

## 수치모델을 이용한 고성만 양식 참굴의 연구

### I. 먹이가 참굴의 성장에 미치는 영향

오경희 · 방익찬 · Eileen E. HOFMANN\* · 김 윤\*\* · 김성연\*\* · 박윤정\*\* · 최광식+  
 제주대학교 해양과학부, \*Old Dominion University, \*\*국립수산과학원

## Modeling Oyster Populations Dynamics

### I. Effect of Available Food on Growth of the Pacific Oyster *Crassostrea gigas* in Goseong Bay, Korea

Kyung-Hee OH, Ig-Chan PANG, Eileen E. HOFMANN\*, Yoon KIM\*\*, Sung-Yeon KIM\*\*  
 Yoon-Jung PARK\*\* and Kwang-Sik CHOI+

School of Applied Marine Science, Cheju National University 1 Ara 1 Dong, Jeju, 690-756, Korea  
 \*Center for Coastal Physical Oceanography, Old Dominion University Norfolk, VA 23529, USA  
 \*\*National Fisheries Research And Development Institute, Busan 619-902, Korea

Effects of available food on growth of commercially cultured Pacific oysters, *Crassostrea gigas* in Goseong Bay on the south coast were studied using a numerical model. Levels of total protein, carbohydrate and lipid in particulate organic matter in the water column as well as chlorophyll *a* concentration were determined for estimating total available food for oyster growth. Environmental parameters including water temperature, salinity and total suspended solid were also monitored for the model. Oyster growth was also monitored by means of measuring shell length and tissue wet weight increase on a monthly basis. Simulation results from the numerical model indicated that chlorophyll *a* is not a good representative of available food for the oysters in Goseong Bay. In contrast, available food in the water column measured by filtration of the organic particles and analyzed in terms of total lipids, carbohydrates and protein was well matched with simulated oyster growth in the Bay which is similar to observed growth. The model also suggested that oysters have relatively low retention efficiency of 50% or less. This result indicates that oysters in the bay utilize only a part of food particle available in the water column, as reported in other studies.

Key words: Numerical model, Oyster growth, Goseong Bay, Food

## 서 론

우리나라의 참굴 양식은 대부분 연승 수하식이며, 수하식 참굴 양식업은 1960년대 말부터 경남 통영 연안을 중심으로 본격적으로 시작되었다 (Choi et al., 1997). 참굴 양식어장은 남해안 천해의 작은 만들을 중심으로 개발되었으며, 개발초기에는 양식 시설의 확대와 더불어 생산량이 증가하였으나 1987년을 정점으로 점차 감소하기 시작하였다 (Choi et al., 1997; Park et al., 1999). 이러한 양식 참굴 생산량 감소 원인으로 해면의 지속적인 이용과 자가 오염부하에 의한 어장환경악화와 과밀양식, 기생충에 의한 감염, 수온, 염분, 부유물질 및 먹이생물과 같은 환경인자의 장기적이며 지속적인 변화 등이 지목되어 왔다 (Spark and Chew, 1959; Agius et al., 1978; Thompson and Nichols, 1988; Grant et al., 1990; Park et al., 1999; Kang et al., 2000).

최근 들어 참굴 양식생산량의 최적화를 이루기 위하여 참굴 양식 어장관리와 적정 수용력 산정을 위한 모델 개발이 활발히 이루어지고 있다 (Heral, 1993; Raillard and Menesguen, 1994; Smaal et al., 1998). Smaal et al. (1998)은 패류 양식 해역의 어장환경용량을 산정하기 위해서는 기초생산과 패류성장과정을 파

악하는 것이 가장 중요하며, 어장 환경용량 산정 모델은 해수유동, 해수 퇴적물간의 물질 교환, 이때패류의 생리 및 개체군 성장 과정 등이 필수적으로 포함되어야 한다고 보고한 바 있다. Powell et al. (1992)은 대서양 굴의 성장에 관한 수치적 모델을 개발하였으며, 이를 이용하여 환경인자와 굴의 성장간의 상관관계를 밝힌 바 있다. 이 모델은 Hofmann et al. (1992; 1994; 1995)과 Klinck et al. (1992)에 의하여 확장 개발되었으며, 대서양산 참굴의 번식 및 개체군 역학의 연구에 이용된 바 있다. 우리나라의 경우 참굴의 성장에 관한 수치 모델은 참굴 양식장의 수용력 측정을 위한 목적으로 남해안의 가막만, 고성만 및 북만에서 양식중인 참굴을 대상으로 개발 보고 되었다 (Cho, 1996; Jeong, 1998; Lee, 2001).

이 연구는 우리나라 참굴 양식의 주 어장인 경남 고성만의 참굴 양식 어장관리와 만 내의 적정 수용력 산정 모델 개발의 일환으로, 수치 모델을 이용하여 굴 개체군 성장을 분석하였다. 연구에 사용된 모델은 참굴 개체군 역학 모델로서, Powell et al. (1992; 1994; 1995)에 의해 개발된 모델을 바탕으로, 고성만 참굴의 생태적 특성을 반영하여 수정 개발되었다. Powell et al. (1992; 1994; 1995)에 의하여 개발된 참굴 개체군 역학모델은 Kobayashi et al. (1997)에 의해 일본 히로시마 및 오카야마 등지의 양식 참굴에 적용된 바 있다. 또한 이 수치 모델은 우리나라 가막만 양식 참굴의 개체군 역학을 이해하는 데에도 적용된 바 있다 (Hyun et al., 2001). 이 연구에서는 해수 중에 분포하는 가용 먹이와 참굴의 성장과의 상

\*Corresponding author: skchoi@cheju.cheju.ac.kr

관계를 수치 모델을 이용하여 분석하였다.

재료 및 방법

조사 지역의 특성

고성만은 경남 통영에 위치한 표면적 약 17.5 km<sup>2</sup>, 총 체적 약 1.2×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>인 비교적 작은 만이다 (Fig. 1). 만은 주변에 작은 하천들을 가지고 있지만, 좁은 만 입구를 제외하고는 육지로 둘러싸여 있다. 만의 수심은 평균 7 m이다.

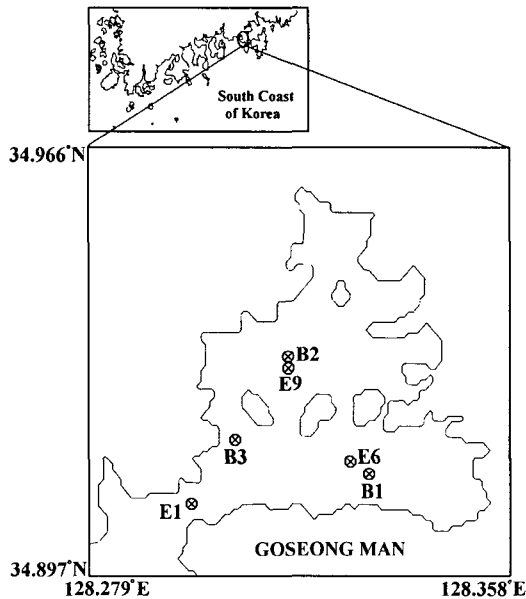


Fig. 1. Location of the study area, Goseong Bay, Korea. Environmental data were collected from E1, E6, and E9 and oysters were sampled from B1, B2 and B3.

만으로 유입되는 창조류는 만 입구에서 북서방향으로 흐르며 약 30~40 cm/sec의 유속을 갖는다. 흐름의 주류는 비도와 읍도, 연도와 앵비말 사이를 통과하여 만 북쪽 내측으로 유입되며, 각 섬들의 배후에서는 유속이 느리다. 북쪽 내만에서는 약 10 cm/sec 이하, 동쪽 내만에서는 약 5 cm/sec 이하의 유속을 갖는다. 낙조류의 유속은 창조류보다 다소 빠르며, 수심이 깊은 만 입구 (평균 20 m)에서는 강한 유속이 나타난다. 따라서, 양식장은 북쪽지역보다는 대부분 만의 중심과 남쪽부분에 형성되어 있다.

고성만에서 생산되는 참굴은 우리나라에서 연승 수하식으로 양식되는 참굴 생산량의 70% 이상을 차지하고 있다 (Kang, 2001). 참굴 양식어장의 시설들은 각 어장마다 연승 길이나 수하연 길이가 조금씩 다르다. 연승의 길이는 100~200 m로 어장의 형태에 따라 다르지만 보통 100 m를 기준으로 한다. 연승과 연승 사이는 약 5 m이며, 수하연과 수하연 간의 간격은 40 cm로 권장하고 있다. 수하연 길이는 수심에 따라 차이를 보이는데, 수심이 얇은 만 안쪽은 4~5 m, 10 m 이상의 수심을 보이는 해역에서는 5~6 m이다. 수하연 당 콜렉터 간격은 평균 25~30 cm이며, 약 20~30개의

콜렉터를 갖는다.

시료채취

참굴의 성장에 영향을 미치는 수치 모델 입력 자료인 수온, 염분, 부유물질, chlorophyll *a*는 정점 E1, E6, E9에서 1999년 6월부터 2000년 5월까지 매일 측정하였으며, 같은 시기에 굴의 체장, 육중량, 습중량, 및 해수중의 유기물 총량은 정점 B1, B2, B3에서 한 달에 두 번씩 측정하였다. 해수 중에 분포하는 가용 먹이량은 일정한 량의 해수를 여과한 뒤, 여과지에 걸러진 입자 유기물의 총량을 단백질, 탄수화물 및 지방으로 분류하여 분석하였다. 단백질 분석은 BCA protein assay kit (Pierce)를 이용하였고, 탄수화물 분석은 페놀-황산법을 이용하였다. 시료의 농도는 분광광도계 (Spectronic 3000 Array, Milton Roy, USA)를 이용하여 단백질은 485 nm의 파장에서 탄수화물은 562 nm 파장에서 각각 흡광도를 측정 후 미리 작성된 검량선의 농도식에 대입하여 µg/L로 환산하였다. 지질은 3 L의 해수를 여과하여 여과수량에 따라 µg/L로 환산하였다 (구체적인 분석법과 참고문헌 제시). 실험은 각각의 온도 구간에서 각 항목별로 3~6회 반복 실험하여 평균농도를 구하였다.

모 델

참굴 개체군 역학 모델은 단련된 굴이 양식장에 이식된 후 성장하여 수확되기까지의 성장역학을 파악하기 위해 만들어졌다. 고성만에서 양식되고 있는 참굴의 성장역학을 연구하기 위해 일부 주요방정식과 환경자료들을 고성만의 환경과 참굴에 맞게 수정·보완하였다. 모델에 사용된 주요 방정식과 관계식들은 Table 1과 같다.

효율적인 참굴 집단의 성장을 이해하기 위하여 참굴의 크기는 12등급으로 구분하였으며, 각 등급은 체장과 건중량 사이의 관계식을 이용하여 계산하였다 (Table 2). 이 모델은 동화량과 호흡량의 차에 의해 순 생산량이 계산되어지는 일반적인 에너지 흐름 방정식에 토대를 두고 있으며, 순 생산량은 성장과 번식의 합으로 나타난다. 모델의 모든 과정은 에너지 (calori)항으로 계산되며, 참굴에 대한 에너지 전환계수는 5,112 cal/g, 먹이에 대한 칼로리 전환계수는 5,168 cal/g이다 (Hofmann et al., 1992; 1994; 1995; Powell et al., 1992; 1994; 1995; Kobayashi et al., 1997; Hyun et al., 2001).

수치모델에서의 먹이공급

굴은 주로 식물플랑크톤을 먹이로 이용하는 여과섭식자로 알려져 있다. Kusuki (1977a)와 Newell and Jordan (1983)의 보고에 의하면 특히 굴은 작은 식물플랑크톤이나 질소가 풍부한 입자들을 선택하여 섭취하는 것으로 알려져 있다. 이 연구에서는 먹이에 따른 참굴의 성장을 이해하기 위해 각기 다른 두 가지의 먹이공급원을 이용하여 그에 따른 굴의 성장을 모사하였다. 먼저 현재 가장 널리 측정되고 있는 chlorophyll *a*, 즉 플랑크톤만을 먹이공급원으로 고려하여, 이에 대한 굴의 성장을 수치 모델로 모사하였다. 모델에 쓰인 자료는 1999년 6월부터 2000년 5월까지 고성만에서

Table 1. Equations and correlations used in the population dynamics model for the Pacific oyster *C. gigas* in Goseong Bay, Korea (modified from Hofmann et al. (1996) and Powell et al. (1995))

<b>Governing equation</b>	
$NP_j = P_{gj} + P_{rj} = A_j - R_j$	$NP_j$ , net production; $j$ , size class
$dO_j/dt = P_{gj} + P_{rj}$ + (gain from $j-1$ ) - (loss to $j+1$ ) + (gain from $j+1$ ) - (loss to $j-1$ )	$P_{gj}$ , somatic production $P_{rj}$ , reproductive tissue production $A_j$ , assimilation; $R_j$ , respiration $O_j$ , number of oyster population
<b>Filtration rate</b>	$FR_{wj}$ , Filtration rate (mL filtered per individual $min^{-1}$ )
at $W_{dj} > 2.09$ g $FR_{wj} = 2.51W_{dj}^{0.279}$	$W_{dj}$ , the ash-free dry weight in g per individual for each size class
at $W_{dj} \leq 2.09$ g $FR_{wj} = 0.117W_{dj}^3 - 1.05W_{dj}^2 + 3.09W_{dj} + 0.133$	$T$ , temperature
$FR_j = FR_{wj} T^{0.5}/4.47$	$S$ , ambient salinity
at $S \geq 20$ ‰ $FR_{sj} = FR_j$	
at $10$ ‰ $< S < 20$ ‰ $FR_{sj} = FR_j(S-10)/(20-10)$	
at $S \leq 10$ ‰ $FR_{sj} = 0$	
$\tau_{t-1} = (4.17 \times 10^{-4})(10^{0.418x})$	$\tau$ , total particulate content (inorganic+organic) (g/L)
$FR_{ij} = FR_{sj}[1 - 0.01((\log_{10}\tau_{t-1} + 3.38)/0.418)]$	$x$ , the percent reduction in filtration rate
<b>Ingestion</b>	$I_j$ , ingestion
$I_j = fFR_j$	$f$ , the measured food value (mg/L)
<b>Assimilation</b>	$A_{eff}$ , the assimilation efficiency
$A_j = I_j A_{eff}$	
<b>Respiration</b>	$R_r$ , the ratio of respiration
at $W_{dj} \leq 0.1$ g $R_r = 0.0005T^{2.47}$	
at $0.1$ g $< W_{dj} \leq 0.5$ g $R_r = 0.0026T^{1.91}$	
at $0.5$ g $< W_{dj} \leq 0.6$ g $R_r = 0.0056T^{1.74}$	
at $0.6$ g $< W_{dj} \leq 0.7$ g $R_r = 0.0102T^{1.92}$	
at $0.7$ g $< W_{dj}$ $R_r = 0.0017T^{2.37}$	
at $T \leq 10^\circ C$ $R_j = 0.6693W_{dj}^{0.4774} \times R_r$	
at $10^\circ C < T \leq 15^\circ C$ $R_j = 0.7552W_{dj}^{0.5434} \times R_r$	
at $15^\circ C < T \leq 20^\circ C$ $R_j = 0.7934W_{dj}^{0.6635} \times R_r$	
at $20^\circ C < T \leq 25^\circ C$ $R_j = 0.7754W_{dj}^{0.7552} \times R_r$	
at $25^\circ C < T \leq 30^\circ C$ $R_j = 0.7103W_{dj}^{0.9234} \times R_r$	
<b>speed</b>	$f'$ , average food in area of interest (mg/L), $f_s$ , food upstream (mg/L), $A$ , width $\times$ height, $s$ , speed (m/s)
$f' = fs[\frac{1}{2} + \frac{1}{2}(\frac{2sA - FR_{wj}}{2sA + FR_{wj}})]$	
<b>Reproduction</b>	
Juvenile/adult boundary	0.29 g ash-free dry weight, about 50 mm long for adult oyster
$P_{rj} = R_{effj} NP_j$	$R_{effj}$ , Reproduction efficiency
at $T \geq 27^\circ C$ $R_{effj} = 0.8$	
at $23^\circ C < T < 27^\circ C$ $R_{effj} = 0.2T - 4.6$	
at $T < 23^\circ C$ $R_{effj} = 0.8$	
when $NP_j < 0$	preferential re-sorption of gonadal tissue
<b>Spawning</b>	when the reproduction biomass exceeds 50% of total biomass
Male/Female ratio	$f_{ratio}$ , the ratio of females to males
$f_{ratio} = 0.021L_b - 0.62$	$L_b$ , lenght (mm)
<b>Eggs spawned</b>	when the reproduction biomass exceeds 50% of total biomass
$R_i = 0.50O_j$	
No. eggs spawned = $R_i/6133$	
$W_{egg} = 2.14 \times 10^{-14} V_{egg}$	$V_{egg}$ , oyster egg volume ( $\mu m^3$ )
<b>Caloric conversions</b>	
Oysters	5,112 cal/g dry wt.
Food	5,168 cal/g dry wt.
Eggs	6,133 cal/g dry wt.
Energy	4.83 cal/mL $O_2$
<b>Model Solution</b>	Crank-Nicolson Tridiagonal solution Technique

Table 2. Oyster size classes used in the model

Size Class	Weight (g dry weight)	Length (mm)
1	$0.46644 \times 10^{-7} - 0.46132 \times 10^{-3}$	1-10
2	$0.46132 \times 10^{-3} - 0.59935 \times 10^{-2}$	10-19
3	$0.59935 \times 10^{-2} - 0.32462 \times 10^{-1}$	19-29
4	$0.32462 \times 10^{-1} - 0.85918 \times 10^{-1}$	29-37
5	$0.85918 \times 10^{-1} - 0.15662$	37-43
6	0.15662-0.36111	45-53
7	0.36111-0.76711	53-64
8	0.76711-1.37010	64-74
9	1.37010-2.27350	74-84
10	2.27350-3.56330	84-94
11	3.56330-5.54450	94-105
12	5.54450-9.45270	105-120

월별로 측정된 해수 표본내의 chlorophyll a 자료를 이용하였다. 규조류나 편조류와 같은 식물플랑크톤은 오랫동안 굴의 주 먹이원으로 알려져 왔는데, 최근 들어 굴이 식물플랑크톤 이외에도 잔존 유기물이나 박테리아와 같은 입자성 유기물을 섭취한다는 보고와 함께 chlorophyll a 농도와 다른 입자 유기물 농도와의 상관관계를 이용한 가용먹이 전환식들이 보고되었다 (Parsons et al., 1961; Widdows et al., 1979; Soniat, 1982). Soniat et al. (1984; 1985; 1998)의 미국 Texas주 Galveston Bay에 분포하는 대서양굴을 대상으로 굴 먹이공급원의 효율성 및 가용먹이량 측정에 관한 보고에 의하면, 굴의 먹이원으로는 식물플랑크톤만을 고려한 먹이량, 즉 chlorophyll a 농도를 측정하는 것 보다 식물플랑크톤과 잔존입자성 유기물 및 박테리아와 같은 총 입자 유기물을 먹이량으로 추정하는 것이 굴의 성장을 이해하는데 있어 보다 더 효율적인 것으로 보고한 바 있다. 따라서, 이 연구에서는 chlorophyll a 외에 입자성 유기물에서 측정된 단백질, 지질, 탄수화물을 굴이 섭취할 수 있는 가용 먹이원으로 가정하여 이들에 대한 굴의 성장을 추정하였다.

유속과 먹이

해수 중에서 개체군의 밀도와 먹이공급, 유속간의 상호작용을 알아보기 위해 Wilson-Ormond et al. (1997)이 제시한 방정식을 모델에 적용하였다. 시간에 따른 해수중의 가용 먹이의 변화는 다음과 같이 개체군의 여수율과 먹이의 관계로 나타낼 수 있으며,

$$\frac{df}{dt} = -\frac{\alpha}{V} f \tag{1}$$

먹이와 유속의 관계는 양식장 내의 해수가 한 방향으로만 흐른다고 가정하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{df}{dl} = \frac{1}{s} \frac{df}{dt} = -\frac{\alpha}{sV} f \tag{2}$$

여기서 f는 공급되는 먹이량 (mg/L), t는 시간, α는 여수율 (L/hr), V는 체적 (m³), s는 유속 (m/s), f'은 잔여 먹이량 (mg/L), l은 체적의 길이 (length)를 뜻한다. 좁은 해역에서 수직적인 혼합과 확산은 중요하지 않은 것으로 보고되고 있어 수심에 따른 유속의 변화는 본 연구에서 고려하지 않았다 (Powell et al., 1995). 해수

중 잔여 먹이량은 다음과 같이 표층과 저층에 분포하는 먹이의 평균으로 나타낼 수 있으며,

$$f' = \frac{fs + fb}{2} \tag{3}$$

여기서 fs는 표층에 분포하는 먹이, fb는 저층에 분포하는 먹이를 나타낸다. 위의 식들을 이용하여 해수 중에 존재하는 먹이량을 계산하면

$$f' = fs \left[ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \left( \frac{2sA - \alpha}{2sA + \alpha} \right) \right] \tag{4}$$

이다. 여기서 A는 면적 (m², width×height)이다.

결 과

물리적 환경요인

Fig. 2는 고성만에서 관측된 각 정점 (E1, E6, E9)의 수온과 염분, 부유물질, chlorophyll a에 대한 월별 평균값을 나타낸 것이다. 조사기간 중 수온은 4~25°C로 각 정점이 비슷한 분포를 보이며, 최대값은 8월에, 최소값은 2월에 관측되었다 (Fig. 2A). 전체 염분 범위는 약 27.5~34.0이며, 각 정점 모두 최소값은 9월에 관측되었고, 겨울철에 비교적 높은 염분 분포를 보였다 (Fig. 2B). 정점 E6과 E9는 거의 같은 분포를 나타내는데 비해, 정점 E1에서는 최소값이 약 30.0으로 다른 정점보다 높게 나타났다. 해수중의 부유물질 농도는 15~30 mg/L이었다 (Fig. 2C). 조사기간 중 측정된 chlorophyll a는 0.2~6.2 mg/L의 분포범위를 보였으며, 식물플랑크톤 대증식이 일어나는 4월과 9월에 최대값을, 2월에 최소값을 보였다 (Fig. 2D).

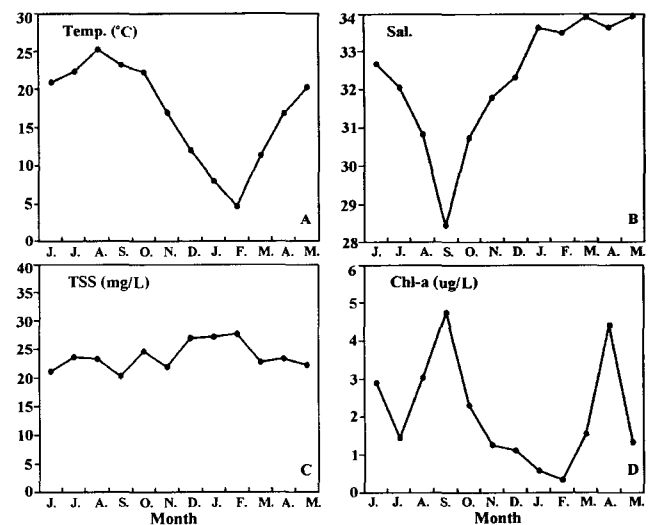


Fig. 2. Time series of the averaged (A) water temperature (°C), (B) salinity, (B) total suspended solid (mg/L) and (D) chlorophyll a concentration (µg/L) in Go-seong Bay from June 1999 to May 2000.

가용먹이량 추정

Fig. 3은 연구해역인 고성만의 관측정점 B1과 B2, B3에서 측정된 입자성 유기물 내의 단백질, 지질, 탄수화물의 월별 평균값을 나타낸 것이다. 단백질은 0.3~3.0 mg/L의 범위를 보이며, 3월과 9월에 가장 높은 값을 보였으며 (Fig. 3A), 지질은 전반적으로 1 mg/L 이하의 낮은 값을 보였다 (Fig. 3B). 탄수화물은 0.3~1.3 mg/L의 범위를 보였으며, 3월과 8월에 가장 높게 나타났다 (Fig. 3C). 이 연구에 이용된 수치모델에서는 여과된 유기물 입자로부터 추정된 단백질, 탄수화물 및 지방의 총량을 칼로리로 환산한 후, 이를 가용 먹이원으로 산정하여 대입하였다. Fig. 3D는 여과된 유기물의 총량 (단백질, 지질, 탄수화물의 합)을 나타낸 것으로, 0.5~3.5 mg/L의 범위를 가지며 3월과 8월에 가장 높은 값을 보여 chlorophyll의 연중 변화와 유사한 계절 변동을 보였다.

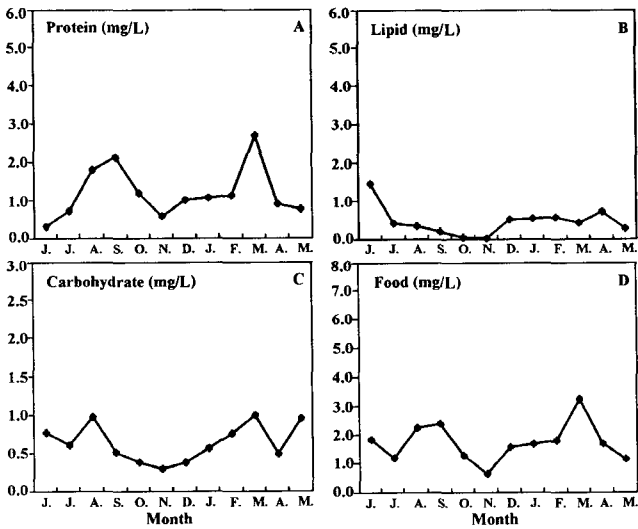


Fig. 3. Time series of mean concentration of (A) protein (B) total labile lipid, (C) labile carbohydrate and (D) sum of three factors (Lipid+Protein+Carbohydrate) in water samples collected from June 1999 to May 2000.

참굴의 성장

Fig. 4는 정점 B2에서 채집된 참굴의 체장과 중량 (습중량, 건중량)의 월 평균 변화를 나타낸 것이다. 이식시기인 6월에는 약 18 mm였던 참굴은 이듬해 4월에는 약 85 mm까지 성장하였다 (Fig. 4A). 월 평균 육질 습중량은 9월부터 12월까지는 빠르게 증가하다가 12월 이후부터는 느린 증가를 보였다 (Fig. 4B). 반면에 육질의 월 평균 건중량은 이듬해 4월까지 점차적으로 증가하는 추세를 보여 계절적인 수분함량의 변화가 있음을 시사하였다 (Fig. 4C). Fig. 4D는 고성만 참굴의 건중량과 습중량 비를 나타낸 것으로 연간 0.1~0.3 변화 폭을 보였다.

Fig. 5는 고성만에서 채집된 참굴의 체장과 건중량, 체장과 습중량, 체장과 건중량 및 건중량과 습중량의 상관 관계를 관계식으로 나타낸 것이다. 또한 고성만과 유사한 환경에서 측정된 참굴의 성장을 비교해 보기 위하여 고성만 (GS), 가막만 (GM) 및 일본 히로시마와 오키야마에서 (JP) 측정된 참굴의 성장패턴을 도식화

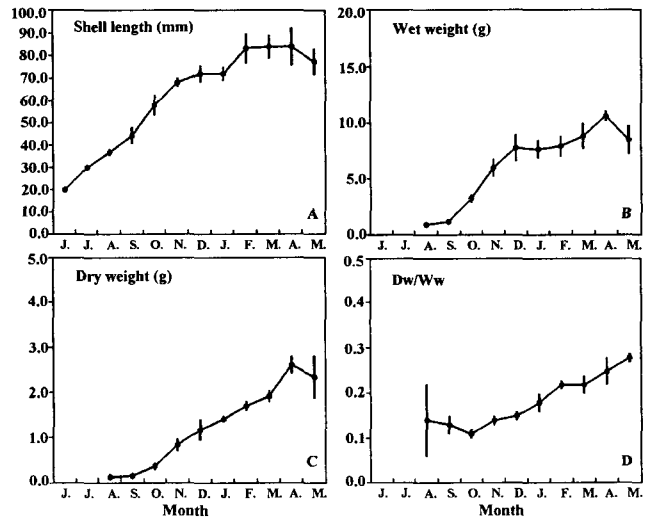


Fig. 4. Time series of the averaged (A) mean shell length (mm), (B) mean wet tissue weight (g), (C) mean dry tissue weight (g) and (D) a ratio of dry tissue weight to wet tissue weight (g).

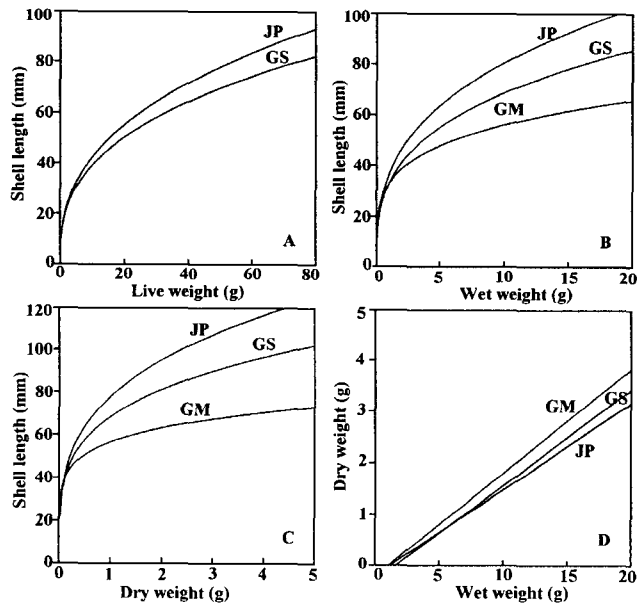


Fig. 5. Relationships between (A), shell length and live wet weight (B), shell length and wet tissue weight, (C), shell length and dry tissue weight and (D), dry tissue weight (g) and wet tissue weight (g) in Goseong Bay (GS), Gamag Bay (GM) and Hinase waters, Japan (JP).

하였다.

체장과 건중량의 관계식은 보편적으로 굴의 성장지표로 이용되며, 다음과 같은 형태로 나타낸다.  $SL = aW^b$  (Kobayashi et al., 1997). 여기서 SL은 체장 (mm)이고 W는 건중량 (g)이며, 이 방정식의 형태를 도입하여, 고성만에서 측정된 참굴의 체장과 중량 (건중량, 습중량, 건중량)의 관계식을 계산하고, 이를 모델에 적용

하였다.

고성만 참굴의 평균 체장과 평균 건중량의 관계식은

$$SL = 20.78W_w^{0.3563} \quad (n=10, r^2=0.970) \quad (5)$$

이며 (Fig. 5A), 참굴의 평균 체장과 평균 습중량으로 계산된 관계식은 다음과 같았다.

$$SL = 39.74W_w^{0.317} \quad (n=10, r^2=0.972) \quad (6)$$

여기서는  $W_w$  습중량 (g)이다 (Fig. 5B). 참굴의 평균 체장과 평균 건중량의 관계식은

$$SL = 68.39W_d^{0.2503} \quad (n=10, r^2=0.978) \quad (7)$$

이며,  $W_d$ 는 육질 건중량 (g)을,  $n$ 은 참굴을 채취한 개월수를 나타낸다 (Fig. 5C). 관계식에서 알 수 있듯이 일본산 참굴은 한국산 참굴보다 빠른 성장률을 보였다. 평균 체장과 평균 건중량의 관계식은 모델에서 체장과 중량사이의 전환 관계식으로 이용되었으며, 굴의 크기 등급을 결정짓는데 이용되었다.

고성만 참굴에 대한 건중량과 습중량의 관계식은 다음과 같이 유도되었으며, 건중량과 습중량의 비는 약 0.25였다 (Fig. 5D).

$$W_d = 0.25W_w + 0.3006 \quad (n=10, r^2=0.8877) \quad (8)$$

대부분의 굴 개체군에게 있어 건중량과 습중량의 관계는 서식지에 관계없이 유사하며 (Kobayashi et al., 1997), 일반적으로 습중량과 건중량의 전환계수는 0.2로 보고되고 있다 (Klinck et al., 1992).

수치모델을 이용한 고성만 양식굴의 성장모사

모사 결과 (Fig. 6, 7, 8, 9, 10)에서, 세로축은 굴의 크기 등급 (12 등급)을 나타내며, 가로축은 시간 (월)으로 참굴이 단련장에서 본 양식장으로 이식된 후부터 수확된 기간까지를 의미한다. 등급은 Table 2와 같이 체장과 건중량 사이의 관계식 (Eq. 8)으로 결정되었다. 모델에서 참굴 개체군은 이식초기의 체장과 중량을 기준으로 2등급에서 초기화되었다. 점선은 참굴 개체군의 성장을 나타내며, 이것은 실제 고성만 참굴 양식장에서 측정된 참굴의 건중량에서 유도되었다. 등치선은 모델 수행 결과 얻은 참굴 개체수를 로그함수 ( $\log_{10} N$ )를 이용하여 나타낸 것으로, 등치선 간격은 0.5이다. 0은 참굴 개체수가 1개체를 뜻하며, '- '는 개체수가 1개체 이하인 것을 의미한다.

Fig. 6은 chlorophyll *a*를 가용 먹이원으로 가정하였을 때의 모사 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보면, 고성만에서 측정된 참굴 (점선)은 2등급에서 10등급까지 양식기간동안 꾸준한 성장을 하고 있다. 이에 반해 모델 결과 (등치선)는 2등급에서 4등급 내에서만 참굴 개체군들이 분포하면서, 실제 측정된 참굴의 성장보다 낮은 성장률을 보인다.

Fig. 7은 유기물 입자에서 측정된 단백질, 탄수화물 및 지질의 함을 가용 먹이원으로 가정하였을 때의 모사 결과를 나타낸 것이다. 모델 결과는 모델 수행초기부터 개체수 분포가 실제 참굴 성장률을 뛰어넘는 분포를 보이면서 모델에서 얻은 참굴의 성장이 실제 참굴 성장보다 훨씬 빠름을 보이고 있다. 이 결과는 참굴이 해수 중에 있는 유기물질을 100% 섭취한다고 가정했을 때의 경

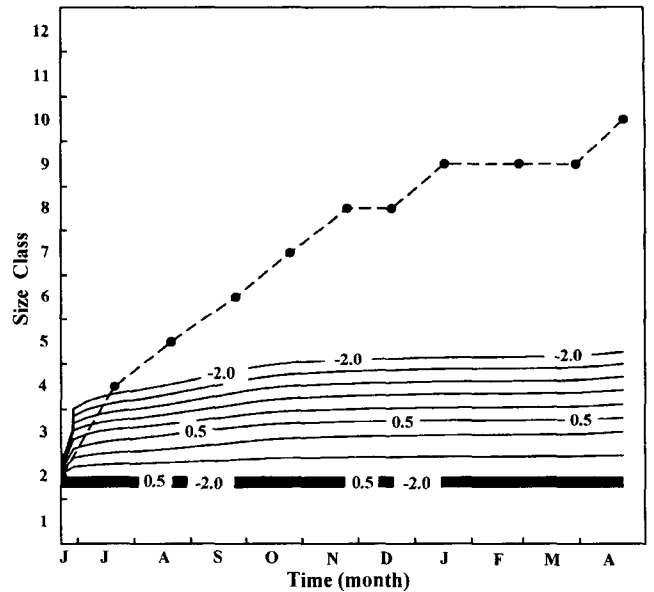


Fig. 6. Simulated time-dependent growth of *C. gigas* populations using only chlorophyll-*a* (mg/L) as a food supply in the model. Contours represent number of oysters with an interval of 0.5. Size class boundaries are defined in terms of shell length and biomass as shown in Table 2. The dashed line indicates the time development of *C. gigas* populations, which was obtained from oyster dry tissue weight that was measured for populations at a farm sites in Goseong Bay.

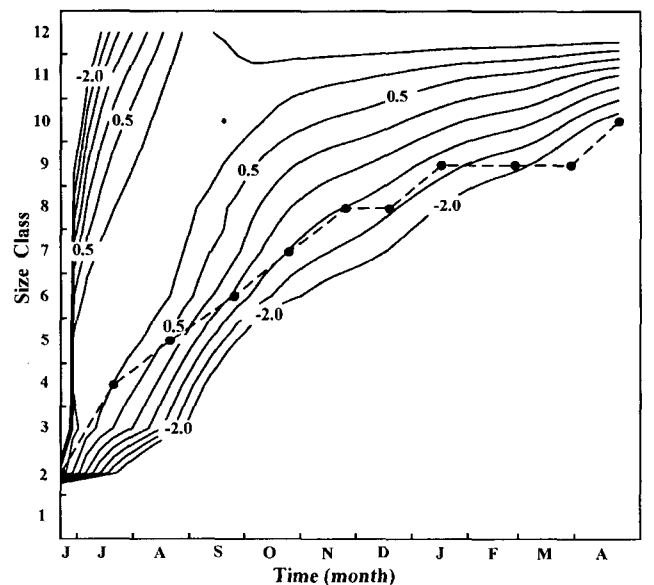


Fig. 7. Simulated time-dependent growth of *C. gigas* populations using lipid, protein and carbohydrate (mg/L) in particles retained in the filter as a food source with 100% retention efficiency, assuming that most of the food is available as small particles by oysters. Otherwise same in Fig. 6.

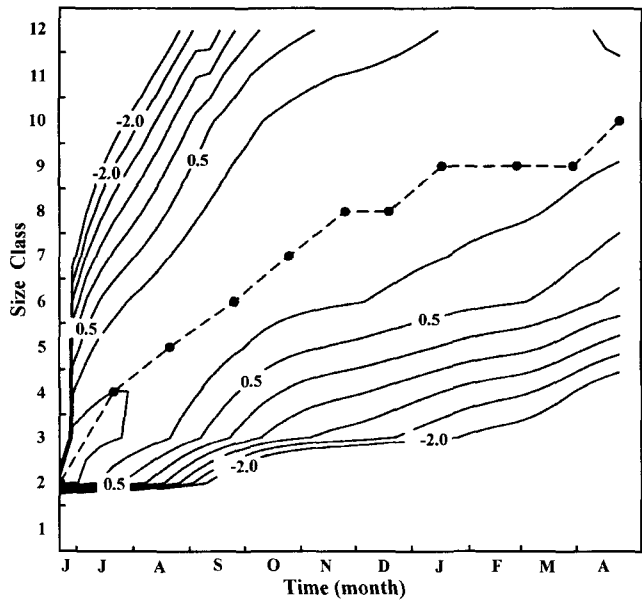
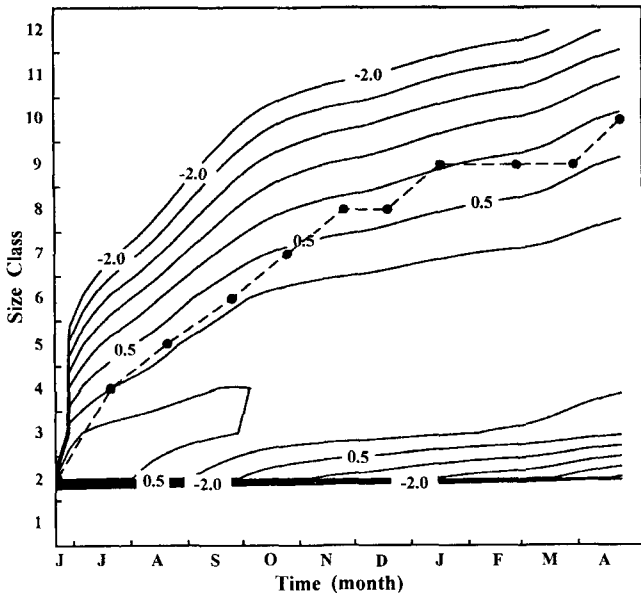


Fig. 8. Simulated time-dependent growth of *C. gigas* populations using lipid, protein and carbohydrate (mg/L) in particles retained in the filter and considered as a food source with 10% retention efficiency. Otherwise same in Fig. 7.

Fig. 10. Simulated time-dependent growth of *C. gigas* populations using lipid, protein and carbohydrate (mg/L) in particles retained in the filter and considered as a food source with 35% retention efficiency. Otherwise same in Fig. 7.

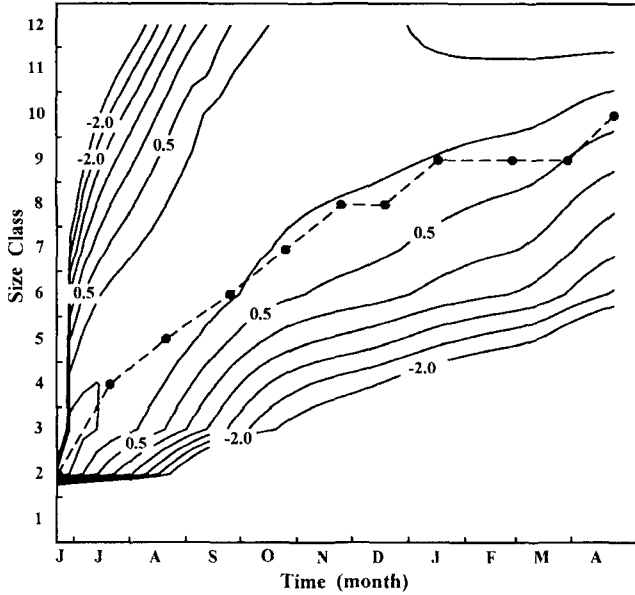


Fig. 9. Simulated time-dependent growth of *C. gigas* populations using lipid, protein and carbohydrate (mg/L) in particles retained in the filter and considered as a food source with 50% retention efficiency. Otherwise same in Fig. 7.

우로서, 실제 성장률이 모사 결과보다 높은 것은 양식굴이 해수 중에 있는 이용 가능한 먹이입자들의 일부만을 먹이로 이용하고 있음을 암시하고 있다. 이에 따라, 먹이입자 선택효율을 적용하여 그에 따른 굴의 성장률을 알아보았다. 적용된 먹이입자 선택효율

의 범위는 10~50%이다 (Fig. 8, 9, 10).

Fig. 8은 단백질과 탄수화물, 지질의 합을 가용 먹이원으로 가정하고, 10%의 먹이입자 선택효율을 주었을 때의 모사 결과이다. 모델 결과 대부분의 참굴이 8등급 이하에 분포하면서, 실제 참굴 성장보다 낮은 성장률을 보인다. Fig. 9는 50%의 먹이입자 선택효율을 주었을 때의 모사 결과이다. 모델 수행초기에는 실측치(점선)가 개체수 분포범위의 중앙부분에 위치하면서 실제 참굴과 모델에서 얻어진 참굴이 유사한 성장률을 보이다가 시간이 지남에 따라 모델 결과가 관측 결과보다 빠른 성장률을 보이고 있다. 그러나 모델 결과와 실측치가 매우 근접하게 접근하고 있음을 알 수 있다. Fig. 10은 35%의 먹이입자 선택효율을 주었을 때의 모사 결과이다. 개체수 분포범위의 중앙에 실제 측정된 참굴의 성장을 나타내는 점선이 위치하면서 실제 참굴 성장률과 모델에서 얻은 참굴의 성장률이 일치하고 있다. 따라서 수치 모델을 이용한 참굴의 성장에 관한 모사 결과 참굴의 먹이원은 식물플랑크톤을 포함한 입자성 유기물 전체로 간주되며, 굴의 입자 선택 효율은 고성만의 경우 35%로 추정되었다.

### 고 찰

참굴은 우리나라를 포함한 북 태평양 연안의 조간대 및 조하대에 분포하는 광범, 광온성 패류로 오래 전부터 수산업적 목적으로 다양한 방법으로 양식되고 있다 (Ventilla, 1984; Arkawa, 1990a, b; Lee, 1999). 고착성이며 여과섭식형인 참굴은 양식환경에 따라 성장과 생존이 영향을 받는다. 이에 따라 굴의 성장과 생산량 증대를 위해 양식환경을 개선하기 위한 노력들이 이루어지고 있으며, 이

연구 또한 어장관리와 적정 수용력 산정 모델을 개발하는 과정에서 수행되었다 (Cho, 1996; Jeong, 1998; Lee, 2001). 이 연구에 사용된 모델은 개체군 역학 모델로서, 주어진 양식환경 속에서 각기 달리 공급되는 먹이원에 따른 굴의 성장을 모사하는데 이용되었다. 대서양 굴 *C. virginica*에 적용하기 위해 개발된 이 모델 (Hofmann et al., 1992; 1994; 1995; Klinck et al., 1992; Powell et al., 1992; 1994; 1995)은 최근 들어 *C. gigas*에 적용되면서 더욱 발전되어 왔다 (Kobayashi et al., 1997; Hyun et al., 2001). 이 연구에 사용된 모델은 가막만에서 양식중인 참굴의 개체군 역학 모델과 동일한 모델로 참굴의 성장과 이에 영향을 미치는 환경인 자와의 상관관계를 잘 반영하는 것으로 보고되고 있다 (Hyun et al., 2001).

굴은 식물플랑크톤을 여과하여 먹이로 삼는 여과섭식형 이매패류로, 해수 중에 가장 풍부하게 분포하는 입자성 유기물인 규조류나 편조류와 같은 식물플랑크톤을 주로 먹고 사는 것으로 알려져 있다 (Soniati et al., 1984; Berg and Newell, 1986; Baldwin and Newell, 1991). Powell et al. (1995)은 대서양산 굴의 성장에 관한 수치적 모델을 통하여 해수중의 가용성 먹이가 굴의 집단 성장에 미치는 영향에 대하여 모사한 바 있다. 이들의 연구에 따르면 해수 중에 분포하는 식물플랑크톤을 포함한 입자성 유기물의 현존량이 15% 감소할 경우 4년 이내에 대부분의 시판 크기의 굴 (7~10 cm)이 먹이부족으로 인하여 폐사할 것으로 추정하였다.

Fig. 6에서 볼 수 있듯이 chlorophyll *a*를 먹이공급원으로 이용했을 때의 참굴 성장 (Fig. 6)은 수치적 모델에 있어 고성만에서 실제 측정된 참굴의 성장보다 낮은 성장률을 보이고 있다. 이는 chlorophyll *a*를 포함하고 있는 식물플랑크톤만을 굴의 먹이공급원으로서 고려하기에는 적절하지 않으며, 굴은 식물플랑크톤 뿐만 아니라 다른 유기물질들도 가용 먹이원으로 이용함을 뜻한다 (Quayle, 1988; Soniat et al., 1984; 1985; 1998). Lee et al. (2001)은 남해안 고성만 및 강진만 연안의 해수 중에 분포하는 입자성 유기물의 계절적 변이를 연구한 바 있으며, 이러한 입자성 유기물이 이매패류와 같은 여과섭식형 동물의 먹이로 중요한 역할을 하는 것으로 보고한 바 있다. Fig. 7에 보듯이 해수 중에 분포하는 유기물의 총량을 먹이공급원으로 이용하고, 먹이입자 선택효율을 100%로 주었을 때 모델 결과가 실제 측정된 굴 성장보다 훨씬 높게 나타나고 있다. 이는 Soniat et al. (1998)이 해수중의 입자 유기물 총량을 굴의 먹이공급원으로 고려하여 시행했던 연구에서 이들이 굴의 성장을 잘 반영했던 결과와 대조된다. Hyun et al. (2001)에 의하면 고성만 같은 연안역에서는 상대적으로 작은 입자 유기물들이 먹이공급원으로 중요한 역할을 하는 것으로 보고하였다. Haven and Morales-Alamo (1970)에 의하면 강하구나 만에서 3  $\mu$ m 보다 작은 입자들에 대한 *C. virginica*의 먹이입자 선택효율은 50% 이하이고, 2  $\mu$ m 이하의 입자에서는 18~40%의 먹이입자 선택효율을 보인다 (Ropert and Gouilletquer, 1999). 우리나라 가막만의 참굴을 대상으로 한 연구결과에서는 30% 이하의 낮은 먹이입자 선택효율을 보였다 (Hyun et al., 2001).

한편 유기물 총량을 먹이공급원으로 이용하고 10%의 먹이입자 선택효율을 주었을 때의 모사는 실제 참굴의 성장보다 모델 결과

가 낮은 성장률을 보였다 (Fig. 8). 그러나 수치모델을 이용한 모사에서 50%의 먹이입자 선택효율을 주었을 때는 실제 참굴의 성장에 근접한 모델 결과를 보임으로써 고성만에서 적용 가능한 먹이입자 선택효율은 50% 이하임을 제시하고 있다 (Fig. 9). 또한 먹이입자선택효율을 35%로 적용한 결과, 현장에서 측정된 참굴의 성장과 모델 결과가 가장 일치하게 나타났다 (Fig. 10). 이에 따라 고성만 참굴은 35~50%의 범위 먹이입자 선택효율을 갖는다고 판단되며, 고성만에서 양식되고 있는 참굴은 해수 중에 있는 유기물질들을 모두 먹이로 이용하고 있지 않으며 해수 중에 있는 먹이입자의 약 35~50% 정도만이 참굴의 성장에 이용하는 것으로 사료된다.

이 연구는 가막만 참굴을 대상으로 한 연구 결과 (Hyun et al., 2001)와 같은 모델을 가지고 같은 과정을 통해 수행되어졌다는 점에서 비교·분석이 용이하다. 두 해역이 위도상 비슷한 곳에 위치해 있고 서로 같은 종을 양식하고 있다는 점을 고려했을 때, 먹이입자 선택효율이 차이를 보이는 것은 유사한 환경이지만, 두 만은 서로 다른 양식환경을 가지고 있으며 섭취 가능한 먹이의 종류 또한 다르기 때문이라고 판단된다. 즉, 굴의 성장이 양식환경과 먹이조건에 따라 영향을 받고 있음을 뜻한다. 굴의 성장이 생산량과 밀접한 관련이 있다는 점에서 앞으로의 연구는 이런 모델 결과들을 통해 보다 실질적인 문제인 굴의 생산량을 추정해 내는데 초점을 맞추어야 할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

이 연구는 1999~2001년 국립수산물과학원의 수산특정연구개발과제로 (MOMAF/SRGP) 수행되었으며, 제주대학교 해양과학대학의 BK 21사업의 지원을 받아 이루어졌습니다. 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- Agius, C., V. Jaccarini and D.A. Ritz. 1978. Growth trials of *Crassostrea gigas* and *Ostrea edulis* in inshore waters of Malta. *Aquaculture*, 15, 195~218.
- Arakawa, K.Y. 1990a. Commercially important species of oysters in the world. *Mar. Behav. Physiol.*, 17, 1~13.
- Arakawa, K.Y. 1990b. Competitors and fouling organisms in the hanging culture of the Pacific oyster, *Crassostrea gigas* (Thunberg). *Mar. Behav. Physiol.*, 17, 67~94.
- Baldwin, B.S. and R.I.E. Newell. 1991. Ominivorous feeding by planktonic larvae of the eastern oyster *Crassostrea virginica*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 78, 285~301.
- Berg, J.A. and R.I.E. Newell. 1986. Temporal and spatial variations in the composition of seston available to the suspension feeder *Crassostrea virginica*. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 23, 375~386.
- Cho, E.I. 1996. The estimation of carrying capacity for marine culture grounds using an eco-hydrodynamic model. Ph. D. Dissertation, Pukyong National University (in Korean).
- Choi, W.J., K.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. Bull. Korean. Fish. Soc., 30, 794~803 (in Korean).
- Grant, J., E.T. Enright and A. Griswold. 1990. Resuspension and growth of *Ostrea edulis*: A field experiment. Mar. Biol., 104, 51~59.
- Haven, D.S. and R. Morales-Alamo. 1970. Filtration of particles from suspension by the American oyster *Crassostrea virginica*. Biol. Bull. Woods Hole, 139, 248~264.
- Heral, M. 1993. Why carrying capacity models are useful tools for management of bivalve molluscs culture? Bivalve filter feeders in estuarine and coastal ecosystem processes, NATO ASI series, 33, 455~478.
- Hofmann, E.E., E.N. Powell, J.M. Klinck and E.A. Wilson. 1992. Modeling oyster populations III. Critical feeding periods, growth and reproduction. J. Shellfish Res., 11, 399~416.
- Hofmann, E.E., J.M. Klinck, E.N. Powell, S. Boyles and M. Ellis. 1994. Modeling oyster populations II. Adult size and reproductive effort. J. Shellfish Res., 13, 165~182.
- Hofmann, E.E., E.N. Powell, J.M. Klinck and G. Saunders. 1995. Modeling diseased oyster populations I. Modeling Perkinsus marinus infections in oysters. J. Shellfish Res., 14, 121~151.
- Hyun, K.H., I.G. Pang, J.M. Klinck, K.S. Choi, J.B. Lee, E.N. Powell, E.E. Hofmann and E.A. Bochenek. 2001. The effect of food composition on Pacific oyster *Crassostrea gigas* (Thunberg) growth in Korea: A modeling study. Aquaculture, 199, 41~62.
- Jeong, W.G. 1998. Studies on proper management of oyster farms in Pukman Bay, Korea. Ph.D. Dissertation, Cheju National University (in Korean).
- Kang, C.K., M.S. Park, P.Y. Lee, W.J. Choi and W.C. Lee. 2000. Seasonal variations in condition, reproductive activity and biochemical composition of the Pacific oyster, *Crassostrea gigas* (Thunberg), in suspended culture in two coastal bays of Korea. J. Shellfish Res., 19, 771~133.
- Kang, S.G. 2001. Quantification of Reproduction output in the Pacific oyster, *Crassostrea gigas*, using Immunological method. M.S. thesis. Cheju National University (in Korean).
- Klinck, J.M., E.N. Powell, E.E. Hofmann, E.A. Wilson and S.M. Ray. 1992. Modeling oyster population: The effect of density and food supply on production. Pro. Adv. Mar. Tech. Conf., 5, 85~105.
- Kobayashi, M., E.E. Hofmann, E.N. Powell, J.M. Klinck and K. Kusaka. 1997. A population dynamics model for the Japanese oyster, *Crassostrea gigas*. Aquaculture, 149, 285~321.
- Kusuki, Y. 1977. Fundamental studies on the deterioration of oyster growing grounds-I Production of fecal materials by the Japanese oyster. Bull. Jap. Soc. of Sci. Fish., 4, 163~166 (in Japanese).
- Lee, C.H. 1999. Growth and reproduction of the Pacific oyster *Crassostrea gigas* at Kamakman in Yeosu. M.S. thesis. Cheju National University (in Korean).
- Lee, W.C. 2001. Modification and application of an ecosystem model for carrying capacity in oyster culturing ground. Ph. D. Dissertation, Pukyong National University (in Korean).
- Newell, R.I.E. and S.J. Jordan. 1983. Preferential ingestion of organic material by the American oyster *Crassostrea virginica*. Mar. Ecol. Prog. Ser., 13, 47~53.
- Park, M.S., H.J. Lim, Q. Jo, J.S. Yoo and M.J. Jeon. 1999. Assessment of reproductive health in the wild seed oysters, *Crassostrea gigas*, from two locations in Korea. J. Shellfish. Res., 18, 445~450.
- Parsons, T.R., K. Stephens and J.D.H. Strickland. 1961. On the chemical composition of eleven species of marine phytoplankton. J. Fish. Res. Bd. Canada, 18, 1001~1016.
- Powell, E.N., E.E. Hofmann, J.M. Klinck and S.M. Ray. 1992. Modeling oyster populations I. A commentary on filtration rate. Is faster always better? J. Shellfish Res., 11, 387~398.
- Powell, E.N., J.M. Klinck, E.E. Hofmann and S.M. Ray. 1994. Modeling oyster populations IV. Rates of mortality, population crashes, and management. Fish. Bull., 92, 347~373.
- Powell, E.N., J.M. Klinck, E.E. Hofmann, E.A. Wilson-Ormond and M.S. Ellis. 1995. Modeling oyster population V. Declining phytoplankton stocks and the population dynamics of American oyster (*Crassostrea virginica*) population. Fisheries Res., 24, 199~222.
- Quayle, D.B. 1988. Pacific oyster culture in British Columbia. Can. Bull. Fish. Aquat. Sci., 218, 1~231.
- Raillard, O. and A. Menesguen. 1994. An ecosystem box model for estimating the carrying capacity of a macrotidal shellfish system. Mar. Ecol. Prog. Ser., Vol., 115, 117~130.
- Ropert, M. and P. Gouletquer. 1999. Comparative physiological energetics of two suspension feeders: Polychaete annelid *Lanice conchilega* (Pallas 1766) and Pacific cupped oyster *Crassostrea gigas* (Thunberg 1795). Aquaculture, 181, 171~189.
- Smaal, A.C., T.C. Prince, N. Dankers and B. Ball. 1998. Minimum requirements for modelling bivalve carrying capacity. Aquat. Ecol., 31, 423~428.
- Soniat, T.M., S.M. Ray and L.M. Jeffrey. 1984. Components of the seston possible available food for oysters in Galveston Bay, Texas. Contrib. Mar. Sci., 27, 127~141.
- Soniat, T.M., and S.M. Ray. 1985. Relationships between possible available food and the composition, condition and reproductive state of oysters from Galveston Bay, Texas. Contrib. Mar. Sci., 28, 109~121.
- Soniat, T.M., E.N. Powell, E.E. Hofmann and J.M. Klinck. 1998. Understanding the success and failure of oyster populations: the importance of sampled variables and sample timing. J. Shellfish Res., 17, 1149~1165.
- Spark, A.K. and K.K. Chew. 1959. Preliminary report on growth and survival of Pacific oyster in Washington waters. Proc. Natl. Shellfish. Assoc., 50, 125~132.
- Thompson, J.K. and F.H. Nichols. 1988. Food availability controls seasonal cycle of growth in *Macoma balthica* (L.) in San Francisco Bay, California. J. Exp. Mar. Biol. Ecol., 116, 43~61.
- Ventilla, R.F. 1984. Recent developments in the Japanese oyster culture industry. Adv. Mar. Biol., 21, 1~57.
- Widdows, J., P. Fieth and C.M. Worrall. 1979. Relationship between seston, available food, and feeding activity in the common mussel *Mytilus edulis*. Mar. Biol. (Berl.), 50, 195~207.
- Wilson-Ormond, E.A., E.N. Powell and S.M. Ray. 1997. Short-term and small-scale variation in food availability to natural oyster populations: food, flow and flux. P.S.Z.N. Mar. Ecol., 18, 1~34.

---

2002년 3월 9일 접수

2002년 6월 24일 수리