

## 생태계모형을 이용한 가막만 해역의 환경용량 산정

김종구\*

군산대학교 토목환경공학부

## 1. 서 론

가막만은 여천반도 남단에 위치한 여수시와 접해있는 연안만으로 각종 어선 및 소형 객선의 집결지인 여수어항과 직접 연결되고, 동쪽 한려수도를 거쳐 북쪽에 위치한 광양만의 여천 공업단지와 연결된다.

가막만은 수질이 깨끗하고 수심이 낮아 양식 시설물의 설치 용이하고, 하천수에 의한 영양염 등의 유입으로 기초생산력이 높은 해역이며, 지형적인 영향으로 양식을 하기에 좋은 조건을 지니고 있어, 어패류 양식장으로 널리 이용되고 있으며, 국내 굴양식의 30%를 점하는 중요한 어장이다.

그러나 최근 과도한 굴 양식과 주변 임해공단으로부터의 오염물질의 유입 및 인구의 집중으로 인한 도시 확장에 따른 도시하수의 유입으로 인하여 가막만 내 수질이 점차 오염되고 있어, 수질관리 대책이 시급한 실정이다.

가막만과 같은 연안 굴 양식장에 있어서 적정시설과 합리적인 어장이용을 하기 위해서는 무엇보다 연안 수질관리가 필요하며, 특히 자정 능력에 기초를 둔 합리적인 해양 수질관리가 요구되고 있다.

이를 위해서는 어장이 가지는 환경용량을 파악하는 것이 중요하다. 환경용량이란 생물학적 관점에서는 주어진 환경이 수용할 수 있는 최대수용력이라고 Odum(1953)이 최초 정의하였고, 그 후 주어진 생태계가 지속적으로 생산할 수 있는 개체군의 생물량(Kashiwai, 1995; Dame & Prince, 1998)이라 정의한 것도 있다. 또한 일본에서는 어장환경용량의 관점에서 어장의 최대수용력, 어장을 유지하기 위해 보전해야 할 환경조건, 환경적 관점에서는 어장의 변화를 일으키기 시작하는 인위적인 영향의 한계로 정의하였다(日本水産資源保護協會, 1989).

자정능력의 한계로 표현되는 환경용량은 시뮬레이션을 통하여 산정이 가능하며, 해수 유동, 육상 오염부하량, 저질 용출 등 만 내에서 물질 순환 과정을 표현할 수 있는 생태-유체역학모델이 유용한 도구가 된다. 생태-유체역학모델은 부영양화모델의 일종으로 영양염의 순환을 중심으로 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, POC, DOC, DIN, DIP를 고려하고 있으며, 이들 성분에 관계된 많은 생화학적 요소와 상호작용에 의한 내부생산, 분해, 침강 및 용출 등에 관한 역학적 과정과

파라메타가 규명되어 있다. 이러한 모델은 연안해역의 생산성 특히 적조발생과 관련된 제과정의 이해와 그들의 제어를 위한 목적으로도 이용 가능하다(堀江 毅, 1990).

이러한 모델을 이용하여 장래의 수질을 예측함과 동시에 대상 해역의 환경용량을 파악함으로써 유입 오염부하를 해역의 자정능력 범위 내로 삭감하는 등 수질관리 방안을 강구해야 한다. 즉, 해역의 용도에 적합한 수질을 유지하기 위해서는 대상 해역이 악영향을 받지 않고 수용할 수 있는 최대의 오염 부하량으로 정의되는 환경용량(西村, 1977)의 범위 내로 유입 부하의 총량을 규제할 필요가 있다.

기존의 가막만에서의 환경용량을 산정하기 위해서 조(1996)는 현 환경 조건하에서 굴의 먹이원으로 고려된 식물플랑크톤의 양, 즉 기초 생산력을 구하고 이를 토대로 해서 알굴의 최대 생산량을 산정하여 생산된 알굴량과 정량적으로 비교 평가 하였으며, 이(1997)는 기초 생산력을 증가시키기 위한 수단으로 여러 환경인자들을 조절하여 기초생산력과 용존산소에 주체를 둔 오염물질의 최대 수용력을 예측하여 산정된 기초생산력에 해당되는 최대 알굴 생산량을 구했으며, 해양수산부(2001)는 빈산소 수괴 해소를 위한 환경용량을 산정하였다. 이들 연구는 용존산소와 생물생산량에 중점을 두었으며, 생물생산이 일어나는 시기, 즉 양식이 행해지는 시기에 이루어졌다.

그러나 환경용량산정방법의 하나로써 해역의 오염도를 기준으로 평가함으로써 외부 오염원에 대한 해역의 환경용량을 산정하는 것도 중요하다 하겠다. 일반적으로 어느 대상해역의 환경용량을 산정하는데 있어 중요한 요인은 해역의 사용용도에 따른 오염원인을 밝히고, 그에 대한 해역의 환경에 미치는 영향을 평가함으로써 수용가능한 환경용량을 평가하는 것이 중요하다.

가막만의 경우 주요한 생물생산을 하는 어장이 밀집된 지역으로 생물생산을 기준으로 환경용량을 산정할 필요가 있다. 그러나 만의 유역에 포함된 여천시의 생활하수는 하천유입구 주변의 오염도를 증가시킴으로써 만전체가 아닌 일부 해역에 큰 영향을 미치고 있는 실정이다. 따라서 본연구도 이에 초점을 두어 하천을 통한 육상의 오염부하가 가막만에 미치는 환경용량을 산정하기 위해 수행하였다.

본 연구에서는 해역 환경기준물질인 COD를 이용하여 양식이 행해지는 않는 4월에 가막만의 환경용량을 평가하였다. 이를 위해서 가막만의 수질 특성을 조사하고, 3차원 해수유

\* 정희원, kjg466@kunsan.ac.kr, 063-469-1874

동모델을 이용하여 해수 유동을 재현하였으며, 생태계 모델을 이용하여 수질을 재현하고, 장래 오염의 중요 부하원인 하천 유입부하량의 변화에 따른 수질변화를 예측하였다. 최대 환경용량의 크기는 해양수질환경기준 III급수를 기준으로 가막만이 가지는 오염물질에 대한 환경수용력, 즉 환경용량을 산정하였다.

## 2. 연구내용 및 방법

### 2.1. 대상해역

가막만은 남북방향의 길이가 약 15km, 동서방향의 길이가 약 9km인 타원형의 내만으로 면적은 147.5km<sup>2</sup>이고, 평균수심은 약 9m인 천해로서 용적은 10.2×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>이다(國立水産振興原, 全羅南道, 1982).

해저 지형은 북서 내만역이 수심이 깊고, 만 중앙이 대체로 얕은 편이고 남쪽으로 갈수록 차츰 깊어지는 양상을 보이며(姜, 1980), 해수유동상황은 여수항과 돌산도 사이의 북쪽 협수도와 남쪽 만 입구를 통하여 유출입되는 왕복성조류의 영향을 받고 가막만은 3개의 수괴가 존재한다고 알려져 있다(李, 1993). 즉 만 내부의 북서쪽은 수심이 깊고 오목한 웅덩이 형태로서 저층에 해수가 고여있는 정체성 해수이고 부근 육지의 생활하수가 이곳으로 직접 유입되어 부영양화가 진행되고 있으며, 여름철 수온이 높을 경우 저층 해수에 무산소층이 형성된다. 여수항수는 만의 동쪽에 위치하고 연동천과 섬진강 하구수, 돌산, 평사천 등의 영향을 크게 받는 해수이며, 외양수는 남쪽만구에 위치해 있고 외해수의 영향을 많이 받는 해수이다.

### 2.2. 자료도출

#### 1) 수질자료

가막만 해역의 수질 특성을 조사하기 위하여 2003년 4월 22일에 Fig. 1에 표시된 12개 정점에서 Nisikin 채수기를 이용하여 층별(표층, 중층, 저층)로 채수하였으며, 이들 자료를 바탕으로 경계자료 및 base 농도를 구하였고, 모델 예측치와 비교 분석하였다.

#### 2) 오염부하량 조사

가막만 내로 유입되는 하천은 총 7개를 고려하였으며, 하천부하량은 여수수산대학 수산연구소(1991) 자료를 이용하였다.

#### 3) 저질 영양염 용출부하

저질로부터의 영양염 용출 부하를 조사하기 위하여 정점 2~12에서 core sampler를 이용하여 시료를 채취하였다. 본 모델에서는 실험을 통하여 얻어진 암모니아질소와 인산인의 용출속도 자료를 모델 격자망에 맞게 보간하여 적용하였다.

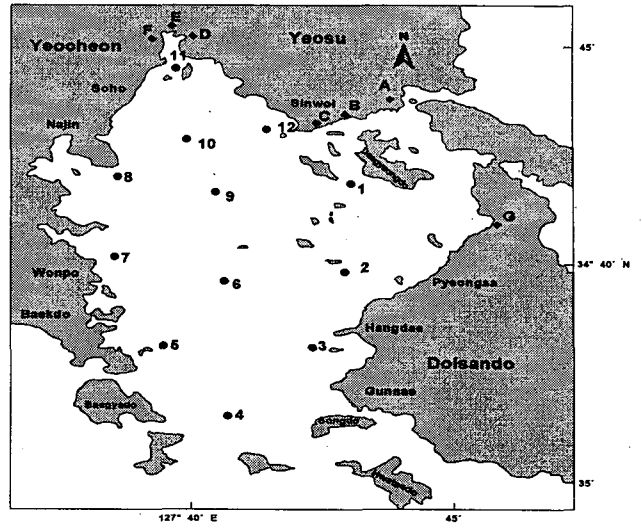


Fig. 1 Location of the sampling station in Gamak bay.

### 2.3. 모델 입력자료

#### 1) 3차원 해수유동 모델

해수유동 모델의 영역은 가막만 북부의 돌산대교 아래의 협수로, 송도와 돌산도 사이, 만 남부의 백야도와 송도를 잇는 선, 그리고 백야도와 백도 사이를 잇는 선을 개방경계로 하였다. 격자망의 구성은 지형을 충분히 고려할 수 있도록 가로방향으로 78개, 세로 방향으로 90개 격자로 하였고, 각 격자 간격은 200m로 하였다. 연직 방향으로는 수온약층의 깊이를 고려하고 저층 부근의 수질상태를 상세히 살펴보기 위하여 3개 층으로 구분하였다. 계산되는 총 격자수는 21,060개(78×90×3)로 구성하였다(Fig. 2). 해수유동모델의 입력자료는 Table 1에 제시하였다. 모델영역 내의 해수유동을 재현하기 위하여 가막만의 탁월분조인 M<sub>2</sub> 분조를 이용하였다. 경계영역 내의 조위와 위상은 수로국(1978)의 자료를 이용하였으며, 하천을 통한 모델 영역내로 들어오는 담수 유입량과 수온, 염소량 등 다른 입력자료는 실측치와 문헌을 통해서 적용하였으며, 바람의 영향은 없는 것으로 가정하였다.

또 3차원 해수유동 모델을 이용하여 대상해역의 조석류와 유동이 정상상태에 도달한 마지막 한 조석을 조석주기로 평균해서 잔차류를 재현하였다. 그 결과가 기존에 발표된 관측치와 어느 정도 일치하는지 알아보기 위해서 조류타원도를 이용하여 관측 지점에서 실측된 유향과 유속을 G1, G2, G3 지점에서 비교하였다(Fig. 2).

#### 2) 생태계 모델

생태계 모델은 해수유동모델의 잔차류 성분을 유동장으로 하였으며, 3차원 해수유동모델의 격자구성과 동일하게 적용하였다. 각 층별 초기 농도와 경계농도는 대상해역의 실측치를 토대로 입력하였다.

생태계 모델의 구성요소는 Table 2에 나타내었다. 영양염류의 유입원으로는 하천으로 통한 유입부하와 저질의 유기물 분해에 기인한 영양염 용출부하로 나누어 모델에 적용하였다.

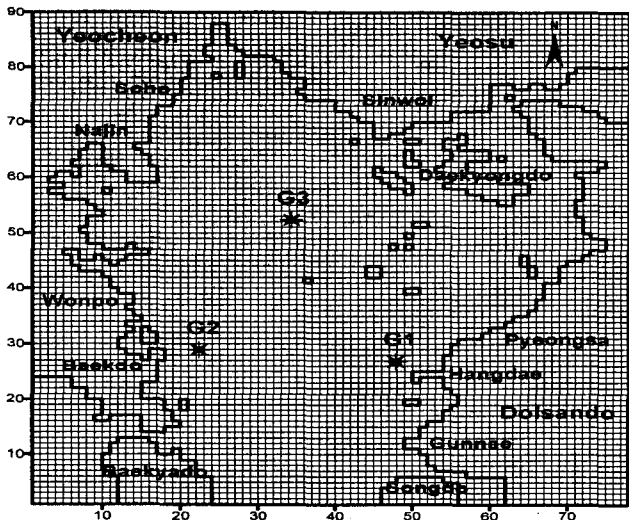
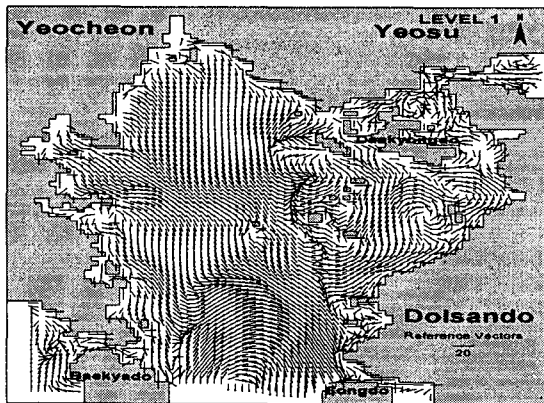


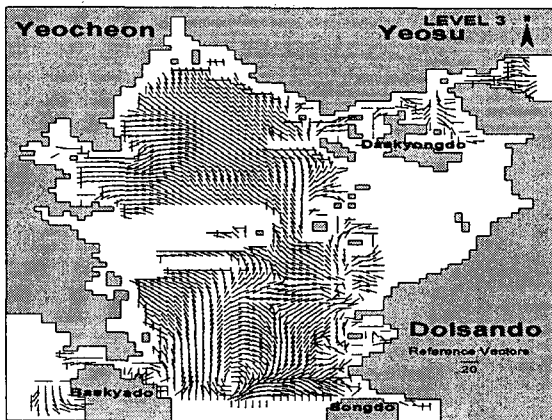
Fig. 2 Finite-difference grid of the three-dimensional model in Garak bay.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 해수유동모델 시뮬레이션



(a)



(b)

Fig. 3 Computed residual current at 1st, 2nd, 3rd level with no wind.

#### 1) 해수 유동의 검증

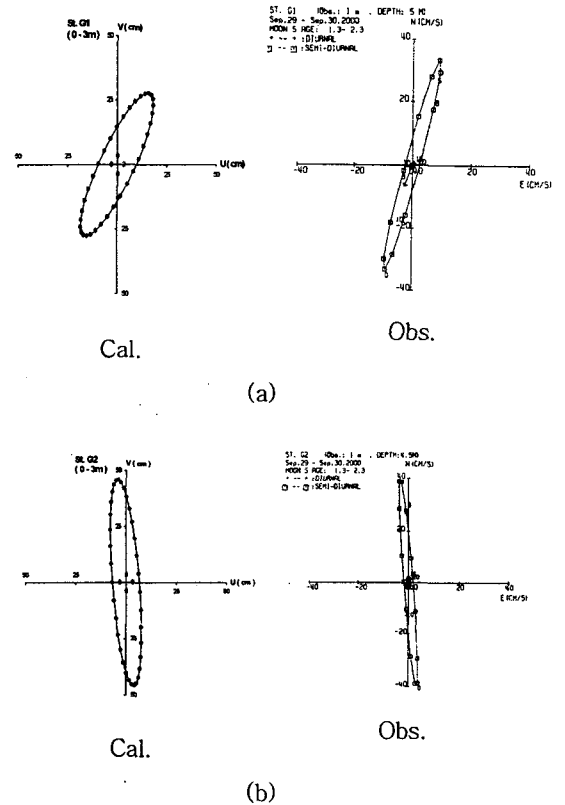


Fig. 4 Comparison of tidal current ellipses between computed and observed results.

#### 3.2. 생태계 모델 시뮬레이션

##### 1) 수질예측 및 모델의 적용성 검토

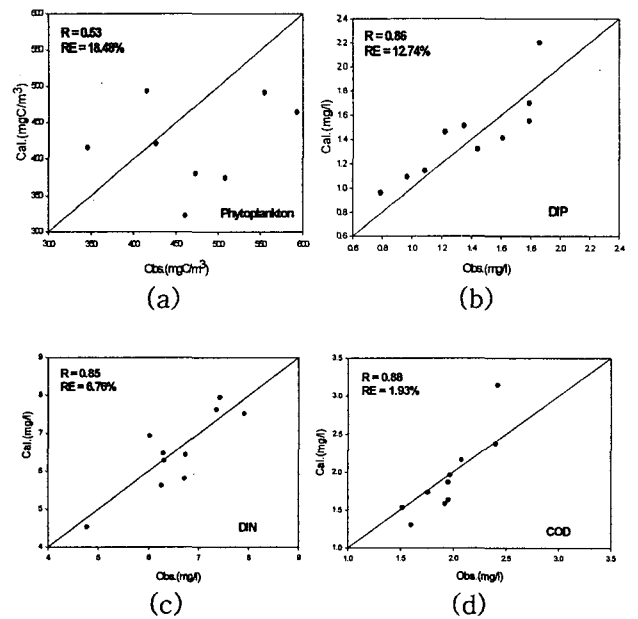


Fig. 5 Comparisons between predicted and observed water quality.

2) 환경용량 산정

생태계 시뮬레이션을 통하여 적용성이 검토된 모델을 이용하여 현재의 보정된 각 구성 요소들에 대한 분포를 기준으로 육상 유입원인 COD, DIP, DIN, POC, DOC의 양을 모두 동시에 일률적으로 현재 부하량의 2배에서 50배까지 단계별로 증가시키면서 모델 해석으로 유입시켰을 경우를 시뮬레이션 하였으며, 그 중에서 10배, 20배, 30배, 50배로 증가시킨 경우에 대하여 COD 대한 변화를 정량적으로 예측하였다. 그래서 COD의 농도가 해역수질 환경기준 III급수를 만족시키면서, 가막만이 수용할 수 있는 최대의 오염부하량을 환경용량으로 산정하였으며, 그 결과는 Fig. 6에 나타내었다.

(1)오염부하율 증가에 따른 수질변화

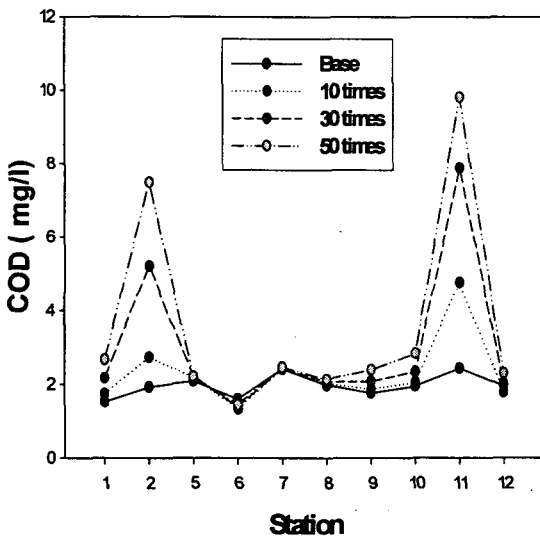


Fig. 6 The predictions of COD depending on various loads increase from Gamak bay under the present condition.

가막만내 수질을 COD 기준으로 III급수를 유지하기 위한 오염부하의 크기를 산정한 결과 하천 오염부하량을 기준으로 볼 때, 하천부하량의 30배가 유입 되었을 때 COD III급수에 해당되는 것으로 나타났다. 그러나 가막만으로 유입되는 오염부하량은 하천을 통한 유입부하 이외에도 가막만내 양식생물에 의한 부하도 상당 부분을 차지하고 있어 실제 하천에 의한 부하는 많지 않을 것으로 판단되어, 환경용량의 크기를 부하량으로 계산하면 COD는 108.75t/d, DIN은 20.48t/d, DIP는 1.50t/d, DOC는 111.15t/d, POC는 63.70t/d으로 나타났다.

해양수산부(2001)의 보고서에 제시된 원단위법에 의한 오염부하원별 부하량을 기준으로 가막만에 미치는 오염부하 크기를 비교해 보았다. 오염부하원으로는 인구, 축산, 산업, 토지 이용 및 양식장부하로 구분되며 양식장부하를 제외한 대부분

의 부하는 하천부하의 일부로 설명할 수 있다. 원단위 부하 중, 배출부하량에 있어 양식부하가 차지하는 비율을 보면, BOD의 경우 전체부하의 80%, TN의 경우 전체부하의 60%, TP의 경우 전체부하의 80%로 아주 높게 나타나, 양식부하에 의한 영향이 비교적 큰 해석임을 알 수 있다.

따라서 가막만에서 COD의 수질환경기준을 III급수로 유지에 필요한 환경용량의 크기로 계산된 하천유입부하의 30배는 실제 하천부하를 기준으로 산정한 결과이며, 양식이 이루어지는 계절인 5월부터 익년 2월까지의 양식부하를 고려하면 하천부하의 크기는 더욱 적어질 것으로 판단된다.

4. 결 론

가막만의 환경용량을 산정하기 위하여 해수 유동을 재현한 다음 생태계 모델을 이용하여 수질 인자의 농도 분포를 재현하고, 가막만으로 유입되는 하천부하량을 단계적으로 증가시켜, 해역의 유기 오염도의 지표인 COD의 변화를 정량적으로 평가하였다. 현재 수질 기준을 유지하면서 수용할 수 있는 오염부하량의 한계, 즉 환경용량을 산정한 결과는 다음과 같다.

(1) 가막만 내의 COD 농도는 표층에서 1.52~2.42mg/l, 저층에서 0.16~3.68mg/l로 저층이 표층보다 다소 높게 나타났으며, 해역 수질 기준 II급수에 해당한다. 전 지점별로 보면 하천수가 많이 유입되는 St. 11과 St. 12에서 높은 값을 보였다.

(2) 가막만 내의 해수 유동 특성을 보면, 창조시의 조석류는 북쪽의 협수로와 남쪽 만 구를 통해서 거의 동시에 해수가 유입하는 것을 볼 수 있고, 낙조시의 해수유동은 창조시와 반대의 유동패턴을 보이며 창조류시 개방 경계서 유입한 해수가 대경도와 잉도 사이에서 양쪽 만구로 나뉘어 각각 유출하는 경향을 보인다.

(3) 연안해역의 물질분포에 큰 영향을 미치는 잔차류의 분포는 북쪽 협수로에서 남향하고, 남쪽 만구에서는 외해로 유출하는 흐름을 보이고, 만 북서부 수역은 표층과는 반대로 북서방향의 흐름이 나타났다. 그리고 해수유동 시뮬레이션의 타당성을 검토하기 위하여 3개의 대표 지점에서 관측치와 계산치를 조류타원도를 이용하여 검토한 결과, 유향과 유속이 유사하게 나타나 가막만의 유동을 잘 재현하고 있음을 알 수 있다.

(4) 생태계 모델을 이용하여 시뮬레이션 한 결과 COD의 실측치와 계산치의 유의성을 나타내는 상관계수는 0.88이며, 실측치와 계산치의 일치성을 나타내는 상대오차는 평균 1.93%로, 오차범위 30% 이내로 나타나, 재현성이 양호한 것으로 판단된다.

(5) 가막만에서 COD의 해역 수질 환경기준을 현 II급수에서 III급수로 유지하기 위해서 수용 가능한 오염부하량, 즉 환경용량은 현재의 유입부하량의 30배에 해당한다. 지점별로 보면, 육상의 유입 부하 유입원이 위치하는 연안인 St. 11은

현재 부하량의 5배 초과시부터 해역 수질 환경기준 III급수를 초과하였으며, St. 2는 10배 초과 시부터 해역수질 환경기준 III급수를 초과하는 것으로 나타났다. 그러나 이런 결과는 양식이 행해지지 않는 계절을 평가한 것으로, 실제로 양식이 행해지고 있을 시 양식장 부하를 감안하면 가막만의 환경용량은 지금의 결과 보다 더 낮게 나타날 것으로 예상된다.

참고문헌

[1] 수로국, 1978, 1977년도 여수항 일대 조류관측결과, 수로기술연보.  
 [2] 여수수산대학 수산과학연구소, 1991, 가막만 환경오염 실태 및 보전대안 조사보고서, p.1~922.  
 [3] 이대인, 1997, 어장 기초생산력 향상 방안에 관한 생태계 모델링, 부산대학교 대학원 석사 학위 논문, p.83.  
 [4] 조은일, 1996, 생태계모형을 이용한 어장환경용량 조사, 부산수산대학교 대학원 박사학위 논문, p.97.  
 [5] 해양수산부, 2000, 제 1차 가막만 지역포럼 자료집.  
 [6] 해양수산부, 2001, 환경관리해역 시범해역관리 시행계획 수립연구.  
 [7] 國立水産振興原·全羅南道, 1982, 全南東部沿岸 養殖漁場 基礎環境 및 底棲貝類에 關한 調査, pp.7~39.

[8] 姜弼愛·朴昶洋·李明淑·金潤, 1980, 굴 양식장 종합조사, 水振院年報, 24, p.7~46.  
 [9] 堀江 毅, 1990, 海域の水質生態系の數値モデル. 土木學會論文集, 第417號, II-13, p.21~31.  
 [10] 細見正明·順藤陵一, 1984, 低泥からの窒素と磷の溶出について, 國立公害研究所研究報, 51, p.195~216.  
 [11] 西村 肇, 1976, 環境容量の概念について, 海洋科學, p.42~45.  
 [12] 李奎亨, 1993, 駕莫灣의 養殖 굴의 生産에 關한 水産海洋學的 研究, 釜山水産大學校 理學博士學位論文, p.1~180.  
 [13] 日本水産資源保護協會, 1989, 漁場環境容量算定 事業報告書, 制 1分冊.  
 [14] Dame, R. F. and T. C. Prince, 1998, Bivalve carrying capacity in coastal ecosystem. Aquatic Ecology, 31: 409~421.  
 [15] Kashiwai, M., 1995, History of carrying capacity concept as an index of ecosystem productivity (Review). Bull. Hokkaido Nalt. Fish. Res. Inst., 59: 81~101.  
 [16] Odumn, E. P., 1953, Fundamentals of Ecology. Saunders, Philadelphia, 574p.