

Ecopath 모델을 이용한 남양호의 영양구조 분석

장성현* · 장창익¹ · 나종헌¹ · 김세화² · 안광국³ · 이정준 · 이정호

(대구대학교 생물교육과, ¹부경대학교 해양생산관리학과
²용인대학교 환경생명학부, ³충남대학교 생명과학부)

A Analysis of Trophic Structure in Lake Namyang Using the Ecopath Modelling. Jang, Sung Hyun*, Chang Ik Zhang¹, Jong Hun Na¹, Se Wha Kim², Kwang Guk An³, Jung Joon Lee and Jung Ho Lee (Department of Biology Education, Daegu University, Gyeongsan 712-714, Korea; ¹Department of Marine Production Management, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea; ²Department of Environmental Biology, Yongin University, Yongin 449-714, Korea; ³School of Bioscience and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea)

The purpose of this study was to describe quantitatively trophic structures and to analyze energy flows in the Lake Namyang using the Ecopath with ecosim (Walter *et al.*, 1997). The sampling and analyses were carried out at 6 sampling sites of the Lake Namyang during May and November in 2007. A total of 10 groups were considered in this study (detritus, macrophytes, phytoplankton, zooplankton, zoobenthos, *Cyprinus carpio*, *Carassius cuvieri*, *Carassius auratus*, *Pseudobagrus fulvidraco* and other fishes) to assess the trophic relationship, energy flows and interactions between them. As a result, it was concluded that Lake Namyang was consisted of primary producers (Detritus, Macrophytes, Phytoplankton), primary consumers (Zooplankton, Zoobenthos, *Cyprinus carpio*, *Carassius cuvieri*, *Carassius auratus*, Other fishes) and secondary consumer (*Pseudobagrus fulvidraco*). The total system throughput was estimated at 14.1 kg m⁻¹ year⁻¹ including a consumption of 39%, exports of 21%, respiratory flows of 12% and flows into detritus of 28%. MTI analyses indicate that *Pseudobagrus fulvidraco* have positive impact on *Cyprinus carpio*, *Carassius cuvieri* and *Carassius auratus*. On the other hand, other fishes have negative impact on *Cyprinus carpio*, *Carassius cuvieri* and *Carassius auratus*. All the functional groups except detritus had a negative impact on themselves and this may show within-group competition for the same resources.

Key words : Ecopath with ecosim, trophic relationship, energy flows, Lake Namyang

서 론

우리나라의 인공담수호는 도시화, 산업화, 인구 밀도의 증가 등에 따른 수질오염이 심화되어 빠르게 부영양화 되고 있다. 이런 부영양화 현상은 수계에 서식하는 생물

들의 종다양성을 감소시키며, 오염종들에 의한 수화현상을 유발함으로써 환경문제를 야기하고 있다(국립환경연구원, 1993).

남양호는 1974년 다목적 농업개발사업의 일환으로 남양만으로 흐르는 발안천 하구에 방조제를 축조하여 만든 인공담수호(하구호)이며, 농업용수 공급과 어업자원으로

* Corresponding author: Tel: 053) 850-4421, Fax: 053) 850-6999, E-mail: welcomenews@naver.com

써 매우 중요한 수자원이다(한국농촌공사, 2005). 그러나 담수 이후 지속적인 부영양화가 나타나 수자원의 효율적인 이용이 어려운 상태이다(정 등, 2007). 따라서 남양호의 수질보전과 생태계 서식환경 개선을 위한 체계적인 생태계 관리 및 보전 대책이 마련되어야 한다. 또한, 최근 서해안 하구역의 개발에 따른 생태계 변화의 문제점이 심각하게 대두되고 있으며, 삼면이 바다와 접하고 있는 우리나라에서는 하구호의 생태학적인 측면에 대한 수자원 관리의 연구가 시급한 실정이다.

체계적인 생태계 관리 및 보전을 위해 최근 생태계를 구성하는 생물들 간의 영양역학적 관계를 기초로 한 방식으로서의 인식 전환이 점차 강조되고 있다(Zhang, 2002). 즉 담수생태계 먹이망의 한부분에 속하는 생물들은 같거나 다른 영양단계에 속하는 생물 개체들과 먹고 먹히는 관계를 형성하며, 인위적 환경교란은 이 생물들의 종조성과 생체량을 변화시켜 먹이망 구성과 에너지 흐름을 변화시킨다. 따라서 수 생태계 전체 먹이망의 구성과 영양단계별 에너지 흐름에 기초로 한 관리 및 보전 대책의 마련되어야 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 Ecopath with ecosim (Walters *et al.*, 1997)을 이용하여 생태계 내 생물들의 복잡한 상호관계, 즉 영양구조 및 에너지 흐름을 단순화, 정량화하고자 하였다. Ecopath 모델은 국외적으로 해양 및 담수 생태계 등에서 다양한 연구들이 수행되고 있으며 (Pauly *et al.*, 2000; Villanueva and Moreau, 2001; Fetahi and Megistou, 2007), 국내에서도 동해의 기후변화에 따른 자원량 변동 (Zhang and Yoon, 2003)과 여수 들산도 쇄파대 생태계의 적정 자원방류 (Kang, 2003), 한국 해양생태계의 영양단계 변동 및 어획강도 추정 (Zhang and Lee, 2004), 광양만의 영양류모형 적용 (Kang, 2005), 바다목장 자원량 평가(이, 2008) 등 해양생태계에서 수행된 바 있다.

따라서 본 연구는 생태계 모델을 이용하여 남양호 수계의 현황 및 영양구조, 에너지 흐름 등을 파악하고, 이를 통하여 남양호 수생태계 및 수자원 관리를 위한 기초연구로서 활용하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 조사지점 및 조사시기

본 연구는 경기도 화성시와 평택시의 경계부에 위치한 인공담수호인 남양호에서 실시하였다. 남양호는 1974년 5월 평택지구 다목적 농업개발사업의 일환으로 남양만으로 흐르는 발안천 하구에 길이 2,065 m, 높이 35 m의 방

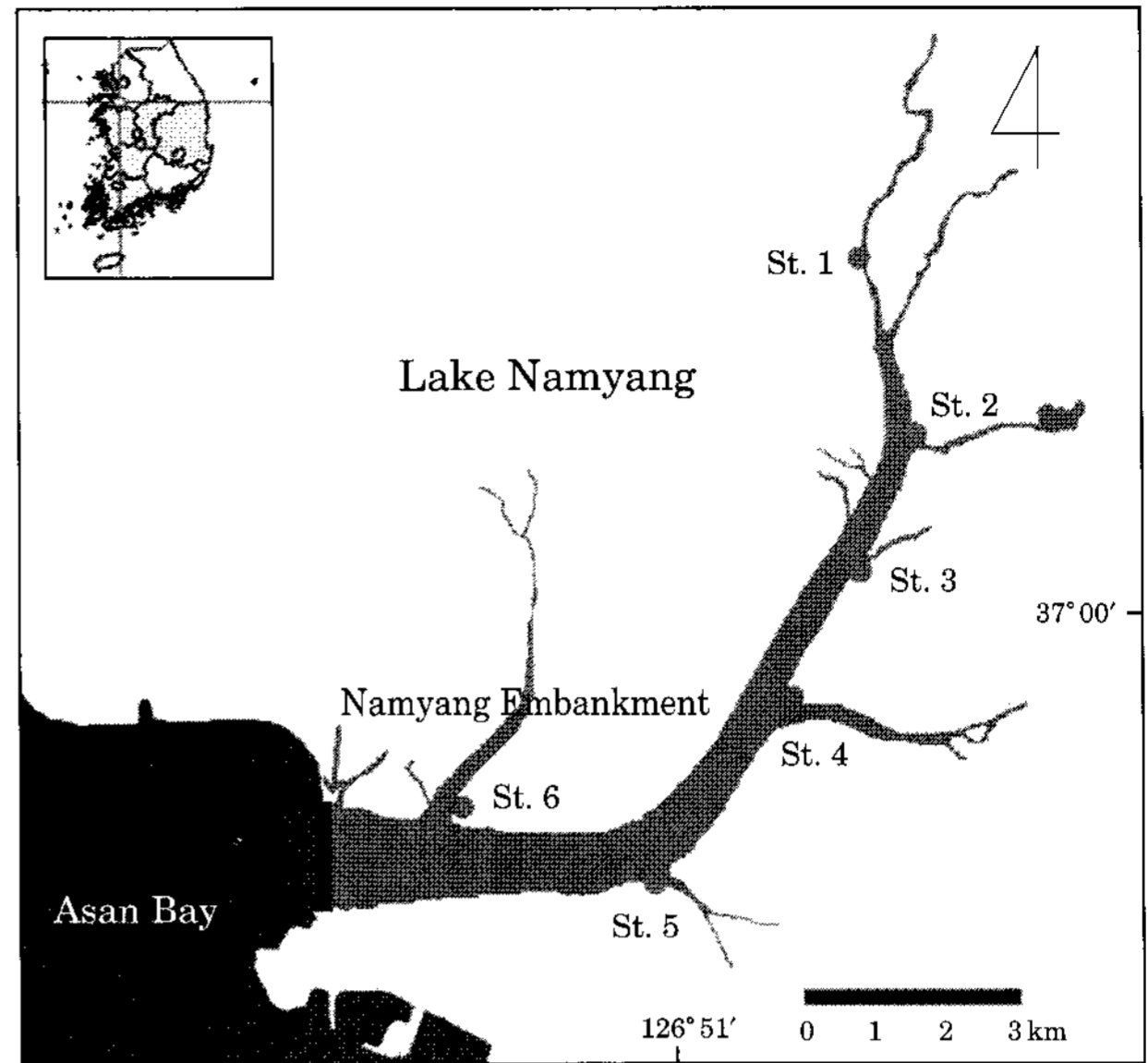


Fig. 1. Map showing the sampling sites in Lake Namyang.

조를 축조하여 만든 총저수량 3,100만 m², 유효저수량 1,800만 m³의 하구호이다(Fig. 1).

본 연구는 2007년 갈수기(5월)와 풍수기(8월)에 남양호 6개 지점에서 조사를 실시하였으며, 어류의 각 어종별 밀도와 자원량 자료를 위해 2007년 3월에서 11월까지 매달 2회씩 조사를 실시하였다.

2. 환경요인

남양호 수계의 환경요인을 알아보기 위해 수질조사를 실시하였으며, 이를 위한 시료 채취는 수심 10~30 cm 깊이의 표층수를 Van Dorn 채수기를 이용하여 채수하였다. 수온, 전기전도도, 용존산소, pH, 수심, 투명도 등은 현장에서 측정하였으며, Chl-*a*와 TOC, DOC 등은 현장 채취한 시료를 아이스박스를 사용하여 당일 실험실로 운반 후 수질오염공정시험법(환경부, 2000)에 따라 측정하였다.

3. Ecopath 모델

본 연구는 생태계를 구성하고 있는 생물들간의 에너지 흐름, 즉 생태계 영양구조를 알아보기 위해 Ecopath with ecosim (Walters *et al.*, 1997)을 사용하였다. 이 모델은 Polovina (1984)에 의해서 개발되었고 Christensen and Pauly (1992), Christensen (1995)에 의해서 더욱 발전되었다. Ecopath 모델은 질량균형모델 (Mass-balance model) 이라고도 불리는데 하나의 생태계 내에 존재하는 단일종(혹은 종 그룹)에 대한 현 상태와 각종의 변화율을 추

정해서, 이 상태와 변화율 체제 내의 주어진 기간에 대해 생태계의 상태를 정량적으로 설명한다. 즉 생태계 영양구조를 나타낼 수 있다. 이 모델은 각 그룹으로부터의 유입량과 유출량이 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) 모델식에서 각 그룹(i)에 대한 생산량식은

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

여기서, P_i 는 생물군 i의 총생산량, Y_i 는 i의 총 어획량, $M2_i$ 는 i의 포식자에 의한 사망량, E_i 는 순회유량(이출-이입), BA_i 는 i의 누적생체량, $P_i \cdot (1 - EE_i) = MO_i$ 로 i에 대한 기타 사망량을 나타낸다. 이 식에서 총생산량은 총어획량과 사망량, 성장을, 순이출량 등의 합으로 구성된다.

에너지 균형 (Energy balance) 모델식에서는 모든 생물의 에너지 유입과 유출이 균형을 이루어야 한다. 각 그룹간 에너지 균형은 다음 식에 의해 성립된다.

$$Q = P + R + NA \quad (2)$$

여기서 Q는 섭식량 (Consumption, Q), P는 생산량 (Production, P), R은 호흡량 (Respiration, R), 그리고 NA는 미동화량 (Non-assimilated food)이다. 생태계를 구성하는 그룹들은 상호간에 피식과 포식에 의한 에너지 흐름으로 연결되어 있기 때문에 피식자에 의한 소비량을 위의 식으로 표현할 수 있다 (Christensen and Pauly, 1992). Ecopath 모델을 실행하기 위해 필요한 기본 입력자료는 대상 생태계 면적과 각 그룹에 대한 생체량 (B, Biomass)과 생산량/생체량 비 (P/B ratio), 섭식량/생체량 비 (Q/B ratio), 생태영양효율 (ecotrophic efficiency, EE), 먹이조성 (diet composition, DC) 등의 자료가 필요하다.

1) 대상 생태계

본 모형 평가는 남양호 수계를 대상으로 하고 있으며, 대상 수역의 전체 면적은 농촌용수종합정보시스템 (<http://rawris.korio.co.kr>)의 자료를 토대로 산출하였고, 계산된 대상 생태계 면적은 5,890,000 m²이었다. 본 수계의 생물/비생물 모형 입력치의 추정에서 중량/부피 단위의 측정치를 중량/면적 단위의 것으로 변환하기 위한 남양호 수계의 평균 수심은 3.4 m로 하였으며, 이는 현장조사를 통해 얻어진 결과이다. 또한 본 수계에서 측정된 유광층의 깊이는 수심 1.13 m이었다.

2) 생물그룹

본 수계에 서식하는 생물들을 서식지, 먹이습성, 그리고

생태학적 기능의 관점에서 구분한 결과 9개의 생물군과 1개의 유기쇄설물로 분류하였다. 즉, 유기쇄설물 (Detritus)과 대형수생식물 (Macrophytes), 식물플랑크톤 (Phytoplankton), 동물플랑크톤 (Zooplankton), 저서동물 (Zoo-benthos), 떡붕어 (*Carassius cuvieri*), 붕어 (*Carassius auratus*), 동자개 (*Pseudobagrus fulvidraco*), 잉어 (*Cyprinus carpio*), Other fishes 등 10개 그룹이다.

3) 생물그룹별 생체량 및 생산량/생체량, 섭식량/생체량의 비

Ecopath 모델에 필요한 입력자료 즉, 생체량, 생체량에 대한 생산량의 비 (P/B ratio), 생체량에 대한 섭식량의 비 (Q/B ratio)는 직접 현장조사를 통한 결과와 참고 가능한 문헌자료를 토대로 추정하였다. 본 조사에서 유기쇄설물 (Detritus, D)은 남양호 수계 6개 지점으로부터 측정된 평균 TOC (Total organic carbon)의 값 (Overall mean = 4.810 mg L⁻¹)을 활용하였으며, 수층 내 식물플랑크톤의 생체량 (Biomass)도 남양호 수계 6개 지점으로부터 측정된 평균 엽록소 값 (38.456 µg L⁻¹)을 Jones (1979)의 변환인자를 통해 산출한 후 중량/면적 단위로 환산하여 활용하였다. 식물플랑크톤의 생산량은 광합성의 결과 증가된 산소의 양을 측정하는 명암방법에 의한 용존산소 측정법으로 현장에서 직접 측정하였다. 동물플랑크톤의 경우는 코니칼 네트 (망목 0.63 mm, 망구 30 cm)를 사용하여 정량 채집한 시료를 검경한 후 생체량을 산출하였으며, 산출된 생체량은 27.886 g m⁻²이었고, 생산량-생체량 비 (P/B ratio)와 섭식량-생체량 비 (Q/B ratio)는 정수역 조사를 통해 획득한 Fetahi and Mengistou (2007) 등이 제안한 69.100 year⁻¹과 316.370 year⁻¹ 값을 인용하였다. 또한, 대형수생식물의 생체량은 Fetahi and Mengistou (2007) 등이 제안한 생체량 200 g m⁻²와 P/B ratio 1 year⁻¹을 입력하였으며, 저서동물의 생체량과 생산량-생체량비, 섭식량-생체량 비는 각각 30.310 g m⁻², 4.300 year⁻¹, 21.050 year⁻¹ (Christensen *et al.*, 2000) 등의 자료를 사용하였다. 어류의 생체량은 직접 현장에서 삼각망을 이용하여 어획된 어획량을 토대로 정량화시켜 전체 생체량을 추정하였다. 삼각망의 어획량을 정량화시키기 위해서는 삼각망이 가지는 특징을 잘 파악하여야 한다. 본 연구에서는 삼각망을 통하여 남양호에 서식하는 생물들의 생체량을 추정하기 위하여 다음과 같은 4가지 가정을 설정하였다.

- ① 모든 생물종들은 호수 내 무작위로 균등 분포한다.
- ② 모든 생물종들이 삼각망에 만날 확률은 동일하다.
- ③ 삼각망의 길그물의 면적 (50 m × 10 m) 내에 서식하는 모든 생물종들은 어구를 만나게 되며, 어구를 만

Table 1. Growth and other parameters compiled for Q/B and M estimation (L_{∞} and K: parameters of VBGF, T: annual mean water temperature, M: natural mortality, F: fishing mortality coefficients, P/B: production/biomass ratio, Q/B: consumption/biomass ratio).

| Prey/Predator | L_{∞} * (mm) | K* | T* | ln(M)* | M* | F*** | P/B* | Q/B** |
|--------------------------------|---------------------|-------|----|----------|------|-------|-------|--------|
| Other fishes | | | | | | | 0.533 | 15.350 |
| <i>Cyprinus carpio</i> | 565.64 | 0.140 | 20 | -1.68289 | 0.19 | 0.191 | 0.377 | 8.800 |
| <i>Pseudobagrus fulvidraco</i> | 283.97 | 0.270 | 20 | -1.06091 | 0.35 | 0.322 | 0.668 | 19.000 |
| <i>Carassius auratus</i> | 333.74 | 0.161 | 20 | -1.44425 | 0.24 | 0.389 | 0.625 | 25.100 |
| <i>Carassius cuvieri</i> | 352.9 | 0.188 | 20 | -1.35838 | 0.26 | 0.206 | 0.463 | 8.500 |

*Present study

**<http://www.fishbase.com/search.php>

***MMAF (Ministry of Maritime Affairs and Fisheries, 2007)

난 생물들이 어구에 어획되는 확률은 50%로 일정하다.

④ 주요 어종들은 저서어로서 이동성이 적어 삼각망 길그물 면적 내에 존재하는 개체들만 어획대상이 된다.

따라서 삼각망의 유효 채집면적은 500 m²이며 삼각망의 어획율(q)은 0.5로 하여 Area swept 방법을 사용하여 다음 식(3)과 같이 생체량을 계산하였다.

$$B = \frac{D \times \bar{W} \times A}{q} \quad (3)$$

여기서, B는 생체량, D는 면적당 개체수(ind. m⁻²), \bar{W} 는 대상종의 평균중량, A는 수계의 면적, q는 어획율이다. 또한, 어류의 생체량에 대한 생산량의 비(P/B ratio)는 직접적으로 추정하기에 매우 어려운 부분이다(Allen, 1971). 따라서 생태계가 안정적인 환경이라는 것을 가정하여 순간전사망계수(Z)를 생체량에 대한 생산량의 비로 표현할 수 있다(Pauly et al., 2000). 여기서 순간전사망계수는 순간어획사망계수(F)와 순간자연사망계수(M)의 합으로 계산된다. 본 연구에서 사용된 각 어종별 순간어획사망계수는 해양수산부(2007)의 값을 사용하였고, 각 어종별 순간자연사망계수는 Pauly의 경험적인 방정식을 사용하였다(Pauly, 1984).

$$\ln(M) = -0.0152 - 0.279 \ln(L_{\infty}) + 0.6543 \ln(K) + 0.463 \ln(T) \quad (4)$$

여기서 L_{∞} 와 K는 Von Bertalanffy 성장방정식의 매개변수로 L_{∞} 는 이론적인 최대체장, K는 성장계수 그리고 T는 남양호의 표층수온이다(Zhang, 1991). 생체량에 대한 섭식량의 비(Q/B ratio)는 체중 당 섭식량으로 각 생물종이 체중의 몇 배를 소비하는지를 나타내는 것으로 남양호에 서식하는 생물에 대한 사용 가능한 자료가 거의 없

어 fishbase(2007)의 자료를 사용하였다(Table 1). 본 조사에서 기타어류로는 가물치와 미꾸라지, 밀어, 버들붕어, 얼룩동사리 등이 서식하는 것으로 조사되었다. 먹이조성은 생물그룹을 이루는 동자개와 붕어, 떡붕어, 잉어, 기타어류 등의 위 내용물 분석으로부터 가중평균치를 구하였다. 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.

4) 모델 균형 조정

Ecopath가 실행될 때 이입과 이출의 균형을 이루기 위해서, EE(생태영양효율) 값은 모델의 평형을 유지하기 위해 0과 1사이로 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 안된다. 본 연구에서 최초로 추정된 기본 입력값에 의한 모델은 균형을 이루지 않았기 때문에 모델의 균형을 이루기 위해서 기본 입력값을 조정하였다. 따라서 직접적인 현장 조사에 의해 도출된 값과는 약간의 차이가 발생할 수 있다(Zhang and Yoon, 2003).

결 과

1. 환경요인

갈수기 조사 시 수온은 17.9~21.5°C의 범위를 보였으며, 전기전도도(EC)는 1,150~11,560 $\mu\text{s cm}^{-1}$ 을 기록하였다. 용존산소(DO)는 9.3~12.61 mg L⁻¹의 범위를 나타내었으며, pH는 10.1~10.4의 범위를 보였다. 총 유기탄소

Table 2. Environmental factors at the Lake Namyang during the studying period.

| Factors | May | August |
|------------------------------|--------------|-------------|
| Temperature (°C) | 17.9~21.5 | 28.0~30.6 |
| EC ($\mu\text{s cm}^{-1}$) | 1,222~11,560 | 400~437 |
| DO (mg L^{-1}) | 9.3~12.6 | 6.7~10.6 |
| pH | 10.1~10.4 | 10.3~10.5 |
| TOC (mg L^{-1}) | 4.414~5.412 | 3.810~4.210 |
| DOC (mg L^{-1}) | 4.387~5.397 | 3.62~3.92 |
| Water depth (m) | 0.4~7.0 | 1.0~10.0 |
| Transparency (m) | 0.2~0.7 | 0.3~0.5 |

(TOC)의 양은 4.414~5.412 mg L^{-1} 로 나타났으며, 용존탄소(DOC)의 양은 4.387~5.397 mg L^{-1} 로 조사되었다. 또한, 본 수계의 수심은 0.4~7.0 m의 범위를 보였으며, 투명도는 0.2~0.7 m의 범위를 보였다. 풍수기 조사 시 수온은 28.0~30.6°C의 범위를 보였으며, 전기전도도(EC)는 400~437 $\mu\text{s cm}^{-1}$ 를 기록하였다. 용존산소(DO)는 6.7~10.6 mg L^{-1} 의 범위를 나타내었으며, pH는 10.3~10.5의 범위를 보였다. 총 유기탄소(TOC)의 양은 3.810~4.210 mg L^{-1} 로 나타났으며, 용존탄소(DOC)의 양은 3.620~3.920 mg L^{-1} 로 조사되었다. 또한, 수심은 1.0~10.0 m의 범위를 보였으며, 투명도는 0.3~0.5 m의 범위를 보였다(Table 2). 이 중 전기전도도가 갈수기와 풍수기에 걸쳐 상당히 높게 조사되었는데 이는 지리적 위치상 해양과 인접하고 있어 해수 용출로 인한 염분도의 상승으로 인한 결과로 사료된다. 본 연구에서는 대체적으로 풍수기에 비해 갈수기에 환경요인들이 높게 조사되어 환경요인들이 계절적 특성에 따른 영향을 받는 것으로 확인되었다.

2. 생태계 영양구조

1) 생물그룹별 생체량 및 생산량/생체량, 섭식량/생체량의 비

본 수계에서 유기체설물(Detritus, D)은 현장조사를 통해 얻어진 TOC(Total organic carbon)의 평균 값(Overall mean=4.810 mg L^{-1})을 평균 수심 3.4 m을 이용하여 단위 면적당 값으로 환산(2.776 g m^{-2})한 후, 이를 365일 동안의 양으로 산정하여 구하였으며, 그 결과치는 1013.448 $\text{g m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ 이었다. 본 수계의 1차 생산자인 식물플랑크톤의 생체량(Biomass)은 측정된 평균 엽록소 양(38.456 $\mu\text{g L}^{-1}$)을 Jones (1979)의 변환 인자를 통해 산출한 후 평균 유광층(1.13 m) 수심을 통해 중량/면적 단위로 환산하였다. 이를 365일 동안의 양으로 계산한 결과는 110.490 $\text{g m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ 이었다. 생산량-생체량 비(P/B ratio)는 현장

조사에서 측정된 식물플랑크톤 생산량 값(0.475 mg L^{-1})과 식물플랑크톤 생체량과의 비를 통해 산출한 29.411 mg L^{-1} 을 사용하였다. 조사 총 면적 5,890,000 m^2 내 평균 수심과 365일을 고려한 동물플랑크톤 생체량은 27.886 g m^{-2} 이었다. 동물플랑크톤 군집의 생산량-생체량 비(P/B ratio)와 섭식량-생체량 비(Q/B ratio)는 각각 69.100 year^{-1} 과 316.370 year^{-1} 값을 입력하였다(Fetahi and Mengistou, 2007). 또한, 대형수생식물의 생체량과 생산량-생체량 비는 각각 200 g m^{-2} 와 1 year^{-1} (Fetahi and Mengistou, 2007)으로, 저서동물의 생체량과 생산량-생체량비와 섭식량-생체량 비는 각각 30.310 g m^{-2} , 4.300 year^{-1} , 21.050 year^{-1} (Christensen *et al.*, 2000)로 입력하였다. 어류의 경우, 현장조사에서 측정된 연령별 평균체장 자료를 이용하여 추정된 동자개의 최대체장은(L_{∞})은 283.97 mm, 성장계수(K)는 0.270 year^{-1} , 순간자연사망계수(M)는 0.349 year^{-1} , 순간어획사망계수(F)는 0.322 year^{-1} 이었다. 따라서 추정된 동자개의 생체량과 생산량-생체량비, 섭식량-생체량 비는 각각 13.786 g m^{-2} , 0.668 year^{-1} , 19.000 year^{-1} 이었다. 잉어의 최대체장은(L_{∞})은 565.64 mm, 성장계수(K)는 0.140 year^{-1} , 순간자연사망계수(M)는 0.190 year^{-1} , 순간어획사망계수(F)는 0.191 year^{-1} 이었다. 따라서 추정된 잉어의 생체량과 생산량-생체량비, 섭식량-생체량 비는 각각 7.684 g m^{-2} , 0.377 year^{-1} , 8.800 year^{-1} 으로 산출되었다. 붕어의 최대체장은(L_{∞})은 333.74 mm, 성장계수(K)는 0.161 year^{-1} , 순간자연사망계수(M)는 0.240 year^{-1} , 순간어획사망계수(F)는 0.389 year^{-1} 이었다. 따라서 추정된 붕어의 생체량과 생산량-생체량비, 섭식량-생체량 비는 각각 4.678 g m^{-2} , 0.625 year^{-1} , 25.100 year^{-1} 으로 산출되었다. 떡붕어의 최대체장은(L_{∞})은 352.90 mm, 성장계수(K)는 0.188 year^{-1} , 순간자연사망계수(M)는 0.260 year^{-1} , 순간어획사망계수(F)는 0.206 year^{-1} 이었다. 따라서 추정된 떡붕어의 생체량과 생산량-생체량비, 섭식량-생체량 비는 각각 19.578 g m^{-2} , 0.463 year^{-1} , 8.500 year^{-1} 으로 산출되었다. 또한, 기타어류의 생체량과 생산량-생체량비, 섭식량-생체량 비는 각각 24.390 g m^{-2} , 0.533 year^{-1} , 15.350 year^{-1} 으로 산출되었다. 추정된 남양호 수계에 서식하는 각 그룹별 먹이조성 비율은 Table 3과 같다. 본 조사에서 최고 포식자로 예상되는 동자개는 기타어류와 저서동물을 섭식하는 것으로 조사되었으며, 붕어와 떡붕어, 잉어 등은 저서동물, 동물플랑크톤, 식물플랑크톤 등을 섭식하는 것으로 조사되었다.

2) 영양구조 및 에너지 흐름

상기의 생물그룹별 입력매개변수들 즉, 생체량과 생산

Table 3. Diet composition matrix in percentage of volume of prey groups.

| Prey/Predator | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 <i>Pseudobagrus fulvidraco</i> | | | | | | | |
| 2 Other fishes | 0.330 | | | | | | |
| 3 <i>Carassius auratus</i> | | | | | | | |
| 4 <i>Carassius cuvieri</i> | | | | | | | |
| 5 <i>Cyprinus carpio</i> | | | | | | | |
| 6 Zoobenthos | 0.500 | 0.200 | | | 0.076 | 0.100 | |
| 7 Zooplankton | | 0.200 | 0.50 | 0.300 | | 0.200 | 0.340 |
| 8 Phytoplankton | | 0.200 | 0.25 | 0.300 | 0.150 | 0.030 | 0.510 |
| 9 Macrophytes | | 0.200 | | 0.100 | 0.387 | 0.080 | 0.015 |
| 10 Detritus | 0.170 | 0.200 | 0.25 | 0.300 | 0.387 | 0.590 | 0.135 |
| Sum | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |

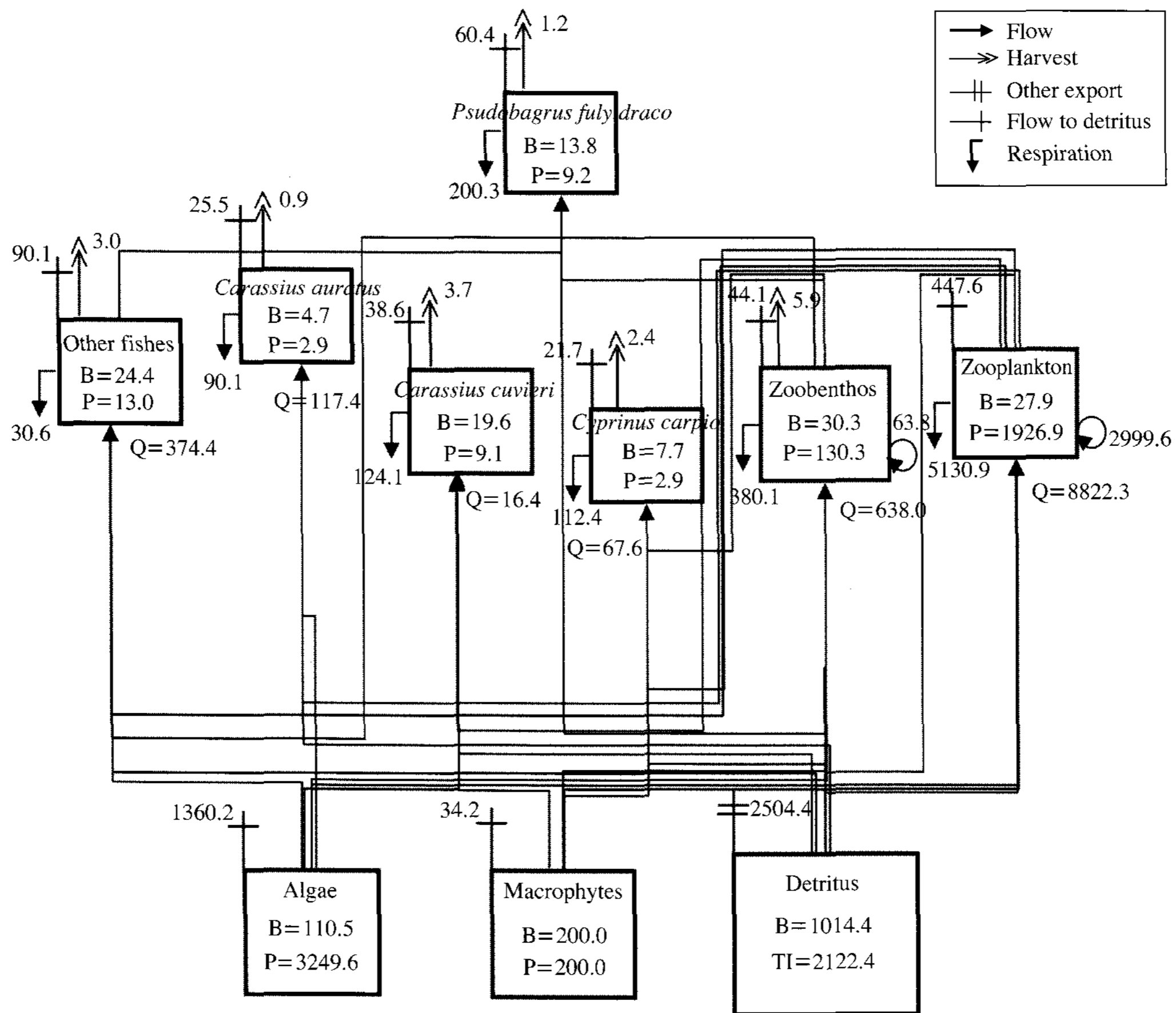


Fig. 2. Flow diagram showing trophic flows in Lake Namyang. Flows are expressed in $g\ m^{-2}\ year^{-1}$.

량/생체량의 비, 섭식량/생체량의 비, 먹이조성 자료 등이 도출되면, 본 남양호 수계 생태계 내에서 각 그룹이 영양학적으로 어떤 위치에 있는지를 보여주는 영양구조와 각 생물군간의 영양학적 상호작용, 즉 피식/포식관계, 에너지 흐름 등을 파악할 수 있다. Ecopath 모델을 사용하여 추

정한 남양호 수계의 생태계 영양구조와 에너지 흐름은 Fig. 2와 같다. 왼쪽 축은 영양단계로서 일차생산자 그룹에서부터 최고소비자 그룹까지 여러 단계를 포함하며, 그림의 상자 크기는 생체량을 나타내고 화살표는 에너지가 이동하는 방향을 보여준다. 유기체실물의 경우, 생체량은

Table 4. Basic input parameters used for analysis of Lake Namyang ecosystem (P/B: production/biomass, Q/B: consumption/biomass).

| Species/group | Trophic level | Biomass (g m ⁻²) | P/B ratio (year ⁻¹) | Q/B ratio (year ⁻¹) | EE |
|--------------------------------|---------------|------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------|
| <i>Pseudobagrus fulvidraco</i> | 3.25 | 13.786 | 0.668 | 19.000 | 0.194 |
| Other fishes | 2.59 | 24.390 | 0.533 | 15.350 | 0.931 |
| <i>Carassius auratus</i> | 2.76 | 4.678 | 0.625 | 25.100 | 0.161 |
| <i>Carassius cuvieri</i> | 2.45 | 19.578 | 0.463 | 8.500 | 0.638 |
| <i>Cyprinus carpio</i> | 2.11 | 7.684 | 0.377 | 8.800 | 0.324 |
| Zoobenthos | 2.45 | 30.310 | 4.300 | 21.050 | 0.970 |
| Zooplankton | 2.52 | 27.886 | 69.100 | 316.370 | 0.769 |
| Phytoplankton | 1.00 | 110.490 | 29.411 | - | 0.499 |
| Macrophytes | 1.00 | 200.000 | 1.000 | - | 0.845 |
| Detritus | 1.00 | 1013.448 | - | - | 0.233 |

Table 5. Relative flows of each group by trophic level (Roman number).

| Group name | I | II | III | IV | V |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <i>Pseudobagrus fulvidraco</i> | | 0.170 | 0.587 | 0.228 | 0.015 |
| Other fishes | | 0.600 | 0.356 | 0.044 | |
| <i>Carassius auratus</i> | | 0.500 | 0.500 | | |
| <i>Carassius cuvieri</i> | | 0.700 | 0.300 | | |
| <i>Cyprinus carpio</i> | | 0.924 | 0.059 | 0.017 | |
| Zoobenthos | | 0.778 | 0.222 | | |
| Zooplankton | | 1.000 | | | |
| Phytoplankton | 1.000 | | | | |
| Macrophytes | 1.000 | | | | |
| Detritus | 1.000 | | | | |

1013.488 g m⁻²이며, 총 유입량(TI)은 2122.4 g m⁻²이고 동자개와 기타어류, 붕어, 떡붕어, 잉어, 동물플랑크톤, 저서동물 등에게 2504.4 g m⁻²이 포식되어 진다. 저서동물은 생체량이 30.310 g m⁻²이며, 유기체설물과 식물플랑크톤, 대형수생식물, 동물플랑크톤으로부터 638.0 g m⁻²을 포식하고 동시에 3개의 어류그룹에게 피식된다. 남양호 수계의 가장 아래 단계에 있는 식물플랑크톤과 대형수생식물의 영양단계는 1.00이며, 가장 상위 단계에 있는 동자개의 영양단계는 3.25인 것으로 계산되었다(Table 4).

모델링 결과, 계를 구성하는 10개 그룹은 5개 영양단계로 재구성되었다(Table 5). 1단계에서 100% 물질흐름이 발생하는 그룹은 무생물인 유기체설물과 식물플랑크톤, 대형수생식물 등이었으며, 물질흐름 80% 이상이 2단계에서 발생하는 그룹은 잉어와 동물플랑크톤이었다. 50% 이상 물질흐름이 3단계에서 발생하는 경우는 동자개와 기타어류, 붕어, 떡붕어 등이었으며, 4단계와 5단계에서도 일부 물질흐름이 발생되었다(Table 5). 남양호 수계 내 영양물질의 총에너지량(total system throughput)은 약

14.1 kg m⁻²로 나타났으며, 이 중 약 7.6 kg m⁻²(53.4%)이 유기체설물을 제외한 식물플랑크톤 등의 1차 생산자로부터 발생하는 것으로 조사되었다(Table 6). 또한, 식물플랑크톤 등의 1차 생산자에 에너지 생산량은 4819.615 g m⁻²로 이 중 50.9%인 2455.190 g m⁻²이 상위소비자에 의해 직접 소비되는 것으로 나타났으며, 나머지 49.1%는 유기체설물로 유입되는 것으로 나타났다. 무생물인 유기체설물은 4018.551 g m⁻² 중 23.9%인 936.781 g m⁻²만이 상위소비자에 의해 직접 소비되고 나머지 3081.771 g m⁻²은 외부로 유출되는 것으로 나타났다(Table 6). 물질 전환효율(TE, transfer efficiencies)은 영양단계 사이의 에너지 전달을 기술하기 위해 사용되는 효율의 척도이며, 어떤 주어진 영양단계의 생산량과 그들이 먹는 영양단계 생산력의 비로 정의된다. 남양호 수계의 물질 전환효율은 2단계에서 15.1%로 가장 높게 나타났고, 3단계 9.3%, 4단계 5.2%, 5단계 1.7% 등의 순으로 나타났다(Table 6).

3) 혼합영양영향 (MTI, Mixed Trophic Impacts)

Ecopath 모델의 혼합영양영향(MTI)은 생태계를 구성하는 생물그룹들 간의 직간접 상호작용을 평가할 수 있다(Ulanowicz and Puccia, 1990; Christensen and Pauly, 1993; Kang, 2005). 또한, 그룹 생체량을 조금 증가시켰을 때 다른 그룹이 받는 영향을 파악할 수 있기 때문에 민감도해석이라고 할 수 있다(Kang, 2005). Fig. 3에서 왼쪽 그룹의 생체량 증가가 오른쪽 그룹의 생체량에 미치는 효과가 양일 때는 상부방향으로, 음일 때는 하부방향으로 상자가 나타나며, 상자의 크기는 효과의 상대적 정도를 표시한다. 본 조사에서 남양호 수계에 최고포식자인 동자개의 생체량 증가는 기타어류에게 큰 음의 효과를, 붕어와 떡붕어, 잉어에게는 양의 효과를 미치는 것으로 나타났다. 또한, 기타어류의 생체량 증가는 붕어와 떡붕어, 잉어에게 음의 효과를 미치는 것으로 나타났으며, 저

Table 6. Energy flows (g m^{-1}) and transfer efficiencies (%) in the Lake Namyang.

| TL/Flow | Cons. by pred. | Export | Flow to detritus | Respiration | Throughput |
|---|----------------|----------|------------------|-------------|------------|
| Flows origination from primary producers (excluding detritus) | | | | | |
| 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 | | | | | |
| 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 |
| Transfer efficiency (%) by trophic level | | | | | |
| Source | I | II | III | IV | V |
| Producer | - | 14.4 | 9.8 | 5.6 | 1.7 |
| Detritus | - | 17.1 | 8.3 | 4.1 | 1.7 |
| All flows | - | 15.1 | 9.3 | 5.2 | 1.7 |

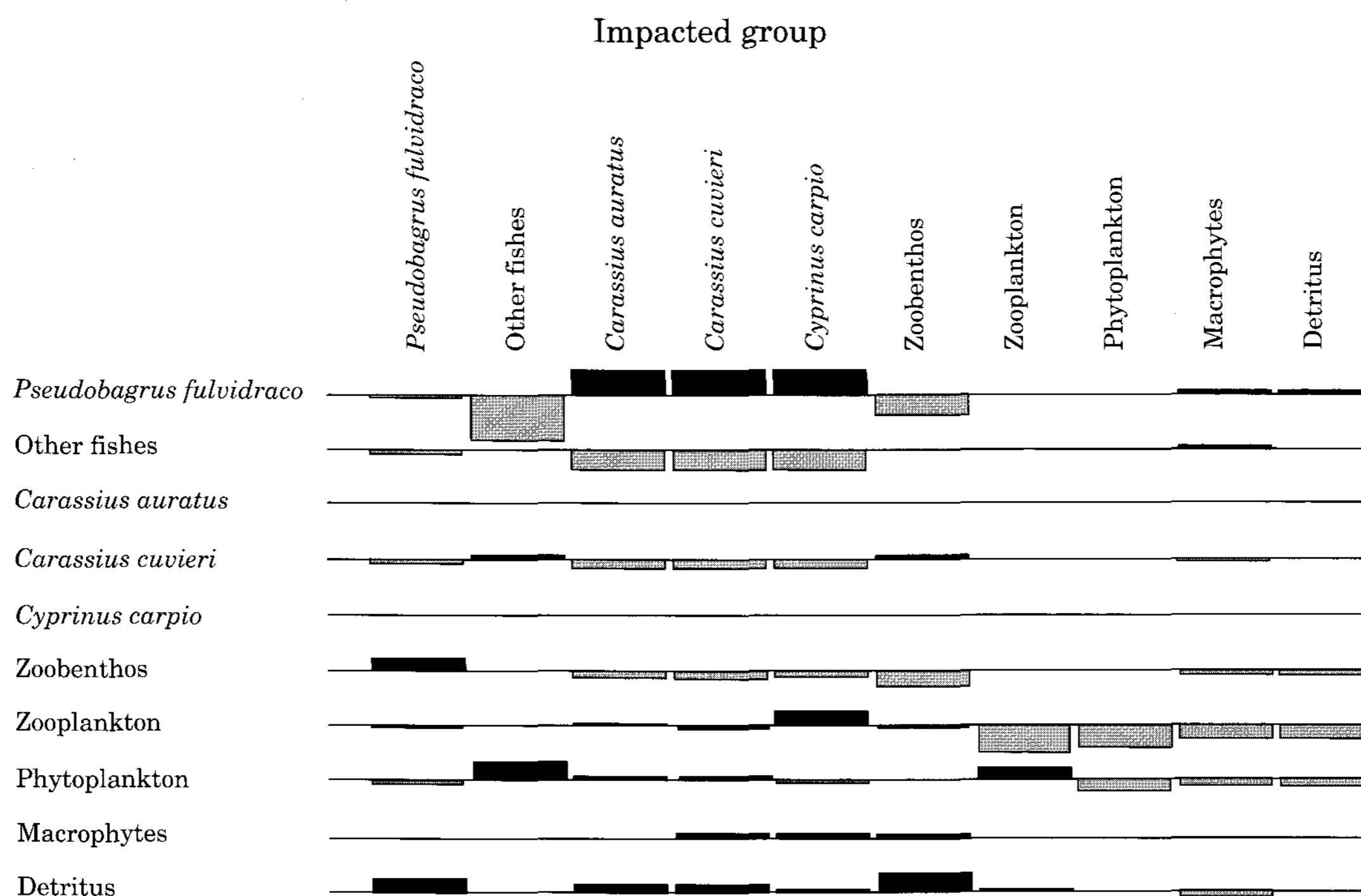


Fig. 3. Mixed trophic impacts of the functional groups in Lake Namyang ecosystem showing the combined direct and indirect trophic impacts. Positive impacts are shown above each baseline in dark columns, while negative impacts are shown below the baseline.

서동물의 생체량 증가는 동자개에게는 양의 효과를, 기타 어류와 붕어, 떡붕어, 잉어 등에는 다소 음의 효과를 미치는 것으로 나타났다. 또한, 저서동물의 생체량 증가는 저서동물 자체에게 음의 효과를 미치는 것으로 나타났다.

동물플랑크톤의 증가는 동물플랑크톤과 식물플랑크톤, 대형수생식물, 유기쇄설물 등의 생체량에게 음의 효과를 미치는 것으로 나타났다. 식물플랑크톤의 증가는 기타 어류와 붕어, 떡붕어, 동물플랑크톤에게는 양의 효과를, 잉

어와 대형수생식물, 유기체설물, 식물플랑크톤 자체에게 는 음의 효과를 보였다.

고 찰

본 연구는 생태계 모델인 Ecopath with ecosim (Walters *et al.*, 1997)을 이용하여 남양호 수계의 영양구조와 에너지 흐름을 정량적으로 분석하고자 하였다. 모델링 결과, 남양호 수계의 생물그룹별 생태효율지수(EE, Ecotrophic efficiency)는 0.161~0.970의 범위를 보였다. 생태효율지수는 모델링을 검증하는 방법이며, 결과치가 0과 1 사이 범위 내에 있어야 대상생태계의 전체 에너지 흐름에서 사용량이 생산량을 초과하지 않는 에너지 균형을 이룬다고 판단한다. 따라서 범위 내의 결과치를 가진 남양호 수계는 전체 에너지의 사용량과 생산량이 에너지 균형을 이루고 있음을 보여준다. 또한, 본 연구에서 저서동물과 기타어류가 가장 높은 에너지영양효율(EE)을 가지는 것으로 나타났으며, 이는 남양호 수계에서 가장 활발하게 다른 생물들에게 이용되어져 에너지 흐름에 많은 비중을 차지하는 것을 의미한다. 즉, 다른 생물그룹으로부터 강한 포식압력을 받고 있음을 짐작할 수 있다. 또한, 남양호 수계의 영양구조는 크게 3단계 즉, 무생물인 유기체설물과 식물플랑크톤, 대형수생식물 등은 1차 생산자로, 동물플랑크톤과 저서동물, 잉어, 떡붕어, 붕어, 기타어류 등은 1차 소비자, 동자개는 2차 소비자 등으로 구분할 수 있었다. 이와 같은 영양구조를 통하여 다양한 생물그룹을 분류하는 것은 생태계 내 생물그룹 간의 상호작용을 단순화함으로 생태계의 구조와 기능을 보다 쉽게 이해하도록 한다. 일반적으로 생태계 내 생산자의 생체량은 그들이 부양하는 1차 소비자의 생체량보다 더 커야 하며, 1차 소비자의 생체량은 2차 소비자의 생체량보다 커야 한다. 왜냐하면 영양단계를 통과하는 에너지는 먹이사슬에서 다음 단계로 넘어갈 때마다 양이 감소하기 때문이다. 따라서 대부분 생태계의 영양구조는 위로 뾰족한 피라미드의 형태를 가진다(강 등, 2007). 남양호 수계는 1차 생산자로 추정된 유기체설물과 식물플랑크톤, 대형수생식물 등의 생체량이 $1323.938 \text{ g m}^{-2}$, 1차 소비자로 추정된 동물플랑크톤과 저서동물, 잉어, 떡붕어, 붕어, 기타어류 등의 생체량이 114.526 g m^{-2} , 2차 소비자로 동자개의 생체량이 13.786 g m^{-2} 등으로 조사되었다. 따라서 각 영양단계별 생물그룹의 총 무게를 순서대로 도표화하면 남양호 수계는 위로 뾰족한 피라미드의 영양구조를 가지며, 이는 생태계의 평형 상태를 가지는 것을 의미한다.

남양호 수계 내 영양물질의 총에너지량(total system throughput)은 14.1 kg m^{-1} 로 나타났으며, 이 중 53.4%가 식물플랑크톤 등의 1차 생산자로부터 발생하는 것으로 조사되었고, 36.0%가 무생물인 유기체설물에 의해 발생하는 것으로 조사되었다. 또한, 식물플랑크톤 등의 1차 생산량 중 50.9%가 상위소비자에 의해 직접 소비되는 것으로 나타났으며, 무생물인 유기체설물은 23.9%만이 상위소비자에 의해 직접 소비되는 것으로 나타났다. 따라서 남양호 수계의 에너지 흐름은 무생물인 유기체설물보다는 식물플랑크톤 등의 1차 생산자 그룹에 더욱 의존적이라고 판단된다. Ulanowicz and Puccia (1990)은 생태계의 총에너지량을 총섭식량(consumption)과 총이출량(exports), 총호흡량(respiratory flows), 유기체설물 전환(flows into detritus) 등 네 가지 요소로 구분하였으며, 이에 따라 남양호 수계는 총에너지량에 대해 39% ($5440.919 \text{ g m}^{-1}$)는 섭식으로, 21% ($3107.271 \text{ g m}^{-1}$)는 이출, 12% ($1708.362 \text{ g m}^{-1}$)는 호흡, 28% ($4018.551 \text{ g m}^{-1}$)는 유기체설물로 전환되는 것으로 나타났다. 따라서 남양호 수계의 에너지 흐름은 상위 영양단계의 포식이 39%로 가장 높은 비율을 가지는 것이 특징적이며, 이는 에너지 흐름이 이출 또는 호흡보다 주로 상위 영양단계의 포식에 의해 야기되어지는 것으로 판단된다. 남양호 수계의 물질 전환효율(TE, transfer efficiencies)은 2단계에서 15.1%로 가장 높게 나타났고, 삼단계 9.3%, 사단계 5.2%, 오단계 1.7% 등으로 나타났다. Lampert and Sommer (1997)는 생태계 내의 물질 전환효율은 연구와 영양단계에 따라 차이가 있으나, 영양단계 간 평균 0.5~20%가 전달되는 것이 일반적인 현상이라고 보고하였다. 이에 따라 남양호 수계의 영양단계 간 물질 전환효율은 일반적인 범위 내의 흐름을 보이는 것으로 확인할 수 있었다. 또한, 남양호 수계의 유기체설물에 의한 물질 전환효율은 8.4%를 보인 반면 식물플랑크톤 등의 1차 생산자에 의한 전환효율은 9.2%로 유기체설물보다 다소 높게 나타났다. 따라서 남양호 수계는 무생물인 유기체설물보다 식물플랑크톤 등의 1차 생산자에 의한 에너지 흐름이 더 큰 비중을 차지하는 것으로 판단된다.

혼합영양영향(MTI) 결과, 남양호 수계에서 최고포식자인 동자개의 생체량 증가는 기타어류에게 큰 음의 효과를, 붕어와 떡붕어, 잉어 등에게는 양의 효과를 미치는 것으로 나타났다. 이는 동자개가 기타어류의 많은 양을 직접 포식하기 때문에 음의 영향을 미치는 것으로 판단되며, 이에 따른 기타어류의 감소는 상대적으로 먹이경쟁에 위치하고 있는 붕어와 떡붕어, 잉어의 생체량에 간접적으로 양의 영향을 미친 것으로 판단된다. 또한, 각 생물그룹

의 생체량 증가는 동일 그룹의 생체량을 감소시키는 것으로 나타났다. Christensen *et al.* (2000)은 어떤 생물그룹의 생체량 증가는 동일 생물그룹의 먹이자원에 대한 경쟁을 유발시켜, 동일 생물그룹의 생체량에게 부정적 영향을 미칠 것이라고 보고하였다. 따라서 남양호 수계에 서식하는 각 생물그룹의 생체량이 증가하게 되면 동일 생물그룹 내 먹이자원의 경쟁을 유발시켜, 동일 생물그룹의 생체량을 감소시키는 음의 효과를 보일 것으로 추정할 수 있다. 결론적으로 이 같은 연구들은 특정 생물그룹의 증가가 생태계에 미치는 영향이 부정적인지 긍정적인지 또한, 생태계 구조가 어떻게 변형되는지 등을 예측할 수 있다. 이러한 분석결과들은 체계적인 수 생태계 및 수자원의 관리를 위한 방안으로 제공될 수 있다.

본 연구는 생태계를 구성하는 생물들의 생태학적 특성과 상호작용을 통하여 남양호 수계의 기능과 구조를 해석하고자 하였다. 비록 생물그룹 분류와 관련 자료의 부족, 부정확성 등의 문제점이 있지만 Ecopath 모델을 통해 남양호 수계의 영양구조와 에너지 흐름 등의 생태특성을 설명할 수 있었다. 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 저차소비자의 환경에 대한 반응성을 예측함으로써 고차소비자의 변동을 함께 분석할 수 있는 정보를 제공할 수 있다. 이러한 관계는 생태계 내에서의 top-down 또는 bottom-up을 규명하는 자료로 활용되어 보다 객관적이고 정확한 영향을 평가할 수 있으며, 구성종의 변화를 통해 변화를 받은 생태계가 어떠한 기능을 지니게 되고 이에 따라 필요한 보전 및 관리 정책이 결정되어 질 수 있는지에 대한 정보를 제공할 수 있다. 향후 생물그룹의 추가적 자료와 어획과 같은 인위적 환경변화가 대상생태계에 어떠한 영향을 미칠 것인지를 역학적 시뮬레이션으로 보여주는 Ecosim 모델을 활용한다면 담수생태계의 관리 및 보전에 유용한 도구가 될 수 있을 것으로 기대한다. 본 연구는 담수생태계에서 생태계를 구성하고 있는 각 생물종 및 생물군의 영양역학적인 관계를 밝힌 첫 시도라는데 의의를 둘 수 있다.

적 요

본 연구는 Ecopath 모델을 이용하여 인공담수호인 남양호의 생태계 구조와 에너지 흐름을 알아보려고 하였다. 이를 위해 2007년 갈수기(5월)와 풍수기(8월)에 남양

호 6개 지점에서 조사를 실시하였으며, 어류의 각 어종별 밀도와 자원량 자료를 위해 2007년 3월에서 11월까지 매달 2회씩 조사를 실시하였다. 남양호는 수온이 17.9~30.6°C, 전기전도도(EC) 400~11,560 $\mu\text{s cm}^{-1}$, 용존산소 6.7~12.61 mg L^{-1} , pH는 10.1~10.5, 총 유기탄소(TOC) 3.810~5.412 mg L^{-1} , 용존탄소(DOC) 3.629~5.397 mg L^{-1} , 수심 0.4~10.0 m, 투명도 0.2~0.7 m 등의 범위를 보이는 인공호로 조사되었다. 본 연구에서 남양호 생태계는 크게 3단계 즉, 1차 생산자, 1차 소비자, 2차 소비자로 나누어지는 영양단계를 보였다. 1차 생산자에 해당하는 생물군은 유기체설물, 조류, 대형수생식물이었고, 1차 소비자에는 동물플랑크톤, 저서동물, 잉어, 떡붕어, 붕어, 기타 어류 등이었고, 2차 소비자에는 동자개로 확인되었다. 남양호 수계의 총에너지량은 14.1 kg m^{-1} 로 나타났으며, 39%는 섭식으로, 21%는 이출, 12%는 호흡, 28%는 유기체설물로 전환되는 것으로 나타났다. 또한, 혼합영양영향(MTI) 결과 본 남양호 생태계에서 최고포식자로 추정된 동자개의 생체량 증감은 기타어류와 붕어, 떡붕어, 잉어 등의 어류군 및 저서동물에게 직·간접적으로 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 각 그룹의 생체량 증가는 그룹 내 중간 먹이 경쟁을 야기시켜 각 그룹별 자체생체량을 감소시키는 음의 효과를 보이는 것으로 나타났다.

인 용 문 헌

- 강혜순, 오인혜, 정 근, 이우신. 2007. 생태학(6판). 라이프사이언스. 622 p.
- 국립환경연구원. 1993. 호소 만입부에서의 조류 대량증식 제어 기술 개발(III). p. 60-67.
- 농촌용수종합정보시스템. 2007. <http://rawris.korio.co.kr>.
- 이성일. 2008. 생태계 모델링에 의한 바다목장의 자원평가 연구. 부경대학교 박사학위논문. 130 p.
- 장창익. 1991. 수산자원생태학. 우성출판사, 서울. 399 p.
- 정용락, 김유경, 류 환, 정세웅, 엄한용, 최준혁. 2007. 남양호 비점오염물질 유출특성 및 유달울 산정. 한국물환경학회·대한상하수도학회 공동춘계학술발표회 논문집. p. 1111-1119.
- 한국농촌공사. 2005. <http://www.ekr.or.kr>.
- 환경부. 2000. 수질오염공정시험방법, 환경부고시 제99-208호.
- 해양수산부. 2007. 내수면 잠재력 조사 및 발전방안 연구-3차년도- 해양수산부. 548 p.
- Allen, K.F. 1971. Relation between production and biomass. *J. Fish. Res. Bd. Can.* **20**: 1573-1581.
- Christensen, V. 1995. Ecosystem maturity-towards quantification. *Ecological Modelling* **77**: 3-32.

- Christensen, V. and D. Pauly. 1992. Ecopath 2 a software for balancing steady ecosystem models and calculating network characteristics. *Ecological Modelling* **61**: 169-185.
- 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 (Ethiopia) using mass-balance Ecopath model. *Ecological Modelling* **201**: 398-408.
- Fishbase. 2007. <http://www.fishbase.com>.
- Jones, J.G. 1979. A guide to methods for estimating microbial numbers and biomass in fresh water. Freshwater biological association, Scientific publication No. 39.
- Kang, Y.H. 2003. Carrying capacity and fishery resource release in the Bangjukpo surfzone ecosystem. *J. Kor. Fish. Soc.* **36**: 669-675.
- Kang, Y.H. 2005. A preliminary trophic flow model for Gwangyang Bay, Korea. *J. Kor. Fish. Soc.* **38**: 184-195.
- Lampert, W. and U. Sommer. 1997. Limnology: the ecology of lakes and streams. Translated by Haney, J.F. Oxford University Press, New York.
- 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.
- Polovina, J.J. 1984. Model of a coral reef ecosystem. 1. The ECOPTH model and its application to French Shoals. *Coral Reefs* **3**(1): 1-11.
- Villanueva, M.C. and J. Moreau. 2001. Recent trends of evolution in Lake Victoria fisheries as assessed by Ecopath 4 (with Ecosim) software, p. 96-110. *In: Lake and Reservoirs Fisheries Management* (Cowx, I.G. ed.). The University of Hull Publication, United Kingdom.
- 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. 2002. Prospect of ecosystem-based fisheries resource management. *J. Kor. Soc. Fish. Res.* **5**: 73-90.
- 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.
- Zhang, C.I. and S.K. Lee. 2004. Trophic levels and fishing intensities in Korean marine ecosystems. *J. Kor. Soc. Fish. Res.* **6**: 140-152.

(Manuscript received 10 March 2008,
Revision accepted 14 May 2008)