

## 암반조간대 대형저서동물군집에 대한 씨프린스호 유류 유출사고 영향 평가

신현출 · 이정호\* · 임경훈<sup>1</sup> · 윤성명<sup>2</sup> · 고철환<sup>3</sup>

전남대학교 해양기술학부, <sup>1</sup>한국농촌공사 농어촌연구원,  
<sup>2</sup>조선대학교 해양생명과학과, <sup>3</sup>서울대학교 지구환경과학부

## Assessment of the Impacts of 'Sea Prince' Oil Spill on the Rocky Intertidal Macrobenthos Community

Hyun Chool Shin, Jung Ho Lee\*, Kyeong Hun Lim<sup>1</sup>,  
Seong Myeoung Yoon<sup>2</sup> and Chul Hwan Koh<sup>3</sup>

Faculty of Marine Technology, Chonnam National University, Yeosu, Chonnam 550-749, Korea

<sup>1</sup>Rural Research Institute, KRC, Ansan, Gyeonggi 426-908, Korea

<sup>2</sup>Department of Marine Life Science, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

<sup>3</sup>School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

**Abstract** – This study was aimed to classify the intertidal macrozoobenthic community status after 2 years of *Sea Prince* oil spill, and oil spill effects along oil spreading track from heavily impacted to unaffected reference site. Field sampling was initiated in late February and continued through November 1998 seasonally, after 2.5 years of oil spill. 7 rocky sampling sites were selected among coastal regions coated and/or affected by the *Sea Prince* spilled oil.

Identified species was 158 species, 65 family, 24 order, 9 class, 5 phylum. Mollusca was the dominant faunal group comprising 100 species (63.3%), and followed by 38 species of Crustacea (24.1%), 12 species of Echinodermata (7.6%), 5 species of Porifera (3.2%), and 3 species of Cnidaria (1.9%). On Dugpo of Sori Island, the fewest species was collected from 28 species to 35 species seasonally among sampling stations. But far away Dugpo toward Gamak Bay, the number of species increased, collecting the maximum on Sohwoenggan Island. At the wreck site of Sori Island, especially the species number of attached animals such as poriferans and anthozoans was very low compared to another site. The density and biomass on the higher tidal zone increased toward the low affected sites, but biomass on middle tidal zone decreased. The invertebrate biomass of study area was dependent on the sessile animals. The major dominant species were small-sized barnacles, *Chthmallus challengerii*, periwinkles, *Littorina brevicula*, mussels, *Septifer virgatus*, and so on. The biomass of *C. challengerii* and *L. brevicula* on the higher tidal zone was highest in the wreck site of Sori Island and decreased further and further. However, mussels on the middle tidal zone showed the inverse trends because of the larger individual size of mussel inhabited in Sori Island than those of another sites. As a result of community analysis, the effect of oil spill was not found distinctly. Several ecological indices and cluster analysis did not show the meaningful varia-

\* Corresponding author: Jung Ho Lee, Tel. 061-659-3140,  
Fax. 061-659-3149, E-mail. jungho-babo@hanmail.net

tion with oil track despite of the conspicuous differences among tidal heights. These indicate that the macrozoobenthic community level of oil spreaded zone recovered in some degree after the Sea Prince oil spill accident, but population or individual levels of dominant sessile animals took more recovery times.

**Key words :** Sea Prince, oil spill, rocky shore, macrobenthos community

## 서 론

오늘날의 산업사회에서 에너지원 및 각종 화학물질의 원료로서 유류가 차지하고 있는 비율은 막대하며 그 의존도는 날로 증가하는 추세에 있다. 이러한 높은 유류 의존성에 따른 유류의 물동량 증가는 주요 운송 경로인 해양의 유류오염이라는 필연적인 결과로 나타나고 있다. 특히 각종 선박과 유조선에 의한 대형 유류 유출사고에 의한 피해는 매우 심각한 상태이며, 이러한 유류오염은 그 발생을 예견할 수 없는 예측 불가능한 사건이다. 규모 또한 대형화라서 문제의 심각성이 더욱더 크다. 이러한 유류오염을 예방하고, 방제하기 위한 시스템의 구축은 전 세계적인 과제중의 하나이다. 특히 유럽과 미주대륙에서 발생한 1967년 'Tory Canyon', 1978년 'Amoco Cadiz', 1989년 'Exxon-Valdez', 1996년 'Sea Empress' 유조선 난파 사건은 유류오염이 해양에 얼마나 심각한 영향을 미치는가를 일깨워 준 대표적 사건이다. 이로 인해 해양환경보존의 문제성을 인식하여 1982년에 제정된 UN 해양법 협약에서도 모든 국가들이 해양환경오염의 예방, 감소, 통제를 위하여 모든 조치를 할 수 있도록 규정하고 있다.

유류 유출사고 이후 생태계 모니터링의 모범적인 예가 1989년 알래스카의 Prince Williams Sound에서 좌초한 Exxon Valdez호 사고 이후 실시된 해양생태계 및 환경에 대한 영향 파악, 복원을 위한 대책 수립의 일환으로 실시된 연구의 경우이다. 유조선 사고가 발생한 즉시 미 해양기상청 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 내 유류오염 방제 전문가들로 구성된 방제 팀이 현장에서 가장 적절한 방제 방법을 선택하여 방제작업을 실시하였고, 방제 이후 파괴된 생태계가 어떻게 회복되는지 장기간 동안 모니터링을 실시하였다 (Rice *et al.* 1996; Fukuyama *et al.* 2000; Peterson 2001; Peterson *et al.* 2003). 이들은 사고 발생 이후 10년이 넘도록 계속 정기적인 현장 조사를 통하여 암반 조건대 지역에서 서식하고 있는 저서생물 군집의 현황을 파악하였고, 초기에 우점하는 생물종 및 후기에 우점하는 생물 종 등을 밝혀내고, 생태지수가 시간이 지남에 따라

변동하는 폭이 얼마나 일정한 지 여부를 분석함으로써 해안이 정화되었는지 여부를 판단하고 있다. 뿐만 아니라, 환경의 회복 속도를 더욱 증가시키기 위하여 미생물을 이용하는 방법 등과 같은 Bioremediation 방법에 관한 연구도 활발히 진행 중이다 (Atlas 1995; Boobath 2000).

뿐만 아니라 유출유의 제거 (clean up)와 처리 등의 방제활동이 서식생물에게는 훨씬 더 크고 장기적인 영향을 미칠 수도 있다 (Irvine 2000; Peterson 2001). 특히 해양에 유출된 기름을 화학적으로 분해시키기 위해 사용하는 유처리제는 자체가 생분해효소를 사용하는 주요한 유기물질이기 때문에 해수유동이 미약한 만과 같은 폐쇄성해역에서 다량으로 사용하면 수중미생물에 의해 분해되면서 생태계에 심한 영향을 미칠 정도로 용존산소를 고갈시킬 수 있으며, 잠재적인 유기오염을 지속시킬 수가 있다. 눈앞의 유출유를 제거하기에는 유처리제가 효과적인 것처럼 보이지만, 유처리제가 생태계 혹은 우리 인간에게 어떠한 영향을 미치는가에 대한 연구는 거의 되어있지 않은 실정이다. Gajbhiye *et al.* (1995)는 조간대 생물에 있어서 그 피해는 유출유에 의한 것보다 유처리제에 의한 것이 더 클 수도 있음을 지적하고 있다.

한국의 남해안에 위치한 광양만은 석유화학단지인 여천공단과 광양제철소, 컨테이너부두가 들어서 있다. 따라서 대형 유조선을 비롯한 수많은 선박의 입·출항이 빈번하기 때문에 항시 선박의 충돌, 좌초 등으로 인한 기름 유출 사고가 발생할 가능성을 안고 있다. 최근에 일어난 유류 오염으로 1993년 9월 광양만에서 유조선 충돌로 인하여 발생한 '금동호'의 기름 유출 사고, 1995년 11월의 '호남사파이어호', '경해호' 사고가 있었다. 그리고 1995년 7월 태풍 폐이를 피하기 위하여 외해로 피항하던 중 소리도에서 좌초한 'Sea Prince호' 사고는 유출유의 양과 확산 범위, 수산자원 피해액에 있어서 국내의 유류오염 중 최대의 사건이라고 볼 수 있다. 그럼에도 불구하고 국내에서 빈번하게 발생하는 유류오염이 해양 생태계에 미치는 영향에 대하여 연구된 바가 많지 않다. 특히 국내에서 유류오염과 유처리제가 암반조건대 서식 해양생물에 미치는 영향에 대한 연구는 제 등(1991) 외에는 없는 실정이다.

본 연구는 전남 여천군 소리도에서 1995년 7월 23일에 태풍 페이로 인하여 좌초한 'Sea Prince호'에서 유출된 기관유(Bunc-C유)와 원유, 그리고 유처리제를 포함한 방제활동으로 인한 해양환경의 파괴 정도를 해양생태학적 관점에서 조사, 분석하고 나아가서는 해양생태계의 복원을 위한 대책을 수립하기 위한 연구의 일환으로 수행되었다. 특히 유출유와 방제활동이 인근 해역 연안의 암반 생태계에 미치는 영향을 저서무척추동물 분포 상황을 중심으로 분석하였다. 이러한 목적을 달성하기 위하여 씨프린스호 사고 이후 2년 정도의 시간이 경과된 시점에서 유조선 좌초지점을 중심으로 하여 유류 확산 및 방제 노력의 강도에 따라 조사지점을 선정하여 암반조간대에 서식하는 무척추동물의 종류와 양을 파악하였다. 이 조사지점에서 파악한 종들 중 유류오염 지표종을 도출하여 유류오염의 영향을 평가하고 그 변화를 예측하고자 하였으며, 나아가서는 유류 사고 이후 암반조간대 저서동물군집의 회복 여부를 판단하는 기초 자료로 활용하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 1. Sea Prince호 유류 유출 사고 개요

씨프린스호 사고는 평양항 호남정유 부두에 정박 중이던 유조선 씨프린스호가 제3호 태풍 페이를 피하기 위하여 피항지를 찾던 중 1995년 7월 23일 17시경 전남 여천군 남면 소리도 남쪽 끝단 남방 암초에 좌초되어 아라비아 원유 4,155.3톤과 연료유(벵커C유/벵커A유) 879.9톤이 유출됨으로써 경남, 남해, 거제, 부산, 울산, 포항 해상까지 약 127마일 해상을 오염시킨 대형 해난사고이다. 사고 해역은 수산자원 양식시설이 밀집된 지역으로 사고 당시 가두리에서 양성 중이던 어류가 대량으로 폐사하여 수백억원의 피해가 발생하였으며, 방제활동 중 인근 해역의 해조류가 지속적으로 사멸되는 등 심각한 생태계에의 영향이 발생하였다.

### 2. 조사방법

본 조사는 유류 유출사고가 난 1995년 이후 2년의 시간이 경과한 1998년에 수행하였다. 조사 지점은 유류오염의 영향이 가장 심각했던 해역(유조선 좌초 지역)에서부터 유류오염의 영향이 없었던 해역까지를 조사대상 해역으로 선정하였다. 대부분의 유출유는 해류를 따라 소리도에서 동쪽방향으로 흘러갔으며, 일부 유류가 조류를 따라 북쪽(가막만과 광양만방향)으로 흘러갔다. 따라

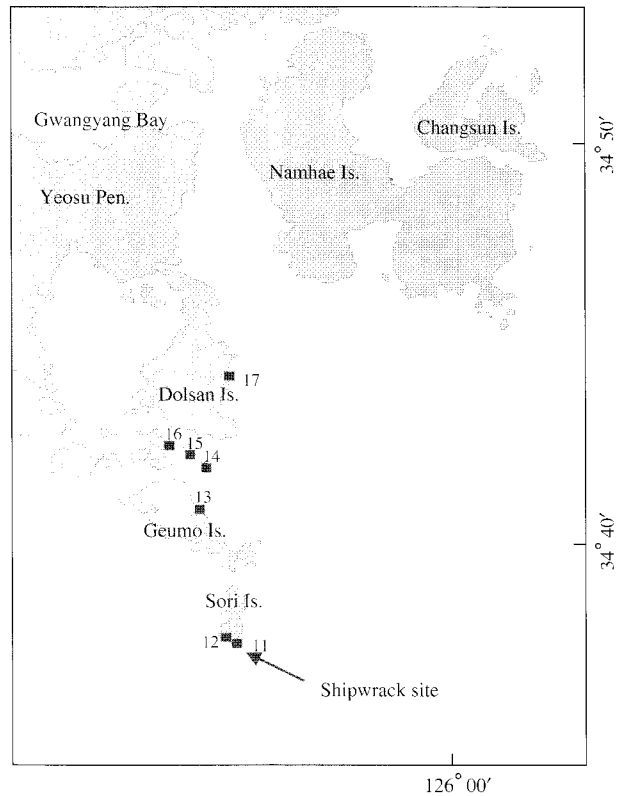


Fig. 1. Location of study sites investigating the impacts of 'Sea Prince' oil spill on the rocky intertidal macrobenenthos.

서 좌초지점부터 유류 침적 정도에 따라(거리에 따라) 소리도 2개소(덕포 11, 동대앞 12), 금오도(연목) 13, 소횡간도 14, 대횡간도 15, 화태도 16의 6개소와 대조구(유류 침적이 없었던 지역)로서 돌산도의 방죽포 17 1개소 등 총 7개소에서 조사를 수행하였다(Fig. 1).

각각의 조사지소에서 3개 이상의 조사선을 설정하여 상부조간대에서부터 하부조간대까지 정성, 정량 채집법을 도입하였다. 각 조사정점에서는 저서무척추동물의 종 구성과 서식밀도, 생물량, 우점종의 분포, 생태지수 등의 계절적 변화 및 오염 지표종 등을 파악하였다. 그리고 각 지소 내에서 정한 3개 이상의 조사선에서 상부조간대에서부터 하부조간대까지 조고에 따라 서식하는 생물의 특성을 조사하고, 조사지소간 생물상의 차이를 파악하였다.

현장조사는 1998년에 계절별로 대조기에 1회씩(년 4회) 실시하였다. 각각의 조사지소에서 해안선과 수직방향으로 임의의 조사선(transsect line)을 긋고 조간대를 최간조 및 최만조시의 조위를 기준으로 하여 상조대, 중조대 및 하조대의 3구역으로 구분하였다. 이후 각 조사선의 3개 구역마다 대표적인 지점에 크기가 0.5×0.5 m인 방형구를 고정·설치하고 이를 영구방형구로 삼아 방형구 속의 생물분포 양상의 변화추이를 파악하였다. 이와

더불어 반복채집횟수를 늘리기 위하여 영구방형구를 설치한 조사선 근처에 동일한 요령으로 3~5개의 조사선과 구역들을 추가로 설정하고 각 구역마다 동일한 크기 (0.25 m<sup>2</sup>)의 방형구들을 설치한 후, 그 속에 분포하고 있는 모든 해조류와 저서동물을 갈로 끊어서 모두 채집하였다. 채집된 시료들은 비닐봉지와 1,000 mL 크기의 플라스틱 관병에 넣은 후, 라벨을 붙이고 해수로 희석된 5~10% 중성포르말린 용액으로 현장에서 고정하여 실험실로 운반하였다. 이상과 같은 정량적 조사 외에 서식처 특성에 유의하면서 각 조사지점의 조간대 전 범위에 걸쳐 정성적인 채집을 병행함으로써 정량조사에서 확인되지 않았던 서식 종들의 분포를 확인하고자 하였다. 생물량은 우점종을 중심으로 각 방형구에서 채집된 모든 종들에 대하여 실험실에서 동정된 즉시 개체수의 계수와 더불어 습중량을 측정하였다. 계수된 저서생물의 조사정점별 서식밀도 및 생물량은 단위면적당 (m<sup>2</sup>) 개체수 및 생물량으로 환산하였다. 이후 각 조사지소별 생물량 및 서식밀도의 차이를 비교하기 위하여 분산분석을 실시하였다. 한편, 각 조사지점별 생태지수는 다음과 같은 식을 통하여 계산하였다.

$$\text{다양도지수: } H' = -\sum(P_i) \cdot \ln(P_i) \\ \text{(Shannon and Weaver, 1963)}$$

$$\text{풍부도지수: } R = (S-1)/\ln(N) \text{ (Margalef, 1958)}$$

$$\text{균등도지수: } J = H'/\ln(S) \text{ (Pielou, 1966)}$$

$$\text{우점도지수: } D = (n_1 + n_2)/N \text{ (McNaughton, 1968)}$$

이때  $P_i$ 는  $i$ 번째 종의 총 개체수에 대한 비율,  $S$ 는 출현종수,  $N$ 은 각 조사지점에서 출현한 총 개체수,  $n_1$ 은 첫 번째 우점종의 개체수,  $n_2$ 는 두 번째 우점종의 개체수들의 의미한다.

한편, 조사 결과 얻어진 저서생물의 자료를 이용하여 조사지소간 유사성을 파악하기 위하여 집괴분석을 실시하였다. 조사지점간의 유사도를 알아내기 위한 지수로는 Bray-Curtis index를 이용하였고(Bray and Curtis 1957), 결합법은 Lance and Williams (1967)의 linear combinatorial equation을 이용한 가중평균결합법(WPGMA, weighted pair-group average method)을 이용하였다. 그리고 각 조사지소간 유의성을 파악하기 위해 일원배치 분산분석(one-way ANOVA)을 수행하였다.

## 결 과

### 1. 출현종 현황

1998년도에 4회에 걸쳐 실시된 7개 암반조간대 조사

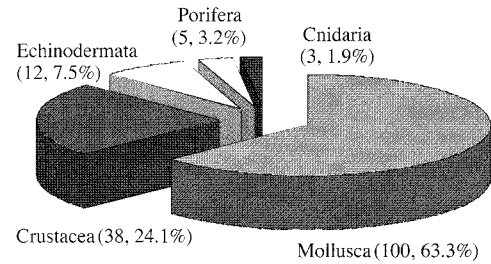


Fig. 2. Composition of rocky intertidal macrobenthic invertebrate species collected at study sites.

지소에 대한 조사 결과, 해면동물, 자포동물, 편형동물, 유형동물, 태형동물, 연체동물, 환형동물, 절지동물, 극피동물 및 척색동물 등 총 11문, 176종 이상(미동정 종 포함)의 저서무척추동물들이 채집되었으며, 이 중 총 5문, 9강, 24목, 65과에 속하는 총 158종의 저서무척추동물이 동정되었다. 동정된 종들의 구성을 분류군별로 살펴보면, 연체동물이 100종(전체 종수의 63.3%), 절지동물의 갑각류가 38종(24.1%), 극피동물이 12종(7.6%), 해면동물이 5종(3.2%), 자포동물이 3종(1.9%)등의 순으로 나타났다(Fig. 2).

계절별로는 1998년도 1차(동계)조사에서는 94종, 2차(춘계)에는 112종, 3차(하계)에는 106종, 4차(추계)에는 총 89종의 저서무척추동물 종들의 출현이 확인되었다. 각 조사지소에서 저서무척추동물 출현 양상을 살펴보면 Fig. 3과 같다. 소리도 덕포(II)에서는 32±4종, 소리도 등대앞(II)에서는 33±12종, 금오도 연목(III)에서는 57±10종, 소횡간도(IV)에서는 63±9종, 대횡간도(V)에서는 41±6종, 화태도(IV)에서는 51±10종, 돌산도 방죽포(IV)에서는 42±10종이 각각 채집되었다. 유류오염의 영향이 가장 심하였던 소리도 덕포를 중심으로 출현종수를 살펴보면, 전 조사시기에 걸쳐 소리도 덕포에서의 저서무척추동물 출현종수는 금오도 연목이나 소횡간도, 화태도에 비해 현저히 낮은 출현종수를 나타내고 있으며, 조사지소가 요철이 적고 단순한 암반 구조를 보이는 대횡간도에서의 출현종수와는 비슷한 양상으로 나타났다. 한편, 대조 지점인 돌산도 방죽포에서의 출현종수는 소리도에서의 출현종수를 약간 넘을 뿐 금오도 연목과 소횡간도에서의 출현종수에 훨씬 못 미치고 있다.

각 조사지소에서의 저서무척추동물의 분류군별 출현양상을 비교해 보면, 다른 조사지점들에 비해 소리도 덕포(II)의 경우 대부분의 조사시기에서 고착성 종들로 구성된 해면동물(poriferans)과 자포동물(cnidarians)의 출현이 적은 편이었다(Fig. 3). 또한 전체 출현종수 가운데 이매패류 연체동물(bivalves)의 비율이 다른 조사지점들에 비해 상대적으로 낮은 것으로 나타나고 있다. 암

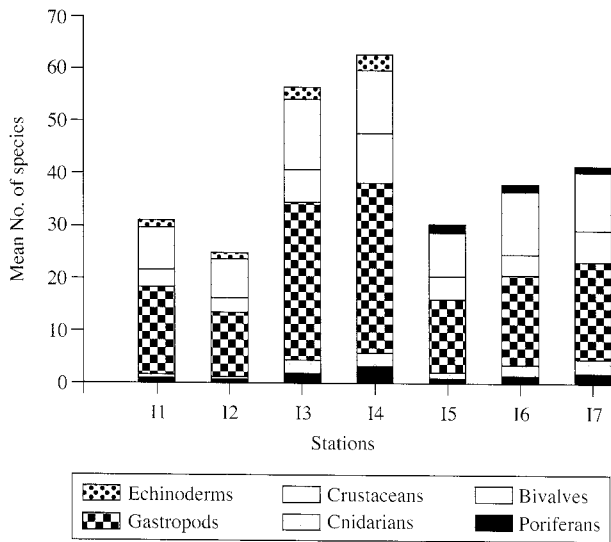


Fig. 3. Distribution of occurring species numbers at each sampling site.

반 조간대에 출현하는 이동성 종들로 구성된 복족류 연체동물(gastropods)와 절지동물의 갑각류(crustaceans) 및 극피동물(echinoderms)의 비율이 다른 조사지소들과 비슷한 출현종수를 보이고 있다.

2. 서식밀도 및 생물량 분포

1998년도의 4회에 걸쳐 조사한 전체 저서무척추동물의 서식밀도와 생물량에 대한 각 조사지소별 분포 양상을 살펴보면 Fig. 4와 같다. 상조대의 서식밀도는 소리도 덕포(11)에서 멀어질수록 증가하는 경향이 매우 뚜렷하였다 ( $P < 0.001$ ). 반면에 중조대와 하조대의 서식밀도는 소리도 덕포에서 멀어질수록 증가하기는 하나 그 경향이 상조대만큼 비교적 뚜렷하게 나타나지 않았다 ( $P > 0.05$ ). 다음으로 평균 생물량을 살펴보면, 상조대는 서식밀도와 마찬가지로 소리도 덕포(11)를 중심으로 거리가 멀어질수록 평균 생물량이 뚜렷히 증가하는 경향을 보였다 ( $P < 0.001$ ). 이에 비해 중조대의 평균 생물량은 덕포에서 멀어질수록 오히려 감소하는 경향을 보이고 있다 ( $P < 0.001$ ). 하조대의 경우도 생물량이 소폭 증가하는 양상을 보였다 ( $P < 0.05$ ).

3. 우점종 분포

조사지역의 저서무척추동물 생물량은 소수의 고착성 우점종들에 의해 좌우되고 있다. 상조대의 최우점종인 조무래기따개비(*Chthamalus challenger*)의 조사지점별 생물량을 살펴보면, 소리도 덕포(11)에서 생물량이 가장

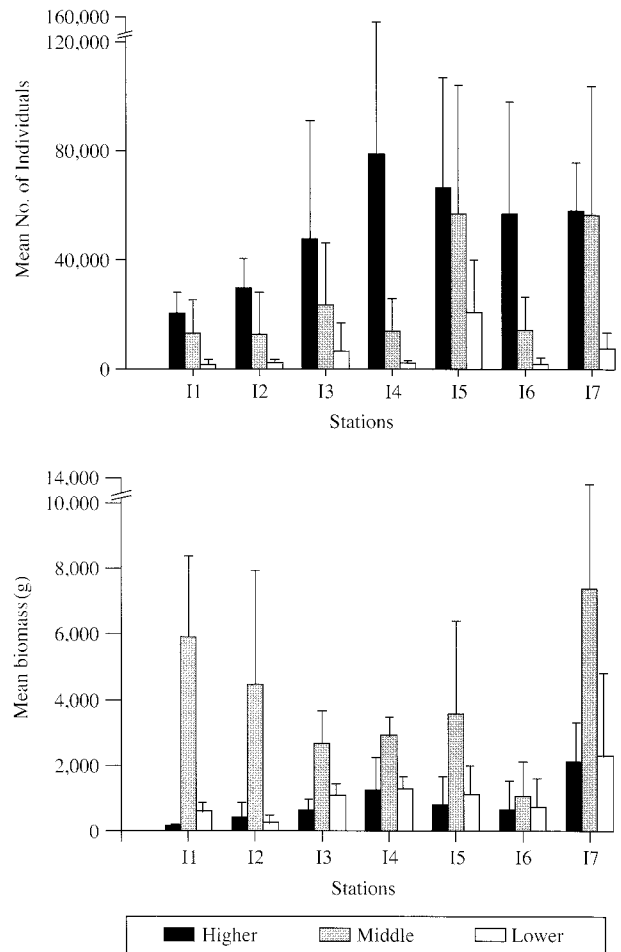


Fig. 4. Distribution of density (ind. m<sup>-2</sup>) and biomass (g-wet m<sup>-2</sup>) collected at each sampling site and tidal height.

적으며, 소횡간도(14)와 방죽포(17)에서 가장 많았다. 지리적 생물량의 변동은 소리도 덕포(유조선 좌초 지점)에서 멀어질수록 생물량이 뚜렷히 증가하고 있다 ( $P < 0.001$ ) (Fig. 5A). 상조대의 두 번째 우점종인 총알고둥류(periwinkles) 역시 소리도 덕포에서 멀어질수록 생물량의 증가가 확연히 나타나고 있다 ( $P < 0.01$ ) (Fig. 5B). 소리도 덕포에서 타 조사지역과는 비교도 안될 정도로 낮은 생물량을 보였으며, 금오도 연목(13)과 대횡간도(15)에서 높은 값을 보였다. 조사지역 내에 출현하는 총알고둥류는 2종으로 총알고둥(*Littorina brevicula*)과 좁쌀무늬총알고둥(*Granulilittorina exigua*)이다. 이러한 분포 경향은 4회의 조사 모두에서 공통된 결과로서 상조대 생물에 대한 유류오염의 피해를 단적으로 보여주고 있다. 즉, 유류오염에 의한 영향 및 회복 여부를 판단할 수 있는 지표종으로서의 높은 활용가능성을 보였다.

중조대의 우점종들인 담치류(mussels)는 생물량 분포

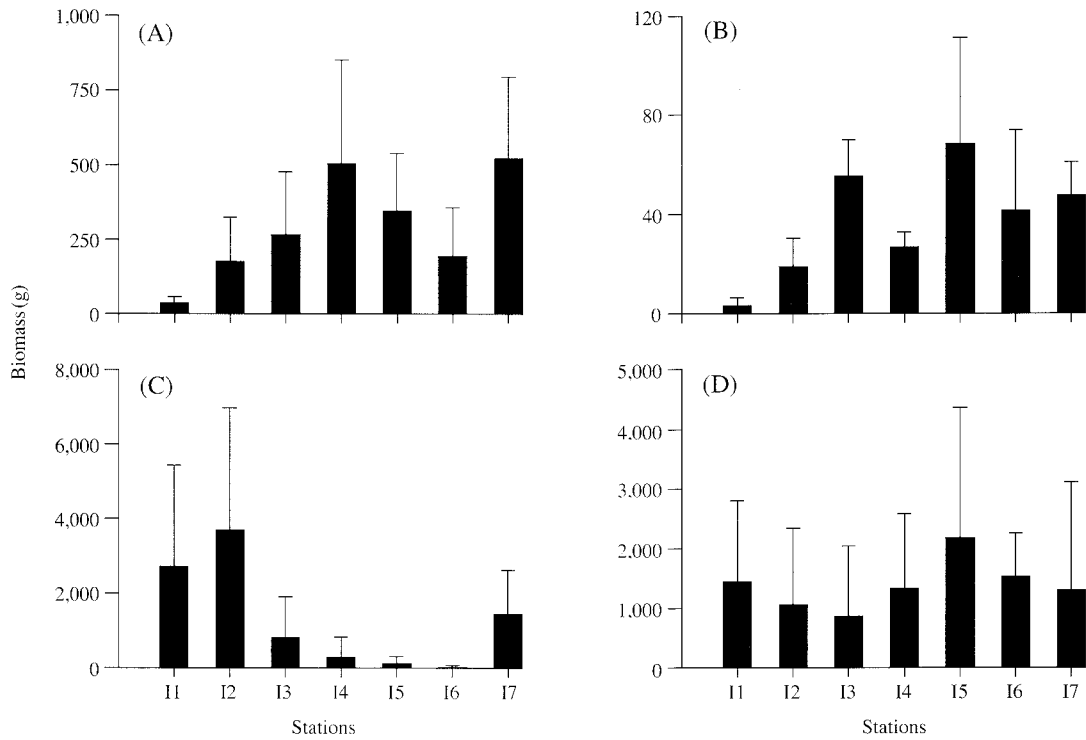


Fig. 5. Distribution of dominant species biomass (g-wet m<sup>-2</sup>) at each sampling site. (A) *Chthamalus challengerii*, (B) Periwinkles, (C) Mussels, (D) *Tetraclita japonica*

에 있어서 조부래기따개비의 경우와 상반되는 경향을 보였다 (Fig. 5C). 즉 소리도 덕포를 중심으로 담치류의 생물량이 가장 많았으며, 덕포에서 멀어질수록 크게 감소하고 있는 경향이 나타나고 있다 ( $P < 0.001$ ). 본 조사 지역 담치류 군락에 분포하고 있는 것으로 확인된 담치류는 주름담치 (*Hormomya mutavilis*), 비단담치 (*Modiolus elongatus*), 털담치 (*Modiolus modiolus difficilis*), 진주담치 (*Mytilus edulis*), 격판담치 (*Septifer keenae*), 굵은줄격판담치 (*Septifer virgatus*)의 6종이며, 이중 굵은줄격판담치의 생물량이 가장 많아 조사지역의 대표적 담치류라고 볼 수 있다. 특히 위에서 언급한 바와 같이 담치류의 서식 밀도는 덕포에서 멀어질수록 높아지나, 타 조사지점에 비해 상대적으로 덕포 주변에는 크기가 큰 개체 (각장 4 cm 이상)들로 담치류 군락이 형성되어 있기 때문에 생물량이 타 지역에 비해 월등히 높은 것으로 나타났다. 또한 중조대의 대표적 우점종인 검은큰따개비 (*Tetraclita japonica*)는 어느 정도 담치류와 유사한 생물량 분포를 보이고 있으나 그 경향성은 담치류와 같이 뚜렷하게 나타나지 않았다 ( $P > 0.05$ ) (Fig. 5D). 이는 검은큰따개비가 조부래기따개비와 거의 비슷한 생활사를 갖고 있지만 조사지역의 중조대가 상조대에 비해 오염의 회복이 빨리 진행된 탓에 조건대 암반서식처의 구조와 같은 기타

환경요인이 보다 큰 영향을 준 결과라고 판단할 수 있다.

#### 4. 생태지수

각 조사지소별 생태지수는 조고에 따라 뚜렷한 차이를 보이고 있다 (Fig. 6). 모든 조사지소에서 다양도지수 (H'), 풍부도지수 (R), 균등도지수 (J)는 상조대, 중조대, 하조대의 순으로 높은 값을 보였으나, 우점도지수 (D)는 그 반대로 나타났다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 상조대에서 하조대로 가면서 출현 서식종이 다양해지며, 특히 상조대의 경우 소수의 종만이 출현하고 있기 때문이다.

조사지소간 생태지수의 변화를 살펴보면 상조대의 경우가 가장 뚜렷한 차이를 보이고 있다 (Fig. 6). 즉 소리도 덕포 (I1)에서 멀어질수록 다양도지수 (H'), 풍부도지수 (R), 균등도지수 (J)가 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 상조대에서는 유류 및 방제의 영향이 심했던 지역일수록 몇몇 종을 제외하고는 그 영향을 심하게 받았음을 의미한다고 볼 수 있다. 반면 중조대와 하조대의 경우에는 뚜렷한 특징적인 경향성을 인지하기는 어려우나, 종풍부도지수는 증가하는 경향, 균등도지수는 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 유류의 영향이 적을수록 소량

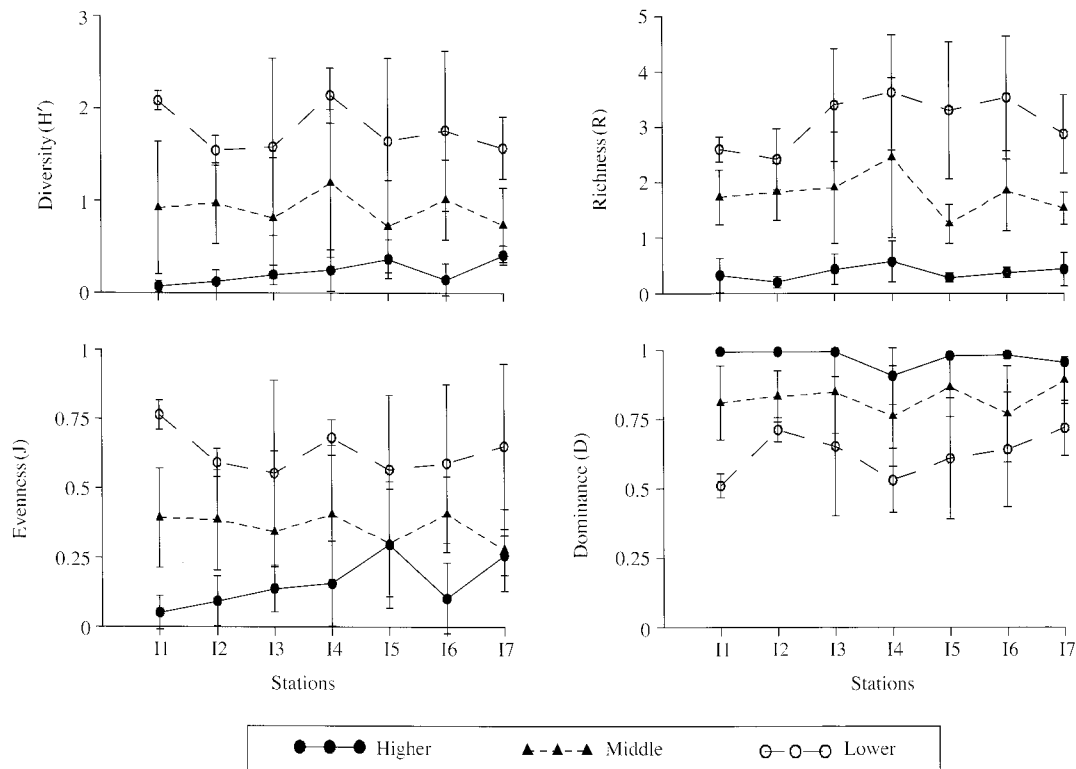


Fig. 6. Variation of ecological indices at each sampling site. Vertical bars mean standard deviations.

출현하는 종들이 다수 서식가능함을 의미한다. 소리도 덕포의 경우 소량 출현하는 종들이 상당수 배제되어 서식가능한 출현종수는 적으나 서식종들의 밀도는 오히려 균일한 분포를 보기 때문이다.

5. 군집분석

각 조사지소에서 상, 중, 하조대별 그리고 계절별 종 조성에 기초하여 집괴분석을 실시한 결과 (Fig. 7), 조간대 저서무척추동물 군집의 생태적 특성상 조사지점이나 계절 변동보다 조고 (tidal height)에 따른 영향이 가장 크게 나타나 상조대, 중조대, 하조대별로 뚜렷하게 군집의 종조성이 차이를 보였다. 각 조고별로는 계절에 따라 약간씩의 차이는 있지만 상조대~하조대 모두 대체적으로 소리도 덕포 (I1)에 형성되어 있는 군집과 금오도 연목 (I3), 소횡간도 (I4), 대횡간도 (I4)의 군집 종조성이 약간 차이를 보이는 것으로 나타났다. 그 외 소리도 등대 (I2), 화태도 (I6), 방죽포 (I7)의 경우는 계절에 따라 종 조성의 유사성에 있어서 변화가 심한 지역이라고 볼 수 있다. 즉 조사지역 내에서 가장 유류오염이 심하였던 소리도 덕포의 저서무척추동물군집과 상대적으로 그 영향이 적었던 지역간에 저서동물군집 종조성의 차이를 어느 정

도 인지할 수는 있으나 그 정도는 미약하다고 볼 수 있다. 이는 유류오염으로 인한 암반생태계에의 영향 및 그 회복 정도를 평가할 때, 군집 종조성의 차이를 이용한 평가 기법으로는 정확한 판단을 하기가 어렵다는 것을 보여주고 있다.

고 찰

유류오염의 영향이 가장 심하였던 소리도 덕포를 중심으로 출현종수를 살펴보면, 전 조사시기에 걸쳐 소리도 덕포에서의 저서무척추동물 출현종수는 금오도 연목이나 소횡간도, 화태도에 비해 현저히 낮은 출현종수를 나타내고 있으며, 조사지소가 요철이 적고 단순한 암반 구조를 보이는 대횡간도에서의 출현종수에도 못 미치고 있다. 소리도 덕포의 암반 조간대 조사지점이 저서무척추동물들에게 다양한 서식처가 될 수 있는 구조로 되어 있음을 고려할 때, 소리도 덕포에서의 낮은 출현종수는 유류오염 및 물리적 방제의 영향 때문인 것으로 판단된다. 한편, 대조 지점인 돌산도 방죽포에서의 출현종수는 소리도에서의 출현종수를 약간 넘을 뿐 금오도 연목과 소횡간도에서의 출현종수에 훨씬 못 미치고 있다. 이는

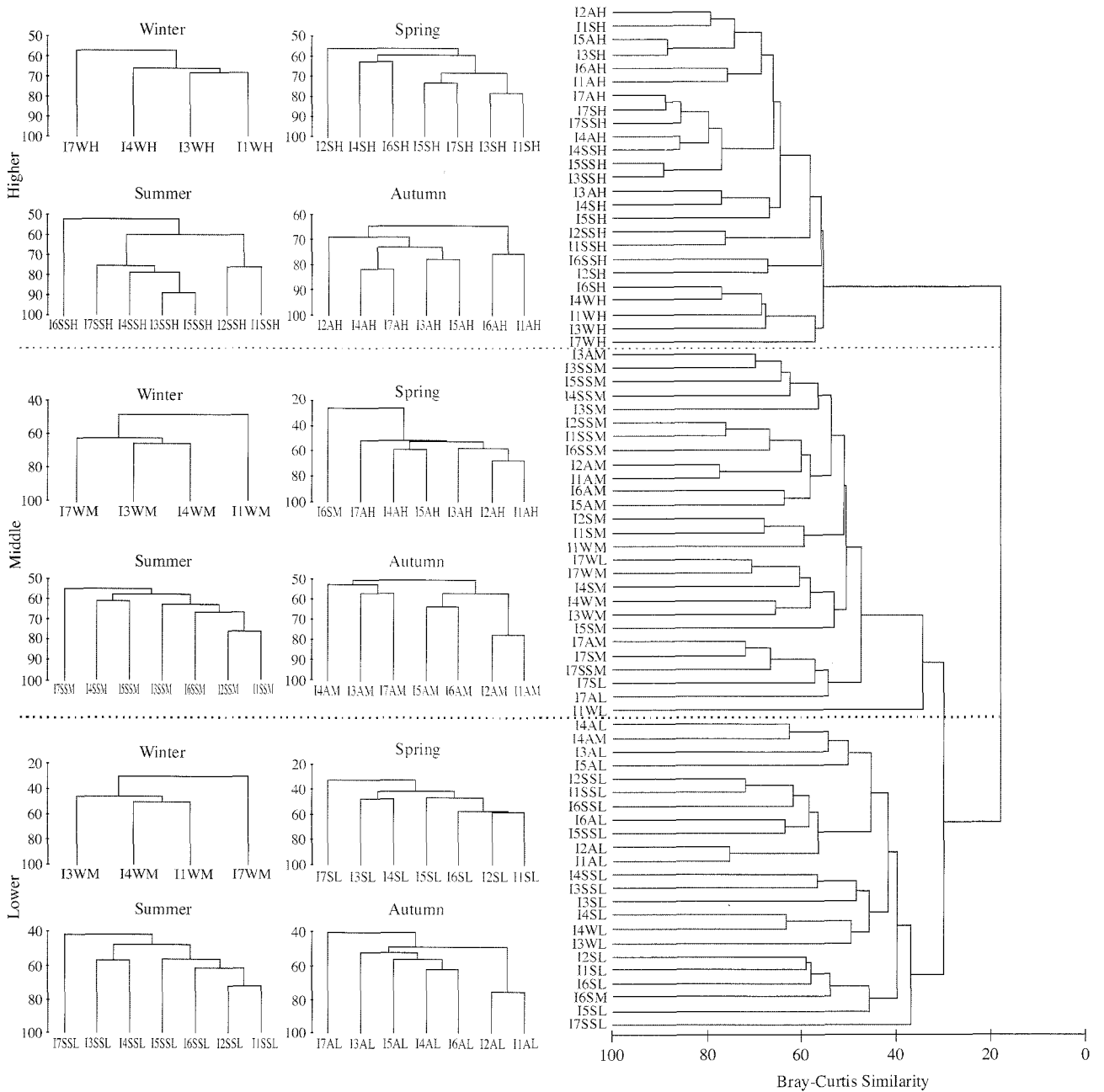


Fig. 7. Dendrogram showing the results of cluster analysis based on the species composition collected at each sampling time and site (W: winter, S: spring, SS: summer, A: autumn, H: higher zone, M: middle zone, L: lower zone).

유류의 영향을 전혀 받지 않았던 돌산도 방죽포의 암반 조간대가 단순한 구조로 되어 있어 저서무척추동물들에게 다양한 서식처를 제공하고 있지 못하고 있기 때문인 것으로 보인다(Raffaelli and Hawkins 1996).

각 조사지소들에서의 저서무척추동물의 분류군별 출현양상을 비교해 보면, 다른 조사지점들에 비해 소리도 덕포(II)의 경우 대부분의 조사시기에서 고착성 종들로 구성된 해면동물(poriferans)과 자포동물(cnidarians)의

출현이 적은 편이었다(Fig. 3). 또한 전체 출현종수 가운데 이매패류 연체동물(bivalves)의 비율이 다른 조사지점들에 비해 상대적으로 낮은 것으로 나타나고 있다. 암반 조간대에 출현하는 이매패류의 대부분은 고착성 또는 부착성 종들로서, 대부분 이동성 종들로 구성되어 있는 복족류 연체동물(gastropods)과 절지동물의 갑각류(crustaceans) 및 극피동물(echinoderms)의 비율이 비슷한 출현종수를 나타내고 있는 것과 비교할 때 의미있는



분포 양상으로 보인다. 즉, 과거 유류오염의 직접적인 영향 하에 있었던 소리도 덕포에서 이동성이 없거나 적은 종들이 상대적으로 많은 피해를 받았음을 의미하며, 또한 소리도 덕포지역 조간대 생태계가 소수의 종들만이 출현하는 단순한 군집구조를 하고 있음은 아직도 이 지역에 유류오염의 영향이 어느 정도 존재하고 있음을 의미한다.

상조대의 경우 주요 우점종은 조무래기따개비로서 이들의 서식밀도와 생물량이 덕포에서부터 멀어질수록 증가하고 있는 사실은 유류오염으로 인한 피해와 방제활동으로 인한 영향을 단적으로 보여주고 있다. 그런데 중조대의 경우 주요 우점종은 담치류로서 이들의 서식밀도와 생물량이 상반되는 경향을 보이고 있는 것은 유류오염의 영향이 서식생물의 개체 크기에 따라 다르게 작용하였기 때문으로 보인다. 즉 유류의 영향이 심할수록 크기가 작은 개체가 영향을 심하게 받고 어느 정도 내성을 갖출 수 있는 큰 개체들은 생존이 가능하기 때문에 덕포를 중심으로 하여 서식밀도는 적으나 생물량은 높게 나타나고 있음을 보여주고 있다.

1989년 2월 알래스카해역에서 좌초된 원유운반선 Exxon Valdez호의 원유유출에 따른 생태계 피해와 그 회복에 관한 많은 연구사례에서도 볼 수 있듯이, 원유로 뒤덮힌 조간대 생태계는 상조대, 중조대, 하조대의 순서로 피해를 덜 입으며, 그 회복은 하조대, 중조대, 상조대의 순으로 빠르게 일어나는 것으로 알려져 있다. 이러한 연구 결과는 걸프전쟁으로 인한 유류 오염 피해 이후의 회복 연구에서도 잘 나타나고 있다(Jones *et al.* 1998). 본 조사 역시 상조대의 생물상이 가장 영향을 많이 받고 있음을 알 수 있다(Fig. 4). 또한 생태계에 대한 유류오염의 직접적인 영향이 지속되는 정도는 피해 해역의 물리적 환경과 생태계를 구성하는 생물 종들에 따라 다르다(Highsmith *et al.* 1996; Stekoll *et al.* 1996). 대체적으로 유류오염에 의하여 손상된 생태계가 원래의 상태로 회복되는 데에는 약 10년 이상의 시간이 필요하다는 것이 알려져 있으며, 회복된 뒤에도 원래의 상태보다는 군집의 다양도가 떨어지는 것으로 보고되고 있다. 이는 유류오염의 영향이 생물군집의 먹이연쇄 각 단계에서 영향을 미치기 때문이다. 그러나 그 회복 정도는 조사환경에 따라 큰 차이를 보이고 있다. MacFarlane and Burchett (2003)은 유류 사고 이전의 충분히 확보된 자료를 기초 비교자료로 삼아 유류사고 이후 암반조간대 저서동물군집상과 비교함으로써 지역에 따라 군집 구조의 변화, 개체수의 감소, 기회주의종(opportunists)의 증가, 중간 불균형(species imbalance)이 심하게 나타나는 지역(회복까지 수년이 걸릴 것으로 예상)과 사고이후 12개월 경과

후 벌써 회복의 징후가 나타나는 지역이 있음을 현장조사로 파악하였다. 그리고, Yamamoto *et al.* (2003)은 Nakhodka Oil Spill 사고 후 수년 내에 유류오염이 심했던 암반조간대지역에서 저서무척추동물의 출현종수와 총개체수가 지속적으로 증가하고 있으나 종에 따라서 유류에 대한 반응 정도가 서로 확연히 차이가 남(서식지 이용 방법, 유류 내성 정도, 생활사, 이동 능력 등에 따라 달라짐)을 관찰하고, 유류오염 이후 2~3년 내 사고 이전의 저서생태계로 회복될 수 있다고 하였다. 그러나, Carls *et al.* (2001)은 Exxon Valdez호 사고 이후 Prince William Sound 주변의 암반조간대 담치군락에서 계속 기름이 검출되는 것으로 보아 30년 이상 지나야 자연상태(background)의 농도와 유사해질 것으로 예측하였으며, Fukuyama *et al.* (2000) 역시 Exxon Valdez 사고 이후 유류 유출지역과 비유출지역 간 이매패류 이식 실험을 한 결과, 5~6년 이후에도 잔존유(residual oil)가 조개의 생존과 성장에 영향을 미침을 밝혔다. Gulf전쟁 5년 후의 회복 조사에서도 종다양성(출현종수)이 하조대는 대조구와 거의 유사한 수준을 보인 반면, 가장 피해가 컸던 상조대는 대조구의 최대 80% 수준까지만 회복되었다(Jones *et al.* 1998). 반면 유류 경로(Oil path)에서 보호받는 지역, 파도가 약한 지역, 적당한 온도, 높은 일사량, 벙크와 디젤유의 혼합 등은 유류오염의 영향이 적게 발현될 수 있는 요인으로 Edgar *et al.* (2003)은 제시하고 있다. 뿐만 아니라 Clean up activity 이후 상부조간대에는 후속적인 간접 영향으로 소형따개비와 같은 일부 기회주의 종들의 재점유가 가속화될 수도 있다(Peterson 2001). 즉 본 조사지역의 상부조간대에서 조무래기따개비와 총알고둥의 우점 현상은 빠른 회복이거나 간접 후속 효과인 재점유일 것으로 보인다.

본 연구는 여수해역에서 씨프린스 유류유출 사고가 발생한지 약 2년 반의 시간이 경과된 이후에 연구가 진행되었고, 사고 당시 조간대에 침적되었던 원유를 높은 강도로 제거하였기 때문에 피해가 극심하였던 소리도 덕포의 상조대 일부 구역을 제외하고는 가시적인 유류의 흔적을 확인하기는 어렵지만, 대부분의 지점들에서 자갈밭의 퇴적층 하부에서 계속 기름이 검출되고 있는 상황이었다. 즉 본 연구는 씨프린스호 사고 전후의 직접적인 유류오염의 영향보다는 유류 침적 정도에 따른 지리적 비교를 함으로서 유류오염이 암반조간대 생태계에 미친 영향을 파악하고자 하였다. 본 연구 결과 저서무척추동물의 분포와 생물량에서 볼 때, 아직도 피해지역 상조대의 저서무척추동물 군집에는 그 영향이 뚜렷이 남아 있으며, 중조대와 하조대에서도 그 영향이 존재함을 알 수 있다. 특히 조사해역 상조대의 우점종인 조무래기

따개비, 총알고둥류와 증조대 및 하조대의 우점종인 담치류와 검은큰따개비는 모두 부착생물들로서 이들의 분포양상은 이러한 오염의 영향 정도와 생태계 회복의 과정을 잘 드러내준다고 하겠다(Fig. 5). 특히 개체군역학적으로 볼 때 이들 주요 종들의 가입 및 성장, 사망은 각 개체군의 회복과 가장 밀접한 관련이 있다(Delany *et al.* 2003). Forde(2002) 역시 유류오염 이후 회복 정도 예측시 각 개체군의 가입이 가장 중요함을 강조하고 있으며, Delany *et al.* (2003)은 Chthamaliid barnacle의 분포는 유생공급보다 오히려 착저 후 사망률에 의해 좌우된다고 하였다.

개체군 수준에서의 영향 및 회복 정도는 비교적 손쉽게 비교가 가능하나, 군집 수준에서의 그 정도를 파악하기는 매우 어렵다. 본 조사에서도 조무래기따개비 등의 대표적 부착동물의 서식밀도와 생물량의 경우는 유조선 사고지점으로부터의 거리에 따라 뚜렷한 증가 혹은 감소의 경향을 보여주고 있으나, 군집 구조상에 있어서의 차이는 심하게 나타나지 않고 있다(Figs. 6, 7). Gelin *et al.* (2003) 역시 Jessica Oil Spill 사고시 본 조사와 거의 유사한 sampling design을 통해 유류오염이 조간대 저서 무척추동물군집에 미친 영향을 파악하고자 하였으나, 서식밀도와 출현종수 등과 유류와의 관계를 명확하게 보이지 않음을 지적하고 있다.

본 조사지역은 파도에 직접 노출된 암반조간대 만을 대상으로 조사하였으나, 인근의 갯벌과 자갈, 모래해안의 경우 그 영향이 훨씬 더 크고 장기적일 수 있다. 이러한 결과는 Exxon-Valdez 사고 이후 인근의 자갈해안에서 10년이 경과한 이후에도 유류의 징후가 계속 발견되고 있다는 사실에서 알 수 있다(Heyes and Michel 1999; Irvine *et al.* 1999, 2006). Sea Prince호가 좌초되어 유출유가 가장 심하게 뒤덮었던 소리도와 금오도 일대 일부 해안의 자갈 아래 퇴적층 수십cm 이하에서 2005년 아직도 유류가 발견되고 있는 현상(Pers. Obs.)을 보아 암반조간대보다 이들 지역의 생태계 회복에는 시일이 더 오래 걸릴 것으로 보인다.

## 적 요

아라비안 원유 86,886.2톤 이상을 선적한 유조선 Sea Prince호는 태풍 페이를 피하다가 1995년 7월 23일 소리도 인근 해안에 좌초되었다. 이후 4,155.3톤의 원유와 879.9톤의 엔진오일(뱅크C,뱅크A)이 유출되었으며, 유출유는 주로 북동방향으로 확산되어 소리도와 남해도를 중심으로 수백킬로미터의 해안이 기름으로 뒤덮였다.

본 연구는 Sea Prince 유류 유출 사고 2년 후, 유류의 영향이 가장 심각했던 지역부터 영향을 받지 않은 지역까지 유류 확산 경로를 따라 조간대 대형저서동물군집에의 영향을 알아보기 위하여 수행되었다. 현장 조사는 사고 2.5년 후인 1998년 2월부터 11월까지 계절별로 Sea Prince 유출유가 뒤덮인 연안을 대상으로 7개 지역의 암반조간대를 선정하여 실시하였다.

조사기간 중 11개 동물문이 채집되었으나, 이중 해조덤불속에서 채집된 단각류와 등각류 등의 일부 종은 미동정되었다. 동정된 종은 총 5문 9강 65과에 속하는 158종이다. 연체동물이 100종(63.3%)으로 가장 많은 종수가 채집되었고, 다음은 갑각류 38종(24.1%), 극피동물 12종(7.6%), 해면동물 5종(3.2%), 자포동물 3종(1.9%)이 채집되었다. 소리도 덕포(Sea Prince 좌초 지역)에서 계절에 따라 28~35종으로 가장 출현종수가 적었다. 출현종수는 덕포에서 가막만쪽으로 가면서 증가하였으며, 소횡간도에서 가장 많았다. 특히 소리도 덕포에서는 다른 지역에 비해 해면동물이나 자포동물과 같은 부착동물의 종수가 매우 적었다. 상부조간대의 서식밀도와 생물량은 유류 영향이 적은 지역으로 갈수록 증가하였으나, 중부조간대의 생물량은 오히려 감소하였다. 조사지역의 무척추동물 생물량은 부착동물의 양에 좌우되었다. 최우점종은 조무래기따개비(*Chthmallus challengerii*), 총알고둥(*Littorina brevicula*), 담치류이었다. 상부조간대의 조무래기따개비와 총알고둥의 생물량은 소리도의 좌초지역에서 가장 높았으며, 이 곳에서 멀어질수록 감소하였다. 반면에 중부조간대의 담치류는 반대의 경향을 보였는데, 이는 소리도 좌초지역에서 담치류의 개체크기가 다른 지역에 비해 크기 때문이다. 군집분석 결과로는 유류의 영향이 뚜렷이 나타나지 않았다. 생태지수와 집괴분석 결과 조고에 따라서는 뚜렷한 차이를 보이는 반면에 유류 경로에 따라서는 의미있는 결과를 보이지 않았다. 이는 Sea Prince사고 이후 유류확산 지역에서 군집 수준에서는 어느 정도 회복되었음을 의미하는 것으로 보인다. 그러나 우점 부착동물의 개체군이나 개체 수준에서는 유류 사고 이후 회복에 더 많은 시간이 걸림을 보여준다고 할 수 있다.

## 참 고 문 헌

- 제종길, 강성현, 오재룡, 양동범. 1991. 유류오염과 유처리제를 이용한 정화작업이 조간대에 서식하는 고둥류에 미치는 영향. 한국해양학회지. 26:350-357
- Atlas RM. 1995. Bioremediation of petroleum pollutants.

- International Biodeterioration & Biodegradation 35:317-327.
- Boobathy R. 2000. Factors limiting bioremediation technologies. *Bioresource Technology* 74:63-67.
- Blumer M, HL Sanders, JF Grassie and GR Hampson. 1971. A small oil spill. *Environment* 13:2-12.
- Bray JR and JT Curtis. 1957. An ordination of the upland forest communities of southern Wisconsin. *Ecol. Monogr.* 27:325-349.
- Carls MG, MM Babcock, PM Harris, GV Irvine, JA Cusick, and SD Rice. 2001. Persistence of oiling in mussel beds after the Exxon Valdez oil spill. *Marine Environmental Research* 51:167-190.
- Delany J, AA Myers, D McGrath, RM O'Riordan and AM Power. 2003. Role of post-settlement mortality and 'supply-side' ecology in setting patterns of intertidal distribution in the chthamalid barnacles *Chthamalus montagui* and *C. stellatus*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 249:207-214.
- Edgar GJ, L Kerrison, SA Shepherd and MV Toral-Grand. 2003. Impacts of the Jessica oil spill on intertidal and shallow subtidal plants and animals. *Marine Pollution Bulletin* 47:276-283.
- Forde SE. 2002. Modelling the effects of an oil spill on open populations of intertidal invertebrates. *Journal of Applied Ecology* 39:595-604.
- Fukuyama AK, G Shigenaka and RZ Hoff. 2000. Effects of Residual Exxon Valdez Oil on Intertidal *Protothaca staminea*: Mortality, Growth, and Bioaccumulation of Hydrocarbons in Transplanted Clams. *Marine Pollution Bulletin* 40: 1042-1050.
- Gajbhiye SN, S Mustafa, P Mehta and YR Tlair. 1995. Assessment of biological characteristics on coastal environment of Murun (Maharashtra) during the oil spill. *Indian J. of Marine Science* 24:196-202.
- Gelin A, V Gravez and GJ Edgar. 2003. Assessment of Jessica oil spill impacts on intertidal invertebrate communities. *Marine Pollution Bulletin* 46:1377-1384.
- Heyes MO and J Michel. 1999. Factors determining the long-term persistence of Exxon Valdez oil in gravel beaches. *Marine Pollution Bulletin* 38:92-101.
- Highsmith RC, TL Rucker, MS Stekoll, SM Saupe, MR Lindeberg, RN Jenne and WP Erickson. 1996. *American Fisheries Society Symposium* 18:212-237.
- Irvine GV, DH Mann and JW Short. 1999. Multi-year persistence of oil mousse on high energy beaches distant from Exxon Valdez spill origin. *Marine Pollution Bulletin* 38: 572-584.
- Irvine GV, DH Mann and JW Short. 2006. Persistence of 10-year old Exxon Valdez oil on Gulf of Alaska beaches: The importance of boulder-armoring. *Marine Pollution Bulletin*. in Press.
- Je J-G, S-H Kahng, J-R Oh and D-B Yang. 1991. Effects of stranded oils and dispersant clean-up on intertidal gastropods. *J. Oceanol. Soc. Kor.* 26:350-357.
- Jones DA, J Plaza, I Watt and MA Sanei. 1998. Long-term (1991-1995) Monitoring of the Intertidal Biota of Saudi Arabia after the 1991 Gulf War Oil Spill. *Marine Pollution Bulletin* 36:472-489.
- Lance GN and WT Williams. 1967. A general theory for classifactory sorting strategies. 1. Hierarchical systems. *Computer J.* 9:373-380.
- MacFarlane GR and MD Burchett. 2003. Assessing effects of petroleum oil on intertidal invertebrate communities in Sydney Harbour: Preparedness pays off. *Australasian Journal of Ecotoxicology* 9:29-38.
- Margalef R. 1958. Information theory in ecology. *Gen. Syst.* 3: 157-175.
- McNaughton SJ. 1968. Structure and function in California grassland. *Ecology.* 49:962-972.
- Peterson CH. 2001. The "Exxon Valdez" oil spill in Alaska: Acute, indirect and chronic effects on the ecosystem. *Advances in Marine Biology* 39:1-103.
- Peterson CH, SD Rice, JW Short, D Esler, JL Bodkin, BE Bal-lachey and DB Irons. 2003. Long-term ecosystem response to Exxon-Valdez oil spill. *Science* 302:2082-2086.
- Pielou EC. 1966. The measurement of diversity in different types of biological collections. *T. Theoret. Biol.* 13:131-144.
- Raffaelli D and S Hawkins. 1996. *Intertidal Ecology*. Chapman & Hall, London, 356pp.
- Rice SD, RB Spies, DA Wolfe and BA Wright (eds.). 1996. *Proceedings of the Exxon Valdez Oil Spill Symposium*. American Fisheries Society. Bethesda. 931pp.
- Shannon CE and W Weaver. 1963. *The mathematical theory of communication*. Univ. Illinois. Press. Urbana. 177pp.
- Stekoll MS, L Deysher, RC Highsmith, SM Saupe, Z Guo, WP Erickson, L McDonald and D Strickland. 1996. *American Fisheries Society Symposium* 18:177-192.
- Yamamoto T, M Nakaoka, T Komatsu, H Kawai, ML Research and K Ohwada. 2003. Impacts by heavy-oil spill from the Russian tanker Nakhodka on intertidal ecosystems: recovery of animal community. *Marine Pollution Bulletin* 47:91-98.