

거제한산만 굴양식장의 지속적 이용을 위한 생태지표의 적용

조운식* · 홍석진**† · 박성은** · 정래홍** · 이원찬** · 이석모***

*, ** 국립수산물과학원 환경연구과, ***부경대학교 생태공학과

Application of Ecological Indicator to Sustainable Use of Oyster Culture Grounds in GeojeHansan Bay, Korea

Yoon-Sik Cho* · Sok-Jin Hong**† · Sung-Eun Park** ·

Rae-Hong Jung** · Won-Chan Lee** · Suk-Mo Lee***

*, ** Division of Environmental Research, National Fisheries Research & Development Institute, Busan, 619-705, Korea

*** Major of Ecological Engineering, Pukyong National University, Busan, 608-737, Korea

요 약 : 지금까지 연안 양식장의 지속적인 생산 및 체계적인 관리를 위해 어장환경용량 산정 및 활용에 관하여 많은 연구가 선행되어 왔다. 그러나, 생태학적 부하를 고려한 지속적 적정 생산을 위해서는 4가지 계층구조(물리적 수용능력, 생산 수용능력, 생태학적 수용능력 및 사회적 수용능력)에 의한 어장환경용량 산정 개념을 활용할 수 있다. 생태학적 수용 능력 산정의 경우, 환경과 패류 양식의 상호작용에 관한 좀 더 전체적인 접근이 필요하여 아직까지 모델 개발은 초기 단계에 있으므로, 이에 대한 대안접근으로 패류양식장이 해양생태계의 기능을 어떻게 변화시킬 수 있는지 패류양식장의 생태적 효율을 평가할 수 있는 생태지표의 필요성이 대두되었다. 현재 거제한산만 굴양식장의 정화율 생태지표는 0.331, 여과압 생태지표는 0.203으로 계산되었으며, 이는 연안 생태계에 부하를 주지 않는 생태학적 수용 능력인 0.05를 초과하고 있음을 나타내었다. 본 연구에서는 생태학적 수용 능력의 개념에 근거한 생태지표를 거제한산만에 적용하여, 현재의 굴 양식장의 개발 수준이 어느 정도인지를 평가하여 지속적인 생산과 효과적인 양식어장 관리 지침으로 활용하는 방안을 마련하고자 하였다.

핵심용어 : 생태학적 수용 능력, 생태지표, 어장환경용량, 거제한산만, 정화율, 여과압

Abstract : The concept of carrying capacity for bivalve culture of an area can be classified into four hierarchical categories, according to their level of complexity and scope, such as physical, production, ecological and social carrying capacity. Most scientific efforts to date have been directed towards modelling production carrying capacity and some of the resultant models have been used successfully. But, the modelling of ecological carrying capacity is still in its infancy, because it should consider the whole ecosystem and all culture activities. A more holistic approach is needed to determine the influence of bivalve aquaculture on the environment and ecological carrying capacity. As an alternative, we can use a set of ecological indicators which can show the environmental performance of bivalve farms and assess ecological carrying capacity. Clearance efficiency and filtration pressure indicators show the value of 0.331 and 0.203, respectively, and these indicators suggest that the present level of culture in GeojeHansan Bay is above the ecological carrying capacity of 0.05. Consequently, these indicators can provide a guidance on the present level of culture in regard to production and ecological carrying capacity in GeojeHansan Bay.

Key words : Ecological carrying capacity, Ecological indicator, Carrying capacity for bivalve culture, GeojeHansan Bay, Clearance efficiency, Filtration pressure

1. 서 론

경남을 중심으로 남해안 일대가 세계적인 굴 생산지역인 우리나라에서, 2002년 태풍과 홍수에 의한 거제만 굴 대량폐사, 2006년 고수온에

의한 여수, 고흥 굴 대량폐사, 2007년 빈산소 수피와 고수온에 의한 통영 굴 대량폐사 등의 어려움도 있었으나, 수하식 굴 양식 기술의 발달과 웰빙 열풍에 의한 내수시장의 굴 소비 증가에 힘입어, 2001년에서 2007년까지의 천해양식 굴 생산량은 지속적인 증가 추세에 있다(한국해양수산개발원, 2006). 2008년에는 전년 대비 22%가 감소하였으며, 이는 2007년 12월 태안 앞바다에서 발생한 유조선 허베이 스피리트

* 대표저자 : 정희원, ysc@nfrdi.go.kr, 051-720-2526

† 교신저자 : 정희원, sj@nfrdi.go.kr, 051-720-2522

(Hebei Spirit)호 원유유출 사고에 의하여 서해안의 굴 양식장 시설 철거와 생산중단 그리고 경남지방의 굴 양식 작황 부진에 기인한다.

어장 주변의 환경을 살펴보면, 환경을 고려하지 않은 어장의 배치, 해면의 지속적인 이용에 따른 자가 오염 부하의 증가, 가용 먹이량을 초과한 시설량 증대 등의 이유로 연안에 주로 위치한 어장 주변의 환경오염은 지속적으로 증가하고 있는 상황이다(국립수산과학원, 2008). 그동안 연안 어장의 체계적인 관리 및 지속적인 생산을 위한 방법을 고안하기 위하여 어장환경용량 산정 및 활용에 관한 연구가 많이 선행되었다. 국내의 경우, 양식 생물의 에너지 전환효율을 이용한 최대생산력 산정(조 등, 1996a; 1996b), 기초생산력과 양식생물 먹이요구량을 활용한 최대 수용력 산정(박, 2001), 참굴 성장과 관련된 생리 대사 과정을 수식화하여 굴 성장 모델을 정립한 후, 생태계 모델에 연계시켜 해역의 환경용량 산정 모델 구축(이, 2001), 이때때의 수질정화 효과 분석(엄, 2007) 등이 있다.

그러나, 생태학적 부하를 고려하여 적정한 생산을 지속할 수 있는 어장환경용량 산정을 위해서는 Inglis et al.(2000)이 분류하고, McKindsey et al.(2006)이 리뷰한 4가지 계층구조에 의한 어장환경산정 개념을 활용할 수 있다. 이에 따르면 어장의 최대 생산력에 기준한 어장환경용량을 생산 수용능력(Production carrying capacity)으로, 생태학적 부하를 고려한 어장환경용량은 생태학적 수용능력(Ecological carrying capacity)으로 정의하고 있다. 생태학적 수용능력 산정의 경우, 환경과 패류 양식의 상호작용에 관한 좀 더 전체적인 접근이 필요하고, 포함되어야 할 전형적인 변수가 영양염, 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, 양식종, 유기체설물, 각종 변수들 사이의 피드백, 상호작용 등으로 복잡성이 크게 달라 아직까지 모델개발은 초기 단계에 있으므로, 생태학적 수용능력을 산정 및 예측할 수 있는 모델 개발 및 활용을 위해 더 많은 연구가 필요하다(McKindsey et al., 2006). 생산 수용능력과 생태학적 수용능력을 결정하는 가장 확실한 방법은 대규모의 양식장 개발 프로그램에 직접 참여하여 양식생물의 성장을 모니터링하고, 성장률이 예측된 어느 임계점 아래로 생산이 떨어질 때 개발을 멈추는 것이다. 그러나, 이는 시스템 전반에 대한 과도한 시간적 비용, 노동집약적인 모니터링이 수반되어야 하고, 시스템 내부와 외부의 시공간적인 다양한 변화로부터 파생되는 어장 생태계의 변화를 예측할 수가 없다.

따라서, 이에 대한 대안적 접근으로 패류양식장이 해양생태계의 기능을 어떻게 변화시킬 수 있는지 패류양식장의 생태적 효율을 평가할 수 있는 생태지표(Ecological indicator)의 필요성이 대두되었다(Gibbs, 2007). 양식업자들은 얼마나 많은 양식수산물에 대상해역의 성장 환경에 의해 생산되는지에 관심을 가지며, 환경론자들은 최소한의 환경적 부하를 가지는 생산량이 어느 정도인지에 관심을 가지며, 정책론자들은 쌍방의 선호도를 절충하는 생산량에 관심을 가지게 되는데, 측정 가능한 생태지표는 양식활동의 환경적 행위 산정, 미래 양식개발의 범위 산정의 효과적인 수단이므로 이해당사자 간의 갈등구조를

해결하기 위한 대안이 되고 있다(Callens and Tyteca, 1999; Gibbs, 2007). 본 연구에서는 생태학적 수용능력의 개념에 근거한 생태지표를 거제한산만에 적용하여, 현재의 굴 양식장의 개발 수준이 어느 정도인지를 평가하여 지속적인 생산과 효과적인 양식어장 관리를 위한 지침으로 활용하는 방안을 마련하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 대상 해역

거제한산만은 크고 작은 4개의 섬(거제도, 화도, 한산도, 봉암도)으로 둘러싸여 있고, 남동쪽과 북서쪽에 만구가 있는 반폐쇄적 성격을 지닌 곳으로, 이번 연구해역에 해당하는 총 수면적은 58.8km²였고, 그 중 어업면허권에 따른 굴 양식장은 총 6.0km²의 면적으로 10.2%의 비율을 차지하였다(Fig. 1). 해수 유동은 창조시에 만의 남단에서 유입하여 주류는 곧장 북서 방향으로 유출하고 일부는 만의 내측으로 유입하며, 낙조시는 반대 방향이다. 해저 지형은 거제도 남단에서 북서 방향으로 향하는 수로에서는 20~40 m로 깊으나 산달도 부근의 만 내측에서는 10 m 이내로 평탄한 곳이며, 전체 수용적은 1,402×10⁶m³에 달한다. 양식어장의 배치는 굴 양식이 주류를 이루고, 내측의 작은 하천으로부터 담수가 유입되고 있다. 거제한산만의 어장환경 특성을 파악하기 위해 2008년 계절별 수질, 퇴적물 환경을 조사하였으며, 거제한산만의 어장구역별 지표(Indicator) 적용을 위하여 서식 적합도와 조사 정점별 위치를 고려하여 7개의 구역으로 분류하였다.

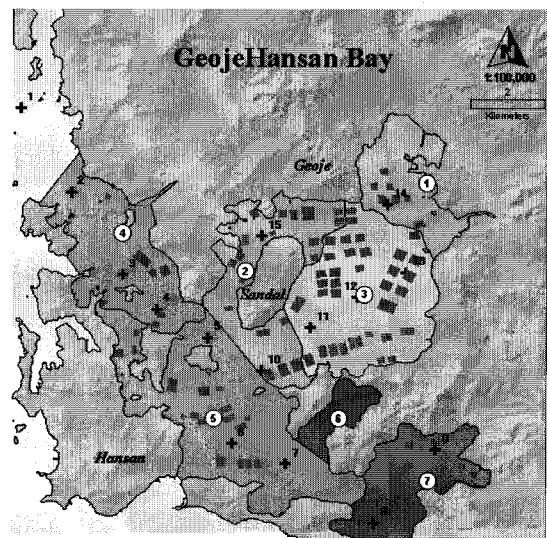


Fig. 1. Distribution of oyster farms, sampling stations and oyster farms groups in Geojehansan Bay.

2.2 어장환경용량 개념의 발전

연안 양식의 개발에 있어 “어장환경용량”의 개념은 종종 논쟁의 대상이 되는데, 이 개념에 관한 토론은 물리적, 생물학적, 사회적 변수를 포함하는 가치에 대하여 폭넓은 규모로 해석될 수 있으며, Inglis et al.(2000)은 패류 양식장의 어장환경용량을 물리적 수용능력(Physical carrying capacity), 생산 수용능력(Production carrying capacity), 생태학적 수용능력(Ecological carrying capacity), 사회적 수용능력(Social carrying capacity)의 네 가지 카테고리로 분류하여 정의하였다. 또한, McKindsey et al.(2006)은 아래의 Fig. 2와 같이 계층구조에 의해 어장환경용량의 모식도를 정의하고, 어장환경용량의 개념 및 접근방법에 대하여 좀 더 자세한 리뷰를 제공하였다.

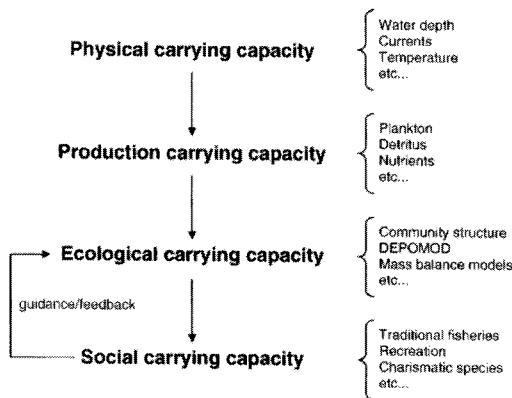


Fig. 2. Hierarchical structure to determine carrying capacity of a given area (adapted from McKindsey et al., 2006).

여기서, 생태학적 수용능력은 ‘수용할 수 없는 생태학적 부하를 유발하는 시설량이나 입식밀도’로 정의되며, 생산 수용능력과는 반대로, 패류양식장용 해역에 관한 생태학적 수용능력을 산정하고 예측하는 모델개발에는 많은 시도가 있지 않았다. 생산 수용능력의 경우에 양식장 운전과 상호작용의 모든 면을 고려하지 않고 양식의 생육과정에만 제한되어 왔지만, 생태학적 수용능력은 전체 생태계와 채묘부터 생육, 수확, 가공까지의 모든 양식 활동을 고려해야 하며, 종묘 이용이나 필요시 사용가능한 지역 같은 제한인자도 고려하여야 한다. 선행된 생태학적 수용능력 산정(Cromey et al., 2002; Jiang and Gibbs, 2005)의 대부분의 연구결과는 단지 제한된 수의 생태계 인자를 고려하기 때문에, 적용할 수 있는 유연한 접근성을 개발하기 위해서는 생태학적 수용능력에 영향을 주는 인자들의 폭넓은 이해와 해양생태계의 기능에 대해 좀 더 깊이 있는 연구가 필요하다.

2.3 생태지표(Ecological Indicator)

양식은 수산물의 수요와 이용가능한 공급사이에 존재하는 결점을 채운다. 패류양식은 특히 추가적인 먹이원 공급이 필요

없는 장점이 있지만, 전적으로 천연 먹이원에 의존한다는 사실은 생산성에 대한 제약사항이 된다. 따라서 패류 양식업자, 관리자들은 패류양식이 어떻게 해양의 성장환경에서 저영양 레벨과 상호작용하고, 영향을 주는지를 이해하고자 하지만, 이를 정량화하는 것은 패류양식이 영양염 순환을 바꿀 수 있기 때문에 단순하지 않다. 명백한 것은 이러한 상호작용을 이해하는 생태학적 수용능력 산정 모델을 개발하는 것이지만, 아직까지는 모델 개발이 여의치가 않다. 그렇다면, 측정 가능한 생태지표는 양식 활동의 환경적 부하 범위와 생산 적정 범위 산정, 미래 양식개발의 범위 산정의 효과적인 수단이 될 수 있으므로 유용한 대안을 증명할 수 있다(Callens and Tyteca, 1999; Gibbs, 2007).

Fig. 3은 패류양식이 도입되기 전 패류양식지역에서의 전형적인 먹이사슬 구조를 보여준다. 패류양식장이 없는 경우 식물플랑크톤은 동물플랑크톤에 의해 섭이되고, 일부는 유기체설물과 저서 여과 섭이자의 기본 생체량으로 보관될 수도 있다(Officer et al., 1982). 그러나, 대증식 기간 동안 식물플랑크톤의 생체량을 조절할 수 있는 것은 일반적으로 동물플랑크톤이며 따라서, 종종 동물플랑크톤의 증식은 식물플랑크톤의 증식을 따른다.

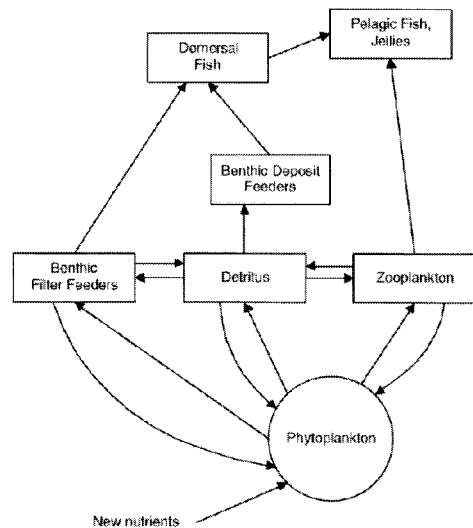


Fig. 3. Theoretical food web in area where bivalve culture is performed prior to the introduction of farms (adapted from Gibbs, 2007).

패류 양식장의 도입에 따른 먹이사슬을 살펴보면(Fig. 4), 예전에 다른 세 그룹으로 흘렀던 에너지의 일부는 패류 양식장을 통해 흐르게 되며, 양식장의 도입이 증가할수록 에너지 흐름은 증가하게다.

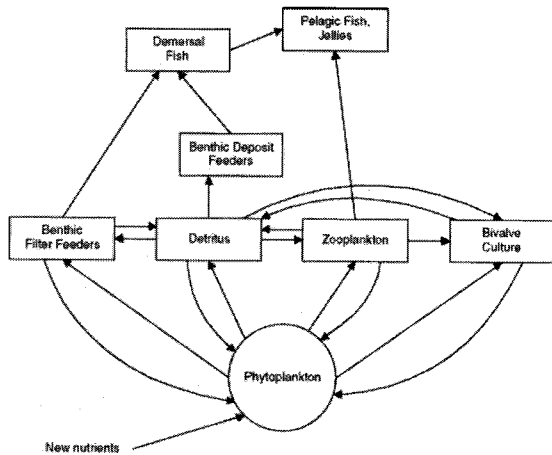


Fig. 4. Theoretical food web in area where bivalve culture is performed with culture included (adapted from Gibbs, 2007).

2.3.1 정화율(Clearance Efficiency : CE)

$$CE = \frac{R_t}{C_t} = \frac{\text{Residence Time (day)}}{\text{Clearance Time by oyster culture (day)}} \quad (1)$$

여기서 C_t 는 패류 양식장이 대상해역에서 모든 수체를 처리하는데 걸리는 시간이다. R_t 는 대상해역에 있는 수체가 교체되는데 걸리는 시간이다. 정화율 지표는 패류 양식장이 대상해역의 교체와 비교하여 얼마나 효과적으로 해역의 수체를 처리할 수 있는지의 척도를 의미하며, 대상해역과 근처 연안해역 사이의 상호연결성을 극복한다.

패류 양식장의 교체시간에 대한 가장 직접적인 산정은 '각 패류의 평균교체시간'과 '양식장 패류의 총 수'를 곱함으로써 결정될 수 있다. 대상해역의 교체시간은 경험식(Tidal prism 산정)이나, 그 지역의 수치 해수유동 모델을 개발함으로써 산정될 수 있다. 0.05 이하의 값이 해양기능에 뚜렷한 변화를 유도하지 않는 양식장이며, 이는 생태학적 수용능력의 정의를 충족한다고 Gibbs(2007)는 제안한다. 반대로, 1보다 큰 값은 대상해역의 수체가 패류양식장을 통해 처리되는 시간보다 더 늦게 교체되고 있음을 나타낸다. 즉, 대상해역 밖으로 교체되기 전에, 반복적으로 패류 양식장에 의해 여과되기 때문에, 그런 경우 패류는 식물플랑크톤의 총 풍부성을 조절할 것으로 기대된다(Smaal and Prins, 1993; Gibbs, 2007).

2.3.2 여과압(Filtration Pressure : FP)

$$FP = \frac{B_f}{P_p} = \frac{\text{Bivalve Filtration (ton C)}}{\text{Phytoplankton Production (ton C)}} \quad (2)$$

여기서 B_f 는 패류 양식에 의해 수체로부터 추출되는 총 탄소량으로서, 어장의 생체량 생산에 관한 정확한 정보가 B_f 를 산정하는데 이용될 수 있다. P_p 는 대상해역에서 식물플랑크톤과 같은 독립영양에 의해 고정되는 총 탄소량으로서, 기초생산

력 측정으로 계산될 수 있다.

정화율 지표와는 달리, 여과압 지표는 연안해역과의 연결성은 설명하지 않고, 대상해역의 자원 흐름을 설명한다. 여과압 지표에서 0.05 이하의 값은 대상해역 내에 생성되는 매우 작은 탄소량이 패류 양식장을 통해 지나간다는 것을 나타내고, 이는 이 해역의 패류 양식장이 시스템에 거의 부하가 없고 생태학적 수용능력에 근접함을 제안한다. 이 생태지표의 1.0 값은 패류 양식장이 이론적인 생산 수용능력에 있음을 제안한다(Smaal and Prins, 1993; Dame 1996; Gibbs, 2007).

3. 결 과

3.1 거제한산만의 정화율(Clearance Efficiency)

거제한산만 대상해역의 수면적은 58,798,597m², 수용적은 1,402,771,315m³이다. 패류양식장의 여수율은 수온과 개체 육중량의 함수(Kobayashi et al., 1997)로서 거제한산만의 경우 양식 순기(2008. 6~2009. 2) 동안 0.16~2.81L/ind./hr(Table 1), 평균 1.84L/ind./hr이었다(국립수산과학원, 2008). 굴 수하식 수협이 굴 양식장 시설량을 근거로 한 조사에 따르면, 거제한산만 굴 양식장의 예상 생산 개체수는 1,484×10⁶미이고, 여수율을 고려한 여수량은 65,548,700m³/day 로서 매일 수용적의 4.7%를 여수한다. 이에 따라 굴 양식장이 거제한산만의 수체를 처리하는데 걸리는 시간인 C_t 는 21.4day이었다.

$$2.0g < W_d : FR_w = 2.51 W_d^{0.279}$$

$$W_d \leq 2.0g : FR_w = 0.117 W_d^3 - 1.05 W_d^2 + 3.09 W_d + 0.133$$

$$FR = \frac{FR_w T^{0.5}}{4.47} \quad (3)$$

여기서, FR : 여수율 (L/g DW · h)

W_d : 건조 육중량 (g)

Table 1. Filtration rates of *Crassostrea gigas*

	2008			2009				
	Jun	Jul.	Aug. Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.
Water temp. (°C)	17.9	22.1	23.5 23.7	19.6	16.9	12.2	11.7	8.55
Wet-tissue weight (g/ind.)	0.05	0.79	2.36 4.06	4.06	10.2	12.1	14.0	15.5
Dry-tissue weight (g/ind.)	0.01	0.16	0.47 0.81	0.81	2.04	2.42	2.80	3.09
Filtration rate (L/ind./hr)	0.16	0.62	1.48 2.19	1.99	2.81	2.51	2.56	2.26

거제한산만 대상해역의 교체시간을 구하기 위하여 조석프리즘법(Tidal prism method)을 이용하였다(Bowden, 1967; 김과장, 1985). 이에 따른 거제한산만 대상해역의 교체시간인 R_t 는 7.08 day이었다(Table 2).

$$P = - \int_t^{t+T/2} Q dt = - \int_t^{t+T/2} u A dt = U A \int_t^{t+T/2} \sin(\sigma t - r) dt$$

$$= Q_{max} \int_t^{t+T/2} \sin(\sigma t - r) dt = \frac{Q_{max} T}{\pi} = 2A_b S \quad (4)$$

여기서, P = 창조시 유입된 수용적(Tidal prism volume)

A = 만구의 단면적; A_b : 만내조위진폭

u = 만구단면의 평균유속

S = 만의 표면적

U = 최대유속

$2A_b S$ 는 만내의 수위가 일정하다는 전제하에서 적용

$$r_p = P/(V+P) \quad (5)$$

여기서, r_p = 해수교환율; V = 저조시 만내용적

$$t_p = (V+P)/P \quad (6)$$

여기서, t_p 는 만내교체시간

Table 2. Flushing time by tidal prism in GejeHansan Bay

Bay volume ($\times 10^6$ m ³)		P ($\times 10^6$ m ³)	r_p (%)	Tidal range (m)	Flushing time (day)
H.W.	L.W.				
1,520.4	1,402.8	117.6	7.7	1.88	7.08

이러한 결과를 토대로 계산된 정화율 지표값은 7.08/21.4로서 0.331의 결과가 나왔다. 이는 Gibbs(2007)가 제안한 생태학적 수용능력의 기준인 0.05 이상의 값이므로 해양 생태계에 변화를 유도할 수도 있으며, 생태학적 수용능력의 정의를 충족하지 못하는 것으로 판단된다. 정화율 지표가 1.0을 넘으면 만내의 대상해역이 패류양식에 의해 처리되는 것보다 더 늦게 교체되는 상황으로서, 이 경우 패류양식장은 식물플랑크톤의 개체수를 제어할 수 있을 것으로 판단된다.

Smaal and Prins(1993)는 패류 부유 섭이에 관한 실험 및 현장측정을 통해 수용적당 굴의 생체량이 2~8gDW/m³의 범위에 있을 때 대상수체의 체류시간은 종종 굴의 정화시간보다 길고, 패류 양식장은 전체 생태계에 부하를 가질 수 있음을 보

여주었으며, 이는 Gibbs(2007)가 제안한 정화율 지표값으로 나타낼 수 있다. 정화율 지표값이 1 이상일 경우, 양식장은 식물플랑크톤의 동역학에 관한 조절 가능성을 가지게 되며, 0.05에서 1 사이에서는 대상해역내의 수체치리에 영향을 줄 수 있게 된다. 정화율 지표값이 0.05 이하일 경우 생태계에 부하를 주지 않는 상태로서 생태학적 수용능력의 정의를 만족하게 된다(Fig. 5). 거제한산만의 정화율 지표값은 0.331로서 생태학적 수용능력의 기준을 초과하고, 해역의 수 처리에 영향을 주고 있으며, 식물플랑크톤의 조절 가능성을 가지지 않는 것으로 판단된다. 거제한산만의 수용적당 굴의 생체량은 0.7gDW/m³로서 식물플랑크톤의 동역학을 조절할 수 있는 2~8gDW/m³의 범위에는 미치지 못함을 알 수 있다(Table 3).

Table 3. Assessment of clearance efficiency in different regions (adapted from Smaal and Prins, 1993 and updated)

Region (Country)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
South San Francisco Bay (USA)	2500	6	15	2.5	6250	600	9.0	11.1	0.7	16.65
Western Wadden Sea (NL)	4020	2.9	10.4	3.6	14417	48	0.5	10	5.8	1.72
Marennes-Oleron Bay (F)	675	5	21	4.2	2835	86.4	1.8	7.1	2.8	2.58
Bay of Brest (F)	1480	10	74	7.4	10952	48	3.6	16.7	2.8	5.93
Arosa (Sp)	4335	19	30	1.6	6845	51	1.5	23	12.4	1.85
Geje Hansan (KR)	1403	23.9	16.8	0.7	986	66.9	1.1	7.1	21.3	0.33

1. Total volume (10^6 m³)
2. Avg. depth (m)
3. Biomass (gDW/m²)
4. Biomass (gDW/m³)
5. Standing stock (10^6 g)
6. Clearance rate (L/g/d)
7. Clearance rate (m³/m²/d)
8. Residence time (d)
9. Clearance time (d)
10. CE(=Residence time / Clearance time)

거제한산만의 어장구역별 정화율 지표값을 살펴보면(Fig. 6), 산달도 우측인 3번 어장구역이 0.752로 가장 높은 값을 나타내었으며, 울포만 7번 어장구역이 0.079로 가장 낮은 값을 나타내었지만, 생태계에 아무런 부하를 주지 않는 생태학적 수용능력의 기준 0.05를 모든 구역에서 초과하고 있으며, 식물플랑크톤의 동역학을 조절할 수 있는 1.0에는 미치지 못하는 상태이다.

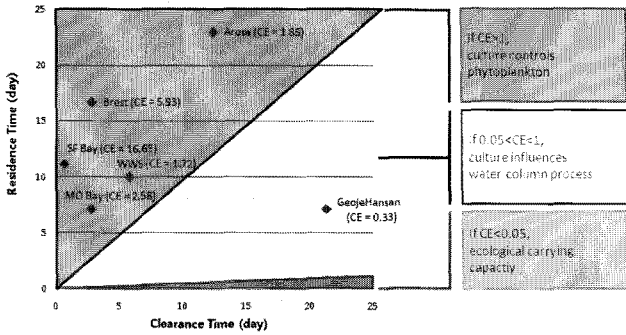


Fig. 5. Residence time as compared with clearance time (adapted from Smaal and Prins, 1993 and updated).

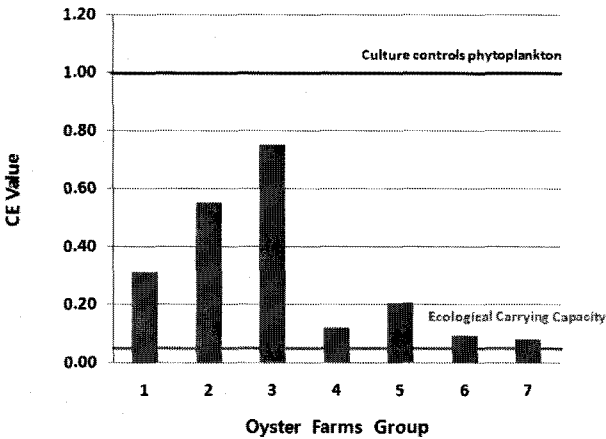


Fig. 6. CE value according to oyster farms groups in GeojeHansan Bay.

3.2 거제한산만의 여과압(Filtration Pressure)

P_f 의 산정은 기초생산력 측정으로부터 획득될 수 있다. 2008년의 거제한산만의 굴 양식 순기(2008. 6~2009. 2) 동안 기초생산력은 $0.161 \sim 0.973 \text{gC/m}^2/\text{day}$ (Fig. 7)로서 평균 $0.5804 \text{gC/m}^2/\text{day}$ 이었다(국립수산물과학원, 2008). 이는 2001년의 조사인 $0.102 \sim 1.089 \text{gC/m}^2/\text{day}$, 평균 $0.6276 \text{gC/m}^2/\text{day}$ 와 유사한 결과이다(박, 2001). 기초생산력은 현장관측시 많은 시간이 소요될 뿐만 아니라, 현장관측 결과는 굴이 섭취하고 남은 양을 나타내기 때문에, 본 연구에서는 거제한산만 내의 모든 해역에 기초생산력을 적용하기 위하여 생태계 모델에서 계산된 값을 활용하였다. 양식 굴의 영향을 배제한 상태에서 양식순기동안을 계산기간으로 하였으며, 사용된 수식은 다음과 같다. 기초생산력과 대상해역 면적, 양식 순기 기간을 고려한 거제한산만의 기초생산력은 $9,703 \text{tonC}$ 이었다. 거제한산만의 2008년 굴 예상 생산량을 살펴보면, 습중량은 $4,935.08 \text{ton}$ 이었고, 이는 $987.02 \text{ton} \cdot \text{dry weight}$ (wet weight : dry weight = 1 : 0.2; Klink et al., 1992; Kobayashi et al., 1997), 394.81tonC (dry weight : Carbon = 1 : 0.4; Bierman and Dolan, 1981; Horiguchi et al.,

1998)가 된다. 이를 생산하기 위해, 굴이 필요로 하는 탄소량은 $1,974.03 \text{tonC}$ (Ecological efficiency 20%; Jordan and Valiela, 1982)가 된다. 이러한 결과를 토대로 계산된 여과압 지표값은 $1,974.03/9703$ 으로서 0.203이었다. 이는 0.05 이상의 값으로서 대상지역내에서 생성되는 탄소자원의 적지 않은 양이 굴 양식장으로 이동됨을 나타내고, 이는 생태학적 수용능력의 정의를 충족하지 못하며, 또한 1.0 미만의 값으로 이론적인 생산 수용능력에는 도달하지 않았음을 알 수 있다.

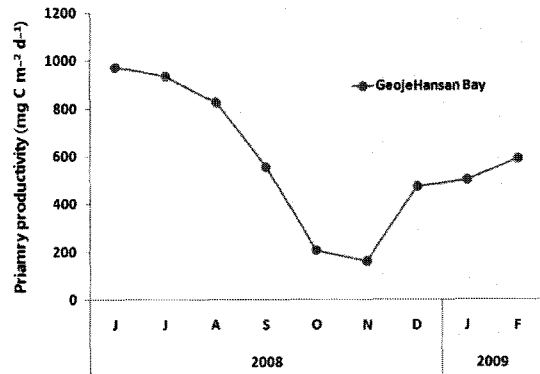


Fig. 7. Monthly variation of daily primary productivity in GeojeHansan Bay.

굴의 식물플랑크톤 섭취는 m^2 당 기초 생산력을 초과한다. 식물플랑크톤의 일일 플럭스를 생산하기 위하여 필요로 하는 면적은 Table 4에 있다. 거제한산만의 여과압 지표값은 0.20로서, 기초생산력의 20%가 굴에 의하여 매일 섭취됨을 알 수 있다. 물론, 대상해역 내의 모든 섭취자에 대한 고려는 포함되지 않았으므로, 실제 여과압 지표값은 더욱 높아질 것이다. Sylt 지역의 경우에는 여과압 지표값이 1을 초과하였는데, 이는 외부로부터의 추가적인 섭취로 간주되며(Smaal and Prins, 1993), Marennes-Oleron Bay의 경우에는 Microphytobenthos가 주요기초생산자로서 재부유에 의하여 패류의 추가적인 먹이원으로 간주된다(Smaal and Prins, 1993). 결과적으로 대상해역의 수체에서 식물플랑크톤의 회전율은 여과압 지표값을 초과하지 않으며, 여과압 지표값이 1인 경우를 이론적인 생산 수용능력으로 볼 수 있다. 0.05이하일 경우 생태계에 아무런 부하를 주지 않는 상태로서 생태학적 수용능력의 정의를 만족하게 된다(Fig. 8).

거제한산만의 어장구역별 여과압 지표를 살펴보면(Fig. 9), 산달도 우측인 3번 어장구역이 0.344로 가장 높은 값을 나타내었으며, 이는 이론적인 생산 수용능력에는 도달하지 않은 상태이다. 화도와 비산도 주변 해역인 4번 어장구역이 0.063으로 가장 낮은 값을 나타내었으며, 이는 생태계에 부하를 주지 않는 생태학적 수용능력의 기준인 0.05에 가장 근접한 값을 나타내고 있다.

Table 4. Assessment of filtration pressure in different regions (adapted from Smaal and Prins, 1993 and updated)

Region (country)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Sylt (G)	7.2	2	4	0.2	0.8	0.48 [12]	3	1.4	15.1	1.81
Oosterschelde (NL)	2,740	8	351	0.52	183	18 [5.1]	6	108	11.5	0.59
Marenes-Oleron Bay (F)	675	5	135	0.22	29.7	32 [23.7]	3.5	112	15.9	3.76
Arosa (Sp)	4,335	19	228	0.27	61.6	0.85 [0.4]	41	34.5	150	0.56
Geoje Hansan (KR)	1,403	24	58.8	0.58	34.1	6.00 [10.2]	1.2	6.9	2.0	0.20

1. Total volume ($10^6 m^3$)
2. Average depth (m)
3. Area ($10^6 m^2$)
4. Primary production ($gC/m^2/d$)
5. Primary production ($10^6 gC/d$)
6. Surface bivalves [% of total] ($10^6 m^2$)
7. Phytoplankton flux ($gC/m^2/d$)
8. Phytoplankton flux ($10^6 gC/d$)
9. Required production area
10. FP (=Phytoplankton flux / Primary production)

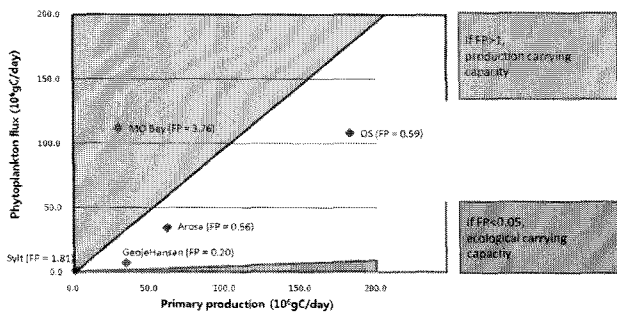


Fig. 8. Phytoplankton flux as compared with primary production (adapted from Smaal and Prins, 1993 and updated).

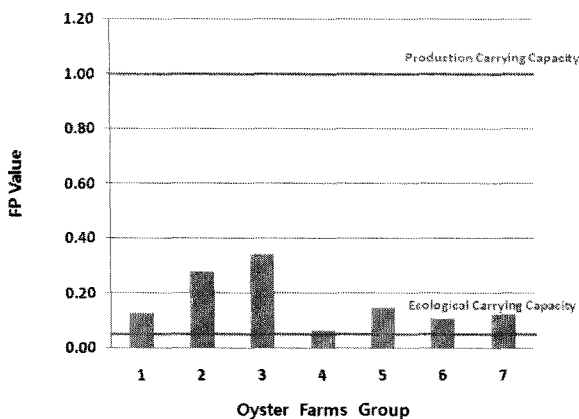


Fig. 9. FP value according to oyster farms groups in GeojeHansan Bay.

4. 고찰

Fig. 10은 패류양식장 개발에 있어서 지속성 이정표를 보여 준다. 한 해역에 양식장이 점점 더 도입될수록, 이정표가 만나는 첫 번째는 생태학적 수용능력(<0.05)이고, 이는 대상해역 내에서 생태계를 변화시키지 않고 해역 내에 도입될 수 있는 양식의 레벨을 나타낸다. 다음 두 번째 이정표($0.05 \sim 1.0$)는 양식이 특정 개발레벨에 도달할 때 시스템에 발생하는 기능적 변화와 관련이 있는데, 이는 양식장이 대상해역내의 수체처리에 영향을 주게 될 때 발생한다. 최종 이정표(>1.0)는 양식장이 식물플랑크톤에 대해 제어를 할 수 있을 때 발생한다. 이 단계에서 양식은 성장 환경에서 정확하게 어디서 얼마만큼 인지는 모르지만, 경쟁과 과섭이자에 대한 자원의 방향을 바꿀 수 있다.

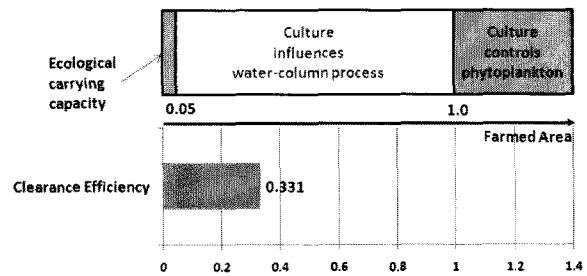


Fig. 10. Clearance efficiency in GeojeHansan Bay and schematic representation of the progression of the development of bivalve culture.

Fig. 11의 최종 이정표는 양식장이 생산 수용능력(>1.0)에 있을 때로서, 이는 경쟁자를 위한 자원을 남기지 않고서, 모든 자원이 양식장을 지원하는데 사용 될 때, 그리고 해양 생태계가 영양염-식물플랑크톤-패류양식의 순환 고리로 정리될 때를 의미한다.

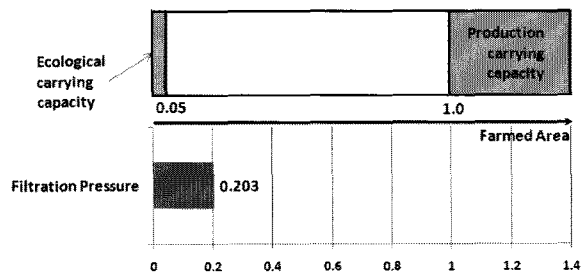


Fig. 11. Filtration pressure in GeojeHansan Bay and schematic representation of the progression of the development of bivalve culture.

정화율 지표의 경우는 패류양식장이 대상해역의 교체와 비교하여 얼마나 효과적으로 해역의 수체를 처리할 수 있는지의 척도로서 대상해역의 수체 교환을 고려한다는 장점이 있지만, 수체는 완전혼합이라고 가정을 하여야 하며, 해역교체시간과 굴의 여수율만 고려한다는 단점이 있다. 여과압 지표의 경우는 대상해역의 기초생산력과 패류양식장의 섭취율을 고려함으로

써 대상해역의 자원흐름을 고려한다는 장점이 있지만, 외부해역과의 교환은 무시한다는 단점이 있다. 이 생태지표들은 대상해역의 수체량, 해수 교환량, 굴의 평균 여과율, 해역의 기초생산력, 식물플랑크톤 평균 생체량 등의 변수로서 서로서로의 부분집합에 해당하거나, 선형관계에 있기 때문에 하나의 값으로 통합하여 보는 것도 의미가 있다(Gibbs, 2007). 만약 이 값들을 개개변수의 선형조합 모델을 적용한다면, 양식의 상호의존성이 낮은 생태학적 수용능력일 경우는 변수들이 독립적이지만, 양식레벨이 증가할수록 서로 상호의존적이게 될 것이다. 예를 들어, 식물플랑크톤의 생체량과 굴 생산량은 양식에 의한 영양염 순환을 통하여 많은 영향을 받을 것이고, 굴의 여과율 또한 가용한 먹이원인 식물 플랑크톤과 좀 더 밀접한 관련을 가질 것이다. 여기서는 가장 직접적인 접근으로 두 생태지표를 간단히 더하여(Fig. 12) 생태학적 수용능력으로 가기 위한 굴 개체수 저감목표량을 거제한산만의 어장구역별로 살펴보았다.

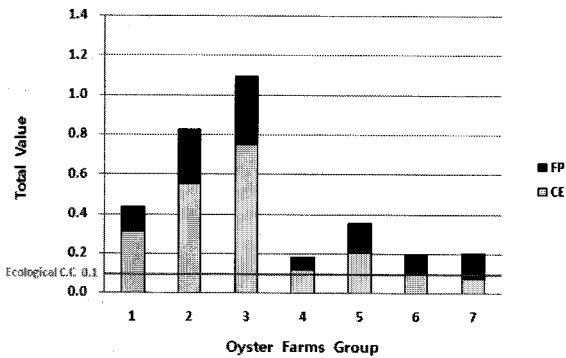


Fig. 12. Total value(CE+FP) according to oyster farms groups in GeojeHansan Bay.

두 생태지표의 값들을 합산시, 생태학적 수용능력을 만족하는 값을 0.1로 규정할 수 있다. 그 결과 어장밀집도가 높은 3번 어장구역의 경우 생산되는 굴 개체수를 90.9%를 저감하여야 Gibbs(2007)가 제안한 생태계에 부하를 주지 않는 생태학적 수용능력의 수준에 도달가능하고, 가장 낮은 4번 어장구역의 경우에도 굴 개체수를 45.2%를 저감하여야 생태학적 수용능력의 수준에 도달 가능하였다(Fig. 13). 이와 같이 지속적인 굴 생산을 위해서 생태지표를 이용해서 현 레벨의 양식이 주위 환경과 잠재적인 성장범위(Scope for growth)에 얼마나 영향을 주는지를 산정하게끔 대상해역에 적용할 수 있고, 대상 해역의 생산 수용능력, 생태학적 수용능력에 관련하여 현 레벨의 양식에 관한 지침을 제공할 수도 있으며, 양식업자, 관리자들이 효과적으로 양식 활동을 관리할 수 있는 지침이 될 수 있다. 물론 이러한 생태지표의 적정 활용을 위해서는 해양생태계에 대한 좀 더 전체적인 접근이 필요하며, 해양생태계의 기능에 대해 좀더 연구함으로써, 생태학적 수용능력에 영향을 주는 인자들의 이해를 발전시키고, 여러 가지 변화에 대해 적용할 수 있는 유연한 접근을 개발할 필요가 있으며, 여기서 언급된 정확율 지표와 여과압 지표 외에도 유기물 섭취, 자가오염, 분의 무기

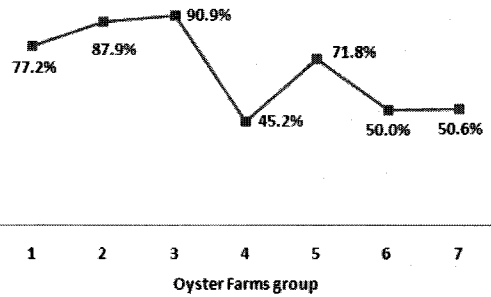


Fig. 13. Production reduction rate required for ecological carrying capacity.

화, 영양염 용출 등의 상호작용 연구 및 여러 지역의 사례분석을 통한 생태지표 기준값의 개선은 반드시 필요하다.

감사의 글

이 연구는 국립수산과학원의 사업과제(연안어장환경용량산정연구, RP-2009-ME-057)의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] 국립수산과학원(2008), 어장환경실태조사, p. 243.
- [2] 김종화, 장선덕(1985), 거제만의 해수교환, 한국수산학회지, 제18권, 제2호, pp. 101-103.
- [3] 박종수(2001), 생태계모형을 이용한 굴 양식어장의 최대수용력 산정, 부경대학교 대학원 박사학위논문, p. 142.
- [4] 엄기혁(2007), 이매패의 생물정화기작을 이용한 마산만의 수질개선방안, 부경대학교 대학원 박사학위논문, p. 148.
- [5] 이원찬(2001), 패류양식장 어장환경용량 산정 모델 개발 및 적용, 부경대학교 대학원 박사학위논문, p. 132.
- [6] 조은일, 박청길, 이석모(1996a), 가막만의 환경용량 산정 (I), 한국수산학회지, 제29권, 제5호, pp. 369-385.
- [7] 조은일, 박청길, 이석모(1996b), 가막만의 환경용량 산정 (II), 한국수산학회지, 제29권, 제5호, pp. 709-715.
- [8] 한국해양수산개발원(2006), 우리나라 굴 산업의 현황과 당면과제, 해양수산동향, 제1232호, pp. 1-11.
- [9] Bierman, Jr. V. J. and D. M. Dolan(1981), Modeling of phytoplankton-nutrient dynamics in Saginaw Bay, Lake Huron, J. Great Lakes Res., Vol. 7, No. 4, pp. 409-439.
- [10] Bowden, K. F.(1967), Circulation and diffusion, Estuaries Factors, Amer. for the Adv. of Sci., pp. 15-36.
- [11] Callens, I. and D. Tyteca(1999), Towards indicators of sustainable development for firms; a productive efficiency perspective, Ecol. Econ. Vol. 28, pp. 41-53.
- [12] Cromey, C. J., T. D. Nickell and K. D. Black(2002), DEPOMOD-modelling the deposition and biological effects of waste solids from marine cage farms,

Aquaculture, Vol. 214, pp. 211-239.

- [13] Dame, R. F.(1996), Ecology of Marine Bivalves, CRC Press, p. 254 .
- [14] Gibbs, M. T.(2007), Sustainability performance indicators for suspended bivalve aquaculture activities, Ecol. Indic., Vol. 7, pp. 94-107.
- [15] Horiguchi, F., K. Nakata, P. Y. Lee, W. J. Choi, C. K. Kim and T. Terasawa(1998), Mathematical eco-hydrodynamical model application in Chinhae Bay, J. Adv. Mar. Sci. Tech. Soci., Vol. 4, No. 1, pp. 81-94.
- [16] Inglis, G. J., B. J. Hayden and A. H. Ross(2000), An overview of factors affecting the carrying capacity of coastal embayments for mussel culture, NIWA, Christchurch, Client Report CHC00/69, pp. 1-31.
- [17] Jiang, W. M. and M. T. Gibbs(2005), Predicting the carrying capacity of bivalve shellfish culture using a steady, linear food web model, Aquaculture, Vol. 244, pp. 171-185.
- [18] Jordan, T. E. and I. Valiela(1982), A nitrogen budget for the ribbed bivalve, *Geukensia demissa* and its significance in nitrogen flow in a New England salt marsh, Limn. Oceanogr., Vol. 27, pp. 75-90.
- [19] Klinck, J. M., E. N. Powell, E. E. Hofmann, E. A. Wilson and S. M. Ray(1992), Modeling oyster populations; The effect of density and food supply on production, Pro. Adv. Mar. Tech. Conf., Vol. 5, pp. 85-105.
- [20] Kobayashi, M., E. E. Hofmann, E. N. Powell, J. M. Klink and K. Kusaka(1997), A population dynamics model for the Japanese oyster, *Crassostrea gigas*, Aquaculture, Vol. 149, pp. 285-321.
- [21] McKindsey, C. W., H. Thetmeyer, T. Landry and W. Silvert(2006), Review of recent carrying capacity models for bivalve culture and recommendations for research and management, Aquaculture, Vol. 261, pp. 451-462.
- [22] Officer, C. B., T. J. Smayda and R. Mann(1982), Benthic filter feeding; a natural eutrophication control, Mar. Ecol. Res. Ser., Vol. 9, pp. 203-210.
- [23] Smaal, A. C. and T. C. Prins(1993), The uptake of organic matter and the release of inorganic nutrients by bivalve suspension feeder beds, In: Dame, R. F.(Ed.), Bivalve Filter Feeders in Estuarine and Coastal Ecosystem Processes, Springer-Verlag, Heidelberg, pp. 273-298.

원고접수일 : 2009년 12월 07일

원고수정일 : 2010년 02월 12일 (1차)

: 2010년 03월 22일 (2차)

게재확정일 : 2010년 03월 24일