

굴 양식수역의 환경용량 산정

I. 생태계 모델을 이용한 거제·한산만 굴 먹이 공급량 추정

박종수⁺ · 김형철 · 최우정 · 이원찬 · 박청길*
국립수산과학원 환경관리과, *부경대학교 환경공학과

Estimating the Carrying Capacity of a Coastal Bay for Oyster Culture

I. Estimating a Food Supply to Oysters Using an Eco-hydrodynamic Model in Geoje-Hansan Bay

Jong Soo PARK⁺, Hyung Chul KIM, Woo Jeung CHOI, Won Chan LEE and Chung Kil PARK*

Marine Environment Management Division, National Fisheries Research & Development Institute, Busan 619-902, Korea

*Department of Environmental Engineering, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

A 3D hydrodynamic-ecological coupled model was applied to estimate a food supply to oysters in Geoje-Hansan Bay where is one of the oyster culturing sites in Korea. In this study, the primary productivity (PP) was adopted as an index of food supply, and the spatial patterns of average chlorophyll *a* concentration during a culturing seasons from September to May of the following year were simulated by the model. The numerical result showed that PP was high in the inner part of the bay and the adjacent areas of Hwado island, but low in the outer. This result indicates that PP is essentially influenced by anthropogenic nutrient loadings in the system. The model was calibrated using the field data in May which is non culturing season of oysters and a simulated phytoplankton biomass agreed fairly well with the observed data ($R^2=0.70$, RE=10.3%). The computed food supply varied from 0.19 to 1.27 gC/m²/day with a mean value of 0.62 gC/m²/day from September to May. The highest value was showed in May (1.27 gC/m²/day) and the lowest was in February (0.19 gC/m²/day).

Key words: Hydrodynamic-ecological model, Food supply, Oysters, Primary productivity (PP), Chlorophyll *a*, Geoje-Hansan Bay

서 론

거제·한산만은 수질이 깨끗하고 수심이 낮아 양식 시설물의 설치가 용이하고, 크고 작은 섬으로 둘러싸여 태풍과 같은 자연 재해를 방지할 수 있는 등 양식을 위한 좋은 조건을 지니고 있어 1969년 이후 양식시설이 급격히 증가하기 시작하였고, 1980년에는 양식어장의 총 면적이 1,100 ha로 수면 이용률이 23%에 달하였다 (Yoo et al., 1980). 그러나, 한정된 공간에서 집약적인 양식을 거듭하면서 거제·한산만의 굴 생산성이 감소하고 있고, 최근에는 양식기간이 연장되고 있는 실정이다.

양식어장의 생산성 저하 현상의 원인은 여러 가지가 있을 수 있지만, 수질이 양호한 거제·한산만은 환경적인 측면에서 접근하기 보다는 과밀양식에 의한 먹이생물 부족에 초점을 맞출 필요가 있다. 실제, 거제·한산만의 기초생산력은 가막만과 같은 남해안의 다른 양식어장에 비해 낮은 것으로 보고되고 있으며 (Lee et al., 1991), Choi et al. (1997)은 비만 저조의 원인을 남해안의 다른

해역에 비해 영양상태가 낮고 먹이생물의 양이 부족하기 때문이라 하였다.

굴의 먹이생물에 관한 연구는 많이 이루어지고 있으나 아직까지 정론에 이르는 것은 없으며, 미소 현탁물과 식물플랑크톤 양이 많은 양식어장에서 굴 성장이 양호하다고 알려져 있다 (楠木, 1986; Rodhouse et al., 1984; Pazos et al., 1997). 또한, 참굴의 성육과 chlorophyll *a* 양과는 양의 상관관계가 있으며 (Kusuki, 1977), 굴의 먹이량을 측정하는 것은 현탁물 중 유기질소 양보다는 chlorophyll *a* 양을 측정하는 것이 좋다고 하였다 (Kusuki, 1978; Brown and Hartwick, 1988).

굴의 먹이량은 현장관측을 통해 기초생산력, 식물플랑크톤 현존량, chlorophyll *a* 양을 측정하여 산정할 수 있으나 굴 양식이 이루어지고 있는 현장에서 측정된 값은 굴이 섭취하고 남은 양이기 때문에 굴이 성장함에 따라 필요로 하는 실제 먹이원으로 이용가능한 양을 알지 못하는 실정이다. 따라서, 본 연구는 양식어장 수용력 결정에 있어 가장 중요한 요소인 먹이를 식물플랑크톤 (chlorophyll *a*)이라 가정하고 생태-유체역학 모델 (日本通商産業省: MITI, 1991)을 이용하여 현장관측을 통해 구하기 어려운 비양식 상태의 월별 먹이량 변화를 추정하였다.

⁺ Corresponding author: jsparkk@nfrdi.re.kr

재료 및 방법

1. 대상해역

거제·한산만은 Fig. 1과 같이 크고 작은 4개의 섬 (거제도, 화도, 한산도, 봉암도)으로 둘러싸인 만으로 남해 동부연안에 위치하고 있으며, 수면적은 약 63 km²이다. 해저지형은 거제도 남단에서 북서 방향으로 향하는 수로는 20~40 m로 깊고 산달도 부근의 만 내측은 10 m 이내로 평탄한 지형이며, 전체 수용적은 545×10⁶ m³에 달한다. 만 내에는 4개의 만구가 있으며, 해수교환은 한산면 봉암도와 거제시 동부면 사이의 만구와 한산도 북단과 화도 사이의 만구를 통해 대부분 일어나고, 한산도 남단의 창좌리와 봉암도 사이의 만구는 수심이 얇고 수로가 좁아 해수교환량은 적다 (Yoo et al., 1980).

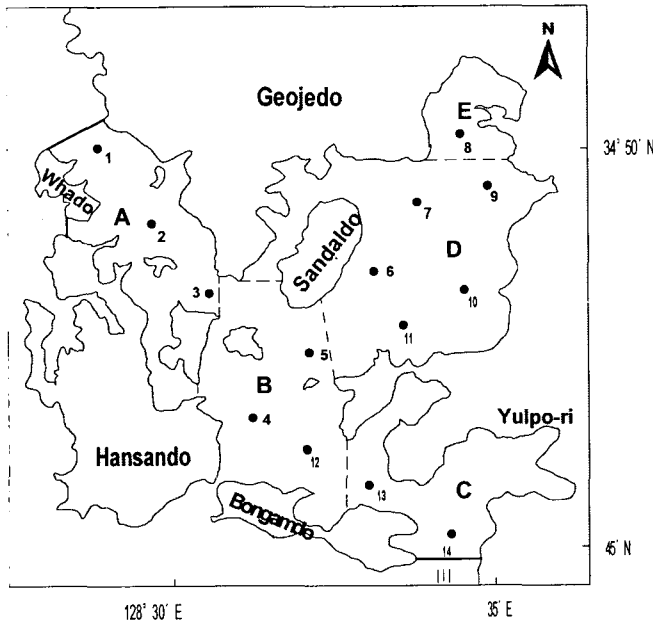


Fig. 1. Location of sampling stations in Geoje-Hansan Bay.

2. 현황조사

거제·한산만의 계절별 수질특성을 파악하기 위하여 Fig. 1에 표시된 14개 정점을 중심으로 1980년부터 1998년까지 19년 동안 2월, 5월, 8월 및 11월에 국립수산과학원이 조사한 월별, 정점별 자료를 이용하였다. 한편, 양식 비수기로 가정된 5월에 장기 관측 자료가 없는 chlorophyll a, 입자유기탄소 (particle organic carbon, POC), 용존유기탄소 (dissolved organic carbon, DOC) 등은 1994년과 1998년 5월에 현장 조사를 실시하였다.

수온, 염분, 용존산소는 수질측정기 (CTD, SeaBird)로 현장관측하였고, 영양염류, chlorophyll a는 현장에서 시료를 채취하여 해양오염 및 적조조사지침 (NFRDI, 1985a) 및 해양환경공정시험법 (해양수산부, 1997)에 따라 분석하였다. 입자유기탄소는 미리 회화시킨 유리섬유 여과지 (GF/F, φ25 mm, 공경 0.7 μm)로 시료를 현장에서 여과한 후 무기탄소를 제거하기 위하여 진한 염산으

로 약 30초 동안 혼중하고 50℃에서 24시간 건조시킨 후 CHN analyzer (Perkin Elmer, model 2400)로 정량하였다 (Sharp, 1974; Telek and Marshall, 1974). 용존유기탄소는 유리섬유 여과지 (GF/F, φ25 mm, 공경 0.7 μm)로 시료를 여과한 후 여액을 이용하여 TOC meter (Dohrmann, DC180)로 분석하였다.

해저 퇴적물은 해수조사 정점에서 1994년과 1998년 5월에 중력식 코어 채취기 (gravity corer sampler)로 채취하여 해양오염 및 적조조사지침 (NFRDI, 1985a)에 따라 화학적 산소요구량 (chemical oxygen demand, COD)과 산취발성 황화물 (acid volatile sulfide, AVS)을 분석하였다.

해저 퇴적물의 영양염 용출 및 산소소모속도 (sediment oxygen demand, SOD) 조사는 1998년 5월에 만 중앙부에서 시료를 채취하여 내경 9 cm, 길이 50 cm의 아크릴통에 약 10 cm 깊이로 채운 후 여과해수를 조용히 채워 대형 수조속에 넣고 7일 동안 하루에 1~2회 암모니아질소, 인산인, 용존산소 농도를 측정하여 해저 퇴적물의 영양염 용출속도 (細見·順藤, 1984)와 산소소모속도 (Brown and Delfino, 1980)를 측정하였다. 실험시 대형 수조의 수온은 22 ± 2.5℃로 유지하였다.

3. 적용 모델

3.1. 생태-유체역학 모델

생태-유체역학 모델 (eco-hydrodynamic model)은 Fig. 2와 같이 해수유동 시뮬레이션을 위한 다층모델 (multi-level model: COSMOS)과 수질 시뮬레이션을 위한 생태계 모델 (ecosystem model: EUTRP2)로 구성되어 있다 (日本通商産業省: MITI, 1991).

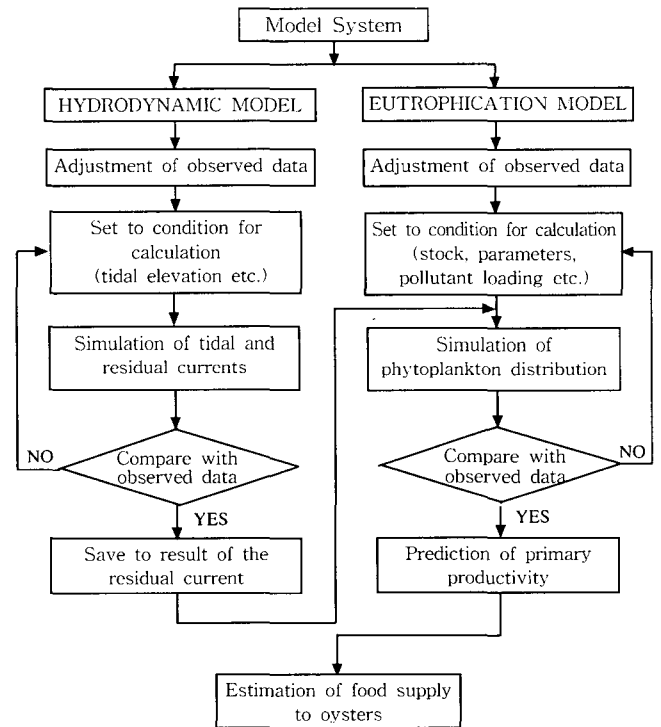


Fig. 2. The schematic diagram of an eco-hydrodynamic model for the flow of simulation.

해수유동 모델을 이용하여 조석류와 잔차류를 시뮬레이션하고 잔차류 성분을 생태계 모델의 유동장으로 입력하여 수질을 예측할 수 있다.

해수유동 모델과 생태계 모델의 개요 및 수식화는 Park (2001) 과 같다.

4. 시뮬레이션 방법

4.1. 해수유동 모델의 시뮬레이션

모델 계산 영역의 개방경계는 Fig. 1과 같이 화도와 거제시 둔덕면 학산리를 잇는 선 (I), 거제시 둔덕면 화도 남단과 한산도의 북단을 잇는 선 (II), 통영시 한산면 봉암도와 거제도 남단을 잇는 선 (III)으로 하였다. 격자망의 구성은 지형을 충분히 고려할 수 있도록 x 방향으로 85개, y 방향으로 87개 격자로 구분하였으며, 격자간격은 150m로 하였다. 수층은 투명도 수심, 수온 약층의 깊이 등을 고려하여 3개 층으로 구분하였다.

모델 영역내의 해수유동을 재현하기 위하여 입력한 자료는 Table 1과 같이 탁월분조인 M₂ 분조를 이용하였다. 개방경계에서 조위와 위상 값은 실측치가 없어서 실측치가 있는 해역 (한국해양연구소, 1996)까지 계산영역을 확대하여 대영역을 계산하였고, 본 모델 영역의 개방경계에서의 조위와 위상 값은 대영역에서 계산된 모델 결과 값을 이용하였다. 지형 및 수심은 수로국 (1992) 발행 해도를 이용하였고, 하천의 유량은 거제시 (1995; 1997) 자료를 이용하였다.

3차원 해수유동 모델을 이용하여 M₂ 분조에 의한 조석류와 유동이 정상상태에 도달한 마지막 한 조석을 조석주기로 평균해서 잔차류를 시뮬레이션하였고, 해수유동 모델에 의해 계산된 결과를 검증하기 위하여 Kim (1976)이 실측한 유향과 유속 자료를 상호 비교하였다.

Table 1. Input data for a hydrodynamic model

Parameters	Input values
Mesh size	$\Delta x = \Delta y = 150$ m
Total mesh	$85 \times 87 \times 3 = 22,185$
Water depth	chart datum + MSL
Time interval	4 sec
Level	1st: 0~5 m, 2nd: 5~10 m, 3rd: below 10 m
Tidal level and degree at open boundary	I : 83.74 cm, 255.66° II : 84.65 cm, 255.50° III : 80.00 cm, 252.74°
Water temperature and chlorinity at open boundary	Level 1: 16.9°C, 34.07‰ Level 2: 16.3°C, 34.07‰ Level 3: 15.6°C, 34.07‰
Coriolis coefficient	$F = 2\omega \sin \mu$ ($\mu = 34^\circ 47'$)
Surface & internal friction coefficient	0.0013
Bottom friction coefficient	0.0025
Horizontal viscosity	$3.0E5$ (cm ² /sec)
Horizontal diffusion coefficient	$3.0E5$ (cm ² /sec)
Vertical diffusion coefficient	Level 1~3: 0.2 (cm ² /sec)
Calculation time	80 tidal cycles

4.2. 생태계 모델의 시뮬레이션

본 연구에 이용된 생태계 모델은 식물 및 동물플랑크톤, 입자 및 용존유기탄소, 인산인, 용존무기질소, 화학적 산소요구량 등의 요소로 구성되어 있으며, 연안 양식생물의 생리 생태에 관한 요소는 포함되어 있지 않다. 거제·한산만을 포함한 남해안 일원의 굴 양식 형태는 6~8월 경에 채묘하여 수하하고, 이듬해 봄철 이전에 대부분 수확을 완료하므로 모델에 의한 양식 비수기의 식물플랑크톤 재현 시점을 5월로 하였다.

생태계 모델의 초기치 및 경계치는 국립수산과학원 자료와 1994년과 1998년 5월에 수층별로 조사한 자료를 입력하였다 (Table 2). 거제·한산만 유역 내의 주요 하천은 둔덕천, 간덕천, 오수천, 산양천 및 부천천의 5개 하천이나, 모델에서는 이들 하천을 권역별로 구분 입력하였다. 둔덕천, 간덕천 그리고 나머지 3개 하천을 묶어

Table 2. Input data for an ecosystem model

Parameter	Input values
Mesh size	$\Delta x = \Delta y = 150$ m
Water depth	chart datum + MSL
Time interval	100 sec
Initial condition for compartments	
Level	DO (mg/L) COD (μg-at/L) DIP (μg-at/L) DIN (μg-at/L) POC (mgC/m ³) DOC (mgC/m ³) Chl.a (μgC/m ³) ZOO (mgC/m ³)
1	10.0 1.35 0.30 5.99 200 1,650 100 10
2	9.50 1.30 0.30 5.00 180 1,600 95 15
3	9.00 1.25 0.35 5.16 200 1,750 90 20
Boundary condition for compartments	
Area Level	DO (mg/L) COD (μg-at/L) DIP (μg-at/L) DIN (μg-at/L) POC (mgC/m ³) DOC (mgC/m ³) Chl.a (μgC/m ³) ZOO (mgC/m ³)
I	1 9.64 1.55 0.55 8.50 250 1,800 200 12
	2 9.60 1.40 0.52 8.00 200 1,500 150 13
	3 9.54 1.37 0.58 8.00 220 1,650 150 15
II	1 9.43 1.63 0.58 9.01 300 1,680 250 11
	2 9.40 1.60 0.54 8.00 300 1,690 200 12
	3 9.26 1.55 0.57 8.00 300 1,720 200 14
III	1 11.16 1.09 0.18 5.83 200 1,440 78 8
	2 11.00 1.09 0.20 4.52 220 1,440 70 8
	3 10.26 1.08 0.24 6.12 250 1,500 70 10
Horizontal viscosity coefficient	$3.0E5$ (cm ² /s)
Horizontal diffusion coefficient	$3.0E5$ (cm ² /s)
Vertical diffusion coefficient	0.2 (cm ² /s)
Calculation time	80 tidal cycles
Pollutant loads	
Name of stream	DO (ton/day) COD (ton/day) DIP (kg/day) DIN (kg/day) POC (kg/day) DOC (kg/day)
Dundeok	0.53 0.13 0.24 98.28 11.89 86.80
Gandeok	0.30 0.07 2.20 30.84 7.08 51.69
Sanyang	1.27 0.32 7.46 111.97 29.99 218.91

산양천으로 하였다. 각 하천의 월별 오염 부하량은 거제시가 하천 정비계획의 일환으로 조사한 월별 유량과 수질 자료를 이용하였다 (거제시, 1995; 1997). 생태계 모델 입력자료 중 생물학적 변수는 기존 측정된 자료와 문헌조사를 통하여 입력하였다 (Table 3).

5. 월별 먹이공급량 추정

양식 굴의 먹이공급량은 생태계 모델에서 기초생산력 (mgC/m²/day)을 나타내는 다음의 수식과 같이 표현가능하며, 양식 굴에 의한 영향을 배제한 5월의 재현 결과를 바탕으로 하여 9월부터 이듬해 4월까지를 계산기간으로 하였다. 월별 식물플랑크톤 현존량 변화를 재현하기 위해 기초생산력에 영향을 미치는 요소로 월별 수온, 염분, 일사량, 일조시간 및 오염 부하량 등을 고려하였다.

$$\frac{dP}{dt} = (\text{광합성에 의한 증식} - \text{세포의 분비} - \text{호흡} - \text{동물플랑크톤에 의한 섭취} - \text{고사} - \text{침강}) \times \text{수층}$$

$$\frac{dP}{dt} = \{ [1 - \mu_3(P)] \cdot V_1(T) \cdot \mu_1(\text{DIP, DIN}) \cdot \mu_2(I) \cdot P - V_2(T) \cdot P - V_3(T) \cdot Z - V_4(T) \cdot P - W_p \frac{dP}{dz} \} \times H$$

- 여기서, $\mu_3(P)$: 세포의 분비
- $V_1(T)$: 성장속도
- $\mu_1(\text{DIP, DIN})$: 영양염에 의한 비성장속도
- $\mu_2(I)$: 광합성속도 (mgC/mgChl.a/day)
- $V_2(T)$: 0°C에 있어서 호흡속도 (1/day)

- $V_3(T)$: 동물플랑크톤 섭식속도 (1/day)
- $V_4(T)$: 0°C에서 고사속도 (1/day)
- $W_p \frac{dP}{dz}$: 식물플랑크톤 침강플럭스
- H : 수심 (m)

월별 수온 및 염분은 1980~1998년까지 약 19년 동안 월별로 조사하여 보고된 자료 (국립수산과학원 (NFRDI), 1983; 1985b; 1989; 1996b; 1996c; 1997; 1998; 1999)와 미 발표된 자료를 종합 정리하여 입력하였고, 일사량, 일조시간 및 일장 등은 1980~1998년까지의 기상월보를 이용하여 월별 평균한 입력자료는 Table 4와 같고 각 하천의 월별 오염부하량은 Table 5에 나타내었다.

결과 및 고찰

1. 수질 및 퇴적을 환경 특성

1.1. 수질 환경

1.1.1. Chlorophyll a 농도 분포

1994년과 1998년 5월에 2회에 걸쳐 조사한 결과 표층은 0.90~4.72 µg/L 범위 (평균 1.76 µg/L), 저층은 0.29~4.12 µg/L 범위 (평균 1.69 µg/L)로 표층이 저층보다 높게 나타났다. 수평 분포 특성은 Fig. 3과 같이 만의 북서쪽에 위치한 화도 주변 수역에서 등농도 분포 곡선의 기울기가 조밀하게 나타나고 2.0 µg/L 이상의 높은 농도 분포를 보였는데, 이곳은 통영시와 가장 가까운 곳이며 주변

Table 3. Parameters used in the ecosystem model

Parameter	Nomenclature	Unit	Value
Phytoplankton			
Maximum growth rate	G_{max}, β_{Gmax}	day ⁻¹ , °C ⁻¹	0.50 · exp (0.0633T)
Half saturation constants for nutrient uptake	K_{SP}, K_{SN}	µM	Phosphate 0.2, Nitrogen 2.35
Photosynthetic light optimum	I_{opt}	ly · day ⁻¹	195.8
Light extinction coefficient	k	m ⁻¹	0.40
Respiration rate	P_{resp}, β_{Pres}	day ⁻¹ , °C ⁻¹	0.012 · exp (0.0524T)
Sinking rate of living cells	w_p	m · day ⁻¹	0.173
Rate of natural mortality	P_{mot}, β_{Pmot}	day ⁻¹ , °C ⁻¹	0.013 · exp (0.0693T)
C/Chl-a ratio	[Chl.a : C]	by weight	47.62
Zooplankton			
Maximum ration	R_{max}, β_{Rmax}	day ⁻¹ , °C ⁻¹	0.193 · exp (0.0693T)
Ivlev's constant	λ	(mgC/m ³) ⁻¹	0.01
Growth efficiency	ν	-	30% of the daily
Assimilation efficiency	μ	%	70.0
Rate of natural mortality	Z_{mot}, β_{Zmot}	day ⁻¹ , °C ⁻¹	0.053 · exp (0.0693T)
Detrital carbon			
Mineralization rate	V_{POC}, β_{POC}	day ⁻¹ , °C ⁻¹	0.01 · exp (0.0693T)
Fraction of biodegradation	κ	-	25% of mineralization
Sinking rate	w_{POC}	m · day ⁻¹	0.432
Dissolved organic carbon			
Mineralization rate	V_{DOC}, β_{DOC}	day ⁻¹ , °C ⁻¹	0.001 · exp (0.0693T)
Others			
Aeration rate	k_a	day ⁻¹	0.25

Table 4. Monthly input data used in an ecosystem model for the prediction of phytoplankton biomass in the absence of oyster culture grounds

Item	Month	Month							
		Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.
Water temperature (°C)	Surface	23.7	19.6	16.4	12.2	11.7	7.5	11.9	12.5
	Middle	23.0	19.5	16.4	12.2	11.8	7.5	11.9	12.3
	Bottom	22.3	19.4	16.3	12.2	11.9	7.6	11.8	12.1
Salinity	Surface	31.15	32.91	33.43	33.55	33.68	34.11	34.00	34.21
	Middle	31.77	32.92	33.48	33.55	33.69	34.13	34.00	34.25
	Bottom	32.38	32.93	33.53	33.56	33.70	34.16	34.01	34.29
*Imax (ly/d)		336.7	294.2	232.8	187.2	201.6	281.1	329.0	412.4
**Iopt (ly/d)		201.7	149.1	126.6	91.5	116.7	149.9	165.4	180.6
***DL		0.50	0.47	0.42	0.41	0.42	0.41	0.50	0.53

*Imax (ly/d): Surface light intensity.

**Iopt (ly/d): Light availability.

***DL: Day length.

Table 5. Monthly variations of pollutant loads discharged into Geoje-Hansan Bay

Parameters	Month	Month							
		Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.
COD (ton/day)	Dundeok	0.11	0.03	0.02	0.01	0.01	0.03	0.05	0.11
	Gandeok	0.07	0.04	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.06
	Sanyang	0.26	0.15	0.05	0.04	0.05	0.08	0.12	0.26
DO (ton/day)	Dundeok	0.48	0.20	0.15	0.07	0.12	0.18	0.22	0.49
	Gandeok	0.25	0.12	0.08	0.04	0.07	0.09	0.11	0.27
	Sanyang	1.13	0.48	0.36	0.18	0.28	0.41	0.51	1.17
DIP (kg/day)	Dundeok	0.48	0.34	0.24	0.05	0.14	0.41	1.12	2.87
	Gandeok	5.39	1.81	0.90	0.36	0.47	0.52	0.66	1.56
	Sanyang	3.77	5.65	0.56	0.24	0.49	1.21	2.32	5.11
DIN (kg/day)	Dundeok	54.93	21.49	21.60	13.34	19.49	29.45	44.67	96.81
	Gandeok	49.77	23.59	13.48	5.33	7.78	8.29	9.85	23.33
	Sanyang	39.55	70.21	50.98	24.89	32.83	38.71	28.30	68.08
POC (kg/day)	Dundeok	10.52	2.65	1.84	0.81	1.31	2.55	4.41	10.17
	Gandeok	7.06	3.43	0.96	0.78	1.18	1.67	2.64	5.51
	Sanyang	24.93	13.88	4.34	3.66	4.97	7.78	11.66	24.13
DOC (kg/day)	Dundeok	76.79	19.32	13.41	5.90	9.54	18.60	32.19	74.22
	Gandeok	51.51	25.04	6.98	5.72	8.58	12.16	19.26	40.24
	Sanyang	181.95	101.35	31.66	26.71	36.25	56.75	85.13	176.17

육지부에 자연부락이 위치할 뿐만 아니라 둔덕천이 인접하여 영양염류의 유입량이 만 내의 다른 수역에 비해 많은 곳이기 때문으로 판단된다. 거제읍의 생활하수가 유입하는 죽림포 내측 수역에서 2.0 µg/L 이상의 높은 농도 분포를 나타내었고, 산달도, 비산도에 이르는 수역에서는 1.5 µg/L 내외의 농도 분포를 나타내었다. 그리고, 만의 남측에 위치한 봉암도, 율포 일원의 외양과 접한 수역은 1.5 µg/L 이하의 낮은 농도 분포를 나타내었다.

Lee et al. (1991)에 의하면 1987년 9월부터 1988년 8월까지 총 6회에 걸쳐 조사한 결과 chlorophyll a 농도 분포는 0.56~9.08 µg/L

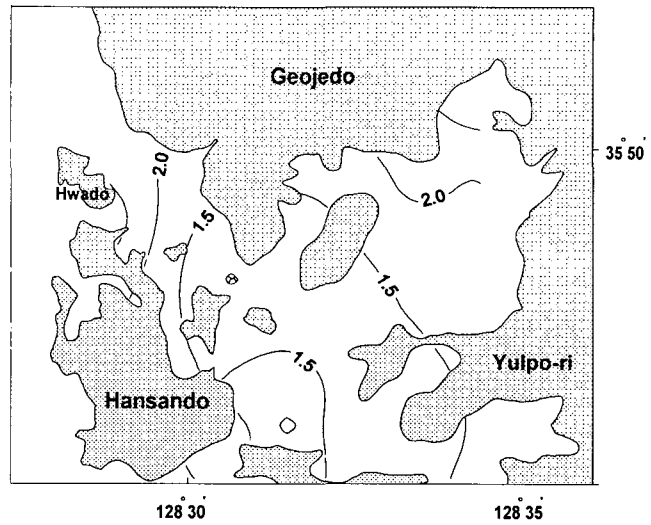


Fig. 3. Horizontal distributions of mean chlorophyll a (µg/L) at the surface layer in Geoje-Hansan Bay, in May 1994 and 1998.

(평균 1.70 µg/L) 범위였으며, 9월에서 이듬해 5월까지의 1~2 µg/L 범위로 비교적 일정한 경향을 보이다가 8월에 최고 농도를 나타내었고, Choi et al. (1997)은 5월 조사에서 0.98~2.76 µg/L (평균 1.73 µg/L)로 보고하여 본 조사결과와 유사하였다. 한편 같은 시기에 진주만은 2~3 µg/L 범위 (국립수산과학원, 1998), 통영 저산은 4~5 µg/L (NFRDI, 1997) 범위임을 감안할 때 거제·한산만의 chlorophyll a 농도는 상대적으로 낮은 것으로 판단되었다.

1.1.2. 영양염류 분포

암모니아 질소, 아질산 질소 및 질산 질소의 합으로 나타낸 용존무기질소의 표층 분포는 1.65~19.57 µg-at/L 범위에 평균 8.15 µg-at/L로 나타났다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 월별로는 11월이 가장 높았고 5월이 가장 낮았다. 2월에서 8월까지 만 내측은 7 µg-at/L 이하로 낮았으며, 11월은 만 전체가 10 µg-at/L 이상의 분포를 하였고, 만 내측으로 갈수록 낮아지는 경향이였다. 5월이 가장 낮은 분포를 보인 것은 춘계로 접어들면서 식물플랑크톤의 활발한 증식에 따른 것으로 생각된다. 본 연구 해역과 비교하여 굴 양식이 성행하고 있는 고성만과 여천만 (NFRDI, 1997), 가막만 (Lee et al., 1991; Cho et al., 1996)에서도 비슷한 농도를 보였고, 본 연구해역에서 조사한 Choi et al. (1997)의 조사결과와 거의 일치하였다.

거제·한산만의 인산 인 농도는 굴 양식이 성행하는 고성만과 여천만 (NFRDI, 1997), 가막만 (Lee et al., 1991; Cho et al., 1996)에 비해 낮았으며, 본 연구해역에 대한 Choi et al. (1997)의 조사결과와 잘 일치하였다. 표층의 수평 분포는 Fig. 5와 같이 만 상부와 만 하부측에서 만 내측으로 갈수록 대체적으로 낮아지는 경향이였다.

1.2. 퇴적물 환경

해수유동이 미약한 반 폐쇄성 만에서는 각종 오염물질이 외해로 확산되지 못하고 쉽게 퇴적되며, 퇴적된 각종 유기물질은 해양 생태계 내 물질순환의 리듬을 파괴하여 직·간접적으로 생물에 영

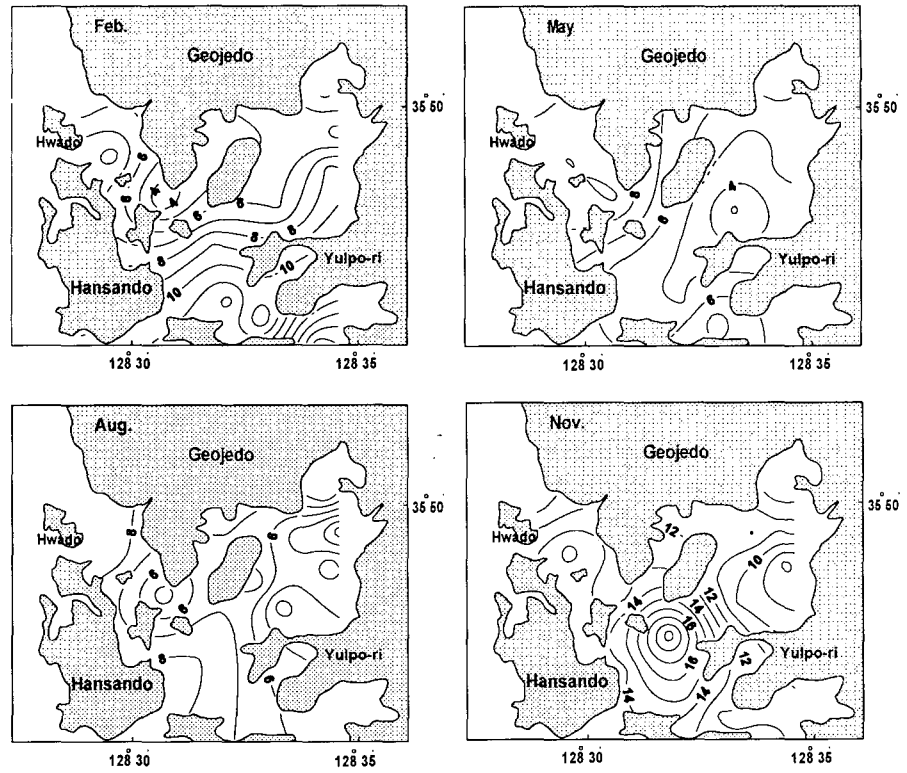


Fig. 4. Horizontal distributions of mean dissolved inorganic nitrogen ($\mu\text{g-at/L}$) at the surface layer in Geoje-Hansan Bay during 1980~1998.

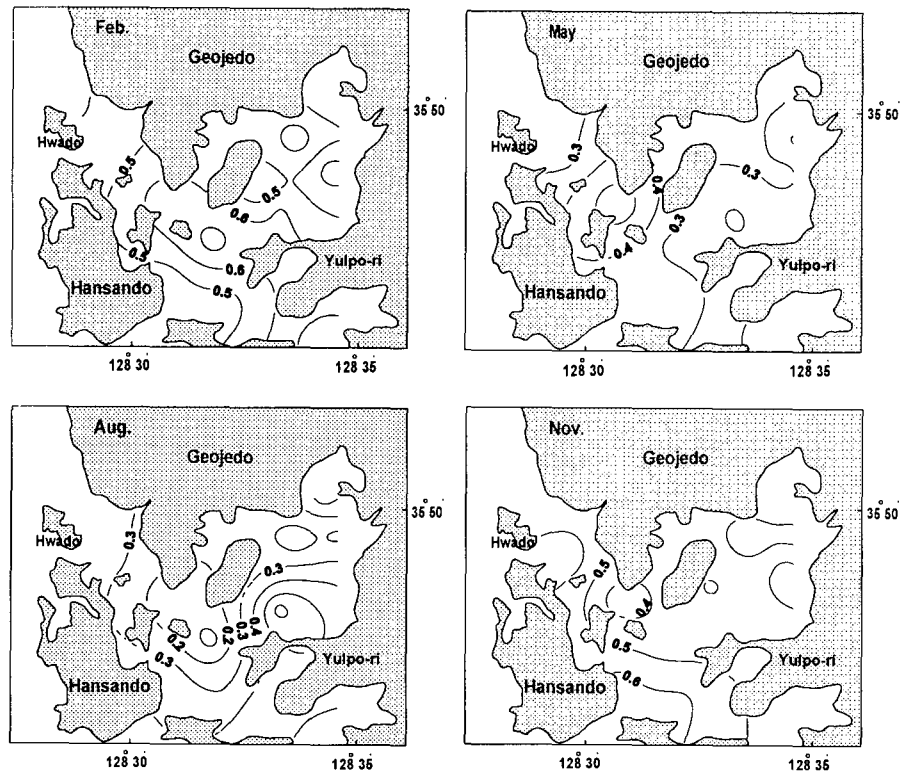


Fig. 5. Horizontal distributions of mean phosphate phosphorus ($\mu\text{g-at/L}$) at the surface layer in Geoje-Hansan Bay during 1980~1998.

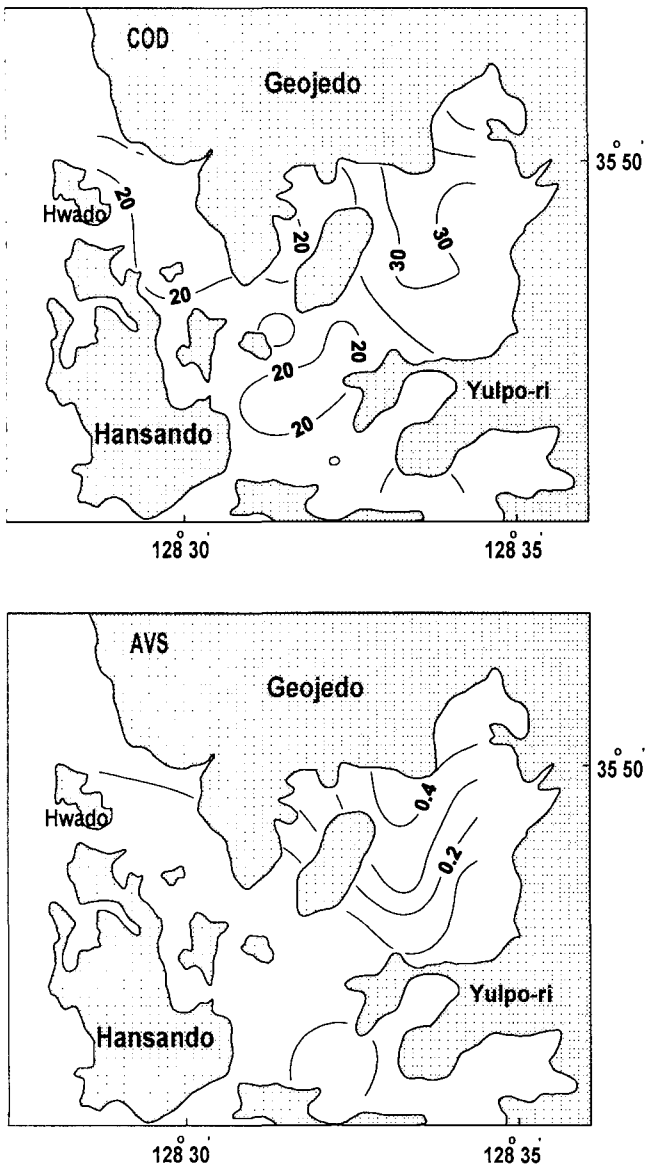


Fig. 6. Horizontal distributions of mean chemical oxygen demand (mg/g.dry-wt) and acid volatile sulfide (mg/g.dry-wt) of sediment in Geoje-Hansan Bay, in May 1994 and 1998.

향을 미치기도 한다. 퇴적물의 화학적 산소요구량은 1994년 5월에 18.5~38.9 mg/g.dry-wt 범위 (평균 22.5 mg/g.dry-wt), 1998년 5월은 16.0~43.5 mg/g.dry-wt 범위 (평균 24.3 mg/g.dry-wt)로 1994년과 1998년이 비슷한 수준이었고, 대부분의 정점에서 오염퇴적물 기준 (日本水産資源保護協會, 1983)인 20 mg/g.dry-wt를 초과하였다. Fig. 6과 같이 수평 분포는 굴 양식어장이 밀집된 D 지역의 상부 층이 높은 농도를 보인 반면, 수로부근인 A~C 지역은 상대적으로 낮은 경향이였다. D 지역은 수심이 낮고 유속이 느릴 뿐만 아니라 굴 양식어장이 밀집되어 있어 굴 배설물의 퇴적이 많은 반면, 수로부근은 유속이 내측보다 상대적으로 빨라 확산이 용이하기 때문으로 생각된다.

산취발성 황화물 (AVS)은 1994년 5월에 0.01~0.46 mg/g.dry-wt 범위 (평균 0.15 mg/g.dry-wt), 1998년 5월은 0.02~0.40 mg/g.dry-wt 범위 (평균 0.19 mg/g.dry-wt)로 평균 농도는 오염퇴적물 기준 (日本水産資源保護協會, 1983)인 0.2 mg/g.dry-wt 보다 낮았으나 D 지역의 내측은 0.2 mg/g.dry-wt 이상의 높은 분포를 나타내었고, 수로 주변 (A~C지역)은 0.1 mg/g.dry-wt 이하로 낮았다.

해저퇴적물의 영양염 용출속도는 수온 21~25°C의 여름철 조건에서 암모니아 질소는 20~50 mg/m²/day 범위 (평균 30 mg/m²/day), 인산 인의 용출속도는 5~15 mg/m²/day 범위 (평균 8 mg/m²/day)

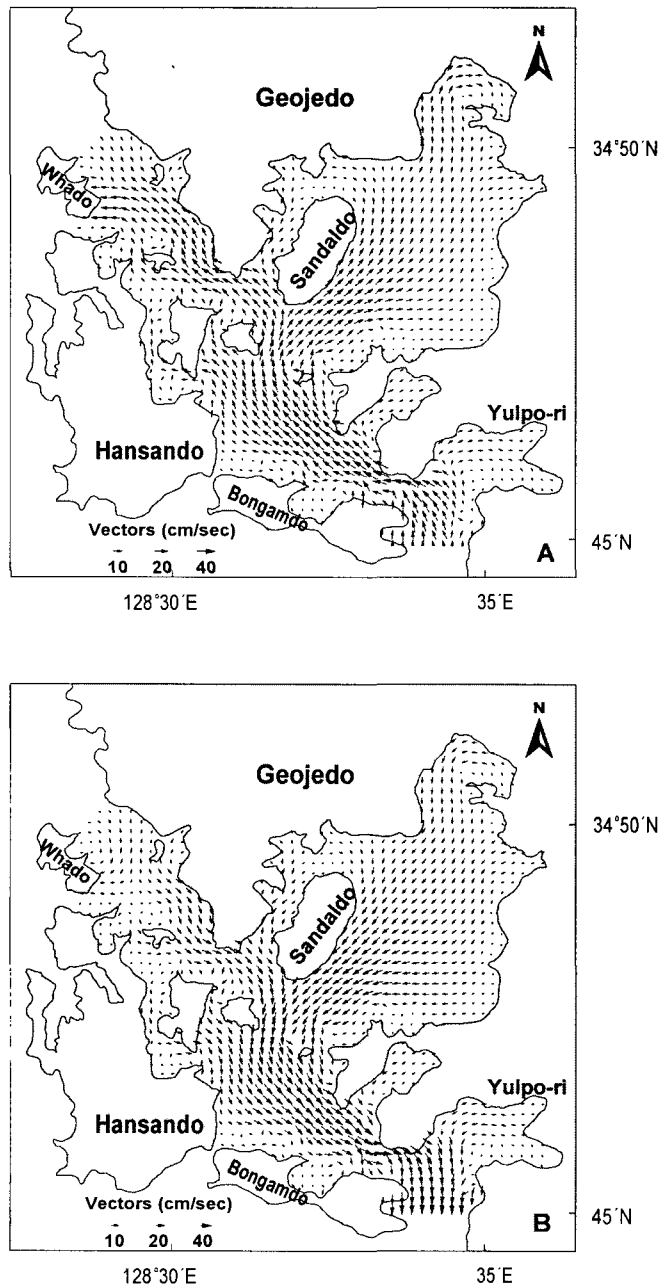


Fig. 7. Computed current vectors at surface level for flood tide (A) and ebb tide (B) in Geoje-Hansan Bay.

였다. 용존산소 소모속도는 $420 \sim 1,430 \text{ mgO}_2/\text{m}^2/\text{day}$ (평균 $450 \text{ mgO}_2/\text{m}^2/\text{day}$)이었다.

2. 생태-유체역학 모델의 시뮬레이션

2.1. 해수유동 시뮬레이션

2.1.1. 조석류 시뮬레이션

거제·한산만의 최강 창조류 (Fig. 7A)는 한산면 봉암도와 거제시 남부면 사이의 협수로 (개방경계 III)로 해수가 유입되어, 주류는 송도를 거쳐 통영시 방향으로 북서진하고, 일부는 만의 내측인 죽림포 방향으로 향하였다. 유속의 크기는 외양수가 유입하는 봉암도와 거제시 남단사이 (개방경계 III)의 협수로에서 40 cm/sec 내외로 크게 나타났고, 송도와 비산도 주변 수역 역시 20 cm/sec 정도로 유속이 비교적 크게 나타났다. 그러나 만 내측의 죽림포 수역은 10 cm/sec 이하로 유속이 작게 나타났고, 산달도 뒤편 수역에서는 5 cm/sec 이하의 정체상태를 나타내었다. 그러나 거제 한산만의 유속은 가막만 (Cho et al., 1996)이나 진해만 (Choi et

al., 1994) 등에 비해 크게 나타나 남해안의 다른 해역에 비해 해수교환이 비교적 양호한 것으로 판단되었다.

낙조류 (Fig. 7B)는 만의 북서 방향인 거제시 둔덕면과 화도 사이의 협수로 (개방경계 I)로 유입하여 송도 부근 수역에서 만의 내측인 죽림포 부근의 유출수와 합쳐지게 되며, 봉암도와 거제시 남단사이의 협수로를 통하여 외해로 유출하는 왕복조류의 형태를 나타내었다. 유속의 크기는 송도와 비산도 주변 수역이 10 cm/sec , 죽림포 일원 수역이 $5 \sim 10 \text{ cm/sec}$ 로 전반적으로 창조류에 비해 유속의 크기가 작게 나타났다. 그러나 외양역과 접한 봉암도와 거제시 남단사이의 협수로에서 45 cm/sec 내외로 낙조시의 유속이 더 크게 나타났다.

한편 Yoo et al. (1980)은 거제·한산만의 해수유동이 창조시 봉암도와 거제도 남면사이의 협수로에서 30 cm/sec 로 외양측에서 해수가 유입되어 송도를 거쳐 일부는 10 cm/sec 의 유속으로 죽림포로 향하고, 다른 일부는 $20 \sim 30 \text{ cm/sec}$ 로 비산도와 어구리 사이를 지나 견내랑 쪽으로 향한다고 하였다. 낙조시는 반대 방향으로

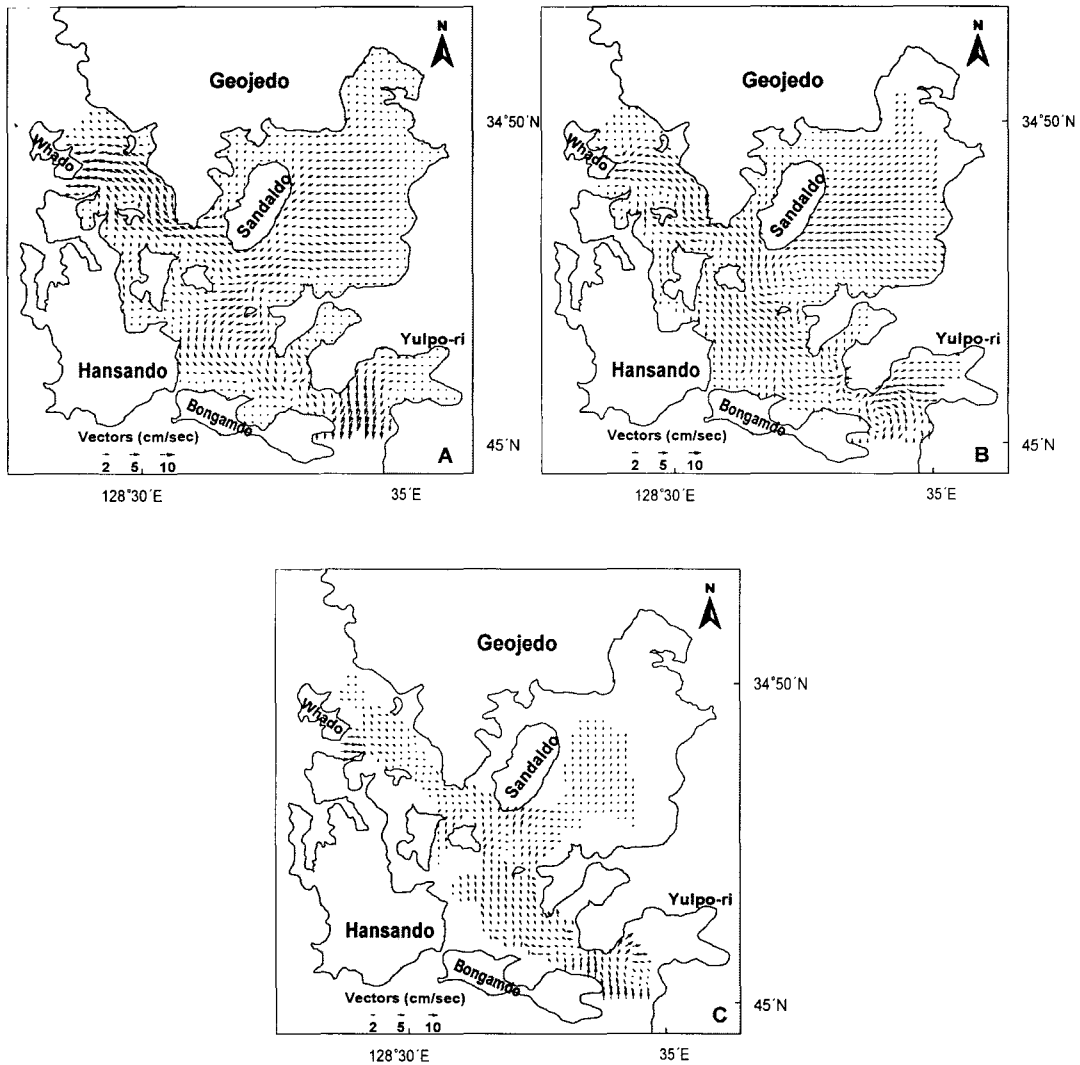


Fig. 8. Computed residual current vectors at surface (A), middle (B) and bottom level (C) in Geoje-Hansan Bay.

어구와 비산도 부근에서 10 cm/sec로 남류하고, 봉암도와 가배 사이를 지나 외양으로 유출하는 특성을 보이며, 전반적으로 창조류가 낙조류에 비해 강하고 수치실험에서 낙조류가 강하게 나타났던 봉암도와 남면 가배 사이의 수로에서는 낙조류가 강하다고 하였다. 이와 같은 결과로 볼 때 본 수치실험 결과는 거제·한산만의 유동장을 비교적 잘 재현한 것으로 판단되었다.

2.1.2. 잔차류 시뮬레이션

거제·한산만의 잔차류 재현 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 표층의 잔차류 (Fig. 8A) 형태는 계산영역의 남쪽 경계인 한산면 봉암도와 거제시 남부면 사이의 협수로에서는 10 cm/sec 유속으로 외해 방향으로 유출하였다. 송도와 비산도 부근 수역에서는 5 cm/sec 내외의 유속으로 북서방향의 흐름이 진행되어 대부분 한산도 북단과 와도 사이의 수로로 유출하며, 수로 부근은 7 cm/sec 내외로 유속이 크게 나타났다. 한편 만 중앙부의 흐름 형태는 만 내측에서 외측으로 유출하는 형태이나 유속의 크기가 3 cm/sec 이하로 작으며, 산달도 뒤편 수역과 죽림포 일원은 흐름이 거의 나타나지 않았다.

중층의 잔차류 (Fig. 8B) 형태는 전반적으로 표층에 비하여 유속의 크기가 감소하였으나, 만 내측인 산달도와 죽림포에 이르는 수역은 유속의 크기가 오히려 크게 나타났다. 흐름의 형태는 계산영역의 남쪽 경계에서는 시계 방향의 환류가 형성되었고, 송도와 비산도에 이르는 수역에서는 북서진하여 한산도 북단과 와도 사이의 협수로를 통하여 유출하였다. 와도 북단과 거제시 둔덕면 사이의 개방경계에서 흐름이 만 내측으로 향하는 것이 특징이었다. 또한 산달도와 죽림포에 이르는 수역에서는 표층과는 반대로 만 내측으로의 흐름이 뚜렷이 형성되었다. 저층의 잔차류 (Fig. 8C) 형태는 대부분 수로를 따라 흐름이 형성되는 것을 볼 수 있었고, 중층의 형태와 유사하였다.

한편 수로국의 통영항 일대 조류관측 결과 (Kim, 1976)에서 거제·한산만의 잔차류는 모델 계산영역의 남쪽 경계에 해당하는 한산면 봉암도와 거제시 남부면 사이의 협수로에서 외해 방향으로 10 cm/sec, 송도와 비산도 수역에서는 북서 방향으로 4~5 cm/sec, 한산도 북단과 와도 사이의 협수로에서는 서쪽 방향으로 유출하며 유속의 크기는 6 cm/sec, 그리고 와도 북단과 거제시 둔덕면 사이의 수로에서는 1.5 cm/sec로 만 내측으로 유입하는 것으로 보고하고 있다. 이와 같은 관측의 결과는 모델에 의해 계산된 잔차류와 유속의 크기 및 방향에 있어 비교적 잘 일치하는 것으로 판단되었다.

2.2. 생태계 시뮬레이션

2.2.1. 모델의 재현성

생태계 모델이 실제 거제·한산만의 식물플랑크톤을 잘 재현하는지를 알아보기 위하여 5월의 표층 실측치와 계산치를 비교하여 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다. 상대오차는 10.3%로 매우 유사하게 재현되었고, 실측치와 계산치의 적합성을 나타내는 결정계수 (coefficient of determination) R^2 은 0.70으로 70%가 표본회귀선에 적합한 것으로 나타났다. 따라서, 생태계 모델에 의해 계산된 계산치는 실측치와 높은 상관성을 가지며 대상해역의 식물플랑크

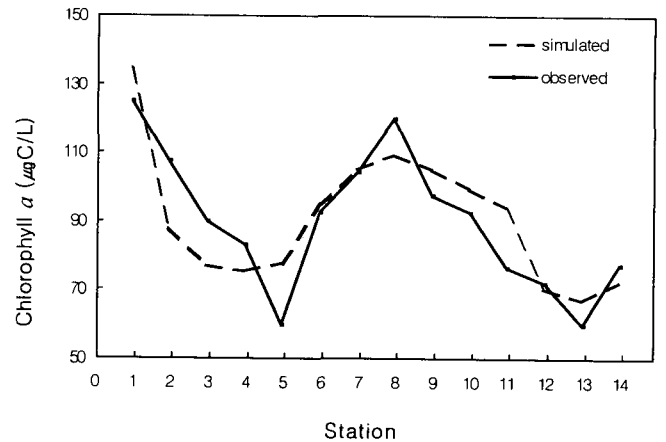


Fig. 9. Comparison between simulated and observed chlorophyll a ($\mu\text{gC/L}$) at each stations in Geoje-Hansan Bay.

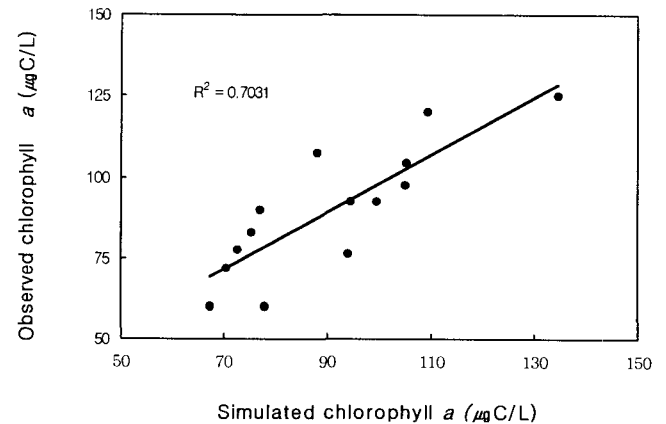


Fig. 10. Correlation between simulated and observed chlorophyll a ($\mu\text{gC/L}$) in Geoje-Hansan Bay.

톤의 분포상황을 잘 반영하고 있다고 판단되었다.

2.2.2. 식물플랑크톤의 재현

생태계 모델에 의해 재현한 5월의 chlorophyll a 농도의 수층별 분포를 Fig. 11에 나타내었다.

Chlorophyll a 농도 분포는 표층 (Level 1)의 경우 I 및 II의 개방경계 영역, 즉 한산면 화도와 거제시 둔덕면 사이의 수로에서 등농도 분포 곡선이 조밀하고 100~130 $\mu\text{gC/L}$ (2.0~2.6 $\mu\text{g/L}$) 범위의 높은 농도 분포를 보였다. 이것은 현장관측 조사결과에서도 나타난 바와 같이 이 수역의 경우 인근에 소규모 마을, 공장 등 오염원이 많고, 통영시와 인접하여 영향을 받기 때문으로 생각된다. 그러나 입구 수로부의 높은 chlorophyll a 농도는 만 내측으로 갈수록 점차 감소하는 분포를 보였다. 한편 산양천, 간덕천 등의 영향을 받는 만 내측에서도 110 $\mu\text{gC/L}$ (2.2 $\mu\text{g/L}$) 이상의 높은 농도를 나타내었다. 그리고, 만의 중앙부인 산달도 전면은 90~100 $\mu\text{gC/L}$ (1.8~2.0 $\mu\text{g/L}$), 봉암도 주변 수역은 70~80 $\mu\text{gC/L}$ (1.4~1.6 $\mu\text{g/L}$) 범위로 농도가 감소하고, 외양역과 접한 개방경계 III 주변 수역은 70 $\mu\text{gC/L}$ (1.4 $\mu\text{g/L}$) 이하로 계산영역 내에서 최저 농도를 나타내었다.

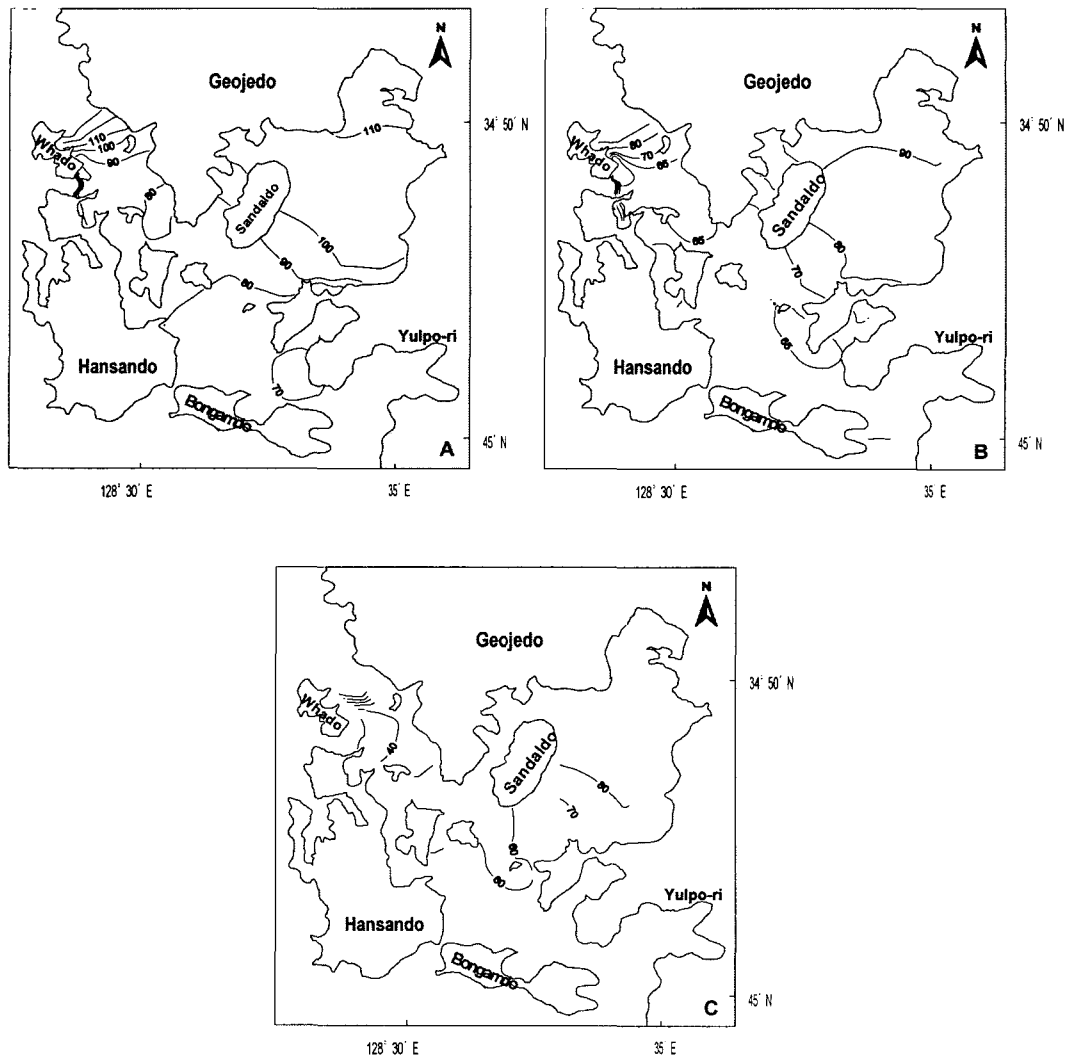


Fig. 11. The distributions of simulated chlorophyll *a* ($\mu\text{gC/L}$) at surface (A), middle (B) and bottom level (C) in Geje-Hansan Bay.

중층 (Level 2)의 경우 표층에 비해 농도가 감소하는 경향을 나타내었다. 농도 분포 특징은 표층에서의 같이 한산면 화도와 거제시 둔덕면 사이의 수로 및 하천의 영향을 많이 받는 만 내측 수역에서 높은 농도를 나타내었다. 산달도, 읍도 및 봉암도에 이르는 수역, 그리고 외양과 접한 개방수역에서는 낮은 농도 분포를 나타내었다. 저층 (Level 3)은 수심 10 m 아래층을 나타내므로 화도와 비산도 및 만의 외측으로 이어지는 수로 부분에만 나타나고 있으며, 개방경계 I에서 개방경계 III으로 갈수록 농도가 점차 감소하는 경향을 나타내었다.

3. 월별 먹이 공급량

수하식 패류양식의 먹이 공급원으로서 해수유동의 중요성이 강조되고 있다 (Incze et al., 1981; Wildish and Kristmanson, 1984). 하구역의 경우에는 하천으로부터의 유출 부하가 중요하며, 연안역의 아주 작은 만 등에서는 해수유동이 먹이 공급원으로서 중요한

역할을 한다. Carver and Mallet (1990)은 표면적이 0.5 km^2 의 작은 반 폐쇄성 만에서 먹이의 공급원으로 해수유동 만을 고려하여 추정된 바 있으나 거제·한산만과 같이 다소 규모가 큰 수역에서는 해수유동에 의한 공급뿐만 아니라 물질순환 과정에 의해서도 크게 좌우될 것으로 생각된다.

Fig. 12는 거제·한산만의 월별 기초생산력 즉, 먹이공급량을 나타낸 것으로 $0.19 \sim 1.27 \text{ gC/m}^2/\text{day}$ 범위였으며, 평균은 $0.62 \text{ gC/m}^2/\text{day}$ 이었다. 계산 시작 시점인 9월에 $1.12 \text{ gC/m}^2/\text{day}$ 의 높은 값을 나타낸 이후 점차 감소하기 시작하여 2월에 $0.19 \text{ gC/m}^2/\text{day}$ 의 최소값을 나타내었으며, 봄철로 접어들면서 점차 증가하여 5월에 $1.27 \text{ gC/m}^2/\text{day}$ 로 최고값을 나타내었다.

전 세계 해양에 있어서 기초생산력은 Table 6에 나타낸 바와 같이 열대 외양역은 $0.05 \sim 0.14 \text{ gC/m}^2/\text{day}$, 태평양 연안역은 $0.29 \text{ gC/m}^2/\text{day}$, 하구역은 $0.65 \text{ gC/m}^2/\text{day}$ 그리고 용승역은 $0.82 \text{ gC/m}^2/\text{day}$ 이다 (Kobrentz-Mishke, 1967; Ryther, 1969). 거제·한산만은

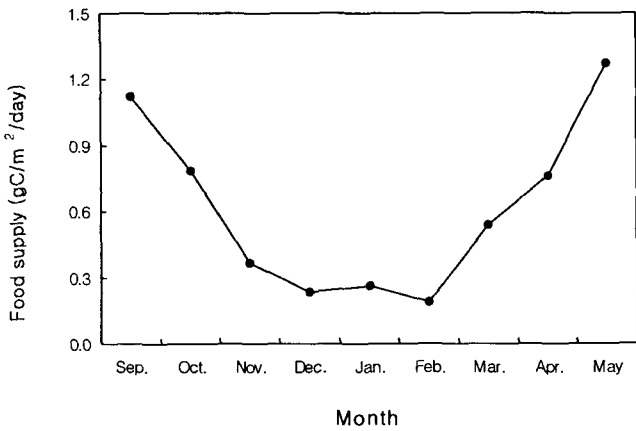


Fig. 12. Monthly variations of food supply (gC/m²/day) in model area.

Table 6. Comparison of annual primary productivities in different regions

Region	Primary productivity		Reference
	gC/m²/yr.	gC/m²/day	
Upwelling water	300	0.82*	Ryther (1969)
Continental water	100	0.27*	“
Oceanic water	50	0.14*	“
Subtropical oligotrophic water	36	0.10*	Kobrentz-Mishke (1967) (Pacific Ocean)
Coastal water	105	0.29*	“
Estuarine water	237	0.65*	“
Seto Inland Sea	122	0.33*	Uye et al. (1987)
Cheonsu Bay	150	0.41*	Jo (1988)
Kyeonggi Bay	320	0.88*	Jung and Park (1988)
Gamak Bay	0.99~10.20** (4.43)		Cho et al. (1996)
Gamak Bay	0.11~3.61 (0.91)		Lee et al. (1991)
Geoje-Hansan Bay	0.22~1.02 (0.52)		“
Geoje-Hansan Bay	0.19~1.27** (0.62)		This study

*Primary productivity (gC/m²/day) calculated from annual primary productivity (gC/m²/yr.).

**Primary productivity (gC/m²/day) computed on assumption that there were no oyster culturing facilities.

열대 외양역과 태평양 연안역보다 다소 높고, 하구역보다 낮은 값을 나타내고 있다. 그리고 천수만 (Jo, 1988)과 일본 세토내해 (Uye et al., 1987) 보다는 다소 높으나 Jung and Park (1988)의 경기만과 Cho et al. (1996)의 가막만 보다는 낮은 수준이었다. 한편 Lee et al. (1991)이 탄소동위원소 방법 (C¹⁴)으로 거제·한산만의 계절별 기초생산력을 측정하였는데, 0.22~1.02 gC/m²/day 범위에 평균 0.52 gC/m²/day로 본 계산결과와 거의 유사한 측정치를 나타내었고, 월별 농도는 11월에 평균 0.47 gC/m²/day 수준에서 점차 생산력이 감소하여 1월에 최저치 (0.41 gC/m²/day)를 보이다가 점차 증가하여 5월 (0.57 gC/m²/day)을 거쳐 8월에 평균 0.62

gC/m²/day로서 최고치를 나타내는 것으로 보고하고 있어 모델에 의해 계산된 기초생산력과 거의 비슷한 농도와 계절변동을 나타내었다. 한편, 거제·한산만은 소 해역에 따라 양식품종이 다르고, 환경특성도 차이가 있으므로 Fig. 1과 같이 A, B, C, D 및 E 해역으로 구분하여 먹이 공급량을 추정하였다 (Fig. 13). 각각의 소해역 중 하천으로부터 육상부하량이 해역으로 직접적으로 유입되고 해수유동이 아주 작아 거의 정체수역인 E 해역이 0.23~1.58 gC/m²/day 범위에 평균 0.78 gC/m²/day로 가장 높은 기초생산력을 나타내었다. D 해역은 주로 굴 양식장이 밀집한 해역으로 E 해역과 거의 같은 수준의 기초생산력을 보이고 있으며, 화도와 거제시 둔덕면과 접하며 굴, 어류 및 우렁쉥이 양식이 혼재해 있는 A 해역과 중앙 수로의 B 해역이 다음 순위였으며, 외양역과 연결되는 C 해역 (0.03~0.69 gC/m²/day, 평균 0.26 gC/m²/day)이 가장 낮은 기초생산력을 나타내었다.

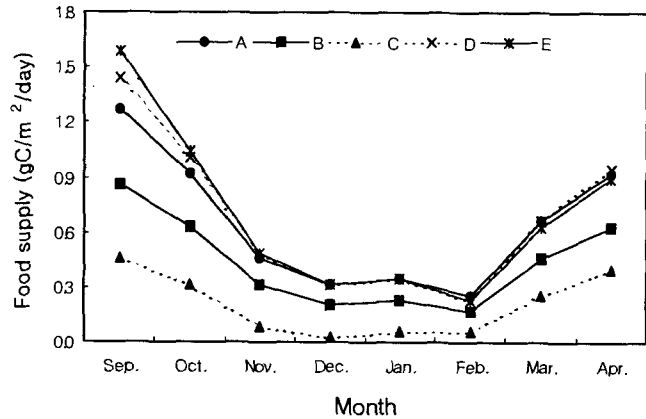


Fig. 13. Monthly variations of food supply (gC/m²/day) at each subarea.

요 약

거제·한산만 굴 양식어장의 수용력 산정에 가장 중요한 요소인 월별 먹이량 변동을 생태-유체역학 모델을 이용하여 산정한 결과는 다음과 같다.

비양식시기인 5월의 거제·한산만의 chlorophyll a 농도는 0.29~4.72 µg/L (평균 1.73 µg/L)로 낮은 농도를 나타내었고, 수평 분포 특성은 화도 주변 수역에서 2.0 µg/L 이상의 높은 농도 분포를 보인 반면, 만의 중앙부에 해당하는 산달도에서 봉암도 및 울포에 이르는 수역에서 1.4 µg/L 이하의 낮은 농도 분포를 보였다.

거제·한산만의 간차류는 표층의 경우 외양과 접한 남쪽의 협수로에서는 10 cm/sec의 유속으로 남쪽 방향으로 유출하고, 송도와 비산도 부근에서는 5 cm/sec 내외의 유속으로 북서 방향으로 흐름이 진행되었으며, 만 중앙부에서는 내측에서 외측으로 유출하는 형태였으나 유속의 크기는 3 cm/sec 이하로 작게 나타났다. 증층은 전반적으로 유속의 크기가 감소하였고, 만 중앙부근에서는 표층의 흐름과는 반대로 만 내측으로의 흐름이 뚜렷하였으며, 저층에서는 수로를 중심으로 흐름이 나타났다.

생태계 모델에 의해 비 양식시기로 가정된 5월의 식물플랑크톤 분포를 재현한 결과 실측치와 계산치의 적합성의 정도를 나타내는 R^2 값은 0.70, 상대오차는 10.3% 이었고, 재현된 분포 특성은 화도와 거제시 둔덕면 사이의 수로 부근 수역과 하천의 영향을 많이 받는 만 내측 수역에서 높은 농도분포를 나타내었고, 외해 방향으로 갈수록 점차 낮아지는 경향을 보였다. 이것은 만내로 유입하는 유입부하에 직접적으로 영향을 받고 비교적 정체수역인 만 내측에서 기초생산력이 높다는 것을 나타내었다.

생태계 모델을 이용하여 9월부터 다음해 5월까지 월별 먹이 공급량을 추정한 결과 0.19~1.27 gC/m²/day 범위에 평균 0.62 gC/m²/day로 나타났다. 9월에 1.12 gC/m²/day의 높은 값을 나타낸 이후 점차 감소하기 시작하여 2월에 0.19 gC/m²/day의 최소 값을 나타내었으며, 봄철로 접어들면서 점차 증가하는 양상을 보였고, 5월에 1.27 gC/m²/day의 최대 값을 나타내었다.

참 고 문 헌

- Brown, G.T. and J.J. Delfino. 1980. Sediment oxygen demand techniques: A review and comparisons of laboratory and *In situ* systems. *Water Research*, 14, 491~499.
- Brown, J.R. and E.B. Hartwick. 1988. Influences of temperature, salinity and available food upon suspended culture of the Pacific oyster, *Crassostrea gigas*. II. Condition index and survival. *Aquaculture*, 70, 253~267.
- Carver, C.E.A. and A.L. Mallet. 1990. Estimating the carrying capacity of a coastal inlet for mussel culture. *Aquaculture*, 88, 39~53.
- Cho, E.I., C.K. Park and S.M. Lee. 1996. Estimation of carrying capacity in Kamak Bay (I) - Estimation of primary productivity using the eco-hydrodynamic model. *J. Korean Fish. Soc.*, 29, 369~385 (in Korean).
- Choi, W.J., C.K. Park and S.M. Lee. 1994. Numerical simulation of the formation of oxygen deficient water masses in Jinhae Bay. *J. Korean Fish. Soc.*, 27, 413~433 (in Korean).
- Choi, W.J., Y.Y. Chun, J.H. Park and Y.C. Park. 1997. The influence of environmental characteristics on the fatness of Pacific oyster, *Crassostrea gigas*, in Hansan-Koje Bay, 30, 794~803 (in Korean).
- Incze, L.S. and R.A. Lutz. 1981. Modeling carrying capacities for bivalve molluscs in open, suspended-culture systems. *J. World Maricul. Soc.*, 12, 143~155.
- Jo, J.S. 1988. Primary Productivity and Nutrient Dynamics in Chunsu Bay, Yellow Sea. MS thesis, Inha University, 65pp. (in Korean).
- Jung, K.H. and Y.C. Park. 1988. Primary production and nitrogen regeneration by macrozooplankton in the Kyunggi Bay, Yellow Sea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 4, 194~206 (in Korean).
- Kim, D.S. 1976. The result of tidal current observation in the Chungmu hang approaches. Technical Reports, Hydrographic Officer, ROK., Pub., 1101, 147~172 (in Korean).
- Kobrentz-Mishke, O.I. 1967. Primary production. In *Tychyi okean*. Biologia Tychoyo okean, Vol. 1, V.G. Kort, ed. Nauka, Moscow, pp. 86~97 (in Russian).
- Kusuki, Y. 1977. Fundamental studies on the deterioration of oyster growing grounds. II. Organic content of faecal materials. *Bull. Jpn. Soc. Sci. Fish.*, 43, 167~171 (in Japanese).
- Kusuki, Y. 1978. Relationship between quantities of faecal material produced and of the suspended matter removed by the Japanese oyster. *Bull. Jpn. Soc. Sci. Fish.*, 44, 1183~1185 (in Japanese).
- Lee, B.D., K.K. Kang and Y.J. Kang. 1991. Primary production in the oyster farming bay. *Bull. Korean Fish. Soc.*, 24, 39~51 (in Korean).
- NFRDI. 1983. A comprehensive study on marine pollution for the conservation of the Korean coastal ecosystem with respect to culture areas and fishing grounds. Technical Report of National Fisheries Research and Development Institute, 58, 252pp. (in Korean).
- NFRDI. 1985a. Manual of methods for research and monitoring of marine pollution and red tide. National Fisheries Research and Development Institute, Korea, 297pp. (in Korean).
- NFRDI. 1985b. A comprehensive study on marine pollution for the conservation of the Korean coastal ecosystem with respect to culture areas and fishing grounds. Technical Report of National Fisheries Research and Development Institute, 63, 432pp. (in Korean).
- NFRDI. 1989. A comprehensive study on marine pollution for the conservation of the Korean coastal ecosystem with respect to culture areas and fishing grounds. Technical Report of National Fisheries Research and Development Institute, 84, 347pp. (in Korean).
- NFRDI. 1996b. Environmental survey to assess the water quality of the Korean coastal areas (1989~1994), National Fisheries Research and Development Institute, Korea, 255pp. (in Korean).
- NFRDI. 1997. Studies on the bad seed collection in oyster growing area and investigation of the new oyster seed collection area. National Fisheries Research and Development Institute, Korea, 226pp. (in Korean).
- Park, J.S. 2001. Estimating the carrying capacity for oyster culture grounds using an eco-hydrodynamic model. Ph. D. thesis, Pukyong National University, 142pp. (in Korean).
- Pazos, A.J., G. Román, C.P. Acosta, M. Abad and J.L. Sánchez. 1997. Seasonal changes in condition and biochemical composition of the scallop *Pecten maximus* L. from suspended culture in the Ria de Arousa (Galicia, N.W. Spain) in relation to environmental conditions. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 211, 169~193.
- Rodhouse, P.G., C.M. Roden, G.M. Burnell, M.P. Hensey, T. McMahon, B. Ottway and T.H. Ryan. 1984. Food resource, gametogenesis and growth of *Mytilus edulis* on the shore and in suspended culture: Killary Harbour, Ireland. *J. Mar. Biol. Assoc. U. K.*, 64, 513~529.
- Ryther, J.H. 1969. Photosynthesis and fish production in the sea. *Science*, 166, 72~76.
- Sharp, J.H. 1974. Improved analysis for particulate organic carbon and nitrogen from seawater. *Limnol. Oceanogr.*, 19, 984~979.
- Telek, G. and N. Marshall. 1974. Using a CHN analyzer to reduce carbonate interference in particulate organic carbon analysis. *Mar. Biol.*, 24, 219~221.
- Uye, S.H., H. Kuwata and T. Endo. 1987. Standing stocks and production rates of phytoplankton and planktonic copepods in the Inland Sea of Japan. *J. Oceanol. Soc. Japan*, 42, 421~434.
- Wildish, D.J. and D.D. Kristmanson. 1984. Importance to mussels of the benthic boundary layer. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 41, 1618~1625.

- Yoo, S.K., J.S. Park, P. Chin, D.S. Chang, K.B. Lim, C.K. Park, S.Y. Hong, C.H. Cho, J.S. Hue, S.S. Lee, P.A. Kang, K.Y. Park, M.S. Lee and Y. Kim. 1980. Comprehensive studies on oyster culture in Hansan, Geoje Bay. Bull. Fish. Res. Dev. Agency, 24, 7~46 (in Korean).
- 거제시. 1995. 산양천 부천천 오수천 하천정비기본계획, pp. 19~42.
- 거제시. 1997. 사등천 간덕천 오랑천 하천정비기본계획, pp. 26~32.
- 국립수산과학원. 1996c. 어장환경 오염조사. 1995년도 수진사업보고, pp. 62~73.
- 국립수산과학원. 1998. 남해연안 해양오염 및 적조조사. 남해수산연구소 사업보고, pp. 73~119.
- 국립수산과학원. 1999. 남해연안 해양오염 및 적조조사. 남해수산연구소 사업보고, pp. 84~145.
- 수로국. 1992. 해도 No. 208.
- 한국해양연구소. 1996. 한반도 주변 조석 조화상수 자료집. 한국해양연구소, pp. 275~282.
- 해양수산부. 1997. 해양환경공정시험방법. 해양수산부, 317pp.
- 楠木豊. 1986. 二枚貝の適正収容力研究について. 廣島縣水産試験場, 指定調査総合助成 事業報告書, pp. 1~8.
- 細見正明・順藤陵一. 1984. 底泥からの窒素と燐の溶出について. 國立公害研究所年報, 51, 195~216.
- 日本水産資源保護協會. 1983. 水産用水基準. 日本水産資源保護協會, 29 pp.
- 日本通商産業省 (MITI). 1991. 兵名湖 磐田地域産業公害總合事前調査 -兵名湖の部- 水質豫測シミュレーション報告書(案). 通商産業省 立地公害局 工業技術院 資源環境技術研究所. 80pp.

2002년 1월 15일 접수

2002년 7월 13일 수리