

먹이가용성에 의한 고성만의 굴 양식장 수용력

이상준¹, 정우건², 조상만³, 권정노¹

¹국립수산과학원 어장환경과, ²경상대학교 해양생명과학과, ³군산대학교 해양생명과학과

Estimation of Carrying Capacity by Food Availability for Farming Oysters in Goseong Bay, Korea

Sang-Jun Lee¹, Woo-Geon Jeong², Sang-Man Cho³ and Jung No Kwon¹

¹Marine Environment Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

²Department of Marine biology and Aquaculture, Gyeongsang National University, 445 Inpyeong, Tongyoeng 650-160, Korea

³Department of Aquaculture and Aquatic Sciences, Kunsan National University, 558 Daehangno, Gunsan 573-701, Korea

ABSTRACT

For the continuous stable production of oyster, estimation of food availability (F) was carried out in Goseong Bay, south of coast Korea. Primary productivity ranged from 0.07 to 0.44 gC/m²/day (average 0.25 gC/m²/day), lowest in July and highest in January. The distribution of primary productivity at Goseong Bay showed the pattern of “high in the south and low in the north.” Food availability (F) was $F \leq 0$, indicating insufficient food supply, from August to November and $F > 0$ from January to April. Continuous insufficient food supply was observed at 18 oyster farms in the southern part of the bay and 4 in its northern part. Mortality at the oyster farms was 56% on the average, and around 58% of death occurred during November when food supply was insufficient. The optimal population of cultured oyster per unit flow area was calculated to be 110-115 indiv./m² (198-201 indiv./string). When the sea area was divided into 3 regions (A, B, C) according to carrying capacity, the carrying capacity of (A) regions was 52-53 indiv./m² (93-95 indiv./string), (B) regions was 142-144 indiv./m² (255-259 indiv./string), and (C) regions was 198-202 indiv./m² (356-363 indiv./string). In particular, (A) regions showed extremely low productivity. For continuous stable oyster farming at Goseong Bay, it is necessary to control point and non-point source pollution through continuous environmental monitoring and to adjust harvest according to the base carrying capacity during the season of high water temperature.

Key words: Goseong Bay, Oyster farm, Food availability, Carrying capacity

서론

해양 생태계에서 어느 생물군이 유지될 수 있는 양은 일반적으로 그 생물군이 이용할 수 있는 먹이량에 의하여 규정되며 (Kim, 2003), 해양생태계에서 생물이 살아갈 수 있도록 에너지를 공급해주는 식물플랑크톤은 광합성을 통하여 무기염류를

유기물질로 합성하기 때문에 모든 해양생물의 기본 먹이가 된다 (Lee, 1992). 식물플랑크톤에 의한 유기물 생산은 해양의 전 유기물 합성의 약 95% 정도를 차지하며, 먹이사슬의 기본으로서 Carbon과 Energy fluxes의 경로에서 기초를 이루기 때문에 중요한 역할을 담당한다 (Steemann-Nielsen, 1975; Rowan, 1989). 그러므로 해양에서 식물플랑크톤의 변동, 즉 기초 생산력을 파악하는 것은 해양 생태계 내의 에너지 흐름을 이해하고, 해양의 생산량 변동 및 자원량을 추정하는데 매우 중요한 사항이다 (Lee, 1992; MOMAF, 2001). 또한 해양환경 중에서 먹이와 양식생물의 성장은 상호 밀접한 관계를 갖기 때문에, 식물플랑크톤이나 입자성 유기물과 같은 먹이원과 이 매패류의 영양에 관한 상호작용은 이매패류의 성장과 환경에 미치는 영향을 평가하는데 있어 매우 중요한 인자가 된다 (Bacher *et al.*, 1998). 미소 현탁물과 식물플랑크톤의 양이 많은 해역에서는 굴의 성장이 양호하다 (Rodhouse *et al.*,

Received: June 9, 2016; Revised: June 25, 2016; Accepted: June 30, 2016

Corresponding author : Sang-Jun Lee

Tel: +82 (51) 720-2543, e-mail: e2ngxa@nate.com
1225-3480/24614

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License with permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproducibility in any medium, provided the original work is properly cited.

1984; Pazos *et al.*, 1997). 그러므로 굴 양식장 해역의 기초 생산력은 굴의 먹이 공급량과 함께 굴의 성육에 직접적으로 관계되므로 (Kusuki, 1977), 굴의 최대 생산량을 지속적으로 유지하기 위해서는 먼저 굴 양식장 해역의 기초생산력이 파악되어야 한다 (Lee *et al.*, 1991).

해양에서의 식물플랑크톤은 수온, 영양염류, 태양광선의 세기, 수면에 입사된 태양광의 수중에서의 소멸 정도에 따라 생산속도가 달라진다. 기초생산력은 식물플랑크톤의 광합성 속도를 나타내며, 식물플랑크톤의 광합성에 관계하는 chlorophyll-a의 함량으로부터 추정이 가능하다 (Kim, 2003)

이 연구 대상해역인 고성만은 남해에 위치하고 있으며, 만의 입구는 매우 좁고 안으로 갈수록 삼각형의 형상으로 크게 벌어지는 전형적 반폐쇄적인 만의 형상을 하고 있다. 만의 안쪽은 리아스식 해안으로 입구에 유자도, 중앙부에는 비도, 읍도, 조도 등과 같은 작은 섬들이 위치하고 있다. 고성만은 총 수면적 2100 ha 에 이르며, 평균수심은 7 m 이고, 만의 외측은 수심 10-20 m 로 비교적 깊지만, 만의 내측은 모두 수심 10 m 미 만이다. 해수유동은 만 입구에서 40-50 cm/sec 정도의 유속으로 유입되어 만 북쪽에서는 5 cm/sec 이하로 느리다 (경상남도, 1997). 특히 고성만은 우리나라의 굴양식 중심지로 미국 FDA의 수출용 패류생산지정해역에 속해있으며 생산되는 패류는 대부분이 수하식 굴이다. 고성만의 굴 양식 어업권은 41건, 면허면적은 총 148 ha (평균 3.6 ha) 이다 (고성군, 2008; 통영시, 2008). 생산되는 굴의 예상생산량은 1996년도에 2,148 톤이었으나, 2003년도에 800톤, 2008년도에 745톤으로 점차 감소하는 추세에 있다 (굴수하식협동조합, 2008). 굴 생산량의 감소 원인에는 굴 양식장의 주변 환경의 오염물질 유입으로 인한 환경악화와 (Sugawara and Okoshi, 1991), 굴 양식장의 먹이 감소 (Kang *et al.*, 2000) 등 다양한 원인이 거론되고 있다. 그러므로 지속적이고 안정적인 굴 양식을 위해서는 환경 모니터링을 통하여 환경수준을 평가, 반영하고 가용 먹이량에 의한 적정수용력을 산정하여 양식하는 것이 필요하다.

이 연구는 고성만의 지속적이고 안정적인 양식 굴 생산성을 유지하기 위한 연구의 일환으로 고성만의 굴 양식장별로 기초 생산력 및 먹이가용성 (*F*) 지수를 산정한 후 생산성에 의한 해역을 평가하여 구획을 하였고, 적정 양식밀도를 산출하여 굴 양식장의 수용력을 구명하였다.

재료 및 방법

1. 기초생산력 추정

고성만 내 41개의 굴 양식장 인근에 20개의 정점을 설정하고, 2008년 7월부터 2009년 4월 까지 매월 1회씩 수온, 염분, 용존산소, Chlorophyll-a, 해면입사광량 및 수중광량을 측정

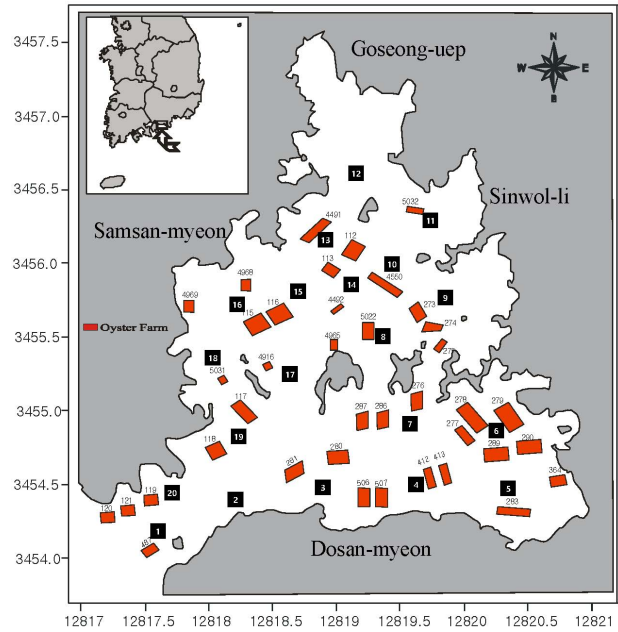


Fig. 1. Location of sampling stations and oyster farms in Goseong Bay.

하였다 (Fig. 1). 수온, 염분 및 용존산소는 수질연속측정기 (SBE-19, Sea Bird, USA) 로 현장 측정하였고, Chlorophyll-a는 해양환경공정시험법 (2002) 에 따라 아세톤으로 추출하여 분광광도계로 측정하였다. 하루 동안의 시간별 해면 입사 광량은 LI-COR사의 LI-190SA quantum sensor 를 연결한 LI-1000 Data Logger (LI-COR, Nebraska, USA) 를 사용하였으며, 수중광량 측정에는 LI-COR사의 LI-193SA Spherical underwater quantum sensor (LI-COR, Nebraska, USA) 를 사용하였다. 해면 입사광량 (CO) 과 수심 (Z) 에 도달하는 유효수중광량 (C_Z) 을 Eq. 1로 표현된다.

$$C_z = C_0 \cdot e^{-k \cdot Z} \quad (\text{Eq. 1})$$

여기서 k는 소멸계수에 해당하며 다음과 같이 구할 수 있다.

$$a = -\ln\left(\frac{C_z}{C_0}\right) \times Z^{-1} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$\ln C_z = \ln C_0 - k \cdot Z \quad (\text{Eq. 3})$$

조사당일의 시간별 해면 입사광과 소멸계수를 사용하여 수심 0.5 m 부터 1 m 간격으로 해저면 까지 각 수층에 도달하는 광량을 산출하되, 수심이 깊은 곳은 $C_z \geq 0.1 \times 10^{15}$

quanta/cm²/sec되는 수층까지 생산층으로 하여 계산하였다. 기초생산력 추정배경에 사용된 Photon flux와 광합성 속도의 관계 (PPC), 수온과 광합성 속도의 관계는 Steemann Nielsen (1975) 의 이론을 따랐다.

2. 단위 해면당 기초생산력 계산

조사된 자료로부터 각 수층의 단위 수량당, chlorophyll-a 양당 광합성을 PPC (z) 를 구하고, 여기에 chlorophyll-a 양을 곱하여 단위수량당 Pz로 변환한 다음, 광합성 유효수주 내의 수층별 Pz를 적산하여 매 시간당 단위 해면당 기초생산력 PP (H) 를 산출하였다.

$$P_z, \text{mg C/m}^3/\text{h} = \text{PPC}_z, \text{mg C/mg Chl}_a/\text{h} \times \text{Chl}_a, \text{mg/m}^3 \quad (\text{Eq. 4})$$

$$PP_H, \text{mg C/m}^2/\text{h} = \sum_{z=0.5}^{Z_d} P_z, \text{mg C/m}^3/\text{h} \quad (\text{Eq. 5})$$

조사당일 일조 시간별로 구한 PP (H) 를 그날의 일조시간 동안 적산하여 하루 동안의 기초생산력 PPday를 산출하였다.

$$PP_{day}, \text{mg C/m}^2/\text{day} = \sum_{H=1}^{H_{rad}} PP_H, \text{mg C/m}^2/\text{h} \quad (\text{Eq. 6})$$

3. 먹이 가용성 (F) 에 의한 굴 양식장 수용력 추정

먹이 가용성에 의한 굴 양식장 수용력을 추정하기 위해 2008년 7월부터 2009년 4월까지 경남 고성만에서 양성 중인 굴 양식장을 대상으로 매회 1연의 수하연을 상, 중, 하부로 나누어 채취하여 개체수와 육질부 중량을 측정하였다.

고성만의 먹이 공급능력의 추정은 굴집단의 단위시간당 해수 초과량에 포함된 먹이 에너지의 양을 공급량 (VE) 으로 하고, 단위시간동안 그 굴집단의 생리대사에 요구되는 에너지양을 요구량 (EFD) 으로 하여, 공급량이 요구량을 충족할 수 있는지 여부를 추정하였다.

$$F = VE - EFD \quad (\text{Eq. 7})$$

$$VE = VF \times PP \times 10^{-3} \text{ (Mcal/day)} \quad (\text{Eq. 8})$$

$$VF = \left(\sum_{i=0}^{372} \Delta FR \cdot rFi \right) \times 60 \times \frac{24}{6.2} \times N \times 10^{-3} \text{ (m}^3/\text{day)} \quad (\text{Eq. 9})$$

여기에서 단위 수량당 먹이 에너지 함량 (VE) 은 기초생산력 (PP) 을 사용하였으며, 집단여수량 (VF) 에서는 해수의 창

조류-낙조류 진동주기를 6.2시간 (= 372분) 으로 설정하였다. 또한 순간 여수량 (ΔFR) 은 Kim (1995) 의 방법을 따랐고, 순간 여수 효율 (rFi) 은 Jeong (1998) 의 방법을 따랐다.

생리대사 에너지 요구량 (EFD) 은 섭취한 먹이 에너지의 증중 효율값 (rG) 과 단위시간당 연체부 육중량 증가분 (ΔW) 으로부터 추정하였다.

$$EFD = (\Delta W \times dr \times E_k / rG) \times N_t \times 10^{-3} \text{ (Mcal/day)} \quad (\text{Eq. 10})$$

여기에서 ΔW는 일간 증육량, dr은 건조율, Nt는 시간t의 굴 개체수에 해당한다. 한편 굴 육질의 에너지 함량 (Ek), 증육효율 (rG) 는 Kim (1980) 및 Jeong (1998) 의 방법을 따랐다. 따라서 먹이가용성 (F) 은 요구량에 대한 공급량의 차이로 평가하며, F ≤ 0 이면 먹이 부족을 의미한다.

적정 양식밀도를 산정하기 위해서 단위면적당 수하 개체수 (n) 와 개체중량 (Y) 과의 상관관계를 알아보았다. 단위면적당 최적 수하밀도 산정은 단위 면적당 수하 개체수 (n = 1-400) 을 대입하여 최대 생산량을 나타내는 밀도를 최적 수하 개체수로 산정하였다. 고성만 굴 양식장 유동면적을 고려한 과밀정도 산정은 알 굴 잠재 생산력에 대한 알 굴 수하량의 비로 나타냈었다.

$$Y(g) = aExp(-b \cdot n) \quad (\text{Eq. 11})$$

4. 통계처리

통계분석은 SPSS 10.0 Statics package를 사용하여 일원 배치 분산분석 (One-Way ANOVA) 을 했고, 평균간의 유의성 검정은 SNK검정을 실시하였다. 통계적 유의성은 위험율 5% (α = 0.05) 에서 실시하였다.

결 과

1. 기초생산력 산정

2008년 7월부터 2009년 4월까지 수온, 해면입사광량, 수중 광량 소멸계수, 기초생산력을 조사한 결과는 Table 1, Fig. 2-4와 같다. 조사기간 중 고성만의 기초생산력 추정치는 0.07-0.44 gC/m²/day (0.25 ± 0.094 gC/m²/day) 의 범위였고 (Table 1), 월별로는 7월에 0.07 ± 0.004 gC/m²/day 로 가장 낮았고, 1월에 0.44 ± 0.157 gC/m²/day 로 가장 높았다 (Fig. 4 (a)). 정점별 평균 기초생산력의 변화는 만 북측의 조사정점 12이 0.18 ± 0.063 gC/m²/day 로 가장 낮았고, 조사정점 20이 0.37 ± 0.287 gC/m²/day 로 가장 높아 (Fig. 4 (b)), 만의 입구 쪽이 다소 높고 만의 북쪽이 낮은 “남고북저” 현상을 나타내었다 (Fig. 5).

Table 1. The parameters for estimating primary production of Goseong Bay

Month	Item	Water Temp.(°C)	Light-Extinction coefficient ¹⁾	PP, gC/m ² /day (Mean ± STD)
Jul. 2008		23.9	0.3853	0.07 ± 0.05
Aug.		26.7	0.2737	0.20 ± 0.09
Sep.		24.0	0.0862	0.38 ± 0.06
Oct.		18.7	0.0841	0.17 ± 0.13
Nov.		11.8	0.3399	0.15 ± 0.10
Dec.		10.9	0.2997	0.15 ± 0.10
Jan. 2009		4.5	0.3458	0.44 ± 0.16
Feb.		8.6	0.3309	0.28 ± 0.20
Mar.		12.0	0.3309	0.30 ± 0.09
Apr.		15.3	0.4102	0.23 ± 0.08

¹⁾ A coefficient revealing a light of its extinction extent under water from its penetration into water.

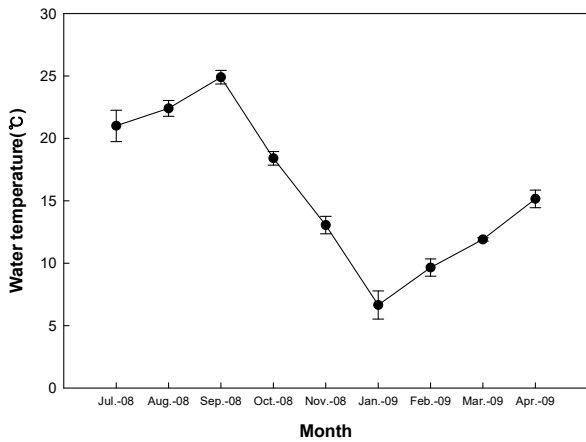


Fig. 2. Monthly variations of sea water temperature (°C) in Goseong Bay.

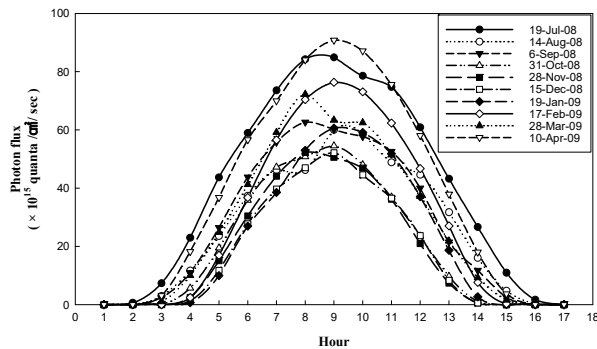


Fig. 3. Diurnal average photon flux of during experimental period.

2. 굴 양식장의 먹이가용성 (Food availability, F)

고성만에 산재해 있는 개별 굴 양식장에 대한 월별 먹이가용성 (F) 은 8월에서 11월 사이가 $F \leq 0$ 로 먹이 공급이 부족

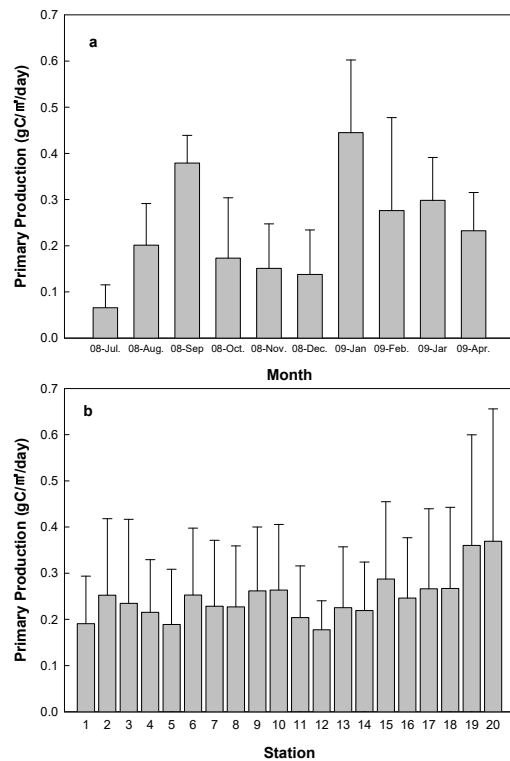


Fig. 4. (a) Monthly variations of primary production (gC/m²/day) and (b) mean of primary production (gC/m²/day) at each station in Goseong Bay.

하였고, 1월에서 4월 사이는 $F > 0$ 을 나타나, 주 성장기에 먹이 공급이 매우 부족하였고, 1월 이후 다시 회복되었다. 한편, 각 양식장별 먹이공급능력은 읍도와 비도의 이남해역에 위치한 양식장 (121, 487, 280, 281, 412, 413, 506, 507, 283, 364, 277, 278, 279, 289, 290, 276, 287, 288) 과 만의 최북측에 위치한 고성읍에 이웃한 해역 (112, 4491, 113, 4492)

Table 2. The monthly food availability of each oyster farm in Goseong Bay [$F = VE - EFD$]

ST	Farm Code	Month									
		Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr
1	120	0.82	- 0.95	- 0.9	- 0.93	- 0.97	- 0.95	0.23	0.18	0.22	0.29
1	121	1.03	- 0.95	- 0.91	- 0.93	- 0.97	- 0.96	- 0.08	- 0.16	- 0.17	- 0.16
1	487	1.09	- 0.95	- 0.91	- 0.94	- 0.97	- 0.96	- 0.14	- 0.23	- 0.25	- 0.25
3	280	0.73	- 0.94	- 0.85	- 0.90	- 0.97	- 0.97	0.49	- 0.35	- 0.32	- 0.48
3	281	0.17	- 0.95	- 0.82	- 0.85	- 0.95	- 0.92	3.56	1.46	2.11	1.88
4	412	1.17	- 0.95	- 0.81	- 0.89	- 0.97	- 0.96	- 0.24	- 0.45	- 0.10	- 0.36
4	413	1.31	- 0.95	- 0.81	- 0.90	- 0.98	- 0.97	- 0.34	- 0.53	- 0.25	- 0.48
4	506	0.93	- 0.95	- 0.81	- 0.88	- 0.97	- 0.96	- 0.02	- 0.25	0.30	- 0.04
4	507	0.93	- 0.95	- 0.81	- 0.88	- 0.97	- 0.96	- 0.02	- 0.25	0.30	- 0.04
5	283	0.67	- 0.95	- 0.68	- 0.79	- 0.96	- 0.95	- 0.11	- 0.12	- 0.32	0.39
5	364	1.58	- 0.94	- 0.70	- 0.84	- 0.98	- 0.97	- 0.64	- 0.71	- 0.81	- 0.67
6	277	1.65	- 0.85	- 0.46	- 0.78	- 0.92	- 0.88	0.16	- 0.39	- 0.10	- 0.21
6	278	2.49	- 0.83	- 0.46	- 0.81	- 0.94	- 0.92	- 0.30	- 0.67	- 0.57	- 0.66
6	279	2.49	- 0.83	- 0.46	- 0.81	- 0.94	- 0.92	- 0.30	- 0.67	- 0.57	- 0.66
6	289	2.49	- 0.83	- 0.46	- 0.81	- 0.94	- 0.92	- 0.30	- 0.67	- 0.57	- 0.66
6	290	1.46	- 0.85	- 0.45	- 0.77	- 0.91	- 0.87	0.38	- 0.25	0.15	0.03
7	276	0.52	- 0.96	- 0.72	- 0.90	- 0.92	- 0.89	0.13	- 0.54	- 0.35	- 0.34
7	287	0.09	- 0.96	- 0.69	- 0.86	- 0.86	- 0.78	1.78	0.33	1.20	1.63
7	288	0.52	- 0.96	- 0.72	- 0.90	- 0.92	- 0.89	0.13	- 0.54	- 0.35	- 0.34
8	4965	-0.01	- 0.96	0.35	- 0.70	- 0.70	- 0.36	10.02	5.82	18.00	21.46
8	5022	0.55	- 0.96	- 0.04	- 0.85	- 0.90	- 0.84	1.01	- 0.07	0.96	0.79
9	196	6.20	- 0.88	- 0.61	- 0.86	- 0.85	- 0.86	- 0.62	- 0.93	- 0.85	- 0.9
9	273	0.75	- 0.95	- 0.70	- 0.81	- 0.68	- 0.49	1.23	- 0.35	1.22	1.19
9	274	-0.10	- 0.95	- 0.48	- 0.41	0.74	3.56	31.22	13.79	77.55	116.47
9	275	-0.17	- 0.95	- 0.46	- 0.36	0.98	4.45	39.23	18.3	105.82	165.33
10	4550	0.77	- 0.94	- 0.77	- 0.66	- 0.54	- 0.15	4.38	1.42	6.42	5.83
11	5032	1.84	- 0.85	- 0.63	- 0.54	- 0.51	- 0.16	1.08	0.70	4.33	5.45
13	4491	1.22	- 0.95	- 0.73	- 0.90	- 0.42	- 0.04	1.38	0.17	2.05	0.66
13	112	2.51	- 0.94	- 0.76	- 0.93	- 0.71	- 0.63	- 0.28	- 0.72	- 0.41	- 0.74
14	113	0.99	- 0.92	- 0.75	- 0.94	- 0.68	- 0.52	0.36	- 0.26	0.71	0.16
14	4492	1.98	- 0.9	- 0.76	- 0.95	- 0.79	- 0.75	- 0.41	- 0.73	- 0.47	- 0.69
15	4969	1.25	- 0.95	- 0.47	- 0.97	- 0.61	- 0.38	1.43	2.00	2.34	1.92
15	115	1.00	- 0.95	- 0.43	- 0.97	- 0.50	- 0.13	2.69	3.90	4.83	4.44
16	4968	2.42	- 0.95	- 0.14	- 0.97	- 0.75	- 0.62	0.66	0.54	0.47	0.60
16	116	1.72	- 0.96	- 0.02	- 0.96	- 0.60	- 0.30	2.56	2.79	3.09	4.03
17	4916	0.86	- 0.94	- 0.65	- 0.94	- 0.67	- 0.46	2.61	1.77	2.29	1.23
18	5031	- 0.40	- 0.97	- 0.12	- 0.85	4.92	21.81	372.48	635.16	1832.19	4856.17
19	117	1.51	- 0.92	- 0.70	- 0.94	- 0.75	- 0.64	1.36	1.52	1.20	1.01
19	118	- 0.05	- 0.92	- 0.27	- 0.63	2.22	9.09	134.37	291.28	491.83	850.95
20	119	- 0.11	- 0.91	- 0.70	- 0.98	- 0.68	- 0.49	2.31	4.75	3.01	3.06
20	119	- 0.3	- 0.91	- 0.62	- 0.97	- 0.35	0.29	9.15	20.22	16.56	19.96

Table 3. The mortality rate (%) of each oyster farm in Goseong Bay

ST	Farm Code	Month									
		Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr
1	120	16.5	31.1	42.8	52.2	60.3	66.8	72.5	77.1	80.7	84.0
1	121	17.2	32.3	44.3	53.9	62.1	68.6	74.2	78.8	82.2	85.4
1	487	12.6	24.3	34.2	42.5	50.0	56.3	62.0	66.9	70.9	74.7
3	280	10.5	20.5	29.1	36.6	43.4	49.4	54.9	59.8	63.7	67.6
3	281	24.3	43.8	57.9	68.1	76.1	81.9	86.5	89.9	92.2	94.1
4	412	15.7	29.8	41.1	50.4	58.4	65.0	70.6	75.4	79.0	82.4
4	413	7.2	14.4	20.7	26.5	32.0	36.9	41.6	45.9	49.6	53.4
4	506	2.7	5.4	8.0	10.5	12.9	15.3	17.6	19.9	21.9	24.0
4	507	9.4	18.5	26.4	33.4	39.8	45.5	50.8	55.6	59.5	63.5
5	283	15.2	28.9	40.0	49.2	57.1	63.7	69.3	74.2	77.8	81.3
5	364	15.7	29.8	41.1	50.4	58.4	65.0	70.6	75.4	79.0	82.4
6	277	6.1	12.2	17.7	22.8	27.6	32.1	36.3	40.3	43.8	47.3
6	278	12.6	24.3	34.2	42.5	50.0	56.3	62.0	66.9	70.9	74.7
6	279	13.9	26.7	37.2	45.9	53.7	60.1	65.9	70.8	74.6	78.2
6	289	7.2	14.4	20.7	26.5	32.0	36.9	41.6	45.9	49.6	53.4
6	290	7.8	15.4	22.2	28.3	34.0	39.2	44.0	48.5	52.3	56.1
7	276	13.4	25.7	36.0	44.6	52.3	58.7	64.4	69.3	73.2	76.9
7	287	11.3	22.0	31.1	38.9	46.0	52.1	57.7	62.6	66.6	70.5
7	288	19.7	36.4	49.3	59.3	67.5	73.9	79.2	83.4	86.5	89.2
8	4965	18.5	34.4	46.9	56.7	64.9	71.4	76.8	81.2	84.5	87.4
8	5022	10.2	20.0	28.5	35.8	42.6	48.4	53.9	58.8	62.7	66.6
9	196	24.1	43.5	57.5	67.7	75.8	81.6	86.2	89.6	92.0	94.0
9	273	14.2	27.1	37.8	46.6	54.4	60.9	66.6	71.5	75.3	78.9
9	274	18.5	34.4	46.9	56.7	64.9	71.4	76.8	81.2	84.5	87.4
9	275	21.1	38.7	52.0	62.2	70.4	76.6	81.7	85.7	88.5	91.0
10	4550	15.5	29.3	40.6	49.8	57.8	64.3	70.0	74.8	78.4	81.9
11	5032	88.3	98.8	99.9	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
13	4491	12.4	23.9	33.6	41.8	49.2	55.5	61.2	66.1	70.0	73.9
13	112	88.3	98.8	99.9	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
14	113	6.1	12.2	17.7	22.8	27.6	32.1	36.3	40.3	43.8	47.3
14	4492	24.3	43.8	57.9	68.1	76.1	81.9	86.5	89.9	92.2	94.1
15	4969	27.2	48.2	62.7	72.9	80.5	85.8	89.8	92.6	94.5	96.1
15	115	88.2	98.8	99.9	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
16	4968	19.7	36.4	49.3	59.3	67.5	73.9	79.2	83.4	86.5	89.2
16	116	19.9	36.8	49.8	59.8	68.0	74.4	79.6	83.8	86.8	89.5
17	4916	20.6	38.0	51.1	61.2	69.4	75.8	80.9	85.0	87.9	90.4
18	5031	11.3	22.0	31.1	38.9	46.0	52.1	57.7	62.6	66.6	70.5
19	117	25.5	45.5	59.8	70.0	77.9	83.5	87.8	91.0	93.2	95.0
19	118	22.0	40.2	53.8	64.0	72.1	78.3	83.2	87.0	89.7	92.0
20	119	12.6	24.3	34.2	42.5	50.0	56.3	62.0	66.9	70.9	74.7
20	119	11.0	21.5	30.4	38.1	45.2	51.2	56.8	61.7	65.7	69.6

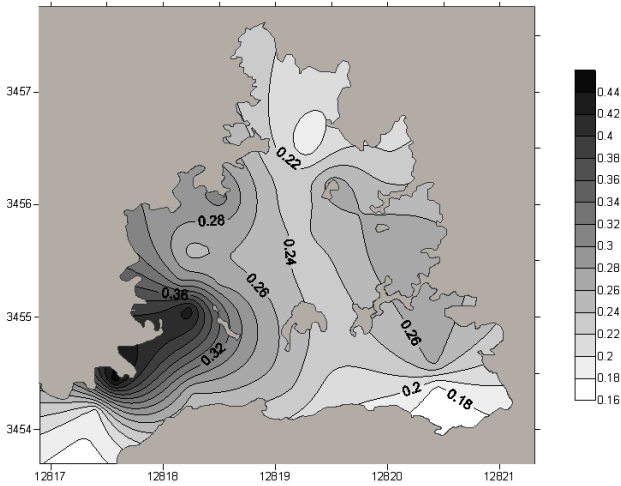


Fig. 5. Horizontal distributions of primary production (gC/m²/day) in Goseong Bay.

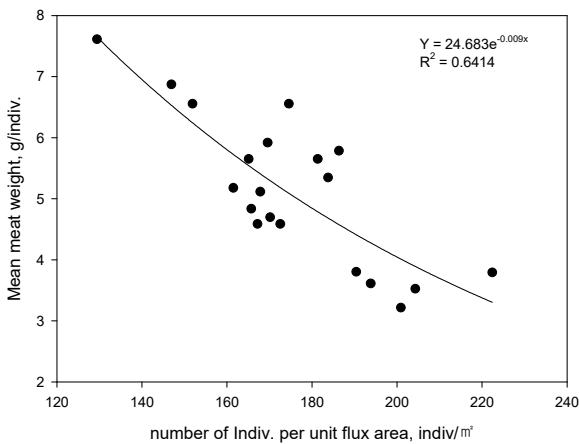


Fig. 6. Relationship between cultural density and mean meat weight in Goseong Bay.

에서 양식기간 동안 지속적인 먹이부족 현상이 관찰되었다 (Table 2). 고성만의 굴 양식장 의 폐사율을 조사한 결과 평균 폐사율은 56%이었고, 시기별로는 먹이 공급이 부족한 8월에 서 11월까지 약 58%의 폐사가 일어나고 있었다 (Table 3).

3. 굴양식 적정밀도 산정

고성만의 각 양식장의 적정 수하밀도를 산정하기 위하여 단위유동면적당 개체밀도에 대한 평균개체중량의 관계를 분석하면 Fig. 6과 같고, 이때 단위유동면적당 개체수 (N) 와 개체알굴 중량 (W) 사이에는 Eq. 12와 같은 관계식이 성립된다.

$$W = 24.683 \cdot e^{-0.009 \cdot N} \quad (\text{Eq. 12})$$

여기에 개체수 (N) 을 1-400까지 차례로 대입하여 체중의

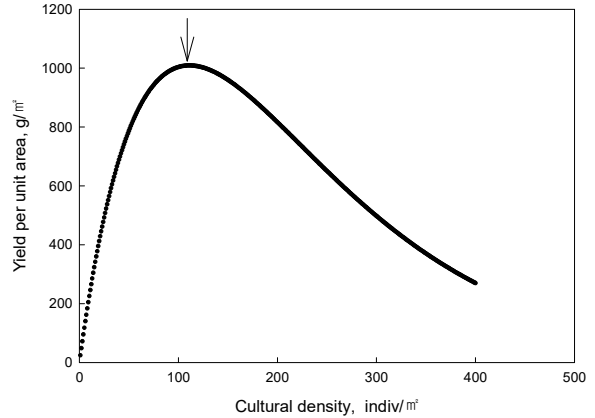


Fig. 7. Relationship between cultural density (indiv./m²) and yield per unit area (g/m²). The relation between the number of oyster per flux unit area estimated from the data of estimating alive oyster monthly collected from July 2008 to April 2009 and weight of oyster (the optimum number of oyster in Goseong Bay is 114 indiv./m²).

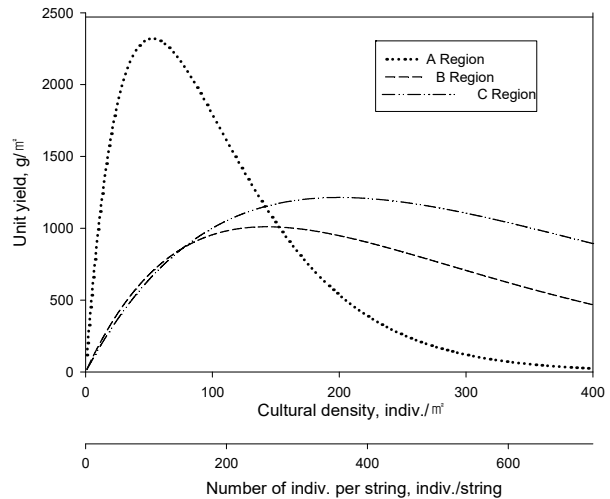


Fig. 8. Estimation of optimal cultural density in Goseong Bay. The optimum culturing density of 3 regions (A, B, C) classified by mortality rate in each oyster farms in Goseong Bay. The optimum density **A** region is 52-53 indiv./m², **B** region is 142-144 indiv./m², **C** region is 198-202 indiv./m².

변화를 관찰한 결과는 Fig. 7과 같다. 고성만의 전체 양식장의 평균 수하연 간격 0.4 m, 수하연 길이 4.5 m 를 고려하면, 수하연당 유동면적은 1.8 m² 가 되므로 단위유동면적당 최적의 양식굴 개체수는 Fig. 7의 peak에 해당하는 110-115 indiv./m² (198-201 indiv./string) 이 된다.

그러나 이를 앞서 수용력에 따라 해역을 3개 구역으로 세분

Table 4. A potential productive capacity and density index of Goseong Bay under the consideration of its flux area

	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.
Photoplasm [ton/month]	2,394	7,310	13,773	899	785	785	2,309	1,433	1,548	1,206
Potential monthly weight gain [ton/month]	106	10	591	112	181	218	791	402	353	213
Potential yield (ton/year)	106	116	707	819	1,001	1,218	2,010	2,411	2,764	2,978
Cultural density (ton/year)	471	650	697	682	638	964	725	424	388	282
Density index	4.4	5.6	1	0.8	0.6	0.8	0.4	0.2	0.1	0.1

하여 평가하면, A구역은 52-53 indiv./m² (93-95 indiv./string), B구역은 142-144 indiv./m² (255-259 indiv./string), 그리고 C구역은 198-202 indiv./m² (356-363 indiv./string) 으로 구명되었다 (Fig. 8).

고찰

연구 대상해역인 고성만은 입구가 좁은 반 폐쇄성 내만으로 총 수면적은 2100 ha, 굴 양식 어업권은 41건, 면허 면적은 총 148 ha 이다 (고성군, 2008; 통영시, 2008). 해수유동은 만 입구에서 40-50 cm/sec 정도의 유속으로 유입되어 만 북쪽에서는 5 cm/sec 이하로 느리다 (경상남도, 1997).

기초생산력은 고수온기인 7월에 가장 낮았고, 1월에 가장 높았다. 만의 입구 쪽이 다소 높고 만의 북쪽이 낮은 남고북저 현상을 나타내었는데, 이는 폐쇄성 내만에 해당하는 고성만의 환경적 특성과 관련이 있는 것으로 고성만의 북측은 고성읍의 생활하수가 인근 간헐천을 통해 유입되는 해역으로 고성만 중에서도 가장 오염부하가 높은 지역에 해당한다 (해양수산부, 2005). 따라서 고성만은 폐쇄적인 내만의 특성상 해역의 식물 플랑크톤 현존량의 변화가 극심하고 (Lee et al., 2004; Oh et al., 2008), 이로 인한 기초생산력도 시기별 조사장소에 따른 차이가 비교적 높은 것으로 판단된다. 또한 고성만의 내측을 가로지르는 읍도, 비도 등의 섬들에 의해서 만의 북측과 남측이 현격하게 구분되는 해역특징을 지니므로 기초생산력도 이들 섬을 중심으로 남측과 북측이 서로 상이한 특징을 지니게 되는 것으로 판단된다.

고성만 인근 유역의 인구밀도는 매우 희박하고, 인근지역은 대부분 임야와 농경지이므로 고성만으로 유입되는 오염부하는 경남의 다른 인근 해역과 비교해도 비교적 낮은 특징을 지니고 있다. 따라서 유입되는 영양염류의 제한으로 기초생산력도 비교적 낮은 것으로 판단된다. 이러한 특징은 여름철 고수온기의

기초생산력이 강우량과 밀접하게 연동되지 않는 특징에서도 잘 나타나고 있다 (Table 5), (Fig. 9).

먹이가용성 (Food availability, *F*) 은 8월에서 11월 사이인 주성장기에 먹이 공급이 매우 부족하였고, 1월 이후 다시 회복되었다. 이는 우리나라 굴양식산업의 순기에 따라 10월 이후 수확이 시작되고, 12월부터 본격적인 수확이 개시되어, 자연스럽게 양식장 수하밀도가 조절되기 때문이다.

일반적으로 굴은 다양한 환경요인에 의해 대사율 및 성장이 영향을 받게 되고 어장의 기초생산력 또는 먹이조건, 수온, 염분, 부유물질의 양, 해류조건 및 부착생물 등 매우 다양한 요인

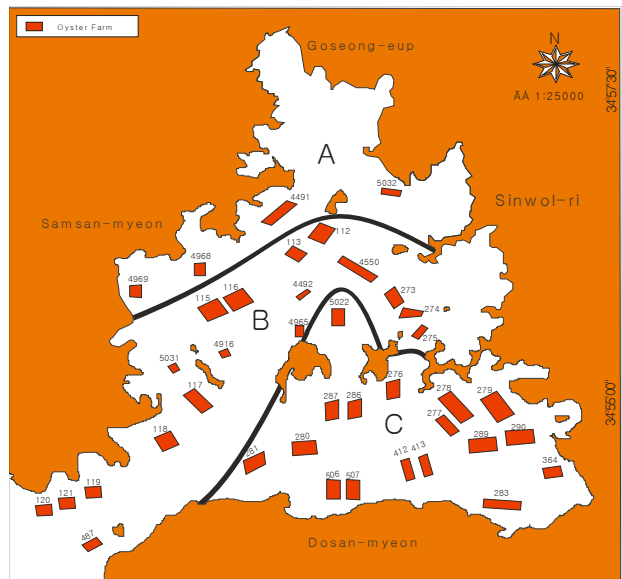


Fig. 9. Division of observed area estimated by carrying capacity of oyster farm in Goseong Bay. [A region : fishery area-12.84 ha, 95 indiv./string] [B region : fishery area-60.45 ha, 260 indiv./string] [C region : fishery area-69.53 ha, 365 indiv./string]

에 의해 간접받게 된다 (Park and Choi, 2002). 그러나 굴의 먹이섭이로 직결되는 여수율에 가장 큰 영향을 미치는 것은 수온이라고 할 수 있다 (Kim, 1980). 따라서 12월 이후에는 낮아진 수온에 따라 굴의 여수율이 현저하게 저하된 것도 이 해역의 먹이공급지수가 개선되는데 일조하였을 것으로 판단된다.

각 양식장별 먹이공급능력에서는 읍도와 비도의 이남해역에 위치한 18개의 양식장과 만의 최 북측의 고성읍에 이웃한 4개의 양식장에서 양식기간 동안 지속적인 먹이부족 현상이 관찰되었다. 이는 서로 다른 요인에 의한 것으로 판단되는데, 남측해역은 높은 기초생산에 의한 풍부한 먹이공급량에도 불구하고 비교적 수심이 좋고 수하량이 많아, 에너지 요구량이 많기 때문이고, 고성만의 북측의 인근해역은 낮은 수심과 높은 탁도 등으로 기초생산력이 해역에서 가장 낮은 것으로 조사되었다. 연안해역에서 어느 정도의 부유물질 함량은 해역의 생산성을 보장하는데 일조하지만, 과도한 부유물질은 광합성의 중요한 요인이 되는 해수면으로부터의 광 투과도를 저하시켜 광합성을 저해할 위험이 있다 (Lars Hakanson, 2006). 고성만에서 북측해역은 수심이 매우 낮아 상대적으로 왕래하는 선박이나 조류 등에 의해 다른 구역보다는 탁도가 높은 해역이었으며, 또한 연접한 고성읍으로부터 지속적으로 생활하수가 유입되는

등 다른 구역에 비해서는 다소의 위협요인이 존재하고 있다.

굴 양식장 의 평균 폐사율과 시기별 (8월-11월) 폐사율은 각각 56%, 58%였는데 이는 이 연구에서 구명한 먹이가용성과 일치되는 결과로써, 고성만의 양식순기중 굴 폐사는 주로 먹이 부족에 의해 일어나고 있음을 나타내고 있다. 그러나 해역내의 어장 위치나 시기에 따라서는 또 다른 요인이 영향을 미치고 있음을 배제할 수는 없다.

한편, 고성만의 수면적은 약 2,100 ha 이지만, 통상 생태학적인 허용면적을 10%정도로 기준하면 (Kim, 2003), 약 200 ha 정도가 양식가능 수면적으로 가정할 수 있다. 현재 고성만은 148 ha 의 굴양식 시설이 점유하고 있으므로 허용면적의 약 74%의 시설율을 보이고 있고, 양식장 초과시설과 과밀정도를 고려하면 약 80%이상으로 매우 높은 활용수준이다. 그러므로 생산력의 경년변동을 고려하면 현재의 수준보다 다소 낮출 필요가 있다.

유동면적을 고려하여 고성만 굴 양식장의 과밀정도를 산정한 결과, 7월과 8월에 양식면적의 유동면적에서 생산 가능한 알골 생체량보다 약 4-5배가 과다 입식되어 있는 것으로 산정되어 양식시설의 과밀이 심각한 수준에 있다 (Table. 4). 이는 관행적으로 실시되는 채묘기준이나 수하기준에 비해 고성만이 지닌

Table 5. The expectable volumes of weight gain per oyster and the area ratio required for feed supply in Goseong Bay

	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.
Food demand per oyster (mg/day/indiv.)	5.75	17.57	33.10	2.16	1.89	1.89	5.55	3.44	3.72	2.90
Drying rate (%)	12	13	15	16	17	17	17	17	18	18
Conversion rate (%)	0.4	0.0	0.3	0.8	1.4	1.6	2.0	1.6	1.3	1.0
Expectable volumes of weight gain per oyster (mg/day/indiv.)	2.13	0.18	9.47	1.69	2.56	3.08	11.18	5.68	4.82	2.85
Expectable volume of weight gain per oyster (g/month/indiv.)	0.066	0.006	0.293	0.052	0.080	0.095	0.347	0.159	0.149	0.085
Meat weight per oyster (g/indiv.)	0.07	0.01	0.88	0.21	0.40	0.57	2.43	1.27	1.35	0.85
Area ratio required for feed supply (ha)	32.4	119.0	0.96	2.57	0.94	0.43	0.07	0.13	0.05	0.07
Area ratio required for feed supply (148 ha)	4,799.6	17,605.1	141.6	381.0	139.8	64.3	10.9	19.6	6.9	10.1

해양 환경적 특성이 다소 다르기 때문에, 폐쇄해역에서 제한된 먹이공급능력에 따라 통영 인근의 개방해역의 수하기준과는 다소 차이가 있음을 보여주고 있다. 고성만에서 흔하게 발생하는 여름철 대량폐사도 이와 관련이 있는 것으로 생각된다.

유효 여과수면적은 해수의 유동과 밀접한 관련이 있다. 그러나 고성만은 폐쇄성 내만으로 거의 풍파가 없고, 주요 유향유속은 조류이므로 풍파나 파도에 의한 유효 여과수면적의 증대 효과를 기대하기 어렵다. 따라서 7-8월에 수하된 양식생물을 100% 생존시키기 위해서는 약 4,700-17,605 ha 의 유효 여과 수면적이 필요한 것으로 구명되었고 (Table. 5), 이는 수하된 전량을 생존시키기 위해서는 8월에는 양식면적의 8배에 달하는 여과 수면적이 요구되는 것을 의미한다. 현재 고성만의 전체 수면적 2100 ha 대비 148 ha 의 양식수면적은 이를 충족시키는 듯 보이지만, 연안의 수심 4 m 이하지역과 양식장 밀집지역 등을 고려하면 실제 유효여과수면적은 여전히 부족하다는 것을 쉽게 알 수 있다.

고성만의 단위유동면적당 최적 양식 굴 개체수와 수용력에 따라 해역을 3개 구역으로 세분하여 평가하면, A 구역은 생산성이 극단적으로 낮은 것으로 조사되었다 (Fig. 9). 이 구역은 양식기간 동안 지속적으로 먹이가 부족하였고, 각 어장별 폐사율이 높았으며, 또한 고성읍이 인접한 지역으로 수심이 낮고 해수 유동이 느리며 고성읍으로부터 유입되는 생활하수의 영향을 받는 곳이다. 특히, 4491, 4696, 4968, 5032 굴 양식장은 90% 이상의 폐사율을 나타내어 굴 양식의 경제성이 아주 낮다고 생각되며, 타 해역으로 이설하는 것이 타당할 것으로 생각된다.

만 중앙부 B 구역은 양식장이 밀집되어 있어 과도한 양식시설에 의한 자가오염과 도시하수 및 산업폐수의 유입으로 양식 굴의 대량폐사를 일으킬 수 있으므로, 계획적인 개선과 관리방법이 요구된다.

만 남측의 C 구역은 생산성이 가장 좋은 해역이나, 유속이 약 5 cm/sec 이하로 느리다. 양식시설의 밀도와 배치에 따라 유수저항은 달라지고, 어장내의 조류 소통은 양식 굴의 먹이 공급과 수질 개선 등에 직접적인 영향을 줄 수 있으므로 높은 생산성을 유지하기 위해서는 양식 굴의 적정밀도유지가 필요하며, 어장들의 연승방향은 조류의 주 흐름방향과 일치시키는 것이 해수유동이나 해수 교환 측면에서 유리할 것으로 생각된다.

고성만의 굴의 생산성은 양식환경과 먹이조건에 따라 영향을 받고 있으므로, 지속적이고 안정적인 굴 양식을 위해서는 주변유역의 오염원 및 굴 양식장 주변의 수질, 저질, 기초생산력 등의 환경 모니터링을 통하여 조사된 결과를 종합적으로 판단하여 관리해야 할 것이다. 특히 먹이공급이 부족한 고수온기를 고려하여 소 해역별로 양식수용력을 기준으로 수하밀도를 조절할 필요가 있다.

사사

이 논문은 경상대학교 해양생물교육연구센터와 국립수산물학원 수산과학연구사업(R2016056)의 지원으로 수행되었음.

REFERENCES

- Bacher, C., P. Duarte, J.G. Ferreira, M. He'ral and O. Raillard. (1998) Assessment and comparison of the Marennes-Ole'ron Bay(France) and Carlingford Lough (Ireland) carrying capacity with ecosystem model. *Aquatic Ecology*, **31**: 379-394.
- Cho, C.H. (1980) Farming Density of Oyster in Hansan-Geoje Bay. *Bulletin of the Korean Fisheries Society*, **13(2)**: 45-56.
- Hakanson, L. (2006) Suspended Particulate Matter in Lakes, Rivers, and Marine Systems. The Blackburn Press. Caldwell, New Jersey.
- Jeong, W.G. (1998) Studies on Proper Management of Oyster Farms in Pukman Bay, Korea. 14pp. Ph.D Thesis, Graduate School of Jeju National University, Jeju.
- Jeong, W.G., J.D. Choi, Y.S. Kim, C.H. Cho and M.G. Yeom (1999) Studies on Proper Management of Oyster Farms in Pukman Bay, Korea. (1) The characteristics of Water and Sediments. *Journal of the Institute of Marine Industry*. **12**: 83-93.
- Jeong, W.G., S.M. Cho and C.H. Cho (1999) Suspended Time Dependent Meat Weight Increase of Oysters, *Crassostrea gigas*, in Pukman Bay, Korea. 1999. *Korean Journal of Malacology*, **15(1)**: 41-47.
- Jeong, W.G. and S.M. Cho (2003) The Physiochemical Characteristics of Seawater and Sediment of Marine Shellfish Farm in Jindong Bay. *Korean Journal of Malacology*, **19(2)**:161-169.
- 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. *Journal of Shellfish Research*, **19**: 771-779
- Kim, Y.S. (1980) Efficiency of energy transfer by a population of the farmed Pacific Oyster, *Crassostrea gigas* in Geoje-Hansan Bay. *Bulletin of the Korean Fisheries Society*, **13**: 179-193 (in Korean)
- Kim, Y.S. (2003) Estimation of Primary Production. In: *Aquatic Production* (ed. by Kim, Y.S.), pp 5-18. Gyeongsang National University, Tongyeong.
- Kusuki, Y. (1977) Fundamental studies on the deterioration of oyster growing grounds. (II) Organic content of faecal materials. *Bulletin of the Japanese Society for the Science of Fish*, **43**: 167-171.
- Lee W.J., N.J. Park, J.H. Noh, J.D. Lee, R.G. Jang, M. Chang and Y.H. Yoon (2004) Temporal and Spatial Distribution of Phytoplankton in Gwangyang Bay. Environmental Research Institute, Kyungnam

- University. **27**: 105-127.
- Lee, B.D., H.K. Kang and Y.J. Kang (1991) Primary Production in Oyster Farming Bay. *Bulletin of the Korean Fisheries Society*, **24(1)**: 39-51.
- Lee, J.H. (1992) Marine Biology. 265pp, Donghwa Technology Publishing, Donghwa Technology.
- MOMAF (Ministry of Maritime Affairs and Fisheries) (2001) Development of Optimal Technology for Sustaining Production in Shellfish Farm. 543pp. (in Korean)
- Odum, E.P (1971) Fundamentals of Ecology. Third Edition. 574pp. Saunders, Philadelphia.
- Oh, S.J., J.S. Lee, J.S. Park, I.H. Noh and Y.H Yoon (2008) Environmental Factor on the Succession of Phytoplankton Community in Jinju Bay, Korea. *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, **11(2)**: 98-104.
- Oyster Hanging Culture Fisheries Cooperatives (2008). Annual Report (1996-2008).
- Park, Y.C. and K.S. Choi (2002) Growth and Carrying Capacity of Pacific Oyster, *Crassostrea gigas*, in Kamak Bay, Korea. *Korean Journal of Environmental Biology*, **20(4)**: 378-385.
- Pazos, A.J., G. Roman, C.P. Acosta, M. Abad and J.L. Sanchez (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. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. **211**: 169-193.
- Rodhouse, P.G., C.M. Roden, G.M. Burnell, M.P. Hensey, T. Mc Mahon, 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. *Journal of the Marine Biological Association of the UK*, **64**: 513-529.
- Rowan, K.S. (1989) Photosynthetic Pigments of Algae. Cambridge University Press, Cambridge. 344pp.
- Steemann-Nielsen, E. (1975) Marine Photosynthesis with Special Emphasis on the Ecological Aspects. 141pp. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
- Sugawara, Y. and K. Okoshi (1991) An important problem for oyster farming in enclosed coastal waters. *Marine Pollution Bulletin*, **22**: 271-274.
- 경상남도 (1997) 경상남도 특별관리어장 정화사업 기본조사 및 실시설계 용역 최종보고서(고성만).
- 고성군 (2008) 경상남도 고성군 통계연보(2008-2009).
- 통영시 (2008) 경상남도 통영시 통계연보(2008-2009)
- 해양수산부 (2005) 수산물 생산해역 안전평가 연구 보고서. pp. 3.