

생태지표를 이용한 거제한산만 굴양식장의 생태학적 수용능력 산정

이원찬* · 조윤식**† · 홍석진** · 김형철** · 김정배** · 이석모***

*, ** 국립수산물품질관리원 어장환경과, *** 부경대학교 생태공학과

Estimation of Ecological Carrying Capacity for Oyster Culture by Ecological Indicator in Geoje-Hansan Bay

Won-Chan Lee* · Yoon-Sik Cho**† · Sok-Jin Hong** · Hyung-Chul Kim** · Jeong-Bae Kim** · Suk-Mo Lee***

*, ** Marine Environment Research Division, National Fisheries Research & Development Institute, Busan, 619-705, Korea

*** Ecological Engineering, Pukyung National University, Busan, 608-737, Korea

요약 : 전 세계적으로 연안양식산업의 중요성은 날로 증대되고 있지만, 반폐쇄성 내만의 연안환경은 양식의 장기화 및 과밀식에 의하여 연안 오염이 가중되고 있다. 지속적인 연안양식을 위하여, 해양생태계에 부하를 주지 않는 생태학적 수용능력 산정을 통한 친환경적 어장관리의 필요성이 대두되고 있다. 생태학적 수용능력 산정 모델링의 경우, 전체 생태계와 모든 양식활동을 고려해야 하기 때문에, 그 개발 및 적용에 있어 아직 초기단계에 있다. 대안으로, 양식장의 생태학적 능률을 산정하는 생태지표에 대한 요구가 있다. 본 연구는 대상해역의 기초생산력과 굴 양식장의 섭취율을 고려한 여과압 지표를 사용하여 생태학적 수용능력 산정을 시도하였다. 2008년, 거제한산만에 시설되어있는 굴 양식장의 여과압 지표값은 0.203으로 나타났으며, 생산량은 4,935 M/T로서 49 개체/m³로 시설되어 있다. 거제한산만의 현재 시설된 굴 양식장과 환경적 특성에 따라, 해양생태계에 부하를 주지 않는 생태학적 수용능력에 관해 새로이 산정된 여과압 지표는 0.102 였다. 결과적으로, 거제한산만의 굴 양식장의 생태학적 수용능력은 현 생산량에서 49.8% 저감된 2,480 M/T, 25 개체/m³였고, 이는 생태학적 과정, 종, 군집에 현저한 변화를 주지 않고서 거제한산만에 도입될 수 있는 양식장의 수용능력을 나타낸다. 본 연구는 굴 양식장의 지속적인 생산을 위하여 생태학적 수용능력을 산정할 수 있는 생태지표를 활용하였으며, 이는 친환경적 어장관리의 과학적 근거로 활용될 수 있다.

핵심용어 : 생태학적 수용능력, 생태지표, 굴, 거제한산만, 친환경적 어장관리

Abstract : The importance of aquafarming is increasing all over the world, however the coastal environment in the semi-closed inner bay has been aggravated due to the long term production and the high stocking density. For the sustainable aquafarming, there is a requirement for a eco-friendly fishery management by the estimation of ecological carrying capacity. The model development and application is still in the initial step, because it has to consider the whole ecosystem and all culture activities. As an alternative, there is a requirement for ecological indicator to assess the ecological performance. This study tried the estimation of ecological carrying capacity using ecological indicator. The production and the facility of the oyster farms was 4,935 M/T, 49 ind./m³ in Geoje-Hansan Bay(2008). Filtration pressure indicator was 0.203 which could provide a guidance on the present level of culture development. According to the environmental characteristics and the present oyster farms in Geoje-Hansan Bay, the newly assessed filtration pressure for the acceptable ecological carrying capacity was 0.102. Consequently, ecological carrying capacity in Geoje-Hansan Bay was 2,480 M/T, 25 ind./m³ and this represents the level of culture that can be introduced into Geoje-Hansan Bay without leading to significant changes to ecological process, species, populations or communities. Our study utilized the ecological indicator to estimate ecological carrying capacity of oyster farming for sustainable productivity and this could be the scientific basis for the eco-friendly fishery management.

Key Words : Ecological carrying capacity, Ecological indicator, Oyster, Geoje-Hansan Bay, Eco-friendly fishery management

* 대표저자 : 종신회원, wlee@nfrdi.go.kr, 051-720-2520

† 교신저자 : 정희원, ysc@nfrdi.go.kr, 051-720-2527

1. 서론

1960년대 이후 연안에 집중적으로 건설된 공단과 이에 따른 인구의 집중으로 인하여 오염 부하량 증가와 양식생물의 장기간 연작에 따른 어장의 노후화 및 밀식으로 인하여 우리나라의 연안해역은 부영양화가 가속화되고 있다. 특히, 어장 설치와 관리의 용이성, 태풍 등의 자연재해 예방성, 풍부한 먹이생물의 존재 등의 요구에 의하여 반 폐쇄성 내만을 중심으로 어장이 개발되어오며 따라 오염에 매우 취약한 구조를 가지고 있으며, 이는 결과적으로 어장의 지속적인 생산을 어렵게 하고 양식 수산물의 품질 저하를 초래하게 된다(NFRDI, 2009). 우리나라의 연안 굴 생산량을 살펴보면, 1970년 36,981 M/T에서 2007년 321,276 M/T으로 지속적인 성장을 보였으며, 세계 3위 이내의 높은 생산량을 기록하고 있다. 국내 굴 생산량 중 경남지방에서 거의 80%의 생산량에 기여하고 있으며, 2000년 151,621 M/T, 2008년 223,614 M/T으로 지속적인 성장을 보이고 있다(Statistics Korea, 2000-2008). 반면, 국가해양환경측정망의 연간조사에 따르면(거제도 남안 st.1: 34°48'48", 128°33'29"; st.2: 34°46'51", 128°31'12"), 거제항산만의 표층 COD는 2000년 0.74 mg L⁻¹에서 2008년 1.33 mg L⁻¹로, 저층 COD는 2000년 0.98 mg L⁻¹에서 2008년 1.76 mg L⁻¹로 수질상황은 매년 악화되고 있는 실정이다(NFRDI, 2000; NFRDI, 2001; NFRDI, 2002; NFRDI, 2003; NFRDI, 2004; NFRDI, 2005; NFRDI, 2006; NFRDI, 2007; NFRDI, 2008). 이와 같은 연안해역의 오염 방지 및 연안 양식장의 지속적인 생산을 위해서는 적절한 어장 수용능력 산정 및 활용이 반드시 필요하다. Inglis et al.(2000)이 분류하고, McKindsey et al.(2006)이 리비한 4가지 계층구조에 의한 어장 수용능력의 개념에 따르면, 유체역학모델과 물리적 정보의 조합으로 산정되는 물리적 수용능력(Physical carrying capacity), 어장의 최대 생산력에 기준한 생산 수용능력(Production carrying capacity), 생태학적 부하를 고려한 어장 수용능력을 생태학적 수용능력(Ecological carrying capacity), 상기의 세 가지 수용능력과 사회경제적 인자까지 고려하는 사회적 수용능력(Social carrying capacity)으로 나눌 수 있다. 최근 들어 해양 생태계에 부하를 주지 않는, 지속적인 생산을 위하여 생태학적 수용능력 산정을 통한 친환경적 어장 관리의 필요성이 대두되고 있다(Inglis et al., 2000; McKindsey et al., 2006; Gibbs, 2007).

현재 대부분의 과학적 노력은 생산 수용능력에 관한 모델링에 치중하고 있고, 일부 모델들은 성공적으로 사용되어지고 있다(Carver and Mallet, 1990; Cho et al., 1996; Bacher et al., 1998; Park et al., 2002; Lee et al., 2002; Hawkins et al., 2002; Duarte et al., 2003; Ferreira et al., 2007). 생산 수용능력에 관한 모델링이 대상패류종과 생산을 지원하는 조직체에 초점을 맞추는데 반해, 생태학적 수용능력에 관한 모델링은 전체 생태계와 모든 양식활동(채묘부터 생육, 수확, 가공까지)을 고려해야하기 때문에, 아직까지 패류양식장의 생태학적 수용능력을 산정 및

예측하는 모델개발(Cromey et al., 2002; Jiang and Gibbs, 2005)에는 많은 시도가 있지 않았으며, 생태학적 수용능력에 관한 모델 개발 및 활용을 위해서는 많은 연구가 필요하다(McKindsey et al., 2006).

이에 대한 대안접근으로 패류양식장의 생태적 효율을 평가할 수 있는 생태지표를 활용할 수 있다(Gibbs, 2007). 생태지표 산정을 통하여 현재의 양식 레벨이 주위 환경과 잠재적 성장범위(Scope for growth)에 대하여 어느 정도의 부하를 가지는지 산정 가능하고, 대상 해역의 생산 수용능력, 생태학적 수용능력에 관련하여 현재의 양식 레벨에 관한 지침을 제공할 수도 있으며, 양식업자, 관리자 등이 효과적으로 양식 활동을 관리할 수 있는 지침이 될 수 있다(Gibbs, 2004). 생태지표가 패류양식장의 생태학적 수용능력과 선형적인 관계가 성립된다는 가정 하에서, 패류양식장에 대하여 적절한 생태지표 산정을 함으로서 해양 생태계에 부하를 주지 않고 지속적인 생산을 할 수 있는 생태학적 수용능력 산정이 가능하다. 즉, 기존의 선행연구(Cho et al., 2010)에서는 Gibbs(2007)가 제안한 생태지표 값을 그대로 활용하였으나, 대상해역의 해양특성과 양식생물의 생리특성에 따라 생태지표 값을 새로이 산정함으로써, 생태학적 수용능력을 만족하는 적정생산량을 제안할 수 있다. 이러한 접근은 생태계모델링과 같이 해양생태계의 수층 및 퇴적물에서 일어나는 모든 메커니즘에 대한 충분한 실측 및 검증 없이 몇 가지의 실험을 통하여 간단히 산정할 수 있는 잇점도 있어 그 중요성을 줄 수 있다. 또한, 이를 통하여 양식업자로 하여금 과밀식이 성행하지 않도록 적절한 입식시설량을 설계하여 줄 수 있다. 본 연구에서 사용되어진 여과압 지표는 대상해역에서 얼마나 많은 에너지가 패류 양식장을 통하여 흘러가는지 나타냄으로서 양식장의 생태적 효율을 잘 평가할 것으로 판단된다.

본 연구는 생태학적 수용능력의 개념에 근거하여 Smaal and Prins(1993)의 이론에 따라 Gibbs(2007)가 제시한 생태지표를 거제한산만에 적용함으로써 해양생태계에 부하를 주지 않는 양식장 수용능력을 산정하였으며, 거제한산만 굴양식장의 지속가능한 생산을 위하여 친환경적 어장관리를 위한 정책적 활용 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 반 폐쇄적 성격을 지닌 곳으로서, 내만에 해당하는 거제만과 수로에 해당하는 한산만으로 나눌 수 있다. 수로입구에 해당하는 봉암도 우측 해역에서부터 화도 우측 해역 및 화도와 한산도 사이의 협수로 까지를 거제한산만의 연구 대상해역으로 선정하였다.

거제한산만의 어장환경 특성을 파악하기 위하여 15개 정점에 대하여 2008년 계절별 수질, 퇴적물 환경을 조사하였다(Fig. 1). 거제한산만 해역의 식물플랑크톤에 의한 기초 생산력은 광량 1%

생태지표를 이용한 거제한산만 굴양식장의 생태학적 수용능력 산정

까지 광투과수심에 상응하는 해수에 13C을 주입한 후 3시간 가량 배양하여 측정하였다. 참굴의 생리조사를 위해 2008년 6월부터 2009년 2월까지 매일 30~50마리씩 거제한산만의 참굴을 채취하여 실험실에서 일주일간 순치시킨 후 생리지표의 측정에 사용하였다(NFRDI, 2009).

수온은 15.40~18.02 °C(평균 16.75 °C)로서 쓰시마 난류의 영향을 받는 한산만의 수온이 수심이 얇은 거제만보다 봄, 가을에 높은 경향을 보였다. 용존산소는 4.65~11.60 mg L⁻¹(평균 8.20 mg L⁻¹)로서 진해만 서부 해역이나 북만 등지에서 나타나는 빈산소 현상은 없었으며, 전반적으로 수온의 분포와 대비되어 수온이 용존산소량을 조절하는 일차적 요인으로 제시될 수 있었다. Choi et al.(1997)은 거제한산만의 환경특성이 양식 굴의 비만에 미치는 영향 연구에서 양식 밀집도가 높은 거제만 중앙부 동남쪽 해역에서 chlorophyll *a*의 농도가 낮게 나타난다고 하였는데, 본 조사에서도 유사한 분포를 보이며(0.18~7.30, 평균 2.03 ug L⁻¹), 이는 영양염의 공간적인 분포 특성, 양식생물의 대사에 의한 섭취와 관련이 있는 것으로 판단된다.

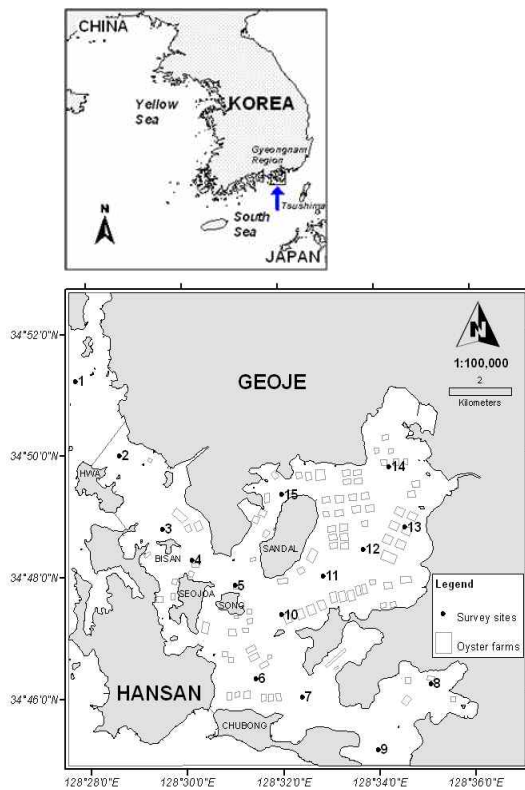


Fig. 1. Distribution of oyster farms, survey sites in Geoje-Hansan Bay.

2.2 여과압 지표

여과압 지표(Filtration pressure indicator, FP)는 대상해역의 기초생산력과 패류양식장에서 성장하는 굴의 섭취율을 고려함으로써 대상해역의 자원흐름을 고려한다는 장점이 있으며, 외부

해역과의 교환은 무시한다. 식(1)에서 분모인 Phytoplankton production은 대상해역에서 식물플랑크톤과 같은 독립영양에 의해 고정되는 총 탄소량으로서, 기초생산력 측정으로 계산된다. 분자인 Bivalve filtration는 패류 양식장이 필요로 하는 총 탄소량으로서, 이를 산정하기 위하여 어장의 생체량 생산에 관한 정확한 정보가 이용된다.

$$FP = \frac{B_f}{P_p} = \frac{\text{Bivalve Filtration (tonC)}}{\text{Phytoplankton Production (tonC)}} \quad (1)$$

Smaal and Prins(1993)는 굴 양식장 시설에 따른 패류층에 의한 여과율, 유기물 섭취, 여과압, 자가오염, 분과 의분의 무기화, 영양염 용출, 영양염 플럭스 수지 등의 현장 측정과 실험을 통하여 패류층이 해양과 저서를 연결하는데 주요 역할을 한다는 가정에 대한 정량적 기준을 제공하였으며, Gibbs(2007)는 생태지표인 여과압 지표의 이론적 배경을 Smaal and Prins(1993)의 연구에 근거하였다(Smaal and Prins, 1993; Dame 1996; Gibbs, 2007). 이러한 여과압 지표는 대상해역에서 에너지흐름이 패류 양식장에 얼마나 흘러가는지 나타냄으로서 양식장의 생태적 효율 즉, 양식장시설의 적정수준을 충분히 나타낼 수 있을 것으로 판단된다. Gibbs의 제안에 따르면, 여과압 지표가 1인 경우를 이론적인 생산 수용능력으로 볼 수 있고, 0.05 이하일 경우가 생태계에 부하를 주지 않는 상태로서 생태학적 수용능력의 정의를 만족한다고 하였으며, 기존의 연구에서 현재 거제한산만의 여과압 지표는 0.203으로서 Gibbs가 제안하는 생태학적 수용능력을 만족할 수 있는 여과압 지표 0.05를 4배 정도 초과하여 굴 양식장이 시설되어 있음을 진단한 바 있다(Cho et al., 2010).

패류양식장이 시설되기 전 대상해역에서의 전형적인 먹이사슬 구조를 살펴보면, 식물플랑크톤은 동물플랑크톤(Zooplankton)에 의해 섭취되고, 일부는 유기체설물(Detritus)과 저서 여과 섭이자(Benthic filter feeders)의 기본 생체량으로 보관될 수 있다(Officer et al., 1982). 패류 양식장이 시설될 경우, 에너지의 흐름은 세 그룹에서 네 그룹으로 분산되게 되며, 양식장의 시설이 증가할수록 양식장으로의 에너지 흐름은 증가하게 된다. 식물플랑크톤이 패류 양식장으로 100% 전부 흐르게 되는 경우가 여과압 지표 1인 경우로서 대상해역에서 생산할 수 있는 이론적인 최대 생산 수용능력으로 볼 수 있고, 여과압 지표 0.05인 5% 이하로 흐르는 경우가 생태학적 수용능력을 만족하는 경우로서, 생태계의 아무런 변화를 주지 않는다고 Gibbs(2007)는 제안하였다. 즉, 양식장에서 대상해역의 식물플랑크톤을 5% 이하만 소모할 경우에는 해양생태계에 어떠한 변화를 초래하지 않지만, 그 이상 소모할 정도의 시설이 추가되면 기존 해양생태계의 먹이사슬 구조를 변화시킴으로서 전체적인 변화를 초래할 수 있다는 것이다. 그러나 생태학적 수용능력을 만족하는 여과압 지표값 0.05는 대상해역의 기초생산력과 그 해역에서 시설되는 실제 패류양식장의 시설면적 및 섭취율에 따라 얼마든지 달라질 수 있다고 판단되며, 또한 기존 Gibbs(2007)의 연구에서는 여과

압 지표값 0.05의 산정근거가 불분명하여, 본 연구에서는 그 산정근거를 정확히 추론하여 거제한산만의 정확한 여과압 지표를 계산하고자 하였다.

2.3 생태학적 수용능력과 최적 입식 밀도

거제한산만의 특성에 맞는 여과압 지표를 계산함으로써 해양 생태계에 부하를 주지 않는 생태학적 수용능력을 산정할 수 있고, 이러한 결과를 통하여 현재 거제한산만에 시설되어 있는 굴 양식장의 최적 입식 밀도를 계산할 수 있다. 결과적으로 이는 굴 양식장에 있어서 지속가능한 생산을 통하여 친환경적 어장 관리를 가능하게 한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 거제한산만의 여과압 지표

거제한산만의 여과압 지표에 관한 계산을 우선 Smaal and Prins(1993)의 연구에 기준하여 계산하면, Table 1과 같다. GIS의 3D analyst로 분석한 거제한산만 대상해역의 수면적은 58,798,597 m²이었다. 대상해역의 식물플랑크톤에 의한 기초생산력은 광량 1%까지 광투과 수심에 상응하는 해수에 1C를 주입한 후 3시간 가량 배양하여 측정하였다. 2008년 거제한산만의 굴 양식 순기(2008. 6~2009. 2) 270일 동안 측정된 결과는 0.16~0.97 gC m⁻² day⁻¹로서 평균 0.58 gC m⁻² day⁻¹이었으며(NFRDI, 2009), 이는 Park et al.(2002)이 조사한 0.62 gC m⁻² day⁻¹와 유사한 결과를 보였다.

거제한산만의 대상해역 수면적(58.80 × 10⁶ m²)과 기초생산력(0.58 gC m⁻² day⁻¹)을 곱하여 34.13 × 10⁶ gC day⁻¹라는 값이 나왔으며, 이는 식(1)의 분모에 해당하는 Phytoplankton production으로 볼 수 있다.

거제한산만의 대상해역 중 현재 시설되어있는 굴 양식장은 총 6,001,400 m²(600.14 ha)의 면적으로 수면적 대비 10.2%의 비율을 차지하였다. 패류양식장의 여수율은 수온과 개체 육중량의 함수(Kobayashi et al., 1997)로서 굴 양식 순기(2008. 6~2009. 2) 270일 동안 0.16~2.81 L ind.⁻¹ hr⁻¹, 평균 1.84 L ind.⁻¹ hr⁻¹이었다(NFRDI, 2009). 이와 함께 거제한산만의 2000~2008년간의 chlorophyll a 5월 평균 농도 3.55 ug L⁻¹(NFRDI, 2000-2008), 카본함산비율 30(C : chlorophyll a = 30 : 1; Smaal and Prins, 1993), 현재 2008년 굴수하식수협에 등록되어있는 시설 굴 양식장의 단위용적당 시설 개체수 49 ind. m⁻³(1ha당 시설대수 14대 × 수하연 235연 × 콜렉터 25개 × 부착개체수 30개 ÷ 10,000 m² ÷ 수하연 길이 5m), 양식장 평균 수심 5m 등을 고려하면 1.15 gC m⁻² day⁻¹(굴 여수율 × 식물플랑크톤 농도 × 30 × 24hr × 단위용적당 시설개체수 × 양식장 평균 수심 ÷ 1,000,000)의 굴 양식장 섭취율을 산출할 수 있다. 이 값(1.15 gC m⁻² day⁻¹)과 양식장 면적(6.00 × 10⁶ m²)을 곱하면 6.92 × 10⁶ gC day⁻¹로서, 이는 식(1)의 분자인 Bivalve filtration에 해당한다.

이러한 자료를 토대로 한 여과압 지표값은 6.92 ÷ 34.13으로서

0.203이 되며, 이는 기초생산력의 20.3%가 굴에 의하여 매일 섭취됨을 알 수 있다.

Table 1. Assessment of filtration pressure indicator in Geoje-Hansan Bay(Adapted from Smaal and Prins, 1993 and updated)

Area	(10 ⁶ m ²)	58.80
Phytoplankton production	(gC m ⁻² d ⁻¹)	0.58
"	(10 ⁶ gC d ⁻¹)	34.13
Bivalve area [% of total]	(10 ⁶ m ²)	6.00 [10.2]
Bivalve filtration	(gC m ⁻² d ⁻¹)	1.15
"	(10 ⁶ gC d ⁻¹)	6.92
FP		0.203

Gibbs의 연구에 따른 여과압 지표값 계산은 이미 Cho et al. (2010)의 연구에서 밝힌 바 있다. 거제한산만의 기초생산력과 대상해역 면적, 양식 순기 기간을 고려한 기초생산력의 총합은 9,703 tonC이었다. 굴수하식수협에서 조사된 거제한산만의 2008년 굴 생산량에 따른 습육중량은 4,935.08 ton이었고, wet weight : dry weight = 1 : 0.2로 보면 987.02 ton · dry weight (Klinck et al., 1992; Kobayashi et al., 1997), dry weight : Carbon = 1 : 0.4일 때 394.81 tonC(Bierman and Dolan, 1981; Horiguchi et al., 1998)가 된다. 이를 생산하기 위한 Ecological efficiency 20%를 고려하면 굴이 필요로 하는 탄소량은 1,974.03 tonC(Jordan and Valiela, 1982)가 되며, 여과압 지표값은 0.203(1,974.03 ÷ 9703)으로서, Smaal and Prins(1993)의 방법에 의한 값과 마찬가지로 결과가 나왔다.

3.2 거제한산만의 생태학적 여과압 지표

Gibbs(2007)는 굴 양식장이 시설될수록 식물플랑크톤을 소비하는 양은 증가하겠지만, 시설된 굴 양식장이 기초생산력의 생산 범위 이내에서 식물플랑크톤을 소비한다면 이는 생태계에 아무런 부하나 변화를 초래하지 않는 생태학적 수용능력을 만족하는 것으로 볼 수 있다고 제안하였다. 즉, 생태학적 수용능력을 만족하는 여과압 지표는 0.05로서 이를 초과하는 해역은 생태학적 수용능력을 초과하여 양식장이 시설된 상태라고 정의하였다. 그러나 Gibbs(2007)가 제안한 0.05의 값은 해역마다 기초생산력과 식물플랑크톤 Flux가 제각각 다르기 때문에, 거제한산만의 생태학적 수용능력을 만족하는 여과압 지표를 새로이 산정할 필요가 있으며, 이를 생태학적 여과압 지표로 정의하기로 한다.

해역에서 굴 양식장의 시설량이 많아질수록 굴 양식장의 단위면적당 식물플랑크톤 섭취는 단위면적당 기초 생산력을 초과하게 되며, Smaal and Prins(1993)는 실제 굴 양식장이 운전되

고 있는 해역을 대상으로 식물플랑크톤의 일일 Flux를 계산하여 각각의 해역에서 단위면적당 기초생산력에 대하여 굴 양식장이 필요로 하는 면적은 Sylt는 15.1배, Western Wadden Sea는 3.6배, Ooster-Schelde는 11.5배, Marennes-Oleron Bay는 15.9배로 조사되었다(Table 2).

Table 2. Assessment of ecological filtration pressure indicators in different regions and Geoje-Hansan Bay(Adapted from Smaal and Prins, 1993 and updated)

Region (Country)	Phyto-plankton production		Bivalve filtration (Phyto-plankton flux)		Required production area (Times)	FP
	(gC m ⁻² d ⁻¹)	(10 ⁶ gC d ⁻¹)	(gC m ⁻² d ⁻¹)	(10 ⁶ gC d ⁻¹)		Ecological FP
	①	②	③	④	③÷①	④÷②
Sylt (G)	0.2	0.8	3.02	1.4	15.1	1.81
	"	"	0.2	0.1	1	0.12
Western Wadden Sea(NL)	0.68	942.6	2.48	173.6	3.6	0.18
	"	"	0.68	47.6	1	0.05
Ooster-Schelde (NL)	0.52	182.7	6	108	11.5	0.59
	"	"	0.52	9.4	1	0.05
Marennes-Oleron Bay(F)	0.22	29.7	3.49	111.7	15.9	3.76
	"	"	0.22	7	1	0.24
Gejoe-Hansan (KR)	0.58	34.13	1.15	6.92	2.0	0.203
	"	"	0.58	3.5	1	0.102

이론적으로 각각의 해역에서 단위면적당 기초생산력(단위면적당 식물플랑크톤 생산량)과 단위면적당 굴 양식장 섭취량(단위면적당 식물플랑크톤 Fflux, 단위면적당 식물플랑크톤 소비량)이 같다고 가정하면, 이를 생태학적 수용능력을 만족하는 상태로 볼 수 있다. 즉, 독일 Sylt의 경우 시설되어 있는 양식장은 동일해역에서 생산되는 단위면적당 기초생산력의 15.1배를 초과하여 운영되고 있으며, 이 해역의 여과압 지표는 1.81이 된다. 그러나, 대상해역에서 생산되는 단위면적당 기초생산력 0.2 gC m⁻² day⁻¹만큼 소비되게끔 기존 굴 양식장의 섭취율 3.02 gC m⁻² day⁻¹를 0.2 gC m⁻² day⁻¹로 양식장 시설을 줄인다면 이는 식물플랑크톤이 생산되는 만큼만 굴 양식장이 소비하므로, 생태학적 수용능력을 만족하는 시설량이 될 수 있다. 여기서, 양식장 시설 면적을 고려한 굴 양식장 섭취율 0.1 × 10⁶ gC day⁻¹를 대상해역

면적을 고려한 기초생산력 0.8 × 10⁶ gC day⁻¹로 나누어 주면, 생태학적 수용능력을 만족하는 여과압 지표, 즉 생태학적 여과압 지표인 0.12를 산출할 수 있다. 동일한 방식으로 적용하였을 때, 네덜란드의 Western Wadden Sea, 네덜란드의 Ooster schelde, 프랑스의 Marennes-Oleron Bay의 생태학적 여과압 지표는 각각 0.05, 0.05, 0.24의 결과가 나왔다. Gibbs는 이러한 여러 가지 해역에 대한 적용결과에 있어, 생태학적으로 부하가 가지 않는다고 판단되는 가장 낮은 값인 0.05를 생태학적 수용능력을 만족하는 여과압 지표로 결정하였다고 판단된다.

이를 다시 거제한산만의 기초생산력, 해역면적, 현재 시설되어 있는 굴 양식장의 섭취율, 양식장 면적 등을 고려하여 거제한산만의 생태학적 여과압 지표는 0.102로 계산될 수 있다.

거제한산만의 여과압 지표가 0.203이고, 생태학적 여과압 지표가 0.102라는 것은 현재 거제한산만에 시설되어 있는 굴 양식장은 두 배 정도 생태학적 수용능력을 초과하여 입식되어 있음을 간접적으로 나타내고, 이는 해양생태계에 부하를 초래함으로써 굴 생산의 지속성을 보장할 수 없음을 의미한다(Fig. 2).

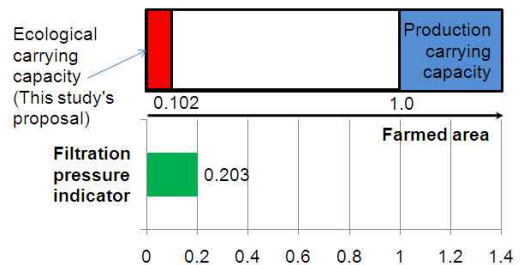


Fig. 2. Filtration pressure and ecological filtration pressure in Geoje-Hansan Bay and schematic representation of the progression of the development of bivalve culture(Adapted from Cho et al., 2010 and updated).

3.3 거제한산만의 생태학적 수용능력 및 최적입식밀도

굴수하식수협에서 조사된 거제한산만 굴 양식장의 2008년 생산량은 4,935 M/T이었으며, 이를 기준으로 계산된 여과압 지표 값은 0.203으로서, 현 시설량을 기준으로 한 이론적인 최대 생산량을 여과압 지표값 1로 보면 거제한산만의 대상해역에서 24,311 M/T까지 생산가능하고, 생태학적 여과압 지표값 0.102를 적용하면 생태학적 수용능력을 만족하는 생산량은 2,480 M/T이다(Fig. 3). 즉, 현 거제한산만 굴 양식장은 생태학적 수용능력을 초과 시설되어 생태계에 어떠한 부하나 변화를 초래할 수 있는 상태이고, 생태계에 부하를 주지 않기 위해서는 4,935 M/T에서 2,480 M/T으로 저감, 즉, 현 생산량의 49.8%를 저감 생산하여야 한다고 제안할 수 있다.

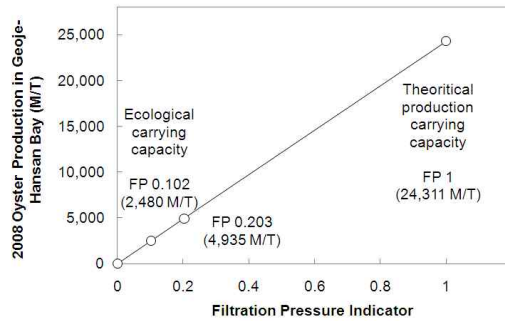


Fig. 3. Ecological & theoretical production carrying capacity according to filtration pressure indicator in Geoje-Hansan Bay.

현재, 굴 수하식 수협(2008)에 따른 거제한산만 굴 양식장의 시설현황을 살펴보면, 양식어장 1ha를 기준으로 시설대수 14대, 수하연 간격 42cm, 수하연 길이 5m, 수하연 당 콜렉터 수 25개, 부작개체수 30개로서, 1m³당 49개체가 시설되어 있다. 이때의 단위면적당 굴 양식장 섭취율(Bivalve filtration, phytoplankton flux)는 1.15gC m⁻² day⁻¹(굴 여수율 × 식물플랑크톤 농도 × 30 × 24hr × 단위용적당 시설개체수 × 양식장 평균 수심 ÷ 1,000,000)로서, 거제한산만의 단위면적당 기초생산력인 0.5804gC m⁻² day⁻¹와 동일하게 입식 시설량을 낮추기 위해서는 단위용적당 시설개체수를 낮추어야하며, 결과적으로 입식밀도를 1m³당 25개체로 저감하여 시설하면 된다. 즉, 현재 거제한산만의 굴 양식장 시설 면적인 600.14ha에서 입식되고 있는 1m³당 49개체는 과밀식의 상태로서 동일 양식장의 면적에서 1m³당 25개체로 저감하여 시설하면 생태학적 수용능력을 만족할 수 있다.

본 연구에서는, 굴 양식장의 생태학적 수용능력 산정을 위하여 보다 쉽게 접근할 수 있는 생태지표를 활용하였으며, 추후 생태학적 수용능력을 좀 더 정확하게 산정할 수 있는 생태계 모델의 개발은 반드시 필요하다. 패류양식 해역의 생태학적 수용능력을 결정하기 위해서는 양식장이 시설된 대상해역 내에서 패류와 같은 여과섭이자가 대상해역내의 다른 여과섭이자에 대한 부정적 피드백을 어느 시점에서 가지는지 말해줄 수 있어야 한다. 또한, 생태학적 수용능력을 산정하는 모델은 영양염, 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, 양식종류, 유기쇄설물과 함께 이러한 변수들 사이의 피드백, 온도 의존의 상호성 등 모든 상호작용의 복잡다단한 변화 정도를 포함하여야 하고, 환경과 패류 양식의 상호작용에 관한 전체적인 접근이 필요하기 때문에(McKindsey et al., 2006), 그에 대한 모델 개발은 아직 초기 단계에 있음도 사실이다. 이에 대한 대안접근인 생태지표는 영향력 있는 제한된 변수들만의 계산값을 취하며, 손쉬운 계산으로 현장에 빠르게 적용할 수 있는 이점을 가진다. 본 연구는 생태지표가 패류양식장의 생태학적 수용능력과 선행적인 관계가 성립된다는 가정 하에서 진행하였으나, 실제로는 대상해역에서 생산되는 식물플랑크톤이 시설되어 있는 굴 양식장에 모두 섭취되지 않고, 동물플랑크톤, 유기쇄설물, 저서 여과섭이자 등에도 분산된다는 점을 고려

한다면, 대상해역의 해양생태계에 대한 정확한 물질수지 산정 또한 해결하여야 할 과제라고 본다.

생태학적 수용능력에 따른 최적입식밀도 산정을 통하여 양식업자는 지속적인 생산성을 유지할 수 있으며, 연안관리자는 양식장 및 주변해역의 환경보존과 대상해역의 체계적인 관리를 할 수 있는 과학적 기반을 획득할 수 있다. 또한, 연안개발, 관광산업과 같은 연안산업 종사자들은 양식업자와의 갈등 감소 및 연안 해역에 대한 체계적인 이용을 이룰 수 있다. 굴 양식장에 대한 생태학적 수용능력에 따른 최적입식밀도 산정은 현재 한국에서 양식장의 문제점으로 대두되고 있는 양식장 오염취약 위치 문제와, 그에 따른 어장환경 악화 문제점의 해결을 위한 접근이 될 수 있으며, 이는 친환경적 어장관리의 정책적 방안을 위한 판단 근거로 활용될 수 있다.

감사의 글

이 연구는 국립수산물과학원의 사업과제(어장적지선정 및 재배치기술개발, RP-2011-ME-000)의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] Bacher, C., P. Duarte, J. G. Ferreira, M. Heral and O. Raillard(1998), Assessment and comparison of the Marennes-Oleron Bay (France) and Carlingford Lough (Ireland) carrying capacity with ecosystem models, *Aquatic Ecology*, Vol. 31, pp. 379-394.
- [2] Bierman, Jr. V. J. and D. M. Dolan(1981), Modeling of phytoplankton-nutrient dynamics in Saginaw Bay, Lake Huron, *Journal of Great Lakes Research*, Vol. 7, No. 4, pp. 409-439.
- [3] Carver, C. E. A. and A. L. Mallet(1990), Estimating the carrying capacity of a coastal inlet for mussel culture, *Aquaculture*, Vol. 88, pp. 39-53.
- [4] Cho, E. I., C. K. Park and S. M. Lee(1996), Estimation of carrying capacity in Kamak Bay(II), *J. Korean Fish. Soc.*, Vol. 29, No. 5, pp. 709-715.
- [5] Cho, Y. S., S. J. Hong, S. E. Park, R. H. Jung, W. C. Lee and S. M. Lee(2010), Application of ecological indicator to sustainable use of oyster culture grounds in Geoje-Hansan Bay, Korea, *Journal of the Korean society of marine environment & safety*, Vol. 16, No. 1, pp. 21-29.
- [6] 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, *J. Korean Fish. Soc.*, Vol. 30, No. 5, pp. 794-803.
- [7] 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.
- [8] Dame, R. F.(1996), *Ecology of Marine Bivalves*, CRC Press, p. 254.
- [9] Duarte, P., R. Meneses, A. J. S. Hawkins, M. Zhu, J. Fang and J. Grant(2003), Mathematical modelling to assess the carrying capacity for multi-species culture within coastal waters, *Ecological Modelling*, Vol. 168, pp. 109-143.
- [10] Ferreira, J. G., A. J. S. Hawkins and S. B. Bricker(2007), Management of productivity, environmental effects and profitability of shellfish aquaculture, the Farm Aquaculture Resource Management (FARM) model, *Aquaculture*, Vol. 264, pp. 160-174.
- [11] Gibbs, M. T.(2004), Interactions between bivalve shellfish farms and fishery resources, *Aquaculture*, Vol. 240, pp. 267-296.
- [12] Gibbs, M. T.(2007), Sustainability performance indicators for suspended bivalve aquaculture activities, *Ecological Indicators*, Vol. 7, pp. 94-107.
- [13] Hawkins, A. J. S., P. Duarte, J. G. Fang, P. L. Pascoe, J. H. Zhang, X. L. Zhang and M. Y. Zhu(2002), A functional model of responsive suspension-feeding and growth in bivalve shellfish, configured and validated for the scallop *Chlamys farreri* during culture in China, *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, Vol. 281, pp. 13-40.
- [14] 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.
- [15] 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. Report for Ministry for the environment, NIWA report CHC00/69, p. 31.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Lee, W. C., H. C. Kim, W. J. Choi, P. Y. Lee, J. H. Koo and C. K. Park(2002), Modification of an ecosystem model for carrying capacity of shellfish system, *J. Korean. Fish. Soc.*, Vol. 35, No. 4, pp. 386-394.
- [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] NFRDI(2000), Annual report of Korean marine environment monitoring, National Fisheries Research Development Institute, Vol. 5, p. 155,
- [23] NFRDI(2001), Annual report of Korean marine environment monitoring, National Fisheries Research Development Institute, Vol. 6, p. 155,
- [24] NFRDI(2002), Annual report of Korean marine environment monitoring, National Fisheries Research Development Institute, Vol. 7, p. 193,
- [25] NFRDI(2003), Annual report of Korean marine environment monitoring, National Fisheries Research Development Institute, Vol. 8, p. 236,
- [26] NFRDI(2004), Annual report of Korean marine environment monitoring, National Fisheries Research Development Institute, Vol. 9, p. 400,
- [27] NFRDI(2005), Annual report of Korean marine environment monitoring, National Fisheries Research Development Institute, Vol. 10, p. 400,
- [28] NFRDI(2006), Annual report of Korean marine environment monitoring, National Fisheries Research Development Institute, Vol. 11, p. 396,
- [29] NFRDI(2007), Annual report of Korean marine environment monitoring, National Fisheries Research Development Institute, Vol. 12, p. 408,
- [30] NFRDI(2008), Annual report of Korean marine environment monitoring, National Fisheries Research Development Institute, Vol. 13, p. 400.
- [31] NFRDI(2009), Environmental research of aquaculture farm in Korea, National Fisheries Research Development Institute, 1st (2008) Report, p. 243.
- [32] 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.
- [33] Park, J. S., H. C. Kim, W. J. Choi, W. C. Lee, D. M. Kim, J. H. Koo and C. K. Park(2002), Estimating the carrying capacity of a coastal Bay for oyster culture, *J. Korean. Fish. Soc.*, Vol. 35, No. 4, pp. 408-416.

- [34] 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.
- [35] Statistics Korea(2000-2008), Fishery production survey, Retrieved from <http://fs.fips.go.kr/main.jsp> on August 20.

원고접수일 : 2011년 09월 22일

원고수정일 : 2011년 10월 31일

게재확정일 : 2011년 12월 26일