

Original Research Article

낙동강 하굿둑 개방으로 인한 먹이망 영향 예측

Predicting the Impact of the Opening of the Nakdong River Estuary Barrage on the Ecosystem Food Web

이진영¹, 최문성¹, 손현철¹, 강윤호^{1,*} JinYeong Lee¹, Mun Seong Choi¹, HyeonCheol Son¹, Yun-Ho Kang^{1,*}

¹(주)선진해양

¹SeonJin Ocean Science Co., Ltd. Yeosu Daehak-ro, No.50, Chonnam National University, Yeosu 59626, Republic of Korea

* Correspondence to Yun-Ho Kang E-mail: ykang001@hanmail.net

 Received
 May 9, 2023

 Revised
 June 29, 2023

 Accepted
 July 4, 2023

Abstract : In the several decades since the barrage at the mouth of the Nakdong River estuary was built in 1987 for water supply and salinity control, the water mass inside the barrage has become polluted and the ecosystem has shrunk. To restore the health of the ecosystem, fishery resources and biodiversity, stakeholders who currently use the estuary are calling for the barrage to be opened, which has been partially accomplished. In this study, trophic flow foodweb models are applied to understand the food web structure and functions of the Nakdong River estuary ecosystem and forecast the effects of barrageopening. The model results showed that; 1) Ecological theory and cycling indices of Total System Throughput 5457 t km⁻² y⁻¹, Primary Production/Total Respiration 2.0, PP/ Biomass 34.9 y⁻¹ and B/TST 0.010 y⁻¹ indicate that the ecosystem is not fully developed and vulnerable to external perturbation. 2) A Transfer Efficiency of 2.6% between TL II-IV indicates low predation pressure and/or excess nutrients and detritus being supplied to the lower trophic level but not ultimately transferred to higher trophic levels, as is generally the case in polluted ecosystems. 3) Macrophytes appear to be able to provide food for benthic organisms in the form of organic detritus, and the effects of opening up the lower bank on macrophyte communities may feed through the food web to higher trophic levels. 4) As this study is for the purpose of a pilot model based on a limited range of reliability in the basic data and salinity-response relationship data, although it reproduced relatively stable distributions along the estuary, caution is needed in interpreting the model results. The pilot model developed in this study is expected to provide a useful basis for analyzing the food web and predicting and managing the effects of opening the estuary in the future.

Keywords : Nakdong River estuary, Barrage opening, Food web, Ecopath, Ecospace

서 론

낙동강은 총길이 506 km로 강원도 태백 함백산에서 발원하 여 남해로 들어가며 유역면적은 23,690 km²이다. 낙동강 하굿 둑은 안동댐으로부터 355 km 하류에 위치하며, 1934년 녹산과 대동 수문을 시작으로 하구 지역의 안정적인 용수공급을 위한 염수침입 방지를 목표로 1987년에 건설하였고, 우안, 좌안, 녹 산 배수문을 계속하여 증설하였다(MOE, 2015).

하구는 육상과 해양의 전이지역으로 일반적으로 높은 생산 성과 종다양성을 보이는데, 특히 낙동강 하구는 조석과 파랑 요인에 의해 삼각주, 사주 그리고 습지 등의 복잡한 환경과 그 에 따른 생태계 구조를 가진다(Kim and Ha, 2001; Park *et al.*, 2016; Kim and Youn, 2019). 하굿둑은 담수와 해수 유량과 육 상과 해상기원 물질 간의 교환을 차단하고, 기수역을 소실시 키기 때문에 생지화학적 순환에 영향을 미치며, 생산성과 종 다양성을 감소시킬 수 있다(Burt and Rees, 2001; Friedl and Wüest, 2002). 낙동강 하구에서는 하굿둑 건설과 매립 등 여러 인위적 개발로 인해 지형이 변화하고, 기수역이 소실되어 생태 계 먹이망의 구조와 기능에 큰 변화가 발생하였다(Williams *et al.*, 2013; MOE, 2015; Park *et al.*, 2016). 낙동강 하굿둑 건설 이후 훼손된 하구역 생태계에 대한 장 기 모니터링이 시행되고 있으며(Busan Development Institute, https://www.busan.go.kr/depart/ahnaturalsurvey02), 하구 복 원 및 관리를 위한 여러 연구와 최근 하굿둑을 시범적으로 개 방하고, 이로 인한 환경과 생태계 영향을 파악하여 향후 상시 적인 수문개방을 위한 기초자료로 활용코자 하는 연구가 진행 된 바 있다(An *et al.*, 2007; Environment and Labor committee, 2020).

한편, 낙동강 하구 생태계를 대상으로 하는 연구는 하천 수리 수문, 하굿둑 방류, 염 침투(Lee and Eun, 2003; Jang and Kim, 2006; Sin *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2016a; Shim *et al.*, 2023), 퇴적물 이동과 퇴적상(Eun and Lee, 2008; Eom and Lee, 2017), 저질 및 수질(Lee and Park, 2002; Sin, 2003; Yoon *et al.*, 2008; Park *et al.*, 2016; Kang *et al.*, 2020), 저서동물(Lee *et al.*, 2009; Park *et al.*, 2016), 어류(Kwak and Huh, 2003; Lee *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2012; Park *et al.*, 2020; Chin *et al.*, 2021), 조류(Hong, 2009; Kim *et al.*, 2016b; Kim *et al.*, 2017a)와 갈대(Chang and Kang, 1984; Kang and Chang, 1985; Chang and Oh, 1995; Ryu *et al.*, 2016) 등 환경과 먹이 망을 구성하는 기능군에 대한 개별적인 연구에 집중된 반면, 생태계 먹이망 전체를 다룬 연구는 An *et al.*(2007), Lee *et al.* (2021), Jang *et al.*(2008b), Hoang *et al.*(2021)에 국한되는 것 으로 파악되었다.

An et al. (2007)은 낙동강 하구의 갯벌, 갈대군락, 조하대 구 간에서 안정동위원소분석을 통한 먹이망 해석과 하구 시스템의 물질수지를 제시한 바 있고, Jang et al. (2008a)은 하굿둑에서 북쪽으로 직선거리로 약 30 km에 위치하는 하천 담수 생태계 에 ecopath 모형을 적용한 바 있다. Lee et al. (2021)은 AQUA-TOX 모델을 낙동강 하구역 생태계에 적용하여 하굿둑 방류 시 식물플랑크톤의 유실로 인해 총 일차생산량은 감소하는 반면 육상기인 오염물의 유입으로 인해 호흡량은 증가하는 관계를 해석하였다. Hoang et al. (2021)은 동일 모델을 사용하여 낙동 강 하구역에서 제초제의 생물농축과 독성에 의한 상위 기능군 생물의 생체량 변동을 모의한 바 있다. 위 모델의 공간적 영역 은 낙동강 하굿둑 외측으로 둑 내측은 포함하지 않았으며, 모델 에서 다루는 기능군은 식물성플랑크톤, 동물성플랑크톤, 저서 무척추동물, 어류를 포함하였으나 상위 영양단계 기능군의 경 우 우점 출현하는 몇 가지 생물에 집중하였고, 모델 기능의 한 계로 생태계 먹이망의 구조와 기능에 대한 생태계네트워크 해 석은 시도하지 않았다.

본 연구의 목적은 먹이망모형을 적용하여 낙동강 하구역 생 태계 먹이망의 구조와 기능에 대해 해석하고, 하굿둑 개방으로 인한 생태계 영향을 예측하여 하구 관리를 위한 기초자료를 제 공하기 위해 다음의 연구과정을 포함하였다: - 첫째, 하굿둑을 중심으로 북측 담수역 그리고 남측 기수역과 해수역 3개의 구 간을 하나의 계로 포함하여 먹이망모델 Ecopath를 적용하고 질량평형을 이루어 모델을 구축한다. 둘째, 현재 생태계의 구조 와 기능 및 생태계 특성을 영양상호영향, 핵심종분석, 생태계이 론지수와 순환지수 등을 이용하여 생태계네트워크를 분석한다. 셋째, Ecospace 모델을 이용하여 하굿둑 개방 시 새로이 형성 될 해수, 기수, 담수 구간을 대상으로 장기간 생체량 변동을 모 의하여 향후 하굿둑 관리를 위한 기초자료로 제시한다. 아울러, 금번 연구는 기초자료와 염분 반응 관계자료에서 제한된 범위 의 신뢰도에 근거하는 시범모의의 목적을 갖는 만큼 결과해석 에 주의가 요망된다.

재료 및 방법

1. 모델소개

Ecopath with Ecosim (EwE) 모델은 ecopath, ecosim, ecospace, ecotrace 모델로 구성된다. Ecopath 모델의 지배방정 식은 생산량과 소비량 평형식이며, 생산량은 어획, 피식 및 질 병에 의한 사망, 생장, 회유에 의한 합으로 구성되고, 소비량 은 생산량, 호흡량과 미동화량의 합으로 구성된다고 가정한다 (Christensen and Pauly, 1992):

$$B_{i} \cdot \left(\frac{P}{B}\right)_{i} \cdot EE_{i} - \sum_{j=1}^{n} B_{j} \cdot \left(\frac{Q}{B}\right)_{j} \cdot DC_{ji}$$
$$-Y_{i} - E_{i} - BA_{i} = 0$$
(1)

$$Q = P + R + U \tag{2}$$

여기서,

B_i, B_j : 피식자(i)와 포식자(j)의 단위면적당 생체량(t km⁻²)

i,*j* : 1, 2, 3, ..., *n*; *n*은 계를 구성하는 그룹의 수

- P : 단위시간과 면적당 생산속도 혹은 생산량(t km⁻² y⁻¹)
 (*P*/*B*)_i : (*i*)의 생산량/생체량 비로서 평형 가정하 사망률과
- (P/B); : (1)의 생산당/정세당 미도시 정영 가장아 사망물과 동일(y⁻¹)
- EE_i : 영양효율로서 피식자(i)의 생산량 가운데 포식과 어획에 의해 소비되는 분율
- Q : 단위시간과 면적에서 포식자에 의한 섭식, 포식속도
 혹은 소비량(t km⁻² y⁻¹)

(Q/B)_i: 소비량/생체량 비(y⁻¹)

- DC_{ji} : 먹이조성지수, 포식자(j)의 먹이조성에서 피식자(i)의 분율
- Y_i : 총어획량(= F_iB_i, F_i 는 어획사망계수)(t km⁻² y⁻¹)
- *E_i* : 순회유량(=이출-이입)(t km⁻² y⁻¹)
- *BA*_i : 생장량(t km⁻² y⁻¹)

Ecosim 모델은 ecopath 모델 (1)에서 기능군 생체량의 시간 변동을 추적하며 식 (3)과 같이 전개할 수 있고, 여기서 소비량 C_{ij} 는 포식장이론(Foraging Area Theory)에 근거하여 식 (4)와 같이 계산할 수 있으며(Walters *et al.*, 1997), 교환속도 v_{ij} 는 피 식자 생체량 가운데 포식에 취약한 부분과 취약하지 않은 부분 간의 영양흐름 속도를 규정짓는 취약도(vulnerability)라 할 수 있고, $v = v_{ij} = v_{ji}$ 이며, 취약한 부분 즉 가용성 생체량 V_{ij} 를 식(5) 와 같이 산정할 수 있다:

$$\frac{dB_i}{dt} = cg_i \sum_{j=1}^n C_{ji} - \sum_{j=1}^n C_{ij} + I_i - B_i (M_i + F_i + E_i)$$
(3)

$$C_{ij} = \frac{a_{ij}v_{ij}B_iB_j}{2v_{ij} + a_{ij}B_j} \tag{4}$$

$$V_{ij} = \frac{v_{ij}B_i}{2v_{ij} + a_{ij}B_j} \tag{5}$$

위 식에서,

- c : 스칼라 강제함수
- C_{ij}: 단위 시간과 면적에서 피식자(i)를 포식하는 모든 포식자(j)
 에 의한 섭식, 포식 속도 혹은 소비량(t km⁻² y⁻¹)

M_i: 피식자(*i*)의 자연사망률(y⁻¹)

- *F_i*: 어획사망률(y⁻¹)
- g_i : 피식자(i)의 성장효율(=P/Q)
- n : 계를 구성하는 기능군의 수
- I_i :계로 들어오는 유입속도 혹은 이입량 $(t \text{ km}^{-2} \text{ y}^{-1})$
- F_i : 어획사망률(y^{-1})
- *a_{ij}* : 탐색속도(searching rate)(km² t⁻¹)
- vij : 영양흐름속도, 교환속도, 취약도(vulnerability)
- *V_{ij}* : 피식 가용 생체량(t km⁻²)

Ecospace 모델은 ecosim 모델(식 3)을 이차원 공간에서 양 해법으로 전개하며(Walters *et al.*, 1999), 서식지선택, 이류와 회귀 이동, 어선세력, 영양작용과 개체군동태를 고려할 수 있다 (Christensen and Walters, 2004). 격자 간 이동은 분산(dispersal, *m_i*)과 이류(advection, *A_i*), 포식위험과 먹이가용성, 어획노 력에 의해 이루어지며(Walters *et al.*, 1999), 이입과 이출은 격 자면을 통과하는 모든 흐름의 합으로 (*m_i*+*A_i*)*B_i*으로 표현되 고, 분산 *m_i*은 기능군, 서식지타입, 포식위험 등 조건에 따라 다 르며, 모델에서는 서식지경사함수(habitat gradient function) 를 사용하여 생물이 수심, 염분, 수온 등의 환경조건에 따른 이 동을 좀 더 현실적으로 예를 들어, 선호하는 서식지로 의도적으 로 이동하도록 조절할 수 있다. 이류항은 난, 영양염, 부유생물 의 이동에 중요한 물리기구로 사용자가 모델에 입력할 수 있고, 회유는 회유어종의 월 단위 선호위치를 입력하여 재현할 수 있 다. Ecospace 모델에서는 복수의 환경요인을 서식지포식용량모 델(Habitat Foraging Capacity Model)을 이용하여 서식지용량 (*C_{rcj}*)으로 변환한 후, 포식자 *B_j*와 가용성 피식자 *V_i*의 생체량을 식 (6)과 (7)을 이용하여 산정할 수 있다:-

$$V_{ij} = \frac{v_{ij}B_i}{2v_{ij} + a_{ij}B_j/C_{rcj}}$$
(6)

$$B_j = \left(g_i v_{ij} \frac{B_i}{Z_j} - 2 \frac{v_{ij}}{a_{ij}}\right) C_{rcj} \tag{7}$$

위 식에서,

C_{rcj}: 서식지용량(=f_j(H_{rc}), 서식지속성 H_{rc}=(H₁, H₂, ..., H_v)_{rc} 의 함수, r-row, c-column, j-cell)

Z_i : 포식사망계수(y⁻¹)

2. Ecopath 모델구축

사업 해역의 현재 자연 해황 및 수산업 조건을 반영하여 Ecopath 모델을 적용하였으며 기능군 분류, 기초입력자료 작 성, 질량평형 보정, 생태계네트워크 해석의 4가지 단계를 거쳐 모델을 구축하였다.

조사해역 생태계 먹이망을 구성하는 생물의 종조성과 생체 량 및 먹이조성은 국내 문헌조사를 참고하였으며, 어류의 P/B 와 Q/B는 Fishbase (http://www.fishbase.org)에서 제공되는 수 치를 이용하였다. 일반적으로 기능군은 단일 종이 복수의 종을 포함하는 까닭에 P/B와 Q/B 대푯값은 기능군에 속한 종의 생 체량을 가중 평균하여 산정하였다. 먹이조성은 포식자가 피식 자로부터 취하는 먹이량의 합이 1이 되도록 설정하였으며, 여 기서 먹이조성은 위내용물 분석 혹은 안정동위원소 분석으로부 터 구하고, 위내용물 분석 시 총량은 부피 혹은 무게에 관계없 이 1이 되도록 가정하였다.

Ecopath 모델은 조사 해역 먹이망을 구성하는 유기쇄설물, 기초생산자, 저서동물, 무척추동물, 어류 등을 크기, 식성, 서식 지 특성에 따라 비동물(식물플랑크톤, 대형식물, 유기쇄설물), 소형-중형동물(소형저서동물, 동물플랑크톤), 무척추동물(갑각 류, 극피동물, 다모류, 빈모류, 이매패류), 척추동물(어식성어류, 저어류, 하천어류, 플랑크톤식어류)를 포함하는 총 14개의 기능 군으로 구성하였다. 어류 기능군에 속하는 생물의 종조성과 생 체량은 Kwak and Huh (2003), Lee *et al.* (2009, 2012), Chin *et al.* (2021)과 Park *et al.* (2020)을 참고하였다. 어식성어류에는 황아귀, 홍어, 꼼치, 달고기, 넙치, 성대, 쌍뽈달재, 등가시치, 보 구치, 점넙치, 쌍동가리, 살살치, 별넙치, 붕장어, 동갈양태, 베도 라치, 쏨뱅이, 바다뱀, 참돔, 삼세기, 실양태, 갯장어, 꼬마달재,

No	Functional group	TL	HA	В	P/B	Q/B	P/Q	EE	NE
1	Piscivorous fish	<u>3.8</u>	1	0.103	0.253	3.192	0.079	<u>0.631</u>	<u>0.099</u>
2	Demersal fish	<u>3.3</u>	1	0.208	0.400	5.244	<u>0.076</u>	<u>0.790</u>	<u>0.095</u>
3	River fish	<u>2.5</u>	0.1	1.000	0.400	8.800	<u>0.045</u>	0.000	<u>0.057</u>
4	Planktivorous fish	<u>3.0</u>	1	0.110	1.510	8.667	<u>0.174</u>	<u>0.855</u>	<u>0.218</u>
5	Crustaceans	<u>3.0</u>	1	0.520	2.076	<u>6.920</u>	0.300	<u>0.541</u>	<u>0.375</u>
6	Echinoderms	<u>2.9</u>	1	0.507	0.519	<u>1.730</u>	0.300	<u>0.953</u>	<u>0.375</u>
7	Polychaetes	<u>2.0</u>	1	16.195	2.481	8.270	0.300	0.014	<u>0.375</u>
8	Oligochaetes	<u>2.0</u>	1	0.026	1.288	<u>4.293</u>	0.300	<u>0.000</u>	<u>0.375</u>
9	Bivalve	<u>2.1</u>	1	13.678	1.288	<u>4.293</u>	0.300	<u>0.037</u>	<u>0.375</u>
10	Small benthos	<u>2.0</u>	1	<u>3.841</u>	2.000	<u>10.000</u>	0.200	<u>0.800</u>	<u>0.250</u>
11	Zooplankton	<u>2.0</u>	1	6.000	49.3	<u>246.50</u>	0.200	0.017	0.250
12	Phytoplankton	<u>1.0</u>	1	9.840	200.0			<u>0.443</u>	
13	Macrophytes	<u>1.0</u>	0.1	8.500	1.7			<u>0.958</u>	
14	Detritus	<u>1.0</u>	1	126.0				<u>0.461</u>	

Table 1. Input parameters and outputs (underlined) of the balanced model representing the Nakdong River estuary ecosystem

TL - trophic level, HA - habitat area, B - biomass t km⁻², P/B - production/B y⁻¹, Q/B - consumption/B y⁻¹, P/Q - production/consumption (=GE - Gross food conversion efficiency), EE - ecotrophic efficiency, NE - Net efficiency)

Table 2. Diet composition of the Nakdong River estuary ecosystem

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0.05										
2	0.2										
3											
4	0.1	0.1									
5	0.35	0.1			0.1						
6	0.05	0.05			0.05						
7	0.02	0.2			0.05	0.2					
8					0						
9	0.05	0.25			0.05	0.2					
10	0.03	0.2	0.5		0.3	0.5					
11	0.15	0.1		1	0.3				0.05		
12									0.25		0.58
13			0.25			0.1	0.05	0.05	0.05	0.05	
14			0.25		0.15		0.95	0.95	0.65	0.95	0.42
Ι											
S	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

top row - predator, left column - prey, I - import, S - sum

눈볼대, 갈치, 꼬치고기를 포함하며, 기능군의 총생체량 0.103 t km⁻² 가운데 물가자미가 49.5%, 문치가자미가 25.7%를 차지 하였다(Lee *et al.*, 2012). 해당 어종의 P/B와 Q/B는 Fishbase (http://www.fishbase.org)를 참고하였으며 기능군의 대푯값 은 기능군에 속한 종의 생체량을 가중 평균하여 산정하여 각 기 0.253 y⁻¹과 3.192 y⁻¹으로 설정하였다(Table 1). 주요 우점 종인 물가자미와 문치가자미의 식성은 Hatanaka *et al.* (1954) 과 Huh *et al.* (2012)을 참고하였으며 기능군 식성의 대푯값은

기능군에 속한 종의 생체량을 가중 평균하여 Table 2에 입력하 였다. 저서성어류에는 물가자미, 문치가자미, 반딧불게르치, 조 피볼락, 쥐노래미, 달강어, 열동가리돔, 쥐치, 노랑촉수, 덕대, 흰발망둑, 개서대, 기름가자미를 포함하며, 기능군의 총생체량 0.208 t km⁻² 가운데 황아귀가 30.5%, 홍어가 17.4%를 차지하 였다(Lee *et al.*, 2012). 기능군의 P/B와 Q/B는 Fishbase를 참 고하고, 생체량을 가중 평균하여 각기 0.400 y⁻¹과 5.244 y⁻¹으 로 설정하였다(Table 1). 주요 우점종인 황아귀와 홍어의 먹이 조성은 각기 Park *et al.* (2013)과 Jung *et al.* (2015)을 참고하였 으며, 생체량을 가중 평균하여 Table 2에 입력하였다. 플랑크톤 식어류에는 청어, 멸치, 전갱이, 청보리멸, 갈전갱이를 포함하며 총생체량 0.110 t km⁻² 가운데 청어가 36.4%, 멸치가 30.9%를 차지하였다(Lee *et al.*, 2012). 기능군의 P/B는 Fishbase를 참 고하고, 생체량을 가중 평균하여 1.510 y⁻¹으로 입력하였고, Q/ B는 P/Q 0.3을 가정하여 8.667 y⁻¹으로 실정하였다(Table 1). 여기서 P/Q는 일반적으로 0.01에서 0.5의 범위를 가진다. 주 요 우점종인 청어와 멸치의 먹이조성은 각기 Choi *et al.* (2015) 과 Kim *et al.* (2017b)을 참고하였으며, 생체량을 가중 평균하 여 Table 2에 입력하였다. 하천어류에는 민물검정말둑, 잉어, 누 치를 포함하며, 전체 모의영역에서 차지하는 면적을 고려하여 HA 0.1, 기능군의 B 1.0 t km⁻², P/B 0.4 y⁻¹, Q/B 0.8 y⁻¹ 그리고 먹이조성 자료는 모두 기왕의 낙동강과 남양호 먹이망모델 자 료를 인용하였다(Jang *et al.*, 2008a, 2008b).

한편, 갑각류, 극피동물, 다모류, 빈모류, 이매패류와 소형저 서동물의 종 조성과 생체량은 Park et al. (2016)과 Lee et al. (2009)을 참조하였다. 갑각류의 B는 0.520 t km⁻², P/B는 Avdin et al. (2007)을 참고하여 2.076 y⁻¹, Q/B는 P/Q 0.3을 가정하여 6.920 y⁻¹, 먹이조성은 Aydin et al. (2007)을 참고하여 입력하였 다. 극피동물의 B는 0.507 t km⁻², P/B는 Harvey et al. (2010)을 참고하여 0.519 y⁻¹, Q/B는 P/Q 0.3을 가정하여 1.730 y⁻¹, 먹이 조성은 Harvey et al. (2010)을 참고하여 입력하였다. 다모류의 B는 16.195 t km⁻², P/B는 Christian and Luczkovich (1999)을 참고하여 2.481 y⁻¹, Q/B는 P/Q 0.3을 가정하여 8.270 y⁻¹, 먹이 조성은 Christian and Luczkovich (1999)을 참고하여 입력하였 다. 빈모류 Limnodrilus hoffmeisteri의 B는 0.026 t km⁻², P/B 는 Christian and Luczkovich (1999)을 참고하여 1.288 y⁻¹, O/ B는 P/Q 0.3을 가정하여 4.293 y⁻¹, 먹이조성은 Christian and Luczkovich (1999)을 참고하여 입력하였다. 이매패류의 B는 13.678 t km⁻², P/B는 Robertson (1979)을 참고하여 1.288 y⁻¹, Q/B는 P/Q 0.3을 가정하여 4.293 y⁻¹, 먹이조성은 Christian and Luczkovich (1999)을 참고하여 입력하였다. 소형저서동물 의 B는 3.841 t km⁻², P/B는 Christian and Luczkovich (1999) 을 참고하여 2.0 y⁻¹, Q/B는 P/Q 0.2를 가정하여 10.0 y⁻¹, 먹 이조성은 Christian and Luczkovich (1999)을 참고하여 입력 하였다. 동물플랑크톤은 Kang and Kim (2020)과 Kim *et al.* (2015b)을 참고하여 B는 6.0 t km⁻², P/B는 Youn *et al.* (2010) 을 참고하여 49.3 y⁻¹, Q/B는 P/Q 0.2를 가정하여 246.5 y⁻¹, 먹 이조성은 Christian and Luczkovich (1999)을 참고하여 입력 하였다. 식물플랑크톤은 Kang and Kim (2020), Kim and An (2021), Kim *et al.* (2020a, 2021)을 참고하여 B는 9.840 t km⁻², P/B는 Kim *et al.* (2015a)을 참고하여 200.0 y⁻¹으로 입력하였 다. 대형식물은 갈대를 포함하며, 전체 모의영역에서 차지하는 면적을 고려하여 HA는 0.1, B는 8.5 t km⁻² (Chang and Kang, 1984; Kang and Chang, 1985; Chang and Oh, 1995; Ryu *et al.*, 2016), P/B는 1.7 y⁻¹ (Harvey *et al.*, 2010)으로 입력하였다.

모델의 질량평형은 다음 몇 가지 지수를 이용하여 여부를 판단할 수 있다: - EE>1.0, 0.01 < GE < 0.5, 0.0 < NE < 1.0, GE = P/Q). 모든 기능군의 EE, GE, NE 지수가 적절한 범위 내 에 산정된 것으로 모델의 질량평형이 이루어짐을 확인하였다 (Table 1).

3. Ecospace 모형구축

낙동강 하굿둑 개방으로 생태계 구조와 기능에 미치는 영향 을 파악하기 위해 ECOSPACE 모델을 이용하여 염도 변화에 따른 생체량 변동을 모의하였다. 첫째, 낙동강하구 Ecopath 모 델의 시·공간을 확장하여 공간상에는 염도 분포를 고려할 수 있게 해수역, 기수역, 담수역 3개 구간으로 구분하였고, 시간상 으로 10년의 모의기간을 적용하였다. 전 장에서 구축된 ecopath 모델을 ecospace 모델로 확장하여 낙동강 하굿둑을 중심 으로 북측으로 10 km, 남측으로 4 km 확장하여 하굿둑 개방 후 상류지역에 형성될 해수, 기수, 담수 구간을 Fig. 1과 같이 시범 모의를 위해 임의로 가정하였다. 모의구간의 공간영역은 남북 방향으로 14 km, 동서방향으로 4 km이며, 격자크기는 250 m로 격자구조는 56×16, 그리고 모의 시간간격은 월단위로 10년 기 간 모의하였다.



Fig. 1. Computation domain and presumed salinity distribution along the Nakdong River estuary ecosystem after the barrage is opened.

이진영, 최문성, 손현철, 강윤호



Fig. 2. Salinity impact-response curves of functional groups representing (a) piscivorous fish, demersal fish and planktivorous fish; (b) river fish and oligochaetes; (c) crustaceans, echinoderms, polychaetes and bivalves.

 Table 3. Habitat gradient function scaled in the Ecospace model for

 Nakdong River estuary ecosystem

6

Functional		Habitats		
group	Saline water	Brackish water	Fresh water	
Zooplankton	1.0	0.2	0.2	
Phytoplankton	0.7	0.3	1.0	
Detritus	0.8	1.0	0.3	

둘째, 하굿둑개방 관련 염도의 영향을 고려하기 위해 염도 분 포는 일정하다고 가정하였으며 염의 생물영향을 파악하기 위해 염도-반응 관계곡선과 서식지경사함수를 적용하였다. 염분-반 응 관계곡선은 해수와 담수 어류 그리고 저서동물에 대한 3가 지 반응곡선을 사용하였다(Fig. 2). 생물의 염도 반응곡선은 현 장 및 실내실험을 통해 제시된 어종별 반응곡선 자료를 사용하 여야 하나, 본 연구에서는 참고자료가 부재하여 대안으로 담수, 기수, 해수 구간에서 관측된 풍도와 현존량 자료를 근거하여 개 략적인 관계를 시범적으로 제시하였다. 세 개의 염도 반응곡선 에 해당되는 기능군은 (a) 어식성어류, 저서성어류, 플랑크톤식 어류, (b) 하천어류, 빈모류 그리고 (c) 갑각류, 극피동물, 다모 류, 이매패류를 포함한다.

전체 모의영역에서 하굿둑 기준으로 북쪽으로 염도에 따라 해수역, 기수역, 담수역 3가지 서식지를 설정하였다. 그리고 특 정 기능군의 경우, 비록 이들의 분포가 염분만에 의한 영향이라 판단할 수는 없으나, 현장 및 문헌자료에서 비교적 뚜렷한 염분 분포 특성을 보이는 유기쇄설물, 식물플랑크톤, 동물플랑크톤 은 특정 서식지로 집중되도록 설정하였다(Table 3).

한편, 낙동강하구에서 해수침입 거동은 강우, 수리수문과 조 석 등의 영향으로 시·공간에 따라 변화할 것이나 본 모의에서 는 편의상 일정한 공간분포를 갖는다고 가정하였다. 어류 등 상 위포식자는 일반적으로 저차 영양단계의 생물에 비해 생명기간 이 길기 때문에 먹이망모델은 순환이나 생지화학모델에 비해 긴 시간격자를 이용할 수 있다. 따라서 단기간에 걸쳐 발생하는 물리나 생지화학 기구는 시간평균되어 사용하는데, 본 모델에 서는 월단위 시계열 자료를 사용하였다.

4. 생태계해석

Ecopath 모형은 Odum (1971)이 제시하고 Ulanowicz (1986) 가 모형에 도입한 생태계해석과 관련하여 생태계이론지수, 순 환지수 및 정보지수를 제공한다. 이를 이용하여 계의 안정도와 성숙도를 평가하고 다른 계와 정량적으로 비교가 가능하다. 생 태계 이론지수에는 총통과흐름, 총소비량, 총이출량, 총호흡량, 총유기쇄설물흐름량, 총순일차생산량, 순시스템생산량, 총생체 량, PP/TR, PP/B, B/TST, 연결지수, 잡식지수를 포함한다. 총시 스템통과량(Total System Throughput)은 계에서 발생한 모든 영양흐름 즉 계를 구성하는 모든 그룹을 통과하는 흐름 즉, 총 소비량, 총이출량, 총호흡량, 총유기쇄설물전환량을 포함하며, 계의 크기를 지시하며 네트워크 비교에 매우 중요한 변수이다. 총일차생산량/총호흡량(PP/TR)은 계의 성숙도를 지시하고, 일 차생산자에 의해 고정된 에너지와 계를 유지하는 데 사용되는 에너지가 평형을 이룰 때 1에 접근하고 이때 성숙된 계라 평가 할 수 있다. 계가 발전하는 초기단계 생산량은 호흡량보다 크지 만 오염된 계에서 생산량은 호흡량보다 작다고 판단할 수 있다 (Christensen and Pauly, 1992). 총일차생산량/총생체량(PP/B) 은 성숙도를 지시하며, 미성숙계에서 생산량은 호흡량보다 많 기 때문에 PP/B는 크지만, 시간이 경과하면 생체량이 증가함에 따라 생산량은 감소하고 호흡량은 증가하기 때문에 PP/B는 감 소한다. 총생체량/총시스템통과량(B/TST)의 경우, 총생체량은 최대로 성숙한 계에서 최댓값에 도달할 수 있다고 가정할 수 있기 때문에 B/TST는 성숙계에서 증가한다고 할 수 있다.

결 과

조사해역 생태계의 먹이망 구조는 Fig. 3에 도시하였다. 그림 좌측에 영양단계를 표시하였으며, 일차생산자에서 최상위 포식 자에 이르기까지 1.0에서 3.8의 범위를 보인다. 기능군은 박스 로 표시되었고 박스의 크기는 생체량, 박스를 연결하는 선의 방 향과 두께는 박스를 통과하는 영양물질의 이동경로와 상대적 양을 지시한다.

영양물질 흐름은 린드만척추(Lindeman spines; Ulanowicz, 1995) 그림으로 표시할 수 있으며, 일차생산자와 유기쇄설물 기원의 영양흐름을 분리하여 제시할 수 있다. Fig. 4의 상단 영 양단계 II 박스에서 좌측 882.8은 포식량, 상단 0.000은 이출 과 어획량, 우측 8.128은 피식량, 하단 683.0은 유기쇄설물 전 환량 그리고 989.2는 호흡량을 지시하며 단위는 t km⁻² y⁻¹이 다. 위 4가지 항목의 합을 영양단계 II의 총통과량(Total System Throughput)이라 한다. 한편, 박스 내 우측 상단 30.79% 는 계 전체 TST에 대한 박스의 분율을 지시한다. 박스 내 하단 36.44 t km⁻²은 생체량 그리고 박스 우측의 0.00484는 전환효 율(Transfer Efficiency, =(이출+피식)/통과량)을 지시한다.

일차생산자와 유기쇄설물 기원의 영양물질은 각기 0.4에서



Fig. 3. Flow diagram showing trophic flows between functional groups in the Nakdong River estuary ecosystem (left-trophic level, box-functional group, line-trophic pathway between functional groups).

1.5 그리고 0.6에서 1.8로 단계별 전환효율을 보였다(Table 4). 두 가지의 평균은 0.5~1.7의 범위를 보였다. 유기쇄설물 기원 의 총흐름분율은 47%이며 영양단계 II에서 IV를 평균하면, 일 차생산자와 유기쇄설물 기원 영양물질은 각기 2.2와 3.0%, 전 체 2.6%를 보였다.

영양단계 I에서 소비량 1,680과 이출 988은 합하여 2,668 t km⁻² y⁻¹이며, 총통과흐름 TST의 0.71에 해당한다(Table 5). 이는 일차생산자가 일차소비자에 의해 소비되어 영양물질 전환 이 양호하게 발생하고 있음을 지시한다. 그러나, 영양단계 II에 서 III으로 전환되는 효율은 급격히 감소함을 알수 있다.

영양단계 II의 전환효율 TE는 일반적으로 10~20% (Barnes and Hughes, 2009) 범위를 보이며, 상위단계로 갈수록 감소하 는 추세를 보인다. 본 연구의 결과 Table 5를 보면 위에 비해 상 당히 낮은 것으로 산정되었고, Daya Bay (Chen *et al.*, 2015)와 Black sea (Akoglu *et al.*, 2014)에서 유사한 사례로 보고된 바 있다. 이는 하위 영양단계의 에너지가 상위단계로 전환되지 않 는 대신 이출 혹은 유기쇄설물로 전환된 것으로 해석할 수 있 으며, 상위 영양단계 생물 포식압이 충분치 않거나, 오염원 유 입으로 인한 영양염 과잉공급으로 인해 일차생산이 증가하고 먹이망을 따라 일차소비가 증가하였으나, 상위단계에서는 여

Table 4. Transfer efficiency of the Nakdong River estuary ecosystem

Source\TL	II	III	IV	V			
Producer	0.375	5.680	4.868	1.493			
Detritus	0.604	9.014	4.724	1.775			
All flows	0.484	7.657	4.767	1.688			
Prop. of total flow from detritus: 0.47							
TE (cal. as geometric mean for TL II-IV)							
From primary producers: 2.180%							
From detritus: 2.952%							
Total: 2.604%							



Fig. 4. A Lindeman spine of the Nakdong River estuary ecosystem (P-primary producer, D-detritus).

TL\Flow	Import	Consumption by predators	Export	Flow to detritus	Respiration	Throughput
VI		0.000004	0	0.000119	0.000378	0.000501
V		0.000501	0	0.00724	0.0219	0.0297
IV		0.0297	0	0.166	0.427	0.622
III		0.622	0	2.97	4.536	8.128
II		8.128	0	683	989.2	1680
Ι	0	1680	988.3	1100	0	3768
Sum	0	1689	988.3	1786	994.2	5457

Table 5. Transfer efficiency of the Nakdong River estuary ecosystem



Fig. 5. Biomass change due to opening of the Nakdong River estuary barrage (B (E/S), B - biomass, S - start, E-end).



Fig. 6. Comparison of relative biomass due to the opening of the Nakdong River estuary barrage ($rel_Bt = (B_t - B_0)/B_0$).

분의 영양물질이 사용되지 않아 폐기되었음을 의미한다. 강 하 구와 연안역 등 오염이 심한 계에서 영양물질 전환효율이 낮게 나타남에 따라 주의가 필요하다.

모의시점과 종점에서 해수역, 기수역, 담수역 3개 구간의 값 을 평균한 결과를 비교한 상대생체량을 Fig. 5에 제시하였다. 상대값이 1보다 크면 증가, 작으면 감소를 의미하며, 1이면 변 화가 없음을 지시한다. 담수어종인 하천어류와 빈모류는 담수 역에서 약 9 이상으로 크게 나타났고, 기수역에서는 0에 가까우 며 해수역에서는 0으로 재현되어 담수어종의 모의가 적절히 재 현된 것으로 나타났다. 해수역에서 담수종을 제외한 대부분 기 능군의 상대 생체량은 1보다 약간 크고, 이는 생체량이 소량 증 가한 것으로 나타났다. 기수역에서 어식성어류와 저서성어류의 상대생체량은 1에 근접한 반면, 나머지 기능군은 모두 감소하 여 1보다 작게 나타났다. 특히, 담수역에서 담수종인 하천어류 와 빈모류를 제외한 해수종과 기수종 기능군은 대부분 출현하 지 않아 모델 결과는 모의조건에서 기대된 바를 충분히 재현한 것으로 판단되었다.

모의기간 동안 기능군의 상대 생체량 변동을 Fig. 6에 제시하 였다. 담수역에서는 담수어종인 하천어류와 빈모류가 크게 증 가하고 시간 경과에 따라 수렴하는 양상을 보였다. 반면, 기수



Fig. 7. Mixed Trophic Impact analysis of the Nakdong River estuary ecosystem.

역에서 대부분 기능군은 감소하는 추세를 보였고, 해수역에서 는 플랑크톤식 어류가 모의 초기에 급격히 증가하고 시간 경과 에 따라 수렴하는 양상을 보이고, 다모류와 이매패류 또한 초기 에 다소 증가하는 양상을 보였다.

고 찰

영양상호영향(Mixed Trophic Impact)은 특정 기능군의 생 체량을 조금 증가시켰을 때 다른 기능군이 받는 영향을 -1에 서 1의 범위로 정량화한 값으로 음의 값은 하향조절, 양의 값은 상향조절 영향을 갖는 것으로 해석한다. 어식성어류는 피식 그 룹인 저서성어류에게는 직접적인 음의 효과를 미치는 한편, 무 척추 저서동물에게는 간접적인 양의 효과를 보였다(Fig. 7). 플 랑크톤식 어류는 대부분 기능군에게 양의 효과를 미치며, 저서 성어류와 반대되는 효과를 보였다. 플랑크톤식 어류는 저서성 어류의 주요 피식자 중 하나로, 만일 플랑크톤식 어류가 증가 하면, 다른 피식자가 갖는 피식압이 감소하게 되고, 결과적으로 양의 효과를 갖게 된다. 하천 어류는 담수역에서 주요한 생물이 나 전체 계에서 차지하는 양은 미약하고, 먹이식성이 단순하게 적용된 까닭에 다른 기능군에 미치는 영향이 거의 없는 것으로 Table 6. Ecological Network Analysis of the Nakdong River estuary

Parameters	Unit	Values	
Sum of all consumption	$t \text{ km}^{-2} \text{ y}^{-1}$	1689	31.6%
Sum of all exports	$t \text{ km}^{-2} \text{ y}^{-1}$	988	18.1%
Sum of all respiratory flows	t km ⁻² y ⁻¹	994	18.2%
Sum of all flows into detritus	$t \text{ km}^{-2} \text{ y}^{-1}$	1785	32.7%
Total system throughput	$t \text{ km}^{-2} \text{ y}^{-1}$	5457	
Sum of all production	$t \text{ km}^{-2} \text{ y}^{-1}$	2339	
Mean trophic level of the catch			
Gross efficiency (catch/net p.p.)			
Calculated total NPP	$t \text{ km}^{-2} \text{ y}^{-1}$	1982	
Total primary production/TR		1.994	
Net system production	$t \text{ km}^{-2} \text{ y}^{-1}$	988	
Total primary production/TB		34.9	
Total biomass/total throughput	У	0.010	
Total biomass (exc. detritus)	t km ⁻²	56.7	

나타났고, 담수종 빈모류도 유사하게 해석되었다.

다모류, 극피동물과 소형저서동물은 유사한 영향을 보인 반 면, 대형식물은 이들의 유기쇄설물 형태를 소비하는 극피동물, 빈모류, 이매패류, 소형저서동물에게 미약하게 양의 효과를 보 였다. 섬진강 하구의 경우, 동위원소분석을 통해 갈대와 잘피의



Fig. 8. Distribution of functional groups along the Nakdong River estuary after the barrage was opened.

유기쇄설물이 인근 해역의 저서동물에게 먹이원으로 공급됨을 제시한 바 있다(Kim et al., 2020b). 본 조사해역에는 대규모의 대형식물 군락지가 존재하며 하구로 상당한 양의 유기물을 제 공하는 것으로 판단되고, 이들이 저서생물에 미치는 영향에 주 의가 필요하다. 하굿둑 개방으로 식생에 미치는 영향은 먹이망 을 통해 상부 영양단계 생물에게도 파급될 것으로 파악된다.

조사해역에서 총통과량 TST는 5457 t km⁻² y⁻¹이며 섭식 31.6%, 이출 18.1%, 호흡 18.2%, 유기쇄설물전환 32.7%의 분 율을 보여 이출과 유기쇄설물 전환량이 전체의 49.7%를 차지 하는 것으로 나타났다(Table 6). 총일차생산량/총호흡량 TPP/ TR은 1에 접근할수록 성숙계를 의미하나 조사해역은 1.99로 미성숙계임을 지시한다. 총일차생산량/총생체량 TPP/TB는 작 을수록 성숙계를 의미하나 조사해역은 34.9로서 높아 미성숙계 임을 지시한다. 총생체량/총시스템통과량 TB/TST는 성숙계에 서 증가양상을 보이나 조사해역은 0.010으로서 미성숙계임을 지시한다. 몇 가지 생태계속성으로 보아 연구해역은 충분히 성 숙하지 못한 계인 것으로 해석되고 따라서 외부교란에 취약한 것으로 판단되었다.

10년 모의기간 이후 계산된 기능군의 상대 생체량 분포를 Fig. 8에 제시하였다. 담수종인 하천어류와 빈모류는 하굿둑 상 단 북측에 높은 값으로 재현되었고, 기수와 해수종 대부분 기능 군은 담수역에서 거의 서식하지 않는 것으로 모의되었다. 어류 와 저서동물은 해수역에서 높은 값을 보이고, 기수역에서 다소 낮게 재현되어 모의조건에 따라 기대되는 양상을 적절히 재현 한 것으로 판단되었다. 일반적으로 기수에서 우점하거나 특히, 조사해역에서 관심받는 재첩이나 장어 등의 기수역 생물에 대 해 서식분포와 염분에 따른 생리 등 기초자료의 부재로 본 연 구에서 충분히 다루지 못한 만큼 모델 결과 해석에 주의가 필 요하고, 향후 심화연구가 요망된다.

결 론

영양흐름 먹이망모델과 생태계네트워크 해석 결과 낙동강하

구 생태계는 다음과 같은 특성을 갖는 것으로 파악되었다: - 1) 생태계이론지수와 순환지수를 근거로 조사해역의 생태계는 충 분히 성장하지 않아 외부교란에 취약한 것으로 판단되었다. 2) 영양물질의 전환계수가 매우 작은 것으로 보아 상위영양단계 생물의 현존량이 낮아 포식압이 작거나 혹은 과잉 공급된 영양 염과 유기쇄설물이 비록 먹이망의 하부 영양단계로 유입되나 먹이망의 피식-포식 경로를 통해 상부로 전환되지 못하고, 저면 혹은 경계 바깥으로 이출되는 것으로 판단되며, 이는 오염된 해 역의 일반적 특성이기도 하다. 3) 갈대나 잘피와 같은 대형저서 식물은 유기쇄설물 형태로 저서동물에게 먹이를 공급할 수 있 는 것으로 보이며, 하굿둑 개방이 대형식물 군락지에 미치는 영 향은 먹이망을 통해 상부 영양단계 생물에게 파급될 수 있을 것으로 파악되었다. 4) 금번 연구는 기초자료와 염분 반응 관계 자료에서 제한된 범위의 신뢰도에 근거하는 시범모의의 목적 을 갖는 만큼, 비록 하굿둑 개방 시 담수역, 기수역, 해수역에서 비교적 안정된 분포를 재현하였으나, 모델 결과 해석에 주의가 필요하며, 향후 모델개선을 위해 재첩이나 장어 등의 관심어종 을 포함하는 심화연구가 요망된다. 본 연구에서 구축된 시범모 델은 하구 생태계 먹이망 해석과 향후 하굿둑 개방에 따른 영

요 약

것으로 기대된다.

낙동강 하굿둑 생태계 먹이망의 구조와 기능을 파악하고 향 후 둑 개방 시 발생할 생태계 영향을 예측하기 위해 두 가지 먹 이망모델을 조사해역에 적용하였으며 결과는 다음과 같다. 첫 째, 조사해역의 먹이망을 14개 기능군으로 분류하여 Ecopath 모델을 구축하였으며, 질량평형과 생태계네트워크 해석을 통 해, 총에너지흐름 5,457 t km⁻² y⁻¹ (소비량 32%, 이출량 18%, 호흡량 18%, 유기쇄설물이동량 33%), 에너지전환효율 2.6% (TL II-IV 기하평균), 식물플랑크톤 기원 에너지 공급 53%, Primary Production/Total Respiration 2.0, PP/Biomass 34.9 y⁻¹, B/Total System Throughput 0.010 y⁻¹을 파악할 수 있었다. 둘째, ecospace 모델을 하굿둑 개방 이후 10년 기간 하굿둑의 담수역, 기수역, 해수역 공간에서 기능군의 생체량 변동을 모의 한 결과, 담수어종인 하천어류와 빈모류는 담수구간에서 크게 증가하였고 해수역에서 현존량은 현재 하굿둑 남측 해역의 특 성을 대부분 재현하는 것으로 나타났다.

향을 예측하고 관리하는 데 유용한 기초자료를 제공할 수 있을

참고 문헌

Akoglu, E., B. Salihoglu, S. Libralato, T. Oguz and C. Solidoro, 2014.

An indicator-based evaluation of Black Sea food web dynamics during 1960-2000. *Journal of Marine Systems*, 134, 113-125.

- An, S., C.K. Kang, I.K. Jung, G.S. Lee and D.S. Lee, 2007. Restoration and management for degraded wetland ecosystem in Nak-Dong estuary. Ministry of Environment, Rep. No. GOVP1200728860.
- Aydin, K., S. Gaichas, I. Ortiz, D. Kinzey and N. Friday, 2007. A comparison of the Bering Sea, Gulf of Alaska, and Aleutian Islands large marine ecosystems through food web modeling. U.S. Dep. Commer., NOAA Tech. Memo. NMFS-AFSC-178, 298pp.
- Barnes, R.S.K. and R. Hughes, 2009. An Introduction to Marine Ecology, Third Edition.
- Burt, N. and A. Rees, 2001. Guidelines for the assessment and planning of estuarine barrages. Thomas Telford Publishing, 483pp.
- Chang, N.K. and H.K. Kang, 1984. Productive Structure and Energy Storage of *Phragmites longivalvis* Community in the Delta of Nak Dong River. J. Korean Grassl. Sci., 4(3), 220-225.
- Chang, N.-K. and K.-H. Oh, 1995. The Removal Rate of the Constituents of the Litters in the Aquatic Plant Ecosystems I. *Phragmites longivalvis* Grasslands in a Delta of the Nakdong River. *Kor. Turfgrass Sci.*, 9(4), 331-342.
- Chen, Z., S. Xu and Y. Qiu, 2015. Using a food-web model to assess the trophic structure and energy flows in Daya Bay, China. Continental Shelf Research, 111, 316-326.
- Chin, B.S., S. Han, T.H. Kim and G.S. Park, 2021. Species Composition and Seasonal Variation of Larval Fishes in Nakdong River Estuary. J. Fisheries Mar. Sci. Edu., 33(1), 168-180.
- Choi, H.C., I.-S. Han, Y.S. Suh and S.-H. Huh, 2015. Feeding Habits of Larval Konosirus punctatus from the Nakdong River Estuary, Korea. Korean J. Fish. Aquat. Sci., 48(5), 752-759.
- Christian, R.R. and J.J. Luczkovich, 1999. Organizing and understanding a winter's seagrass foodweb network through effective trophic levels. *Eco. Mod.*, 117, 99-124.
- Christensen, V. and C. Walters, 2004. Ecopath with Ecosim: methods, capabilities and limitations. *Ecol. Modell.*, 72, 109-139.
- Christensen, V. and D. Pauly, 1992. Ecopath II-a software for balancing steady-state ecosystem models and calculating network characteristics. *Ecol. Modell.*, 61(3-4), 169-185.
- Environment and Labor Committee, 2020. 21st National Assembly Environment and Labor Committee Policy Issues I-Ministry of Environment and Korea Meteorological Administration, 311pp.
- Eom, J. and C. Lee, 2017. Analysis on the Area of Deltaic Barrier Island and Suspended Sediments Concentration in Nakdong River Using Satellite Images. *Korean Journal of Remote Sensing*, 33(2), 201-211.
- Eun, C.Y. and J.S. Lee, 2008. Chracteristics of Seasonal Variation to Sedimentary Environment at the Estuary area of the Nakdong. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 20(4), 372-389.
- Friedl, G. and A. Wüest, 2002. Disrupting biogeochemical cycles- consequences of damming. *Aquatic Sciences*, 64(1), 55-65.
- Harvey, C.J., K.K. Bartz, J. Davies, T.B. Francis, T.P. Good, A.D. Guerry, B. Hanson, K.K. Holsman, J. Miller, M.L. Plummer, J.C.P.

Reum, L.D. Rhodes, C.A. Rice, J.F. Samhouri, G.D. Williams, N. Yoder, P.S. Levin and M.H. Ruckelshaus, 2010. A mass-balance model for evaluating food web structure and community scale indicators in the central basin of Puget Sound. U.S. Dept. Commer., NOAA Tech. Memo. NMFS-NWFSC-106, 180pp.

- Hatanaka, M., M. Kosaka, Y. Sato, K. Yamaki and K. Fukui, 1954. Iiter-specific relations concerning the predaciolts habits among the benthic fish. *Tohoku Journal of Agricultural Research*, 5(3), 177-189.
- Hoang, T., D. Nguyen, J. Lee, K. Han and T. Lee, 2021. Development of Nakdong River Estuary Ecosystem Model Using AQUATOX Model. J. Korean Soc. Environ. Eng., 43(1), 51-65.
- Hong, S.-B., 2009. Regional Characteristics of Bini in Nakdong Estuary. Korean J. Ornithol., 16(1), 11-27.
- Huh, S.-H., K.-M. Nam, J.-M. Park, J.-M. Jeong and G.-W. Baeck, 2012. Feeding Habits of the Marbled Flounder, *Peluronectes yokohamae* in the Coastal Waters off Tongyeong, Korea. J. Korean Fish. Soc., 24(2), 77-83.
- Jang, S. and K.-C. Kim, 2006. Change of Oceanographic Environment in the Nakdong Estuary. *The Sea*, 11(1), 11-20.
- Jang, S.H., C.I. Zhang, J.H. Na, S.W. Kim, K.G. An, J.J. Lee and J.H. Lee, 2008a. Comparison of Trophic Structures and Energy Flows using the Ecopath Model in the Lake Namyang and the Lower Reaches of the Nakdong River. *Korean. J. Limnol.*, 41(2), 144-154.
- 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.
- Jung, J.M., H.J. Kim, G.W. Baeck, S.J. Ye and S.H. Huh, 2015. Feeding habits of ocellate spot skate, *Okamejei kenojei* in the coastal waters of Gadoek-do, Korea. *J. Korean Soc. Fish. Technol.*, 51(2), 261-271.
- Kang, H.K. and N.K. Chang, 1985. Annual net production and the stability of the pure *Phragmites communis* grassland in the lower course of Nakdong River. J. Korean Grassl. Sci., 5(1), 8-12.
- Kang, J.-H. and M. Kim, 2020. Distributional characteristics of mesozooplankton community in Nakdong river estuary. *Journal of Korea Acadeia-Industrial cooperation Society*, 21(7), 1-11.
- Kang, K.H., J. Kim, H. Jeon, K. Kim and I. Byun, 2020. Assessment of Nakdong River Basin Management: Target Water Quality Achievement and Future Challenges. J. Korean Soc. Hazard Mitig., 20(2), 251-263.
- Kim, B.-S., U. Yeo, D. Oh and K. Sung, 2016b. Selection of Bird Species for the Nakdong River Estuary Management. J. Environ. Sci. Int., 25(5), 615-623.
- Kim, C., H.Y. Kang, Y.-J. Lee, S.-G. Yun and C.-K. Kang, 2020b. Isotopic Variation of Macroinvertebrates and Their Sources of Organic Matter Along an Estuarine Gradient. *Estuaries and Coasts*, 43, 496-511.
- Kim, D., H. Park and S. Park, 2016a. The Investigation of Sea Water Intrusion Length on Opening of Nakdong River Estuary Barrage Using Numerical Simulation Model. J. Korean Soc. Hazard

Mitig., 16(5), 299-309.

- Kim, H.G., F. Recknagel, H.-W. Kim and G.-J. Joo, 2021. Implications of flow regulation for habitat conditions and phytoplankton populations of the Nakdong River, South Korea. *Water Research*, 207, 117807.
- Kim, H.G., S. Hong, D.-K. Kim and G.-J. Joo, 2020a. Drivers shaping episodic and gradual changes in phytoplankton community succession: Taxonomic versus functional groups. *Science of The Total Environment*, 734. 138940.
- Kim, H.J., J.M. Jeong, J.H. Park and G.W. Baeck, 2017b. Feeding Habits of Larval Japanese Anchovy *Engraulis japonicus* in Eastern Jinhae Bay, Korea. *Korean J. Aquat. Sci.*, 50(1), 92-97.
- Kim, J.-H., E.J. Kang, K. Kim, H.J. Jeong, K. Lee, M.S. Edwards, M.G. Park, B.-G. Lee and K.Y. Kim, 2015a. Evaluation of carbon flux in vegetative bay based on ecosystem production and CO₂ exchange driven by coastal autotrophs. *Algae*, 30(2), 121-137.
- Kim, S. and S. An, 2021. Enhanced Primary Production in Response to Freshwater Inflow in the Nakdong River Estuary: Characteristics of land-Ocean Coupling (LOC). J. Korean Soc. Oceanogr., 26(2), 96-109.
- Kim, S. and S.H. Youn, 2019. Effect of Freshwater Discharge on the Nakdong River Estuary: Mooring Observations of Water Temperature and Salinity. J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf., 25(1), 89-95.
- Kim, S.K., D.-G. Hong, M. Kang, K.-L. Lee, L. Hak, Y. Lee, G.-J. Joo and J.-Y. Choi, 2015b. Zooplankton Community Dynamic in Lentic Freshwater Ecosystems in the Nakdong River Basin. *Korean J. Environ. Ecol.*, 29(3), 410-420.
- Kim, S.Y. and J.S. Ha, 2001. Sedimentary facies and environmental changes of the Nakdong River Estuary and adjacent coastal area. J. Korean Fish. Soc., 34(3), 268-278.
- Kim, Y.-W., J.-H. Lee, T.-J. Park and I.-G. Byun, 2017a. Variation of Water Environment and Algae Occurrence Characteristics After Weirs Construction at Mulgeum Site in Downstream of the Nakdong River. J. Korean Soc. Hazard Mitig., 17, 383-392.
- Kwak, S.M. and S.-H. Huh, 2003. Changes in species composition of fishes in the Nakdong River Estuary. J. Korean Fish. Soc., 26(2), 129-135.
- Lee, D.-I. and C.K. Park, 2002. The modeling of winter water quality in the estuary of the Nakdong river. J. Korean Soc. Water Environ., 18(5), 449-460.
- Lee, J.H., J.B. Lee, J.N. Kim, D.W. Lee, Y.J. Shin and D.S. Chang, 2009. Seasonal Species Composition of Marine Organism Collected by a Shrimp Beam Trawl in Nakdong River Estuary, Korea. J. Korean Fish. Soc., 21(3), 177-190.
- Lee, J.H., J.B. Lee, Y.M. Choi, I.J. Yeon and and D.W. Lee, 2012. Study on Comparison of Fishes by Trawl Fishery in Nakdong River Estuary, Korea. *Korean J. Ichthyol.*, 24(2), 84-93.
- Lee, J.S. and C.Y. Eun, 2003. A Study on the 3-Dimensional Mixing Behaviours of Nakdong River Plume. J. Korean Soc. Civil Eng., 23(4B), 347-358.
- Lee, T., T. Hoang, D. Nguyen and K. Han, 2021. Simulating the Gross Primary Production and Ecosystem Respiration of Estuarine

Ecosystem in Nakdong Estuary with AQUATOX. J. Korean Geo-Environmental Soc., 22(3), 15-29.

- Ministry of Environment (MOE), 2015. A study for the restoration ecosystem of Nakdong River Estuary. Pusan National University.
- Odum, E.P., 1971. Fundamentals of Ecology, W.B. Saunders Co, Philadelphia.
- Park, J., R. Riedel, H.H. Ju and H.C. Choi, 2020. Fish Assemblage Structure Comparison between Freshwater and Estuarine Habitats in the Lower Nakdong River, South Korea. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(7), 496.
- Park, J.M., S.H. Huh, J.M. Jeong and G.W. Baeck, 2013. Diet composition and feeding strategy of yellow goosefish, *Lophius litulon* (Jordan, 1902), on the southeastern coast of Korea. J. Appl. Ichthyol., 30 (2014), 151-155.
- Park, S., J. Lee, J.U. Choi, N. Heo and S. An, 2016. Study on the longterm changes in water quality and benthic ecology and evaluation on effect of the barrage in Nakdong River Estuary. *Journal* of Wetlands Research, 18(1), 58-67.
- Robertson, A.I., 1979. The Relationship Between Annual Production: Biomass Ratios and Lifespans for Marine Macrobenthos. *Oeco-logia* (Berl.), 38, 193-202.
- Ryu, S., K. Kim and I. Lee, 2016. Environmetal Characteristics of Reed Habitat in Nakdong Estuary Saltmarsh. J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf., 22(2), 187-194.
- Shim, K., H.C. Jung, D. Hwang and D. Kim, 2023. Estimating Nakdong Estuary Barrage outflow using upstream hydrograph. J. Korea Water Resour. Assoc., 56(3), 165-171.
- Sin, S.K., 2003. Understanding and programming the management of coastal water quality in Busan. Busan Development Institute,

Report no. 93 2003-11.

- Sin, S.K., G.H. Baek and S.J. Hong, 2006. Analyzing the salinity impact of the Nakdong River estuary bank construction and improving the operation of the estuary bank. Busan Development Institute, Report no. 17 2006-6.
- Ulanowicz, R.E., 1986. Growth and Development: Ecosystem Phenomenology, Springer Verlag, New York.
- Ulanowicz, R.E., 1995. Ecosystem trophic foundations: Lindeman exonerata. pp. 549-560. In: Patten, B.C. and S.E. Jorgensen (eds.) Complex Ecology: The part-whole relation in ecosystems Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Walters, C., D. Pauly and V. Christensen, 1999. Ecospace: prediction of mesoscale spatial patterns in trophic relationships of exploited ecosystems, with emphasis on the impacts of marine protected areas. *Ecosystems* 2, 539-554.
- Walters, C., V. Christensen and D. Pauly, 1997. Structuring dynamic models of exploited ecosystems from trophic mass-balance assessments. *Rev. Fish Biol. Fish.*, 7, 139-172.
- Williams, J.R., T.M. Dellapenna and G.H. Lee, 2013. Shifts in depositional environments as a natural response to anthropogenic alterations Nakdong Estuary, South Korea. *Marine Geology*, 343, 47-61.
- Yoon, H.S., S. Park, I.C. Lee and H.T. Kim, 2008, Spatiotemporal Variations of Seawater Quality due to the Inflow of Discharge from Nakdong River Barrage. J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, 11 (2), 78-85.
- Youn, S.-H., G.-S. Oh and M.-H. Chung, 2010. Zooplankton community structure and copepod production in the Seomjin river estuary. J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf., 16(4), 369-379.