

駕莫灣에서의 基礎生産力 향상방안에 관한 生態系모델링

이 대 인 · 조 은 일 · 박 청 길
부경대학교 환경공학과 · 제주대학교 환경공학과
(1998년 11월 9일 접수)

The ecosystem modelling for enhancement of primary productivity in Kamak Bay

Dae-In Lee, Eun-Il Cho*, and Chung-Kil Park

Department of Environmental Engineering, Pukyong National Univ., Pusan 608-737, Korea

*Department of Environmental Engineering, Cheju National Univ., Cheju-do 690-756, Korea

(Manuscript received 9 November, 1998)

From the environmental aspects, primary productivity of phytoplankton plays the most important role in enhancement of marine culture oyster production. This study may be divided into two branches; one is estimation of maximum oyster meat production per unit facility(Carrying Capacity) under the present environmental conditions in Kamak Bay, the other is improvement of carrying capacity from increase of primary productivity by changing the environmental conditions that cause not to form an unfavorable environment such as the formation of oxygen deficient water mass using the eco-hydrodynamic model. By simulation of three-dimensional hydrodynamic model and ecosystem model, the comparison between observed and computed data showed good agreement. The results of sensitivity analysis showed that phytoplankton maximum growth rate was the most important parameter for phytoplankton and dissolved oxygen. The estimation of mean primary productivity of Wonpo, Kamak, Pyongsa, and Kunnae culture grounds in Kamak Bay during culturing period were 3.73gC/m²/d, 2.12gC/m²/d, 1.98gC/m²/d, and 1.26gC/m²/d, respectively. Under condition not to form the oxygen deficient water mass, four times increasing of pollutants loading as much as the present loading from river increased mean primary productivity of whole culture grounds to 4.02gC/m²/d. Sediment N, P fluxes that allowed for 35% increasing from the present conditions increased mean primary productivity of whole culture grounds to 3.65gC/m²/d. Finally, ten times increasing of boundary loadings from the present conditions increased mean primary productivity of whole culture grounds to 3.95gC/m²/d. The maximum oyster meat production per year and that of unit facility in actual oyster culture grounds under the present conditions were 6,929ton and 0.93ton, respectively. This 0.93ton/unit facility is considered to be the carrying capacity in study area, and if the primary productivity is increased by changing the environmental conditions, oyster production can be increased.

Key words : Primary productivity, Carrying capacity, Eco-hydrodynamic model, Oxygen deficient water mass, Oyster production

1. 서 론

우리나라 남해안과 같은 연안해역은 하천수에 의한 영양염 등의 유입으로 기초생산력이 아주 높은 해역이며 지형적인 영향으로 인한 쇄파효과로 양식시설의 설치가 용이하기 때문에 어패류 양식장으로 널리 이용되고 있는데, 진해만과 같은 내만 해역은 육상으로부터 오염부하의 증가로 부영양화가 진행되어 적조가 유발되고 있고, 가막만과 한산·거제만 등 양식장으로 이용되고 있는 청정해역에서도 최근 생산성이 저하되고 수질이 악화되는 현상이 빈발하고 있다. 따라서 이러한 문제를 해결하고

연안양식장의 생산성 향상을 위해서는 양식생물의 먹이가 되는 식물플랑크톤의 기초생산력을 증가시키는 방안에 관한 연구, 즉 환경용량 또는 연안 양식장의 최대생산량을 증가시키는 연구의 필요성이 대두되고 있다.¹⁾

이러한 연구를 위해 최근에는 수질예측을 위한 수치모델이 개발되어 이용되어 왔는데, ²⁾는 물질순환모델을 이용해서 진해만의 빈산소수괴형성을 시뮬레이션하였으며, ³⁾은 생태계모델을 이용해서 진해만의 식물플랑크톤을 예측하고 오염물질 부하량 삭감에 따른 부영양화 억제방안을 제시한 바 있고, ⁴⁾은 생태계모델을 이

용한 황해의 환경용량을 산정하였다. 가막만에서 환경용량을 산정하기 위해서 Cho⁵⁾는 생태계모델을 이용하여 현 환경조건하에서 굴의 먹이원으로 고려된 식물플랑크톤의 양, 즉 기초생산력을 구하고 이를 토대로 해서 알굴의 최대생산량을 산정하여 실제 생산된 알굴량과 정량적으로 비교 평가한 바 있다. 그러나 어장생산력을 증진시키기 위해서는 어떤 환경조건을 어떻게 변화시켜야 하는지를 예측하는 접근법은 시도되지 않았다.

가막만의 현 환경조건하에서 굴 생산은 해마다 감소추세를 보이고 있고, 또한 굴 생산이 시설대수와 수하연 등 양식시설문제에도 관계 있지만, 이러한 인위적인 요인을 증가시켜도 굴 생산량이 불규칙한 양상을 유지하는 등 외부환경요인이 굴 생산력에 큰 비중을 차지하는 것으로 알려지고 있다.⁶⁾ 따라서 본 연구에서는 환경적인 관점에서 고찰해 볼 때, 양식장의 굴 생산력 향상은 기초생산력 증가와 직결되고, 그러면 이러한 기초생산력을 향상시키기 위한 방안으로 생태계모델을 이용해서 어떤 환경조건을 어느 정도 변화시키면 굴양식장내의 환경용량을 따르면서 적절한 생산력 증가를 보일 것인가를 시뮬레이션하였다. 또한 각 양식장지역별로 환경변화에 따른 기초생산력의 변동을 파악함으로써 생산력증가에 어느 양식장을 더욱 더 효율적으로 관리하면 효과적인 생산력 향상방안에 기여할 수 있는가를 파악하였다. 연구의 첫 번째 단계로 생태-유체역학 모델을 이용해서 현 환경조건하에서의

기초생산력에 의한 양식기간동안 각 양식장에서의 식물플랑크톤의 생산량을 산정하고, 두 번째 단계로 기초생산력을 증가시키기 위한 수단으로 여러 환경인자들을 조절해가며 수질변동을 예측하였다. 대상해역으로 유입하는 부하변동이 저층 빈산소수괴 형성의 기준인 용존산소 3.57mg/l 이하^{7,8)}를 유발하지 않는 한계까지 기초생산력을 어느 정도 증가시키는가를 정량적으로 평가하였다. 마지막으로 현 환경조건하에서의 가막만의 기초생산력과 용존산소에 주체를 둔 오염물질의 최대수용량을 예측해서 산정한 기초생산력에 해당되는 최대알굴생산가능량을 전환식을 통해 구해서 시설대수별로 잠정적으로 비교해봄으로써 적절한 어장관리방안과 생산성향상을 위해서 어떤 환경인자가 중요하며, 어떠한 대책이 잠재적인 대안이 될 수 있는지를 평가하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 대상해역

한국 남해안에 위치한 가막만은 여수반도 남단과 돌산도에 둘러싸여 있으며 남북방향 길이가 약 15km, 동서방향이 약 9km, 평균수심이 약 9m인 타원형의 천해로서 각종 어패류를 양식하고 있다. 가막만의 전체 표면적은 134km²이고 그리고 1994년 가막만에서의 전체 굴 양식장 면적은 12.463km²이며 본 연구에서 대상으로 하는 가막만 내의 굴 양식장 총면적은 약 9.19km²이다.

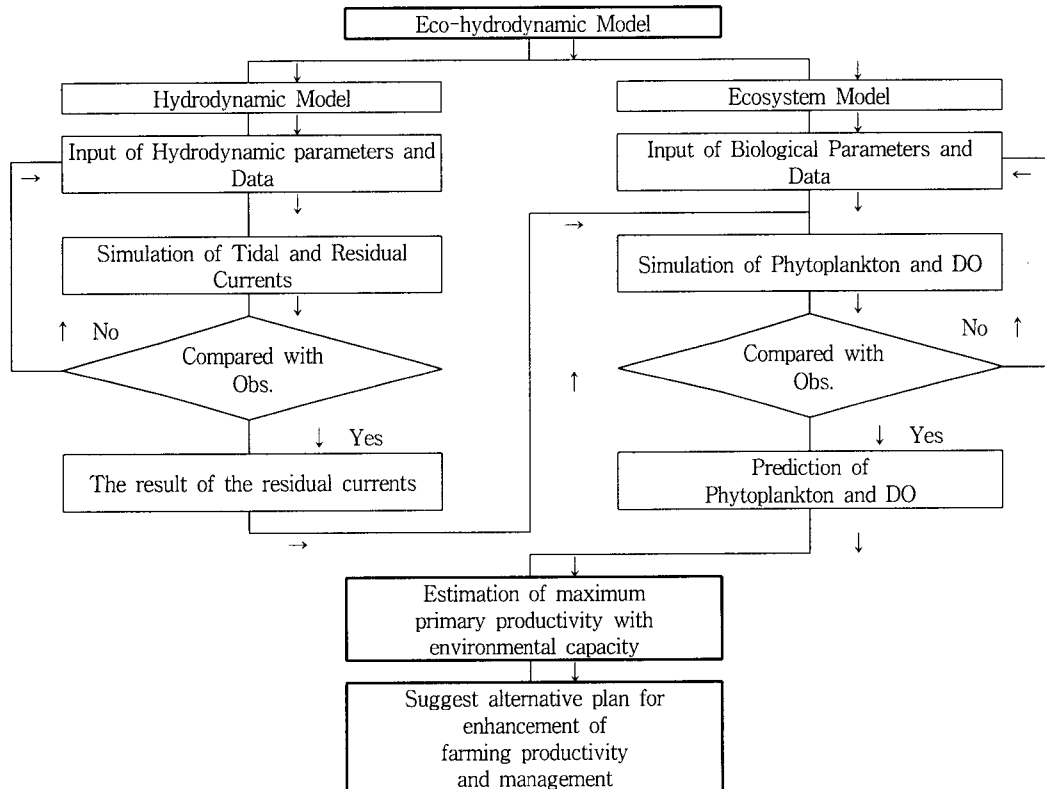


Fig. 1. The schematic diagram of an Eco-hydrodynamic model.

2.2. 현황조사 및 분석

가막만의 수질과 저질 현황조사는 1994년 5월부터 1995년 3월까지 총 8회에 걸쳐서 총별로 채수하였고, 분석은 수온, 염분, pH, 투명도, 총부유물질, 화학적산소요구량, 용존산소, Chl.a, 영양염류, 입자성유기탄소, 용존성유기탄소, 및 저질산소요구량을 수질오염공정시험방법과 Standard method에 의하여 분석했다.

2.3. 생태-유체역학 모델

생태-유체역학 모델(Eco-hydrodynamic model)은 해수유동 시뮬레이션을 위한 다층모델(Multi-level model: COSMOS)과 수질 시뮬레이션을 위한 생태계모델(Eco-system model: EUTRP 2)로 구성되어 있다. Fig. 1과 같이 해수유동 시뮬레이션을 이용하여 조석류와 잔차류를 파악하고 잔차류성분을 생태계모델의 유동장으로 입력하여 수질예측 시뮬레이션을 할 수 있다.

2.3.1 해수유동 시뮬레이션

해수유동모델의 영역은 Fig. 2에 나타내었고 입력자료는 Table 1에 나타내었다. 가막만내에서 북쪽 협수도와 남쪽 만구의 백야도와 송도를 잇는 선을 개경계로 해서 x방향으로 58개, y방향으로 73개, z방향으로는 3층(Level 1: 해면~3m, Level 2: 3m~6m, Level 3: 6m이하)으로 격자망을 구성하고, 하나의 격자크기는 x, y방향으로 각각 250m로 하였다. 모델 영역내의 해수유동을 시뮬레이션하기 위해서 가막만의 탁월분조인 M2분조를 이용하고 조위와 위상의 경계치는 Cho⁵⁾의 자료를 이용했다. 육상의 하천을 통하여 모델영역내로 들어오는 담수유량과 수온, 염소량 등 다른 입력자료는 실측치와 麗水水産大學 水産科學研究所⁹⁾의 자료를 참조하여 적용하였다.

시뮬레이션 방법은 3차원 해수유동모델을 이용하여 대상해역의 조석류가 정상상태에 도달한 마지막 한 주기의 조석류를 조석주기로 평균해서 잔차류를 시뮬레이션 하였다. 그리고 시뮬레이션된 조석류에 대해서는 조류타원도를 이용하여 실측된 유향과 유속을 비교하여 유동모델을 검증하였다.

2.3.2 생태계 시뮬레이션

본 연구에 이용된 생태계모델은 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, 입자성유기탄소, 용존성유기탄소, 인산인, 용존성 무기질소, 용존산소 및 화학적산소요구량을 구성요소로 이루어졌다. 또한 저생생물이나 퇴적물 등으로 이루어진 해저계도 환경인자로서 취급하여 모델의 변수로 정의되어 있다. 생태계모델의 모델영역은 해수유동모델에 사용된 모델 격자망과 동일하게 적용하였다. Table 2에 나타난 생태계모델에 사용된 초기치와 경계치는 조사한 값을 사용하였고, 대상해역으로 유입되는 하천을 7개로 고려하고 생태계모델의 구성요소에 대한 월별 부하량은 麗水水産大學 水産科學研究所⁹⁾에서 조사한 값을 이용하였다. 확산계수 및 그 밖의 모델에 입력되는 파라메타는 기존의 측정된 자료와 문헌조사⁵⁾를 통하여 선정하였다. 생태계모델은 1994년 5월 자료를 이용하여 보정을 하고 1990년

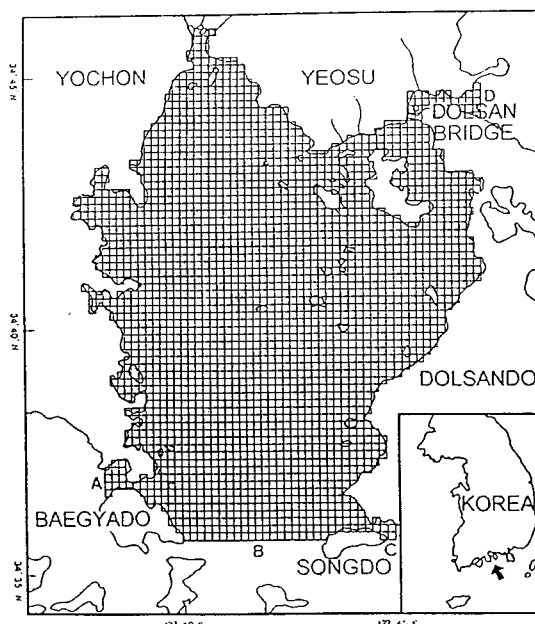


Fig. 2. Finite-difference grid of the three-dimensional model in Kamak Bay.

Table 1. Input data for hydrodynamic model

Parameter	Input value
Mesh size	$\Delta x = \Delta y = 250m$
Total mesh value	$58 \times 73 \times 3 = 12702$
Water depth	chart datum + MSL
Time interval	10sec
Level	1: 0~3m 2: 3~6m 3: below 6m
Tidal level and degree at open boundary	A: 103cm, 266° B: 97cm, 265° C: 101cm, 264° D: 101cm, 254°
Water temp. and chlorinity at open boundary	1: 17.35°C, 18.33‰ 2: 16.97°C, 18.34‰ 3: 16.41°C, 18.32‰
Coriolis coefficient	$f = 2\omega \sin\Phi$
Surface friction coefficient	0.0013
Interlayer friction coefficient	0.0013
Bottom friction coefficient	0.0025
Horizontal viscosity coefficient	$1.0E5 \text{ (cm}^2/\text{s)}$
Horizontal diffusion coefficient	$1.0E5 \text{ (cm}^2/\text{s)}$
Calculation time	20 tidal cycle

5월 자료를 이용하여 검증을 하였다.⁵⁾

2.4. 식물플랑크톤 현존량과 용존산소에 대한 민감도분석
양식생물의 먹이원인 식물플랑크톤 현존량과 중요한 수질인자인 용존산소의 증감에 영향을 미칠 수 있는 인자를 고려하여 사용되는 계수값과 그 값을 $\pm 50\%$ 증감

Table 2. Input data for ecosystem model in May, 1994

Parameter	Input values								
Mesh size	$\Delta x = \Delta y = 250m$								
Water depth	chart datum + MSL								
Time interval	900sec								
Initial condition for compartments									
	Level	DO	COD	DIP	DIN	POC	DOC	PHYTO	ZOO
		(mg/ℓ)		(μg-at/ℓ)		(mg-C/m ³)	
	1	8.40	2.07	0.620	7.000	340.0	3270.0	812.81	35.0
	2	8.20	2.39	0.470	7.000	387.0	3590.0	777.40	35.0
	3	8.10	2.25	1.000	6.000	482.3	3450.0	830.12	35.0
Boundary condition for compartments									
	Level	DO	COD	DIP	DIN	POC	DOC	PHYTO	ZOO
		(mg/ℓ)		(μg-at/ℓ)		(mg-C/m ³)	
A	1	8.65	1.43	0.660	5.210	438.0	2630.0	756.80	35.0
	2	8.55	2.22	0.500	7.860	318.5	3420.0	727.04	35.0
	3	8.55	2.06	0.770	7.360	526.1	3260.0	778.66	35.0
B	1	8.65	1.43	0.660	5.210	438.0	2630.0	756.80	35.0
	2	8.55	2.22	0.500	7.860	318.5	3420.0	727.04	35.0
	3	8.55	2.06	0.770	7.360	526.1	3260.0	778.66	35.0
C	1	8.65	1.43	0.660	5.210	438.0	2630.0	756.80	35.0
	2	8.55	2.22	0.500	7.860	318.5	3420.0	727.04	35.0
	3	8.55	2.06	0.770	7.360	526.1	3260.0	778.66	35.0
D	1	8.20	2.30	1.500	15.00	400.0	3500.0	785.35	35.0
	2	8.10	2.30	1.500	15.00	400.0	3500.0	785.35	35.0
	3	7.95	2.30	1.500	15.00	550.0	3500.0	785.35	35.0
Horizontal viscosity coefficient	1.0 E5 (cm ² /s)								
Horizontal diffusion coefficient	1.0 E5 (cm ² /s)								
Vertical diffusion coefficient	level 1~3 : 1.0(cm ² /s)								
Water Temp. and Sal.	1 : 19.31°C, 33.46‰ 2 : 18.84°C, 33.43‰ 3 : 18.17°C, 33.25‰								
Calculation time	200 tidal cycle								

시켰을 때 식물플랑크톤 현존량과 용존산소 농도에 어느 정도 영향을 미치는가를 파악하고 지배인자를 도출하였다.

2.5 기초생산력 산정

생태계모델에서 기초생산력 산정은 다음과 같은 식을 이용했다.

$$\frac{dP}{dt} = + \{1 - \mu_3(P)\} \cdot V_1(T) \cdot \mu_1(DIP, DIN) \cdot \mu_2(I) \cdot P - V_2(T) \cdot P - V_3(T) \cdot Z - V_4(T) \cdot P - W_p \frac{\partial P}{\partial z} \quad (II-1)$$

여기서, $\mu_3(P)$: 식물플랑크톤 세포의 분열속도
 $V_1(T)$: 식물플랑크톤 성장속도
 $\mu_1(DIP, DIN)$: 식물플랑크톤의 영양염에 의한 비성장속도
 $\mu_2(I)$: 식물플랑크톤 광합성속도(mgC/mgChl.a/day)
 $V_2(T)$: 식물플랑크톤의 호흡속도(day⁻¹)

$V_3(T)$: 동물플랑크톤의 섭식속도(day⁻¹)

$V_4(T)$: 식물플랑크톤의 고사속도(day⁻¹)

$W_p \frac{\partial P}{\partial z}$: 식물플랑크톤의 침강 플럭스

생태계모델에서의 기초생산력(mgC/m³/d)은 월별로 예측한 식물플랑크톤량, 동물플랑크톤량, DIP량 그리고 DIN량과 모델 보정과 검증을 통해 적용된 계수값들을 기초생산력 산정식에 대입하여 월별 기초생산력(mgC/m³/d 또는 gC/m³/d)을 계산하였다.

2.6 기초생산력 증가 시뮬레이션과 환경용량 (Environmental Capacity)

가막만의 수질환경 중 용존산소는 평균 5mg/ℓ 이상이고 계절적으로 공간적으로 큰 변동을 보이고 있으며, 특히 하계에는 북서쪽의 내만을 포함한 천해양식장지대에 5mg/ℓ 이하의 수위가 나타나고 있어서 만약 환경이 악화되면 빈산소층이 형성될 가능성이 높다고 판단되고

있다. 따라서 본 연구는 가막만해역의 수산생물의 활동에 치명적인 영향을 미치는 저층빈산소발생(3.57mg/l) 한계까지 외부환경인자를 변화시켜감으로써 최대 기초생산력을 산정하였다. 기초생산력을 변화시킬 수 있는 외부환경조건으로는 여러 가지가 있겠지만, 인위적으로 제어하기 힘든 인자는 배제하고 단지 질소와 인 등 영양염을 포함한 유입원인 하천부하, 저질부하, 그리고 외부 유동조건에 의한 경계치부하를 대상으로 하여 단계적으로 변동시켜 시뮬레이션을 시도하였다.

2.7. 기초생산력과 굴 생산량과의 관계

생태계 시뮬레이션에 의해 산정된 기초생산력을 이에 해당하는 알굴생산가능량으로 계산하기 위해서, 양식장의 월별 기초생산력에서 월별 일수와 양식굴이 수하된 시설의 해수면에서 차지하는 면적을 곱하면 실제 양식장에서 굴이 섭취할 수 있는 식물플랑크톤의 양을 구할 수 있다. 여수 굴 수협에 따르면 양식장의 해수면에서 시설대수 1대가 차지하는 면적은 1ha를 기준으로 약 800m² (100m쌍줄을 사용해서 다음 시설까지 8m간격)으로 알려져 있다. 이렇게 구한 탄소량을 알굴생산량으로의 전환은 다음과 같은 식¹⁰⁾을 이용하였다.

$$\begin{aligned} & \text{Maximum Oyster meat production(ton)} \\ &= \text{Carbon production(ton)} \times 0.1528 \\ & \times \frac{1}{(479.75 - 4.02T)} \text{ (gDW/mgC)} \\ & \times \frac{1}{0.2483} \text{ (gWW/gDW)} \times 10^3 \end{aligned} \quad (\text{II}-2)$$

여기서, 0.1528 : 섭취한 양에 대한 육질로 남은 양의 비
 $\frac{1}{(479.75 - 4.02T)}$: 탄소함량(mgC)에 대한 굴의 건중량(gDW)으로의 전환식(온도의 함수)
 $\frac{1}{0.2483}$: 건중량(DW)에 대한 습중량(WW)의 비

따라서 현 환경조건하에서의 기초생산력과 알굴생산량, 그리고 환경조건이 변했을 때 예측되는 잠재적인 기초생산력과 알굴생산량을 비교해서 생산성향상을 위해서는 어

떤 인자가 어느 한계까지 중요한 변수가 되는지를 정량적으로 파악하였다. 그래서 어장의 환경용량범위하에서 각 어장의 효율적인 관리와 생산성 향상방안에 대해 고찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 수질현황

조사기간의 용존산소는 표층에서 6.4~13.7mg/l로 평균 9.33mg/l, 중층에서 6.4~13.5mg/l로 평균 9.35mg/l 그리고 저층에서 5.4~14.3mg/l의 범위를 나타내었고 평균값은 9.29mg/l였다. 월별 전 수층의 평균농도분포를 보면 1월이 평균 12.27mg/l로 가장 높은 값을 나타내었고 7월이 6.77mg/l로 가장 낮은 값을 나타내었다. COD 농도분포는 표층에서 0.84~3.81mg/l, 중층에서 0.30~4.16mg/l, 저층에서 0.29~4.23mg/l의 범위를 나타내었고, 용존무기질소 농도분포는 표층에서 0.17~11.22μg-at/l로 평균 3.33μg-at/l, 중층에서 0.13~10.70μg-at/l로 평균 3.21μg-at/l, 저층에서 0.13~9.96μg-at/l이고 평균 2.95μg-at/l를 나타내었다. 월별로는 2월이 가장 낮았고 5월이 대체로 높은 경향을 보여주었다. 인산인의 농도분포를 보면 표층에서 0.05~1.45μg-at/l로 평균 0.48μg-at/l, 중층에서 0.05~1.60μg-at/l로 평균 0.50μg-at/l, 저층에서 0.05~1.41μg-at/l 그리고 평균 0.48μg-at/l로 나타났다. 월별로는 11월이 최대분포 그리고 3월이 최소의 분포를 보였다. 駕莫灣의 월별 총무기질소(TIN) 대 인산염(PO₄³⁻)의 비(Redfield ratio)는 2.04~15.14로 전 조사기간에 걸쳐 질소가 제한인자로 되는 것을 알 수 있다.

해역에서 식물플랑크톤의 현존량을 나타내는 Chl.a의 농도분포를 보면 전 조사기간에 걸쳐 표층에서 1.0~23.28μg/l, 중층에서 1.27~29.97μg/l, 저층에서 1.23~23.08μg/l로 나타났고 월별로는 5월부터 증가하기 시작하여 7월에 최대농도를 그리고 12월에 최소치를 보여주었다. 지점별로는 대체로 만구쪽이 낮은 분포를 나타내는 등 영양염의 분포와 유사한 경향을 나타내었다.

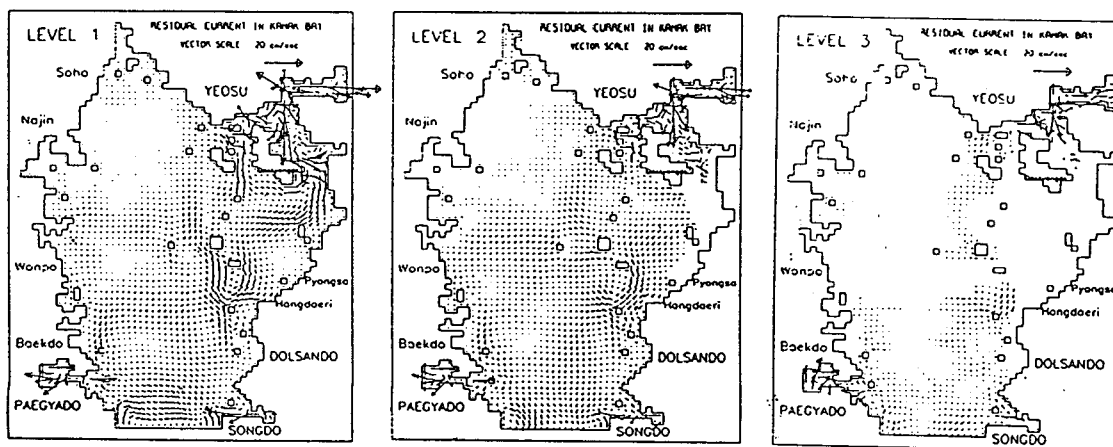


Fig. 3. Computed residual current at 1st, 2nd and 3rd level.

3.2. 해수유동의 시뮬레이션

잔차류 시뮬레이션 결과를 Fig. 3에 제시하였다. 전체적으로 북쪽협수도에서 복잡한 양상을 띠나 유입한 해수는 남향성분이 강해서 대경도의 동쪽을 따라서 향대리 근처까지 남하했다가 북상하는 유동을 보이고 있고, 남쪽 만구에서는 백야도 동쪽부근에서 북상해서 만내로 들어온 해수가 동쪽으로 가로질러 흐르다가 송도의 서쪽근처에서 남하하는 시계방향의 환류가 형성되는 것 같다.

해수유동 시뮬레이션의 타당성여부를 검토하기 위해서 가막만내의 대표지점에서의 Lee⁶⁾가 수심별로 25시간 연속측류해서 최소자승법으로 조화분해해서 얻은 실측된 조류타원도와 계산된 것을 비교한 결과가 Fig. 4에 제시되었다. 돌산대교 앞인 C1지점과 평사부근인 C3지점에서의 조류타원도 비교결과 계산치(Calculated)와 관측치(Observed)가 유속과 유향면에서 유사하게 나타나서 해수유동모델이 어느 정도 가막만의 해수유동을 잘 재현하고 있다고 사료된다.

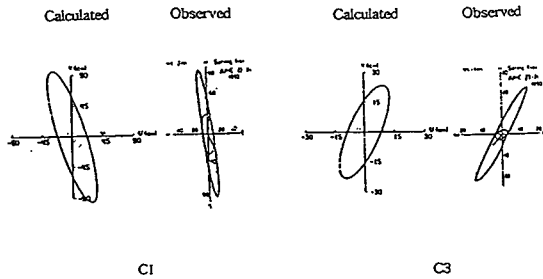


Fig. 4. Comparison of tidal current ellipses between computed and observed results.

3.3. 식물플랑크톤 현존량과 용존산소에 대한 민감도 분석

분석에 사용된 계수의 기준값과 그 값을 $\pm 50\%$ 증감시켰을 때, 식물플랑크톤과 용존산소의 수질인자에 가장 큰 영향을 미치는 계수를 입력하여 계산한 수질인자의 농도값을 기준(100)으로 하고 다른 계수의 영향정도를

백분율로 나타낸 결과가 Table 3에 제시되었다.

각 층에서 식물플랑크톤 현존량과 용존산소에 가장 큰 영향을 주는 인자는 식물플랑크톤의 최대성장속도(α_1)이고, 식물플랑크톤 호흡속도(α_2), N 반포화상수(KSN), 식물플랑크톤 사망속도(α_4), POM 분해속도(α_6)순으로 나타났다.

3.4. 생태계모델의 적용성 검토

무풍시 조건으로 해수유동모델에서 계산된 잔차류성분을 생태계모델에 적용하여 시뮬레이션된 식물플랑크톤 현존량과 용존산소의 계산치를 실측치와 비교하여 모델의 적용성을 검토하였다.

각종 계수값을 보정한 후, 굴 양식을 시작하지 않는 시기인 1994년 5월의 식물플랑크톤 현존량과 용존산소의 계산치를 실측치와 비교한 결과, 각 층별 상대오차는 식물플랑크톤 현존량에 대해서는 10.74~21.27%를 보였고, 용존산소에 대해서는 6.52~12.14%의 낮은 상대오차를 나타냈다. 그리고 1990년 5월의 자료를 가지고 모델의 검증한 결과, 식물플랑크톤 현존량에 대한 계산치와 실측치의 상대오차는 층별로 14.78~15.76%를 보여서 생태계모델의 적용성이 가막만의 수질환경을 예측하는데 타당성이 있다고 사료된다.

3.5. 식물플랑크톤 분포의 재현

생태계모델의 적용성을 검토한 후 1994년 5월 즉, 가막만에서 굴 양식을 시작하지 않을 때의 식물플랑크톤 농도분포를 Fig. 5에 제시하였다. 무풍시 가막만내의 식물플랑크톤의 농도분포는 북서쪽 내만이 하천유입의 영향을 많이 받고 유동조건이 안정적이어서 비교적 높은 농도를 보였다.

3.6. 기초생산력 산정

월별로 식물플랑크톤 현존량을 예측하기 위해서 생태계모델의 입력인자로서 변화시킬 수 있는 것인 월별 수온, 염분, 광조건, 일장(日長)은 관측치와 기상월보를 이

Table 3. The results of sensitivity analysis for reaction coefficients

Coefficient	Unit	Default	Phytoplankton			Dissolved Oxygen		
			Level 1	Level 2	Level 3	Level 1	Level 2	Level 3
α_1	/day	1.0	100	100	100	100	100	100
α_4	/day	0.02	24.7	26.2	27.5	6.3	10.1	13.3
α_3	/day	0.18	0.2	0.1	0.1	-	-	-
α_5	/day	0.1	0.4	0.2	0.2	3.1	2.9	3.5
KSP	$\mu\text{g-at}/\ell$	0.536	3.9	4.2	4.2	-	0.7	0.9
KSN	$\mu\text{g-at}/\ell$	8.571	33.4	33.1	32.9	37.1	37.4	38.1
α_6	/day	0.05	23.9	23.6	23.5	4.4	1.4	8.0
α_7	/day	0.03	14.2	14.0	13.9	3.8	9.4	16.8
α_2	/day	0.05	55.4	58.6	60.7	59.1	66.2	76.1
WP	m/day	0.1	18.3	17.3	17.1	1.3	2.9	6.2

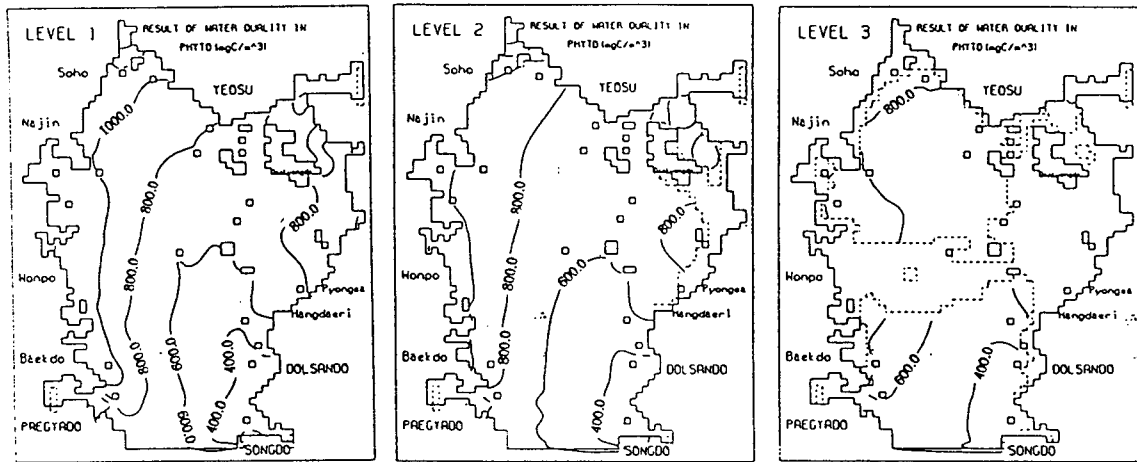


Fig. 5. The distribution of phytoplankton in Kamak Bay on May 1994 by an ecosystem simulation

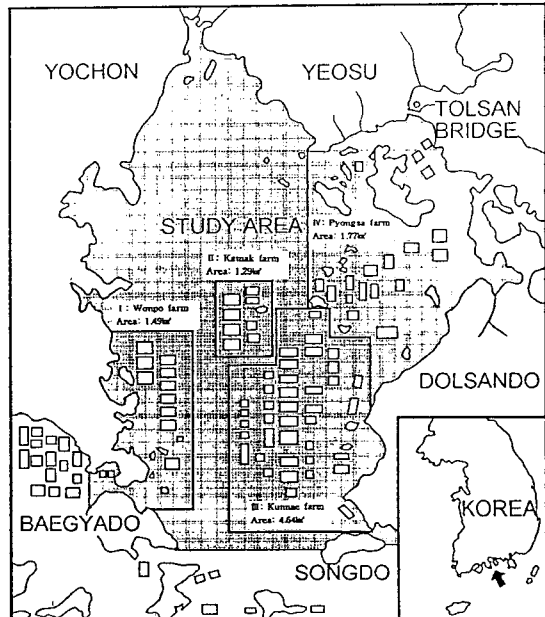


Fig. 6. The location and distribution of oyster culture grounds in the model area.

용하였다. 연직확산계수의 경우 1cm/sec 및 10cm/sec는 완전혼합조건을 나타내고 0.1cm/sec는 경미한 혼합조건을 나타낸다고 보고되고 있다. 가막만의 하계에는 상하층간에 약한 성층을 이루고 있어 연직확산이 완만하다고 가정하여 각 층마다 0.1, 0.1, 0.01(cm/sec)을 적용했고, 그 밖의 월은 1~3층 모두 1.0cm/sec를 입력하였다.

가막만내의 식물플랑크톤의 농도분포와 기초생산력은 지역별로 차이가 나기 때문에 굴 양식장에서의 기초생산력과 굴 생산력을 산정하기 위해서는 굴 양식장지대를 세분화할 필요가 있다. 즉, 굴 양식장을 4개의 지역(I: 원포어장, II: 가막어장, III: 군내어장, IV: 평사어장)으로

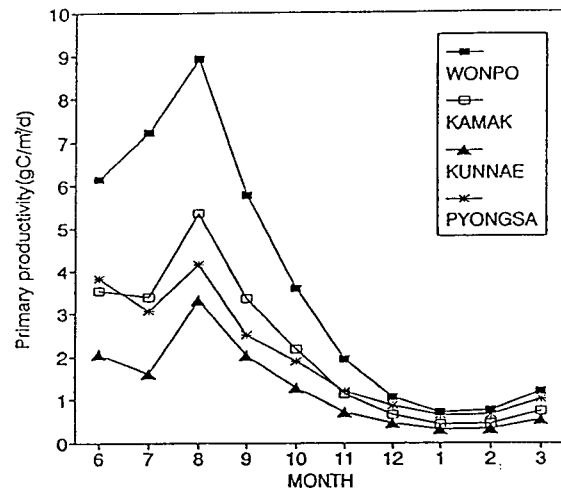


Fig. 7. Variation trends of monthly primary productivity in oyster culture grounds, in case the absence of oyster from June 1994 to March 1995.

나누었고 각 지역의 양식면적을 Fig. 6에 나타내었다. 여기서, 양식굴이 섭취할 수 있는 식물플랑크톤을 고려할 때, 양식굴은 수하연의 길이까지 부착해서 주위의 식물플랑크톤을 섭취하므로 가막만의 수하연길이가 시·공간적으로 차이가 있지만 최대생산 가능량을 알아보기 위하여 최대 길이인 6m(여수어촌지도소 자료)까지의 각 양식장지역에서 식물플랑크톤 현존량, 동물플랑크톤 현존량, DIN농도, DIP농도를 시물레이션을 통하여 계산한 후, 기초생산력 산정식에 대입하고 그 때의 입력값은 Table 4에 나타내었고, 그리고 각종 생물학적 계수는 보정과 검증에 사용된 데이터를 사용하였다.

수하연 길이를 6m로 가정하고, 입력자료와 식 (II-1)을 이용하여 산정한 가막만의 양식장 구역별 기초생산력은 Table 5와 Fig. 7에 나타낸 바와 같다.

가막만의 양식장내의 기초생산력 산정 결과, 동계에

Table 4. Monthly phytoplankton, zooplankton, DIP and DIN of oyster culture grounds for calculation of primary productivity from June 1994 to March 1995

	Culture ground	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar.
Phyto-plankton (mgC/m ³)	I	1033.61	1399.28	1331.26	1400.43	1139.06	980.71	807.58	808.92	797.34	799.46
	II	800.26	1051.96	1047.11	1099.45	895.43	763.98	622.26	621.29	611.70	616.16
	III	591.30	787.38	822.49	869.33	691.24	607.08	501.98	507.11	496.20	505.26
	IV	795.28	1029.67	1012.79	1063.47	907.17	798.36	616.38	618.26	597.29	629.08
Zoo-plankton (mgC/m ³)	I	15.56	24.97	35.50	20.92	14.00	10.31	6.86	6.15	6.10	7.13
	II	11.64	18.93	27.45	15.94	10.50	7.60	4.90	4.34	4.30	5.10
	III	7.74	12.41	18.72	11.06	7.41	5.47	3.66	3.30	3.27	3.80
	IV	7.67	12.81	19.11	10.91	7.03	4.97	3.06	2.67	2.64	3.20
DIP ($\mu\text{g-at}/\ell$)	I	0.56	0.24	0.29	0.22	0.43	0.61	0.83	0.85	0.87	0.83
	II	0.39	0.16	0.22	0.17	0.33	0.47	0.65	0.67	0.68	0.65
	III	0.31	0.12	0.18	0.14	0.28	0.37	0.51	0.52	0.53	0.51
	IV	0.36	0.15	0.18	0.14	0.26	0.38	0.56	0.57	0.59	0.55
DIN ($\mu\text{g-at}/\ell$)	I	5.78	6.73	11.41	5.02	3.39	2.78	3.03	2.59	2.75	3.17
	II	4.12	5.04	9.04	4.06	2.72	2.27	2.51	2.15	2.29	2.62
	III	3.29	3.47	6.23	2.72	2.24	1.96	2.31	2.04	2.17	2.41
	IV	4.45	4.56	7.16	3.30	2.42	2.27	3.17	2.90	3.10	3.33

Table 5. The monthly primary productivity of oyster culture grounds estimated by an ecosystem model, in case the absence of oyster from June 1994 to March 1995

	Culture ground	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar.	Mean
Primary productivity (gC/m ³ /d)	I	6.15	7.22	8.93	5.78	3.59	1.94	1.07	0.71	0.75	1.20	3.73
	II	3.54	3.38	5.34	3.36	2.18	1.14	0.65	0.42	0.44	0.73	2.12
	III	2.06	1.62	3.32	2.02	1.28	0.71	0.46	0.31	0.33	0.53	1.26
	IV	3.81	3.07	4.14	2.51	1.90	1.20	0.87	0.64	0.65	1.01	1.98
	Mean	3.89	3.82	5.43	3.42	2.24	1.25	0.76	0.52	0.54	0.87	2.27

* gC/m³/d = (mgC/m³/d) × (6m)/(1000)

최저 0.31gC/m³/d에서 하계에 최고 8.93gC/m³/d의 월별 변화를 보이고 있고 양식장별로는 만 서쪽에 위치한 원포어장(I)이 가장 높고 만의 동남부에 위치한 군내어장(III)이 가장 낮은 기초생산력을 보여주었다. 월별변화는 6월에서부터 서서히 증가하다가 8월에서 최대치를 보이고 그 후 감소경향을 나타내다가 다시 2월부터 서서히 증가하는 경향을 보였다.

생태계 시뮬레이션을 통하여 현 환경조건하에서 양식 기간동안 가막만내의 전 양식장의 평균 기초생산력은 2.27gC/m³/d로 평가되었다. 한편 조사시기와 측정방법이 다르지만, 추 등¹¹⁾의 결과에 따르면 가막만에서의 일간 기초생산력은 평균 0.91gC/m³/d로서 한산·거제만의 평균 0.52gC/m³/d보다는 다소 높은 것으로 보고되었다. 그러나 한산·거제만 뿐만 아니라 가막만에서의 굴 생산성은 점차 감소되고 있고 특히, 굴 성장기에 비만도가 떨어지는 현상이 나타나므로 이러한 기초생산력이 굴이 충분히 성장하고 또한 굴 생산성을 향상시키는데 있어서 낮은 값이라 판단된다.

굴 양식장 수역에 있어서 기초생산량은 굴의 성육과 밀접히 관련되고,^{12,13)} Lee⁶⁾는 식물플랑크톤과 굴의 대당

생산량과의 관계를 파악함으로써 굴 생산량은 식물플랑크톤의 량과 비례관계에 있다고 보고하였다. 이러한 관점에서 가막만의 현 환경조건하에서 굴의 먹이가 되는 식물플랑크톤의 기초생산력을 증가시킨다면 굴 생산량은 환경용량하의 최대생산량까지 접근 가능한 것으로 사료된다.

3.7. 기초생산력 증가를 위한 시뮬레이션

3.7.1. 하천부하의 변동에 의한 영향

가막만내로 유입해 들어오는 월별 하천의 용존성무기질소, 인산인, 용존성유기탄소, 입자성유기탄소 및 화학적 산소요구량을 일률적으로 2배, 3배, 4배, 5배로 단계적으로 증가시키면서 월별 식물플랑크톤 농도분포와 하계에 저층빈산소수괴발생을 예측하였다. 하천부하량의 증가가 2배에서 4배사이인 경우는 저층빈산소수괴가 형성되지 않는 범위하에서 지속적으로 굴의 먹이원인 식물플랑크톤의 생산력이 증가를 보였다. 그러나 하천부하를 5배 증가시켰을 때부터 6월과 7월, 즉 하계에 가막만의 북쪽과 서쪽 내만 등에 저층의 산소가 3.57mg/ℓ 이하의 빈산소수괴가 형성되기 시작하였고 그리고 월별하천부

하를 5배 이상 증가시키는 하계 저층 빈산소수괴 범위가 더 넓은 범위로 확산되었다. Fig. 8에 월별 하천부하를 4배, 5배 증가시켰을 때의 빈산소수괴 형성시작 그리고 5배 이상의 하천부하를 증가시켰을 때 나타나는 빈산소수괴의 확산이 제시되었다.

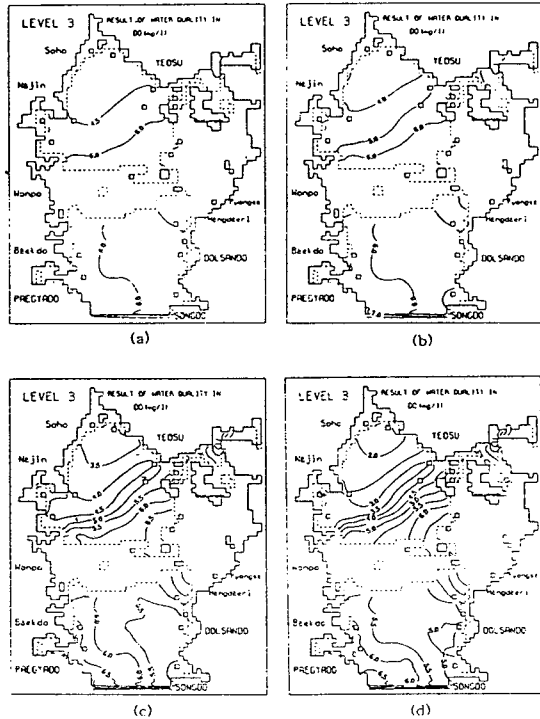


Fig. 8. The predicted dissolved oxygen distribution of summer at bottom level in Kamak Bay depending on increasing of pollutant loads from the present river discharges.

- (a): three times (b): four times
(c): five times (d): above seven times

가막만의 하계 저층빈산소수괴발생 한계까지인 하천부하를 4배 증가시켰을 때 예측된 월별 식물플랑크톤의 농도, 동물플랑크톤의 농도, DIP농도, DIN농도 결과와 월별 시뮬레이션에 사용된 각종 계수를 이용해서 양식장지대의 기초생산력을 산정한 결과는 Table 6에 나타내었다.

Table 6. The estimated monthly primary productivity of oyster culture grounds under four times increasing of pollutant loads from the present river discharges

	Culture ground	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar.	Mean
Primary productivity (gC/m ² /d)	I	9.90	9.17	11.66	8.32	6.75	4.17	1.87	1.12	1.17	2.08	5.62
	II	5.76	4.35	7.65	5.16	4.33	2.84	1.27	0.72	0.77	1.42	3.43
	III	3.83	2.58	5.14	3.26	2.88	2.30	1.11	0.69	0.74	1.36	2.39
	IV	7.48	5.28	7.58	5.25	4.82	3.63	3.34	2.42	2.45	3.94	4.62
	Mean	6.74	5.35	8.01	5.50	4.70	3.24	1.90	1.24	1.28	2.20	4.02

하천부하량 증가에 따른 최대기초생산력의 증가는 각 양식장의 특성에 의해 차이가 있어서 만 북부에 위치한 하천부하의 영향을 많이 받고 상대적으로 내만 지역인 평사어장에서 두드러지며(약 133%의 증가) 상대적으로 만 서쪽에 위치한 원포어장에서 낮았다(약 51%의 증가). 모든 양식장의 평균으로 볼 때는 현 환경하의 조건보다 약 84%의 기초생산력증가(4.02gC/m²/d)가 예측되었다.

3.7.2. 저질 질소, 인 용출부하 변동의 영향

영양염의 또 다른 유입원인 저질에서의 용존무기질소와 인산인 용출부하를 단계적으로 증가시켜 하계 빈산소수괴 형성을 시뮬레이션한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 즉, 현재의 저질용출부하(암모니아질소: 25mg/m²/d, 인산인: 8mg/m²/d)를 증가시킨 결과, 월별 식물플랑크톤 현존량은 증가하지만, 약 35%이상 증가시켰을 때부터는 하계에 빈산소수괴가 형성되기 시작했다. 이것은 자가오염에 의한 저질오염이 지속적으로 축적된 상태에서 하천부하보다 저질부하를 조금만 변동시켜도 수질악화가 일어나기 쉬운 것이라 사료된다. 빈산소수괴를 형성시키지 않는 범위하의 저질 질소, 인을 최대로 부하시켰을 때 나타나는 기초생산력을 Table 7에 나타내었다.

빈산소수괴를 유발하지 않는 범위내에서 최대로 저질 용출부하를 증가시킨 결과 기초생산력의 증가는 전체 양식장 평균 약 60%의 향상(3.65gC/m²/d)이 예측되었다.

3.7.3. 외부유동에 의한 경계치의 부하변동

기초생산력과 굴 생산력 향상을 위한 또 다른 기법으로 현 환경조건하에서 영양염류, 화학적 산소요구량, 용존성유기탄소 및 입자성유기탄소가 외부경계에서 가막만의 만내로 유입하는 경계치부하가 수질환경에 악영향을 미치지 않고 어느 정도 어장 생산력향상에 기여를 하는가를 평가하였다. 즉, 생태계모델에서 다른 조건을 그대로 둔 채 만내의 경계치부하를 단계적으로 증가시키면서 하계 저층빈산소수괴형성 과정을 살펴봄으로써 수용한계를 파악하고 그때까지의 결과를 기초생산력으로 환산하는 방식으로 시뮬레이션하였다. 경계치부하를 단계적으로 증가시킨 결과, 형성되는 빈산소수괴를 Fig. 10에 나타내었고, 빈산소수괴를 형성시키지 않는 최대의 경계치부하를 입력하여 계산된 기초생산력의 전환결과를 Table 8에 나타내었다.

외부 유동조건변화에 의한 경계치부하가 10배 이상될

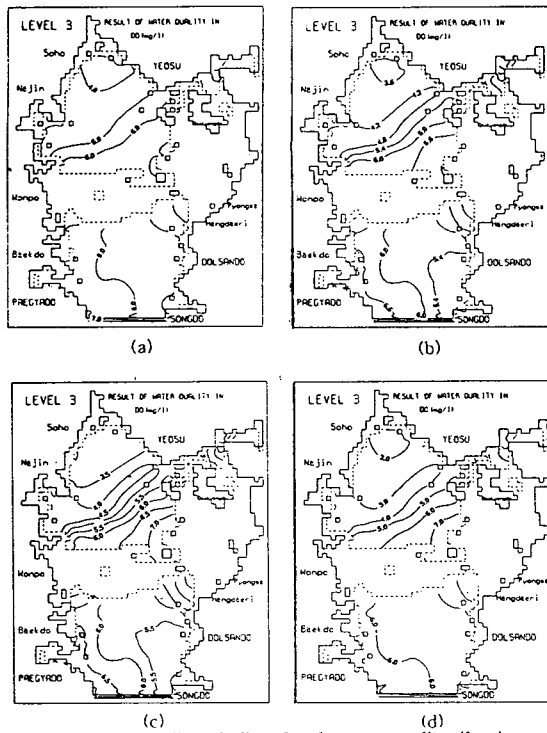


Fig. 9. The predicted dissolved oxygen distribution of summer at bottom level in Kamak Bay depending on increasing of sediment N, P fluxes under the present conditions.

(a): 25% increase (b): 35% increase
(c): 50% increase (d): 100% increase

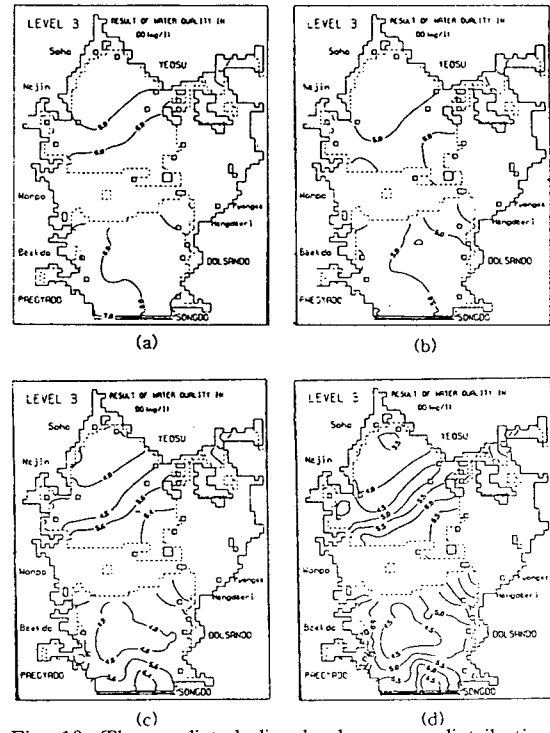


Fig. 10. The predicted dissolved oxygen distribution of summer at bottom level in Kamak Bay depending on increasing of the boundary loads under the present conditions.

(a): two times (b): five times
(c): ten times (d): above ten times

Table 7. The predicted primary productivity of oyster culture grounds by 35% increasing of the sediment N, P fluxes under the present conditions

Culture ground	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar.	Mean
I	8.64	13.39	14.72	10.04	5.28	2.94	1.62	1.09	1.13	1.79	6.06
II	5.04	6.10	9.03	6.29	3.23	1.76	1.00	0.66	0.70	1.12	3.49
III	2.91	3.16	5.59	3.20	1.88	1.06	0.68	0.48	0.48	0.78	2.02
IV	5.06	5.22	6.90	4.28	2.64	1.68	1.21	0.89	0.92	1.38	3.02
Mean	5.41	6.97	9.06	5.95	3.26	1.86	1.13	0.78	0.81	1.27	3.65

시는 가막만의 북서쪽내만에서 하계에 저층빈산소수괴가 형성되었다. 하천부하나 저질부하와는 대조적으로 경계치부하는 잔차류패턴 등 유동조건과 밀접한 상관관계가 있기 때문에 상대적으로 빈산소수괴형성 등 수질악화현상에 그 영향이 크지 않고 시뮬레이션 결과 약 10배 정도의 증가도 용존산소를 크게 감소시키지 않는 것으로 나타났다.

이러한 조건하에서 계산된 기초생산력은 각 양식장별로 큰 차이를 보여주고 있는데, 만 남단의 개방경계에서 유입되는 영양염 등의 영향을 가장 강하게 받는 군내어장에서 약 115%의 증가가 나타났고 상대적으로 평사어

장에서는 약 18%정도의 기초생산력 증가가 예측되었다. 전 양식장의 평균은 3.95gC/m²/d로 계산되었다.

3.8. 어장 기초생산력향상에 대한 정량적 평가와 환경용량

어장의 환경용량이라 함은 첫 번째로는 생물의 입장에서 보면 어떤 해역에서 생물활동에 부작용없이 최대 생물개체를 수용할 수 있는 잠재적 능력을 말하며 지속성 있는 생산량을 획득하기 위해서는 이 용량의 범위내에서 어장을 효율적으로 관리할 필요가 있다. 두 번째로는 수질적인 측면에서 수질악화현상, 즉 수중의 용존산

Table 8. The predicted primary productivity of oyster culture grounds by ten times increasing of the boundary loads under the present conditions

	Culture ground	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar.	Mean
Primary productivity (gC/m ² /d)	I	11.51	13.98	16.29	10.93	7.59	4.28	2.25	1.52	1.56	2.51	7.24
	II	6.11	5.58	8.48	5.25	3.87	2.04	1.09	0.70	0.74	1.24	3.51
	III	3.93	3.83	7.65	4.10	2.71	1.58	0.93	0.64	0.66	1.05	2.71
	IV	4.73	3.39	4.86	3.01	2.37	1.41	0.97	0.69	0.71	1.13	2.33
	Mean	6.57	6.70	9.32	5.82	4.14	2.33	1.31	0.89	0.92	1.48	3.95

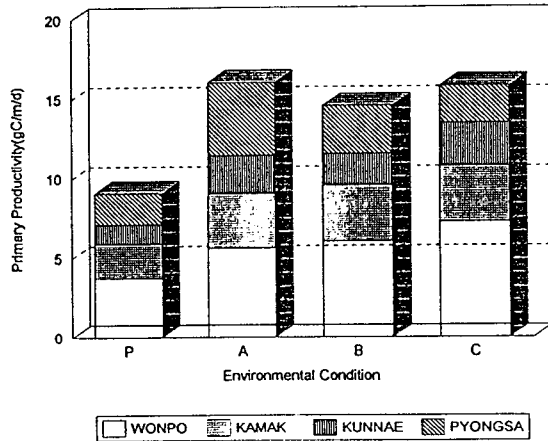


Fig. 11. The comparison between primary productivities of oyster culture grounds by change of the environmental conditions under the environmental capacity.

- P : Present condition
- A : Four times increasing of N, P loads from the river discharges
- B : 35% increasing of sediment N, P fluxes
- C : Ten times increasing of the boundary loads

소가 저하하여 빈산소수괴가 형성됨으로써 생물서식에 부적합한 환경이 발생하기까지 오염물을 최대도 받아들일 수 있는 허용부하치를 말한다.

생태계모델을 이용해서 가막만의 각 양식장에서 현 환경조건에서의 기초생산력과 환경인자의 변동시 나타나는 환경용량하의 기초생산력을 종합한 결과는 Fig. 11과 같다. 그리고 식 (II-2)를 이용해서 1994년 현재의 가막만 환경조건하에서 양식장에 설치된 총 시설대수(7,470대)를 고려할 때 알굴을 최대도 생산가능한 양이 총 6,929ton, 즉 단위시설대수를 고려해 볼 때 약 0.93ton정도로 산출되어 이것이 가막만의 양식장에서 시설대수당 최대의 생산가능량으로 추정된다. 1994년도에는 실제 단위시설대수당 알굴생산량이 0.61ton정도로 산출되었고, 최대 알굴생산량을 보인 1987년도에는 단위시설대수당 약 0.8ton정도의 알굴생산량이 산출되어 환경용량에 미치지 못하는 것으로 평가된다. 만약, 기초생산력의 증가 시뮬레이션에서 본 것처럼 환경조건이 변해서 현재의 기

초생산력이 증가되어 알굴로 모두 전환된다고 가정을 한다면, 최대의 알굴생산량이 0.93ton, 즉, 어장의 생산성이 향상될 것으로 추정된다. 그리고 환경적으로 볼 때 원포, 가막, 군내, 평사어장으로 구분된 지역에서의 기초생산력과 굴 생산량의 정도가 다르고 또한 지역의 환경특성으로 여러 가지 부하증가에 따른 영향의 정도가 달라서 각 부하원의 대상에 따라서 적절한 시설대수, 위치선정문제 등 인위적인 요인이 고려될 필요가 있다고 사료된다.

4. 결 론

현 환경조건하에서 굴의 생산력증가에 대한 환경적 접근방법으로서 생태계모델을 이용해서 가막만의 기초생산력을 산정하고 환경조건 변동에 의한 기초생산력의 증가시 저층 빈산소수괴형성과 같은 수질악화를 일으키지 않는 범위하에서 최대도 수용할 수 있는 유입부하(수질측면의 환경용량)를 파악해서 이것이 알굴로의 생산에 정량적인 기여를 살펴본 결과는 다음과 같다.

조사기간중 가막만에서의 용존산소분포는 5.4~14.3mg/ℓ 범위로서 하계 저층에서도 빈산소수괴형성과 같은 산소부족현상은 나타나지 않았다. 총무기질소는 0.13~11.22 μg-at/ℓ, 인산인은 0.05~1.60 μg-at/ℓ 범위를 나타내었고, 그리고 Chl.a는 1.0~29.97 μg/ℓ 범위로서 5월에 증가하기 시작하여 7월에 최대치를, 12월에 최소치를 보였다.

3차원 해수유동모델에 의해 가막만의 유동을 시뮬레이션한 후 생태계모델을 이용해서 현 환경조건하의 가막만의 각 양식장에서 양식기간동안 기초생산력을 산정한 결과, 원포어장이 평균 3.73gC/m²/d로 가장 높았으며, 가막어장이 평균 2.12gC/m²/d, 평사어장이 평균 1.98gC/m²/d였고 군내어장이 평균 1.26gC/m²/d로 가장 낮은 수치를 보였고, 전 양식장 평균은 2.27gC/m²/d이었다. 현 환경조건하에서 빈산소수괴를 유발하지 않는 범위하(수질적 차원의 환경용량)의 환경인자를 변동시켜 기초생산력 증가를 시뮬레이션한 결과 하천부하를 4배로 증가시키면 전 양식장 평균 4.02gC/m²/d정도로 증가되었고, 저질에서의 질소와 인 용출을 35%정도 증가시키면 전 양식장 평균 약 3.65gC/m²/d를 보였다. 마지막으로 경계치부하를 10배 증가시킨 결과 전 양식장 평균 약 3.95gC/m²/d로 증가되었다. 이렇게 산정된 기초생산력 결과를 이에 대응하는 단위시설대수당 최대 알굴생산가능량으로 전환한 결과, 현 환경조건하에서 약 0.93ton정도로 산출되어 이것이 생물생산적 차원의 환경용량이라 추정할 수 있다. 기초생산력의 증가 시뮬레이션결과에 따라서 환경용량

범위내에서 환경조건이 변하여 기초생산력이 증가된다면, 단위시설대수당 알굴의 최대생산 가능량은 증가되리라 기대된다.

참 고 문 헌

- 1) 國立水産振興院, 1991, 沿岸 養殖漁場 環境容量 算定에 관한 研究.
- 2) 崔禹政, 1993, 鎭海灣의 貧酸素水塊 形成에 관한 시뮬레이션, 釜山水産大學校 博士學位論文.
- 3) 金鍾九, 1994, 鎭海灣 海域의 夏季 富營養化 모델링, 釜山水産大學校 博士學位論文.
- 4) 金光壽, 1995, 生態系모델을 이용한 黃海의 環境容量算定, 釜山水産大學校 博士學位論文.
- 5) Cho, E. I., 1996, The estimation of carrying capacity for marine culture grounds using an eco-hydrodynamic model, Ph.D. Thesis, Department of Environmental Engineering, Pukyong National University, 1~180pp (in Korean).
- 6) Lee, G. H., 1993, Fisheries oceanographical studies on the production of the farming oyster in Kamak Bay, Ph.D. Thesis, Department of Oceanography, Pukyong National University, 1~180pp(in Korean).
- 7) 日本水産資源保護協會, 1990a, IV. 貧酸素水塊形成についてモデリング, 漁場環境容量策定事業.
- 8) 柳哲雄, 1989, シンポジウム「貧酸素水塊」のまとめ, 沿岸海洋研究ノート, 26(2), 141~145.
- 9) 麗水水産大學 水産科學研究所, 1991, 駕莫灣 環境汚染實態 및 保全對策 調査報告書, 922pp.
- 10) 김용술, 1980, 거제·한산만 양식굴Crassostrea virginica의 에너지 전환효율, 韓國水産學會誌, 13(4), 179~193.
- 11) 李秉喆, 姜亨求, 姜龍柱, 1991, 굴 養殖場 水域의 基礎生産 研究, 韓國水産學會誌, 24(1), 39~51.
- 12) 木村知博·橋本俊將, 1968, 廣島灣のかき養殖場水域における基礎生産について, 日本水産増殖, 16, 1~14.
- 13) Gerdes, D., 1983, The pacific oyster Crassostrea gigas, Part I, Feeding behaviour of larvae and adults, Aquaculture, 31, 195~219.