

생태학과 인공생명

洪 英 男
서울대학교 生物學科

I. 들어가는 말

인공생명은 생물체를 모델로 모의실험을 도구로 하여 생명현상의 본질, 진화 메카니즘등 지금까지 해결하지 못한 중요한 문제들을 해결하려는 새로운 과학분야이다. 특히 생물의 발생과 발달, 그리고 진화과정의 복잡하고 긴 시간을 요하는 문제들을 컴퓨터를 통하여 시간을 단축하여 복잡한 과정의 근본적인 물음에 효율적으로 답하려고 한다. 더욱이 인공 유기체가 미리 프로그램되어 있지 않은 특성을 만들어 내는 창발성을 다룬다. 생태학은 이미 1세기전부터 수학적 모델에 대한 연구가 이루어졌으며 현재 생태계 연구에서 컴퓨터는 가장 강력한 도구로 사용되고 있다. 먼저 생태학과 인공생명을 다루기 전에 생명이란 무엇인가? 그리고 생태학이란 무엇인가를 간략히 소개하고자 한다.

1. 생명이란 무엇인가?

지구상에 살고 있는 생물들은 생명을 지니고 있다. 그러나 생명이란 무엇인가? 라는 근본적인 질문에는 당혹함을 갖는 것이 우리다. 생명이라는 추상적인 단어는 그것을 지닌 생물들이 나타내는 현상으로 이해된다. 그러므로 생명현상을 이해함에 따라 생명을 이해할 수 있다. 지구상의 생물은 다음 여섯가지의 특성으로 설명할 수 있다.

- ① 생명체는 조직화되어 있다. 우주의 모든 것은 무질서의 상태로 나아가려는 경향이 있기 때문에 생물이 이에 반하여 일정한 체제를 유지하지 않으면 효과적인 생존이 어렵다.
- ② 생명체는 환경으로부터 물질과 에너지를 얻는다. 이것을 이용해 생물체는 자라고 생명을 유지한다.
- ③ 생명체는 번식한다. 생물체는 번식을 통해 자기의 화학정보(DNA라고 불리는 분자의 독특한 배열)를 자손에게 전한다.
- ④ 생명체는 환경에 대하여 반응을 한다. 자연 환경 중의 어떤 것은 생명체에 자극으로 작용하여 생물로 하여금 반응을 유발시킨다.
- ⑤ 생명체는 환경에 적응한다. 적응이란 환경에

생물체가 유리한 방향으로 자신을 맞추어 나감을 의미한다. 겨울철에 이리의 털이 두껍게 발달하듯이 개체는 물론 개체군도 자연에 적응한다. 이러한 개체군 안에서도 주어진 환경에 가장 잘 적응하는 개체가 수명이 길고 더 많은 자손을 생산하게 되는 것이다. 오랜 시간에 걸쳐 개체군의 여러 세대가 적응 과정을 거치면서 진화한다.

- ⑥ 생명체는 항상성(homeostasis)을 유지하려는 경향이 있다. 즉, 생물체는 감각과 반응을 통하여 유지되는 물리적, 화학적 항상성하에서 존재하려는 경향을 띠는 것이다.

2. 생태학이란 무엇인가?

지구환경의 오염으로 생태학에 관련된 문제가 최근 세계적으로 큰 관심이 쏠리고 있다. 생태학자들이 그들의 역할에 대해 최선을 다하고 있다고 하지만 생태학 분야는 아직도 일반의 주목을 받을 정도로 성장해 오고 있지는 않다.

생태학이란 말할 것도 없이 종합학문이다. 대상이 되는 공간적 스케일은 아래로는 분자수준에서부터 위로는 군집 및 생태계에 이르기까지, 시간축을 생각해도 생리 및 행동 수준의 짧은 스케일로부터 진화 수준의 긴 스케일까지를 포함한다.

이와같은 중요성에도 불구하고 겹쳐져 있는 계층의 복잡성을 회피하기 위하여 생태학자들은 우선 계층마다의 문제를 생각해 보려는 시도를 해왔다. 생리생태학, 행동생태학, 개체군생태학 등의 학문체계의 세분화가 보여주는 것처럼, 주목하는 공간적, 시간적 스케일을 제한하는 것에 따라 대상을 “구분하고”복잡성을 만족하는 범위 내에 머물도록 노력해 왔다. 그러나 대상범위를 작게 나누면서 오히려 외부에는 그대로 복잡성이 남게 되었다.

연구대상을 자연계에 존재하는 생명현상으로 제한하는 한 여기에 얽히고 확대된 요인의 복잡성 때문에 진정한 의미로서의 종합적인 연구는 불가능해졌다. 여기에 다가 1920년대부터 시작된 또한 하나의 “분리”작업, 결국 개념의 추출이 시작되었다. 수학 모델이 등장한 것이다. Lotka Volterra 방정식이라고 하는 고전역학에 기초한 모델은 지금까

지도 많은 수리모델의 핵심 부분으로 사용되어 왔다. 진화적으로 안정된 전략에서 주목을 받은 게임이론에 기반한 모델에도 기본적으로 이 고전역학계의 수리모델과 동일한 것이다. 또한 시스템공학으로부터 힌트를 얻어 생태계를 에너지의 흐름으로 파악하는 시스템으로 생각하는 방안도 제출되었다.

한편 진화과정과 집단유전학에도 수학이 도입되어 양적 형질의 유전을 구성하고 있는 종의 절멸 등의 논의가 제기되기도 했다. 수리 모델에 따른 추상화가 시작된 것과 거의 마찬가지로 일부 생태학자들 중에는 세 가지의 “분리”작업이 시작되었다. 실험개체군을 사용한 연구가 등장한 것이다. 사육하기에 간단한 생물을 사용하여 연구실에 인공 생태계 정원을 만들어 자연계에서와 같은 먹고 먹히는 관계 및 경쟁 관계를 재현한 것이다. 현재 수중미생물과 곤충을 대상으로 하여 연구가 진행되고 있다.

이러한 식의 연구는 많은 비판을 받기도 했다. 자연계에 존재하지 않는 시스템에서 얻은 결과는 자연계의 현상을 해명하는 데 아무 소용이 없다는 이유에서였다. 실험개체군의 연구는 수학모델과 야외 연구의 중간점에 위치한다.

수학모델에서 보면 추상적 작업에 생물을 사용하고 있을 뿐이라는 비판을 받는다. 이런 딜레마의 상태에서 감히 “분리”에 구애받지 않는 접근이 바로 인공생명이다. 그러므로 인공생명을 생태계에 응용할 수 있는 가능성과 문제점을 고찰하도록 하자.

II. 본 론

1. 게임전략

Toquenaga는 콩을 잡아먹는 바구미의 실험개체군을 이용하여 개체군 동태의 메카니즘을 연구해 왔다. 콩바구미의 성충은 콩의 표면에 알을 낳고 그곳에서 자란 유충은 콩 속으로 들어가 유충기와 번데기의 기간을 지나 다시 콩의 외부로 성충이

되어 나온다. 콩 속의 유충에는 2가지의 전략이 있다. 하나는 호전주의로 같은 콩 속에 있는 다른 개체를 죽여 콩을 독점하는 것이다. 다른 하나는 평화주의로 같은 콩 속에 있는 다른 개체들과 공생하는 것이다.

자연계에는 여러 가지 콩과식물이 있다. 콩바구미는 콩과식물에 있어 상당히 귀찮은 포식자이다. 콩과식물은 바구미의 공격을 피하기 위하여 바구미에 대해 유독물질을 가지도록 진화하여 왔고 콩의 크기를 작게 하고, 그 대신에 콩의 수를 증가시켜 피식율을 완화시켜 왔다. 후자의 경우, 바구미의 입장에서 생각하면 작은 콩을 다른 개체와 공유하는 것은 성장하는 데 충분한 먹이를 얻지 못할 지도 모른다. 거기에서 하나의 콩을 한 개체가 독점하는 호전주의가 선택되게 된 것이다. 확실히 야외의 작은 콩에 살고있는 바구미의 대부분은 호전주의이다. 한편 인간이 먹기 위하여 재배하거나 창고에 저장하고 있는 큰 콩을 잡아먹는 바구미의 대부분은 평화주의자들이다. 결국 자연계에서 일어나고 있는 작은콩-호전주의의 공진화에 대해 인간은 큰콩-평화주의라고 하는 정반대의 공진화를 시작한 것이 된다.

Toquenaga는 위에서 말한 바와 같은 시나리오를 실험실의 유리접시 위에서 재현했다. 호전주의적인 콩바구미와 평화주의적인 콩바구미를 콩의 크기를 변화시켜 여러 세대에 걸쳐 사육한 결과 예상대로 큰 콩에서는 호전주의적인 콩바구미가, 작은 콩에서는 평화주의적인 콩바구미가 절멸하고 말았다. 그러나 2개의 콩바구미 사이에서 유전적인 교류가 일어나는 경우에는 확실히 개체수의 변동의 모습은 “큰콩-평화주의” “작은콩-호전주의”의 시나리오대로 되어 있었으나 살아남은 개체군의 유전적 조성을 보면 시나리오대로의 패턴은 보여주지 않았다.

유전을 고려한 모델은 1970년 후반부터 갑자기 각광을 받아왔다. 양적 유전학을 사용하는 것이 고려된 것이다. 이것은 생물이 갖고 있는 여러 가지의 생활사 전략을 유전의 계통 위에서 엮어감으로서 진화해가는 모양을 묘사하는 수법이다. 선명한 선형대수의 기법과 정규분포의 가정에 근거하는

이론은 그러나 그 가정이 비현실적이라는 것과 어떤 예측을 얻기 위하여 필요한 실험양이 너무 크기 때문에 실용적이지 않다는 결점을 지닌다.

여기에서 문제는 생태계가 가지고 있는 계층성에 기인하는 것이다. 자연계의 현상을 조작가능한 인공정원에서 재현한 것에도 거기에는 아래로는 유전자 수준에서 위로는 개체군 혹은 군집수준까지의 계층이 존재하고 각 수준마다 고유의 사상의 연속 반응의 결과로서 큰 콩-평화주의, 작은 콩-호전주의의 도식이 그려지는 것이다. 이 계층의 주된 무언가를 세워가기 위해서는 인공생명의 수법을 이용하는 것을 생각해 낸 것이다.

2. 인공생명을 이용한 해석

처음의 단계는 개체군 수준현상을 개체수준, 혹은 행동수준으로 나누는 것이다.

한마디로 호전주의, 평화주의라고 말하고 있지만, 이것은 콩 속에 들어있는 유충개체군 수준의 기술이다. 그러면 콩 속에서 한 개체는 무엇을 하고 있는 것인가? 간단하게 보면 다음과 같다.

콩을 주변부와 중심부의 두 부분으로 나누어져 있다고 가정하자. 알에서 변화한 유충은 우선 콩의 주변부에서 서로 빨리 먹는 경쟁을 한다. 거기에서 충분한 먹이를 얻은 자는 성충이 되어 바깥으로 나오지만 성충이 되기에 충분한 먹이를 얻지 못한 것들은 다시 콩의 중심부로 들어간다. 거기에는 빨리 먹는 경쟁과 동시에 만약 호전적인 성격을 가진 유충이 있는 경우에는 이 개체에 의해 다른 개체를 죽이기를 반복해 넓어지게 된다.

이러한 개체수준의 시나리오에 다시 유전 요소를 포함시켜 컴퓨터상에 재현하기 위하여 유전적 알고리즘을 사용한 인공생명, 마메조(MAMEZO)의 작성이 이루어졌다.

우선 각 개체는 4가지의 생활사 파라미터(콩 속에서의 먹는 속도, 콩 속에서의 구심성, 다름을 하는 정도, 그리고 콩 밖에서의 알의 산란분포)로 특징지어진다. 이 네 가지의 파라미터는 2배체의 염색체에 암호화되고 점돌연변이 및 교차라고 하는 유전적 오퍼레이터가 시행된다.

공학에서 이용되고 있는 유전적 알고리즘과 크

게 다른 것은 적응관계수가 陽으로 정해져 있지 않은 것이다. 적응도는 주어진 콩 속의 주어진 다른 개체의 존재를 토대로 얼마만큼 살아남을지로 평가된다. 최초로 생활사 파라미터의 수치를 亂數로 정해 진화를 시작하면, 확실히 “작은 콩-호전주의, 큰 콩-평화주의”의 시나리오가 재현된다. 또 각 생활사 파라미터에도 실제의 콩바구미에서 볼 수 있는 것과 같이 분화해 호전주의에는 구심성이 높아지지만 성장속도는 느려지고 산란분포는 한가지 모양으로 분포되는데 비해 평화주의에는 성장속도가 빨라지고 구심성은 낮고 알은 집중분포하도록 진화하였다.

생태학 분야에도 컴퓨터의 발달에 따라 많은 컴퓨터 시뮬레이션이 이루어졌다. 그것은 해석적으로 풀지 못한 방정식의 수치해를 산출하는 것과 일반적으로 넘새라고 말하는 몬테카를로시뮬레이션이었다. 또 정확히 인공생명이 처음 출현한 1980년대의 후반 생태학 분야에도 mechanistic approach라든가 individual-based modeling이라고 하는 캄프프레스를 토대로 새로운 생태계 시뮬레이션 방법이 모색되기 시작했다. 이것은 이름과 같이 시스템의 상당히 아래 수준에서 오브젝트 지향적인 모델 구축을 하는 것으로 인공생명의 특징을 거의 갖추고 있는 것이다. 종래의 접근방법과 인공생명과의 차이는 크게 보아 어떻게 규칙을 규정하느냐에 있다.

인공생명에서 시스템을 규정하는 규칙은 국소적으로 단순한 것이고 포토맵에 쌓인 과정으로 大域的인 규칙은 창발적인 emergent가 발생하여 또 국소적인 규칙에 피드백된다고 하는 루프를 형성한다. 종래의 mechanistic approach 및 Individual-based modeling에는 이와같은 大域的인 규칙의 생성에 대해 명확한 규정은 없이 많은 경우 모델 제작자가 미리 양으로 규정하고 있는 경우가 많다. (예를 들면 개체당 평생 낳는 알의 수를 최대로 하는 것...등)

그러면 마메조는 어떻게 될까. 호전주의와 평화주의라고 하는 개체군 수준의 기술을 네가지의 생활사 바로미터로 나뉜 단계는 mechanistic 혹은 Individual-based 에는 있지만 大域的인 규칙은

전혀 명확히 되지 않고 있다.

마메조 1개체의 적응도는 유전적 알고리즘에 따라 생겨나는 생물적 환경에 따라 陰으로 정의되고 있다는 점에서 훌륭히 인공생명이다.

그러나 평화주의와 호전주의를 개체 수준으로 나누기 위하여 어떻게 생활사 바로미터로서 4개의 것을 선택해 왔는가라고 하는 질문에 대해서는 답을 금할 수 없다. 도대체 이 4가지의 바로미터와 이것을 둘러싼 콩의 크기 등 환경변수의 조합 중에 추구하고 싶은 해답(이는 큰 콩-평화주의, 작은 콩-호전주의의 대응)이 반드시 포함되어야 한다. 유전적 알고리즘은 미리 존재하는 해답을 꺼집어낸 것이 아닌가? 본래대로 한다면, 어떤 생활사 바로미터가 관여하는지도 포함하여 포토맵에 모델을 구축해야 하는 것이 아닐까.

3. 생태계에의 적용과 그 문제

인공생명은 어디까지나 현존하는 생명을 이해하는 경우에 참조하는 모델로서 인공생명을 취급하는 Weak ALife와 현존하는 생명과 관계없이 스스로 만들어낸 인공생명 그 자체를 연구대상으로 하는 Strong ALife라고 하는 두가지의 입장이 있다.

Weak ALife의 입장에서 생태학에 응용된 인공생명은 캘리포니아주 오렌지군의 버섯의 동태를 예측한 RAM 및 땅벌의 사회성의 수수께끼의 해명을 시도한 MIRROR등이 있다. 어떤 것이라도 오브젝트 지향에 근거해 국소적인 규제를 발생시키고 그에 따라 생성되는 대역적인 현상과 실제의 자연계에서 얻어지는 패턴을 부품의 행동으로 분해하는 경우에 실제로 자연을 관찰하고 있는 생태학자의 직감에 근거한 간략화를 필요로 한다.

이와 같이 대역적으로 창발적인 현상을 얻기 위해 처음부터 직감에 따라 정도해 공간을 좁게 한다는 문제를 가지고 있는 것이다. 여기에 Weak ALife가 안고 있는 문제점을 열거해보면 다음과 같다.

- ① 모델이 번잡해진다는 것이다.
- ② 결과의 해석방법(통계 등)의 빈약함은 현존하는 생명을 취급하고 있는 경우와 같다.
- ③ 설명하는 계층 또는 해상도를 자의적으로 선

택하는 반면, 어떤 계층 등을 설정하는 것이 좋을지가 기준이었다.

- ④ 현상을 설명하기 위해 부품을 선택할 때에 자연히 解空間을 규정해 놓았다.
- ⑤ 결과가 나오는 것이 언제일지 “모르지만”, 나온 후에는 “생각나지 않았다! 당연히! 전에!”하는 경우가 많았다.

한편, Strong ALife의 입장에서 생태계를 만든 것은 코아 전쟁의 아이디어를 발전시킨 Tierra이다.

Tierra에는 현실세계를 그대로 컴퓨터 속으로 투영하는 것은 아니고 컴퓨터에 특유의 CPU시간과 메모리라고 하는 것을 자연계의 불과 빛에 비유하여 그 속에 자연계와 같은 돌연변이 및 자연선택을 일으키는 것에 따라, 자기증식하는 인공생명의 진화를 실현시킨 것이다.

작자인 Tom Ray는 이 Tierra에 발생한 생명에 대해 기생 및 사회 기생 등, 어떤 쪽으로라도 거시적인 생물로서의 해석을 전개해나가고 있다.

진화하는 생물들의 극적인 변화를 보여줄 수 있다면 생물의 역사는 적나라하게 들어날 것이다. 그러나 여기에서 문제가 되는 것은 이 변화가 점진적으로 장기간을 통해 일어난다는 것이며 우리는 다만 그 결과들만을 보고 있는 것이다.

Tom Ray는 컴퓨터 내부에서 발생하는 생명과 흡사한 현상을 인식할 수 있는 다양한 실험을 Tierra를 이용하여 모의실험을 했다.

대개의 생물학자들은 컴퓨터에서 생명과 유사한 현상이 일어날 가능성에 대해 조심스러운 입장을 취해오고 있다.

그러나 레이의 연구는 핵심적인 진화생물학자인 존 메이드나드 스미스로 부터 지지를 받았다. 생태학자인 스티븐 P. 휴벨도 그의 세미나에 참석한 후에 놀라운 성과라고 표현했다. 앞으로 Ray의 연구는 다윈의 진화론의 정당성을 논리적으로 입증하는 예가 될 수 있다. Ray의 연구는 3가지 중요한 용도가 있다. 첫째로 그의 프로그램은 선택에 의한 진화의 논리적 일관성을 명백하게 증명해준다.

둘째, 진화속에서 이론적인 개념을 검증하는 탁월한 방법이다.

셋째, 그의 연구를 통해 어떤 목적이든 효율적으로 이용할 수 있는 알고리즘 등을 진화시키는 것이 가능함이 밝혀졌다.

Tom Ray는 Tierra가 디지털 수프에서 생물체의 작동원리를 진화시킬 수 있는 능력에 대해 관심을 가지므로 생물과 무생물을 가르는 경계선을 둘러싼 논쟁의 문을 활짝 열었다.

그러나 한가지 중요한 것은 Ray가 다루고 있는 체계가 더 복잡한유기체에 상응하는 생명형태를 탄생시킬 수 있는 유기체로 진화하기 위해서는 현재 수준보다 몇 배나 발전된 고성능 컴퓨터가 필요하다.

그러나 자기증식하는 방식을 생각해보면, 발생하는 생물현상은 오히려 원시지구의 거대분자의 진화에 견주어 생각하는 것이 자연스럽다. 과연 이러한 수법의 연장선상에서 다세포생물, 혹은 보다 고등한 생물은 발생시 이를 얻을 수 있을까. 컴퓨터 특유의 자원을 규정해버린 시점에서 그와 같은 생명의 발생은 무리인지도 모른다.

5. Weak ALive

어디까지나 Weak ALive의 입장에서 생태학에 응용을 해가는 경우에는 기본적으로 다음과 같은 3가지의 인공생명의 사용법이 있다고 생각된다.

① 지근요인(至近要因)에 근거한 몬테카를로법 이것은 mechanistic approach 의 인공생명판이다. 수식의 계산이 어려운 지근요인의 기술이 가능할 뿐만 아니라 실제 관찰 및 실험과의 충돌, 대조가 쉽게 되는 이점이 있다. 얻어진 大域的인 현상은 어디까지나 지근요인의 상호작용의 결과라고 생각하는 점, 어떤 의미에서 귀무가설(null hypothesis)을 내놓게 되었다. 해석에는 종래의 통계학을 구사하는 것이 되지만 부트스트랩적인 수법이 용이하게 접목될 수 있는 점이 유리하다.

② 스탠다드의 제곱

종래의 생물학에서도 복잡한 방법을 그대로 사용하는 것이 아니라 사용이 용이한 생물을 모델로 이용하여 검증되어지는 수법이 도입되어졌다. 이때 문제가 되는 것은 자신이 사용하고 있는 것이 스탠다드인가 아닌가라는 점이다. 취급이 쉬운 생

물이라도 여러 가지 변화를 하고 있다. 결과가 그 변화에 의존하고 있는 경우, 산출된 이론의 일반화가 어렵게 된다. 인공생명은 그런 점에서 간단히 스탠다드가 만들어지는 것 뿐만 아니라 치열한 정도의 변이도 용이하게 만들어진다.

③ 대화의 도구

정신과 의사와 흡사한 ELIZA라고 하는 소프트가 있다. “오늘 당신은 어떤 일로 고민하고 있나요?”라고 말을 걸어온다. 이쪽에서도 키보드를 두드려 “에에, 실은....”이라고 하면서 대화가 시작된다. 프로그램 자체의 조직은 단순하고 적당히 맞장구치는 말을 해가면서 때때로 충직하게 교육된 것을 반복하는 것뿐이나, 모르는 사이에 회화에 빠져들게 된다.

Weak ALife 모델도 유사한 것으로서 연구자가 현상으로부터 추출한 규칙으로 반응하게 된다. 그것을 기초로 하여 단순한 규칙으로 국소적 반응을 하게 된다. 그것을 기초로 하여 다시 견해를 달리해, 현상으로부터 개념의 “분리”작업이 시작되는 것이다.

인공생명은 현존하는 복잡한 생태계를 그대로 고스란히 만들어내는 것이 아니라 역시 계층과 어느 정도 정돈된 오브젝트를 “분리”해내는 도구로서 사용되어야만 한다. 결국 인공생명은 제 4의 “분리”해 내는 방법으로서, 이로써 생태계를 기술하는 게 가능한 것일까. 성공의 길은 생태학에 관련된 사람의 관찰로부터 오는 직감과 컴퓨터 과학에 관련된 사람의 사고의 자유도 간의 창의적인 상호작용이 함께 어울려져 있어야 한다.

III. 에필로그

만약 인공유기체가 성장하고, 먹고, 재생산하고 돌연변이를 일으키고, 서로 싸우고 그리고 죽으며 사람의 간섭없이 창발적 행동을 한다면 자연생명과 인공생명과 무엇이 다른가. 다만 컴퓨터와 생물은 구성이 다를 뿐이다.

탄소를 골격으로 이루어진 자연생명에 반해 인

공생명은 규소로 이루어져 있다.

자연계에는 DNA라는 정보를 가진 생물들이 살고 있으나 컴퓨터 세계에는 수학의 산물들이 있을 뿐이며 그 산물들은 디지털 DNA를 갖고 있다.

인공 생명의 재료는 비유기물질이며 그 본질은 정보다. 컴퓨터는 이 새로운 유기체를 만들어 낸다. 시험관 속에서 생명체를 다루듯이 컴퓨터 속에서 생명을 창조하려는 것이다. 그러나 이것은 어디까지 모의 실험에 불과하다는 것을 인정해야 한다.

생물학자들이 이 인공생명체를 실험용 동물로 간주할 수 있다면 유기체의 특징을 밝히는데 더욱 수월할 수 있을 것이다. 더욱이 인공생명으로 부터 자기 조직화 현상을 연구함으로써 이러한 신비함이 풀릴 가능성이 있다고 생각한다. 비선형적인 생명현상을 이해하는 첨경이 될 수 있다.

컴퓨터 안에 무엇이 살아 있다고 볼 수 있을까? 생명이란 다만 자연의 고유 영역일 수 밖에 없는 것일까?라는 질문에 대한 답을 하려고 노력할 필요는 없다.

어쨌든 21세기에는 이 두 생명이 공존하여야 하며 훗날 공진화하고 있는 그들을 볼 것이다.

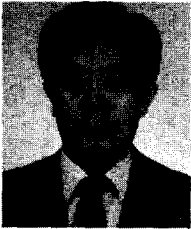
참 고 문 헌

- [1] De Angelis D.L. and Gross L.J. (eds.) : “Individual-based models and approaches in ecology”, Chapman and Hall. New York (1992).
- [2] Hofbauer J. and Sigmund K. : “Evolutionstheorie und dynamische systeme”, Verlagsbuchhandlung PAUL PAREY, Berlin (1984).
- [3] Hogeweg P. : “MIRROR beyond MIRROR, Puddles of LIFE”, in C.G. Langton (ed.) “Artificial Life”. Addison Wesley, New York, pp. 297-316 (1989).
- [4] May R.M. : “Stability and complexity in model ecosystems”, Princeton UP,

Princeton (1973).

- [5] Maynard-Smith J. : "Evolution and the theory of game", Cambridge UP, Cambridge (1982).
- [6] Odum E.P. : "Fundamentals of ecology", Saunders, Philadelphia (1953).
- [7] Ray S.T. : "An approach to the synthesis of life". in Langton C.G., Taylor C., Farmer J.D. and Rasmussen S. (eds.) "Artificial Life II", Addison Wesley, New York, pp. 371-408 (1991).
- [8] Smith R.H. and M. Lessells : "Oviposition, ovicide, and larval competition in granivorous insects", pp. 423-448 (1985). in Sibly R.M. and Smith R.H. (eds.) : "Behavioural ecology : ecological consequences of adaptive behavior", Blackwell. Oxford.
- [9] Smith R.H. : "Adaptation of Callosobruchus species to competition", pp. 351-360 (1990), in Fujii K., et al. (eds.) : "Bruchids and legumes : economics, ecology and coevolution, Kluwer, Dordrecht".
- [10] Taylor C., Jefferson D.R., Turner S.P. and Goldman S.R. : "RAM : Artificial life for the exploration of complex biological systems", in C.G. Langton (ed.) Artificial Life. Addison Wesley, New York, pp.275-295 (1989).
- [11] Toquenaga, Y. : "The mechanism of contest and scramble competition in Bruchid species", pp. 341-350 (1990), in Fujii K., et al. (eds.) : "Bruchids and legumes : economics, ecology and coevolution, Kluwer, Dordrecht".

저 자 소 개



洪 英 男

1942年 9月 23日生

1964年 2月 서울대 문리대 식물학과(이학사)

1969年 2月 서울대 대학원 식물학과(이학석사)

1978年 11月 독일 프라이부르크대학 식물학과(이학박사)

1970年 10月~1974年 3月 독일 프라이부르크대학 육수학연구소 연구원

1978年 12月~1980年 2月 독일 프라이부르크대학 생물학연구소 연구원

1980年 3月~현재 서울대 자연대 생물학과 교수

1994年 11月~1996年 10月 한국 식물학회 부회장

주관심 분야 : 광생물학