예를 들면 Denial of Service 공격이나 웜에 의한 최근의 인터넷 대란 등) 치명적인 약점을 지니고 있다는 것이 밝혀진 것이다. 결국 인터넷의 구조를 잘 알고 있는 누군가가 중요한 노드 1%만 공격해도 전체 인터넷 기능의 절반이 마비되고 4%정도를 공격하면 인터넷은 연결이 완전히 끊긴 조각으로 파편화 된다는 것이다. 다시 말해 동전의 양면성과 마찬가지로 이러한 스케일-프리 네트워크의 구조는 무작위적인 오동작이나 고장에는 아주 강한 장점을 지니고 있는 반면, 연결중요도가 높은 곳에 대한 계획적인 공격에는 무기력한 단점을 지니고 있게 되는 것이다. 이러한 정보통신분야의 연구는 현재 세부 연구가 진행되고 있는 분야로, 네트워크의 구조를 정확히 알아서 이러한 장점을 좀더 살리고 단점을 보완하고자하는 새로운 차세대 인터넷의 디자인의 핵심 요소로 자리 잡고 있다.

그럼 이러한 불균일한 스케일-프리 네트워크 구조에서 나타나는 멱함수 법칙은 어떻게 해서 나타나게 되었을까? 멱함수 법칙은 빈익빈 부익부로 설명될 수 있는 불평등한 선택적 연결법칙 (preferential attachment principle)에 기본을 두고 있다는 사실이 최근의 연구결과이다. 다시 WWW의 예를 들면, Yahoo나 Amazon과 같이 기존의 잘 알려진 웹사이트가 새로 만들어지는 웹페이지에 연결되는 페이지로 등재될 확률이 잘 알려지지 않은 다른 웹페이지들에 비하여 높다는 것이다. 왜냐하면, 유용성 면에서 다른 웹페이지에 비하여 훨씬 뛰어나기 때문이고 따라

서 잘 알려져 있기 때문이다. 결국 이에 힘입어 Yahoo나 Amazon 웹사이트는 더욱더 번창하게 된다. 경제현상의 부익부 빈익빈 현상에 비유될 수 있는 이러한 네트워크의 형성 특징은 불균일한 스케일-프리 네트워크 구조를 형성하는데 중요한 요소이다. 이러한 예에서 우리는, 기존의 상태가 앞으로의 미래에 영향을 미친다는 사실을 알 수 있고 따라서 복잡계 네트워크의 미래를 예측하기 위해 현재 네트워크의 구조를 연구해야한다는 필요성을 확인 할 수 있다. 이러한 관점에서 인터넷의 정확한 모델을 만들기 위한 연구도 행해졌는데 기존의 무작위 네트워크 이론이 아닌 빈익빈 부익부 법칙에 의해 연결선들이 결정되어 현재의 실제 인터넷의 구조와 같은 불균일한 스케일-프리 네트워크를 만드는 인터넷 모델이 (Internet Topology Generator) 제안 되기도 하였다. 이 연구 결과에 따르면 인터넷의 연결 구조는 새로운 라우터가 기존의 인터넷에 연결되려할 경우 연결선 수가 적은 라우터보다 연결선 수가 많은 라우터가 선택되어 연결될 확률이 높다는 선택적 연결법칙과 함께 연결선의 길이에 따른 비용 문제 때문에 연결선 길이에 반비례하는 확률효과도 고려가 되어져야한다는 사실이 밝혀졌다. 이러한 두가지 효과를 고려하여 네트워크 모델을 만들면 실제 인터넷과 정확히 맞는 인터넷 모델을 만들 수 있을 것이다.

그러면, 이러한 복잡계 네트워크의 구조를 안다는 것이, 실제로 어떤 응용분야가 있을까? 간단한 예로, WWW의 구조가 검색엔진의 정보 수집에 필수요소라는 사실을 들 수 있다. Yahoo나 google과 같은 좋은 검색엔진이 없다고 생각해 보자. 우리는 정보를 찾기에 많은 노력이 필요하게 될 것이다. 어찌면, WWW을 통한 정보 검색이라는 것이 아예 불가능할 지도 모른다.

따라서 이러한 네트워크의 구조를 정확히 이해하는 것이 실제 WWW을 이용하는데 큰 실질적인 도움을 줄 수 있는 것이며, 이러한 방향으로 현재 NEC 연구소, 인터넷 Archive 등이 새로운 검색엔진개발에 관한 연구를 진행하고 있다. 또한 앞서 예를 들었던 인터넷의 경우에, 차세대 인터넷의 디자인과는 별도로 기존의 인터넷의 보안성을 높이기 위해, 네트워크의 구조를 파악하여 중요한 허브 역할을 하는 컴퓨터를 알아냄으로써 해커 등의 침입에 의한 인터넷의 마비를 예방할 수 있는 정보를 제공하기도 한다. 또한 앞서 예를 든 새로운 인터넷 모델을 사용하면 원하는 사이즈의 인터넷을 원하는대로 구성할 수 있어서 새로운 프로토콜들을 실험할 때 유용하게 사용할 수 있을 것이다. 이러한 복잡계 네트워크의 구조 연구 응용분야의 더욱 중요한 예는 요사이 큰 각광을 받고 있는 생물정보학 (bio-informatics) 분야의 생물체 네트워크에서 찾아 볼 수 있다.

생물학의 생명체 내부에서 일어나는 복잡한 유기화학 반응들로 구성되어있는 신진대사 네트워크를 생각해 보자. 이와 같은 유기화학 반응망에서도, 반응의 연결선을 가지고 연결 링크 수의 분포도를 그려보면, 이 역시 멱함수분포도를 갖는다는 것이 최근 연구논문에서 밝혀졌다. 이러한 신진대사망에서 가장 연결중요도가 큰 물질을 제거하면 생물체에서 신진대사가 활발히 일어나지 못하게 되어, 결국 생물체는 죽게 될 수 있음을 쉽게 예측할 수 있다. 이러한 사실을 이용하여 바이러스의 신진대사 망을 이해하고 있으면, 그 바이러스에 감염된 질병을 치유하는 백신을 개발할 수도 있으며, 또 반대로 신진대사가 약한 경우에는 필요한 부분을 보강할 수도 있을 것이다. 최근에 많은 사람들의 관심

의 대상이 되고 있는 게놈 프로젝트까지 이 개념을 확장하여 적용하면, 최근에 밝혀진 유전자 지도를 가지고 그 유전자들의 상호작용을 통한 네트워크 연결 구조를 밝히고 이렇게 알아낸 정확한 네트워크 정보를 여러 가지 질병을 진단하고 치료하는데 이용할 수 있을 것이다. 이러한 맥락에서 최근에는 유전자, 좀더 엄밀히는 유전자가 생성해내는 단백질들의 상호 관계를 네트워크의 개념을 통해서 새로운 방식으로 이해하여 게놈프로젝트 이후 가장 중요시 되고 있는 transcriptomics 와 proteomics 분야의 연구가 활발히 진행 중이며 효모(Yeast) 단백질 네트워크의 중요성에 관한 논문이 최근 발표되기도 하였다. 물론 이러한 연구 결과를 잘 활용하기 위해서는 실제 백신 개발을 하고 있는 연구소와의 산학 협동, 또한 생물학적 지식의 도움을 받을 수 있는 생물학자 및 효율적인 정보처리를 위한 컴퓨터공학 연구자들과의 자유로운 학제간 연구가 절실히 필요할 것이다.

이러한 복잡한 네트워크는 생명체 내부뿐만 아니라 개개의 생명체 간에도 존재한다. 먹이사슬이라고 불리우는 생태계가 바로 그 예이다. 최근 들어 생태계를 연구하는 학자들은 엄청나게 복잡한 네트워크를 눈앞에 두고 그 연구방법을 모색하고 있다. 일례로, 남아프리카공화국 수산업계에서는 꽤 오래 전부터 서부 해안에 서식하는 바다표범의 수를 줄이면 가격이 비싼 남방대구의 어획량이 늘어서 경제적인 이득을 얻을 수 있을것이라고 주장해왔다. 바다표범이 주로 남방대구를 잡아먹고 사는 것이 사실이므로 그들의 주장에는 무시못할 수학적 논리가 담겨 있는 것 같기는 하다. 하지만 조금만 멀리 떨어져서 이 상황을 살펴보면 그리 단순하지만은 않다. 바다표범과 남방대구는 남아프리카공화국

서해안에 살고 있는 여러 가지 수산생물들이 이루고 있는 먹이사슬망의 극히 일부분에 지나지 않는다. 예를 들어 상어는 남방대구와 바다표범을 함께 잡아먹으며, 또 바다표범 역시 상어를 잡아먹기도 한다. 이러한 전체 먹이사슬망의 연결관계를 무시하고 바다표범과 남방대구 달랑 둘만을 떼어내서 생태학적인 간섭을 예측한다는 것은 있을 수 없는 일인 것이다. 좀더 전문적으로 이야기하면, 캐나다 겔프대학의 생태학과 교수인 피터 요지즈 박사는 바다표범 개체 수에 변화가 일어날 경우, 남방대구의 개체수는 그 중간에 개입된 여러 관련 종들에 의한 2억2천5백만 가지도 넘는 도미노 연쇄 상호작용을 통해 결정될 것이라고 추산했다. 따라서 남방대구를 잡아먹는 바다표범을 제거하는 것이 직접적으로 남방대구의 숫자를 늘릴 것이라는 예측은 어찌보면 무모한 것인지도 모른다. 중간에 개입한 다른 여러 생물들에 의한 영향으로 오히려 숫자가 줄어들지도 모르기 때문이다.

바다표범-남방대구 네트워크는 생태계의 엄청난 복잡성을 보여주는 한가지 예에 지나지 않는다. 물론 이밖에도 복잡계에 대한 우리의 무지로 인해 재앙을 자초할지도 모르는 사례는 얼마든지 있다. 지질학의 역사를 뒤돌아볼 때 최소 다섯 번 정도의 대규모 재앙이라 일컬을 만한 사건들이 있었는데, 그때마다 전세계 모든 종의 50퍼센트 이상이 갑자기 지구상에서 사라졌다고 한다. 최근 들어 인류가 지구 환경을 훼손시키고 동요함으로써 스스로 여섯 번째의 재앙을 초래하고 있는지도 모른다는 주장이 과학자들 사이에서 나오고 있다. 이러한 주장의 타당성을 검증하고, 또 무엇보다도 이러한 만일의 사태를 피할 방법을 찾기위해서는 당연히 복잡한 생태계 네트워크의 작동원리를 잘 파악하고

이해해야 할 것이다.

복잡계를 네트워크 개념을 이용하여 바라보는 이러한 접근 방법은 인문학, 특히나 사회학과 경제학 분야에서도 최근 연구에 활발히 사용되기 시작하였는데, 특히나 사회학 분야에서는 컴퓨터 및 인터넷의 발달로 기존에는 접할 수 없었던 많은 양의 데이터들이 손쉽게 접근가능하여짐에 따라, 예를 들면 사이버 공간(Cyberspace) 상에서의 사회 집단의 경우 등 (예를 들면 인터넷상의 동호회 등) 실제 사회에서 추적 이 불가능했던 많은 수의 구성원들로 이루어진 집단을 쉽고 엄밀하게 정의하고 그 집단의 성질을 손쉽게 연구할 수 있게 됨에 따라 대규모 데이터를 이용한 사회 네트워크 분석이 새로운 사회학 분야의 연구 주제로 각광을 받고 있다. 또한 많은 데이터베이스의 자료들을 바탕으로 새로운 사회관계 및 집단을 네트워크의 입장에서 정의하고 그 네트워크의 성질을 연구하여 사회학에서 많이 관찰되어왔던 사실들을 새로운 각도에서 올바르게 설명하려는 시도도 활발히 이루어지고 있다. 경제학 분야에서는 각 기업간의 연결 관계를 각 기업의 주가의 변동에 따른 상호상관관계 계수로 정량화 하고 이렇게 이루어진 각 기업들 간의 네트워크의 구조를 분석, 여러 필요한 양들을 측정하고 이를 바탕으로 새로운 예측을 하려는 시도가 이루어지고 있다.

기존의 물리학의 지식과 방법을 이용하여 새로이 등장한 여러 복잡계 네트워크들, 정보통신 네트워크, 사회 및 경제-네트워크 (social & econo network), 생명정보학 (bio-informatics) 및 bio-technology의 제반 문제들을 연구하는 것은 현재 세계적으로도 경쟁적으로 연구가 수행되어 지고 있는 분야이며 국내에서도 신속히 연구를 시작해야하는 중요한 분야로 생각되며

기초적인 새로운 학문으로서의 중요성을 제외하더라도 그 다양한 응용분야를 생각할 때 관심이 필요한 분야라고 생각된다. 또한 앞서 언급했듯이 이러한 연구는 그 특성상 다양한 학문간의 조화가 필수적인 학제간 연구이므로 국내에서도 기존의 틀을 깨고 여러 학문분야의 긴밀한, 상호보완적인 협조를 통한 활발한 연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] R. Albert, H. Jeong, and A.-L. Barabasi, "The diameter of the World Wide Web", *Nature* 401, 130 (1999).
- [2] A.-L. Barabasi and R. Albert, "Emergence of scaling in random networks", *Science* 286, 509 (1999).
- [3] A.-L. Barabasi, R. Albert, and H. Jeong "Mean-field theory for scale-free random networks", *Physica A* 272, 173 (1999).
- [4] R. Albert, H. Jeong, and A.-L. Barabasi, "Error and attack tolerance of complex networks", *Nature* 406, 378 (2000).
- [5] A.-L. Barabasi, V.W. Freeh, H. Jeong, J.B. Brockman, "parasitic computing", *Nature* 412 894 (2001).
- [6] H. Jeong, B. Tomber, R. Albert, Z.N. Oltvai, and A.-L. Barabasi, "The large-scale organization of metabolic networks", *Nature* 407, 651 (2000).
- [7] H. Jeong, S.P. Mason, A.-L. Barabasi and Z.N. Oltvai, "Lethality and centrality in protein networks", *Nature* 411, 41 (2001).
- [8] R. Albert, and A.-L. Barabasi, "Statistical mechanics of complex networks", *cond-mat/0106096*.
- [9] S.N. Dorogovtsev, and J.F.F. Mendes, "Evolution of networks", *cond-mat/0106144*.
- [10] S.-H. Yook, H. Jeong, and A.-L. Barabasi, "Modeling the Internet's Large-Scale Topology", *Proc. Nat. Acad. Sci.* 99, 13382 (2002).

- [11] Author likes to thank B. Kahng R. Albert, Z.N. Oltvai and A.-L. Barabasi for helpful discussion and KAIST for generous financial support.

저자소개

정 하 용

1981년	서울대학교 물리학과 이학사
1983년	서울대학교 물리학과 이학석사
1988년	서울대학교 물리학과 이학박사
1998년	이론물리연구센터 연구원
1999년	-2000년 미국 Univ. of Notre Dame Postdoc
2001년	-2001년 미국 Univ. of Notre Dame, 연구 조교수
2001년	-현 재 한국과학기술원 물리학과 조교수/부교수
	주관분야 Complex Systems (복잡계)