

## 동해안 조식성 무척추동물과 해조류 간 상호작용

유재원\* · 김효진 · 이현정 · 이창근 · 김창수 · 홍재상<sup>1</sup> · 홍정표<sup>2</sup> · 김동삼<sup>2</sup>

(주) 한국연안환경생태연구소

<sup>1</sup>인하대학교 해양학과

<sup>2</sup>국립수산과학원 동해수산연구소

## Interaction between Invertebrate Grazers and Seaweeds in the East Coast of Korea

J. W. YOO\*, H. J. KIM, H. J. LEE, C. G. LEE, C. S. KIM, J. S. HONG<sup>1</sup>, J. P. HONG<sup>2</sup> AND D. S. KIM<sup>2</sup>

Korea Institute of Coastal Ecology, Inc., Incheon 402-835, Korea

<sup>1</sup>Department of Oceanography, Inha University, Incheon 402-751, Korea

<sup>2</sup>East Fisheries Research Institute, NFRDI, Kangnung 210-861, Korea

조식동물-해조류 상호작용의 크기 분포를 추정하기 위하여 12종의 조식동물에 대하여 개체 당 일평균 섭식률(PCGR, per capita grazing rate, g seaweeds/individual/day)을 구하고, 다른 종들의 섭식률을 추정할 수 있는 회귀모형을 만들었다. 조식동물의 생체량과 사제곱근 변환 PCGR은 power curve( $y=0.2310x^{0.3290}$ )에 적합되었고 모형의  $r^2$ 은 0.8864였다. 이로부터 조식동물의 PCGR 변동은 생체량과 관계가 있으며, 섭식 효율성은 관찰된 생체량 범위 내에서 균일하지 않다는 것이 파악되었다. 따라서 각 종별 생체량 효과가 보정된 PCGR을 추정하였고, 작은 몸체를 갖는 종일수록 보다 효율적인 섭식자인 것으로 밝혀졌다. 서식밀도를 감안한 개체군 별 상호작용(grazing impact,  $mg/m^2$ )을 계산한 결과, 해조장에 가장 큰 영향을 갖는 개체군은 군소(*Aplysia kurodai*, 약 2,513  $mg/m^2$ )인 것으로 나타났고, 다음은 등근성게(*Strongylocentrotus nudus*, 약 1,500  $mg$ )와 새치성게(*S. intermedius*, 733  $mg/m^2$ ) 등인 것으로 나타났다. 단각류 가운데 단위 면적당 밀도가 4,000 개체 이상인 멜리타옆새우류, *Elasmopus* sp.와 2,000 개체 이상인 가시꼬리육질꼬리옆새우붙이, *Jassa falcata*의 섭식량은 각각 3.435와 1.697  $mg/m^2/day$ 인 것으로 나타났다. 본 연구에서 추정된 조식동물 군집의 종 조성과 서식 밀도가 동일할 때 상호작용의 총합은 5,045  $mg/m^2/day$ 인 것으로 나타났다. 실험과 모형 연구로부터 성게류와 군소 외에도 적잖은 상호작용이 높은 밀도를 갖는 많은 수의 종들로부터 해조류에 가해지고 있음을 추정할 수 있었다. 성게류의 경우 3 개체/ $m^2$ 의 평균 서식밀도에서 발생하는 섭식량은 국내 천해 양식업의 평균 해조류 생산량(약 5 ton/ha)을 초과하는 것으로 예측되었다. 미소 갑각류 역시 낮은 포식압 조건에서 서식밀도가 증가하면 적잖은 충격(해조류 생산량의 약 16%)을 가할 것으로 예측되었다. 해조장에 서식하는 조식동물의 밀도가 어류에 의해 강도 높게 조절되고 있음을 감안하면, 어류와 조식동물 간 상호작용에 대한 인간의 간섭(어류의 남획 등)은 해조장에 커다란 변화를 유발할 수 있는 잠재력을 가질 것으로 예상된다.

We estimated the distribution of predator-prey interaction strengths for 12 species of herbivores (including amphipods, isopods, gastropods, and sea urchins) and made a regression model that may be applicable to other species. Laboratory experiments were used to determine per capita grazing rate (PCGR; g seaweeds/individual/day). Relationship between the biomass of individual grazers and fourth-root transformed PCGR was fitted to power curve ( $y=0.2310x^{0.3290}$ ,  $r=0.8864$ ). This finding supported that the grazing efficiency was not even as individual grazers increase in size (biomass). Therefore, the biomass-normalized PCGR was estimated and revealed that smaller size herbivores were more effective grazers. Grazing impact considering density of each taxon was calculated. The sea hare *Aplysia kurodai* had greatest grazing impact on the seaweed bed and the sea urchin *Strongylocentrotus nudus* and *S. intermedius* were ranked in descending order of the impact. The amount of seaweed grazed by the amphipod *Elasmopus* sp. (>4,000 ind./ $m^2$ ) and *Jassa falcata* (>2,000 ind./ $m^2$ ) were 3.435 and 1.697  $mg/m^2/day$  respectively. The combined grazing amount of herbivores was 5,045  $mg/m^2/day$  in the seaweed bed. Although sea hare and sea urchin had strong impacts on seaweeds, the effects of dense, smaller species could not be seen as negligible. Surprisingly, the calculated grazing potential of sea urchins with a mean density of 3 ind./ $m^2$  exceeded the mean production of seaweed cultured in domestic coastal waters in Korea (ca.,

\*Corresponding author: jwyoo@coastkorea.com

5 ton/ha). Small crustaceans were also expected to consume up to 16% of the seaweed production if their densities were rising under weak predation conditions. Considering that the population density of herbivores are strongly controlled by fish, human interference like overfishing may have strong negative effects on persistence of seaweeds communities.

**Keywords:** Macroalgal Bed, Herbivore, Seaweed-Grazer Interaction, Grazer Impact, Per Capita Grazing Rate

## 서 론

해조장(macroalgal bed)은 연안역의 높은 생물 다양성을 유지하는 데에 크게 기여하며, 다양한 저서동물에게 부착 기질을, 유영성과 저서성 동물들에게 보육장과 양육장을 제공하고, 이곳에서 발생하는 높은 2차 생산력은 연안역의 먹이망을 지탱하는 데에 중요한 역할을 한다(Steneck *et al.*, 2002). 현재까지의 연구에서 연안역의 조식동물은 해조장에 커다란 영향력을 가지며, 해조장 황폐화(이하 갯녹음)의 주요 요인 가운데 하나로 지목되고 있다(Estes *et al.*, 1998; Dean *et al.*, 2000; Duffy and Hay, 2000). 물리적 요인(예를 들어, ENSO event나 비정상적 염분 수위 발생)에 의한 해조장 황폐화는 가역적이며, 지속 기간이 길지 않은 데에 반해, 성계류와 같은 조식동물 섭식압에 의한 것은 매우 안정적이고, 오랜 기간 지속되는 것이 큰 특징이다(Steneck *et al.*, 2002).

연안역의 갯녹음은 생물 생산의 증대와 생물 다양성 보존 측면에서 반드시 해결해야 할 과제이다. 국내 연안에서 관찰된 현상을 기준으로 삼는다면 우리나라 연안에서 발생한 갯녹음은 후자에 기인한 것일 가능성이 높다. 갯녹음 문제를 이해하고, 효율적 관리방안을 제시하기 위해서는 조식동물에 의해 발생하는 섭식압에 대한 구체적인 또는 다양한 정보가 필요하나, 현재로서는 성계류에 대한 일부 제한적 연구(손, 2001; 유 등, 2004)만이 존재한다. Duffy and Hay(2000)에 의하면 성계류 외에도 다양한 종류의, 그러나 작은 몸체 크기를 갖는 mesograzer 또는 mesoherbivore(평균 copepod size보다 크고 2.5 cm 미만, 이하 중형조식동물; Brawley, 1992)에 의한 섭식압 역시 무시할 수준이 아닌 것으로 추정된다. 따라서 다양한 개체군 별 섭식압에 대한 정보를 취득하기 위한 연구는 그 중요성이 크다고 하겠다.

해조류에 가해지는 조식동물로부터의 섭식압은 생태계 내 구성된 간 포식-피식 관계로 이루어지는 음(-)의 상호작용(negative interaction)이라 할 수 있다. Sala and Graham(2002)은 대형 갈조류의 현미경적 크기의 포자체를 대상으로 실험적 연구를 수행하여 조식동물 종별 1 개체 당 상호작용의 강도(per capita interaction strength)를 추정하였다. 이들이 추정한 상호작용은 한 종이 다른 종에게 갖는 상대적 효과(%), 조식동물 밀도와 조식동물 존재/부재 시 포자체의 밀도 등을 고려)로서 조식동물의 생체량과 비선형적 관계(즉, Michaelis-Menten function)가 있는 것으로 나타났다. 본 연구진은 다양한 조식동물의 생체량으로부터 상대적 개체당 상호작용을 추정하는 것이 가능하다면, 적절한 디자인의 실험을 통해 절대적 개념의 개체당 섭식률(per capita grazing rate)을 예측하는 것 역시 가능할 것으로 기대하였다.

Sala and Graham(2002)은 대상 생물의 종류 별 상호 작용의 상대적 강도와 분포를 이해하는 것이 (1) 군집 내에서 중추적 역할을

수행하는 종이냐 영양군에 대한 파악과 (2) 시스템의 안정성과 외부 충격에 대한 저항성을 이해하고 그 결과를 예측 가능케 해줄 수 있다는 측면에서 매우 중요한 일인 것으로 언급한 바 있다. 만약 본 연구로부터 절대적 개념의 개체당 섭식압을 예측하는 것이 가능해진다면, 그리고 본 연구와 더불어 여러 연구자들에 의해 수행된 섭식압 연구 결과와 지식이 축적된다면, 연안역의 해조장을 관리 또는 보존하는 데에 있어 주요 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대한다.

본 연구를 통해 획득할 수 있는 조식동물 섭식압에 관한 정보는 잘 알려지지 않은 조식 동물의 시스템 내 역할에 대한 이해뿐만 아니라 해조류 생산량과의 비교를 통한 조식동물의 적정 서식 밀도와 생체량을 추정하고 시스템 내 상호작용의 변화가 갖는 생태학적 의미를 파악하는 데에 도움을 줄 수 있을 것이다.

본 연구는 (1) 중규모 생태계 실험(mesocosm experiment)을 통하여 12종의 개체당 1일 평균 섭식률(per capita grazing rate, g seaweeds/individual/day, 이하 PCGR)을 측정하고 이를 바탕으로 각 종별 PCGR을 예측할 수 있는 선형 함수를 추정하며, (2) 정확도가 높은 함수를 추정하여 실험 대상 외의 조식동물 상호작용의 추정에 활용하고, (3) 해조장 시스템 내 조식동물과 해조류 간 상호작용의 분포와 그 의미를 파악하는 것이 주목적이다.

## 재료 및 방법

### 재 료

실험 대상 조식동물은 연체동물 복족류의 8종, 갑각류의 등각류 1종, 단각류 2종 그리고 극피동물 성계류의 1종 등 총 12종이었다. 각 동물군 별 실험 대상종을 보면, 복족류의 군소(*Aplysia kurodai*), 깨고둥류(*Barleeia* sp.), 열록고둥(*Cantharidus callichroa*), 구멍뿔고둥(*Chlorostoma argyrostoma turbinata*), 산팔알고둥(*Homalopoma sangarensense*), 둥근전복(*Nordotis discus*), 보말고둥(*Omphalius rusticus*), 소라류(*Turbo* sp.)와 등각류의 가시흙뿔잔벌레(*Dynoides dentisinus*) 단각류의 참옆새우류(*Amphithoe* spp.), 바다대벌레류(*Caprella* spp.) 그리고 성계류의 둥근성계(*Strongylocentrotus nudus*) 등이었다.

조식 동물은 실험 개시 전 7일 이내에 강원도 삼척과 고성에서 잠수를 통해 채집된 것이며, 채집 직후 냉장 박스를 이용하여 동해수산연구소까지 운반되었다. 동해수산연구소의 수조 시설에서 실험 직전까지 순치시켰으며, 해조류를 공급하여 공복상태가 되지 않도록 하였다.

조식 동물은 몸체의 크기에 따라 두 가지 범주, 즉 중형조식동물(단각류, 등각류, 미소복족류 등)과 대형조식동물(성계류, 복족류 등)로 구분되었다. 이들에게 공급된 먹이는 다음과 같다. 중형 조식동물의 경우 대부분의 시기에 갈조류의 다시마(*Laminaria japonica*)를 공급하였고, 2005년 6월과 9월에 각각 홍조류의 도박

(*Pachymeniopsis elliptica*)과 갈조류의 곰피(*Ecklonia stolonifera*)를 이용하여 실험하였다. 대형조식동물의 경우, 위의 갈조류와 홍조류 외에 미역(*Undaria pinnatifida*)이나 모자반(*Sargassum fulvellum*) 등의 갈조류와 홍조류의 우뚝가사리(*Gelidium amansii*)를 먹이로 공급하였다.

조식 동물은 각 종별로 구분되었으며, 중형조식동물 범주에 속하는 종들은 500 ml, 대형조식동물 범주에 속하는 종들은 20 l의 유리 용기에 해조류와 함께 넣어 실험을 수행하였다. 이때 각 유리 용기는 1 mm 망목의 천으로 입구를 차단한 후 대형 수조로 옮겨 24시간 동안 담가두어 실험을 수행하였다.

### 자료수집방법

현실성을 갖는 정량적 상호작용의 추정을 위해 동해수산연구소 내의 수조를 이용하여 대규모 생태계 실험 조건(환경 조건은 주변 해역과 동일하나 포식자나 타 종의 간섭이 제한됨)하에서 실험하였다. 실험은 2005년 4월(예비 실험), 5월, 6월, 7월, 9월 그리고 11월 등의 6회에 걸쳐 매 시기마다 24시간 동안 동일한 실험 디자인으로 반복 시행되었다.

실험 기간 동안 동해수산연구소의 수조 내에서 측정된 해수온의 최소-최대값 범위는 2005년 4월의 11.2 °C부터 7월의 18.7 °C였고, 2005년 4월부터 11월까지 전형적인 계절 변화를 나타내었다. 염분도는 실험 당시 측정이 이루어지지 않았으나, 취수구에 인접한 국립수산과학원의 한국해양환경 조사자료의 강릉 연안 정점 4(경포)와 주문진 연안 정점 5(연곡해수욕장 동방)에서 관찰된 저층수 염분도 자료에 근거했을 때 최소-최대 범위가 32.89-34.33‰로 그 차이가 1.5% 이내였으므로 실험에 인위적 영향을 미칠 정도는 아닌 것으로 판단하였다.

유리 용기 내에 조식동물 개체군 별로 해조류와 함께 넣어두고 24 시간 뒤 해조류 습중량 변화값을 측정하였으며, 측정치를 바탕 시험값(blank, 해조류만 넣어둔 유리 용기)의 차이와 비교, 보정하였다. 해조류의 습중량은 대기의 노출 시간에 따른 차이를 나타내어 실험 오차의 주요인이 될 가능성이 큰 것으로 판단되었다. 실험 전에 수행한 예비 실험으로부터 단편화된 미역 4 조각의 습중량을 30초 간격으로 측정된 결과 감소율은 시간에 따라 선형적으로 변화하였으며, 매 간격마다 습중량이 평균  $0.05 \pm 0.03\%$  (n=52) 만큼 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 실험 시에는 30초 이내에 물기를 최대한 제거한 후 습중량을 측정하고, 이를 3회 반복하여 추정된 평균값을 바탕시험값과 비교하여 보정하였다.

각 유리 용기 내의 조식동물의 개체수 범위는 1~14개체였다. 최대 개체수는 2005년 11월에 실험된 미소 복족류, *Barleeia* sp.의 것이었다. 여러 개체들을 유리 용기에 담은 이유는 이들의 해조류 섭식량이 미미할 것으로 예상되었기 때문이다. 이 종은 2005년 10월 자연에서 채집된 다시마(*L. japonica*) 13.369 g에 7 개체가 착생된 것으로 기록(다시마 2 g 당 약 1 개체 서식, 1 개체 당 평균 생체량 0.001 g 미만)되었으며, 약 6 g의 다시마를 먹이로 공급한 실험의 밀도는 해조류 1 g 당 약 2 개체였다. 후자에서 다소 높긴 하나 낮은 밀도와 개체 당 생체량 수준을 고려할 때 이정도 차이가 유리 용기 내에서 종내 경쟁을 유발할 정도로는 생각되지 않았다. 각 용기 내의 섭식량은 개체수로 나누어 24시간 동안의 1 개체 당 섭식량으로 나타내었다. 매 실험 시기마다 동일 개체군

별로 2~3개의 유리 용기를 사용하여 섭식량을 반복 측정하였다.

### 분석 방법

2005년 4월부터 11월까지의 실험을 통해 다양한 조식동물을 대상으로 PCGR을 추정된 후 관찰값을 이용하여 종별 개체당 평균 습중량과 PCGR 간 관계를 추정하였다. 이때 PCGR은 분산의 패턴을 고려하여 사제곱근 변환(4th root transformation,  $\sqrt[4]{x}$ )을 행하였다. 사제곱근 변환은 변수변환 강도가 높은 방법 중 하나이며, 로그 변환이 갖는 장점들, 즉, 넓은 분산 패턴을 갖는 변수의 등분산성 가정을 충족시켜주고, 이러한 변수들의 값 차이를 차수의 크기로 단위화하여 나타내준다는 점 등을 유지한다. 습중량을 독립 변수로, PCGR을 종속 변수로 하는 자료에 선형회귀모형( $y=a+bx$ )과 비선형 모형인 Michaelis-Menten function(saturation growth-rate model,  $y=ax/(b+x)$ ) 그리고 power function model( $y=ax^b$ )을 적용하였으며, 추정 결과를 검토하여 타당한 모델을 선정하였다.

동계에는 실험이 수행되지 않았으므로, “추정된 모형이 자연의 것에 근사한 PCGR의 개체군 별, 생체량 별 변화를 충분히 반영할 수 있을 것인가”라는 의문과 같은 일종의 모형 강건성 관련 문제가 발생할 수 있을 것으로 판단하였다. 그러나 수온차가 현저한 봄, 여름, 가을의 관찰값을 병합하여 모형을 적합한 시도 자체가 습중량의 효과보다 수온/계절적 효과가 크지 않을 것임을 전제로 한 것이며, 본 연구자들은 이러한 가정의 타당성 여부를 추정된 모형의 설명력으로 가늠해 볼 수 있는 문제일 것으로 판단하였다. 다시 말해서, 계절적 또는 실험 시기에 따른 효과가 우세하다면 선형 모형의 적합이 어려울 것으로 예상하였으며, 반면 높은 선형/비선형 모형의 적합도는 습중량의 차이로 인한 효과가 훨씬 우세함을 증명하고, 겨울철 시료의 누락 역시 심각한 편의 발생의 요인으로 간주될 가능성이 높지 않음을 지시하는 것으로 받아들였다.

조식동물 섭식 활동의 효율성을 종별로 비교하기 위하여 생체량의 효과를 제거한 PCGR(biomass-normalized PCGR, 즉, 조식동물 1 g 당 1일 해조류 섭식량, 이하 생체량 보정 PCGR)을 추정하였다. 이는 동일한 생체량 조건에서의 각 종간 섭식량에 차이가 존재하는가를 관찰하기 위한 것이다. 생체량 보정 PCGR의 평균과 종별 생체량의 평균 간 유의한 상관관계가 존재하는지를 파악하기 위하여 Pearson 상관 계수를 활용하였다.

본 연구를 통해 구한 모형과 동해안 해조장의 단위 면적당 조식동물 개체수 그리고 개체 당 생체량 자료(총 29종)를 활용하여 개체군 별 그리고 이를 합산한 군집의 1일 섭식량(grazing impact,  $\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$ )을 추정하였다. 조식동물의 추정밀도와 개체 당 생체량은 포항지방 해양수산청(1999)과 동해수산연구소(2002, 2005)의 현장 조사 결과를 참고하였다. 정확한 추정치를 얻기 위해서는 모수에 근사한 평균 서식밀도와 생체량이 이용되어야 하나 이러한 값을 추정하는 것은 현장에서나 실험실에서 많은 노력이 투입되어야 한다. 한정된 공간적 조사 범위와 시기로부터의 결과를 활용한 본 연구의 추정치는, 따라서, 어느 정도 편의 되었을 가능성이 있는 것으로 볼 수 있다.

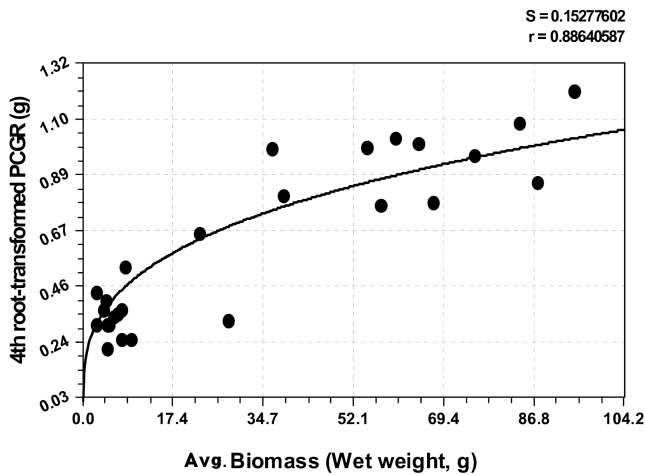
## 결 과

### 조식동물 생체량과 PCGR 간 관계

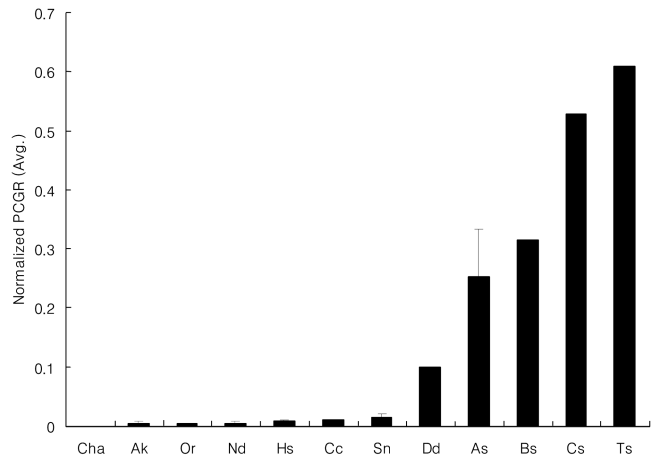
Table 1은 조식동물의 사제곱근 변환 PCGR( $\text{g seaweeds}/\text{individual}/$

**Table 1.** Comparison of linear/non-linear fitting results on the relationship between grazer biomass (wet weight) and 4th root transformed PCGR (per capita grazing rate, g seaweeds/individual/day)

Model type	Equation	Standard error	Correlation
Linear Fit	$y=0.279+0.010x$	0.130	0.919
Saturation Growth-Rate Model (Michaelis-Menten Model)	$y=1.453x/(14.881+x)$	0.183	0.833
Power Fit	$y=0.231x^{0.329}$	0.153	0.886



**Fig. 1.** Relationship between the individual biomass(g) and 4th root-transformed PCGR(g) data fitted by non-linear model(power curve fit).



**Fig. 2.** Comparisons of biomass-normalized PCGR among species. Cha, *Ch. argyrostoma turbinata*; Ak, *A. kurodai*; Or, *O. rusticus*; Nd, *N. discus*; Hs, *H. sangarensis*; Cc, *C. callichroa*; Sn, *S. nudus*; Dd, *D. dentisinus*; As, *Amphithoe* spp.; Bs, *Barleeia* sp.; Cs, *Caprella* spp.; Ts, *Turbo* sp.

day)과 생체량(습중량, g WWt/individual) 자료에 적용된 세 가지 모형이 모두 높은 상관관계를 지니고 있음을 보여주고 있다. 그 가운데 선형회귀 모형의 상관 계수가 가장 높은 것( $r=0.92$ )으로 나타났다. 그러나 직선 회귀 모형은 y절편이 0.27923인 것으로 추정되어 생체량이 0일 때 약 0.006g을 섭식하는 것으로 예측되었고, 이는 0이 되어야할 조식동물 생체량과 PCGR 간 관계를 고려할 때 부적절한 것으로 판단되었다. 차선으로 택할 수 있는 나머지 두 가지 비선형 모형 가운데 적합 결과가 우수한 것은 power curve 모형(0.89 vs. 0.83)이었다. Fig. 1은 power curve에 의한 적합 결과를 나타낸 것인데, 대체로 관찰치는 적합선( $y=0.231x^{0.329}$ )을 중심으로 균질적인 분포를 갖는 것으로 나타났다.

**생체량 보정 PCGR**

위의 모형 추정 결과로부터 조식동물의 PCGR의 크기는 생체량과 비선형적 관계에 있으며, 따라서, 관찰된 생체량 범위 내에서, 섭식 효율성의 분포는 균일하지 않은 것으로 파악되었다. Fig. 2는 생체량 보정 PCGR을 추정한 후, 종별로 좌측부터 우측까지 오름 순서대로 배열한 것이다. 예비 실험 기간을 제외한 2005년 5월부터 11월까지의 기간에 2회 이상 실험이 반복된 종(12종 가운데 5종)의 경우 평균과 편차를 계산하였다. 평균과 편차가 계산된 종은 군소(*Aplysia kurodai*), 둥근전복(*Nordotis discus*), 산괘알고둥(*Homalopoma sangarensis*), 둥근성게(*S. nudus*), 참옆새우류(*Amphithoe* spp.) 등이었다.

Fig. 2 좌측의 군소(*A. kurodai*)부터 둥근성게(*S. nudus*)까지 생체량 보정 PCGR의 편차는  $\pm 0.007$  g 이하인 것으로 나타났다. 둥

근성게(*S. nudus*)의 경우 5월, 7월, 9월 그리고 11월에 실험이 수행되었으며 0.006부터 0.026 g의 범위(평균  $0.015 \pm 0.007$  g)를 갖는 것으로 나타났다. 참옆새우류, *Amphithoe* spp.의 경우 5월, 6월 그리고 11월에 실험이 수행되었으며 0.198부터 0.346 g의 범위(평균,  $0.253 \pm 0.081$  g)를 갖는 것으로 나타났다.

생체량 보정 PCGR의 평균과 종별 생체량 평균 간에는 유의한 상관관계가 존재하는 것으로 판단할 수 있었다( $n=36$ , Pearson's  $r = -0.307$ ,  $p\text{-value} = 0.068$ ).

**조식동물 개체군 별 그리고 군집의 상호작용 추정**

추정된 PCGR과 기존 문헌으로부터의 개체군 별 서식 밀도를 활용하여 개체군 별 상호작용(grazing impact,  $mg/m^2$ )을 계산하고 비교하였다(Table 2). 해조장에 가장 큰 영향력을 갖는 개체군은 군소(*A. kurodai*, 약  $2,513 mg/m^2$ )인 것으로 나타났고, 다음은 둥근성게(*S. nudus*, 약  $1,500 mg/m^2$ )와 새치성게(*S. intermedius*,  $733 mg/m^2$ ) 등인 것으로 나타났다. 둥근성게(*S. nudus*)의 서식밀도는 2 개체/ $m^2$ 인 것으로 추정되었으며, 이는 Sala and Graham(2002)의 *Strongylocentrotus purpuratus*의 서식 밀도인 1.463과 유사한 수준이다. 단각류는 대체로 0.005 g 이하의 개체당 평균 습중량을 갖는 것으로 나타났다. 이들 가운데 단위 면적당 밀도가 4,000 개체 이상인 멜리타옆새우류(*Elasmopus* sp.)와 2,000개체 이상인 가시꼬리육질꼬리옆새우붙이(*Jassa falcata*)의 섭식량은 각각 3.435와  $1.697 mg/m^2/day$ 인 것으로 나타났다. 개체군 별 섭식량의 합산값은  $5,045 mg/m^2/day$ 인 것으로 추정되었다.

**Table 2.** Average biomass, density, PCGR and impact of grazers on seaweeds

Taxa	Scientific name	Biomass (g/ind.)	Density (ind./m <sup>2</sup> )	PCGR (mg/ind./day)	Impact (mg/m <sup>2</sup> /day)
MPo	<i>Acanthochiton</i> spp.	0.0300	28.3	0.0282	0.800
CAM	<i>Aorcho</i> sp.	0.0010	77.8	0.0003	0.025
CAM	<i>Aorides</i> sp.	0.0005	67.8	0.0001	0.009
CAM	<i>Amphithoe</i> spp.	0.0050	191.3	0.0027	0.511
MGs	<i>Aplysia kurodai</i>	30.0785	10.0	251.2949	2512.949
MGs	<i>Barleeia</i> sp.	0.0040	25.6	0.0020	0.051
MGs	<i>Cantharidus callichroa</i>	0.0560	40.9	0.0642	2.628
CAM	<i>Caprella</i> spp.	0.0020	423.5	0.0008	0.339
MGs	<i>Chlorostoma argyrostoma turbinata</i>	28.1190	1.0	229.9757	229.976
CAM	<i>Ceradocus</i> sp.	0.0010	1.1	0.0003	<0.001
CAM	<i>Corophium</i> spp.	0.0005	57.5	0.0001	0.007
ClS	<i>Dynoides dentisinus</i>	0.0040	17.8	0.0020	0.035
CAM	<i>Elasmopus</i> sp.	0.0020	4296.0	0.0008	3.435
CAM	<i>Erichthonius brasiliensis</i>	0.0030	579.7	0.0014	0.790
CAM	<i>Gammaropsis</i> spp.	0.0020	478.9	0.0008	0.383
MGs	<i>Homalopoma sangarens</i>	0.0260	498.6	0.0234	11.658
CAM	<i>Hyale</i> spp.	0.0050	207.2	0.0027	0.553
MPo	<i>Ischinchiton comptus</i>	0.0490	10.0	0.0538	0.538
CAM	<i>Jassa falcata</i>	0.0020	2122.5	0.0008	1.697
MPo	<i>Lepidozonia</i> spp.	0.0120	23.8	0.0085	0.201
MGs	<i>Littoraria strirata</i>	0.0080	167.8	0.0050	0.832
CAM	<i>Maera serratipalma</i>	0.0030	128.9	0.0014	0.176
MGs	<i>Nordotis discus</i>	5.9190	0.4	29.5849	11.834
MGs	<i>Omphalius rusticus</i>	2.7200	3.0	10.6336	31.901
CAM	<i>Podocerus inconspicuus</i>	0.0020	364.2	0.0008	0.291
CAM	<i>Stenothoe</i> sp.	0.0002	588.6	0.0000	0.023
EEc	<i>Strongylocentrotus nudus</i>	69.0558	2.0	750.2220	1500.444
EEc	<i>Strongylocentrotus intermedius</i>	136.1680	0.4	1833.3626	733.345
MGs	<i>Turbo</i> sp.	0.0006	1.0	0.0002	<0.001

※CAM, Amphipoda; ClS, Isopoda; MGs, Gastropoda; MPo, Polyplacophora; EEc, Echinoidea

## 고 찰

### 선형 모형 추정치의 타당성과 의미

본 연구는 PCGR을 1개체가 1일간 해조류를 섭식하는 평균량으로 간주하였으나, (1) 개체군 별로 격리하여 중간 경쟁에 의한 간접 효과가 없고, (2) 포식자를 차단하여 포식압의 영향을 배제하고, 그리고 (3) 매 실험 시기 내 먹이의 성장이나 가입이 없는 조건 등임을 전제하였으므로 이를 1일 최대 평균 섭식률(maximum per capita grazing rate)로 보는 것이 타당하다(Sala and Graham, 2002).

조식동물 생체량-PCGR 간 관계의 추정에 있어서 관찰치는 적합선( $y=0.2310x^{0.3290}$ )을 중심으로 균질적인 분포를 갖는 것으로 나타났다. 다양한 시기(즉, 실험 당시의 다양한 수온 조건)의 관찰값이 포함되었음에도 불구하고 연구진이 선택한 모형이 갖는 높은 상관성은 본 연구진의 “섭식량에 미치는 계절적 효과가 생체량 차이에 기인하는 효과에 비해 크지 않다”는 가정이 타당성 있음을 나타내는 것으로 볼 수 있다. 이로부터 해조류에 미치는 조식동물의 상호작용은 생체량과 power curve의 관계를 갖는 것으로 알 수 있었으며, 또한 예측 가능성도 알 수 있었다.

국내에서는 개체군 별 섭식압의 측정 연구 사례가 풍부한 편이 아니나 동해안에 서식하는 동근성게(*S. nudus*)의 경우 이에 대한 정보를 몇몇 문헌으로부터 구할 수 있었다. 자연 서식처에서 울타리 실험(enclosure experiment)을 수행한 유 등(2004)은 2002년 8월에 0.160, 10월에 0.025, 0.002 g seaweeds/g sea urchin/day을 추정하였으며, 실내에서 실험을 행한 손(2001)의 경우 3종의 성게류(*Hemicentrotus pulcherrimus*, *S. nudus*, *S. intermedius*)의 2001년 3월과 9월 다시마 섭식률이 각각 0.083-0.184, 0.072-0.102 g seaweeds/g sea urchin/day인 것으로 추정되었다. 유 등(2004)은 8월과 10월 두 시기 추정치의 차이를 계절적인 변화보다는 파랑 발생과 같은 해황 조건의 차이에 기인하는 것으로 보았다. 그럼에도 불구하고 이들로부터의 추정치를 시기에 상관없이 평균한 결과 0.062 g seaweeds/g sea urchin/day인 것으로 나타났다. 본 연구의 평균치인 0.015 g seaweeds/g sea urchin/day보다 4배가량 높으나 Fig. 3의 전반적인 모형 예측치의 범위(mg - g)와 비교할 때 유사한 수준에 해당하는 것으로 볼 수 있었으며, 따라서 타당성을 갖춘 것으로 판단할 수 있었다.

앞서 언급한 바와 같이, Sala and Graham(2002)의 실험에서는 조식동물과 포식체 간 상호작용이 비선형 함수인 Michaelis-Menten

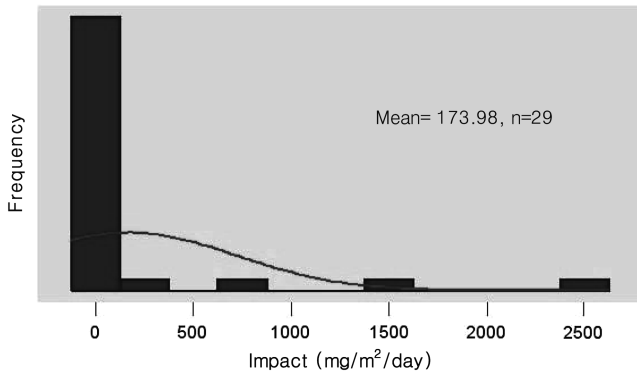


Fig. 3. Frequency distribution of grazing impact of 29 populations.

함수에 적합 되는 것으로 나타났다. 이 모형은 변곡점을 지나 중속변수 값이 포화되는 패턴을 갖는 함수인데, 이는 현미경적 크기의 포자체를 대상으로 했을 때 몸체가 큰 조식 동물의 비효율적 섭식으로 인해 크기에 의한 조식압으로부터의 도피(size refuge)가 발생할 수 있기 때문에 이러한 유형의 비선형적 관계가 보다 바람직한 것으로 언급하였다. 반면 대형 갈조류의 엽상체를 사용하여 크기에 의한 조식압으로부터의 도피(size refuge) 효과를 기대할 수 없었던 본 연구에서 power curve 형태의 비선형적 모형이 적합된 것은 먹이의 유형(포자체 또는 엽상체)과는 독립적인, 실험 대상 조식동물 간 크기나 생체량에 따른 섭식 효율에 근본적인 차이가 있음을 지지하는 현상인 것으로 판단되었다. Sala and Graham(2002)의 실험 결과는 해저에 착저하는 포자체에 가해지는 음(-)의 상호작용을 측정하는 것으로 그 적용 범위를 해조류 엽상체에 적용하기는 어렵겠지만 대형 갈조류의 엽상체를 대상으로 행한 본 연구의 결과는 생활사 중 다양한 형태를 갖는 현미경적 크기의 어린 개체나 엽상체에 미치는 조식 동물의 impact를 추정하는 데에도 이용될 수 있을 것으로 생각된다.

종별 생체량 보정 PCGR은 Fig. 2 좌측의 7개 개체군의 경우 동일한 수준이었으나, 우측의 가시홍빨잔벌레(*Dynoides dentisinus*), 참옆새우류(*Amphithoe* spp.), 바다대벌레류(*Caprella* spp.) 그리고 복족류 *Barlecia* sp., *Turbo* sp. 등에서 월등히 높은 값이 관찰되었다. 이들은 좌측에 배치된 종들에 비해 몸체의 크기가 작은 종들이다. 생체량 보정 PCGR의 평균과 종별 생체량 평균 간 상관관계는 좀 더 작은 크기를 갖는 우측의 종들이 좀 더 효율적인 섭식자일 것이라는 추정과 이어질 수 있다.

### 군집 내 상호작용의 분포와 중요성

본 연구를 통해 제시된 각 개체군 별 상호작용의 총합은 5,045 mg/m<sup>2</sup>/day인 것으로 나타났다. 이는 조식동물 군집의 구성과 밀도가 표의 것과 동일할 때 단위 면적당 약 5g의 해조류가 하루에 섭식됨을 의미하는 것이다. 그러나 이와 같은 추정치는 다음과 같은 점을 고려할 때 실제 현장의 수치와는 다소 차이가 있을 것을 예상할 수 있다. 첫째, 본 연구에서 추정된 PCGR은, 앞서 언급한 바와 같이, 포식자나 이중 경쟁자의 간섭이 없는 등의 여러 조건을 고려할 때 최대치에 가까울 것으로 판단할 수 있었다. 둘째, 개체군들이 1 m<sup>2</sup> 내에 Table 2의 것과 동일한 구성과 밀도로 서식하

고 있을 가능성은 매우 낮다. 특히 일부 개체군(예를 들어 벨리타 옆새우류(*Elasmopus* sp.), 해조숨이옆새우류(*Hyale* spp.) 등의 경우 서식처 분포의 중심이 조간대에 치우쳐 나머지 종들과는 동일한 서식처에서 발생할 가능성이 매우 낮을 것으로 추정되었다. 셋째, 리스트의 일부 종들은 엽상 생물(epiphytes)과 해조류를 섭식하는 잡식성들이며, 본 연구의 추정치는 이들이 해조류만을 섭식할 경우에 가깝다고 할 수 있다. 이러한 점들을 고려하면 자연 서식처에서 조식동물 개체군들이 갖는 상호작용 추정치의 총합은 5 g 보다 낮을 것으로 판단할 수 있다.

군집을 구성하는 각 개체군 별 상호작용의 분포는 군집의 구조와 동태를 이해하는 데 매우 중요한 기여를 한다. 해조장에 서식하는 Table 2의 29개 조식동물 개체군들을 대상으로 종별 PCGR과 개체군의 상호 작용 분포를 추정된 결과 상대적으로 약한 상호작용을 갖는 종들의 빈도가 우세하였으며 일부만이 강한 상호작용을 갖는 것으로 나타났다(Fig. 3). 이는 실험적 연구를 통해 파악된 몇몇 시스템 내 개체군 별 상호 작용의 분포에 대한 연구결과와 유사한 것이다. 예를 들어 Paine(1992)이나 Berlow(1999)와 같은 연구자들은 생태계가 낮은 개체 당 효과(per capita effect) 또는 밀도를 갖는 약한 상호 작용자들로 구성된 기반 위에 소수의 강한 상호 작용자들이 존재하는 분포 패턴을 갖는 것으로 제안하였다. 일부 이론적 연구들(예를 들어, May, 1973)은 이러한 시스템이 강한 상호작용 우세 시스템에 비해 충격이나 침입종에 대한 안정성이 보다 높을 것으로 예측하고 있다. Berlow(1999)의 연구에서는 다수의 약한 상호 작용자들이 이러한 안정화 역할 또는 noise-dampening role을 수행하는 것으로 나타났으며, 이러한 이유로 이들의 소멸이 자연 상태의 군집에 커다란 변화를 유발할 수 있는 것으로 예상하였다.

현재까지 국내 해조장 관련 연구 분야에서는 성계와 같은 강한 상호 작용자에게만 초점이 맞추어져 있었으며, 단각류나 복족류와 같은 약한 상호작용자들에 대한 연구는 전무한 형편이라 할 수 있다. 이와 달리, 국외에서는 여러 연구자들에 의해 이들의 잠재적인 효과가 입증되거나 분포 조절요인에 대한 연구가 수행되고 있다(Duffy and Hay, 2000; Christie and Kraufvelin, 2003). 따라서 약한 상호작용자가 기여하는 해조장 시스템의 안정성이나 역할을 이해하기 위한 모니터링과 실험적 연구가 필요할 것으로 생각된다.

### 인간 간섭이 해조장에 미치는 영향

해조장 생태계에 서식하는 다양한 조식동물의 분포는 시공간적으로 매우 변동폭이 크며, 아직까지는 이에 대한 이해가 부족한 편이다. 본 연구의 최종 목적은 논리의 단순화와 가정을 통해 해조장의 조식동물이 해조류에 가하는 잠재적 충격을 이해하고 예측하는 것이었다. 본 실험을 통해 해조장에 가해지는 음(-)의 상호작용들 가운데 성계류와 군소 개체군과 같은 강한 상호작용자에 의한 것이 대부분을 차지하는 것으로 나타났으나 이들 외에도 해조류에 많은 수의 종들과 이들의 높은 밀도에 의해 적잖은 상호작용이 가해지고 있으며, 보다 효율적인 섭식을 행하는 것으로 추정할 수 있었다. 본 실험과 Sala and Graham(2002)의 실험 결과들의 유사성과 차이점을 고려할 때, 해조장의 형성에 결정적인 영향을 미칠 수 있는 어린 포자체의 가입에는 상대적으로 작은 몸체를 갖는 상호작용자들의 효과가 무시할 수 없는 크기일 것으로

예상할 수 있었다.

동해안에서 수행된 유 등(2004)의 실험에서 갯녹음 현장과 자연 해조장의 둥근성게(*S. nudus*)의 서식밀도와 생체량은 각각 평균 3 개체/m<sup>2</sup>, 69.417 g/개체, 1 개체/m<sup>2</sup>, 95.905 g/개체였다. 본 연구의 모형을 적용하여 추정된 갯녹음 현장과 자연 해조장의 상호작용은 각각 2266.19와 1155.87 mg/m<sup>2</sup> 이었다. 이를 ha 당 연간 섭식량으로 환산하면, 각각 8.3과 4.2 ton/ha/year이었다. 2005년 국내의 천해 양식어업에 의한 해조류의 생산량이 평균적으로 약 5 ton/ha(총 생산량, 621,156 ton, 천해양식어업 면적, 124,668 ha; 해양수산부, <http://www.momaf.go.kr>)임을 감안하면 평균 3 개체/m<sup>2</sup> 이상(약 210 g)이 서식할 때 평균치 주변의 해조류 생산이 이루어지는 곳은 생산이 붕괴될 수 있다는 계산이 가능해진다. 이는 둥근성게(*S. nudus*)가 1 m<sup>2</sup> 당 200 g 이상 서식할 경우 해조류 식생이 큰 영향을 받는 것으로 나타난 谷口(2001)의 가두리 실험 결과와 유사한 수준이라 할 수 있다.

작은 물체를 갖는 상호작용자들 가운데 단각류의 섭식량은 해조장에 서식하는 조식동물의 섭식압 범위에서 비교적 높은 수준에 속하는 것으로 나타났다. 이는 개체군의 서식 밀도가 개체군별 상호작용의 크기를 결정하는 데에 중요한 영향력을 갖고 있음을 나타내는 것이라 할 수 있다. Christie and Kraufvelin(2003)의 중규모 생태계 실험에서는 인위적으로 조성된 낮은 포식압 조건(게류의 *Carcinus maenas*와 불가사리류의 *Asterias rubens*는 흔하게 관찰, 놀래기류와 망둑어류 드물게 관찰)에서 단각류와 등각류로 구성된 중형조식동물의 밀도가 실험 후기에 500,000~2,000,000 개체/8 m<sup>2</sup>에 달하는 것으로 나타났다. 앞서 언급한 바와 같이, 다소 비현실적인 수치로 볼 수 있는 본 연구의 단각류와 등각류 서식밀도 추정치(약 10,000 개체/m<sup>2</sup>)를 활용한 섭식압 추정치는  $8.3 \times 10^3$  g/m<sup>2</sup>/day였다. 만약 낮은 포식압 조건 하에서 이들의 밀도가 최대 25배 정도 증가한다면 이들에 의한 섭식압은 약 0.21 g/m<sup>2</sup>/day, 0.8 ton/ha/year에 이른다. 2005년 국내의 천해 양식어업에 의한 해조류의 생산량(5 ton/ha)과 비교하면 이는 무시할 수 없는 수준이다.

자연 해조장 시스템의 어류에 의한 포식은 대형무척추동물의 서식밀도를 조절하는 데에 중요한 역할을 한다(Christie and Kraufvelin, 2003). 위에 언급한 조식동물 가운데 성게류에 미치는 포식압이 이들의 서식 밀도에 영향을 주며, 궁극적으로 해조장의 유무를 설명할 수 있음은 이미 여러 연구자의 보고를 통해 잘 알려져 있다(유 등, 2004; McClanahan and Muthiga, 1989; Sala and Zabala, 1996; Estes et al., 1998). 현재까지 알려진 이들의 포식자로는 게류, 복족류, 불가사리류, 어류(쥐치류, 놀래기류, 노래미류, 돝류, 한류성 대형어류 등) 등이 있다(교육부, 1996; 유 등, 2004; McClanahan and Muthiga, 1989; Sala and Zabala, 1996). 단각류나 등각류 역시 어류들에 의해 집중적으로 이용되고 있는 주요 먹이원이라는 것은 국내의 위 내용물 분석 연구를 통해서도 잘 알려져 있으며(동해수산연구소, 2002, 2005; 서, 2003), 이들 개체군의 크기는 어류 포식자에 의해 효율적으로 조절되는 것으로 보고된 바 있다(Fjøsne and Gjøvsæter, 1996; McCurdy et al., 2005).

유 등(2004)은 포식자-조식동물-해조장 관계가 하향식 조절(top-down control)되는 것으로 추정하였으며, Estes et al.(1998)을 비롯한 다양한 연구로부터의 결론도 이를 뒷받침하고 있다. Christie

and Kraufvelin(2003)의 실험에서 높은 수준의 영양염 첨가에서도 조식동물 개체군의 크기는 매우 미미한 반응을 보였으므로 이 역시 상향식 조절(bottom-up control)의 가능성이 낮은 것으로 추정할 수 있는 근거가 될 수 있다. 낮은 포식압은 다양한 요인에 의해 유발되나 포식자 조합의 구성이 주로 어획에 의한 영향을 받을 수 있는 생물들로 구성되었음을 감안하면 남획과 같은 인간의 지나친 간섭 행위에 의해서도 발생할 수 있다. 앞서 고찰한 바와 같은 포식-피식 관계의 강도와 하향식 조절의 가능성을 고려하면 적절치 못한 관리로부터의 수산자원 고갈은 조식동물에 가해지는 포식압을 낮출 것이며, 따라서 이들의 서식밀도를 큰 폭으로 증가시킬 수 있다. 본 연구는 이러한 현상이 해조장에 커다란 변화를 유발시킬 수 있는 잠재력을 가질 것이라는 예측을 제안한 데에서 의미를 찾을 수 있다. 물론 이러한 접근 방법을 통해 좀 더 다양한 조건 하에서 반복 측정이 이루어질 수 있다면, 우리나라 연안의 해조장의 관리에 유용하게 활용될 수 있는 신뢰할 수 있는, 정확한 정보를 얻는 것이 가능해질 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 2005년도 국립수산물과학원의 '해조장 조성 효과 추정 및 조식동물 생태 연구'의 일환으로 수행되었습니다. 논문의 검토에 도움을 주신 주)한국연안환경생태연구소의 정승원 연구원님 그리고 국립수산물과학원의 윤상필 박사님께 감사드립니다. 본 논문을 심사하시면서 여러 지적을 해주신 부산대 강창근 교수님과 무명의 심사위원님께 감사드립니다.

## 참고문헌

- 교육부, 1996. 한국동식물도감-제36권 동물편(극피동물). 교육부, 780 pp.
- 동해수산연구소, 2002. 해조장 동물상 변화 및 조식동물 연구(최종보고서). 국립수산물과학원 동해수산연구소, 163 pp.
- 동해수산연구소, 2005. 해조장 조성 효과 추정 및 조식동물 생태 연구. 국립수산물과학원 동해수산연구소, 115 pp.
- 서인수, 2003. 인천 갯벌 저서생물의 군집구조와 먹이망. 인하대학교 이학박사학위논문, 273 pp.
- 손용수, 2001. 동해안 해조장 조성과 서식동물의 특성. 동해안 생산력 향상을 위한 해조장 조성 워크숍 간행물, 국립수산물진흥원 동해수산연구소, pp. 1-9.
- 유재원, 손용수, 이창근, 김정수, 한창훈, 김창수, 문영봉, 김동삼, 홍재상, 2004. 동해안 삼척 호산에 서식하는 둥근성게, *Strongylocentrotus nudus*의 분포와 피식 패턴. 한국해양학회지, 9: 40-49.
- 포항지방해양수산청, 1999. 후포항 방파제 확장 공사 사후환경영향조사. 포항지방해양수산청, 176pp.
- 谷口和也, 2001. 磯焼けを海中林へ-岩礁生態系の世界-. 裳華房.
- Berlow, E.L., 1999. Strong effects of weak interactions in ecological communities. *Nature*, **398**: 330-334.
- Brawley, S.H., 1992. Mesoherbivores. In: Price, J.H., D.M. John, S.J. Hawkins (eds.), *Plant-animal interactions in the marine benthos*. Systematics Association Special Volume 46. Clarendon Press, Oxford, 235-263.

- Christie, H. and P. Kraufvelin, 2003. Mechanisms regulating amphipod population density within macroalgal communities with low predator impact. *Scientia Marina*, **67**: 1–10.
- Dean, T.A., J.L. Bodkin, S.C. Jewett, D.H. Monson and D. Jung, 2000. Changes in sea urchin and kelp following a reduction in sea otter density as a result of the Exxon Valdez oil spill. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **199**: 281–291.
- Duffy, J.E. and M.E. Hay, 2000. Strong impacts of grazing amphipods on the organization of a benthic community. *Ecological Monograph*, **70**: 237–263.
- Estes, J.A., M.T. Tinker, T.M. Williams and D.F. Doak, 1998. Killer whale predation on sea otters linking oceanic and nearshore ecosystems. *Science*, **282**: 473–476.
- Fjøsne K. and Gjøsaeter J., 1996. Dietary composition and the potential of food competition between 0-group cod (*Gadus morhua*L.) and some other fish species in the littoral zone. *ICES Journal of Marine Science*, Volume 53, Issue 5, pp 757–770.
- May, R.T., 1973. *Stability and complexity in model ecosystems*. Princeton Univ. Press, Princeton, NJ.
- McClanahan, T.R. and N.A., Muthiga, 1989. Patterns of predation on a sea urchin, *Echinometra mathaei* (de Blainville), on Kenyan coral reefs. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **126**: 77–94.
- McCurdy, D.G., M.R. Forbes, S.P. Logan, D. Lancaster, S.I. Mautner, 2005. Foraging and impacts by benthic fish on the intertidal amphipod *Corophium volutator*. *Journal of Crustacean Biology*, **25**(4): 558–564.
- Paine, R.T., 1992. Food-web analysis through field measurement of per capita interaction strength. *Nature*, **355**: 73–75.
- Sala, E. and M.H. Graham, 2002. Community-wide distribution of predator-prey interaction strength in kelp forests. *PNAS*, **99**: 3678–3683.
- Sala, E. and M. Zabala, 1996. Fish predation and the structure of the sea urchin *Paracentrotus lividus* populations in the NW Mediterranean. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **140**: 71–81.
- Steneck, R.S., M.H. Grahan, B.J. Bourque, D. Corbett, J.M. Erlandson, J.A. Estes and M.J. Tegner, 2002. Kelp forest ecosystems: biodiversity, stability, resilience and future. *Environmental Conservation*, **29**: 436–459.

---

2007년 1월 15일 원고접수

2007년 3월 15일 수정본 채택

담당편집위원: 최광식