

연구노트

생태 모델링기법으로서 동적구조모형의 고찰

김좌관

부산가톨릭대학교 환경과학부

(2004년 5월 12일 접수, 2004년 7월 19일 승인)

A Study on the Application of Ecological Structural Dynamic Modelling

Kim, Jwa-Kwan

School. of Environment Science, Catholic University of Pusan

(Manuscript received 12 May 2004; accepted 19 July 2004)

Abstract

Exergy is defined as the amount of work (entropy-free energy) a system can perform when it is brought into thermodynamic equilibrium with its environment. Exergy measures the distance from the inorganic soup in energy terms. Therefore, exergy can be considered as fuel for any system that converts energy and matter in a metabolic process. The aim of this study is to introduce structural dynamic modelling which is based on maximum exergy principle. Especially, almost ecological models couldn't explain algal succession until now. New model (structural dynamic model) is anticipated to predict or explain the succession theory. If the new concept using maximum exergy principle is used, algal succession can be explained in many actual cases. Therefore, It is estimated that structural dynamic model using maximum exergy principle might be a excellent tool to understand succession of nature from now on.

Key words : Exergy, Darwin's principle, Structural dynamic modelling, Ecological model, Maximum exergy principle, algae succession

I. 서론

생태계 모형의 발달과정은 최초 1920년대

Streeter-Phelps 모형(BOD-DO 모형)과 Lotka Volterras 모형(포식-피식자 모형)으로부터 최근에 이르기까지 다양한 생태계 모형들이 개발되어져

왔다. 그러나 개발된 모든 모형들은 언제나 개선의 여지가 있다. 우선 우리의 다양한 생태 모형들은 그 생태학적 구조가 시뮬레이션동안 고정되어 있고 생태계 계수값도 시간에 따라 고정된 값을 적용하고 있다. 생태계 모형에서 고정된 생태계 수값이 적용될지라도 실제 생태계내 생물들은 현 환경조건에 끊임없이 적응해 나가기 위하여 그들의 생태학적 특성을 변화시켜 나간다. 이는 곧 생태계가 갖는 일반적 특성중 Darwin의 적자 생존의 원리 (Survival of the fittest)에 해당한다. 즉, 현 환경에서 가장 잘 적응할 특성을 가진 군집이나 종이 생존 (survival) 및 성장 (growth)한다는 의미이다. 만일 현재 종이 변화된 환경에 적응할 능력이 충분하지 못하면 다른 종으로 대체된다. 따라서 생태계내 일어나는 이와 같은 천이현상을 고려할 수 있는 새로운 모형의 개발은 필수적인 것이다. 이에 Jørgensen(1979)은 목적기능(goal function)을 가진 엑서지(exergy)개념을 도입하여 기존 생태모형의 예측력을 높일 것을 제안하고 있다. 따라서 본 연구에서는 수생태계내 종의 천이 및 발달현상을 엑서지를 이용한 차세대 생태 모형 개발과 기본 이론 및 실제 적용사례를 살펴 보고자 한다.

II. 엑서지 (exergy)와 생태계

1. 엑서지(exergy)의 정의

엑서지(exergy)는 열역학 제 3 법칙이 발견된 이후로 최근 물리학자나 열역학자들로부터 많이 언급되고 있으며 에너지를 양적 측면이 아닌 질적 측면에서 평가하는 데 적절한 개념인 것으로 파악되고 있다. 그래서 엑서지는 '유효에너지 (available energy)'라 불린다. 즉 어떤 환경속에서 그 환경과 다른 온도, 압력을 갖는 계(system)가 있을 때, 그 계가 주위 환경과 같은 온도, 같은 압력으로 변할 때까지 얻어낼 수 있

는 최대의 일을 말하며, 잠정적으로 열역학 제 4 법칙(Tentative Fourth Law of Thermodynamics)으로 언급되고 있다(Jørgensen and Mejer, 1977).

즉 엑서지는 하나의 시스템이 열역학적 평형상태 (thermodynamic equilibrium)로 갈 때 주위 환경에 전달할 수 있는 최대 entropy-free 에너지로서 다음 식 1, 2로 정의되고 있다. 엑서지의 감소와 엔트로피의 생산은 하나의 실체에 대한 동전의 양면과 같은 표현방법이다.

$$Ex = T_0 \cdot NE = T_0 \cdot I = T_0 \cdot (S_0 - S) \quad (\text{식 1})$$

Ex = 엑서지

T_0 = 주위 환경의 절대온도

NE = Negentropy

I = 열역학적 정보(Thermodynamic information)

S_0 = 주위 환경의 엔트로피 (열역학 평형상태)

S = 시스템의 엔트로피

$$\Delta E = T_0 \cdot W \cdot (1/T_2 - 1/T_1) \quad (\text{식 2})$$

ΔE = 엑서지 차

W = 태양에너지

T_2 = 주위 환경온도

T_1 = 태양온도

열역학적 제 2 법칙에서는 불가역변화가 엔트로피가 증가하는 방향에서 생긴다는 것을 나타내고 있다. 그러나 열역학에서 주요가정조건으로 삼는 열역학적 평형상태는 태양이 존재하는 한 이루어지지 않을 것이다. 식 2에서 보는 바와 같이 고온인 태양에서 오는 가시광선을 중심으로 한 복사에너지와 저온인 우주공간에의 적외선 방사라는 에너지 흐름이 있으므로 지구는 항상 비평형인 상태로 유지되고 있기 때문이다. 따라서 다음 식 3, 4와 같이 압력, 온도, 전위, 물질의 농도, 중력 등의 다양한 형태의 비평형성 덕분에 지구내 다양한 변화가 일어나며, 엔트로피보다 더 큰 '·' 엔트로피(negentropy)를 만들어내어 유효한 일의 발생 (exergy)도 가능하게 된다.

$$\text{압력 엑서지} = n \cdot R \cdot T_0 \left(\ln \frac{P}{P_0} - \left(1 - \frac{P_0}{P} \right) \right) \quad (\text{식 3})$$

$$\text{열 엑서지} = m \cdot Cp \left\{ (T - T_0) - T_0 \cdot \ln \frac{T}{T_0} \right\} \quad (\text{식 4})$$

따라서 엑서지의 크기는 주변 환경상태에 의존하므로 시간의 변화에 따라 상대적인 값을 갖게 되고, 열역학적 평형상태로부터 그 거리를 측정함으로써 파악될 수 있다. 열역학적 평형상태는 열적 구배가 없는 상태이며, 계의 구성성분이 무기물질일 경우 가장 낮은 자유에너지를 갖게 된다. 이는 태초에 생물이 탄생하기 이전 지구상에 존재하는 무기물질상태 (inorganic soup)에 해당하기도 한다.

엑서지의 정의를 다음 Fig. 1의 기계적 에너지의 형태로 표현할 수 있다. 두 상자가 entropy-free 에너지를 서로 교환할 때, 그 결과로 발생하는 열역학적 정보가 '0'이 되지 않는 것이 분명하다. 우선 시스템 A는 추를 매달고 있는 회전축이 일정한 부피를 가진 통안에 존재하고 있는 상태를 말한다. 전체 시스템으로서 $A = A_0$ 를 가정할 시, 시스템 A의 엑서지는 주위환경에 대하여 행해진 역학적 에너지 (mechanical energy)를 말한다. 즉 추의 상하이동은 축을 회전시키고 에너지를 통안에 전달시키게 된다. 에너지 'U'를 가진 추가 위에서 바닥으로 낙하할 때, 시스템 A에 대한 에너지 구배 $U - U_{eq}$ 는 주위환경으로부터 시스템 A에 전달된 에너지량과 같다. 엑서지의 정의에 따른 시스템 A의 엑서지는 주위환경 'A₀'에 대한 기계적 에너지에 비례하고 에너지 측면에서 열역학적 평형상태로부터의 거리로서

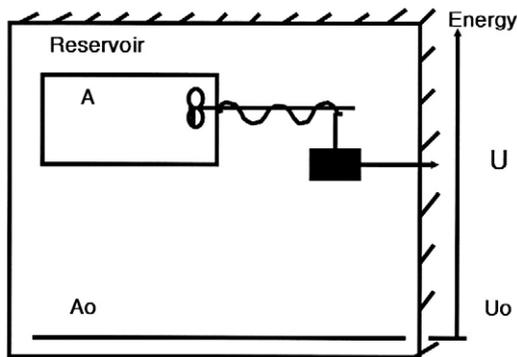


Fig. 1. The global isolated system composed by two reservoirs

나타낼 수 있다(Jørgensen, 1979).

특히 식 1에서 보는 바와 같이 열역학적 정보의 크기와 엑서지는 비례관계에 있다. 예로서 건축 구조물을 생각하면 점토 분자가 모여 흙을 만들고 이는 벽돌로 변환 가공되어 최종적으로 하나의 성당을 완성하기까지 그 물리적 구조물에 들어있는 정보량은 점차 증가일로에 있으며 이는 엑서지의 증가와 비례하게 된다.

2. 엑서지와 생태계

시스템이 생태계일 경우에는 생태계내 고도의 조직화와 질서상태를 평형 열역학적 개념으로 설명되어지지 못한다. 생태계는 에너지, 물질, 정보면에서 개방되어 있는 하나의 산일 시스템 (dissipative system)이다. 생태계는 폐쇄된 시스템이 아니며 끊임없이 태양에너지를 받고 있어 열적 죽음 (thermal death)으로 가는 대신 정교한 먹이망 구조의 생성과 자기조직화를 통하여 낮은 엔트로피를 갖게 된다. 그러나 이것이 열역학적

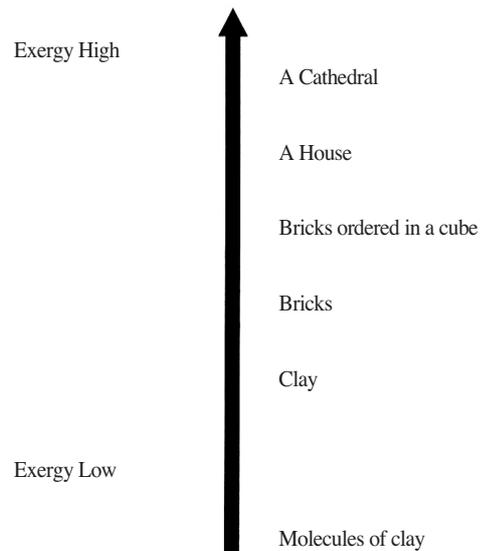


Fig. 2. Illustration of the relation between exergy and physical structure

제 2 법칙을 위반하는 것은 아니다. 즉 생태계는 외부로부터 낮은 엔트로피를 가진 에너지 (negative entropy flux)를 흡수함으로써 열역학적 평형상태로부터 끊임없이 벗어나려고 하고 있으며 조직화 수준을 높이고 생체량을 최대화하는 방향으로 발달 및 진화하게 된다(Schneider and Kay, 1994).

다음 Fig. 3에서 보는 바와 같이 엑서지는 열적 평형상태에 대한 최대의 일량을 의미하는 데, 일을 열로 전환할 경우 생태계에서는 열적 평형상태는 무기물질 상태를 의미하게 되며 생물의 생체량은 일정한 에너지로 표현가능하게 된다(예, 단백질, 지방, 탄수화물의 경우 평균 18.8 kJ/g의 열량).

따라서 생태계내 엑서지 크기는 우선 유기물질의 량에 비례하게 된다. 더불어 엑서지는 위의 식 1에서 언급된 바와 같이 생물체내에 정보량과 밀접한 연관이 있다. 해당 생태계내 생물의 생체량과 생물이 갖는 정보량에 따라 엑서지값이 변화되는 데, 이는 지구의 탄생 이후 무기물질 상태 (inorganic soup)에서 단세포 생물→다세포 생물→고등생물→영장류→인류의 탄생까지의 일련의 진화과정에서 생체량과 정보량으로 표현되는 엑서지의 증가과정과 비례관계가 있다고 본다. 여기서 생물체내 정보량은 일련의 아미노산 구조가 만들어내는 유전자속의 정보량과 연관된다. 따라서 유전자내 많은 정보를 갖는 유기체일수록 더

큰 엑서지를 유발하게 된다.

3. 다윈 이론의 열역학적 해석 ; Maximum exergy principle

일반적으로 생태계의 천이(succession) 및 발달 현상(development)은 Darwin의 적자 생존의 원리 (Survival of the fittest)에 의해 설명가능하다. 즉 적자(fittest)는 현 환경조건하 (경쟁, 환경조건의 변화등)에 가장 잘 적응할 특성을 가진 종 및 군집을 말하고, 생존 (survival)은 이 종이나 군집의 생체량이 유지(maintenance) 및 증가 (growth)됨을 의미한다. 일반적으로 각 개별 종은 일정한 범주내에 그 들의 특성을 변화시켜 새로운 환경에 적응할 능력을 갖고 있다고 본다. 만일 현재 종이 변화된 환경에 적응할 능력이 충분하지 못하면 다른 종으로 대체되며 현 환경에서 가장 잘 적응할 특성을 가진 군집이나 종이 생존 (survival) 및 성장 (growth)한다는 의미이다.

적자생존의 원리에 준한 생태계의 천이현상과 극상개념(climax)은 엑서지의 증가현상과 연관되어진다. 일반적으로 극상단계의 경우 해당 생태계내에 대부분의 영양염류가 생물체내에서 존재하고 생물체밖에 존재하는 유리 영양염류 양은 최소상태가 되며, 이 생체량과 정보량은 최대로 유지된다. 생태계내 흐르는 엑서지는 그 시스템의 구조를 유지시키기 위하여 생산해내는 엔트로피보다도 더 큰 ‘-’ 엔트로피 (negentropy)를 만들어 내며, 가능한 한 열역학적 평형상태부터 최대한 멀리 벗어나려는 데 쓰인다는 점이다. 그 결과 해당 생태계의 구조는 고도로 조직화되며, 가능한 한 최대의 엑서지를 가지게 된다. 즉 현 상태의 생태계는 외부환경의 변화에 끊임없이 반응해 나가는 데, 생태계내 엑서지의 유지 및 성장에 가장 크게 기여할 수 있는 종이나 군집을 선택해 나간다는 점이다(최대 엑서지원칙: Maximum exergy principle). 여기서 열역학 4법칙(잠정적)으

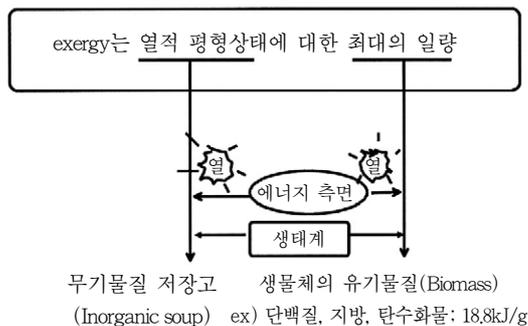


Fig. 3. Interpretation of the concept exergy at ecosystem level

로 지칭되는 엑서지 개념은 다윈적 진화론인 적자생존(The survival of the fittest)의 법칙을 재해석할 수 있게 된다(Jørgensen, 1979, 1994, 1997). 앞에서 언급한 바와 같이 적자로 생존한 종이나 군집은 내재된 정보(embodied information)와 생체량(biomass)에 가장 크게 기여하게 된다. 이에 다윈 이론의 열역학적 해석은 생태계 수준에서 가능하게 되며, 잠정적 열역학 4 법칙으로 불리는 이 원칙은 생태계의 초기단계로부터 성숙단계(극상)까지의 일반적 발달현상이나 진화의 원칙과 대단히 일치한다. 다시 말해 해당 생태계는 외부환경(영양염류 부하량, 광량, 유량등)이 변화함에 따라 내부 생태계도 변화하게 되는 데 엑서지값이 최대가 되는 방향으로 해당 생태계가 발달해 나간다는 점이다.

따라서 현재 생태학의 목적기능(goal function)으로 역할을 담당하고 있는 ascendancy(Ulanowicz, 1997), indirect effect(Pattern, 1990), emergy(Odum, 1983)등과 같이 이 '최대 엑서지 원칙(maximum exergy principle)'도 생태계의 변화특성을 파악해 낼 수 있는 훌륭한 목적기능(goal function)을 가진 셈이 된다(Jørgensen *et al.* 1995).

최근 Jørgensen은 생태계에 보다 쉽게 적용할 수 있도록 하기 위하여 다음과 같은 식 (5)으로 정리하였다. 즉 엑서지 값은 해당 생태계내 생물체량과 그 생물체가 갖는 정보량의 곱으로 표현 가능하게 되었다. 식 (5)에 포함된 W_i (생태계 생물속에 있는 정보)는 각 생물체내 유전자 숫자를 근거로 가중치(weighting factor)로 환산한 Table 1을 정리 발표하였다(Jørgensen *et al.* 1995).

$$Exergy(kj/l) = \sum_{i=1}^n W_i \cdot C_i \quad (식 5)$$

W_i = 각 생물체 유전자 정보에 따른 가중치
 C_i = 각 생물체의 생체량

생태계의 발달과 천이과정은 그 자체가 어떤 의도된 목적과 방향성, 그리고 의지하에 나아가는 것이라고 볼 수 없지만 이론 생태학적 측면에

Table 1. The approximate number of information genes and weighting factors for some organisms

Organisms	Number of information genes	Weighting factors
Detritus	0	1
Minimal cell	470	2.3
Bacteria	600	2.7
Algae	850	3.4
Yeast	2000	5.8
Fungus	3000	9.5
Sponges	9000	26.7
Molds	9500	28.0
Plants, trees	10,000-30,000	29.6-86.8
Worms	10,500	30.0
Insects	10,000-15,000	29.6-43.9
Jellyfish	10,000	29.6
Zooplankton	10,000-15,000	29.6-43.9
Crustaceans	100,000	287
Fish	100,000-120,000	287-344
Birds	120,000	344
Amphibians	120,000	344
Reptiles	130,000	370
Mammals	140,000	402
Human	250,000	716

서 생태계를 진단 평가하기 위해서는 해당 생태계가 마치 의도적 목적을 갖고 변화하고 있는 것으로 볼 수 있다. 천이에 따른 극상의 도달이 이에 해당한다. 토양특성, 기후특성이 다를 경우 도달하는 극상상태가 달라지며 이 또한 예측 가능하다. 따라서 우리가 생태계의 변화추이를 진단 및 예측해 낼 수 있는 도구가 필요하며 이에 이론 생태학자들은 목적기능(goal function)을 가진 개념으로서 ascendancy, indirect effect, catastrophe theory, chaos theory 등을 정의하고 이용하게 되었고 열역학적 개념인 엑서지도 목적기능을 가진 도구로서 활용 가능하게 된 셈이다(Jørgensen *et al.* 1995). 따라서 실제 종의 천이 및 발달, 그리고 진화가 발생하는 모든 생태학적 과정을 엑서지값을 통하여 추적하거나 예측 가능하다고 판단된다. 실제 자연생태계에 적용 가능한 범위는 아래

와 같다(Jørgensen, 1994; Jørgensen et al, 1992; Jørgensen, 1997)

- 1) 생태계 발달현상이 일어나는 모든 자연현상의 파악
적조현상, 부영양화현상, 호수의 천이, 동, 식물플랑크톤의 종의 천이현상, 산림생태계의 천이현상, 농업생태계의 특성분석, 인공생태계의 생태학적 건강성 평가, 종의 다양성과 안정성의 평가 등
- 2) 생태모형(Ecological model)
 - (1) 생태계 계수값 추정
 - (2) 생태학적 완충능력 파악을 위한 exergy 값의 적용
 - (3) 생태모형내 상태변수 숫자의 결정
 - (4) 생태모형의 보정작업을 효율적으로 수행 가능
 - (5) 동적구조모형 (structural dynamic model) 개발
- 3) 생태계의 건강성 (ecosystem health) 및 생태학적 지표 (ecological indicator)로서의 활용
- 4) 생태공학 (ecological engineering) 수단의 평가

III. 차세대 생태계 모형으로서의 동적 구조모형 (Structural Dynamic Modelling)

1. 동적구조모형의 개요

생태계는 대단히 복잡한 구조를 갖고 있어서 정확하게 파악해내는 것은 거의 불가능한 수준이다. 게다가 계(system)는 그 모든 부분(parts)의 합 이상의 의미를 가지므로 전체주의 관점(holistic view)에서 바라보아야 한다. 따라서 모든 모형들은 언제나 개선의 여지가 있다. 그러나 대부분의 경우 파악하고자 하는 중요 생태 반응기작들이 포함되어 있어 모형의 복잡성(complexity)을 높임으로서 모형을 개선하는 경우

는 드문 편이다(Jørgensen, 1994). 그러나 주요 반응과정은 사실상 다양한 형태의 반응식으로 표현될 수 있으므로 실측치만 양적 질적 측면에서 제공할 수 있다면 다양한 반응식들을 제대로 검증할 수 있어 모형의 개선시킬 수 있다. 생태계는 일반적으로 해당 생태 모형에 포함되지 않은 여러 특성을 가지고 있다고 본다. 종(species)은 새로운 환경에 적응할 능력이 있고 종의 조성은 외부의 환경인자에 대단히 민감한 편이다. 그러나 우리의 생태 모형들은 그 생태학적 구조가(ecological structure) 시뮬레이션 기간동안 고정되어 있고 생태계 계수값도 보통 변함없이 고정된 값을 적용하고 있다. 그러나 누구나 알다시피 우리 생태계는 끊임없이 종 조성과 구조가 변화하는 특성을 가진 동적 구조(dynamic structure)를 가지고 있으므로 향후 개발될 생태 모형은 이를 반영할 수 있어야 하고 이점이 지금까지 모든 모형이 가질 수 밖에 없었던 한계점이기도 하다.

Straskraba(1996)는 생태계 동역학(ecosystem dynamics)에 있어서 네 가지 특징을 다음과 같이 언급하고 있다. 첫째, 모형내 상태변수들(state variables)의 변화는 외부환경인자의 변화에 기인한다는 것이며, 이는 오늘날 모든 생태 모형에서 채택되고 있다. 둘째, 환경에 대한 종의 적응단계를 모형내에서 반영하기 위해서는 일부 생태계수값이 다양하게 파악되어야 한다는 점이다. 셋째, 종조성이나 종의 구조의 변화가 생태계내에서 발생한다는 점이며 모형은 이를 고려할 수 있어야 한다는 점이다. 넷째, 생태계내 종이 genetic pool의 점진적 변화를 가진다는 점이다. 그러나 이런 변화는 대단히 장기적인 시간대를 요구하므로 대부분의 환경관리모형에서는 고려할 필요가 없는 생태학적 특성이다. Straskraba(1989)는 실제 자연현상과 생태모형간에 차이를 줄이기 위하여 다양한 계수값의 적용이나 정량적인 생태학적 이론을 이용한 목적기능(goal function)을 도입할 것을 제안한 바 있다.

생태계 모형에서는 고정된 생태계수값이 적용

될지라도 실제 생태계와 그 생물들은 변화되어지는 현재의 조건에 적응하기 위해 끊임없이 그들의 생태학적 특성을 변화시켜 나간다. 예로서 폐수처리를 통한 영양염류 부하량의 감소효과는 수체내 환경조건을 급격히 변화시켜 버린다. 이 때 생태계 내부는 그 기본적 기능을 담보받기 위하여 생태학적 반응기작과 종 조성을 변화시킴으로서 그 구조를 새로운 환경에 계속 적응시켜나가게 된다. 이는 곧 열역학적 평형상태로부터 가능한 한 멀어지려는 생태계의 능력이기도 하다. 따라서 실제 생태계의 이와 같은 특성을 제대로 반영할 수 있는 새로운 모형의 개발은 필수적이다. 즉 현 환경조건에 적응 및 생존한 종의 특성변화와 종조성의 변화를 판단할 수 있는 모형의 개발은 필수적이다. 그러나 현재 생태모형은 고정된 계수값을 적용함으로써 동적인 생태계를 제대로 재현해 내지 못하는 결정적 단점을 갖고 있다.

이에 Jørgensen과 Mejer(1977)는 목적기능으로서 열역학적 개념인 exergy를 도입하였다. 즉 외부 환경요인이 변화함에 따라 생태계 내부는 종조성과 종의 구조가 달라지게 되며, 이는 곧 exergy가 증가하는 쪽으로 해당 생태계가 변화하고 있음을 확인하게 되었다. exergy는 외부환경요인의 변화에 따른 내부 생태계 완충능력을 평가하는 정량적 척도가 되는 셈이다. 열역학적으로도 exergy는 시스템의 질서나 조직의 수준을 평가하는 척도이기도 하다.

새로운 환경에 따른 생태계의 반응은 생태계의 발달과 진화로 연결되어진다. 생태계가 생태학적 교란을 당할 때 해당 생태계는 생태계의 구조를 바꿈으로서 외부적 변화 및 교란에 대응하려고 하며 이는 곧 생태학적 완충능력 (ecological buffer capacity)을 유지하거나 증가시키려는 방향으로 해당 생태계가 발달 및 진화한다고 본다. 즉 외부 환경요인에 따른 내부적 변화를 최소화시키려는 완충능력이 있고 또한 실제 내부적 변화를 대응하기 위하여 해당 완충능력을 최대화하기 위하여

내부의 생태학적 구조를 변화시킬 능력을 가지고 있다는 점이다.

수생태계내 종조성과 구조를 변화시키는 요인은 무엇일까? 이 질문은 지금까지 끊임없이 제기되어져 온 풀지 못한 질문이며 생태계 모델링에 있어서 반드시 풀어야만 할 과제이다. 비록 관측에 의해 생태계내 현재의 상태에 평가하더라도 현재의 종 조성과 구조를 근간으로 어떻게 미래의 제대로 평가할 수 있겠는가? 언제 현 생태계의 종조성과 구조가 변화될 지 알 수 없는 것이다. 새로운 모형은 이러한 문제를 해결하는 동적 구조 모형(structure dynamic model)이 되어야 할 것이다. 이를 위한 기본적 가정은 열역학적 4 법칙(잠정적)인 엑서지의 생태학적 적용이다. 즉 일련의 엑서지 흐름을 갖는 계는 그 에너지를 열역학적 평형상태로부터 벗어나기 위하여 이용되어진다. 생태계내 에너지 흐름은 그 산일구조(dissipative structure)를 발달시키기 위하여 생성된 엔트로피 양보다도 큰 ‘-’ 엔트로피(negentropy)를 증가시킨다. 해당 생태계는 외부환경(영양염류 부하량, 광량, 유량등)의 변화함에 따라 내부 생태계도 변화하게 되는 데 생태이론으로서 목적기능(goal function)을 가진 엑서지를 이용하면 이 엑서지값이 최대가 되는 방향으로 해당 생태계가 발달해 나간다는 점이다. 즉 계내 구성요소와 반응기작의 새로운 선택압(selection pressure)은 현재 잘 적응하고 있는 종의 생존 뿐만 아니라 생태계내 종조성과 구조에 영향을 미침으로서 가장 높은 엑서지를 갖는 방향으로 해당 생태계가 발달한다는 것이다.

2. 최대 엑서지 원칙을 이용한 동적구조모형의 적용사례

1) 덴마크 Sobygarrd 호수의 적용 사례

덴마크에 위치한 Sobygarrd 호수는 수심 1m, 체류시간 약 20일의 작은 호수다. 1982년 하수의

고도처리로 호수로 유입되는 인 부하량이 년 30 gP/m²에서 5 gP/m²으로 감소하기 시작하면서 호수 생태계는 변화하기 시작했다. 1985년까지는 퇴적된 인의 용출탕으로 인 부하량의 감소효과가 호수내 인 농도나 조류농도의 감소를 유발하지 못했다. 그 후 1985년부터 1988년까지 호수내 생태학적 변화는 급변하기 시작했다. 부영양화로 빛어진 높은 pH탕으로 어류가 대량 폐사하기 시작했고 이에 동물성플랑크톤이 증가하고 연이어 식물성 플랑크톤은 1985년 700 ug/l(chl-a)에서 1988년 150 ug/l(chl-a)로 급감하기 시작했다. 이 감소한 식물성플랑크톤은 그 크기가 증가한 반면 성장율의 감소와 침강속도의 증가를 갖게 되었다. 동물성플랑크톤의 종도 *Bosmina*에서 *Daphnia*로 종의 천이가 발생하기도 했다(Sondergard, 1989).

이와 같이 외부 인부하량의 감소는 호수생태계 내 종의 구성과 구조를 변화시킴으로서 기존의 생태 모형으로서의 하수의 고도처리가 미치는 생태학적 특성변화를 제대로 예측해 낼 수 없었다. 이에 Jørgensen(1997)은 기존의 생태 모형에서 다음 Fig. 4와 같이 시간에 따라 민감도 계수값이 큰 일련의 생태계수값을 ±10%씩 변환시키면서 단위시간 동안 (5일) 최대 엑서지를 나타내는 일련의 생태계수값을 계속적으로 추적해 나감으로서 인부하량 삭감 후 호수에서 일어난 일련의 생태학적 발달 및 천이특성을 제대로 반영할 수 있는 예측 결과를 갖게 되었다.

선택된 생태계수값은 조류 최대성장율(algae maximum growth rate)과 조류 침강율(Settling rate of algae)이다. 최대엑서지를 나타내는 조류 최대 성장율 값은 해당기간동안에 2.2(1/day)에서 1.1(1/day)로 낮아졌고 조류침강율도 0.15 m/day에서 0.45 m/day로 커지게 되었다. 이는 최대 엑서지를 나타내는 두 생태계수값이 실제 호수내 조류종의 크기가 커짐에 따른 최대 성장율 감소 현상과 높은 침강율을 제대로 반영하게 되었다.

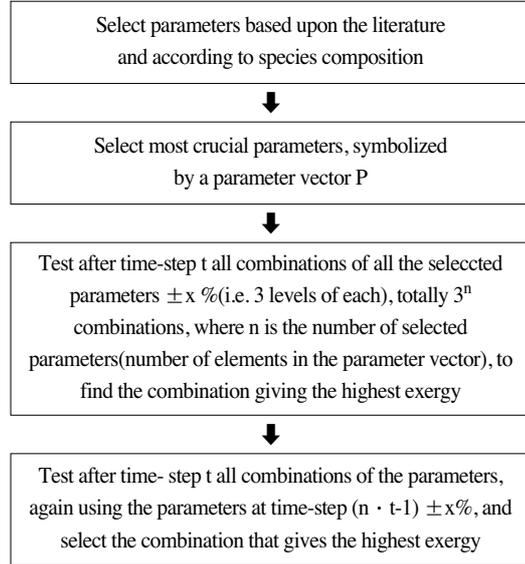


Fig. 4. The procedure used for the development of structural dynamic models

2) 영양염류농도에 따른 조류종의 천이과정의 해석

최대 엑서지값을 이용하면 수중 영양염류농도에 따라 조류종의 천이과정을 설명할 수 있다. 두 종의 조류중 최대 엑서지값을 나타내는 조류종으로 종의 천이가 일어나게 된다. 일반적으로 구조

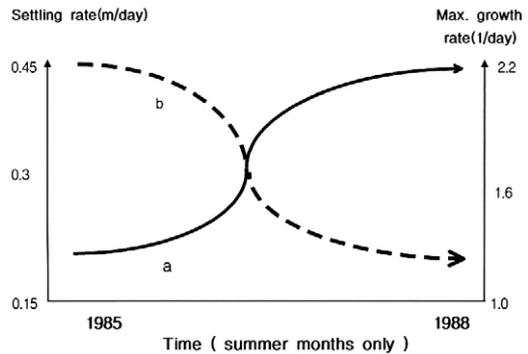


Fig. 5. The continuously changed parameters obtained from the application of a structural dynamic modeling approach to Sobygaard Lake. 'a' is the settling rate of phytoplankton and 'b' is the maximum growth rate of phytoplankton

류종 수중 $\frac{Si}{P}$ 비가 높으면 낮은 인 반포화상수값을 지닌 조류종이 선택되고 $\frac{Si}{P}$ 비가 낮으면 낮은 규소 반포화상수값을 지닌 종이 선택되어진다 (Tilman and Kilham, 1976). 다음 Fig. 6과 같이 A는 인의 반포화상수값이 0.003 mg/l, 규소의 반포화상수값이 0.5 mg/l 일 때의 조류종을 나타내고 있어 수중 인농도가 낮을 때 번식하는 규조류에 해당하며 B는 인의 반포화상수값이 0.1 mg/l, 규소의 반포화상수값이 0.1 mg/l 일 때의 조류종을 나타내고 있어 수중 규소농도가 낮을 때 번식하는 조류종에 해당한다. Fig. 6에서 $\frac{Si}{P}$ 비가 낮은 경우 일반적인 추세와 같이 낮은 규소 반포화상수값을 지닌 종이 높은 엑서지값을 나타내고 있어 이 종이 우점종이 될 수 있을 반증하고 있으며 $\frac{Si}{P}$ 비가 높을 경우 낮은 인 반포화상수값을 지닌 조류종이 높은 엑서지값을 나타내고 있어 이 종으로의 천이과정을 설명가능하게 된다.

3) 낙동강 하류부(물금) 조류종의 천이과정 해석

낙동강 하류부 물금에는 년중 여름철 남조류인 *Microcystis*와 규조류인 *Stephanodiscus*가 우점하고 있으며, 봄 가을에 두 조류종간에 천이가 보통 발생한다. 1994년 최악의 가뭄시 조사된 자료를 활

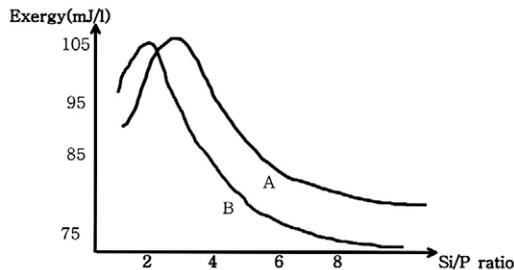


Fig. 6. Exergy is plotted versus Si/P ratio for two species of algae. 'A' corresponds to the situation where the half saturation constant for P is 0.003 mg/l and for Si is 0.5 mg/l. 'B' corresponds to the situation where the half saturation constant of P is 0.1 mg/l and for silica is 0.1 mg/l.

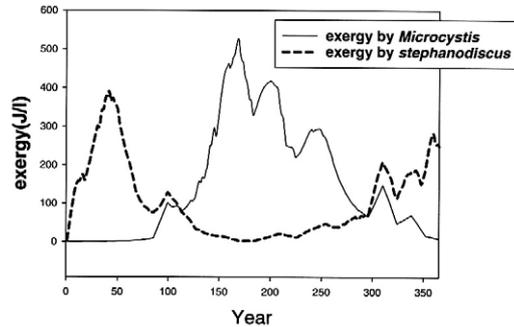


Fig. 7. Exergy and algae succession in the lower part (Mulgum) of Nakdong River

용하여 생태계 모형을 적용하였다. 봄철(3월 하순) *Stephanodiscus*에서 *Microcystis*로 천이가 발생할 즈음에 최대 엑서지를 나타내는 조류종도 *Stephanodiscus*에서 *Microcystis*로 바뀌고 있으며, 가을철(10월 하순) *Microcystis*에서 *Stephanodiscus*로 천이가 발생할 시점에도 최대 엑서지를 나타내는 종이 *Microcystis*에서 *Stephanodiscus*로 바뀌게 되어 종의 천이과정을 해석할 수 있음을 증명해주고 있다(김좌관, 2003). 따라서 낙동강 하류부(물금)에서 최대엑서지 원칙(Maximum Exergy Principle)을 적용할 때 조류종의 천이과정을 설명해낼 수 있는 것으로 사료된다.

IV. 결론

본 연구에서는 최근 새롭게 서구에서 언급되고 있는 열역학적 개념인 엑서지(exergy)를 소개하였다. 비평형상태의 유효에너지인 '엑서지'는 끊임없이 negentropy를 생산해 낼 수 있는 생태계에 적용할 수 있는 개념이다. 즉 다윈의 적자생존의 법칙이 생태계에서는 최대의 엑서지를 유지하려는 방향과 일치한다는 점이 확인된 셈이다. 최대 엑서지원칙(Maximum Exergy Principle)은 다양한 방면에서 적용 가능하다. 생태계 모형을 동적구조모형으로 변환할 때, 생태계의 건강성을 평가할 때, 또는 생태학적 천이 및 발달현상이 일어나

는 모든 제반현상 등을 제대로 추적해 낼 수 있는 목적 기능(goal function)을 가진 것으로 평가된다. 따라서 시간에 따라 다양하게 변화해나가는 생태계를 추적할 수 있는 동적모형 개발이 가능하게 된 셈이다. 즉 기존의 생태계 모형들은 실제 생태계내에 일어나는 다양한 생태적 변화과정을 제대로 반영하지 못하고 있다. 앞에서 언급된 바와 같이 호수내 조류종이 바뀌었음에도 불구하고 기존 생태모형들은 고정된 생태계수값을 입력함으로써 조류종의 제반 특성을 제대로 반영하지 못하고 있다. 따라서 최대역서지원칙을 따라 구해진 동적 계수값의 적용은 다양한 예에서 보듯이 적절한 생태적 변화과정을 추적할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- 김좌관, 2003, 생태계모형을 이용한 *Microcystis bloom*ig 해석에 관한 연구, 부산가톨릭대학교 논문집.
- Jørgensen, S. E. and H. F. Mejer, 1977, Ecological buffer capacity, *J. Ecol. Modelling*, 3, 39-61.
- Jørgensen, S. E., 1979, A holistic approach to ecological modelling, *J. Ecol. Modelling*, 7, 169-189.
- Jørgensen, S. E., 1994, *Fundamental of Ecological Modeling*, Elsevier.
- Jørgensen, S. E., Nielsen, S. E. and Mejer, H., 1995, *Emergy, environ, exergy and ecological modelling*, *Ecological Modelling*, 77, 99-109.
- Jørgensen, S. E., 1997, *Integration of Ecosystem Theories: A Pattern*(2nd Ed.), Kluwer Academic Publishers.
- Odum, H.T., 1983, *System Ecology*, Wiley Science, New York.
- Schneider, E. D. and Kay, J., 1994, Life as a manifestation of the second law of Thermodynamics, *Mathl. Comput. Modelling*, 19(6), 25-48.
- Sondergard, M., 1989, Phosphorus release from a hypertrophic lake sediment:experiments with intact sediments cores in a continuous flow system, *Arch. Hydrobiol*, 116, 45-59.
- Strasbaska, M., 1989, Natural control mechanisms in models of aquatic ecosystems, *J. Ecological Modelling*, 6, 305-322.
- Strasbaska, M., 1996, Lake and reservoir management, *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 26, 193-209.
- Tilman, D. and Kilham. S.S., 1976, Phosphate and silicate growth and uptake kinetics of the diatoms *Asterionella formosa* and *Cyclotella meninghiniana* in batch and semi-continuous culture, *J. of Phycol*, 12, 375-383.
- Ulanowicz, R. E., 1997, *Ecology, The Ascendent Perspective*, Columbia University Press.