

포식이 선재도 갯벌 대형저서동물 군집에 미치는 영향

김창수¹ · 유재원¹ · 박미라¹ · 이창근¹ · 홍재상^{2*}
¹한국연안환경생태연구소, ²인하대학교

Effects of Predation on Macrobenthic Communities in Seonjae-do Tidal Flat

Chang-Soo KIM¹, Jae-Won YOO¹, Mi-Ra PARK¹, Chang-Gun LEE¹ and Jae-Sang HONG^{2*}
¹Korea Institute of Coastal Ecology, Inc., 205-1, Juan 1-Dong, Nam-Gu, Incheon, 402-835, Korea
²Department of Oceanography, Inha University, Incheon, 402-751, Korea

We examined the effect of predation by observing the changes in macrobenthic communities in a tidal flat at Seonjae, Korea, following the exclusion of large predators such as birds, fishes and crustaceans using protective screens. We conducted two interference experiments in the field from April to November 2004: (1) Experiment 1 was conducted at a mid-tidal flat in the western part of Seonjae-do, Incheon, Korea, (2) Experiment 2 was set up at a low tidal flat in the eastern part of Seonjae-do. Predator exclusion showed different effects in the two experiments. Both the number of species and density were reduced by 20% in Experiment 1. Whereas in Experiment 2, they increased by up to 13% and 69%, respectively. In Experiment 1, a high density of brachyuran crabs observed in the treatment may have caused the difference in community composition between the treatment and the control, and this probably resulted from active predation of macrofauna (e.g., small crabs) under protection from megafaunal predators such as birds and fishes. However, in Experiment 2, as typically observed in other predator exclusion experiments, a lower density of benthic predators and the subsequent reduction of over predation probably resulted in a more diverse and abundant benthic community in the treatment. We confirmed that predation was a contributing factor in the formation of the macrobenthic community. We also demonstrated relationships that exist among different trophic groups (large predators, macrobenthic predators and prey) and what effects and responses occur in each component of the tidal flats.

key words: Predation effects, Field experiment, Macrobenthic community, Tidal flat

서론

대형 저서무척추동물의 초기 생활사에 있어서의 착저 후 가입의 성공 여부가 개체군과 군집의 변동에 중요한 변수임이 밝혀짐에 따라(Olafsson et al., 1994), 궁극적으로 성체군집의 구조에 영향을 줄 수 있는, 착저 후 과정에서 발생하는 잠재적 요인들에 대한 연구가 진행되어왔다(Armonies, 1996; Beukema et al., 1998; Desroy et al., 1998; Dunn et al., 1999; Ejdung and Elmgren, 1998; Hiddink et al., 2002; Moksnes et al., 1998; Osman and Whitlatch, 2004; Retraubun et al., 1996; Roegner et al., 1995; Strasser and Günther, 2001; Van der Veer et al., 1998). 주요 요인들로는 변태시기의 지연, 생물적·물리적 교란, 수력학적 영향, 생리적 스트레스, 포식 그리고 경쟁 등이며 특히, 운동성이 있는 저서동물의 경우 가장 잘 알려져 있는 것은 포식으로 인한 영향이다(Hunt and Scheibling, 1997).

갯벌 저서동물군집의 형성에 있어 포식의 중요성은 1970년대 말에 이미 가두리 실험(cage experiment)을 통하여 인식되었다(Peterson, 1979; Reise, 1979). 그러나 포식으로 인한 영향의

시·공간적인 특수성과 다양성으로 인하여 가두리 혹은 망(screen)을 이용한 현장에서의 실험은 다양한 포식자-피식자 간 상호작용을 규명하기 위한 연구에서 현재에도 활발히 이용되고 있다(Jensen and Jensen, 1985; Posey et al., 1995; Hiddink et al., 2002; Hunt and Mullineaux, 2002).

저서동물군집의 형성에 주요한 영향을 미치는 포식에 관련된 연구는 군집 변동을 이해하는데 필수적이다. 외국에서는 성체뿐만 아니라 초기 생활사 등 각 생활사 전반에 대한 평가가 이루어지고 있으며 이를 통하여 해양생물과 환경요인의 단순한 선형적인 관계에서 설명될 수 없는 다양한 변동을 이해하기 위한 연구가 진행되고 있다. 그러나 우리나라의 경우, 저서동물 성체를 대상으로 한 군집과 개체군 변동에 관한 연구가 대부분이며, 일부를 제외하면(Park and Kim, 1985; Kang et al., 2000; Paik et al., 2004) 포식 및 포식과 관련한 생활사 초기에 관련된 연구는 거의 없는 실정이다.

본 연구는 현장에서 망(screen)을 이용하여 조류(birds)와 어류 및 갑각류 등 대형 포식자를 갯벌에서 배제시킬 경우 발생할 수 있는 저서동물군집의 변화를 관찰함으로써 포식의 영향(predation effects)을 평가하고자 하였다. 망목의 크기를 고려할 때, 실험 기간 중 다양한 저서동물 유생이 실험구 내의

*Corresponding author: jshong@inha.ac.kr

기질로 착저 혹은 가입할 것으로 예상되며, 이들 중에는 바지락을 포함한 이매패류 뿐만 아니라 계류와 고등류와 같은 포식자의 유생도 있을 것으로 판단된다. 따라서 실험구 내의 저서동물이 이들 소형 포식자에게 노출될 가능성을 전제로 유생과 성체 모두에게 야기될 수 있는 포식의 영향을 최종적인 군집 반응을 통하여 파악하였다.

재료 및 방법

실험 방법

실험은 2004년 4월부터 11월까지 인천 인근 전라도 남서측의 중조위 부근과 북동측 갯벌의 하부 조위 부근 두 지점(연구 지역 1과 2)에서 수행되었다(Fig. 1). 대형포식자의 포식 효과를 제거하기 위하여 2 mm 망목의 천(gauze)을 1×1 m 면적으로 2004년 4월과 5월에 각각 연구 지역 1과 2의 두 곳 갯벌 퇴적물 위에 설치하였다. 인위적인 영향을 최소화하기 위하여 실험구의 퇴적물 높이를 외부와 같은 수준으로 유지하였으며 천은 약간 여유를 두어 물의 소통이 원활하게 설치하였다. 또한 경계면을 30 cm 깊이로 파고 쇠파이프를 천을 퇴적물에 견고하게 고정한 후, 다시 퇴적물로 덮어 포식자의 접근을 차단하였다. 각각 5, 6개월이 경과한 후 대형 포식자로부터 보호를 받은 천 내부와 이들에 직접 노출된 천 외부의 생물상 간에 어떠한 차이가 발생하였는지를 관찰하였다. 또한 서식처가 다르므로써 야기될 수 있는 포식과 관련된 차이점을 두 연구 지역의 연구결과에 대한 비교를 통하여 고찰하였다.

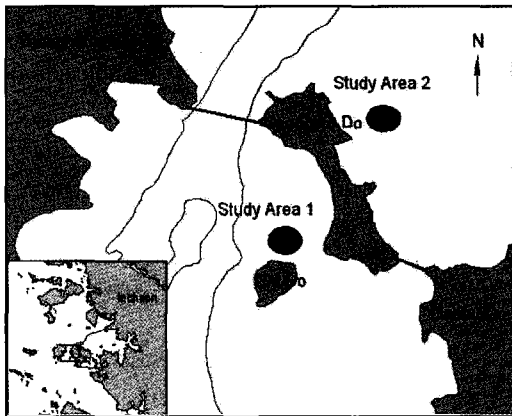


Fig. 1. Location of the study area.

연구 지역 1과 2에서 행해진 실험들을 각각 포식 실험 1과 2로 구분하여 언급할 것이다. 실험의 종료 시 표본 채집을 하였으며, 포식 실험 1에서는 설치 5개월 후인 9월에 표본 채집을 행하였다(2004년 4월 설치). 설치한 천 내부(이하 처리구 또는 treatment로 부름)에서 12개의 표본을 채집하였고, 비교를 위하여 처리구로부터 반경 3.4 m 이내에서 4개의 표본(이하 대조구 또는 control로 부름)을 채집하였다. 포식 실험 2에서는 설치 6개월 후인 2004년 11월에 표본 채집을 행하였으며, 처리구와 대조구에서 각각 8개의 표본을 취하였다(2004

년 5월 설치). 표본 채집에는 채집면적 80 cm²의 원통형 코어를 이용하였다.

퇴적물 내 포함된 저서동물을 분리하기 위하여 0.5 mm 망목의 체로 체질하였으며, 10% 중성 포르말린으로 고정한 후, 실험실로 운반하였다. 실험실에서는 잔여 퇴적물과 저서동물을 선별하는 과정(sorting)을 거친 후, 해부 현미경하에서 가능한 중 수준까지 동정(identification)을 실시하였다.

분석 방법

일반적으로 실험을 통하여 반응 변수의 평균을 비교할 때, 요인이 한 가지이며 비교의 범주가 두 가지에 국한된 경우 *t*-test를 행한다. *t*-test는 자료의 정규 분포성을 요구하나 자료의 분포가 이로부터 약간 벗어나는 정도는 그 결과에 심각한 영향을 미치지 않는 것으로 알려져 있다(Montgomery, 1991). 절대적인 기준은 없으나 *t*-검정에서 표본의 개수가 30미만인 경우는 적은 것으로 분류되며, 일부는 10개 미만 자료의 비교에도 이용되고 있다. 앞서 언급한 바와 같이 본 실험은 두 지역에서 수행되었으며 각 실험 간 그리고 실험 내 대조구와 처리구 표본 개수 간 차이(실험 1, 각각 4개와 12개; 실험 2, 각각 8개)가 있었다. 실험 1의 경우, 비록 정규 분포성에 대해 탄력성을 가지는 방법이긴 하나 4개와 12개의 자료를 비교하면서 모평균의 차이를 검정하는 *t*-검정보다는 비모수적인 방법이나 그 외 다른 방법을 이용하는 것이 좀 더 바람직할 것으로 판단하였다. 대조구의 적은 표본 개수(4개)를 생물학적 변수(출현 종수와 밀도)의 평균 비교에 필요한 표본 개수 기준으로 삼았다. 처리구의 12개의 표본으로부터 다양한 4개 표본 조합의 평균치와 분포 범위를 추정하였으며 이를 비교의 기준으로 활용할 수 있을 것으로 기대하였다. Diaconis and Efron (1983)의 bootstrap simulation 기법을 행하면 4개 표본으로부터 추정되는, 정규 분포와 근사한 평균의 분포를 알 수 있다. 따라서 실험 1의 경우에는 이 기법을 이용하여 1,000회 반복적 표본 추출(resampling)을 행하였고, 이를 바탕으로 처리구 내 생물학적 변수 평균의 분포를 추정하였으며, 대조구의 4개 표본으로부터 추정된 값들을 이와 비교하고 차이의 유의성을 살펴보았다. 동일한 반복 채집 표본 개수를 갖는 실험 2의 경우에는 대조구와 처리구 각 8개의 표본 개수가 *t*-검정에 적절한 것으로 판단, 이를 통하여 평균 차이의 유의성을 검정하였다. 귀무가설과 대립가설은 각각 대조구와 처리구의 차이=0과 ≠0(즉 양측 검정)이다.

포식의 효과에 대한 특정 개체군의 반응을 살펴보기 위하여 실험 1에서는 부호 검정(sign test)을, 그리고 실험 2에서는 *t*-검정을 수행하였다. 전자의 경우 대조구의 표본 개수(4개)를 기준으로 처리구에서 무작위적으로 4개 씩 표본을 선택하여 15개의 데이터 세트를 생성하였으며, 대조구와 처리구의 15개 데이터 세트 간 개체군 별 평균 밀도의 차이를 계산하였다. 각 개체군 별 15개의 밀도 차이 값을 대상으로 수행된 부호 검정의 귀무가설은 값들의 중위수=0 또는 ≠0(즉 양측 검정)이다. 만약 대조구와 처리구의 개체군 밀도에 유의한 차이가

없다면 차이 값의 반 정도가 음수이고 나머지 반 정도가 양수이며 중위수는 0으로 기대할 수 있다. 실험 2의 경우에는 t-검정을 통하여 대조구와 처리구의 8개 표본으로부터 추정된 각 개체군 별 밀도 평균의 차이(양측 검정)를 분석하였다.

실험 1과 2의 대조구와 처리구 간 생물학적 변수와 개체군 별 밀도 차이의 유의성을 검정하기 위한 분석 프로그램으로는 MINITAB13을 사용하였다.

결 과

포식 실험 1

출현 종수와 밀도에 미치는 효과

처리구 내 4개 반복 표본의 출현 종수 평균의 bootstrap distribution을 나타낸 결과, 반복적 표본추출(resampling)을 통하여 추정된 평균은 8종이었으며, 편의가 보정된 평균의 95% 신뢰 구간(bias corrected confidence intervals)은 6.5-10.3종이었다(Fig. 2A). 이에 비해 대조구의 평균 출현 종수는 10±3종이었다. 평균값을 기준으로 하면 출현 종수에 미치는 포식자 제거 효과는 -20%인 것으로 추정되었다(Table 1).

처리구 내 4개 반복 표본의 밀도 평균의 bootstrap distribution을 나타낸 결과, 반복적 표본추출을 통하여 추정된

Table 1. Enhancement effect of predator exclusion on the macrobenthic community in Experiment 1

	Treatment (95% CL)	Control	Enhancement effect
Mean species number	8 (6.5-10.3)	10±3	-20%
Mean density	16 (13.8-19.8)	20±1	-20%

평균은 16개체/80 cm²이었으며, 편의가 보정된 평균의 95% 신뢰 구간(bias corrected confidence intervals)은 13.8-19.8개체/80 cm²이었다(Fig. 2B). 이에 비해 대조구의 평균 밀도는 20±1개체/80 cm²이었다. 평균값을 기준으로 하면 밀도에 미치는 포식자 제거 효과는 -20%인 것으로 추정되었다(Table 1).

전체 출현 종수와 밀도의 측면에서 포식압의 제거는 오히려 부정적인 것으로 나타났다.

포식자의 제거와 노출에 대한 개체군의 반응

부호 검정을 통해 각 개체군의 포식 제거에 대한 반응을 살펴보았다(Table 2). P-value 0.05 이하의 수준으로 처리구에서 높은 밀도를 나타낸 종들은 다모류의 등가시버들갯지렁이(*Capitella capitata*), *Aricidea* sp., 두갈래별난가시갯지렁이(*Cirrophorus furcatus*), *Heteromastus filiformis*와 게류에서는 칠게(*Macrophthalmus japonicus*), 무늬발게(*Hemigrapsus sanguineus*), 펼털콩게(*Ilyoplax pingi*) 등이었다. 이 가운데 *H. sanguineus*는 처리구 내에서 높은 밀도로 서식하는 것이 관찰되어 실험 종료 1개월 전에 인위적으로 제거하였으나, 그룹에도 불구하고 처리구에서 보다 높은 밀도를 나타내었다. 실험구 간 차이가 뚜렷하지 않은 종들은 다모류의 곤봉빛갯지렁이(*Cistenides okudai*), 작은부채발갯지렁이(*Eteone longa*), 짧은다리송곳갯지렁이(*Lumbrineris nipponica*), *Leonnates persica*, 큰갈매기고리갯지렁이(*Goniada japonica*), 이매패류의 *Nitidotellina* sp., *Laternula* sp. 그리고 단각류의 *Photis* sp. 등이었다. 처리구에서 상대적으로 낮은 밀도를 나타낸 종들은 다모류의 *Amphitritinae* spp., *Glycinde gurjanovae*, *Mediomastus californiensis*, *Prionospio (M.) pulchra*, 남방백금갯지렁이(*Nephtys polybranchia*), 이매패류의 종뭇(*Musculista senhousia*), 바지락(*Ruditapes philippinarum*), 복족류의 왕죽살무늬고둥(*Reticunassa festiva*), 민칭이(*Bullacta exarata*), 단각류의 발성육질꼬리옆새우(*Grandidierella japonica*), *Caprella* spp., 그리고 쿠마류의 *Nippoleucon hinumensis* 등이었다. 게류의 *H. penicillatus* 역시 실험 기간 중 처리구에서 높은 밀도를 나타내어 제거되었으며, (-) 반응은 그로 인한 것으로 추정된다.

부호 검정 결과에 근거하여 일부 개체군을 선택, 처리구와 대조구 간 밀도(개체수/80 cm²)를 비교하였다(Fig. 3). Fig. 3A는 *M. japonicus*의 밀도를 나타낸 것으로 처리구 내에서는 평균 4개체로 주변의 대조구 2개체에 비해 약 2배 높은 밀도를 나타내었다. 다모류, *M. californiensis* (Fig. 3B)는 대조구(약

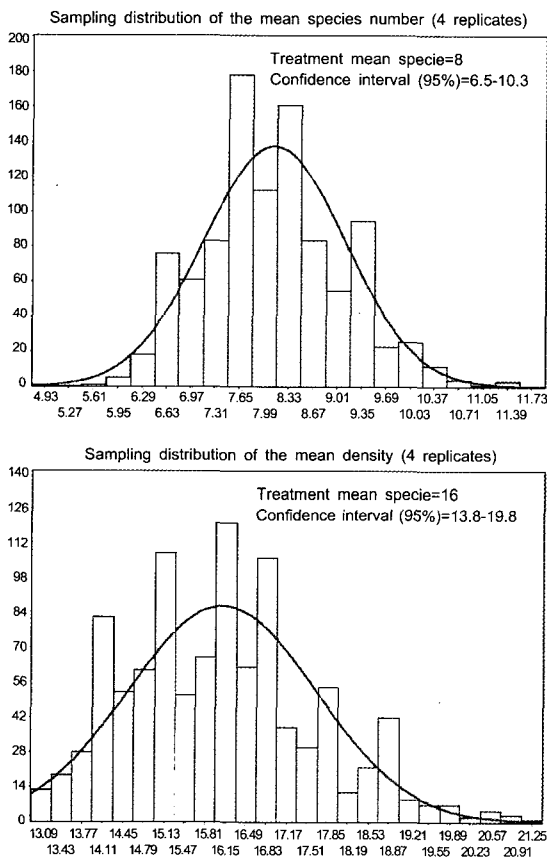


Fig. 2. Distribution of the mean species number (A) and mean density (B) in treatment estimated by bootstrap simulation (Diaconis and Efron, 1983).

Table 2. Results of sign test for the effects of predator exclusion on the abundance of each species in Experiment 1

Taxon	Species	Tendency	p-value
APol	<i>Capitella capitata</i>	+	0.0001
CDB	<i>Macrophthalmus japonicus</i>	+	0.0002
Others	<i>Nemertinea spp.</i>	+	0.0005
APol	<i>Aricidea sp.</i>	+	0.0020
APol	<i>Cirrophorus furcatus</i>	+	0.0117
CDB	<i>Hemigrapsus sanguineus*</i>	+	0.0156
CDB	<i>Ilyoplax pingi</i>	+	0.0156
APol	<i>Heteromastus filiformis</i>	+	0.0225
APol	<i>Cistenides okudai</i>	0	0.0625
APol	<i>Eteone longa</i>	0	0.0625
APol	<i>Lumbrineris nipponica</i>	0	0.0625
MBi	<i>Nitidotellina sp.</i>	0	0.0625
CAM	<i>Photis sp.</i>	0	0.0625
APol	<i>Leonnates persica</i>	0	0.0923
MBi	? <i>Nitidotellina sp.</i>	0	0.1250
CCu	<i>Dimorphostylis brevicaudata</i>	0	0.1250
APol	<i>Goniada japonica</i>	0	0.1250
CCo	<i>Harpacticoida spp.</i>	0	0.1250
MBi	<i>Laternula sp.</i>	0	0.1250
CDA	<i>Upogebia major</i>	0	0.1250
APol	<i>Pseudopolydora kempii</i>	0	0.1797
APol	<i>Glycera chirori</i>	0	1.0000
APol	<i>Scolecopsis kudenovi</i>	0	1.0000
MGs	<i>Agatha virgo</i>	-	0.0001
APol	<i>Amphitritinae spp.</i>	-	0.0001
APol	<i>Glycinde gurjanovae</i>	-	0.0001
CAM	<i>Grandidierella japonica</i>	-	0.0001
APol	<i>Mediomastus californiensis</i>	-	0.0001
APol	<i>Prionospio (M.) pulchra</i>	-	0.0001
MBi	<i>Musculista senhousia</i>	-	0.0001
APol	<i>Nephtys polybranchia</i>	-	0.0001
CCu	<i>Nippoleucon hinumensis</i>	-	0.0001
MGs	<i>Reticunassa festiva</i>	-	0.0001
MBi	<i>Ruditapes philippinarum</i>	-	0.0001
APol	<i>Sigambra tentaculata</i>	-	0.0001
MGs	<i>Bullacta exarata</i>	-	0.0010
CDB	<i>Hemigrapsus penicillatus*</i>	-	0.0020
CAM	<i>Caprella spp.</i>	-	0.0063
APol	<i>Glycera subaenea</i>	-	0.0063

*The asterisk refers to the species that showed high levels of density in treatment during experimental period. In order to protect prey species inside the screen, those species were removed. Accordingly, the density might be underestimated.

6개체/80 cm²에서 처리구(약 3개체/80 cm²)에 비해 약 2배에 가까운 평균 밀도를 나타내었다. Fig. 3C의 다모류 *N. polybranchia*는 대조구(약 2개체/80 cm²)에서 처리구(약 0.4개체/80 cm²)에 비해 약 5배에 가까운 평균 밀도를 나타내었다. Fig. 3D의 *R. philippinarum*은 대조구(약 1.3개체/80 cm²)에서 처리구(약 0.3개체/80 cm²)에 비해 약 4배에 가까운 평균 밀도를 나타내었다. 포식 실험 1로부터 포식자의 제거는 특정 개체군에 따라 차별적인 영향을 미친 것으로 나타났다.

포식 실험 2

출현 종수와 밀도에 미치는 효과

2004년 11월까지 수행된 포식 실험 2로부터 관찰된 실험구의 출현 종수와 밀도를 Fig. 4의 A와 B에 나타내었다. 8개의

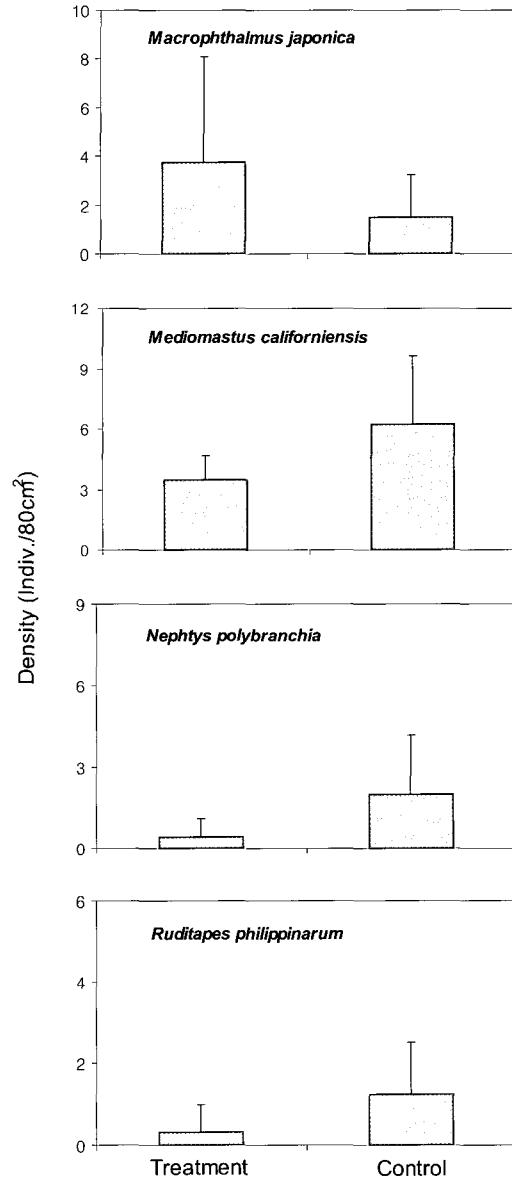


Fig. 3. Comparison of the mean density of each dominant species between treatment and control in Experiment 1.

반복 채집 표본으로부터 추정된 출현 종수의 평균은 처리구에서 6.8종, 대조구에서 6종이었다(Table 3). 대조구의 분산에 비해 처리구의 것이 큰 것으로 나타났다. *t*-test 결과 출현 종수의 분산이 다를 경우를 가정할 때, 실험구 간 출현 종수의 평균의 차이는 없는 것($p=0.623$)으로 볼 수 있었다(Fig. 4A). 8개의 반복 채집 표본으로부터 추정된 밀도의 평균은 처리구에서 11.1개체/80 cm², 대조구에서 7.1개체/80 cm²이었다. 출현 종수의 경우와 마찬가지로 대조구의 분산에 비해 처리구의 것이 컸다. *t*-test 결과 밀도의 분산이 다를 경우를 가정할 때, 실험구 간 서식밀도 평균은 유의 수준 $p=0.090$ 에서 근소하게 차이가 있었다(Fig. 4B).

포식 실험 1에서는 출현 종수와 밀도에 모두 -20%의 효과가

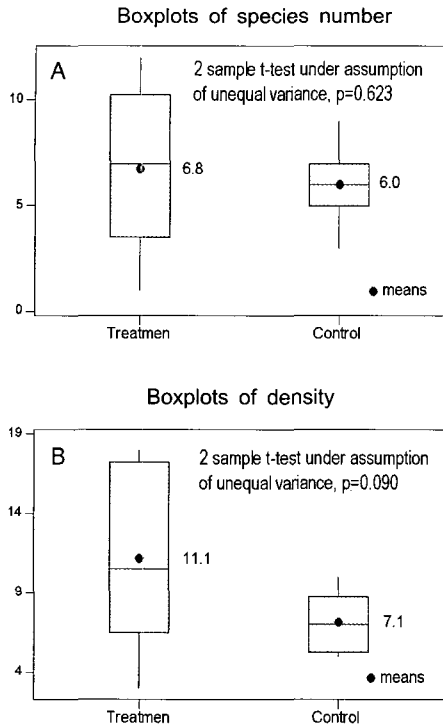


Fig. 4. Results of *t*-test for difference between treatment and control in mean species number (A) and mean density (B) in Experiment 2.

Table 3. Enhancement effect of predator exclusion on the macrobenthic community in Experiment 2

	Treatment	Control	Enhancement effect
Mean species number	7±4	6±2	+13%
Mean density	11±6	7±2	+60%

가해진 것으로 나타난 반면, 포식 실험 2에서는 출현 종수는 유의한 차이가 없으나, 평균값을 기준하면 약 13% 증가 효과가 있고, 밀도는 약 60%의 증가 효과가 있는 것으로 나타났다 (Table 3).

포식자의 제거와 노출에 대한 개체군의 반응

Table 4와 Fig. 5에 처리구와 대조구의 밀도 기준 우점종을 나타내었다. 대부분의 경우 처리구와 대조구 모두 표본의 분산이 큰 것으로 나타났으며 통계적으로 유의한 차이는 관찰되지 않았다. 이매패류의 *R. philippinarum*은 처리구와 대조구에서 모두 우점종으로 나타났으며, 밀도의 평균은 대조구에 비해 처리구에서 약 2배 정도 높았다. 다모류의 *H. filiformis*와 *N. polybranchia*, *M. californiensis* 등은 처리구에서 상위에 배열되었으며, 이들 밀도의 평균은 대조구에 비해 처리구에서 약 2-4배 정도 높았다(Fig. 5). 다모류의 치료리미갑갯지렁이 (*G. chirori*)와 *G. gurjanovae*는 대조구와 처리구에서 동일한 밀도를 나타내었다. 잠재적인 어류의 먹이원인 단각류의 두 종(*Byblis japonica*와 *Melita pilopropoda*)은 처리구에서만 출

Table 4. Results of *t*-test for the effects of predator exclusion on the abundance of each species in Experiment 2

Taxon	Species	Density(ind./80 cm ²)		p-value
		Treatment	Control	
MBi	<i>Ruditapes philippinarum</i>	2.5	1.4	0.080
APol	<i>Nephtys polybranchia</i>	1.1	0.3	0.087
CDB	<i>Hemigrapsus penicillatus</i>	0.5	0.0	0.104
APol	<i>Heteromastus filiformis</i>	1.1	0.3	0.133
APol	<i>Diopatra sugokai</i>	0.0	0.3	0.170
MGs	<i>Odostomia subangulata</i>	0.0	0.3	0.170
MGs	<i>Reticunassa festiva</i>	0.0	0.3	0.170
CAm	<i>Byblis japonica</i>	0.5	0.1	0.285
CAm	<i>Melita pilopropoda</i>	0.5	0.1	0.285
CAm	<i>Paraphoxus sp.</i>	0.0	0.3	0.351
APol	<i>Scoloplos armiger</i>	0.4	0.1	0.451
APol	<i>Mediomastus californiensis</i>	1.1	0.5	0.483
APol	<i>Marphysa sanguinea</i>	0.1	0.3	0.598
APol	<i>Glycera chirori</i>	0.9	0.9	1.000
APol	<i>Glycinde gurjanovae</i>	0.6	0.6	1.000

현하였다. 처리구의 단각류 밀도는 대조구의 것에 비해 약 3배 이상 높았다. 잠재적인 포식자로 분류될 수 있는 계류로는 *H. penicillatus*만이 처리구 안에서 출현하였으며(Fig. 5), 이들의 밀도(0.5개체/80 cm²)는 포식 실험 1의 처리구 내 계류(*M. japonicus*와 *H. sanguineus*, *H. penicillatus*)의 밀도 합계(4개체/80 cm²)의 1/8 수준인 것으로 나타났다. 다모류의 털보갯지렁이(*Diopatra sugokai*)는 대조구에서만 출현하였으며, 0.3개체/80 cm²의 밀도를 나타내었다(Fig. 5). 복족류의 *Odostomia subangulata*, *R. festiva* 등은 *D. sugokai*와 유사한 패턴을 나타냈다.

고찰

실험의 인위적 영향(artefact)과 대형저서동물 군집의 반응

본 연구에서는 포식 효과를 추정하기 위하여 천을 이용하여 포식을 간섭하고 이를 대조구와 비교하는 현장 실험(interventionist experiment)을 수행하였다. 실험의 전제 조건은 포식에 대한 간섭 외에는 모든 환경이 동일해야 하는 것임에도 불구하고 이와 같은 방식의 실험에서는 대부분 천이나 가두리의 설치에 따른 인위적 영향이 발생한다. 대표적인 인위적 영향으로는 유속의 감소를 들 수 있으며, 이로부터 야기되는 물리적인 변화는 실험구 내 퇴적작용의 강화이다(Steele, 1996). 이와 같은 물리적 환경 조건의 변화 외에도 포식압의 제거에 따른 사망률의 감소로 인한 경쟁의 발생, 인위적인 구조물의 설치에 따른 특정종의 가입 촉진 등 생물학적인 조건마저도 달라질 수 있다(Reise, 1985). 이러한 이유로 Diamond (1983)이나 Clarke and Warwick (1994)은 실험의 자연성(naturalness) 또는 사실성(realism) 그리고 결과의 보편성(generality) 측면에서 간섭을 행하는 현장 실험보다는 자연 실험(natural experiment)이 보다 강력한 실험 유형인 것으로 언급하였다. 그러나 본 연구에서는 간섭에 따른 효과를 좁은 실험 면적 내에서 좀 더 직접적으로 측정하여 이해할 수 있

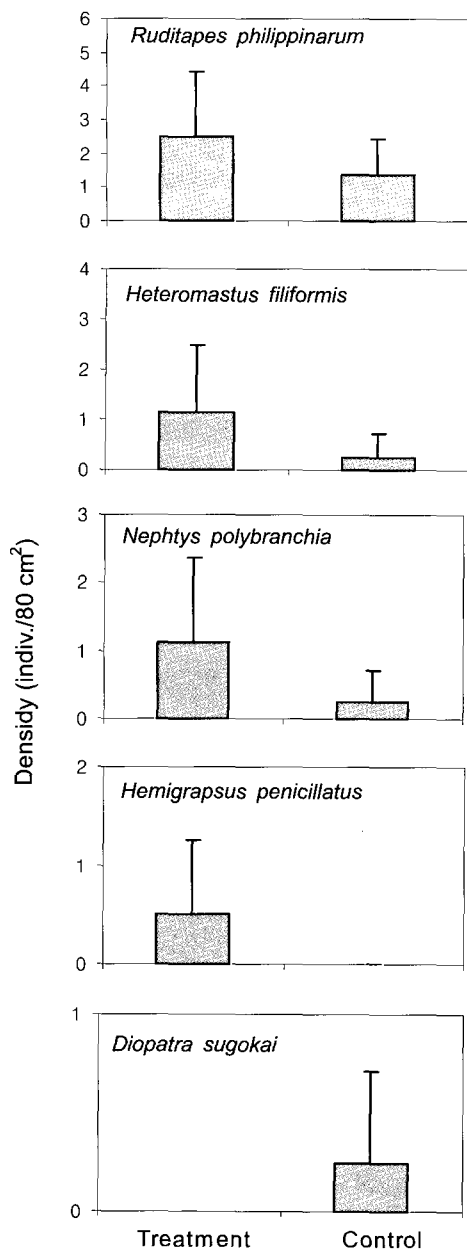


Fig. 5. Comparison of density between treatment and control in each dominant species in Experiment 2.

고, 양식에 이용 가능한 잠재적인 방법이나 원리를 찾을 수 있을 것이라는 점 등을 고려하여 현장 실험을 선택하였다.

포식 실험 1과 2를 통하여 연구진이 감지할 수 있을 것으로 기대한 반응은 두 가지 효과, 즉 인위적 영향과 포식압에 대한 것이다. 포식압에 대해서는 뒷부분에서 다루어질 것이므로 인위적인 영향의 경우를 살펴보면, 비록 양 실험지역의 환경 조건은 다르지만 천의 사용으로 인하여 야기될 수 있는 처리구 내의 변화는 동일할 것으로 가정하였다. 현장에서의 관찰 결과, 서식처에 가해지는 물리적인 인위적 영향의 하나인 퇴적 작용의 강화는 본 연구에서도 역시 뚜렷한 것으로 나타났

다. 좁은 망목은 해류 속도 저하와 퇴적 속도 증가를 유발한 것으로 보이며, 이로 인해 연구 종료시점(즉 표본 채집시점)에는 퇴적물 위에 설치한 천의 윗부분까지 퇴적물이 쌓인 것으로 나타났다. 따라서 처리구의 저서생물은 이러한 효과에 대한 반응을 나타낼 수 있으며, 앞서 언급한 바와 같이, 포식 실험 지역 1과 2에서 공통적으로 나타나는 현상일 것으로 예상하였다.

처리구에서 공통적으로 나타난 현상은 기회종 특성을 갖는 다모류 밀도의 증가였다. 포식 실험 1의 처리구에서 관찰된 기회종은 다모류의 *C. capitata*, *Aricidea* sp., *C. furcatus*, *H. filiformis* 등이었다. 포식 실험 2의 처리구에서는 상대적으로 많은 수의 기회종이 관찰되었으며, 이들은 *H. filiformis*, *N. polybranchia*, *M. californiensis*, *P. (M.) pulchra*, *Aonides oxycephala*, *Lumbrineris longifolia*, *Polydora* sp. 등이었다. 급격한 퇴적 작용은 단순한 인위적 영향보다는 교란 요인으로 작용했을 가능성이 있으며, 기회종 밀도의 증가는 이에 대한 반응으로 보아야 할 것으로 생각된다(Boesch, 1973; Absalao, 1991; Hong and Yoo, 1996).

포식의 효과(predation effects)

본 연구에서 측정된 결과를 볼 때, 천 아래의 포식자(게류)는 새롭게 중요성이 부각된 변수인 것으로 파악되었다. 이러한 변수의 영향을 고려하면, 포식에 대한 반응이라 할 수 있는 현상은 두 실험구 간 차별적이어야 할 것으로 기대되었다.

포식 실험 1에서 포식압 제거에 대한 긍정적 반응을 나타낸 개체군은 기회종과 게류였다. 실험 2에서는 좀더 다양한 종류의 개체군들의 밀도 증가가 관찰되었으며, 기회종과 이매패류의 *R. philippinarum*과 단각류 등이었다. 앞서 언급한 바와 같이 두 실험구 간 공통적으로 관찰된 기회종의 증가를 인위적 영향에 대한 반응으로 간주한다면, 나머지 현상을 포식을 제거한 데에 대한 반응으로 간주하는 것에는 무리가 없는 듯하다.

본 연구에서 출현한 게류는 *Hemigrapsus penicillatus*, *Hemigrapsus sanguineus*, *Ilyoplax pingi* 그리고 *Macrophthalmus japonicus*의 4종이었다. 이들 중 *H. sanguineus*는 미국과 유럽 등, 광범위한 지역에서 외래 유입종으로 잘 알려져 있다. 본 종은 잡식성 혹은 기회적인 잡식성의 섭식유형을 가지고 있는 것으로 보고 되었으나 포식성향이 강해서 조류(algae)보다는 담치와 같은 동물성 먹이를 선호하는 것으로 알려져 있다(Lohrer and Whitlatch, 2002; DeGraaf and Tyrrell, 2004; Brousseau and Baglivo, 2005). 따라서 실험 1의 처리구 내에서의 상대적으로 높은 게류의 포식압이 이매패류나 다모류와 같은 내생동물의 개체군 밀도에 영향을 미쳤을 것이라는 추정이 가능하다.

이러한 가정을 바탕으로 하면 관찰된 현상을 다음과 같이 해석할 수 있다. 실험 1은 천의 보호 효과로 인해 천 아래 생물은 포식자(초대형 동물)로부터 해방될 것으로도 기대할 수 있었으나 오히려 또 다른 포식자들에 의해 발생한 포식압

으로 더욱 낮은 출현 종수와 밀도가 관찰된 상황이라고 할 수 있다. 실험 2는 두 가지 유형, 즉 새나 어류 그리고 천 아래 포식자인 게류 등의 포식압이 모두 제거됨으로 주요 산업종인 바지락과 먹이 자원으로서 중요성이 높은 단각류 등을 포함하는 천 아래의 저서생물들이 천 외부의 저서생물들보다 높은 밀도를 나타낸 상황이라고 할 수 있다.

연구 지역 간 저서동물군집의 차별화된 반응의 원인

저서동물군집의 차별화된 반응의 변인으로 제시된 게류의 밀도가 실험구별로 차이를 보인 것은 근본적으로 환경조건에 따른 종조성의 차이에 기인한 현상으로 판단된다. 앞서 살펴본 바와 같이 두 실험 지역의 저서동물군집이 처리구 내에서 차별화된 반응을 나타낸 것은 천 아래에서 관찰된 게의 존재에 의한 것으로 추정되었으며 그 서식밀도가 실험 1에서 월등히 높은 것으로 나타났다. 인천 송도지역의 적전 갯벌에서 수행된 대형저서동물의 군집생태에 대한 연구와 갯벌 저서동물군집과 관련한 선행된 연구들의 고찰을 통하여 경기만 조간대에 서식하는 주요 대형저서동물 우점종의 일반적인 분포도가 작성되었다(Seo and Hong, 2004). 이 모식도에 의하면 갯벌 상부에서 하부로 갈수록 갑각류, 연체동물, 극피동물의 순으로, 특정 생물군의 우점대가 존재하는 것으로 나타났다. 또한, 게류의 *Ilyoplax pingi*와 *Macrophthalmus japonicus*가 갯벌 상부에서 중부에 걸쳐 분포하는 것으로 보고하였다. 따라서 게류의 밀도가 실험구 간에 차이를 보인 것은 이들의 생태학적 분포 특성에 기인하는 것으로 추정할 수 있다.

가두리를 이용하여 포식자를 배제함으로써 운동성이 있는 초대형 포식자의 영향을 평가하기 위한 연구들이 다양한 서식처에서 수행되어 왔다. 비록 가두리에 의한 인위적인 효과가 존재하지만 대형저서동물 군집의 형성에 대한 초대형 포식자의 영향이 확인되었으며 식생이 없는 조간대와 얕은 수심의 서식처, 수심이 깊은 조하대의 서식처 그리고 식생이 있는 서식처의 순으로 포식의 영향이 감소되는 것으로 나타났다(Peterson, 1979; Ólafsson et al., 1994). 이들 연구들이 생태학적으로 구분된 서식처에서의 포식의 영향을 평가하였다면 본 연구는 보다 작은 규모 즉, 같은 유형의 서식처 내에서도 환경조건이 다른 지역에서의 포식의 영향을 평가하였으며, 종조성 및 영양단계의 구조에 따라 포식의 영향이 차별화될 수 있음을 제안하였다.

이로부터 초대형 동물(새나 어류) → 대형저서동물 포식자(게류) → 대형저서동물 먹이(패류, 다모류 등)의 먹이 사슬 관계를 그려볼 수 있다. 초대형 동물의 포식이 패류나 다모류 등에도 직접적으로 감행된다는 것은 별도의 실험을 통해 증명하는 것을 필요로 하지 않는 사실이다. 또한 초대형 동물로부터 게류에 가해지는 포식압은 간접적으로 대형저서동물 먹이의 밀도에도 영향을 미칠 수 있다. 따라서 단순한 사슬 관계보다는 좀 더 복잡한 먹이 그물 관계에 있는 것으로 볼 수 있다. 이러한 먹이망의 외형은 Wadden Sea에 인접한 Königshafen 갯벌의 저서동물 군집에 대한 포식 압력을 상세히 연구한

Reise(1985)의 것과 매우 유사하다. 포식압과 먹이망의 측면에서 유럽과 국내의 갯벌이 유사한 구조를 갖는다는 것을 밝힌 점과 갯벌 저서동물 군집의 구조와 분포에 있어서 포식압의 중요성이 높다는 가설을 제안한 점 등에서 본 연구의 의의를 찾을 수 있으며, 또한 인접한 갯벌에서 동시에 수행된 저서동물의 재점유 양상 관찰 결과의 해석과 이해에 있어서 매우 유용한 정보로 활용될 것으로 기대된다.

사 사

본 연구를 수행하는데 있어 현장 조사와 생물 분류 작업에 도움을 주신 한국연안환경생태연구소 동료들께 감사드리며 아울러 실험에 협조를 해주신 선재도 어촌계 주민들께도 감사드립니다. 본 연구는 “갯벌 생태계 복원을 위한 대형저서동물 다양성 조절인자 연구”의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- Absalao, R.S. 1991. Environmental discriminating among soft-bottom mollusc associations off Lagoa dos Patos, South Brazil. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 32, 71-85.
- Armonies, W. 1996. Changes in distribution patterns of 0-group bivalves in the Wadden Sea: Byssus-drifting release juveniles from the constraints of hydrography. *J. Sea Res.*, 35, 323-334.
- Boesch, D.F. 1973. Classification and community structure of macrobenthos in the Hampton Roads area, Virginia. *Mar. Biol.*, 21, 226-244.
- Beukema, J.J., P.J.C. Honkoop and R. Dekker. 1998. Recruitment in *Macoma balthica* after mild and cold winters and its possible control by egg production and shrimp predation. *Hydrobiologia*, 375-376, 23-34.
- Brousseau, D.J. and J.A. Baglivo. 2005. Laboratory investigations of food selection by the Asian shore crab, *Hemigrapsus sanguineus*: algal versus animal preference. *J. Crust. Biol.*, 25, 130-134.
- Clarke, K.R. and R.M. Warwick. 1994. Change in marine communities: an approach to statistical analysis and interpretations. Plymouth: Plymouth Marine Laboratory, 1-144.
- DeGraaf, J.D. and M.C. Tyrrell. 2004. Comparison of the feeding rates of two introduced crab species, *Carcinus maenas* and *Hemigrapsus sanguineus*, on the blue mussel, *Mytilus edulis*. *Northeast. Natural.*, 11, 163-167.
- Desroy, N., C. Retiere and E. Thiebaut. 1998. Infaunal predation regulates benthic recruitment: an experimental study of the influence of the predator *Nephtys hombergii* (Savigny) on recruits of *Nereis diversicolor* (O.F. Müller). *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*,

- 228, 257-272.
- Diaconis, P. and B. Efron. 1983. Computer-intensive methods in statistics. *Sci. Amer.*, 248, 116-130.
- Diamond, J.M. 1983. Laboratory, field and natural experiments. *Nature*, 304, 586-587.
- Dunn, R., L.S. Mullineaux and S.W. Mills. 1999. Resuspension of postlarval soft-shell clams *Mya arenaria* through disturbance by the mud snail *Ilyanassa obsoleta*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 180, 223-232.
- Ejdung, G. and R. Elmgren. 1998. Predation on newly settled bivalves by deposit-feeding amphipods: a Baltic Sea case study. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 168, 87-94.
- Hiddink, J.G., R. ter Hofstede and W.J. Wolff. 2002. Predation of intertidal infauna on juveniles of the bivalve *Macoma balthica*. *J. Sea Res.*, 47, 141-159.
- Hong, J.S. and J.W. Yoo. 1996. Salinity and sediment types as sources of variability in the distribution of the benthic macrofauna in Han Estuary and Kyonggi Bay, Korea. *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, 31, 217-231.
- Hunt, H.L. and L.S. Mullineaux. 2002. The roles of predation and postlarval transport in recruitment of the soft shell clam (*Mya arenaria*). *Limnol. Oceanogr.*, 47, 151-164.
- Hunt, H.L. and R.E. Scheibling. 1997. Role of early post-settlement mortality in recruitment of benthic marine invertebrates. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 155, 269-301.
- Jensen, K.T. and J.N. Jensen. 1985. The importance of some epibenthic predators on the density of juvenile benthic macrofauna in the Danish Wadden Sea. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 89, 157-174.
- Kang, K.H., Kim, J.M. and S.T. Oh. 2000. Predation of *Asterias amurensis* and *Asterina pectinifera* on valuable bivalves at different water temperature. *Kor. J. Malacol.*, 16, 17-20.
- Lohrer, A.M. and R.B. Whitlatch. 2002. Relative impacts of two exotic brachyuran species on blue mussel populations in Long Island Sound. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 227, 135-144.
- Moksnes, P.-O., L. Pihl and J. van Montfrans. 1998. Predation on postlarvae and juveniles of the shore crab *Carcinus maenas*: importance of shelter, size and cannibalism. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 166, 211-225.
- Montgomery, D.C. 1991. Design and analysis of experiments-third edition. John Wiley and Sons, New York, 1-649.
- Olafsson, E.B., C.H. Peterson and W.G. Ambrose, Jr. 1994. Does recruitment limitation structure populations and communities of macro-invertebrates in marine soft sediments: the relative significance of pre- and post-settlement processes. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, 32, 65-109.
- Osman, R.W. and R.B. Whitlatch. 2004. The control of the development of a marine benthic community by predation on recruits. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 311, 117-145.
- Paik, S.G., H.S. Park, S.G. Yun and S.K. Yi. 2004. Distribution pattern and feeding preference of *Asterias amurensis* (Echinodermata: Asteroidea) in Tongyeong. *J. Kor. Fish. Soc.*, 37, 469-477.
- Paine, R.T. 1966. Food web complexity and species diversity. *Amer. Nat.*, 100, 65-75.
- Park, M.S. and B.Y. Kim. 1985. Feeding behaviour of the starfish, *Asterias amurensis* (Lutken). *Bull. Fish. Res. Dev. Age.*, Busan, 34, 171-174.
- Peterson, C.H. 1979. Predation, competitive exclusion, and diversity in the soft-sediment benthic communities of estuaries and lagoons. In: *Ecological Processes in Coastal and Marine Systems*. Livingston, R.J., ed. Plenum Press, New York, 234-264.
- Posey, M., C. Powell, L. Cahoon and D. Lindquist. 1995. Top down vs. bottom up control of benthic community composition on an intertidal tideflat. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 185, 19-31.
- Reise, K. 1979. Moderate predation on meiofauna by the macrobenthos of the Wadden Sea. *Helgoländ. Meeres.*, 32, 453-465.
- Reise, K. 1985. *Tidal Flat Ecology*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 63-118.
- Retraubun, A.S.W., M. Dawson and S.M. Evans. 1996. The role of the burrow funnel in feeding processes in the lugworm *Arenicola marina* (L.). *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 202, 107-118.
- Roegner, C., C. André, M. Lindegarth, J.E. Eckman and J. Grant. 1995. Transport of recently settled soft-shell clams (*Mya arenaria* L.) in laboratory flume flow. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 187, 13-26.
- Seo, I.S. and J.S. Hong. 2004. The community ecology of benthic macrofauna on the Cheokjeon tidal flat, Incheon, Korea. 2. Spatio-temporal distribution patterns of the major dominant species. *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, 9, 93-105.
- Steele, M.A. 1996. Effects of predators on reef fishes: separating cage artifacts from effects of predation. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 198, 249-267.
- Strasser, M. and C.P. Günther. 2001. Larval supply of

predator and prey: temporal mismatch between crabs and bivalves after a severe winter in the Wadden Sea. *J. Sea Res.*, 46, 57-67.

Van der Veer, H.W., R.J. Feller, A. Weber and J.I.J. Witte. 1998. Importance of predation by crustaceans upon bivalve spat in the intertidal zone of the Dutch Wadden

Sea as revealed by immunological assays of gut contents. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 231, 139-157.

2005년 9월 15일 접수
2006년 5월 23일 수리