Biology **40** (2), India.

Gutierrez MAR (1994) Utilizacion de la Ictiofauna como Indicadora de la Integridad Biotica de los Rios Guache y Guanare, Estado Portuguesa, Venezuela, pp. 1-40. M.Sc. thesis, Universidad Nacional Experimental de los Llanos Occidentales "Ezequiel Zamora," Guanare, Venezuela.

Harris JH (1995) The use of fish in ecological assessments, *Australian Journal of Ecology* 20: 65-80.

Hocutt CH, PN Johnson, C Hay & BJ VanZyl (1994) Biological basis of water quality assessment: the Kavango River, Namibia, *Reviews Hydrobiologie Tropical* **27**: 361-384.

Hugueny B, S Camara, B Samoura & M Magassouba (1996) Applying an index of biotic integrity based on communities in a west african river, *Hydrobiologia* **331**: 71-78.

Judy RD, Jr. PN Seeley, TM Murray, SC Svirsky, MR Whitworth & LS Ischinger (1984) National Fisheries Survey. Volume 1. Technical · Report: initial findings. United States Fish and Wildlife Service. FWS/OBS-84/06.

Karr JR (1981) Assessment of biotic integrity using fish communities. *Fishieries* **6**: 21-27.

Karr JR & M Dionne (1991) Designing surveys to assess biological integrity in lakes and reservoirs, in biological criteria; Research and Regulation-Proceedings of a symposium. pp. 62 - 72. U.S. EPA, Office of Waters, Washington, D.C., EPA-440/5-91-005, U.S.A.

Karr JR, KD Fausch, PL Angermeier, PR Yant & IJ Schlosse (1986) Assessing biological integrity in running water: A method and its rationale. pp. 28. *In* Illinois national History Survey, Special Publication 5, Champaign, IL.

Kim BC, JH Park, GS Hwang and KS Choi, (1997) Eutrophication of large freshwater ecosystems in Korea. Korean J. Limnol. 30:512-517.

Koizumi N and Y Matsumiya (1997) Assessment of stream fish habitat based on Index of Biotic Integrity. *Bull. Jap. Soc. Oceanogr.* **61**:144-156.

Lofti JC, RC Ward & GM Smillie (1983) Statistical models for water quality regulation. *Journal of the Water Pollution Control Federation* **55**: 1098-1104.

Oberdorff T & RM Hughes (1992) Modification of an index of biotic integrity based on fish assemblages to characterize rivers of the Seine Basin, France, *Hydrobiologia* **228**: 117-130.

Oberdorff T & JP Porcher (1994) An index of biotic integrity to assess biological impacts of salmonid farm effluents on receiving waters. *Aquaculture* **119**: 219-235.

Ohio EPA (1987) Biological criteria for the protection of aquatic life. Vol.II, Users manual for biological field assessment of Ohio surface waters. Division of Water Quality Monitoring and Assessment, Surface Water Section, Columbus. OH.

U.S. EPA (1983) Technical support manual: waterbody surveys and asessment for conducting use attainability analyses. Office of Water Regulations and Standards, U.S. EPA, Washington, D.C., USA.

U.S. EPA (1985) Technical support document for water quality-based toxic control. Office of Water Enforcement and Permits, Office of Regulations and Standards, U.S. EPA, Washington, D.C., USA.

U.S. EPA (1991) Technical support document for water quality-based toxic control. EPA 505-2-90-001. U.S. EPA, Office of Water, Washington, D.C., USA.

U.S. EPA (1993) Fish field and laboratory methods for evaluating the biological integrity of surface waters. EPA 600-R-92-111. Environmental Monitoring systems Laboratory - cincinnati office of Modeling, Monitoring systems, and quality assurance Office of Research Development, U.S. EPA, Cincinnati, Ohio 45268.

SL402

21세기 생태환경관리와 차세대 생태계 모형 개발을 위한 exergy의 적용

김 좌 관

부산가톨릭대학교 산업환경시스템학부

1. 엑서지 (exergy)와 생태계

1-1. 엑서지의 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 있는 최대의 일을 말하며, 잠정적으로 열열학 제 4 법칙(Tentative Fourth Law of Thermodynamics)으로 언급되고 있다. 즉 엑서지는 하나의 시스템이 열역학적 평형상태 (thermodynamic equilibrium)로 갈 때 주위환경에 전달할 수 있는 최대 entropy-free 에너지로서 다음 식 (1)로 정의되고 있다. 엑서지의 감소와 엔트로피의 생산은 하나의 실체에 대한 동전의 양면과 같은 표현방법이다.

$$Ex = T_o \cdot NE = T_o \cdot I = T_o \cdot (S_o - S) \quad \text{---} \quad (1)$$

Ex = 엑서지
T_o = 주위 환경의 절대온도
NE = Negentropy
I = 열역학적 정보(Thermodynamic information)
S_o = 주위 환경의 엔트로피 (열역학 평형상태)
S = 시스템의 엔트로피

열역학적 제 2 법칙에서는 불가역변화가 엔트로피가 증가하는 방향에서 생긴다는 것을 나타내고 있다. 그러나 지구상에서 발생하는 모든 변화는 열역학에서 주요가정조건으로 삼는 열역학적 평형상태는 태양이 존재하는 한 이루어지지 않을 것이다. 고온인 태양에서 오는 가시광선을 중심으로 한 복사에너지와 저온인 우주공간에의 적외선 방사라는 에너지 흐름이 있으므로 지구는 항상 비평형인 상태로 유지되고 있기 때문이다. 따라서 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)을 가능토록 하고 있다.

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

2-2. 엑서지와 생태계

시스템이 생태계 (ecosystem)일 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 제 2 법칙을 위반하는 것은 아니다. 즉 생태계는 외부로부터 낮은 엔트로피를 가진 에너지 (negative entropy flux)를 흡수함으로서 열역학적 평형상태로부터 끊임없이 벗어나려고 하고 있으며 조직화 수준을 높이고 생체량을 최대화하는 방향으로 발달 및 진화하게 된다.

엑서지는 열적 평형상태에 대한 최대의 일량을 의미하는 데, 일을 열로 전환할 경우 생태계에서서는 열적 평형상태는 무기물질

상태를 의미하게 되며 생물의 생체량은 일정한 에너지로 표현가능하게 된다 (예, 단백질, 지방, 탄수화물의 경우 평균 18.8 kJ/g 의 열량).

따라서 생태계내 엑서지 크기는 우선 유기물질의 량에 비례하게 된다. 더불어 엑서지는 위의 식 (1)에서 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 진화정과정이 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.

최근 Jorgensen (1979, 1988, 1992, 1998)은 생태계에 보다 쉽게 적용할 수 있도록 하기 위하여 다음과 같은 식 (2)로 정리하였다. 즉 엑서지값은 해당 생태계내 생물체량과 그 생물체가 갖는 정보량의 곱으로 표현가능하게 되었다. 식 (2)에 포함된 Wi (생태계 생물속에 있는 정보)는 각 생물체내 유전자 숫자를 근거로 가중치 (weighting factor)로 환산한 표를 정리발표하였다 (Jorgensen, 1992).

$$\text{Exergy (kj}/l) = \sum_{i=1} Wi \cdot Ci \text{ ------ (2)}$$

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

2-3. 다윈 이론의 열역학적 해석 ; Maximum exergy principle

일반적으로 생태계의 천이 (succession) 및 발달현상 (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)으로 지칭되는 엑서지 개념은 다윈적 진화론인 적자생존 (The survival of the fittest)의 법칙을 재해석할 수 있게 된다. 앞에서 언급한 바와 같이 적

자로 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 ascendency, indirect effect, emergy 등과 같이 이 '최대 엑서지 원칙 (maximum exergy principle)'도 생태계의 변화특성을 파악해 낼 수 있는 훌륭한 목적기능(goal function)을 가진 셈이 된다.

생태계의 발달과 천이과정은 그 자체가 무슨 의식적 목적과 방향성, 그리고 의지하에 나아가는 것이라고 볼 수 없지만 이론생태학적 측면에서 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 도구 (tool)가 필요하며 이에 이론생태학자들은 목적기능 (goal function)을 가진 개념으로서 ascendency, indirect effect, catastrophe theory, chaos theory 등을 정의하고 이용하게 되었고 열역학적 개념인 엑서지도 목적기능을 가진 도구로서 활용 가능하게 된 셈이다. 따라서 실제 종의 천이 및 발달, 그리고 진화가 발생하는 모든 생태학적 과정을 엑서지값을 통하여 추적하거나 예측 가능하다고 판단된다. 실제 자연생태계에 적용 가능한 범위는 아래와 같다.

가. 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

나. 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

다. 생태계의 건강성 (ecosystem health) 및 생태학적 지표 (ecological indicator)로서의 활용

라. 생태공학 (ecological engineering) 수단의 평가

마. structural dynamic model을 통한 수생태계의 변화를 제대로 파악해냄으로서 수생태계 회복을 위한 각 종 대안들의 효과를 보다 정확하게 평가할 수 있다.

3. 차세대 생태계 모형으로서의 동적구조모형(Structural Dynamic Modelling)

생태계는 대단히 복잡한 구조를 갖고 있어서 정확하게 파악해내는 것은 거의 불가능한 수준이다. 따라서 생태계를 해석하는 모든 생태모형들은 언제나 개선의 여지

가 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 구조 (ecological structure)가 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. 생태계 모형에서는 고정된 생태계수값이 적용될지라도 실제 생태계는 현재의 조건에 적응하기 위해 끊임없이 그 들의 생태학적 특성을 변화시켜 나간다. 이는 곧 열역학적 평형상태로부터 가능한 한 멀어지려는 생태계의 능력이기도 하다. 즉 외부 환경요인이 변화함에 따라 생태계 내부는 종 조성과 종의 구조가 달라지게 되며, 이는 곧 exergy가 최대로 증가하는 쪽으로 해당 생태계가 변화하고 옴을 확인가능하며, 생태모형을 통하여 최대엑서지값을 추적하면 이의 해석이 가능하게 된다.

4. 결 론

본 연구에서는 최근 새롭게 서구에서 언급되고 있는 열역학적 개념인 엑서지 (exergy)를 소개하였다. 비평형상태의 유효 에너지인 '엑서지'는 끊임없이 negentropy 를 생산해 낼 수 있는 생태계의 특성을 반영할 수 있어 적용가능한 개념으로 파악된다. 즉 다윈의 적자생존의 법칙이 생태계에서는 최대의 엑서지를 유지할려는 방향과 일치한다는 점이 확인된다. 최대엑서지원칙 (maximum exergy principle)은 다양한 방면에서 적용 가능하다. 생태계 모형을 동적구조모형으로 변환할 때, 생태계의 건강성을 평가할 때, 또는 생태학적 천이 및 발달현상이 일어나는 모든 제반현상 등을 제대로 추적해 낼 수 있는 목적 기능 (goal function)을 가질 것으로 평가된다.

참 고 문 헌

Jorgensen, S.E. 1979. A holistic approach to ecological modelling. *J. Ecol. Modelling* **7**: 169-189.

Jorgensen S. E., Use of models as experimental tool to show the structural changes are accompanied by increased exergy. Ecol. Modelling, 41:117-126, 1988.

Jorgensen S. E., Development of models able to account for changes in species composition. Ecol. Modelling, 62: 195-208, 1992.

Jorgensen S. E., Integration of Ecosystem Theories: A Pattern. Kluwer Academic Publishers, 1998.

SL403

댐저수지의 수질관리 방안 연구 -섬진강 다목적댐 저수지를 중심으로-

이 요 상
한국수자원공사 수자원연구소

제 1 장 서 론

1997년 현재 국내에는 18,797개의 호소가 존재하고 있으며 이들의 대부분은 수자원의 확보를 위해 인공적으로 조성한 것이다. 순수한 의미의 자연호소는 경포호 등 주로 동해안 지방에 존재하는 기수호 5~6 개소에 불과하며 전체호수의 99% 이상이 용수확보를 위해 인공적으로 조성한 것이