

## 동해안 삼척 호산에 서식하는 등근성게 *Strongylocentrotus nudus*의 분포와 피식 패턴

유재원 · 손용수<sup>1</sup> · 이창근 · 김정수 · 한창훈 · 김창수 · 문영봉<sup>1</sup> · 김동삼<sup>1</sup> · 홍재상<sup>2</sup>

(주)한국연안환경생태연구소  
<sup>1</sup>국립수산과학원 동해수산연구소  
<sup>2</sup>인하대학교 해양학과

### Distribution Pattern of the Sea Urchin *Strongylocentrotus nudus* in Relation to Predation Pressure in Hosan, the East Coast of Korea

JAE-WON YOO\*, YONG-SOO SON<sup>1</sup>, CHANG-GUN LEE, JUNG-SOO KIM, CHANG-HOON HAN,  
CHANG-SOO KIM, YOUNG-BONG MOON<sup>1</sup>, DONG-SAM KIM<sup>1</sup> AND JAE-SANG HONG<sup>1</sup>

Korea Institute of Coastal Ecology, Inc., Department of Oceanography, Inha University, Incheon 402-751, Korea  
<sup>1</sup>East Sea Fisheries Research Institute, National Fisheries Research & Development Institute, Gangneung 210-860, Korea  
<sup>2</sup>Department of Oceanography, Inha University, Incheon 402-751, Korea

강원도 삼척 호산해역에서 해조장의 회복에 결정적 역할을 할 것으로 짐작되는 등근성게(*Strongylocentrotus nudus*) 개체군에 대한 생태학적 연구를 수행하였다. 2002년 6월의 예비연구를 통해 조하대에 3개 실험구(인공해조장, 갯녹음지역, 자연해조장)를 설정하고, 8월, 10월, 12월에 등근성게의 분포와 섭식률, 포식압, 포식자 조합을 추정하였다. 등근성게의 서식 밀도는 자연해조장에서 가장 낮았으나, 각경(test diameter)의 중위수는 가장 큰 것(Kruskal-Wallis test, 8월,  $p < 0.001$ ; 10월,  $p = 0.036$ )으로 나타났다. 등근성게의 먹이 섭식률을 추정하기 위한 실험(enclosure cage experiment)은 자연해조장에서 수행되었으며, 8월과 10월에 각각 160, 13.8 mg seaweed/g sea urchin/day로 추정되었다. 등근성게에 대한 상대적인 포식압의 실험구 간 비교를 위해 수행된 포박실험(tethering experiment)으로부터 자연해조장의 포식압이 다른 두 실험구에 비해 상대적으로 높은 것으로 나타났다. 실험 도중 현장에서 관찰된 포식자는 대부분 무척추동물인 것으로 나타났으며 어류 포식의 증거는 찾을 수 없었다. 죽은 성게나 산 성게를 담은 통발을 이용하여 포식자 조합을 파악하기 위한 실험을 하였다. 등근성게의 포식자는 복족류 *Neptunea arthritica*와 별불가사리 *Asterina pectinifera*, 집게류 *Pagurus cf. samuelis*, 그리고 게류에 속하는 *Atergatis integerrimus* 등이며, 집게류인 *Paguristes barbatus*와 게류인 *Actaea subglobosa*도 가능성이 있는 포식자인 것으로 추정되었다. 실험구 간 대비되는 관찰 결과로부터 (1) 성게의 낮은 서식 밀도와 관련된 요인은 포식압이며, (2) 이는 조사 해역의 백화 현상의 발생, 유지와 낮은 포식압 간 가능한 상관관계를 제시하는 것으로 해석되었다.

An ecological study on a sea urchin population, *Strongylocentrotus nudus*, a key role species in recovery of macroalgal bed, was conducted in Hosan, Samcheok area on the east coast of Korea. Three experimental plots, namely, AMB (artificially-restored macroalgal bed), BG (barren grounds) and NMB (natural macroalgal bed) were established after a pilot survey in June 2002. Distribution and abundance, grazing rates, predation pressure and predator guilds on *S. nudus* were estimated in three plots bimonthly from Aug. to Dec., 2002. Abundance of *S. nudus* was lowest, but median test diameter of the urchin was highest (Kruskal-Wallis test, p-value,  $p < 0.001$  in Aug. and  $p = 0.003$  in Oct.) in NMB. In-situ grazing rate of *S. nudus* estimated by enclosure cage experiment in NMB was about 12 times higher in Aug. (160.0 mg seaweed/g sea urchin/day) than in Oct. (13.8). Predation intensity measured by tethering experiment was higher in NMB. Most of the predators on *S. nudus* were invertebrates and no fish predators were found. Predator guilds identified by the fish trap experiment using live or dead sea urchins included whelks *Neptunea arthritica*, starfish *Asterina pectinifera*, hermit crabs *Pagurus cf. samuelis*, *Paguristes barbatus*, brown shawl crabs *Atergatis integerrimus* and crabs *Actaea subglobosa*. High predation pressure on *S. nudus* in natural macroalgal beds was the likely cause of its low density. Elevated sea urchin density and

\*Corresponding author: jwyoo23@netsgo.com

the consequent lasting deforestation of macroalgae in barren grounds demonstrate the importance of predation pressure on sea urchins.

**Key words:** sea urchin, *Strongylocentrotus nudus*, grazing rate, tethering experiment, predation intensity, cage experiment, predator guild

## 서 론

연안역의 해조장은 먹이의 공급원으로서 또는 포식자에 대한 피난처로서 해양생물 다양성 보존에 필수적인 시스템이다(Estes, 1996; Primack, 2002). 그러나 전 세계적으로 해조장은 지속적으로 소실되고 있으며, 우리나라도 예외가 아니다. 이러한 상황에 2001년부터 동해수산과학원의 주도하에 이루어지고 있는 동해안 삼척 호산해역의 인공 해조장 조성사업은 해양생물의 보존과 수산 자원의 증대에 커다란 기여를 할 것으로 기대되고 있다. 해조장을 인위적으로 조성하는 데는 비단 해조류의 생태에 관한 지식뿐만 아니라 다양한 생태계 구성원 간의 상호관계를 이해하는 것이 필요하다.

성게류는 해조장을 빠른 시간 내에 황폐화된 공간으로 전환시킬 수 있는 잠재력을 지니고 있으며, 서식처 생물의 군집구조, 생물 다양성, 환경의 구조적 복잡성(structural complexity) 등에 큰 영향을 끼친다(Estes and Palmisano, 1974; Hagen, 1995; Estes *et al.*, 1998; Lafferty and Kushner, 2000; Dean *et al.*, 2000; Edmunds and Carpenter, 2001). 예를 들면, Nova Scotia에서는 성게류(*Strongylocentrotus droebachiensis*)의 개체군 크기를 조절하는 포식자 바다가재류(*Homarus americanus*)가 남획에 의해 자원량이 줄어들자 성게류의 대번식이 발생하여 해조장을 파괴하였고, 곧 바다가 황량해졌다. 주된 먹이자원이 격감되면 성게류의 개체군 크기가 자연스럽게 조절될 것으로 예상되었지만, 성게류는 성장과 생식(gonad production)에 투입되는 에너지를 낮춤으로써 큰 개체군 크기를 유지하였다. 성게류의 이러한 변화는 무해조 환경(barren)에 매우 큰 안정성을 부여하여, 무해조 상태가 상당 기간 지속되었다(Clark, 1986). 대형조식동물(macrograzer)에 속하는 성게류는 다양한 범주의 생물을 먹이로 취한다. 예를 들어 *S. droebachiensis*는 해조류, 담치류, 연잎성게, 따개비, 총알고둥, 해면동물, 태형동물, 어류 사체, 성게 등을 먹이로 하며(Himmelman and Steele, 1971; Christopher Pearce at Fisheries and Oceans Canada, pers. comm.), 심지어 미처리된 오수까지 이용한다(Pearse *et al.*, 1970). 먹이 선택 성에서 이들이 갖는 다재다능함은 이들로 하여금 먹이가 부족한 열악한 환경 내에서도 그 개체군 크기를 안정적으로 유지할 수 있게 해주는 매우 중요한 요인인 것으로 생각된다. 한편, 해조장의 복원에 있어 해적생물인 성게류는 동시에 유용한 수산자원이기도 하다. 최근 전 세계 성게알 수요의 90%를 차지하는 일본에서 성게알에 대한 수요가 급증하고 시장 규모가 커지면서 일본으로 성게를 대량 수출하는 캐나다와 미국에서는 사람이 성게 개체군을 조절할 수 있는 강력한 포식자로 떠오르고 있다. 따라서 1990년대 이후로 성게 어업이 급성장한 Nova Scotia와 New Brunswick에서는 해마다 수출 단가가 상승함에 따라, 오히려 성게의 자원량 감소를 우려하는 목소리까지 나오고 있다.

우리나라의 동해안과 같이, 해조장이 백화지역으로 변하고 이러한 환경이 좀처럼 복구되지 못하는 것에는 성게류의 역할이 결정적일 것으로 추정되며, 따라서 이들 개체군에 대한 조절이 없는 자연적 회복은 물론, 인공적인 복원 역시 어려울 것으로 생각된다. 이러한 이유로 외국에서는 성게류의 개체군 크기를 조절하기 위해 포식자를 이용한 천적연구와 환경오염과의 관계 그리고 세균과 기생충에 의한 질병에 대하여 연구가 진행되고 있다(Hagen, 1995; Stien *et al.*, 1998; Lafferty and Kushner, 2000). 국내의 성게 개체군 연구는 대부분 발생과 성장에 관한 연구이며(유 등, 1982; 정과 Natsukari, 1995; 홍과 정, 1998; 강 등, 1999; 이 등, 2003), 조식동물로서 해조장과의 상관관계에 관한 연구(이 등, 1988; 손, 2001) 또는 개체군 크기의 조절요인으로서 피식-포식에 관한 생태학적 연구는 거의 없다. 본 연구에서는 동해 해조장의 대표적 대형 조식동물 가운데 하나인 동근성게 (*Strongylocentrotus nudus*)의 서식처별 분포 및 서식양상을 파악하고, 이들의 개체군 크기를 조절하는 포식자와 포식압에 대하여 현장실험을 통해 고찰하고자 한다.

## 재료 및 방법

강원도 삼척시 호산 앞바다에서 2002년 6월에 수행된 예비조사에서 동근성게가 성게류 밀도의 대부분(1 cm 이상 성체 개체수의 95%)을 차지하는 것으로 나타났으며, 따라서 동근성게를 실험 대상 생물로 정하였다. 동근성게의 서식환경의 차이가 이들의 생태학적 특성에 어떻게 영향을 미치는지 파악하기 위하여 자연해조장(NMB; natural macroalgal bed), 인공해조장(AMB; artificially-restored macroalgal bed), 그리고 갯녹음지역(BG; barren grounds)으로 3개의 실험구를 설정하였다(Fig. 1). 자연해조장의 수심은 약 10 m 정도이며, 우점하는 해조류는 팽생이모자반(*Sargassum horneri*)이었다. 인공해조장은 수심이 약 9 m 정도이며, 다시마(*Laminaria japonica*), 쇠미역(*Costaria costata*), 대황(*Eisenia bicyclis*)등을 이식하여 인공적으로 조성한 곳이다. 갯녹음지역은 해조류가 없으며, 수심은 약 7 m 정도이다.

### 동근성게의 밀도분포 및 서식유형

각 실험구별로 잠수를 통해 18 m 길이의 밧줄로 4×5 m(20 m<sup>2</sup>) 면적의 구획을 만들고, 그 안에서 발견된 동근성게의 개체수와 각 경(test diameter)을 현장에서 측정하였다. 개체 크기에 따른 서식처 선호도가 있는지 파악하기 위해 서식지 형태를 바위 틈새 또는 노출지로 구별하여 크기-빈도를 측정하였다. 각 실험구별로의 바위틈새의 상대적인 양은 비슷하였다. '3개 실험구에 서식하는 동근성게의 중위수 각경은 차이가 없다'는 귀무가설을 검정하기 위하여 비모수 방법인 Kruskal-Wallis test를 수행하였고, 분석 프로그램은 MINITAB을 사용하였다.

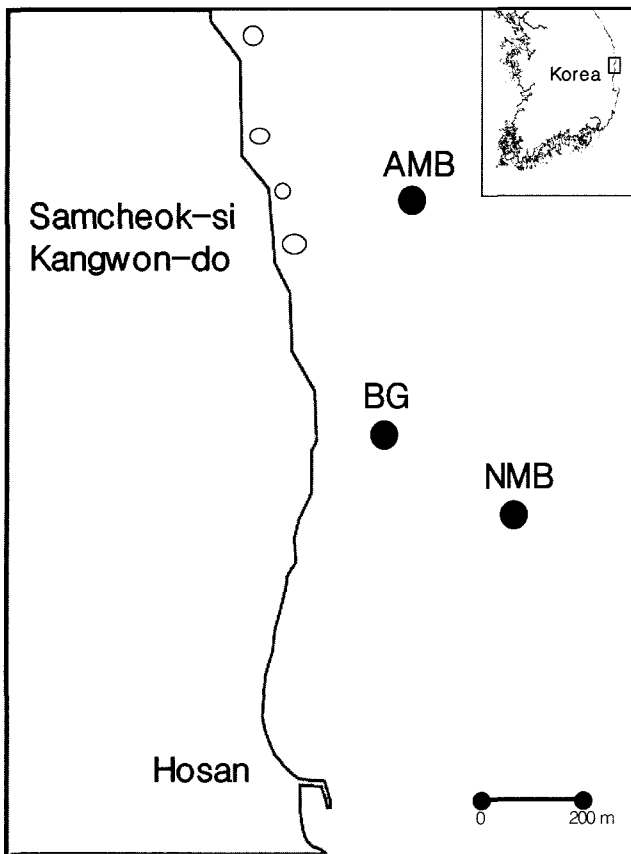


Fig. 1. Location of the experimental plots established from pilot survey in June 2002 (AMB, artificially-restored macroalgal bed; NMB, natural macroalgal bed; BG, barren grounds).

#### 해조류 섭식률 추정

등근성계의 해조류 섭식률은 2002년 8월과 10월에 자연해조장에서 폐쇄형 가두리 실험(enclosure cage experiment)을 통해 추정하였다. 가두리 크기는  $1 \times 1 \times 0.5$  m이고, 그물눈의 크기는 가로·세로 1 cm이며, 8월과 10월에 각각 1개와 2개씩 설치하였다. 등근성계는 무작위적으로 선택되었으며 가두리 내 밀도는 8월에 3개체, 10월에 5개체씩 넣었다. 성계의 체중은 실험 수행 당시 주변에서 측정된 성계의 체중과 각경의 관계식(8월,  $y = 0.8017x^{2.5865}$ ; 10월,  $y = 1.3131x^{2.3166}$ )을 이용하여 추정하였다. 성계의 먹이로는 주변에서 채집한 다시마 엽상체를 사용하였으며, 24시간 경과 후의 다시마 무게 감소량을 섭식률로 계산하였다. 실험이 진행되는 동안 엽상체의 자연적인 분해나 예상치 못한 소형 조식동물에 의한 간섭효과를 보정하기 위하여 다시마만 넣은 대조구 가두리를 설치하였다. 실험 당시의 저층수온은 2002년 8월에  $19.2^\circ\text{C}$ , 10월에  $19.3^\circ\text{C}$ 였다.

#### 등근성계에 대한 상대적 포식압(relative predation intensity, PI)

포박실험(tethering experiment)을 통해 등근성계의 상대 포식압을 추정하였다. 포박법은 일종의 표지기법으로 McClanahan and Muthiga(1989)에 소개된 바를 따랐다. 등근성계의 입과 항문을 바늘과 낚시줄(길이 2 m, 굵기 0.45 mm)을 이용하여 관통하게 꿰고, 이렇게 마련된 10개체를 21 m의 밧줄에 2 m 간격으로 묶어 1개

의 포박 세트를 만들었다. 2002년 8월에는 자연해조장, 인공해조장, 갯녹음지역에 각 1 세트씩, 10월에는 2 세트씩 설치하였다. 실험은 8월에는 48시간 동안, 10월에는 72시간 동안 진행하였다. 등근성계의 사망여부는 매 24시간 마다 잠수를 통해 관찰하였으며, 이 과정을 통해 등근성계에 붙어있는 무척추동물 포식자들의 조성을 정성적으로 파악할 수 있었다. 불가사리류에 의한 사망의 경우 비록 현장에서 포식자가 관찰되지 않았더라도 성계의 사체 형태만으로도 판별할 수 있었다. 기타 무척추동물의 경우 관찰 당시 사체에 접촉한 것을 포식자로 판단하였으며 따라서 성계에 대한 최초의 포식을 행한 동물과 추정된 포식자는 다를 수도 있음을 가정하였다. 포식압 계산을 위해 우선 등근성계의 평균 생존일(일 단위, d)을 추정하고, 총 실험일(2d 또는 3d)에서 평균 생존일을 뺀 값을 포식율(predation rate)로 간주하였다. 상대적 포식압(relative predation intensity, PI)은 포식율을 실험일 수로 나눈 값이다.

#### 등근성계 포식자 추정

등근성계를 통발 미끼로 사용하여 포식자 조합을 파악하였다. 실험은 2002년 8월과 10월엔 자연해조장에서, 12월엔 갯녹음지역에서 24시간 동안 이루어졌다. 각 실험마다 등근성계 2개체씩 넣은 6개의 통발을 사용하였는데, 3개의 통발엔 온전히 살아있는 개체를, 또 다른 3개의 통발에는 골판을 파손시켜 죽인 개체들을 할당하였다. 살아있는 개체와 죽은 개체를 구분한 이유는 포식자와 사해식자(scavenger)를 구분하기 위함이었다.

## 결 과

#### 등근성계의 서식처별 밀도분포

Fig. 2는 3개 실험구에서 추정된  $20 \text{ m}^2$  내 등근성계의 서식 밀

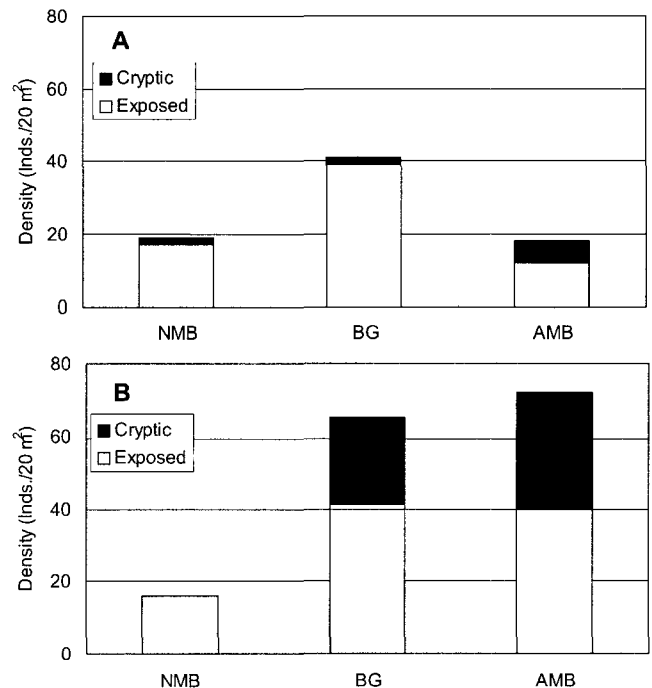


Fig. 2. Density of sea urchin, *S. nudus* in the experimental plots (NMB, BG and AMB) in Aug. (a), and Oct., 2002 (b).

Test diameter (cm) distribution

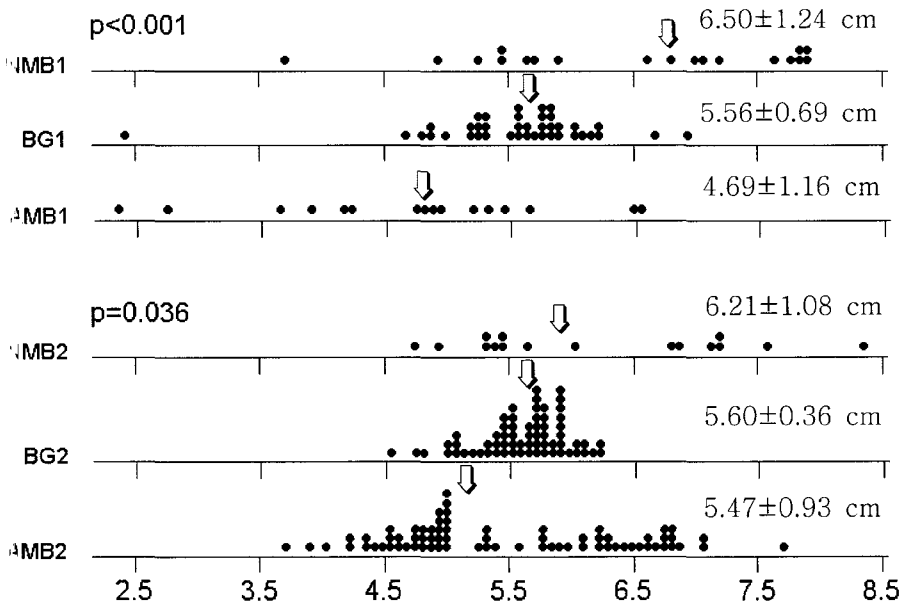


Fig. 3. Size frequency distribution of test diameter (cm) of sea urchin, *S. nudus* in the experimental plots, AMB1-NMB1 (Aug., 2002) and AMB2-NMB2 (Oct., 2002). Differences of medians (↓) of the diameters among the plots were tested by Kruskal-Wallis test.

이다. 대체로 2002년 8월보다는 10월의 밀도가 높은 것으로 나타났다. 8월에는 갯녹음지역에서 가장 높은 밀도(41 개체/20 m<sup>2</sup>)를 보였다. 10월에는 인공해조장에서 가장 높은 밀도(72개체/20 m<sup>2</sup>)가 측정되었고 갯녹음지역에서도 비교적 높은 수준의 밀도(65개체/20 m<sup>2</sup>)가 관찰되었다. 자연해조장에서는 8월과 10월 모두 20 개체 미만의 밀도를 나타내었다. 8월에 관찰된 인공해조장에서의 낮은 밀도는 해조장 조성을 위한 사전작업으로 잠수부가 주변의 연식동물을 제거한 영향인 것으로 추정되었다.

3개 실험구에 서식하는 등근성게 각경의 분포를 Fig. 3에 나타내었다. 점들의 산포 패턴을 볼 때 분산의 범위는 대체로 커다란 차이가 없는 것으로 나타났으며, 자연해조장에서 상대적으로 높은 분포 범위를 가졌다. 2002년 8월에 인공해조장-갯녹음지역-자연해조장에서 성게의 평균 각경과 편차는 각각 4.69±1.16, 5.56±0.69, 6.50±1.24 cm였다(Kruskal-Wallis 검정, p<0.001). 2002년 10월엔 인공해조장-갯녹음지역-자연해조장에서의 평균 각경이 각각 5.47±0.93, 5.60±0.36, 6.21±1.08 cm였다(p=0.036).

노출서식처 vs. 은닉서식처

2002년 8월 조사시 다른 곳에 비해 인공해조장에서 상대적으로 많은 개체들이 바위틈에 은닉하고 있었다. 이러한 경향은 10월에도 지속되었으며, 갯녹음지역에서는 8월에 비해 10월에 숨은 개체들의 비율이 증가하는 것으로 나타났다. 자연해조장에서는 전체 서식 밀도가 낮은 수준이며 숨은 개체들의 비율 또한 낮은 것으로 나타났다(Fig. 2 and 4).

등근성게의 크기에 따라 서식처 유형(노출 또는 은닉서식처)에 대한 선호도가 있는지 파악하기 위하여 3개 실험구의 서식처 유형별 등근성게의 각경 분포를 나타내었다(Fig. 5). 8월의 경우 갯녹음지역을 제외한 나머지 2개 실험구 모두 바위틈에 서식하는 개체들의 크기가 노출 서식처의 것에 비해 작은 경향을 나타냈다. 10월의 경우도 비록 바위틈에 은닉하는 성게들의 평균 크기가 작

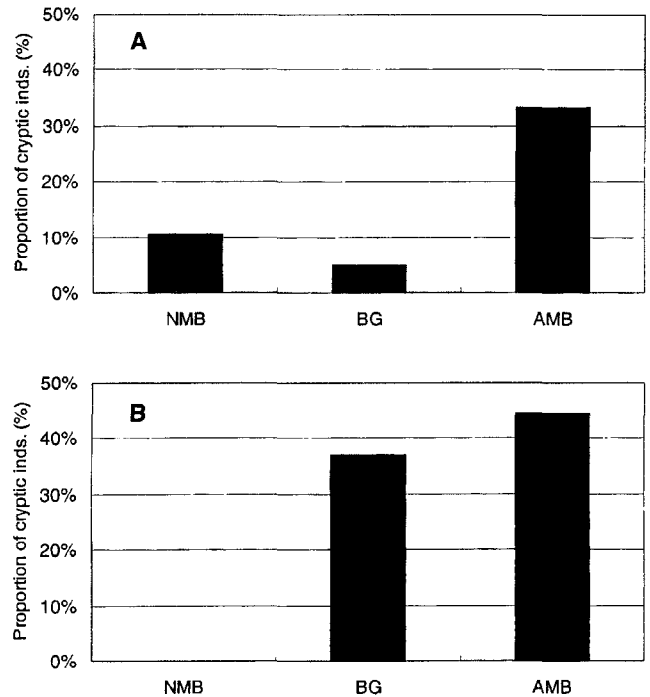


Fig. 4. Comparisons of the proportion of sea urchin individuals utilizing crevices as refuges among the experimental plots in Aug. (a) and Oct., 2002 (b).

았으나 그 차이는 뚜렷하지 않았다.

해조류 섭식률

2002년 8월에 자연해조장에서 수행된 등근성게의 해조류 섭식률 실험결과, 대조구(성게가 제거된 가두리)에서는 24시간 동안 다시마의 엽상체가 5.3% 감소하였고, 실험구(성게가 포함된 가두리)

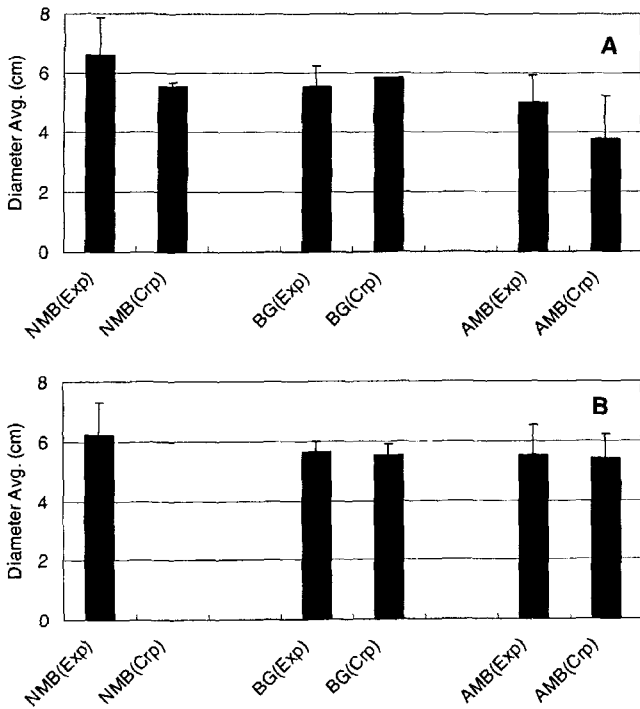


Fig. 5. Comparisons of the distribution of test diameters among the experimental plots and habitat types (exposed and cryptic) in Aug. (a) and Oct., 2002 (b).

에서는 13.3%가 감소한 것으로 나타났다. 실험에 사용된 성체 3개체는 무작위적으로 채집된 것이며, 각경은 각각 5.32, 6.80, 8.51 cm이며, 이들의 추정 습중량 합은 378.2 gWWt(wet weight in gram)이었다. 대조구로부터 보정된 섭식률은 160 mg seaweed/g sea urchin/day이다(Fig. 6a). 2002년 10월엔 실험구에 가두리가 1개 추가 되었다. 24시간 동안 대조구에서는 다시마의 염상체가 4.5% 감소하였고, 2개 실험구에서는 각각 7.3%와 4.8%가 감소하였다. 두 개의 실험구에 사용된 성체 5개체의 각경은 각각 5.8-8.0, 5.1-8.2 cm, 이들의 추정 습중량 합은 각각 503.9, 509.3 gWWt이었다. 대조구로부터 보정된 등근성계의 섭식률은 각각 25.3과 2.4 mg seaweed/g sea urchin/day(평균 13.8 mg seaweed/g sea urchin/day)이었다(Fig. 6b and c).

**등근성계에 대한 포식압**

2002년 8월과 10월의 포식실험에서 추정된 3개 실험구의 등근성계에 대한 상대 포식압을 Fig. 7에 나타냈다. 8월의 경우 자연해조장에서의 상대포식압은 0.20 이었으며, 다른 실험구는 이것의 25% 수준(각각 0.05)이었다. 10월의 경우엔 8월에 비해 포식압 추정치가 전반적으로 낮아 자연해조장에서 0.083, 인공해조장에서 0.067 그리고 갯녹음지역에서 0.033으로 추정되었다.

포식실험 중 현장에서 관찰된 포식자의 조성을 살펴보면 2002년 8월의 실험에서는 사망한 개체의 57%가 불가사리류 *Asterina pectinifera*에 의한 것으로 나타났으며, 29%가 집게류 *Paguristes barbatus*, 14%가 복족류 *Neptunea arthritica*에 의한 것으로 나타났다. 2002년 10월의 실험에서는 사망한 개체의 17%가 복족류 *Neptunea arthritica*에 의한 것으로 나타났으며, 83%는 원인불명으로 유실되었다.

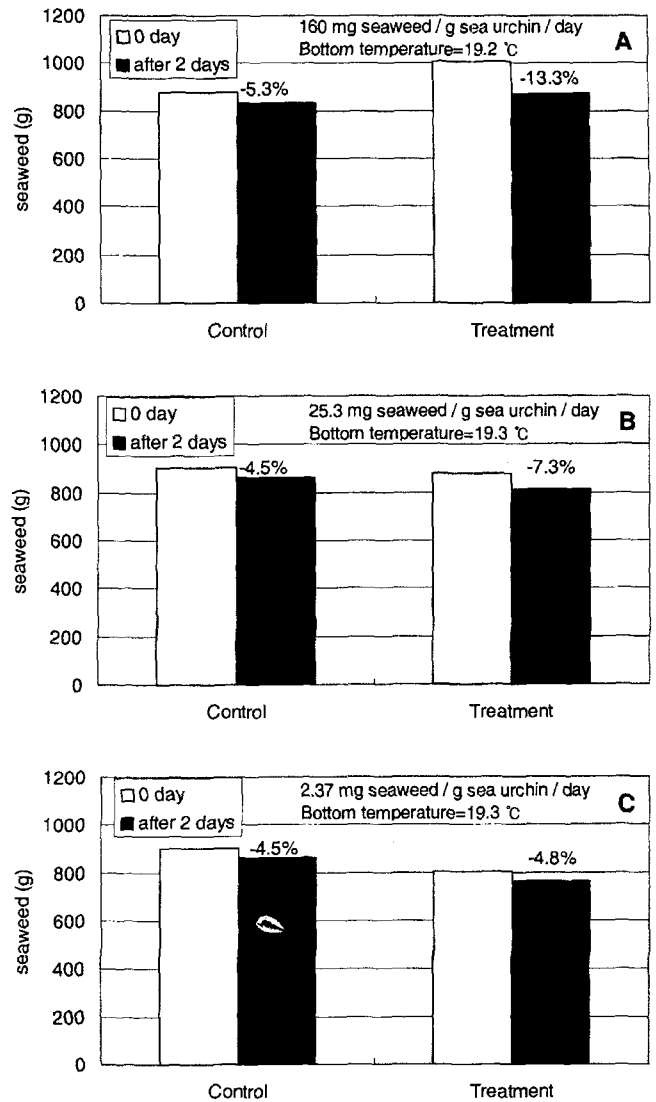


Fig. 6. Grazing rate of *S. nudus* estimated from enclosure cage experiment in Aug. (a) and Oct., 2002 (b and c).

**포식자의 조성(통발실험)**

등근성계의 포식자 조합을 파악하기 위한 통발실험에서 총 6종의 무척추동물과 1종의 어류가 포획되었다. 2002년 8월 자연해조장에서 24시간 동안 통발로 채집한 포식자는 4종의 무척추동물이었다(Fig. 8a). 죽은 성계를 넣은 통발에서는 집게류 *Paguristes barbatus*와 게류 *Actaea subglobosa*가 포획되었다. 살아있는 성계를 넣은 통발에서는 집게류 *Paguristes barbatus*, *Pagurus cf. samuelis*, 게류 *A. subglobosa* 그리고 복족류 *Neptunea arthritica*가 포획되었다. 2002년 10월, 자연해조장에서 24시간 뒤에 회수된 통발에서도 4종의 무척추동물이 관찰되었으나 종 조성은 다소 차이가 있었다(Fig. 8b). 죽은 성계 쪽에서는 복족류 *N. arthritica*와 게류 *A. subglobosa*와 꽃게류인 *Thalamita sima*가 출현하였고, 살아있는 성계 쪽에서는 게류 *Atergatis integerrimus*가 채집되었다. 2002년 12월, 갯녹음지역에서 24시간 뒤에 회수된 통발에선 2종의 무척추동물과 1종의 어류가 관찰되었다(Fig. 8c). 3종 모두 죽은 성

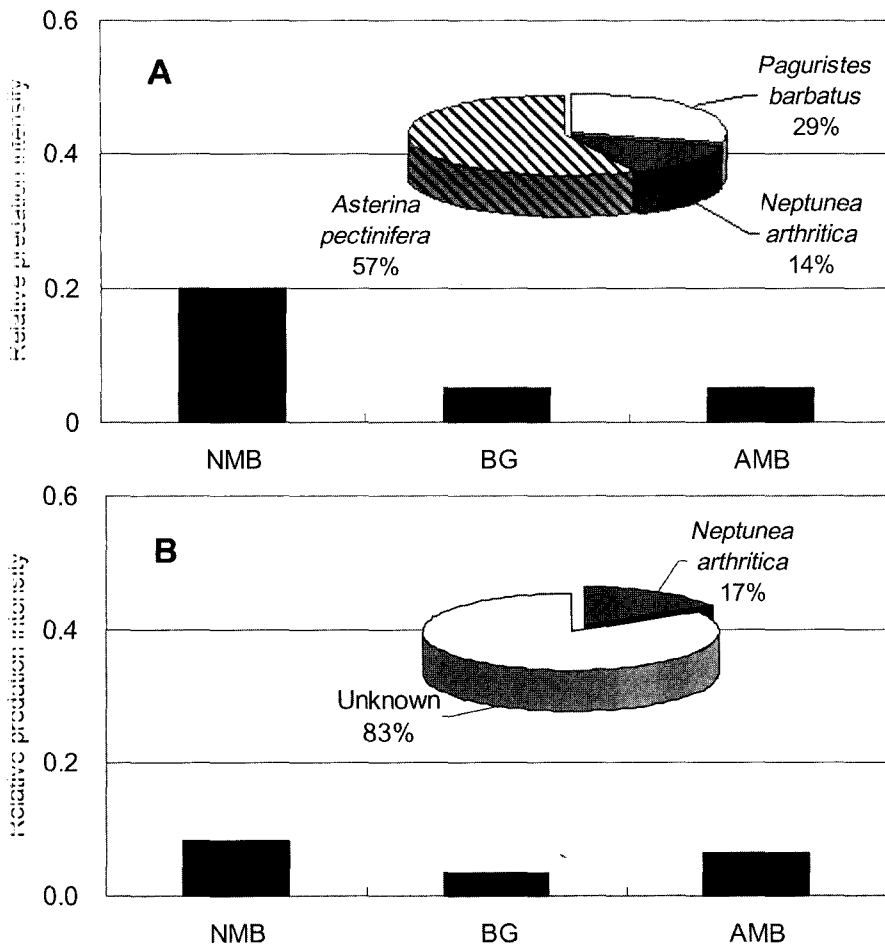


Fig. 7. Comparisons of relative predation intensity on *S. nudus* among the experimental plots in Aug. (a) and Oct., 2002 (b). Pie diagram shows predators observed during the experiment.

쪽에서만 나타났는데, 집게류 *P. barbatus*와 복족류 *N. arthritica* 그리고 어류인 노래미(*Hexagrammos agrammus*)가 채집되었다.

### 고찰

대부분의 현장실험이 그렇듯, 본 연구도 다양한 가정과 단순 논리화 과정을 포함하고 있다. 그러한 예 가운데 하나가 실험구의 밀도 설정이다. 3개 실험구는 대체로 7~10 m 수심에 설정되었으므로, 공간적 스케일은 수백 미터 규모이다. 이는 서식처의 기질차(자연해조, 인공해조, 갯녹음지역) 외에는 동일한 물리적 환경 조건을 가진다고 가정한 것이다. 본 조사와 동시에 수행된 수온, 염분, 영양염, Chl-*a* 농도 측정치의 세 실험구 간 차이는 거의 없는 것으로 나타났다(동해수산연구소, 2002).

#### 등근성게의 밀도 및 서식유형

본 연구에서 파악된 등근성게의 전체 평균 밀도는 다소 낮은 수준인 2개체/m<sup>2</sup>였다. 이는 손(1999)이 1993년 5월에 추정된 서식 밀도(약 10~15개체/m<sup>2</sup>)의 약 15~20% 수준이다. Sala and Zabala(1996)의 연구에서는 암반 기질에 서식하는 성게류 *Paracentrotus lividus*가 10 m<sup>2</sup>에서 30~160 개체의 분포 범위를 나타내어, 손(1999)이 추정된 밀도의 수준과 유사했다. 그러나 *P. lividus*는 각 기질의 분포가 1~7 cm 범위이며 대체로 40% 이상의 개체가 1~2 cm

범위의 작은 크기인 것으로 볼 때, 각경이 4 cm 이상의 개체만 주로 관찰되는 동해연안의 등근성게와는 개체군 패턴에 뚜렷한 차이가 있는 것으로 보인다. 실험 당시 등근성게의 밀도는 1 m<sup>2</sup> 채집 단위로 추정하면 경우에 따라 10~20개체의 밀도가 기록될 수도 있었겠지만, 잠수관찰 결과 등근성게의 분포가 팻취분포(patchy distribution)에 가까워 채집면적을 20 m<sup>2</sup>로 크게 설정하였다. 본 연구의 추정치는 등근성게 개체군 크기의 계절간 또는 연간 밀도의 차이나 채집기 또는 채집 면적의 차이에 따른 효과가 반영된 것으로 보이며 과소평가된 수치는 아닌 것으로 판단된다. 인공해조장과 갯녹음지역의 성게밀도가 8월에 비해 10월에 크게 증가한 이 유가 시간에 따른 개체군 크기의 증가인지 패치분포에 의한 단순 변이인지를 명확히 규명하는 것은 본 논문의 연구범위를 벗어난다. 그러나 8월의 인공해조장에서 파악된 낮은 서식밀도는 해조장 조성을 위한 사전작업으로 잠수부가 주변의 조식동물을 제거한 영향으로 보이며, 10월까지 많은 개체들이 새롭게 이입된 것으로 추정된다.

본 연구에서 관찰된 등근성게의 크기-빈도 분포는 최빈수(mode)가 나타나는 경우 단봉형(unimodal) 분포패턴을 보이고 있다. 케냐의 산호초에 서식하는 *Echinometra mathaei* 역시 주어진 서식처에서는 단봉형 패턴의 분포를 나타내었다(McClanahan and Muthiga, 1989). 앞서 인용한 Sala and Zabala(1996)의 연구에서 *P. lividus*의 크기-빈도 분포는 이봉형(bimodal) 또는 음의 지수형

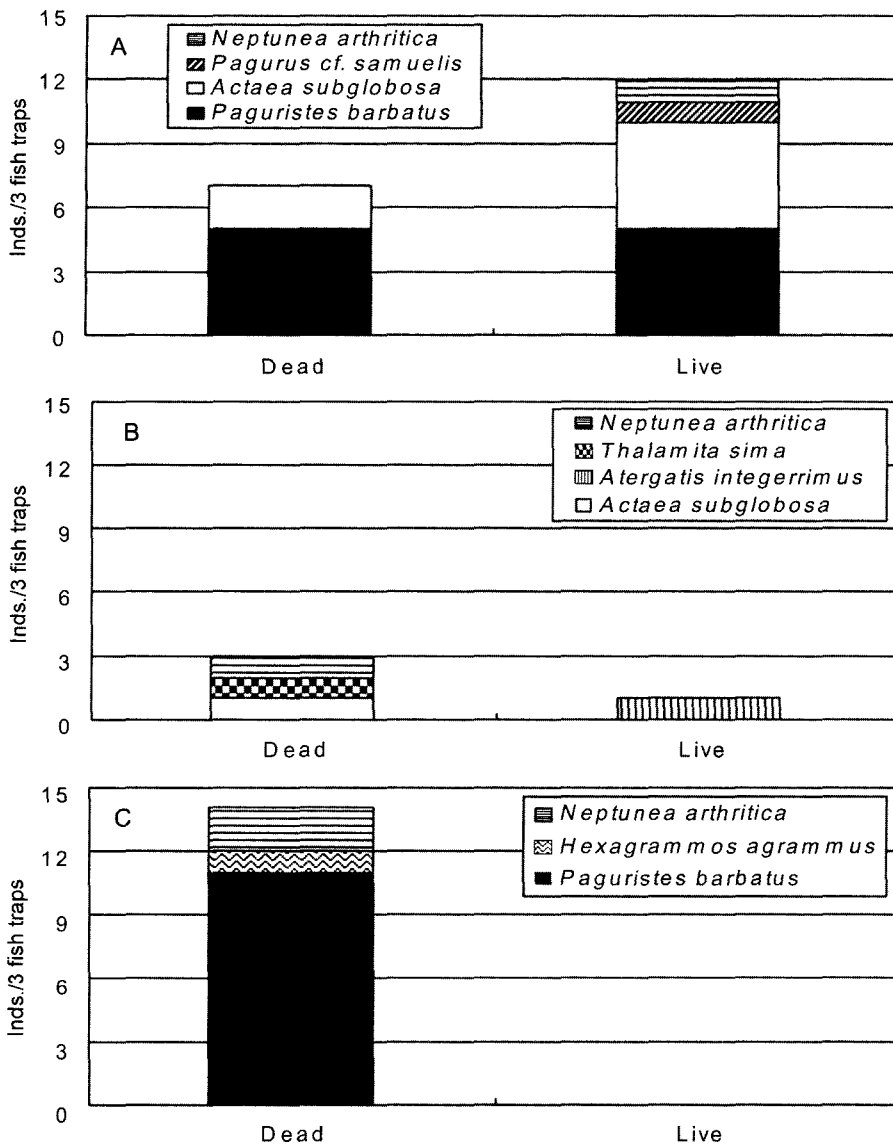


Fig. 8. Predators of *S. nudus* captured in fish traps in Aug. (a), Oct. (b) and Dec., 2002 (c).

(negative exponential pattern)으로 흔치 않은 유형의 예에 해당한다. 한편 손(1999)의 연구에선 강원도 양양에서 둥근성게, 새치성게 (*S. intermedius*), 말뚝성게(*Hemicentrotus pulcherrimus*)의 평균 각경이 조간대부터 수심 15 m까지 선형적으로 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 어린 개체와 다년생 성체가 공서하는 양상보다는 성장에 따라 성게가 깊은 곳으로 이동하는 것을 나타낸다. 본 연구의 자연해조장에서 상대적으로 크기가 큰 성게들이 출현한 것은 다른 곳에 비해 수심이 깊은 영향으로 볼 수도 있다.

둥근성게가 은닉처로서 바위틈새를 이용하는 비율은 실험구와 조사 시기 마다 다소 차이가 있었으나 성게의 크기를 고려할 때, 상대적으로 큰 개체의 성게들이 많았던 자연해조장에서 은닉처 이용 비율이 낮았고, 작은 개체가 많았던 인공해조장에서 이용 비율이 높았다. 또한 대체로 노출된 서식처 보다는 바위 틈새에 서식하는 성게의 각경이 짧은 경향을 보였다. 일반적으로 작은 성게의 높은 은닉처 이용 빈도는 포식에 대한 반응인 것으로 해석된다 (Ogden and Carpenter, 1987; Sala and Zabala, 1996).

### 해조류 섭식률

둥근성게의 해조류 섭식률 실험은 모래 기질에서 수행되었다. 물론 2002년 8월에 가두리 내부의 벽면에 붙어 활발하게 섭식하는 장면이 관찰되긴 하였으나 암반 기질에서 수행된 것과는 다를 수 있으며, 가두리 실험 자체의 인위적 오류(artefact)를 내포할 가능성도 있다. 8월에 측정된 해조류 섭식률은 160 mg seaweed/g sea urchin/day인데 반해, 10월엔 8월 추정치의 8.7%에 해당하는 13.8 mg seaweed/g sea urchin/day에 불과했다. 8월의 섭식률은 손 (2001)이 3종의 성게류 (*H. pulcherrimus*, *S. nudus*, *S. intermedius*)로 추정된 다시마 섭식률인 83~184 mg(3월)과 72~102 mg seaweed/g sea urchin/day(9월)와 비슷한 범위에 속한다. 섭식률은 수온에 의존적일 것으로 예상할 수 있으나 현장에서 관측된 8월과 10월의 저층 수온은 커다란 차이가 없었다. 수온과 무관하게 낮은 10월의 섭식률은 실험 기간 동안 강풍에 의해 발생한 파랑의 영향인 것으로 추정된다(8월과 10월의 4일 실험기간 기상청의 일평균 풍속은 각각 1.7~2.9, 3.3~4.4 m/sec). 당시의 잠수 관찰에 의하면 파랑에 따라 가

우리가 심하게 요동하여 둥근성게의 섭식활동이 원활치 못하였다. 따라서 메조코즘(mesocosm)이나 수조를 이용하여 측정된 섭식률이 자연의 선호도나 수온에 따른 섭식률의 변화와 같은 상대적 측정치에 관한 것이 아니라면 편의가 높을 수 있을 것으로 생각된다.

### 둥근성게에 대한 포식압

포박실험의 적절성은 대상 동물군의 이동성에 크게 영향을 받는다. 포식자의 이동성은 높을수록, 피식 대상 동물군의 이동성은 낮을수록 왜곡 가능성이 낮을 것으로 예측할 수 있다(Aronson *et al.*, 2001). 포식자의 이동성은 피식자의 이동성에 따라 상대적인 것이므로 후자가 보다 중요한 것으로 생각된다. 어류나 게류 또는 새우류에 비해 이동성이 작은 둥근성게는 포박실험에 적절한 생물군인 것으로 간주할 수 있다. 그럼에도 불구하고 본 연구처럼 포박실험을 통한 포식강도 측정은 최대 포식압을 추정한 것으로 간주되며, 이는 성게들이 포식자로부터 도피할 수 있는 행동반경이 2 m로 제한되었기 때문이다. 따라서 추정치를 포식압의 절대값으로서 이해하기 보다는 잠재적 포식압(predation potential)으로서 3개 실험구간을 비교하는 것에는 문제가 없을 것으로 판단된다.

자연해조장에서 포식압이 다른 2개 실험구, 특히 갯녹음지역에 비해 상대적으로 높은 것으로 나타났는데 이러한 차이는 포식자의 풍부한 정도의 차이 때문인 듯하다. McClanahan and Muthiga (1989)와 Sala and Zabala(1996)는 어류 보호 구역과 어획 지역 간을 비교하였으며, Estes *et al.*(1998)은 통계적 방법을 이용한 추정과 포식자의 접근이 자연적으로 제한되는 조건 간을 비교함으로써 포식자의 풍부한 정도를 범주화하거나 그 영향을 평가(높은 포식압 하에서 개체군 구조와 습성의 차이 보고)하였다. 본 연구의 관심사 가운데 하나가 해조장과 성게의 상호 작용이었고 포식압의 차이보다는 해조류의 서식 여부가 실험구 설정의 중요한 기준이었으나 해조류의 분포나 이와 관련된 정량적 변수의 측정 그리고 기능에 대한 실험이 수행되지 않았으므로 '왜 실험구에 따른 포식압의 차이가 존재하는가'라는 의문에 대한 답이 될 수 있는 구체적인 결과를 제시할 수 없었다. 다만 조사 해역에서 인공적인 해조장의 조성과 자연 해조장의 존재가 어류나 저서동물의 생물 다양성을 증가시키거나 보유하는 효과는 매우 뛰어난 것으로 보인다. 2002년 6월, 8월 그리고 12월에 세 실험구에서 행해진 어류 군집의 관찰 결과, 노래미류(*Hexagrammos* sp.), 용치놀래기(*Halchoeres poecilopterus*), 망상어(*Ditrema memmincki*), 성대(*Chelidonichthys spinosus*) 등 어류 4종의 풍부도는 자연해조장과 인공해조장에서 높은 것으로 나타났다(동해수산연구소, 2002). 암반 기질 대형저서동물군집의 서식 밀도(2002년 6, 8, 10월)는 NMB>AMB>BG, 모래 퇴적물 군집은 AMB>NMB>BG인 것으로 나타났다. 모래 퇴적물 군집의 생체량은 NMB>AMB>BG였으며, 다양도는 두 가지 기질에서 모두 AMB>NMB>BG인 것으로 나타났다. 둥근성게의 무척추동물 포식자 조합의 풍부한 정도 역시 이러한 경향을 나타내었을 것으로 짐작된다.

### 포식자

둥근성게의 포식자 조합(predator guild)을 추정함에 있어 포박 실험과 통발실험이 내포하고 있는 몇 가지 제약을 언급할 필요가 있다. 포박실험은 성게의 입과 항문 사이를 낚시줄로 꿰기 때문에

성게의 인위적 사망을 초래할 수도 있을 것으로 예상되나, McClanahan and Muthiga(1989)의 연구에서 낚시줄로 표시하는 것과 상처로 인해 밖으로 새어나오는 체강액(coelomic fluid) 등이 성게의 사망률에 기여하는 효과는 없는 것으로 나타났다. 그러나 유출된 체강액은 일종의 화학적신호로 작용하여 포식자와 사해식자의 보다 쉬운 접근을 초래했을 것이다. 잠수관찰의 제한요인은 관찰시간이 길지 못하고, 잠수 시점에 성게에 붙어있는 포식자만을 파악할 수 있으며, 이동성이 큰 어류의 조성은 파악하기 어렵다는 점이다. 비록 실험의 제약으로 인해 어류 포식자가 과소평가 되었을 가능성이 있으나, 본 연구에서는 둥근성게의 포식자로서 불가사리류, 복족류 그리고 갑각류와 같은 무척추동물의 중요성이 크게 부각되었다. 통발실험의 제한요인은 통발의 입구를 통과할 수 있는 생물상만 파악된다는 점과 식성에 따라 포식자와 사해식자의 구분이 어렵다는 점이다. 본 연구에서는 살아있는 성게와 죽은 성게를 따로 사용하여 포식자와 사해식자를 구별하는 시도를 하였다. 그러나 양쪽에서 공통적으로 채집된 집게 *Paguristes barbatus*의 경우 포식자와 사해식자의 특성을 모두 가진 것인지, 다른 포식자의 섭식활동 이후에 사해식자로서 유입된 것인지는 불분명하다. 실제로 해양환경에서 포식자와 사해식자를 구분하는 일은 매우 어려운 것으로 알려져 있다. 해양 무척추동물 중 진정한 사해식자(obligatory scavenger)로 구분되는 생물은 없는 것으로 보이며, 많은 경우 포식성 생물은 동시에 선택적 사해식자(facultative scavenger)인 것으로 보고되고 있다(Britton and Morton, 1994).

2002년 12월에 갯녹음지역에서 수행된 통발 실험의 결과는 갯녹음지역에 특별히 포식자가 많았기 보다는, 별도의 증명이 필요하긴 하나 통발 내에 담긴 성게와 포식자가 조우할 수 있는 확률이 죽은 개체와 살아있는 개체에 따라 다르거나, 살아있는 성게가 들어있는 통발이라 하더라도 해저면에 놓인 위치에 따라 결과가 달라질 가능성이 있기 때문인 것으로 생각할 수 있다. 한편 2002년 10월의 포박실험으로부터 사라진 개체 중 83%의 사망 원인을 밝혀낼 수 없었다. 앞서 언급했듯이 포박실험에 의한 체강액 유출이 사인일 경우, 성게 몸체는 남아있어야 하나 흔적이 전혀 없었다. 또한 어류에 의한 포식이라고 단정지을 수 없는 이유는 동일 연구 프로그램 가운데 하나인 어류 위 내용물 분석에서 자망으로 포획된 10종 22개체의 어류 중 둥근성게의 관족이나 골판 조각이 관찰된 사례가 전혀 없었기 때문이다(동해수산연구소, 2002). 실험 개시 24시간 뒤에 수심이 가장 깊은 자연해조장과 중간 수심의 인공해조장에서 1개체 씩 사라졌으며, 72시간 뒤 인공해조장과 수심이 가장 얇은 갯녹음지역에서 각각 1개체와 2개체가 사라졌다. 앞서 언급한 바와 같이 10월 실험 당시 발생한 높은 파랑은 성게의 높은 은닉처 이용 빈도, 낮은 섭식률과 포식압의 요인은 될 수 있으나 수심이 가장 얇은 갯녹음지역에서 가장 많은 개체가 사라지지 않은 이상 파랑의 요인과 연결짓는 것은 무리이다.

동일한 방식의 포박실험을 수행한 외국의 사례에선 성게포식의 90~100%가 어류에 의한 것이며, 불가사리류나 복족류에 의한 것은 각각 5% 이하인 것으로 나타났다(McClanahan and Muthiga, 1989; Sala and Zabala, 1996). Randall(1967)은 위 내용물에서 성게류의 흔적이 5% 이상 관찰된 15 종류의 어류 목록을 제시하였다. 그 가운데 가장 중요한 포식자는 쥐치류(queen triggerfish) *Balistes vetula*이었으며, 개체의 73%에서 성게류가 관찰되었다.



Randall(1967)이 제시한 무척추동물 포식자에는 계란고둥류(Cassidae)가 있는데, 성계류를 가장 선호하지는 않을지라도 중요한 포식자로 언급하였다. 본 연구지역에서는 계란고둥류를 대체하는 북쪽류로서 *Neptunea arthritica*가 관찰되었다. 이종은 자연해조장에서 높은 서식 밀도를 나타낸 것으로 추정되나 실험 초기에 대부분의 무척추동물 포식자와 마찬가지로 그 중요성이 낮게 평가되어 밀도의 추정 작업이 행해지지 않았다. 현장에서의 관찰 결과로도 둥근성게는 이들이 선호하는 먹이는 아닌 것으로 판단되며, 많은 경우에 우렁쟁이 *Halocynthia roretzi*를 포식하는 장면이 목격되었다.

### 포식압-성계 밀도-해조장의 상관관계

포식압의 실험구 간 차이에 대한 반응으로 볼 수 있는 각 실험구의 성계 밀도는 해조장 조성을 위하여 조식성 동물을 집중적으로 제거한 2002년 8월 인공해조장의 낮은 밀도를 제외하면 포식압의 패턴과 잘 부합된다. 본 실험에서 관찰된 포식압-성계의 밀도-해조장 상태의 관계는 다음의 두 가지 가능한 해석을 제시한다. 첫째, 백화 현상의 발생과 지속은 성계의 높은 서식 밀도와 이를 유지시키는 낮은 포식압에 기인한다는 점이다. 둘째, 포식자-성계-해조장 관계가 하향식 조절(top-down control)이나 상향식 조절(bottom-up control)이냐의 물음에서 전자가 강조되는 결과로 해석될 수 있다. 해조장의 상태변화(phase shift)를 조절하는 성계의 중추적 역할은 다양한 문헌에 언급되어 있다(Estes and Palmisano, 1974; Hagen, 1995; Estes et al., 1998; Lafferty and Kushner, 2000; Dean et al., 2001; Edmunds and Carpenter, 2001). 성계와 해조장 간의 직접적 관계를 가늠할 수 있는 현상은 본 연구 지역에서도 관찰된 바 있다. 동해수산과학원의 2001년 해조장 복원사업 당시, 둥근성계와 조식성 북쪽류를 제거하지 않고 해조를 이식한 결과 1개월 만에 전량 유실되었으며, 성공적 복원은 이들의 제거 후에 가능했다(손, 1999).

본 연구 결과는 해조장 시스템에서 성계에 대한 포식압이 중요하다는 다른 연구사례들과 동일한 선상에 있으며, 둥근성계 개체군 조절에 있어 무척추동물에 의한 포식의 중요성을 포착한 데에 가치를 둘 수 있다. 3개 실험구의 서로 대비되는 외관은 강력한 상호 관계를 바탕으로 성계류를 조절하여 백화 지역의 확산을 저지하고 연안역의 해조장을 회복시키는 것이 가능함을 나타낸다. 앞으로 좀 더 다양한 서식처의 성계류를 대상으로 연구를 확대하여 성계와 해조장 시스템의 조절 인자로서의 포식압과 이외의 요인들(기생, 질병, 부영양화 그리고 기온 변화)을 평가하고 그 연구 결과와 지식을 축적하는 작업이 필요하다.

## 사 사

본 연구는 국립수산물과학원 동해수산연구소의 동해안 생산력 향상을 위한 해조장 조성(세부 과제명: 해조장 동물상 변화 및 조식동물 연구) 조사·연구 용역의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 강도형, 최광식, 정상철, 1999. 제주도 함덕 연안에 서식하는 구멍연일성계, *Astriclypeus manni*(VERRIL 1867)의 생태학적 특성에 관한 연구. 한국수산학회지, **32**: 345-352.
- 동해수산연구소, 2002. 해조장 동물상 변화 및 조식동물 연구(최종 보고서). 163 pp.
- 손용수, 1999. 동해안 성계 3종, *Strongylocentrotus intermedius*, *Strongylocentrotus nudus* and *Hemicentrotus pulcherrimus*의 생태적 특성. 국립수산진흥원연구보고, **57**: 55-66.
- 손용수, 2001. 동해안 해조장 조성과 조식동물의 특성. 동해안 생산력 향상을 위한 해조장 조성 워크숍 간행물, 국립수산진흥원 동해수산연구소, pp. 1-9.
- 유성규, 허성범, 유호영, 1982. 보라성계의 산란과 성장. 한국수산학회지, **15**: 345-358.
- 이기완, 소철현, 정상철, 1998. 제주연안의 해조상과 성계의 섭식 효과. 한국양식학회지, **11**: 401-419.
- 이재성, 이정용, 김두호, 구학동, 정세한, 2003. 북쪽말뚝성계, *Strongylocentrotus intermedius*의 산란유발 및 초기성장. 한국양식학회지, **16**: 129-134.
- 정상철, Y. Natsukari, 1995. 분홍성계의 지역별 개체군 성장에 관한 연구. 한국수산학회지, **28**: 421-427.
- 홍성완, 정상철, 1998. 보라성계(*Anthocidaris crassispina*)의 연령과 성장. 한국수산학회지, **31**: 302-308.
- Aronson, R.B., Heck Jr., K.L. and J.F. Valentine, 2001. Measuring predation with tethering experiments. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **214**: 311-312.
- Britton, J.C. and B. Morton, 1994. Marine carrion and scavengers. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, **32**: 369-434.
- Clark, R.B., 1986. Marine pollution. Oxford University Press, 214 pp.
- 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.
- Edmunds, P.J. and R.C. Carpenter, 2001. Recovery of *Diadema antillarum* reduces macroalgal cover and increases abundance of juvenile corals on a Caribbean reef. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.*, **98**: 5067-5071.
- Estes, J.A., 1996. The influence of large, mobile predators in aquatic food webs: Examples for sea otters and kelp forests. In S.P.R. Greenstreet and M.L. Tasker (eds.), *Aquatic Predators and Their Prey*, pp. 65-72. Fishing News Books, Blackwell Scientific Publications, Malden, MA.
- Estes, J.A. and J.F. Palmisano, 1974. Sea otters: their role in structuring nearshore communities. *Science*, **185**: 1958-1960.
- 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.
- Hagen, N.T., 1995. Recurrent destructive grazing of successional immature kelp forests by green sea urchin in Vestfjorden, Northern Norway. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **123**: 95-106.
- Himmelman, J.H. and D.H. Steele, 1971. Foods and predators of the green sea urchin *Strongylocentrotus droebachiensis* in Newfoundland waters. *Mar. Biol.*, **9**: 315-322.
- Lafferty, K.D. and D.J. Kushner, 2000. Population regulation of the purple sea urchin *Strongylocentrotus purpuratus*, at the California Channel Islands. pp. 379-381 in Mitchell, B.K.L. and Chang, H.W., editors. *Proceedings of the fifth California Islands Symposium*. Minerals Management Service Publication, #99-0038.

- 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.
- Ogden, J.C. and R.C. Carpenter, 1987. Species profiles: Life histories and environmental requirements of coastal fishes and invertebrates(South Florida) - Long-spined black sea urchin. Biological Report 82(11.77) TR EL-82-4, Fish and Wildlife Service, U.S. Department of the Interior and Coastal Ecology Group Waterways Experiment Station, U.S. Army Corps of Engineers. 17 pp.
- Pearse, J.S., M.E. Clark, D.L. Leighton, C.T. Mitchell and W.J. North, 1970. Marine waste disposal and sea urchin ecology. In Kelp Habitat Improvement Project, Annual Report, 1 July 1969-30 June 1970, Appendix. California Institute of Technology, Pasadena, California.
- Primack, R.B., 2002. Essentials of conservation biology. Sinauer Associates, Inc. Publishers, Sunderland, MA., 698 pp.
- Randall, J.E., 1967. Food habits of the tropical reef fishes of the West Indies. *Stud. Trop. Oceanogr.*, **5**: 665-847.
- 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.
- Stien, A., H.P. Leinaas, O. Halvorsen and H. Christie, 1998. Population dynamics of the *Echinomermella matsi* (Nematoda)-*Strongylocentrotus droebachiensis* (Echinoida) system: effects on host fecundity. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **163**: 193-201.

---

2003년 10월 28일 원고접수

2004년 2월 25일 수정본 채택

담당편집위원: 신현출