

대형 저서동물 군집의 채집 면적이 상대적 출현 종수에 갖는 효과의 추정

유재원 · 김창수 · 박미라 · 이형곤¹ · 이창근 · 이재학¹ · 홍재상²

(주) 한국연안환경생태연구소
¹한국해양연구원 생태환경연구본부
²인하대학교 해양학과

Estimating the Size Effect on Relative Species Number in Macrobenthic Community

JAE-WON YOO*, CHANG-SOO KIM, MI-RA PARK, HYUNG-GON LEE¹, CHANG-GUN LEE,
JAE-HAC LEE¹ AND JAE-SANG HONG²

Korea Institute of Coastal Ecology, Inc., Department of Oceanography, Inha University, Incheon 402-751, Korea

¹*Marine Ecosystem and Environment Research Laboratory, Korea Ocean Research & Development Institute,
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea*

²*Department of Oceanography, Inha University, Incheon 402-751, Korea*

채집 면적이 다른 연구 결과 간 출현 종수의 비교를 가능토록 하기 위하여 대형 저서동물 군집 출현 종수와 채집 면적에 따른 관계를 파악하고 경험적 모형을 추정하였다. 이 연구는 주어진 채집 면적에서의 누적 상대종수(cumulative relative species number, CRSN)를 예측하는 데에 목적을 두었다. 재료로는 2002년 4월과 5월 그리고 8월에 방문한 전라북도 새만금 해역의 총 87개 정점에서 매 정점마다 정량 채니기인 Smith-McIntyre 그랩 채집기로 3회 반복 채집하여 구한 총 261개의 표본을 사용하였다. 상대적 출현 종수(%)는 1000 cm² 채집 면적의 것을 기준하였으며 누적 상대종수-채집 면적 간 패턴을 측정하고 관찰하였다. 환경 요인과 생물학적 변수간 상관관계 분석에서 대수 변환된 누적 상대종수는 유일하게 대수 변환된 평균 밀도와 유의한 관계를 갖는 것으로 추정되었다. 이를 바탕으로 3개 모형, Log CRSN 2000, Log CRSN 3000 그리고 Log CRSN을 제시하였다. 이들 중 앞의 2개는 각각 채집면적 2000과 3000 cm²의 누적 상대종수를 추정하며, 후자는 다양한 채집기와 채집 면적으로부터의 것을 추정하기 위한 것이다(모형의 유의수준은 모두 <0.001). 타 연구의 데이터베이스(과거 경기만과 새만금의 조간대나 조하대 대형저서동물 군집 자료)를 활용하여 모형의 타당성을 평가하였다. 채집 면적 3000 cm² 이내에서는 실측된 누적 상대종수가 모형의 95% 예측 구간에 포함되는 것으로 나타났으며 이 채집 면적 내에서의 예측치는 신뢰 가능한 것으로 판단할 수 있었다.

Macrobenthos species-area relationship was investigated and empirical models were estimated to enable comparisons among species numbers of different sample size. The study aims to choose a way to predict cumulative relative species number (CRSN) in a given sample size. Saemangeum, located in the west coast of South Korea, were visited in Apr., May and Aug., 2002 and a total of 261 biological samples from 87 stations were obtained by employing a quantitative sediment sampler, Smith-McIntyre grab and design of 3 replicates at each station. Relative species numbers (%) were baselined at sample size of 1000 cm² and the patterns of CRSN along the axis of sample size were measured and observed. In correlation analysis performed on a set of abiotic and biotic variables, log-transformed CRSN showed the only significant relationship with log-transformed density. Based on the result, three models, Log CRSN 2000, Log CRSN 3000 and Log CRSN were produced. The former two were devised to predict CRSN at 2000 and 3000 cm² respectively, and the latter at various sample sizes and samplers (all p-values were <0.001). Database from other studies (intertidal or subtidal macrofaunal samples from Kyonggi Bay and Saemangeum) were used to evaluate validity of the models. Observed CRSN below sample size of 3000 cm² fell under the range of 95% prediction interval and this was appeared to provide reliability of the models below that sample size.

Keywords: Species-Area Relationship, Macrobenthos, Species Richness, Sample Size Effect

*Corresponding author: jwyo023@netsgo.com

서 론

군집의 특성 파악에 가장 널리 쓰이는 생물 다양성 지수 가운데 하나가 주어진 면적 내에서 측정된 출현 종수(number of species or species richness)이다(Gray, 2000). 어떠한 유형의 생태계에서든 관심 구성원의 채집 종수는 채집 면적의 증가에 따라 비선형적(일반적으로 누승 모형의 형태)으로 증가하며 이는 누적 출현종수-채집 면적 곡선(species area curve)으로도 쉽게 예측된다. 비선형성으로 인해 채집 면적이 다른 표본 간 출현 종수의 비교는 불가능하며 이는 군집 연구 분야의 전문가들이 오랜 동안 겪어온 어려움 가운데 하나이다. 국내 해양 저서동물 군집의 연구에서도 의미 있는 출현 종수의 비교를 행하지 못하는 경우는 다반사이다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 Sanders(1968)의 희박법(rarefaction technique)과 Whittaker(1975)의 $d = SR_i / \log A$ 또는 $SR_i / \log N$ (SR_i = 표본 내 총 종수, A = 채집 면적 그리고 N = 총 개체수) 등이 제안된 바 있다.

대형 저서동물 군집의 출현 종수는 다양한 요인에 의해 결정되며 이를 주제로 다루는 논문은 일일이 열거할 수 없을 정도로 많다. 국내의 경우 연안역 대형 저서동물 군집의 다양도가 나타내는 시공간 패턴은 주로 퇴적물의 특성(substratum properties), 기온 변화 그리고 부영양화 등과 관련된 것으로 해석되고 있으며(Yoo and Hong, 1996; Yoo, 1998; Hong *et al.*, 1999), Ron and Grassle (1992)에 의하면 심해역에서도 퇴적물이 중요한 효과를 갖는 것으로 나타났다. 그러나 이러한 해석은 채집과 비교의 규모에 매우 의존적인 것이며, 이외에도 다양한 요인과 가설(Stehli *et al.*, 1967; Huston, 1979; Sanders, 1968)이 출현 종수 또는 다양성의 패턴을 설명하고 있다.

연안역 생태계의 모니터링에서 대형 저서동물 군집의 출현 종수의 변화를 살피고 그 원인을 논하는 것은 매우 중요한 일이다. 그러나 과거는 물론이고 최근 국내에서 행해진 대부분의 저서동물 군집 연구에서 채집 면적은 2000, 3000 cm²의 것으로 양분되어 비교에 어려움이 존재하는 상태라고 볼 수 있다. 비교적 특이적인 주제의 연구 문헌 간에서도 채집 면적이 서로 다른 경우가 있다. 예를 들면 양식장 해역의 저서생물 군집에 관한 연구에서, 각 등(2000)과 정 등(2002)의 채집 면적은 각각 2250 cm²와 3000 cm²이다. 물론 단위 면적으로 환산된 밀도와 생체량의 비교나 패턴의 관찰만으로도 의미가 있으나 출현 종수와 같은 유용한 정보를 담고 있는 변수가 추가된다면 군집 연구에서 해석의 신뢰도는 더욱 높아질 것이다.

앞서 제시된 예와 같이 어떤 조사 해역에서 채집 면적이 동일한 조건의 출현 종수가 갖는 시공간 패턴을 생물적 또는 무생물적 요인 등으로 설명하거나 예측하는 연구 문헌은 매우 흔하다. 그러나 채집 면적이 다른 결과 간 출현 종수의 비교를 행한 예는 적어도 국내 연구에서는 전무한 실정이며 정점 또는 서식처마다 달라질 것으로 기대되는 채집 면적에 따른 누적 출현종수의 증가 패턴이 어떠한 요인에 의해 결정되는 것인가를 연구한 사례 역시 많지 않다. 적정 채집 면적의 추정을 주제로 다룬 종전의 연구들은 대체로 한 개의 정점에서 집중적 노력을 투입하여 누적 종수와 채집 면적 간 관계를 추정하였다(Livingston *et al.*, 1976; 고 등, 1999). 본 연구에서는 누적 종수의 상대적 증가율 추정에 초점을

맞추었고, 제한된 채집 면적에서 다양한 표본의 비교를 통하여 규칙성을 찾기 위한 전략을 선택하였다. 저자 등은 절대 종수가 대상일 경우 증가율의 변화 외에 표본마다 다른 출현종수의 수준을 예측하는 것이 필요하고 (1) 이것은 주어진 독립변수 자료의 한계성(예를 들어 다양한 환경 요인 자료의 축적이 필요)과 (2) 자료가 충분히 준비되었다 하더라도, 예상컨대 퇴적물 특성, 연평균 수온, 염분도 등 다양한 요인이 모형에 포함되어야 하며(모수 절약의 법칙 위배, 모형의 강건성과 보편성 취약해짐) 그리고 (3) 이러한 요건들을 만족하였다 해도 단순한 선형 함수 모형만으로는 만족할 만한 예측이 불가능(복잡한 비선형 모형 요구)하다고 생각하였기 때문이다.

다양한 퇴적 환경과 수괴 환경으로 이루어진 새만금 해역에서 2002년 4, 5, 8월의 3회의 시기에 걸쳐서 채집된 자료를 바탕으로 가장 보편적 채집 단위(sampling unit)인 1000 cm²의 면적을 100%로 기준하여 채집 면적에 따른 누적 종수의 상대적 증가율을 예측하는 경험적 모형을 추정하였다. 앞서 언급한 바와 같이 절대적 출현 종수의 증가율을 예측할 경우 모형이 지나치게 복잡해질 가능성이 있고 따라서 절대적 출현 종수의 변동에 효과를 주는 요인은 독립적인, 좀더 가벼운 모형을 추정하는 것이 본 연구의 목적이다. 만약 상대적 증가 속도의 규칙성을 파악한다면 다양한 서식처 조건에 구애받지 않고 절대종수를 추정하며, 다양한 시공간적 스케일에서의 출현 종수의 변화양상 관찰과 더욱 많은 연구 사례 간 유용한 비교가 가능해질 것으로 기대한다.

재료 및 방법

현장 조사

새만금 주변 조하대 지역의 연성 기질 서식처를 대상으로 2002년 4월 11개 정점, 5월과 8월 각각 38개 정점(총 87개 정점)을 설정하였다(Fig. 1). 매 정점에서 3회씩 반복 채집(replication)하였으며, Smith-McIntyre 그랩 채집기(채집 면적 1000 cm² 또는 0.1 m²)를 이용하여 총 261개의 표본을 채집하였다. 채집물은 현장에서 1 mm 직경의 체 구멍으로 돌레가 채워진 sieve에 담고 해수로 세척하여 퇴적물과 1 mm 이상의 몸체 크기를 갖는 대형 저서동물을 분리하였고, 추출된 저서동물을 중성 포르말린에 고정, 실험실로 운반하였다.

현장에서는 저서생물 시료의 채집과 동시에 CTD(SBE-19)와 전자 탐침 온도계 등을 이용하여 water column의 수온, 염분도 그리고 퇴적물 온도 등을 측정하였으며, 퇴적물의 평균 입도(MGS, mean grain size)와 분급도(sorting value), 함수량(water content) 그리고 퇴적물 내 유기탄소 함량(organic carbon content) 등을 측정하기 위한 시료를 채집하였고 냉동하여 실험실로 운반하였다.

실험실 분석

운반된 생물체는 우선 실험실 내에서 숙련된 기능원들에 의해 상위 수준의 동물군 별(예를 들어 연체동물, 갑각류, 극피동물 등)로 구분되었고, 이후 연구원들에 의해 현미경 하에서 가능한 최하위 수준인 종 수준까지 동정되었다. 각 정점의 반복 채집 시료 별로 출현 종수를 측정하였다.

표층 퇴적물의 함수량을 측정하기 위하여 퇴적물 시료의 건조

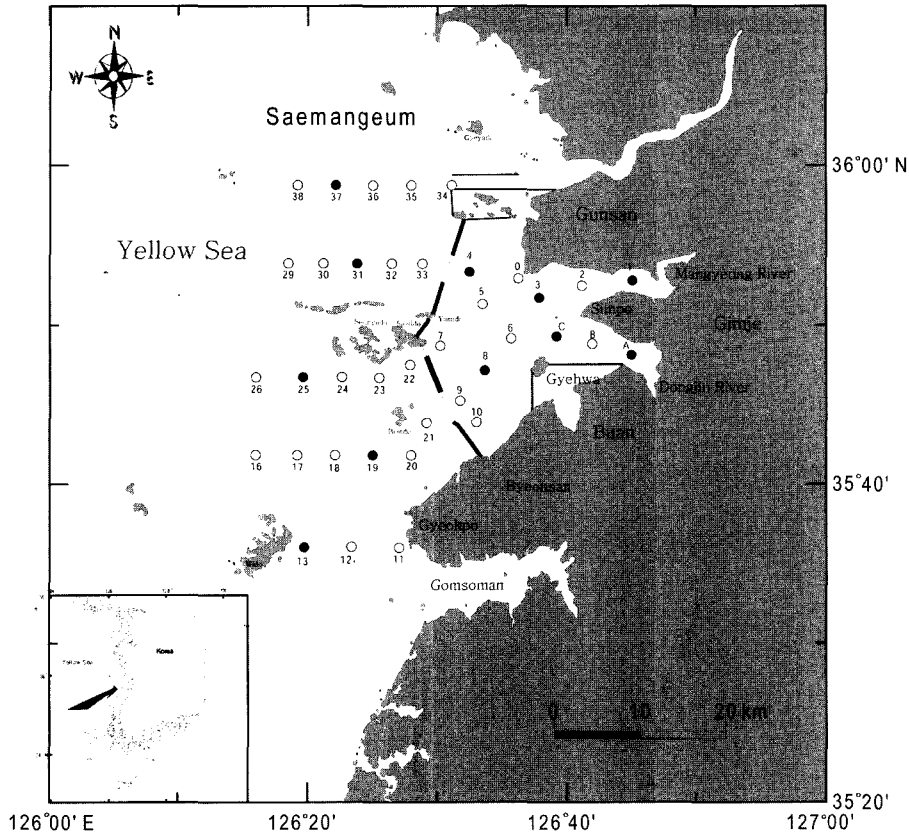


Fig. 1. Locations of 38 sampling stations for estimating size effect on species number in Saemangeum area. -11 stations (●) are those visited in Apr., 2002.

전 무게와 건조 후 무게의 차를 측정하였고, 건조 전 무게에 대한 백분율로 나타내었다. 입도 분석을 위하여 퇴적물의 유기물과 탄산염을 제거한 후 습식체질과 건식체질하여 무게의 백분율을 구하였다. 퇴적물의 조직학적 변수인 평균입도(MGS, mean grain size)와 분급도(sorting) 등을 측정하였다. 퇴적물 내 유기탄소 함량을 측정하기 위해 Carlo Erba NA1500 CNS Analyzer를 이용하여 분석하였다.

자료 분석

경험적 모형의 추정에 사용하기 위한 자료를 다음과 같은 방법으로 만들었다. 먼저 각 정점의 3개 반복 시료, 1000 cm² 채집 면적 별로 출현 종수를 측정하였고, 가능한 조합을 사용하여 1000 (n=3), 2000(n=3), 3000 cm²(n=1) 면적에서의 평균 출현 종수를 추정하였다. 출현 종수-채집 면적 간 관계를 파악하기 위하여 채집 면적 대비 출현 종수의 평균을 사용한 이유는 채집 오차의 영향을 적게 받을 수 있도록 하기 위한 것이다. 3000 cm²는 평균 종수를 추정할 수 없었으나 채집 면적이 상대적으로 넓기 때문에 편의 역시 적을 것임을 가정하였다.

본 연구에서는 평균 누적 상대 출현종수(cumulative species number in average, 이하 누적 상대종수)의 패턴을 파악하는 것이 주목적이므로 채집 면적 1000 cm²의 평균 출현 종수를 100%로 기준하여 증가된 채집 면적의 출현 종수의 비율(%)을 나타내었다. 우선 관찰치를 대상으로 두 가지 가설을 일원 분산분석(one-way ANOVA)을 이용하여 검정하였다. 첫째는 '관찰치의 평균에 시기적인 차이가 없다'이며 둘째는 '관찰치 평균에 새만금 방조제 안, 밖의 차

이가 없다'이다. 전자는 각각 2000과 3000 cm²의 관찰치에서 세 조사 시기(2002년 4월, 5월 그리고 8월) 간을 비교한 것이며, 둘째는 3000 cm²의 관찰치만을 대상으로 각 조사 시기별 방조제 안, 밖 간을 비교한 것이다. 후자는 2002년 새만금 방조제를 중심으로 안과 밖의 대형 저서동물 군집의 분포와 환경이 뚜렷하게 대비된 결과(해양수산부, 2003)에 근거한 것이다.

전통적으로 출현 종수(S)-채집 면적(A)은 $S = CA^b$ 와 같은 비선형적 관계를 갖는 것으로 알려져 있다. 87개 정점의 관찰값에 이러한 누승 모형을 적합시켰으며, 주어진 채집 면적 내에서도 누승 모형의 적합이 타당한 지를 관찰(모형의 결정계수, r²)하였다. 누적 상대종수와 채집 면적 간 대수-대수 관계의 여부를 진단한 후 밑을 10으로 하는 대수로 변환하였으며, 3000 cm²의 상대 종수(누적 상대종수의 다양한 선형 패턴을 특징화할 것으로 간주)와 생물학적 변수(채집 면적 1000 cm²의 평균 개체수와 종수) 그리고 표층 퇴적물의 온도, 함수량, 평균 입도, 분급도, 유기 탄소 함량 그리고 저층 염분도 간 상관관계(Pearson's product moment correlation)를 추정하였고 결과에는 유의한 상관관계(p-value < 0.05)만을 표시하였다.

상관관계의 분석에서 유의성을 나타낸 변수를 독립 변수로 포함하여 누적 상대종수를 예측하는 경험적 모형(다중 회귀모형)을 추정하였다. 만약 독립 변수가 2개 이상인 경우 신뢰할 수 있는 모형을 제시할 수 있도록 다중 공선성 문제를 검토하였다. 이를 위해 분산 확대 요인(variance inflation factor, VIF)을 계산하였고, 다소 주관적인 방법으로 소개된 최(1997)의 기준값(10 이상이면 다중 공선성 존재)에 근거하여 변수들을 제거하거나 선택하였다.

선택된 모형으로부터 관찰값의 95% 신뢰 구간을 추정하였다.

모형의 타당성을 테스트하기 위하여 본 연구진이 소유한 3개의 데이터베이스를 활용하였다. 모두 “반복채집 실험계획”(replication sampling design) 하에서 표본 채집이 이루어진 것으로 (1) 경기만에 위치한 승봉도 남단의 사질 퇴적상(수심 약 20 m, 평균입도 0.15φ)과 (2) 인천 송도 척전 조간대의 니질~사니질 퇴적상(평균 입도는 약 3.5~5φ) 그리고 (3) 본 조사 표본의 일부인 2002년 5월과 8월의 새만금 해역의 표본이다.

첫번째 자료로서 여러 채집 시기의 승봉도 남단의 표본 데이터베이스에서 2001년 12월과 2002년 1월, 3월 그리고 5월의 것들을 선택하였으며, 각 시기 내에서 6개의 반복 채집 표본들을 무작위적으로 추출하여 누적 상대종수를 계산하였다.

두 번째 자료로서 인천 송도 척전 조간대 표본 데이터베이스(1992년 9월-1996년 11월 기간동안 격월 간 채집)로부터 무작위적으로 4개 표본(각각 10개 replicates로 구성)을 선택, 누적 상대종수를 계산하였다. 4개 표본은 93년 5월 하부 조간대, 94년 11월 상부 조간대, 94년 3월 중부 조간대 그리고 93년 7월 상부 조간대이다. 척전 조간대의 누적 상대종수의 평균은 Gray(2000)에서 소개된 바 있는 estimateS 프로그램(version 6.0b1, <http://vicero.yeeb.uconn.edu/estimateS>)을 사용하였다. 이 프로그램은 누적 종수를 계산할 때 처음 표본의 선택부터 채집 면적의 증가에 따른 다음 표본의 선택을 무작위적으로 한다. 이렇게 하면 10개의 반복 표본으로 구성된 자료에서 누적 종수-채집 면적 곡선이 10! 개가 생성된다. 이 가운데 50개를 선택하여 각 채집 면적에서의 평균 종수를 계산하도록 하였다. 첫 번째와 두 번째 자료의 경우 모형 타당성의 검증은 누적 종수의 패턴 비교와 관찰치가 예측치의 신뢰 구간에 포함되는지의 여부를 관찰하기 위한 것이다.

마지막으로 만경-동진 하구역 표본은 누적 종수 패턴의 비교보다는 1988년에 조사 발표된 Choi and Koh(1994)의 2000 cm² 채집 면적 표본의 다모류 출현 종수자료(나머지 동물군은 밀도 추정만 가능하나 종수 추정이 불가능한 것으로 판단하였음)에 본 연구의 추정 모형을 적용하여 3000 cm²의 다모류 출현 종수를 예측, 이를 2002년의 5월과 8월 조사 자료와 비교가 가능한지의 여부를 관찰하기 위해 시도된 것이다. 만약 1988년 채집 면적 2000 cm²의 자료로부터 3000 cm² 채집 면적의 다모류 출현 종수 예측이 적절하다면, 2000 cm² 채집 면적의 실측된 다모류 출현 종수와 동일한 채집 면적의 2002년 5월과 8월의 새만금 표본의 것 간 유의 또는 무의미한 차이가 3000 cm²의 1988년 예측치와 2002년 5월 8월 실측치 간에서도 동일하게 관찰될 것으로 기대하였다. 표본으로는 동일한 환경구배에 속하는 정점 자료를 선별하여, Choi and Koh(1994)의 M4, M5(만경강 유역), 그리고 D3, D4(동진강 유역)와 2002년 5월, 8월의 새만금 해역 조사 정점인 St. 1, St. 2, St. A, St. B 등을 이용하였으며, 안정적 비교를 위해 4개 정점 출현 종수의 관찰치를 평균하여 비교하였다. 2002년 8월 St. 1의 출현 종수가 이상치의 범주(평균과 표준 편차가 나머지 표본 것의 약 2배와 7.5배)에 해당하는 것으로 판단되어 제외시켰다. 다모류 출현 종수가 나타내는 Choi and Koh(1994)와 본 자료의 2000 cm² 채집 면적의 관측값 간의 패턴과 전자의 3000 cm² 예측값과 후자의 3000 cm²의 관측값 간의 패턴을 앞서 언급한 바 있는 일원 분산 분석과 스튜던트의 t분포를 이용한 모든 쌍 간 다중 비교(all pair-

wise comparisons using Student's t)를 이용하여 비교하였다. 이러한 시도는 다모류 출현 종수의 채집 면적에 따른 증가율이 총 출현 종수의 것과 동일한 관계임을 가정한 것이다.

결 과

누적 상대종수

채집 면적 1000 cm²의 출현 종수를 100%로 기준하여 2000 cm²와 3000 cm²의 평균 누적 상대종수를 조사 시기별로 나타내었다. 2002년 4월의 1개 정점(St. 4)의 것만 제외하면 나머지 표본들에서 3000 cm²에서의 누적 상대종수는 2000 cm²의 것에 매우 의존적인 것으로 나타났다(Fig. 2). 2002년 5월 표본의 누적 상대종수가 위, 아래로 넓은 분산을 나타내었다. 동일한 채집 면적에서 누적 상대종수 평균의 계절 간 차이가 있는 지를 알아보기 위해 수행한 일원 분산분석 결과를 나타내었다(Table 1). 2000과 3000 cm²의 면적에서 관찰치는 평균적으로 계절 간 유의한 차이를 갖지 않

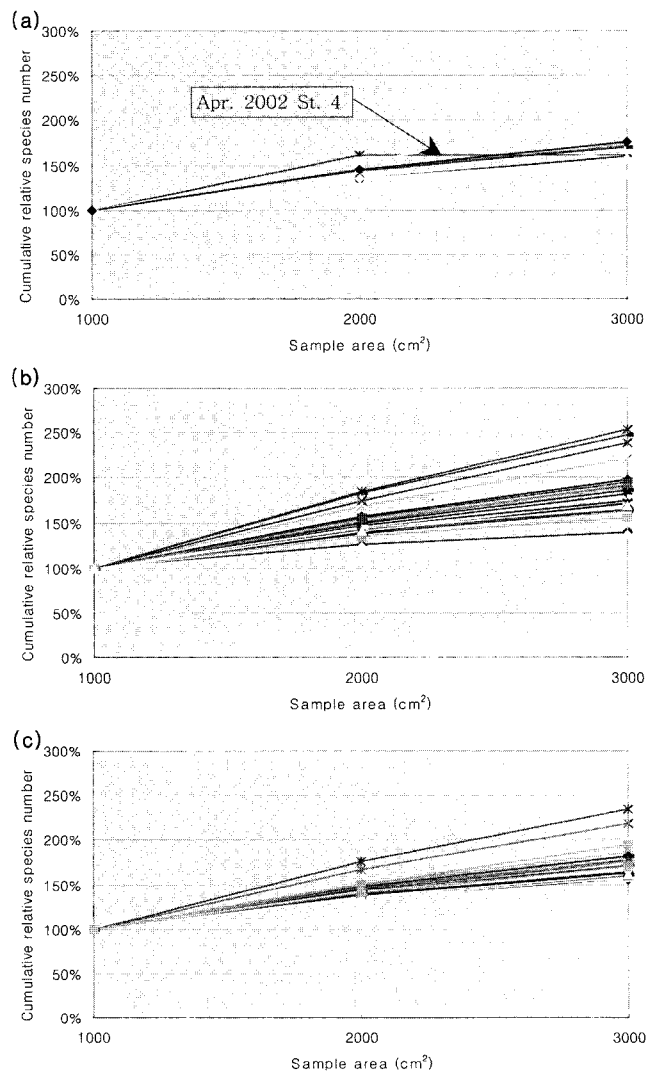


Fig. 2. Cumulative relative species number in average and sample size (cm²) - Observations of Apr. (A), May (B) and Aug., 2002 (C).

Table 1. Results of one-way ANOVA for testing difference of relative species number at given sampling areas of 2000 and 3000 cm² among sampling time, Apr., May and Aug., 2002

Sample area: 2000 cm ²					
Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	2	0.01	0.01	0.42	0.661
Error	84	1.16	0.01		
Total	86	1.17			
Sample area: 3000 cm ²					
Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	2	0.09	0.05	0.92	0.401
Error	84	4.18	0.05		
Total	86	4.28			

Table 2. Results of one-way ANOVA for testing difference of relative species number (3000 cm²) between inner and outer dyke of Saemangeum at each sampling time

Sample time: Apr., 2002					
Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	0.01	0.01	0.56	0.473
Error	9	0.22	0.02		
Total	10	0.24			
Sample time: May, 2002					
Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	0.02	0.02	0.26	0.613
Error	36	2.89	0.08		
Total	37	2.91			
Sample time: Aug., 2002					
Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	0.01	0.01	0.42	0.523
Error	36	1.02	0.03		
Total	37	1.03			

는 것(p-value는 각각 0.661, 0.401)으로 볼 수 있었다. Table 2에 는 각 채집 시기에서 새만금 방조제 안, 밖의 차이가 존재하는 지 를 검증한 결과를 나타내었다. 2002년 4월과 5월 그리고 8월 3000 cm²의 면적에서 관찰되는 평균적으로 방조제 안, 밖 간 유의한 차 이를 갖지 않는 것(p-value는 각각 0.473, 0.613 그리고 0.523)으 로 볼 수 있었다. 총 87개의 표본에 누승 모형(power curve)의 적 합 결과를 나타내었다(Fig. 3). 관찰치의 경우와 마찬가지로 2002 년 5월의 표본에서 누적 상대종수의 패턴이 다양한 것으로 나타 났다. 결정 계수는 2002년 4월 St. 4의 것(0.866)을 제외하면 나머 지는 0.990~0.999의 높은 값을 나타내었다. 이에 근거하여 주어진 채집 면적 내(1000~3000 cm²)의 누적 상대종수-채집 면적 간 관 계도 전형적인 대수-대수 관계임을 추정할 수 있었다.

누적 상대종수와 생물적, 무생물적 요인과의 상관관계

Log CRSN 3000은 생물적, 비생물적 요인 가운데 유일하게 대 수 변환된 1000 cm² 면적의 평균 개체수와 유의한 상관관계(r= -0.328, p-value=0.002)를 갖는 것으로 나타났다. 이와 달리 대수 변환된 1000 cm² 면적의 평균 종수(Log S1000)는 저층 염분도 (bottom salinity, ‰)와 퇴적물 함수량(water content, %), 분급도

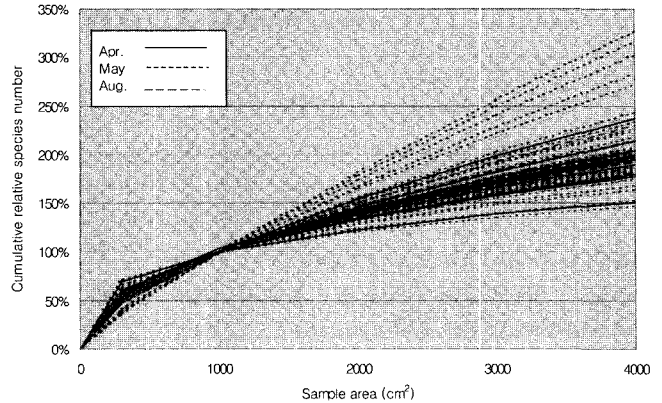


Fig. 3. Power curves fitted on cumulative relative species number in average and sample size data.

Table 3. Results of correlation analysis (Pearson's product moment). r (p-value)

	Log CRSN 3000	Log N 1000	Log S 1000
Log N 1000	-0.328(0.002)		
Log S 1000		0.732(<0.001)	
Sediment temperature			
Bottom salinity			0.443(<0.001)
Water content			0.284(0.013)
Mean grain size			
Sorting		0.301(0.008)	0.411(<0.001)
Organic carbon			0.336(0.039)

*Log CRSN 3000=log-transformed cumulative species number in average at sample size of 3000 cm², Log N 1000=individuals in average at sample size of 1000 cm², Log S 1000=species number in average at sample size of 1000 cm².

(sorting) 그리고 유기탄소 함량(organic carbon content, %) 등 다 양한 요인과 유의한 상관관계를 갖는 것으로 나타났다(Table 3).

누적 상대종수와 채집 면적, 개체수 간 경험적 모형

누적 상대종수와 채집 면적 그리고 개체수 간의 관계를 고려하 여 세 가지 선형 회귀 모형을 추정하였다(Table 4). 첫 번째 모형 은 1000 cm² 채집 면적의 대수 변환된 평균 밀도(Log N 1000)로 부터 2000 cm²의 대수 변환된 누적 상대종수(Log CRSN 2000)를 추정하는 모형이다. 두 번째 모형은 1000 cm² 채집 면적의 대수 변환된 평균 밀도(Log N 1000)로부터 3000 cm²의 대수 변환된 누 적 상대종수(Log CRSN 3000)를 추정한 모형이다. 세 번째 모형 은 다양한 면적의 채집기로부터의 표본에 적용하기 위하여 추정 한 모형으로서 대수 변환된 평균 밀도(Log N 1000)로부터 다양 한 면적의 대수 변환된 누적 상대종수(Log CRSN)를 추정할 수 있다. 만약 1000 cm² 이하의 채집 면적일 경우에는 평균 밀도-채 집 면적이 선형관계이므로 해당 채집 밀도에 적절한 비례식이나 상수를 곱하여 추정할 수 있을 것이다. 세 가지 모형 모두 p-value 0.001 이하의 유의성을 갖는 것으로 나타났으며 2개 이상의 변수 가 포함된 세 번째 모형에서 다중공선성(multi-collinearity) 여부 를 진단하기 위하여 계산한 VIF(variance inflation factor)가 기준

Table 4. Estimated regression models of cumulative relative number of species (Log CRSN 2000, Log CRSN 3000 and Log CRSN) on individuals in average at sample size of 1000 cm² (Log N 1000) and sample area (Log SA)

Log CRSN 2000=0.251-0.0434 Log N 1000					
Predictor	Coef	SE Coef	T	P	
Constant	0.25095	0.019	13.46	0.000	
Log N 1000	-0.04344	0.009	-4.92	0.000	
S=0.02968 R-Sq=22.3% R-Sq(adj)=21.4%					
Analysis of Variance					
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	0.021	0.021	24.16	0.000
Residual Error	84	0.074	0.001		
Total	85	0.095			
Log CRSN 3000 = 0.369 - 0.0606 Log N 1000					
Predictor	Coef	SE Coef	T	P	
Constant	0.36865	0.029	12.57	0.000	
Log N 1000	-0.06060	0.014	-4.36	0.000	
S=0.04670 R-Sq=18.4% R-Sq(adj)=17.5%					
Analysis of Variance					
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	0.041	0.041	18.98	0.000
Residual Error	84	0.183	0.002		
Total	85	0.225			
Log CRSN= - 1.48+0.510 Log SA-0.0248 Log N 1000					
Predictor	Coef	SE Coef	T	P	VIF
Constant	-1.47665	0.037	-40.03	0.000	
Log SA	0.50984	0.011	47.30	0.000	1.0
Log N 1000	-0.02478	0.005	-4.62	0.000	1.0
S=0.03431 R-Sq=89.7% R-Sq(adj)=89.7%					
Analysis of Variance					
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	2.658	1.329	1129.20	0.000
Residual Error	258	0.304	0.001		
Total	260	2.962			

치인 10보다 훨씬 낮은 것으로 나타나 다중공선성이 존재하지 않는 것으로 추정할 수 있었다.

세 가지 모형의 적합 결과와 예측치의 95% PI(95% prediction interval)을 Fig. 4에 나타내었다. 첫 번째 모형(Log CRSN 2000 vs. Log N 1000)의 95% PI는 ±0.060이며 anti-log scale에서는 -18.6과 +21.4%이다. 두 번째 모형(Log CRSN 3000 vs. Log N 1000)의 95% PI는 ±0.094이며 anti-log scale에서는 -34.1과 +42.3%이다. 세 번째 모형(Log CRSN vs. Log SA and Log N 1000)의 95% PI는 ±0.068인데 anti-log scale로 나타내면 sample size에 따라 달라진다. 채집 면적 1000 cm²에서는 -14.6과 +17.0%이며, 2000 cm²에서는 -20.7과 +24.2% 그리고 3000 cm²에서는 -25.5와 +29.8%였다.

모형의 타당성

앞에서 추정된 세가지 모형을 채집 면적의 적용이 자유로운 모

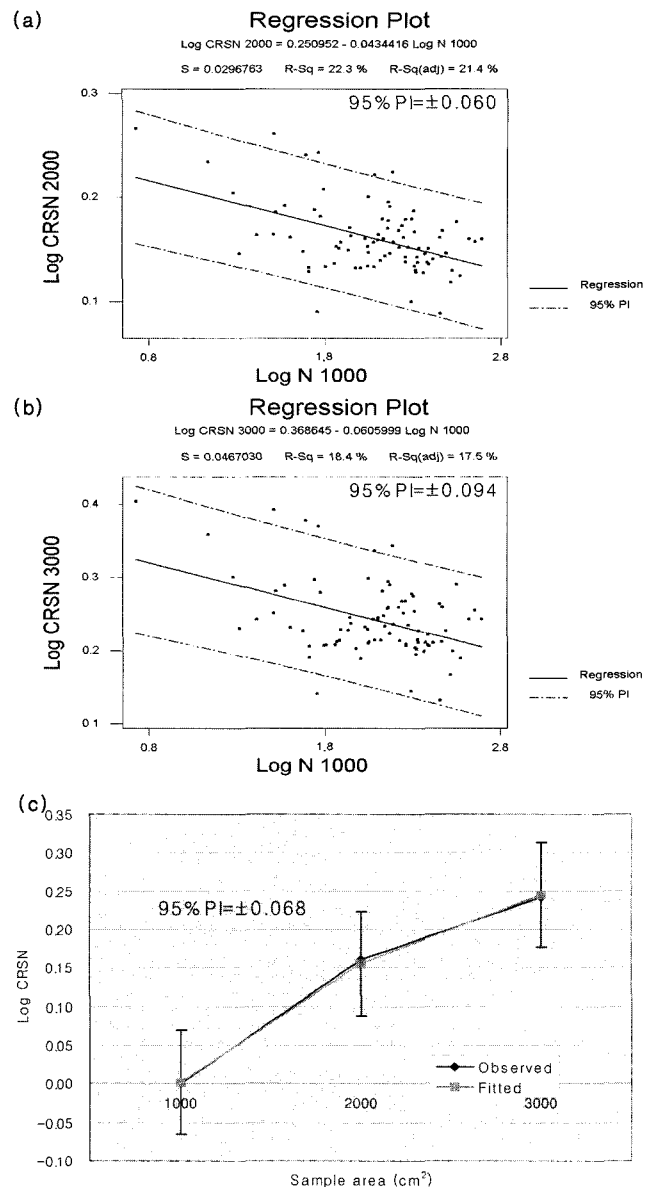


Fig. 4. Estimated models and 95% prediction intervals. - Regression models of Log CRSN 2000 vs. Log N 1000(a), Log CRSN 3000 vs. Log N 1000(b) and Log CRSN vs. Log SA and Log N 1000(c).

형(Log CRSN)과 채집 면적이 고정된 모형(Log CRSN 2000, Log CRSN 3000)으로 구분하여 각각 CRSN1과 CRSN2로 새롭게 명명하고, 두 모형의 타당성을 검토하였다. 인천 송봉도 남단에서 채집된 표본들로부터 누적 상대종수를 계산하였고 이를 두 가지 모형에 의한 예측치와 비교하였다(Fig. 5a-d). 채집 면적 4000 cm²에서 일부 관찰치가 모형의 95% 신뢰 구간을 벗어났으나 대부분 구간 내에 포함되는 것으로 나타났다. 관찰치와 예측치 간 차이는 CRSN2의 것이 상대적으로 좁은 것으로 나타났다.

1992년 9월부터 1996년 11월까지 격월 간 인천 척전 조간대에서 채집된 표본들 가운데 무작위적으로 4개를 추출하여 누적 상대종수를 계산하였다. 두 가지 예측치(CRSN1, CRSN2)와 비교한 결과(Fig. 6a-d) 송봉도의 경우와 마찬가지로 채집 면적 4000 cm²

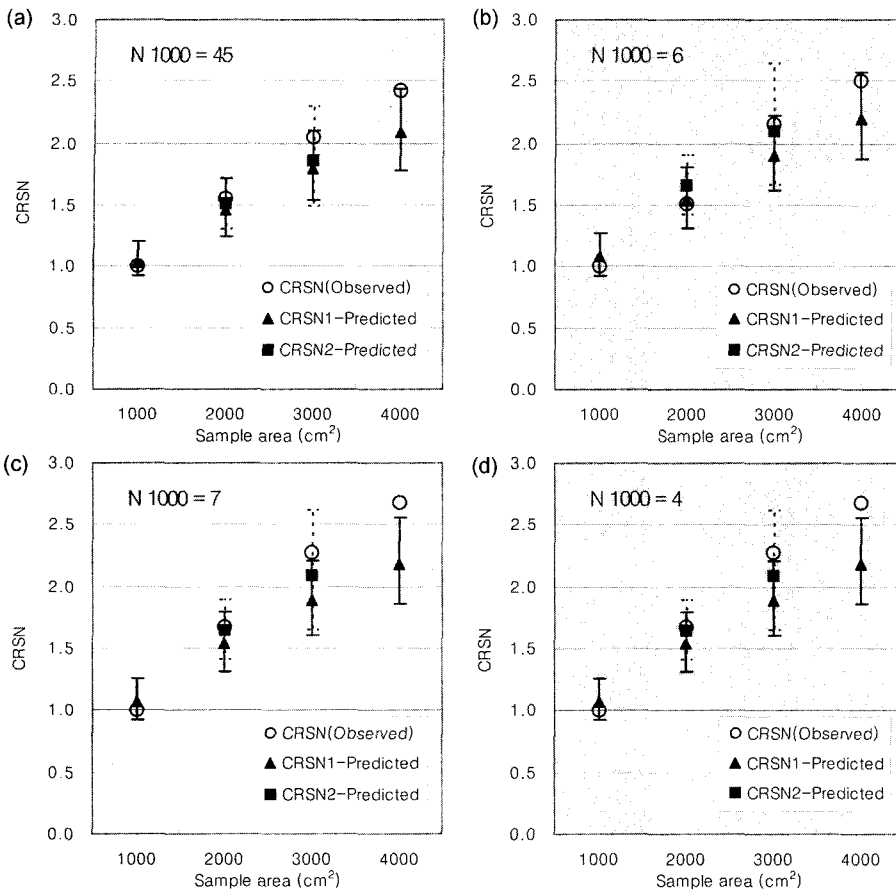


Fig. 5. Evaluation of validity of the empirical model by comparing observed and predicted values from randomly selected subtidal sand bottom samples around Seungbong Island, Kyonggi Bay, Dec. 2001 (a), Jan., Mar. and May 2002 (b~d) (CRSN1=Log CRSN; CRSN2=Log CRSN 2000, Log CRSN 3000). N 1000 denotes an average density at sample size of 1000 cm².

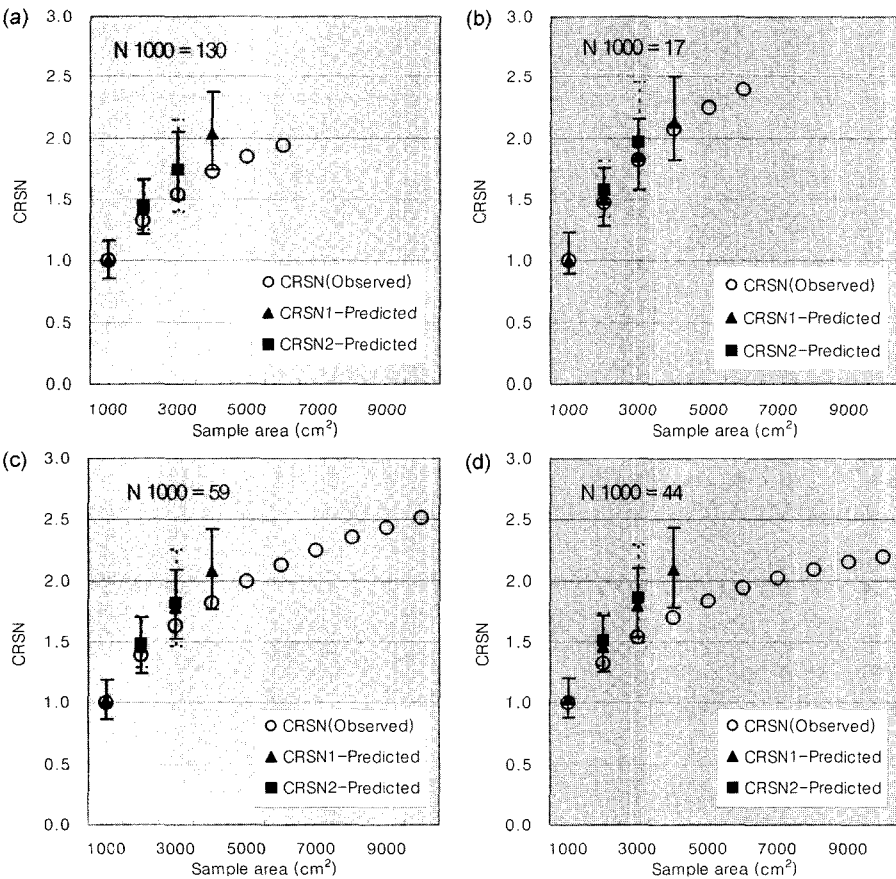


Fig. 6. Evaluation of validity of the empirical model by comparing observed and predicted values from randomly selected intertidal mud and sandy silt bottom samples in Chokchon, Kyonggi Bay, May 1993 (a), Nov. 1994 (b), Mar. 1994 (c) and Jul. 1993 (d). N 1000 denotes an average density at sample size of 1000 cm².

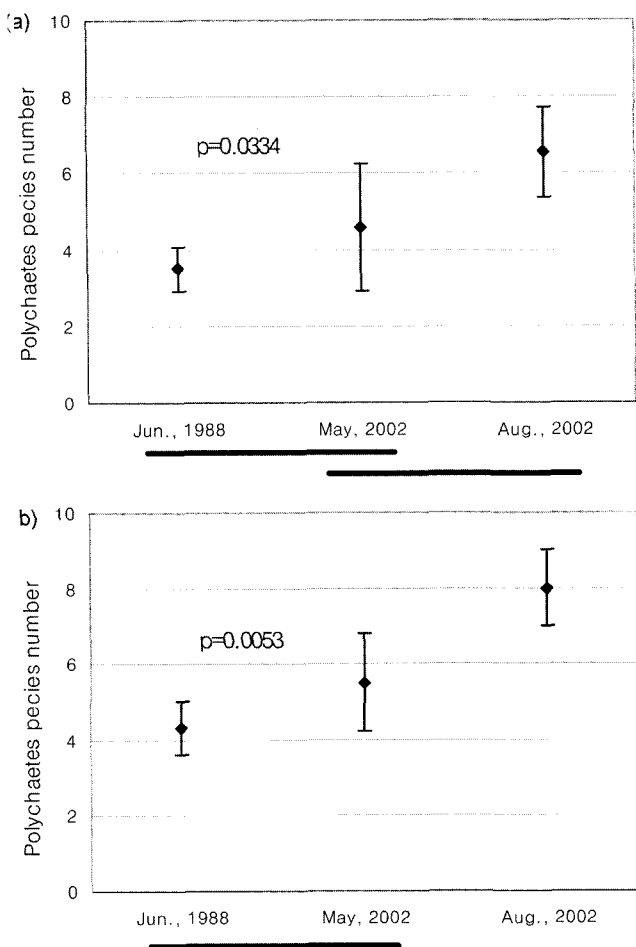


Fig. 7. Comparisons of the polychaete species number of Saemangeum in 1988 and 2002. ANOVA was performed among observed values (Jun., 1988, May and Aug., 2002) at sample size of 2000 cm² (a) and among predicted (Jun., 1988) and observed values (May and Aug., 2002) at 3000 cm² (b). Solid line means not significantly different at p-value of 0.05.

에서 일부 관찰치가 모형의 95% 신뢰 구간을 벗어난 것으로 나타났으나(Fig. 6d) 대부분 구간 내에 포함되었다. 관찰치와 예측치 간 차이는 CRSN1의 것이 좁은 것으로 나타났다. 타 지역 자료와의 비교 결과 3000 cm² 이내에서는 본 연구에서 추정된 경험적 모형의 예측을 신뢰 가능한 것으로 판단할 수 있었다.

1988년(Choi and Koh, 1994)과 2002년의 새만금 해역 다모류 출현 종수의 패턴을 비교한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 예측치의 추정은 앞서의 2가지 모델로 구하였으며, CRSN2의 경우에는 2000과 3000 cm²의 상대종수를 추정된 다음 비례식으로 절대종수를 추정하였다. CRSN1과 CRSN2의 예측치는 동일한 것으로 나타났다. Fig. 7a는 2000 cm² 면적에서 실측치간 비교한 것이다. 시기 간 출현 종수에는 유의한 차이(p=0.0334)가 있는 것으로 나타났으며, 다중 비교 결과 유의 수준 0.05에서 1988년 6월의 4개 정점별 다모류 출현 종수의 평균은 2002년 5월의 것과 동일하나 8월의 것과는 유의하게 다른 것으로 나타났다. Fig. 7b는 3000 cm² 면적에서 예측치(1988)와 실측치(2002년 5월과 8월) 간 비교한 것이다. 시기 간 출현 종수에는 유의한 차이(p=0.0053)가 있는 것으로

나타났으며, 유의 수준 0.05에서 1988년의 4개 정점별 다모류 출현 종수의 평균은 2002년 5월의 것과 동일하나 8월의 것과는 유의하게 다른 것으로 나타났다.

고 찰

이 연구에서는 모형의 활용도를 높이기 위하여 2가지 유형의 것(CRSN1과 CRSN2)을 제시하였다. 그 가운데 CRSN1은 다양한 면적의 대수 변환된 누적 상대종수(Log CRSN)를 추정하는 모형으로서 주로 직경 10-20 cm²의 원형 코어 채집기나 330, 500 cm²의 van Veen 또는 Smith-McIntyre 그랩 채집기로부터의 반복 채집 표본에 적용하여 사용할 수 있도록 한 것이다. 1000 cm²의 밀도는, 평균 밀도-채집 면적이 선형관계이므로, 관찰된 밀도에 적절한 상수를 곱하여(예를 들어 500 cm²의 경우 ×2) 추정할 수 있다. 모형에 주어진 면적 내의 관찰된 밀도를 적용하여 상대 종수를 추정한 뒤 원하는 면적의 누적 종수를 추정하여 비례식을 사용하면 절대 종수를 구할 수 있을 것이다. 1000 cm² 이하 채집 면적의 누적 종수는 power curve의 특성상 2000 또는 3000 cm²의 추정치에 비해 신뢰 구간이 좁을 것으로 예상할 수 있으며, 본 조사 자료를 사용하여 시뮬레이션을 행한 결과 1000 cm²의 누적 종수와 비교하면 330 cm² 채집 면적에서는 평균 56.7%(95% 신뢰구간은 54.1~59.3%), 500 cm² 채집 면적에서는 평균 70.1%(95% 신뢰구간은 66.8~73.3%)인 것으로 나타났다.

생물학적 변수와 환경 요인 간 비교에서 출현 종수는 퇴적물의 평균 입도를 제외한 저층 염분도, 퇴적물 함수량, 분급도 그리고 유기탄소 함량 등과 유의한 상관관계를 갖는 것으로 나타났다. 조사 해역은 만경, 동진강으로부터 유입되는 담수의 영향을 받는 기수해역으로서 이러한 곳에서는 일반적으로 염분도와 퇴적상이 저서 생물상의 분포를 결정하는 주요 인자이다(Hong and Yoo, 1996). 따라서 군집의 구조를 반영하는 출현 종수와 환경 요인 간에 관찰된 위와 같은 결과는 기수 해역의 전형을 보여주는 것이라 하겠다. 한편, 1000 cm² 채집 면적 기준 출현 종수와 개체수 간의 관계는 양성 상관관계인 것으로 나타났으며, 이 역시 연안역의 저서 동물 군집에서 비교적 흔하게 관찰되는 현상이다. 이러한 관계를 쉽게 이해할 수 있는 예가 Sanders(1968)의 희박법 곡선(rarefaction curve)이며, 예외도 있으나 대체로 높은 개체수의 표본에서 상대적으로 높은 기대 종수(expected number of species)가 관찰된다(예를 들어, 임과 홍(1997)의 Fig. 10, 11이나 Sanders(1968)의 Fig. 2-4). 이는 채집 노력량이 다른 표본 간 출현 종수를 비교하기 위하여 Whittaker(1975)가 제안한 $d = SR / \log N$ (SR = 표본 내 총 종수 그리고 N = 총 개체수)의 관계식으로도 알 수 있는 것이다.

반면 3000 cm² 면적에서 누적 상대종수의 증가 비율은 예상 밖의 관계를 보여주었다. 누적 상대종수는 모든 물리적 환경 요인과는 관련없는 것으로 나타났으나, 생물의 밀도와는 유일하게 유의한 상관관계를 갖는 것으로 관찰되었으며, 생물의 밀도가 낮을수록 상대적 출현 종수의 증가율은 높아지는 선형적 관계가 존재함을 파악할 수 있었다. 이러한 관계를 희박법 곡선 또는 누적 출현 종수-채집 면적 곡선을 예로 들어 설명한다면, 밀도가 낮은 표본의 곡선 기울기가 밀도가 높은 표본의 것보다 급격하여, 낮은 밀도와 낮은 출현 종수의 표본에서 채집 면적이 증가할수록 상대적

인 종수의 증가가 더욱 두드러졌음을 의미한다. 관찰 자료로부터 예측한다면 2002년 4월 정점 31의 경우 채집 면적이 1000 cm²일 때의 평균 종수가 52종이고, 채집 면적이 3000 cm²로 증가했을 때는 81종이 출현하였다면 절대적으로는 29종이 증가한 것이고 상대적으로는 57%가 증가한 것이다. 반면 2002년 5월의 정점 1에서 채집 면적 1000 cm²의 평균 종수가 5종이었고 3000 cm²에서는 10종이 출현하여 절대적으로는 불과 5종이 증가하였으나 상대적으로는 100%가 증가한 것이다. 관찰된 상관관계는 자료에서 이러한 현상이 우세하였음을 나타내는 것이다.

이 연구에서 관찰된 누적 상대종수는 1000 cm²를 100%로 기준하였을 때 2000 cm²에서 평균 145%, 3000 cm²에서 176%이다. 국내의 누적종수-채집면적 관계에 관한 연구로는 Hong(1983)과 고 등(1999)이 있다. 전자의 경우에는 퇴적물의 부피와 누적 종수의 관계를 살펴본 것으로 본 연구 결과와의 비교가 어렵다. 고 등(1999)의 누적 종수곡선으로부터 추정된 누적 상대종수는 박스 코어와 van Veen 그래프 채집기를 사용한 조간대와 조하대에서 모두 동일하게 119%(2000 cm²), 133%(3000 cm²)이며, Gray(1981)에 소개된 van Veen 그래프 채집기의 누적 상대종수는 각각 150, 179%인 것으로 추정되었다. Livingston *et al.*(1976)은 600 cm²의 사각 채집면적을 채집 단위로 하여 저서성 대형식물을 채집, EstimateS 프로그램으로 표본 수에 따른 평균 출현 종수를 추정한 결과, 1회를 기준으로 2회와 3회가 각각 138, 156%이었다. 이 결과를 본 연구의 누적 상대종수 평균치를 기준하여 모형 CRSN1의 95% 관찰치 예측 구간을 적용하면 2000 cm²에서는 약 124-169, 3000 cm²에서는 약 150-206%이다. 대부분의 추정치가 신뢰구간 내에 포함되는 것으로 나타났으나, 고 등(1999)의 것은 2개 면적에서 모두 본 연구의 신뢰구간 하한선 이하의 범위에 해당하는 것으로 나타났다.

일반적으로 출현 종수(S)와 채집 면적(A) 사이에는 $S = CA^z$ 와 같은 비선형적 관계가 있는 것으로 알려져 있다. 이 관계를 바탕으로 추정된 채집면적에 따른 누적 종수의 수준은 C에 의해 결정되나 그 증가 양상 또는 곡선의 경사는 z에 따라 달라진다. 따라서 누적 상대종수의 증가 양상은 z의 관찰만으로도 가능한 것이며 절대종수의 관계에서 추정된 z와의 비교는 무리가 없다. 다음의 비교는 연구 대상 동물군과 이에 적절한 공간적 스케일이 각기 다르더라도 추정된 z의 다름이 무엇을 의미하는 지를 파악하기 위한 비교에는 무리가 없을 것임을 가정한 것이다. 최근 Collins *et al.*(2002)이 조사 지역 종 조성의 중복 패턴(overlapping patterns)에 따라 z가 달라지는 것으로 언급한 바에 근거하면 z의 변동은 공간적 이질성(spatial heterogeneity)의 영향을 받는 것으로 추정된다. Collins *et al.*(2002)의 z는 이질적 생물 지리적 영역을 포함하는 조사 범위(inter-provincial scale)에서 분류군에 따른 차이를 보이며 평균 0.70(95% 신뢰구간 0.56-0.84)인 것으로 추정하였다. Crawley and Harral(2001)은 공간 규모가 100 cm²에서 1 km² 사이인 경우 z가 0.18-0.57의 범위 내에서 공간적 규모에 따라 체계적으로 변하고, 개체 간 상호 작용을 주고받을 수 있는 좁은 규모에서는 낮은 값을 갖는 것으로 보고하였다. 대륙붕의 벙크 주변에서 서식하며 이동력이 강한 어류 군집을 대상으로 측정한 결과 신뢰할 수 있는 z는 0.18 주변이었다(Frank and Shackell, 2001). 이처럼 z는 대상 생물군의 특성(예를 들어 고착성 또는 이동성)이나 공

간 내 패치(patch)의 분포 양상 또는 공간 규모 등의 매우 다양한 원인들과 이들의 기여하는 정도에 따라 변동하는 것이라 할 수 있다. 앞서 언급한 예는 대부분 육상 생태계의 것이며 따라서 적절한 비교의 대상이 아니라고도 볼 수 있다. 이 연구에서의 z의 분포(평균=0.51, 95% 신뢰구간=0.29-0.73)는 다소 높은 편이나 관찰될 수 있는 범위인 것으로 판단된다. 앞서 고 등(1999)의 낮은 누적 상대종수를 나타낸 모형의 z는 송도 조간대와 영일만 조하대에서 모두 0.257로서 본 연구의 z의 분포에 근거하면 유의하게 낮은 값이라 할 수 있으며, 동일한 대상 동물군(대형 저서동물)과 비교 가능한 공간적 규모에서의 이러한 차이는 특이한 것으로 생각된다.

이 연구에서 관찰된 z의 변화, 즉 출현 종수의 증가를 나타내는 곡선 기울기의 높낮음은 서식처의 다양성(habitat diversity) 또는 공간적 이질성 등으로 설명이 가능할 것으로 보인다. 본 조사에서는 표본 채집시 매 정점에서 닻을 내려 배를 고정시키고 작업을 행하였으나 해류의 흐름에 영향을 받을 수 있기 때문에 경우에 따라 20 m 이상의 채집 표본간 거리 차이가 발생할 수 있고, 따라서 조간대의 작업과 같이 1 m²의 정해진 범위 내에서 채집된 표본과는 속성이 다를 수 있다. 앞서 결과의 타당성 검토 부분에서 조하대(송봉도 남단) 표본의 관찰값이, 비록 신뢰구간 내이긴 하나, 예측값에 비해 지속적 또는 작위적으로 높으며, 조간대(인천 송도 적전)의 경우 같은 패턴으로 낮게 나타나는 것은 채집기가 접촉한 저서 환경의 이질성의 정도 차이에 기인하는 것으로 해석할 수 있을 것이다. 이질성이 서로 다른 다양한 자료를 활용하였음에도 불구하고 예측값이 신뢰 구간 내에 포함된 것은 모형의 강건함을 반영하는 것으로도 볼 수 있으나 작위적인 편차가 지속됨은 출현 종수의 예측 면적을 한정해야 할 필요성이 있음을 시사한다. 따라서 이 연구에서 추정된 모형은 채집 면적 3000 cm² 이 내에서 평균 출현종수와 밀도 측정값을 이용하여 누적 상대종수를 예측하는 데에 활용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

사 사

현장 채집에 도움을 주신 (주)한국연안환경생태연구소의 채진호 박사님, 한창훈님, 김정수님 그리고 한국해양연구원의 민원기님께 감사드립니다. 본 논문을 보시고 많은 조언을 해주신 심사위원 제종길, 최진우 박사님께 감사드립니다. 이 연구는 해양수산부의 새만금 해양환경보전을 위한 조사·연구 용역의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 고철환, 강성길, 이창복, 1999. 송도 갯벌과 영일만 조하대 저서동물의 군집조사를 위한 적정 채집면적의 결정. 한국해양학회지, 바다, 4: 63-70.
- 박홍식, 최진우, 이형근, 2000. 통영 인근 가두리 양식장 지역의 저서동물군집구조. 한수지, 33: 1-8.
- 임현식, 홍재상, 1997. 진해만 저서동물의 군집생태-3. 군집구조. 한수지, 30: 175-187.
- 정래홍, 임현식, 김성수, 박종수, 전경암, 이영식, 이재성, 김귀영, 고우진, 2002. 남해안 가두리 양식장 밀집해역의 대형저서동물

- 군집에 대한 연구. 한국해양학회지, 바다, 7: 235-246.
- 최병선, 1997. 회귀분석(하). 세경사, 1094 pp.
- 해양수산부, 2003. 새만금 해양환경보전대책을 위한 조사연구(1차년도). 해양생태/적조. 해양수산부.
- Choi, J.W. and C.H. Koh, 1994. Macrobenthic community in Keum-Mankyung-Dongjin Estuaries and its adjacent coastal region, Korea. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, **29**: 304-318.
- Hollins, M.D., D.P. Vázquez and N.J. Sanders, 2002. Species-area curves, homogenization and the loss of global diversity. *Evol. Ecol. Res.*, **4**: 457-464.
- Crawley, M.J. and J.E. Hurrell, 2001. Scale dependence in plant biodiversity. *Science*, **291**: 864-868.
- Frank, K.T. and N.L. Shackell, 2001. Area-dependent patterns of fin-fish diversity in a large marine ecosystem. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **58**: 1703-1707.
- Gray, J.S., 1981. The ecology of marine sediments. Cambridge University Press, 185 pp.
- Gray, J.S., 2000. The measurement of marine species diversity, with an application to the benthic fauna of the Norwegian continental shelf. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **250**: 23-49.
- Hong, J.S., 1983. A minimal volume determination from dredge samples for benthic community study of subtidal mud flats in Korean waters. *Benthos Res.*, **25**: 1-9.
- 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. Korean Soc. Oceanogr.*, **31**: 217-231.
- Hong, J.S., J.W. Yoo, R.H. Jung, I.S. Seo and B.S. Koh, 1999. Macrobenthic communities on the tidal flats around Yongjong and Yongyu Islands, Incheon, Korea. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, **34**: 220-230.
- Huston, M., 1979. A general hypothesis of species diversity. *Am. Nat.*, **113**: 81-101.
- Livingston, R.J., R.S. Lloyd and M.S. Zimmerman, 1976. Determination of sampling strategy for benthic macrophytes in polluted and unpolluted coastal areas. *Bull. Mar. Sci.*, **26**: 569-575.
- Ron, J.E. and J.F. Grassle, 1992. Patterns of species diversity in the deep sea as a function of sediment particle size diversity. *Nature*, **360**: 576-578.
- Sanders, H.L., 1968. Marine benthic diversity: a comparative study. *Am. Nat.*, **102**: 243-282.
- Stehli, F.G., A.L. McAlester and C.E. Helsley, 1967. Taxonomic diversity of recent bivalves and some implications for geology. *Bull. Geol. Soc. Am.*, **78**: 455-466.
- Whittaker, R.H., 1975. Communities and ecosystems, 2nd edition. Macmillan, New York, pp. 1-385.
- Yoo, J.W., 1998. The spatial distribution and long-term variation of macrofaunal communities on macrotidal flats in the west central coast of Korea. Ph.D. thesis, Inha Univ., 352 pp.
- Yoo, J.W. and J.S. Hong, 1996. Community structures of the benthic macrofaunal assemblages in Kyonggi Bay and Han Estuary, Korea. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, **31**: 7-17.

2003년 9월 1일 원고접수

2004년 2월 13일 수정본 채택

담당편집위원: 신현출