

Ecopath 모델을 이용한 남양호와 낙동강 하류 생태계의 영양구조 및 에너지 흐름 비교¹

장성현² · 이정호^{2*}

Comparison of Trophic Structures and Energy Flows using the Ecopath Model in the Lake Namyang and the Lower Reaches of the Nakdong River¹

Sung-Hyun Jang², Jung-Ho Lee^{2*}

요 약

Ecopath 모델을 이용하여 남양호와 낙동강 하류 생태계의 영양구조와 에너지 흐름을 정량적으로 파악하고, 그 결과를 비교·분석하고자 하였다. 이를 위해 2007년 갈수기(5월)와 풍수기(8월)에 남양호와 낙동강 하류 수계의 각 6개 지점에서 조사를 실시하였다. 연구결과, 남양호는 무생물인 유기쇄설물과 식물플랑크톤, 대형 수생식물 등이 생산자로, 동물플랑크톤과 저서동물, 떡붕어, 붕어, 기타 어류 등은 1차 소비자로, 잉어와 동자개는 2차 소비자로 조사되었으며, 낙동강 하류는 무생물인 유기쇄설물과 식물플랑크톤, 대형 수생식물 등은 생산자로, 동물플랑크톤과 저서동물, 기타 어류, 잉어, 누치 등은 1차 소비자로, 배스는 2차 소비자로 나타났다. 영양구조는 남양호가 1.0~3.3의 범위를, 낙동강 하류는 1.0~3.7의 범위로 낙동강 하류가 남양호보다 더 긴 먹이사슬을 가지는 것으로 추정되었다. 영양단계별 먹이자원에 대한 경쟁은 남양호가 0.100~0.900로 나타나 0.018~0.845 범위의 낙동강 하류보다 먹이자원에 대해 높은 경쟁을 가지는 것으로 확인되었다. 총에너지량은 남양호가 14.1 kg m⁻², 낙동강 하류는 2.7 kg m⁻²이었으며, 이 중 남양호 수계는 39%(5440.919 g m⁻²)는 섭식으로, 21%(3107.271 g m⁻²)은 이출, 12%(1708.362 g m⁻²)는 호흡, 28%(4018.551 g m⁻²)은 유기쇄설물로 전환되는 것으로 나타났으며, 낙동강 수계는 52.0%(1433.998 g m⁻²)은 섭식으로, 9.1%(252.101 g m⁻²)은 이출, 18.0%(498.150 g m⁻²)은 호흡, 20.9%(575.984 g m⁻²)는 유기쇄설물로 전환되는 것으로 추정되었다.

주요어: 먹이사슬, 총에너지량, 섭식, 이출, 호흡, 유기쇄설물

ABSTRACT

The purpose of this study was to compare the trophic structures and the energy flows in the Lake Namyang and the lower reaches of the Nakdong River using the Ecopath model. The sampling and analyses were carried out at 6 sampling sites of the Lake Namyang and the lower reaches of the Nakdong River respectively on March and November in 2007. As a result, the Lake Namyang was consisted of producers(Detritus, Macrophytes, Phytoplankton), primary consumers(Zooplankton, Zoobenthos, *Carassius cuvieri*, *Carassius auratus*, Other fishes) and secondary consumer(*Cyprinus carpio*, *Pseudobagrus fulvidraco*) and the lower reaches of the Nakdong River was consisted of producers(Detritus, Macrophytes, Phytoplankton), primary consumers

1 접수 2010년 10월 20일, 수정(1차: 2011년 8월 5일, 2차: 2011년 10월 21일), 게재확정 2011년 10월 22일

Received 20 October 2011; Revised(1st: 5 August 2011, 2nd: 21 October 2011); Accepted 22 October 2011

2 대구대학교 생물교육과 Dept. of Biology Education, Daegu University, Gyeongsan(712-714), Korea

* 교신저자 Corresponding author(jungho@daegu.ac.kr)

(Zooplankton, Zoobenthos, *Cyprinus carpio*, *Hemibarbus labeo*, Other fishes) and secondary consumer (*Micropterus salmoides*). The food-chain length of the Lake Namyang was relatively short when compared with the lower reaches of the Nakdong River. The shortness of food-chain length in the Lake Namyang could be attributed to the low biomass of the top predators. The total system throughput of the lake Namyang was estimated at $14.3 \text{ kg m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ including a consumption of 39.0%, exports of 21.0%, respiratory flows of 12.0% and flows into detritus of 28.0% and the total system throughput of the lower reaches of the Nakdong River was estimated at $2.8 \text{ kg m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ including a consumption of 52.0%, exports of 9.1%, respiratory flows of 18.0% and flows into detritus of 20.9% in the lower reaches of the Nakdong River.

KEY WORDS: FOOD-CHAIN LENGTH, TOTAL SYSTEM THROUGHPUT, CONSUMPTION, EXPORTS, RESPIRATORY, DETRITUS

서론

담수 생태계를 구성하는 모든 생물과 무생물학적 요소들은 먹이그물과 에너지 흐름에 의하여 거미줄처럼 연결되어 있다. 또한, 최종 소비자인 인간에 이르기까지 다양한 경로를 통하여 연결되어 있다. 따라서 수질오염 및 인위적인 교란 등과 같은 환경변화는 여러 경로를 통하여 국소적인 생태계의 구조와 기능에 영향을 주며, 결국 인간에게까지 악영향을 미친다(Hong *et al.*, 2005). 따라서 이러한 복잡한 과정에서 발생할 수 있는 문제점에 대한 원인과 결과를 미리 확인하고 진단하며, 이를 통해 수 생태계 및 수자원을 효율적으로 관리할 수 있는 방법이 필요하다.

담수 생태계의 영양구조와 에너지 흐름은 생태계내의 생물상의 현황과 생물다양성, 그리고 인위적·자연적 교란에 의한 생물군집천이 과정을 파악할 수 있으며, 생물간의 상호 관련성을 파악하고 평가함으로써 담수 생태계의 종합적 관리를 수행할 수 있다. 이는 현재까지 수행되고 있는 생물상 조사가 일정지역 내에 있어서 분류군별로 별개의 조사가 수행된 것과는 달리, 생물상의 정보를 서식환경의 입지에 따른 생물간의 상호 관련성에 따라 파악하고 평가함으로써, 담수 생태계의 종합적 관리를 수행할 수 있게 한다(Jang, 2008). 아울러, 생태계 영양구조와 에너지 흐름에 대한 지속적인 모니터링을 수행함으로써 향후 담수 생태계의 개발 및 오염의 증가, 홍수로 인한 범람 등과 같은 자연적·인위적 교란에 대한 생태계의 변화를 추적할 수 있다. 따라서 추후 증대되는 담수 생태계의 이용계획 수립을 위한 기초 자료로써의 활용할 수 있으며, 수 생태계의 생물다양성을 향상시킬 보전 지역 및 복원 지역 등의 토지이용계획의 수립, 생물 서식 공간 조성 및 관리의 기본계획의 수립을 위한 기술적인 정보로 활용될 수 있는 중요한 기초자료를 제공할 수 있다.

그러므로 본 연구는 생태모델인 Ecopath with ecosim (Walters *et al.*, 1997)을 이용하여 담수 생태계의 영양구조와 에너지 흐름을 파악하고 이를 통하여 담수 생태계 및 수자원 관리의 기초 연구로서 활용하고자 하였다. 이를 위하여 정수 생태계의 남양호와 유수 생태계의 낙동강 하류에서 영양구조와 에너지 흐름을 파악하였으며, 그 결과를 비교, 분석하였다.

재료 및 방법

조사대상지인 남양호는 1974년 다목적 농업개발사업의 일환으로 남양만으로 흐르는 발안천 하구에 방조제를 축조하여 만든 인공 담수호(정수생태계)이며, 낙동강은 우리나라 4대 강 중의 하나로 강원도 태백에서 발원하여 남해안으로 유입되는 총 유로연장 525 km, 유역면적이 23,895 km²를 가지는 우리나라 제2의 수계(유수생태계)이다. 본 연구는 생태모델을 이용하여 담수생태계의 영양구조 및 에너지 흐름을 비교 분석하고자 2007년 갈수기(5월)와 풍수기(8월)에 남양호와 낙동강 하류 수계의 각 6개 지점에서 조사를 실시하였다(Figure 1). 또한, 어류의 각 어종별 밀도와 자원량 자료를 위해 2007년 3월에서 11월까지 매달 2회씩 조사를 실시하였다. 환경요인을 위한 시료 채취는 수심 10~30 cm 깊이에서 이루어졌으며, 수심과 투명도는 현장에서 측정하였고, 엽록소 a와 TOC, DOC 등은 현장 채취한 시료를 아이스박스를 사용하여 당일 실험실로 운반 후 수질오염공정시험법(Ministry of Environment, 2000) 및 Standard Methods for examination of water and wastewater(APHA·AWWA·WEF, 1998)에 따라 측정하였다.

본 연구에서는 생태계의 영양구조와 에너지 흐름의 규명을 위하여 Ecopath 모델(Walters and Pauly, 1997)을 사용하였으며, 이 모델은 각 그룹으로부터의 유입량과 유출량이

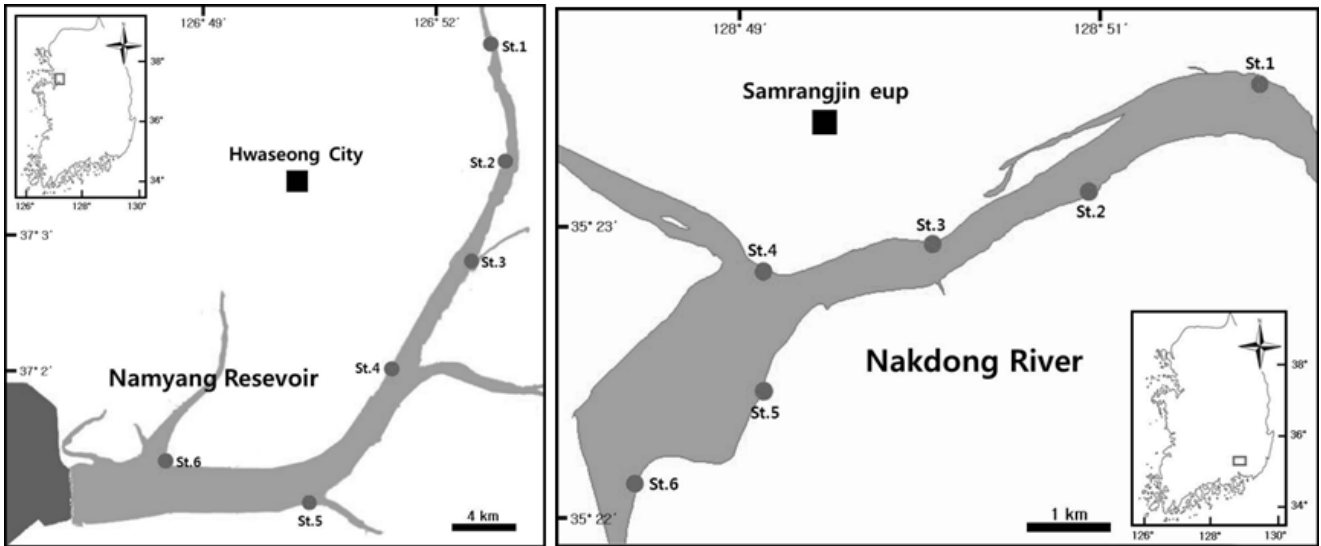


Figure 1. Map showing the sampling sites in the Lake Namyang and the Lower Reaches of the Nakdong River(left: Lake Namyang, right: Nakdong River)

균형을 이룸을 가정하여 질량균형 모델식(Mass balance equation)과 각 그룹에 대한 에너지 균형 모델식(Energy balance equation)을 기본식으로 한다. 질량 균형(Mass balance) 모델식의 각 그룹(i)에 대한 생산량식은 식-1과 같다.

$$P_i = Y_i + B_i \cdot M2_i + E_i + BA_i + P_i \cdot (1 - EE_i) \quad (식-1)$$

여기서, P_i = 생물군 i의 총생산량,

Y_i = i의 총 어획량,

B_i = i의 생체량,

$M2_i$ = i의 포식자에 의한 사망량,

EE_i = 순회유량(이출-이입),

BA_i = i의 누적생체량,

$P_i \cdot (1 - EE_i)$ = MO_i (i에 대한 기타 사망량)

에너지 균형 모델식(Energy balance)은 모든 생물의 에너지 유입과 유출이 균형을 이루어야 한다. 각 그룹 간 에너지 균형은 다음 식-2에 의해 성립된다.

$$Q = P + R + NA \quad (식-2)$$

여기서, Q = 섭식량(Consumption, Q),

P = 생산량(Production, P),

R = 호흡량(Respiration, R),

NA = 미동화량(Non-assimilated food)

모형평가의 대상수역인 남양호와 낙동강 하류 수계의 면적은 농촌수산종합정보시스템(<http://rawris.ekr.or.kr>)의 자료를 토대로 산출하였으며, 계산된 대상 생태계 면적은 남

양호가 5.89 km², 낙동강이 3.3 km²이었다. 또한, 서식생물들을 서식지와 먹이습성, 생태학적 기능의 관점에 따라 남양호는 9개의 생물군과 1개의 유기쇄설물로, 낙동강 하류 수계는 8개의 생물군과 1개의 유기쇄설물로 각각 분류하였다(Jang, 2008; Jang et al., 2008a; Jang et al., 2008b).

유기쇄설물은 각 수계 6개 지점으로부터 측정된 평균 TOC의 값을 활용하였고, 수층 내 식물플랑크톤의 생체량은 측정된 평균 엽록소 값을 Jones(1979)의 변환 인자를 통해 산출한 후 증량/면적 단위로 환산하여 활용하였다. 식물플랑크톤의 생산량은 광합성의 결과 증가된 산소의 양을 측정하는 명암병법에 의한 용존산소 측정법으로 현장에서 직접 측정하였다. 동물플랑크톤은 플랑크톤 네트(망목 0.63mm, 망구 30cm)를 사용하여 정량 채집한 시료를 검정한 후 생체량을 산출하였다(Jang, 2008; Jang et al., 2008a; Jang et al., 2008b).

어류의 생체량은 체장별 어획자료가 사용 가능한 어종에 대해서는 체장을 기초로한 코호트 분석법(Jones, 1984)을 통해 생체량을 추정하였고, 체장별 어획자료의 사용이 불가능한 종에 대해서는 현장에서 어획한 어획량을 토대로 정량화시켜 직접 생체량을 추정하였다. 기타어종으로 남양호에서는 가물치와 미꾸라지, 밀어, 버들붕어, 얼룩동사리 등이, 낙동강 하류 수계는 밀자개와 기름중개, 꺾지, 붕어, 불루길 등이 서식하는 것으로 확인되었으며, 이들 종들에 대한 자원량은 삼각망 및 투망 등 직접 조사법으로 추정하였다(Jang, 2008; Jang et al., 2008a; Jang et al., 2008b). 또한, 어류의 생체량에 대한 생산량의 비(P/B ratio)는 직접적으로 추정하기에 매우 어려운 부분이다(Allen, 1971). 따라서 생

태계가 안정적인 환경이라는 것을 가정하여 순간전사망계수(Z ; instantaneous coefficient of total mortality)를 생체량에 대한 생산량의 비로 표현할 수 있다(Pauly and Walters, 2000). 순간전사망계수(Z)는 생존율(S ; survival rates) 추정치를 사용하여 계산하였으며, 생존율(S)은 어획된 샘플의 체장을 연령-체장 상관표(age-length key)를 통하여 연령으로 환산하여 연령조성을 구한 후, 연령조성 자료를 사용하여 추정하였다. 순간전사망계수(Z)는 순간어획사망계수(F ; instantaneous coefficient of fishing mortality)와 순간자연사망계수(M ; instantaneous coefficient of natural mortality)의 합으로 계산되며, 본 연구에서 사용된 각 어종별 순간자연사망계수(M)는 Pauly(1984)의 경험적인 방정식(식-3)을 사용하였다.

$$\ln(M) = -0.0152 - 0.279 \ln(L_{\infty}) + 0.6543 \ln(K) + 0.463 \ln(T) \quad (\text{식-3})$$

여기서, L_{∞} = 이론적인 최대체장

K = 성장계수

T = 표층수온

생체량에 대한 섭식량의 비(Q/B ratio)는 체중 당 섭식량으로 각 생물종이 체중의 몇 배를 소비하는지를 나타내는 것으로 1년 동안 단위생체량에 대한 섭식량(Q)으로 표현된다. 즉 1년 동안 각 생물종이 체중의 몇 배를 소비하는지를 나타낸다. 어류의 생체량에 대한 섭식량의 비(Q/B ratio)는 일반적으로 Pauly(1984)의 정량적 방법으로 사용되지만 본 대상수역에 서식하는 생물들에 대한 사용 가능한 자료가 거의 없어 Fishbase(2007)와 기존 문헌자료를 활용하였다. 먹이조성은 각 그룹의 위 내용물 분석으로부터 가중평균치를 구하였으며, 본 조사에 의해 먹이생물 중요도가 정확히 추정된 생물종에 대해서는 그 결과를 그대로 이용하였고, 먹이생물 중요도가 정확하게 분류되지 않은 생물종에 대해서는 Fishbase(2007)의 자료를 사용하였다.

Ecopath가 실행될 때 이입과 이출의 균형을 이루기 위해서, 생태영양효율(EE, Ecotrophical efficiency) 값은 모델의 평형을 유지하기 위해 0과 1 사이에 있도록 조정한다. 여기서 0이라는 값은 시스템 내에서 어떤 다른 생물군도 해당 생물군을 소비하지 않음을 나타낸다. 반면 1 혹은 1에 가까운 값은 생물군이 강한 포식압력 혹은 어획압력을 받음을 의미한다. 특히 평형상태에서 이 값은 1을 초과하여서는 안 된다. 본 연구에서 최초로 추정된 기본 입력값에 의한 모델은 균형을 이루지 않았기 때문에 모델의 균형을 이루기 위해서 기본 입력값을 조정하였다. 따라서 직접적인 현장조사에 의해 도출된 값과는 약간의 차이가 발생할 수 있다(Zhang and Yoon, 2003).

결과 및 고찰

1. 영양구조 및 먹이 중복도

1) 영양구조(trophic level)

Ecopath 모델을 사용하여 추정한 남양호 및 낙동강 하류 생태계의 영양구조와 에너지 흐름은 Figure 2와 같다. 왼쪽 축은 영양단계로서 일차생산자 그룹에서부터 최고소비자 그룹까지 여러 단계를 포함하며, 그림의 상자 크기는 생체량을 나타내고 화살표는 에너지가 이동하는 방향을 보여준다(Kang, 2005).

남양호와 낙동강 하류 생태계의 영양구조는 3단계 즉, 생산자와 1차 소비자, 2차 소비자로 구분되어졌다. 남양호 수계는 무생물인 유기쇄설물과 식물플랑크톤, 대형 수생식물 등은 생산자로, 동물플랑크톤과 저서동물, 떡붕어, 붕어, 기타 어류 등은 1차 소비자로, 잉어와 동자개는 2차 소비자로 나타났다. 낙동강 하류는 무생물인 유기쇄설물과 식물플랑크톤, 대형 수생식물 등은 생산자로, 동물플랑크톤과 저서동물, 기타 어류, 잉어, 누치 등은 1차 소비자로, 배스는 2차 소비자로 나타났다(Table 1). 이와 같이 먹이사슬을 통하여 다양한 생물그룹을 생산자와 1차 소비자, 2차 소비자 등의 영양단계로 분류하는 것은 생태계 내 생물그룹 간의 상호작용을 단순화함으로 생태계의 구조와 기능을 보다 쉽게 이해할 수 있도록 하기 때문에 이러한 단순화는 생태계를 이해하는데 필수적이다(Tomas and Robert, 2007). 또한, Odum(1968)은 영양단계 개념이 근본적으로 종을 분류하기 위한 것이 아니며, 생태계를 분석하고 모델화하기 위한 방법으로 다양한 유형과 규모의 생태계를 분석, 묘사하는 영역을 제시한다고 보고하였다(Jang, 2008).

남양호 수계의 영양구조는 1.0~3.3의 범위를, 낙동강 하류는 보다 넓은 1.0~3.7의 범위를 보여 낙동강 하류가 남양호 수계보다 더 긴 먹이사슬을 가지는 것으로 나타났다. Fetahi and Mengistou(2007)은 Lake Awassa(Ethiopia)의 영양구조 연구에서 특별한 최고 포식자의 부재는 짧은 먹이사슬을 야기한다고 보고하였으며, 따라서 낙동강 하류가 남양호 수계보다 다소 긴 먹이사슬과 높은 영양단계를 보인 것은 배스와 같은 독보적이고 특별한 최고 포식자가 서식하기 때문으로 판단할 수 있었다.

2) 먹이 중복도(preyn overlap)

둘 이상의 생물이 먹이 또는 서식지의 동일한 자원을 동시에 이용하는 것을 먹이중복(preyn overlap)이라 하며, 이는 생태계에서 경쟁을 유발한다. 경쟁에는 종내 또는 종간 경쟁이 있으며, 경쟁의 정도에 따라 생물의 생장은 물론 생존까지도 영향을 미친다(Jang, 2008).

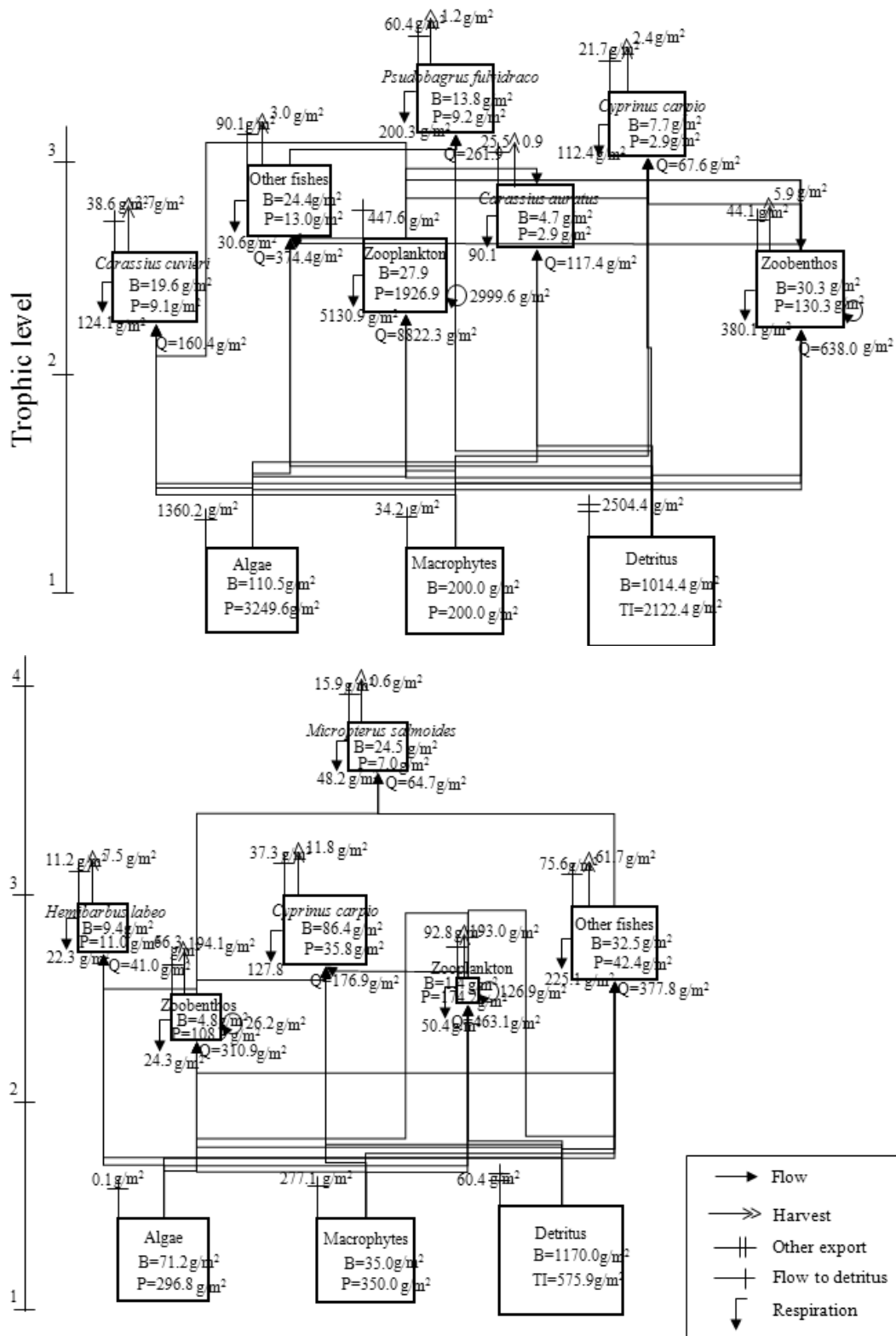


Figure 2. Flow diagram showing trophic flows in the Lake Namyang and the Lower Reaches of the Nakdong River. Flows are expressed in $g\ m^{-2}\ year^{-1}$ (above: Lake Namyang, below: Nakdong River).

Table 1. Basic input parameters used for analysis of the Lake Namyang and the lower reaches of the Nakdong River ecosystem

	Species / Group	Trophic level	Biomass(g m ⁻²)	P/B ratio(year ⁻¹)	Q/B ratio(year ⁻¹)	EE
Lake Namyang	<i>Pseudobagrus fulvidraco</i>	3.25	13.786 ^a	0.668 ^a	19.000 ^a	0.194
	Other fishes	2.59	24.390 ^a	0.533 ^a	15.350 ^a	0.931
	<i>Carassius auratus</i>	2.76	4.678 ^a	0.625 ^a	25.100 ^a	0.161
	<i>Carassius cuvieri</i>	2.45	19.578 ^a	0.463 ^a	8.500 ^a	0.638
	<i>Cyprinus carpio</i>	2.11	7.684 ^a	0.377 ^a	8.800 ^h	0.324
	Zoobenthos	2.45	30.310 ^j	4.300 ^j	21.050 ^j	0.970
	Zooplankton	2.52	27.886 ^a	69.100 ⁱ	316.370 ⁱ	0.769
	Phytoplankton	1.00	110.490 ^a	29.411 ^a	-	0.499
	Macrophytes	1.00	200.000 ⁱ	1.000 ⁱ	-	0.845
	Detritus	1.00	1,013.448 ^j	-	-	0.233
Nakdong River	<i>Micropterus salmoides</i>	3.730	24.548 ^a	0.216 ^a	10.100 ^h	0.173
	<i>Hemibarbus labeo</i>	2.870	9.382 ^a	0.777 ^a	6.000 ^h	0.703
	Other fishes	2.740	32.515 ^a	0.489 ^a	17.630 ^h	1.000
	<i>Cyprinus carpio</i>	2.790	86.412 ^a	0.475 ^a	8.800 ^h	0.863
	Zoobenthos	2.450	4.800 ^e	10.400 ^f	40.000 ^g	0.982
	Zooplankton	2.520	1.438 ^a	55.000 ^b	250.00 ^c	0.999
	Phytoplankton	1.000	71.230 ^a	3.741 ^a	-	1.000
	Macrophytes	1.000	35.000 ^d	10.000 ^d	-	0.273
Detritus	1.000	1,169.70 ^a	-	-	0.636	

*a: Present study, b: Angelini *et al.*(1996), c: Sipaub-Tavares *et al.*(1994), d: Angelini and Agostinho(2005), e: Takeda *et al.*(1997), f: Brey(1999), g: Mihuc(1997), h: <http://www.fishbase.com/search.php>(2007), i: Fetahi and Mengiston(2007), j: Christensen *et al.*(2000), P/B: production/biomass, Q/B: consumption/biomass, EE: Ecotrophical efficiency

Table 2. Estimated prey overlap by group in the Lake Namyang and the lower reaches of the Nakdong River ecosystem

	Prey \ Predator	1	2	3	4	5	6	7
Lake Namyang	1 <i>Pseudobagrus fulvidraco</i>	1.000						
	2 Other fishes	0.477	1.000					
	3 <i>Carassius auratus</i>	0.100	0.785	1.000				
	4 <i>Carassius cuvieri</i>	0.129	0.779	0.861	1.000			
	5 <i>Cyprinus carpio</i>	0.214	0.711	0.888	0.661	1.000		
	6 Zoobenthos	0.360	0.509	0.673	0.706	0.588	1.000	
	7 Zooplankton	0.057	0.820	0.848	0.900	0.594	0.444	1.000
Nakdong River	1 <i>Micropterus salmoides</i>	1.000						
	2 <i>Hemibarbus labeo</i>	0.039	1.000					
	3 Other fishes	0.018	0.722	1.000				
	4 <i>Cyprinus carpio</i>	0.034	0.845	0.538	1.000			
	5 Zoobenthos	0.006	0.444	0.485	0.578	1.000		
	6 Zooplankton	-	0.409	0.775	0.147	0.438	1.000	

영양단계별 먹이 중복도는 남양호 수계가 0.100~0.900, 낙동강 하류는 0.018~0.845 범위를 보였다(Table 2). 남양호 수계는 어류분류군 간, 그리고 어류분류군과 동물플랑크톤 사이에 먹이원에 대한 경쟁이 최대 0.900로 높은 것으로 나타난 반면, 낙동강 하류는 타 생물 그룹보다는 동일 분류

군 내 먹이 자원에 대한 경쟁이 높은 것으로 나타났다. 이는 남양호 수계에 서식하는 생물 그룹들은 한정된 서식지를 함께 공유하고 유사한 먹이자원을 의존하기 때문에 높게 나타난 것으로 판단된다. 반면, 유속이라는 환경적 요인을 가진 낙동강 하류 수계는 종내 보다 나은 서식지 우위를

위한 경쟁과 더불어 먹이자원에 대한 경쟁까지 해야 함으로 생물 그룹간의 경쟁보다는 동일 분류군 내 먹이 자원에 대한 경쟁이 높게 나타난 것으로 판단된다(Tomas and Robert, 2007). 이러한 종내, 종간 경쟁은 서로의 생존과 성장, 생식에 직접적인 영향을 미치고, 나아가 수생태계 전반의 영양구조와 에너지 흐름, 생태계 기능 등에 영향을 미칠 것으로 판단된다.

2. 에너지 흐름

생태계의 에너지 흐름은 생산자에 의해 생성된 에너지를 먹이사슬의 여러 에너지 전달 단계를 걸쳐 많은 종류의 고차 소비자로의 흐름을 말하며, 이 에너지는 궁극적으로 호흡의 열로 소멸된다(Jang, 2008). 먹이사슬의 각 영양단계를 통과하는 에너지는 다음 단계로 넘어갈 때마다 양이 감소하며, 이런 양상은 모든 에너지가 생산으로 이용되지 않기 때문이다. 생태계의 에너지 흐름을 측정하는 데는 많은 어려움이 따르지만(Brock, 1967) Ecopath 모델은 영양단계를 통한 에너지 흐름을 정량화할 수 있다. 에너지 흐름의 정량화(diagram)는 생태계 내 에너지수지를 평가하는 기준을 제공하므로 가치가 크다. 즉 생태계 내 에너지 연구에 유용한 개념적 틀을 제공하며, 복잡한 흐름통로의 망을 간단하게 요약하여 상이한 생태계들을 비교할 수 있게 해준다. 생태계 내의 각 영양단계에서 에너지 흐름의 방향과 규모를 관찰하고 측정할 수 있다는 것은 중요하다(Jang, 2008).

남양호와 낙동강 하류 생태계의 전반적인 에너지 흐름은 유기쇄설물과 대형 수생식물, 식물플랑크톤 등에 의해 생성

된 에너지로부터 시작되며, 이 에너지는 먹이사슬의 영양단계에 따라 1차 및 2차 소비자인 동물플랑크톤과 저서동물, 어류 분류군 등 일련의 먹고 먹히는 단계를 지나는 것으로 나타났다. 그리고 1차 및 2차 소비자에 섭취된 에너지 중 일부는 각 생물그룹의 체내로 동화되고 나머지는 배설물 형태로 체외로 방출되는 것으로 나타났다. 또한, 동화된 에너지 중 일부는 호흡으로 사용되고 나머지는 새로운 조직 생산과 번식을 포함하는 생산에 이용되는 것으로 나타났다(Table 3).

생태계 먹이사슬 내의 섭식관계에 있어서 전환되는 에너지 흐름은 동화량에 대한 호흡량의 비(R/A ratio, Respiration/Assimilation)와 호흡량에 대한 생산량의 비(P/R ratio, Production/Respiration)를 통해 알 수 있다. 남양호와 낙동강 하류 수계의 소비자 그룹 중 어류 생물 그룹은 동화량에 대한 호흡량의 비가 남양호에서는 0.879~0.952, 낙동강 하류에서는 0.686~0.931로 나타난 반면, 저서동물과 동물플랑크톤은 남양호에서 0.289~0.465, 낙동강 하류에서 0.098~0.136으로 보다 낮게 나타났다. 그러나 호흡량에 대한 생산량의 비는 저서동물과 동물플랑크톤(남양호: 1.152~2.461, 낙동강 하류: 6.347~9.235)이 어류 생물그룹들(남양호:0.051~0.148, 낙동강 하류: 0.074~0.458)보다 더 높은 효율을 보이는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 어류 생물군이 저서동물과 동물플랑크톤보다 유동성이 더 높아 상대적으로 에너지 손실이 더 증가하였기 때문으로 판단된다(Tomas and Robert, 2007). 또한, 높은 P/R을 보인 저서동물과 동물플랑크톤은 동화된 에너지가 호흡의 열에 의해 잃는 것보다는 대부분이 생산으로 전환되는 것으로 추정할 수 있다.

Table 3. Respiration and assimilation in the Lake Namyang and the lower reaches of the Nakdong River during the studying periods

	Group name	Respiration (g/m ³)	Assimilation (g/m ³)	Respiration/ Assimilation	Production/ respiration
Lake Namyang	<i>Pseudobagrus fulvidraco</i>	41.441	47.584	0.871	0.148
	Other fishes	250.294	284.453	0.880	0.136
	<i>Carassius auratus</i>	105.754	111.101	0.952	0.051
	<i>Carassius cuvieri</i>	110.876	116.689	0.950	0.052
	<i>Cyprinus carpio</i>	49.657	52.189	0.951	0.051
	Zoobenthos	183.705	395.321	0.465	1.152
	Zooplankton	966.634	3345.399	0.289	2.461
Nakdong River	<i>Micropterus salmoides</i>	48.176	51.726	0.931	0.074
	<i>Hemibarbus labeo</i>	22.323	32.555	0.686	0.458
	Other fishes	225.111	302.222	0.745	0.343
	<i>Cyprinus carpio</i>	127.812	142.506	0.903	0.107
	Zoobenthos	24.301	248.706	0.098	9.235
	Zooplankton	50.427	370.483	0.136	6.347

Table 4. Energy flows in the Lake Namyang and the lower reaches of the Nakdong River during the studying periods

	TL\Flow	Cons. by Pred.*	Export	Flow to Detritus	Respiration	Throughput
Flows origination from primary producers (excluding detritus)						
Lake Namyang	V	0.000	0.021	0.306	0.738	1.065
	IV	1.059	0.956	7.331	22.238	31.584
	III	31.612	6.605	70.546	208.623	317.386
	II	317.728	5.867	1180.390	948.669	2452.655
	I	2455.190	0.000	2364.425	0.000	4819.615
	Flows origination from detritus					
Nakdong River	V	0.000	0.005	0.069	0.167	0.241
	IV	0.240	0.294	2.776	7.726	11.036
	III	11.020	4.614	37.391	115.520	168.545
	II	168.828	7.138	355.317	404.680	935.963
	I	936.781	3081.771	0.000	0.000	4018.551
	Flows origination from primary producers (excluding detritus)					
Lake Namyang	V	0.001	0.001	0.601	1.825	2.427
	IV	2.450	2.944	11.364	34.450	51.208
	III	50.721	6.228	40.762	90.460	188.170
	II	187.980	11.400	114.627	154.418	468.425
	I	466.629	0.000	277.099	0.000	743.728
	Flows origination from detritus					
Nakdong River	V	0.000	0.000	0.188	0.570	0.758
	IV	0.766	0.920	5.709	17.316	24.710
	III	24.642	12.554	39.058	108.011	184.264
	II	181.881	8.274	86.575	91.101	367.830
	I	366.203	209.781	0.000	0.000	575.984

*Cons. by pred.: consumption by predator

총에너지량은 남양호 수계가 약 14.3 kg m⁻²로 나타났으며, 낙동강 하류는 약 2.8 kg m⁻²로 나타났다. 이 중 식물플랑크톤 등의 1차 생산자에 의한 에너지 생산량은 남양호 수계가 4819.615 g m⁻², 낙동강 하류가 743.728 kg m⁻²로 나타났으며, 이 중 남양호 수계는 50.9%인 2455.190 g m⁻²가, 낙동강 하류는 62.7%인 466.629 kg m⁻²가 상위 소비자에 의해 소비되는 것으로 나타났다. 생산자 중 무생물인 유기체설물의 생산량은 남양호 수계에서 4018.551 g m⁻², 낙동강 하류에서 575.984 kg m⁻²로 나타났으며, 이 중 남양호 수계는 23.9%인 936.781 g m⁻²가, 낙동강 하류는 63.6%인 366.203 kg m⁻²가 상위 소비자에 의해 소비되는 것으로 나타났다(Table 4). 이는 남양호 수계는 에너지 기원과 에너지 흐름이 무생물인 유기체설물보다는 식물플랑크톤 등의 1차 생산자에 의해 주로 야기되는 것으로 추정된다. 또한, 낙동강 하류 수계의 에너지 흐름은 무생물인 유기체설물보다 식물플랑크톤 등의 1차 생산자에 의한 흐름이 다소 더 효율적인 것으로 판단된다.

총에너지량 중 남양호 수계는 39%(5440.919 g m⁻²)는 섭식으로, 21%(3107.271 g m⁻²)는 이출, 12%(1708.362 g m⁻²)

는 호흡, 28%(4018.551 g m⁻²)는 유기체설물로 전환되는 것으로 나타났으며, 낙동강 수계는 52.0%(1433.998 g m⁻²)는 섭식으로, 9.1%(252.101 g m⁻²)는 이출, 18.0%(498.150 g m⁻²)는 호흡, 20.9%(575.984 g m⁻²)는 유기체설물로 전환되는 것으로 나타났다(Table 5). 따라서 두 수계 모두 총에너지량에 대해 섭식량이 많은 부분을 차지하는 특성을 보였다.

Table 5. Summary of system statistics obtained for the lower reaches of the Lake Namyang and the lower reaches of the Nakdong River

	Parameter	Value	Units
Lake Namyang	Sum of all consumption	5440.919	g/m ²
	Sum of all exports	3107.271	g/m ²
	Sum of all respiratory flows	1708.362	g/m ²
	Sum of all flows into detritus	4018.551	g/m ²
	Total system throughput	14275.000	g/m ²
Nakdong River	Sum of all consumption	1433.998	g/m ²
	Sum of all exports	252.101	g/m ²
	Sum of all respiratory flows	498.150	g/m ²
	Sum of all flows into detritus	575.984	g/m ²
	Total system throughput	2760.000	g/m ²

으며, 이는 생태계 내 에너지 흐름이 상위 영양단계의 포식에 의해 주로 이루어짐을 간접적으로 추정할 수 있다(Kang, 2005).

3. 생물그룹 간 영양학적 상호관계

Ecopath 모델의 혼합영양영향(MTI, mixed trophic impacts)은 계를 구성하는 그룹 상호간의 직·간접적인 영향을 정량화한 개념이다(Kang, 2003). 따라서 이를 통해 생태계를 구성하는 생물그룹들 간의 직·간접 상호작용을 평가할 수 있다(Kang, 2005; Ulanowicz and Puccia, 1990; Christensen and Pauly, 1993). 또한, 그룹 생체량을 조금 증가시켰을 때 다

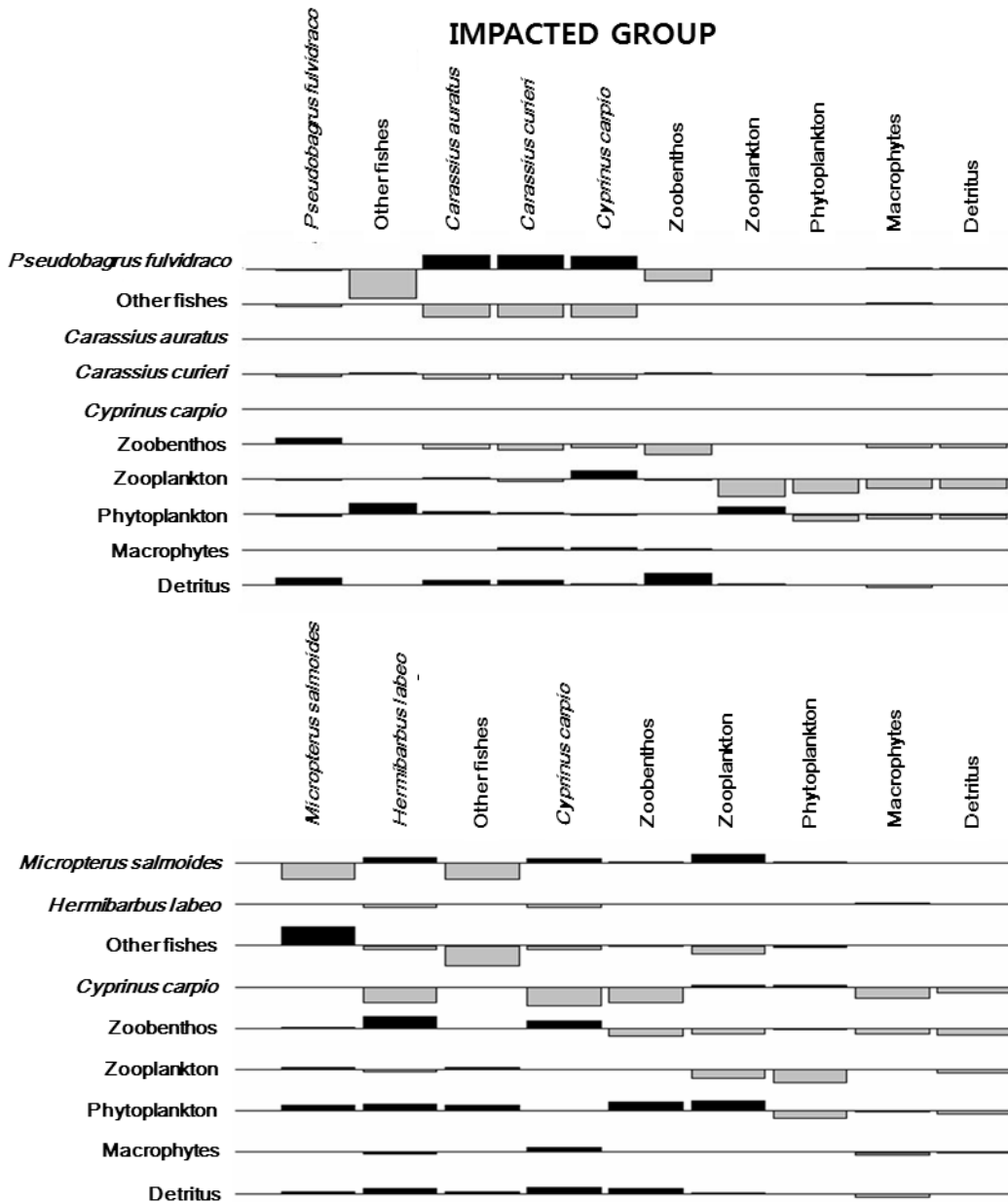


Figure 3. Mixed trophic impacts of the functional groups in the Lake Namyang and the Lower Reaches of the Nakdong River ecosystem showing the combined direct and indirect trophic impacts(above: Lake Namyang, below: Nakdong River). Positive impacts are shown above each baseline in dark columns, while negative impacts are shown below the baseline.

른 그룹이 받는 영향을 파악할 수 있다(Kang, 2005). Figure 3에서 왼편 그룹의 생체량 증가가 상부 그룹의 생체량에 미치는 효과가 양일 때는 상부방향으로, 음일 때는 하부 방향으로 상자가 나타나며, 상자의 크기는 효과의 상대적 정도를 표시한다.

혼합영양영향(MTI) 결과, 두 수계에서 각 생물그룹의 생체량 증가는 동일 생물그룹의 생체량을 감소시키는 음의 효과를 보이는 것으로 나타났다. Christensen *et al.*(2000)은 동일한 먹이 자원에 대한 생물그룹 내 경쟁은 동일 생물그룹의 생체량에 부정적 영향을 미칠 것이라고 보고하였다. 따라서 남양호 및 낙동강 하류의 각 생물그룹의 생체량 증가는 동일 생물그룹의 먹이 자원에 대한 경쟁을 유발시켜 동일 생물그룹의 생체량을 감소시킨 것으로 추정된다(Jang *et al.*, 2008a). 또한, 특정 생물그룹의 증가가 동일 생물그룹의 생체량을 감소는 남양호 수계보다 낙동강 하류가 더 뚜렷하게 나타났다. 이는 물의 흐름, 즉 유속의 유무에 의해 나타난 결과로 판단된다(Tomas and Robert, 2007). 낙동강 하류와 같은 유수 생태계는 물의 흐름, 즉 유속을 가지며, 이 환경에 서식하는 생물군들은 유속의 영향을 받는다. 따라서 유수 생태계에 서식하는 생물군들은 하류로 흘러내려 가지 않기 위한 노력과 더불어 먹이 자원에 대한 경쟁을 하게 된다. 그러므로 유수 생태계에 서식하는 생물군들은 보다 나은 서식지 우위를 차지하기 위한 경쟁과 더불어 먹이 자원에 대한 경쟁을 하므로 특정 생물그룹의 증가가 동일 그룹의 생체량을 더 감소시키는 것으로 판단할 수 있다(Tomas and Robert, 2007). 따라서 낙동강 수계가 남양호 수계보다 각 그룹의 생체량 증가에 따라 동일 그룹의 생체량 감소가 더 뚜렷하게 발생한 것으로 판단된다.

4. 생태계의 성숙도(Maturity)

Odum(1969)은 성숙도는 군집 복잡성 및 구조화와 관련된 역학적 개념으로, 어떤 교란 받지 않는 생태계에서 시간에 따라 증가한다고 하였다. 따라서 성숙도는 천이와 관련될 수 있으며, 또한 다른 생태계와 비교하도록 사용될 수 있는 개념이기도 하다. 본 연구에서는 남양호와 낙동강 하류 생태계 Odum(1969)이 제시한 생태지수들 가운데 Ecopath 모델에 의해 정량화가 가능한 6가지 항목을 통하여 남양호 및 낙동강 하류 생태계의 성숙도와 관련하여 여러 구조적이고 기능적인 속성을 논의하고자 하였다(Table 6).

1) 생산량/호흡량 비(total primary production/total respiration: PP/R)

Odum(1969)은 계의 생산량/호흡량 비를 계의 성숙도를 표현하는 함수로 정의하였다. 즉, 계가 활발히 발전하는 단

Table 6. Comparison of system statistics for the Lake Namyang with the Nakdong River

Parameter	Lake Namyang	Nakdong River	Units
PP/R	2.831	1.492	
PP/B	11.059	2.973	year ⁻¹
B/T	0.031	0.091	year
NP	3127.911	244.871	g m ⁻²
CI	0.333	0.375	
FCI	14.850	14.010	%

*PP/R: total primary production/total respiration, NP: Net system production, PP/B: total primary production/total biomass, B/T: total biomass/total throughput, CI: Connectance Index, FCI: Finn's cycling index

계에서는 유지(호흡)보다는 성장(생산)에 많은 에너지를 집중하지만, 성숙해지는 단계에 접어들면 성장에 사용되는 에너지는 감소하고 유지하는 방향으로 보다 많은 에너지를 집중하게 된다. 따라서 발전단계에서는 PP/R 비가 크지만 성숙단계에서는 PP/R 비는 1에 접근하게 된다(Christensen, 1995; Kang, 2003). 따라서 PP/R 비가 2.831인 남양호 수계와 PP/R 비가 1.492인 낙동강 하류 수계를 비교하면 낙동강 하류 수계가 남양호 수계보다 더 성숙한 단계에 있는 것으로 추정할 수 있다. 또한, 낙동강 하류 수계보다 높은 PP/R 비를 보인 것은 남양호 수계가 낙동강 하류 수계보다 1차 생산자에 의한 생산량이 더 높음을 시사한다.

2) 총생산량/생체량 비(total primary production/total biomass: PP/B)

총생산량/생체량 비는 성숙단계를 표현할 수 있는 또 다른 함수이다(Kang, 2003). 계가 성숙함에 따라 총 생체량이 증가할 것이라고 기대할 수 있으며, 따라서 PP/B 비는 발전 단계의 생태계에서 가장 크고 성숙단계의 생태계로 갈수록 점차 작아진다고 할 수 있다(Kang, 2003). 모델링 결과, 남양호 수계의 PP/B는 11.059, 낙동강 하류 수계의 PP/B는 2.973으로 남양호 수계에서 약 5배 이상 높게 나타났다. 따라서 PP/B를 통해 두 수계를 비교하면 약 5배 이상 낮은 값을 보인 낙동강 하류 수계가 더 성숙한 단계의 생태계로 접어든 것으로 판단할 수 있다.

3) 총생체량/총에너지량 비(total biomass/total throughput: B/T)

생태계의 생체량/총에너지량 비는 계가 성장할수록 생체량이 증가하며, 생체량이 증가하면 섭식과 호흡, 쇄설물 발생이 모두 증가하기 때문에 B/T 비는 증가한다고 할 수 있다. B/T 비가 0.091을 보인 낙동강 하류 수계가 0.031의 B/T 비를 보인 남양호 수계에 비해 약 3배 정도 높게 나타났

다. 이는 낙동강 하류 수계가 남양호 수계보다 더 많은 섭식과 호흡, 쇄설물 발생 등이 일어나는 것으로 추정할 수 있으며, 낙동강 하류 수계가 더 성숙한 단계의 생태계로 접어든 것으로 판단할 수 있다.

4) 순시스템생산량(net system production: NP)

순시스템생산량은 총 일차 생산량에서 총 호흡량을 감산한 값이며, 덜 성숙한 생태계에서는 높은 값을 가지며, 성숙한 생태계로 진행될수록 감소하는 경향을 보인다. 두 수계를 비교한 결과, 남양호 수계(NP=3127.911 g m⁻²)가 낙동강 하류 수계(NP= 244.871 g m⁻²)보다 높은 값을 보여 덜 성숙한 단계의 생태계로 추정할 수 있다.

5) 연결지수(connectance index: CI)

계의 연결지수는 생물그룹간의 연결 관계를 지시하는 지수로서 이론적으로 가능한 연결 수에 대해 실제 연결수의 비로 주어진다(Kang, 2005). 따라서 계가 성숙한 단계일수록 먹이망 구조는 선형에서 그물망 형으로 변형되기 때문에 연결지수는 성숙도와 상관관계를 보인다. 본 연구에서 남양호 수계의 CI는 0.333으로 나타났으며, 낙동강 하류 수계의 CI는 0.375로 나타났다. 결과적으로 두 수계의 CI는 유사한 경향을 보였지만 낙동강 하류 수계가 남양호 수계에 비해 다소 높은 값을 보여 더 성숙한 단계의 생태계로 판단할 수 있다.

6) Finn's cycling index(FCI)

Finn's cycling index(FCI)는 열역학법칙에 근거하여 영양염 순환을 정의하기 위해 사용되는 지수이다(Finn, 1976). FCI는 총에너지흐름에서 순환되는 에너지의 비율로 계산된다(Kang, 2003). Finn(1976)과 Christensen(1995)은 FCI는 계 내에서 발생하는 모든 흐름 중 순환되는 흐름의 비로서 성숙된 단계의 생태계에서 높은 값을 보인다고 보고하였다. 본 연구에서 남양호 수계의 FCI는 14.85로 나타났으며, 낙동강 하류 수계는 14.01로 나타났다. 두 수계가 유사한 값을 보였으나 남양호 수계가 낙동강 하류 수계보다 다소 높은 FCI를 보였으며, 이는 남양호 수계가 낙동강 하류 수계보다 총에너지 흐름에서 순환되는 에너지가 더 많다는 것을 시사한다. 따라서 FCI를 기준으로 두 수계를 비교하면 남양호 수계가 낙동강 하류 수계에 비해 더 성숙한 단계의 생태계로 판단할 수 있다. 또한, 낙동강 하류 수계는 유속의 흐름을 가진 우수 생태계로서 1차 생산자들에 의해 생성된 에너지의 많은 양이 계 내의 순환뿐만 아니라 하류로 흘러내려 가기 때문에 남양호 수계에 비해 낮은 값을 보였을 것으로 추정된다.

결론적으로 생태계의 발달에 대한 Odum(1969)이 제시

한 생태지수의 일반적인 경향은 FCI 지수를 제외한 모든 지수에서 낙동강 하류 수계가 남양호 수계보다는 더 성숙한 단계의 생태계로 추정되었다. 이는 낙동강 하류 수계가 남양호 수계에 비해 중간 공생이 높으며, 양분이 보존되고 안정도가 높은 특성을 나타내는 생태계임을 시사한다. 또한, 본 연구에서 다른 생태지수들과 상반된 결과를 보인 FCI 지수는 계의 성숙도 측면뿐만 아니라 정수 생태계와 우수 생태계를 구분할 수 있는 함수로 사용 가능할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 생태모델을 이용하여 담수 생태계의 영양구조와 에너지 흐름, 각종 생태관련 지수 등을 파악하였다. 결과적으로 남양호와 낙동강 하류 생태계의 영양구조는 3단계 즉, 생산자와 1차 소비자, 2차 소비자로 구분되어졌으며, 배스와 같은 독보적이고 특별한 최고 포식자가 서식하는 낙동강 하류 수계가 남양호 수계보다 더 긴 먹이사슬을 가지는 것으로 나타났다. 영양단계별 먹이 중복도는 한정된 서식지를 함께 공유하고 유사한 먹이자원을 의존하는 남양호 수계에서는 중간 경쟁이 높게 나타났으며, 유속이라는 환경적 요인을 가진 낙동강 하류 수계에서는 종내 경쟁이 높게 나타났다. 남양호 수계는 에너지 기원과 에너지 흐름이 무생물인 유기쇄설물보다는 식물플랑크톤 등의 1차 생산자에 의해 주로 야기되는 것으로 나타났으며, 낙동강 하류 수계의 에너지 흐름은 무생물인 유기쇄설물보다 식물플랑크톤 등의 1차 생산자에 의한 흐름이 다소 더 효율적인 것으로 나타났다. 두 수계 모두 총에너지량에 대해 섭식량이 많은 부분을 차지하는 동일한 특성을 보였으나, 특정 생물그룹의 증가가 동일 생물그룹의 생체량을 감소는 남양호 수계보다 낙동강 하류 수계가 더 뚜렷하게 나타났다. 생태계의 발달에 대한 Odum(1969)이 제시한 일반적인 경향은 낙동강 하류 수계가 남양호 수계보다는 더 성숙한 단계의 생태계로 추정되었다.

비록 생물그룹 분류와 관련 자료의 부족, 부정확성 등의 문제점이 있지만, 남양호 및 낙동강 생태계의 에너지양과 흐름, 구조 등의 생태특성을 설명할 수 있었다(Jang *et al.*, 2008b). 이와 같은 생태특성에 대한 연구는 환경에 따른 생물상의 구조적 측면(분류군별 생물상)과 기능적 측면(먹이사슬의 관련성)을 파악할 수 있으며, 또한, 생태계의 먹이사슬에 있어 기본이 되는 생산자와 저차 소비자의 환경에 대한 반응성을 예측함으로써 고차 소비자의 변동을 함께 분석할 수 있는 정보를 제공할 수 있다(Jang *et al.*, 2008a). 향후, 생물그룹의 추가적 자료와 어획과 같은 인위적 환경변화가 대상 생태계에 어떠한 영향을 미칠 것인지를 역학적 시뮬레이션으로 보여주는 Ecosim 모델(Walters *et al.*, 1997)을 활용한다면 담수 생태계의 관리 및 보전 측면에서 크게 기여를 할 것으로 기대한다.

인용문헌

- Allen, K.F.(1971) Relation between production and biomass. J. Fish. Res. Bd. Can. 20: 1573-1581.
- Angelini, R. and A.A. Agostinho(2005) Food web model of the Upper Parana River Flood plan in: description and aggregation effects. Ecological Modelling 181: 109-121.
- Angelini, R., M.A.P. Abuabara and A.C. Rietzler(1996) Application of de Bernardi and Di Cola model in a *Argyrodiaptomus furcatus*(zooplankton-copepod) from Broa Reservoir(Aso Carlos SP-Brazil). Memorie dell'Istituto Italiano di Idrobiologia 54: 69-75.
- APHA(American Public Health Association), AWWA(American Water Works Association) and WEF(Water Environment Federation)(1998) Standard methods for examination of water and wastewater, 20th ed. American Public Health Association, Washington, D.C.
- Brey, T.(1999) A collection of empirical relations for use in ecological modelling Naga, The ICLARM Quarterly 22(3): 24-28.
- Brock, T.D.(1967) The ecosystem and the steady state. Bioscience 17:166-169.
- Christensen, V. and D. Pauly(1993) On steady-state modelling of ecosystems. In: Trophic models of aquatic ecosystems, Christensen V, D Pauly eds. ICLARM Conference Proceedings 26, International Center for Living Aquatic Resources Management, Manila, Philippines.
- Christensen, V.(1995) Ecosystem maturity-towards quantification. Ecological Modelling 77: 3-32.
- Christensen, V., C.J. Walters and D. Pauly(2000) Ecopath with Ecosim: A user's guide. Fisheries center. University of British Columbia, Vancouver and ICLARM, Malaysia.
- Fetahi, T. and S. Mengistou(2007) Trophic analysis of Lake Awassa(Etiopia) using mass-balance Ecopath model. Ecological modeling 201: 398-408.
- Finn, J.T.(1976) Measurement of ecosystem structure and function derived from analysis of flows. Journal of Theoretical Biology 56: 363-380.
- Fishbase(2007) <http://www.fishbase.com>.
- Hong, S.G., H.J. Kang, E.S. Kim, J.G. Kim, C.H. Kim E.J. Lee, J.C. Lee, J.S. Lee, B.S. Lim, Y.S. Jung and H.R. Jung(2005) Restoration ecology and engineering: conservation and management of habitats and ecotope. Lifescience, Seoul, 310pp. (in Korean)
- Jang, S.H.(2008) Analysis of trophic structure and energy flows using the Ecopath model in lake and stream ecosystem. Ph. D. thesis, Univ. of Daegu, Gyungsan, Korea, 113pp. (in Korean with English abstract)
- Jang, S.H., C.I. Zhang, J.H. Na and J.H. Lee(2008b) Analysis of trophic structures and energy flows in aquatic ecosystem of the lower reaches of the Nakdong River. Korean J. Environ. Biol. 26(4): 292-302. (in Korean with English abstract)
- Jang, S.H., C.I. Zhang, J.H. Na, S.W. Kim, K.G. An, J.J. Lee and J.H. Lee(2008a) A analysis of trophic structure in Lake Namyang using the Ecopath modeling. Korean J. Limnol. 41(2): 144-154. (in Korean with English abstract)
- Jones, J.G.(1979) A guide to methods for estimating microbial numbers and biomass in fresh water. Freshwater biological association, Scientific publication No. 39.
- Jones, R.(1984) Assessing the effects of changes in exploitation patterns using length composition data(with notes on VPA and cohort analysis). FAO Fisheries Technical Paper 256, 118pp.
- Kang, Y.H.(2003) Carrying capacity and fishery resource release in the Bangjukpo surf zone ecosystem. J. Kor. Fish. Soc., 36: 669-675. (in Korean with English abstract)
- Kang, Y.H.(2005) A preliminary trophic flow model for Gwangyang Bay, Korea. J. Kor. Fish. Soc. 38: 184-195. (in Korean with English abstract)
- Mihuc, T.B.(1997) The functional trophic role of lotic primary consumers: generalist versus specialist strategies. Freshwater Biol. 37: 455-462.
- Ministry of Environment(2000) Standard method of water quality. Ministry of Environment, Seoul, 622pp.(in Korean)
- Odum, E.P.(1968) Energy flow in ecosystems-a historical review. American Zoology 8: 11-18.
- Park, C.C and M.W. Son(2007) Ecology Seoul. 332pp. (in Korean)
- Pauly, D.(1984) Fish population dynamics in tropical waters; manual for use with programmable calculators. ICLARM studies Rev. 8: 325.
- Pauly, D., V. Christensen and C. Walters(2000) Ecopath, Ecosim, and Ecospace as tools for evaluation ecosystem impact of fisheries. ICES J. Marine Sci. 57: 697-706.
- Sipauba-Tavares, L.H., M.A. Bachion and O. Rocha(1994) Estudo do crescimento populacional de tres especies zooplanctonicas em laboratorio e o uso do plandcton na alimentacao de alevinos de *Oerochromis niloticus*(tilapia) e *Astyanax scabripinis* paranae(lambari). Rev. UNIMAR 16: 189-201.
- Takeda, A.Y., G.Y. Shimizu and J. Higuti(1997) Variacoes espaco-temporais da comunidade zoobentica. In: Vazzoler, A.E.M., Agostinho, A.A., Hahn, N.S.(Eds), Aplanicie de inundacao do alto rio Parana: aspectos fisicos, biologicos e socio-economicos. Ed. da Universidade Estadual de Maringa, pp. 157-177.
- Thomas, M.S. and L.S. Robert(2007) Elements of Ecology(6th). Lifescience, Seoul, 630pp. (in Korean)
- Ulanowicz, R.E. and C.J. Puccia(1990) Mixed trophic impacts in ecosystems. Coenoses 5: 7-16.

Walters, C., V. Christensen and D. Pauly(1997) Structuring dynamics models of exploited ecosystems from trophic mass-balance assessments. *Rev. Fish Bio. Fish.* 7: 139-172.

Zhang, C.I. and S.C. Yoon(2003) Effects of climatic regime shift on the structure of marine ecosystem in the southwestern east sea

during the 1970s. *J. Kor. Fish. Soc.* 36: 389-401. (in Korean with English abstract)

Zhang, C.I.(1991) Fisheries resource ecology. Woosungsa, Seoul, 399pp. (in Korean)