

# 초기 개체군 밀도가 포식자-피식자 생태계 안정성에 미치는 영향

조정희<sup>1</sup> · 이상희<sup>1†</sup>

## Exploring the Stability of Predator-Prey Ecosystem in Response to Initial Population Density

Jung-Hee Cho · Sang-Hee Lee

### ABSTRACT

The ecosystem is the complex system consisting of various biotic and abiotic factors and the factors interact with each other in the hierarchical predator-prey relationship. Since the competitive relation spatiotemporally occurs, the initial state of population density and species distribution are likely to play an important role in the stability of the ecosystem. In the present study, we constructed a lattice model to simulate the three-trophic ecosystem (predator-prey-plant) and using the model, explored how the ecosystem stability is affected by the initial density. The size of lattice space was  $L \times L$ , ( $L=100$ ) with periodic boundary condition. The initial density of the plant was arbitrarily set as the value of 0.2. The simulation result showed that predator and prey coexist when the density of predator is less than or equal to 0.4 and the density of prey is less than or equal to 0.5. On the other hand, when the predator density is more than or equal to 0.5 and the density of prey is more than or equal to 0.6, both of predator and prey were extinct. In addition, we found that the strong nonlinearity in the interaction between species was observed in the border area between the coexistence and extinction in the species density space.

**Key words** : Predator-prey system, Population dynamics, Lattice model, Ecosystem stability

### 요약

생태계는 다양한 환경 내에 다양한 생물종이 서로 상호작용하고 있는 복잡계이다. 이들 상호작용은 계층적 먹이그물 구조를 이루고 있는데, 많은 경우, 포식자-피식자-식물의 관계를 보여준다. 포식자-피식자 경쟁관계는 시공간적으로 일어나는 현상이기 때문에, 초기시점에서의 개체들 분포와 밀도가 어떠한가는 매우 중요한 정보를 담고 있다. 본 연구에서는, 이들 세 단계 계층구조의 생태계를 간단한 격자 모델로 구성하고 이 모델을 사용하여 각 종의 초기 개체군 밀도가 변함에 따라 생태계 안정성이 어떻게 변하는지를 연구하였다. 격자공간은  $L \times L$  크기의  $L(=100)$  사각격자로 구성되었다. 식물의 초기 밀도는 0.2로 고정하였다. 시뮬레이션 결과는, 포식자의 밀도가 0.4이하, 피식자의 밀도가 0.5이하일 때 두 종이 공존하는 것을 보여 주었으며, 포식자 밀도가 0.5이상, 피식자 밀도가 0.6 이상의 조건에서는 두 종이 멸종하는 것을 보여 주었다. 공존과 멸종의 두 상태가 접하는 영역의 조건에서는 확률적으로 공존하기도하고 멸종하기도 하는 비선형성이 강한 행동을 보여 주었다. 본 연구를 통해 초기 종의 밀도가 생태계 안정성에 매우 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있었다.

**주요어** : 포식자-피식자 모델, 개체군 동역학, 격자모델, 생태계

## 1. 서론

생태계는 다양한 환경 속에서 많은 생물종이 서로 상호작용하고 있는 복잡계이다. 생태계 안에서 생물들은 서로 영향을 주고받으며 살아갈 뿐 아니라 주위 환경과도 영향을 주고받으며 살아간다. 이들 상호작용은 계층적 먹이그물 구조를 이루고 있는데, 많은 경우, 포식자-피식자

접수일(2012년 12월 20일), 심사일(2013년 6월 24일),  
게재 확정일(2013년 7월 5일)

<sup>1)</sup> 국가수리과학연구소 수리모델부

주 저 자 : 조정희

교신저자 : 이상희

E-mail; sunchaos@nims.re.kr

식물의 관계를 보여준다.

포식자-피식자 경쟁관계는 시공간적으로 일어나는 현상이기 때문에 임의의 시점에서의 개체들 분포와 밀도가 어떤 상태에 있는가는 생태계의 안정성을 결정하는데 매우 중요한 정보를 담고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 초기 시점에서의 각 종들의 개체 밀도가 변할 때, 포식자-피식자-식물 생태계가 어떻게 되는지에 대해서 조사하였다. 이 결과는 생태계 안정성 문제와도 직결되어 있다.

먹이사슬 관계에 관한 개체군 동태 문제를 효과적으로 이해하기 위해서 로카-볼테라(Lotka-Volterra)모델에 기초한 결정적(deterministic) 수리 모델들이 다수 제안되었다<sup>[1]</sup>. 이러한 모델들은 실제 자연계에서 볼 수 있는 포식자-피식자 간의 계량적 관련성을 설명해 주었다. 그러나 실제 먹이사슬 구조에서는 포식자와 피식자간의 포식율이 단지 피식자의 개체군의 밀도에만 의존해 서는 잘 설명되어 지지 않는다는 것이 알려짐에 따라<sup>[2, 3]</sup>, 새로운 형태의 모델이 요구되었다<sup>[4]</sup>. Arditi와Ginzburg<sup>[5]</sup>는 밀도비에 의존하는 포식자-피식자 모델(density ratio-dependent prey-predator model)을 처음으로 제안하였는데, 이들은 포식자의 기능적 반응(functional response)에 근거하여 이 개념을 발전시켰다. 이들은 포식자의 증식률이 단지 피식자의 밀도에만 의존하는 것이 아니라 포식자밀도와 피식자 밀도의 비에 의존한다고 하였다. Gutierrez<sup>[6]</sup>는 포식자의 생리학적 에너지와 피식자에 대한 무작위적(random) 탐색 행동개념을 결합시켜 로지스틱 방정식을 제안하였다.

Kareiva<sup>[7]</sup>, Hanski, Gyllenborg<sup>[8]</sup>은 번식하는 개체수의 장기적인 지속성과 안정성을 결정할 수 있는 분산속도를 연구하였으며, 다른 연구<sup>[9, 10]</sup>에서는 밀도 증가와 함께 멸종 확률의 감소, 그리고 패치 크기와 패치 거리사이의 분산의 증가와 개체 지속성 확률에 미치는 영향을 보여주었다. 아울러, Peterson<sup>[11]</sup>, Sih 등<sup>[12]</sup>, 그리고 Schmitz 등<sup>[13]</sup>은 포식 강도의 변화가 종의 밀도에 매우 중요한 요인이 된다는 것을 보여 주었다. 위에서 언급한 이러한 연구들은 종간 경쟁 관계를 이해하는데 많은 도움이 되었다.

또한 Lee<sup>[14, 15]</sup>는 환경 조건 변화에 따른 개체의 출생, 사망, 이주 및 개체의 행동과 생리적 특성을 간단하게 고려하여 포식자-피식자 생태계 안정성이 어떻게 변하는지를 연구하였다.

이러한 기존의 모델은 많은 생태학적 변수들을 내포하고 있기 때문에 변수들의 역할과 영향에 대한 많은 부분이 아직 분석되지 않고 남아 있다.

본 연구에서는 Lee<sup>[14, 15]</sup>가 제안한 모델을 토대로 약간 변형된 모델을 구성하였다. Lee의 연구에서는, 외부환경

조건이 생태계에 미치는 영향에 대해 초점을 맞추었다. 비균질한 외부공간조건이 생태계 안정에 어떤 영향을 미치는지 연구하였으며<sup>[14]</sup>, 또한 외부에 회전의 흐름이 있을 때 생태계가 흐름의 세기에 따라서 어떤 영향을 받는지를 조사하였다<sup>[15]</sup>. 개체밀도의 초기조건이 생태계에 미치는 영향에 대해서는 간과하고 있다. 본 연구에서, 이 문제를 정량적으로 다루었다. Lee가 제안한 모델에서 변형된 부분은 각 종의 개체들이 한 격자에는 하나씩만 있을 수 있다는 조건을 추가한 것이다. 모델 구성 중 특정 셀에 여러 개체가 존재할수 있다는 기존 모델에서 사용된 규칙은 시뮬레이션 계산에 있어 컴퓨터메모리 문제와 계산시간의 문제를 야기시킨다. 아울러, 개체기반모델 관점에서 하나의 개체만 한 격자 공간에 위치 할 수 있다는 규칙은 매우 광범위하게 사용되어지는 규칙이다<sup>[16, 17]</sup>. 변형되어진 모델의 장점을 활용하여, 우리는 초기 개체군 밀도변화가 충분한 시간이 흐른 후에 생태계의 안정성이 어떻게 되는지를 조사하였다.

## 2. 시뮬레이션 모델 설명

본 모델은 생태계를 모사할 사각형  $L \times L$  ( $=100 \times 100$ )의 연속되는 격자 공간을 고려하였다. 이 격자공간의 각 셀(또는 격자)에 포식자, 피식자, 그리고 식물이 위치할 수 있다.

격자모형은 주기적 경계 조건(periodic boundary condition)을 사용하여 작성되었다. 주기적 경계조건은 제한된 공간의 크기로 인해 나타날 수 있는 경계효과를 최소화하기 위한 것이다<sup>[18]</sup>.

시뮬레이션 초기에 포식자와 피식자 그리고 식물을 공간에 랜덤하게 분포시켰다. 그리고 서론에서 언급한 바와 같이 다른 종은 한 셀에 같이 존재할 수 있으나, 같은 종은 한 개의 셀에 하나의 개체만 있을 수 있도록 하였다. 서로 다른 종이 같은 공간에 위치할때는 주어진 확률에 따라서 포식행동이 일어난다. 초기의 랜덤한 분포는 매트랩 ver 7.5(Mathworks)에서 제공하는 “rand” 함수를 활용하였다. rand 함수는 균등함수(uniform random)를 기반으로 난수를 발생시킨다. 이는 개체의 초기 분포를 공간적으로 밀집되는 부분이 없도록 만들어 주기 위한 것이다.

rand (i, j)는 임의의(i, j)셀에 무작위수를 발생시킨다. 포식자 개체의 초기 분포를 만들기 위해서 우선 포식자 밀도, D를 정한다. 그리고 격자공간상의 모든 각각의 셀에서 랜덤수를 만들고 이 수들이 D값에 비해 큰지 작은지를 비교한다. 만약 작은 경우라면 그 해당 셀에 포식자 개

체를 위치시키고 큰 경우라면, 빈 공간으로 남겨둔다. 피식자와 식물의 초기 개체 분포도 마찬가지로 방법을 따른다. 본 연구에서, 포식자, 피식자, 그리고 식물의 초기 밀도는 0.1에서 0.9까지 0.1의 간격으로 주어졌다. 각 초기 밀도 조건에 대해서 100번 독립된 시뮬레이션을 실행하여 결과를 얻었다.

2.1. 포식자, 피식자, 그리고 식물 설계

식물은 Fig. 1과 같이 광합성에 의해 매번(iteration time step) 이웃한 8개의 셀에 대해 각각 초기조건으로 설정된 0.2의 확률로 번식한다. 이미 이웃한 셀에 식물이 있는 경우 그 자리로 번식하지 못한다.

포식자와 피식자는 매번 이웃한 8개의 셀중 랜덤한 하나의 셀로 이동한다. 단, 이웃한 모든 셀에 동일한 개체가 있을 경우에만 이동하지 않고 제자리에 있는다.

포식자와 피식자가 같은 시간, 같은 셀에 있을 때 피식자는 포식자에게 먹혔다고 설정하고, 모형에서 제거된다. 이 관계는 피식자와 식물에도 적용되었다.

포식자와 피식자의 활동성은 5에서 0까지의 값으로 설정했다. 한번씩 칸을 이동할 때 마다 활동성이 1씩 감소되고, 0이 되면 죽어서 격자공간에서 제거된다. 개체가 일정시간동안 먹이를 먹지 못하면 굶어 죽는 생물학적 현상을 반영한 것이다. 개체가 죽기 전에 먹이를 섭취한 경우

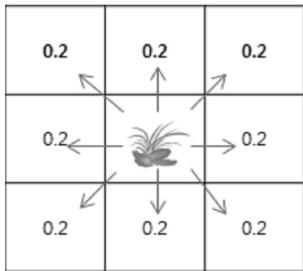


Fig. 1. Growth process of grass with growth probability of 0.2

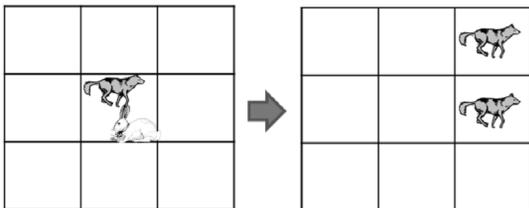


Fig. 2. Possible configurations encountered by predator and prey at a site

는 다시 활동성이 5로 증가하도록 하였다.

포식자와 피식자는 먹이를 섭취했을 때 Fig. 2와 같이 매번 0.2의 확률로 번식을 하게 된다. 새로 태어나는 개체는 모 개체와 이웃한 셀 가운데 빈 공간인 셀에 위치하도록 하였다. 그러나 모 개체의 주위 모든 셀이 다른 개체들로 차 있을 경우 번식하지 못하도록 하였다. 새로 태어나는 개체는 활동성이 5의 값을 가지도록 하였다.

2.2. 시뮬레이션 모델 동작

본 모델의 시뮬레이션 과정은 Fig. 3에서 보이는 순서도의 흐름을 가지고 있다. 다만, 포식자와 피식자는 같은

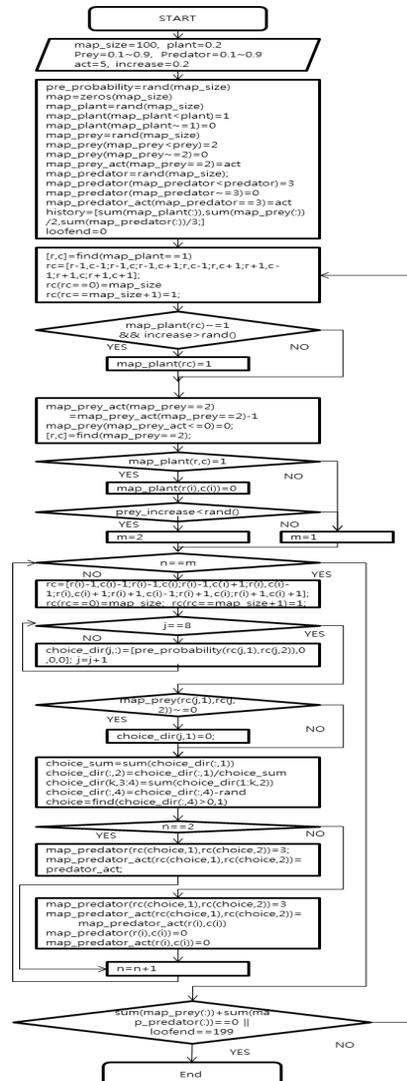


Fig. 3. Process of ecosystem

알고리즘으로 생략하였다.

우선 격자공간은  $L \times L$  크기의  $L (=100)$  사각격자로 공간을 구성하고, 초기 설정에 따라 각종의 밀도로 포식자 0.1~0.9, 피식자 0.1~0.9, 식물 0.2 맵을 설정한다. 또한 포식자와 피식자 각 개체는 5의 활동성을 부여한다. 이 수는 개체의 수명으로 해석되어 질 수 있다.

설정한 조건에 따라 식물은 주변 셀로 0.2의 확률로 번식한다. 피식자 및 포식자는 먹이의 유무를 판단하고, 먹이가 있으면 먹이를 섭취한다. 이때 먹이는 공간에서 사라진다. 그 후 주변에 빈 셀로 이동을 하고, 빈 셀이 없을 경우 그대로 있다. 주변에 빈 셀이 없으면 번식하지 않는다. 주변에 빈 셀이 있고, 먹이를 섭취하였을 경우 0.2의 확률로 번식을 한다. 그리고 다시 식물이 번식하도록

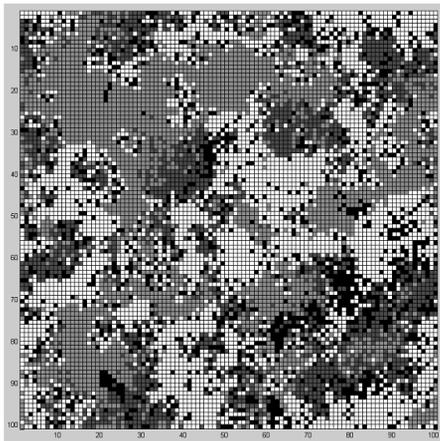


Fig. 4. The spatial distribution of lattice model with three kinds species (red: predator, white: prey, green: grass, black: empty space)

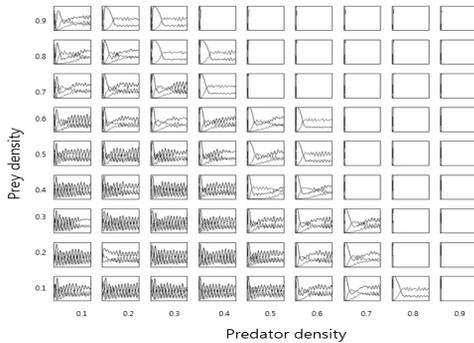


Fig. 5. According to density of predator, prey, change populations graph (red: predator, green: prey, blue: grass)

한다. 이 사이클은 최대 200번 까지만 하도록 하였다. 이 수는 사전 실험에 의해 결정되었으며, 안정화 유무의 판단을 하는 시점으로 해석되어 질 수 있다.

이때의 동작을 각각 Fig. 4와 같이 포식자는 빨강색, 피식자는 흰색, 식물은 녹색, 빈곳은 검정색으로 표시하도록 하여, 실시간으로 각 종의 이동 및 번식 패턴을 분석하였다.

또한, 각 종의 개체수 변화를 Fig. 5와 같이 포식자는 빨강색, 피식자는 녹색, 식물은 파란색 선의 그래프로 표현하여, 밀도 변화에 따른 개체수 변화 패턴을 분석할 수 있도록 하였다.

### 3. 시뮬레이션 결과

Fig. 5는 초기 피식자 포식자의 밀도를 0.1~0.9로 설정하여 100번 반복 실험한 결과 중 하나의 결과를 보여준다. 여기서 몇 가지 경향을 볼 수 있는데, 첫번째는 처음부터 적당한 개체밀도를 유지하며 안정화가 되는 경우다. 본 연구와 비슷한 연구나 확장된 연구를 할 경우 이러한 구간을 사용하면 유용할 것이다.

두번째는 초기 피식자의 밀도가 높아 식물이 급감하여, 피식자의 멸종 후 포식자가 연쇄적으로 멸종한 경우이다. 이 경우에는 모든 종이 멸종하거나, 식물 몇 개체가 살아남아 얼마 후 식물로 가득 차게 된다. 이는 적정 숫자의 포식자가 피식자 종의 유지에 필요한 것을 보여준다.

세번째는 초기 포식자의 밀도가 높아 피식자의 숫자가 급감하거나, 피식자의 밀도가 높아 식물이 극감하여 피식자의 밀도가 극감되면, 연쇄적으로 포식자도 극감 후, 피

Table 1. The simulation results of 100 independent runs

prey \ predator density	density of predator								
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.9	92	92	77	62	11	0	0	0	0
0.8	97	97	92	77	32	31	1	0	0
0.7	100	100	100	88	79	8	9	0	0
0.6	100	100	100	98	78	35	0	0	0
0.5	100	100	100	100	97	74	38	10	0
0.4	100	100	100	100	100	94	76	19	0
0.3	100	100	100	100	100	98	83	61	0
0.2	100	100	100	100	100	100	98	49	4
0.1	100	100	100	100	100	100	99	86	0

식자와 포식자의 살아남은 개체들이 번식하여 이내 안정화 수순을 밟는다. 이는 한 종의 이상증식이 생태계 교란을 가져오지만 자연적으로 다시 안정화가 될 수 있음을 보여준다. 이 현상은 실제로 생태계가 가지는 회복능력(resilience)을 잘 보여준다고 할 수 있다.

네번째는 포식자가 멸종한 후, 피식자와 식물이 안정된 상태를 유지하게 된다. 이는 피식자의 수명보다 식물의 번식력이 좋은 경우에만 가능한 것으로 보이며, 모델 초기설정에 따라 나오지 않을 수 있다.

위의 다양한 동역학적 현상을 정량적으로 보여주기 위해서 각 종의 초기 밀도에 따라서 생태계가 어떻게 반응하였는지를 간략히 Table 1로 나타내었다. Table 1은 각 초기 조건에 대한 시뮬레이션을 독립적으로 100번을 실행하였을 때 각각 모델 안정화된 횟수를 보여준다.

0은 100번 실행하였을 때 모두 안정화 하지 못한 것을 나타내며, 100은 모두 안정화 된 것을 나타낸다. 또한 안정화가 이루어진 모델은 일정한 범위의 밀도로 개체수가 유지되는 것을 볼 수 있다. 또한 모든 Fig. 5의 그래프를 살펴보았을 때 안정화 이후 멸종되는 모습은 발견할 수 없었다.

#### 4. 논의 및 결론

본 연구에서, 우리는 생태계 내의 초기 종 밀도가 어떠한지에 따라서 시간이 충분히 지난 후에 생태계가 어떻게 될 것인가 하는 문제를 다루었다. 기본적으로, 생태계는 먹이그물 구조로 이루어져 있다. 따라서 우리는 포식자-피식자-식물의 세 단계 계층구조를 가지는 격자 모델을 구성하였다. 포식자와 피식자 식물은 각각 기본적인 생물학적 특성(예: 수명, 번식, 죽음 등)을 가지도록 하였다.

시뮬레이션 결과는 피식자가 많고 포식자가 적은 경우 식물의 급격한 감소로 인해 피식자 감소와 포식자 멸종의 형태가 나타남을 보여 주었다. 반대로, 포식자가 많고 피식자가 적은 경우 피식자의 멸종으로 포식자 또한 멸종되는 형태가 나타났다. 이는, 종 들이 서로 공존하는 상태로서의 생태계 안정성을 이루기 위해서는 초기에 중간 밀도가 적절하게 균형을 이루어야 함을 간접적으로 보여주는 것이다. 또한 포식자의 초기 밀도가 0.3 이상, 그리고 피식자의 초기 밀도가 0.3이상인 경우 안정화(공존상태)가 이루어지지만, 흥미롭게도, 초기에 포식자의 밀도가 급격히 올라갔다가 줄어드는 시스템 행동을 보여 주었다. 이것은 아마도 강한 비선형성으로 인해 나타나는 것으로 보

인다. 이러한 효과는 다른 밀도 조건에서는 상대적으로 크게 나타나지 않았다. 이 효과는 사실상 불안정한 공존 상태를 일시적으로 만들어 낸다고 할 수 있다. 포식자 밀도가 급격히 증가할 때 외부환경요소가 영향을 주게 된다면 종의 멸종을 야기 시키실 수 있는 것처럼 보였다<sup>13, 14</sup>. 이에 대한 자세한 연구는 흥미로운 주제가 될 것으로 여겨진다.

안정화가 이루어진 모델은 일정한 범위의 밀도로 개체수가 유지되는 것을 볼 수 있으며, 안정화 이후 멸종되는 모습은 발견할 수 없었다.

본 시뮬레이션 연구를 통해, 종의 초기 밀도가 생태계의 먹이사슬 안정화에 매우 중요하게 작용한다는 것을 보여주었다.

본 모델은 계산의 효율성을 높이기 위해서, 생태계를 지나치게 단순화한 측면이 있다. 그럼에도 불구하고 다양한 생태계 동역학을 보여준다. 본 모델은 확률개념으로 개체들의 행동을 기술하였기 때문에 다양한 행동을 표현하기가 용이하다. 예를 들면, 피식자는 포식자가 인접한 셀에 위치하게 되면 그 셀 쪽으로 운동할 확률을 줄이는 간단한 규칙을 통해서 포식자 회피 행동을 만들어 낼 수 있다. 반대로 포식자는 피식자가 있는 위치로 향하는 확률을 높여 줌으로써 먹이 포획행동을 구현할 수 있다. 이러한 간단한 규칙의 도입으로 포식자-피식자 간의 먹이경쟁 및 도피 경쟁 전략 등을 연구해 볼 수 있다. 향후 연구 과제로서 우리는 개체들끼리에 인공신경망을 접목하여 환경에 따라 직접 행동을 결정할 능력을 개체에 부여하려고 한다. 이 연구를 통해 좀 더 실제 생태계를 잘 모방하는 모델을 만들고, 향후 지구온난화와 같은 환경교란에 대한 생태계 안정성 문제에도 적용하여 대처방안수립에 기여하고자 한다. 본 연구는, 이러한 잠재적 연구를 위한 토대로써의 중요한 의미가 있다고 할 수 있다.

#### References

1. Bazykin, A.D., "Nonlinear dynamics of interacting populations," WorldScientific, Singapore. 1998.
2. Leslie, P.H., "Some furthers notes on the use of matrices in population mathematics," Biometrika. vol. 35, pp. 213-245, 1948.
3. Arditi, R., Abillon, J.M. and DaSilva, J.V., "A predator-prey model with satiation and intraspecific competition," Ecol. Model. vol. 5, pp. 173-191, 1978.
4. Berryman, A.A., "The biological control paradox," Trends Ecol Evol. vol. 6, pp. 32, 1991.

5. Arditi, R. and Ginzburg, L.R., "Coupling in predator-prey dynamics: ratio-dependent," *J. Theor. Biol.* vol. 139, pp. 311-326, 1989.
6. Gutierrez, A.P., "Physiological basis of ratio-dependent predator-prey theory: the metabolic pool model as a paradigm," *Ecology.* vol. 73, pp. 1552-1563, 1992.
7. Kareiva, P., "Population Dynamics in Spatially Complex Environments: Theory and Data [and Discussion]," *Phil. Trans. Soc. Lond. B.* vol. 330, pp. 175-190, 1990.
8. Hanski, I., and Gyllenberg, M., "Two general metapopulation models and the core-satellite species hypothesis," *Am. Natur.* vol. 142, pp. 17-41, 1993.
9. Ovaskainen, O., Sato, K., Bascompte, J., and Hanski, I., "Metapopulation models for extinction threshold in spatially correlated landscape," *J. Theoret. Biol.* vol. 215, pp. 95-108, 2002.
10. Ovaskainen, O., and Hanski, I., "How much does an individual habitat fragment contribute to metapopulation dynamics and persistence?," *Theor. Popul. Biolo.* vol. 64, pp. 481-495, 2003.
11. Peterson, C.H., "experimental tests of the importance of prey size, prey density, and seagrass cover," *Mar. Biol.* vol. 66, pp. 159-170, 1982.
12. Sih, A., Crowley, P., McPeck, M., Petranka, J., and Strohmeier, K., "Predation, competition and prey communities: a review of field experiments," *Annu. Rev. Ecol. Syst.* vol. 16, pp. 269-311, 1985.
13. Schmitz, O.J., Hamback, P.A., Beckerman, A.P., "Trophic cascades in terrestrial systems: a review of the effects of top carnivore removals on plants," *Am. Nat.* vol. 155, pp. 141-153, 2000.
14. Lee, S.H., "Effects of the heterogeneous landscape on a predator-prey system," *Physica A.* vol. 389, pp. 259-264, 2010.
15. Lee, S.H., "Effects of uniform rotational flow on predator-prey system," *Physica A.* vol. 391, pp. 6008-6015, 2012.
16. Szwabinski, J., Pekalski, A., "Effects of random habitat destruction in a predator-prey model," *Physica A.* vol. 360, pp. 59-70, 2006.
17. Trokan, K., Pekalski, A., "Dynamics of a predator-prey model in a habitat with cover," *Physica A.* vol. 330, pp. 130-138, 2003.
18. Shirts, R.B., Burt, S.R., Johnson, A.M., "Periodic boundary condition induced breakdown of the equipartition principle and other kinetic effects of finite sample size in classical hard-sphere molecular dynamics simulation," *J Chem Phys.* vol. 125(16):164102, 2006.



**조 정 희** (xtin@nims.re.kr)

2011 충남대학교 기계설계공학과 석사  
20012~ 현재 국가수리과학연구소 연구원

관심분야 : 생물행동 모델링, 생태계 모델링



**이 상 희** (sunchaos@nims.re.kr)

2005 부산대학교 물리학과 박사  
2009~2010 한국수리생물학회 운영위원  
2011~ 현재 한국수리생물학회 총무  
2008~ 현재 국가수리과학연구소 연구원

관심분야 : 생물행동 모델링, 생태계 모델링, 최적화 이론, 비선형동역학